

東京大学大学院新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻

2021年度

修士論文

浮体式洋上風車の動揺時の
係留索動的特性に関する研究

Study on Dynamic Characteristics of Mooring Lines
for Motion of a Floating Offshore Wind Turbine

2022年2月25日提出

指導教員

平林 紳一郎 准教授

山田 光輝

目次

第 1 章	序論	1
1.1	世界のエネルギー動向	1
1.2	再生可能エネルギーの動向	2
1.3	風力発電	3
1.4	Vortex-Induced Vibration (VIV) と Vortex-Induced Motion (VIM)	8
第 2 章	研究目的	10
2.1	先行研究	10
2.2	研究目的	11
第 3 章	係留	12
3.1	係留方式	12
3.2	カテナリー係留の特性	13
3.3	曲線座標系を用いたカテナリー解析	13
第 4 章	係留解析プログラム	18
4.1	ランプドマス法	18
4.2	動的解析プログラム MoorDyn	18
第 5 章	水槽実験	26
5.1	実験目的	26
5.2	実験概要	26
5.3	実験装置	26
5.4	静的係留特性実験結果	34
5.5	実験条件	38
5.6	座標変動比較結果	40
5.7	座標変動比較結果考察	48
5.8	張力変動比較結果	61
5.9	張力変動比較結果考察	71
第 6 章	張力変動特性	78
6.1	波浪影響による動揺を考慮した場合	78
6.2	波浪影響と VIM 影響が共存した場合	97

第 7 章	疲労評価	106
7.1	疲労評価手法	106
7.2	疲労評価	110
第 8 章	結論と今後の課題	114
8.1	本研究のまとめ	114
8.2	今後の課題	114
	謝辞	116
	参考文献	117
付録 A	3 軸方向加振 実験結果	119
A.1	座標変動比較結果	119
A.2	張力変動比較結果	125

表目次

1.1	Characteristics of each floating body type [8]	6
5.1	Parameters of FBG tension sensor	31
5.2	Result of voltage measurement	31
5.3	Parameters of chain	32
5.4	Parameters of chain in real scale	33
5.5	Initial conditions of the chain	38
5.6	Experimental cases	39
5.7	Coordinate fluctuation range in the Y direction of Case 9	50
5.8	Position of X-intercept and touch down point for each case	51
6.1	Calculation conditions	79
6.2	Maximum value of tension fluctuation range in Cases of “+” direction	82
6.3	Maximum value of tension fluctuation range in Cases of “-” direction	82
6.4	Maximum value of tension fluctuation range in Cases of VIM “+” direction	98
6.5	Maximum value of tension fluctuation range in Cases of VIM “-” direction	98
6.6	Ratio of maximum value of tension fluctuation range in Cases of “+” direction	99
6.7	Ratio of maximum value of tension fluctuation range in Cases of “-” direction	99
7.1	T-N Fatigue curve parameters [29]	107
7.2	S-N Fatigue curve parameters [30]	108
7.3	Fatigue damage degree calculated by T-N curve	110
7.4	Fatigue damage degree calculated by S-N curve	112

目次

1.1	Trends in the world energy consumption [1]	1
1.2	Investment in renewable energy [1]	2
1.3	Power generation costs of renewable energy [1]	3
1.4	Installed capacity of wind power in the world [1]	4
1.5	Installed capacity of wind power in Japan [3]	4
1.6	New installations and total installations of offshore wind power [4]	4
1.7	Offshore wind foundations [9]	7
1.8	Abstract of the Act on Promoting the Utilization of Sea Areas for the Development of Marine Renewable Energy Power Generation Facilities [10]	8
1.9	Promotion area of offshore wind power generation [12]	8
1.10	Karman's vortex [13]	9
3.1	Types of mooring [23]	12
3.2	Displacement of the catenary mooring line	13
3.3	Micro element of a mooring line	14
4.1	Model of lumped mass method [18]	18
4.2	Model of MoorDyn [22]	19
4.3	Input file of MoorDyn	19
4.4	Internal and external cable forces [26]	22
5.1	Forced vibration device	27
5.2	Forced vibration motor	27
5.3	Qualisys motion capture in air	27
5.4	Qualisys motion capture in water	27
5.5	Qualisys camera synchronization unit	28
5.6	Laser sensor	28
5.7	Data logger	28
5.8	FBG tension sensor (ts1000v2)	28
5.9	FBG cable	28
5.10	FBG trigger	28
5.11	SUS chain	29
5.12	Anchor	29

5.13	Carriage	29
5.14	Carriage controller	29
5.15	Installation of laser sensor	29
5.16	Installation of chain	29
5.17	Voltage-Distance calibration	32
5.18	Schematic diagram from side	33
5.19	Schematic diagram from top	34
5.20	Time series data of static tension	34
5.21	Static tension at each measurement position	35
5.22	Static tension at each measurement position (only S02)	36
5.23	Static tension at the origin point	37
5.24	Static tension at the origin point in real scale	37
5.25	Initial shape of the chain	38
5.26	Rotational direction of vibration point	39
5.27	Coordinate fluctuation result of Case 1	41
5.28	Coordinate fluctuation result of Case 2	41
5.29	Coordinate fluctuation result of Case 3	42
5.30	Coordinate fluctuation result of Case 4	42
5.31	Coordinate fluctuation result of Case 5	43
5.32	Coordinate fluctuation result of Case 6	43
5.33	Trajectory of measurement points of Case 5	44
5.34	Trajectory of measurement points of Case 6	44
5.35	Coordinate fluctuation result of Case 7	45
5.36	Coordinate fluctuation result of Case 8	46
5.37	Coordinate fluctuation result of Case 9	47
5.38	Coordinate fluctuation result of Case 10	48
5.39	Comparison result of Z coordinate fluctuation of Case 1	49
5.40	Comparison result of Z coordinate fluctuation of Case 5	49
5.41	Coordinate fluctuation range in the Y direction of Case 9	50
5.42	Assumed shape of the experiment start time from side view	51
5.43	Assumed shape of the experiment start time from top view	51
5.44	Relationship diagram of transverse amplitude and X-intercept	52
5.45	Coordinate fluctuation result of Case 7 in case of considering the effect of friction	53
5.46	Coordinate fluctuation result of Case 8 in case of considering the effect of friction	54
5.47	Coordinate fluctuation result of Case 9 in case of considering the effect of friction	55
5.48	Coordinate fluctuation result of Case 10 in case of considering the effect of friction	56
5.49	Coordinate fluctuation result of Case 11	58
5.50	Coordinate fluctuation result of Case 15	59
5.51	Coordinate fluctuation result of Case 17	60
5.52	Comparison result of Z coordinate fluctuation of Case 15	61

5.53	Tension fluctuation result of Case 1	62
5.54	Tension fluctuation result of Case 2	63
5.55	Tension fluctuation result of Case 3	64
5.56	Tension fluctuation result of Case 4	65
5.57	Tension fluctuation result of Case 5	66
5.58	Tension fluctuation result of Case 6	67
5.59	Tension fluctuation result of Case 9	69
5.60	Tension fluctuation result of Case 10	71
5.61	Time history of the tension before processing with a filter	72
5.62	Single-sided amplitude spectrum of the tension	72
5.63	Installation of FBG tension sensor	73
5.64	Tension fluctuation result at mooring point of Case 9 after processing with a band-pass filter	73
5.65	Tension fluctuation result at mooring point of Case 10 after processing with a band-pass filter	74
5.66	Tension fluctuation result of Case 11	75
5.67	Tension fluctuation result of Case 15	76
5.68	Tension fluctuation result of Case 17	77
6.1	Time series data of tension fluctuation in Case of Amplitude=1.0m, Oscillation period=20s	79
6.2	Time series data of tension fluctuation in Case of Amplitude=1.0m, Oscillation period=5s	80
6.3	Time series data of length of segments	81
6.4	Time series data of tension processed with a low-pass filter	81
6.5	Tension fluctuation data at each oscillation period in Case of Amplitude=0.5m	83
6.6	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.0m	84
6.7	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.5m	84
6.8	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=2.0m	85
6.9	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=2.5m	85
6.10	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=3.0m	86
6.11	Tension fluctuation range at each node point in Case of Period=5s	87
6.12	Tension fluctuation range at each node point in Case of Period=7s	87
6.13	Tension fluctuation range at each node point in Case of Period=15s	88
6.14	Position of the mooring line with the maximum tension fluctuation range	88
6.15	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=0.5m	89
6.16	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.0m	90
6.17	Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.5m	90
6.18	Time series data of tension and coordinate fluctuation in case of unidirectional motion assuming “-” direction	91
6.19	Time series data of tension and coordinate fluctuation in Case of “-” direction	92

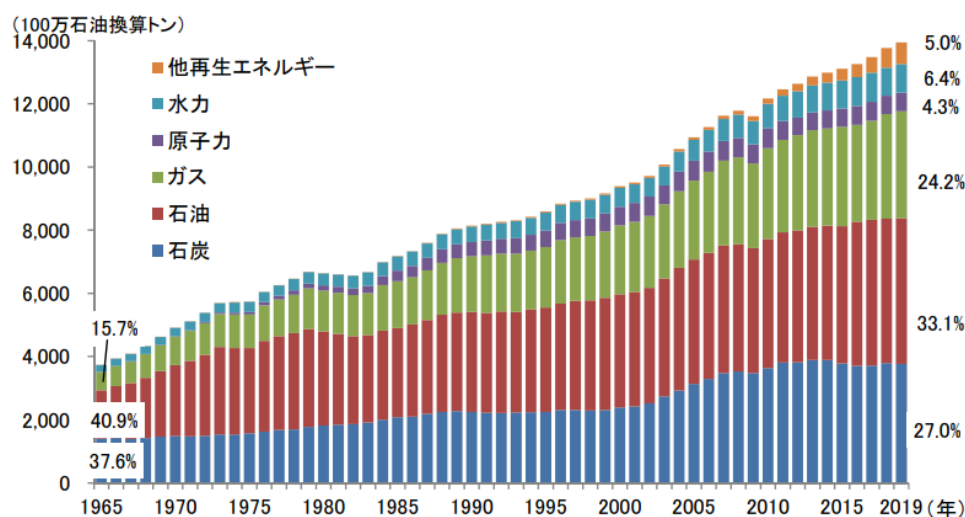
6.20	Time series data of tension and coordinate fluctuation in case of unidirectional motion assuming “+” direction	92
6.21	Time series data of tension and coordinate fluctuation in Case of “+” direction	93
6.22	Tension fluctuation range at each node point in Case of Depth=50m	93
6.23	Tension fluctuation range at each node point in Case of Depth=100m	94
6.24	Tension fluctuation range at each node point in Case of Depth=200m	94
6.25	Position of the mooring line with the maximum tension fluctuation range in Case of Depth=50m	95
6.26	Tension fluctuation range at each node point in some length cases	96
6.27	Tension fluctuation range when the overall length is changed	96
6.28	Static tension at each measurement position (only S02)	97
6.29	Assumed VIM characteristics in current and waves [28]	100
6.30	Map of tension fluctuation range in Cases of “+” direction	102
6.31	Map of tension fluctuation range in Cases of “-” direction	102
6.32	Map of tension fluctuation range in Cases of VIM “+” direction	103
6.33	Map of tension fluctuation range in Cases of VIM “-” direction	103
6.34	Tension fluctuation range at each node point in some period cases	104
6.35	Time series data of tension fluctuation in Case of VIM period=50s	104
6.36	Time series data of tension fluctuation in Case of VIM period=100s	105
6.37	Time series data of tension fluctuation in Case of VIM period=200s	105
7.1	T-N curve of a studless chain with a nominal diameter of 140mm	107
7.2	S-N curve	108
7.3	Probability distribution map of significant wave height and significant period [32]	110
A.1	Coordinate fluctuation result of Case 12	120
A.2	Coordinate fluctuation result of Case 13	121
A.3	Coordinate fluctuation result of Case 14	122
A.4	Coordinate fluctuation result of Case 16	123
A.5	Coordinate fluctuation result of Case 18	124
A.6	Tension fluctuation result of Case 12	125
A.7	Tension fluctuation result of Case 13	126
A.8	Tension fluctuation result of Case 14	127
A.9	Tension fluctuation result of Case 16	128
A.10	Tension fluctuation result of Case 18	129

第1章

序論

1.1 世界のエネルギー動向

世界のエネルギー消費量（一次エネルギー）は経済の成長とともに増加を続けている。エネルギー源別に見ると、過去50年間でいずれの年代も石油が最も高い割合を占めており、依然としてエネルギー消費の中心となっている。その次に石炭が高い割合を占めている。これは特に2000年代において、経済成長が著しい中国等、安価な発電用燃料を求めるアジア地域を中心に消費量が拡大したためである。しかし近年では、中国の需要鈍化、米国における天然ガス代替による需要減少などの要因により、石炭消費量は伸び悩んでいる。一方で、石油と石炭以上に消費量が伸びたのが天然ガスであり、特に気候変動への対応が強く求められる先進国を中心に、発電用および都市ガス用の消費量が増加した。同じ期間で原子力と、その他再生可能エネルギー（風力、太陽光など）の消費量も増加しているものの、2019年時点のシェアはそれぞれ4.3%および5.0%と、エネルギー消費全体に占める比率はいまだに大きくない。しかしながら、近年は太陽光発電や風力発電のコストが低下しており、今後再生可能エネルギーの比率はさらに拡大すると予想される。



(注) 端数処理の関係で合計が100%にならない場合がある。

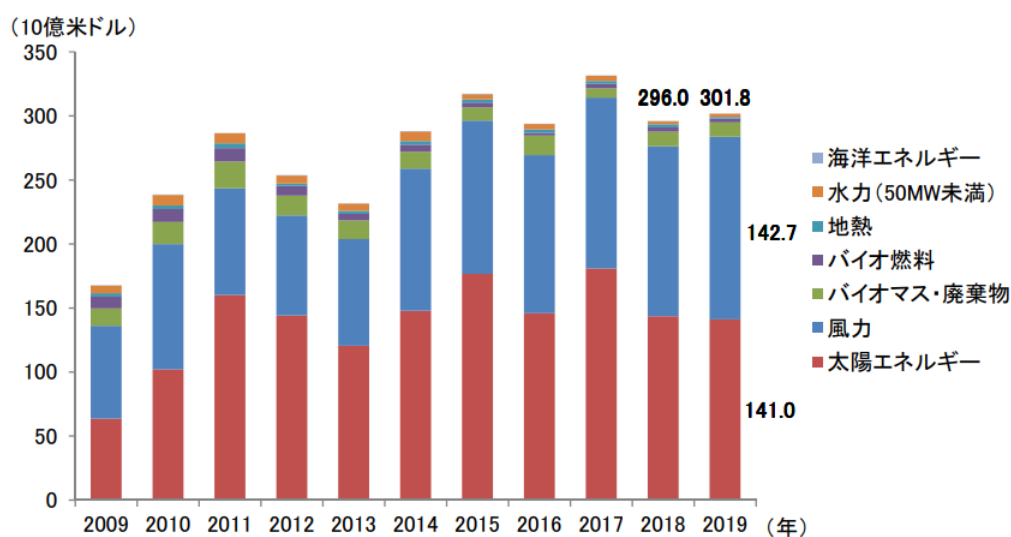
出典：BP「Statistical Review of World Energy 2020」を基に作成

Fig1.1 Trends in the world energy consumption [1]

1.2 再生可能エネルギーの動向

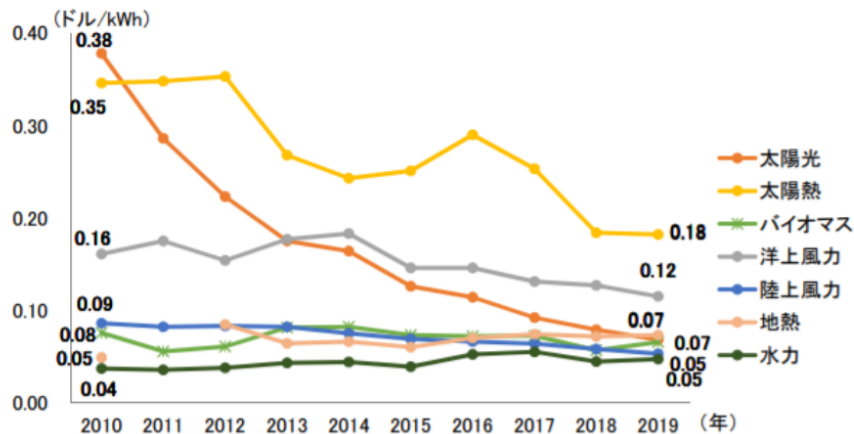
石炭や石油などの化石燃料の資源量には限度があり、将来には化石燃料の資源が枯渇してしまうという懸念がある。またそれら化石エネルギーを大量に消費すると、二酸化炭素など温室効果ガスの排出量も増加するというリスクがある。これらの資源問題や環境問題に対応すべく、化石燃料に頼らない再生可能エネルギーの開発に世界中の国や地域が取り組んできている。再生可能エネルギーの導入促進策としては、研究開発・実証、設備導入補助のほか、固定価格買取制度 (FIT:Feed-in Tariff) や、再生可能エネルギー導入量割当制度 (RPS:Renewables Portfolio Standards) が挙げられる。FIT は、電力会社に対して優遇的な買取価格を設定する施策であり、RPS は事業者に対して再生可能エネルギーの一定割合以上の導入量を義務づける制度である [2]。また近年では、多くの国が入札によって電気の買取価格を決定する仕組みを取り入れている。こうした取り組みにより、再生可能エネルギーへの投資は増大し、2019 年には約 3018 億米ドルの投資が行われた。エネルギー別の内訳を見ると、太陽エネルギーと風力が高い割合を占め、特に風力発電への投資は年々増え続けていることが分かる。

このような再生可能エネルギーの推進策の制定やそれに対する投資、技術革新などによって、世界的には再生可能エネルギーの発電コストが低下している傾向にある。特に、太陽光の発電コストは9年間で0.38ドル/kWhから0.07ドル/kWhと約82%低下した。また、陸上風力に関しても発電コストの低下傾向が続いている。これら2種類の発電は、太陽電池モジュールやタービンといった部材の価格も発電コストを引き下げている要因となっている。太陽熱や洋上風力に関しても、2016年以降はコストの低下傾向が続いていることから、今後発電コストの競争力が高まるとみられている。



出典：REN21「Renewables 2020 Global Status Report」を基に作成

Fig1.2 Investment in renewable energy [1]



(注)地熱の2011年のデータなし。
出典：IRENA「Renewable Power Generation Costs in 2019」を基に作成

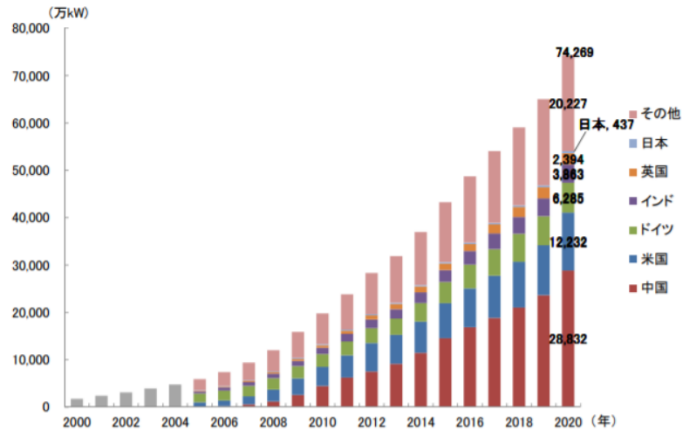
Fig1.3 Power generation costs of renewable energy [1]

1.3 風力発電

1.3.1 風力発電の動向

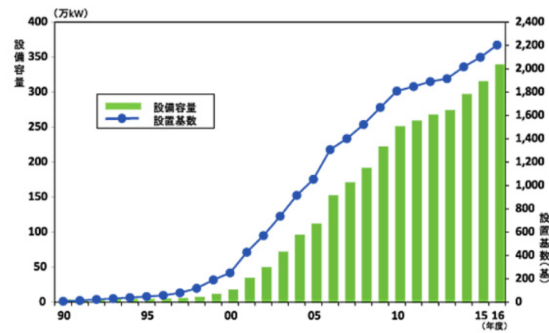
風力発電は環境負荷が小さい点に加え、大規模に導入できれば低コストで発電できるといった利点がある。また太陽光発電と異なり、風さえ吹けば夜間でも発電できる利点もある。Fig1.4 に世界の風力発電の導入状況を示す。この図が示すように、世界的に風力発電の設備容量は急速に増加し、2020 年には約 7.4 億 kW に達した。設備容量を国別に見ると、中国 (約 2 億 8800 万 kW)、米国 (約 1 億 2200 万 kW)、ドイツ (約 6300 万 kW) の順に高く、この 3 ヶ国で世界の設備容量の約 6 割を占めている。日本の風力発電設備容量は約 437 万 kW と、世界の設備容量の 1% にも満たない。Fig1.5 を見ると、日本国内の風力発電設備容量も実際には増加傾向にある。しかし、日本の山がちな地形の特性や電気系統の制約などから、諸外国に比べると風力発電の導入の伸び率は劣るといえる。

近年では、従来の陸上風力発電に加え、洋上風力発電の市場も急速に拡大している。2020 年末の時点で、世界で合計約 3530 万 kW(35.3GW) が導入されており、その約 7 割の 2480 万 kW(24.8GW) が欧州諸国の沖合に集中している。Fig1.6 に洋上風力発電の導入量の国別の割合を示す。2020 年時点の累計導入量は英国が最も高い割合を占めているが、新規導入量は中国が圧倒しており、今後は欧州やアジアを中心に普及が進んでいくと考えられる [1][4]。



(注1) 2004年以前の国別データなし。
 (注2) 四捨五入の関係で項目の和と合計の数値が一致しない場合がある。
 出典：Global Wind Energy Council (GWEC)「Global Wind Report(各年)」を基に作成

Fig1.4 Installed capacity of wind power in the world [1]



出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)ホームページ

Fig1.5 Installed capacity of wind power in Japan [3]

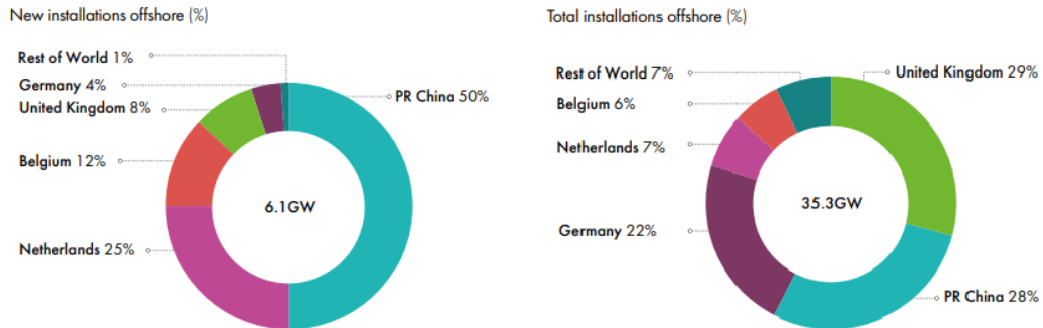


Fig1.6 New installations and total installations of offshore wind power [4]

1.3.2 陸上風力発電

現在導入されている風力発電の多くは陸上風力発電である。陸上風力発電の設置に当たっては、多くの風車が設置可能な広大な土地が必要であるという課題や、人の生活圏の近くに設置する場合、景観の損失・騒音の被害といった環境面の課題が懸念点として挙げられる。特に日本は、地形や人口密度の問題で立地の制約が厳しく、陸上での風力発電の適地が今後減少する可能性があることから、陸上風力発電の導入拡大は難しいと考えられる。

1.3.3 洋上風力発電

風力発電の導入拡大を図るためには、風況ポテンシャルの高い洋上への展開が必要になってくる。洋上風力発電は、陸上風力発電と比較して大きく3つの利点がある [5]。

- ・風況が良く、風の乱れが小さい
- ・土地や道路の制約がなく、大型風車の導入が比較的容易
- ・景観、騒音への影響が小さい

日本では、長い海岸線や広域な海域などを活かした洋上風力発電が有望視されている。一方で、洋上風力発電の課題として以下の3点が挙げられる [6]。

- ・陸上風力発電と比較して設置・メンテナンスコストが大きい
- ・風車の信頼性を向上させるための技術が必要
- ・漁業者など先行利用者の理解が必要

この他にも、電力消費地から遠くなることによる送電の問題や、腐食による劣化の問題がある。

洋上風力発電は大きく分けて、設備を海底に固定する着床式と、洋上に設備を浮かべて海底に係留させる浮体式の2種類の設置方式がある。どちらが適しているかは、設置する海域の水深によって異なる。

1.3.4 着床式洋上風力発電

着床式洋上風力発電は、風車の基礎を海底に直接固定して発電する方式である。着床式洋上風力発電設備の支持物の基本的な構造形式は、モノパイル、重力式、ジャケット式の大きく3つに区分される。それぞれの特徴を以下に記す。この説明は、石原 [7] を参考にした。

モノパイル式は、風車のタワーを海底に延長した形状になっており、この3種類の中で最も構造が単純である。

重力式は、ケーソンと呼ばれる大型の円筒型構造物を海底に固定する方式のため、海底地盤が比較的良好的な場所での設置に適している。

ジャケット式は、モノパイル式に比べて剛な構造であるため、地盤からの影響を受けにくく地盤が軟弱な場所での設置にも適している。

また、これらの方式を発展させたトリパイル式やトリポッド式なども導入されている。

一般的に、モノパイル式および重力式は水深 30m 以内、ジャケット式、トリパイル式およびトリポッド式は水深 50~60m 以内の海域に適用でき、それより水深が大きくなると設置コストが高くなり採算性が悪化することが知られている [7]。洋上風力発電が先駆けて導入された英国の北海沿岸地域は遠浅の地形が広がっているため、着床式を中心に普及が進んでいる。

1.3.5 浮体式洋上風力発電

浮体式洋上風力発電は、風車の基礎構造物を水面に浮遊させ、係留索によって風車の位置保持を図る発電方式である。着床式では技術・コスト面で限界のある水深 50m 以深の海域でも設置できることから、海底地形が比較的急峻である日本沿岸にも大規模な導入が見込まれる。浮体式洋上風力発電設備の構造形式には、バージ（ポンツーン）型、セミサブ型、スパー型、TLP(Tension Leg Platform) 型といった種類がある。これらは浮体の形状や係留方式によって区別される。各種類の特徴や適用海域について次表にて示す。

浮体式洋上風力発電は、着床式洋上風力発電と比較して設置海域が海岸から遠くなることから、設置やメンテナンスにおいてコストが大きくなるといった課題がある。また、浮体が波や海流などの自然外力を受けて動揺することから、それに繋がれている係留索の形状の変動により、係留索への負荷もかかるといった課題がある。

Table1.1 Characteristics of each floating body type [8]

浮体形式	特徴	浮体性能	係留性能	適用海域
バージ（ポンツーン）型	底面が平らな箱舟（バージ、ポンツーン）に風車を設置した形式。	水線面二次モーメントが大きい ため、応答が大きい。	カテナリー係留によるため、相対的に係留力は小さい。	静穏な海域に設置するのに適する。
セミサブ型	浮体を所定の喫水まで沈めて半潜水状態とした形式。	全自由度の固有周期が波の主要周期に重ならないため、安定である。	カテナリー係留によるため、相対的に係留力は小さい。	沖合に設置するのに適する。
スパー型	円筒型の浮力体を垂直方向に延長した形式。	全自由度の固有周期が波の主要周期に重ならないため、安定である。	カテナリー係留によるため、相対的に係留力は小さい。	波浪条件の激しい沖合に設置するのに適する。
TLP 型	浮力体と海底を直線の索で結び、緊張力を利用する形式。	緊張係留により、ヒープ、ピッチ方向の動揺がほぼない。	緊張係留により係留・アンカーに大きな荷重が作用する。	実用段階ではないため、考慮されていない。

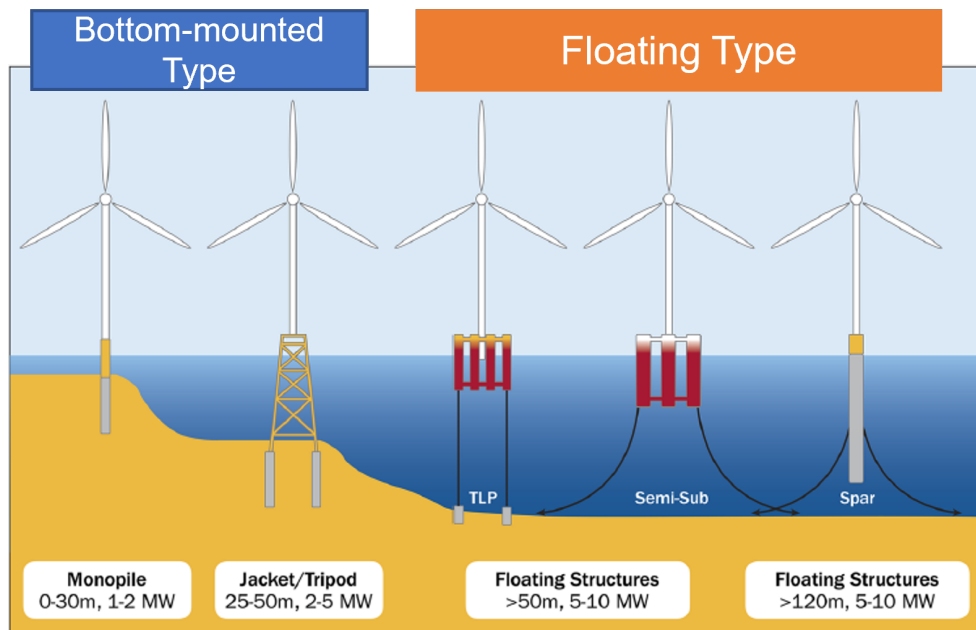


Fig1.7 Offshore wind foundations [9]

1.3.6 日本国内の洋上風力発電の動向

国内で洋上風力発電を導入するにあたり、海域利用に必要なルール整備を実施するため、海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（通称：再エネ海域利用法）が2019年4月に施行された。この法律は、海域の占有に関する統一的なルールが未決定だったこと、先行利用者との調整の枠組みが不明確だったことなどの洋上風力発電の導入の課題を解決するために成立された。再エネ海域利用法の概要を Fig1.8 に示す。この法律に基づき、経済産業大臣および国土交通大臣は促進区域の指定を行い、当該区域について公募に基づく事業者の選定を行う。選定された事業者は最大30年間の占有許可とFIT認定を取得し、洋上風力発電事業を実施できる [10][11]。

2021年9月現在、長崎県五島市沖、千葉県銚子市沖、秋田県八峰町・能代市沖など5つの区域が促進区域に指定されている。また東北地方の日本海側を中心に、国と地元自治体、漁業者間での合意形成が進捗していることから、有望な区域として整理されている。促進区域の中で最も早く指定された長崎県五島市沖では浮体式の設備により、それ以外の促進区域では着床式の設備によりそれぞれ発電が行われると想定される [12]。

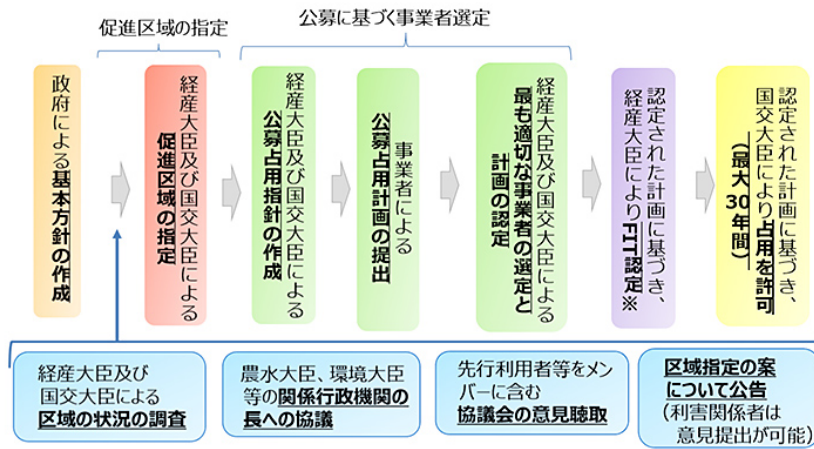


Fig1.8 Abstract of the Act on Promoting the Utilization of Sea Areas for the Development of Marine Renewable Energy Power Generation Facilities [10]

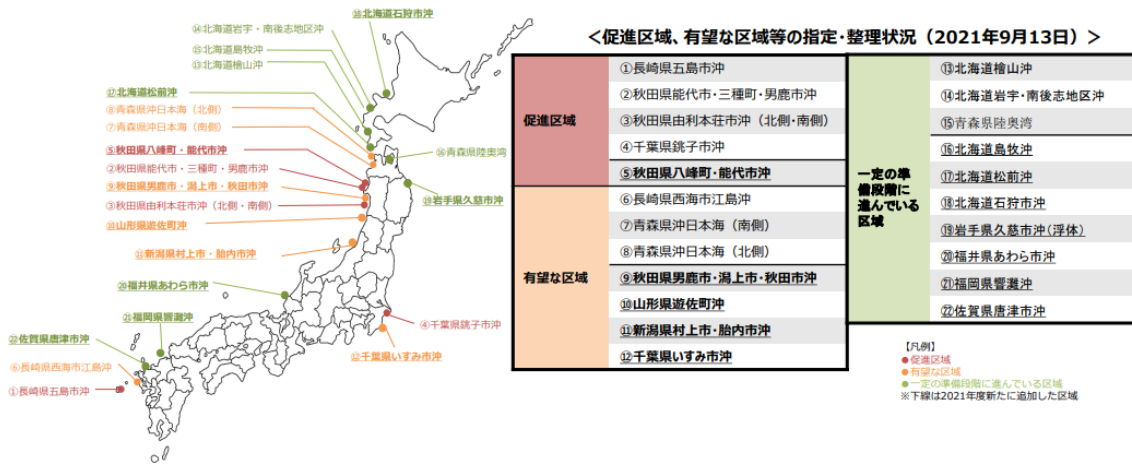


Fig1.9 Promotion area of offshore wind power generation [12]

1.4 Vortex-Induced Vibration (VIV) と Vortex-Induced Motion (VIM)

流れの中におかれた浮体構造物の周りには、粘性的作用により、渦が物体から剥離されるという現象が起こる。この渦が構造物の上下から交互に剥離されることによって周囲に角運動量が発生し、構造物に揚力を発生させている。この渦放出による揚力や抗力によって構造物が流れと直交方向に動揺する現象を、Vortex-Induced Vibration(VIV) もしくは Vortex-Induced Motion(VIM) と呼ぶ。両者の違いは構造物のアスペクト比（細長比）によるもので、ライザー管などアスペクト比の大きい構造物に発生するのが VIV で、海洋構造物などアスペクト比の小さいものに発生するのが VIM と定義されている。渦放出の発生は、物体の長さ D 、流速 U 、流体の動粘性係数 ν で定義される無次元パラメータのレイノルズ数 Re によって決まる。レ

レイノルズ数は (1.1) 式で定義される。

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1.1)$$

この値が概ね 40~50 以上になると、周期的に交互に渦が放出され、Fig1.10 のようなカルマン渦と呼ばれる渦が形成される。渦放出周波数 f_v は、物体の長さ D と流速 U により、ストローハル数 St として無次元化される。

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (1.2)$$

ストローハル数は一般的にレイノルズ数の関数として実験的に求められ、その値は $Re = 500$ 以上から臨界レイノルズ数 3×10^5 までの範囲で約 0.2 と一定値になることが知られている。渦放出周波数が系の固有周波数に近い値になると、一定の周波数で浮体が大きく動揺する。この現象をロックインという。VIV の場合は構造物自身が、VIM の場合は係留索が固有周波数を決定づけている。また、波浪中でも VIM 現象が発生することが実験的に確認されている [14][15]。このことについては、次章の先行研究の部分で述べる。



Fig1.10 Karman's vortex [13]

第 2 章

研究目的

2.1 先行研究

浮体の VIM 現象や係留索の疲労評価に関するさまざまな研究が行われてきた。本節ではそれらの研究を紹介する。

Saito et al.[14] は、モノカラム型円筒浮体の模型実験において、規則波中および不規則波中における VIM の振幅特性を明らかにした。Gonçalves et al.[15] は、セミサブ型浮体の模型実験において、振動波の最大速度 U_M と周波数 f_{RW} 、物体の長さ D によって決まるパラメータによって、波浪中の VIM 現象の発生の有無が分かれることを確認した。このパラメータは KC 数 (Keulegan-Carpenter Number) として知られており、(2.1) 式で定義される。また、振動波の速度と流れの速度 U との関係式 α を定義している (σ_U は振動波の速度時系列データの RMS(Root Mean Square) 値)(2.2)。これと付加質量係数 C_a 、抗力係数 C_D との関係式 (2.3) の値が KC 数を上回れば波浪による慣性力が支配的となり、VIM は発生しなくなる。一方で、この値が KC 数を下回れば粘性力が支配的となり、外部波浪を与えても VIM 現象は起こり流れと直交方向への動揺が持続する。このように、波浪と VIM は条件によって非線形に干渉するという知見が得られている。

$$KC = \frac{U_M}{f_{RW} D} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_U}{\sigma_U + U} \quad (2.2)$$

$$\frac{1 + C_a}{C_D} (\pi\alpha)^2 \quad (2.3)$$

VIM を考慮した係留索の疲労評価に関する研究は、藤原ら [16][17] によって行われた。[16] では、スパー型浮体構造物において、VIM の振幅変動を加味した係留ラインの疲労評価法を示した。[17] では、セミサブ型浮体の代表浮体について、深海域を想定した係留索の疲労寿命を推定した。また、係留索の張力変動に着目した研究は、中嶋ら [18]、菊池 [19]、関谷 [20]、恩田 [21] によって行われた。中嶋ら [18] は、係留ラインの 3 次元動的解析法であるランプドマス法を示し、水槽で加振実験を行い係留索上端の張力変動が計算と実験で概ね一致することを確認した。菊池 [19] は、浮体の動揺プログラムと係留プログラムを連成させて係留索上端の張力変動を求めた。関谷 [20] は、係留索全体において動的影響による張力変動の特性を明らかにした。恩田 [21] は、ブイとシンカーを用いた係留索の加振実験により動的影響の及ぼす振動数の範囲を示した。

波浪中の VIM 応答に関する研究の課題としては、特定の浮体や波の条件においてしか浮体の応答特性が解

明されていないこと、実海域における VIM の発生要因がはっきりと分かっていないことが挙げられる。また、VIM に波浪中の浮体運動影響が加わった場合の係留索の疲労評価も限られたケースにしかされていないこと、VIM の影響を考慮した場合の係留索の張力変動の特性も明らかになっていないことも課題である。

2.2 研究目的

本研究では、波浪による影響と VIM による影響が共存した場合に起こりうる浮体の動揺を波浪条件を網羅する形で、係留索全体の動的特性を調査した。本来浮体は 3 つの並進および 3 つの回転方向に対する 6 自由度の座標系で動揺するが、本研究では並進 3 方向 (surge、sway、heave) の 3 自由度の動揺ケースに限定した。

研究の流れとしては、係留索の動的解析プログラムである MoorDyn[22] を使用して、波浪影響による動揺と VIM 影響による動揺の双方を加味した場合の張力変動を求めた。そして、それぞれの動揺の特性における係留索の張力変動や位置変動を明らかにし、係留索の疲労寿命についても計算を行った。また、動的解析プログラムの妥当性を水槽での係留索の加振実験により検証した。

波浪中において VIM 影響による浮体の動揺が発生するリスクは現在のところ明らかになっていないが、あくまでも動揺が起きた場合におけるハザードを想定して、係留索の動的特性を解明することを目的とした。

第3章

係留

3.1 係留方式

この節では、鈴木 [23] を参考にした。

浮体の係留方式は、Fig3.1 に示すように大きく緩係留、緊張係留、Dynamic Positioning の3つに分けられる。

緩係留は、変位した浮体を元の位置に戻す位置保持のばね定数が小さく、漂流力などによる長周期の緩やかな変位運動を抑える係留で、波による周期の短い浮体運動自体を抑えることを目的とした係留方式ではない。この方式には、チェーンを用いたカタナリー係留、中間シンカーや中間ブイを用いた係留など、浮力・重力を利用した係留と、合成繊維ロープの弾性ポテンシャルエネルギーを用いたトート係留が含まれる。緩係留では、浮体-係留系の固有周期が波周期に比べて十分長く設定される。

緊張係留は、鋼管やワイヤーなど剛性の高い係留索によって、浮体を海底の基礎につなぐ係留方式である。非常に剛な係留で、浮体の上下運動や横揺れを拘束して動揺を大幅に減らすことができる。係留索に初期張力を加えることによって、浮体運動によって係留索に圧縮力が発生し座屈が発生すること、さらに係留が緩んだ後に再度張力が作用する際に発生する衝撃力を防いでいる。

Dynamic Positioning は、スラスタによる位置制御で、エネルギー消費を伴う係留方式である。

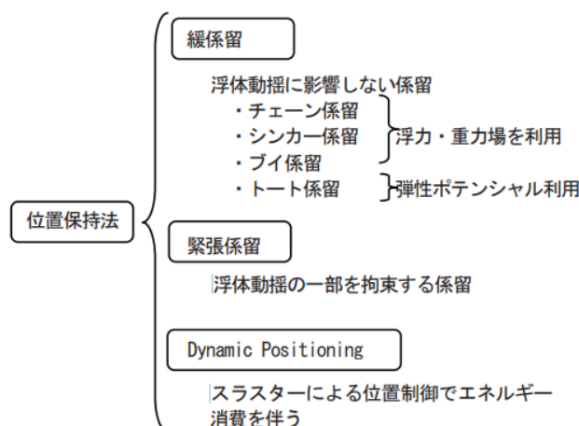


Fig3.1 Types of mooring [23]

3.2 カテナリー係留の特性

本研究ではカテナリー係留の係留索を扱う。カテナリー係留は緩係留であり、緊張係留と比較すると係留・アンカーにかかる荷重は小さくなる。しかし、浮体の設置海域の水深が浅くなるほど係留索の張力が大きく変動しやすいといった特性がある。これは水平方向への変位の吸収特性が低下するためである。このことは単純な幾何学から、水平方向の変位の上限が水深となることが分かる。以下の Fig3.2 のように、水平方向の移動変位の限度を x 、水深を D 、索の全長を L_{all} とすると、アンカーから係留点までの水平距離の取り得る値の範囲をもとに式が立てられる。

$$\begin{aligned} L_{all} \cos \theta &= X_0 + x \\ L_{all} &= X_0 + D \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned} x - D &= L_{all}(\cos \theta - 1) < 0 \\ x &< D \end{aligned}$$

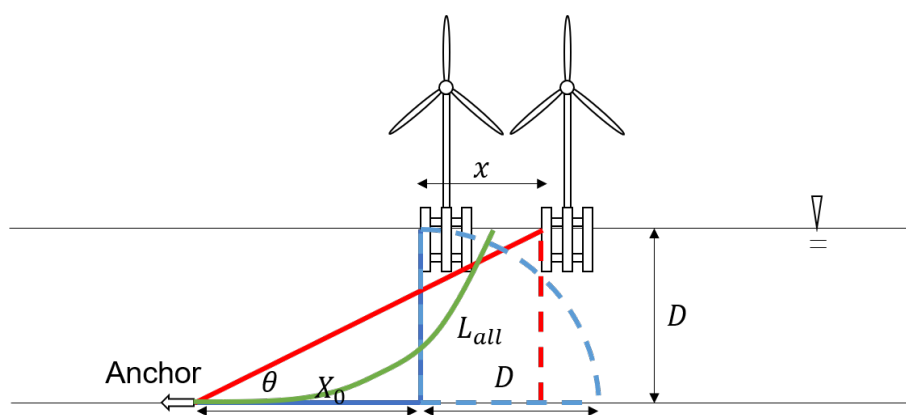


Fig3.2 Displacement of the catenary mooring line

3.3 曲線座標系を用いたカテナリー解析

この節では、菊池 [19] の 3.2, 3.3 節、関谷 [20] の 3.2, 3.3 節を参考にした。以下の本文中の (3.2)~(3.21) 式は菊池 [19] の (3-1)~(3-16) 式に、(3.22)~(3.24) 式は菊池 [19] の (3-17)~(3-19) 式に、(3.25)~(3.26) 式は関谷 [20] の (3-21)~(3-22) 式にそれぞれ基づいている。

Fig3.3 のような微小要素について、上下方向、左右方向の釣り合いを考える。

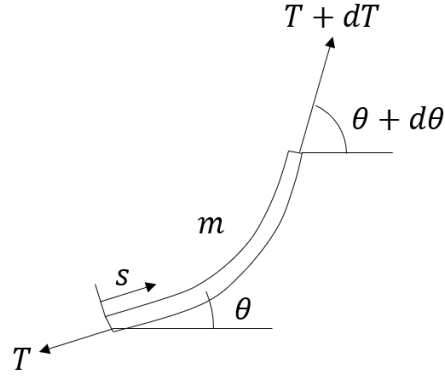


Fig3.3 Micro element of a mooring line

以下、 m は水中での単位長さ当たりの重量、 T は張力、 s はタッチダウン点からの係留索長さ、 θ は傾斜である。

上下方向の釣り合いは

$$\begin{aligned}
 mds &= (T + dT) \sin(\theta + d\theta) - T \sin \theta \\
 &= (T + dT)(\sin \theta \cos d\theta + \cos \theta \sin d\theta) - T \sin \theta \\
 &= dT \sin \theta + T d\theta \cos \theta
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

左右方向の釣り合いは

$$\begin{aligned}
 0 &= (T + dT) \cos(\theta + d\theta) - T \cos \theta \\
 &= (T + dT)(\cos \theta \cos d\theta - \sin \theta \sin d\theta) - T \cos \theta \\
 &= dT \cos \theta - T d\theta \sin \theta \\
 \Rightarrow dT &= T \tan \theta d\theta
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

(3.2) 式より

$$m \sin \theta ds = dT \sin^2 \theta + T d\theta \sin \theta \cos \theta \tag{3.4}$$

(3.3) 式より

$$0 = dT \cos^2 \theta - T d\theta \sin \theta \cos \theta \tag{3.5}$$

(3.4)、(3.5) 式より

$$dT = m \sin \theta ds \Rightarrow \frac{dT}{T} = m \sin \theta \tag{3.6}$$

(3.3)、(3.6) 式より

$$T d\theta = m \cos \theta ds \Rightarrow T \frac{d\theta}{ds} = m \cos \theta \tag{3.7}$$

(3.6)、(3.7) 式から、積分定数を c 、 C_1 として

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{T} \frac{dT}{d\theta} &= \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \Rightarrow \log T = -\log \cos \theta + c \\
 \Rightarrow T &= C_1 \frac{1}{\cos \theta}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

(3.8) 式を (3.7) 式に代入する。積分定数 C_2 を用いて

$$\frac{1}{\cos^2 \theta} \frac{d\theta}{ds} = \frac{m}{C_1} \Rightarrow \tan \theta = \frac{m}{C_1} s + C_2 \quad (3.9)$$

と表される。この式は索の長さ s の点での傾斜を表している。

次に、索の長さ s に対応する水平位置を求める。左右方向に X 軸を取る。

$$\begin{aligned} \frac{dX}{ds} &= \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{C_1} s + C_2\right)^2}} \\ \Rightarrow X &= \int_0^s \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{C_1} s + C_2\right)^2}} ds \\ &= \frac{C_1}{m} \int_{C_2}^{\frac{m}{C_1} s + C_2} \frac{1}{\sqrt{1 + x^2}} dx \\ &= \frac{C_1}{m} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{m}{C_1} s + C_2 \right) - \sinh^{-1} C_2 \right\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

ここで $s = 0$ のとき $X = 0$ としている。また、次の関係式を用いた。

$$y = \sinh^{-1} x \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{1}{\cosh y} = \frac{1}{\sqrt{1 + x^2}} \quad (3.11)$$

さらに、長さ s に対応する鉛直位置を求める。上下方向に Z 軸を取る。

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{ds} &= \sin \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \theta}}} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \\ &= \frac{\frac{m}{C_1} s + C_2}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{C_1} s + C_2\right)^2}} \\ \Rightarrow Z &= \int_0^s \frac{\frac{m}{C_1} s + C_2}{\sqrt{1 + \left(\frac{m}{C_1} s + C_2\right)^2}} ds \\ &= \frac{C_1}{m} \int_{C_2}^{\frac{m}{C_1} s + C_2} \frac{z}{\sqrt{1 + z^2}} dz \\ &= \frac{C_1}{m} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{m}{C_1} s + C_2\right)^2} - \sqrt{1 + C_2^2} \right\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

ここで $s = 0$ のとき $Z = 0$ としている。

(3.10) 式を解くと

$$\frac{m}{C_1} s + C_2 = \sinh \left(\frac{m}{C_1} X + \sinh^{-1} C_2 \right) \quad (3.13)$$

