

調 査 報 告

ガイドウェイ・ビークルのダイナミクスと制御に関する研究調査

Research Trends on Dynamics and Control of Guideway Vehicles

須 田 義 大*

Yoshihiro SUDA

1. は じ め に

三好研究助成金により、ガイドウェイ・ビークルに焦点を絞って、交通システムにおけるダイナミクスと制御に関する研究調査を行う機会を得た。先ず、7月後半に、カナダ・バンクーバおよびアメリカ・シアトルを訪問し、主として、車輪とレールの接触問題に関する国際会議（4th International Conference of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems）に出席し、研究成果の発表とともに研究者と交流を図った。さらに、11月には、ドイツおよびアメリカをまわり、ガイドウェイ・ビークルに関する研究の盛んな研究所や大学の訪問とともに、国際会議での情報交換を行い、有意義な研究調査を行うことができた。以下の報告では、3つの項目に絞って紹介する。

2. ドイツ・アーヘン工科大学での軌道系交通システムに関する研究・教育

オランダとベルギーの国境近くに位置するドイツのAachen 工大（RWTH Aachen）には、Institut für Fortertechnik und Schienenfahrzeuge（交通および鉄道研究所）があり、そこのプロフェッサーである F. Frederich 教授をたずねた。Frederich 教授は独立回転車輪方式台車の研究開発の第一人者であり、その名前が付けられた Frederich 台車が、既にドイツを始めとするヨーロッパ諸国で実用化されている。教授とは以前からカナダやフランスでの国際会議で懇意にさせて頂き、1993年秋に我が国において日本機械学会主催で開催された STECH'93（鉄道高速化国際会議）出席のため来日もされている。図らずも机の上に日の丸を立てて小生を歓迎して頂き、後述するような研究に対するポリシーから、多様な研究成果について討論する時間を持ち、最後には、小生の提案した実用化間近な前後非対称方式操舵台車に対しても好ましい評価も得た。

大学の研究所という立場でありながら、その施設には驚かされた。研究室のある建物は、Aachen West 駅に併設されており、DB（ドイツ鉄道）の本線から分岐した線路が実験室まで伸びているのである。実験室にも、本物の小型のディーゼル機関車が止まっており、車両工場のミニチュアという様相であった。うらやましい限りである。そのため、研究は非常に実践的であり、大学の研究所内の工場で作った台車の走行試験や台上試験も行われている。

研究に対するポリシーについては、思考（Pre-thinking）、計算（Calculation）、実験（Experiment）、そして検証（Post thinking）を経て、再度フィードバックして思考をするという、明確な手法を力説され、優れた研究成果が如何に産み出されるかが分かったような気がする。そして、「人間のための技術」が重要だということを強調され、それが、現在までに独立回転方式の台車だけでも3種類も実用化している原動力のように感じた。

専門的になりすぎるため、詳細は省略するが、教授の考案した台車のコンセプトの概略を紹介すると、独立回転方式の長所を徹底的に利用し、短所を独創的なアイデアで巧みに克服するという考えである。すなわち、通常の鉄道車両では、自己操舵機能を期待して、左右二つの車輪が剛に結合した輪軸を用いるが、操舵機構を適切に設計しないと、蛇行動という自励振動に関わる高速安定性と曲線をスムーズに旋回させる操舵性能の二律背反の係に陥ってしまう。一方、単に左右の車輪を切り離した独立回転方式だけでは、安定性は飛躍的に向上するが、操舵機能が失われる。よって、我が国でも幾度となく試みられたにも関わらず、現在のところ実用化がなされていない。それに対し、Frederich 教授は、独立回転方式のシステムに、操舵機能を設けるために、次の2つの独創的なアイデアを提案して実用化を図ってきた。一つは、2つの車輪を縦にブロックにするという方式、もう一つは、左右の車輪の動きをリンクで拘束することにより、ヨーイングモーメントを発生させる方式である¹⁾。

*東京大学生産技術研究所 第2部

現在では研究テーマは拡張して、通常の鉄道のようなドライバーが運転する有人信号システムの列車に混在して、無人自動運転車両を運転するシステム（SST；Safe Signal Transportation）を提案し、実用試験を行っていた。筆者も大学構内の線路上を、通常の信号システムと併存するコンピュータ制御の無人機関車に試乗させてもらった。あらかじめ自動運転を前提にしたシステムではなく、通常の営業線で貨物輸送であるが無人運転車両を混在させるという考えは、我が国ではそう簡単に受け入れられない方式である。ドイツにおける「人間のための技術」への強い考えの表れと思われる。

