

平成 17 年度 国土交通省建設技術研究開発助成制度

— 研究開発課題名 —

巡回車による舗装・伸縮装置の高頻度
簡易診断に関する研究開発

研究開発分野；設定分野②：ストックを診断，解体，再生するための技術開発

東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻

教授 藤野陽三

目次

巡回車による舗装・伸縮装置の高頻度簡易診断に関する研究開発

＜第1章＞	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	道道路維持管理上重要な点検指標と現在の点検方法, 点検方法に関する既往の研究	3
1.2.1	ひび割れ, わだち掘れ, 平坦性	4
1.2.2	IRI	5
1.2.3	伸縮装置部段差・異常音	8
1.2.4	ポットホール	8
1.3	研究目的とシステムの概要, 研究手順	9
1.4	本論文の構成と概要	10
＜第2章＞	計測・集録システムの開発	12
2.1	概説	12
2.2	計測システムの開発	12
2.2.1	車両と車両に搭載する装置（ハードウェア）の構成	12
2.2.2	車両	13
2.2.3	加速度計	14
2.2.4	GPS	18
2.2.5	騒音計・マイクロフォン	20
2.2.6	スピードモニター	22
2.2.7	電圧発生器	22
2.2.8	DAQ カード	23
2.2.9	その他計測システムに必要な装置	23
2.3	集録システム	24
2.4	まとめ	25
＜第3章＞	車両の振動特性と応答のキャリブレーション	26
3.1	概説	26
3.2	車両の振動特性	26

3.2.1	車両の振動の基礎	26
3.2.2	計測車両の固有振動数	27
3.2.3	舗装路面走行時の車両応答特性	34
3.3	データの再現性	39
3.3.1	距離の再現性	39
3.3.2	車両応答の再現性	41
3.3.3	GPS 位置データの再現性	43
3.3.4	まとめ	44
 ＜第4章＞ 車両加速度から点検指標となる値の導出		45
4.1	概説	45
4.2	IRI の導出	45
4.2.1	クォーターカーモデルの加速度から IRI の導出	46
4.2.2	計測車両加速度と IRI の関係	52
4.2.3	計測車両加速度から クォーターカーモデルでの加速度を求めるための伝達関数の導出	54
4.2.4	計測車両加速度から IRI の導出	56
4.2.5	IRI のキャリブレーション	60
4.2.6	評価区間の決定	61
4.3	平坦性の導出	62
4.4	伸縮装置アプローチ部段差の導出	65
4.4.1	段差実験	65
4.4.2	伸縮装置部の形状と加速度応答の関係	67
4.4.3	伸縮装置部の代表値と車両応答の代表値の決定	71
4.5	異常音の検出	74
4.6	その他の点検すべき項目について	77
4.6.1	わだち掘れ	77
4.6.2	ひび割れ	79
4.6.3	ポットホール	80
4.7	まとめ	81
 ＜第5章＞ 道路維持管理を目的とした診断システムの開発		82
5.1	概説	82
5.2	診断システムの概略と開発コンセプト	82
5.3	道路維持管理のためのデータベースシステムの開発	83

5.3.1 構造諸元データ, 点検履歴データ, 補修履歴データ	84
5.3.2 計測履歴データ	85
5.3.3 GIS データベースと位置情報データとの連携	85
5.4 指標値算出プログラムの開発	86
5.4.1 IRI	87
5.4.2 段差量	87
5.5 データベースへの埋め込み	87
5.6 画面表示による結果表示システムの流れ	89
5.7 まとめ	95
5.8 今後の課題	95
 ＜第6章＞ 実際の道路への適用と道路別の比較	 96
6.1 概説	96
6.2 首都高速 7 号小松川線下りへの適用と考察	
6.2.1 システムの適用方法	96
6.2.2 診断結果と考察	97
6.3 首都高全線への適用	105
6.3.1 システムの適用方法	105
6.3.2 診断結果	105
6.3.3 考察	115
6.4 まとめと今後の課題	115
 ＜第7章＞ 高速視覚センサとデジタル一眼レフカメラを用いた 伸縮装置および路面性状の合理化診断システムの構築	 117
7.1 はじめに	117
7.2 現行の診断システム	117
7.3 本研究の目的	118
7.4 合理化診断システムの概要	119
7.5 検知集録システムの構築	119
7.6 画像診断の自動化アルゴリズム	121
7.7 まとめ	123
 ＜第8章＞ 実用化に向けた取り組み	 124
8.1 はじめに	124
8.2 実施の目的	124
8.3 実施概要	124
8.4 計測・集録システムのタッチパネル化	126
8.5 点検指標と診断システムの構成	128
8.6 データ登録までの流れとオプション設定	129

8.7	診断システムの運用状況と計測結果	131
8.8	計測結果について考察	132
<第9章> 結論		134
付録		138

第1章 緒論

1.1 研究背景

延長 115 万kmを超える¹⁾わが国の道路は建設の時代から維持管理の時代へと移ってきている。車両から直接荷重を受ける舗装路面（以下、舗装）・橋梁の伸縮装置（以下、伸縮装置）はダメージを受けやすく、また、舗装・伸縮装置のダメージが車両の走行性、安全性および振動、騒音、水跳ね等、沿道住民・道路利用者に大きな影響を与える。そのため、舗装と伸縮装置の状態の把握は道路維持管理において非常に重要な課題である。

舗装・伸縮装置の維持管理の現状として、首都高速道路の例を以下に挙げる。2006 年 2 月現在、総延長 283.3kmにおよぶ首都高速道路は、82%が高架構造であり、22,000 レーンもの伸縮装置を有する。また、全長の約 3 分の 1 が経年 30 年以上であり、1 日の車両交通量は 112 万台（うち大型車交通量比率 9%）と多い。伸縮装置の交換頻度はゴム製伸縮装置で 5～10 年に 1 回、鋼製伸縮装置で約 20 年に 1 回となっている²⁾。また、舗装の打ち換え頻度は 4 号新宿線のように交通量の多い路線で 5～6 年、2 号目黒線のように少ない路線で 7～8 年である。レーン数と交換頻度から計算すると伸縮装置は約 4 時間おきに 1 レーンを交換、総延長と打ち換え頻度から計算すると舗装路面は約 3 時間おきに 1 km 打ち換えを行っていることになる。以上のことから、首都高速道路における舗装・伸縮装置の劣化は激しいといえる。舗装・伸縮装置の劣化による事故や沿道住民への騒音・振動を未然に防ぐためには、道路の状態を把握する点検が必要である。

首都高速道路における点検は日常点検、定期点検、臨時点検に分けられる（付録 1 参照）。日常点検における、高速道路上巡回点検（昼間）というのがいわゆる車上目視といわれる点検であり、点検者が巡回車で高速道路上を走行し、舗装・伸縮装置の状態や落下物などを調べるものである。定期点検の中で舗装機器点検というのが路面性状測定車という舗装の性状を調査するための高性能点検車を用いる点検である。道路上から舗装路面・伸縮装置を点検するものは車上目視による点検（高速道路上巡回点検（昼間））と路面性状測定車による点検（舗装機器点検）である。車上目視による点検の頻度は 2 日に 1 回であり、特別な機器を用いないため、手軽に行える点検手法である。しかし、高架部の高欄・トンネルなどの本体構造物、伸縮継手・舗装などの付属物、防護柵・遮音壁・標識柱などの付属施設、落下物などと 1 回の点検で非常に多くの対象を点検しなければならず、人間の目では異常を見逃すことが想像できる。それに加え、点検の技量が個人に依存し、定量的な評価でないため、評価が妥当なものかどうか、疑問が残る。一方、路面性状測定車による点検の頻度は年に 1 回であり、舗装のみを対象としている。機器を用いた点検のため、定量的であり、点検者の技量に左右されることも少なく、信頼できる結果となっているが、点検費用は 4.5 万円／km と高く、点検によって得られた生データを解析し、点検結果を得るのにかかる時間も 2 ヶ月と長く、迅速な道路保全に反映されない。また、伸縮装置を対象とした点検は車上目視のみであり、伸縮装置の構造上、車上目視による本体内部の点検は難しいものとなっている。

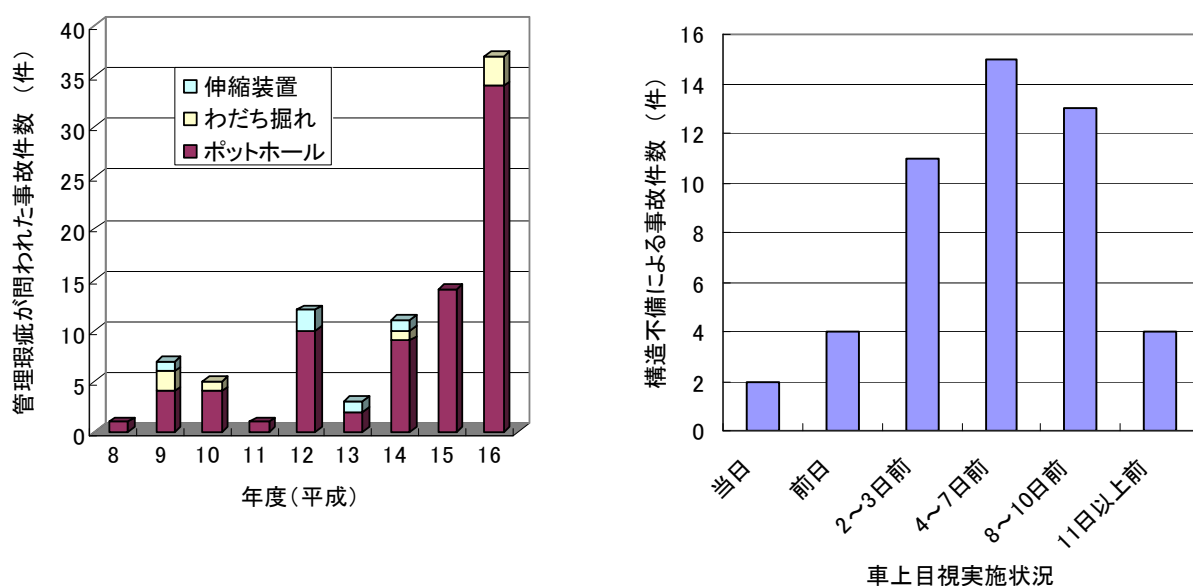


図 1-1 管理瑕疵が問われた事故の件数（首都高） 1-2 静岡県における車上目視間隔と事故³⁾

伸縮装置・舗装路面の損傷項目とその判定基準が構造物等点検要領から決められている（付録1参照）。伸縮装置の損傷項目は伸縮装置の種類によって分けられ、数多くの点検項目が存在する。高架上・高架下の両面からの点検となっているが、高架上からの点検を考えると、伸縮装置を対象とした点検は車上目視のみであるのに、これだけの項目を点検するのは不可能である。徒歩点検なら点検は可能かもしれないが、数年に1回であるため、伸縮装置の交換頻度に追いついていない。また、損傷判定基準に詳しい値が用いられているが、車上目視により、その値を知ることは不可能である。徒歩点検でも、交通規制を掛けない限りは難しい。このため、伸縮装置は住民の苦情や管理瑕疵を問われる事故により交換しているのが現状である。これでは道路維持管理を十分に果たしているとは考えにくい。道路四公団は2005年10月に民営化された。それに伴い、今後は更なるサービスレベルの向上を図るべきであり、そのためには、より効率的な点検が必要である。

首都高速道路における舗装の点検費用は年間4千万円である。これは路面性状測定車の運用費であり、人件費は含まれていない。この費用によって増大している点検に必要なコストを削減するため、首都高速道路では平成16年4月、当初1日に1回だった車上目視の点検頻度を2日に1回に減らした。その結果、平成16年度において管理瑕疵が問われる事故が急増した（図1-1）。事故の内容はポットホールによるタイヤのパンク、わだち掘れによるバイクの転倒、伸縮装置内の芯金突出による車両損傷などが挙げられ、ポットホールによる事故がほとんどである。また、首都高速道路だけでなく、静岡県でも同様の例が紹介されている³⁾。図1-2は静岡県における車上目視と構造不備による事故との関係を示している。静岡県では車上目視の間隔を7日～10日に設定している。そのため、8日以降、事故が減っている。以上の2つの例から高頻度の点検が重要であると言える。

日常巡回車、路面性状測定車で得られた点検結果は、データベース化される。また、舗装・伸縮装置の構造諸元などのデータもデータベース化されている。このデータベースの活用事例は欲しいときに表形式で取得する程度にとどまっている。表形式では視覚的にわかりにくいいため、現況把握や補修計画立案が立てにくく、データベースが道路維持管理のために有効利用されているとは言いがたい。PASCOが開発した道路維持管理システム（IRISYS）⁴⁾は道路資産に関する各種情報を、地図・映像と関連づけることにより、現況把握や補修計画立案等の事業推進上の各種判断を視覚的に支援するシステムである。しかし、これは路面性状測定車の結果と連携させてあり、路面性状測定車で得られたデータは解析時間が長いため、リアルタイムに情報を更新していくことはできず、事故や沿道住民への振動・騒音を未然に防ぐことができない。以上の理由から、高頻度に得られた点検結果をリアルタイムに診断するシステムが必要となる。

以上をまとめると、舗装路面・伸縮装置の維持管理には、高頻度かつ低コストであり、定量的に舗装・伸縮装置の状態をリアルタイムに把握できる新たな点検システムが必要であると考えられる。首都高速道路の例を挙げることで、現在の点検体系の問題点を挙げてきたが、これは首都高速道路に限ったことではなく、他の高速道路、国道、県道、市道でも、点検手法が大きく変わらないことから、同様の問題点があると言える。

1.2 道路維持管理上重要な点検指標と現在の点検方法、点検方法に関する既往の研究

上記のような点検システムを開発するため、現在における道路維持管理に重要な点検指標とその点検方法、点検方法に関する既往の研究を以下に述べる。

道路維持管理のための指標として国土交通省では道路維持管理指数MCI(Maintenance Control Index)を開発し、採用している⁵⁾。MCIが開発されるまではAASHO(American Association of State Highway Officials：アメリカ合衆国州政府道路担当官協会)道路試験によって開発された、ドライバーの立場を中心とした車両の乗り心地を評価したPSI(Present Serviceability Index)を用いて来た。しかし、近年、わが国においては、道路管理延長の増大、舗装の維持管理に対する沿道住民からの社会的要請の高度化などにより、車両の走行性のみから供用性を判断し、維持管理に反映させるのでは実態に合わないと考えられるようになって来た。そのため、舗装の維持管理を行うための実用的な評価手法として開発されたのがMCIである。つまり、MCIは道路利用者よりも管理者側の視点に立った指標であると言える。後に述べる路面性状測定車を利用して、ひびわれ、わだち掘れ、平坦性を測定し、以下の4つの式に代入し、そのうち最小のものをMCI値としている。ひびわれ、わだち掘れ、平坦性それぞれの指標については後に述べる。MCIの値が低いほど舗装状態が悪く、3以下で「早急に修繕が必要」、4以下で「修繕が必要である」、5以下で「望ましい管理水準」という維持修繕基準が設けられている。

$$\begin{aligned}
MCI &= 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \\
MCI_0 &= 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7} \\
MCI_1 &= 10 - 2.23C^{0.3} \\
MCI_2 &= 10 - 0.54D^{0.7}
\end{aligned}
\tag{1.1}$$

ここで、 C ：ひび割れ率（％）， D ：平均わだち掘れ量(mm)， σ ：平坦性標準偏差(mm)

以上から、ひびわれ、わだち掘れ、平坦性の指標は道路維持管理上、重要なインデックスであると言える。また、これらの指標に加え、人間の乗り心地に特化した平坦性である **International Roughness Index (IRI, 国際ラフネス指数)** という指標を日本道路協会が中心となって導入する動きがある。さらに図 1-1, 図 1-2 で示したように、事故の多いポットホール、近隣住民からの苦情の多い伸縮装置の段差（近隣地盤への振動に影響）・異常音も道路管理上重要な点検指標といえる。これら重要な指標に対する現在の点検手法と点検指標に関する現在の点検手法、既往の研究を以下に述べる。

1.2.1 ひび割れ、わだち掘れ、平坦性

ひびわれ、わだち掘れ、平坦性については路面性状測定車が用いられており、便宜上まとめて記す。

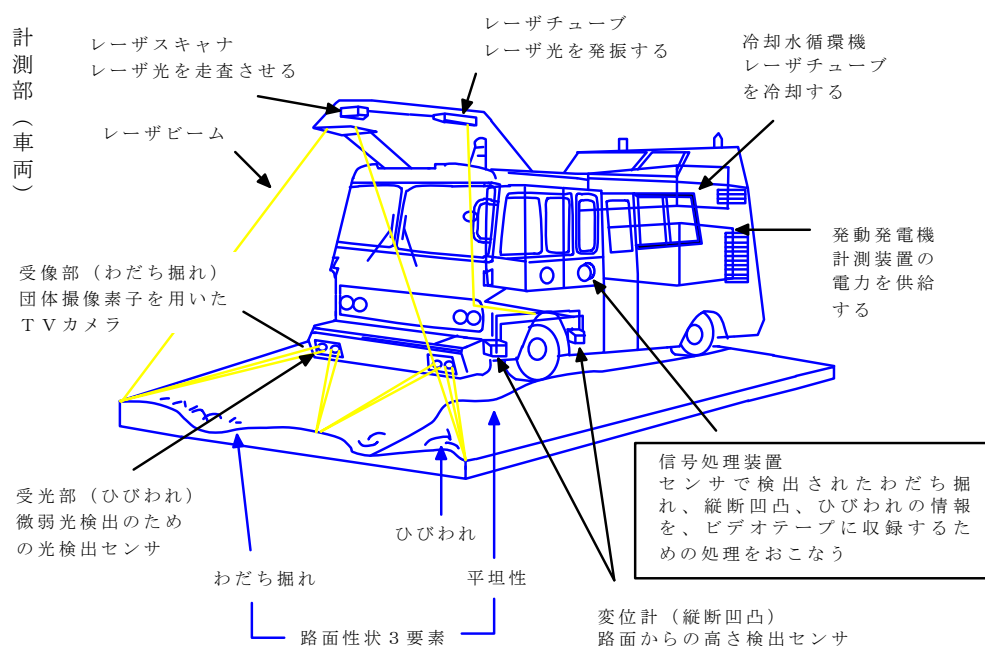
(1) 発生メカニズム

現在の点検手法や既往の研究を述べる前に、それぞれの発生メカニズムについて把握しておく。

ひびわれ発生にはいろいろな原因が考えられるが、外的要因の中で最も大きな要素は交通荷重である。ひび割れはこの交通荷重によってアスファルト混合物層の下縁に生じる引張応力により発生する。また、橋面舗装におけるひび割れは、舗装の強度不足というより、橋梁自体のたわみや振動、ねじれなどが要因となる。

わだち掘れとは車輪走行位置に生ずる横断方向の路面の凹凸を総称したものであり、アスファルト系舗装に多く発生する。わだち掘れの種類は大きく分けて 2 つある。流動によるわだち掘れと磨耗によるわだち掘れである。流動によるわだち掘れは夏期の路面温度の上昇や重車両の特定車線への集中により発生し、磨耗によるわだち掘れは冬期のタイヤチェーン、スパイクタイヤによって発生する。また、橋面舗装の重交通の道路においては、下方が床版で拘束されているため、わだち掘れが進行すると左右に連続したこぶのような状態に発展することがあり、これによりバイクなどによる交通事故が起こる。

平坦性は縦断方向の凹凸が原因と推定される。平坦性は経年とともに低下し、その主原因として、他の破損に伴うことが多い。例えば、ひび割れによる路面の落ち込み、コルゲーション、ポットホール、段差などがある。

図 1-3 路面性状測定車⁶⁾

(2) 路面性状測定車を用いた測定

ひび割れ、わだち掘れ、平坦性を定量的に把握する装置として路面性状測定車（図 1-3）が現在用いられている。1回の走行で3種類の性状値を同時に計測できる。また、調査速度は車種によっても異なるがおおむね 60km 以内の計測が可能である。まず、レーザ光をレーザーチューブから発振させ、レーザスキャナを用いてレーザ光を舗装に走査させる。そのレーザ光に対し、微弱光検出のための光検出センサを用いて、反射光の明暗によりひび割れを検出する。同様に固体映像素子を用いた TV カメラでレーザ光を受光する、つまり路面の凹凸によって生じる光線のゆがみを撮影し、横断形状（わだち掘れ）を測定する。平坦性に対しては、前タイヤ付近のレーザ変位計を用い、路面からの高さを測定することで求める。

(3) 既往の研究

先に述べた路面性状測定車は所有する会社ごとに開発しているのが現状である。しかし、どれをとってみても、コストが高いため、現在の情勢に不向きである。路面性状測定車に変わるような、ひび割れ、わだち掘れ、平坦性の測定方法に関する研究は見当たらない。

1.2.2 IRI

IRI（国際ラフネス指数）は、1986 年に世界銀行により提案された、道路路面の平坦性を評価するための世界共通指標である。IRI はまだわが国に導入されていない指標であるため、決まった点検方法はない。その開発経緯、定義、算出方法、評価について以下に示しておく。

(1) IRIの開発経緯⁶⁾

1920 年代の初めに道路技術者がラフネス（真に平らな表面に対する舗装道路表面の偏差）の測定のためにサスペンションのストロークを記録する装置を車に据え付けた．この装置はロードメータと呼ばれ、サスペンションが下方に移動するとき変位を測定するように設計されている．この装置を用いてラフネスを測定するシステムを応答型道路ラフネスシステム（Response-Type Road Roughness Measuring System, RTRRMS）という．RTRRMS は 1940 年代からよく利用されているが、異なった自動車から同じ値を得ることは不可能であるばかりか、同じ自動車ですら時間の経過により同じ値を得ることも不可能であるという、再現性、移植性の問題を有している．これを克服するため、NCHRP (National Cooperative Highway Research Program Report) は基準車と呼ばれるコンピュータ化された応答型クォーターカーシステムを開発した．このクォーターカーシステムのパラメータは RTRRMS でのアウトプットとクォーターカーシステムによるシミュレーションアウトプットの相関が最も高くなるように調整されている．ばね定数は共振周波数の主要な 2 つに合わせて選んであるが、減衰定数は大多数の車と比較して非常に大きい．高い減衰を選んだ理由は、RTRRMS との相関を広い車種において向上させていることがわかったためである．その後、1982 年に世界銀行が、再現性があり、移植性があり、時間に対して不変である IRI の解析式の開発を開始した．

(2) IRIの定義と算出方法⁷⁾

IRI の算出方法は表 1-1 に示す 4 種類がある．これらのうち最も実用的なのは、任意の測定装置で路面の縦断プロファイルを測定し、クォーターカーモデルを用いたクォーターカーシミュレーションによって IRI を算出するクラス 2 の方法である．

QC シミュレーションを用いて実際に IRI を算出する場合の定義は以下のようになっている．

- ① IRI は 1 本のプロファイルを基に算出される．サンプル間隔は、正確な算出のためには 300mm 以上としてはならない．必要な分解能はラフネスのレベルに依存し、滑らかな道路ではより細かな分解能を必要とする．分解能が 0.5mm であればあらゆる条件に対して適切である．
- ② プロファイルは路面測点間の勾配を一定であると見なしている．
- ③ プロファイルを平滑化する際の移動平均のベース長は 250mm である．
- ④ 平滑化したプロファイルにクォーターカー・シミュレーションを適用する．特性パラメータには基準車の値を適用する．シミュレーション速度は 80km/h である．
- ⑤ シミュレーションによる車体懸架装置の運動を一次加算し、プロファイルの延長で除して IRI を得る．したがって、IRI は mm/m あるいは m/km といった勾配の単位を持つ．

クォーターカーモデルとは、通常用いられている 2 軸 4 輪の乗用車の 1 輪だけを取り出し抽象化した仮想車両モデルであり、路面上を走行するクォーターカーは、図 1-4 で示すような力学系で表現される．図 1-4 のクォーターカーモデルのパラメータ、 c_s ：車体懸架装置の減衰率、 k_s ：車体懸架装置の弾性率、 k_t ：タイヤの弾性率、 m_s ：ばね上重量（車輪 1 個によって支持された車体の重量）、 m_u ：ばね下重量（車輪・タイヤの各重量と車体懸架装置・車軸の各 1/2 重量）である．

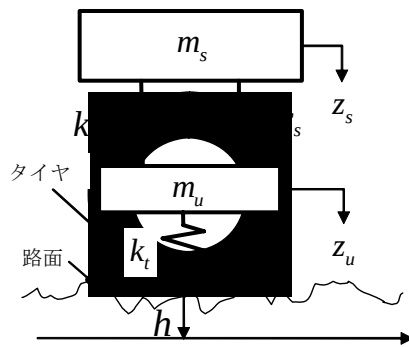


図 1-4 クォーターカーモデル

表 1-1 IRI の算出方法⁸⁾

1	間隔250mm以下の水準測量で縦断プロファイルを測定し、QCシミュレーションによりIRIを算出する方法.
2	任意の測定装置で縦断プロファイルを測定し、QCシミュレーションによりIRIを算出する方法.
3	RTRRMS（レスポンス型道路ラフネス指数を測定し、相関式によりIRIに変換する方法.
4	パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視によりIRIを推測する方法

このモデルに含まれているのは力学的な動作の基本部分であり、これによって路面のラフネスが車両の振動をどのように引き起こすかが決まる。IRIは、このクォーターカーを一定の速度（80km/h）で路面上を走行させたときのばね上重量とばね下重量の間のシミュレーション運動の累計であり、これをプロファイル長 L で割って基準化した量である。すなわち、クォーターカーシミュレーションによって算出されるIRIは以下の式で表せる。

$$IRI = \left\{ \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \right\} / L \quad (1.2)$$

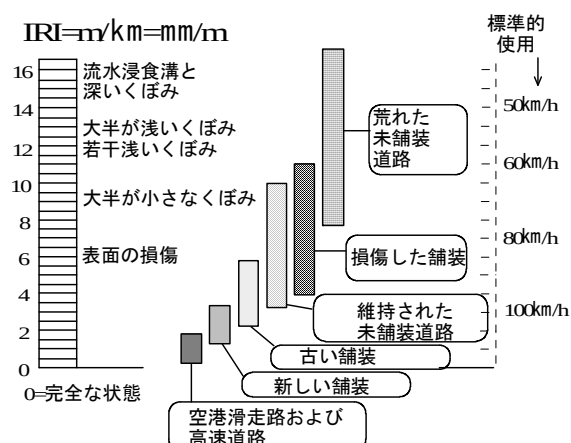
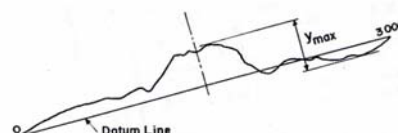
ここで、 z_s ：ばね上重量の絶対変位(mm)， z_u ：ばね下重量の絶対変位(mm)， $\dot{z}_s$ ： z_s の時間の導関数(mm/s)， $\dot{z}_u$ ： z_u の時間の導関数(mm/s)， L ：走行距離(m) V ：走行速度(22.2m/s=80km/h)
 t ：時間(s)

(3) IRIによる路面評価

世界銀行のレポートによると、IRIを用いることで、図 1-5 に示されるように非常に高い平坦性が要求される空港の滑走路、高速道路から維持作業が行われていない未舗装道路までを評価できる。

(4) 既往の研究

IRIの計測に関する研究については池田ら⁸⁾が前述した路面性状測定車を用いて、縦断プロファイルにより、IRIを求める方法と平坦性からIRIを求める方法を検討している。しかし、前述したように路面性状測定車を用いた方法はコストが高く、解析時間も長いため、優位な方法であるとはいえない。また、本研究室において、福山⁹⁾は慣性プロファイラ（路面のプロファイルを測定するための特別車両）を用いてIRIの算出を行ったが、慣性プロファイラの測定装置である慣性センサ（加速度計、ジャイロ）、レーザ変位計が高価であるため、汎用性が低い。

図 1-5 IRIによる路面評価¹⁰⁾図 1-6 最大凹凸量 y_{max} の読み取り⁸⁾

1.2.3 伸縮装置部段差・異常音

大型車が多数通行する橋面舗装では、舗装にわだち掘れが起こりやすく、伸縮装置部の後打ちコンクリート部と舗装の間に段差が発生する。この段差は走行安定性を損なうだけでなく、振動・騒音による近隣住民への影響も大きい。現在は日常巡回車により点検されているが、車上目視によって段差量を調べるのはほぼ不可能であり、体感から判断するしかない。近隣住民からの苦情により補修をしているのが現状である。段差の計測に関する既往の研究は、野口ら¹¹⁾が試験車の実際の伸縮装置上での応答を測定し、その全振幅と伸縮装置の3m間の最大凹凸量（図1-6）とに相関があるという結果を示している。しかし、比較したのはその2つの量だけであり、他に相関が高いインデックスがある可能性がある。

また、伸縮装置内部においてボルトが外れたり、ゴムジョイントの芯金がひび割れたり破損したりすると金属音（異常音）が鳴る。この異常音は騒音となり、近隣住民に影響を及ぼす。異常音も日常巡回車走行中で点検者が聞くことにより点検されているが、全聞き逃す異常音もあると考えられる。実際の道路を走ってみても、金属音が鳴っている伸縮装置は多い。異常音を桁下から計測し、結果を検討する研究は多くなされているが、桁下からでは多くの伸縮装置の状態を把握するのに時間がかかる。

1.2.4 ポットホール

ポットホールはひびわれによる舗装の剥離、車両のオイル漏れ、アスファルト混合物の混合不良等により発生する。また、橋面舗装では舗装内に水が浸入し排水しきれず穴が開くということが梅雨から夏季にかけて多く見られる。ポットホールは日常巡回車の車上目視によって点検されており、発見次第すぐ埋められる。しかし、図1-1を見ても分かるように、ポットホールによる事故が非常に多いため、予防保全のために、ポットホールが大きくなる前に検出できる点検方法が必要となる。ポットホール検出に関する研究は今のところない。

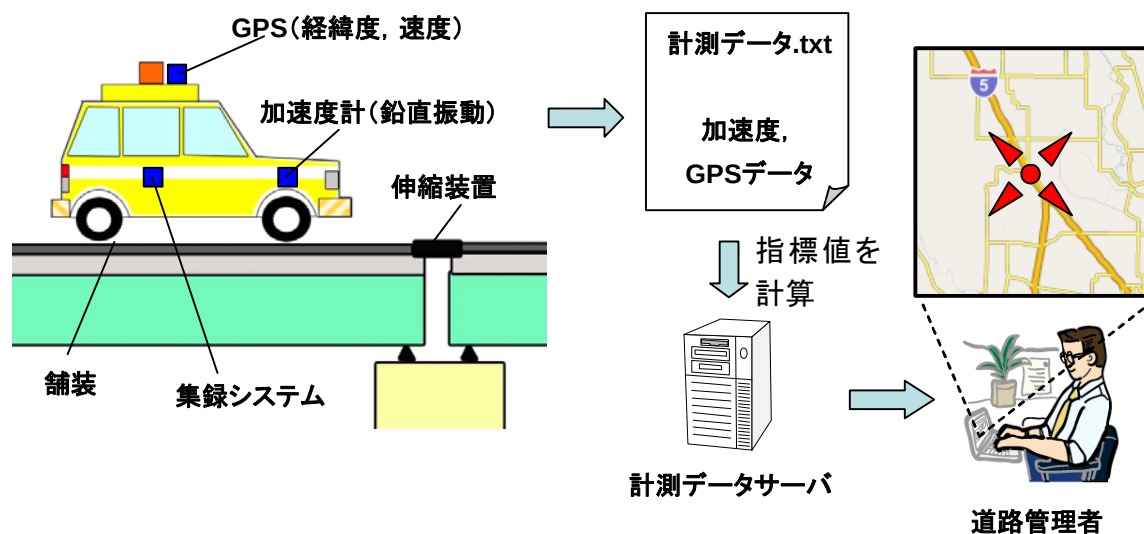


図 1-7 本研究におけるシステム概要の概要

1.3 研究目的とシステムの概要，研究手順

前述したように，道路管理に関わる予算の現状を考えると，点検には低コストの手法が必要となる．また，事故件数と点検頻度の関係から，事故を点検により未然に防ぐために，路面性状測定車よりも精度は落ちるが，高頻度に点検でき，リアルタイムに結果を診断するシステムが要求される．さらに，日常巡回車の車上目視により点検するには限界のある点検指標が多いため，舗装・伸缩装置の状態を定量的に評価する点検手法が必要となる．以上より，本研究の目的は，低コストかつ簡易な舗装路面・伸缩装置の計測診断システムを開発することとした．

図 1-7 に本研究におけるシステム（以下，本システム）の概要を示す．まず，本システムの車両は点検にも使えるよう，巡回車を用いる．巡回車に車両鉛直振動を計測するための加速度計，音圧を測定するためのマイクロフォン，経緯度・速度を測定するための GPS，加速度データ・音圧データ・GPS データを集録するためのデータ集録システムを車載し，道路上を走行させ，舗装上，伸缩装置上のデータを得る．それを道路管理局内に持ち帰り，点検の指標となる値を自動計算し，その値をサーバに蓄積する．そのサーバに道路管理者がアクセスし，地図上に表示された結果から異常箇所を把握し，補修対象箇所を決定するというシステムである．

本研究に先立ち，河野¹²⁾は GPS・加速度計を車載した車両応答計測システムの開発，それによる路面凹凸の算出，わだち掘れ量と加速度の相関があることの確認を行った．しかし，データの再現性の確認や GPS と加速度計の同期，実際の点検に利用できる指標の検討，診断に対して不十分な部分が多い．また，横断形状を表すわだち掘れ量が縦断方向の加速度と相関があるというのは信じがたい．

本研究では，これらの問題を解決するとともに，先に挙げた道路管理上重要な点検項目をでき

るだけ点検できるシステムを目指す。研究手順は①計測・収録システムの開発、②点検指標となる値の導出、③診断システムの開発の順に行っていく。

1.4 本論文の構成と概要

本論文の構成と概要を以下に示す。

第1章「緒論」では、現在の首都高速道の点検の問題点など本研究の背景、点検指標に関する既往の研究、研究目的と本研究におけるシステムの概要、研究手順を述べている。

第2章「計測・集録システムの開発」では、本システムの計測装置であるハードウェアを決定し、加速度データ・GPSデータのデータ集録システムを開発している。

第3章「計測車両の振動特性と応答の再現性」では、まず、車両の振動特性を自由振動試験から把握し、その後、路面走行時の応答の特性を示し、同日同路線における加速度、音圧、GPSデータに対し、再現性を確認している。

第4章「車両加速度から点検の指標となる値の導出」では、IRI、伸縮装置部段差、平坦性、ポットホール、わだち掘れ、その他の指標に対し、指標値の導出について考察している。

第5章「道路維持管理を目的とした診断システムの開発」では、首都高速道路の台帳を基に道路維持管理のためのデータ項目を洗い出し、データベースを構築している。また、そのデータベースを用いたWebアプリケーションを構築し、異常箇所を地図表示するシステムを開発している。

第6章「実道路へのシステムの適用」では研究室で構造諸元データを所有している首都高速7号小松川線と構造諸元データを所有していない首都高速道路全線を対象とし、本システムを適用し、考察を加えている。

第7章「結論」では第2章から第6章において得られた研究成果をまとめる、今後の課題と将来の展望について言及している。

参考文献

- 1) 社団法人新交通管理システム協会ホームページ
<http://www.utms.or.jp/japanese/condi/>
- 2) 首都高速道路公団保全施設部：構造物等点検要領，2004.4
- 3) 静岡県土木部ホームページ <http://doboku.pref.shizuoka.jp/Topics/douro/ziko/report04.htm>
- 4) PASCOホームページ http://www.pasco.co.jp/products/gis_solution/other_public/irisys/
- 5) 土木学会：舗装工学，pp.279-338,1995
- 6) Michael W. Sayers / Steven M. Karamihas：路面のプロファイリング入門，2003.1
- 7) Michael W. Sayers，（訳）笠原篤，関口幹夫，加藤昌太郎：道路縦断プロファイルからのIRIの算出（上），舗装，第31巻7号，pp.21-27，1996
- 8) 池田拓哉，東嶋奈緒子：国際ラフネス指数の計測方法に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第3巻，pp.9-14，1998.12
- 9) 福山貴子：道路の走行快適性能に関する計測と評価基準，東京大学工学部土木工学科卒業論文，2001.3
- 10) Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D. O. Paterson：Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, World Bank Technical Paper Number 46, pp.4-5
- 11) 野口勇二郎，沖野真：伸縮継手部の走行性に関する調査および研究，道路，pp.2-11，1967.3

12) 河野整 : 道路高速診察システム (VIMS) の開発, 東京大学工学部土木工学科卒業論文, 2002.2

第2章 計測・集録システムの開発

2.1 概説

本章ではデータの取得に必要な計測システムと集録システムを開発する．計測システムはハードウェアに対するシステム，集録システムはソフトウェアに対するシステムである．計測システムと集録システムは，以下のコンセプトの基，開発を行った．

- ・ 応答を精度よく記述
- ・ 車両の大掛かりな改造を伴わず，安価
- ・ 簡易かつ高頻度な操作性

2.2 計測システムの開発

2.2.1 車両と車両に搭載する装置（ハードウェア）の構成

1.5 で説明したように，本研究では車両に加速度計，GPS，マイクロフォン，ノートパソコンを搭載する．車両内の計測システムの全体図を図 2-1 に示す．

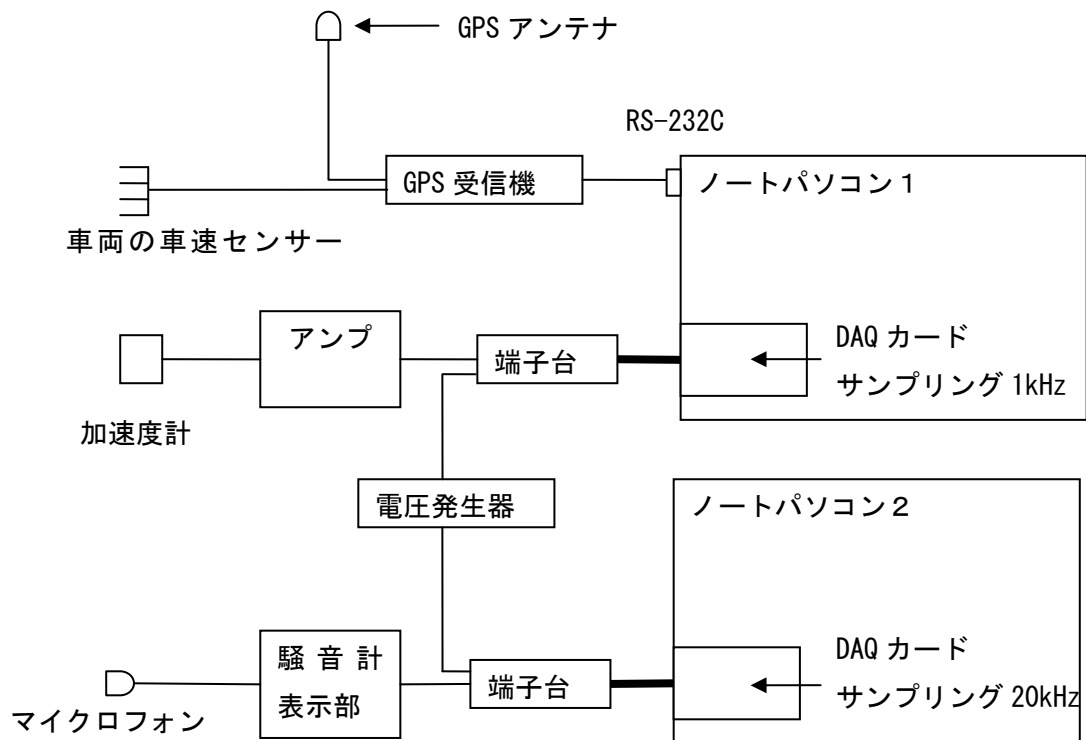


図 2-1 車両内計測システム全体図



図 2-2 ランドクルーザー (トヨタ)



図 2-3 セレナ (日産)

集録するデータは加速度データ，GPS データ，音圧データである．ノートパソコン 1 では加速度データ，GPS データを収録する．加速度データは加速度計，アンプ，端子台を通じて DAQ カードにより収録される．GPS データは GPS 本体，RS232C クロスケーブルを通じて収録される．また，ノートパソコン 2 では音圧データを騒音計，端子台を通じて収録する．加速度データと音圧データのサンプリング数が違い，1 枚の DAQ カードでは集録できないため，ノートパソコンを 2 台使用している．1.5V の電圧発生器により電圧を発生させ，その電圧データをノートパソコン 1 とノートパソコン 2 で取得し，電圧が発生する時間をノートパソコン 1 とノートパソコン 2 で合わせることで，同期を取っている．加速度の応答だけを集録したい場合はノートパソコン 1 だけで十分であり，電圧発生器も必要ない．

2.2.2 車両

車両の違いによる応答の変化を明確にし，車種による応答の違いを補正できるシステムを開発するため，本研究では 2 台の車を使用した．1 台は首都高速道路会社の巡回車と同じ車種であるトヨタのランドクルーザー (図 2-2)，もう 1 台は東京大学工学部所有の車両である日産セレナ (図 2-3) である．主として使用したのはランドクルーザーであり，日産セレナは比較対象として用いた．それぞれの主要諸元を表 2-1 に示す．2 車種の大きな違いは重量，長さ，供用年数が違うことである．このことから，2 車種は違う特性の応答を示すことが考えられる．

表 2-1 車両諸元

項目		ランドクルーザー	セレナ
車名および型式		トヨタ E-FZJ80G	ニッサン UA-TC24
自動車の種別		普通	小型
用途		乗用	乗用
車体の形状		ステーションワゴン	ステーションワゴン
乗車定員(人)		8	8
車両重量(kg)	前軸重	1210	910
	後軸重	1060	660
	計	2270	1570
車両総重量(kg)	前軸重	1320	1020
	後軸重	1390	990
	計	2710	2010
長さ(m)		4.95	4.59
幅(m)		1.93	1.695
高さ(m)		1.86	1.825
軸距(m)		2.85	2.695
原動機の型式		1FZ	QR20
総排気量(L)		4.47	1.998
燃料の種類		ガソリン	ガソリン

2.2.3 加速度計

(1) 加速度計の選定

加速度計は、必要とされる応答の周波数範囲、応答の最大加速度、設置箇所による大きさの制約を考慮して決定するべきである。車両の振動特性は普通国産乗用車の場合、ばね上加速度の固有振動数が 1.4~1.6Hz、ばね下加速度の固有振動数が 10~17Hzとなっている¹⁾。また、路面凹凸のパワースペクトル S_R は空間周波数を Ω 、平滑度パラメータを A とすると

$$S_R = \frac{A}{\Omega^n}, \quad \Omega_L \leq \Omega \leq \Omega_U$$

ここで、 Ω_U 、 Ω_L は S_R が無限大に発散しないための上限値、下限値で表されることが知られている²⁾。河合・森崎は名神道路の測定より、 $n=2$ 、 $A=0.001$ の値を得ている。参考文献 2) を参考に、上限値、下限値を $\Omega_U = 5(\text{cycles/m})$ 、 $\Omega_L = 0.5(\text{cycles/m})$ とし、路面凹凸のパワースペクトルを図 2-4 に示す。図 2-4 において空間周波数とは 1m の路面にいくつの波があるかを表している。つまり、空間周波数が高いと波長の小さな凹凸となり、逆に低いと波長の大きな凹凸となる。60km/h (=16.7m/s) で車両が走行した場合、 $0.01\text{cycle/m}=0.167\text{Hz}$ 、 $0.1\text{cycle/m}=1.67\text{Hz}$ となり、図 2-4 から低振動数領域で卓越、つまり波長の大きな凹凸が多いことがわかる³⁾。

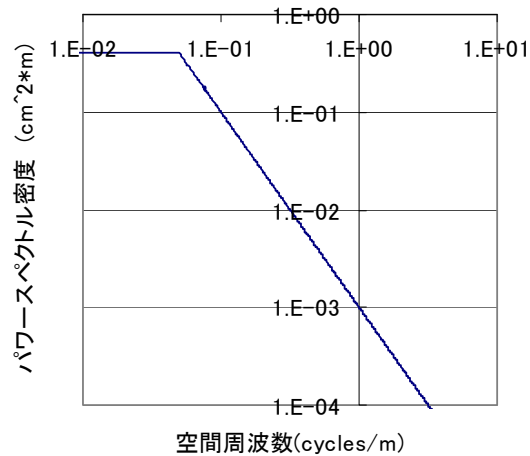


図 2-4 路面凹凸のパワースペクトル

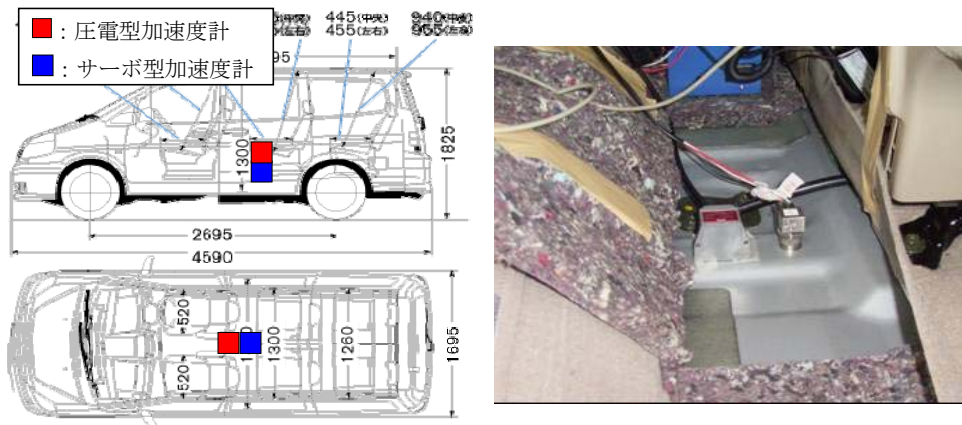


図 2-5 加速度計設置状況

車両の周波数特性，路面凹凸の周波数特性より，加速度計は低振動数領域で精度の良いものを使うべきであると言える．低振動数領域で精度の良い加速度計には導電型コイルにサーボコイルを付加したサーボ型加速度計，圧電素子を応用した圧電型加速度計がある．サーボ型加速度計は圧電型加速度計に比べ，低振動数領域での応答が大きく，精度が良いものの，装置の寸法が大きく，高価である．実際にシステムを運用する場合，加速度計自体の大きさの制約や，計測システムの価格の制約を受けるため，寸法がなるべく小さく，安価なものの方が良い．そこで，圧電型加速度計がサーボ型加速度計と比較して低振動数領域での応答を精度よく捕らえているかを以下で比較した．

日産セレナを用いて，サーボ型加速度計と圧電型加速度計を車両の真ん中，フロア上のほぼ同じ位置に付け(図 2-5)，RION 製のサーボ型加速度計と圧電型加速度計の応答について比較した．それぞれの加速度計のスペックは表 2-2，表 2-3 のとおりである．

表 2-2 サーボ型加速度計スペック (RION)

最大測定加速度	$\pm 20 \text{ m/s}^2$
電圧感度	$0.5 \text{ V/(m/s}^2\text{)} \text{ (DC)}$
周波数範囲	DC $\sim$ 100 Hz ($\pm 10 \%$)
分解能	PDF カタログ参照 http://www.rion.co.jp/dbcon/pdf/LS-40C_10C.pdf
大きさ・重さ	約 37 $\times$ 37 $\times$ 40 mm 約 230 g (コードを含む)

表 2-3 圧電型加速度計スペック (RION, PV-93)

最大測定加速度	$\pm 10,000 \text{ m/s}^2$
電圧感度	—
周波数範囲	1 $\sim$ 8000 Hz ($\pm 1\text{dB}$)
分解能	PDF カタログ参照 http://www.rion.co.jp/dbcon/pdf/Pvseries.pdf
大きさ・重さ	約 21 $\times$ 27 $\times$ 16 mm 約 30 g (コードを含む)

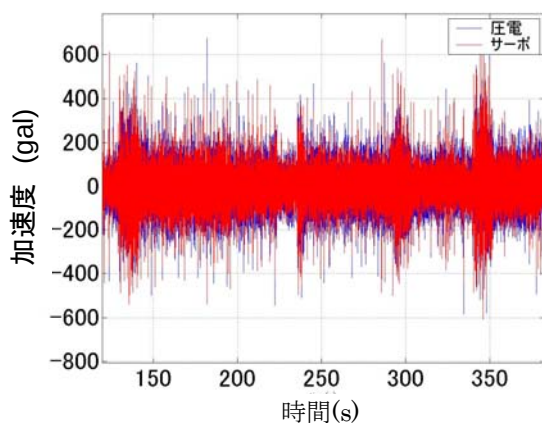


図 2-6 両加速度計での応答波形 (300 秒分)

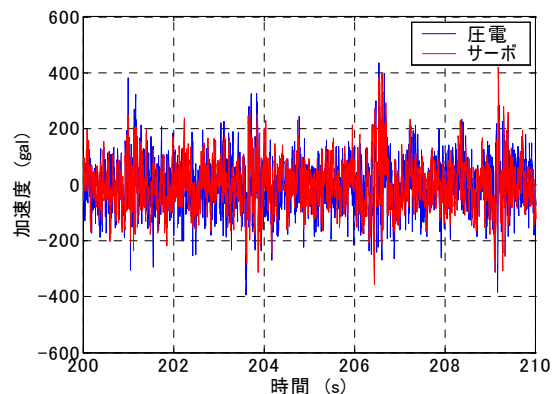


図 2-7 両加速度計での応答波形 (10 秒分)

首都高速道路 7 号小松川線下り (錦糸町入口 $\rightarrow$ 篠崎ノーズ) について, 2005 年 1 月 26 日に走行速度 60km/h の等速で計測した. サンプル周波数は 200Hz である. フィルター処理をしていない波形の一部, 300 秒分を図 2-6 に示し, 10 秒分を図 2-7 に示す.