この式を (3.12) に代入して

$$\begin{aligned} Z &= \frac{C_1}{m} \left\{ \sqrt{1 + \left(\sinh \left(\frac{m}{C_1} X + \sinh^{-1} C_2 \right) \right)^2} - \sqrt{1 + C_2^2} \right\} \\ &= \frac{C_1}{m} \left\{ \cosh \left(\frac{m}{C_1} X + \sinh^{-1} C_2 \right) - \sqrt{1 + C_2^2} \right\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$C_3 = \frac{C_1}{m} \sinh^{-1} C_2$ とおくと、

$$\begin{aligned} Z &= \frac{C_1}{m} \left\{ \cosh \frac{m}{C_1} (X + C_3) - \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{mC_3}{C_1}} \right\} \\ &= \frac{C_1}{m} \left\{ \cosh \frac{m}{C_1} (X + C_3) - \cosh \frac{mC_3}{C_1} \right\} \end{aligned} \quad (3.15)$$

係留ライン長さを、水平座標 X を用いて次式のように表す。(3.15) 式を用いて、

$$\begin{aligned} L &= \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{dZ}{dX} \right)^2} dX \\ &= \int_0^X \sqrt{1 + \left(\sinh \frac{m}{C_1} (X + C_3) \right)^2} dX \\ &= \int_0^X \cosh \frac{m}{C_1} (X + C_3) dX \\ &= \frac{C_1}{m} \left\{ \sinh \frac{m}{C_1} (X + C_3) - \sinh \frac{mC_3}{C_1} \right\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

水平座標 X における張力 T を求める。(3.8) 式と (3.10) 式を用いて

$$\begin{aligned} T &= C_1 \sqrt{1 + \left(\frac{m}{C_1} s + C_2 \right)^2} \\ &= C_1 \sqrt{1 + \left(\sinh \left(\frac{m}{C_1} X + \sinh^{-1} C_2 \right) \right)^2} \\ &= C_1 \cosh \left(\frac{m}{C_1} X + \sinh^{-1} C_2 \right) \\ &= C_1 \cosh \frac{m}{C_1} (X + C_3) \end{aligned} \quad (3.17)$$

張力の水平方向成分を T_0 とすると、(3.8) 式から

$$T_0 = T \cos \theta = C_1 \quad (3.18)$$

となる。

係留ラインの下端が海底に固定されていて、下端での傾斜が 0 とならない場合は次の関係が満たされる。

$$L = \frac{T_0}{m} \left\{ \sinh \frac{m}{T_0} (H + C_3) - \sinh \frac{m}{T_0} C_3 \right\} \quad (3.19)$$

$$D = \frac{T_0}{m} \left\{ \cosh \frac{m}{T_0} (H + C_3) - \cosh \frac{m}{T_0} C_3 \right\} \quad (3.20)$$

$$T_{top} = T_0 \cosh \frac{m}{T_0} (H + C_3) \quad (3.21)$$

ここで、 L はラインの持ち上がっている部分の長さ、 H はそれに対応する水平長さ、 D は水深、 T_{top} は上端での張力としている。

係留ラインの下端からタッチダウン点までの傾斜が 0 で一定となる場合は、(3.9) 式において $C_2 = 0$ となることから、次の関係が満たされる。

$$L = \frac{T_0}{m} \sinh \frac{m}{T_0} H \quad (3.22)$$

$$D = \frac{T_0}{m} \left(\cosh \frac{m}{T_0} H - 1 \right) \quad (3.23)$$

$$T_{top} = T_0 \cosh \frac{m}{T_0} H \quad (3.24)$$

また、(3.22) と (3.23) 式、(3.23) 式と (3.24) 式からそれぞれ水平長さ H のパラメータを消去でき、以下の関係式が得られる。

$$T_0 = \frac{m(L^2 - D^2)}{2D} \quad (3.25)$$

$$T_{top} = T_0 + mD \quad (3.26)$$

本研究では海底の傾斜は考慮していないため、この式に基づいて係留の形状を決定した。カテナリー解析は動的影響を考慮しない準静的解法であり、係留索が静止している時の張力を求めるのに適している。

第 4 章

係留解析プログラム

本研究では、ランプドマス法を用いたプログラム MoorDyn[22] を使用して係留索の動的解析を行った。

4.1 ランプドマス法

ランプドマス法は、係留索をいくつかの質量節点とばねが連結されたモデルとしてみなし、各質量節点において運動方程式と拘束条件を連立させて解く数値的手法 [18] である。ランプドマス法のモデル図を Fig4.1 に示す。

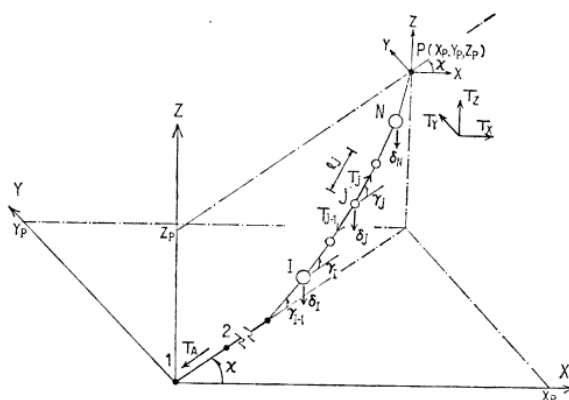


Fig4.1 Model of lumped mass method [18]

4.2 動的解析プログラム MoorDyn

本研究で使用した係留索の動的解析プログラム MoorDyn[22] は、係留索にかかる力をランプドマス法によって導出するオープンソースプログラムである。MoorDyn のソースコードは Hall[24] によって C++ で書かれている。このモデルは、索の軸方向の弾性力と減衰力、索に働く流体力、海底との接触による力を考慮している。これらの力を反映させた運動方程式が C++ ソースコード内に記述されており、MATLAB などで作成した外部プログラムと組み合わせることで動的解析ができるようになる。MoorDyn のモデル図を Fig4.2 に示す。

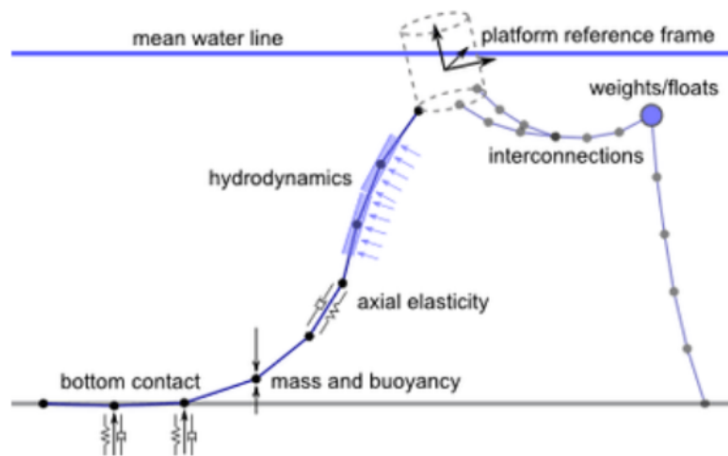


Fig4.2 Model of MoorDyn [22]

4.2.1 設定パラメータ

係留索の初期形状や物性値は、テキスト形式の入力ファイルにおいて値を指定できる。設定例を Fig4.3 に示す。

```

MoorDyn input file for OC3-Hywind mooring system
-----
LINE DICTIONARY
LineType  Diam  MassDenInAir  EA  BA/-zeta  Can  Cat  Cdn  Cdt
(-)      (m)      (kg/m)        (N)  (Pa-s/-)  (-)  (-)  (-)  (-)
main     0.2323  344.76        140.000E7  1.0E8    1.0  0.0  1.6  0.05
-----
NODE PROPERTIES
Node      Type  X  Y  Z  M  V  FX  FY  FZ  CdA  CA
(-)      (-)  (m) (m) (m) (kg) (m^3) (kN) (kN) (kN) (m^2) (-)
1  Fix  626.224  0.0  -50  0  0  0  0  0  0  0
2  Fix  0.0  626.224  -50  0  0  0  0  0  0  0
3  Fix  -626.224  0.0  -50  0  0  0  0  0  0  0
4  Fix  0.0  -626.224  -50  0  0  0  0  0  0  0
5  Vessel  10.00  0.000  0.0  0  0  0  0  0  0  0
6  Vessel  0.000  10.000  0.0  0  0  0  0  0  0  0
7  Vessel  -10.00  0.000  0.0  0  0  0  0  0  0  0
8  Vessel  0.000  -10.000  0.0  0  0  0  0  0  0  0
-----
LINE PROPERTIES
Line      LineType  UnstrLen  NumSegs  NodeAnch  NodeFair  Flags/Outputs
(-)      (-)      (m)      (-)      (-)      (-)      (-)
1  main  632.444  70  1  5  p
2  main  632.444  70  2  6  p
3  main  632.444  70  3  7  p
4  main  632.444  70  4  8  p
-----
SOLVER OPTIONS
1.0e-4 dtM - time step to use in mooring integration (s)
0 WaveKin - wave kinematics flag (0=neglect, the only option currently supported)
3.0e6 kBot - bottom stiffness (Pa/m)
3.0e5 cBot - bottom damping (Pa-s/m)
50 WtrDpth - water depth (m)
1.0 dtIC - time interval for an alyzing convergence during IC gen (s)
120 TmaxIC - maximum simulation time to allow for IC generation without convergence (s)
5.0 CdScaleIC - factor by which to scale drag coefficients during dynamic relaxation IC gen (-)
0.001 threshIC - threshold for IC convergence (-)
-----
OUTPUTS
L1N0T L1N1T L1N2T L1N3T L1N4T L1N5T L1N6T L1N7T L1N8T L1N9T L1N10T
L1N11T L1N12T L1N13T L1N14T L1N15T L1N16T L1N17T L1N18T L1N19T L1N20T
L1N21T L1N22T L1N23T L1N24T L1N25T L1N26T L1N27T L1N28T L1N29T L1N30T
L1N31T L1N32T L1N33T L1N34T L1N35T L1N36T L1N37T L1N38T L1N39T L1N40T
L1N41T L1N42T L1N43T L1N44T L1N45T L1N46T L1N47T L1N48T L1N49T L1N50T
L1N51T L1N52T L1N53T L1N54T L1N55T L1N56T L1N57T L1N58T L1N59T L1N60T
L1N61T L1N62T L1N63T L1N64T L1N65T L1N66T L1N67T L1N68T L1N69T L1N70T
-----
need this line -----

```

Fig4.3 Input file of MoorDyn

以下、プログラムの入力条件として与えることのできるパラメータを列挙する。なお、この説明は MoorDyn User's Guide[25] を参考にした。

○ LINE DICTIONARY：係留索の物性値の設定

- ・ LineType[-]：特に指定の無い限り、"main" と入力する。
- ・ Diam[m]：索の体積相当直径：単位長さ当たりの排水量が想定 of 索と同等である円柱の直径
- ・ MassDenInAir[kg/m]：空気中での索の単位長さ当たりの質量
- ・ EA[N]：索の剛性：弾性率と断面積の積
- ・ BA/-zeta[N-s]：索の内部減衰
- ・ Can[-]：索の横断方向の付加質量係数（索の排水量に依存）
- ・ Cat[-]：索の接線方向の付加質量係数（索の排水量に依存）
- ・ Cdn[-]：索の横断方向の抗力係数（正面領域 $d*1$ に依存）
- ・ Cdt[-]：索の接線方向の抗力係数（表面領域 $\pi*d*1$ に依存）

○ NODE PROPERTIES：係留索端部の接続点の設定

- ・ Node[-]：索の接続点の識別番号
- ・ Type[-]："Fixed" は固定点で、アンカー点として指定される。"Vessel" は外部プログラムの支配下によって動く点で、係留点として指定される。
- ・ X,Y,Z[m]：係留索端部の初期位置
- ・ M[kg]：係留索の接続部にクランプウェイトを使う場合の接続点の質量
- ・ V[m³]：係留索の接続部にブイを使う場合の接続点の排水量
- ・ FX,FY,FZ[kN]：接続点に働く定常的な外力
- ・ CdA[m²]：接続点での抗力を計算するための、抗力係数と投影面積の積
- ・ Ca[-]：接続点での付加質量を計算するために V と共に使用される、付加質量係数

○ LINE PROPERTIES：係留ラインの設定

- ・ Line[-]：索の識別番号
- ・ LineType[-]：特に指定の無い限り、"main" と入力する。
- ・ UnstrLen[m]：索の全長
- ・ NumSegs[-]：索の分割数
- ・ NodeAnch[-]：それぞれの索において、アンカー点として指定される接続点の識別番号
- ・ NodeFair[-]：それぞれの索において、係留点として指定される接続点の識別番号

Flags/Outputs は出力のパラメータを指定するものであり、以下の文字を使用して各質量節点やセグメントの位置、張力などを出力できる。特に出力の必要が無い場合は"- " と入力すればよい。

- ・ p：各質量節点の位置
- ・ v：各質量節点の速度
- ・ U：各質量節点における波の速度
- ・ D：各質量節点における流体抗力
- ・ t：各セグメントの張力

- ・ c : 各セグメントでの内部減衰力
- ・ s : 各セグメントのひずみ
- ・ d : 各セグメントのひずみ率

○ SOLVER OPTIONS

このセクションでは、海底の特性や、初期条件の生成設定、タイムステップサイズなど、係留索モデル全体に関わるパラメータを任意に設定できる。これらの行はいずれも省略できるが、その場合はプログラムコードで定められたデフォルト値が使用される。

- ・ dtM[s] : 係留モデルの運動方程式（内部の微分方程式 2 次ルンゲクッタ法）の時間刻み幅（デフォルト値 : 0.001）
- ・ WaveKin : 波浪運動のパラメータ（波力を考慮しない場合は 0 に設定）
- ・ kBot[Pa/m] : 海底のばね-ダンパーモデルの剛性係数（デフォルト値 : 3.0e+6）
- ・ cBot[Pa · s/m] : 海底のばね-ダンパーモデルの減衰係数（デフォルト値 : 3.0e+5）
- ・ FrictionCoefficient[-] : 海底摩擦係数（デフォルト値 : 0.0）
- ・ FricDamp[-] : 海底摩擦減衰係数（デフォルト値 : 200.0）
- ・ WtrDpth[m] : 水深（デフォルト値 : 0）
- ・ dtIC[s] : 初期条件生成中に動的緩和の収束を分析するための時間刻み幅（デフォルト値 : 1.0）
- ・ TmaxIC[s] : 収束せずに初期条件を生成できる最大シミュレーション時間（デフォルト値 : 120）
- ・ CdScaleIC[-] : 初期条件生成の収束を加速するために抗力係数をスケーリングする係数（デフォルト値 : 5.0）
- ・ threshIC[-] : 初期条件生成の収束閾値（デフォルト値 : 0.001）

○ OUTPUTS : 出力条件の設定

このセクションでは、係留索の任意の接続点や質量節点について出力条件を指定できる。出力できるパラメータは以下の 5 種類ある。

- ・ pX, pY, pZ[m] : x/y/z 座標
- ・ vX, vY, vZ[m/s] : 速度
- ・ aX, aY, aZ[m/s²] : 加速度
- ・ T or Ten[N] : 張力
- ・ fX, fY, fZ[N] : 各方向の合力

係留索の番号は”L”、質量節点の番号は”N”で指定できる。例えば、このセクションに”L1N20T”と入力すると、LINE PROPERTIES で 1 番と指定した係留索の中の、アンカー点から数えて 21 番目の質量節点における張力が出力される。

4.2.2 係留索の運動方程式

係留索の各質点での運動方程式を Hall et al.[24][26] を参考に紹介する。

節点番号 i の質点における運動方程式は以下のように表される。

$$[\mathbf{m}_i + \mathbf{a}_i] \ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{T}_{i+(1/2)} - \mathbf{T}_{i-(1/2)} + \mathbf{C}_{i+(1/2)} - \mathbf{C}_{i-(1/2)} + \mathbf{W}_i + \mathbf{B}_i + \mathbf{D}_{pi} + \mathbf{D}_{qi} \quad (4.1)$$

\mathbf{m}_i : 質量行列

\mathbf{a}_i : 付加質量行列

$\ddot{\mathbf{r}}_i$: 加速度ベクトル (質点 i の位置ベクトルは $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ と定義される)

$\mathbf{T}_{i+(1/2)}$: 質点 i と $i+1$ の間のセグメントの内部剛性 (張力)

$\mathbf{C}_{i+(1/2)}$: 質点 i と $i+1$ の間のセグメントの内部減衰力

\mathbf{W}_i : 水中での重力

\mathbf{B}_i : 海底から鉛直上向きに働く接触力

\mathbf{D}_{pi} : 索の横断方向の抗力

\mathbf{D}_{qi} : 索の接線方向の抗力

これらの力を模式化したものを Fig4.4 に示す。

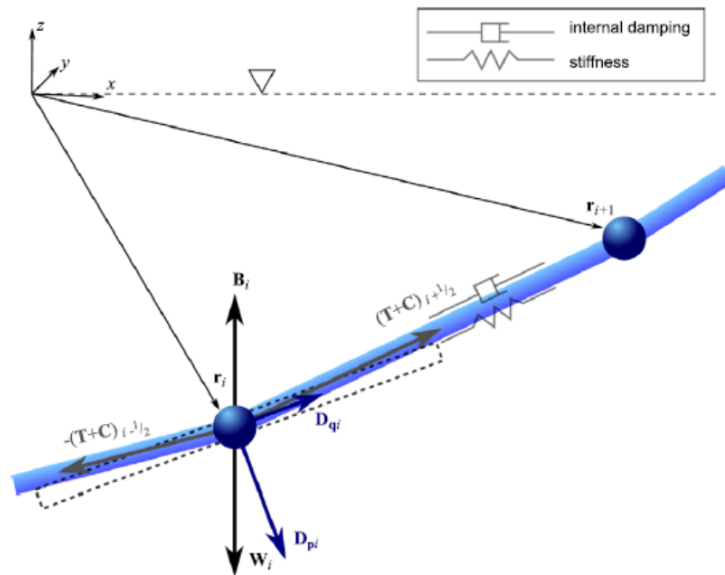


Fig4.4 Internal and external cable forces [26]

ここで、以下のように定数を定義する。なおこれらの定数は、プログラムの入力ファイルにて指定できる。

$l[m]$: 各セグメントの初期長さ

$d[m]$: 単位長さ当たりの排水量が想定 of 索と同等である円柱の直径

$\rho[kg/m^3]$: 空気密度
 $\rho_w[kg/m^3]$: 海水密度
 $E[N/m^2]$: ヤング係数
 C_{int} : 索の内部減衰係数
 C_{dn} : 索の横断方向の抗力係数
 C_{dt} : 索の接線方向の抗力係数
 C_{an} : 索の横断方向の付加質量係数
 C_{at} : 索の接線方向の付加質量係数
 k_b : 海底のばね-ダンパーモデルの剛性係数
 c_b : 海底のばね-ダンパーモデルの減衰係数
 $g[m/s^2]$: 重力加速度

(4.1) 式の左辺の質量行列は以下のように表される。なお \mathbf{I} は、3次元単位行列である。

$$\mathbf{m}_i = \frac{\pi}{4} d^2 l \rho \mathbf{I} \quad (4.2)$$

(4.1) 式の左辺の付加質量行列は索の横断方向と接線方向の付加質量行列を足し合わせたもので、以下のよう表される。

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_{\mathbf{p}_i} + \mathbf{a}_{\mathbf{q}_i} = \rho_w \frac{\pi}{4} d^2 l [C_{an}(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{q}}_i \hat{\mathbf{q}}_i^T) + C_{at}(\hat{\mathbf{q}}_i \hat{\mathbf{q}}_i^T)] \quad (4.3)$$

ここで $\hat{\mathbf{q}}_i$ は以下のように定義される。 $\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_{i-1}$ は質点 i の前後の質点を通るような向きのベクトルである。 $\hat{\mathbf{q}}_i$ はこれをノルムで除算することにより、索の接線方向の単位ベクトルとして近似できる。

$$\hat{\mathbf{q}}_i = \frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_{i-1}}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_{i-1}\|} \quad (4.4)$$

索の横断方向の付加質量力と接線方向の付加質量力はそれぞれ (4.5) 式、(4.6) 式で表される。

$$\mathbf{a}_{\mathbf{p}_i} \ddot{\mathbf{r}}_i = \rho_w C_{an} \frac{\pi}{4} d^2 l [(\ddot{\mathbf{r}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \hat{\mathbf{q}}_i - \ddot{\mathbf{r}}_i] \quad (4.5)$$

$$\mathbf{a}_{\mathbf{q}_i} \ddot{\mathbf{r}}_i = \rho_w C_{at} \frac{\pi}{4} d^2 l (-\ddot{\mathbf{r}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \hat{\mathbf{q}}_i \quad (4.6)$$

(4.1) 式の右辺の内部剛性 (張力) は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{i+(1/2)} &= E \frac{\pi}{4} d^2 \left(\frac{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|}{l} - 1 \right) \left(\frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} \right) \\ &= E \frac{\pi}{4} d^2 \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} \right) (\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i) \end{aligned} \quad (4.7)$$

この式は質点 i に働く張力をベクトル形式で表したもので、ベクトルの向きは質点 i から質点 $i+1$ に向かう方向になっている。また、これと逆向きで同じ大きさの力が質点 $i+1$ に作用している。質点 i と質点 $i+1$ の間のセグメント $l_{i+(1/2)}$ の張力の大きさ (スカラー量) は

$$T_{i+(1/2)} = E \frac{\pi}{4} d^2 \epsilon_{i+(1/2)} = E \frac{\pi}{4} d^2 \left(\frac{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|}{l} - 1 \right) \quad (4.8)$$

ここで、 $\epsilon_{i+(1/2)}$ はセグメントのひずみを表している。

(4.1) 式の右辺の内部減衰力は以下の式で表される。

$$\mathbf{C}_{i+(1/2)} = C_{int} \frac{\pi}{4} d^2 \dot{\epsilon}_{i+(1/2)} \left(\frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} \right) \quad (4.9)$$

$\dot{\epsilon}_{i+(1/2)}$ はセグメントのひずみ率を表しており、以下の式から計算される。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{i+(1/2)} &= \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|}{l} \right) \\ &= \frac{1}{2l} \frac{1}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} \frac{\partial}{\partial t} [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2] \\ &= \frac{1}{l} \frac{1}{\|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i\|} [(x_{i+1} - x_i)(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + (y_{i+1} - y_i)(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) + (z_{i+1} - z_i)(\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i)] \end{aligned} \quad (4.10)$$

(4.1) 式の水中重力は以下の式で表される。

$$\mathbf{W}_i = \frac{1}{2} (W_{i+(1/2)} + W_{i-(1/2)}) \hat{\mathbf{e}}_z \quad (4.11)$$

$\hat{\mathbf{e}}_z$: 鉛直上向き方向の単位ベクトル

この式は質点 i に連結されている 2 つのセグメントに働く重力の平均値を取っている。 $W_{i+(1/2)}$ は以下の式から計算される。

$$W_{i+(1/2)} = \frac{\pi}{4} d^2 l (\rho_w - \rho) g \quad (4.12)$$

(4.1) 式の右辺の抗力はモリソン式を用いて計算されている。なお今回は波力を考慮していないため、以下の式に波粒子の速度は反映されていない。質点 i に働く横断方向の抗力は

$$\mathbf{D}_{pi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dn} dl \|(\dot{\mathbf{r}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \hat{\mathbf{q}}_i - \dot{\mathbf{r}}_i\| [(\dot{\mathbf{r}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \hat{\mathbf{q}}_i - \dot{\mathbf{r}}_i] \quad (4.13)$$

索の接線方向の抗力は

$$\mathbf{D}_{qi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dt} \pi dl \|(-\dot{\mathbf{r}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \hat{\mathbf{q}}_i\| (-\dot{\mathbf{r}}_i \cdot \hat{\mathbf{q}}_i) \hat{\mathbf{q}}_i \quad (4.14)$$

(4.1) 式の鉛直方向の接触力は以下の式で表される。

$$\mathbf{B}_i = dl[(z_{bot} - z_i)k_b - \dot{z}_i c_b] \hat{\mathbf{e}}_z \quad (4.15)$$

$z_{bot}[m]$: 設定水深の z 座標

本プログラムは、海底との鉛直方向の接触力を線形ばね-ダンパーとしてモデル化している。そのため、係留索が海底と接する部分は質点の z 座標が設定水深の z 座標よりも僅かに深くなる場合がある。この線形ばね-ダンパーモデルは質点が海底と接触する条件 ($z_i \leq z_{bot}$) にのみ適用される。

また、海底との水平方向の接触力として海底摩擦がある。海底摩擦係数は入力ファイルにて指定できる。しかしプログラムの仕様上、海底摩擦の式をコードに組み込むと不具合が起り、計算ができないようになっている。

4.2.3 係留索の運動方程式の解法

本プログラムは、係留索の運動方程式を2次ルンゲクッタ法 (RK2) で解いている。2次ルンゲクッタ法は、ある時刻 t_k と t_{k+1} の中間の時刻における値を用いて近似を行う常微分方程式の数値解法である。(4.1) の運動方程式を1次微分方程式に変換して簡略化すると、以下のように表現できる。

$$\frac{d\mathbf{r}(t)}{dt} = \mathbf{f}(t, \mathbf{r}) \quad (4.16)$$

2次ルンゲクッタ法は、時間刻み幅 h を用いた漸化式を解いている。以下にその式を記す。

$$t_{k+1} = t_k + h \quad (4.17)$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k + h\mathbf{f}_1 \quad (4.18)$$

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}\left(t_k + \frac{h}{2}, \mathbf{r}_k + \frac{1}{2}h\mathbf{f}(t_k, \mathbf{r}_k)\right) \quad (4.19)$$

時間刻み幅 h は入力ファイルの dtM のパラメータにて指定できる。今回は $dtM = 1.0 \times 10^{-4}[s]$ に設定して計算を行った。

第 5 章

水槽実験

5.1 実験目的

本研究の水槽実験では、以下の 2 点を目的とする。

- ・動的解析プログラムで得られた係留索の張力の妥当性の検証
- ・並進 3 方向動揺の影響における係留索の形状変化の再現性の検証

この 2 点を目的に、東京大学柏キャンパス生産技術研究所海洋工学水槽で実験を行った。既存の研究では、水平方向（係留点からアンカーの真上の水面上の点に伸びる方向）および鉛直方向の 2 方向に関して加振を行っていたが、今回はその 2 方向に垂直となるようなもう 1 つの水平方向への加振を加えて実験を行った。並進 3 方向への加振実験により、係留索の形状と張力の変化を検証した。

5.2 実験概要

実験期間と場所を以下に示す。

- ・実験期間：2021 年 10 月 18 日～2021 年 10 月 21 日
- ・実験施設：東京大学柏キャンパス生産技術研究所海洋工学水槽
長さ 50m×幅 10m×最大深さ 5.5m（最大水深 5m）

本水槽の底面は昇降床式となっており、水槽底から水面までの 5m の昇降幅で動かすことができる。今回は水深を 1.43m に設定して実験を行った。また、本水槽は造波装置、潮流発生装置、送風装置を備えているが、今回の実験では波、風及び潮流はいずれも発生させないため、使用しなかった。

5.3 実験装置

今回の実験で使用した装置を以下に示す。

- ・強制動揺装置（東京計測株式会社製）(Fig5.1, Fig5.2)
- ・Qualisys モーションキャプチャーカメラ（Qualisys AB 社製）(Fig5.3, Fig5.4)
- ・Qualisys カメラ同期ユニット（Qualisys AB 社製）(Fig5.5)
- ・レーザー距離センサ（オプテックス・エフエー株式会社製）(Fig5.6)
- ・データロガー（株式会社キーエンス製）(Fig5.7)
- ・FBG 張力計（ts1000v1、ts1000v2）、ケーブル（株式会社シミウス製）(Fig5.8, Fig5.9)

- ・FBG トリガー (株式会社シミウス製)(Fig5.10)
- ・チェーン模型 (株式会社水本機械製作所製、ステンレス材質、カチオン塗装でコーティング)(Fig5.11)
- ・アンカー (ベニヤ板の上に 25kg の錘、20kg の錘各 4 個を載せて固定)(Fig5.12)



Fig5.1 Forced vibration device

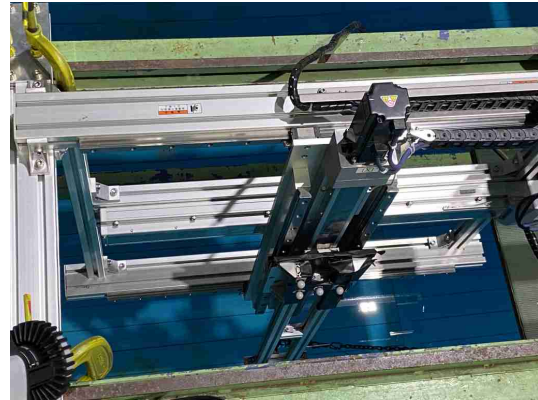


Fig5.2 Forced vibration motor



Fig5.3 Qualisys motion capture in air



Fig5.4 Qualisys motion capture in water

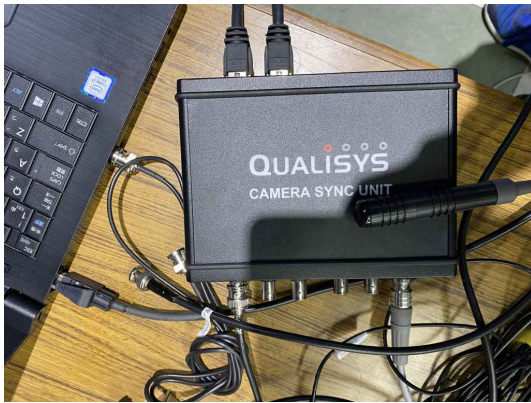


Fig5.5 Qualisys camera synchronization unit



Fig5.6 Laser sensor



Fig5.7 Data logger



Fig5.8 FBG tension sensor (ts1000v2)

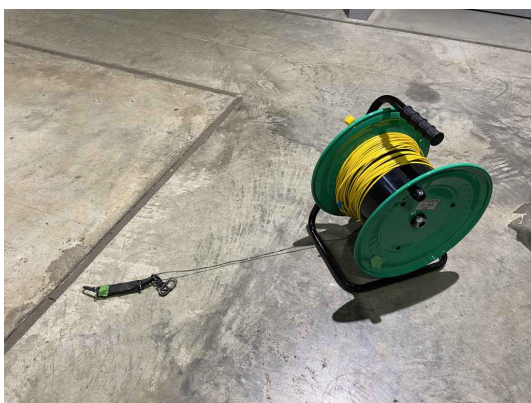


Fig5.9 FBG cable



Fig5.10 FBG trigger

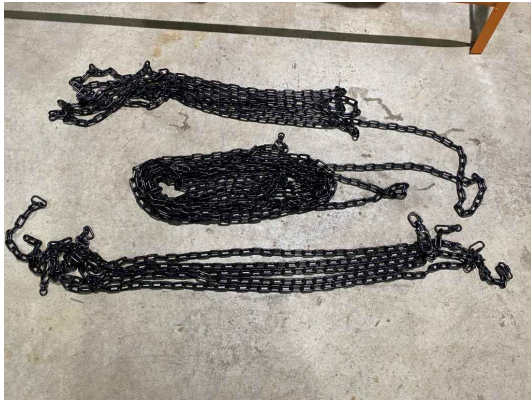


Fig5.11 SUS chain

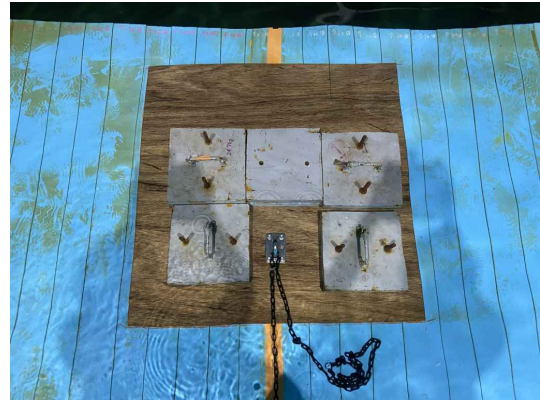


Fig5.12 Anchor

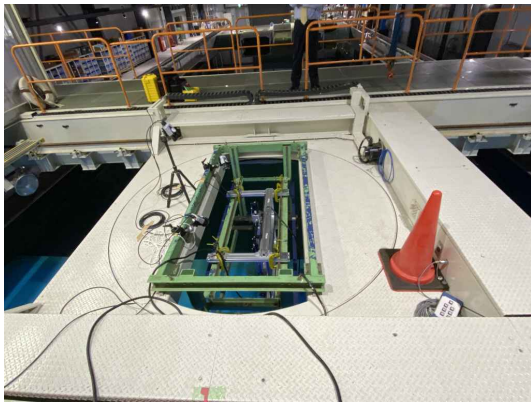


Fig5.13 Carriage



Fig5.14 Carriage controller

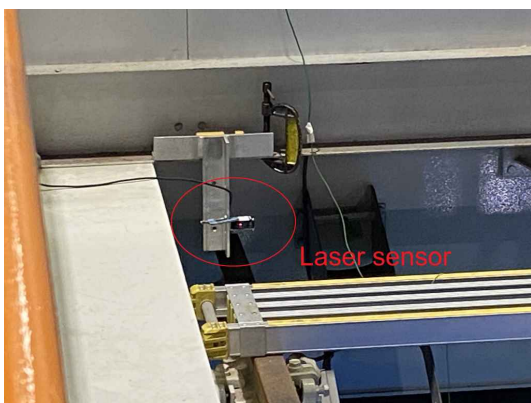


Fig5.15 Installation of laser sensor

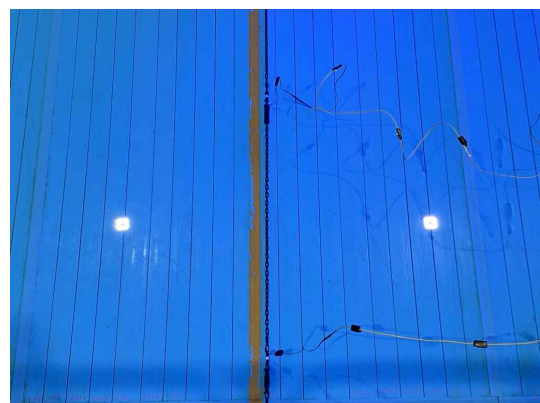


Fig5.16 Installation of chain

Fig5.2 に示した強制動揺装置は水平方向と鉛直方向の 2 方向加振にしか対応していない。そのため、この装置を水槽のフレームに取り付けた場合はチェーンを水槽の長手方向と鉛直方向に加振することになり、この装置を利用して水槽の幅方向に加振することはできない。そこで、水槽の長手方向と幅方向に可動できる曳引台車 (Fig5.13) を利用して水槽の幅方向に加振する。この台車は幅方向に中心から $\pm 1.2\text{m}$ の範囲で動かすことができる。本研究の実験では台車を Fig5.13 の左右方向に正弦波往復運動させる。振動の振幅と周期は台車の制御プログラムで設定でき、Fig5.14 に示す装置での操作により台車の走行速度をアナログ電圧で連続的に制御する [27]。Fig5.2 の強制動揺装置は水平方向、鉛直方向ともに中心から $\pm 300\text{mm}$ の範囲で動かすことができる。この装置はサーボモータ式で、 0.01s 毎に入力した位置の時系列データに従って動作する。

実験の流れとしては、Fig5.11 に示すチェーン (1 本当たり $1.0\text{m} \times 18$ 本) をつなぎ合わせ、上端を Fig5.2 の強制動揺装置の可動部の中心に、下端を Fig5.12 のアンカーの取っ手部分に固定した。この際水槽の長手方向に伸びている黄色い線に沿ってチェーンを設置した (Fig5.16)。なお強制動揺装置の中心の高さは水面の高さに合わせている。また、チェーンの上端及びつなぎ目に Fig5.8 の張力計の両端のリングチャックを利用して、FBG (Fiber Bragg Gratings) 張力計を上端を含めた 6 点に一定間隔で設置した。この張力計は光ファイバーの伸縮により、高い分解能で張力を測定できる。Fig5.8 の左に伸びている細い線は Fig5.9 に示す黄色の光ファイバーケーブルと一体となっている。本実験で使用した張力計の概要を Table5.1 に示す。なおアンカーへの設置においてチェーンを余らせているのは、張力計及びリングチャックの長さの影響により想定の高さ 18.0m を超えたためである。

係留索の加振点の位置を計測するために、Fig5.3 に示す Qualisys モーションキャプチャーカメラを 3 台曳引台車に固定して使用した。係留索の水中での位置を計測するために、Fig5.4 に示す Qualisys モーションキャプチャーカメラを 3 台水槽の底面に固定して使用した。この際カメラが動かないように 10kg の錘をフレームの左右にそれぞれ設置している。計測方法は、チェーンに白い球状のマーカーを設置してカメラにより撮影し、付属の解析ソフトによりマーカーの位置を追跡して座標を決定した。このマーカーは張力計に隣り合うよう設置し、張力と座標を概ね同じ位置で計測できるようにしている。

曳引台車の幅方向の位置を計測するために Fig5.6 のレーザ距離センサを使用した。この際距離センサを水槽の開口部の縁に固定して、曳引台車の壁に当てて測定した (Fig5.15)。なお距離センサは位置に対応する電圧を測定しているため、事前にキャリブレーション試験を行い、計測では電圧から位置への換算作業を行っている。キャリブレーション結果を Table5.2 と Fig5.17 に示す。測定されたデータは Fig5.7 に示すデータロガーに収集される。

以上より測定項目は係留索の張力、係留索の加振点の位置、係留索の水中での位置、曳引台車の幅方向の位置の 4 項目にまとめられる。これらのデータを同期するために、Fig5.5 に示す Qualisys カメラ同期ユニットを使用した。この付属のトリガーを押すことにより、空中のカメラと水中のカメラが同時に計測開始され、Fig5.7 のデータロガーと Fig5.10 の FBG トリガーに Qualisys のトリガーの入る時刻データも収集される。これをもとに 4 つの計測項目を同期して計測できるようになる。なお強制動揺装置と曳引台車の操作は別系統で、この 2 つの起動のタイミングを完全に同期することはできなかった。

5.3.1 張力計

本実験で使用した張力計の物性値を以下に示す。

Table5.1 Parameters of FBG tension sensor

名称	ts1000v1	ts1000v2
使用場所	上端 (S01)	つなぎ目 (S02～S06)
質量	70g	40g
長さ	100mm	99mm
単位長さ当たり質量	0.700kg/m	0.404kg/m
最大容量	600N	100N
分解能	0.63N	0.31N

強制動揺装置と係留索の上端との間の張力計は容量 600N の ts1000v1 を使用した。それ以外の計測点には、張力計の大きさや重さが係留索の挙動に影響するのを避けるために容量 100N の ts1000v2 を使用した。

5.3.2 レーザー距離センサ

本実験では、オプテックス・エフエー株式会社製のレーザー距離センサ TOF-DL250AM12(アナログ出力タイプ)を使用した。この装置の仕様は最大検出距離が 3.0m、電圧出力範囲が 0～10V となっているが、仕様の正確性を検証するためにキャリブレーション試験を行った。

キャリブレーション試験は、レーザー距離センサから物体までの距離を 0～3000mm の間で 300mm 刻みで変化させながら電圧を計測した。結果を以下に示す。

Table5.2 Result of voltage measurement

距離 [mm]	電圧 [V]
0	0.443
300	1.041
600	2.093
900	3.034
1200	4.064
1500	5.084
1800	6.105
2100	7.125
2400	8.087
2700	8.981
3000	10.061

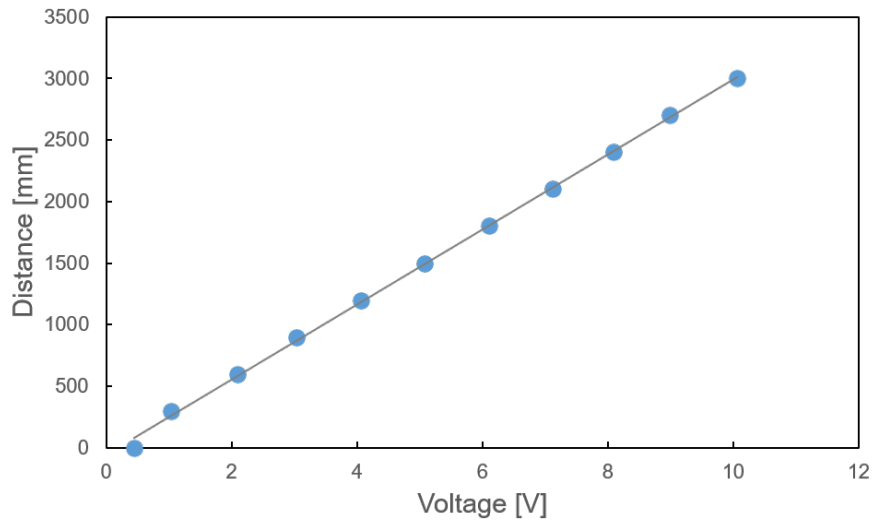


Fig5.17 Voltage-Distance calibration

Table5.2 のデータをプロットし、最小二乗法により回帰直線の関係式を求める。電圧を $V[V]$ 、距離を $Y[mm]$ として以下の関係式が得られる。今回はこの式を用いて、電圧から曳引台車の幅方向の位置への換算を行った。

$$Y = 305.091V - 56.463 \quad (5.1)$$

5.3.3 チェーン

本実験で使用したチェーンの物性値を次に示す。

Table5.3 Parameters of chain

材質	ステンレス (SUS)
全長	18.0m
直径	4.0mm
破断張力	3920N
許容張力	1960N
単位長さ質量	0.282kg/m(カチオン塗装除く)
単位長さ水中重量	2.417N/m

本研究では、実機での想定水深を 50m としている。水槽の深さ 1.43m との相似比 (幾何学的相似則及びフルード則) を適用すると、実機でのチェーンの物性値は以下ようになる。数値計算においては以下のパラメータを使用した。

Table5.4 Parameters of chain in real scale

材質	スタッドレス第 R4 種
模型と実機の相似比	1:34.965
全長	629.37m
直径	140mm
破断張力	17586kN
許容張力	8793kN
軸剛性 EA	1400000kN
単位長さ質量	344.76kg/m
単位長さ水中重量	2955N/m

5.3.4 実験概略図

実験の概略図を Fig5.18、Fig5.19 に示す。なお Fig5.18 は水槽の側面方向から見た側面図、Fig5.19 は水槽の上面方向から見た平面図である。FBG 張力計および Qualisys マーカーはチェーンのつなぎ目に設置したが、張力計および留め具の長さの影響により、設置間隔はチェーンの 1 本当たりの長さ 1.0m よりも長い 1.28m となっている。張力の計測位置を上から順に S01、S02、S03、S04、S05、S06 と定義する。S01 の位置に付けられている張力計の上端は強制動揺装置につながれており、ここが係留索の加振点（係留点）となっている。S04 の位置の近くが係留索のタッチダウン点となっており、索を上端から辿ったときに初めて底面に接する部分となっている。なおタッチダウン点の位置は係留索の振動による形状の変化に伴い移動する。また、Fig5.19 の太線の青枠で囲まれた部分は曳引台車の幅方向可動部である。以下、本研究では水槽の長手方向を X 軸、水槽の幅方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸と定義する。

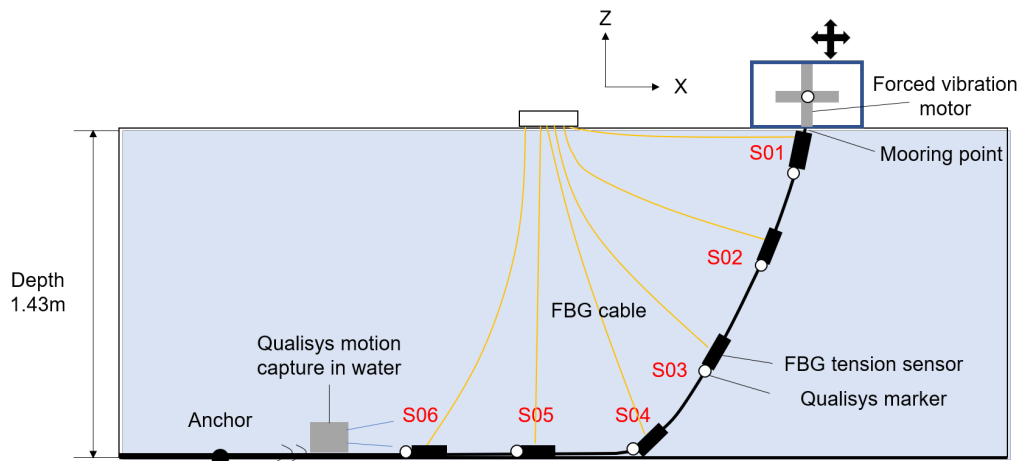


Fig5.18 Schematic diagram from side

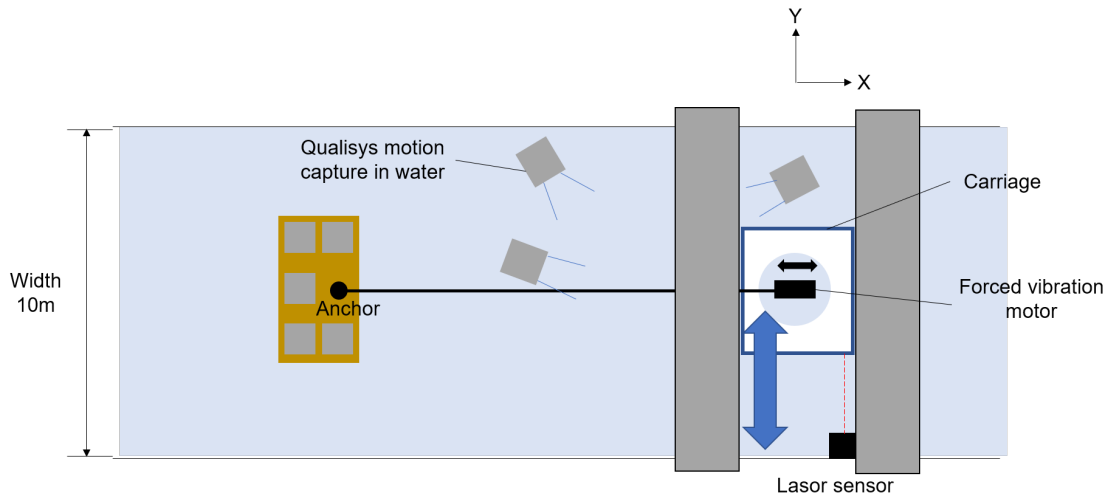


Fig5.19 Schematic diagram from top

5.4 静的係留特性実験結果

アンカーから加振点までの係留チェーンの長さは、レーザー距離センサでの測定により 18.0m に決定した。しかし、チェーンの取り付け角度と、アンカーから加振点までの水平距離は計測していない。そこで、加振点を水平方向に移動させて静止させたときの各計測点での張力を測定した。これにより、チェーンの水中での持ち上がり長さも変化することから、張力の測定値も変わってくる。チェーンの加振点が装置の中心の位置 (原点) にあるときの測定張力をもとに、カテナリー解析から係留索の初期張力と形状を決定した。

加振点は強制動揺装置のスペックに合わせて、中心から水平方向に± 300mm の範囲で 50mm ごとに区切って移動させた。加振点を原点の位置に静止させた時の張力の計測結果を以下に示す。

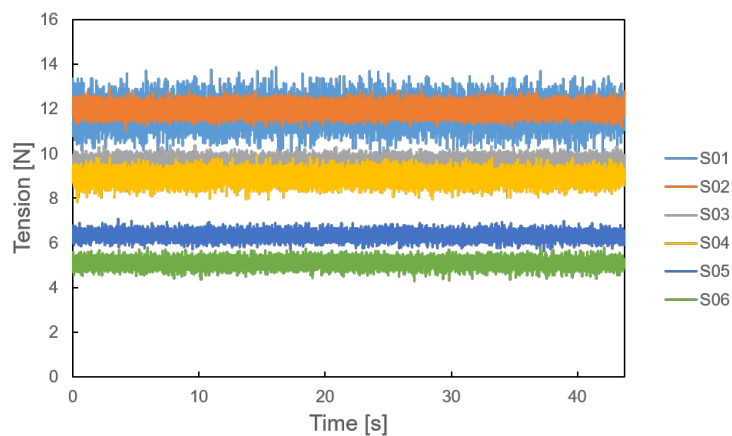


Fig5.20 Time series data of static tension

張力計にはノイズが含まれているため、それぞれの張力計の時系列データを平均化して静的張力のデータと

した。

加振点の原点に対する距離を横軸に、各張力計の静的張力を縦軸にとりグラフ化したものを Fig5.21 に示す。なお位置の正方向を、加振点がアンカーから遠ざかる向き (Fig5.18 の水平右向き) としている。

