



学位請求論文

234

超電導磁気浮上車両の走行運動 に関する研究

1996 年 12 月 20 日 提出

指導教官

正田 英介

教授

日高 邦彦

助教授

東京大学大学院

工学系研究科

電気工学専攻

47076

大橋 俊介

目次

目次	i
図表一覧	iv
第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 本研究の背景	1
1.1.2 超高速軌道交通機関の現状	1
1.1.3 磁気浮上鉄道	2
1.2 本研究の目的	6
1.3 本論文の構成	8
第2章 超電導磁気浮上システムのモデル化および解析手法	10
2.1 緒言	10
2.2 計算における超電導磁気浮上鉄道システムのモデル化と解析手法	11
2.3 超電導磁気浮上鉄道システムのモデル化	13
2.3.1 LSM、EDS のモデル化	13
2.3.2 台車、車両のモデル化	15
2.4 計算方法	18
2.4.1 EDS システムによる電磁力	18
2.4.2 推進力	19
2.4.3 運動解析	20
2.5 結言	22
第3章 側壁式電磁誘導浮上システムの等価支持モデル	23
3.1 緒言	23
3.2 解析モデル	24
3.3 支持特性の計算と等価バネモデル	26

3.3.1	発生する浮上案内力の定常特性	26
3.3.2	浮上案内力の速度依存性についての検討	27
3.3.3	浮上案内力の上下位置依存性	29
3.3.4	等価電磁バネ係数の近似式	31
3.4	台車が上下左右に変位した場合の電磁バネ係数	33
3.5	ダンピングを含んだ等価支持モデルの検討	36
3.5.1	ダンピング係数のモデル化	36
3.5.2	等価バネ-ダンパモデルの検証	38
3.6	結言	39
第 4 章	超電導磁気浮上車両の走行特性解析	40
4.1	緒言	40
4.2	推進系	41
4.2.1	LSM による推進力	41
4.2.2	EDS による推進方向抗力	42
4.3	浮上案内系の特性	46
4.3.1	上下左右変位に対する基本特性	46
4.3.2	回転方向に対する特性	52
4.4	台車単体モデルにおける走行シミュレーション	55
4.4.1	側壁浮上方式におけるローリング発生の機構	55
4.4.2	台車モデルにおける計算の初期値	58
4.4.3	横方向外乱を受けた場合の解析	60
4.4.4	台車に外乱が加わった場合の走行特性のまとめ	78
4.4.5	台車モデルによるカーブ走行特性の解析	79
4.4.6	カーブ走行特性のまとめ(台車モデル)	97
4.5	列車モデルにおける解析	99
4.5.1	列車モデルにおける計算の初期値	99
4.5.2	横方向外乱を受けた場合の解析	101
4.5.3	前方台車の後方台車への影響が少ない原因	126
4.5.4	列車モデルによるカーブ走行特性の解析	127
4.5.5	列車モデルによる走行特性解析のまとめ	137
4.6	結言	138
第 5 章	浮上力のダンピング特性	139
5.1	緒言	139
5.2	浮上力の基本ダンピング特性	140
5.3	SC コイル磁気シールド板のうず電流の影響	142
5.3.1	うず電流場の解析方法	142

5.3.2	台車走行シミュレーション	148
5.3.3	ダンピング特性についての検討	151
5.4	パッシブダンパシステム	153
5.4.1	パッシブダンパコイルの設置条件の検討	154
5.4.2	設置高さ方向に関する検討	155
5.4.3	幅方向に関する検討	158
5.4.4	抵抗値に対する依存性	160
5.5	アクティブダンパシステム	162
5.5.1	ダンパコイルの形状	164
5.5.2	SC コイルと同形のダンパコイル (タイプ 1) の場合	165
5.5.3	浮上コイル対向型アクティブダンパコイル (タイプ 2)	169
5.5.4	アクティブダンパ 1 と 2 の比較	174
5.5.5	ガイドウェイ変位に対するアクティブダンパコイルの効果	175
5.5.6	アクティブダンパコイルに必要なエネルギー	176
5.6	結言	178
第 6 章	超電導コイルクエンチの影響解析	179
6.1	緒言	179
6.2	超電導コイルがクエンチした場合の電流モデル	180
6.3	台車モデルによる解析	181
6.3.1	クエンチ後の台車および SC コイル位置	181
6.3.2	SC コイル電流および各電磁力の変化	186
6.3.3	台車走行速度による影響	189
6.3.4	SC コイルの特性による影響	191
6.4	列車モデルにおける解析	194
6.4.1	列車モデルにおける解析結果	194
6.5	超電導コイルの対向消磁による車両運動の安定化	209
6.6	超電導コイルクエンチの推進系への影響	214
6.7	結言	216
第 7 章	結論	217
7.1	本研究の結論	217
7.2	今後の課題	221
	参考文献	223

図 表 一 覧

第 1 章 序 論

図 1.1	車上一次型 (リニア誘導モータの場合)	3
図 1.2	地上一次型 (リニア同期モータの場合)	4

第 2 章 超電導磁気浮上システムのモデル化および解析手法

図 2.1	超電導磁気浮上鉄道システム断面図	11
図 2.2	超電導磁気浮上鉄道システムコイル配置	11
図 2.3	超電導コイル構成図	12
図 2.4	座標系	12
表 2.1	SC コイルおよび LSM 一次コイルの実際の形状	13
図 2.5	コイル形状のモデル化 (単位 m)	13
表 2.2	LSM、EDS の計算条件	14
図 2.6	台車単体モデル	15
表 2.3	台車モデルにおいて計算に用いた値	15
図 2.7	車両モデル	16
図 2.8	車両-台車結合モデル	16
表 2.4	車両モデルにおいて計算に用いた値	17
図 2.9	側壁式電磁誘導浮上方式モデル	18
図 2.10	浮上・案内の機構	18
図 2.11	計算の手順	21

第 3 章 側壁式電磁誘導浮上システムの等価支持モデル

図 3.1	超電導磁気浮上鉄道システム浮上系解析モデル	24
表 3.1	等価モデルを求めるための計算条件	25
図 3.2	台車に加わる浮上力 $v_x=125\text{m/s}, (y, z)=(0, -0.04\text{m})$	26
図 3.3	台車に加わる案内力 $v_x=125\text{m/s}, (y, z)=(0.02\text{m}, 0)$	26
図 3.4	浮上力の速度依存性 ($z=-0.04\text{m}$, 1SC コイル, 1 浮上コイル)	27
図 3.5	浮上力の浮上コイル抵抗依存性 ($v_x=125\text{m/s}$, 1SC コイル, 1 浮上コイル)	28
図 3.6	上下電磁バネ係数の速度依存性 ($z=0.001\text{m}$)	28

図 3.7	左右電磁バネ係数の速度依存性 ($y=0.02\text{m}$)	29
図 3.8	上下電磁バネ係数の位置依存性 (定常時, 平均値)	29
図 3.9	上下電磁バネ係数の位置依存性 (定常時, $v_x=125\text{m/s}$)	30
図 3.10	$dM_{sc}/dt, dM_{sc}/dz$ の位置依存性	31
図 3.11	左右電磁バネ係数の位置依存性 (定常時, 平均値)	31
図 3.12	上下電磁バネ係数の y, z 位置依存性 (定常時, 平均値)	33
図 3.13	上下電磁バネ係数の左右位置依存性 (定常時, $y=0$ の値で規格化)	33
図 3.14	上下電磁バネ係数の左右位置依存性 (定常時, 平均値)	34
図 3.15	左右電磁バネ係数の位置依存性 (定常時, 平均値)	35
図 3.16	左右電磁バネ係数の上下位置依存性 (定常時, 平均値)	35
図 3.17	各走行速度における上下振動特性	36
図 3.18	各計算法による上下振動特性の計算結果 ($v_x=125\text{m/s}$)	37
図 3.19	振幅増加率の速度依存性	38
表 3.2	近似式を用いた場合の計算誤差	38

第 4 章 超電導磁気浮上車両の走行特性解析

図 4.1	LSM による推進力の様子 (1 セクション)	41
図 4.2	推進力の横方向変位依存性 (1 セクション平均値)	42
図 4.3	推進力の上下方向変位依存性 (1 セクション平均値)	42
図 4.4	SC コイルと浮上コイルの位置関係	42
図 4.5	SC コイルに加わる抗力 (SC コイル 1 個, 浮上コイル 1 組)	43
図 4.6	SC コイルに加わる浮上力 (SC コイル 1 個, 浮上コイル 1 組)	43
図 4.7	各エネルギー変化 (SC コイル 1 個, 浮上コイル 1 組)	43
図 4.8	SC コイルに加わる抗力およびそのフーリエ解析 (1 台車)	44
図 4.9	SC コイルに加わる浮上力およびそのフーリエ解析 (1 台車)	44
図 4.10	各エネルギー変化 (1 台車)	45
図 4.11	相互インダクタンス上下方向特性 (浮上コイル片側上下 2 個分)	47
図 4.12	相互インダクタンス左右方向特性 (浮上コイル上側左右 2 個分)	48
図 4.13	浮上力 $v_x=125\text{m/s}, \Delta z=-0.04\text{m}$	49
図 4.14	案内力 $v_x=125\text{m/s}, \Delta y=0.02\text{m}$	49
図 4.15	上下振動を伴う走行シミュレーション ($v_x=125\text{m/s}$)	50
図 4.16	左右振動を伴う走行シミュレーション ($F_{ext,y}=0.2MgN, v_x=125\text{m/s}$)	50
図 4.17	上下振動の走行速度 v_x 依存性	51
図 4.18	左右振動の走行速度 v_x 依存性 (横方向外力 $F_{ext,y}=0.2MgN$)	51
図 4.19	ピッチング方向の振動特性 ($v_x=125\text{m/s}$)	52
図 4.20	ヨーイング方向の振動特性 ($v_x=125\text{m/s}$)	52
図 4.21	ローリング方向の振動特性 ($v_x=125\text{m/s}$)	52
図 4.22	振動周期の速度依存性 ($\Delta\theta=0.001\text{rad}$)	53

図 4.23	振幅増加率の速度依存性 ($\Delta\theta=0.001\text{rad}$)	53
図 4.24	台車に働く電磁力 (重心がガイドウェイの中心にある場合)	55
図 4.25	台車の重心に働く電磁力 (重心がガイドウェイの中心にある場合)	56
図 4.26	ローリング方向のトルク (重心がガイドウェイの中心にある場合)	56
図 4.27	台車に働く電磁力 (重心がガイドウェイの中心にない場合)	56
図 4.28	台車に働く電磁力 (重心がガイドウェイの中心にない場合)	57
図 4.29	ローリング方向のトルク (重心がガイドウェイの中心にない場合)	57
図 4.30	横方向変位とローリングトルクの均衡点の関係 (上下位置 $z=-0.03935\text{m}$)	58
図 4.31	各 SC コイルにかかる浮上力	58
図 4.32	上下均衡位置の速度依存性	59
図 4.33	ピッチングトルクが均衡する角度の速度依存性	59
図 4.34	横方向外力を加えた場合のモデル	60
図 4.35	横方向のステップ外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の台車運動	61
図 4.36	横方向外力を加えた場合の台車運動の様子	62
図 4.37	横方向の外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の浮上力変化	62
図 4.38	横方向の外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の案内力変化	63
図 4.39	横方向の外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の推進力変化	63
図 4.40	台車運動の横方向外力依存性 ($t=0\sim 2.0\text{sec}$ 間の平均値, $v_x=140\text{m/s}$)	64
図 4.41	台車に横方向変位がある場合のモデル	65
図 4.42	台車に $\Delta y=0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の台車運動	66
図 4.43	台車に $\Delta y=0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の浮上力変化	67
図 4.44	台車に $\Delta y=0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の案内力変化	67
図 4.45	台車に $\Delta y=0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の推進力変化	68
図 4.46	ガイドウェイにステップ変位が起こった場合	69
図 4.47	ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車運動	70
図 4.48	ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の浮上力変化	71
図 4.49	ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の案内力変化	71
図 4.50	ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の推進力変化	72
図 4.51	変位ガイドウェイに入った直後の変位極大値のガイドウェイ変位量に対する依存性	73
図 4.52	ガイドウェイの 1 セクションに変位が起こった場合	74
図 4.53	ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車運動	75
図 4.54	ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の浮上力変化	76
図 4.55	ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の案内力変化	76

図 4.56	ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の推進力変化	77
表 4.1	各外乱時における各電磁力の平均値	78
図 4.57	カーブ区間解析モデル	79
図 4.58	カーブ区間形状(カント角なし)	80
図 4.59	台車がカーブを通過する際の運動(ガイドウェイ固定座標系、カントなし)	81
図 4.60	ヨーイング運動(絶対座標系、カント角なし)	82
図 4.61	台車がカーブを通過する際の浮上力(カントなし)	82
図 4.62	台車がカーブを通過する際の案内力(カントなし)	83
図 4.63	台車がカーブを通過する際の推進力(カントなし)	83
図 4.64	LSMの台車ヨーイング角への影響(絶対座標系)	84
図 4.65	横方向・ローリング振動振幅の走行速度依存性(カーブ区間最初の振動周期, $R_m=8000\text{m}$)	84
図 4.66	横方向・ローリング振動振幅の曲率半径依存性(カーブ区間最初の振動周期, $v_x=140\text{m/s}$)	85
図 4.67	カント角の様子	86
図 4.68	カーブ区間形状(カント角あり)	86
図 4.69	台車がカーブを通過する際の運動(ガイドウェイ固定座標系、カント角 0.1745rad)	88
図 4.70	各SCコイル中心の上下方向運動(ガイドウェイ固定座標)	89
図 4.71	カーブ走行時のある浮上コイル電流の様子($t=1.15\sim 1.22\text{sec}$)	90
図 4.72	台車がカーブを通過する際の運動(絶対座標系、カント角 0.1745rad)	90
図 4.73	台車がカーブを通過する際の浮上力(カントあり)	91
図 4.74	台車がカーブを通過する際の案内力(カントあり)	91
図 4.75	台車がカーブを通過する際の推進力(カントあり)	92
図 4.76	緩和曲線およびカーブ区間形状	93
図 4.77	台車がカーブを通過する際の運動(ガイドウェイ固定座標系、緩和曲線あり)	94
図 4.78	台車がカーブを通過する際の運動(絶対座標系、緩和曲線あり)	95
図 4.79	台車がカーブを通過する際の浮上力(緩和曲線あり)	96
図 4.80	台車がカーブを通過する際の案内力(緩和曲線あり)	96
図 4.81	台車がカーブを通過する際の推進力(緩和曲線あり)	97
表 4.2	カーブ区間における電磁力の平均値	98
図 4.82	列車モデルにおける計算の初期位置($x-z$ 平面)	99
表 4.3	計算時における台車・客室の初期位置($v_x=140\text{m/s}$)	100
表 4.4	計算時における台車・客室の初期位($v_x=70\text{m/s}$)	100
図 4.83	横方向外力を加えた場合のモデル(列車モデル)	101
図 4.84	横方向のステップ外力を加えた場合の台車横方向運動($F_{ext,y}=0.1MgN$)	102

図 4.85 横方向のステップ外力を加えた場合の台車上下運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	102
図 4.86 横方向のステップ外力を加えた場合の台車ヨーイング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	103
図 4.87 横方向のステップ外力を加えた場合の台車ローリング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	103
図 4.88 横方向のステップ外力を加えた場合の台車重心の軌跡 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	104
図 4.89 横方向の外力を加えた場合に列車にかかる横方向力およびローリングトルク	105
図 4.90 横方向外力を受けたときの台車と客室の相互作用	105
図 4.91 横方向のステップ外力を加えた場合の客室横方向運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	107
図 4.92 横方向のステップ外力を加えた場合の客室上下運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	107
図 4.93 横方向のステップ外力を加えた場合の客室ヨーイング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	108
図 4.94 横方向のステップ外力を加えた場合の客室ローリング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	108
図 4.95 横方向のステップ外力を加えた場合の客室重心の軌跡 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)	109
図 4.96 ガイドウェイにステップ変位が起こった場合 (列車モデル)	110
図 4.97 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の台車横方向運動	112
図 4.98 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の台車上下運動	112
図 4.99 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の台車ヨーイング運動	113
図 4.100 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の台車ローリング運動	113
図 4.101 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の台車重心の軌跡	114
図 4.102 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の客室横方向運動	115
図 4.103 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の客室上下運動	115
図 4.104 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の客室ヨーイング運動	116
図 4.105 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の客室ローリング運動	116
図 4.106 ガイドウェイに $\Delta y = 0.01m$ のステップ変位が起こった場合の客室重心の軌跡	117
図 4.107 ガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合 (列車モデル)	118
図 4.108 ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01m$ の横変位が起こった場合の台車横方向運動	120
図 4.109 ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01m$ の横変位が起こった場合の台車上下運動	120
図 4.110 ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01m$ の横変位が起こった場合の台車ヨーイング運動	121

図 4.111 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車ローリング運動	121
図 4.112 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車重心の軌跡	122
図 4.113 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室横方向運動	123
図 4.114 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室上下運動	123
図 4.115 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室ヨーイング運動	124
図 4.116 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室ローリング運動	124
図 4.117 ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室重心の軌跡	125
表 4.5 EDS の電磁バネ係数と 2 次系の機械バネ係数の特性の比較	126
図 4.118 緩和曲線およびカーブ区間形状	127
図 4.119 列車がカーブを通過する際の台車横方向運動 (ガイドウェイ固定座標系)	129
図 4.120 列車がカーブを通過する際の台車上下運動 (ガイドウェイ固定座標系)	129
図 4.121 列車がカーブを通過する際の台車ヨーイング運動 (ガイドウェイ固定座標系)	130
図 4.122 列車がカーブを通過する際の台車ローリング運動 (ガイドウェイ固定座標系)	130
図 4.123 列車がカーブを通過する際の台車重心の軌跡 (ガイドウェイ固定座標系)	131
図 4.124 列車がカーブを通過する際の客室横方向運動 (ガイドウェイ固定座標系)	132
図 4.125 列車がカーブを通過する際の客室上下運動 (ガイドウェイ固定座標系)	132
図 4.126 列車がカーブを通過する際の客室ヨーイング運動 (ガイドウェイ固定座標系)	133
図 4.127 列車がカーブを通過する際の客室ローリング運動 (ガイドウェイ固定座標系)	133
図 4.128 列車がカーブを通過する際の客室重心の軌跡 (ガイドウェイ固定座標系)	134
図 4.129 列車がカーブ区間を走行している様子 ($y-z$ 平面)	135
図 4.130 先頭台車・客室がカーブを通過する際のヨーイング運動 (絶対座標系、緩和曲線あり)	136
図 4.131 先頭台車・客室がカーブを通過する際のローリング運動 (絶対座標系、緩和曲線あり)	136

第 5 章 浮上力のダンピング特性

図 5.1 台車を上下に強制振動させエネルギー収支を求めるモデル	140
----------------------------------	-----

図 5.2	電磁誘導型超電導磁気浮上システムのエネルギーの流れ	141
図 5.3	強制振動モデルによるエネルギー収支の速度依存性	141
図 5.4	シールド板の分割	143
図 5.5	節点の周りの電流ループ	143
図 5.6	ピラミッド関数	143
図 5.7	節点 i の周りの基底関数	144
図 5.8	外部電源のベクトルポテンシャルの離散化	145
図 5.9	うず電流場の離散化	145
図 5.10	電界の線積分	145
図 5.11	電流ループの簡単化	147
表 5.1	磁気シールドの計算条件	148
図 5.12	磁気シールド板の設置位置	148
図 5.13	磁気シールド板の分割	149
図 5.14	台車振動シミュレーションの初期条件	149
図 5.15	台車振動の様子	150
図 5.16	磁気シールド板に誘導されるうず電流の様子 (時刻 61ms)	150
図 5.17	磁気シールド板に誘導されるうず電流の様子 (時刻 64ms)	150
図 5.18	$a - a'$ 間の電流密度分布 (時刻 64ms)	151
図 5.19	磁気シールド板を考慮した時のシステムにおけるエネルギーの流れ	152
図 5.20	磁気シールド板の有無によるエネルギー収支の違い	152
図 5.21	コイル間の関わり	153
図 5.22	パッシブダンパコイルの形状	153
表 5.2	パッシブダンパコイルの諸定数	153
表 5.3	ダンパコイルなしの場合の W_{total} の値	154
図 5.23	ダンパコイル高さ検討方法	155
図 5.24	$h=0.38\text{m}$ の時の各エネルギーの z 依存性	155
図 5.25	W'_{total} の極小値の設置高さ h 依存性 (振幅 0.04m)	155
図 5.26	W'_{total} の極小値の設置高さ h 依存性 (振幅 0.02m)	156
図 5.27	W'_{total} の極小値の h 依存性 (振幅 0.06m)	156
図 5.28	振幅 0.04m, $h=0.42\text{m}$ の時の W'_{total} の分布	157
図 5.29	振幅 0.02m, $h=0.42\text{m}$ の時の W'_{total} の分布	157
図 5.30	振幅 0.06m, $h=0.42\text{m}$ の時の W'_{total} の分布	157
図 5.31	ダンパコイル幅の検討方法	158
図 5.32	各エネルギーの x 依存性 ($w=0.963\text{m}$)	158
図 5.33	W'_{total} の極小値の w 依存性 (振幅 0.04m)	158
図 5.34	W'_{total} の極小値の w 依存性 (振幅 0.02m)	159
図 5.35	W'_{total} の極小値の w 依存性 (振幅 0.06m)	159
図 5.36	パッシブダンパコイルの配置	159

図 5.37	抵抗率 ρ と W'_{total} の関係	160
図 5.38	アクティブダンパシステムを含む車上の電気系統図	162
図 5.39	アクティブダンパの設置場所	163
図 5.40	アクティブダンパコイル タイプ 1	163
図 5.41	アクティブダンパコイル タイプ 2	164
図 5.42	アクティブダンパコイルの配置 (タイプ 1)	165
表 5.4	検討に用いるアクティブダンパコイルの諸元 (タイプ 1)	166
図 5.43	アクティブダンパコイルを用いた場合の車両振動 (タイプ 1)	166
図 5.44	エネルギー収支の速度依存性 (タイプ 1)	167
図 5.45	2 剛体系モデル	168
図 5.46	電圧-振動速度係数とバネ係数の関係 (タイプ 1・ $v_x=120\text{m/s}$)	168
図 5.47	電圧-振動速度係数とダンピング係数の関係 (タイプ 1・ $v_x=120\text{m/s}$)	169
図 5.48	磁気シールド板のエネルギー収支への影響 (タイプ 1)	169
図 5.49	アクティブダンパコイルの配置 (タイプ 2)	170
表 5.5	検討に用いるアクティブダンパコイルの諸元 (タイプ 2)	170
図 5.50	アクティブダンパコイルを用いた場合の車両振動 (タイプ 2)	171
図 5.51	エネルギー収支の速度依存性 (タイプ 2)	171
図 5.52	電圧-振動速度係数とバネ係数の関係 (タイプ 2, $v_x=120\text{m/s}$)	172
図 5.53	電圧-振動速度係数とダンピング係数の関係 (タイプ 2, $v_x=120\text{m/s}$)	172
図 5.54	磁気シールド板のエネルギー収支への影響 (タイプ 2)	173
図 5.55	アクティブダンパシステムの有無によるエネルギー収支の違い	174
表 5.6	K の値と印加電圧・電流の関係	174
図 5.56	ガイドウェイ変位に対するアクティブダンパの効果 (タイプ 2)	175
図 5.57	ダンピング係数 1Ns/m 当たりアクティブダンパコイルで消費するエネルギー (タイプ 1・ $K_{ac,dz} = 100$)	177
図 5.58	ダンピング係数 1Ns/m 当たりアクティブダンパコイルで消費するエネルギー (タイプ 2・ $K_{ac,dz} = 100$)	177
図 5.59	ダンピング係数 1Ns/m 当たりに発生する磁気抗力 (タイプ 1・ $K_{ac,dz} = 100$)	177
図 5.60	ダンピング係数 1Ns/m 当たりに発生する磁気抗力 (タイプ 2・ $K_{ac,dz} = 100$)	177

第 6 章 超電導コイルクエンチの影響解析

図 6.1	クエンチした SC コイルの電流変化	180
図 6.2	SC コイル配置図	180
図 6.3	1 つの SC コイルがクエンチした場合の台車運動	182
図 6.4	SC コイルがクエンチした場合の台車運動の様子	183
図 6.5	SC1 がクエンチした場合の SC コイル位置変化	184

図 6.6	SC2 がクエンチした場合の SC コイル位置変化	184
図 6.7	SC3 がクエンチした場合の SC コイル位置変化	185
図 6.8	SC4 がクエンチした場合の SC コイル位置変化	185
図 6.9	SC1 がクエンチした場合の各 SC コイル起磁力変化	186
図 6.10	SC1 がクエンチした場合の SC コイル浮上力変化	187
図 6.11	SC1 がクエンチした場合の SC コイル案内力変化	187
図 6.12	SC1 がクエンチした場合の SC コイル推進力変化	188
図 6.13	SC1 がクエンチした場合の浮上コイル電流変化	188
図 6.14	クエンチ時の台車運動の速度依存性 (SC1 がクエンチ)	190
図 6.15	SC1,5 の位置の速度依存性 (SC1 がクエンチ)	191
図 6.16	SC コイル減衰時定数の台車運動への影響	192
図 6.17	SC コイル自己インダクタンスの SC2 電流への影響	192
図 6.18	台車運動の SC コイル自己インダクタンスに対する依存性	193
図 6.19	列車モデルにおけるクエンチモデル (先頭台車の SC1 がクエンチ)	194
図 6.20	列車の位置関係の指標	195
図 6.21	先頭台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動	197
図 6.22	先頭台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動	198
図 6.23	先頭台車クエンチ後の列車の様子 ($x-y$ 平面)	199
図 6.24	先頭台車クエンチ後の列車の様子 ($x-z$ 平面)	199
図 6.25	第 2 台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動	200
図 6.26	第 2 台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動	201
図 6.27	第 2 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-y$ 平面)	202
図 6.28	第 2 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-z$ 平面)	202
図 6.29	第 3 台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動	203
図 6.30	第 3 台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動	204
図 6.31	第 3 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-y$ 平面)	205
図 6.32	第 3 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-z$ 平面)	205
図 6.33	第 4 台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動	206
図 6.34	第 4 台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動	207
図 6.35	第 4 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-y$ 平面)	208
図 6.36	第 4 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-z$ 平面)	208
図 6.37	対向消磁の台車運動に対する効果	210
図 6.38	対向消磁時間の台車・客室の最大変位への影響	211
図 6.39	台車にかかる最大案内力への対向消磁の効果	212
表 6.1	各 SC コイルに加わる浮上力	213
表 6.2	各 SC コイルに加わる案内力	213
図 6.40	クエンチによる台車間距離の変化	214
表 6.3	クエンチ後 ($t=2.5\sim 4.0\text{sec}$ 間) の LSM 推進力と磁気抗力の平均値	215

第 7 章 結論

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

1.1.1 本研究の背景

現在都市間交通機関は主に航空機、軌道交通機関、自動車が用いられている。この中で日本において最も広く用いられている手段はその定時性、輸送力から鉄道となっている。そして都市間をより高速で結ぶことが求められており、速度の向上が図られている。高速鉄道の中で代表的なものが新幹線である。現在最高時速 270km/h 付近で営業運転を行っており、時速 300km/h 以上の営業運転を目指したものが開発中である。しかし、従来の鉄車輪型の鉄道の高速化には、粘着の限界や接触集電などの問題から限界がある [1]。また高速走行に伴う騒音と振動を許容範囲に抑える必要があり、特に住宅地付近を通過することが多い場合には深刻な問題となる。そこでこれらの問題点を解決し、超高速での走行を実現する新しい方式の都市間超高速軌道交通機関が求められている。

1.1.2 超高速軌道交通機関の現状

以上のことから、磁気浮上技術を用いて非接触で車両を支持し、リニアモータを用いたダイレクトドライブにより超高速で走行するシステムが開発中である。この高速の磁気浮上式鉄道をマグレブ (Maglev) と呼ぶ。

アメリカにおいて 1990 年に発足した国家マグレブ推進計画 (NMI: National Maglev Initiative Program) による報告書 [2] では、次のような超高速マグレブの利点を挙げている。

- 時間の短縮

速度の限界が従来の鉄道より高いと考えられ、最高速度および加減速能力の向上により所要時間が大きく短縮され、500km までの距離ではアクセス時間を考えると航空機より速くなる。

- 定時性

航空機など他の輸送機関に比べて天候の影響を受けることが少なく、到着時間の信頼性が高い。1987年のデータでは米国の21の主要空港での航空機の遅れは年間のべ2万時間、それが米国の経済界および航空会社に与えた損害は8億ドルと見積もられている。

- 低公害性、省エネルギー

電気エネルギーを用いているため航空機や自動車のより大気汚染物質の放出が少ない。また、石油消費の全体の64%を占めている航空機や自動車による石油消費を抑え、石油輸入量を削減することが出来る。

現在アメリカにおいては予算の問題から開発が凍結されているが、ドイツ・日本においては実用化に向けた開発 [3] が進んでいる。

- ドイツにおける開発

1977年から Transrapid[4] が開発中であり、現在 Emsland の実験線において実用に向けての最終的な実験が行われている。営業線における走行速度は都市部で200km/h、その他の地域で450km/hの走行を目指しており、ベルリンーハンブルグ間300kmを約1時間で結ぶ計画である。現在ベルリンーハンブルグ間の営業線のルートもほぼ決定しており、環境に対するアセスメントが行われている。そして1998年からの軌道建設、2003もしくは2006年での営業開始が予定されている。

- 日本における開発

推進・浮上用に超電導マグネットを用いたマグレブが国鉄時代から現在のJRグループに引き継がれ、開発が進んでいる。営業線における走行速度は500km/h以上を目指しており、東京ー大阪間500kmを約1時間で結ぶことを目標としている。実験は宮崎県で行われてきたが、今後は山梨県の新実験線において、2編成（3両および4両）の列車を用い、営業線を想定した実験が行われる [5]。

1.1.3 磁気浮上鉄道

次に磁気浮上式鉄道に用いられる各方式について示す。

- 推進系

鉄道に用いられるリニアモータの代表的なもの [6] は以下の2つである。その特徴を以下に示す。

- － リニア誘導モータ (Linear Induction Motor:LIM)

高速走行した場合の推力の低下(端効果)などで速度が制限される。しかし、2次側の構造を簡単にすることができ、軌道の建設費が安いので、地下鉄 [3] な

どで既に実用化されている。また、距離 100km 程度までの中距離輸送用に開発中の HSST システムにもこれが用いられている。

－ リニア同期モータ (Linear Synchronous Motor: LSM)

高推力で、LIM に比べて端効果が小さいため高速走行に適している。しかし、構造が複雑になり建設コストが高い。また、同期を保つために位置検出が必要である。JR マグレブ、ドイツの Transrapid などに用いられている。

モータの一次側 (電機子側) と二次側 (界磁側) の配置には図 1.1 に示す車上一次型と図 1.2 に示す地上一次型がある [3]。

－ 車上一次型

モータの一次部分を車両に搭載し、二次部分を軌道上に設置する方式。モータ電流はき電線から集電され、車載のモータ制御用の変換装置によって制御される。基本的には従来のインバータ電車と同じ。図 1.1 のように LIM の場合は軌道に設置される部分はアルミ板などの二次導体と二次鉄心のみでコストも比較的安く、施工も容易である。また、モータの主要部分が車両にあるので輸送能力や速度などは軌道建設後でも変更が可能である。しかし、集電が必要なので車両と軌道の間に接触部が出来て、環境性や保守性に問題がある。重量の大きい制御用の変換装置やリニアモータの一次部分を車載するため車重が増加し、あまり大容量の装置を搭載するのは難しい。以上の点から高速化に限界がある。リニア地下鉄、HSST システムはこの方式である。

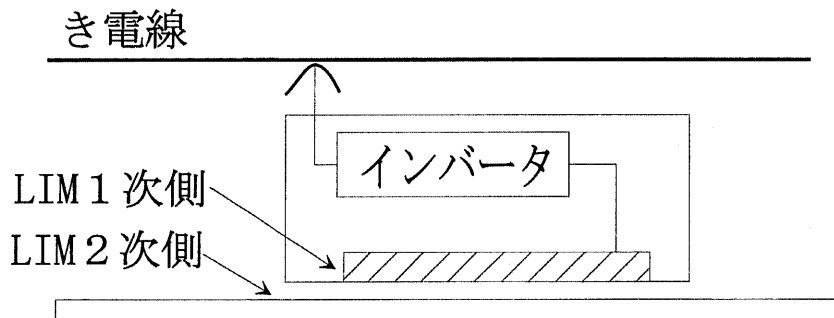


図 1.1: 車上一次型 (リニア誘導モータの場合)

－ 地上一次型

一次側を軌道上に設置し、車上には二次側を搭載する。

モータの主要部分は地上にあるので車両の重量を軽くできる。推進装置の主要部分が地上に配置できるので、大容量化が容易である。また、車内電源は車載バッテリーやリニア発電機で対応でき、集電システムを必要としない。以上の点から超高速の磁気浮上システムに適する。しかし、システムの輸送能力や速

度が地上設備で決まってしまうので、需要の伸びなどで段階的に発展させることが難しく、システム的な自由度が小さい。また、一次部分を軌道の全長にわたって設備する必要がある、全体のシステムのコストが大きくなる。さらに車両の速度などを地上側から制御する従来とは全く違った方式をとるので、新しい車両の運転や信号などの保安技術の確立が必要である。

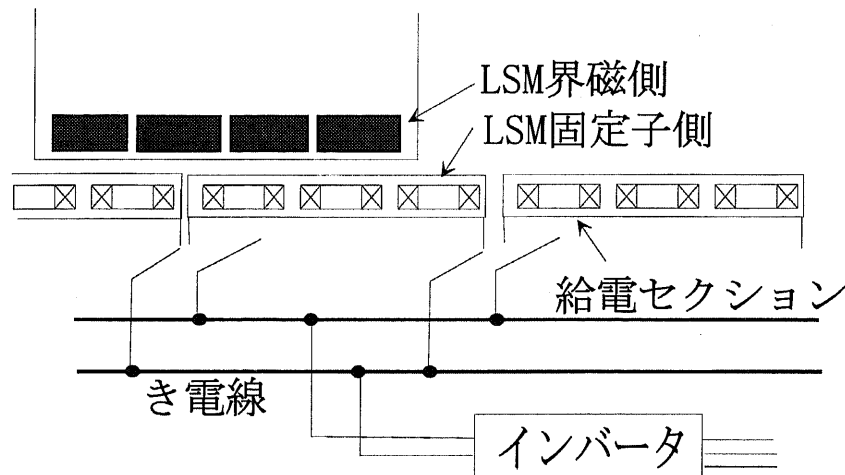


図 1.2: 地上一次型 (リニア同期モータの場合)

以上の点から、超高速運転を目標としている日本の JR マグレブやドイツの Transrapid では、コストは高くなるが、高速運転が実現できる LSM を、そして車両重量を軽くでき、駆動用の集電システムを必要としない地上一次型を採用している。

● 浮上案内系

磁気浮上鉄道では磁気力により浮上力および案内力を得るが、主に以下の2つの浮上方式が研究されている。

－ 電磁誘導 (Electrodynanic Suspension:EDS) 方式

車体に電磁石を取り付け、軌道上に短絡コイルを並べる。そして車両が軌道上を走行すると電磁石の通過により、対向する短絡コイルには電磁誘導作用により電流が誘起され、この電流と電磁石との相互作用で浮上案内力を得る。そして超電導マグネットを用いた場合には後の電磁吸引方式よりも浮上ギャップを大きくとることができる。しかし浮上案内力は車両速度によって変わり、速度ゼロでは力は得られないので低速時には補助車輪が必要である。JR マグレブでは短絡コイルをガイドウェイ底面に設置する対向浮上方式が取られていたが、磁気抗力によるエネルギー損失を小さくするため、新実験線では全線でヌルフラックス結線を用いたコイルをガイドウェイ側壁に配置する側壁浮上式が採用されている。

－ 電磁吸引 (Electromagnetic Suspension:EMS) 方式

この方式は車体に取り付けられた磁石と軌道の鉄レールとの吸引力で浮上案内力を得ている。台車構造が複雑になる、ガイドウェイとのギャップを制御する必要があるが、列車速度ゼロでも浮上力が得られる。また洩れ磁束が小さく、車内の磁気シールドの問題が少ないといった利点を持つ。

日本では、地震や軟地盤のため、ガイドウェイの設置精度に余裕を持たせる必要がある。よって JR マグレブは大きな浮上ギャップをとれる超電導 EDS 方式を用いている。一方地盤の固いドイツの Transrapid などはギャップが 1cm 程度で十分であるので EMS 方式を用いている。

本研究では、日本の JR マグレブを取り上げる。JR マグレブは台車に LSM の界磁と EDS 用の浮上マグネットを兼ねた超電導マグネットを搭載している。これにより大きな推進力を得ることができ、時速 500km/h を越える高速走行が可能である。また走行中は大きな浮上力が働き、約 10cm と大きなギャップ長を大きくとることができる。この結果ガイドウェイ建設の際の設置精度を低くすることができる。

JR 方式はこのような利点を持つが、解決すべき問題も依然として残されている。既設の宮崎県での実験線では全長 7km の直線走行のみであり、この浮上系の走行特性を解明するのに十分な結果が得られていない。

そこでこの磁気浮上台車の走行特性を明らかにするため、様々な研究が行われている。この系は非線形系であるため、理論的な解析解を得ることができず、数値解析による検討が [7][8] 行われている。従来の解析結果から、走行速度の小さい領域ではダンピングが正となり、超電導コイルの磁気シールド板に流れる渦電流の効果など他の電磁氣的要素によるダンピングの増加が示されている [9]。しかし宮崎での MLU002N 型実験車両での結果では車両振動は収束し、この浮上系のダンピングは正となっているのに対して、浮上コイルと超電導コイルのみの系を考えた場合には浮上走行可能領域においてダンピングが小さく、負になることが示されている。このためカーブ走行時の安定性や、超電導コイルへの振動、乗り心地への影響が危惧されており、安定性を向上させるために、十分なダンピングを得る方法が求められている。またこのシステムでは推進系と浮上系の相互作用が大きい。従来の研究ではこの両者を総合的に解析するものは少なく、推進系、浮上系間の相互作用を解析する手法が必要とされている。そして車両が横風などの外乱を受けた場合やカーブ突入時の挙動、複数の台車や車両が存在する場合の台車間や車両間の干渉問題、さらに超電導マグネットがクエンチした場合の車両、台車位置の安定化についての検討が求められている。

1.2 本研究の目的

本研究では JR グループで開発中の超電導磁気浮上鉄道システムを対象としてとりあげる。現在山梨県で 42.8km(先行区間 18.4km) の新実験線が建設中であり [5]、2 編成の列車を導入しカーブ区間、トンネル区間、列車のすれ違いなど、営業線に向けた様々な実験が行われる予定である。しかし、超電導磁気浮上車両の走行特性については明らかにされていない部分が多く、解析結果と実験線での実験結果の対比が求められる。さらにこれらから実用線設計の最適化の手法が導かれなければならない。

本研究の目的は解析的に車両の走行特性を求め、その結果から浮上特性の問題点を明らかにし、車両の走行安定性を向上する方策を見い出すことにあり、次の 4 つに分けられる。

- 浮上系と推進系を組み合わせた超電導磁気浮上システムの 6 自由度多剛体解析コードの作成

従来の解析は浮上系、推進系に限定したものが多く、これらを統合して総合的に解析し、浮上系と推進系の相互作用を検討したものは少ない。また、システムの定常特性のみに着目したものが多く、カーブ走行や超電導マグネットのクエンチなど 3 次元の運動を伴う走行シミュレーションは行われていない。本研究では、3 次元 6 自由度多剛体解析コードを作成する。さらに車両の 2 次系といった機械系を組み込み、列車モデルを構築しそれを用いてシステムの様々な特性解析を行う。

- 超電導磁気浮上台車および車両の走行特性

浮上案内系について、各移動および回転方向に対する電磁力・トルクの基本特性を明らかにする。その結果からシステムのダンピングの設計を行うために、浮上案内系の等価支持モデルを求める。また、台車モデル、それを発展させた列車モデルについて、3 次元 (6 自由度) の解析を行い、外乱を受けた場合やカーブ突入などの走行特性を求め、その安定性を検討する。また従来の研究では明らかにされていない浮上系と推進系の相互作用や列車運動における車両間の影響を求める。

- 浮上システムのダンピングの向上

浮上系の解析結果からこのシステムのダンピングが小さいことが示されている。そこで台車および車両の走行特性から、必要なダンピングの特性を求める。そして、ダンピングを増やして超電導マグネットの安定性や乗り心地を改善するために、パッシブダンパコイル [10] やアクティブダンパコイルシステム [11] を導入し、その形状・ダンピングへの効果を検討する。

- 超電導コイルクエンチ時の走行特性およびその安定化

このシステムにおいて超電導コイルのクエンチは最も深刻な外乱の一つである。ここでは、クエンチ時の運動解析を行い、台車単体モデルを用いて台車の挙動や電磁力、超電導コイル電流への影響を検討する。また列車においてクエンチ台車が他の台車、車両に与える作用を明らかにする。また他の超電導コイルの消磁による車両位置の安定化について検討する。

1.3 本論文の構成

本論文は序論、結論を含め全7章で構成される。論文の構成は以下の通りで、各章の題目および内容の概略を示す。

第1章: 序論

第2章: 超電導磁気浮上システムのモデル化と解析手法

本章では超電導磁気浮上鉄道システムの概要と特徴について述べる。また解析において推進系、浮上案内系、列車、地上ガイドウェイなどの各要素のモデル化が必要であり、その解析要素のモデル化について論じた。さらに推進・浮上・案内といった電磁力および列車運動の解析手法について示した。

第3章: 側壁式電磁誘導浮上システムの等価支持モデル

EDS方式の磁気浮上車両の走行特性は、2章に述べた電磁現象と機械運動の方程式を連成させた数値解析により求められるがその計算量は膨大であり、より簡単な等価的な支持系としての表現が望まれる。本章では2章で述べた解析法を用いて浮上システムの位置依存性、走行速度依存性といった基本特性を求めた。それを用いて、EDS方式の浮上特性を等価的な機械的な支持系としてあらわす方法について検討した。

第4章: 超電導磁気浮上システムの走行特性解析

カーブ走行や様々な外乱の影響を検討する場合は、第3章の近似式からの誤差は大きくなる。よって第2章で述べた電気回路を解く解析法を用いて、台車に車両の全重量が集中しているとするモデルについて解析を行い、浮上案内系の基本特性を求めた。さらに横方向の外力を受けた場合やカーブ区間を走行する際の運動を求め、その際の走行安定性について検討した。同様に複数の台車・車両で構成される列車モデルについて解析し、車両間の相互作用などについても考察した。

第5章: 浮上システムのダンピング

数値解析による結果ではシステムのダンピングは小さい。そこでダンピング要素として超電導コイルの磁気シールド板の影響を求めた。またダンパ用の短絡コイルを台車に付加し、その設置位置、効果について検討した。さらに制御を加えて台車振動を積極的に抑えるアクティブダンパシステムの導入を提案し、その形状・配置条件などを求めた。

第6章: 超電導コイルクエンチの影響解析

本章ではこのシステムにおいて最も大きな外乱である超電導コイルがクエンチした場合の解析を行った。まず台車に車両の全重量が集中しているとするモデルにおいてクエンチ時の推進系と浮上系の基本的な特性および両者の間の相互作用について

解析した。さらに列車モデルについて検討し、クエンチが列車全体に与える影響、クエンチの形態による依存性、さらに対向消磁によるクエンチ後の列車位置の安定化について論じた。

第7章: 結論

本論文で得られた解析結果、成果をまとめ、今後の課題について述べた。

第 2 章

超電導磁気浮上システムのモデル化および 解析手法

2.1 緒言

本章では超電導磁気浮上システムの概要と特徴について述べる。数値解析を行なうためには推進系、浮上案内系、地上ガイドウェイや列車などについてのモデル化が必要である。そこで 3 章以降の解析のために用いた超電導磁気浮上システムの各要素のモデル化および計算簡略化のための近似法について述べる。また LSM による推進力、EDS による浮上案内力の解析法について示し、電磁現象と機械運動の方程式を連成させた運動解析の手法について述べる。

このシステムについては、推進コイルと浮上案内コイルを併用する方式 [12] などとも検討されているが、ここでは山梨新実験線 [5] での方式に沿って解析を行う。

2.2 計算における超電導磁気浮上鉄道システムのモデル化と解析手法

図 2.1 に超電導磁気浮上システムの断面図および浮上コイルの結線を示す。また図 2.2 にシステムのコイル配置を示す。非接触集電を行うため、LSM は地上一次型となっている。図のように地上側ガイドウェイ側壁には推進系 LSM の一次側コイルが 3 相 (U,V,W) 配置され、内側と外側の 2 層に交互に配置される。ガイドウェイは施工のため、セクション構造 (1 セクション 12.6m) をとっており、切れ目にあたる部分の推進コイルは中心で 2 つに分けられる。これは推進力の脈動の原因になる。推進コイルの内側に 8 の字型に上下浮上案内用のコイルが配置されており、これらは左右もガイドウェイ下を通る Null-flux 線で結線されている。そして超電導 (SC : Superconducting) コイル 1 ピッチ当たり 3 コイルの割合で配置されている。

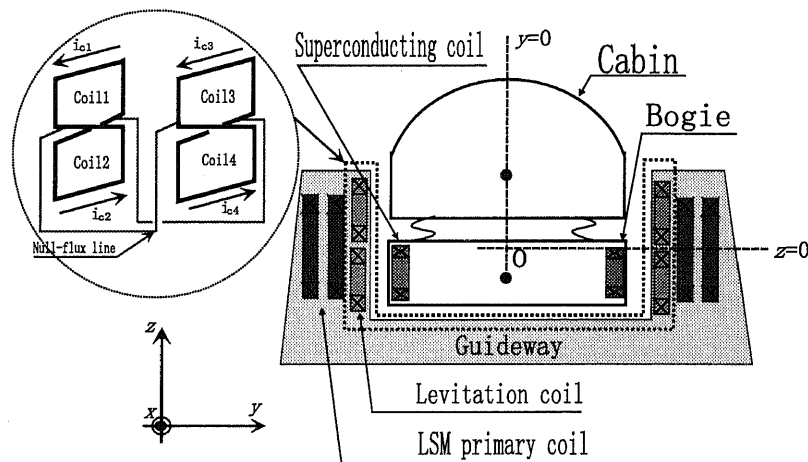


図 2.1: 超電導磁気浮上鉄道システム断面図

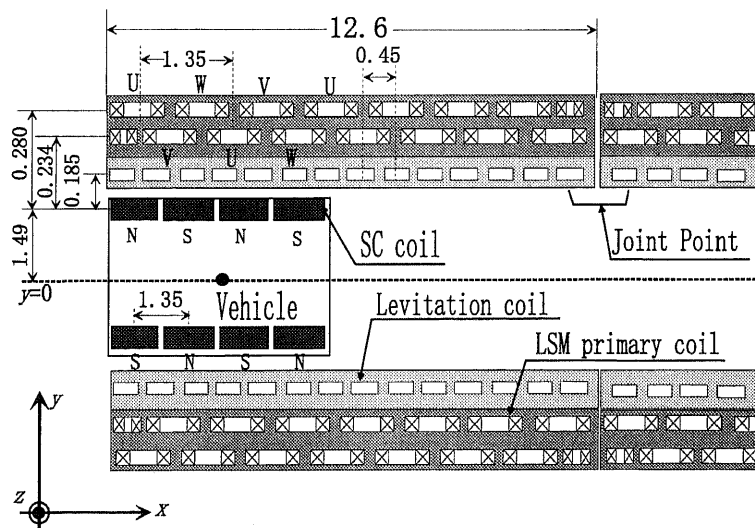


図 2.2: 超電導磁気浮上鉄道システムコイル配置

この浮上コイル結線により、マグネットが上下浮上コイルの中心より下を通過した場合、浮上コイルに走行速度および上下位置に応じた誘導起電力が発生し電流が流れることで、下側コイルには反発力が、上側コイルには吸引力が働くことで浮上力が発生する。案内方向も同様にして案内力が得られる。図 2.3 に車上に設置される SC コイルの構成を示す。液体ヘリウム (4K) で満たされた内層に SC コイルが配置され、その回りを液体窒素 (77K) で満たし、輻射シールド板で覆っている。この SC コイルは LSM の 2 次側と浮上案内用を兼ねており、1 台車当たり 8 個 (片側 4 個) 配置され、2 磁極対を構成している。

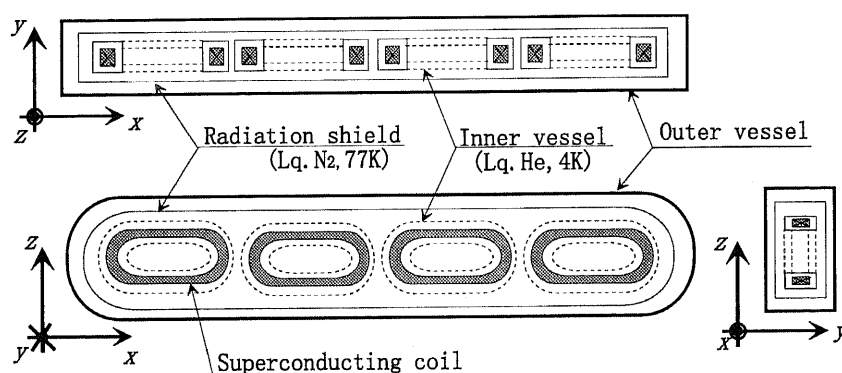


図 2.3: 超電導コイル構成図

図 2.4 に解析における座標系を示す。座標系については特に明記している場合を除き、地上に固定した座標系を用いて列車位置を示す。座標軸は列車が進行する方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とする。そして台車重心の出発点を $x=0$ とし、図 2.1 中にも示すようにガイドウェイの中心を $y=0$ 、LSM 地上コイルの中心 (8 の字浮上コイルの中心) を $z=0$ とする。そして図のように z 軸まわりの回転をヨーイング、 y 軸まわりの回転をピッチング、 x 軸まわりの回転をローリングとする。走行特性は基本的には地上に固定した絶対座標系で示すが、カーブ走行時などガイドウェイが変位する場合にはガイドウェイに固定した相対座標系を用いている。

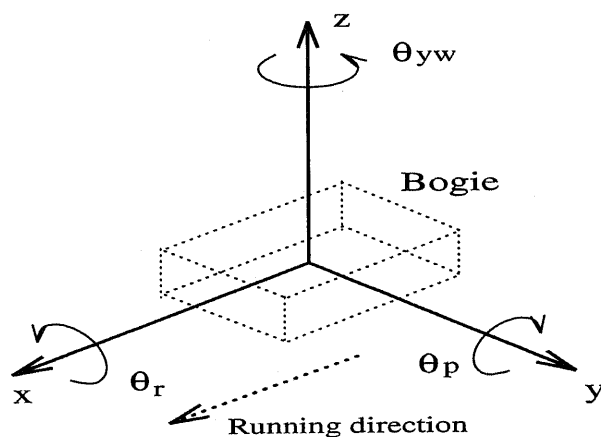


図 2.4: 座標系

2.3 超電導磁気浮上鉄道システムのモデル化

計算においては次のようなモデル化および計算の簡略化のための近似を行っている。

2.3.1 LSM、EDS のモデル化

超電導 LSM と EDS について以下の近似、モデル化を用いている。

1. 推進コイル、浮上コイルおよび SC コイルの巻線の太さは考慮しない。LSM 一次コイルと SC コイルは実際は表 2.1 に示すレーストラック形状をしているが、解析においては走行特性に影響を与えないようにした方形近似をする [13]。このコイル近似モデルを図 2.5 に示す。

表 2.1: SC コイルおよび LSM 一次コイルの実際の形状

SC コイル レーストラック形状	1.08[m] × 0.5[m]
LSM 一次コイル レーストラック形状	1.3[m] × 0.6[m]

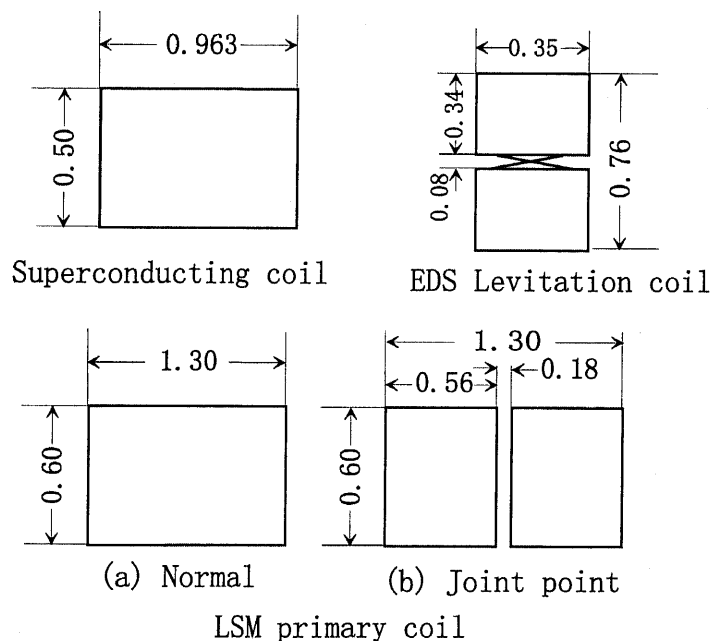


図 2.5: コイル形状のモデル化 (単位 m)

2. LSM は常に台車の重心（中心）と同期をとる。

3. LSM 一次コイルには定電流、定周波数の正弦波交流電流が流れている。最大電流は 1kA であるが、走行シミュレーションでは磁気抗力などと均衡する 0.42kA を用いている。
4. SC コイル電流 i_{sc} は次式に示すように SC コイルへの鎖交磁束 ϕ_{sc} を一定にするように変化する定磁束モード [14] にある。

$$\phi_{sc} = L_s \cdot i_{sc} + \phi_{mul.sc} + \phi_{lev} = const \quad (2.1)$$

ただし、 L_s :超電導コイルの自己インダクタンス、 $\phi_{mul.sc}$: まわりの SC コイルからの全鎖交磁束、 ϕ_{lev} :台車から±4m 以内にある浮上コイルからの全鎖交磁束であり、数値積分により求められる。

また表 2.2 に計算に用いた値を示す。

表 2.2: LSM、EDS の計算条件

LSM	
幅 × 高さ (通常)	1.3[m] × 0.60[m]
幅 × 高さ (接合点)	0.56[m] × 0.60[m]
巻数	内側 8[Turn], 外側 10[Turn]
最大コイル電流 (実効値)	1.0[kA]
極ピッチ τ	1.35 [m]
SC コイルからの距離	内側 0.234[m], 外側 0.280[m]
SC コイル	
初期起磁力	700 [kA]
コイルピッチ τ	1.35 [m]
巻数	1400 [turn]
自己インダクタンス	2.70 [H]
寸法 横 × 縦	0.963[m] × 0.50[m]
浮上コイル	
抵抗 R_{lev}	8.928 [mΩ]
自己インダクタンス L	0.288 [mH]
相互インダクタンス M_{mul}	21 [μH]
コイルピッチ τ_{lev}	0.45 [m]
寸法 横 × 縦	0.35[m] × 0.34[m]
SC コイルからの距離	0.185 [m]

2.3.2 台車、車両のモデル化

本研究では台車に車両質量が集中しているとする単体モデルと、台車と客室それぞれについて運動方程式を解き、相互の連成運動を考慮した車両モデルの2つについて検討している。計算においては以下の近似を用いている。

1. 台車、車両、ガイドウェイは剛体とし、たわみなどは考慮しない。
2. SC コイルにかかる電磁力およびトルクは各コイルの中心に作用するとしている。

● 台車単体モデル

図 2.6 に台車単体モデルを示す。このモデルでは車両の全質量が台車に集中しているとしている。これより 2 次系や台車・客室間の相互作用を無視して EDS のみの特性を求めることができる。表 2.3 に計算に用いた値を示す。密度は一様として、各回転軸まわりの慣性能率を求めている。

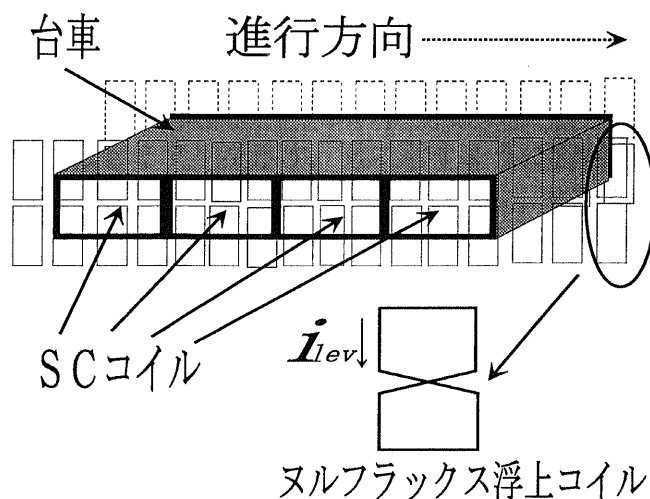


図 2.6: 台車単体モデル

表 2.3: 台車モデルにおいて計算に用いた値

質量（車両質量が集中）	$2.0 \times 10^4 \text{ kg}$
ピッチング慣性能率	$4.700 \times 10^4 \text{ kgm}^2$
ヨーイング慣性能率	$5.668 \times 10^4 \text{ kgm}^2$
ローリング慣性能率	$5.188 \times 10^3 \text{ kgm}^2$

● 車両モデル

図 2.7に車両（列車）モデルを示す。このモデルは車両と台車が分離している。これは山梨新実験線の第一編成をモデルにしており、3車両4台車で構成されている。台車は先頭車両内と車両間に設置されている。そして車両間にある台車は連接台車となっており、車両間の接続は台車を通して行われる。ここで列車前後にある先頭車は質量が中間車の1.5倍であり、台車が1.5個分配置される。そして車両のピッチングトルクを均衡させるために重心位置が中心からずれる。

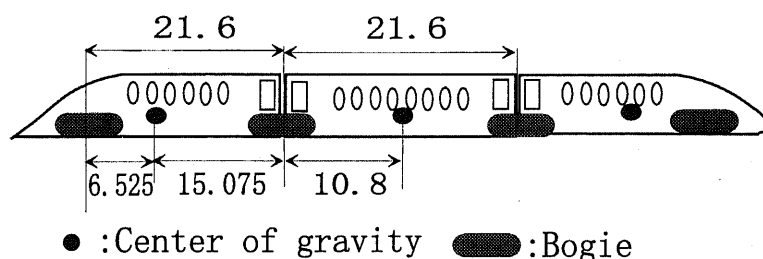


図 2.7: 車両モデル

図 2.8に車両一台車結合モデルを示す。図に示すように前後各2個（計4個）の空気バネと2次ダンパ（機械ダンパ）で結合されている。客室および台車の密度は一樣として、回転に対する慣性能率を求めている。表 2.4に計算に用いた値を示す。ここで先頭車は質量が1.5倍であるので、慣性能率も1.5倍としている。

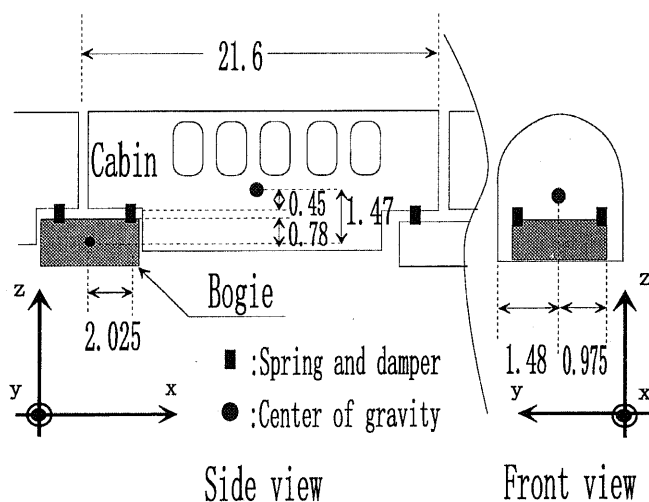


図 2.8: 車両一台車結合モデル

表 2.4: 車両モデルにおいて計算に用いた値

台車	
質量	$6.3 \times 10^3 \text{ kg}$
ピッチング慣性能率	$1.480 \times 10^4 \text{ kgm}^2$
ヨーイング慣性能率	$1.785 \times 10^4 \text{ kgm}^2$
ローリング慣性能率	$1.634 \times 10^3 \text{ kgm}^2$
客室（先頭車はそれぞれ 1.5 倍）	
質量	$1.37 \times 10^4 \text{ kg}$
ピッチング慣性能率	$9.351 \times 10^5 \text{ kgm}^2$
ヨーイング慣性能率	$15.85 \times 10^5 \text{ kgm}^2$
ローリング慣性能率	$1.977 \times 10^4 \text{ kgm}^2$
2 次支持系	
台車－客室間アンカーバネ	$2.94 \times 10^5 \text{ N/m} \times 1 \text{ 個}$
機械バネ (上下)	$1.96 \times 10^5 \text{ N/m} \times 4 \text{ 個}$
機械バネ (左右)	$2.25 \times 10^5 \text{ N/m} \times 4 \text{ 個}$
台車－客室間アンカーダンパ	$5.88 \times 10^4 \text{ Ns/m} \times 1 \text{ 個}$
ダンパ (上下)	$2.45 \times 10^3 \text{ Ns/m} \times 4 \text{ 個}$
ダンパ (左右)	$1.47 \times 10^4 \text{ Ns/m} \times 4 \text{ 個}$

2.4 計算方法

2.4.1 EDS システムによる電磁力

EDS システムでの電磁力の計算法 [15] を示す。まず、浮上コイル 1 組（上下左右各 1 個）を SC コイル 1 組（左右各 1 個）が通過する場合について考える。図 2.9 に側壁式電磁誘導浮上方式のモデル図を示す。図のように浮上コイルは 4 つで一組となっている。図 2.10 に浮上・案内の機構を示す。

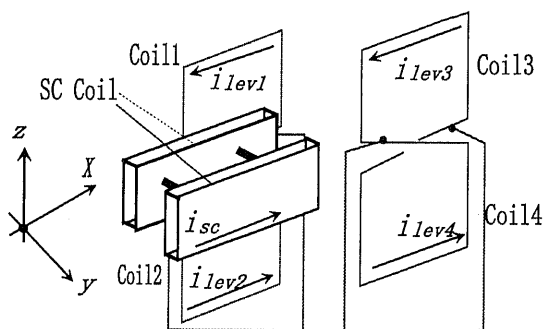


図 2.9: 側壁式電磁誘導浮上方式モデル

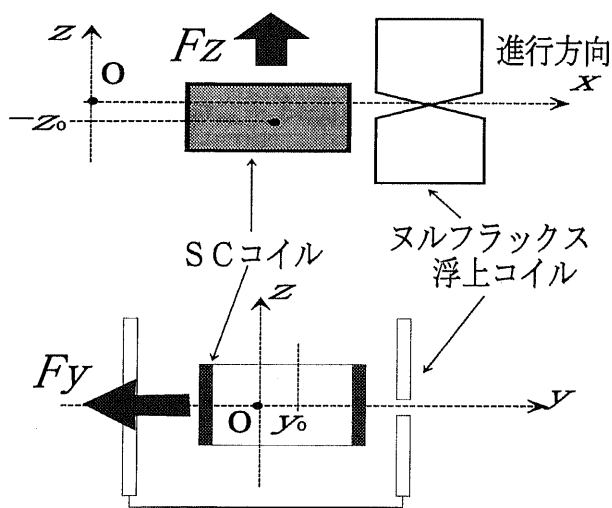


図 2.10: 浮上・案内の機構

浮上コイルと SC コイル間に働く電磁力・トルクは次のようにして求められる [16]。浮上コイルと SC コイルの間に働く電磁力（進行方向力 $F_{EDS,x}$ 、案内力 $F_{EDS,y}$ 、浮上力 $F_{EDS,z}$ ）、トルク（ヨーイング $T_{EDS,\theta_{yw}}$ 、ピッチング T_{EDS,θ_p} 、ローリング T_{EDS,θ_r} ）は、仮想変位法により、次式で求められる。

$$F_{EDS,\alpha} = -i_{sc} \sum_{k=1}^4 i_{lev,k} \cdot \frac{\partial M_{sc,k}}{\partial \alpha} \quad \alpha = x, y, z \quad (2.2)$$

$$T_{EDS,\beta} = -i_{sc} \sum_{k=1}^4 i_{lev,k} \cdot \frac{\partial M_{sc,k}}{\partial \beta} \quad \beta = \theta_{yw}, \theta_p, \theta_r \quad (2.3)$$

ただし、 i_{sc} :SC コイル電流、 $i_{lev,k}$ 浮上コイル Coil k の電流、 $M_{sc,k}$:SC コイルと k 番目の浮上コイル Coil k との相互インダクタンスで $M_{sc,k}$ は k 番目の浮上コイルと SC コイルの位置によって決まり、数値積分により求められる。

SC コイルは定磁束モードにあるので、式 (2.1) のように SC コイル電流 i_{sc} は SC コイルへの鎖交磁束 ϕ_{sc} を一定にするように変化する。

ここで式 (2.2) と (2.3) を解くために浮上コイルに流れる電流を求める必要がある。浮上コイルと SC コイルの系を電気回路と見るとこの浮上系において、次の回路方程式が成立する。

$$-\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{\partial \phi_2}{\partial t} - i_{lev,1} R_{lev} + i_{lev,2} R_{lev} = 0 \quad (2.4)$$

$$-\frac{\partial \phi_3}{\partial t} + \frac{\partial \phi_4}{\partial t} - i_{lev,3} R_{lev} + i_{lev,4} R_{lev} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \phi_3}{\partial t} + i_{lev,1} R_{lev} - i_{lev,3} R_{lev} + 2R_c(i_{lev,1} + i_{lev,2}) = 0 \quad (2.6)$$

$$i_{lev,1} + i_{lev,2} = -(i_{lev,3} + i_{lev,4}) \quad (2.7)$$

ただし、 R_{lev} :浮上コイル 1 個の抵抗、 R_c :左右ヌルフラックス線の抵抗、 ϕ_k : k 番目の浮上コイル Coil k に鎖交する磁束で、これは次のように表すことができる。

$$\phi_k = -M_{sc,k} i_{sc} + L i_{lev,k} - M_{mul} i_{lev,j} \quad (2.8)$$

$$(k, j) = (1, 2), (3, 4), (2, 1), (4, 3)$$

ただし L :浮上コイル自己インダクタンス、 M_{mul} :浮上コイルの上下間の相互インダクタンス、 k, j は浮上コイルの番号であり、式中の組合せで用いられる。これらの式を解くことによって、SC コイルが通過する際に浮上コイルに誘導される電流が求められる。そして浮上コイル電流を式 (2.2) と (2.3) に代入することで電磁力およびトルクを求めることができる。

2.4.2 推進力

推進力については次のように求められる。SC コイルが地上側一次コイル上に作る磁束密度 B を Biot-Savart の法則によって求める。そして、次式のように一次コイル電流 I_{LSM} と磁束密度 B の外積をとり、コイルについて周回積分することによって求まる [17]。

$$F_{LSM,\alpha} = \oint_s I_{LSM} \times B ds \quad (2.9)$$

トルク $T_{LSM,\beta}$ は $F_{LSM,\alpha}$ から求めることができる。

2.4.3 運動解析

以上のようにして得られた EDS および LSM による電磁力を車両の SC コイルとその影響下にある（各台車中心から 4m 以内）の全浮上コイル、LSM 一次コイルについて計算を行い、台車全体にかかる電磁力・トルクを求める。そして以下の運動方程式にそれぞれの力・トルクを代入し解くことにより、台車の運動を求めることができる。

○台車モデルにおける運動方程式

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{LSM,x} + F_{EDS,x} + F_{ext,x} \quad (2.10)$$

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{LSM,y} + F_{EDS,y} + F_{ext,y} \quad (2.11)$$

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{LSM,z} + F_{EDS,z} - Mg + F_{ext,z} \quad (2.12)$$

$$I_\beta \frac{d^2 \beta}{dt^2} = T_{EDS,\beta} + T_{LSM,\beta} \quad (2.13)$$

ただし、 M :車両質量、 g :重力加速度、 F_{ext} :横風や空気抵抗などの外力、 I_β :各回転軸に対する慣性能率。

また実際には式 (2.13) に他の回転角速度の項が加わるが、この運動ではその影響は非常に小さいため、無視している。

○車両モデルにおける運動方程式

車両モデルにおいては、客室一台車間の 2 次系（機械バネやダンパ）による力・トルクが加わるので、上の運動方程式の右辺に 2 次系による力 $F_{2ndsus,xyz}$ および、トルク $T_{2ndsus,\beta}$ が加わることになる。ここで台車部分はガイドウェイの側壁に覆われるため、横風などの外力が加わることは考えにくい。よって外力はすべて客室重心に加わるものとする。また、式 (2.17) および式 (2.21) には他の回転角速度の項が加わるが、この運動ではその影響は非常に小さいため、無視している。

● 台車の運動方程式

$$M_b \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{LSM,x} + F_{EDS,x} + F_{2ndsus,x} \quad (2.14)$$

$$M_b \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{LSM,y} + F_{EDS,y} + F_{2ndsus,y} \quad (2.15)$$

$$M_b \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{LSM,z} + F_{EDS,z} + F_{2ndsus,z} - M_b g \quad (2.16)$$

$$I_{b,\beta} \frac{d^2 \beta}{dt^2} = T_{EDS,\beta} + T_{LSM,\beta} + T_{2ndsus,\beta} \quad (2.17)$$

ただし、 M_b :台車質量、 $I_{b,\beta}$:台車重心まわりの各回転軸に対する慣性能率。

● 客室についての運動方程式

$$M_c \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_{2ndsus,x} + F_{ext,x} \quad (2.18)$$

$$M_c \frac{d^2 y}{dt^2} = -F_{2ndsus,y} + F_{ext,y} \quad (2.19)$$

$$M_c \frac{d^2 z}{dt^2} = -F_{2ndsus,z} - M_c g + F_{ext,z} \quad (2.20)$$

$$I_{c,\beta} \frac{d^2 \beta}{dt^2} = -T_{2ndsus,\beta} \quad (2.21)$$

ただし、 M_c :客室質量、 $I_{c,\beta}$:客室重心まわりの各回転軸に対する慣性能率。

以上の計算を繰り返すことにより、浮上系と推進系を組み合わせた解析を行い、列車運動を計算することができる。図 2.11 に車両モデルの場合の計算の手順を示す。なお、回路方程式や運動方程式の微分方程式を解くにあたってルンゲクッタ法（4 次）を用いた。

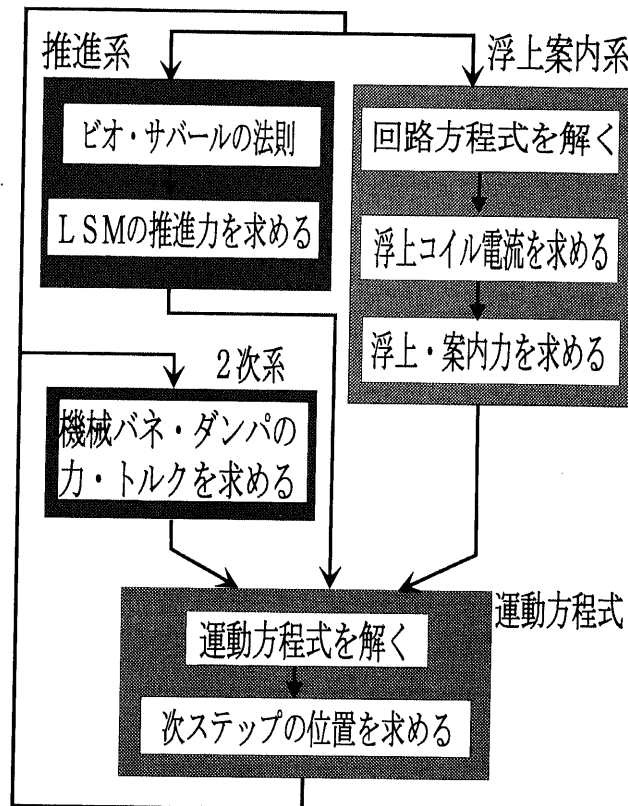


図 2.11: 計算の手順

2.5 結言

本章では超電導磁気浮上鉄道システムの概要と特徴について述べた。そして数値解析に用いたモデル化について示した。また LSM による推進力の解析法、EDS 浮上コイル系を電気回路とし、仮想変位法を用いて浮上案内力を求める手法について示し、これらを用いた電磁現象と機械運動の方程式を連成させた運動解析の手法について述べた。

以降の章ではここで示した台車モデルにより本システムの基本走行特性および様々な条件下での解析を行なう。またそれをふまえて複数台車、車両が存在する列車モデルについての解析を行ない、列車モデルにおける特性を検討する。

第 3 章

側壁式電磁誘導浮上システムの等価支持モデル

3.1 緒言

EDS 方式は時速 500km 以上の超高速運転に適した多くの特長をもつが、第 2 章に示したように原理的にも数値解析の結果からも、浮上力特性のダンピングの不足が指摘されている [18][9][19]。宮崎実験線における試験結果からは理論的に予想されるよりはるかに大きいダンピングが台車に働いていることが示されている。しかしその原因については不明な点が多い。そして超電導コイルの磁気シールド板に誘導されるうず電流など他のダンピング機構に着目し、その特性を明確化するために、超電導コイル-浮上コイル系の正確かつ簡単なモデル化が求められている [20]。走行時の振動特性は SCM の損失の増加や乗り心地の点から問題になる。従って、浮上式鉄道の必須条件である軽量化を実現するためには、台車に備えられる一次支持系や台車と車両の間の 2 次支持系の設計との関係で、EDS 方式の電磁現象による等価的な支持系の特性を明らかにすることが求められる。

EDS 方式の磁気浮上車両の走行特性は、2 章に述べた電磁現象と機械運動の方程式を連成させた数値解析により求められるが [7][15]、その計算量は膨大であり、上記のような設計の問題に反映させるためにもより簡単な等価的な支持系としての表現が望まれる。本章ではこのような目的から EDS 方式の浮上特性を等価的な機械的な支持系としてあらわす方法について検討した。

3.2 解析モデル

まず数値解析モデルについて示す。図 3.1 にここで用いる超電導磁気浮上鉄道システム [3] の浮上系解析モデルを示す。基本的なモデルは同じであるが、推進系は考慮しない。そして浮上案内力の求め方は第 2 章に示したように、仮想変位法を用いる。また浮上系を電気回路と見て回路方程式を解くことにより浮上コイルに誘導される電流を求める。こうして求めた浮上案内力を基にして EDS 方式の浮上特性を等価的な機械的な支持系としての表現を検討する。

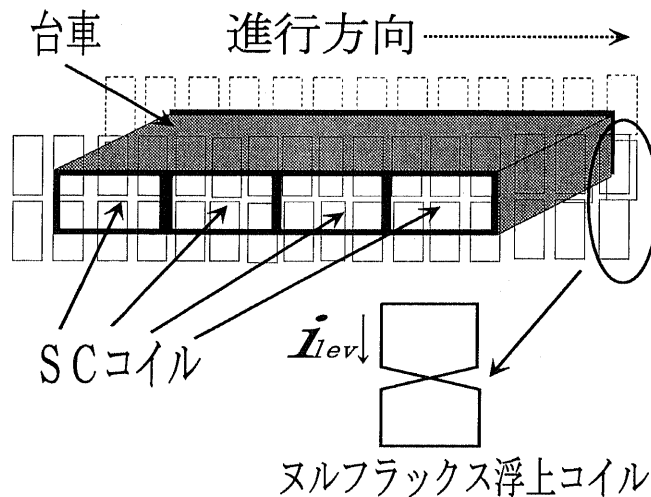


図 3.1: 超電導磁気浮上鉄道システム浮上系解析モデル

さらにここでは横方向変位が小さい場合を考え、ローリングなどの回転運動は考慮しない。よって走行シミュレーションにおいては以下の上下左右 2 方向に対する運動方程式に浮上案内力を代入しこれを解くことで台車運動を求める。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y \quad (3.1)$$

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z - Mg \quad (3.2)$$

計算では簡略化のため以下の仮定を用いた。

1. 台車の質量は重心に集中しており、SC コイルに加わる浮上力は台車重心に加わる。
2. 走行シミュレーションについては台車は進行方向 x には一定の速度 v_x で走行しており、推進系は考慮しない。
3. 上下左右の変位が小さい場合は SC コイル電流の磁束保存特性による影響は小さいとされており [14]、ここでは SC コイル電流は一定としている。

表 3.1 に等価モデルを求めるために解析に用いた計算条件を示す。また、微分方程式を解くにあたってはルンゲクッタ法（4 次）を用いた。

表 3.1: 等価モデルを求めるための計算条件

台車	
質量 M (質点モデル)	2.0×10^4 [kg]
SC コイル	
起磁力	700 [kA]
極ピッチ τ	1.35 [m]
寸法 横 \times 縦	0.963[m] \times 0.50[m]
浮上コイル	
抵抗 R_{lev}	8.928 [m Ω]
自己インダクタンス L	0.288 [mH]
相互インダクタンス M_{mul}	21 [μ H]
コイルピッチ τ_{lev}	0.45 [m]
寸法 横 \times 縦	0.35[m] \times 0.34[m]
SC コイルからの距離	0.185 [m]

3.3 支持特性の計算と等価バネモデル

3.3.1 発生する浮上案内力の定常特性

図 3.2 に SC コイル中心位置が均衡変位である $z=-0.04\text{m}$ で一定速度 $v_x=125\text{m/s}$ で通過する場合の浮上力を示す。ここで横方向位置 $y=0$ とする。また、図 3.3 に台車がガイドウェイ中心 ($y=0$) から 0.02m ずれた場合に一定速度 $v_x=125\text{m/s}$ で通過する場合の案内力を示す。ただし、台車上下位置 $z=0$ とする。

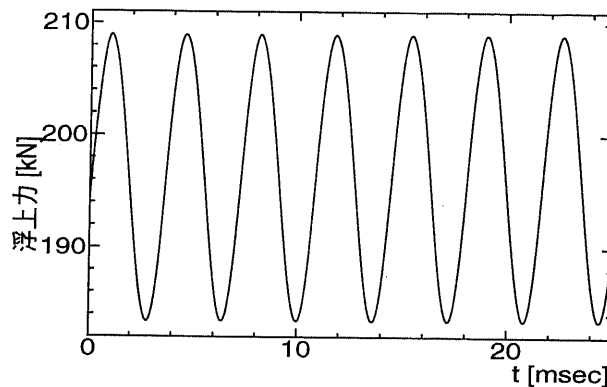


図 3.2: 台車に加わる浮上力 $v_x=125\text{m/s}, (y, z)=(0, -0.04\text{m})$

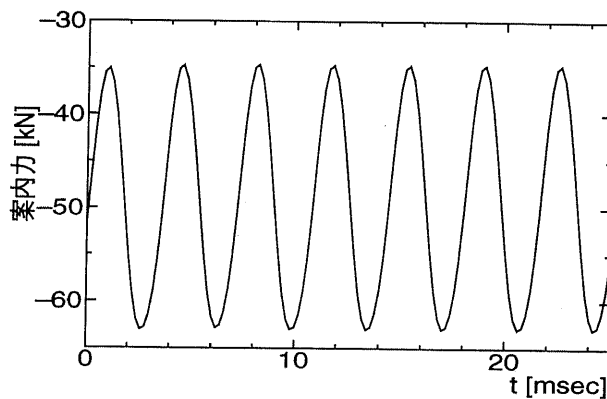


図 3.3: 台車に加わる案内力 $v_x=125\text{m/s}, (y, z)=(0.02\text{m}, 0)$

浮上力と案内力の双方に周期 $T=3.6\text{msec.}$ の正弦波が見られ、これは浮上コイルピッチによって生じる振動分である。浮上力の平均値は約 196kN で、台車重量と均衡している。コイルを通過することによる変動分は約 43.1kN で平均値の約 22% となっている。また、案内力の平均値は約 48.8kN で、コイルを通過することによる変動分は約 27.5kN となり、平均値の半分程度と非常に大きくなっている。特性をモデル化するにはこの浮上コイルによる変動も考慮する必要がある。浮上案内力は SC コイルと浮上コイルの相互インダクタンス M_{sc} の微分関数であるから台車の速度・位置に依存し、浮上コイルピッチによる変

動があるのでそれを考慮すると、浮上案内力は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} k_y(v_x, x, y, z) &= F_y/y \\ k_z(v_x, x, y, z) &= F_z/z \end{aligned} \quad (3.3)$$

ただし、 $k_y(v_x, x, y, z)$ は案内力をその時の左右位置 y で、 $k_z(v_x, x, y, z)$ は浮上力をその時の上下位置 z で割ったものである。これを以下では電磁バネ係数と表現する。 x は進行方向の変位である。そして以下の検討から k_y, k_z の台車位置および速度依存性について明らかにし、近似式を求める。

3.3.2 浮上案内力の速度依存性についての検討

浮上案内力の速度依存性について検討する。まず浮上力について調べる。図 3.4 に SC コイル 1 個が一定高さ $z=-0.04\text{m}$ で浮上コイル 1 組を通過した場合の浮上力の速度依存性を示す。このように速度が低下すると、浮上力の形状が変化して浮上力の減衰率が増加する。これは速度が低下すると、浮上コイル電流の抵抗による減少の影響がより大きくなるからである。一般に RL 回路における時定数は L/R であり、この浮上系は基本的には RL 回路であるので、電流の減衰は $e^{-tR/L}$ で近似できると考えられる。

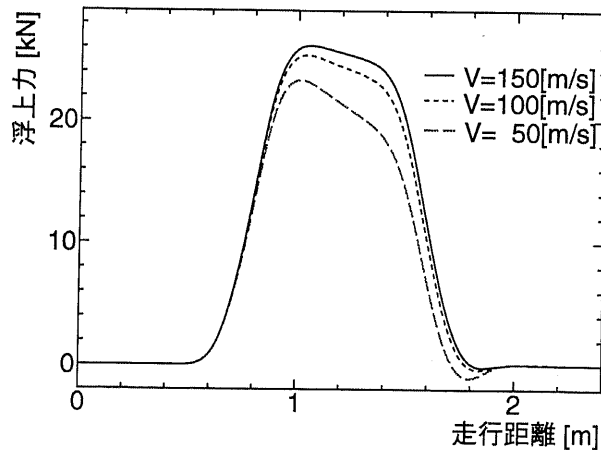


図 3.4: 浮上力の速度依存性 ($z=-0.04\text{m}$, 1SC コイル, 1 浮上コイル)

この近似が成立するためには、通過時間の逆数となる走行速度 v_x と R の間に一定の関係がある必要があり、次にその関係について検討する。図 3.5 に $v_x=125\text{m/s}$ における浮上力の浮上コイル抵抗依存性を示す。

ここで抵抗値は $R=0.83R_{lev}, 1.25R_{lev}, 2.5R_{lev}, 0\Omega$ であり、それぞれ、 $125/150, 125/100, 125/50$ と速度の比になっている。図 3.4 と図 3.5 を比較すると、 $v_x=150\text{m/s}$ と $R=0.89R_{lev}$ や、 $v_x=50\text{m/s}$ と $R=2.5R_{lev}$ は全く同形となっている。これは $R \cdot v_x$ (抵抗値と走行速度の積) が同じだと浮上コイル電流は一定になるということを示している。このことは対向

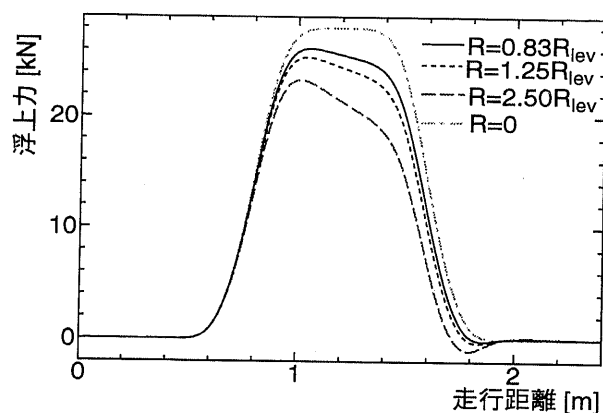


図 3.5: 浮上力の浮上コイル抵抗依存性 ($v_x=125\text{m/s}$, 1SC コイル, 1 浮上コイル)

浮上式においては台車が無限に続くモデルを級数展開した解析で示されているが [6]、側壁浮上方式でも同様のことが分かり、また電気回路モデルで正確に解いた場合の浮上力波形としても示された。

走行速度 v_x は SC コイルが浮上コイルを通過する時間の逆数になるので、 $R \cdot v_x$ が一定ということは $e^{-tR/L}$ の指数部が同じであることになる。よって速度が低下すると、通過時間が増加してコイル抵抗による浮上力が減少することになり、浮上力の形状が大きく変化する。逆に速度が大きくなると、抵抗値がゼロの場合の波形に近付くことになる。

図 3.6 に SC コイル 4 個の場合の上下電磁バネ係数の速度依存性を示す。この電磁バネ係数は先に述べたように、浮上力をゼロ点からの上下距離 z で割ったものである。図の値は上下距離が 0.001m のときの定常状態での値である。このように電磁バネ係数は速度に依存する。そして、浮上系が RL 回路であることを考慮すると、電流の減衰は指数関数で表すことができ、その結果浮上力も同様に表現できる。

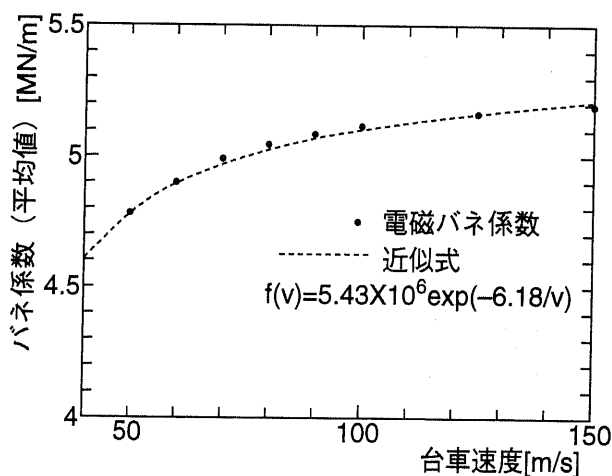


図 3.6: 上下電磁バネ係数の速度依存性 ($z=0.001\text{m}$)

案内力についても同様に考えることができる。図 3.7 に左右電磁バネ係数の速度依存性を示す。ここで案内方向の変位は $|y| \leq 0.02\text{m}$ について検討する。図の値は $y=0.02\text{m}$ の場合の値である。図中に示すように、 $v_x > 60\text{m/s}$ の領域で近似式と計算値はほぼ一致する。

以上の結果から電磁バネ定数は速度の関数で近似することができ、図 3.6, 図 3.7 中に示すように、 Ae^{-B/v_x} (A, B は定数) の形に書くことができる。

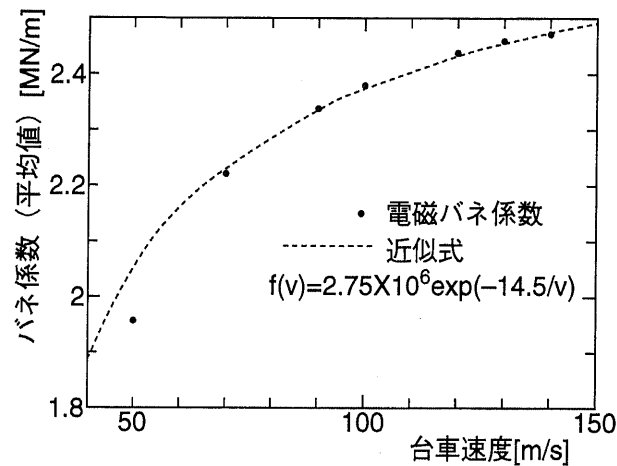


図 3.7: 左右電磁バネ係数の速度依存性 ($y=0.02\text{m}$)

3.3.3 浮上案内力の上下位置依存性

次に位置についての近似を行う。図 3.8 に各速度における上下電磁バネ係数の台車位置依存性を示す。浮上コイルピッチによる変動分があるが、図中の値は平均値を示している。このように位置に対して上下電磁バネ係数には非線形の関係がある。

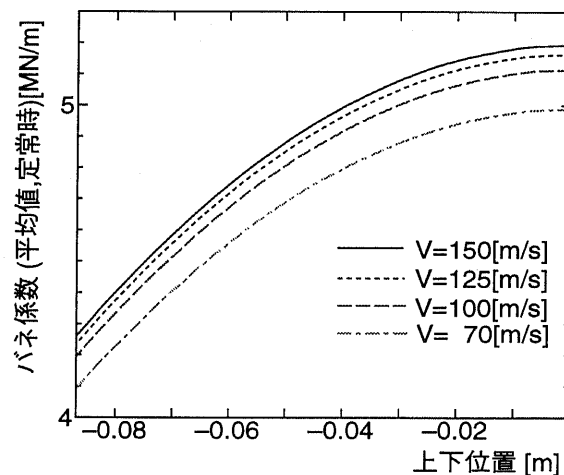


図 3.8: 上下電磁バネ係数の位置依存性 (定常時, 平均値)

図 3.9 に浮上コイルピッチによる変動分も含めた台車速度 $v_x=125\text{m/s}$ における電磁バネ係数の位置依存性（定常時）を示す。浮上コイルピッチによる浮上力の変動が起こるため、極大値、平均値および極小値を示した。図 3.2 にも示すように、この浮上力の変動はほぼ正弦波であり、この振動分も近似式で考慮する必要がある。

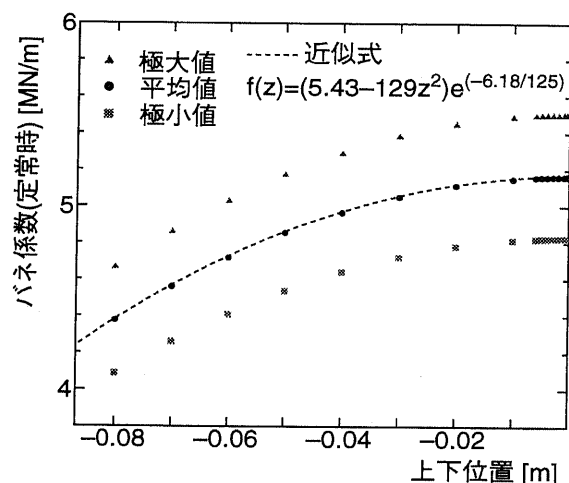


図 3.9: 上下電磁バネ係数の位置依存性（定常時, $v_x=125\text{m/s}$ ）

各速度において電磁バネ係数は（位置 z の 2 次関数 + 定数）の形となっている。次にこの位置依存性の近似式の形の理由について検討する。

浮上コイルに流れる電流は第 2 章の回路方程式より台車速度と相互インダクタンスの時間微分 dM_{sc}/dt により求められる。そして、浮上力は仮想変位法の式より浮上コイル電流と相互インダクタンスの z 方向微分 dM_{sc}/dz により求められる。図 3.10(a) に SC コイルが浮上コイルに侵入する際つまり dM_{sc}/dt が最大になる位置での dM_{sc}/dt の上下位置依存性、図 3.10(b) に SC コイルと浮上コイルの中心点の x 座標が一致するところでの上下位置依存性を示す。図 3.10(a) に示すように dM_{sc}/dt が z に対して比例するので、電流と変位は比例関係にあり、ここからは機械バネと同じ性質を持つことが分かる。しかし、図 3.10(b) に示すように dM_{sc}/dz は位置に対して非線形であり、 $-0.1 < z < 0(\text{m})$ の範囲で z に対して（2 次関数 + 定数）の形で近似できる。つまり、電磁バネ係数を非線形にしている要因は dM_{sc}/dz の位置依存性によるものであり、結果として電磁バネ係数も同様に（2 次関数 + 定数）の形と近似できる。

