

営業列車を活用した
軌道状態監視システムの構築に関する研究

森 裕 貴

目次

第1章	序論	1
1.1	交通機関としての鉄道とその特徴	1
1.1.1	国内鉄道の現状	1
1.1.2	鉄道交通の特徴	3
1.1.3	鉄道における事故	5
1.2	現在の軌道検査方法と軌道保守	7
1.2.1	軌道保守の概要	7
1.2.2	軌道構造	8
1.2.3	軌道不整	10
1.2.4	軌道不整の測定	13
1.2.5	軌道検査方法の問題点	16
1.2.6	地方鉄道の現状	17
1.3	軌道の状態監視の研究動向	21
1.3.1	軌道の状態監視の必要性	21
1.3.2	営業列車による状態監視	22
1.4	プローブ車両による新たな軌道保守形態の提案	25
1.4.1	自動車におけるプローブカー	25
1.4.2	鉄道におけるプローブ車両	26
1.5	本論文の目的	28
1.6	営業車両を活用した軌道診断サイクルの全体構想	30
1.7	本論文の構成	32
第2章	軌道評価指標の提案と診断ソフトの開発	34
2.1	はじめに	34
2.2	評価指標と想定される軌道異常	35
2.2.1	RMS 値による解析	35
2.2.2	ウェーブレット変換による解析	36
2.2.3	カルマンフィルタを用いた逆解析	37
2.3	RMS による評価	38

2.3.1	評価値の算出方法	38
2.3.2	シミュレーションによる検証	38
2.4	ウェーブレット変換による評価	42
2.4.1	連続ウェーブレット変換	42
2.4.2	離散ウェーブレット変換	42
2.4.3	シミュレーションによる検証	43
2.5	逆解析による軌道不整推定の検討	49
2.5.1	モデルの構築	49
2.5.2	カルマンフィルタの構築	58
2.5.3	走行シミュレーション	64
2.6	レール診断ソフトウェア	70
2.6.1	RMS 値の解析画面	70
2.6.2	ウェーブレット変換の解析画面	73
2.7	まとめ	75
第 3 章	測定装置の開発	77
3.1	はじめに	77
3.2	先行研究における試作測定装置	77
3.2.1	試作測定装置の全体構成	77
3.2.2	列車位置・速度の検出	80
3.2.3	試作測定装置による軌道異常の検出	82
3.2.4	確認された課題	86
3.2.5	課題への対策	88
3.3	ハードウェアの検討	89
3.3.1	筐体設計と基本仕様	89
3.3.2	測定用センサ	93
3.3.3	電源	94
3.3.4	保存メディア	94
3.3.5	動作確認用 LED ランプ	94
3.4	ソフトウェアの検討	95
3.4.1	測定データ容量の削減	95
3.4.2	データ転送機能	96
3.5	新しく開発した測定装置	97
3.5.1	装置外観	97
3.5.2	加振試験機における検証	101
3.6	まとめ	104

第4章	軌道状態監視システムの構築と営業路線における評価	105
4.1	はじめに	105
4.2	軌道状態監視システム	105
4.3	路線Aにおける評価事例	107
4.3.1	測定データの再現性	108
4.3.2	要注意区間の現地調査	114
4.3.3	要注意区間における軌道監視と予測	122
4.4	路線Bにおける評価事例	124
4.4.1	RMS値による軌道評価	125
4.4.2	逆解析による軌道不整推定の検討	134
4.5	路線Cにおける評価事例	139
4.5.1	軌道異常の発見と軌道保守例について	140
4.5.2	左右振動に影響を与える軌道異常	145
4.6	まとめ	149
第5章	結論	151
	参考文献	155
	謝辞	160

Study on Development of Track Condition Monitoring System Using In-service Railway Vehicles

Hiroataka Mori

Condition monitoring of railway tracks are essential in ensuring the safety of railways. In-service vehicles equipped with sensors and GPS systems can act as probes to detect and analyze vehicle vibration. They may also dramatically change the current style of rail maintenance, thus contributing to the establishment of safer transport systems. Such trains are known as probe vehicles. The probe vehicle can change the current maintenance style to a focus on locations regarded as essential maintenance areas, utilizing data acquired by high frequency monitoring of actual vibration together with positional information obtained by GPS. For this purpose, condition monitoring system of railway track using in-service railway vehicles has developed. Monitoring based on information obtained by developed system may enable the detection of track faults at an early stage, thus contributing to the revitalization of local railways by making maintenance tasks more efficient.

In this paper, the development of track condition monitoring system using in-service railway vehicles from car-body vibration is described. This paper also introduces our long term experience in Japanese railway track condition monitoring using in-service railway vehicles.

Chapter1 describes problems of track maintenance and the background of the condition monitoring of railway tracks.

Chapter 2 describes detection methods of track faults from car-body acceleration using root mean square (RMS) value and wavelet transform. It is shown that the RMS value of the car-body acceleration and roll rate are useful for the detection of track faults. The wavelet transform that changes time-frequency window size automatically is employed for obtaining detail information of the track faults. An inverse analysis is also proposed to estimate track irregularity from car-body acceleration.

Chapter 3 describes a newly developed on-board sensing device for the track condition monitoring system.

Chapter 4 describes field test results of the developed track condition monitoring system at different railway company.

In Chapter 5, conclusions of this study and future works are summarized.

第1章 序論

1.1 交通機関としての鉄道とその特徴

1.1.1 国内鉄道の現状

鉄道は、大量性，高速性，安定性などに優れる交通機関であり，従来から陸上交通において，重要な役割を果たしている．例えば，大都市圏においては，鉄道は通勤通学輸送をはじめ主要な交通手段となり，都市にとって必要不可欠である．また，空港と都市部を結ぶアクセス交通としても，鉄道は重要な役割を果たしている．

総合的な交通体系は鉄道だけではなく，自動車，航空等の交通機関が相互に連携し，利用者にとってより使いやすい交通を提供することが重要であるが，近年では，鉄道輸送は二酸化炭素の排出が少なく，省エネルギーに貢献できる交通機関であることから，環境問題の解決に貢献できる交通手段としての期待が高まっている [1]．

日本国内における鉄道（軌道含む）は公共交通機関として，通勤通学といった人々の生活の足として重要な役割を果たしており，その利用者数は「鉄道輸送統計調査」（図 1.1.1，国土交通省 [2]）によると，1993 年をピーク（約 227 億人）に減少傾向にあったが，2002 年頃を境として再び増加傾向に転じ，2014 年度では 236 億人（延べ数）にのぼる．

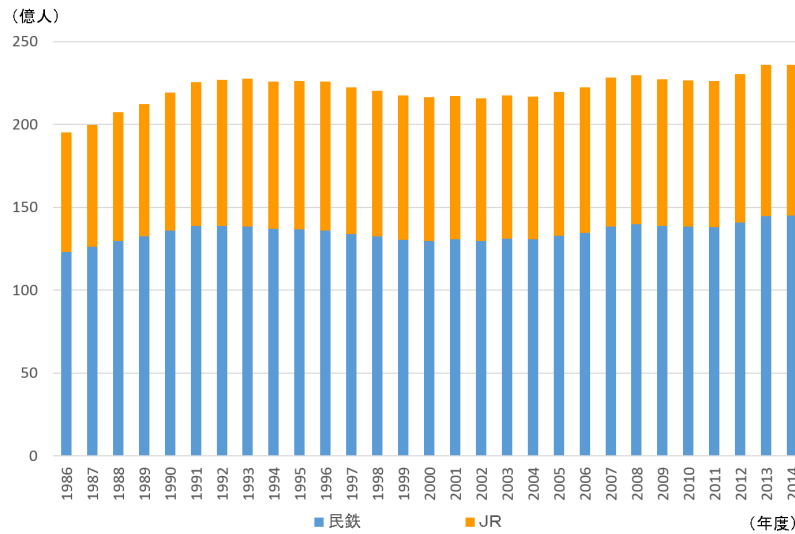


図 1.1.1: 鉄道・軌道利用者数の推移 [2]

しかしながら、我が国における鉄道は、大量輸送・安定輸送といった特徴から、都市内及び都市間において主要な交通手段となっている反面、大都市の地下鉄、近郊線については輸送力の面から、他に代わり得る輸送機関がない。そのため、遅延や運休による社会的な影響は大きく、2011年3月11日に発生した東日本大震災の際には、首都圏においても各路線が運休となり、約10万人の帰宅困難者が出るなど社会問題となっている。

また、地方鉄道事業者（中小民鉄及び第三セクター鉄道）については、これらの鉄道事業者の経営状態は必ずしも芳しくなく、数多くの路線が廃止されている。BRT（bus rapid transit）等への移行により、公共交通機関が存続された例はあるものの、廃止により交通弱者（移動制約者）を生み出すケースも少なくない。

高齢化率が年々増加している日本においては、自家用車等を保有・運転が困難な交通弱者の割合は今後増大することが予想され、鉄道を含む公共交通機関を維持することが重要である。

1.1.2 鉄道交通の特徴

鉄道は、「定時性」、「大量輸送性」、「省エネルギー」、「環境性」、「安全性」などに優れた交通・輸送機関であり、古くから陸上輸送において基幹的な輸送機関として、そして、我々の身近な交通機関として、重要な役割を担っている。また、地方においても、鉄道は通勤・通学、通院、買い物などの沿線地域住民の交通手段であるとともに、観光振興による地域の発展を支え、経済・社会的便益を地域にもたらす役割も担っている。

定時性及び大量輸送性が優れる要因として、二つの車輪が鉄輪軸に結合され、専用軌道をレールで案内されながら走行するといった特徴が挙げられる。レールで案内されているため、長大な列車を編成することができ大量輸送が可能である。特に土地の占有面積あたりの輸送力が他の交通機関に比較して大きい。大都市の地下鉄、近郊線は、輸送力・速度などから、他に代わり得る輸送機関がないのが現状である。また、専用軌道を有するため、保安設備を完備することで高速運転が可能であり、自動車は道路の渋滞により、飛行機は天候等に左右されやすいが、鉄道は専用軌道を走行することで定時制運行の信頼度が他の交通機関と比べると比較的高いといった長所がある。

省エネルギーや環境面といった観点においても、鉄道は優れた特徴を有している。鉄車輪が鉄レールの上を走行するため走行抵抗が少なく、他の輸送機関に比べてエネルギー効率が高い。旅客輸送と貨物輸送において、2014年度の各輸送機関から排出される二酸化炭素(CO₂)の排出量を輸送量(人キロ：輸送した人数に輸送した距離を乗じたもの、トンキロ：輸送した貨物の重量に輸送した距離を乗じたもの)で割り、単位輸送量当たりの二酸化炭素の排出量を試算すると図1.1.2[3]のようになる。図より、鉄道は他の輸送機関と比較して、CO₂の単位輸送量当たりの排出量が非常に少なく、環境性に優れた輸送機関であることが分かる。

また、架線から電気を供給されるため動力効率の優れた電気運転が可能であり、自動車やトラックのように排気ガスによる大気汚染のなど公害を招くことがなく、環境の面で極めて優れている。また、電気車両は外部から電力を供給されて、電気モーターにより走行しているので、ディーゼル車両に比べて大幅な軽量化、高性能化が可能である。

安全面については、鉄道は自動車をはじめとする道路交通と比較して単位輸送量当たりの事故率が非常に低く、安全性が高い交通機関である。また、幾多の事故経験や設計・製造・保守技術の開発、技術基準や運営規定の整備など、安全文化の醸成等により、現在の日本の鉄道は世界でも

高い水準の安全性を実現している。

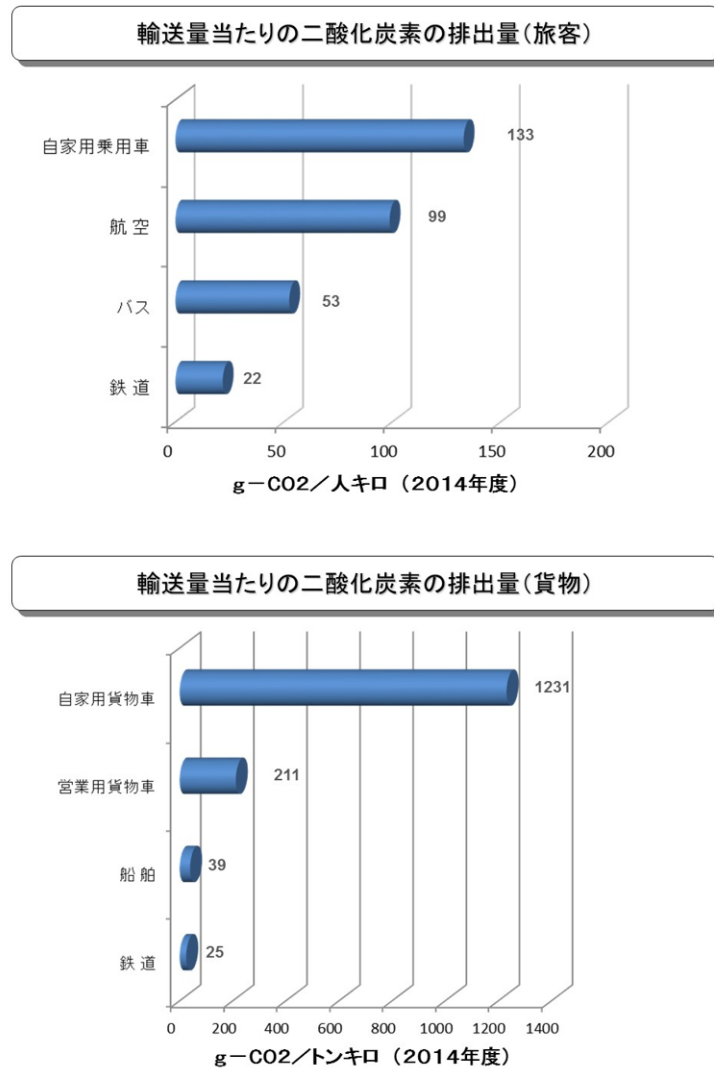


図 1.1.2: 輸送量当たりの二酸化炭素の排出量 [3]

1.1.3 鉄道における事故

鉄道における事故は他の交通モードと交差する踏切事故やプラットフォーム上での事故が大部分であり、乗車中の安全性は自動車や飛行機に比べて、非常に高いなどの長所が挙げられる。

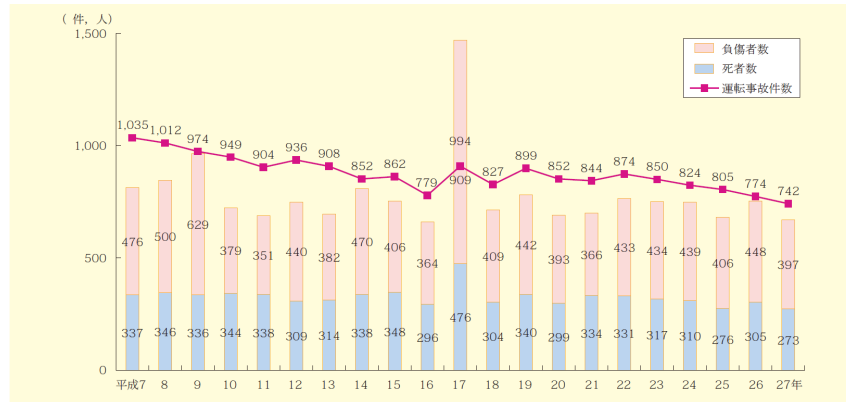
鉄道の運転事故全体の発生件数については、交通安全白書（図 1.1.3, 国土交通省 [4]）によると長期的には減少傾向にあるものの、近年では下げ止まりの傾向を見せている。

図 1.1.4 に平成 26 年度の事故種類別の発生状況について示す。その内訳をみると、踏切障害、道路障害、人身障害といった他のモードと交わる場面での事故が全体の 97.4 % と大勢を占めるものの、重大事故（本論文においては、死傷者が 10 名以上又は脱線両数が 10 両以上生じた事故をいう）に繋がる可能性が大きい列車事故（列車衝突、列車脱線、列車火災）の中でも、列車脱線については年間 15 件の発生が確認されている。

前節までに述べた鉄道の長所は、事故が発生した場合は短所ともなり得る。レールで案内されているために、運転士は前方に異常を視認した場合でも自動車のようにハンドル操作による回避行動をとることは出来ない。加えて長所で挙げた走行抵抗が少ないことにより、ブレーキをかける際には摩擦が小さいために、ブレーキの制動距離が自動車に比べて数倍長くなり、ブレーキを操作しても安全に停止できない可能性が挙げられる。

特に、レールに欠陥や制限速度超過により鉄道車両がレールから逸脱した場合は、高い速度を保持したまま脱線・転覆といった大事故に至る可能性がある。実際、過去には多くの死傷者を出す大事故を経験してきている。

このように、鉄道は重大事故の件数としては他の交通機関と比べて桁違いに小さいという実績があるものの、鉄道輸送は大量性・高速性といった特性を持つため、一度脱線・転覆といった事故が発生すると大規模になる性質があることから、小さな異常を早期に発見し、対応することが非常に重要となる。また、大規模な事故とならない場合も、一度脱線が生じた際は一定期間の運休が生じ、利用者の利便性を著しく損なうなど、社会的な影響が大きいいため、安全性の確保が求められている。



注 1 国土交通省資料による。
 2 死者数は24時間死者。

図 1.1.3: 運転事故の件数と死傷者の推移 [4]

(平成26年)

区分	列車事故				その他の事故					合計
	列車衝突	列車脱線	列車火災	小計	踏切障害	道路障害	人身障害	物損	小計	
件数(件)	1 0.1%	15 1.9%	0 0.0%	16 2.1%	251 32.5%	48 6.2%	454 58.7%	4 0.5%	757 97.9%	773 100.0%
死傷者(人)	72 (0)	48 (2)	0 (0)	120 (2)	160 (93)	15 (2)	456 (208)		631 (303)	751 (305)

注 1 () 内は、死亡者で死傷者の内数である。
 2 踏切障害とは、踏切道において列車又は車両が道路を通行する人又は車両等と衝突し、又は接触した事故のうち列車事故に至らなかったもの。
 3 道路障害とは、踏切道以外の道路において、列車又は車両が道路を通行する人又は車両等と衝突し、又は接触した事故のうち列車事故に至らなかったもの。
 4 人身障害とは、列車又は車両の運転により人の死傷を生じた事故をいう(列車事故、踏切障害及び道路障害を除く)。
 5 物損とは、列車又は車両の運転により500万円以上の物損を生じた事故をいう(列車事故、踏切障害、道路障害及び人身障害を除く)。

図 1.1.4: 事故種類別の運転事故の発生状況 [4]

1.2 現在の軌道検査方法と軌道保守

1.2.1 軌道保守の概要

鉄道の歴史において、初期の保守作業は、壊れたものを直す、随時補修のメンテナンス方式で保守作業が行われていた。線路は毎日歩いて点検し、異常がないかを調べると同時に、異常があれば、その都度修理するというのが保線作業の典型的な形態であった。その後、「予防保全」の考え方が生まれ、今では、定期的に対象となる機器や設備を点検検査して異常の有無や機能の良し悪しを判断すると同時に次の点検まで異常なく使えるかどうかを判断して計画的に保全が行われている。

軌道は主にレール、まくら木、道床とその付属品及びこれらを支える路盤からなり、毎日の列車の走行により大きな力を受け、緩んだり、壊れたりする。そのため、軌道の検査と保全は、車両の乗り心地と安全を確保するために非常に重要である。

軌道検査の目的は、軌道の実態を的確に把握し、その結果に基づいて効率的な保守を行い、軌道の機能を維持し走行安全を確保することである。軌道検査の体系、検査項目、検査方法及び検査周期は、鉄道会社によっても異なる。検査の種別は軌道保守検査、軌道材料検査、巡回検査に分類される。軌道保守検査は、列車の走行安全と乗り心地を維持するため定期的に軌道全般にわたり、保守状態、列車の動揺などをチェックする検査であり、軌道不整検査や列車動揺検査が実施されているが、その検査頻度は事業者により様々である。軌道材料検査は、レール、まくら木、道床、分岐器などすべての材料の損傷、摩耗、腐食などの状態について行う検査で、主に保守係員の巡回によって実施される。また、巡回検査は、徒歩または列車により巡回し、軌道の保守状態及び劣化など、線路全般にわたり、列車の安全を確認する検査である。

1.2.2 軌道構造

軌道の構造として、最も一般的なバラスト軌道と省力化軌道の一種であるスラブ軌道の構造について以下に述べる。

(1) バラスト軌道

バラスト軌道は、鉄道において古くから用いられている軌道であり、鉄道全体としてはバラスト軌道がその多くを占めている。図 1.2.1 に示す通り、バラスト軌道は、レール、レール締結装置、まくらぎ、バラスト道床で構成される。枕木からの荷重を効率よく分散させ路盤に伝えるので低振動・低騒音であり乗り心地がよい。また、建設費が安いことから、日本だけでなく世界中で採用されている。

しかし、強度が低く、列車の走行による繰り返し荷重により、レールの歪み（軌道不整）を生じやすいため、定期的な保守を繰り返しながら維持管理する必要がある。軌道不整の整正、バラストのふるい分けや更新の作業は人手を要するため、バラスト軌道に関わる保守コストの削減は極めて重要な課題となっている [5]。

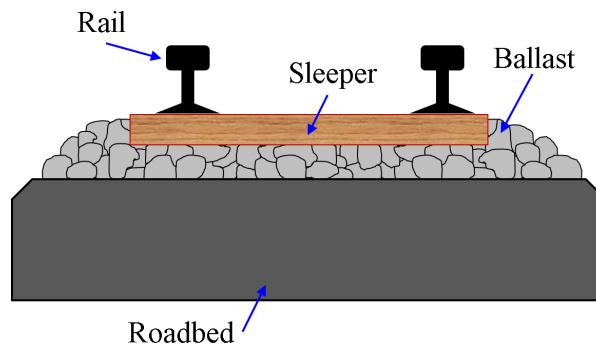


図 1.2.1: バラスト軌道

(2) スラブ軌道

スラブ軌道は、路盤コンクリート上に軌道スラブと呼ばれるコンクリート製の板を設置し、その上にレールを敷く構造を持つ軌道である。スラブ軌道は、レール、レール締結装置、軌道スラブ、てん充層、突起、コンクリート版（路盤コンクリート）で構成されている。バラスト軌道は定期的な保守を前提とした構造体である一方で、スラブ軌道はコンクリート

板とてん充層でレールを強固に支持するため，レールに歪みが生じにくく，日常的なメンテナンスを必要としない省力化軌道である [6]．スラブ軌道はメンテナンスが少なく，レールに歪みが生じにくいことにより安定した列車の高速走行に寄与することから，新設される新幹線の約9割を占める主要な軌道となっている．

以上のように，バラスト軌道の保守作業を抜本的に軽減するためにスラブ軌道などの省力化軌道が開発され，その敷設延長も増加している．しかし，既にバラスト軌道が敷設されている路線において，長期間の運休を伴う大規模な改修工事は事実上不可能であり，全体としてはバラスト軌道がまだその多くを占めている．

1.2.3 軌道不整

軌道は列車荷重を支持・案内し，列車を円滑に走行させる使命をもつ．その軌道は，列車の繰り返し通過や自然現象により徐々に変状をきたし，車両の走行路面であるレールの長手方向の形状が変化してくる．これを軌道不整または軌道変位，軌道狂いという．（本論文では軌道不整と呼称する）

代表的な軌道不整の生成・成長過程として，道床（バラスト）は列車が通過する際に繰り返し荷重を受け，徐々に塑性変形する．その結果，道床が支えるまくらぎ，さらにレールに残留変位が生じる．その他，降雨や地震などの自然現象による軌道や土木構造物の変状による軌道変位の発生もある．

また，レールの摩耗及び塑性変形による凹凸も軌道不整の一つである．軌道不整は列車の円滑な走行を障害し，車両の動揺による乗り心地の悪化や横圧の増大とともに輪重抜け現象による脱線の危険性を発生させ，また著大輪重及び横圧により軌道材料を劣化させるので，軌道を定期的に検査して，軌道不整を定常的に把握し，必要な軌道整正作業を行うことが必要である．

軌道不整には上下方向については，水準不整，平面性不整，左右方向については通り不整と軌間不整がある．詳細を以下に示す [7]．

1. 高低不整（Longitudinal level irregularity）

高低不整とはレール頭頂面の長さ方向の凹凸をいい，高低不整の測定は，一般的に 10m の糸との垂直距離によって表す．

レール頭頂面の長手方向の上下の凹凸をいう．有道床軌道では，主に道床バラストの沈下によってもたらされる．高低不整は車体上下動につながるるとともに，輪重変動の増加によって高低不整がさらに成長する．

2. 通り不整（Alignment irregularity）

通り不整とはレール側面の長さ方向の凹凸をいい，その測定は一般的に 10m の糸をレール側面に張り，その中央部におけるレールと糸との水平距離によって表す．曲線部においては曲線半径による正矢量を測定値から差し引く．

3. 水準不整（Cross level irregularity）

軌間の基本寸法（たとえば狭軌線では 1067mm）当たりの左右レールの

高さの差。ただし、新幹線（標準軌）では車輪支持間隔に相当する1500mm当たりの左右レール高さの差を水準としている。曲線を走行する車両には遠心力が作用し、乗り心地の悪化や転倒の危険性が增大するため、曲線部ではカントを設定している。曲線部を均衡速度異常で走行する場合に、超過遠心力の影響で外軌側の輪重が内軌側に比べて大きくなるため水準不整が生じやすい。

4. 軌間不整（Gauge irregularity）

軌間の拡大，縮小などの変化をいう。軌間拡大は軌間内脱線，軌間縮小は横圧の増大から乗りあがり脱線に至るおそれがある。急曲線部や分岐器部では，車両走行を円滑にするためのスラックが設定されているため，軌間はこれを考慮して管理される。

5. 平面性不整（Twist irregularity）

一定距離間の水準の変化量のことであり，軌道の平面に対するねじれの状態を表す。鉄道車両は一般に車体または台車に複数の車軸が固定されており，平面性不整が大きいと輪重抜けが起きやすくなるため，走行安全性の面から重要な軌道不整管理項目である。平面性の基準長は，新幹線では台車固定軸距に対応した2.5m，在来線では二軸貨車の固定軸距離を想定した5.0mが用いられている。緩和曲線部ではカント変化に伴う構造的な平面性不整があり，特に出口側の緩和曲線部では台車前軸外軌側の輪重減少が生じやすくなるため，管理上注意が必要である。

その他，貨車の競合脱線を防止する目的で，通り不整と水準不整を組み合わせた複合変位がある。これらの項目ごとに，軌道整備基準値や仕上がり基準値が鉄道事業者により定められている。軌道不整の検査を軌道検測といい，糸張りや軌間ゲージなどによる静的な手検測のほかに，軌道検測車による動的な検測が行われている [7]。

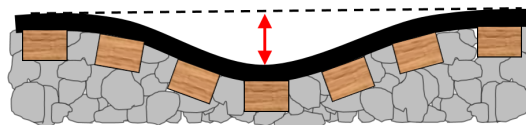


図 1.2.2: 高低不整

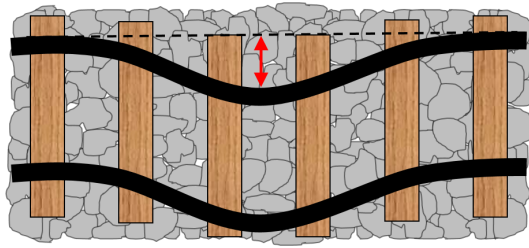


図 1.2.3: 通り不整

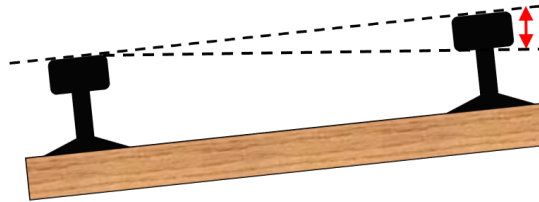


図 1.2.4: 水準不整



図 1.2.5: 軌間不整

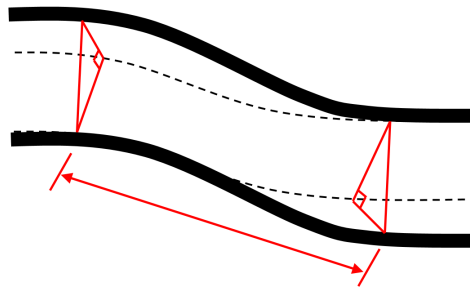


図 1.2.6: 平面性不整

1.2.4 軌道不整の測定

鉄道事業者は、安全性・信頼性・快適性の確保・向上のため、軌道不整の測定（鉄道事業者は検査測定、検測と呼んでいる）を定期的に行っている。5項目ある軌道不整のうち、水準不整、軌間不整、平面性不整は、ある地点における左右レールの相対位置であるため、測定は比較的容易である。一方、高低不整と通り不整は軌道の長さ方向に連続的に測定する必要から、10mの弦をレールに張り、その弦の中央位置でレールとの上下・左右離れを測定する「10m弦正矢法」が広く用いられている[7]。

（1）軌道検測車による測定

軌道検測車における軌道不整の測定は、総合検測車の編成の中に組み込まれている軌道検測車により月に3回程度の頻度で測定されている[8]。現在の国産軌道検測車の主流となっている検測方法は、2台車による偏心矢法（図1.13）である。営業車と同じ台車配置で、台車端に搭載したレール変位検出装置から、レール側面にレーザービームを照射する。その反射光の大小から、センサと軌道との距離を演算し、3つの軸の位置でレール変位を検出する。これによって偏心矢法による軌道不整波形が得られる。偏心矢法の測定波形からデジタルフィルタ処理を用いて、軌道保守の実務に使用する10m弦正矢による軌道不整などを算出している[9, 10, 11]。

この方法は光式の非接触のセンサで行うため、この装置を搭載している東海道・山陽新幹線の新幹線電気軌道総合試験車（通称「ドクターイエロー」）（図1.14）は最高時速270km/h、東日本旅客鉄道株式会社新幹線管内の新幹線電気・軌道総合検測車（通称「East.i」）（図1.15）は最高時速275km/hで走行できるため、営業線でのダイヤ編成が可能となっている。また、在来線や一部地方鉄道においても、新幹線と同様な軌道検測車による軌道不整の測定が定期的に行われている。

（2）保線係員の巡回による測定

軌道検測車を保有しない鉄道事業者は保線係員が軌道を巡視し、主として手測定や手押しにより連続的に測定できる測定機器を用いて、軌道不整の測定を行っている[12]。軌道検測車のような高いコストのかかる設備を必要としないが、保線係員が全線を巡回し、軌道不整を測定するには膨大な人手と時間を要する。

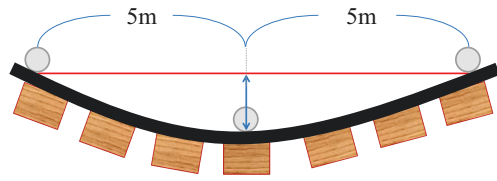


图 1.2.7: 10m 弦正矢法

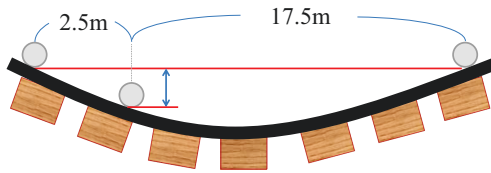


图 1.2.8: 偏心矢法



図 1.2.9: 軌道検測車 (ドクターイエロー)



図 1.2.10: 軌道検測車 (East.i)

1.2.5 軌道検査方法の問題点

鉄道を中心とした公共交通機関は、地球環境負荷低減やバリアフリーの観点からも今後ますます重要度が増すものと考えられる。しかし、現実の鉄道を顧みれば、新幹線や一部幹線のように、先端的設備導入と十分な保全体制により安定的に維持されている線区がある一方、設備の老朽化が進み、保全費の増大や経営コスト増大に存続すら危ぶまれる線区も少なくない。

軌道の検査については、事故を未然に防ぐために、レールが破損に至る前に、き裂などの予兆を早い段階で検知することが求められる。そのためには、高頻度で軌道検査を実施することが望ましいが、現在の軌道検査方法では困難な状況であり、その頻度は制限されている。主な要因を下記に示す。

(1) 人手・維持費

鉄道の軌道等の保全を、保守員の手検測や目視により行う場合では、保守員が全線を巡回するには膨大な時間を要する。一方、専用の軌道検測車や特別な試験車を用いる場合、短時間で測定が可能であるが、測定機器の取り扱いや維持管理が難しく、多くの手間や費用を要し、実施する頻度は非常に限られる。これは、目的とする信号を直接測定することを意図するため、車輪近傍などの環境が悪い位置にセンサを配置するのが一般的で、さらに精密な測定のために耐久性よりも精度が優先されるために、センサの寿命は長くない場合が多い。脱線安全性に関係の深い、車輪・レール間の状態を表す輪重、横圧を測定するには、専用の高価な輪軸やレールなどが必要で、特別な場合しか測定されていない。

(2) 運行ダイヤ

在来線で広く使用されていた軌道検測車は、測定時の走行速度が20～30km/h程度と遅いため、軌道検測は営業線運転終了後の深夜に行われてきた。最近では、営業列車と同等の速度で測定が可能な高速軌道検測車の導入が増え、昼間時に走行しながら検測作業を行うことが可能になったが、軌道検測車はいずれも計画的な走行が前提であり、経路や時間について柔軟な対応はできない状態にある。特に運転時隔の短い都市鉄道においては難点である。

以上のような背景から、一般的な検査周期は表 1.1 に示した程度である

が、地方鉄道を中心とした軌道検測車を有さない線区においては、さらに検査周期間が長くなる傾向にあり、通常月に数回行われる軌道不整検査や列車動揺検査についても、年に数回といった事業者も少なくない。

1.2.6 地方鉄道の現状

地方鉄道とは、一般に新幹線、在来幹線、都市鉄道に該当する路線以外の鉄道路線のことをいい、その運営主体は、JR、一部の大手民鉄、中小民鉄及び旧国鉄の特定地方交通線や整備新幹線の並行在来線などを引き継いだ第三セクターが主である。

地方鉄道は、地域住民の通学・通勤などの足として重要な役割を担うとともに、地域の経済活動の基盤であり、移動手段の確保、少子高齢化や地球環境問題への対応、まちづくりと連動した地域経済の自立・活性化等の観点から、その活性化が求められている重要な社会インフラである [13]。