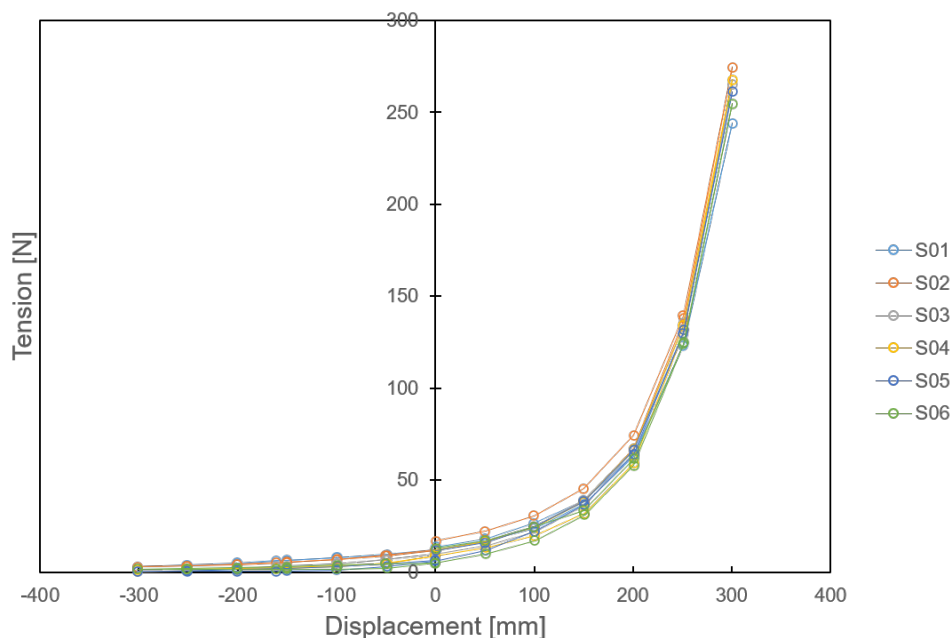


Fig5.21 Static tension at each measurement position

計測の順番は、加振点を原点から係留索が緩む方向に 300mm 往復させて原点に戻した後、係留索が張る方向に 300mm 往復させている。従って原点では 3 回計測、± 300mm の位置では 1 回ずつ計測、それ以外の位置では 2 回ずつ計測を行っている。カタナリー解析の式 (3.26) に基づくと、タッチダウン点からの高さが大きくなるほど張力も大きくなるのが分かる。このとき Fig5.18 において、S01 の位置における張力が最大となる。しかし、+ 300mm の位置での静的張力のデータを見ると、S01 より S02 の方が値が大きくなっていることが確認される。この原因としては、係留チェーン全体を水槽底面に置いて張力計をゼロリセットする際に、チェーンが完全に緩んだ状態でなかった可能性が考えられる。

Fig5.22 に張力計 S02 の静的張力のデータを載せる。加振点を索が張る方向に 300mm 移動させた後原点に戻していく時の 2 回目のデータは、1 回目のデータよりも張力が大きくなっていることがわかる。この原因としては、索が張った状態から戻る際にチェーンの弾性によって全長が短くなり、1 回目の同じ加振点の位置と比較すると、索がより張った状態になるためだと考えられる。

原点で計測した 3 回のデータを Fig5.23 に示す。右から順に S01、S02、S03、S04、S05、S06 のデータになっており、それぞれ 3 回の計測値と平均値をプロットしている。どの張力計もデータのばらつきがあり、再現性が示されていない。そこで、以下の式で定義する誤差範囲をエラーバーで描いている。この誤差範囲に収まるように、係留索の初期張力を決定した。

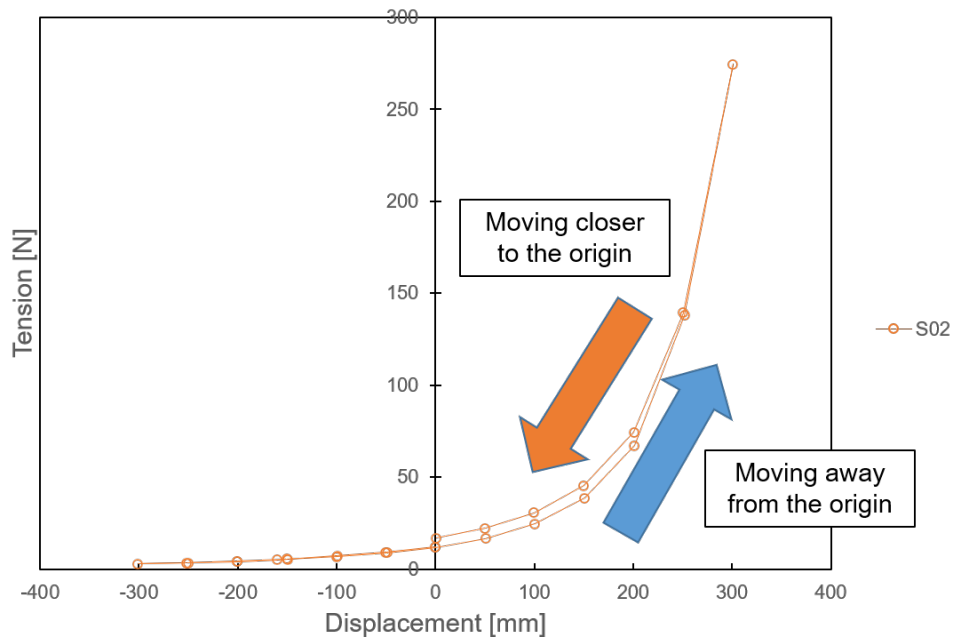


Fig5.22 Static tension at each measurement position (only S02)

・誤差範囲

データの個数を n 、標本平均を \bar{x} とすると、標準偏差は

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

標準誤差は

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

平均値の $\pm 2SE$ の区間は一般的に 95% 信頼区間として知られており、本研究ではこの範囲を誤差範囲として定義している。

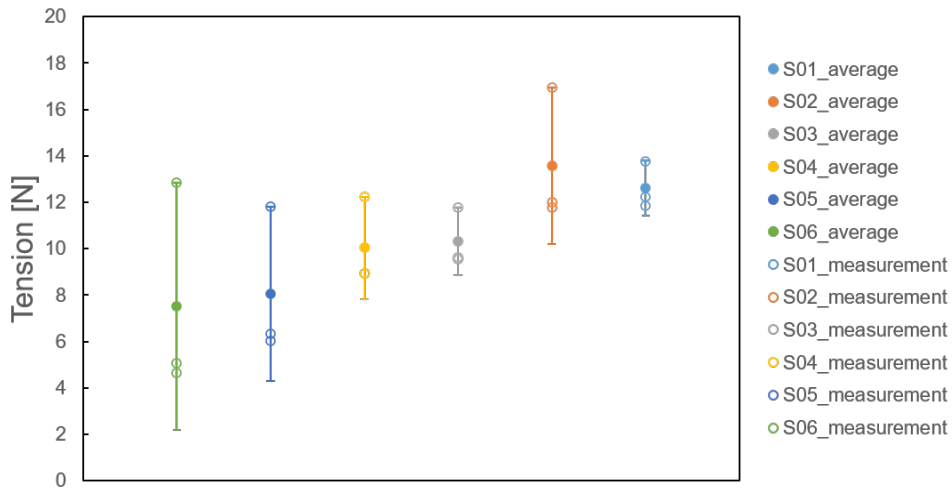


Fig5.23 Static tension at the origin point

Fig5.23 で示した 6 点のデータを実機のスケールに換算した結果を、Fig5.24 に示す。黄色い点が各計測点での張力の平均値、黄色い線が誤差範囲である。これにカテナリー解析および数値計算で求めた係留索の張力をフィッティングさせている。ここで、数値計算での索の分割数は 70 としている。張力計の設置間隔は 1.28m と全長のおよそ 1/14 になっていることから、係留索の上端から順に 5 区間ずつ区切った点の座標を張力計の設置座標としている。加振点付近の計測点 S01 における計測張力の誤差範囲の最大値とカテナリー解析で得られる上端の張力を合わせている。カテナリー解析より、アンカーから上端までの水平距離は実機スケールで 616.22m となり、これを以降の数値計算の検証での初期水平長とした。このときの上端の張力は実機スケールで 590kN となり、これを以降の数値計算の検証での初期張力とした。係留索の初期形状をカテナリー解析およびプログラムで計算したものを Fig5.25 に示す。

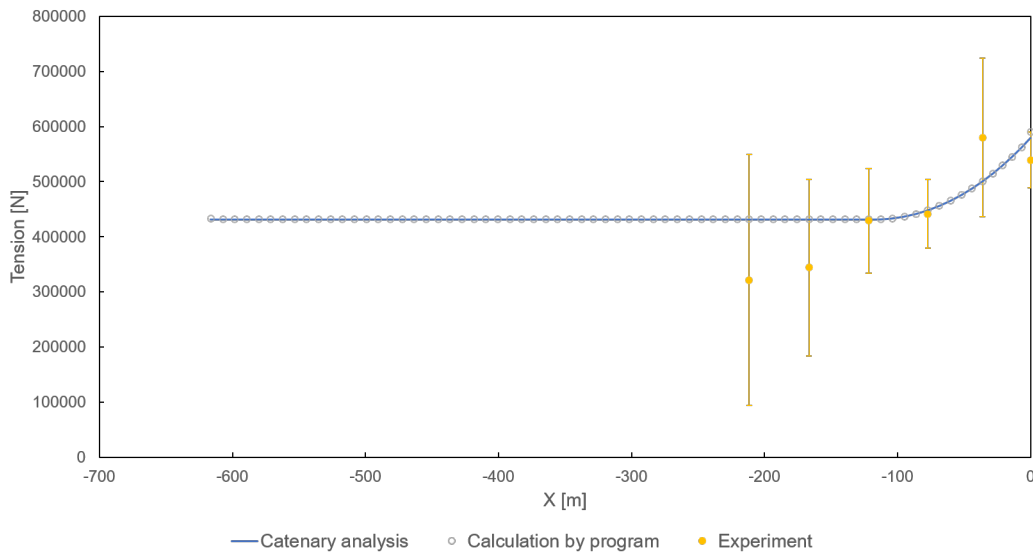


Fig5.24 Static tension at the origin point in real scale

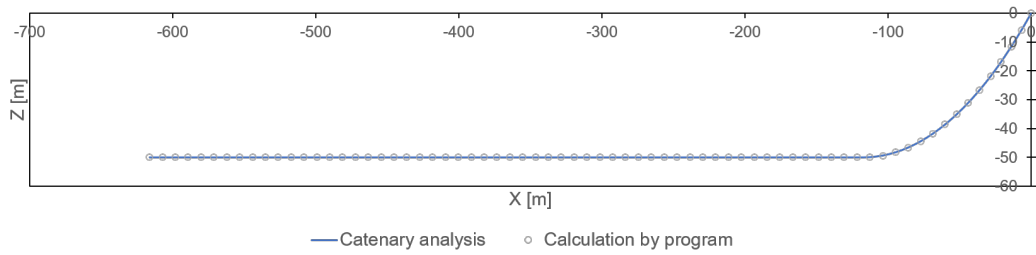


Fig5.25 Initial shape of the chain

この図において、水平長さやタッチダウン点の位置などをまとめた情報を Table5.5 に示す。

Table5.5 Initial conditions of the chain

	実機スケール	模型スケール
索の全長	629.37m	18.00m
水平長	616.22m	17.62m
水深	50m	1.43m
カテナリー解による上端の張力	590000N	13.80N
上端からタッチダウン点までの水平距離	117.59m	3.36m
上端からタッチダウン点まで索に沿った長さ	130.74m	3.74m

5.5 実験条件

実験パターンは大きく X 軸方向 +Z 軸方向加振、Y 軸方向加振、X 軸方向 +Z 軸方向 +Y 軸方向加振の 3 つに分けられる。XYZ 軸は、Fig5.18 と Fig5.19 で定義した方向とする。X 軸方向と Z 軸方向には強制動揺装置を使って加振し、Y 軸方向には曳引台車を使って加振した。

本研究の実験では、波浪影響と VIM 影響が共存した場合における浮体の動揺を想定している。本来、波浪中の VIM 現象は浮体为非線形的な応答を示すが、実験では一定の周波数で加振するため、これを完全に再現することはできない。しかし流れと平行方向に規則波を与えた場合、浮体は surge 方向、heave 方向に波周期で、sway 方向に概ね VIM 周期で動揺することが Gonçalves et al.[15] により実験的に確認されている。そこで、Y 軸方向 (sway 方向を想定) の設定周期は VIM 周期に基づいて実スケール単位で 100~150s、X 軸方向 (surge 方向を想定) と Z 軸方向 (heave 方向を想定) の設定周期は実際に起こりうる波の周波数を網羅するように実スケール単位で 5~20s の範囲とした。浮体の VIM 振幅に関しては浮体の代表長さや固有周期、流速に依存するが、Y 軸方向の設定振幅の最大値を 20.0m(実スケール単位) とした。この値は、スパー型浮体のうち最も大型の浮体の直径を想定している [16]。また、X 軸方向と Z 軸方向の動揺振幅に関しても浮体の形

状や波周期によって変化するが、ここでは波高の半分の大きさを想定する。

各測定ケースごとに実機の風車の動揺振幅・周期、実験の振幅・周期をまとめると次表のようになる。なお空欄のセルは、その条件において該当方向に加振を行わないことを示す。Case1～6がX軸方向+Z軸方向加振、Case7～10がY軸方向加振、Case11～18がX軸方向+Z軸方向+Y軸方向加振の条件になっている。

Table5.6 Experimental cases

	XZ軸方向					Y軸方向			
	風車動揺振幅 [m]	風車動揺周期 [s]	実験振幅 [mm]	実験周期 [s]	回転方向	風車動揺振幅 [m]	風車動揺周期 [s]	実験振幅 [mm]	実験周期 [s]
Case 1	0.5	20	14	3.38	+				
Case 2	0.5	20	14	3.38	-				
Case 3	0.5	5	14	0.85	+				
Case 4	0.5	5	14	0.85	-				
Case 5	3.0	20	86	3.38	+				
Case 6	3.0	20	86	3.38	-				
Case 7						4.0	150	114	25.35
Case 8						4.0	100	114	16.90
Case 9						20.0	150	571	25.35
Case 10						20.0	100	571	16.90
Case 11	0.5	20	14	3.38	+	12.0	100	343	16.90
Case 12	0.5	20	14	3.38	-	12.0	100	343	16.90
Case 13	0.5	20	14	3.38	+	20.0	150	571	25.35
Case 14	0.5	20	14	3.38	-	20.0	150	571	25.35
Case 15	0.5	20	14	3.38	+	20.0	100	571	16.90
Case 16	0.5	20	14	3.38	-	20.0	100	571	16.90
Case 17	1.0	20	29	3.38	+	20.0	100	571	16.90
Case 18	1.0	20	29	3.38	-	20.0	100	571	16.90

X軸方向とZ軸方向には同じ片振幅、周期で動揺させる。ただしX軸方向とZ軸方向の動揺の位相差の変化により、加振点の描く軌跡が変化する。本実験では、X軸方向の位相がZ軸方向の位相に対して $\pi/2$ 進むように加振した場合を”回転+方向”、 $\pi/2$ 遅れるように加振した場合を”回転-方向”と定義する。回転+方向にチェーンを加振した場合加振点は円を反時計回りに描くように、回転-方向にチェーンを加振した場合加振点は円を時計回りに描くように動く。加振点の回転方向の定義を Fig5.26 に示す。

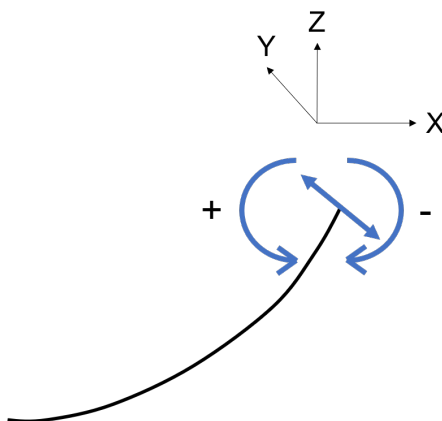


Fig5.26 Rotational direction of vibration point

5.6 座標変動比較結果

この節では、係留索の加振点および水中の点の位置について、Qualisys モーションキャプチャーで計測した実験結果と、プログラムでの数値計算結果を比較する。加振点を計測する Qualisys カメラは台車に固定されており台車の変位とともにカメラの位置も変位する(台車上から見た加振点の Y 軸方向の位置は一定である)ため、加振点の Y 座標に関してはレーザー距離センサで測定したデータを使用している。実験データは Qualisys カメラ、レーザー距離センサともに 0.01 秒ごとに収集を行っているが、レーザー距離センサに関してはノイズが乗ってしまったため 40 個のデータの移動平均を取った。また Case 9 など実験振幅 571mm のケースでは Y 軸方向の変位が大きく、加振点が原点にある場合に Qualisys カメラで捉えられたマーカーでも、加振点の変位が最大となった時刻付近でマーカーが Qualisys カメラの画角を外れてしまい、一部の時刻で座標を計測することができなかった。この時系列のデータに関しては線形補間によって処理を行っている。

比較対象項目は、X 軸方向 +Z 軸方向加振のケースについては加振点の X 座標・Z 座標、位置 S03 の Z 座標の時系列データ、Y 軸方向加振のケースについては各計測点の Y 軸方向の変位の大きさとした。水中の Qualisys カメラで捉えることができたマーカーは位置 S03~S06 の 4 点であり、その 4 点の中で最も大きく変動するのが、係留索が持ち上がっている部分の位置 S03 の座標であるためである。

グラフに示されている実験結果は全て実機スケールである水深 50m の場合に換算している。数値計算のパラメータは、実験条件から実機スケールに換算したもの (Table5.4 参照) を使用している。マーカー及び張力計の設置間隔 1.28m を実機スケールに換算すると約 45m となり、数値計算結果では上端(加振点)から 45m ごとに各点の軌跡を図示する。なお位置 S02(上端からチェーンに沿った長さ 45m の地点)にあるマーカーは Qualisys カメラの画角に入らなかったため、実験結果には長さ 45m 地点の座標データを掲載していない。

5.6.1 X 軸方向 +Z 軸方向加振

それぞれのケースについて 4 つグラフを示し、実験結果を実機スケールに換算した結果を左列に、数値計算結果を右列に示す。上段が加振点の X・Z 座標、下段が位置 S03(実機スケールで上端から索に沿った長さ 90m) の Z 座標の時系列データとなっている。横軸の時系列および縦軸の座標の数値間隔は全グラフで揃えている。

○ Case 1 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

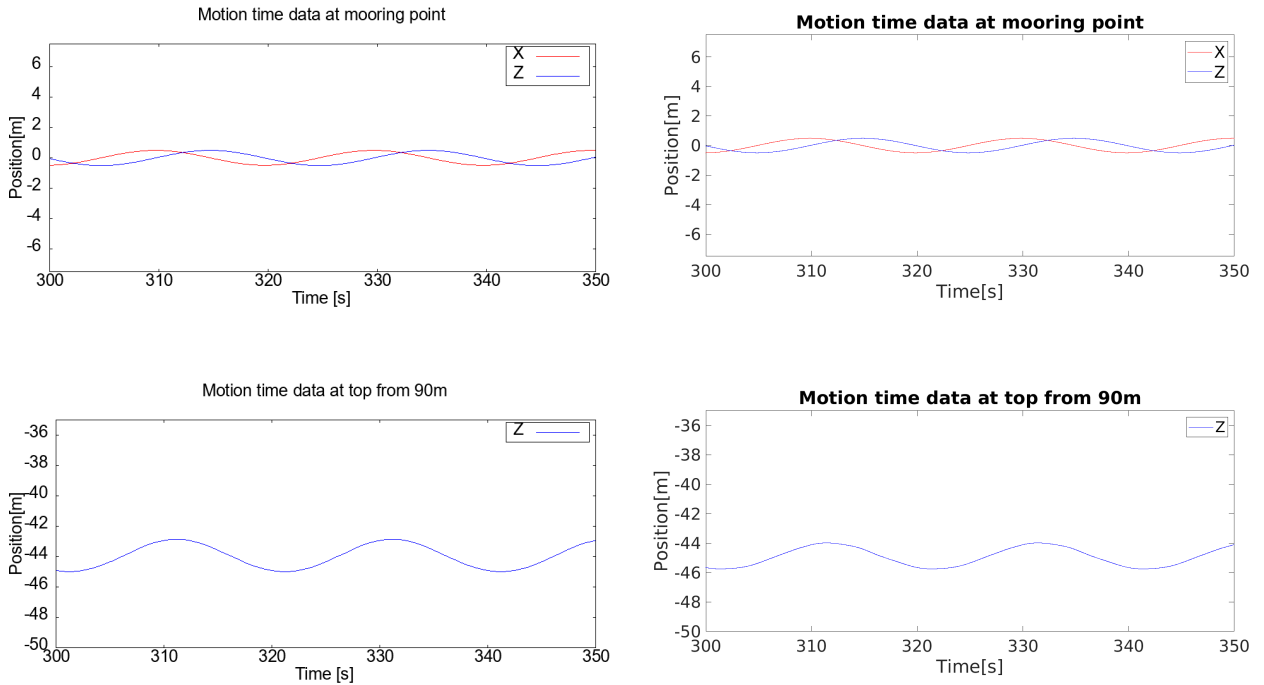


Fig5.27 Coordinate fluctuation result of Case 1

○ Case 2 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

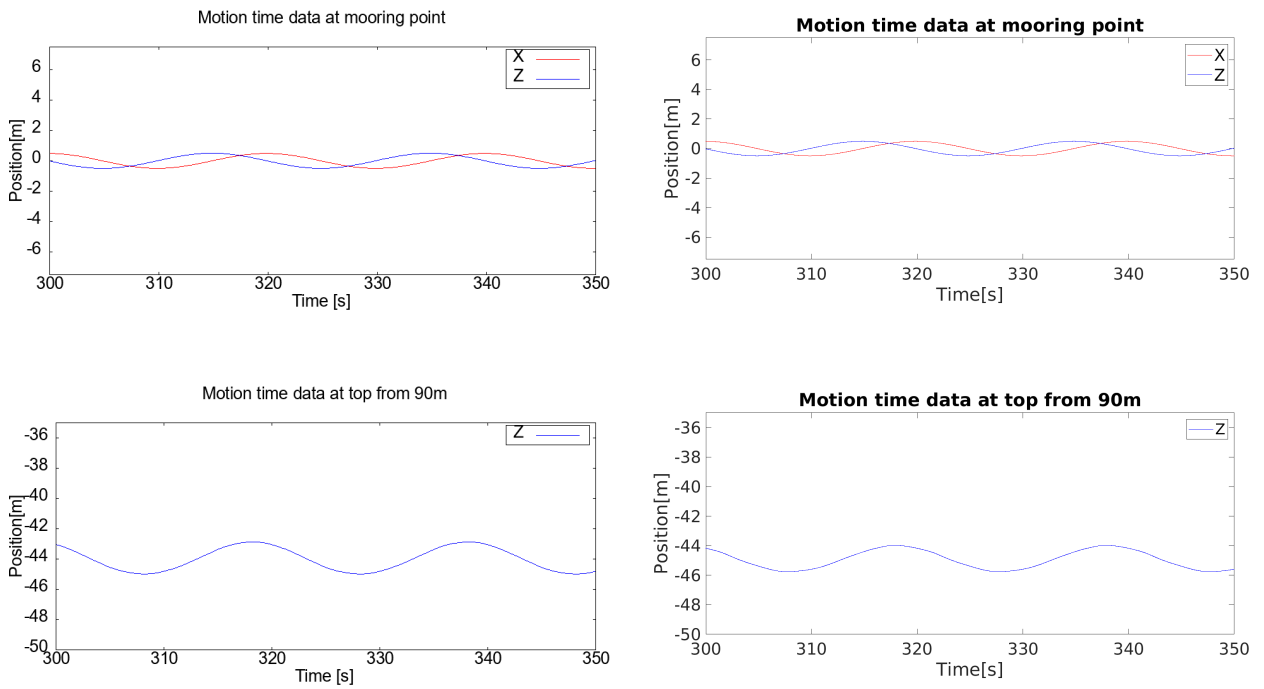


Fig5.28 Coordinate fluctuation result of Case 2

○ Case 3 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

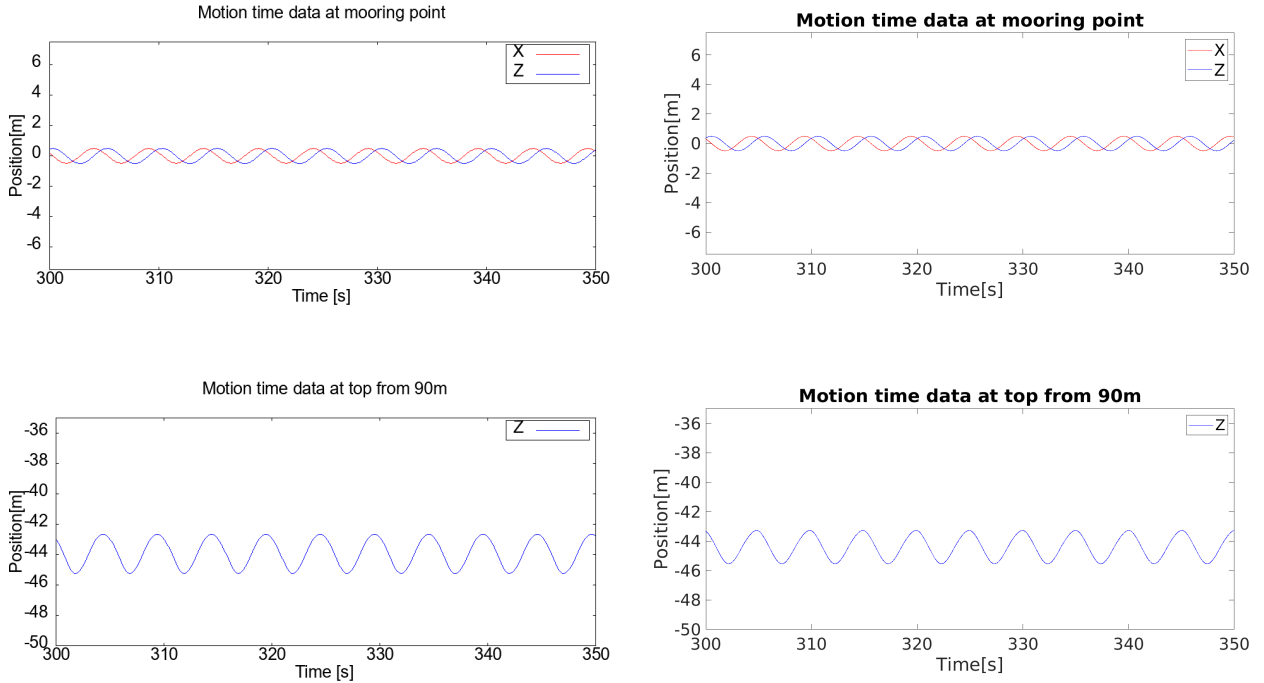


Fig5.29 Coordinate fluctuation result of Case 3

○ Case 4 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

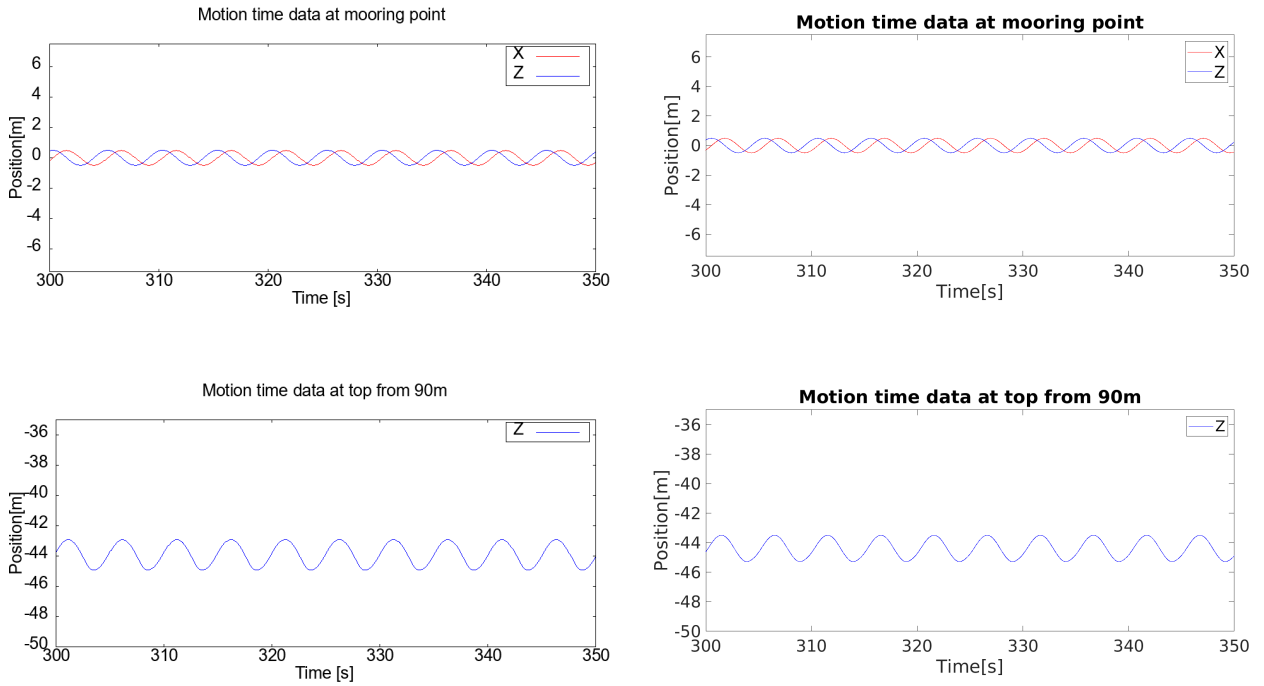


Fig5.30 Coordinate fluctuation result of Case 4

○ Case 5 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

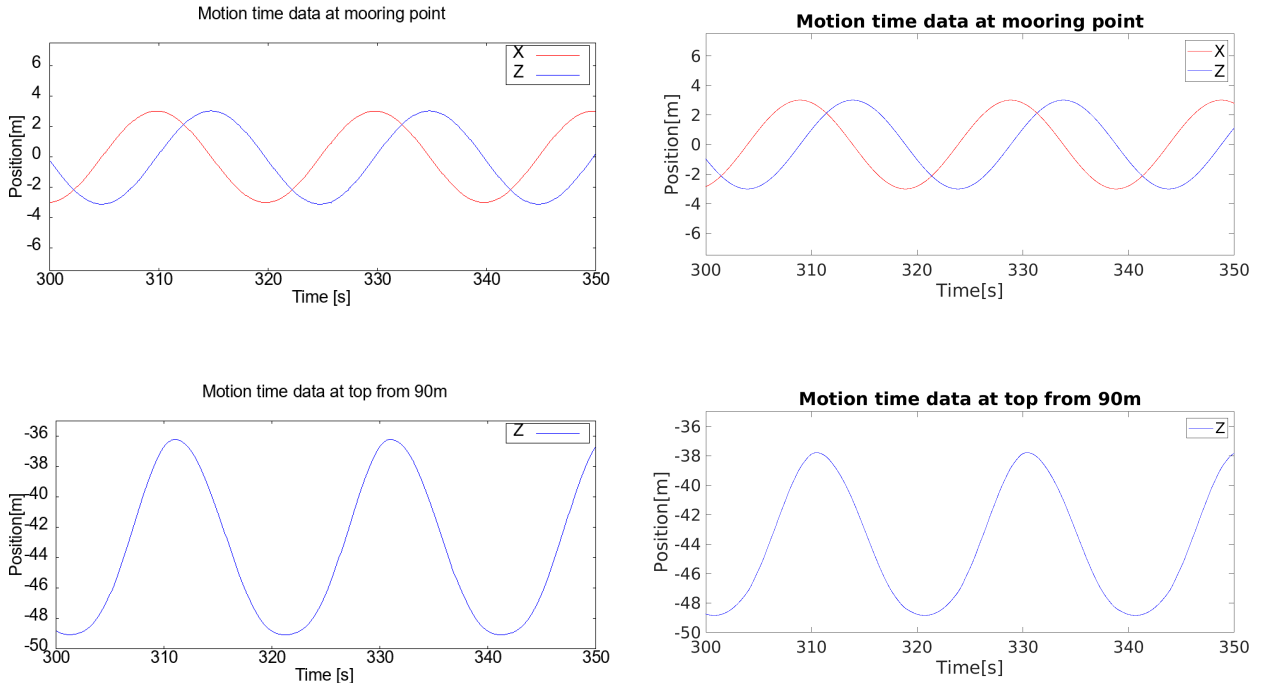


Fig5.31 Coordinate fluctuation result of Case 5

○ Case 6 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

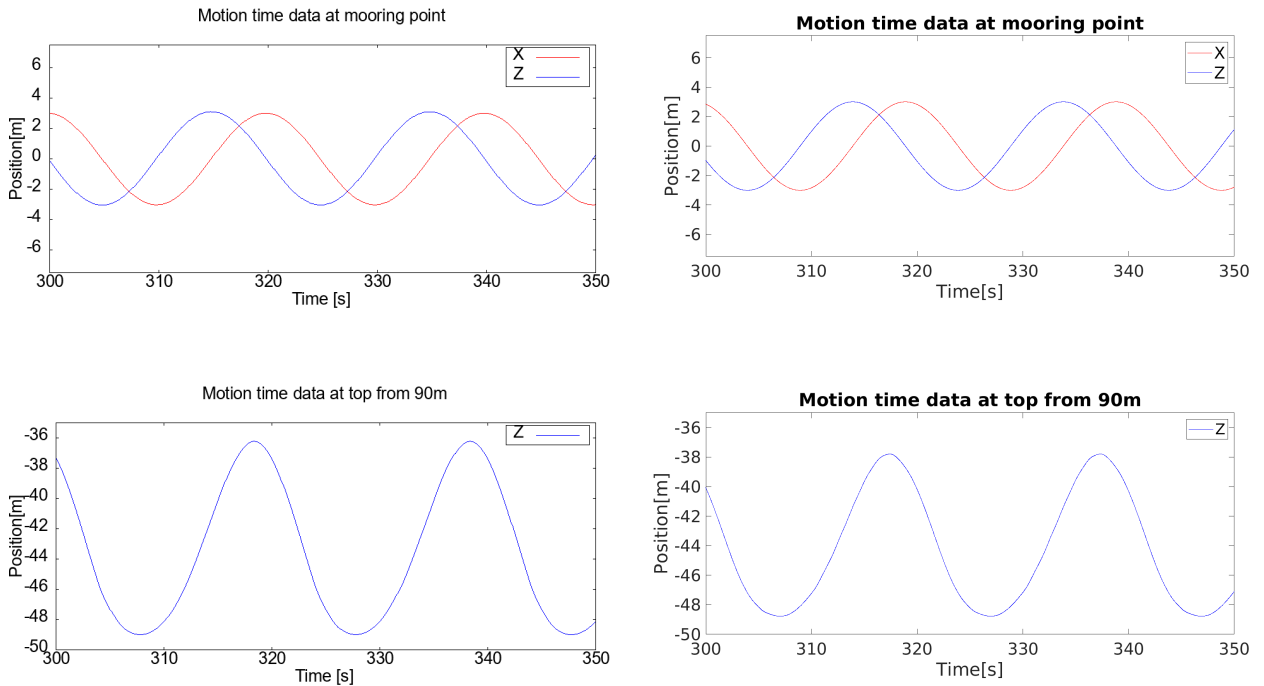


Fig5.32 Coordinate fluctuation result of Case 6

また Case 5 と Case 6 に関して、各計測点の軌跡の側面図を図示したものを以下に示す。

○ Case 5 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

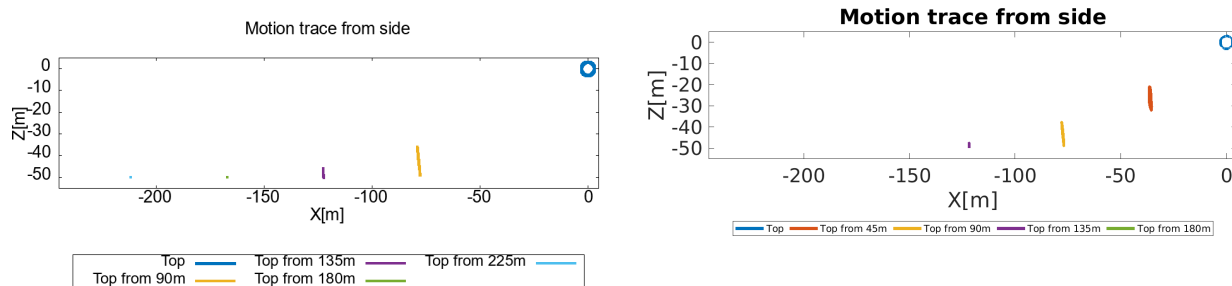


Fig5.33 Trajectory of measurement points of Case 5

○ Case 6 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

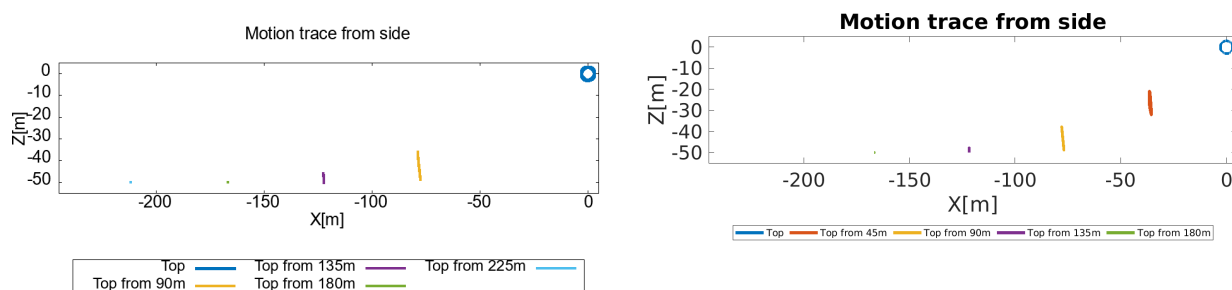


Fig5.34 Trajectory of measurement points of Case 6

5.6.2 Y 軸方向加振

それぞれのケースについて 4 つグラフを示し、実験結果を実機スケールに換算した結果を左列に、数値計算結果を右列に示す。上段が各点の Y 座標の時系列データ、下段が各計測点の軌跡を上から見た図となっている。なおこのケースは上端 (加振点) の X 座標を原点から +86mm(実スケールで +3.0m) の位置に固定して実験を行っている。

○ Case 7 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

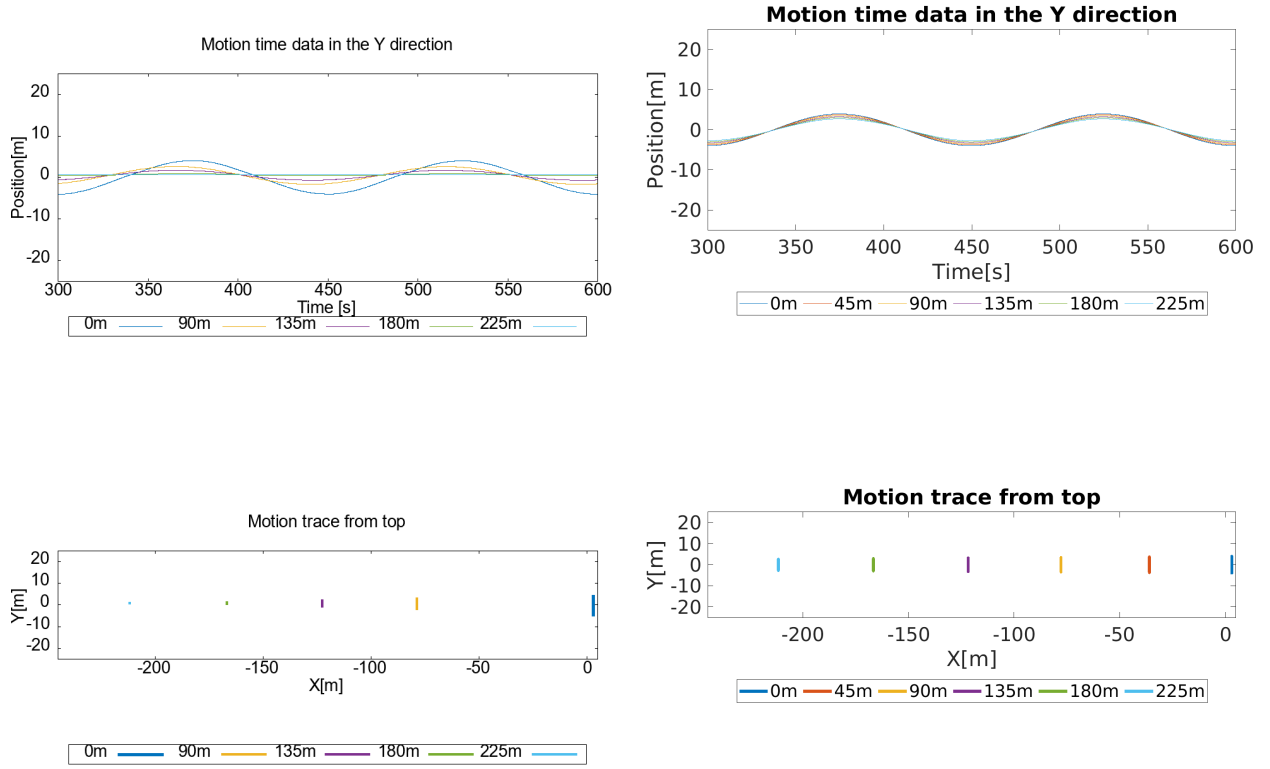


Fig5.35 Coordinate fluctuation result of Case 7

○ Case 8 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

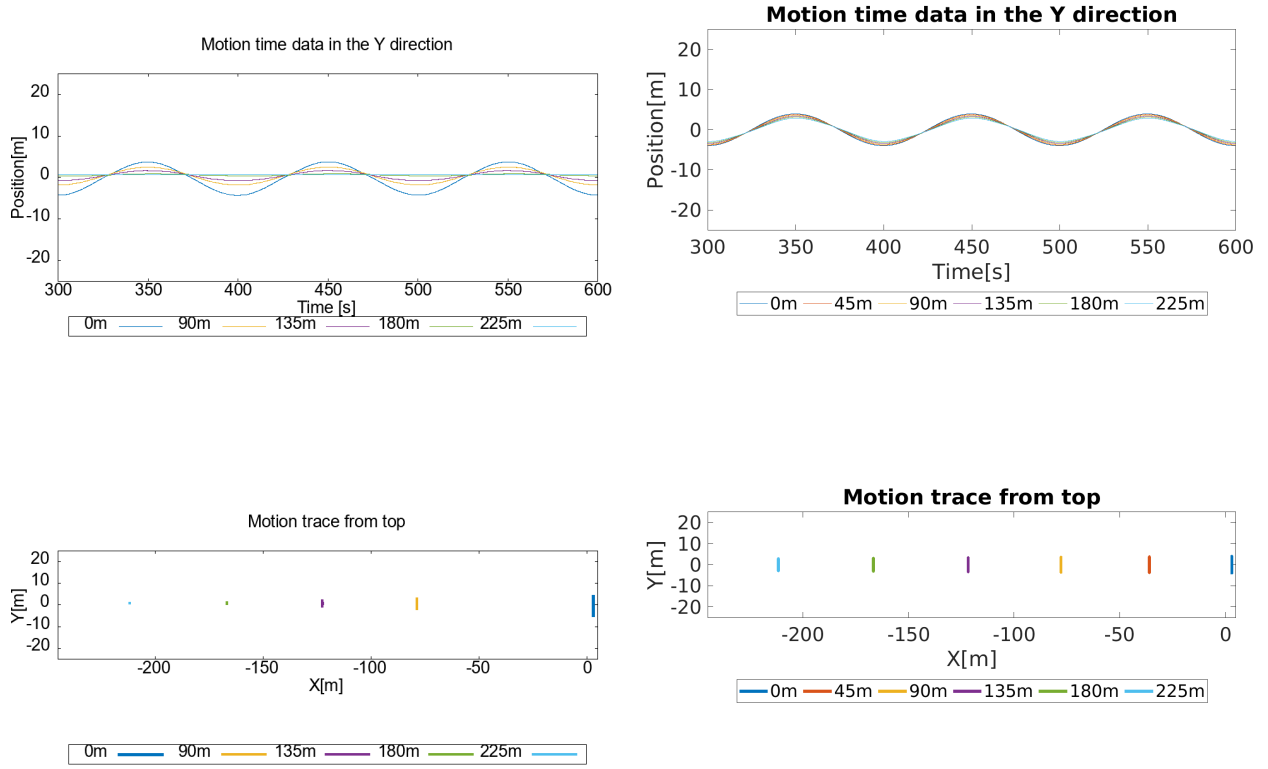


Fig5.36 Coordinate fluctuation result of Case 8

○ Case 9 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

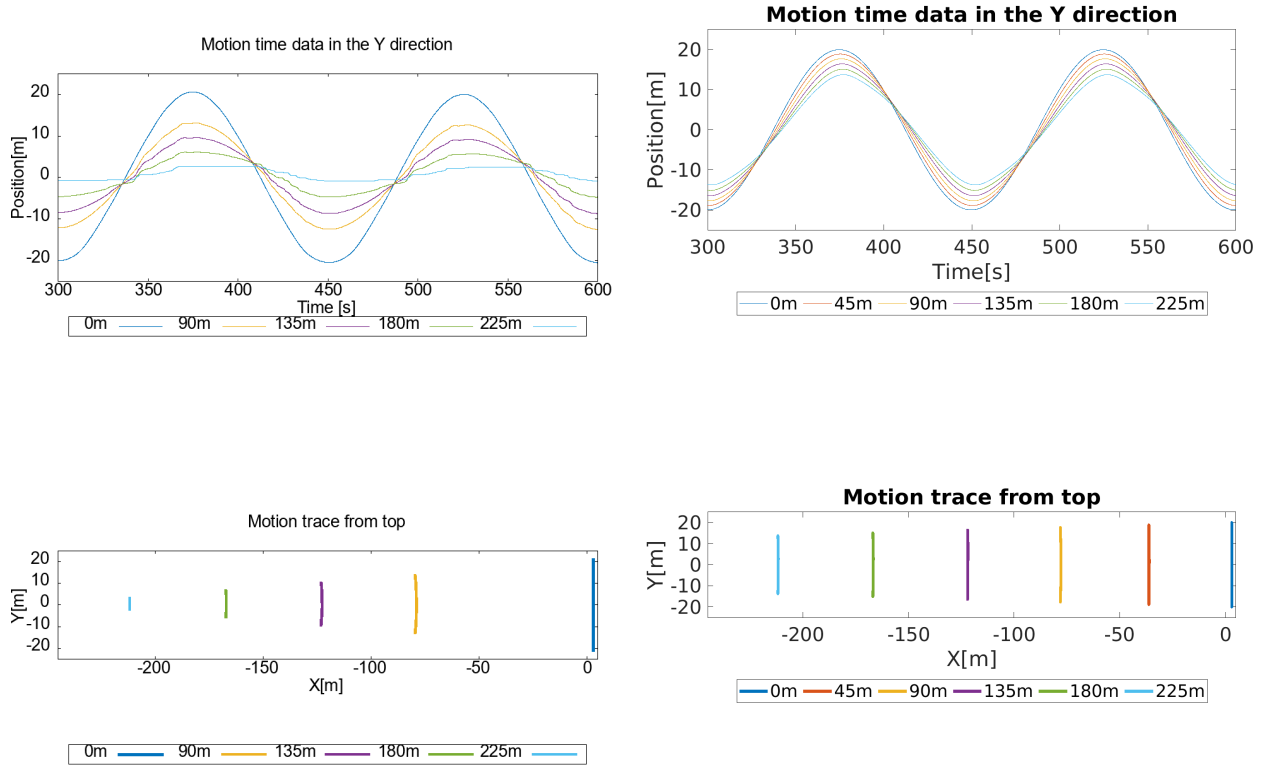


Fig5.37 Coordinate fluctuation result of Case 9

○ Case 10 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

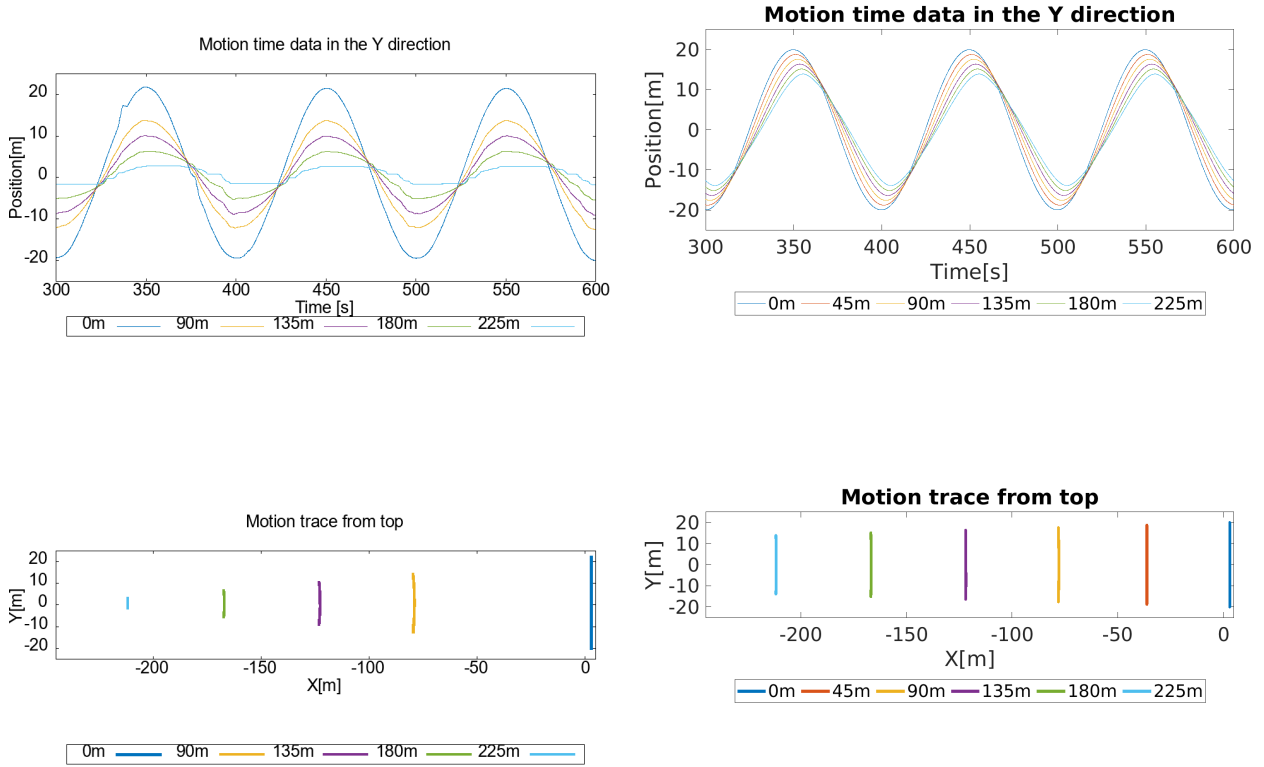


Fig5.38 Coordinate fluctuation result of Case 10

5.7 座標変動比較結果考察

X 軸方向 +Z 軸方向加振について、Fig5.27～Fig5.32 の左右のグラフをそれぞれ比較すると、上端から 90m の点の Z 座標の変動は変動周期、変動振幅ともに概ね一致していることが読み取れる。これを示すために、Case 1 において上端から 90m の点の Z 座標の時系列データを重ね合わせたものを Fig5.39 に、Case 5 において上端から 90m の点の Z 座標の時系列データを重ね合わせたものを Fig5.40 にそれぞれプロットしている。Fig5.31 と Fig5.32 の振幅 3.0m のケースでは、実験結果の方が若干大きい変動幅を示している。これはチェーンを大きく引っ張った際に働く引張力により、チェーンの全長が変化しているためだと考えられる。