次に案内力について考える。図 3.11 に左右電磁バネ係数の位置依存性を示す。図に示すように各速度について電磁バネ係数は一定で、 $|y| \leq 0.02(\text{m})$ 以内の範囲では位置依存性は無視できることがわかる。

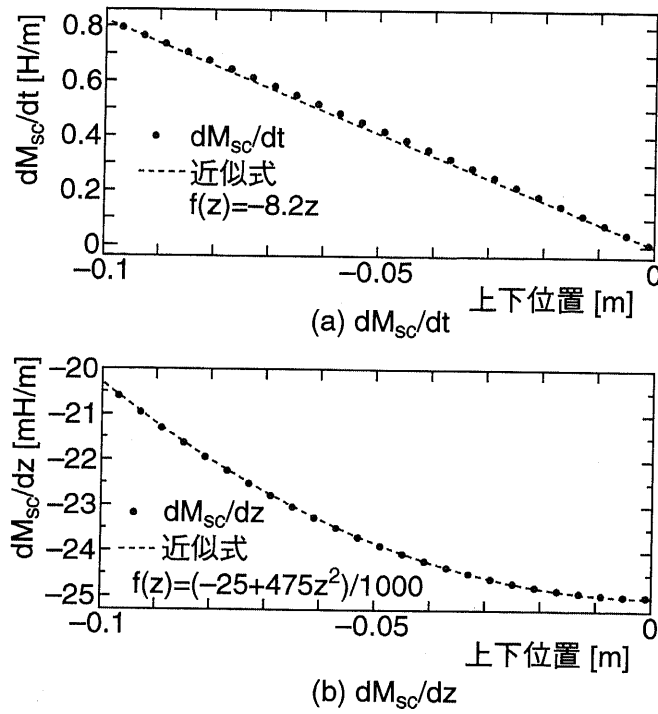


図 3.10: $dM_{sc}/dt, dM_{sc}/dz$ の位置依存性

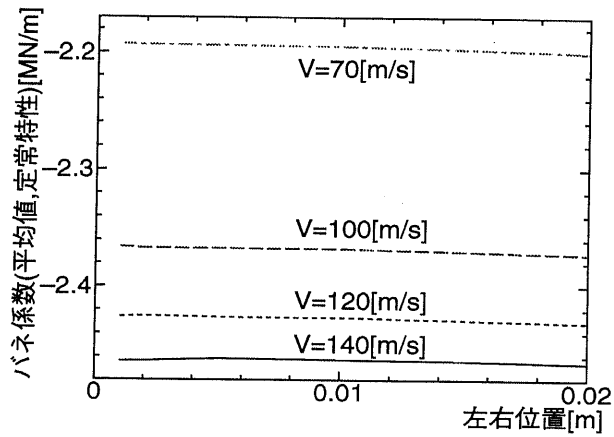


図 3.11: 左右電磁バネ係数の位置依存性 (定常時、平均値)

3.3.4 等価電磁バネ係数の近似式

速度および位置に対する依存性から得られた近似から、電磁バネ係数の解析的表現を求める。

まず上下電磁バネ係数の $-0.1 < z < 0$ (m) の範囲での平均値 $k_{z,ave}$ (N/m) は次の近似式で表せる。

$$k_{z,ave}(v_x, z) = c_1(v_x) - c_2(v_x)z^2 \quad (3.4)$$

ここで c_1, c_2 は速度の関数の係数であり、先に示したように Ae^{-B/v_x} の形をとる。ただし A, B は係数で、浮上コイルの形状により決まる。図 3.8 から

$$\begin{aligned} c_1 &= 5.43 \times 10^6 e^{-6.18/v_x} \\ c_2 &= 1.29 \times 10^8 e^{-6.18/v_x} \end{aligned} \quad (3.5)$$

さらに図 3.2 に見られた浮上コイルのピッチによる振動成分を考慮する。振動成分の振幅を $k_{osc}(\text{N/m})$ とする。 $k_{z,osc}$ は上の $k_{z,ave}$ と同様に v_x, z の関数となり、

$$k_{z,osc}(v_x, z) = c_{o1} - c_{o2}z^2 \quad (3.6)$$

となる。浮上走行領域である $v_x > 40\text{m/s}$ では c_{o2} の変化は非常に小さいため、定数とみなせる。

$$\begin{aligned} c_{o1} &= 6.85 \times 10^5 e^{-1.43/v_x} \\ c_{o2} &= 1.56 \times 10^7 \end{aligned} \quad (3.7)$$

1 周期は浮上コイル 1 ピッチを通過する時間であるので、進行方向位置 x 、上下位置 z におけるバネ係数 $k_{lev}(\text{N/m})$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} k_{lev}(v_x, x, z) \\ = k_{z,ave}(v_x, z) + k_{z,osc}(v_x, z) \cdot \sin(2\pi x/\tau_{lev}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

ただし、式 (3.8) の成立範囲は $-0.1 < z < 0(\text{m})$ 、 $v_x > 40\text{m/s}$ 、SC コイルとある浮上コイルの中心が一致した x で $\sin(2\pi x/\tau_{lev})$ は -1 をとる。

左右電磁バネ係数についても同様に求めることができる。まず、平均左右電磁バネ係数は図 3.11 から $|y| \leq 0.02(\text{m})$ において位置依存性を無視できるから、

$$k_{y,ave}(v_x, y) = k_{y,ave}(v_x) = d_1(v_x) \quad (3.9)$$

$$d_1 = -2.75 \times 10^6 e^{-14.5/v_x} \quad (3.10)$$

さらに浮上コイルピッチによる振動成分も考慮するが、上下の場合と同様に $v_x > 60\text{m/s}$ の領域では振動成分においては速度の影響は小さいため、 $k_{y,osc}$ は定数とみなせる。

$$k_{y,osc}(v_x, y) = k_{y,osc} = -7.18 \times 10^5 \quad (3.11)$$

よって、進行方向位置 x 、左右位置 y におけるバネ係数 $k_{gui}(\text{N/m})$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} k_{gui}(v_x, x, y) \\ = k_{gui}(v_x, x) = k_{y,ave}(v_x) + k_{y,osc} \cdot \sin(2\pi x/\tau_{lev}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

このシステムでは浮上力と案内力は同じ浮上コイルで発生するので、これらの相互作用を考慮する必要がある。そこで、次に台車が上下方向にも左右方向にも変位した場合について考え、その電磁バネ特性を明らかにする。

3.4 台車が上下左右に変位した場合の電磁バネ係数

まず、 x 方向走行速度 $v_x=140\text{m/s}$ における上下電磁バネ係数の位置依存性を図 3.12 に示す。図に示すように、電磁バネ係数は y 方向、 z 方向ともに非線形性を示す。次にその形状について検討する。図 3.13 に速度 $v_x=140\text{m/s}$ の場合の左右位置依存性を示す。図の縦軸はそれぞれの z 位置において $y=0$ でのバネ係数の値で規格化しており、図中には z が 0.01m ごとに 8 本の特性を示しているが、ほぼ重なっていることがわかる。これより z 位置が変化しても、 y の変位に対する特性への影響がないことが示された。

Vertical spring constant k_z [MN/m]

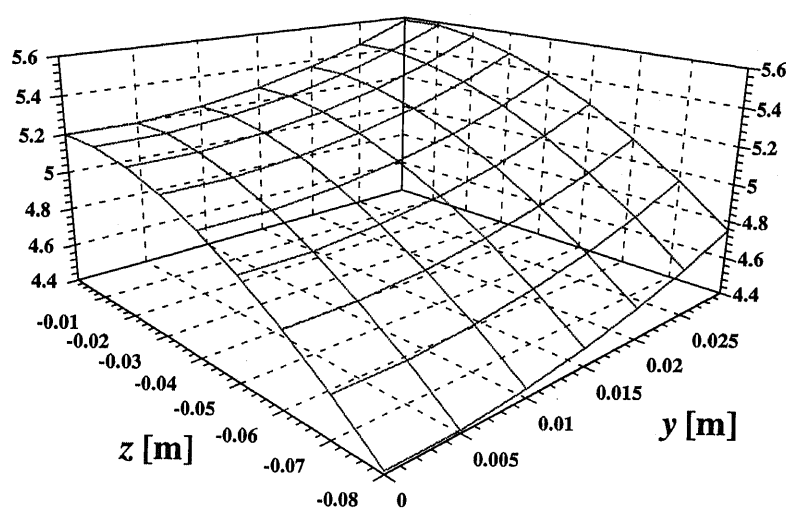


図 3.12: 上下電磁バネ係数の y, z 位置依存性 (定常時、平均値)

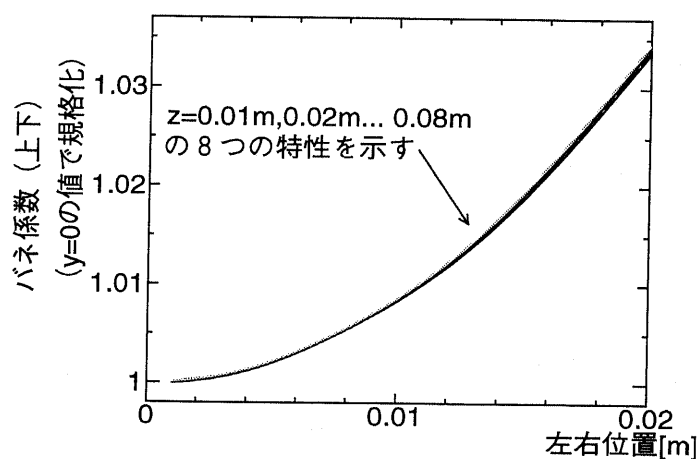


図 3.13: 上下電磁バネ係数の左右位置依存性 (定常時、 $y=0$ の値で規格化)

次に図 3.13 に示した上下電磁バネ係数の左右位置依存性について検討する。図 3.14 に各速度における上下電磁バネ係数の左右位置依存性を示す。図中に示すように、 z 位置に対する結果と同様に速度に対しても y に対する特性は同じである。

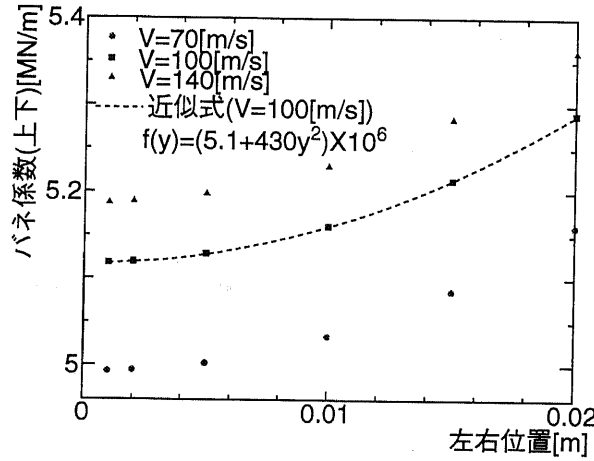


図 3.14: 上下電磁バネ係数の左右位置依存性 (定常時、平均値)

よって図中に示すようにバネ定数 $k_{z,ave,yz}$ (N/m) は 2 次関数の形で近似することができ、

$$k_{z,ave,yz}(v_x, y, z) = k_{z,ave}(v_x, z) \cdot (1 + 84.3y^2) \quad (3.13)$$

となる。ただし、 $k_{z,ave}(v_x, z)$ は前節の上下電磁バネ係数である。同様にして振動成分 $k_{z,osc,yz}$ (N/m) も

$$k_{z,osc,yz}(v_x, y, z) = k_{z,osc}(v_x, z) \cdot (1 + 171y^2) \quad (3.14)$$

となる。

次に左右電磁バネについて検討する。図 3.15 に速度 $v_x = 140 \text{ m/s}$ の場合の左右電磁バネの位置依存性を示す。図から明らかなようにバネ定数は z に依存し、 y には依存しない。次に図の z 依存性の形状について検討する。図 3.16 に左右電磁バネ係数の速度および上下位置依存性を示す。

先の上下電磁バネ係数と同様に台車速度 v_x によって絶対値のみが変化する。そして図中のように $k_{y,ave,yz}$ (N/m) は近似が可能で

$$k_{y,ave,yz}(v_x, y, z) = k_{y,ave}(v_x, y) + 4.1z^2 \times 10^8 \quad (3.15)$$

と表すことができる。ただし、 $k_{y,ave}(v_x, y)$ は $z=0$ における左右電磁バネ係数である。同様にして振動成分 $k_{y,osc,yz}$ (N/m) も

$$k_{y,osc,yz}(v_x, y, z) = k_{y,osc}(v_x, y) + 0.5z^2 \times 10^6 \quad (3.16)$$

となる。このように左右電磁バネは y 変位については線形性を示し、 z 変位に対しては 2 次関数の形をとる。このようにして求めた、上下・左右近似バネ係数を用いて台車に働く浮上・案内力を求めることができる。

y 方向の変位が起こった場合ローリング運動を考慮する必要があるが、 y 方向変位が 2cm の場合でも発生するローリング角は約 0.03° [21] であるから、列車運動解析や、乗り心地を問題にする場合は問題にはならない。

Lateral spring constant k_y [MN/m]

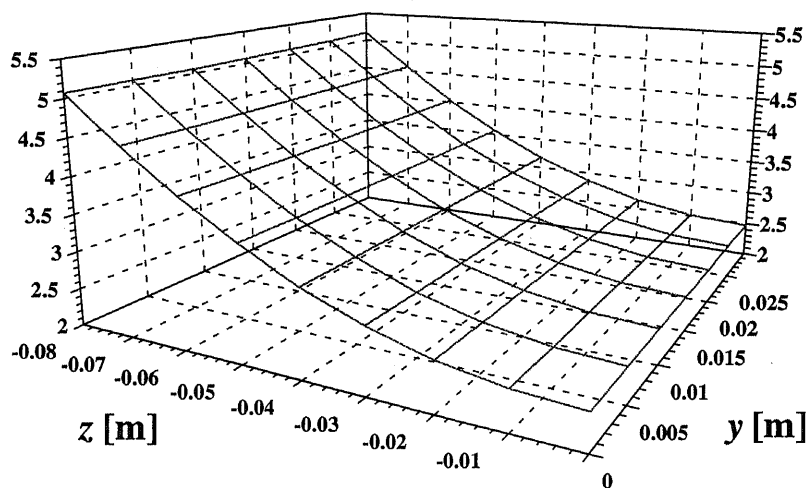


図 3.15: 左右電磁バネ係数の位置依存性 (定常時、平均値)

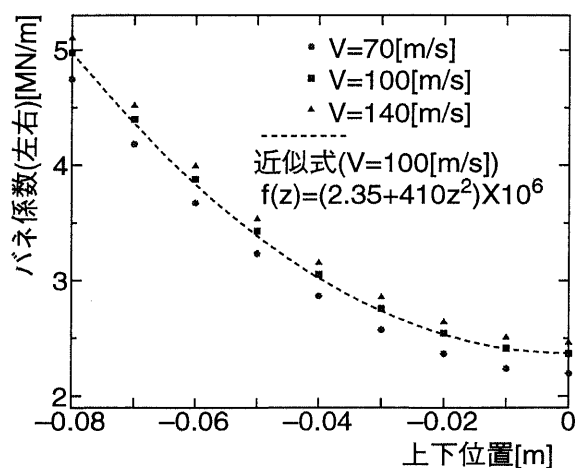


図 3.16: 左右電磁バネ係数の上下位置依存性 (定常時、平均値)

3.5 ダンピングを含んだ等価支持モデルの検討

従来の解析結果から SCM と浮上コイルのみの系を考えた解析結果ではあまり大きなダンピングは得られておらず、速度が小さい領域ではダンピングが正の領域があるが、 $v_x > 50\text{m/s}$ の浮上走行が可能な領域においてダンピングは負になる。

よって SCM と浮上コイルのみの系を考えた場合、台車が上下振動を伴い走行している場合には、上下振動の振幅は発散する方向にある。そこで次に台車が上下振動している場合を取り上げ、この浮上系のダンピングについて検討する。また SCM の磁気シールド板に流れるうず電流の影響を考慮すると浮上走行速度領域でもダンピングは増加することが知られているが、ここでは SCM と浮上コイルのみの系について扱う。

3.5.1 ダンピング係数のモデル化

台車の上下振動を伴う走行シミュレーションを行い、等価ダンピングモデルを検討する。なお、左右振動についてはダンピングがほぼゼロであるため [22]、ここでは考慮しない。座標は上下浮上コイルの中心を $z=0$ とした。そして $t=0$ において台車を $z=0$ にし、速度は進行方向に対しては一定として上下に対して自由運動させた。まず、進行方向速度 v_x が 50, 100, 150m/s の場合の台車の振動の様子を図 3.17 に示す。

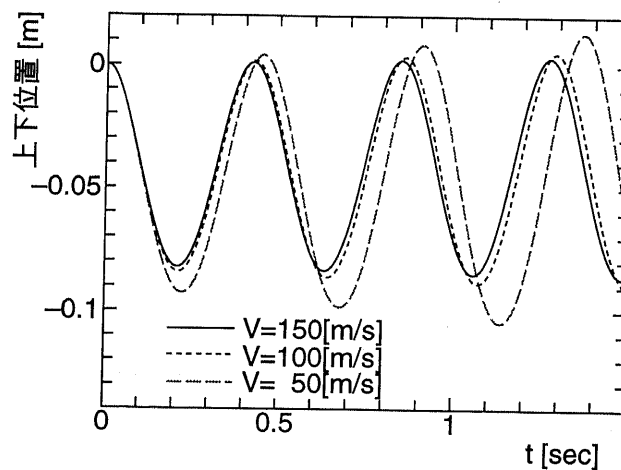


図 3.17: 各走行速度における上下振動特性

図に示すように速度が低下するにつれて振動の振幅が増加しており、この系が負のダンピングを持っていることがわかる。図 3.18 に電気回路モデルによる数値解析、式 (3.8) のモデルおよび機械バネモデルを用いた場合での、 $v_x=125\text{m/s}$ における上下振動特性の計算結果を示す。

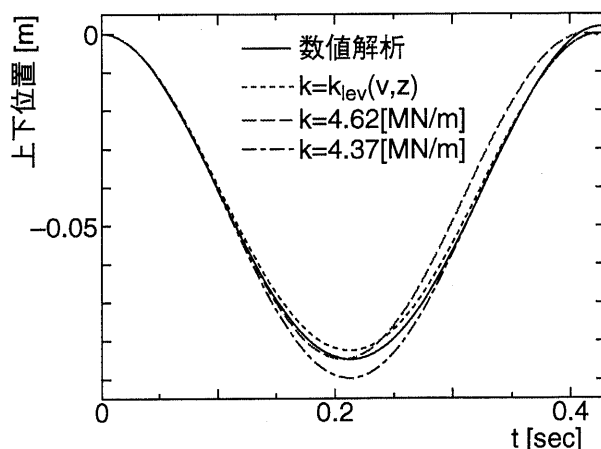


図 3.18: 各計算法による上下振動特性の計算結果 ($v_x=125\text{m/s}$)

機械バネの係数は $k_z=4.62, 4.37 \text{ MN/m}$ を用い、それぞれ数値解析結果と振幅、周期が一致するように設定している。バネ定数が一定の場合は振幅を一致させると周期がずれて小さくなり、位相を一致させると振幅が大きくなってずれてしまう。一方 k_{lev} は周期は一致している。そして振幅が数値解析よりも若干小さくなっているが、これは近似式には振幅の増加の影響（負のダンパ）が入っていないためである。

先に述べたようにこのシステムではダンピングが負になることが知られており [9]、位置変位の割合、つまり上下振動速度が大きくなると、抵抗による浮上力変化の減衰が起こるので、先に求めた近似式を用いることはできない。また定常走行において、浮上力の平均値が台車にかかる重力と均衡していても、浮上力コイルピッチによる $k_{osc}(v_x, z) \cdot \sin(2\pi x / \tau_{lev})$ の項により、台車が振動を起こすことになる。そして振動を開始すると上に述べた理由で浮上力変化の減衰が起こり、位置変化と浮上力変化の位相がずれて振動が発散傾向に移る。よってこの負のダンピングの要素を考慮する必要がある、次にこれについて検討する。

図 3.17 より各速度について振動の時間に対する振幅増加率を求め、これを速度の関数 $a(v_x)$ とする。図 3.19 に a の速度依存性を示す。

図に示すように、 a は速度と共に小さくなる。そこで、図 3.19 の形状から速度 $v_x > 40\text{m/s}$ の領域でダンピングは Ae^{B/v_x} (A, B は係数) の関数と近似できる。電磁バネ係数は Ae^{-B/v_x} の関数であったが、負のダンピングの絶対値は速度と共に減少するため、指数部の符号が反対になる。ここで振幅増加率は台車の位置エネルギーの増加であり、ダンピング項によるエネルギー増加率と考えることができる。ダンピング項によるエネルギー増加は振動速度の 2 乗 v_z^2 を時間積分したものとダンピング係数 η の積である。振動速度 v_z は η により変化するが、浮上走行領域では η の絶対値は小さく v_z に与える影響は小さいので、 a と η は比例の関係にあると近似できる。そして電磁力 $F_z(v_x, x, z)$ 特性は定常時のバネによる力と上下振動速度 v_z に比例する力の項の和で表すと次式のように、

$$F_z = k_{lev}(v_x, x, z) \cdot z - \eta(v_x) \cdot v_z \quad (3.17)$$

となる。ただし、 η はダンピング係数で振幅増加率 a が Ae^{B/v_x} の関数となること、および図 3.17に示した上下シミュレーション結果から、

$$\eta(v_x) = -0.060e^{100/v_x} \quad (3.18)$$

と近似できる。ここで、 η の上下位置 z の依存性は小さいので、走行速度 v_x のみの関数としている。また、符号の-はダンピングが負であることを示している。

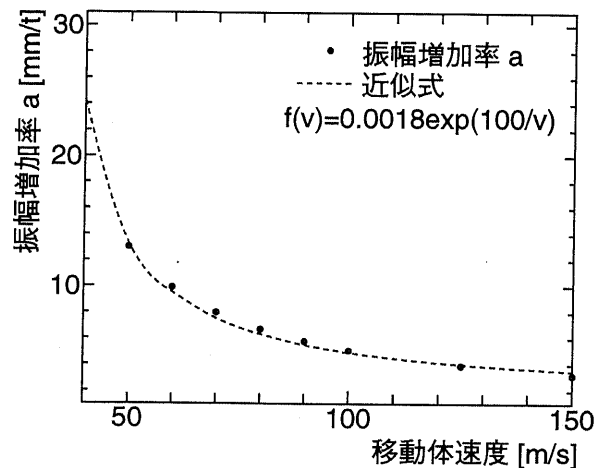


図 3.19: 振幅増加率の速度依存性

3.5.2 等価バネ-ダンパモデルの検証

次に式 (3.17) で得られた浮上力を用いた場合の解析結果の検証を行う。表 3.2に式 (3.17) を用いた場合の解析結果の電気回路モデルを用いた解析結果 (図 3.17) に対する誤差を示す。台車は各速度において一定速度で走行しており、 $t=0$ において $z=0$ から上下に対し

表 3.2: 近似式を用いた場合の計算誤差

速度 v_x [m/s]	振幅誤差 [%]	周期誤差 [%]
50	0.39	0.04
70	0.57	0.27
100	0.40	0.18
125	0.15	0.24
150	0.08	0.0

でのみ自由運動を行う。表には、振動の周期と振幅の誤差を示す。表に示すように誤差は非常に小さく両者は一致しており、近似式の妥当性を示している。

3.6 結言

本章では超電導磁気浮上鉄道システムでの側壁式電磁誘導方式の等価支持モデルを求めた。まず、電磁現象の解析より浮上力の定常特性を求めた。その結果から浮上力の速度・位置依存性を検討し、定常状態での電磁バネ係数の近似式を導いた。電磁バネ係数は走行速度 v_x に対しては浮上コイルと SC コイルの系を電気回路として見た場合の時定数から Ae^{-B/v_x} の関数になり、位置に対しては相互インダクタンスの上下方向微分 dM_{sc}/dz の位置依存性から $(z^2 + \text{定数})$ の形になることを示した。同様に案内力についても定常特性を求め、左右電磁バネ係数は横方向変位に対して線形バネであることを示した。

さらに台車が y, z 両方向について変位した場合の浮上・案内力についてそれぞれの位置、速度依存性を求め、近似式を求めた。これらを用いて台車に働く浮上・案内力を容易に求めることができる。

また、台車の上下振動シミュレーションを行い、このシステムの持つ負のダンピング要素を速度依存性を持つダンピング係数を導入した。そして、システムのダンピング要素も考慮した走行シミュレーションにも適用できる等価支持モデルの近似式を求めた。この式による運動解析は電気回路を解く解析法による結果と一致した。この近似式を用いることで、従来の機械バネ近似よりも正確な浮上力を得ることが可能であり、車両や列車モデルなどの解析が容易になる。現段階では上下振動に限られるが、近年発展している市販の車両運動特性の演算パッケージなどにも支持モデルとして取り入れることが可能である。

しかし台車の変位が大きい場合、例えばカーブ走行時や超電導コイルクエンチ時の解析においては、ここで述べた支持モデルからの誤差が大きくなる。またこれらの場合は変位速度が大きくなり、台車の位置の履歴が浮上コイル電流に影響し、浮上案内力を変化させる。よって4章以降ではこの支持モデルを用いず、電気回路を解く方法により解析を行なう。

第 4 章

超電導磁気浮上車両の走行特性解析

4.1 緒言

本章では、推進系である LSM と浮上案内系である EDS システムについて、それぞれの推進力特性、浮上案内力特性などの基本特性を求める [23]。また台車モデルを用いて上下、左右そして各回転運動に対する基本振動特性や走行速度に対する依存性を求める。それらをふまえて台車モデルについて台車が外力を受けたりガイドウェイが変位した場合などの外乱を受けた場合の走行特性について検討する。またカーブ区間の走行シミュレーションを行ない、様々なガイドウェイ形態に対する特性を求める。さらに複数車両が存在する列車モデルについて同様の走行シミュレーションを行ない、客室と台車の相互作用について検討する。

なお、第 3 章で浮上案内系の近似解法を求めたが、カーブ走行時や外乱を受けた場合などは台車の変位や回転角が大きくなり、さらに浮上案内力に台車の運動経緯の影響があらわれる。よってここでは第 2 章に示した電気回路を解く詳細シミュレーションにより解析を行なった。

4.2 推進系

4.2.1 LSM による推進力

次に LSM による推進力の基本特性を示す。EDS による抗力が働くため、これを打ち消すだけの推進力を加える必要がある。まず図 4.1 に台車が $(y, z) = (0, 0)$ にある場合の台車片側当たりの推進力の様子を示す。ここで地上コイルに流れる電流は最大の 1kA としている。ただし 2 章に示したように後の走行シミュレーションにおいては磁気抗力などと推進力がほぼ均衡する 0.42kA を用いている。

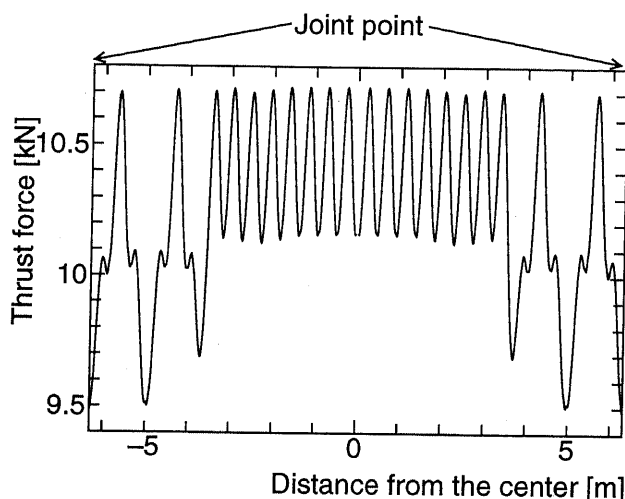


図 4.1: LSM による推進力の様子 (1 セクション)

列車が車輪走行しているときには台車はこの (y, z) 位置にある。横軸はガイドウェイセクションの中心からの距離で、1 ガイドウェイセクション (12.6m) 間の変化を示している。図 2.2 に示すようにガイドウェイの継目で LSM 地上コイルは 2 つに分割されるので、推進力の変動が起こる。全般にみられる基本的な振動は LSM の配置によるものであり、周期は τ_{LSM}/v_x (LSM の極ピッチ/走行速度) となる。例えば $v_x = 140\text{m/s}$ の時には周波数は約 311Hz となる。

次に推進力の位置依存性について示す。図 4.2 に推進力の横方向変位依存性を示す。縦軸は台車片側の 1 セクション間の平均値を示す。上下位置は $v_x = 140\text{m/s}$ での均衡位置 $z = -0.03935\text{m}$ に固定している。図 4.3 に推進力の上下方向変位依存性を示す。縦軸は台車片側の 1 セクション間の平均値を示している。左右位置は $y = 0$ に固定している。このように台車位置によって推進力は変動し、横方向変位は左右の推進力のバランスも崩して、ヨーイングトルクを発生し、ヨーイング運動の原因になる。例えば左右位置が 2cm 変位した場合、左右の推進力の差は約 1.62kN となり回転トルクを概算すると 2.41kNm となる。また浮上走行時における上下高さは 4cm 付近なので約 10.15kN となり、車輪走行時の約 10.26kN に比べて約 1.1% 減になる。また上下変位 4cm でも推進力低下は 1.1% 程度であるのに対して横方向変位 4cm に対しては約 17% の変動になり、横方向変位への依存性が大きいことが分かる。

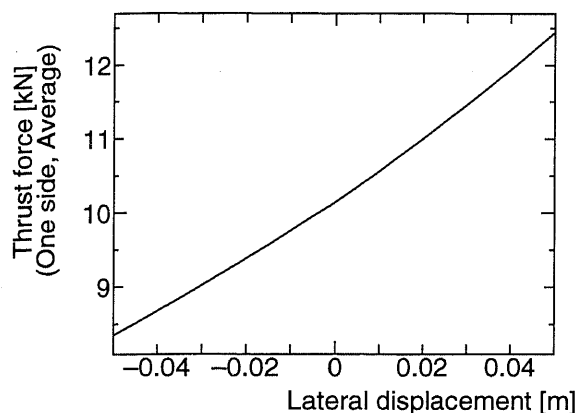


図 4.2: 推進力の横方向変位依存性 (1 セクション平均値)

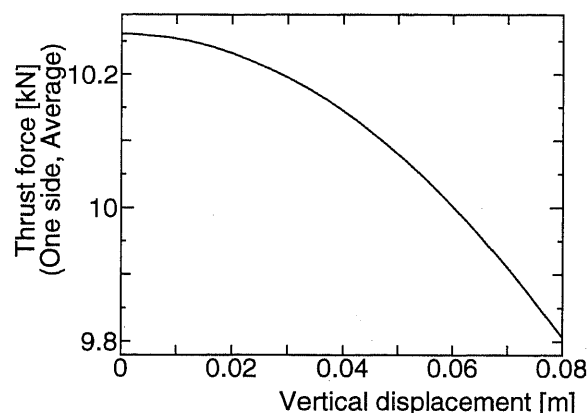


図 4.3: 推進力の上下方向変位依存性 (1 セクション平均値)

4.2.2 EDS による推進方向抗力

EDS システムの浮上案内力は台車上の SC コイルが浮上コイルの横を通過することで得られる。つまり台車の運動エネルギーが浮上案内力に変換されることになる。そこで EDS による推進方向抗力について検討する。

このシステムの基本特性を見るために、1 組の浮上コイルに対して 1 つの SC コイルが通過した場合について検討する。図 4.4 に SC コイルと浮上コイルの位置関係を示す。図中の A, B, C はそれぞれ A は SC コイルが浮上コイルにさしかかる直前、B はそれぞれの中心が一致する、C は通過終了時の位置である。

SC コイル中心が浮上コイルの中心に対して 4cm 下 (システムにおける浮上高さ) を、一定速度 $v_x=125\text{m/s}$ で通過する場合の進行方向力と浮上力を図 4.5 と図 4.6 に示す。

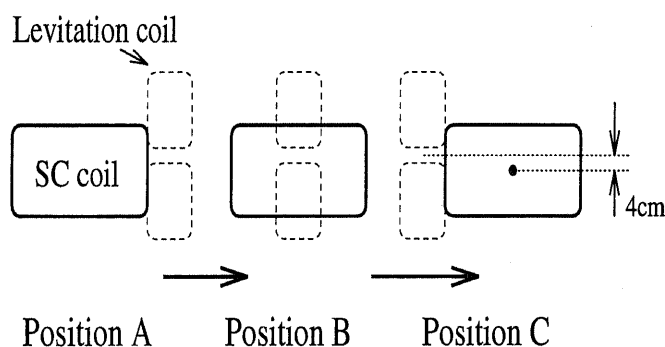


図 4.4: SC コイルと浮上コイルの位置関係

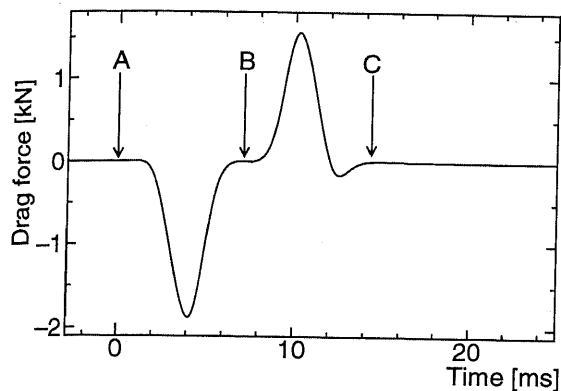


図 4.5: SC コイルに加わる抗力 (SC コイル 1 個, 浮上コイル 1 組)

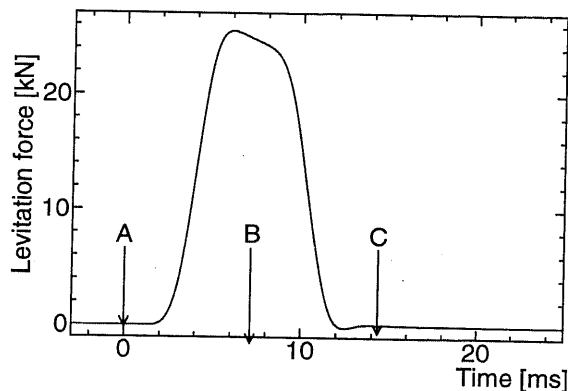


図 4.6: SC コイルに加わる浮上力 (SC コイル 1 個, 浮上コイル 1 組)

また、図 4.7 に浮上系のエネルギー変化を示す。進行方向力に対しては磁束を保存する方向に浮上コイル電流が流れるため、SC コイルは A → B 間で進行方向と反対の力を受け、推進系からエネルギーが注入される。逆に B → C 間では進行方向に力を受け、推進系にエネルギーが戻されることになる。浮上コイル抵抗がゼロの場合は全てのエネルギーが推進系に返されることになる、左右のピークは同形になる。しかし抵抗により電流が減少し、推進系に戻るエネルギーが小さくなり、この差分が抵抗での消費エネルギーとなる。浮上力については浮上コイル抵抗で電流が減衰するために、SC コイルによる鎖交磁束が一定となる B 点付近でも浮上力低下が見られる。

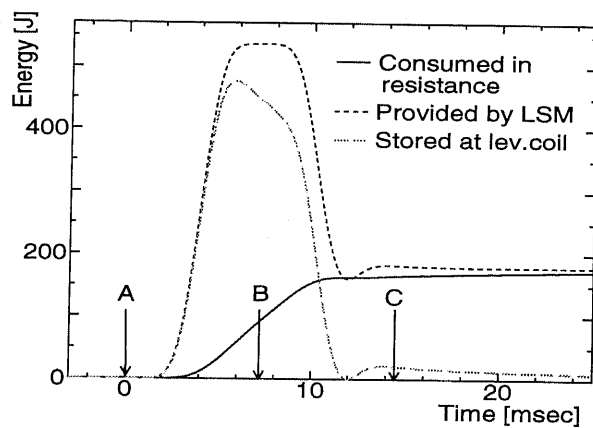


図 4.7: 各エネルギー変化 (SC コイル 1 個, 浮上コイル 1 組)

次にシステムにおいて台車に加わる電磁力について検討する。基本的には図 4.5 および 4.6 での電磁力の重ね合わせで、SC コイル 4 個と全浮上コイル間の電磁力が求まる。図 4.8 に進行方向力とそのフーリエ解析を、図 4.9 に浮上力とそのフーリエ解析を示す。なお、フーリエ解析では直流分は除外している。

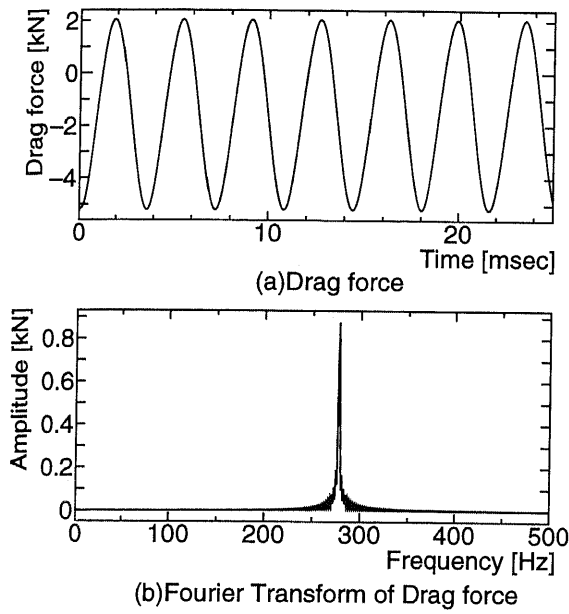


図 4.8: SC コイルに加わる抗力およびそのフーリエ解析 (1 台車)

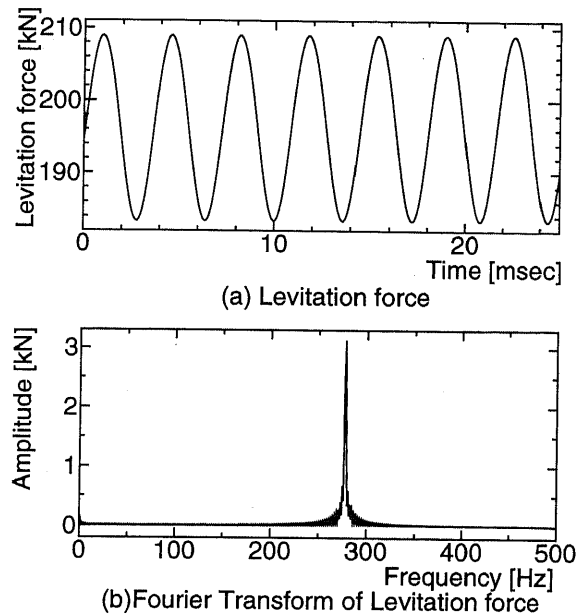


図 4.9: SC コイルに加わる浮上力およびそのフーリエ解析 (1 台車)

進行方向力と浮上力の双方に、周期 $T=3.6\text{msec.}$ の正弦波が見られる。この周期は SC コイルが一つの浮上コイルを通過する時間 T である。よって T は浮上コイルピッチと車両速度に依存する。

$$T = \frac{\tau_{lev}}{v_x} \quad (4.1)$$

ここでは速度 $v_x=125\text{m/s}$ 、コイルピッチ τ_{lev} は 0.45m であるので、振動成分の周期は 3.6msec. 、振動数約 277.8Hz となる。

進行方向力の平均値は約 -1.6kN である。ここで、推進系から注入されるエネルギー E_{LSM} は

$$E_{LSM} = - \int F_{EDS,x} v_x dt \quad (4.2)$$

である。今 v_x は一定であるので、LSM からの平均供給電力は $F_{EDS,x}$ の平均値と v_x の積で約 200kW となる。浮上力の平均値は約 196kN で、台車重量と均衡している。図 4.9(b) の浮上力の極小点での位置関係は、図 4.4 での B (ある浮上コイルの中心と SC コイルの中心が一致) になる。

また図 4.8(a) と図 4.9(a) を比較すると、浮上力の振動周期に対して進行方向力の位相がずれていることが分かる。これは浮上コイル抵抗のためである。抵抗がゼロだと、進行方向力はゼロを中心に振動し、浮上力の極小点では力はゼロになる。しかし、図 4.5 おける AB 間の進行方向と逆の力が大きくなることで、直流成分が変化し、中心が負の方向に移動し、かつ分布も変化するので、位相も変化する。浮上コイルにも同じことが起きるので両者の位相はずれることになる。

図 4.10 に台車が一定高さ $z=-0.04\text{m}$ を $v_x=125\text{m/s}$ で走行している際の注入エネルギー分布を示す。1 台車当たりになると、浮上コイルに蓄えられるエネルギーはほぼ正弦波となり、消費電力は線形となる。

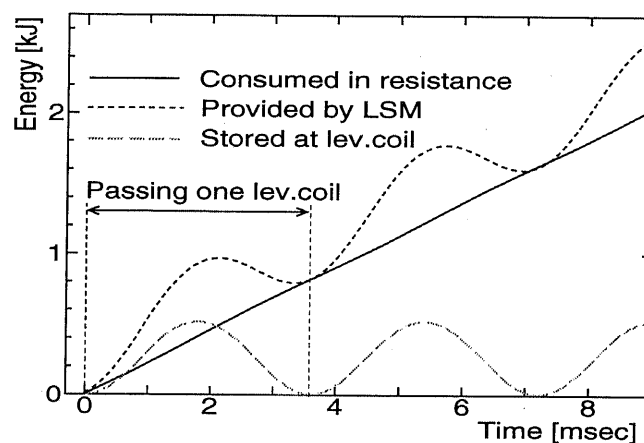


図 4.10: 各エネルギー変化 (1 台車)

4.3 浮上案内系の特性

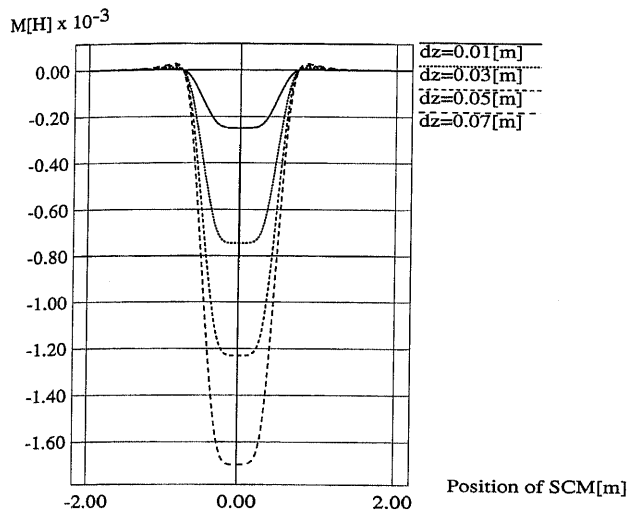
4.3.1 上下左右変位に対する基本特性

浮上案内系の上下左右変位に対する基本特性について示す [24]。計算方法で示したように、それぞれの力は SC コイルと浮上コイルの間の相互インダクタンスの位置・時間微分の関数となる。そこで図 2.9 のように浮上コイルを SC コイル 1 個が $v_x=125\text{m/s}$ で x 方向に通過する際の SC コイルと浮上コイルの相互インダクタンス M_{sc} 、その位置微分、および時間変化の上下・左右位置依存性を示す。まず、図 4.11 に上下位置依存性を示す。横軸は浮上コイルの中心と SC コイルの中心の x 座標のずれを示す。ここで浮上系のみの特性を見るため、左右変位はゼロとする。よって案内力は発生しない。この場合システムは左右対称であるので、図 2.9 中の片側の 2 個の浮上コイル Coil 1, Coil 2 と SC コイルの間の相互インダクタンスについて台車を z 方向に変位した場合の値を示す。時間微分は SC コイルが浮上コイルにさしかかるときと離れる時に最も大きくなり、位置微分は両者の中心が一致したときに最大となる。

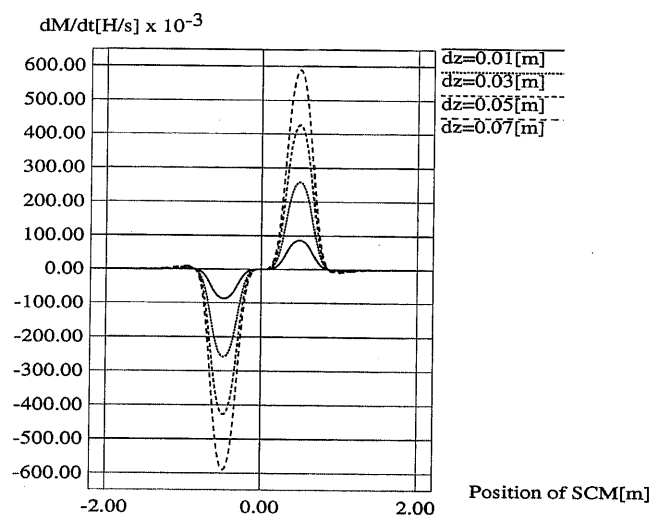
図 4.12 に左右位置依存性を示す。ここでは案内系のみの特性を見るため、上下変位はゼロとする。よって浮上力は発生しない。またシステムは 8 の字浮上コイルの中心 $z=0$ について上下対称であるので、図 2.9 中の上側の 2 個の浮上コイル Coil 1, Coil 3 と SC コイル間の相互インダクタンスについて、ガイドウェイ中心から台車を y 方向にずらした場合の値を表している。時間微分については SC コイルが浮上コイルにさしかかるときと離れる時に最も大きくなるが、その前後で脈動が見られる。また、位置微分については $\partial M_{sc}/\partial z$ には見られなかった極小値が両コイルの中心が一致したときに見られる。

左右方向と上下方向の相互インダクタンスの変位依存性を比較すると、左右方向の方が相互インダクタンスの脈動が大きい。その結果相互インダクタンスの時間微分および位置微分の脈動も左右変位に対する依存性の方が大きくなっている。

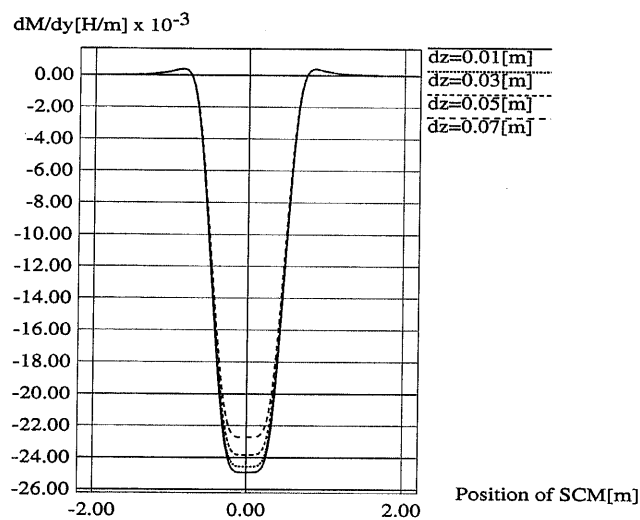
解析法で述べたように本解析では仮想変位法で電磁力を求めており、相互インダクタンスの位置微分の脈動は電磁力の脈動の原因となる。また回路方程式より浮上コイルに流れる電流は相互インダクタンスの時間微分 $\partial M_{sc}/\partial t$ の関数であるので、左右変位の際に働く電磁力、つまり案内力は浮上力よりも大きな高調波成分を含むと考えられる。



(a) 相互インダクタンスの上下変位依存性

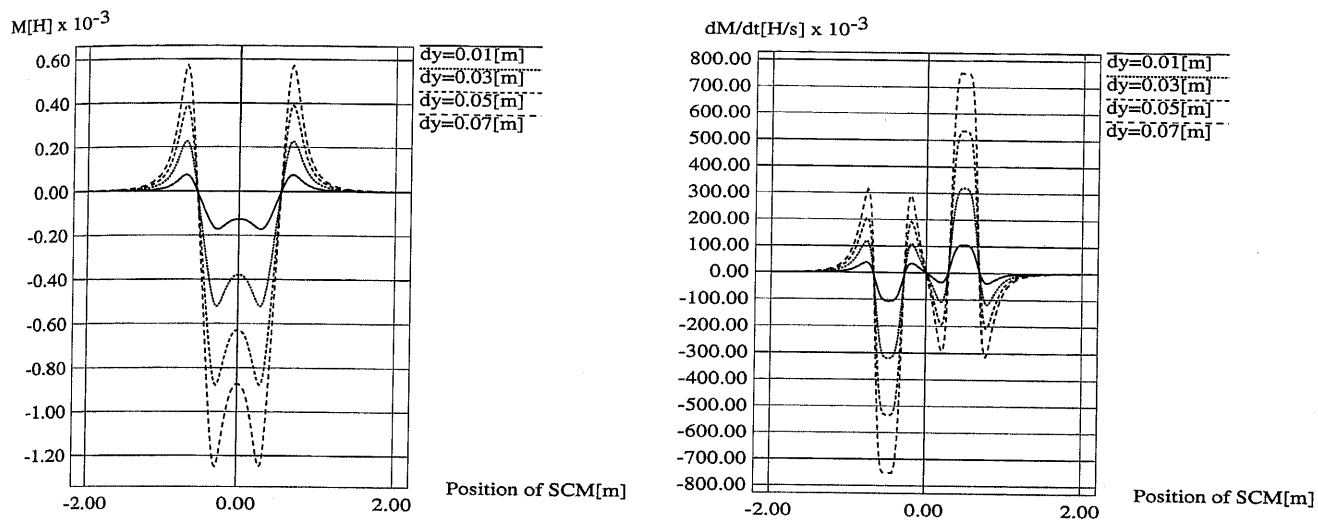


(b) 時間微分 $\partial M_{sc}/\partial t$ の上下変位依存性



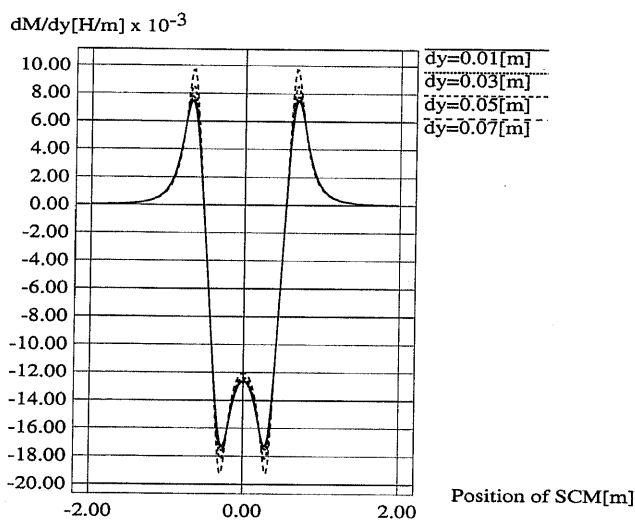
(c) 位置微分 $\partial M_{sc}/\partial z$ の上下変位依存性

図 4.11: 相互インダクタンス上下方向特性 (浮上コイル片側上下2個分)



(a) 相互インダクタンスの左右変位依存性

(b) 時間微分 $\partial M_{sc}/\partial t$ の左右変位依存性



(c) 位置微分 $\partial M_{sc}/\partial y$ の左右変位依存性

図 4.12: 相互インダクタンス左右方向特性 (浮上コイル上側左右 2 個分)

次に台車が x 方向のみに一定速度で走行したときの EDS による浮上案内力を示す。図 4.13 に SC コイル中心が 8 の字浮上コイルの中心 ($z=0$) に対して 4cm 下 (台車重量と浮上力が均衡する浮上高さ) を、一定速度 $v_x=125\text{m/s}$ で通過する場合の浮上力を示す。ここで横方向位置 $y=0$ とする。また、図 4.14 に台車がガイドウェイ中心 ($y=0$) から横方向に 0.02m 変位した場合に一定速度 $v_x=125\text{m/s}$ で通過する際の案内力を示す。ただし、台車上下位置 $z=0$ とする。

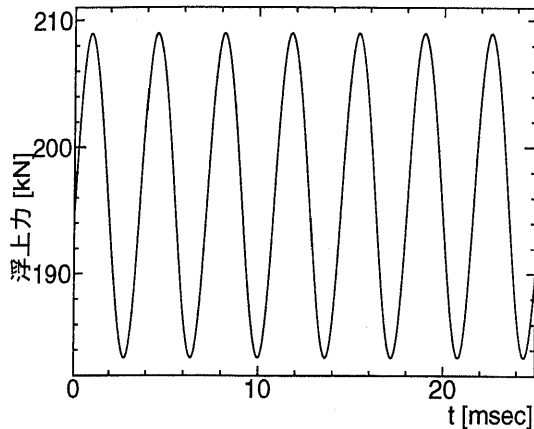


図 4.13: 浮上力 $v_x=125\text{m/s}, \Delta z=-0.04\text{m}$

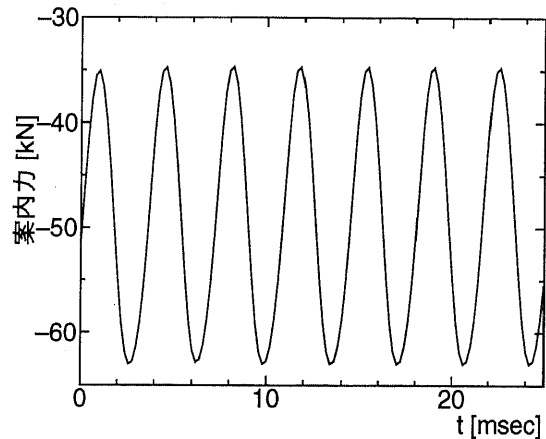


図 4.14: 案内力 $v_x=125\text{m/s}, \Delta y=0.02\text{m}$

浮上力と案内力の双方に直流分と周期 $T=3.6\text{msec.}$ の正弦波が見られる。正弦波部分は浮上コイルピッチによって生じる。浮上力の平均値は約 196kN で、台車重量と均衡している。コイルを通過することによる変動分は約 43.1kN で平均値の約 22% となっている。また、案内力の平均値は約 48.8kN で、コイルを通過することによる変動分は約 27.5kN となり、平均値の半分程度と非常に大きくなっている。このように案内力には大きな高調波成分が含まれ、図 4.12 での相互インダクタンスの位置依存性でみられた脈動の高調波成分への寄与が確認できる。

次に台車を x 方向に一定速度で走行させながら、左右および上下振動させた場合の電磁力や振動特性を示す。 $t \leq 0$ において台車重心は $(y, z) = (0, 0)$ にあり、浮上コイル電流はゼロとしている。そして $t = 0$ において台車は $v_x=125\text{m/s}$ で走行を開始する。

図 4.15 に上下振動を伴う走行シミュレーションの振動運動と浮上力の結果を示す。この走行速度では上下位置約 $z=-0.04\text{m}$ で車両重量と浮上力が均衡するため、図 4.15(a) に示すように $z=-0.04\text{m}$ 付近を中心に車両にかかる重力と浮上力の相互作用で上下振動運動を行う。台車の左右位置は $y=0$ であり、進行方向と上下方向以外の方向には運動せず、案内力はゼロとなる。振動の周波数は約 2.5Hz であり、この浮上系をバネ近似すると等価的なバネ係数は約 4.9MN/m となる。また図より明らかなように振動は発散しており、ダンピングが負の値をとることが分かる。また図 4.15(b) の浮上力に周期の小さい振動成分が見られる。これは浮上コイルピッチにより発生する振動数約 277.8Hz の脈動である。

図 4.16 に左右振動を伴う走行シミュレーションの振動運動と浮上力の結果を示す。左

右運動の場合には台車が $y=0$ の位置にあると案内力が働かないため、 y 方向に一定の外力 $F_{ext,y}=0.2MgN(39.2kN)$ を加え、外力と案内力の相互作用で左右振動運動を行う。この外力は、車両が $v_x=125m/s$ で半径 $8000m$ のカーブを曲がる時に受ける遠心力に相当する。台車の上下位置は $z=0$ であり、進行方向と左右方向以外の方向には運動せず、浮上力はゼロとなる。振動の周波数は約 $1.67Hz$ であり、この案内系をバネ近似すると等価的なバネ係数は約 $2.2MN/m$ となる。また上下の場合と同様に振動は発散しており、ダンピングが負の値をとることが分かる。図 4.16(b) の案内力に浮上力でみられた浮上コイルピッチによる周期 $277.8Hz$ の振動成分が見られる。両者を比較するとこの振動成分は左右振動の場合の方が大きく、振幅の約 45% にも達する。このように案内力には大きな高調波成分が含まれる。

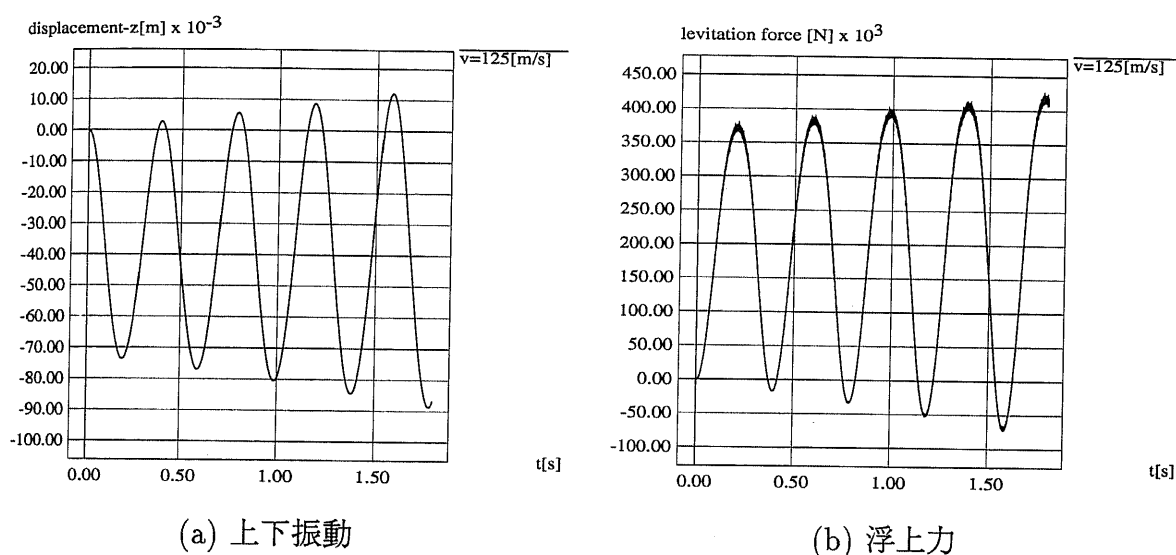


図 4.15: 上下振動を伴う走行シミュレーション ($v_x=125m/s$)

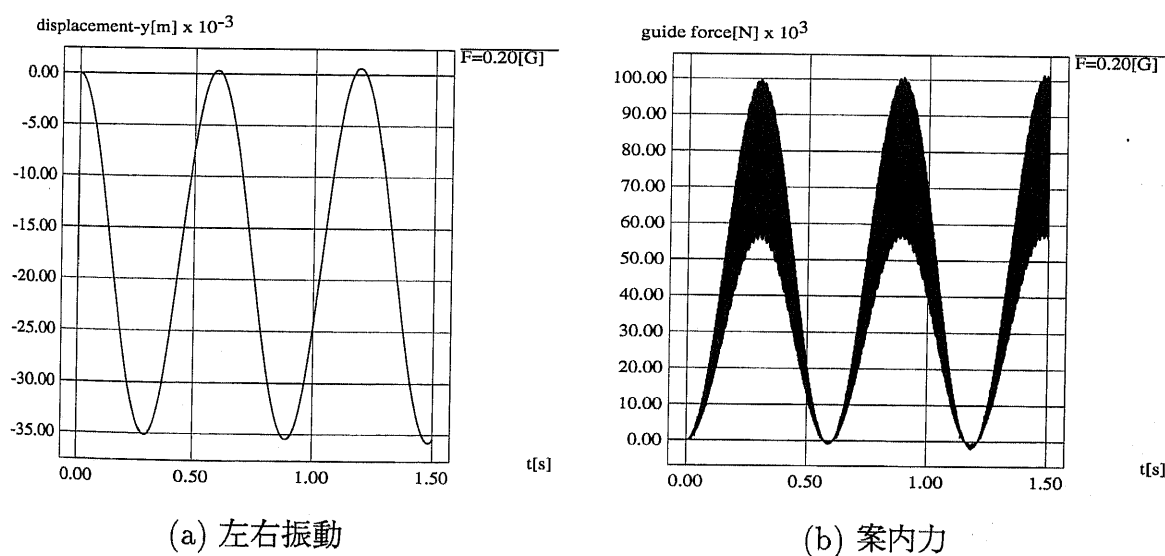


図 4.16: 左右振動を伴う走行シミュレーション ($F_{ext,y} = 0.2MgN$, $v_x=125m/s$)

次に振動の速度依存性について示す。図 4.17 に上下振動、図 4.18 に横方向振動の振動周期および振幅増加率の走行速度 v_x 依存性を示す。図に示すように振動周期および振幅増加率ともに非線形性を持っており、これは浮上力および案内力の速度に対する依存性が非線形であることを示している。速度が大きいと振動周期が小さくなっている。このことから、浮上案内系を機械バネと近似した場合のバネ係数(電磁バネ係数)は速度が上昇すると増加することが分かる。同様に振幅の増加率が速度が大きくなると低下していることから、高速域ほどダンピングが増加していることが分かる。振幅増加率を比較すると、上下振動が 1~2% であるのに対して、左右振動の方が 0.42%以下と 1桁増加率が小さいことが分かる。この結果から SC コイルと浮上コイルのみの系について、浮上系については負のダンピングを持つことを考慮しなければならないが、左右振動に対してはほぼダンピングがゼロと考えて良い。

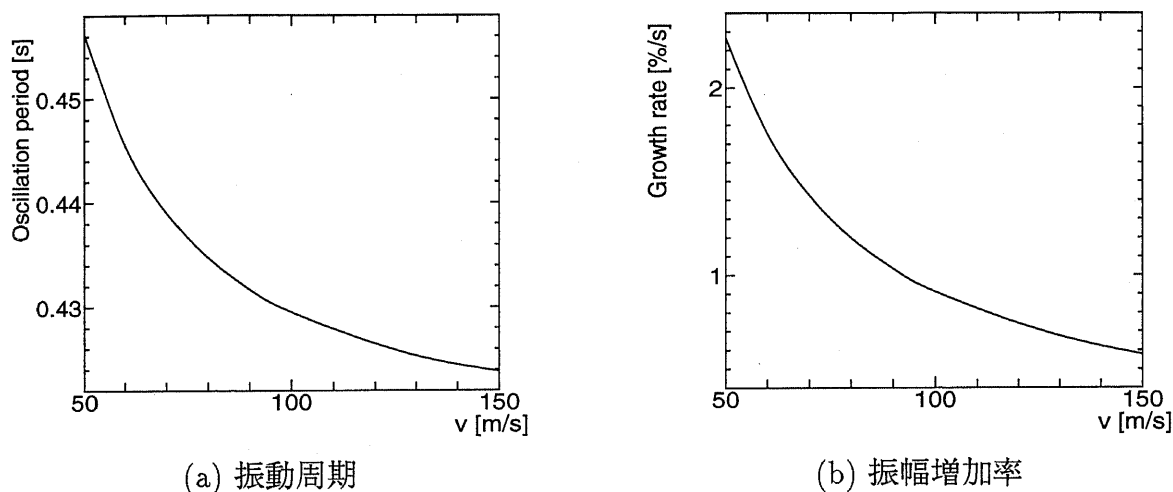


図 4.17: 上下振動の走行速度 v_x 依存性

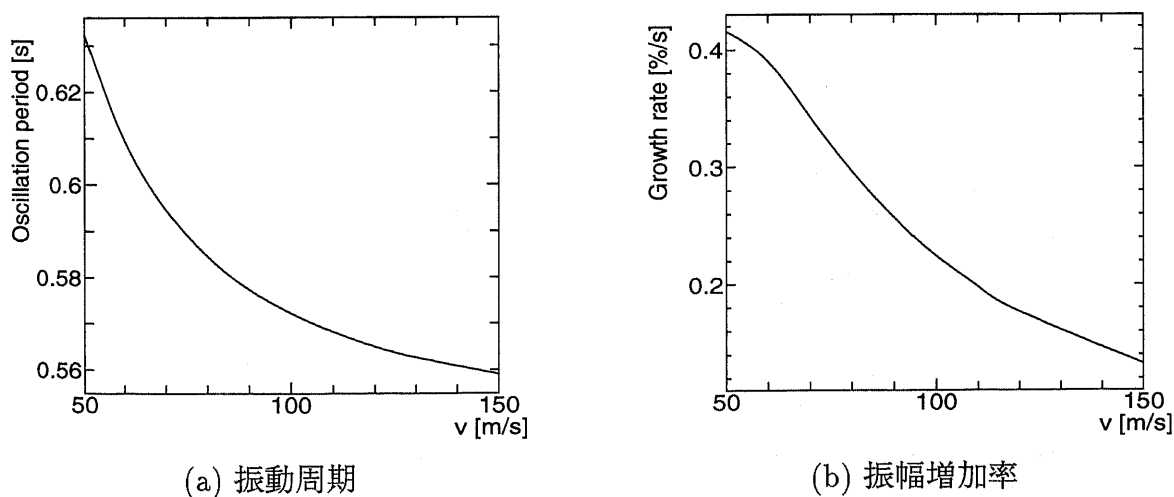


図 4.18: 左右振動の走行速度 v_x 依存性 (横方向外力 $F_{ext,y}=0.2MgN$)

4.3.2 回転方向に対する特性

次に回転方向についての特性を示す。各回転方向に対して $0.001\text{rad} \sim 0.01\text{rad}$ の初期変位を与え、 x 方向には一定速度で走行した場合の結果を示す。台車は一定速度 $v_x=125\text{m/s}$ で走行する。そして上下左右位置は $(y,z)=(0,0)$ を保ち、 $t=0.05\text{sec.}$ の時点で EDS による電磁力が安定した後各回転方向にのみに対して自由運動を開始する。図 4.19 から図 4.21 にピッチング、ヨーイング、そしてローリング回転方向に初期角度変位を与えた場合の振動特性を示す。

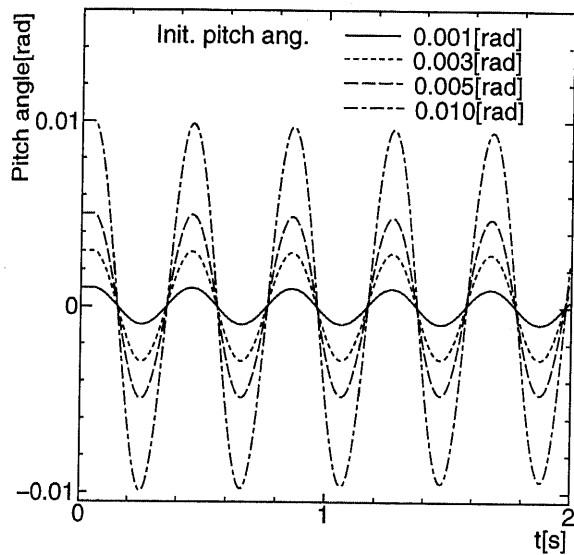


図 4.19: ピッチング方向の振動特性 ($v_x=125\text{m/s}$)

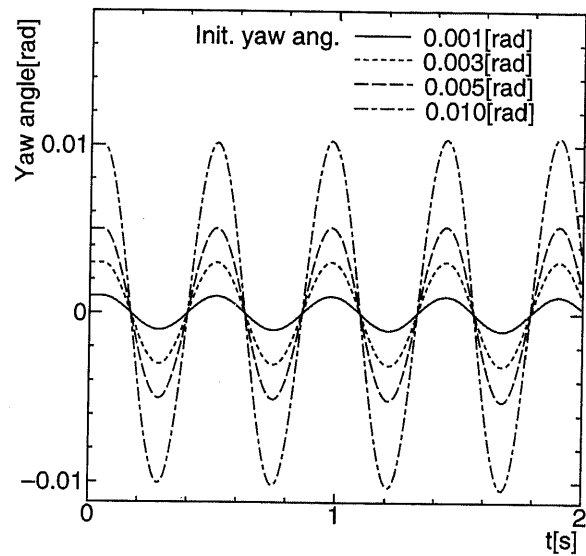


図 4.20: ヨーイング方向の振動特性 ($v_x=125\text{m/s}$)

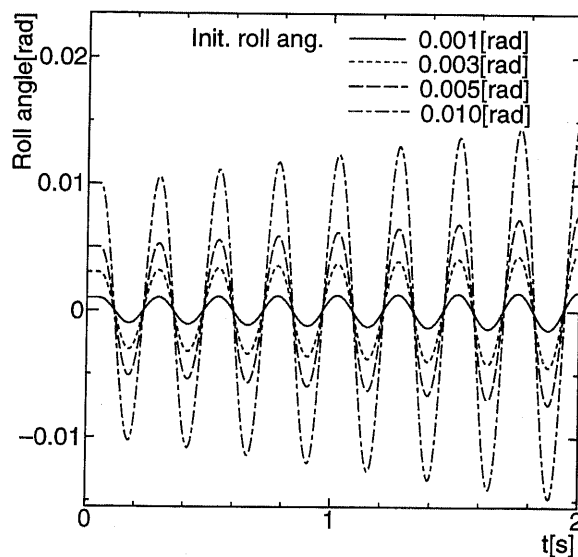


図 4.21: ローリング方向の振動特性 ($v_x=125\text{m/s}$)

ピッチングに対しては振動周期は 0.404sec (振動数 2.48Hz) であり、これは初期変位に関わらず、一定となっている。また振動の振幅は若干ながら減少している。ヨーイングに対しては振動周期は 0.463sec (振動数 2.16Hz) であり初期変位によらず一定である。振動の振幅は若干増加傾向にあり、増加率は 4.15%/sec となっている。ローリングについては振動周期は 0.243sec (振動数 4.12Hz) であり、最も小さくなっているが、これはローリングの慣性能率が最小だからである。また、振幅の増加率は 37.8%と最大で、振動がもっとも不安定であることを示している。

次に初期変位 $\Delta\theta=0.001\text{rad}$ の場合の回転運動の走行速度依存性を示す。まず図 4.22 に振動周期の速度依存性を示す。速度が高い領域では浮上案内力が大きくなるので、速度の上昇と共に振動周期が減少する。周期がヨーイングが最大であるのは、その慣性能率が最大であることによる。また図 4.23 に振幅増加率の速度依存性を示す。振動周期と同様に速度上昇と共に振幅増加率は小さくなる。また、振幅増加率は各走行速度においてローリング方向が最も大きいことが分かる。

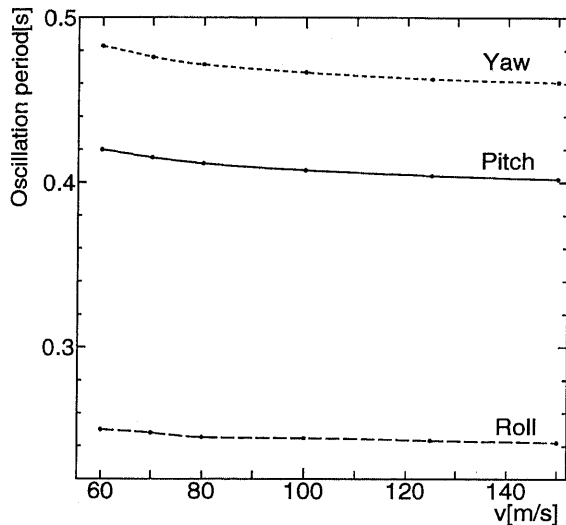


図 4.22: 振動周期の速度依存性 ($\Delta\theta=0.001\text{rad}$)

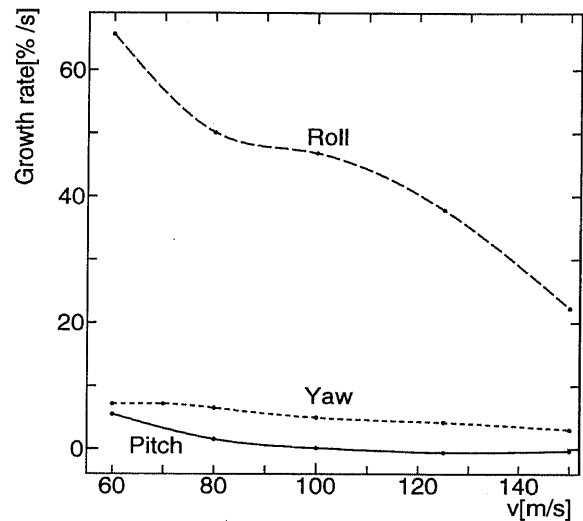


図 4.23: 振幅増加率の速度依存性 ($\Delta\theta=0.001\text{rad}$)

この理由は次のように考えられる。このシステムは浮上コイル抵抗により、浮上力と台車の位置の位相がずれて、ダンピングが負になることが示されている [25]。よって、回転方向の場合も同じことが考えられる。回路方程式から、浮上コイルに誘導される電流の変化は浮上コイルと SC コイル間の相互インダクタンスの時間微分 $\partial M_{sc}/\partial t$ の関数となり、

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{sc}}{\partial t} = & \frac{\partial M_{sc}}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \\ & + \frac{\partial M_{sc}}{\partial \theta_p} \cdot \frac{\partial \theta_p}{\partial t} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial \theta_{yw}} \cdot \frac{\partial \theta_{yw}}{\partial t} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial \theta_r} \cdot \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ここで、 $\partial x/\partial t$ は走行速度であるから、他の振動速度よりもはるかに大きく、電流変化は $\partial M_{sc}/\partial x$ が大きく影響することになる。回転方向のトルクは仮想変位法の式から、相互インダクタンス M_{sc} の各方向微分 $\partial M_{sc}/\partial \beta$ で表され、それぞれ

$$\begin{aligned}\frac{\partial M_{sc}}{\partial \theta_p} &= \frac{\partial M_{sc}}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial \theta_p} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial \theta_p} \\ \frac{\partial M_{sc}}{\partial \theta_{yw}} &= \frac{\partial M_{sc}}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial \theta_{yw}} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \theta_{yw}} \\ \frac{\partial M_{sc}}{\partial \theta_r} &= \frac{\partial M_{sc}}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \theta_r} + \frac{\partial M_{sc}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial \theta_r}\end{aligned}\tag{4.4}$$

よって、 $\partial M_{sc}/\partial \theta_p$ と $\partial M_{sc}/\partial \theta_{yw}$ は電流変化に大きく影響する $\partial M_{sc}/\partial x$ の項を含むことになり、位置とトルクの位相差が小さいと考えられる。一方ローリングはこの $\partial M_{sc}/\partial x$ の項を含まないため、位相差が他の回転方向よりも大きくなり、発散傾向が大きくなると考えられる。また進行方向速度 v_x は一定としていることも、進行方向成分が直接関係しているピッチングとヨーイングの発散を抑制している。

4.4 台車単体モデルにおける走行シミュレーション

ここでは台車単体モデルを用いて台車が外乱を受けた場合やカーブ走行時などの EDS の基本特性を求める。台車が横風やガイドウェイの横ずれなどの横方向外乱を受けた場合について述べる。台車が外乱を受け、横方向に変位すると左右の浮上力のバランスが崩れ、ローリングトルクが発生する。そこでまず台車モデルを用いて側壁浮上方式におけるローリングの発生機構について述べる。

4.4.1 側壁浮上方式におけるローリング発生機構

ローリングの駆動機構を台車の重心がガイドウェイの中心にある場合と、重心がガイドウェイの中心にない場合について考える。計算は台車の重力と浮上力が均衡する位置から開始するので、台車の重心の z 座標は常に $z < 0$ となる。ローリングのトルク T_θ は式 (2.3) から直接求められるが、浮上力によるトルク T_{Fz} と、案内力によるトルク T_{Fy} 、そして回転方向に働くトルクを合成したものと等しいと考えられる。

台車の重心がガイドウェイの中心にある場合、ローリング角がゼロだとローリングは発生しない。そこで図 4.24 に示すように、台車がある角度 $\theta (> 0)$ 傾いているとする。 $\theta = 0.01 \text{ rad}$ におけるそれぞれの電磁力の計算結果を図 4.25 に示す。

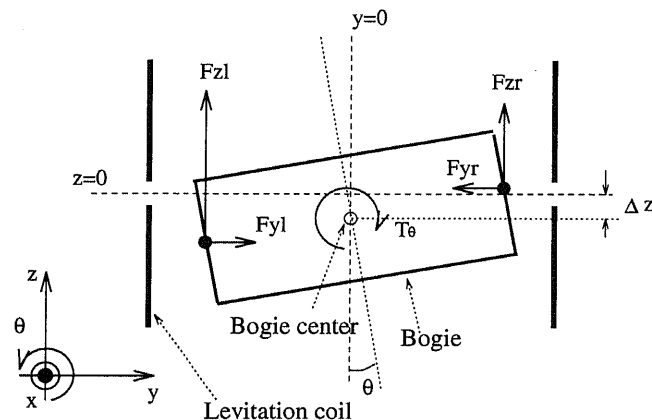


図 4.24: 台車に働く電磁力 (重心がガイドウェイの中心にある場合)

また、ローリングトルクを図 4.26 に示す。浮上力によるトルク T_{Fz} 、案内力によるトルク T_{Fy} は次式で与えられる。ただし、 θ はローリング角であり、 bw は台車の幅である。

$$T_{Fz} = (F_{zr} - F_{zl}) \cdot bw \cos \theta \quad (4.5)$$

$$T_{Fy} = (F_{yr} + F_{yl}) \cdot bw \sin \theta \quad (4.6)$$

それぞれの電磁力は次のようにトルクに影響する。

- 浮上力 F_z : 台車が左下がりになっていることから、台車の左側に働く浮上力 F_{zl} が F_{zr} より大きくなる。この両者の差により、 $T_{Fz} < 0$ となり、ローリング角を減少させるトルクが働く。

- 案内力 F_y : 浮上力の発生のために誘導された電流により、図 4.24 のように台車をガイドウェイの内側に寄せようとする方向に働く。これにより $T_{F_y} > 0$ となり、ローリング角を増加させるトルクが働く。

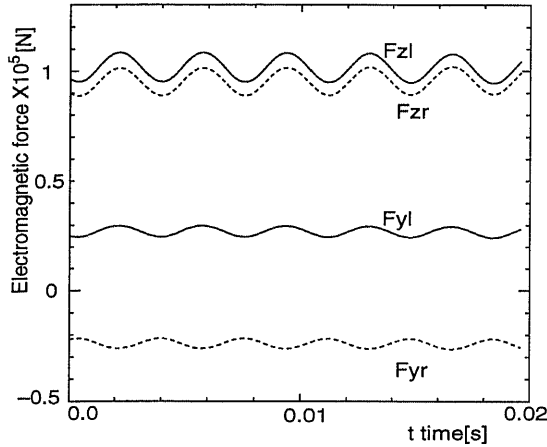


図 4.25: 台車の重心に働く電磁力（重心がガイドウェイの中心にある場合）

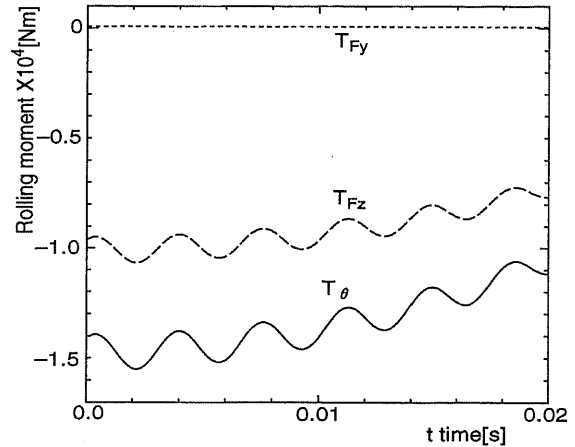


図 4.26: ローリング方向のトルク（重心がガイドウェイの中心にある場合）

このように T_{F_z} がローリング角の絶対値 $|\theta|$ を減少させる方向に働き、 T_{F_y} が $|\theta|$ を増加させる方向に働く。 T_{F_z} と T_{F_y} を比較すると、 $(F_{zr} - F_{zl})$ は $(F_{yr} + F_{yl})$ よりも大きい。また θ の値が非常に小さいことから、 $\cos \theta > \sin \theta$ となり、 T_{F_z} が T_{F_y} よりも大きくなる。 T_{F_y} は $|\theta|$ を増加させる方向に働くが、図 4.26 に示すように T_{F_z} が全トルク T_θ の大部分を占めるため、全体として $|\theta|$ を減少させる方向にトルクが働く。 $\theta < 0$ の場合も同様に、 T_{F_z} が台車を水平にする方向、つまり $|\theta|$ を減少させる方向に、 T_{F_y} が $|\theta|$ を増加させる方向に働くが、 T_{F_z} が大きいために、全体では $|\theta|$ を減少させるトルクが働く。

次に図 4.27 のように横風などを受け、台車の重心が左側へ Δy 変位した場合を考える。浮上力からのトルクと案内力からのトルクは同じく式 (4.5), (4.6) で与えられる。

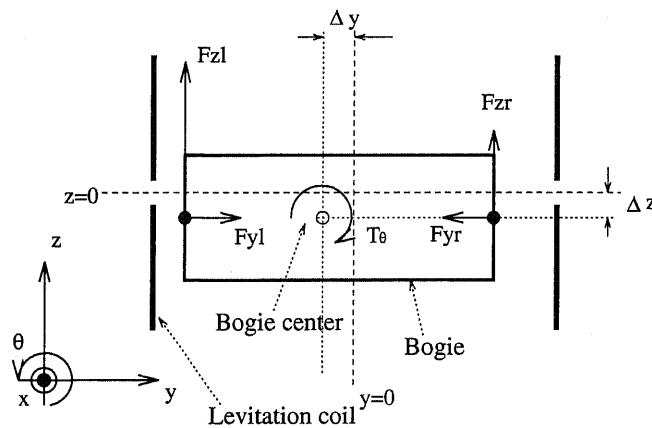


図 4.27: 台車に働く電磁力（重心がガイドウェイの中心にない場合）

図 4.28に $\Delta y=0.01\text{m}$ とした場合の電磁力の計算結果を、図 4.29にローリング方向のトルクの計算結果を示す。それぞれの電磁力は次のようにローリングに影響する。

- 浮上力 F_z : 台車が左側に寄るので、 F_{zl} が F_{zr} より大きくなる。この結果 $T_{F_z} < 0$ となり、 $\theta < 0$ の方向に $|\theta|$ を増加させるトルクが働く。
- 案内力 F_y : $\theta=0$ の場合は初期位置において案内力のローリングに対する影響はない。しかし、ローリング角 θ が発生すると $|\theta|$ を増加させるトルクが働く。

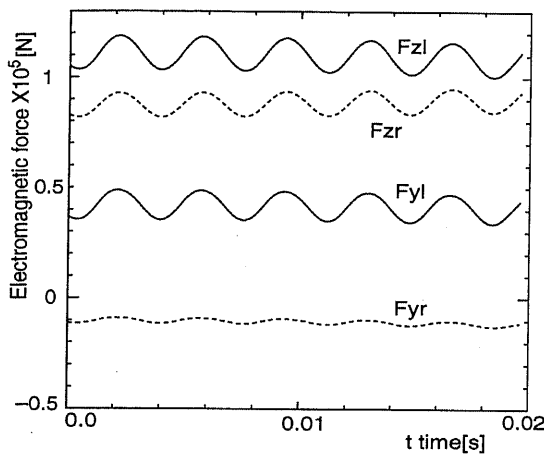


図 4.28: 台車に働く電磁力（重心がガイドウェイの中心にない場合）

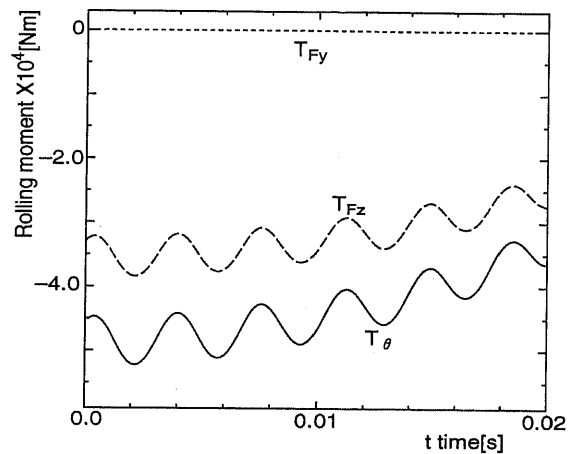


図 4.29: ローリング方向のトルク（重心がガイドウェイの中心にない場合）

$\Delta y > 0$ の場合は T_{F_z} が $|\theta|$ を増加させる方向に働く。これにより θ は負の方向に増加するが、 θ がある大きさ以上になると、 $F_{zl} < F_{zr}$ となり、 T_{F_z} は $|\theta|$ を減少させる方向に働く。つまり横変位が生じた場合、ロール角は側壁に近い側が持ち上がった状態で安定となる。案内力によるトルク T_{F_y} は $|\theta|$ を増加させる方向に働く。しかし、図 4.27においてローリング角 $\theta > 0$ の場合は $F_{zl} > F_{zr}$ で浮上力によるトルク T_{F_z} は $|\theta|$ を減少させる方向に働く。このように台車の位置によってEDSによる電磁力のローリングへの影響が大きく変化する。そして図 4.29に示すように全トルク T_θ での T_{F_z} の占める割合は大きくなっている。図 4.30に台車の上下位置 $z=-0.03935\text{m}$ の場合の横方向変位とローリングトルクがゼロになる角度の関係を示す。このように横方向変位とローリングトルクの均衡角はほぼ線形の関係がある。

以上のことから浮上力からのトルク T_{F_z} は基本的には $|\theta|$ を減少させる方向に働き、 Δy がある場合はその大きさに応じて安定角が水平面よりもずれる。案内力からのトルク T_{F_y} は $|\theta|$ を増加させる方向に働くことが分かった。また、 T_{F_z} はローリング方向のトルク T_θ の大部分を占めることが分かった。これらの結果から検討すると、横方向の外乱下にある台車の運動は横変位とローリング運動の相互作用が強く、複雑な非線形運動になると考えられる。

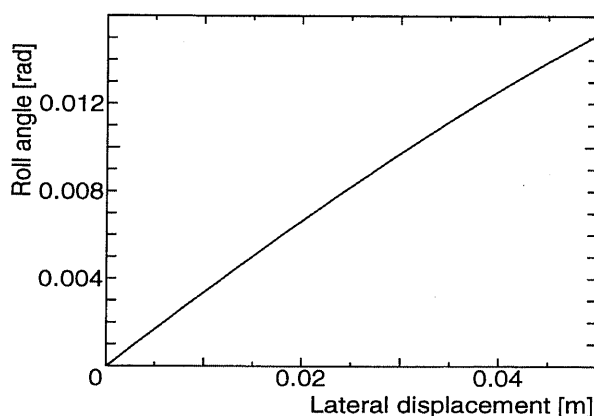


図 4.30: 横方向変位とローリングトルクの均衡点の関係 (上下位置 $z=-0.03935\text{m}$)

4.4.2 台車モデルにおける計算の初期値

計算における初期値は各電磁力およびトルクが均衡している位置とし、次に台車が均衡する位置について述べる。浮上力は台車の走行速度 v_x によって変化するため、台車重量が浮上力と均衡する位置も v_x に依存する。

まず図 4.31 に台車が $v_x=125\text{m/s}$ で一定高さ $z=-0.0395\text{m}$ で走行しているときに各 SC コイルにかかる浮上力を示す。図中の SCM 1 が先頭、以下 SCM2,3,4 と続く。先頭の SC コイルにかかる浮上力が最も小さく、以下 SCM3,4,2 の順になる。そして全体として台車重心に対して前方の浮上力が小さくなるので、ピッチングトルクは台車前方が若干下がった状態でゼロとなる。よって台車は浮上力およびピッチング角の 2 つの均衡位置を持つことになる。

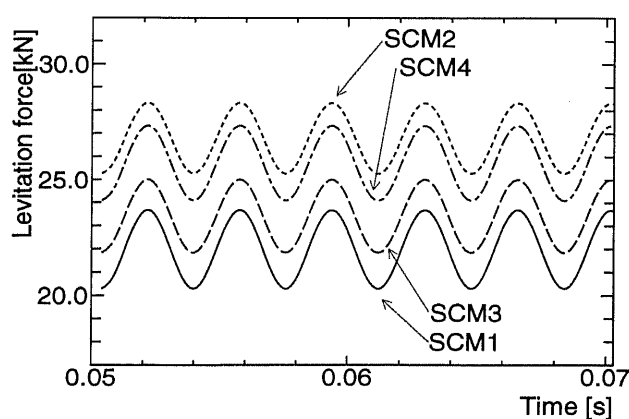


図 4.31: 各 SC コイルにかかる浮上力

図 4.32 に上下均衡位置の走行速度 v_x に対する依存性を示す。速度の上昇に伴い浮上力が増加し、均衡位置が高くなっている。また、図 4.33 にピッチングトルクが均衡する角度

の走行速度依存性を示す。ここでも速度上昇に伴いピッチングトルクが均衡する角度が小さくなり、各 SC コイル間の浮上力の差が小さくなっていることが分かる。以下の台車モデルのシミュレーションでは計算の初期値にこれらの図中の値を用いる。

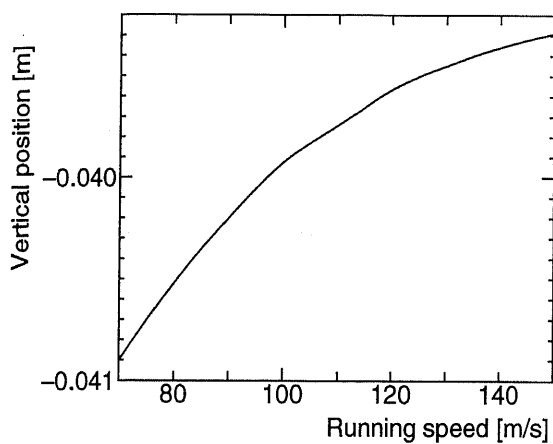


図 4.32: 上下均衡位置の速度依存性

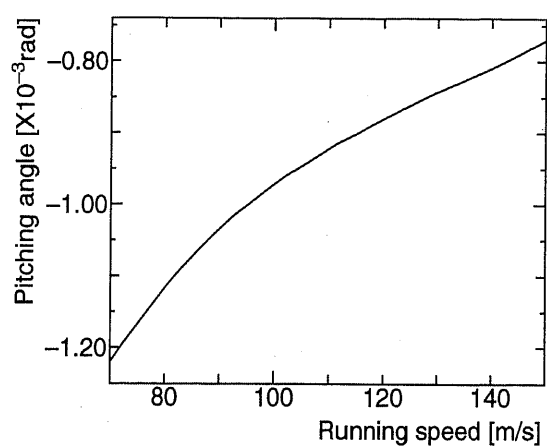


図 4.33: ピッチングトルクが均衡する
角度の速度依存性

4.4.3 横方向外乱を受けた場合の解析

システムに横方向の外乱が発生した場合について検討する。計算における初期位置の z 座標はすべて図 4.32 と 4.33 に示した均衡位置になっている。また浮上力を安定させるため、計算開始点において 0.045sec. 間初期位置に保持し x 方向に走行させた後、LSM を駆動し、自由走行を行っている。外乱としては以下のように台車に直接加わる場合とガイドウェイの位置が変位することにより加わる場合 [26] が考えられる。

○台車に外乱が加わる場合

台車に外乱が加わる場合としてここで次の 2 つを考える。

- 台車重心に横風などにより横方向の外力が加わる。
- 台車に初期変位がある場合。これは例えば台車がなんらかの外力を受けて変位していたが、その力が失われ、再び中心に戻ろうとする時などが考えられる。