鉄道事業者の支出項目については、鉄道事業会計規則により表 1.2 のように定められている。平成 24 年度鉄道統計年報をもとに鉄道事業者の支出構成を費目別に示したものが図 1.18 である。運転費（車両の運転に係る費用、運転者人件費、動力費など）、運輸費（駅務費など）に係る費用のウェイトが合計 4 割を占めるほか、線路、電路、車両の各保存費が合わせて 2 割前後、また減価償却費が 2 割程度（地下鉄や大都市鉄道は 3 割程度）を占めていることがわかる。

表 1.2.1: 鉄道事業者の費用構造

鉄道事業営業費		
	運送費	
	線路保存費	有形固定資産運送中，電路，車両（線路保存用特殊車両を除く）及び自動改札装置等の営業用機械装置を除いた一切の固定資産の維持補修に要する作業費，保線区，営繕区，建築区等公務関係の現業従業員に関わる人件費
	電路保存費	有形固定資産運送施設中電路，変電所機械，通信機械及び電路保存用特殊車両の維持補修に要する作業費，電力区，通信区，信号区，変電区等電気関係の現業従業員に関わる人件費
	車両保存費	有形固定資産運送施設中車両（線路保存用特殊車両及び電路保存用特殊車両を除く）の維持補修に要する作業費，検車区，車両修理工場，車庫等車両関係の現業従業員に関わる人件費
	運転費	列車の運転に要する作業費，機関区，電車区，車掌区等運転関係の現業従業員に関わる人件費
	運輸費	旅客及び貨物の取り扱いならびに列車の組成及び車両の入換えに要する作業費，停車場，営業所及び信号場の業務に従事する者に係る人件費
	保守管理費	有形固定資産運送施設の保守の作業管理に要する費用，本社の工務，電気及び車両関係の従事員にかかる人件費
	輸送管理費	運転及び運輸の作業管理に要する費用，本社の運転及び運輸関係の従事員に係る人件費
	その他費用	
	案内宣伝費	自線への旅客誘致に関する企画，広告宣伝等に要する費用，本社または旅客案内所の企画，広告宣伝費等に係る人件費
	厚生福利施設費	住宅施設，医療施設，給食施設，教習所等厚生福利施設に係る費用，厚生福利施設の業務に直接従事する者及びこれらの管理部門の従事員に係る人件費
	一般管理費	鉄道事業の運営の全般に関連する総括的業務に係る費用，役員及び庶務，人事，会計，資材，企画等一般管理職の業務に従事する者にかかる人件費
	諸税	
	減価償却費	

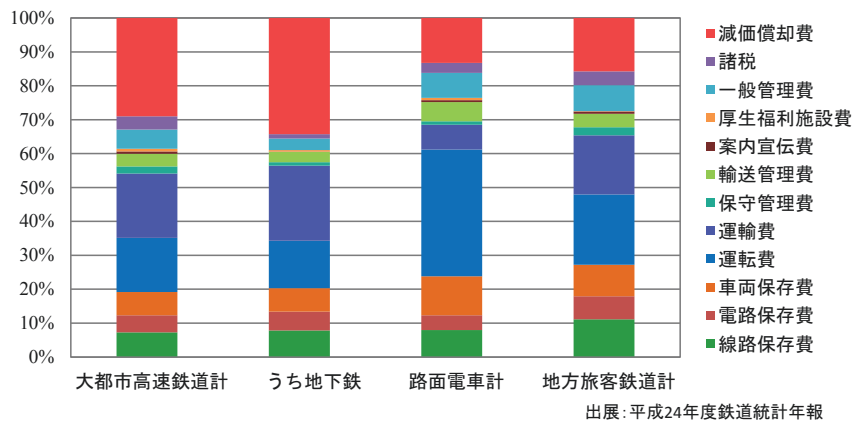


図 1.2.11: 鉄道事業者の営業費の支出構成

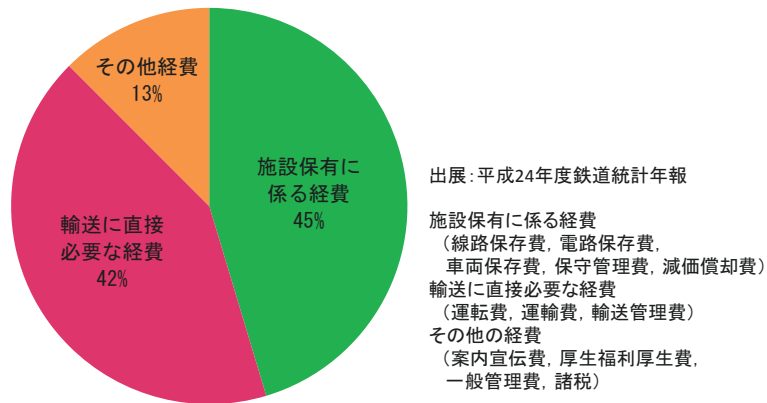


図 1.2.12: 地方鉄道のコスト構造

地方鉄道では、鉄道施設の老朽化が日本各地で進んでおり、地上設備のメンテナンスにかかる費用は増加する傾向にある。特に、また、地方鉄道は開業後70年以上を経過しているものが約7割以上を占め、軌道やトンネル等の施設や車両の経年劣化が安全確保上重要な課題となっている。また、輸送需要の伸び悩む地方鉄道では、モータリゼーションの進展や過疎化、超高齢化社会への突入により、鉄道の優位性が発揮できず、鉄道の維持・存続自体が課題となっている路線も少なくない [14]。

鉄道事業者は、他の交通機関と異なり、インフラ設備（土地、線路、駅等）をセットで自らが保有することが通例であるという特色を持っている。地方鉄道における経費（図 1.19）を見ると、施設保有に係る経費は全体の約45%を占め、この比率は、鉄道事業者が取り組んできたワンマン化・無人化等の合理化により、近年増加傾向にある。

前述の通り、鉄道事業者では予防保全の考えのもと、保守員の巡回や、軌道検測車などの検査専用の車両の走行により、軌道の状態を定期的に検査し、事故を予防している。しかし、軌道のメンテナンス不足が原因と推定される鉄道事故の発生は近年でも少なくない。運輸安全委員会の公表資料 [15] によると、悪天候による土砂災害やトラック等が進入する踏切傷害に伴う脱線事故も報告されているが、軌道管理状態に原因があると推定される脱線事故が散見され、その傾向は地方鉄道において特に顕著である。

そのため、軌道保守をより確実に実施することが望まれるが、地方鉄道の収支状況は全体の約7割が営業赤字であり、施設保有に係る経費を除くと、全体の約9割の事業者が黒字に転じるとされた調査も報告されており、施設保有にかかる経費がコスト構造上の経営圧迫要因となっていることが分かる。

加えて、施設、車両の保守面においては、少ない社員数で運営している中で、人材確保と人材育成が困難な状況がみられる。また、保守作業を外注に頼らざるを得ないことから、技術力の空洞化による保守管理が適正に機能しなくなるおそれがある。さらに、管理職世代が少人数で職務を兼務していることなどもあり、技術の維持・継承を行うことが難しい状況となってきている。

このような状況から、人間の経験や高度な技術を必要とせず、かつ低コストで実現可能な軌道検査の方法が求められている [16]。

1.3 軌道の状態監視の研究動向

1.3.1 軌道の状態監視の必要性

軌道状態は、予防保全の考えのもと、一定の周期で検査されている。しかし実際、車輪・軌道系の状態は常時変化しているため、本当の予防保全のためは、レール摩耗、軌道不整、摩擦係数、脱線係数など、軌道状態や車輪・レール境界の状態を常時または高頻度に監視する必要がある。実際にレール破断が発生していることは、検査周期より短い時間で軌道状態が変化していることを示唆している。また、地下鉄日比谷線脱線事故は、レールの摩擦係数が事故発生当日に急増したことが要因の一つとされており、定期的な管理のみでなく高頻度な軌道監視の重要性が明らかである。近年では、測定データに基づく軌道保全について着目されつつある。Schenkendorfら [25] は、軌道の状態監視において医療分野におけるPHM (Population Health Management) の考えのもと、予防から予後の監視データを数値化し、インフラの連続的な管理の重要性を述べている。

このような問題に対して、もし、簡便な方法により軌道状態が監視可能になり、異常を早期に検知できれば、適切な軌道保全を遂行でき、より確実な事故防止の実現が期待できる。これを実現する一つの方法として、一般の営業車両を用いて軌道検査を行う方法が考えられる。

営業列車を活用して軌道の状態監視を行う一番のメリットは高頻度測定が可能となることである。営業列車を活用したこれまでの研究動向としては、軌道検測車と同等以上の診断精度を維持したまま、いかに測定頻度を高めていくかといったアプローチが中心であり、佐藤らによる常時脱線係数を測定可能なPQモニタリング台車など、既に実用化へ至った研究も確認される。しかしながら、このようなアプローチでは革新的なコスト削減には繋がらず、最も軌道の状態監視を必要とする地方鉄道における普及は困難である。そのため、地方鉄道への普及を念頭に置くのであれば、高頻度で監視可能かつ低コストであることを前提に、いかに診断精度を向上させるかといった新たなアプローチが必要であると考えられる。

軌道の状態監視手法について、コストと計測頻度の傾向を整理したものを図1.3.1に示す。高頻度測定のためには営業列車を活用することが望ましく、低コストを実現するためにはメンテナンスコストを踏まえ、測定環境が比較的良好な位置での測定が望まれる。

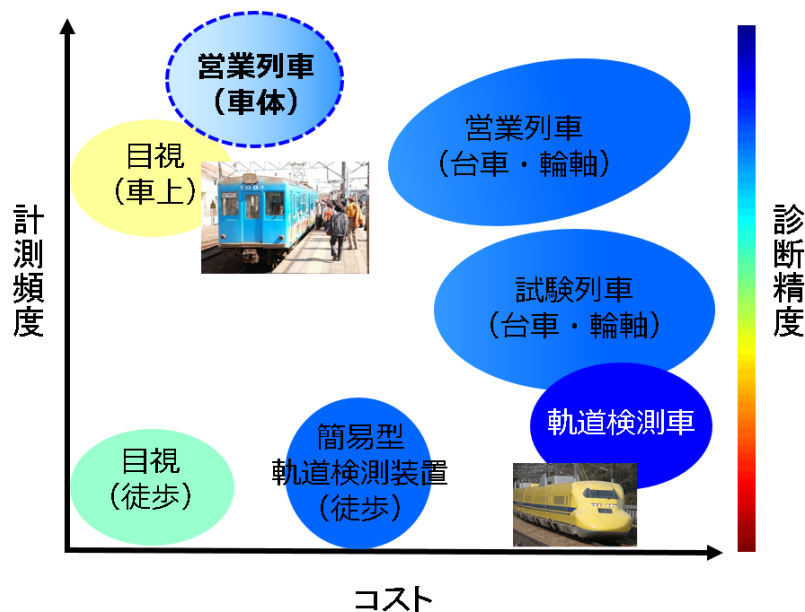


図 1.3.1: 軌道検査手法のコストと計測頻度

1.3.2 営業列車による状態監視

営業列車において保守係員が目視にて軌道の状態監視を行うことは、多くの鉄道事業者で実施されている。これは保守係員の主観的な評価であり、その精度は熟練度に大きく左右される。そこで、客観的・定量的な評価を行うために、営業車両にセンサを用いて軌道の状態を推定する研究は、既にいくつか行われている。須永ら [17, 18] は、軸箱上下加速度にローパスフィルタやウェーブレット変換を適用し、浮きまくら木等の短波長の高低不整を検出している。Waston ら [19, 20, 21] は、台車枠のピッチ角速度やヨー角速度を用いることにより、軌道不整の推定を可能にしている。さらに精密な軌道検測を目標とした慣性正矢法軌道検測装置の開発 [22, 23] が行われている。この装置は、加速度計、レーザー変位計、ジャイロなどを備えた検出ユニットを台車に取り付けて軌道を高精度に測定するものである。

いずれも、台車にセンサを取り付ける方法であるが、営業列車を用いて軌道の状態監視を行うには、耐久性等の面から車内で測定できることが望ましい。また、車内での測定による研究として、水野ら [24] による研究があるが、測定するセンサ類は別個に運転席床面に固定する必要がある。

り、また測定の都度配線やデータ記録用PCを接続する必要がある。より高頻度に測定を実施するためには、旅客が乗車している中でも測定が可能で、かつ専門の測定員が不在であっても測定出来ることが望ましい。

保守係員による検査では軌道全線を詳細にチェックする場合は徒歩による巡回となり、高頻度の軌道監視は要員確保の点で困難である。また、軌道検測車は、走行しながら精密な測定が可能であるが、導入・維持といったコストに問題があり、特に地方鉄道における高頻度の監視は実質的に不可能である。そこで、営業列車の車内で測定が行えれば、簡易で、かつ高頻度な監視が可能にあるが、測定センサの耐久性や軌道の情報が他のノイズに埋もれるといった課題がある。しかしながら、車内で測定される状態量から軌道の情報を抽出することができれば、営業列車による軌道の状態監視は非常に有効な方法となり得る。

1.2.6節において、現在の軌道検査の一番の問題点は検査頻度の少なさにあると述べたが、軌道検査間において営業列車による軌道の高頻度な状態監視が実現した場合、軌道検査、軌道保守計画の策定、軌道補修といった一連の軌道保守の流れは図1.3.2のように変化し、以下の成果が期待される。

- これまで数値化がなされなかった軌道補修直後や起動検査間の軌道状態が可視化され、軌道補修結果の評価や軌道異常の前兆を発見を通じた安全性の向上
- 軌道の経年変化を捉え、適切な定期検査期間の設定や無駄の無い軌道補修を通じて、メンテナンスコストが削減される。

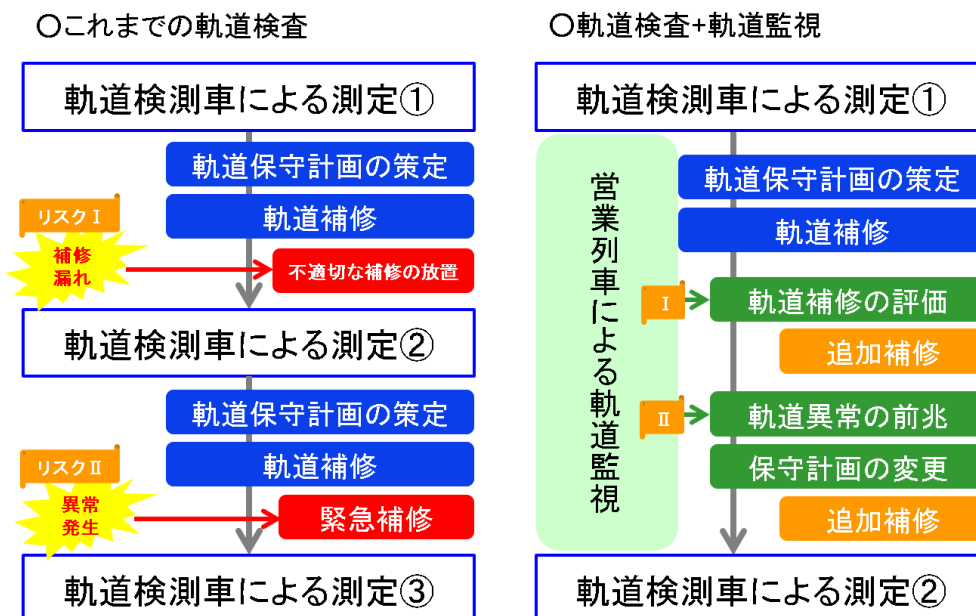


図 1.3.2: 軌道保守の流れ

1.4 プロブ車両による新たな軌道保守形態の提案

1.4.1 自動車におけるプロブカー

道路交通の分野では、プロブカーシステムの研究が進んでいる [26]. 自動車を探針（プロブ：Probe）とみなしたプロブカーからさまざまな情報を収集するシステムである。車両の速度データをはじめ、ワイパーのスイッチやアンチロックブレーキシステム（ABS）などの先進安全システム、エアバッグなどの各システムの作動状況を GPS の位置情報とともに通信モジュールを使ってセンターに送信し、センター側ではその収集データを蓄えることで様々な情報として利用するものである。近年では、一般に普及したスマートフォンを活用したプロブカーの実現可能性についての検討など、多くの研究が進められている。

このように、多くのサービスへの活用が期待されているプロブカーについて、いくつかの例を下記に示す。

- 設定された道路区間を走行するのにかかった走行時間をセンターに集約し、渋滞の予測精度を大幅に高める。
- 多数の車の走行ルートを時系列毎にまとめ、通行不可となっている道路や新しく開通した道路を検出し、最新のカーナビマップ情報を更新する補助ツールとする。
- 自動車のワイパーの動作状況を収集し、きわめて精密な降雨情報マップを作成する。
- ABS の作動状況から路面凍結の情報などを配信する。

他にも、車体に取り付けられた加速度センサから、走行路面の段差評価を行った研究や、加速度センサ、ジャイロ、GPS などの情報から冬季の路面状態を分類するといった報告など、車体情報から路面の状態を監視する研究が自動車分野において進められている。

1.4.2 鉄道におけるプローブ車両

ダイヤに従って運行される鉄道などの軌道交通システムにおいては、交通流情報を収集するような目的でのプローブは不要であるが、営業車両に設置が容易なセンサ類やGPSを取り付け、自らが走行して得られる車両動揺などの状態をリアルタイムで検出、分析することが可能となると、既存の保全形態が大幅に変貌するばかりでなく安全な輸送システム実現にも寄与できる可能性がある。このような車両をプローブ車両と呼んでいる（図1.4.1）[27, 29]。プローブ車両については、軌道だけでなく、車両、運転士、信号保安設備等を含む鉄道システム全体を対象とする概念であり、孫ら[28]による軌道回路保全に活用する検討や、小島ら[30]による車内騒音を活用した波状摩耗の検出といった、プローブ車両を利用した研究が報告されている。

プローブ車両による状態監視について軌道検査を一例とすると、一般の車両にセンサ類を取り付けプローブ車両とすれば、営業運転を行いながら軌道の状態診断が可能になる。しかしながら、プローブ車両を特に必要とする地方鉄道において、設置されるセンサ類の初期コストやメンテナンス費用が著大となるようでは、導入及び普及が困難となる。そのため、地方鉄道におけるプローブ車両については、測定装置を雨や粉塵等の影響が少なく、振動等の測定環境が良好な車室内に設置されることが望ましい。

車体内の加速度センサによる軌道診断においては、車体-台車間の2次ばねによって減衰された振動加速度を測定するため、台車または軸箱等にセンサを設置して、慣性測定法により状態監視を行う手法に対しては測定精度が劣る一方で、常時または高頻度に状態監視を行うことにより多くの測定データを統計処理し軌道状態の時間的な変動を診断に活用するという、新たなアプローチが可能になる。

前述のように、営業列車を活用した軌道の状態監視に関する研究は数多く実施されているものの、プローブ車両の考えをいち早く鉄道に取り入れて測定装置を製作し、地方鉄道の営業列車より得られた車体の状態量にて軌道診断を既に実施していることに、本研究の優位性・新規性があると考えられる。

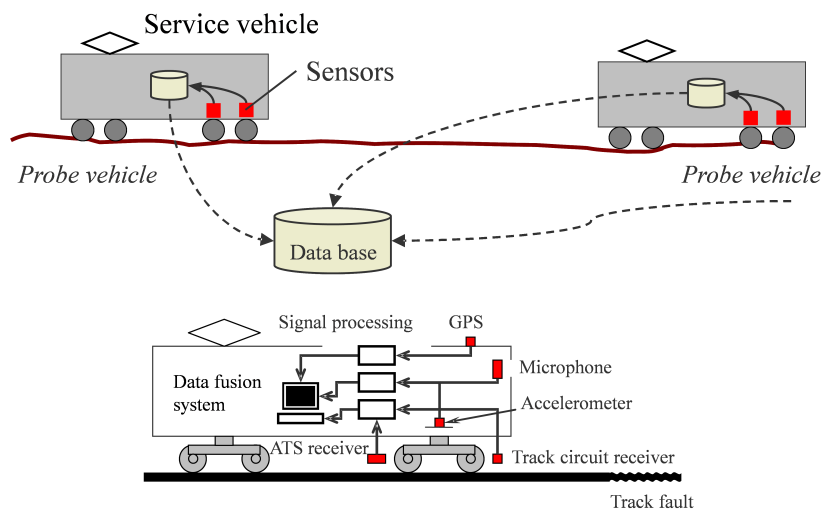


図 1.4.1: プローブ車両

1.5 本論文の目的

鉄道は、車輪が軌道で案内されて走行するため、鉄道車両を安全かつ快適に走行させるためには、軌道の検査と補修による維持管理が必要不可欠である。しかしながら、軌道の維持管理不足に起因した鉄道事故は少なからず発生している。そのため、事故を未然に防ぐために、レールが破損に至る前に、軌道不整やき裂などの予兆を早い段階で検知することが求められ、軌道の検査は高頻度で行うことが望ましい。

現在、軌道不整は軌道検測車と保線係員の巡回により測定が行われているが、運用コストや人員などの問題から、測定頻度が制限されている。よって、更なる安全性向上のためには、高頻度で軌道不整を監視する軌道状態監視が必要不可欠である。

そこで、簡便な方法により軌道の状態監視が可能になり、異常を早期に検知できれば、適切な軌道保全を遂行でき、より確実な事故防止の実現が期待できる。

このような軌道状態監視を省コストで実現するための手段としてプローブ車両に着目する。プローブ車両により予防安全を実現するには、まず、車体に設置されたセンサにて、軌道の異常を的確に検出することが重要である。そのためには、得られる情報から特徴を抽出、異常を評価する方法が必要となる。

また、軌道異常を検知可能な車体情報が整理されたとしても、省コストで測定可能な測定装置が必要となる。かつ軌道の保守に活用可能な情報に変換される必要があり、既に人員的な余裕のない地方鉄道においては、可能な限り自動的に軌道異常を検出するシステムであることが望ましい。

以上のことから、本研究の目的を以下に示す。

(1) 車室内にて比較的容易に測定可能な状態量から、的確に軌道異常を検出し、実環境における軌道保守に活用可能な軌道の評価手法を提案する。

(2) 軌道異常を検知するために必要な車体の状態量を的確かつ、簡易に測定可能な測定装置の仕様を整理し、実用化及び広域への普及を目指した測定装置を開発する。

(3) 開発した測定装置を実環境において軌道保守に活用可能か検証し、鉄道事業者連携のもと持続可能な軌道状態監視システムの構築を行う。

本論文においては、振動加速度や角速度といった安価で容易に測定可能な状態量から、地方鉄道における軌道保守のニーズと適合する評価方法について提案し、市場に投入できる製品水準を満たすことを前提として、新たに開発した測定装置を用いて、鉄道事業者協力の下、営業路線において長期間の軌道監視が可能とするシステムを実現する。

1.6 営業車両を活用した軌道診断サイクルの全体構想

本研究において目的とする、軌道状態診断サイクルの全体構想を図1.6.1に示す。軌道状態診断サイクルでは、まず営業車両に設置した車上測定装置により測定が行われる。次に、測定データは解析を実施するためのデータセンタのサーバに蓄積され、データセンタにおいて蓄積されたデータを解析し軌道診断を行う。その診断結果に基づいて、鉄道事業者は軌道保守を実施し、保守結果を確認することが可能である。

現在の軌道保守に関するノウハウは、各鉄道事業者あるいは保線担当者の中で閉じているが、データを蓄積するデータセンタが実現されれば、診断サイクルを何周も回す中で知識の共有化が進み、同じ評価指標を使用することで、他の鉄道事業者との技術交流の活性化や、熟練者の経験を客観的に示した新人教育の資料になるといった効果も期待できる。

その診断サイクルを実現するためには、測定データを大量に取得し、データベースに蓄積、蓄積されたデータから軌道状態を評価するといった軌道状態の監視システムが必要となる。

軌道状態監視システムにおいては、膨大なデータを取り扱うこととなるため、省力化、自動化が必要である。地方鉄道においてはワンマン運転が採用されている事業者も多いため、営業車両を活用するのであれば、自動的に測定が行われ、測定データについても自動的にデータサーバへ転送されれば、現場へかかる人的な負荷は最小限となる。

このような軌道診断サイクルが構築されれば、鉄道事業者は必要な時にデータベースへアクセスし、定期的な軌道検査が実施されていない時期であっても、最新の軌道監視結果をいつでも入手可能となり、この情報をもとに軌道保守の優先順位を決め、効率的な保守作業を実施したり、適切な保守計画を立てたりすることが可能になる。また、営業運転時に、リアルタイムで車体動揺を測定することにより、管理基準値に対して異常に大きい車体動揺が観測された場合、緊急に軌道の点検、保守を行うなどの早期の対応が期待される。

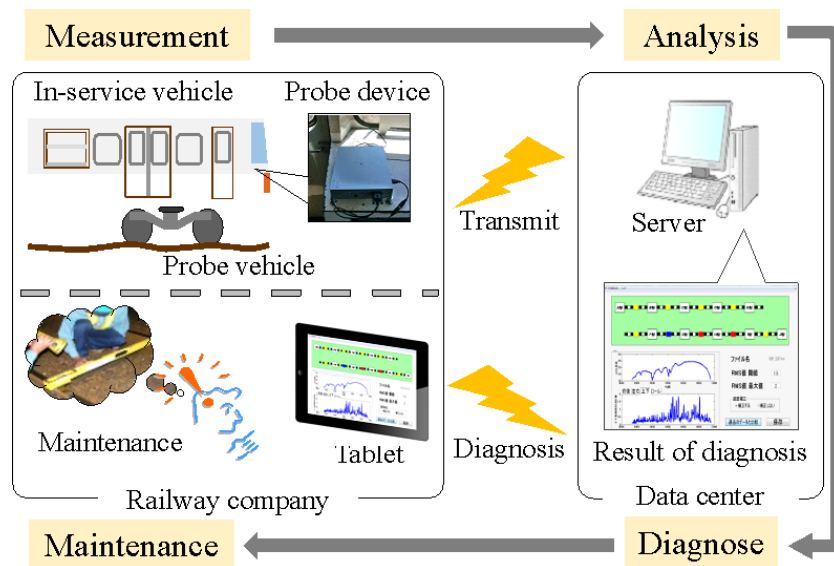


図 1.6.1: 軌道診断サイクル

1.7 本論文の構成

本論文は全5章から構成され、その概要を図1.7.1に示すとともに、以下にまとめる。

第1章では、鉄道の特徴と軌道管理の重要性を概説した上で、現状安全維持管理について述べ、その問題点を提起し、本研究の目的と位置づけを示す。

第2章では、診断の対象となる軌道異常とその評価手法について述べる。評価に使用する評価指標としては、二乗平均平方根(RMS:Root Mean Square)の値による評価、ウェーブレット変換による評価、カルマンフィルタを用いた逆解析による評価について検討する。また、これらの診断手法を組み込んだ診断ソフトを開発する。

第3章では、営業車両での長期間の測定を前提とし、車両の大幅な改造を伴わず簡易に設置でき、低コストで軌道の状態監視を実施するための測定装置を開発する。また、開発された測定装置が省コストかつ市場に投入できる製品としての水準を満たしているか検証を行う。

第4章では、第2章及び第3章における成果を統合し、構築された軌道状態監視システムについて述べると共に、実際の営業路線において、軌道保守に活用した結果について評価する。

第5章では、本論文によって得られた知見を結論として示すとともに、今後の課題を提起する。

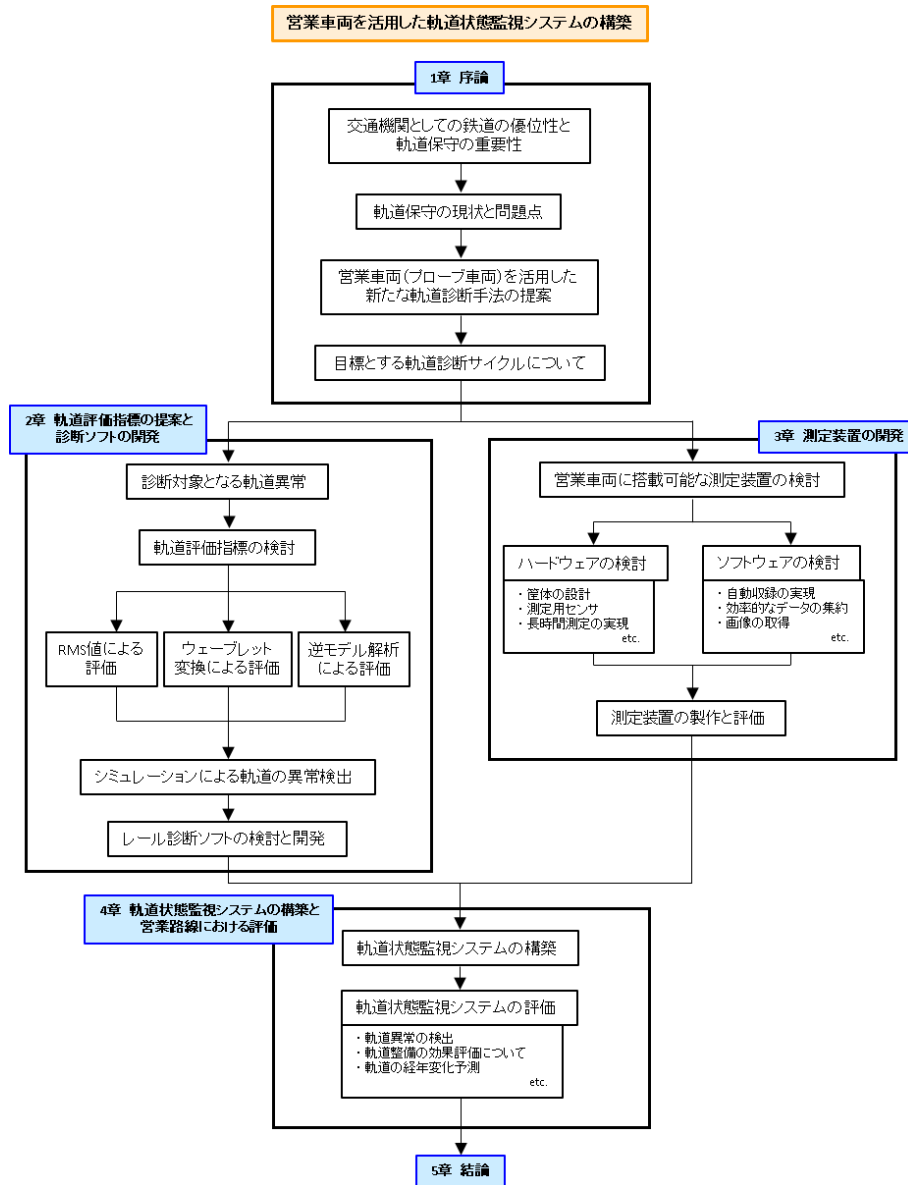


図 1.7.1: 本論文の構成

第2章 軌道評価指標の提案と診断ソフトの開発

2.1 はじめに

車内で得られる情報の中で、軌道からの影響が大きいと考えられるものに、車体の振動がある。振動は、加速度センサやジャイロによって比較的容易に測定することができる。しかしながら、車体とレールとの間は、車輪、台車がばね・ダンパによって接続されており、軌道不整の情報は、他の情報に乱されて直接得ることはできない。

直接観測できない状態量を得る方法に、オブザーバによる状態推定がある。車両の動的システムを数学モデルで記述し、それにもとづいて観測できない状態を推定することができる。オブザーバをベースとした方法を鉄道車両の異常検出に適用した例は多い。車両システムの外乱となる軌道入力を推定する場合には、外乱オブザーバの適用が考えられる。しかし、車両モデルが実際のシステムを正確に記述していないと推定値に大きな誤差が生ずることがあるため、精度を上げるために車両モデルを調整する必要がある。また、軌道全線を評価するためには演算量が膨大になるなど、実用化の面で課題がある。

そこで、第1章でも述べたように、これまで台車または軸箱等に加速度センサ等を設置して状態監視を行う手法が直接軌道不整を算出することに対し、本章では高頻度に状態監視を行うことを前提とし、直接軌道不整を算出するのではなく、軌道検測車や保守員の巡回といった定期検査間の経年変化を捉え、定期検査結果との併用による新たなアプローチによる評価指標を提案する。

2.2 評価指標と想定される軌道異常

軌道不整の評価指標としては、緊急的に軌道補修をすべき箇所の特定制及び軌道の経年変化を観察する目的でRMSによる評価、周波数情報を広く確認しどのような軌道異常が発生しているかを特定する目的でウェーブレット変換による評価について提案する。また、逆解析による軌道の評価法についても提案し、地方鉄道において適用するための要件について検討した結果について述べる。

なお、対象とする軌道異常については、車体動揺の低周波領域に影響を与える軌道不整から、波状摩耗や段差といった車体動揺の高周波領域に影響を与えるものまで、幅広い軌道異常を対象とし全ての評価はオフライン処理によって実施される。本研究にて評価を実施する手法と対象となる軌道不整を表2.2.1に示す。該当する評価手法にて「○」は軌道異常の検出が可能であると想定されるもの、「△」は統計的解析等と組み合わせることで検出可能と想定されるもの、「×」は軌道異常の検出が困難であると想定されるものとしている。本論文では、「○」と想定した組み合わせについて検証を進める。

表 2.2.1: 軌道不整と評価手法

軌道不整		評価手法		
名称	特徴	RMS	ウェーブレット	逆解析
高低不整 (10m弦正矢)	レール長手方向の 上下変位	○	○	○
通り不整 (10m弦正矢)	レール長手方向の 左右変位	○	○	△
水準不整	左右レールの 高低差	○	○	△
軌間不整	左右レールの 間隔差	×	△	×
平面性不整	レールの平面性に 対するねじれ	△	△	△

2.2.1 RMS 値による解析

軌道不整については、車体の上下振動加速度には強い相関があり、また、通り変位は左右加速度と、水準変位と平面性等は左右加速度とロール角速度などに影響を与えているといわれている [31, 32]。したがって、車上