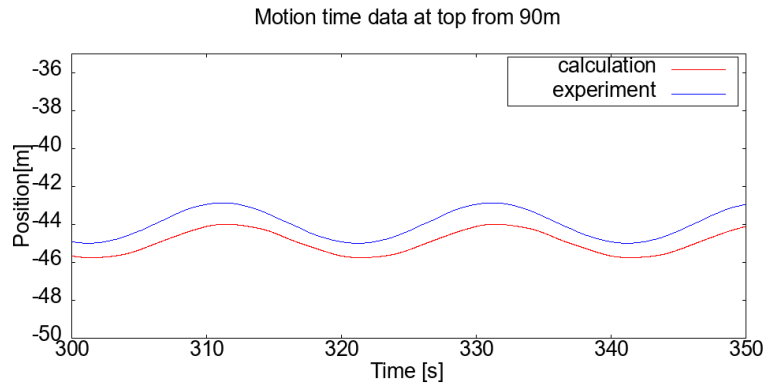


Fig5.39 Comparison result of Z coordinate fluctuation of Case 1

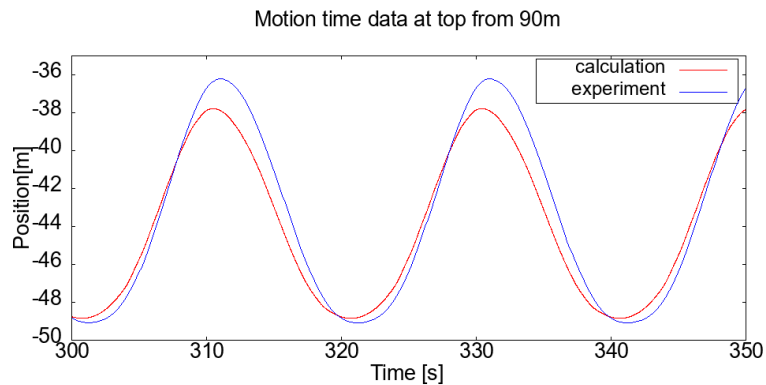


Fig5.40 Comparison result of Z coordinate fluctuation of Case 5

Y 軸方向加振について、Fig5.35～Fig5.38 の左右のグラフをそれぞれ比較すると、いずれのケースも Y 軸方向の変位の大きさは一致していないことが分かる。数値計算結果では、アンカーからの距離の比がそのまま Y 軸方向の変動範囲の大きさの比になっている。一方で実験結果では、測定点がアンカーに近づくにつれ Y 軸方向の変動範囲が急激に小さくなっている。この原因は係留索の着底部に働く摩擦力だと考えられ、係留索の特定の点よりアンカー側の部分はほとんど動かないことが実験でも観察されている。この特定の点の位置を明らかにするために、実験結果の各計測点における Y 軸方向の変動範囲の大きさを求めた。求めるに当たっては、Fig5.35～Fig5.38 のそれぞれの左上のグラフに示されている Y 座標の極大値と極小値の差を測定周期分取って平均した。ここでは一例として、Case 9 の計算結果を示す。

Table5.7 Coordinate fluctuation range in the Y direction of Case 9

位置番号	上端からチェーンに沿った長さ	X 座標の平均値 [m]	Y 座標の変動範囲 [m]	左の半分の値 [m]
S01	0m	3.01	40.71	20.36
S03	90m	-79.07	25.48	12.74
S04	135m	-122.75	18.28	9.14
S05	180m	-167.02	10.90	5.45
S06	225m	-211.72	3.71	1.85

縦軸に Y 座標の変動範囲の半分の値、横軸に X 座標の平均値をとってプロットしたものを Fig5.41 に示す。

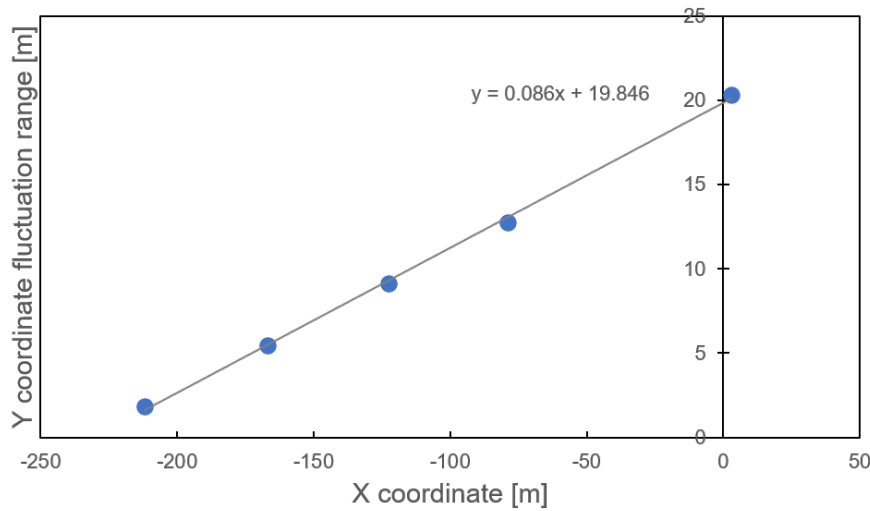


Fig5.41 Coordinate fluctuation range in the Y direction of Case 9

グラフの黒線および式は、データに最小二乗法を用いて一次関数の近似式を求めたものである。このグラフより、Y 座標の変動範囲と X 座標 (原点に対する水槽長手方向の位置) は概ね線形関係になっていることが分かる。したがって、この直線の X 切片付近で Y 座標の変動範囲が 0 になるとみなすことができ、この位置よりアンカー側は動かないと考えられる。Y 軸方向加振を含めた Case 7~18 の全てのケースについて同じ作業で計算を行い、X 切片を求めた。また、実験開始時刻における係留索の想定形状をカタナリー解析によって求めた。実験開始時刻においては、加振点を振動の中心からの変位が最大となるような位置に移動させて静止させている。これをもとに、加振点が振動の中心にあるときのタッチダウン点の位置を求めた。これらの結果を Table5.8、Fig5.42、Fig5.43(Case 9 の実験開始時刻の想定形状) に示す。なお想定形状は見やすいように、縦軸と横軸のスケールは揃えずに描いている。

Table5.8 Position of X-intercept and touch down point for each case

	X 切片 [m]	タッチダウン点 X 座標 [m]	X 切片からタッチ ダウン点までの距離 [m]	加振点の Y 軸方向測定振幅 (実機スケールに換算)[m]
Case 7	-177.14	-155.82	21.32	4.01
Case 8	-177.32	-155.75	21.57	4.01
Case 9	-230.77	-154.85	75.91	20.36
Case 10	-233.87	-154.81	79.06	20.52
Case 11	-163.24	-119.04	44.20	12.02
Case 12	-164.01	-118.93	45.08	12.07
Case 13	-198.99	-118.85	80.14	20.40
Case 14	-194.26	-118.72	75.54	20.44
Case 15	-193.59	-118.87	74.72	20.46
Case 16	-194.06	-118.72	75.35	20.53
Case 17	-198.13	-118.92	79.21	20.49
Case 18	-201.52	-118.60	82.92	20.39

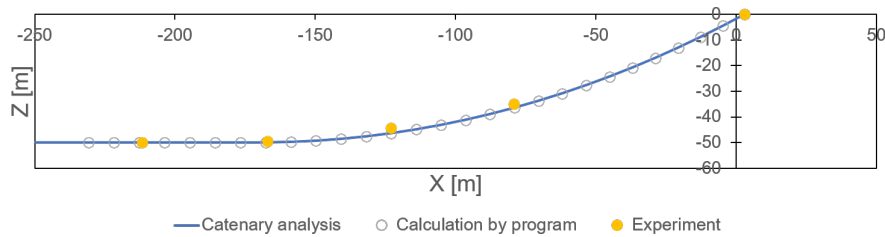


Fig5.42 Assumed shape of the experiment start time from side view

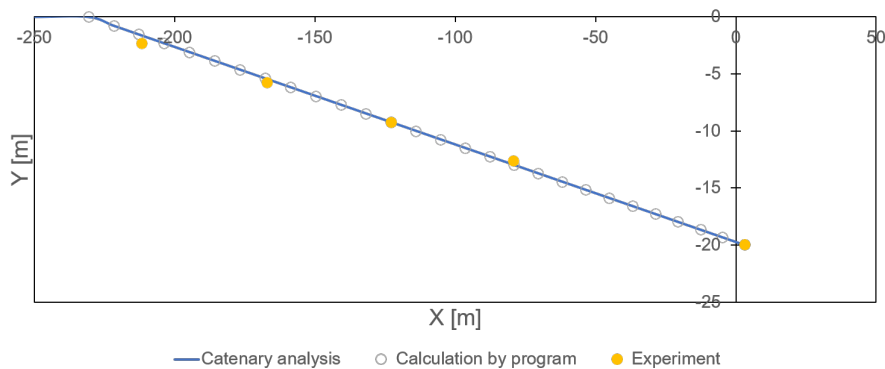


Fig5.43 Assumed shape of the experiment start time from top view

Table5.8 のデータより、X 切片からタッチダウン点までの距離を縦軸、加振点の Y 軸方向測定振幅を横軸に取りプロットすると、Fig5.44 のようになる。

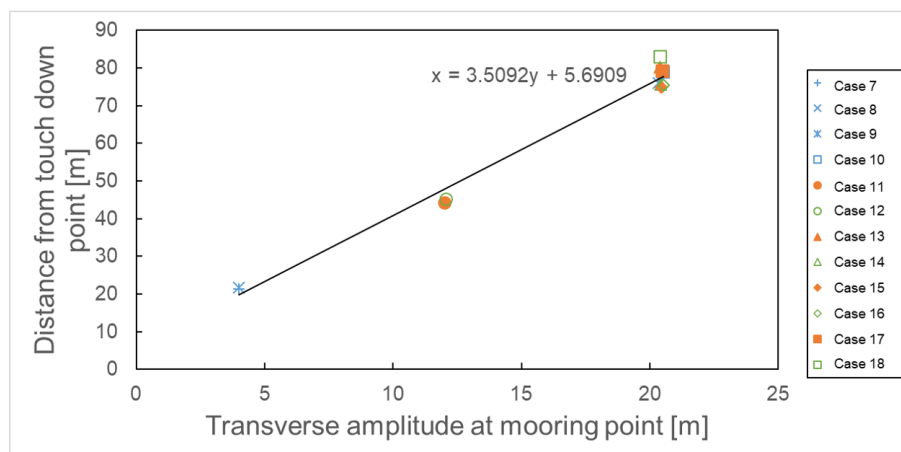


Fig5.44 Relationship diagram of transverse amplitude and X-intercept

水色の点：Case 7～10 の Y 軸方向加振のケース

橙色の点：Case 11～18 の 3 軸方向加振のうち回転 + 方向に加振したケース

緑色の点：Case 11～18 の 3 軸方向加振のうち回転 - 方向に加振したケース

このグラフより、XZ 軸方向の加振の有無、回転の向きに関係なく、加振点の Y 軸方向の振幅に依存して X 切片-タッチダウン点間距離が変化することが分かる。したがって係留索の上端が Y 軸方向に動揺した場合は、その動揺の大きさに依存して索の動く範囲が決まると言える。ただし、本研究では Y 軸方向の動揺周期は 100s 以上と比較的長周期な範囲を想定しており、この動揺周期が短くなった場合は索の可動範囲が変わる可能性も考えられる。

また、データに最小二乗法を用いて一次関数の近似式を求めたものをグラフ内に示している。本研究では、この式の y に係留索の Y 軸方向の動揺振幅を代入して、X 切片 (Y 軸方向に索が動く限界の X 座標の位置) からタッチダウン点までの距離 x を求めている。プログラムの都合上海底摩擦係数のパラメータを入力しての計算ができなかったため、数値計算では X 切片よりアンカー側は動かないものとして、設定アンカー点を X 切片の位置にずらして計算を行っている。このとき、索の設定全長と設定水平長さの差が一定となるように留意した。この式はあくまでも実験水槽との摩擦の影響を考慮したものであり、実海域における海底摩擦係数が実験での摩擦係数と異なれば、この式のパラメータも変化する可能性がある。

Case 7～10 の数値計算において、設定アンカー点をずらした場合の各点の Y 座標の時系列と軌跡の結果を右列に示す。左列は Fig5.35～Fig5.38 の左列の実験結果と同一である。

○ Case 7 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

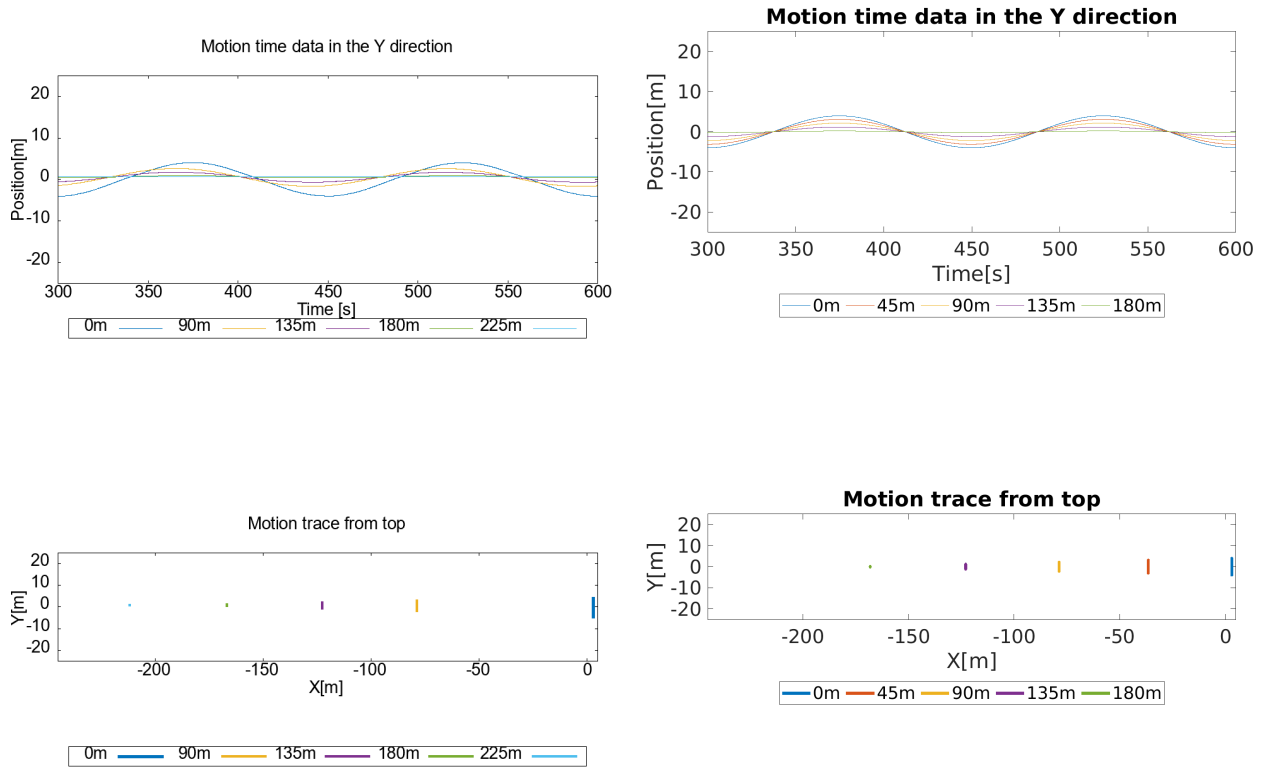


Fig5.45 Coordinate fluctuation result of Case 7 in case of considering the effect of friction

○ Case 8 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

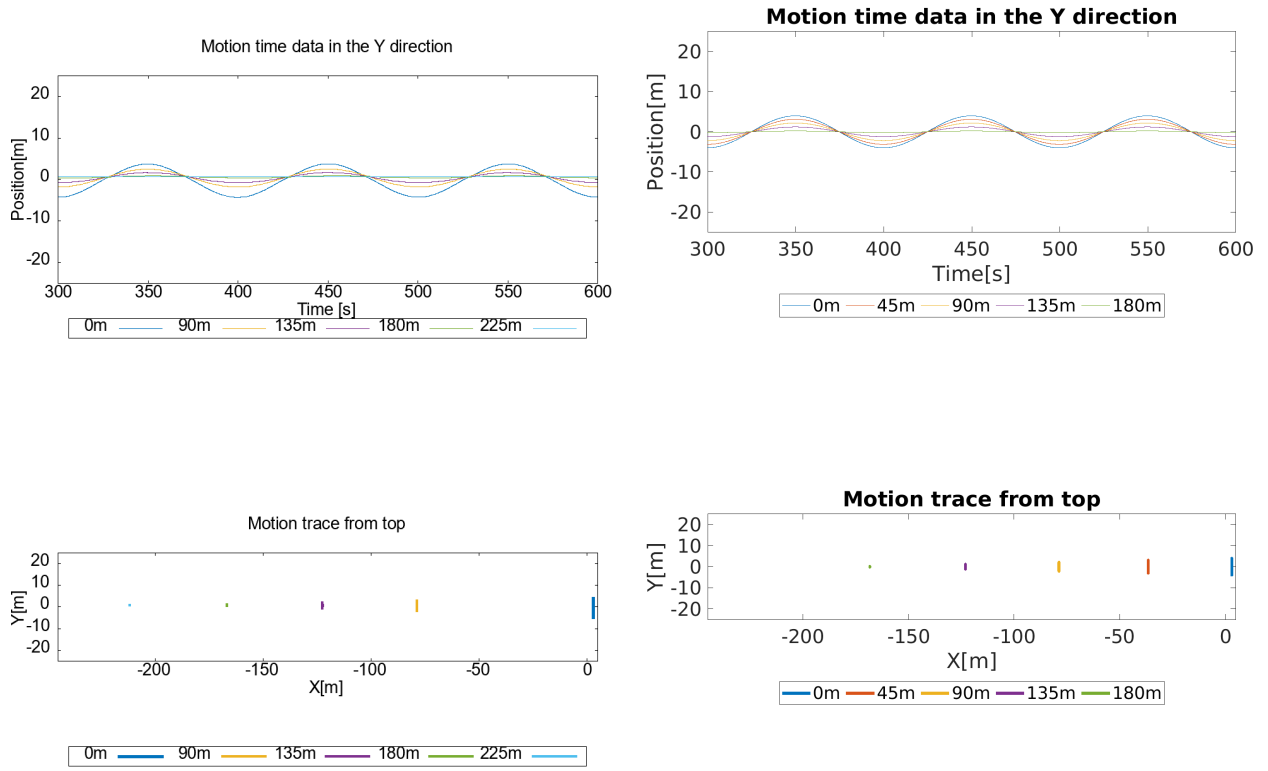


Fig5.46 Coordinate fluctuation result of Case 8 in case of considering the effect of friction

○ Case 9 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

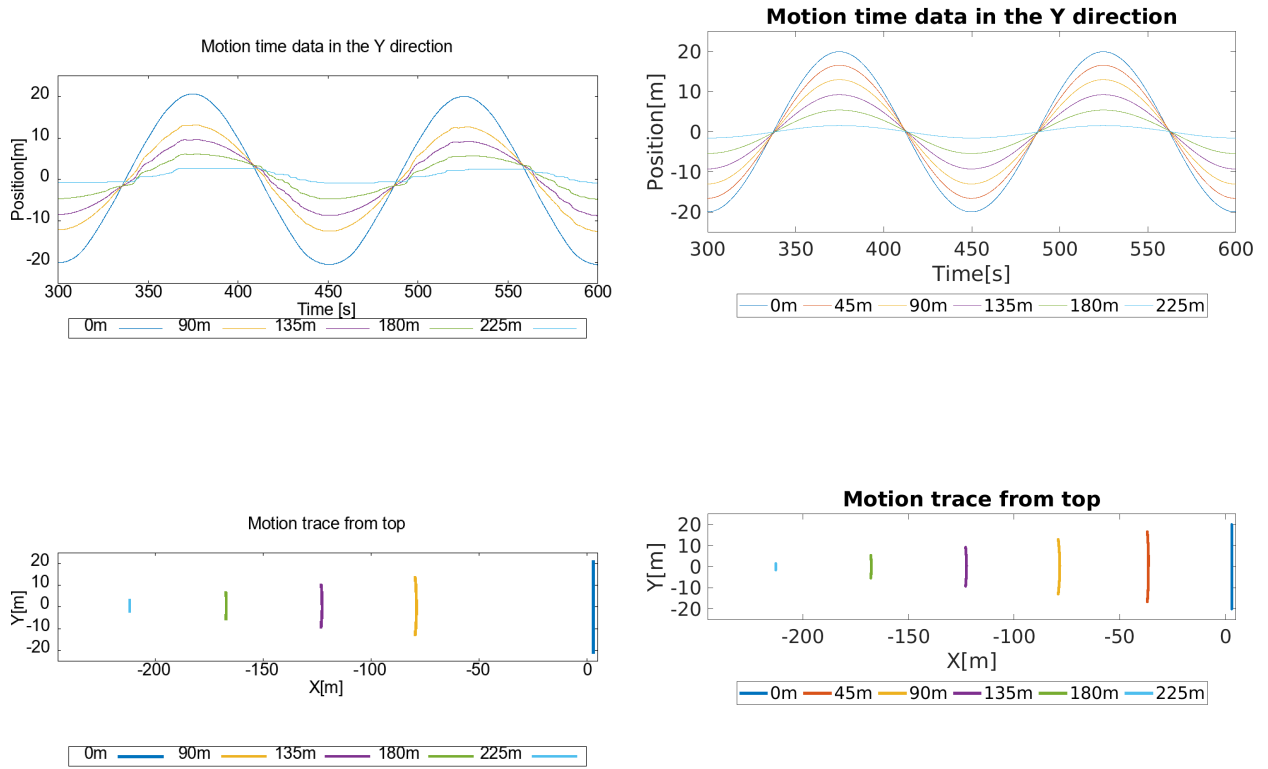


Fig5.47 Coordinate fluctuation result of Case 9 in case of considering the effect of friction

○ Case 10 (左列：実験結果、右列：数値計算結果)

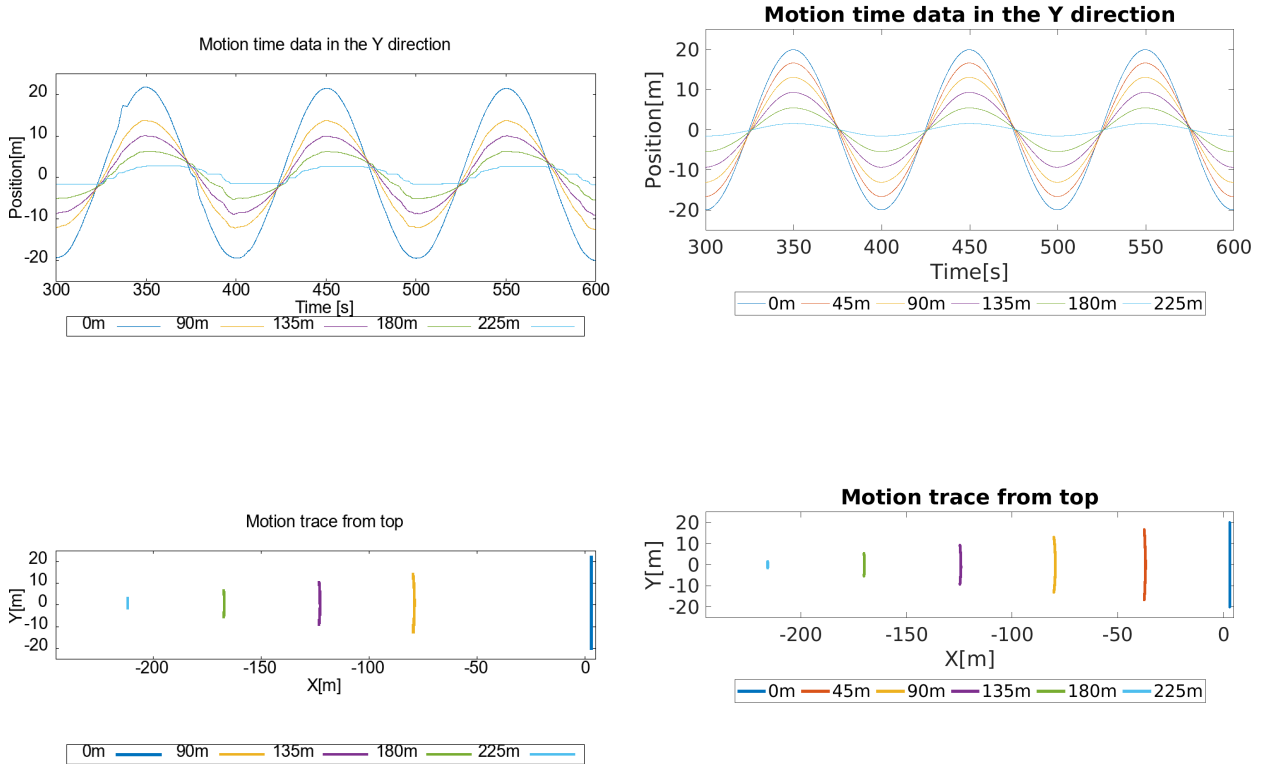


Fig5.48 Coordinate fluctuation result of Case 10 in case of considering the effect of friction

タッチダウン点よりアンカー側の位置である 225m の地点では索は滑らかに動かず、時系列の波形のグラフおよび変動範囲に多少の差異が見られたものの、設定アンカー点の位置を変更した場合は、各点の座標の変動範囲が実験結果に概ね一致した。このことから、以降 Y 軸方向に動揺が含まれる場合の計算では、アンカー点を Fig5.44 に示す関係式に基づいて設定することにする。

3 軸方向加振のうち、Case 11, 15, 17 のケースにおける座標変動結果を以下に示す。なお Case11, 15, 17 以外の結果は付録 A.1 に掲載する。

Fig5.49, 5.50, 5.51 の左右のグラフをそれぞれ比較すると、いずれのケースも座標変動範囲の大きさは再現できたといえる。しかし、Case 15 の Z 座標の時系列データを比較すると実験結果の方が位相が進んでいることが確認できる。これを示すために、Case 15 において上端から 90m の点の Z 座標の時系列データを重ね合わせたものを Fig5.52 にプロットする。この原因として考えられることは、実験開始時にチェーン全体が完全に静止していない状態で加振を始めた可能性が挙げられる。加振開始時に、係留索の加振点が静止状態でも持ち上がり部分がわずかに動く座標変動に影響を与えることが考えられる。また、Fig5.50, 5.51 の 3 段目の Y 座標の時系列データの波形から、タッチダウン点と X 切片の間の長さ 180m 地点は摩擦の影響により滑らかに動かないことが読み取れる。

次ページ以降の Fig5.49, 5.50, 5.51 において

- 1 段目：加振点の X・Z 座標の時系列データ
- 2 段目：位置 S03(上端から索に沿った長さ 90m の地点) の Z 座標の時系列データ
- 3 段目：各点の Y 座標の時系列データ
- 4 段目：各点の軌跡を上から見た図

としている。なお、横軸の時系列は全グラフで揃えている。

○ Case 11 (左列：実験結果 (実機スケールに換算、以下同様)、右列：数値計算結果)

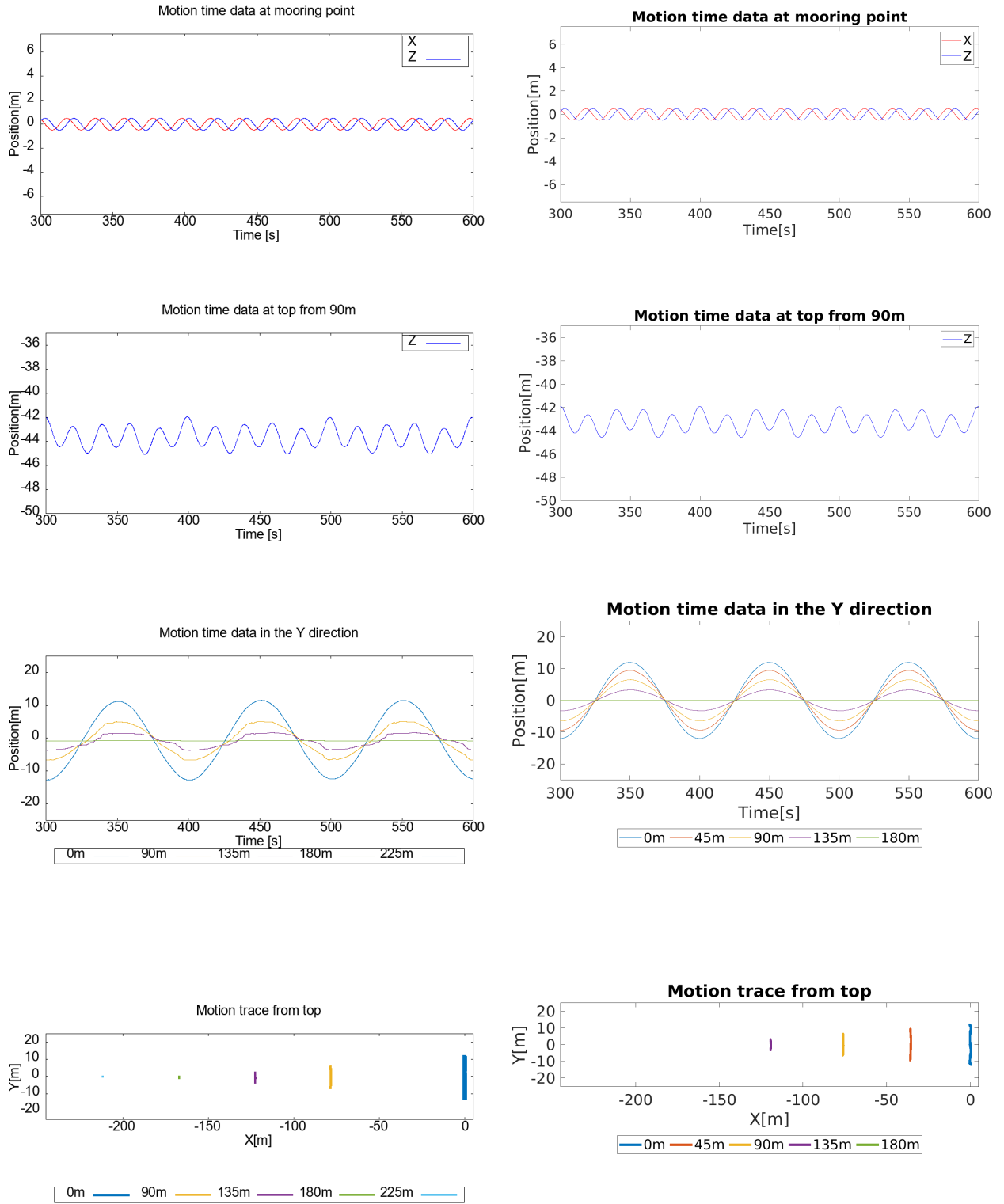


Fig5.49 Coordinate fluctuation result of Case 11

○ Case 15 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)

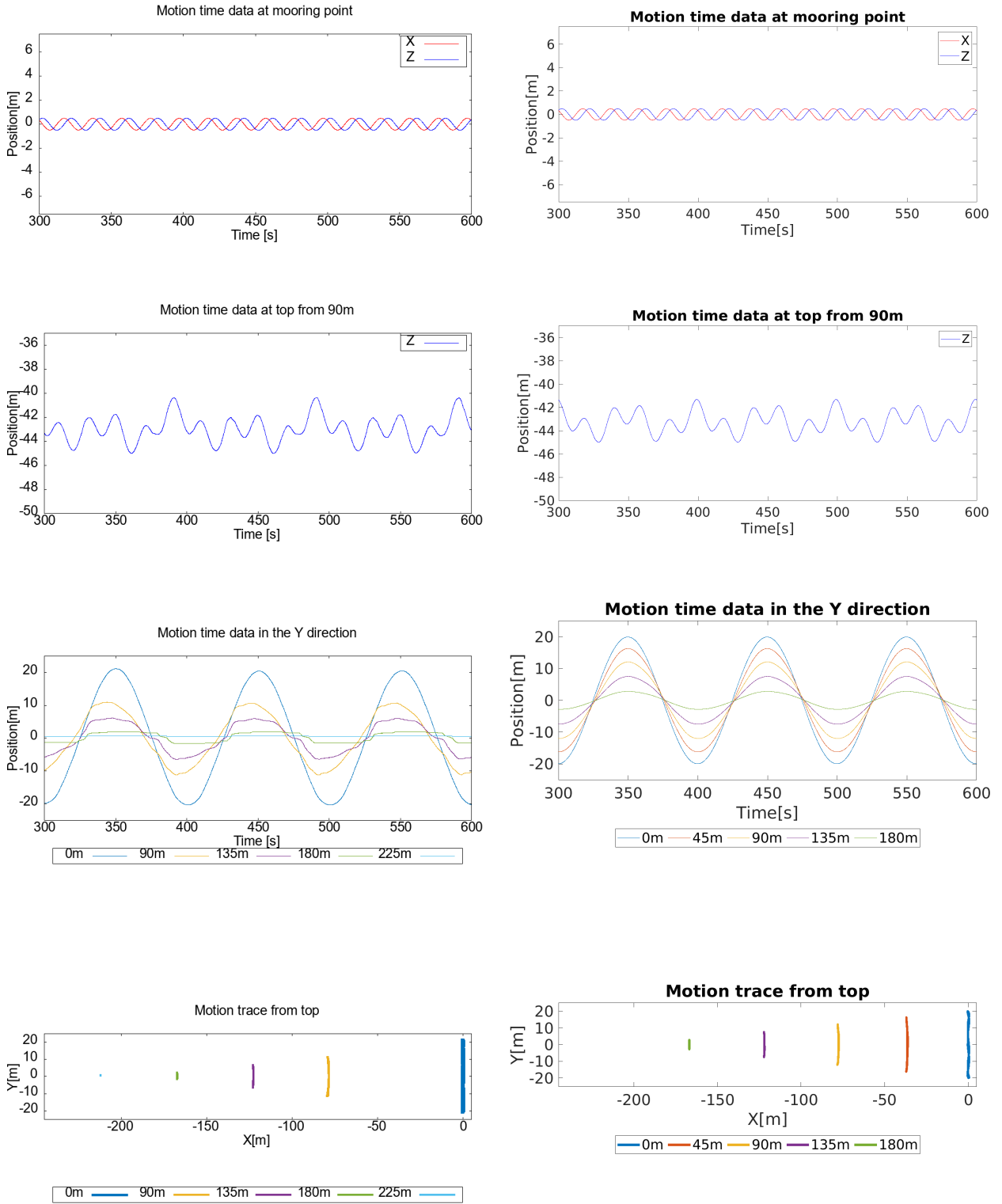


Fig5.50 Coordinate fluctuation result of Case 15

○ Case 17 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)

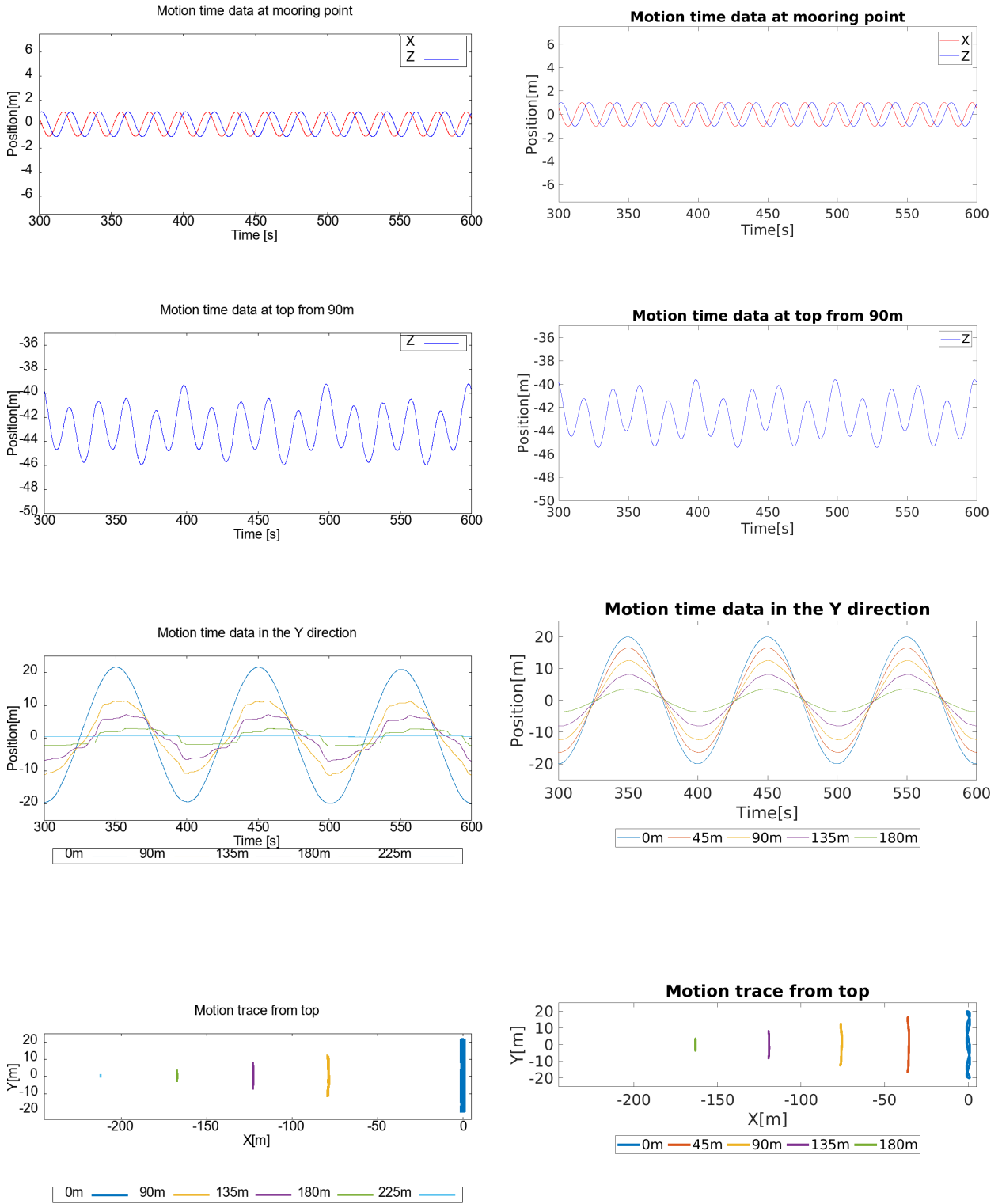


Fig5.51 Coordinate fluctuation result of Case 17

○ Case 15 Z 座標の時系列データの比較

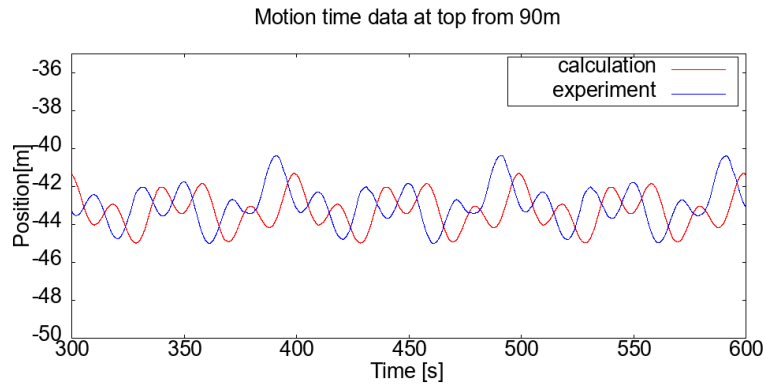


Fig5.52 Comparison result of Z coordinate fluctuation of Case 15

5.8 張力変動比較結果

この節では、係留索の各点の張力について、FBG 張力計で計測した実験結果とプログラムでの数値計算結果を比較する。実験データは 0.005 秒ごとに収集を行ったが、計測値にはノイズが含まれていた。そこで、それぞれのケースの張力変動周波数が通過帯域に含まれるように、ローパスフィルタによって処理を行っている。

グラフに示されている実験結果は全て実機スケールである水深 50m の場合に換算している。数値計算のパラメータは、実験条件から実機スケールに換算したもの (Table5.4 参照) を使用している。張力計は Qualisys マーカーに隣り合うように設置したため、座標変動の検証と同様に上端 (加振点) からチェーンの長さ方向に 45m ずつ区切った地点で張力変動を比較する。なお Fig5.23 と Fig5.24 に示すように測定張力には誤差範囲があることから、張力の計測値の生データの検証は行わず、変動範囲の大きさおよび張力変動の周期、位相関係によって検証を行うことにする。

5.8.1 X 軸方向 +Z 軸方向加振

各計測点ごとに、測定張力を実機スケールに換算した値を青線で、数値計算で求めた張力を赤線で重ね合わせてプロットしている。縦軸が張力値、横軸が時系列で、縦軸の表示範囲は全グラフで $0 \sim 1.0 \times 10^6 \text{N}$ に揃えている。