台車重心に横方向のステップ外力が加わる場合の解析モデルを図 4.34 に示す。

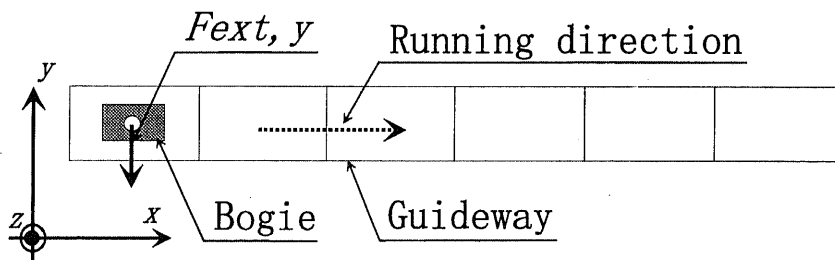
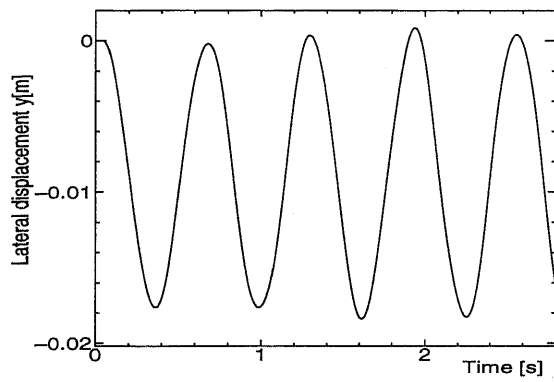


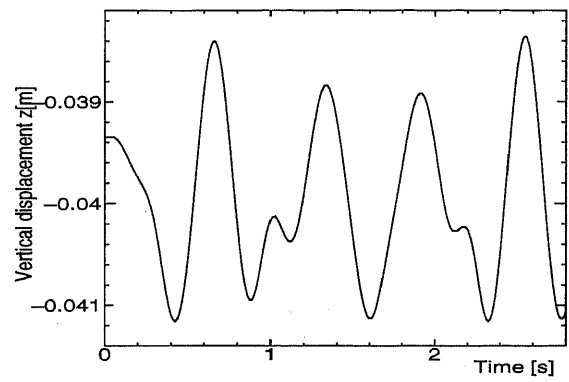
図 4.34: 横方向外力を加えた場合のモデル

図 4.35 に横方向にステップ状の外力を加えた場合の台車の振動の様子を示す。

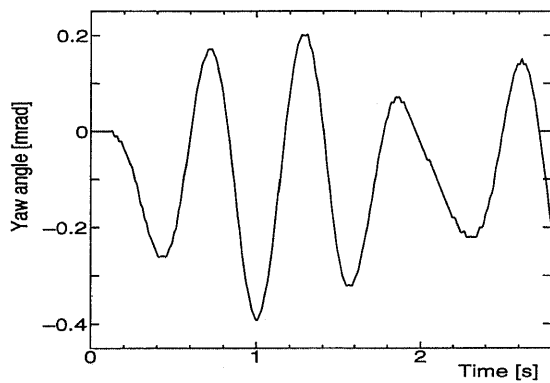
図 4.35(a),(b),(c),(d) はそれぞれ台車重心の y 座標、 z 座標そしてヨーイング角、ローリング角の時間変化を示す。また図 4.35(e) に重心の軌跡を示す。加えた外力 $F_{ext,y}=0.1Mg$ N (19.6kN, M : 台車質量、 g : 重力加速度) は台車が半径 16000m のカーブを $v=140\text{m/s}$ で通過する時に受ける遠心力に相当し、約 $0.1g$ の加速度が加わる。この場合の左右変位は図 4.35(a) に示すように周期が 0.6sec で振幅約 1cm の振動運動となる。図 4.35(a) と (d) を比較すると振動周期が同じであり、横方向変位とローリング運動に強い相関があることが分かる。図 4.27 で示したように、横方向の外力により台車が横方向に変位し、その結果左右の浮上力の均衡が崩れはじめ、浮上力からのトルクにより、台車が右回りに回転しはじめる。そしてある角度まで来ると、台車の左側の浮上力が小さくなり、左右の浮上力の関係が逆転する。そして、左上の浮上コイルと SC コイルの反発力も働き、ローリング角の絶対値 $|\theta|$ を減少させるトルクにより、台車は左に回り始める。ローリング運動に基本振動よりも周波数の高い成分が見られるが、これは上下振動の影響がローリング運動に加わっているからである。図 4.35(d) は $t=0$ から $t=2.8\text{sec.}$ までの $y-z$ 平面での台車の軌跡を示しており、ここから時間の経過とともに台車重心の運動範囲が大きくなっており、振動運動が発散していることが分かる。



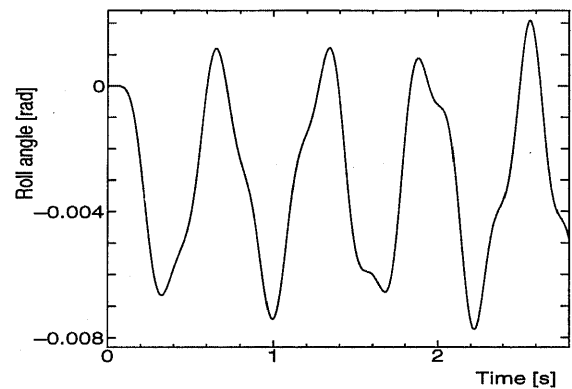
(a) 台車重心の左右運動



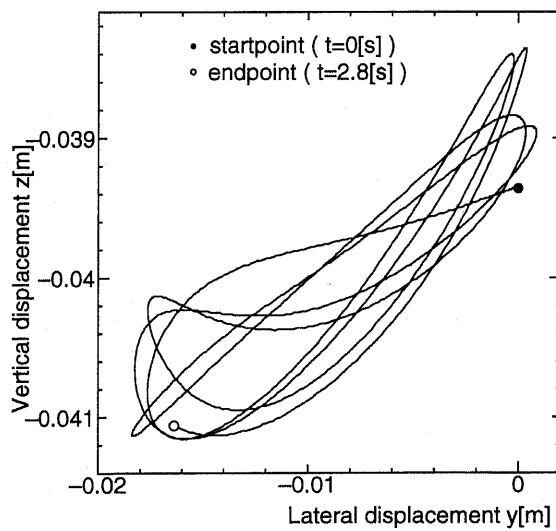
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ヨーイング角の変化



(d) 台車ローリング角の変化



(e) 台車重心の軌跡

図 4.35: 横方向のステップ外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の台車運動

図 4.36 に台車運動の様子を示す。このように、浮上コイルに近づく側の浮上力が大きくなり反対側は小さくなることで、ローリング運動が発生する。

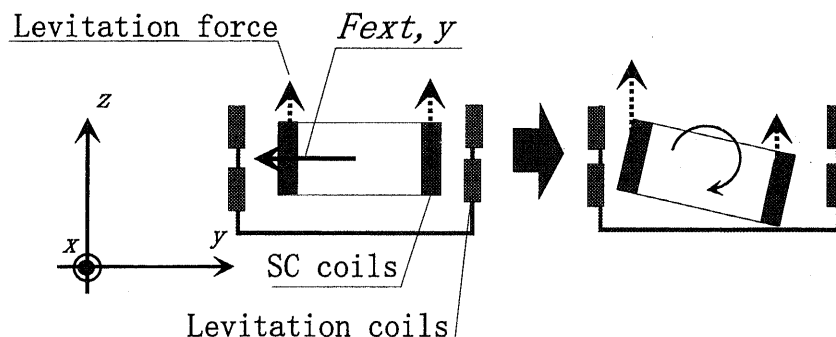
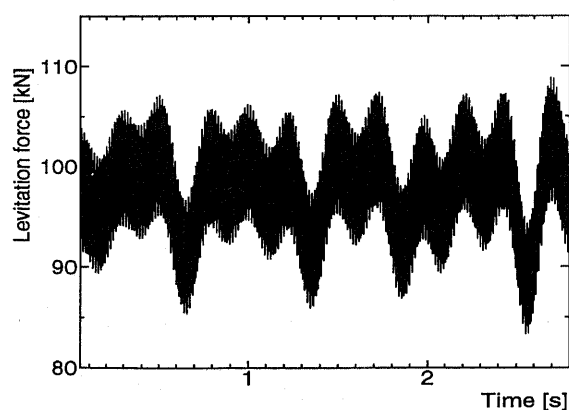
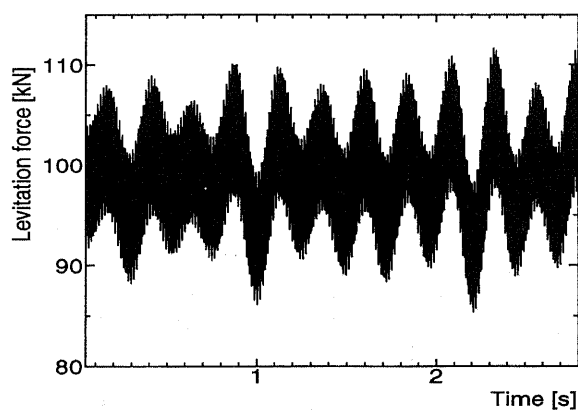


図 4.36: 横方向外力を加えた場合の台車運動の様子

図 4.37 に横方向の外力を加えた場合の浮上力変化を示す。横方向変位がない場合は左右それぞれに約 98kN の浮上力が加わっている。そして横方向振動により浮上力のバランスが変化し、上下振動が起こる。振動による浮上力変化は 10~15% となっている。図中に黒く見えている小さい振動周期は浮上コイルピッチによるものである。時間の経過とともに浮上力の変動が増加しているが、これは振動運動が発散傾向にあり、台車変位が増加しているからである。



(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)

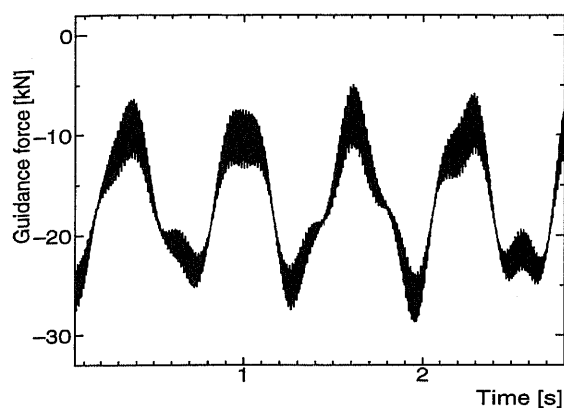


(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

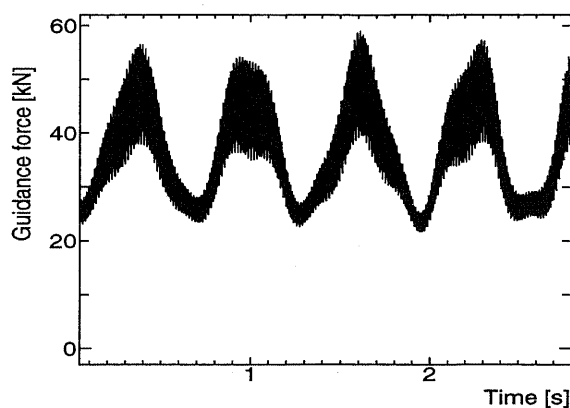
図 4.37: 横方向の外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の浮上力変化

図 4.38 に横方向の外力を加えた場合の案内力変化を示す。横方向変位がない場合でも左右それぞれにガイドウェイの中心に向かって約 25kN の案内力が加わっており、台車全体としてはゼロとなっている。そして横方向外力により台車は進行方向右側に振動するので図 4.38(b) の右側の反発力が増加し、図 4.38(a) の左側の反発力は減少する。案内力の変

化は大きく左側は平均-15kN程度と約40%減少し、右側は平均40kNと約60%増加する。案内力についても台車運動が発散傾向にあるために、時間の経過とともに変動分が増加している。



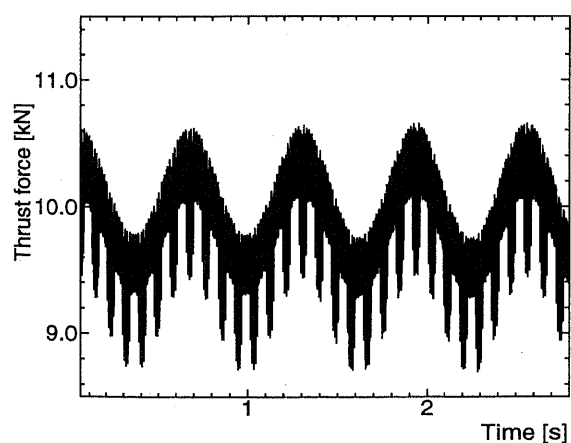
(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)



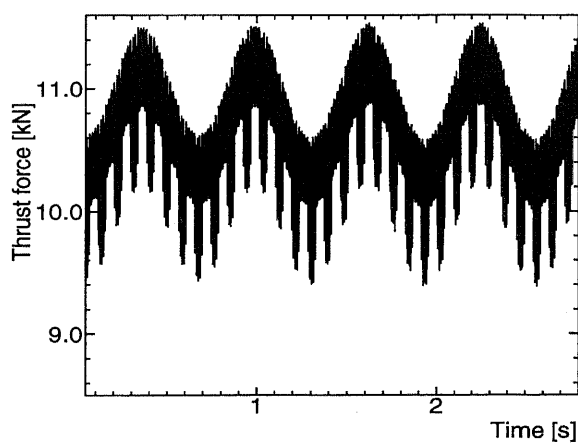
(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.38: 横方向の外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の案内力変化

図 4.39に外力を加えた場合の台車の推進力の変化を示す。0.09sec ごとに見られる周期的な変動はガイドウェイの継目部分を通過することによるものである。外力により、台車は y の正の方向に移動するため、進行方向左側の推進力が大きくなる。あとは図 4.35(a)の横方向振動に応じて推進力が変動する。推進力は左側が平均約8%小さくなり、右側が約8%大きくなる。そして、左右推進力のバランスが崩れるためにヨーイングトルクが発生し、台車に図 4.35(c)にみられるヨーイング運動が発生する。



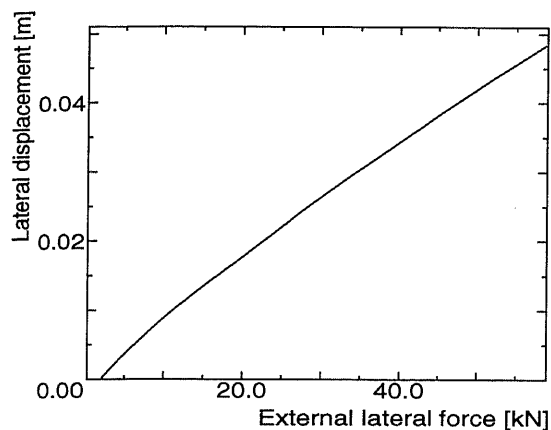
(a) 進行方向左側 ($+y$ 側)



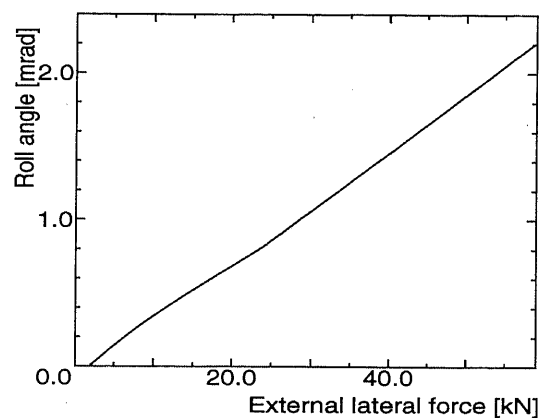
(b) 進行方向右側 ($-y$ 側)

図 4.39: 横方向の外力 $F_{ext,y}=0.1MgN$ を加えた場合の推進力変化

次に図 4.40 に横方向変位とローリング角の横方向外力の大きさに対する依存性を示す。ここで図の縦軸は $t=0\sim 2.0\text{sec.}$ までの変位の平均値を示している。双方ともに横方向外力の大きさに比例している。また、これより横方向変位とローリング運動が強い相関関係にあるといえる。



(a) 横方向変位



(b) ローリング

図 4.40: 台車運動の横方向外力依存性 ($t=0\sim 2.0\text{sec}$ 間の平均値, $v_x=140\text{m/s}$)

以上まとめると、台車が横方向の外力を受けた場合はその大きさにほぼ比例する横方向変位が発生し、そのために浮上力のバランスが崩れてローリング運動が起こる。よって横方向変位とローリング角の相関は強く、外力に対する変位依存性は双方ともほぼ線形となっている。また、台車が横方向変位を起こす結果、浮上案内力では浮上コイルと接近する側の浮上コイルピッチによる高調波成分を増加させ、推進力については左右のバランスが崩れるのでヨーイングトルク発生の原因となる。

次に台車に横方向に初期変位を与えた場合について検討する。台車に横方向変位がある場合の解析モデルを図 4.41 に示す。

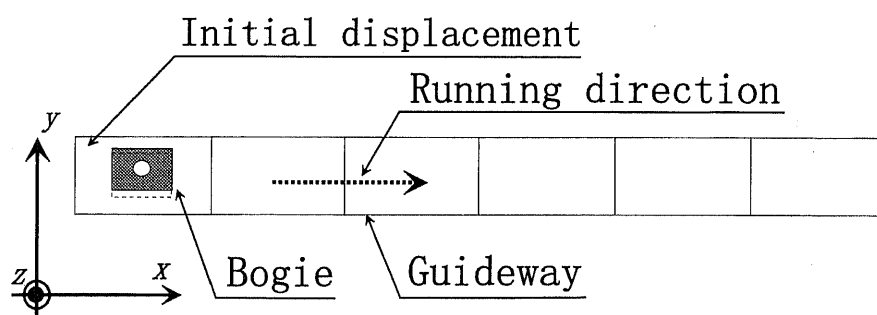
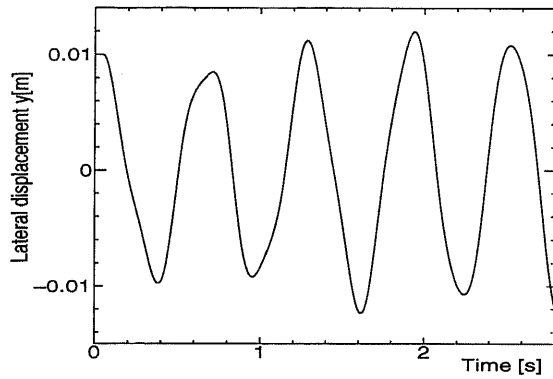
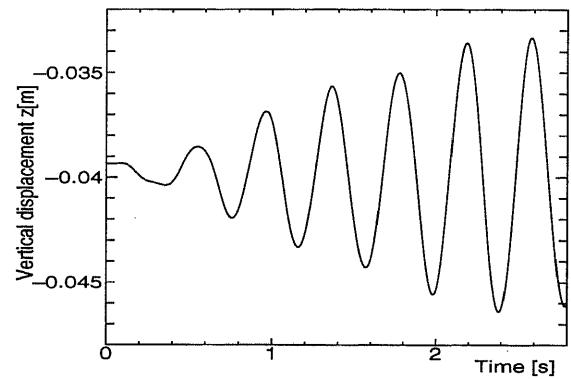


図 4.41: 台車に横方向変位がある場合のモデル

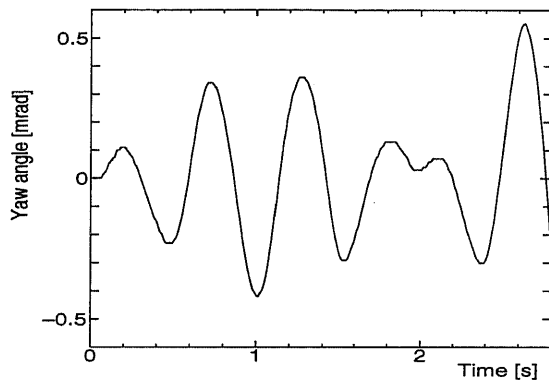
図 4.42 に台車の横方向初期位置をガイドウェイの中心から横方向に 0.01m ずらした場合の結果を示す。まず台車を 0.045sec 間 $y-z$ 平面の位置を $(y, z) = (0.01, -0.03935)$ m に拘束して走行させ、自由走行に入る。図 4.42(a), (b), (c), (d), はそれぞれ台車重心の y 座標、 z 座標、そしてヨーイング角、ローリング角の時間変化、図 4.42(e) は重心の軌跡を示す。拘束された状態から自由走行に移るときに横方向にステップ状の案内力、ローリング方向にステップ状トルクが加わることになる。図 4.42(a) より台車は $y=0$ を中心にして周期 0.6sec、振幅 1cm で振動している。外力を加えた場合と比較すると、ステップ状の力とトルクが加わった分、上下運動およびヨーイング運動の振幅が大きくなっている。その結果としてローリング角の変動が大きく図 4.42(d) には横方向振動に対応する周期約 0.6sec の振動と他の運動の影響も入った周期約 0.2sec の振動成分が見られる。ローリングの変動が大きいことは浮上力にも影響を与え、上下方向変位の振幅は外力を加えた場合 (図 4.35(b)) よりも大きくなる。また、図 4.42(d) に見られるように台車の振動はここでも発散している。



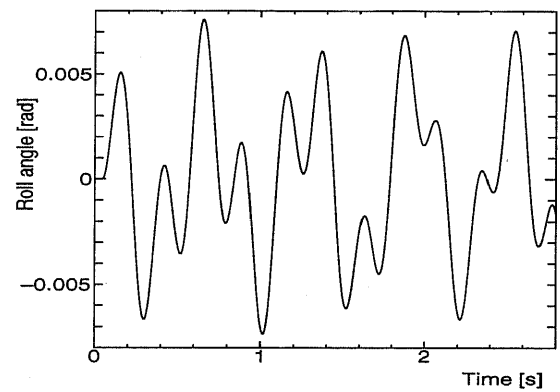
(a) 台車重心の左右運動



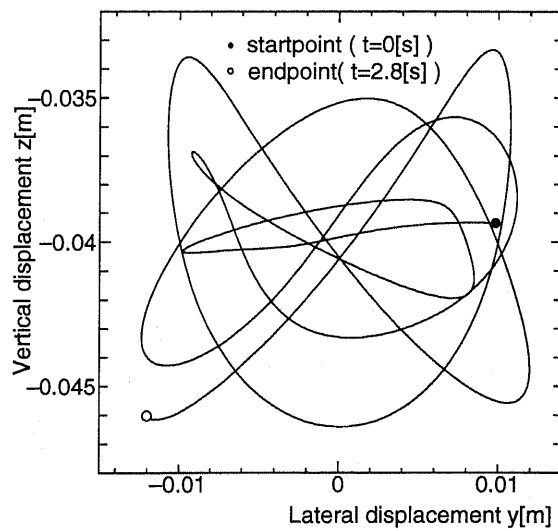
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ヨーイング角の変化



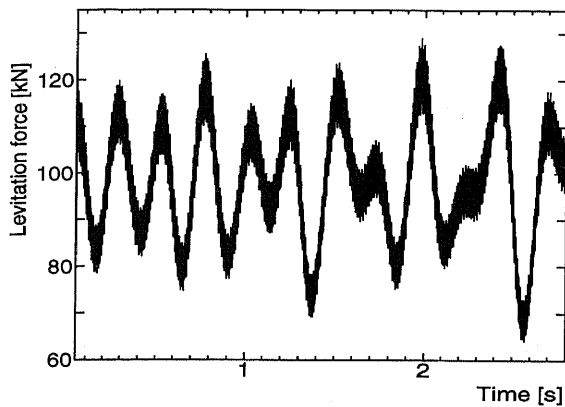
(d) 台車ローリング角の変化



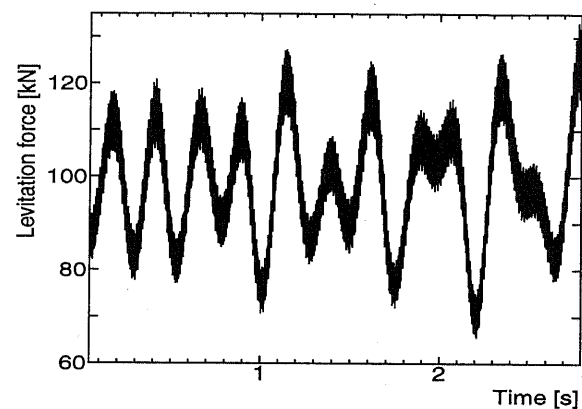
(e) 台車重心の軌跡

図 4.42: 台車に $\Delta y=0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の台車運動

図 4.43 に台車初期変位がある場合の浮上力変化を示す。台車が横方向に $\Delta y = 0.01\text{m}$ 変位しているので、台車左側の浮上力が約 110kN 、右側が約 90kN となる。これは自由運動に移行すると左側を上昇させるローリングトルクとなる。外力を加えた場合の図 4.37 と比較すると、振動が大きくなっているが、それはローリング運動の振動成分が大きいためである。また台車運動が発散傾向にあるため、浮上力の変動が時間経過とともに大きくなっている。



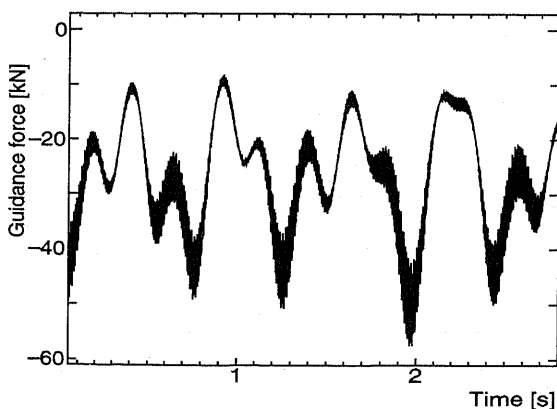
(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)



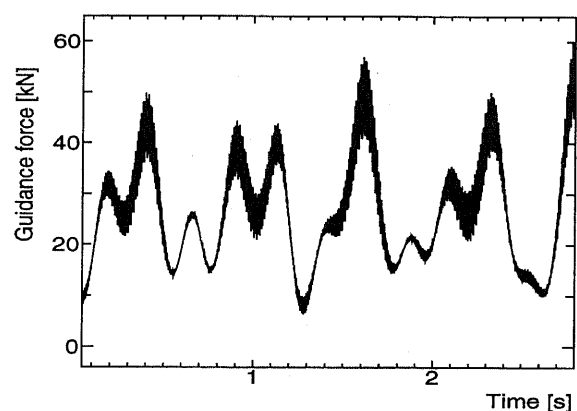
(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.43: 台車に $\Delta y = 0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の浮上力変化

図 4.44 に台車初期変位がある場合の案内力変化を示す。台車が横方向に変位しているので、台車左側の初期案内力が約 -42kN 、右側が約 10kN となる。これは自由運動に移行すると台車をガイドウェイ中央に戻す力となる。また台車運動が発散傾向にあるため、案内力の変動が時間経過とともに大きくなっている。



(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)

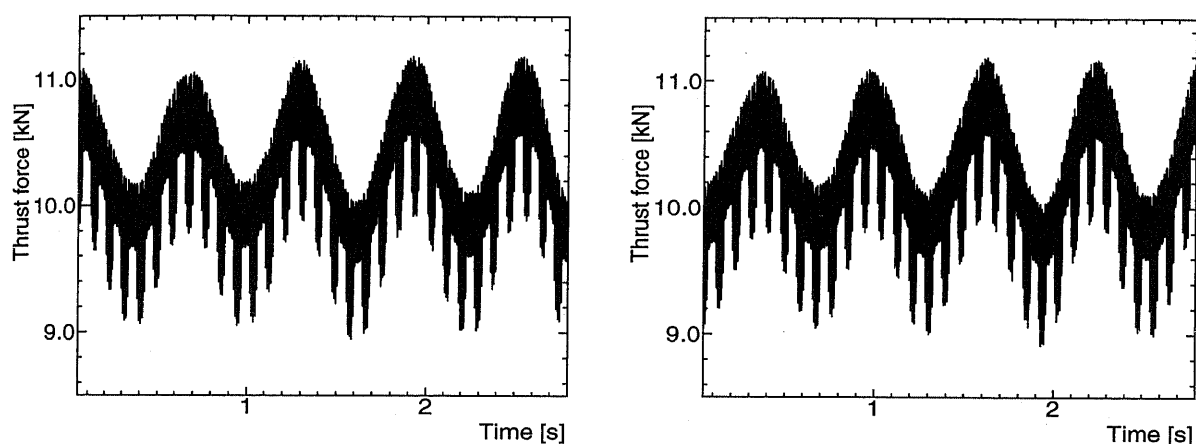


(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.44: 台車に $\Delta y = 0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の案内力変化

外力を加えた場合の図 4.37と比較すると、横方向変位による振動以外の振動が大きくなっているが、これもローリング運動の振動成分が大きいため、図 4.42(d) に対応していることが分かる。平均値はそれぞれ約 $\pm 25\text{kN}$ となっており、台車が $y=0$ の位置にある場合とほぼ同じであり、台車が $y=0$ を中心に振動していることを示している。

図 4.45に台車に初期位置変位がある場合の台車推進力の変化を示す。台車は初期位置として y の正の方向にあるため、進行方向左側の推進力が大きい状態から変動が始まる。そして図 4.42(a) の横方向振動に応じて推進力が変動する。台車運動が発散傾向にあるため、推進力の変動分が時間経過とともに大きくなっている。振幅は外力の場合と同じであるが、ガイドウェイ中心を振動の中心にしているため、推進力振動は位相が違うのみで変動は左右ともに約 $\pm 8\%$ となる。このように左右の推進力の差が外力の場合より小さくなるため、図 4.35(c) と比較すると図 4.42(c) のヨーイングの振幅は小さくなっている。



(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)

(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.45: 台車に $\Delta y=0.01\text{m}$ の初期変位がある場合の推進力変化

以上台車に横方向初期変位がある場合についてまとめると、台車が自由運動に入ると同時に横方向へのステップ力とローリングトルクが発生する。このステップ状のローリングトルクは外力を加えた場合にはなかったものである。このため、ローリング振動の振幅が増加してSCコイルの位置変動が起こる。これは浮上力に影響し、上下運動の振幅も増加する。そして横方向以外の運動が増加した結果、ローリング運動に横方向運動の周期とは異なる成分が発生する。また台車は $y=0$ を中心にして振動運動を行なうため、振幅が外力を加えた場合と同じく約 1cm であるが、最大変位が 1cm となり、左右の推進力差は小さくなる。

○ガイドウェイが変位する場合

ガイドウェイが変位する場合としてここで次の2つを考える。

- ガイドウェイのあるセクションからステップ状の変位が起こった場合
- ガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合

ガイドウェイにあるセクションからステップ状の変位が起こった場合の解析モデルを図4.46に示す。

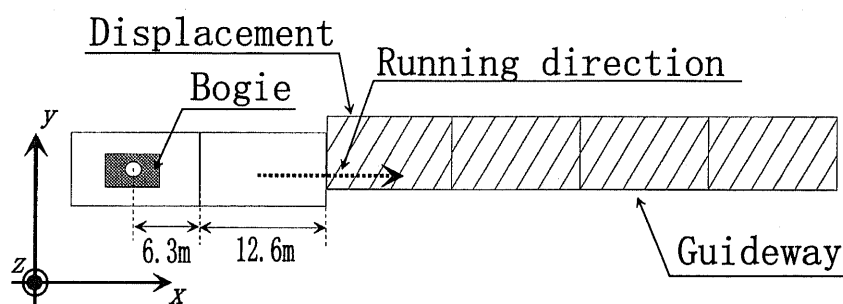
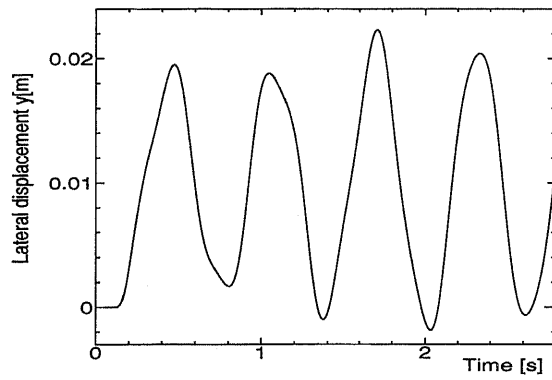
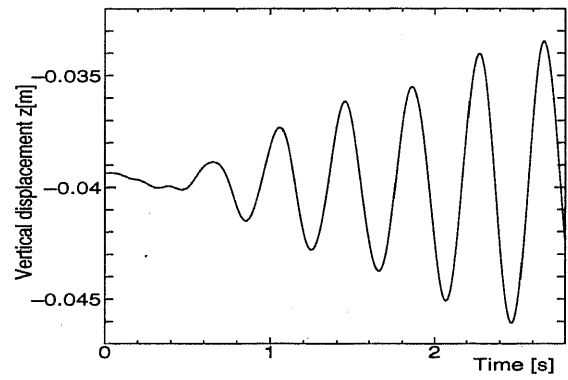


図 4.46: ガイドウェイにステップ変位が起こった場合

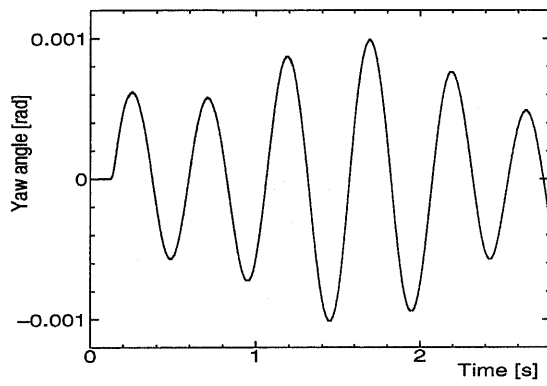
図 4.47 にガイドウェイにステップ状の変位が起こった場合の台車運動を示す。第3番目以降のガイドウェイセクションが横方向に 0.01m 変位する。台車は走行速度 $v_x=140\text{m/s}$ で $t=0.045\text{sec}$ まで進行方向に一定速度で移動し、その後自由運動に入る。そして出発してから先頭 SC コイルは約 0.116sec 後に変位したガイドウェイに入り、台車重心は 0.135sec 後 (18.9m) に変位したガイドウェイに入ることになる。図 4.47(a),(b),(c),(d) はそれぞれ台車重心の y 座標、 z 座標そしてヨーイング角、ローリング角の時間変化を示す。また図 4.47(e) に重心の軌跡を示す。図に示すように台車運動に変化が起こるのは台車重心が変位ガイドウェイに入った 0.135sec 後である。横方向は変位ガイドウェイの中心である $y = 0.01\text{m}$ を中心にして振幅約 0.01m で振動し、周期は初期変位を与えた場合の結果 (図 4.42(b)) と同じく 0.6sec である。またローリング運動には横方向変位に対応する 0.6sec の振動と他の運動の影響による 0.2sec の振動が見られる。上下運動は振幅は約 0.5cm となっており、ヨーイング運動以外の運動は図 4.42 とほぼ一致している。ヨーイング運動の振幅が異なるのは変位ガイドウェイに入るときの推進力によるステップトルクによるものであり、これについては後に述べる。図 4.47(e) の軌跡よりこの場合もダンピングの不足により、運動は発散していることが分かる。



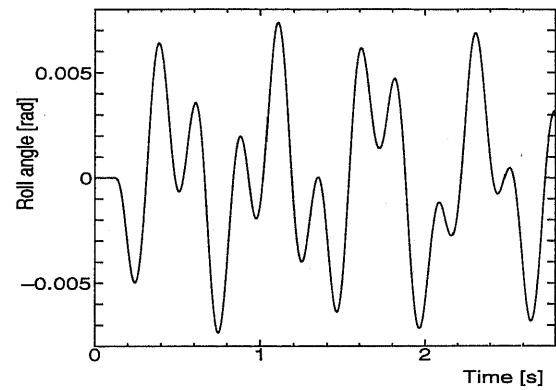
(a) 台車重心の左右運動



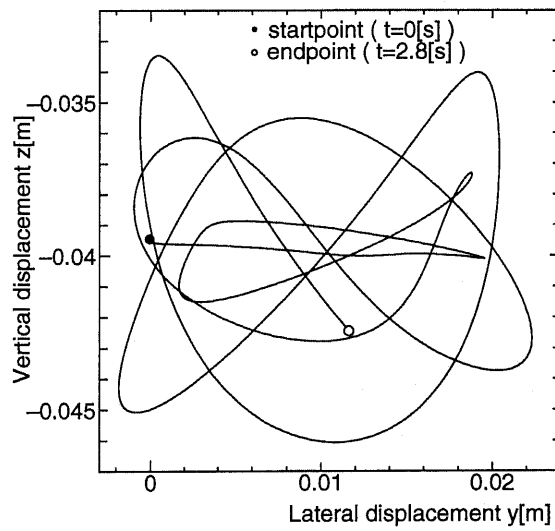
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ヨーイング角の変化



(d) 台車ローリング角の変化

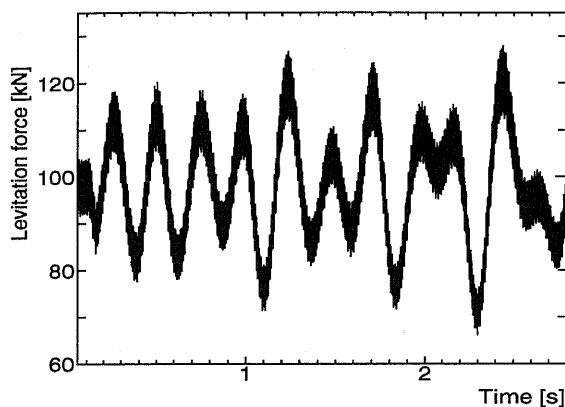


(e) 台車重心の軌跡

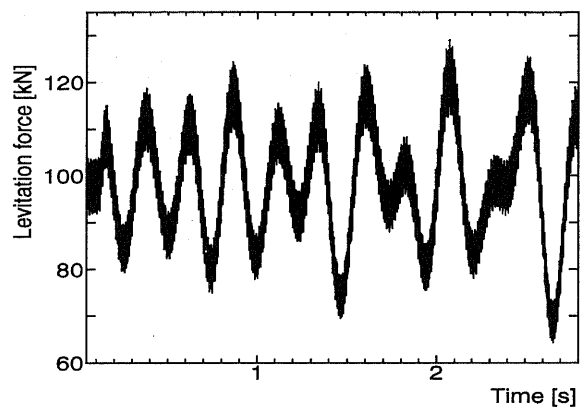
図 4.47: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車運動

図 4.48 にガイドウェイにステップ状の変位が起こった場合の浮上力変化を示す。台車の先頭 SC コイルが変位セクションにさしかかる $t=0.12\text{sec}$. 付近で浮上コイルから離れる進行方向左側の浮上力が約 15kN 低下し、右側が約 15kN 増加する。この左右の浮上力差は台車へのローリングトルクとなる。その後は台車の位置変動による浮上力の変化が始まり、台車運動が発散するために時間の経過とともに変動が大きくなる。浮上力の平均値は片側約 100kN であるが、変動幅は $60\text{kN}\sim 130\text{kN}$ と大きい。

図 4.49 にガイドウェイにステップ状の変位が起こった場合の案内力変化を示す。台車の先頭 SC コイルが変位セクションにさしかかる $t=0.12\text{sec}$. 付近から案内力変動が見られ、浮上コイルから離れる左側が約 15kN 減少し、接近する右側が約 20kN 増加する。この案内力差は台車へのヨーイングトルクとなる。その後は主に横方向運動とローリング振動による案内力の変化が始まり、時間の経過とともに変動が大きくなる。

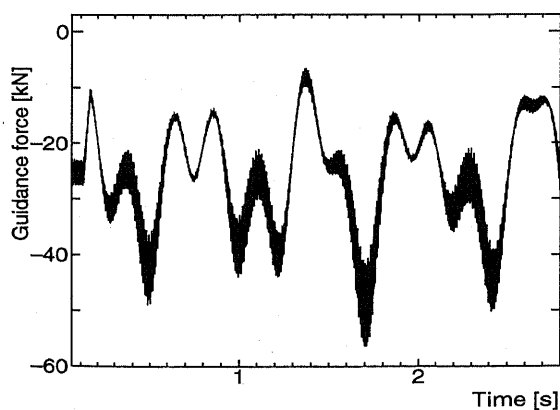


(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)

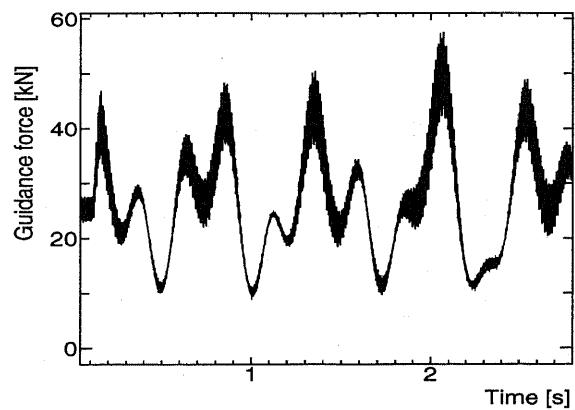


(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.48: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の浮上力変化



(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)

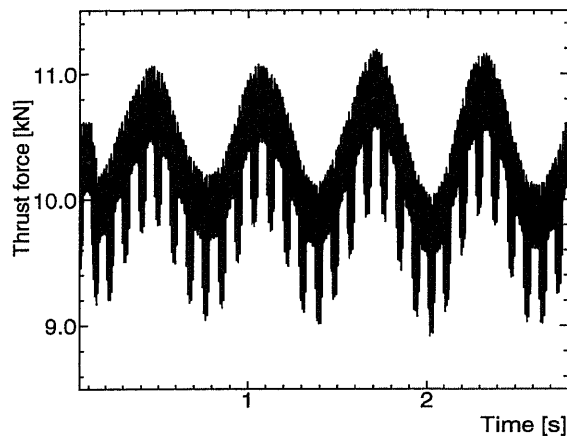


(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

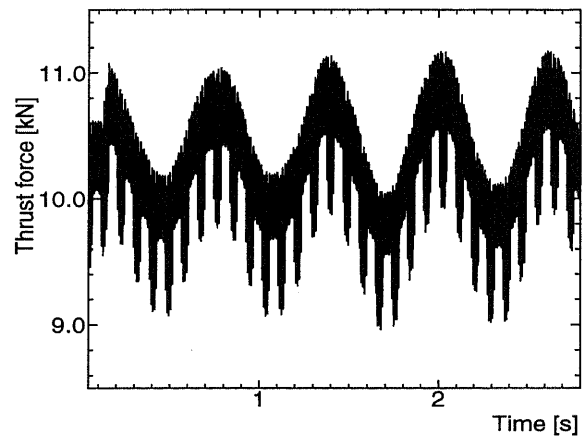
図 4.49: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の案内力変化

浮上力と案内力ともにガイドウェイ変位後は台車に初期変位を与えた場合と同じ傾向にあり、台車運動が同じ傾向にあることが確認できる。

図 4.50 にガイドウェイにステップ状の変位が起こった場合の推進力変化を示す。ここで台車が変位ガイドウェイに入る $t=0.12\text{sec}$ 付近でガイドウェイ変位による変動がはっきり見られ、左側は推進力がステップ状に約 5% 低下し、右側は約 5% 上昇する。ヨーイング運動の傾向が台車に初期変位を与えた場合と異なり、振動の振幅が大きいのはこの推進力によるステップ状のヨーイングトルクのためである。この後は図 4.47(a) の横方向運動に対応して推進力が変動し、台車運動の発散とともに推進力の変動分が大きくなる。



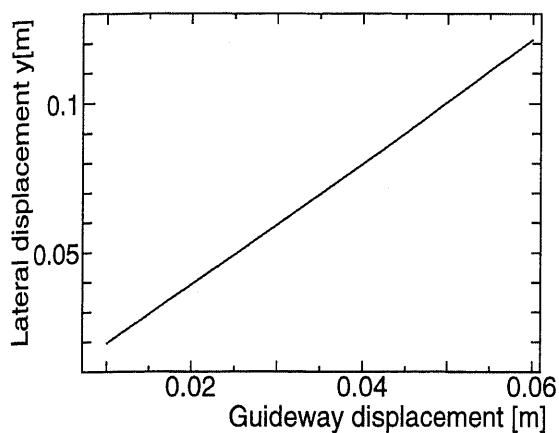
(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)



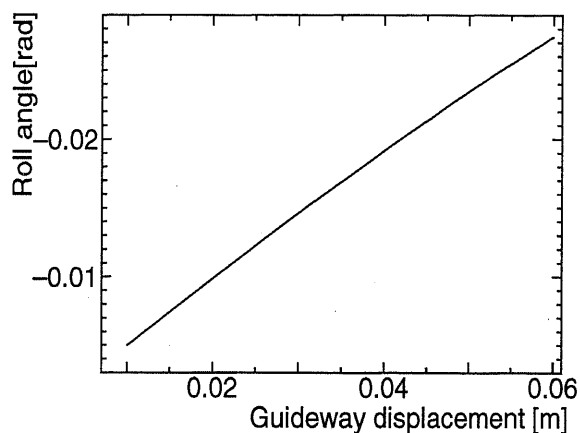
(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.50: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の推進力変化

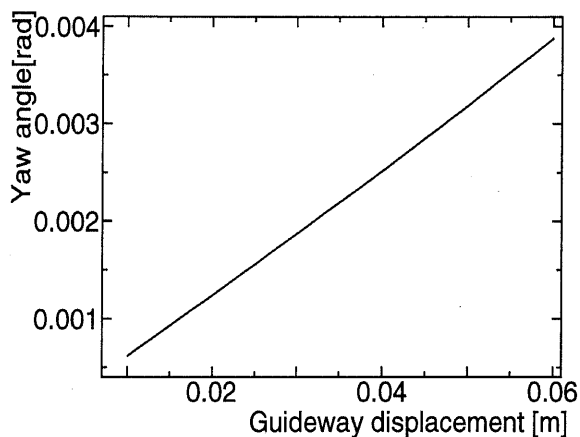
次に台車変位のガイドウェイ変位量依存性について検討する。図 4.51 に台車が変位ガイドウェイに入った直後の台車の横方向変位、ローリングそしてヨーイング角の変位極大値のガイドウェイ変位依存性を示す。これは図 4.47 では横方向は $t=0.48\text{sec}$ 付近、ローリングおよびヨーイングについては $t=0.25\text{sec}$ 付近の値になり、ガイドウェイの変位量に関わらずほぼ同じ位置で極大値をとる。そして運動も同じ傾向を示すので、変位ガイドウェイに入った直後の極大値のみについて示した。ガイドウェイの変位量 Δy は $0.01\text{m} \sim 0.06\text{m}$ まで 0.01m ごとに計算を行っている。横方向変位はガイドウェイ変位量にほぼ比例し、振幅は Δy と等しくなっている。これは第 3 章で得られた案内力が横方向変位にほぼ比例するという結果とも一致する。ローリングについては Δy との関係は横方向変位に対して非線形性のある浮上力の影響があるため、若干の非線形性が見られるが、ほぼ線形である。また、ヨーイングについてはトルクは案内力の影響のみであるため、 Δy に対して線形性が見られる。



(a) 横方向変位



(b) ローリング角



(c) ヨーイング角

図 4.51: 変位ガイドウェイに入った直後の変位極大値のガイドウェイ変位量に対する依存性

以上ガイドウェイにステップ変位が起こった場合についてまとめると、台車の変位ガイドウェイに入る時に、浮上案内力、推進力にステップ状の変化が起こる。推進力はその際に5%の変動を受ける。台車はガイドウェイの変位 $y=0.01\text{m}$ を中心にして、振幅 1cm で振動運動する。運動は台車に初期変位を与えた場合とほぼ一致するが、変位ガイドウェイに入るときに案内力と推進力の左右の力の違いによるヨーイングトルクが加わるために、ヨーイング運動の振幅が約2倍と大きくなる。また、ガイドウェイの変位量に対して各台車変位は線形の関係があることが示された。

次にガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合について検討する。ガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合の解析モデルを図4.52に示す。

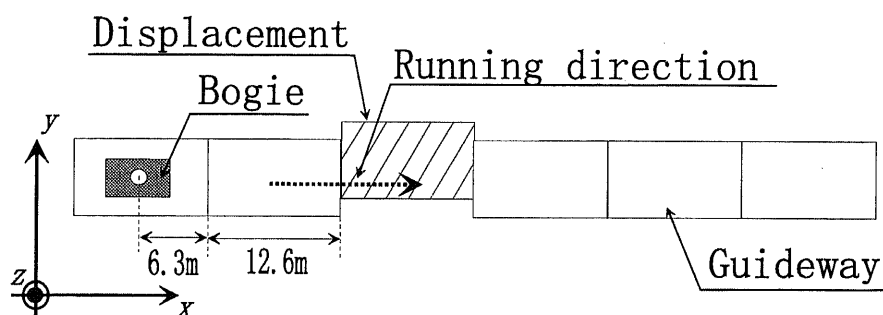
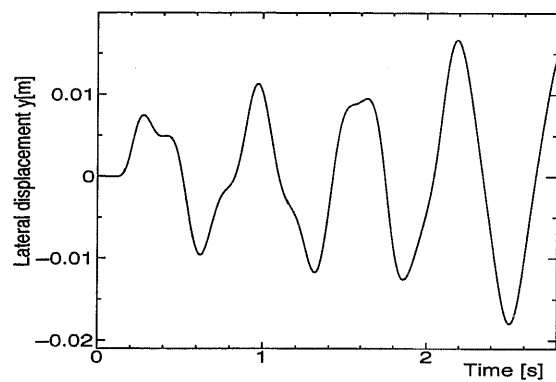


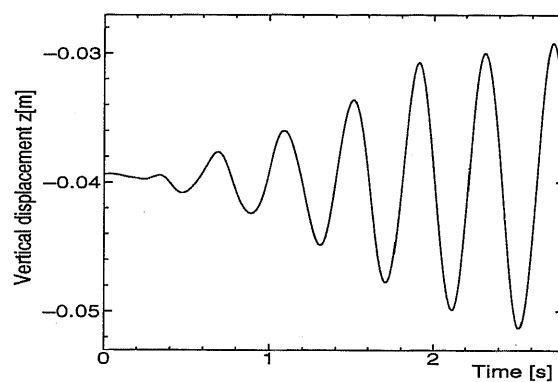
図 4.52: ガイドウェイの1セクションに変位が起こった場合

図4.53に1つのガイドウェイだけに変位が起こった場合の台車運動を示す。3つ目のセクションのみ横方向に0.01m変位する。他の計算条件は図4.47と同じであり、台車走行速度 $v_x=140\text{m/s}$ で $t=0.045\text{sec}$ まで進行方向に一定速度で移動し、その後自由運動に入る。台車重心は0.135sec後(18.9m)に変位したガイドウェイに入り、その後0.09秒後(12.6m)に再び正常なガイドウェイに戻る。

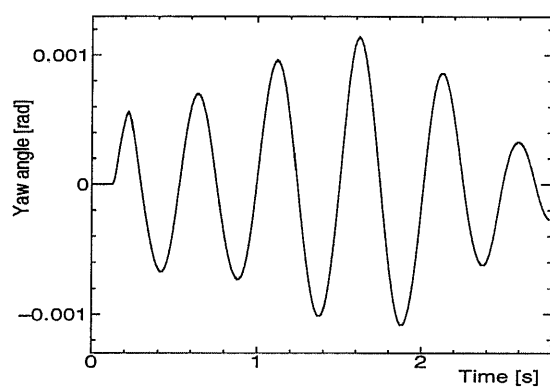
図4.53(a),(b),(c),(d)はそれぞれ台車重心の y 座標、 z 座標そしてヨーイング角、ローリング角の時間変化を示す。また図4.53(e)に重心の軌跡を示す。1セクションだけに変位が起こった場合には、異常セクションから正常セクションに戻るときにもう一度 $\Delta y=-0.01\text{m}$ の外乱を受けることになる。よって図4.53(a)に示すように $t=0.12\text{sec}$ での最初のガイドウェイ変位により横方向変位が発生し、 $t=0.22\text{sec}$ 付近で再び正常なガイドウェイに戻るために横方向変位の増加が止まり、 y の負の方向に移動しはじめる。上下運動はステップ変位を与えた場合とほぼ同じ傾向を示しているが、振幅は2倍の約1cmとなり、ステップ変位を外乱を2回受ける影響が出ている。またローリング運動については横方向運動に対応した周期約0.6secの振動と他の運動の影響も入った周期約0.2secの振動成分が見られ、ステップの場合と同じ傾向を示している。しかし、上下運動の振幅が増加しているため周期が0.2secの振動成分の割合が増加し、全体の振幅も約0.001radと2倍程度見られる。また図4.53(e)の軌跡よりこの場合も運動は発散していることが分かる。



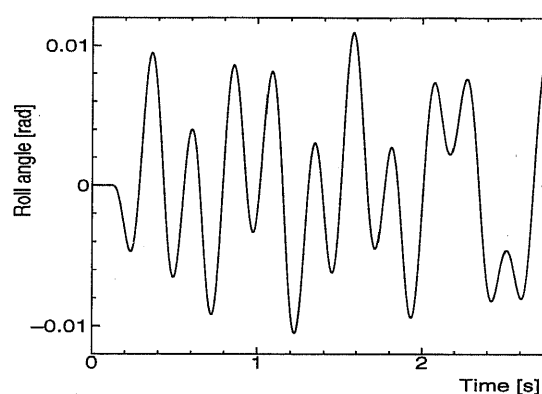
(a) 台車重心の左右運動



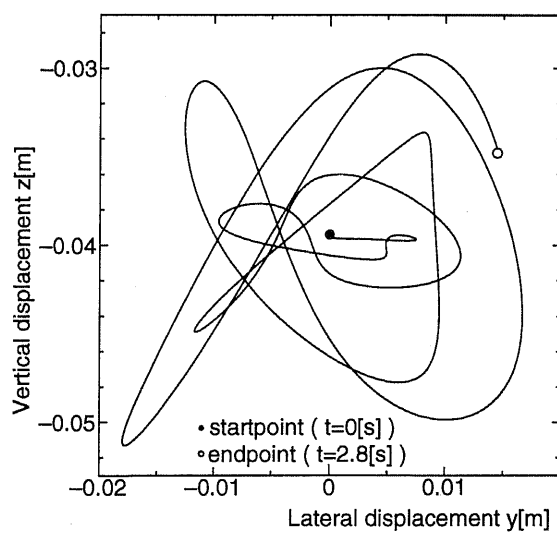
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ヨーイング角の変化



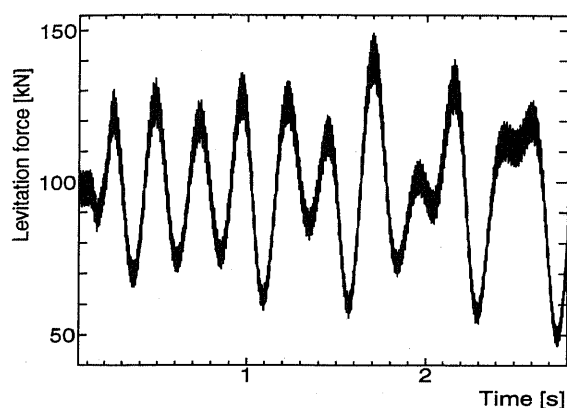
(d) 台車ローリング角の変化



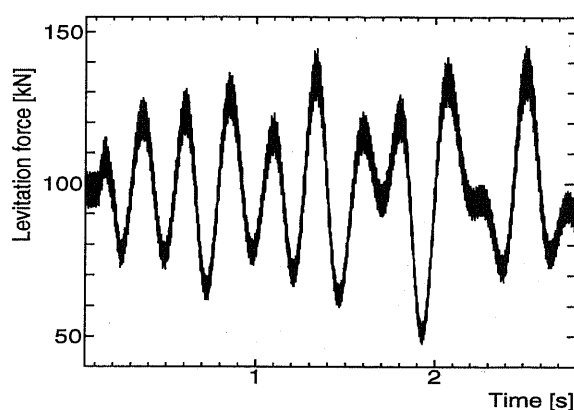
(e) 台車重心の軌跡

図 4.53: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車運動

図 4.54 にガイドウェイの 1 セクションだけに変位が起こった場合の浮上力変化を示す。台車の先頭 SC コイルが変位セクションにさしかかる $t=0.12\text{sec}$ 。付近から変動が見られ、浮上コイルから離れる進行方向左側の浮上力は低下し、右側は増加する。その後 0.09sec 後に正常なセクションに戻る。外乱を 2 回受けることで上下振動およびローリング変位が大きくなるため、浮上力変動はステップ状変位の場合より大きく、 $\pm 50\%$ まで達する。



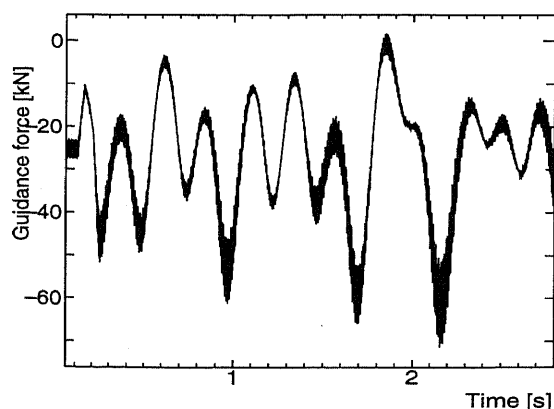
(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)



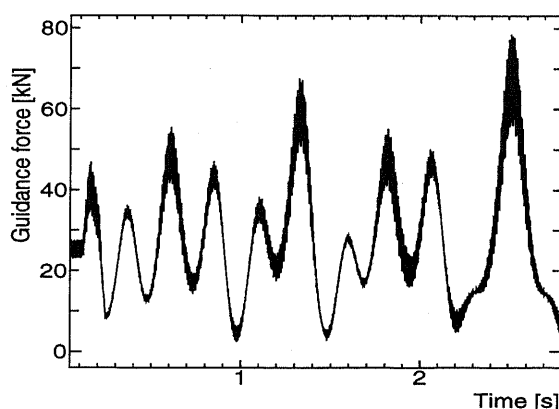
(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.54: ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の浮上力変化

図 4.55 にガイドウェイの 1 セクションだけに変位が起こった場合の案内力変化を示す。台車の先頭 SC コイルが変位セクションにさしかかる $t=0.12\text{sec}$ 。付近から変動が見られ浮上コイルから離れる進行方向左側の案内力は低下し、右側は増加する。振動の傾向自体はステップ状変位の場合と同じだが、台車の振動運動が大きくなっているため変動幅はこちらの方が大きく、進行方向左側は最大 -70kN 、右側は 80kN に達する。



(a) 進行方向左側 ($y+$ 側)



(b) 進行方向右側 ($y-$ 側)

図 4.55: ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の案内力変化

図 4.56 にガイドウェイの 1 セクションのみが変位した場合の推進力変化を示す。ステップ状の変位と同様に $t=0.13\text{sec}$ 付近でガイドウェイ変位による変動がはっきり見られ、左側は推進力がステップ状に約 5% 低下し、右側は約 5% 増加する。さらに正常セクションに戻る $t=0.22\text{sec}$ 付近では反対に左側が約 5% 増加し、右側は約 5% 低下する。その後は図 4.53(a) の横方向運動に対応して推進力が変動する。上下振動やローリング振動の振幅が約 2 倍であり、SC コイルの上下変位が大きいものにも関わらず、変動の大きさがステップ変位した場合 (図 4.50) とあまり変わらない。これは図 4.2 と 4.3 で示したように、LSM 推進力の上下変位依存性は横方向依存性の 1/10 程度であり、変動分が小さいからである。

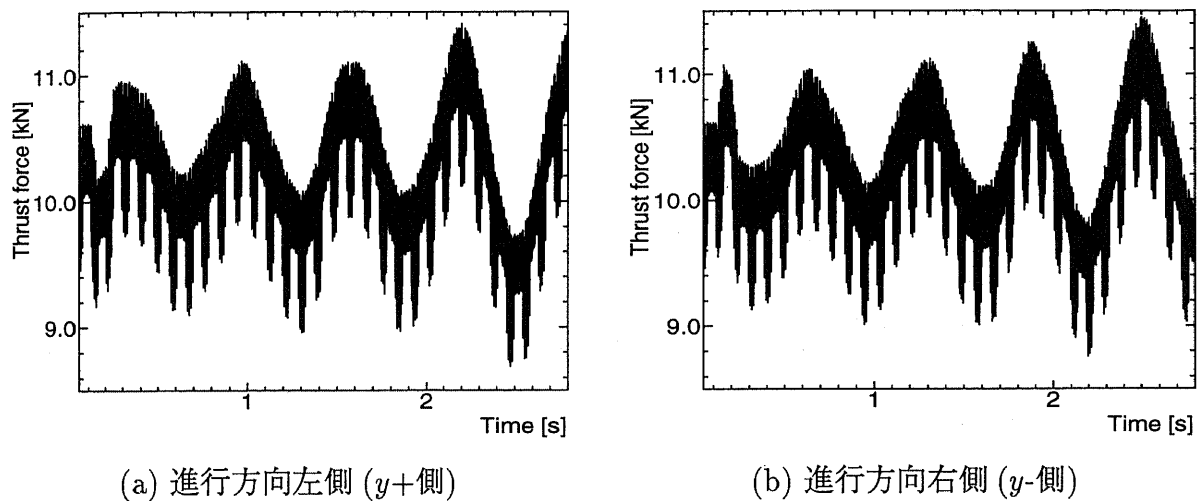


図 4.56: ガイドウェイの 1 セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の推進力変化

以上ガイドウェイの 1 セクションに変位が起こった場合についてまとめると、台車は変位ガイドウェイに入る時と、正常ガイドウェイに戻る時に 2 回の変位を受けることになる。変位ガイドウェイを通過して 0.09sec 後に正常ガイドウェイに戻るので、台車は 0.09sec ステップ外乱をけた形になり、横方向には $y=0$ を中心に運動する。また 2 回外乱を受けているので上下振動やローリング運動の振動分は大きくなる。またローリング変位が大きくなったために SC コイルの上下位置変動が増加し、浮上力の変動は 50% にも達する。

4.4.4 台車に外乱が加わった場合の走行特性のまとめ

ここでは、台車に横方向の外乱が加わった場合の走行特性について述べた。そして次のような結果を得た。

- 横方向の外力を受けた場合
 - － 最大横方向変位は、その外力の大きさにほぼ比例する。
 - － 横方向変位とローリング変位には強い相関があり、ローリング変位にも同様の特性がある。そして、横方向運動とローリング運動の周期は一致する。
 - － 台車の横方向位置が変化することで台車の左側と右側で推進力のバランスが変化し、これはヨーイングトルクとなって台車運動に影響する。
- ガイドウェイに横方向変位が起こった場合
 - － 台車の最大横方向変位は、ガイドウェイ変位の大きさに比例する。
 - － 横方向変位とローリング変位には強い相関があり、ローリング変位にも同様の特性がある。しかし、ガイドウェイ変位の場合には横方向振動の周期より小さい成分が含まれる。これは横方向振動以外の上下振動やヨーイング振動が大きいためである。
 - － 外力を受けた場合と異なり、変位ガイドウェイに突入する際にステップ状の力だけではなく、トルクも加わる。その結果、振動運動は外力が加わった場合よりも大きくなり、浮上力や案内力の変動が増加する。さらにその変動が振動運動を増加させて、台車片側の浮上力の変動幅は 60～130kN(正常値 98kN) に達する。
 - － ガイドウェイの 1 セクションのみが変位した場合は、変位ガイドウェイに入るときと、正常ガイドウェイに戻る時で、等価的にガイドウェイのステップ変位が 2 回加わることになる。よってこの場合が外乱の影響が最大になる。

表 4.1 に各外乱を受けた後の各電磁力の平均値を示す。表中の左右は台車の左側、右側の値であることを示している。外乱により台車位置は右側に移動するので、台車の右側がガイドウェイ側壁に接近、左側は離れることになる。

表 4.1: 各外乱時における各電磁力の平均値

	浮上力変動	案内力変動	推進力変動
$F_{ext,y} = 0.1Mg$ の外力	10%～15%	左-40%, 右+60%	左-8%, 右+8%
ガイドウェイ 0.01m 変位 (ステップ変位)	左-15.3%, 右+15.3%	左-60%, 右+80%	左- 5%, 右+5%

注: ガイドウェイ変位が 1 セクションの場合、振動振幅は 2 倍になる。

4.4.5 台車モデルによるカーブ走行特性の解析

台車モデルを用いてカーブ走行時の走行特性を示す [27]。図 4.57 にカーブのガイドウェイモデルを示す。図に示すようにカーブ区間はセクション構造をとるガイドウェイが折れ線状に配置されて構成される。台車は 18.9m(1.5 セクション) 直線区間を進んでから、カーブ区間に入る。カーブの曲率半径 R_m は 8000m であり、これは新実験線での浮上走行区間における最小半径である。ガイドウェイには $y-z$ 平面でカント角が設定され、曲率半径 $R_m=8000\text{m}$ において 0.1745rad (10°) となる。そして実験線にはカーブ区間の前に緩和曲線区間が設けられ、曲率半径を減少させカント角を増加させている。

ここでは台車モデルを用いて次の 3 つの場合について解析する。

- カント角がない場合
- カント角がある場合
- 緩和曲線区間がある場合

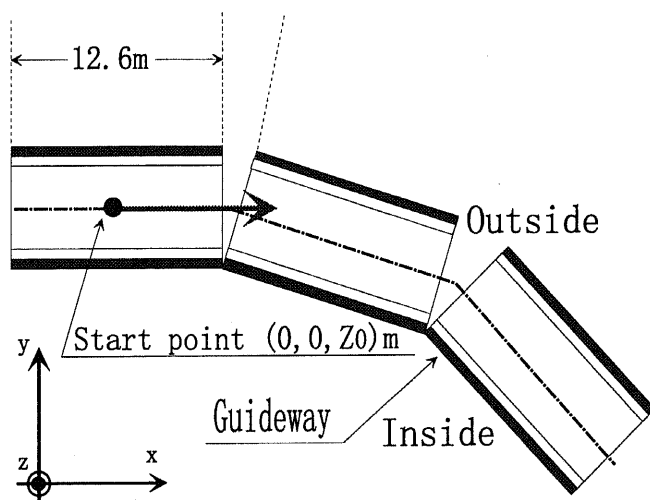


図 4.57: カーブ区間解析モデル

○カントのない場合

図 4.58 にカント角のない場合のカーブのガイドウェイ形状を示す。

図 4.59 に台車がカーブ区間を走行する際の運動を示す。台車は 18.9m 直線区間を $v_x=140\text{m/s}$ で走行し、カーブ区間に入る。地上に固定した絶対座標系ではガイドウェイに対する変位が分からず、特に横方向振動運動を見ることができない。そこで、図中の値はガイドウェイに固定した相対座標系で表しており、台車重心が含まれるガイドウェイについての相対座標となっている。よって座標系は時間とともに変化している。

図 4.59(a)～(e) はそれぞれ台車の横方向振動、上下運動、ピッチング運動、ヨーイング運動およびローリング運動を示す。ここでヨーイング角についてはガイドウェイの方向角

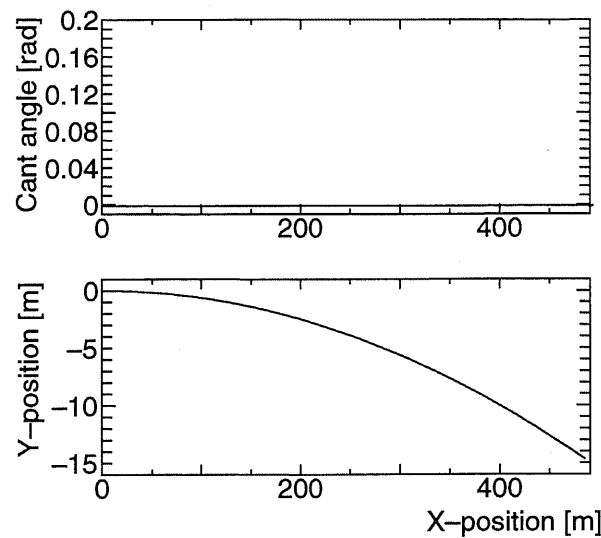
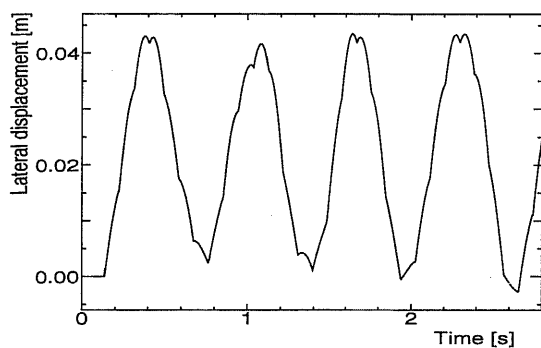
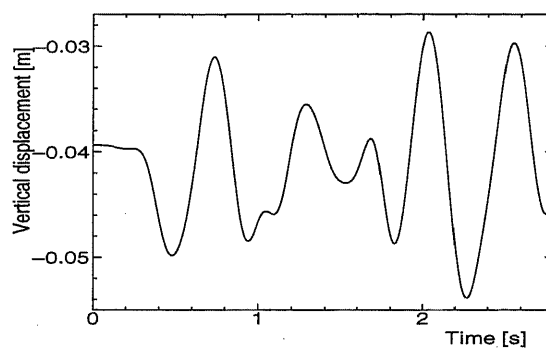


図 4.58: カーブ区間形状 (カント角なし)

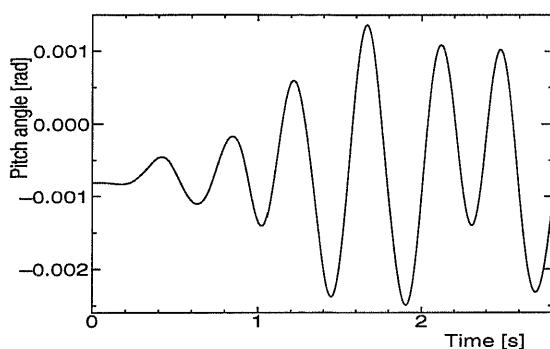
を引いた相対角度となっている。図 4.59(f) に $t=0\sim 2.8\text{sec}$ までの台車重心の軌跡を示す。横方向振動の最大変位は約 4cm であり、これにより壁に接触することはないといえる。図中に見られる小さな変動分、例えば $t=0.6\sim 0.8\text{sec}$ にかけて、変位の変化率が不連続な点が見られるが、これはガイドウェイのセクション間の継目によるものである。座標系の基準としているガイドウェイが図 4.57 に見られるように不連続に配置されており、台車がガイドウェイを通過するごとに座標系が切り替わるため、図中ではこのような変位の変化率が不連続な点が見られる。実際の運動では、このような振動要素は含まれていない。大きな振動の周期は案内力特性によるものであるから、ガイドウェイの継目には関係しない。左右振動に伴い浮上力変動が起きるので、上下振動も見られる。ヨーイング角についてはほぼ一定の振動を繰り返している。図中に見られる高調波成分は、ステップ状に変化しているガイドウェイの方向角との差をとったために見られるものであり、実際の運動にはこのような高調波振動は含まれない。ローリングについては、横方向外力を加えた場合と同様に、台車が平均約 2cm カーブ外側に押し出されるため、ローリングトルクが発生し、平均約 0.015rad のローリング角が生じる。横方向変位と比較すると振動周期が一致していることが分かる。上下振動による影響も付加されているため、横方向振動と対応していない振動成分も含まれている。このローリング角はカント角として働く。ここではガイドウェイのカントは考えていないが、この EDS システムでは横方向変位によりローリング角が生じるため、カーブ区間の設計においては走行時に起こるローリング角の増加分を考慮してカント角を決定する必要がある。図 4.59(f) の重心軌跡より振動が発散傾向にあるが、この範囲ではガイドウェイに接触することはない。



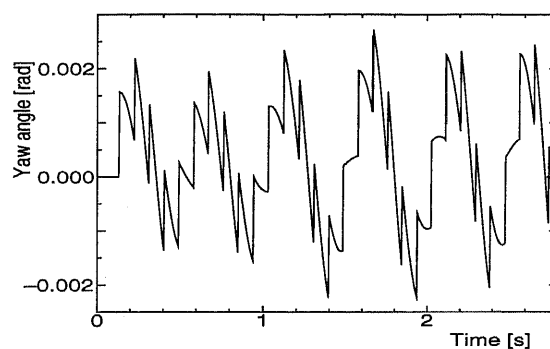
(a) 台車重心の左右運動



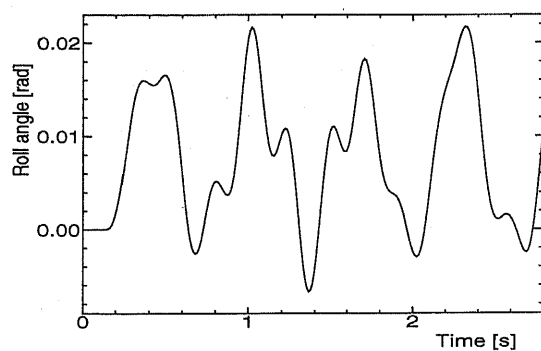
(b) 台車重心の上下運動



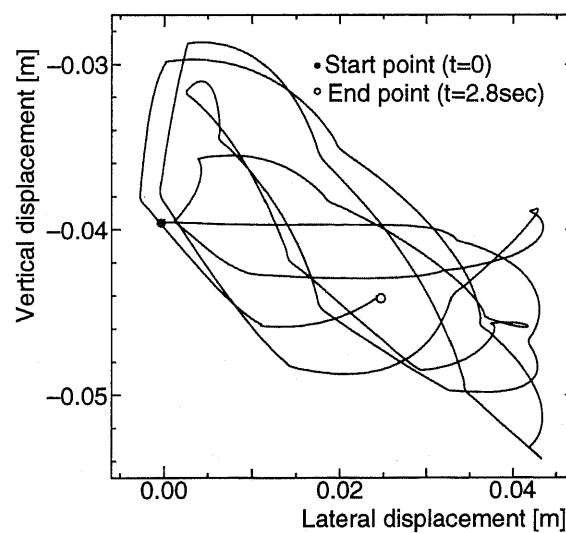
(c) ピッチング運動



(d) ヨーイング運動



(e) ローリング運動



(f) 台車中心の軌跡

図 4.59: 台車がカーブを通過する際の運動 (ガイドウェイ固定座標系、カントなし)

台車のカーブへの追従性を見るために、図 4.60 に絶対座標系で表現したヨーイング運動を示す。ここにはガイドウェイの方向角も示しているが、ヨーイング方向の運動から、台車はガイドウェイの方向角に追従して回転していることが分かる。

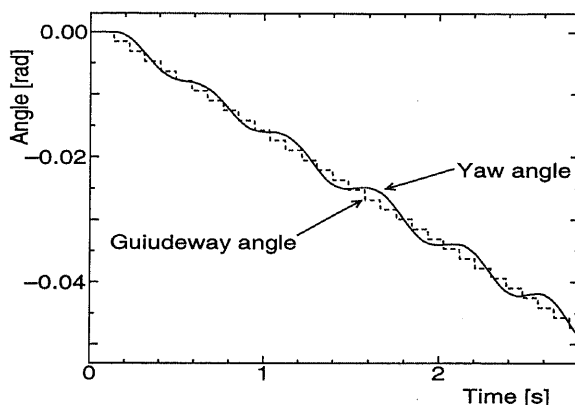
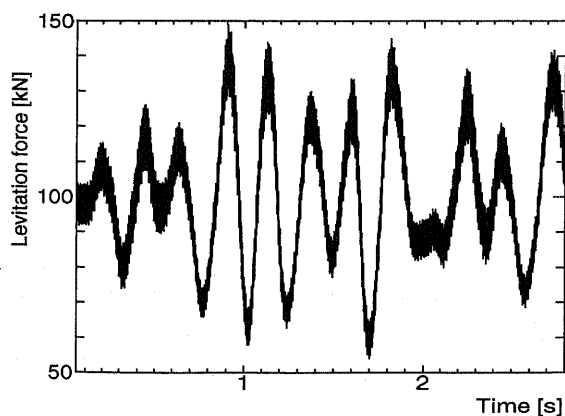
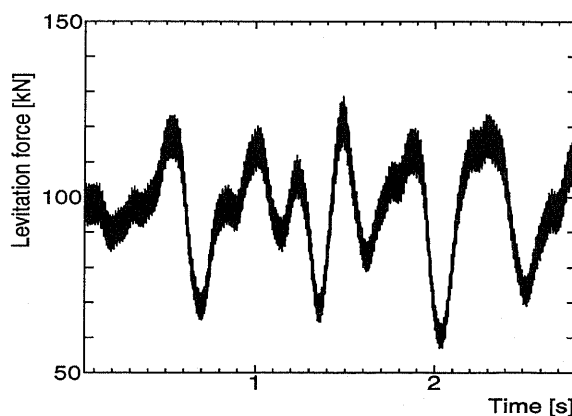


図 4.60: ヨーイング運動 (絶対座標系、カント角なし)

カーブを通過する際の浮上力を図 4.61 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 z_g 方向の電磁力を示している。浮上力の変動はカーブ外側の方が大きく、 $\pm 50\text{kN}$ にも達する。これはカーブ外側の SC コイルが浮上コイルに接近するので位置変動に対する浮上力変化を大きく受けていることを示している。



(a) 進行方向左側 (カーブ外側)

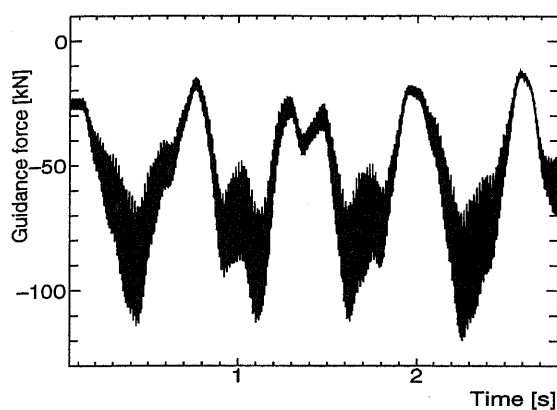


(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

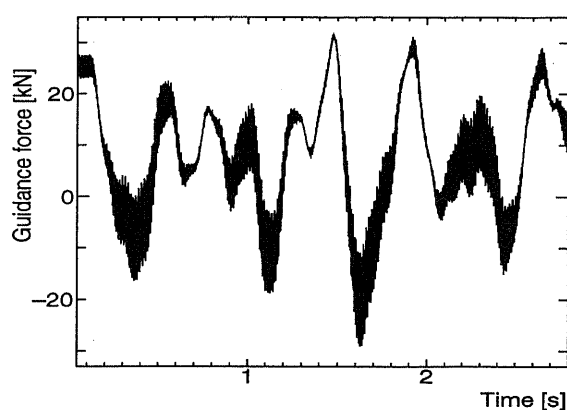
図 4.61: 台車がカーブを通過する際の浮上力 (カントなし)

カーブを通過する際の案内力を図 4.62 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 y_g 方向の電磁力を示している。直線走行時には常に約 25kN の反発力が加わっている。カーブ区間では台車がカーブ外側に変位するため、カーブ外側の SC コイルへの反発力は

平均約-70kN となり内側はほぼゼロとなる。またガイドウェイに接近することで、4章でのべたように相互インダクタンスの位置微分による高調波成分が増加し、浮上コイルピッチによる振動成分が増加している。この影響はヌルフラックス線を通してカーブ内側へも伝達され、カーブ内側の SC コイルの案内力の高調波成分も増加している。



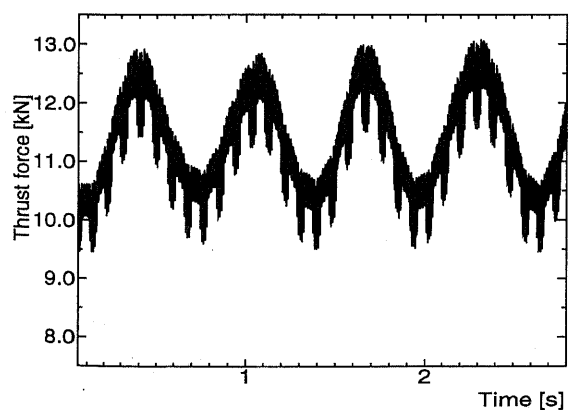
(a) 進行方向左側 (カーブ外側)



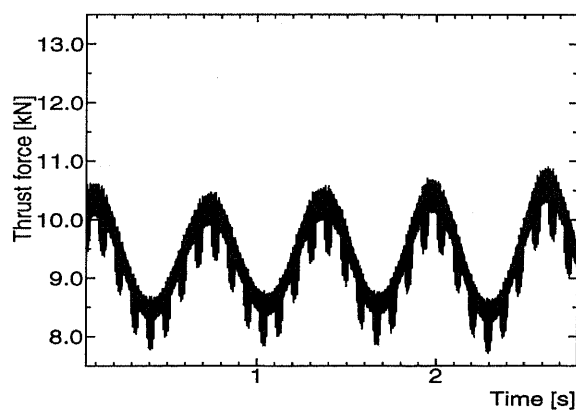
(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.62: 台車がカーブを通過する際の案内力 (カントなし)

カーブを通過する際の推進力を図 4.63 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 x 方向の推進力を示している。台車がカーブ外側に平均 2cm 押し出されるのでカーブ外側の推進力が増加し、カーブ内側の推進力が低下する。変動分はかなり大きく 2kN 以上の変動があり、外側は通常推進力の平均 10% の増加、内側は低下となる。



(a) 進行方向左側 (カーブ外側)



(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.63: 台車がカーブを通過する際の推進力 (カントなし)

しかし、これは走行距離の大きくなるカーブ外側の推進力が増加し、カーブの曲がる方向へのヨーイングトルクとなるので、台車のカーブ走行における安定性を増加させる。LSM のヨーイング運動への影響を検討するため、図 4.64 に LSM を駆動している場合と駆動していない場合の台車ヨーイング角を示す。LSM を停止させた場合は推進力がなくなるが、停止後 2sec でも速度低下は 0.5% 程度と微小であるので影響がないとした。図に示すように LSM を駆動している方がヨーイング角の膨らみが小さくなっており、LSM により台車のカーブへの追従性が改善されていることが分かる。

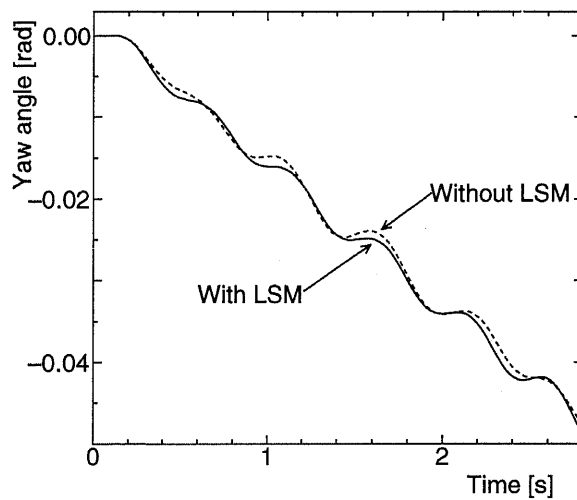
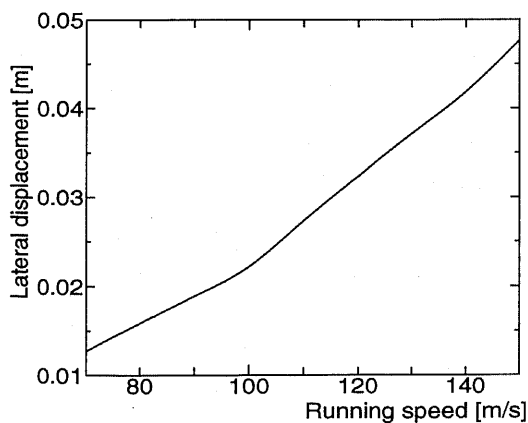
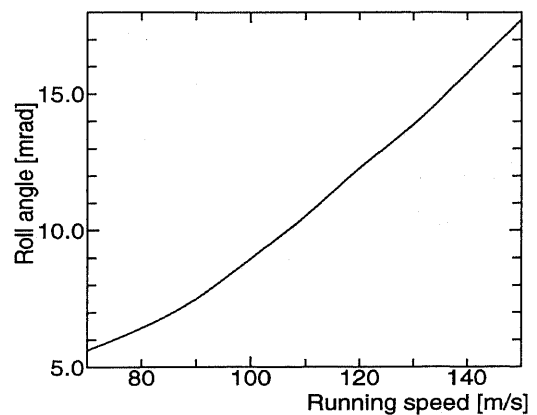


図 4.64: LSM の台車ヨーイング角への影響 (絶対座標系)

次に横方向およびローリング振動の振幅の速度依存性を図 4.65 に示す。これはカーブ区間に入って最初の振動の振幅である。横方向変位は v_x の 2 乗の関数となっており、ローリングについても同様の傾向が見られる。



(a) 横方向変位



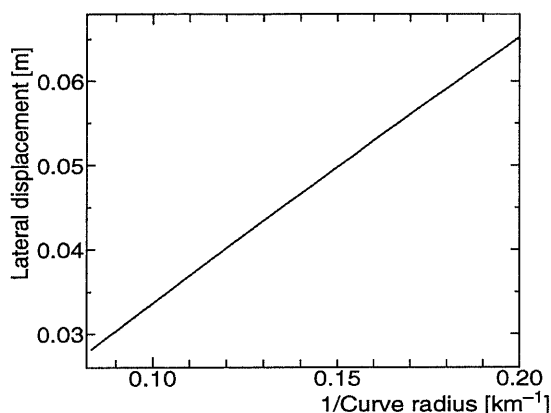
(b) ローリング角

図 4.65: 横方向・ローリング振動振幅の走行速度依存性 (カーブ区間最初の振動周期, $R_m=8000\text{m}$)

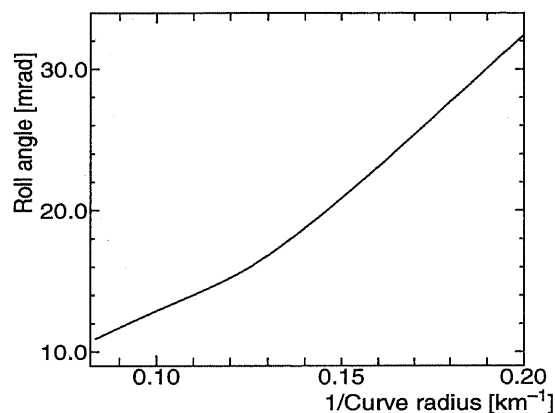
この理由について検討する。カーブを通過する際の遠心力 F_{cent} は台車質量 M 、走行速度 v_x 、曲率半径 R_m を用いて次式で表される。

$$F_{cent} = M \frac{v_x^2}{R_m} \quad (4.7)$$

案内力は横方向変位に対してほぼ比例の関係があり、定数バネに近い特性を持つ。遠心力は v_x^2 に比例するので横方向変位は v_x の2乗の関数となっていると考えられる。また図4.66に一定走行速度 $v_x=140\text{m/s}$ における横方向およびローリング振動の振幅のカーブ曲率半径依存性を示す。横軸は曲率半径の逆数をとっている。ここで各変位はカーブの曲率半径の逆数に対してほぼ比例の関係があり、式(4.7)により遠心力が $1/R_m$ に比例することが説明できる。



(a) 横方向変位



(b) ローリング角

図4.66: 横方向・ローリング振動振幅の曲率半径依存性 (カーブ区間最初の振動周期, $v_x=140\text{m/s}$)

ここではEDSのカーブに対する基本特性を見るために、カント角がない場合について検討した。台車のガイドウェイに対する横方向振動の振幅は約2cmとなり、遠心力に相当する外力を加えた場合の振動とほぼ一致した。この横方向変位のため、平均0.015radのローリング角が発生する。また案内力はカーブ外側が通常の3倍程度になる。推進力もカーブ外側が約10%増加、内側が10%低下するが、一方でこれは台車のカーブへの追従性を改善する。横方向変位のカーブ曲率半径、走行速度依存性については、変位はカーブの曲率半径の逆数に比例し、速度の2乗に比例する。

○カント角がある場合

カーブ区間では列車を安定に走行させるため、また乗客にかかる横方向加速度を均衡させるためカント角をつける必要がある。図 4.67にカント角の様子を示す。本来なら $R_m=8000\text{m}$ で $v_x=140\text{m/s}$ の場合、約 14° のカントが必要だが、この区間で列車が緊急停止し、乗客がガイドウェイを歩行する際を考慮し設計上は 10° とされている。図 4.68 にカント角がある場合のカーブ区間形状を示す。このモデルでは最初から $0.1745\text{rad}(10^\circ)$ のカント角がついている。

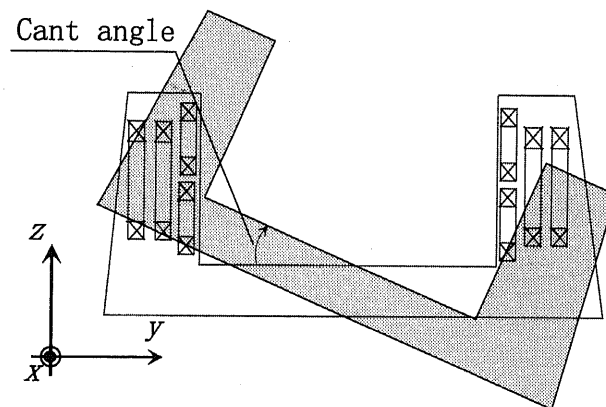


図 4.67: カント角の様子

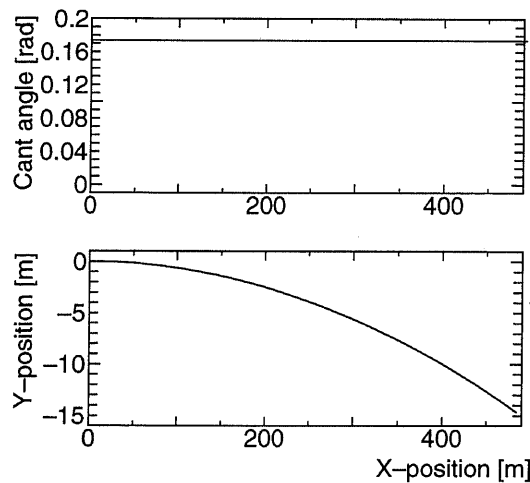
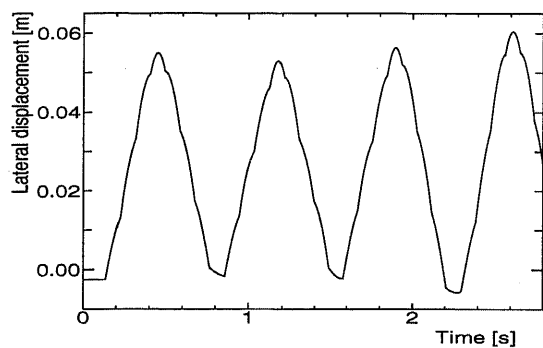


図 4.68: カーブ区間形状 (カント角あり)

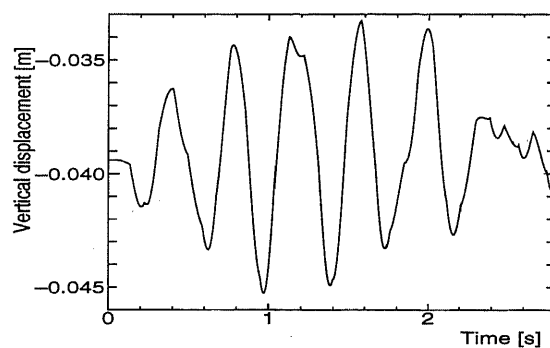
図 4.69にカント角がある場合の台車運動を示す。図 4.69(a)~(e) は、それぞれ台車重心の y 座標、 z 座標、そしてピッチング角、ヨーイング角、ローリング角の時間変化を示し

ている。図 4.59 と同様に台車重心が通過中のガイドウェイに固定した相対座標系についての値を示し、ヨーイング角、ローリング角についてもそれぞれガイドウェイの方向角、カント角を引いた値となっている。図 4.69(f) に $t=0\sim 2.8\text{sec}$ までの台車重心の軌跡を示す。