で車体の上下振動加速度，左右振動加速度，ロール角速度を測定すれば，多くの軌道異常を発見することができると考えられる。

車体振動による軌道を評価する指標は，在来線の速度向上を実施する際の「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル」にも記載されており，速度向上後の車体上下加速度 p-p 値（peak to peak）は $3.5m/s^2$ 以内，車体左右加速度 p-p 値は $2.5m/s^2$ 以内に納めるよう，軌道整備を行うことが推奨されている。

全区間中の p-p 値が特に高い地点を瞬定するために RMS 値を活用する。原信号から直接 p-p 値を算出することが困難であるので，著大な振幅を強調しかつ移動平均による高周波ノイズ除去を目的として車体動揺の RMS 値を算出する。その後，路線全体の RMS 値より適切な閾値を設定することで，優先的に軌道補修を行うべき p-p 値の著大箇所を特定することが可能となる。また，同一箇所でも車体動揺を測定することで，測定データの再現性が確認されれば，RMS 値の増減量から軌道に何らかの変動があったことを捉え，軌道検査間における急変や軌道不整の進展を予測することで，軌道異常の評価が可能になると考える。

このように軌道異常を捉えた区間を「要注意区間」又は「要警戒区間」として設定することで，他の軌道評価を実施する，あるいは直接保守係員が現地調査に向かうといった情報としても有用である。

2.2.2 ウェーブレット変換による解析

RMS 値を用いた解析 [33] においては，周波数情報が欠落するため，様々な軌道異常を判別することは困難である。一方，フーリエ変換に代表される周波数解析では時間情報が失われるため，軌道異常の発生位置を特定することが困難となる。そのため，軌道異常の種別を判別し発生位置を特定するには時間一周波数解析が必要となる。

一般的に，時間一周波数解析においてもフーリエ変換を応用した短時間フーリエ変換が多く用いられる。理由の一つとして，高速フーリエ変換を用いることにより，短時間で解析できるといった長所も有している。しかしながら，周波数の窓幅が一定のため，広い周波数域を一度に解析することは難しい。

ウェーブレット変換については，連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換でその特徴が異なる。連続ウェーブレット変換は，窓幅が周波数によって変化するので，広い周波数域を見ることが可能である。周

波数の間隔を細かく設定できるが、情報が重複し、多くの計算時間を要することから、解析はオフライン計算となる。離散ウェーブレット変換は、信号を必要最小限の基底で表現するので、信号の効率的な分解、再構成が可能であるが、周波数の間隔は2の累乗に固定される [33]。

このことから、信号の性質や用途に応じて適切な解析方法を選択する必要がある。

2.2.3 カルマンフィルタを用いた逆解析

RMS およびウェーブレット変換による解析では、軌道不整の変動を捕らえ、軌道保守時期の予測を立てることは可能であるものの、変動幅を軌道管理の単位である mm として扱うことは出来ない。多くの軌道保守係員にとって、軌道の保守計画を策定する際は、自社内の軌道管理基準値 mm に基づき立案する。そのため、これまでに培われた軌道保守のノウハウを最大限に活用するためには、定期的な軌道検測の結果と併せて現在の軌道不整量を提供することが望ましい。

営業車両の車体動揺から軌道不整量を算出する研究としては、永沼らの新幹線における検討例 [34] がある。しかしながら、在来線や地方鉄道においては、新幹線と比較して走行速度の変動が激しいため、筆者らは地方鉄道等に活用可能な、カルマンフィルタによる軌道不整推定手法を提案し、本章においてはシミュレーションによりその有効性を確認し、第4章において実測データに適応した例を紹介する。

2.3 RMSによる評価

2.3.1 評価値の算出方法

軌道状態と位置との関係を得るためには、短時間のRMS値を求める必要がある。測定値 $x(\tau)$ のうちの短い時間区間におけるRMS値を式(2.3.1)で定義する。

$$RMS(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\tau=1}^{t+N-1} x(\tau)^2} \quad (2.3.1)$$

軌道不整として挙げられる項目のうちの高低不整、通り不整、水準不整を評価するために、車体で測定した上下・左右加速度、ロール角速度のRMS値を求める。波状摩耗といった高周波数帯域に影響を及ぼす軌道異常の検出についても検討するため、サンプリング時間 t を0.0012sとしてRMS値を算出する。本論文においては過度に高周波数情報を失わぬよう $N = 26$ と設定し0.0318sの移動平均とした。 N の値については、測定装置のサンプリング時間や車体・台車構造等により適切な値が変更となる恐れがあるため、路線毎に再検討する必要がある。

2.3.2 シミュレーションによる検証

(1) 車両モデル

シミュレーションに用いた車両モデルを図2.3.1に示す。車両モデルは、1車両の線形モデルとし、車体2自由度(上下動, ピッチ), 各台車2自由度(上下動, ピッチ)の合計6自由度を考慮し、速度50km/hで300mの区間を直線走行させた。車両モデルのパラメータをTable.2.3.1に示す。

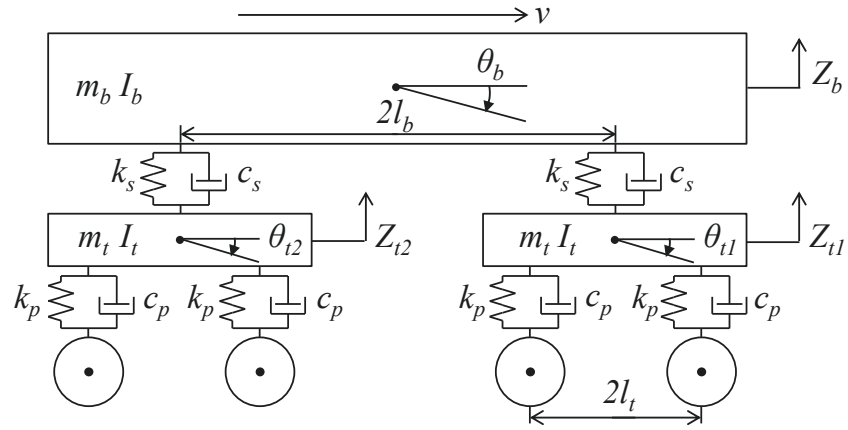


図 2.3.1: 上下 6 自由度モデル

表 2.3.1: 上下 6 自由度モデルパラメータ

Symbol	Description	Unit	Value
m_b	Car-body mass	kg	14600
m_t	Truck mass	kg	2400
I_b	Car-body inertia	kgm ²	500452
I_t	Truck pitch inertia	kgm ²	2773.5
$2l_b$	Car-body base	m	14.1
$2l_t$	Wheel base	m	2.15
k_p	Primary suspension vertical stiffness	kN/m	1090
k_s	Secondary suspension vertical stiffness	kN/m	329
c_p	Primary suspension vertical damping	kNs/m	19.6
c_s	Secondary suspension vertical damping	kNs/m	27.2
v	Vehicle speed	km/h	50

(2) 軌道形状の生成と軌道異常

一次の成形フィルタ（式 2.3.2）に正規乱数を入力することで不規則波形を作成した [35]. このとき $A_1 = 3 \times 10^{-5}$, $\omega_1 = 6.7$, $V = 13.9\text{m/s}$ とし, 分散 1 の正規乱数を入力した結果を図 2.3.2 に示し, これを基本の軌道形状とした. 作成した基本となる軌道形状波形に, 高低不整や波状摩耗, レール継ぎ目における段差といった異常を人工的に付加した. それぞれの異常は, 高低不整は 40m から 60m の位置における振幅を, 基準の軌道形状の 2 倍の大きさにし, 波状摩耗は 145m から 155m の間に 10m の範囲で全振幅 1mm, 周波数 175Hz の正弦波で表現した. このときの波長は 0.08m となる. 250m の位置には, 2mm のステップ状の段差を設定した. このようにして設定した軌道不整を図 2.3.3 に示す.

$$G(s) = \frac{2\pi\sqrt{A_1V}}{s + \omega_1} \quad (2.3.2)$$

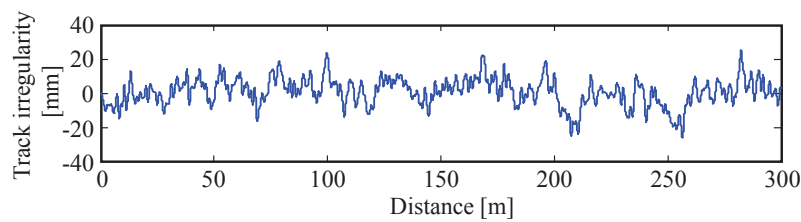


図 2.3.2: 基本の軌道形状

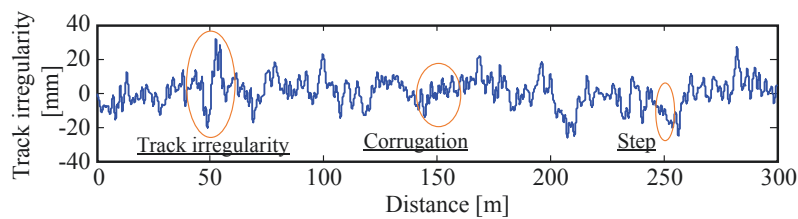


図 2.3.3: 軌道不整を入力した軌道形状

(3) 車体上下加速度の算出

作成した異常を含んだ軌道形状を一車両モデル(図2.3.1)に入力し、前
台車中心直上で車体振動加速度(鉛直方向)を算出した。サンプリング
周波数は、測定装置に使用するセンサと同じ820[Hz]とした。算出した加
速度に観測ノイズとして白色ノイズを加えたものを振動加速度データと
した(図2.3.4)。観測ノイズの標準偏差は $1 \times 10^{-3} \text{m/s}^2$ とした。

振動加速度の原波形からは、模擬した異常の影響は一部確認できるが、
その他の異常については差異が確認できない。

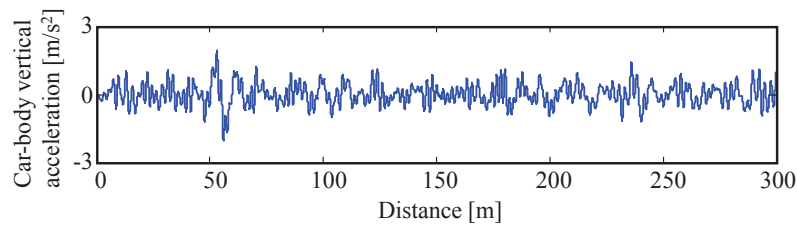


図 2.3.4: シミュレーション結果

(4) RMS 値による評価

算出した加速度から軌道異常の検出を行う。図2.3.5に式(2.3.1)をも
とに算出した上下加速度のRMS値を示す。図2.3.5からは50m地点にお
いて値が著大なものとなっていることが分かる。50m地点には高低不整
を模擬していることから、RMS値からは高低不整著大箇所を検出でき
ているといえる。しかし、波状摩耗や段差といった異常をこの解析結果か
ら検出するのは困難であることがわかる。

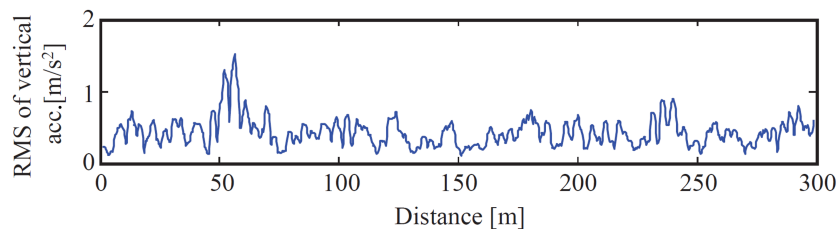


図 2.3.5: 上下加速度の RMS 値

2.4 ウェーブレット変換による評価

2.4.1 連続ウェーブレット変換

連続ウェーブレット変換とは、対象波形 $x(t)$ にマザーウェーブレット $\psi(t)$ を掛け合わせることで、その波形の特定部分を強調し他の部分を抑制する変換方法である。突発的な変化をする非定常信号の解析に適しており、式 (2.4.1) で定義される。

$$(W_\psi x)(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (2.4.1)$$

パラメーター a と b はそれぞれスケールパラメータ、シフトパラメータと呼ばれ、マザーウェーブレット $\psi(x)$ の時間（位相）を b だけずらし、周波数を $1/a$ にしている。ウェーブレット変換 $(W_\psi f)(b, a)$ の値を、 b を横軸、 $1/a$ を縦軸としたものがウェーブレット変換の信号平面である。

2.4.2 離散ウェーブレット変換

連続ウェーブレット変換の等高線図による解析結果の提示は、信号の性質を知るのに便利な表示法である。しかし、演算を施して信号処理を行うにはこの表示法は、多くの情報が重複するため必ずしも効率的でない。そこで、式 (2.4.1) の a と b を離散化して式 2.4.2 のように与えたものを離散ウェーブレット変換という。

$$D_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}(t) dt \quad (2.4.2)$$

ここで

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (2.4.3)$$

この離散ウェーブレット変換を用いて多重解像度解析を行う。多重解像度解析とは対象の信号 $x(t)$ を近似成分（低周波成分）と複数の詳細成分（高周波成分）に分解することである。離散ウェーブレット変換により、信号 $x(t)$ は次のように表現できる。

$$\begin{aligned}
x(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{m_0,n} \phi_{m_0,n}(t) \\
&+ \sum_{m=-\infty}^{m_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n} \psi_{m,n}(t)
\end{aligned} \tag{2.4.4}$$

$\phi_{m,n}(t)$ はスケーリング関数であり，次式で定義される．

$$\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n) \tag{2.4.5}$$

近似成分の係数は，

$$A_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \phi_{m,n}(t) dt \tag{2.4.6}$$

により計算される．レベル m における信号の詳細成分は

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n} \psi_{m,n}(t) \tag{2.4.7}$$

となるので，原信号 $x(t)$ は，次のように表現できる．

$$x(t) = x_{m_0}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t) \tag{2.4.8}$$

2.4.3 シミュレーションによる検証

本節では，RMS による検証では検出出来なかった軌道異常について，その種別を判定できるかを検証する．そのため，シミュレーションに使用する車両モデルは図 2.3.1 のモデル，軌道形状は図 2.3.2 で入力した値，車体上下加速度については図 2.3.4 で出力された値をそれぞれ用いる．

(1) 連続ウェーブレット変換による評価

時間周波数解析の一つである連続ウェーブレット変換の機能を用いて解析した結果を図 2.4.1 に示す．図中の上から下に向かって信号平面の周波数帯域は小さなものとなっている．また，信号平面の色が赤に近いほどその帯域の周波数成分を大きく含んでいることになる．ウェーブレット変換に用いるマザーウェーブレットは *Morlet* とした．

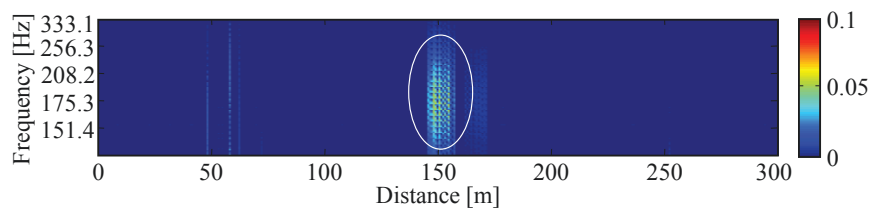
図 2.4.1(a) より，150m 付近に 174Hz 前後の周波数で信号が強く表れて

いる。波長 0.08m の波状摩耗を速度 50km/h で走行した場合，波状摩耗の周波数は 174Hz となり，その位置と周波数成分からもこの信号平面からは波状摩耗の影響を検出できていると考えられる。

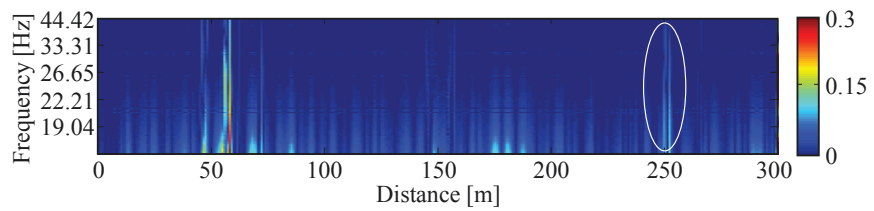
図 2.4.1(b) からは，250m の位置に広い帯域に信号強度が強くなっていることがわかる。これは，段差などの振動応答はステップ入力であるため周波数局在性が悪くなり，幅広い帯域に表れるという特徴と一致していることから段差の影響だと考えられる。

また，図 2.4.1(c) においては，一般的な車両の固有振動数付近とされる 1Hz 付近 [36] で信号強度が卓越している。特に 50m 付近で顕著となっており，高低不整の影響であると考えられる。

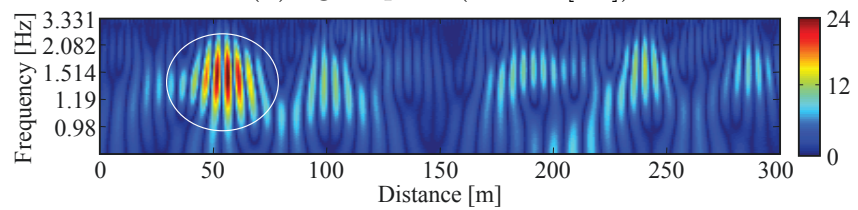
連続ウェーブレット変換を用いることで車体振動加速度から高低不整，波状摩耗，段差をそれぞれ検出することができた。



(a)Signal plane(333-151[Hz])



(b)Signal plane(44.4-19[Hz])



(c)Signal plane(3.33-0.98[Hz])

図 2.4.1: 連続ウェーブレット変換による結果

(2) 離散ウェーブレット変換による評価

同様に、離散ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析の結果を図 2.4.2 に示す。

このときのマザーウェーブレットは *Daubechies* の生成指数を 8 としたものを使用 [37] し、分解レベルは $m_0 = 6$ とした。

周波数帯域毎に分解した車体振動加速度の分解成分 (図 2.4.2) を見ると、波状摩耗の影響は d_1 , d_2 成分, レール継ぎ目部の段差の影響は d_3 , d_4 成分, 高低不整の影響は a_6 成分にそれぞれ表れていることが確認できる。そこで、異常に対応した周波数成分ごとにを行った (図 2.4.3)。

高周波成分の再構成波形 (図 2.4.3(a)) の 150m 地点からは波状摩耗の影響を確認することができ, d_3 , d_4 成分の再構成成分 (図 2.4.3(b)) の 250m 地点からは段差の影響を確認することができる。また, 低周波帯域の d_3 成分の再構成成分 (図 2.4.3(c)) の 50m 地点からは高低不整を検出できていることがわかる。

また, 高低不整を基準の軌道形状の 2 倍の大きさにした区間では, 接続部分の変化率が不連続になることから, 波形の変化率の不連続性を検出している (図 2.4.3(a)(b))。

これより, 車体振動加速度波形に対して, RMS 値からは検出することが困難であった軌道異常が, 連続ウェーブレット変換, 離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を併用することにより検出できる可能性があると考えられる。

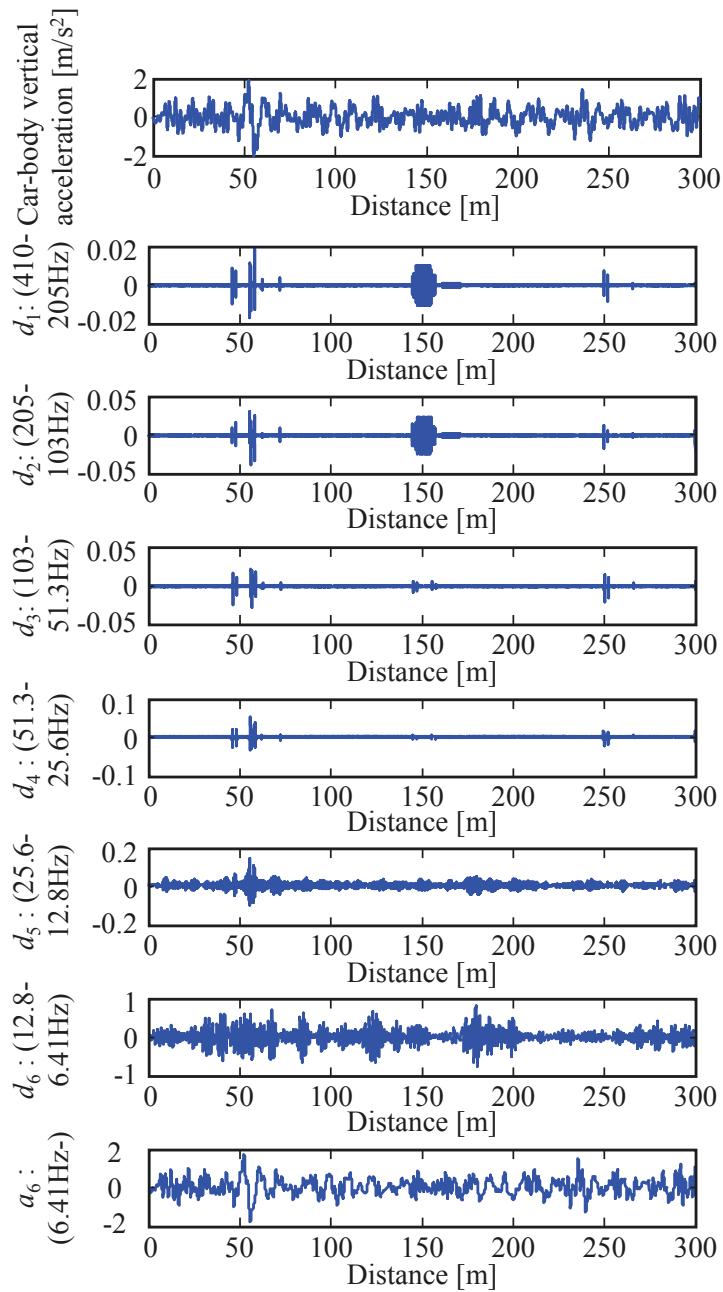
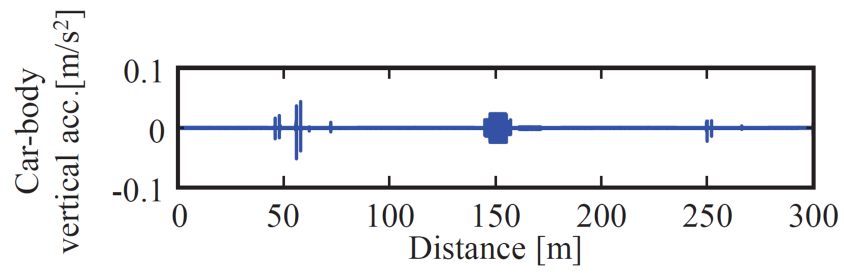
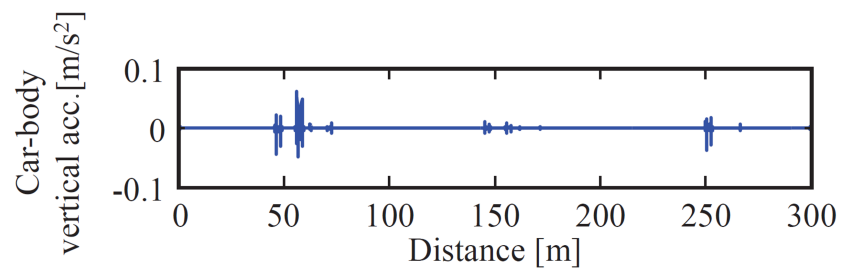


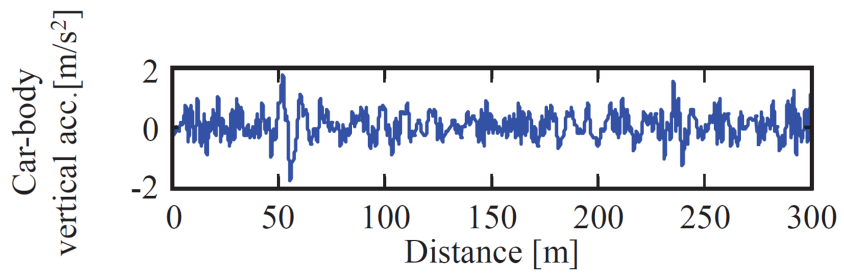
図 2.4.2: 離散ウェーブレット変換による結果



(a)Reconstructed signal ($d_1 + d_2$: 410Hz - 103Hz)



(b)Reconstructed signal($d_3 + d_4$: 51.3Hz - 25.6Hz)



(c)Reconstructed signal(a_6 : 6.4Hz -)

図 2.4.3: 再構成波形

2.5 逆解析による軌道不整推定の検討

本節では、代表的な状態推定手法であるカルマンフィルタを用いて、車体への入力である高低不整を鉛直方向の車体振動から推定する方法について記述する。

2.5.1 モデルの構築

カルマンフィルタを用いた軌道不整の推定のために、鉄道車両の鉛直方向の運動を表現した車両モデルを用いる。使用する車両モデルを図2.5.1に示す。本モデルは、直線走行を想定した1車両の線形モデルとし、車体2自由度（上下動、ピッチ）、各台車2自由度（上下動、ピッチ）を考慮した6自由度の1車両モデルである。ここで、 Z_c は車体の上下動、 Z_{t1} は前台車、 Z_{t2} は後台車の上下動を表す。また、 θ_c は車体のピッチ角、 θ_{t1} は前台車、 θ_{t2} は後台車のピッチ角を表す。 r_{1a} 、 r_{1b} 、 r_{2a} 、 r_{2b} は各輪軸に与えられる鉛直方向への高低不整による強制入力である。

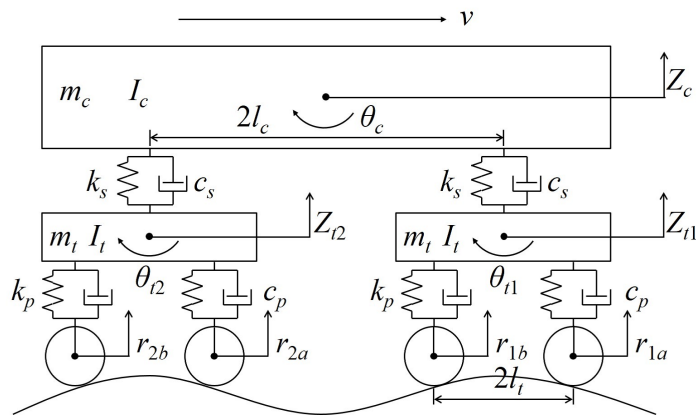


図 2.5.1: 上下6自由度モデル

ここで，本章で使用する記号を以下の通りに定義する．

\ddot{Z}_c	:	車体上下加速度
\ddot{Z}_{t1}	:	前台車上下加速度
\ddot{Z}_{t2}	:	後台車上下加速度
\dot{Z}_c	:	車体上下速度
\dot{Z}_{t1}	:	前台車上下速度
\dot{Z}_{t2}	:	後台車上下速度
Z_c	:	車体上下変位
Z_{t1}	:	前台車上下変位
Z_{t2}	:	後台車上下変位
$\ddot{\theta}_c$:	車体ピッチ角加速度
$\ddot{\theta}_{t1}$:	前台車ピッチ角加速度
$\ddot{\theta}_{t2}$:	後台車ピッチ角加速度
$\dot{\theta}_c$:	車体ピッチ角速度
$\dot{\theta}_{t1}$:	前台車ピッチ角速度
$\dot{\theta}_{t2}$:	後台車ピッチ角速度
θ_c	:	車体ピッチ角
θ_{t1}	:	前台車ピッチ角
θ_{t2}	:	後台車ピッチ角
r_{1a}	:	第1輪軸への強制変位
r_{1b}	:	第2輪軸への強制変位
r_{2a}	:	第3輪軸への強制変位
r_{2b}	:	第4輪軸への強制変位
I_c	:	車体ピッチ慣性モーメント
I_t	:	台車ピッチ慣性モーメント
m_c	:	車体質量
m_t	:	台車質量
l_c	:	台車中心間距離
l_t	:	軸間距離
k_s	:	空気ばねの上下剛性
c_s	:	空気ばねの上下減衰係数
k_p	:	軸ばねの上下剛性
c_p	:	軸ばねの上下減衰係数

直線軌道を走行時の運動方程式は、以下のように表される。

車体上下運動

$$\ddot{Z}_c = \frac{1}{m_c} \left\{ c_s \dot{Z}_{t1} + c_s \dot{Z}_{t2} - 2c_s \dot{Z}_c + k_s Z_{t1} + k_s Z_{t2} - 2k_s Z_c \right\} \quad (2.5.1)$$

車体ピッチ運動

$$\ddot{\theta}_c = \frac{1}{I_c} \left\{ -c_s l_c \dot{Z}_{t1} + c_s l_c \dot{Z}_{t2} - 2c_s l_c^2 \dot{\theta}_c - k_s l_c Z_{t1} + k_s l_c Z_{t2} - 2k_s l_c^2 \theta_c \right\} \quad (2.5.2)$$

前台車上下運動

$$\ddot{Z}_{t1} = \frac{1}{m_t} \left\{ (-c_s - 2c_p) \dot{Z}_{t1} + c_s \dot{Z}_c + c_s l_c \dot{\theta}_c + (-k_s - 2k_p) Z_{t1} + k_s Z_c + k_s l_c \theta_c + c_p \dot{r}_{1a} + c_p \dot{r}_{1b} + k_p r_{1a} + k_p r_{1b} \right\} \quad (2.5.3)$$

前台車ピッチ運動

$$\ddot{\theta}_{t1} = \frac{1}{I_t} \left\{ -c_p l_t \dot{r}_{1a} + c_p l_t \dot{r}_{1b} - 2c_p l_t^2 \dot{\theta}_{t1} - k_p l_t r_{1a} + k_p l_t r_{1b} - 2k_p l_t^2 \theta_{t1} \right\} \quad (2.5.4)$$

後台車上下運動

$$\ddot{Z}_{t2} = \frac{1}{m_t} \left\{ (-c_s - 2c_p) \dot{Z}_{t2} + c_s \dot{Z}_c - c_s l_c \dot{\theta}_c + (-k_s - 2k_p) Z_{t2} + k_s Z_c - k_s l_c \theta_c + c_p \dot{r}_{2a} + c_p \dot{r}_{2b} + k_p r_{2a} + k_p r_{2b} \right\} \quad (2.5.5)$$

後台車ピッチ運動

$$\ddot{\theta}_{t2} = \frac{1}{I_t} \left\{ -c_p l_t \dot{r}_{2a} + c_p l_t \dot{r}_{2b} - 2c_p l_t^2 \dot{\theta}_{t2} - k_p l_t r_{2a} + k_p l_t r_{2b} - 2k_p l_t^2 \theta_{t2} \right\} \quad (2.5.6)$$

式(2.5.1)～式(2.5.6)をMCK形方程式で表すと式(2.5.7)となる.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Z}(t) = \mathbf{D}\dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{E}\mathbf{r}(t) \quad (2.5.7)$$

ここで, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} は質量行列, 減衰行列, 剛性行列であり, $\ddot{\mathbf{Z}}$, $\dot{\mathbf{Z}}$, \mathbf{Z} , $\dot{\mathbf{r}}$, \mathbf{r} は加速度ベクトル, 速度ベクトル, 変位ベクトル, 外力ベクトルの微分値, 外力ベクトルとなる. 上式の各行列は以下の通りである.

$$\mathbf{M} = \text{diag}(m_c \ I_c/l_c^2 \ m_t \ I_t/l_t^2 \ m_t \ I_t/l_t^2) \quad (2.5.8)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2c_s & 0 & -c_s & 0 & -c_s & 0 \\ 0 & 2c_s & -c_s & 0 & c_s & 0 \\ -c_s & -c_s & 2c_p + c_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2c_p & 0 & 0 \\ -c_s & c_s & 0 & 0 & 2c_p + c_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2c_p \end{bmatrix} \quad (2.5.9)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 2k_s & -k_s & 0 & k_s & 0 \\ -k_s & -k_s & 2k_p + k_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_p & 0 & 0 \\ -k_s & k_s & 0 & 0 & 2k_p + k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_p \end{bmatrix} \quad (2.5.10)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_p & c_p & 0 & 0 \\ c_p & -c_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_p & c_p \\ 0 & 0 & c_p & -c_p \end{bmatrix} \quad (2.5.11)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_p & k_p & 0 & 0 \\ k_p & -k_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_p & k_p \\ 0 & 0 & k_p & -k_p \end{bmatrix} \quad (2.5.12)$$

ここで, $\mathbf{Z}^T(t) = [Z_c \ l_c\theta_c \ Z_{t1} \ l_t\theta_{t1} \ Z_{t2} \ l_t\theta_{t2}]$, $\mathbf{r}^T(t) = [r_{1a} \ r_{1b} \ r_{2a} \ r_{2b}]$ となる.

