

博士論文

ウェーブバンドを考慮した
路面プロファイルの測定及び評価に関する研究

2004 年 3 月

白川 龍生

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	
1.2 本研究の概要	
1.3 本研究の構成	
参考文献	
第 2 章 舗装路面の維持管理	13
2.1 概説	
2.2 道路の種類と管理	
2.3 舗装路面の主な破損とその原因	
2.4 舗装路面の管理指標	
2.5 舗装路面の調査及び補修	
2.6 舗装マネジメントシステム	
参考文献	
第 3 章 路面プロファイルの測定及び評価に関する既往の研究	37
3.1 舗装の波状特性分類	
3.2 路面プロファイルの測定に関する既往の研究	
3.3 路面プロファイルの評価に関する既往の研究	
参考文献	
第 4 章 ウェーブバンドを考慮した True Profile の推定方法	65
4.1 概説	
4.2 路面と車の相互作用問題	
4.3 自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンドの設定	
4.4 プロファイルの測定データを用いた True Profile の推定方法	
4.5 まとめ	
参考文献	

第 5 章	3m プロフィロメータを用いた True Profile の推定及び推定精度の検証	81
5.1	概説	
5.2	PIARC EVEN 試験	
5.3	3m プロフィロメータの検出特性及び検出精度	
5.4	True Profile 推定及び精度の検証	
5.5	まとめ	
	参考文献	
第 6 章	路面性状評価に適したウェーブレット基底関数の選定	97
6.1	概説	
6.2	ディジタルフィルタ演算法	
6.3	ウェーブレット解析法	
6.4	路面性状評価に適したウェーブレット基底関数の選定	
6.5	まとめ	
	参考文献	
第 7 章	第二世代ウェーブレット解析を用いた特徴的な路面凹凸の検出方法	125
7.1	概説	
7.2	第二世代ウェーブレット解析	
7.3	特徴的な路面凹凸の検出方法	
7.4	まとめ	
	参考文献	
第 8 章	道路パトロール車両を用いた路面管理支援システムの開発	139
8.1	概説	
8.2	路面管理支援システムの構成	
8.3	自動車の振動加速度を用いた True Profile の推定	
8.4	自動車の振動加速度を用いた特徴的な路面プロファイル区間の検出	
8.5	道路メンテナンスへの適用	
8.6	まとめ	
	参考文献	
第 9 章	結論	169
	謝辞	175
	研究業績	177

第 1 章

序 論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

道路は日常生活や経済活動を根幹から支える社会資本として不可欠なものであり、人や車を安全かつ快適に通行させるとともに、出会いや憩いの場、都市の景観形成や防災空間など、様々な機能を有する¹⁾。道路の舗装(路面)は、交通車両と接する構造物であり、その性状の良否は車両の走行に直接影響を及ぼす。近年、交通量の増加や車両の大型化・高速化に伴い、路面性状に対する社会の要請は変化しており、道路管理者は舗装の耐久性の確保のみならず、車両の走行安定性・快適性を確保するとともに、道路周辺環境に与える影響を最小限に抑えなければならない²⁾。さらに最近では、道路利用者と道路管理者とのギャップを埋めるため、説明責任(Accountability)の一層の向上が求められるようになった。このような観点から、道路管理者としては道路利用者に対して常に一定水準以上のサービスを提供するよう、路面の維持管理を実施する必要がある³⁾。

舗装の構造や機能は供用性能として定量的に評価されるが、舗装は新設直後の評価が最も高く、その後は交通による繰り返し荷重や経年的な劣化などにより評価が低下する傾向がある。このことから、舗装という社会資本を効率的に運営するための手段として、ライフサイクル分析の考え方が導入されており、道路利用者費用と道路建設・維持管理費といった道路管理者側の費用の総和についての最適化を目的とした舗装マネジメントシステム(Pavement Management System: 以下、「PMS」という)の構築が各国で精力的に進められている^{4), 5)}。全ての土木構造物は維持管理を要するが⁶⁾、舗装は他の構造物と異なり交通荷重が直接作用するため、摩耗あるいは幾何的な塑性変形が生じる。このような舗装の特徴的な劣化現象を分析するにあたっては、PMS の構築は必要不可欠である。

路面プロファイルの測定は、路面性状の良否に関する情報を PMS へ反映するための重要な要素である。例えば、ISOHDM が開発した道路投資選択

及び評価のための汎用コンピュータソフトウェアである HDM-4 (Highway Development and Management System)は、路面縦断プロファイル測定結果を国際ラフネス指数 (International Roughness Index:以下、「IRI」という)へ換算し道路利用者費用の算定に用いているが、IRI は最も影響が大きい因子の一つとされている⁷⁾。北海道の国道における道路利用者費用のシミュレーション結果によれば、IRI が一定水準($IRI \leq 3.55 \text{ m/km}$)となるよう維持管理を施した場合、分析開始から 7 年後には約 30%の道路利用者費用の削減効果があるとされている⁸⁾。

道路の維持管理は、道路資産の増加、財政構造改革などにより一層厳しさを増しており、よりの確な対応が求められている。路面の性状はその中心的指標であり、これを正確に把握することが道路管理者の責務として強く求められている。このため、路面プロファイルは測定装置(以下、「プロファイラ」という)の種類を問わず一定の値が出力されなければならないが、現在用いられている主なプロファイラは、測定方法が多岐に及ぶことに加え、個々の装置が有する固有の検出特性によって出力結果が歪められるため、必ずしも一定の値は得られていない²⁾。

維持管理に用いるための路面プロファイルデータは、IRI の算出をはじめ、種々の分析目的に柔軟に対応できるよう、基本的には水準測量などに代表される絶対形状であることが望ましい。しかし、水準測量作業は供用中の道路を長時間占有しなければならず、人件費も高額となりがちである。

上記の理由から、道路関係企業では、GPS、レーザ式変位計及びジャイロ機構等を用いた高性能プロファイラの技術開発を積極的に行なっており、このうち一部は既に供用され、有用性が報告されている^{2), 9), 10)}。しかしながら、導入時の初期コストが高額であるなどの問題があり¹¹⁾、現段階では十分に普及している状況とはなっておらず、高速道路及び幹線国道で 3 年に 1 回程度の測定頻度に留まっている^{2), 12)}。

実測データの時間推移から PMS によって供用性 (パフォーマンス) の低下を予測する場合、測定頻度が高いほど予測精度は向上すると考えられている。例えば、交通具の一つである鉄道線路の場合、新幹線では 10 日に 1 回、在来線の閑散線区においても年に 2 回以上の周期で測定されているため、複雑な

予測モデルを考慮しなくとも比較的高い精度の予測(予防的保全)が行われている¹³⁾。鉄道線路の場合は走行路が決まっており、測定に重点を置き、弱点箇所を集中的に補修するという側面が大きい¹⁴⁾。これに対し、道路舗装の場合は車両走行時に横断方向の動きを伴うため、鉄道線路に比べ走行時の自由度が大きいことに加え、全国約 117 万 km の道路全延長¹⁵⁾について高頻度の測定を行うことは事実上不可能である。一部のモデル区間では舗装の経時的な劣化の進行に関する調査研究が行われているものの、その他大多数の一般道路においては、舗装状態の把握は道路巡回車両を用いた目視検査に依存しているのが現状である¹⁶⁾⁻²⁵⁾。

一方、路面プロファイルの評価については、維持管理指数(MCI)²⁶⁾をはじめ、平坦性指標(σ)^{27), 28)}及び IRI²⁹⁾などの区間評価値が用いられるとともに、ラフネス特性の傾向を分析する場合はフーリエ変換を基礎とするスペクトル解析が行なわれている³⁰⁾⁻³³⁾。しかしながら、空間領域のデータを周波数領域に変換する際、路面上に生ずる凹凸の発生位置に関する情報が不明瞭になるとともに、局在する路面凹凸の影響により平均的な路面プロファイル特性が歪められて表現されるなどの問題点が見受けられる^{34), 35)}。

上記の背景に基づき、本研究は PMS を十分に機能させるために不可欠である路面プロファイルの測定について、既存のプロファイラ及び道路巡回車両を有効活用することにより測定内容の充実を図るとともに、路面プロファイルデータの評価についても新しい解析手法を導入することにより、総合的な「路面管理支援システム」として体系化することを指向した。

1.2 本研究の概要

舗装の維持管理は、本来、舗装が果たすべき機能(安全性、快適性及び経済性)の維持を目的とした活動であり、計画主導の活動となるべきである³⁶⁾。したがって、効率的かつ有効な保守活動を実現するためには、目的に応じた適切な予測技術及び解析技術が不可欠である。

前述のように、路面プロファイルの測定技術については、高性能プロファ

イラの開発に伴い技術的水準は飛躍的に高まっている。しかしながら、高性能プロファイラの現場への普及が遅れているため、ライフサイクル分析の観点からは PMS が十分に機能していないのが現状であり、舗装状態の把握は日々の道路巡回に依存している^{25), 37)}。さらに、点検員による定性的な評価は、熟練度の差の影響を受けるため、客観性及び信頼性に欠ける場合が想定されると共に、そのデータベース化は困難である²⁶⁾。以上の事実を踏まえると、現在の道路舗装の維持管理体系は、経時的な劣化状況の的確な把握と迅速な補修という要求を満たすことは困難な状況にあると考えられる。

近い将来、特に中軽交通区間において、供用年数が 20, 30 年を超える路線の割合の増加が見込まれ、本格的な維持管理の時代に突入すると考えられている³⁸⁾。このような路線では、舗装も含めた土木構造物の劣化速度が加速しているため、現在幹線道路で行われている高性能プロファイラによる 3 年に 1 度という測定頻度であっても、供用性能の劣化状況を定量的に把握することは困難であると思われる^{38), 39)}。将来的には、路面プロファイルの測定コスト及び測定頻度を向上することにより適切なモニタリングが実現すると思われるが、現在、わが国ではこのような維持管理の実施例は見受けられない。

したがって、公共投資や維持管理経費が今後も多くを望めない中で、現有の道路ストックのサービスレベルを維持し有効に活用していくためには、路面性状の経年変化を正確に把握するとともに、適切な維持管理を計画主導で実施することが必要と考えられる。

本研究は、上記の問題を解決し、道路利用者費用の軽減及び道路交通の安全確保を主目的として、道路利用者のニーズと最も関係が大きい「路面縦断プロファイルの平坦性」に着目し、主として測定及び評価に関する以下の考察を行う。

- (1) 道路管理者及び道路関連企業に最も普及したプロファイラである 3m プロフィロメータを有効活用し、自動車の走行安定性及び乗り心地に影響を与える周波数帯域（以下、「ウェーブバンド」という）の True Profile（真のプロファイル）を実用的な精度で推定する^{40), 41)}。
- (2) 従来のフーリエ変換を基礎とする解析法では識別が困難とされてきた「路

面上に局在する凹凸」について、発生位置及び周波数情報を同時識別することができるウェーブレット解析を行い、路面性状評価への適用性について考察するとともに、パラメータ学習機能を有する第二世代ウェーブレット解析を用いた特徴的な路面プロファイル形状の検出方法を述べる⁴²⁾⁻⁴⁵⁾。

- (3) 路面プロファイルの測定頻度を高め、PMS の普及に寄与するとともに、事故や災害など緊急時の道路調査業務支援を指向し、道路パトロール車両のバネ下振動加速度を利用した「路面プロファイル管理システム」の開発を行う。また、同システムの適用性及び適用範囲について考察する^{44), 46)}。

1.3 本研究の構成

本研究の構成は全 9 章であり、その内容は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、研究の背景及び概要を述べ、本論文の意義を示した。

第 2 章では、舗装路面の維持管理方法について概説するとともに、舗装マネジメントシステムの必要性について述べる。

第 3 章では、路面プロファイルの測定及び評価に関する既往の研究について述べる。

第 4 章では、自動車車両の走行安定性及び快適性に影響を与えるウェーブバンド（周波数帯域）の設定方法について考察し、プロファイラ（プロファイル測定装置）の測定データから True Profile を推定する方法について述べる。

第 5 章では、世界道路協会（World Road Association：以下、「PIARC」という）によって行われた EVEN 試験の結果を用いた 3m プロフィロメータによる True Profile の推定例を示し、推定精度についての検証を行う。

第 6 章では，近年，路面性状評価に用いられるようになったウェーブレット解析について考察する．特に平坦性データの特徴を考慮したウェーブレット基底関数の選定方法について論じる．

第 7 章では，新しいデジタル信号処理手法として注目されている第二世代ウェーブレット解析を用いた路面凹凸の学習及び検出方法について論じる．

第 8 章では，道路パトロール車両の振動加速度を利用した「路面管理支援システム」について述べる．特に，このシステムを舗装路面の維持管理に適用した場合の利点を示し，振動加速度データを用いた True Profile の推定方法及び特徴的な路面プロファイル区間の検出方法について論じる．

第 9 章では，本研究によって得られた成果をまとめ結論とした．

本研究の構成及び範囲を図 1.1 に示す．

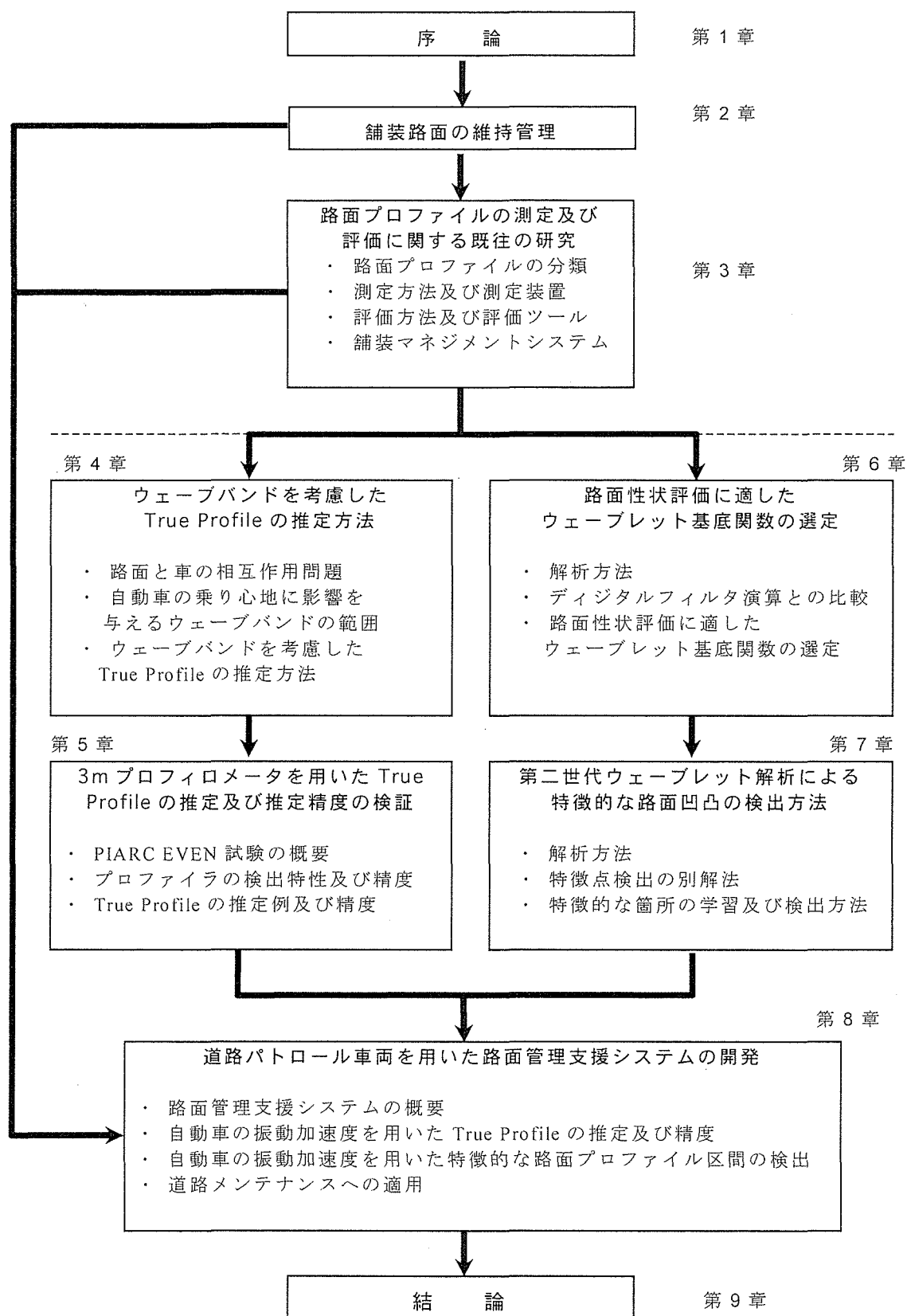


図 1.1 本研究の構成及び範囲

参考文献

- 1) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会編：舗装工学，丸善，1995.
- 2) 小野田光之：講座・路面の評価(3)路面性状測定車(自動測定装置)，舗装，Vol.36, No.10, pp.34-39, 2001.
- 3) 小川篤生：高速道路舗装マネジメントの今後，舗装，Vol.38, No.1, pp.7-8, 2003.
- 4) 笠原篤：舗装マネジメントシステム，土木学会論文集，No.478/V-20, pp.1-12, 1993.
- 5) 菊川滋，久保和幸，達下文一，羽山高義，丸山暉彦，山之口浩：最新アスファルト舗装技術 舗装学のすすめ・A から Z まで，山海堂，1995.
- 6) 村上温，野口達雄監修：鉄道土木構造物の維持管理，日本鉄道施設協会，1998.
- 7) 松原正人，田中友紀，川村彰，白川龍生：HDM-4 を用いた道路利用者費用に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部，Vol.58, pp.1259-1260, 2003.
- 8) 山本亘平，川村彰，高橋清：ユーザーコストに着目した舗装マネジメントシステムの構築，土木学会第 57 回年次学術講演概要集，IV-387, pp.773-774, 2002.
- 9) 秋本隆，姫野賢治，川村彰，福原敏彦：舗装路面の絶対プロファイルデータ収集システムの開発，土木学会論文集，No.606/V-41, pp.13-20, 1998.
- 10) 兼平信蔵，來島輝武，小泉達哉：保全管理における路面性状測定車の利用法 -高速測定技術の紹介-，EXTEC, No.57, pp.52-54, 2001.
- 11) 秋本隆，福原敏彦，笠原篤：舗装破損データ自動収集装置のセミナー，舗装，Vol.26, No.2, pp.21-25, 1991.
- 12) 丸山記美雄，岳本秀人，星野吉昇，岡本和久：寒冷地におけるアスファルト舗装の路面性状経年変化に関する検討，舗装，Vol.38, No.11, pp.3-7, 2003.
- 13) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重編：新しい線路 -軌道の構造と管理-，日本鉄道施設協会，1997.

- 14) 田中宏昌, 磯浦克敏編: 東海道新幹線の保線, 日本鉄道施設協会, 1998.
- 15) 国土交通省道路局: 道路統計年報 2002 年版, 全国道路利用者会議, 2002.
- 16) 森修二, 岳本秀人, 丸山記美雄: 積雪寒冷地における舗装マネジメントに向けた路面性状予測について, 北海道開発土木研究所月報, No.598, pp.2-9, 2003.
- 17) 巽崇, 永井司, 石崎喜兵衛, 高橋剛蔵, 石井良典, 寺本博明, 伊勢田要一, 福島健二, 板谷治喜: 舗装管理計画の策定について (第 2 報) 路面性状予測式の作成 -路面性状調査より, 大阪市建設局業務論文報告集, Vol.3, No.3, pp.517-528, 1996.
- 18) 阿部忠行, 内田喜太郎, 峰岸順一: 舗装の耐流動性に関する試験舗装による検討 (その 3), 東京都土木研究所年報, Vol.1990, pp.65-74, 1990.
- 19) 阿部忠行, 内田喜太郎, 峰岸順一: 長期供用舗装におけるライフサイクルの検討, 東京都土木研究所年報, Vol.1990, pp.75-86, 1990.
- 20) 亀山修一, 川端伸一郎, 豊田邦男, 川村彰, 笠原篤: 寒冷地の高速道路における平坦性の季節変動に関する研究, 土木学会論文集, No.742/VI-60, pp.51-60, 2003.
- 21) 亀山修一, 笠原篤, 松本順二, 菅原秀蔵: 生活道路における路面性状と FWD たわみの関係, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.53, pp.30-31, 1998.
- 22) 石井宏美, 亀山修一, 加藤三雄, 松野修平, 笠原篤: 舗装の縦断プロファイルの季節変動に関する解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.55, pp.60-61, 2000.
- 23) 笹木裕也, 亀山修一, 菅原秀蔵, 松野修平, 笠原篤: 札幌市準幹線道路における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.55, pp.62-63, 2000.
- 24) 見楚谷豪, 沖田文勝, 笠原篤: 都市内生活道路舗装のパフォーマンスに関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.55, pp.64-65, 2000.
- 25) 河野整, 藤野陽三, 阿部雅人, 平林望: 道路高速診断システム (VIMS) の実用化に向けた研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 CS 部門, Vol.58, pp.3-4, 2003.

- 26) 飯島尚, 今井博, 猪股和義: MCI による舗装の供用性の評価, 土木技術資料, Vol.23, No.11, pp.15-20, 1981.
- 27) 河野宏: 竣工時の舗装の平坦性検査について (I) 平坦性の測定方法, 土木技術資料, Vol.9, No.4, pp.20-24, 1967.
- 28) 河野宏: 竣工時の舗装の平坦性検査について (II) 平坦性の検査基準, 土木技術資料, Vol.9, No.7, pp.41-42, 1967.
- 29) Gillespie, T.D., Sayers, M.W. and Queiroz, C.A.V.: The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and Calibration Standard for Measurement-, The World Bank Technical Report, no.45, 1986.
- 30) Sayers, M.W. and Karamihas, S.M.: The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 31) ISO8608: Mechanical vibration - Road surface profiles -Reporting of measured data, pp.1-30, 1995.
- 32) 兼重一郎: 道路面凹凸による自動車不規則振動のスペクトル解析, 東京工業大学博士論文, 1964.
- 33) 本田秀行, 城戸隆良, 梶川康男, 小堀為雄: 道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査, 土木学会論文報告集, No.315, pp.149-155, 1981.
- 34) 川村彰, 姫野賢治, 藤原隆, 秋本隆: ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について, 舗装工学論文集, Vol.2, pp.23-28, 1997.
- 35) Kawamura, A., Shimeno, S., Himeno, K., Komatsubara, A. and Hagiwara, T.: Study on Application of the Multiresolution Analysis to Road Profile Evaluation, Proceedings of the 3rd International Symposium on the Environmental Impact of Road Unevenness, pp.121-132, 1999.
- 36) 三和雅史, 石川達也, 大山達雄: 軌道状態推移予測モデルの構築と最適軌道保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析, 土木学会論文集, No.681/IV-52, pp.51-65, 2001.
- 37) 豊田義明, 高橋守人, 大池浩司: 道路維持管理支援システムの開発 (第1報) -GPS と GIS を統合したプロトタイプシステムの現地試験結果-, 北海道開発土木研究所月報, No.537, pp.2-12, 1998.

- 38) 相馬幸六, 山之口浩, 笠原篤: 中軽交通道路における舗装修繕のための手法 -舗装評価データベースと構造評価の利用-, 舗装, Vol.30, No.10, pp.25-33, 1995.
- 39) 国土交通省道路局: 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方 提言, 国土交通省, 2003.
- 40) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆: ウェーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理方法について -EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 41) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 上浦正樹: 3m プロフィロメータによる True Profile の推定 -PIARC EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.25-33, 2003.
- 42) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 中辻隆: 軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, no.1, pp.71-78, 2003.
- 43) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹: ウェーブレットパケット変換を用いた路面プロファイルデータ処理, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.199-206, 2003.
- 44) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹: 第二世代ウェーブレット変換を用いた路面凹凸検出方法の基礎的研究, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.35-41, 2003.
- 45) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹: 路面プロファイルデータ処理に適したウェーブレット基底関数の選定について, 土木学会論文集, No.753/V-62, pp.81-93, 2004.
- 46) 白川龍生, 川村彰, 中島繁則, 中辻隆: 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて, 交通工学, Vol.38, No.6, pp.32-41, 2003.

第 2 章

舗装路面の維持管理

第 2 章 舗装路面の維持管理

2.1 概説

舗装は、交通荷重及び気象条件といった外作用を直接受ける構造物であり、他の土木構造物に比べ寿命が短く、また予め破壊が生じることを前提として設計されるという特徴を有している。さらに、舗装自体が老朽化することにより、放置しておくとも供用性が低下し、円滑かつ安全な交通に支障をきたすことがある。これを防ぐためには、常に路面の状態を把握し、適切な補修を行なうことが重要である¹⁾。

舗装の補修とは、舗装の供用性能を一定水準以上に保つための行為をいい、維持と修繕がある。舗装の補修目的としては、以下の 3 つに大別される²⁾。

- i) 舗装の耐久性を確保し、舗装の構造機能を保つ。
- ii) 路面の走行性を確保し、交通の安全と快適性を保つ。
- iii) 舗装に起因する沿道環境の悪化を防ぐ。

ここで、「維持」と「修繕」の定義は必ずしも明確ではないが、一般には以下のように示されている³⁾。

「維持」は道路の機能を保持するために行なわれる道路の保全行為であり、計画的に日常行なわれる手入れや軽度の修理をいう。例えば、路面清掃、散水、除草、除雪、舗装のパッチング、表面処理、目地の充填などがこれに相当する。さらに、これらの行為を的確に実施するために、道路の状況を巡回や点検で把握しなければならないが、これも維持作業に含まれる。

「修繕」は日常の手入れでは間に合わない程度の、比較的大きな損傷部分の修理及び施設の更新などをいう。例えば、舗装のオーバーレイや打換え、橋りょう床版の打換え、トンネル覆工の補強などがこれに相当する。修繕は、修理で施設の機能を当初の状況まで復元することを目的とするが、最近では時代の要求を踏まえて従前より高い機能を付加させた修理や、老朽化、耐震対策による更新及び機能強化も修繕の対象としている。

1998 年に行われたわが国のアスファルト舗装の修繕工事に関する全国規模

本章では、現在行なわれている舗装路面の維持管理について概説するとともに、舗装維持修繕マネジメントシステムの必要性について述べる。

2.2.1 道路の種類と道路管理者

高速自動車国道は、平成 13 年 4 月現在で約 6,600km が供用されており、一般道路の延長は約 116 万 km である⁶⁾。これら 4 種類の道路は、道路法にその指定・認定要件が具体的に定められており、さらに高速自動車国道については高速自動車国道法の適用を受けている⁵⁾。これ以外に、道路法によらない道路として、道路運送法による一般自動車道、港湾法による臨港道路、森林組合法による林道、自然公園法による公園道及び私道など、限定された利用者を想定して建設される道路がある⁵⁾。

市町村道 : 市町村

15

正式に権限を与えられた者に、代行または委任させることができる。このような代行者の例としては日本道路公団が代表的であり、高速自動車国道の新設、改築、補修もしくは災害復旧のために、道路整備特別措置法の規定に従って国土交通大臣の権限の一部を代行する機能を与えられている⁵⁾。

2.2.2 道路の管理に関する法令

道路行政を律している法令については道路法を中心に多数定められているが、道路の管理に関する基本的な法令としては以下の2つが定められている⁵⁾。

(1) 道路法

道路に関する基本法であり、道路の種別、指定・認定手続きなどを定めるとともに、その管理体系を明示している。また、道路がその本来の機能を果たすための道路の占用、保全に必要な諸規定のほか、道路の管理に必要な費用負担区分などを定めている。道路の巡回、補修などの業務は、この法律を根拠として行なわれている。

(2) 道路の修繕に関する法律

道路法で国の負担または補助の対象にならない道路の修繕工事について、その緊急性に鑑み、当分の間その費用の一部を補助することなどを定めている。

2.3 舗装路面の主な破損とその原因⁷⁾

舗装は供用後交通荷重の繰返しを受け、自然環境にも影響されながら経年とともに破損が生じ、供用性が低下する。破損は、舗装の種類、構造、また地域等によって様々な形となって現れる。以下、全舗装の施工割合の9割以上を占めるアスファルト舗装の破損を中心に、破損の分類及び主な破損の発生原因について述べる。

一般的に、舗装破損の様式は、以下の3つに分類される(図2.1)⁸⁾。

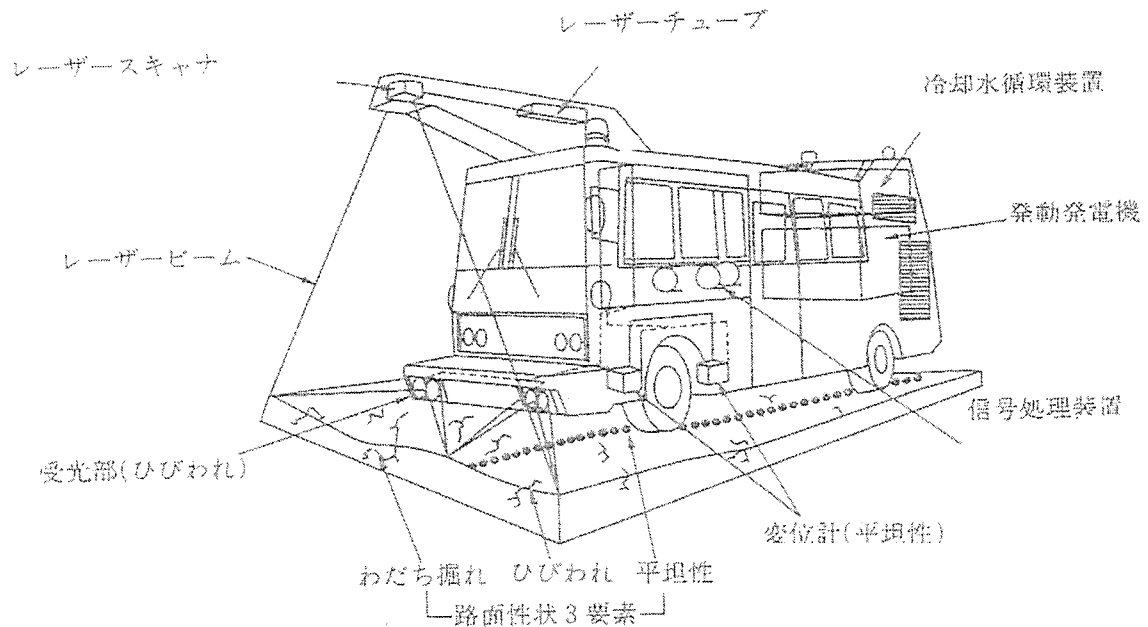


図 2.1 舗装に生ずる主な破損⁸⁾

- i) ひび割れ
- ii) 変形
- iii) 崩壊

ひび割れは、各層あるいは材料の破断であり、疲労やくだけ、ずれなど様々なタイプがある。通常、気象（風化、低温）及び交通（重量、高速車両）の作用、アスファルト老化及びアスファルト量不足などが大きな原因となり、この破損に影響する（写真 2.1）。ひび割れは、特に初期段階では、舗装のサービス性（自動車交通に対する快適性）には然したる影響を与えないが、舗装の耐久性に結びつく破損であるため、維持修繕の対象である。

変形は、材料の塑性変形による結果であり、わだち掘れ（写真 2.2）、波状凹凸（写真 2.3）などが含まれる。通常、高温や低速、重交通が支配的に影響し、転圧不足及びアスファルト量過多なども主原因となる。変形は、結果として舗装のサービス性に大きく関与する。

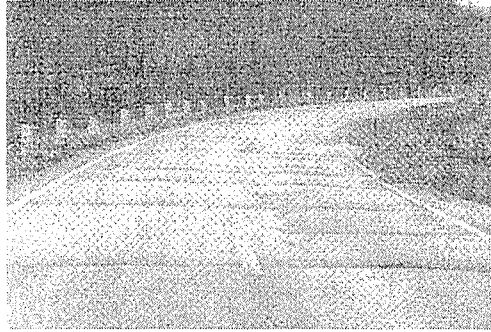


写真 2.1 温度収縮によるひび割れ ⁵⁾

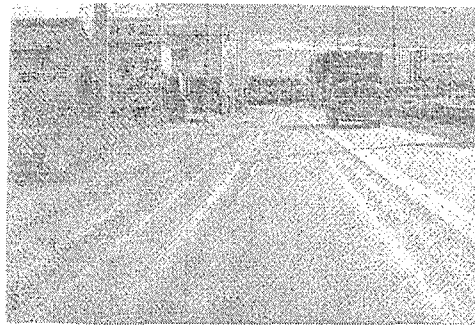


写真 2.2 流動によるわだち掘れ ⁵⁾

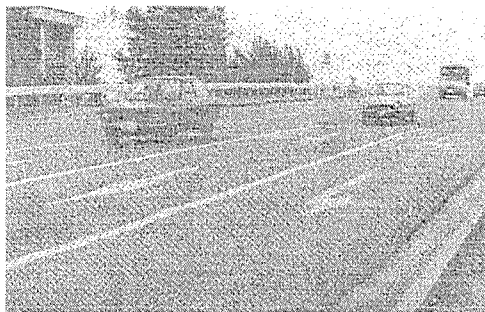


写真 2.3 流動変形路面 ⁷⁾

崩壊は、表層構成要素の分解またははく脱飛散ないしは摩耗の状態であり、ラベリングやスケーリング、はく離なども含まれる（写真 2.4）。通常、低温や高速車両、特殊車両（タイヤチェーン装着車両など）、水の作用のほか、骨材岩質によるアスファルトの付着性、アスファルト量不足などが原因となる。崩壊が進行し、特に弱点箇所が不均一になりポットホールなどが生じると、耐久性及びサービス性にも関連するため、舗装供用性の低下をきたすことになる。



写真 2.4 摩耗路面 ⁷⁾

また，安全性の観点からすべりの重要性が高まっている．すべりは，路面とタイヤの摩擦抵抗が小さくなった状態であり，これが問題となるのは主として湿潤路面の場合であり，表面水の膜厚，路面の汚損状態などが影響する．

すべりの要因には，一般に骨材の研磨による場合と，アスファルトのにじみ出しによる表面の平滑があり，表層工種，骨材の摩耗性，アスファルトの品質，量などが原因となる．近年，視認性を向上し，すべり抵抗を高めスリップ事故を防止する目的で排水性舗装と呼ばれる高機能舗装が注目されており，施工面積が急増している ⁹⁾．

2.4 舗装路面の管理指標

舗装の路面性状は，車両走行の快適性，安全性に関わるため，車両運転者から直接評価される性状であるが，定性的な評価は評価する者によって大きく異なることがあるため，客観的指標で定量的に評価されている．評価対象としては，わだち掘れ，平坦性などが設定されている．

2.4.1 路面性状の管理指標 ⁸⁾

各国が取り入れている維持管理のための路面性状に関する管理指標項目を表 2.1 に示す．舗装路面の破損形態は多種多様であるが，重要度を別にすれば，各国とも同様な項目を対象としている．

表 2.1 路面性状に関する評価項目⁸⁾

管理項目 国・州		舗装種別	ひびわれ	段差	わだち掘れ ラベリン	平坦性	コルゲーション	すべり	ポットホール	くぼみ	はく離	目地部の破損	座屈	外観		
アメリカ	オンタリオ州	A	○		○		○	○		○						
	ワシントン州	A	○		○		○	○		○						
		C	○	○			○		○		○					
	カリフォルニア州	A	○		○		○	○		○						
	ケベック州	A	○		○											
		C	○									○	○			
	ミネソタ州	A	○		○											
		C	○									○	○			
フランス		A	○	○		○	○	○	○	○						
カナダ		A	○	○	○	○	○	○							○	
イギリス		A	○		○		○	○		○						
オランダ		A	○		○											
スイス		A	○		○	○	○	○		○						
日本	自動車専用道路	A	○	○	○	○	○	○	○							
		C	○	○	○	○		○				○	○			
	交通量の多い一般道路	A	○	○	○	○	○	○	○							
		C	○	○	○	○	○		○				○	○		
	交通量の少ない一般道路	A	○	○			○			○						
		C	○	○			○							○	○	

注) 舗装種別 A:アスファルト舗装, C:コンクリート舗装

2.4.2 路面管理の複合指数

各機関は、それぞれが管理する道路の現状に合わせ、複数の管理項目を組み合わせた評価式を開発するなど、管理基準値を設定している。

カナダでは、複合指数の 1 つとして、舗装総合品質指数 (PQI: Pavement Quality Index) が開発されている¹⁰⁾。この指標は乗り心地、路面損傷及び支持力の 3 つの指数を関数として定義されており、工法の選択及び工法の優先順位の決定に用いられている。

また、米国の各州でも各々独自の複合指数を開発しており、非常に多くの指数が提案されている¹¹⁾。複合指数を構成する要素としては、路面損傷、支持力、乗り心地及びすべり抵抗が 4 大要素となっている。

また、複合指数化が困難であるにしても、要素毎に限界値を設定し、舗装のサービス性能を評価する必要がある。

2.4.3 国内で用いられている管理指標

わが国では、国道など一般道路における路面性状の管理指標としては、PSI (Present Serviceability Index: 供用性指数) あるいは MCI (Maintenance Control Index: 舗装維持管理指数) といった総合評価指標が用いられており、わだち掘れ量、ひび割れ率及び平坦性の3要素によって評価が行なわれている。

なお、高速自動車国道（日本道路公団）では、わだち掘れ、ひび割れ及びすべり抵抗等を個々に管理している。

(1) PSI

AASHO 道路試験の成果として、舗装のサービス性能評価指標である PSI が考案された。路面プロファイル測定とその上を走行した被験者による路面評価を基礎として、1960 年代に開発された¹²⁾。わが国では、上記 AASHO 道路試験結果を参考に、現場の実情に合わせて作られた式(2.1)が用いられている。

$$PSI = 4.53 - 0.518 \log \sigma - 0.317 \sqrt{C} - 0.174 D^2 \quad (2.1)$$

ここで、 σ : 縦断凹凸量（平坦性） [mm]

C : ひび割れ率 [%]

D : わだち掘れ量 [cm]

PSI は乗り心地指数とも呼ばれており、ドライバーの乗り心地を中心に舗装路面の評価を行なうものであるが、要因の中では、破損の程度が大きくなるに伴い、わだち掘れの寄与率が大きくなる。一般に、管理路線全体や各路線単位などネットワークレベルで、補修の優先順位及び対象工法を決定するために利用されているが⁵⁾、わが国では国情の相違等の理由により、次に示す MCI が用いられている場合が多い。

(2) MCI

MCI は、建設省（現国土交通省）が全国の直轄国道における基準検査及び一般検査の結果を基に開発した指数である¹³⁾。計算式を式(2.2)～(2.5)に示す。

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad (2.2)$$

$$MCI_0 = 10 - 1.5C^{0.3} - 0.3D^{0.7} \quad (2.3)$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3} \quad (2.4)$$

$$MCI_2 = 10 - 0.5D^{0.7} \quad (2.5)$$

ここで, σ :縦断凹凸量 (平坦性) [mm]

C :ひび割れ率 [%]

D :わだち掘れ量 [cm]

なお, コンクリート舗装の場合は, ひび割れ度 (C_0) に係数 (h) を乗じてひび割れ率に換算する.

ひび割れ度 ≥ 5 の場合: $h = 1$

ひび割れ度 < 5 の場合: $h = (C_0 + 25)/30$

PSI がドライバーの乗り心地を中心に評価する手法であるのに対し, MCI は舗装の維持管理を行なうための手法として開発されたものであるため, 道路管理者の立場の評価指数となっている. したがって, 舗装の耐久性も含めた評価を行う必要があることから, ひび割れ率の MCI に対する寄与率が比較的大きく設定されている.

さらに, 式 (2.3) ~ (2.5) のように, 要因の 1 あるいは 2 要素による評価式も含め評価できることから, 例としてわだち掘れが極端に大きくなった場合は, ひび割れ及び平坦性に関係なく補修を行なうべき評価指数として計算される¹³⁾.

2.4.4 従来の管理指標の問題点

近年, 東京都では都道の破損特性に着目した独自の管理指標 MNI (Maintenance necessity Index: 要補修指標) を用いるようになった. MNI は路面性状の 3 要素を各 10 点満点で評価し, いずれかが要補修判断基準値 (MNI=5: ひび割れ率 15%, わだち掘れ 25mm, 平坦性 6mm) を超えた場合, 他の性状値の良否に関わらず補修が必要と判断される仕組みになっている¹⁴⁾.

東京都の例に限らず, 近年, 交通事情の変化, 舗装に対する要求水準の高度化及び多様化に伴い, 「MCI が実態に合わない」と指摘されるようになった¹⁵⁾.

池田らは, MCI に対する各路面損傷の影響度を数量化理論 II 類によって分析を行っている (表 2.2)¹⁵⁾. ここでは, 目的変数を MCI, 説明変数を路面損傷として分析がなされており, レンジの値が大きいほど影響度は大きい.