○ Case 1

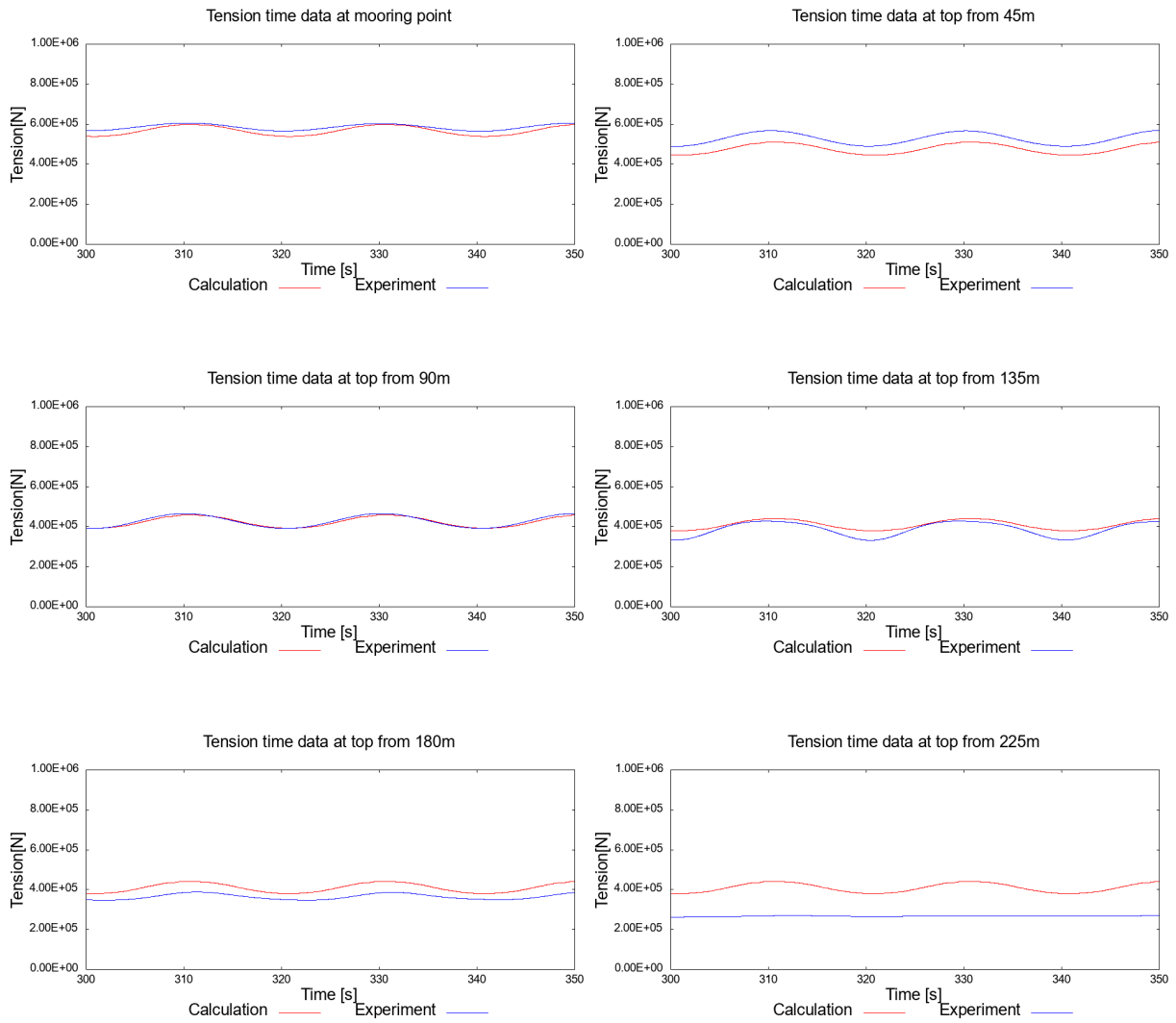


Fig5.53 Tension fluctuation result of Case 1

○ Case 2

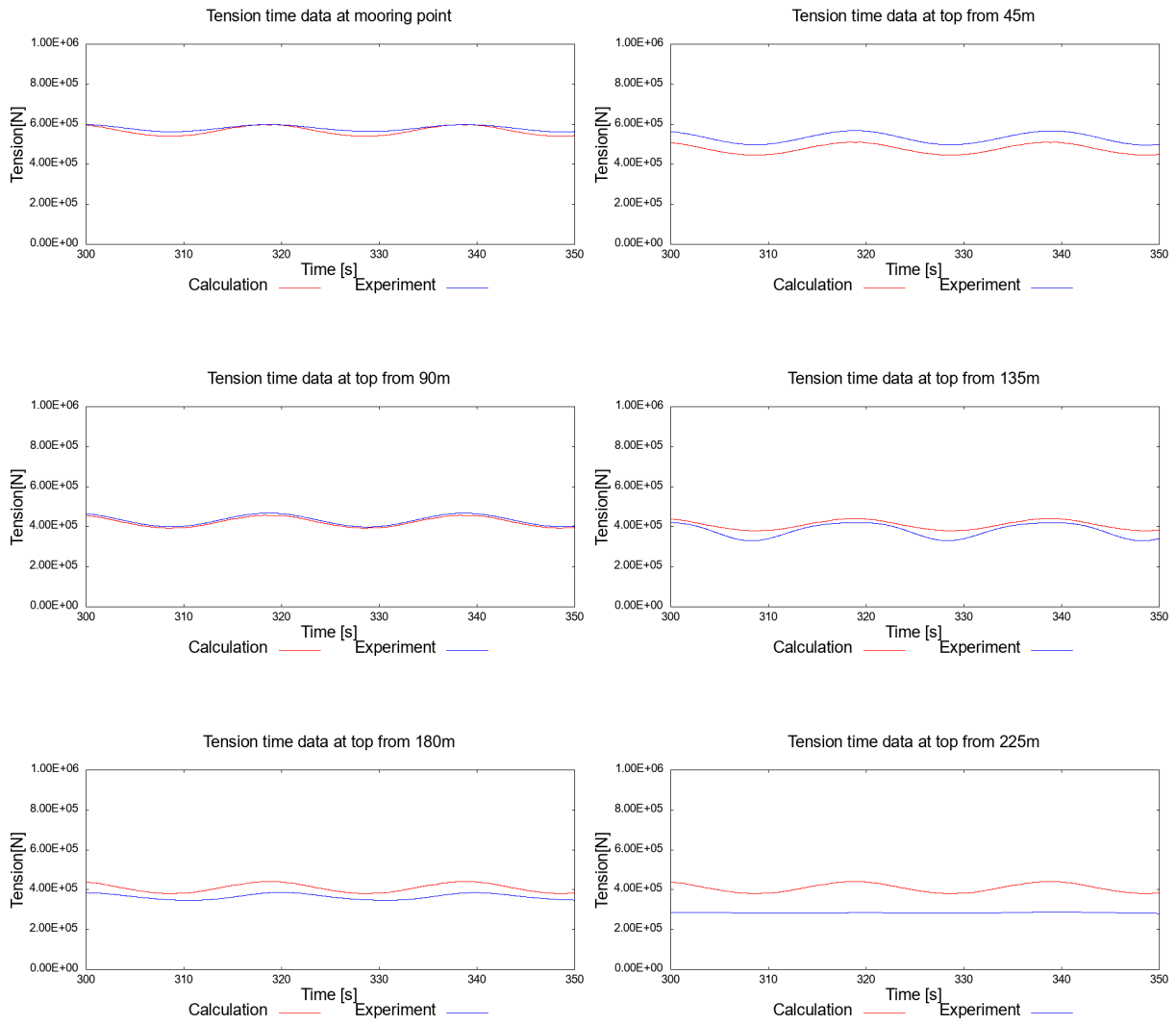


Fig5.54 Tension fluctuation result of Case 2

○ Case 3

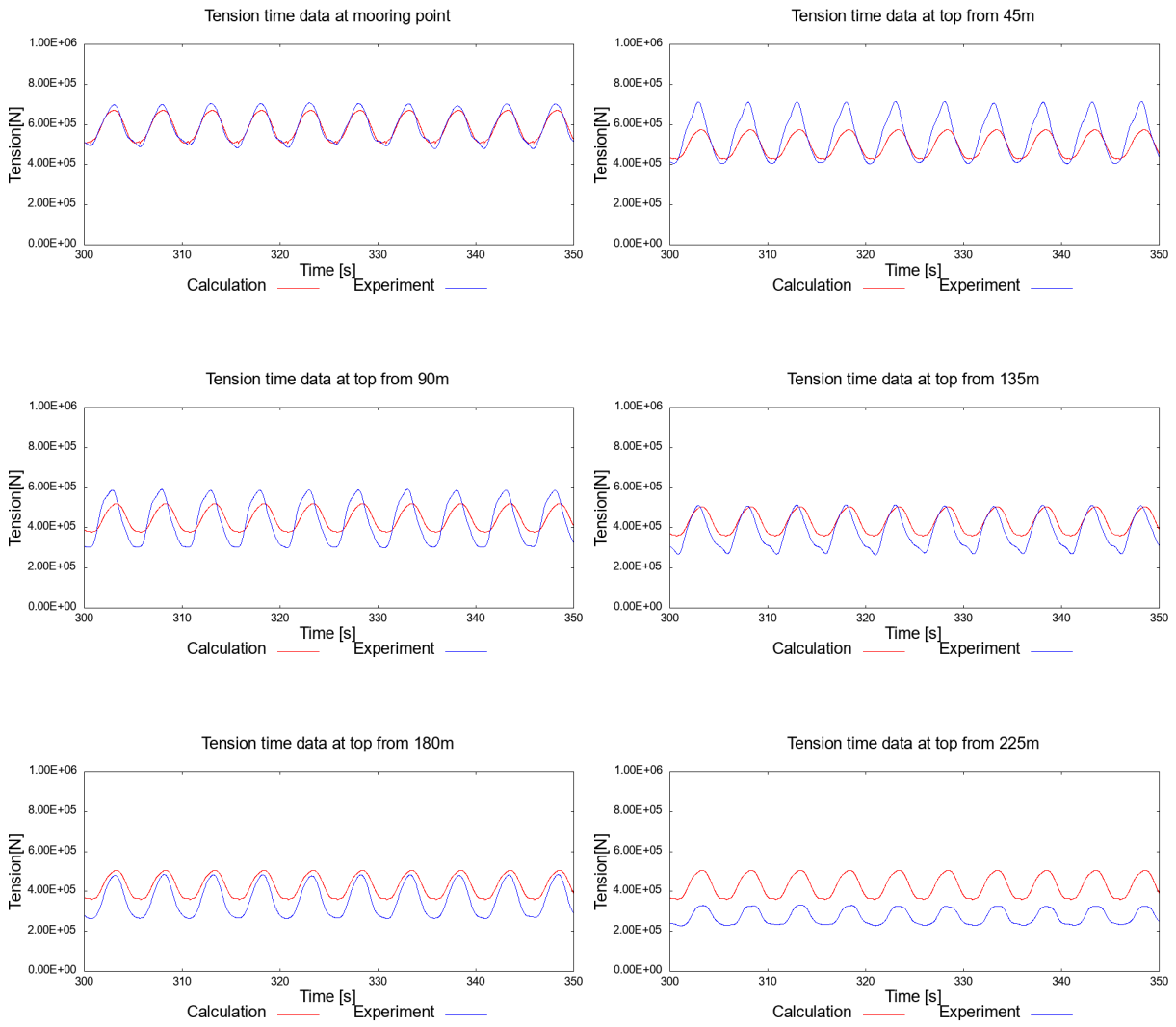


Fig5.55 Tension fluctuation result of Case 3

○ Case 4

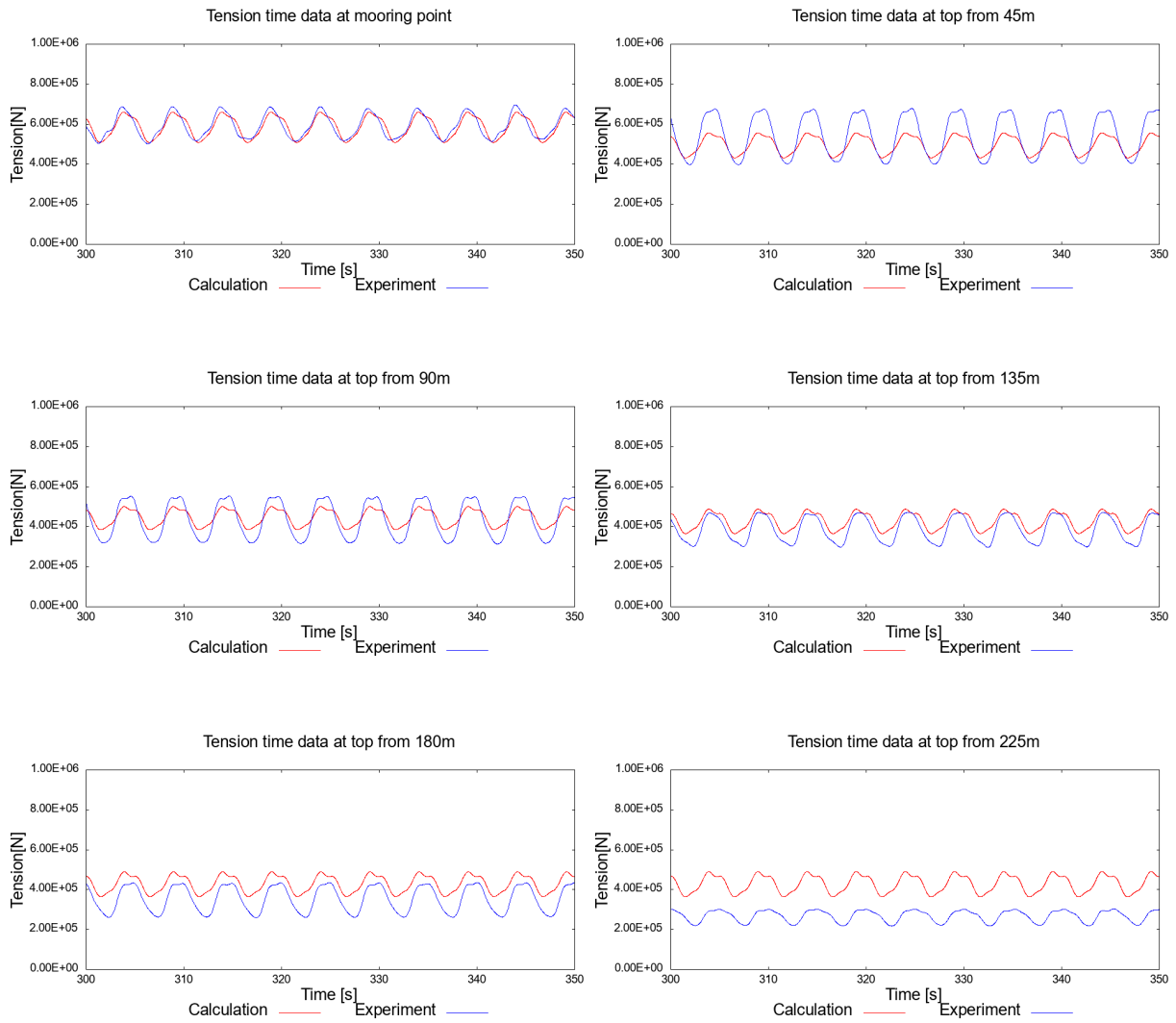


Fig5.56 Tension fluctuation result of Case 4

○ Case 5

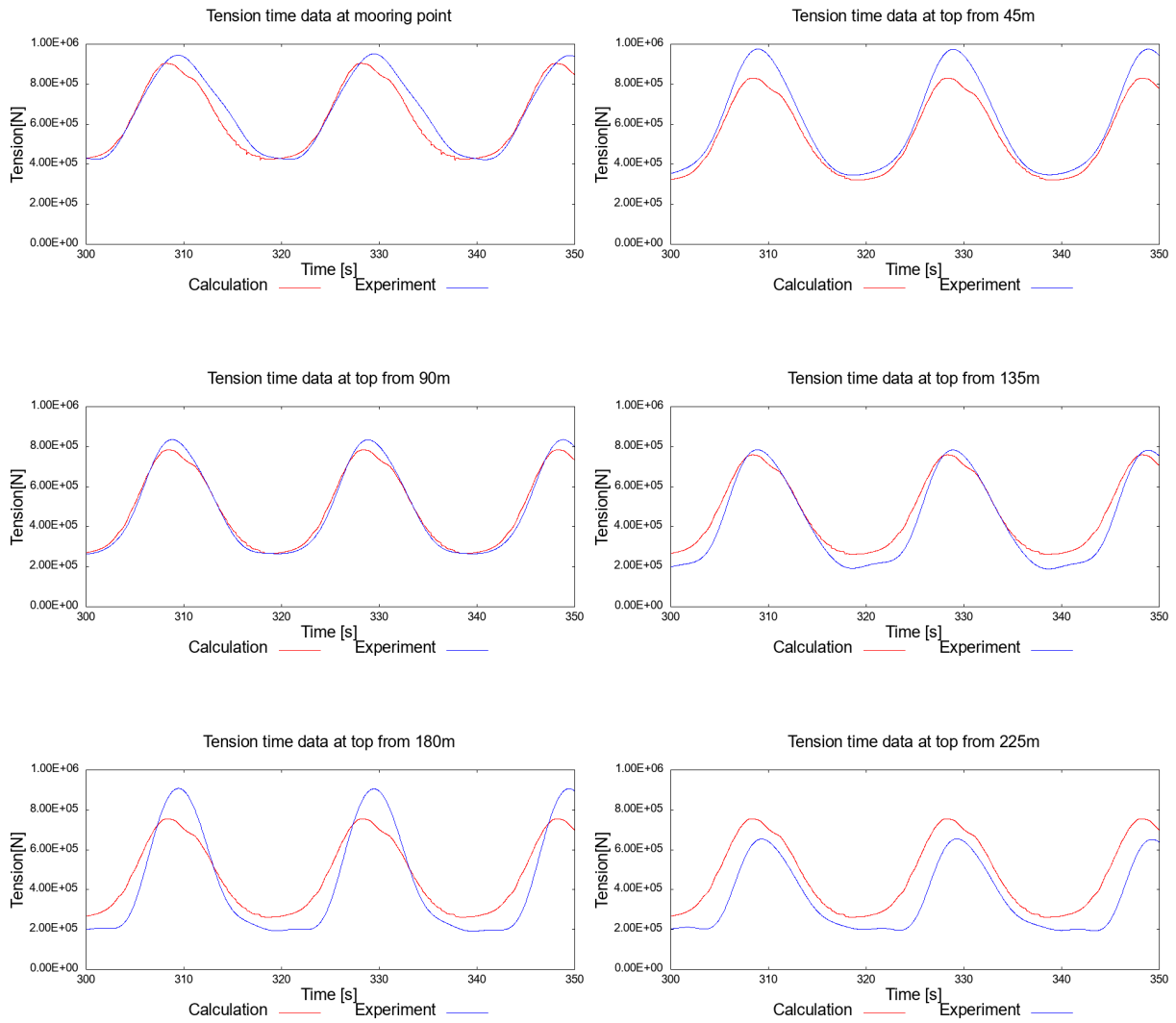


Fig5.57 Tension fluctuation result of Case 5

○ Case 6

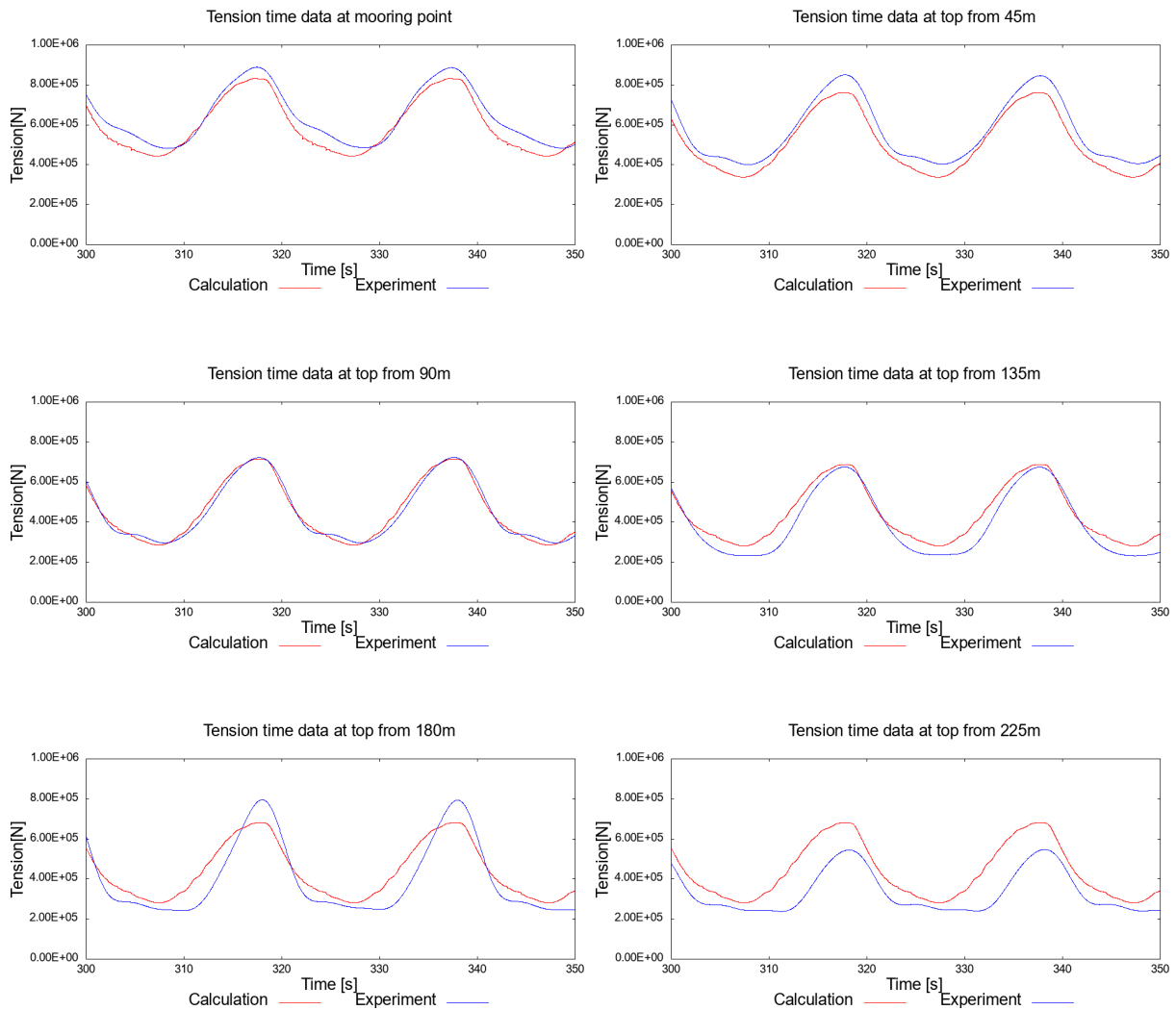


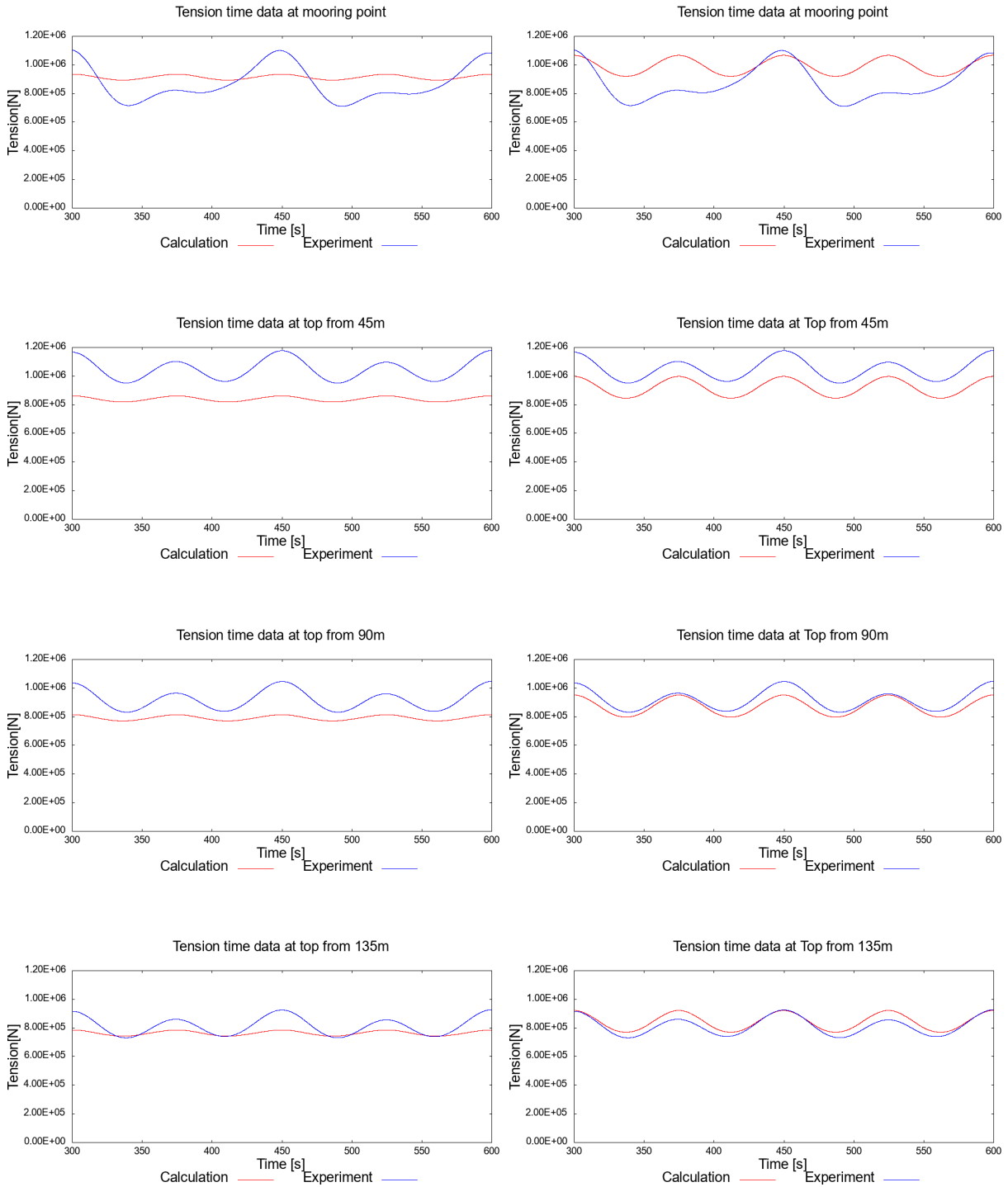
Fig5.58 Tension fluctuation result of Case 6

5.8.2 Y 軸方向加振

X 軸方向 +Z 軸方向加振のケースと同じ要領でグラフを描いている。ただし S06 の張力計はチェーンが静的状態である場合も測定誤差が大きく、特に Y 軸方向に加振した場合は水槽の底面との摩擦の影響を受けやすく正確性が検証ができないため、以降の条件では上端からの長さ 225m の位置での張力の測定結果は掲載しない。

この節では、左列に元の初期水平長で計算を行った結果、右列に設定アンカー点の位置を変更して計算を行った結果を示す。縦軸の表示範囲は全グラフで $0 \sim 1.2 \times 10^6 \text{N}$ に揃えている。なお Case 7 と Case 8 の動揺振幅 4.0m のケースでは、実験における Y 軸方向の振動の中心の原点に対するずれの影響が大きかったため、数値計算との比較検証を行わない。

○ Case 9 (左列：元の初期水平長で計算、右列：アンカー点の位置を変更して計算、左列と右列の実験結果は同一)



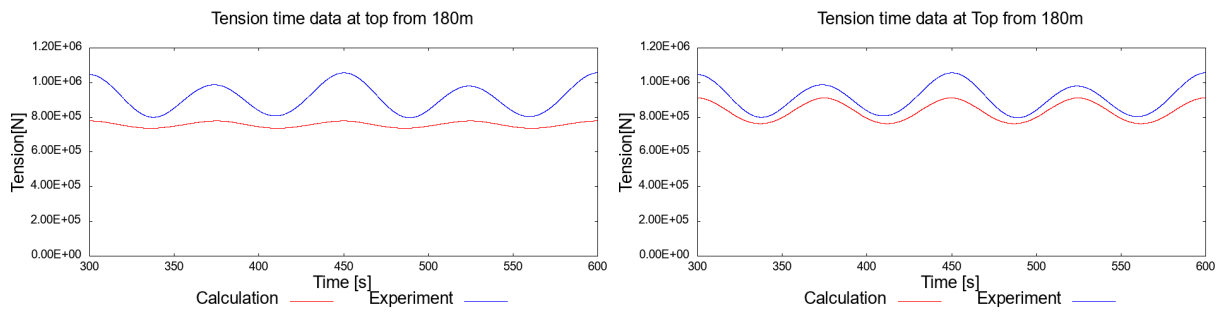
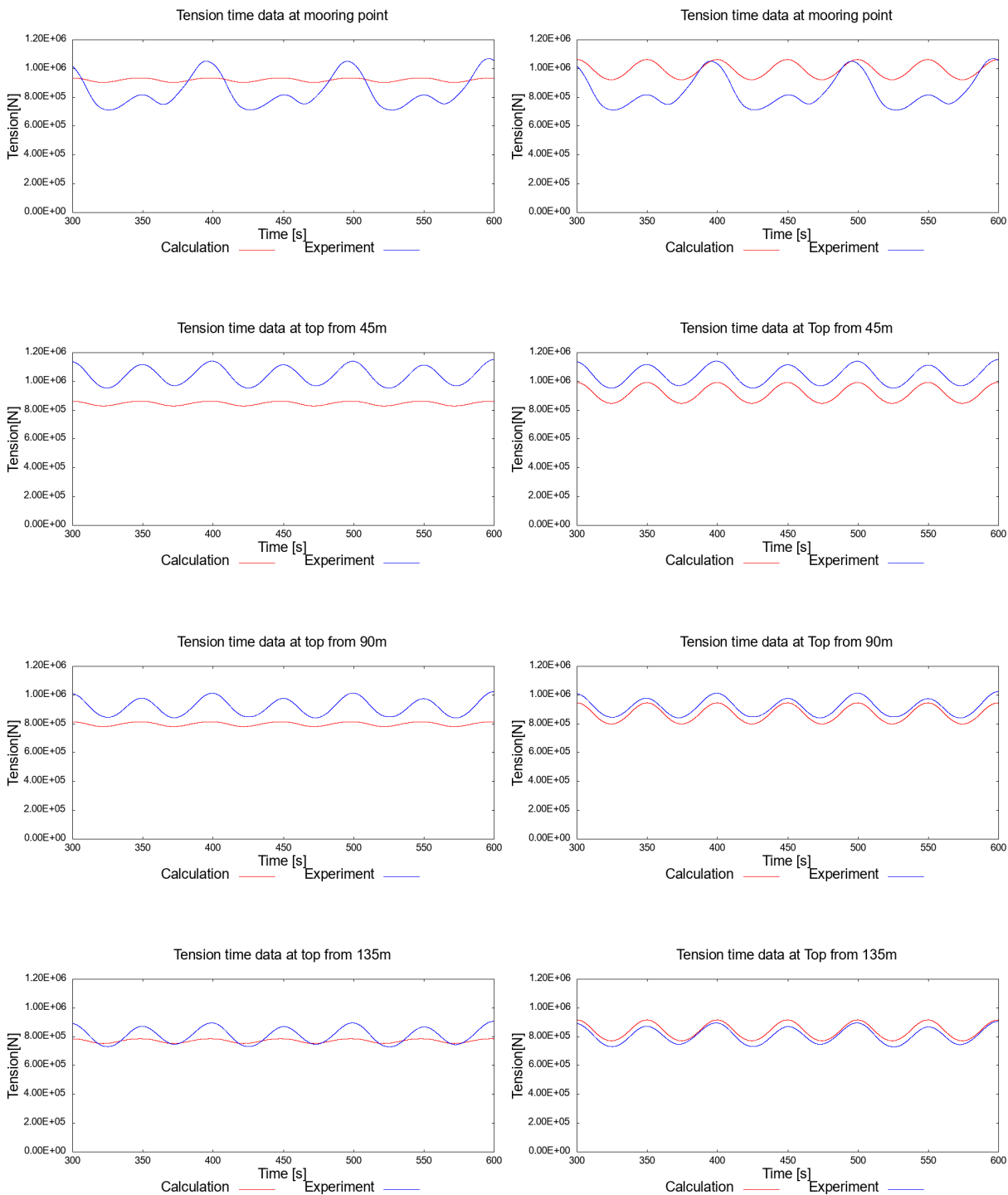


Fig5.59 Tension fluctuation result of Case 9

○ Case 10 (左列：元の初期水平長で計算、右列：アンカー点の位置を変更して計算、左列と右列の実験結果は同一)



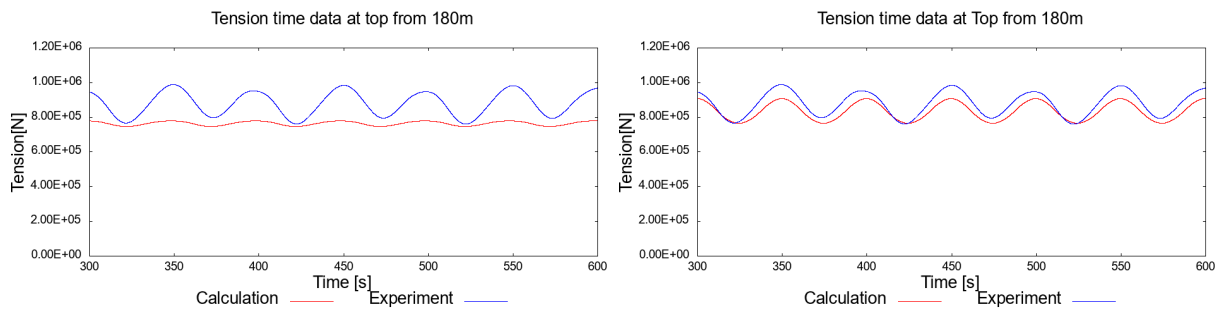


Fig5.60 Tension fluctuation result of Case 10

5.9 張力変動比較結果考察

○ X 軸方向 +Z 軸方向加振の条件

上端(加振点)付近の張力変動の結果は、いずれの条件も変動範囲の大きさ、張力変動の周期、位相関係全てにおいて実験結果と数値計算結果が概ね一致した。上端からチェーンに沿った長さ 45m、90m の地点はいずれも索の持ち上がり部分である。それらの地点での張力変動の結果は、動揺周期が 20s の Case1, 2, 5, 6 では変動範囲の大きさが概ね一致したと言える。しかし、動揺周期が 5s の Case3, 4 では実験結果の方が大きく変動していたことが読み取れる。この原因としては係留索に働く付加質量の影響が大きいことが考えられる。動揺周期が短くなると係留索全体も素早く動揺するため、その分の加速度の増大が張力変動範囲の大きさに影響を与えている可能性がある。この傾向は上端からチェーンに沿った長さ 135m、180m の地点でも確認されている。上端からチェーンに沿った長さ 225m の地点では変動範囲の大きさにあまり違いは見られなかったが、実験結果の波形の極小値部分が平らになっていることが確認できる。これは、係留索が緩む際に海底との接触部分が長くなることから海底との抗力が影響していると考えられる。

○ Y 軸方向加振の条件

張力変動範囲の大きさについて、海底摩擦を考慮せず元の初期水平長で計算を行った場合、実験結果と数値計算結果は異なる結果になった。係留索の上端が同じ動揺条件でも、実験では係留索の途中の点の Y 軸方向への変位に限られるためその分張力変動が激しくなると考えられる。設定アンカー点の位置を変更して計算を行った場合は、上端以外の地点において実験結果と数値計算結果が一致していたといえる。Y 軸方向の動揺周期 1 区間のうちアンカーから加振点までの距離が最大となる時刻が 2 回来ることから、張力変動の周期は動揺周期の半分の周期となる。なお、実験では加振点の Y 軸方向の振動の中心と原点の位置にずれがあったことから、実験結果での変動のピークは少し大小を繰り返していた。

一方上端付近の張力変動は、実験結果と数値計算結果で大きくグラフの形が異なっていた。本来は動揺周期の半分の周期で張力が変動するが、Fig5.61(Case 9 における上端での測定張力データ)と Fig5.62(Fig5.61 の測定張力のデータを高速フーリエ変換した結果)に示すように、動揺周期の成分も含まれてしまっていることが分かる。なおこの条件における動揺周期は 150s なので、加振点の動揺の周波数は 0.0067Hz、本来の張力変動の周波数は 0.0133Hz となる。

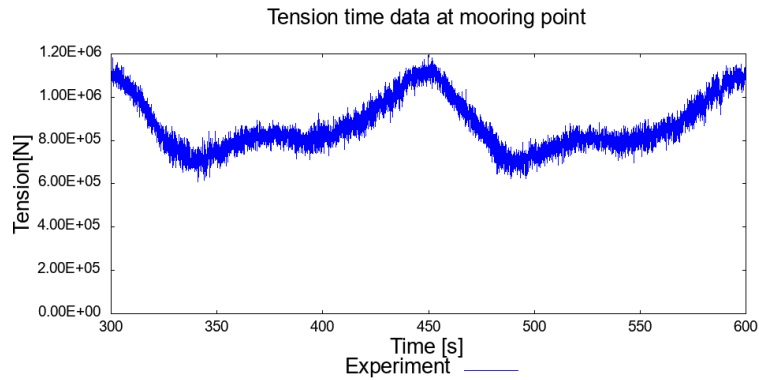


Fig5.61 Time history of the tension before processing with a filter

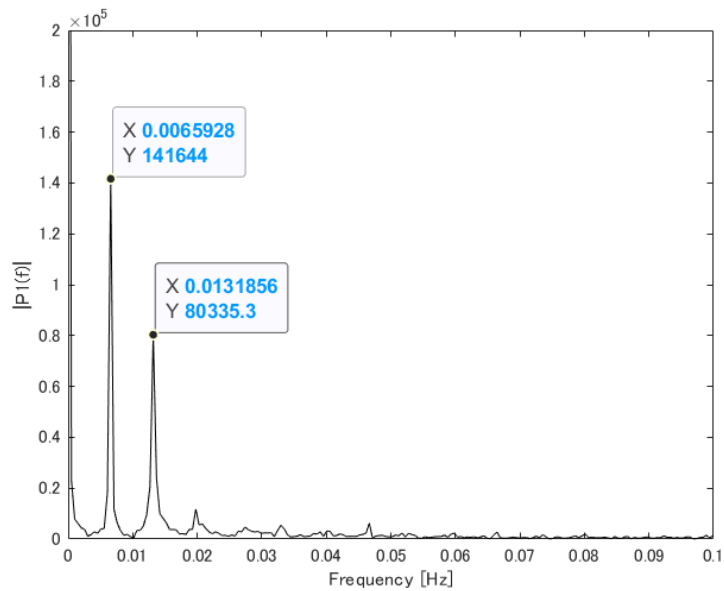


Fig5.62 Single-sided amplitude spectrum of the tension

このように、上端付近での張力計でのみ本来と異なる周波数の成分が測定されてしまう原因として、張力計の取り付け方に問題があることが考えられる。チェーンの上端付近での張力計の取り付け写真を以下に示す。黄色い枠で囲った部分が張力計になっている。

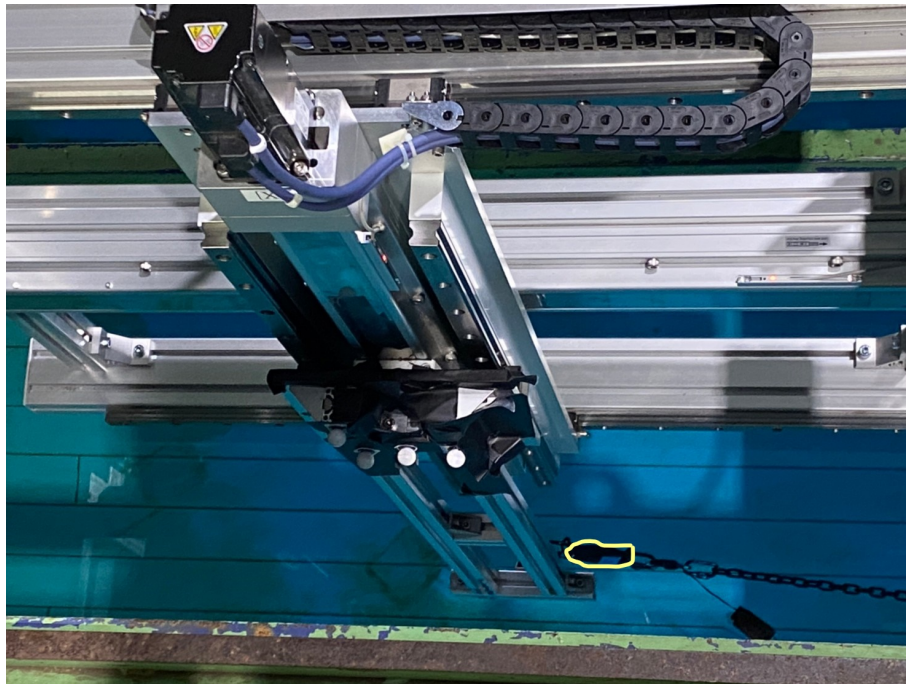


Fig5.63 Installation of FBG tension sensor

曳引台車を使用した Y 軸方向加振では、Fig5.63 の前後方向に加振している。この方向に加振する場合、強制動揺装置のフレームの位置は変動しないが、チェーンの伸びる角度は変動する。したがって、手前の方向に加振点が移動する際は問題ないものの、奥の方向に加振点が移動する際に張力計が強制動揺装置のフレームに引っかかり余分な力が発生している可能性がある。写真のフレームの奥側の面に張力計を取り付けていることから、この問題が発生していると考えられる。この問題を改善するためには、フレームの真横にチェーンを取り付けるといった方法がある。ただ今回の実験では Fig5.63 の取り付け方のまま全ケース測定してしまったため、検証では便宜上、本来の張力変動の周波数成分を取り出すようにバンドパスフィルタで処理し、それを実験結果として扱う。

バンドパスフィルタで処理した結果を Fig5.64,5.65 に示す。

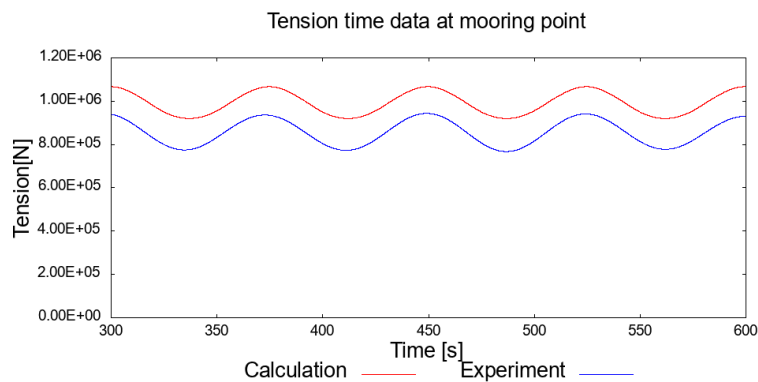


Fig5.64 Tension fluctuation result at mooring point of Case 9 after processing with a band-pass filter

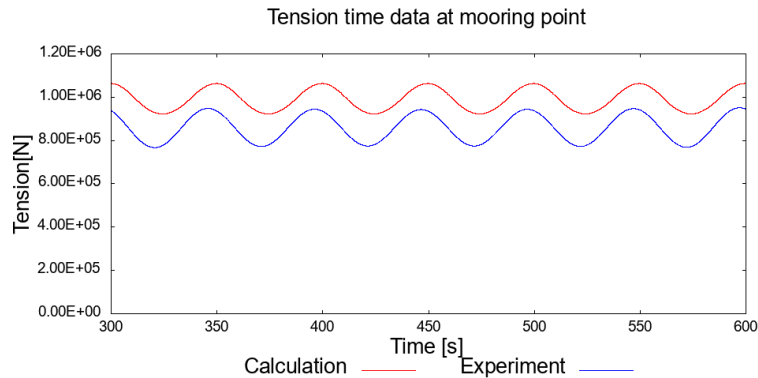


Fig5.65 Tension fluctuation result at mooring point of Case 10 after processing with a band-pass filter

Fig5.64,5.65 より、本来の張力変動成分を取り出して実験結果を処理した場合は、係留索上端の測定張力の変動幅が数値計算結果での変動幅に概ね一致することが確認された。

3軸方向加振のうち、Case11, 15, 17における張力変動結果を以下に示す。実験結果においては上端での測定張力にバンドパスフィルタを掛けて処理している。縦軸の表示範囲は全グラフで $0 \sim 1.0 \times 10^6 \text{ N}$ に揃えている。なお Case11, 15, 17 以外の結果は付録 A.2 に掲載する。

Fig5.66, 5.67, 5.68 より、上端からチェーンに沿った長さ 45m の地点では、実験結果と計算結果のグラフの波形がぴったりと一致していることが分かる。また、上端と上端からの長さ 90m 地点においては、実験結果と計算結果で張力の値自体に違いはあったものの波形はほとんど同じ形をしていた。このことより、係留索が海底と接触せず持ち上がっている部分については数値計算で得られた張力が妥当であるといえる。上端からチェーンに沿った長さ 135m の地点は初期状態におけるタッチダウン点近傍の地点であり、海底と接触したり離れたりする動揺を繰り返す。この地点においても実験結果と計算結果で張力変動の波形は近い形をしていたが、実験結果の方が極小値のピークが多少鋭くなっていることが分かる。上端からチェーンに沿った長さ 180m の地点は、上下方向 (Z 軸方向) にほとんど動かず、ほぼ全時刻で海底に接触する部分である。この地点では実験結果と計算結果で張力変動の波形は一致しなかった。この原因としては、海底摩擦係数のパラメータを入れて計算できなかったことが考えられる。

以上より、係留索の上端からタッチダウン点付近までの区間において、動的解析プログラムで計算した張力の妥当性が示された。

○ Case 11

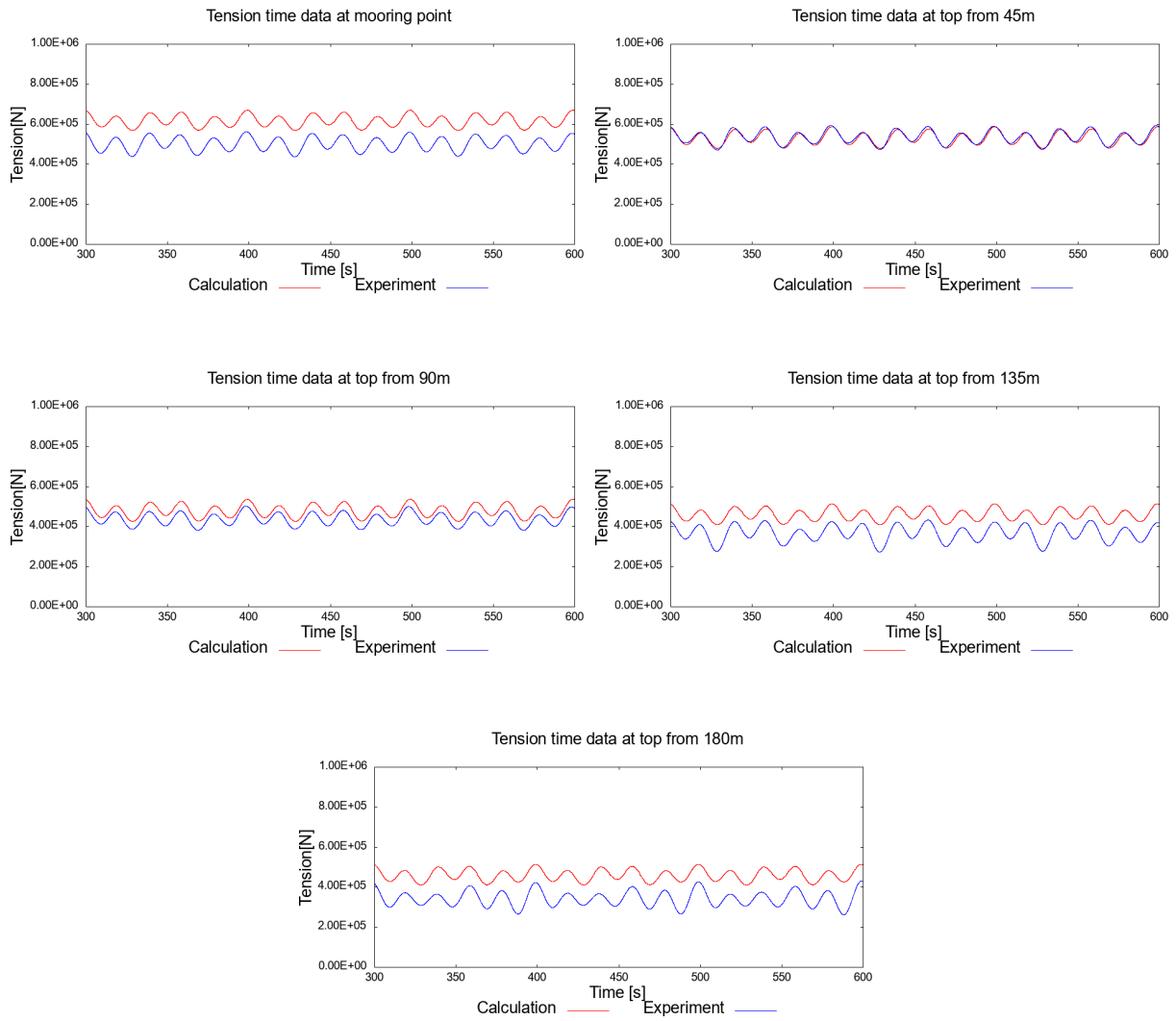


Fig5.66 Tension fluctuation result of Case 11

○ Case 15

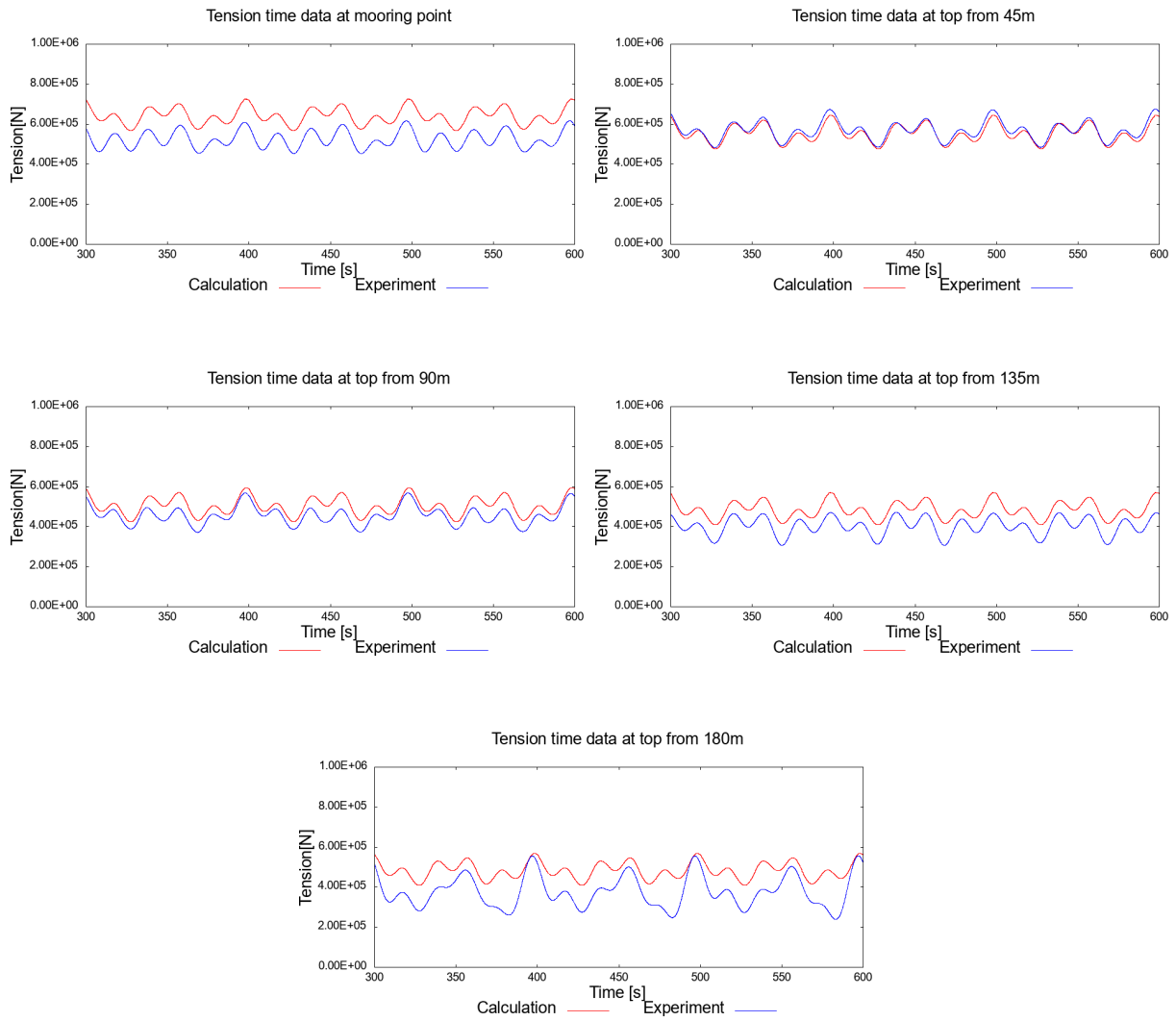


Fig5.67 Tension fluctuation result of Case 15

○ Case 17

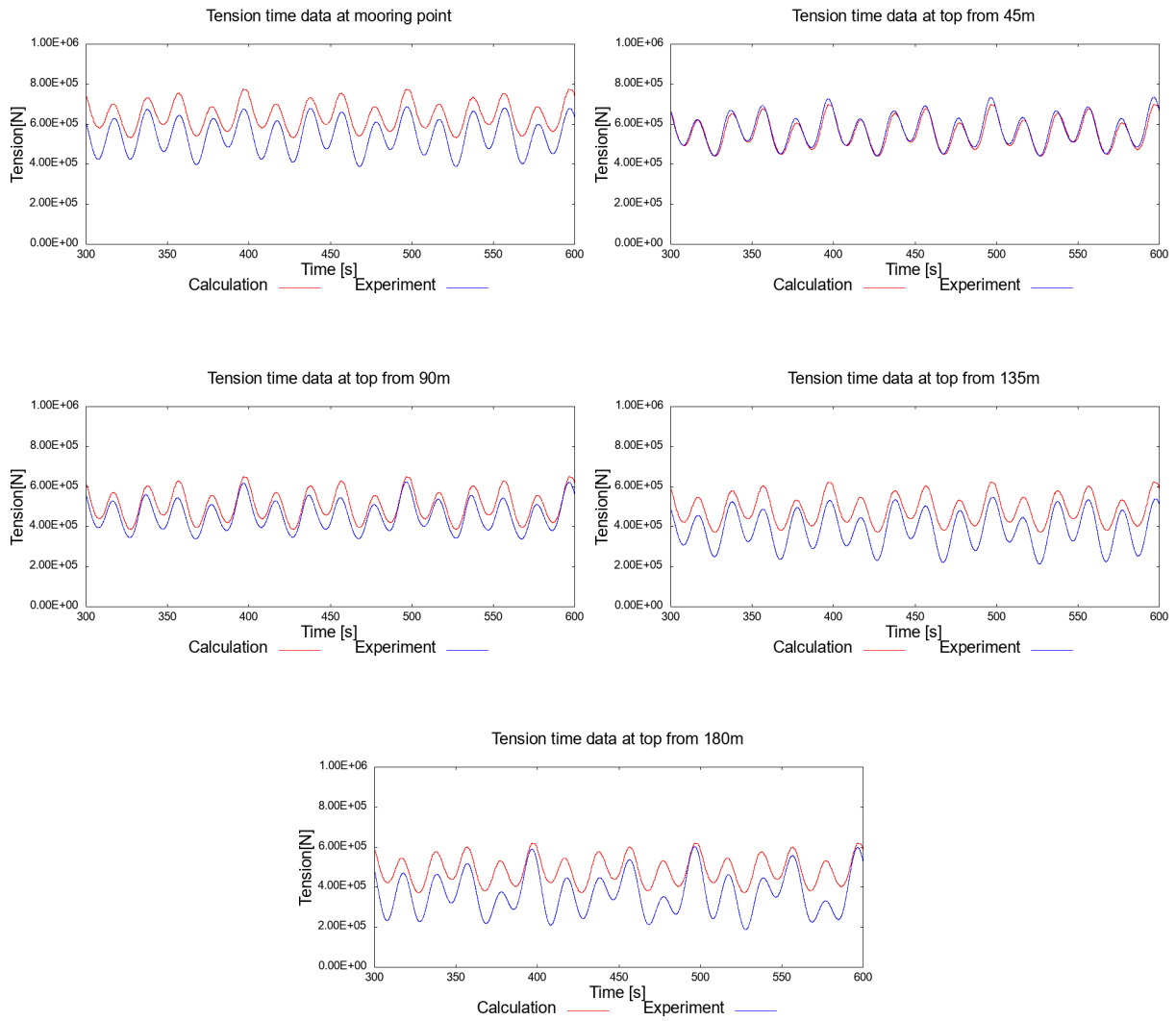


Fig5.68 Tension fluctuation result of Case 17

第 6 章

張力変動特性

本研究では、係留索の動的解析プログラムを使用して各質量節点の位置と張力を時系列ごとに出力した。本章では、張力変動範囲の大きさ (変動二重振幅) について数値計算結果を掲載する。これは、張力変動範囲の大きさが係留索の疲労損傷の最も重要なパラメータになっているからである。