車両運動シミュレーションなどの時系列解析の問題は，運動方程式を時間積分する必要がある．これは，微分方程式に基づいて，多数回の繰り返し計算により車両の時刻歴応答を求める手法である．一般的な数値積分の方法として，オイラー法やルンゲ・クッタ法が挙げられる．しかし，これらの方法は，1階微分形方程式のため状態量に加速度を含んでいない．つまり，軌道不整を入力として与えた際の車体振動加速度を得るためには，速度を微分する必要がある．そのため，車両モデルをMCK形方程式で表し，加速度を状態量として取り扱う際は，2階微分方程式のNewmark β 法を用いたほうが良いとされる [38][39]．また，Newmark β 法は高周波成分を除去する減衰効果を持つため，解の発散を防ぐことができる．

そこで本研究では，2階微分形用のNewmark β 法を時間積分の手法として用いる．図2.5.2のように，状態量 y を微小時間 h 間隔に区分して考えると，時刻 $k+1$ ステップにおける運動方程式は次式のようになる．

$$M\ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} + C\dot{\mathbf{Z}}_{k+1} + \mathbf{K}\mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{D}\dot{\mathbf{r}}_{k+1} + \mathbf{E}\mathbf{r}_{k+1} \quad (2.5.13)$$

図2.5.2において時刻 t_k から t_{k+1} まで加速度が直線的に変化すると仮定したときの，図2.5.3(a)に示す τ における加速度 $\ddot{\mathbf{Z}}_\tau$ は，

$$\ddot{\mathbf{Z}}_\tau = \ddot{\mathbf{Z}}_k + \frac{\tau}{h} \left(\ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} - \ddot{\mathbf{Z}}_k \right) \quad (2.5.14)$$

となり，速度 $\dot{\mathbf{Z}}_\tau$ ，変位 \mathbf{Z}_τ は上式を τ について積分すると次式となる．

$$\dot{\mathbf{Z}}_\tau = \dot{\mathbf{Z}}_k + \ddot{\mathbf{Z}}_k \tau + \frac{1}{2h} \left(\ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} - \ddot{\mathbf{Z}}_k \right) \tau^2 \quad (2.5.15)$$

$$\mathbf{Z}_\tau = \mathbf{Z}_k + \dot{\mathbf{Z}}_k \tau + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{Z}}_k \tau^2 + \frac{1}{6h} \left(\ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} - \ddot{\mathbf{Z}}_k \right) \tau^3 \quad (2.5.16)$$

ここで， $\tau = h$ のとき， $\ddot{\mathbf{Z}}_\tau = \ddot{\mathbf{Z}}_{k+1}$ ， $\dot{\mathbf{Z}}_\tau = \dot{\mathbf{Z}}_{k+1}$ ， $\mathbf{Z}_\tau = \mathbf{Z}_{k+1}$ であるから，

$$\dot{\mathbf{Z}}_{k+1} = \dot{\mathbf{Z}}_k + \frac{1}{2}h \left(\ddot{\mathbf{Z}}_k + \ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} \right) \quad (2.5.17)$$

$$\mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{Z}_k + h\dot{\mathbf{Z}}_k + \frac{1}{3}h^2\ddot{\mathbf{Z}}_k + \frac{1}{6}h^2\ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} \quad (2.5.18)$$

となる。

Newmark β 法は，時間間隔内の加速度変化を表す β を用いて，時刻 t_{k+1} での速度 $\dot{\mathbf{Z}}_{k+1}$ ，変位 \mathbf{Z}_{k+1} を次式のように仮定している。

$$\dot{\mathbf{Z}}_{k+1} = \dot{\mathbf{Z}}_k + \frac{1}{2}h \left(\ddot{\mathbf{Z}}_k + \ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} \right)$$

$$\mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{Z}_k + h\dot{\mathbf{Z}}_k + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) h^2 \ddot{\mathbf{Z}}_k + \beta h^2 \ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} \quad (2.5.19)$$

式 (2.5.17) と式 (2.5.19) を式 (2.5.13) に代入し，加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{Z}}_{k+1}$ について整理すると，次のような式が求められる。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{Z}}_{k+1} &= \left(\mathbf{M} + \frac{1}{2}h\mathbf{C} + \beta h^2\mathbf{K} \right)^{-1} \\ &\left\{ \mathbf{D}\dot{\mathbf{r}}_{k+1} + \mathbf{E}\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{C} \left(\dot{\mathbf{Z}}_k + \frac{1}{2}h\ddot{\mathbf{Z}}_k \right) \right. \\ &\left. - \mathbf{K} \left[\mathbf{Z}_k + h\dot{\mathbf{Z}}_k + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) h^2 \ddot{\mathbf{Z}}_k \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.5.20)$$

式 (2.5.20) を計算する際には，時刻 t_k での外力と変位，速度，加速度が求まっているため，右辺項はすべて既知の値となる。よって，時刻 t_{k+1} における加速度が求められ，未来の応答を逐次計算することが可能となる。

式 (2.5.7) を Newmark β 法 ($\gamma = 1/2$, $\beta = 1/6$) を用いてデータ間隔 h で離散化すれば，以下の状態方程式と観測方程式が得られる。

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (2.5.21)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.5.22)$$

ここで， \mathbf{x}_k は状態ベクトル， \mathbf{u}_k は入力ベクトル， \mathbf{y}_k は出力ベクトルであり， \mathbf{w}_k はシステムノイズ， \mathbf{v}_k は観測ノイズである。また， \mathbf{F} は状態遷移行列， \mathbf{G} は入力行列， \mathbf{H} は観測行列である。状態遷移行列 \mathbf{F} と入力行列 \mathbf{G} は以下の行列 \mathbf{A} ， \mathbf{B} ， \mathbf{C} を用いて $\mathbf{F} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ ， $\mathbf{G} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}$ と

なる.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O} & -\beta h^2 \mathbf{I} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} & -0.5h \mathbf{I} \\ \mathbf{K} & \mathbf{C} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad (2.5.23)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & h & (0.5 - \beta) h^2 \mathbf{I} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} & 0.5h \mathbf{I} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \end{bmatrix} \quad (2.5.24)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{E} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (2.5.25)$$

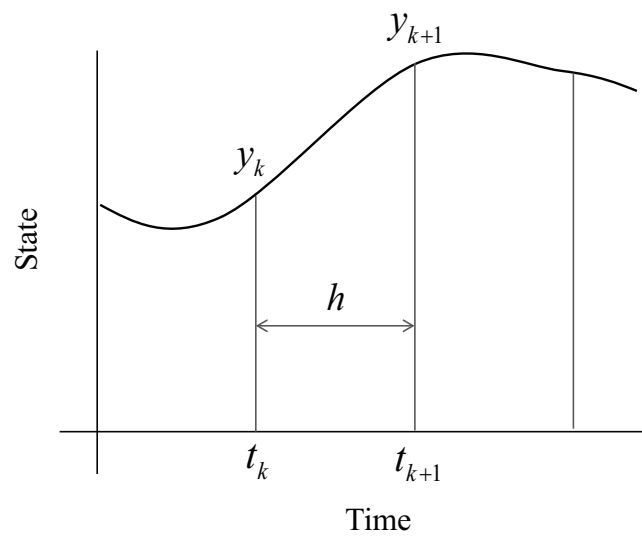
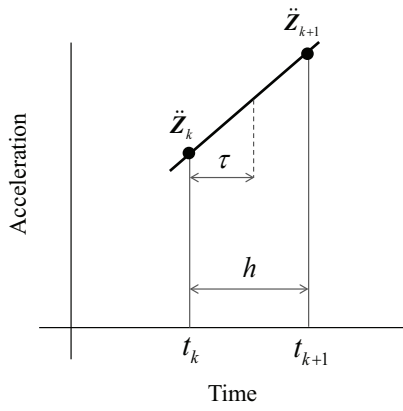
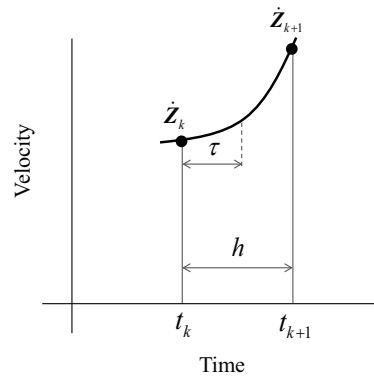


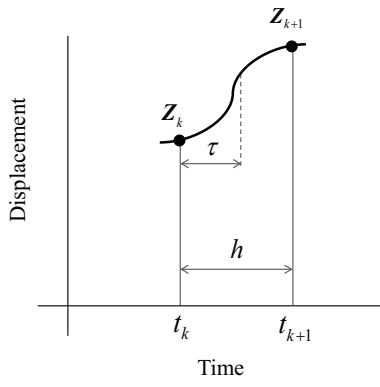
図 2.5.2: 時間積分の概要



(a) Acceleration



(b) Velocity



(c) Displacement

图 2.5.3: Newmark β 法 ($\beta = 1/6$)

2.5.2 カルマンフィルタの構築

(1) 状態空間モデル

カルマンフィルタを用いて高低不整を推定するための、状態方程式 (式 (2.5.21)) の状態遷移行列 F と入力行列 G および、観測方程式 (式 (2.5.22)) の観測行列 H を以下のように定義する。

状態方程式

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{k-L+1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_{k-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{k-L} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{k-1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}} \underbrace{(u_{k-1} + w_{k-1})}_{\mathbf{u}_{k-1}} \quad (2.5.26)$$

観測方程式

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ y_{k-L+1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} h(0) & h(1) & \cdots & \cdots & h(L) \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{k-L+1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_k} + v_k \quad (2.5.27)$$

ここで、 x_k は軌道形状、 y_k は車体振動加速度、 v_k は観測ノイズである。通常、外部入力である軌道形状 u_k は既知の確定入力として扱われるので、これを求めることはできない。そこで、式 (2.5.26) のように軌道形状を u_k とシステムノイズ w_k を加算してランダムウォークで表現した。車両モデルは、式 (2.5.27) のようにインパルス応答を用いた畳み込み積分を観測方程式で表現する。 H 中の h は軌道形状に対する車体振動加速度の単位インパルス応答、 L はその総数である。以上の状態空間モデルによって、カルマンフィルタを用いた高低不整の推定が可能となり、車体振動加速度から軌道形状を未知の状態変数の一成分として逐次推定する。

(2) 走行速度の変化への対応

観測行列に用いる車体振動加速度のインパルス応答は走行速度によって変化する。走行速度の変化の度にインパルス応答を再計算することで原理的には速度変化に対応できるが、計算負荷や効率を考えると現実的ではない。そこで本手法では、予めインパルス応答を一定速度間隔毎に計算しておき、カルマンフィルタによる逐次推定において、その時刻の速度情報を用いて切り替える(図 2.5.4) [40]。本研究では、車両モデルを用いてインパルス応答を計算し、数値シミュレーションに用いた。

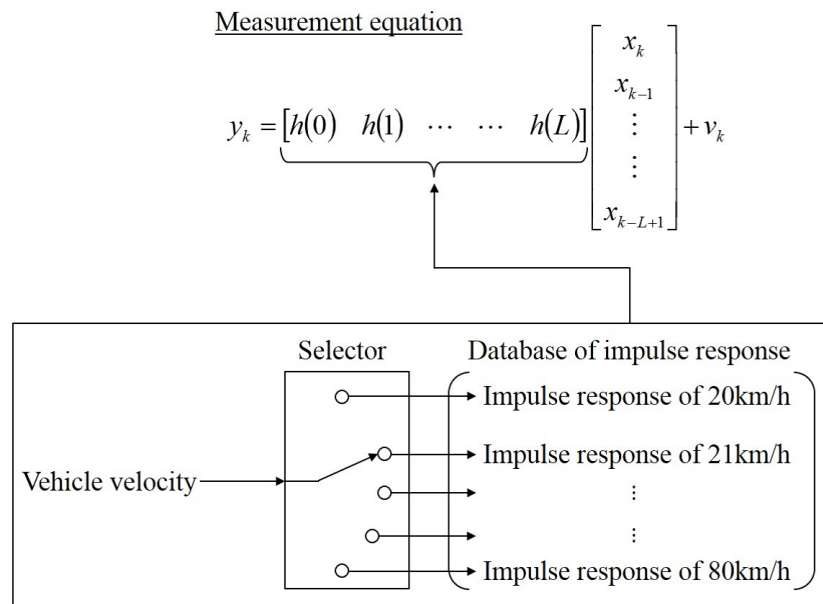


図 2.5.4: インパルス応答の切替え

本研究で取り扱うような線形システムの場合，車両モデルの時刻歴応答はFIR（Finite Impulse Response）フィルタを用いることによって計算することができる．つまり，車両モデルのインパルス応答 $g(\tau)$ が既知であれば，入力（軌道形状）に対する出力（車体振動加速度）は畳み込み積分によって計算でき，式(2.5.27)のように観測方程式で車両モデルを表現することができる [41]．畳み込み積分は，インパルス応答 $g(\tau)$ の時間をずらしながら，入力 $x(t)$ の大きさを重み係数として掛け合わせて，全ての応答を重ね合わせることで，入力 $x(t)$ に対する出力 $y(t)$ を求める手法である．以下に畳み込み積分の式を示す．

$$y(t) = \int_0^t g(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (2.5.28)$$

$$= g(t) * x(t) \quad (2.5.29)$$

式(2.5.29)は，式(2.5.28)の積分を簡素化して表現した形である．

車体振動加速度の単位インパルス応答は，車両モデルに単位インパルス信号（図2.5.5）を入力することで計算できる．例として，地方鉄道車両を想定した走行速度60km/h時のインパルス応答を図2.5.6に示す．新幹線では，永沼ら [42] の先行研究において，新幹線営業列車の後部台車直上で車体振動加速度の測定を行っていることから，インパルス応答の観測位置を同一の後台車直上としている．一方，本論文では，実車実験時に測定装置を先頭車両の運転室横の空きスペースへ設置することを想定し，インパルス応答の観測位置を前台車直上とした．

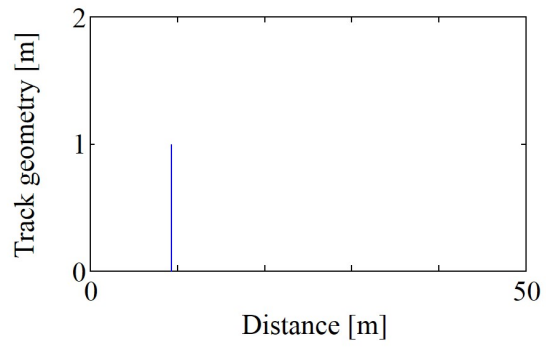


図 2.5.5: インパルス入力

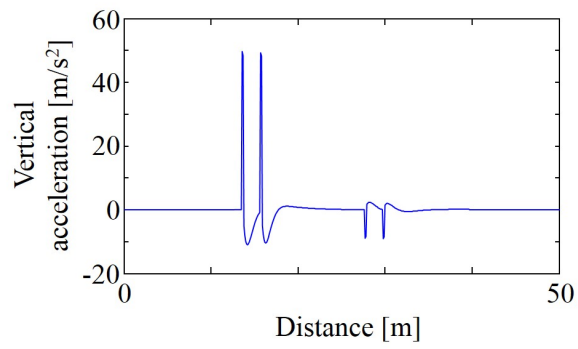


図 2.5.6: インパルス応答 (60km/h)

(3) カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、時々刻々と与えられる観測データを用いて、システムの状態を逐次的に推定するオンラインアルゴリズムである。通常、センサから得られる観測データは雑音に乱されており、またいくつかの状態は直接観測されないことも多い。このような状況下で、観測データからシステムの状態に関する情報を抽出（推定）することが必要となる。本研究では、カルマンフィルタを応用して、車体振動加速度から高低不整の推定を行う。

一期先予測

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1|k-1} + \mathbf{G}\mathbf{u}_{k-1} \quad (2.5.30)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T \quad (2.5.31)$$

フィルタ

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2.5.32)$$

$$\mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (2.5.33)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (2.5.34)$$

ここで、状態遷移行列 \mathbf{F} と入力行列 \mathbf{G} および観測行列 \mathbf{H} は式 (2.5.26)、式 (2.5.27) に示す通りである。また、 \mathbf{P} は誤差共分散行列、 \mathbf{K} はカルマ

ンゲイン, \mathbf{Q} はプロセスノイズの共分散行列, \mathbf{R} は観測ノイズの共分散行列を表す. 上式のアルゴリズムによって計算された軌道形状 x_k は, 未知の状態変数の推定値の一成分として逐次的かつ安定的に与えられる.

(4) 軌道不整の評価方法

軌道の状態監視を行う上での目的から考えると, 必ずしも完全な軌道の実形状が得られなくても, 主に走行安全性に影響を与える波長帯域について, 推定することができれば, 大量・高頻度データの取得を前提とした軌道状態監視の目的は十分達せられると考えられる.

一般に, 高低不整は 10m 弦正矢の振幅により測定・管理されている [43][44]. そこで本研究では, 軌道形状を推定した後, 10m 弦正矢による高低不整に換算して推定結果の評価を行った. 軌道形状から高低不整を計算する式を以下に示す.

$$a(x) = b(x) - \frac{b(x+5) + b(x-5)}{2} \quad (2.5.35)$$

ここで, $a(x)$ は 10m 弦正矢による高低不整, $b(x)$ は軌道形状である.

2.5.3 走行シミュレーション

本項では、提案した軌道不整の推定手法の有効性を確認するために、地方鉄道を想定して模擬データを作成し、軌道不整の推定シミュレーションを行った結果について記述する。

このシミュレーションでは、本来、営業列車に搭載したセンサで測定する車体振動加速度には車両モデルに軌道形状と速度曲線を入力し、計算した車体振動加速度にノイズを加えたものを使用し、軌道不整の推定を行う。シミュレーションは以下に示す手順で行った。また、図 2.5.7 にシミュレーションのフローを示す。

- (I) 2階の微分方程式で表される車両モデルの運動方程式を離散化し、状態方程式を求める。
- (II) 実際の軌道の周波数特性を模擬した軌道形状データ（波長 6.00m 以上）を作成する。また、それぞれの列車の運転を模擬した速度データを設定する。
- (III) (II) の軌道形状データと速度データを (I) の車両モデルに入力し、前台車または後台車直上における鉛直方向の車体振動加速度を計算する。この車体振動加速度に正規分布ノイズを加え、観測値とする。
- (IV) カルマンフィルタを用いて、(III) で観測値とした車体振動加速度と、(II) で設定した速度データから軌道形状を推定する。
- (V) (II) の軌道形状と (IV) で推定した軌道形状をそれぞれ 10m 弦正矢による高低不整に換算し、推定誤差を求める。各推定結果における推定精度の評価を行い、本研究における推定手法の有効性を確認する。

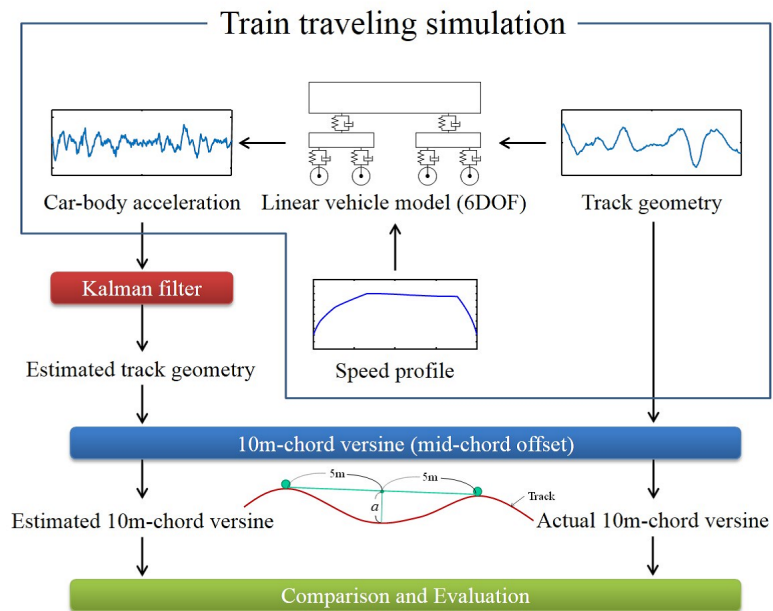


図 2.5.7: シミュレーションフロー

(1) 軌道形状と運転曲線データの作成

図 2.5.8 に車両モデルに入力した軌道形状, 図 2.5.9 に車体振動加速度の計算時における走行速度を示す. 軌道形状は, 乱数を発生させることで実際の軌道の周波数特性を模擬した軌道形状データ (波長 6.00m 以上) を作成した. また, 速度曲線は在来線や地方鉄道の 1 駅区間分を想定し設定した.

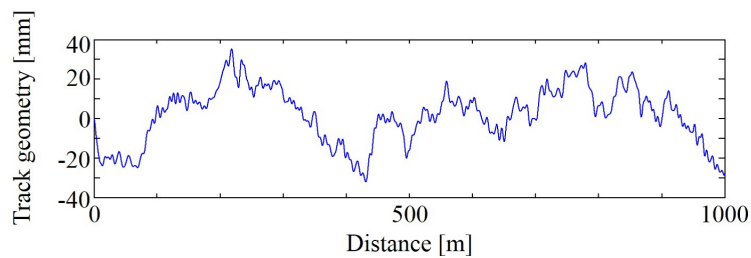


図 2.5.8: 軌道形状

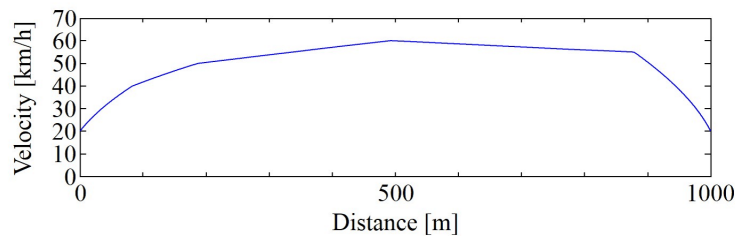


図 2.5.9: 速度曲線

(2) 車体振動加速度の計算

車両モデルに軌道形状データと速度データを入力し, 計算した前台車直上における鉛直方向の車体振動加速度を図 2.5.10 に示す. 計算に用いた車両モデルの各パラメータ (表 2.5.1) は地方鉄道を想定し設定した. 計算した車体振動加速度を観測値として用いるために加える正規分布ノイズの標準偏差は $1.00 \times 10^{-3} \text{m/s}^2$ とした.

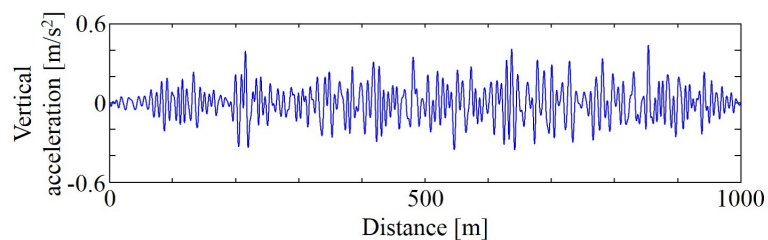


図 2.5.10: 車体振動加速度

表 2.5.1: 鉄道車両パラメータ

Symbol	Description	Unit	Value
m_c	Car-body mass	kg	25000
m_t	Truck mass	kg	3100
I_c	Car-body pitch inertia	kgm ²	856940
I_t	Truck pitch inertia	kgm ²	3417.8
$2l_c$	Car-body base	m	14.1
$2l_t$	Wheel base	m	2.1
k_p	Primary suspension vertical stiffness	kN/m	2120
k_s	Secondary suspension vertical stiffness	kN/m	400
c_p	Primary suspension vertical damping	kNs/m	39.2
c_s	Secondary suspension vertical damping	kNs/m	96

(3) 軌道不整の推定

カルマンフィルタを用いて車体振動加速度から軌道形状と高低不整を推定した結果を図2.5.11に示す。推定におけるシステムノイズ w_n および観測ノイズ v_n の分散はそれぞれ $\sigma_w^2 = 1.00 \times 10^{-1} \text{m}^2$, $\sigma_v^2 = 5.00 \times 10^{-3} (\text{m/s}^2)^2$ とした。図2.5.11より、軌道形状は長波長成分が推定できないことによる差異が見られたが、これは地方鉄道を想定し、設定した走行速度では、計算した車体振動加速度に軌道形状まで推定するための長波長成分が含まれないためであると考えられる。一方で、軌道の管理に用いられている10m弦正矢の振幅による高低不整は推定誤差が約2.00mm以下であり、良好な精度の推定結果が得られた。この結果により、カルマンフィルタを用いた推定手法の軌道状態監視への有効性が確認された。

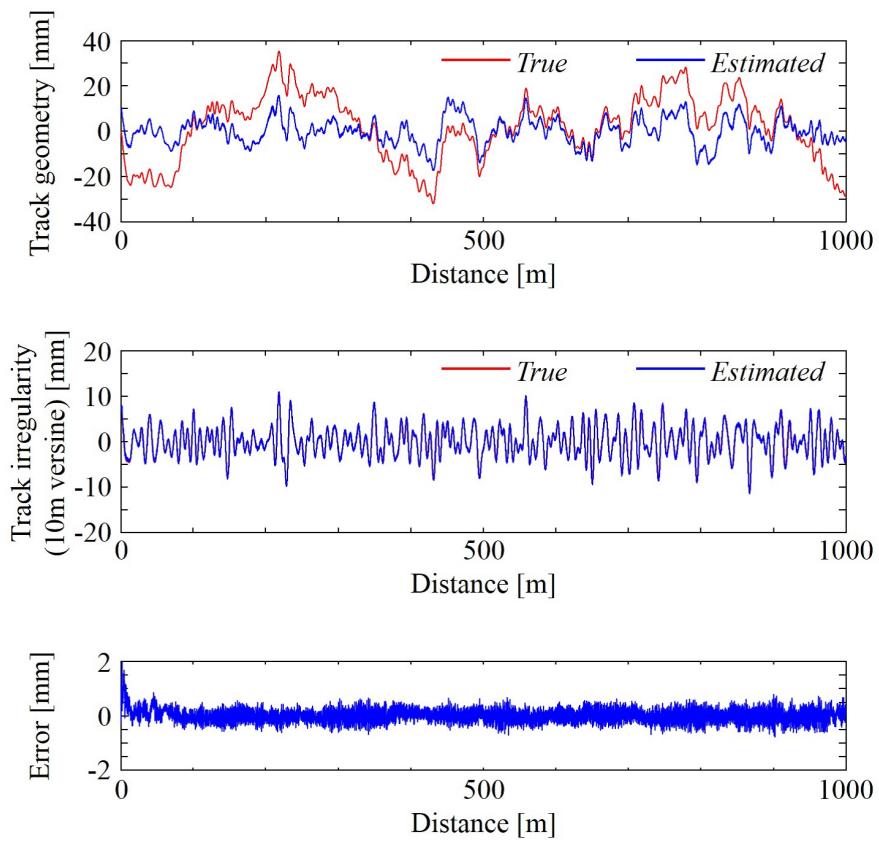


図 2.5.11: 軌道不整の推定結果

2.6 レール診断ソフトウェア

小型レール診断装置を軌道状態の診断に活用するためには、蓄積された大量の測定データの効率的な取り扱い、視覚化による診断結果の提示、測定から診断までの期間短縮など、装置と連携可能なソフト面でのインターフェースの開発が必要である。そこで、測定データの信号処理の操作、結果の提示を GUI(Graphical User Interface) で表すこととした。信号処理、GUI 化には MATLAB(MathWorks) を用いた。

本診断ソフトでは、振動加速度の振幅が軌道異常を示す指標の一つとして紹介した、RMS 値による軌道状態の評価を組み込む。ただし、RMS 値による評価のみでは周波数情報が欠如するため、より詳細な診断を行うために、連続ウェーブレット変換、離散ウェーブレット変換による時間周波数解析も併せて組み込むこととする。

2.6.1 RMS 値の解析画面

レール診断ソフトのメイン画面を図 2.6.1 に示す。メイン画面では、式 (2.3.1) により算出される振動加速度の RMS 値を元に軌道状態を評価する。タブを変更することで、算出に用いる振動加速度を検査する軌道不整に合わせて、変更することができる。図 2.6.1 上部の路線図は駅間ごとに軌道の状態を色分け評価したものである。色分けの指標には、振動加速度の RMS 値を用いており、設定したしきい値を基準にして、赤、黄、青で表示している。また、図 2.6.2 は、選択した駅間の走行速度と RMS 値の実測値を表示している。RMS 値著大箇所を見ることで軌道異常の発生位置を明らかにすることができる。

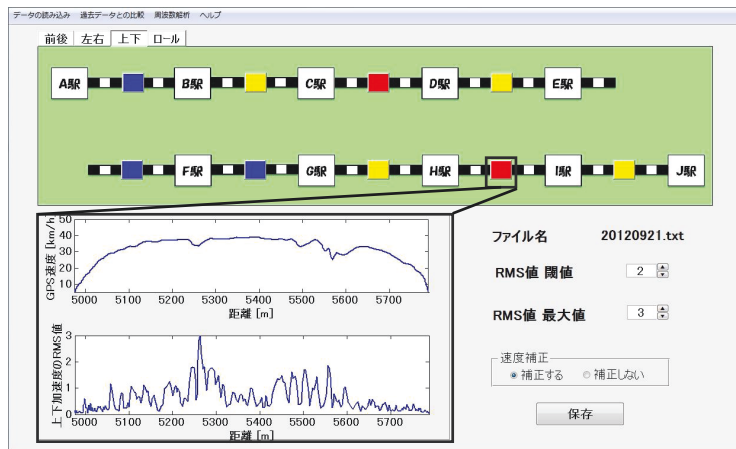


図 2.6.1: レール診断ソフトのメイン画面

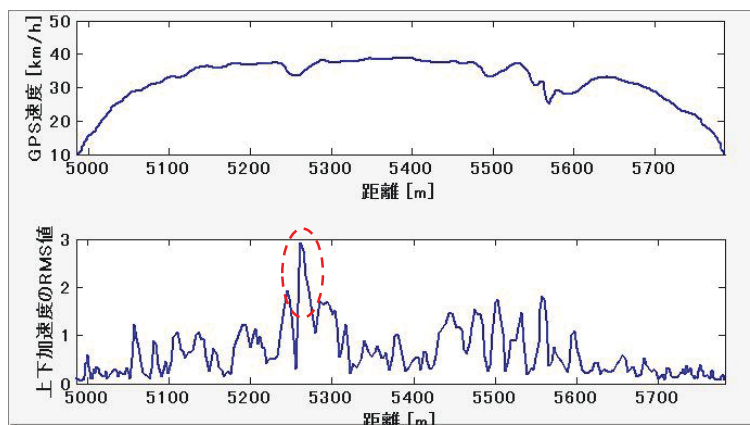


図 2.6.2: RMS 値の解析結果

図 2.6.3 上図は、特定の駅間の複数回の走行データを比較したものである。設定した閾値 (2.0m/s^2) を超える箇所がプロットされる。RMS 値による軌道評価では RMS 値が著大であるほど、軌道状態が悪化していると評価される。そのため、閾値を超えてプロットされた回数が多い 5260m 地点において、軌道の異常が発生している可能性がある。図 2.6.3 下図は、上図の破線部の RMS 値（最大値）を走行日時ごとに表示したものである。2012 年 9 月から 2013 年 2 月の間での補修作業の影響が RMS 値の低下として表れている。このように特定箇所を要監視区間として、長期的な軌道保守のモニタリングを行うことも可能である。

走行速度等の影響により、図 2.6.2 のような一走行分のデータでは、正確な軌道状態の評価が行えない場合があるが、複数回の走行データによる評価（図 2.6.3）では、時間経過による影響や、ノイズが含まれる測定データを排除することで、より正確な軌道診断を行うことが可能であり、本ソフトウェアにおいては、時系列データを一括して表示する機能が盛り込まれている。

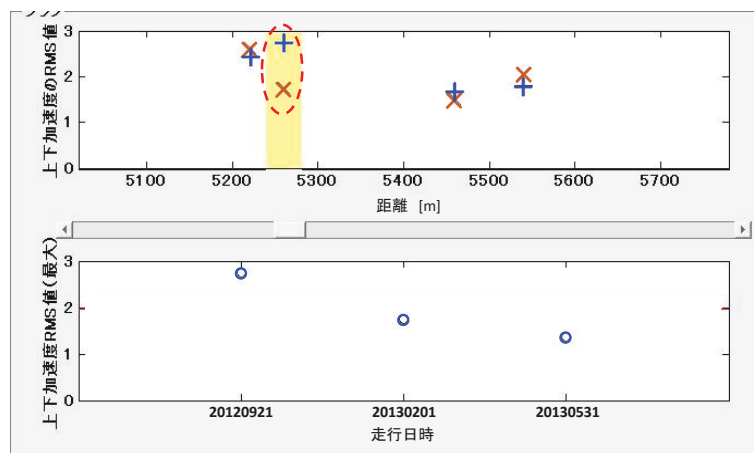


図 2.6.3: RMS 値推移の表示画面

2.6.2 ウェーブレット変換の解析画面

連続ウェーブレット変換による解析結果を表示した画面が図 2.6.4 である。RMS 値によるメイン画面と同様に、駅間を選択することで、対象とする振動加速度波形と連続ウェーブレット変換による結果を並べて表示する。連続ウェーブレット変換の信号平面は等高線で表わされており、赤に近づくほど振幅が大きいことを表わし、対応する周波数成分を多く含んでいる。等高線図の縦軸はスケール値から擬似周波数に変換したものを表示する。

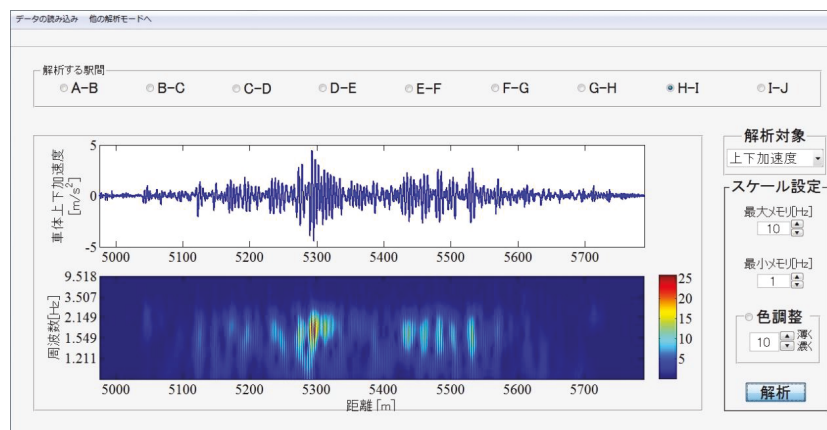


図 2.6.4: 連続ウェーブレット変換による解析結果

また、診断ソフトで離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を行ったものが図 2.6.5 である。この機能では駅間ごとの車体振動を任意の分割数で周波数分解できる。また、複数の周波数帯に軌道異常を原因とした車両振動が確認されることから、任意の周波数成分を選択し、再構成する機能を有している。これにより、特定の成分を見ることでその成分に見合った軌道異常を素早く診断することが可能となる。なお、分解レベル m_0 は、サンプリング周波数や特徴の抽出を行う周波数帯域から適切に設定する必要がある。