青い波形が圧電型加速度計によって得られた波形, 赤い波形がサーボ型加速度計によって得られた波形である. 図 2-6 でひげのように伸びているのは伸縮装置部での応答, それ以外が舗装部

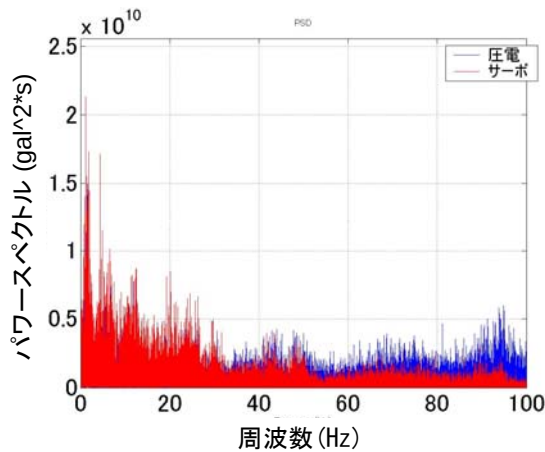


図 2-8 両加速度計での PSD (0~100Hz)

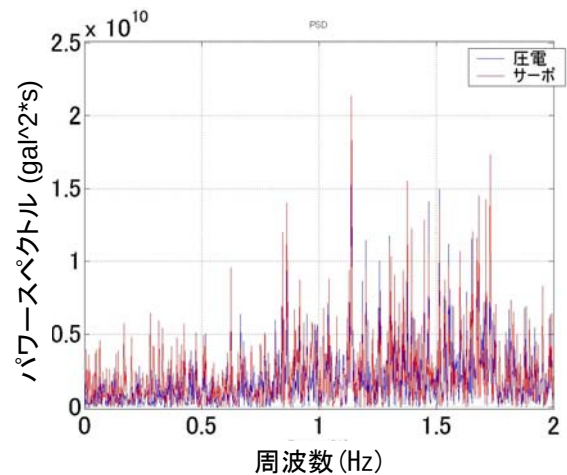


図 2-9 両加速度計での PSD (0~2Hz)

での応答である．図 2-7 において，201 秒付近，204 秒付近，206 秒付近，209 秒付近の応答が伸縮装置部での応答であり，舗装部よりも大きな応答を示している．2 つの加速度計を比較すると，特に舗装部において，圧電型加速度計の方が大きい．これは圧電型加速度計の方が，周波数範囲が広く，高周波の感度がよいためである．計測した全データに対し，パワースペクトルを求め，図 2-7 に示した．

図 2-8 では，50Hz 以上では圧電型の方が大きくなっている．これも周波数範囲によるものと考えられる．一方，30Hz 以下ではサーボ型の方が大きく，感度がよいといえる．路面のスペクトル密度分布は 1Hz 以下で大きくなっていることから，0-2Hz を拡大すると（図 2-9），サーボ型加速度計の方が感度はよいものの，圧電型加速度計でも卓越周波数のピーク（例えば 1.2Hz 付近）は落としていない．また，急激な段差通過時に起こるピーク値を拾うためには高振動数でも精度が必要である．さらに，大きさの制約を受けず，どこにでもつけられるようにする必要がある．以上の理由から，圧電型加速度計を採用した．

(2) 加速度計の設置箇所

車両の左右，前後，ばね上ばね下と加速度計を複数箇所に設置すれば，舗装路面・伸縮装置の状態を詳細に知ることが出来るであろう．しかし，実際の運用を考えた場合，複数の加速度計を使用するのは，設置の手間，メンテナンスの手間がかかるだけでなく，データの処理に対しても時間がかかり，多くのメモリ容量を使ってしまい，実用的でない．そのため，加速度計の数をできるだけ少なくし，車両応答を最も精度よく記述できる加速度計の設置箇所を決定する必要がある．

通常，道路には横断方向に勾配がある．道路中央を山とした勾配である．そのため，舗装には左タイヤが乗るわだち部分への荷重が最も大きく，ダメージを受けやすい．最もダメージを受け



図 2-10 左後ばね上加速度計設置状況



図 2-11 GPS 本体設置状況

ている舗装を対象に計測した方が効率がよいため、本システムではその影響を受けやすい車両の左側に設置することとした。また、本システムで用いる計測車両の場合、前輪駆動であるため、ハンドル操作は前側のタイヤに伝わり、前側に加速度計をつけると、それに付随する応答を受けやすい。さらに、車内では前タイヤ、後タイヤの両車輪での応答を受けやすく、振動成分が複雑となってしまう。そこで、本システムでは加速度計の設置箇所を左後のばね上（図 2-10）に設置することとした。

2.2.4 GPS

GPS には Pioneer 製の GPS2003ZZ（図 2-11）を用いた。この GPS は旋回角度を検出するジャイロセンサーと走行距離を検出する車速センサーを内蔵しているため、車速パルス（車両のコンピュータから出力されている車速信号あるいは、車速パルス発生器による信号）とバック信号を供給することにより、GPS とのハイブリッド測位を行うことが出来る。車速パルスが入力されている場合、ビルの間やトンネルの中のように GPS 信号を受信できない状況でも、ジャイロ・車速センサーを利用した自立測位が可能である。それを実証したものを図 2-12 に示す。図 2-12 は首都高速道路中央環状王子線の飛鳥山トンネル付近で計測した GPS の位置データ（緯度、経度）をプロアトラスの地図上にプロットしたものである。青でプロットされたものが高架部での位置プロット、赤でプロットされたものがトンネル部での位置プロットである。トンネル内でも問題なく即位できていることが図 2-12 から明らかである。

また、通常の GPS は秒間 1 回または 2 秒に 1 回測位データが出力されるが、この GPS は車速パルスを供給することで秒間 2 回の測位が可能である。そのため、GPS データを補完によって加速度応答と対応付ける場合、他の GPS と比較し、精度よく対応付けることができる。車速パルスを車両のコンピュータから取り出すためには配線工事が必要となるが、工事費用はそれほど高くない。配線は図 2-13 のようになっており、上から電源接地ライン（黒）、車速パルスライン（ピンク）、バック信号ライン（紫）、車両バックアップライン（黄）、車両アクセサリライン（赤）である。なお、車速パルスは車種やメーカーによって使用が異なる。日産の場合はほとんどが 2 パルスであるが、トヨタの場合は 4 パルスである。この GPS はパルス数を自動認識する学習機能が



図 2-12 高架部・トンネル部での測位結果

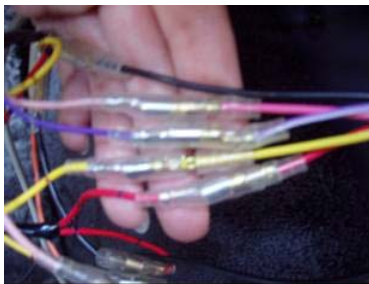


図 2-13 本体に必要な配線



図 2-14 アンテナ設置状況



図 2-15 USB 変換ケーブル

備わっているが、車両を変えた際にはリセットボタンにより、認識を一度消去する必要があることに注意が必要である。

本体の設置場所は出来るだけ水平なシフトレバーの前側とした(図 2-11)。アンテナは車両ルーフ上、前側中央に設置した(図 2-14)。GPS データは GPS 衛星から GPS アンテナ、GPS 本体を通じ、シリアルケーブルを通してパソコンに入力される。今回使用したノートパソコンにはシリアルポートがないため、RS232C-USB 変換ケーブル(図 2-15)を用いて、USB ポートからデータを集録した。出力フォーマットは NMEA モード、Pioneer モードの 2 種類があるが、車速のデータが取得できかつ秒間 2 回の出力は Pioneer モードのみであるため、Pioneer モードを採用した。GPS の仕様は表 2-4 のとおりである。

表 2-4 GPS仕様

受信方法	C/A コード, SPS (スタンダードポジショニングサービス)
測位更新日時	1 秒または 0.5 秒 (0.5 秒は車速パルス入力アリの場合)
測位系	日本測地系 (規定値) (WGS-84 他 47 測地系設定可)
日付有効期間	2003 年 1 月 1 日～2022 年 8 月 16 日
インターフェース	1 系統 EIA-232D (RS-232C) EIA-574 規格準拠
伝送速度	9600bps, 4800bps
出力データ	指定測地系での緯度, 経度, 高度, 速度, 移動方向, 時刻, オドメータ (積算距離計), 速度変化量, 方位変化量他
外部スイッチ	RESET ボタン - CPU リセット CLR ボタン - ジャイロ学習初期化
外形寸法	110(W)×30.5(H)×92(D)mm
重量	0.39kg

2.2.5 騒音計・マイクロフォン

騒音計にはリオンの精密騒音計 NL-32 型を用いた。図 2-16 に示す騒音計はマイクロフォン(円筒部分上側)とプリアンプ(円筒部分下側), 表示・操作部分(下灰色部分)が一体となっており, パソコンで音圧, 音圧レベルを取り込めるためデータ処理を後で行うことができる。その理由から, この騒音計を採用した。データの流れとしてはマイクロフォンで音を取り込み, プリアンプでその音を増幅させ, データ表示・操作部内にあるコンピュータで AD 変換する。その AD 変換したデータを騒音計最下部の AC/DC 出力端子から, BNC-ピンコードを用いて端子台に接続している。データは AC データを取り込んでいる。図 2-16 のままでは扱いにくいので, マイクロフォン・プリアンプと表示・操作部分の間に延長コード EC-04A (図 2-17) を介し, マイクロフォン・プリアンプは左後タイヤのすぐ後ろに治具を用いて設置した。風きり音や, 雨によるマイクロフォン・プリアンプの損傷を防ぐため, マイクロフォン・プリアンプに全天候防風スクリーン (WS03S01, 図 2-18) を設置している。表 2-5 に騒音計の仕様を示す。



図 2-16 騒音計（リオン，NL-32）



図 2-17 マイクロフォン延長コード（EC-04A）



図 2-18 マイクロフォン設置状況

表 2-5 騒音計仕様

周波数重み特性	A 特性、C 特性、FLAT 特性
測定レベル範囲	A 特性：28～130dB、C 特性：33～130dB、FLAT 特性：38～130dB C 特性ピーク音圧レベル：55～141dB ピーク音圧レベル：60～141dB
測定周波数範囲	20～8000Hz
実効値検出回路	デジタル演算方式、時間重み特性：Fast、Slow、Impulse(補助演算機能でのみ選択可能)
マイクロフォン/プリアンプ	UC-52/NH-21
出力端子	交流／直流出力端子（キー操作で選択）
I/O 端子	コンピュータによる測定制御とデータ出力、プリンターDPU-414 へのデータ出力
使用温湿度範囲	-10～+50℃、10～90%RH
大きさ・重さ	約 260×76×33mm、約 300g（電池含まず）



図 2-19 スピードモニター設置状況

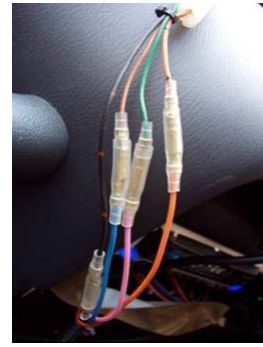


図 2-20 スピードモニター用配線

表 2-6 スピードモニター仕様

外形寸法	94 (W) ×34 (H) ×26 (D) mm
適合車速パルス数	2、4、8 に対応（基本的に国産車を適用）

2.2.6 スピードモニター

応答を場所ごとに比較するため、車両の走行速度はできるだけ一定であることが望ましい。走行速度を一定に保つには、クルーズコントロールのような機能を車両が有していれば良いが、一般的にそのような機能を持つ車両は少ない。クルーズコントロールをつけるには、車両製作の段階から設計する必要がある。それでは、特殊な車両となってしまう、巡回車に使える簡易な計測システムとは言いがたい。そこで、デジタル表示のスピードモニター（永井電子、スピードモニターNo.4010）を運転席左前側に設置し（図 2-19）、車速をできるだけ一定に保てるようにした。このスピードモニターは、GPS 同様、車両のコンピュータから車速パルス拾い、車両の速度情報をデジタル表示で示している。このスピードモニターを用いるにも、配線（図 2-20、左から黒—ボディアース、茶—エンジン回転信号、緑—車速信号、橙—電源）工事が必要となるが、GPS のための配線を 2 又に分岐させて使えばよい。表 2-6 にスピードモニターの仕様を示す。

2.2.7 電圧発生器

前述したが、本研究では 2 台のノートパソコンを用い、1 台を GPS データ・加速度データ集録用、もう 1 台を音圧データ集録用としている。別々の PC で、別々の DAQ カードを使用しているため、同時に計測を開始したとしても、GPS データ・加速度データと音圧データは同期が取りにくい。そこで、電池を用いた電圧発生器（図 2-21）でスイッチを ON/OFF し、1.5V の電圧を両 PC で取り込むことにより同期を取った。つまり、スイッチが ON になった瞬間で GPS データ・加速度データと音圧データを合わせている。電圧発生器は端子台と接続できるよう、BNC 端子で電圧を出力している。



図 2-21 電圧発生器



図 2-22 DAQCard-6062E



図 2-23 端子台 (National Instruments, SCB-60)



図 2-24 アンプ (リオン, UV-06A)

2.2.8 DAQ カード

DAQ カード (図 2-22, National Instruments, DAQCard-6062E) は端子台を介したアナログ信号をデジタル信号に変換し、パソコン上にデータを集録する役割を果たしている。ノートパソコンの PCIMA スロットに挿して使う。National Instruments のデータ集録ソフトウェア LabVIEW に対応している。DAQ カードの仕様は表 2-7 のとおりである。

表 2-7 DAQ カード仕様

入力端子	16
最大サンプリングレート	500kS/s
分解能	12bits
入力レンジ	$\pm 0.05 \sim \pm 10V$

2.2.9 その他計測システムに必要な装置

その他、計測システムに必要な装置を以下に示す。

- ・ 端子台 (図 2-23) - National Instruments, SCB-60
- ・ アンプ (図 2-24) - リオン, UV-06A
- ・ ノートパソコン - Panasonic, Let's Note W2, W4

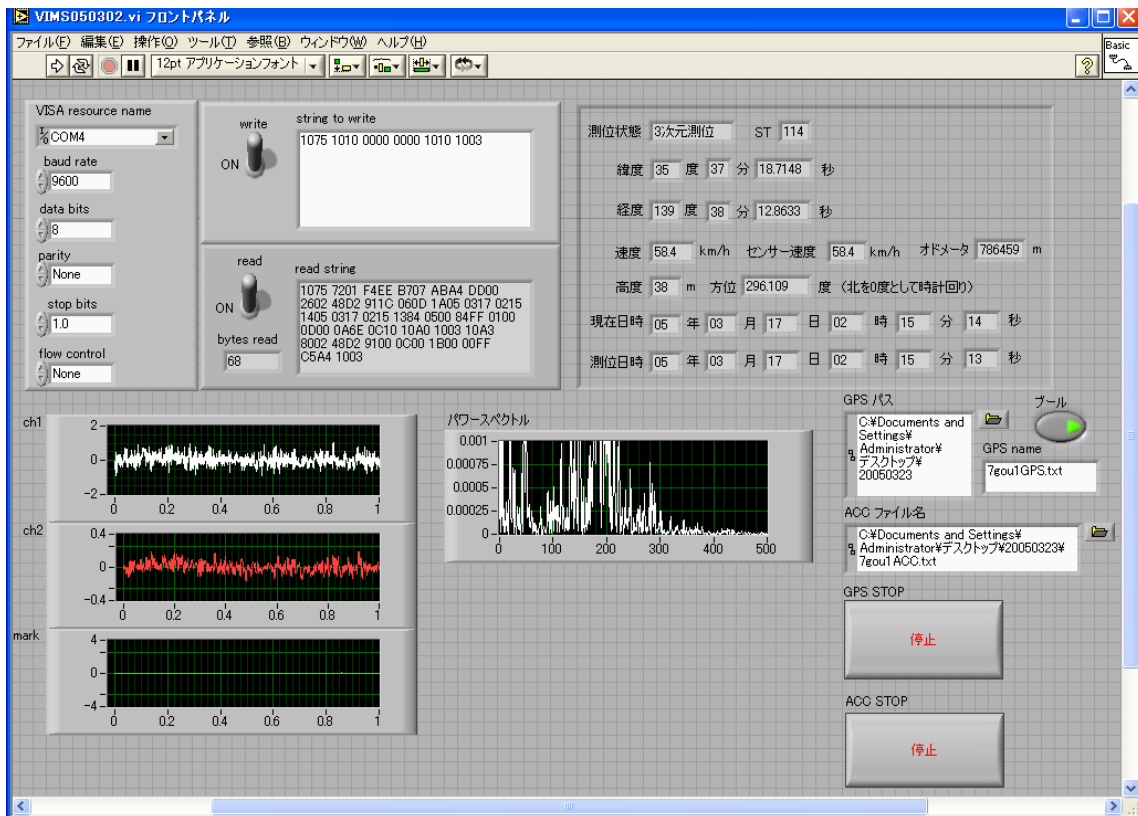


図 2-25 加速度データ・GPS データ集録プログラム画面

2.3 集録システム

データ収録には National Instruments 社の LabVIEW7.1 を用いた。LabVIEW7.1 はグラフィカルプログラミング言語によってデータ集録が可能なソフトである。

ノートパソコン 1 のプログラム（図 2-25）では加速度データと GPS データを集録している。このプログラムでは GPS データを取得する際に出力されるフッターでトリガーをかけ、次に取得する GPS データとともに加速度データを取り始めるようにしている。これによりデータの同期採取を実現しており、加速度応答と場所が対応付けられる。プログラムを付録に載せる。操作方法はまず、画面左上で GPS 用のシリアル通信の設定を行う。また、画面中央上で 16 進数の文字列を入力し、GPS データでの欲しい情報を GPS 本体に送る。右中央の GPS データのファイル名、加速度データのファイル名を入力する。左上の矢印ボタンを押すと、画面右上の GPS 情報（測位状態、緯度、経度、GPS による速度、車両コンピュータからの速度、オドメータ、高度、角度、現在日時、測位日時）、左下の加速度波形（1ch, 2ch）と電圧発生器による電圧が表示され、それぞれのデータが保存される。GPS 情報は本来、バイナリ形式で出力されるものであるが、プログラム上でテキストデータに変換している。プログラムを停止するときは右下の停止ボタンをそれぞれ押す。

ノートパソコン 2 のプログラムは GPS データを取得せず、音圧データのみを集録するようにな

っている。

2.4 まとめ

本章では計測・集録システムの開発を行った。計測システムでは、本システムに適したハードウェアを選定した。集録システムでは GPS データに対し、トリガーを掛け、加速度データ、音圧データとの同期を取った。次章以降は、本章で開発した計測・集録システムを用い、その後のシステムを開発していく。

参考文献

- 1) 小口泰平：自動車工学全書 11 ステアリング，サスペンション，山海堂，1980
- 2) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技法堂出版，pp.400-401，1993

第3章 計測車両の振動特性と応答の再現性

3.1 概説

前章で開発した計測システムを用いて、応答を計測する前に、計測車両の振動特性を把握しておく必要がある。本章では①計測車両の固有振動数を求め、②一般道において走行したときの車両応答に対して考察する。さらに、高速道路上で応答の再現性を確認する。

3.2 車両の振動特性

3.2.1 車両の振動の基礎¹⁾

車両の応答を用いるシステムであるため、車両の基本的な振動特性を理解しておくことは非常に重要なことである。以下に車両の基本的な振動特性についてまとめる。

車両は機能面からの構成として、車体、懸架系、車軸、タイヤに分類され、車軸の上にある懸架ばね系で車体が支えられており、またタイヤを介して路面に接している。

走行する車両振動の主な原因として路面凹凸が挙げられるが、車両振動には車体懸架系の振動や駆動系の振動があり、前者の振動にもばね上ばね下振動や車体・車台の弾性振動などがある。RTRRMSに関する多くの研究では車両振動としてばね上ばね下振動が一般的に考えられている²⁾。そこで、ここでもばね上ばね下振動について考える。

ばね上ばね下振動は、車両を基本的な分離構造とした場合、懸架系ばねの上に支えられている車体や積載質量を含むばね上質量、懸架ばね系、懸架ばね系とタイヤ間の車軸やタイヤ質量などのばね下質量およびタイヤばね系の組み合わせによる有限自由度のばね質量系の振動体と考えられる。いま、ばね上質量を剛体と考えると、図の車の例で示すように、車両の左右、前後、上下方向を x, y, z 軸、ばね上質量の重心を $G(x_0, y_0, z_0)$ 、および重心を通る x, y, z 軸回りの回転角を θ 、 ϕ 、 ψ とすれば、ばね上質量の振動モードは一般的に次の6種類に分類される

- (1) バウンシング（上下振動）
- (2) 前後振動
- (3) 左右振動
- (4) ピッチング（縦揺れ振動）
- (5) ローリング（横揺れ振動）
- (6) ヨーイング（偏揺れ振動）

これらの振動現象のうち、走行車両の振動としては（1）のバウンシング、（4）のピッチング振動、（5）のローリング振動が重要となる。

一方、ばね下質量についてもばね上質量と同様に考えられる。いま、ばねした質量の左右、前後、上下方向を x', y', z' 軸、その重心を $G'(x'_0, y'_0, z'_0)$ 、その重心を通る軸回りの回転角をとすれば、振動モードは一般に次の6種類に分類される。

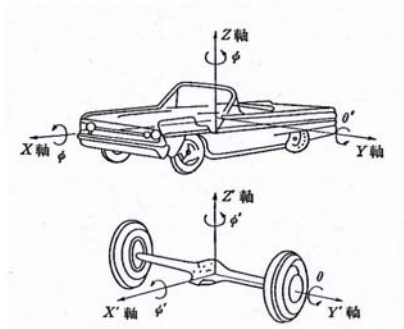


図 3-1 ばね上，ばね下振動の座標系

表 3-1 ばね上，ばね下の固有振動数

車種	ばね下固有振動数 (Hz)		ばね上固有振動数 (Hz)
	前輪系	後輪系	
軽自動車	13-17.5	13-16	1.5-2.1
大型車	11-16	12-16	1.4-1.7
小型車	10-15.5	10-17.5	1.2-1.6
中型車	12-13.5	9-13	1.0-1.5

- (1) 上下振動
- (2) 前後振動
- (3) 左右振動
- (4) ワインドアップ
- (5) 地だんだ振動
- (6) 首振り振動

これらの振動のうち、(1)の上下振動、(4)のワインドアップ、(5)の地だんだ振動が顕著であるとされている³⁾。ばね上振動、ばね下振動の各振動モードに対する固有振動数を表 3-1 にまとめる。車種や車輪によって異なるが、ばね上の固有振動数は 1.0Hz～2.1Hz、ばね下の固有振動数は 9～18Hz となっている。本研究で通常用いるランドクルーザーは中型車であり、ばね下の固有振動数は他と比較して低いことが予想される。

3.2.2 計測車両の固有振動数

一般的な車両の固有振動数がある程度理解したが、実験車両についても固有振動数を把握しておくべきである。そこで、実験車両の固有振動数を明らかにするため、以下のように、自由振動試験を行った。

(1) 試験方法

試験車両は通常用いるトヨタのランドクルーザーを用いた。全体の応答により真相モードを判断するため、加速度計を 9 個用いた。図 3.2 のように、圧電型加速度計を、車両内の真中に 1 個、前後左右ばね上ばね下にそれぞれ 1 個ずつ、計 9 個設置し、それぞれの鉛直振動を測定している。それぞれの加速度計の設置箇所の選定条件はできるだけ水平で加速度計が安定する位置とした。設置状況を図 3-3 に示す。車内の加速度計は運転席と助手席の間のシフトレバー横に設置した。左前ばね上の加速度計は車両の左前タイヤ近くに懸架ばねがあり、その懸架ばねの上の鋼板上に設置した。左前ばね下の加速度計は左前ばね上の加速度計と同じ懸架ばねの下側の鋼板上に設置した。左後ばね上の加速度計は、車両の左後タイヤ近くにも懸架ばねがあるが、その上に設置できるような箇所がなかったため、タイヤ近くのボディーに横付けするような形とした。

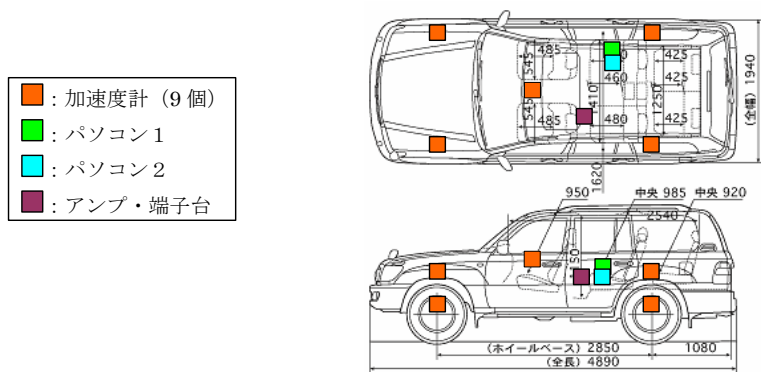


図 3-2 加速度計設置箇所



(a) 車内



(b) 左前ばね上



(c) 左前ばね下



(d) 左後ばね上



(e) 左後ばね下



(f) 右前ばね上



(g) 右前ばね下



(h) 右後ばね上



(i) 右後ばね下

図 3-3 加速度計設置状況



図 3-4 試験時の状況（ピッチング振動）

左後ばね下の加速度計は左前ばね下同様、ばねの下側の鋼板上に設置した。右側については、できるだけ左側と同じ位置になるよう、設置した。加速度計は前述したよう、圧電型加速度計（表 2-3）とした。

（2） 試験概要

試験方法は車両を 10 c m 角のスロープ付き角材の上に載せ、車両を自由落下させ、その自由振動波形を計測するものとした。この波形のパワースペクトルを求めることにより、固有振動数を求める。この方法は土木研究所、日本橋梁建設協会の延長床版効果確認試験⁴⁾を参考にした。試験時の状況を図 3-4 に示す。

対象とした振動の種類は走行時の応答に特に影響の大きいとされるばね上振動のバウンシング、ピッチング、ばね下振動の上下運動である。それぞれの振動モードを励起させるため、以下のように落下させた。

- ・ バウンシングモード：全てのタイヤを角材の上に乗せ、全てのタイヤが同時に落下
- ・ ピッチングモード①：前タイヤのみを角材の上に乗せ、前タイヤのみを落とす
- ・ ピッチングモード②：後タイヤのみを角材の上に乗せ、後タイヤのみを落とす

ばね下の上下振動については、ばね上がピッチング振動しているときに励起されていたのでそのときの波形を用いることにした。なお、前タイヤを落下させるモード（バウンシングモード、ピッチング前）の固有振動数を計測する際、落下後、後タイヤが前側のスロープに乗りあがってしまい、応答に影響してしまう。そこで、前側の両スロープ間に直径 1mm 以下の紐をつけ、自由落下と同時に引き下げ、応答に影響しないように工夫している。

（3） 試験条件

通常、道路上を計測する際、運転手、1 台目パソコンを操作する人、2 台目のパソコンを操作する人が乗車する。重量を一定にするため、自由振動試験でも乗車人数を 3 人とした。また、道路走行時にはエンジンがかかっているため、エンジンは掛けた状態とした。試験回数はそれぞれのモードに対して 5 回とした。

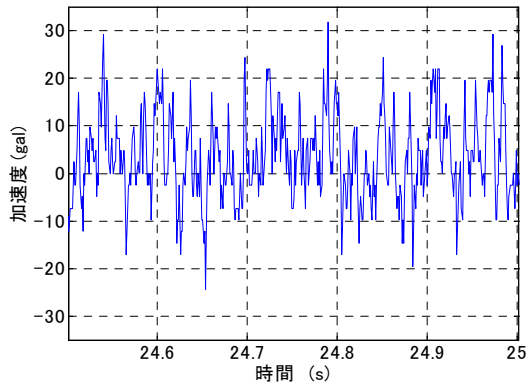


図 3-5 エンジン振動波形（左後ろばね上）

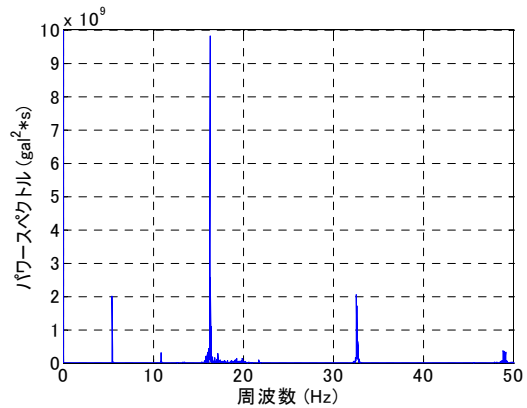


図 3-6 エンジン振動 PSD（左後ろばね上）

（4） 試験結果

得られた振動波形に対しパワースペクトルを求め、周波数領域で最も卓越している部分の周波数を固有振動数とした。

エンジンを掛けたまま実験するため、まずはアイドリング時のエンジンによる車両の振動を 1 分間計測し、エンジンによる振動数を求め、その振動数を把握した。本システムで使用する左後ろばね上の加速度計のエンジンによる振動波形 0.5 秒分を図 3-5 に示す。アイドリング時には 20gal 程度の振動をしている。1 分間のパワースペクトルを図 3-6 に示す。

エンジンによる振動数は 8.2Hz, 16.3Hz, 32.7Hz, 49Hz にピークがあり、16.3Hz のものが一番大きい。卓越する振動数が 16.3Hz の半分、2 倍、3 倍となっているのは、エンジンが回転体であるためである。回転体の振動では高調波となり、基本周波数の整数倍の振動数が卓越してくる。この場合、基本周波数は 16.3Hz である。ここで求めた振動数は他の振動モードと混同しないようにするために使用する。

① バウンシング

4 つのタイヤを角材から同時に落とした場合の、自由減衰振動波形を図 6 に示す。上がばね上の真中（車内）、左前、左後、右前、右後の振動波形、下がばね下の左前、左後、右前、右後の振動波形である。

ばね上（図 3-7 上）については、すべての加速度計において同位相で振動しており、バウンシングモードで振動しているといえる。また、1.5 秒程度で振動がおさまっていることから構造物の減衰と比べ、減衰が非常に大きいということも分かる。ばね下（図 6 下）についてもバウンシングのモードが卓越した振動であるが、右前の加速度が他のとは異なった挙動を示している。これは、右前の加速度計が故障している、または加速度計の設置箇所が適当ではなかったためなどが原因と考えられる。

固有振動数を把握するため、このバウンシングモードの波形 5 回分の平均パワースペクトルを図 7 に示す。平均パワースペクトルとしたのは 1 回分のパワースペクトルがぎざぎざの形状をし

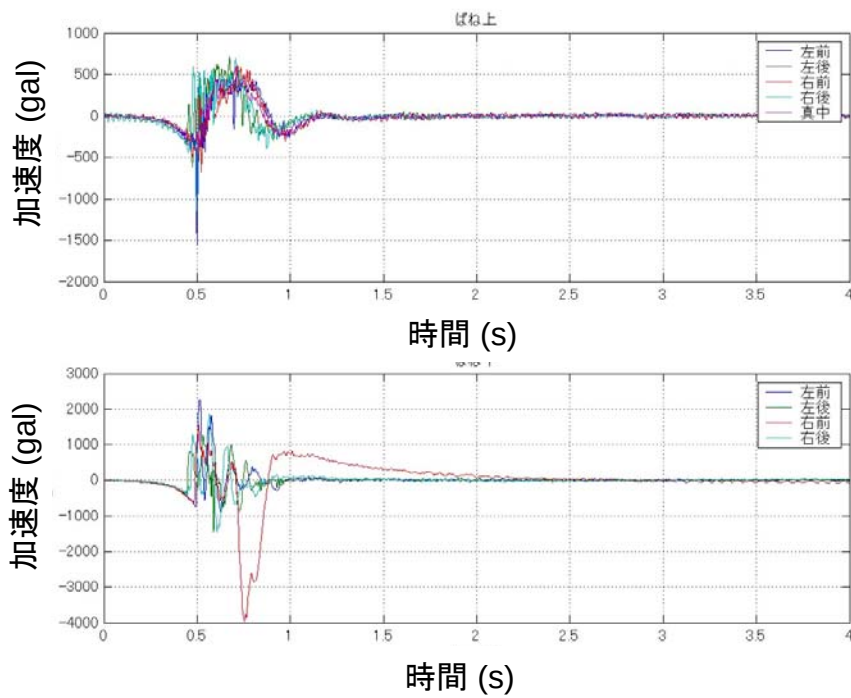


図 3-7 自由振動波形（バウンシング，上—ばね上，下—ばね下）

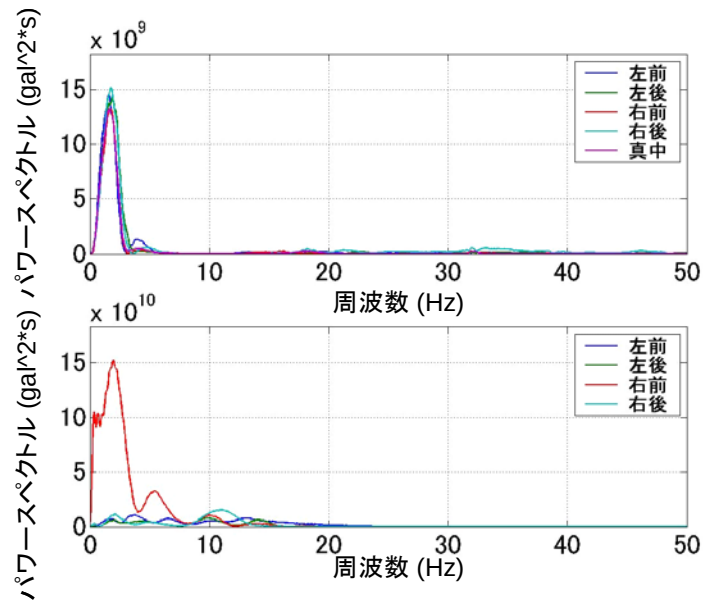


図 3-8 平均パワースペクトル（バウンシング 5 回分，上—ばね上，下—ばね下）

ており，卓越周波数がわかりにくいためである。

ばね上の固有振動数は図 3-8 のパワースペクトルから 1.62Hz をピークに，減衰が大きいため幅広い分布となっている．この結果は一般的な車の固有振動数（表 3-1）と比較しても妥当なも

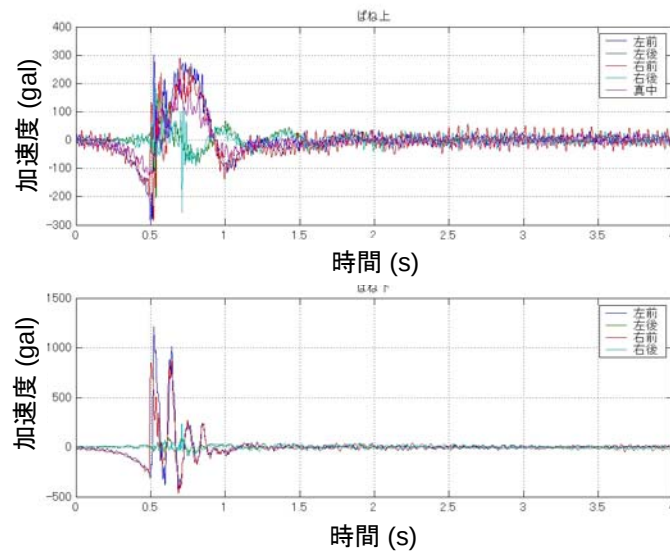


図 3-9 自由振動波形（ピッチング（前を落とす）、上—ばね上、下—ばね下）

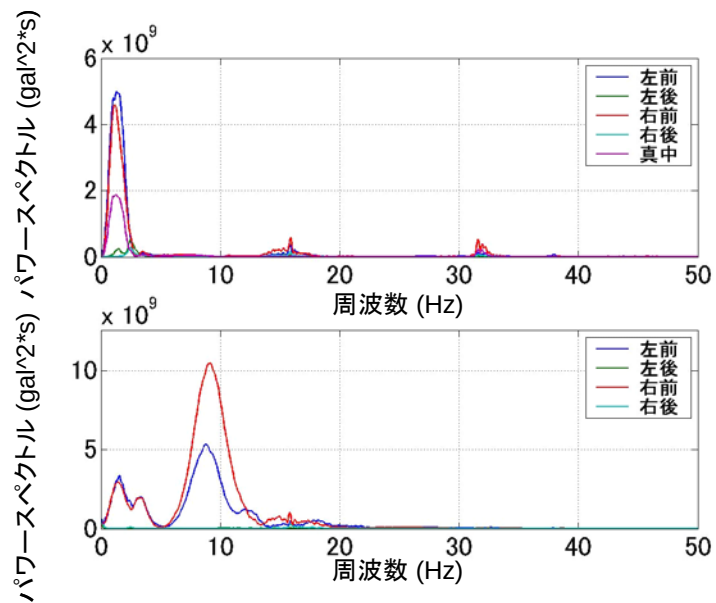


図 3-10 平均パワースペクトル（ピッチング（前を落とす）、上—ばね上、下—ばね下）

のである。

② ピッチング（前）

前タイヤのみ角材から落とした時の減衰自由振動波形を図 3-9 に示す。

前側と後ろ側で位相が逆転しており、ピッチング振動をしているのが見て取れる。当然であるが、

前を落としたため、前側のほうが応答が大きい。車内につけた加速度計は前側の加速度計と

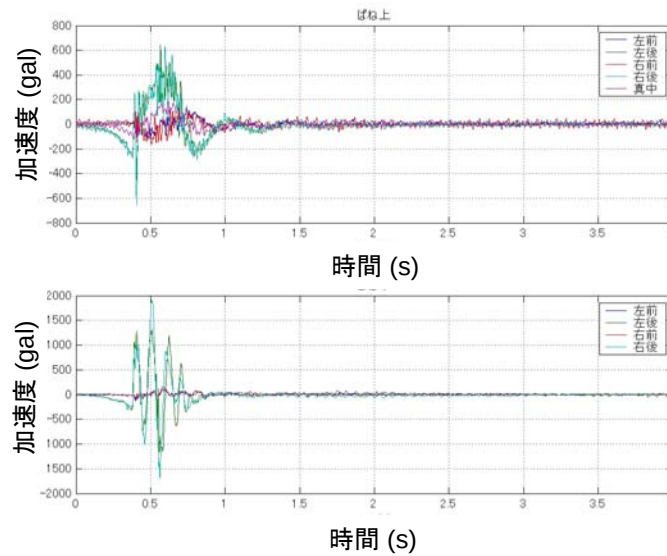


図 3-11 自由振動波形（ピッチング（後ろを落とす）、上—ばね上，下—ばね下）

同位相で振動している。

この波形に対し、パワースペクトルを求めて図 3-10 に示した。ばね上の固有振動数は図 3-10 から 1.31Hz であることが分かる。ばね下右前の固有振動数は 9.06Hz，ばね下左前の固有振動数は 9.05Hz である。16Hz，32Hz 付近にエンジン振動が卓越しているのがわかる。

③ ピッチング（後ろ）

後ろタイヤのみ角材から落とした時の減衰自由振動波形を図 3-11 に示す。

図 3-11 では、前側と後ろ側で位相が逆転しており、ピッチング振動をしているといえる。真中につけた加速度計は後ろ側の加速度計と同位相で振動している。ピッチング振動の前を落とした振動波形と後を落とした振動波形から、車内の加速度は前輪後輪の両輪の影響があるといえる。前を落とした時、後の加速度は小さく、後を落とした時、前の加速度は小さい。このことから、車内に加速度計をつけた場合は、応答が複雑になり、前、後ろのどちらかにつけたほうが指標値を求める際に、扱いやすいと言える。

図 3-11 の波形に対し、パワースペクトルを求めて図 3-12 に示した。

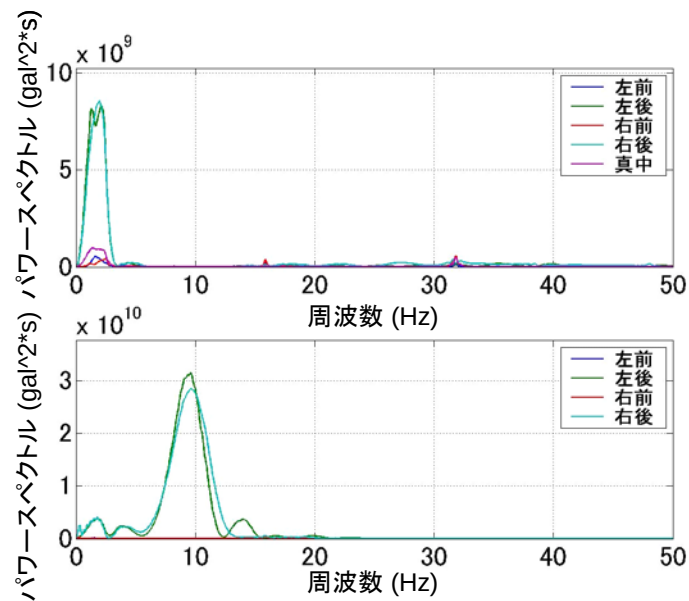


図 3-12 パワースペクトル（ピッチング（後ろを落とす），上—ばね上，下—ばね下）

表 3-2 計測車両の固有振動数

	モード	固有振動数(Hz)
ばね上	バウンシング	1.62
	ピッチング（前）	1.31
	ピッチング（後ろ）	1.98
ばね下	右前	9.06
	左前	9.05
	右後ろ	9.61
	左後ろ	9.61

ばね上の固有振動数は 1.98Hz，ばね下右後ろの固有振動数は 9.61Hz，ばね下左後ろの固有振動数は 9.61Hz である。

各モードの固有振動数を以下のまとめると表 3-2 のようになる。ばね上ではバウンシングモード，ピッチングモードは近い値をとっており，実際の道路走行時においてその区別は難しいと考えられる。表 3-1 と比較すると，ばね上，ばね下とも一般的な車両と同程度の固有振動数となる。この結果を参考に，次節以降の応答特性を見ていく。

3.2.3 舗装路面走行時の車両応答特性

道路の走行時に起こる車両の振動の原因には以下のものが考えられる。

- ① 舗装路面・伸縮装置の凹凸によるもの
- ② 加速度計設置箇所の車両パーツの局部振動によるもの
- ③ 車両のエンジン振動によるもの

本研究で知りたいのは①であり、②、③はフィルターにより除去する必要がある。ただし、そのフィルターが①の応答に影響しないよう、注意する必要がある。

実際の道路を走行したときの車両応答の特性を以下に述べる。

(1) 一般道走行時の車両特性

埼玉県坂戸市小沼にある一般道を選定した。選定条件は以下のようにした。

- ① 路面の形状が計測できるほど交通量の少ない箇所
- ② 等速で走行できるような直線道路
- ③ 新設、悪い舗装など、さまざまな状態の舗装があること

計測車両は南向きの車線である。

この道路において、計測区間 687.5m を決定した。計測路面には計測開始地点から新設の舗装 70m があり、計測開始地点から 160m 付近の十字路に、交差道路からの舗装が流れ込んでいる。また、計測開始地点から 395m 付近に横断方向のひび割れと、それに伴う段差がある。さらにその 50m 先の十字路に交差道路からの舗装が流れ込み、計測終了地点付近に大きな段差がある。

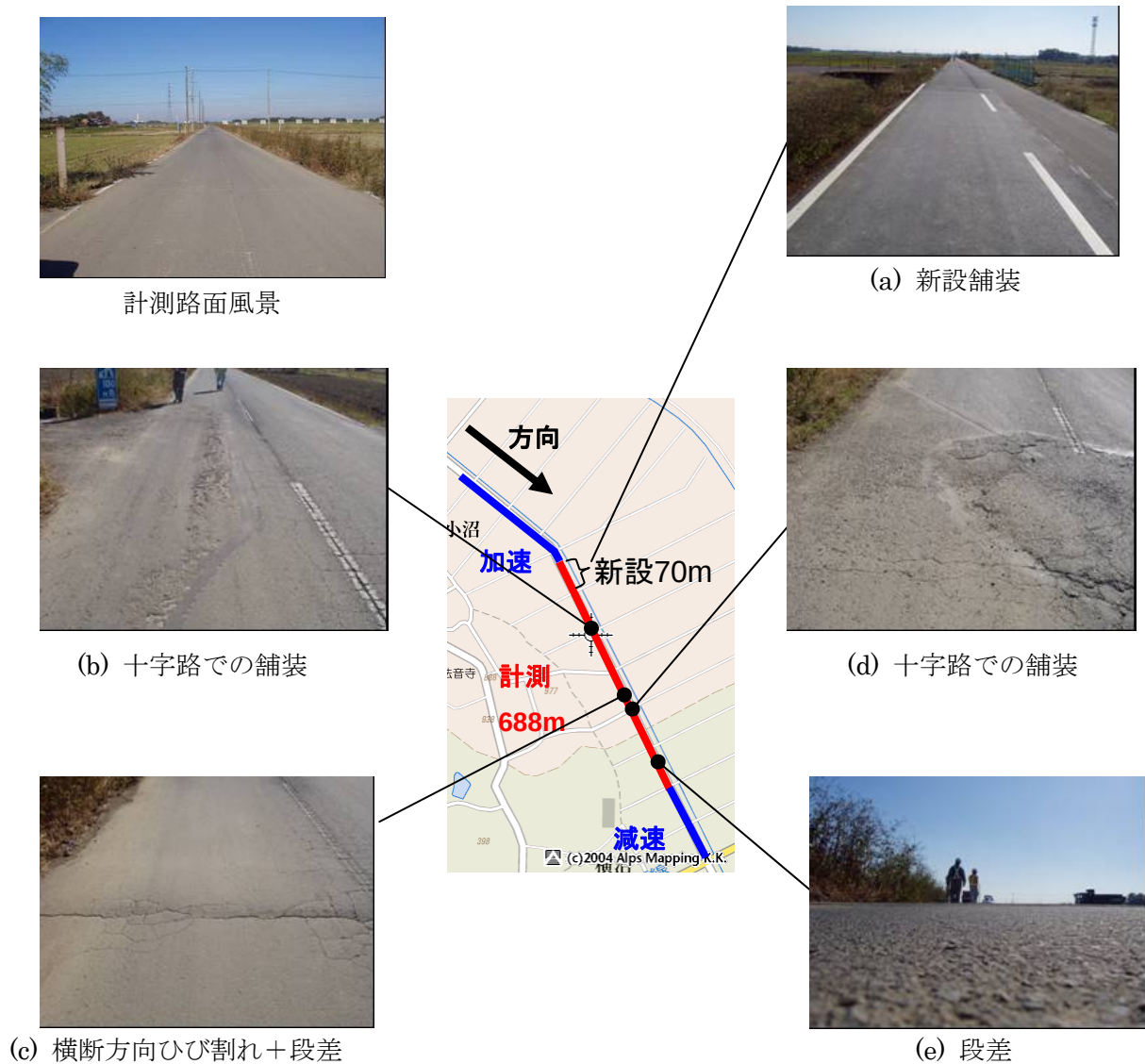


図 3-13 計測路面の状況

この舗装路面に対し、ニチレキ(株)が開発したDual purpose Automatic Measuring kit (DAM, 縦横断形状測定装置)を用いて路面形状を計測した。DAMは手押し車のように、路面上を手で押して車輪を転がし、路面の形状を測定できる装置である(図 3-14)。DAMは時速 1kmで押すことが出来、1cm間隔でデータを採取できる。仕様を表 3-3 に示す。まず、計測用車両のタイヤに水をつけ、DAMにおける計測線を確定した。その後、DAMを用いて、その計測線を測定した。



図 3-14 DAM を用いた路面形状計測状況

表 3-3 DAM 仕様

本体寸法	H299mm×W150mm×L746mm
本体重量	25kg ※ 組立時総重量 30kg
測定間隔	1 cm 毎
測定可能距離	2 km/ 1 回の試験
測定輪の計測範囲	+35-50mm
測定輪の分解能	0.01mm 以下
計測速度	時速 0.5～1.5km/h
計測可能勾配	± 9 0 度
F Type 搭載ジャイロの分解能	0.1 度以下
FType 搭載ジャイロの計測制度	± 1 度

左タイヤの軌跡を計測した結果が図 3-15 である。300m 付近を頂上とした山のような形状であることが分かる。スタートから 70m の新設舗装付近をみると、急激な突起状の凹凸はなく、なだらかなのであるが、図 3-13 で取り上げた舗装の悪い部分には急激な突起状の凹凸や、細かい凹凸がある。

続いて、DAM で路面形状を計測した同じ箇所を車両で計測した。加速度計は前章の計測システムの開発の際に決定した左後ろばね上に設置している。

計測車両での応答を図に示す。図 3-16 の横軸が距離となっているが、距離への変換方法は次節で説明する。応答を見ると所々で大きな衝撃応答が見られ、最大で 4100gal ほどの衝撃応答となっている。新設舗装付近ではあまり大きな応答が見られないが、図 3-13 で取り上げた舗装の悪い部分では、急激に高い加速度を示しているのがわかる。そのような応答が図 3-13 で取り上げた箇所以外にもあり、それ以外でも舗装の悪いところがあることが伺える。ちなみに、車の速度は、図 3-17 のようにほぼ 60km/h 一定であった。