6.1 波浪影響による動揺を考慮した場合

浮体は波の力を受けて様々な方向に動揺するが、本研究では浮体が規則波の影響を受けて上下 (heave、Z 軸) 方向、左右 (surge、X 軸) 方向に一定の周期で動揺する場合を想定する。計算の条件は、動揺振幅、周期ともに上下方向と左右方向で同一とし、2 方向の動揺の位相差を変えて計算を行った。位相差は実験条件 (Fig5.26) で定義した” 回転 + 方向” と” 回転 - 方向” の 2 パターンとした。動揺周期の設定範囲は実際に起こりうる波の周波数を網羅するように 4~20s とし、周期を 1.0s ごと (15~20s の区間は 2.5s ごと) に変えて計算を行った。また動揺振幅の設定範囲を 0.5~5.0m とし、振幅を 0.5m ごと (3.0~5.0m の区間は 1.0m ごと) に変えて計算を行った。計算ケースを Table6.1 に示す。係留索の物性値は Table5.4 に載せている値を用い、初期水平長を Table5.5 に従い設定した。なお、セルに×を記入したケースは、張力変動幅が初期張力範囲を超えて張力が 0 になるスラック現象が発生したケースである。スラック現象を防ぐためには初期張力を増加させるといった方法があるが、本研究では一定の初期張力で計算を行ったため、このケースについて張力変動範囲の大きさは求めないことにする。

数値計算での索の分割数は 70 としており、Table5.4 で示した全長を分割数で割ると約 9m になる。アンカーに近い点は海底との摩擦や抗力の影響が大きくなり、張力の計算値が妥当ではないと判断したため、上端から数えて 24 番目 (上端から索に沿った長さ 207m の点) までの質量節点の張力変動範囲の大きさを求めた。なお初期状態において上端から数えて 16 番目 (上端から索に沿った長さ 135m の点) の質量節点付近がタッチダウン点となっている。

各計算ケースの測定時間を 800s としており、張力変動が安定した時刻から測定終了時刻までの張力変動範囲を取った。張力変動の時系列データの例を Fig6.1, 6.2 に示す。

Table6.1 Calculation conditions

振幅 [m]	周期 [s]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20
5.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
4.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○
3.0	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○
2.5	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.5	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○：張力変動幅を求めたケース
 ×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

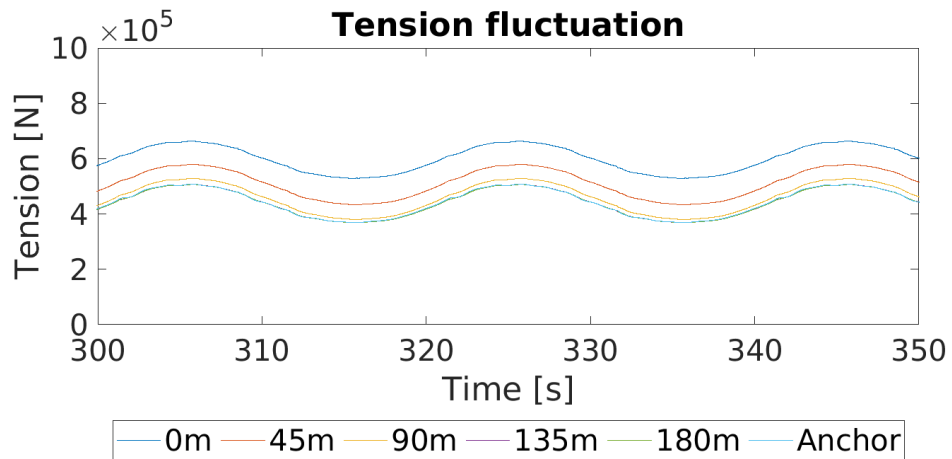


Fig6.1 Time series data of tension fluctuation in Case of Amplitude=1.0m, Oscillation period=20s

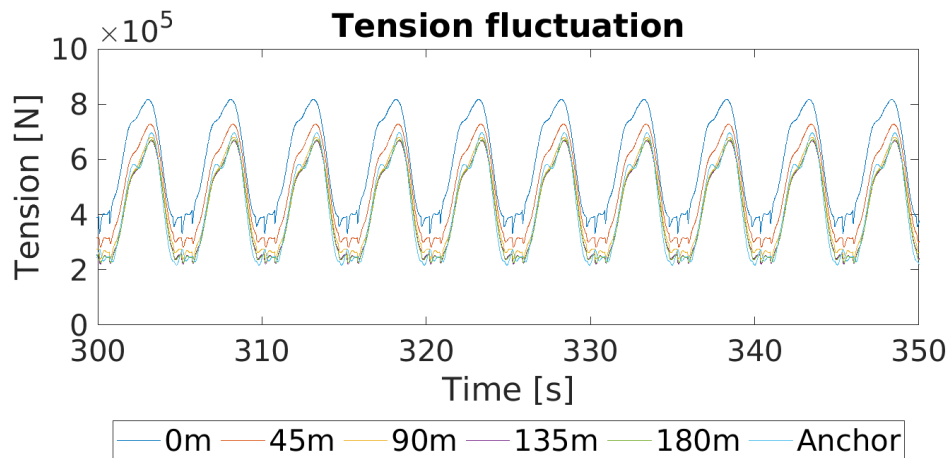


Fig6.2 Time series data of tension fluctuation in Case of Amplitude=1.0m, Oscillation period=5s

Fig6.1 は、振幅 1.0m、周期 20s、回転 + 方向のケースの張力変動の時系列データを示している。このグラフより、張力は動揺周期で変動していることが確認される。

Fig6.2 は、振幅 1.0m、周期 5s、回転 + 方向のケースの張力変動の時系列データを示している。このケースに関しても、張力は動揺周期で変動している。しかし Fig6.1 とはグラフの概形が異なり、張力の極小値が急激に下がっていることが確認される。この現象は動揺周期が短いもしくは動揺振幅が大きいケースでいくつか確認された。つまり係留索の上端の動揺が激しくなると、張力変動の波形が一部の時系列において不連続になることがいえる。この原因は、数値計算上で形状が滑らかに変化しなかったことが考えられる。カテナリー係留の場合、係留索はカテナリー曲線に従う形状になるが、プログラム上では係留索の質量節点間を直線状のセグメントで繋ぐモデルとしている。(4.8) 式より、係留索の計算張力はセグメントのひずみに依存していることが分かる。そのため、セグメントの長さが連続的に変化しなければ、出力される張力も連続ではなくなる。この動揺ケースにおいて、上端の質点とその隣の質点との間のセグメント長さを時系列に示したものを Fig6.3 に示す。

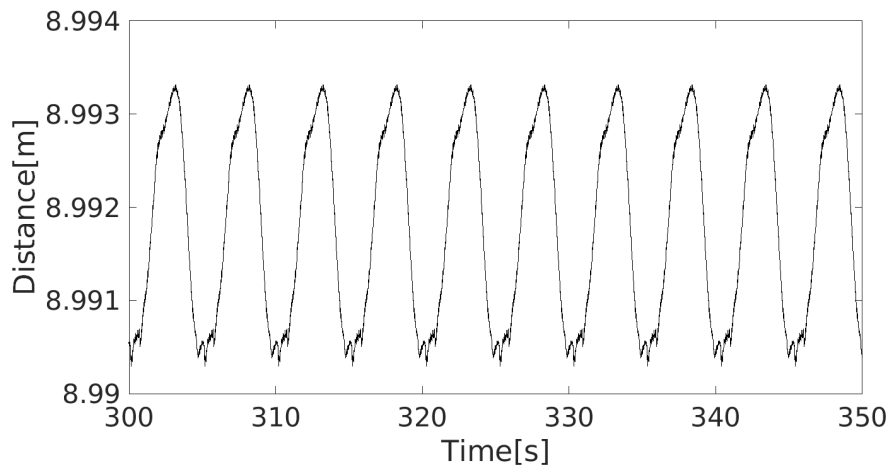


Fig6.3 Time series data of length of segments

このグラフより、セグメントが縮む度にセグメント長さが不連続に変化していることが確認される。これは、曲線状の部分直線を近似した影響により、各質点間における索に沿った長さを正しく反映できなかったことが考えられる。この問題を解決するためには、索の分割数を増やす、もしくはルンゲクッタ法の時間刻み幅を細かくするといった方法がある。

今回は規則波の条件を与えているので、本来ならば不連続な張力の応答は発生しないと考えられる。この不連続な応答を処理するために、動揺周波数の4倍以下の周波数成分が通過帯域に含まれるようにローパスフィルタを掛けた。Fig6.4に、Fig6.2の時系列データをカットオフ周波数0.8Hzでローパスフィルタ処理を行った結果を示す。本研究ではローパスフィルタで処理した張力データを用い、1動揺周期ごとの最大値と最小値の差を取り平均化したものを張力変動範囲の大きさとして定義する。

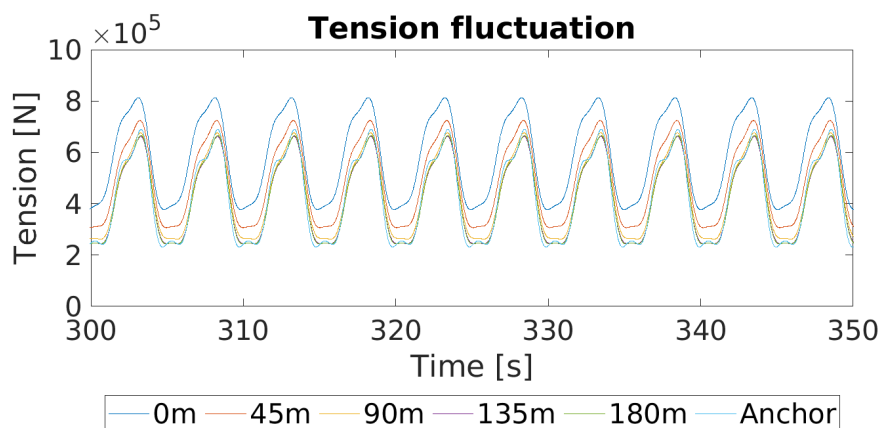


Fig6.4 Time series data of tension processed with a low-pass filter

6.1.1 動的影響の発生するケース

各質量節点において張力変動範囲の大きさを計算し、比較を行った。Table6.2, 6.3 に各ケースごとの張力変動範囲の最大値を示す。

Table6.2 Maximum value of tension fluctuation range in Cases of “+” direction

単位 [kN]	周期 [s]													
振幅 [m]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20
5.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	1298	1145
4.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	1151	1052	965	842	770
3.0	×	×	×	×	×	×	949	837	745	674	622	582	534	505
2.5	×	×	×	×	×	788	681	601	540	492	461	439	414	399
2.0	×	×	×	753	607	512	447	400	363	338	323	312	304	300
1.5	×	×	601	445	363	312	277	251	234	224	220	218	220	221
1.0	757	435	301	218	181	163	148	138	135	134	134	135	141	144
0.5	316	158	99	62	58	55	53	55	58	59	61	63	67	69

×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

Table6.3 Maximum value of tension fluctuation range in Cases of “-” direction

単位 [kN]	周期 [s]													
振幅 [m]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20
5.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	854
4.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	761	692	573	597
3.0	×	×	×	×	×	×	×	585	501	444	399	381	406	431
2.5	×	×	×	×	×	563	460	386	334	300	297	303	336	355
2.0	×	×	×	563	420	328	266	229	213	216	225	239	264	277
1.5	×	×	469	307	219	170	142	139	145	161	173	183	200	209
1.0	731	365	224	135	78	67	74	88	100	111	119	124	134	140
0.5	311	148	72	35	14	29	39	46	51	55	58	61	66	68

×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

以上に掲載した張力変動範囲の最大値は必ずしも上端の質量節点において取るわけではない。大まかな傾向としては、動揺周期が短いケースでは上端において張力変動範囲が最大となり、動揺周期が長いケースでは上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動範囲が最大となった。特に動揺周期 15s 以上のほとんどのケースでは、上端からの長さ 81m 地点における質量節点において張力変動範囲が最大となる傾向が見られた。

回転 + 方向のケースについて、上端における張力変動範囲の大きさ、上端からの長さ 81m 地点における張力変動範囲の大きさと加振周期の関係を示したグラフを以下に示す。

○ Caption

- ・ 0m：上端での張力変動範囲 動的解析結果
- ・ 81m：上端からの長さ 81m 地点における張力変動範囲 動的解析結果
- ・ 0m(Catenary)：上端での張力変動範囲 カテナリー解析結果
- ・ 81m(Catenary)：上端からの長さ 81m 地点における張力変動範囲 カテナリー解析結果

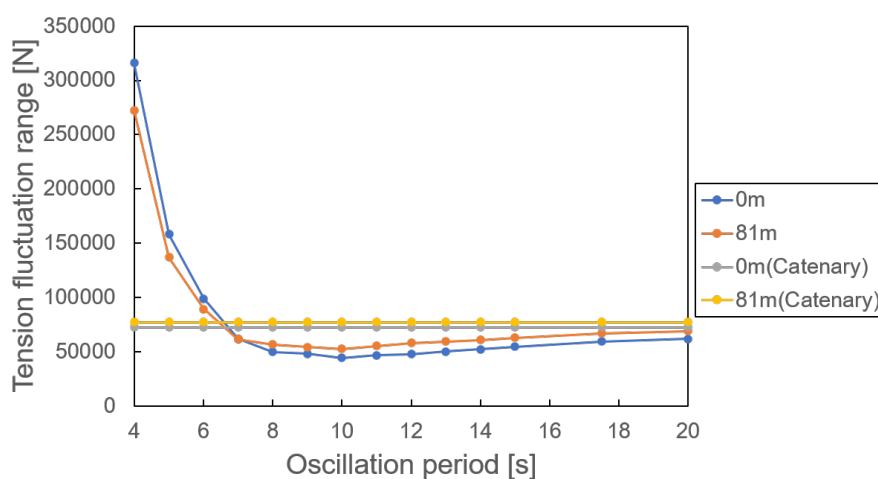


Fig6.5 Tension fluctuation data at each oscillation period in Case of Amplitude=0.5m

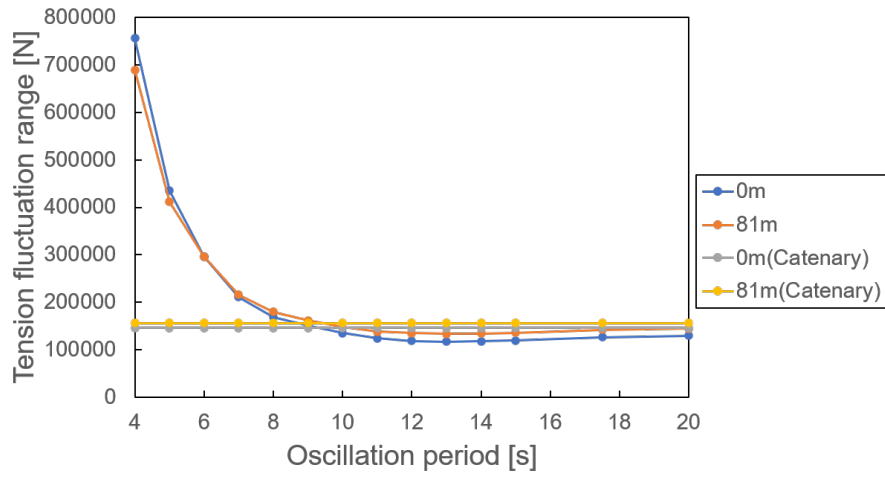


Fig.6.6 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.0m

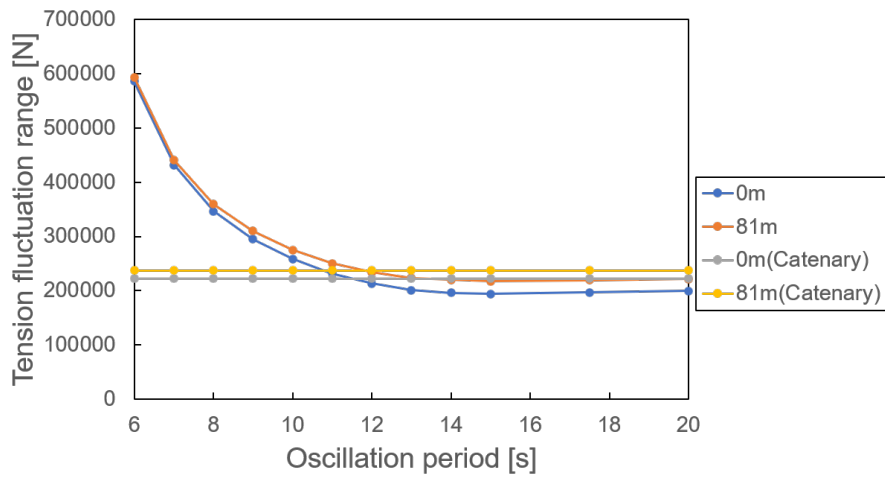


Fig.6.7 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.5m

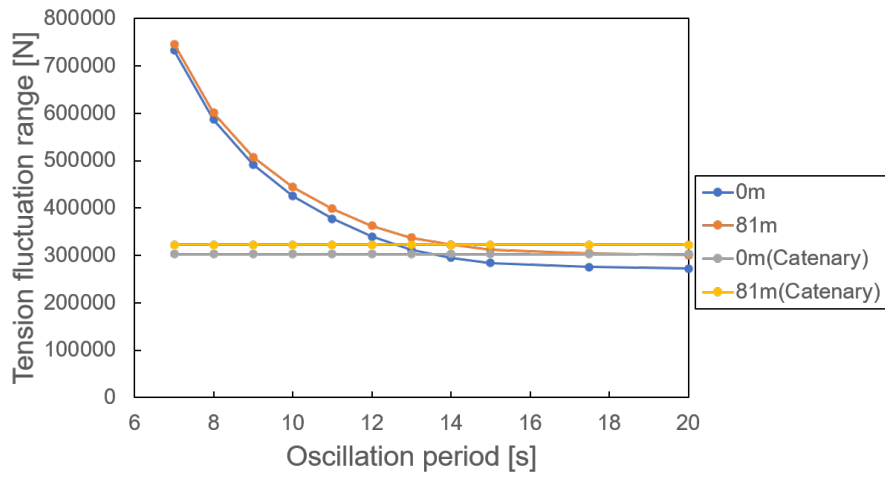


Fig6.8 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=2.0m

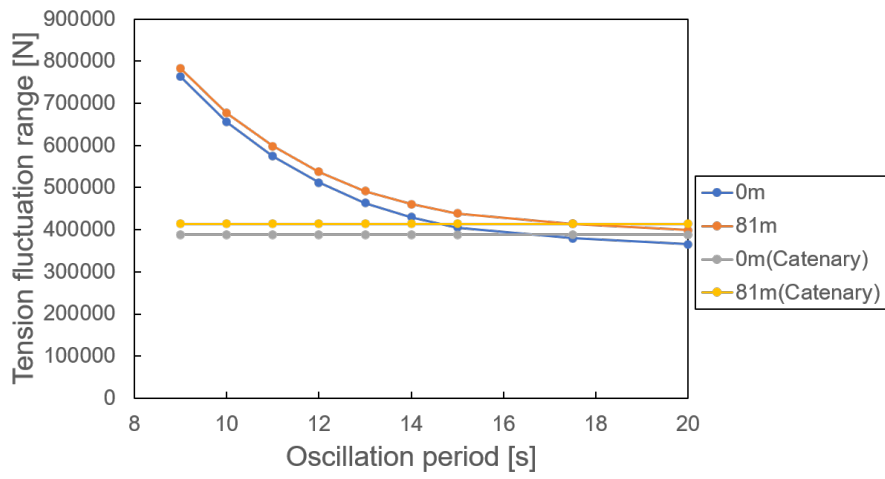


Fig6.9 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=2.5m

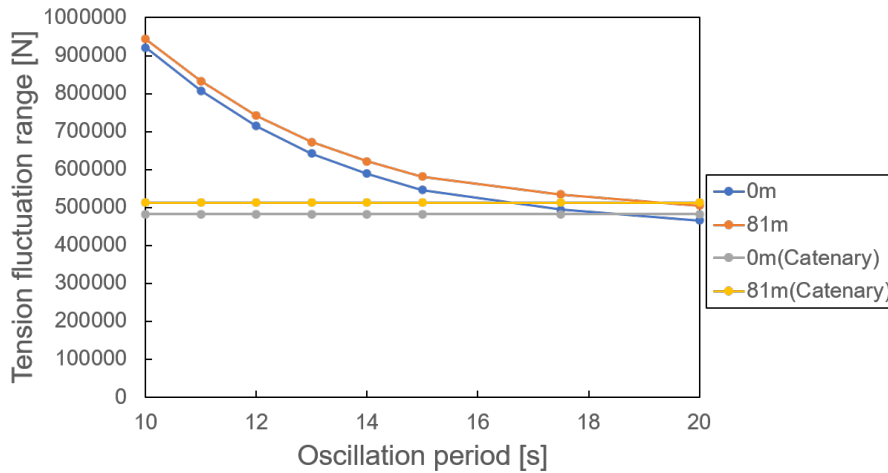


Fig6.10 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=3.0m

Fig6.5～6.10 に共通する特徴として、動的解析によって求めた張力変動範囲の大きさは周期が短くなるにつれて急激に大きくなる、ということがいえる。一方で、カタナリー解によって求めた張力変動範囲は静的な条件におけるものなので、周期に依存せず一定値をとる。この2種類のグラフがかけ離れるほど、動的影響が大きいことがいえる。動的影響の発生する周期は振幅によって異なり、振幅が大きくなるほど動的影響の発生する周波数帯も広がる事が分かる。

また、係留索上端と81m地点の動的解析結果のグラフを比較すると、Fig6.5の振幅0.5mのケースやFig6.6の振幅1.0mのケースでは、上端の方がより強く動的影響が出ていることが確認される。これらのケースでは、周期7s付近で上端と81m地点の張力変動範囲の大きさが逆転していることがいえる。一方で、Fig6.9やFig6.10の振幅の大きいケースでは、係留索に動的影響が働いても張力変動の大きさは逆転していないことが分かる。しかし、2つのグラフの差は周期が短くなるにつれて縮まっていることから、この場合も係留索上端への動的影響が大きいことがいえる。

以上のような周期を短くしていった場合の動的影響は、関谷 [20] の研究で示されている。関谷 [20] での係留索の初期条件は本研究と異なるため動的影響の発生する周波数帯には多少違いが見られたが、周期が短くなるにつれて、動的解析によって求めた張力変動範囲の大きさが急激に大きくなるという傾向は一致した。関谷 [20] の研究では水平方向の加振のみによりこの傾向を明らかにしたが、本研究では水平方向加振に鉛直方向加振を加えた、並進2方向加振により同じような結果を示した。

次に同じ動揺条件下において、係留点からの位置の違いによる張力変動範囲の大きさの変化について考える。以下、回転+方向の振幅0.5mのケースについて、各質量節点における張力変動範囲の大きさを示す。上から順に周期5s、7s、15sのケースとなっており、グラフの特性が周期によって変わってくる。

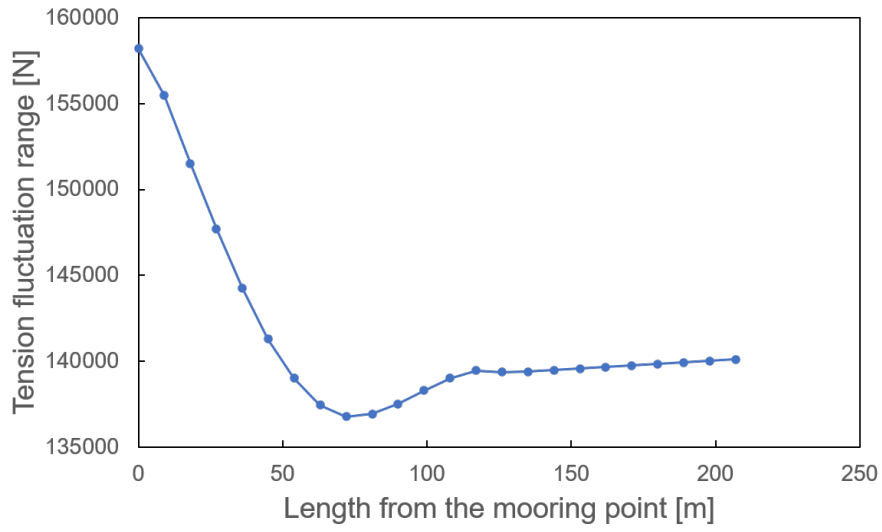


Fig6.11 Tension fluctuation range at each node point in Case of Period=5s

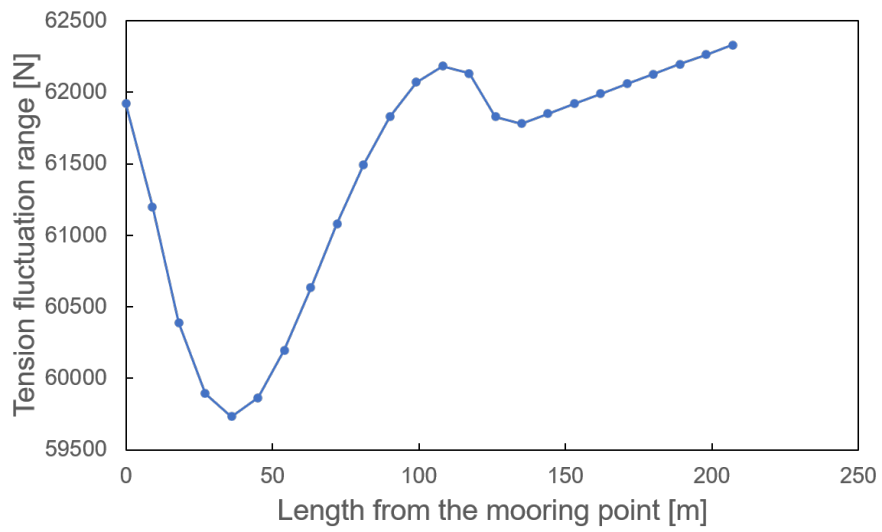


Fig6.12 Tension fluctuation range at each node point in Case of Period=7s

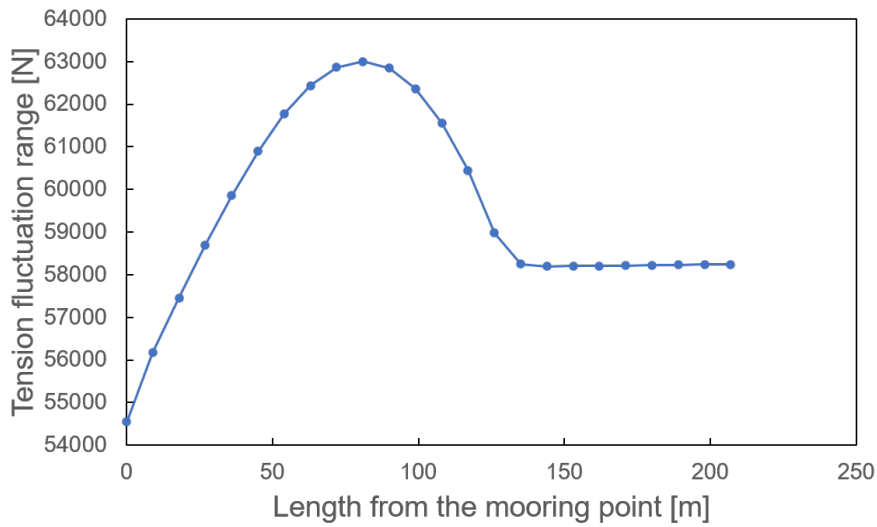


Fig6.13 Tension fluctuation range at each node point in Case of Period=15s

Fig6.11~6.13 のグラフの概形をパターン分けして、動揺条件の表を色分けしたものを Fig6.14 に示す。表中の値は、上端からタッチダウン点までの区間内において張力変動幅が最大となる係留索の位置（係留点からの距離）を示している。

この表の左下の部分の赤色の領域では、上端での張力変動範囲の大きさが最大となっている。このことより、動揺周期が短い場合は上端での動的影響が強く出ていることがいえる。動揺周期が長くなるにつれ右側の水色の領域に遷移し、静的な傾向に近づくことが確認できる。

振幅[m]	周期[s]																	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20				
5.0													99m	81m				
4.0												99m	99m	99m	81m	81m		
3.0											108m	108m	99m	99m	90m	90m	81m	81m
2.5										108m	108m	99m	99m	90m	90m	90m	81m	81m
2.0									108m	108m	108m	108m	99m	99m	90m	90m	81m	81m
1.5								117m	108m	108m	108m	99m	99m	90m	90m	81m	81m	81m
1.0	上端	上端	117m	108m	108m	108m	99m	99m	90m	90m	90m	81m	81m	81m	81m			
0.5	上端	上端	上端	108m	99m	99m	90m	90m	90m	81m	81m	81m	81m	81m				

Fig6.14 Position of the mooring line with the maximum tension fluctuation range

赤色：上端において張力変動幅が最大となる領域 (Ex. Fig6.11)

黄緑色：上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動幅が極大となるが、タッチダウン点から遠ざかるにつれ増大する領域 (上端において最小とならない、Ex. Fig6.12)

緑色：上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動幅が極大となるが、タッチダウン点から遠ざかるにつれ増大する領域 (上端において最小となる)

水色：上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動幅が最大となり、タッチダウン点以遠では一定の水平張力となる領域 (Ex. Fig6.13)

6.1.2 位相依存性

この節では、振幅 0.5m, 1.0m, 1.5m のケースの上端での張力変動範囲の大きさについて結果を示す。縦軸を張力変動範囲の大きさ、横軸を動揺周期として、それぞれの振幅ごとにグラフを分けてプロットする。

○ Caption

- ・ + direction：回転 + 方向
- ・ - direction：回転 - 方向
- ・ Catenary：カテナリー解

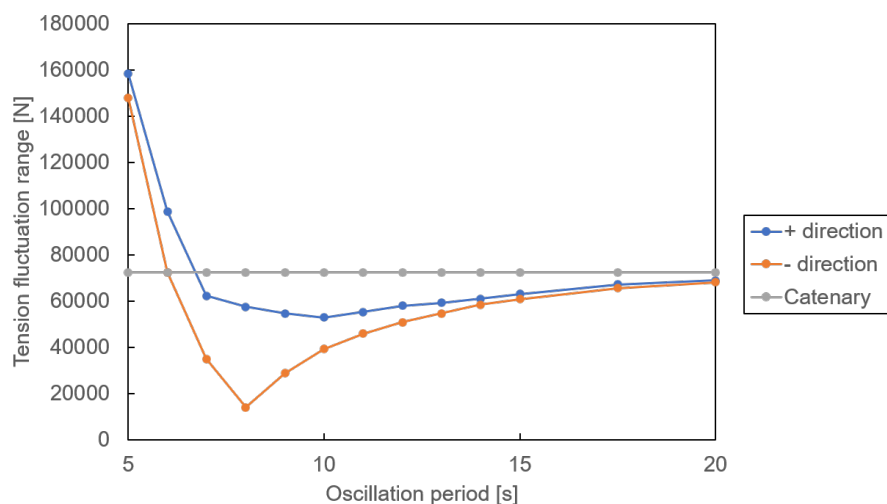


Fig6.15 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=0.5m

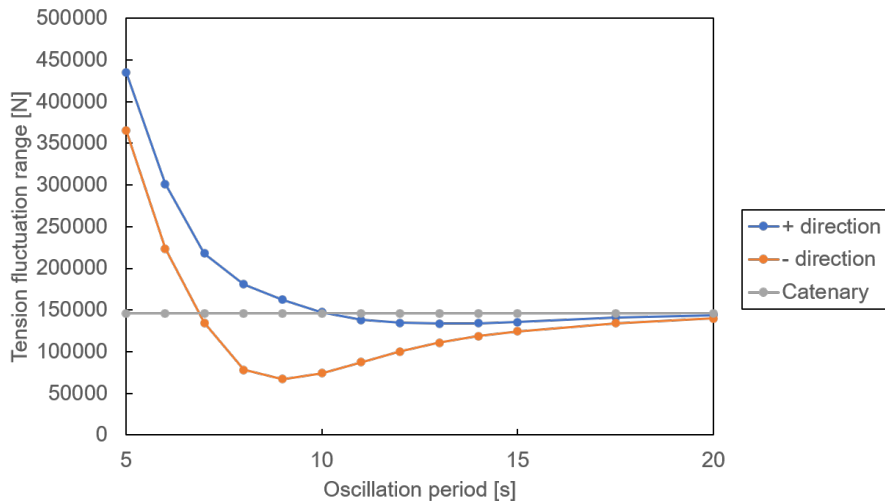


Fig6.16 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.0m

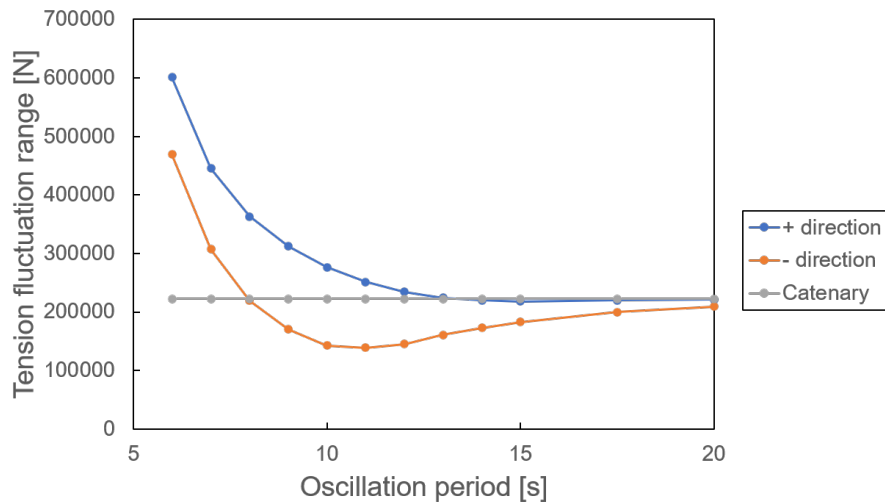


Fig6.17 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.5m

Fig6.15~6.17 より、同じ動揺周期、振幅でも、動揺の位相差が異なると張力変動範囲の大きさが異なることが分かる。これは、実機において波に向かう方向に設置される係留索と反対側に設置される係留索では想定する疲労被害度が異なることを意味している。この原因としては、X 軸方向の動揺による張力変動と Z 軸方向の動揺による張力変動の波形の干渉が考えられる。例として、動揺振幅 1.0m、周期 8s の場合の張力の時系列データを、Z 軸方向のみの動揺と X 軸方向のみの動揺に分けて示す。Fig6.18 より回転 - 方向の位相差の場合、Z 軸方向動揺に伴う張力変動のピークと X 軸方向動揺に伴う張力変動のピークがずれていることが分かる。一方で、Fig6.20 より回転 + 方向の位相差の場合、Z 軸方向動揺に伴う張力変動のピークと X 軸方向動揺に伴う張力変動のピークが一致していることが分かる。これにより、張力の極大値も回転 - 方向のときと比較して大きくなり、張力変動幅も増大することがいえる。動揺の位相差の違いにより張力変動範囲の大き

さも異なることから、より実海域に近い条件で疲労被害度を推定するためには、あらゆる波の方向を想定した解析が必要になる。

○回転 - 方向の位相差の場合 (水色：張力、青色：Z 座標、赤色：X 座標)

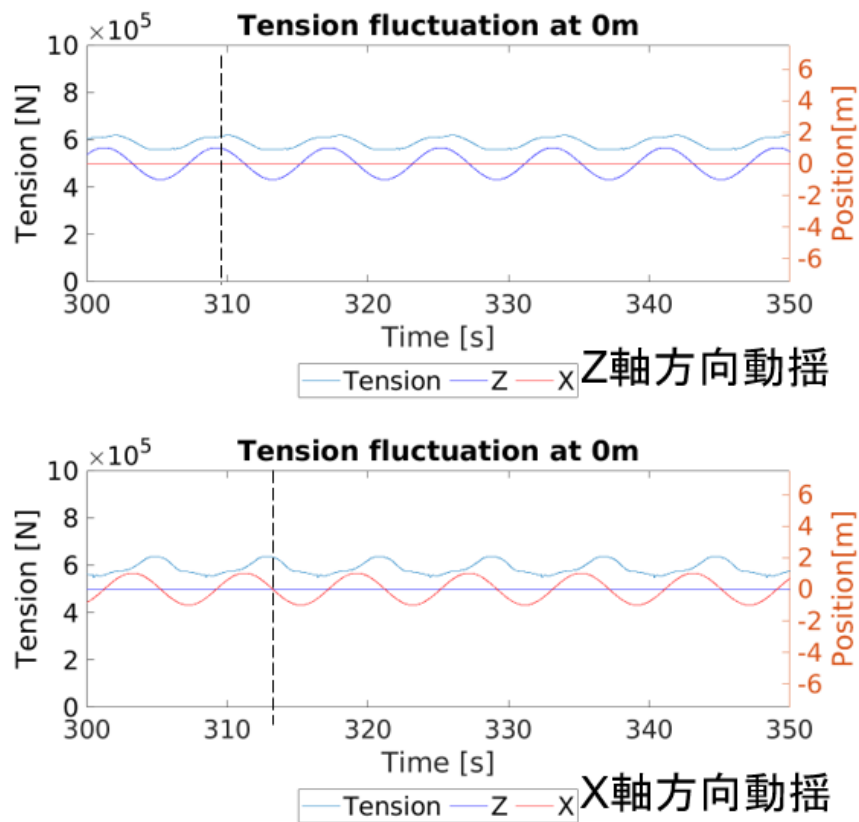


Fig6.18 Time series data of tension and coordinate fluctuation in case of unidirectional motion assuming “-” direction

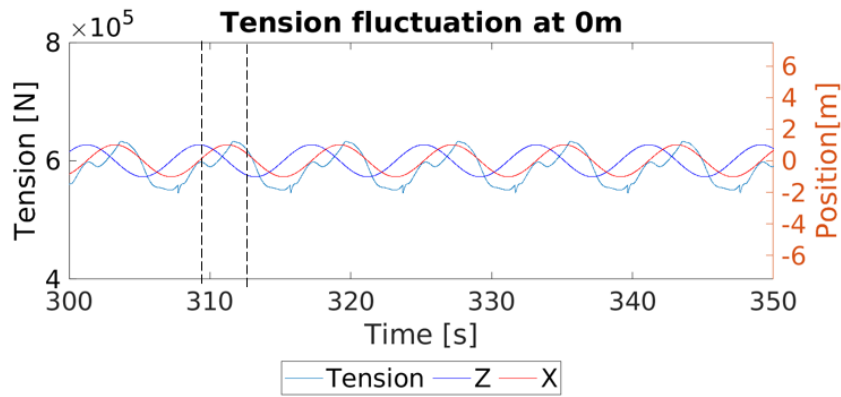


Fig6.19 Time series data of tension and coordinate fluctuation in Case of “-” direction

○回転 + 方向の位相差の場合 (水色：張力、青色：Z座標、赤色：X座標)

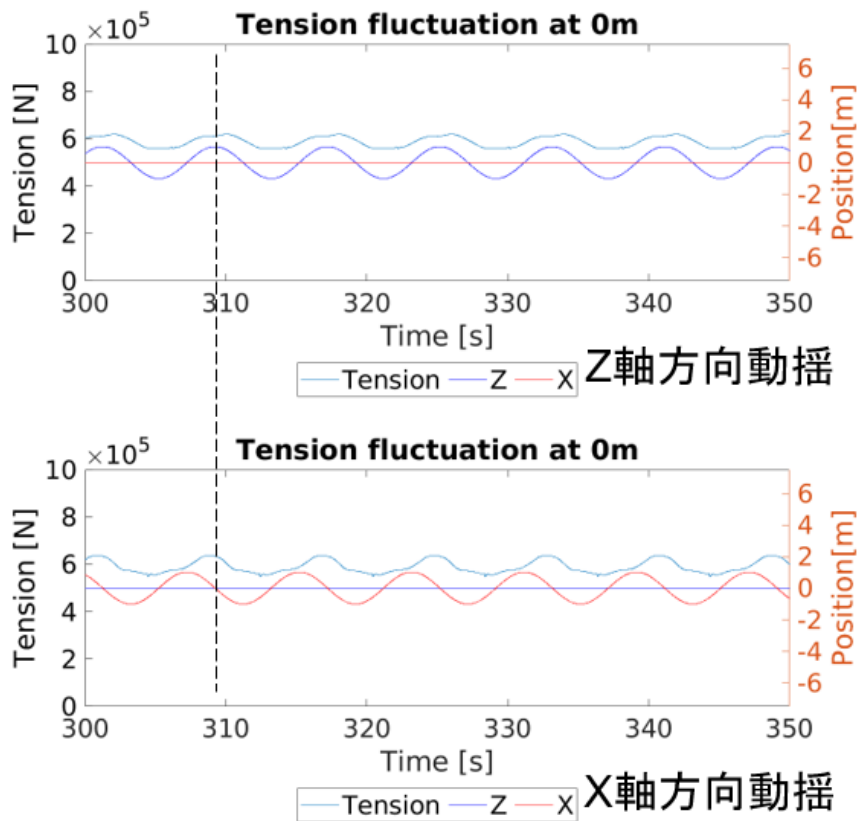


Fig6.20 Time series data of tension and coordinate fluctuation in case of unidirectional motion assuming “+” direction

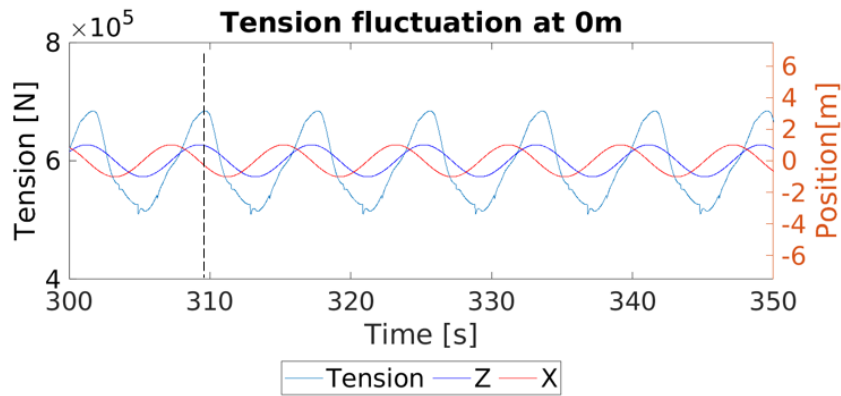


Fig6.21 Time series data of tension and coordinate fluctuation in Case of “+” direction

6.1.3 水深依存性

動揺特性が同じ場合において、水深のパラメータを変えた場合の張力変動幅の計算結果を示す。なおプログラムの初期水平長と全長のパラメータは水深 50m の条件との相似比に合わせて変えるが、実海域での設置において係留索の設計は水深にあまり依存しないため、チェーンの物性値は水深 50m の条件と同一にしている。

ここでは、振幅 1.0m、周期 10s、回転 + 方向の位相差の動揺ケースにおいて、水深を 50m、100m、200m と変えていった場合の、係留点からの位置と張力変動範囲の大きさの関係を示したグラフを Fig6.22～6.24 に示す。