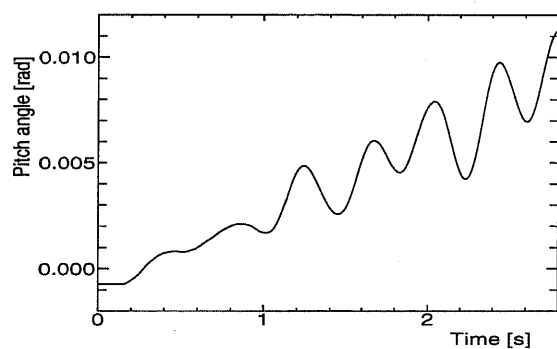
ここでは、カーブに突入する際の緩和曲線区間が十分にあると仮定し、台車初期位置は案内力や浮上力、ローリングトルクなど、すべての力およびトルクが均衡する点 (y, z , ピッチング角, ヨーイング角, ローリング角) = $(-0.01988\text{m}, -0.04135\text{m}, -0.000726\text{ rad}, 0, 0.19362\text{ rad})$ を出発点とした。横方向変位は $5\text{cm}\sim 6\text{cm}$ となっており、平均約 2.6cm の振幅、周期 0.7sec で振動運動する。ピッチング角は増加傾向にあるが、この原因は次のように考えられる。台車がカーブ外側に横方向に変位することで、カーブ外側で前方 2 つの SC コイルが浮上コイルに接近し、浮上力が増加する。その結果台車全体として、前方が上がるピッチングトルクがかかり、ピッチング角が増加する。ヨーイングに見られる高調波成分は先と同じく、ステップ状に変化するガイドウェイの方向角との相対値をとっているためである。ローリング運動では、カント角があるにも関わらずカント角よりも平均 0.028rad 大きいローリング角が出ており、これは 2.6cm の横方向変位により起こるローリングトルクのためである。カントがない場合の台車軌跡 (図 4.59(f)) と比較すると図 4.69(f) は左右変位は約 20% 大きくなっているが、上下変位は約 50% と大幅に減少していることが分かる。これによってカント角をつけたことにより、台車がガイドウェイの底面に沿って平行に運動をしていることが確認できる。



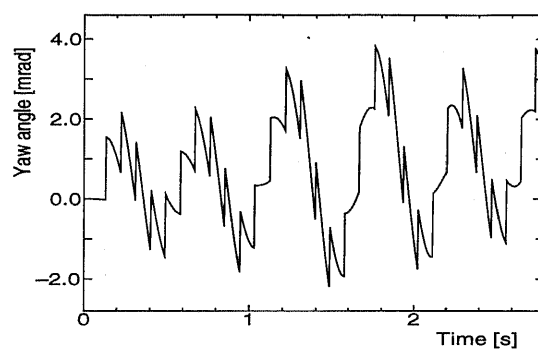
(a) 台車重心の左右運動



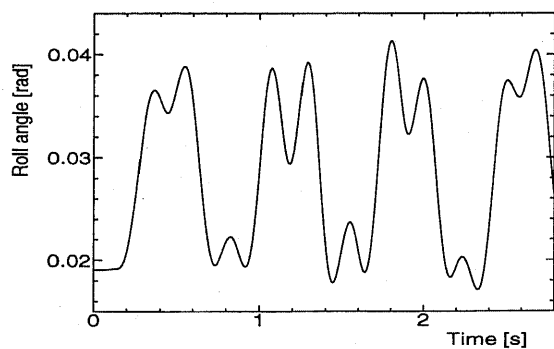
(b) 台車重心の上下運動



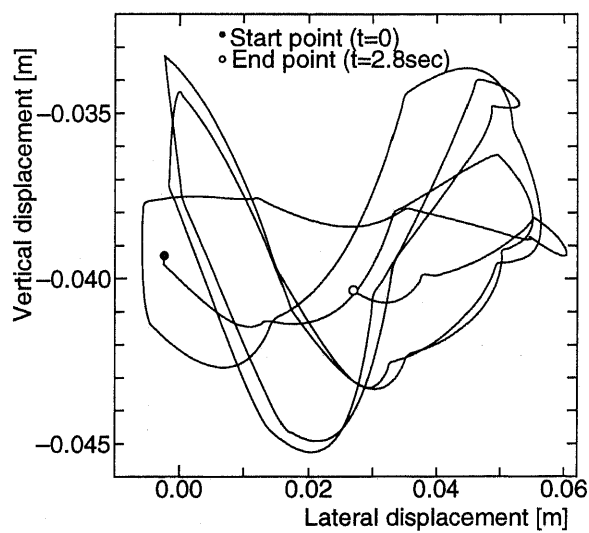
(c) ピッチング運動



(d) ヨーイング運動



(e) ローリング運動



(f) 台車中心の軌跡

図 4.69: 台車がカーブを通過する際の運動 (ガイドウェイ固定座標系、カント角 0.1745rad)

ここで、ガイドウェイに対する相対ローリング角が平均 0.028rad と先のカントがない場合に比べて大きいことから、EDS による電磁力に直接関わる SC コイル中心の位置について検討する。図 4.70 に各コイル中心の上下運動を示す。座標系はガイドウェイに固定した相対座標系で示している。図中 SC1~4 がカーブ外側で SC5~8 がカーブ内側になり、それぞれ番号が小さい方が前方コイルとなる。カーブ外側のコイルが上方に移動し、カーブ内側のコイルが下方に移動しているのが分かる。ここで SC コイルの位置はカーブ内側は平均約 -8cm となり、8 の字浮上コイルの下側に面することになる。逆にカーブ外側は $z=0$ よりも高い位置になり、ローリング角も考慮すると 8 の字浮上コイルの上側に面する。

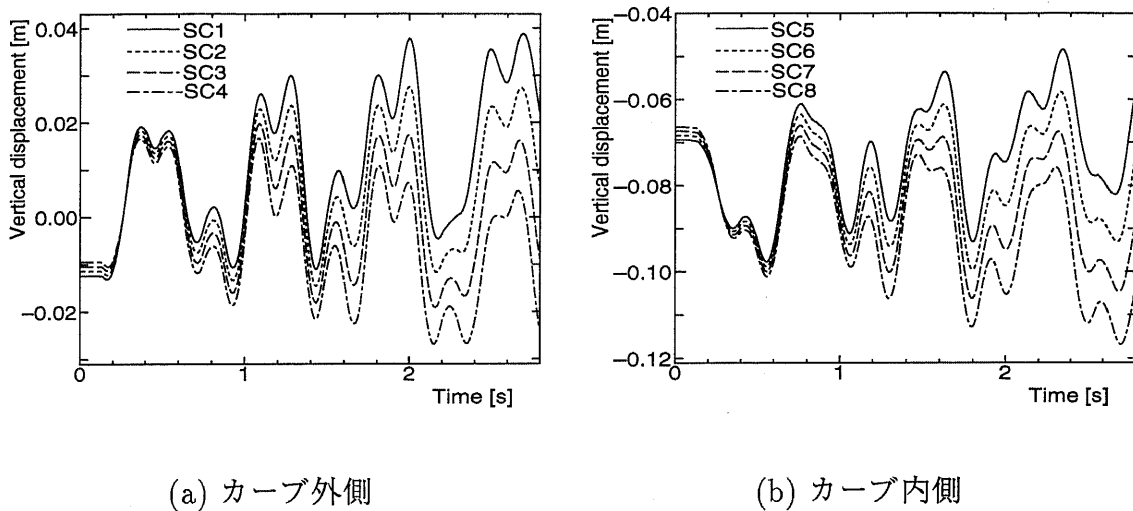


図 4.70: 各 SC コイル中心の上下方向運動 (ガイドウェイ固定座標)

この結果浮上コイルの電流に通常走行とは別のモードが生じることになる。図 4.71 に上図の $t=1.15\sim 1.22\text{sec}$ におけるある浮上コイル電流の様子を示す。Coil 1~Coil 4 は 2 章の図 2.9 に示した浮上コイルで Coil 1,2 がカーブ外側の上下、Coil 3,4 がカーブ内側の上下を示す。この時間はカーブ外側すべての SC コイルが $z=0$ より上方にある。よって、SC コイルが通過することによりカーブ外側では上側コイル、内側では下側コイルにのみ起磁力が発生することになる。その結果図 4.71 に示すように Coil 2 と Coil 3 のみに電流が誘導され、Coil 1 と Coil 4 にはほとんど電流が誘導されないという状態になる。これは EDS による電磁力が Coil 2 と Coil 3 の二つに集中することを示しており、地上側設備の強度上の問題になると考えられる。特に遠心力が加わることからカーブ外側の上方コイル Coil 3 への影響は大きくなり、通常のガイドウェイよりも強度が必要である。

台車のカーブへの追従性を見るために図 4.72 に絶対座標系で示したヨーイング運動およびローリング運動を示す。カーブに入ってから発生するローリング角は約 0.2037rad (11.7°) となり、初期ローリング角より約 0.01rad 大きく、カント角よりも約 0.028rad 大きいローリング角が発生することになる。このときカーブ走行時に台車にかかる加速度の台車に水

平な成分が $0.245g$ となり、重力加速度の台車に水平な成分は $-0.202g$ となる。よって車内の乗客は約 $0.043g$ の加速度を感じることになる。

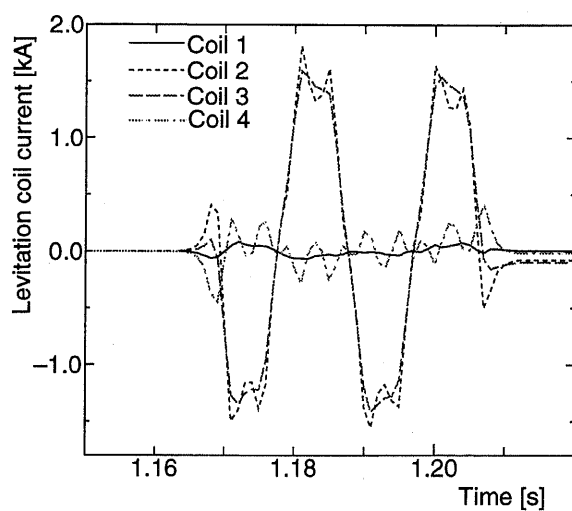
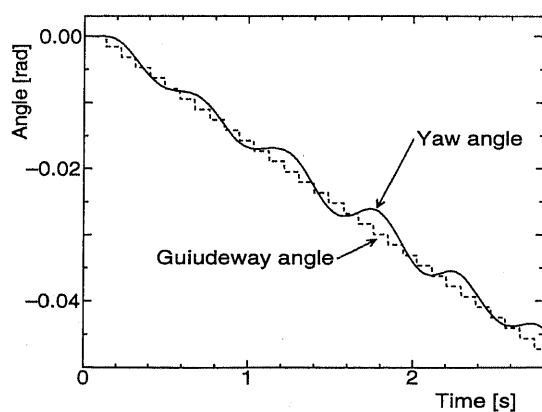
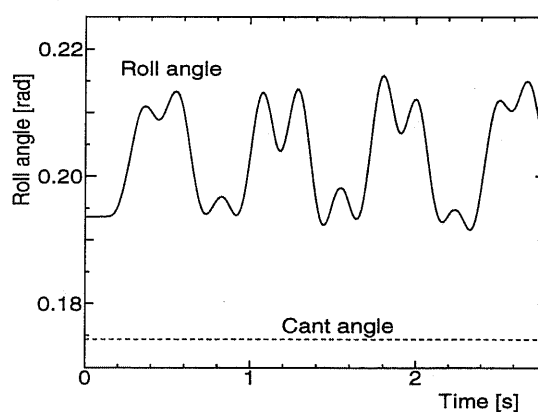


図 4.71: カーブ走行時のある浮上コイル電流の様子 ($t=1.15\sim1.22\text{sec}$)



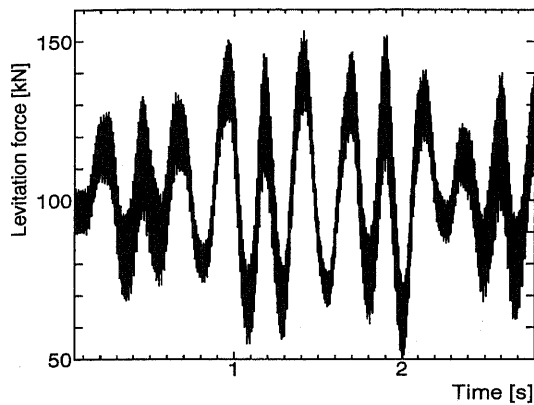
(a) ヨーイング運動



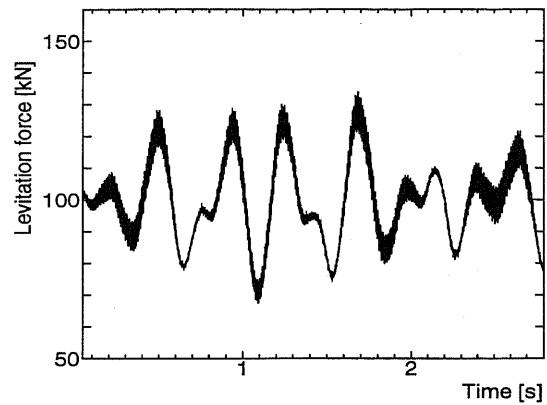
(b) ローリング運動

図 4.72: 台車がカーブを通過する際の運動 (絶対座標系、カント角 0.1745rad)

カーブを通過する際の浮上力を図 4.73 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 z_g 方向の電磁力を示している。カント角がない場合と同様に浮上力の変動はカーブ外側の方が大きい。変動分はカントがない場合と同じく、 $\pm 50\text{kN}$ 程度である。これは上下振動は約 50% 減少しているが、4.69(e) に示すガイドウェイに対する相対ローリング角が大きいいため、SC コイルの変位がカントがない場合と同じになっているためである。



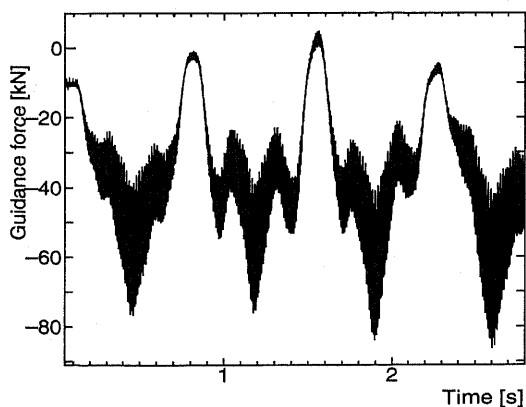
(a) 進行方向左側 (カーブ外側)



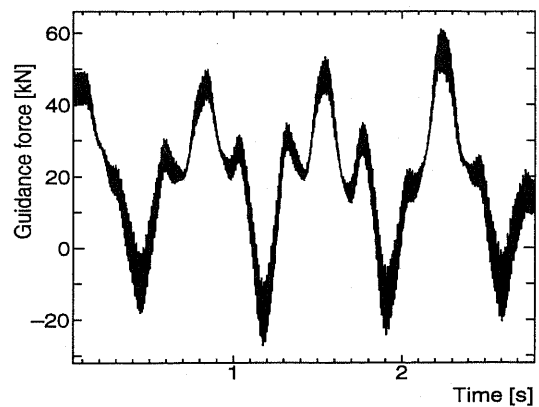
(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.73: 台車がカーブを通過する際の浮上力 (カントあり)

カーブを通過する際の案内力を図 4.74 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 y_g 方向の電磁力を示している。案内力の初期値を見ると、図 4.74(a) に示すカーブ外側の方が -10kN 、図 4.74(b) の内側が 42kN と外側の案内力が小さく均衡していない。これは内側には台車重力のガイドウェイに沿った成分が付加されるため多くの反発力加わるため、全体の系としては均衡している。



(a) 進行方向左側 (カーブ外側)

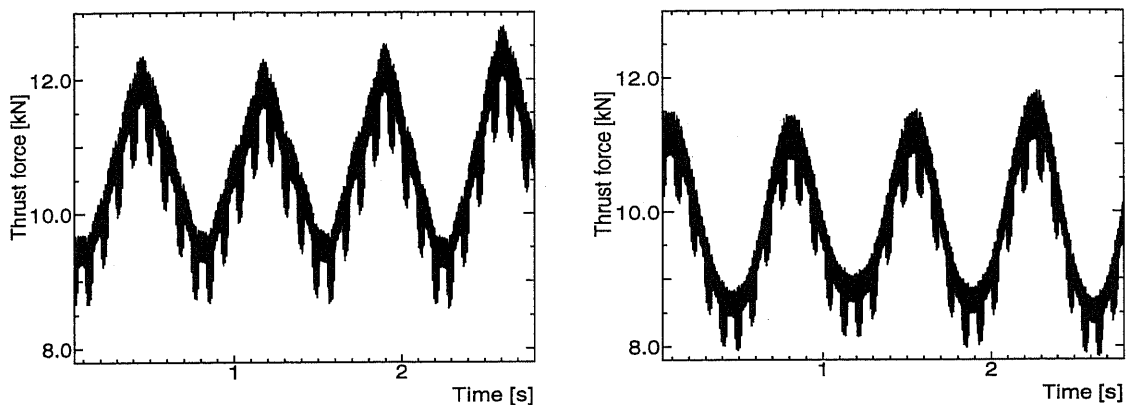


(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.74: 台車がカーブを通過する際の案内力 (カントあり)

またカーブ走行中の案内力の平均値は約45kNと15kNとなっており、カントがない場合には外側に集中していた案内力が分散されていることがわかる。

カーブを通過する際の推進力を図 4.75に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 x_g 方向の推進力を示している。台車がカーブ外側に平均約 2.6cm 押し出されるのでカーブ外側の推進力が増加し、カーブ内側の推進力が低下する。これは走行距離の大きなカーブ外側の推進力が増加し、カーブの曲がる方向へのヨーイングトルクとなるので、台車のカーブ走行における安定性を増加させる。変動分は 2kN 以上であるが、カント角のためにカーブ外側の平均値が約 10.7kN となっているので、最大値が 12kN とカントがない場合より 1kN 低下しており、安定性は向上しているといえる。



(a) 進行方向左側 (カーブ外側)

(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.75: 台車がカーブを通過する際の推進力 (カントあり)

ここでは実際に実験線で用いられる 10° のカント角をつけたカーブモデルについて検討した。左右変位は大きくなったが、上下変位は大きく改善され、台車がガイドウェイの底面に沿って走行していることが分かった。また、案内力がカーブ外側に集中する現象も改善した。このようにカント角をつけることで走行の安定化が見られた。

○緩和曲線区間を含む場合

図 4.76 に解析に用いた緩和曲線およびカーブ区間の形状を示す。カーブ区間の前に 806.4m(64 セクション) の緩和曲線部分があり、この部分でガイドウェイの曲率半径を減少させ同時にカント角 ($y-z$ 平面の角度) を増加させる。ガイドウェイの曲率半径は前のガイドウェイセクションに対して方向角 ($x-y$ 平面の角度) を $2.461 \times 10^{-5} \text{rad}$ ずつ増加させることで変化させる。カント角は前のセクションに対して $2.727 \times 10^{-3} \text{rad}$ ずつ増加させる。最終的に曲率半径は 8000m, カント角は $0.1745 \text{rad}(10^\circ)$ になる。

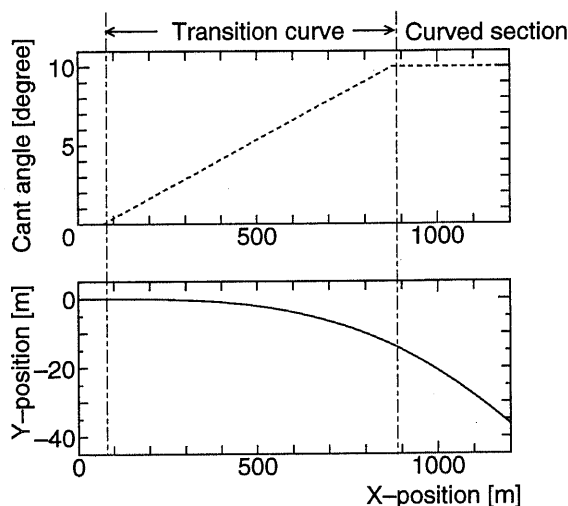
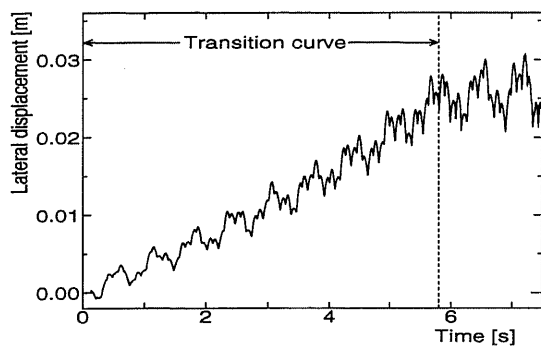


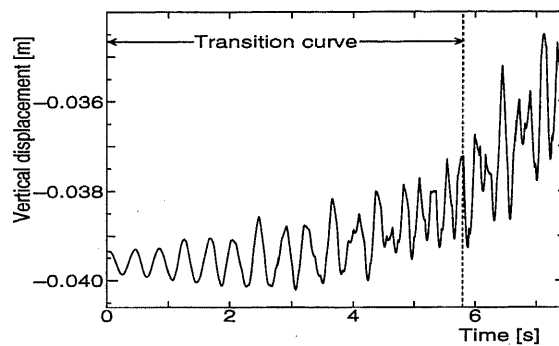
図 4.76: 緩和曲線およびカーブ区間形状

図 4.77 に台車がカーブ区間を走行する際の運動を示す。台車はまず 18.9m 直線区間を $v_x=140 \text{m/s}$ で走行し、緩和曲線区間に入る。図中の値はガイドウェイに固定した相対座標系で表しており、台車重心が含まれるガイドウェイについての相対座標となっている。図 4.77(a)~(e) はそれぞれ台車の横方向振動、上下運動、ピッチング運動、ヨーイング運動およびローリング運動を示す。ヨーイング角およびローリング角についてもガイドウェイに対する相対角度となっている。図 4.77(f) に台車が緩和曲線を通過中の $t=0 \sim 5.75 \text{sec}$ までの台車重心の軌跡を示す。時間の経過とともにカーブの曲率半径とカント角が増加していることが各運動の結果から示されている。

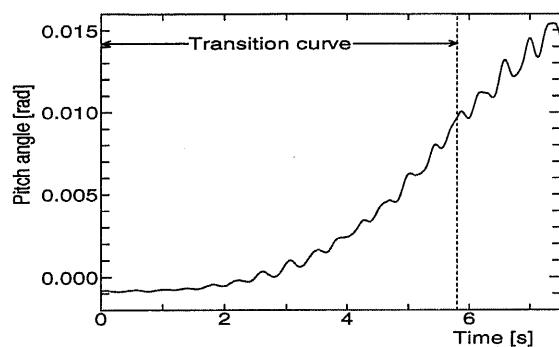
カーブの曲率半径の増加により横方向変位は増加するが、振動運動の振幅は緩和曲線がない場合に比べて小さく、緩和曲線の効果が表れている。また周期 0.09sec. ごとの振動はガイドウェイの継目によるものである。緩和曲線を通過した後にカーブ区間に入るが、そのときの変位は約 2.6cm であり緩和曲線がない場合の結果から得られた横方向振動の中心とほぼ一致する。ピッチング角も増加傾向にある。これはカーブ外側前方の 2 つの SC コイルが浮上コイルに接近し、浮上力が増加することで台車全体として、前方が上がるピッチングトルクが加わるためである。ヨーイング角は横方向変位の増加とともにカーブ方向角への追従性が悪くなる。ローリング角も横方向変位の増加とともに、カント角との差が増加する。そして緩和曲線の終了時点で平均約 $+0.025 \text{rad}$ の増加となり、絶対座標系の値では 0.21rad となり平均値ではカント角がある場合とほぼ一致する。



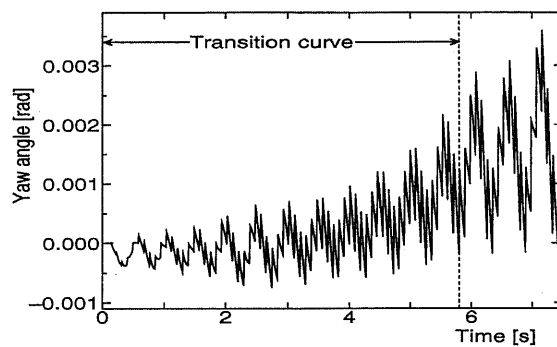
(a) 台車重心の左右運動



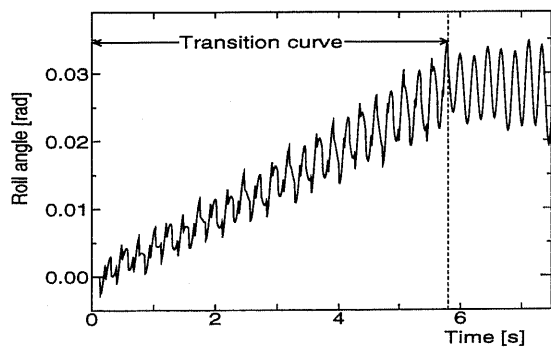
(b) 台車重心の上下運動



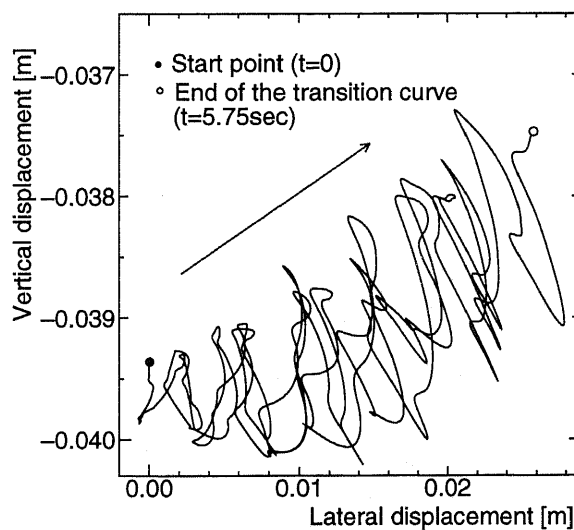
(c) ピッチング運動



(d) ヨーイング運動



(e) ローリング運動



(f) 台車中心の軌跡

図 4.77: 台車がカーブを通過する際の運動 (ガイドウェイ固定座標系、緩和曲線あり)

図 4.77(f) の重心軌跡より曲率半径が小さくなってくると台車がカーブ外側に変位し、上下振動の中心が上昇する傾向がみられる。振動は緩和曲線がない場合と比較すると横方向約 3cm、上下約 3mm とかなり抑えられているが、系のダンピングが小さいので振動は発散傾向にある。

図 4.78 に絶対座標系で表現したヨーイングおよびローリング運動を示す。ここにはガイドウェイの方向角も示しているが、ヨーイング方向の運動から、台車はガイドウェイの方向角に追従して回転していることが分かる。緩和曲線を通して発生するローリング角は約 0.2037rad (11.7°) となり、カント角がある場合の平均値とほぼ一致し、台車にかかる加速度の台車に水平な成分が $0.25g$ となり、重力加速度の台車に水平な成分は $-0.202g$ となる。よって車内の乗客は約 $0.048g$ のカーブ外側向きの加速度を感じることになる。

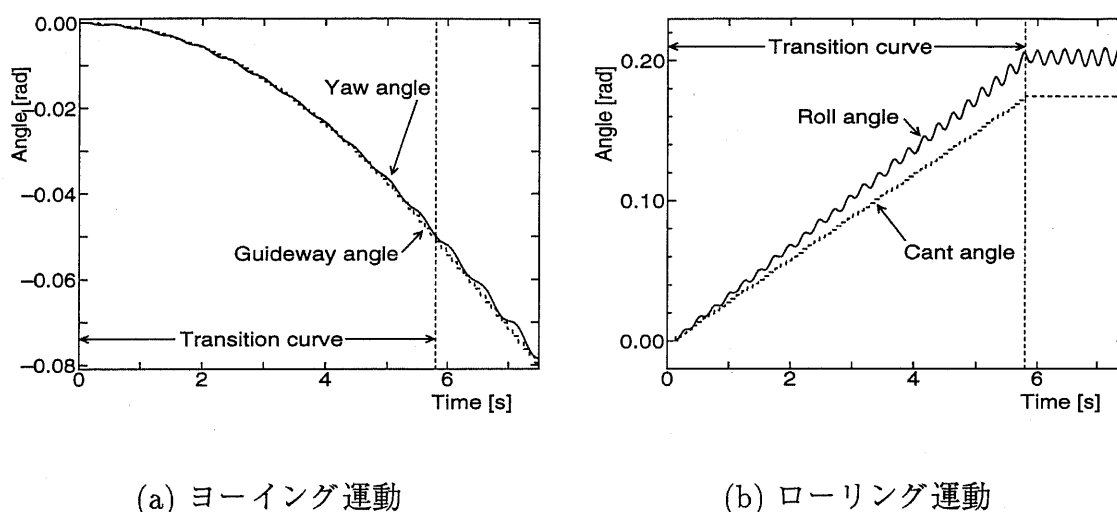
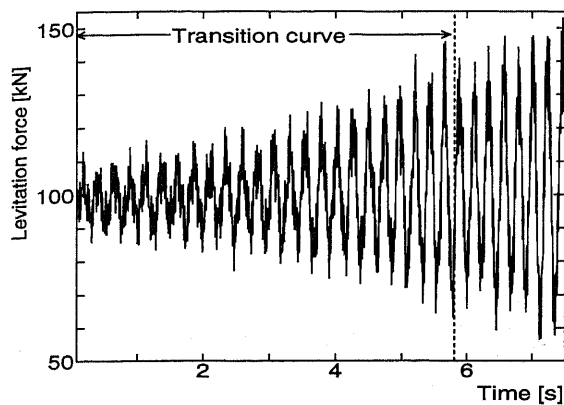


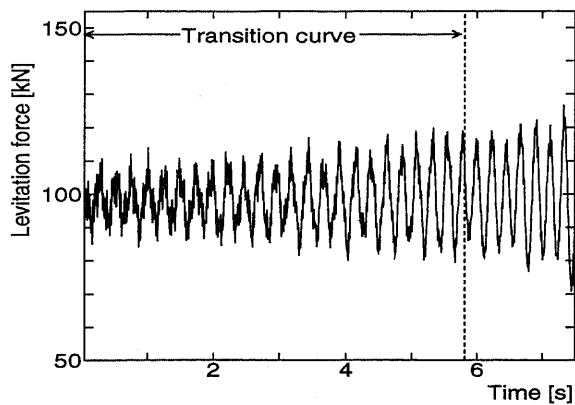
図 4.78: 台車がカーブを通過する際の運動 (絶対座標系、緩和曲線あり)

カーブを通過する際の浮上力を図 4.79 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 z_g 方向の電磁力を示している。浮上力の変動はカーブ外側の方が大きく、これはカーブ外側が浮上コイルに接近するためである。また緩和曲線がない場合と比較すると周期性が増加している。変動分はカーブ外側で約 $\pm 50\text{kN}$ 、内側で約 $\pm 20\text{kN}$ である。またここでもガイドウェイに対するローリング角が大きいために、SC コイル位置が図 4.70 に示したようにカーブ外側が $z=0$ 以上の位置に来る。よって浮上コイル電流はカーブ外側の上側と内側の下側のみに流れるモードになる。

カーブを通過する際の案内力を図 4.80 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 y_g 方向の電磁力を示している。台車振動の振幅が小さくなっているため、緩和曲線終了時点での案内力の変動範囲は緩和曲線がない場合と比較してカーブ外側で約 50%、内側で約 55% 減少している。高調波成分はカーブ外側の方が大きく、これはカーブ外側が浮上コイルに接近しているからである。また時間の経過とともに曲率半径の増加により振動の振幅が大きくなっている。

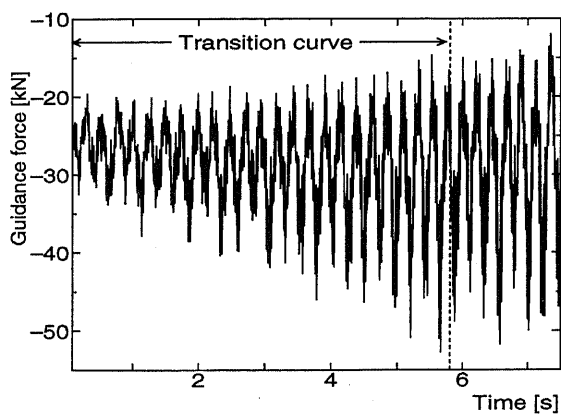


(a) 進行方向左側 (カーブ外側)

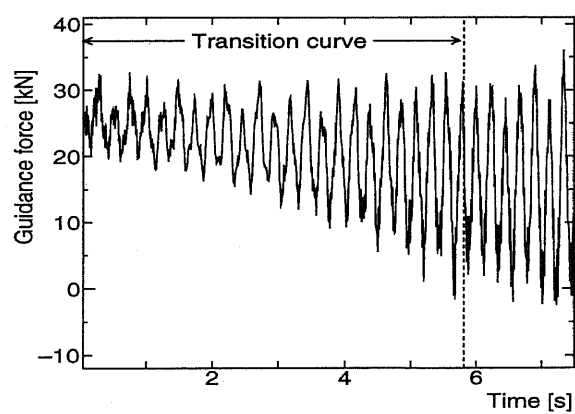


(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.79: 台車がカーブを通過する際の浮上力 (緩和曲線あり)



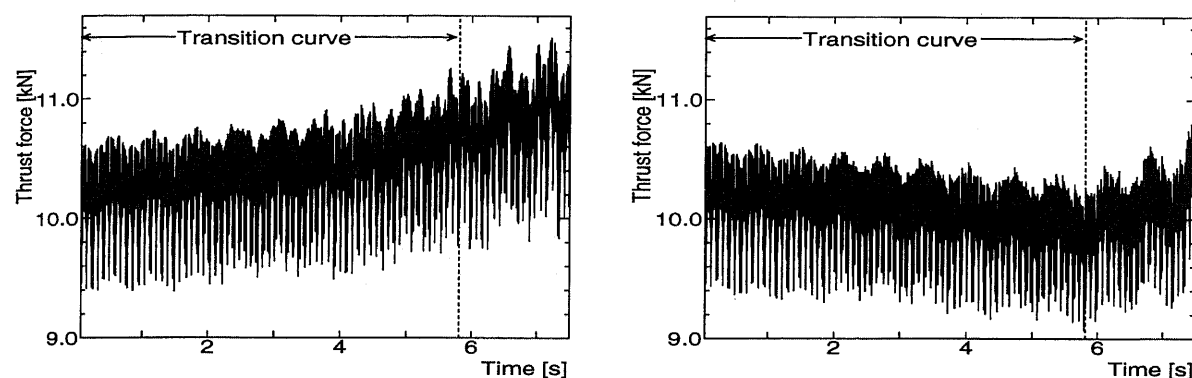
(a) 進行方向左側 (カーブ外側)



(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.80: 台車がカーブを通過する際の案内力 (緩和曲線あり)

カーブを通過する際の推進力を図 4.81 に示す。ここで縦軸はガイドウェイに固定した座標 x_g 方向の推進力を示している。カーブ区間特有である外側の推進力増加、内側の低下が見られるが、図 4.77 に示したように台車の横方向振動とローリング振動の振幅が小さいので、変動は曲率半径の増加に沿って緩やかであり、緩和曲線がない場合に見られていた平均 10% 程度の大きな推進力変動は見られない。



(a) 進行方向左側 (カーブ外側)

(b) 進行方向右側 (カーブ内側)

図 4.81: 台車がカーブを通過する際の推進力 (緩和曲線あり)

以上カーブ区間に入る前に緩和曲線をつけた場合について検討したが、緩和曲線をつけることで、台車の振動運動の振幅が抑えられ、その結果、浮上案内力の変動が減少した。また、緩和曲線がない場合に見られた台車振動に起因する推進力の振動分もほとんど見られない。このように緩和曲線をつけることによって台車の走行特性は大きく改善されることが分かる。

4.4.6 カーブ走行特性のまとめ (台車モデル)

ここでは台車モデルを用いて曲率半径 8000m, 走行速度 140m/s でのカーブ形状での台車走行特性を求め、次のような結果を得た。

- 緩和曲線、カント共がない場合

カーブに区間での基本特性を見るために、カントがない場合について検討した。

- － 台車のガイドウェイに対する横方向振動の振幅は約 2cm となり、遠心力に相当する外力を加えた場合の振動とほぼ一致した。
- － この横方向変位のため、平均 0.015rad のローリング角が発生する。

- 案内力は台車のカーブ外側部分が通常の3倍程度と増加する。推進力はカーブ外側が約10%増加、内側が10%低下するが、一方でこれは台車の方向角を修正し、カーブへの追従性を改善する。
- 横方向変位のカーブ曲率半径、走行速度依存性については、変位はカーブの曲率半径の逆数に比例し、速度の2乗に比例する。

● カント角をつけた場合

実験線で用いられる10°のカント角をつけたモデルについて検討した。

- ガイドウェイに対する台車横方向変位は若干大きくなったが、上下変位は大きく改善され、台車がガイドウェイの底面に沿って走行していることが分かった。
- カントがない場合には案内力がカーブ外側に集中していたが、カント角をつけることでカーブ内側の側壁にも台車荷重が分散された。

● 緩和曲線をつけた場合

- 台車の振動運動の振動中心は先のモデルとほぼ同じであるが、振幅が抑えられた。
- 振動の振幅が抑えられた結果、浮上案内力の変動が減少し、台車振動に起因する推進力の振動分もほとんど見られず、電磁力の変動が大きく減少した。

表4.2に各カーブモデル条件における電磁力の平均値を示す。表中の（内、外）はカーブ区間の内側、外側の値であることを示す。このように緩和曲線をつけることによって台車の走行特性は大きく改善されることが示された。

表 4.2: カーブ区間における電磁力の平均値

	浮上力変動	案内力変動	推進力平均値
カントなし	±50kN	内 60kN, 外 90kN	内 2.0kN, 外 2.0kN
カントあり	±50kN	内 80kN, 外 80kN	内 2.2kN, 外 2.2kN
緩和曲線あり	内±50kN 外±20kN	内 35kN, 外 35kN	内 0.4kN, 外 0.4kN

4.5 列車モデルにおける解析

台車モデルによる計算結果をふまえて台車と客室を考慮した列車モデルについての走行シミュレーションについて検討する。

4.5.1 列車モデルにおける計算の初期値

計算における初期値は各電磁力およびトルクが均衡している位置とする。台車モデルでは図 4.32 と図 4.33 に示した上下均衡位置とピッチングトルクが均衡する角度を用いた。列車モデルの場合は 3 つの客室および 4 つの台車について均衡させる必要がある。

もし台車に初期ピッチングトルクが存在せず水平状態で均衡する場合、すべての台車、客室はそれぞれ一定の位置で均衡する。しかし、このシステムでは図 4.31 に示したように各台車において前方の SC コイルの浮上力が後方よりも小さくなり、各台車は前かがみの姿勢をとる。そして図 2.7 に示すように 2 次系のバネの作用点が重心からずれており、前後 4 点で支えているので、客室にかかるトルクが連接台車と先頭部についている台車とは異なる。よって台車と客室の均衡位置は EDS と 2 次系の相互作用および 2 次系の結合点の幾何位置に依存する。そこですべての台車と客室について個々の値に z およびピッチング角の初期位置を設定する必要がある。この位置を解析的に求めることは難しい。そこで、初期値は次のように求めた。まず車両重量と浮上力のみが均衡する初期位置を与え、直線走行シミュレーションを行う。そして十分時間が経過し、各変位が収束した値を初期値とした。この際、SC コイルと浮上コイルのみを考えた系による解析ではダンピングが負になるので、磁気シールド板を加えた解析結果から [28] 11.0kNs/m のダンピングを地上と台車間に付加した。例として $v_x=140\text{m/s}$ の場合の結果を表 4.3 に、 $v_x=70\text{m/s}$ の場合を表 4.4 示し、図 4.82 に $v_x=140\text{m/s}$ の場合の位置関係を示す。図中台車変位は $z=-0.03935\text{m}$ からの変位を、客室変位は $z=1.4344\text{m}$ からの変位を示す。

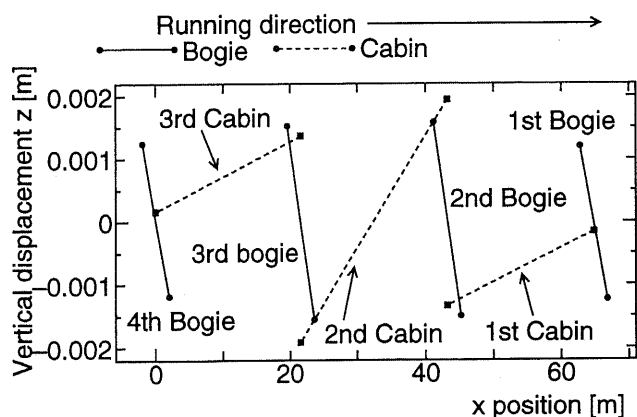


図 4.82: 列車モデルにおける計算の初期位置 ($x-z$ 平面)

表 4.3: 計算時における台車・客室の初期位置 ($v_x=140\text{m/s}$)

台車		
初期位置	z 座標 (m)	ピッチング角 (rad)
先頭台車	-0.039374	-6.00×10^{-4}
第2台車 (接続)	-0.03912	-7.61×10^{-4}
第3台車 (接続)	-0.03968	-7.61×10^{-4}
第4台車	-0.039324	-6.00×10^{-4}
客室		
第1客室	1.433883	0.546×10^{-4}
第2客室	1.434410	1.788×10^{-4}
第3客室	1.434925	0.554×10^{-4}

表 4.4: 計算時における台車・客室の初期位 ($v_x=70\text{m/s}$)

台車		
初期位置	z 座標 (m)	ピッチング角 (rad)
先頭台車	-0.04080	-0.872×10^{-3}
第2台車 (接続)	-0.04083	-1.17×10^{-3}
第3台車 (接続)	-0.04073	-1.17×10^{-3}
第4台車	-0.04075	-0.872×10^{-3}
客室		
第1客室	1.432127	0.803×10^{-4}
第2客室	1.432946	2.717×10^{-4}
第3客室	1.433771	0.803×10^{-4}

4.5.2 横方向外乱を受けた場合の解析

先の台車モデルと同様に横方向の外乱が加わった場合の結果を示す。計算開始点において0.045sec. 間初期位置に保持し x 方向に走行させた後、LSM を駆動し、自由走行を行っている。外乱としては台車モデルと同じく台車に直接加わる場合とガイドウェイの位置が変位することにより加わる場合について検討する。

○台車に外乱が加わる場合

台車に外乱が加わる場合として、台車重心に横風などにより横方向の外力が加わる場合を考える。台車モデルでは初期変位がある場合も考慮したが、ガイドウェイのステップ変位と同様の結果となるため、ここでは扱わない。解析モデルを図 4.83 に示す。

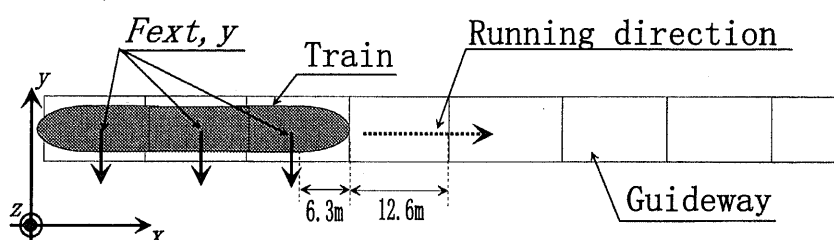
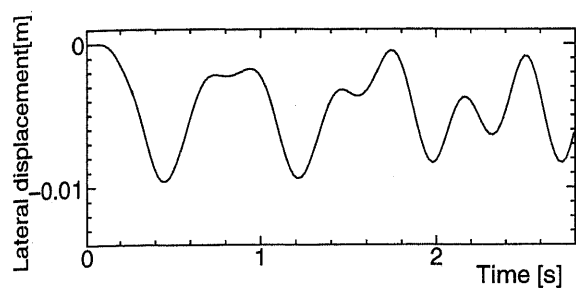


図 4.83: 横方向外力を加えた場合のモデル (列車モデル)

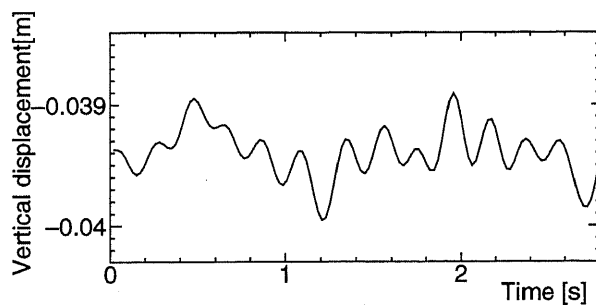
台車モデルの場合と条件を等しくするため、台車が半径 16000m のカーブを $v=140\text{m/s}$ で通過する時に受ける遠心力に相当する外力 $F_{ext,y}=0.1 \text{ } M g$ を加える。ここで列車には 4 台車あるため、全体で $F_{ext,y}=0.1 \text{ } M g \times 4 \text{ N}$ ($1.96 \times 10^4 \times 4 \text{ N}$, M :台車質量、 g :重力加速度) を加える。客室は 3 つであり、先頭車両と中間車ではほとんど車両長が同じである。よって、それぞれの車両に全体にかかる外力の 1/3 である $F_{ext,y}=2.61 \times 10^4 \text{ N}$ の力を加える。ここで先頭車両は台車が 1.5 個分配置されているので、台車当たりに加わる外力は先頭台車が小さく、接続台車が大きくなる。また横風を受けた場合を想定すると解析モデルで述べたようにガイドウェイに囲まれた台車に力が加わることは考えにくいので、外力はすべて客室重心にかかるとする。

図 4.84～4.88 に横方向にステップ状の外力を加えた場合の台車運動の時間変化を示す。

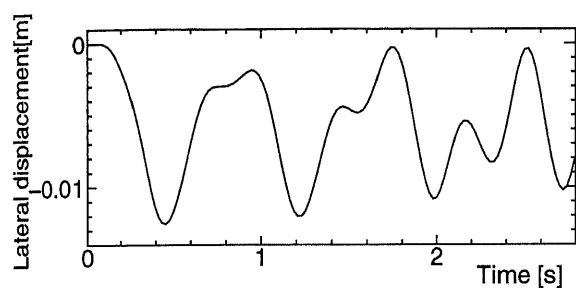
図 4.84 に各台車の横方向運動を示す。台車の左右変位は非接続台車である先頭および第 4 台車で約 1cm、接続台車である第 2、第 3 台車で約 1.2cm となっており、これは先に述べたように接続台車に加わる力が大きくなっているからである。このように 4 つの台車で運動の振幅は異なるが、同様の運動を行なう。また変位は台車モデルの場合の 1cm とほぼ同じになっている。図 4.85 に上下振動を示す。横方向変位が接続台車の方が大きいため、接続台車運動は非接続台車よりも振幅が大きくなっているが、同様の運動を行なっている。図 4.86 にヨーイング運動を示す。ここで非接続台車ではほとんど変位がないが、接続台車では第 2 と第 3 で正負対称の運動を示している。これは中間車両の横方向変位が先頭車に比べて大きいため、車両間の位置の差が接続台車のヨーイング角となって表れているためである。



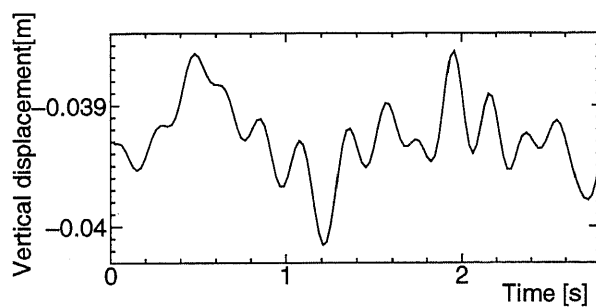
(a) 先頭台車



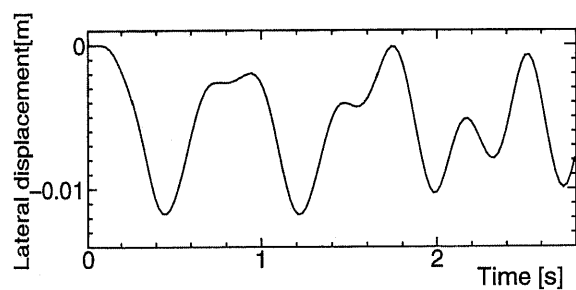
(a) 先頭台車



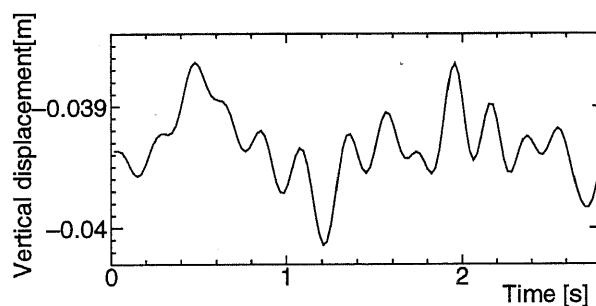
(b) 第2台車



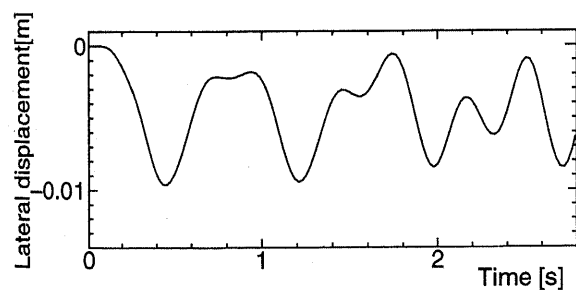
(b) 第2台車



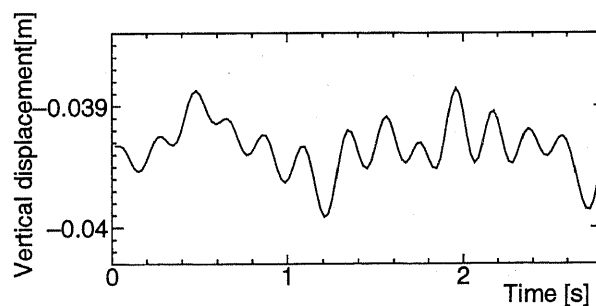
(c) 第3台車



(c) 第3台車



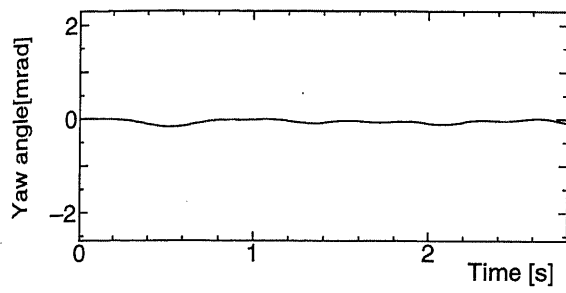
(d) 第4台車



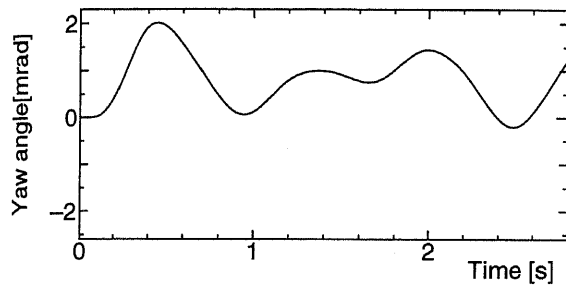
(d) 第4台車

図 4.84: 横方向のステップ外力を加えた場合の台車横方向運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)

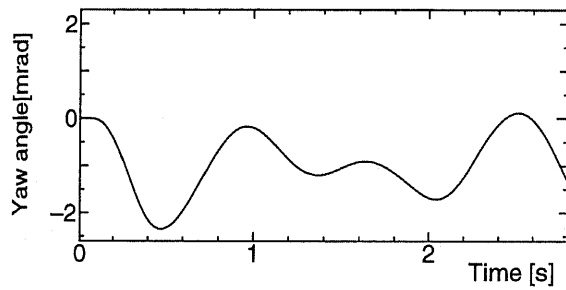
図 4.85: 横方向のステップ外力を加えた場合の台車上下運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)



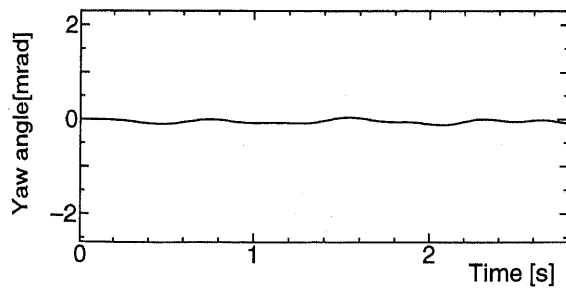
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

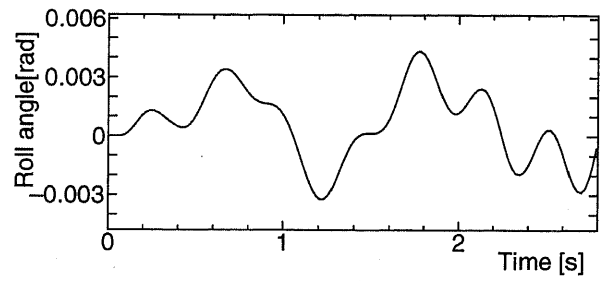


(c) 第3台車

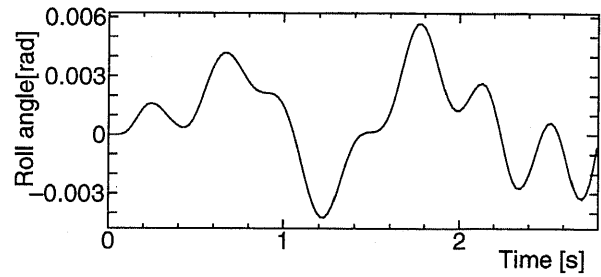


(d) 第4台車

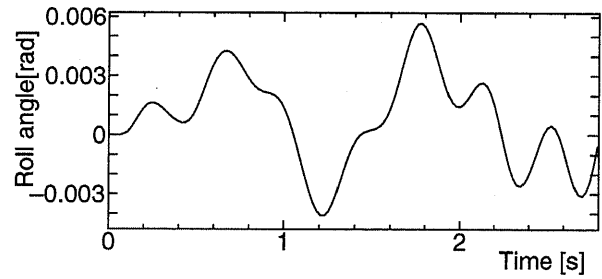
図 4.86: 横方向のステップ外力を加えた場合の台車ヨーイング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)



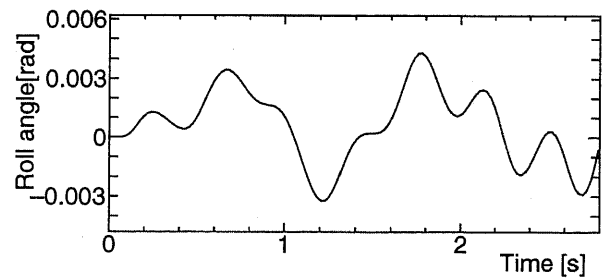
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

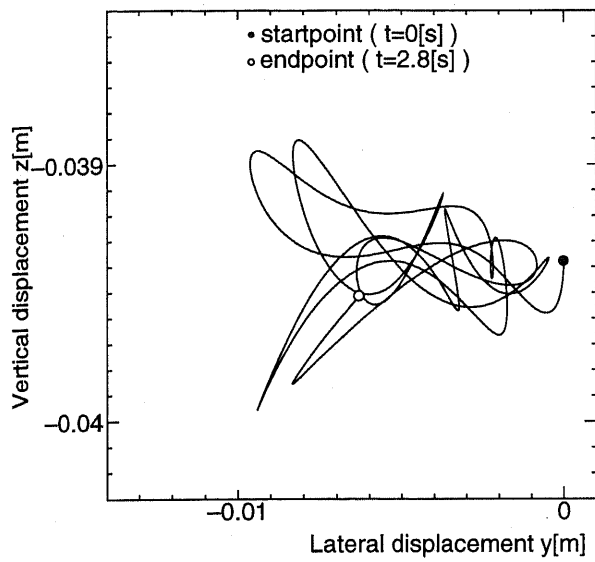


(c) 第3台車

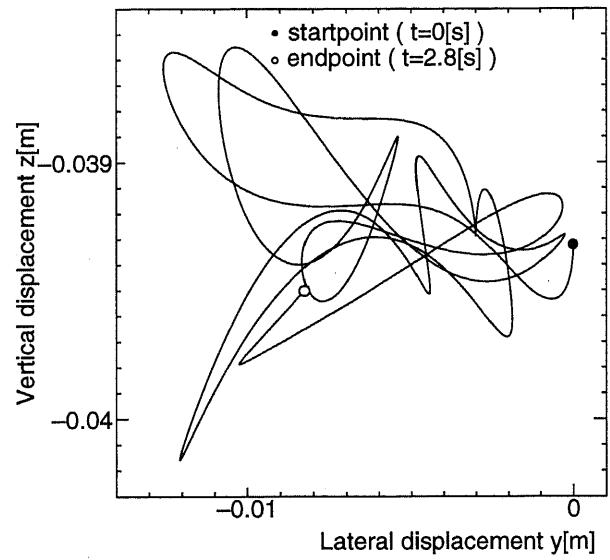


(d) 第4台車

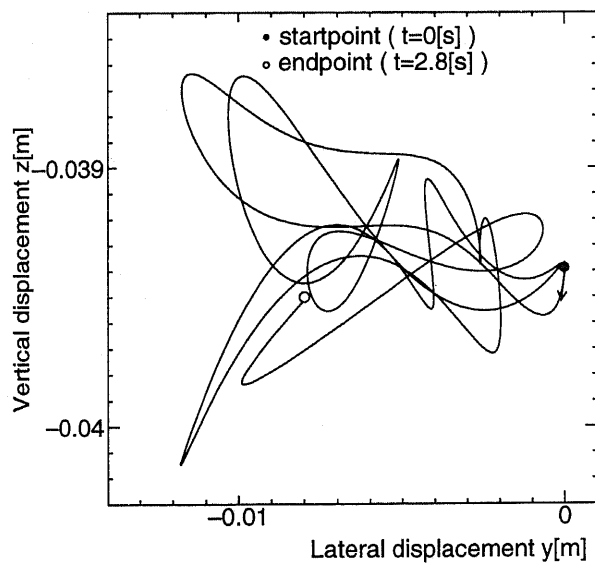
図 4.87: 横方向のステップ外力を加えた場合の台車ローリング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)



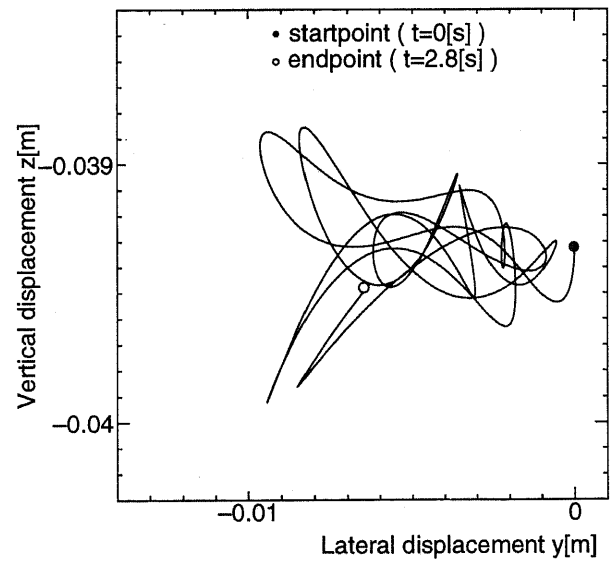
(a) 先頭台車



(b) 第2台車



(c) 第3台車



(d) 第4台車

図 4.88: 横方向のステップ外力を加えた場合の台車重心の軌跡 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)

図 4.87 にローリング運動を示す。台車モデルでは、台車が横方向外力により y の負の方向に押されて、浮上コイルに接近する側の SC コイルの浮上力が増加し、負の方向へのローリング回転運動が発生した。しかし、列車モデルでは台車は同じ方向に押されているにもかかわらず、ローリング角は反対の正の方向に出ている。これについて検討するため、図 4.89 に中間車に加わる EDS と 2 次系の横方向力およびローリングトルクを示す。また図 4.90 にこの時の運動の様子を示す。以下の説明では図に示すに正の方向への回転を左回り、負の方向への回転を右回りとする。運動は次のようにして変化していく。

1. 外力により y の負の方向に変位した客室は横方向 2 次系バネのために左回りのトルクを受ける。
 2. 台車もそれに追従して左側に移動する。すると、台車左側の浮上力が増加し、EDS は台車を右回りに回転させるトルクを発生させる。しかし、客室が左回転しているため、客室と台車の左側の上下ギャップが小さくなる。その結果ギャップを広げようとして、台車を客室と同じ左側に回転させるトルクが 2 次系バネにより発生する。
 3. その結果台車も左回りにローリング回転する。
- このように台車モデルとは異なる反対向きの回転運動を行なう。

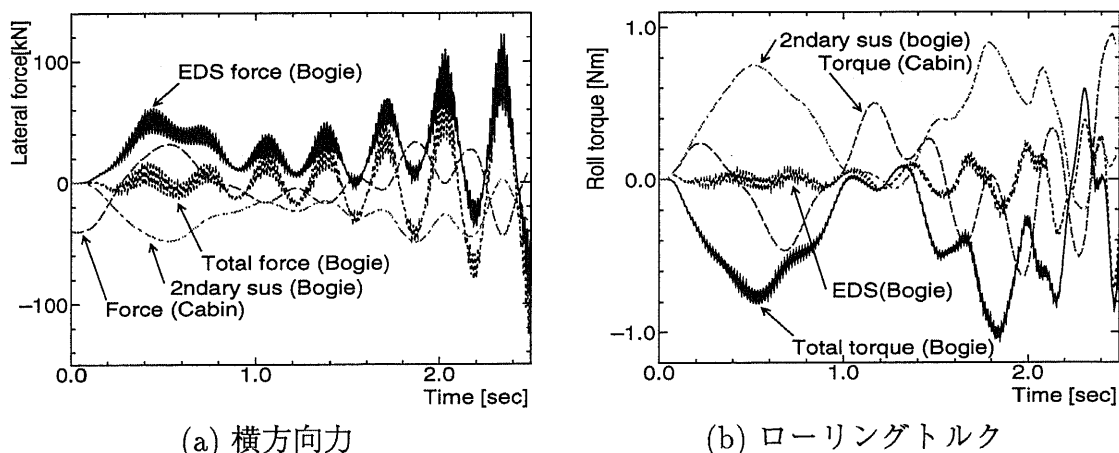


図 4.89: 横方向の外力を加えた場合に列車にかかる横方向力およびローリングトルク

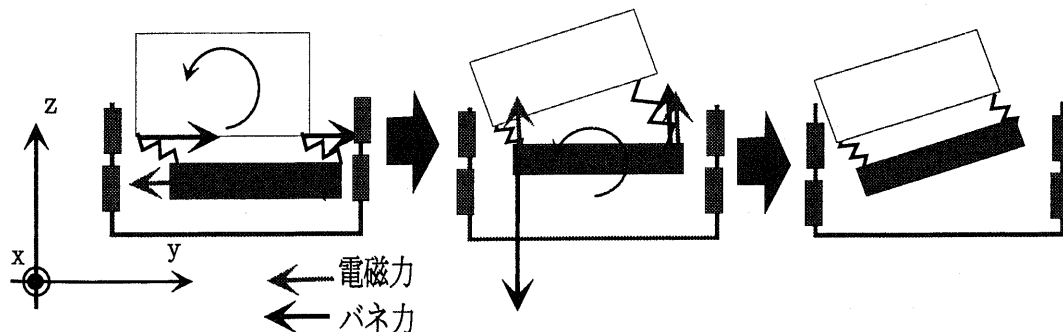
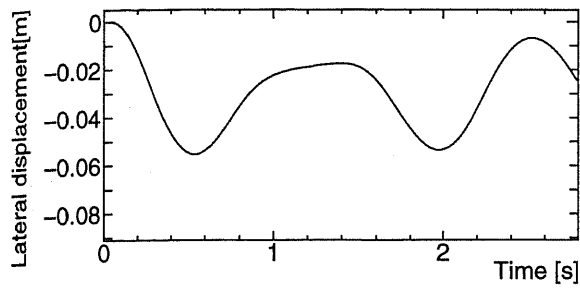


図 4.90: 横方向外力を受けたときの台車と客室の相互作用

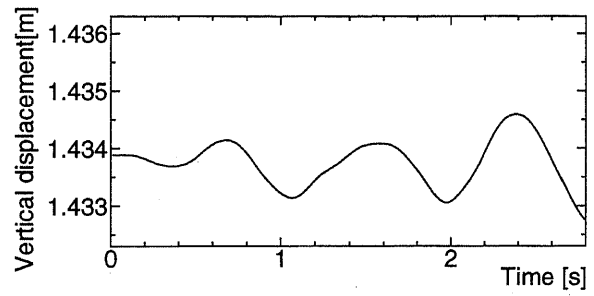
図 4.88 に $t = 0$ から $t = 2.8\text{sec.}$ までの $y - z$ 平面での重心の軌跡を示す。台車軌跡からも先頭と第 4 台車、第 2 台車と第 3 台車は同じ運動をしていることが確認できる。また台車当たりに加わる力の小さい非連接台車の変位は小さくなっていることも分かる。台車の運動範囲は時間とともに広がっており、振動運動が発散していることが分かる。

次に客室運動について示す。図 4.91 に各客室の横方向運動を示す。各客室には同じ外力を加えているが、先頭客室には 1.5 台の台車が接続されているため、横方向変位は中間車の方が大きくなっている。また、いずれも台車より変位は小さくなっている。図 4.92 に各客室の上下運動を示す。図 4.82 に示したように上下位置は客室ごとに異なっている。横方向変位が大きい分、第 2 客室の変位が大きくなっている。図 4.93 に各客室のヨーイング運動を示す。中間車の横方向変位が他の二つに比べて大きくなっているため第 2 客室のヨーイング変位はほとんどなく、両側の客室が回転し、その運動は連接台車のヨーイング運動で見られたように正負対称になっている。図 4.94 に各客室のローリング運動を示す。横方向外力により変位した客室は下部に設置された 2 次系バネにより、正の方向にローリング運動をする。第 2 客室のローリング変位が大きい、これは横方向変位が他の 2 つより大きく、台車からのローリングトルクが大きいためである。図 4.95 に $t = 0$ から $t = 2.8\text{sec.}$ までの $y - z$ 平面での重心の軌跡を示す。それぞれの客室は同じ運動をしており、中間車である第 2 客室が支持台車が 1 個分で他の客室より少ないので振幅が大きくなっていることが分かる。また運動範囲が広がっており、運動が発散していることが分かる。

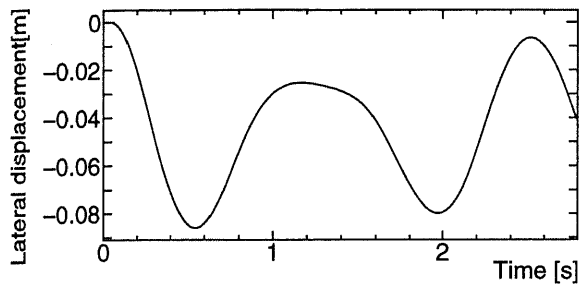
このように列車モデルでは 2 次系の作用が加わるため、台車のローリング運動のように、回転方向が台車モデルと異なるなどの影響が出る。また、等価的に中間車に働く力が大きくなり、中間車の横方向変位が大きくなったが、各台車、客室ともにヨーイング運動を除いてほぼ同じ運動を行なう。



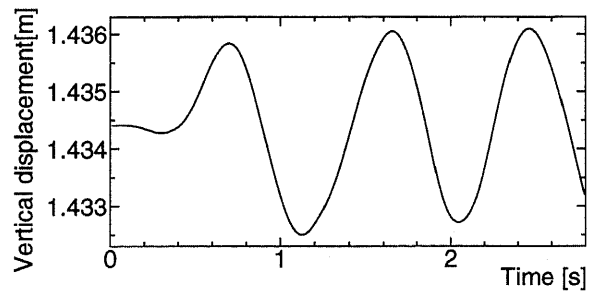
(a) 先頭客室



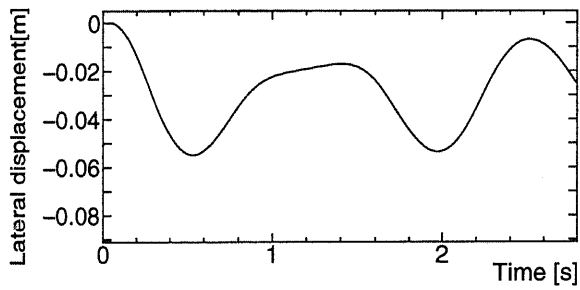
(a) 先頭客室



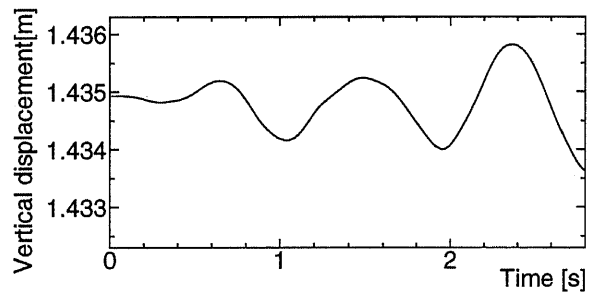
(b) 第2客室



(b) 第2客室



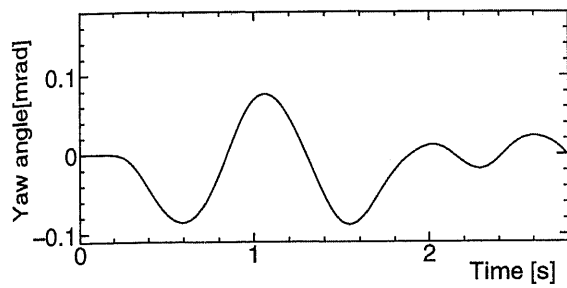
(c) 第3客室



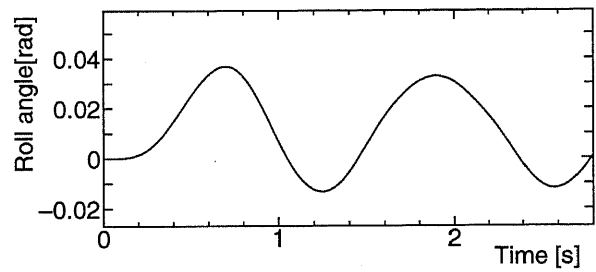
(c) 第3客室

図 4.91: 横方向のステップ外力を加えた場合の客室横方向運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)

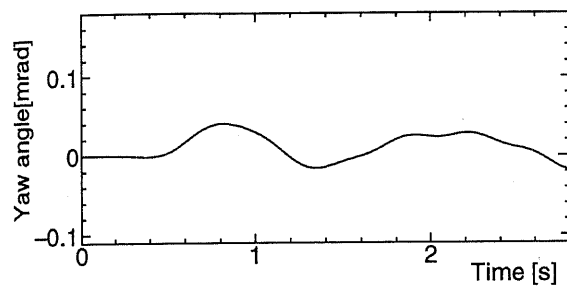
図 4.92: 横方向のステップ外力を加えた場合の客室上下運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)



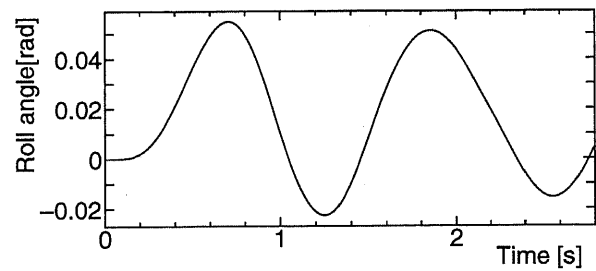
(a) 先頭客室



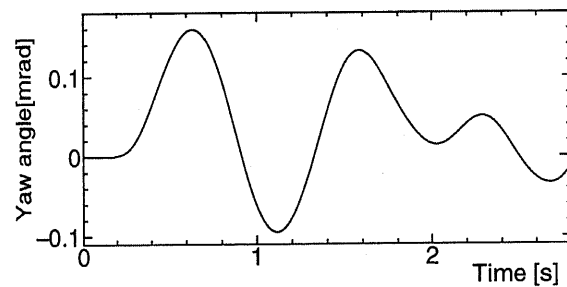
(a) 先頭客室



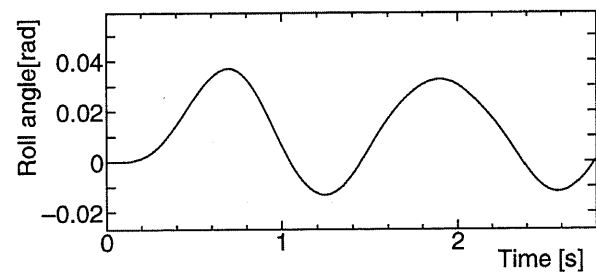
(b) 第2客室



(b) 第2客室



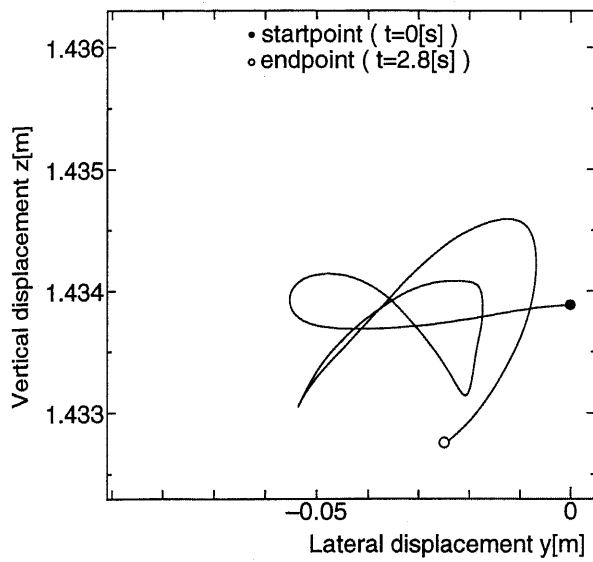
(c) 第3客室



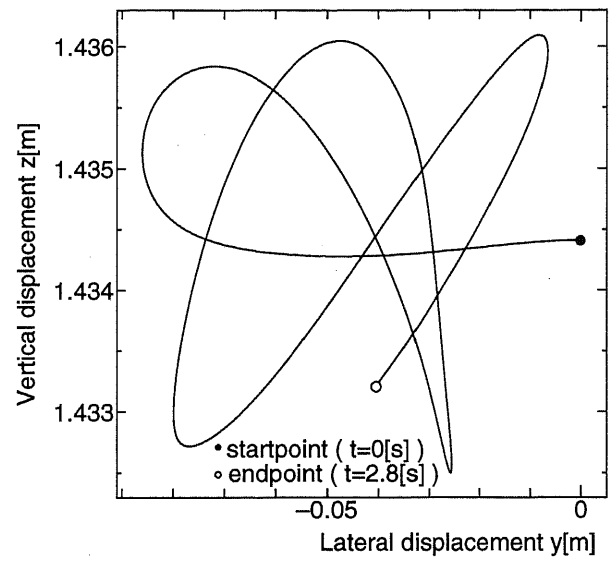
(c) 第3客室

図 4.93: 横方向のステップ外力を加えた場合の客室ヨーイング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)

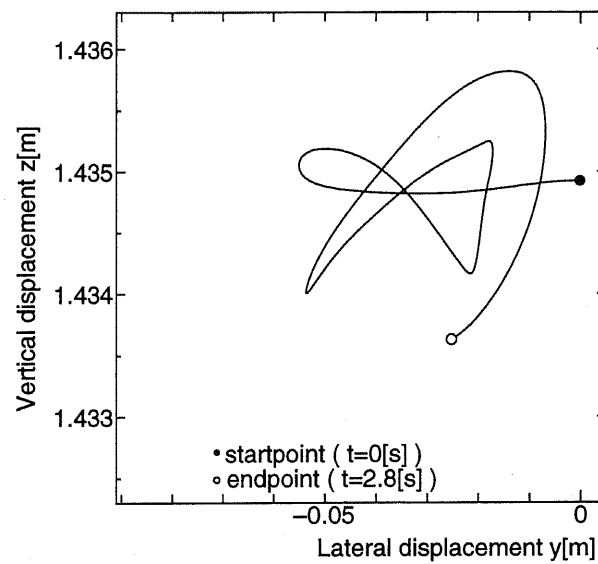
図 4.94: 横方向のステップ外力を加えた場合の客室ローリング運動 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)



(a) 先頭客室



(b) 第2客室



(c) 第3客室

図 4.95: 横方向のステップ外力を加えた場合の客室重心の軌跡 ($F_{ext,y} = 0.1MgN$)

○ガイドウェイが変位する場合

ガイドウェイが変位する場合として台車モデルと同様に次の2つを考える。

- ガイドウェイのあるセクションからステップ状の変位が起こった場合
- ガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合

ガイドウェイのあるセクションからステップ状の変位が起こった場合の解析モデルを図4.96に示す。

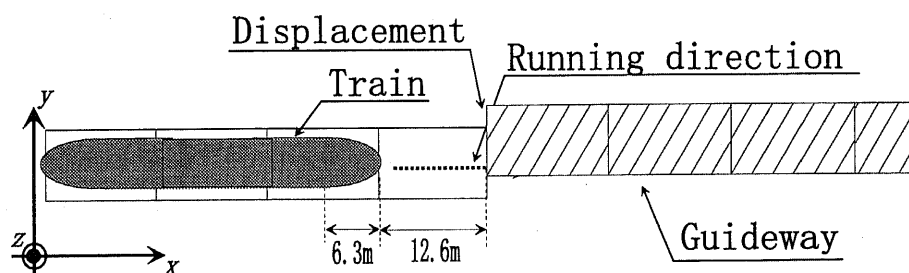


図 4.96: ガイドウェイにステップ変位が起こった場合 (列車モデル)

図4.97～4.101にガイドウェイにステップ状の変位が起こった場合の台車運動を示す。第3番目以降のガイドウェイセクションが横方向に0.01m変位する。台車は走行速度 $v_x=140\text{m/s}$ で $t=0.045\text{sec}$ まで進行方向に一定速度で移動し、その後自由運動に入る。そして出発してから先頭台車重心は17.1m走行した後（約0.122sec後）に変位したガイドウェイに入り、先頭客室重心は23.625m走行した後（約0.169sec後）に入る。

図4.97に各台車の横方向運動を示す。台車の左右変位は台車モデルの場合よりも小さくなっており、変位したガイドウェイに入った後は1.2cm程度となっている。これは客室と台車間の2次系が働き、客室が変位することで台車変位が小さくなるからである。4つの台車運動を比較すると、変位ガイドウェイを通過する時間が違うので運動の位相はずれているが、ほぼ同じ運動を行っていることが分かる。よって前方の台車の外乱がほとんど後方台車に伝わっていないといえる。図4.98に上下運動を示す。運動には周期が0.2sec程度の振動とそれよりも周波数が低い振動が加わっている。前者はEDS浮上力によるものであり、後者は2次系バネによるものである。台車の振動は $\pm 1\text{mm}$ 程度であり、台車モデルの1/5となっている。図4.99にヨーイング運動を示す。横方向外力を加えた場合と同様に、非接続台車と接続台車で運動が異なる。まず変位ガイドウェイに突入する時に台車は相対的に進行方向右側の浮上コイルに接近するので、正のヨーイング角を発生させるトルクが生じる。先頭と第4台車ではその後の振動は小さいが、接続台車では客室間の位置の差の影響を受けるため、振動が大きくなっている。図4.99にローリング運動を示す。台車がガイドウェイの変位による外乱を受けるため、台車モデルと同じく、浮上コイルに接

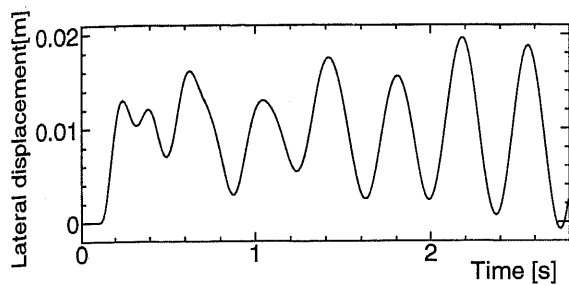
近する側を上昇させる方向に回転する。そして、 -0.001rad 変位すると台車が y の正の方向に移動し、2次系バネも影響して正のローリングトルクが発生し、逆方向に回転する。

図 4.101 に各台車の $y-z$ 平面軌跡を示す。先頭台車が最も運動が発散しているように見られるが、これはガイドウェイの変位を通過してからの時間が最も長いからである。台車の軌跡を見ると4台車の運動はほぼ同じであるといえる。また運動範囲は増加しており、振動は発散傾向にある。

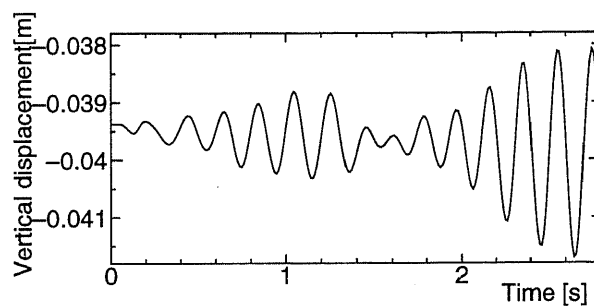
次に客室運動について示す。図 4.102 に各客室の横方向運動を示す。3つとも振動の開始点がずれているだけで同じ運動となっており、ほぼ $y=0.01\text{m}$ を中心に運動している。図 4.103 に各客室の上下運動を示す。図に示すように各客室の初期位置は異なっている。客室の運動は小さく、 0.5mm 程度しか変位しない。図 4.104 に各客室のヨーイング運動を示す。各車両の前方台車の変位ガイドウェイに入って横方向に変位するために、前方が回転し客室にヨーイング角が発生する。その後に後方台車が入って同様に変位すると、ヨーイング角の平均値はほぼゼロになる。ここで先頭客室以外の2つの運動は同じになっているが、これは後方の2つの客室がそれぞれの前の客室の、回転運動の影響を受けるためである。図 4.105 に各客室のローリング運動を示す。横方向外力により変位した客室は下部に設置された2次系バネにより、正の方向にローリング運動をする。台車の変位ガイドウェイに入るときに受けるステップトルクにより発生する負のローリング角の影響は客室には出ず、その後に台車が y の正の方向に移動して起こる正のローリング角によって、客室に正のローリング角が発生し、その後は振動運動を行なう。

図 4.106 に $t=0$ から $t=2.8\text{sec.}$ までの $y-z$ 平面での重心の軌跡を示す。それぞれの客室はほぼ同じ運動をしており、上下方向にはほとんど変位していないことが分かる。

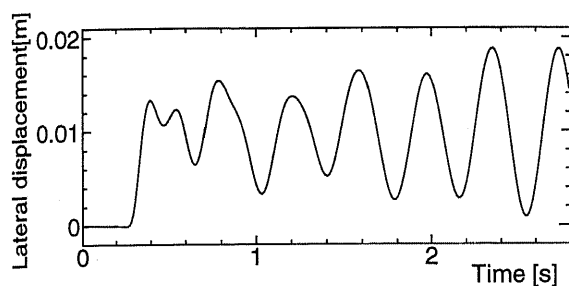
このように客室にも振動が起こり、2次系に振動が吸収されるので台車自体の変位量は台車モデルと比較すると減少している。特に上下振動にその影響は大きく見られる。またヨーイング運動に関しては客室間の相互作用で接続台車と非接続台車で運動が異なっているが、このヨーイング角は非常に小さいことを考慮すると、台車の運動は4つともほぼ同じであり、前の台車による外乱の影響をほとんど受けていないことが分かる。



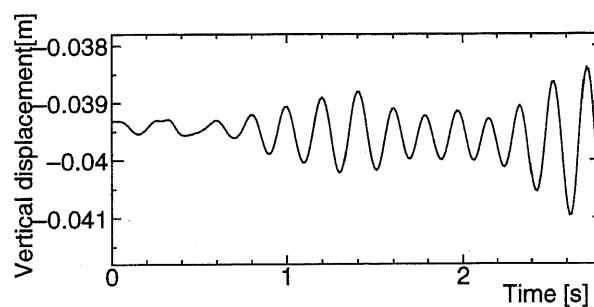
(a) 先頭台車



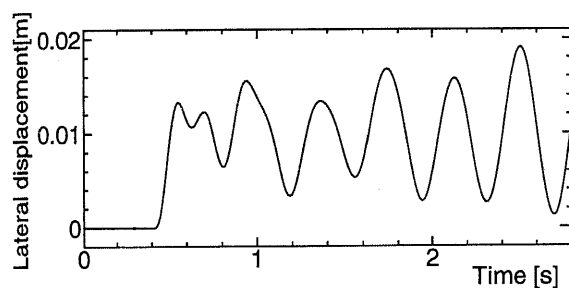
(a) 先頭台車



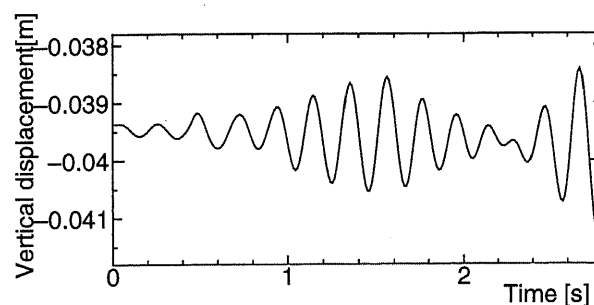
(b) 第2台車



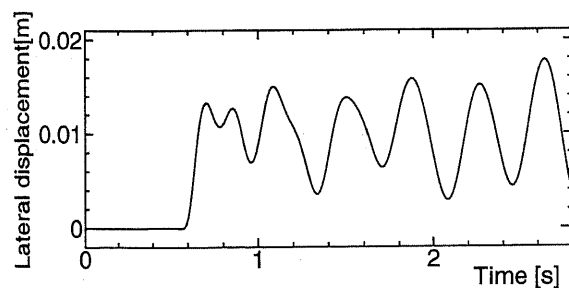
(b) 第2台車



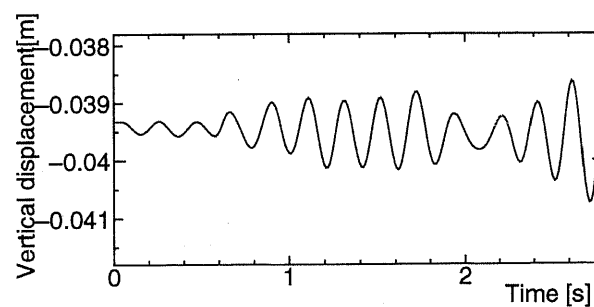
(c) 第3台車



(c) 第3台車



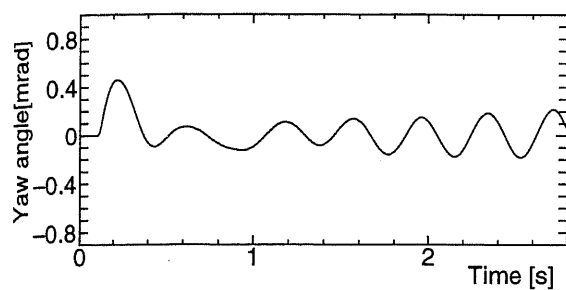
(d) 第4台車



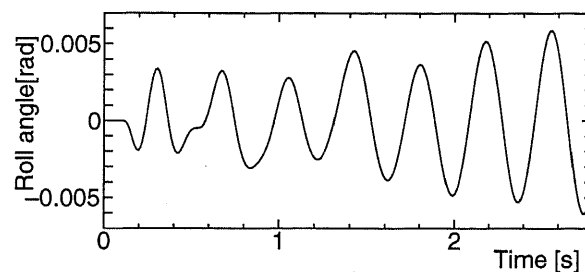
(d) 第4台車

図 4.97: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車横方向運動

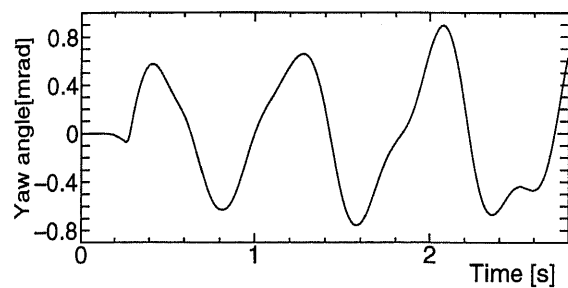
図 4.98: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車上下運動



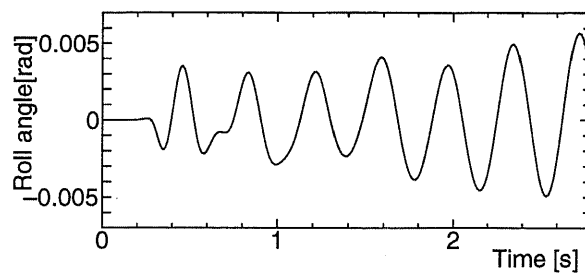
(a) 先頭台車



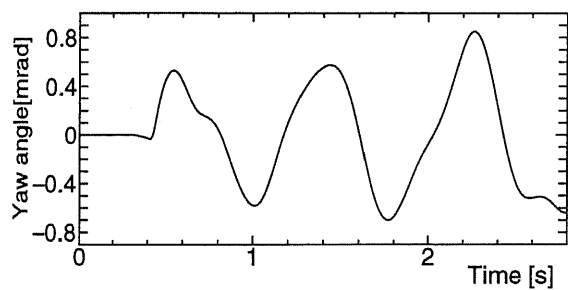
(a) 先頭台車



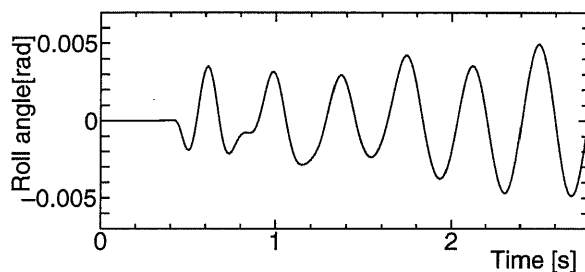
(b) 第2台車



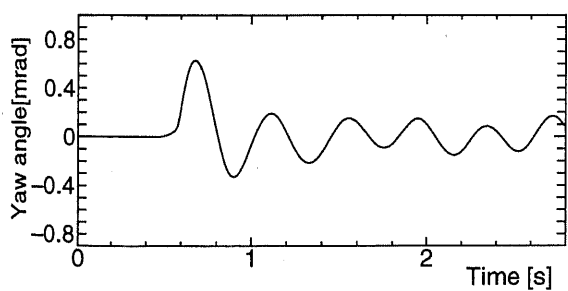
(b) 第2台車



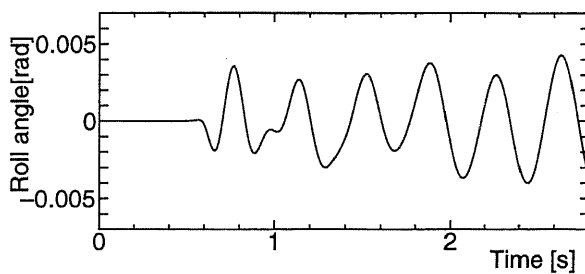
(c) 第3台車



(c) 第3台車



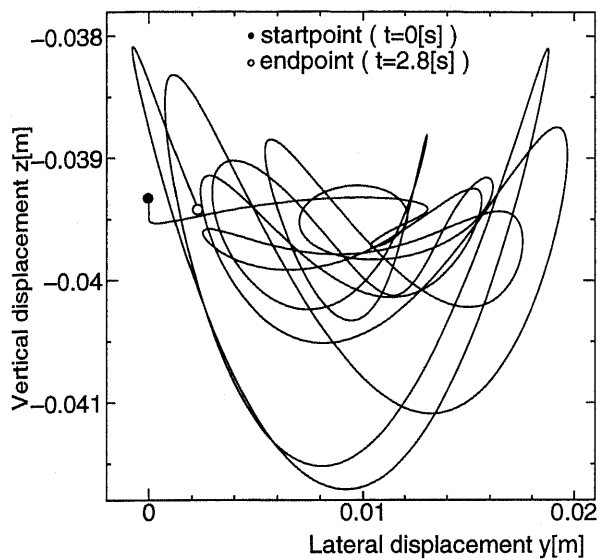
(d) 第4台車



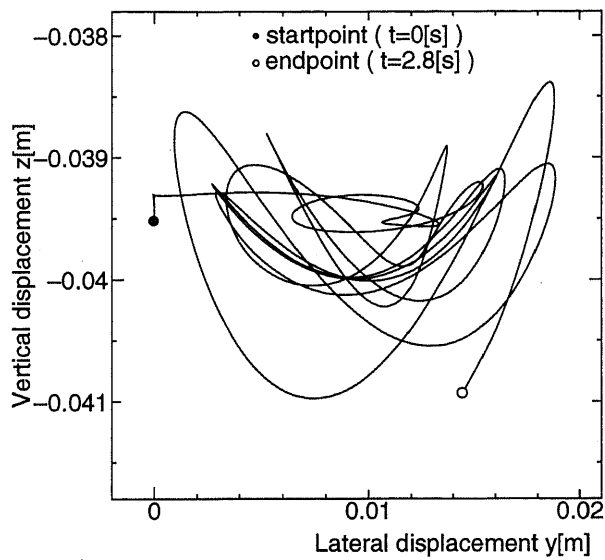
(d) 第4台車

図 4.99: ガイドウェイに $\Delta y = 0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車ヨーイング運動