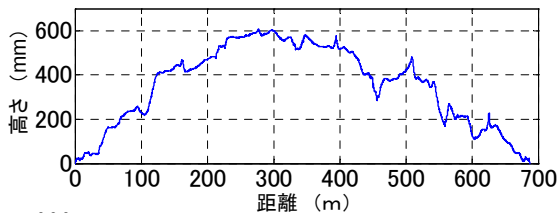


図 3-15 DAM による路面形状

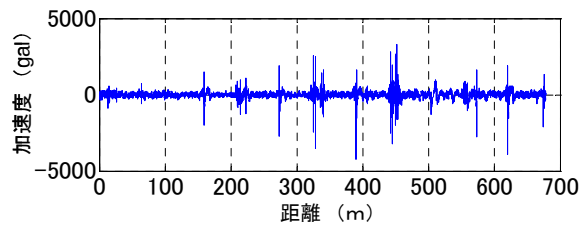


図 3-16 車両応答

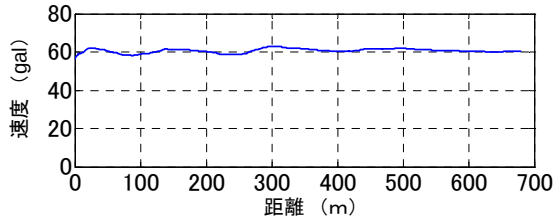


図 3-17 速度

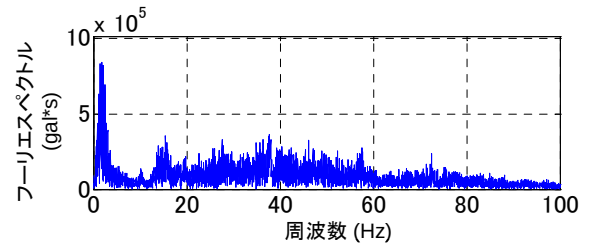


図 3-18 フーリエスペクトル

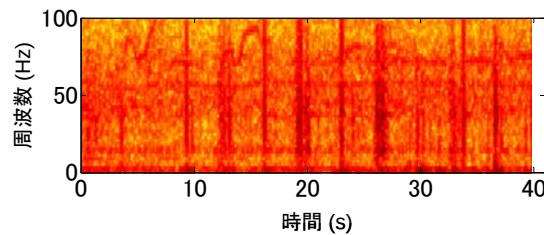


図 3-19 短時間フーリエスペクトル

DAM による形状と車両応答を照らし合わせてみる。DAM による形状の 160m 付近、280m 付近、390m 付近、630 付近の凸形状に、車両は急激な加速度を受けていることがわかる。

計測区間内でのフーリエスペクトルを図 3-18 に示す。100Hz 以上には目立ったピークがないため、100Hz までを表示している。まず、2Hz 付近にはばね上の固有振動数があり、10Hz 付近にはばね下の固有振動数があることが、前節の自由振動試験結果からわかる。それ以外の卓越した振動数はフーリエスペクトルからはわからないため、非定常スペクトル（短時間フーリエスペクトル）を示した。図 3-19 で、色が濃いほどスペクトルの大きさが大きいことを示している。まず、急激な加速度の応答のある時間では、20Hz~100Hz 付近の幅広い周波数領域にピークが出ていることがわかる。これは、インパルス応答のフーリエスペクトルが全周波数領域に一様に分布するのと同じように、急激な応答であるため、周波数領域が広がっていると考えられる。また、その応答が出ると、そのすぐ直後に、ばね上の自由振動が卓越しているのがわかる。これは急激な段差を乗り越えたときに起こる、車体のゆれから来るものであると考えられる。70Hz 付近から 80Hz 付近を時間軸上に波打つように、変化している振動は、図 3-17 の加減速と比較して挙動が一致することから、エンジンによる振動であると考えられる。エンジンによる振動はフィルター

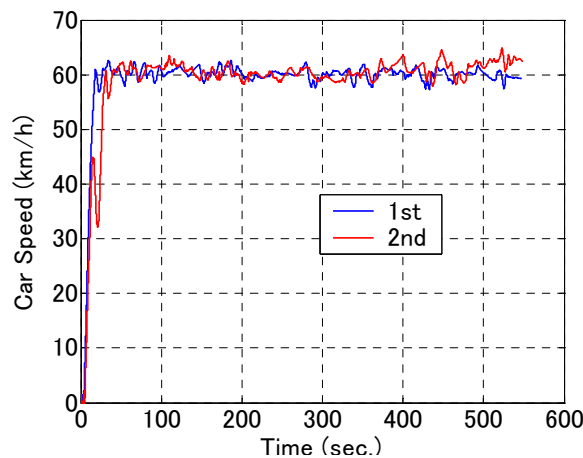


図 3-20 60km/h を目標としたときの同日同路線での車両速度

により取り除くべきであるが、凸形状を超えるときの加速度応答を小さくしてしまう。エンジンによる振動はアイドリング時で 20gal 程度であり、急な加減速のない等速の場合、非定常スペクトルのスペクトルが大きくないことから、エンジンによる加速度応答はアイドリング時と同程度の大きさであると考えられる。そのため、凸形状を超えるときの加速度応答を優先させ、フィルターはピークのない 100Hz とした。

3.3 データの再現性

3.3.1 距離の再現性

2.1 で開発した集録システムにより、それぞれのデータは時間軸上で出力される。しかし、道路上を走行する際に、速度がいつでも同じで、同じ時間上に同じ箇所の応答が得られるとは限らない。図 3-20 はその例として、首都高速 7 号小松川線下りの錦糸町入口から篠崎合流ノーズまでを同日に計測したときの車速を表している。この図を見ると、スタートしてすぐに、速度が異なり、その後も加減速のタイミングが異なっているというのがわかる。

経年変化を見ていくためには、時間のずれを考慮し、同じ軸上にデータを持ってくる必要がある。そこで、GPS データの中の車両速度データを用いて、加速度データの時間軸から距離軸への変換を行うことを考える。この車両速度データは車速パルスから取れるものであり、GPS 衛星から得られる速度より信頼できるものである。加速度データが変換出来れば音圧データも同様に変換できる。まず、GPS データと加速度データではサンプリング周波数が異なるため、GPS データに対し線形補間を行い、加速度データと同じサンプリング周波数とする。その後、サンプリング周波数 1,000Hz の速度データを、台形公式

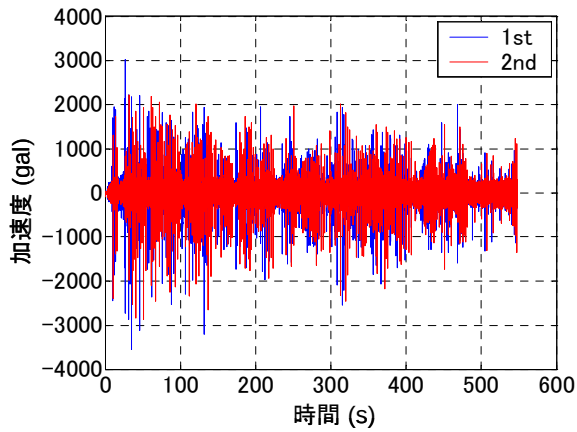


図 3-21 同日同路線の加速度（時間軸）

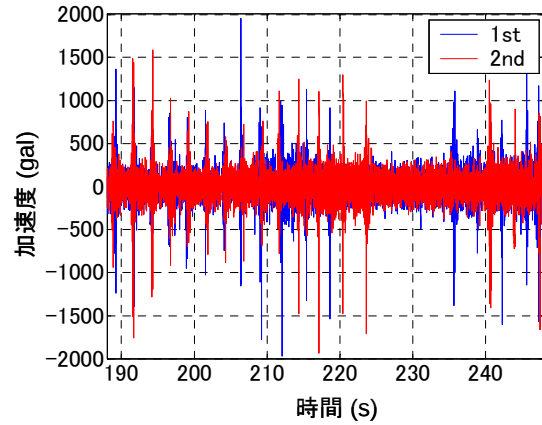


図 3-22 同日同路線の加速度（時間軸，拡大）

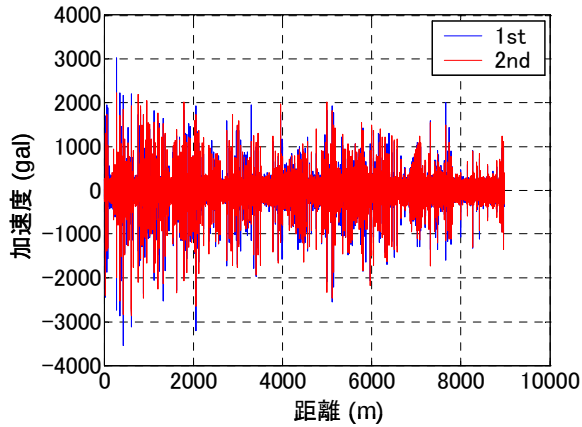


図 3-23 同日同路線の加速度応答（距離軸）

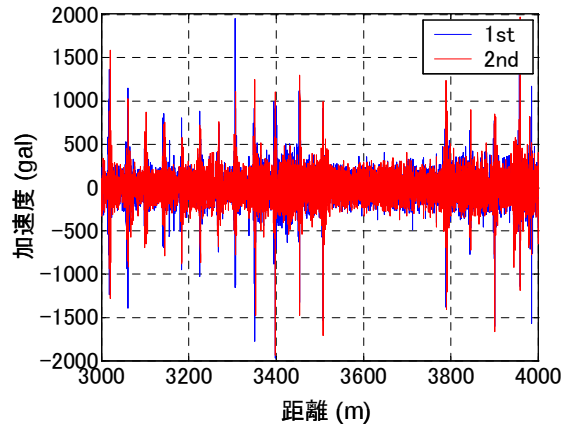


図 3-24 同日同路線の加速度（距離軸，拡大）

$$d_{i+1} = \frac{(v_i + v_{i+1}) \times sf}{2} + d_i \quad (3.1)$$

ここで、 d : スタート位置からの距離 (m)

v : 車両速度(m/s)

sf : サンプル周波数(Hz)

を用いて距離データに直す。

時間軸上に加速度データをプロットすると図 3-21 のようになり、1 回目と 2 回目ですれているのがわかる。拡大してみると（図 3-22）、220 秒付近では 5.0 秒分のずれがあることが分かる。

これを台形公式により距離軸に変換すると、図 3-23、図 3-24 のようになり、1 回目、2 回目のデータがほぼ一致し、再現性が取れていることがわかる。

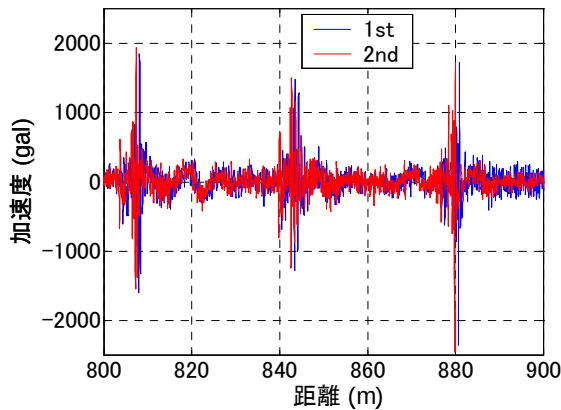


図 3-25 加速度応答（距離軸，100m スケール）

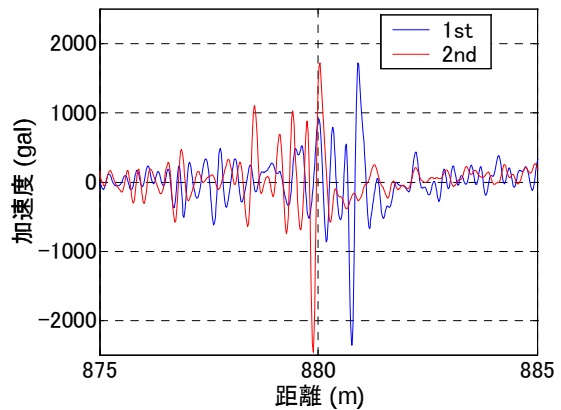


図 3-26 加速度応答（距離軸，10m スケール）

しかし、さらに拡大すると、図 3-25、図 3-26 のように、0.9m 分のずれがあることがわかり、2 回の波形で最大 1.5m 分のずれがあった。このずれの原因としては車両の速度が小数第 1 位までしか集録できないのが大きな原因と考えられる。時速 60km の場合、速度が 0.1km/h ずれると距離にして 0.17m のずれが生じる。そのため、複数の計測データを使用する場合はずれを考慮して計算する必要がある。

3.3.2 車両応答の再現性

舗装路面・伸縮装置の状態を車両の応答から求める場合、その応答が舗装路面・伸縮装置の状態を表している必要がある。加速度データに再現性がない場合、応答は道路走行に関係のない車両そのものの振動が原因であることが考えられる。また音圧データに再現性がない場合、応答は車両の騒音、同じ道路を併走する他車両による騒音が原因であることが考えられる。逆に、再現性が認められれば、応答は舗装路面・伸縮装置の状態を反映しているといえる。

(1) 加速度応答の再現性

そこで、同日同路線の加速度データに対し、1 回目走行時、2 回目走行時での再現性を確認した。図は 3.1.1 のように時間軸上の加速度データを距離軸上の加速度データに直し、1 回目走行時、2 回目走行時での応答をプロットしたものである。再現性がわかりやすくなるよう、距離のずれを修正し、1 回目と 2 回目の応答をあわせている。

図 3-39 は伸縮装置部とその周辺部の応答を示している。舗装部において、高周波数成分の再現性は確認しがたいが、2 回のデータの波形はほぼ重なり合っており、再現性が確認できるといえる。高周波数成分の再現性が低いのは、車両の走行速度の違いにより位相がずれていること、タイヤが通っている線がずれ、波長の短い路面凹凸が異なることが原因として挙げられる。図 3-40 は伸縮装置部の応答を拡大したものを示している。こちらも 2 回のデータの波形がほぼ重なり合っており、再現性が確認できる。パワースペクトルを比較しても両者はほぼ同じ周波数で卓越し

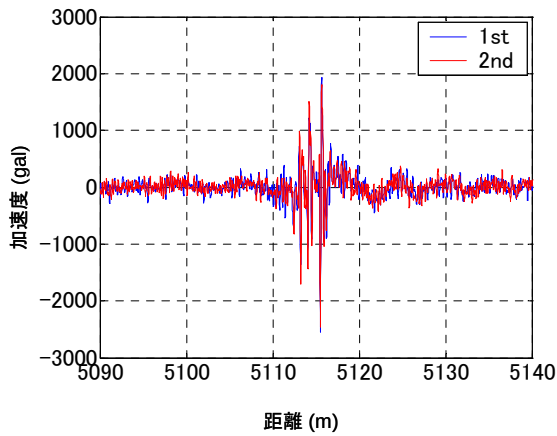
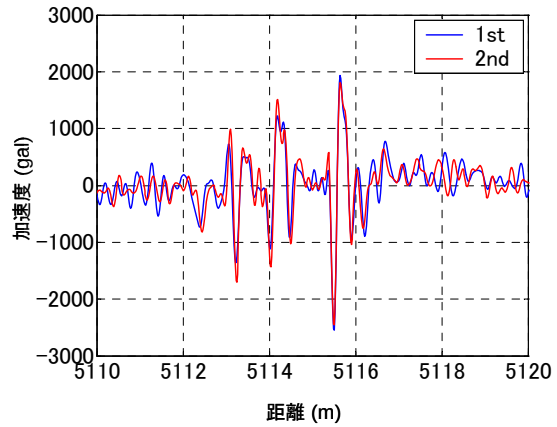


図 3-27 加速度応答（50m，距離修正）



3-28 加速度応答（10m，距離修正）

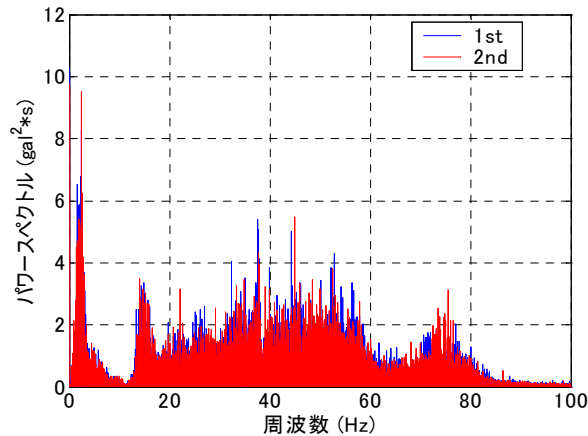


図 3-29 加速度応答パワースペクトル

ており，再現性があるといえる．2 回分の加速度波形に対し，伸縮装置部，舗装部での応答に対して加速度 RMS を計算し，2 回の加速度 RMS の差を平均値で割ることで，再現性を定量的に求めた．波形の特徴から伸縮装置部はピーク値から±3m とし，舗装部はそれ以外の部分とした．データ数は伸縮装置部が 195 箇所，舗装部が 194 箇所である．その結果，2 回の加速度 RMS の差は，伸縮装置部に対しては平均 10.6%，舗装部に対しては平均 9.9% となり，大体の再現性があることを確認できた．

（2）音圧応答の再現性

音は車の風きり音や暗騒音が影響するため，再現性の低いものであると考えられる．本システムにおいて検討するのは伸縮装置部の異常音であるため，伸縮装置部について，ある程度の再現性が認められればよいことにした．

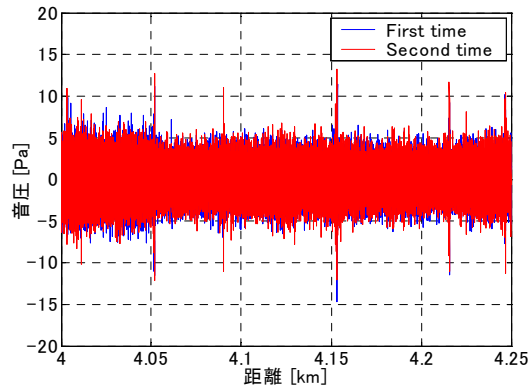


図 3-30 同日同路線での音圧波形

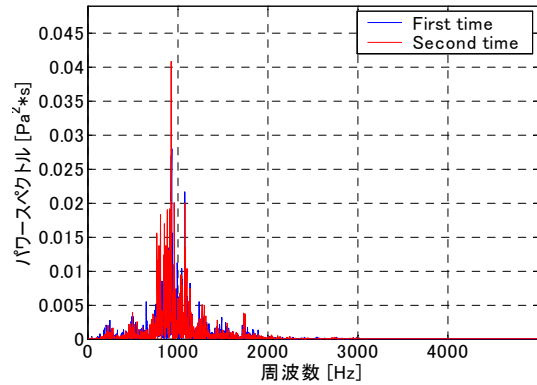


図 3-31 同日同路線での音圧 PSD

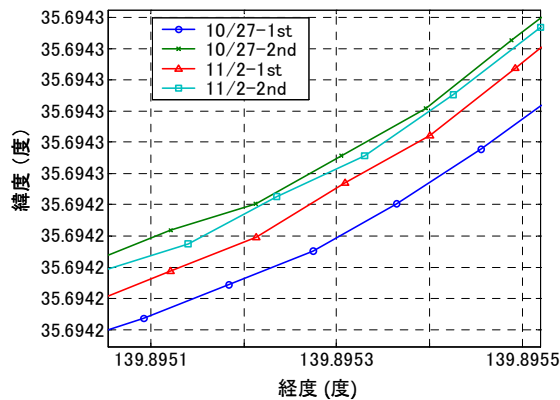


図 3-32 GPS 位置カーブ部 (一之江付近)

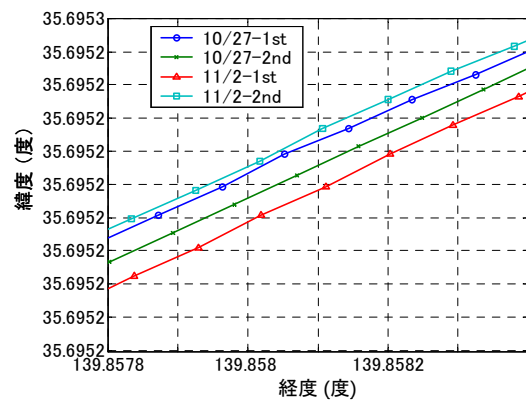


図 3-33 GPS 位置直線部 (小松川斜張橋付近)

加速度データと同様に、同日同路線での応答を図に示す。音圧データの処理方法は第 4 章で詳しく述べるが、音圧波形において、衝撃的な応答が出ているのが伸縮装置部での応答である。2 回の結果を比較すると、どちらも伸縮装置部において衝撃的な応答が認められ、再現性があるといえる。また、伸縮装置部における応答に対しパワースペクトルを求めた結果を、図に示す。この伸縮装置は金属音がするものではない。伸縮装置部でのパワースペクトルは 2 回分とも 1,000Hz 付近に卓越しており、再現性があると考えられる。

3.3.3 GPS 位置データの再現性

地図により、異常箇所等の応答を知りたい場合、GPS の位置データ（緯度・経度）は不可欠である。また、同じ箇所の応答の経年変化を見たい場合、GPS の位置データの精度が悪ければ、それを知ることは困難となる。そこで、GPS の位置データに再現性があるか、また、どの程度の精度があるかを確認した。図は同路線で 4 回測定した時の車両の軌跡を、GPS の緯度・経度から描

いたものである。カーブ部、直線部の精度の悪いところを選んでプロットした。カーブ部は首都高速7号小松川線下りの一之江を越えた後のカーブ部分で、急カーブであり、両側に遮音壁が設置してあるため、見通しがよくない。直線部は小松川斜張橋付近である。

4 回分のデータは同じライン上にプロットされておらず、差の大きい箇所について緯度、経度の関係を用いてずれの長さを算出したところ、カーブ部分では2.12mのずれ、直線部分では5.54mのずれがあった。首都高速道路株式会社では伸縮装置間の舗装を1単位として管理している。伸縮装置間の長さの平均は30mであり、それを基準とするならば、5m程度のズレは許容範囲となる。また、実際に本システムが運用されることを考えると、異常箇所を見て現場に調査に行くことが想像される。その際、本当に以上があった場合、5mのずれで異常箇所がわからないということは考えにくい。そのため、本システムではこの量を許容範囲とする。精度をさらにあげたい場合には、高精度GPSの活用などを考える必要があるが、AQLOC（三菱電機株式会社）のような高精度GPSは非常に高価であり、本システムの必要条件である経済性を満たしていないため、高精度GPSは用いないとする。

3.4 まとめ

本章では計測システムを用いて、車両の固有振動数を求め、一般道での応答特性を把握し、応答の再現性を確認した。車両の固有振動数は一般的な固有振動数であった。また、車両は段差のような凸形状に対し、衝撃的な応答をすることが確認でき、車両の応答を周波数領域により考察した。再現性は加速度応答、音圧について確認できた。距離、GPSについては、ずれが多少あるものの、実用的レベルであるといえる。

参考文献

- 1) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版
- 2) Transportation Research Board：Calibration of Response-type Roughness Measuring System, NCHRP Report 228
- 3) 谷口修編：振動工学ハンドブック，養賢堂，第25章，1998.2
- 4) 独立行政法人土木研究所，財団法人日本橋梁建設協会：延長床版効果確認試験報告書，2002.12

第4章 車両の動的応答から点検指標となる値の導出

4.1 概説

本章では車両の動的応答から点検指標となる値の導出を検討する．検討した点検項目は舗装に関しては IRI，平坦性，わだち掘れ，ポットホールであり，伸縮装置に関しては段差，異常音である．

4.2 IRI の導出

前述のとおり，IRI は路面形状を特定の機器を用いて測り，それをクォーターカーモデルに入力として与え，その応答から求めているのが現状である．それでは路面形状を測定するのに，時間とコストがかかってしまう．より簡便にするため，ここでは本研究で用いる車両から直接，IRI を求めることを考える．

実際の車両から IRI を求める方法には，図 4-1 の黒色の矢印で示すように，車両の伝達関数を介して車両の応答加速度から路面形状を求め，その路面形状をクォーターカーモデルでシミュレーションし，数式により求める方法が考えられる．しかし，その方法は長い距離では数値積分に時間がかかってしまい，有用であるとはいえない．本研究では，図 4-1 の赤色の矢印に示すように計測車加速度から直接，IRI を近似式により導出する．この近似式を求めるには，計測車両の加速度と IRI の関係について調べる必要がある．この計測車両の加速度と IRI の関係を求める前に，まずは数値シミュレーションによって，クォーターカーモデルの加速度 RMS と IRI の関係を調べる．クォーターカーモデルの加速度 RMS と IRI に相関があれば，計測車両の加速度 RMS と IRI に相関がなくても，フィルター処理によりクォーターカーモデルの加速度 RMS を近似できるためである．

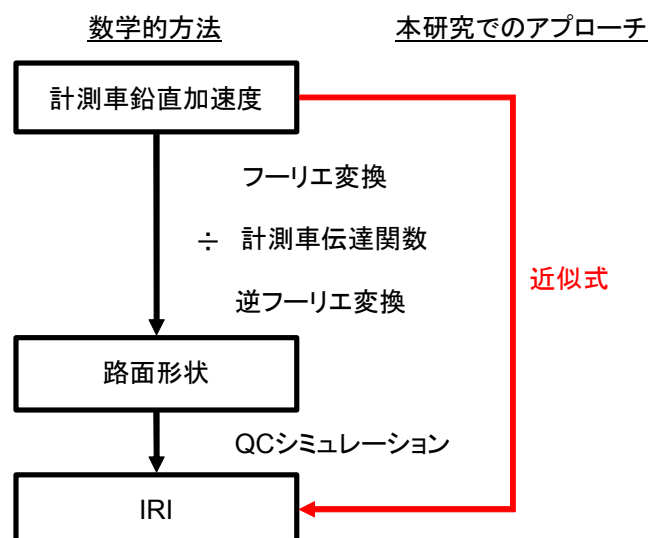


図 4-1 本研究における IRI 導出の流れ

4.2.1 クォーターカーモデルの加速度から IRI の導出

(1) クォーターカーモデルについて

クォーターカーモデルは図 1-4 に示したとおり、ばね上質量とばね下質量を分離させた 2 自由度のモデルである。路面形状を $h = h(t)$ とおくと、運動方程式は、マトリクス形で、以下のよう
に書くことが出来る。路面形状はいわば強制変位であるため、外力はばね下のばねのばね定数（タイヤのばね定数）に直接効くような形となる。

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_s \\ \ddot{z}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_s \\ z_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ k_t h(t) \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

ここで、 m_s ：ばね上質量、 m_u ：ばね下質量、 c_s ：サスペンションの減衰係数、 k_s ：懸架ばねのばね定数、 k_t ：タイヤのばね定数、 z_s ：ばね上の鉛直絶対変位、 z_u ：ばね下の鉛直絶対変位

これらのパラメータの値は (4.8) 式のように設定されている。IRI を指標とする際に、一般的な車両の特性を表し、かつ、最も再現性が高いモデルとして検討した結果、このような値となっている。

$$\frac{m_u}{m_s} = 0.15, \frac{c_s}{m_s} = 6, \frac{k_s}{m_s} = 63.3, \frac{k_t}{m_s} = 653 \quad (4.2)$$

このモデルの振動特性を把握するため、モード解析を行った。その結果、固有円振動数は、

$$\omega_1 = 7.59(\text{rad/s}), \omega_2 = 69.1(\text{rad/s}) \quad (4.3)$$

固有振動数は

$$f_1 = 1.21(\text{Hz}), f_2 = 11.0(\text{Hz}) \quad (4.4)$$

固有振動モードはばね上を 1 とすると、

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.0895 \end{Bmatrix}, \phi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -74.5 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

となる。1.21Hz の振動はばね上の振動が卓越するモード、11.0Hz の振動はばね下の振動が卓越するモードとなっている。また、各モードの減衰比は

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{\phi_1^T \mathbf{C} \phi_1}{2M_1 \omega_1} = 0.327 \\ \xi_2 &= \frac{\phi_2^T \mathbf{C} \phi_2}{2M_2 \omega_2} = 0.297 \end{aligned} \quad (4.6)$$

となり、土木構造物と比較すると非常に大きい値である。

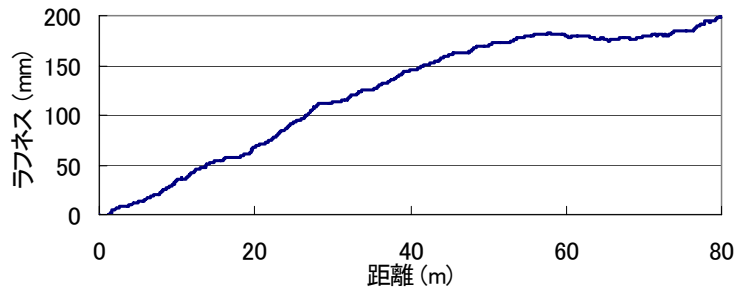


図 4-2 実際の路面形状データ

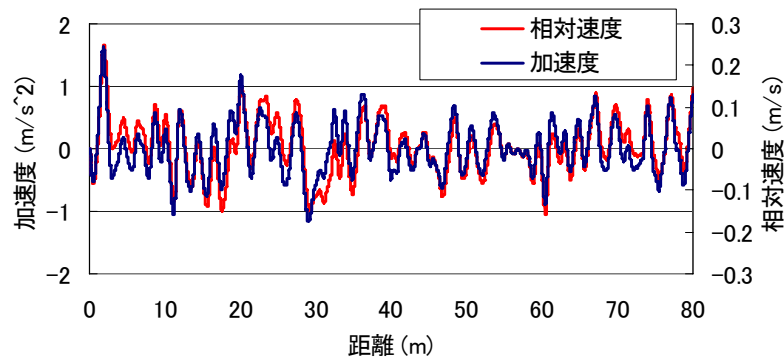


図 4-3 車両応答

(2) クォーターカーモデルにおける加速度 RMS と IRI の関係

加速度 RMS と IRI の関係を調べる．加速度 RMS と IRI の定義式

$$\text{加速度 RMS : } RMS = \sqrt{\sum_{t=0}^{L/V} \{\ddot{z}_s(t)\}^2} \quad (4.7)$$

$$\text{IRI : } IRI = \left\{ \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \right\} / L \quad (4.8)$$

が示すように，加速度 RMS はばね上の加速度を対象とし，1つの距離区間において，加速度の振幅の平均値を表す．一方，IRI はロードメータの応答にあうような式として開発され，1つの距離区間において，ばね上質量とばね下質量の相対変位の累積を表す．ばね上質量ばね下質量の相対速度はばね上のパラメータに大きく依存すると考えられるため，それを用いた指標はばね上の加速度を用いた指標と相関が高いと予想される．

数値シミュレーションにより，加速度 RMS と IRI の相関を調べる．図 4-2 のような実際の路面形状のデータをクォーターカーモデルに入力し，数値時間積分（Newmak β 法， $\beta=1/4$ ）により，その応答を求め，加速度 RMS と IRI を求めた．速度は IRI を求めるときに使用される 80km/h とした．図 4-2 の路面形状から算出した相対速度とばね上加速度が図 4-3 となる．両者の波形の

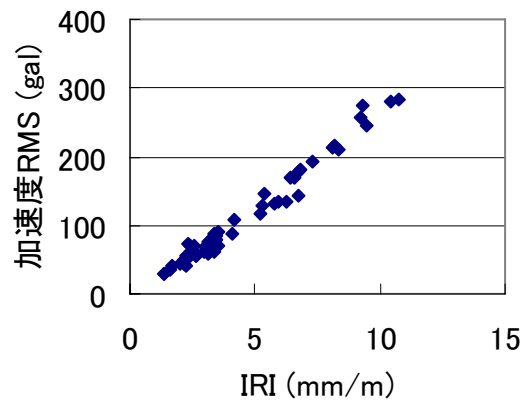
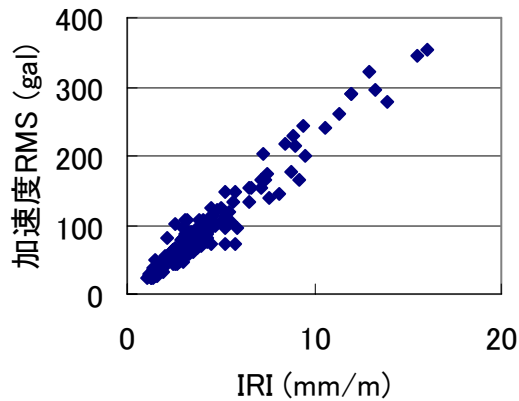


図 4-4 IRI－加速度 RMS 関係（10m ごと） 図 4-5 IRI－加速度 RMS 関係（30m ごと）

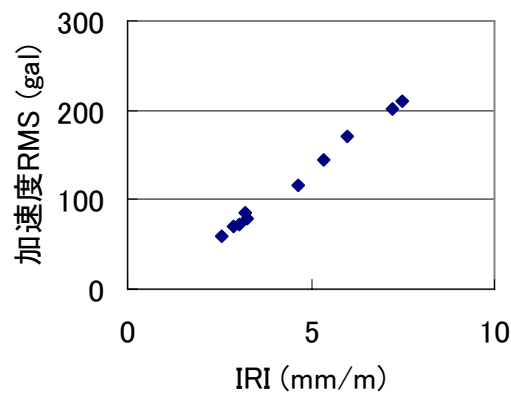


図 4-6 IRI－加速度 RMS 関係（160m ごと）

形状は非常によく似ている。

局所的な応答である 10m ごと、首都高速小松川線の伸縮装置間（首都高速道路の管理単位）を想定した 30m ごと、IRI の一般的な評価区間である 160m ごとに IRI と加速度 RMS の関係を求めたものを図 4-4～図 4-6 に示す。プロット数は用意できたデータの長さの関係上、10m ごとが 182 個、30m ごとが 58 個、160m ごとが 10 個となっている。

10m ごとの IRI と加速度 RMS の相関係数は 0.982、30m ごとの IRI と加速度 RMS の相関係数は 0.988、160m ごとの相関係数は 0.997 と非常に高い相関を示していることがわかる。このことから、段差のような局所的な応答でも、波長の長い凹凸による応答でも加速度 RMS から IRI が求められるといえる。区間の長い方が相関係数が高い理由は、区間が長いと、相対速度と加速度の局所的なずれを、全体で平均化することにより小さくしているためである。

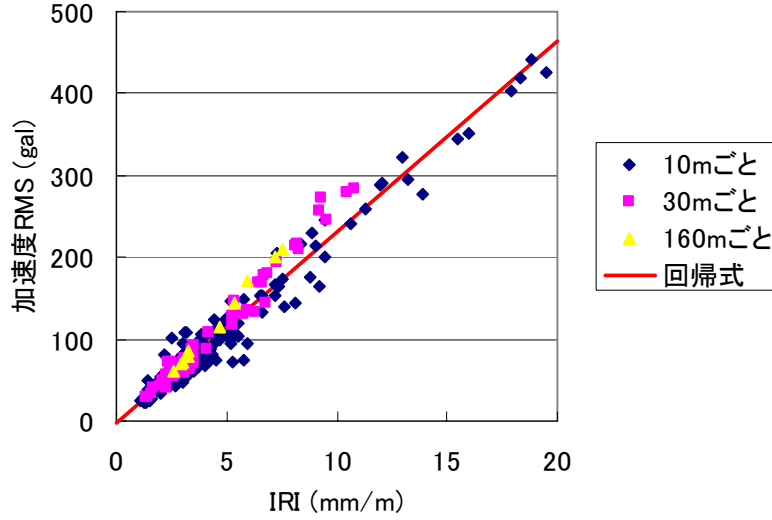


図 4-7 IRI－加速度 RMS 関係

各評価区間について，解析結果を 1 つの図にまとめたのが図 4-7 である．この結果から回帰式は評価区間の長さによらず一定と出来るといえる，これより，近似式は，

$$IRI = 0.0429 \times RMS + 0.0618 \quad (4.9)$$

ここで，IRI : IRI(mm/m)，RMS : クォーターカーモデルの加速度 RMS (gal) と書ける．

(3) クォーターカーモデルにおけるばね上質量，ばね下質量の相対速度とばね上の加速度の相関性に対する考察

IRI とか速度 RMS に相関があるのは図 4-4 において，ばね上質量，ばね下質量の相対速度とばね上加速度の波形形状が似ていることが原因であると考えられる．そこで，クォーターカーモデルに対し，ばね上質量，ばね下質量の相対速度とばね上の加速度には相関があることを理論的により示すため，周波数応答関数を考える．

(4.7)式に対し，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix}, \mathbf{P} = \begin{Bmatrix} 0 \\ k_t \end{Bmatrix}, \mathbf{z} = \begin{Bmatrix} z_s \\ z_u \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

とおき，路面形状を周期関数 $h = e^{i\omega t}$ とおくと，

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{P}e^{i\omega t} \quad (4.11)$$

$\mathbf{z} = \mathbf{H}e^{i\omega t}$ において①に代入すると，周波数応答関数 $\mathbf{H}$ が求まる．

$$\mathbf{H} = \left(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K} \right)^{-1} \cdot \mathbf{P} \quad (4.12)$$

これは，路面形状に対する鉛直変位の応答関数であり，路面形状に対する鉛直速度，鉛直加速度

の応答関数は,

$$\dot{\mathbf{z}} = i\omega \cdot \mathbf{H} e^{i\omega t} \quad (4.13)$$

$$\ddot{\mathbf{z}} = -\omega^2 \cdot \mathbf{H} e^{i\omega t} \quad (4.14)$$

より,

$$\dot{\mathbf{H}} = (-i\omega^3 \mathbf{M} - \omega^2 \mathbf{C} + i\omega \mathbf{K})^{-1} \cdot \mathbf{P} \quad (4.15)$$

$$\ddot{\mathbf{H}} = (\omega^4 \mathbf{M} - i\omega^3 \mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{K})^{-1} \cdot \mathbf{P} \quad (4.16)$$

となる.

(4.15)式, (4.16)式により, 相対速度の応答関数 $\mathbf{H}_{v_{re}}$, ばね上加速度の応答関数 $\mathbf{H}_{a_s}$ は,

$$\mathbf{H}_{v_{re}} = \frac{m_s k_t i \omega^3}{-m_s m_u \omega^4 + (m_s + m_u) c_s i \omega^3 + \{(m_s + m_u) k_s + m_s k_t\} \omega^2 - c_s k_t i \omega - k_s k_t} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{H}_{a_s} = \frac{k_t \omega^2 (k_s + c_s i \omega)}{-m_s m_u \omega^4 + (m_s + m_u) c_s i \omega^3 + \{(m_s + m_u) k_s + m_s k_t\} \omega^2 - c_s k_t i \omega - k_s k_t} \quad (4.18)$$

と書ける. IRI のパラメータを(4.17)式, (4.18)式に代入し, IRI を算出する際の実速度である 80km/h に対して, 空間周波数応答を求めると図 4-8 のようになり, 両者の形状は非常によく似ている. ばね下質量が大きく振動する 0.495cycles/m で最も卓越している.

これらの比は

$$\frac{\mathbf{H}_{a_s}}{\mathbf{H}_{v_{re}}} = \frac{k_s + c_s i \omega}{m_s i \omega} = -\frac{i k_s}{m_s \omega} + \frac{c_s}{m_s} \quad (4.19)$$

となり, ばね上のパラメータだけが残る形となる. ゲインは以下のとおり.

$$\left| \frac{\mathbf{H}_{a_s}}{\mathbf{H}_{v_{re}}} \right| = \sqrt{\left(\frac{k_s}{m_s \omega} \right)^2 + \left(\frac{c_s}{m_s} \right)^2} \quad (4.20)$$

(4.18) 式を代入し, IRI を求める際のクォーターカーモデルに関する応答比を求めると,

$$\frac{\mathbf{H}_{a_s}}{\mathbf{H}_{v_{re}}} = \frac{653 \omega^2 (63.3 + 6i\omega)}{653 i \omega^3} = \frac{63.3}{i \omega} + 6 \quad (4.21)$$

となる.

周波数と比の関係は反比例となり, 周波数が高くなると 6 に収束する. 周波数が高いほど, 相対速度と加速度は比例の関係にあることを示している. グラフに示すと図 4-9 のようになる. ばね上の加速度が大きく振動するモードの 5.45cycles/m (時間周波数 1.21Hz) に対しては, 比は 14.3 となり, ばね下の加速度が大きく振動するモードの 0.495cycles/m (時間周波数 11.0Hz) に

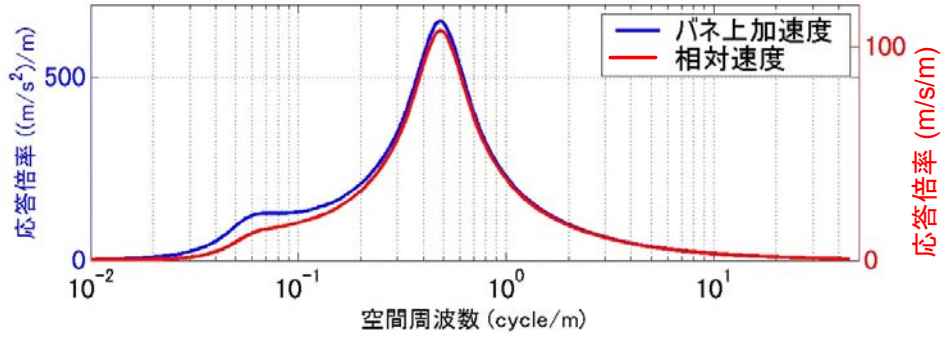


図 4-8 バネ上加速度と相対速度の周波数応答関数

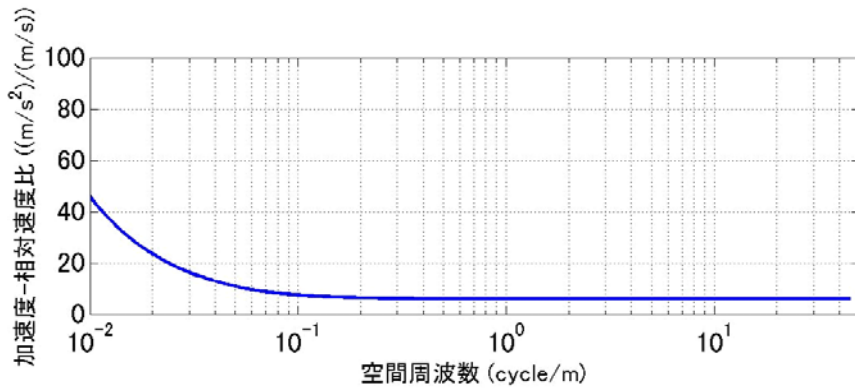


図 4-9 バネ上加速度と相対速度の周波数応答関数の比

対しては、比は 6.92 と、車両応答に大きく影響する周波数で比が一定に近くなる。そのため、加速度波形と相対速度波形が似てくると考えられる

(4.25) 式に対し、 $\frac{c_s}{m_s}, \frac{k_s}{m_s}, v$ (車両速度) をパラメータとして、空間周波数ごとに $\left| \frac{\mathbf{H}_{a_s}}{\mathbf{H}_{v_{re}}} \right|$ (応

答比) を求めると、図 4-10～図 4-12 のようになる。 $\left| \frac{\mathbf{H}_{a_s}}{\mathbf{H}_{v_{re}}} \right|$ が一定に近い周波数帯域が多いのは、

$\frac{k_s}{m_s}$ が小さく、 $\frac{c_s}{m_s}$ が大きく、 v が大きいときとなる。クォーターカーモデルのパラメータについて、 m_s, k_s は一般の車両特性から求められたものであるが、 c_s は一般の車両より大きな値、走行速度は 80km/h と高速である。その結果、応答比が一定となり、加速度波形と相対速度波形が似てくると言える。

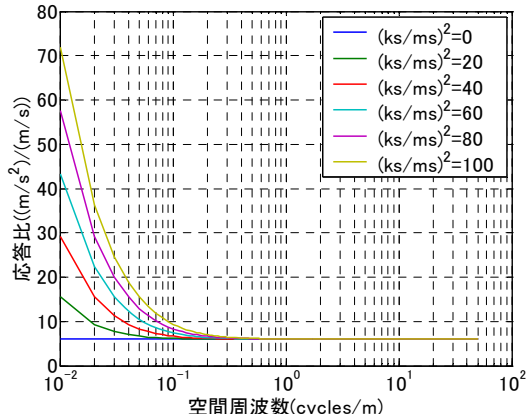


図 4-10 $\frac{k_s}{m_s}$ をパラメータとした時のゲイン

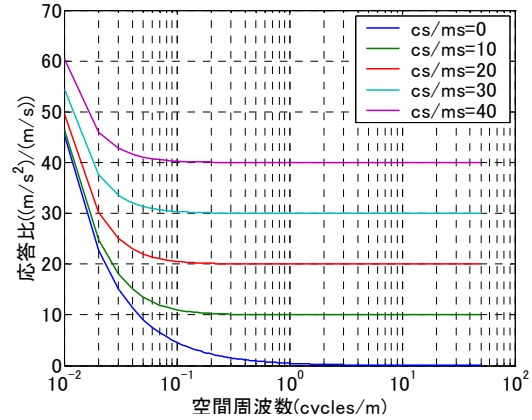


図 4-11 $\frac{c_s}{m_s}$ をパラメータとした時のゲイン

(IRI の場合, $\frac{k_s}{m_s} = 63.3$)

(IRI の場合, $\frac{c_s}{m_s} = 6$)

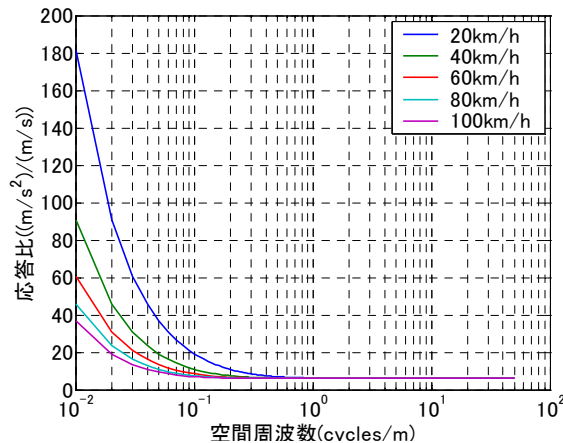


図 4-12 v をパラメータとした時のゲイン

(IRI の場合, $v = 80 \text{ km/h}$)

4.2.2 計測車両加速度と IRI の関係

計測車両の加速度と IRI を比較するため、3.2.3 において DAM で計測した路面形状により IRI を求め、また、その路面を走行したときの計測車の加速度 RMS を計算し、比較した。結果を図 4-13 に示す。IRI とクォーターカーモデルの加速度の関係と比較し、相関が低い（相関係数：0.44）ことが分かる。相関が低い原因はクォーターカーと計測車の違いによるものであるが、図 4-14 に示す、同路面上における両者のパワースペクトルを比較すると主に 3 つの原因に絞られる。まず、①固有振動数や減衰比などの車両振動特性が両者の間で違う。計測車に比べクォーターカーモデルは高周波数領域での大きなピークは見あたらない。また、②走行速度が違う。IRI を求めるた

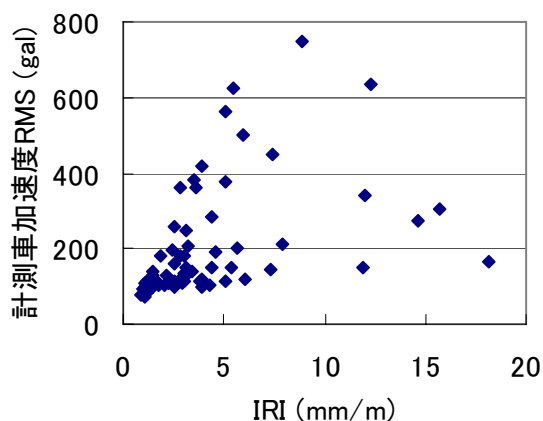


図 4-13 IRI と実測加速度 RMS の比較

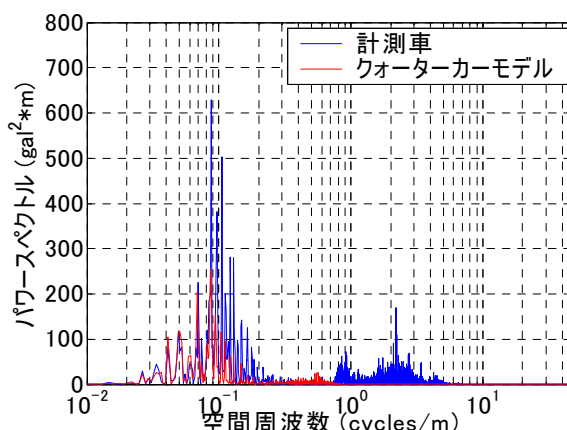


図 4-14 同路面上における計測車とクォーターカーモデルのばね上加速度パワースペクトル

めのクォーターカーモデルは 80km/h で走行しているが、計測車は 60km/h で走行している。そのため、クォーターカーモデルのほうがばね上振動によるピークが低振動数側にずれている形となっている。さらに、③振動モードが違う。クォーターカーモデルは 4 輪のうち、1 輪を取り出したモデルであるのに対し、計測車には 4 輪分の応答が現れる。そのため、振動モードが変化し、特にピッチングモードはクォーターカーモデルには現れないが計測車には現れる主要なモードである。ただし、ピッチングモードはバウンスモードと同じ周波数帯域にあるため、その違いは比較しがたい。その他、エンジン振動も考えられるが、後タイヤばね上に設置した加速度計ではエンジンによる振動は小さく、以上に上げた 3 つが主な原因と思われる。

計測車の加速度と IRI の相関関係が小さいため、近似式を立てることは難しい。そこで、何らかのフィルターを計測車に掛けることにより、計測車の加速度から IRI を求めることを考える。4.1.1 節において、クォーターカーモデルばね上の加速度 RMS と IRI に相関関係があることが分かっている。そのため、クォーターカーモデルの加速度を計測車の加速度から求めることができれば、IRI は求められる。以下では、図 4-15 のような方法で IRI を求める。

まず、計測車両の鉛直加速度をフーリエ変換し、路面形状から計測車両への伝達関数で割り、クォーターカーモデルの伝達関数を掛ける。これにより、クォーターカーモデルでの加速度応答をフーリエ変換したものが導出される。これに対し、逆フーリエ変換を行って加速度応答の距離軸データを導出し、近似式(4.9)により、IRI を導出する。このとき、クォーターカーモデルの伝達関数は既知のものであるが、計測車両の伝達関数は新たに求める必要がある。その方法について、次節に述べる。