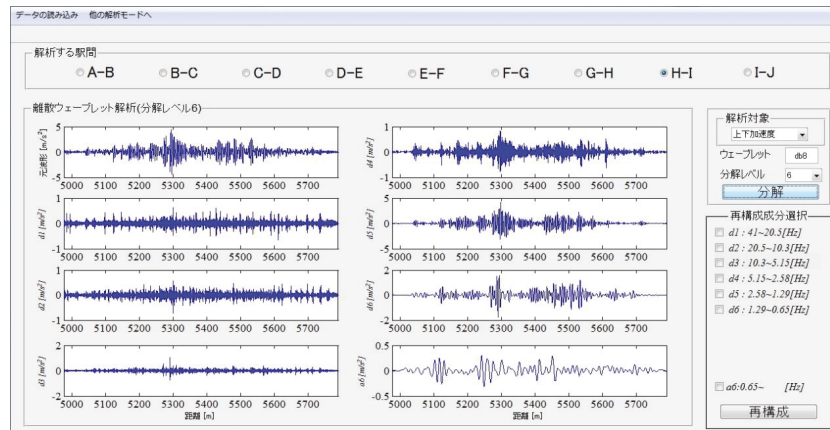


図 2.6.5: 離散ウェーブレット変換による解析結果

2.7 まとめ

車室内にて比較的容易に測定可能な状態量から，検出可能な軌道異常について整理し，実環境における軌道保守に活用可能なデータへ変換するための軌道評価指標を提案する．(1)RMS (Root Mean Square) 値による軌道異常の検出，時間一周波数解析の中でも広い周波数帯を観測することに優位性を持つ(2)ウェーブレット変換による軌道異常種別の判定について，その評価手法の概略について述べた後に，シミュレーションによる検証を実施した．また，新幹線を対象に実績のある，(3)逆解析による軌道不整推定手法について，地方鉄道に適用するためのアルゴリズムの変更について述べ，シミュレーションにおいてその精度を検証した．その結果，以下の結論を得た．

(1) RMS 値による軌道異常の検出

著大な高低不整，波状摩耗，レール継目部の段差といった軌道異常を想定した軌道入力を与えたシミュレーション結果において，高低不整についてRMS 値による検出は十分に可能であることが確認された．しかしながら，波状摩耗や段差といった軌道異常については検出困難であることが判明した．

(2) ウェーブレット変換による軌道異常種別の判定

(1)と同様の条件で実施されたシミュレーションにおいて，連続ウェーブレット変換及び離散ウェーブレット変換を用いて解析を実施した結果，どちらの結果においても，著大な高低不整，波状摩耗，レール継目部の段差といった軌道異常が，それぞれ特定可能であることを確認し，RMS 値による評価では判別が困難である軌道異常についても判別可能であることを示した．

(3) 逆解析による軌道不整推定

地方鉄道を想定した走行シミュレーションにおいて，提案するアルゴリズムの推定精度を検証した．その結果，軌道管理の指標とされる10m 弦正矢法における軌道不整においては，推定誤差は最大で2mm 以下と，軌道保守に活用するデータとしての有用性を示した．

また，本測定装置においては膨大な測定データが蓄積される一方，ビッグデータを扱うため手動による解析作業には限界がある．そこで，測定

データを効率的に取り扱うため Graphical User Interface を活用したレール診断ソフトを開発した。その結果、RMS 値及びウェーブレット変換による評価について、複数測定データを一度に取り扱うことが可能であることを確認し、軌道監視結果を速やかに、かつ視覚的に分かりやすく鉄道へフィードバックできる診断ソフトであることを示した。

第3章 測定装置の開発

3.1 はじめに

第2章において、車体加速度及び車体角速度から軌道異常の検出するための評価指標について述べた。本章では、これらの車体状態量を測定するための測定装置について、求められる仕様について検討し、検討結果に基づき開発された測定装置について紹介する。

3.2 先行研究における試作測定装置

小島ら [45, 46, 47] による先行研究においては、シミュレーションにおいて車体状態量から軌道異常を検出する手法について検証し、測定装置を試作し営業路線での実証試験 [48] を実施している。しかしながら、測定データによる軌道状態の評価は机上検討にとどまり、検出された軌道異常に保守が必要かといった評価に至っていない。また、軌道状態は一般的に短期間で遷移しないことが知られており、少なくとも年単位での状態監視が必要となる。

そこで、先行研究により製作した試作測定装置を用いて測定データを長期間にわたり収集し軌道状態を評価するとともに、現地調査を通じて実際の軌道保守に活用可能な測定装置であるか確認を行った。

3.2.1 試作測定装置の全体構成

図 3.2.1 に試作測定装置の構成図を示す。軌道変位を検出するための加速度センサおよびレートジャイロ、位置を検出するための GPS 受信機、波状摩耗を検出するための騒音計、各センサの信号をコンピュータに入力するためのアナログ入力ターミナル、解析用のコンピュータで構成される。

各センサから出力される信号は、アナログ入力ターミナルによりデジ

タル信号に変換され、コンピュータに入力される。また、GPS受信機により求められる位置情報がコンピュータに入力される。コンピュータに組み込まれた位置推定・マップ表示ソフトは、GPS受信機による位置情報にもとづいて、路線上の位置を求め、画面の地図上の現在位置を逐次表示する。軌道異常検出ソフトは、位置推定・マップ表示ソフトによる位置とGPS受信機による速度情報に対して、加速度センサによる加速度信号を用いて補正を行うとともに、各センサからの信号を信号処理することにより軌道状態を逐次推定する。位置推定・マップ表示ソフトは、軌道異常検出ソフトによる軌道状態を画面の地図上に示す。信号処理されたデータは、オフラインにより解析できるようにするために、ハードディスクドライブに記録される。

軌道不整の測定に使用する加速度センサは、直流成分の測定が可能で、取り扱いが容易なひずみゲージ型を用いている。ジャイロは、費用対効果を鑑み振動ジャイロが採用されている。マイクロホンは、その変換方式の違いにより動電型（ダイナミックマイク）と静電型（コンデンサマイク）に大別されるが、騒音から波状摩耗の程度を推定するために、フラットな周波数特性を持つ静電型マイクロホンが採用されている。

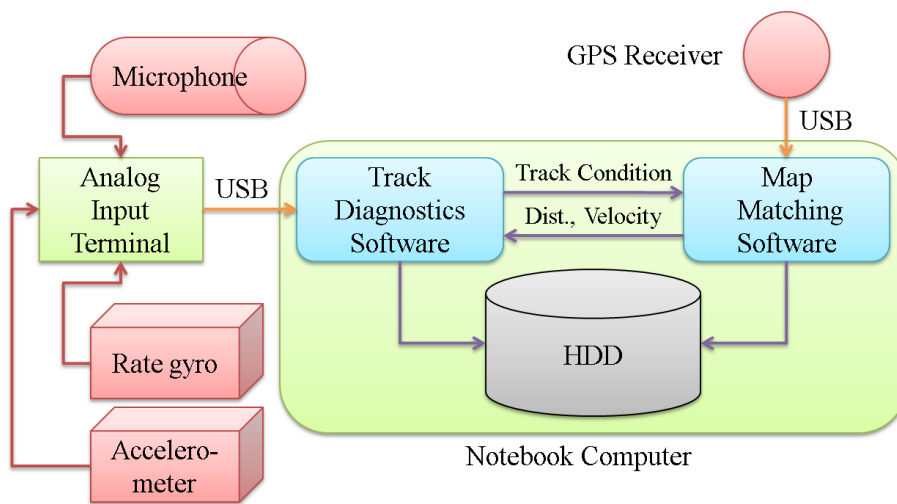


図 3.2.1: 先行研究における試作測定装置

3.2.2 列車位置・速度の検出

軌道異常の情報を鉄道事業者に適切にフィードバックするためには、軌道異常の発生箇所をより正確に掴む必要がある。そのため、併せて車両位置を特定する必要があるが、営業運転中の車両速度や位置を正確に測定する場合、一般的には車軸端に設置された速度発電機によって測定される。しかしながら、その情報を得るためには機器箱との接続が必要であり、また、正確な位置情報を得るためには厳密な車輪径の管理が必要など、既存の装置による車両位置の測定には、特に地方鉄道において多くの課題がある。そのために、車両との接続を必要とせず、準天頂衛星等により今後位置精度向上が期待される衛星測位技術 [49] を活用することで、オールインワンの測定装置が構築可能である。

試作測定装置については、比較的安価な GPS 受信機を採用しているため、GPS の測位データの空間的補正及び時間的補正が必須である。

(1) 空間的補正

GPS による測位データは誤差を生じているため、マップマッチング補正を行う。図 3.2 に示すように、あらかじめ路線形状のデータ緑線を作成しておき、GPS の測位座標（赤印）から直近の路線上に補正する（青印）。補正した座標を、路線の基点からの距離に換算する。

GPS の測位は、1 秒間隔で行われるため、その間の位置を、速度 $v(t)$ の積分値を用いて推定する。時刻 $t = t_G$ で GPS により求めた距離 x_G から現在時刻 $t = \tau$ の距離 $x(\tau)$ を次式より求める。

$$x(\tau) = x_G + \int_{t_G}^{\tau} v(t) dt \quad (t \leq \tau) \quad (3.2.1)$$

ここで、速度 $v(t)$ も同様に予測する必要がある。GPS から速度情報も 1 秒間隔で得られるため、その間の速度を、加速度センサによる前後加速度 $a(t)$ の積分値を用いて推定する。ただし、GPS の速度情報は 2 秒程度の時間遅れを持つため、時刻 $t = t_G$ で GPS により得られた速度 v_G から現在時刻 $t = \tau$ の速度 $v(\tau)$ を次式より求める。

$$v(\tau) = v_G + \int_{t_G-2}^{\tau} a(t) dt \quad (t \leq \tau) \quad (3.2.2)$$

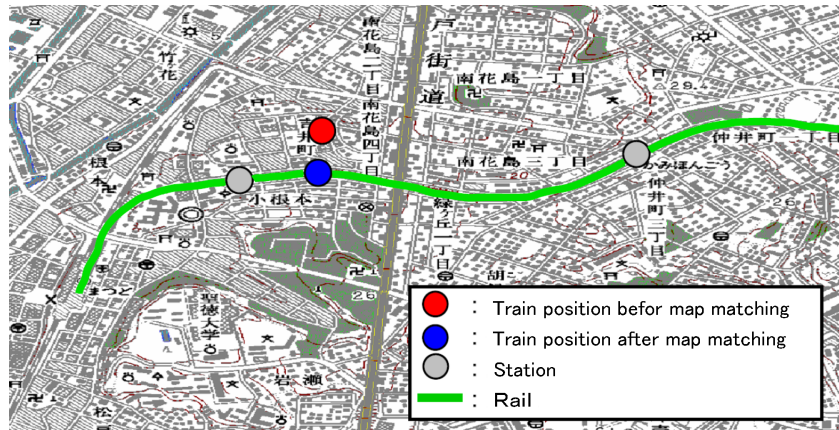


図 3.2.2: マップマッチング補正

3.2.3 試作測定装置による軌道異常の検出

試作測定装置の外観と内部をそれぞれ図 3.2.3, 図 3.2.4 に示す。構築したプローブシステムを乗務員室内の運転台の近くに設置, GPS 受信機を車内窓枠に固定し営業路線を走行した。図 3.2.5 に実験の状況を示す。

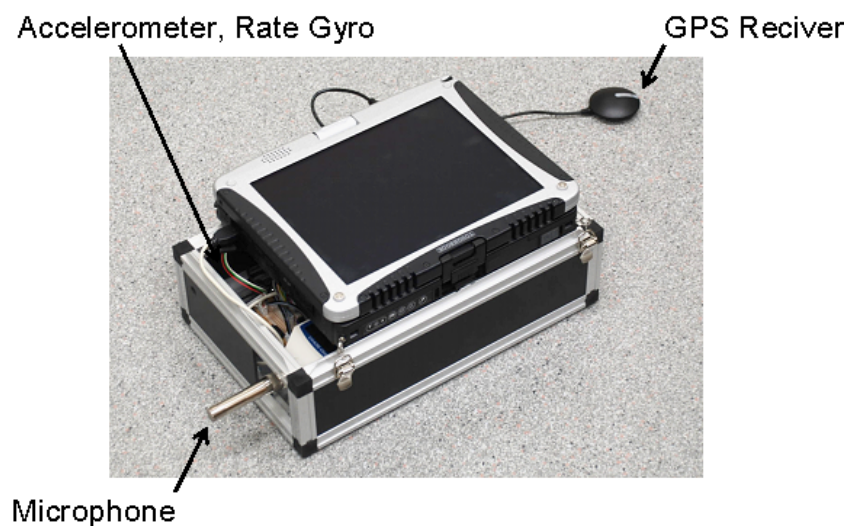


図 3.2.3: 試作測定装置の外観

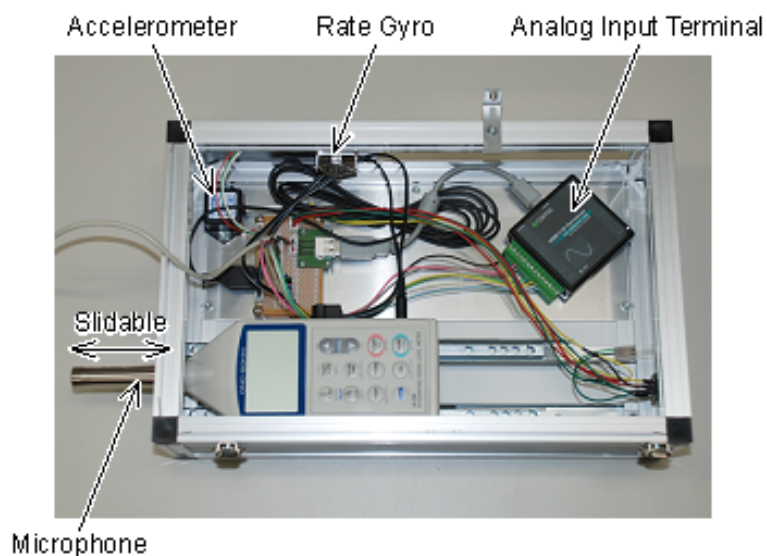


図 3.2.4: 試作測定装置の内部



図 3.2.5: 営業路線における測定の様子（試作測定装置）

試作測定装置による試験結果について示す。比較的大きな車体上下加速度 RMS 値を測定した区間を図 3.2.6 に示す。縦軸は車体上下加速度 RMS 値で、横軸は GPS の測位データから補正されたキロ程である。車体上下加速度 RMS 値が著大であるほど、軌道状態が悪化していると考えられる。

そこで、特に RMS 値が著大である箇所(図 3.2.6 の○で囲われた部分)に徒歩による現地調査を行った。その結果、道床碎石に土が混入し、道床とレール間に隙間が複数箇所が発生していた(図 3.2.7)。このような状態を浮きまくらぎ(図 3.2.8)と呼び、浮きまくらぎが発生すると車両が通過する際、レールの沈下によりたわみが発生しレールを痛めるため、安全上大きな問題となる。

現地調査の結果、車体上下加速度 RMS 値が著大な箇所で軌道異常が発見された。このことから、車体振動の振幅を示す RMS により軌道異常の発生箇所を特定できることができ、軌道異常が発生している地点情報を鉄道事業者へフィードバックすることができた。

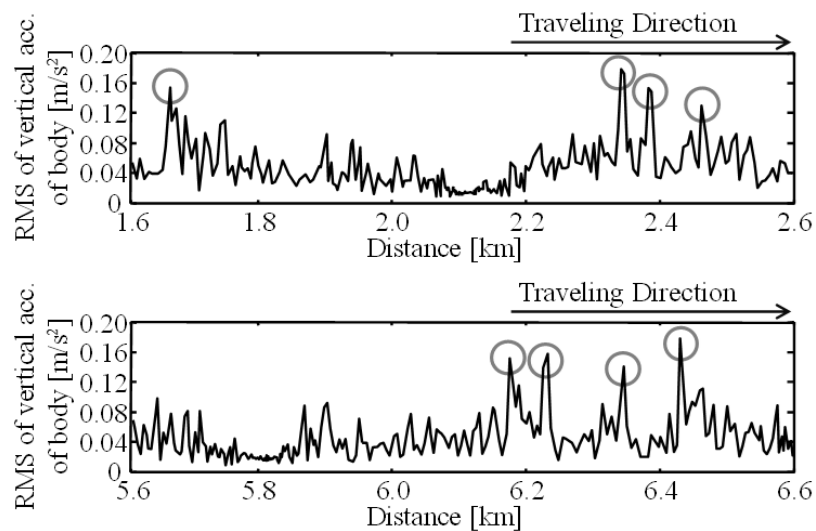


図 3.2.6: 上下加速度 RMS 値



図 3.2.7: 浮きまくらぎ

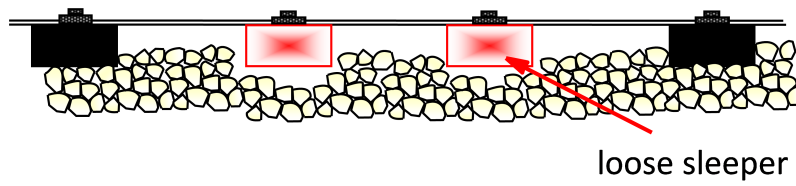


図 3.2.8: 浮きまくらぎの概要

3.2.4 確認された課題

試作された測定装置においては、オールインワンの構想にて製作され、顕著な軌道異常を検知できたことから、本研究における基礎的な知見を得るという点で一定の成果を挙げた。しかしながら、営業路線において高頻度で測定し、信頼性の高いレール診断の結果を鉄道事業者へフィードバックするためには課題が認められた。ハードウェアに起因する課題とソフトウェアに起因する課題に分けて、以下に整理する。

<筐体等ハードウェアに起因する課題>

(1) 設置可能箇所の限定

営業車両で測定する装置としては大きく、測定車両によっては測定可能な位置が運転士の荷物台付近に限定されるなど、乗客が触れられる位置への設置を余儀なくされ、監視要員が必要となる。

(2) 連続測定時間が短い

ノートPCのバッテリーを各種センサ装置の電源としていたため、平均測定時間が1時間程度、最大でも2時間程度であった。また、電源断となった際に、測定データの破損が確認された。

(3) 低耐久性

回路基板とセンサ部分が密閉されておらず、経年劣化等による接触不良などにより、測定中にソフトウェアが異常終了することが確認された。

(4) 測定データの信頼性

回路設計において、センサのゼロ点電圧をPCバッテリーの電源電圧の中心電圧(2.5V)としていたため、電源電圧の変動に起因すると推察される測定データのドリフトが確認された。

<測定機能等ソフトウェアに起因する課題>

(1) 測定操作に熟知したオペレータが必要

オペレータは起動、測定、データの保存等の操作を行う必要があり、操作に不慣れな鉄道事業者(車掌、保守員等)が単独で運用を行うことが困難である。

(2) 測定データの回収が煩雑

測定データの保存先をHDDのみに限定していたため、測定データを回収するためには、ノートPCを立ち上げて外部メディアに移し変える作業が必須であった。マニュアルを作成し、鉄道事業者へ回収を依頼したが、負担が大きいとの指摘があった。

(3) 測定データの破損

電源断による測定データの破損とは別に、軌道異常検出ソフトと列車位置推定・マップマッチングソフト間の通信エラーによる破損が確認された。これは、オペレータの通信設定誤りの他、想定していない信号が送信されてきた際の例外処理漏れに起因すると推定される。

3.2.5 課題への対策

前述の問題点を踏まえ、市場に投入できる製品として新たに設計製作するにあたっては、下記の対策を満たすことを基本として、次項以降でハードウェア及びソフトウェアの再検討を行う。

<ハードウェアに関する対策>

(1) 測定装置の小型化

座席下や機器箱への設置を目的として測定装置の小型化を図る。特に高さ方向への影響が大きいモニタ装置をオプションとし、動作確認ランプの導入や保存されたデータを容易に取り出す手段を検討する。

(2) 消費電力の低減及び外部給電の追加

消費電力の最も大きいモニタ装置や、測定事業者が限られる騒音計等をオプションとすることで、通常測定時の省電力化を図る。また、完全なオールインワンではなくなるが、車両から給電を受けられるケースが見受けられたため、外部からの給電を受ける方式を検討する。

(3) 耐久性の向上

回路基板やセンサを密閉された筐体の内部へ収納する。ただし、発熱については十分に検討を行う。

(4) 回路設計

長期間の安定した測定を実現するため、使用環境を考慮した設計を検討する。

<ソフトウェアに関する対策>

(1) 自動又は簡単なスイッチ操作での測定

オペレータの操作を省略するため、測定装置は電源を投入された場合、自動的に測定を開始するとともに、電源断を検知した際もデータを破損せずに測定を終了することとする。スイッチ操作による測定の場合は、電源のON・OFFのみスイッチ操作を許容する。

(2) 測定データの自動転送

ハードウェアに関する対策(1)で示した、データを容易に取り出す手段の他、携帯電話回線を利用して測定データを自動で外部のデータサーバ

等へ転送する機能の追加を検討する。

(3) 測定用ソフトウェアの統合

軌道異常検出ソフトと列車位置推定・マップマッチングソフトについては測定項目を整理し，ソフトウェアを一本化する。

3.3 ハードウェアの検討

3.3.1 筐体設計と基本仕様

筐体については装置全体の小型化のため，回路基板の高密度化による小型化を基本に，バッテリーなどの必要部材を高密度に実装することとした。この場合，回路の発する熱が問題となるが，筐体全体を放熱器（アルミ筐体）として利用することで解決した。

また，筐体を車両に固定しない場合，がたつきや筐体が移動してしまうことにより測定データへ影響を与えることが懸念される。そこで，筐体の足部分に高さ調整・傾き調整を付加，装置全体の重心を低く設計，車両との設置面へ滑り止めといった対策を行い，筐体を固定しなくとも測定ノイズが増大しない設計とした。

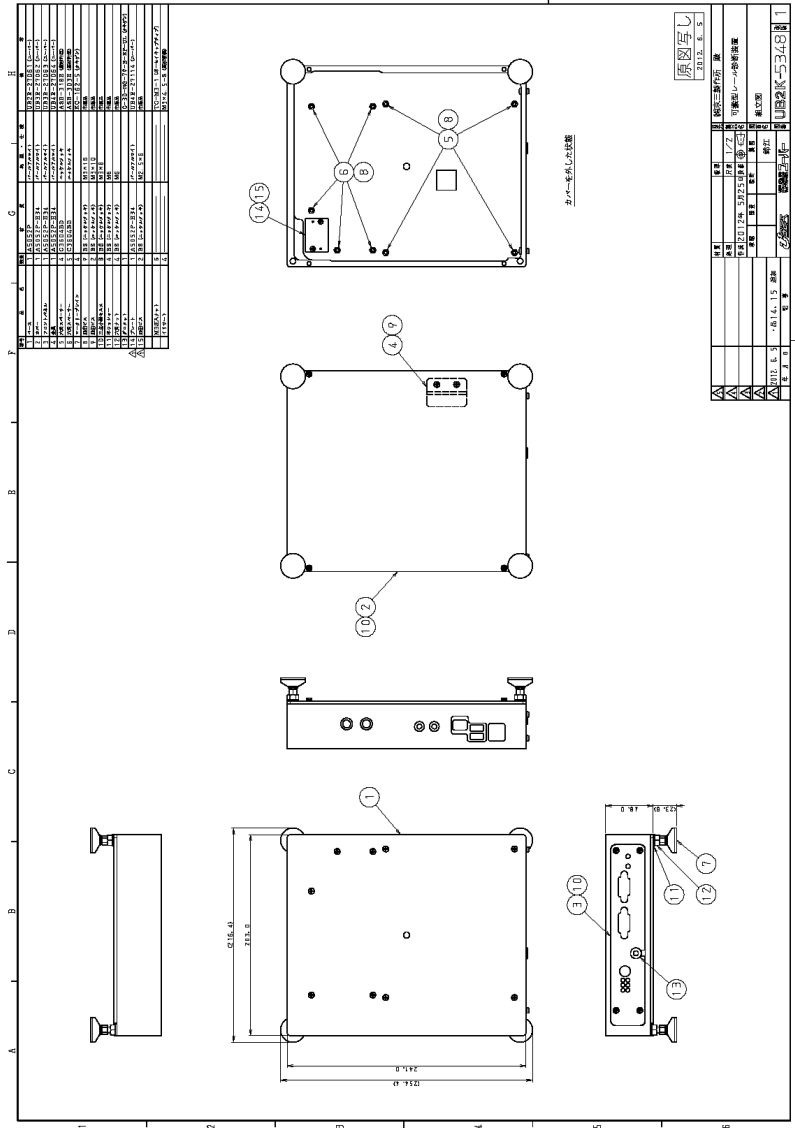


图 3.3.1: 筒体寸法図 (上面)

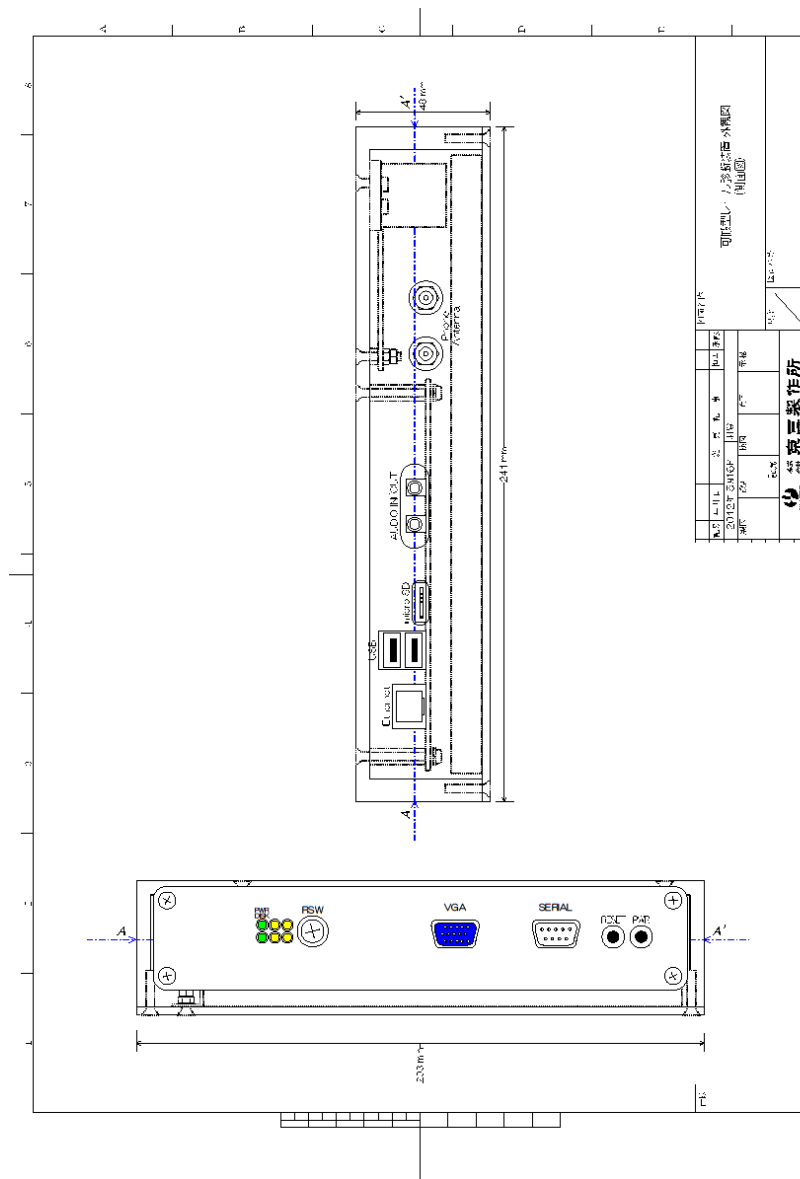


图 3.3.2: 筐体寸法图 (横面)

回路設計は、外来ノイズ、温度、振動など、使用環境を十分考慮して長期安定動作を実現できるように行った。また、高性能CPUの採用、センサを別基板としてローノイズ化し、基本性能の向上を行った。また、使用部品は、長期安定供給できるものを選定した。

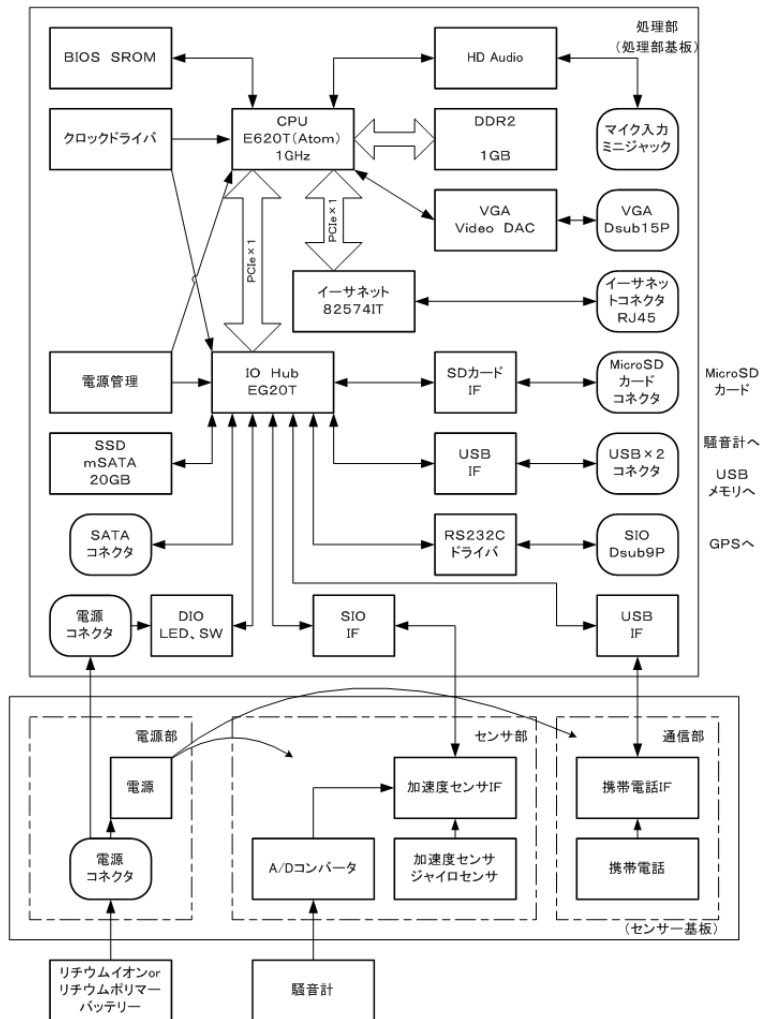


図 3.3.3: 回路設計

3.3.2 測定用センサ

測定用センサについては、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による加速度センサ及びジャイロが一体型の慣性センサを採用し、小型化を図っている。また、使用用途が限定される騒音計をオプションとして外部接続とすることで、筐体のさらなる小型化に成功した。表 3.3.1 に本論文において採用した 6 自由度慣性センサの特性を示す。慣性センサが故障 (正しい値を出力しない, そもそも出力がない等) した場合, 軌道異常が不検出となることが最悪事象として挙げられる。本研究においては, 常に測定データをモニタリングし前回測定データとの比較することで, 軌道異常と誤検出するものの, センサ故障は検出可能である。ただし, 緩やかにセンサ出力値が減少する等, 故障検出が困難であるケースが考えられるため, 複数のセンサにて出力値を相互にチェックするなどの対策が必要である。

GPS については, 今後の商品開発が見込まれるため, 特定の受信機を採用するのではなく, 様々な受信機を検討できるように, 対応する I/F を有する設計とした。表 3.3.2 に本論文において採用した GPS 受信機の特性を示す。

表 3.3.1: 6 自由度慣性センサ (ADIS16362)

	ACCELEROMETERS	GYROSCOPES
Dynamic Range	$\pm 1.7 \text{ G}$	$\pm 75^\circ$
Offset error	$\pm 0.003 \text{ G}$	$\pm 0.114^\circ$
Gain error model	$\pm 0.009 \text{ G}$	$\pm 0.375^\circ$
Sampling frequency	0.4Hz~820Hz	0.4Hz~820Hz

表 3.3.2: GPS 受信機 (FV25RS)

GPS receiver	
Receiving sensitivity	-149dBm
Sampling frequency	4Hz, 1Hz

3.3.3 電源

電源については、可搬型のリチウムイオンバッテリー駆動 (DC12V, 最大約 6 時間) による測定方式と、常設型の車両給電 (AC 100V~200V) を受けて測定する方式が選択可能とした。バッテリー駆動については、試作機と同様に車両と完全に非接続で稼働する。車両より給電を受ける方式では、給電された時点で装置が起動し、自動で測定が開始される。

3.3.4 保存メディア

測定された測定データについては、ソリッドステートドライブ (SSD) に記録され、microSD カード等により容易に取り出しが可能である。また、microSD カードに直接保存することも可能で、オプションとしたモニタを接続しなくともデータの抜き取りが可能である。

3.3.5 動作確認用 LED ランプ

ソフトウェアが正常に動作、記録していることを確認する LED ランプを筐体側面に配置することで、モニタによる確認を不要とした。

(出力内容)

左上：OS 起動

左下：アクセスランプ

中上：電源管理

中下：センサ情報取得

右上：GPS 取得
右下：ソフトウェア起動

正常に動作しているときの LED の様子を図 3.3.4 に示す。



図 3.3.4: LED ランプの外観

3.4 ソフトウェアの検討

本研究で目標とする軌道診断サイクルを実現するためには、前述のような測定装置の小型化や信頼性向上などのハード対策だけでなく、測定の自動化（無人化）やデータ転送の自動化を実現する必要がある。

本項では、営業車両における車上測定を自動化するために、測定装置に必要なソフトウェア機能について検討すると共に、測定装置への反映状況について述べる。

3.4.1 測定データ容量の削減

測定装置の当初設計においては、1 分間の測定データが約 8MB と、ファイル容量が膨大（1ヶ月の測定で 200GB 以上）であり、データ転送及びデータ回収期間延長の障害となっていた。

そこで、保全する測定項目を選択制とし、必要の無い項目は破棄することで測定データのファイル容量を削減し、解析に必要な項目のみを記

録する機能を追加した。

また、車両から給電を受ける常設型については完全自動測定を実現したが、起動と同時に測定を開始し電源断まで連続して測定を行うと、列車が営業走行をしておらず、車庫やホームで待機している間も測定が行われる。そこで、タイムスケジュール機能を追加し、測定開始時刻及び終了時刻を設定できるようにした。

3.4.2 データ転送機能

セキュリティ確保のため専用回線を契約するなど、若干のインフラ設備が必要であるが、データ転送モジュールを組み込み、携帯電話回線を通じて測定データを遠隔地のデータサーバへ転送することを可能とした。また、解析する軌道異常は低周波領域に限定(軌道不整等)されるものの、サンプリング周波数を 820Hz から 82Hz までダウンサンプリングすることで、データ転送の負荷を低減することも可能である。近年、急速に発達しているクラウド技術については、セキュリティへの懸念の声があるものの、診断データの共有化など軌道診断サイクル実現のためのツールとして有効であると思われる。

3.5 新しく開発した測定装置

3.5.1 装置外観

構築された測定装置の構成を図 3.5.1, 装置の外観を図 3.5.2 に示す. 比較のため試作測定装置の寸法を図 3.5.3 に示す. 測定装置はソフトウェアやセンサ類を統合し, 試作機に対し設置面積比で 40 %程度低減し, A4用紙より一回り小さい大きさとなった. また, 大きな課題となっていた高さ方向の寸法も 180mm から 72mm と半分以下になり, 大幅な小型化を実現した.