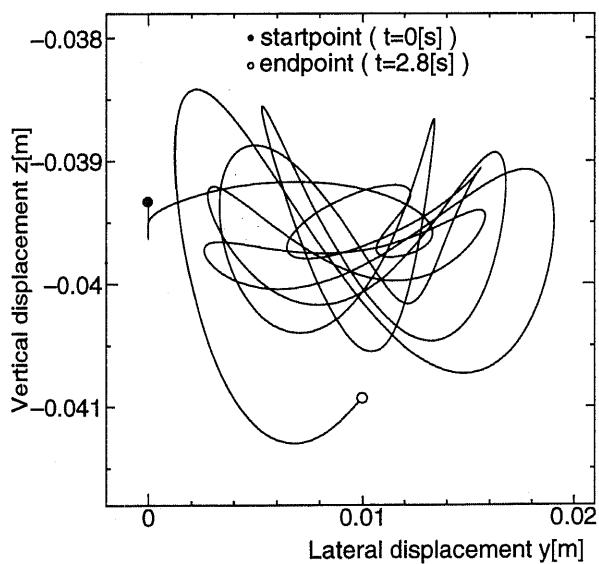
図 4.100: ガイドウェイに $\Delta y = 0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車ローリング運動



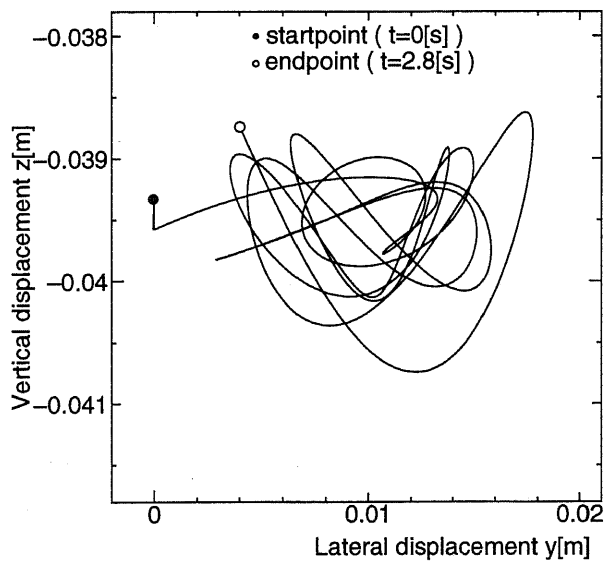
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

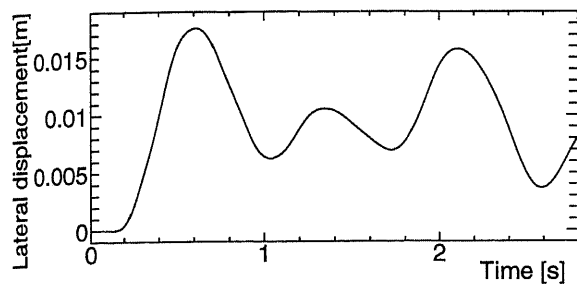


(c) 第3台車

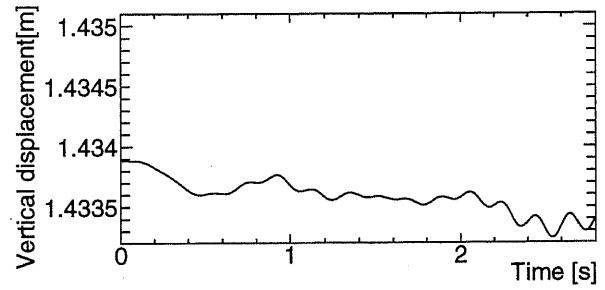


(d) 第4台車

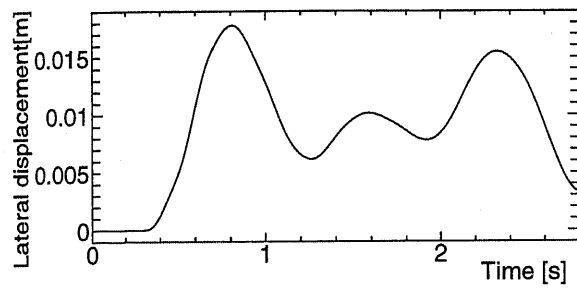
図 4.101: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の台車重心の軌跡



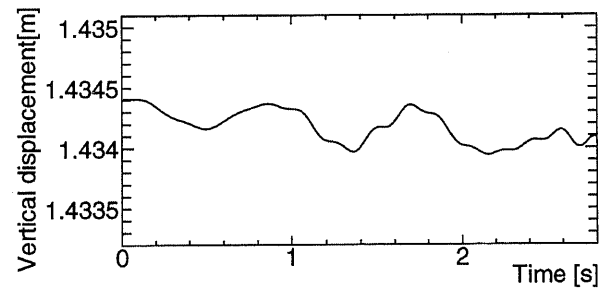
(a) 先頭客室



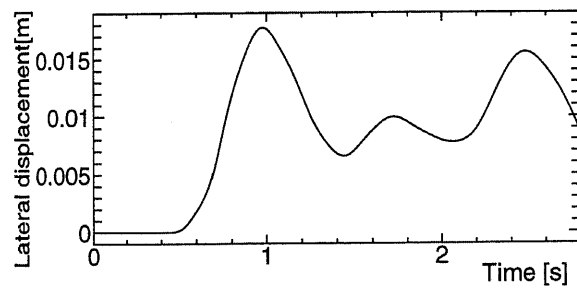
(a) 先頭客室



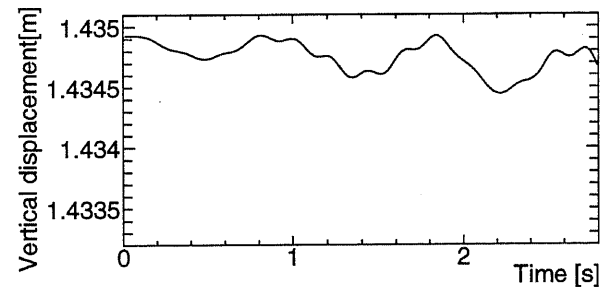
(b) 第2客室



(b) 第2客室



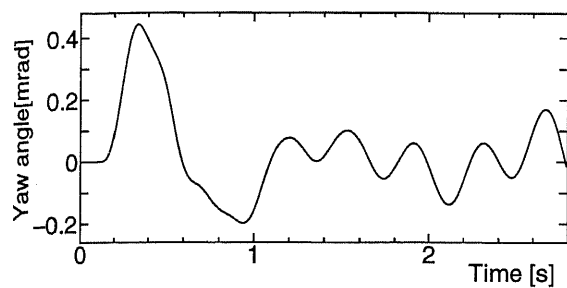
(c) 第3客室



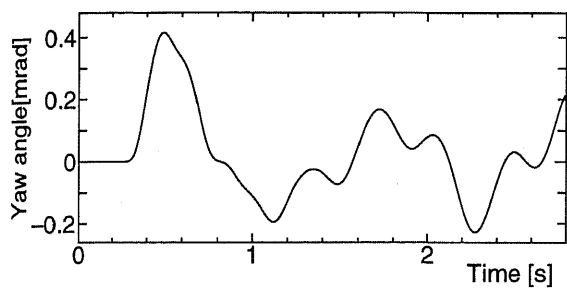
(c) 第3客室

図 4.102: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の客室横方向運動

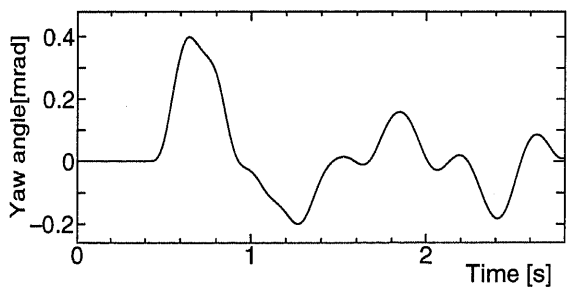
図 4.103: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の客室上下運動



(a) 先頭客室

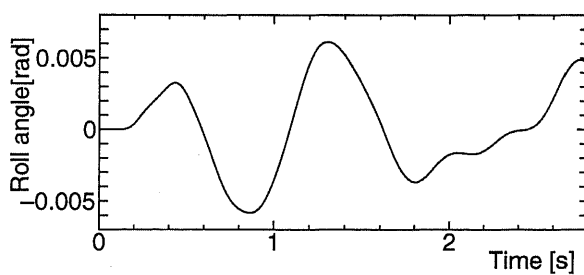


(b) 第2客室

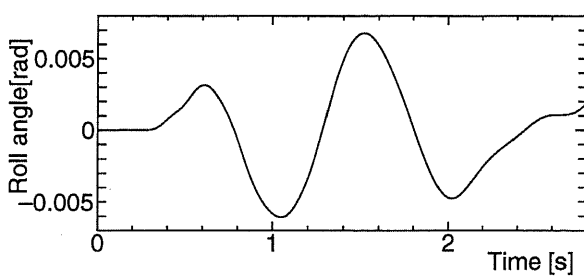


(c) 第3客室

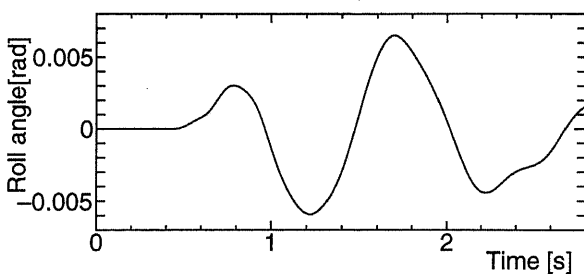
図 4.104: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の客室ヨーイング運動



(a) 先頭客室

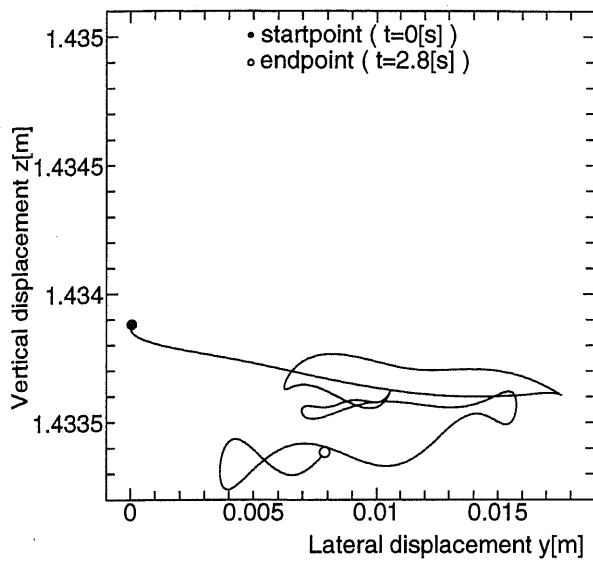


(b) 第2客室

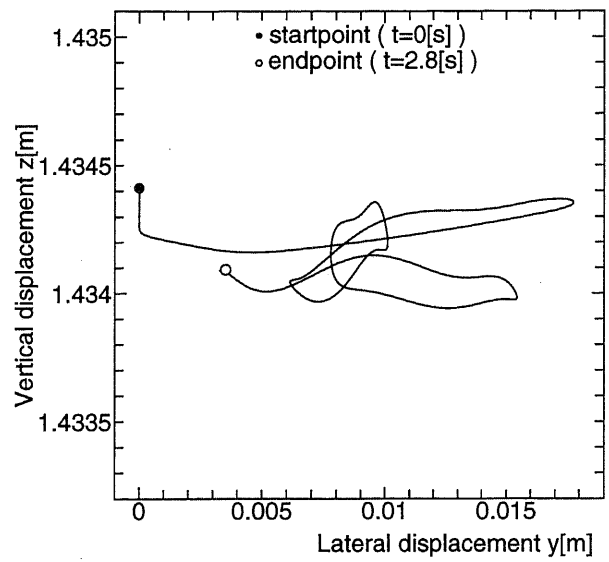


(c) 第3客室

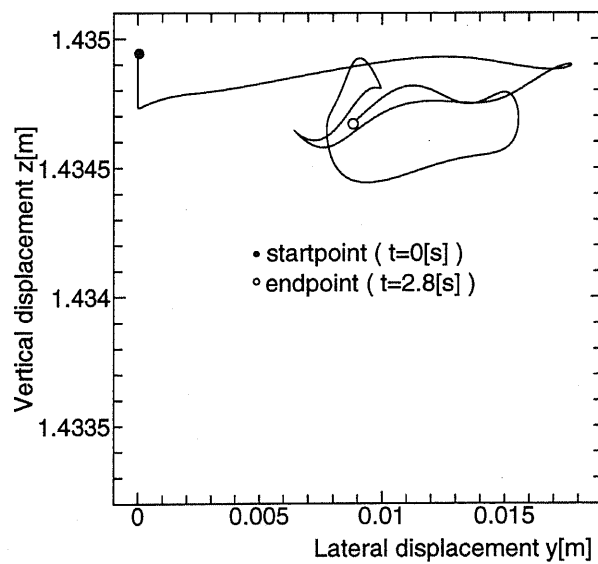
図 4.105: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の客室ローリング運動



(a) 先頭客室



(b) 第2客室



(c) 第3客室

図 4.106: ガイドウェイに $\Delta y=0.01\text{m}$ のステップ変位が起こった場合の客室重心の軌跡

ガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合の解析モデルを図4.107に示す。

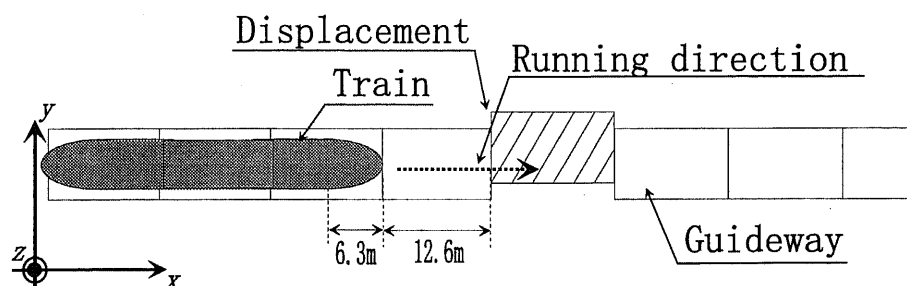


図4.107: ガイドウェイの1セクションだけに変位が起こった場合 (列車モデル)

図4.108～4.112にガイドウェイにあるセクションからステップ状の変位が起こった場合の台車運動を示す。第3番目のガイドウェイセクションのみが横方向に0.01m変位する。台車は走行速度 $v_x=140\text{m/s}$ で $t=0.045\text{sec}$ まで進行方向に一定速度で移動し、その後自由運動に入る。そして出発してから先頭台車重心は17.1m走行した後（約0.122sec後）に変位したガイドウェイに入り、先頭客室重心は23.625m走行した後（約0.169sec後）に入る。そしてそれぞれその0.09sec後に再び正常なガイドウェイに入る。

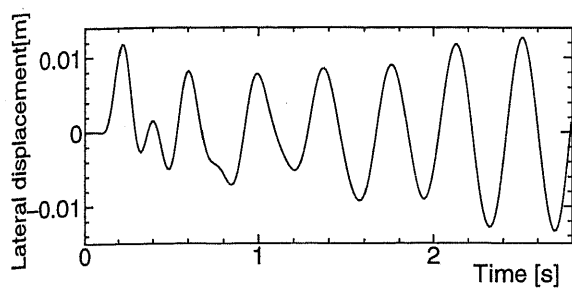
図4.108に各台車の横方向運動を示す。まず変位ガイドウェイに入る時に0.01mの変位が起こり、その0.09sec後に変位ガイドウェイを通過することにより変位が減少する。4つの台車運動を比較すると、ガイドウェイがステップ変位した場合と同様に時間はずれているが、ほぼ同じ運動を行っていることが分かる。よって前方の台車の外乱の影響がほとんど後方台車に伝わっていない。図4.109に上下運動を示す。運動にはEDS浮上力による周期が0.2sec程度の振動と2次系バネによる周波数が低い振動が加わっている。台車の振動は $\pm 2\text{mm}$ 程度であり、台車モデルの1/5となっている。図4.110にヨーイング運動を示す。ここでも非接続台車と接続台車で運動が異なる。まず変位ガイドウェイに突入する時に正のヨーイング角を発生させるトルクが生じ、その直後に変位ガイドウェイを通過する時の逆向きのヨーイング角が発生する。ステップ変位の場合と同じく、先頭と第4台車ではその後の振動は小さいが、接続台車では客室間の位置の差の影響を受けるため、振動が大きくなっている。図4.110にローリング運動を示す。台車が変位ガイドウェイに入る時にステップ力およびトルクを受けるため、台車モデルと同じく、浮上コイルに接近する側を上昇させる方向に回転する。通過する時にも同様の力、トルクを受けるため、振動はガイドウェイがステップ変位した場合に比べて大きくなっている。

図4.112(e)に各台車の $y-z$ 平面軌跡を示す。先頭台車が最も運動が発散しているように見られるが、これはガイドウェイの変位を通過してからの時間が最も長いからである。台車の軌跡を見ると4台車の運動はほぼ同じであるといえる。また運動範囲は増加しており、振動は発散傾向にある。

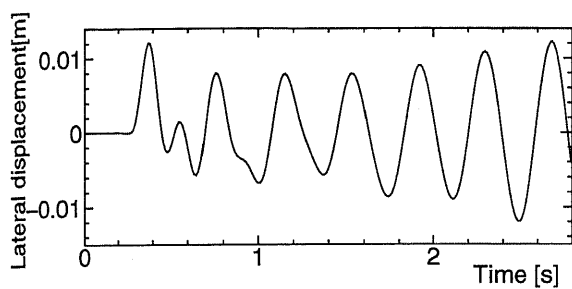
次に客室運動について示す。図 4.113 に各客室の横方向運動を示す。3 つとも振動の開始点がずれているだけで同じ運動となっており、ほぼ $y=0.01\text{m}$ を中心に運動している。0.09sec 後に列車は正常なガイドウェイに戻るなので客室の横方向変位はあまり大きくなり、6mm 以下とガイドウェイがステップ変位した場合の半分となっている。図 4.114 に各客室の上下運動を示す。運動は小さく、1mm 程度しか変位しないが、先のガイドウェイのステップ変位の場合の 2 倍となっている。これは 2 回ガイドウェイ変位を受けるので台車の上下変位が大きくなっているためである。図 4.115 に各客室のヨーイング運動を示す。各車両の前方台車に変位ガイドウェイに入って横方向に変位するために、前方が回転し客室にヨーイング角が発生する。そして 0.09sec 後に正常なガイドウェイに戻るなので回転角が 0.2mrad で反対側に回転し始める。これはステップ変位の場合の半分である。変位を通過した後はヨーイング角の平均値はほぼゼロになる。先頭客室以外の 2 つの運動は同じになっているが、これは後方の 2 つの客室が、それぞれの前の客室の回転運動の影響を受けるためである。図 4.116 に各客室のローリング運動を示す。横方向外力により変位した客室は下部に設置された 2 次系バネにより、正の方向にローリング運動をする。台車に変位ガイドウェイに入るときに受けるステップトルクにより発生する負のローリング角の影響は客室には出ず、その後に台車が y の正の方向に移動して起こる正のローリング角によって、客室にも正のローリング角が発生し、その後は振動運動を行なう。ステップ変位の場合と比較すると、横方向変位が小さいためにローリング角変動も小さく、約 40% 減少している。

図 4.117 に $t=0$ から $t=2.8\text{sec.}$ までの $y-z$ 平面での重心の軌跡を示す。それぞれの客室はほぼ同じ運動をしており、上下方向にはほとんど変位していないことが分かる。

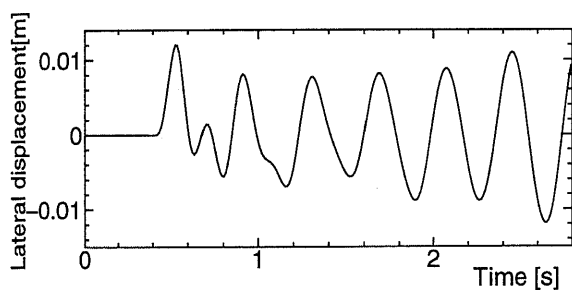
台車モデルと比較すると、2 次系および客室運動に振動が吸収されるので、台車振動は小さくなっている。特に上下振動にその影響は大きく見られる。ガイドウェイがステップ変位した場合と比較すると、客室の変位は小さくなっていることが分かる。これはガイドウェイ変位の区間が 1 セクションで通過時間にして 0.09sec であり、影響が客室に達する前に列車は正常なガイドウェイに達するからである。また、ここでもヨーイング角以外の運動は 4 つの台車でほぼ一致し、これは重心の軌跡を見ても明らかである。次にこの原因について検討する。



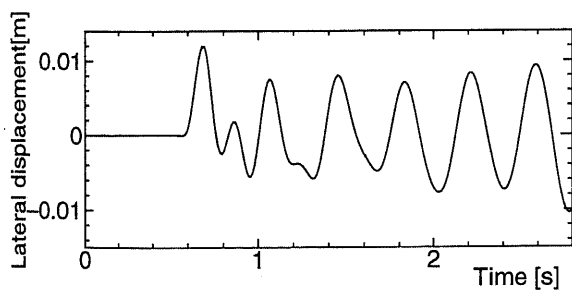
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

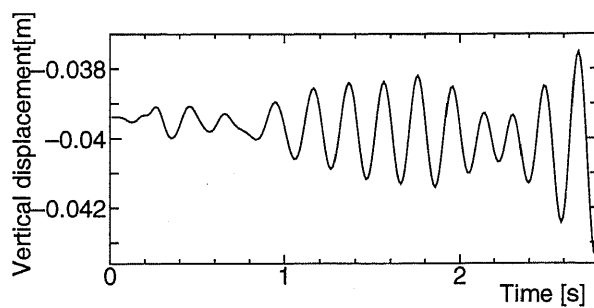


(c) 第3台車

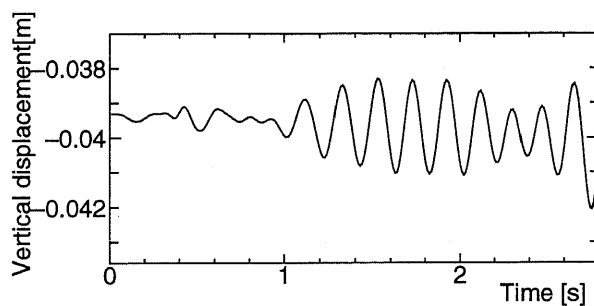


(d) 第4台車

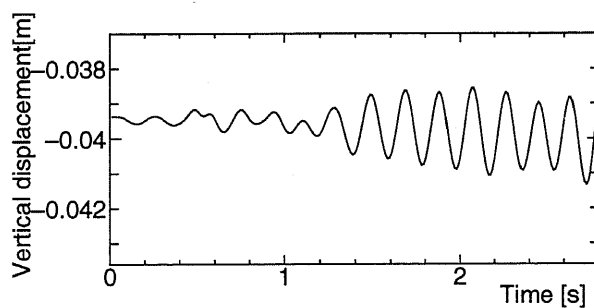
図 4.108: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車横方向運動



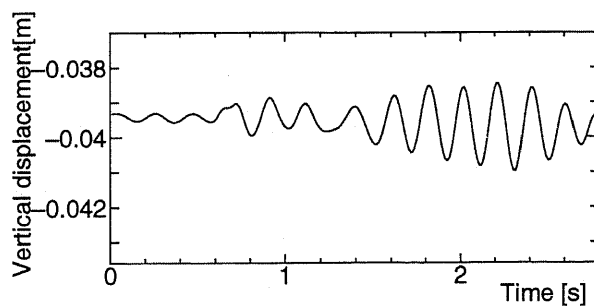
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

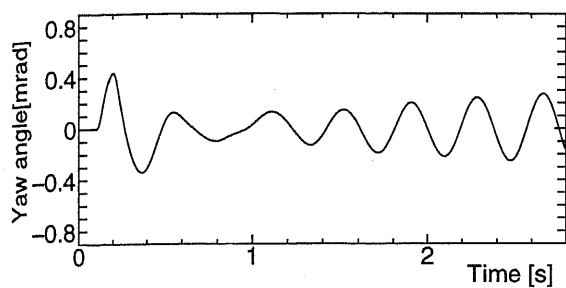


(c) 第3台車

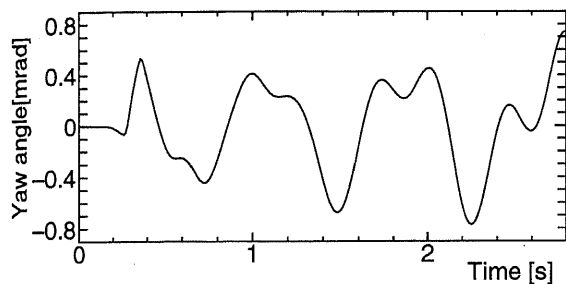


(d) 第4台車

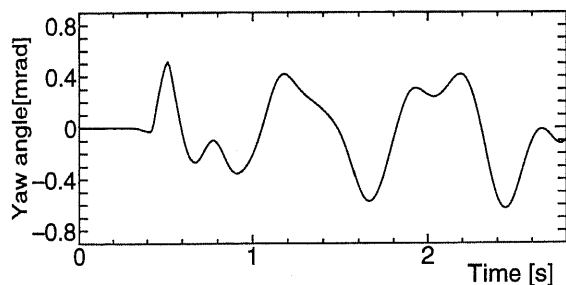
図 4.109: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車上下運動



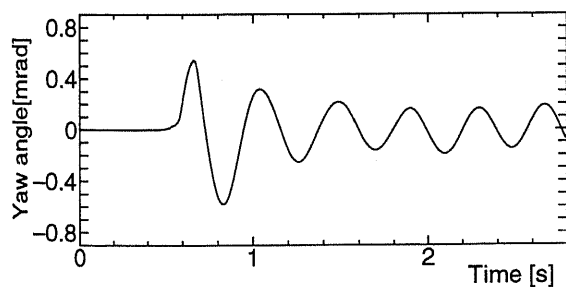
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

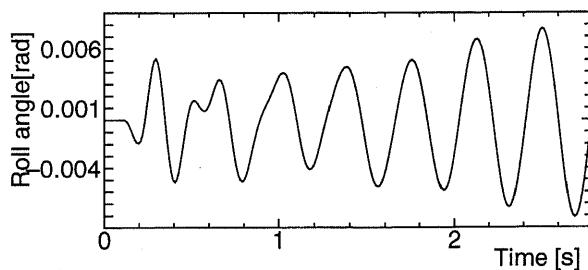


(c) 第3台車

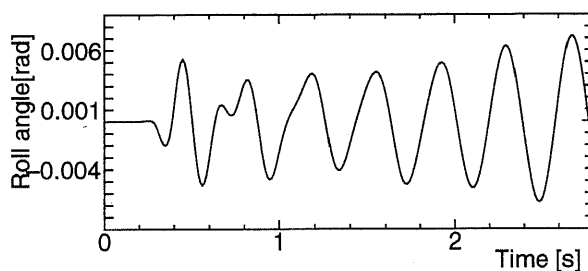


(d) 第4台車

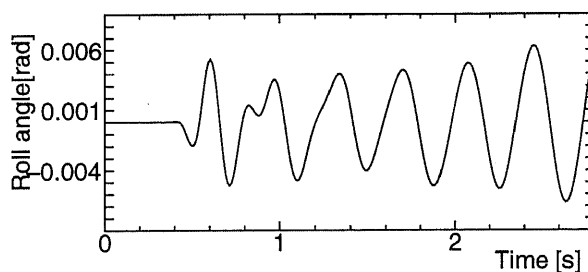
図 4.110: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車ヨーイング運動



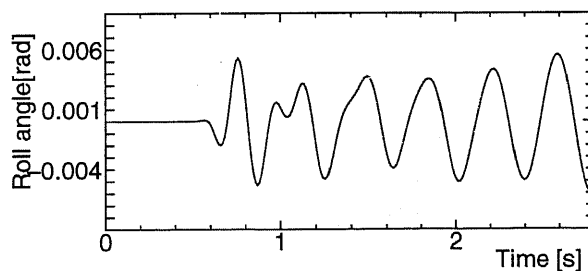
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

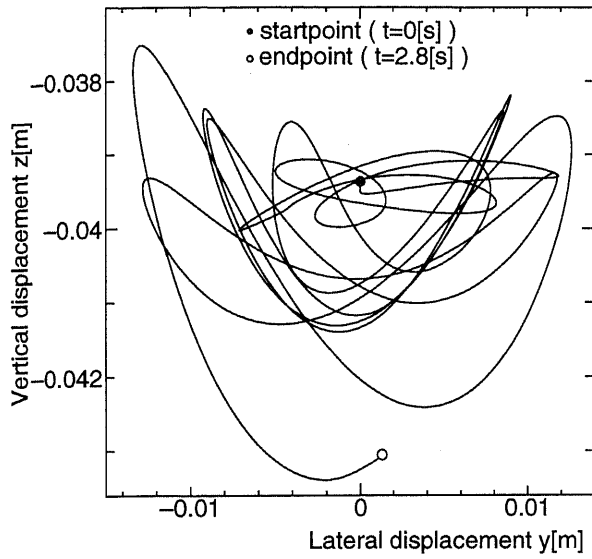


(c) 第3台車

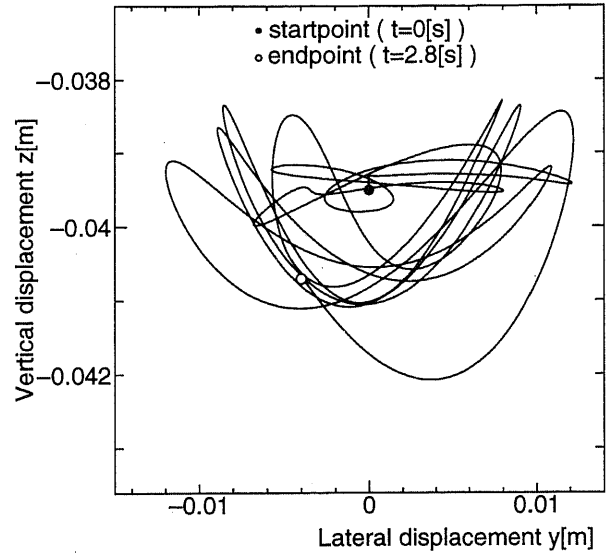


(d) 第4台車

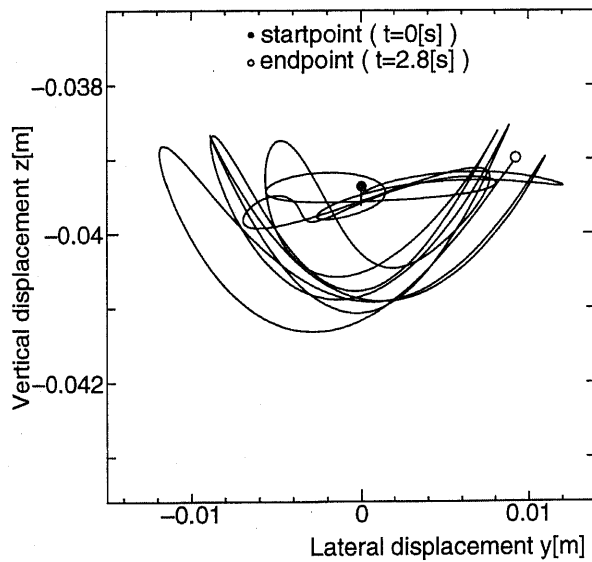
図 4.111: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車ローリング運動



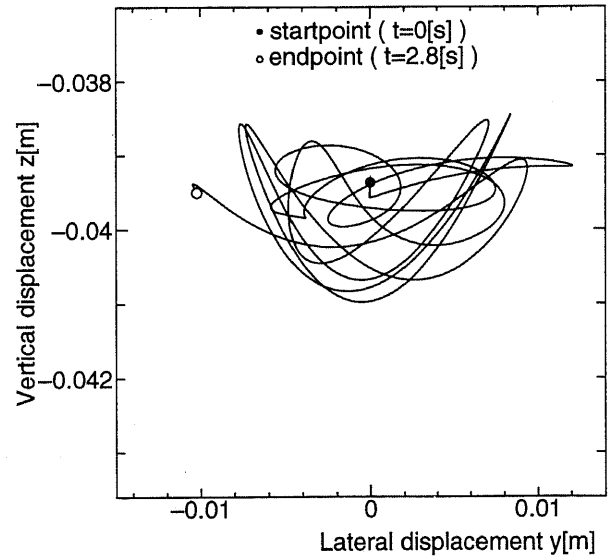
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

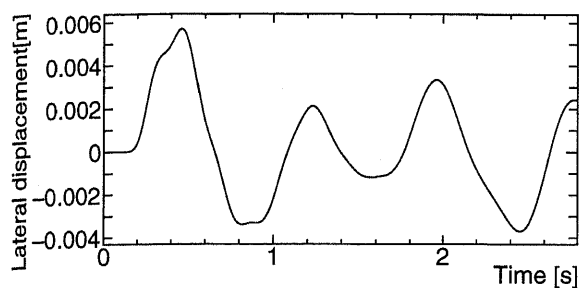


(c) 第3台車

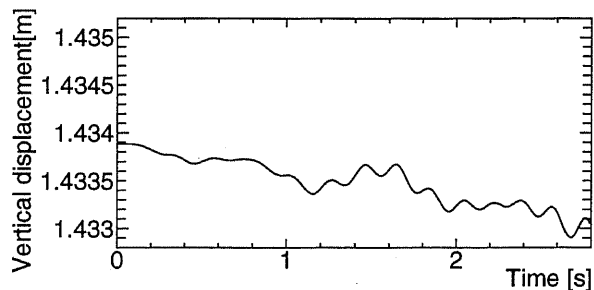


(d) 第4台車

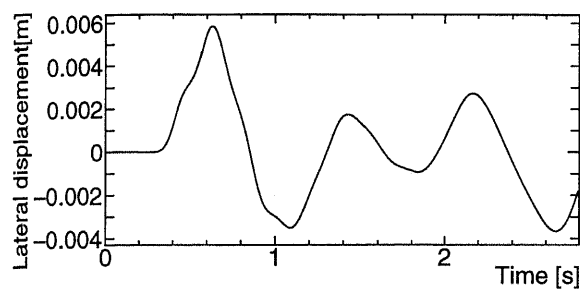
図 4.112: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の台車重心の軌跡



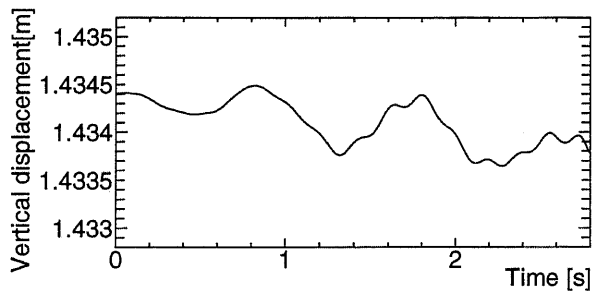
(a) 先頭客室



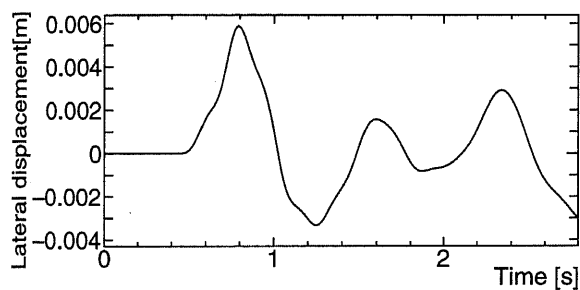
(a) 先頭客室



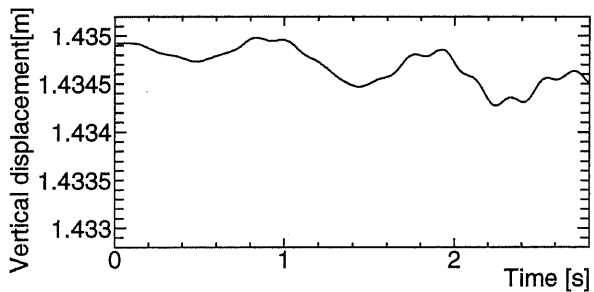
(b) 第2客室



(b) 第2客室



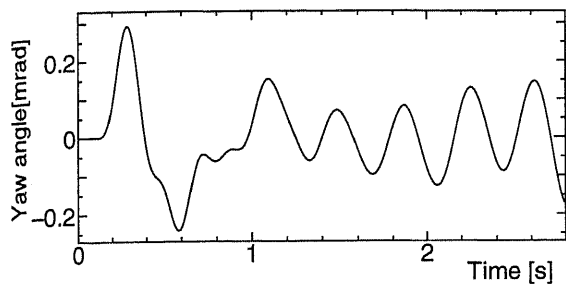
(c) 第3客室



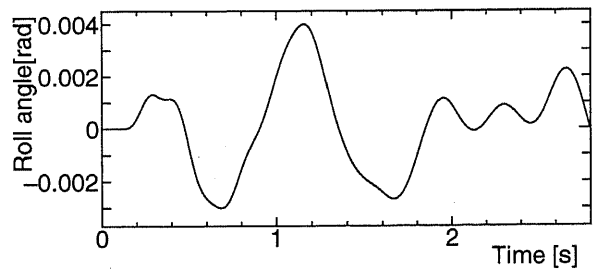
(c) 第3客室

図 4.113: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室横方向運動

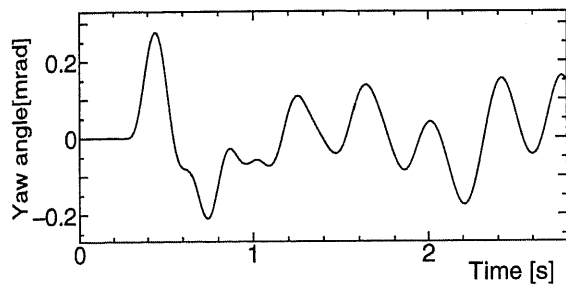
図 4.114: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室上下運動



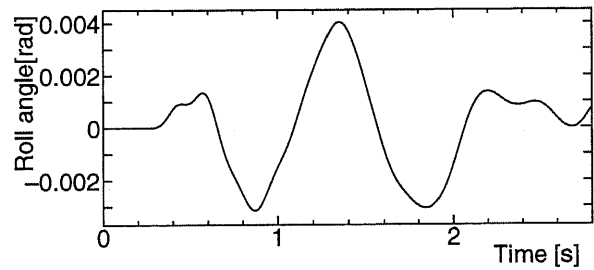
(a) 先頭客室



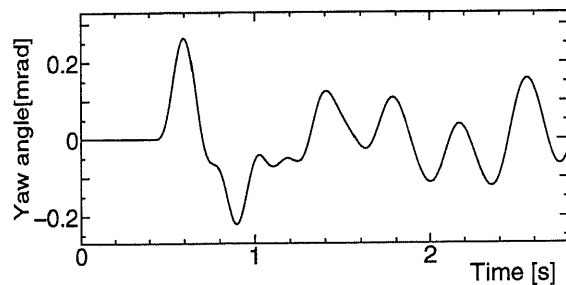
(a) 先頭客室



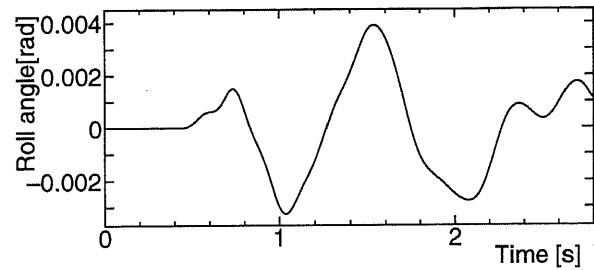
(b) 第2客室



(b) 第2客室



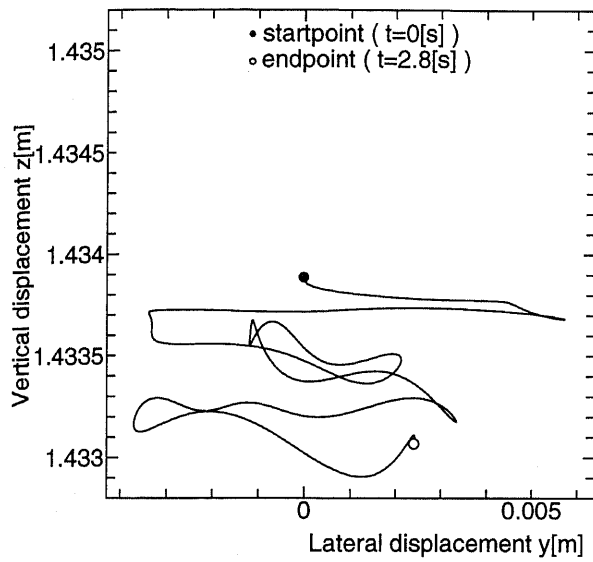
(c) 第3客室



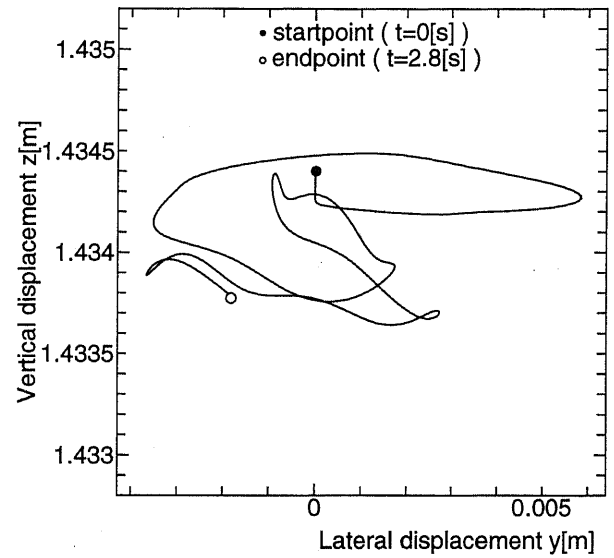
(c) 第3客室

図 4.115: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室ヨーイング運動

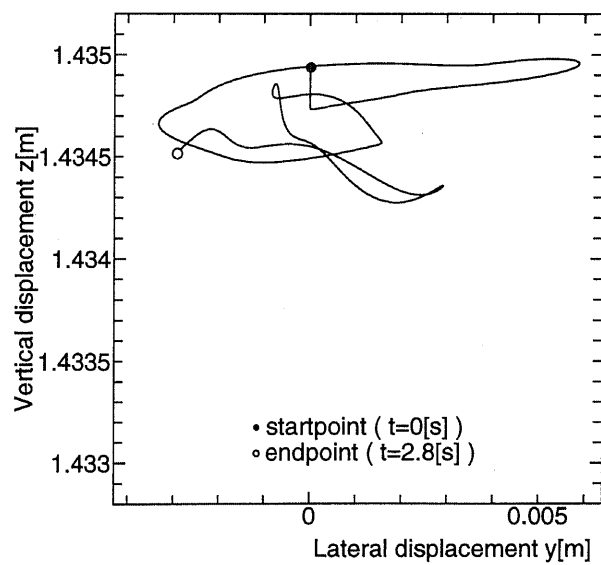
図 4.116: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y=0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室ローリング運動



(a) 先頭客室



(b) 第2客室



(c) 第3客室

図 4.117: ガイドウェイの1セクションに $\Delta y = 0.01\text{m}$ の横変位が起こった場合の客室重心の軌跡

4.5.3 前方台車の後方台車への影響が少ない原因

ガイドウェイに横方向変位が起こった場合の結果からはヨーイング運動を除いた各台車の運動はほとんど同じであり、前方の台車が外乱を受けたための影響が後方の台車に伝わっていないことが示された。この原因は EDS の浮上案内特性と 2 次系の機械バネの強さとの関係にあると考えられる。

表 4.5 に EDS の電磁バネ係数と 2 次系の機械バネ係数の特性の比較を示す。ここで EDS の電磁バネ係数は第 3 章で示したように電磁力をその時の台車変位で割ったものであり、等価的に機械バネにおけるバネ係数となる。EDS による電磁バネは位置に対して非線形性を持つため、ここでは台車が $(y, z) = (0, -0.04\text{m})$ にある時の値を示す。

台車と客室を結合する 2 次系の機械バネ係数は示すように上下 $1.96 \times 10^5 \text{ N/m}$ 、左右 $2.25 \times 10^5 \text{ N/m}$ であるのに対して、EDS による電磁バネ係数は上下約 $5.2 \times 10^6 \text{ N/m}$ 、左右約 $3.5 \times 10^6 \text{ N/m}$ である。よって、EDS によるバネが 2 次系のバネよりも固いので、客室が変位することにより、外乱による台車変位が 2 次系バネによって吸収され、隣接する台車には変位の影響が小さくなる。

表 4.5: EDS の電磁バネ係数と 2 次系の機械バネ係数の特性の比較

EDS	台車位置 $(y, z) = (0, -0.04\text{m})$
上下	$5.2 \times 10^6 \text{ N/m}$
左右	$3.5 \times 10^6 \text{ N/m}$
2 次支持系	
上下	$1.96 \times 10^5 \text{ N/m} \times 4 \text{ 個}$
左右	$2.25 \times 10^5 \text{ N/m} \times 4 \text{ 個}$

4.5.4 列車モデルによるカーブ走行特性の解析

列車モデルを用いてカーブ走行時の走行特性を示す。カーブのガイドウェイモデルは台車モデルと同じく図 4.57 のようになる。またここでは台車モデルでの解析の結果、実際の実験線の形状に近く、走行特性もよい緩和曲線区間がある場合についてのみ検討を行なう。

図 4.118 に解析に用いた緩和曲線およびカーブ区間の形状を示す。台車モデルの場合と同様にカーブ区間の前に 806.4m(64 セクション) の緩和曲線部分があり、この部分でガイドウェイの曲率半径を減少させ同時にカント角 ($y-z$ 平面の角度) を増加させる。ガイドウェイの曲率半径は前のガイドウェイセクションに対して方向角 ($x-y$ 平面の角度) を $2.461 \times 10^{-5} \text{rad}$ ずつ増加させることで変化させる。カント角は前のセクションに対して $2.727 \times 10^{-3} \text{rad}$ ずつ増加させる。最終的に曲率半径は 8000m, カント角は $0.1745 \text{rad}(10^\circ)$ になる。

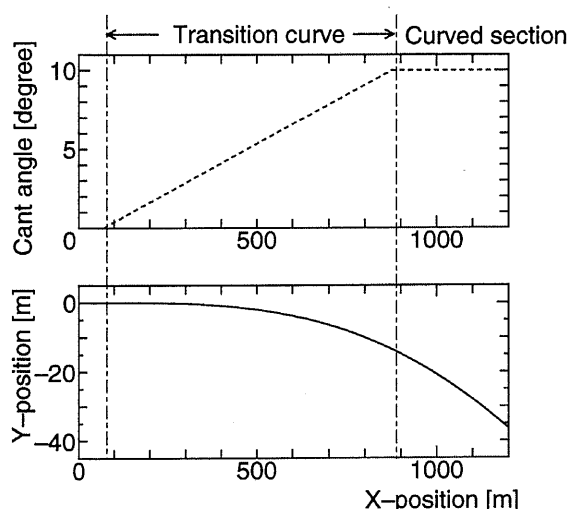


図 4.118: 緩和曲線およびカーブ区間形状

図 4.119～4.123 に列車がカーブ区間を走行する際の台車運動を示す。まず列車は直線区間を $v_x=140 \text{m/s}$ で走行し、出発してから 17.1m 走行した後 (約 0.122sec 後) に先頭台車重心が、23.625m 走行した後 (約 0.169sec 後) に先頭客室重心が緩和曲線区間に入る。台車モデルと同様に図中の値はガイドウェイに固定した相対座標系で表しており、台車重心が含まれるガイドウェイについての相対座標となっている。ヨーイング角およびローリング角についてもガイドウェイに対する相対角度となっている。先頭台車は $t=5.882 \text{sec}$ 後に緩和曲線を通り、後続の台車はその後 0.154sec ごとに通過する。

図 4.119 に台車の横方向運動を示す。時間の経過とともにカーブ曲率半径が小さくなるので、変位は大きくなる。台車モデルの結果と比較すると、平均値はほぼ同じ値で推移しており、緩和曲線終了後の変位は約 2.6cm となっている。しかし振幅が大きくなっており、約 1.5cm と台車モデルの 1.5 倍となっている。これは客室と台車を分離したことでカーブを走行している時に客室が遠心力により振動し、その結果台車振動の振幅が増加

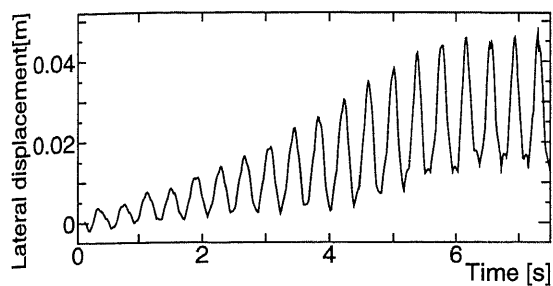
したからである。図 4.120 に台車の上下運動を示す。振動幅は大きくなっており、これは客室振動の影響である。また変位の平均値は大きくなる傾向にあり台車モデルと一致する。図 4.121 にヨーイング運動を示す。図中に見られる周期 0.09sec の振動成分はステップ状に変化するガイドウェイ方向角との相対値をとっているからである。横方向変位の増加とともにカーブ方向角への追従性が悪くなり、相対角度が増加している。ここで連接台車である第 2、第 3 台車には非連接台車には見られない周期約 1sec の振動成分が見られる。これは非連接台車が接続されている 1 つの客室運動の影響しか受けないのに対して連接台車が前後 2 つの客室運動の影響を受けるためである。図 4.122 にローリング運動を示す。横方向変位の増加とともに、カーブ外側の浮上力が増加しローリングトルクが大きくなるのでカント角との差が増加する。そして緩和曲線の終了時点で平均約 +0.025rad の増加で絶対座標系の値では 0.21rad となり台車モデルとほぼ一致する。

図 4.123 に台車が緩和曲線を通過中の $t=0 \sim 5.75\text{sec}$ までの台車重心の $y-z$ 平面軌跡を示す。時間の経過とともに運動の振幅が増加している。また台車モデルと比較すると、横方向変位は 4cm で 2 倍、上下変位は 1.2cm で 4 倍となっており、運動が不安定になっていることが分かる。先頭台車が最も運動が発散しているように見られるが、これはカーブ区間に入ってから時間が最も長いからである。台車の軌跡を見ると 4 台車の運動はほぼ同じであるといえる。また運動範囲は増加しており、振動は発散傾向にある。

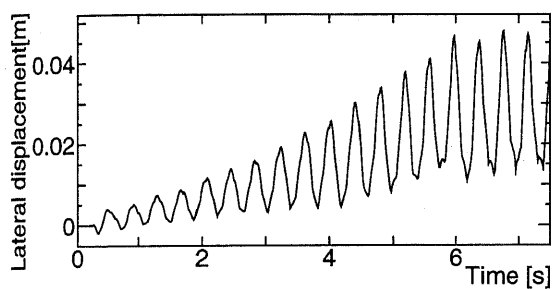
次に客室運動について示す。図 4.124 に各客室の横方向運動を示す。3 つとも振動の開始点がずれているだけで同じ運動となっている。しかし、図 4.119 に示すように台車は遠心力によりカーブ外側、つまり $y \geq 0$ の領域で運動するのに対して客室は $y \leq 0$ の領域に振動の中心が入っており、これは客室重心が常にガイドウェイに対してカーブ内側に入っていることを意味する。そしてその変位は時間とともに増加している。

また各客室ともに緩和曲線が終った付近で大きな振動が見られる。これは次のように考えられる。緩和曲線内で一定の割合で曲率半径を減少させていたので、遠心力による客室への横方向加速度が一定の割合で増加していた。しかし、カーブ区間に入ったため加速度の増加が止まり、 $t=6.4\text{sec}$ 付近に見られるように $y=-0.03\text{m}$ と大きく内側に変位する。

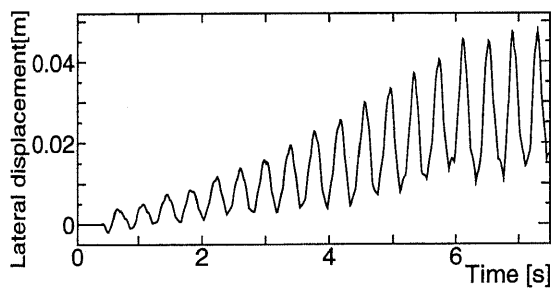
図 4.125 に各客室の上下運動を示す。初期位置のところで述べたように各客室の初期位置は異なっている。曲率半径の減少とともに客室が下方に移動する。台車変位は 6mm 程度であり、横方向運動と同じく緩和曲線が終った付近で大きな振動が見られる。図 4.126 に各客室のヨーイング運動を示す。周期が 0.09sec の振動成分はガイドウェイ方向角がステップ状に変化しているためである。時間が経過しカーブの曲率半径が減少するに従ってカーブ方向角への追従性が悪くなる。図 4.127 に各客室のローリング運動を示す。台車のローリング運動の影響が 2 次系バネによって伝えられ、EDS と 2 次系のバネの固さが違うため振動周期は異なるが、平均値としては台車とほぼ同じローリング角が出ている。図 4.128 に $t=0$ から $t=5.7\text{sec}$ までの $y-z$ 平面での重心の軌跡を示す。それぞれの客室はほぼ同じ運動をしており、横方向の運動領域の中心は $y \leq 0$ であることが分かる。



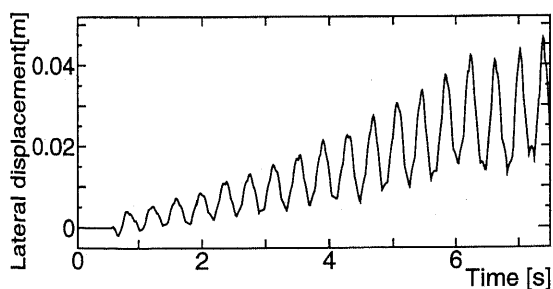
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

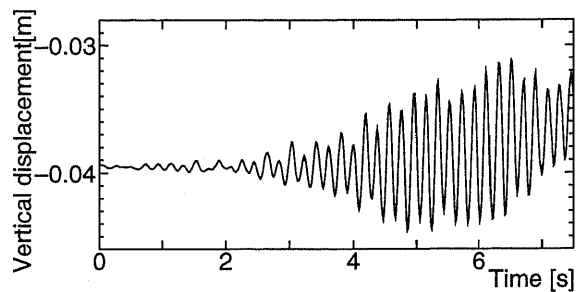


(c) 第3台車

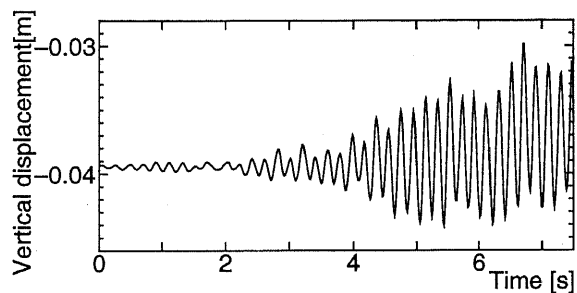


(d) 第4台車

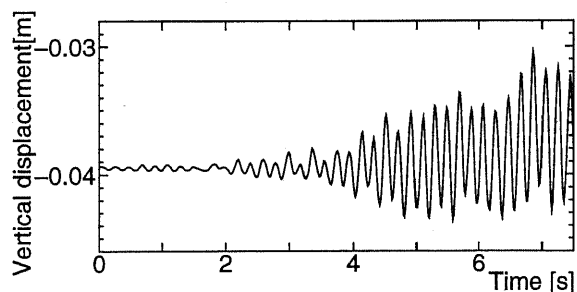
図 4.119: 列車がカーブを通過する際の台車横方向運動 (ガイドウェイ固定座標系)



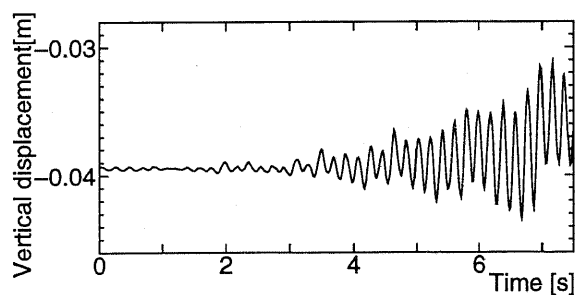
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

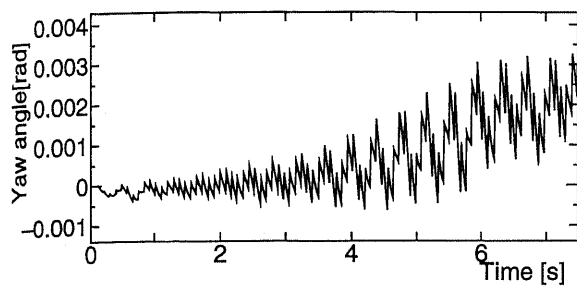


(c) 第3台車

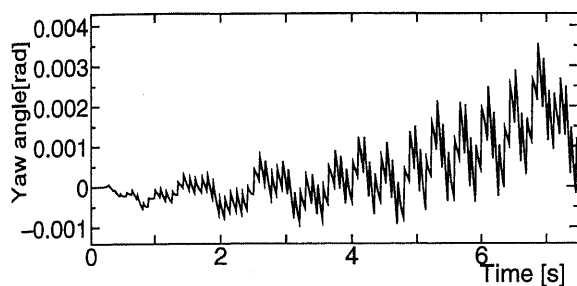


(d) 第4台車

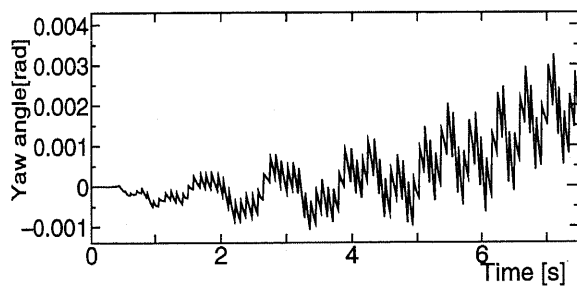
図 4.120: 列車がカーブを通過する際の台車上下運動 (ガイドウェイ固定座標系)



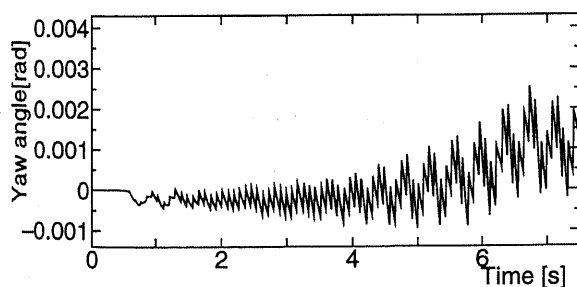
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

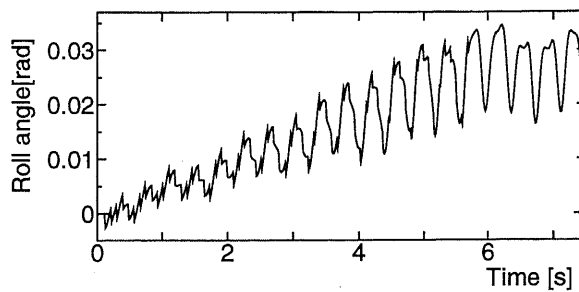


(c) 第3台車

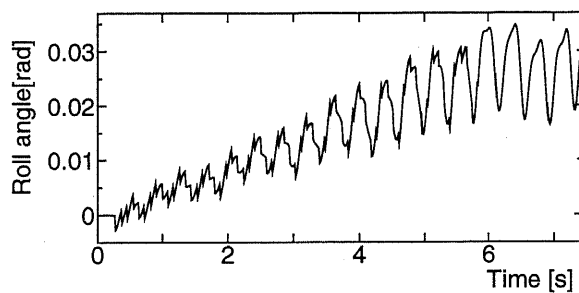


(d) 第4台車

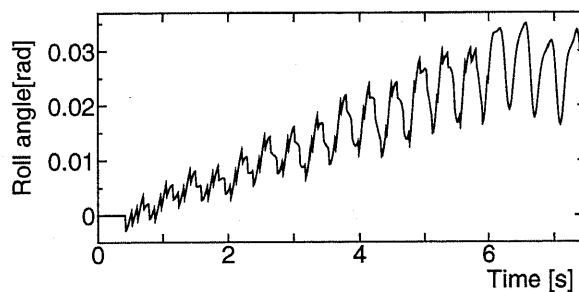
図 4.121: 列車がカーブを通過する際の台車ヨーイング運動 (ガイドウェイ固定座標系)



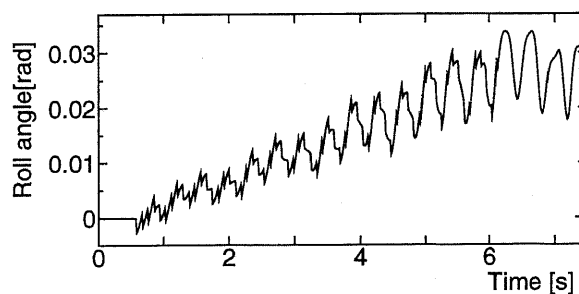
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

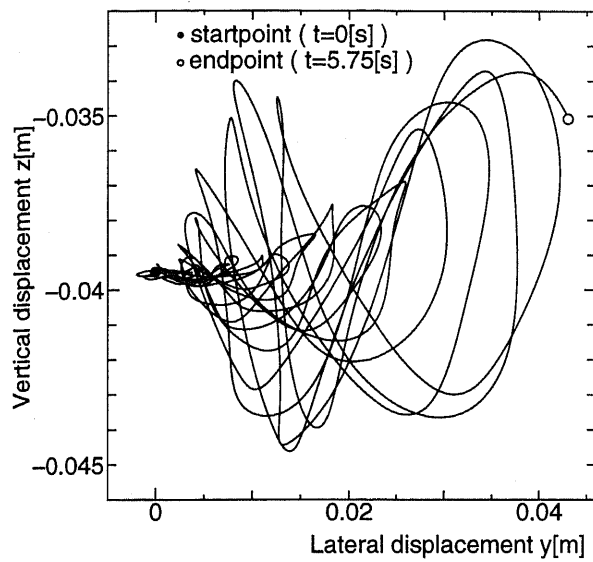


(c) 第3台車

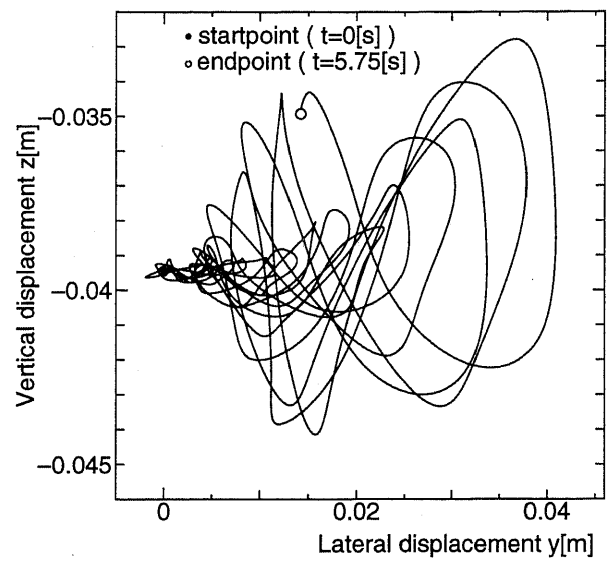


(d) 第4台車

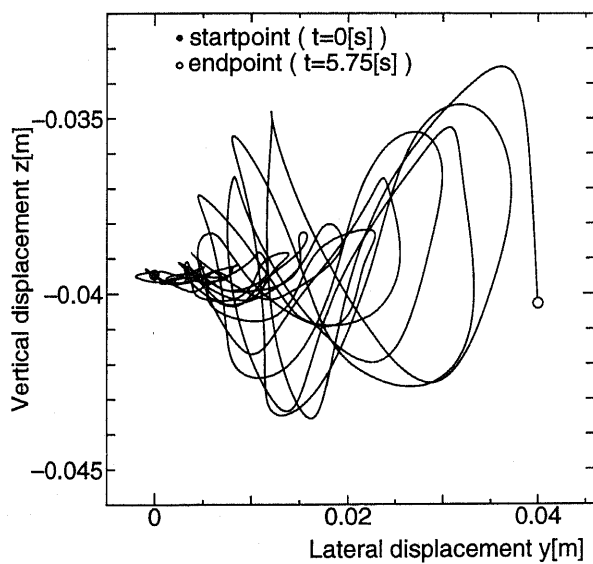
図 4.122: 列車がカーブを通過する際の台車ローリング運動 (ガイドウェイ固定座標系)



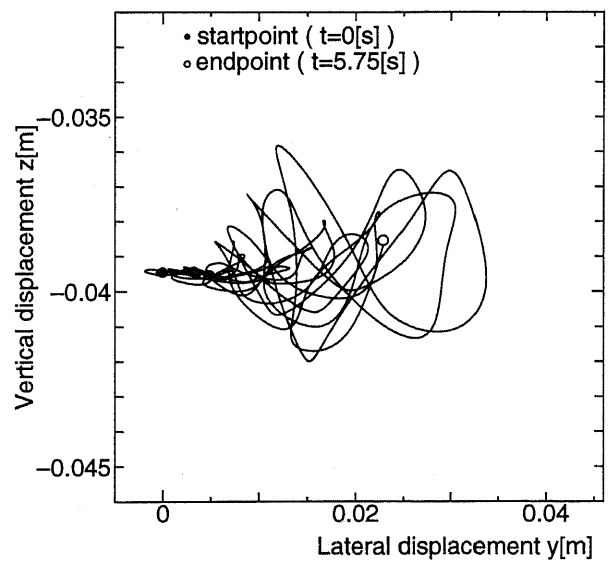
(a) 先頭台車



(b) 第2台車

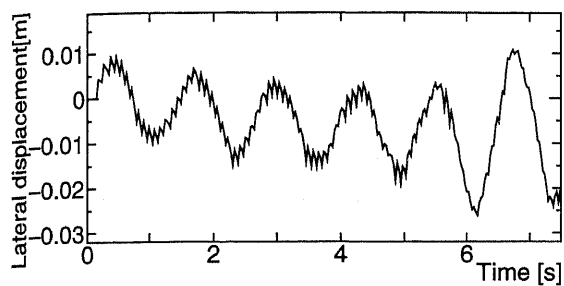


(c) 第3台車

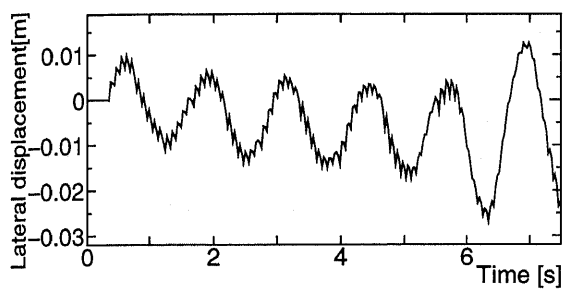


(d) 第4台車

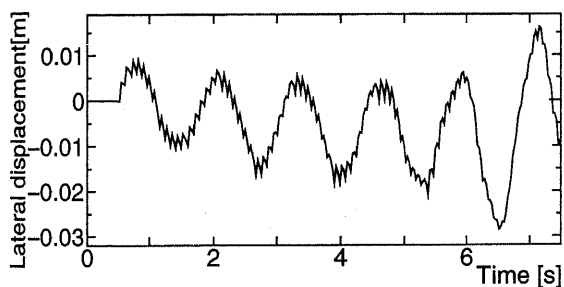
図 4.123: 列車がカーブを通過する際の台車重心の軌跡 (ガイドウェイ固定座標系)



(a) 先頭客室

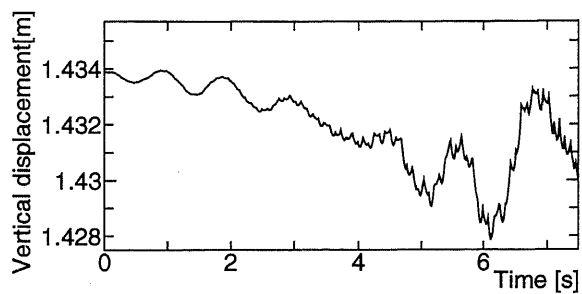


(b) 第2客室

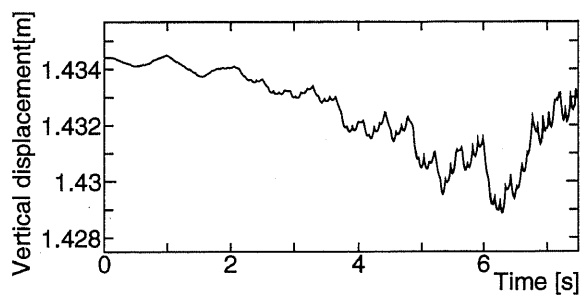


(c) 第3客室

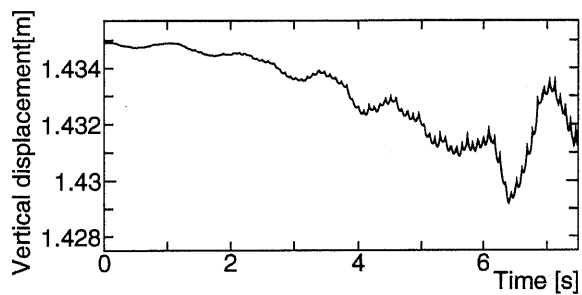
図 4.124: 列車がカーブを通過する際の客室横方向運動 (ガイドウェイ固定座標系)



(a) 先頭客室

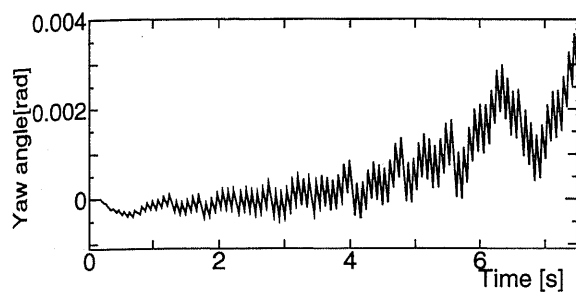


(b) 第2客室

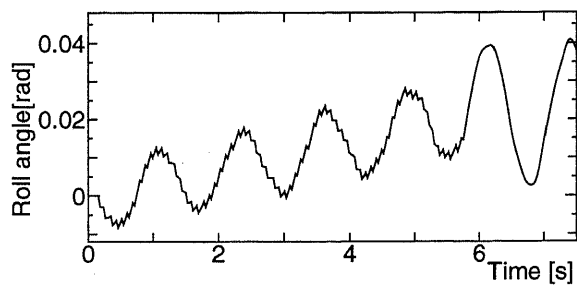


(c) 第3客室

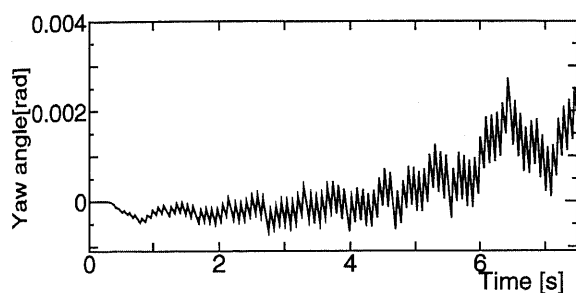
図 4.125: 列車がカーブを通過する際の客室上下運動 (ガイドウェイ固定座標系)



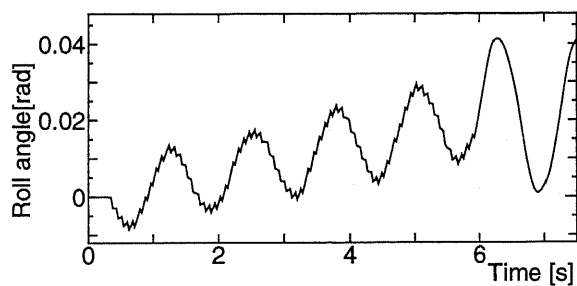
(a) 先頭客室



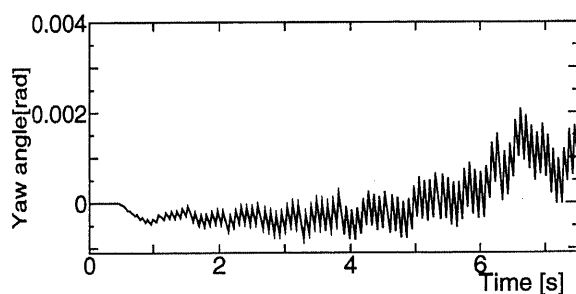
(a) 先頭客室



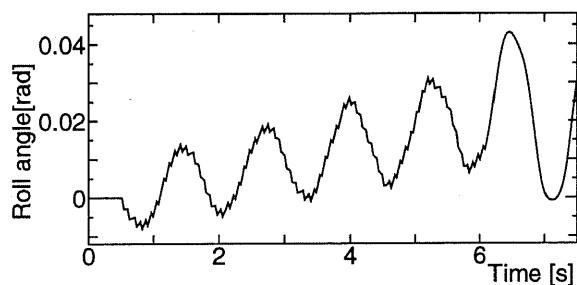
(b) 第2客室



(b) 第2客室



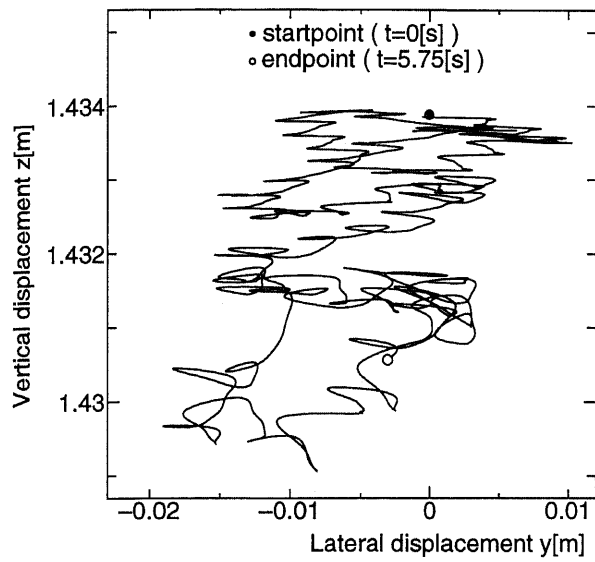
(c) 第3客室



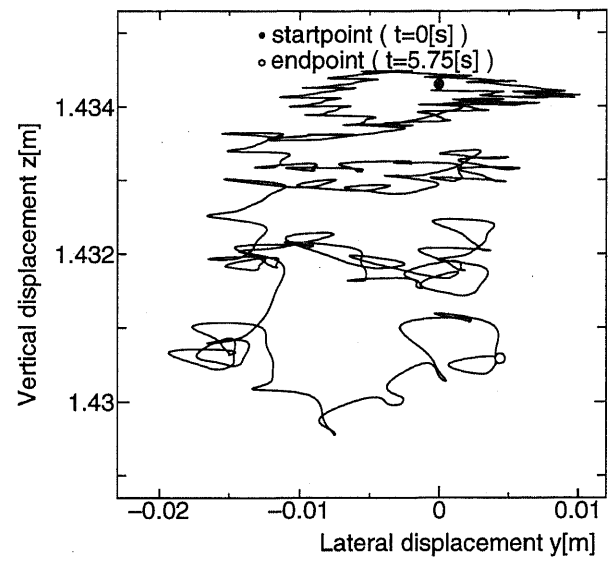
(c) 第3客室

図 4.126: 列車がカーブを通過する際の客室ヨーイング運動 (ガイドウェイ固定座標系)

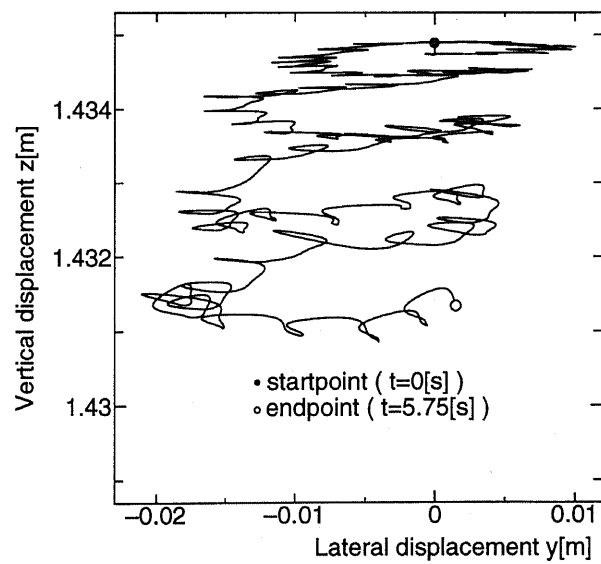
図 4.127: 列車がカーブを通過する際の客室ローリング運動 (ガイドウェイ固定座標系)



(a) 先頭客室



(b) 第2客室



(c) 第3客室

図 4.128: 列車がカーブを通過する際の客室重心の軌跡 (ガイドウェイ固定座標系)

ここで台車がカーブ外側に移動するにも関わらず、客室重心がカーブ内側に移動する理由について検討する。図 4.129 に列車がカーブ区間を走行している様子 ($y-z$ 平面) を示す。まず台車が遠心力によりカーブ外側に移動する。ここで EDS の特性により図 4.122 に示すローリング角が発生する。このローリング角は 2 次系バネを通じて客室にも伝えられる。よって図 4.129 右側のように列車全体が傾斜する形になる。すると、客室重心は台車重心よりも約 1.48m 上にあるので台車重心は $y \geq 0$ の領域にあるが、客室重心は $y \leq 0$ の領域になる。例えば緩和曲線終了点付近で、台車のガイドウェイに対する相対ローリング角は約 0.025rad 、客室もほぼ同じである。よって客室重心は概算すると $1.48 \times \sin(0.025) = 0.037\text{m}$ 台車重心よりも内側にあることになる。ここで図 4.124 を見ると台車変位は約 0.026m であり客室が約 -0.01m であるので両者の差が約 0.037m と一致していることが分かる。

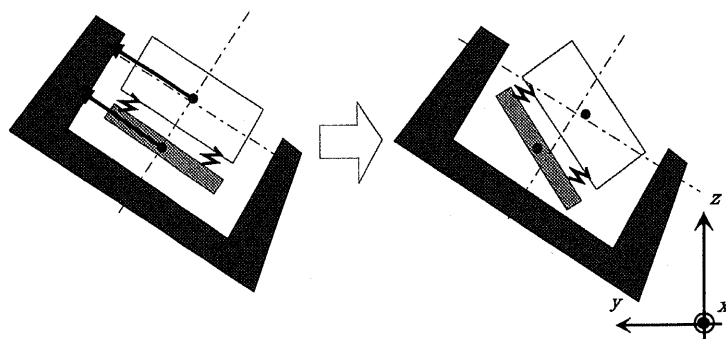
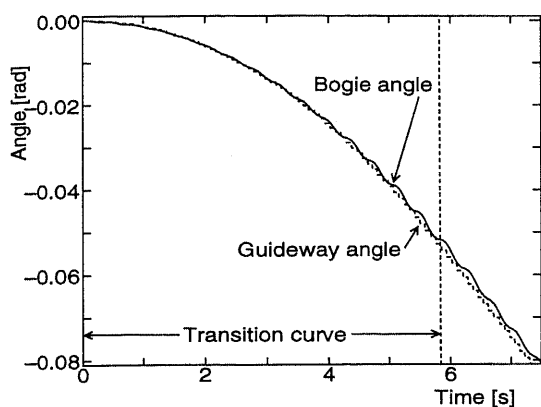


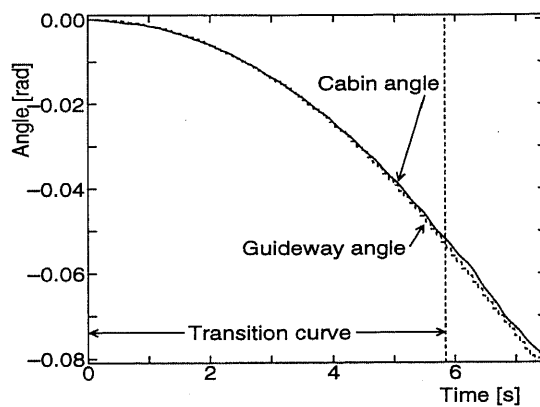
図 4.129: 列車がカーブ区間を走行している様子 ($y-z$ 平面)

台車モデルと列車モデルは重心も違い、列車モデルは 2 剛体モデルなので単純に比較はできないが、重心が高くなっており、客室の振動運動も加わるので台車運動の不安定性は増加している。しかし、横方向変位やローリング変位の平均値はほぼ台車モデルと同じになっており特性は同じである。またここでも各台車の運動に大きな差は見られず、各台車の運動は独立性が強いといえる。

次に絶対座標系でのカーブ追従性を見るために、図 4.130 に絶対座標系で表現したヨーイング運動を示す。ここで各台車、客室の運動はほぼ同じであるため、ここでは先頭台車・客室について示す。図中にはガイドウェイの方向角も示しているが、ヨーイング方向の運動から、台車・客室ともにガイドウェイの方向角に追随して回転していることが分かる。図 4.131 に絶対座標系で表現したローリング運動を示す。台車・客室ともに常にカント角よりも大きいローリング角が見られる。緩和曲線を通じてから発生する台車ローリング角は約 0.20rad となり、台車モデル場合の平均値とほぼ一致する。客室のローリング角はそれより 0.005rad 小さい値である 0.195rad をとる。客室にかかる遠心力による加速度の客室に水平な成分が $0.25g$ となり、重力加速度の台車に水平な成分は $-0.194g$ となる。よって車内の乗客は約 $0.05g$ 程度のカーブ外側向きの加速度を感じるようになる。

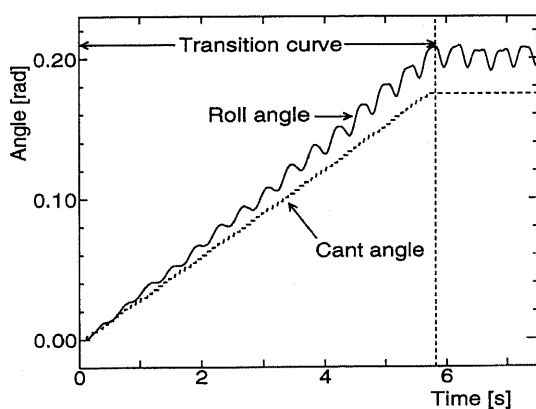


(a) 先頭台車

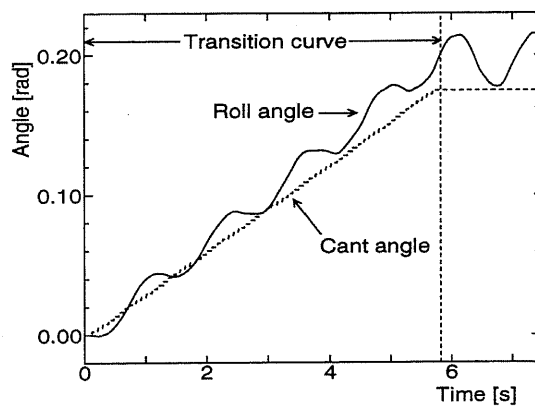


(b) 先頭客室

図 4.130: 先頭台車・客室がカーブを通過する際のヨーイング運動 (絶対座標系、緩和曲線あり)



(a) 先頭台車



(b) 先頭客室

図 4.131: 先頭台車・客室がカーブを通過する際のローリング運動 (絶対座標系、緩和曲線あり)

4.5.5 列車モデルによる走行特性解析のまとめ

ここでは台車モデルを発展させた列車モデルについて列車が外乱を受けた時やカーブ走行時の走行特性解析を行なった。その結果次のようなことが分かった。

- 外乱を受けた直後の台車運動の傾向は台車モデルと同じである。しかし、その後客室との間の2次サスペンション系が台車運動に作用し、振動運動に2次系に起因する振動モードが見られる。
- 外乱をうけた台車には変位が起こるが、その変位は隣接する台車にはほとんど波及しない。これは EDS による電磁バネが2次系バネよりも固いため、外乱を受けた台車の変位を2次系が吸収するためである。よって現在の2次系の設計では台車間の相互作用が小さく、客室の変位によって外乱の影響が吸収されることになる。
- カーブ区間走行については、列車モデルは台車モデルと比較すると重心が高くなっており、客室の振動運動も加わるために台車モデルよりも台車運動の振動振幅は増加する。
- 台車の横方向変位やローリング変位の平均値はほぼ台車モデルと同じになっており特性は同じである。また前方の台車の変位の影響が後方の台車にほとんど波及しない。
- カーブ走行中は台車が約 3cm カーブ外側に移動するために、カント角よりも大きい台車ローリング角が見られる。緩和曲線を通してから発生する台車ローリング角はカント角よりも大きい約 0.20rad となり、台車モデル場合の平均値とほぼ一致する。客室のローリング角はそれより 0.005rad 小さい値である 0.195rad をとる。客室にかかる遠心力による加速度の客室に水平な成分が 0.25g となり、重力加速度の台車に水平な成分は -0.194g となる。よって遠心力と均衡させるためには現在のカント角よりも大きいカント角が必要となる。

4.6 結言

本章では台車モデルおよび列車モデルについて様々な条件における解析を行なった。まず、LSM、EDS についての基本特性について述べ、台車位置に対する依存性を求めた。そして台車の横方向振動とローリング運動の強い相関性について示した。さらに台車モデルについて外乱を受けた場合の走行特性を求め、推進力や浮上案内力、そして運動への影響について検討した。

またカーブ走行時の走行シミュレーションを行ない、カーブ区間ではカーブカント角よりも常に大きいローリング角が発生すること、また、緩和曲線をつけることで振動運動が大きく改善され、推進力や浮上案内力の安定性が増加することを示した。

同様の条件に対して列車モデルでの解析を行なった。客室と台車が2つに分離し、2次系が存在するために台車の上下振動は台車モデルに比較すると小さくなる。上下、左右運動は台車モデルとほぼ同じになるが、回転運動では2次系の影響が大きく出ることが分かった。またカーブ走行については、客室と台車を分離したことで全体に重心が上昇した分、安定性は低下するが、台車の各変位の平均値はほぼ台車モデルの結果と一致した。

前方を走行する台車が外乱を受けたときに後続台車に与える影響について検討した。その結果、前方台車が外乱を受けてもその影響は後続の台車にはほとんどなく、各台車は同様の運動を行なう。これは EDS をバネ近似したときのバネ係数が2次系に吸収されるため、客室が変位するのみで後続の台車には影響しないからである。

第 5 章

浮上力のダンピング特性

5.1 緒言

本章では、この浮上システムが抱える課題の一つである、台車振動のダンピングを改善する方法について検討する。今までの解析結果からも明らかなように、浮上コイルと SC コイルのみの系では得られるダンピングが小さい。一方宮崎実験線での実験結果からは比較的大きなダンピングが得られており、他のダンピング要素についての検討が求められている。ここでは、まず SC コイル用磁気シールド板に誘導されるうず電流について検討した。そして、さらにダンピングを増加させるために短絡コイルを台車の SC コイルの前に設置するパッシブダンパシステムについて、コイル形状、設置位置およびその効果を求めた。さらに大きなダンピングを得るために、SC コイルの前にコイルを設置し制御された電流を流してアクティブに制御するアクティブダンパシステムを提案した。そしてその設置位置、形状について検討し、その実現性について考察した。

5.2 浮上力の基本ダンピング特性

まず、浮上力のダンピングの特性について示す [25]。この系は非線形系であり、台車を上下に自由に振動させた状態での走行シミュレーションからダンピング係数を求めるのは困難である。そこで、エネルギー収支の観点からダンピングの指標を求めることを考える。図 5.1 に解析の方法を示す。ここでは台車がある一定の周期の上下振動を保つように、強制的に外力を加えている。つまり台車が上下方向に次式のように、強制振動させられて、進行方向に一定速度で走行するようなモデルを考える。

$$z = -A \sin(2\pi ft) \quad (5.1)$$

そして台車が 1 周期分振動を行なったときに必要なエネルギー収支を見ることでダンピングの特性の指標とする。ただし、 A : 振幅, f : 振動の周波数で、振動の周波数は台車を自由運動させた場合の振動数 $f=2.35\text{Hz}$ とし、振幅は台車重量の均衡点が、8 の字コイルの中心下 4cm にあることから、 $A=4\text{cm}$ としている。

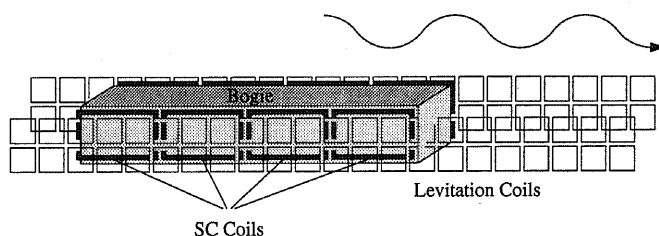


図 5.1: 台車を上下に強制振動させエネルギー収支を求めるモデル

台車は一定の周波数・振幅を保つように外力により強制的に加振されている。浮上系にダンピングがなければ、外部から外力によるエネルギーを加えなくとも振動を保つことができる。一方、浮上系にダンピングがあれば、外部からのエネルギーの出入りがなければ振動を保つことができない。すなわち、この外力が行なった仕事がダンピングの指標となり、負の値をとれば系は負のダンピング、正の値をとれば正のダンピングを持つことになる。図 5.2 にエネルギーの流れを示す。

台車が一周期間振動を行なった時、浮上力が台車に対して行なった仕事を W_{fls} 、台車上記の単振動を行なうために加えるべき外力による仕事を W_o とするとき、次の関係式が成り立つ。

$$W_{fls} + W_o = 0 \quad (5.2)$$

$$W_{fls} = \int F_{EDS,z} \frac{dz_b}{dt} dt \quad (5.3)$$

W_{fls} は式 (5.3) のようにして求めることができるので、式 (5.2) を用いて W_o を算出しダンピングの指数とする。 W_o の値が正であればダンピングは正になり、 W_o の値が負であればダンピングは負になる。