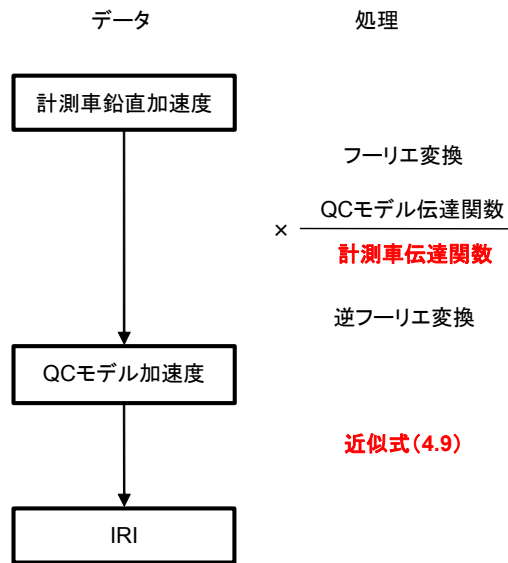


図 4-15 計測車加速度から IRI の導出方法

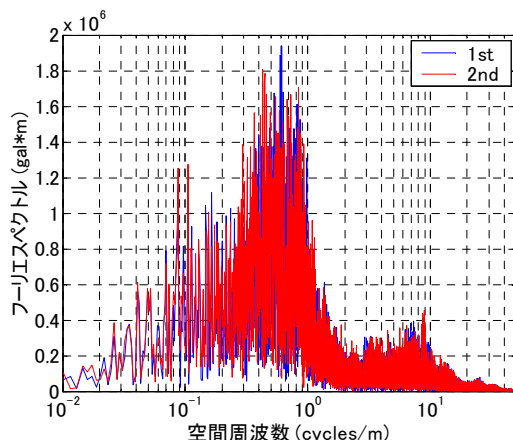


図 4-16 2 回分の加速度フーリエスペクトル

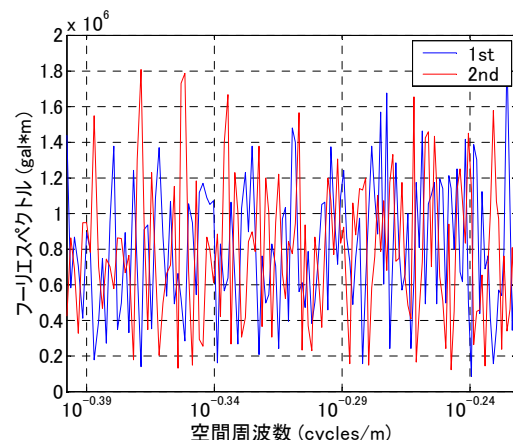


図 4-17 2 回分の加速度フーリエスペクトル
(拡大)

4.2.3 計測車両加速度からクォーターカーモデルでの加速度を求めるための伝達関数の導出

計測車両の加速度からクォーターカーモデルでの加速度を求めるため、3.2.3 で用いた DAM によって測定した路面形状と車両応答から、路面形状に対する車両応答の伝達関数を導出した。

同じ舗装を車両が複数回走行した場合、車両の応答がその回数ごとに違ってくると、車両応答のフーリエ変換が変わり、伝達関数も変わってくる。そこで、まず車両の応答に対して、計測回数ごとの再現性を詳細に確認することにした。

60km/h における、2 回分のフーリエスペクトルを図 4-16 に示す。低振動数領域では再現性が高いことが分かるが、クォーターカーモデルで応答の大きくなる 0.1cycles/m から 1 cycles/m に

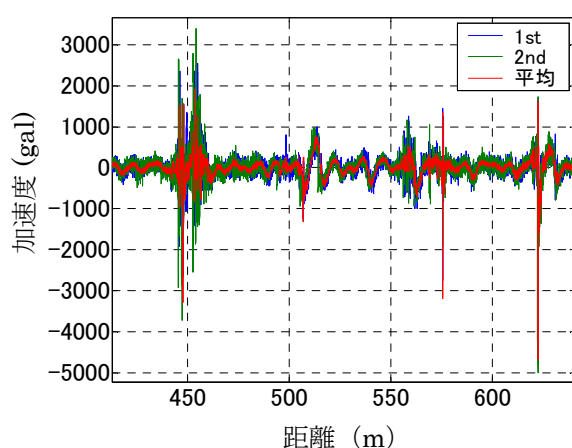


図 4-18 距離軸波形を平均化した波形（15 回分）

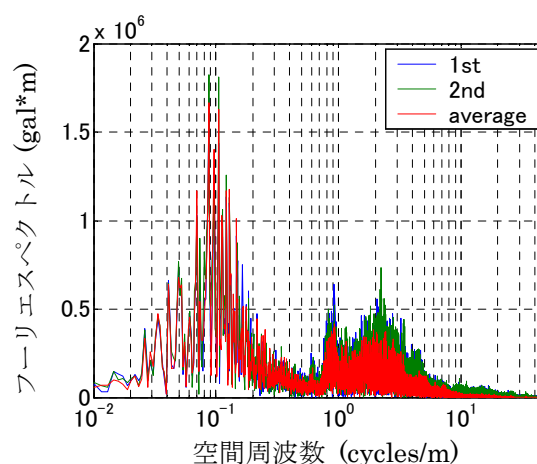


図 4-19 平均化波形のスペクトル

において拡大してみると図 4-17，再現性が低いことが分かる．これは，計測車が走行するラインが計測回ごとに違うことや，走行速度が全区間において一致しないことが高振動数に影響するためであると考えられる．

このずれを克服するため，15 回分の計測データを距離軸で合わせ，足し合わせて平均した．そのことにより計測回ごとの走行ラインのずれや，走行速度の影響をできるだけ小さくする．この方法は橋梁の衝撃加振試験において，観測波形を平均化することにより，雑音を除去する方法を参考としている¹⁾．距離軸で計測データを合わせる際，GPS の速度の精度により，回数ごとに距離軸がずれる．そのため，衝撃応答のある複数箇所でも一致させるよう工夫した．図 4-18 に距離軸の波形を平均化したグラフを示す．青色，緑色で示した 1 回分の波形に対し，赤色で示した平均化した波形は 470m～500m の平坦な路面において雑音を除去しているように見える．図 4-19 のスペクトルを見ても，再現性の高い低振動数領域は 1 回分と同程度の大きさであり，再現性の低い高振動数領域で応答を小さくしている．ここでは伝達関数を求めるのにこの波形を使うこととする．

この波形のフーリエ変換を路面形状のフーリエ変換で除したものが路面形状に対する車両応答の伝達関数となる．ここで DAM によって測定される路面形状は再現性が高いことから，DAM の 1 回の測定結果は真とし，伝達関数を求めた．その結果である，伝達関数のゲインと位相差を図 4-20，図 4-21 に示す．

ゲインを見ると周波数が卓越している箇所が 2 箇所見られる．0.2(cycles/m)付近に卓越しているのがばね上の固有振動数に対応するピーク，4.0(cycles/m)付近に卓越しているのがばね下の固有振動数に対応するピークである．クォーターカーモデルの伝達関数と比較すると多くの振動成分を含んでいるため，非常にぎざぎざした形状が多く，速度の違いによりピークが高い周波数成分にあることが分かる．位相差を見ても，計測車の伝達関数はぎざぎざ下形状が多い．

次節ではこの伝達関数を用いて車両加速度からクォーターカーモデルのばね上加速度を導出し，IRI を求める．

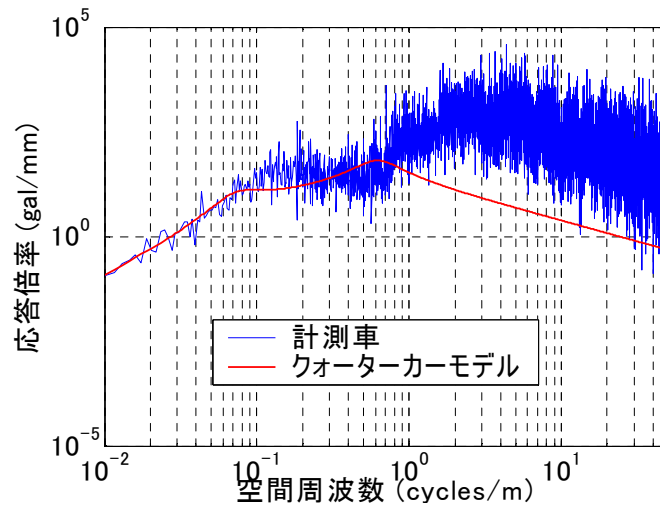


図 4-20 伝達関数ゲイン

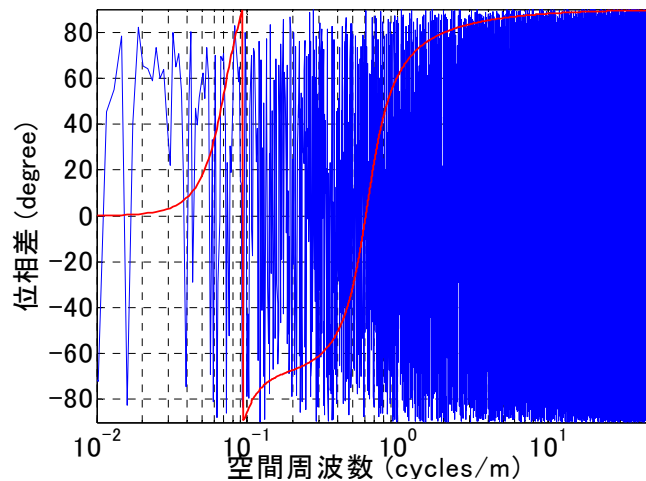


図 4-21 伝達関數位相差

4.2.4 計測車両加速度から IRI の導出

4.1.1 で求めたクォーターカーモデルの加速度 RMS-IRI 関係と 4.1.2 で求めた伝達関数から、直接、車両加速度から IRI を導出することができる。まず、伝達関数を用いて、計測車両の加速度からクォーターカーモデルでの加速度を求める。

図 4-15 で示したように、計測車両の加速度のフーリエ変換にクォーターカーモデルの伝達関数を掛け、計測車両の伝達関数で除し、逆フーリエ変換を行うことでクォーターカーモデルの加速度は求められる。その加速度が正しいかどうかを検証するため、伝達関数を求める際に使用したコースとは違う 230m のコースで、DAM を用いて路面形状（図 4-22）を計測し、車両走行を行

った。

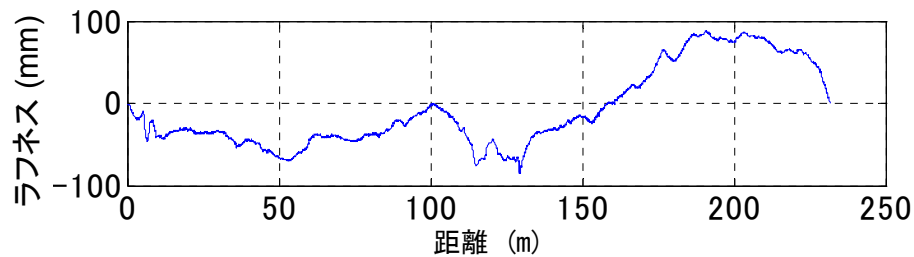


図 4-22 検証に用いた路面形状

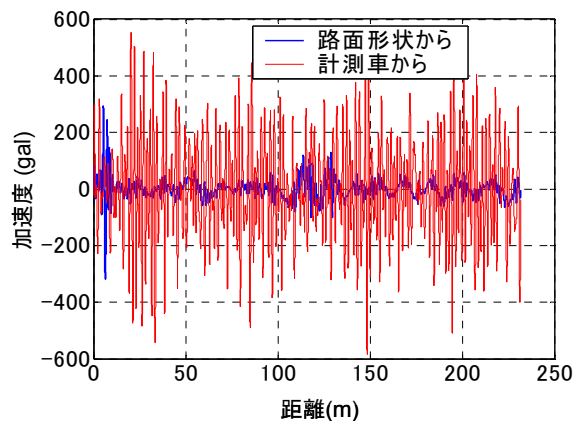


図 4-23 フィルター処理を行わない場合のクォーターカーモデル加速度波形

230m のコースで計測した車両加速度と伝達関数からクォーターカーモデルの加速度応答を求めたものとそのコースの路面形状をクォーターカーモデルに入力して加速度応答を求めたものとを比較する。路面形状で比較する方法も考えられるが、IRI はクォーターカーモデルの加速度 RMS と相関があるため、クォーターカーモデルの加速度で比較するのが妥当である。

クォーターカーモデルの加速度の導出方法は、図 4-15 が主であるが、4.1.3 節で求めた計測車の伝達関数は 688m の長さの路面に対するもので、ここでは 230m の長さの路面に対する伝達関数とはデータのサンプル数が違う。そこで、線形近似によりデータをダウンサンプリングすることによって、230m 用の伝達関数を求めた。クォーターカーモデルの伝達関数についても同様に処理を行った。雑音除去などを一切行っていない計測車の加速度を用いて、計測車の加速度からクォーターカーモデルの加速度を求めると、路面形状から求めたものと比較して、高振動数成分が卓越してしまう（図 4-23）。これは伝達関数を求める際に述べたように、計測車が走行するラインが計測回ごとに違うことや、走行速度が全区間において一致しないことが高振動数に影響するためであると考えられる。高振動数成分に対しては何らかの処理をする必要がある。

そこで、高振動数成分が卓越しないよう、パス周波数 0.1(cycles/m)のローパスフィルターを掛けて導出した。路面形状から求めたクォーターカーモデルの加速度と計測車から求めたクォータ

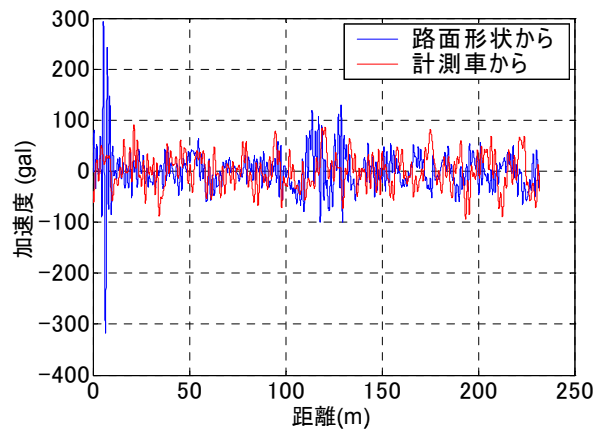


図 4-24 230m のコースにおけるクォーターカーモデルの加速度波形

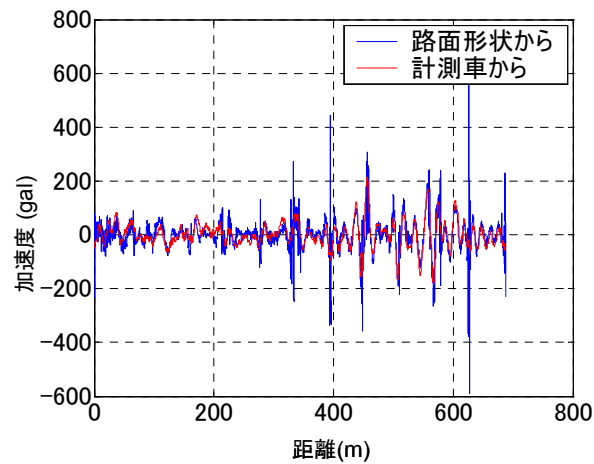


図 4-25 688m のコースにおけるクォーターカーモデルの加速度波形

一カーモデルの加速度波形を図 4-24 に示す。30m から 100m 付近は形状が類似しているように見える

が、それ以降は位相がずれているように見える。これは計測車の伝達関数を線形近似によってダウンサンプリングしたことにより、位相がうまく近似できていないためであると考えられる。データのサンプル数が同等の、680m のコースにおいて、同様にクォーターカーモデルの加速度を求めてみると（図 4-25）、よく再現できているのが分かる。本システムを通常の道路（高速道路、一般道）に適用する際、230m のように短い道路での適用は考えにくく、680m 以上の道路を対象に行うのが普通である。そのため、ダウンサンプリングによる再現性の低さについてはあまり考える必要がないといえる。

また、図 4-24、図 4-25 を見ると、両コースとも衝撃的な応答に対しては、うまく再現できていない。これはローパスフィルターを掛けたためであると考えられる。このローパスフィルター

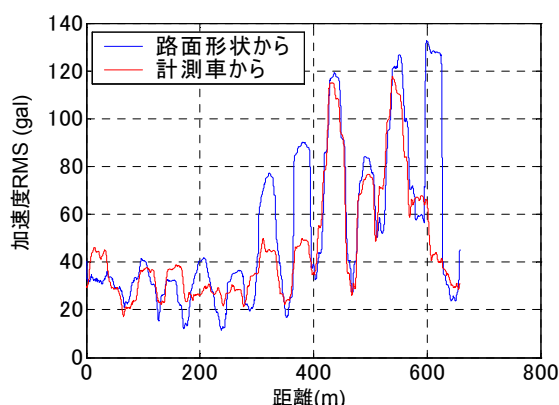


図 4-26 移動加速度 RMS (30m 単位)

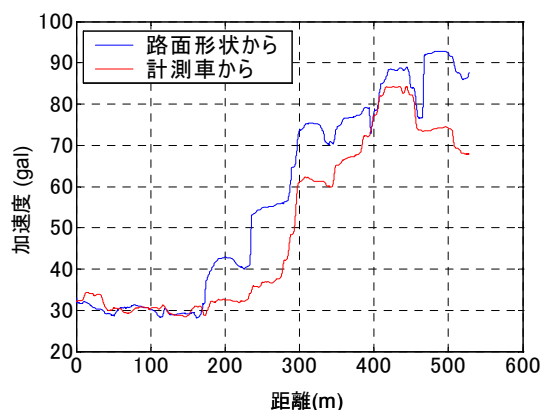


図 4-27 移動加速度 RMS (160m 単位)

はパス周波数が 0.1cycles/m であるため、クォーターカーモデルにおいて衝撃的な応答が出る 0.7cycles/m での応答を小さくしている。そのため、衝撃的な応答がほとんど出ないようにしている。パス周波数をこれ以上大きくすると、計測車の高振動数領域での再現性が低いことから、ノイズが載ってしまう。高振動数領域と低振動数領域のどちらを優先させるべきかという問題になるが、舗装に関して考えれば、衝撃的な応答のある舗装はごく一部であるため、低振動数領域を優先すべきであると考えられる。衝撃的な応答については IRI ではなく、段差量に関する指標とするなど他の指標で考えることとし、本研究で求める IRI は衝撃的な応答を考慮しないものとする。その際、QC モデルの加速度を用いるのではなく、計測車の加速度を用いて作られる指標であることが望ましい。

続いて、IRI とクォーターカーモデルの加速度 RMS に線形関係があるため、図 4-25 の波形に対し、伸縮装置間を考慮した 30m 区間、一般的な IRI の評価区間である 160m 区間で加速度 RMS を比較することにより、本システムの IRI 導出の妥当性を検討する。データ量を多くするため、この加速度 RMS は 1cm ごとの移動 RMS とした。つまり、30m 区間の場合、30m の大きさの窓を 1cm ごとに移動し、その都度 RMS を計算するといったものである。その結果を図 4-26 に示す。

評価区間が短いため、衝撃応答のある箇所両者を比較すると大きな差があることが分かる。数値的に比較するため、誤差を求める。誤差は以下の式から求める。

$$\text{誤差 (\%)} = \frac{\text{計測車からの加速度RMS} - \text{路面形状からの加速度RMS}}{\text{路面形状からの加速度RMS}} \times 100$$

全体の平均誤差は 24.7%、最大誤差は 141% と非常に大きい。が、衝撃応答の少ない区間、0～200 m と 400m から 600m の平均誤差 12.2% は、最大誤差 36.7% となり、傾向がつかめる程度の誤差である。

160m 単位の移動加速度 RMS は 30m と比べ、評価区間が長いため、小さな衝撃応答であればその影響は小さい (図 4-27)。全体の平均誤差は 12.9%、最大誤差は 34.6% と 30m に比べかなり小さくなっている。30m の場合と同様、衝撃応答のない区間、0～200m と 400m から 600m について誤差を求めると、平均誤差は 5.43%、最大誤差は 12.1% とおおよそその値が推定できる誤差と

なっている。

ここで求めたクォーターカーモデルの加速度と〇〇式により、IRI を求めることができる。

4.2.5 IRI のキャリブレーション

点検に使用できるようにするためには再現性の高いシステムにすべきではあるが、車両の応答はさまざまな因子に影響し、それが IRI にも影響する。世界銀行のレポート²⁾ではロードメータを用いた車両のキャリブレーションが述べられているが、ここでは、それを基に加速度計を用いた車両について考えていく。考えるべき因子としては、加速度計、車両の重量・ばね剛性・ショックアブソーバー、加速度計の設置箇所、走行速度、タイヤの空気圧、タイヤの変形、温度、水の影響が挙げられる。ここでは、再現性に最も影響の大きい、車両の走行速度が変化する場合の補正と車両の振動特性が変化する場合の補正について考える。

(1) 走行速度に対する補正

前節までは 60km/h の走行速度に対して、IRI を検討して来た。しかし、実際に本システムを運用する際、渋滞によって速度を下げざるを得なかったり、道路の制限速度により速度が制限されたりなど、速度への制約があると考えられる。ここでは、速度が 60km/h 以外の場合でも本システムで求める IRI が求められるかを検討する。方法としては 60km/h に対して伝達関数を求めた 680m のコースを用いて、60km/h 以外の速度に対する伝達関数を求め、それが正しければ速度の変化に対応できると言える。20km/h から 10km/h ごと 60km/h までの速度で 680m のコースを走行し、それぞれの伝達関数を求めた。伝達関数の導出方法は 1 回分の計測車の加速度データを用いて求めている。1 例として、20km/h、40km/h、60km/h での伝達関数を図 4-28 に示す。速度が上がると周波数の低い側に移動しているのがわかる。これは時間領域での車両の固有振動数が一定であることを考えれば理解できる。例えば 40km/h では 20km/h で共振した路面形状よりも波長の長い路面形状に共振するということである。

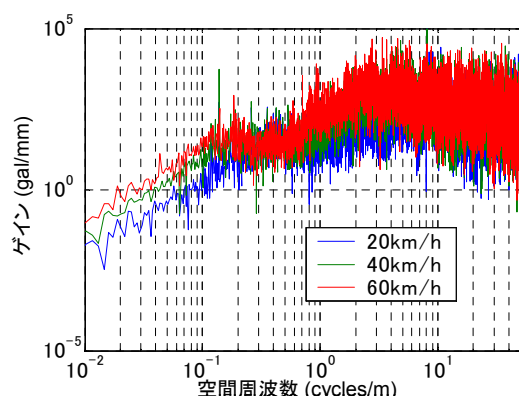


図 4-28 走行速度の違いによる
伝達関数の変化

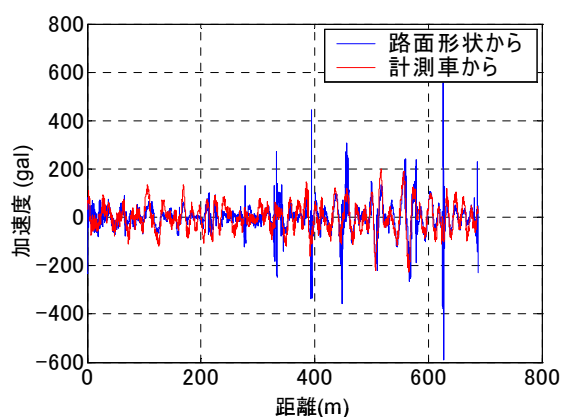


図 4-29 20km/h で走行した計測車
の加速度から求めたクォーターカー
モデルの加速度

各速度で求めた伝達関数を用いて、クォーターカーモデルの加速度を再現できれば、速度の違いを補正できる。20km/h~60km/h の伝達関数を用いたときのクォーターカーモデルの加速度を 4.1.4 節と同様に求めた。20km/h の結果を図 4-29 に示す。

図 4-25 の 60km/h での結果と比較すると、高振動数成分が少々多く見えるが、よく再現できていると言える。他の速度でも同様の結果が得られており、走行速度の違いによる補正は有効であるといえる。

(2) 車両の振動特性が変化する場合の補正

車両は車種によってばね定数や減衰定数が違い、振動特性が違ってくる。また、同じ車種でも経年劣化により、振動特性は変わっていく。IRI をいつでも同じように求めるためには車両の振動特性が変化する場合の補正を考える必要がある。

ここでは 1 つの方法を提案する。周波数領域による補正である。例えば、IRI を求めるのに A 車を使用していたが、何らかの理由で B 車に変更する場合を考える。道路線において、それぞれで加速度応答を計測し、A 車のフーリエ変換 F_A と B 車のフーリエ変換 F_B によりフィルター $f_{A/B}$ を作成する。B 者に変更した後は、そのフィルターを B 車で計測した加速度のフーリエ変換 F_B' に掛けることで A 車での応答と同等な応答とする。式で表せば以下のようなになる。

$$\begin{aligned} f_{A/B} &= F_A / F_B \\ F_A' &= f_{A/B} \cdot F_B' \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.2.6 評価区間の決定

IRI 導出の節の最後に、評価区間を決定しておく必要がある。IRI の値が評価区間によって変わってくるためである。

文献3)によると、IRI を算出するためのプロファイル長は 0.1mile (160m)が普通であるが、段差を求めるような局所的に IRI を利用する際には標準の長さを定めるべきであるとされている。段差がある場合、評価区間が短いと IRI は大きくなり、長いと IRI は段差の影響を受けにくく、小さくなるためである。前節までに本システムで求める IRI は段差のような衝撃的な影響を考慮できないとしている。そのため、評価区間はあまり問題とならず、管理側で評価区間が定められている場合はそれに従い、それ以外では 160m とする。

4.3 平坦性の導出

道路利用者の乗り心地に特化した平坦性の指標である IRI に対し、路面性状測定車によって測定される平坦性は道路管理者側の視点に立った指標であり、現在使用されているものである。今後、平坦性を表す指標が IRI のみになり、現行の平坦性がすぐになくなるとは考えにくい。よって、この指標も管理上必要なものとなる。路面性状測定車によって測定された平坦性が加速度応答と関係があることを示すため、両者を比較することにした。

車両の挙動は舗装の縦断方向の凹凸に影響するため、平坦性と加速度応答の関係は相関関係にあると考えられる。ここでは、まず、加速度応答と路面形状の標準偏差の間に相関があるかをクォーターカーモデルにより検討し、その後、ある舗装に対し、実際の車両の応答と路面性状測定車で測定された平坦性とを比較する。

路面性状測定車によって平坦性を求める場合、レーザー変位計で得られたデータから凹凸量の標準偏差を算出して路面の平坦性として評価している。平坦性を求める場合、読み取り間隔が重要となるが、読み取り間隔は 1.5m としている。これは読み取り間隔が 1.5m の平坦性であれば、それ以下の間隔で求めた平坦性との間に制度の面で大差ないとしているためである⁴⁾。凹凸量 H は 1.5m ピッチで取り付けられた、3 個のレーザー変位計より、 h_1, h_2, h_3 を同時測定し、以下の式により求められる。

$$H = \frac{(h_1 + h_3)}{2} - h_2 \quad (4.23)$$

この凹凸量 H の標準偏差を一定区間で求め、平坦性とするが、一般的に評価単位区間は 100m となっている。

平坦性と、加速度応答の関係を求めるため、前述した DAM で測定した路面形状から求めた平坦性とクォーターカーの数値シミュレーションにより計算した加速度 RMS を比較することとした。DAM で測定した路面形状は、670m のものが 1 本、200m のものが 1 本、230m のものが 1 本となっている。評価区間については一般的な 100m と、小松川線の伸縮装置間の代表値である 30m を使用した。走行速度は 60km/h とした。

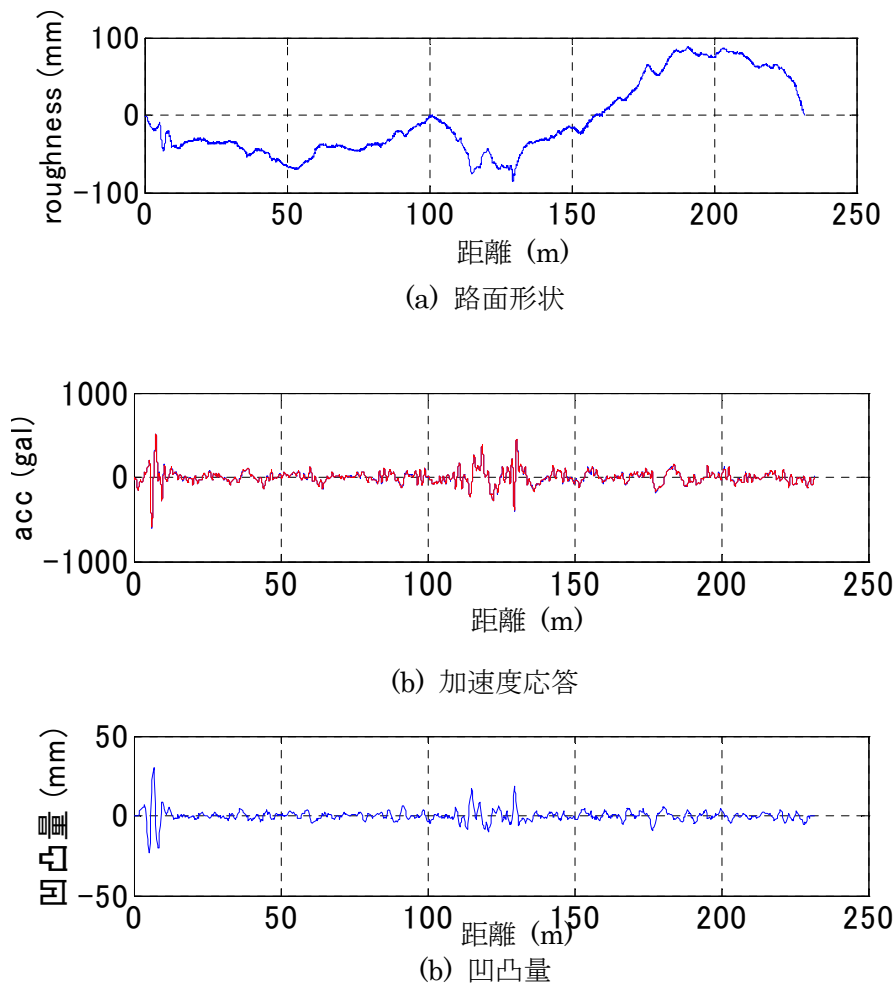


図 4-30 路面形状に対する数値解析結果と凹凸量

図 4-30 に実際の路面形状と、数値シミュレーションした結果であるばね上の加速度応答、舗装凹凸量の波形を示す。ばね上の加速度応答と舗装の凹凸量は波形が類似しており、加速度応答は凹凸量に起因するものであると考えられる。

それぞれの路面形状と得られた加速度応答に対して、評価区間を 100m とし、舗装の平坦性と加速度 RMS を求め、両者をプロットしたものを図 4-31 に示す。プロット数は用意できた実際の路面形状の長さにより制限されており、10 プロットである。正の相関を示しており、相関係数も 0.87 と高いため、加速度応答から、舗装の平坦性を近似することができるといえる。

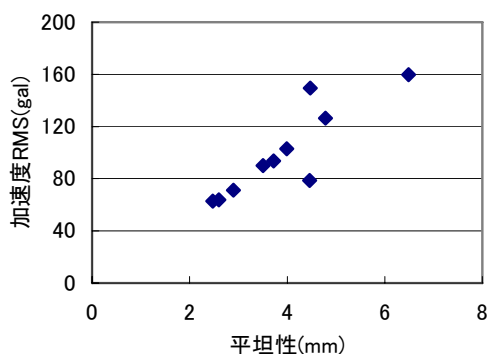


図 4-31 平坦性—加速度 RMS 関係 (100m)

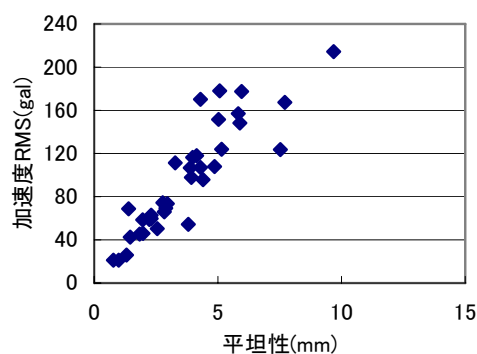


図 4-32 平坦性—加速度 RMS 関係 (30m)

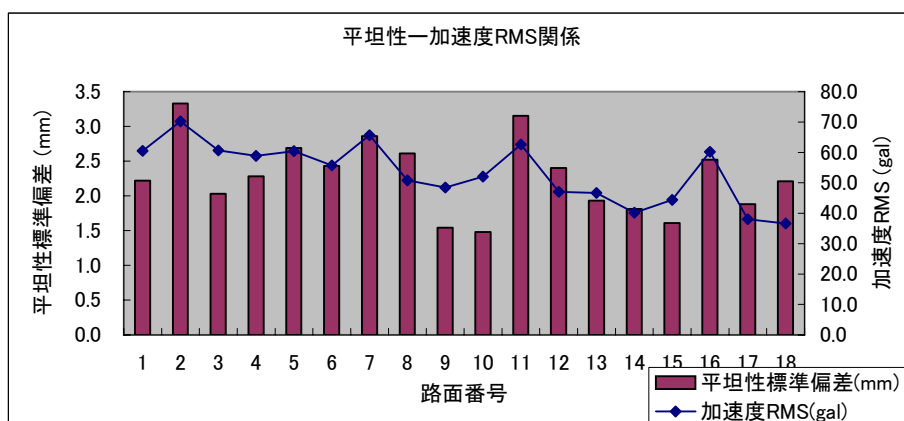


図 4-33 平坦性と加速度 RMS の関係

図 4-32 の評価区間を 30m としたもののでも、相関係数は 0.89 と高く、加速度応答から、舗装の平坦性を求めることができるといえる。

平坦性と加速度 RMS に相関があることを解析的に示すことができたため、今度は路面性状測定車で測定された平坦性と実際の車両応答を比較する必要がある。解析ではクォーターカーを使用しているが、実際の車両は 4 輪であり、さらに車両の固有振動数や減衰比も異なるため、応答特性が違ってくるためである。車両は日産セレナを用いた。首都高速 11 号台場線のレインボーブリッジを含む延長 km を対象とし、その舗装での平坦性と加速度 RMS を比較する。舗装の種類はアスファルト舗装である。路面性状測定車による平坦性は 2005 年 1 月に測定したもの、車両加速度 RMS は 2005 年 7 月に計測したものであり、その間、舗装の打ち替えは行っていない。首都高速道路は伸縮装置間で舗装を管理しているため、平坦性は伸縮装置間で 1 つの値となる。そのため、延長はその区間ごとに違ってくる。車両加速度も同様に、伸縮装置間で求め、1 つの伸縮装置間の舗装を 1 つの路面番号として、2 つのデータを比較したものを図 4-33 に示した。

相関係数は 0.68 と解析結果ほど高くはないが、平坦性の大きいところは加速度 RMS も大きく

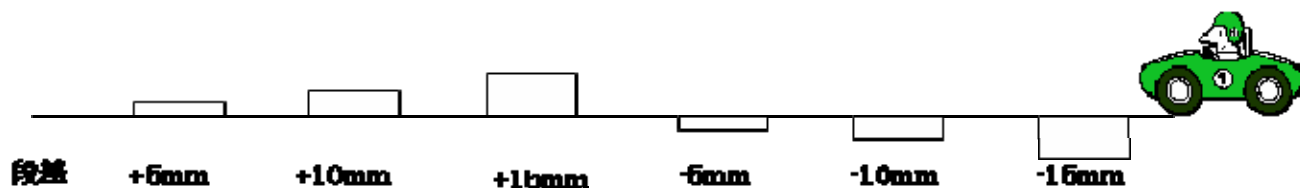


図 4-34 試験方法

出ている。その理由の1つとして、二者の測定には半年の差があるため、平坦性の低いところが大きくなったのではないかと考えられる。定量的に示すには路面性状測定車が測定したものと同一時期に計測車を用いて測定したものを比較する必要があるが、ここでは時間的に困難であるため、今後の課題とする。

4.4 伸縮装置アプローチ部段差の導出

高架橋の伸縮装置部を車両で走行するとき、車両に大きな衝撃が生じることがある。この衝撃は、自動車の走行性、乗り心地、伸縮装置部付近の床版破損、近隣建物への低周波空気振動、騒音、橋脚周辺の地盤振動などの問題を検討する際に重要なファクターとなっている。

ここでは、伸縮継手部の形状が車両にどのように影響するかを見ていくことにした。伸縮装置部における車両の応答波形を見ると、舗装路面部での応答よりも大きく、急激な応答となっていることが第3章で確認できている。伸縮装置の形状と車両応答の関係を求めるには、実際の伸縮装置部の形状を測り、同じ箇所を車両で通過し、その関係を求めるのが1番ベストな方法であるが、多くの伸縮装置について伸縮装置の形状をはかるのは交通整理の関係上、困難である。そこで、まずフィールド上において段差実験を行い、車両応答と段差量との関係を明らかにし、その後、実際の伸縮装置部の形状と車両応答の関係を数サンプルに対し、確認することとした。

4.4.1 段差実験

(1) 実験概要

2005年7月に首都高速道路羽田補修基地において段差実験を行った。図4-34のように、-15mm, -10mm, -5mm, +5mm, +10mm, +15mmの6つ理想的段差上を時速60kmで走行し、そのときの車両の応答を計測した。6つの段差は直線上にあり、段差と段差の間隔は15.8mとなっている。加速度データのばらつきを考慮し、5回の計測を行った。

この理想的段差は、首都高速道路株式会社で行った段差体感試験での段差を用いているため、車両のタイヤが乗る場所の舗装や段差が磨り減り、コンクリート段差上に書かれている段差量（-15mm～+15mm）とは異なる可能性がある。そこで、まず、コンベックスを用いて図4-36のように段差量を測定した。その結果、実際の段差量は設定された段差量と異なることがわかった（表4-1）。表4-1の段差量は車両が走るラインでの左タイヤ側、右タイヤ側での段差量を平均している。実験結果では実際の段差量を用いて段差と加速度の関係を調べていくことにする。加速度計は左後ばね下に設置した。車両は日産セレナを用いた。



図 4-35 段差実験，実際の実験状況



図 4-36 段差量計測状況

表 4-1 設定された段差と実際の段差

設定された段差(mm)	実際の段差(mm)
-15	-10
-10	-10
-5	-4.5
15	15
10	11
5	8.5

(2) 実験結果

段差を超えると衝撃的な応答が出ることが、3.2.3 からわかっている。そこで、段差量と加速度の最大振幅の関係を見ることにした。加速度の最大振幅は走行する線や速度の微妙な変化により、変わってくることが考えられる。そこで、段差による応答の範囲の加速度 RMS をとることにより、その加速度のずれを平均化することにした。

段差実験での応答は、図 4-37 のようになっており、段差を乗り越えたときの応答は、9 秒付近、

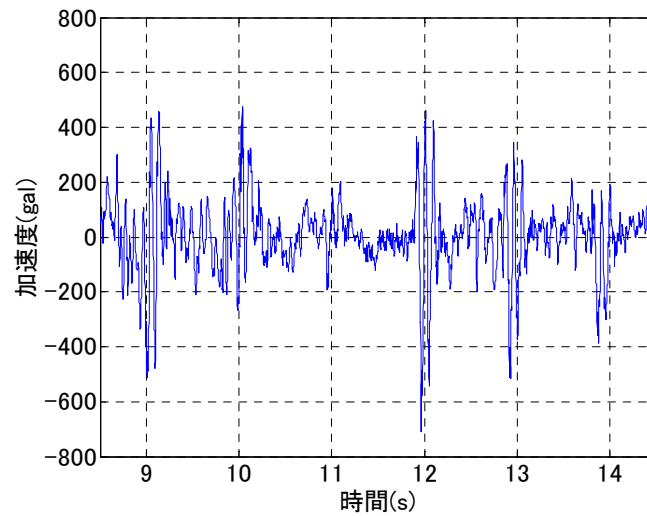


図 4-37 段差実験での応答

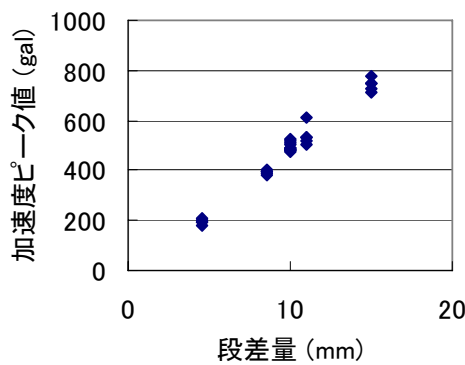


図 4-38 段差量と加速度最大振幅の関係

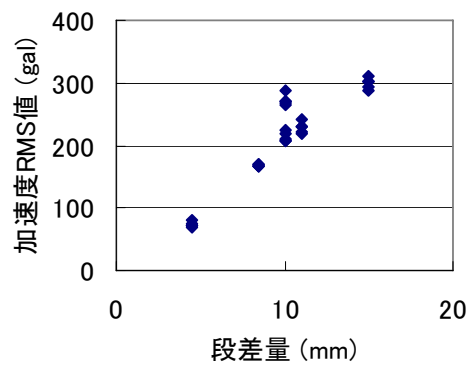


図 4-39 段差量と加速度最大振幅の関係

10 秒付近, 11 秒付近, 12 秒付近, 13 秒付近, 14 秒付近となっている. 加速度の最大振幅と段差量, 加速度の RMS 値と段差量を 5 回分のデータに対してプロットすると図 4-38, 図 4-39 のようになる. 両者とも高い相関を示していることがわかる. 相関係数を求めると, 段差量－加速度最大振幅が 0.99, 段差量－加速度 RMS 値が 0.92 と非常に高い. 以上から, 段差量は加速度の最大振幅, RMS 値に大きく関係するといえる.

4.4.2 伸縮装置部の形状と加速度応答の関係

段差量と加速度最大振幅, 加速度 RMS 値の関係は高い相関を示したが, 実際の伸縮装置部の形状は, 段差実験で使用した段差とは形状が異なると考えられる. 本田ら⁵⁾は, 北陸地方の 91 橋梁を選び, それらの橋台上と橋脚上の合計 248 の伸縮継手部の凹凸を測定している. 結果として,

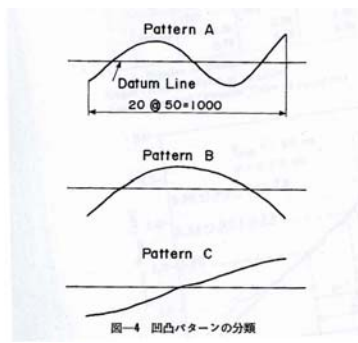


図 4-40 凹凸パターンの分類

図 4-41 伸縮装置部形状計測状況



図 4-42 形状を計測した伸縮装置の位置と状況



図 4-43 EX-84 工事後伸縮装置

凹凸パターンが図 4-40 の 3 種類に分類（上下逆形状も含む）されることが分かっている．このことから，実際の伸縮装置部は理想段差のような形状とは異なるといえる．

そこで，実際の伸縮装置部の形状と加速度応答の関係を調べることにした．それには，まず，伸縮装置部の形状が必要である．2005 年 12 月に首都高速 9 号深川線上路塩浜付近で，伸縮装置の工事の際に規制帯の中に入り，前述の DAM により路面形状を計測した．交通整理の関係上，実際に形状を計測した伸縮装置は 3 箇所であり，伸縮装置の中心から前後 2m，両わだち部とした．計測車線は左車線である．伸縮装置は EX-84，EX-86，EX-88 であり，工事対象の EX-84 については，工事前，工事後の両方を計測した．

工事の対象となった EX-84 はゴムジョイント(図 4-42 左上)から簡易鋼製ジョイント(図 4-43)に形式が変更となった．簡易鋼製ジョイントは後内コンクリート部での振動が小さい，また，伸縮装置したでの騒音が小さいため，首都高速道路公団ではこの構造形式の採用を勧めている．交換の原因はわだち部のゴムの磨り減りと金属の露出で，日常巡回車の点検により，発見されたものである．ゴムの磨り減りは確認できたが，金属が露出しているのは確認できなかった．工事前と工事後に，工事対象の伸縮装置上を 60km/h で走行し，車両応答を計測した．結果を図 4-44 と図 4-45 に示す．工事対象の伸縮装置での応答は 80m 付近での応答である．工事前では 1500gal の衝撃応答が出ているが，工事後にはその衝撃応答はなくなっている．これは工事により伸縮装置部近傍の形状が滑らかになったためであると考えられる．この違いより，段差が大きいなど，伸縮装置部の形状の悪さを検出できると考えられる．

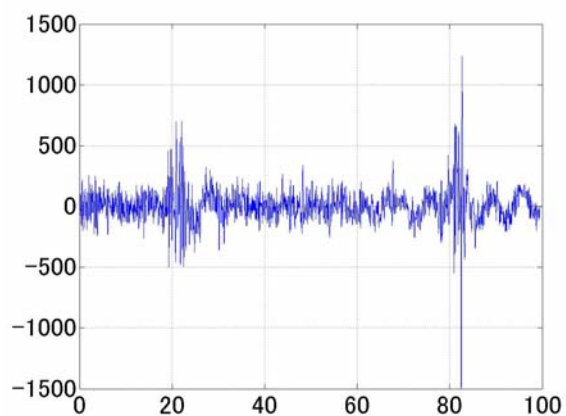
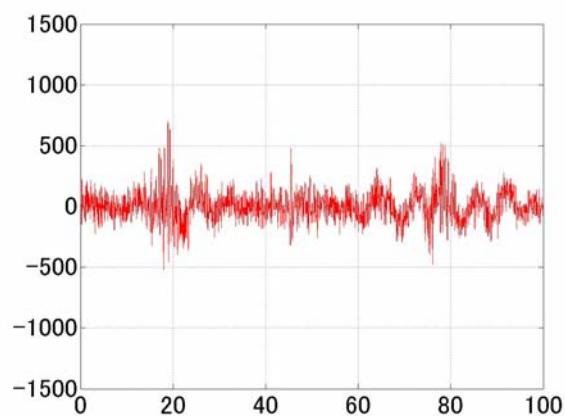


図 4-44 工事前伸縮装置における応答



4-45 工事後伸縮装置における応答

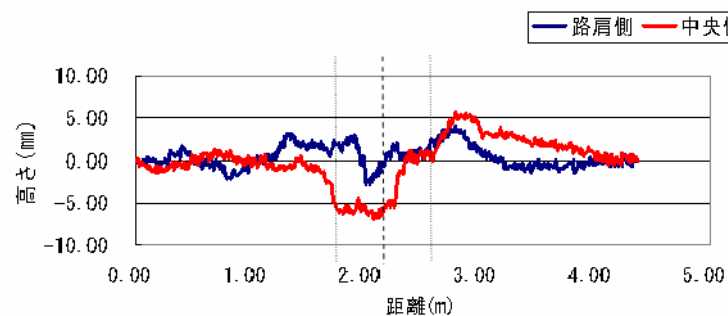


図 4-46 伸縮装置近傍の形状（継手番号：深-84，施工前）

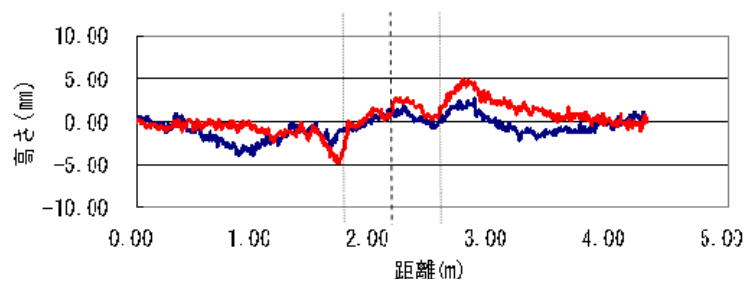


図 4-47 伸縮装置近傍の形状（継手番号：深-84，施工後）

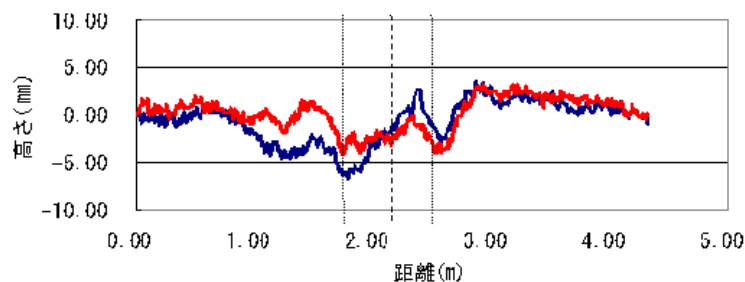


図 4-48 伸縮装置近傍の形状（継手番号：深-86）

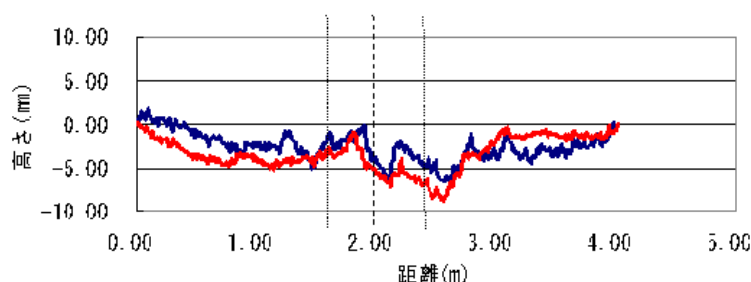


図 4-49 伸縮装置近傍の形状（継手番号：深-88）

形状が悪い伸縮装置，よい伸縮装置の違いが明確になったところで，その量を定量的に導出していく．まず，路面形状のどの量に応答のどの量に対応するかを調べるため，クォーターカーモデルにより，解析的に見ていく．

クォーターカーモデルに，DAM で計測した伸縮装置部の形状を入力し，60km/h での応答を数値シミュレーションにより求める．その後，形状に関する代表値と応答に関する代表値を比較し，相関の高いものを採用する．最後に，実際の車両での計測値との相関係数を求め，応答に関する代表値と形状に関する代表値の近似式を導出する．

DAM で計測した実際の伸縮装置部の形状を図 4-46～図 4-49 に示す．点線が伸縮装置の中心，破線が後打ちコンクリート部の縁となっている．

これらを見ると，全データにおいて，理想段差のような明確な段差を確認するのは難しい．野口らは図 1-6 に示す最大凹凸値が自動車のシート上加速度の全振幅（最大値の最大振幅－最小値の最大振幅）に最も影響を及ぼす要素であると実験により求めている．しかし，その相関には疑問が残る．それは，工事前の形状である図 4-46 と工事後の形状である図 4-47 とで中央側の最大凹凸値は大きな差がない値であるが，工事前後の計測車両の加速度応答には大きな差があったためである．また，最大凹凸値と加速度の全振幅以外には相関がある値について考えていない．そこで，ここでは，基準車であるクォーターカーモデルを用いて，解析的に最大凹凸値を含めた路面形状を代表する値と加速度の全振幅を含めた車両応答を代表する値の相関を求める．その両値に対し，巡回車についても使用できることを示す．