表 2.2 MCI へ与える路面損傷の影響度¹⁵⁾

調査項目	カテゴリー	カテゴリースコア	レンジ
ひび割れ	大	-0.51	0.62
	中	-0.11	
	小	0.11	
わだち掘れ	大	-0.37	0.52
	中	-0.10	
	小	0.15	
平坦性	大	-0.25	0.21
	中	-0.09	
	小	-0.04	

この分析結果によると、MCI における平坦性の影響はひび割れ及びわだち掘れに対し非常に小さいことがわかる。しかし、関口の報告によると、東京都道約 1,200km の調査の結果、路面損傷パターンに占める平坦性の割合は高く、約 55%（単独破損及び複合破損の合計）に達している¹⁴⁾。平坦性はひび割れやわだち掘れと比較すると維持管理の対象としての認識が低く、これまで研究例は少なかったが、運転者及び乗客の乗り心地、あるいは荷物の損傷など、道路利用者の立場で考えると、平坦性は路面性状の中で最も重視されなければならない^{16), 17)}。東京都で MNI という独自の指標が開発された背景には、MCI では平坦性が評価されにくいことも一因と推察される¹⁴⁾。

このことを別の視点から考察すると、平坦性評価値の計算方法にも問題があると思われる。平坦性評価値は、3m プロフィロメータまたはこれと同等の測定方法によって得られた測定結果を基に、1.5m 間隔で基準線からの変位を読み取り、その標準偏差（ σ ）を算出することによって求められる（図 2.2）⁵⁾。ゆえに、この評価値にはポットホールなどの局所的な凹凸の情報が反映されていないことがある。さらに、エイリアジングの影響を防ぐ

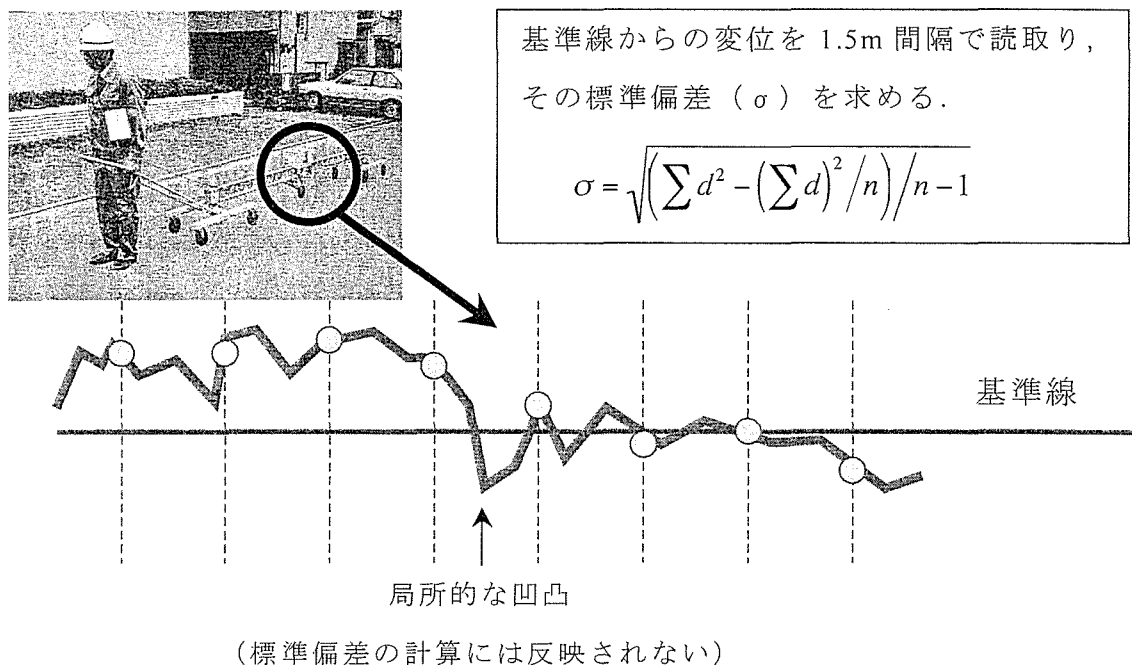


図 2.2 平坦性評価値の計算方法とその問題点⁵⁾

ためのフィルタ処理についても行われておらず、また測定結果には測定装置固有の特性が現れるため、絶対基準で測定された結果と比較すると、波形の形状は大きく異なる（図 2.3）。したがって、MCI などの計算に用いる平坦性評価値の値は過小評価されている可能性がある。

このことから、従来の平坦性評価値は、測定装置である 3m プロフィロメータの本来の用途である竣工時の仕上り検査のみ用いられるべき値であり、路面に損傷が生じた場合など、供用性が低下している場合には適用すべきではないと考えられる。

路面プロファイルの測定及び評価に関する近年の研究動向については次章に記す。

2.5 舗装路面の調査及び補修¹⁾

道路は、災害や陥没・倒壊、崩落などが発生すると、その価値が初めて

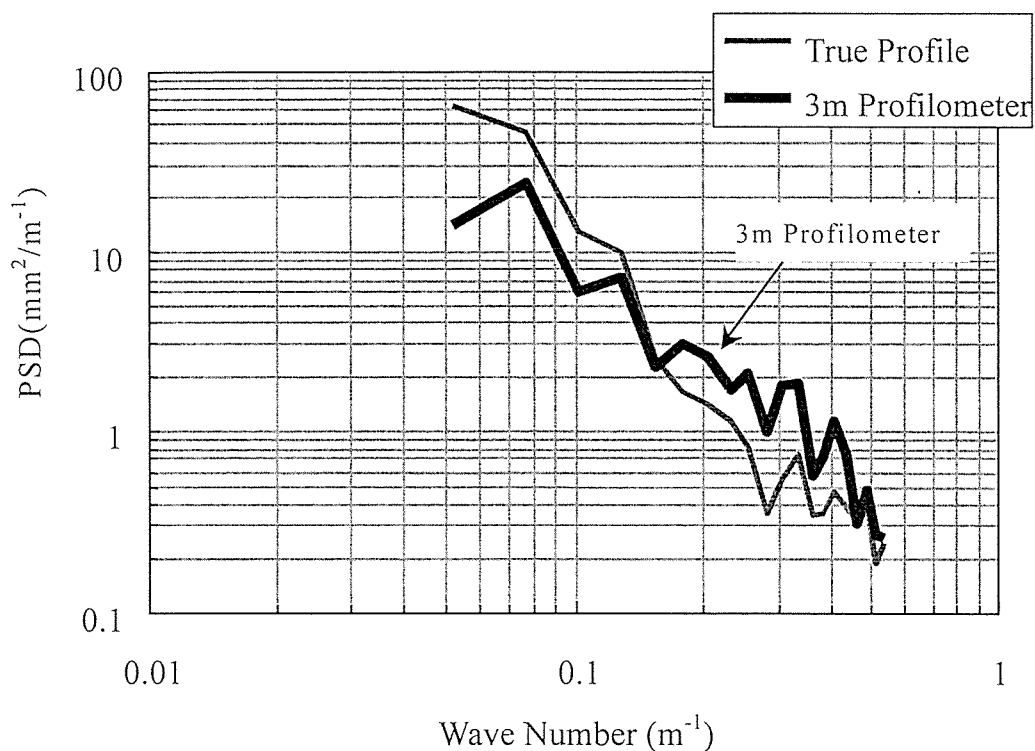


図 2.3 3m プロフィロメータと絶対基準（True Profile）の測定結果の比較

わかる施設である⁵⁾。したがって、常に安全で安心して利用できる状態に管理、補修されていることが不可欠である。本節では、既設舗装における路面の調査及び補修について述べる。

2.5.1 舗装路面の調査

適切な補修を行なうため、事前に既設舗装を調査し、その結果に基づき舗装を評価する。既設舗装の調査においては、舗装の破損状態に加え、補修の計画・設計に必要な関連事項についても調査し、常時それらのデータを有効利用できるように整理されていることが望ましい⁷⁾。

調査は、道路網全体の補修計画に係わるものと補修の実施段階に係わるものとに大別される。前者は主に路面状態を把握するための定期調査と巡回調査があり、後者には個別箇所の調査として目視観察や破損状態の調査等がある。ここで、最も基本かつ重要なことは、日常の定期的な点検であると思われる。具体的には、危険の予知やバリアフリーなどの問題意識を持ち、効率

的な巡回パトロールを実施することである。例えば、東京都では年間 3 万件を超える異常等を発見し即時対応しているが、この中には路面のわずかなたわみから舗装下の巨大な空洞が発見された場合、ポットホールから床版の抜け落ちの危険性を発見するなどの事例も報告されている¹⁸⁾。

補修を必要とする箇所を選定、優先順位付け、工法の選択及び実施時期の決定にあたっては、各種調査により得られた結果に技術的判断を加え、舗装の評価を行なう。現在は主に前節の MCI が用いられているが、舗装の評価項目及び管理水準は、管理する道路の重要性、地域性なども考慮される必要がある。各道路管理者が個別に管理水準を定めることが望ましいとされている。

なお、破損状態の調査方法については、日本道路協会編「アスファルト舗装要綱」¹⁾及び「セメントコンクリート舗装要綱」¹⁹⁾、個々の調査項目に対する調査方法については、同協会編「舗装試験法便覧」²⁰⁾等に詳細が示されている。

2.5.2 舗装路面の補修⁷⁾

補修には、道路全体の補修を計画する段階、選定された箇所を実施計画する段階、及び補修工事を実施する段階がある。補修の手順を図 2.4 に示す。

道路網全体の補修計画では、管理区間内の全路線を単位区間に分割し、各区間の供用性能を比較評価することにより補修の優先順位をつけ、道路網全体の立場から補修の実施計画を立てる。定期調査や巡回観察により発見された路面のうち、緊急の措置を要するものについては、経験等により工法を選択し、ただちに補修を行なう必要がある。

補修の実施段階の計画では、道路網全体の計画段階で選定された補修が必要とされる区間について、必要な調査を実施し、補修工法、実施時期などの検討を行ない合理的な実施計画を立てる。補修を適切に実施するためには、舗装台帳または調書を逐次整備し、補修の履歴等を明確にすることが望ましい。

補修工事は、施工計画の立案後、それに基づき材料及び施工機械を調達し、合理的に所定の品質及び出来形を確保するように施工する。

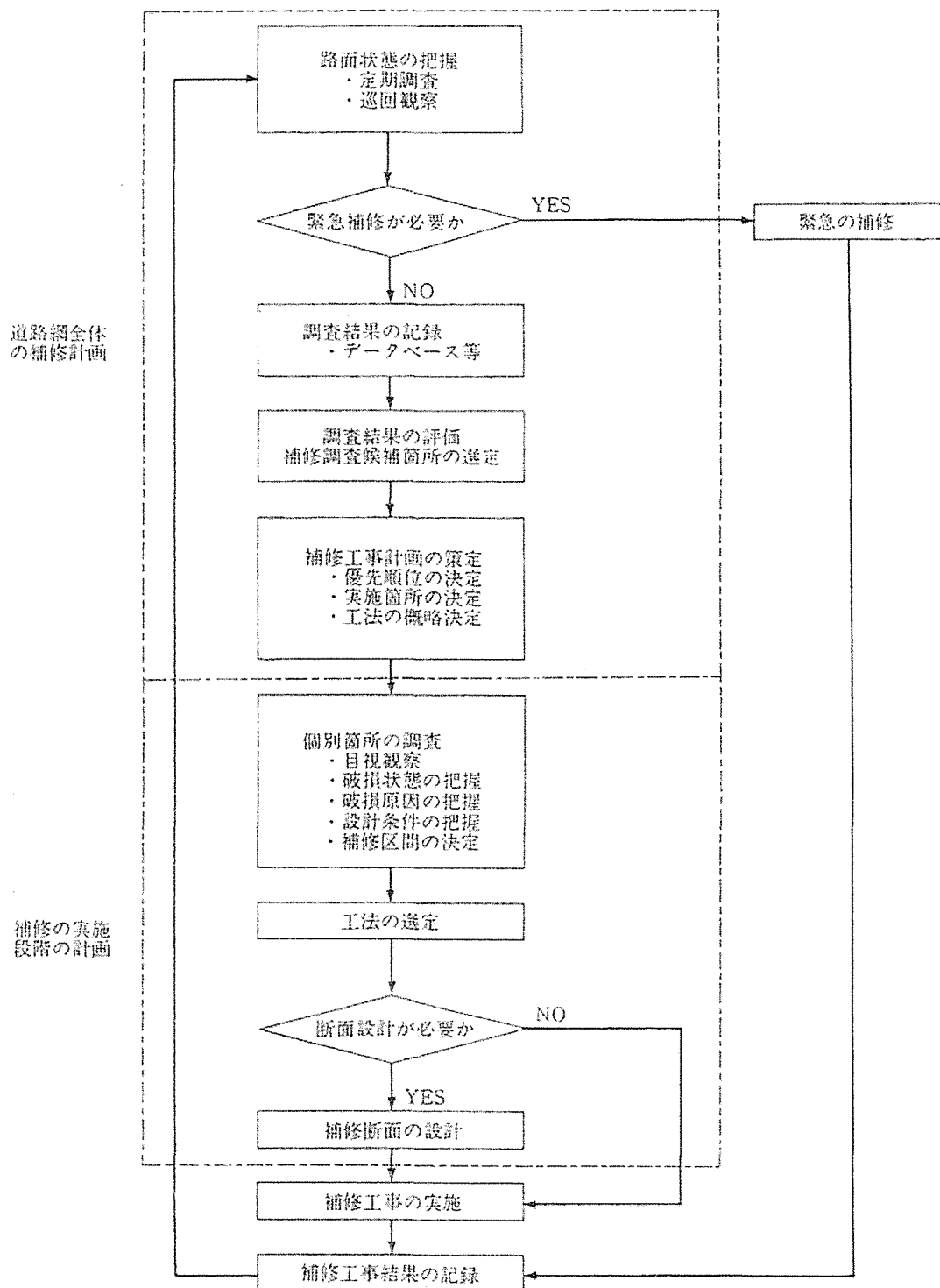


図 2.4 舗装の補修手順¹⁾

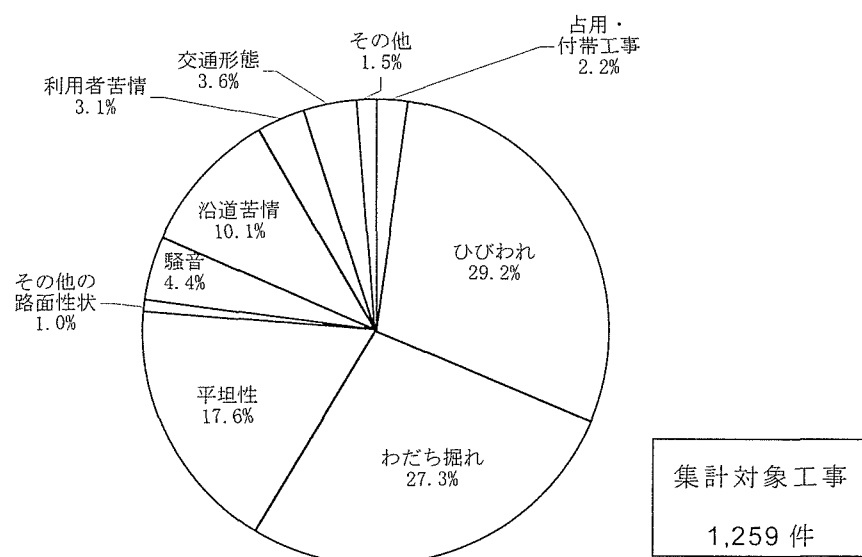


図 2.5 舗装修繕要因 ⁴⁾

2.5.3 アスファルト舗装修繕の実態 ⁴⁾

寺田らによるアスファルト舗装の修繕に関する実態調査の報告によると、わが国における修繕原因はひび割れ、わだち掘れ、平坦性といった路面性状を原因とするものが多く、全体の 75%を占めている(図 2.5, 1998 年の調査結果)。また、騒音、沿道や利用者からの苦情などが路面性状に起因しているものと考え、路面性状が原因となる修繕は全体の 90%以上を占めている。この場合の修繕工法としては、70%が表層・基層打換えであり、全層打換えは 12%であった。

またこの報告には、設計期間内の舗装の破損状態は以下の傾向があると要約されている。

- i) 交通量が多くなるほど、又は舗装厚 (T_A) が厚くなるほど機能的破損(表層・基層部分の破損)が生じやすく、軽交通または T_A が薄いほど構造的破損(路盤までの破損)が生じやすい。
- ii) 軽交通箇所では設計期間を超えると構造的破損が起こりやすい。
- iii) 軽交通より重交通、あるいは新設舗装より修繕舗装の方が早期の破損が起こりやすい。
- iv) 前回の施工が新設よりも修繕の場合の方が機能的破損を起こしやすい。
- v) 以上のことから、 T_A 法に基づき設計された舗装の破損は機能的破損

が多く、構造的破損が少ないと思われる。したがって、設計期間内の舗装の破損を防ぐためには、機能的破損対策、特に重交通箇所や修繕舗装についての機能的破損対策を十分に検討する必要がある。

2.6 舗装マネジメントシステム

2.6.1 舗装マネジメントシステムとは

舗装のライフサイクルの概念は、一般に図 2.6 に示される。図 2.6 において、縦軸は供用性能（パフォーマンス）を表すが、これは舗装の支持力、路面性状及び要求される機能の程度を表す概念である⁵⁾。

通常、新設時の供用性能が最も高く、経年に従って劣化が進行する。これが補修基準値に達すると、修繕が必要となる。修繕後、供用性能は回復するが、一般的に新設時に比べると次の修繕に至るまでの期間は短い。修繕が度重なると、新設直後の供用性能までは回復できなくなるため、新設と同等の大規模な修繕を行うことになる¹⁰⁾。

このようなライフサイクルの考え方をもとに、舗装を効率的かつ総合的に運用、管理するための概念と方法論を舗装マネジメントシステム（PMS）という。これは、舗装に係わるすべての行為（計画・調査・設計・施工・維持・修繕・評価など）と、データベースさらには研究開発とを総合的に取り入れ

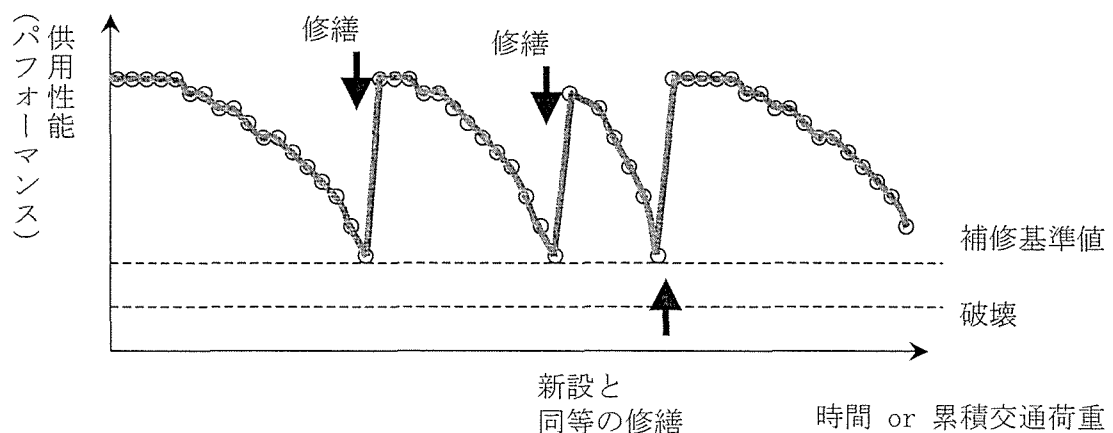


図 2.6 舗装のライフサイクルの概念図⁵⁾

たシステムである^{7), 21), 22)}。PMS の特徴は、ある解析期間において舗装利用者に対するサービスをあるレベル以上に保つために必要な費用（管理者費用と利用者費用の和）を最小化する経済解析にある。PMS の全体的な枠組みについては、Hass らが述べている²¹⁾。その後、国際的に PMS の有用性が認められ、現在、諸外国では舗装施策の中心に PMS を据えている²²⁾。特にアメリカの各州では、PMS を運用することが連邦政府によって義務づけられている²²⁾。

土木構造物のマネジメントシステムの歩みとしては、欧米を中心に 1970 年頃に考案された舗装マネジメントシステムを皮切りに、1980 年代の橋梁マネジメントシステム、1990 年代の道路資産マネジメントと推移し、今日では社会資本のマネジメントシステムへと発展している^{22), 23)}。ここで注目すべき事項としては、PMS が土木構造物のマネジメントシステムの先駆的な位置付けとされている点である。この理由としては、舗装は他の構造物に比べ寿命が短く、敷設後 10 年程度で設計期間に達することから、特にこのようなシステムが必要になったと推察される。

2.6.2 プリベンティブ・メンテナンス

現在、最も理想的な土木構造物のマネジメントシステムの例として知られているのは、東海道新幹線における軌道狂い管理の例である²⁴⁾。新幹線では、開業当初から 10 日に 1 回、営業線全線の測定が行われており、東海道新幹線の場合、過去 40 年間の豊富な軌道狂い（線路のゆがみ）データから精度の高い供用性曲線（パフォーマンスカーブ）が算出されている。さらに有道床軌道でありながら最高速度 270km/h の測定も行われており、世界的にみても最高水準の測定システムといえる²⁵⁾。

東海道新幹線において上記のように高水準の測定及び軌道狂いの劣化予測が行われている背景の一つには、プリベンティブ・メンテナンス（Preventive Maintenance, 以下、「PM」という）を指向していることもその一因ではないかと推測される^{26), 27)}。

PM とは、供用性能が十分に高い段階で修繕を予防する、あるいは遅らせる目的で採用される計画的なメンテナンス手法であり、予防的保全といえる

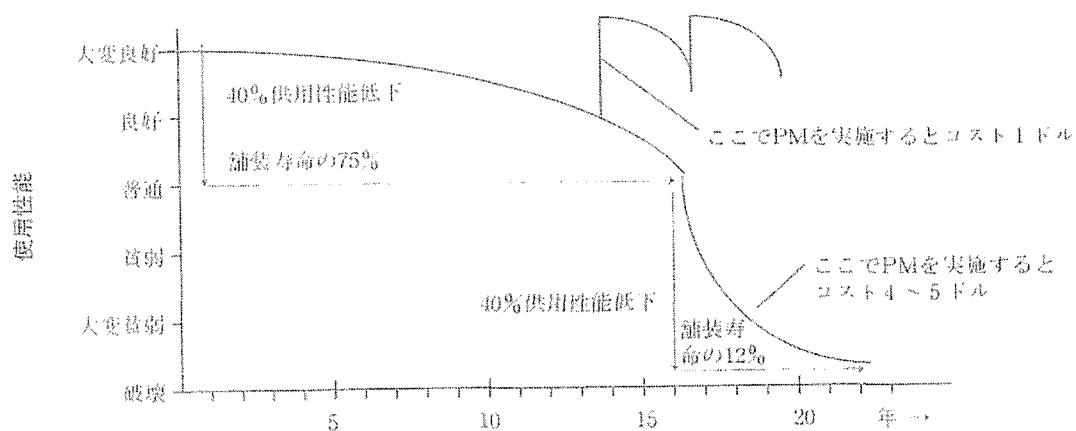


図 2.7 プリベンティブ・メンテナンスの例 ²⁷⁾

ものである ²⁵⁾、²⁶⁾。現在 PMS が運用されている区間では、将来的に、PM の考え方が導入される方向となりつつある ²⁶⁾。

PM を実施する上で特に重要な点は、適切な時期にメンテナンスを繰り返し行う点である (図 2.7) ²⁵⁾。このことによって後の供用性能の低下を小さくするとともに、本格的な修繕までの時期を延ばすことにより、長期的にはライフサイクルコストを抑制することが可能となる。そのためには、供用性能の測定精度及びその頻度の向上が求められる ²⁸⁾。

道路舗装における PM の採用例としては、アメリカ (ミシガン州) 及びカナダ (オンタリオ州) の研究報告が知られており、Lee らは動的輪荷重が路面損傷へ及ぼす影響を低減し舗装寿命を延長する目的で、路面のラフネスの管理基準値の設定方法について述べている ²⁶⁾、²⁷⁾。

2.6.3 わが国における PMS の現状と問題点

わが国における PMS の現状としては、幹線道路 (主要国道など) においては 3 年に 1 度の周期で路面性状測定車と呼ばれる高性能測定装置による調査が行われている ²⁹⁾、³⁰⁾。この調査結果に基づく舗装のライフサイクルの概念を図 2.8 に示す。

ここで、例えば舗装の供用性能が劣化し補修基準値に達した際、現状では路面性状測定車の測定周期と一致するとは限らないため、道路管理者または道路関連企業が所有する可搬式の測定装置によって調査が行われる。この際、供用性

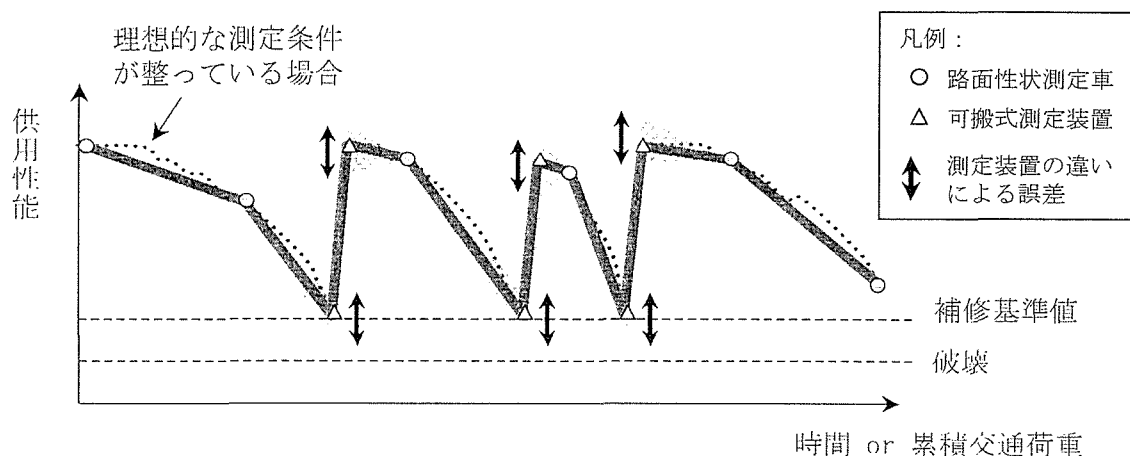


図 2.8 幹線道路における舗装のライフサイクルの概念図

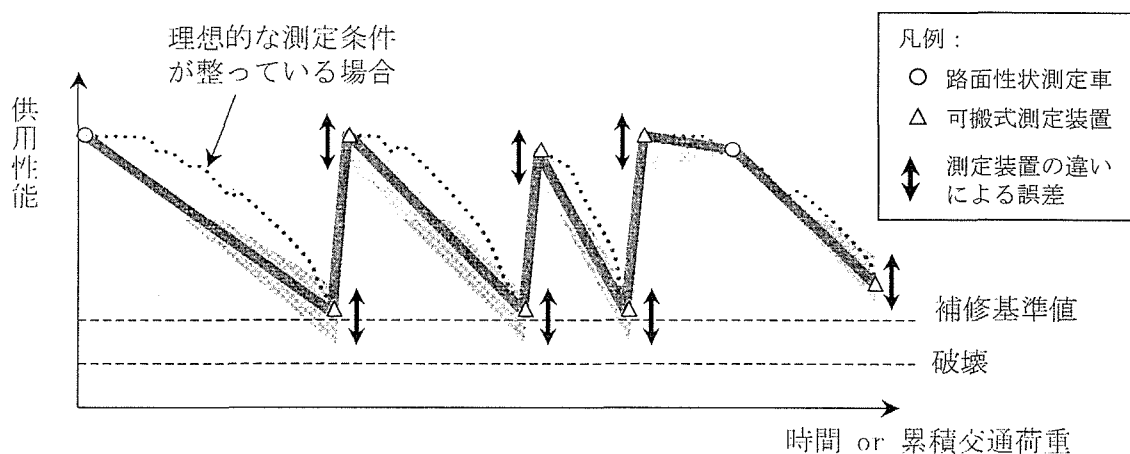


図 2.9 一般道路における舗装のライフサイクルの概念図

曲線は図中の太線のような形状が考えられ、理想的な測定条件が整っている場合（先述の東海道新幹線のような場合）と比較すると誤差が生じる。さらに、測定装置の違いがあるため、路面性状測定車を基準とすると、現場の可搬式測定装置による測定結果は一定の誤差範囲を伴うことになる。

以上は幹線道路の例であり、市町村道など一般道路では、路面性状測定車による測定は極めて稀であるため、道路パトロール時の目視検査が主体となる³¹⁾。したがって、定量的な測定は修繕の直前・直後のみであり、さらに測定の誤差範囲を考慮すると、路面性状の経年変化を定量的に把握することはほぼ不可能であると考えられる（図 2.9）。

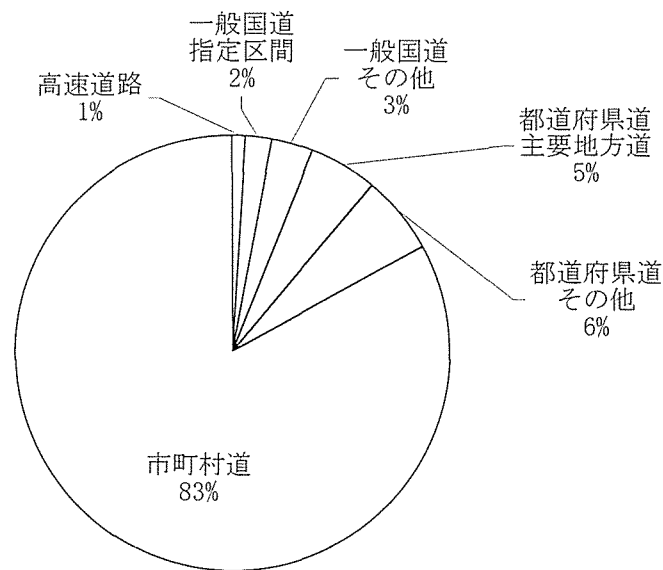


図 2.10 わが国の道路延長の内訳⁶⁾

わが国の道路延長の内訳は，図 2.10 のように示される⁶⁾．総延長約 117 万 km のうち，ほとんどの道路は一般道路であるため，路面性状測定車による測定は一部の道路に限られているのが現状である．さらに路面性状測定車の普及には数千万円～数億円単位の初期コストを要するため，現在，地方自治体には財政的な余裕がないことから，普及にはまだ多くの時間を要すると思われる．

上記のように，PMS の成否は，将来の舗装の劣化状況について，どの程度正確に予測することが可能かという点にある．そこで本研究では，一般道路などにおける PMS の構築を実現するため，既存の測定装置を有効活用する方法について，次章より考察する．

参考文献

- 1) 日本道路協会編：アスファルト舗装要綱，丸善，1993.
- 2) 川島義昭，坂田耕一，川野敏行：道路舗装に関する試験法，山海堂，1982.
- 3) 日本道路協会編：道路維持修繕要綱，丸善，1981.
- 4) 寺田剛，吉田武，東嶋奈緒子，池田拓哉：アスファルト舗装の修繕に関する実態調査，道路建設，No.637，pp.72-76，2001.
- 5) 多田宏行編：道路工学，オーム社，1998.
- 6) 国土交通省道路局：道路統計年報 2002 年版，全国道路利用者会議，2002.
- 7) 山之口浩，丸山暉彦：超・舗装学入門 アスファルト舗装修繕技術 続・舗装学のすすめ・A から Z まで，山海堂，1997.
- 8) 菊川滋，久保和幸，達下文一，羽山高義，丸山暉彦，山之口浩：最新アスファルト舗装技術，舗装学のすすめ・A から Z まで，山海堂，1995.
- 9) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会編：舗装工学，丸善，1995.
- 10) Hass,R. and Hudson,W.R.: Pavement Management Systems, McGraw-Hill Book Company, 1978.
- 11) Baladi,G.Y.,Novak Jr,E.C. and Kuo,W-H.: Pavement Condition Index - Remaining Service Life, American Society for Testing Material Special Technical Publications, No.1121, pp.63-90, 1992.
- 12) 川村彰：講座 路面の評価(1) -平坦性に着目して-, 舗装, Vol.36, No.8, pp.31-35, 2001.
- 13) 飯島尚，今井博，猪股和義：MCI による舗装の供用性の評価，土木技術資料，Vol.23, No.11, pp.15-20, 1981.
- 14) 関口幹夫：東京都の舗装管理情報システム (PMS)，舗装，Vol.29, No.5, pp.23-32, 1994.
- 15) 池田拓哉，東嶋奈緒子：道路管理者における MCI の適合性の再評価，舗装，Vol.33, No.7, pp.16-19, 1998.
- 16) 川村彰，七五三野茂，鈴木一隆，木村篤史：道路利用者の視点から見た高速道路の平坦性について，舗装工学論文集，Vol.4, pp.1-8, 1999.

- 17) 土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来，土木学会論文集，No.472，pp.13-28，1993.
- 18) 依田俊治：問われる「管理の時代」，舗装，Vol.38，no.1，pp.11-12，2003.
- 19) 日本道路協会編：セメントコンクリート舗装要綱，丸善，1973.
- 20) 日本道路協会編：舗装試験法便覧，丸善，1988.
- 21) Hass,R., Hudson,W.R. and Zaniewski,J. :Modern Pavement Management, Krieger Publishing Compony, 1994.
- 22) 笠原篤：舗装マネジメントシステム，土木学会論文集，No.478/V-20，pp.1-12，1993.
- 23) 山本鎮男編著：ヘルスマニタリング -機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視-，共立出版，1999.
- 24) 大竹敏雄，川崎祐征，青木衛市，佐藤吉彦：軌道管理システム TOSMA の開発，日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集，Vol.6，鉄道シンポジウム編，pp.271-274，1997.
- 25) 窪野代男：T4 導入後の乗り心地管理，新線路，Vol.56，No.8，pp.28-31，2002.
- 26) Lee,D.,Chatti,K. and Baladi,G.Y. :Use of Distress and Ride Quality Data to Determine Roughness Thresholds for Smoothing Pavements as a Preventive Maintenance Action, Journal of the Transportation Research Record, No.1816，pp.43-55，2002.
- 27) 七五三野茂：プリベンティブ メンテナンス（PM），道路建設，No.610，pp.60-61，1998.
- 28) 渡辺忠，神野稔久：舗装の供用性に関する 2, 3 の検討，道路建設，No.583，pp.34-42，1996.
- 29) 小野田光之：講座・路面の評価(3)路面性状測定車(自動測定装置)，舗装，Vol.36，No.10，pp.34-39，2001.
- 30) 丸山記美雄，岳本秀人，星野吉昇，岡本和久：寒冷地におけるアスファルト舗装の路面性状経年変化に関する検討，舗装，Vol.38，No.11，pp.3-7，2003.
- 31) 相馬幸六，山之口浩，笠原篤：中軽交通道路における舗装修繕のための手法 -舗装評価データベースと構造評価の利用-，舗装，Vol.30，No.10，pp.25-33，1995.

第 3 章

路面プロファイルの測定及び 評価に関する既往の研究

第3章 路面プロファイルの測定及び評価に関する既往の研究

3.1 舗装の波状特性分類

路面は、物理的には縦横断方向に空間的な広がりをもつ立体的なものであるが、その大きさを定量的に把握するには、ひびわれなど一部の損傷を除き、路面プロファイルの測定が必要である。路面プロファイルは、図 3.1 に示されるように、縦断と横断プロファイルがあり、各方面における路面をスライス状に切断したとき、路面高及び距離で表現される 2 次元データにより収集される^{1), 2)}。

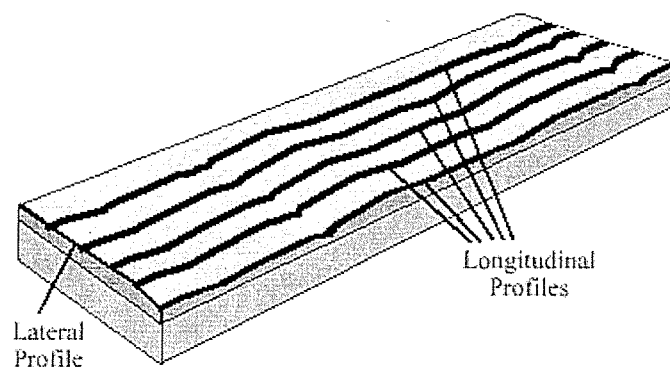


図 3.1 路面プロファイル²⁾

舗装の路面特性は、舗装の維持や車両の消耗のみならず交通安全、乗り心地、環境保護やエネルギーの節約等を含めた評価のための決定要因に直接影響を与えるもので、時の経過と共に質的に変化をするものである。このような性質を有する路面特性を体系的に把握する方法について、Hiersche および PIARC から以下の提案がなされている³⁾。

3.1.1 Hiersche による分類⁴⁾

Hiersche は、路面特性は、路面が本来有する基本的特性と、それから派生する特性とに区別することができるとしている。基本的特性は、舗装された路面が本質的に関係する性質を表し、1) 平坦性、2) ラフネスおよびテクスチ

ェア，3)輝度，さらに場合によっては，4)幾何形状，5)舗装表面の材料物性からなる．これらの路面の本質に関係する性質は，異質の要素を含んでいるため，このままでは路面の最適化のための重み付けは困難であるが，「平坦性」と「ラフネスおよびテクスチャ」との関係は，「平坦性」と「輝度」との関係よりも理解しやすく，互いに密接である．

また，路面により派生して起こる種々の特性は，気象状況，日照状況(照明状況)およびタイヤ，サスペンションスプリング，ライト，速度などの車両状況に関連する舗装表面の特性があり，具体的には，1)運転操作への動的影響，2)排水性，3)すべり抵抗，4)光反射特性，5)タイヤ・路面間騒音，6)転がり抵抗，7)熱力学特性，8)摩耗などが挙げられる．

このうち，1)は，車の3次元的な挙動を含む「運転者－路面システム」を意識した舗装面がドライバーの運転操作に及ぼす動的効果に関連する．これらの特性分類より，特性間の相関関係に着目しながら路面の最適化対象および道路設計，交通，環境などへの影響について整理したものが図3.2である．

ここで注目すべき点としては，基本的特性のうちの「平坦性」である．図3.2から判断できるが，派生特性とリンクする線数が最も多く，道路利用者の評価に関する要素が多くなっている．このことは，PMSの観点から述べ

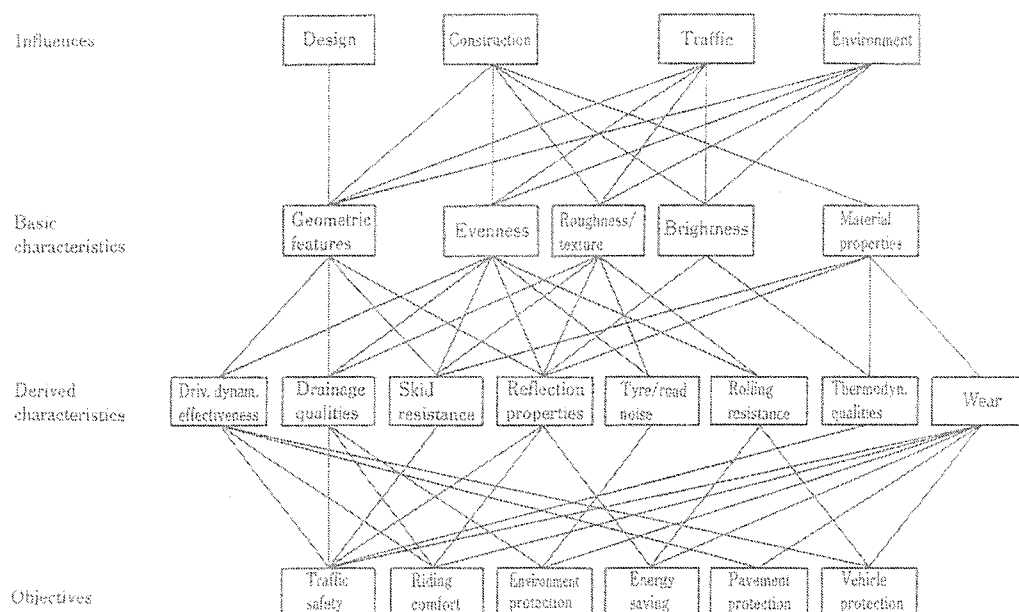


図 3.2 舗装路面の概念³⁾

られている「道路利用者費用と最も関係のある路面特性は平坦性」の根拠を与えているとも捉えることができる¹⁾。本研究では、道路利用者費用の軽減及び道路交通の安全確保を主目的としているため、以下、道路利用者のニーズと最も関係が大きい「路面縦断プロファイルの平坦性」に着目する。

3.1.2 PIARC による分類⁵⁾

一方、PIARC では、主として路面の幾何形状により路面の特性を分類し、他の要因への影響評価に用いている。図 3.3 は、PIARC の路面性状に関する技術委員会 C1 によって定義された路面特性の対象領域であるが、「マイクロテクスチュア」、「マクロテクスチュア」、「メガテクスチュア」及び「ラフネス」の概ね 4 区分で分類されている。これらは、いずれも路面が有する波状特性の波長により区分されているものである。図 3.3 では、これらの区分を基に、路面が誘因となって発生する車両もしくは乗員の動的応答特性に関連する尺度である「乗り心地」、「安全性」、「騒音」及び「オペレーティングコスト」などとの関連性について示されている。

ここで「平坦性」が属する波長帯は、図 3.3 より約 0.5～50m であることがわかる。この波長帯は、乗り心地、騒音、燃費、車のダメージなど、VOC (Vehicle Operating Costs) と称される車両の走行費用に関係している。

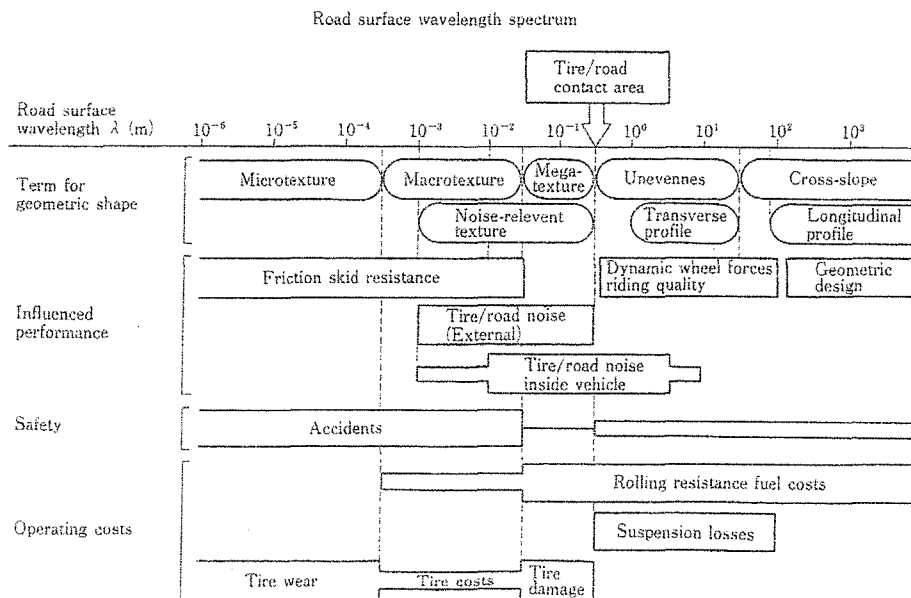


図 3.3 波状特性による舗装の分類図¹⁾

3.2 路面プロファイルの測定に関する既往の研究^{2), 6)}

3.2.1 低速による測定 (Viagraph から Profirograph まで)

水準測量以外の方法による路面プロファイルの測定は、1900 年頃、アイルランドの Brown, J. によって行われたものが最初の試みとされている。この際 Viagraph の名で知られるスライド直定規型プロファイラが作られた (図 3.4)。測定原理は、直定規の中心点の変位を記録することで凹凸を測定する初期の方法の一つが採用されている。図中、縦軸の Gain は、直定規の測定レスポンスを示している。このプロファイラの検出特性としては、長波長の感度は低いが、直定規の全長あるいはそれ以下の波長でレスポンスが 1 に近づくという特徴がある。

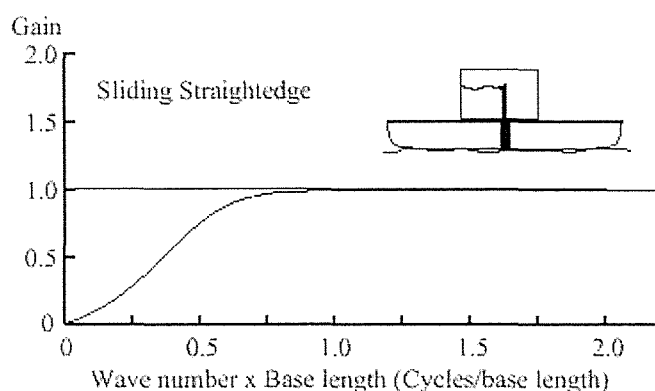


図 3.4 スライド直定規の検出特性²⁾

スライド直定規は、これを動かすための労力と装置自体の摩耗及び破損という問題点があり、その後、図 3.5 に示すローリング直定規の開発に至った。

ローリング直定規の検出特性は、3 点で路面に接触するため、波長によっては振幅が倍の値で記録されることがあり、逆に全く記録されない波長もある。すなわち、路面プロファイルのある決まった波長に同調するプロファイラであるといえる (この測定原理の詳細については、次章で述べる)。

路面プロファイルの測定技術としては、変位測定の基準面を確立するために車輪アレーを取り付けることによって上記の問題を解決する方向へ進展したことから、近年、ローリング直定規は用いられなくなった。

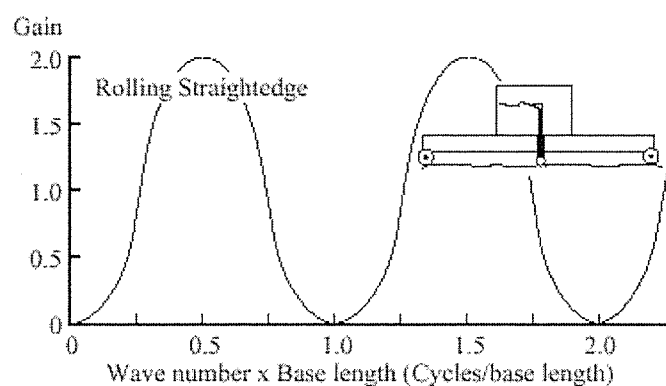


図 3.5 ローリング直定規の検出特性²⁾

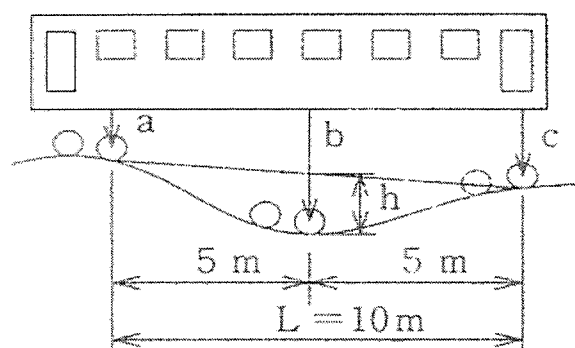


図 3.6 10m 弦正矢法の測定原理⁸⁾

ここで、道路舗装と同様に走行路の測定を行なっている鉄道線路の例を参照すると、フランスの Mauzin 車が基準面を多車輪の平均化処理によって確立した例があるが⁷⁾、わが国ではローリング直定規と同様の機構である 10m 弦正矢法（図 3.6）が主に用いられている⁸⁾。この理由としては、ローリング直定規の利点でもあるが、1) 検出機構が簡単であり、2) 検出特性が安定している点を重要視しているためである。しかしながら、近年の速度向上施策に伴い、10m 弦正矢法では十分に把握できない長波長の凹凸が問題となってきたため、倍長演算法⁹⁾及び後述する検出特性の補正法によってデータ処理が施されるようになった^{10), 11)}。鉄道線路においても高性能測定装置の開発は進められているが¹²⁾、その一方で検出特性の補正法及びこれを応用した線路補修方法に著しい技術的進展があったため、従来の測定データを有効利用する動きが高まりつつある^{13), 14)}。

本研究では、鉄道線路で普及しつつある検出特性の補正法を応用し、道路管理者及び道路関係企業へ広く普及したプロファイラの測定データを有効利用する方法について、次章より考察する。

ローリング直定規の問題点を基準面の確立によって解決したプロファイラは Profilograph と呼ばれており、わが国の道路管理者及び道路関係企業に最も普及している 3m プロフィロメータ及び 8m プロフィロメータはこの測定原理を用いている（図 3.7）。

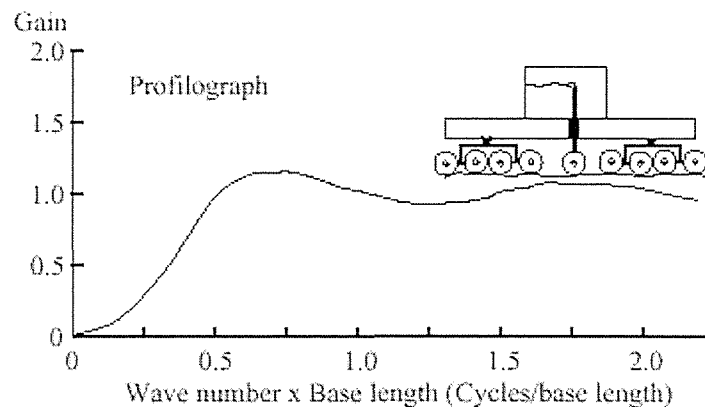


図 3.7 Profilograph の検出特性²⁾

Profilograph は、車輪アレーをボギー連結することにより、車輪で接する全ての点の高低を平均化し、これを基準として中央輪の変位を測定するものである。車輪数の増加によりレスポンスは理論的な限界に近づく。しかしながら、このタイプの測定装置の検出特性は多種多様であるため、道路の平坦性の指標を全世界的に標準化する動きは進展しなかった。

3.2.2 自動車車両を用いた測定（Via-Log から IRI の開発まで）

道路技術者の共通の認識として、自動車の振動励起の原因となる波長帯が路面プロファイル特性の中で最も重要であると認識し始めたのは 1920 年代に入ってからである。ニューヨーク州では、Via-Log を開発し（図 3.8）、乗用車のサスペンションの動きを指標化する試みがなされたが、自動車の動特性が多様であるため、車両を標準化する試みに移行した。

1941 年、BPR Roughometer が登場した。このプロファイラは単輪の

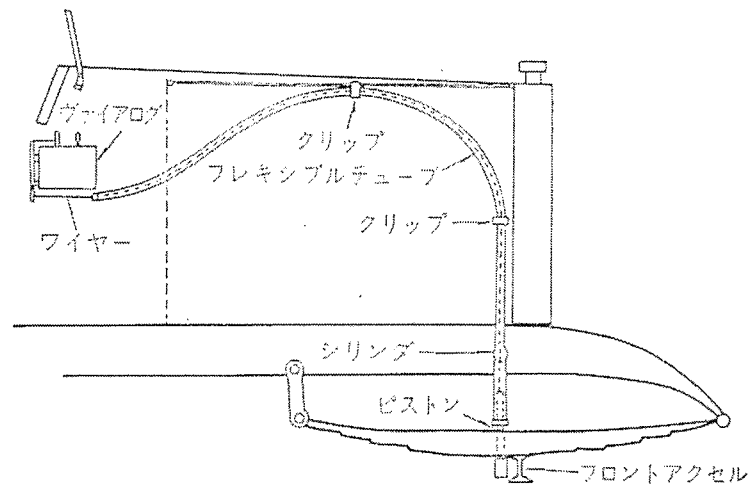


図 3.8 Via-Log¹⁵⁾

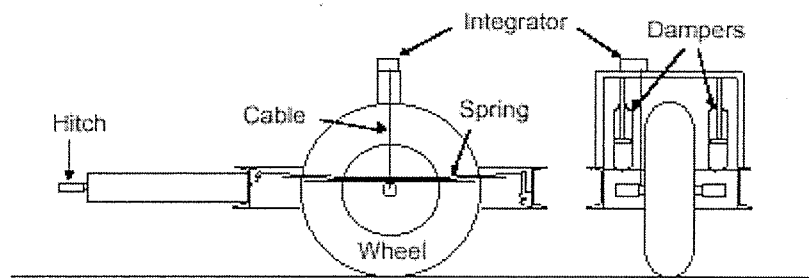


図 3.9 BPR Roughometer²⁾

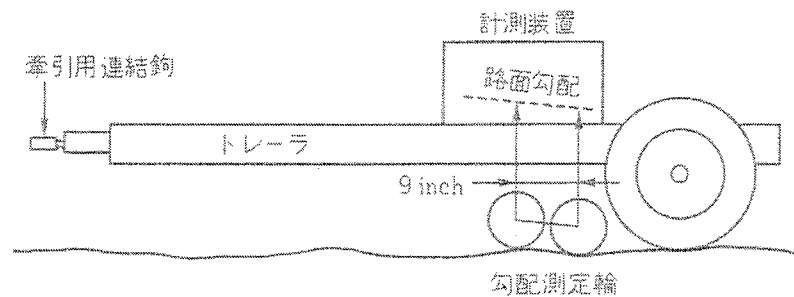


図 3.10 CHLOE⁶⁾

トレーラタイプであり、あらゆる装置上でパフォーマンスが比較できるよう、各部の寸法、重量、タイヤ及びサスペンションの特性が標準化されている(図 3.9)。

その他重要なプロファイラとしては、AASHO 道路試験時に開発された

CHLOE がある（図 3.10）。このプロファイラは、小型測定輪 2 個が前後間隔 9inch で装着された低速牽引トレーラタイプであり、勾配測定装置が取り付けられている。記録される信号は、勾配の変動であり、これは「inches/mile」という特有の値である。CHLOE で測定された勾配変動は、舗装のサービス性能という考え方の開発に使われた歴史的な値であったことは重要である。しかしながら、今日ではほとんど使用されていない。