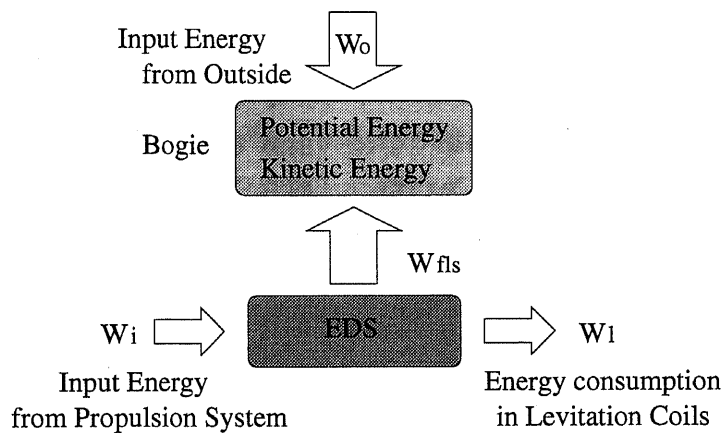


図 5.2: 電磁誘導型超電導磁気浮上システムのエネルギーの流れ

このようにして上下振動の一周期間にわたってのエネルギー収支を検討することにより得られた結果を示す。図 5.3 にエネルギー収支と台車の走行速度と関係を示す。エネルギーが正の部分ダンピングが正、負の部分ダンピングが負となる。図より浮上速度全域に渡ってダンピングが負になる。この結果から SC コイルと浮上コイルのみの系では十分なダンピングがないと言える。

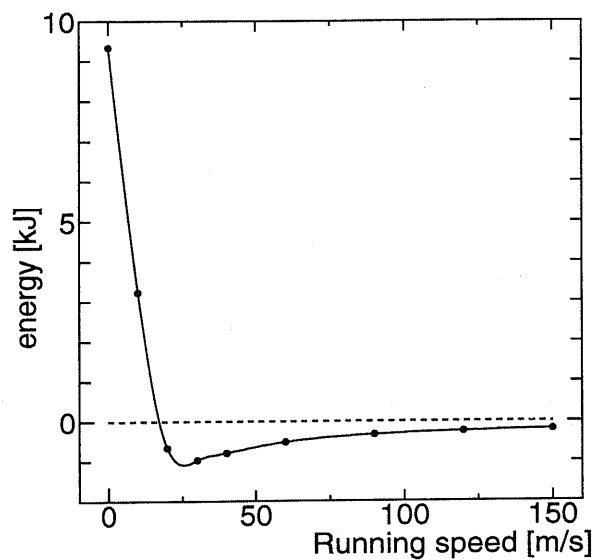


図 5.3: 強制振動モデルによるエネルギー収支の速度依存性

5.3 SC コイル磁気シールド板のうず電流の影響

理論的には台車振動に対して負のダンピングを持つ電磁誘導型超電導磁気浮上システムが宮崎実験線での結果では正のダンピングを持つ理由の一つに、SCM 前面に配置される磁気シールド板に誘導されるうず電流の影響が挙げられている。ここでは、このシールド板に誘導されるうず電流の影響を考慮した時のダンピング特性について検討する。一般に、電磁界の計算には有限要素法や境界要素法といった手法が用いられるが、本研究では有限要素法の一つである電流ベクトルポテンシャル法を適用する [29]。

電流ベクトルポテンシャル法は、有限要素法の代表的な計算方法である磁気ベクトルポテンシャル法に比べると計算時間、メモリ使用量が少なくなるなどの点で優れている [30]。しかし、この電流ベクトルポテンシャル法をそのまま台車走行シミュレーションに組み込むことは難しいので、適当な近似を行ない磁気シールド板をコイル系として扱うことで台車走行シミュレーションを実現する。ここではまず電流ベクトルポテンシャル法を用いたうず電流解析の手法の説明とその近似の方法について述べる。そして台車走行シミュレーションの結果を示し、シールド板による磁気ダンピングについての考察を行なう。

5.3.1 うず電流場の解析方法

うず電流が流れる導体中の位置 \mathbf{r} におけるベクトルポテンシャルを $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ とすると、 \mathbf{r} における磁束密度 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ との間に次の関係がある。

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \text{rot}\mathbf{A}(\mathbf{r}) \quad (5.4)$$

また、位置 \mathbf{r} における電界を \mathbf{E} とすれば、電磁誘導の法則より

$$\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{d\mathbf{B}(\mathbf{r})}{dt} \quad (5.5)$$

が成立する。式 (5.4) を式 (5.5) に代入すると、

$$\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \text{rot} \frac{d\mathbf{A}(\mathbf{r})}{dt} \quad (5.6)$$

が得られ、電界とベクトルポテンシャルとの間に次のような関係を得る。

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{d\mathbf{A}(\mathbf{r})}{dt} \quad (5.7)$$

一方、位置 \mathbf{r}' にある領域の体積が dv の外部電流に対する位置 \mathbf{r} におけるベクトルポテンシャルは

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu \mathbf{j}(\mathbf{r}')}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}')} dv \quad (5.8)$$

のように表すことができるので、磁気シールドの位置 \mathbf{r} におけるうず電流分布の方程式は次のように表せる。

$$\rho \mathbf{j}_e(\mathbf{r}, t) + \frac{d}{dt} \int_v \frac{\mu \mathbf{j}_e(\mathbf{r}', t)}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}')} dv + \frac{d}{dt} \int_{v'} \frac{\mu \mathbf{j}_{ex}(\mathbf{r}'', t)}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}'')} dv' = 0 \quad (5.9)$$

ただし、 ρ はシールド板の抵抗率、 \mathbf{j}_e はうず電流密度、 \mathbf{j}_{ex} は外部電流源の電流密度を示す。また、 dv はシールド板の微小領域、 dv' は外部電流源の微小領域を示し、 \mathbf{r}' は dv の位置、 \mathbf{r}'' は dv' の位置を示す。

この方程式を領域全体に渡って解くことで、厳密なうず電流分布を得ることができる。

一方、数値計算により解く場合には、領域を分割し離散化を行なう必要がある。離散化を行なうにあたって以下のような仮定をする。

- シールド板を図 5.4 のように分割する。そして、1 節点の周りに図 5.5 のような電流ループを考え、シールド板全体の電流分布が各節点の周りの電流ループの重ね合わせで表せるものとみなす。
- 電流は板厚方向には一定であるものとみなす。

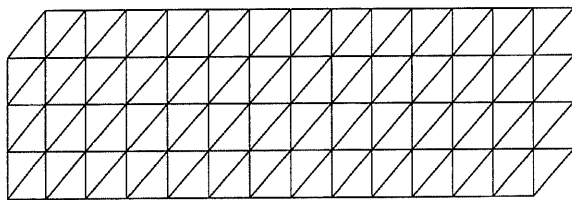


図 5.4: シールド板の分割

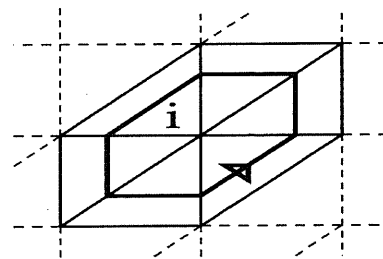


図 5.5: 節点の周りの電流ループ

次にこのような電流ループの表現方法について検討する。まず、図 5.6 に示すようなピラミッド関数を考える。この関数 $\phi_i(x, y)$ は、節点 i で $\phi_i(x, y) = 1$ であり、節点 i に隣接する要素の範囲外では値がゼロとなる六角錐型の関数である。

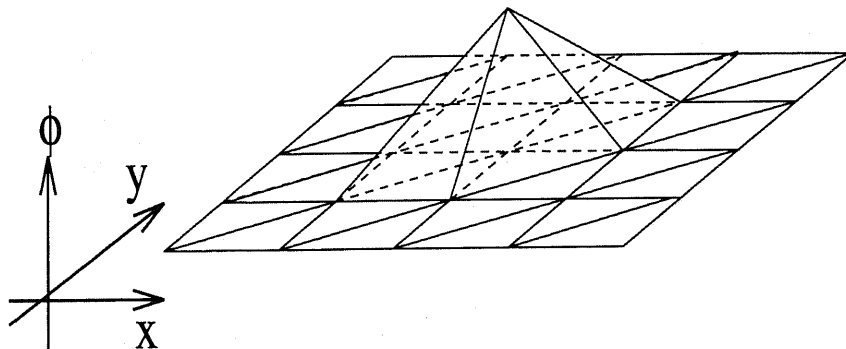


図 5.6: ピラミッド関数

このような関数に対し、

$$\mathbf{u}_i(x, y) = \text{rot} \phi_i(x, y) \quad (5.10)$$

によって得られる基底関数 \mathbf{u}_i は、図 5.7 に示したように図 5.5 に示した電流ループと同じ形状をしているので都合がよい。従って、節点 i のループを流れる電流密度は次式のように表現できる。

$$\mathbf{j}_i(x, y, t) = J_i(t) \cdot \mathbf{u}_i(x, y) \quad (5.11)$$

ここで、 $J_i(t)$ の意味について考える。図 5.7 に示した節点 i の周りのループ電流の大きさは、シールド板の板厚を d とすると $dJ_i(t)$ と表現される。従って $J_i(t)$ は節点 i の周りのループ電流の表面電流密度を表していることになる。

このような電流離散化の手法を用いることで、シールド板上の任意の位置 \mathbf{r} の電流密度 $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ は次のように表現することが可能になる。

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^N J_i(t) \cdot \mathbf{u}_i(\mathbf{r}) \quad (5.12)$$

ただし、 N はシールド板上の総節点数である。

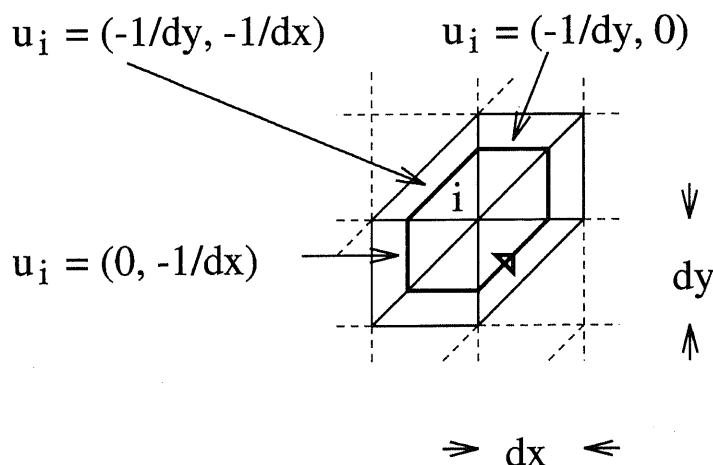


図 5.7: 節点 i の周りの基底関数

以上のような領域分散とうず電流離散化の手法を用いて、うず電流場の方程式を離散化することを考える。まず、式 (5.12) を式 (5.9) に代入して以下の式を得る。

$$\rho \sum_{i=1}^N J_{ei}(t) \cdot \mathbf{u}_i(\mathbf{r}) + \sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_v \frac{\mu J_{ej}(t) \cdot \mathbf{u}_j(\mathbf{r})}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}')} dv + \frac{d}{dt} \int_{v'} \frac{\mu \mathbf{j}_{ex}(\mathbf{r}'', t)}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}'')} dv' = 0 \quad (5.13)$$

式 (5.13) は、単にシールド板上の任意の点において成立するうず電流場の方程式である。この式を用いて各節点のループごとに方程式をたてて（電流場の離散化） N 次の連立

方程式を得ることができれば、数値計算によって全領域のうず電流分布を求めることができる。式(5.13)において各項は電界を表しているので、ループ方向の線積分 ($\int_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 0$) と第2項と第3項の離散化が必要となる。具体的には、図5.8に示したように各節点のループに平行な成分のみを取り出し、図5.9に示したような各ループごとのうず電流場の方程式を得る。節点 k の周りの電流ループのみを取り出すには、式(5.13)の両辺に対して節点 k の基底関数 \mathbf{u}_k 方向の単位ベクトルを作用させ線積分をとればよい。従って、節点 k の周りのループにおける回路方程式は、以下のような式で表すことができる。

$$\begin{aligned} & \rho \sum_{i=1}^N \int_c J_{ei}(t) \frac{\mathbf{u}_i(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}_k(\mathbf{r})}{|\mathbf{u}_k(\mathbf{r})|} d\mathbf{s} + \sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_c \int_v \frac{\mu J_{ej}(t) \mathbf{u}_j(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}_k(\mathbf{r})}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}') |\mathbf{u}_k(\mathbf{r})|} dv d\mathbf{s} \\ & + \frac{d}{dt} \int_c \int_{v'} \frac{\mu \mathbf{j}_{ex}(\mathbf{r}'', t) \cdot \mathbf{u}_k(\mathbf{r})}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}'') |\mathbf{u}_k(\mathbf{r})|} dv' d\mathbf{s} = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

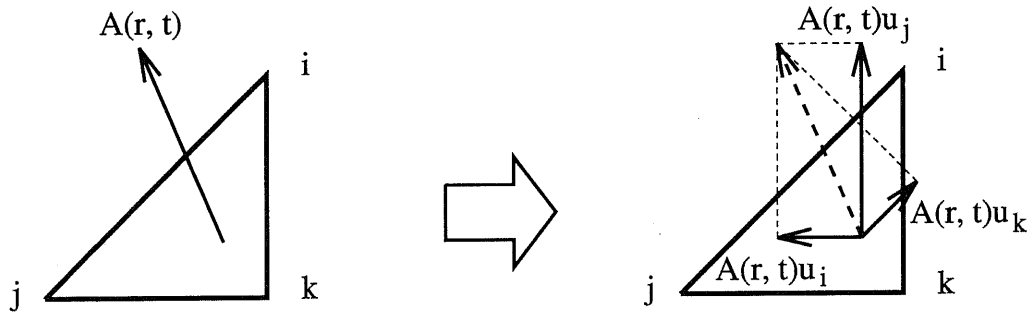


図 5.8: 外部電源のベクトルポテンシャルの離散化

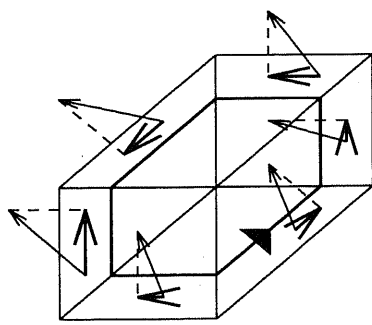


図 5.9: うず電流場の離散化

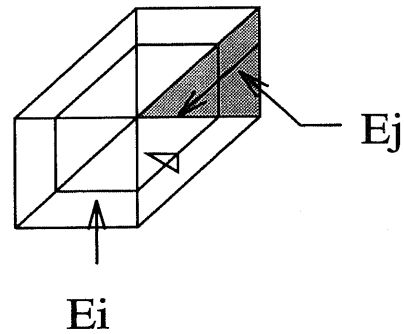


図 5.10: 電界の線積分

ここで、式(5.14)の第1項について考える。例として、図5.10に示したように電界 \mathbf{E}_j の \mathbf{u}_i 方向の成分を要素の範囲内で線積分する場合を考える。

まず、 \mathbf{E}_j の \mathbf{u}_i 方向の成分は

$$\mathbf{E}_{ji} = \frac{\mathbf{u}_j \cdot \mathbf{u}_i}{|\mathbf{u}_i|} \mathbf{E}_j \quad (5.15)$$

$$= -\frac{1}{dx} \mathbf{E}_j \quad (5.16)$$

になる。従って、要素の範囲内での線積分（電位差）の平均値は

$$V_{ji} = \frac{1}{2} \int \mathbf{E}_{ij} \cdot d\mathbf{s} \quad (5.17)$$

$$= -\frac{dy}{2dx} \mathbf{E}_j \quad (5.18)$$

になる。一方、次のような関数内積を定義する。

$$\langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_k \rangle = \frac{1}{d} \int_v \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_k dv \quad (5.19)$$

上記の例に従って次の計算をすると、

$$\mathbf{E}_j \langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_k \rangle = \mathbf{E}_j \frac{1}{d} \int_v \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_k dv \quad (5.20)$$

$$= -\frac{dy}{2dx} \mathbf{E}_j \quad (5.21)$$

となり、式(5.18)と式(5.21)が一致することが分かる。このことは、あらゆる内積、線積分の組み合わせについて成立する。

以上のことから、式(5.14)は式(5.22)のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} & \rho \sum_{i=1}^N J_{ei}(t) \langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_k \rangle + \frac{1}{d} \sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_{v''} \int_v \frac{\mu J_{ej}(t) \mathbf{u}_j(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}_k(\mathbf{r})}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}')} dv dv'' \\ & + \frac{1}{d} \frac{d}{dt} \int_{v''} \int_{v'} \frac{\mu \mathbf{j}_{ex}(\mathbf{r}'', t) \cdot \mathbf{u}_k(\mathbf{r})}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}'')} dv' dv'' = 0 \end{aligned} \quad (5.22)$$

なお、 dv'' はシールド板上の微小領域を示す。さて、式(5.22)の第1項の $\langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j \rangle$ の値については、以下の各場合に分類される。

節点*i*と節点*j*が隣合わないとき

$$\langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j \rangle = 0 \quad (5.23)$$

節点*i*と節点*j*が斜めに隣合うとき

$$\langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j \rangle = 0 \quad (5.24)$$

節点*i*と節点*j*が左右に隣合うとき

$$\langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j \rangle = -2 \frac{1}{d} \frac{1}{dx^2} \frac{1}{2} dx dy d = -\frac{dy}{dx} \quad (5.25)$$

節点 i と節点 j が上下に隣合うとき

$$\langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j \rangle = -2 \frac{1}{d} \frac{1}{dy^2} \frac{1}{2} dx dy d = -\frac{dx}{dy} \quad (5.26)$$

節点 i と節点 j が一致するとき

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_j \rangle &= 2 \frac{1}{d} \left(\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dy^2} \right) \frac{1}{2} dx dy d + 2 \frac{1}{d} \frac{1}{dx^2} \frac{1}{2} dx dy d + 2 \frac{1}{d} \frac{1}{dy^2} \frac{1}{2} dx dy d \\ &= \frac{2(dx^2 + dy^2)}{dx dy} \end{aligned} \quad (5.27)$$

次に第 2 項、第 3 項の意味について考える。例えば式 (5.14) の第 2 項について、

$$\sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_c \int_v \frac{\mu J_{ej}(t) \mathbf{u}_j(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}_k(\mathbf{r})}{4\pi(\mathbf{r} - \mathbf{r}')|\mathbf{u}_k(\mathbf{r})|} dv ds = \sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_c \mathbf{A} ds \quad (5.28)$$

$$= \sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_s \text{rot} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.29)$$

$$= \sum_{j=1}^N \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5.30)$$

このことは、第 2 項、第 3 項が外部電流ループによる相互インダクタンス成分であることを示している。なお、式 (5.28) から式 (5.29) への式変形にはストークスの定理を用いた。以上のように、節点 k の周りの電流ループの回路方程式が求められたので、相互インダクタンスの計算方法を決めれば、目的であった N 次の連立回路方程式を得ることができる。

上記の離散化手法により、各節点の周りに六角形の電流ループを構成したが、これらのループ間の相互インダクタンスの計算を簡単にするために、方形コイルに近似することを考える。上記の検討では、電流がループの外枠と節点の中間を流れるものと考えたので、できるだけこのループに沿うようにコイルを考えた。この結果、図 5.11 に点線で示したように、面積がループ外枠の面積の 3 分の 1 になるようなコイルを採用することにした。

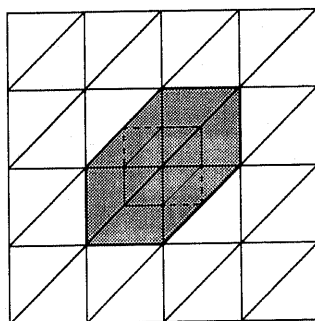


図 5.11: 電流ループの簡単化

以上のような検討の結果、節点 k の周りの電流ループについて次のような計算を行なうことになる。

$$\rho \sum_{i=1}^N J_{ei}(t) \langle \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_k \rangle + \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^N M_{e,e}^{k,j} I_{ej} + \frac{d}{dt} \sum_{l=1}^M M_{e,ex}^{k,l} I_{exl} = 0 \quad (5.31)$$

ただし、 $M_{e,e}^{k,j}$ は電流ループ同士の相互インダクタンス、 I_{ej} はループ j の電流、 $M_{e,ex}^{k,l}$ は電流ループと外部電流のループ間の相互インダクタンス、 I_{exl} は外部ループ l の電流、 M は外部電流源の総数である。なお、シールド板の板厚を d としたとき $I_{ej} = J_{ej}d$ である。

5.3.2 台車走行シミュレーション

上記に述べたような計算手法を用いて、台車の走行シミュレーションを行なう。これまでの検討通り台車は進行方向には一定速度で走行するものとし、上下振動のみを対象とする。磁気シールド板に関する諸元は、表 5.1 に従っている。これは、山梨実験線で使用される台車に設置されるものに準ずるものである。

表 5.1: 磁気シールドの計算条件

幅	5.4 m
高さ	0.7 m
厚み	0.08 m
抵抗率	$3.1 \times 10^{-8} \text{ m}\Omega$
浮上コイルまでの距離	0.10 m

磁気シールドの設置位置は図 5.12 に示したように台車の正面とし、前節に述べたようなく電流解析法に基づき、図 5.13 に示したように磁気シールド板を縦方向に 4 分割、横方向に 24 分割（領域内の節点数 69）して計算を行なった。厳密な電流分布の解析のためには分割数が多い方が望ましいが、計算時間が増大することや計算中にメモリに格納できるデータ数に限界があることから、このような分割数を採用した。

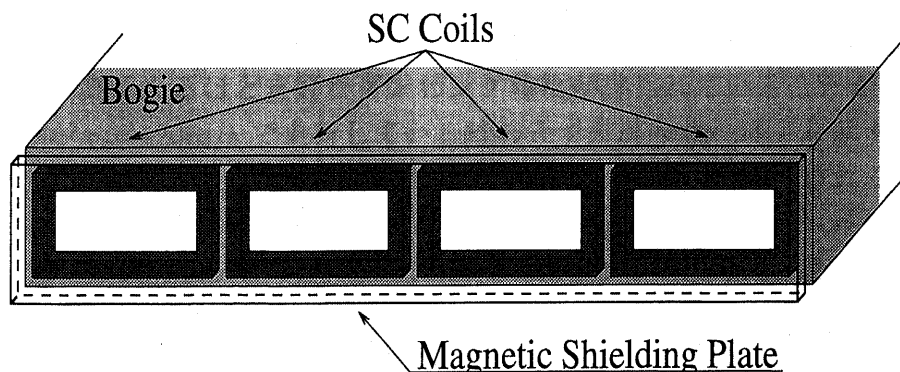


図 5.12: 磁気シールド板の設置位置

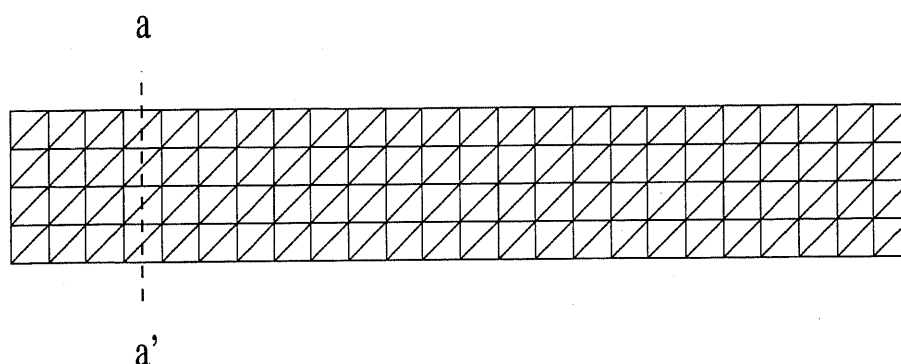


図 5.13: 磁気シールド板の分割

まず、台車を自由に運動させた場合の台車振動の様子を示す。台車の上下位置は $z=0$ に支持されて一定速度で走行しているものとする。このとき浮上コイルには電流が流れないので、台車には浮上力は働かない。次に、時刻 $t=0$ で支持を解放すると台車は重力により下方に移動始めるが、同時に浮上コイルの上下浮上コイルを貫く磁界に差が生じるために電流が流れ始めて浮上力が発生する。以下に示す結果は、 $t > 0$ の時間領域において台車運動の数値計算を行なって得られたものである（図 5.14 参照）。

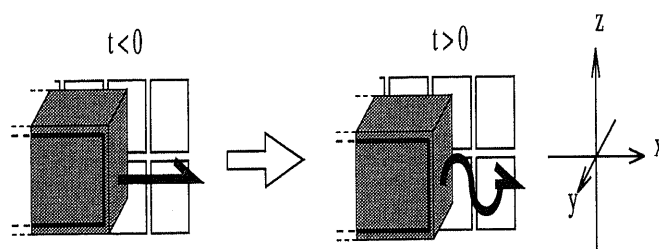


図 5.14: 台車振動シミュレーションの初期条件

まず、図 5.15 に 90, 120, 150m/s で台車が走行している時の台車振動の様子を示す。いずれの結果も台車振動が収束する傾向にあるので、台車の上下振動は浮上走行速度領域で正のダンピングを持つことが分かる。しかも、減衰の度合は走行速度が高いほど大きいので、走行速度が高くなるほど良好なダンピング特性が得られていることが分かる。

次に、台車が $v_x=120\text{m/s}$ で走行している時のうず電流分布の様子を示す。図 5.16 と図 5.17 は、それぞれ時刻 61ms と 64ms において磁気シールド板に誘導されるうず電流の様子を示している。4つの SC コイルの前面に電流が流れており、SC コイルの境界を境に左右の電流の向きは逆転している。また、上下の浮上コイルに対向する位置に渦ができており、上下の電流の向きが逆転していることが確認できる。なお、磁気シールド板をさらに細かく分割して計算を行なうことができれば、各浮上コイルの前面の磁気シールド板上にうず電流のうずを時刻よらずはっきり見ることができるものと思われるが、分割数が少ないために図 5.17 では確認することができない。

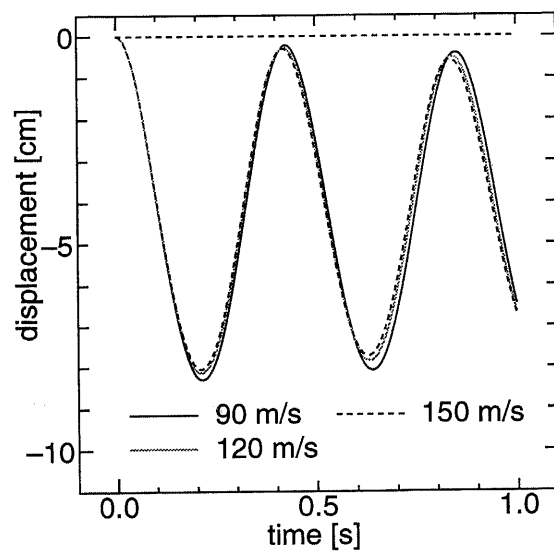


図 5.15: 台車振動の様子

Eddy Current Distribution Analysis

Frame No. = 061 time = 061 ms

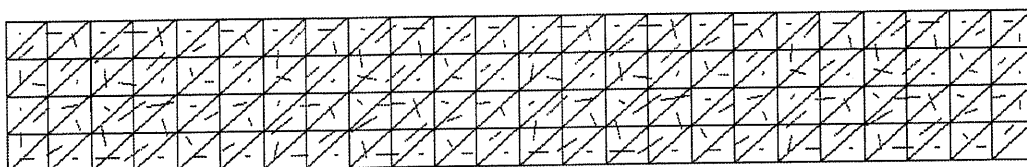


図 5.16: 磁気シールド板に誘導されるうず電流の様子 (時刻 61ms)

Eddy Current Distribution Analysis

Frame No. = 064 time = 064 ms

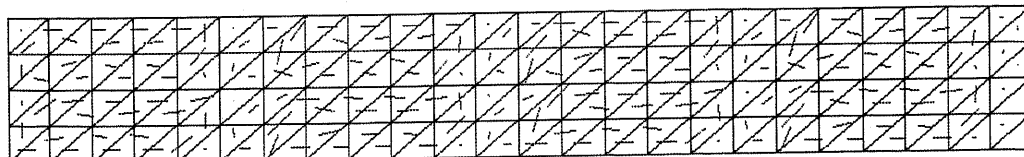


図 5.17: 磁気シールド板に誘導されるうず電流の様子 (時刻 64ms)

次に、図 5.17 に示した時刻 64ms の場合に、図 5.13 の a-a' に渡る電流密度分布を示す。図 5.18 に a-a' 間の電流密度分布の計算結果を示す。最大 2×10^6 A/m² 程度の電流密度が得られている。

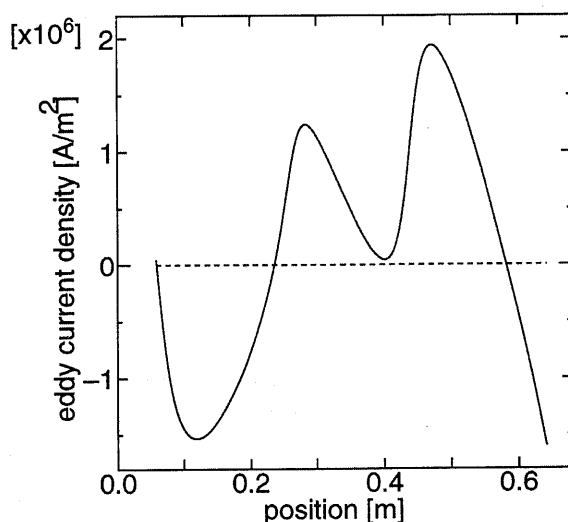


図 5.18: a - a' 間の電流密度分布（時刻 64ms）

5.3.3 ダンピング特性についての検討

前節では台車を自由に運動させるようなシミュレーションを行なうことにより、磁気シールド板のうず電流を考慮した場合に台車の上下振動に対して正のダンピングを発生するという結果を得た。ここでは、このダンピング特性の台車速度依存性について検討する。この検討には、浮上コイル—SC コイル系のダンピングと台車の走行速度との関係を示すために用いた強制振動モデルを採用する。そして台車が周波数 2.35Hz 振幅 4cm で上下方向に振動しながら進行方向に一定速度で走行するようなモデルを考え、台車が 1 周期分振動を行なったときのエネルギー収支を見ることでダンピングの特性を得る。

図 5.19 に磁気シールド板を考慮した時のシステムにおけるエネルギーの流れを示す。推進系から注入されたエネルギーは、浮上コイルや磁気シールド板に流れる電流により消費され、残ったエネルギーが台車に運動エネルギーや位置エネルギー、コイル間の磁気的エネルギーとして蓄積される。このモデルでは、台車振動は一定周期一定振幅を保ちながら運動しているので、系が正のダンピングを持つ場合には台車振動は減衰傾向にあるために、台車に対して外部からエネルギーを注入する必要がある。逆に、負のダンピングを持つ場合には台車の持つエネルギーを外部に放出する必要がある。つまり台車振動一周期に対して系が台車に注入したエネルギー $W_{fls} + W_{flsh}$ と外部から注入したエネルギー W_o との間に次の関係が成り立つ。

$$W_{fls} + W_{flsh} + W_o = 0 \quad (5.32)$$

ただし、 W_{fls} は浮上コイル—SC コイル間に働く電磁力が台車振動 1 周期間に台車に対

してした仕事を、 W_{flsh} は 浮上コイル-磁気シールド間に働く電磁力が台車振動 1 周期間に台車に対してした仕事である。式 (5.32) より W_o を求めれば、この値をダンピングを示す指標として扱うことができる。

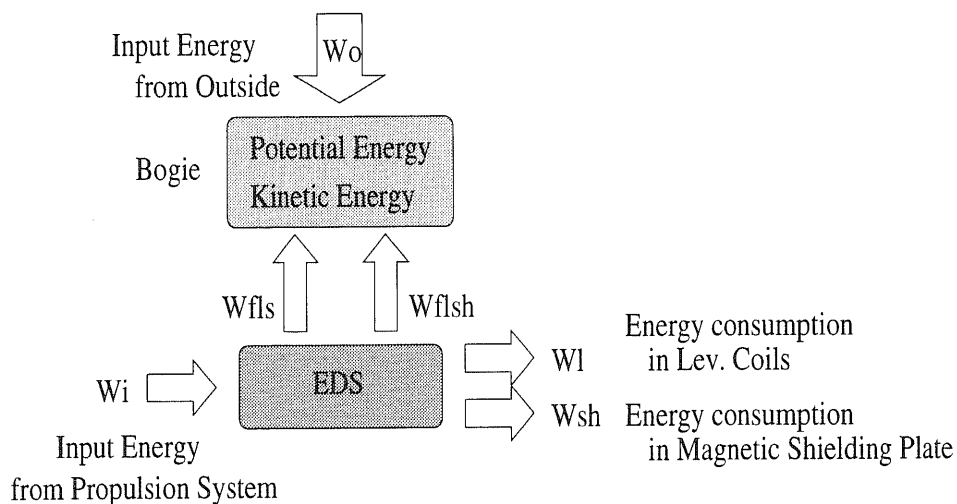


図 5.19: 磁気シールド板を考慮した時のシステムにおけるエネルギーの流れ

次に計算結果を示す。図 5.20 に磁気シールド板を考慮した場合と比較のために無視した場合のエネルギー収支と台車の走行速度と関係を示す。この結果より、磁気シールド板を考慮した場合には低速域では正のダンピングを持つが、中速域で負のダンピングを持ち、高速域では再び正のダンピングを取ようになることが分かる。磁気シールド板が無い場合のエネルギー収支特性と比較すると、全体的に大きなダンピングが得られ、浮上走行領域全体でダンピングが正となっている。

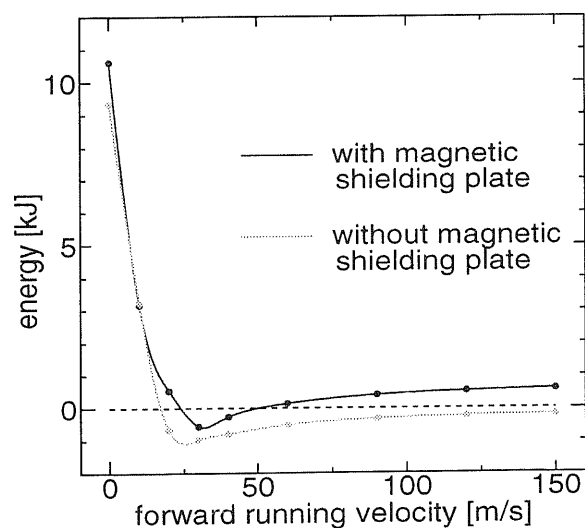


図 5.20: 磁気シールド板の有無によるエネルギー収支の違い

5.4 パッシブダンパシステム

ここでは短絡コイルを SC コイルの前に設置し、そのコイルに誘導される電流によってダンピング力を増加させるパッシブダンパシステムについて検討する。そして、その形状および設置位置について試行的に検討し、その効果を求める。なおここでは磁気シールド板の影響は考慮しない。

パッシブダンパコイルとして、図 5.22 のような方形コイルを考える。また、このコイルの諸量を表 5.2 に示す。

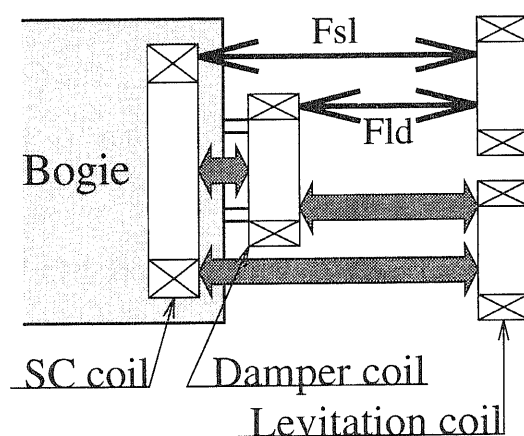


図 5.21: コイル間の関わり

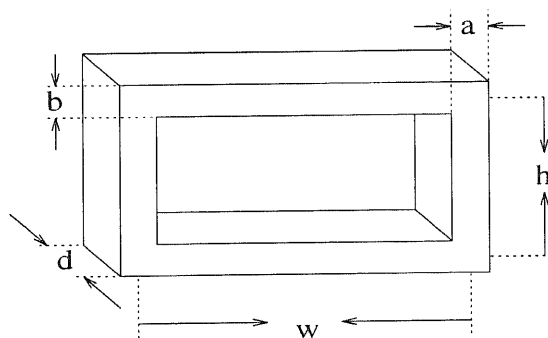


図 5.22: パッシブダンパコイルの形状

表 5.2: パッシブダンパコイルの諸定数

ダンパコイルの巻数	1[turn]
浮上コイルとの距離	0.1[m]
a	0.015[m]
b	0.015[m]
d	0.01[m]

そして、ダンパコイルの高さ h 、幅 w 、抵抗値を変数として検討を進めていく。また、ダンパコイルと浮上コイルおよび SC コイルの間の相互インダクタンスを求める計算においては、ダンパコイルは線電流として扱う。

台車側のある位置にある形状のダンパコイルを設置したとして、台車を 5.1 節に示した図 5.1 のように進行方向には一定速度で走行させながら、上下方向に周期 2.35Hz、振動中心を $z_0 = -0.04\text{m}$ にして強制振動させる。

まず振幅を 0.02m, 0.04m, 0.06m として強制振動振動を行なった時に 1 振動周期間に台車が浮上コイル系から受ける全エネルギーを W_{total} とし、この値を求めると表 5.3 のようになる。ここではダンパコイルは考慮していないので、 $W_{total} = -W_o$ (外力による仕事) となる。そしてこの値をそれぞれ W_2, W_4, W_6 と定義する。

表 5.3: ダンパコイルなしの場合の W_{total} の値

振幅 [m]	W_{total} [J]
0.02	$W_2 = 57$
0.04	$W_4 = 223$
0.06	$W_6 = 498$

ここで値が正であれば、負のダンパ要素とみなすことができる。よって、表の値はそれぞれ浮上コイルと SC コイルの系でこれだけの負のダンピングを持つことを意味し、逆に正のダンピングを持たせるには、ダンパコイルの設置によって、この W_{total} を打ち消すだけの効果を持たせなければならない。これらの W_{total} の値 W_2, W_4, W_6 は、これからの検討におけるエネルギーの目標値となる。

5.4.1 パッシブダンパコイルの設置条件の検討

パッシブダンパコイルの設置条件について検討する。検討の手順としては、 $v_x = 120\text{m/s}$ の条件のもとで、

1. ダンパコイルの抵抗値は一定として、縦の寸法と高さ方向の位置を変えた場合の、ダンピング特性の変化を見る。ここで強制上下振動の振幅は、0.02m, 0.04m, 0.06m の 3 通りについて行なう。
2. ダンパコイルの抵抗値は一定として、横の寸法と幅方向の位置を変えた場合の、ダンピング特性の変化を見る。
3. コイルの形状、位置は変えずに、抵抗値のみを変えた場合の、ダンピング特性の変化を見る。

5.4.2 設置高さ方向に関する検討

高さ方向に関する検討を行なうため、図 5.23 のように、1 個のダンパコイルを幅方向には固定したまま、高さ方向に中心位置を移動させた場合のダンパコイル-浮上コイル間力のする仕事 (W_{ld})、SC コイル-浮上コイル間の電磁力のする仕事 (W_{sl})、そして W_{total} の特性を見る。ここでダンパコイルによる効果を明確にするために以下では表 5.3 に示した W_2, W_4, W_6 を値を引いた W'_{sl} および W'_{total} を用いる。そして $W'_{total} < 0$ であれば、外力が台車に仕事をすることになるので、ダンピングは正となる。

ダンパコイルの寸法は SC コイルと同じ 0.963m とし、 h の値は様々な値に関して検討する。ただし、条件としてダンパコイルの抵抗値を一定の $5.55 \times 10^{-4} \Omega$ とする。

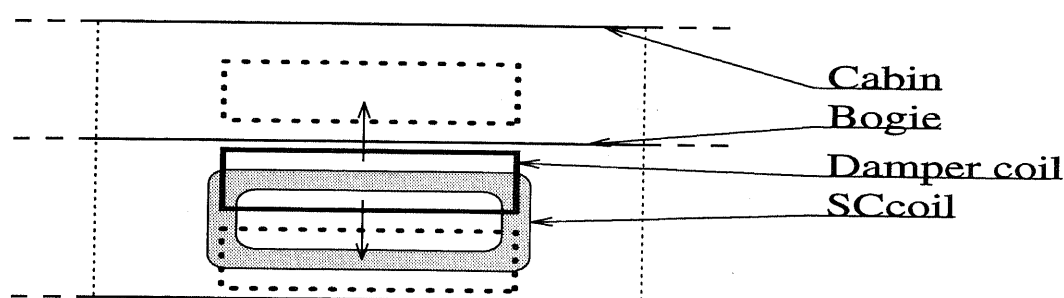


図 5.23: ダンパコイル高さ検討方法

まず $h=0.38\text{m}$ として、各エネルギーのダンパコイルの z 方向設置位置に対する依存性を図 5.24 に示す。図に示すように上下位置が $z \leq 0$ と $z \geq 0$ の領域に極小値が一つずつ存在する。ここで変数を h として、 W'_{total} の極小値の変化を図 5.25 に示した。

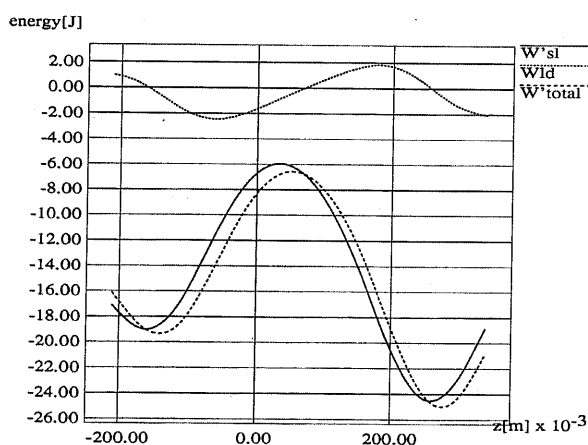


図 5.24: $h=0.38\text{m}$ の時の各エネルギーの z 依存性

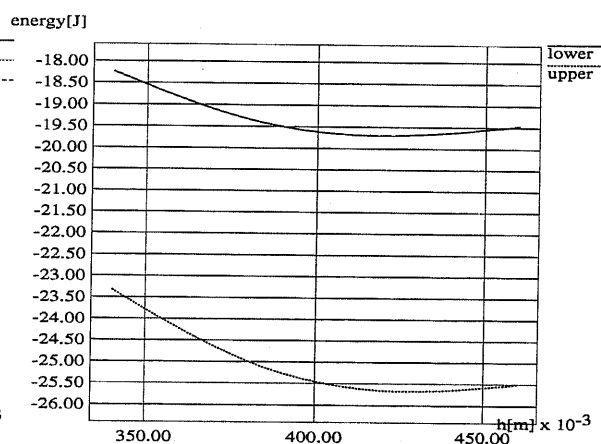


図 5.25: W'_{total} の極小値の設置高さ h 依存性 (振幅 0.04m)

同様の計算を、台車振幅 0.02m, 0.06m の場合について行なった。その結果を図 5.26 と図 5.27 に示す。ただし W'_{total} の値は、先に述べたようにそれぞれの振幅にあわせて、 $W_{total} - W_2, W_{total} - W_6$ の値を示している。

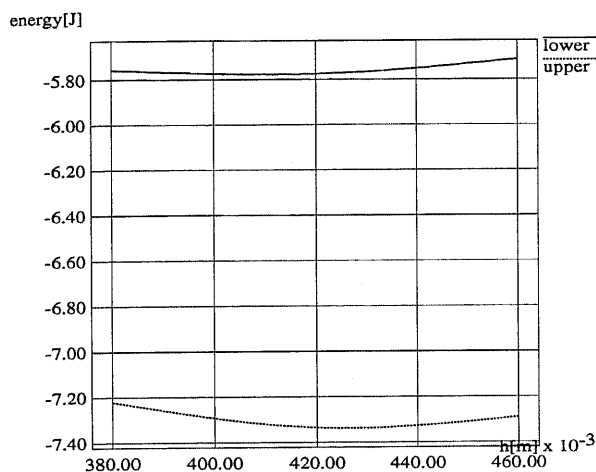


図 5.26: W'_{total} の極小値の設置高さ h 依存性 (振幅 0.02m)

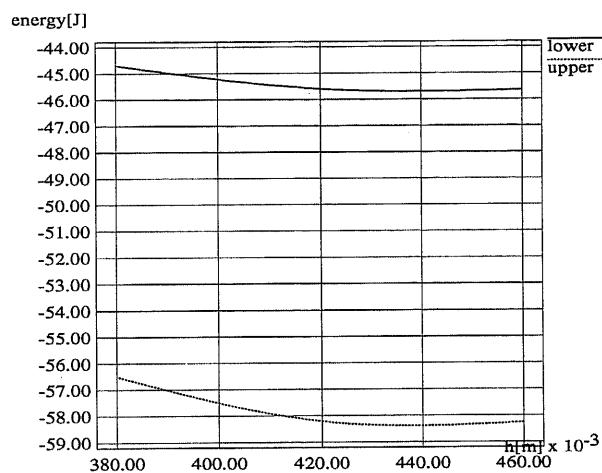


図 5.27: W'_{total} の極小値の h 依存性 (振幅 0.06m)

以上の結果を見ると、台車振幅の違いによって、最もダンピングの得られる h の値は多少異なっているが、ほぼ $h=0.42\text{m}$ 付近と考えられる。

ここで、 $h=0.42\text{m}$ 、台車振幅を 0.04m とした場合のダンパコイルの高さ方向位置 z と W'_{total} の関係を図 5.28 に示す。図 5.28 から、この条件で極小値をとるのは、 $z=-0.15\text{m}$, 0.28m の 2 箇所である。また、台車振幅を 0.02m , 0.06m とした場合の結果を示している図 5.29, 図 5.30 から、極小値をとる位置は $z=-0.15\text{m}$, 0.28m といえる。

以上の結果より、高さ方向においては次のように配置した時、最もダンピングが得られると考えることができる。

- 上下 2 箇所にダンパコイルを設置
- それぞれの縦の寸法は $h=0.42\text{m}$
- 上下ダンパコイルそれぞれの中心の高さは $z=-0.15\text{m}$, 0.28m とする。

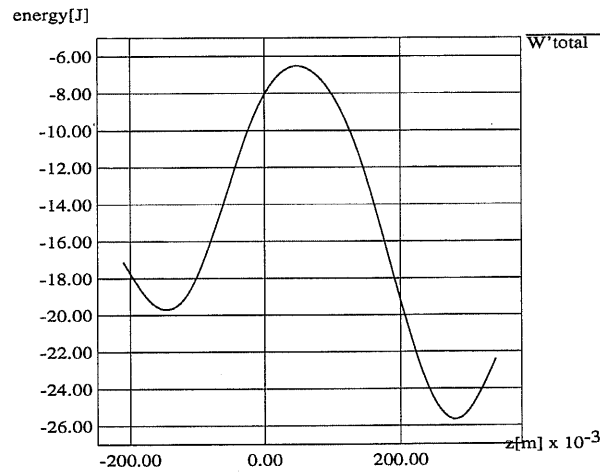


図 5.28: 振幅 0.04m, $h=0.42\text{m}$ の時の W'_{total} の分布

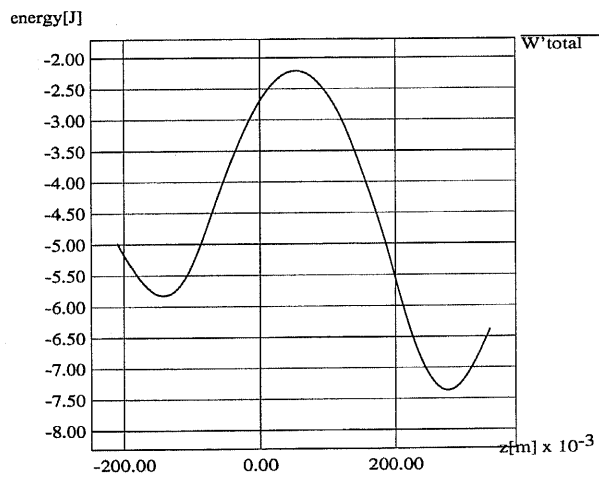


図 5.29: 振幅 0.02m, $h=0.42\text{m}$ の時の W'_{total} の分布

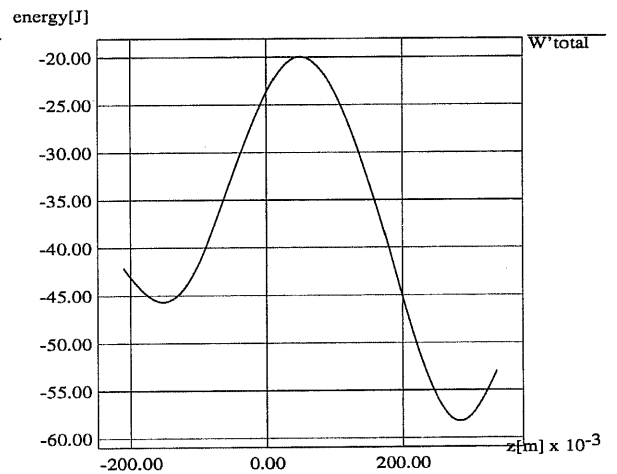


図 5.30: 振幅 0.06m, $h=0.42\text{m}$ の時の W'_{total} の分布

5.4.3 幅方向に関する検討

幅方向に関する検討を行なうため、高さ方向には、前節の最適配置の下側コイルの条件 ($h=0.42\text{m}$, $z=-0.15\text{m}$) に固定して、図 5.31 に示すように幅方向に移動させた場合や横の寸法 w を変えた場合の W_{ld} , W'_{sl} , W'_{total} の特性を求める。ここで上側についても同じ結果が得られると考えられるので、下側の設置高さのみについて検討する。抵抗値は $5.55 \times 10^{-4}\Omega$ とする。

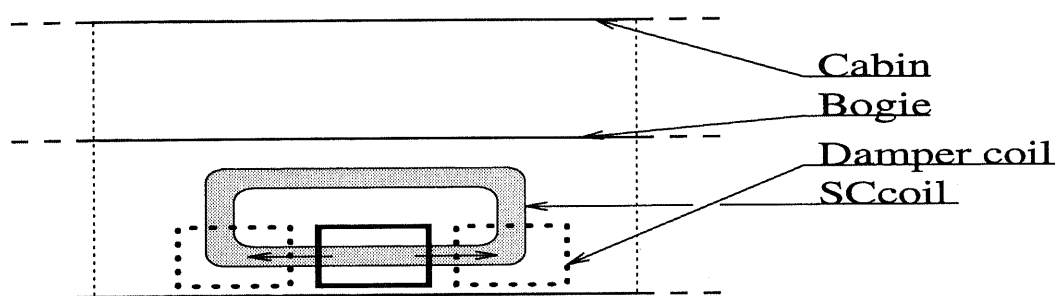


図 5.31: ダンパコイル幅の検討方法

上下振動の振幅を 0.04m とした時のコイルの中心位置 x と各エネルギーの関係を図 5.32 に示す。ここでコイル幅 $w=0.963\text{m}$ で $x=0$ は SC コイルの中心としている。

図 5.32 より、ダンピングが最も得られる x 方向の位置は、ちょうど SC コイルの中心位置となっている。また、同様の計算を幅 w の値を変化させて行なった。 W'_{total} の極小値の w 依存性を図 5.33 に示す。

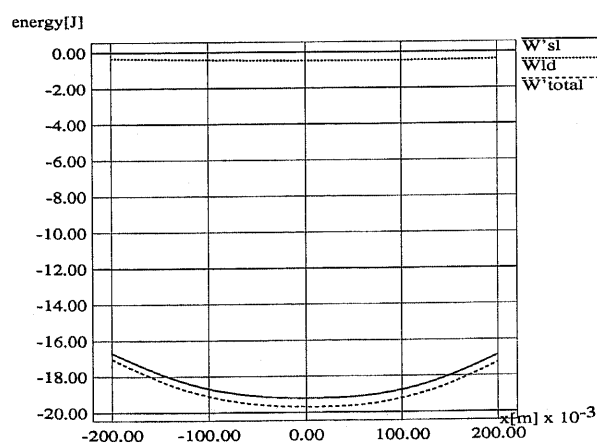


図 5.32: 各エネルギーの x 依存性 ($w=0.963\text{m}$)

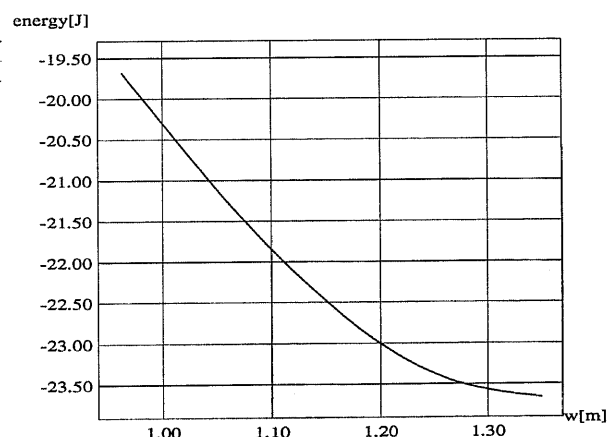


図 5.33: W'_{total} の極小値の w 依存性 (振幅 0.04m)

また、同様の計算を台車振幅 0.02m, 0.06m の場合において行ない、その結果を図 5.34, 図 5.35 にそれぞれ示す。

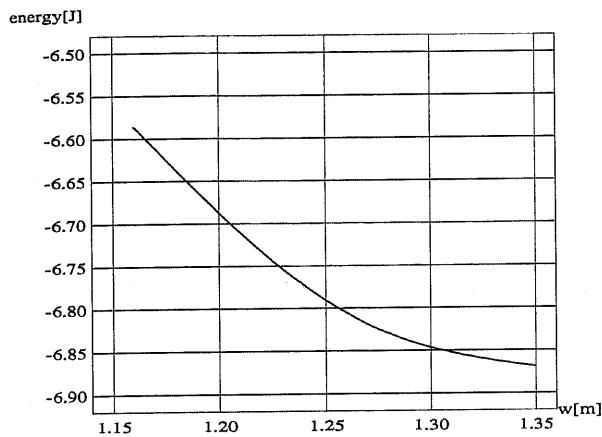


図 5.34: W'_{total} の極小値の w 依存性 (振幅 0.02m)

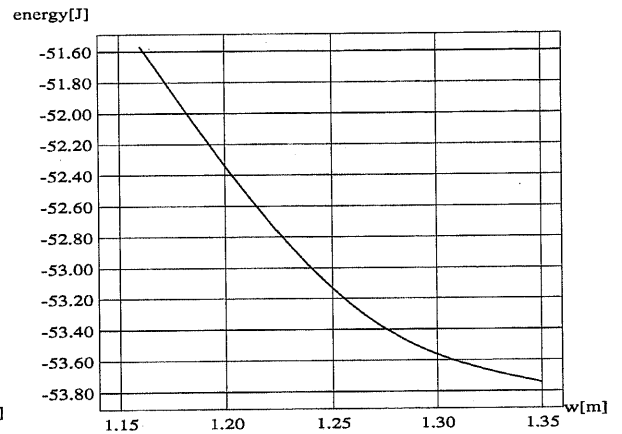


図 5.35: W'_{total} の極小値の w 依存性 (振幅 0.06m)

以上の結果から、ダンピングを得るには、幅方向には SC コイルピッチの 1.35m 以下の範囲で、できるだけ寸法を大きくとり、かつ中心位置は SC コイルの中心に近づければよいということが分かる。しかし、実際はコイルの太さがあり、コイル同士の間隔もとる必要がある。したがって、以上の条件下での、妥当なパッシブダンパコイルの設置条件は、図 5.36 のようになる。

- $h=0.42\text{m}$, $w=1.32\text{m}$ のコイルを 8 箇所を設置
- 横方向位置は、SC コイルと同ピッチとする (上下 2 段)
- 縦方向位置は、 $z=-0.15\text{m}$, $z=0.28\text{m}$ に設置

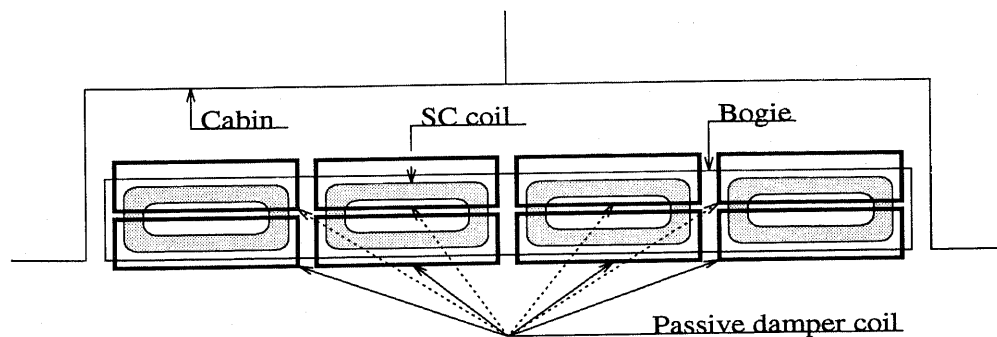


図 5.36: パッシブダンパコイルの配置

5.4.4 抵抗値に対する依存性

適正なダンピングを得るような、パッシブダンパコイルの形状や配置を決定する際には、抵抗値を一定として検討した。しかしダンパコイルのインピーダンスは抵抗が主体であるために、ダンピングの抵抗値への依存性は大きい。そこで、ダンパコイルの抵抗値以外の要素を固定した状態で、抵抗値に対する依存性を求める。ダンパコイルの配置は、図 5.36 に示したものをを用いる。計算においては、相互インダクタンスを求める際にコイルを線電流近似していた。ダンパコイルの配置を変化させず、抵抗値を変える方法としては、

- コイルの断面積を変える
- 抵抗率を変える

が挙げられる。ここでは、抵抗率に対する依存性について検討する。

図 5.37 に強制振動を行なった時のダンパコイルの抵抗率 ρ と W'_{total} の関係を示す。ただし上下振動の振幅は 0.04m とし、 W'_{total} は 8 個のダンパコイルの総和である。

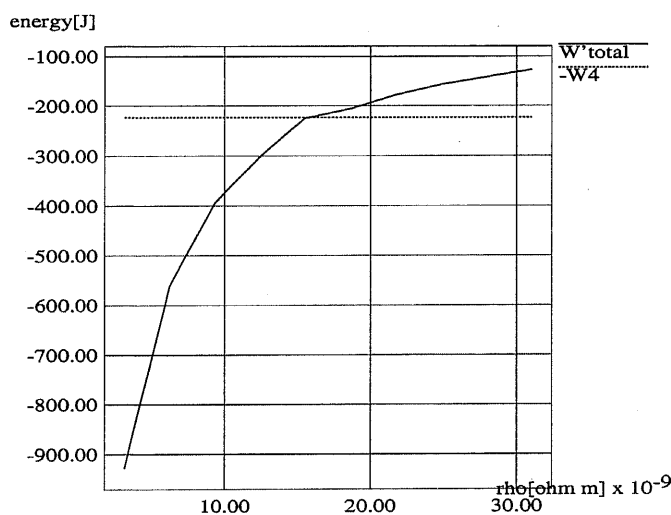


図 5.37: 抵抗率 ρ と W'_{total} の関係

図 5.37 にはダンピングの正負の境界になる $-W_4$ も示す。この図より、抵抗値を小さくしていき、 $\rho = 1.55 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ より小さいと正のダンピングが得られる。ここで実際に、 $\rho = 1.55 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ の実現性について検討する。

例として、銅とアルミニウムの抵抗率を挙げると

- 銅: $\rho = 1.69 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$
- アルミニウム: $\rho = 2.62 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$

となっており、いずれも図 5.37においては、負のダンピングの領域である。したがって、現在の形状で抵抗率を変えて正のダンピングを発生させるのは、困難であると思われる。

次にコイルの断面積について検討する。コイルの断面積が変わると、抵抗値が変わると同時に自己インダクタンスも変化する。しかし、もし抵抗値の変化に比べて自己インダクタンスの変化が極めて小さいとすれば、自己インダクタンスを一定として抵抗だけを変化させた場合に置き換えることができる。つまり、抵抗率を変えた場合に置き換えることができ、図 5.37の結果を近似的に用いることができる。検討しているダンパコイル形状は表 5.2に示したように $0.01\text{m} \times 0.015\text{m}$ である。設置場所の問題もあるが、断面積をその 5 倍にすれば、等価抵抗率が $1/5$ になるので、パッシブダンパコイルにより、正のダンピングを得ることができる。

また断面積がそのままであっても、5.2 節で述べた磁気シールド板によるダンピングを合わせると、全ての走行領域である程度の正のダンピングが得られる。しかし、ガイドウェイにずれが生じたり、SC コイルクエンチ時といった外乱が加わった場合などに対し十分なダンピングがあるとは言えず、次節でさらに大きいダンピングが得られるアクティブダンパシステムについて検討する。

5.5 アクティブダンパシステム

先の計算結果からも明らかなように、この浮上系のダンピングは十分ではない。そして台車ー客室間の2次機械支持系のみで十分な安定性を得ることは出来ず、台車と地上間にダンピング要素を付加する必要がある。しかし、このシステムは非接触支持系であるので、地上一台車間のダンパも同様に非接触で実現しなければならない。従って、ダンパシステムもコイル系で対応する必要がある。コイルによるダンパシステムとしては、短絡コイルをダンピングが効果的に出る位置に配置し、制御は行わないパッシブダンパシステムについて検討したが、あまり大きなダンピングは期待できない。よってここでは、コイルに制御された電流を流してより大きい効果があると考えられる、アクティブダンパシステム [11] を取り上げる。

図 5.38 にアクティブダンパシステムが付加された場合の車上の電気系統図を示す。

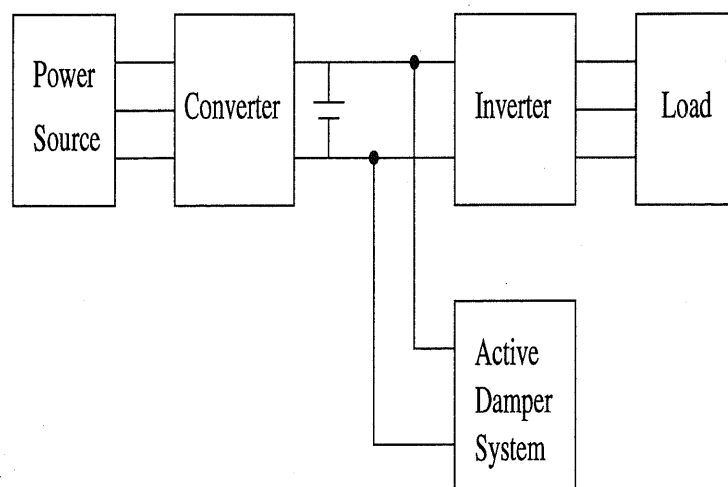


図 5.38: アクティブダンパシステムを含む車上の電気系統図

誘導集電により車上側に供給された電力は、コンバータを介して直流に変換され蓄電池に蓄えられる。車上の負荷にはこの蓄電池からインバータを介して電力が供給される。本研究で提案するアクティブダンパシステムは、図 5.38 に示したように直流部分から電力を取り出す。

次にアクティブダンパシステムの設置場所について検討する。図 5.39 に設置可能な場所を示す。設置場所は SC コイルの前面、台車の前後が考えられる。まず SC コイルの前面だが、これは SC コイル影響下にある浮上コイル電流を直接制御できるという点で最も効果的であるが、SC コイルの前面であるので、SC コイルの磁束保存則による SC コイル電流の変化の影響を大きく受けると考えられる。また台車の前後では SC コイル電流の変化の影響は小さいが、SC コイルから離れているために、同じダンピング効果をあげるのにより多くの電流を必要とする。よってここではダンパコイルは図 5.39 中 Areal の SC コ

イルの前に設置する。ダンパコイルの制御は次式のように上下振動速度 dz/dt に比例した電圧 V をダンパコイルに印加する手法をとる。

$$V = K_{ac,dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (5.33)$$

ただし $K_{ac,dz}$ は比例定数で以下では電圧-振動速度定数とする。

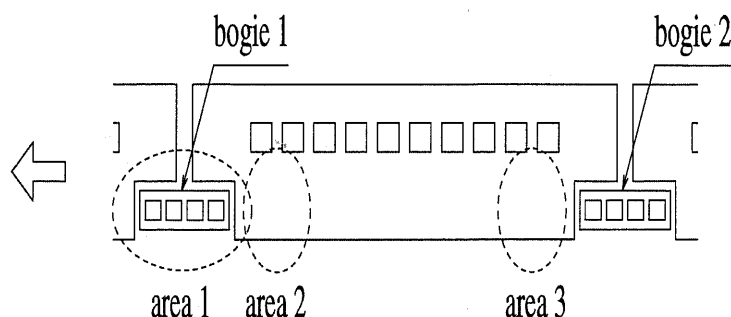


図 5.39: アクティブダンパの設置場所

台車の前面に配置するようなアクティブダンパシステムには、以下に挙げるような 2 通りの方法が考えられる。

- タイプ 1 — 図 5.40 に示すように、台車上 SC コイルに向き合う位置にアクティブダンパコイルを配置する方法。このコイルに台車振動速度に比例するような電流を流すことで、浮上コイル—アクティブダンパコイル間に電磁力を発生する。すなわち、浮上コイル側から見て見かけ上 SC コイル側にダンピングを発生するような磁界を発生する。この方法は、推進の観点から見ると磁気抗力が小さいという特徴を持つが、SC コイルの前面に配置するために SC コイル電流により磁束変化が打ち消され、アクティブダンパの効果が落ちるという欠点を持つ。

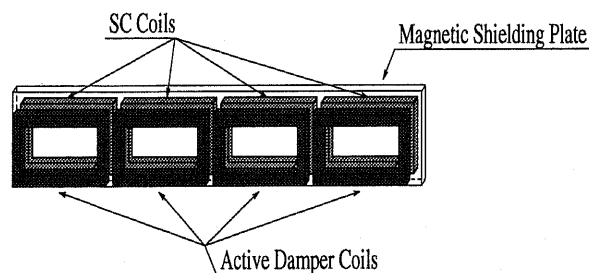


図 5.40: アクティブダンパコイル タイプ 1

- タイプ 2 — 図 5.41 に示すように台車上の上下浮上コイルに向き合う位置にアクティブダンパコイルを配置する方法。この方法では、アクティブダンパコイルに台車の振動速度に比例するような電流を流すことで、SC コイルから見て浮上コイル電流にダンピングを発生するような電流を重畳させる。つまりダンピング力は浮上コイ

ル— SC コイル間に働くことになる。この方法は、タイプ 1 に比べて SC コイル電流により遮蔽されないという長所を持つが、浮上コイルの前面に配置されるために推進系に対して大きな磁気抗力を発生するという欠点を持つ。一方、SC コイル前面に集電コイルを配置して車上電源を賄うことが可能であれば、集電コイル自体をアクティブダンパコイルとして扱うことができる。

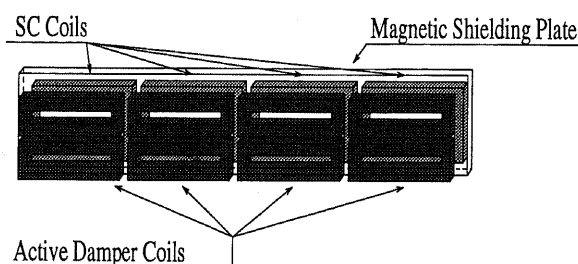


図 5.41: アクティブダンパコイル タイプ 2

5.5.1 ダンパコイルの形状

浮上コイルとアクティブダンパコイル間に働く上下方向の電磁力は、仮想変位法を用いて次の式で表現することができる。

$$F_{adz} = -i_{lev} \times i_{ad} \times \frac{dM_{lad}}{dz} \quad (5.34)$$

ただし、 i_{lev} は浮上コイル電流、 i_{ad} はアクティブダンパコイル電流を、 M_{lad} は浮上コイルとアクティブダンパコイル間の相互インダクタンスを表す。

式 (5.34) より、大きな浮上力を得るための要因は次のようになる。

- i_{lev} の最大化: SC コイルと浮上コイルの配置や台車速度に依存
- i_{ad} の最大化: ダンパコイルの回路定数や電源に依存
- dM_{lad}/dz の最大化: 浮上コイルとダンパコイルの形状に依存

○タイプ 1 の場合

形状に関係する部分は 3 番目の dM_{lad}/dz であるので、これを最大にする必要がある。そして dM_{lad}/dz の形状依存性から、ダンパコイルの幅、高さ、設置位置は次のようなものが最適と考えられる [25]。

- 高さ — 浮上コイル—ダンパコイル間の相互インダクタンスの z 方向変化分 dM_{lad}/dz の特性は、ダンパコイルの高さと設置位置で決定される。基本的にはコイル高さが大きければそれだけ dM_{lad}/dz は大きくなるが、ダンパコイルが浮上コイルを通過する過程全体で見ると、 dM_{lad}/dz は高さが SC コイルと同じ 0.5m のときに最適となる。

- 幅 — 浮上コイル—ダンパコイル間の相互インダクタンスの z 方向変化分 dM_{lad}/dz と x 方向変化分 dM_{lad}/dx は、ダンパコイルの幅で決定される。パッシブダンパコイルの幅方向に関する検討で述べたように、アクティブダンパのコイル幅は大きければ大きいほど良いダンピング効果を期待することができると考えられる。よって設置に必要な場所を考え、幅 1m とする。
- 設置高さ — 設置高さはアクティブダンパの性質から考えて、均衡変位にあるときに力がゼロであることが望ましい。よってダンパコイルの中心は台車が均衡変位にある時に浮上コイルの 8 の字の中心と一致する場所とする。これはダンパコイルの中心が SC コイルの中心よりも上に 0.04m にあることを意味する。
- 進行方向設置位置 — パッシブダンパの設置位置で述べたように進行方向位置は両者の中心が一致し、コイルピッチが等しい場合が最適である。

○タイプ 2

以上はタイプ 1 の場合であり、タイプ 2 では 8 の字浮上コイルと対向させるのでコイル高さを上下それぞれ 0.25m ずつ、また極性が上下逆になるようにする。その他はタイプ 1 と同様になる。

5.5.2 SC コイルと同形のダンパコイル (タイプ 1) の場合

図 5.42 に SC コイルと同形のダンパコイルの場合のモデル図を示す。ダンパコイルの中心は台車が均衡変位にある時に浮上コイルの中心に来るように、SC コイルに対して 4cm 上に設置されている。また表 5.4 にダンパコイルの諸元を示す。

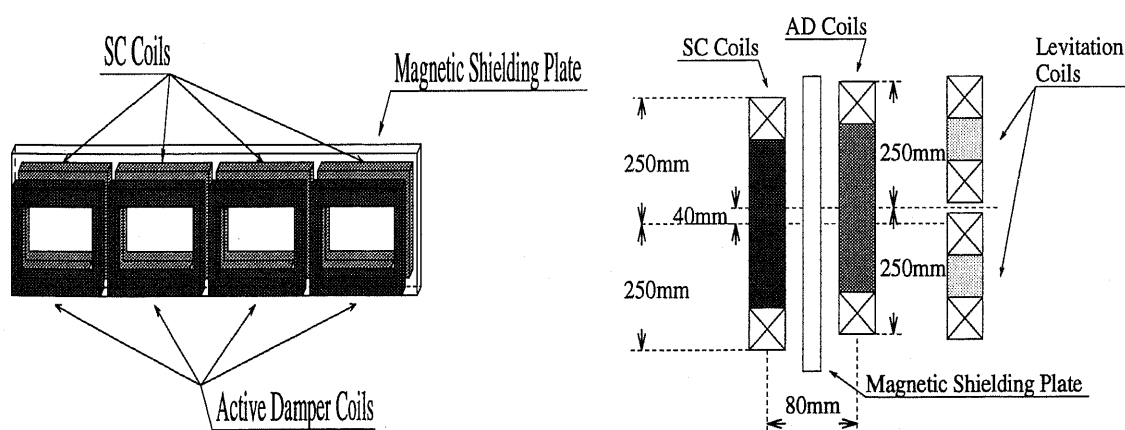


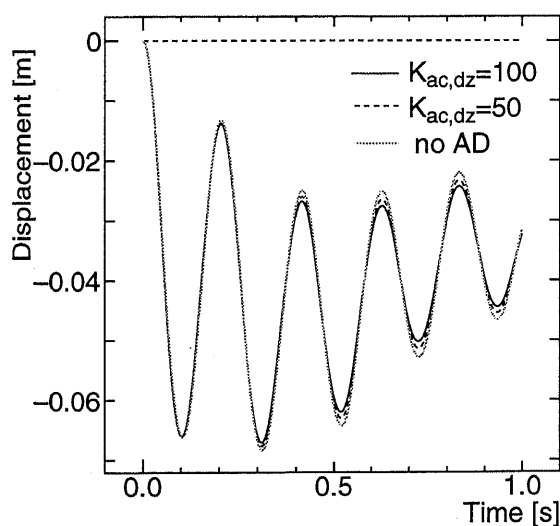
図 5.42: アクティブダンパコイルの配置 (タイプ 1)

このダンパコイル (タイプ 1) を用いて車両を進行方向には一定速度で上下のみに自由に振動させた場合の、台車の運動の様子を図 5.43 に示す。前節の解析と同様、台車の初期位置は $z=0$ で、 $t=0$ で上下のみに対して自由運動を開始する。ただしここで用いてい

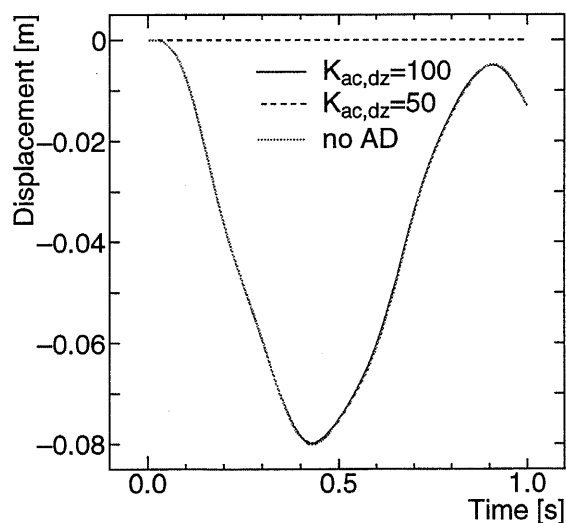
るのは台車と客室を分離した列車モデルであり、台車・客室ともに上下方向のみに自由度を持つものとする。図にはアクティブダンパを用いなかった場合と、アクティブダンパを用い印加する電圧を変えた場合の計算結果を示す。なお、台車の走行速度は 120m/s で、台車重量と浮上力の均衡点は縦軸が-4cm 付近である。このタイプ 1 の場合は、 $K_{ac,dz}$ を大きくとる、つまり印加電圧を大きくしても効果があまり見られない。

表 5.4: 検討に用いるアクティブダンパコイルの諸元 (タイプ 1)

幅	1000 mm
高さ	500 mm
コイル断面	5mm × 5mm
巻数	20
設置位置	SC コイルの上方 40mm SC コイルの前面 80mm
自己インダクタンス	8.22×10^{-4} H
隣合うコイル間の相互インダクタンス	-8.14×10^{-6} H/turn
抵抗	0.0744 Ω



(a) 台車



(b) 客室

図 5.43: アクティブダンパコイルを用いた場合の車両振動 (タイプ 1)

このアクティブダンパコイルを用いた場合のエネルギー収支特性を図 5.44 に示す。ここでは式 (5.33) で $K_{ac,dz}=100$ とした場合の結果を示している。この図には SC コイルの磁束保存性による影響を明らかにするため、SC コイル電流を一定と近似した定電流モードでの結果も合わせて示す。実際の SC コイルの電流変化は永久電流モードであるが、ここでは SC コイルの電流変化の影響を検討するために、電流変化を無視した定電流モードに

についても計算を行なっている。また、この定電流モードは SC コイルの代わりに永久磁石を用いた場合の結果と考えることもできる。

図に示すように、SC コイルの磁束保存を考慮した永久電流モードの場合は、あまりダンピングの改善が見られない。定電流モードの方が大きなダンピングが得られており、永久電流モードでの計算結果と定電流モードでの計算結果の差が SC コイル電流による遮蔽効果分と考えることができる。

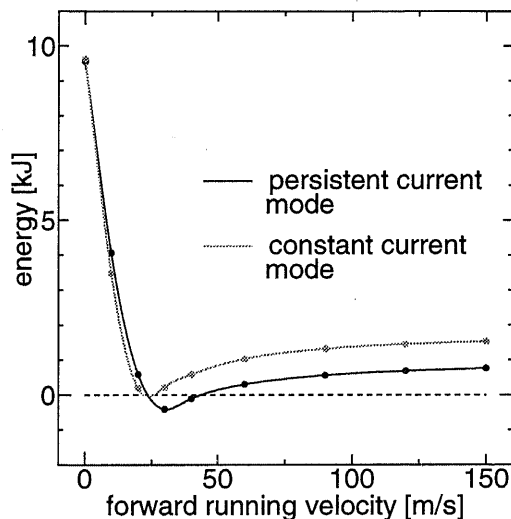


図 5.44: エネルギー収支の速度依存性 (タイプ 1)

これは SC コイル電流がダンパコイルによる磁束の変化を打ち消すように働くため、ダンパコイルの電流を大きくしてもダンピングへの効果が少ない。この形状では SC コイルの磁束保存性により、十分なダンピングを得られない。よって SC コイルの鎖交磁束への変化が小さいダンパコイルの形状を考慮する必要がある。

次に $v_x=120\text{m/s}$ での電圧-振動速度係数 $K_{ac,dz}$ とバネ係数およびダンピング係数の関係を示す。これら 1 次バネ係数及び 1 次ダンピング係数は次のようにして求めた。まず図 5.45 のような質量や 2 次バネ係数、2 次ダンピング係数を車両モデルと同じくする 2 剛体系を考える。そして、上記と同じ初期条件のもと剛体のバネ振動シミュレーションを 1 次バネ係数と 1 次ダンピング係数を様々に変え、波形比較を行なうことにより同定した。

図 5.46 に $v_x=120\text{m/s}$ での電圧-振動速度係数 $K_{ac,dz}$ とバネ係数、図 5.47 には、電圧-振動速度係数 $K_{ac,dz}$ とダンピング係数の関係を示した。ここでは、永久電流モードと、定電流モードの 2 通りの特性について示した。

図 5.46 では、永久電流モードの場合はバネ係数には大きな変動が見られずほぼ一定の値であるが、定電流モードでは電圧-振動速度係数の増大に伴って増大している。これはアクティブダンパコイルに電流が流れることで浮上コイル側から見ると等価的に SC コイル電流が増加していることになるので、バネ係数が増加している。一方、永久電流モードの場合、アクティブダンパコイルの電流増加による磁束増加は SC コイル電流により遮蔽されるので、バネ係数は増大しない。

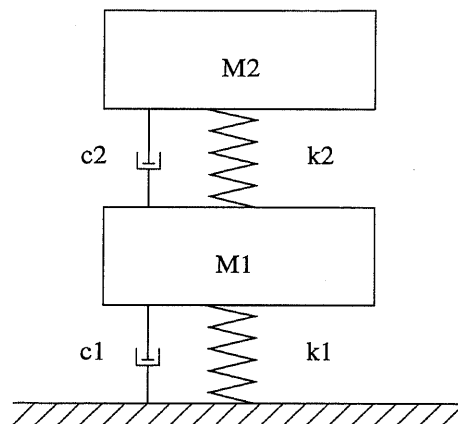


図 5.45: 2 剛体系モデル

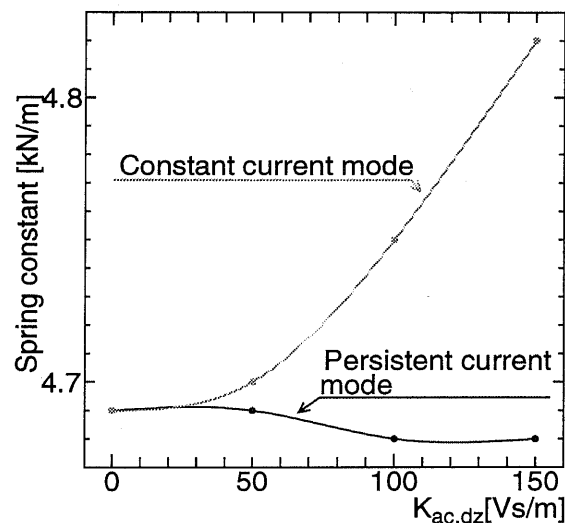


図 5.46: 電圧－振動速度係数とバネ係数の関係 (タイプ 1・ $v_x=120\text{m/s}$)

図 5.47では、得られるダンピング係数が電圧－振動速度係数の値に比例して増大することが分かる。これはアクティブダンパコイルに流した電流に比例したダンピング力が発生しているので、タイプ 1 のアクティブダンパシステムの場合、正のダンピング力が浮上コイル－アクティブダンパコイル間に発生しているからである。

また、定電流モードに比べて永久電流モードの方がダンピング効果が小さいことが分かる。永久電流モードの場合、アクティブダンパコイル電流の変動に伴う磁界変化を遮蔽するように SC コイルや磁気シールド板に電流が流れる。このうち主に浮上コイル－SC コイル間の電磁力が、浮上コイル－アクティブダンパコイル間に働くダンピング力を弱めていると言える。一方、定電流モードでは SC コイル電流や磁気シールド板のうず電流による遮蔽効果を見做すことになるので、大きなダンピングが得られることになる。

次に、磁気シールド板に誘導されるうず電流の効果について検討する。図 5.48に磁気シールド板のエネルギー収支への影響を示す。磁気シールド板がない場合には全ての速度

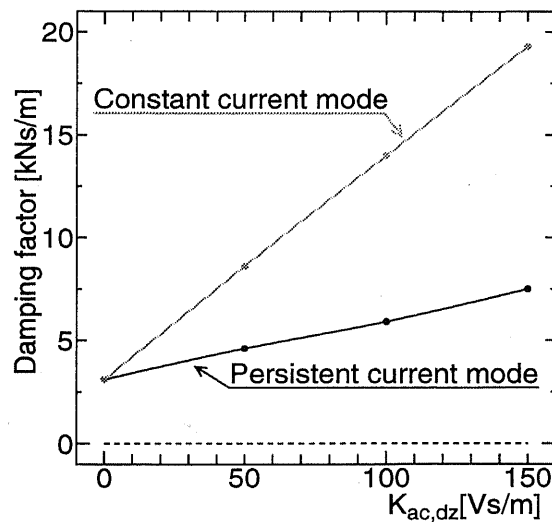


図 5.47: 電圧－振動速度係数とダンピング係数の関係 (タイプ 1・ $v_x=120\text{m/s}$)

領域で負の値を取ることが分かる。磁気シールド板を考慮した時と考慮しない時の特性の差が、磁気シールド板に誘導されるうず電流の効果と考えることができる。図 5.20 と比較するとアクティブダンパコイルを導入してもほとんど特性が改善されず、うず電流と浮上コイル電流との相互作用により生じるダンピング成分によりダンピングが正になることがわかる。

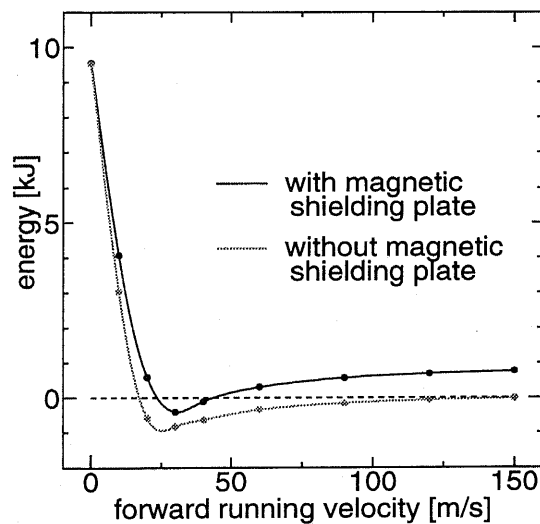


図 5.48: 磁気シールド板のエネルギー収支への影響 (タイプ 1)

5.5.3 浮上コイル対向型アクティブダンパコイル (タイプ 2)

図 5.49 に浮上コイル対向型のアクティブダンパコイルのモデルを示す。ここではダンパコイルの形状を浮上コイルに対向するようにし、上下のコイルには逆向きの電圧を加える。この形状を用いることでアクティブダンパコイルから SC コイルに鎖交する磁束の変

化を抑えることができる。アクティブダンパコイルと浮上コイルの 8 の字の中心は、浮上力と台車重量が均衡しているときに一致する、つまり上下アクティブダンパの中心が、SC コイル中心よりも 4cm 上になるように設置されている。ここで用いるダンパコイルの諸元を表 5.5 に示す。

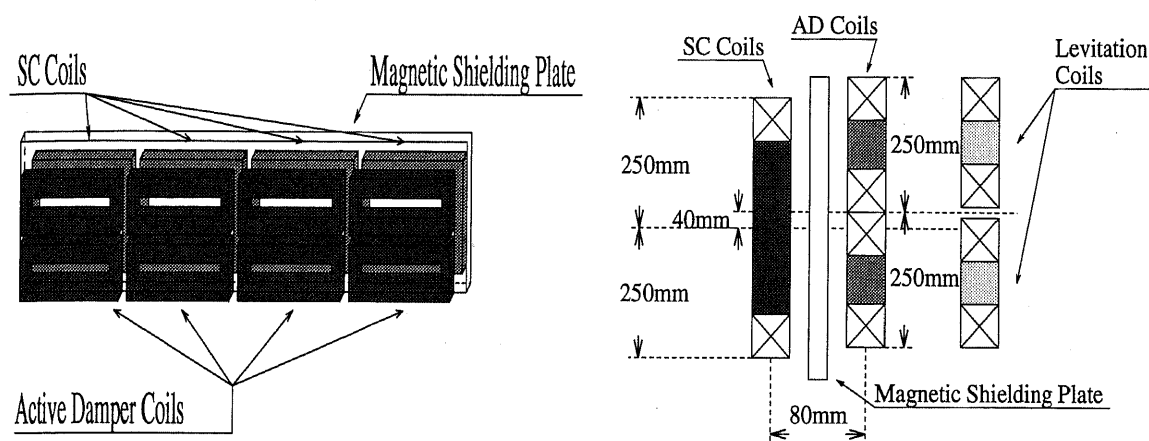


図 5.49: アクティブダンパコイルの配置 (タイプ 2)

表 5.5: 検討に用いるアクティブダンパコイルの諸元 (タイプ 2)

幅	1000 mm
高さ	250 mm
コイル断面	5mm × 5mm
巻数	20
設置位置	SC コイルの上方 40mm SC コイルの前面 80mm
自己インダクタンス	7.14×10^{-4} H
隣合うコイル間の相互インダクタンス	-2.19×10^{-6} H/turn
抵抗	0.0620 Ω

図 5.50 に車両を進行方向に一定速度 $v_x=120\text{m/s}$ で、上下のみに自由に振動させた場合の運動の様子を示す。タイプ 1 の場合と同様、台車の初期位置は $z=0$ で、 $t=0$ で上下のみに対して自由運動を開始する。図にはアクティブダンパを用いなかった場合と、アクティブダンパを用いて電圧-振動速度係数 $K_{ac,dz}$ を変えた場合の計算結果を示す。また台車重量と浮上力の均衡点は縦軸が -4cm 付近である。図のように良好なダンピングが得られている。

アクティブダンパコイル (タイプ 2) を用いた場合のエネルギー収支の速度依存性を図 5.51 に示す。ここでも図 5.44 と同様に (式 5.33) で $K_{ac,dz}=100$ とした場合の結果を示し、SC コイル電流の変化による影響を明らかにするため、SC コイル電流を一定とした場合の結果も合わせて示す。図に示すように、永久電流モードにおいてもダンピングの効果が

減少しない。2つの特性を比較すると SC コイル電流変化の影響が小さくなり、浮上コイル対向型の配置が効果的であることが分かる。

これは、アクティブダンパコイルを上下に配置することで、SC コイル電流による遮蔽効果が避けられていることによる。なお、定電流モードで計算した時のダンピング特性の方が、永久電流モードで計算した時よりもわずかに大きい。これは、上下のアクティブダンパコイル対を SC コイルの中心高さより 4cm 上方に設置しているために、SC コイルを貫くアクティブダンパコイル電流磁界が上下で完全に打ち消し合わず、ずれが生じているものと思われる。

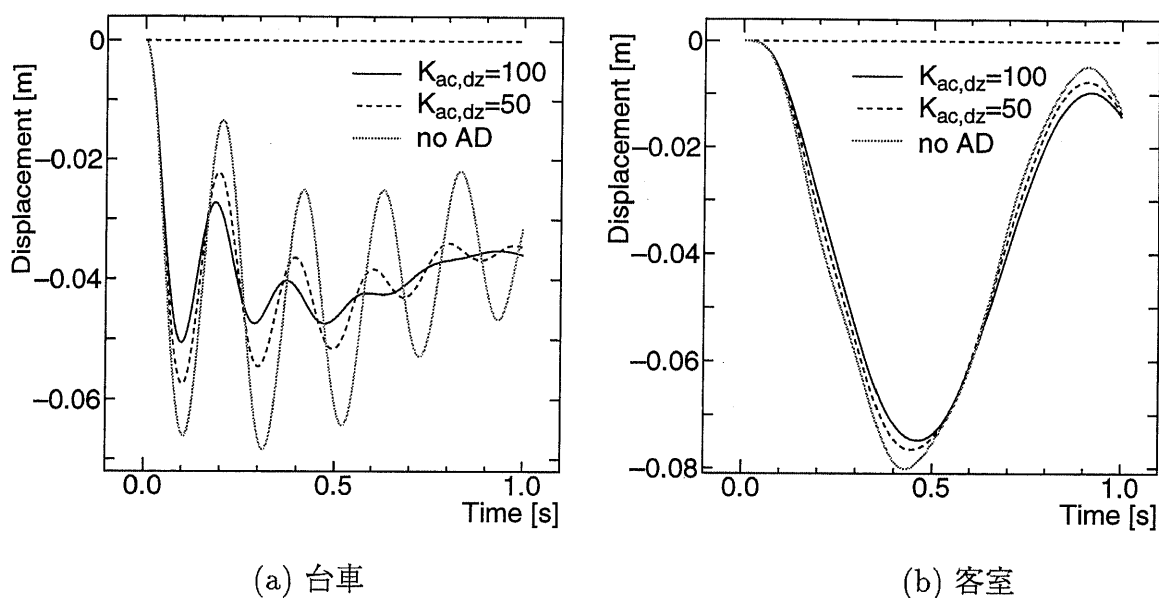


図 5.50: アクティブダンパコイルを用いた場合の車両振動 (タイプ 2)

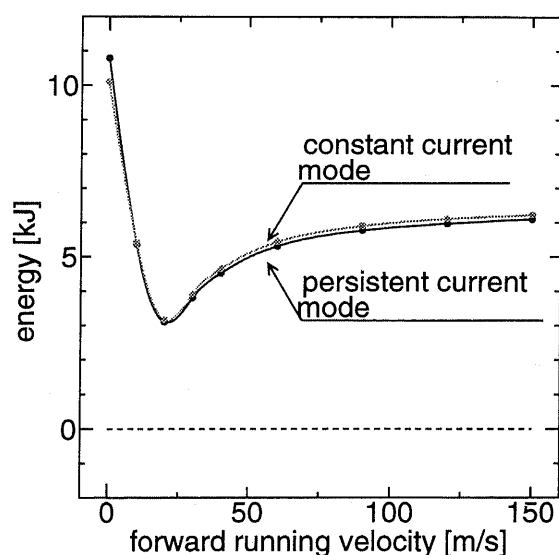


図 5.51: エネルギー収支の速度依存性 (タイプ 2)

タイプ 1 の特性と比較すると、定電流モードでもダンピング特性は明らかにタイプ 2の方が優れている。これは、タイプ 1 の場合は浮上コイルとアクティブダンパコイルとの磁氣的結合が弱いのにに対し、タイプ 2 では互いに対向する位置にあるために磁氣的結合が強いことに起因する。