4.4.3 伸縮装置部の代表値と車両応答の代表値の決定

クォーターカーモデルに図 4-46～図 4-49 の実際の伸縮装置近傍の形状 8 種類を入力して，時速 60km で走行させることによりその応答を求め，伸縮装置部の形状に関する代表値と車両応答に関する代表値を求め，その相関を調べた．数値時間積分法には Newmark β 法（ $\beta=1/4$ ）を用いた．伸縮装置部の形状に関する代表値には，野口らが提案した伸縮装置近傍（ $\pm 2\text{m}$ ）の最大凹凸値，伸縮装置の中心から前側（走行方向に対し，手前側）2m での凹凸値，伸縮装置の中心から後ろ側 2m での最大凹凸値である．前側と後側に分けたのは，自動車に乗っている際，後打ちコンクリート部に乗り上げる瞬間に，大きな振動を感じるためである．8 種類の伸縮装置に対し，

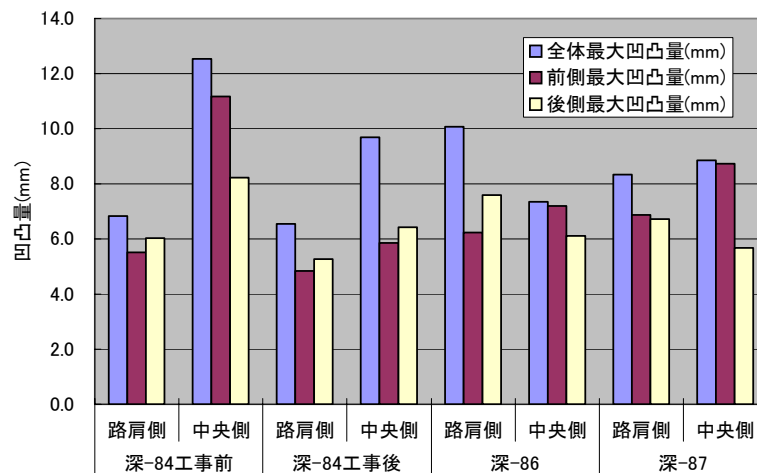


図 4-50 各形状での代表値となる凹凸量

表 4-2 路面形状に関する代表値と車両応答に関する代表値の相関

	最大振幅	全振幅	加速度 RMS
全体最大凹凸量	0.85	0.85	0.76
前側最大凹凸量	0.87	0.87	0.92
後側最大凹凸量	0.68	0.71	0.58

これらの量を求めると図 4-50 のようになる。計測した箇所は中央側が下となる逆勾配区間であるため、中央側に荷重が多くかかり、中央側のほうが全体的に大きい値となっていると考えられる。深 - 84 工事前の中央側がすべての代表値に対して大きい値をとっているが、深-86 の路肩側のように全体の最大凹凸量は大きいが前側の最大凹凸量は小さいというものもあり、それぞれの代表値間の相関は大きくないといえる。そのため、どの代表値が車両応答に影響するのか明らかになると考えられる。

続いて、車両応答に関する代表値には、野口らが提案した伸縮装置部での全振幅、段差実験において相関の大きかった伸縮装置部での最大振幅、最大振幅から $\pm 2m$ での加速度 RMS を用いた。車両応答の代表値で、路面形状に関する代表値と対応するよう、前側、後側での加速度の全振幅、最大振幅も考えたが、実測の波形ではどこが伸縮装置部の中心を通った瞬間なのかということとはわかりにくい（図 4-44，図 4-45）。無論、前側、後側の違いも付かないため、それらの量は採用しないこととした。

路面形状、加速度それぞれの代表値に対し、相関係数を求めた。結果を表 4-2 のようになっている。全体の最大凹凸量よりも前側の最大凹凸量がそれぞれの代表値と相関が高い。このことから、車両応答は前側の最大凹凸量に影響するといえる。さらに前側最大凹凸量は、加速度を代表する値の中では加速度 RMS と相関が高い。最大振幅や前振幅より高い理由は、最大

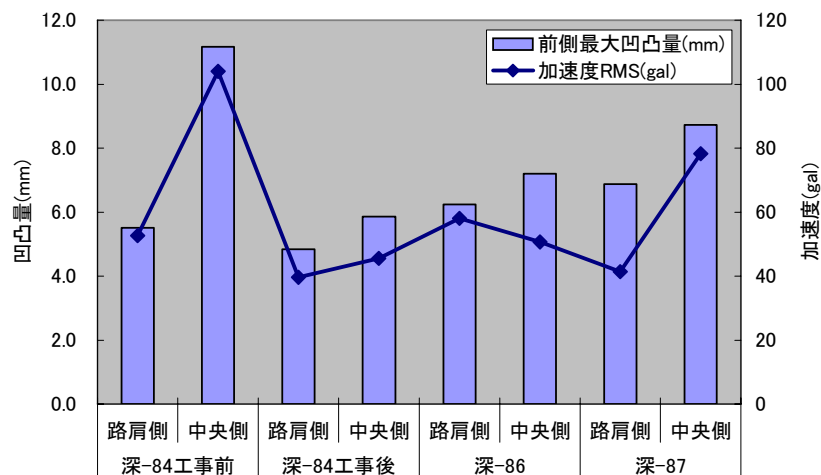


図 4-51 前側最大凹凸量と加速度 RMS の関係

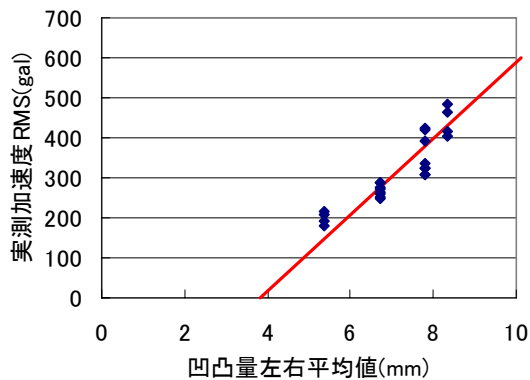


図 4-53 前側最大凹凸量中央・路肩平均値と実測加速度 RMS の関係

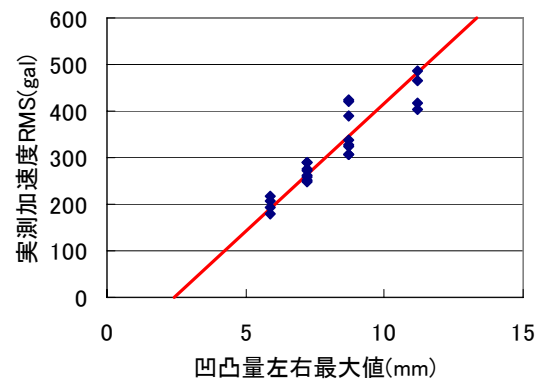


図 4-52 前側最大凹凸量中央・路肩最大値と実測加速度 RMS の関係

凹凸量が急激な段差でない場合もあり、衝撃的な応答に効いてこないことがあるためであると考えられる。最も相関の高い加速度 RMS と前側の最大凹凸量を図 4-51 で比較すると、深-86 中央側と深-87 の路肩側では加速度 RMS の応答が小さくなっているものの、段差量に対応しているといえる。

解析結果で相関の高かった前側の最大凹凸量と加速度 RMS を用いて、実測した車両応答に対しても、その相関を求めた。ここでも伸縮装置上を通過するときに出る、衝撃応答の最大振幅から±2m を RMS の計算範囲として選定した。また、実際の車両が伸縮装置上を走行する際、路肩側と中央側の段差を乗り越えることになり、その応答は片方のみの量に起因するのではなく、2つの量の平均値または最大値に起因すると考えられる。そこで、路肩側の前側最大凹凸量と中央側の前側最大凹凸量に対し、平均値・最大値を算出し、実測した加速度 RMS (4 回分) との相関を求めた。その結果を図 4-52、図 4-53 に示す。

平均値、最大値の両者とも高い相関を示しているが、平均値と実測した加速度 RMS との相関係数が 0.90、最大値と実測した加速度 RMS との相関係数が 0.92 と、若干最大値の方が相関は高い。本システムでは最大値を採用する。この相関から、前側最大凹凸量 $y_{f\max}$ と実測加速度 RMS a_{rms} の近似式が以下のように立てられる。

$$y_{f\max} = 0.0181 \times a_{rms} + 2.437 \quad (4.24)$$

計測回数によって、図 4-53 の 8.34mm による応答のようにばらつきが出てくる。これは段差による衝撃的な応答が高振動数成分にあり、高振動数成分での再現性の低さと計測車両が同じライン上ではなく、段差量の異なる場所を走行していることが原因として挙げられる。ここで用いた指標の精度を、回帰式による段差と実測した段差の差の最大値として求めると、 $\pm 1.4\text{mm}$ ほどであり、比を求めると 16.7% となる。実際の段差量から比較するとその値は小さく、特に、段差の大きいところでは最大 2 割未満の誤差は、経年変化を長いスパンで見ると考えると実用レベルに達していると言える。

ただし、これは本実験に採用した速度の特性、車両の特性によるところが大きいため、異なる速度、異なる車両を用いる際には再度、この式を求める必要がある。IRI の導出方法を考える際、異なる車両を用いることを考えた時、フーリエ変換から求めるフィルターにより検討することを挙げたが、段差量の場合は項振動数成分に応答が効いてくるため、フィルターは高振動数成分も再現できるものである必要がある。

4.5 異常音の検出

伸縮装置の上を車両が通過する際に、異常音が生じる場合がある。その音は①ゴムのばたつきによる音や、②伸縮装置のアンカーボルトが外れているまたは芯金にひび割れ・破損があることによる高い金属音、③高架橋の桁の振動による低周波音などに分類される。これらのうち②は伸縮装置が破損していることを示すだけでなく、近隣住民にも影響を与える。本研究で発見できたのは②のみであった。②の金属音を車両にマイクを設置することにより、検出できないかを検証した。

首都高速道路を走行中、金属音が鳴っている伸縮装置での音をマイクにより測定した。サンプリング周波数は 20kHz である。測定できたのは 7 箇所である。測定した音圧データに対してフィルターは何も掛けておらず、図 4-54 では 1150m, 1145m, 1185m に伸縮装置があるが、伸縮装置部で大きいはずの応答が大きくない。

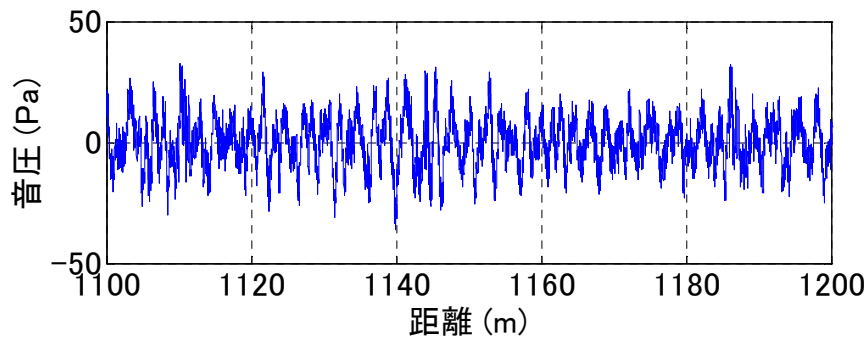


図 4-54 フラット特性で集録した音圧波形

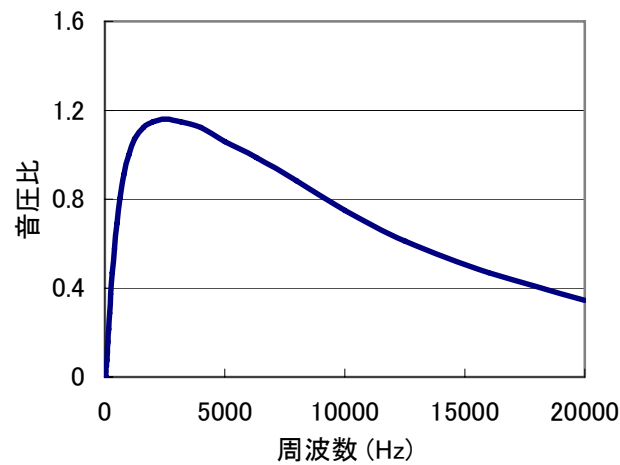


図 4-55 用いた A 特性補正

そこで、音の周波数に対する人間の耳の感度が異なるために、人間の耳の聴覚特性に合うように掛ける補正である、A 特性補正を行った． A 特性補正は普通、音圧レベルに対して用いられるものだが、音圧レベルと音圧の関係式

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (4.25)$$

p : 音圧の実効値(Pa)

p_0 : 基準となる音圧の実効値(=20 μ Pa)

から、音圧に対するものに変換した (図 4-55)．この A 特性補正は、1,000Hz から 5,000Hz で元の応答を増幅し、それ以外では小さくするようなフィルターとなっている．特に 1,000Hz 以下ではかなり小さな応答となる．また、A 特性補正の重みは普通、オクターブバンドまたは 3 分の 1 オクターブバンドごとに求められているため、3 分の 1 オクターブバンドの値を線形補完して、

元の波形に A 特性補正を掛けた．A 特性補正を掛けたもの（図 4-56）は，図 4-54 と比較して伸縮装置部で応答が大きくなっているのがわかる．

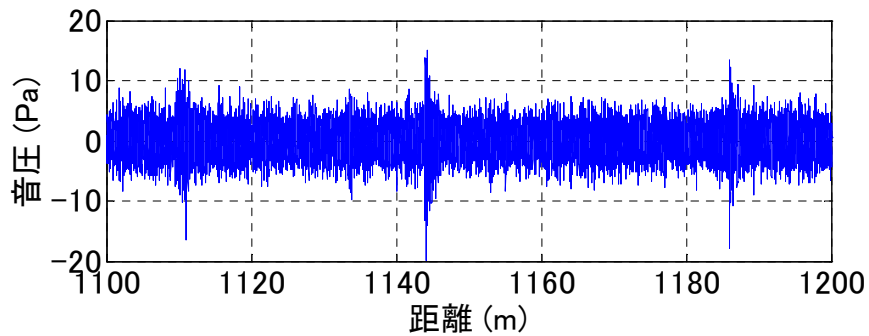


図 4-56 A 特性を掛けた後の音圧波形

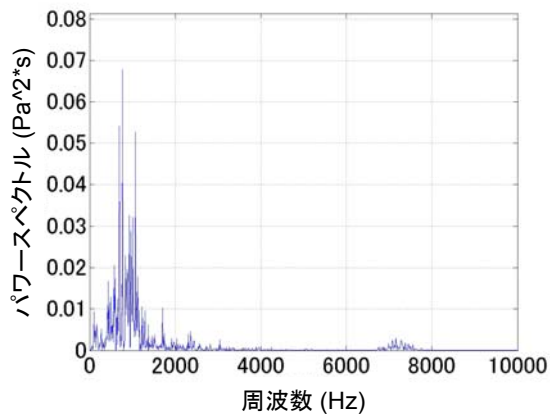


図 4-57 金属音伸縮装置 1 音圧 PSD

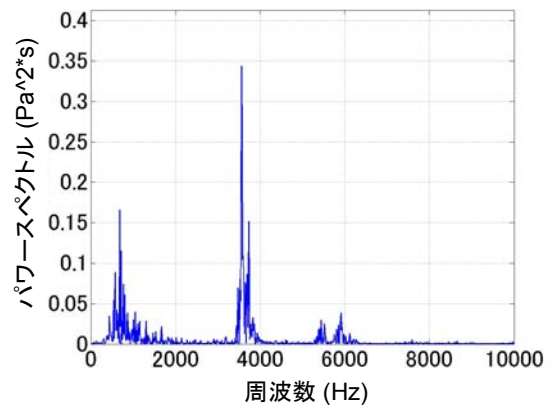


図 4-58 金属音伸縮装置 2 音圧 PSD

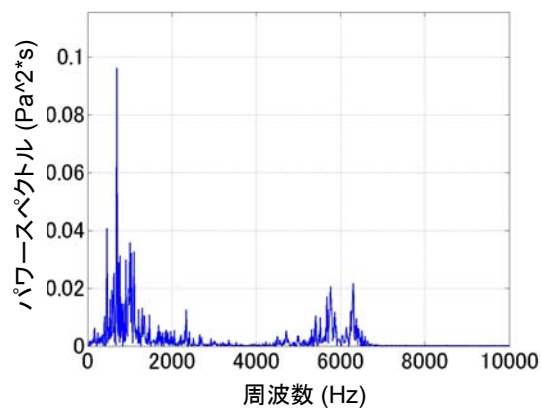


図 4-59 金属音伸縮装置 3 音圧 PSD

処理後の波形に対し、金属音のする箇所 0.1 秒分についてのパワースペクトルを求めた。7 箇所のうち、周波数特性の異なる 3 箇所の結果を図 4-57～図 4-59 に示す。これらの図には共通して、1,000Hz 付近にピークがある。これはタイヤのエアポンピング音とよばれる、タイヤのミゾに圧縮された空気が開放されるとき発生する音によるものである。走行するときに聞こえる、ゴーッという音（走行音）がそれにあたる。その他のピークについては、図 4-57 からは 7,000Hz にもピークが見え、図 4-58 からは 4,000Hz と 6,000Hz 付近にピークが見える。図 4-59 からは 6000Hz 付近にピークがある。これらのピークが伸縮装置部の破損による金属音であると考えられる。破損の内容と、その周波数の比較をすることによって、音からどこにどのような破損があるのかを検出できると考えられるが、破損データの収集が困難であるため、ここでは金属音がする伸縮装置を検出できる程度にとどめておく。

この金属音を定量的に示す方法を以下に提案する。まず、タイヤ騒音である 1,000Hz 付近の音をカットする必要がある。測定結果から、バンドパスフィルタを 3,000~8000Hz でかけ、その周波数成分だけ抜き出す。その後、抜き出したデータに対して、音圧値を(4.25)式により、音圧レベル L_p に変換する。

その結果、音圧レベルは高い周波数領域での音だけを示すようになる。騒音計でその操作をしてから、データを集録するほうがより現実的となる。

4.6 その他の点検すべき項目について

4.6.1 わだち掘れ

わだち掘れは事故の原因にもなる重要な点検項目である。河野⁷⁾は路面性状測定車によって測定された舗装の平均わだち掘れ量と舗装を走行した車両加速度 RMS データに相関があることを示した。しかし、わだち掘れは道路の横断方向の凹凸量であり、縦断方向を走行する車両の加速度に影響してくるとは考えにくい。そこで、本研究でも路面性状測定車によって測定された平均わだち掘れ量と車両加速度 RMS に関係があるかを調べてみた。対象とした道路は首都高速 11 号台場線のレインボーブリッジを含む延長 km である。舗装の種類はアスファルト舗装である。路面性状測定車のわだち掘れ量は 2004 年 1 月に測定したもの、車両加速度 RMS は 2004 年 7 月に計測したものであり、その間、舗装の打ち替えは行っていない。首都高速道路は伸縮装置間で舗装を管理しているため、最大わだち掘れ量は伸縮装置間で 1 つの値となる。そのため、延長はその区間ごとに違ってくる。車両加速度も同様に、伸縮装置間で求め、2 つのデータを比較したものを図 4-60 に示した。

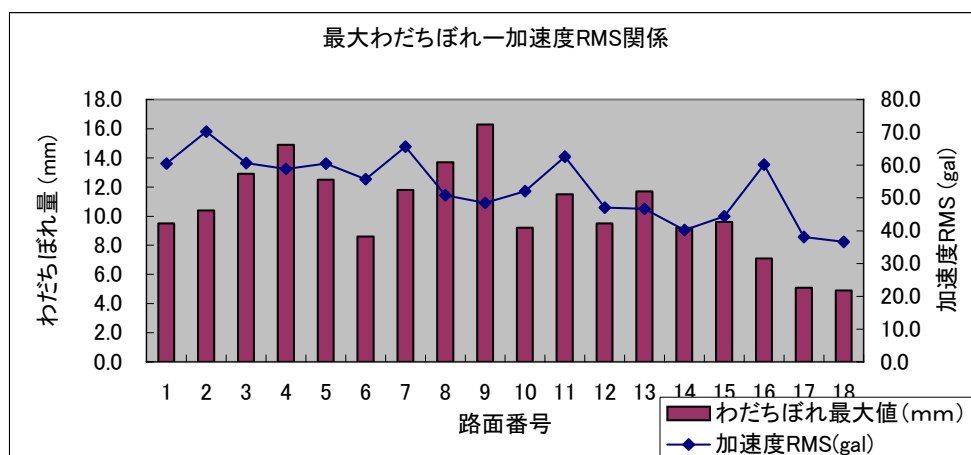


図 4-60 最大わだち掘れ量ー加速度 RMS 関係

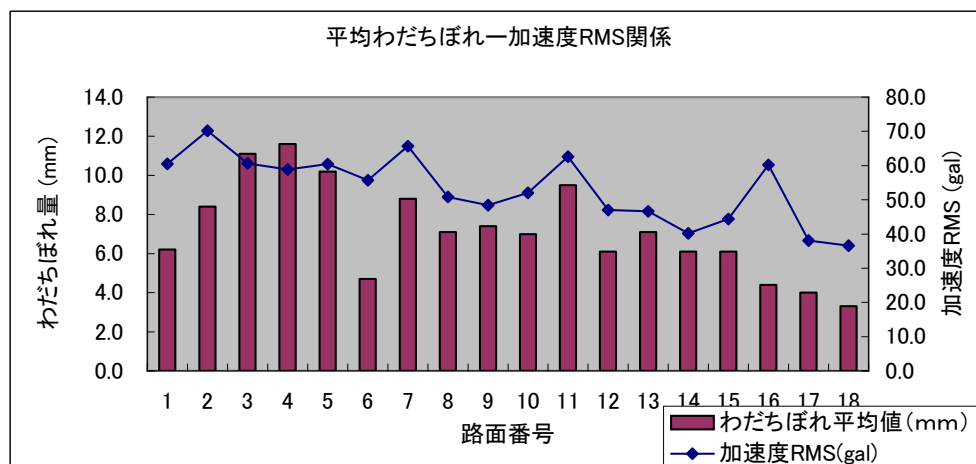


図 4-61 平均わだち掘れ量ー加速度 RMS 関係

舗装番号 10~12 辺りはわだち掘れ量と加速度 RMS の相関が高そうに見えるが、他はあまり相関がよくない。相関係数を求めてみると 0.48 となり、相関が高いとはいえない。平均わだち掘れ量と加速度 RMS の相関を見ても、図 4-61 のとおり、相関があるとはいえず、相関係数も 0.48 と低い。

やはり、横断方向の凹凸量であり、縦断方向を走行する車両の加速度に影響してこないためであると考えられる。相関が高かったのは、局所的なものであり、すべてに対して相関が高くなければ、わだち掘れ量と加速度 RMS に相関があるとはいえない。

わだち掘れ量を定量的に検出する別の方法として、平坦性とわだち掘れ量の相関について考えていく。平坦性とわだち掘れ量に相関があれば、近似式によりわだち掘れ量を求められるためである。首都高速道路 11 号台場線（上下線、走行・追越車線全て）において、路面性状測定車により測定された平坦性とわだち掘れ量平均値の関係を図 4-62 の青のプロットで示す。

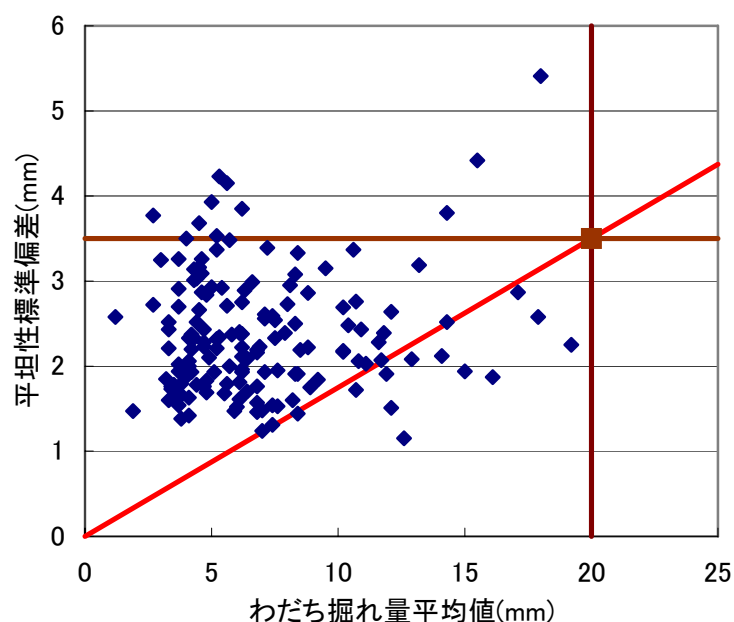


図 4-62 わだち掘れ量平均値と平坦性標準偏差の関係

プロットのばらつきが大きく、平坦性とわだち掘れ量の間には相関があるとはいえあう、本システムによって、わだち掘れ量を検出することはできないといえる。

しかし、平坦性とわだち掘れのどちらの基準を優先的に選び、舗装の補修をすべきかどうかは考えることができる。首都高速道路におけるわだち掘れ量平均値の補修基準は 20.0mm 以上、平坦性標準偏差の補修基準は 3.50mm 以上となっている。図 4-62 の茶色の太線がそれにあたる。これを見ると、平坦性について基準を超えているものは 11 個 (7.2%)、わだち掘れ量が基準を超えているのは 0 である。また、新設の場合、平坦性標準偏差もわだち掘れ量の平均値もともに 0 であることが容易に想像されるため、0 と基準値とを赤色の太線で結んだ。この赤線よりも上にあれば平坦性のほうが悪く、下にあればわだち掘れの方が悪いと言える。青のプロットは全体の 92% が赤色の太線よりも上にあり、平坦性のほうが悪いものが多くなっているといえる。この結果から、平坦性が悪いものを補修していくべきであると考えられる。つまり、平坦性が悪いものを点検できればよいということになり、平坦性が点検できる本システムはわだち掘れに対しても有効であるといえる。

4.6.2 ひび割れ

文献8)では、ひび割れ幅は車両の運動に影響を及ぼさないとしている。ひび割れ幅が通常、車輪の設置長に比べて狭いためである。本システムでは車両の動的応答を用いたシステムであるため、ひび割れについては考慮しないこととする。ひび割れ検出にはカメラなど、新たな機器を計測システムに搭載する必要があると考えられる。



図 4-63 ポットホール

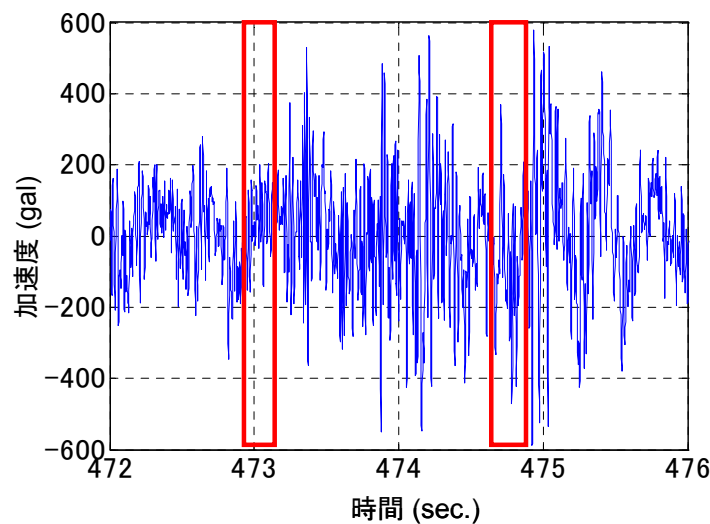


図 4-64 ポットホール上を走行したときの計測車加速度応答

4.6.3 ポットホール

ポットホールは穴が開く前に、その周辺で舗装にひび割れが起こり、徐々に穴が開いていく。ひび割れが検出できない本システムではそのため、ポットホールの事前検出は非常に難しいと考えられる。また、ポットホールはほぼ全て日常巡回車によって点検されてすぐに穴を埋められる。日常巡回車が見落とさないものを、事後に計測してもあまり意味がないが、ポットホール上を走行したら車両加速度に影響が出るかを調べることにより、加速度によって事前に検出できるかどうかを示すことへのアプローチにつなげる。

千葉県八千代市においてポットホール上を走行し、車両の応答を計測した。ポットホールは全部で4つ（図 4-63）あり、それらの寸法は1個目が幅 50mm、深さ 15mm、2個目が幅 100mm、深さ 15mm、3個目が幅 90mm、深さ 15mm、4個目が幅 90mm 深さ 15mm である。これらのポットホール上を 33.0km/h で走行したときの応答を図 4-64 に示す。

図 4-64 において、赤枠で込んだ箇所がポットホール上を走行したときの応答である。左側がポ

ットホールは1個目と2個目、右側が3個目と4個目での応答である。これを見ると、ポットホール上での応答とそれ以外の箇所の応答とが加速度の大きさからは判別し難い。また、ポットホール上の応答で振動数を見ても、他との違いはない。これはポットホールの大きさがタイヤの設置面積と比べて小さく、車両の応答に影響しないためであると考えられる。以上から、加速度計からポットホールを検出するのは難しく、ポットホールができる事前検出はさらに難しいといえる。ポットホールに対してはカメラなどひび割れが起こるような箇所を検出することでポットホールの発生を防ぐ方法が望ましいと考えられる。

4.7 まとめ

本章では、車両の動的応答から点検指標となる値の導出を検討した。その結果、本システムから舗装に関してはIRIと平坦性、伸縮装置に関しては前側の段差量と異常音の点検項目が検出できるという結果に至った。

参考文献

- 1) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，pp.82-83，1993
- 2) Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D. O. Paterson : Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER 46, 1986
- 3) Michael R. Sayers (著)，笠原篤，関口幹夫，加藤昌太郎 (訳)：道路縦断プロファイルからのIRIの算出 (下)，舗装，31-8，pp.12-17，1996.8
- 4) 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 No.9-7，pp. 41-42，1967
- 5) 本田秀行，梶川康男，小堀為雄：道路橋の伸縮装置部の凹凸性状，土木学会論文報告集，No.324，pp.173~176，1982.6
- 6) 野口勇次郎・沖野真：伸縮継手部の走行性に関する調査および研究，道路，第313号，pp.2~10，1967.3
- 7) 河野整：道路高速診察システム (VIMS) の開発，東京大学工学部土木工学科卒業論文，2002.2
- 8) Michael W. Sayers / Steven M. Karamihas：路面のプロファイリング入門，2003.1

第5章 道路維持管理を目的とした診断システムの開発

5.1 概説

第4章では加速度データ、GPSデータから点検の指標となる値を導出したが、その指標値が点検日時時点で補修が必要な値であるのかなど、点検日時時点における舗装・伸縮装置の状態が診断できる、「診断システム」を開発する必要がある。ここではリアルタイムに点検結果が表示され、かつ、効率的な維持管理が行いやすい診断システムを開発する。

5.2 診断システムの概略と開発コンセプト

診断システムの概略は図5-1のようになる。まず、道路管理者が計測システムによって出力された計測データをWebアプリケーションサーバに送り、4章で示した指標値を計算する。その後、計算された指標値をデータベースサーバに蓄積する。道路管理者の要求により、Webアプリケーションサーバがデータベースサーバ内の指標値データと地図データ、道路管理データを組み合わせて、道路管理者のWebブラウザ上で診断結果がわかるというシステムである。

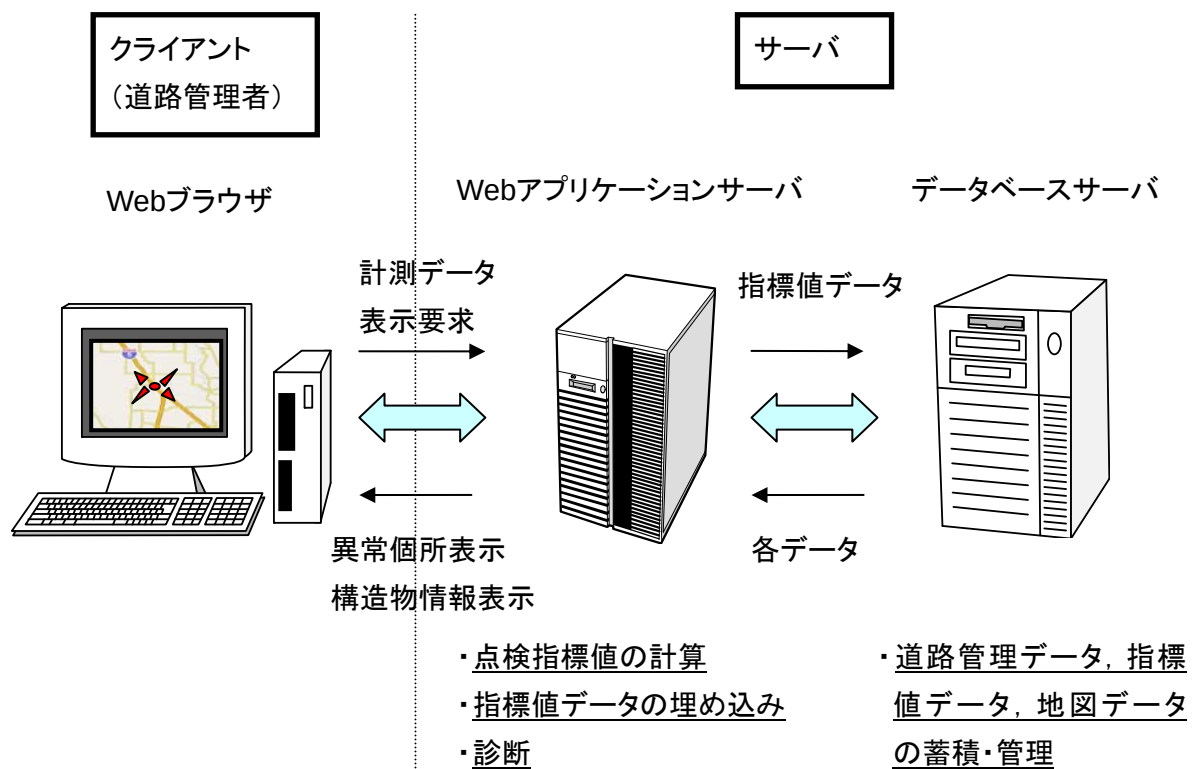


図 5-1 診断システムの概略

診断システム内で必要な処理は Web アプリケーションサーバの処理である 3 つとなる。計測データから指標値を計算する部分とその指標値をデータベースに埋め込む部分、診断し、結果を表示する部分である。

以下の事項を開発コンセプトとし、さらに道路管理者の意見を参考にしながら診断システムの開発を行った。

- ・ 道路管理者が操作しやすい
- ・ 解析時間が短く、点検結果がリアルタイムで分かる
- ・ 診断結果が地図上にあり、一目でわかる
- ・ 診断結果をどこからでも閲覧できる
- ・ 構造物の情報がワンクリックで表示され、補修計画が立てやすい

診断システムのプロトタイプとして首都高速 7 号小松川線下りを対象に、独自に開発した。なお、この診断システムのデータベースは他の路線でも適用できるよう、工夫している。

5.3 道路維持管理のためのデータベースシステムの開発

上記のような開発コンセプトで診断システムを作る際、その目的に合ったデータベースを構築する必要がある。例えば最後の項のように、構造物の情報がワンクリックで表示されるシステムであれば、構造物の情報を示すデータは不可欠である。また、データベースは 1 枚の表でも表すことが出来るが、それぞれのデータ項目に重複が多くなる。これでは、データを格納するための領域が無駄になるだけでなく、データをメンテナンスするときの効率性も悪くなってしまふ。そのため、本システムで開発するデータベースは図 5-2 に示すように、「構造諸元データ」、「点検履歴データ」、「補修履歴データ」、「指標値履歴データ」、「位置情報データ」の 5 つのデータより構成されるリレーショナルデータベース¹⁾とした。構造諸元データ、点検履歴データ、補修履歴データが管理者側に元からある台帳データに相当する。また、位置情報データと外部の GIS データベース (Google Maps) を JavaScript によって連携させることにより、地図情報を取得する。各データの関係は、構造諸元データを上位システムとした、リレーショナルデータベースのテーブル構造により反映されている。上位システムと下位システムは、舗装の場合は橋脚番号、伸縮装置の場合は継手番号の列で繋がれている。以下に、それぞれのデータについて説明を加える。なお、それぞれのデータの記録単位は首都高速道路の台帳データの例を参考に、伸縮装置は 1 車線のレーンごとの伸縮装置を 1 単位、舗装は橋脚間の舗装を 1 単位とした。また、データベースの構築には Windows SQL Server 2000 Enterprise Manager を使用した。

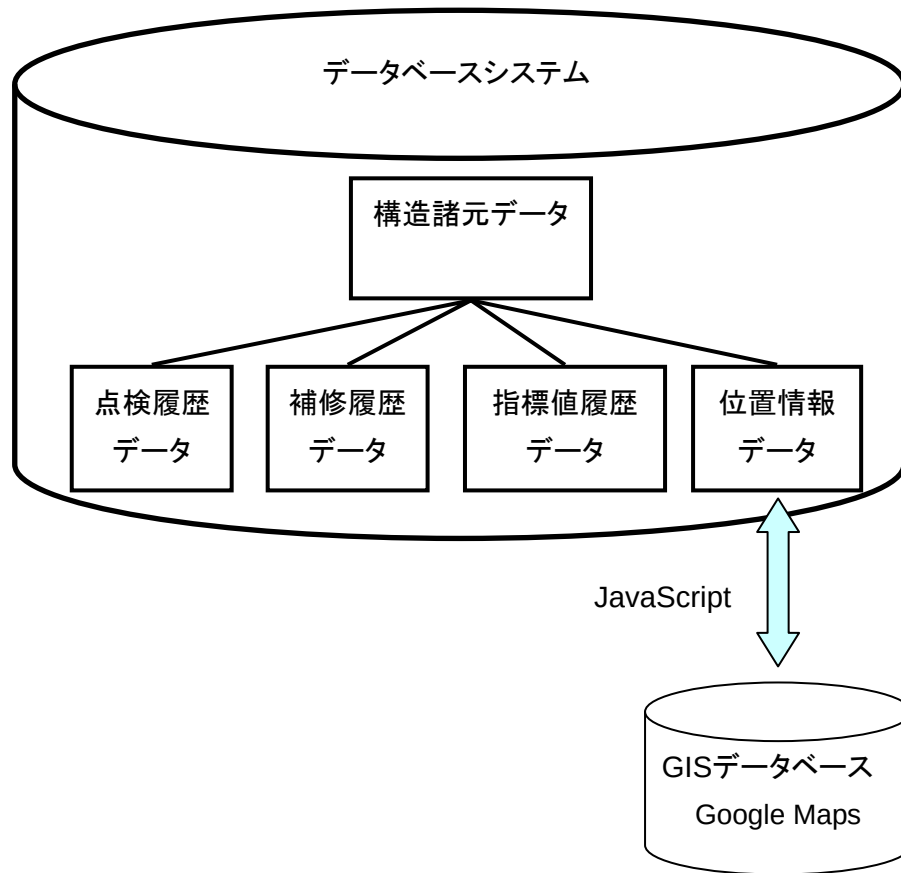


図 5-2 データベースシステム

5.3.1 構造諸元データ，点検履歴データ，補修履歴データ

構造諸元データには路線名，伸縮継手番号，橋脚番号など舗装・伸縮装置の基本情報となるもの，点検履歴データには，点検日，構造物の種類，損傷概要など，日常巡回車によって点検されたデータ．補修履歴データには補修年月，損傷内容，取替え回数，補修回数など補修に関する情報が格納される．

構造諸元データ，点検履歴データ，補修履歴データについては，新しく考えるよりも，今現在使われているデータを参考に，必要なデータ項目を決定した方が効率がよい．首都高速道路における舗装台帳，伸縮継手台帳，巡回点検台帳を基に，必要なデータ項目の選定を行う（ボトムアップアプローチ²⁾，既存のシステムで使われている画面や帳票，業務で使用している書類などからデータを洗い出し，分析を行ってデータモデルを作成する方法）．その際，本診断システムは道路管理者が利用することを念頭においているため，必要なデータについて道路管理者に意見を聞く必要がある．そこで，道路管理者に対し，アンケート調査を行った．アンケートに協力していただいたのは首都高速道路株式会社東東京管理局の方々（保全設計第1グループ，保全管理グル

ープ、保全工事第1グループ、保全工事第2グループ、調査環境グループ)である。データベースを設計する際、新しいシステムを開発するため、アンケート結果をそのまま使用するのは難しいと考えられる。そこで、アンケート結果を参考にして、自分の考えを入れつつ、データの洗い出しを行った。洗い出しを行った後のデータ項目は付録2を参考にされたい。以下にはデータ項目決定の際に重視した事項である。

- ・ アンケートで必要とされているか
- ・ 点検時に必要とされるか
- ・ 補修計画に必要とされるか
- ・ 首都高速7号線だけでなく他の道路にも適用可能か

5.3.2 指標値履歴データ

第4章から本システムでは舗装部のIRI、平坦性、伸縮装置部の段差、金属音の点検ができるとされている。それらの指標値である、IRI、平坦性標準偏差、段差量、高周波騒音レベルの4つが指標値履歴データとなる。計測データから指標値の算出までの流れは5.5節に示す。データベース内のテーブルの構造は、まず、構造諸元と対応付けられるように舗装なら舗装番号、伸縮装置なら継手番号が1列目となる。2列目に指標値、3列目に点検日が分かるように計測した年月日が入る。点検するごとに行が増えていくという形になる。

5.3.3 GIS データベースと位置情報データとの連携

結果表示で用いる地図データはWeb上で使用できるGoogle Maps を用いる³⁾。Google MapsはGoogleのホームページ上で使用することができ、ドラッグできる便利な地図である。さらにGoogle Mapsは個人のホームページ上に地図を載せることもできる、Google Maps API⁴⁾ (JavaScriptを使用)を公開している。Google Maps API Key を取得すれば誰でも無料でGoogle Mapを個人のウェブサイトで使用することができる。Google Maps では経度・緯度を与えれば、アイコンや吹き出しをその位置にプロットすることが出来るという機能を備えている。以上のような理由からGoogle Maps を採用した。

Google Maps を使用するためには、記録単位での緯度・経度の情報(以下、位置情報データと呼ぶ)が必要となる。計測データから、伸縮装置部で加速度が大きい応答を示すことがわかっている。また、首都高速道路の舗装の長さもわかっている。そこで、計測開始位置からの距離と舗装の長さから伸縮装置近傍での応答を割り出し、その部分でのピーク値を伸縮装置の位置と判定。その位置での緯度、経度データを伸縮装置部での位置情報データとした。また、舗装は橋脚間での記録とするため、上部に伸縮装置がないと判定は難しい。そこで、伸縮装置間の橋脚数を調べ、伸縮装置での位置情報データを線形補完する事により、橋脚での位置情報データを求め、舗装での位置情報データを橋脚間での位置情報データの平均とした。

以上に述べたデータベースを構築しておけば、あとは指標値履歴データをデータベースに追加していくだけということになる。各データのデータ項目については付録2を参考にされたい。

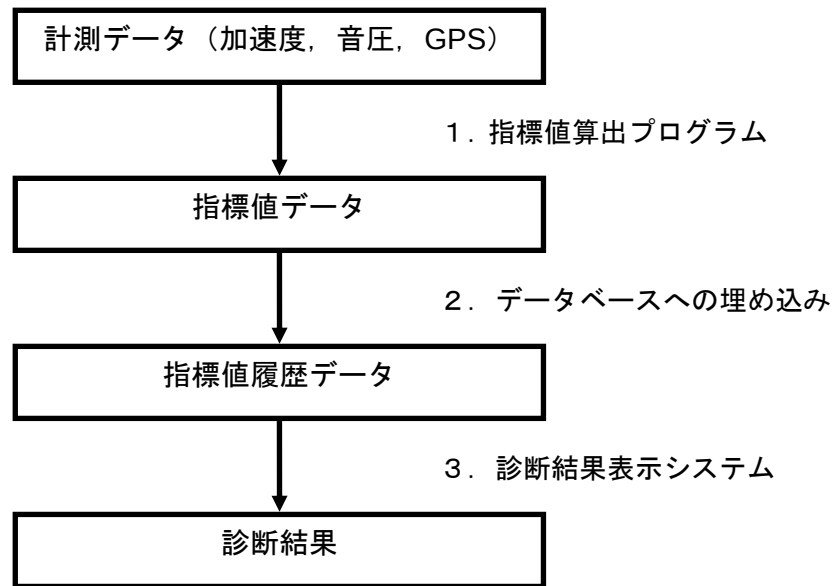


図 5-3 計測データから診断結果表示までの流れ

実際に計測データを取得した時の流れについて述べていく．指標値の算出から結果の表示までの全てを自動的に行うのが理想的であるが，ここではそのためのアプローチとして図 5-3 のように 3 段階を経て結果表示まで持っていく．

5.4 指標値算出プログラムの開発

計測システムからテキスト形式で出てくるデータをそのままの形式で保存しておくのは現実的ではなく，前述したそれぞれの量のデータに変換する必要がある．IRI についての指標値算出の流れを図 5-4 に示す．まず，計測システムから，加速度データ（車両鉛直加速度），音圧データ（音圧），GPS データ（緯度，経度，速度）を得る．1 本の道路を複数回計測し，経時変化を見る場合，データは距離で比較すると便利であるため，これらのデータは計測回ごとに同じ位置から計測を開始したものが望ましい．サンプリング周波数が加速度データは 1000Hz，音圧データは 20,000Hz，GPS データは 2Hz と異なるため，どの場所でどのような応答が出ているのか細かくはわからない．そこで，加速度データと GPS データ，音圧データと GPS データのサンプリング周波数を等しくするため，GPS データを線形補完によりアップサンプリングする．次に，アップサンプリングされた GPS データのうち，速度を使い，台形公式により距離に変換する．これにより，速度が変化した場合でも，距離の再現性を保つことが出来る．その後のプログラムはそれぞれによって異なるため，以下にそれぞれの処理を示す．平坦性，金属音についてはまだ，算出方法が確立していないため，今後の課題とする．

5.4.1 IRI

IRIは1つの区間に対し、1つの値を出すものであるため、求める区間長さを設定する必要がある。首都高速道路のように伸縮装置間で舗装を管理している場合は伸縮装置間の長さを区間長さとし、そうでない場合は第4章で述べたように160mとする。加速度データを距離軸へ変換した後、設定した区間を上記で算出した距離に当てはめ、その場所での加速度を用いて指標値を計算する。図5-4では設定した区間を伸縮装置間としている。その後、第4章で求めたフィルター使用してクォーターカーモデルの加速度へ変換し、記録単位での加速度のデータに分離する。最後に、加速度RMSを計算し、近似式(4.9)によりIRIを算出する。アウトプット形式は、舗装番号（たとえば0～160mを舗装番号1、160m～320mを舗装番号2）が1列、それに対応するIRIの値が1列、さらに計測した年月日が1列となるように配列を組む。この操作により、既存のデータベースに追加しやすくなる。

5.4.2 段差量

伸縮装置のアプローチ部における段差を求める場合、舗装の長さをあらかじめ設定しておく必要がある。まず、舗装の長さを用いて、伸縮装置部の位置を求める。伸縮装置部の位置からGPS速度のずれによる距離のずれを考慮して伸縮装置部の位置から±5mでの加速度の最大振幅を求める。その最大振幅から±2mの加速度RMSを算出し、第4章で求めた(4.24)式から、段差量が求まる。IRI、平坦性と同様にして、伸縮番号が1列、それに対応する段差量の値が1列となるように配列を組む。

5.5 データベースへの埋め込み

構造諸元データ、点検履歴データ、補修履歴データ、指標値履歴データ、GISデータがすでにデータベースに組み込まれているとして、新たに指標値データが取得されたときのデータベースへの追加を考える必要がある。

テキストデータで出力されたそれぞれの指標値データをデータベースの形式に変換（データ型などを宣言）し、既存の指標値履歴データのテーブルへ追加する。幸いなことに、Windows SQL ServerにはSQL Server Enterprise ManagerというGUIツールが存在し、データのインポート、追加が容易に行える。そのため、このツールを用いてデータベースへの追加を行えばよい。