一方、教育システムについても興味ある情報を得た。こ

の研究所では、交通および鉄道に関する大学教育を専門的に行っており、これまた我が国にはとても想像もできないようなカリキュラムであった。カリキュラムと講義内容の一例を表1、2に示す。

3. ドイツ・ブランシュバイクにおけるプロジェクト

ドイツ北部、旧東ドイツとの国境近くに Braunschweig という大学町がある。フォルクスワーゲンの本拠地にも近く、前述の無人運転貨物輸送は、この近くでフォルクスワーゲンの工場間の部品輸送に実用化されるという。まだ運転が開始されていないので視察はできなかったが、今回は Braunschweig 工大（TU Braunschweig, Institut für

表1 アーヘン工大における交通・鉄道関係の専門教育プログラム

| | | | | | | | | | | | | |
|------|-------------|--------------|------------|------------|-----------|----------------|-------------|--------------|------|----------|----|----|
| | 卒業最終試験 | | | | | | | | | | | |
| 第9学期 | 卒業研究 | | | | | | | | | | | |
| 第8学期 | 鉄道車両Ⅳ | 情報処理 | 選択科目 | | | | | | | | | |
| 第7学期 | 熱機関 作業機 | 労働 科学 | 鉄道 車両Ⅲ | 原動機 制御 | 鉄道 原動機 | 信号 工学 | 機械 実習 | 選択科目 | | | | |
| 第6学期 | 振動工学 | プログラマー 講習 | 鉄道 車両Ⅱ | | 運搬工学Ⅱ | | 鉄道動力 要素 | 選択科目 | | | | |
| 第5学期 | 機械 動力学Ⅰ | 制御工学 | 数値数学 | | | 油・水力学 気圧力学 | 鉄道車両Ⅰ | 運搬工学Ⅰ | | | | |
| | 学位一次試験 | | | | | | | | | | | |
| 第4学期 | 力学B 動力学Ⅱ | | 機械要素Ⅱ | | | 電子工学 | | 物理工学 工学実習 | | | | |
| 第3学期 | 数学Ⅲ | | 力学A 動力学 | | 機械要素Ⅰ | | 工業材 科学Ⅲ | 熱力学Ⅱ | | | | |
| 第2学期 | 数学Ⅱ | | 力学A 強度学 | | 機械製図 | | 工学 材料科学Ⅱ | | 熱力学Ⅰ | | 物理 | |
| 第1学期 | 数学Ⅰ | | | 力学A 静力学 | | 画面幾何学 機械製図Ⅰ | | 工業 材料科学Ⅰ | | 製造 工学 | | 化学 |

| | | | | | | | | | | | |
|------|-------------|--------------|------------|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|------|----------|----|
| | 卒業最終試験 | | | | | | | | | | |
| 第9学期 | 卒業研究 | | | | | | | | | | |
| 第8学期 | 選択科目 | | | | | | | | | | |
| 第7学期 | 熱機関 作業機 | 労働 科学 | 運搬 工学Ⅲ | 原動機 制御 | 自重車Ⅰ | 輸送制度 オペレーション モデルⅡ | 機械 実習 | 選択科目 | | | |
| 第6学期 | 振動工学 | プログラマー 講習 | | 鉄道 車両Ⅱ | 実験 領域 | 運搬工学Ⅱ | 輸送制度 オペレーション モデルⅠ | 選択科目 | | | |
| 第5学期 | 機械 動力学Ⅰ | 制御工学 | | 数値数学 | | 油・水力学 気圧力学 | 鉄道車両Ⅰ | 運搬工学Ⅰ | | | |
| | 学位一次試験 | | | | | | | | | | |
| 第4学期 | 力学B 動力学Ⅱ | | 機械要素Ⅱ | | | 電子工学 | | 物理工学 工学実習 | | | |
| 第3学期 | 数学Ⅲ | | 力学A 動力学 | | 機械要素Ⅰ | | 工業材 科学Ⅲ | 熱力学Ⅱ | | | |
| 第2学期 | 数学Ⅱ | | 力学A 強度学 | | 機械製図 | | 工学 材料科学Ⅱ | | 熱力学Ⅰ | | 物理 |
| 第1学期 | 数学Ⅰ | | 力学A 静力学 | | 画面幾何学 機械製図Ⅰ | | | 工業 材料科学Ⅰ | | 製造 工学 | 化学 |