1960 年代には、走行車両上で路面のプロファイル特性を測定するロードメータが開発された。これらの装置は比較的安価であり、自動車の車種を問わず装着でき、試験区間を走行しながら車軸の変位を測定することができる。ロードメータでは車軸変位の累積値が計測され、それは車両の動特性が加味された路面変位「inches/mile」である。この種の装置は、一般にレスポンス型道路ラフネス測定システム（RTRRMS: Response-Type Road Roughness Measurement Systems）として知られている（図 3.11）。

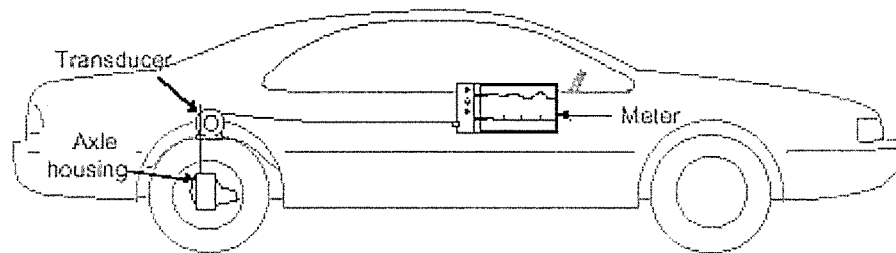


図 3.11 RTRRMS²⁾

RTRRMS は、構造が簡単であり低価格であったため、1970 年代までに米国の州道路局の約半数が導入している。しかし、「inches/mile」は、舗装の竣工検査などに適用したときには十分な精度が得られないことが多かった。予期されたことであるが、車両の動特性が異なっているために、異なるロードメータで同一の測定値が得られず、また個々のロードメータを使った日常業務で「整合したパフォーマンス」を得ることが困難であった。燃料の補給や乗員の増減、タイヤの空気圧調整、バランス調整、といった日常行為により装置のキャリブレーションに変化が生じたためである。結果として、車両の状態変化の管理や補償のための頻繁なキャリブレーション作業が必要になった。

上記の問題は1978年に全米道路共同研究計画(NCHRP)のプロジェクト1-18に「レスポンス型道路ラフネス測定システムのキャリブレーションと相関」として取り上げられている¹⁶⁾。同時期に、世界銀行は道路システムの開発にローンを提供しつつあった多くの国々において、道路費用モデルへの入力データとして比較可能な路面プロファイル測定値を得るという問題に直面しており、世界中に移植できる標準尺度が必要となっていた。そこで1982年にブラジルで行われたのが国際道路ラフネス実験(International Road Roughness Experiment)であり、この実験の成果によってIRIが開発された。

IRIは、一般的な車両が路面プロファイルから受けるレスポンスに基づいた1つのラフネス尺度であり、1)路面プロファイルの測定値を正確に取得し、2)ラフネス入力に対する基準車両の応答を2自由度のクォーターカーシミュレーションによって求め、3)サスペンションの動きを加算、という手順で行われる。したがって、IRIはロードメータの数学的な再現に相当する(図3.12)。

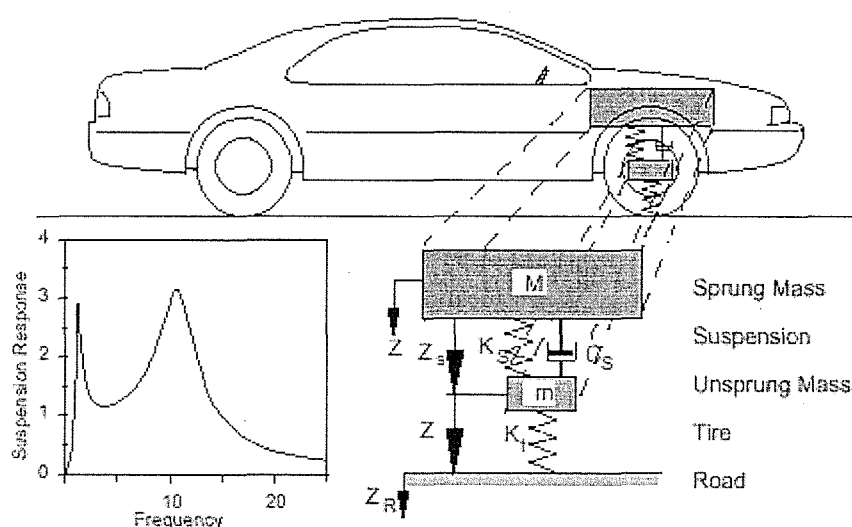


図 3.12 クォーターカーモデル²⁾

IRIの開発は、以下のコンセプトに基づいて行なわれた。

- i) 自動車の振動レスポンスに関係づけられる指標であること。これは、それまでの多くのラフネス指数が自動車のパフォーマンスと直接または間接に関連していたことに基づいている。

- ii) 時間に関して安定であるために道路のプロファイルと数学的に関係づけられる尺度であること。その理由としては、ハードウェアを標準化しようとの従来の試みはすべて不成功だったことによる。
- iii) 様々なハードウェア(すなわち、水準測量、RTRRMS、プロファイルメータ、等々)で測定できること。
- iv) 移植可能であること(すなわち、手順とハードウェアが、世界中どこでも確実に再現できるよう規定されること)。

IRI は、基本的に路面プロファイル上を走行した際の車の振動応答に関連する指標であり、車体のダメージや乗り心地評価に応用されることもある。IRI 値により路面状況を判断する場合、図 3.13 に示す IRI 尺度が利用されるが、未舗装路面から非常に高い平坦性が要求される高速道路、飛行場滑走路に至るまで、同一尺度で表現できる利点がある。

わが国においても IRI は注目されており、最近では 1) 高速道路における路面性状評価¹⁷⁾、2) B 交通程度以下の中軽交通道路向けの簡易路面調査システムに関する IRI の適用例の報告¹⁸⁾等がある。

なお、IRI についても入力データとなる路面プロファイルの測定は重要な

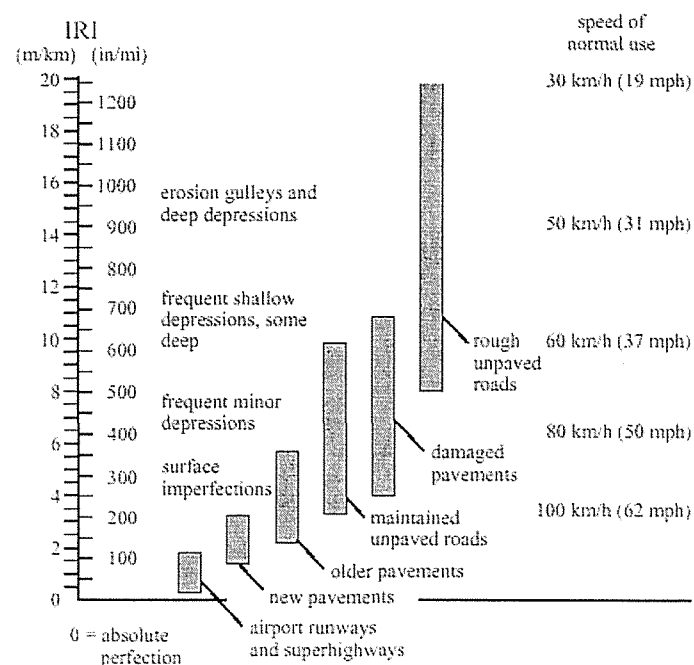


図 3.13 IRI 尺度²⁾

項目であり，GMR 型 Profilometer，Dipstick 及び水準測量など，世界銀行によって認定された測定装置を用いなければならない．

3.2.3 路面性状測定車及び可搬型高性能測定装置の開発

(1) 路面性状測定車の開発

前章で述べたように，道路管理者は道路利用者に対し，常にあるレベル以上のサービスを提供するために路面の補修を行なう必要があるが，舗装の供用性を総合的かつ定量的に判定するための客観的評価手法（例えば，MCI など）が導入されるに従い，データ収集時の安全性を確保するとともに，個々の路面性状データを高速かつ大量に計測する路面性状測定車の開発が強く望まれた¹⁹⁾．路面性状測定車は，1970 年代から開発が進められ，わが国では一部の国道において試験的に使用されていたが，全国的な舗装の補修に対する認識の変化とともに，路面性状調査の重要性が高まってきたことから，民間企業において積極的な技術開発が進められてきた．特に近年のコンピュータ，デジタルビデオ，非接触センサの急速な技術進歩によって，路面性状測定車が普及しつつある（写真 3.1）．この分野において，わが国の技術は世界的にも高水準にあり，1985 年に建設省（現・国土交通省）が実施した路面性状自動測定装置に関する建設技術評価制度がその役割を果たした²⁰⁾．現在，国道の総延長約 45 千 km のうち，毎年約 15 千 km について，路面性状測定車によってひび割れ，わだち掘れ及び路面プロファイルの 3 要素が測定されており，MCI 及び前述の IRI を算出するとともに，データバンクへの蓄積が行われている．



写真 3.1 路面性状測定車の例²¹⁾

路面プロファイルの測定方法については、レーザ変位計を車両に搭載し、通常の車両走行速度で測定する方式が主流である。現在、測定タイプとしては図 3.14 のように車両に取り付けられた 3 個の非接触型変位計を用いる三点逐次法と呼ばれるタイプ(以下、「Type A」とする)、または図 3.15 のように、加速度センサとジャイロ機構からなる慣性測定装置によって作り出された基準面からの鉛直位置及び車両/路面間の距離の差を用いて路面の縦断形状を算出するタイプ(以下、「Type B」とする)に大別される²²⁾。

このうち Type A は図 3.16 のような周波数特性を示す。この方法の原理は、ローリング直定規と同様である。

Type B については、測定機器によって仕様が異なり、周波数特性の理論値については公表されていない場合が多いが、図 3.15 からは線形など路面プロファイルの絶対形状を指向した測定システムであることが窺える²²⁾。例えば、秋本らの研究によると、逐次 2 点真直度測定法(図 3.17)と呼ばれる相

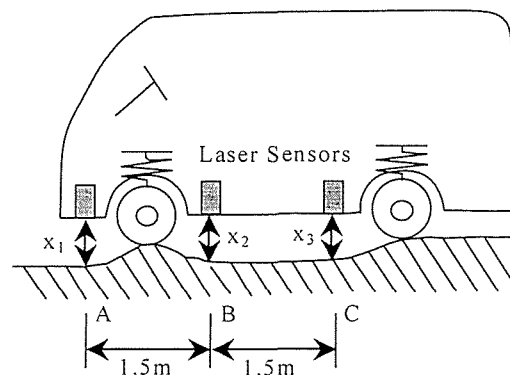


図 3.14 三点逐次法²²⁾

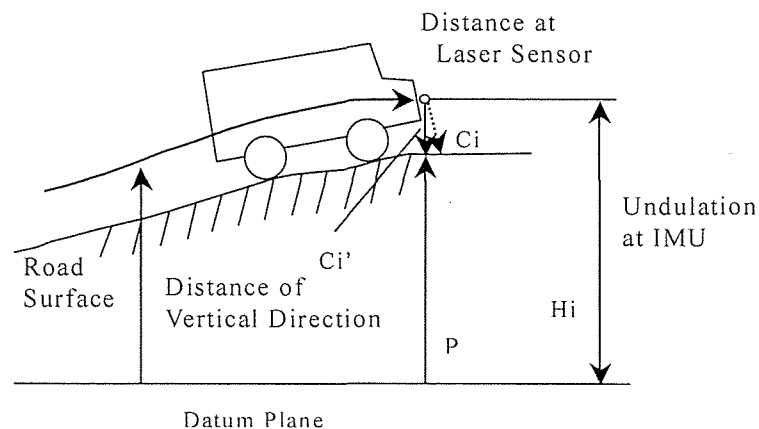


図 3.15 慣性測定装置を用いた測定方法²²⁾

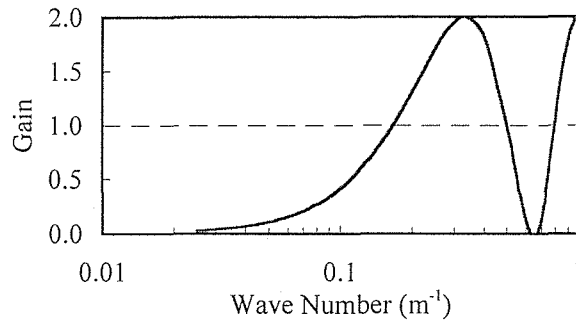


図 3.16 三点逐次法の検出特性 ²²⁾

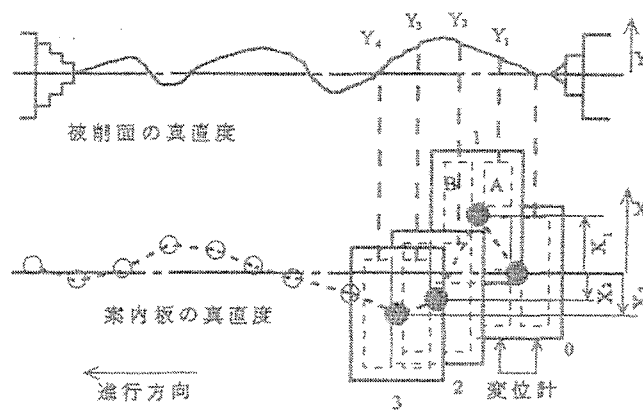


図 3.17 逐次 2 点真直度測定法 ²³⁾

対変位計及びジャイロ機構を組合せた測定法は、サンプリング間隔を最小 1mm まで設定することが可能であり、精度は $\pm 1.2\text{mm}$ と高水準を示している。また、通常の走行速度での測定を可能としている ²³⁾。

諸外国においても様々な種類の路面性状測定車が開発されているが、車両の幅などの規定が厳しいため、わが国で測定することは困難なものが多い。

このうち、1990 年にアメリカで行われた Automated Pavement Distress Data Collection Equipment Seminar に参加した路面性状測定車については、秋本らによってその概要が報告されている ²⁴⁾。

(2) 可搬型高性能測定装置の開発

一方、歩道舗装の測定など狭い空間での測定、及び路面性状測定車が導入できない場合は、3m プロフィロメータなど従来型の測定装置が用いられてきたが、軽量化、小型化のニーズが高まるとともに、絶対形状を把握すること

ができるシステムが要求されるようになった²⁵⁾。道路関係企業では、これらの要求に応えるための可搬型高性能測定装置の開発も行なっている。わが国で近年開発された測定装置の数例を以下に示す。

秋本らは、傾斜計及び変位計を組合せることにより絶対形状を測定するポータブル型路面プロファイラを開発した（図 3.18）²⁶⁾。この装置の特徴と

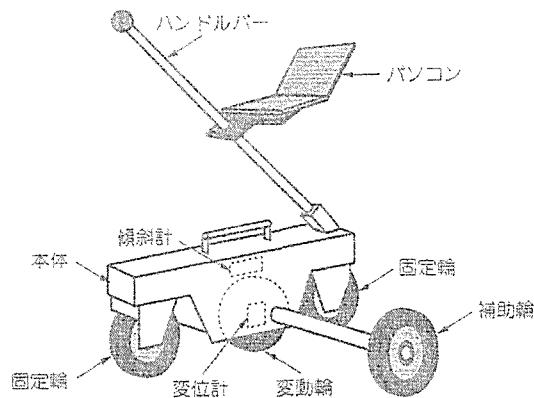


図 3.18 ポータブル型路面プロファイラ²⁶⁾

しては、小型、軽量であり、乗用車のトランクに格納することができるほか、5 分程度で組立て作業が完了することである。精度については、水準測量結果と比較し $\pm 2.0\text{mm}$ 以内である。

石田らは、逐次 2 角法による小型プロファイラを開発した²⁵⁾。逐次 2 角法とは、進行方向に 25cm 間隔で配置された直径 15cm の 3 つの車輪を 2 本の棒で連結し、その角度を測定する方法である（図 3.19）。この装置も小型、軽量であるが、車両乗り入れ部端部など平坦性が著しく悪化している区間では、最大 5～10mm 程度の誤差が生じる可能性がある。しかし現在主流であるレーザセンサや光センサを用いる方法とは大きく異なる測定原理を採用しており、今後の精度向上が期待される。諸外国の測定装置では、Dipstick 及び Rolling Dipstick が知られている²⁾。この測定装置については 4 章で述べる。

3.2.4 路面プロファイルの測定に関する本研究の位置づけ

路面プロファイルの測定については、路面性状測定車及び可搬型高性能測定装置の開発が進んだことにより、既に精度的には実用域を上回るレベルに

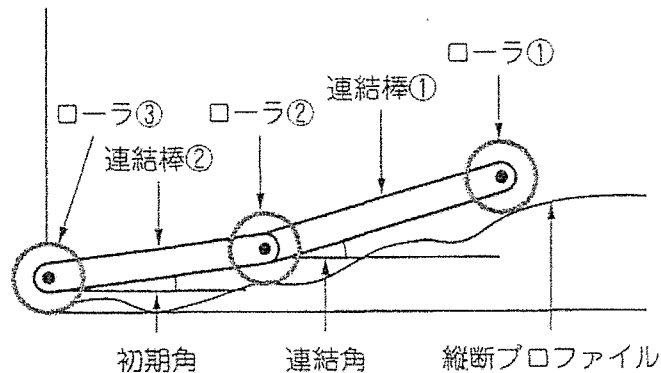


図 3.19 逐次 2 角法の測定機構 ²⁵⁾

まで達した感があるが、一方では路面性状測定車及び可搬型高性能測定装置の開発には莫大な経費が伴うため、販売価格は高額であり、わが国の各地方自治体では積極的な導入が困難な状況にある ^{24), 27)}。このため、前章で述べたように、PMS は一部の試験区間を除き機能していないのが現状である。

アメリカの各州では、舗装の維持管理に PMS を用いることが義務づけられていることもあり、路面性状測定車の開発及び導入が進んでいる。既にアメリカでは、PMS が維持修繕計画のツールとして、更に予算計上を行うために重要なものになっていることを鑑みると、わが国においても PMS を有効活用すべきである。そのための方法の一つとして、既に道路管理者及び道路関連企業に普及しているプロファイラや道路パトロール車両等を有効活用することが考えられる。そこで本研究では、プロファイラ及び道路パトロール車両で測定されたデータを考察し、固有の検出特性を演算補正することにより、自動車の走行に影響を及ぼす周波数帯域に関する路面プロファイルの絶対形状を推定する方法について述べることにする。この方法では、線形成分あるいはマイクロテクスチャなどの周波数帯域は推定範囲外としているが、必要な周波数帯域に限定することによって既存のデータを有効活用できるため、PMS の運用にあたって問題となっていたコストを削減することができる。

路面プロファイルの測定に関する本研究の位置づけについて、その歴史的変遷とともに整理すると図 3.20 のようになる。

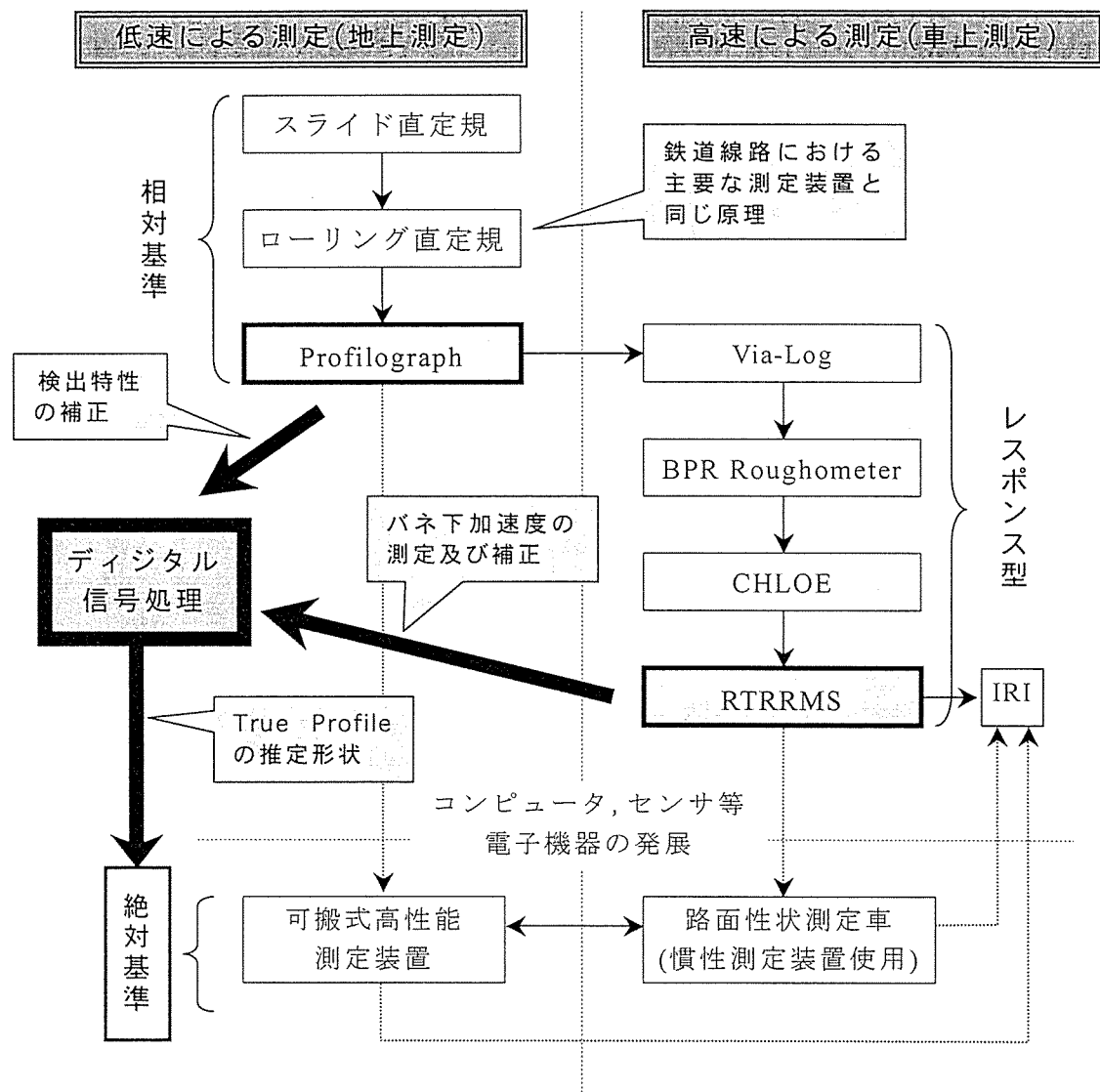


図 3.20 路面プロファイルの測定に関する本研究の位置づけ

3.3 路面プロファイルの評価に関する既往の研究

路面プロファイル特性の評価は，一般的には 1)プロファイルの測定，2)測定データの処理，3)特性要約指標（例えば，平坦性指標など）の算定，4)評価という手順で行なわれる．平坦性による路面評価は，前節のプロファイル測定とも一部重複するが，振動乗り心地の観点に立脚したものが多く，歴史的に最も古い．本節では，平坦性指標及び乗り心地評価基準・指標の代表的なものについて概説する¹⁾．

3.3.1 平坦性指標

わが国における平坦性指標は，一般道路では，3m プロフィロメータによって測定された路面凹凸データの標準偏差（ σ ）が，高速道路では 8m プロフィロメータによる PrI(Profile Index)などが用いられてきた²⁸⁾．

σ は，品質管理の観点から路面の平坦性を算出するものであり，主として新設舗装の出来高を管理する指標として，1960 年代に提案された． σ は 1.5m 間隔で基準線からの変位を読取り，式(3.1)によって算出される．アスファルト舗装の施工直後の仕上り検査の合格基準は， $\sigma \leq 2.4\text{mm}$ とされている^{29), 30)}．

$$\sigma = \sqrt{\left\{ \sum d^2 - \left(\sum d \right)^2 / n \right\} / (n-1)} \quad (3.1)$$

ここで， σ :測定区間の平坦性(mm)

d :波高の測定値(mm)

n :データ数

しかしながら，式(3.1)を用いた路面の平坦性評価方法は前章で述べたように多くの問題点があるため，この計算結果を分析に用いる場合は注意を要する．

PrI は，主として高速道路が対象となる際に用いられる指標であり，その際には測定対象波長及び精度の関係から，一般的に 8m プロフィロメータが

使用されている²⁸⁾。

諸外国では、路面の波状特性による平坦性分類方法として、ISO から路面のパワースペクトル密度 (Power Spectral Density: 以下、「PSD」という) による基準が提案されている^{1), 31)}。また前章で概説した IRI が国際的に平坦性評価指標として定着しつつある³²⁾。

路面波形を不規則な振動波形をもつ定常不規則過程とみなし、PSD で表現することは古くから実施されてきた。路面の評価に PSD を採用する方法は、1954 年に米国の Houlbort が空港滑走路の評価に適用して以来、今日まで数多く用いられている³³⁾。

路面波形の PSD は、パワースペクトル $S(n)$ と空間周波数 (単位長さ当たりの波数) n との関係が、両対数軸上で直線状になっていることが多いため、ISO ではこれまでに波状特性より路面の平坦性を分類するための基準を提案してきた。この場合、 $S(n)$ は式 (3.2) で表現される¹⁾。

$$S(n) = S(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-W} \quad (3.2)$$

ここで、 n_0 : 基準空間周波数

$S(n_0)$: 路面の平滑度

W : 対象周波数の分散度を表す定数

図 3.21 では、路面の平坦性の程度を A~H まで 8 段階に分類している。上式の $S(n)$ は、図中の $G_d(n)$ と同意であり、下の区分に属するほど平坦性が良好であることを意味する。

PSD は路面特性の傾向を分析する場合に有効な方法であるが、周波数領域への変換によって空間列 (又は時系列) の情報が失われるため、路面上に存在するポットホール、段差などの損傷の発生位置を把握することはできない。また局所的な損傷を含む路面の PSD は、一部の著大値によって平均的な路面プロファイル特性が歪められることがある (図 3.22)³⁴⁾。このことから、路面プロファイルデータ処理では空間領域 (位置情報) 及び周波数領域の両面

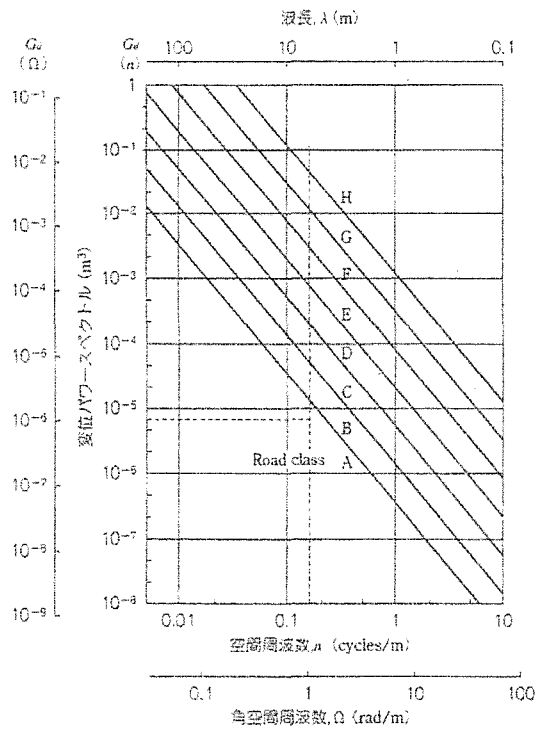
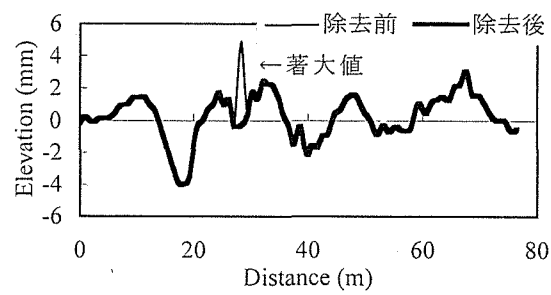
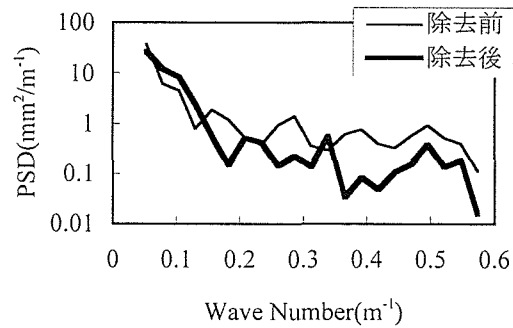


図 3.21 PSD による路面の平坦性分類¹⁾



(a) 波形例



(b) パワースペクトルによる比較

図3.22 著大値の影響による路面プロファイル特性の歪みの例³⁴⁾

からのアプローチが不可欠であり，効率的な分析方法が求められている．

上記の理由から，近年，ウェーブレット解析（Wavelet Analysis：以下，「WT 解析」という）が試行され始めている．WT 解析は，小波状の基底関数の作により入力データを近似し，分解数列（フィルタ）とのたたみ込み積分により分割及びダウンサンプリング演算を行う方法である（図 3.23）．WT 解析の利点としては，データを空間領域及び周波数領域において同時識別することができる点である．また，基底関数の選定によって分解数列及び分解アルゴリズムが全て決定されることから，デジタルフィルタ演算などに比べ周波数帯域設定の自由度は少ないが，演算効率に優れているため，様々な分野で着目されるようになった³⁴⁾．

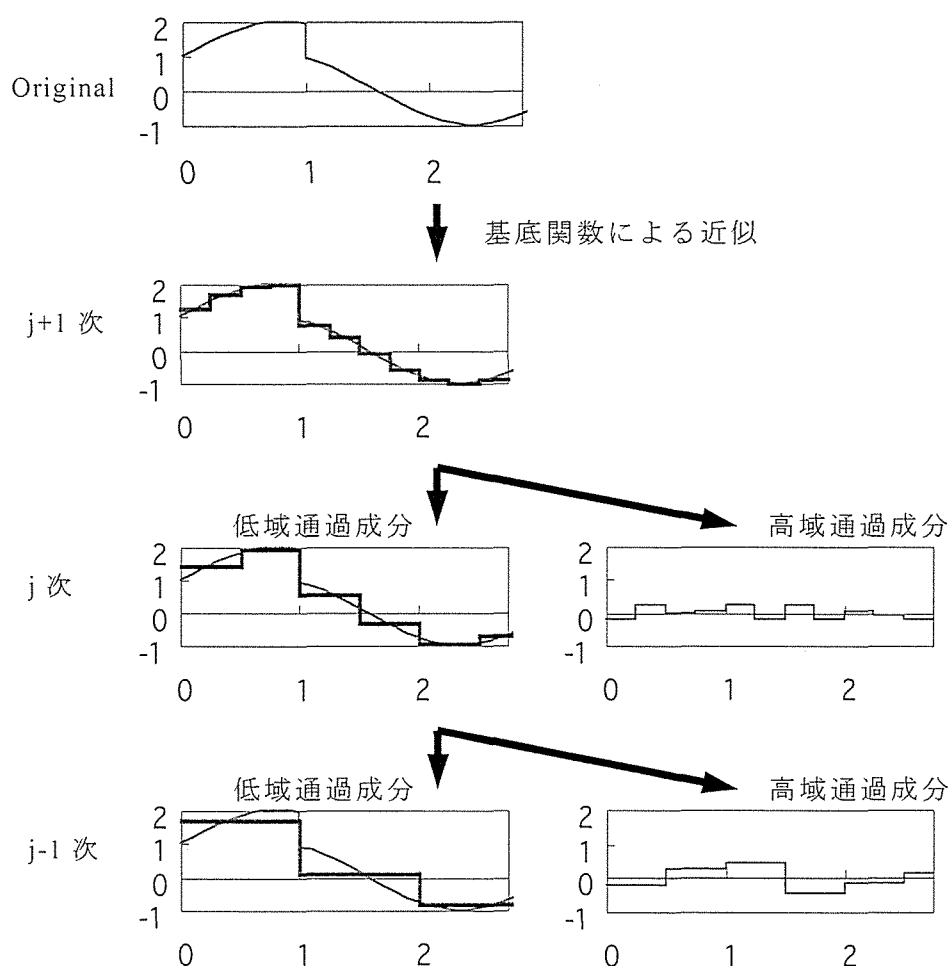


図 3.23 ウェーブレット解析の例（Haar 関数）

（横軸：位置，縦軸：振幅）

路面プロファイルデータへの WT 解析の適用は、川村らによる舗装の平坦性評価に関する研究を契機に^{35), 36)}、わが国の研究者が主体となって近年精力的に解析がなされている。近年では空港滑走路の乗り心地評価³⁷⁾、冬期路面判別³⁸⁾などへの適用例も報告されている。諸外国における研究としては、Attoh-Okine らによる舗装の平坦性評価への適用例³⁹⁾があり、また Raja らによる材料表面粗さの波長帯分割及び形状分離へのウェーブレット解析の適用例⁴⁰⁾などは、舗装工学分野には特定されたものではないが、非常に興味深い研究である。

本研究では、第 6 章及び第 7 章において WT 解析を行っており、主として 1) 路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定方法について論ずる³⁴⁾とともに、2) パラメータ学習機能を有した第二世代ウェーブレット解析を用いた特徴的な路面プロファイル形状の検出方法について述べることにする⁴¹⁾。

3.3.2 乗り心地評価指標¹⁾

路面凹凸により車に生ずる振動を乗り心地の観点により評価する試みは、1930 年以來数多く行われている。人間の感覚と振動加速度についての実験結果から提案されている ISO の評価基準が代表的な例であるが、ここでは路面プロファイルからの平坦性指数と被験者による乗り心地評価値との相関分析結果に基づき、近年、ASTM により提案された評価指標であるライドナンバー(Ride Number, 以下、「RN」という)について概説する。

AASHO 道路試験で定義された舗装のサービス性能評価指標である PSI は、路面プロファイル測定とその上を走行した被験者による路面評価を基礎として、1960 年代に開発された。

1980 年代になり、米国では道路交通事情が開発当時と比べて変化し、道路利用者の舗装のサービス性能に対する認識にも違いが生じてきた。また、舗装のサービス性能は舗装の損傷要因から評価されるため、舗装の乗り心地との因果関係を複雑にしているとの指摘がなされるようになった。

このような背景を基に、「乗り心地」と「舗装の破損」を分離し、道路利用者の主観的乗り心地感覚と直結した合理的な舗装評価スケールの開発プロジ

エクトが，オハイオ州などを中心に計画された．ここで開発された乗り心地の観点からなる平坦性評価指標が RN である．

5 年間隔で 2 件の研究が行なわれ，被験者の平均的評価値 (MPR: Mean Panel Rating) が実験的に得られた．MPR は，米国の幾つかの州におけるさまざまな平坦性を有する試験箇所で行われ，評価に際しては乗り心地の程度を 0-5 のスケール (数値が大きくなるほど良い路面を表す) により実施している．RN は，PI (Profile Index: プロファイル指数) と称する統計量の非線形変換により求められる．PI は，特定周波数帯に関するプロファイル成分を取り出し，路面高の自乗平均値の平方根 (RMS) を求めたものである．RN は，PI により式 (3.3) で計算される．

$$RN = e^{-160(PI)} \quad (3.3)$$

このプロジェクトの成果として，RN の開発者である Janoff によれば，路面プロファイルについて， $\lambda = 0.49\text{--}2.44\text{m}$ (原文では，1.6 to 8 ft) の波長範囲が乗り心地に影響すると述べている．これは，55 mph (時速 88 km) 走行時に 10-50 Hz の振動にさらされることを意味する．

3.3.3 路面プロファイルの評価に関する本研究の位置づけ

上記より，様々な路面機能と関連している路面プロファイルから必要な情報を得るには，波状特性分析が有効であると考えられる．これは前述の平坦性評価指標 (PSD, IRI, RN) の共通点として，いずれも路面の評価対象となるウェーブバンド (Wave Band) に着目した基準・指標であり，PSD は路面プロファイル上における波高の分散状況を示すものであり，IRI 及び RN は車両の周波数応答と人の振動に関する感受性に関係している¹⁾．今後の路面評価の視点は，道路利用者の観点との対応を明確にすべきであり，路面プロファイルに関するウェーブバンド分析の重要性について論ずる必要があると思われる．

路面プロファイルの評価に関する本研究の位置づけとしては，1) ウェーブバンド分析を行なう上で有効な WT 解析を用いて，自動車の走行安定性及び

乗り心地に影響を与えると考えられる成分の検出方法を体系化するとともに、路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定方法について述べる。さらに、2) 第二世代ウェーブレット解析による特徴的な路面プロファイル形状の検出方法を示し、3) 局所的な路面凹凸を含むデータの評価について論ずることに主眼点を置くこととする。

参考文献

- 1) 川村彰：講座 路面の評価(1) -平坦性に着目して-, 舗装, Vol.36, No.8, pp.31-35, 2001.
- 2) Sayers,M.W. and Karamihas,S.M. : The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 3) 土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来, 土木学会論文集, No.472, pp.13-28, 1993.
- 4) Hiersche, E.: Optimization of Road Surface Characteristics -A Concept for a Research Program in the Federal Republic of Germany, American Society for Testing Material Special Technical Publications,No.1031, 1990.
- 5) American Society for Testing Material E867-02a: Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems, American Society for Testing Material, 2003.
- 6) トマス D.ギレスピ (加藤昌太郎, 笠原篤訳) :知りたかったが尋ねるのが怖かった IRI のすべて, 舗装, Vol.35, No.5, pp.19-26, 2000.
- 7) 佐藤吉彦：新軌道力学, 鉄道現業社, 1997.
- 8) 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重編：新しい線路 -軌道の構造と管理-, 日本鉄道施設協会, 1997.
- 9) 高井秀之, 菊池勝浩：在来線の高速化と 20m 弦正矢軌道狂い, 日本鉄道施設協会誌, Vol.28, No.4, pp.259-262, 1990.
- 10) 吉村彰芳：軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の確立とその応用, 鉄道技術研究報告, 施設編 586 号, No.1336. 1987.
- 11) 吉村彰芳：軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用, 土木学会論文集, No.377/IV-6, pp.117-126, 1987.
- 12) Esveld,C.: Modern Railway Track Second Edition, MRT-Production, 2001.
- 13) 神山雅子, 古川敦, 吉村彰芳：復元波形を用いた軌道狂い最適整正量算出の理論と実践, 鉄道総研報告, Vol.13, No.5, pp.17-22, 1999.
- 14) 古川敦, 吉村彰芳：鉄道車両の上下動特性の同定および軌道保守への適用, 土木学会論文集, No.730/IV-59, pp.15-25, 2003.

- 15) 市原薫:路面の凹凸, 技術書院, 1968.
- 16) Gillespie, T.D., Sayers, M.W. and Segel, L.: Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems, National Cooperative Highway Research Program Report, No.228, 1980.
- 17) 大野滋也, 佐藤正和, 鈴木一隆:「乗り心地」に着目した路面管理指標に関する研究 -IRI(国際ラフネス指数)の適用性-, EXTEC, No.61, pp.37-40, 2002.
- 18) 相馬幸六, 山之口浩, 笠原篤:中軽交通道路における舗装修繕のための手法 -舗装評価データベースと構造評価の利用-, 舗装, Vol.30, No.10, pp.25-33, 1995.
- 19) 小野田光之:講座・路面の評価(3)路面性状測定車(自動測定装置), 舗装, Vol.36, No.10, pp.34-39, 2001.
- 20) 深沢淳志:路面性状の自動測定, 舗装, Vol.20, No.8, pp.8-12, 1985.
- 21) 舗装 編集部:路面の性能の評価方法, 舗装, Vol.36, No.8, p44, 2001.
- 22) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆:ウェーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理方法について -EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 23) 秋本隆, 姫野賢治, 川村彰, 福原敏彦:舗装路面の絶対プロファイルデータ収集システムの開発, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.13-20, 1998.
- 24) 秋本隆, 福原敏彦, 笠原篤:舗装破損データ自動収集装置のセミナー, 舗装, Vol.26, No.2, pp.21-25, 1991.
- 25) 石田眞二, 亀山修一, 福原敏彦, 笠原篤:逐次 2 角法を用いた小型プロファイルによる歩道の平坦性測定, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.16.1-16.8, 2002.
- 26) 秋本隆, 鈴木康一, 井上良和:ポータブル型路面プロファイル測定装置の開発, 舗装, Vol.36, no.8, pp.3-7, 2001.
- 27) 白川龍生, 川村彰, 中島繁則, 中辻隆:車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて, 交通工学, Vol.38, No.6, pp.32-41, 2003.
- 28) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会編:舗装工学, 丸善, 1995.
- 29) 河野宏:竣工時の舗装の平坦性検査について(I)平坦性の測定方法, 土木技術資料, Vol.9, No.4, pp.20-24, 1967.

- 30) 河野宏：竣工時の舗装の平坦性検査について (II) 平坦性の検査基準，土木技術資料，Vol.9, No.7, pp.41-42, 1967.
- 31) ISO8608: Mechanical vibration -Road Surface Profiles- Reporting of measured data, pp.1-30, 1995.
- 32) 笠原篤，加藤昌太郎：国際ラフネス指数，舗装，Vol.26, No.7, pp.24-26, 1991.
- 33) Press,H.,Houlbolt,J.C. and Walls,J.C. : Some measurements and power spectra of runway roughness, National Advisory Committee for Aeronautics Technical Note, No.3305, 1954.
- 34) 白川龍生，川村彰，中辻隆，上浦正樹：路面プロファイルデータ処理に適したウェーブレット基底関数の選定について，土木学会論文集，No.753/V-62, pp.81-93, 2004.
- 35) 川村彰，姫野賢治，藤原隆，秋本隆：ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について，舗装工学論文集，Vol.2, pp.23-28, 1997.
- 36) Kawamura,A.,Shimeno,S.,Himeno,K.,Komatsubara,A. and Hagiwara, T.: Study on Application of the Multiresolution Analysis to Road Profile Evaluation, Proceedings of the 3rd International Symposium on the Environmental Impact of Road Unevenness, pp.121-132, 1999.
- 37) 遠藤桂，姫野賢治，川村彰，八谷好高，松井邦人：滑走路の乗り心地に着目した路面プロファイル解析，舗装工学論文集，Vol.7, pp.13.1-13.8, 2002.
- 38) 武市靖，三浦真平，魚住純：ウェーブレット解析による冬期路面判別の検討，舗装工学論文集，Vol.7, pp.14.1-14.8, 2002.
- 39) Attoh-Okine,N.O. and Mensah,S.: Characterizing Pavement Profile Using Wavelets Analysis, American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, No.1433, pp.142-153, 2003.
- 40) Raja,J.,Muralikrishnan,B. and Fu,S.:Recent advances in separation of roughness, waviness and form, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol.26, No.2, pp.222-235, 2002.
- 41) 白川龍生，川村彰，中辻隆，上浦正樹：第二世代ウェーブレット変換を用いた路面凹凸検出方法の基礎的研究，舗装工学論文集，Vol.8, pp.35-41, 2003.