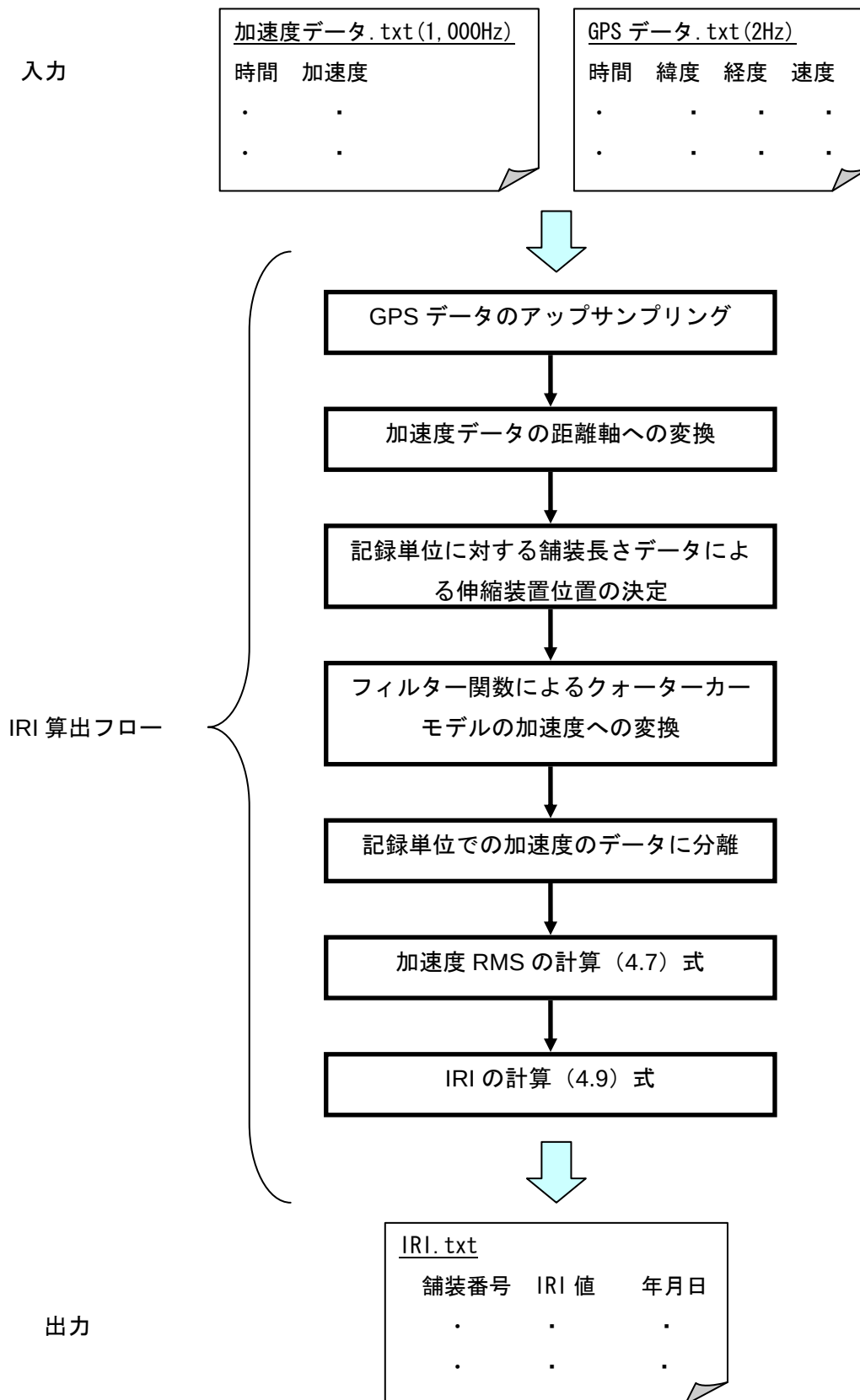


図 5-4 IRI 算出プログラムの流れ

5.6 画面表示による結果表示システムの流れ

結果表示には、Web アプリケーションを用いた。Web アプリケーションはクライアントアプリケーションと比べ利点が多い。例えば、ネットワーク接続環境下であれば、複数の事務所から計測したデータをデータベースに蓄積することや、リアルタイムに閲覧することができるなど、Web 上で操作できることで、データや診断結果を共有することができる。また、導入が簡単で、運用の手間とコストを押さえることができる。なお、本システムの Web アプリケーションは HTML によく似た言語である CFML(Cold Fusion Markup Language)によって開発されている。CFML は Allaire 社の Web アプリケーションソフト Cold Fusion で用いられるスクリプト言語であり、Web ブラウザからの要求に対し、Web サーバ上で処理を行い、結果をブラウザに送信する。本システムでは、見たい箇所の構造物の情報を表示するなど、Web ブラウザからの要求が必要となる。また、HTML に似たタグであるため、ASP や CGI などの同種の技術より開発期間が短い。開発ソフトには ColuFusionMX7 を用いた。

本研究で開発した結果表示システムの画面の流れに沿い、アウトラインを説明する(図 5-5)。まず、トップ画面において点検日を入力して診断ボタンを押す。すると、点検日における異常箇所の件数が画面 2 上に現れる。画面 2 内の異常件数をクリックすると、画面 3 において異常箇所を表示する。異常箇所のアイコンをクリックすると、画面 4 で詳細情報を表示するという流れである。画面 2 の異常件数の表示により、その点検日に異常があるかないか、即座に分かり、画面 3 の地図表示により、異常箇所がすぐわかる。

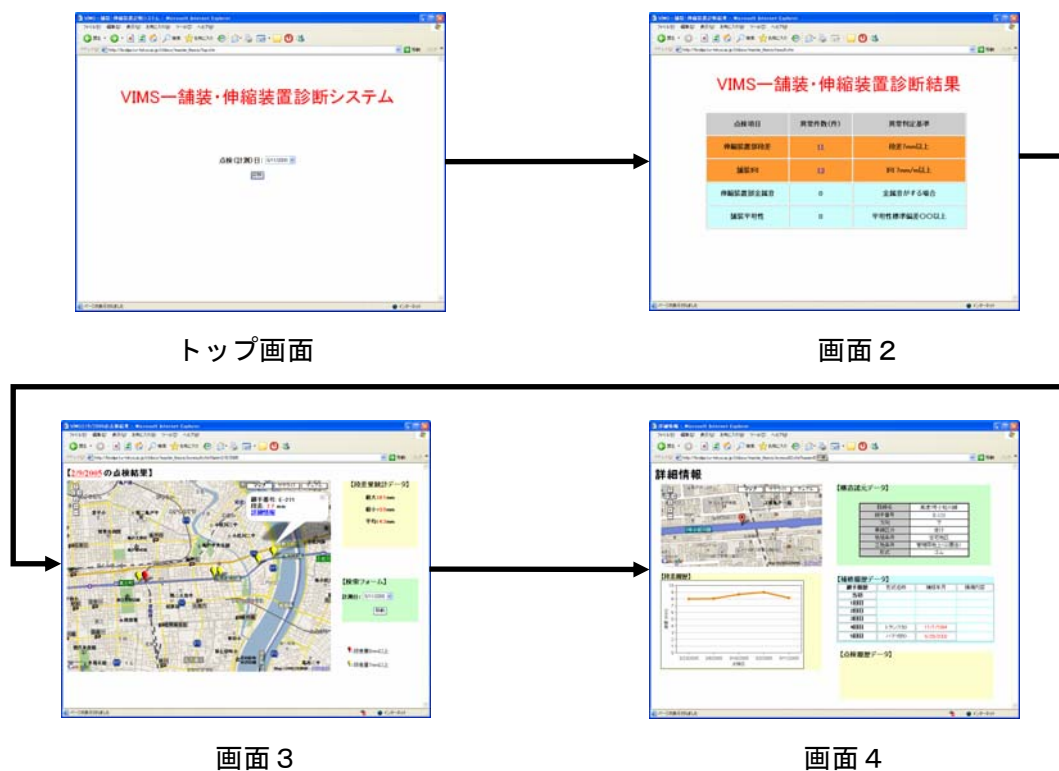


図 5-5 結果表示システムの流れ



図 5-6 舗装・伸縮装置診断システムトップ画面

各画面での詳細な内容について、道路管理者の操作とサーバ上の主な処理に分けて解説していく。

[STEP1] トップ画面の表示と点検日の入力 (図 5-6)

＜道路管理者の操作＞

- ・道路管理者は診断システムのトップページにアクセスし、トップ画面を表示する。
- ・点検（計測）日の日付を選択し診断ボタンをクリックする。

＜サーバ上の主な処理＞

- ・日付をデータベース内の指標値履歴のテーブルから読み出し、フォーム内に表示する



点検項目	異常件数(件)	異常判定基準
伸縮装置部段差	11	段差7mm以上
舗装IRI	13	IRI 7mm/m以上
伸縮装置部金属音	0	金属音がする場合
舗装平坦性	0	平坦性標準偏差〇〇以上

図 5-7 舗装・伸縮装置診断結果

[STEP2] 診断結果の表示（図 5-7）

<道路管理者の操作>

- ・ 各点検項目に対し異常件数を確認する（オレンジ色が異常のある点検項目）
- ・ 異常件数をクリックする（STEP3 へ）

<サーバ上の主な処理>

- ・ 前画面の診断ボタンを押すと、選択された日付かつ基準値を超えたデータに対し、正規化されたテーブルを結合する
- ・ 結合したテーブルの行数を数え、その数を表示する



図 5-8 異常個所の地図表示

[STEP3]異常個所の地図表示 (図 5-8)

<道路管理者の操作>

- ・ 画面中央の地図上のアイコンにより異常個所を確認する
- ・ 地図上のアイコンの色により、異常の程度を把握する
- ・ 画面右上の統計量データにより、その日の全体の状態と他の日の状態とを比較する
- ・ アイコンをクリックすることでポップアップする噴出しにより、舗装番号（継手番号）と指標値の量を確認する
- ・ 噴出しの中の詳細情報をクリックする (STEP4 へ)
- ・ 他の日の状態を見たい場合、検索フォームで計測日を選択し、ボタンにより移動する

<サーバ上の主な処理>

- ・ 異常件数をクリックすると、選択された日付かつ基準値を超えたデータに対し、正規化されたテーブルを結合し、基準値を超えたデータ（継手番号、加速度、経度、緯度）を取得する
- ・ JavaScript で継手番号、加速度、経度、緯度を新しい配列に組み込む

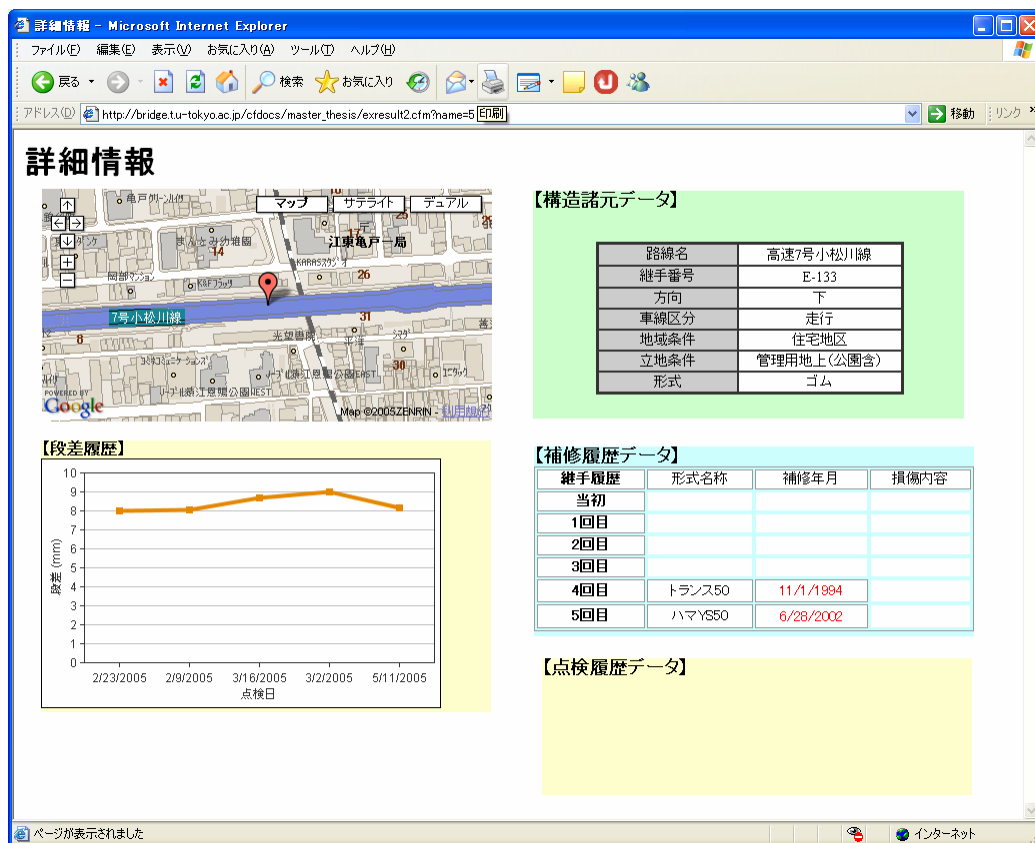


図 5-9 異常個所の詳細情報（伸縮装置）

- ・ For ループを使って、Google Maps 上にそれぞれのデータの経度・緯度で、指標値によって色分けされたアイコンをプロットする
- ・ 指クリックすると噴出しを表示し、その中に舗装番号（継手番号）と指標値の量、詳細情報へのリンクを表示する（ここまで JavaScript）
- ・ 統計量データについては、選択した日のデータの最大値、最小値、平均値を SQL で計算し取得する

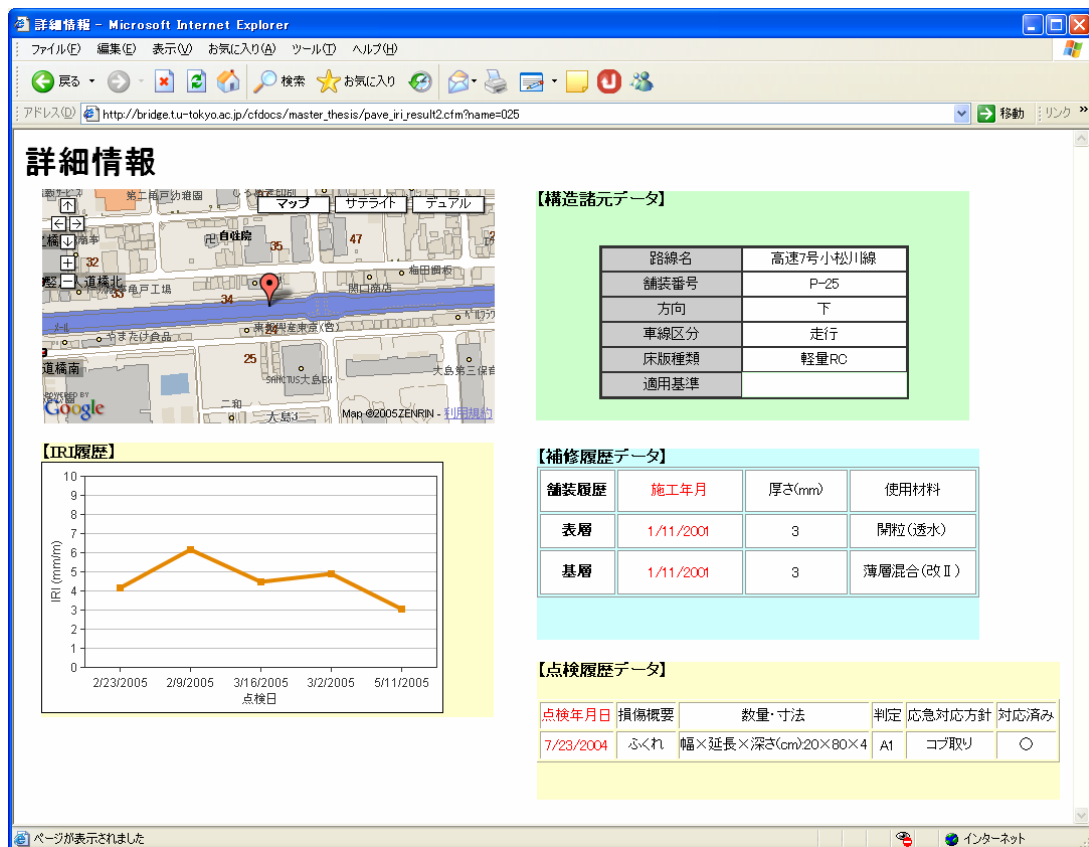


図 5-10 異常個所の詳細情報（舗装）

[STEP4] 選択箇所の詳細情報表示（図 5-9，図 5-10）

<道路管理者の操作>

- ・ 画面左上の詳細地図より，詳細な場所を確認する
- ・ 画面右上の構造諸元データから路線名，方向，車線区分，地域条件，立地条件，形式などを確認する
- ・ 画面右中央の補修履歴データから現在までの舗装・伸縮装置の補修履歴（形式名称，補修年月，補修内容）などを確認する
- ・ 画面右下の点検履歴データから，日常巡回車の目視によって点検されたデータを確認する
- ・ 画面左下の点検日と指標値の履歴グラフから，指標値の履歴を確認する
- ・ 以上のデータを踏まえた上で，劣化の予測を行い，補修計画を立てる

<サーバ上の処理>

- ・ 詳細情報をクリックすると，選択された舗装（伸縮継手）に対し，指標値履歴のテーブル・構造諸元のテーブル・補修履歴のテーブル・点検履歴のテーブルを結合し，その舗装（伸縮継手）のデータ（経緯度，加速度履歴，路線名，舗装番号（継手番号），形式…）を取得する
- ・ 拡大した地図では経緯度情報を使用して，アイコンをプロットする

- ・ 画面右の構造諸元データ，補修履歴データ，点検履歴データでは，それぞれに必要なデータを表示する
- ・ 指標値の履歴グラフでは指標値の履歴と点検日の情報を使って，Cold Fusion 内の関数でグラフを書いている

5.7 まとめ

本章では計測システムによって取得されたデータに対し，リアルタイムに点検結果を表示する診断システムを開発した．本診断システムは点検結果が地図表示によりわかり，また，構造諸元データ，補修履歴データ，点検履歴データも同時に閲覧できるため，補修計画などが立てやすく，道路維持管理のための診断システムとなっている．

5.8 今後の課題

本システムでは道路維持管理に必要なデータとして，首都高速道路管理者にアンケートを実施し，それを元に，診断システムを開発した．しかし，必要なデータを表示するまでとなっており，実際に補修計画を立てるのにはさらなるアプローチが必要である．例えば，以下のような項目が挙げられる．

- ・ 段差や IRI の履歴から余寿命を割り出し，補修の優先順位をつける
- ・ 地域条件で住宅地であれば，苦情を避けるため，補修の優先度を高くする
- ・ 伸縮装置の形式と伸縮装置の補修履歴データの補修年月の間隔から，その場所に最適な伸縮装置の形式を決定する（舗装の使用材料，厚さ，床版種類も同様）

また，本診断システムで表示しなかった項目，例えば，補修費用や予算を組み合わせることにより，コストの面からも耐久性の面からも，最も効率のよい道路維持管理を行えるシステムも将来的には考えられる．

このような補修計画を立てるための診断システムとなると，システム開発者がイメージしたものが道路管理者にとって使いやすいものであるとは限らない．そのため，まず動くシステムを開発者が作成し，道路管理者がそれを使用してみて，問題点や要望を挙げ，開発者がそれを改善し，さらに道路管理者が評価するといった繰り返しによって，開発していくことが必要となる．これは今後の課題とし，本システムでは補修計画に必要なデータの表示にとどめておく．

参考文献

- 1) 神波修一郎，吉原信義，中村秀明，宮本文穂：橋梁維持管理システムにおけるデータベースシステムの構築，土木情報システム論文集，vol.8，1999
- 2) 高橋栄司，飯室美紀：基礎からのデータベース設計，p.45，ソフトバンクパブリッシング，2002.12
- 3) Google Maps ホームページ
<http://maps.google.com/>
- 4) Google Maps API Documentation
<http://www.google.com/apis/maps/documentation/>

第6章 実道路へのシステムの適用

6.1 概説

本章では前章までに開発したシステムの有効性を示すため、実際の道路にシステムを適用させる。まず、本研究室で管理データを所有している首都高速7号小松川線下りに対し、本システムを適用し、結果を考察する。続いて、本研究室で管理データを所有していない、首都高速全線で、本システムを適用する。

6.2 首都高速7号小松川線下りへの適用と考察

本研究室で管理データ（舗装伸縮装置の構造諸元、補修履歴、点検履歴）を所有している、首都高速7号小松川線下りに対し、本システムを適用した。

6.2.1 システムの適用方法

（1）計測方法

開発した計測システムを用いて、以下の要領で行った

- ・ 計測日：2005年11月2日、12月29日、2006年1月28日
- ・ 対象場所：首都高速7号小松川線下り左車線、錦糸町料金所から谷河内（首都高速と京葉道路の境）の7.8km、伸縮装置195レーン、舗装218箇所
- ・ 車両速度：可能な限り60km/h

（2）舗装・伸縮装置の状態

それぞれの計測日の間で、大規模な工事（舗装の打ち替え、伸縮装置の取替え工事）は行っていない。

（3）診断方法

評価する指標を舗装のIRIと伸縮装置部での段差量とした。IRIはわが国では用いられていないため、診断基準が策定されていない。また、他国のIRIの診断基準も国々によってばらばらである。図1-5に示した道路の種類別のIRIの範囲より、空港滑走路および高速道路のIRIは通常2mm/m以下となっている。しかし、この評価は評価区間160mに対する評価であり、舗装の管理区間が伸縮装置間となっており、その舗装ごとに長さが違うため、この評価を使用するには抵抗がある。そこで、異常件数の表示には参考としてこの値を用い、地図表示には乗り心地の悪い舗装上位10箇所を示すことにした。また、段差量については首都高速道路での修繕基準が5mmであるため、その値を用いた。

舗装・伸縮装置診断結果

点検項目	異常件数(件)	異常判定基準
伸縮装置部段差	180	段差5mm以上
舗装IRI	8	IRI 2mm/m以上
伸縮装置部金属音	0	金属音がする場合
舗装平坦性	0	平坦性標準偏差〇〇以上

図 6-1 11月2日の異常箇所件数

舗装・伸縮装置診断結果

点検項目	異常件数(件)	異常判定基準
伸縮装置部段差	175	段差5mm以上
舗装IRI	1	IRI 2mm/m以上
伸縮装置部金属音	0	金属音がする場合
舗装平坦性	0	平坦性標準偏差〇〇以上

図 6-2 12月29日の異常箇所件数

舗装・伸縮装置診断結果

点検項目	異常件数(件)	異常判定基準
伸縮装置部段差	176	段差5mm以上
舗装IRI	10	IRI 2mm/m以上
伸縮装置部金属音	0	金属音がする場合
舗装平坦性	0	平坦性標準偏差〇〇以上

図 6-3 1月28日の異常箇所件数

6.2.2 診断結果と考察

(1) 異常件数

まず、それぞれの計測日での異常件数を図 6-1～図 6-3 に示す。まず図 6-1 より、IRI の評価対象箇所のうち、5%程度が 2mm/m 以上となっている。また、段差量については伸縮装置のレーン数は 195 であるので、ほぼ全ての伸縮装置において、修繕基準を超えているのが分かる。異常件数の経時変化を見てみると、IRI、段差とも数が多少ばらつく。件数は増加したり減少したりしているため、経時変化によるものとは考えにくい。計測車両が走行する際の試験条件によるものと考えられ、第 5 章で求めたとおり、誤差が生ずると考えられる。

(2) 異常箇所

次に、それぞれの計測日での異常箇所を図 6-4～図 6-9 に示す。図は 1 つの計測日に対する IRI

の異常箇所、段差量の異常箇所の順に並んでいる。IRI の地図表示では前述のとおり、2mm/m とは関係のない、下位 10 箇所を赤色のアイコンで示している。段差量については 5mm 以上のものを地図表示すると、ほぼ全ての伸縮装置に対しアイコンがプロットされ、わかりにくい。そのため、10mm 以上のものを黄色のアイコンで、下位 10 箇所を赤色のアイコンで示している。また、IRI、段差量とも、最も値の大きい箇所は噴出しでポップアップさせている。ただし、最大値と他の下位 9 箇所について、大きな差はないということが、それぞれの計測日の結果から分かっている。

11 月 2 日の診断結果から見ていく。IRI の下位 10 箇所は錦糸町料金所を超えた亀戸駅の南付近に多く分布しており、最大値もその中に存在する。他は一之江出入口付近など、点々としている。段差量については、統計量の平均値を見ても分かるように、多くの箇所が 10mm 以上の段差量となっている。その中でも荒川大橋と一之江出入口の間にある伸縮継手が段差量 18.3mm と管理基準に比べ、非常に大きい値となっている。また、IRI の大きかった錦糸町料金所を超えた付近でも大きな段差が多く見られる。

12 月 29 日は、他の日と比べ、全体的に小さい値となっている。これは IRI と段差量それぞれの平均値、IRI の最小値を見れば分かる。試験条件が他の日と異なったため、このような結果になったと考えられる。このようなことは、本システムが実際の点検で運用される場合でも、多々あると考えられる。その場合、平均値との差を考えたり、思い切ってデータを捨てたりするなどの対処が必要となる。その対処方法は今後の課題とする。IRI の異常箇所を 11 月 2 日のデータと比較すると、最大となる箇所や値は違うものの、下位 10 箇所は似た箇所に分布していると言える。また、段差量についてはアイコンの数が減り、最大となる箇所と値は異なるものの、下位 10 箇所は同様の場所に分布していると言える。

最後に 1 月 28 日の診断結果を見る。IRI の下位 10 箇所は錦糸町料金所を超えた付近に最大値が存在し、また一之江出入口付近にも多数存在する。一之江付近で 11 月 2 日、12 月 29 日にも存在していたものの、その量は少なく、変化が見られる。段差量の下位 10 箇所は 11 月 2 日、12 月 29 日と同様の箇所に存在している。最大箇所は 12 月 29 日の箇所と同じである。最大値は 11 月 2 日と比較すると小さいが、これは試験条件によるばらつきであると考えられる。

以上をまとめると、各計測日によって値にばらつきはあるが、異常箇所を見ると値の大きい箇所はどの計測日でも大きいと言える。小さい箇所についても、同様のことを確認している。

(3) 詳細情報

詳細情報として、IRI と段差量に対し、3 回の計測間で、平均して値の大きい箇所、平均して値の小さい箇所を図 6-10～図 6-13 に示す。大きい箇所と小さい箇所の詳細情報を比較することにより、その原因を簡単に考察する。

IRI に対し、選択した値の大きい箇所は錦糸町料金所を超えた付近の舗装 (P-9) であり、小さい箇所は小松川出入口で入口付近の舗装 (P-104) である。両者の IRI の履歴グラフを見ても、値のばらつきがあることと、時間間隔が 4 ヶ月と短いこと、プロット数が少ないことにより、舗装が劣化しているかどうかは判断しにくい。他の箇所の舗装で、IRI が急激に大きくなっている

ものがあつたとしても、この原因から、劣化しているとは言いがたい。劣化の判断には長期間かつ高頻度での計測が必要であり、これは今後の課題とする。IRI の大きさの違いの原因を考察するため、両者の構造諸元データ、補修履歴データ、点検履歴データの違いを比較する。両者で違うのは床版種類、適用基準、施工年月、表層・基層の厚さ、使用材料、過去の損傷の有無である。その中でも施工年月の違いが、IRI の大きさの違う主な原因ではないかと考えられる。前述したように、舗装の打ち換え頻度は、交通量の少ないところで7年～8年である。P-9では打ち換えするはずの施工年月を大幅にこえている。それが元で適用基準が古いものとなり、表層・基層の厚さ、使用材料が古い基準のままであると考えられる。また、2005年にもポットホールが発生しているのも、そのことが原因で舗装が劣化しているためであると考えられる。ただし、ここで用いたIRIの値は舗装の長さにも影響するため、値の大きいもの全て、施工年月が古いとは言いきれないことに注意が必要である。

段差量に対し、選択した段差の大きい箇所は小松川出入口と一之江出入口の間の伸縮装置(E-347)であり、小さい箇所は一之江出入口を超えたカーブが始まる箇所の伸縮装置(E-437)である。段差量もIRIと同様の理由で、履歴グラフからは劣化しているかどうか判断しがたい。段差量の大きさの違いの原因を考察するため、両者の構造諸元データ、補修履歴データ、点検履歴データの違いを比較する。補修履歴データを見ると、小さい箇所の伸縮装置はノージョイント化されており、すでに伸縮装置がない状態である。このため、小さい段差量となっている。近年、伸縮装置による近隣住民への振動や騒音が原因のため、伸縮装置をノージョイント化が進められており、その一環でノージョイント化されたものと考えられる。一方、段差量の大きい箇所では、現在の伸縮装置は5年前に交換されたものであり、それほど古くはない。舗装のわだち掘れが原因で段差が起きていると考えられる。構造諸元データを見れば分かるように、この伸縮装置は住宅地区にあり、振動や騒音により近隣住民へ影響を及ぼすと考えられる。段差は管理基準の3倍程度となっており、段差を舗装材等により早急に埋める必要があると考えられる。

詳細情報から簡単に考察したが、本システムにより、データを長期間、高頻度取得することで、詳しい刑事変化がわかり、より深い考察ができるであろう。



図 6-4 11 月 2 日の IRI 異常箇所地図表示



図 6-5 11 月 2 日の段差量異常箇所地図表示

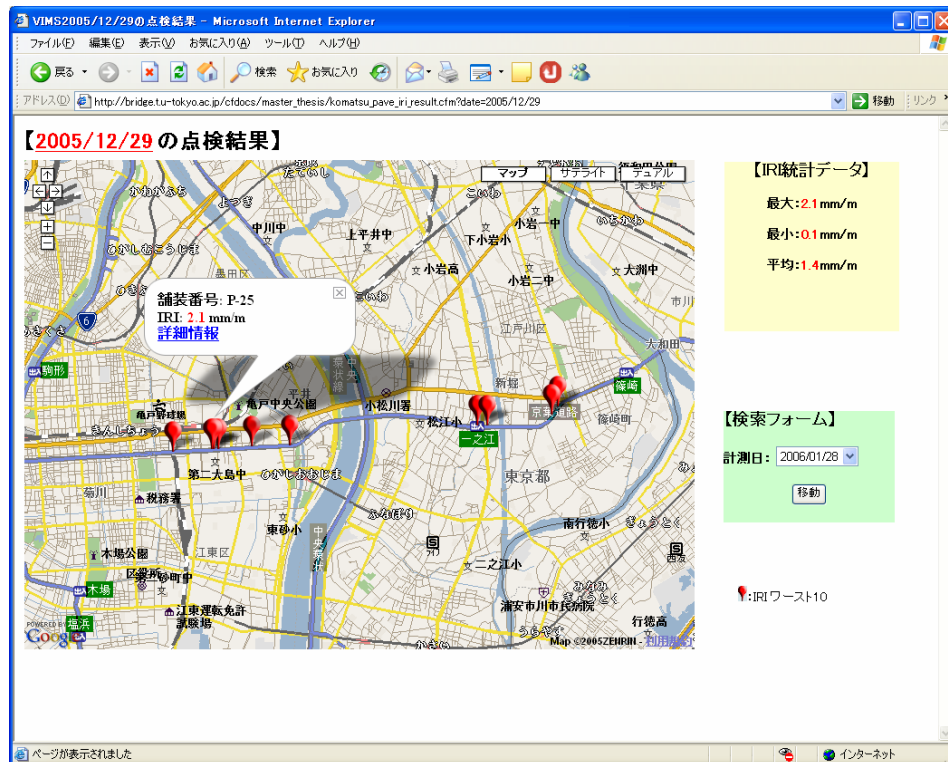


図 6-6 12 月 29 日の IRI 異常箇所地図表示

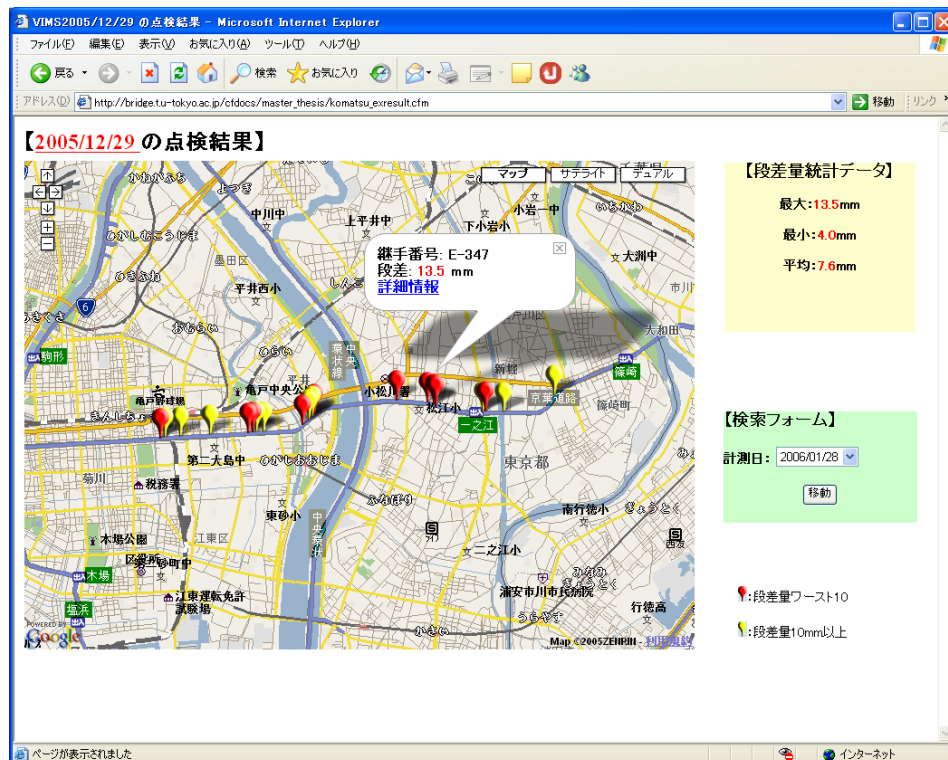


図 6-7 12 月 29 日の段差量異常箇所地図表示

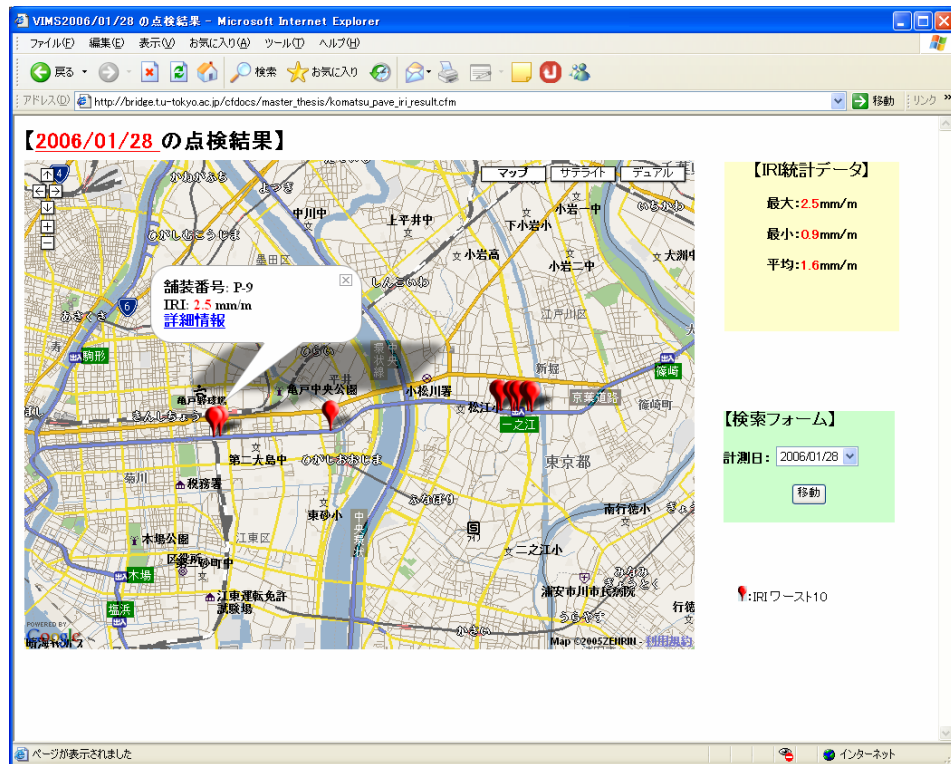


図 6-8 1 月 28 日の IRI 異常箇所地図表示

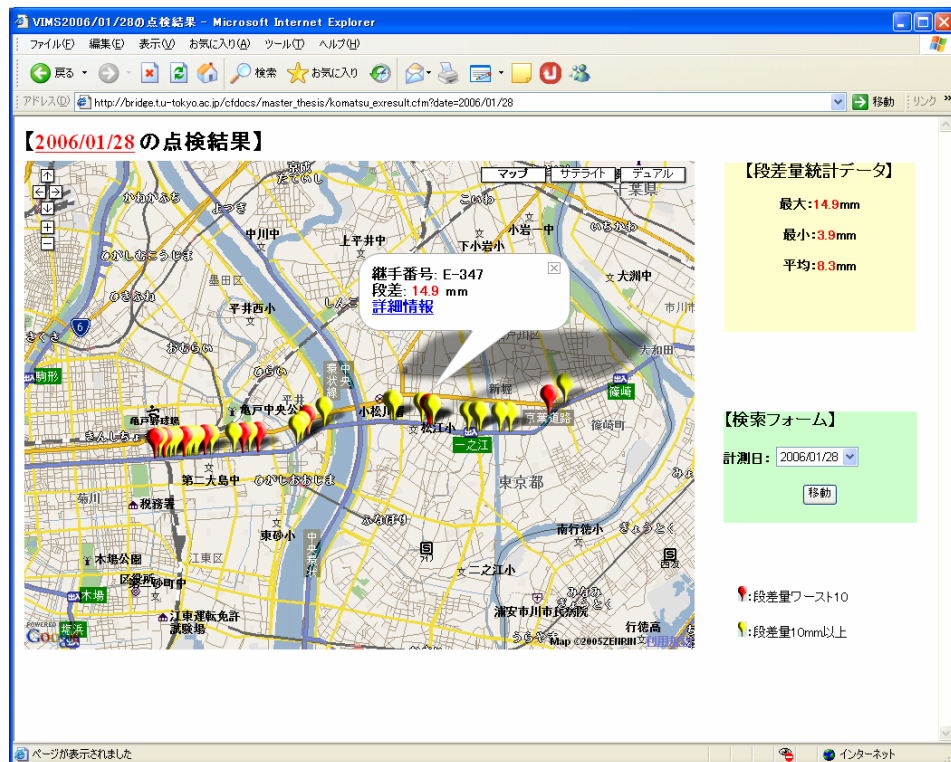


図 6-9 1 月 28 日の段差量異常箇所地図表示

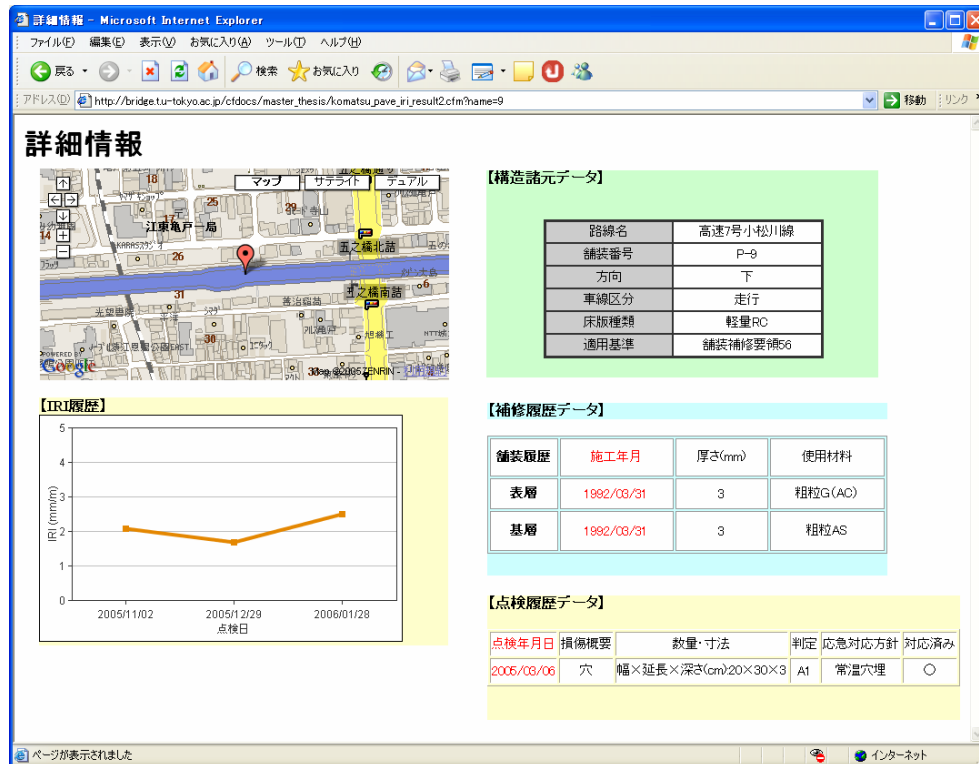


図 6-10 IRI の大きい舗装の詳細情報

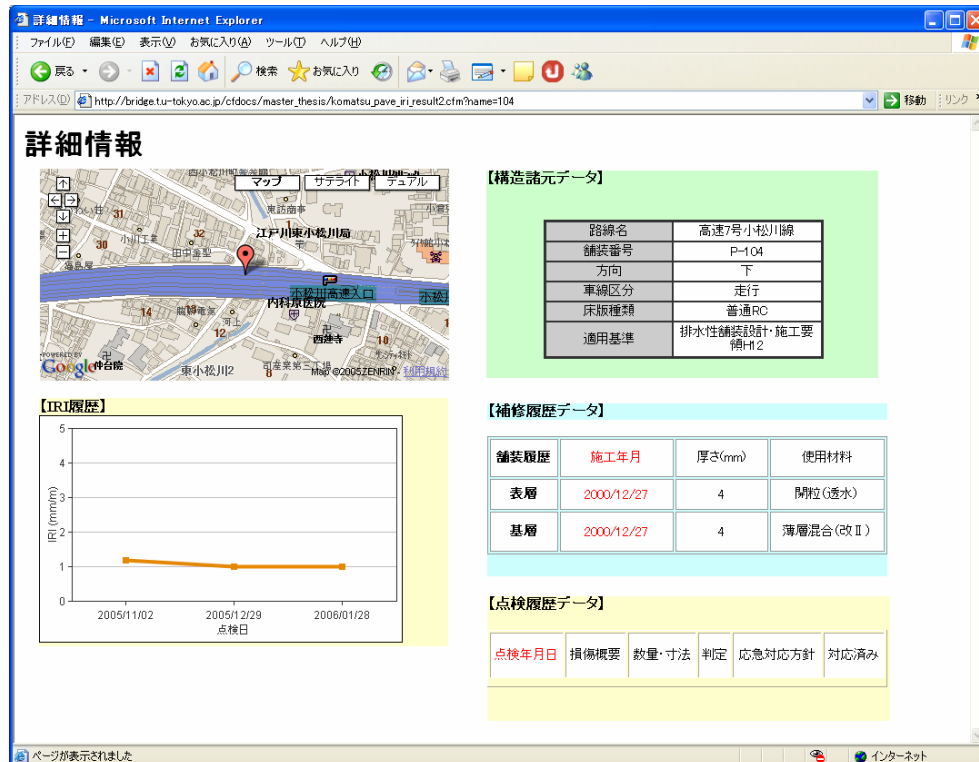


図 6-11 IRI の小さい箇所の詳細情報



図 6-12 段差量の大きい箇所の詳細情報

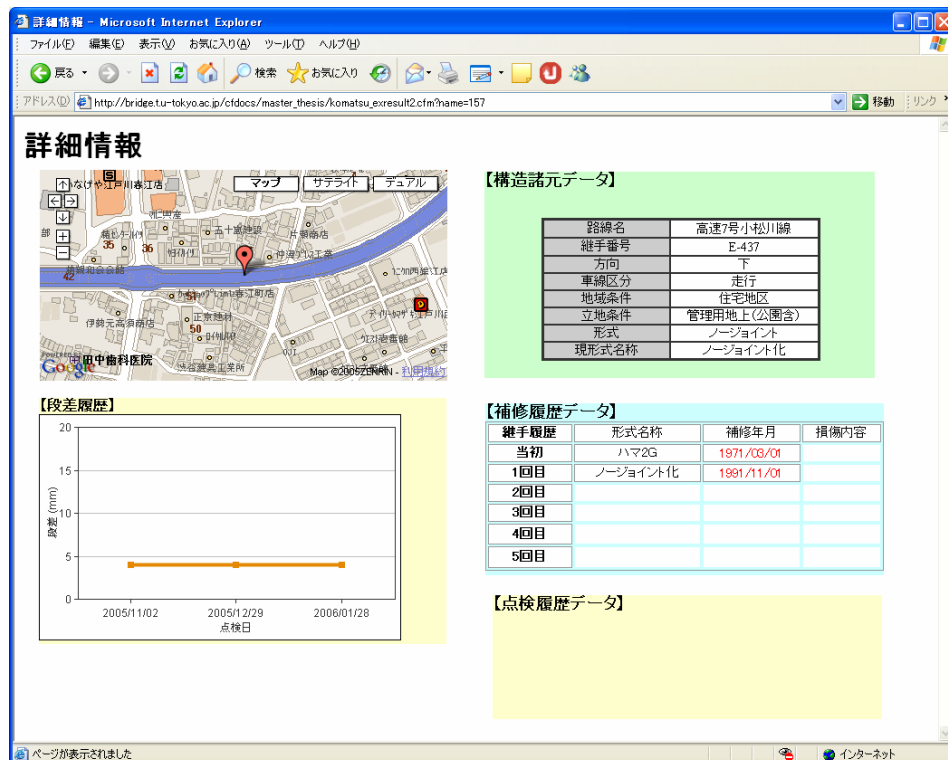


図 6-13 段差量の小さい箇所の詳細情報

6.3 首都高速全線への適用

続いて、本研究室において管理データを所有していない、首都高速全線に対して、本システムを適用する。それにより、計測車両を走行させるだけで、舗装の状態がわかることを示す。

6.3.1 システムの適用方法

(1) 計測方法

2005年12月29日に首都高速全線の計測を以下の要領で行った。

○ 対象場所：

- ・ 都心環状線と中央環状線の内回り、外回り
- ・ 1号～11号線，八重洲線，川口線，大宮線，湾岸線（鶴見つばさ橋，横浜ベイブリッジを含む）の上下線

○ 車両速度：可能な限り 60km/h

(2) 診断方法

全線の構造諸元データ，点検履歴データ，補修履歴データは入手困難なため，第5章の診断システムのように詳細情報を提示することはできない。また，舗装の長さデータもないため，伸縮装置部での段差量，金属音を提示するのは難しい。そこで，ここでは指標値を IRI に絞り，160m 間隔で IRI を求め，地図上にプロットしていくことにした。その地図により，計測日現在でどこが悪いのかを判断できると考えられる。計測区間を 160m とすると，伸縮装置がある箇所とない箇所が存在する。車両応答から求める IRI は衝撃的な応答を再現できないことから，伸縮装置による応答は影響が小さいと考えられる。そのため，160m 間隔で IRI を求め，その中に伸縮装置があったとしても舗装の状態を知ることができると考えられる。

6.3.2 診断結果

結果を地図の見易さから，放射線下りと環状線の外回り，放射線上りと環状線の内回りとに分けて示す。また，一度に全ての結果を地図上にアイコンでプロットすると，結果がわかりにくいので，乗り心地の悪い舗装とよい舗装とに分けて示す。

(1) 放射線下り，環状線外回りにおける乗り心地の悪い舗装

まず，放射線下り，環状線外回りにおいて乗り心地の悪い舗装を示す。図 6-14 右上の統計データを見ると，最大が 2.49 と IRI の評価で高速道路の範囲を超えている。また，平均値は高速道路の範囲内であり，大部分は高速道路の範囲内にあるといえる。異常個所の地図において黄色のアイコン，赤色のアイコンがプロットしてあるのは，2mm/m 以上の箇所である。赤色のアイコンは中でも特に IRI の大きい箇所上位 10 箇所を示している。地図を見ると黄色・赤色のアイコンは都心に集中しているのが分かる。この原因として，都心に集中する交通量の影響や新設，打ち換え後の舗装の供用期間が考えられる。この日，最も乗り心地が悪かったのは 4 号新宿線の初台付近である。他に乗り心地が悪かったのは，3 号渋谷線三軒茶屋付近，都心環状線浜崎橋 JCT

付近，都心環状線溜池トンネル付近である．乗り心地の悪い箇所の拡大地図を図 6-15～図 6-18 に示す．

(2) 放射線下り，環状線外回りにおける乗り心地のよい舗装

続いて，下り，環状線外回りにおいて乗り心地のよい舗装を示す．図 6-15 の異常箇所の地図において緑色のアイコン，青色のアイコンがプロットしてあるのは，1mm/m 以下の箇所である．青色のアイコンは其中でも特に IRI の小さい上位 10 箇所を示している．地図を見ると緑色・青色のアイコンは郊外に集中しているのが分かる．この原因も (1) と同様であると考えられる．この日，最も乗り心地がよかったのは川口線の新郷付近である．他に乗り心地がよかったのは大宮線西浦和付近，湾岸線鶴見つばさ橋付近である．

(3) 放射線上り，環状線内回りにおける乗り心地の悪い舗装

放射線上り，環状線内回りについて，乗り心地が悪い舗装の診断結果を図 6-23 に示す．アイコンは下りのものと同様にプロットしてある．こちらも下り，外回り同様，都心に悪い箇所が集中している．統計データを見ると，下りと比べ，最大値，平均値については大きな差がないものの，基準(2mm/m)以上のものが多く存在する．この日，放射線上り，環状線内回りにおいて，最も乗り心地が悪かったのは 3 号渋谷線の渋谷付近である．他に乗り心地が悪かったのは，湾岸線鶴見つばさ橋付近，都心環状線一ノ橋 JCT 付近，新宿線初台～三宅坂 JCT 付近である．乗り心地の悪い箇所の拡大地図を図 6-24～図 6-27 に示す．

(4) 放射線上り，環状線内回りにおける乗り心地のよい舗装

放射線上り，環状線内回りにおいて乗り心地のよい舗装を図 6-28 示す．アイコンのプロットは下りのものと同様である．地図を見ると下りと同様，アイコンが郊外に集中しているのが分かる．統計量は下りと大きく差がない．この日，放射線上り，環状線内回りにおいて最も乗り心地がよかったのは大宮線の新都心付近である．与野～新都心間は 2004 年 5 月に開通したばかりであるため，乗り心地が良かったと考えられる．他に乗り心地がよかったのは川口線足立入谷付近，湾岸線東扇島付近である．乗り心地のよい箇所の拡大地図を図 6-29～図 6-32 に示す．