表 2 講義の内容の概略

| | |
|---|--|
| <p>輸送工学 I</p> <p>物流・交通システム</p> <p>— 運搬装置, 輸送工学, 輸送手段, 保管工学, 積み替え工学</p> <p>— 不連続輸送</p> <p>クレーン, ボディー, スプリング作用</p> <p>— 巻き上げ装置, 負荷振動, 索</p> <p>— 車台, 原動機システム, 車台システム</p> <p>— ブレーキ, 原理, 作動方法, 製造</p> <p>— 建築方法, 応用領域</p> <p>— 荷車運搬, トラクター, クレーン車, フォークリフト, コンテナ積み替え装置</p> | <p>振動システム</p> <p>序論</p> <p>— 振動システム, モデル, 数学的記述</p> <p>— 評価基準, 快適性, 部品荷重, 部品摩耗, エネルギー原理</p> <p>— 垂直の動力学, 自由振動, 周波数特性</p> <p>— 強制振動車輪荷重変動</p> <p>— レール, 衝撃変形</p> <p>構造動力学</p> <p>— モード解析, 固有周波数, 振動計算, 測定</p> <p>— モード合成, スペクトル, 予測, 質量効果</p> <p>— 評価基準, 快適指数, 疲労耐久性, 実験</p> |
| <p>構造工学 II</p> <p>機械による輸送, バラ積み貨物の性質</p> <p>ベルトコンベア</p> <p>スクリュコンベア</p> <p>バラ荷貯蔵</p> | <p>車両の運動力学</p> <p>基礎</p> <p>— 車輪/レールの接触幾何学</p> <p>— 軌道, 直線, カーブ, ポイント</p> <p>— 評価基準, 乗り心地, 車輪/レールの摩耗, 安全性, エネルギー</p> <p>運動抵抗</p> <p>— 運行動力</p> <p>— モデル, 数学的記述, 評価, シミュレーション</p> <p>— 車両工学の応用, 輪軸, 台車</p> <p>— モデル構築, 座標システム, 動力学的評価</p> <p>— 車輪/レール間の力, 加速度, 快適指数</p> <p>— 自己操舵</p> |
| <p>輸送工学 III</p> <p>輸送工学, 制御工学</p> <p>— 輸送手段, 機械化, 自動化, インテリジェント化</p> <p>— 輸送システム, インテリジェントな輸送技術</p> <p>制御工学</p> <p>ロジスティクス</p> <p>シミュレーション</p> <p>— 実験計画, 統計的处理</p> | <p>車両と輸送任務</p> <p>— 近距離運輸, 長距離運輸</p> <p>— レール, 軌間, 勾配</p> <p>— 推進エネルギー, 電車, ディーゼル車</p> <p>— 車両機構</p> <p>— 車輪, 輪軸, 軸受け, フランジガイド</p> <p>— ボギー台車, 駆動ボギー台車</p> <p>— 車体と台車の接続, ボギーピン, 台車枠</p> <p>駆動装置</p> <p>— モータ, 電気モータ, 内燃機関, ガスタービン, リニアモータ</p> <p>鉄道車両</p> <p>— 仕様, 負荷容量, たわみ, ねじり剛性, 衝撃吸収</p> <p>— 貨車, 台車, 自己支持車体</p> <p>— 長距離旅客列車, 駆動車, 鋼—軽金属, 構造</p> <p>— 蒸気機関車</p> |
| <p>鉄道輸送基礎工学</p> <p>— 輸送, 交通, 流通システム, 輸送システム</p> <p>— 交通機関, 交通設備</p> <p>車輪/軌道の接触理論</p> <p>— 接触幾何学, ヘルツ, 接触楕円</p> <p>— 回転輪, 力, モーメント, 転がり摩擦, 滑り</p> <p>鉄道輸送工学</p> <p>— 車輪, 車両抵抗</p> <p>— 動力装置設計, 内燃機関, 電気モータ, ガスタービン, リニアモータ</p> <p>— 車両性能曲線, 加速度特性</p> <p>— 登坂能力, 最高速度, エネルギー消費量</p> <p>— 制動, ブレーキコンビネーション</p> | |

Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen) の Weh 教授を訪ねた。リニアータおよび磁気浮上システムの草分け的存在であり、浮上と推進を共用したシステムが構築できることを初めて示し、後述の M-Bahn という実用化システムの基礎を築いた研究者である。色々な研究、実験を見せてもらったが、ガイドウェイ・システム以外にも、ダイレクトドライブモータを利用した電気自動車の研究や、エネルギー貯蔵用フライホイールのための、磁器軸受けの研究など、幅の広い活動を行っていた。軌道系車両システムのダイナミクスと制御に関連しては、永久磁石を併用したエネルギー消費が少ない新しい磁気浮上システムの研究、軌道の不整に追従させずに一定高さの浮上を維持させる、浮上制御と振動制御の融合といった興味深い研究開発が行

われていた。

また、大学の構内に隣接する敷地では、そのルーツを Weh 教授の研究に求められる M-Bahn の実験線があり、施設の見学と試乗を行った。このシステムは、磁気浮上を永久磁石の吸引力で行う方式であり、ギャップのコントロールに機械式制御を用いるという非常にユニークな浮上システムを持っている。リニアモータ推進方式についても、地上 1 次方式を採用しており、東西併合前のベルリンでは実際に無料で乗客を輸送する実用試験も行っていた。

4. 車輪とレールの接触問題に関する国際会議

この国際会議は、そのテーマが鉄道車両の車輪とレールの接触問題に限っている点、非常にユニークなものである。

対象は極端に狭い範囲であるが、面白いことに参加者の専門は多岐に渡り、筆者のような車両関連の機械工学者、軌道関連の土木工学者、車輪やレールの製造に関わる材料工学や金属材料の専門家、さらに潤滑関連のトライボロジストと通常の学会では同居しない顔ぶれが一同に会した。また、参加者の所属も、大学や研究所だけでなく、車輪や台車メーカー、レールメーカー、実際の鉄道運営や保守担当の鉄道事業者と多彩である。研究者のみならず実務者の参加もあり、議論を行うときの視点も多様である。我が国からも、大学、運輸省、JR 関係者、台車メーカ、レールメーカーなどから結構参加者がいたが、このメンバーが国内で一同に会することはまず有り得ないという、不思議な取り合わせであった。また国内でこのような会合を持っても、このようなシンポジウムは成立しないように思う。なぜなら、発表関係者のみの集まりになってしまうからである。世界中の関係者を集めてこそ、はじめてこのような講演会が成立する訳である。

筆者が発表した車両と軌道の相互作用によって生じるレール表面に発生するコルゲーション（波状摩耗）の問題は、本会議の一つの重要なテーマであり、我が国ではほとんどこのテーマに携わる研究者はいないため、非常に有意

義な意見交換ができた。

4年に1度開催されるこの会議は、前回はイギリスのケンブリッジで開催され、次回はオーストラリアという。そのうち日本でも開催が望まれているようである。国内でも、このような研究者の集まりを如何に組織していくか、検討を始めたいと思っている。

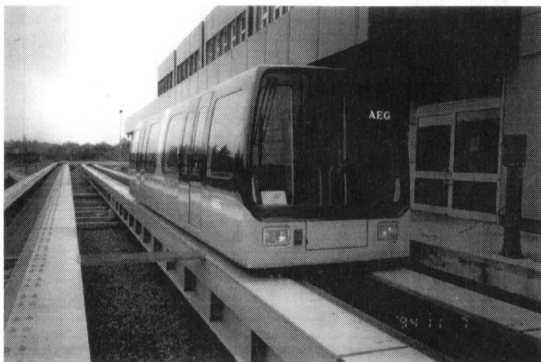
5. お わ り に

上記の他、軌道系交通システムの運動力学と制御の問題に関連して、シカゴで開催されたアメリカ機械学会主催の国際会議（ASME International Mechanical Engineering-Congress & Exposition）への参加や、シアトル、バンクーバー、シカゴおよびドイツ・オランダの都市交通の視察も併せて行った。2度に渡り文字どおり世界一周の行程となった今回の研究調査は、大変有意義に進めることができた。三好研究助成金に対して感謝の意を表したい。

（三好研究助成報告書 1995年3月31日受理）

参 考 文 献

- 1) 須田, 独立回転車輪を用いた操舵台車の研究開発の動向, 生産研究, 41-9 (1995), 397-404.



M-Bahn の実験線と車両



Aachen 工大における SST の実験