第 4 章

ウェーブバンドを考慮した True Profile の推定方法

第4章 ウェーブバンドを考慮した True Profile の推定方法

4.1 概説

路面は直接車両と接する部分であり，その性状の良否は車両の走行に直接影響を及ぼす．特に近年，交通量の増加，車両の大型化・高速化に伴い，路面性状に対する社会の要請は，舗装の耐久性のみならず走行安定性及び乗り心地を確保するとともに，道路周辺環境にも極力影響の少ないものが求められている¹⁾．

路面性状が関係するウェーブバンドの範囲は，騒音，すべりに関係するミクロなものから，燃費などに関係するマクロなものに至るまで広範囲に及んでいるため，走行安定性及び乗り心地を確保する上では，車両の振動に影響する範囲を設定する必要があると同時に，このウェーブバンド内の路面プロファイルを十分な精度で検出できる方法を明確にすることが不可欠であると思われる．換言すれば，車両の特性を理解し，振動に影響を及ぼすウェーブバンド内のデータを用いて，重点的に維持管理を行うと効果的である．

本章では，自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンドを設定するとともに，道路管理者及び道路関係企業に最も普及している 3m プロフィロメータの測定データを用いて，ウェーブバンド範囲内の True Profile 形状を推定する方法について述べる^{2), 3)}．

4.2 路面と車両の相互作用問題

今日における路面と車両の相互作用問題の対象は多岐にわたっており，モータリゼーションの進展，道路利用者の路面に対するニーズの質的变化，環境問題への対応などにより，従来に比べ一層高度化し，複雑になりつつある．特に以下の問題について関心が高まっている．

- ・ 車両の走行安定性

- ・ 車両のオペレーティング費用
- ・ 乗員の乗り心地
- ・ 沿道住民の住環境（騒音，振動，大気汚染など）
- ・ 舗装の補修

したがって，これらを考慮して適切な維持管理を行うためには，路面と車両が互いに相手側に及ぼす影響，すなわち相互作用を理解することが重要である．

また，路面プロファイルの状態は良好であることが望ましいのは言うまでもないが，走行安定性や乗り心地を考慮して必要とされる維持管理レベルを満たした上で，如何に補修費用を低減するかについても，今日の重要な課題となっている．

4.2.1 車両振動

自動車の運動は，3 方向の並進運動（上下動，左右動，前後動）と，それら各軸回りの回転運動（ヨーイング，ピッチング，ローリング）で表すことができる（図 4.1）⁴⁾．このうち，乗り心地に及ぼす影響が大きいものとしては上下動，左右動及びローリングといわれているが，路面プロファイルとの相関が最も大きい運動は上下動である．

車両構造は，新形式の車両が設計されるたびに改良されているが，車両の基本設計には大きな変化がないと考えられる．その理由としては，路面プロ

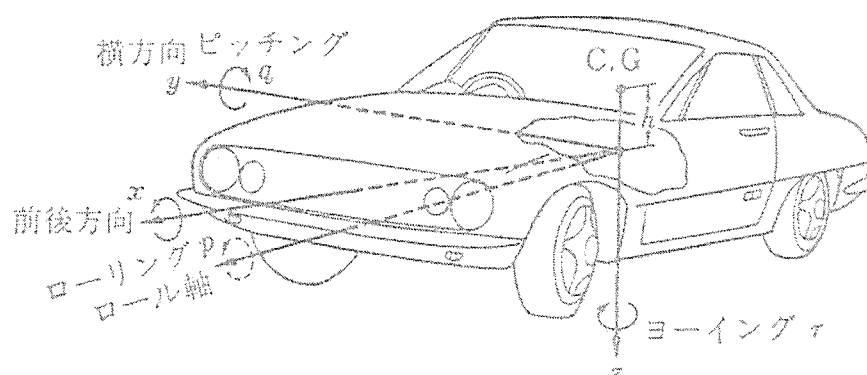


図 4.1 自動車に作用する力とその運動⁴⁾

ファイルや車両構造に起因する不快な振動を遮断し、かつ車体変位を車両限界内に収めるためには、車両構造にかかわらず、ほぼ一定範囲の振動特性に収束するからである⁴⁾。

路面に生ずる凹凸上を車両が走行することにより、車両の各部は振動し、路面は車両振動の反力を受ける。物体が受ける力は質量と加速度の積であるから、振動加速度が大きくなると、路面及び車両を構成する各部材に作用する力も大きくなり、場合によっては破壊に至ることがある。また部材が破壊しない場合でも、過度の車体振動は乗り心地に悪影響を及ぼす。

自動車は、質量、バネが複雑に組み合わされた系（システム）である。振動系は、質量、バネ定数及び減衰係数に応じ、揺れやすい周波数（固有振動数）を有している。したがって、入力される外力の周波数が固有振動数と一致すると、いわゆる共振現象を起こし、振幅が急激に増大する。

車両の振動は、主として路面上の凹凸によって車輪が受ける強制変位により引き起こされる。この路面上の凹凸は、一般に波長が長くなるほど振幅が大きくなる性質を持つ。

また、走行速度の向上に伴い、同じ時間周波数に相当する空間周波数は低くなる。例えば、周波数 $1.5\text{Hz (s}^{-1}\text{)}$ に相当する空間波長（周波数の逆数）は、速度 60km/h で 11.1m 、速度 100km/h で 18.5m となる。速度が高くなるに伴い、長波長の路面プロファイルの維持管理が求められるのはこのためである。

一方で、路面プロファイルの維持管理の程度にも経済的な限界があることから、部材応力、部材の疲労及び乗り心地等を相互に考慮する必要がある。

4.2.2 路面と車両の相互作用

路面と車両の相互作用を表すシステムとしては、図 4.2 のようなシステムが考えられる。ミクロ的な視点では、車両の運動は路面を入力とし、路面の応答は車両の運動を入力として考えることになる。しかし両者は互いに影響を及ぼし、路面は劣化し変形する。次の車両が走行するときは変形した路面が入力となるため、条件が次々と変化していく。すなわち、車両と路面のダイナミクスは、マクロ的にみるとフィードバックシステムになっている⁵⁾。

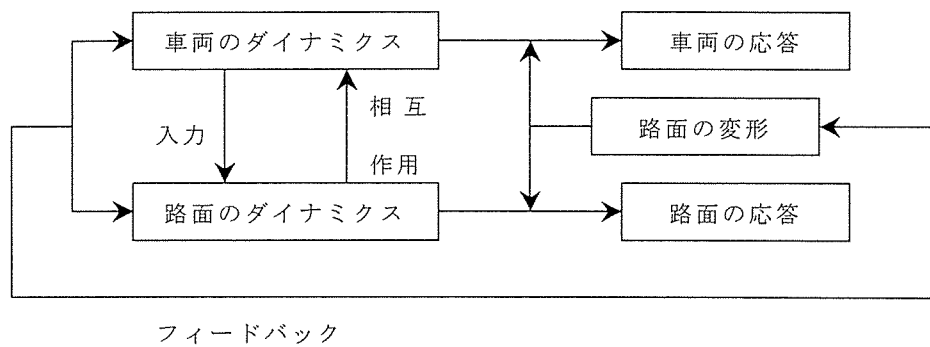


図 4.2 路面と車両の相互作用を表すシステム ⁵⁾

4.3 自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンドの設定

4.3.1 本研究における乗り心地の定義

「乗り心地」という用語の意味は非常に広く、個人の感じ方によって大きな差があるため、定量的な解を得ることは非常に難しい。例えば、旅行の思い出や車内の快適性なども「乗り心地」の範囲内に含まれ、定義はあいまいになりがちである。

乗り心地の定義に関する研究としては、高井らによる鉄道の乗り心地に関する研究報告がある ^{6), 7)}。この報告では、鉄道の乗り心地に関する検討対象を明確にするため、図 4.3 に示す検討対象マップを作成している。この中で、鉄道軌道関係で貢献できる乗り心地向上策は「狭義の乗り心地」に対するもの、すなわち線形や軌道狂い（軌道の凹凸）、車両振動など、物理量に限られている。また、振動加速度のうち 0.5~2Hz 程度の比較的周波数の低い成分のものは「動揺」と呼ばれており、これが「乗り心地」として扱われていることが多いとされている。自動車交通に関しても同様の解釈が可能と思われるため、本研究では図 4.3 の「狭義の乗り心地」に準じた物理量を「乗り心地」として用いることとする。

なお、一般的に乗り心地が一定の水準に管理されていれば、走行安定性は満足されていると考えてよい。しかしながら、短波長凹凸によって生じるバネ下質量の振動のように、乗り心地には大きく影響しないが、路面との接触

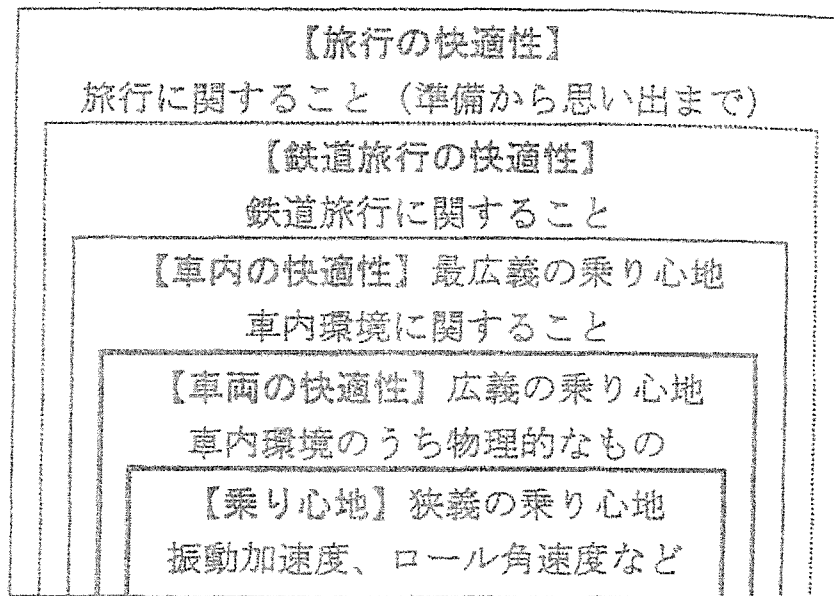


図 4.3 乗り心地の検討対象マップ⁷⁾

が断続的になるため、旋回や加速、制動の性能が阻害される場合があるため、路面管理上は注意を要する⁸⁾。

4.3.2 自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンドの設定

自動車は固有の振動特性を持ったいくつかの振動系の組み合わせであり、それが相互にある程度の連成振動をするように結合されているものである。すなわち車輪の外周にはタイヤがあり、その弾性を通して路面プロファイルに接して転がっており、車軸の上にはサスペンションを介して車体が載っている。このようにタイヤやサスペンションを用いるのは乗客に不快を与えないためであるが、工学的な側面からは自動車の各構造部分に大きな応力が発生するのを防ぎ、かつ道路の損傷を軽減させる目的がある⁹⁾。

一般的に、自動車(乗用車)の固有振動数は、バネ上固有振動数が 1.2~1.5Hz、バネ下固有振動数が 10~17Hz 程度と考えられている¹⁰⁾。バネ下部の実測データから算出した周波数応答の例を図 4.4 に示す¹¹⁾。この例では $WN=1.36m^{-1}$ (15.1Hz) 付近にピークを有しており、上記の範囲内に含まれて

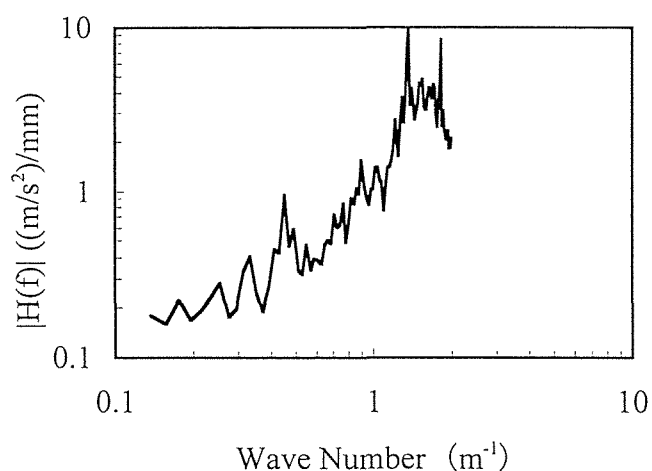


図 4.4 周波数応答の算出例 ($V=40\text{km/h}$)¹¹⁾

いる。

ここで、車両の固有振動数に対応する路面プロファイルの波長は、走行速度と固有振動数の比によって決定され、走行速度が高くなるほど重点整備の波長は長くなる。

図 4.5 にバネ上固有振動数に対応する路面プロファイルの波長範囲を示す。一般道路の場合（速度 $40\sim 60\text{km/h}$ ），波長 $\lambda = 7\sim 14\text{m}$ 程度，高速道路ではさらに $\lambda = 20\text{m}$ 程度までが範囲に含まれる。

また、バネ下部についても同様に整理したものを図 4.6 に示す。一般道路の場合， $\lambda = 0.7\sim 1.7\text{m}$ 程度，高速道路では $\lambda = 2.8\text{m}$ 程度まで範囲に含まれる。

4.3.3 ウェーブバンドの設定

以上の結果から、自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンドとしては、一般道路の場合， $\lambda = 7\sim 14\text{m}$ 程度，高速道路を想定した場合は， $\lambda = 20\text{m}$ 程度の範囲までが含まれるように設定すべきである。

留意すべき点としては、離散化されたデータは、そのサンプリング間隔の 2 倍の波長までの正弦波を表現することができるが、エイリアシングの影響を回避するため、 Δt をさらに細かく設定する必要がある点である。データの精度を考慮すると、ナイキスト周波数に近い成分の正弦波の振幅と位相は、

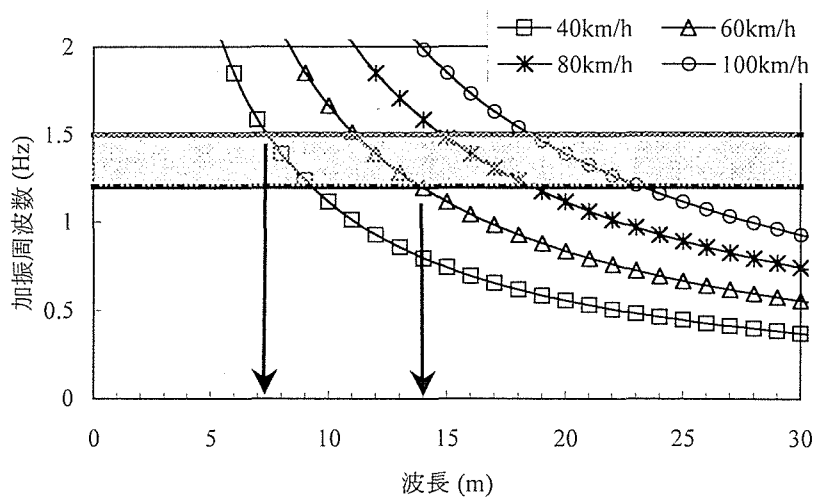


図 4.5 バネ上固有振動数に対応する路面プロファイルの波長範囲

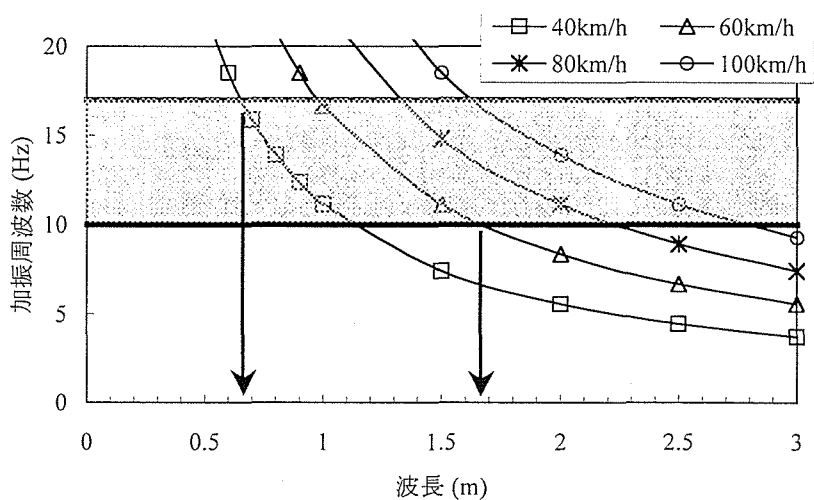


図 4.6 バネ下固有振動数に対応する路面プロファイルの波長範囲

サンプリング開始のタイミングにより変化するため，これを防ぐには情報として必要な最短波長の少なくとも 1/10 程度の間隔でサンプリングすることと提言されている¹²⁾．このことは，乗り心地のように比較的緩やかな成分について分析する場合は大きな問題とはならないが，バネ下固有振動数に対応するウェーブバンドを分析対象とする場合は，サンプリング間隔が $\Delta t=0.05\text{m}$ 程度以下に設定しなければならない場合があるので注意を要する．

4.4 プロファイラの測定データを用いた True Profile の推定方法

4.4.1 True Profile のデータ構成

プロファイラの性能を分析するための評価基準値としては、一般に True Profile（路面縦断プロファイルの絶対形状）が用いられている。Sayers らは True Profile を「神のみぞ知る 真のプロファイル」と表現していることから窺えるように、プロファイラは True Profile のある限られた範囲の数値列データを得るための装置であるため、プロファイラから得られる数値は True Profile と一致するとは限らない^{13), 14)}。したがって、True Profile のデータ構成を定義することは困難であるが、PIARC の CORE Guideline に指針が示されており、水準測量、Static Dipstick 及び Rolling Dipstick によって構成された波形を True Profile として用いている（図 4.7）¹⁵⁾。本研究においてもこの波形を True Profile として用いることとする。

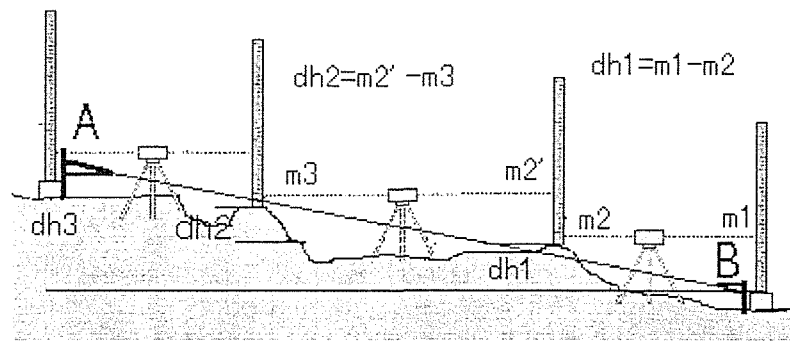
4.4.2 ローリング直定規と 3m プロフィロメータ

3m プロフィロメータは、その原型であるローリング直定規（図 4.8）を改良して作られた^{16), 17)}。

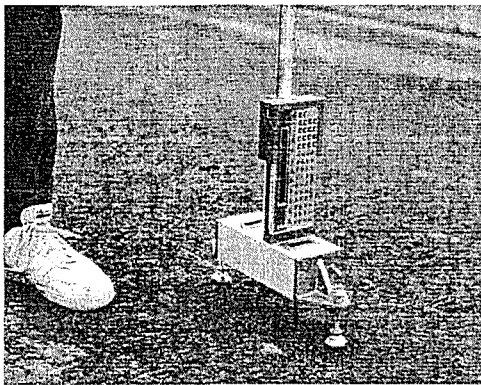
この測定方法は、プロファイラの全長 L に近い波長の Gain は強調されるが、 $L/2$ に相当する波長については理論上検出できず、 $L/2$ 未満の波長帯については Gain が大きく変動し不安定である^{2), 3), 17)}。 $L=3\text{m}$ の例を図 4.9 に示す。

この問題を解決するため、3m プロフィロメータでは変位測定の基準面を確立するための車輪アレーをボギー連結し、車輪で接する全点の凹凸の平均化操作が行なわれている（図 4.10）^{16), 17)}。測定値は、この基準線に対する測定車輪の変位が用いられている。

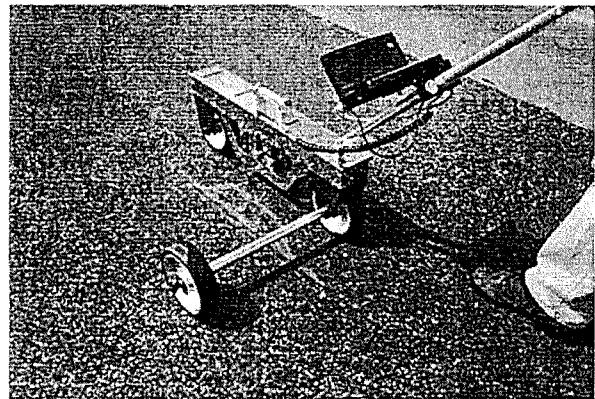
図 4.11 に 3m プロフィロメータの検出特性を示すが、ローリング直定規に比べ検出特性が実形状に近付いていることが窺える¹⁷⁾。しかしながら、線形成分など長波長領域の検出特性については大きな違いはない。



(a) 水準測量



(b) Dipstick



(c) Rolling Dipstick

図 4.7 True Profile データの構成に用いるプロファイラ¹⁵⁾

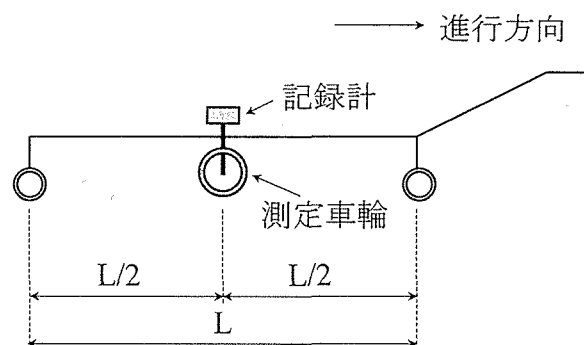
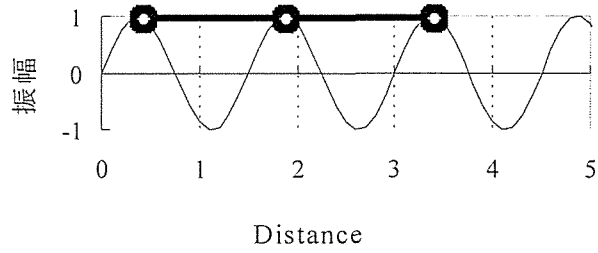
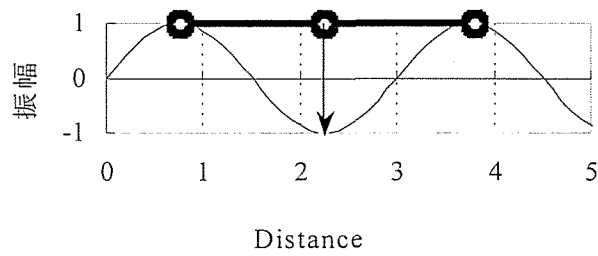


図 4.8 ローリング直定規の模式図³⁾

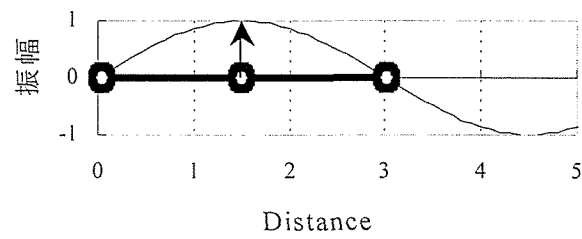
WN=0.67m⁻¹ の場合 (Gain=0)



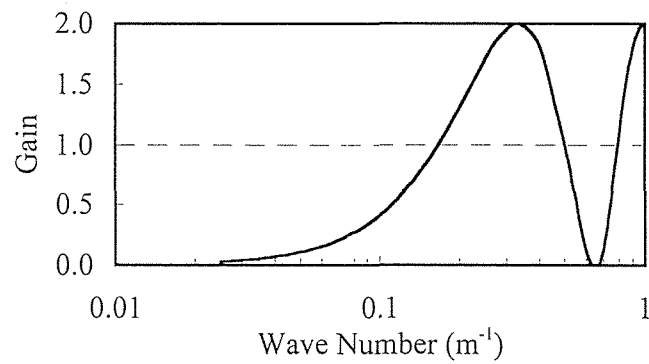
WN=0.33m⁻¹ の場合 (Gain=2)



WN=0.17m⁻¹ の場合 (Gain=1)



(a) Gain 算出例



(b) 検出特性

図 4.9 ローリング直定規の検出特性 (L=3m の場合) ^{2), 3)}

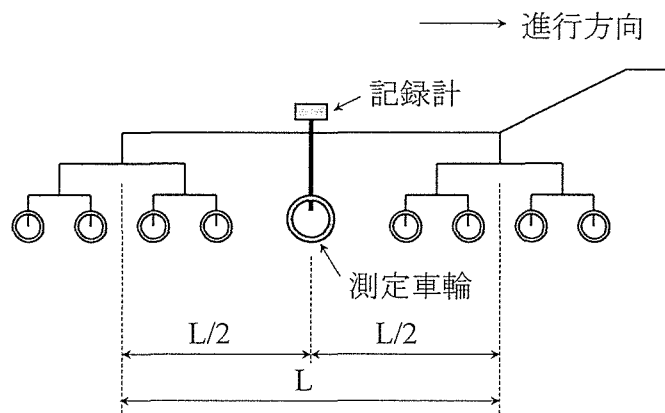


図 4.10 プロフィロメータの模式図 ³⁾

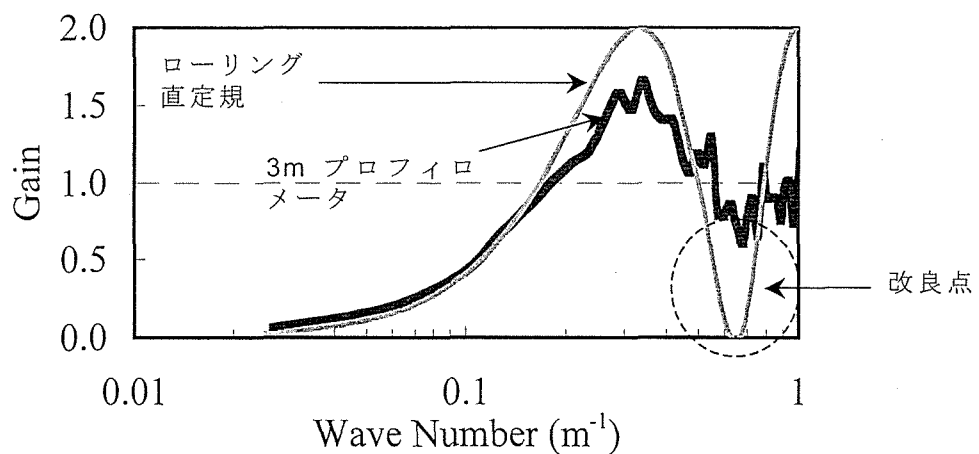


図 4.11 3m プロフィロメータの検出特性の例 ³⁾

4.4.3 True Profile の推定方法

3m プロフィロメータの測定結果から True Profile を推定する場合は、図 4.11 の検出特性の逆数となる演算補正が施されたフィルタ（以下、「プロファイル推定フィルタ」という）を用いるとよい。プロファイル推定フィルタの振幅特性を図 4.12 に示すが、Gain が強調されている周波数では振幅を縮小する一方、Gain の小さい周波数ではこれを拡大する演算補正が行なわれている。前章で述べたように、このような演算補正方法は鉄道線路の維持管理分野において国の内外を問わず行われているが ^{18), 19)}、道路舗装分野に関しては、これまで研究例が見受けられなかった。

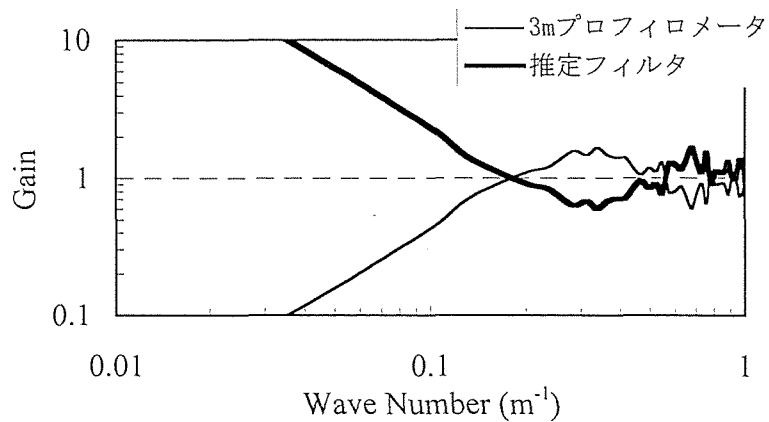


図 4.12 プロファイル推定フィルタの振幅特性の例³⁾

演算を行う場合の留意点としては、測定誤差が周波数に依存せずホワイトノイズ的に発生するならば、Gain の大きな周波数では誤差の影響が相対的に少なく、Gain の小さい周波数では誤差の影響を受けやすいことが挙げられる。

したがって、道路線形（縦断勾配など）に依存する周波数帯については推定の対象外に設定したほうがよい²⁰⁾。3m プロフィロメータの場合、 $WN < 0.05\text{m}^{-1}$

（ $\lambda > 20\text{m}$ ）の周波数帯域では推定フィルタの補正倍率が 10 倍以上となるため、サンプリング間隔が $\Delta t = 0.30\text{m}$ であれば、推定範囲を $WN = 0.05 \sim 1.67\text{m}^{-1}$ 程度に設定することが望ましい（ここで、 $WN = 1.67\text{m}^{-1}$ はナイキスト周波数）。

一般道路における速度の範囲であれば、波長 20m 以上の成分は走行安定性及び乗り心地に与える影響が少ないため、実用上大きな問題は生じない^{2), 10)}。

True Profile の推定手順を整理すると以下のようなになる²⁾。

- True Profile の推定周波数帯域を決定する。
- プロファイラと True Profile のパワースペクトルを算出する。
- 入出力間の振幅特性を求める。ここで、振幅特性は式(4.1)で求められる。

$$|H(f)| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)} \quad (4.1)$$

ここで、 $|H(f)|$: 振幅特性
 $P_x(f)$, $P_y(f)$: 入出力のパワースペクトル

d) 位相特性を線形位相とし, 初期位相 $\theta(0)=0$ としたフィルタを設計する.

このフィルタが「プロファイル推定フィルタ」である.

e) 入力データを空間領域から周波数領域へ変換する.

f) フィルタリング処理を行なう.

g) 処理された波形を周波数領域から空間領域へ変換する.

4.5 まとめ

本章では, 自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンド内の True Profile を推定する方法について述べた. 路面プロファイルは対象となる範囲が広いため, 全ての領域について True Profile を推定することは非常に困難であるが, ある限られた範囲内の True Profile であれば, 一般的なデジタル信号処理技術を応用することにより, プロファイル推定フィルタを作成できることを示した.

ウェーブバンドの設定については, 路面と車両の相互作用の観点から, 車両の固有振動数に対応する周波数帯域を設定することが乗り心地を向上させるために効果的な方法であることを述べた. これらのデータ処理に関する技術は, 鉄道工学の分野において近年わが国を中心に急速に普及しつつあり, その効果については数多くの報告がなされている^{21), 22)}. 一方, 路面性状への適用については現在のところ研究段階にあり, 今後, 現場における施工例の報告が期待される.

次章では, 3m プロフィロメータを用いた True Profile の推定例を示し, その推定精度について考察する. なお, 主として高速道路において用いられている 8m プロフィロメータについても同様の方法で True Profile を推定することが可能である.

参考文献

- 1) 小野田光之:路面の評価(3) 路面性状測定車(自動測定装置), 舗装, Vol.36, No.10, pp.34-39, 2001.
- 2) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆:ウェーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理方法について, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 3) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 上浦正樹: 3m プロフィロメータによる True Profile の推定 -PIARC EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.25-33, 2003.
- 4) 樋口健治:自動車工学, 朝倉書店, 1980.
- 5) 日本機械学会編:鉄道車両のダイナミクス, 電気車研究会, 1994.
- 6) 高井秀之:車両の研究動向 乗り心地評価方法の変遷, 鉄総道研報告, Vol.9, No.8, pp.61-66, 1995.
- 7) 高井秀之:軌道と車両の相互作用(11) -乗り心地の評価方法-, 日本鉄道施設協会誌, Vol.39, No.2, pp.159-162, 2001.
- 8) 自動車工学全書編集委員会編:自動車工学全書 11 巻-ステアリング, サスペンション-, 山海堂, 1980.
- 9) 小林明:自動車振動学, 図書出版社, 1976.
- 10) 景山克三, 景山一郎:自動車力学, 理工図書, 1984.
- 11) 大越健司, 川村彰, 白川龍生, 後藤謙太:車の周波数応答特性を利用した路面性状測定システムに関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.734-737, 2003.
- 12) 酒井幸市:高専学生のためのデジタル信号処理, コロナ社, 1996.
- 13) Sayers, M.W. and Karamihas, S.M.: The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 14) 川村彰:路面のプロファイル, アスファルト, Vol.45, no.212, pp.2-4, 2002.
- 15) PIARC: International Experiment to Harmonize Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedure, CORE, Committee 1 on Surface Characteristics, World Road Association, 1997.

- 16) 遠藤桂：路面プロファイルと平坦性，アスファルト，Vol.45, No.212, pp.16-22, 2002.
- 17) トマス D. ギレスピ（加藤昌太郎，笠原篤訳）：知りたかったが尋ねるのが怖かった IRI のすべて，舗装，Vol.35, No.5, pp.19-26, 2000.
- 18) 吉村彰芳：軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の確立とその応用，鉄道技術研究報告，施設編 586 号，No.1336. 1987.
- 19) 吉村彰芳：軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用，土木学会論文集，No.377/IV-6, pp.117-126, 1987.
- 20) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977.
- 21) 神山雅子，古川敦，吉村彰芳：復元波形を用いた軌道狂い最適整正量算出の理論と実践，鉄道総研報告，Vol.13, No.5, pp.17-22, 1999.
- 22) 白川龍生，川村彰，上浦正樹，中辻隆：軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について，土木計画学研究・論文集，Vol.20, no.1, pp.71-78, 2003.

第 5 章

3m プロフィロメータを用いた True Profile の推定及び推定精度の検証

第5章 3m プロフィロメータを用いた True Profile の推定及び推定精度の検証

5.1 概説

本章では、第4章で述べたプロファイル推定フィルタを用いて、自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンド範囲における True Profile を推定する。

解析に用いるプロファイラは、主に新設時の平坦性指標の算出に用いられており、わが国で最も普及している 3m プロフィロメータである。このプロファイラの検出特性は波長 $\lambda = 3\text{m}$ 近傍の成分が強調されている点であり、一般的な自動車の乗り心地に関係するウェーブバンド内の成分については、True Profile に比べレスポンスが小さい。したがって、プロファイル推定フィルタを用いた検出特性の補正を要する。また、プロファイラの検出精度の確認も不可欠である。本章では第2回 PIARC 路面性状国際共通試験（以下、「EVEN 試験」という）データを用いて、True Profile の推定方法及び精度について検証した。

5.2 PIARC EVEN 試験

5.2.1 試験の概要

EVEN 試験は、1998 年に北アメリカ、ヨーロッパ、環太平洋地域（日本）の3地域で行われた。この試験は、1992 年に PIARC が実施した「舗装路面のすべり抵抗及びテクスチャ測定」に関する国際共同実験に引き続いて行われたものである。このうち日本では、北海道の高速道路、国道及び道道において実施された¹⁾⁻³⁾。

(1) 試験目的

EVEN 試験の主目的は以下の2点である¹⁾。

- ・ 路面の縦断プロファイルに関する各種測定手法の比較及び検討結果を舗装設計と舗装マネジメントの構築に活用する。

- ・ 路面プロファイルから得られる情報の信頼性評価に有用な基礎データを提供する。

(2) 測定条件

世界 3 地域における測定結果の比較のための試験指針として、各地域に共通する試験条件が下記のように設定された¹⁾。

- ・ 縦横断方向の平坦性の程度に応じ、測定区間を 30 箇所設定する（10 区間は予備）。
- ・ 各区間延長は 1000m とし、実際の測定は区間の中央 500m 区間で実施する。ただし、True Profile は始点側から 330m の区間である。
- ・ 選定された各区間は平坦性において均質であることを条件とするが、幾つかの区間では洗濯板状、段差、わだち掘れなどの各種破損箇所のほか直線部、曲線部、登坂部を幾つか含む。
- ・ コンクリート舗装、ポーラスアスファルト舗装も対象路面に含める。

本研究では、北海道の道路において、以上の条件を満足する 14 区間のデータを解析に用いた（図 5.1）。

5.2.2 解析に用いるデータ

解析では、EVEN 試験データのうち 3m プロフィロメータの測定データ及び水準測量結果などによって構成された True Profile データを用いた。

ここで、データのサンプリング間隔は、3m プロフィロメータが $\Delta t=0.300\text{m}$ 、対応する True Profile が $\Delta t=0.025\text{m}$ と異なるため、True Profile データについては、間引き処理によって $\Delta t=0.300\text{m}$ に統一した。

5.3 3m プロフィロメータの検出特性及び検出精度

5.3.1 評価対象周波数帯域の設定

True Profile の推定範囲を $WN=0.05\sim 1.67\text{m}^{-1}$ と仮定し、3m プロフィロメータの検出特性を算出した結果、図 5.2 のような結果が得られた。この例では、特に高周波成分の検出特性に大きな変動が見受けられるが、変動が生じ

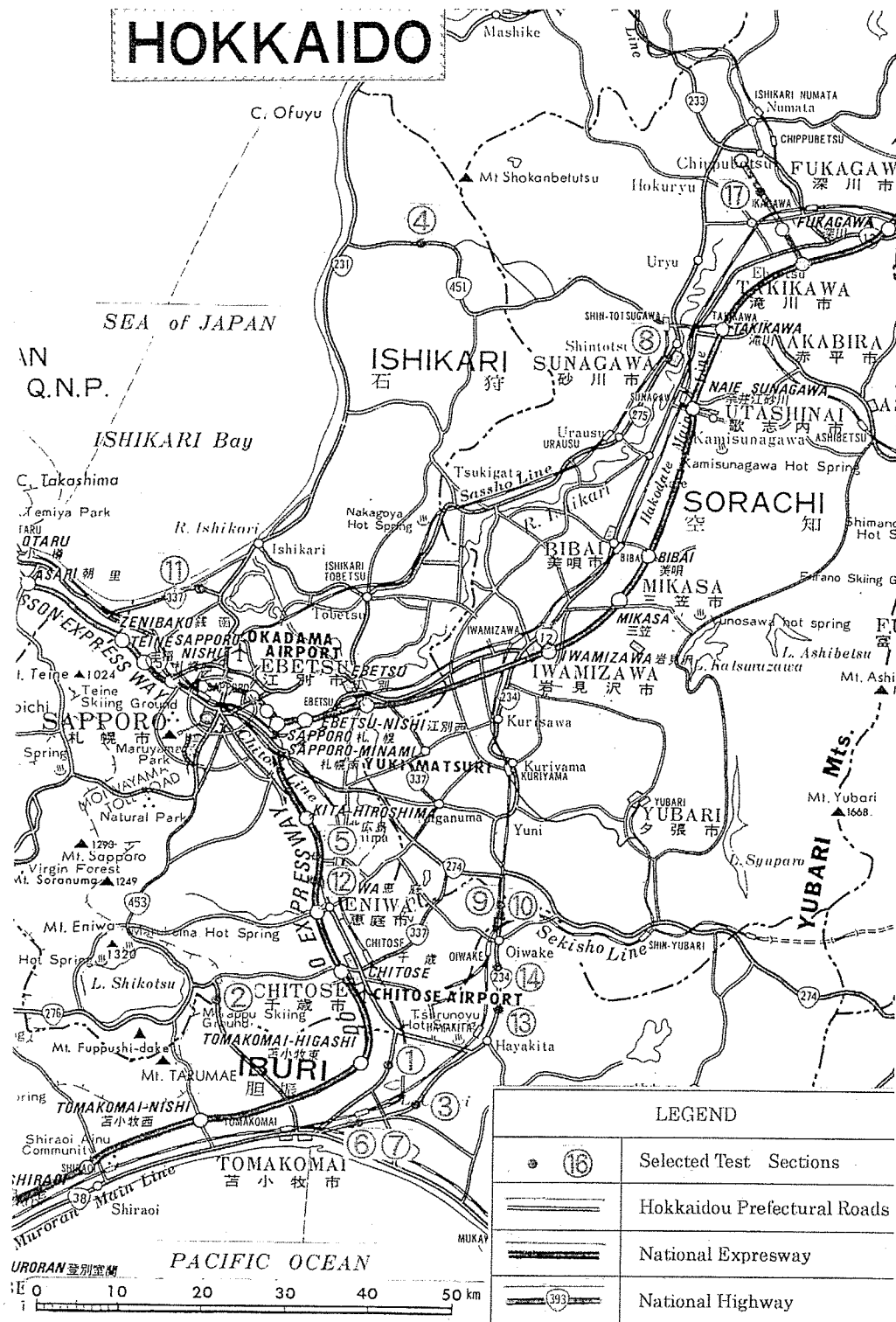


図 5.1 PIARC EVEN 試験区間 (日本, 北海道)

る理由としては，ナイキスト周波数に近い成分の正弦波の振幅及び位相がサンプリング開始のタイミングにより変化していることが考えられる．これを防ぐため，情報として必要な最短波長の少なくとも 1/10 程度のサンプリングが必要であるが，換言すれば $\Delta t=0.30\text{m}$ のデータでは $WN=0.33\text{m}^{-1}$ ($\lambda=3\text{m}$) 程度以下の成分の測定精度は期待できない．したがって， $WN=0.05\sim 0.50\text{m}^{-1}$ を評価対象周波数帯域として設定した⁴⁾⁻⁶⁾．

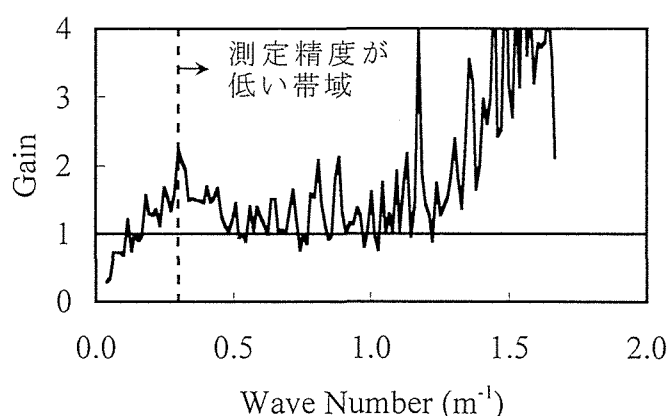


図 5.2 高周波成分の検出特性例 (EVEN 試験区間 No.03)

5.3.2 トリム平均処理による評価基準の設定

ばらつきの程度を平均値からの相対誤差によって評価する場合，基準である平均値の周波数特性は，極値（大きく外れたデータ）の影響が除かれていることが望ましい．このような処理を行なう場合，トリム平均（中間項平均）処理が用いられることが多い．この処理は，上下限の極値を除去し平均値の偏りの防止する方法であり，統計解析分野で広く用いられている⁷⁾．

図 5.3 に EVEN 試験の 14 区間における検出特性の平均値を示すが， $WN=0.20\text{m}^{-1}$ 以上の帯域で変動が大きいため，評価基準として用いるには難がある．そこでトリム平均処理によってデータの上下限の極値を除去すると，図 5.3（太線）のように平滑化された特性が得られた．以下，この特性を「評価基準値」として用いる．

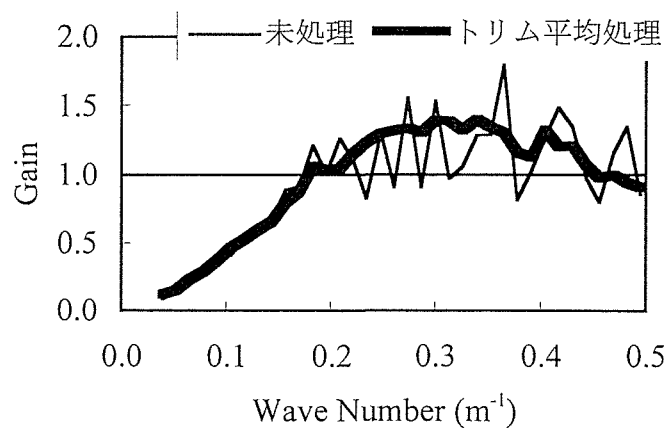


図 5.3 検出特性のトリム平均処理結果

5.3.3 3m プロフィロメータの検出精度

EVEN 試験における 3m プロフィロメータの検出特性を図 5.4.1 及び図 5.4.2 に示す。測定結果は概ね評価基準値 $\pm 30\%$ 以内の範囲に収束したが、一部の区間ではこの範囲から大きく外れている。

例えば、区間 No.14 では $WN=0.17\text{m}^{-1}$ 以上の周波数帯域で検出能力が大きく劣っているが、これは True Profile データに局所的な凹凸（異常値）が含まれているため（図 5.5(a)）、3m プロフィロメータの検出特性が歪められて表現されたものと考えられる（図 5.5(b)）。異常値が含まれる範囲（0～60m）を除外し再計算すると、検出特性は評価基準値に近い値が得られた（図 5.5(b)）⁸⁾。区間 No.10～12 及び 17 でも同様に異常値が含まれていた。したがって、データを周波数領域へ変換する際、異常値の有無を確認する必要がある。

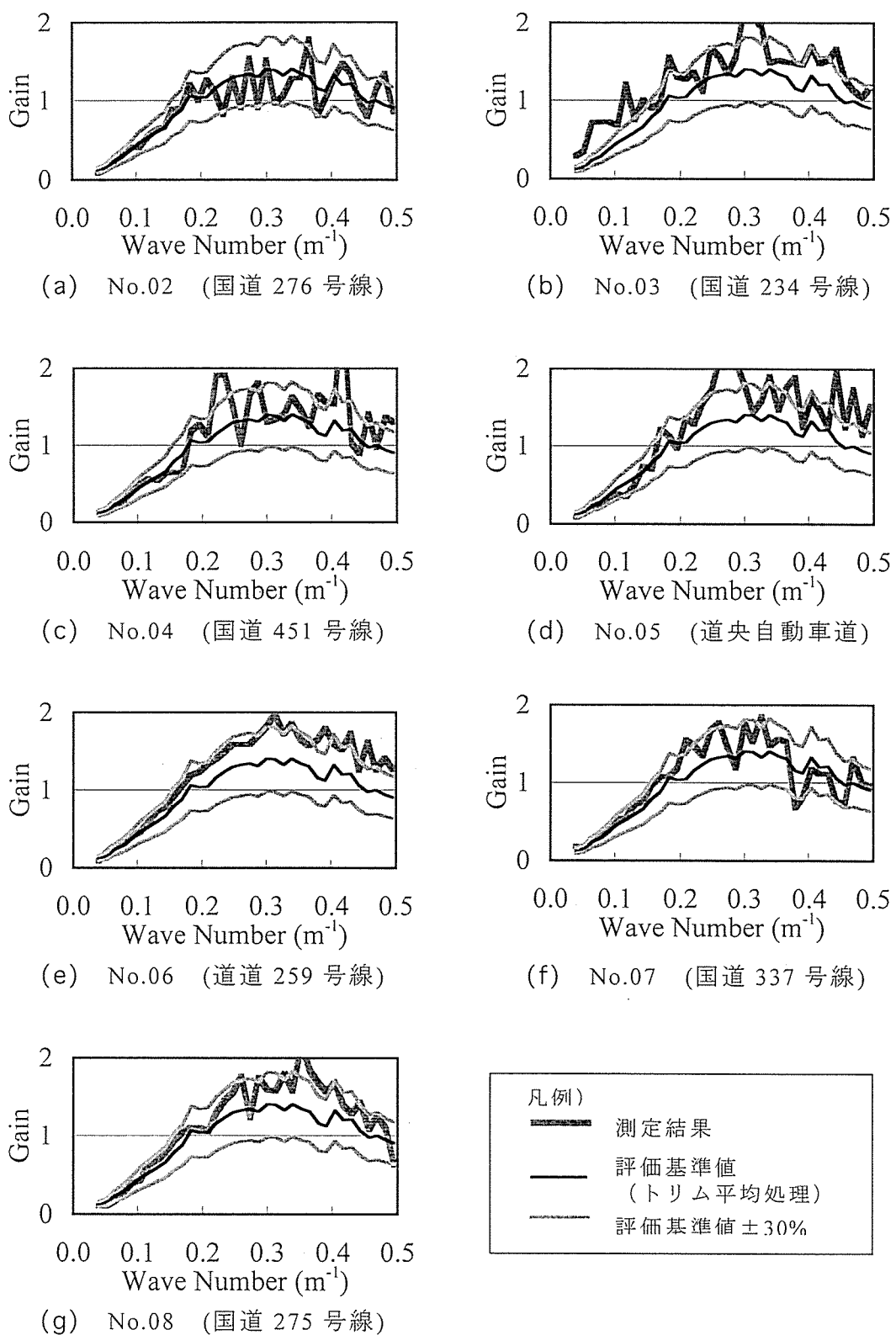
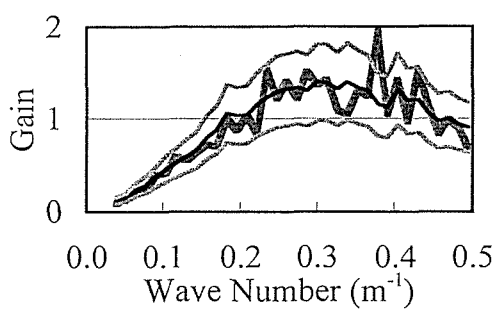
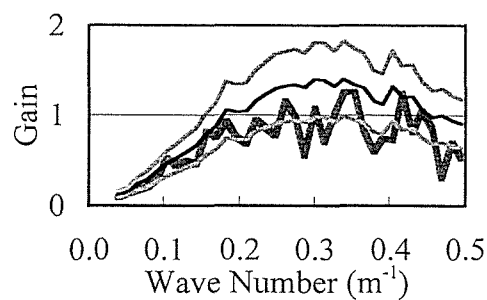


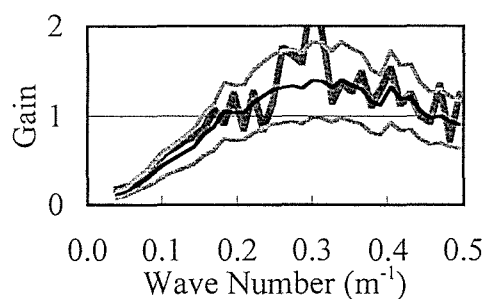
図 5.4.1 EVEN 試験における 3m プロフィロメータの検出特性 (1)



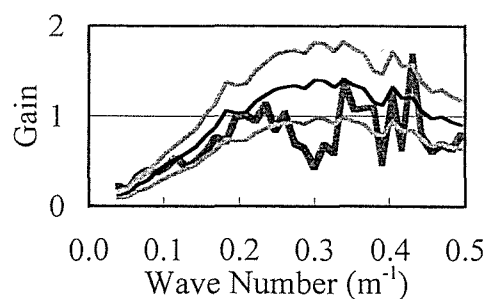
(h) No.09 (国道 234 号線)



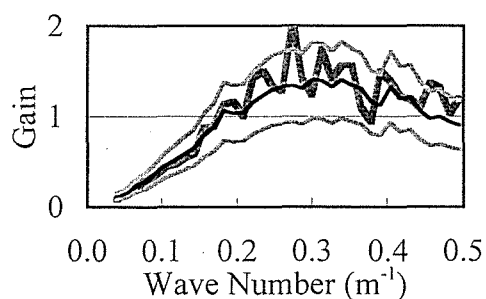
(i) No.10 (国道 234 号線)



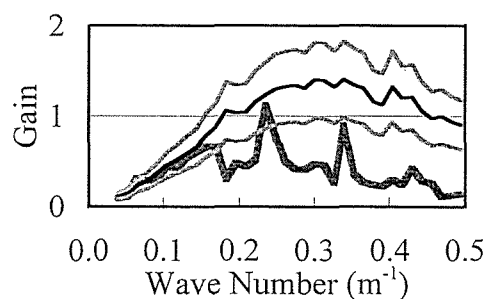
(j) No.11 (国道 337 号線)