図 3.5.4 に示す可搬型装置は, バッテリー駆動で最大 6 時間連続測定をすることができるため, 車内に置くだけで無人で車両の動揺測定が可能である. さらに, 電源ユニットの交換により常設型 (図 3.5.5) への換装が可能で, 車両から電源の供給を受けることで, 常時測定も可能である.

測定データの収集に関しても, microSD カードなどの記録メディアへ書き出す機能や, 携帯電話回線を利用して自動的にサーバに伝送する機能を有している.

オプションとしてモニタ, カメラ及び騒音計を取り付けることが可能であり, また, 車内騒音から波状摩耗の状態を診断することも可能である.

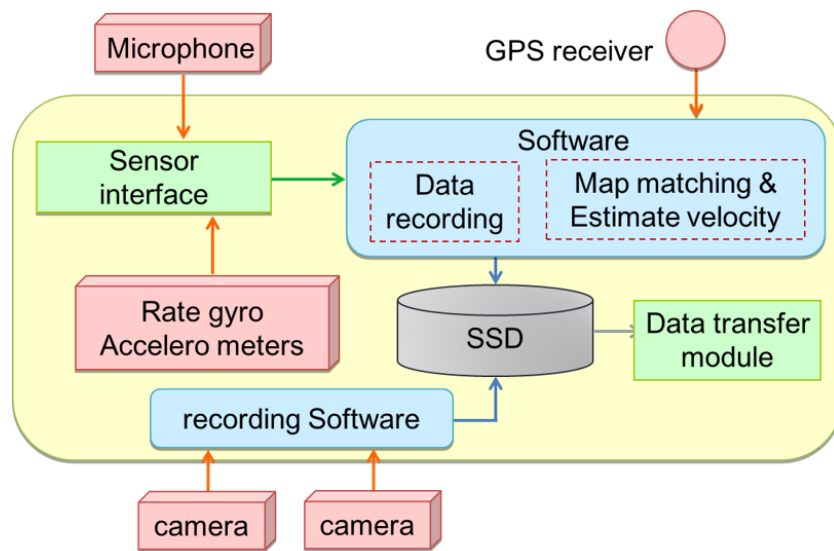


図 3.5.1: 測定装置の構成

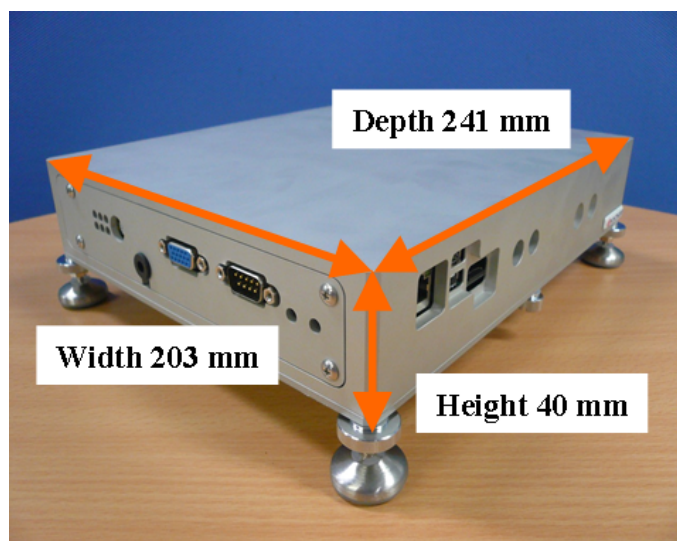


図 3.5.2: 測定装置の外観及び寸法

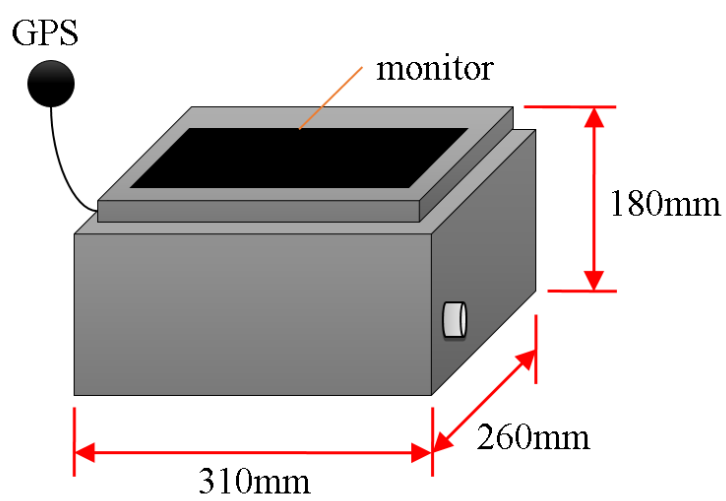


図 3.5.3: 試作装置の設計寸法



図 3.5.4: 可搬型 (バッテリー駆動)



図 3.5.5: 常設型 (車両給電)

3.5.2 加振試験機における検証

測定装置の取得データを検証するため，交通安全環境研究所（交通研）の所有する加振試験機（3軸方向に任意の振幅，周波数で加振可能）にて，今回の測定装置と校正済3軸加速度計にて，測定結果の比較を行う試験を行った．加振試験機の様子を図3.5.6に示す．加振試験機はドライビングシミュレータに用いられる6軸アクチュエータ方式の加振試験機を使用した．

Installation position

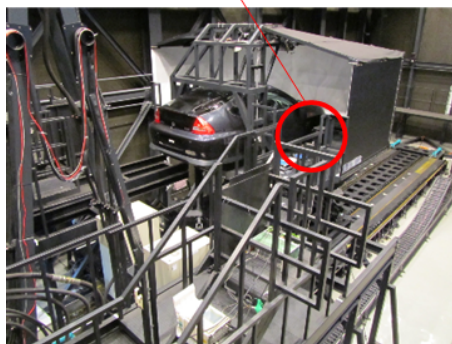


図 3.5.6: 加振試験機の外観



図 3.5.7: 加振試験機への設置状況

試験条件としては，加振方向は軌道の状態診断に用いる横方向（y 方向）と縦方向（z 方向）とした．加振は振幅 50mm，周波数 0.7Hz の正弦波と設定した．

図 3.5.8 に上下加速度測定データの比較結果を，図 3.5.9 に左右加速度測定データの比較結果を示す．校正済 3 軸加速度計の測定データはアナログ値で出力される．測定結果を見ると，入力した 0.7Hz 程度の正弦波に加えて，上下では周期的なインパルス波形が見られ，左右では高周波振動がみられるが，これは加振試験機の特徴であると考えられる．

校正済加速度計と新規測定装置の測定結果を比較すると，測定装置の上下加速度において，若干ノイズが大きくなっているが，振幅，周波数共に良く一致していることが分かる．

以上のことから，測定装置に採用した加速度センサの精度が確認された．

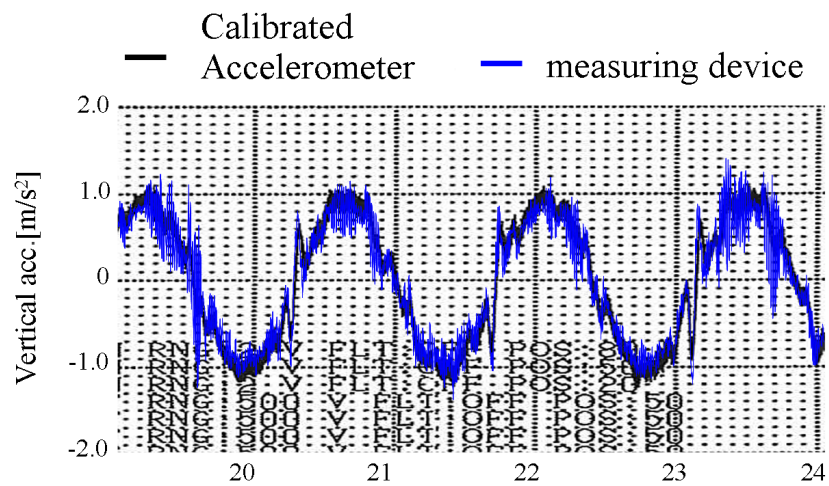


図 3.5.8: 上下加速度の比較

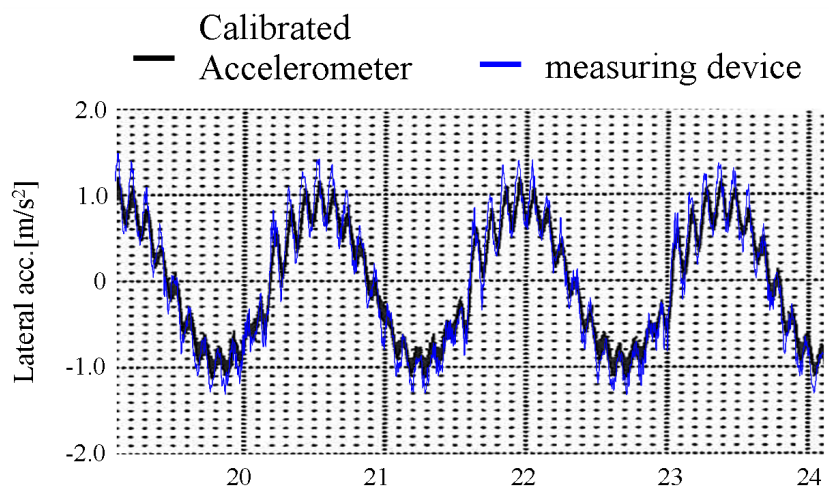


図 3.5.9: 左右加速度の比較

3.6 まとめ

本章では、先行研究において使用した試作機を用いて、営業路線において測定を実施し、装置の問題点を抽出した。次に問題点を解決するために、新しく開発する装置の基本仕様を検討し、製作を行った。

開発した装置の評価を行った結果、開発された測定装置は以下の性能を有し、実用化及び広域への普及を目指した製品水準に到達していることを確認した。

- (1) 小型の測定装置で、運転席下のスペースや機器箱の中等様々な場所へ設置可能
- (2) 自動または簡単なスイッチ操作にて測定が開始され、専門の測定員が不要
- (3) 測定データを携帯電話回線による自動転送または microSD により回収することが可能

第4章 軌道状態監視システムの構築と営業路線における評価

4.1 はじめに

第2章において、車体振動から軌道異常が検出できることを確認した。また、第3章において軌道診断に必要な情報を測定する測定装置を新たに開発した。本章では、それらの結果の統合的な検証を行うために、構築した軌道状態監視システムを営業車両において適用し、軌道異常検出の実証試験を実路線において行う。

また、事業者協力のもと軌道整備を行った前後において軌道評価を実施しその結果について報告すると共に、軌道の経年変化の予測手法について検討を行う。

4.2 軌道状態監視システム

測定部で車体の状態量を得るために、本論文の第3章において新たに測定装置を開発した。開発した測定装置については、自動でデータの収録が可能であり、測定データを携帯電話回線により伝送する機能も有しており、第1章で設定した基本機能を有している。次に、解析部については、第2章において軌道不整を車体動揺から評価する手法の提案を行い、これらの評価手法を組み込んだ軌道診断ソフトについて説明した。本章までに構築された軌道状態監視システムを反映させた、軌道診断サイクルについて図4.2.1に示す。

開発した軌道状態監視システムの有効性については、評価結果が軌道保守計画に反映され、適切な軌道補修に繋がっているか、長期間数多くの測定を実施し、測定→解析→異常発見→保守→測定…といった軌道診

断のサイクルが実現して初めて示すことができる。

本章では、鉄道事業者協力のもと、構築した軌道状態監視システムを使用して営業路線において蓄積したデータから、軌道異常の発見及び軌道保守効果評価を行った。

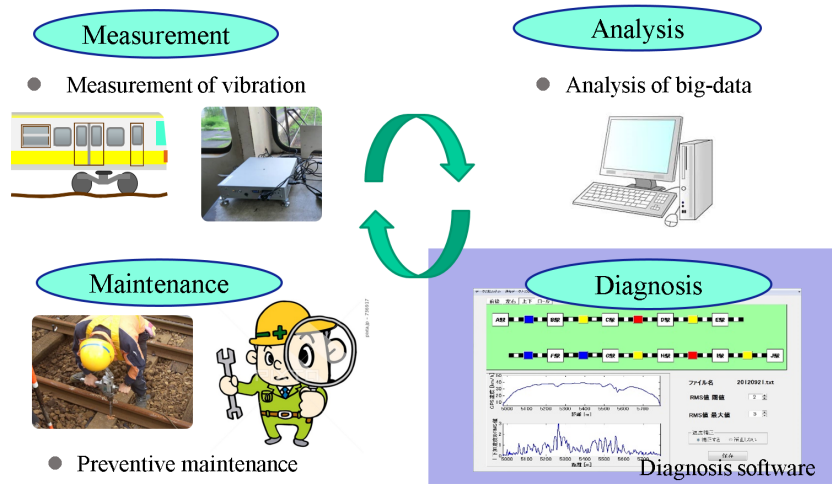


図 4.2.1: 軌道診断サイクル

4.3 路線Aにおける評価事例

関東地区において軌道状態監視システムを導入し検証した結果について述べる。営業列車における測定試験は2015年2月21日から同年3月24日の間まで約1ヶ月間連続して行った。路線Aにおいては車両からの給電が可能であったため、常設型を運転室内の床面に固定し、車両の通電と同時に自動で測定が開始されるよう設定した。測定装置の設置状況を図4.3.1に示す。路線Aにおける一日の測定では、平均8往復程度の測定データを得ることができ、2週間に一度の車庫へ入庫したタイミングで測定データを回収した。

本項では測定データの評価事例を示すために、下り走行の結果についてまとめる。

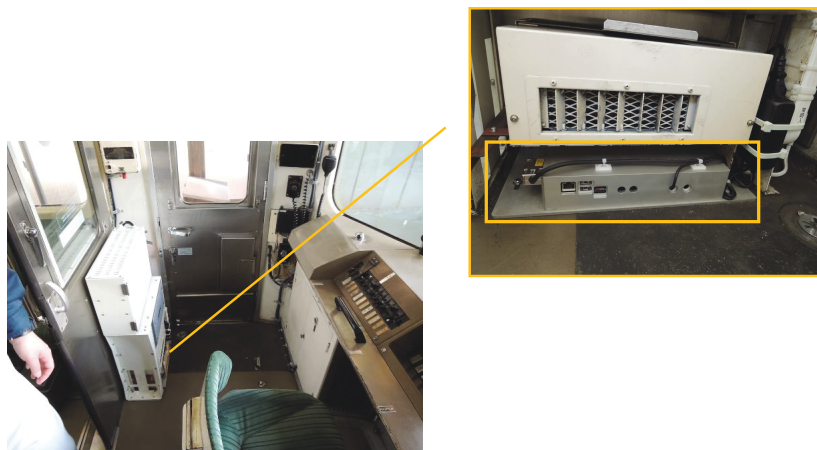


図 4.3.1: 測定装置設置状況（路線A）

4.3.1 測定データの再現性

測定データのうち車両動揺（車体上下加速度，車体左右加速度，ロールレイト）について，その測定値に再現性が確認されるか検証を行う．一般的に軌道は一ヶ月程度では大きく変動しないと考えられ，また，営業列車は運転曲線に従って走行するため，各ポイントにおける通過速度は概ね一致しているが，著しい速度差が確認された測定値は除外している．

住宅街を走行するため多くの曲線を通過する区間Aについて，測定結果の中から代表し2月22日，3月8日，3月21日に測定した結果を図4.3.2に，測定結果のRMS値を算出した結果について図4.3.3に示す．

車体上下加速度及びRMS値については，ピーク位置について高い再現性を確認できる．また，加速度の大きさについて若干の差異は確認できるものの，RMS値に着目すると全てのケースで要注意箇所が特定出来る．

車体左右加速度及びRMS値について比較すると，ピーク位置はずれ，上下動と同時に測定した結果であるにも係わらず，再現性は比較的低い結果となった．特に駅周辺の低速域においてその傾向は顕著である．

また，左右加速度では曲線方向等の情報が読み取れるものの，RMS値を見ると変化の著大値は容易に探索が可能となるが，曲線の左右方向といった情報が失われることに注意が必要である．

車体ロールレイト及びRMS値については，波形は良く一致しているものの，ピーク値についてはややばらつきが大きい．このばらつきが大きい箇所は4070m地点や4220m地点といった左右加速度が著大となる箇所と一致しており，左右動がロールレイトへ強い影響を与えていることが判明した．そのため，ロールレイトを解析する際には左右加速度についても併せて考察する必要がある．

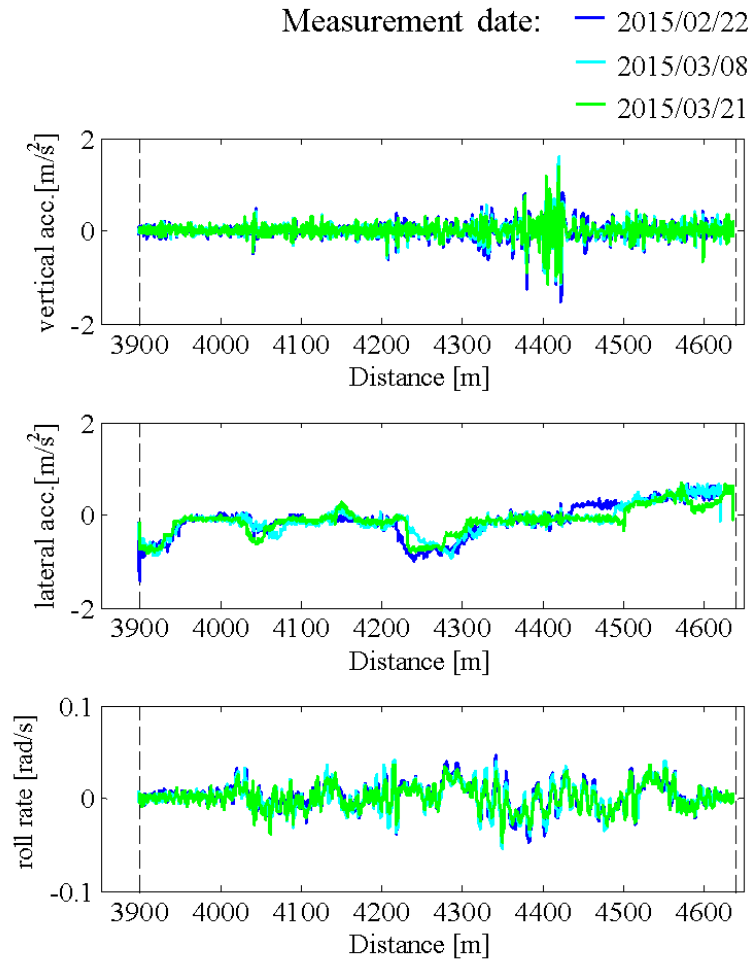


図 4.3.2: 車体動揺の測定結果 (区間A)

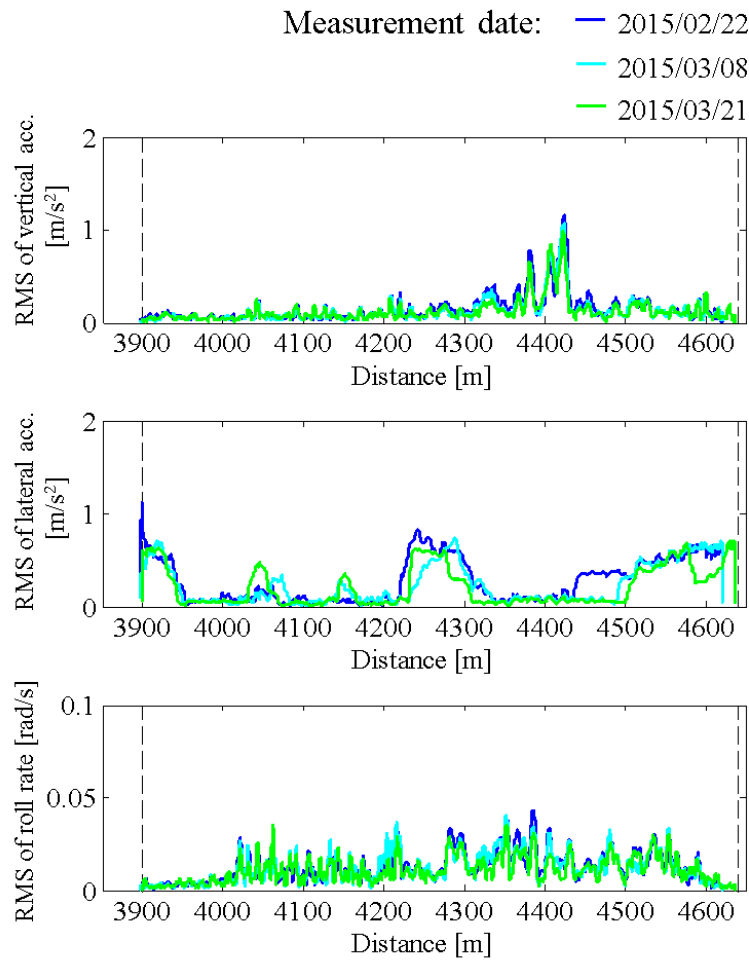


図 4.3.3: 車体動揺の RMS 値測定結果 (区間A)

主に直線区間を走行する区間Bについて、区間Aと同様に2月22日、3月8日、3月21日に測定した結果を図4.3.4に、測定結果のRMS値を算出した結果について図4.3.5に示す。

車体上下加速度及びRMS値については、区間Aピーク位置について高い再現性を確認できる。RMS値に着目することで要注意箇所が特定出来ることも一致している。

車体左右加速度及びRMS値については、直線を走行している9300m～9600mの区間と急曲線が確認されている9700m地点の何れもずれが確認され、上下加速度と比較すると再現性が低い結果となっている。しかしながら、測定回数を多数重ねることにより、揺れの最大値の推移を捉えることは可能である。ただし、キロ程のずれが確認されるため、軌道異常を特定するために現地調査を行う際は、50m程度周囲の状況を確認する必要がある。

車体ロールレイト及びRMS値については、3回の測定において波形が良く一致しており、さらにB区間においてはピーク値についても再現性が高いことが確認される。9330m地点においては踏切が確認されており、強いロールレイトが確認されるものの、本装置の設置位置では左右動にさほど影響を与えておらず、区間Aにおける左右動とロールレイトとの関連とは異なり、ロールレイトの発生が左右動へ強く影響しないことが確認できる。

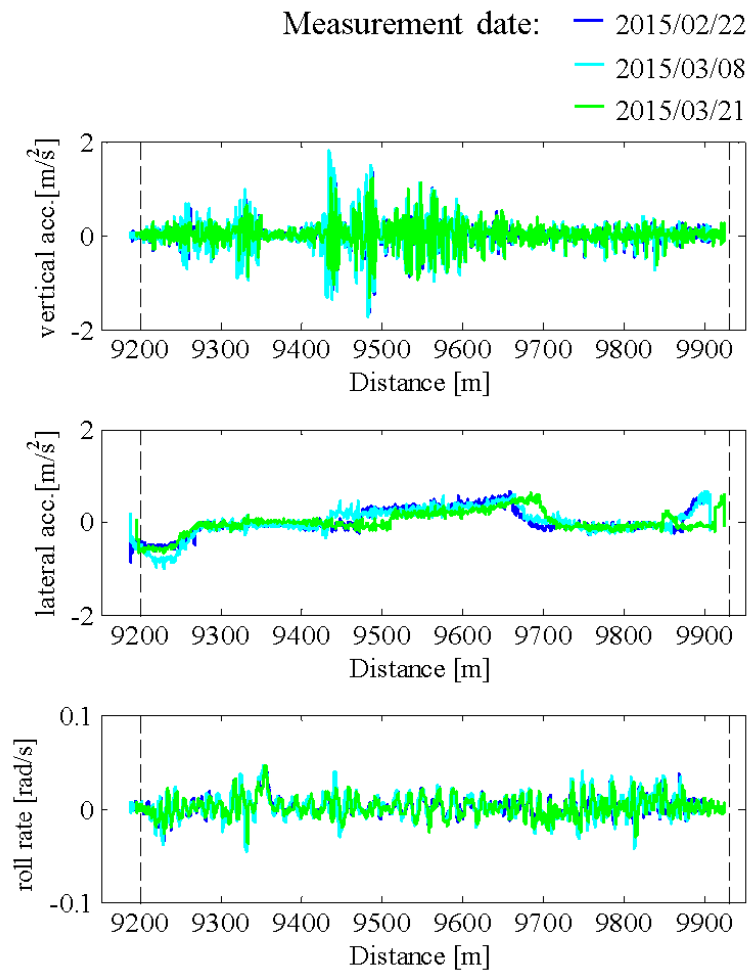


図 4.3.4: 車体動揺の測定結果 (区間B)

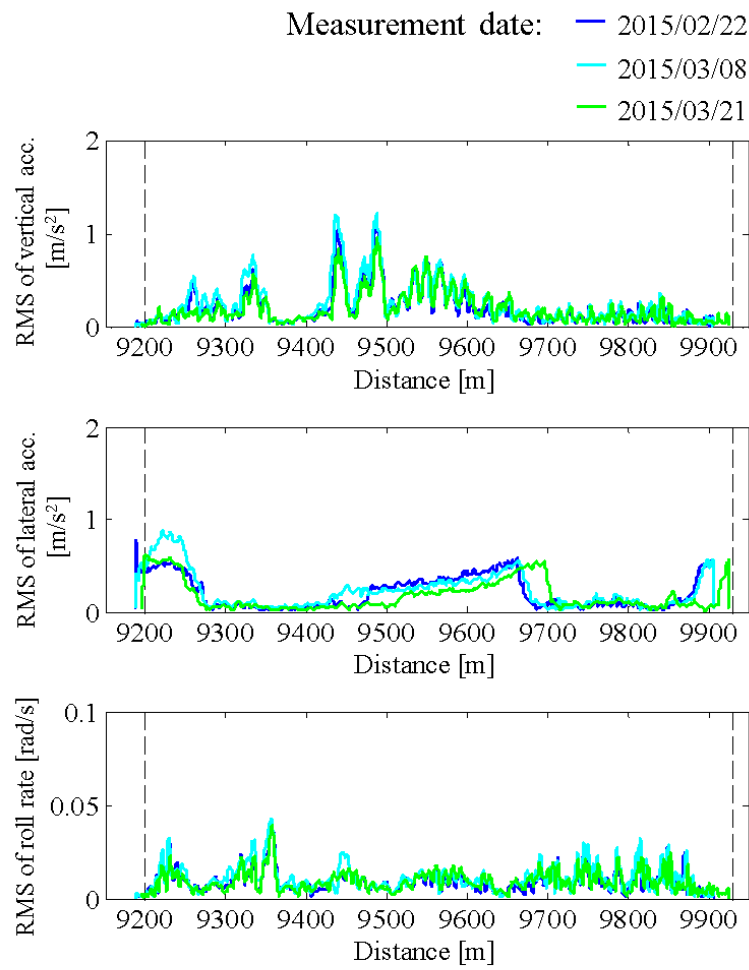


図 4.3.5: 車体動揺の RMS 値測定結果 (区間B)

4.3.2 要注意区間の現地調査

前節の結果から上下加速度の RMS 値については，その高い再現性から要注意区間の特定ができる可能性を示した．そこで，本節では上下加速度 RMS 値が高い区間を現地調査し，軌道異常の特定が可能であるかどうか検討を行う．

一ヶ月間の測定結果から一例として同日に測定した 4 走行分の車体上下加速度を図 4.3.6 に示す．図中の A～O は駅の位置を示しており横軸は基点となった駅からのキロ程である．

図 4.3.6 より，同日に測定した車体上下加速度の値には大きな差異は確認できず値が著大となっている地点も一致していることから測定値に再現性があることが確認できる．

試験より得られた車体上下加速度の結果に対して，信号処理を実施し，軌道異常の検出を行う．図 4.3.7 に測定結果の中から代表して 2 月 22 日，3 月 8 日，3 月 21 日に測定した車体上下加速度を示し，その RMS 値を図 4.3.8 に示す．

図 4.3.8 において，上下加速度 RMS 値の閾値を 1.0m/s^2 とした場合，C-D 駅間，G-H 駅間，N-O 駅間において閾値を超過していることがわかる．そこで，これらの 3 区間を本路線における要注意区間と設定し，離散ウェーブレットによる評価を含めて軌道状態を推定し，現地調査を実施する．

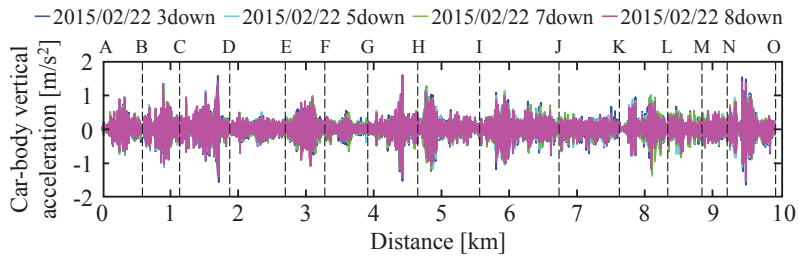


図 4.3.6: 同日の車体上下加速度の測定結果 (A-O 駅間)

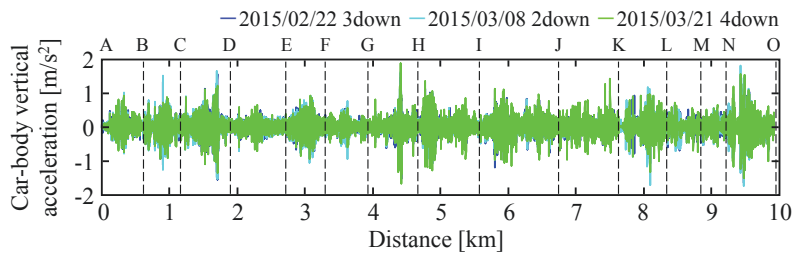


図 4.3.7: 車体上下加速度の推移 (A-O 駅間)

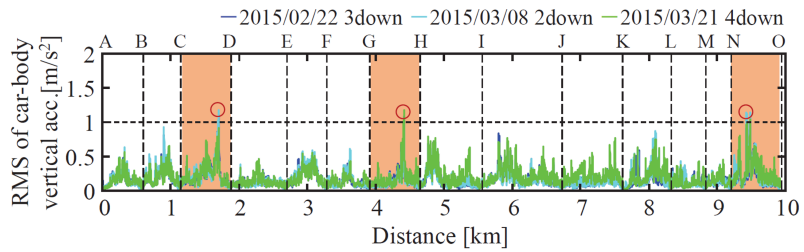


図 4.3.8: 車体上下加速度 RMS 値の推移 (A-O 駅間)

要注意駅間（C-D 駅間，G-H 駅間，N-O 駅間）の測定値である車体上下加速度とその RMS 値，異常が確認された地点の航空写真をそれぞれ図 4.3.9，図 4.3.10，図 4.3.11 に示す。

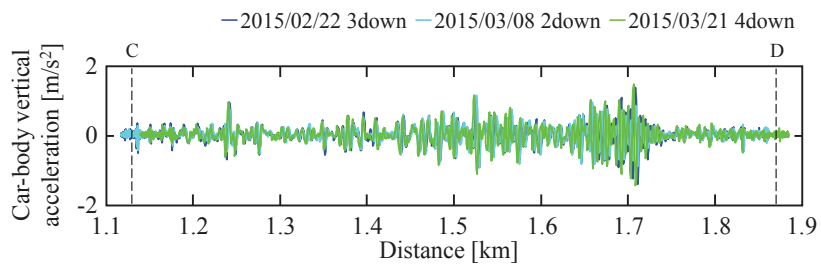
まず，C-D 駅間を詳細に見ると図 4.3.9 (b) の RMS 値から C-D 駅間で閾値を超過していた地点は 1.7km 地点であることがわかる。D 駅から約 150m 手前のこの地点を航空写真（図 4.3.9 (c)）及び現地調査で確認したところ，踏切設置箇所であることがわかった。踏切構造については，自動車の通過による荷重に耐えるため，比較的強くて硬い素材にて構成されることから，十分に衝撃が道床に吸収されず，高い上下加速度が確認される傾向にある。また，自動車が頻繁に通過する踏切においては，軌道に断続的な荷重がかかるため適切なメンテナンスが重要である。

図 4.3.8 に示したように，他の踏切区間と比較しても著大な車体上下加速度 RMS 値が確認されていることから，本踏切には保守上の注意が必要である。

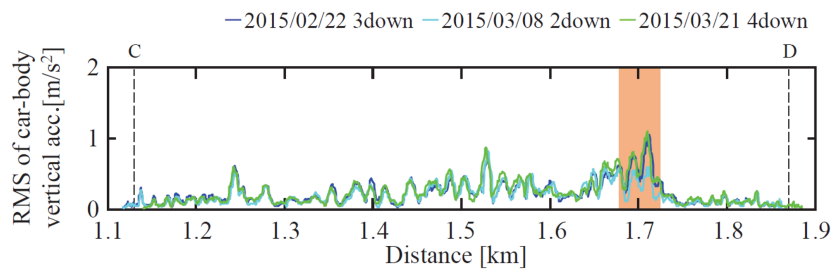
図 4.3.10 に示した RMS 値から G-H 駅間の閾値を超過していた地点は 4.4km 地点付近であることがわかる。航空写真（図 4.3.10 (c)）及び現地調査にて H 駅から 200m 手前の地点を確認すると踏切など軌道構造の違いは見られなかった。目視による調査では特段の異常は見られなかった。そのため，本地点については動的荷重がかかった際に沈み込みが発生する，継ぎ目落ちや浮きまくらぎといった軌道異常が発生している可能性が考えられる。