図 5.52 に $v_x=120\text{m/s}$ での電圧－振動速度係数 $K_{ac,dz}$ とバネ係数、図 5.53 には、 $K_{ac,dz}$ とダンピング係数の関係を示す。これら 1 次バネ係数及び 1 次ダンピング係数はタイプ 1 の場合と同様に図 5.45 に示した定数バネ・ダンパで接続された 2 剛体系において、剛体のバネ振動シミュレーションを 1 次バネ係数と 1 次ダンピング係数を様々に変え、波形比較を行なうことにより同定した。

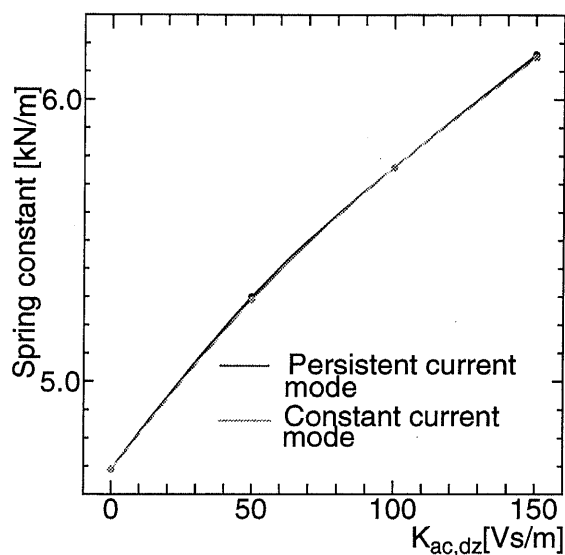


図 5.52: 電圧－振動速度係数とバネ係数の関係 (タイプ 2, $v_x=120\text{m/s}$)

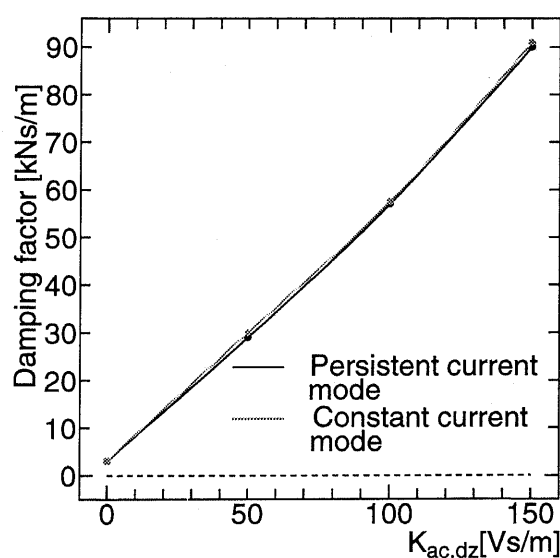


図 5.53: 電圧－振動速度係数とダンピング係数の関係 (タイプ 2, $v_x=120\text{m/s}$)

図 5.52では、永久電流モードの場合も定電流モードの場合もバネ係数が印加電圧（電流）にほぼ比例して増大することが分かる。タイプ 2 の場合は、アクティブダンパコイル電流の向きが上下で逆になっているので SC コイル電流による遮蔽の影響はほとんどない。また図に示すように $K_{ac,dz}$ とバネ係数は比例関係にある。

図 5.53でも、得られるダンピング係数が電圧－振動速度係数に比例して増大していることが分かる。しかも、永久電流モードでも定電流モードでも特性にほとんど違いが見られない。従って、SC コイルによる磁界遮蔽効果がないことが分かる。

次に、磁気シールド板に誘導されるうず電流の効果について検討する。図 5.54に磁気シールド板のエネルギー収支への影響を示す。磁気シールド板に誘導されるうず電流がわずかながらダンピング特性を悪化させていることが分かる。アクティブダンパコイルには台車振動速度に比例するような電流が流れるために、磁気シールド板にはこの電流が作る磁界を遮蔽する向きの電流が流れる。しかし、磁気シールド板には抵抗があるから、この電流の位相はアクティブダンパコイル電流の位相より進むが、このずれがダンパ効果を示す 90° に完全にずれるわけではなく遮蔽効果が現れるものと考えられる。

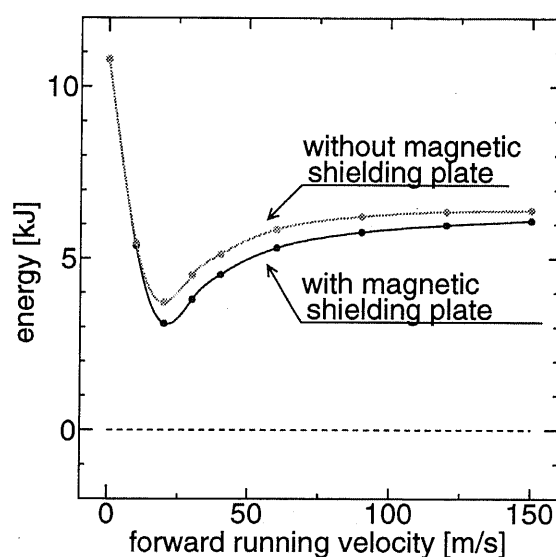


図 5.54: 磁気シールド板のエネルギー収支への影響（タイプ 2）

5.5.4 アクティブダンパ1と2の比較

図 5.55は、アクティブダンパコイルを導入した時と導入しない時のエネルギー収支の速度依存性を比較したものである。タイプ 1 の場合の特性の改善はわずかであるのに対し、タイプ 2 の場合は大きく特性が改善されていることが分かる。

また、表 5.6に $K_{ac,dz}$ と印加電圧の関係を示す。アクティブダンパに必要なダンピング係数として約 55kNs/m を考えているが [25]、表 5.6と図 5.47の対応関係から、タイプ 1 の場合は 55kNs/m のダンピング係数を得るためには、最大 306kA ($15.3\text{kA} \times 20\text{turn}$) の起磁力が必要となる。一方タイプ 2 の場合は、55kNs/m の目標を達成するために最大 24.8kA ($1.24\text{kA} \times 20\text{turn}$) の起磁力が必要となる。起磁力の観点からみても、明らかにタイプ 2の方が効率のよいダンピング特性を得られることがわかる。

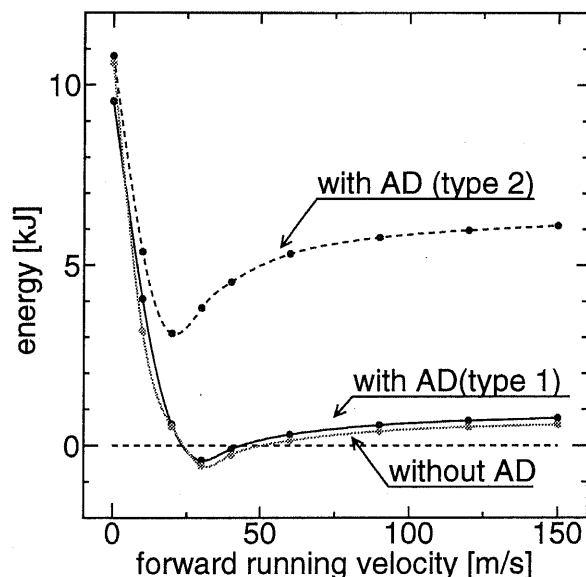


図 5.55: アクティブダンパシステムの有無によるエネルギー収支の違い

表 5.6: K の値と印加電圧・電流の関係

	タイプ 1		タイプ 2	
	最大電圧 V	最大電流 kA	最大電圧 V	最大電流 kA
$K_{ac,dz}=50$	50.6	0.68	45.0	0.73
$K_{ac,dz}=100$	100.2	1.37	81.5	1.31
$K_{ac,dz}=150$	150.5	2.08	120.6	2.03

5.5.5 ガイドウェイ変位に対するアクティブダンパコイルの効果

以上の検討から浮上コイルに対向させる形状をとるタイプ2がアクティブダンパコイルとして有効であることが示された。

次にこのタイプ2を用いて、定常走行を行なっている車両が、上下変位が発生したガイドウェイに突入するときの台車および客室運動について示す。台車は台車速度 $v_x=120\text{m/s}$ で、上下位置は均衡変位である $z=-0.04\text{m}$ を走行し、30m 走行したところで0.01m ステップ状に z 方向に変位したガイドウェイに入る。図5.56にその場合の台車および客室の運動を示す。図に示すように台車振動ではEDSによる振動周期が大きく減少し、アクティブダンパが効果的であることが分かる。また台車振動の減少に伴い、客室振動の振幅も若干ながら減少している。

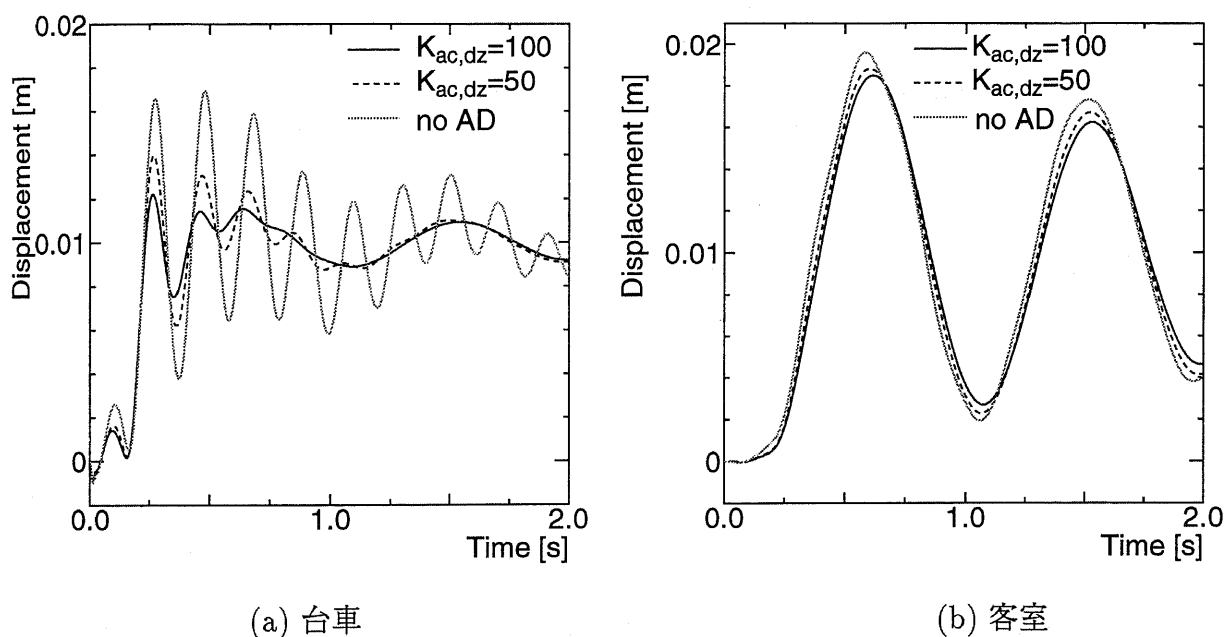


図 5.56: ガイドウェイ変位に対するアクティブダンパの効果 (タイプ 2)

5.5.6 アクティブダンパコイルに必要なエネルギー

台車を正弦波状に強制振動させるモデルで、ダンピング係数 1 Ns/m あたりに必要なアクティブダンパコイルの消費電力と、ダンピング係数 1 Ns/m あたりに発生する磁気抗力をタイプ 1 とタイプ 2 それぞれについて求めた。

平均ダンピング係数 c_{av1} は浮上コイル—アクティブダンパコイル間の電磁力が台車に対して行なった仕事 $W f_{lad}$ から次式を用いて計算した。

$$\begin{aligned} W f_{lad} &= \int_0^T F_{lad} \frac{dz_b}{dt} dt \\ &= c_{av1} \int_0^T \left(\frac{dz_b}{dt} \right)^2 dt \\ &= c_{av1} \int_0^T (A\omega)^2 \cos^2(\omega t) dt \\ &= 2A^2 \pi^2 f c_1 \end{aligned} \quad (5.35)$$

ただし、 A :強制振動における振幅、 T (周波数 f):強制振動における振動周期

まず、消費電力については図 5.57 及び図 5.58 に示すような結果が得られた。タイプ 1 の方がアクティブダンパコイルでの消費電力が大きく、1 桁以上の差がある。これは、タイプ 2 の方が、タイプ 1 よりも浮上コイルとアクティブダンパコイルの磁氣的結合が強いために生じることである。また、ともにアクティブダンパコイルのインピーダンスを大きく取っていることが一因ではあるが、アクティブダンパコイルの消費エネルギーが極めて大きい。ただし、アクティブダンパコイルを超電導線で実現するような方法があることを考えると、ここでは消費エネルギーの大きさよりも供給する電流の大きさに着目すべきである。

次に、磁気抗力については図 5.59 及び図 5.60 に示すような結果が得られた。消費エネルギーとは逆に、タイプ 2 の方がタイプ 1 よりも磁気抗力が大きくなっており、その差は 1 桁以上になる。これも、タイプ 2 の方が、タイプ 1 よりも浮上コイルとアクティブダンパコイルの磁氣的結合が強いために生じることである。ただし、タイプ 2 の場合でもアクティブダンパコイルによる磁気抗力の増大分は、推進系全体の磁気抗力に対して 2 ～ 3 % 程度であった。

アクティブダンパの導入はエネルギーを車上から供給するか、推進系から供給するかという問題に帰結することになる。従って、車上電源からのエネルギー供給を小さくするためには、推進系からエネルギーを供給する方が得策である。また、SC コイル電流の安定性の観点からはタイプ 2 の方がよいことは、先に示した通りである。このようなことから、アクティブダンパシステムを導入する場合、コイルを台車上浮上コイルに向き合う位置に配置する方法が適していると言える。

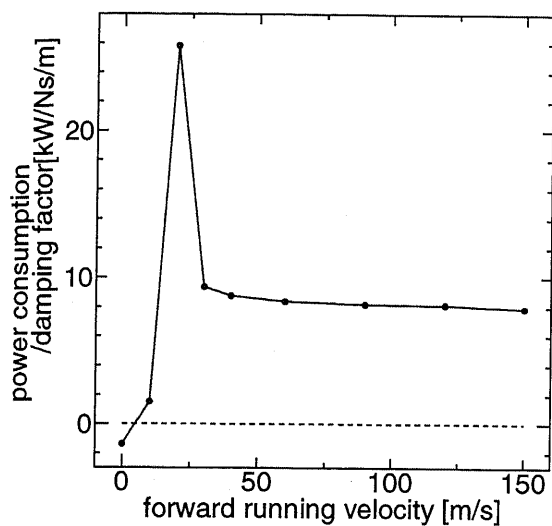


図 5.57: ダンピング係数 1 Ns/m 当たりアクティブダンパコイルで消費するエネルギー (タイプ 1・ $K_{ac,dz} = 100$)

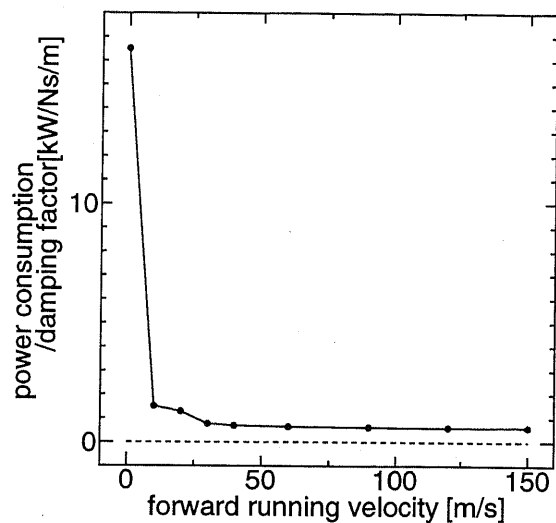


図 5.58: ダンピング係数 1 Ns/m 当たりアクティブダンパコイルで消費するエネルギー (タイプ 2・ $K_{ac,dz} = 100$)

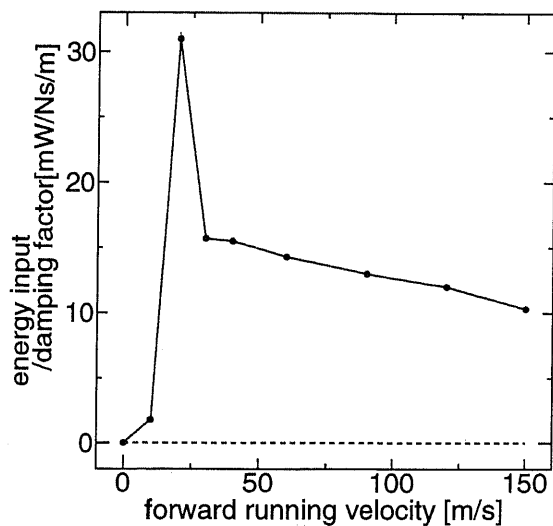


図 5.59: ダンピング係数 1Ns/m 当時に発生する磁気抗力 (タイプ 1・ $K_{ac,dz} = 100$)

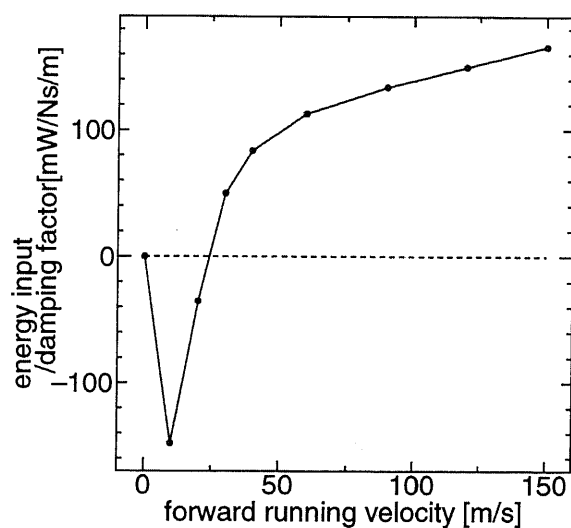


図 5.60: ダンピング係数 1Ns/m 当時に発生する磁気抗力 (タイプ 2・ $K_{ac,dz} = 100$)

5.6 結言

本章では浮上系のダンピングに着目して、解析を行なった。まず、磁気シールド板の影響を考慮することで浮上走行速度領域で正のダンピングが得られることを示した。しかし、さらに大きなダンピングや台車の共振時の対策や乗り心地を考えると、台車と地上間の1次ダンパの導入が必要となる。そこで、まずSCコイルの前に短絡コイルを設置するパッシブダンパコイルについて、その形状および位置について検討した。その結果SCコイル全面に浮上コイルに対向して上下2か所に設置する方法が最適であることを示した。ここで用いたコイル断面積では、あまり効果的なダンピングを得られなかったが、断面積を大きくして等価的にコイル抵抗値を下げれば大きなダンピングが得られる可能性がある。しかし、様々な外乱や乗り心地対策には十分ではないので車上電源を用いて能動的に正のダンピングを得るアクティブダンピングシステムを提案した。提案したアクティブダンパに対して得られるダンピング効果や他のコイルとの磁氣的関わりについて検討を行なったところ、台車上の浮上コイルに向かい合う位置にヌルフラックス結線したアクティブダンパコイルを設置するような方法で、比較的小さな起磁力で十分なダンピング力を得ることができることが分かった。また、ガイドウェイにステップ状の外乱を与えた場合についてもその効果を確認することができた。

第 6 章

超電導コイルクエンチの影響解析

6.1 緒言

このシステムにおいて最も深刻な外乱は台車上の超電導コイルのクエンチである。SC コイルクエンチは SC コイルに大きな応力がかかり熱振動が起こった場合や、なんらかの熱侵入が起こり冷凍機能力では除去できない場合に発生する。このシステムでは台車に超電導コイルを用いているため、これが 100%クエンチしないとは現在の技術では言えず、この場合の走行特性を求めることは必要不可欠である。よって本章では超電導コイルがクエンチした場合の走行特性を求め、さらにクエンチ後の列車の安定方法について検討する。

まず台車モデルを用いて SC コイルがクエンチした場合の台車の過渡運動を求め、台車運動や、台車や各 SC コイルに加わる電磁力について検討する。その上で複数台車が存在する列車モデルについて解析を行ない、クエンチが列車全体に与える影響を求める。またクエンチ時に列車運動を安定させる方法として、他の正常 SC コイルをクエンチすることにより列車位置を安定させる対向消磁が鉄道総合技術研究所から提案されている [31] が、この場合についても同様に過渡運動を求め、対向消磁の効果について検討する。

6.2 超電導コイルがクエンチした場合の電流モデル

SC コイルがクエンチした場合の SC コイル電流 i_{sq} の変化をモデル化したものを式 6.1 に示す。これは鉄道総合技術研究所の実験結果 [32] から得られたものである。

$$i_{sq}(t) = I_0 \times (1.0 + t/T) \times e^{-t/T} \quad T = 0.501\text{sec} \quad (6.1)$$

ただし、 I_0 は SC コイルがクエンチする直前の電流値である。

従来は式中の T には $T=0.29\text{sec}$ を用いていたが、現在の山梨新実験線用の SC コイルは時定数が伸びており [31]、ここでは $T=0.501\text{sec}$ を用いている。

図 6.1 は式 (6.1) を図示したものである。 i_{sq} は 3sec. 後にほぼゼロになる。また図 6.2 に SC コイルの位置を示す。図には例として、進行方向に対して先頭の SC コイル (SC1) がクエンチした場合を示している。以下台車の各 SC コイルは図のように SC1, SC2, ..SC8 とする。

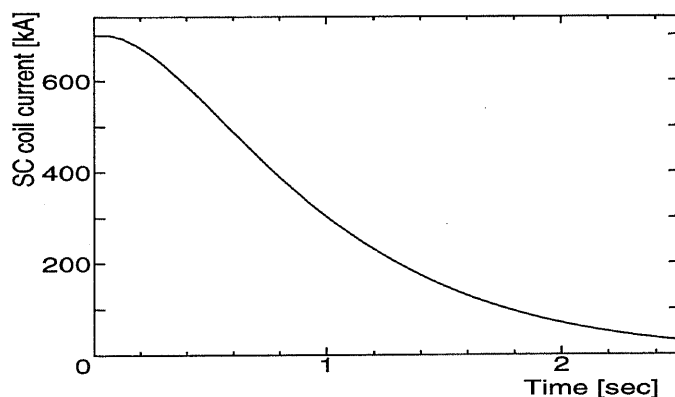


図 6.1: クエンチした SC コイルの電流変化

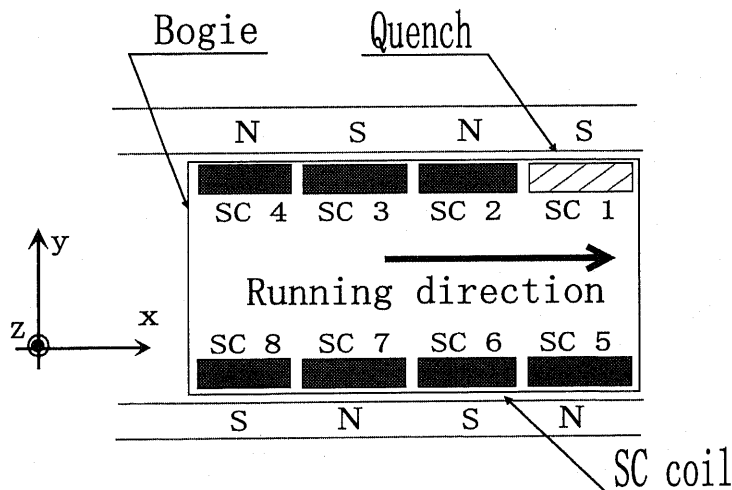


図 6.2: SC コイル配置図

6.3 台車モデルによる解析

6.3.1 クエンチ後の台車および SC コイル位置

まず台車モデルを用いて SC コイルがクエンチした場合の挙動について述べる。いままでの走行シミュレーションと同様に台車は、台車重量と浮上力が均衡する初期位置 $(y, z) = (0, -0.03935\text{m})$ で x 方向にのみ一定速度 $v = 140\text{m/s}$ で $t = 0.045\text{sec.}$ まで走行する。その後 LSM を起動して自由運動に入る。そして同時に一つの SC コイルがクエンチする。台車は左右対称であるから、片側の各 SC コイルがクエンチしたときの位置について検討する。図 6.3 に SC1~SC4 のうちの 1 個がクエンチした場合の台車運動を示す。なお台車モデルでは 2 つ以上の SC コイルがクエンチすると浮上走行が維持できないため、ここではクエンチコイルが 1 つのみとする。図 6.3(a)~(e) にそれぞれ横方向変位、上下変位そしてピッチング、ヨーイング、ローリングの各回転変位を示す。

まずどのコイルがクエンチした場合についても共通する特徴について述べる。図 6.4 に $x-y$ 平面および $y-z$ 平面での台車運動の様子を示す。横方向には y の正の方向、つまりクエンチした側に移動する。通常では台車は浮上コイルから横方向の反発力を受けている。そして SC コイルがクエンチすると、そのコイルに対する反発力がなくなることでクエンチした側の反発力が小さくなり、台車としてクエンチ側に移動することになる。

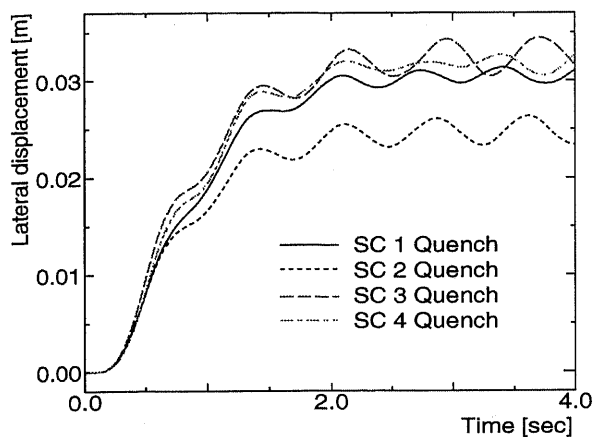
上下方向では、台車は下方に移動する。これはクエンチにより SC コイルが等価的に 1 個減るので、他の SC コイルで台車重量を支えなければならない。よって重量負担が増加するので浮上力を増加させるために位置が低下する。

ピッチングについては台車重心に対して前方にある SC1,2 がクエンチした場合にはそれらの浮上力がなくなるので、台車前方を下げる方向へ、SC3,4 の場合には台車後方を下げる方向へ回転する。

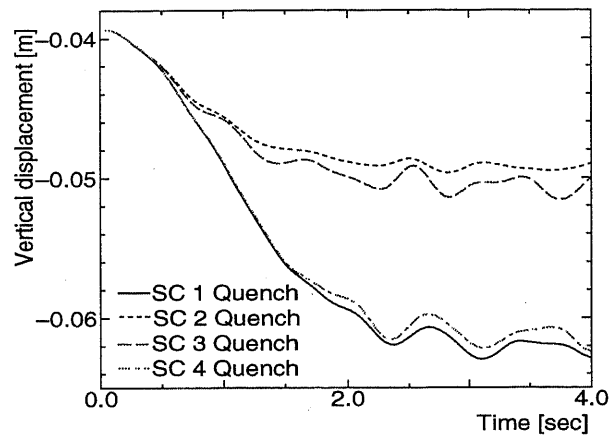
ヨーイングについては先の横方向変位と同じ原因、つまりクエンチしたコイルに対する横方向の反発力がなくなるため、そのコイルを側壁に押しつける方向に回転する。よってここでも台車重心に対して前方にある SC1,2 と SC3,4 で回転方向が逆になる。

ローリングについては、クエンチ側が下がることが予想されるが、それとは反対方向の回転を行なう。本来ならクエンチした側が浮上力が小さくなるために、クエンチした側を下げる方向、つまり図中では負のローリング回転を行なうはずである。しかし、クエンチ直後に負の方向に回転した後は反対方向、つまりクエンチした側を上昇させる方向に回転する。これは台車がクエンチ側に横方向に変位するため、クエンチ側が浮上コイルに接近、正常側が離れることになる。すると、クエンチした側の残りの 3 つの SC コイルによる浮上力が、浮上コイルから離れた正常側の 4 つの SC コイルによる浮上力より大きくなる。その結果台車全体としてローリングのトルクはクエンチ側を押し上げる方向に発生することになる。

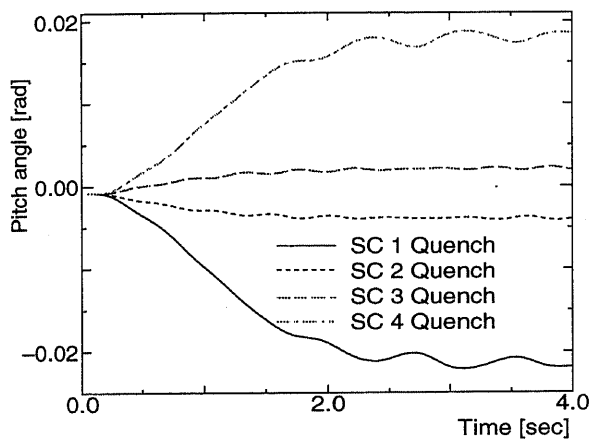
ここで各運動を見ると、上下、ピッチングおよびヨーイング運動で明らかにクエンチするコイルが SC1,4 と SC2,3 で変位量が異なっている。次にこれについて検討する。



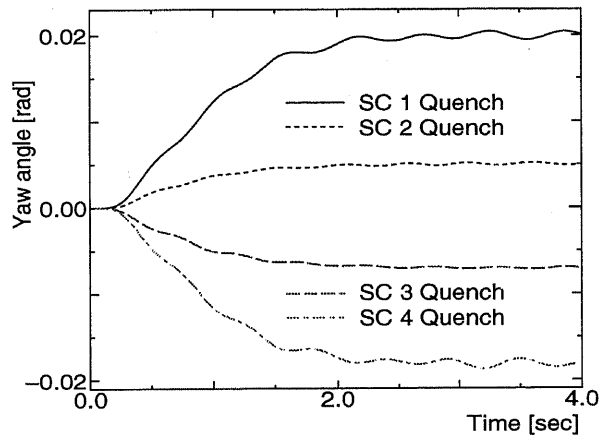
(a) 台車重心の左右運動



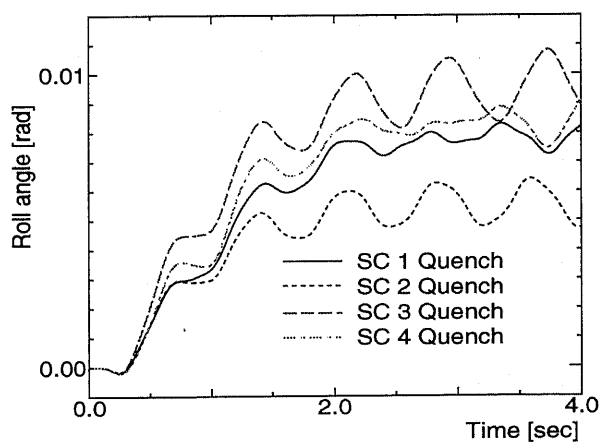
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化

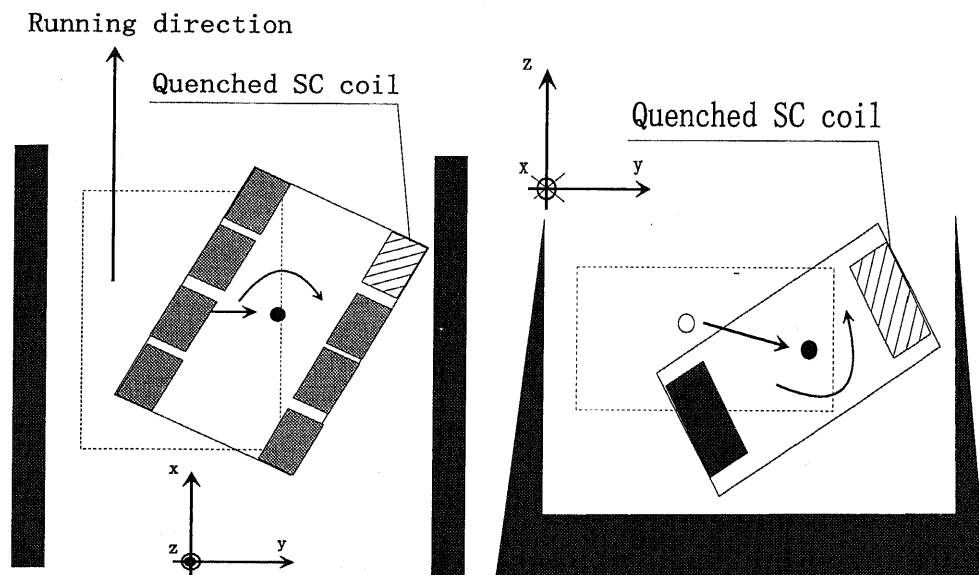


(d) 台車ヨーイング角の変化



(e) 台車ローリング角の変化

図 6.3: 1つの SC コイルがクエンチした場合の台車運動



(a) $x - y$ 平面

(b) $y - z$ 平面

図 6.4: SC コイルがクエンチした場合の台車運動の様子

まず回転運動について検討する。トルクは力と重心から作用点までのストロークの積で表される。ここで、SC1,4はSC2,3よりも重心からの距離が長いので、回転トルクのバランスへの影響が大きくなる。よってクエンチ後に再びバランスをとるためには、SC1,4の方がより大きな回転角を必要とする。その結果、ピッチングとヨーイングで大きな回転角が発生する。ローリングに対しては変位量が変わらないのはローリングの回転平面である $y - z$ 平面に対してはSC1~4でストロークが同じだからである。また、ピッチング角が発生することでクエンチしたコイル位置は下がるが、反対の位置にあるSCコイルの上下位置は上昇することになる。そのため、ピッチング角が大きいSC1,SC4ではそれだけクエンチしていないコイル位置が上昇するため、浮上力を補うためにより台車重心位置を下げなければならない。その結果、図 6.3(b) に見られるように、SC1,4がクエンチした場合には台車位置が大きく下がることになる。

図 6.3のみでは台車位置の外形が把握しにくく、SCコイル中心の位置が不明確である。よって次に $t=0 \sim 4\text{sec}$ までの各SCコイルの中心の $y - z$ 平面軌跡を示す。縦軸は初期台車位置 $z=-0.03935\text{m}$ からの変位を示しており、横軸はSCコイルの初期位置(クエンチ側 $y=1.49\text{m}$, 正常側 $y=-1.49\text{m}$) からの変位を示す。各図(a)の正常側では図の左側に浮上コイルがあり、各図(b)のクエンチ側では図の右側に浮上コイルがある。図 6.5にSC1がクエンチした場合の $y - z$ 平面SCコイル中心軌跡を示す。先に述べたようにSC1がクエンチすることで、SC1位置が下がり、反対側の先頭コイルであるSC5位置も低下する。ここでSC4の z 変位が 0.035m となり、これはちょうど8の字浮上コイルの中心と同じ高さになる。よって、このコイルの浮上力はほぼゼロになることが予想される。図 6.6と図 6.7にそれぞれSC2,3がクエンチした場合の軌跡を示す。図 6.6の正常側では軌跡が重なっており、矢印で各軌跡の終点を示している。SC2,3がクエンチした場合はSC1がクエンチ

した場合に比べて SC コイル変位が小さい。また SC2 の場合が変位が最も小さくなっており、これは第 4 章で述べた LSM によるヨーイングトルクが安定性を向上させているからである。図 6.8 に SC4 がクエンチした場合の軌跡を示す。SC 1 がクエンチした場合とちょうど前後反対になっていることが分かる。そして変位を比べると SC 1 よりも若干小さくなっている。これは SC 1 がクエンチした場合には異常電流が浮上コイルに発生し、その影響が後続の SC コイルにも伝わるが、SC4 の場合には後続のコイルがないので、その分変位が小さくなるからである。

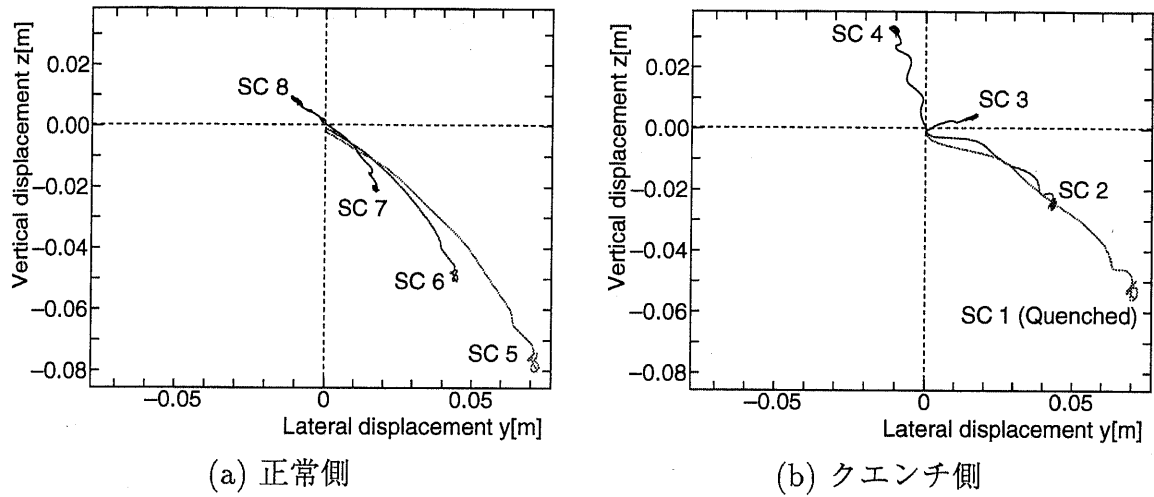


図 6.5: SC1 がクエンチした場合の SC コイル位置変化

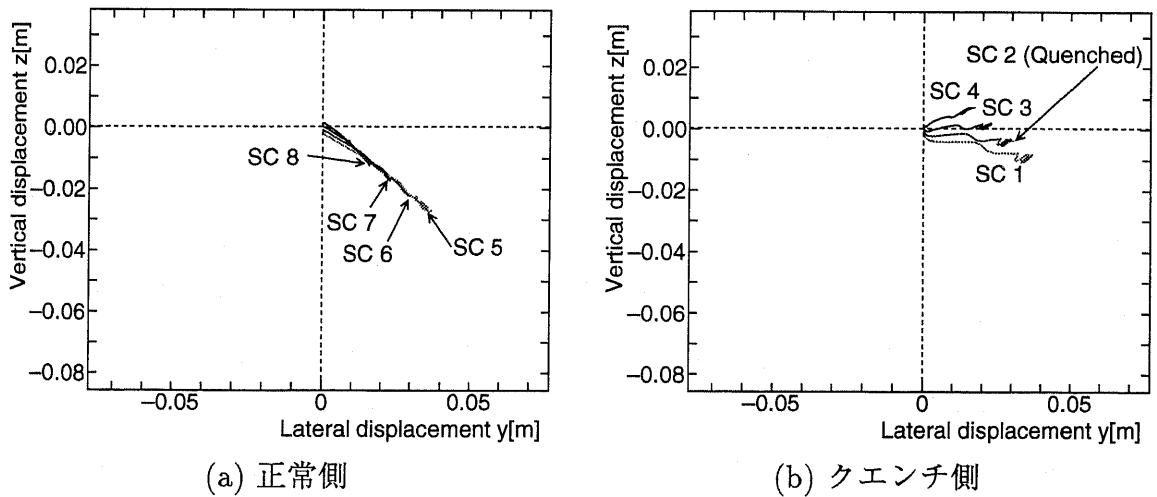


図 6.6: SC2 がクエンチした場合の SC コイル位置変化

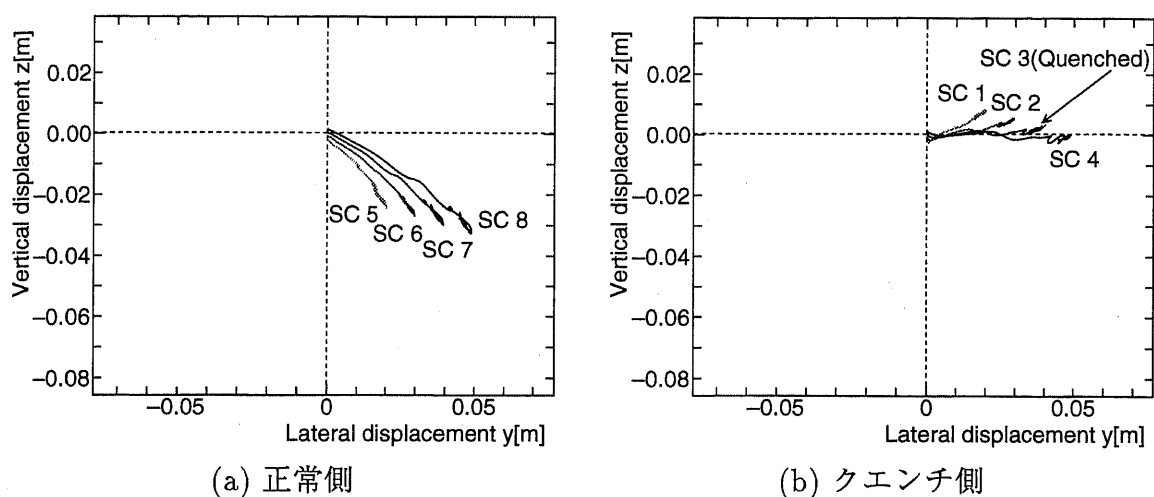


図 6.7: SC3 がクエンチした場合の SC コイル位置変化

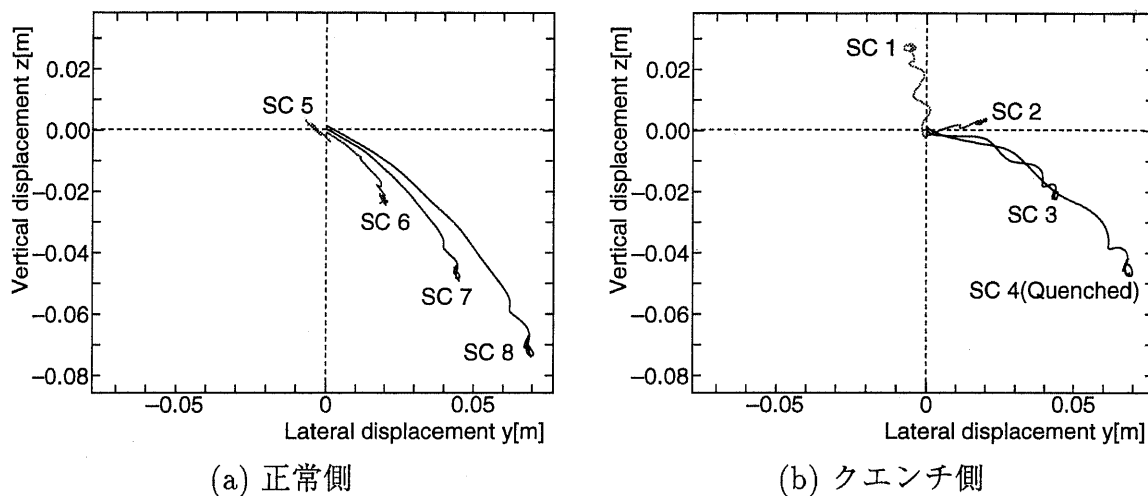


図 6.8: SC4 がクエンチした場合の SC コイル位置変化

以上の結果から次のことが言える。

- 4つの SC コイルのうち中の2つがクエンチした場合の SC コイル中心変位は最大上下約 0.04m、横方向約 0.05m の変位である。
- 両端のコイルがクエンチした場合には上下約 0.08m、横方向約 0.07m の変位が発生する。このように特に両端の SC コイルに対するクエンチ対策は重要になる。
- 台車に設置されたストッパーなどの突起物を考慮しない場合、これらの変位では側壁との衝突は起こらない。
- SC 1、つまり進行方向に対して先頭の SC コイルがクエンチした場合が変位が最大になる。

以降では台車変位が最大になる SC1 がクエンチした場合について詳しく検討する。

6.3.2 SC コイル電流および各電磁力の変化

前節で示したように4つのSCコイルのうち、先頭のSC1がクエンチした場合が最も台車運動に大きな影響を与える。よって、ここではSC1がクエンチした場合についてSCコイル電流および各電磁力の変化を示す。

まず図6.9にSC1がクエンチした場合の各SCコイル起磁力の変化を示す。ここでSCコイルに流れる電流は、値をターン数の1400で割れば求まる。SCコイルの磁束保存性により、各SCコイル電流は鎖交磁束を一定にするように変化する。そして、最も大きな電流変化が起こるのはSC2であるが、その増加は2%程度である。また電流変化率も図から大きくないことが分かる。よって、この電流増加によりSC2がクエンチを起こすことはないと言える。反対側ではSC5が最大であり、1%の増加が見られる。これはSC1がクエンチしたことで、左右の浮上コイルの誘導起電力の差が生じて左右コイルを接続しているヌルフラックス線に大きな電流が浮上コイル流れる。そして、図6.5に示すようにSC5が浮上コイルの下側の中心近くに来るために、その異常浮上コイル電流による磁束変化に影響を受けるからである。また、図中に見られる小さな振動の周期は3.6msecであり、これは台車が浮上コイル一つを通過する毎に起こる振動である。実際のシステムではこの振動成分は磁気シールド板により減衰すると考えられる[33]。SC2でこの振動の振幅が大きくなっているのは、第3章に示したようにSC2が浮上コイルに接近することで、SCコイルと浮上コイルの相互インダクタンスの位置微分の高調波成分が増加するからである。

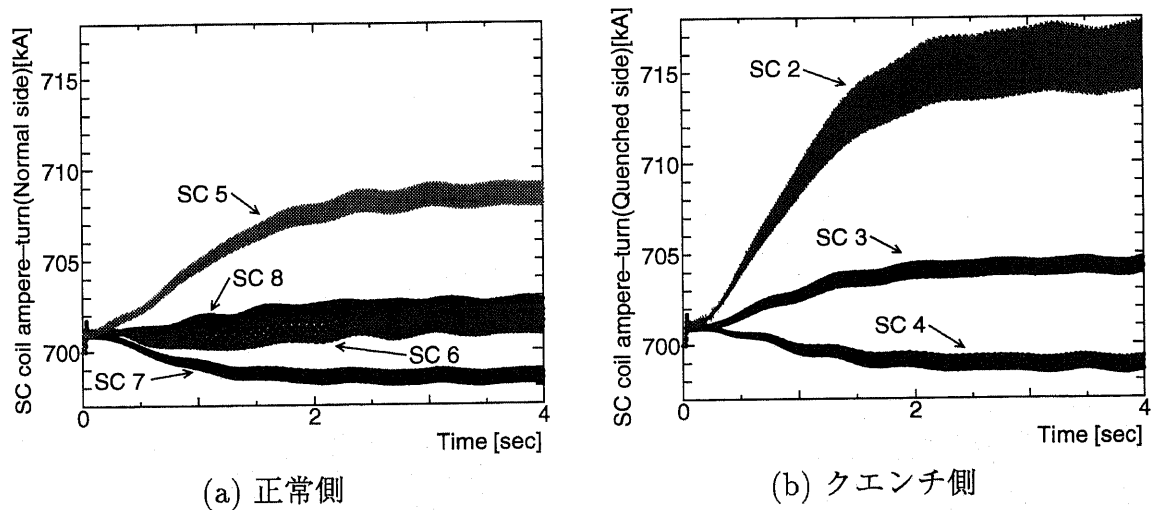


図 6.9: SC1 がクエンチした場合の各 SC コイル起磁力変化

図 6.10に SC1 がクエンチした場合の浮上力変化を示す。図中に見られる小さい振動成分はSCコイル電流と同様に浮上コイルピッチによるものである。SC4の浮上力が小さくほぼゼロになっているが、これはSCコイル軌跡のところ述べてように、SC4の上下位置がほぼ浮上コイルの8の字の中心に来たためである。最も浮上力が大きくなるのはSC2であり、通常の約2.4倍になる。

図 6.11 にクエンチ側の案内力を示す。SC2 が最も側壁に接近するため、SC 2 の案内力の平均値は-40kN になり、通常値の約 7 倍になる。また浮上コイルに接近することで、浮上コイルピッチによる振動成分も大きくなり、その振幅は約 14kN になる。SC5 の案内力も 6 倍程度増加しているが、これは台車軌跡で示したように、SC5 が浮上コイルの下側コイルの中心付近にあり、反発力を大きく受けるからである。しかし、浮上コイルからの距離は SC2 よりも離れているため、振動成分は約 5kN と小さくなっている。

これらの結果 SC1 のクエンチにより、SC2 に大きな浮上力および案内力の変化が起こり、大きな応力が加わることになる。よってこれを防止するために他の SC コイルの消磁を行うなどして、台車位置のバランスをとる必要がある。

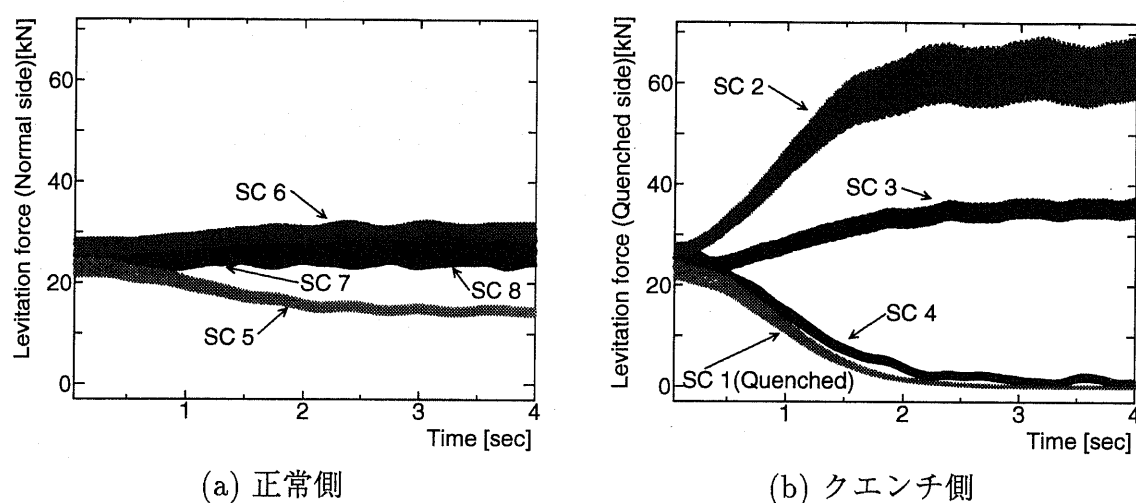


図 6.10: SC1 がクエンチした場合の SC コイル浮上力変化

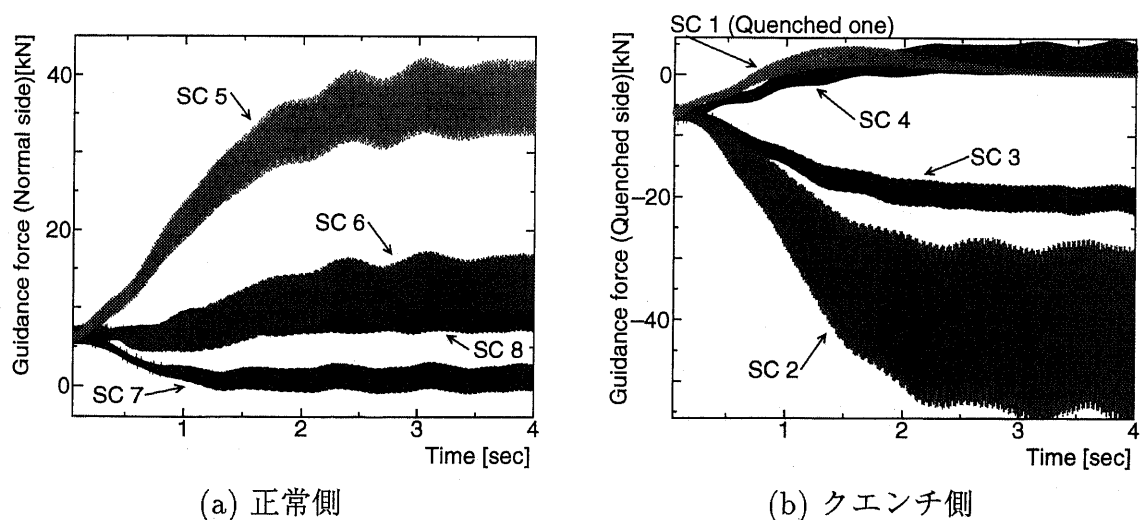


図 6.11: SC1 がクエンチした場合の SC コイル案内力変化

図 6.12 に LSM による推進力を示す。図 6.12(a) の正常側は浮上コイルへの y 方向距離が減少する SC8 のみ増加し、浮上コイルから離れる残り 3 つは減少して大きさは SC7, 6, 5 の順となる。図 6.12(b) のクエンチ側については、浮上コイルへの y 方向距離が最小の SC2 が最も大きく約 15% 増加し、以下 SC3, 4 という順になる。正常側の合計推進力は約 9.0kN で 12.7% 減、クエンチ側は約 8.4kN で 18.5% 減となる。クエンチ側の推進力は 25% (全体の 1/4) 減少するが、台車位置がクエンチした側に横方向にずれ、クエンチ側の SC 1 以外の SC コイルの推進力が増加したため、18.5% となっている。そして、全体で約 15.6% 推進力が低下していることが分かる。

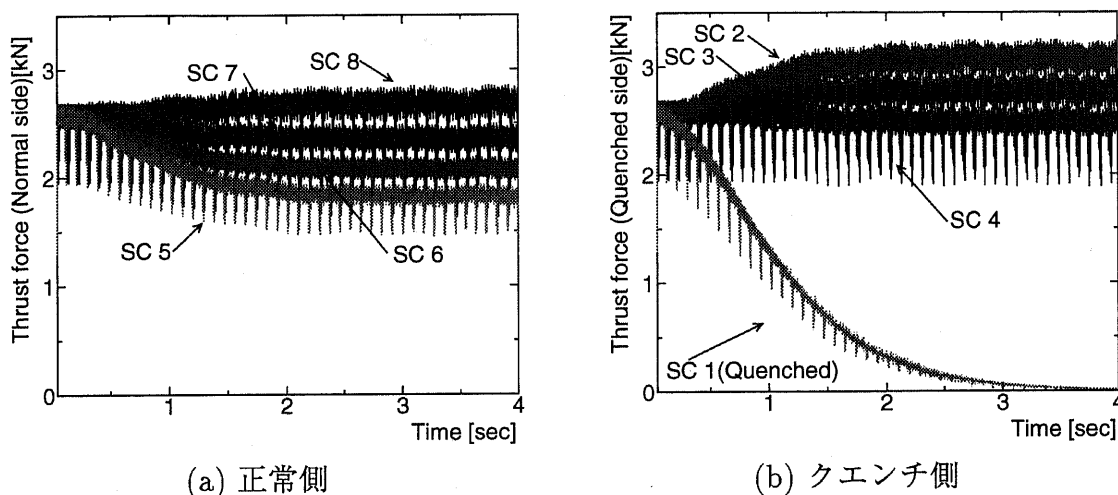


図 6.12: SC1 がクエンチした場合の SC コイル推進力変化

図 6.13 に SC 1 のクエンチ後に台車が通過する時に浮上コイルに誘導される電流を示す。ここで Coil 1, 2 はクエンチ側の上下浮上コイル、Coil 3, 4 は正常側の上下浮上コイルである。

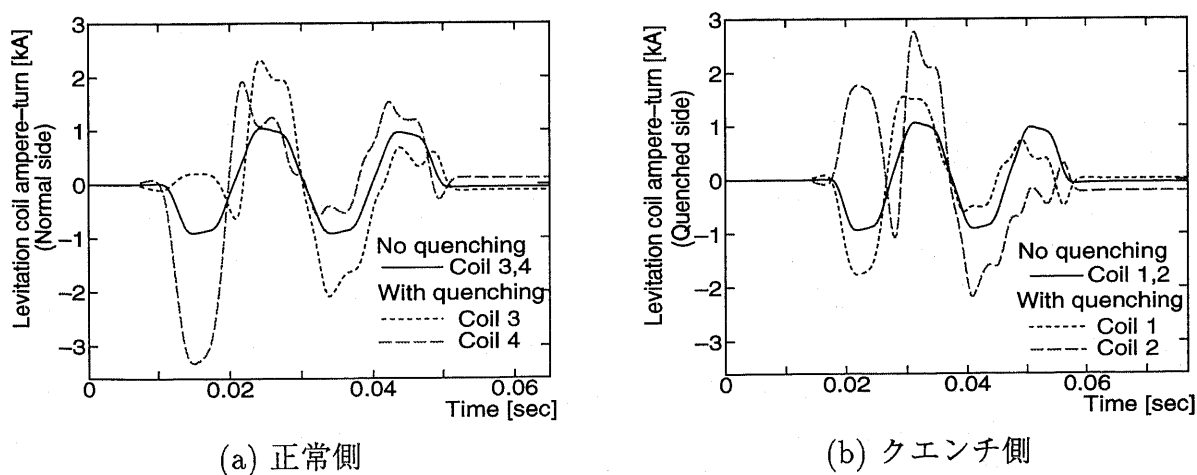


図 6.13: SC1 がクエンチした場合の浮上コイル電流変化

台車が定常状態で走行している場合は1組の浮上コイルに流れる電流は全て同じ波形になる。電流波形は4つのピークを持っており、それぞれ片側4つのSCコイル(SC1,SC2...)が通過時に発生するものである。浮上コイルに最も大きな影響が現れるのが、最初のピークであり、これはSC1がクエンチしているので、SC5による誘導電流が左右の浮上コイルを結合しているヌルフラックス線を通して流れ込むことによる。その結果浮上コイルCoil2とCoil3の電流方向が通常時と比べ逆転している。またピーク電流はCoil1で約2倍、Coil4で約3倍にもなる。この最初のピークの変動の影響が残りのピークにも付加されることになり、図に示すような高調波成分を含んだ電流波形になる。これにより浮上コイルにも大きな応力が加わると考えられる。

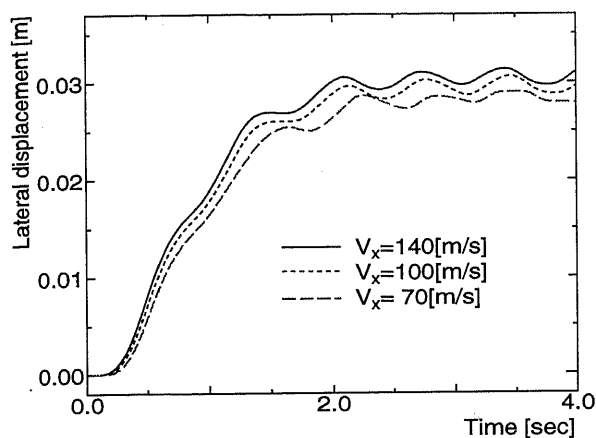
以上電磁現象についてまとめると次のようになる。

- SC1がクエンチした場合には、SC1に隣接するSC2に通常の2.4倍の浮上力、7倍の案内力が加わることになる。
- 台車のクエンチした側が浮上コイルに接近することで浮上コイルピッチに起因する振動成分の振幅が約14kNに達する。
- 地上設備についても浮上コイルに大きな異常電流が流れ、大きな応力が加わると考えられる。

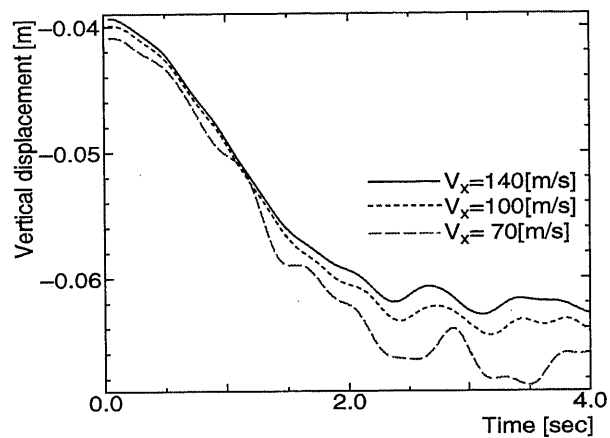
このようにコイルクエンチは他のSCコイルの安定性を著しく低下させる。また横方向変位が大きいために台車に異常な案内力が加わる。このまま走行させると、他のSCコイルのクエンチなど悪影響が予想される。SC4でも台車変位がSC1の場合とほぼ同じなので、同様の問題が発生する。よって台車片側4つのSCコイルのうち両端のどちらかがクエンチした場合には、なんらかの保護手段が必要である。

6.3.3 台車走行速度による影響

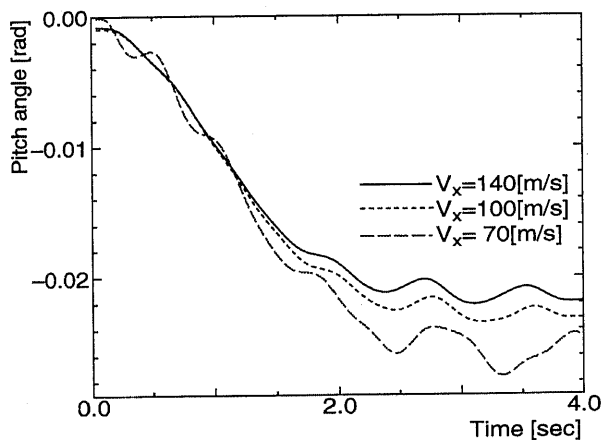
次に台車走行速度がクエンチ時の走行特性に与える影響について述べる。先に示したようにSC1がクエンチした場合が最も運動への影響が大きいので、この場合について述べる。図6.14に台車運動の走行速度依存性を示す。図6.14(a)に示すように左右変位は速度が大きい方が大きくなっており、これは高速域でダンピングが良くなることに矛盾するように見える。しかし、これは台車を中央に向かって押している反発力が速度が低いほど小さいため、クエンチ時に起きる異常左右力も低速度域の方が小さいからである。速度が大きい方が同じ変位に対して浮上力が大きいので、上下変位は速度が大きい方が小さくなっている。またピッチングも同様の理由で、速度が大きい方が小さくなっている。その他の運動でも速度が大きい方が変位が小さく、安定性があると言える。さらに図6.15に最も変位が大きいクエンチコイルであるSC1と、その左右反対側にある正常側で変位が最大のSC5のコイル中心の軌跡を示す。速度が低下すると上下左右方向ともに変位が増加する。そして浮上走行領域では速度が小さいほどダンピングは小さくなるので、特に上下方変位の増加が見られる。



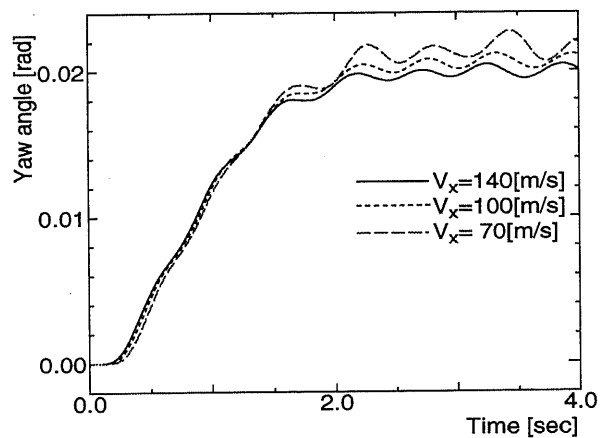
(a) 台車重心の左右運動



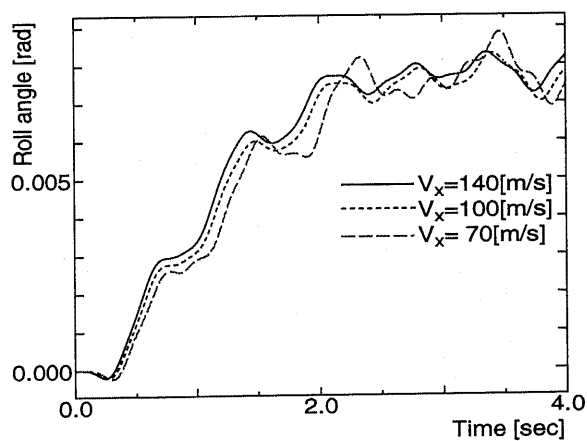
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化



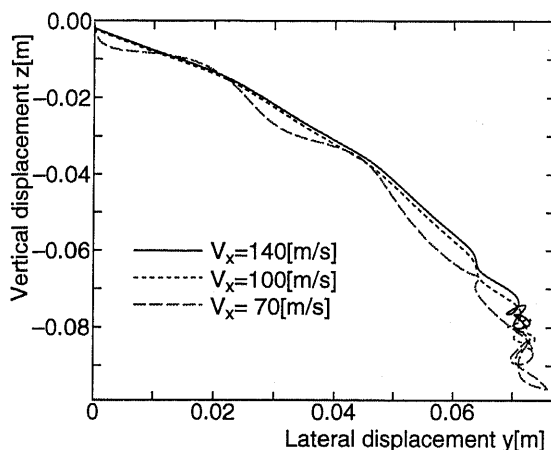
(d) 台車ヨーイング角の変化



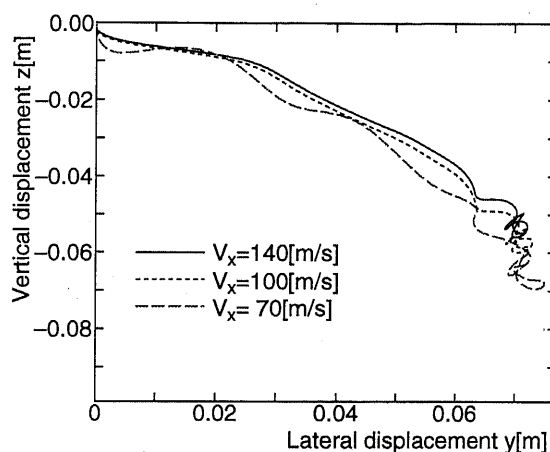
(e) 台車ローリング角の変化

図 6.14: クエンチ時の台車運動の速度依存性 (SC1 がクエンチ)

ここで当然クエンチ時に起きる異常左右力は高速であるほど大きく、個々の SC コイルに発生する電磁力は大きくなるが、台車全体にかかる力で考える、つまり台車の運動に着目すると、高速でクエンチした方がクエンチ後の変位が小さくなることがわかる。クエンチは鉄車輪式の鉄道でいえば、車輪がはずれることに相当するが、高速域の方が異常発生後の変位が小さくなることから、低速の方が必ずしも安定性があるとは言えず、従来の鉄道とは別の対策が必要である。



(a) SC5 コイル中心の軌跡



(b) SC1 コイル中心の軌跡

図 6.15: SC1,5 の位置の速度依存性 (SC1 がクエンチ)

6.3.4 SC コイルの特性による影響

ここでは、SC コイルの特性がクエンチ時の走行特性に与える影響について述べる。SC 1 がクエンチした場合が最も運動への影響が大きいため、この場合についてのみ述べる。

まず SC コイルのクエンチ時の電流減衰時定数について検討する。山梨新実験線用の SC コイルの電流減衰時定数は式 (6.1) に示したように、 $T=0.501\text{sec}$ となっているが、従来の宮崎実験線では $T=0.29\text{sec}$ の SC コイルも用いられていた。そこで電流減衰時定数の違いによる特性の違いを求め、減衰定数が伸びたことによる効果について検討する。図 6.16 に SC コイル電流減衰時定数の台車運動への影響を示す。他の計算条件は先と同じである。なお、ここでは横方向運動と、回転運動としてピッチング運動について示す。他の運動は同じ傾向をとるためここでは省略する。時定数が伸びたことにより、クエンチ直後の運動変化の速度が小さくなる。最終的に位置の平均値は同じになりほぼ同じ姿勢で運動するが、時定数が短いと最初のオーバーシュート分が大きいためクエンチ後の台車位置の移動が終了した後の振動成分が増加する。

次に SC コイルの自己インダクタンスによる影響について検討する。超電導磁気浮上鉄道用には宮崎実験線車両から山梨実験線車両まで様々な仕様の SC コイルが製作されている。その中でコイルクエンチ時に、他の SC コイルの電流変化に影響するのは SC コイルの自己インダクタンスである。SC コイルは定磁束モードにあるので、外部からの磁束の

変化を打ち消すように電流を変化させる。よって自己インダクタンスが大きくなると同じ外部からの侵入磁束に対して小さい電流変化で対応できることになる。ここでは実際に用いられている SC コイルの自己インダクタンスよりも小さい $L=1.48\text{H}$ と比較する。

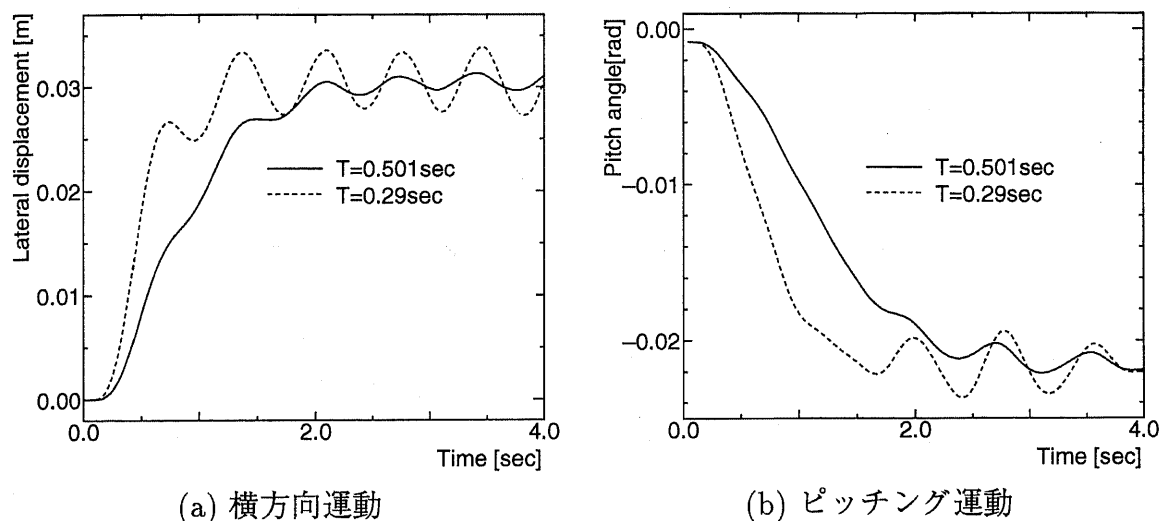


図 6.16: SC コイル減衰時定数の台車運動への影響

まず図 6.17 に SC コイル自己インダクタンスの SC コイル電流への影響を示す。図 6.9 に示したようにクエンチしたコイル SC1 に隣接する SC2 で最も大きい影響が表れるのでこのコイルの電流変化を示す。 $L=2.70\text{H}$ において電流変化は約 2% であるが、 $L=1.48\text{H}$ においては約 4% となり、ほぼ 2 倍となっている。ここで自己インダクタンスは約 1/2 なのでこの結果は理論とほぼ一致する。

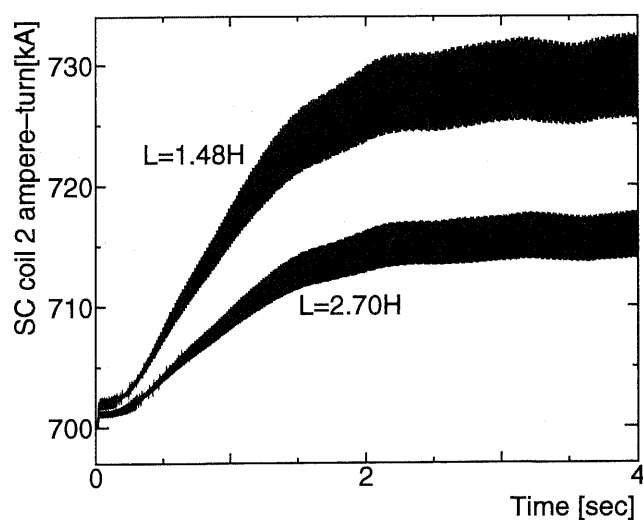


図 6.17: SC コイル自己インダクタンスの SC2 電流への影響

図 6.18に SC コイル自己インダクタンスの台車運動への影響を示す。図には横方向振動とピッチング運動について示す。運動の様子は両者とも一致している。しかし、自己インダクタンスが小さくなると、クエンチ終了後の変位が小さくなる。これは、図 6.17に示したように自己インダクタンスが小さくなると、SC コイルの電流変化が大きくなることによる。相互インダクタンスは変わらないので電流変化が大きくなると、必要な浮上案内力に対する台車変位が小さくなり、自己インダクタンスが小さい方がクエンチ後の変位が抑えられるのである。

SC コイル電流は外部からの磁束の変化を打ち消す方向に変化するので、例えば台車が片側の浮上コイルに接近すると、離そうとする方向に力が働くことになり、一種のダンパの機能を持つ。これはカーブ区間でも言えることであり、SC コイル電流の変化により遠心力による横方向変位が減少する。よって、SC コイルの定磁束モードは台車位置を一定にする働きがある。このように SC コイルの自己インダクタンスが小さいと台車の変位が小さくなるが、これは逆に SC コイルの電流変化が大きくなることを示し、正常な SC コイルに新たなクエンチを発生させる可能性が増える。よって両者の相関により適切なコイル設計をする必要がある。

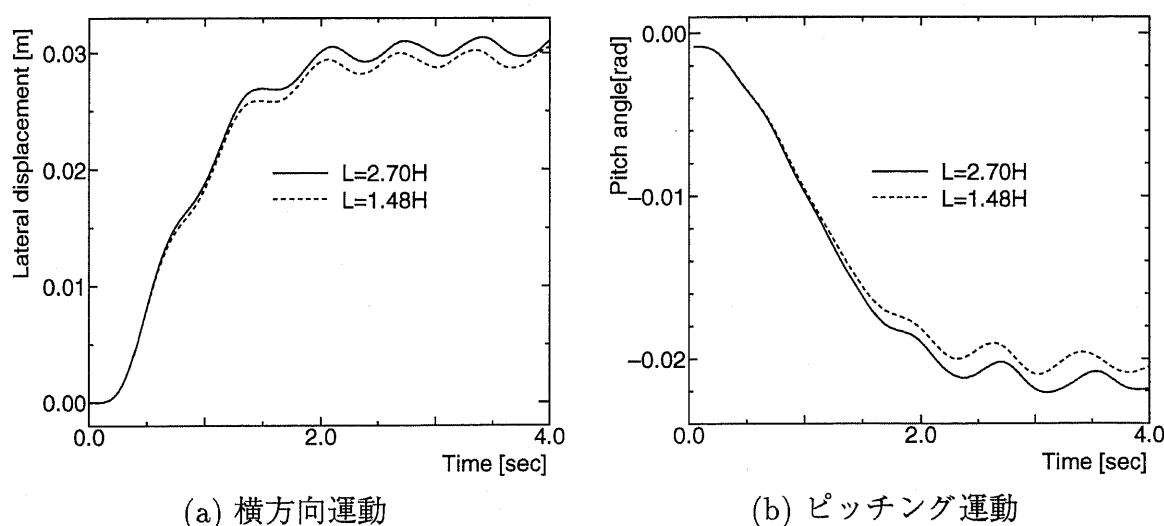


図 6.18: 台車運動の SC コイル自己インダクタンスに対する依存性

6.4 列車モデルにおける解析

次に列車モデルにおける解析結果を示す。SC コイルのクエンチ電流などは台車モデルと同じである。図 6.19 に列車モデルにおけるクエンチモデルを示す。図には先頭台車の SC1 がクエンチした場合を示す。台車モデルの結果より、進行方向先頭台車がクエンチした場合が最も変位が大きかったので、この場合について検討する。

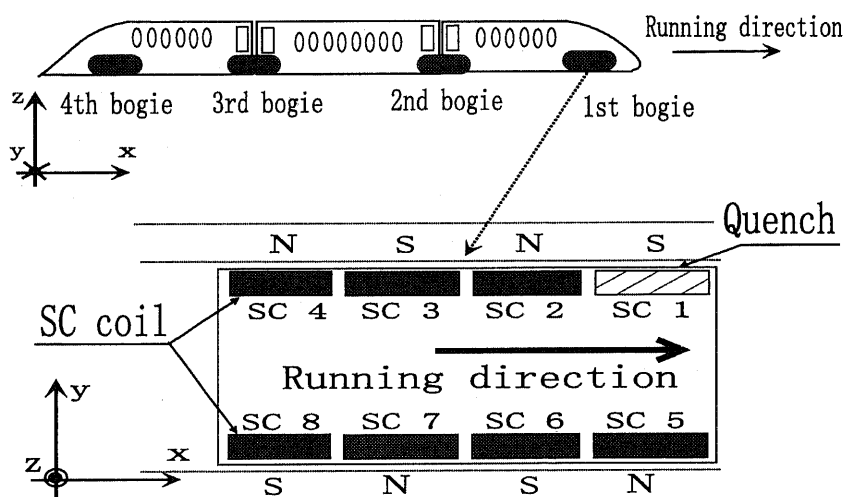


図 6.19: 列車モデルにおけるクエンチモデル (先頭台車の SC1 がクエンチ)

台車および客室初期位置は第 4 章の表 4.3 に示した値を用いる。車両は 0.045sec 間進行方向速度 $v_x=140\text{m/s}$ で走行し、その後自由走行に移り、同時に LSM も起動する。またクエンチもその時点で発生する。台車および車両は進行方向先頭から 1,2,.. の順となっている。

6.4.1 列車モデルにおける解析結果

まず各台車の SC1 がクエンチした場合の計算結果を示す。ここで計算結果として、各台車および客室の重心の位置および回転角、そしてクエンチ後の列車全体の位置関係について検討する。このクエンチ後の列車全体に位置関係については図 6.20 に示すように、台車・客室について重心を含む水平面と側面の交線の位置を指標とする。ここで交線の長さは台車 4.05m, 客室 21.6m とした。この 21.6m は台車間距離と同じで、初期位置では客室の線の両端と台車の重心の x 座標位置は一致する。そしてクエンチしたあと運動が落ち着いた時 ($t=3\text{sec}\sim 4\text{sec}$ まで) の交線の平均位置を示す。なお横軸は第 4 台車の重心位置をゼロとしている。

図 6.21 に先頭台車の SC1 がクエンチした場合の台車運動を示す。図に示すようにクエンチしたコイルがある台車 1 以外の変位は小さく、ほとんど変位しないといえる。クエ

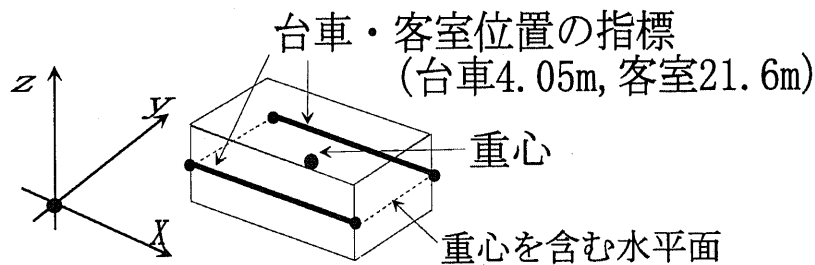


図 6.20: 列車の位置関係の指標

ンチコイルのある台車運動は台車モデルで示したものとほぼ一致するが、クエンチ後のピッチング角が -0.0115rad 、ヨーイング角が 0.0125rad と台車モデルに比べると35%程度減少している。これは2次系バネにより慣性能率が大きい客室に接続されることによって、ピッチングとヨーイングに対する剛性が増加し、回転角が減少したためである。ローリングは 0.007rad となっており、台車モデルとあまり変わらないが、これは列車モデルの方が慣性能率が大きい、その分客室と台車を一つに考えた場合のローリングに対するストロークが長くなり、ローリングトルクも大きくなるためである。

図 6.22に先頭台車の SC1 がクエンチした場合の客室運動を示す。先頭台車は非連接台車であるため、接続されている先頭客室のみが変位する。そして他の客室はほとんど変位していないことがわかる。ここで列車の位置をより正確にみるためにクエンチ後の各台車および客室位置を図 6.20に示した指標を用いて表す。図 6.23に $x-y$ 平面（上から見た図）、図 6.24に $x-z$ 平面（横から見た図）を示す。それぞれ進行方向左側と右側について示している。また図では変位の確認を容易にするために横軸の縮尺を縦軸に比べて小さくしている。横方向変位は進行方向左側は $y=1.49\text{m}$ から、右側は $y=-1.49\text{m}$ からの変位を示している。上下変位は台車は初期位置 $z_{0b}=-0.03935\text{m}$ 、客室は $z_{0c}=1.43\text{m}$ からの変位を表す。図より、クエンチを起こした先頭台車および先頭客室以外の変位は隣の台車 B2 に若干のヨーイング回転がみられる他はほぼゼロである。

次に第2台車がクエンチした場合の各台車運動を図 6.25に、客室運動を図 6.26に示す。またクエンチ後の台車および客室位置を図 6.27($x-y$ 平面)、図 6.28($x-z$ 平面)に示す。第2台車は連接台車であるため、その影響は接続されている2つの客室に及ぶことになる。そして先頭台車のときは台車が一つの客室に固定されていたため、2次系バネによって上下変位やピッチング・ヨーイングの回転角が減少していたが、ここでは前後に接続されている客室が独立に動くため、これらの変位は台車モデルとほぼ同じになる。次に客室運動について検討する。変位はクエンチ台車に接続されている客室 C1 と C2 に変位が起こる。まず横方向変位であるが、第2台車がクエンチすることで客室 C1 は台車と同じ $y \geq 0$ の方向に変位する。そして、台車のヨーイング角の発生により、台車後方にある台車と客室 C2 の接続点は $y \leq 0$ の領域に入るため、客室 C2 は $y \leq 0$ の方向に移動する。また上下運動で客室 C2 の位置が上昇するのは、台車に前方を下げて後方を上げるピッチ

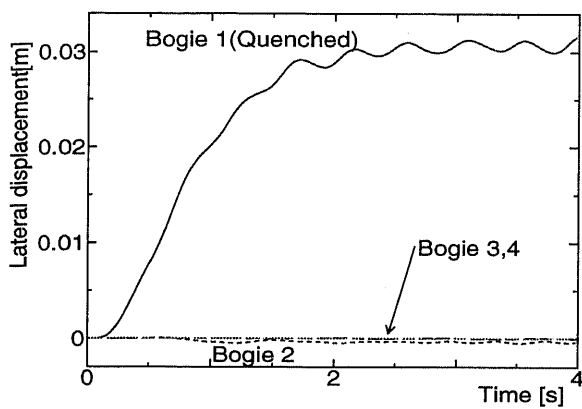
ング角が発生するため、C2 が台車によって押し上げられるためである。さらにピッチング角やヨーイング角で客室 C1 の回転角は客室 C2 の約 3 倍となっている。ヨーイングについては図 6.27 に示すように、クエンチにより客室 C1 と台車の接続点が C1 の重心に対して $y=6\text{cm}$ 変位するのに対して、客室 C2 との接続点は C2 の重心に対して 2cm 程度しか変位しないためである。また、ピッチングについては図 6.28 に示すように、第 2 台車前方が大きく下がるため、C1 との接続点の変位が 5cm になるのに対して、C2 との接続点は 2cm 程度しか上昇しないためである。これはクエンチ台車の推進力が低下し、さらに磁気抗力が増加するので、クエンチ台車は後方の台車から押されることになる。その結果、客室 C2 と C1 にクエンチ台車が挟まれることになり、ヨーイングとピッチングが増加するのである。一方ローリングは客室 C2 の方が回転角が大きくなっている。これは客室の質量が客室 C1 が大きく、慣性能率が C2 より大きいためである。

さらに第 3 台車がクエンチした場合の各台車運動を図 6.29 に、客室運動を図 6.30 に示す。またクエンチ後の台車および客室位置を図 6.31($x-y$ 平面)、図 6.32($x-z$ 平面) に示す。第 3 台車も連接台車であるから、第 2 台車がクエンチした場合と同じ運動を行なう。

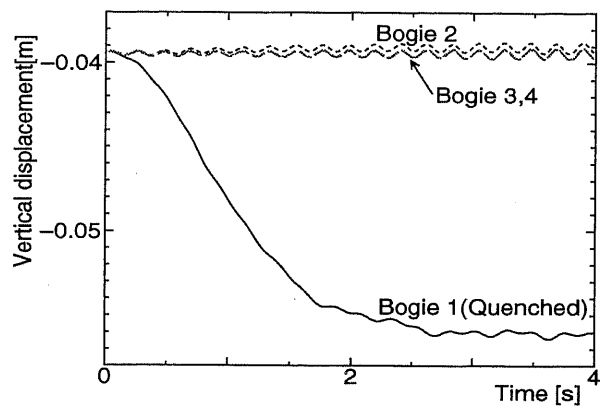
第 4 台車がクエンチした場合の各台車運動を図 6.33 に、客室運動を図 6.34 に示す。またクエンチ後の台車および客室位置を図 6.35($x-y$ 平面)、図 6.36($x-z$ 平面) に示す。第 4 台車は非連接台車であるから、先頭台車がクエンチした場合と同じ運動を行なう。しかし、台車変位は第 4 台車がクエンチした場合の方が小さくなっている。先頭台車がクエンチした場合は後方の第 2~4 台車により、先頭台車は台車後方から押されることになり、台車ピッチング角が増加する。しかし、第 4 台車の場合には前方の台車がクエンチして下がっている第 4 台車前方を引っ張り上げることで、ピッチング角が小さくなっているため、台車変位が小さくなるのである。

以上、列車モデルを用いた解析について次のようなことがわかる。

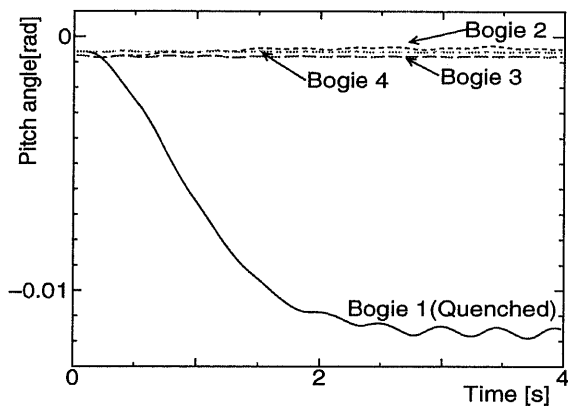
- 先頭客室に接続されている台車がクエンチした場合には、客室の慣性能率が大きいために客室が台車の回転変位を減少させ、各回転変位が小さくなる。
- 連接台車がクエンチした場合には接続されている 2 つの車両に影響を与える。そしてクエンチ台車の推進力が低下かつ磁気抗力が増加することで後方の台車から押される形になり、左右上下変位が大きくなり列車運動の不安定性を増すことになる。台車の変位は台車モデルの結果とほぼ同じである。
- すべての台車がクエンチした場合に共通するのは、隣接する台車へのクエンチの影響が小さいことである。この原因は第 4 章で述べたように、EDS によるバネが 2 次系のバネよりも固いので、クエンチ台車の変位が 2 次系に吸収されるためである。よってクエンチの影響が列車全体に及ぼす影響は小さいと言える。



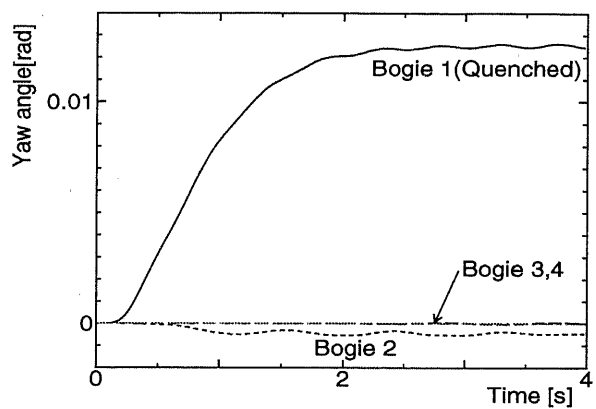
(a) 台車重心の左右運動



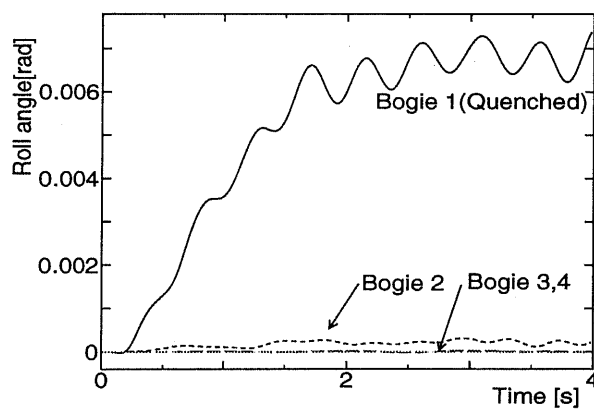
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化

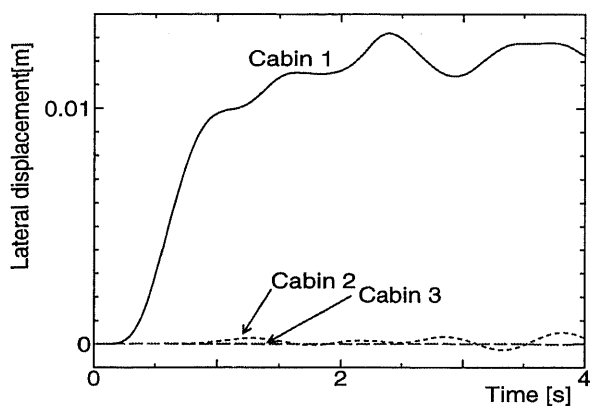


(d) 台車ヨーイング角の変化

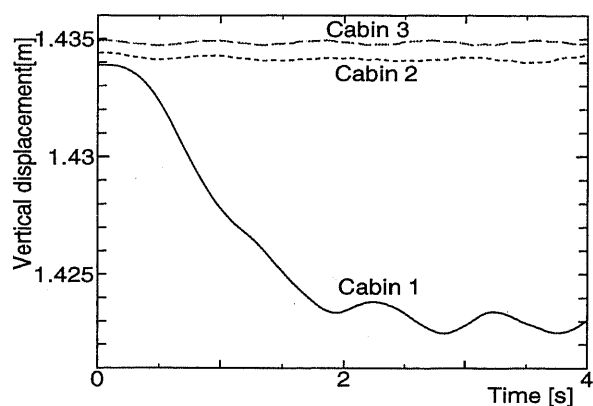


(e) 台車ローリング角の変化

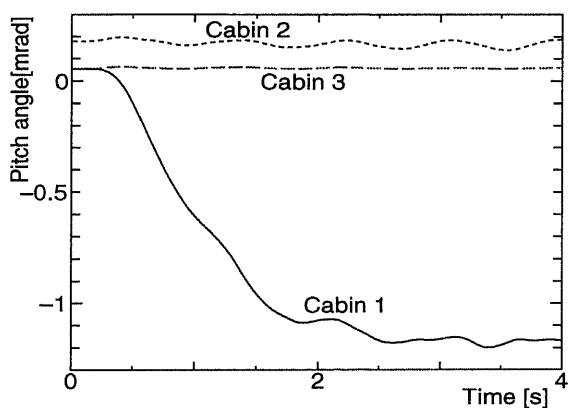
図 6.21: 先頭台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動