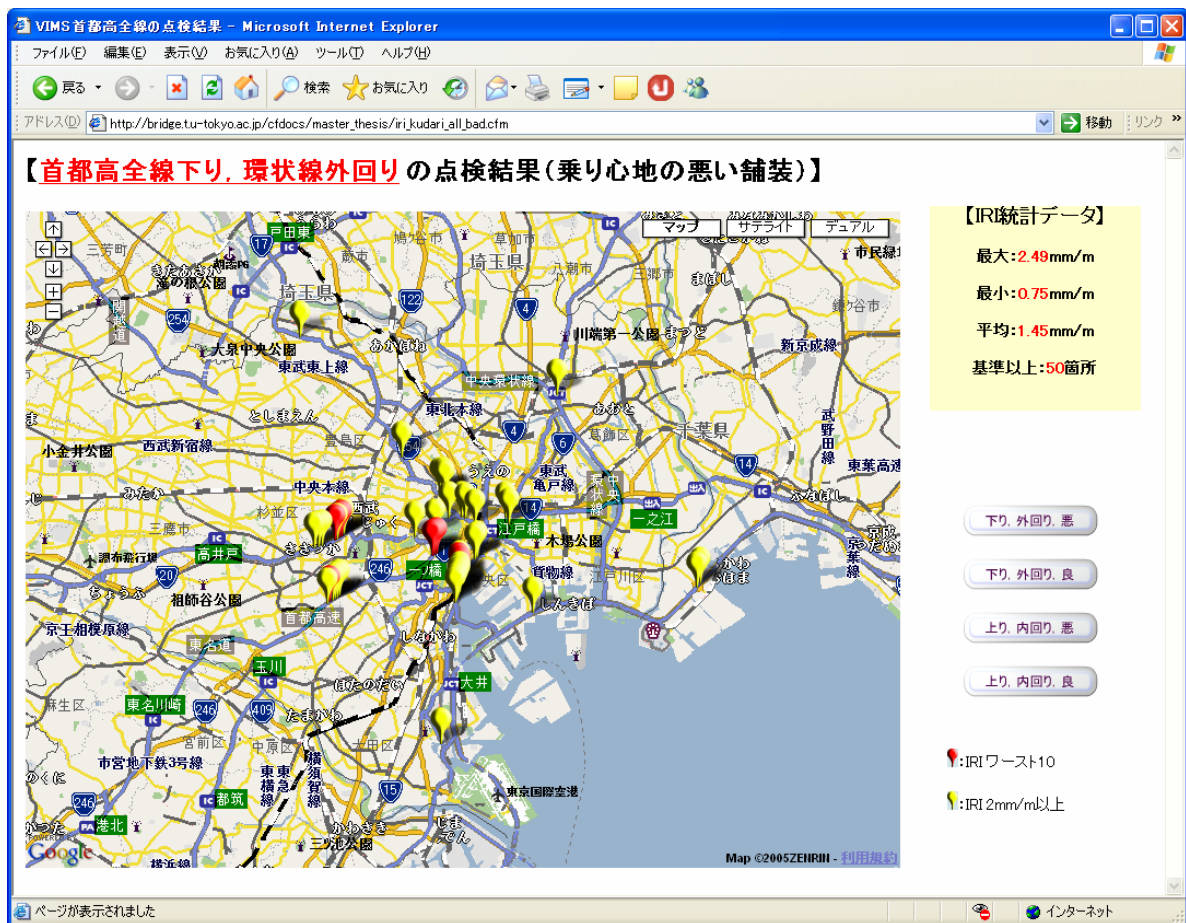


図 6-14 首都高放射線下り、環状線外回りの診断結果（乗り心地の悪い舗装）



図 6-15 新宿線下り初台付近での悪い舗装



図 6-16 渋谷線下り三軒茶屋付近での悪い舗装



図 6-18 都心環状線浜崎橋 JCT 付近での悪い舗装

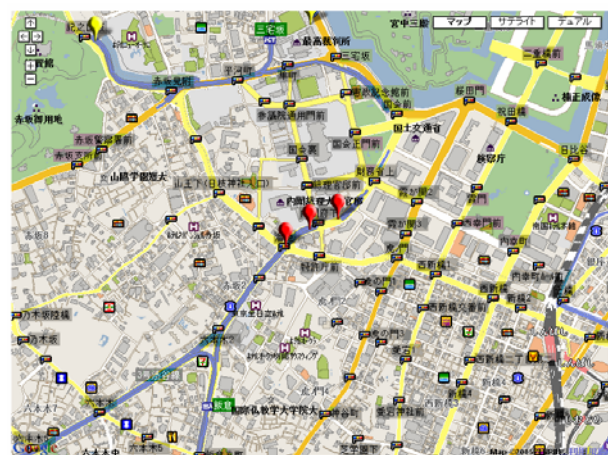


図 6-17 都心環状線溜池付近での悪い舗装

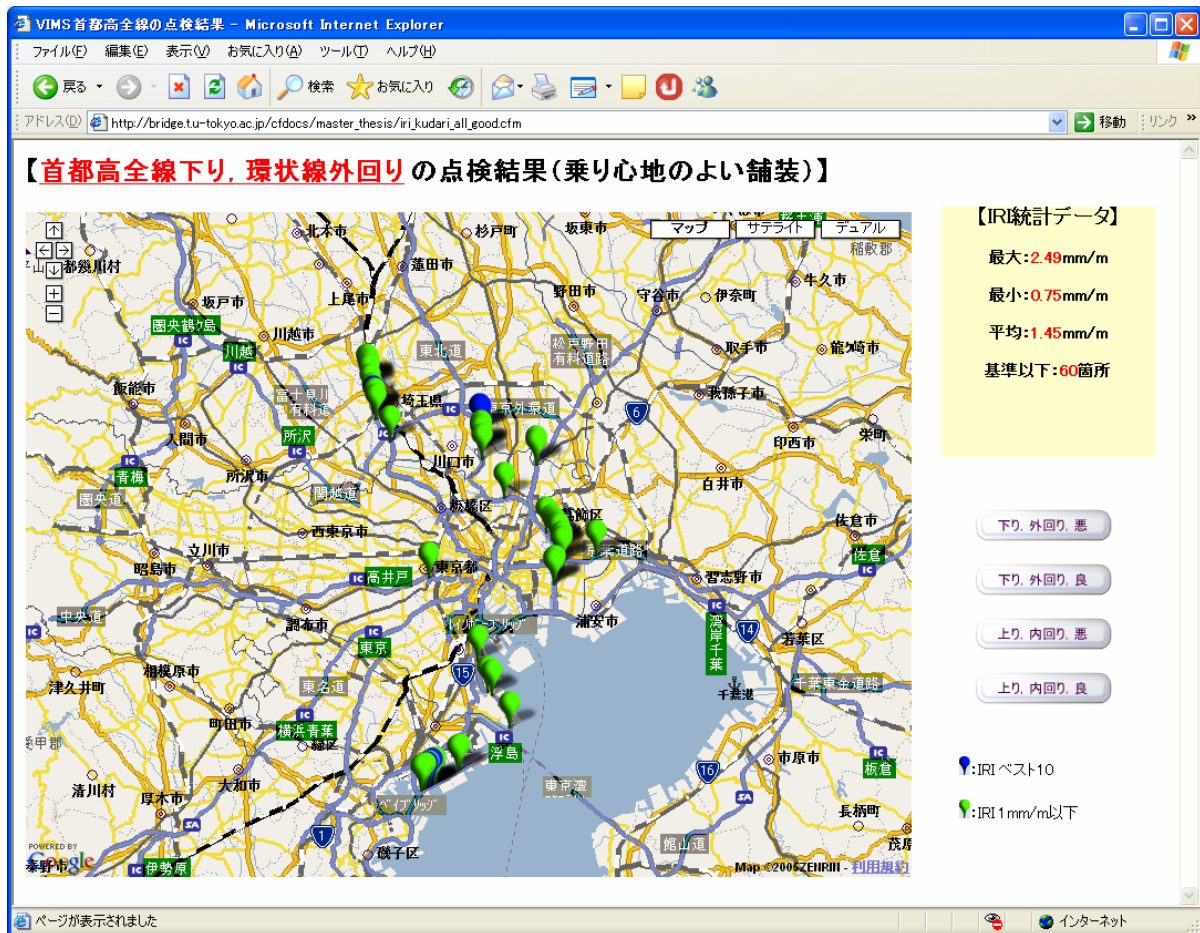


図 6-19 首都高放射線下り、環状線外回りの診断結果 (乗り心地のよい舗装)



図 6-20 川口線新郷付近でのよい舗装



図 6-21 大宮線西浦和付近でのよい舗装



図 6-22 湾岸線鶴見つばさ橋付近でのよい舗装

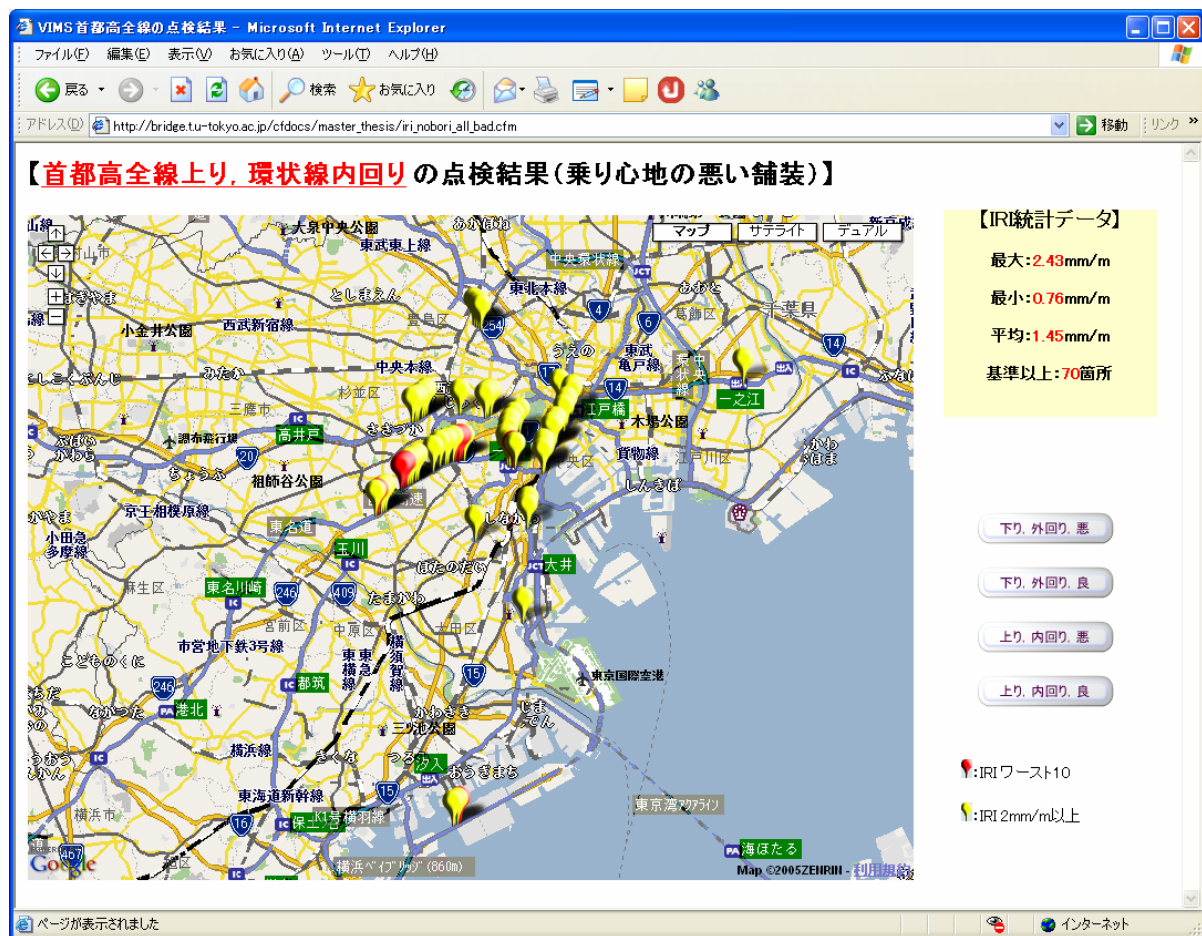


図 6-23 首都高放射線入り、環状線内回りの診断結果 (乗り心地の悪い舗装)



図 6-24 渋谷線渋谷付近での悪い舗装



図 6-25 湾岸線鶴見つばさ橋付近での悪い舗装



図 6-26 都心環状線一ノ橋付近での悪い舗装



図 6-27 新宿線三宅坂～初台での悪い舗装

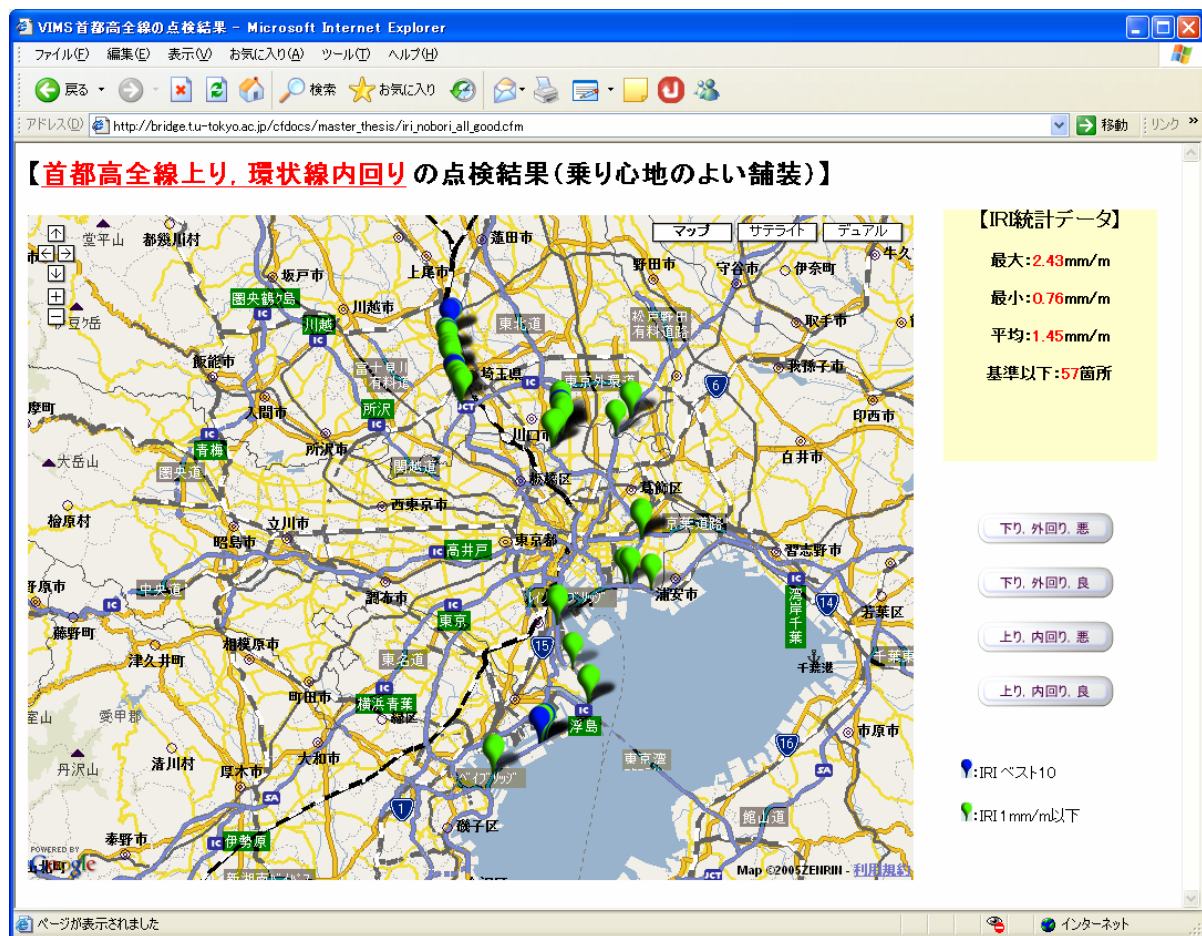


図 6-28 首都高放射線上り、環状線内回りの診断結果(乗り心地のよい舗装)



図 6-29 大宮線でのよい舗装



図 6-30 川口線足立入谷付近でのよい舗装



図 6-31 湾岸線東扇島付近でのよい舗装

表 6-1 路線別の乗り心地のよい舗装, 悪い舗装の 1km あたりの箇所数

路線名		開通年度 (年)	通行台数 比率(%, H15)	区間延長に対する悪い舗装, 良い舗装の割合(%)					
				下り, 外回り		上り, 内回り		平均	
				悪い	良い	悪い	良い	悪い	良い
C1	都心環状線	1967	—	18.4	0.0	27.0	0.0	22.7	0.0
C2	中央環状線	2002	3.1	0.6	9.1	0.0	2.4	0.3	5.7
1号	上野線	1969	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1号	羽田線	1966	8.3	7.0	0.0	4.6	0.0	5.8	0.0
2号	目黒線	1967	3.7	0.0	0.0	2.7	0.0	1.4	0.0
3号	渋谷線	1971	7.8	8.1	0.0	29.6	0.0	18.8	0.0
4号	新宿線	1976	8.2	10.7	1.2	11.9	0.0	11.3	0.6
5号	池袋線	1993	7.0	3.7	0.7	3.0	0.0	3.3	0.4
6号	向島線	1981	2.7	3.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
6号	三郷線	1984	2.7	0.0	3.0	0.0	4.5	0.0	3.8
7号	小松川線	1970	4.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.8	0.0
9号	深川線	1979	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11号	台場線	1993	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
s1	川口線	1987	4.9	0.0	11.7	0.0	16.9	0.0	14.3
Y	八重洲線	1972	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B	湾岸線	1994	16.8	1.5	2.0	0.0	4.5	0.8	3.3
B	湾岸線(神)	2001	7.0	0.0	6.9	1.6	4.3	0.8	5.6
s2, s5	大宮線	2004	3.2	0.0	16.2	0.0	23.2	0.0	19.7
平均				3.2	3.9	4.6	3.7	3.9	3.8

6.3.3 考察

路線別での舗装の乗り心地について考える。路線ごとに乗り心地の悪い舗装とよい舗装の箇所数を求め、それに評価区間である 160m を掛け、さらに、区間延長で割ることにより、区間延長に対する乗り心地の悪い舗装, よい舗装の割合を求めた。路線別にまとめたものを表 6-1 に示す。放射線下り, 環状線外回りについて舗装が悪い箇所は都心環状線が最も多く、次いで新宿線, 渋谷線, 羽田線, 池袋線となっている。逆に舗装が最もよいのは大宮線であり、次いで川口線, 中央環状線, 湾岸線(神奈川)となっている。乗り心地の悪い舗装とよい舗装の路線は、はっきり別れていることがわかる。放射線下り, 環状線外回りについては渋谷線が最も悪く、次いで都心環状線, 新宿線, 羽田線, 池袋線となっている。また、大宮線が最も良く、次いで川口線, 三郷線, 湾岸線となっている。このことから、上下線, 内外回りにおける、悪い路線, 良い路線は大体同様であると言える。平均すると乗り心地の悪い上位 3 路線は都心環状線, 渋谷線, 新宿線となっており、舗装の良い上位 3 路線は大宮線, 川口線, 中央環状線となっている。この結果は供用期間, 舗装の施工年月, 交通量に依存するものであると考えられる。

6.4 まとめと今後の課題

管理データを所有している首都高速 7 号小松川線下り, 管理データを所有していない首都高速全線に対し, 本システムを適用し, その有効性を示した。

今後の課題を以下に述べる。小松川線では, 指標値にばらつきがあることと, 時間間隔が 4 ヶ月と短いこと, プロット数が少ないことにより, 舗装・伸縮装置の劣化の判断ができなかった。そのため, 今後は長期間, 高頻度のデータ取得し, 経年変化により劣化の判断をする基準を確立

する必要がある。

また、本章では詳細情報に対し、簡単な考察で終わっているが、データマイニング技術を導入することにより、更なる発見が得られるだろう。なお、データマイニングとは、データベース等に蓄積されたデータ群より、隠された知識や、予想と異なる知識、新しい規則を発見するという技術で在る。本システムのデータベースにこの技術を付加することで、損傷が起こりやすい環境や材料、条件に関する新たな発見が可能となるであろう。

第7章

高速視覚センサとデジタル一眼レフカメラを用いた 伸縮装置および路面性状の合理化診断システムの構築

道路橋の車両走行時における事故や振動，騒音問題の原因となる，伸縮装置の老朽化や路面性状劣化に対して，現在行われている点検・診断方法に代わる，新たな合理化診断システムの構築を目的とする．まず，高速視覚センサであるビジョンチップとデジタル一眼レフカメラを組み合わせ，合理的な画像データの取得を可能とする検知・集録システムを構築する．次に，集録された画像データに対して，伸縮装置および路面性状の特徴量を画像解析によって自動的に抽出するアルゴリズムを開発する．

7.1 はじめに

自動車産業や道路交通網が急速な発展を果たした高度経済成長期に，建設ラッシュによって生み出された膨大な数の道路橋は，その建設から30年以上が経過しようとしている現在，都市化の進展と道路橋の老朽化によって，車両走行時に発生する振動や騒音の問題が急増している．車両走行時の振動や騒音により運転者や周辺住民が被る不快感は，その大半が道路橋の伸縮継手部の異常と走行路面の老朽化が直接的な原因であり，これらの異常が発生した場合，いかに早期にその異常箇所を発見し，迅速かつ適切な対処を行うかが，構造的欠陥を要因とする事故を未然に防ぐための鍵となる．



図-1 伸縮装置の目視検査



図-2 路面性状検査車の例

7.2 現行の診断システム

これらに対し現状では，道路橋伸縮装置に対する検査員の巡回による目視点検と，走行路面の異常に対する路面性状検査車を用いたレーザ照射，画像診断がそれぞれ別個に行われている（図-1，図-2）．しかしながら，伸縮装置の目視検査は一般の交通を規制しなければならないうえに，その診断作業の時間効率は決して良いとは言えない．また，検査車や診断装置などはシステムの導入コストが非常に高い．さらに，路

面性状を対象とした現在の画像診断は，点検対象区間全域の路面画像を CCD カメラ等により撮影し，データベースに持ち帰った膨大な画像データを検査員が逐一目視し，ひび割れやポットホール，剥離などの損傷程度を判定するという非常に非効率なものである．そのため，高頻度に行われることが望まれる日常点検に要する時間と労力は多大であり，現状のシステムのままでその頻度を高めることは非常に困難である．

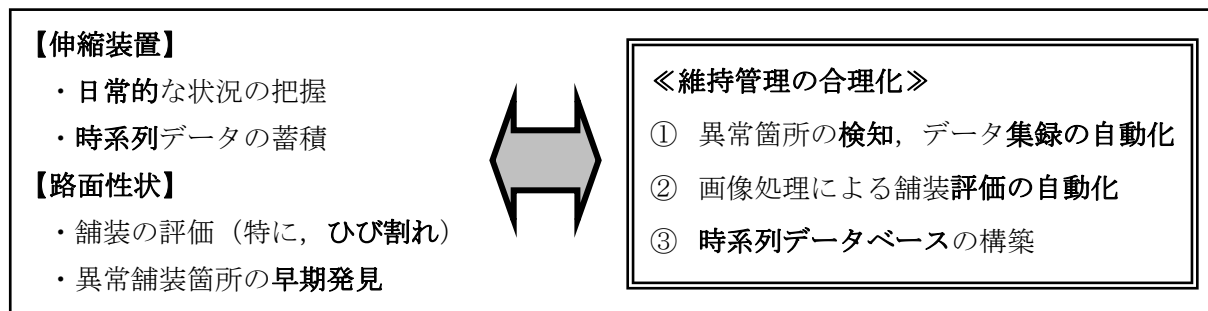


図-3 本研究の目的

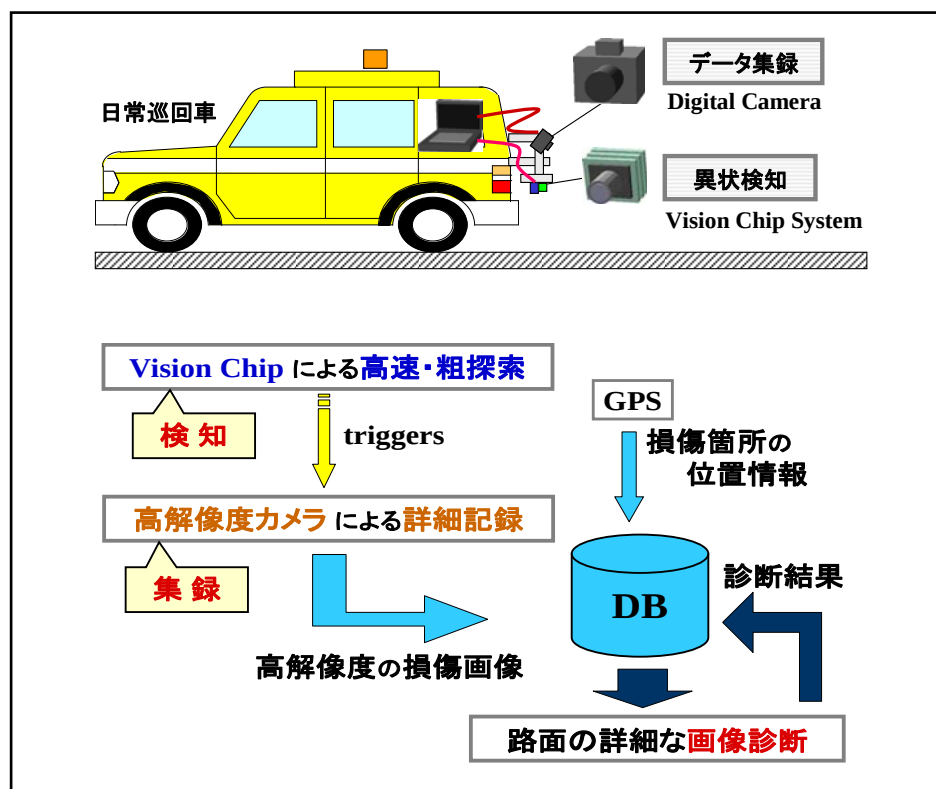


図-4 合理化診断システムの概要

7.3 本研究の目的

前述した現行システムの抱える諸問題を改善するためには、点検の高頻度化を可能とする、合理的な新しい診断システムの開発と導入が強く求められる。特に、一度の点検業務において検査可能な伸縮装置数の拡大と、路面性状を対象とした画像診断の所要時間ならびに作業労力の軽減が、最も強く望まれる。

これらの改善すべき要項に対し本研究では、

伸縮装置の点検へ画像診断を導入し、日常点検車で走行しながら、一括して伸縮装置と路面性状の点検・診断を行うことを可能とする新たな合理化診断システムの構築を目的とする。まず、①画像情報の取得の合理化を図り、さらに、集録された画像データに対して行う診断作業効率の飛躍的な向上のために、②画像処理による損傷判定の自動化という、二段構えの効率化について取り組む(図-3)。

7.4 合理化診断システムの概要

本研究ではまず、前述①の伸縮装置および路面性状に関する画像情報の取得合理化を可能とする手法として、高速視覚センサであるビジョンチップの利用に着目した。ビジョンチップは、イメージセンサの画素毎に処理回路を備えることで、秒間 1000 フレームの画像に対してリアルタイム処理を行うことが可能である¹⁾。しかしながらその反面、1 チップあたりの画素数が少なく空間解像度が低い。そこで、ビジョンチップの利用に加え、時間解像度は小さいが空間解像度が大きく、高詳細な画像を取得できるデジタル一眼レフカメラを組み合わせることで、この両者の短所を補い長所を活用する検知・集録システムを構築することとした(図-4、図-5)。本システムにおいては、損傷箇所周辺に重点をおいてデータが集録され、損傷の見られない箇所についてはデータ量が削減されるため、現行システムでは全領域の画像データを一律に集録するために膨大となるデータ量を軽減することが可能であると考えられる。

さらに、集録された画像データを用いた損傷診断において、並列型画像フィルタ^{2),3)}の適用による異常箇所の自動抽出と画像特徴量の自動算出によって、短時間で省力的に診断結果を得、集録された画像データと共に時系列データベース内に格納することで、可視的な情報と数値データを同時に参照することを可能とする(図-4)。

7.5 検知・集録システムの構築

ビジョンチップによって走行路面の画像から伸縮装置部分と舗装異常箇所、特にひび割れを検知するために、ビジョンチップ画像に特化した画像判断法を考案する。これまでの研究により、以下に述べるビジョンチップに実装する粗画像探索フィルタを構築した。



オペレーションシステム	Linux
使用レンズ	Micro-Nikkor 55mm 1:2.8
接続方式	イーサネット

図-5 検知システム
(ビジョンチップ+ホスト PC)

(1) 概略探索のための並列画像フィルタの構築

a) フィルタ生成システムの概要

ビジョンチップが取得する画像は、非常に低解像度で高ノイズという特徴があり、今回の診断対象である伸縮装置の検知や路面性状の判定を可能とするためには、粗い画像に対して有効な画像判断処理を行うアルゴリズムが必要となる。この判断処理においては、ひび割れ幅などの詳細な数値情報は必要ではなく、画像内の異常の有無を判断するだけでよい。

これに対し、本研究では、並列型画像フィルタ生成システム^{4),5)}により、高圧スムージング処理、動的閾値操作による二値化処理、要素結合・ラベリング処理、パターンのラフマッチングやベクトル追跡などの画像処理を階層的かつ並列的に施すことによって、粗い画像のままで信頼性の確かな判断を行うことを可能とする画像フィルタを導出する。並列型画像フィルタ生成システム

では、GP (Genetic Programming) を用いて、入力画像に対する処理結果が、目標画像を精度良く再現する画像フィルタの組み合わせを自動的に探索することが可能である^{6),7)}。

b) フィルタ生成システムの評価関数

本システムが抽出対象とするのは、伸縮装置部と舗装異常箇所であり、特に舗装異常箇所の特徴はさまざまであるため、実際の舗装面に発生し得る複数の損傷形状に対して汎用的に特徴量を抽出することを目的として、次式に示す評価関数 E を最小にする木構造状のフィルタの組み合わせを GP により探索する。

$$E := \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k \left[\frac{\sum_{i=1}^{w_k} \sum_{j=1}^{h_k} W_k(i, j) \cdot |O_k(i, j) - T_k(i, j)|}{\sum_{i=1}^{w_k} \sum_{j=1}^{h_k} W_k(i, j) \cdot V_{\max}} \right] \quad (1)$$

ただし、 N は評価の対象とした画像の数であり、 I_k を k 個目 ($k=1, 2, 3, \dots, N$) の入力画像としたとき、 T_k 、 O_k および W_k はそれぞれ I_k に対する目標画像、処理結果 (出力画像) および重み画像である。 w_k 、 h_k は画像 I_k の幅と高さである。また、

$$w_{\max} := \max_{1 \leq k \leq N} \{w_k\}, h_{\max} := \max_{1 \leq k \leq N} \{h_k\} \text{ として}$$

$$R_k := \sqrt{\frac{w_k h_k}{w_{\max} h_{\max}}} \quad (2)$$

のように定義され、式(1)では評価関数 E が各画像サイズの 1/2 乗に比例するよう重み付けしている。

c) 原画像、目標画像および重み画像

GP での入力画像の元になる原画像、目標画像、重み画像の画像セットの一例を図-6 に示す。汎用的でロバストなフィルタを構築するため、ノイズを多く含む数種の舗装面画像を原画像として入力する。

目標画像は人間の目で判断してクラックとみなされる箇所を選定し、原画像から手作業で作成する。また、重み画像は、出力画像が目標画像と一致することを強く求められる領域では大き

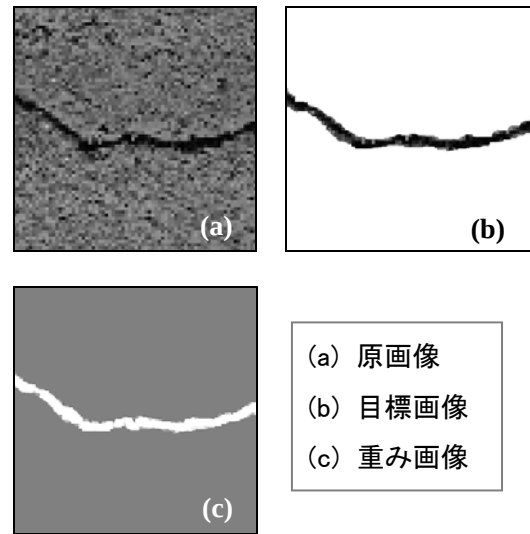


図-6 フィルタ生成用入力画像セット例

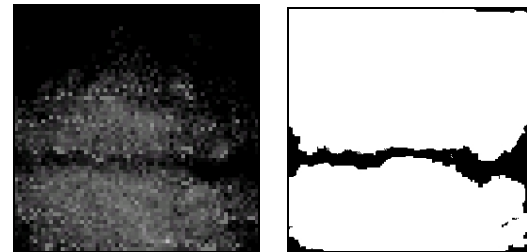


図-7 並列画像フィルタ適用例

な値を設定する。

(2) GP により得られた並列画像フィルタの適用

GP 探索により生成された並列画像フィルタを、ビジョンチップ画像へ適用した結果の例を図-7 に示す。図-7 に示した画像について舗装面のひび割れが良く抽出されていることがわかる。

(3) 適用画像に対する特徴検出システム

前述の並列画像フィルタを適用した画像に対して、各画素の階調値の分布から舗装面に存在する異常箇所を自動的に検出し、記録装置へとシャットトリガを送出するシステムを構築する。

本システムによる概略探索を行うことにより、全体の画像情報量を少なく抑えながら、検査領域内の伸縮装置や路面の損傷箇所の発見頻度を上げることが可能となる。

デジタルカメラ



オペレーションシステム	Windows
使用カメラ	Nikon D70s
使用レンズ	AF-S DX Zoom-Nikkor 17-55mm f/2.8G
接続方式	リモートコード

図-8 データ集録システム
(デジタル一眼レフカメラ+ホスト PC)

(4) デジタル一眼レフカメラによる高詳細画像の取得

ビジョンチップにより検知された伸縮装置や路面の劣化・損傷箇所の高詳細画像を、デジタル一眼レフカメラによって自動的に撮影する(図-8)。ビジョンチップと一眼レフカメラは、ホスト PC を介して接続されており、ビジョンチップが検査対象を検知したことを通知するためにパルス信号を送出し、受信したホスト PC がリモートコードを介して一眼レフカメラへシャッターリガを送出することで、自動撮影を行うことが可能となる。このとき、撮影された画像データは、撮影頻度を考慮してカメラ内のメモリに記録され、検査終了時にホスト PC 内のローカルディスクへと移動・格納される。

7.6 画像診断の自動化アルゴリズム

舗装の健全度は、舗装面の平坦性・ひび割れ率・わだち掘れを評価指標として計られるが、中でもひび割れ率は重要なファクタとして扱われる。その算定は、2次元の画像情報のみによってなされるが、現状では検査者が画像を逐一見ながら損傷を探し、ひび割れ率の算定基準に該当する領域の面積を計算する方法が採られており、非常に効率性が乏しい。そこで本診断システムでは、ローカルディスクに格納された舗装画像群に対して、画像解析によってひび割れ率を自動的に算出するアルゴリズムを開発し、舗装の損傷判定の自動化を図る。

本アルゴリズムでは、その算出処理の過程を大きく 4 段階に分け(図-9)、(i) 損傷の抽出、(ii) グリッドの作成、(iii) グリッド内走査、ひび

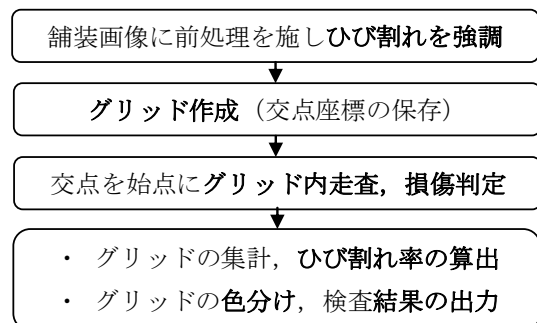


図-9 ひび割れ率自動算出アルゴリズム

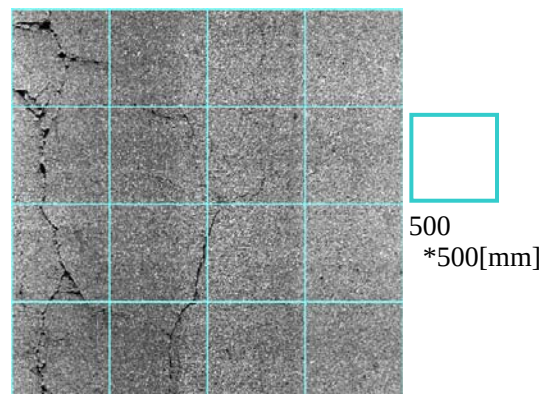


図-10 舗装画像の一部 (ひび割れ率 : 28%)

割れの有無判定, (iv)グリッドの集計, によって検査対象領域のひび割れ率を算出する. また, 処理の高速化を図り, (ii)のグリッド作成処理で保存した格子交点座標を始点とした走査を, 複数のグリッドで並行して行う(図-10).

(1) 詳細探索のための並列画像フィルタの構築

a) フィルタ生成システムの概要

画像診断のためにデジタル一眼レフカメラによって集録された画像データは高解像度であり, それらを用いた損傷診断では詳細な判定精度が求められる. そこで, 診断画像に適用する並列画像フィルタは, ビジョンチップ画像に適用したものとは異なり, より高精度に特徴量を抽出する並列画像フィルタを構築する. 具体的には, 前述のフィルタ生成システムに入力する画像セットに, 高詳細に抽出する傾向をもった画像を採用し, 導出されたフィルタを詳細探索のための並列画像フィルタとする.

b) 原画像, 目標画像および重み画像

GP での入力画像の元になる原画像, 目標画像, 重み画像の一例を図-11 に示す.

舗装ひび割れの詳細探索では, ひび割れの先端部まで抽出することが求められるため, 画像全体の解像度に対する抽出対象とするひび割れ画素領域の幅の割合を, 概略探索用フィルタ生成時よりも小さく設定する.

(2) 並列画像フィルタの適用結果と課題

GP 探索により生成された並列画像フィルタを, 診断対象画像へ適用した結果の例を図-12 に示す. 図-12 に示した画像について舗装面の細かいひび割れの周辺部分まで良く抽出されていることがわかる. しかし, 診断対象画像, つまりは実際の舗装ひび割れと比較して, フィルタを適用した画像ではひび割れの幅が異なっているという問題点が挙げられる. ただし, 本診断システムで対象とする特徴量は, 路面性状に関しては舗装ひび割れの分布率であり, それを得るため

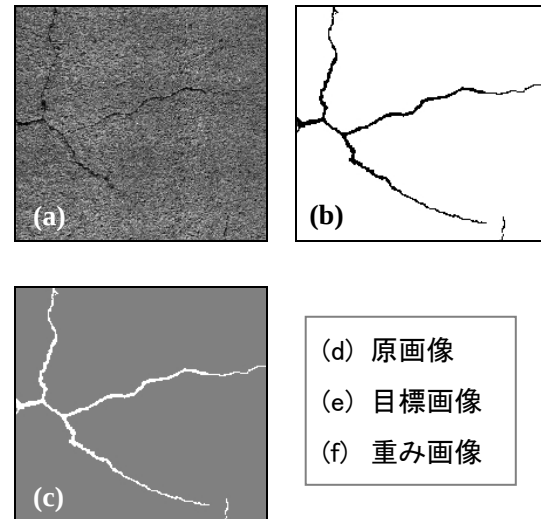
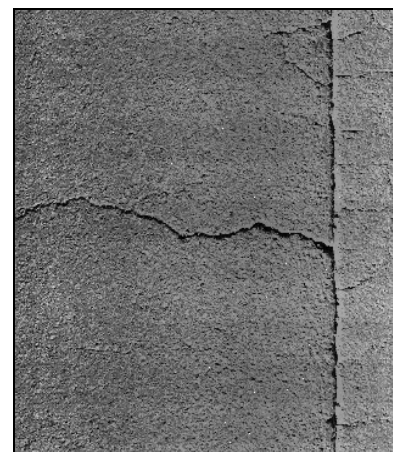
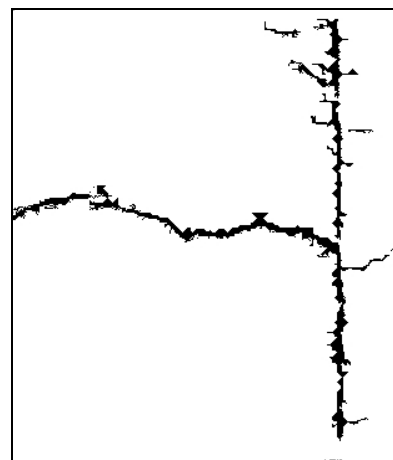


図-11 フィルタ生成用入力画像セット例



(a) 診断対象画像



(b) フィルタ適用画像

図-12 並列画像フィルタ適用例

には、高精度のひび割れ幅の算出は必要ではない。したがって、本システムで構築した並列画像フィルタは詳細探索に十分適用できるといえる。

(3) 適用画像と診断対象画像を利用した詳細診断アルゴリズム

前述したひび割れ幅の問題に対しては、並列画像フィルタを適用した結果を、診断対象画像上に反映させることによって、高精度にひび割れ幅を算出できると考える。

具体的には、適用画像に対して、ノイズ除去、細線化処理を施した後、ひび割れの端点と分岐点の同定、ひび割れの方向と幅を算出し、それらのパラメータをもとに診断対象画像上においてひび割れの方向と幅を算出すればよい。現在、このアルゴリズムについて開発を進めている。

7.7 まとめ

本研究では、道路橋の伸縮装置や路面性状の点検・診断手法について、現行の診断システムの非効率的な手法に代わる、新たな合理化診断システムの構築を目的として、合理的な画像データの取得を可能とする検知・集録システムの構築を図った。さらに、集録された画像データに対して、伸縮装置および路面性状の特徴量を画像解析によって自動的に抽出するアルゴリズムの開発に取り組んだ。

本診断システムが構築され、適用されることにより、現行の診断において多大な時間と労力を要するうえに、検査員の主観に左右される、道路橋伸縮装置の目視検査や、検査車が集録した膨大な画像データの集計作業を、質・頻度と

もに大幅に改善することが可能となる。

参考文献

- 1) Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, Shingo Kagami, Masatoshi Ishikawa: Multi-Target Tracking Using a Vision Chip and its Applications to Real-Time Visual Measurement, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 17, No. 2, pp. 121-129, 2005.
- 2) Parker, J.R.: *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, 1997.
- 3) Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle, R.: *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, 2nd ed, ITP, 1998.
- 4) 伊庭斉志: 遺伝的プログラミング, 東京電機大出版局, 1996.
- 5) 長尾智晴: 進化的画像処理, 昭光堂, 2002.
- 6) 青木紳也, 長尾智晴: 木構造状画像変換の自動構築 ACTIT, 映像情報メディア学会誌, Vol.53, No.6, pp.888-894, 1999.
- 7) 内藤孝平, 長尾智晴: 教師画像を自動修正する木構造状画像変換の自動生成法, 日本映像メディア学会技術報告, Vol.25, No.24, pp.1-6, 2001.
- 8) 高木幹雄他: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2004.

第8章 実用化に向けての取り組み

8.1 はじめに

本システムの実用化に向けて、東京大学橋梁研究室、首都高速道路株式会社、(財)首都高速道路技術センターの4者により実用化に向けた取り組みを行なっている。平成16年度を平成17年度の実用化に向けた試験運用期間と位置づけ、下記のような体制で取り組んでいる。

8.2 実施の目的

現在、本研究は平成17年度国土交通省建設技術研究開発助成制度に採択されたことを土台として基礎研究から実用化の段階に至ろうとしている。しかし、この技術を実用化するためには、試験運用として特定路線を日常点検車とともに一年間定期的に走行しながら、継続的に舗装状態をIRI (International Roughness Index, 国際ラフネス指数) ならびに画像で評価すると同時に伸縮装置部の段差量を計測し、本システムが道路管理者の的確な判断指標となることを証明するための試験運用が必要である。更に、この段階で出てくる計測・集録システム及び診断システムの不具合を解消しながら、VIMSが道路管理者にとって有効なツールとなるよう開発を行っていかなければならない。

そこで、首都高速道路株式会社及び同技術センターのご協力のもと、首都高速道路 7号線(上り・下り)、6号線(上り・下り)、C2(上り・下り)を試験運用のためのモニターフィールドとし、図8-1に試験運用の実施することとした。計測実験は運転者・計測車の2名で行なう。運転者については技術センターが派遣してくれた日常点検車の方をお願いし、計測業務を橋梁研究室・ニチレキ側とで交代制で実施することとした。

8.3 実施概要

これまでの研究結果を踏まえて、実用化を見据えた試験運用の実施しながら実用化に向けた研究開発を行なう。走行路線を左車線に限定し、通常の日常点検車の規定スピードである60km/hで定期的に走行する。継続的にデータを取得すると同時に、この中で出てきた問題点を図8-2のPDCAサイクルに基づき随時、問題を解決しながら計測実験を継続していく。また、2ヶ月に一度、VIMS技術会議を開催し、問題点とその解決方法を報告し、道路管理者側の意見も踏まえながらVIMSの技術開発を行なっていく。

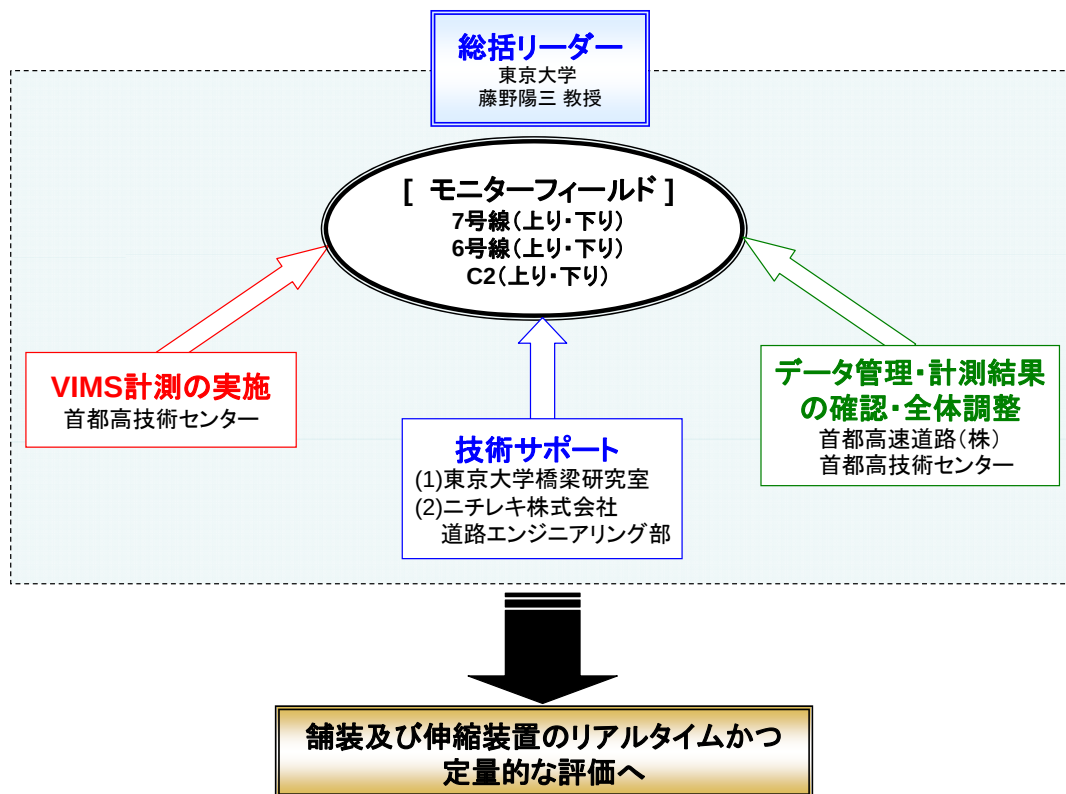


図 8-1 VIMS 試験運用の実施体制

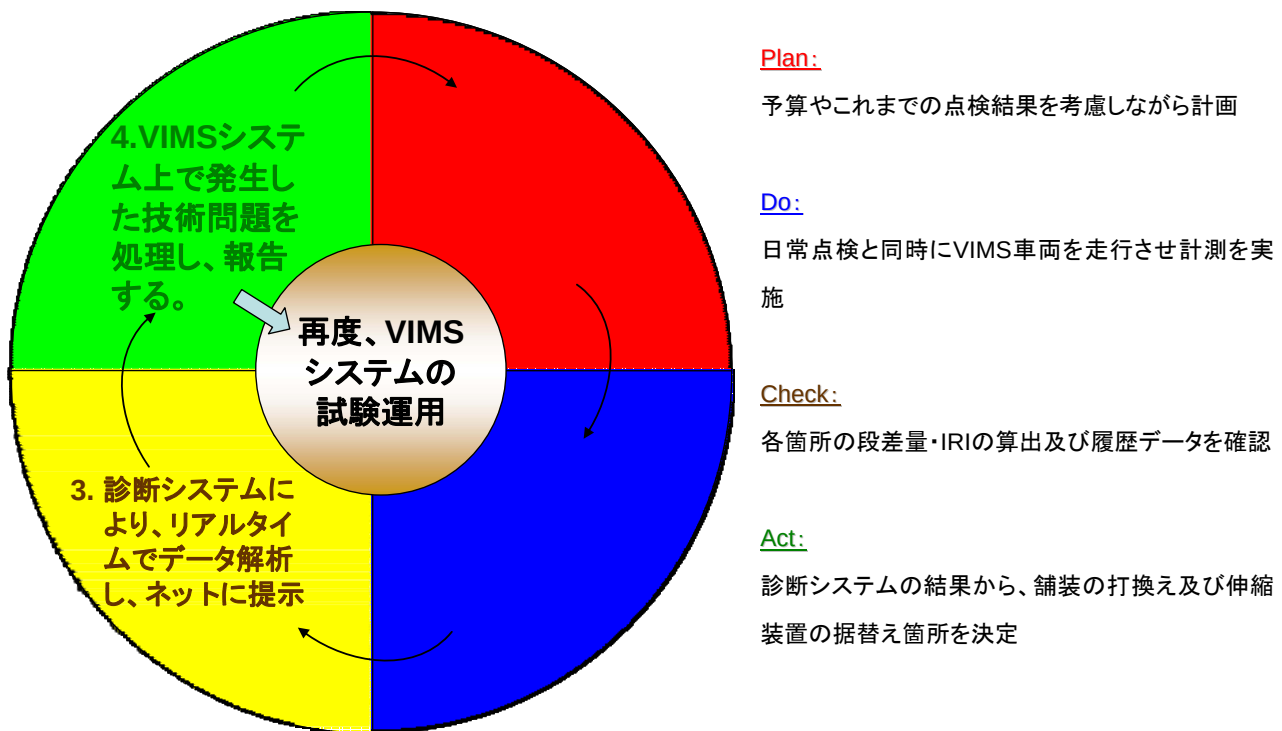


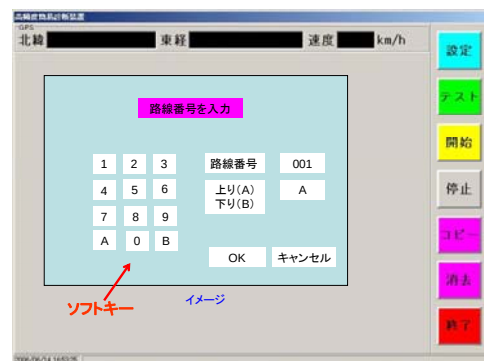
図 8-2 VIMS の PDCA サイクル

8.4 計測・集録システムのタッチパネル化

本研究において開発された計測・集録システムでは加速度応答と位置情報を対応付けられるよう加速度データとGPSデータの同期集録を行っている。信号の受信状態が悪い場所でも測位でき、かつ、できるだけ正確に走行速度を集録できるよう、GPSは車速パルスを利用したものを使用している。更に、日常点検者が通常業務と平行してVIMSを使用する際の作業性を考慮し、簡易なボタン操作のみで計測を行うことができる計測・集録システムを考案した。一般的な操作方法の概要を図 8-3に示す。また、各種設定方法を図-8.5 に、システム構成図を図 8-5示す。



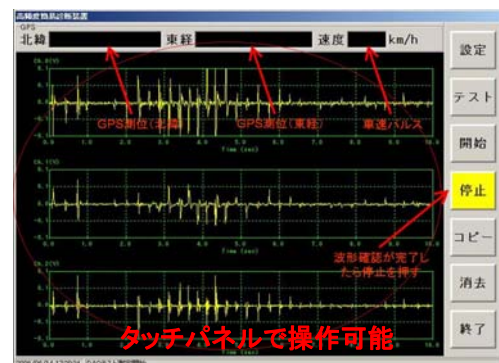
a) 起動画面



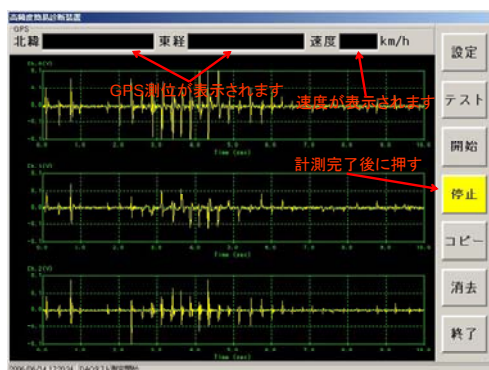
b) 走行路線番号を登録



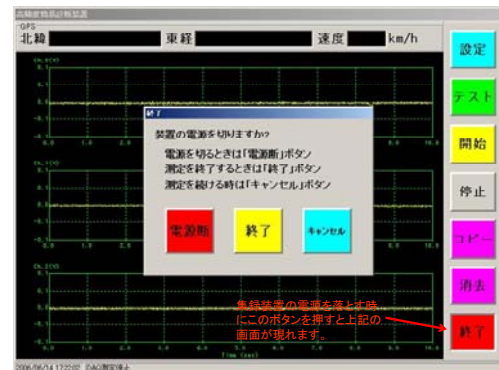
c) テスト画面を起動



d) 波形状態を確認し、計測開始

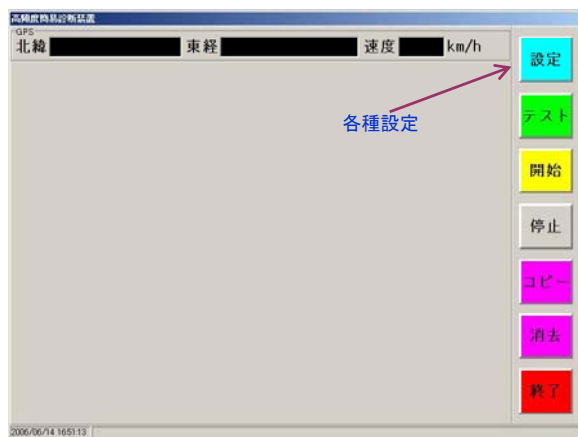


e) 計測終了地点で停止ボタンを押す。

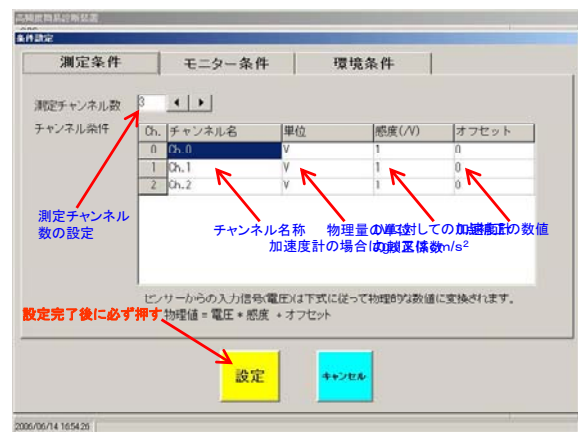


f) 終了ボタンを押し機器を OFF.