要注意区間として設定した最後の N-O 駅間については，車体上下加速度の RMS 値である図 4.3.11 (b) から RMS 値著大箇所は 9.4km 地点から 9.5km 地点の間に 2 地点あることが確認できる。航空写真（図 4.3.10 (c)）から，C-D 駅間と同様に一つは踏切通過の影響であることが判明した。

しかし，RMS 値からはこれらの地点の異常の種類を見分けることは困難であるため，GPS による測定誤差を考慮した場合，どちらの RMS 著大値が踏み切りを原因としているのかは，RMS による評価のみでは判断が難しい。



(a) Car-body vertical acceleration

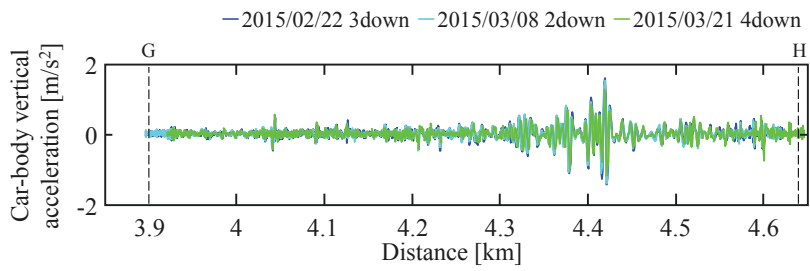


(b) RMS of car-body vertical acceleration

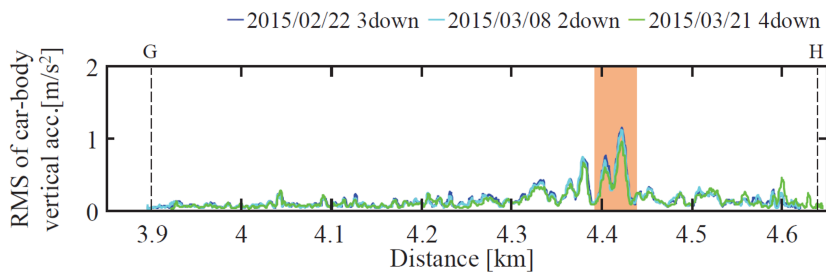


(c) Aerial photograph

図 4.3.9: C-D 駅間の解析結果



(a) Car-body vertical acceleration

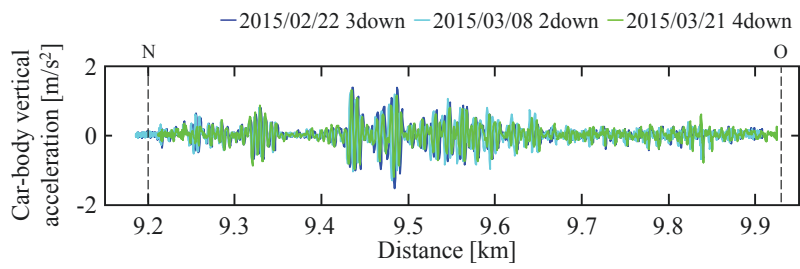


(b) RMS of car-body vertical acceleration

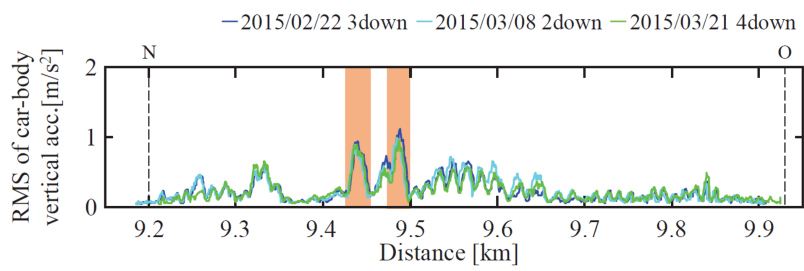


(c) Aerial photograph

図 4.3.10: G-H 駅間の解析結果



(a) Car-body vertical acceleration



(b) RMS of car-body vertical acceleration



(c) Aerial photograph

図 4.3.11: N-O 駅間の解析結果

そこで、離散ウェーブレット変換による多重解像度解析による軌道異常の分離する検討を行う（図 4.3.12）。多重解像度解析の結果（分解レベル $m_0 = 6$ ）から、9.4km~9.5km の間に注目すると、9.4km 過ぎの地点では d_2 , d_3 の周波数成分を多く含んでおり、9.5km 手前では d_1, d_2, d_3, d_4 の周波数成分を多く含んでいることがわかる。 d_2 , d_3 といった低周波の周波数帯域は車体の固有振動数とされる 1Hz 前後の周波数帯域と近いことから、9.4km 過ぎの地点では高低不整の影響が主であることが考えられる。9.5km 手前の区間に着目すると、 d_1 といった高い周波数成分が観測され、この周波数帯は継ぎ目落ちや段差といった要因による影響が現れることが、第 2 章における検討から明らかになっている。

この区間においても目視による現地調査を実施したところ 9.4km 過ぎの地点には踏切があり接続軌道が用いられていた（図 4.3.11 (c)）。接続軌道は通常の踏切と比べると剛性が高いため列車通過時の振動も大きい傾向にある。現地調査の結果、踏切を自動車が通過する度にレールが振動していることが観測されたが、継ぎ目落ちといった列車が大きく沈み込む異常は確認されなかった。

以上の結果から、9.4km 過ぎの RMS 値ピークは軌道による影響であり、9.5km 手前の RMS 値ピークは踏切通過後の継ぎ目付近で発生していることが判明した。

このことから、 d_1 成分に着目することで、通常の軌道不整と継ぎ目落ちといった軌道異常について、離散ウェーブレット変換を用いることで、軌道異常の要因分離ができる可能性を示した。

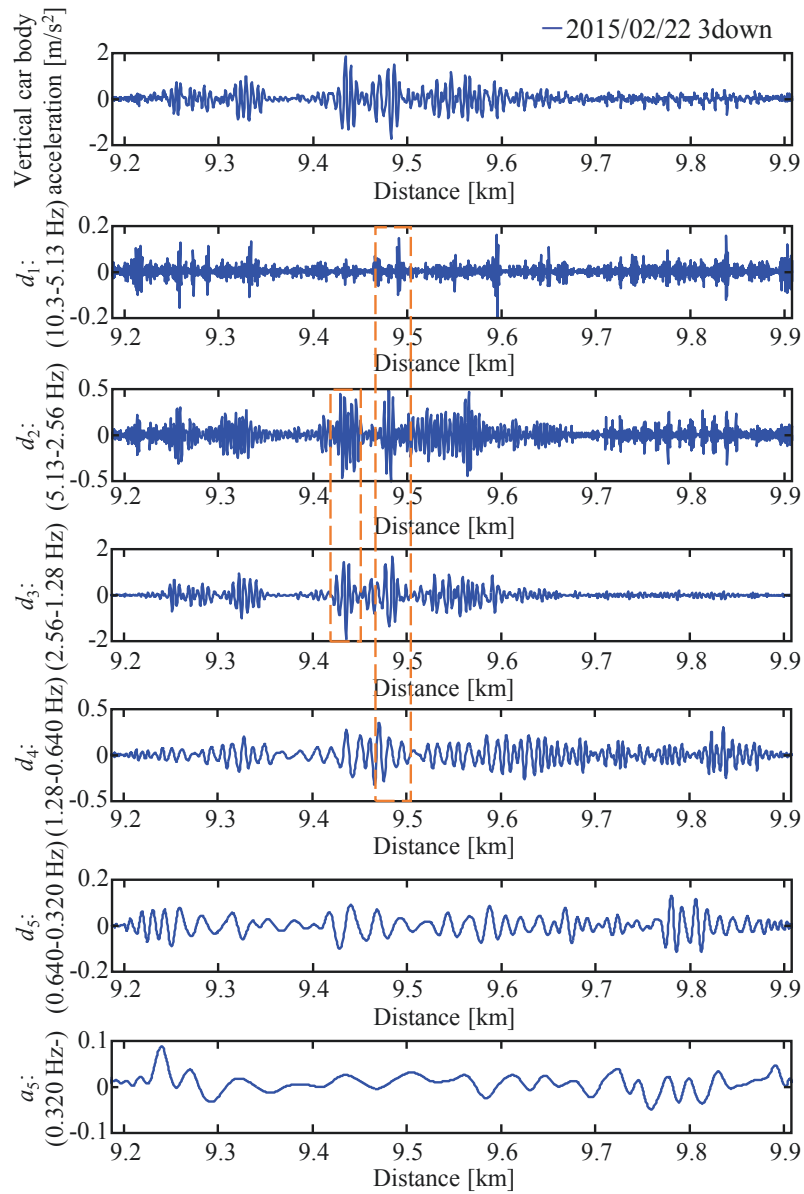
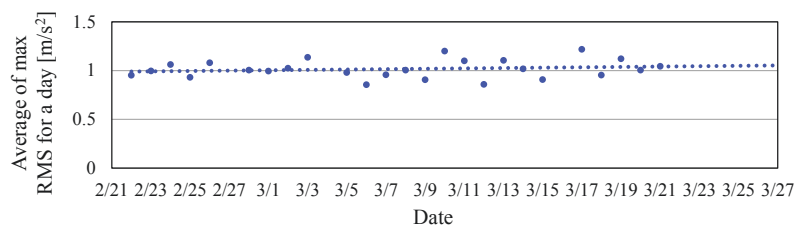


図 4.3.12: N-O 駅間の離散ウェーブレット変換結果

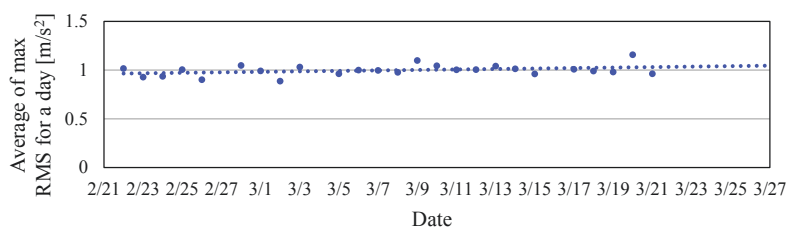
4.3.3 要注意区間における軌道監視と予測

最後に、要注意区間としたそれぞれの駅間（C-D 駅間，G-H 駅間，N-O 駅間）について，1日の RMS 値の最大値の平均値の推移を図 4.3.13 に示す．点線は各平均値の近似直線である．どの駅間においても RMS 値の平均値の推移は緩やかではあるが，増加傾向にあることがわかる．この近似直線を監視することで，適切なメンテナンス時期（例えば 1.3m/s^2 に到達する頃に軌道補修を実施する等）を定めたり，直線の傾きが急激に変化した際には緊急メンテナンスを実施したりといった対策が可能となる．

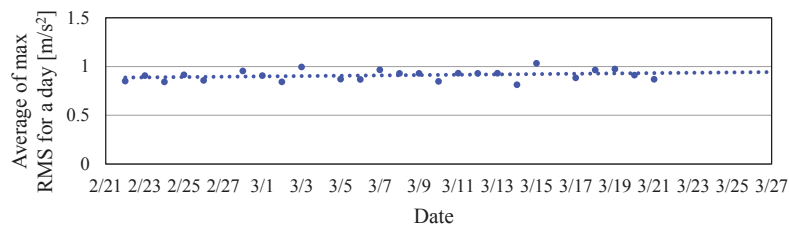
このように，長期的にかつ高頻度で連続的に軌道状態の経過を監視することが，軌道状態が悪化する前の潜在的リスクを予測することにつながる．ただし，軌道状態を予測するための適切な閾値を設定するためには，より長期間の測定と実軌道の観測を併せて実施することが必要である．



(a)C-D section



(b)G-H section



(c)N-O section

図 4.3.13: G-H 駅間の上下加速度 RMS 値の推移

4.4 路線Bにおける評価事例

本項では東北地区において、軌道状態監視システムを導入し検証した結果について述べる。本路線は、比較的直線区間が多く、曲線についても緩やかな曲線が中心である。本路線では2015年春に軌道検測が実施された後に2015年の5月から6月にかけて軌道整備が実施されている。

軌道検測は軌道検測車によって実施され、高低不整、通り不整、水準不整、軌間不整、平面性不整の5種類について調査を行った。管理基準値を超えるなど軌道保守が必要または要観察と診断された軌道不整について、図4.4.1にその種類と割合を示す。

注目すべき点は、軌道不整の86.3%が高低不整であり、軌間不整と合わせると97.3%と大部分を占める。軌間不整については、車体動揺から検出することは困難であるため、本項においては、高低不整に着目して検討を進める。

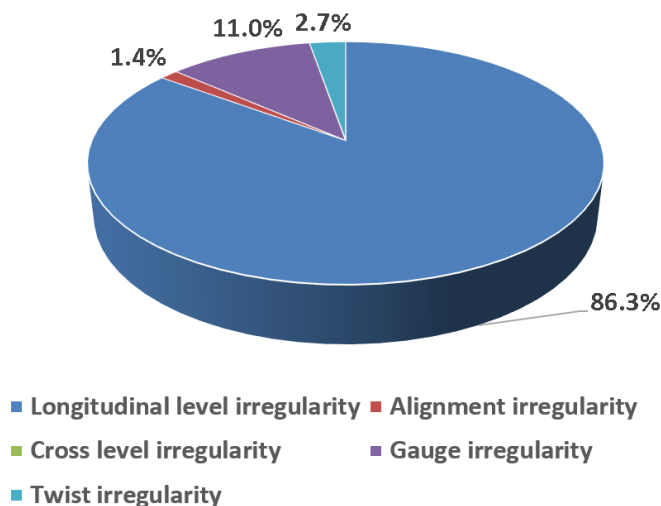


図 4.4.1: 路線Bにおける軌道不整の種類と割合

4.4.1 RMS 値による軌道評価

本節では 2015 年 5 月～12 月の間に実施された 5 回の測定結果について述べると共に、軌道保守前後の車上測定データと軌道保守に着目し、軌道保守の結果が車両振動へ反映されることを確認し、車体加速度 RMS 値による軌道評価が有効であることを検証する。

路線 B における測定装置の設置状況を図 4.4.2 に示す。使用した測定装置は可搬型であるが、測定車両及び測定場所を記録し、常に同一車両を使用して同一の位置で測定を実施している。

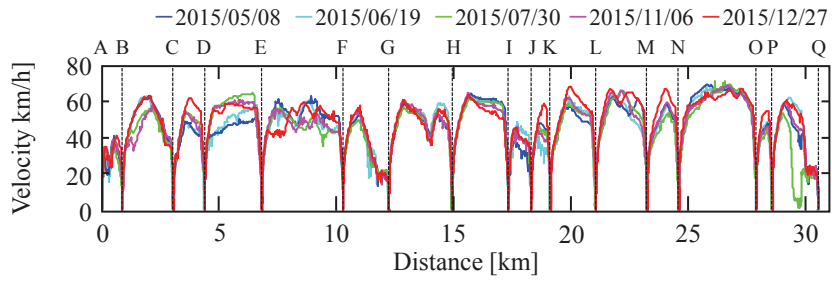
路線 B における全線の下り走行の測定結果を図 4.4.3 (A-Q はそれぞれ駅位置を表す) に示す。以後特段の表記が無い場合は下り走行の試験結果となる。ここでは高低不整に着目するため、車両速度、車体上下加速度、車体上下加速度 RMS 値をそれぞれ記載した。

車体上下加速度について着目すると複数の駅間で大きなマイナス値を示していることが分かる。これは、車体重量が軌道に負荷された際に軌道と車両が沈み、マイナス方向へ加速度が発生する典型例である。このような沈み込みが発生すると、繰り返しレールが曲げられ、徐々に軌道不整が拡大することが知られている。

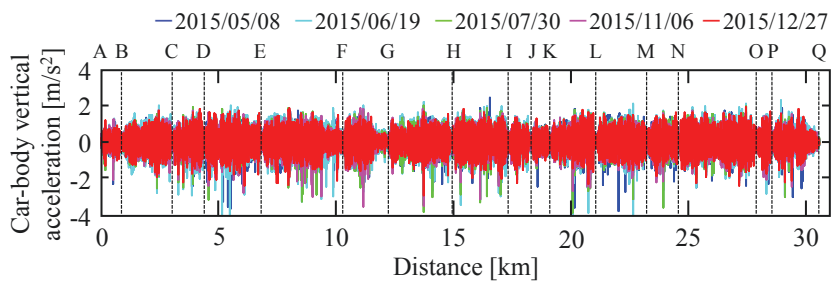
そこで、路線 B においては 2.0m/s^2 を大きく超える RMS 値を観測した、D-E 駅間及び L-M 駅間を対象として軌道保守前後の測定値を比較する。また、2015 年 12 月 27 日の測定において 2.0m/s^2 を超える RMS 値を観測した G-H 駅間については要注意区間として設定し、その地点について鉄道事業者へ報告した結果について述べる。



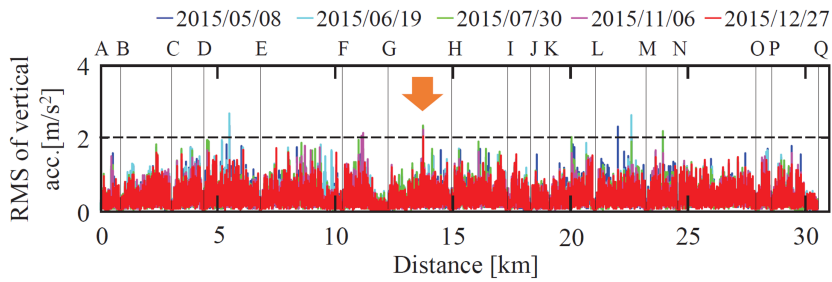
図 4.4.2: 測定装置設置状況 (路線B)



(a)Traveling speed



(b)Car-body acceleration



(c)RMS Car-body acceleration

図 4.4.3: 測定結果 (路線 B)

D-E 駅間の 2015 年 5 月 8 日及び 6 月 19 日の測定結果を図 4.4.4 に示す。4500 m 地点付近及び 6000 m 地点においては、比較的大きな RMS 値が確認されているが、1 ヶ月後に RMS 値が低減し、軌道保守が実施されたと推測された。実際に 4530 m～4650 m 区間及び 6030 m 地点を中心として高低不整が確認されており、5 月中旬に付近の軌道補修が実施されている。軌道保守が必要であると判断された区間と RMS 値が著大な区間が一致したことから、車体上下加速度 RMS 値は軌道保守を実施すべき箇所を特定するための有効な指標となることが示された。

また、今回 RMS 値の閾値を 2.0m/s^2 として要注意区間を設定したが、いずれの軌道保守区間も軌道保守が実施された時の RMS 値は $1.6\text{m/s}^2 \sim 1.8\text{m/s}^2$ (p-p 値で $3.5\text{m/s}^2 \sim 4.0\text{m/s}^2$) を超えた場合に実施され、軌道保守後は 1.5m/s^2 以下に抑えられていることが分かる。ただし、上記の判断基準によれば、5500 m 付近では 2.5m/s^2 を超える RMS 値が観測されており、軌道保守を実施する必要がある。

6 月 19 日及び 7 月 30 日の測定結果を図 4.4.5 に示す。軌道保守は 6 月末にも実施されており、著大な RMS 値が確認されていた 5500 m 付近も軌道保守 (5550 m～5580 m を中心) が実施されており、7 月 30 日時点の測定において RMS 値が 1.0m/s^2 以下に抑えられており、保守の効果が確認できた。

しかしながら、図 4.4.5 の 4500 m 付近に着目すると、一度は軌道保守により RMS 値が低減したものの、 2.0m/s^2 付近まで RMS 値が再び上昇していることが分かる。このような地点では、軌道不整を修正しても道床が弱いために再び軌道不整が急進し、著大な RMS 値が観測されていると考えられる。そのため、該当区間を要監視区間として、鉄道事業者へ診断結果のフィードバックを実施した。このような区間では道床の改善を目的とした保守が必要である。

以上のことから、長期間にわたって RMS 値と軌道保守の関連性についてのデータを蓄積することで、路線 B における最適なメンテナンス時期の決定、実施された軌道保守の評価、最適な保守方法の提案等の実現のために、軌道状態監視システムが有用であることが示された。

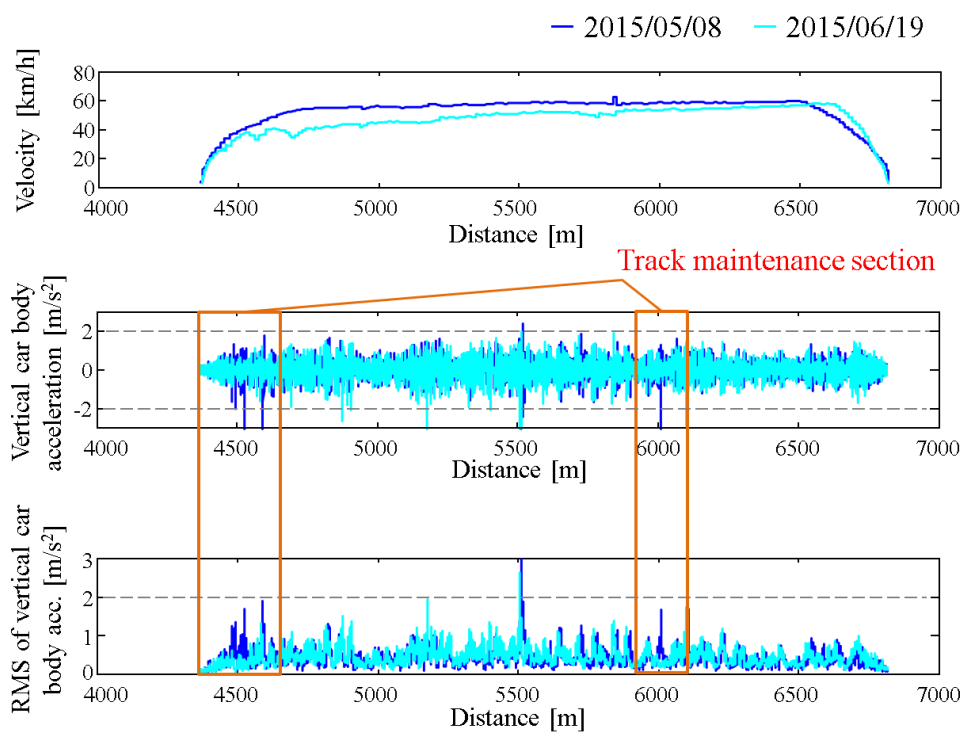


図 4.4.4: 2015 年 5 月の軌道補修前後の測定結果 (D-E 駅間)

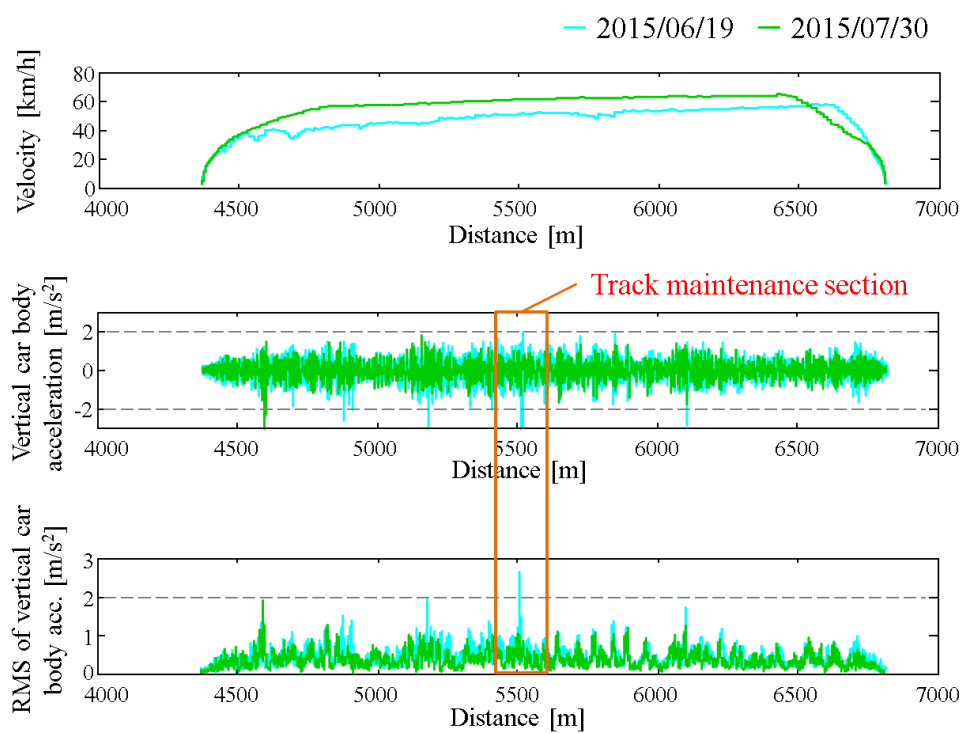


図 4.4.5: 2015 年 6 月の軌道補修前後の測定結果 (D-E 駅間)

次に、L-M 駅間において5月の軌道保守前後に測定した結果について、図4.4.6に示す。軌道検測の結果から21300 m～21700 m区間、22000 m～22100 m区間及び23110 m地点において高低不整が確認され、5月に軌道整備が実施され、上下加速度 RMS 値の減少が確認された。

一方で、22600 m～22700 m区間において 2.3m/s^2 を超える著大な RMS 値を観測しているが、軌道検測車による測定結果で異常が確認されておらず、軌道保守は実施されていない。L-M 駅間は田畑が周囲に広がる駅間であるが、該当箇所については、比較的交通流が多いと思われる県道と交差する踏切が存在することが確認され、上下不整以外の要因によって RMS 値が著大となっている可能性があると考えられる。当該区間はその他の踏切道と比較しても顕著な値であるため、鉄道事業者に要注意区間として報告した。

最後に、全ての測定において 2.0m/s^2 を超える著大な RMS 値を観測した G-H 駅間の測定結果について図4.4.7に示す。該当区間において、軌道検測の結果では特段の異常は検出されていないが、鉄道事業者と協議した結果、当該地点は河川上を通過する橋梁付近であり、橋梁の前後は地盤が軟弱で、憤泥が頻出する区間であることが判明した。実際に、14220 m 及び14550 m周辺では軌道整備が順次実施されており、RMS 値の減少が確認されている。

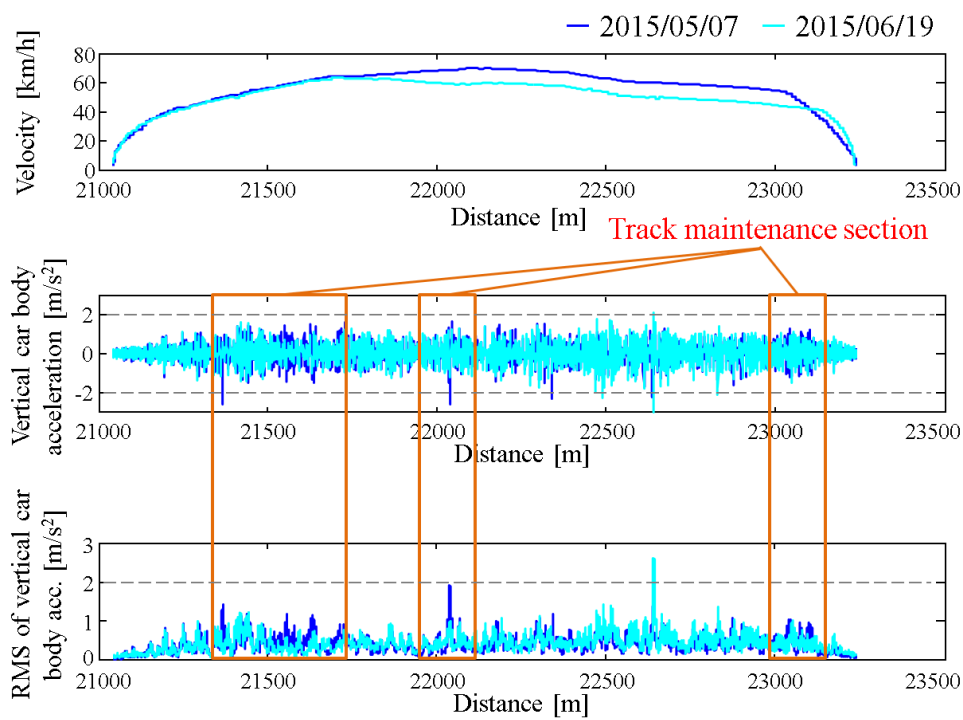
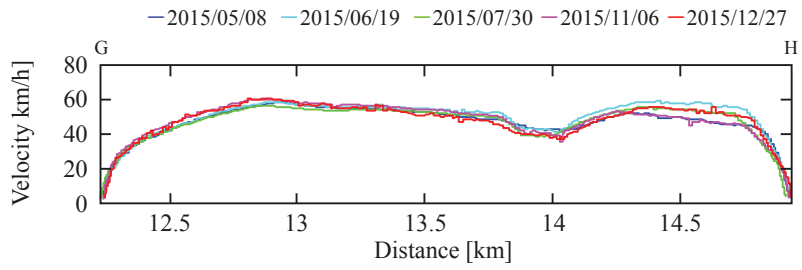
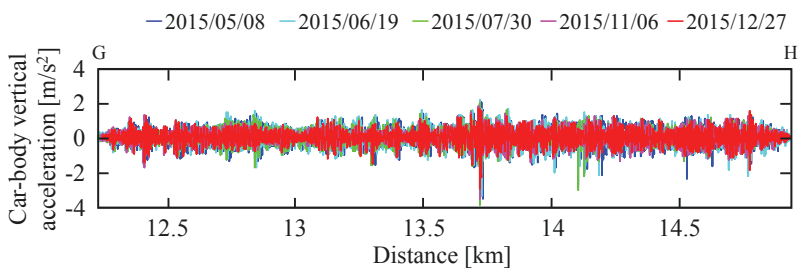


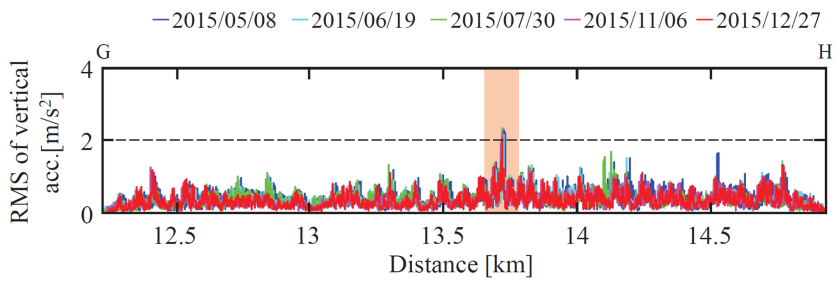
図 4.4.6: 2015 年 5 月の軌道補修前後の測定結果 (L-M 駅間)



(a)Traveling speed



(b)Car-body acceleration



(c)RMS of car-body acceleration

図 4.4.7: 測定結果 (G-H 駅間)

4.4.2 逆解析による軌道不整推定の検討

2章で述べたカルマンフィルタを用いた逆解析による軌道不整の推定を、路線Bの一区間において実施した。本節では推定結果について説明する。

推定に使用するための車両モデルパラメータの設定を以下に示す手順で行った。

1. 測定したデータの中から直線区間の一部車体振動加速度と走行速度を抽出する。
2. 実車走行試験を行う路線の実測の軌道形状模擬するため、乱数を発生させることで、10m弦正矢による高低不整に換算したときに実測の軌道不整に近い振幅を持つ軌道形状データ（波長6m以上）を作成する。
3. 2.の軌道形状データと1.の速度データを車両モデルに入力し、鉛直方向の車体振動加速度を計算する。
4. 1.の車体振動加速度と3.で計算した車体振動加速度の振幅特性を求める。
5. 車両モデルの各パラメータを変えながら3.と4.を繰り返す、試行錯誤的に最も周波数特性に近いパラメータを求める。

上記フローにて決定した各パラメータを用いて計算した車体振動加速度の振幅特性を図4.4.8に、決定した車両モデルの各パラメータを表4.4.1に示す。

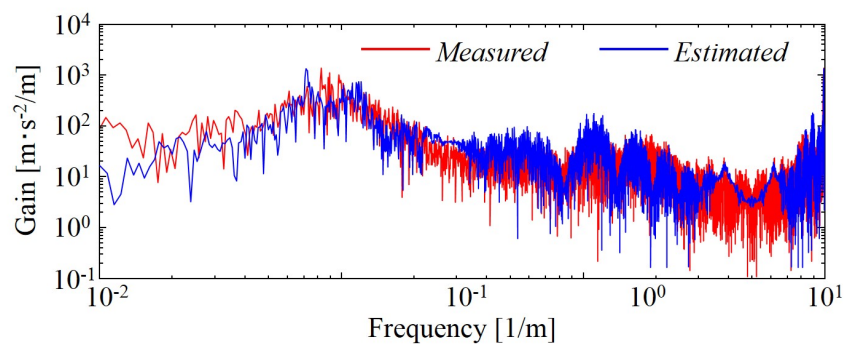


図 4.4.8: 振幅特性

表 4.4.1: 車両モデルパラメータ

Symbol	Description	Unit	Value
m_c	Car-body mass	kg	24900
m_t	Truck mass	kg	2800
I_c	Car-body pitch inertia	kgm ²	567520
I_t	Truck pitch inertia	kgm ²	2268
$2l_c$	Car-body base	m	13.0
$2l_t$	Wheel base	m	1.8
k_p	Primary suspension vertical stiffness	kN/m	16960
k_s	Secondary suspension vertical stiffness	kN/m	600
c_p	Primary suspension vertical damping	kNs/m	39.2
c_s	Secondary suspension vertical damping	kNs/m	12

図4.4.9に推定に用いた車体振動加速度，図4.4.10に走行速度を示す．使用した測定データは直線区間500mを用いた．カルマンフィルタを用いて実測の車体振動加速度から推定した高低不整を推定した結果を図4.4.11に示す．図4.4.11(a)が推定した高低不整（左右レールの平均値），図4.4.11(b)が実測の10m弦正矢による高低不整である．推定におけるシステムノイズ w_n および観測ノイズ v_n の分散はそれぞれ $\sigma_w^2 = 1.00 \times 10^{-1} \text{m}^2$ ， $\sigma_v^2 = 5.00 \times 10^{-3} (\text{m/s}^2)^2$ とした．