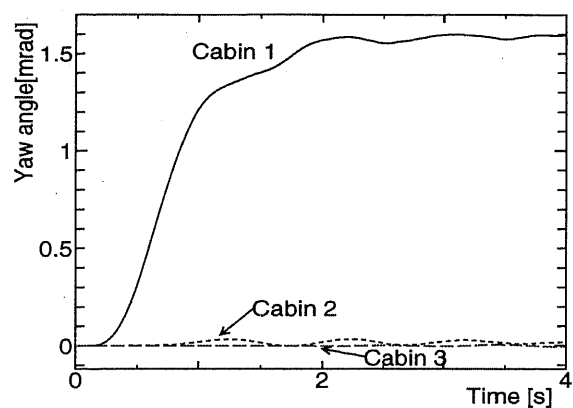
(a) 客室重心の左右運動



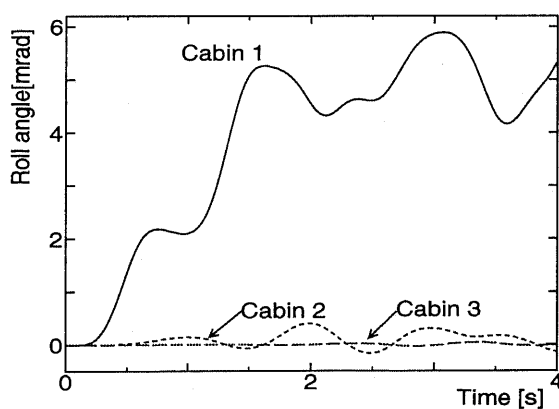
(b) 客室重心の上下運動



(c) 客室ピッチング角の変化



(d) 客室ヨーイング角の変化



(e) 客室ローリング角の変化

図 6.22: 先頭台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動

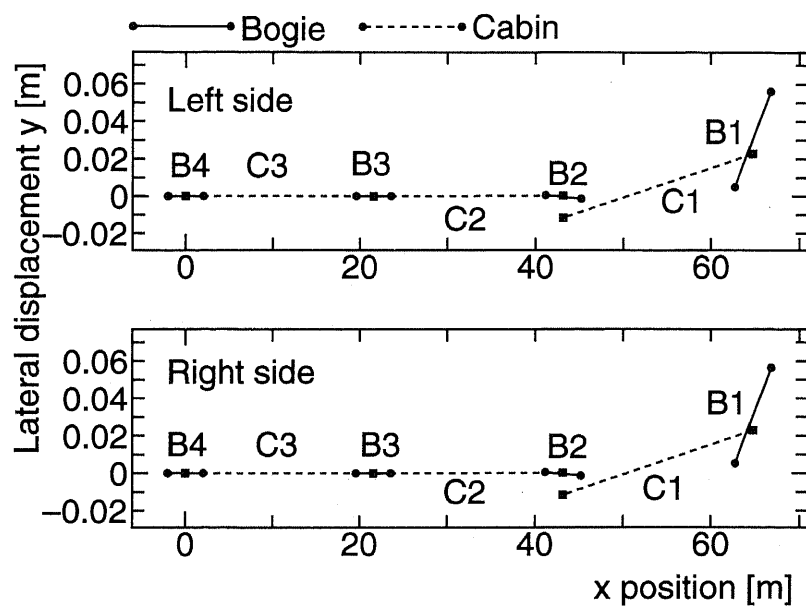


図 6.23: 先頭台車クエンチ後の列車の様子 ($x - y$ 平面)

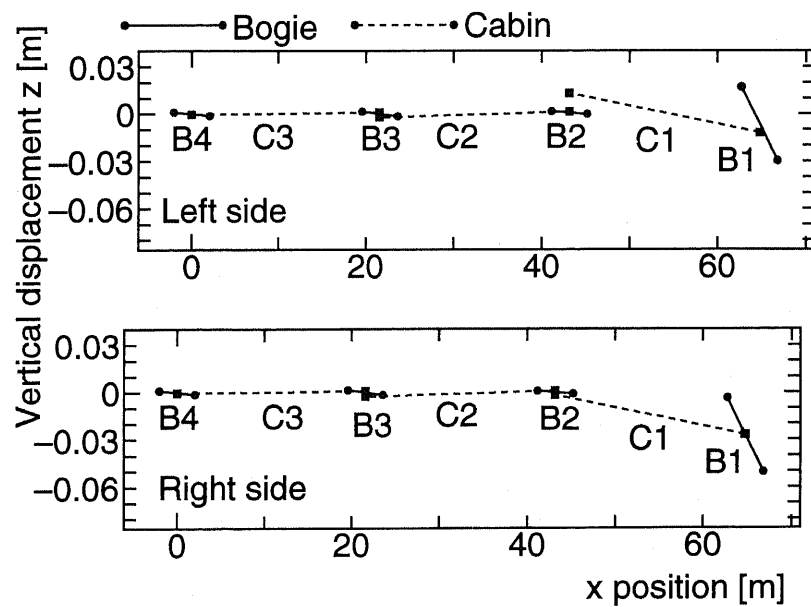
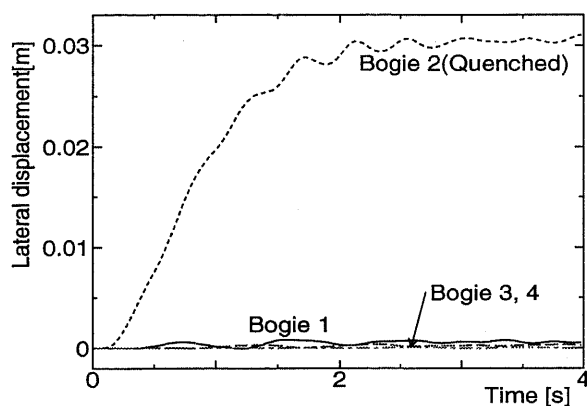
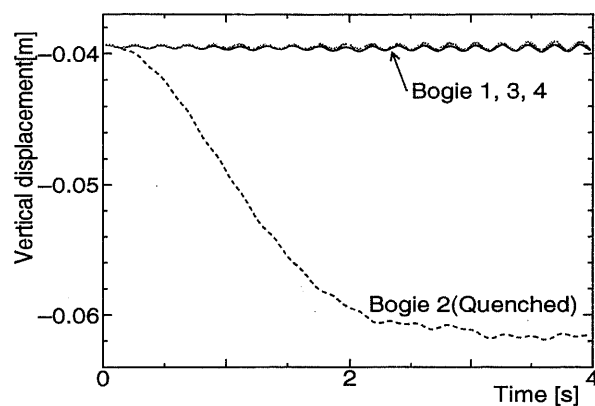


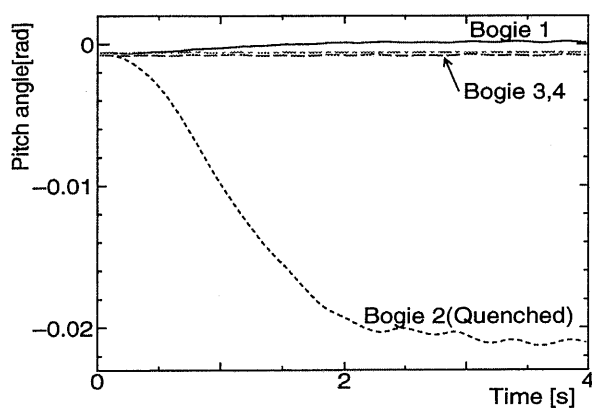
図 6.24: 先頭台車クエンチ後の列車の様子 ($x - z$ 平面)



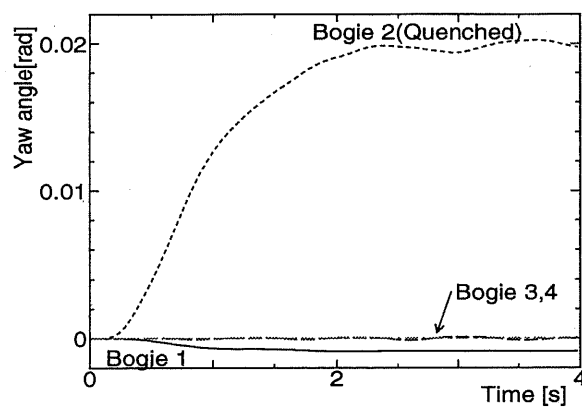
(a) 台車重心の左右運動



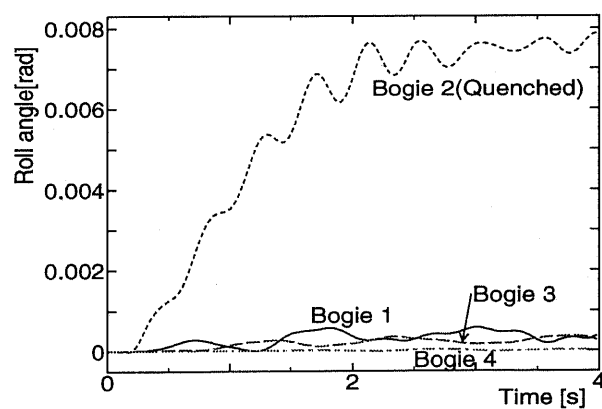
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化

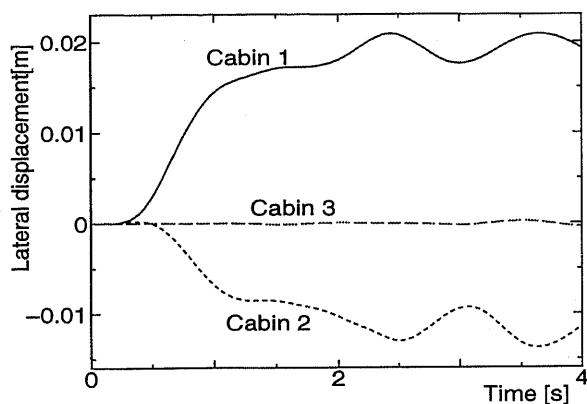


(d) 台車ヨーイング角の変化

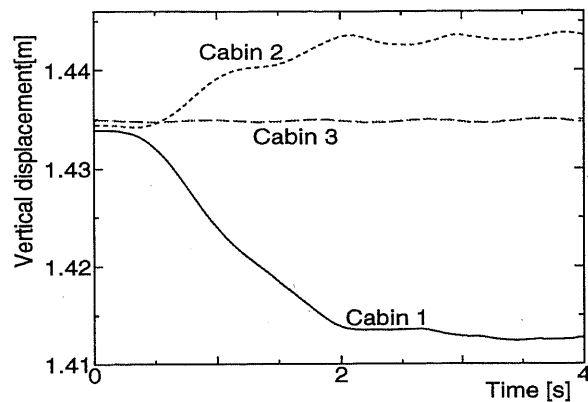


(e) 台車ローリング角の変化

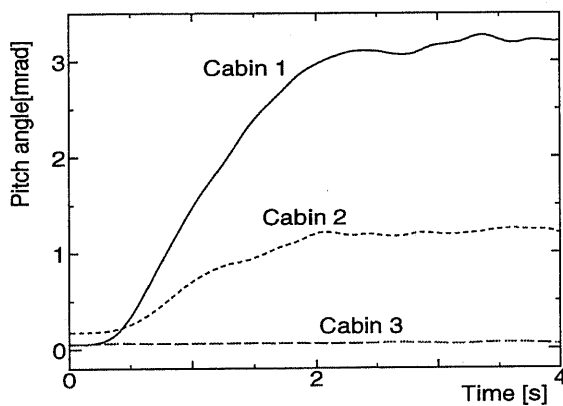
図 6.25: 第 2 台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動



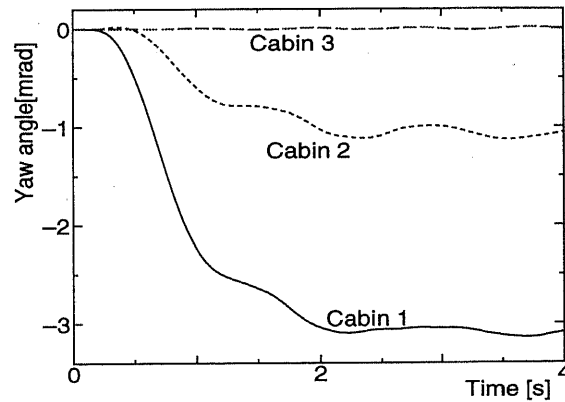
(a) 客室重心の左右運動



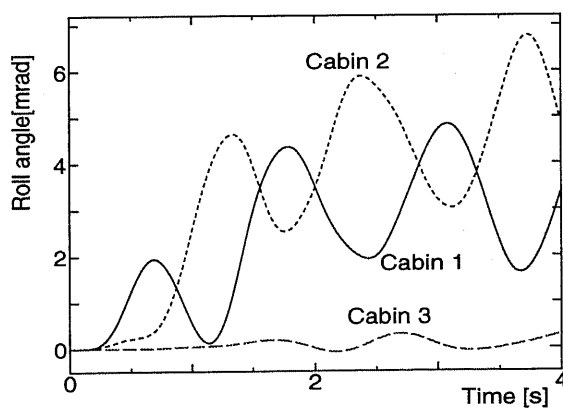
(b) 客室重心の上下運動



(c) 客室ピッチング角の変化



(d) 客室ヨーイング角の変化



(e) 客室ローリング角の変化

図 6.26: 第 2 台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動

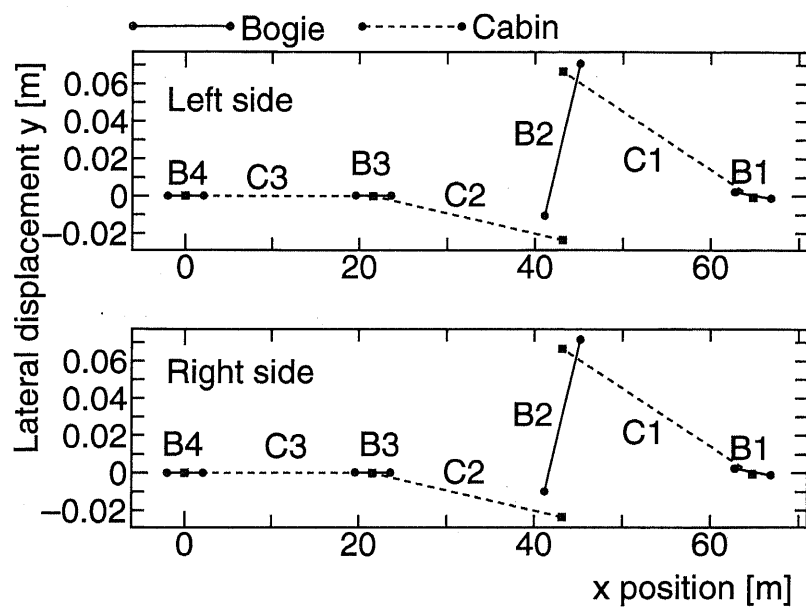


図 6.27: 第 2 台車クエンチ後の列車の様子 ($x - y$ 平面)

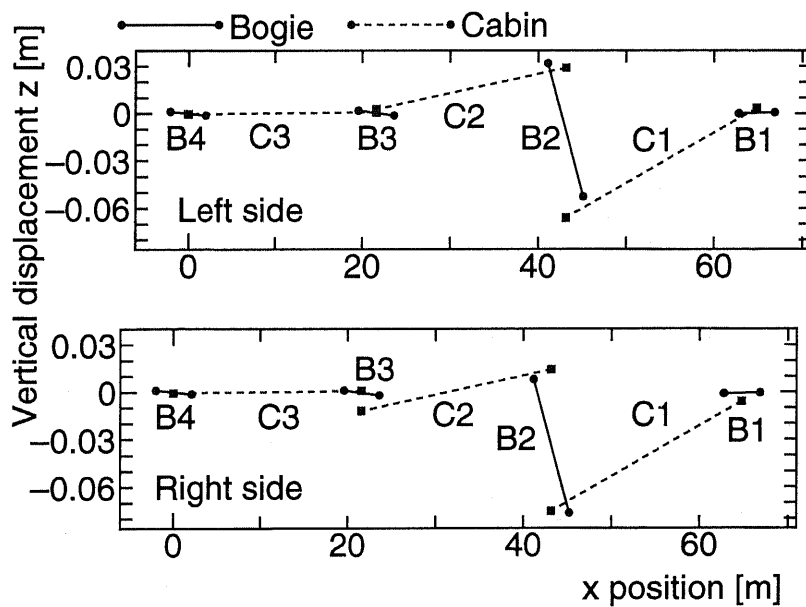
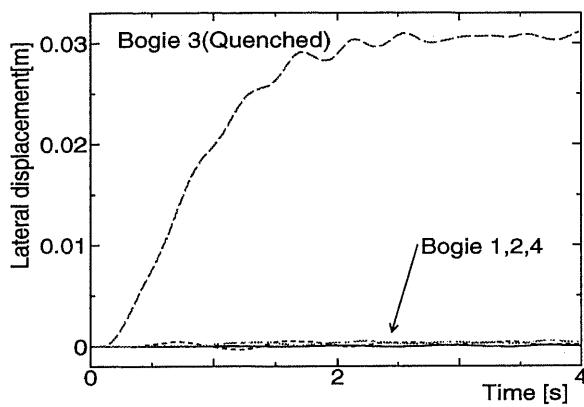
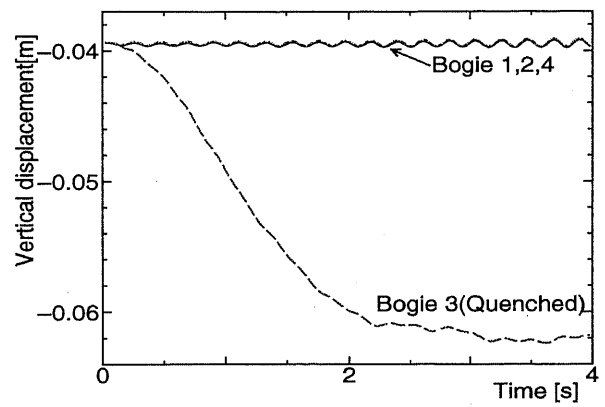


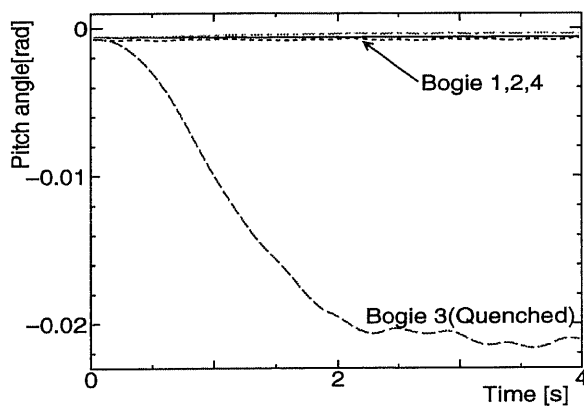
図 6.28: 第 2 台車クエンチ後の列車の様子 ($x - z$ 平面)



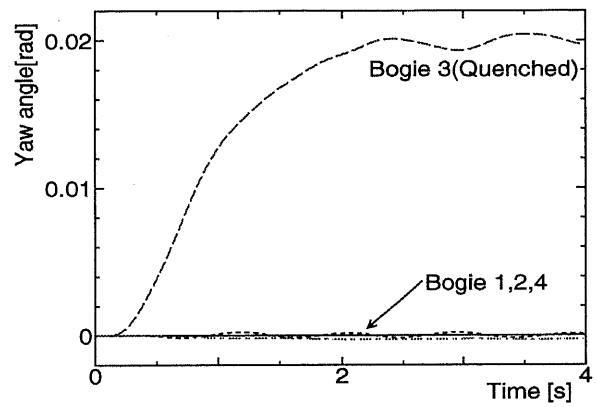
(a) 台車重心の左右運動



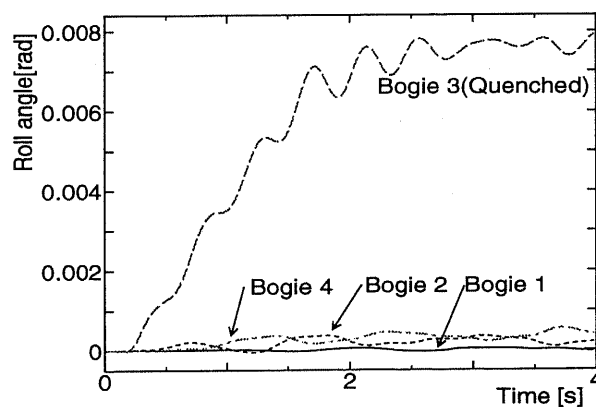
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化

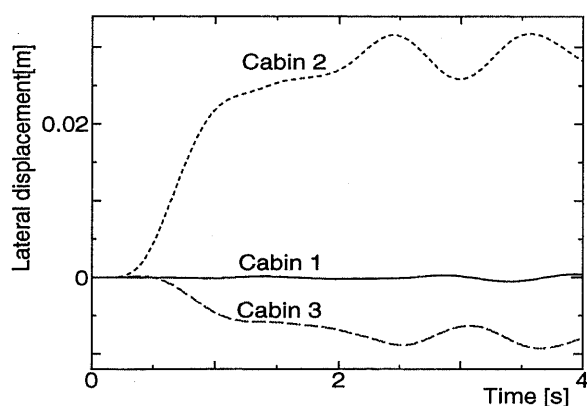


(d) 台車ヨーイング角の変化

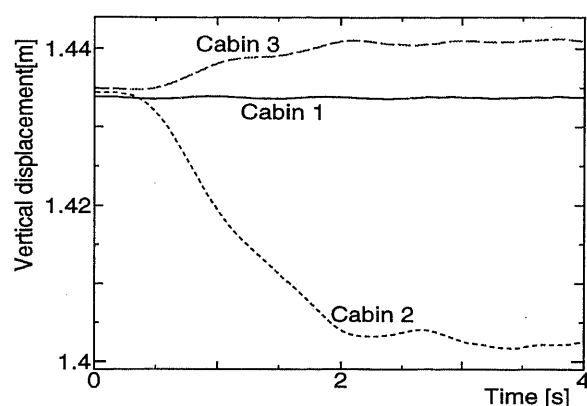


(e) 台車ローリング角の変化

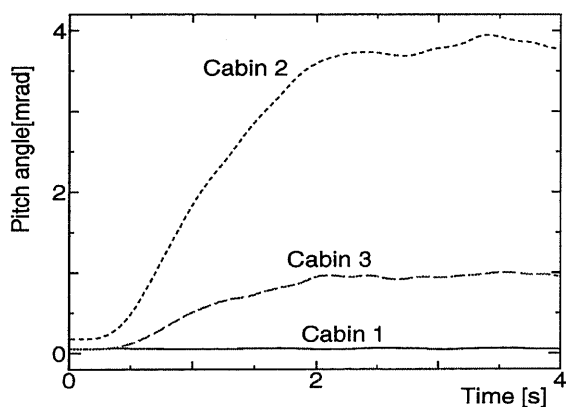
図 6.29: 第 3 台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動



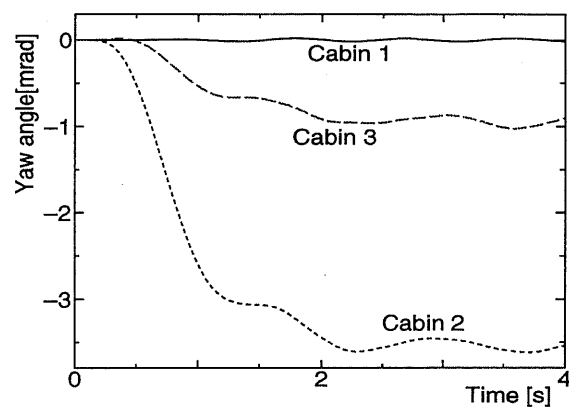
(a) 客室重心の左右運動



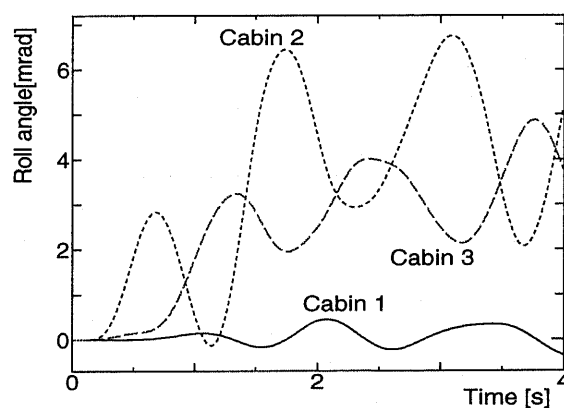
(b) 客室重心の上下運動



(c) 客室ピッチング角の変化



(d) 客室ヨーイング角の変化



(e) 客室ローリング角の変化

図 6.30: 第 3 台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動

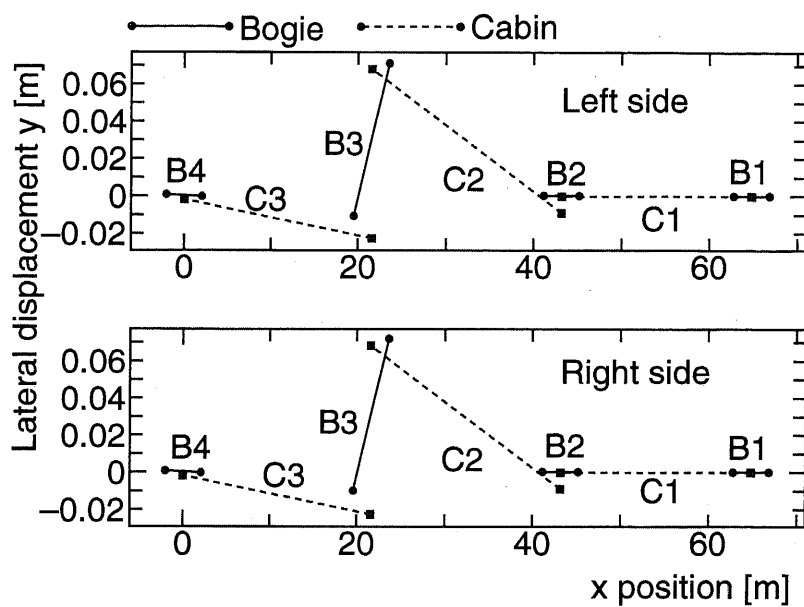


図 6.31: 第 3 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-y$ 平面)

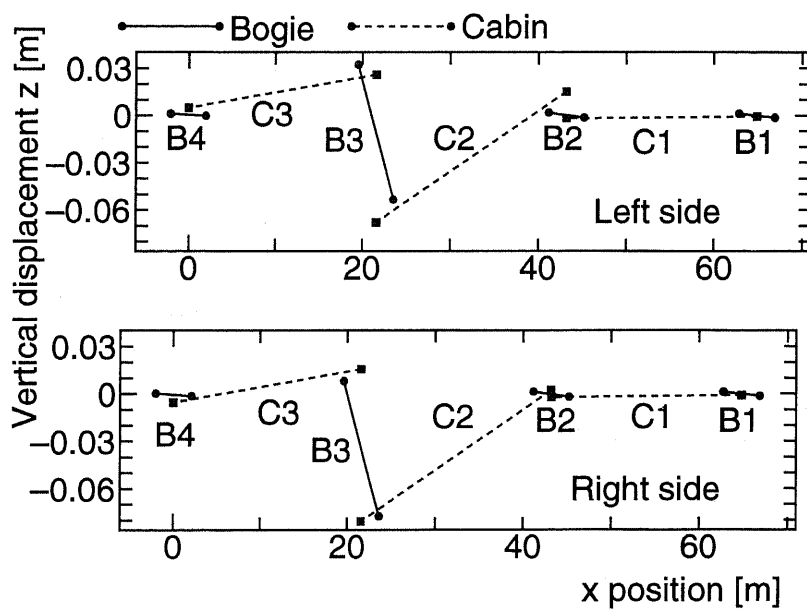
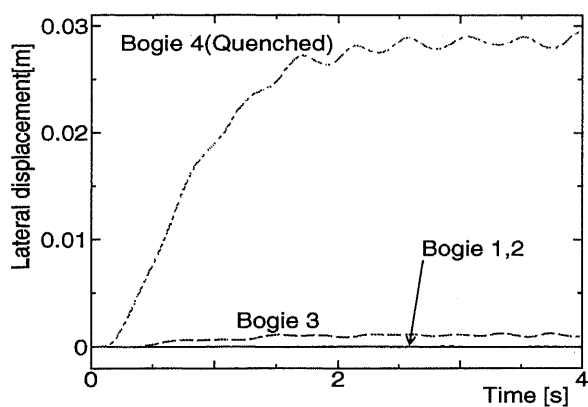
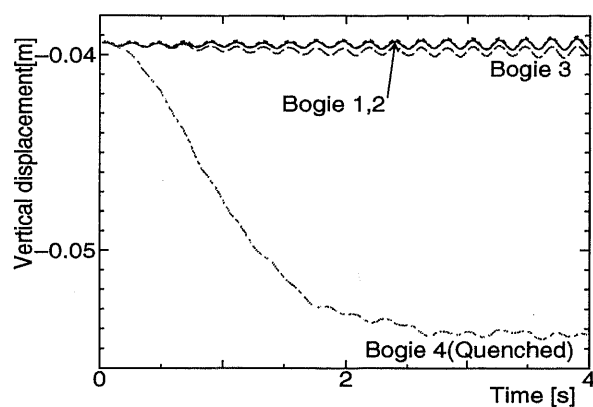


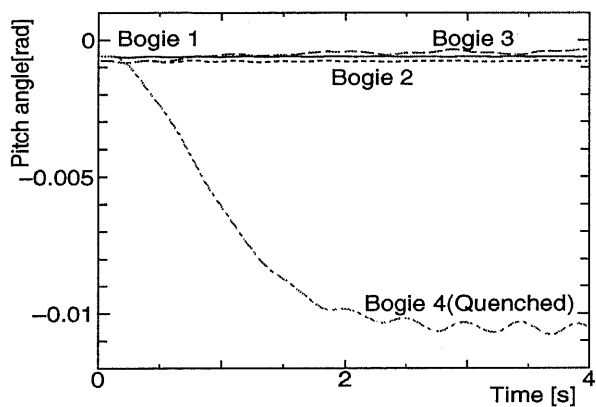
図 6.32: 第 3 台車クエンチ後の列車の様子 ($x-z$ 平面)



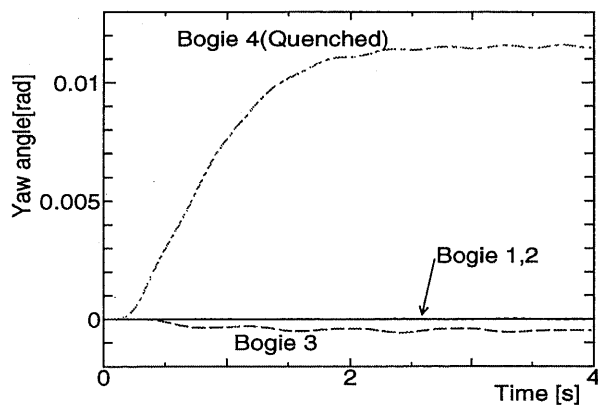
(a) 台車重心の左右運動



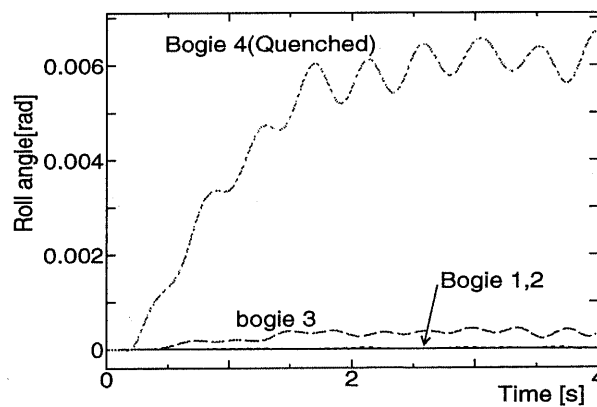
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化

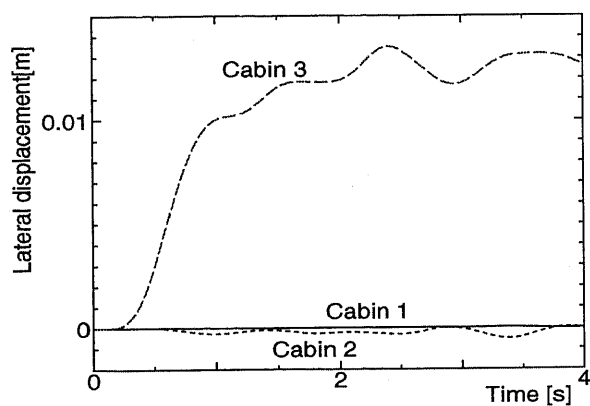


(d) 台車ヨーイング角の変化

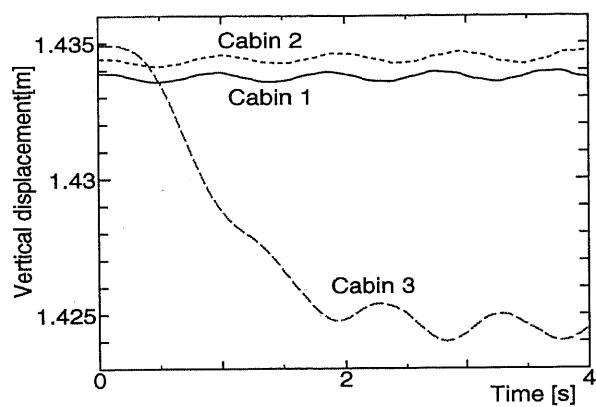


(e) 台車ローリング角の変化

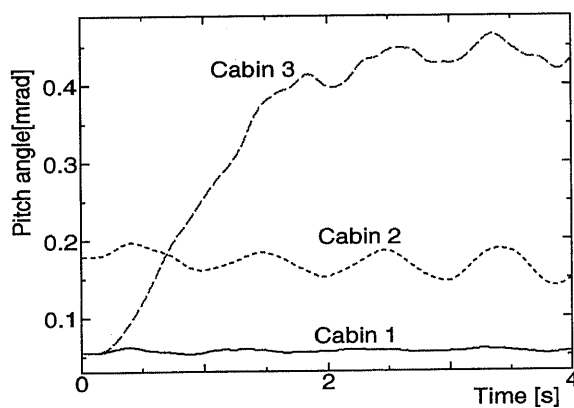
図 6.33: 第 4 台車の SC コイルがクエンチした場合の台車運動



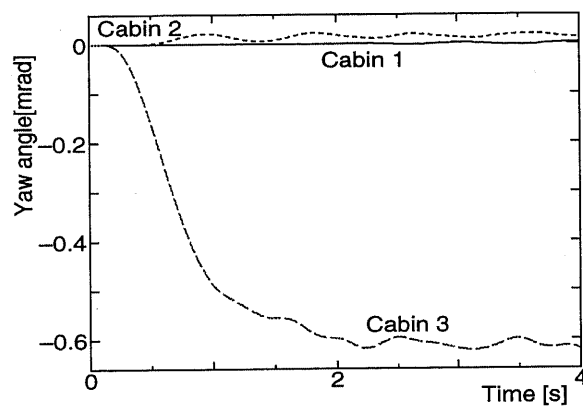
(a) 客室重心の左右運動



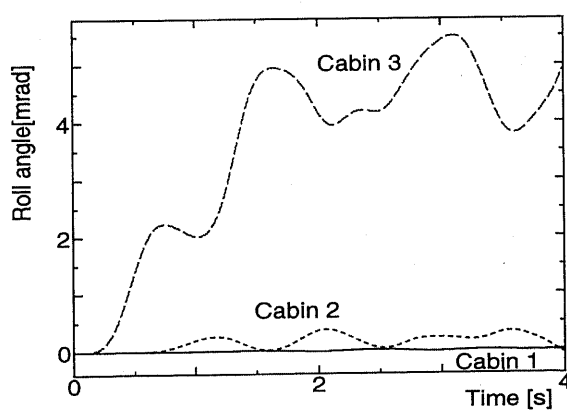
(b) 客室重心の上下運動



(c) 客室ピッチング角の変化



(d) 客室ヨーイング角の変化



(e) 客室ローリング角の変化

図 6.34: 第 4 台車の SC コイルがクエンチした場合の客室運動

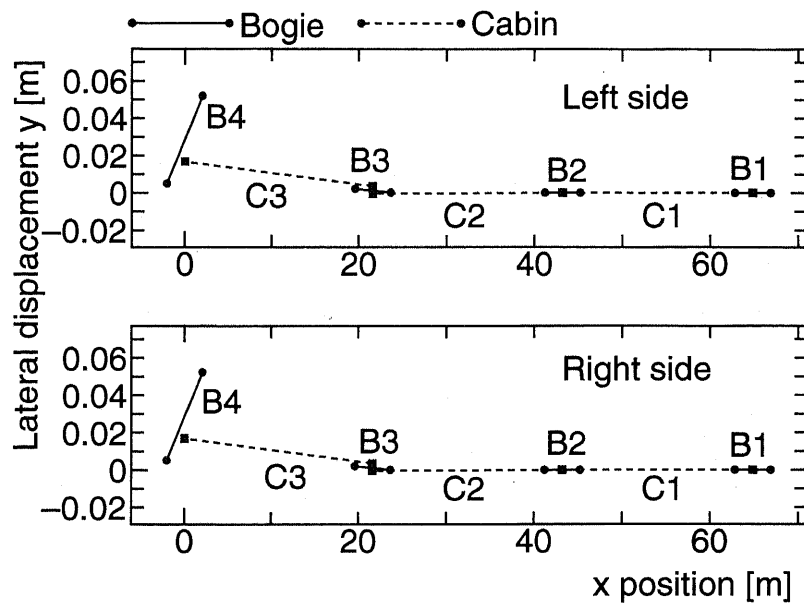


図 6.35: 第 4 台車クエンチ後の列車の様子 ($x - y$ 平面)

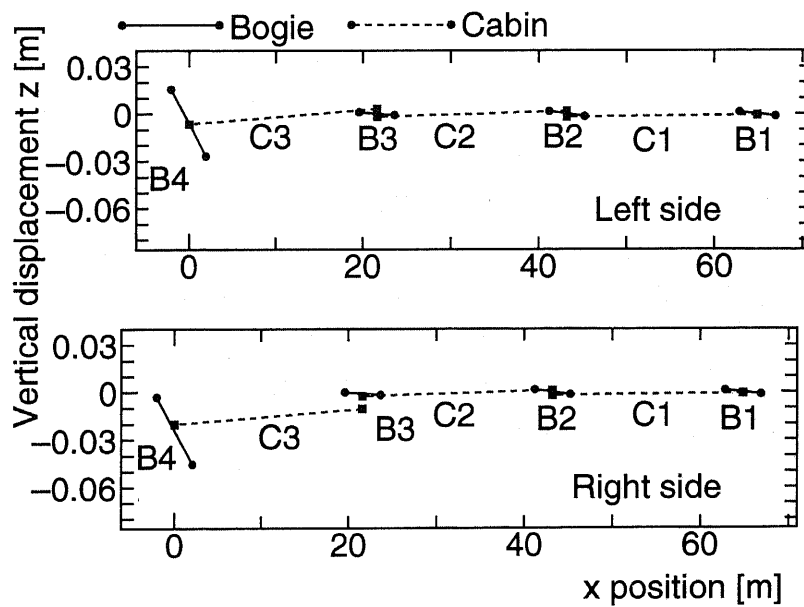


図 6.36: 第 4 台車クエンチ後の列車の様子 ($x - z$ 平面)

6.5 超電導コイルの対向消磁による車両運動の安定化

SC コイルクエンチ時の車両運動の安定化について検討する。まず、正常なコイルを強制的にクエンチさせて台車全体の均衡をとる対向消磁について検討する。図 6.37(a)～(e) に対向消磁の台車運動に対する効果を示す。前節で示したようにクエンチの影響はほとんどまわりの台車に波及しないため、ここではクエンチした第 2 台車についてのみ示す。

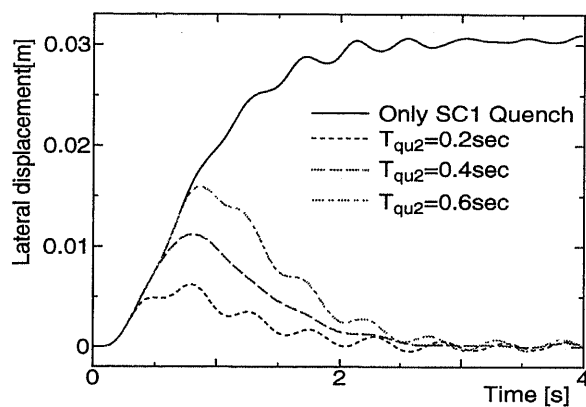
台車および客室初期位置は先と同様に第 4 章の表 4.3 に示した値を用いる。車両は 0.045sec 間進行方向速度 $v_x=140\text{m/s}$ で走行し、その後自由走行に移り、同時に LSM も起動する。また同時に第 2 台車の SC1 がその時点でクエンチする。そしてその T_{qu2} 後に x 軸に対して対称位置にある SC5 がクエンチする。ここでは $T_{qu2}=0.2, 0.4, 0.6\text{sec}$ の 3 つについて計算し、対比のために対向消磁がない場合についても示す。

図 6.37(a) に示すように対向消磁の結果、台車左右の SC コイルが再び均衡するため、台車位置は $y=0$ に収束する。そして対向消磁が早いほど、最大横方向変位は小さくなる。そして横方向変位とローリング角は相関が強いいため、また x 軸回りのモーメントが対向消磁により均衡するために $\theta_r=0$ に収束する。ローリングも対向消磁が早いほど最大角が小さくなる。

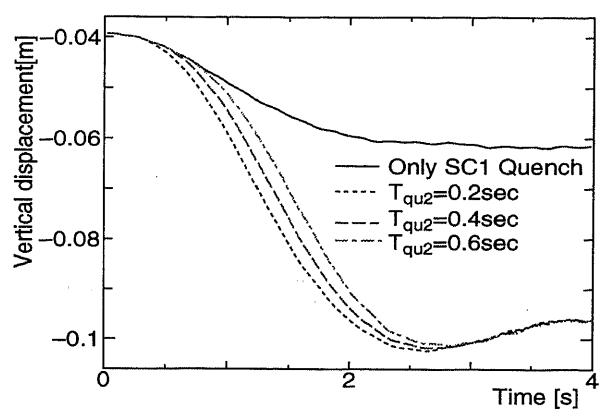
上下運動については、対向消磁により台車を支える SC コイルは 6 つに低下することで、台車位置は大きい浮上力を得るために低下する。さらに台車の重心に対して前方は正常コイル 2 個、後方はすべて正常で 4 個となる。その結果図 6.37(c) に示すようにピッチング角は約 0.04rad となり、対向消磁を行わない場合よりも 2 倍近くのピッチング角が生じることになる。このピッチング角により、台車後方の SC5,8 の上下位置が 8 の字の中心付近となり、浮上力が小さくなる。よって台車重心の上下位置は対向消磁がない場合の 2 倍以上下がることになる。

ヨーイングについては対向消磁により z 軸まわりのモーメントが均衡するため、 $\theta_{yw}=0$ に収束する。ヨーイングも対向消磁が早いほど最大角が小さくなる。

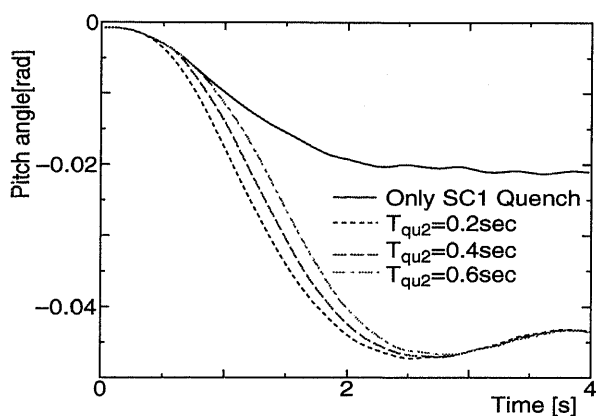
次に図 6.38 にクエンチした第 2 台車 B2 と、それに接続されている客室 C1 と C2 の最大変位と対向消磁の時間の関係を示す。縦軸は対向消磁をしない場合の最大変位に対する割合を示し、横軸は対向消磁までの時間を示す。先頭客室 C1 の上下変位およびピッチング角は対向消磁をしない場合の約 1.65 倍となり、その他の変位は対向消磁までの時間に依存するが、 $T_{qu2}=0.4\text{sec}$ で約半分となっている。第 2 客室 C2 については客室質量と慣性能率が C1 より小さいので、上下変位およびピッチング角は約 2.5 倍になる。他の変位は抑えられ、 $T_{qu2}=0.4\text{sec}$ で横方向変位およびローリング角は約 40%、ヨーイング角約 80% となる。



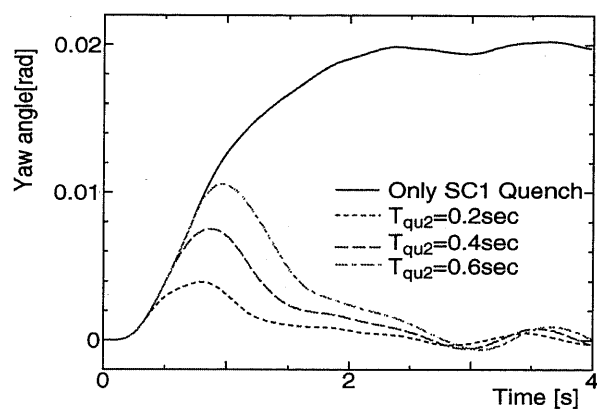
(a) 台車重心の左右運動



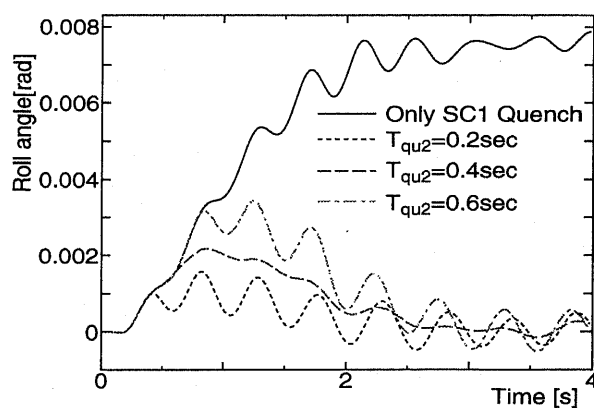
(b) 台車重心の上下運動



(c) 台車ピッチング角の変化

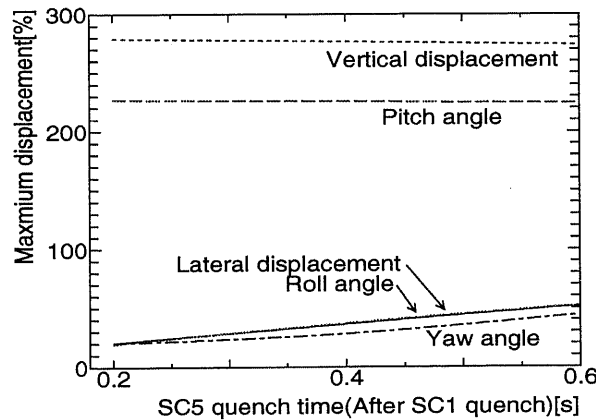


(d) 台車ヨーイング角の変化

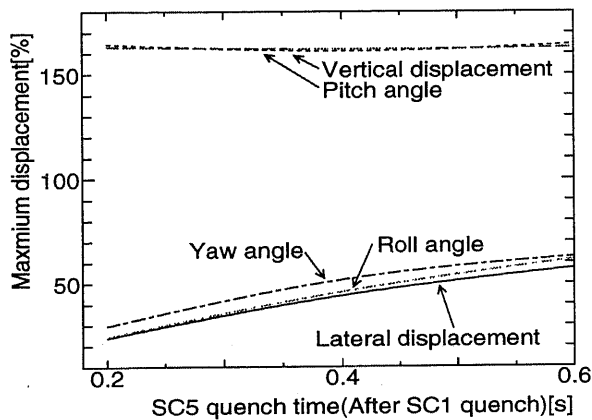


(e) 台車ローリング角の変化

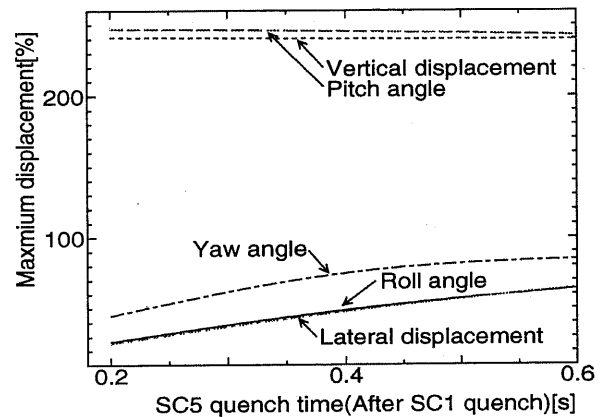
図 6.37: 対向消磁の台車運動に対する効果



(a) 第2台車



(b) 先頭客室



(c) 第2客室

図 6.38: 対向消磁時間の台車・客室の最大変位への影響

図 6.39 に台車に加わる最大案内力と対向消磁までの時間の関係を示す。縦軸は対向消磁をしない場合の最大案内力 21.2kN に対する割合を示し、横軸は対向消磁までの時間を示す。なお、浮上力については台車位置がコイルクエンチによる電流変化のための浮上力の変動を補うように変化するため、約 196kN で一定に保たれている。

対向消磁により、台車に加わる異常案内力の最大値はかなり軽減され、 $T_{qu2}=0.6\text{sec}$ でも約 48% となる。そして図 6.37 に示すように $t=2.5\text{sec}$ で台車の左右位置はほぼゼロになるため、異常案内力もゼロになる。

このように、対向消磁は異常案内力を抑制し、横方向変位、ヨーイングおよびローリング運動には効果を発揮する。しかし、上下変位およびピッチング角は大きくなり、台車の長さを 6m として台車の端の上下位置変位を概算すると 18cm となる。これは台車がガイドウェイ低面に接触することを意味する。実験線での上下浮上ギャップは 10cm であるので $t=0.125\text{sec}$ 付近で着地することになる。

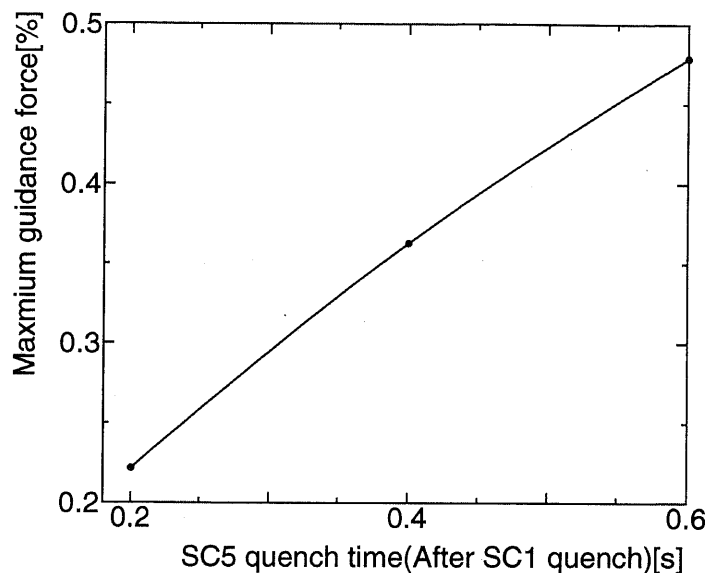


図 6.39: 台車にかかる最大案内力への対向消磁の効果

次に対向消磁をした場合に、クエンチした台車の各 SC コイルに加わる浮上案内力について検討する。表 6.1 に各 SC コイルに加わる浮上力を、表 6.2 に案内力を示す。なお、表には各電磁力の $t=3\sim 4\text{sec}$ までの平均値と、浮上コイルピッチによる振動数約 311Hz の振動成分の振幅を示す。まず番号 1 のコイルがクエンチし、対向消磁がある場合は番号 5 のコイルがクエンチする。 $t=3\text{sec}$ では対向消磁終了後十分時間が経っているので、対向消磁時間 T_{qu2} の違いによる電磁力の差は小さい。よって $T_{qu2}=0.2\text{sec}$ についてのみ示す。

まず浮上力について検討する。対向消磁なしの場合は図 6.10 に示した台車モデルの結果とほぼ同じである。対向消磁した場合、台車のピッチング運動により、SC4,8 は浮上力が発生しない位置に移動する。よって加わる浮上力がほぼゼロになり、SC1,5 もクエンチしているので、残りの 4 つで台車を支えることになる。これら 4 つのコイルにかかる力はほぼ等しく、通常の 2 倍の浮上力がかかることになる。しかし対向消磁なしの場合には SC2 には 62.1kN の力が加わるのに対し、対向消磁した場合には 48.6kN であるので、SC コイルが 2 倍の荷重に十分耐えられるのであれば、対向消磁は好ましいといえる。また対向消磁により、台車は $y=0$ に移動するので、SC1~4 と SC5~8 ではほぼ同じ荷重分布をしていることがわかる。

次に案内力について検討する。対向消磁なしの場合は図 6.11 に示した台車モデルの結果とほぼ同じである。対向消磁なしの場合に問題となっていたのは SC2 に発生する大きな振動成分であった。対向消磁により、平均値は大きくなるが、振動成分の振幅は約 60% 軽減された。浮上力の場合と同様に SC1~4 と SC5~8 ではほぼ同じ荷重分布をしていることがわかる。しかしこのため、対向消磁なしでは通常時と変わらない案内力を受けていた SC6 にも SC2 と同じ 50.7kN の案内力がかかることになる。

このように対向消磁は台車の横方向位置やヨーイング、ローリング運動の安定化および台車全体に加わる異常案内力の軽減には役立つが、各 SC コイルに加わる電磁力で見ると、欠点も見られる。

表 6.1: 各 SC コイルに加わる浮上力

SC コイル番号	対向消磁なし (kN)		対向消磁あり (kN)	
	平均値	振動成分振幅	平均値	振動成分振幅
1	-	-	-	-
2	62.1	6.1	48.6	3.6
3	35.4	2.1	46.7	2.2
4	2.64	2.1	2.64	2.1
5	14.6	0.64	-	-
6	29.8	1.6	48.4	3.6
7	27.7	1.6	46.7	2.2
8	24.5	1.3	2.36	0.82

($t=0.045\text{sec}$ で SC1 がクエンチ、対向消磁は $t=0.245\text{sec}$ で SC8 がクエンチ)

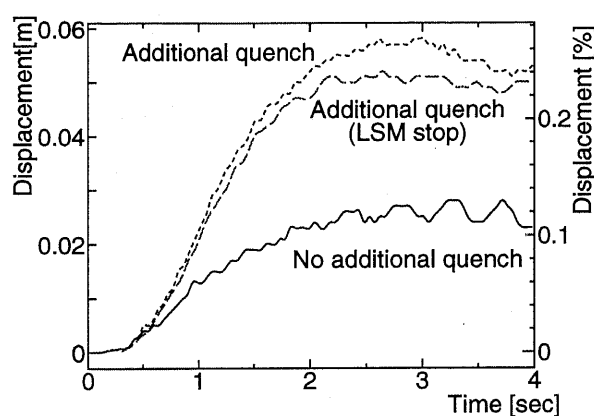
表 6.2: 各 SC コイルに加わる案内力

SC コイル番号	対向消磁なし (kN)		対向消磁あり (kN)	
	平均値	振動成分振幅	平均値	振動成分振幅
1	-	-	-	-
2	-41.1	-14	-50.7	-5.7
3	-20.2	-1.7	-22.0	-2.0
4	2.86	2.1	-0.357	-0.29
5	36.6	4.8	-	-
6	12.3	4.0	50.7	5.7
7	1.61	0.89	22.0	2.0
8	9.82	2.7	0.571	0.36

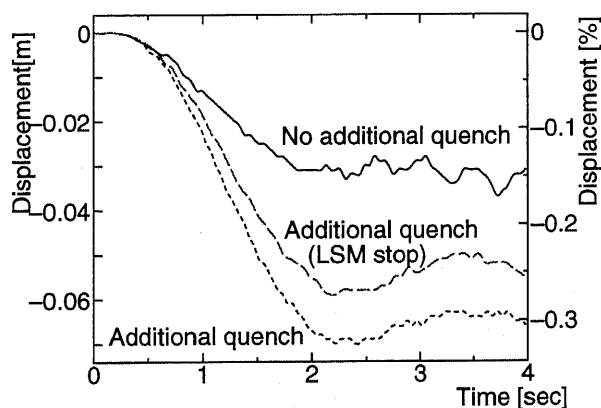
($t=0.045\text{sec}$ で SC1 がクエンチ、対向消磁は $t=0.245\text{sec}$ で SC8 がクエンチ)

6.6 超電導コイルクエンチの推進系への影響

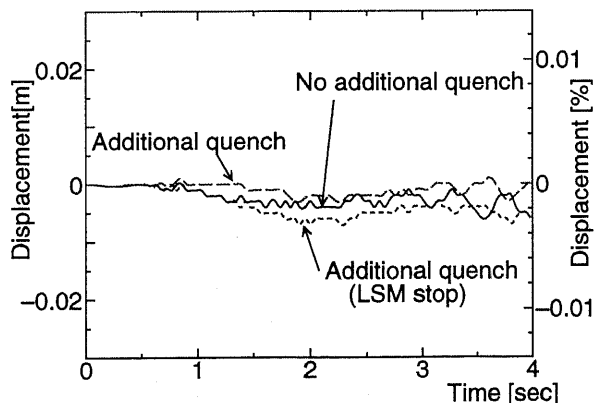
クエンチが起こった場合の推進系への影響について検討する。推進系への影響を見るために、各台車間の x 方向（進行方向）距離の変化を求める。図 6.40 にクエンチによる台車間距離の変化を示す。クエンチは第 2 台車の SC1 で $t=0.045\text{sec}$ に発生するとし、対向消磁がない場合、クエンチ後 2.0sec に SC8 を対向消磁する場合、そして対向消磁の上に LSM を停止する場合の 3 通りについて示す。先頭台車-第 2 台車間距離、第 2 台車-第 3 台車間距離、第 3 台車-第 4 台車間距離の変化を示す。図中縦軸左側の目盛はクエンチ後の変位量を示し、右側は台車間距離 21.6m に対する割合を示している。



(a) 先頭台車-第 2 台車間距離



(b) 第 2 台車-第 3 台車間距離



(c) 第 3 台車-第 4 台車間距離

図 6.40: クエンチによる台車間距離の変化

第 2 台車がクエンチを発生し、推進力が低下するために先頭台車-第 2 台車間の距離が約 0.025m 増加する。これは台車間距離の 1.2% であり、この結果から先頭台車がクエンチした第 2 台車を引っ張っていることがわかる。LSM の同期を考えると位相が $0.058\text{rad}(\pi \cdot 0.025 / \tau_{LSM})$ ずれることになる。また、逆に第 2 台車の後方の第 3 台車との距離は約 0.03m 減少する。

これは台車間距離の 1.5%であり、この結果から第 2 台車は第 3 台車に押されていることがわかる。LSM の位相が $0.070\text{rad}(\pi 0.03/\tau_{LSM})$ ずれることになる。ここで先頭台車との間が約 0.025m 増加し、第 3 台車との距離が 0.03m 減少しているが、その差 0.005m は 2 次系によって吸収されている。一方第 3 台車-第 4 台車間距離にほとんど変化はなく、クエンチの影響は第 4 台車までは及んでいないことがわかる。

対向消磁を行なった場合の変位は対向消磁がない場合の約 2 倍となる。LSM を停止させた場合では、対向消磁を行なわない場合よりも大きな変位が出ている。これは推進系を停止させても浮上系による進行方向に対する磁気抗力がクエンチした台車と正常台車で異なるためである。表 6.3 にクエンチ後 ($t=2.5\sim 4.0\text{sec}$ 間) の LSM による推進力と浮上コイルによる磁気抗力の平均値を示す。

SC コイルクエンチを起こした台車の方が磁気抗力が大きくなる。また対向消磁をした場合の方が磁気抗力がさらに大きくなり、正常な台車の 3 倍近くになる。これは台車上下位置が低下するために、クエンチしていない SC コイルと浮上コイルとの磁気結合が増加し、磁気抗力が増加するためである。このように SC コイルクエンチが起こった台車では、LSM による推進力の低下だけでなく、磁気抗力も増加して推進力を低下させることになる。

表 6.3: クエンチ後 ($t=2.5\sim 4.0\text{sec}$ 間) の LSM 推進力と磁気抗力の平均値

対向消磁なし				
台車番号	1	2	3	4
LSM 推進力平均値 kN	20.3	17.1	20.3	20.3
磁気抗力平均値 kN	-0.960	-2.52	-0.955	-0.952
対向消磁あり、LSM あり				
台車番号	1	2	3	4
LSM 推進力平均値 kN	20.3	14.7	20.3	20.3
磁気抗力平均値 kN	-0.969	-2.82	-0.954	-0.952
対向消磁あり、LSM 停止				
台車番号	1	2	3	4
LSM 推進力平均値 kN	0	0	0	0
磁気抗力平均値 kN	-1.01	-2.82	-0.997	-0.995

($t=0.045\text{sec}$ で SC1 がクエンチ、対向消磁は $t=0.245\text{sec}$ で SC8 がクエンチ)

6.7 結言

本章ではこのシステムにおいて最も深刻な外乱である超電導コイルのクエンチの影響解析を行なった。そして超電導コイルがクエンチした場合の走行特性を求め、さらにクエンチ後の列車の安定方法について検討した。

まず台車モデルを用いて8つのコイルのうちの1つのSCコイルがクエンチした場合について解析し、台車運動、他のSCコイルに与える影響について検討した。その結果次のようなことがわかった。

- 台車の進行方向に対して先頭のSCコイルがクエンチする場合が最も変位が大きくなり、クエンチしたSCコイル中心に上下約0.08m、横方向約0.07mの変位が発生する。また、隣接するコイルへ通常の2.4倍の浮上力、7倍の案内力が加わる
- 台車のクエンチした側が浮上コイルに接近することで浮上コイルピッチに起因する振動成分の振幅が約14kNに達する。
- 地上設備である浮上コイルに大きな異常電流が流れる
- 台車に設置された突起物を考慮しない場合、側壁との衝突は起こらない。

さらに複数台車が存在する列車モデルについて解析を行ない、クエンチが列車全体に与える影響を求めた。

- 先頭客室に接続されている台車がクエンチした場合には、客室の慣性能率が大きいために客室が台車の回転変位を減少させ、各回転変位が小さくなる。
- 連接台車がクエンチした場合には接続されている2つの車両に影響を与える。そしてクエンチ台車の推進力が低下することで後方の台車から押される形になり、左右上下変位が大きくなり列車運動の不安定性を増すことになる。台車の変位は台車モデルの結果とほぼ同じである。
- EDSによるバネが2次系のバネよりも固いので、クエンチ台車の変位が2次系に吸収され、隣接する台車へのクエンチの影響が小さい

クエンチ時に列車運動を安定させる方法として、他の正常SCコイルをクエンチすることにより列車位置を安定させる緊急消磁について検討した。この結果、クエンチしたコイルと進行方向に対して反対側のコイルを消磁することで台車の横方向変位、ヨーイングおよびローリング角を抑えることができた。しかし、上下変位やピッチング角が増加し、各SCコイルにかかる異常電磁力の改善は見られなかった。

さらにクエンチが推進系に与える影響について検討した。そしてコイルクエンチが起こった台車では、コイルがクエンチすることによるLSM推進力の低下だけでなく、台車位置が下方に移動することで浮上系からの磁気抗力も増加し、推進を低下させることがわかった。

第 7 章

結論

7.1 本研究の結論

本章では本研究で得られた結果、及び考察について各章毎にまとめて述べる。

第 1 章では、本研究の背景、目的について詳しく述べるとともに、本研究の主要な内容を概観し、本研究の位置付けを示した。

第 2 章では、超電導磁気浮上鉄道システムの概要と特徴を示した。このシステムは主に以下のような要素から成り立っている。

- 推進系 (LSM)
- 浮上案内系 (EDS)
- 地上ガイドウェイ
- 列車 (台車・客室)

ここでは第 3 章以降の解析のために用いた超電導磁気浮上システムの各要素のモデル化および計算簡略化のための近似法について示し、LSM による推進力、EDS による浮上案内力の解析法および電磁現象と機械運動の方程式を連成させた運動解析の手法について述べた。

第 3 章では側壁浮上式電磁誘導方式の浮上特性を等価的な機械的支持系としてあらわす方法について検討した。まず、電磁現象の解析より浮上力の定常特性を求めた。その結果から浮上力の速度・位置依存性を検討し、定常状態での電磁バネ係数の近似式を求めた。電磁バネ係数は走行速度に対しては浮上コイルと SC コイルの系を電気回路として見た場合の時定数から指数関数になり、位置に対しては相互インダクタンスの上下方向微分の位置依存性から 2 次関数の形になることを示した。同様に案内力についても定常特性を求め、左右電磁バネ係数は横方向変位に対して線形バネであることを示した。さらに台車が y, z 両方向について変位した場合の浮上・案内力についてそれぞれの位置、速度依存性を

示し、近似式を求めた。また、台車の上下振動シミュレーションを行い、このシステムの持つ負のダンピング要素を速度依存性を持つダンピング係数を導入した。そして、システムのダンピング要素も考慮した走行シミュレーションにも適用できる等価支持モデルの近似式を求めた。この近似式を用いることで、次のような利点がある。

- 従来の機械バネ近似よりも正確な浮上力を得ることが可能。
- 車両や列車モデルなどの多剛体系の計算量が小さくなり、外乱時の車両運動の周波数特性が容易に求められ、その結果支持系の設計も容易になる。
- 近年発展している市販の車両運動特性の演算パッケージなどにも支持モデルとして取り入れることが可能。

第4章では、超電導リニア同期モータと側壁浮上式電磁誘導方式についてそれぞれの推進力特性、浮上案内力特性などの基本特性を求め、双方の台車上下位置変位に対する非線形性を示した。また台車モデルを用いて第3章で求めた上下左右運動に対する特性に加えて各回転運動に対する基本振動特性や走行速度に対する依存性を求めた。それらをふまえて台車モデルについて台車が外力を受けたりガイドウェイが変位したときなど、外乱を受けた場合やカーブ区間の走行シミュレーションを行ない、様々なガイドウェイ形態に対する特性を求めた。台車の左右変位および回転角が大きいガイドウェイ変位やカーブを走行時などの解析においては、台車の運動経緯が浮上案内力に影響を与えるため、3章で述べた支持モデルからの誤差が大きくなる。よってここでは、この支持モデルを用いず、第2章で示した電気回路を解く詳細シミュレーション法により解析を行なった。そして以下のような結果を得た。

- 台車が外力を受けた場合については、横方向変位とローリング回転の強い相関性について述べ、外力に対してこれらの変位がほぼ線形になることを示した。
- ガイドウェイ変位がある場合については台車が変位ガイドウェイに突入する際にステップ状の横方向力とヨーイングトルクが加わるため、全体の振動が大きくなり、ローリング運動には、横方向振動と連動する同周期の運動以外に他の運動変位が複合した周期の成分が見られた。
- カーブ区間の走行について、カント角がない場合、カーブ区間の前に緩和曲線をつけた場合の3通りについて解析を行なった。まずカント角がない場合の解析において、台車運動の台車走行速度、カーブ曲率半径による依存性を求めた。その結果台車変位は走行速度の2乗に比例し、カーブ曲率半径に反比例することが分かり、遠心力の概算と一致することが分かった。またカント角をつけるとガイドウェイに対する横方向振動は増加するが、上下振動は約半分になり、ガイドウェイ底面に沿った運動が実現された。そしてカント角がない場合はカーブ外側に集中していた案内力が内側にも分散された。さらに緩和曲線をつけると、変位の平均値は変わらない

が、振動運動の振幅が大幅に減少し、その結果、推進・浮上・案内力の振動成分が大きく削減された。

複数車両が存在する列車モデルについて同様の走行シミュレーションを行ない、客室と台車の相互作用について検討した。そして以下のことが示された。

- 客室と台車が2つに分離し、台車-客室間に2次系が存在するために、台車の上下振動は台車モデルに比較すると小さくなる。上下、左右運動は台車モデルとほぼ同じになるが、回転運動では2次系の影響が大きく出る。
- 変位したガイドウェイの区間が短い場合にはその影響が客室に伝わる前に台車が正常ガイドウェイに戻るので列車全体への外乱の影響は小さくなる。
- カーブ走行については、客室と台車を分離したことで全体に重心が上昇した分、台車単体モデルの結果よりも振動運動の振幅は大きくなり安定性は低下するが、台車の各変位の平均値はほぼ台車モデルの結果と一致した。
- 前方を走行する台車が外乱を受けたときに後続台車に与える影響について検討した。その結果、前方台車が外乱を受けてもその影響は後続の台車にはほとんどない。これは第3章に示したEDSをバネ近似したときのバネ係数が2次系バネよりも大きく、外乱による変位が2次系に吸収されるため、客室が変位するのみで後続の台車には影響しないからである。

第5章においては、この浮上システムが抱える課題の一つである、浮上系のダンピングについて検討した。まずSCコイル用磁気シールド板に誘導されるうず電流について検討した。そして、さらにダンピングを増加させるために短絡コイルを台車のSCコイルの前に設置するパッシブダンパシステムについて、コイル形状、設置位置およびその効果を求めた。これらのダンピング要素により、浮上走行速度領域全域で正のダンピングが得られたものの、大きなダンピングの改善は得られなかった。そこで大きなダンピングを得るために、SCコイルの前にコイルを設置し、制御された電流を流して能動的に制御するアクティブダンパシステムを提案した。そしてその設置位置、形状について検討した。そこでアクティブダンパに対して得られるダンピング効果や他のコイルとの磁氣的関わりについて検討を行なったところ、台車上の浮上コイルに向かい合う位置にヌルフラックス結線したアクティブダンパコイルを設置するような方法で、比較的小さな起磁力で十分なダンピング力を得ることが示された。またこのアクティブダンパコイルを台車走行シミュレーションに組み込み、その効果を確認した。

第6章では、このシステムにおいて最も深刻な外乱であるSCコイルのクエンチの影響解析を行なった。そしてSCコイルがクエンチした場合の走行特性を求め、さらにクエンチ後の列車の安定方法について検討した。まず台車モデルを用いて8つのSCコイルのうちの1つのSCコイルがクエンチした場合について解析し、台車運動、他のSCコイルに与える影響について検討した。そして台車の進行方向に対して先頭のSCコイルがクエン

チする場合が最も変位が大きい。その場合クエンチコイルに隣接する SC コイルへ通常の数倍の浮上案内力が加わることが分かった。さらに複数台車が存在する列車モデルについて解析を行ない、クエンチが列車全体に与える影響を求めた。連接構造をとっている台車がクエンチした場合には前後複数の車両に影響が及ぶので台車および客室の変位は大きくなる。しかし、4 章で示したように EDS の電磁バネは 2 次系機械バネに比べてバネ係数が大きいので、台車がクエンチしても影響はその台車が直接接続されている客室のみに伝わり、隣接する台車の左右および回転運動にはほとんど影響しないことが分かった。また、クエンチが推進系に与える影響について検討した。そしてコイルクエンチが起こった台車では、コイルがクエンチすることによる LSM 推進力の低下だけでなく、台車位置が下方に移動することで浮上系からの磁気抗力が増加し、推進を低下させることがわかった。クエンチ時に列車運動を安定させる方法として、他の正常 SC コイルをクエンチすることにより列車位置を安定させる緊急消磁について検討した。この結果、クエンチしたコイルと進行方向に対して反対側のコイルを消磁することで台車の横方向変位、ヨーイングおよびローリング角を抑えることができた。しかし、上下変位やピッチング角が増加し、各 SC コイルに加わる電磁力に注目すると、特性が悪化するものも見られた。

以上超電導磁気浮上鉄道システムについてその基本特性、台車に外力が加わった場合の解析や、カーブ走行などの解析を行ない、走行特性を求めた。また浮上系のダンピングを検討し、ダンピングの改善方法を提案した。さらに最も深刻な外乱である SC コイルクエンチの影響解析を行なった。

これらの結果から現システムの特性、問題点を示し、システムの実用化や実用システムの設計に重要な点を明らかにすることができた。

7.2 今後の課題

超電導磁気浮上鉄道は超高速非接触走行を実現することができる非常に優れたシステムである。しかし、従来にない様々な最新技術を用いており、本論文での解析結果から、主に次に述べるような課題となる点が挙げられる。

- ダンピングの不足

理論的に浮上コイルと SC コイルの系ではダンピングは負である。そして運動解析で示したようにガイドウェイ変位や外力、カーブ走行などにおいてダンピングの不足から振動が発散する結果が得られている。振動運動の発散は直接浮上案内力や推進力といった電磁力の変動につながるため、ダンピングの増加が必要不可欠である。また営業運転に向けた走行安定性の確保、さらには乗り心地の問題もある。これらを解決するためには台車-客室間の 2 次サスペンション系だけでは不十分であり、本論文でとりあげたアクティブダンパシステムによる 1 次サスペンション系での車両運動制御が求められる。このアクティブダンパシステムの有効性については示したが、設置場所や制御方法など、さらに検討の必要がある。

- 超電導コイル系の安定性の向上

開発当初と比較すると SC コイルや液体ヘリウムのための冷凍装置の性能は格段に向上している。しかし、台車に外乱が加わって台車振動が起こった場合に、大きな力やトルクがステップ状に加わることが計算結果から示された。これにより SC コイルに熱振動が発生し、走行中にコイルクエンチを起こす可能性を完全には否定できない。また一つの SC コイルがクエンチを起こすと隣接する SC コイルに非常に大きな異常電磁力が加わり、台車にも大きな応力が加わることが示された。よって今後より一層の SC コイルの安定性の向上が求められる。

- 解析手法の簡略化

本研究で作成した車両走行シミュレーションにおいては電磁現象を正確に解いているため、浮上案内力を求める際に非常に多くの時間が必要となる。これは車両や列車全体を考慮したダンピングの設計を行なうにあたって大きな問題となる。磁気シールド板やアクティブダンパコイルシステムについてはさらに計算量が増加するため上下方向と進行方向のみの運動を考慮した解析を行なった。これをカーブ区間の走行やクエンチ時など 6 自由度の運動解析に応用することは原理的には可能であるが、計算量を考えると現実的でない。そこで浮上案内系の近似表現が必要となる。SC コイルと浮上コイル系のみについては浮上案内系の近似表現を求めた。今後この手法を発展させて、台車の回転運動を含み、磁気シールド板やアクティブダンパコイルについても物理的に意味のある近似表現を求め、解析を正確かつ簡略化する必要がある。

- 実験線での試験結果との比較、検討

山梨新実験線が完成し、営業運転を想定した試験が行なわれる予定であり、宮崎実験線では明らかにならなかった様々な試験結果が期待されている。そこで本論文の解析結果と試験結果との比較を行ない、ダンピング要素や外乱時の特性などの検討が必要となる。さらに検討結果から現在のシステムの改善点を求める必要がある。

現在の開発としては、山梨実験線の方式の他に推進系と浮上系を同じコイルで行なう PLG 方式や推進コイルを 1 層配置にする方式などが検討されており、地上設備の削減が図られている。また、現在用いられている Nb-Ti の金属超電導コイルの代わりに高温超電導体を用いることも検討されている。高温超電導体の利用が可能になれば、液体窒素による冷却、さらに冷凍機の簡略化により現在の超電導コイル集中配置から多数の高温超電導体を用いる分散配置にすることが可能で、システムの安定性の向上が期待できる。

現在行なわれている宮崎実験線は直線のみの実験であり、今後営業線を想定した山梨実験線における走行試験で様々な問題が出てくる可能性はある。しかし、このような超高速大量輸送システムは必要不可欠であり、今後のシステムの発展および実現を期待したい。

参考文献

- [1] 正田英介（編）．「軌道輸送システムの高速度化と磁気浮上技術」、リニアモータによる高速輸送システムの現状と将来．鉄道総合技術研究所、日本経済新聞社、1992.
- [2] U.S.Dep.of Trans.FRA,U.S.Army Corps of Engineers ,U.S.Dep.of Energy. *Final Report on the National Maglev Initiative*, 1993.
- [3] 正田英介, 藤江恂治, 加藤純郎, 水間毅（編）．「磁気浮上鉄道の技術」．オーム社, 1992.
- [4] Heinrich and Rolf Kretzschmar. *Magnetbahn Transrapid*, 1989.
- [5] H.Nakasima and A.Seki. The status of the technical development for the yamanashi maglev test line. *The 14th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev'95)*, pp. 31-35, 1995.
- [6] 電気学会・磁気浮上応用技術調査専門委員会（編）．「磁気浮上と磁気軸受」．コロナ社, 1993.
- [7] J.L He, D.M.Rote, and H.T.Coffey. Electrodynamic force of the cross-connected figure-eight null-flux coil suspension system. *The 13th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev'93)*, pp. 64-70, 1993.
- [8] 藤原俊輔．「浮上コイル側壁配置磁気浮上方式の特性」．電学論 D, Vol. 108, No. 5, pp. 663-670, 1988.
- [9] K.Higashi, S.Ohashi, H.Ohsaki, and E.Masada. Mechanism of magnetic damping in the superconducting magnetic levitation system. *International Conference of Linear Drive for Industry Application (LDIA '95)*, pp. 131-134, 1995.
- [10] 藤岡裕之．「超電導磁気浮上におけるダンピング特性改善のためのパッシブダンパコイル導入の検討」．東京大学卒業論文, 1996.

- [11] E.Masada, S.Ohashi, K.Higashi, and H.Ohsaki. Damping mechanism and the effect of the active suspension of the superconducting magnetically levitated system. *Speedam*, pp. A8-11-18, 1996.
- [12] T.Murai, T.Fujimoto, and S. Fujihawa. Test run of combined propulsion, levitation and guidance system in eds maglev. *The 14th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev'95)*, pp. 289-294, 1995.
- [13] 出口洋成. 「超電導磁気浮上鉄道の走行特性に関する研究」. 東京大学修士論文, 1991.
- [14] 小豆澤照男. 「超電導誘導式磁気浮上システムの永久電流解析」. 電学論 D, Vol. 114, No. 4, pp. 432-437, 1994.
- [15] 北野淳一, 宮本茂樹. 「側壁浮上案内系の台車運動特性」. 電気学会リニアドライブ研究会, LD-94-106, 1994.
- [16] 鳥居肅. 「超電導磁気浮上車の走行時の挙動解析」. 東京大学博士論文, 1992.
- [17] 大橋俊介. 「パネル構造固定子を持つリニア同期モータの特性解析」. 東京大学卒業論文, 1992.
- [18] 山田忠利. 「超電導磁気浮上推進方式の特性に関する研究」. 東京大学博士論文, 1977.
- [19] 山口仁, 藤原俊輔. 「超電導磁気浮上車の案内系の電磁ダンピングへの電流モードの影響」. リニアドライブ研究会, Vol. LD-92-56, pp. 55-63, 1992.
- [20] E.Masada, B.I.Kwon, M.Miyamoto, and M.Yoshioka. Fahrdynamik von magnetschwebefahrzeugen hsst-03 und mlu-001. *VDI BERICHTE NR.635*, pp. 237-256, 1987.
- [21] 大橋俊介, 東耕太郎, 大崎博之, 正田英介. 「超電導磁気浮上システムのローリングを考慮した浮上案内特性」. リニアドライブ研究会, LD-94-105, 1994.
- [22] 大橋俊介, 東耕太郎, 大崎博之, 正田英介. 「超電導磁気浮上システムにおける浮上系と案内系のダンピング特性の比較」. 平成6年度電気学会産業応用全国大会 220, 1994.
- [23] 藤原俊輔. 「側壁に浮上コイルを配置する超電導磁気浮上方式に関する研究」. 東京大学博士論文, 1992.
- [24] 藤原俊輔, 山口仁. 「誘導式磁気浮上での磁気ダンピング」. リニアドライブ研究会, Vol. LD 92-55, pp. 47-54, 1992.
- [25] 東耕太郎. 「超電導磁気浮上システムの磁気ダンピング」. 東京大学修士論文, 1996.

- [26] A. Seki, J. Kitano, and S. Miyamoto. Dynamics of the bogie of a maglev system with guideway irregularities. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 5043-5045, 1996.
- [27] 北野淳一, 宮本茂樹, 亀有昭久. 「側壁案内浮上方式リニア同期モータの曲線区間における走行特性」. 電気学会交通・電気鉄道リニアドライブ合同研究会, TER-93-19, LD-93-58, 1993.
- [28] 東耕太郎, 大橋俊介, 大崎博之, 正田英介. 「磁気シールド板に誘導されるうず電流を考慮した超電導磁気浮上システムの台車運動解析」. 平成8年度電気学会全国大会 1110, 1996.
- [29] 野中作太郎, 坂本哲三. 「超電導反発形磁気浮上車両におけるクライオスタット外槽定常うず電流の三次元解析」. 電学会論文誌, Vol. 60, No. B24, pp. 211-218, 1985.
- [30] 三次元静磁界計算技術調査専門委員会(編). 「電気学会技術報告(2)部 第286号 三次元静磁界数値計算技術」. 電気学会, 1988.
- [31] 根本, 岸川, 上條. 「磁気浮上式鉄道の車両走行時における超電導コイルの緊急消磁」. 電学論 D, Vol. 116, No. 6, pp. 626-632, 1996.
- [32] 岸秀敏. 「超電導コイルがクエンチした時の1台車の運動」. 第4回電磁力関連のダイナミックス講演論文集, No. 512, pp. 159-164, 1992.
- [33] S. Ohashi, K. Higashi, H. Ohsaki, and E. Masada. Influence of magnet quench on the superconducting magnetically levitated bogie. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 5064-5066, 1996.

謝辞

本研究の指導教官でありました正田英介教授に感謝致します。先生には本研究を進めるにあたっての親切丁寧な御指導や方向付けをして頂きました。またこれからの研究者としての心構えなど多くの面で御指導、御助言を頂きました。さらに外国人研究員との交流、海外での発表、など貴重な機会を多く頂き、国際的な感覚に触れることができました。これらは今後研究を続けていく上で非常によい経験になります。心より感謝致します。これから益々の発展・御栄達を祈り致します。

ご一緒に御指導賜りました大崎博之 助教授にお礼申し上げます。大崎先生には研究についての的確な御指導および御指摘、そして様々な面で常に冷静な御意見を頂きました。深く感謝致します。

田村穰氏には研究室内での生活面で長い間お世話になりました。厚くお礼申し上げます。

本研究の指導教官であり、修士研究の御指導を頂いた日高邦彦助教授に感謝致します。先生には丁寧な御指導を頂き、いつも熱心に夜遅くまで私の話を聞いて頂きました。深く感謝致します。また修士課程の際、修士研究の御指導を頂いた河野照哉先生（現工学院大学教授）、そして研究環境を整えて下さった千葉政邦助手に感謝致します。

古関隆章助教授には卒論生の時代から研究をはじめ、様々なことで相談にのって頂き、アドバイスを頂きました。武蔵工業大学の鳥居肅先生には直接の研究の先輩として指導を頂きました。大阪工業大学の森實俊充先生には様々な面でお世話になりました。当研究室の先輩でもあるこの3人の方々のおかげで有意義な研究生活を送ることができました。

研究を進める上で、必要な資料、有益な議論を頂き、そして様々な見学の機会を設けて下さいました（株）東海旅客鉄道の関秋生氏、北野淳一氏をはじめとするリニア開発本部の皆さん、（財）鉄道総合技術研究所藤原研究室室長 藤原俊輔博士、藤原研究室の皆さんに感謝致します。また本論文の研究の一部を担って頂いた東耕太郎氏（現 三菱電機）、藤岡裕之氏（現 住友商事）、卒論生の田村雅寿君に感謝致します。

現在の研究室のメンバーである Mr. Burlacu Catalin、林屋均君、高畠幹生君、仙波章臣君、工藤靖之君、馬場旬平君、荒木登君、棚橋宣康君、そして片山敏男君をはじめとする研究員、卒論生の皆さんに感謝致します。特に高畠君にはコンピュータシステム管理の片腕となり、その他様々な仕事を引き受けて頂きました。また過去5年間に卒論および博士課程の間を過ごした正田大崎研究室、修士課程時代を過ごした河野・日高研究室の皆様にもお世話になりました。ここに深く感謝致します。

博士課程の3年間奨学金を頂いた（財）東電記念科学技術研究所に感謝致します。

大学にいた9年間に有意義に過ごせたのは学生生活を一緒に送った研究室や東京大学音楽部管弦楽団の友人たちのおかげです。またこのように長い間大学に行くことを快く許してくれた家族の理解、協力を感謝します。

最後に 常に私を支え励ましてくれた関原和美嬢に感謝し、彼女が本論文完成の大きな助けになったことを記す。

発 表 文 献

国内外学会誌

1. S. Ohashi, K. Higashi, H. Ohsaki, E. Masada, "Influence of Magnet Quench on the Superconducting Magnetically Levitated Bogie", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.32, No.5, pp5064-5066, 1996.
2. 大橋, 大崎, 正田「側壁式電磁誘導浮上システムの等価支持モデル」電気学会産業応用部門誌平成9年6月号(掲載予定)
3. S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada, "Running Characteristics of the Magnetically Levitated Train in a Curved Track Section", *IEEE Trans. of Magnetics*, (投稿中)

(以下修士論文研究に関するもの)

4. 大橋, 日高「電流線座標系を用いた放電空間の電流密度および電界の解析」静電気学会誌, Vol.20, No.2, pp98-105, 1996
5. S.Ohashi, K.Hidaka "A Method for Computing Current Density and Electric Field in Electrical Discharge Space Using Current Flow-line Coordinate", *Journal of Electrostatics*(投稿中)

国際会議, プロシーディングス

1. E.Masada, H.Ohsaki, S.Ohashi and S.Torii, "Influence of irregularity inground coil arrangement in the superconducting linear synchronous drives", *Proceeding of Symposium of Power Electronics, Electric Drive, Advanced Electric Motor (Speedam)*, pp441-446 Italy, May, 1994.
2. Ohsaki, Torii, Ohashi, Higashi, Kai and Masada, "Running Characteristics Analysis of a Superconductive Magnetically Levitated Vehicle Driven by a Linear Synchronous Motor" *Proceeding of International Conference on Electrical Machines (ICEM'94)*, Paris September, pp.607-612, 1994.
3. S.Ohashi, K.Higashi, H.Ohsaki and E.Masada, "Study on Damping Characteristics of the Superconductive Magnetically Levitated System" *Proceeding of the 7th International Symposium on Superconductivity (ISS'94)*, vol.2, pp1263-1266, Kita-Kyushu, November, 1994.

4. S.Ohashi, K.Higashi, H.Ohsaki and E.Madada, "Unstable Rotation Motin of the Superconductive Magnecically Levitated Bogie", *Proceeding of International Power Electronics Conference (IPEC'95)*, vol.1, pp551-556, Yokohama, April, 1995.
5. K.Higashi, S.Ohashi, H.Ohsaki and E.Masada, "Mechanism of Magnetic Damping in the Superconducting Magnetic Levitation System" *Proceeding of the 1st International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA '95)*, pp131-134, Nagasaki, June, 1995.
6. S.Ohashi, K.Higashi, H.Ohsaki and E.Madada, "Study on Rotation Characteristics of the Superconductive Magnecically Levitated System", *Proceeding of International Conference on Electrical Engineering (ICEE 95)*, pp517-520, Taejon, Korea, July, 1995.
7. K.Higashi, S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada, " Damping Mechanism of the Electrodynamic Suspension System" *7th International Symposium on Non-Linear Electromagnetic System (ISEM)*, Cardiff, U.K., 1995 (To be published).
8. S.Ohashi, K.Higashi, H.Ohsaki and E.Madada, "Running Simulation of the Superconductive Magnetically Levitated System", *Proceeding of 6th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'95)*, vol.3,pp650-655, Sevilla, Spain, September, 1995.
9. S.Ohashi, K.Higashi, H.Ohsaki and E.Masada, "Influence of Magnet Quench on Running Characteristics of the Superconducting Magnetically Levitated Bogie" *Proceeding of the 8th International Symposium on Superconductivity (ISS'95)*, vol.2, pp1339-1342, Hamamatsu, October, 1995.
10. S.Ohashi, K.Higashi, H.Ohsaki and E.Madada, "Influence of Mechanical and Electromagnetic Disturbance on the Running Characterisrics of the Superconductive Maglev System", *Proceeding of 14th International Conference on Magnetically Levitation Systems (Maglev95)*, pp. 467-472, Germany, November, 1995.
11. E.Masada, S.Ohashi, K.Higashi and H.Ohsaki, "Damping mechanism and the effect of the active suspension of the superconducting magnetically levitated system", *Proceeding of Symposium of Power Electronics, Electric Drive, Advanced Electric Motor (Speedam)*, pp.A8:11-18, Italy, June, 1996.
12. S.Ohashi, H.Ohsaki and E.Masada, "Influece of Magnet Quenching on the Dynamics of the Superconducting Magnetically Levitated Train", *Proceeding of The 9th International Symposium on Superconductivity (ISS '96)*, Sapporo, October, 1996 (To be published).

13. S. Ohashi, H. Ohsaki, E. Masada, T. Hikiyara, Y. Hirane " Influence of Coil Quench on the Electromagnetic Force of the Superconducting Magnetically Levitated Train" *8th International Symposium on Non-Linear Electromagnetic System (ISEM)*, Braunschweig, Germany, May, 1997 (To be presented).
14. S.Ohashi, N.Tanahashi, H.Ohsaki and E.Madada, "Interaction between the drive and the levitation system of the Superconducting Magnetically Levitated System", *7th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'97)*, Trondheim, Norway, September, 1997 (To be presented).

国内研究会、シンポジウムなど

1. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上台車における浮上系及び案内系のダンピング特性」, 第6回リニアドライブ若手研究者シンポジウム, pp.1-8, 1994
2. 東, 大橋, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上台車の上下ダンピング特性の数値解析」第6回リニアドライブ研究会若手シンポジウム, pp.9-16, 1994.
3. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上システムのローリングを考慮した浮上案内特性」, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-94-105, 1994
4. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上システムにおける台車振動特性とその機構」, 第7回電磁力関連のダイナミックス講演論文集, No.189, pp477-482, 1995
5. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上台車のカーブ通過時における走行特性についての検討」鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'95), pp345-348, 1995
6. 大橋, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上車両運動における超電導コイルクエンチの影響」, 電気学会 交通・電気鉄道リニアドライブ合同研究会, TER-96-32, LD-96-83, 1996
7. 大橋, 大崎, 正田, 「カーブ区間突入時の超電導磁気浮上列車の運動」, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-96-123, 1996
8. 大橋, 鳥居, 大崎, 正田, 北野, 関, 「リニア同期モータ推進システムの極ピッチ操作による空間高調波抑制」平成4年度電気学会全国大会 781, 1992
9. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上システムにおける浮上系と案内系のダンピング特性の比較」, 平成6年度電気学会産業応用全国大会 220, 1994
10. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上台車のピッチング運動特性」平成7年度電気学会全国大会 1061, 1995
11. 東, 大橋, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上方式におけるネガティブダンピング発生原因の検討」平成7年電気学会全国大会 1062, 1995.

12. 仙波, 大橋, 森實, 大崎, 正田, 「小規模超電導電力貯蔵装置の回路解析」, 平成7年度電気学会全国大会 1122, 1995
13. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「カーブ走行時における超電導磁気浮上台車の推進特性」平成7年電気学会産業応用部門全国大会 159, 1995.
14. 東, 大橋, 大崎, 正田, 「永久電流モード時の超電導磁気浮上台車の走行シミュレーション」平成7年電気学会産業応用部門全国大会 160, 1995.
15. 東, 大橋, 大崎, 正田, 「磁気シールド板に誘導されるうず電流を考慮した超電導磁気浮上システムの台車運動解析」平成8年電気学会全国大会 1110, 1996
16. 大橋, 東, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上台車のカーブ走行時におけるカントの影響」平成8年電気学会全国大会 1111, 1996
17. 大橋, 大崎, 正田, 「超電導磁気浮上車両の横方向運動における横方向外力の影響」平成8年電気学会産業応用部門全国大会 III-200, 1996.
18. 大橋, 大崎, 正田, 「ガイドウェイに横ずれが生じた場合の超電導磁気浮上台車の走行特性」平成9年電気学会全国大会 1997(発表予定).

(以下修士論文研究に関するもの)

19. 大橋, 日高, 河野, 「電流線座標系によるコロナ場の電流・電界解析」静電気学会講演論文集'92, pp343-346, 1992
20. 大橋, 日高, 河野, 「電流線座標系を用いた針一平板電極コロナ場の電界・電流計算」平成5年電気学会全国大会講演論文集, 129, 1993
21. 大橋, 日高, 河野, 「電流線座標系を用いた線一平板電極コロナ場の電流・電界解析」電気学会放電研究会資料, ED-93-88, 1993
22. 大橋, 日高, 河野, 「電流線座標系による線一平板電極の解析- スプライン補間による等電位面の決定-」平成6年電気学会全国大会講演論文集, 240, 1994