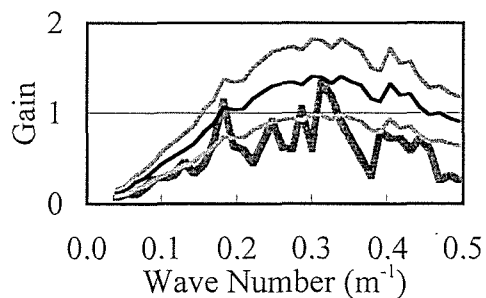
(k) No.12 (道央自動車道)



(l) No.13 (深川留萌自動車道)



(m) No.14 (国道 234 号線)



(n) No.17 (深川留萌自動車道)

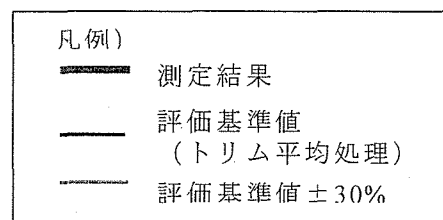
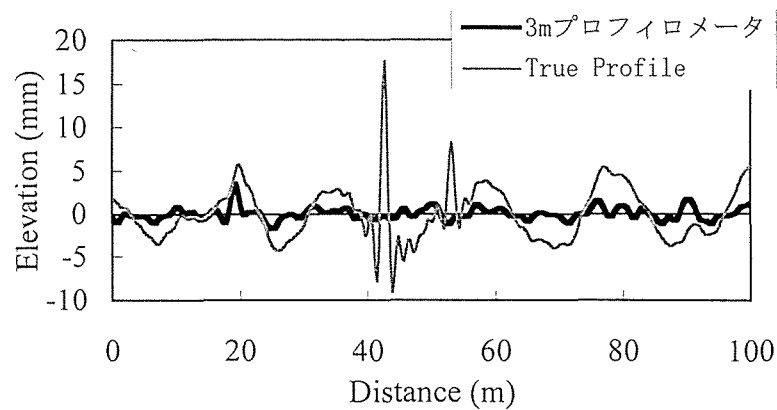
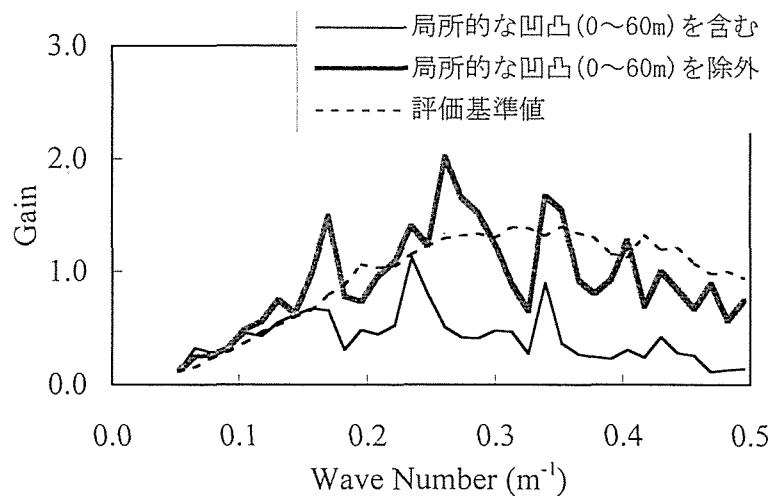


図 5.4.2 EVEN 試験における 3m プロフィロメータの検出特性 (2)



(a) 測定データ波形（局所的な凹凸部分）



(b) 検出特性の差

図 5.5 局所的な凹凸による検出特性の変化（EVEN 試験区間 No.14 の例）

5.4 True Profile 推定及び精度の検証

本節では、3m プロフィロメータの平均的な検出特性を利用した True Profile の推定を行い、推定精度について考察する。図 5.6 は、使用したプロファイル推定フィルタの特性（平均的な検出特性の逆数）である⁹⁾。

True Profile の推定例を図 5.7 に示す。この例では、局所的凹凸によって検出特性が歪められている区間 No.14 のデータを用いて推定した。図 5.7(a)

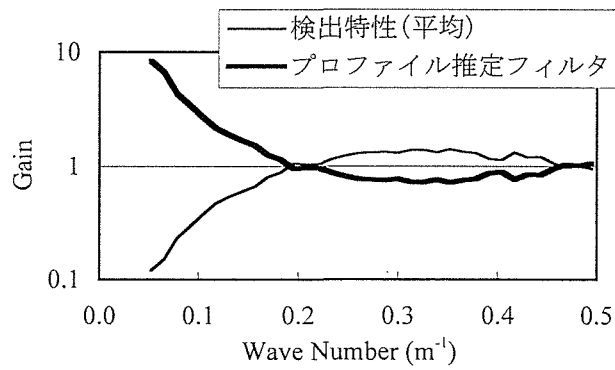
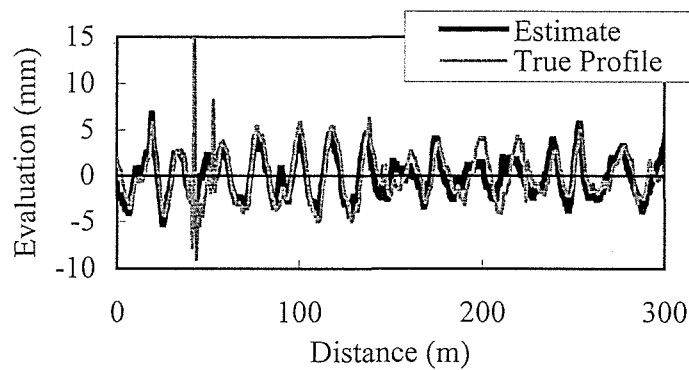
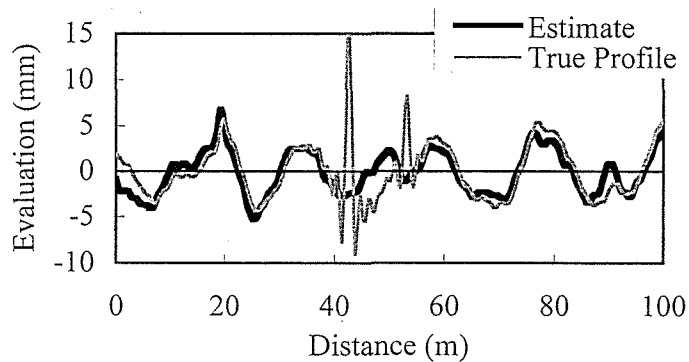


図 5.6 プロファイル推定フィルタのフィルタ特性



(a) True Profile の推定波形（全体）



(b) True Profile の推定波形（局所的な凹凸部分）

図 5.7 True Profile の推定波形（EVEN 試験区間 No.14 の例）

及び局所的な凹凸部分を拡大した図 5.7(b)より，局所的なパルス形状の推定は困難であるが，実用的な推定精度としては十分なレベルであると思われる．

各測定区間におけるコヒーレンス（相互データの関連性の尺度）を図 5.8.1

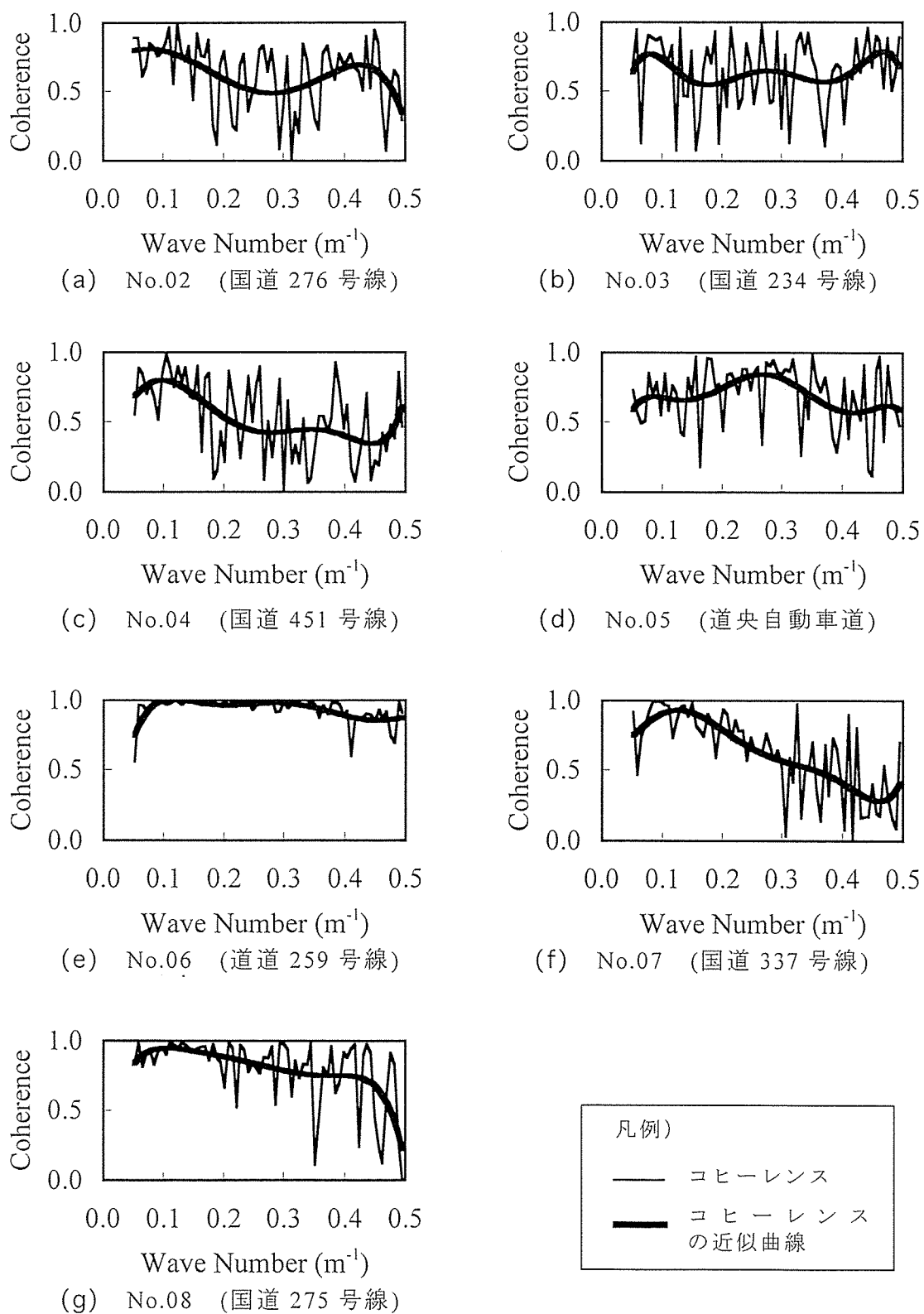
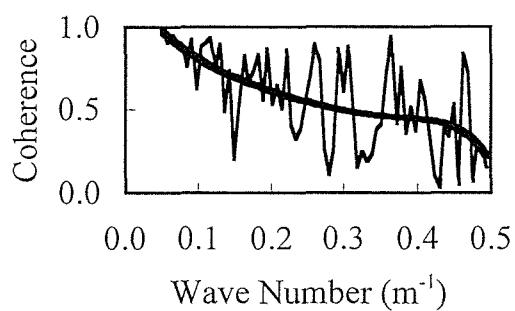
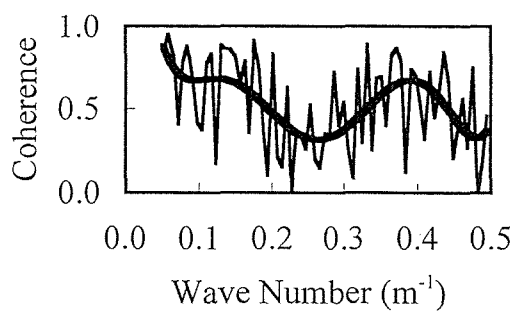


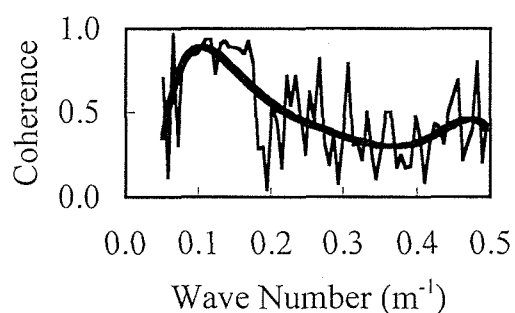
図 5.8.1 EVEN 試験における True Profile とプロファイル推定結果のコヒーレンス(1)



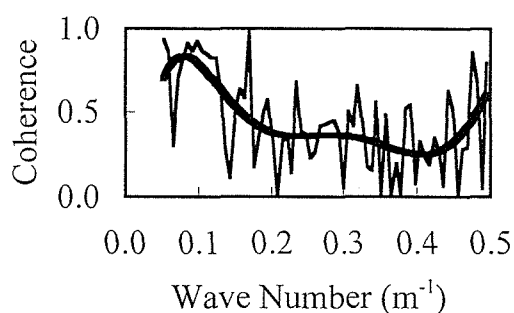
(h) No.09 (国道 234 号線)



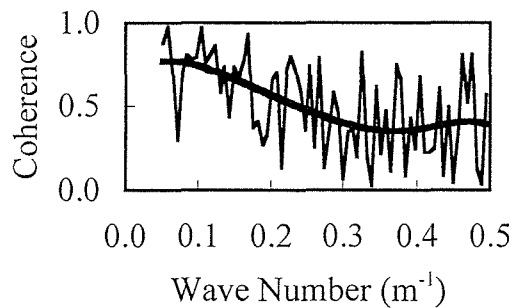
(i) No.10 (国道 234 号線)



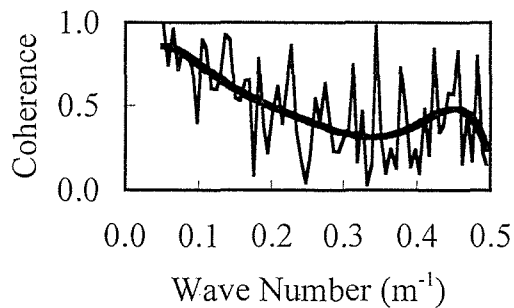
(j) No.11 (国道 337 号線)



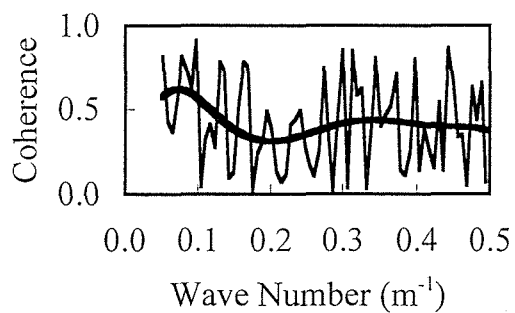
(k) No.12 (道央自動車道)



(l) No.13 (深川留萌自動車道)



(m) No.14 (国道 234 号線)



(n) No.17 (深川留萌自動車道)

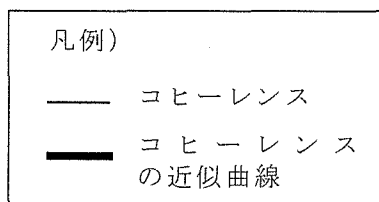


図 5.8.2 EVEN 試験における True Profile とプロフィール推定結果のコヒーレンス(2)

及び図 5.8.2 に示す．コヒーレンスは 0～1 の値をとり，1 に近いほど線形性は高い¹⁰⁾．

True Profile とプロファイル推定結果のコヒーレンスは，区間によりばらつきはあるが，概ね 0.5 程度である．このうち，最も高い値を示した区間は No.06 であり，ほとんどの周波数帯域で 0.8 以上であった．コヒーレンスは振幅のほか位相の影響が含まれるため，3m プロフィロメータ測定の場合にはドリフト（基準線が徐々に移動する現象）の影響等が生じないように，位置照合については特に留意しなければならない．

区間評価値の一つである IRI の推定精度については，図 5.9 の結果が得られた．一部を除きデータのばらつきは少なく，True Profile の IRI を高精度で推定することができた．

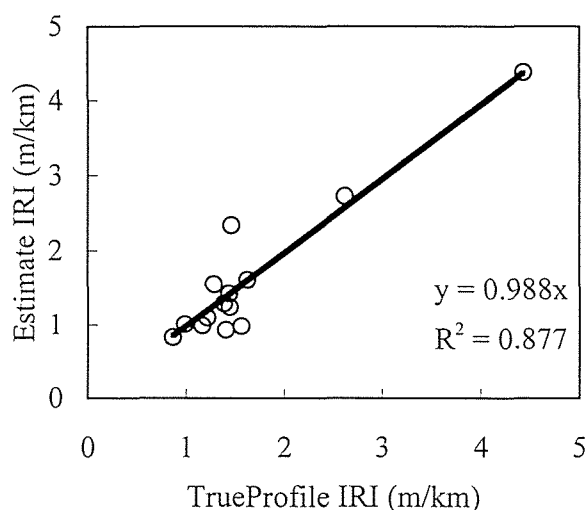


図 5.9 IRI の推定精度

ここで，推定結果が大きく外れた区間は No.03 である．この区間の 0～100m 付近で True Profile と 3m プロフィロメータの波形に明確な相関関係がないことが主な原因と考えられる（図 5.10）．区間 No.03 は，図 5.4.1 に示すように平均値に比べ検出特性が大きいいため，IRI で整理した場合，誤差が拡大したと思われる．

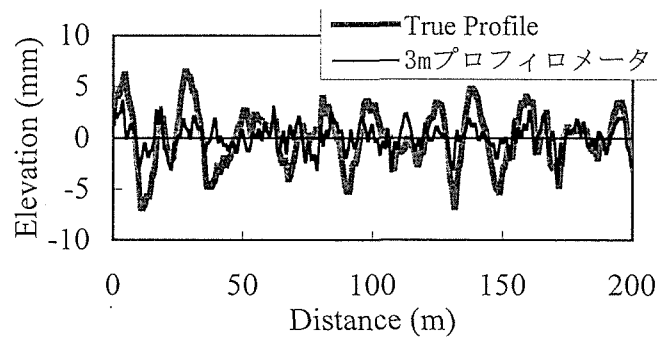


図 5.10 区間 No.03 における測定誤差 (0～200m)

5.5 まとめ

本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) プロファイラの測定データから True Profile を推定する方法について，3m プロフィロメータを用いた考察を行なった結果，一般道路を対象とした周波数帯域 ($WN= 0.05 \sim 0.50m^{-1}$) であれば，プロファイル推定フィルタによって比較的高い精度で推定できることを示した．また IRI についても，高い精度で推定できることを示した．
- (2) 検出特性を算出する際，True Profile に含まれる局所的な著大凹凸の処理を適切に行なう必要がある．複数の測定結果から平均的な評価基準値を求める場合，トリム平均処理を行なうと平滑化された周波数特性を得ることができる．
- (1) 舗装マネジメントの観点から，舗装の劣化予測が重要となりつつあるが，実測データの時間推移から精度の高い劣化予測を行なうためには測定頻度の増加が不可欠である．3m プロフィロメータは現在最も普及している測定装置であり，路面性状測定車の導入が難しい場合などは，この装置を有効活用することが最も現実的かつ合理的な方法であると思われる．

参考文献

- 1) 川村彰：路面の評価(1) 平坦性に着目して，舗装，Vol.36, No.8, pp.31-35, 2001.
- 2) Kawamura,A.,Takahashi,M. and Inoue,T.： Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, Journal of the Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 3) 亀山修一，川村彰，早坂保則，高橋守人，笠原篤：PIARC 路面性状国際共通試験における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係，土木学会論文集，No.683/V-52, pp.119-129, 2001.
- 4) 西原主計，山藤和男：計測システム工学の基礎，森北出版，2001.
- 5) 南茂夫：科学計測のための波形データ処理，CQ 出版社，1986.
- 6) 青島伸治：計測工学入門，培風館，1995.
- 7) 武藤真介：統計解析ハンドブック，朝倉書店，1995.
- 8) 川村彰，姫野賢治，藤原隆，秋本隆：ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について，舗装工学論文集，Vol.2, pp.23-28, 1997.
- 9) 白川龍生，川村彰，高橋清，中辻隆：ウェーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理手法について -EVEN データを用いて-，舗装工学論文集，Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 10) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977.

第 6 章

路面性状評価に適した ウェーブレット基底関数の選定

第 6 章 路面性状評価に適したウェーブレット基底関数の選定

6.1 概説

路面プロファイルは、一般的に不規則であり周期性はないとされているが、このような変動量は、フーリエ変換によって得られるスペクトルの考え方に基づいた PSD を用いて評価されることが多い¹⁾。

PSD はラフネス特性の傾向を分析する場合に有効な方法であるが、周波数領域への変換によって時系列（または空間列）の情報が失われるため、路面上に存在するポットホール、段差など局所的な凹凸の発生位置を把握することはできない。図 3.22 に著大値の影響による路面プロファイル特性の歪みの一例を示したが、この図から明らかなように、局所的な損傷を含む路面の PSD は、一部の著大値によって平均的な路面プロファイル特性が歪められることがある。このことから、路面プロファイルデータ処理では空間領域（位置情報）及び周波数領域の両面からのアプローチが不可欠であり、効率的な分析方法が求められている。このような理由から、諸外国ではデジタルフィルタ演算（以下、「DF 演算」という）によるウェーブバンド分析などが行なわれてきたが、近年では、より効率的な演算を可能とする WT 解析が試行されるようになった²⁾⁻⁶⁾。

DF 演算によるウェーブバンド分析は、入力 of 空間列（時系列）データに含まれる周波数成分を複数の帯域に分割して表現する方法であり、帯域幅を可能な限り小さくすることによって、空間及び周波数の情報を同時に表現することができる。ウェーブバンド分析による路面プロファイルの帯域分割の例を図 6.1 に示す。帯域を複数の帯域に分割することにより、路面損傷など局所的な凹凸の発生位置及び周波数情報を判別することができる。しかし、分割数の増加に伴い、これに対応したフィルタの設計数も増加するため、計算の効率としては高いとはいえない^{3), 7)}。

これに対し、WT 解析は基底関数と称される小波状の関数を伸縮及び平行移動することによって、データを複数のウェーブバンドに分割することが

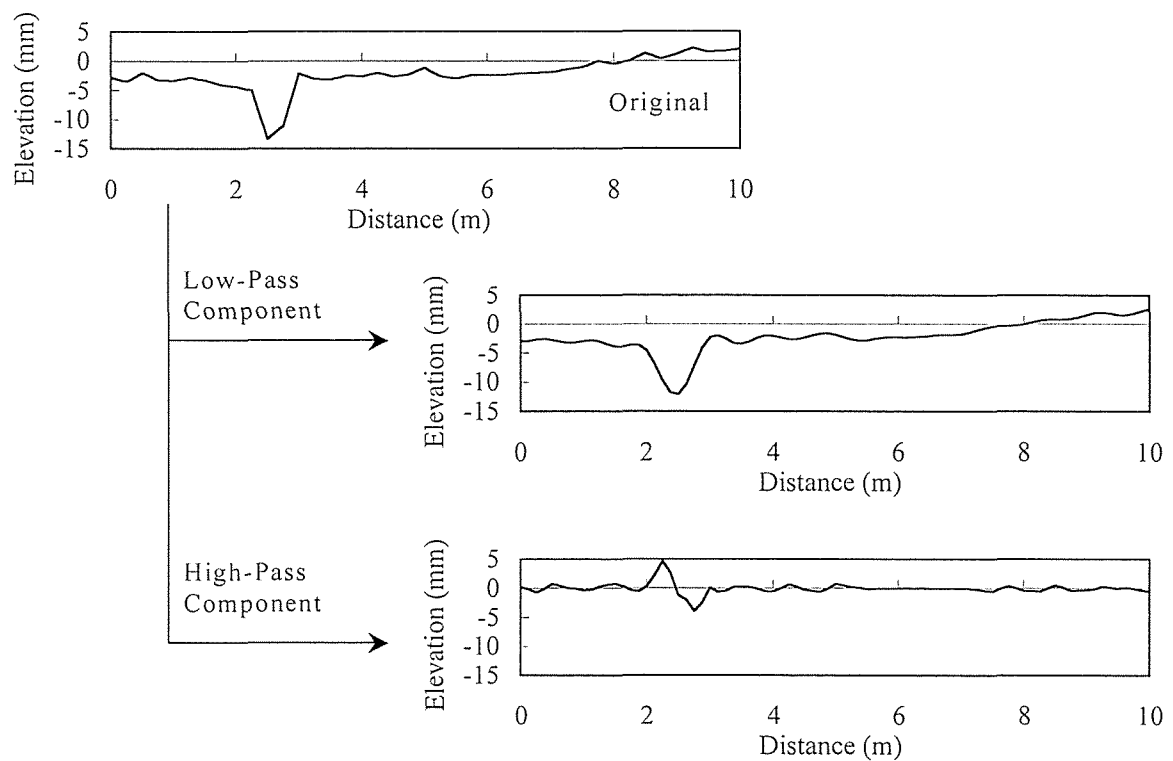


図 6.1 デジタルフィルタ演算による路面プロファイルの帯域分割例

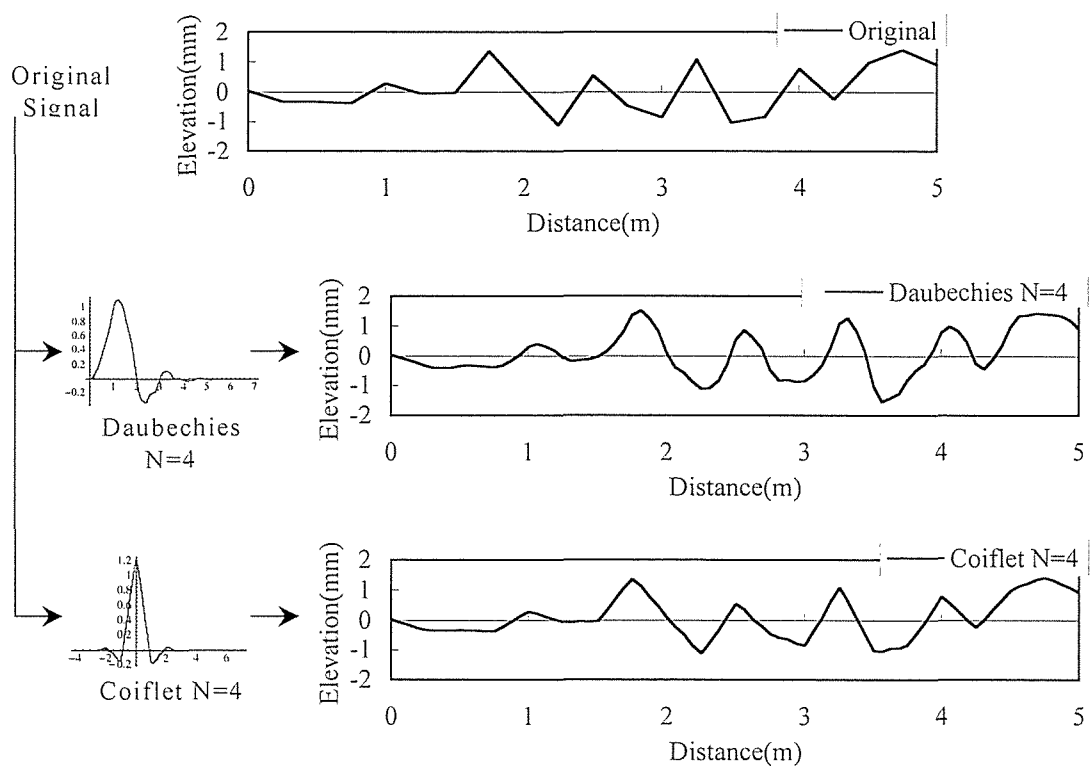


図 6.2 ウェーブレット解析結果の相違（離散データの近似の例）

でき、同時にダウンサンプリング処理によってデータ圧縮及び計算時間の短縮が可能であることから、計算効率は高い^{8), 9)}。しかしながら、図 6.2 に示すように、基底関数の種類によって出力結果が異なるため、これまでは路面損傷の可視化が主目的として用いられてきた^{3), 4), 10), 11)}。

路面の平坦性を評価対象とする場合の測定データのサンプリング間隔は、国際的には IRI の算定に対応した $\Delta t=0.25\text{m}$ が採用される方向になりつつあるが、局所的な路面凹凸はこのデータの最大周波数である $WN=2.0\text{m}^{-1}$ 付近に含まれる。したがって、最大周波数近傍の出力特性（振幅特性）が安定した方法が用いられることが望ましい^{9), 12)-14)}。

本章では、DF 演算と同等の出力特性を有するウェーブレット基底関数の選定方法について論じ、路面性状評価への WT 解析の適用性について考察する。

6.2 デジタルフィルタ演算法

6.2.1 フィルタの設計

K 次のフィルタを用いた DF 演算式は、式 (6.1) のように表される¹⁵⁾。

$$y(t) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) x(t-k) \quad (6.1)$$

ここで、 $x(t)$: 入力時系列データ

$h(k)$: フィルタのインパルス応答

$y(t)$: 出力時系列データ

インパルス応答 $h(k)$ を Z 変換することにより、システムの伝達関数 $H(z)$ が求まる。

フィルタ設計上の主な留意点を以下に記す^{12), 15), 16)}。

(1) フィルタの次数

一般にフィルタ次数 K が大きい場合、以下の特徴がある。

- 1) 計算上の精度が向上する。
- 2) 周波数の分解能が小さくなる。

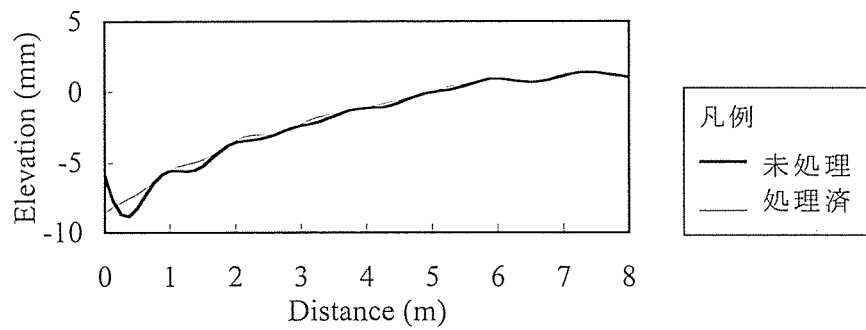


図 6.3 デジタルフィルタ演算による過渡応答の例

3) 計算時間を要する.

4) 計算上の誤差を含む区間が長くなる.

多重解像度解析では計算上の精度が要求されることから, K は大きい方が望ましい.

(2) 過渡応答部の処理

出力データの始終点に生ずる計算上の誤差範囲(以下,「 Ne 」とする)は, $Ne = (K-1)/2$ 点の区間であり, 例えば $K=1000$ の場合, $Ne=500$ 点の範囲で過渡的な誤差が生じる(図 6.3). このため, 事前に過渡応答部を処理する区間を入力データに連結し, フィルタリング演算後に分離する処理を要する.

(3) 位相条件

出力データは入力データと比較し, 位相に α 点分の遅れが生じる. フィルタの位相が線形の場合, 出力データは時系列(空間列)で $\alpha = (K-1)\Delta t/2$ 点後方へ平行移動した結果として現れるが, 線形性を持たない場合, 各周波数成分が時間的に同じ遅れを持たないため, 出力側で合成される際に歪みを受ける. このため, 位相特性には線形性が求められる.

6.2.2 デジタルフィルタ演算によるウェーブバンド分析

デジタルフィルタ演算によるウェーブバンド分析の概念図を図 6.4 に示す. この方法は, 入力データをローパスフィルタへ通過させ, 入力データとフィルタ通過成分の差をハイパスフィルタ成分とみなし分解するものである¹⁷⁾. 以下, 必要に応じてこの手順を繰り返す.

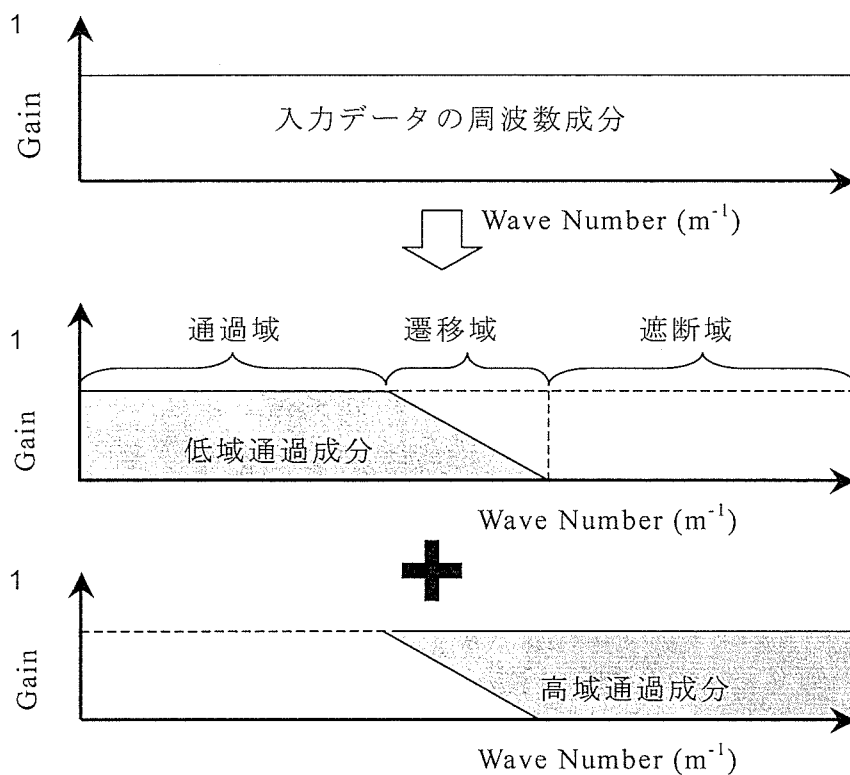


図 6.4 フィルタ特性及びデータ処理の概念図 ¹⁸⁾

この方法は、分解成分から入力データを再構成することが可能であるほか、フィルタの安定性を損なわない限り、通過域、遷移域の周波数帯を任意に設定できる。また通過域の振幅比は 1 であり、入力データの成分を歪めずに出力することができる ^{3), 18)}。

6.3 ウェーブレット解析法

6.3.1 近似関数と分解アルゴリズム

WT 解析では、第 1 段階として離散データ (Original) である $f_j(t)$ をスケーリング関数 $\phi(t)$ によって近似する ^{8), 19)}。計算式を式 (6.2) に示す。

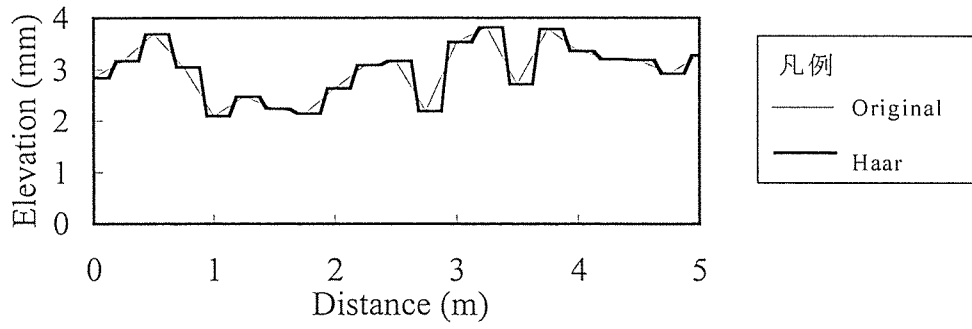


図 6.5 Haar による離散データの近似例

$$f(t) \approx f_j(t) = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^j t - k) \quad (6.2)$$

ここで, $f_j(t)$: WT 近似関数
 $c_k^{(j)}$: j 次のスケーリング展開係数
 $\phi(t)$: スケーリング関数

式(6.2)において, スケーリング展開係数は信号観測の際に基準となる係数である(初期値 $c_k^{(j)}$ の算出方法は次項で述べる). またパラメータ j は近似の精度(以下, 「解像度」という)を表す. スケーリング関数 $\phi(t)$ はこれまでに様々な種類が提案されており, Haar, Daubechies などが広く知られている. 図 6.5 に Haar による近似の例を示す. 式(6.2)では $1/2^j$ 倍に伸縮, k 点の平行移動の演算が施されている.

第 2 段階として, 関数 $f_j(t)$ をローパスフィルタ通過成分 $f_{j-1}(t)$ とハイパスフィルタ成分 ($f_j(t)$ との差) に分解する (式(6.3)).

$$f_j(t) = [f_{j-1}(t)] + [f_j(t) - f_{j-1}(t)] \quad (6.3)$$

ここで, $f_j(t) - f_{j-1}(t)$ を $g_j(t)$ とすると, 式(6.3)は

$$f_j(t) = f_{j-1}(t) + g_{j-1}(t) \quad (6.4)$$

と表すことができる．

式(6.4)に対応し，構成要素であるスケーリング展開係数 $c_k^{(j)}$ に対して以下の演算補正を行う．

$c_k^{(j)}$ の帯域は角周波数で $0 \sim \pi$ の区間（データ点の2区間で1周期 2π となることから周波数は π となる）であるが，この帯域を2等分するフィルタを用いてデータを成分分解する．このうち，ローパスフィルタ $\{h_k\}$ を通過する成分（ $c_k^{(j-1)}$ ）は式(6.5)によって求められる．

$$c_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_l h_{2k-l} c_l^{(j)} \quad (6.5)$$

同様に，ハイパスフィルタ $\{w_k\}$ を通過する成分 $d_k^{(j-1)}$ は式(6.6)で求められる．

$$d_k^{(j-1)} = \frac{1}{2} \sum_l w_{2k-l} c_l^{(j)} \quad (6.6)$$

ここで， $d_k^{(j-1)}$ をウェーブレット展開係数という．

以上より，解像度レベルが $j-1$ 次における低域通過成分 $f_{j-1}(t)$ は，式(6.2)，(6.5)より次式となる．

$$f_{j-1}(t) = \sum_k c_k^{(j-1)} \phi(2^{j-1}t - k) \quad (6.7)$$

高域通過成分を構成する基底関数は，式(6.3)より j 次のスケーリング関数が属する空間（ V_j ）と $j-1$ 次のスケーリング関数が属する空間（ V_{j-1} ）との補空間に属するため，ウェーブレット関数 $\psi(t)$ と呼ばれる基底関数を用いてこれを表現する．

ここで，スケーリング関数とウェーブレット関数は式(6.8)の直交条件が課される．

$$\langle \phi | \psi(\cdot - n) \rangle = 0 \quad (6.8)$$

高域通過成分 $g_{j-1}(t)$ は次式で表される.

$$g_{j-1}(t) = \sum_k d_k^{(j-1)} \psi(2^{j-1}t - k) \quad (6.9)$$

式(6.4)において, レベル j の関数 f_j の解像度は 2^j であるが, 分解によって f_j のレベルが下がると, 解像度は $1/2$ となる. この演算を低域通過成分について繰り返すことにより, 図 6.6 のピラミッドアルゴリズムを構成することができる^{3), 8), 13), 20)}.

なお, WT 解析は周波数領域の分解性能が高周波領域において急速に劣化する問題点を有している. この問題を解決する方法としては, 上記の演算を高域通過成分に対しても適用するウェーブレット・パケット解析がある^{21), 22)}. 解析の対象となる周波数帯域によっては, 必要に応じこの解析方法を用いるべきである (図 6.7).

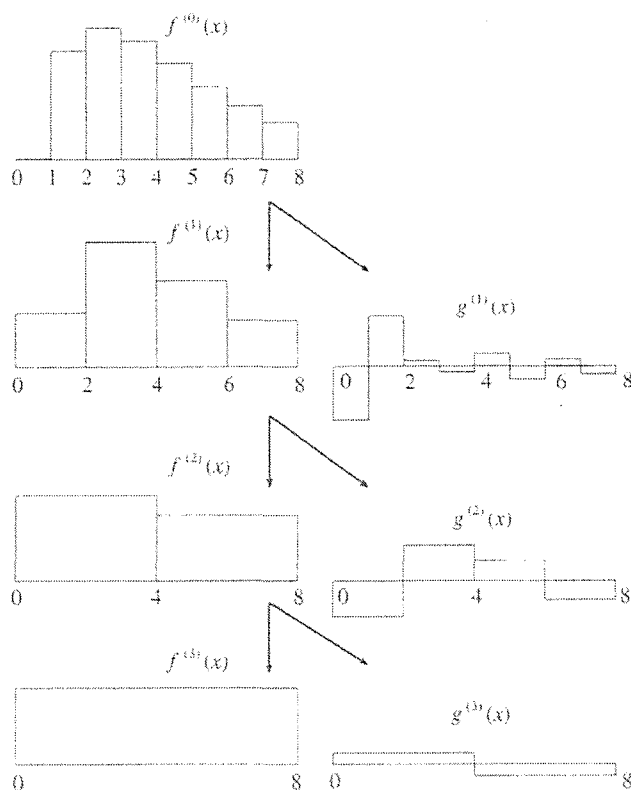
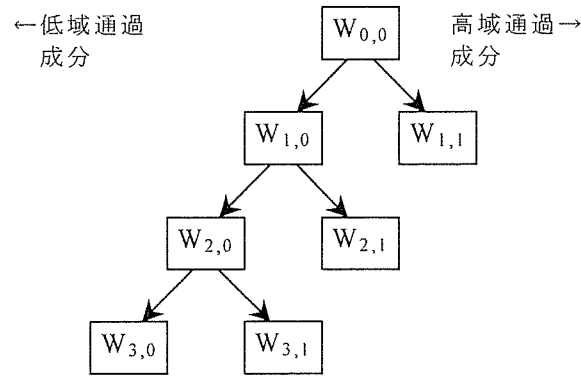
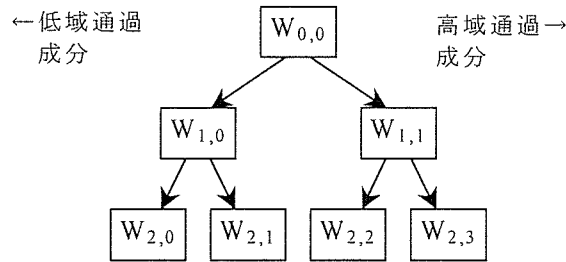


図 6.6 ピラミッドアルゴリズムによる分解の例¹⁹⁾



(a) ウェーブレット解析のピラミッドアルゴリズム



(b) ウェーブレット・パケット解析のピラミッドアルゴリズム

図 6.7 ウェーブレット・パケット解析の概念図 ²¹⁾

6.3.2 高速フーリエ変換を用いた離散データの補間法

WT 解析による方法では，式 (6.2) より離散データの近似が行われるが，構成要素であるスケーリング係数 $c_k^{(j)}$ の初期値は式 (6.10) より求められる ⁸⁾。

$$c_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \phi(2^j t - k) f(t) dt \quad (6.10)$$

しかし，離散データの場合，式 (6.10) の計算は困難であるため，実用的には高速フーリエ変換を応用した以下の方法を用いた方がよい ⁸⁾。

データ列 $\{\theta_n\}_{n \in [1, N]}$ が与えられた場合，周期的境界条件 $\theta_{N+n} = \theta_n$ を満たすことにより，離散データを補間することができる ⁸⁾。 $c_k = c_k^{(0)}$ とすると，

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \hat{c}_m e^{2\pi i(k-1)(m-1)/N} \quad (6.11)$$

$$\hat{c}_m = \frac{\hat{f}_0(m)}{\hat{\phi}_{(1,1)}(m)} \quad (6.12)$$

ここに、
 \hat{c}_m : c_k のフーリエ変換
 $\hat{f}_0(m)$: $f_0(t)$ のフーリエ変換
 $\hat{\phi}_{(1,1)}(m)$: $\phi(t-1)$ のフーリエ変換

6.4 路面性状評価に適したウェーブレット基底関数の選定

6.4.1 解析に用いたデータ

解析に用いた路面プロファイルデータは、PIARC EVEN 試験の一部を用いた^{23), 24)}。試験区間は IRI の程度に応じて 5 レベル、計 15 区間が選定されているが、この解析では最も大きいレベルに属する No.02 (国道 276 号線) の True Profile を用いた。この区間の IRI は 4.02mm/m であり、これは「供用後の道路 (表面損傷)」に分類される平坦性レベルである。

6.4.2 データの事前処理

True Profile は、サンプリング間隔 $\Delta t = 0.025\text{m}$ 、データ数 $N = 13161$ 点 (延長 $L = 329\text{m}$) であり、道路勾配など長波長成分も含まれる¹⁴⁾。

この区間の平坦性は局所的な表面損傷が含まれるレベルであるが、長波長成分の影響から容易には識別できない¹⁴⁾。WT 解析による識別は、式 (6.4) 及び図 6.6 の分解演算を 10 回以上繰返すことにより可能であるが、演算が複雑になるほか、計算過程での誤差の累積が考えられる²⁵⁾。このことから、本研究では平坦性に影響するウェーブバンドを主たる解析対象とし、サンプリング間隔を $\Delta t = 0.25\text{m}$ へ間引き処理した。また、この区間は一般国道であり、走行速度は $V = 60\text{km/h}$ 程度であるため、長波長成分は車両の上下振動

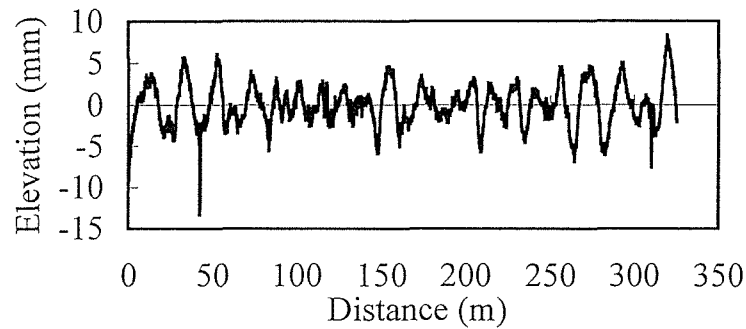


図 6.8 解析対象データ（事前処理した波形）

に対して大きな影響を及ぼさないと思われる¹²⁾。このことから、通過域の波長を $\lambda=20\text{m}$ 以下とするハイパスフィルタを用いてデータの事前処理を行った（図 6.8）。

6.4.3 研究対象のデジタルフィルタとウェーブレット基底関数の種類

（1）デジタルフィルタ

フィルタはローパスフィルタを用いる。 $\Delta t=0.25\text{m}$ のデータを用いるため、サンプリング定理により、最大周波数は $WN=2.0\text{m}^{-1}$ である。フィルタの帯域は任意に設定可能であるが、WN 解析との比較のため、最大周波数の 2^{-j} を遮断域の下限として設定した。

（2）ウェーブレット基底関数

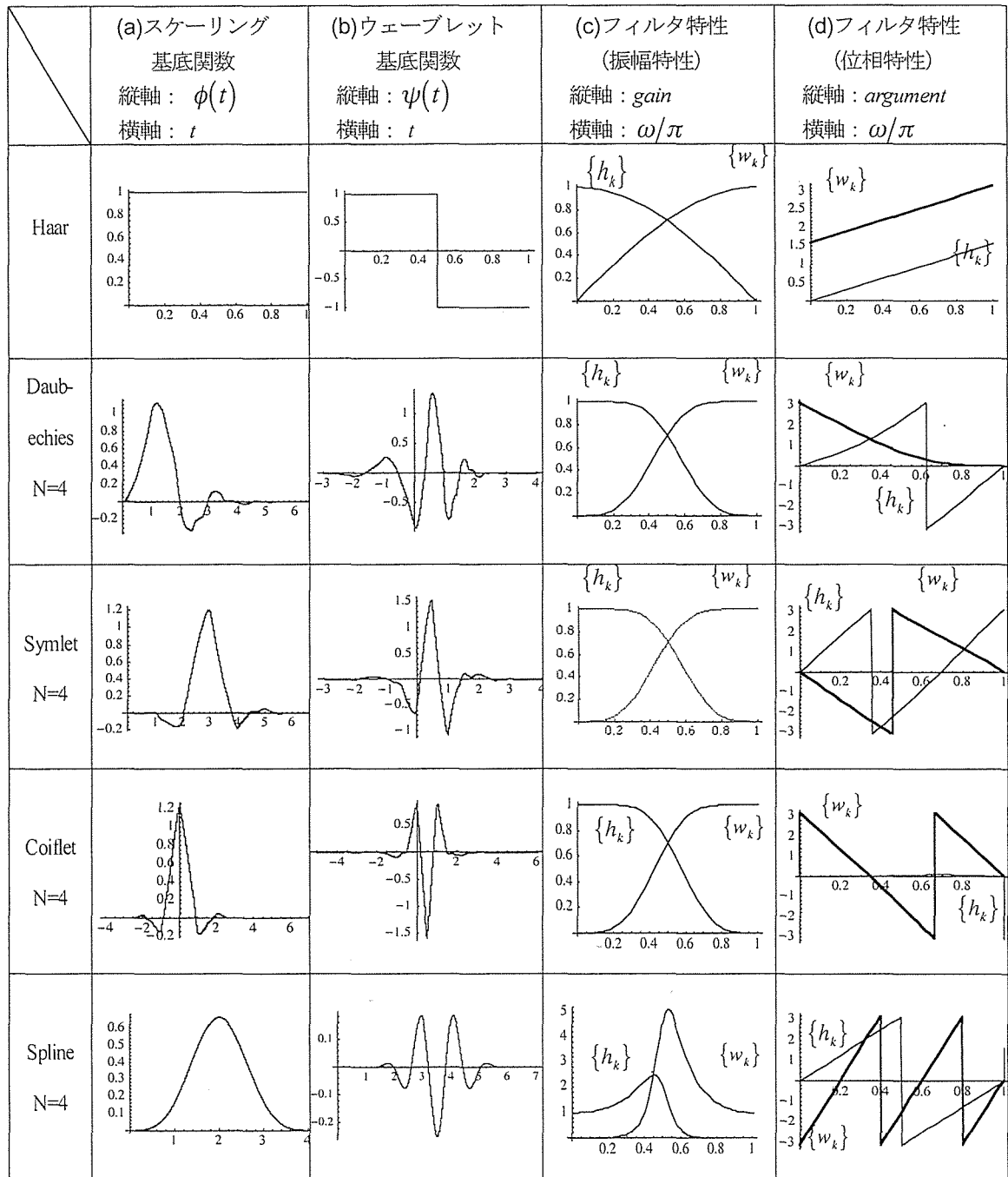
基底関数は、代表的な直交基底である Haar, Daubechies, Symlet, Coiflet の各関数、及び位相を線形とするために 2 種類の基底関数によって対称性を与えた Spline 関数（双直交ウェーブレットと称される）を用いた。生成次数を N で示す。 N の増加とともに平滑度は向上するが、基底関数の 0 ではない有限の区間（以下、「サポート」という）が長くなる。解析に用いた基底関数の特徴を表 6.1 に整理する^{26), 27)}。 Haar 以外の関数は $N=4$ とした。

6.4.4 WT 解析結果の振幅特性

（1）離散データの近似

WT 解析過程の第一段階である離散データの近似について、DF 演算結果の振幅比を用いて補間精度を考察する。

表6.1 解析に用いたウェーブレット基底関数の特徴



の振幅比を用いて補間精度を考察する.