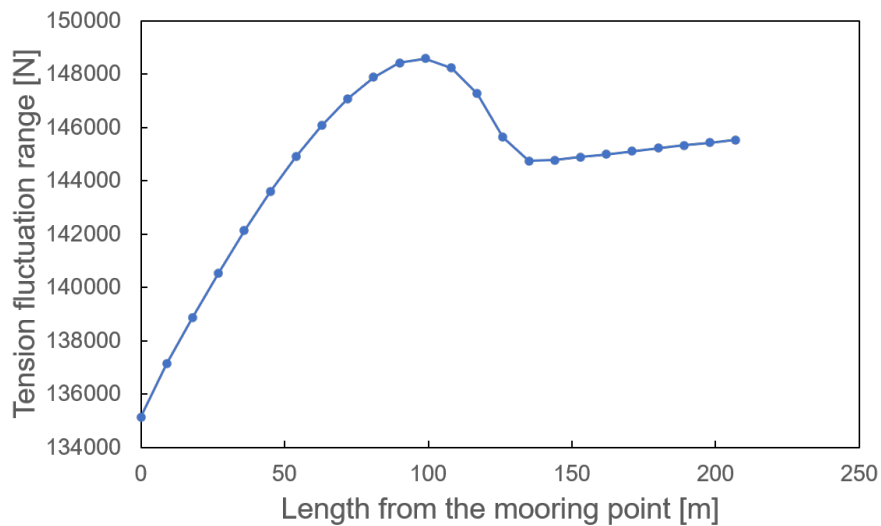


Fig6.22 Tension fluctuation range at each node point in Case of Depth=50m

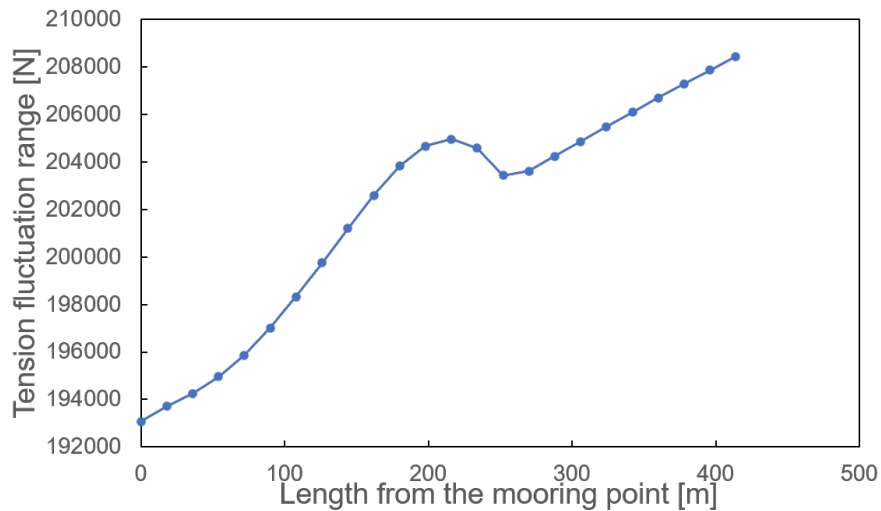


Fig.6.23 Tension fluctuation range at each node point in Case of Depth=100m

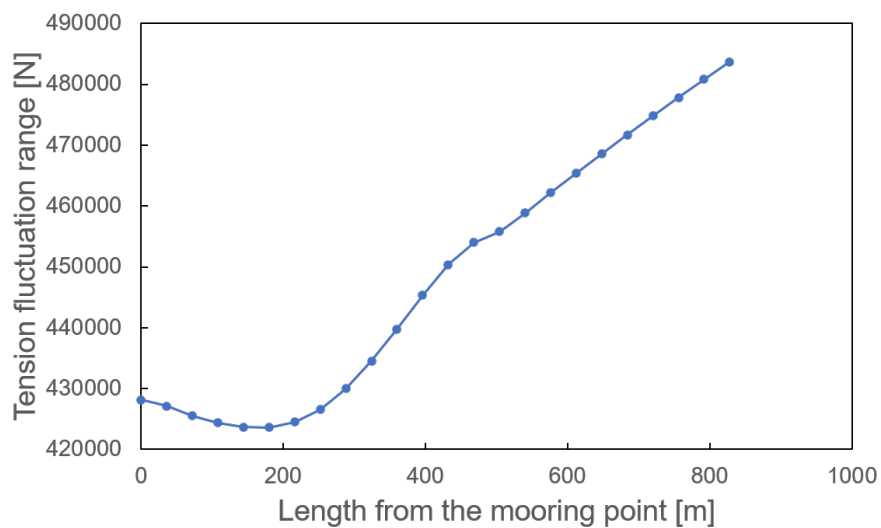


Fig.6.24 Tension fluctuation range at each node point in Case of Depth=200m

水深の比に合わせて全長を変えた場合、動揺振幅が水深の比に比例しなおかつ動揺周期が水深の比の平方根に比例するとき、張力が同じ傾向で変動すると考えられる。このことはフルードの相似則に基づいている。したがって、水深 100m のケースでは水深 50m のときの振幅 0.5m、周期 7.07s の動揺ケースに基づき、水深 200m のケースでは水深 50m のときの振幅 0.25m、周期 5.00s の動揺ケースにそれぞれ基づくことになる。Fig.6.14 にこれらのケースに相当する箇所を枠で囲って、再掲したものを Fig.6.25 に示す。この図は、それぞれの水深の動揺ケースを水深 50m の場合に換算したときに振幅と周期がどの領域に当たるのかを示している。なお水深 50m のときの振幅 0.25m の動揺ケースでは張力の計算を行わなかったため、水深 200m の動揺ケースにおいて水深 50m で相当する部分の張力変動特性はこの図からだと分からない。

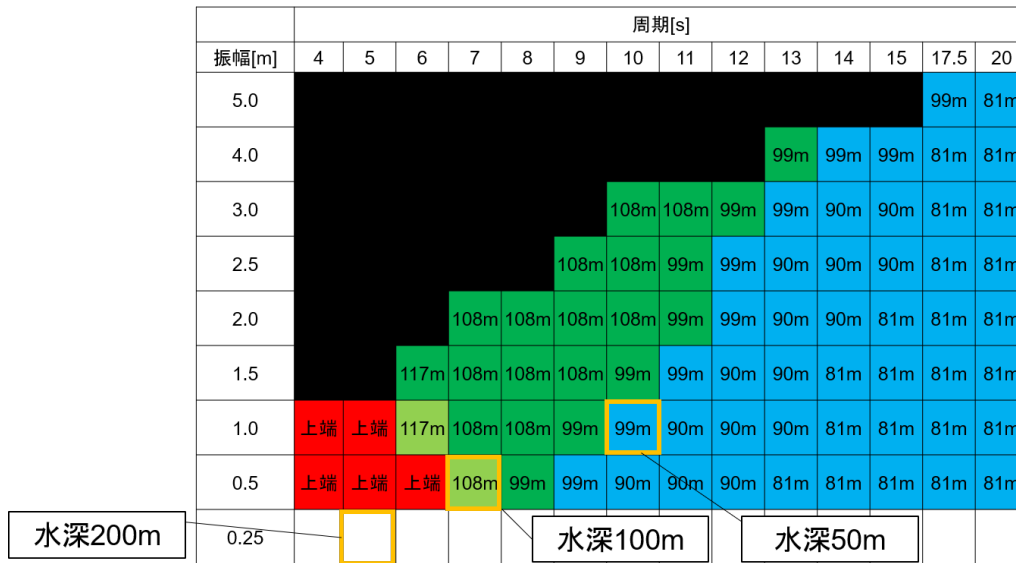


Fig6.25 Position of the mooring line with the maximum tension fluctuation range in Case of Depth=50m

Fig6.22 より、上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動幅が最大となり、タッチダウン点以遠では一定の水平張力となることから、水深 50m のケースでは動的影響が出ていないことが示唆される。一方で、Fig6.23 の水深 100m のケースや Fig6.24 の水深 200m のケースでは、タッチダウン点から遠ざかるにつれ張力変動幅が増大している。この傾向は Fig6.12 と似ており、動的影響が出ている可能性が考えられる。また Fig6.23 と Fig6.24 を比較すると、Fig6.24 の水深 200m のケースの方が上端での張力変動幅が相対的に大きくなり、上端での動的影響が出ていることが分かる。Fig6.25 より、同じ動揺特性でも水深が変化すれば対応する動揺周期も変化することが確認できる。したがって、同じ動揺条件下でも水深が深くなることによる動的影響の発生が考えられる。

6.1.4 係留長さ依存性

動揺特性が同じ場合において、係留長さを変えた場合の張力変動幅の計算結果を以下に示す。Table5.5 に示した全長のパラメータ 629.37m を基準とし、短くした場合 (全長 623.52m) と長くした場合 (全長 632.57m) とで張力変動範囲の大きさを定性的に比較する。

振幅 1.0m、周期 10s、回転 + 方向の位相差の動揺ケースにおいて、係留点からの位置と張力変動範囲の大きさの関係を示したグラフを Fig6.26 に示す。なお、3つの全長のケースを同じグラフに重ね合わせている。

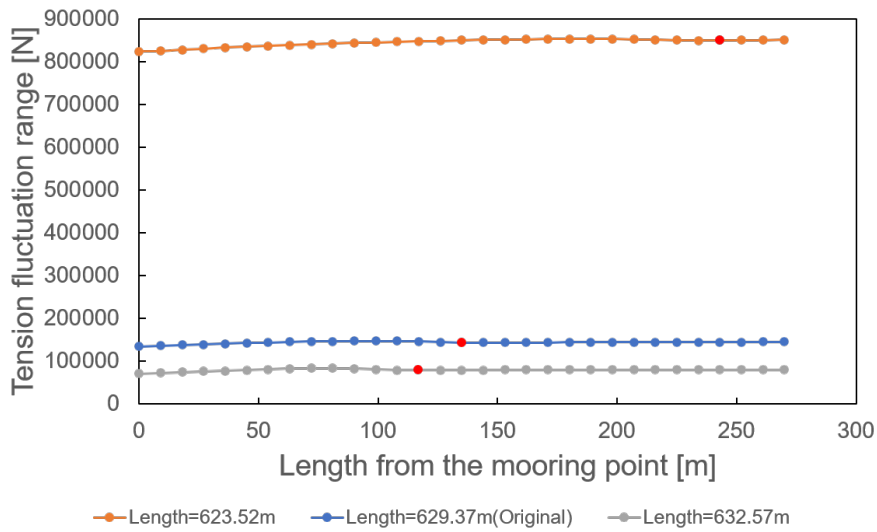


Fig6.26 Tension fluctuation range at each node point in some length cases

赤丸：タッチダウン点付近の質点位置

また、横軸に全長、縦軸に代表の質点における張力変動範囲の大きさをとりプロットしたものを、Fig6.27に示す。

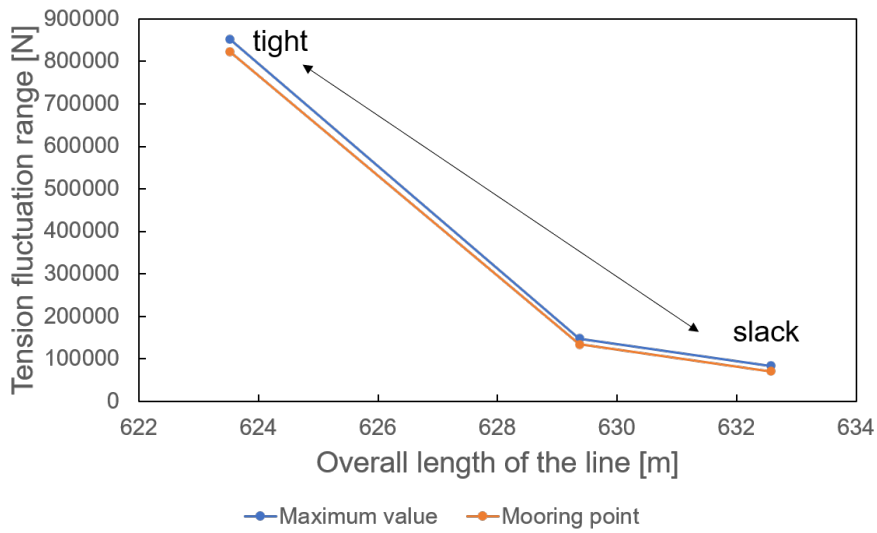


Fig6.27 Tension fluctuation range when the overall length is changed

係留の水平長さが同じ場合、係留長さが短くなると索がより張った状態になる。Fig6.26, 6.27 より、索が張った状態になるほど張力変動範囲の大きさが増大することが分かる。これは各状態における静的張力のデータを参照すると、係留索が張るほど同じ変位に対しての張力の変動も激しくなると考えられるからである。Fig5.22 のグラフを以下に再掲する。左に行くほど索が緩んだ状態で、右に行くほど索が張った状態であるこ

とを示している。

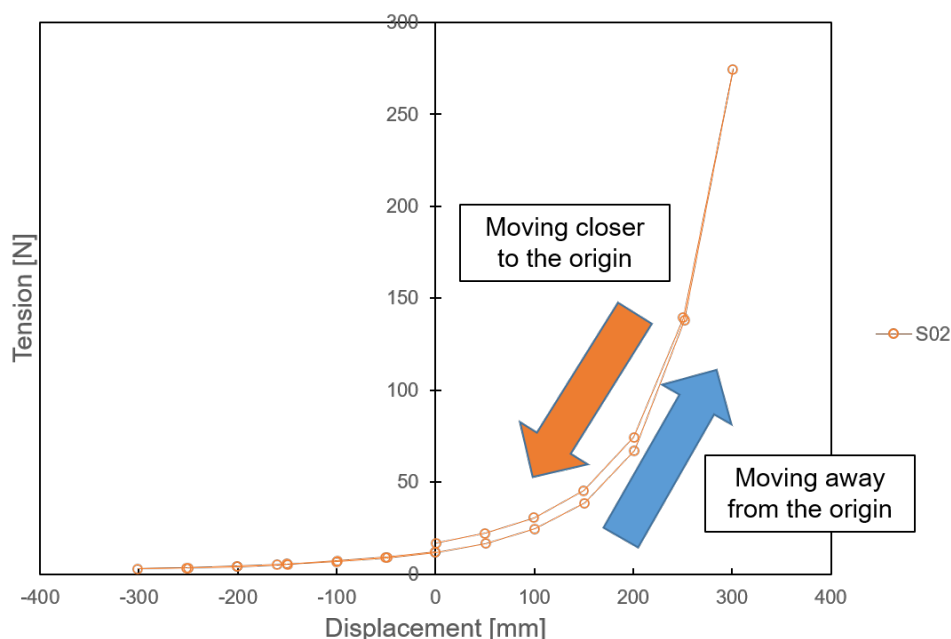


Fig6.28 Static tension at each measurement position (only S02)

6.2 波浪影響と VIM 影響が共存した場合

本研究では、規則波が流れと平行方向にある場合を想定している。VIM は流れと横行方向の動揺振幅が他の方向よりも大きくなり、規則波中の VIM 応答では surge 方向、heave 方向に波周期で、sway 方向に概ね VIM 周期で動揺することが Gonçaves et al. [15] により確認されている。VIM 影響による動揺方向は実験と同様に Y 軸方向とし、動揺周期は 100s、動揺振幅は 20.0m とした。この値は、スパー型浮体のうち最も大型の浮体の直径を想定している [16]。この動揺を係留索の上端に与え、なおかつ Table6.1 に示す XZ 軸方向の動揺を与えたものを、波浪影響と VIM 影響が共存した場合とみなす。なお、この場合の張力変動は波浪の周波数成分と VIM の周波数成分の 2 種類含まれているが、前節と同じようにローパスフィルタで処理した張力データを用い、波浪周期 1 周期分ごとの最大値と最小値の差を取り平均化したものを張力変動範囲の大きさとして定義する。

各質量節点において張力変動範囲の大きさを計算した。Table6.2, 6.3 と同じ要領で各ケースごとの張力変動範囲の最大値を示す。

Table6.4 Maximum value of tension fluctuation range in Cases of VIM “+” direction

単位 [kN]	周期 [s]													
振幅 [m]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20
5.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
4.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3.0	×	×	×	×	×	×	×	1033	918	829	767	717	654	619
2.5	×	×	×	×	×	965	835	736	659	602	565	537	504	488
2.0	×	×	×	×	743	623	544	485	441	411	395	383	372	368
1.5	×	×	738	547	442	377	336	305	286	274	270	267	268	270
1.0	844	546	368	174	224	199	182	172	168	167	168	170	175	178
0.5	334	187	121	84	76	72	72	73	75	77	79	82	85	88

×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

Table6.5 Maximum value of tension fluctuation range in Cases of VIM “-” direction

単位 [kN]	周期 [s]													
振幅 [m]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17.5	20
5.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
4.0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3.0	×	×	×	×	×	×	×	741	635	562	507	468	479	504
2.5	×	×	×	×	×	715	588	492	423	379	360	364	391	413
2.0	×	×	×	×	540	422	343	291	259	259	266	305	307	321
1.5	×	×	580	393	286	220	183	168	175	185	198	209	229	240
1.0	801	434	276	174	117	93	92	102	114	125	134	141	154	161
0.5	318	156	90	49	28	31	42	51	57	62	67	141	77	81

×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

VIM を考慮に入れたケースについて、振幅 4.0m 以上のケースで計算を行うことが出来なかった。これは、想定振幅通りに加振させると係留索が伸びきってしまったことによる。この問題はプログラム上で係留索長さのパラメータを変えるという単純な問題で解決できるが、その場合係留索の初期張力も変化するため、今回はこの部分の計算を行わなかった。

Table6.2 と 6.4、Table6.3 と 6.5 のセルの値をそれぞれ比較する。同じ波の動揺条件でも VIM 影響の有無によって張力変動範囲がどう変化するかについて考察する。Table6.4 の各動揺ケースにおける張力変動範囲の最大値を Table6.2 の張力変動範囲の最大値で割った値を次表に示す。

Table6.6 Ratio of maximum value of tension fluctuation range in Cases of “+” direction

振幅 [m]	周期 [s]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	20
3.0	×	×	×	×	×	×	×	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.23
2.5	×	×	×	×	×	1.23	1.23	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
2.0	×	×	×	×	1.23	1.22	1.22	1.21	1.21	1.22	1.22	1.23	1.22	1.23
1.5	×	×	1.23	1.23	1.22	1.21	1.21	1.22	1.22	1.22	1.23	1.23	1.22	1.22
1.0	1.12	1.26	1.22	0.80	1.24	1.22	1.24	1.24	1.25	1.25	1.25	1.25	1.24	1.24
0.5	1.06	1.18	1.23	1.35	1.33	1.32	1.36	1.32	1.30	1.30	1.30	1.29	1.27	1.28

×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

Table6.7 Ratio of maximum value of tension fluctuation range in Cases of “-” direction

振幅 [m]	周期 [s]													
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	20
3.0	×	×	×	×	×	×	×	1.27	1.27	1.27	1.27	1.23	1.18	1.17
2.5	×	×	×	×	×	1.27	1.28	1.27	1.27	1.27	1.21	1.20	1.16	1.16
2.0	×	×	×	×	1.28	1.29	1.29	1.27	1.22	1.20	1.18	1.27	1.16	1.16
1.5	×	×	1.24	1.28	1.31	1.29	1.28	1.21	1.21	1.15	1.14	1.14	1.14	1.15
1.0	1.10	1.19	1.23	1.29	1.49	1.38	1.24	1.16	1.14	1.13	1.13	1.13	1.15	1.15
0.5	1.02	1.06	1.24	1.41	1.99	1.06	1.07	1.11	1.13	1.14	1.14	2.31	1.17	1.19

×：動揺に伴いスラック現象が発生したケース

この表より、VIM 影響による動揺が働いたと仮定した場合の張力変動範囲の大きさは、波浪影響による周期と振幅に依存することなく大体どのケースも 1.1～1.4 倍の範囲にあることが分かる。しかし、これはあくまでも波浪中の VIM 応答の影響があったと仮定した場合の話であり、実海域中の VIM 応答に関しては現在の知見でははっきりと分かっていない。

本研究の VIM では、直径長さ 20m、固有周期 100s のスパー型浮体モデルを想定している [16]。VIM は、係留索の固有周期 T_n と物体の代表長さ D によって決まる換算流速

$$V_r = \frac{UT_n}{D} \quad (6.1)$$

のパラメータによって決まる。今回は、藤原らの実験結果 [28] から近似された換算流速 V_r と VIM 振幅 A_T/D の関係式（波浪影響がある場合）を用いて、各振幅における流速を求める。

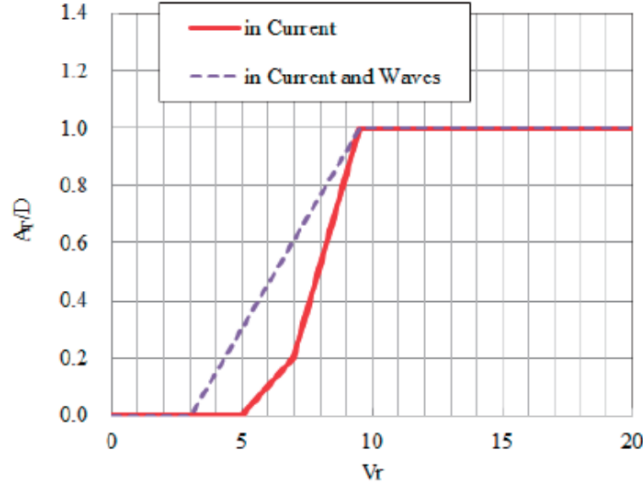


Fig6.29 Assumed VIM characteristics in current and waves [28]

この図において換算流速 $V_r = 9.5$ に達した際に振幅 A_T/D が最大となり、浮体が代表長さの振幅で振動する。そこで $V_r = 9.5$ のときの流速 U を求めると、 $U = 1.9[\text{m/s}]$ となる。

ここで、規則波の波高を H_{RW} 、規則波の周波数を f_{RW} とすると、以下のように振動波の変位の関数が書ける。

$$H(t) = -\frac{H_{RW}}{2} \cos(2\pi f_{RW}t) + \frac{H_{RW}}{2} \quad (6.2)$$

これより振動波の速度の時系列の関数は

$$U_w(t) = \pi H_{RW} f_{RW} \sin(2\pi f_{RW}t) \quad (6.3)$$

となり、

$$U_M = \pi H_{RW} f_{RW} \quad (6.4)$$

が導ける。

ここで、Gonçalves et al.[15] が定義した (2.2) 式の速度パラメータ α は、

$$\alpha = \frac{U_M}{U_M + \sqrt{2}U} \quad (6.5)$$

と表される。(2.1) 式と (2.3) 式を用いて、規則波の波高 H_{RW} と周波数 f_{RW} を用いた関数を導ける。

$$\frac{\pi H_{RW}}{D} > \frac{1 + C_a}{C_D} \left(\pi \frac{H_{RW} f_{RW}}{\pi H_{RW} f_{RW} + \sqrt{2}U} \right)^2 \quad (6.6)$$

Gonçalves et al.[15] の手法に基づくと、規則波の波高 H_{RW} と周波数 f_{RW} がこの条件を満たす場合に VIM 現象が発生することになる。

まとめに、Table6.2, 6.3, 6.4, 6.5 の張力変動範囲の大きさをカラーマップで図示したものを Fig6.30, 6.31, 6.32, 6.33 にそれぞれ示す。この領域に (6.6) 式の間関数をプロットすることで、実際に VIM の発生する可能性が分かるようになる。なお、白色の領域は今回の条件において係留索がスラックした、もしくは係留索の長さが足らなかったケースを表している。

○横軸：動揺周波数 [Hz]、縦軸：動揺振幅 [m]

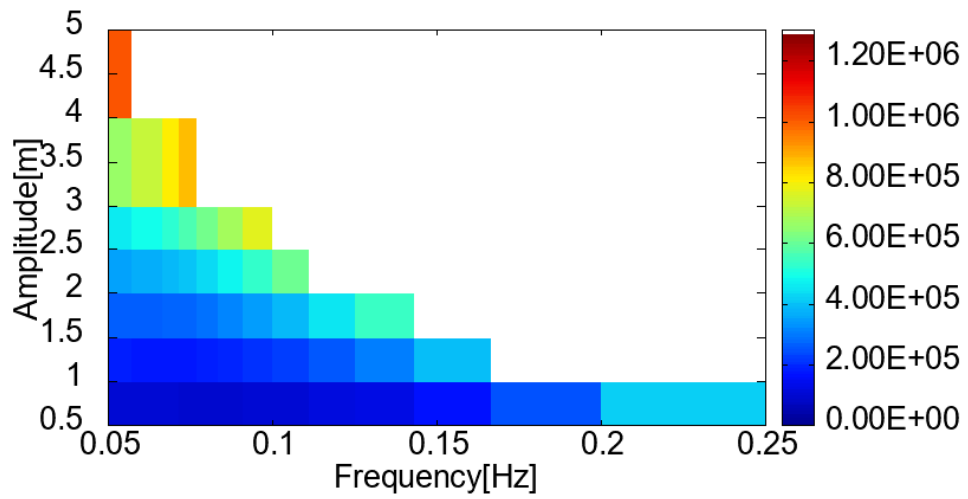


Fig6.30 Map of tension fluctuation range in Cases of “+” direction

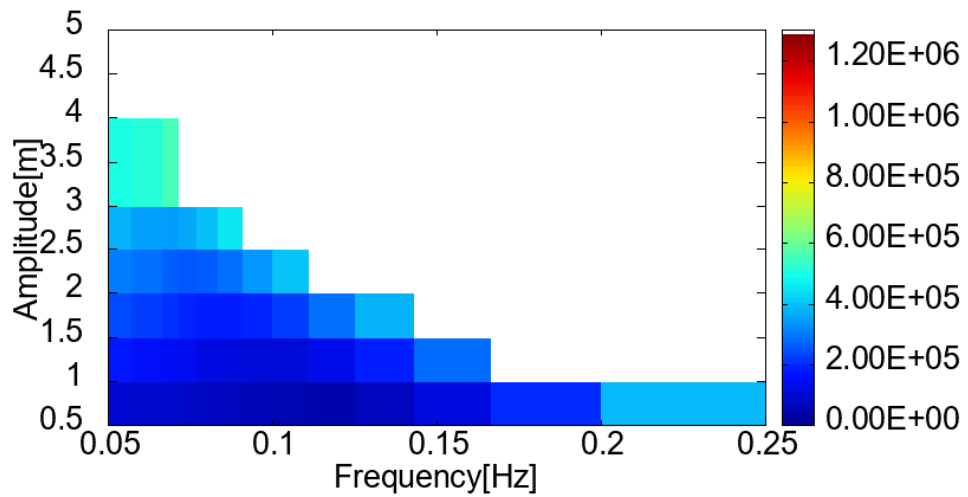


Fig6.31 Map of tension fluctuation range in Cases of “-” direction

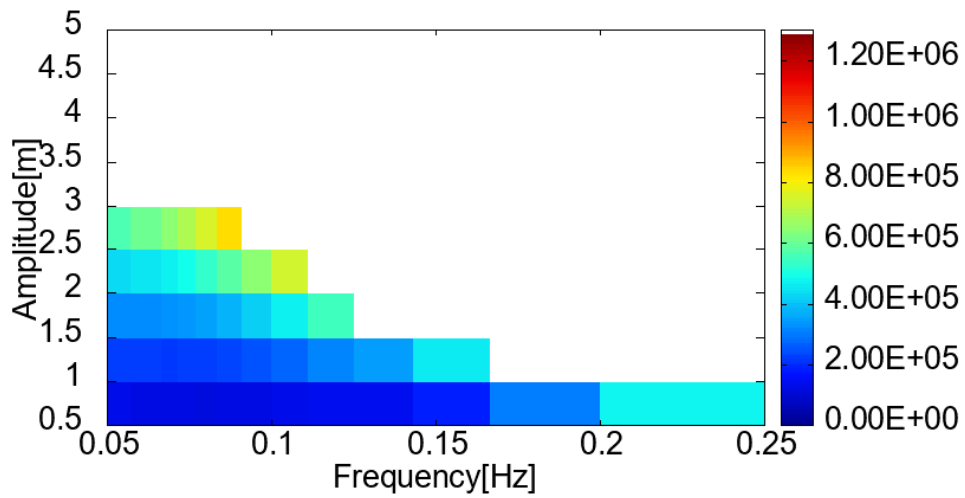


Fig6.32 Map of tension fluctuation range in Cases of VIM “+” direction

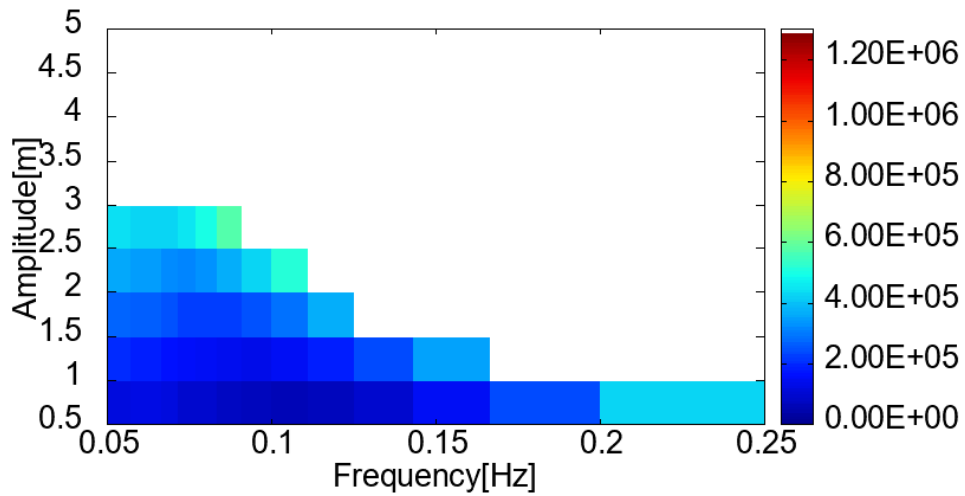


Fig6.33 Map of tension fluctuation range in Cases of VIM “-” direction

6.2.1 VIM 周期依存性

波浪影響による動揺特性が一定と仮定して、VIM 影響による動揺の周期を変えて張力変動幅の計算を行った。

ここでは、波浪影響による動揺特性を振幅 0.5m、周期 10s として、VIM 影響による動揺の周期を 50s、100s、200s と変えて比較する。係留点からの位置と張力変動範囲の大きさの関係を示したグラフを Fig6.34

に示す。なお、3つの周期のケースを同じグラフに重ね合わせている。

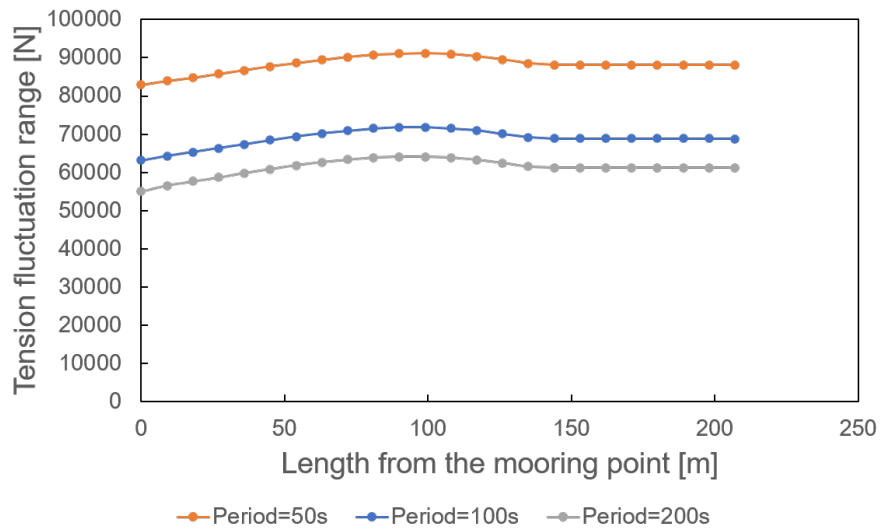


Fig6.34 Tension fluctuation range at each node point in some period cases

Fig6.34 より、VIM 影響による動揺の周期が短くなるほど張力変動範囲の大きさが増大することが読み取れる。この理由としては、VIM による動揺の周期が波周期に近づくにつれて張力変動の波形の干渉影響が強くなるからだと考えられる。参考として、3つの動揺周期のケースにおける張力変動の時系列データを Fig6.35～6.37 に示す。

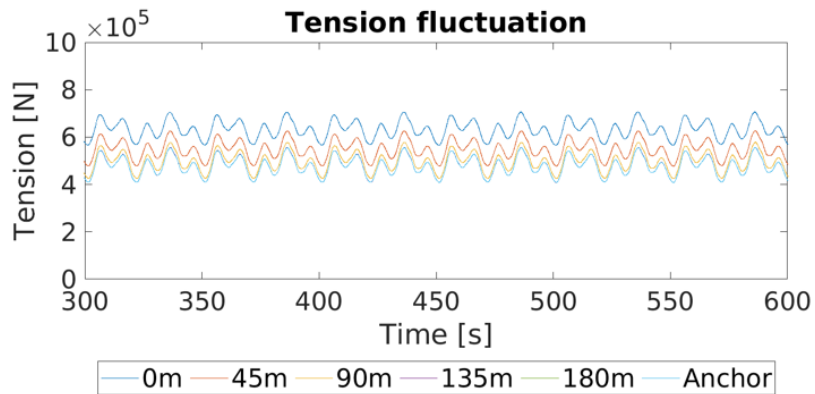


Fig6.35 Time series data of tension fluctuation in Case of VIM period=50s

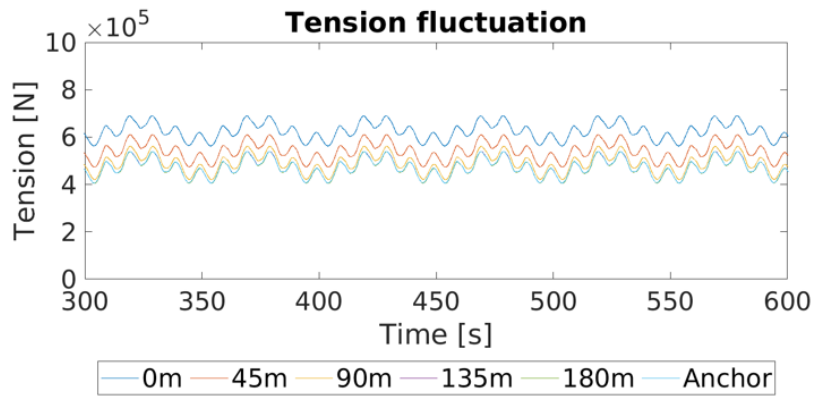


Fig6.36 Time series data of tension fluctuation in Case of VIM period=100s

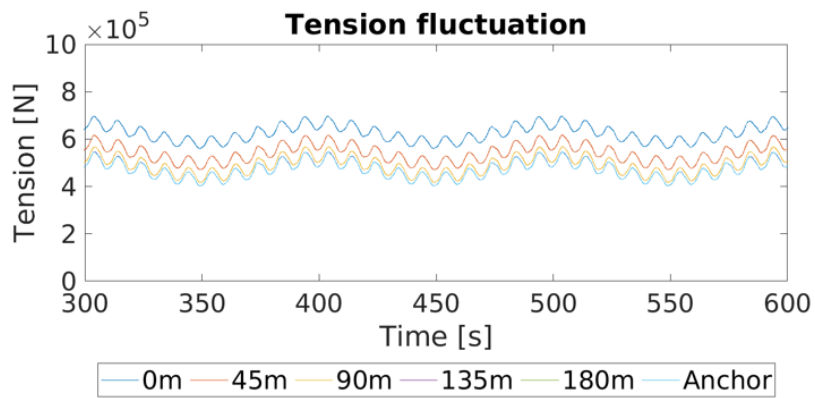


Fig6.37 Time series data of tension fluctuation in Case of VIM period=200s

第7章

疲労評価

係留索の疲労の主要な要因は張力変動幅であり、その大きさと繰り返し回数を計算して疲労影響を推定する。

7.1 疲労評価手法

疲労評価手法は API 規格 [29] および DNV 規格 [30] によって定められており、本研究ではそれらの規格に掲載されている式を用いて疲労寿命を評価する。

7.1.1 T-N 線図

API 規格 [29] には、張力変動範囲の大きさ T と係留索が破断に至るまでの張力変動の繰り返し回数 N の関係性を表した T-N 線図が示されている。これを適用し、マイナー則に基づいた累積疲労被害度 D を求める。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (7.1)$$

n_i : 与えられた海象条件 i において運用期間に張力変動 T_i が繰り返す回数

N_i : 張力変動 T_i が作用し続けた場合に対応する、破断までのサイクル数

T-N 線図の曲線の式の中のパラメータは材質によって決められている。曲線の式とパラメータを (7.2) 式と Table7.1 に示す。

$$NR^M = K \quad (7.2)$$

N : 係留索が破断に至るまでの張力変動のサイクル数

R : 張力変動幅を基準破断張力 (Reference Breaking Strength: RBS) で除した値

Table7.1 T-N Fatigue curve parameters [29]

材質	M	K
スタッド付きチェーン	3.0	1000
スタッドレスチェーン	3.0	316

基準破断張力 RBS [kN] は、日本海事協会鋼船規則 L 編 [31] に示されている切断試験荷重の値を用いる。この値は切断試験の結果から求められており、チェーンの呼び径 (リンクの湾曲部の径) d [mm] を用いた関係式 (7.3) で表される。

第 R4 種スタッドレスチェーンの場合

$$RBS = 0.0274d^2(44 - 0.08d)[kN] \quad (7.3)$$

本研究では、チェーンの想定直径を 140mm としている。この場合、 $RBS = 17590$ [kN] となる。このときの T-N 線図を Fig7.1 に示す。

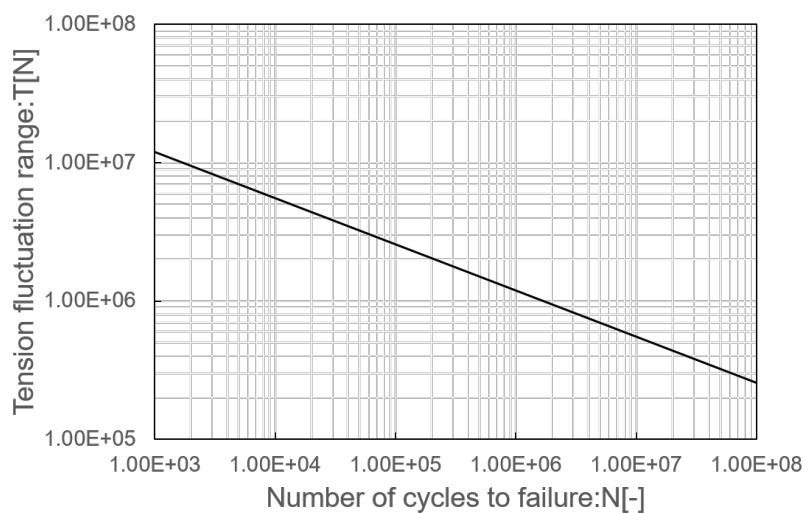


Fig7.1 T-N curve of a studless chain with a nominal diameter of 140mm

7.1.2 S-N 線図

DNV 規格 [30] には、応力変動範囲の大きさ S と係留索が破断に至るまでの張力変動の繰り返し回数 N の関係性を表した S-N 線図が示されている。応力変動範囲は、張力変動範囲の大きさを係留索の公称断面積で割った値である。公称断面積はチェーンの場合 $\frac{2\pi d^2}{4}$ (d はチェーンの呼び径 [mm]) と定義されている。

S-N 線図に関しても、T-N 線図と同じような形で関係式が定められている。この関係式を (7.4) に示す。

$$NS^M = K \quad (7.4)$$

N : 係留索が破断に至るまでの張力変動のサイクル数

S : 応力変動範囲 [MPa]

ただし、(7.2) 式中の R と (7.4) 式中の S は単位が異なるゆえ、式中のパラメータが T-N 線図の場合と異なる。S-N 線図の関係式中の M と K のパラメータを Table7.2 に示す。

Table7.2 S-N Fatigue curve parameters [30]

材質	M	K
スタッド付きチェーン	3.0	1.2×10^{11}
スタッドレスチェーン	3.0	6.0×10^{10}

S-N 線図を Fig7.2 に示す。

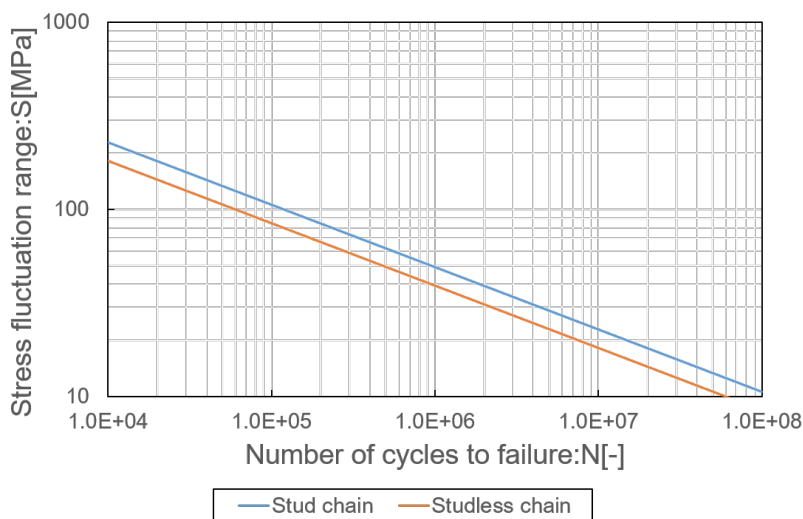


Fig7.2 S-N curve

7.1.3 年間疲労被害度

各々の海象条件 i における年間疲労被害度 D_i は、次の式より計算される。

$$D_i = \frac{n_i}{K} E[R_i^M] \quad (7.5)$$

n_i : 張力変動の年間のサイクル数

K, M : Table 7.1 で定義されるパラメータ

$E[R_i^M]$: (7.2) 式で定義される R を M 乗した値の期待値

規則波の影響を受けて張力が変動する場合、 n_i は波の周波数 f_i を用いて以下のように表される。

$$n_i = f_i \cdot P_i \cdot 3.15576 \times 10^7 \quad (7.6)$$

P_i : 海象条件 i の発生確率

(7.5) 式および (7.6) 式は、T-N 線図を適用した場合の式である。S-N 線図を用いて疲労被害度を求める場合は、(7.5) 式中の R を応力変動範囲 S に置き換えて計算すればよい。また、疲労寿命 L は累積疲労被害度 D と安全率 F_s を用いて以下のように表される。

$$L = 1/(D \cdot F_s)[years] \quad (7.7)$$

7.2 疲労評価

材質の条件はスタッドレスチェーンとし、想定海域は千葉県銚子市沖とする。この区域での波浪推算表を以下に示す。

AREA. 055
ANNUAL (10YEARS)

MEAN OF WAVE HEIGHT 2.09[m]
MEAN OF WAVE PERIOD 7.07[s]

WAVE HEIGHT [m]	0-	1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	TOTAL
14.75-																
14.25-																
13.75-																
13.25-																
12.75-																
12.25-																
11.75-															0.00146	0.00146
11.25-													0.00062		0.01650	0.01712
10.75-													0.01522	0.00013	0.03692	0.05227
10.25-													0.01800	0.00066	0.06934	0.08800
9.75-													0.01756	0.04416	0.04292	0.10512
9.25-													0.00049	0.01509	0.08725	0.10788
8.75-													0.00498	0.01107	0.00970	0.09030
8.25-													0.00035	0.01107	0.00970	0.11143
7.75-													0.00110	0.01292	0.09069	0.15337
7.25-													0.00763	0.01447	0.19546	0.00300
6.75-													0.00190	0.00273	0.01659	0.02982
6.25-													0.00679	0.00604	0.02298	0.51579
5.75-													0.00057	0.01495	0.01032	0.02276
5.25-													0.00578	0.02131	0.03727	1.18152
4.75-													0.06114	0.04561	0.08019	3.07315
4.25-													0.00004	0.33710	0.13180	2.07504
3.75-													0.16749	0.51893	0.42087	7.95486
3.25-													0.01059	2.98497	1.55708	28.13948
2.75-													0.00026	0.79374	0.62797	7.98710
2.25-													1.07614	7.18291	39.80599	26.68659
1.75-													0.00013	0.01050	9.65014	20.48039
1.25-													0.00066	4.00575	23.12570	100.65568
0.75-													0.00009	0.06577	20.37439	54.00286
0.25-													0.04495	8.45671	16.80120	17.54492
0-													0.00657	0.00176	1.41130	0.09330
TOTAL	0.00847	0.00243	2.69908	12.72796	42.32982	106.99356	219.22399	273.57202	176.02376	100.77328	40.30220	16.47085	5.36923	1.70922	1.79414	1.000

Fig7.3 Probability distribution map of significant wave height and significant period [32]

APIのガイドラインに基づいた解析結果を以下に示す。なお、動的解析により張力を推定した場合の係留索の安全率は1.67と定められており[29]、これを疲労寿命の計算に用いる。

Table7.3: Fatigue damage degree calculated by T-N curve

海象条件	波高 [m]	動揺振幅 [m]	周期 [s]	発生確率	年間疲労被害
Case1	1	0.5	4	0.05396	0.007850908
Case2	1	0.5	5	0.073415	0.00107046
Case3	1	0.5	6	0.087297	0.000259719
Case4	1	0.5	7	0.085079	5.36969E-05
Case5	1	0.5	8	0.047244	2.06929E-05
Case6	1	0.5	9	0.030557	1.023E-05
Case7	1	0.5	10	0.006927	1.88615E-06
Case8	1	0.5	11	0.001087	2.91878E-07

Case9	1	0.5	12	0.000166	4.97642E-08
Case10	1	0.5	13	1.53E-05	4.58245E-09
Case11	1	0.5	14	3.22E-06	9.69676E-10
Case12	2	1	4	0.004033	0.008025651
Case13	2	1	5	0.032903	0.009968172
Case14	2	1	6	0.121608	0.010197138
Case15	2	1	7	0.146477	0.003976588
Case16	2	1	8	0.065762	0.000895124
Case17	2	1	9	0.038877	0.00034269
Case18	2	1	10	0.015655	9.3568E-05
Case19	2	1	11	0.005662	2.49314E-05
Case20	2	1	12	0.001468	5.47919E-06
Case21	2	1	13	0.000346	1.18023E-06
Case22	2	1	14	0.000482	1.5447E-06
Case23	3	1.5	6	0.010207	0.006779838
Case24	3	1.5	7	0.041524	0.009635419
Case25	3	1.5	8	0.05504	0.00605888
Case26	3	1.5	9	0.011954	0.000746402
Case27	3	1.5	10	0.00776	0.000304761
Case28	3	1.5	11	0.004643	0.000122591
Case29	3	1.5	12	0.001636	3.2205E-05
Case30	3	1.5	13	0.000662	1.06511E-05
Case31	3	1.5	14	0.000439	6.20128E-06
Case32	4	2	7	0.001151	0.001288994
Case33	4	2	8	0.008441	0.004327256
Case34	4	2	9	0.017556	0.00482074
Case35	4	2	10	0.00271	0.000449105
Case36	4	2	11	0.001525	0.000162892
Case37	4	2	12	0.00078	5.73163E-05
Case38	4	2	13	0.000185	1.01443E-05
Case39	4	2	14	0.000378	1.68249E-05
Case40	5	2.5	9	0.002164	0.002166976
Case41	5	2.5	10	0.006148	0.003601143
Case42	5	2.5	11	0.000828	0.000300085
Case43	5	2.5	12	0.000422	0.000101554
Case44	5	2.5	13	7.38E-05	1.2539E-05
Case45	5	2.5	14	0.00018	2.33722E-05
Case46	6	3	10	0.001232	0.001954213

Case47	6	3	11	0.002716	0.002656364
Case48	6	3	12	0.000168	0.000106235
Case49	6	3	13	0.000117	5.07229E-05
Case50	6	3	14	0.000128	4.06105E-05
Case51	8	4	13	0.000184	0.000398491
Case52	8	4	14	2.3E-05	3.52705E-05
Total				1	0.089077804
				疲労寿命	6.722240174

DNV のガイドラインに基づいた解析結果を以下に示す。係留索の安全率は前表の条件と同じく 1.67 としている。

Table7.4: Fatigue damage degree calculated by S-N curve

海象条件	波高 [m]	動揺振幅 [m]	周期 [s]	発生確率	年間疲労被害
Case1	1	0.5	4	0.05396	0.007739109
Case2	1	0.5	5	0.073415	0.001055216
Case3	1	0.5	6	0.087297	0.000256021
Case4	1	0.5	7	0.085079	5.29322E-05
Case5	1	0.5	8	0.047244	2.03982E-05
Case6	1	0.5	9	0.030557	1.00843E-05
Case7	1	0.5	10	0.006927	1.85929E-06
Case8	1	0.5	11	0.001087	2.87722E-07
Case9	1	0.5	12	0.000166	4.90556E-08
Case10	1	0.5	13	1.53E-05	4.5172E-09
Case11	1	0.5	14	3.22E-06	9.55868E-10
Case12	2	1	4	0.004033	0.007911364
Case13	2	1	5	0.032903	0.009826223
Case14	2	1	6	0.121608	0.010051929
Case15	2	1	7	0.146477	0.003919961
Case16	2	1	8	0.065762	0.000882377
Case17	2	1	9	0.038877	0.00033781
Case18	2	1	10	0.015655	9.22355E-05
Case19	2	1	11	0.005662	2.45764E-05
Case20	2	1	12	0.001468	5.40117E-06
Case21	2	1	13	0.000346	1.16343E-06
Case22	2	1	14	0.000482	1.5227E-06