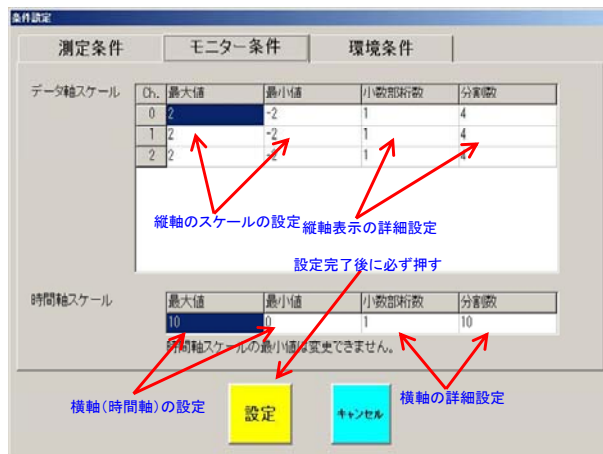
図 8-3 計測・集録システムの操作概要 (タッチパネルで操作可能)



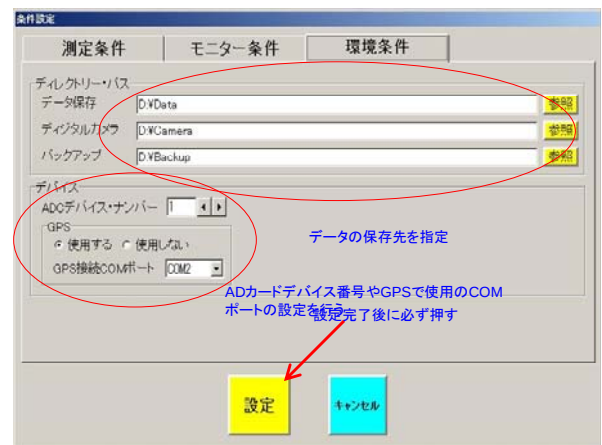
a) 設定画面



b) チャンネル番号を変更



c) 表示させるグラフの変更



d) データ保存場所の変更

図 8-4 計測・集録システムの各種設定

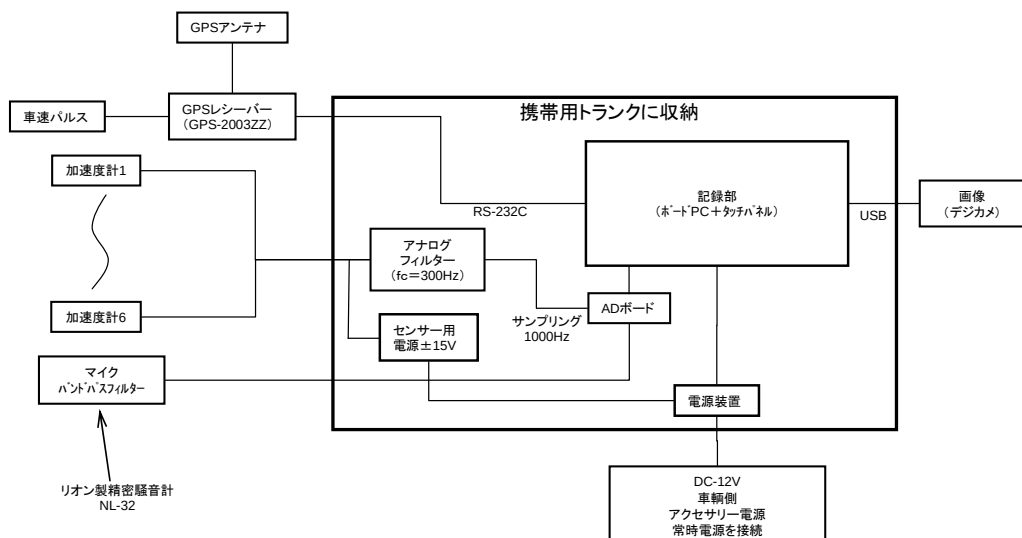


図 8-5 計測・集録システムのシステム構成図

8.5 点検指標値と診断システムの構成

本システムにおいて点検指標値として採用したのは、加速度値から換算される路面の平坦性の指標としてのIRI (International Roughness Index、国際ラフネス指数)と伸縮装置部における段差量である。診断システムの構成を図 8-7に示す。

前章で指標値が導出できたため、次のステップとしてその指標値を算出し、異常箇所を地図表示するための診断システムが必要となる。以下の事項を満たすシステムを目的とし、さらに道路管理者の意見を参考にし、診断システムの開発を行った。

- ・ 道路管理者が操作しやすい
- ・ 点検結果がリアルタイムで分かる
- ・ 診断結果を地図上に示し、視覚的に理解できる
- ・ 構造物の情報も取り込み、補修計画を立てやすくする

診断システムは図 8-6 のように Web ブラウザ、Web アプリケーションサーバ、データベースサーバから構成される。このシステムでは Web アプリケーションサーバを通じて指標値の算出、データの蓄積、異常箇所・構造物情報の表示を行い、データベース内の位置情報データと外部のGIS データベース(Google Maps)を連携させることにより、地図表示を実現している。また、計測回ごとに指標値がデータベースサーバ内の指標値履歴データに蓄積されていく。本診断システムは Web 上での操作となり、データや診断結果を共有することができ、上記の事項の多くを満たしているといえる。一路線に対し、この診断システムのプロトタイプを作成した。

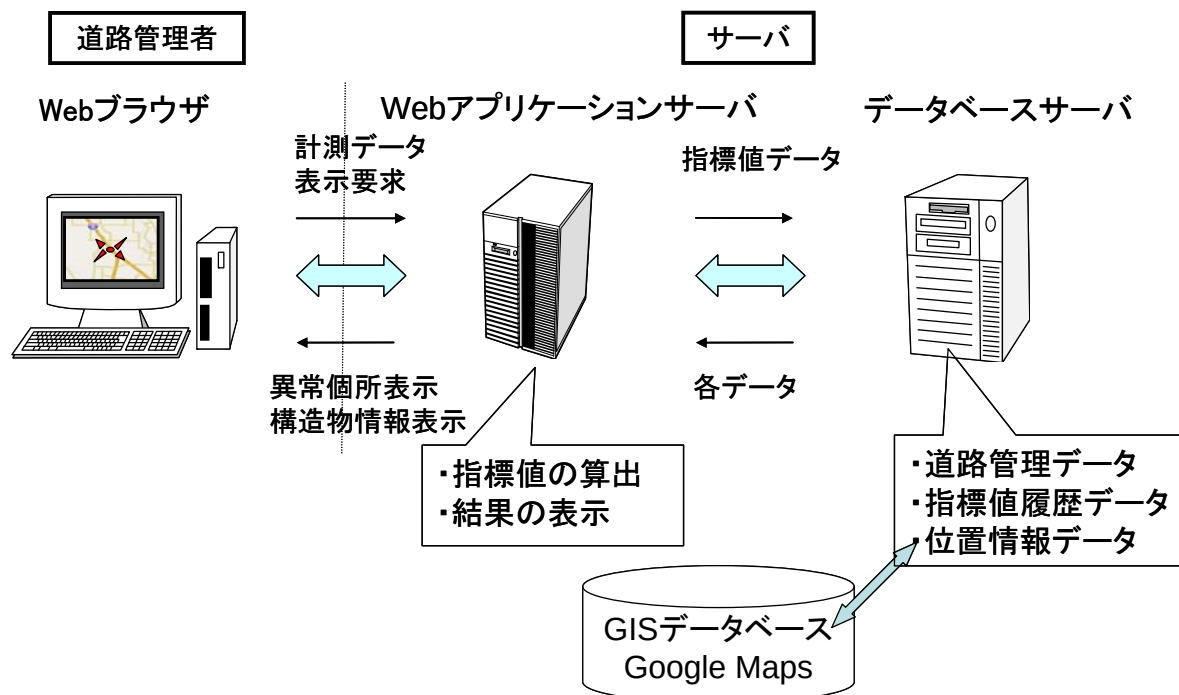


図 8-7 診断システムの構成

8.6 データ登録までの流れとオプション設定

計測・集録システムにおいて取得したデータを診断システム上にアップロードする際にも、道路管理者が操作しやすいようなシステム構成が求められる。そこで、図 8-8 ような流れでデータ登録ができるようにした。まず、計測・集録システムより、外部メディアにデータを保存する。その外部メディアをサーバーに接続すると a) の起動画面が立ち上がり、データの登録作業を開始する。継続して取得したデータは、指標値として保存されると同時に生データとしても保存される。また、サーバー内には取得した生データもバックアップされる。

a) 外部メディア挿入後に起動する画面

c) 取得データを各種指標値に変換する画面

b) データ取得を確認する画面

d) データ登録を確認する画面

図 8-8 データ登録までの流れ

また、オプション画面では各種の設定変更が可能となる（図 8-9）。計測・集録システムの設定を変更しデータ数などが変化した場合や、車輛や走行速度が変化し段差量やIRIの加速度値からの換算式が変化した場合に対応できるようになっている。また、首都高速道路株式会社の場合、段差量が 5mmを越えた場合は取替えとなることや、IRIの指標値としては 2mm/mでは乗り心地が悪い舗装となっているが各道路管理者によって変化するものと考えられる。そこで、地図上にプロットした際や詳細情報を確認した際にこれらの指標値が変更できるようになっている。

オプション

チャンネル番号(1~5)

電圧オフセット V

加速度パラメータ 倍 = gal

開始位置パラメータ
緯度 度
経度 度

ジョイント判定パラメータ m (前後範囲)

段差 = パラメータA × 加速度 + パラメータB
 A
 B

IRI = パラメータC × 加速度 + パラメータD
 C
 D

データロード デフォルトフォルダ

GPS計測間隔 1/ 秒

qchパラメータファイル

mchパラメータファイル

継手 (Joint)			橋桁 (IRI)	
No	指標値(最小)	指標値(最大)	面の色	
1	0.0	3.0		☒ 白抜き ☐ べた塗り
2	3.0	4.0		☒ 白抜き ☐ べた塗り
3	4.0	5.0		☒ 白抜き ☐ べた塗り
4	5.0	10.0		☐ 白抜き ☒ べた塗り
5	10.0	100.0		☐ 白抜き ☒ べた塗り

図 8-9 診断システムのオプション画面

8.7 診断システムの運用状況と計測結果

実際のWebアプリケーションでの結果表示トップ画面はエラー! 参照元が見つかりません。となる。また、検索機能を用いることで各点検項目について、設定した基準値以上の異常件数が表示される(図 8-11)。異常件数をクリックすると異常箇所がアイコンによって地図に表示される。アイコンをクリックするとその場所での、舗装や伸縮装置の管理番号、IRIや段差量の値が表示される。さらに詳細情報をクリックすると詳細な地図や、IRIの経年変化、構造諸元データ、補修履歴データ、点検履歴データが表示される。以上のような仕組みとなっており、劣化予測や、補修計画の立てやすいシステムとなっている。

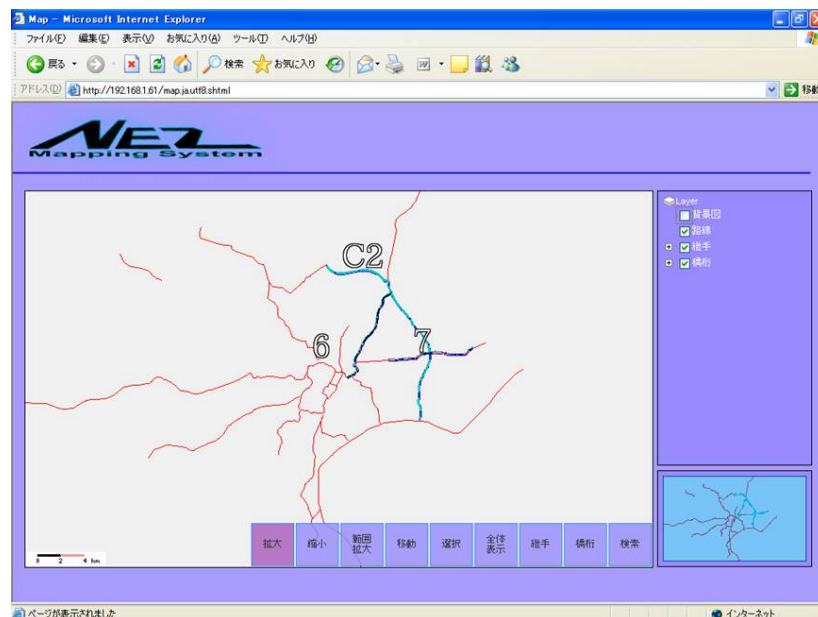


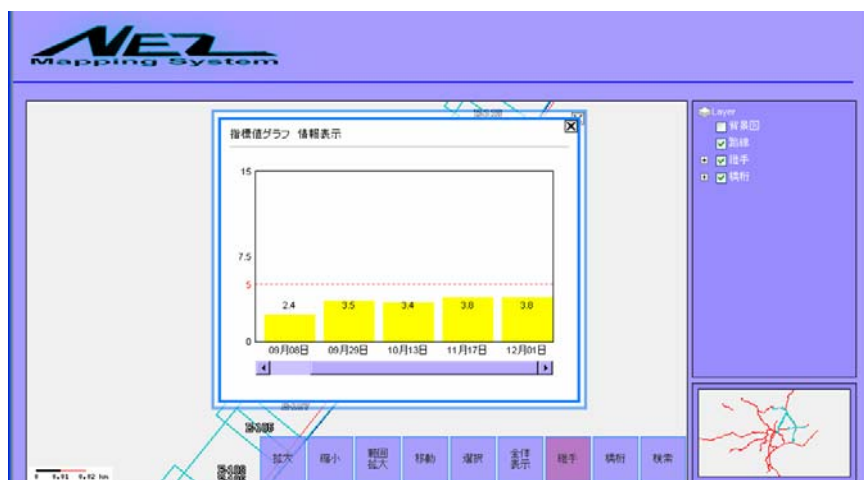
図 8-10 診断システムトップ画面



図 8-11 検索機能の例

8.8 計測結果についての考察

これまでの基礎研究においては、首都高のほぼ全線を一回のみ計測しただけであり継続的なデータを取得できていない。そこで、継続的に取得した段差量やIRIがどのような変化見せるのかを検討した。首都高速上のある箇所で計測した段差量とIRIの結果を図 8-12に示す。首都高速では、段差量 5mm以下で管理されるよう示方書で決められている。また、IRIについては、高速道路の新しい舗装の場合、最も厳しい管理指標で管理した場合 2mm/m以下であるように定められている。この箇所にかんしては、VIMSで計測された段差量は 5mm以下であり、IRIについては約 2mm/mとなっていた。段差量、IRIともに高い再現性を示している。



a) 段差量



b)IRI

図 8-12 計測結果

更に、第 6 章における全線計測結果を基に、IRI が大きい箇所について詳細な検討を行った。その結果、大きなカーブ付近の前後、ランプ出口付近、大きなカーブや半地下構造が連続している区間の IRI が大きくなっていることがわかった。具体的な箇所の航空写真を図 8-13 に示す。このような箇所を重点的に管理することで高速道路ユーザーの更なる安全性を守ることができると考えている。



図 8-13 IRI が大きい箇所の航空写真

第 9 章 結論

本研究では、巡回車の動的応答を利用し、舗装・伸縮装置の点検に必要な指標値を求め、それを地図上に表示させることにより、現在の点検手法の弱点を補強するシステムを開発した。本システムの特長は以下のとおりである。これらの特長により、事故や沿道住民への振動・騒音問題を未然に防ぐことができると考えられる。

- ・ 定量的に舗装・伸縮装置の状態を把握でき、路面性状測定車ほどではないが、実用レベルでの精度を持っている
- ・ 初期費用、運用費が低いため、高頻度に使用できる
- ・ 解析時間が短く、リアルタイムに舗装・伸縮装置の状態を診断できる

以下に、本研究で得られた主要な成果と今後の課題、展望を述べ、本論文の結論とする。

第 1 章「緒論」では、まず現在の点検手法による舗装・伸縮装置の維持管理の問題点と新たな点検手法の必要性について述べた。続いて、道路維持管理上重要な点検項目とそれに対する現在の点検手法、点検手法に関する既往の研究をまとめ、研究目的と車両の応答を利用したシステムの概要を決定した。

第 2 章「計測・集録システムの開発」では、点検結果を診断する際、必要なデータを取得するための計測システム（ハードウェア）の構成と集録システム（ソフトウェア）を開発した。計測システムでは、巡回車と同様の振動特性が得られるよう、計測車両は巡回車と同車種のものとした。また、応答を精度よく記述でき、かつ、誰にでも操作できるシンプルなるものを目的とし、それにあった加速度計、GPS、マイクロフォンを選定した。集録システムでは GPS データと加速度データの同期採取を実現し、位置情報とその位置での応答を対応付けた。

第 3 章「計測車両の振動特性と応答の再現性」では、まず、自由振動試験により計測車両の固有振動数を求め（ばね上バウンスング振動数 1.6Hz、ばね下上下振動 9.6Hz）、振動特性を把握した。その後、一般道での路面形状と計測車両の応答を照らし合わせるにより、路面形状と車両応答の関係を把握し、また、非定常スペクトルにより路面走行時の車両の振動について考察した。また、GPS、加速度応答に対し同日同路線でのデータの再現性について検討したところ、加速度応答に対しては、舗装部、伸縮装置部とも RMS にして $\pm 10\%$ 程度と高い再現性を得た、GPS では最大 5.5m ほどのずれがあるものの、大体の位置を把握でき、実用的レベルであると言える。

GPS の測定に関しては、2008 年に日本版 GPS 衛星が打ち上げられる予定である。この衛星により、GPS の精度は、高速走行時車両の走行車線まで分かる程度になり、ずれ量の減少が期待できる。

第 4 章「車両の動的応答から点検指標となる値の導出」では、舗装の点検項目である IRI (International Roughness Index)、平坦性、わだち掘れ、ポットホールと伸縮装置の点検項目である段差、異常音について、指標となる値の導出を検討した

まず、IRI については、従来の路面形状を測定しなければ求められないという欠点を、計測車両を用いて求められることにより克服した。その方法は路面形状から計測車両に対する伝達関数と、クォーターカーモデルの伝達関数を用いることで、クォーターカーモデルの加速度を求め、クォーターカーモデルの加速度 RMS と IRI との近似式により、計測車両から直接 IRI を求めるというものである。この方法では路面形状に対する計測車両の伝達関数と、クォーターカーモデルの加速度 RMS と IRI の近似式を導出する必要がある。伝達関数は実験で路面形状を測定、同路面上での応答を計測し、両者のフーリエ変換の比を求めることにより算出した。その際、走行する線のずれや、速度の違いによると考えられる高振動数成分の計測回ごとのずれを平均化するため、距離軸において平均化した波形を用いた。近似式については、加速度 RMS と IRI の関係を解析により求め、その回帰式を近似式とした。高振動数成分の再現性の低さからローパスフィルターを用いているため、衝撃応答は再現できないものの、衝撃応答以外の部分では最大誤差 12%と大体の精度を得ることが出来た。

路面性状測定車による平坦性とクォーターカーモデルの加速度 RMS には相関があることを解析的に示し、また、計測車両でも実際の高速道路での平坦性との相関係数が 0.7 と高いことを示した。

わだち掘れについては、わだち掘れが横断方向の凹凸量であり、縦断方向を走行する車両の加速度には影響してこないため、相関が低く、指標値を求められない。そのわだち掘れの対処方法として、平坦性とわだち掘れ量の関係を求めることにより、平坦性の悪い箇所を補修していけば、わだち掘れも補修できることを示した。

ポットホールについては、ポットホール上を走行したときの加速度を確認したが、タイヤの設置長さのほうがポットホールの直径よりも大きいため、検出は不可能とした。

伸縮装置部の段差については、実際の伸縮装置部の形状を計測し、伸縮装置中心から前側 2m の最大凹凸量と加速度のピーク値から $\pm 2\text{m}$ 間の加速度 RMS の相関が最も高いことが解析により得られた。また、伸縮装置中心から前側 2m の最大凹凸量と計測車両の加速度 RMS (最大振幅から $\pm 2\text{m}$ 間) にも高い相関があることを実験により示し、計測車両の加速度 RMS から段差量を求める近似式を導出した。

伸縮装置の内部破損による異常音については、金属音のする伸縮装置で音圧を計測し、周波数の違いから金属音を検出できることを示した。また、金属音検出のための測定方法（フィルター処理による騒音レベルの導出）を提案した。

本システムにおける IRI は衝撃応答が再現できないのが欠点である。伝達関数が原因であるが、本研究で用いた FFT による方法のほかに、AR (Auto-regressive) モデルのようなパラメトリックモデルによる伝達関数推定法がある。この手法を用いて線路の形状から列車の応答を精度よく予測した例もあり、検討の余地はあるといえる。

また、異常音については金属音の騒音レベルと実際の損傷との対応、卓越周波数と実際の損傷との対応をする必要がある。

第 5 章「道路維持管理を目的とした診断システムの開発」では、道路管理者の意見を参考に診断システムを開発した。はじめに、道路管理データ、指標値データ、位置情報データを用い、さらに GIS データベースである Google Maps と位置情報データを連携させたデータベースシステムを開発した。次に、計測データから指標値を算出し、データベースにデータを蓄積する指標値算出プログラムを開発した。最後に、データベースシステムを使用して、リアルタイムに診断結果が表示されかつ、異常箇所での舗装・伸縮装置の情報がわかる Web アプリケーションを開発した。このシステムにより、計測されたデータを入力するだけで、異常件数、異常箇所、異常箇所の構造物情報が表示され、劣化予測や補修計画が立てやすくなると考えられる。

本研究で開発した Web アプリケーションは必要なデータを表示するまでとなっている。実際に補修計画を立てる際にはさらなるアプローチが必要であり、今後は補修計画を立てるまでの追加システムが要求されると思われる。例えば、以下のような項目の追加が挙げられる。

- ・ 段差や IRI の履歴から余寿命を割り出し、補修の優先順位をつける
- ・ 地域条件で住宅地であれば、苦情を避けるため、補修の優先度を高くする
- ・ 伸縮装置の形式と伸縮装置の補修履歴データの補修年月の間隔から、その場所に最適な伸縮装置の形式を決定する（舗装の使用材料、厚さ、床版種類も同様）

また、本診断システムで表示しなかった項目、例えば、補修費用や予算を組み合わせることにより、コストの面からも耐久性の面からも、最も効率のよい道路維持管理を行えるシステムも将来的には考えられる。

このような補修計画を立てるための診断システムとなると、システム開発者がイメージしたものが道路管理者が使いやすいものであるとは限らない。そのため、まず動くシステムを開発者が作成し、道路管理者がそれを使用して見て、問題点や要望を挙げ、開発者がそれを改善し、さらに道路管理者が評価するといった繰り返しによって、開発していく必要があることに注意すべきである。

第 6 章「実道路へのシステムの適用」では、本研究室で管理データを所有している首都高速 7 号小松川線下りに対し、ほぼリアルタイムに診断し、異常箇所の件数、異常箇所の地図、詳細情報を表示することにより、舗装・伸縮装置の状態を把握でき、劣化予測や補修計画を立てる際に詳細情報が役立つことを示した。また、管理データを所有していない首都高速全線（神奈川線を除く）に対し、乗り心地の悪い舗装、乗り心地の良い舗装を地図表示した。本システムを用いれば、管理データがなくても、計測車両を走行させるだけで舗装の状態が把握できることを示した。これらから本システムは有効であるといえる

本章において、小松川線では、指標値にばらつきがあることと、時間間隔が 4 ヶ月と短いこと、プロット数が少ないことにより、舗装・伸縮装置の劣化の判断ができなかった。そのため、今後は長期間、高頻度のデータ取得し、経年変化により劣化の判断をする基準を確立する必要がある。

また、今後はデータマイニング技術を導入することにより、更なる発見が得られると考えられる。なお、データマイニングとは、データベース等に蓄積されたデータ群より、隠された知識や、予想と異なる知識、新しい規則を発見するという技術である。本システムのデータベースにこの技術を付加することで、舗装・伸縮装置に損傷が起りやすい環境や材料、条件に関する新たな発見が可能となるであろう。

第7章「高速視覚センサとデジタル一眼レフカメラを用いた伸縮装置および路面性状の合理化診断システムの構築」では、道路橋の車両走行時における事故や振動、騒音問題の原因となる、伸縮装置の老朽化や路面性状劣化に対して、現在行われている点検・診断方法に代わる新たな合理化診断システムの構築を目的とした。その結果、高速視覚センサであるビジョンチップとデジタル一眼レフカメラを組み合わせ、合理的な画像データの取得を可能とする検知・集録システムを構築することができた。次いで、集録された画像データに対して、伸縮装置および路面性状の特徴量を画像解析によって自動的に抽出するアルゴリズムを開発した。

第8章「実用化に向けての取り組み」では、これまでの研究結果を踏まえて、実用化を見据えた試験運用の実施しながら実用化に向けた研究開発を行なった。本システムが来年度、首都高速道路での実用化に向けて現在更なる検討、改善を進めている。実用化のためには、この技術をパッケージ化し、試験運用として特定路線を日常点検車とともに定期的に走行しながら、継続的に舗装状態をIRIで評価すると同時に伸縮装置部の段差量を計測し、本システムが道路管理者の的確な判断指標となることを証明するための試験運用が必要である。更に、この段階で出てくる計測・集録システム及び診断システムの不具合を解消しながら、本システムが道路管理者にとって有効なツールとなるよう開発を行っていく必要がある。

そこで、本年度は首都高速道路株式会社・(財)首都高速道路技術センター・ニチレキ株式会社と協力して継続的な走行実験を実施しながら本システムの有効性を確認し、来年度以降の実用化に向けた試験運用を実施している。

走行路線を左車線に限定し、通常の日常点検車の規定スピードである60km/hで定期的に走行する。継続的にデータを取得すると同時に、この中で出てきた問題点をPDCAサイクルに基づき随時、問題を解決しながら計測実験を継続した。

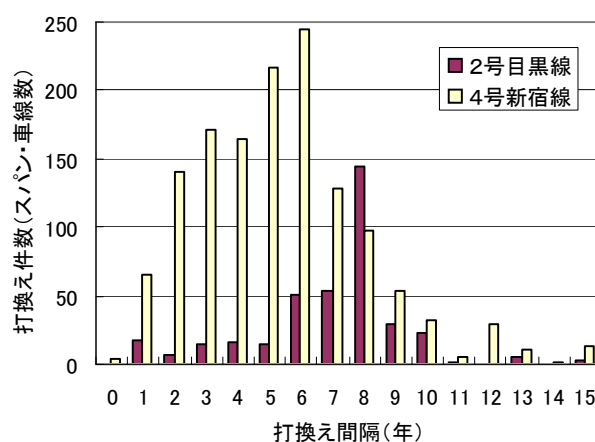
以上、本研究における結論を述べた。本研究で開発したシステムが実用化され、全国の高速道路における新たな点検手法として道路維持管理に利用されることを切に願う。

付録1 首都高速道路の点検に関する補足資料

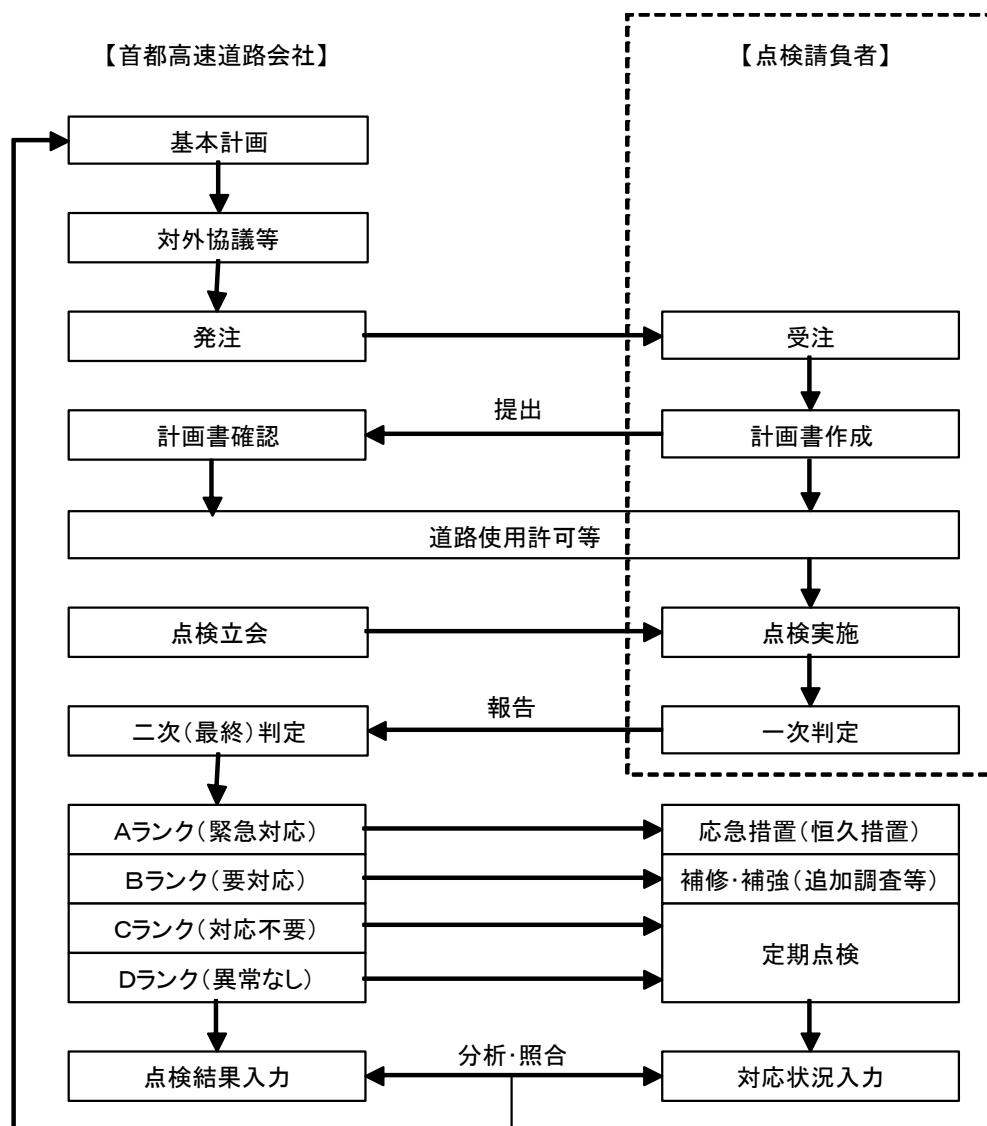
ここでは、1.1 の研究背景において、首都高速道路の点検の現状に関する補足資料を添付する。

付表 1-1 首都高速道路における現在の主な点検方法

点検種別		点検名	点検頻度
日常点検	巡回点検	高速道路上巡回点検（昼間）	1 / 2 日
		高速道路上巡回点検（夜間）	1 / 月
		高架下巡回点検	2 / 月
		雨天時巡回点検	適宜
	徒歩点検	高速道路上徒歩点検	1 / 5 年
		高架下徒歩点検	1 / 2 年
		点検通路上徒歩点検	休止
定期点検	接近点検	構造物接近点検	1 / 5 年
		土木付属施設接近点検	1 / 年
	機器点検	舗装機器点検	1 / 年
		その他の機器点検	適宜
	追跡点検	損傷箇所追跡点検	適宜
		新工法追跡点検	適宜
		モニタリング点検	適宜
臨時点検	臨時点検	異常時点検	異常事態発生時
		事故発生時点検	事故発生時
		特別点検	適宜



付図 1-1 舗装打ち換え実績



付図 1-2 点検補修の流れ

付表 1-2 伸縮装置の損傷項目とその判定基準

損傷ランク			A	B	C	D
対応			要緊急対応	要対応	対応不要	異常なし
基本概念			交通や第三者への影響を防止するために、緊急の対応を必要とする損傷	緊急度は高くないが、補修補強や追加調査等の対応を必要とする損傷	次回点検時まで対応を必要としない損傷	点検実施の事実を記録
伸縮継手	切削目地等	くぼみ	①損傷が著しく、交通に支障を生ずる可能性がある場合 ②落下、飛散等により第三者被害を生ずる可能性がある場合	深さ 5mm 以上 長さ 100mm 以上 幅 50mm 以上	B ランク 損傷未満のくぼみがある場合	損傷等がない場合
		段差		段差 5mm 以上	B ランク 損傷未満の段差がある場合	
		シール材脱落		長さ 100mm 以上	B ランク 損傷未満の脱落がある場合	
		異常音		異常音がある場合	—	
	ゴム製伸縮継手等	アンカー部材欠損	伸縮継手部からの異常音に関しては、周辺への影響も大きく遅滞なく追加調査を行い原因を確定すること	①アンカー部材に欠損がある場合 ②アンカー部材に割れ、きず、変形、発錆、発錆腐蝕等の損傷がある場合	アンカー部材に軽微なきず、変形、発錆腐蝕等の損傷がある場合	
		継手本体くぼみ、盛り上り		深さ 5mm 以上 高さ 5mm 以上	B ランク 損傷未満のくぼみ、盛り上りがある場合	
		後打ちコンクリートくぼみ		深さ 5mm 以上 長さ 100mm 以上 幅 50mm 以上	B ランク 損傷未満のくぼみがある場合	
		ゴム損傷・剥離		損傷長さ 100mm 以上 剥離長さ 100mm 以上	B ランク 損傷未満の損傷、剥離がある場合	
		ボルトホール充填物剥離		剥離がある場合	—	
		舗装・後打ちコ		長さ 100mm 以上	B ランク 損傷未	

		ンクリートの隙間	幅 5mm 以上	満の隙間がある場合
		異常音	異常音がある場合	—
		漏水	漏水がある場合	—
		アンカーボルト緩み・欠損	アンカーボルトに緩み、欠損がある場合	—
	鋼製伸縮継手	作動拘束	伸縮継手作動が拘束されている場合	伸縮継手作動の余裕量が少ない場合
		アンカー部材損傷・欠損	①アンカー部材に欠損がある場合 ②アンカー部材に割れ、きず、変形、発錆腐蝕等の損傷がある場合	アンカー部材に軽微なきず、変形、発錆腐蝕等の損傷がある場合
		フェースプレート部損傷	フェースプレート部に割れ、きず、変形、発錆腐蝕等の損傷がある場合	フェースプレート部に軽微なきず、変形、発錆腐蝕等の損傷がある場合
		フィンガー部損傷・欠損	①フィンガー部に欠損がある場合 ②フィンガー部に割れ、きず、変形、磨耗、発錆腐蝕等の損傷がある場合	フィンガー部に軽微なきず、変形、磨耗、発錆腐蝕等の損傷がある場合
		フィンガー部段差	段差 5mm 以上	Bランク損傷未満の段差がある場合
		後打ちコンクリートくぼみ	深さ 5mm 以上 長さ 100mm 以上 幅 50mm 以上	Bランク損傷未満のくぼみがある場合
		舗装・後打ちコンクリートの隙間	長さ 100mm 以上 幅 5mm 以上	Bランク損傷未満の隙間がある場合
		異常音	異常音がある場合	—

	漏水		漏水がある場合	—	
	アンカーボルト緩み・欠損		アンカーボルトに緩み、欠損がある場合	—	

付表 1-3 舗装の損傷項目とその判定基準

損傷ランク	A	B	C	D
対応	要緊急対応	要対応	対応不要	異常なし
基本概念	交通や第三者への影響を防止するために、緊急の対応を必要とする損傷	緊急度は高くないが、補修補強や追加調査等の対応を必要とする損傷	次回点検時まで対応を必要としない損傷	点検実施の事実を記録
わだち掘れ	①損傷が著しく、交通に支障を生じる可能性がある場合 ②局所的なひび割れが著しく舗装剥離により第三者被害を引き起こす可能性がある場合	①平均わだち掘れ量が 20mm 以上の場合 ②交通に影響を与える場合	平均わだち掘れ量が 20mm 未満の場合	損傷等がない場合
ひびわれ		①累計ひび割れ率が 20% 以上の場合 ②交通に影響を与える場合	累計ひび割れ率が 20% 未満の場合	
コルゲーション、段差		①10mm 以上の場合 ②交通に支障がある場合	10mm 未満の場合	
ポットホール		交通に影響を与える場合	軽微で交通に影響を与えない場合	
剥離		交通に影響を与える場合	軽微で交通に影響を与えない場合	
滞水		交通に影響を与える場合	軽微で交通に影響を与えない場合	
レーンマーク視認性		磨耗、はがれ、汚れ等により、レーンマークの視認性が広範囲に阻害されている場合	磨耗、はがれ、汚れ等により、レーンマークの視認性が一部阻害されている場合	

付録2 データベースシステム内のデータ項目

5.3「道路維持管理のためのデータベースシステムの開発」において開発した，データベースシステム内のデータ項目を添付する．

付表 2-1 伸縮装置諸元テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	NO	int			
2	路線名	int			路線名コード
3	本線ランプ区分	int			本線ランプ区分コード
4	継手番号	nvarchar(50)	主キー		伸縮装置補修テーブル 伸縮装置位置情報テーブル 伸縮装置段差テーブル
5	橋脚番号	nvarchar(50)			
6	方向	int			方向コード
7	車線区分	int			車線区分コード
8	地域条件	int			地域条件コード
9	立地条件	int			立地条件コード
10	現形式名称	nvarchar(50)			
11	現形式メネジ	int			
12	現形式設置年月	smalldatetime			
13	形式	int			形式コード

付表 2-2 伸縮装置位置情報テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	継手番号	nvarchar(50)	主キー		伸縮装置諸元テーブル
2	経度	numeric(12,9)		度	
3	緯度	numeric(12,9)		度	

付表 2-3 伸縮装置補修履歴テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	継手番号	int	主キー		伸縮装置諸元テーブル
2	取替回数	int		回	
3	当初形式名称	nvarchar(50)			
4	当初設置年月	smalldatetime			
5	1 回目形式名称	nvarchar(50)			
6	1 回目補修年月	smalldatetime			
7	1 回目損傷内容	nvarchar(50)			
8	2 回目形式名称	nvarchar(50)			
9	2 回目補修年月	smalldatetime			
10	2 回目損傷内容	nvarchar(50)			
11	3 回目形式名称	nvarchar(50)			
12	3 回目補修年月	smalldatetime			
13	3 回目損傷内容	nvarchar(50)			
14	4 回目形式名称	nvarchar(50)			
15	4 回目補修年月	smalldatetime			
16	4 回目損傷内容	nvarchar(50)			
17	5 回目形式名称	nvarchar(50)			
18	5 回目補修年月	smalldatetime			
19	5 回目損傷内容	nvarchar(50)			
20	6 回目形式名称	nvarchar(50)			
21	6 回目補修年月	smalldatetime			
22	6 回目損傷内容	nvarchar(50)			

付表 2-4 伸縮装置指標値履歴テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	継手番号	nvarchar(50)	主キー		伸縮装置諸元テーブル
2	段差	numeric(5.1)		mm	
3	点検日	smalldatetime	主キー		

付表 2-5 舗装諸元テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	NO	int			
2	舗装番号	nvarchar(50)	主キー		舗装補修テーブル 舗装位置情報テーブル 舗装 IRI テーブル
3	路線名	int			路線名コード
4	始脚番号	nvarchar(50)			点検履歴テーブル
5	終脚番号	nvarchar(50)			
6	本線ランプ区分	int			本線ランプ区分コード
7	構造区分	int			構造区分コード
8	始脚側継手番号	nvarchar(50)			
9	終脚側継手番号	nvarchar(50)			
10	方向	int			方向コード
11	車線区分	int			車線区分コード
12	床版種類	int			床版種類コード
13	適用基準	nvarchar(50)			

付表 2-6 舗装位置情報テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	舗装番号	nvarchar(50)	主キー		舗装諸元テーブル
2	緯度	numeric(12,9)		度	
3	経度	numeric(12,9)		度	

付表 2-7 舗装指標値履歴テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	舗装番号	nvarchar(50)	主キー		舗装諸元テーブル
2	IRI	numeric(5,2)		mm/m	
3	点検日	smalldatetime	主キー		

付表 2-8 舗装補修履歴テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	舗装番号	nvarchar(50)	主キー		舗装諸元テーブル
2	パッチング箇所数	int		箇所	
3	補修回数	int		回	
4	表層施工年月	smalldatetime			
5	表層厚さ	int		mm	
6	表層使用材料	int			使用材料コード
7	基層施工年月	smalldatetime			
8	基層厚さ	int		mm	
9	基層使用材料	int			使用材料コード
10	平均ひび割れ量	int		mm	
11	最大ひび割れ量	int		mm	
12	平均わだち掘れ量	int		mm	
13	最大わだち掘れ量	int		mm	

付表 2-9 点検履歴テーブルのデータ項目一覧

項	項目名称	データ型	キー	単位	リレーショナルテーブル
1	構造物	nvarchar(50)			
2	路線名	int			路線名コード
3	始脚番号	nvarchar(50)	主キー		舗装諸元テーブル
4	方向	int			方向コード
5	本線ランプ区分	int			本線ランプ区分コード
6	車線区分	int			車線区分コード
7	損傷概要 1	nvarchar(50)			
8	数量・寸法	nvarchar(50)			
9	二次判定	nvarchar(50)			
10	点検年月日	smalldatetime			
11	応急対応方針	nvarchar(50)			
12	対応済み	nvarchar(50)			

付表 2-10 路線名コード

コード番号	データ項目内容	コード番号	データ項目内容
1	高速都心環状線	13	高速 7 号小松川線
2	高速八重洲線	14	高速 9 号深川線
3	高速 1 号上野線	15	高速 11 号台場線
4	高速 1 号羽田線	16	高速湾岸線（東京地区）
5	高速 2 号目黒線	17	高速中央環状線（東京東地区）
6	高速 3 号渋谷線	18	高速川口線
7	高速 4 号新宿線	19	高速神奈川 1 号横羽線
8	高速 5 号池袋線	20	高速神奈川 2 号三ツ沢線
9	高速埼玉大宮線	21	高速神奈川 3 号狩場線
10	高速中央環状線（東京西地区）	22	高速神奈川 5 号大黒線
11	高速 6 号向島線	23	高速神奈川 6 号川崎線
12	高速 6 号三郷線	24	高速湾岸線（神奈川地区）

付表 2-11 本線ランプ区分コード

コード番号	データ項目内容	コード番号	データ項目内容
1	本線	14	加平 5 号入口
2	分岐線	15	加平 6 号入口
3	入口	16	加平 7 号出口
4	出口	17	加平 8 号出口
5	JCT	18	鹿浜橋入口 1
6	PA	19	鹿浜橋入口 2
7	D9 本線	20	PA から本線
8	管理通路	21	本線から PA
9	連結路	22	フロア
10	加平 1 号入口	23	フロアから本線
11	加平 2 号入口	24	本線からフロア
12	加平 3 号出口	25	拡幅部
13	加平 4 号出口	26	出口拡幅部

付表 2-12 方向コード

コード番号	データ項目内容	コード番号	データ項目内容
1	上	14	外→下
2	上→内	15	東
3	上→外	16	東→上
4	上→東	17	東→下
5	上→西	18	東→外
6	下	19	西
7	下→内	20	西→上
8	下→外	21	西→下
9	下→東	22	西→内
10	下→西	23	南
11	内	24	北
12	内→下	25	交差点
13	外		

付表 2-13 地域条件コード

コード番号	データ項目内容
1	住宅地区
2	商業地区
3	工業地区
4	湾岸地区
5	田園地区

付表 2-14 立地条件コード

コード番号	データ項目内容
1	河川上
2	街路上
3	管理用地上（公園含）

付表 2-15 形式コード

コード番号	データ項目内容
1	鋼
2	ゴム
3	ノージョイント
4	その他

付表 2-16 車線区分コード

コード番号	データ項目内容	コード番号	データ項目内容
1	走行	5	追越右
2	走行右	6	追越左
3	走行左	7	分流部
4	追越		

付表 2-17 構造区分コード

コード番号	データ項目内容
1	高架
2	土工
3	半地下
4	擁壁
5	トンネル

付表 2-18 床版種類コード

コード番号	データ項目内容	コード番号	データ項目内容
1	普通 RC	4	鋼
2	軽量 RC	5	プレキャスト
3	PC	6	鋼格子

付表 2-19 仕様材料コード

コード番号	データ項目内容	コード番号	データ項目内容
1	粗粒 G (AC)	14	AC120
2	粗粒 AS (AC)	15	密粒 G (ゴム)
3	粗粒 G (ゴム)	16	開粒 (ゴム)
4	グース AS	17	開粒 AS
5	粗粒 G	18	薄層舗装
6	粗粒 AS	19	軽量 AS
7	密粒 G	20	MC 砕石マスチック
8	密粒 AS	21	薄層混合 (改 I)
9	開粒 (透水)	22	薄層混合 (改 II)
10	開粒 (半剛)	23	樹脂入りアスコン
11	コンクリート舗装	24	再生アスコン
12	AC80	25	特殊舗装
13	AC140	26	その他