図 6.9 に各基底関数による離散データの補間精度を示す. 図 6.9 は, 式 (6.2) によって求められたウェーブレット近似関数及び DF 演算結果から, 次式により PSD の比を求め, 平方根を算出することにより求めた.

$$|H_f| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)} \quad (6.13)$$

ここで、 H_f : DF演算に対する近似関数の振幅比
 $P_x(f)$: DF演算結果のパワースペクトル
 $P_y(f)$: WT近似関数のパワースペクトル

また、DF 演算に対する近似関数の振幅比を表 6.2 のように整理する。

i) Haar

WT解析を要約すると、データと基底関数の相似相関を検出する方法であるが、Haarの基本形状は正方形であるため、図6.5のように補間精度には限界がある。この誤差が図6.9(a)に生じたと思われる⁸⁾。

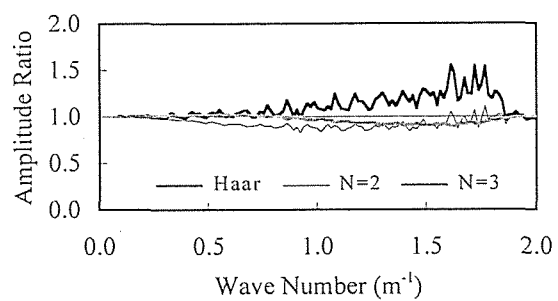
ii) Daubechies

Daubechies は結果が大別される。N=2, 3 の場合（図 6.9(a)），WN=1.0m⁻¹ 付近の帯域における振幅は入力信号よりやや小さいが、入力データの近似精度としては概ね良好である。しかし上記の帯域は、構造物前後の凹凸、ポットホール、はく離など、自動車の走行安定性に直接影響を及ぼす局所的な損傷が含まれている可能性がある。フェール・セーフ設計の観点から、この周波数帯では、近似の段階における振幅比が 1 以上であり WN に依存しないことが望ましい^{10), 28), 29)}。したがって、入力データの特徴について十分な検討が求められる。

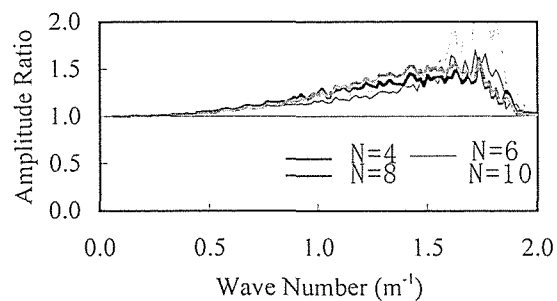
N=4 次以上の場合（図 6.9(b)）は、上記と対照的に高周波帯域で振幅比が大きい。この要因としては、サポート延長が N とともに拡大している点が考えられる^{8), 9), 18), 30)}。

局所的な変動を基底関数の伸縮演算によって捉えるためには、基底関数のサポート長が短い（コンパクトである）ことが望ましいが、生成次数 N が高い場合は演算上不利である。このためコンパクトなサポートを持つ基底関数の重要性が報告されている^{8), 9), 25), 30)}。

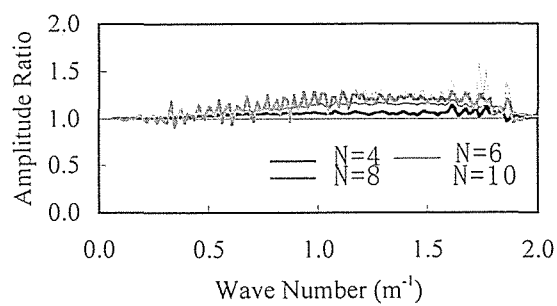
さらに、表 6.1 のように、フィルタ $\{h_k\}$ 、 $\{w_k\}$ の位相特性が非線形であるため、図 6.10 に示されるように、出力結果に歪みが生じている⁸⁾。



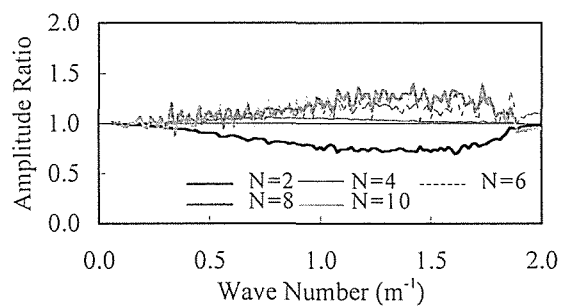
(a) Haar, Daubechies ($N=2,3$)



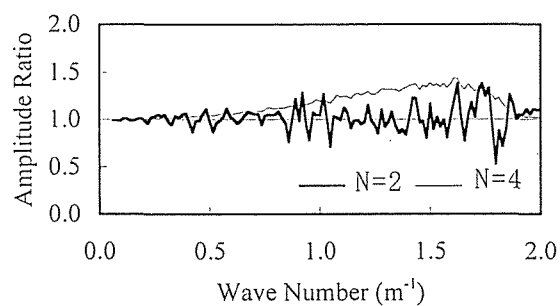
(b) Daubechies ($N=4,6,8,10$)



(c) Symlet ($N=4,6,8,10$)



(d) Coiflet ($N=2,4,6,8,10$)



(e) Spline ($N=2,4$)

図 6.9 基底関数による離散データの補間精度

表 6.2 デジタルフィルタ演算結果に対する
ウェーブレット近似関数の振幅比

基底関数の種類	$WN \leq 1.0\text{m}^{-1}$	$WN > 1.0\text{m}^{-1}$
Haar	1.0～1.2 倍	1.0～1.6 倍
Daubechies (N=2,3)	0.8～1.0 倍	0.8～1.1 倍
Daubechies (N=4以上)	1.0～1.3 倍	1.3～2.5 倍
Symlet	1.0～1.3 倍	1.0～1.6 倍
Coiflet (N=2)	0.8～1.0 倍	0.7～1.0 倍
Coiflet (N=4以上)	1.0～1.2 倍	1.0～1.4 倍
Spline (N=2)	1.0～1.2 倍	1.0～1.5 倍
Spline (N=4)	0.7～1.3 倍	0.5～1.4 倍

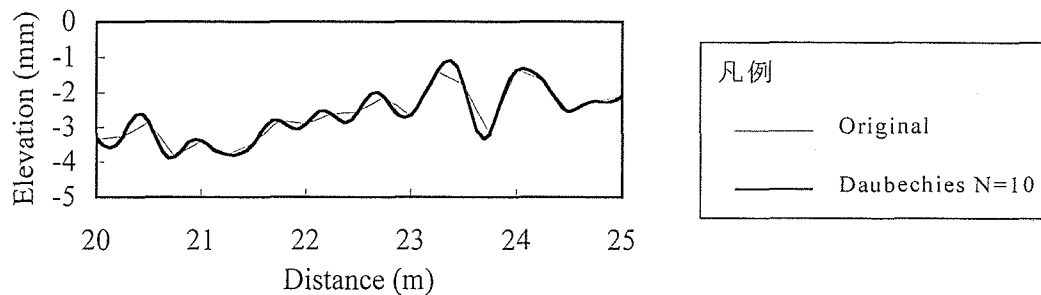


図6.10 位相の影響と考えられる誤差 (Daubechies N=10の例)

iii) Symlet

Symlet は、Daubechies に一定の対称性を与えるため、N=4 以上について別解法により作られた基底関数である。Daubechies に比べ、基底関数形状の対称性が増しており（表 6.1）、図 6.9(c) に示されるように、位相の影響による誤差が減少している⁸⁾。

iv) Coiflet

Daubechies N 次の直交ウェーブレットは、ウェーブレット基底関数の N-1 次のモーメントまでが 0 となる。Coiflet はこの条件をスケーリング基底関数

に対しても適用した関数であるため、対称性に優れているが、完全に対称ではない（表 6.1）^{8), 9)}。図 6.9(d)において、 $N=2$ は Daubechies の場合と同様に局所的損傷箇所を検出できない可能性があるため、解析では注意を要する。その他の関数は振幅比 1~1.5 倍の範囲内であった。

v) Spline

直交ウェーブレットはフィルタの位相特性が非線形であるため、時間遅れが一定とならず、出力結果に歪みを生じる。Spline は、スプライン関数を基本に、必要に応じてこれに直交する双対基底を用いるもので、双直交ウェーブレットと称される。Spline は対称性と滑らかさを兼ね備えており、画像のエッジ検出、画像圧縮に応用例が多い。この関数の境界条件は自由境界であり、基本関数がスプラインであることから、前述の補間法は不要である⁸⁾。

図 6.9(e)において、 $N=2$ はスケーリング関数が三角波であることから、振幅比はこれを反映した結果が現れている。 $N=4$ の場合、基底関数の平滑性は高いが、高周波帯域において振幅比にばらつきが生じており、解析では注意を要する。

(2) ピラミッドアルゴリズムの性能比較

引き続き、DF 演算及び WT 解析によるピラミッドアルゴリズムの性能を比較する。分解回数は 2 回 ($j = -2$) とし、振幅比は式(6.13)に準じて求めた。

基準データを出力するためのフィルタについては、帯域等を任意に設定することが可能であるが、ここではサンプリング間隔及び通過域は WT 解析の条件を準用する。遷移域については、帯域を 2 分割するもので勾配は急峻とし、遮断性能を高めた設計とした^{16), 17)}。WT 解析のフィルタは、各基底関数に対応した $\{h_k\}$, $\{w_k\}$ が用いられるが、本項では基底関数とのたたみ込み演算後の総合周波数特性について比較する。

i) 低域通過成分

$j = -2$ の解像度は近似関数の $1/4$ であり、低域通過成分は主として $WN = 0 \sim 0.5m^{-1}$ の成分が抽出される（図 6.11）。

図 6.12 に DF 演算との振幅比を示す。図 6.12(a)の Haar, Daubechies $N=2$, 3 では、 $WN=0 \sim 0.3m^{-1}$ の振幅比が 1 前後であるが、 $WN=0.3 \sim 0.5m^{-1}$ の検出感度は低い。この帯域に属する損傷は、構造物前後の凹凸、パッチング処理痕

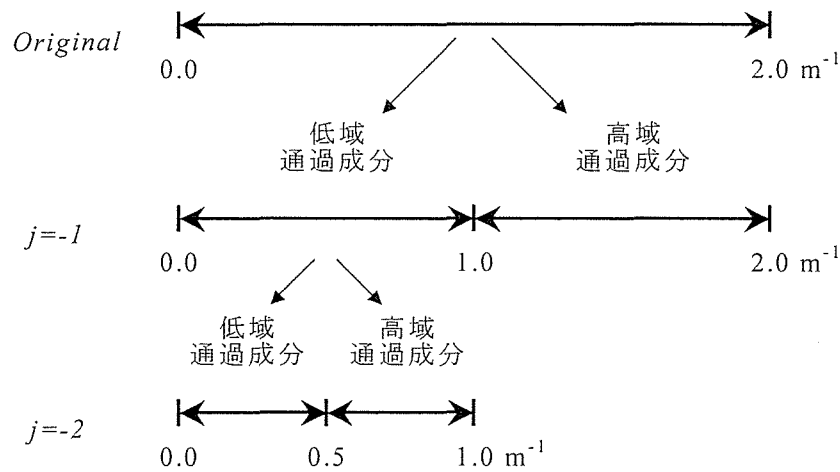


図 6.11 $WN = 0 \sim 0.5 \text{ m}^{-1}$ の成分抽出 (分解回数: 2 回)

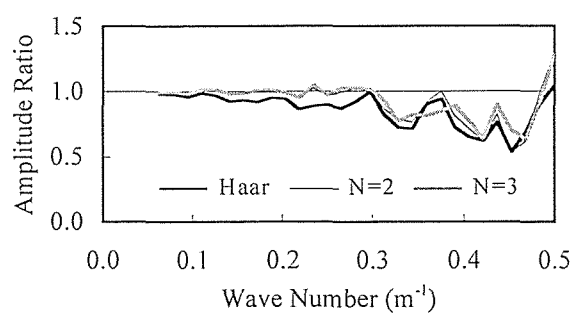
などが含まれる²⁸⁾。図 6.12(a)の基底関数を用いた場合、これらの凹凸に関する情報が想定外の帯域に分類される可能性がある。

図 6.12(b)~(e)については、次数が低い場合、図 6.12(a)と同様の傾向を示すが、次数が高くなるに伴い、振幅比は 1 に近づくことが窺える。

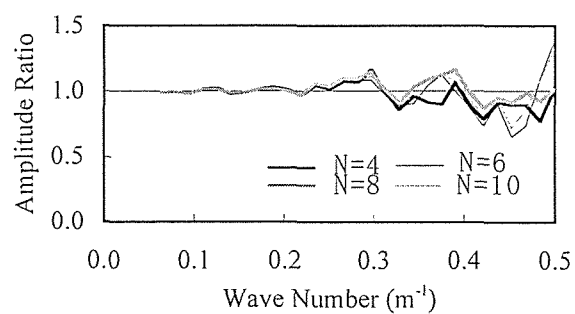
ii) 高域通過成分

高域通過成分は、主として $WN=0.5 \sim 1.0 \text{ m}^{-1}$ の成分が抽出される。このウェーブバンドには、構造物前後の凹凸、ポットホール、パッチング及びはく離などが含まれ、自動車の走行安定性に影響がある領域と考えられる(写真 6.1)^{4), 28)}。

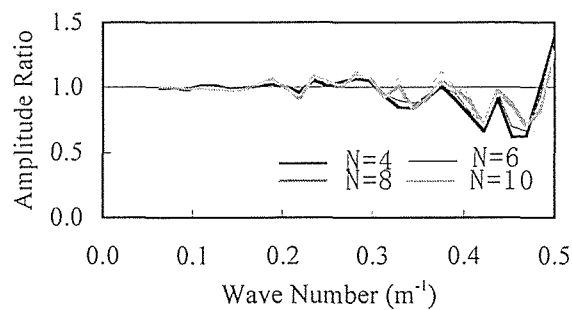
図 6.13 に DF 演算との振幅比を示す。図 6.13(a)のうち、Haar については $WN=0.8 \sim 1.0 \text{ m}^{-1}$ 近傍の振幅が非常に大きい。前節と同様に、基底関数の形状の影響を受けたノイズ成分などが含まれていると考えられる。Daubechies $N=2, 3$ は、変動は大きい。振幅比は 1 程度である。これは図 6.13(b)~(e)についても同様であり、Symlet 及び Spline は周波数による振幅比のばらつきが比較的小さい結果が得られた。



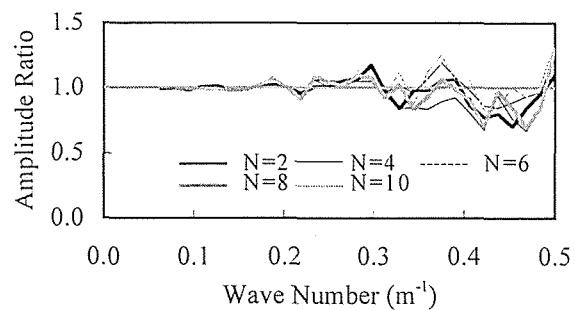
(a) Haar, Daubechies (N=2,3)



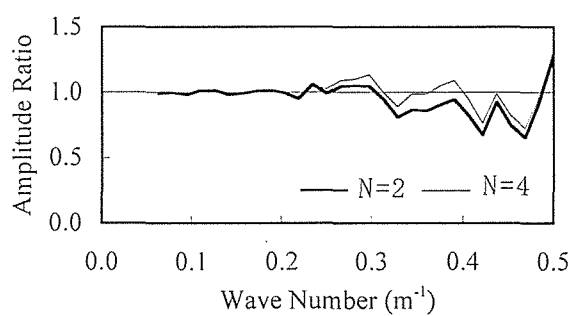
(b) Daubechies (N=4,6,8,10)



(c) Symlet (N=4,6,8,10)

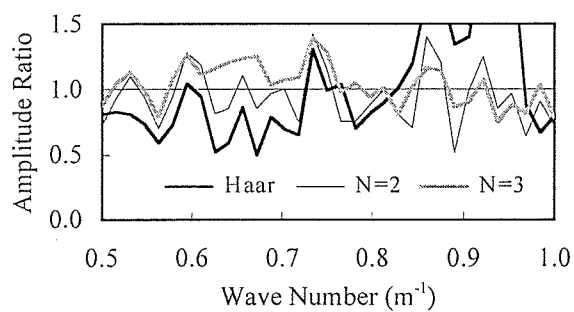


(d) Coiflet (N=2,4,6,8,10)

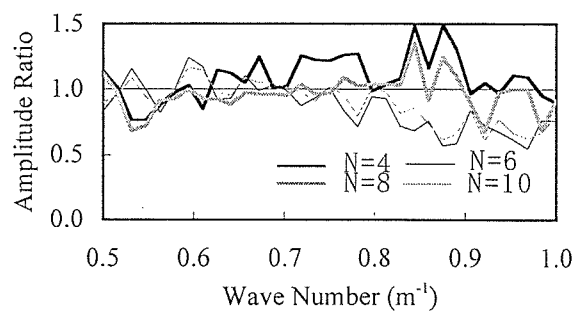


(e) Spline (N=2,4)

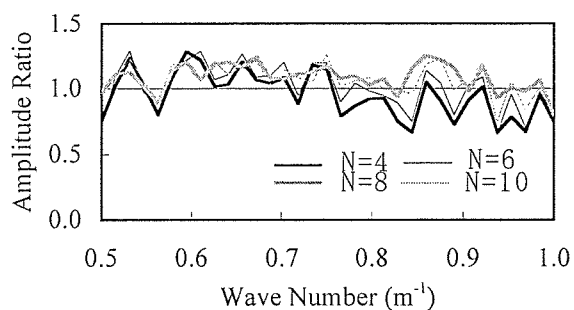
図 6.12 $j = -2$ におけるウェーブレット変換結果の振幅比（低域通過成分）



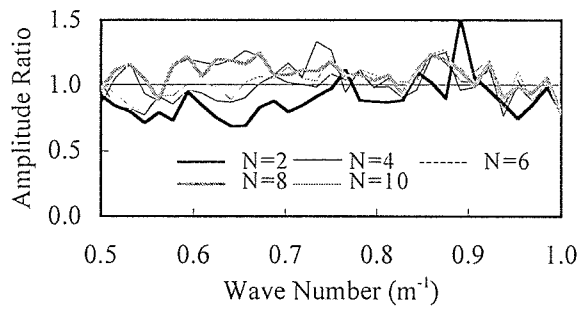
(a) Haar, Daubechies ($N=2,3$)



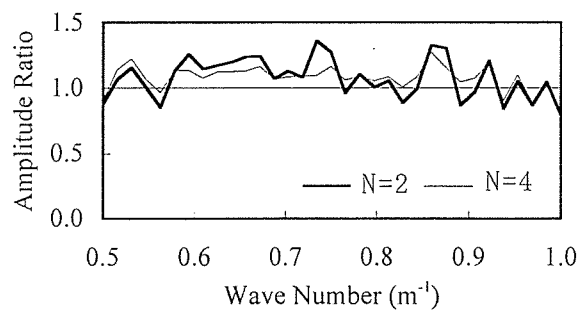
(b) Daubechies ($N=4,6,8,10$)



(c) Symlet ($N=4,6,8,10$)



(d) Coiflet ($N=2,4,6,8,10$)



(e) Spline ($N=2,4$)

図 6.13 $j = -2$ におけるウェーブレット変換結果の振幅比 (高域通過成分)



写真 6.1 パッチング補修痕の例

6.4.5 路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定及び適用方法

(1) 成分分解結果（振幅比）の特徴及び適用性

前節の結果より，各基底関数による成分分解結果（振幅比）の特徴及び適用性について要約したものを表 6.3 に示す．

位相が線形（あるいは線形に近似）となるように考慮された基底関数については概ね周波数の程度に依存せず，ばらつきが小さい結果となった． $\Delta t=0.25\text{m}$ 程度（IRI 算出を指向したサンプリング間隔）の路面プロファイルデータを用いる場合，分解の初期数段階は舗装の破損に関する帯域のデータを扱うため注意を要するが，位相の線形性が考慮された基底関数の場合，振幅比は DF 演算結果に対して $\pm 30\%$ 程度の範囲に収束した．例えば，振幅が 3mm であれば，誤差は $\pm 1\text{mm}$ 以内に収まる．

このことから，Coiflet（ $N=2$ を除く），Spline $N=2$ 及び Symlet の各基底関数を用いる場合，路面プロファイルデータ処理において DF 演算と同程度の結果が期待できる¹²⁾．

本研究は EVEN 試験データのうち，IRI が最も大きいレベルの区間について分析しており，ディジタルフィルタ及び基底関数のフィルタ特性が平坦性の程度に依存せず理論的に一定であるとすれば，他の区間についても同様の結果が得られると思われる．しかし，上記の基底関数を最適解として特定するためには，平坦性が良好な路面も含め，今後さらに数多くの路面プロファイルについて解析を行ない，路面損傷の検知能力の違いについての考察

表 6.3 各基底関数による成分分解結果（振幅比）の特徴及び適用性

基底関数	$WN \leq 0.5m^{-1}$	$WN > 0.5m^{-1}$	特 徴	適用性
Haar	0.5～1.0 倍	0.5～2.8 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Daubechies (N=2,3)	0.6～1.2 倍	0.5～1.4 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Daubechies (N=4以上)	0.6～1.4 倍	0.6～1.5 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Symlet	0.6～1.4 倍	0.7～1.3 倍	次数が大きいものは、高域通過成分のほとんどの帯域で振幅比 1.0～1.3 倍であり、検出感度及び精度がよい.	○
Coiflet(N=2)	0.7～1.2 倍	0.7～1.5 倍	高域通過成分の変動が大きい.	△
Coiflet (N=4以上)	0.7～1.3 倍	0.8～1.3 倍	低域及び高域通過成分ともばらつきが小さく精度がよい.	◎
Spline(N=2)	0.7～1.3 倍	0.9～1.3 倍	低域及び高域通過成分ともばらつきが小さく精度がよい.	◎
Spline(N=4)	0.6～1.3 倍	0.8～1.4 倍	Spline N=2 と比較すると、ややばらつきが大きい.	○

を行なう必要があると思われる。

(2) 空間領域におけるデータの相関性

WT 解析結果のうち低域通過成分について、空間領域における離散入力データとの相関分析例を図 6.14 に、また各基底関数について整理したものを表 6.4 に示す。いずれの関数も誤差 2%以内であり、WT 解析を日常の維持管理に用いる場合、波高及び位置情報の検知、路面特性評価値の算出などへの影響は少ないと考えられる¹²⁾。しかし、図 6.2 のように位相による波形の歪みが生じるため、波形の形状から路面損傷の分類などを行う場合、位相の線形性を考慮した Coiflet (N=2 を除く)、Spline 及び Symlet を用いると DF 演算と同等の結果が期待できると思われる^{8), 12)}。

なお高域通過成分については、低域通過成分と比較すると、帯域による変動が大きい（図 6.13）。これは $WN=0.5 \sim 1.0m^{-1}$ の帯域に含まれる成分が

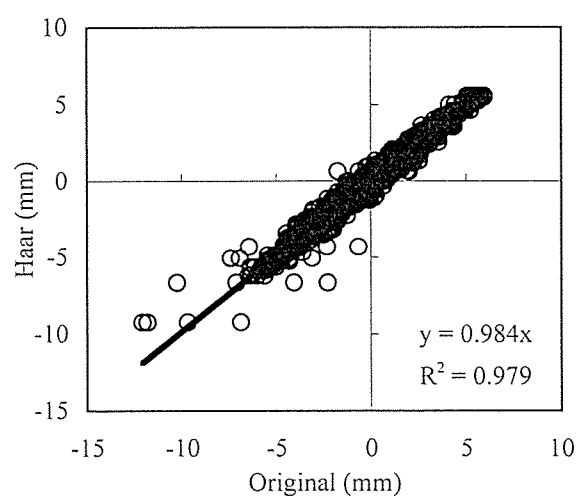


図 6.14 入力データとウェーブレット解析による分解結果（低域通過成分）との相関分析例（Haar 関数）

表 6.4 入力データとウェーブレット解析による分解結果（低域通過成分）との相関性

基底関数の種類		回帰直線の傾き（原点回帰）	決定係数 R
Haar		0.984	0.989
Daubechies	N=2	0.986	0.992
	N=3	0.992	0.993
	N=4	0.994	0.990
	N=6	0.991	0.992
	N=8	0.995	0.992
	N=10	0.991	0.992
Symlet	N=4	0.992	0.994
	N=6	0.993	0.993
	N=8	0.994	0.994
	N=10	0.995	0.993
Coiflet	N=2	0.986	0.992
	N=4	0.994	0.993
	N=6	0.995	0.994
	N=8	0.995	0.993
	N=10	0.995	0.993
Spline	N=2	0.992	0.992
	N=4	0.995	0.993

少ないためであり、DF 演算結果との差がわずかであっても、相対誤差が大きくなることがある。

(3) 今後の路面性状評価及び維持管理における WT 解析の展開について

路面性状評価において、評価対象の帯域があらかじめ一定範囲に特定されている場合、DF 演算によるウェーブバンド分析は効果的である。これは前述のようにフィルタの安定性、特にフィルタ通過成分における振幅利得が 1 であり、位相が線形であるため、データに歪みが生じにくいためである^{16), 17)}。

しかし、多くの場合、路面上には様々なパターンの損傷が点在しており、データの一部に著大値が含まれている場合、道路勾配など長波長成分が多く含まれている場合など、容易には帯域が特定できないケースが想定される。このような場合、DF 演算は計算効率の点で不利になる場合が考えられる。

この点、WT 解析は周波数領域での変化をスケールファクター（解像度の逆数） j の操作のみで検知できるため、DF 演算に比べ操作は容易であり、帯域を特定できない場合、分析対象の帯域が広範囲に及ぶ場合などに適した方法であると思われる^{8), 9)}。

今後の路面性状評価及び維持管理分野への WT 解析の展開として、局所的な異常値の発生箇所の特定など、日常の維持管理は主として WT 解析を用い（DF 演算と同等の結果が期待できる基底関数を使用）、異常値の波形についてさらに詳細な情報を必要とする場合は DF 演算を行うなど、両者をハイブリッドで用いることを提案したい^{3), 8)}。

6.5 まとめ

本章では、代表的なウェーブレット基底関数の出力特性を DF 演算結果との振幅比によって比較し、路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定方法について考察したが、特に離散データの補間方法とその精度について分析したものとしては最初の報告になると思われる。得られた知見を以下に記す。

- (1) WT 解析では、入力データをスケーリング関数によって近似し、これを以後の演算に用いるが、近似精度はスケーリング関数の種類により異

なるため、入力データに含まれる必要な情報が初期段階で失われる場合がある。Daubechies $N=2, 3$ 及び Coiflet $N=2$ は DF 演算結果に比べ検出感度が低いため、使用するデータの特性を十分に考慮することが望ましい。

- (2) ピラミッドアルゴリズムによる数段階の分解の結果得られた総合的な周波数特性を考察すると、低域通過成分については多くの基底関数が DF 演算結果と同等の値を示した。しかし高域通過成分については、離散データを近似した際の誤差の影響によって、低域通過成分に比べ、帯域による振幅比の変動は大きな値を示した。
- (3) 位相の線形性が考慮された基底関数 (Coiflet ($N=2$ を除く), Spline $N=2$ 及び Symlet) の場合、出力結果の振幅比は DF 演算結果に対して $\pm 30\%$ 程度の範囲に収束した。これらの基底関数は、路面プロファイルデータ処理において DF 演算と同程度の結果が期待できる。今後、さらに数多くの路面プロファイルについて解析を行ない、路面損傷の検知能力の違いについての考察を行なう必要があると思われる。

参考文献

- 1) 川村彰, 姫野賢治, 笠原篤: 高精度プロファイルデータに基づいた路面ラフネスの評価, 土木学会年次学術講演概要集第 5 部, Vol.47, pp.104-105, 1992.
- 2) Delanne, Y. and Pereira, P.A.A.: Advantages and limits of different road roughness profile signal-processing procedures applied in Europe, Journal of the Transportation Research Record, No.1764, pp.254-259, 2001.
- 3) 白川龍生, 松原正人, 川村彰: デジタルフィルタを用いた路面プロファイルデータ処理について - ウェーブレットの概念を導入したデジタル信号処理, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.724-727, 2003.
- 4) 川村彰, 姫野賢治, 藤原隆, 秋本隆: ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について, 舗装工学論文集, Vol.2, pp.23-28, 1997.
- 5) Kawamura, A., Shimeno, S., Himeno, K., Komatsubara, A. and Hagiwara, T.: Study on Application of the Multiresolution Analysis to Road Profile Evaluation, Proceedings of the 3rd International Symposium on the Environmental Impact of Road Unevenness, pp.121-132, 1999.
- 6) Oguri, N., Himeno, K., Kawamura, A. and Nakamura, R.: Application of Wavelet Analysis on Evaluation of Roughness of Pavement Surfaces, Proceedings of the 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airfields, pp.57-66, 2000.
- 7) Taylor, F.J.: Digital Filter Design Handbook, Maecel Dekker, inc., 1983.
- 8) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.
- 9) 芦野隆一, 山本鎮男: ウェーブレット解析 誕生・発展・応用, 共立出版, 1997.
- 10) 川村彰: ウェーブレット解析と路面性状評価, 舗装, Vol.35, No.3, pp.25-28, 建設図書, 2000.
- 11) 福田晃一, 川村彰: 多重解像度解析を用いた路面プロファイル評価について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部, Vol.54, pp.364-365, 1999.
- 12) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆: ウェーブバンドを考慮した路面プロファイリングデータ処理手法について - EVEN データを用いて -, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.15.1-15.12, 2002.

- 13) 川村彰:路面の評価(1)-平坦性に着目して-, 舗装, Vol.36, No.8, pp.31-35, 建設図書, 2001.
- 14) Sayers,M.W. and Karamihas,S.M.:The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 15) 中村尚五:ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電機大学出版局, 1989.
- 16) 三上直樹:デジタル信号処理の基礎 はじめて学ぶデジタルフィルタとFFT, CQ出版社, 1998.
- 17) 辻井重男, 鎌田一雄:デジタル信号処理, 昭晃堂, 1990.
- 18) 白川龍生, 松原正人, 川村彰: デジタルフィルタを用いた路面プロファイルデータ 処理について -ウェーブレットの概念を導入したデジタル信号処理-, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.724-727, 2003.
- 19) Sayood,K.:Introduction to Data Compression, Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- 20) 金谷健一:これなら分かる応用数学教室 -最小二乗法からウェーブレットまで-, 共立出版, 2003.
- 21) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹:ウェーブレットパケット変換を用いた路面プロファイルデータ処理, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.199-206, 2003.
- 22) 白川龍生, 川村彰, 谷本晃一, 大越健司:路面性状評価へのウェーブレット・パケット理論の適用性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第V部, Vol.58, pp.1347-1348, 2003.
- 23) Kawamura,A.,Takahashi,M. and Inoue,T. :Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, Journal of the Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 24) 亀山修一, 川村彰, 早坂保則, 高橋守人, 笠原篤:PIARC 路面性状国際共通試験における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.119-129, 2001.
- 25) 石川康宏:臨床医学のためのウェーブレット解析, 医学出版, 2000.
- 26) Chui,C.K.: Introduction to wavelets, Academic Press, New York, 1992.

- 27) Daubechies,I.:Ten Lectures on Wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- 28) 多田宏行編:道路工学, オーム社, 1998.
- 29) 谷村富男:ヒューマンエラーの分析と防止 不安全行動・作業ミスはなぜ起こるか, 日科技連出版社, 1995.
- 30) Daubechies,I.: Orthogonal Bases of Compactly Supported Wavelets, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol.41, pp.909-996, 1988.

第 7 章

第二世代ウェーブレット解析を用いた 特徴的な路面凹凸の検出方法

第 7 章 第二世代ウェーブレット解析を用いた特徴的な路面凹凸の検出方法

7.1 概説

路面プロファイル上に局在する凹凸を識別する方法としては、発生位置及び空間周波数情報を同時に識別できる WT 解析が注目されるようになった¹⁾。

WT 解析の長所は、1) 周波数領域で信号を表現するフーリエ変換の性質に加え、変動の空間的推移も同時に把握でき、2) 初期の段階で決定する分解・再構成アルゴリズムが全計算過程で同一であり、高速演算が可能なことである。このため、WT 解析は音響・画像信号処理をはじめ、数多くの工学的分野で用いられるようになった。ISO 15444 で規格された画像圧縮技術の JPEG 2000 は代表的な応用例である²⁾。

先述のように、路面性状評価への WT 解析の適用に関する研究は近年精力的に行なわれており、従来困難であった路面プロファイル上に局在する凹凸データの処理及び評価に有効であることが示されている^{1), 4)-6)}。

一方、WT 解析の短所としては、1) 空間領域（位置情報）の分解性能は高いが、周波数領域の分解性能は高周波帯域で急速に劣化するため、特定の周波数成分の空間領域における変化は検出が困難であること、2) 基底関数の構成要素に分解するため、出力結果（形状及び特徴点の検出など）が大きく異なる場合がある点が挙げられる。このうち前者については、高周波成分の分解性能を高めたウェーブレットパケット変換が開発されており、必要によりこの方法を用いるとよい⁵⁾。後者については、必要なデータの性質に応じた基底関数を設計又は選択することによって問題を回避できるが、基底関数は直交条件（モーメント・コンディション）など、様々な制約条件を満足する必要があるため、設計は容易ではない。

上記のように、路面性状評価における WT 解析の適用については基底関数の最適化が最大の課題であったが、1996 年に Sweldens によって従来の WT 解析にパラメータの学習機能を付加した Lifting Scheme 法が発表されて以降、上記の問題が解消されつつある⁷⁾。特に高野らによって「第二世代

ウェーブレット」としてこの解析方法が体系化されたことにより，基底関数の最適化処理が飛躍的に向上した^{8), 9)}。

本研究では，以下，この方法を「第二世代ウェーブレット解析」(SWT)とし，路面維持管理へ適用するための基礎的な研究を行なう．SWTの有効性を検証するため，1) 特徴的な路面凹凸を含む路面プロファイルデータによって自由パラメータを学習し，2) 特徴的な形状と類似した成分を検出する方法について述べる．なお，解析は EVEN 試験結果の一部を用いた。

7.2 第二世代ウェーブレット解析

7.2.1 第二世代ウェーブレット解析の概要^{1), 4)-9)}

WT 解析は，入力データに含まれる周波数帯域（角周波数 $0 \sim \pi$ の範囲）を低周波及び高周波分解フィルタによって 2 等分し，同時にダウンサンプリング操作によって解像度を 1/2 倍する演算を低域通過成分について展開する演算方法である。

入力信号 (c_l^1) は，分解フィルタにより式(7.1)及び式(7.2)に分解される。

$$\hat{c}_k^0 = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^1 \quad (7.1)$$

$$\hat{d}_m^0 = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^1 \quad (7.2)$$

ここで，
 \hat{c}_k^0 : 低周波成分
 \hat{d}_m^0 : 高周波成分
 $\tilde{h}_{k,l}^{old}$: 低周波分解フィルタ
 $\tilde{g}_{m,l}^{old}$: 高周波分解フィルタ
 l : 解像度（周波数）パラメータ
 k : 位置パラメータ（低周波成分）
 m : 位置パラメータ（高周波成分）

$\tilde{h}_{k,l}^{old}$ 及び $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ は, 基底関数の種類により性能が異なる.

c_l^1 は, \hat{c}_k^0 , \hat{d}_m^0 より, 式(7.3)のように再構成することができる.

$$c_l^1 = \sum_k h_{k,l}^{old} \hat{c}_k^0 + \sum_m g_{m,l}^{old} \hat{d}_m^0 \quad (7.3)$$

ここで, $h_{k,l}^{old}$: 低周波復元フィルタ
 $g_{m,l}^{old}$: 高周波復元フィルタ

フィルタには以下の条件が与えられる. これを双直交条件 (biorthogonal conditions) という.

$$\begin{aligned} \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{h}_{k',l}^{old} &= \delta_{kk'}, & \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{h}_{k,l}^{old} &= 0, \\ \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{g}_{m,l}^{old} &= 0, & \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{g}_{m',l}^{old} &= \delta_{mm'} \end{aligned} \quad (7.4)$$

SWT は, 上述の WT に自由パラメータを与えたものであり次式によって定義される.

$$\begin{aligned} h_{k,l} &= h_{k,l}^{old} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{old} \\ \tilde{h}_{k,l} &= \tilde{h}_{k,l}^{old} \\ g_{m,l} &= g_{m,l}^{old} \\ \tilde{g}_{m,l} &= \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_m \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \end{aligned} \quad (7.5)$$

ここで, $h_{k,l}$: 新しい低周波復元フィルタ

$\tilde{h}_{k,l}$: 新しい低周波分解フィルタ

$g_{m,l}$: 新しい高周波復元フィルタ

$\tilde{g}_{m,l}$: 新しい高周波分解フィルタ

$\tilde{s}_{k,m}$: 自由パラメータ

SWT は, $\tilde{s}_{k,m}$ を調整することにより, 信号に適応する新しいフィルタを

構成することができる。双直交条件は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_l h_{k,l} \tilde{h}_{k',l} &= \delta_{kk'}, & \sum_l g_{m,l} \tilde{h}_{k,l} &= 0, \\ \sum_l h_{k,l} \tilde{g}_{m,l} &= 0, & \sum_l g_{m,l} \tilde{g}_{m',l} &= \delta_{mm'}, \end{aligned} \quad (7.6)$$

7.2.2 特徴点の検出と自由パラメータの学習方法^{8), 9)}

SWT は、信号の特定部分（特徴的な形状）を検出するため、 $\tilde{s}_{k,m}$ を用いて特徴点における高周波成分（ d_m^0 ）を 0 とする演算を行なう。

WT における \hat{d}_m^0 の絶対値から d_m^0 の絶対値を差引くと、特徴的な形状と異なる箇所では値が小さくなるが、類似箇所ではほとんど変化しない。SWT は、この重み付けを利用して特徴的な形状の箇所を検出する（式(7.7)）。

$$I_m = \left| \hat{d}_m^0 \right| - \left| d_m^0 \right| \quad (7.7)$$

ここで、 $I_m : \left| \hat{d}_m^0 \right|$ と $\left| d_m^0 \right|$ の差

また、 d_m^0 は式(7.8)によって求める。

$$\begin{aligned} d_m^0 &= \sum_l \tilde{g}_{m,l} c_l^1 \\ &= \sum_l \left(\tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \right) c_l^1 \\ &= \hat{d}_m^0 - \sum_k \hat{c}_k^0 \tilde{s}_{k,m} \end{aligned} \quad (7.8)$$

特徴点では、 d_m^0 が 0 となるため、

$$d_m^0 = \hat{d}_m^0 - \sum_k \hat{c}_k^0 \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (7.9)$$

$\tilde{s}_{k,m}$ は，特徴的な形状を有するトレーニング信号（以下，「TS」という）を $\nu = 2n$ 個用意し，式(7.10)によって学習すると効率がよい．

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} \hat{c}_k^{0,\nu} \tilde{s}_{k,m} - \hat{d}_m^{0,\nu} = 0, \quad \nu = 1, 2, \dots, 2n \quad (7.10)$$

$$\hat{c}_k^{0,\nu} = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^{1,\nu}, \quad \hat{d}_m^{0,\nu} = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^{1,\nu}$$

さらに，式(7.10)に $\tilde{g}_{m,l}$ の総和が 0 となる条件を加える．すなわち，

$$\sum_l \tilde{g}_{m,l} = \sum_l \left(\tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \right) = 0$$

ここで， $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ が $\sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} = 0$ と $\sum_l \tilde{h}_{m,l}^{old} = const.$ （定数）を満足させるならば，この条件は式(7.11)と等しい．

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (7.11)$$

式(7.10)及び式(7.11)から，式(7.12)を導出することができる．式(7.12)を展開することにより， $\tilde{s}_{k,m}$ を求めることができる．

$$\begin{bmatrix} \hat{c}_{m-n}^{0,1} & \hat{c}_{m-n+1}^{0,1} & \cdot & \cdot & \hat{c}_{m+n}^{0,1} \\ \hat{c}_{m-n}^{0,2} & \hat{c}_{m-n+1}^{0,2} & \cdot & \cdot & \hat{c}_{m+n}^{0,2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{c}_{m-n}^{0,2n} & \hat{c}_{m-n+1}^{0,2n} & \cdot & \cdot & \hat{c}_{m+n}^{0,2n} \\ 1 & 1 & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{s}_{m-n,m} \\ \tilde{s}_{m-n+1,m} \\ \cdot \\ \tilde{s}_{m+n-1,m} \\ \tilde{s}_{m+n,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_m^{0,1} \\ \hat{d}_m^{0,2} \\ \cdot \\ \hat{d}_m^{0,2n} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

7.2.3 特徴点の検出手順^{8), 9)}

特徴点の検出手順を整理したものを以下に記す．

- i) \hat{d}_m^0 の算出（式(7.2)）
- ii) データの分析目的に応じた TS を選定

- iii) $\tilde{s}_{k,m}$ を学習 (式(7.12))
- iv) d_m^0 の算出 (式(7.8))
- v) I_m の算出 (式(7.7))

7.2.4 特徴点検出の別解法^{8), 9)}

本研究では, $\tilde{g}_{m,l}$ を設計することなく, 特徴点を検出する別解法を以下のように考案した.

式(7.8)を考察すると, WT 解析によって \hat{d}_m^0 及び \hat{c}_k^0 を求め, 7.2.2 の手順により $\tilde{s}_{k,m}$ が得られれば, c_l^1 の各点で d_m^0 を求めることができる. このため, 実用的な演算レベルの場合, $\tilde{g}_{m,l}$ の構成は不要と思われる.

また, d_m^0 の積分演算は一般的な表計算ソフトウェアで実現でき, このことは式(7.7)の計算を行なう上でも有利と考えられる. したがって, 特徴点の検出を目的とする場合は, 本節で提案する別解法が実用的であると思われる.

7.3 特徴的な路面凹凸の検出方法

7.3.1 解析に用いるデータ

解析で用いたデータは, PIARC EVEN 試験における区間 No.03 の True Profile である¹⁰⁾⁻¹²⁾. このデータのサンプリング周波数は $WN=20\text{m}^{-1}$ と高いため, 幅広い周波数情報が含まれている.

この解析では, True Profile から乗用車のバネ下固有振動数に相当する周波数帯域 (10~17Hz) を検出し^{13), 14)}, この中から TS を選出することとした. また, 事前処理として WT 解析による 4 段階の成分分解を行い, 一定の周波数帯域 ($WN=0\sim1.25\text{m}^{-1}$) を検出した. この成分を c_l^1 とし, 図 7.1 に示す. また, 基底関数は双直交基底である Spline N=2 を用いた (図 7.2)^{1), 4), 5)}.