Case23	3	1.5	6	0.010207	0.006683292
Case24	3	1.5	7	0.041524	0.009498209
Case25	3	1.5	8	0.05504	0.005972601
Case26	3	1.5	9	0.011954	0.000735773
Case27	3	1.5	10	0.00776	0.000300421
Case28	3	1.5	11	0.004643	0.000120845
Case29	3	1.5	12	0.001636	3.17464E-05
Case30	3	1.5	13	0.000662	1.04994E-05
Case31	3	1.5	14	0.000439	6.11297E-06
Case32	4	2	7	0.001151	0.001270638
Case33	4	2	8	0.008441	0.004265635
Case34	4	2	9	0.017556	0.004752092
Case35	4	2	10	0.00271	0.00044271
Case36	4	2	11	0.001525	0.000160573
Case37	4	2	12	0.00078	5.65001E-05
Case38	4	2	13	0.000185	9.9998E-06
Case39	4	2	14	0.000378	1.65853E-05
Case40	5	2.5	9	0.002164	0.002136118
Case41	5	2.5	10	0.006148	0.003549862
Case42	5	2.5	11	0.000828	0.000295812
Case43	5	2.5	12	0.000422	0.000100108
Case44	5	2.5	13	7.38E-05	1.23605E-05
Case45	5	2.5	14	0.00018	2.30394E-05
Case46	6	3	10	0.001232	0.001926384
Case47	6	3	11	0.002716	0.002618537
Case48	6	3	12	0.000168	0.000104722
Case49	6	3	13	0.000117	5.00006E-05
Case50	6	3	14	0.000128	4.00322E-05
Case51	8	4	13	0.000184	0.000392816
Case52	8	4	14	2.3E-05	3.47682E-05
Total				1	0.087809322
				疲劳寿命	6.819348797

第 8 章

結論と今後の課題

8.1 本研究のまとめ

8.1.1 動的解析プログラムの検証

係留索の加振実験を行い、実験結果と動的解析プログラムの結果を比較することで、並進 3 方向の動揺において形状と張力の妥当性を検証することができた。係留索が索の横断方向に振動した際は海底摩擦の影響があることが示唆され、プログラムのアンカー点の設定位置を変えることにより張力の結果を合わせることが出来た。

8.1.2 張力変動特性

MoorDyn の係留解析プログラムを利用して、係留索の各点の張力変動範囲の大きさを求めることができた。周期を短くした際の動的影響について、関谷 [20] は単一方向の加振により明らかにしたが、本研究では水平方向に加えて鉛直方向の 2 方向加振により同じような結果が得られた。また、波浪影響と VIM 影響が共存した際の張力変動範囲をあらゆる波の条件において網羅的に求め、張力変動範囲が大きくなる条件を明らかにした。VIM 影響を考慮した場合、今回用いた条件では張力変動範囲の大きさは 1.1~1.4 倍程度になる可能性があることが分かった。

8.2 今後の課題

8.2.1 プログラム

係留索に動的影響がある場合、出力された張力が不連続な応答を示していた。この応答を無くすためにはセグメント数を増やしてより細かい係留索の条件で解析を行う必要がある。

8.2.2 係留索の形状

今回は単一の形状で張力変動範囲を求めたが、初期張力を変えた際はその変動も変わる可能性がある。様々な形状で解析を行うことにより、より安全な係留索の形状を見いだせるようになると考えられる。

8.2.3 不規則波での解析

本研究では波条件として規則波のみを考慮したが、実海域での係留索の挙動や張力変動を求めるためには、不規則波中での浮体の波浪応答を考慮する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方からたくさんのご支援、ご協力を頂きました。この場をお借りして、感謝の意を申し上げます。

指導教員の平林紳一郎准教授には、本研究にて最もお世話になりました。毎週の研究会や個別面談では、研究テーマの設定や進め方など細かい部分まで懇切丁寧に答えて頂き、本当に感謝しています。入学した当初は基本的事項もはっきりと理解しておらずご迷惑とご心配をおかけしてしまいましたが、こんな自分にも親身になってアドバイスをしてくださり本当にありがとうございました。

アドバイザー教員の高木健教授には、中間発表や副査面談において的確なご指摘をしてくださり、研究の方向性について見つめ直すことができました。

鈴木研究室の鈴木英之教授、宝谷英貴助教、Rodolfo Gonçalves 助教には、合同研究会での発表で本質的なアドバイスをしてくださり、自身の研究に関する知識を深めることができました。

鈴木研究室の高岡繭子様、技術専門職員の吉田善吾様、加藤孝義様には、実験の計画から当日の計測作業に至るまで多くの助言を頂くなどお世話になりました。御三方のおかげで、スケジュールが厳しい中でも実験を遂行することができました。

研究室秘書の石渡様には、差し入れを頂いたり業務の合間に話しかけてくださったりなど、とても親切にしてもらいました。

研究室のメンバーにもお世話になりました。先輩の李さんや北野さんとは対面でありお会いすることができなかったのですが、研究室の仕事の引継ぎなどにおいてお世話になりました。同期卒業の松下さんには実験の進め方やフーリエ変換のやり方など教えていただきました。同期の大久保君や何君とは輪講や講義の課題で分からなかった箇所を教え合ったり就活のお話などをすることで、大学院生活のモチベーションを保つことができました。後輩の内藤君や鈴木研究室の南雲君、樋口君には自身の研究の実験の手伝いをしていただきました。また和田研究室の同期の友人にも、研究の合間の時間でお話やボードゲームをしたりとお世話になりました。

最後に、大学院生活を送るにあたっていつも応援してくださった両親に心からの感謝の意を示し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁：令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）
- [2] 新電力ネット：用語集：RPS制度（2022年1月24日アクセス）
<https://pps-net.org/glossary/5250>
- [3] 経済産業省資源エネルギー庁：なっとく！再生可能エネルギー：風力発電（2022年1月24日アクセス）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/renewable/wind/index.html
- [4] GWEC(Global Wind Energy Council)：Global Wind Report 2021, March 2021
- [5] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：国内初！沖合における洋上風力発電への挑戦～プロジェクト現場レポート～：プロジェクト背景（2022年1月24日アクセス）
<https://www.nedo.go.jp/fuusha/haikai.html>
- [6] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：国内初！沖合における洋上風力発電への挑戦～プロジェクト現場レポート～：未来を拓く洋上風力発電プロジェクト（2022年1月24日アクセス）
https://www.nedo.go.jp/fuusha/itv_ito.html
- [7] 石原孟：急拡大する洋上風力発電の現状と将来展望、Journal of JWEA Vol.98、pp.4-8、2011年
- [8] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：浮体式洋上風力発電技術ガイドブック、2018年3月
- [9] European Wind Energy Association:Deep Water:The next step for offshore wind energy. A report by the European Wind Energy Association, July 2013
- [10] 経済産業省資源エネルギー庁：なっとく！再生可能エネルギー：洋上風力発電関連制度（2022年1月24日アクセス）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/index.html
- [11] 経済産業省資源エネルギー庁：第49回調達価格等算定委員会：資料1 太陽光発電・風力発電について、2019年11月
- [12] 経済産業省資源エネルギー庁：第68回調達価格等算定委員会：資料1 再エネ海域利用法に基づく公募占用指針について、2021年9月
- [13] 中村晶、岡島厚：円柱状構造物の流体励起振動、INSS journal：Journal of the Institute of Nuclear Safety System / 原子力安全システム研究所 編、第7巻、2000年、pp.201-215
- [14] M. Saito, T. Fujiwara and K. Maeda:An Experimental Investigation of Cylindrical Floater VIM in Current and Waves, Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014-23702, June 2014
- [15] R.T. Gonçalves, L.A.Pinto and A.L.C.Fujarra:Experimental study on vortex-induced motions of a

- semi-submersible platform with four square columns, part III: Effects of the collinear irregular and regular wave incidence and current, *Ocean Engineering* 217, 2020, 107585
- [16] 藤原敏文、齊藤昌勝、前田克弥 et al.: 高レイノルズ数域での Spar 構造物の VIM 特性、日本船舶海洋工学会論文集 第 20 号、2014 年 12 月、pp.39-47
 - [17] T. Fujiwara, T. Nimura and M. Saito: VIM Model Test and Mooring Line Fatigue Assessment on Semi-submersible Floaters、日本船舶海洋工学会論文集 第 26 号、2017 年 12 月、pp.71-79
 - [18] 中嶋俊夫、元良誠三、藤野正隆：質点系モデルによる係留ラインの 3 次元動的解析法、日本造船学会論文集 第 154 号、1983 年 11 月、pp.192-202
 - [19] 菊池紘樹：洋上浮体式風車の係留システムの安全性評価、2012 年度東京大学修士論文
 - [20] 関谷哲：浮体式洋上風車の浅海係留系の動的挙動特性に関する研究、2013 年度東京大学卒業論文
 - [21] 恩田将維：動的影響を考慮した浅海係留特性の向上に関する研究、2017 年度東京大学卒業論文
 - [22] Matthew Hall: MoorDyn (2022 年 1 月 24 日アクセス)
<http://www.matt-hall.ca/moordyn.html>
 - [23] 鈴木英之：浮体式洋上風車、日本マリンエンジニアリング学会誌 第 44 巻 第 1 号、2009 年、pp.51-57
 - [24] Matthew Hall: MoorDyn V2: New Capabilities in Mooring System Components and Load Cases (Preprint), Presented at the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, August 2020
 - [25] Matthew Hall: MoorDyn User's Guide, August 2017
 - [26] M. Hall, A. Goupee: Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data, *Ocean Engineering* 104, 2015, pp.590-603
 - [27] 板倉博：台車走行アナログ制御プログラム [carg.driv.***.VI] について、東大生研海洋工学水槽 簡易マニュアル 補足 B-2、2019 年 7 月
 - [28] 藤原敏文、齊藤昌勝、前田克弥 et al.: VIM の現象解明と予測に関する研究 3 MPSO 型浮体の波浪中 VIM の振幅特性、海上技術安全研究所報告 第 14 巻 第 3 号 (平成 26 年度) 総合報告
 - [29] American Petroleum Institute(API): Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, API Recommended Practice 2SK Third Edition, October 2005
 - [30] DNV GL:Position mooring, Offshore Standards DNVGL-OS-E301, July 2020
 - [31] 日本海事協会：鋼船規則 L 編 艀装品、2010 年
 - [32] 独立行政法人 海上技術安全研究所：日本近海の波と風のデータベース (2022 年 1 月 24 日アクセス)
<https://www.nmri.go.jp/wwjapan/055/055-ann10yrs-hp.html>

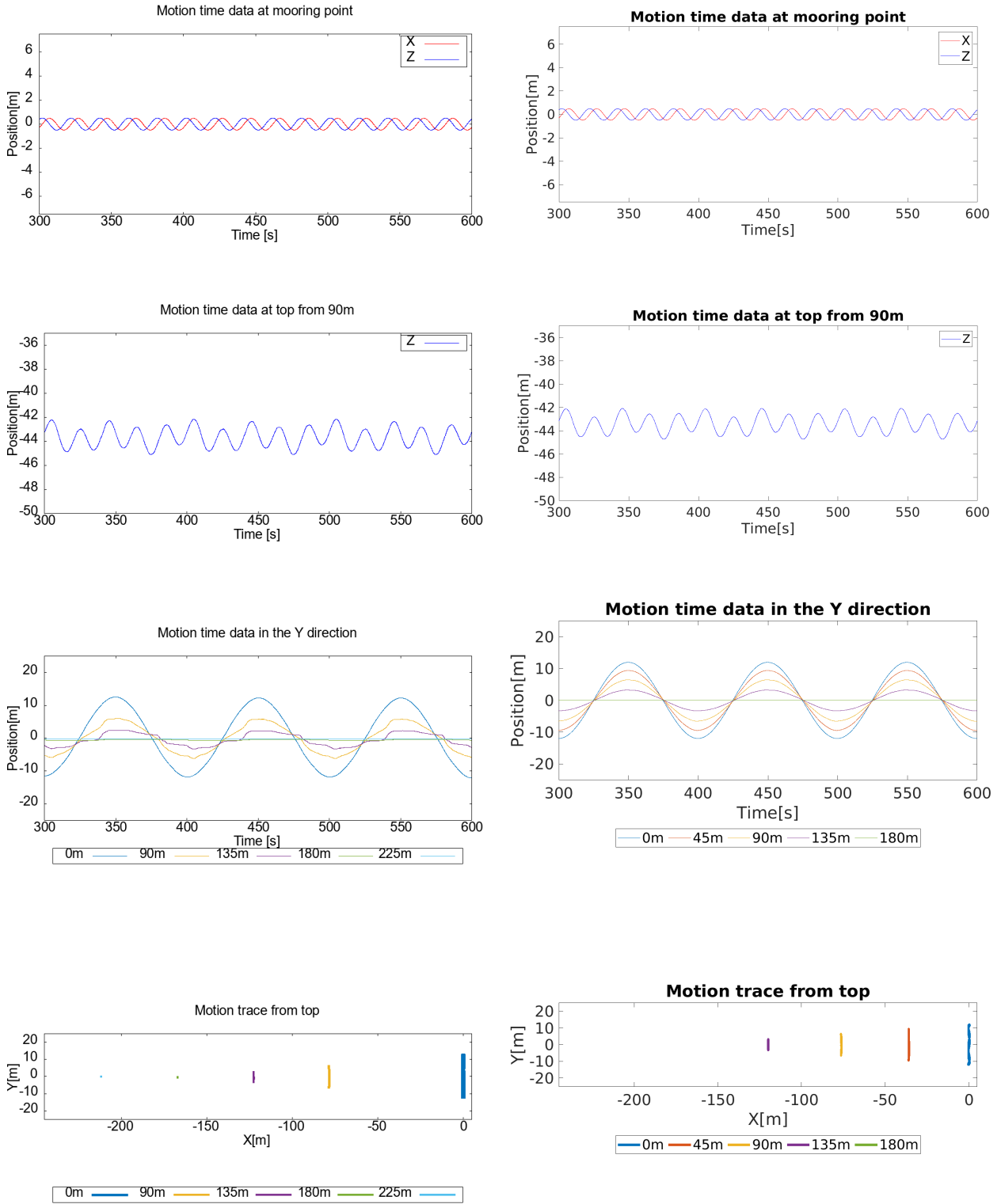
付録 A

3 軸方向加振 実験結果

A.1 座標変動比較結果

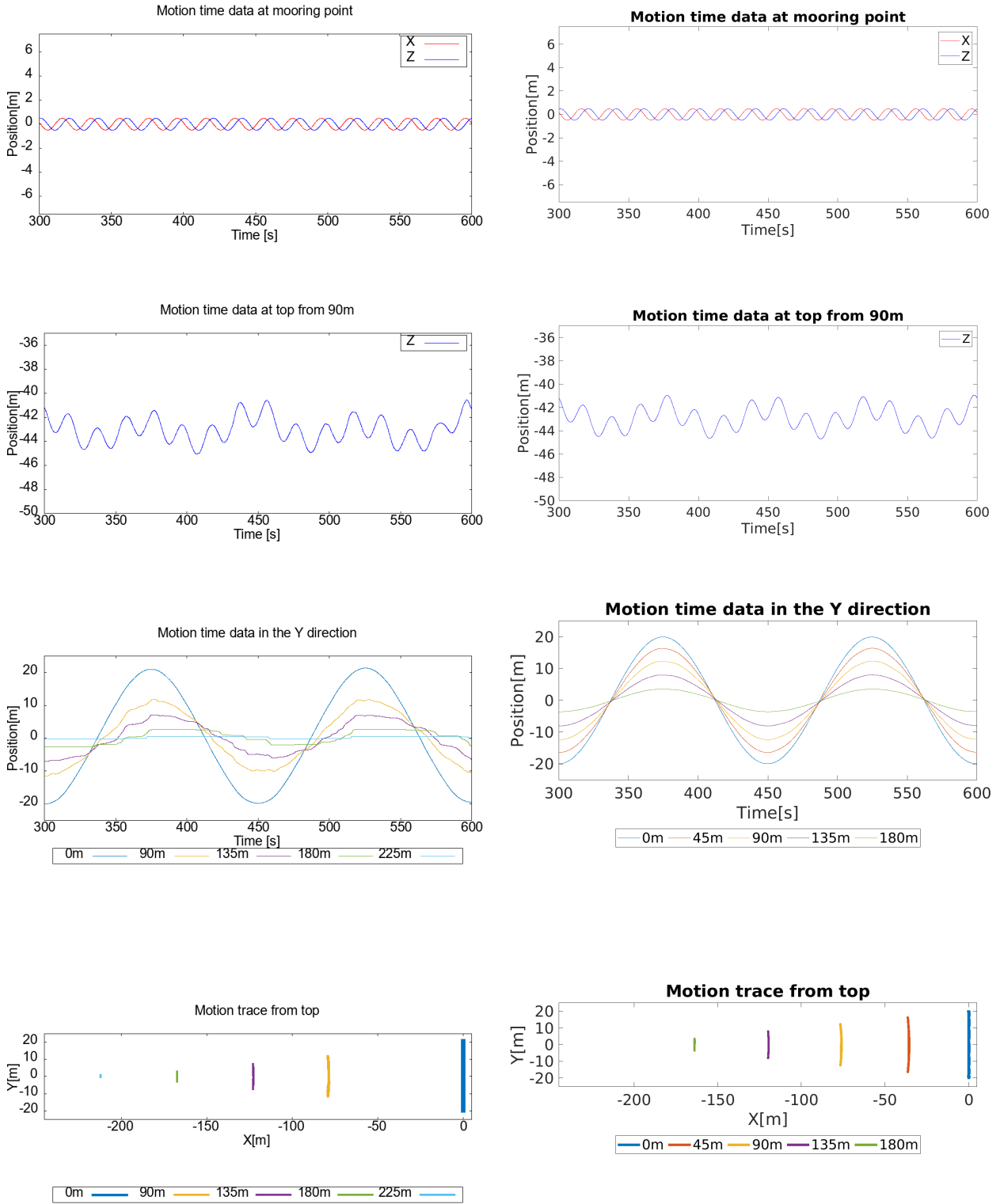
この節では、3 軸方向加振の座標変動結果のうち、5.7 節に掲載しなかったケースを掲載している。1 段目が加振点の X・Z 座標、2 段目が位置 S03(上端から索に沿った長さ 90m の地点) の Z 座標の時系列データ、3 段目が各点の Y 座標の時系列データ、4 段目が各点の軌跡を上から見た図となっている。実験結果を実機スケールに換算した結果を左列に、数値計算結果を右列に示し、横軸の時系列は全グラフで揃えている。

○ Case 12 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)



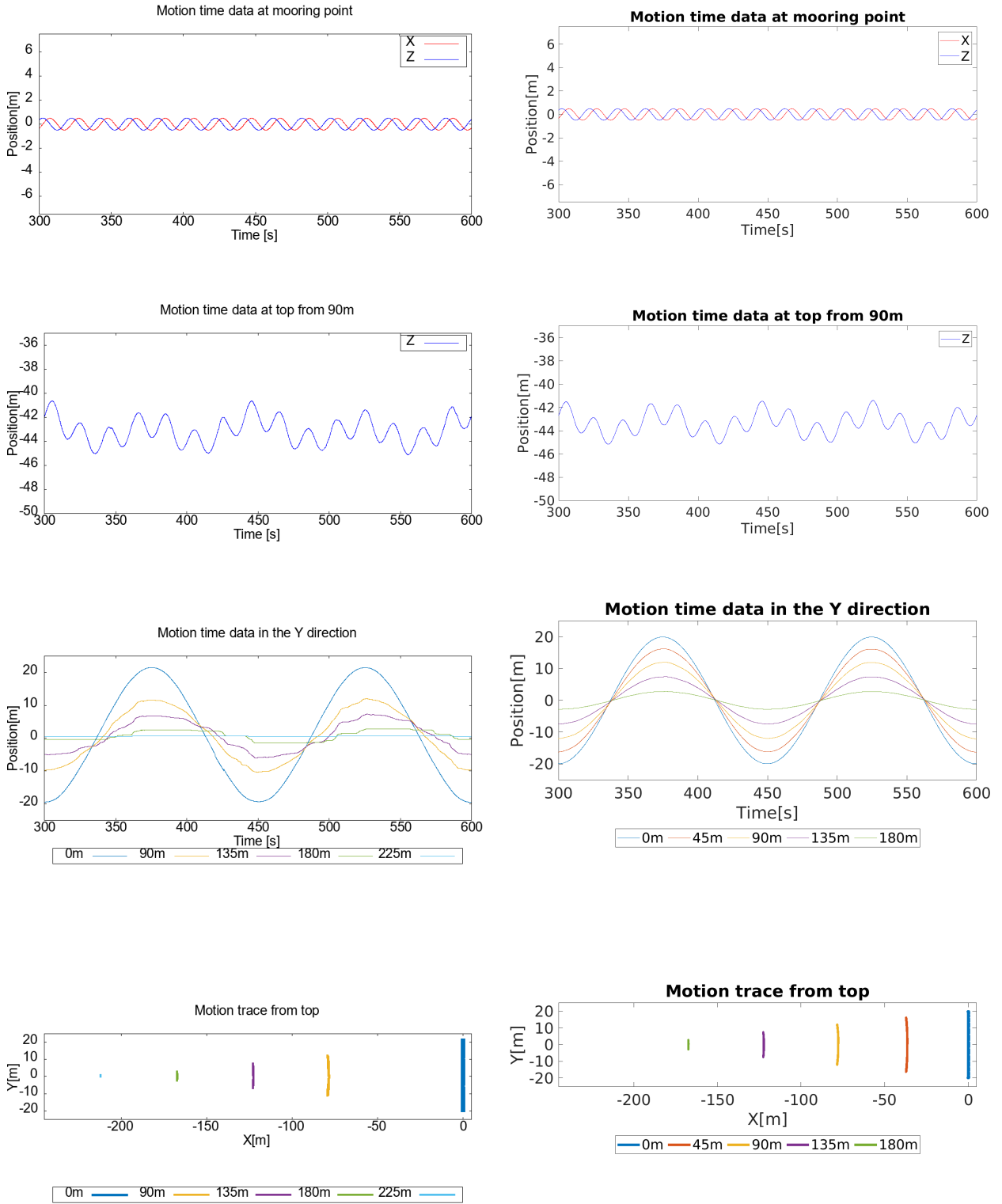
FigA.1 Coordinate fluctuation result of Case 12

○ Case 13 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)



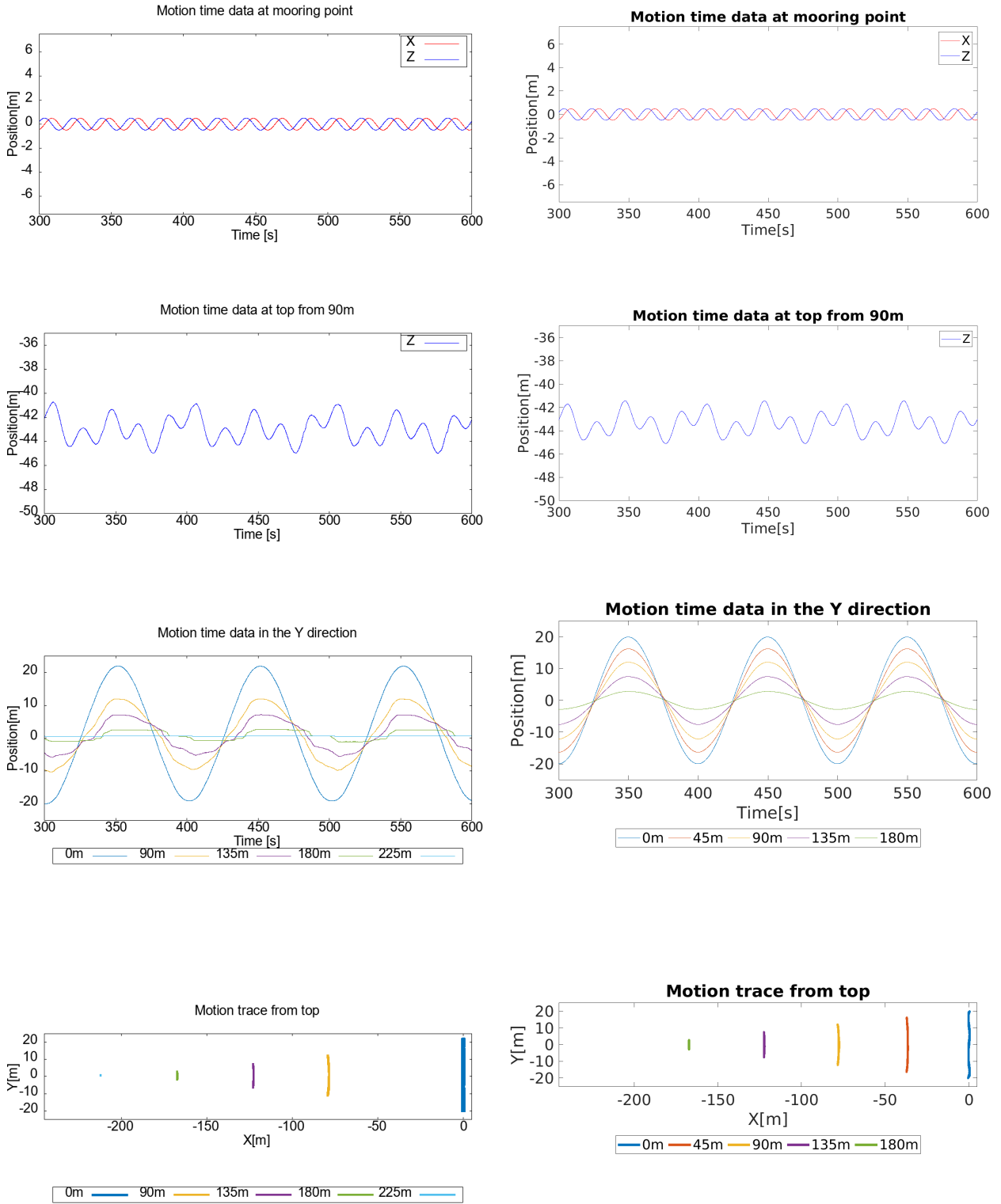
FigA.2 Coordinate fluctuation result of Case 13

○ Case 14 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)



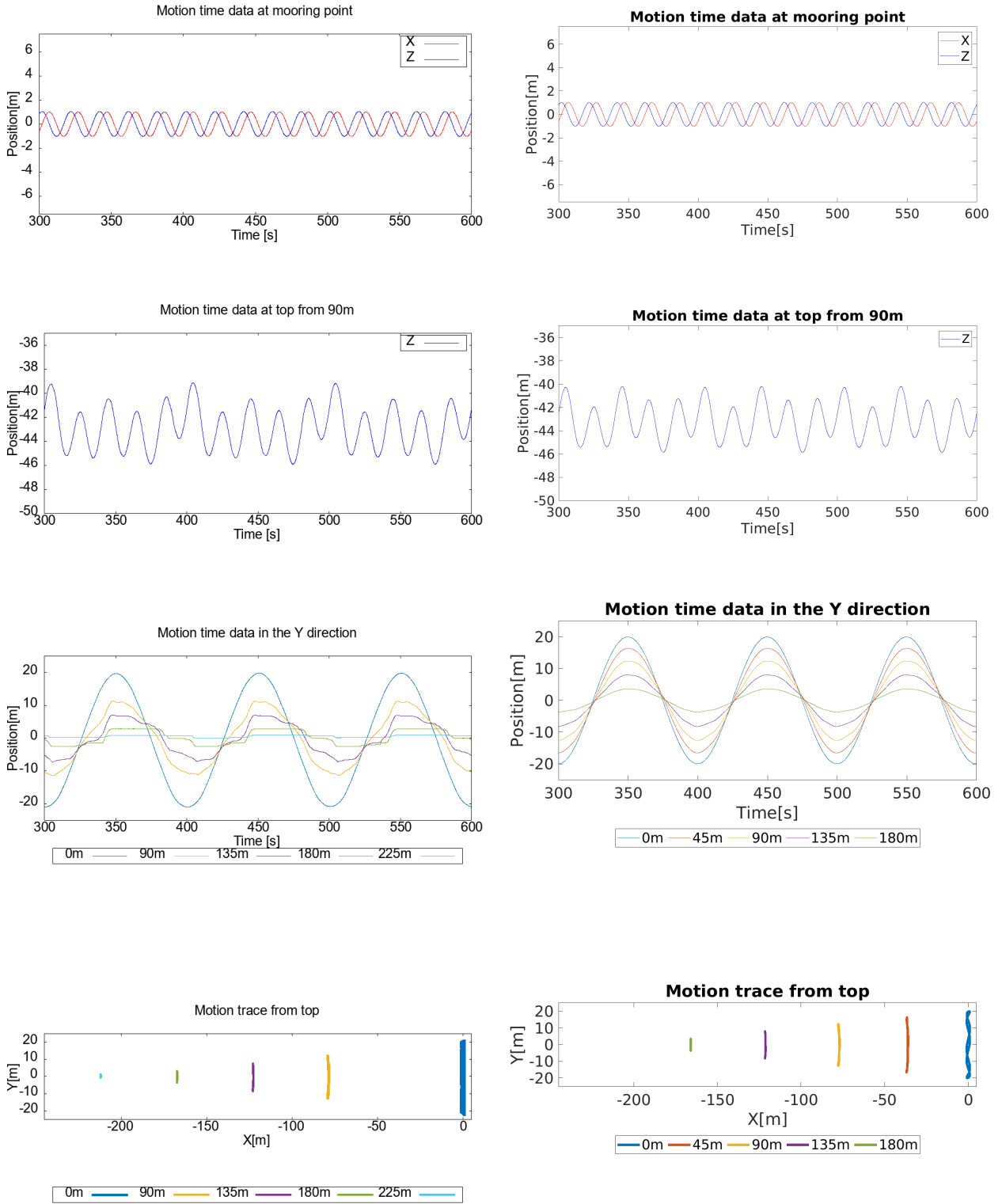
FigA.3 Coordinate fluctuation result of Case 14

○ Case 16 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)



FigA.4 Coordinate fluctuation result of Case 16

○ Case 18 (左列：実験結果、右列：数值計算結果)

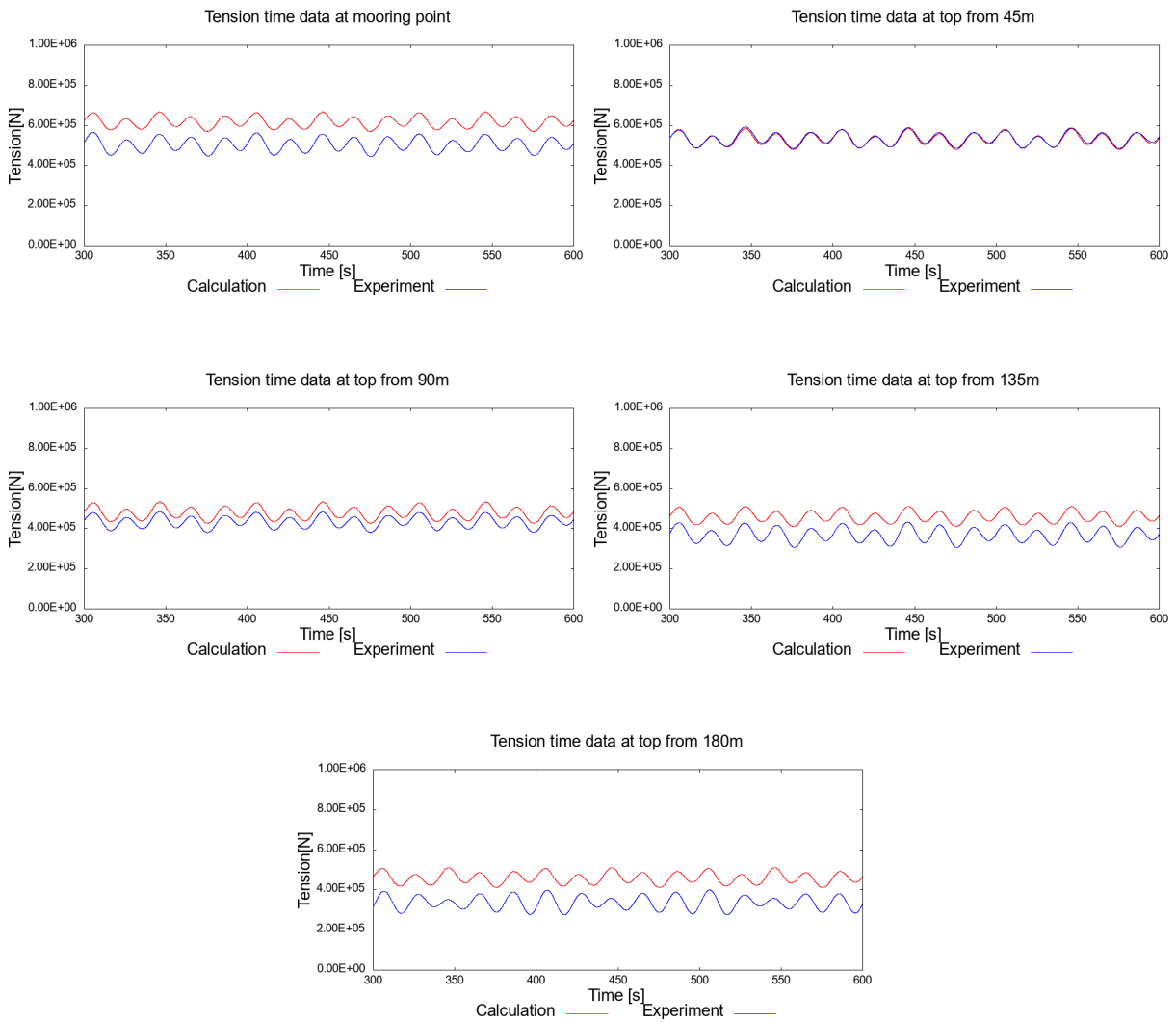


FigA.5 Coordinate fluctuation result of Case 18

A.2 張力変動比較結果

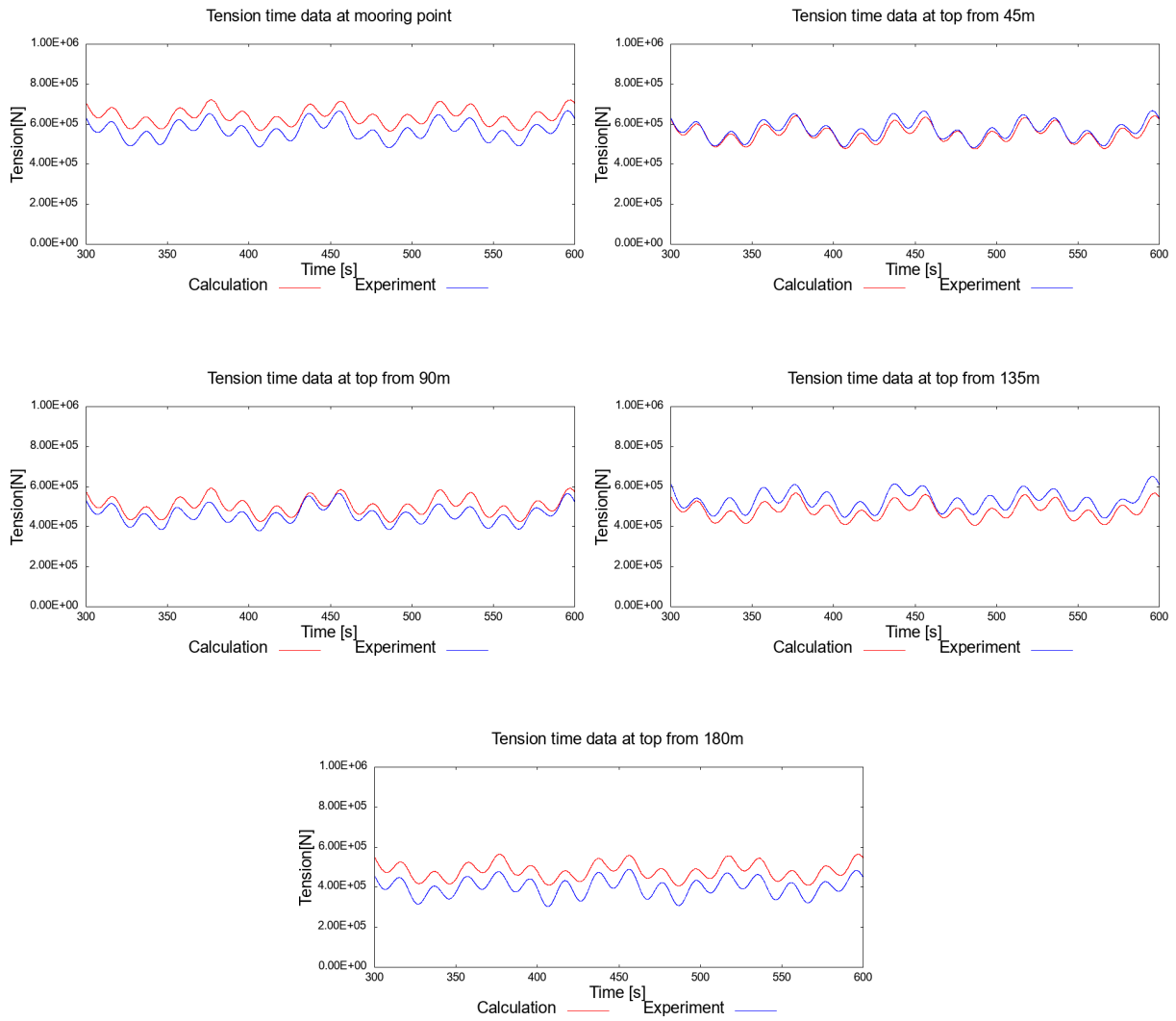
この節では、3軸方向加振の張力変動結果のうち、5.9節に掲載しなかったケースを掲載している。縦軸の表示範囲は全グラフで $0 \sim 1.0 \times 10^6 \text{N}$ に揃えている。

○ Case 12



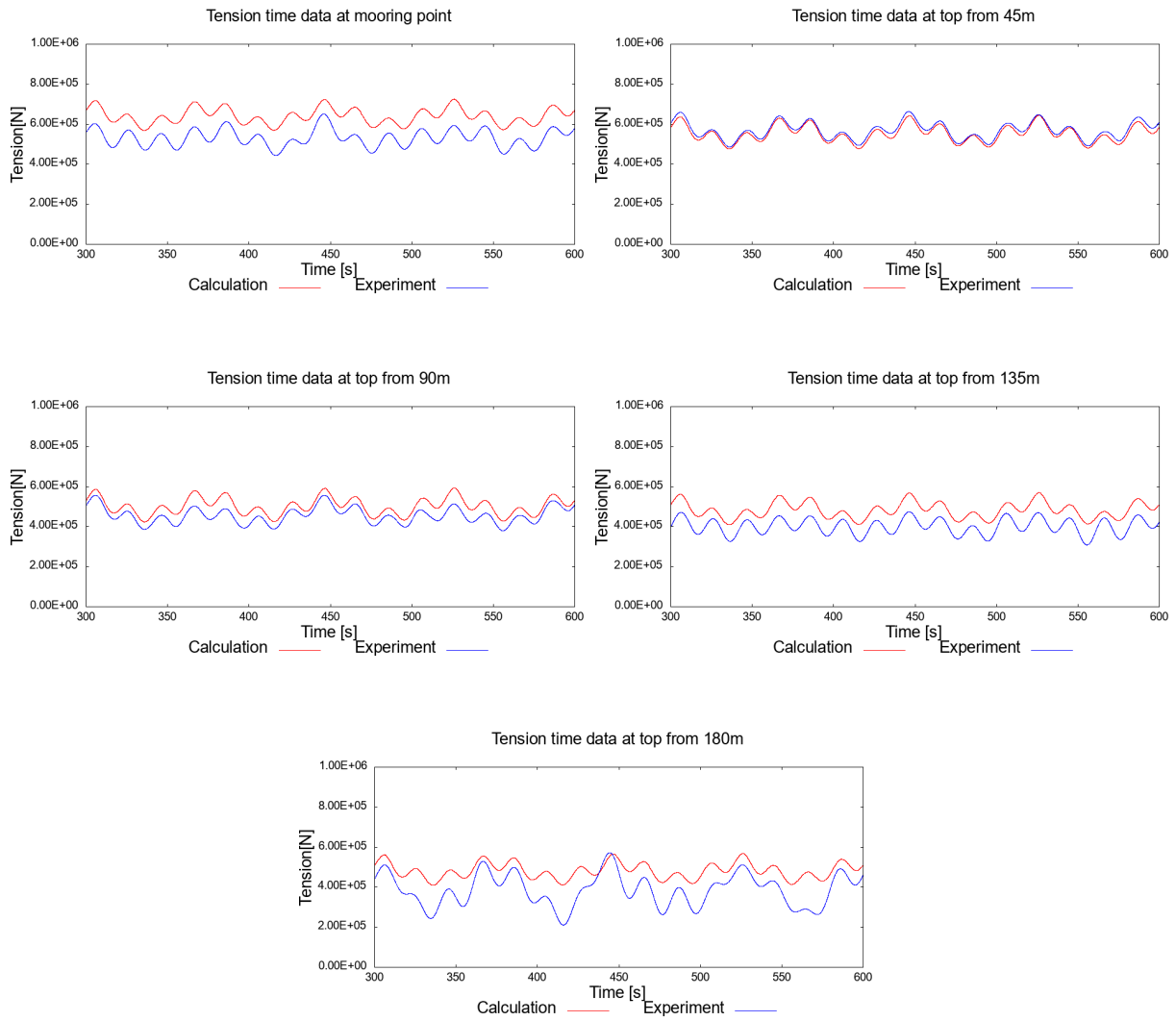
FigA.6 Tension fluctuation result of Case 12

○ Case 13



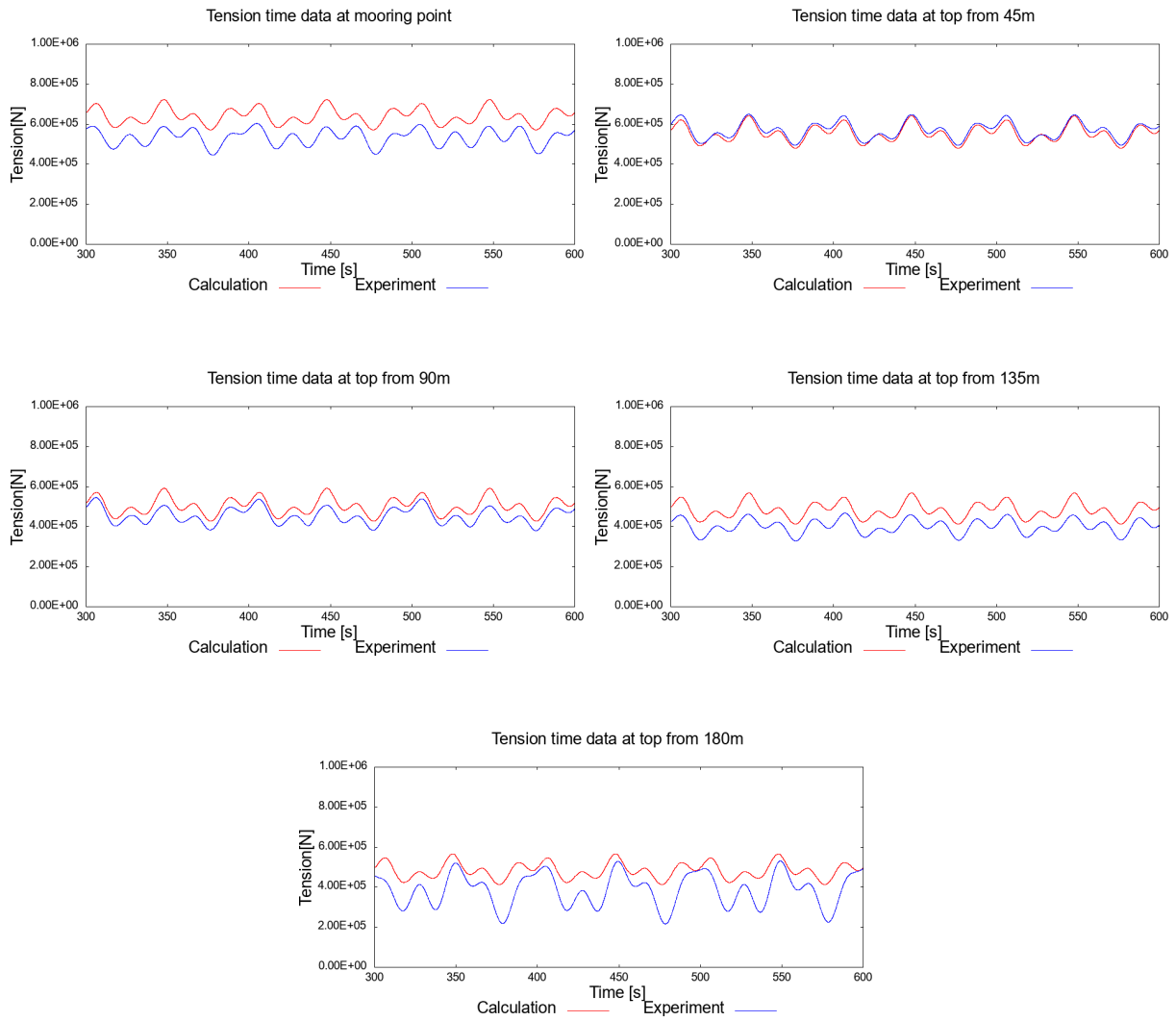
FigA.7 Tension fluctuation result of Case 13

○ Case 14



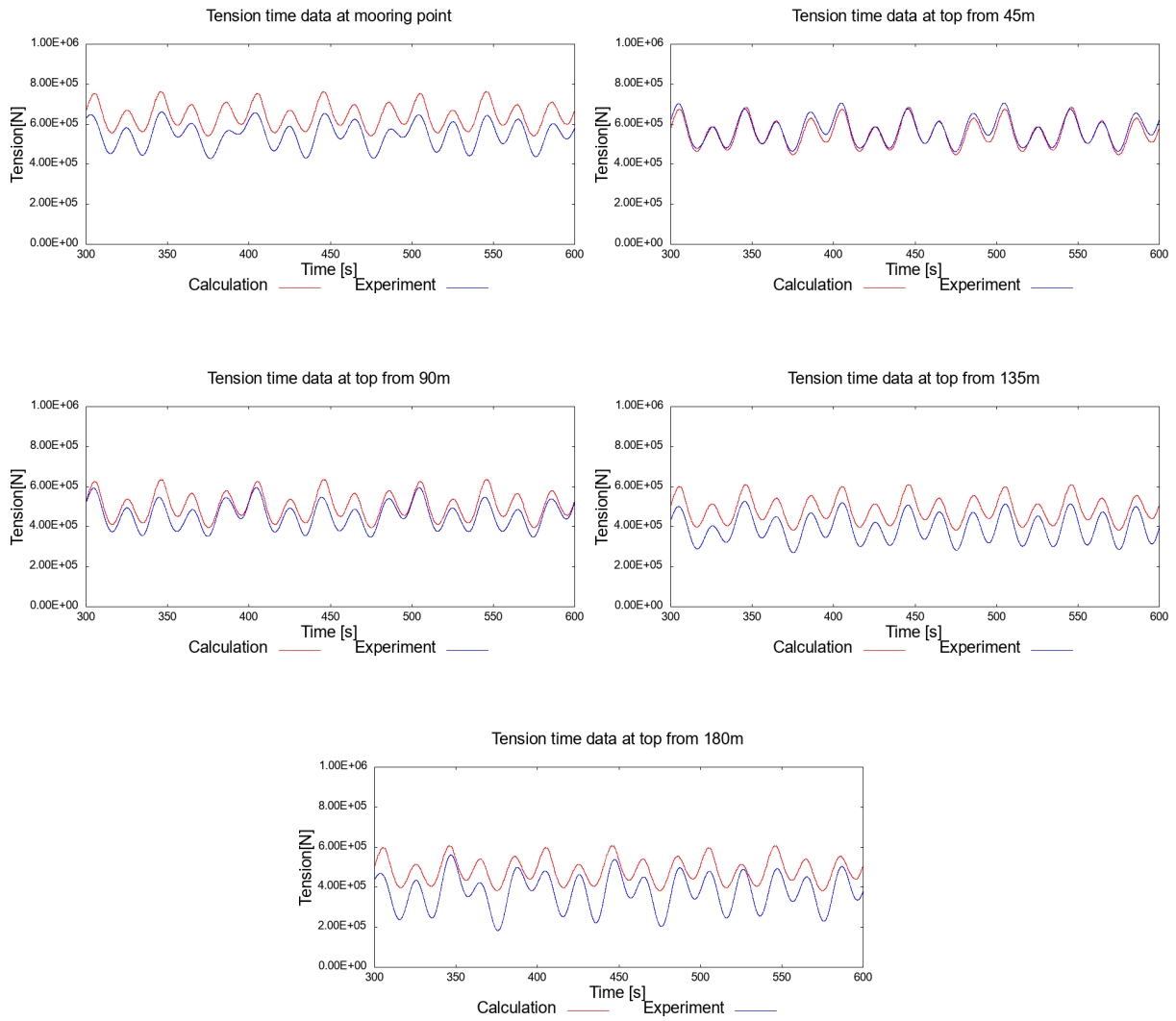
FigA.8 Tension fluctuation result of Case 14

○ Case 16



FigA.9 Tension fluctuation result of Case 16

○ Case 18



FigA.10 Tension fluctuation result of Case 18