JRの4級線の軌道整備基準値を1つの目安とすると，高低不整の整備基準値は静的値で22mm[50]であり，高低不整がその付近の値を示す箇所が要注意箇所である．図4.4.10より，推定した高低不整は実測の高低不整と比較して差異は見られるが，実測の高低不整において高い値を示す箇所はおおよそ推定できていると考えられる．

営業列車を用いた高頻度測定により，このような要注意箇所の高低不整の変化を監視することを考えると，実測データにおいても有効であることが期待できる．

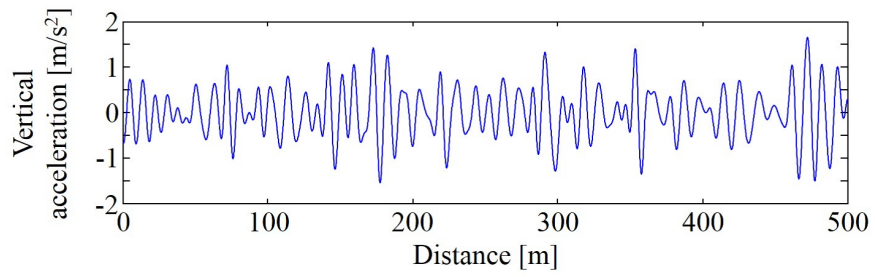


図 4.4.9: 測定された車体上下加速度

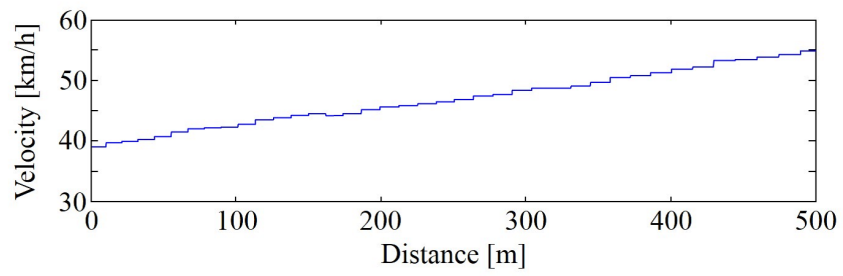
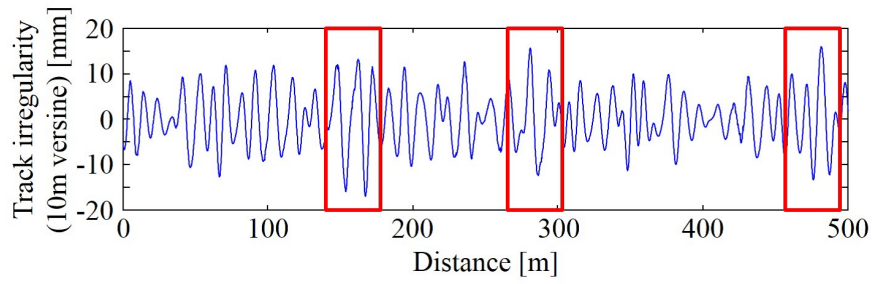
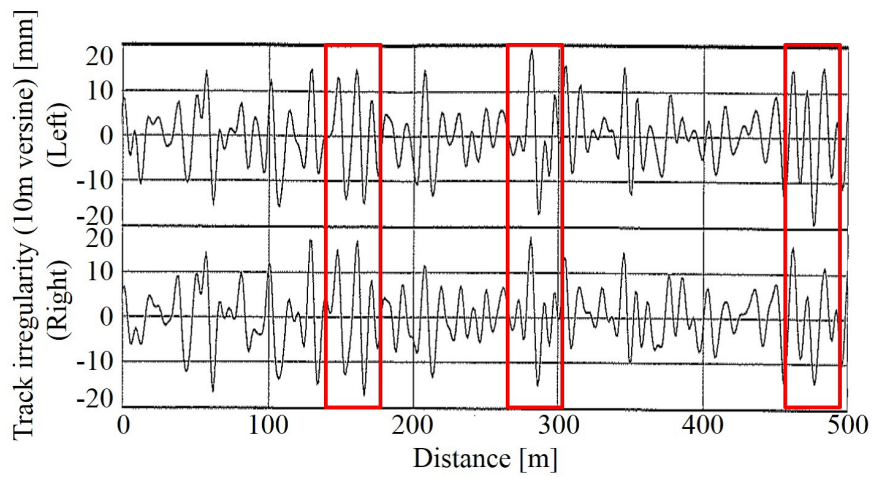


図 4.4.10: 測定された列車速度



(a) Estimated track irregularity



(b) Measured track irregularity

図 4.4.11: カルマンフィルタによる軌道不整推定値

4.5 路線Cにおける評価事例

関東地区の路線Cにおいて軌道状態監視システムを導入し測定した結果について述べる。本路線については、第1章で紹介した地方鉄道の典型的な線区であり、前述の2路線と比較して様々な軌道異常が確認されている。

そこで本項では、軌道状態監視システムにより発見された軌道異常について検証するとともに、種々の軌道異常がどのような車体動揺に影響を与えているのか、現地調査の結果と測定データを比較することにより考察する。



図 4.5.1: 測定装置の設置状況（路線C）

4.5.1 軌道異常の発見と軌道保守例について

路線Cにおける測定装置の設置状況を図 4.5.1 に示す。可搬型の測定装置を使用し、数年に渡る長期間測定を実施している。

測定結果の一例として、2013年2月1日の測定結果について図 4.5.2 に示す。本路線においては、 2.0m/s^2 を超える RMS 値を観測した区間を要注意区間として報告するとともに、RMS 値のグラフを示して軌道保守計画に関しての協議を実施している。

RMS 値が 2.0m/s^2 を超える区間において現地調査を行い、現地において撮影した様子を図 4.5.3～図 4.5.6 に示す。図 4.5.3 に示すような状態を「浮きまくらぎ」と呼び、浮きまくらぎが発生すると車両が通過する際、レールの沈下によりたわみが発生、レールを痛めるため安全上大きな問題となる。まくらぎとレールは通常碎石に支えられているが、土が混入し、道床とレールの間に隙間が発生する。碎石部分に土が混入する要因としては、図 4.5.4 に示すように土砂が台風や豪雨等により流入してくるケースと、図 4.5.5 のように碎石が流出した箇所において、降雨による憤泥が発生し、地面の土が浮き上がってくるケースが確認された。

いずれのケースも、土壌の水はけを良くするような抜本的な土木工事が実施されることが望ましいが、長期間に渡る工期やメンテナンスコストの問題より、短期間での改善は難しい状況にある。

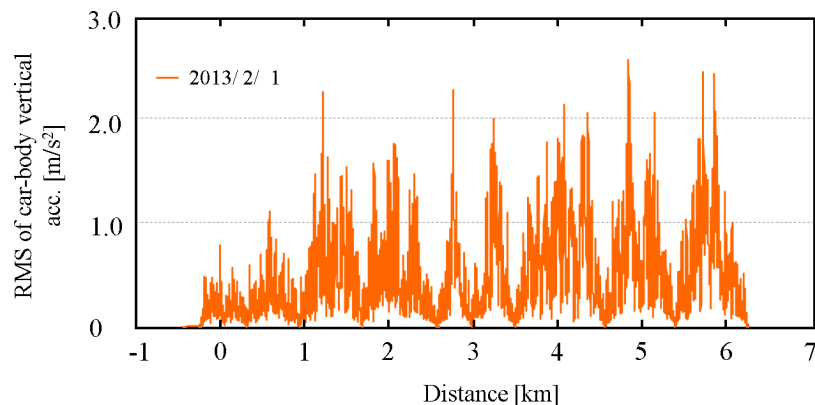


図 4.5.2: 上下加速度 RMS 値の測定結果（2013年2月1日）



図 4.5.3: 浮きまくらぎ



図 4.5.4: 線路脇より流入する土砂



図 4.5.5: 軌道上に溜まる雨水（積泥区間）



図 4.5.6: 目視可能な軌道不整

このような区間に対しては、砕石を十分に補充し突き固める作業にて軌道保守を実施することが一般的である（図 4.5.7）。ただし、過去においてマルチプルタイタンパを用いて全区間の軌道補修を一度に実施したこともあるが、砕石の補充が十分でなく半年程度で保守効果が失われた事例が確認されている [51]。

そこで、RMS 値が著大な地点から集中的に砕石を補充し、突き固めるなど、軌道保守の優先順位を鉄道事業者と協議の上決定し、1 年間の軌道保守を実施した。図 4.5.2 に対し、軌道保守後の測定結果を重ねたグラフを図 4.5.8 に示す。

一部未実施の区間が 4.0km 付近に確認されるが、RMS 値が 2.0m/s^2 を超える区間に対して集中的に軌道保守を行った結果、全線の RMS 値の低減が確認された。また、軌道保守は一年間をかけて順次実施したが、軌道保守後に RMS 値が急増する区間も確認されておらず、効果的な軌道保守が行われていると判断できる。

一方で、土壌の環境があまり良いとはいえない区間が全線にわたり存在することが現地調査の結果判明した。砕石の集中補充は実施したものの、抜本的な改善が行えていない区間も多いため、引き続き RMS 値の推移を含め軌道状態を監視する必要があると考える。



図 4.5.7: 碎石が十分に確認される継ぎ目区間

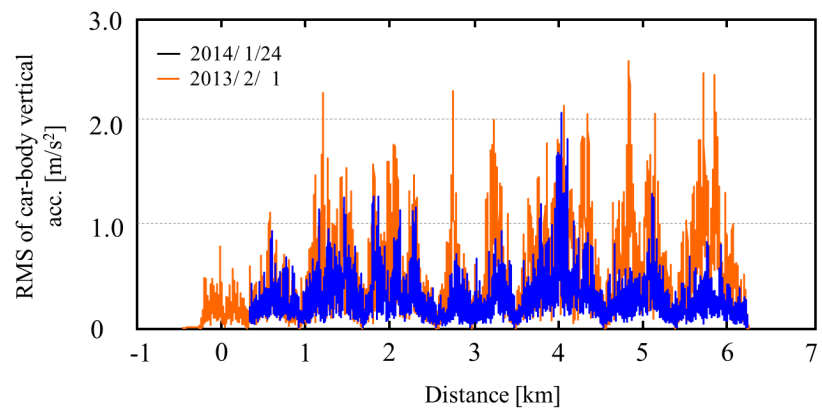


図 4.5.8: 上下加速度 RMS 値の比較

4.5.2 左右振動に影響を与える軌道異常

車体の左右振動に影響を与える軌道異常については、4.4項で確認したように急曲線の少ない地方鉄道では軌道検測では異常全体に対する割合が低く、軌道保守の実施例も少ない。しかしながら、低い周波数帯では、上下振動よりも乗り心地の悪化に多大な影響を与えることが知られている。そこで、C路線において測定試験で左右振動を感じた駅間について、軌道状態監視システムにより測定された結果を図4.5.9に示す。測定データは直近の2回分のデータを比較した。

当該駅間において、最も高い左右加速度RMS値とロールレイトRMS値を観測した箇所(1100m~1200m)の測定データを見ると、1100m地点を通過後に、左右加速度、ロールレイトがともに増加を始め、1200m直前にそれぞれのRMS値がピークを迎えていることが分かる。

鉄道事業者と協議の上現地調査を実施した結果、1100m~1200m地点において、レールが左右方向に少し折れる現象(角折れ)を確認した。該当箇所の写真を図4.5.10に示す。

該当区間では曲線部に踏み切りが存在しており、踏切の前後に継ぎ目が存在している。踏切部分のレールは踏切構造を更新する際に取り替えられているが、隣接するレールは同時に更新されていない。そのため、継ぎ目の接合部分については、曲率に注意を払う必要があるなど、難しい更新作業になることが知られている[52, 53, 54]。

現場の角折れ部分を観察すると、継ぎ目を越えた直後に発生しており、曲率の不一致から大きな荷重がかかり、レールの曲がりに繋がったと推測できる。列車速度については、駅周辺の踏切区間であり、比較的低い速度で通過するものの、放置されればレールの割れや破損等に進展する可能性もあり、継続して監視することが重要である。

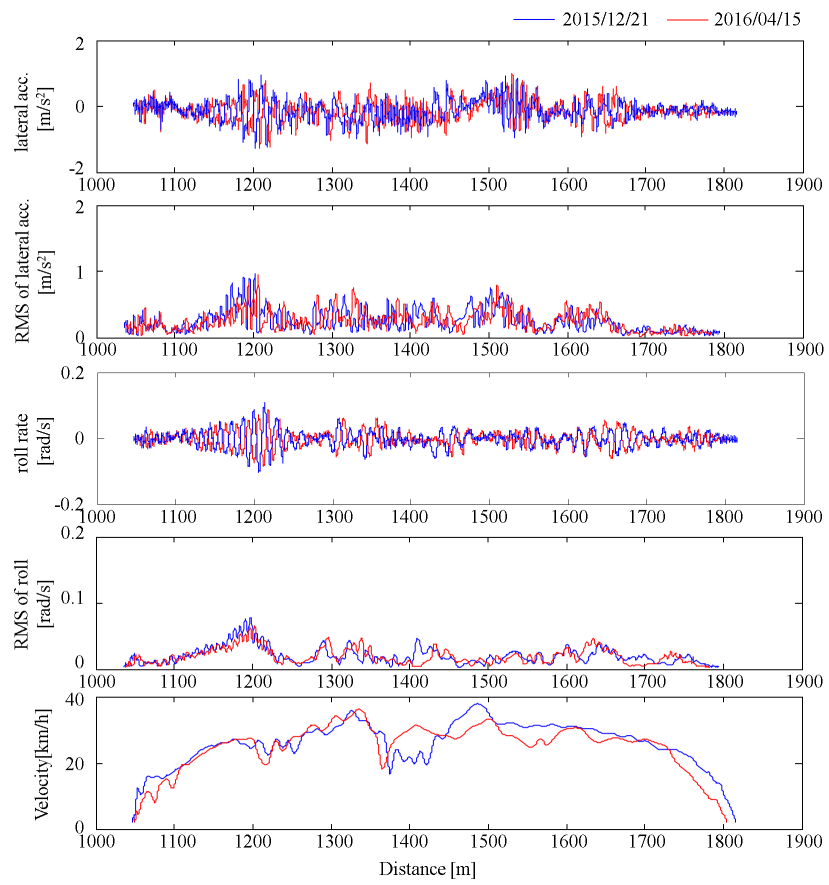


図 4.5.9: 左右加速度とロールレイトの測定結果

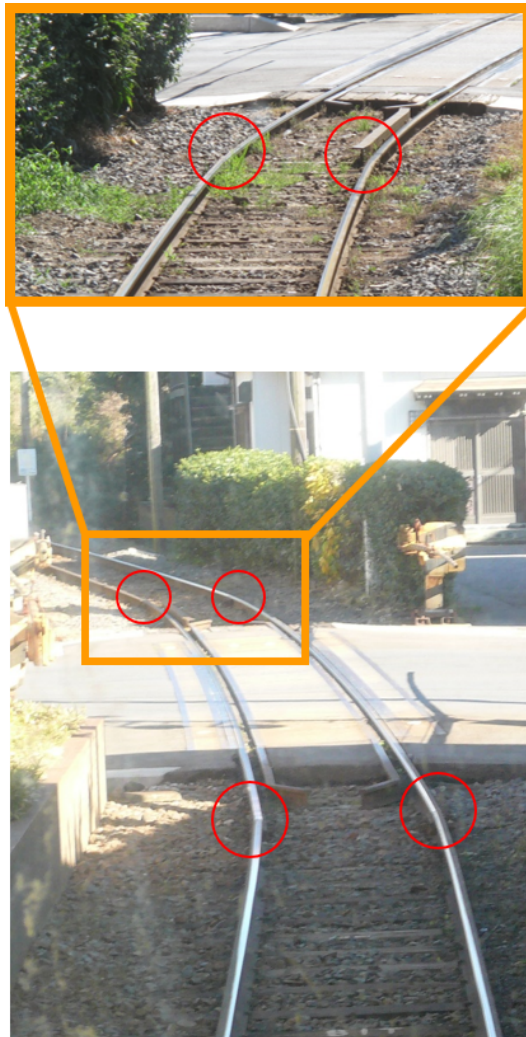


図 4.5.10: 角折れと踏切の位置関係



図 4.5.11: 角折れの状況

4.6 まとめ

本章では、第2章、第3章において、車体動揺とGPS信号などの状態量を取得するために、営業車両に設置する測定装置を構築し、軌道異常を評価する指標を提案した。その結果を統合した軌道状態監視システムを活用し、営業路線における軌道診断を実施した結果、以下の結論を得た。

1. 第3章において説明した測定装置と、第2章において説明した診断ソフトウェアを用いた軌道状態監視システムを構築し、その有用性検証のため、複数の営業路線における評価実験を行った。
2. 車体上下加速度、車体左右加速度、ロールレートに対してRMSによる評価を実施することで、実在する軌道異常を的確に捉えられることを確認した。
3. 車体上下加速度に対してウェーブレット変換による評価を行なった結果、踏切、軌道不整、継目落ち等の軌道異常が周波数帯域によって異なる特徴を有していることを確認し、軌道異常の種類を特定可能であることを示した。
4. カルマンフィルタを用いた逆解析による軌道不整推定については、実測と比較すると数mmの差異は見られるものの、高い値を示すピーク箇所は特定可能であり、実環境においても軌道状態監視に有用であることを示した。

一方で、第2章において想定した軌道不整のうち、実路線において検証がなされたものを図4.6.1に示す。図4.6.1より検証がなされたのは上下不整が中心であることがわかる。これは、これまでに調査した軌道異常に偏りがあり、上下方向の軌道異常が顕著であったことが原因である。そのため、他の軌道異常について検証するために、実路線における測定データを引き続き収集する必要がある。

■ 営業列車にて検証済

軌道異常	評価手法		
	RMS	ウェーブレット	逆解析
高低不整 (10m弦正矢)	○	○	○
通り不整 (10m弦正矢)	○	○	△
水準不整	○	○	△
軌間不整	×	△	×
平面性不整	△	△	△
浮きまくらぎ 継ぎ目落ち	○	○	△

図 4.6.1: 軌道異常の検証結果

第5章 結論

本論文では営業車両において比較的容易に測定可能な車体の状態量から、的確に軌道異常を検出する3つの評価手法について提案し、実路線において提案した評価手法が有用であることを示すため、必要な車体状態量を的確かつ簡易に測定可能な小型の測定装置を開発、その成果を統合し軌道状態監視システムを構築した。構築したシステムを地方鉄道における長期間測定により評価した結果、実路線において軌道異常を特定、該当区間の経年変化データを鉄道事業者へフィードバックし保守計画へ反映させるなど、その有用性を検討し、以下の結論を得た。

2章では、車室内にて比較的容易に測定可能な状態量から、検出可能な軌道異常について整理し、実環境における軌道保守に活用可能なデータへ変換するための軌道評価指標を提案した。

まず、RMS (Root Mean Square) 値による軌道異常の検出及び、時間一周波数解析の中でも広い周波数帯を観測することに優位性を持つウェーブレット変換による軌道異常種別の判定について、その評価手法の概略について述べた後に、シミュレーションによる検証を実施した。また、カルマンフィルタを用いた逆解析による軌道不整推定手法について、アルゴリズムについて述べ、シミュレーションにおいてその精度を検証した。その結果、以下の結論を得た。

(1) RMS 値による軌道異常の検出

著大な高低不整、波状摩耗、レール継目部の段差といった軌道異常を想定した軌道入力を与えたシミュレーション結果において、高低不整について RMS 値による検出は十分に可能であることが確認された。しかしながら、波状摩耗や段差といった軌道異常については検出困難であることが判明した。

(2) ウェーブレット変換による軌道異常種別の判定

(1)と同様の条件で実施されたシミュレーションにおいて、連続ウェー

ブレット変換及び離散ウェーブレット変換を用いて解析を実施した結果、どちらの結果においても、著大な高低不整、波状摩耗、レール継目部の段差といった軌道異常が、それぞれ特定可能であることを確認し、RMS値による評価では判別が困難である軌道異常についても判別可能であることを示した。

(3) 逆モデル解析による軌道不整推定

地方鉄道を想定した走行シミュレーションにおいて、提案するアルゴリズムの推定精度を検証した。その結果、軌道管理の指標とされる10m弦正矢法における軌道不整においては、推定誤差は最大で2mm以下と、軌道保守に活用するデータとしての有用性を示した。

また、本測定装置においては膨大な測定データが蓄積される一方、ビッグデータを扱うため手動による解析作業には限界がある。そこで、測定データを効率的に取り扱うため Graphical User Interface を活用したレール診断ソフトを開発した。その結果、RMS値及びウェーブレット変換による評価について、複数測定データを一度に取り扱うことが可能であることを確認し、軌道監視結果を速やかに、かつ視覚的に分かりやすく鉄道ヘフィードバックできる診断ソフトであることを示した。

3章では、営業車両での長期間の測定を前提とし、車両の大幅な改造を伴わず簡易に設置でき、低コストで軌道の状態監視を実施するための測定装置を開発した。開発された測定装置においては以下の性能を有し、実用化及び広域への普及を目指した製品水準に到達していることを確認した。

- (1) 小型の測定装置で、運転席下のスペースや機器箱の中など様々な場所へ設置可能
- (2) 自動または簡単なスイッチ操作にて測定が開始され、専門の測定員が不要
- (3) 測定データが自動転送または microSD の回収にて可能

4章では、2章における軌道状態の評価指標と3章で開発された測定装置を統合し、軌道状態監視システムを構築し、鉄道事業者協力のもと3路線において営業列車における定期測定を実施した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 車体上下加速度については、長期間測定においても高い再現性を確認し、実路線における高低不整の著大区間、継目落ち（うきまくらぎ）発生箇所といった軌道異常を検出可能である
- (2) 軌道保守を実施後に RMS 値が減少する、軌道状態が悪化した区間で RMS 値が増大するといった相関関係が確認され、RMS 値による軌道状態の評価が可能であることを示した。
- (3) ウェーブレット変換による評価において、踏切、軌道不整、継目落ちなどの軌道異常が異なる周波数帯に特徴があることを説明し、軌道異常の特定手法として有用であることを確認した。
- (4) 逆モデル解析による高低不整の推定について、実路線データを用いて検証した結果、高低不整が高い値を示す箇所については推定が可能であり、現状の軌道検測値との比較により軌道保守に活用する等、軌道保守に有用なデータとなる可能性を示した。

以上、本論文は、軌道状態監視システムを構築し、その有効性を具体的な適用事例において示したものであり、鉄道軌道の適切な保守を通じて鉄道の安全性向上に大きく貢献するものであると考える。

一方で、本論文の成果から考えられる、今後の課題を以下に示す。

(1) 軌道異常の検出範囲・検出精度について

第4章において、実際の営業路線における様々な軌道異常を検出する事が可能であることを示した。しかしながら、鉄道事業者との協議から、より優先度の高い軌道異常から検証を実施しているため、軌道保守をすべき全ての異常は網羅されていない。そのため、軌道状態監視システムの構築により日々蓄積されるデータを解析し、検出可能な軌道異常の範囲拡大及び検出精度の向上については、引き続き検討を行う必要がある。また、現在軌道異常の検出に使用している3つの手法については検証が進んでいるものの、他の解析手法による異常検出について十分に検証がなされているとはいえない。そのため、よりよい軌道異常の検出手法が存在していないか比較検証を実施すべきである。

(2) 列車位置検出精度の向上について

本論文における列車位置の特定は GPS による位置情報を基本としている。しかしながら、山岳部などを通過する路線においては、トンネル等を通る際に GPS 情報が欠落することが確認されている。一方、その

ような GPS の欠落区間においても車体動揺から踏切，継ぎ目，曲線，駅といった地上情報が読み取れることが確認されている．このような情報を活用することで，より軌道状態監視システムの活用可能な路線が広がるとともに，軌道異常の発生位置特定精度がより向上する可能性がある．

(3) 軌道監視を実施する交通機関の拡大について

本論文においては，鉄軌道路線を中心に検討を実施しているが，路面軌道や新交通システムといった交通モードにおいても本システムは有効であると考えられる．しかしながら，軌道異常が車体動揺に与える影響は鉄軌道とは異なることが予測されるため，有効性の検討には実路線における検証が必要である．

参考文献

- [1] 久保田博：鉄道車両のハンドブック， グランプリ出版 (1997)
- [2] 国土交通省， 鉄道輸送統計調査： <http://www.mlit.go.jp/k-toukei/tetsuyu/tetsuyu.html>
- [3] 国土交通省， 地球環境問題， 運輸部門における二酸化炭素排出量： <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/index.html>
- [4] 国土交通省， 交通安全白書：<http://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html>
- [5] 村本勝己：バラスト交換を減らす， RRR, Vol. 68, No. 4, pp. 18-21 (2011)
- [6] 高橋貴蔵， 関根悦夫：スラブ軌道を健全に保つ， RRR, Vol. 65, No. 11, pp. 10-13 (2008)
- [7] 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道技術用語辞典， 丸善株式会社 (1997)
- [8] 古川敦：新幹線の軌道管理技術， RRR (2011)
- [9] 小野重亮， 沼倉明夫， 尾高達男：高速対応の軌道検測技術， JR EAST Technical Review-No. 2, pp. 7-10 (2003)
- [10] 比佐隆文， 金谷元就， 坂井光夫， 浜岡敬伸：安全・安心な鉄道輸送を支える軌道・架線検測技術， 日立評論， Vol.94, No.6, pp. 41-45 (2012)
- [11] 矢澤英治：軌道検測技術， RRR, Vol.70, No.5, pp. 28-31 (2013)
- [12] 島津健， 佐々博明， 阿部秀明：長波長軌道変位測定器の開発， 土木学会第 64 回年次学術講演会， pp. 491-492 (2009)

- [13] 国土交通省：地域公共交通の確保・維持・改善に向けた取組マニュアル (2012)
- [14] 古川敦：地域鉄道における軌道の保守を考える，RRR (2010)
- [15] 運輸安全委員会 HP：<http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/railway/index.php>
- [16] 内田雅夫：鉄道のメンテナンスに関する研究開発の現状と展望，第20回鉄道総研講演会 (2012)
- [17] 須永陽一，井手寅三郎，金尾稔：軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法，鉄道総研報告，Vol.9, No.2, pp. 35–40 (1995)
- [18] 西垣拓也，須永陽一，瀬川祥：軸箱加速度による短波長領域の軌道狂いの評価鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp. 173-176 (2003)
- [19] Waston, P. F., Roberts, C., Goodman, C. J. and Ling, C. S.: Condition monitoring of railway track using in-service trains, The IET International Conference on Railway Condition Monitoring, pp. 26–31 (2006)
- [20] Waston, P. F., Ling, C. S., Roberts, C., Goodman, C. J., Li, P. and Goodall, R. M.: Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles, Rail and Rapid Transit, Vol. 221, No. F1, pp. 75–88 (2007)
- [21] Waston, P. F., Ling, C. S., Goodman, C. J., Roberts, C., Li, P. and Goodall, R. M.: Monitoring lateral track irregularity from in-service railway vehicles, Rail and Rapid Transit, Vol. 221, No. F1, pp. 89–100 (2007)
- [22] 竹下邦夫，矢澤英治：慣性正矢法による軌道狂い検測装置の開発，鉄道総研報告，Vol.14, No.4, pp. 25–30 (2000)
- [23] 矢澤英治：慣性正矢法による軌道検測，鉄道車両と技術，Vol.13, No.3, pp. 17–22 (2007)
- [24] 水野裕介，片岡慶太，松本好弘，長山智則，藤野陽三：鉄道営業列車による移動体センシングの加速度応答を用いた位置同定と軌道変状の検出，土木学会論文集 F, Vol. 66, No.3, pp. 360–365 (2010)

- [25] Rene Schenkendorf and Jorn C. Groos: Global Sensitivity Analysis applied to Model Inversion Problems; A Contribution to Rail Condition Monitoring, International Journal of Prognostics and Health Management, pp. 1–14 (2015)
- [26] (財) 機械システム振興協会, プローブ情報収集のための統合型車載システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書 (2003)
- [27] H. Tsunashima, T. Kojima, A. matsumoto, T. Mizuma: Condition Monitoring of Railway Tracks using In-service Vehicles, Japanese Railway Engineering, No. 161 (2008)
- [28] 孫佳, 林辰憲, 望月寛, 高橋聖, 中村英夫, 山本正宣, プローブ車両による軌道回路保全に関する一検討, 交通・電気鉄道研究会資料, TER-10 巻, 29-40 号, pp. 13–16 (2010)
- [29] H.Tsunashima,Y.Naganuma,A.Matsumoto,T.Mizuma,and H.Mori, Condition monitoring of railway track using in-service vehicle, 5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing 2011(2011)
- [30] 小島崇, 綱島均, 松本陽, 水間毅: 「車上測定データによる軌道の異常検出 (第2報, プローブシステムの開発と検証)」, 日本機械学会論文集 (C編), 75, 754, pp. 264-271 (2009-6)
- [31] 古川敦, 効率的な線路管理のための鉄道車両の動的挙動予測手法の開発, 学位論文, pp. 1-174 (2004)
- [32] 古川敦, 吉村彰芳: 軌道狂い管理のための車両左右動特性の同定, 鉄道総研報告, Vol. 18, No. 3 (2004)
- [33] P. S. Addison: The Illustrated Wavelet Transform Handbook, IOP Publishing Ltd. (2005)
- [34] 永沼泰州, 吉村彰芳: 正則化手法を用いた軌道狂い原波形の復元, 鉄道力学論文集 第13号, (2009)
- [35] 社団法人日本機械学会編: 新技術融合シリーズ第5巻 車両システムのダイナミクスと制御, 養賢堂

- [36] 石田誠, : 軌道のメンテナンス, 鉄道総研講演会要旨集, Vol. 20, pp.37-50(2007)
- [37] I. Daubechies: Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Regional Conference Series In Applied Mathematics: Society for Industrial and Applied Mathematics, (61), pp. 909-996 (1992)
- [38] 日本機械学会 : 数値積分法の基礎と応用, コロナ社 (2003)
- [39] 本田利器, 澤田純男 : デジタルフィルタを伴う時間積分の周波数特性について, 応用力学論文集, Vol. 4, pp. 515-522 (2001)
- [40] 浅見祥平, 永沼泰州, 綱島均 : 車体振動加速度を用いた軌道狂いの状態監視に関する研究 (車両走行速度の変化に対応した推定手法の開発), 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, [CD-ROM] (2014)
- [41] A. Yoshimura : *Dynamic response analysis of the vertical vibration of vehicles excited by the track irregularity in longitudinal level*, Quarterly Report fo RTRI, Vol. 1, No. 3 (1987)
- [42] 永沼泰州, 小林尊仁, 綱島均 : 状態空間モデルを用いた軌道の状態監視, 機械学会関東支部第18期総会講演会, pp. 381-382 (2012)
- [43] 吉村彰芳 : 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎とその応用, 鉄道技術研究報告, No. 1336 (1987)
- [44] 古川敦 : 乗り心地向上のための軌道管理, RRR, Vol. 65, No. 6, pp. 22-25 (2008)
- [45] 小島崇, 綱島均, 松本陽, 中村英夫, 山下博: 多重解像度解析を用いた軌道の異常検出, 年次大会講演論文集 (2005)
- [46] 小島崇, 綱島均, 松本陽, 軌道の状態推定に関する基礎的研究, 日本機械学会第14回交通・物流部門大会 (2005)
- [47] 綱島 均, 小島 崇, 松本 陽, 緒方正剛 : 軌道状態解析方法及び軌道状態解析装置並びに軌道状態解析プログラム, 特許番号 4521524(2010-6)

- [48] 小島崇, 綱島均, 松本陽, 緒方正剛: 車上測定データによる軌道の異常検出, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 72, No. 720, pp. 2447-2454 (2006)
- [49] 吉永純ほか: 速度超過等判定装置の開発, 第 13 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp. 413-414 (2006)
- [50] 古川敦: 地域鉄道における軌道の保守を考える, RRR (2010)
- [51] Hiroataka MORI, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, Hitoshi TSUNASHIMA and Yoshihisa SAITO, Development of Compact Size Onboard Device for Condition Monitoring of Railway Tracks, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 6, No. 2, pp.142-149 (2013-12)
- [52] 西本正人, 高橋 一志: M T T を用いたレール継目部角折れの整正, 土木学会第 58 回年次学術講演論文集, pp. 73-74 (2003)
- [53] 松本嘉司, 藤沢伸光: 水平角折れのある軌道上の車両運動に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 200 号, pp. 91-102 (1972)
- [54] 古川敦, 南木聡明, 泉英治, 米澤秀剛: 軌道検測車の偏心矢を用いた継ぎ目落ち・角折れ等の評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp. 11-16 (2009)

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの皆様に多大なるご支援、ご指導を賜りました。主査である日本大学生産工学部綱島均教授には、学部、大学院博士前期、後期課程の間、学術面のご指導、ご助言のみならず、国際会議での発表や論文投稿、共同研究へ積極的に参加する多くの機会を与えていただき、それを通じて研究者としての基本的な思考、行動をご指導いただきました。本論文は、そのご指導、ご助言の賜物であり、改めてここに深く感謝の意を表します。

副査である東京大学の古関隆章教授、日本大学生産工学部高橋進教授、野村浩司教授には、本論文の審査に際し、ご多忙にもかかわらず時間を割いていただき、本論文をまとめるためのご指導とご助言を賜りました。

新たな測定装置の共同開発にあたり、ご助言と多大なるご協力をいただいた、京三製作所の齊藤嘉久様、浅野晃様、菊地麻香様をはじめとした皆様に深く感謝いたします。

測定用ソフトウェアの開発においては、久保武良様、阿部裕様をはじめとしたセントラルエンジニアリング株式会社の皆様には大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

営業列車による測定は、鉄道事業者様のご協力により実施することができました。各事業者の皆様には、鉄道事業者としての貴重なご意見、ご助言を賜り感謝申し上げます。

そして、実験へご協力頂き、そして多くのご指摘を下さいました綱島研究室の皆様、博士後期課程にご理解と多大なご協力を頂きました交通安全環境研究所の皆様には感謝いたします。

本論文は、この他にも多くの皆様にご支援、ご指導を賜ってまとめたものであります。最後に、大学、大学院博士前期、後期課程の間を暖かく見守ってくれた両親に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。