7.3.2 自由パラメータの学習

特徴点を検出するため, 入力信号 c_l^1 を式(7.1)及び式(7.2)によって \hat{c}_m^0 , \hat{d}_m^0 に分解する. \hat{d}_m^0 を図 7.3 に示す. 本研究では, \hat{d}_m^0 の振幅 (波高) が大きい

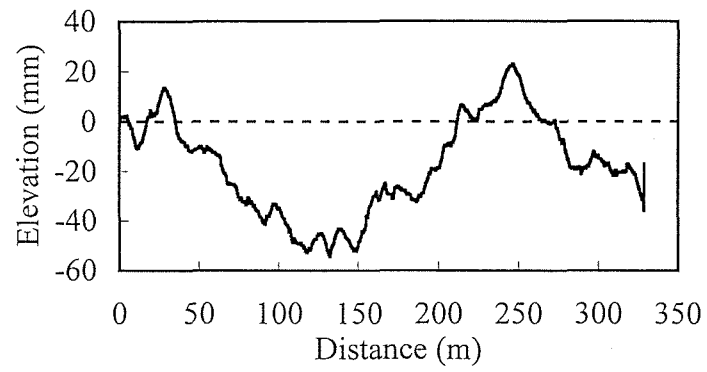


図 7.1 入力信号 c_l^1

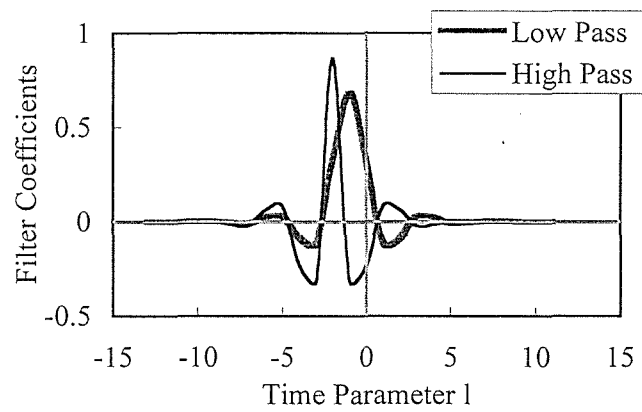


図 7.2 基底関数 (Spline N=2)

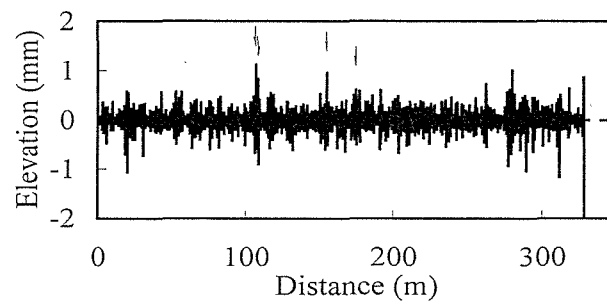


図 7.3 高周波成分 \hat{d}_m^0 (矢印は $\tilde{s}_{k,m}$ の学習区間)

地点を上位 10 箇所抽出し、この地点付近の波形が類似している 4 箇所 ($v=1,2,3,4$) 付近を TS として設定した (図 7.4)^{8), 9)}.

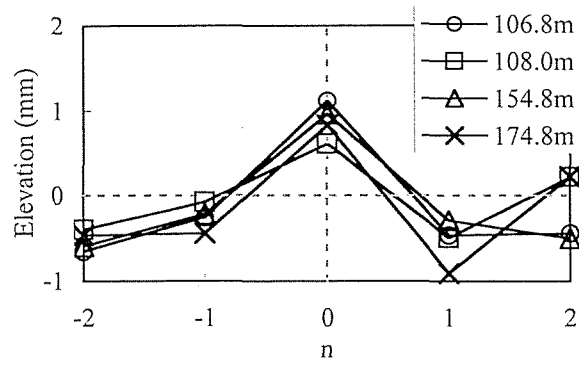


図 7.4 トレーニング信号 TS ($\gamma_{m-2}^n \sim \gamma_{m+2}^n$)

式(7.12)へ代入すると以下ようになる.

$$\begin{bmatrix} \hat{c}_{m-2}^{0,1} & \hat{c}_{m-1}^{0,1} & \hat{c}_m^{0,1} & \hat{c}_{m+1}^{0,1} & \hat{c}_{m+2}^{0,1} \\ \hat{c}_{m-2}^{0,2} & \hat{c}_{m-1}^{0,2} & \hat{c}_m^{0,2} & \hat{c}_{m+1}^{0,2} & \hat{c}_{m+2}^{0,2} \\ \hat{c}_{m-2}^{0,3} & \hat{c}_{m-1}^{0,3} & \hat{c}_m^{0,3} & \hat{c}_{m+1}^{0,3} & \hat{c}_{m+2}^{0,3} \\ \hat{c}_{m-2}^{0,4} & \hat{c}_{m-1}^{0,4} & \hat{c}_m^{0,4} & \hat{c}_{m+1}^{0,4} & \hat{c}_{m+2}^{0,4} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{s}_{m-2,m} \\ \tilde{s}_{m-1,m} \\ \tilde{s}_{m,m} \\ \tilde{s}_{m+1,m} \\ \tilde{s}_{m+2,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_m^{0,1} \\ \hat{d}_m^{0,2} \\ \hat{d}_m^{0,3} \\ \hat{d}_m^{0,4} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\tilde{s}_{k,m}$ の算出結果を表 7.1 に示す.

表 7.1 学習した自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$

k	$\tilde{s}_{k,m}$
m-2	-1.336
m-1	2.980
m	-2.797
m+1	1.746
m+2	-0.594

7.3.3 特徴点の検出

$\tilde{s}_{k,m}$ が求まると、7.2.4の方法を用いて特徴点を検出することができる(図7.5)。図中、TSとして設定した箇所を矢印及び○印で示した。

図7.5(a.1), (a.2)は、 $|\hat{d}_m^0|$ の波形を示しており、これは従来のWT解析の演算結果と同値である。始点からの距離260~320m付近では、振幅が0.5mm以上の箇所が多く見受けられる(図7.5(a.1))。

図7.5(b.1), (b.2)は、 $\tilde{g}_{m,l}$ を用いて算出した $|d_m^0|$ の波形である。TSに類似した箇所では、 $|d_m^0|$ の値が0程度であることが確認できる。

図7.5(c.1), (c.2)は、 $|\hat{d}_m^0|$ と $|d_m^0|$ の差(I_m)を示しており、この演算によってTSと類似する箇所がクローズアップされている。

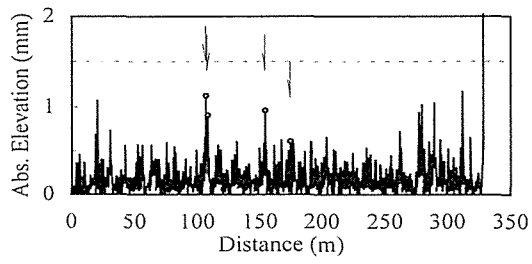
図7.5(d.1), (d.2)は、 $I_m \geq 0$ の値を示しており、この値が大きいほどTSとの相関が高い。図7.5(a.1)において、始点からの距離260~320m付近では $|\hat{d}_m^0|$ の値は大きいですが、TSとの相関が低いため、図7.5(d.1)ではTS箇所に比べ I_m が小さな結果となった。

従来のWT解析では、例えば橋りょう部の段差とポットホールなど、路面損傷データの周波数帯域が同程度である場合、一般的な基底関数ではこれらを識別することが困難である。したがって、特徴的なデータのみを検出する場合は、用途に応じた基底関数を設計しなければならないが、設計は様々な制約条件を満たさなければならない。また段差などの形状は一概に規定することが難しい。

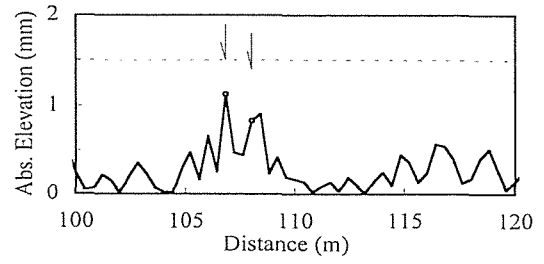
SWTは、 $\tilde{s}_{k,m}$ を導入することによって特徴的な形状を学習することができ、用途に応じたフィルタを作成できる。例えば、路面プロファイルのデータベースを構築した場合など、解析データの蓄積に応じ適宜フィルタを改良することも可能である。

7.3.4 路面管理における第二世代ウェーブレットの適用について

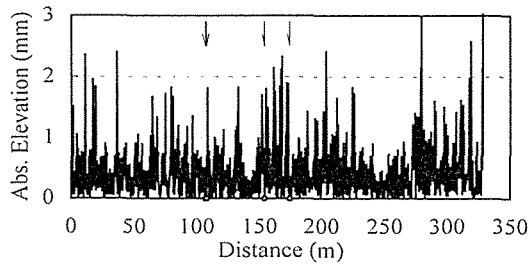
上記のように、SWTは特徴点の検出において従来法より優れている点が多いことがわかった。今後、以下の点について分析を進め、路面管理におけるSWTの適用範囲などを整理する必要があると思われる。



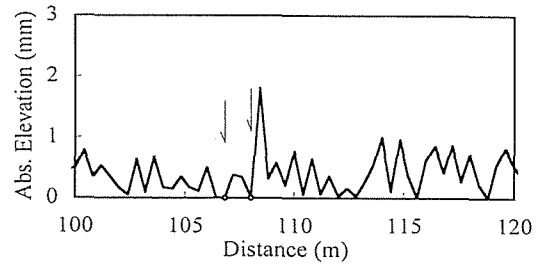
(a.1) $|\hat{d}_m^0|$



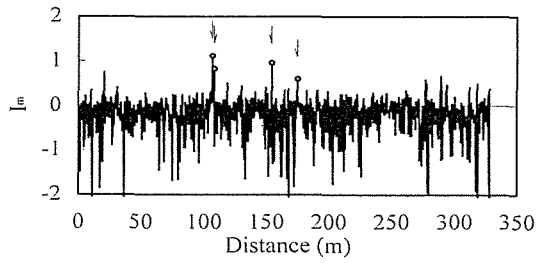
(a.2) $|\hat{d}_m^0|$ (一部拡大)



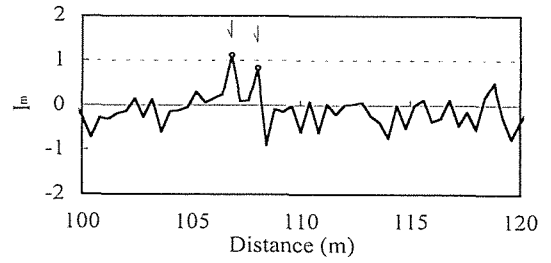
(b.1) $|d_m^0|$



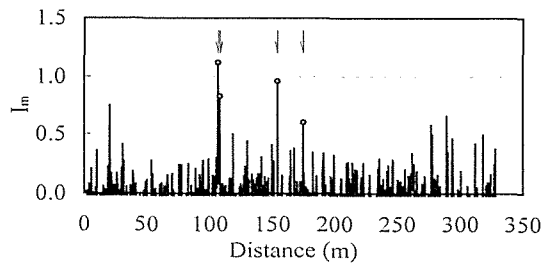
(b.2) $|d_m^0|$ (一部拡大)



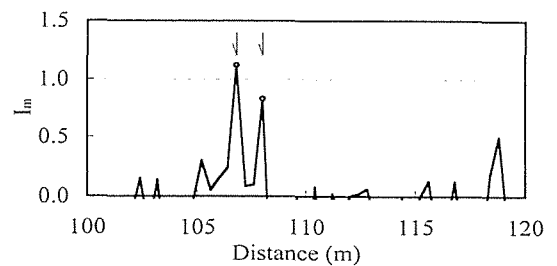
(c.1) $I_m = |\hat{d}_m^0| - |d_m^0|$



(c.2) I_m (一部拡大)



(d.1) $I_m \geq 0$



(d.2) $I_m \geq 0$ (一部拡大)

図 7.5 特徴点の検出

- i) 路面凹凸（段差，ポットホール，コルゲーションなど）を記録したプロフィールデータから複数の TS を検出し，7.2 節の方法によって事前に最適な $\tilde{g}_{k,m}$ を算出する．
- ii) 特徴点は I_m の大小によって判別するため，特徴点とみなすための定量的な基準を設定する．
- iii) 初期段階における \hat{d}_m^0 は，WT 基底関数の種類によって値が異なるため， d_m^0 との組み合わせなどを考慮した最適な基底関数を設計する．

7.4 まとめ

本章では，路面プロフィールデータへの新しい分析ツールとして SWT に着目し，PIARC EVEN 試験データを用いて特徴点の学習及び検出について基礎的な考察を行なった．その結果，従来の WT 解析を補完する有効な分析ツールであることがわかった．本章で得られた知見を要約すると以下のようなになる．

- (1) TS と形状が類似する箇所では，出力成分がクローズアップされる一方，形状が異なる場合は，振幅の大きな場合でも特徴点として検出されず，必要な成分のみが検出された．これは，路面管理目的に応じたフィルタを設計する上で，非常に重要な性質である．
- (2) 新たに $\tilde{g}_{m,l}$ を設計することなく，特徴点を検出する別解法を考案した．特徴点の検出を目的とする場合，実用的にはこの方法でよいと思われる．
- (3) SWT を道路維持管理に用いる場合，段差など路面凹凸を記録したデータバンクから複数の特徴的な波形を検出し，路面管理目的に応じた自由パラメータを事前に算出するなど，SWT の適用方法を体系化する必要がある．

参考文献

- 1) 川村彰, 姫野賢治, 藤原隆, 秋本隆: ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について, 舗装工学論文集, Vol.2, pp.23-28, 1997.
- 2) 浜本和彦: JPEG2000 による医用超音波画像の圧縮と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103, No.158, pp.17-22, 2003.
- 3) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.
- 4) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 中辻隆: 軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, no.1, pp.71-78, 2003.
- 5) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.
- 6) 芦野隆一, 山本鎮男: ウェーブレット解析 誕生・発展・応用. 共立出版. 1997.
- 7) Sweldens, W.: The lifting scheme - A custom design construction of bi-orthogonal wavelets -, Applied and Computational Harmonic Analysis, Vol.3(2), pp.186-200, 1996.
- 8) Takano, S., Minamoto, T., Arimura, H., Niijima, K., Iyemori, T. and Araki, T. : Automatic detection of geomagnetic sudden commencement using lifting wavelet filters, Proceedings of the Second International Conference on Discovery Science, pp.242-251, 1999.
- 9) Takano, S.: Signal and Image Extraction by Lifting Wavelets, Doctorial Thesis, Kyushu University, 2001.
- 10) Kawamura, A., Takahashi, M. and Inoue, T. : Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, Journal of the Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 11) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆: ウェーブバンドを考慮した路面プロファイリングデータ処理手法について -EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 12) 亀山修一, 川村彰, 早坂保則, 高橋守人, 笠原篤: PIARC 路面性状国際共通試験における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.119-129, 2001.

- 13) 景山克三, 景山一郎:自動車力学, 理工図書, 1984.
- 14) 自動車工学全書編集委員会編:自動車工学全書, Vol.11, 山海堂, 1980.

第 8 章

道路パトロール車両を用いた 路面管理支援システムの開発

第 8 章 道路パトロール車両を用いた路面管理支援システムの開発

8.1 概説

路面性状測定は、レーザー変位計やジャイロ計など高性能プロファイラが発達し、高い精度を追求した測定方法が主流となりつつある¹⁾。しかしながら、一方では実用的なレベルの精度を有し、低コストで簡単に測定できる装置へのニーズも少なからず存在する。例えば、地方自治体では厳しい財政状況下での安全性の確保、さらには施設老朽化への対応といった観点から、今後、更に効率的なメンテナンス手法が必要になると思われるが、高速道路及び幹線国道で導入されている測定システムは非常に高価であり、地方自治体の財政規模に対して適当とはいえない²⁾。

本章では、都道府県道や市町村道など、幹線国道等と比較した場合に路面プロファイルの測定及び評価が不足している一般道路について、舗装マネジメント業務を支援することを目的とした「路面管理支援システム」の開発について述べる。また、このシステムの適用性及び適用範囲について考察する。

路面管理支援システムは、道路管理者が所有する一般的な道路パトロール車を用いることを想定しており、市販の振動加速度計及びデータ収録装置などを車両の一部に設置するといった簡単な構成であるが、第 4 章から第 7 章の研究過程で得られた技術を集結することにより、自動車バネ下部の振動加速度データから True Profile 形状の推定及び特徴的な形状の検出などを行うことが可能となった。

自動車を利用した路面性状評価の試みは古くから研究例があり、代表的なものとしては第 3 章で述べた RTRRMS をはじめ³⁾、国内では渡辺らによる動的輪荷重の推定^{4)、5)}、前田によるレーザー変位計を用いた路面形状計測システム⁶⁾、河野らによる道路高速診察システム (VIMS)⁷⁾などが考案されている。しかし、これらのシステムは車両に大幅な改造を施す必要がある、あるいは路面プロファイルの形状の推定は行われておらず、本研究で提案する方法とは異なるものである。

なお，路面管理支援システムは通常の道路パトロール業務に併せて運用することを前提としており，新たに測定業務が追加されるものではない．したがって，現在の維持管理体制を保ちつつ，路面プロファイルの測定及び評価レベル向上が期待できる．

8.2 路面管理支援システムの構成

路面管理支援システムに要求される性能は以下の通りである⁷⁾．

- i) 自動車の走行安定性及び乗り心地に影響を及ぼす路面プロファイルデータを実用的な精度で出力できること．
- ii) 設置スペースがコンパクトに収まること．また，車両に大規模な改造を施さずに測定装置を搭載できること．
- iii) 測定作業が容易であり，従来の道路巡回作業体制に支障しない程度とすること．
- iv) 導入及び測定コストが低廉であること．
- v) 冬期間の測定を可能とすること．

特に PMS の見地から，多くの一般道路において路面状態の定期的なモニタリングを実現するため，一定の測定精度及びデータ処理速度を有しつつ，コストが低廉となるシステムを指向した．

i) については，第 4 章及び第 5 章で述べた「普及型プロファイラの測定データを用いた True Profile の推定方法」を応用することによって実現する．すなわち，プロファイラの検出特性の補正方法を準用することになるのであるが，具体的には，振動加速度の周波数応答特性を補正するためのフィルタを作成し，振動加速度データとのフィルタリング演算によって True Profile を得る．ウェーブバンドの設定については，プロファイラの場合と同様に自動車の乗り心地及び走行安定性に関係のある周波数帯域を設定するが，使用するデータが加速度自体であることから，道路パトロール車両の車両特性に応じたウェーブバンドの設定が可能である．このことは，交通工学における路面と車両の相互作用分析の観点からも興味深い（図 8.1）．

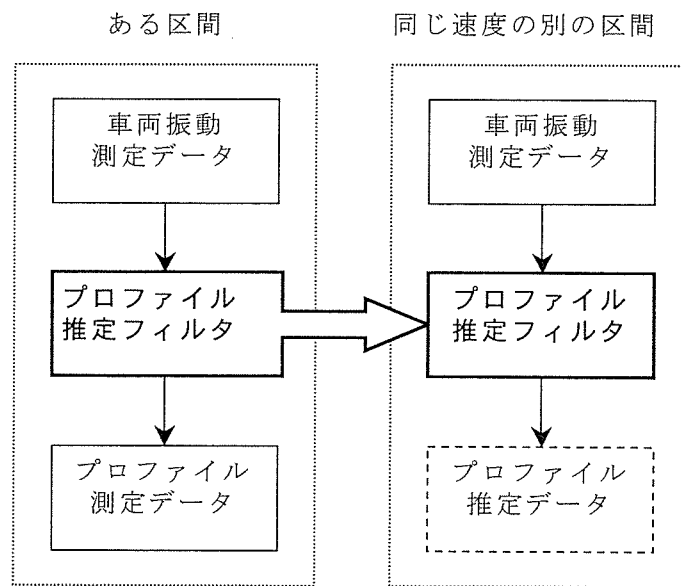


図 8.1 車両の振動加速度を利用したプロフィール推定方法⁸⁾

ii)については、電子、情報機器の発達により、コンパクトなサイズでありながら高性能かつ安価な製品が数多く発売されている。写真 8.1 は、本研究で使した測定装置を示すが、道路パトロール車両は写真 8.2 のような SUV (Sports Utility Vehicle) タイプであることが多いため、測定装置がこの程度のサイズであれば、設置スペースが問題となるケースは少ないと思われる⁹⁾。

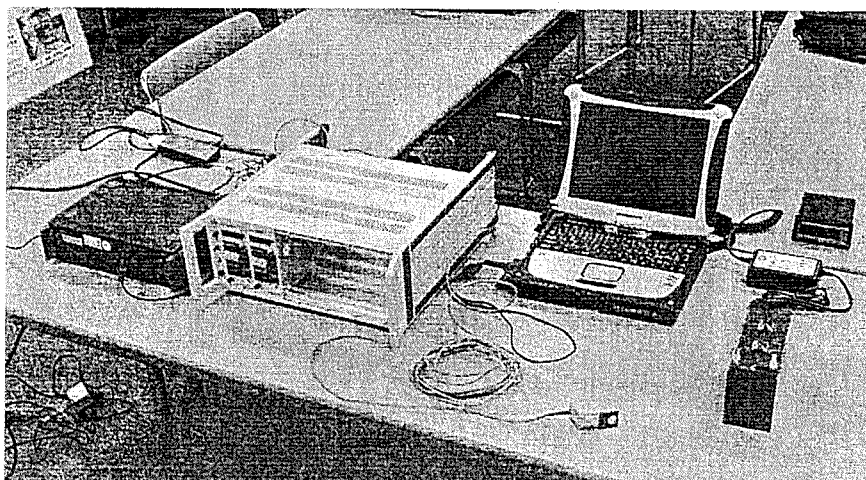


写真 8.1 本研究で使した振動加速度の測定装置



写真 8.2 道路パトロール車両と同等の諸元を有する車両

本研究で構成した測定システムのイメージを図 8.2 に示す．入力となる振動加速度は，車両左前軸の軸受付近（バネ下）で測定されたデータを用いる（写真 8.3）¹⁰⁾．

iii)の測定に要する要員については，測定データを保存するための PC 操作及び区間マーキング作業のため 1～2 名の従事を要するが，これらの作業は，データ解析ソフトウェアや PC の規格によっては大半の作業を自動化することが可能なものである．

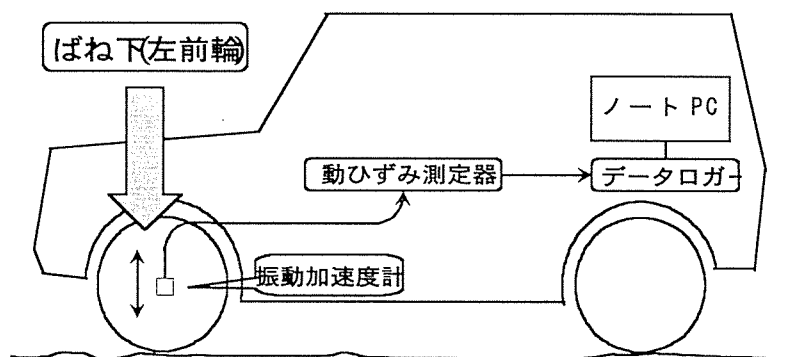


図 8.2 測定システムのイメージ⁵⁾

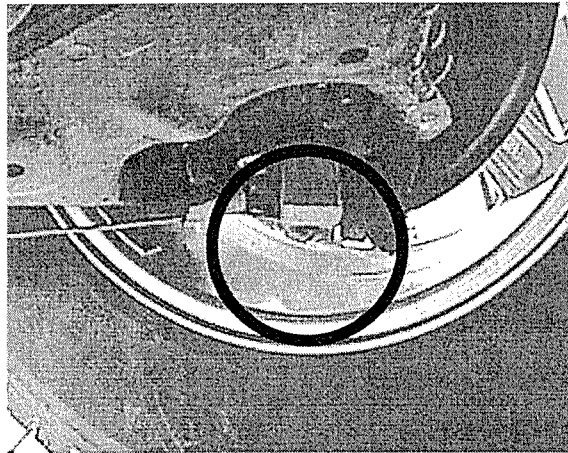


写真 8.3 バネ下に設置した振動加速度計

マーキング作業については、通常の目視巡回に併せて実施可能であると思われ、実質的には従来の道路巡回作業体制に支障しない程度の作業である。

iv) の導入コストについては、測定システムの規格によって差はあるが、本研究の事例では、総額 100 万円程度である。これは、路面性状測定車を導入する場合に比べ、非常に安価である。

v) については、積雪寒冷地において従前からニーズがある¹¹⁾。冬期間の降雪及び凍結作用により、場合によっては路盤の凍上も影響し、路面性状は夏期に比べ悪化する傾向がある（図 8.3）。このため道路管理者としては、走行安定性を確保するため、日々の路面プロファイル形状を定量的に把握すべきである。しかし、路面性状測定車などで用いられているレーザー変位計は積雪に弱いため、冬期間は条件によっては測定することができない⁸⁾。この点で、路面管理支援システムは車両の振動加速度から True Profile を推定する手法であり、冬期間の路面プロファイル測定が可能という利点を有する。ただし下限温度は定められているため、測定時期によっては断熱材等を用いてセンサーを保護しなければならない。

次節では、以上 5 点の要求性能を考慮したシステムの性能について検証する。

市内の道路

通行阻む凸凹

消えぬ
大雪禍 バス路線運休続く

北見地方を襲った大雪後遺症は二十三日も深刻で、北見市内では依然として道路の凸凹が大
きく、車の通行の支障となっており、北見市は北見バスは郊外線を含む十三路線が運休中だ。
北見市は市内をめぐり市内のバス路線の閉鎖を自覚している。

(庄藤大樹)

凸凹が残り通行の障害となっている市内の道路

23日午前、北見市幸町



北見市建設部は「段差
を取るだけで、道の両
側に雪が溜り、かえって
交通の妨げになる」とい
う。山下道については二
十五日までに降雪を止
めるが、ほかの幹線市
道についてはほとんど立
っていない。

北見バスでは、三輪小
泉線などの市内三路線で
運行しているが、市内六
路線、郊外七路線が運
休中だ。北見市はバス路
線にあたる幹線市道の排
雪を急ぎ、二十三日朝ま

図 8.3 交通に障害を与える路面プロファイルの例

(北海道新聞, 2004 年 1 月 24 日版)

8.3 自動車の振動加速度を用いた True Profile の推定

8.3.1 True Profile 推定方法

(1) True Profile と振動加速度

路面から自動車に伝わる振動は、タイヤを介してバネ下に伝わり、サスペンションで衝撃的な振動が吸収された後、バネ上に伝わる¹³⁾。この過程は

一種のフィルタとも考えられるが、例えばバネ上の乗り心地のみを考慮するならば、路面プロファイル成分のうち高周波成分については不要となる。このように、測定部位によって必要な周波数成分は異なるが、一般的に乗り心地及び耐久性については多くの場合考慮しなければならないことから、路面プロファイルの測定はバネ上及びバネ下質量の振動に対応したもの（特にサンプリング間隔について）が必要と思われる¹³⁾。本研究では周波数の情報量が多く含まれるバネ下振動加速度を用いることとし、加速度計を前車軸軸受付近に設置した。

(2) 振幅特性の算出方法

路面プロファイル（入力）と、その上を試験車が走行した場合のバネ下の振動加速度（出力）から振幅特性を求めた例（走行速度 40km/h）を図 8.4 に示す。この例では、 $WN=1.3\sim1.6\text{m}^{-1}$ （走行速度 40km/h の場合、14～18Hz に相当する）付近が共振域と思われるが、これは自動車（乗用車）のバネ下固有振動数として一般的に考えられている 10～17Hz と概ね一致する（なおバネ上は 1.2～1.5Hz 程度が影響すると考えられているが¹³⁾、図 8.4 の場合バネ下に影響する高周波成分が大きいため、明確に現れない）。

本システムの目的の一つは、自動車の振動加速度から必要なウェーブバンド内の True Profile を推定することである。そこで、第 4 章及び第 5 章で述べた 3m プロフィロメータによる True Profile の推定方法を応用し、図 8.4 の逆数となるプロファイル推定フィルタを算出した。

路面プロファイル（入力）と自動車の振動加速度（出力）が線形であると仮定すると、入出力の周波数応答関数の振幅特性は式(8.1)のように示される。

$$|H(f)| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)} \quad (8.1)$$

ここで、 $|H(f)|$: 振幅特性
 $P_x(f)$, $P_y(f)$: 入出力のパワースペクトル密度

この推定方法の留意点としては、上述のようにシステムの入出力間の線形性を利用するため、Repeatability(反復性)の検定が必要である。

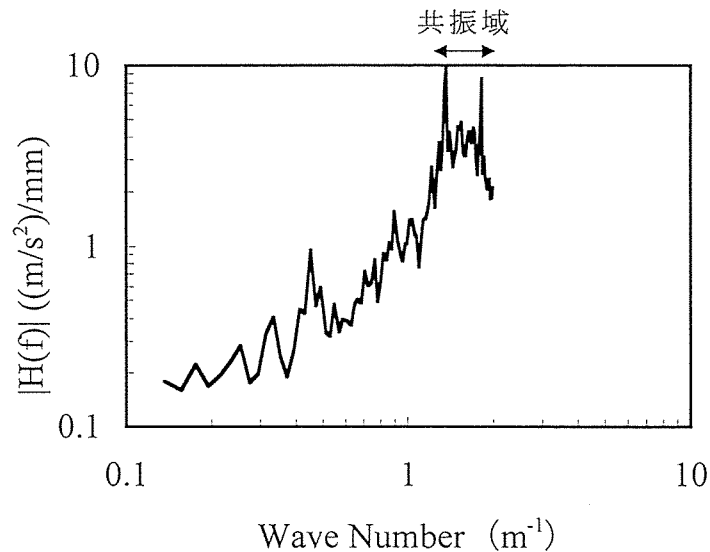


図 8.4 自動車の周波数応答関数（振幅特性）の算出例

8.3.2 推定の対象となるウェーブバンドの範囲

推定対象となるウェーブバンドは，測定データ等の特徴を考慮し，以下のように設定した．

路面特性の条件としては，平坦性を対象とする場合， $WN=0.02\sim 20\text{m}^{-1}$ の帯域が考慮されなければならない．このウェーブバンドは，乗り心地，騒音，燃費，車のダメージなど，車両の走行費用に関係している¹⁴⁾，¹⁵⁾．

車両条件としては，バネ上及びバネ下の振動に影響するウェーブバンドが主たる対象となる場合，測定速度が $40\sim 60\text{km/h}$ であれば $WN=0.08\sim 0.14\text{m}^{-1}$ （バネ上： $1.2\sim 1.5\text{Hz}$ ）及び $WN=0.60\sim 1.53\text{m}^{-1}$ （バネ下： $10\sim 17\text{Hz}$ ）近傍が含まれなければならない．したがって，サンプリング間隔は最大周波数である $WN=1.53\text{m}^{-1}$ （ $\lambda=0.65\text{m}$ ）を構成することが可能な $\Delta t=0.33\text{m}$ 以下であればよいが，情報として必要な最短波長の少なくとも $1/10$ 程度のサンプリング間隔が望ましいため¹⁶⁾， $\Delta t=0.065\text{m}$ 以下に設定すべきである．

またフィルタ安定性の条件としては，サンプリング間隔を短くするとフィルタの通過域が高周波の領域へ拡大するが，一方で低周波領域についてはフィルタ通過域の Gain（振幅利得）が不安定となることが挙げられる¹⁷⁾．したがって，フィルタの通過域の幅には一定の制約が伴う． $\Delta t=0.05\text{m}$ とし

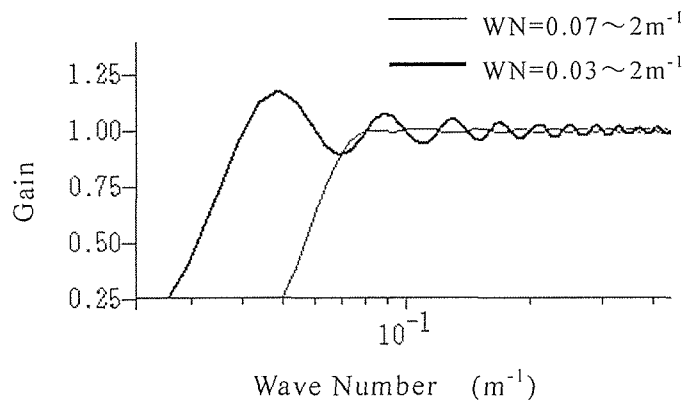


図 8.5 フィルタ通過域の安定性

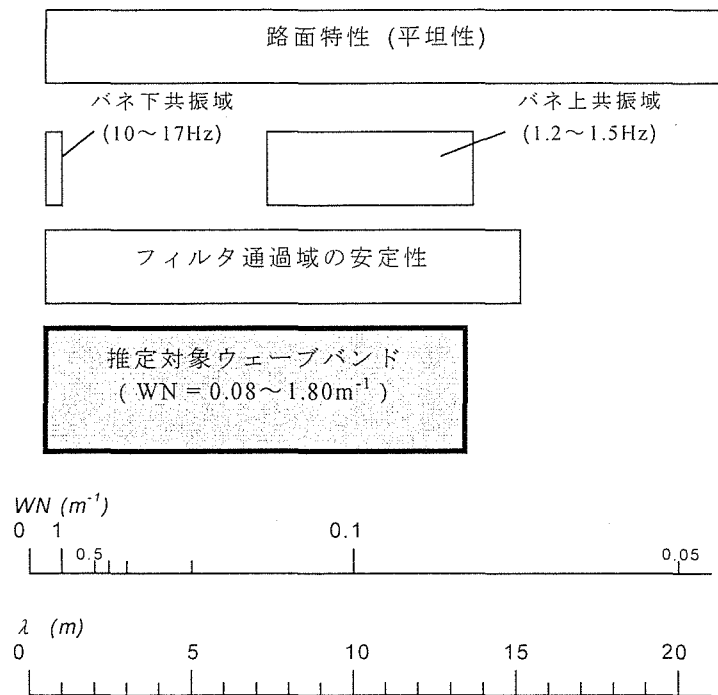


図 8.6 フィルタ通過域の設定方法

た場合、 $WN=0.067 \text{ m}^{-1}$ ($\lambda=15\text{m}$) 付近が限界であると思われる(図 8.5)。以上の条件のうち、本研究では特に車両及びフィルタ安定性の重要度が高いことから、図 8.6 に示すように、 $WN=0.08\sim1.80\text{m}^{-1}$ のウェーブバンド ($\Delta t=0.05\text{m}$) を研究対象として設定した¹⁴⁾。

8.3.3 True Profile の推定

振動加速度を利用した True Profile の推定精度を考察するため、北海道北見市内の常呂川河川敷地内防災用道路にて実施した性能確認試験について述べる。

(1) データ測定

プロファイル推定フィルタの設計に必要なデータについては以下のように測定した。

a) True Profile

第 3 章で述べたように、プロファイラは固有の周波数特性を有しているため^{14), 18)}, 評価の基準となる True Profile が必要である。このため, True Profile を水準測量によって測定した。測定区間の選定は、平坦性の度合の違いが推定精度に及ぼす影響について考察するため、舗装後比較的新しく使用頻度の低い区間（以下、「区間 1」という）、及びクラックなどの損傷や特殊舗装を含む区間（以下、「区間 2」という）の計 2 区間を選定した（直線, $L=320\text{m}$ ）。サンプリング間隔については $\Delta t=0.05\text{m}$ とした。 $WN=0.08\sim 1.80\text{m}^{-1}$ を通過域としたバンドパスフィルタ処理後の路面プロファイルを図 8.7 に示す。なお区間 2 は、図 8.7(b)の点線(始点から 170m)を境にプロファイルの平坦性が大きく異なっているのが特徴である。

b) 振動加速度

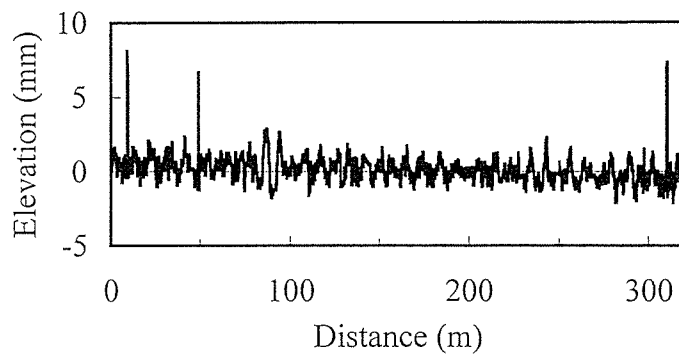
車両バネ下振動加速度は、路面プロファイル測定区間において、速度 40km/h, 50km/h, 60km/h の 3 パターンを各 5 回、計 30 回測定した。

(2) 振動加速度の Repeatability

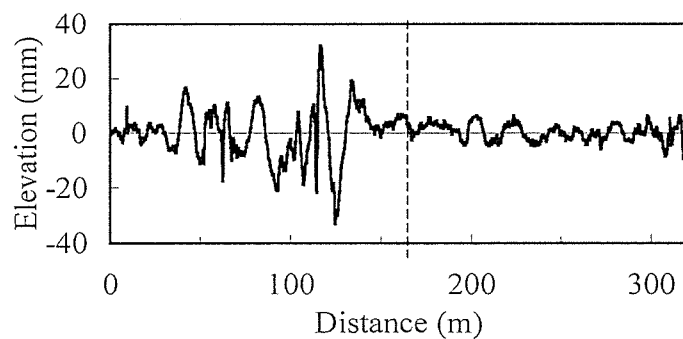
Repeatability(反復性)は、同時期に同一装置を用いて同一測定区間を複数回測定した際、同じ測定値を繰返し得ることができる能力のことであり、一般的には繰返し測定データの平均値もしくは標準偏差によって示されることが多い¹⁴⁾。

各測定区間で速度別に 5 回の走行によって得られた振動加速度データの区間統計値(σ)の平均値を求め、平均値から $n\%$ 以内の範囲にデータがどの程度含まれたかについて、測定速度別に整理したものを図 8.8 に示す。

データの傾向として、平坦性の度合及び速度の違いは明確ではないが、



(a) 区間 1



(b) 区間 2

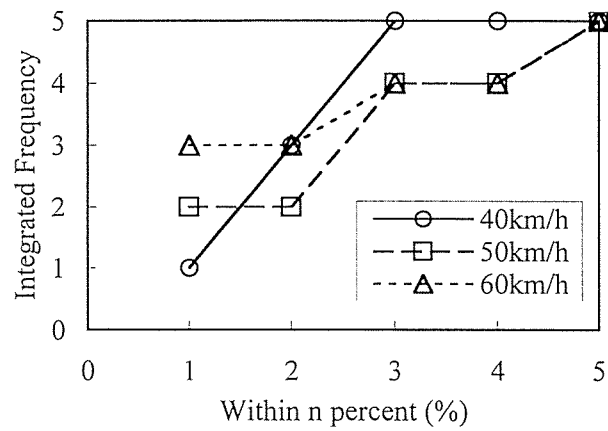
図 8.7 True Profile の測定データ

図 8.8(b)(c)の各 1 回ずつを除き，データは平均値 $\pm 5\%$ 以内の範囲内に含まれている．路面管理支援システムは入出力間の線形性を利用しているため，入力データの誤差が出力データに反映するが，区間 2 の 0～170m ($|RI|=5.3\text{mm/m}$:「古い舗装」に分類³⁾)のように，平坦性が悪い場合も最大で $\pm 0.5\text{mm}$ 程度の誤差であることから，Repeatability としては概ね良好な結果であると思われる．

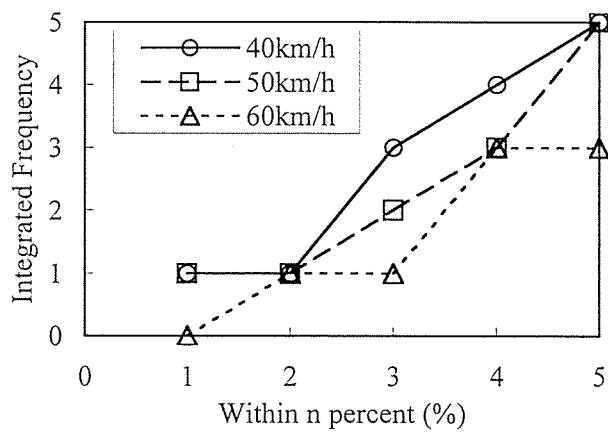
(3) 周波数応答関数の振幅特性

a) 変動係数の分布

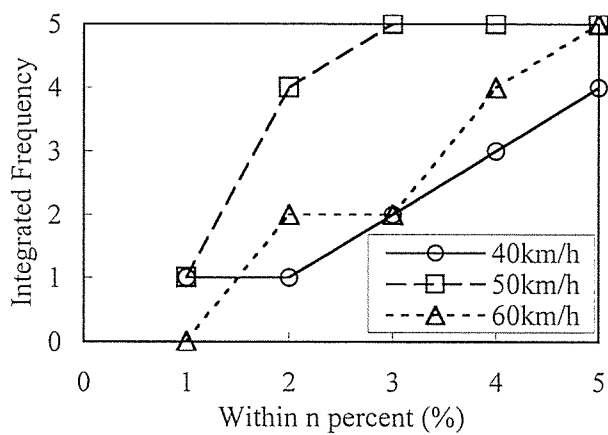
周波数応答関数の振幅特性について，平坦性及び速度の違いによる変動係数(CV)の変化を図 8.9 に示す．変動係数は標本の標準偏差を平均値で除した



(a) 区間 1 ($\sigma = 2.1\text{mm}$)



(b) 区間 2 : 0~170m ($\sigma = 9.4\text{mm}$)



(c) 区間 2 : 170~320m ($\sigma = 3.1\text{mm}$)

図 8.8 振動加速度の Repeatability

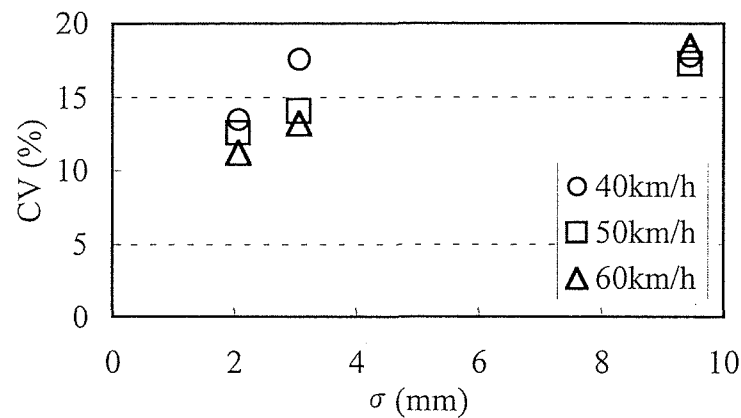


図 8.9 振幅特性の変動係数

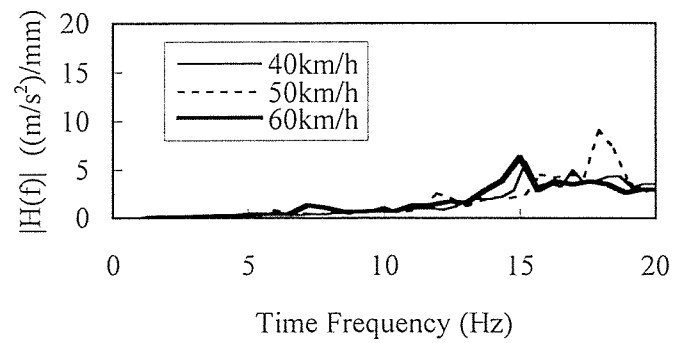
値であり，通常百分率で表されるが，目安として 5% 以下であればばらつきが小さく，6～15% 未満で普通のばらつき，15% 以上で大きなばらつきとされている¹⁹⁾。

図 8.9 では，各周波数で計算された変動係数の平均値を示しているが， σ に比例してばらつきが大きい。また僅差であるが速度の低い場合に大きくなる傾向が窺える。

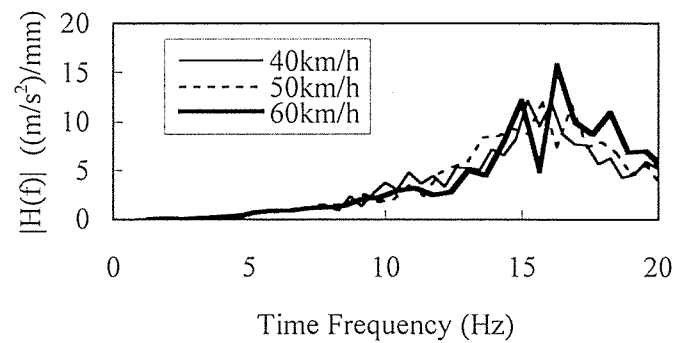
b) 速度の差異による振幅特性の傾向

振幅特性のうち，各速度における 5 回の測定で最も平均的な値を示したデータを用いて，速度の差異による傾向を整理したものを図 8.10 に示す。ここで周波数の情報については各速度の比較を行うため時間周波数 (Hz) で示した。図 8.4 と同様に 10～20Hz 付近に共振域が見られる。

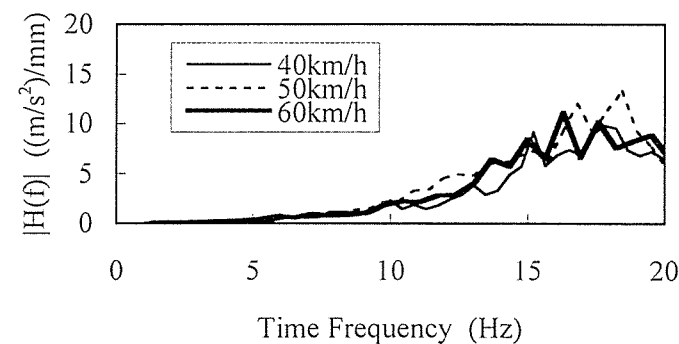
図 8.10 を考察した結果，速度の違いによる明確な差異は見受けられなかった。一般に路面プロファイルは低周波数帯域の成分が大きく，速度が高くなるに伴い共振域が長波長の領域へシフトするため振幅特性の値が大きくなると思われるが¹⁴⁾，本研究で対象とする程度の速度差であれば，その違いが明確には現れなかったと考えられる。



(a) 区間 1 ($\sigma = 2.1\text{mm}$)



(b) 区間 2: 0～170m ($\sigma = 9.4\text{mm}$)



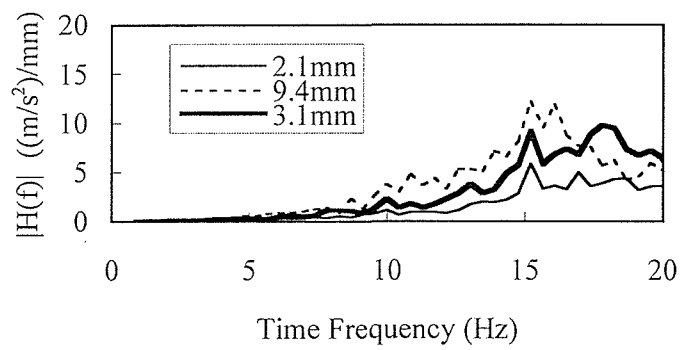
(c) 区間 2: 170～320m ($\sigma = 3.1\text{mm}$)

図 8.10 速度の差異による振幅特性の傾向

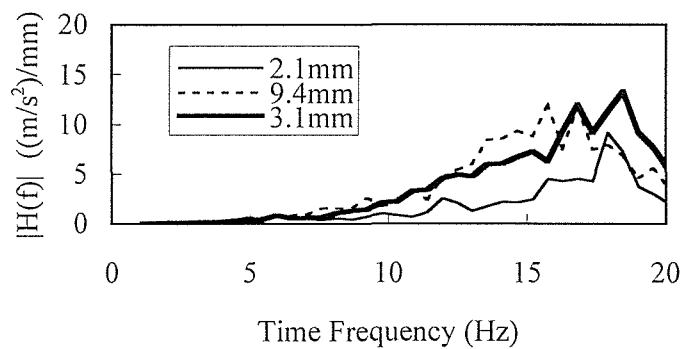
c) 平坦性の差異による振幅特性の傾向

前項と同一のデータを用いて、平坦性の差異による振幅特性の傾向について図 8.11 のように整理する。

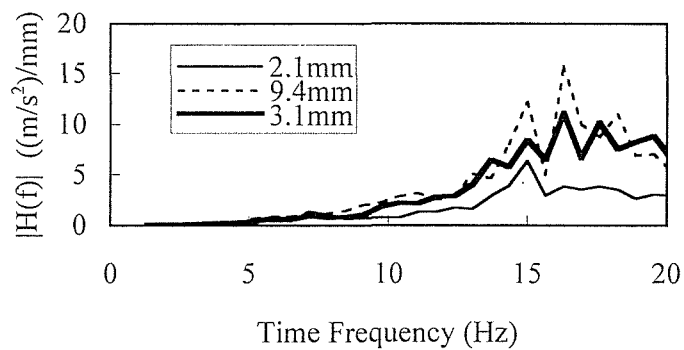
区間 1 ($\sigma = 2.1\text{mm}$) に比べ、区間 2 ($\sigma = 9.4\text{mm}$, 3.1mm) の値が大きい。この結果のみを単純に考察すると、振幅特性は平坦性の大きさに依存すると



(a) 速度 40km/h



(b) 速度 50km/h



(c) 速度 60km/h

図 8.11 平坦性の差異による振幅特性の傾向

受け取れるが，区間 2 のデータのみ比較すると，ピーク値を除く全体の傾向に大差はない．このことから，図 8.11 に見られる差の原因としては，平坦性の差異による影響に比べ，その他の測定条件の違い（タイヤコンディション

など非線形的な要素)が考えられる³⁾。この点については、今後検討を要する。

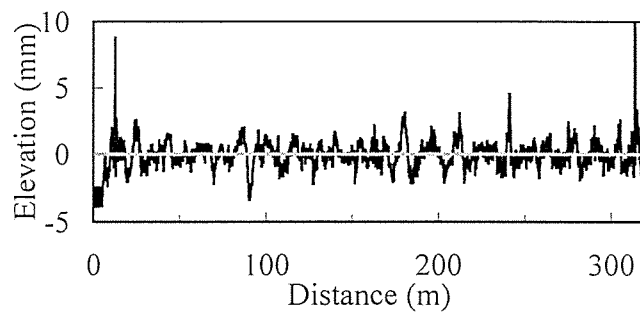
(4) True Profile の推定

以上より，本研究で用いたデータは区間の違いによる振幅特性の差異はあるが，同一区間内であれば概ね安定しており，一定のウェーブバンド内における True Profile の推定は可能である．そこで，前述の方法に基づき，振動加速度から True Profile を推定した．

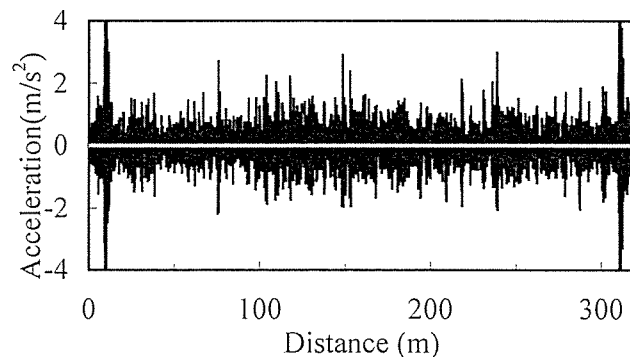
a) プロファイル推定フィルタの算出

本項では，区間 1 の速度 40km/h における 5 回の測定データのうち，最も平均的な値によるプロファイル推定フィルタの算出例を示す．

路面プロファイル及び振動加速度を図 8.12 に示す．また，パワースペクトル密度の分布を図 8.13 に示す．

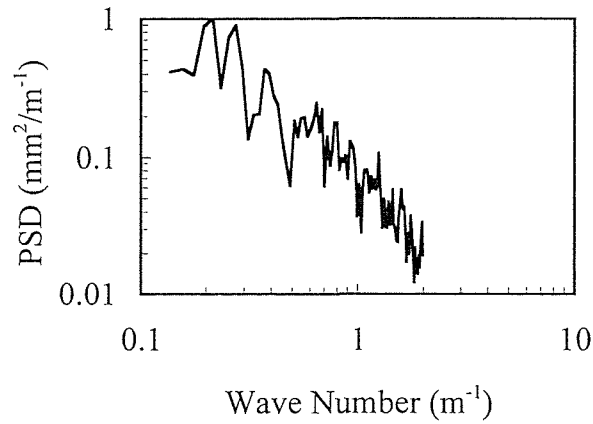


(a) True Profile(区間1)

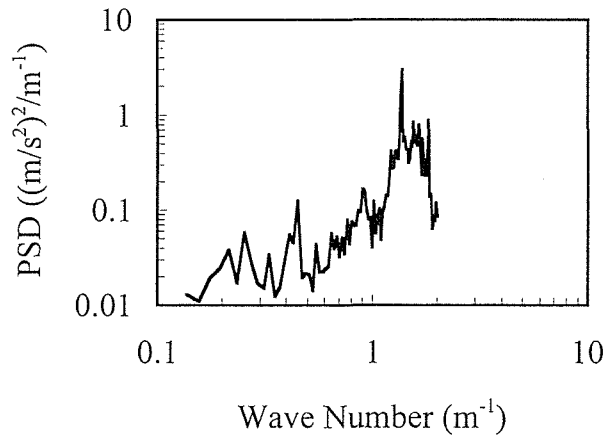


(b) 振動加速度（区間 1，測定速度 40km/h）

図 8.12 振動加速度の測定データ



(a) True Profile (区間 1)



(b) 振動加速度 (区間 1, 測定速度 40km/h)

図 8.13 測定データのパワースペクトル密度

ここでパワースペクトル密度の計算方法としては、データの精度を考慮すると最大エントロピー法が優れている。しかし、フィルタリング処理の過程で高速フーリエ変換法(以下、「FFT」という)及び高速逆フーリエ変換法(以下、「IFT」という)を用いるため、パワースペクトル密度の算出においても演算方法を統一したほうが有利である。このことから本研究では FFT 法を用いることとした¹⁴⁾。なお、FFT 法ではデータ数がセグメント長の 4 倍程度以上とするよう提案されていることから^{14), 20)}、セグメント長を $L_{seg}=1024$ と設定した。ウィンドウ処理については Hamming ウィンドウを用いた。

プロフィール推定フィルタの特性を図 8.14 のように示す．参考として，区間 2 の場合についても示した．ここでは前節で述べた区間の違いによる振幅特性の差異が現れており，低周波数帯域では同程度であるが，高周波数帯域においては区間 1 のフィルタが区間 2 のフィルタに比べ，Gain が大きくなっていることが確認できる．

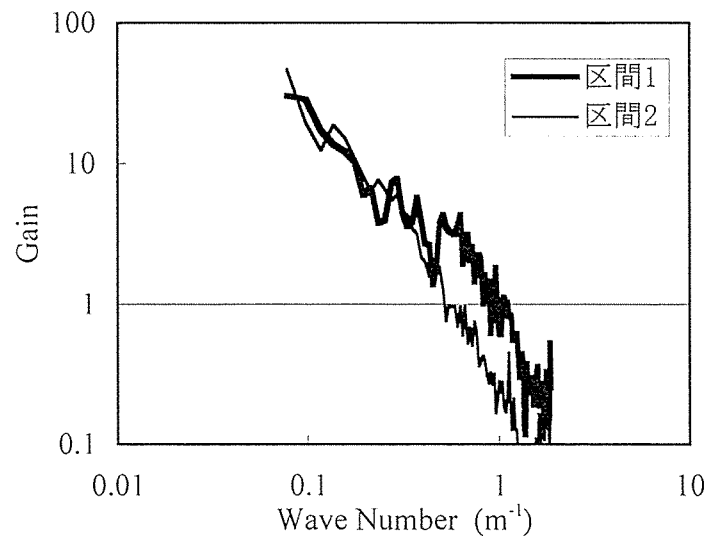


図 8.14 プロファイル推定フィルタ

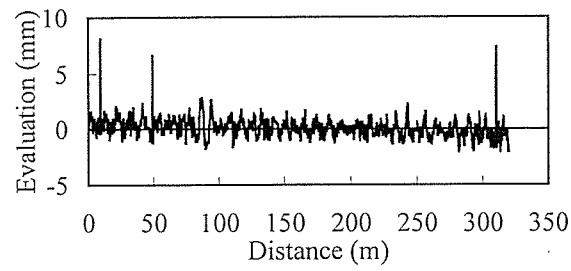
b) True Profile の推定

図 8.14 のフィルタを用いて True Profile を推定した結果を図 8.15 に示す．ここで，振動加速度は区間 1 の σ の平均値から最も外れた値を用いた．

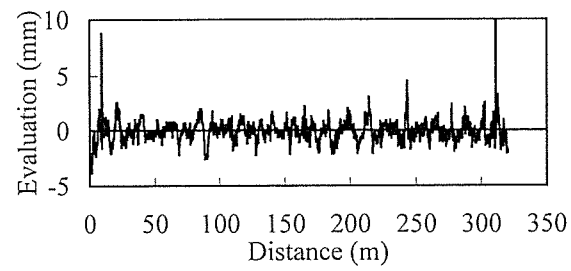
推定手順を整理すると以下のようなになる．

・フィルタの設計

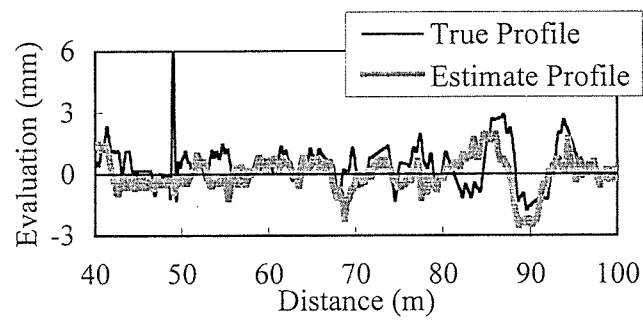
- True Profile の推定範囲（ウェーブバンド）を設定する．
- 振動加速度データ及び True Profile のパワースペクトルを各々 FFT 法によって算出する．
- 入出力間の振幅特性を求める（式 8.1）．
- 位相を線形位相とし，初期位相 $\theta(0)=0$ としたフィルタ（プロフィール推定フィルタ）を設計する．



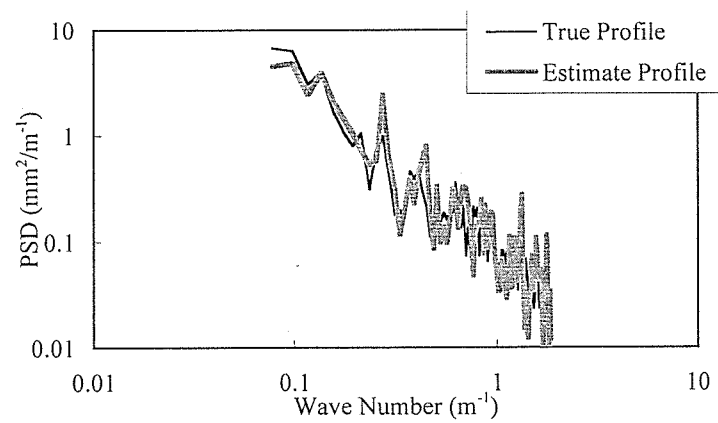
(a) 路面プロファイル



(b) プロファイル推定結果



(c) 波形の比較 (40~100m の例)



(d) パワースペクトル密度による比較

図 8.15 プロファイル推定結果

・路面プロファイルの推定

- 入力データを FFT によって空間周波数領域へ変換する。
- フィルタリング処理を行う（プロファイル推定フィルタを用いる）。
- IFT によって推定プロファイルを出力する。

図 8.15(a), (b)の波形を比較した結果、推定波形の振幅は増幅されているが、特徴的な凹凸の発生位置及び形状については、全体的には類似している。このうち、特に凹凸が大きい 40～100m の区間について考察すると、50m 付近の極大値の推定は困難であるが、その他については±2mm 以内の推定精度を有している(図 8.15(c))。

パワースペクトル密度を比較すると、推定波形は高周波成分が多く含まれているが、全体的な傾向としては True Profile と同等の結果が得られた(図 8.15(d))¹⁴⁾。区間統計値による評価については、第 5 章と同様に IRI を用いるべきであるが、測定区間長及びデータ数が不足していることを考慮し、ここでは σ によって考察した。区間長 10m ごとに σ を算出し、True Profile の σ と比較した(図 8.16)。

結果として、True Profile に対し約 20%程度大きな値が得られた。この理由としては、図 8.14 に示す区間 1 のフィルタが高周波成分を増幅する性質を有しているためと考えられる。しかしながら、推定値のばらつきは比較的小さいため、推定値を縮小することによって True Profile の σ を算出することが

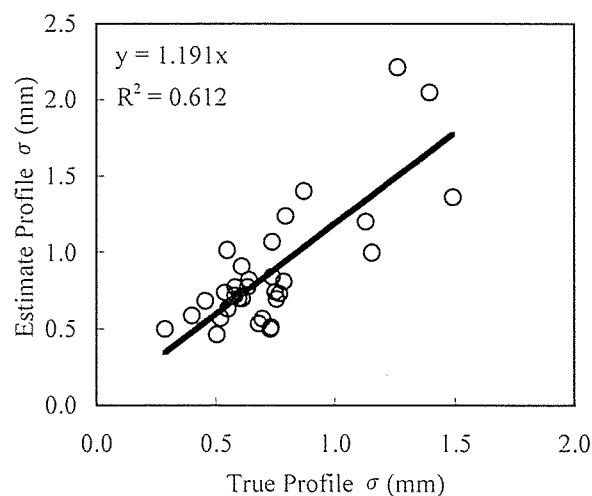


図 8.16 σ の推定精度（極大値が介在する区間を除く）

できる．ここで，一般的な路面性状測定車における許容範囲は基準データ $\pm 30\%$ 以内とされており²¹⁾，路面管理支援システムは路面性状測定車及び各種プロファイルと比較すると精度は劣るが，上記の縮小演算を施すことによって同程度の水準とすることができる．

以上のことから，路面管理支援システムの推定精度は使用するフィルタの特性に依存するものの，その推定精度は実用上支障がないレベルである．

プロファイル推定フィルタを適用する場合の留意点としては，特に低周波数帯域において Gain が非常に大きくなる場合があるため，入力データに含まれるノイズなど僅かな差が出力結果に重大な影響を与える点である．このため，プロファイル推定範囲には一定の制約を与える必要があると考えられる．

8.4 自動車の振動加速度を用いた特徴的な路面プロファイル区間の検出

道路パトロール車による巡回作業は，乗り心地管理の基本といえる．これは，一般道路における速度の範囲内であれば，通常の道路巡回によって路面損傷箇所の位置特定が十分に行なえるとともに，動揺発生箇所付近の状況についても同時に把握できるからである²²⁾⁻²⁴⁾．

しかしながら，定性的な評価は個人差があるとともに，日々の業務においてはマンネリズムなどの影響が危惧される．場合によっては路面上の重大な欠陥箇所を見過ごす可能性も有する．ゆえに，定性的な評価に加えて，可能であれば定量的な評価を加えるためのサブシステムを整備すべきである．

これまで，都道府県道や市町村道などの一般道路では，一部を除き，対症療法的な維持管理が行なわれてきた感がある．道路の管理延長が長いためやむを得ない部分もあるが，中長期的には新設に比べ維持管理の占める割合が高まることは確実であることから，PMS の構築はもとより，予防的保全，すなわち第 2 章で述べた PM を導入すべきである²⁵⁾．そのためには，基礎となる路面プロファイル測定の充実が求められる．本研究で提案する路面管理支援システムは，道路パトロール車に加速度センサーを設置し，通常の巡回

作業を行いつつ振動加速度データの測定を行なうものであり、これは上記の視点からも望ましいスタイルである。さらに加速度波形を用いるため、True Profile の推定のみならず、自動車の動的輪荷重についても推察することができる⁵⁾。

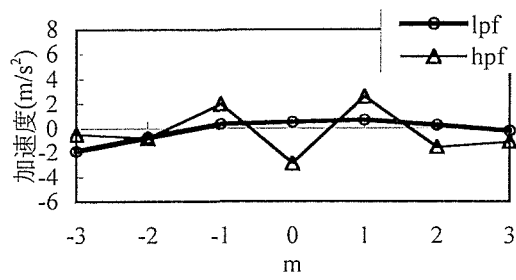
ここで交通具の一つである鉄道線路の維持管理の例を参照すると、鉄道車両の走行特性を把握する上で、鉄道軌道に生じる力の成分を「定常分」（線形などによって定常生じる成分）、「変動分」（軌道狂いによって生ずる変動成分）及び「衝撃分」（継目部等における衝撃成分）に分類し、それぞれに対応する波長成分間において定量的な関係を求めるという方法が近年注目を集めている²⁶⁾。

これを路面管理支援システムに置き換えると、「定常分」については分析の対象外としているが、「変動分」については True Profile 形状を推定することで対応している。そして「衝撃分」については、加速度波形自体を用いた管理を行なうことが適切と考えられる。「衝撃分」については走行安定性に直結するものであるため、速やかに検出されなければならない。第 7 章に記した SWT 解析は、このような場合に最適なツールといえる。そこで本節では、道路パトロール車の振動加速度データを用いて特徴的な区間のデータを学習し、他の路線における類似区間の検出を行なった。

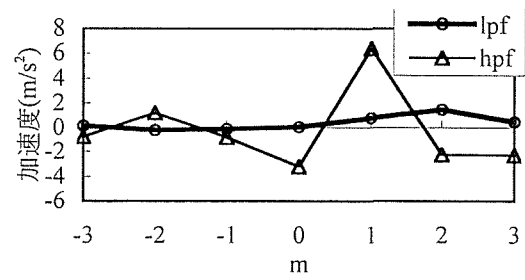
8.4.1 自由パラメータの学習

TS の設定条件としては、やや破損したブロック舗装区間とする。このような特徴を示す区間のデータについて、解析対象とは別の区間において事前に測定した。図 8.17 に自由パラメータの学習に用いる波形を示す。図中、低域通過成分を lpf、高域通過成分を hpf と表記する。

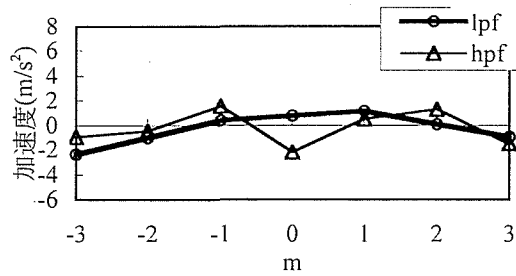
ここで、 $N=4$ に設定したものは、図 8.17(a)～(d)における特徴点 m の前後 2 点を含む 5 点分のデータを用いた。同様に、 $N=6$ に設定したものは、図 8.17 (a)～(f)における特徴点 m の前後 3 点を含む 7 点分のデータを用いた。第 7 章の式(7.12)に示すように、TS の増加に伴い、学習データ区間（点数）については拡大しなければならない。



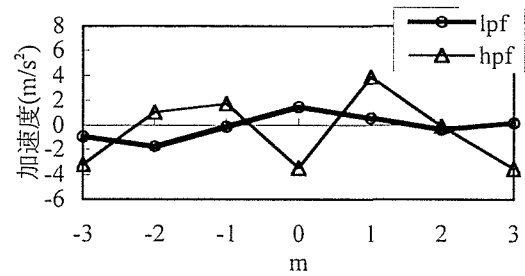
(a) TS No.1



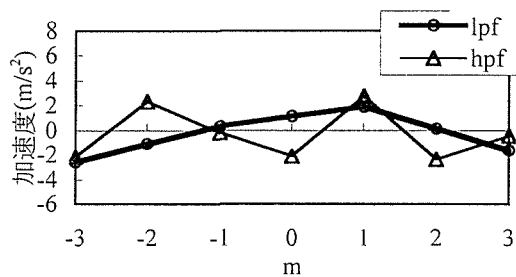
(b) TS No.2



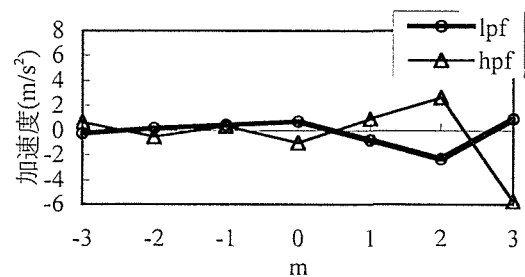
(c) TS No.3



(d) TS No.4



(e) TS No.5



(f) TS No.6

図 8.17 解析に用いたトレーニング信号

学習した $\tilde{s}_{k,m}$ を表 8.1 に示す。なお、基底関数としては Spline N=2 を用いており、この関数を基礎として特徴的な形状を検出するための重み付け処理が $\tilde{s}_{k,m}$ によって行われる。

8.4.2 特徴的な路面プロファイル区間の検出

$\tilde{s}_{k,m}$ が求まると、第 7 章の方法を用いて特徴的な路面凹凸を検出することが

表 8.1 学習した自由パラメータ

k	$\tilde{s}_{k,m}(N=4)$	$\tilde{s}_{k,m}(N=6)$
m-3		0.003
m-2	3.839	3.499
m-1	-3.485	-1.091
m	-0.008	4.766
m+1	2.920	-5.310
m+2	-3.266	2.197
m+3		-4.063

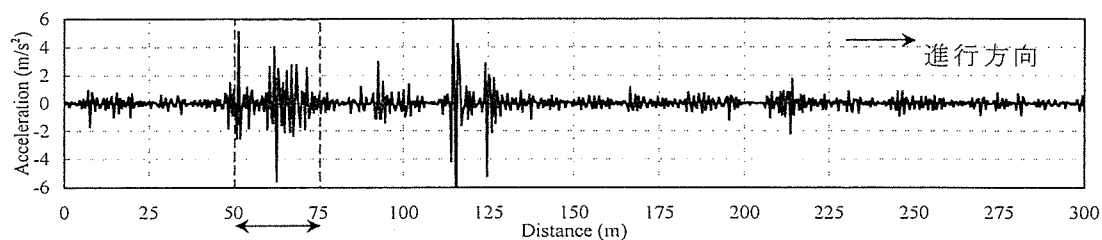
できる．本節では，前節と同様，河川敷道路で測定したバネ下部の振動加速度データからブロック舗装区間の検出を行なった．解析に用いたデータ（Original）を図 8.18(a)に示す．

図中，点棒で示した距離 50m～75m の区間にブロック舗装が存在しており，この区間の振動加速度は手前の 0～50m 区間に比べ振幅が大きく現れていることが認められる．ブロック舗装区間を通過後，数カ所に振幅が大きい箇所があるが，この箇所は段差やポットホールなどによるものであり，ブロック舗装ではない．

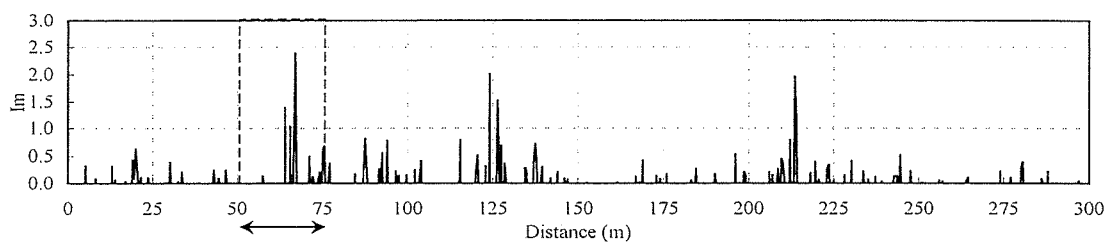
TS の個数を $N=4$ とした場合における特徴的な形状の検出結果を図 8.18(b)に示す．ここで， $1m$ の値が大きいほど，学習したブロック舗装の形状との相関が高い．

$N=4$ の場合，ブロック舗装区間のうち一部の振幅の大きな箇所については検出されているが，他の振幅が大きい区間が「ブロック舗装に類似するもの」として検出されているなど，性能はさらに改善の余地がある．

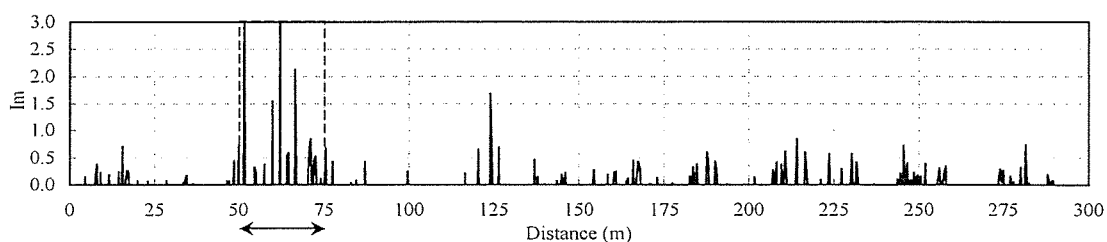
次に TS の個数を $N=6$ とした場合の検出結果を図-2(c)に示す． $N=4$ の場合と比較すると，一部に誤って検出された箇所が見受けられるが（距離 125m 付近），ブロック舗装区間（図中，矢印の区間）については，検出性能が向上したことを確認できる．また，検出成分のうち当該区間が占める割合につい



(a) 振動加速度波形 (Original)



(b) 特徴的な路面凹凸区間の検出 (N=4)



(c) 特徴的な路面凹凸区間の検出 (N=6)

図 8.18 自動車の振動加速度を用いた特徴的な路面プロファイル区間の検出例

て、図 8.19 に整理する．この適用例では、 $N=6$ の場合、 $Im=0.7$ 程度以上の値を示す箇所については 50%以上の確率でブロック舗装区間として特定することができた．以上のように、学習するデータ数の増加に伴って特徴的なデータの検出性能が向上すると考えられる．しかし、一方では学習データ区間が長くなることに伴い、各学習データの波形にばらつきが生じやすくなるため、図 8.18(c)のように Im の値が低いレベルにおいてノイズ的な成分が現れている．このため、分析目的に応じた学習データ数を適切に設定する必要があり、今後、その理論的根拠となる研究が期待される．

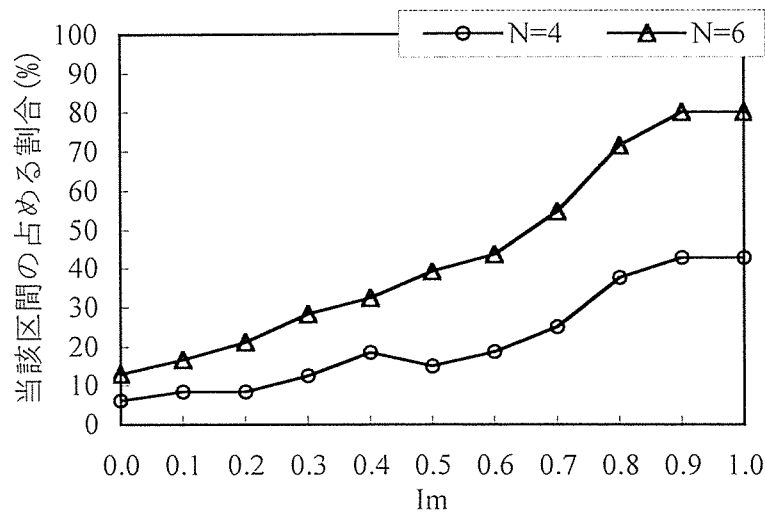


図 8.19 検出成分のうち当該区間が占める割合

8.5 道路メンテナンスへの適用

PMS において、適切な補修箇所及び優先順位を決定するためには、その基礎データである路面プロファイルの測定が重要である。

路面管理支援システムは、プロファイラの測定精度の向上に比べ、測定頻度の向上を意識したものである。測定精度については実用的な範囲以上のレベルを想定していないが、測定に要するコストを低廉に抑え、さらに道路巡回業務に併せて True Profile を推定することが可能であることを示した。路面管理支援システムを道路メンテナンスへ適用することにより、路面プロファイルの測定回数は現在より増加することが期待できるため、PMS の性能（劣化の予測精度）が向上し、1)道路利用者の安全性・快適性が確保できるとともに、2)道路利用者費用の軽減に結びつくことが期待できる。さらに3)事故や冬期路面など、True Profile の形状を緊急に測定したい場合に有効であると考えられる。

8.6 まとめ

本章の結論は以下の通りである．

- (1) 都道府県道や市町村道などの PMS を機能させるため、既存の道路パトロール車両に加速度センサー等を搭載した「路面管理支援システム」を開発した．
- (2) 路面管理支援システムを利用して True Profile を推定する場合、乗り心地に影響を及ぼすウェーブバンドの範囲内であれば、路面性状測定車及び各種プロファイラと比較すると精度は低いものの実用的な推定レベルが期待できることを示した．ただしこのシステムは入出力間の線形性を利用しているため、Repeatability の安定性を確認する必要がある．
- (3) 周波数応答関数の振幅特性は、タイヤコンディションなど測定条件の違いにより異なる場合がある．このため、今後 Portability の観点から、測定区間が異なる場合などに生じる測定条件の違いが路面管理支援システムに与える影響について定量化する必要がある．
- (4) 路面上の局所的な特異箇所を速やかに検出する方法としては、振動加速度データに SWT 解析を適用することが有効であることを示した．この際、学習データ数を増加させると検出性能が向上すると考えられるが、ノイズ的な成分が現れることがあるため、分析目的に応じた学習データ数を適切に設定する必要がある．
- (5) 路面管理支援システムを道路メンテナンスへ適用することにより、路面性状の測定回数は現在より大幅な増加が期待でき、PMS の性能(劣化の予測精度)が向上し、道路利用者の安全確保及び道路利用者費用の軽減に結びつくことが期待できる．

参考文献

- 1) 秋本隆, 姫野賢治, 川村彰, 福原敏彦: 舗装路面の絶対プロファイルデータ収集システムの開発, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.13-20, 1998.
- 2) 相馬幸六, 山之口浩, 笠原篤: 中軽交通道路における舗装修繕のための手法 -舗装評価データベースと構造評価の利用-, 舗装, Vol.30, No.10, pp.25-33, 1995.
- 3) Sayers, M.W. and Karamihas, S.M.: The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 4) 渡辺 忠, 中山晴幸: 舗装の路面性状と交通荷重について, 道路建設, No.532, pp.52-58, 1992.
- 5) 中山晴幸, 渡辺 忠: 舗装路面性状と動的輪荷重との関係, 舗装, Vol.30, No.1, pp.30-34, 1995.
- 6) 前田光俊: 路面形状計測システム, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.27, No.2, 1992.
- 7) 河野整, 藤野陽三, 阿部雅人, 平林望: 道路高速診断システム (VIMS) の実用化に向けた研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 CS 部, Vol.58, pp.3-4, 2003.
- 8) 高井秀之, 矢澤英治: 車両動揺推定システムの開発と軌道整備への適用, 鉄道総研報告, Vol.8, No.11, pp. 37-42, 1994.
- 9) 神田三男吉: 道路巡回業務手法の改善等についての考察, 中部管内事業研究発表会論文集, 施設管理部会編, pp. 79-84, 1998.
- 10) 大越健司, 川村彰, 白川龍生, 後藤謙太: 車の周波数応答特性を利用した路面性状測定システムに関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.734-737, 2003.
- 11) KAWAMURA, A.: Interaction Between Road Roughness and Vehicle Dynamics, Doctorial Thesis, Hokkaido University, 1991.
- 12) 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重編: 新しい線路 -軌道の構造と管理-, 日本鉄道施設協会, 1997.

- 13) 景山克三, 景山一郎:自動車力学, 理工図書, 1984.
- 14) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆: ウェーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理手法について -EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol. 7, pp. 15. 1-15. 12, 2002.
- 15) Kawamura,A.,Takahashi,M. and Inoue,T. : Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, Journal of the Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 16) 酒井幸市: 高専学生のためのデジタル信号処理, コロナ社, 1996.
- 17) 中村章吾: ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電機大学出版局, 1989.
- 18) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 上浦正樹: 3m プロフィロメータによる True Profile の推定 -PIARC EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.25-33, 2003.
- 19) 新城明久: 生物学統計学入門 -計算マニュアル-, 朝倉書店, 1986.
- 20) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.
- 21) 小野田光之: 講座・路面の評価(3)路面性状測定車(自動測定装置), 舗装, Vol.36, No.10, pp.34-39, 2001.
- 22) 板垣正義, 小段栄一, 福島克章, 船曳誠二: 道路パトロール支援システムについて, 建設省技術委員会報告, Vol.50, pp.183-186, 1997.
- 23) 森一宏: 道路維持管理支援システムの利用について, 開発土木研究所月報, No.571, pp.40-43, 2000.
- 24) 豊田義明, 高橋守人, 大池浩司: 道路維持管理支援システムの開発 (第1報), 開発土木研究所月報, No. 537, pp. 2-12, 1998.
- 25) 七五三野茂: プリベンティブ メンテナンス (PM), 道路建設, No.610, pp.60-61, 1998.
- 26) 内田雅夫, 西本正人, 三和雅史, 三木一巨: 急曲線部における振子車両の走行特性と軌道管理手法, 鉄道総研報告, Vol. 12, No. 3, pp. 23-28, 1998.

第 9 章

結 論

第 9 章 結論

PMS の構築は、今日の道路舗装計画における中心的課題であるが、わが国では一部を除き十分に運用されている状況ではない。この原因の一つとしては、サブシステムである路面プロファイルの測定が十分な水準に達しておらず、現時点では供用性低下の推移を十分にモニタリングできていないことが挙げられる。現在、レーザー変位計などの装置を搭載した路面性状測定車の普及の動きは見られるものの、依然として途上段階にあり、全国的な普及にはなお時間を要すると思われる。したがって、路面プロファイルの情報を PMS へ高頻度で入力するためには、道路管理者及び道路関連企業に広く普及しているプロファイルの測定データを有効活用することが現実的かつ合理的な方法であると考えられる。本研究は、既存のプロファイルの検出特性を補正することにより、自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンド内の True Profile を推定する方法について論じた。

一方、路面プロファイルデータの評価に関しては、これまではスペクトルの考え方に基づいた PSD が用いられており、主としてラフネス特性の傾向分析が行なわれてきた。しかしながら、局所的な凹凸によって平均的な路面プロファイル特性が歪められるなどの問題があり、近年は空間及び周波数情報の同時解析を可能とする WT 解析が行なわれるようになった。WT 解析は計算効率に優れているが、基底関数の種類により結果が異なるという問題を有している。本研究では路面プロファイルデータ処理に適した基底関数の選定方法について、DF 演算結果との比較を中心に考察した。また別のアプローチとしては、自由パラメータの学習機能を付加した WT 解析として注目されている SWT 解析を用いて、特徴的な路面プロファイル形状の学習及び検出に関する基礎的な考察を行った。

また、これらの技術を統合し、道路管理者の維持管理業務を支援することを目的として、自動車の振動加速度を利用した「路面管理支援システム」を開発した。このシステムは、車両バネ下部に加速度センサーを設置し、データの記録、解析を行うシンプルな構成ではあるが、乗り心地に影響を

及ぼすウェーブバンドの範囲内であれば、True Profile を実用的な精度で推定できることを示した。さらに、路面上の特徴的な区間を速やかに検出する方法としては、振動加速度データに SWT 解析を適用することが有効であることについても示した。

本研究によって得られた主要な成果をまとめると以下の通りである。

- (1) 路面プロファイルの測定及び評価に関する既往の研究を整理し、これら既往の研究の問題点を明らかにするとともに、本研究の位置づけについて示した。
- (2) 自動車の乗り心地に影響を与えるウェーブバンド内の True Profile を設定する方法について述べた。路面プロファイルは対象となる範囲が広いため、全ての周波数領域について True Profile を推定することは非常に困難である。しかし、ある限られたウェーブバンド内の True Profile であれば、一般的なデジタル信号処理技術を応用することにより、プロファイル推定フィルタによって推定できることを示した。
- (3) ウェーブバンドの設定については、路面と車両の相互作用の観点から、車両の固有振動数に対応する周波数帯域を設定することが乗り心地を向上させるために効果的な方法であることを述べた。
- (4) プロファイラの測定データから True Profile を推定する方法について、3m プロフィロメータを用いた考察を行なった結果、一般道路を対象とした周波数帯域 ($WN= 0.05 \sim 0.50m^{-1}$) であれば、プロファイル推定フィルタによって比較的高い精度で推定できることを示した。また IRI についても、高い精度で推定できることを示した。
- (5) 検出特性を算出する際は、True Profile に含まれる局所的な著大値の処理を適切に行なう必要がある。複数の測定結果から平均的な評価基準値を求める場合、トリム平均処理を行なうと平滑化された周波数特性を

得ることができることを示した.

- (6) 舗装マネジメントの観点から、舗装の劣化予測が重要となりつつあるが、実測データの時間推移から精度の高い劣化予測を行なうためには測定頻度の増加が不可欠である. 3m プロフィロメータは現在最も普及している測定装置であり、路面性状測定車の導入が難しい場合などは、この装置を有効活用することが現実的かつ合理的な方法であると思われる.
- (7) WT 解析では、入力データをスケーリング関数によって近似し、これを以後の演算に用いるが、近似精度はスケーリング関数の種類により異なるため、入力データに含まれる必要な情報が初期段階で失われる場合がある. Daubechies $N=2, 3$ 及び Coiflet $N=2$ は DF 演算結果に比べ検出感度が低いため、これらの関数を用いる場合、使用するデータの特性を十分に考慮することが望ましい.
- (8) WT 解析において、ピラミッドアルゴリズムによる数段階の分解の結果得られた総合的な周波数特性を考察すると、低域通過成分については多くの基底関数が DF 演算結果と同等の値を示した. しかし高域通過成分については、離散データを近似した際の誤差の影響によって、低域通過成分に比べ、帯域による振幅比の変動は大きな値を示した.
- (9) WT 解析において、位相の線形性が考慮された基底関数 (Coiflet ($N=2$ を除く), Spline $N=2$ 及び Symlet) の場合、出力結果の振幅比は DF 演算結果に対して $\pm 30\%$ 程度の範囲に収束した. これらの基底関数は、路面プロファイルデータ処理において DF 演算と同程度の結果が期待できる. 今後、さらに数多くの路面プロファイルについて解析を行ない、路面損傷の検知能力の違いについての考察を行なう必要があると思われる.
- (10) SWT 解析において、TS と形状が類似する箇所では、出力成分がクロ

ーズアップされる一方、形状が異なる場合は、振幅の大きな場合でも特徴点として検出されず、必要な成分のみが検出された。これは、路面管理目的に応じたフィルタを設計する上で、非常に重要な性質である。

- (11) SWT 解析において、新たに高周波分解フィルタを設計することなく、特徴点を検出する別解法を考案した。特徴点の検出を目的とする場合、実用的にはこの方法で十分であると考えられる。
- (12) SWT を道路維持管理に用いる場合、段差など路面凹凸を記録したデータバンクから複数の特徴的な波形を検出し、路面管理目的に応じた自由パラメータを事前に算出するなど、SWT の適用方法を体系化する必要がある。
- (13) 一般道路（都道府県道、市町村道など）において PMS を運用するため、その基礎となる路面プロファイル（True Profile）形状の推定及び振動加速度の分布状況の把握を目的として、既存の道路パトロール車両に加速度センサー等を搭載した「路面管理支援システム」を開発した。
- (14) 路面管理支援システムを利用して True Profile を推定する場合、乗り心地に影響を及ぼすウェーブバンドの範囲内であれば、路面性状測定車及び各種プロファイラと比較すると精度は低いものの実用的な推定レベルが期待できることを示した。ただしこのシステムは入出力間の線形性を利用しているため、Repeatability の安定性を確認する必要がある。また、周波数応答関数の振幅特性は、タイヤのコンディションなど測定条件の違いにより異なる場合がある。このため、今後 Portability の観点から、測定区間が異なる場合などに生じる測定条件の違いが路面管理支援システムに与える影響について定量化する必要がある。
- (15) 特徴的な路面プロファイル形状の区間を速やかに検出する方法としては、振動加速度データに SWT 解析を適用することが有効であることを

示した。この際、学習データ数を増加させると検出性能が向上すると考えられるが、ノイズ的な成分が現れることがあるため、分析目的に応じた学習データ数を適切に設定する必要がある。

- (16) 路面管理支援システムを道路メンテナンスへ適用することにより、路面性状の測定回数は現在より大幅な増加が期待でき、PMS の性能が向上し、道路利用者費用の軽減及び道路利用者の安全確保に結びつくことが期待できる。

謝 辞

本論文は、筆者が2002年4月に北見工業大学大学院工学研究科博士後期課程システム工学専攻に入学して以来2年間の研究成果をとりまとめたものであります。研究を進めるにあたり、多くの方々に貴重なご指導、ご助言、ご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表す次第であります。

本論文をまとめる機会を与えていただき、また多大なご指導ご鞭撻をいただきました、北見工業大学工学部教授 鈴木輝之先生、北見工業大学工学部助教授 川村彰先生ならびに高橋清先生に厚くお礼申し上げます。

川村彰先生には、筆者が1995年4月に先生の前勤務先である函館工業高等専門学校土木工学科（当時）の交通工学研究室に配属となって以来、学生時代から会社員時代を経て今日に至るまでの約9年間、公私にわたり多大なご指導ご激励をいただきました。ここに深謝申し上げます。

本論文の審査にあたり貴重なご助言をいただきました、北見工業大学工学部教授 鈴木茂人先生、北見工業大学工学部助教授 三上修一先生 ならびに北海道大学大学院工学研究科助教授 中辻隆先生に厚くお礼申し上げます。

研究を進めるにあたり多くのご助言をいただきました、北海学園大学工学部教授 上浦正樹先生、株式会社ワークム北海道研究実験部第1部長 中島繁則氏、財団法人鉄道総合技術研究所軌道技術研究部副主任研究員 三和雅史氏ならびに北海道旅客鉄道株式会社札幌保線所江別保線管理室助役 三木一巨氏に感謝申し上げます。

本論文の公開発表会に出席して下さった、中央大学理工学部教授 姫野賢治先生、北海道大学大学院工学研究科助手 上島壮先生、独立行政法人 北海道開発土木研究所道路部維持管理研究室副室長 石田樹氏はじめ、

多くの皆様に感謝申し上げます。

社会人学生として在職しながらの就学にあたりご配慮いただきました，北見工業大学学長 常本秀幸先生，北見工業大学工学部土木開発工学科ならびに北見工業大学事務局の関係各位に感謝申し上げます。

第 8 章で用いた路面プロファイルデータの測定にあたりご協力をいただきました，北海道開発局網走開発建設部の関係各位に感謝申し上げます。

本研究に関して終始ご協力をいただきました，北見工業大学工学部土木開発工学科交通工学研究室の学生諸氏ならびに卒業生諸氏に感謝申し上げます。

北海道旅客鉄道株式会社，財団法人鉄道総合技術研究所ならびに株式会社片平エンジニアリングの関係各位には，筆者がかつて在籍した際，多大なご迷惑をお掛けしたにも関わらず，公私にわたり数々の有益なご助言およびご支援をいただきました。ここに感謝申し上げ，研究が実ったことをご報告させていただきます。

なお本研究の一部は，財団法人佐川交通社会財団より平成 15 年度交通安全調査研究振興助成金（一般研究助成）を受けて実施したものです。ここに記して謝意を表します。

最後に私事ながら，筆者の研究生活を陰ながら支えてくれた，妻，両親および家族に感謝致します。

2004 年 3 月 白川龍生

研究業績

1. 学術論文(学位論文関係)

- 1) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆: ウェーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理手法について -EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 2) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 中辻隆: 軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, no.1, pp.71-78, 2003.
- 3) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹: ウェーブレットパケット変換を用いた路面プロファイルデータ処理, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.199-206, 2003.
- 4) 白川龍生, 川村彰, 中島繁則, 中辻隆: 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて, 交通工学, Vol.38, No.6, pp.32-41, 2003.
- 5) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 上浦正樹: 3m プロフィロメータによる True Profile の推定 -PIARC EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.25-33, 2003.
- 6) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹: 第二世代ウェーブレット変換を用いた路面凹凸検出方法の基礎的研究, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.35-41, 2003.
- 7) 白川龍生, 川村彰, 中辻隆, 上浦正樹: 路面プロファイルデータ処理に適したウェーブレット基底関数の選定について, 土木学会論文集, No.753/V-62, pp.81-93, 2004.

2.学術論文(その他)

なし

3.研究報告(学位論文関係)

- 1) 白川龍生, 川村彰: EVEN データを用いた路面データ処理に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.57, pp.95-96, 2002.
- 2) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 中辻隆: 軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について, 土木計画学研究・講演集, Vol.26, No.194, 2002. (CD-ROM)
- 3) 白川龍生, 松原正人, 川村彰: デジタルフィルタを用いた路面プロファイルデータ処理について -ウェーブレットの概念を導入したデジタル信号処理-, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.724-727, 2003.
- 4) 大越健司, 川村彰, 白川龍生, 後藤謙太: 車の周波数応答特性を利用した路面性状測定システムに関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.59, pp.734-737, 2003.
- 5) 白川龍生, 川村彰, 谷本晃一, 大越健司: 路面性状評価へのウェーブレット・パケット理論の適用性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.58, pp.1347-1348, 2003.
- 6) 谷本晃一, 川村彰, 白川龍生, 尾崎佳人: 自動車の振動加速度を利用した路面性状評価に関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.60, pp.710-713, 2004.
- 7) 白川龍生, 川村彰, 後藤謙太, 近藤智史: 第二世代ウェーブレット変換を用いた特徴的な路面凹凸の検出に関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.60, pp.728-731, 2004.

4.研究報告(その他)

- 1) 白川龍生, 川村彰: 鉄道車両の車両特性に関する研究 -Wavelet 理論を活用して-, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.53(B), pp.412-417, 1997.
- 2) 白川龍生, 川村彰: Wavelet 理論を用いた車両の振動特性に関する研究, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, Vol.6, 鉄道シンポジウム編, pp.279-280, 1997.
- 3) 白川龍生, 川村彰: Wavelet 理論を用いた鉄道車両の振動特性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 IV 部, Vol.52, pp.660-661, 1997.
- 4) 白川龍生, 川村彰: Wavelet 解析を用いた列車動揺管理手法の検討, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.54(B), pp.752-755, 1998.
- 5) 白川龍生, 川村彰: 多重解像度解析を用いた鉄道線路の軌道狂い管理, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.55(B), pp.482-485, 1999.
- 6) 白川龍生, 川村彰: 古レール活用によるロングレール化と軌道保守について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 IV 部, Vol.54, pp.794-795, 1999.
- 7) 白川龍生: 古レールを用いたロングレール構造の最適化, 日本鉄道施設協会平成 11 年度総合技術講演会(保線)講演概要集, pp.13-16, 1999.
- 8) 白川龍生: 古レールを用いたロングレール構造の最適化, 新線路, Vol.54, No.1, pp.15-19, 2000.
- 9) 白川龍生, 川村彰: フラクタル解析を用いた軌道狂いの平坦性評価, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.56(B), pp.452-455, 2000.
- 10) 白川龍生, 川村彰: フラクタル解析を用いた軌道狂いの平坦性評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 IV 部, Vol.55, pp.536-537, 2000.
- 11) 白川龍生, 川村彰: 軌道の劣化・補修効果のモニタリングに関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.57, pp.752-755, 2001.
- 12) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 高井秀之: 軌道の劣化・復元のモニタリングに関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 IV 部, Vol.56, pp.580-581, 2001.

- 1 3) 松原正人, 田中友紀, 川村彰, 白川龍生: HDM-4 を用いた道路利用者費用に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部, Vol.58, pp.1259-1260, 2003.
- 1 4) 松原正人, 川村彰, 白川龍生, 須川雅人: 気象条件に着目した道路利用者費用に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.60, pp.702-705, 2004.

以 上