

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.873

October 2015

ITS スポット共通基盤を活用した
産学官連携サービス開発に関する共同研究
個別会議3（車重推定）
報告書

Report of the joint research on collaborative service among government, industry and academia
based on the common platform ITS Spot.
Working Group 3: Weight Estimation of Vehicle

国土交通省 国土技術政策総合研究所

パナソニック株式会社 オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社

株式会社三菱総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan
Automotive & Industrial Systems Company, Panasonic Corporation
Mitsubishi Research Institute, INC.

ITS スポット共通基盤を活用した産学官連携サービス開発
に関する共同研究 個別会議 3（車重推定）報告書

○高度道路交通システム研究室

金澤 文彦（平成 24 年 9 月～平成 26 年 3 月）

牧野 浩志（平成 26 年 4 月～平成 27 年 3 月）

鈴木 彰一（平成 24 年 9 月～平成 27 年 3 月）

○パナソニックオートモーティブ&インダストリアルシステムズ社

○株式会社三菱総合研究所

概要

本共同研究では、産学官が ITS スポットを共通基盤とし、アップリンク情報を活用するための技術開発、制度設計およびサービス導入効果の検証、技術基準等の作成、国際標準化の検討を行った。

本資料は、ITS スポット路側機と ETC2.0 車載器を活用し、より低コストで効率的に車両重量を推定する方法の検討を目的として行われた個別会議 3（車重推定）の内容をとりまとめたものである。

キーワード : ETC2.0、ITS スポット、アップリンク情報、車重推定

Report of the joint research on collaborative service among government, industry and academia based on the common platform of ITS Spot.
Working Group 3: Weight Estimation of Vehicle.

- Intelligent Transport Systems Division
 - Fumihiko KANAZAWA (H24.9-H26.3)
 - Hiroshi MAKINO (H26.4-H27.3)
 - Shoichi SUZUKI (H24.9-H27.3)
- Automotive & Industrial Systems Company, Panasonic Corporation
- Mitsubishi Research Institute, INC.

Synopsis

In this joint research it is considered that the technology development, the system design, the service benefits, the necessary technical specification and the standardization, for utilization of the uplinked information with ITS Spot common platform among government, industry and academia.

This document reports the results of the Working Group 3, which examined the efficient estimation technology of vehicle's weight at low cost with ETC2.0 OBU and roadside units.

Key Words : ETC2.0, ITS Spot, uplinked information, weight estimation

I . ITS スポット共通基盤を活用した 産学官連携サービス開発に関する 共同研究（全体概要）

目次

I. ITS スポット共通基盤を活用した産学官連携サービス開発に関する共同研究 (全体概要)	
1. 共同研究の目的	1
2. 共同研究の内容	2
3. 共同研究の期間・実施体制	4
4. 個別会議別の実施概要	5

1. 共同研究の目的

ITS スポットのアップリンク機能を活用し、走行履歴（ETC2.0プローブ情報※1、特定プローブ情報※2、車両情報等（以下「アップリンク情報」という）を道路管理者が収集し民間事業者へ提供することで、民間事業者（物流事業者、自動車会社等）では車両の運行管理やユーザ向けサービスの効率化・高度化、道路管理者では交通状況の把握など道路管理の効率化・高度化が期待される。

本共同研究では、産学官がITS スポットを共通基盤とし、アップリンク情報を連携して活用するための技術開発、制度設計およびサービス導入効果の検証、技術基準等の作成、国際標準化の検討を目的として共同研究を行った。

※1 ETC2.0 プローブ情報：ナビ型又はGPS 付き発話型のITS スポット(ETC2.0)対応カーナビ（以下、ITS スポット(ETC2.0)対応カーナビという）に記録された走行履歴などの情報で、道路管理者が管理するITS スポット（DSRC 路側無線装置）と無線通信を行うことによりITS スポット(ETC2.0)対応カーナビから収集される情報。

なお、このプローブ情報から車両又は個人を特定することはできない。

※2 特定プローブ情報：事前に国土交通省地方整備局等と契約等を締結した事業者等の車両に搭載されているITS スポット(ETC2.0)対応カーナビに記録された走行位置の履歴情報などの情報に、個別の車両を特定できる情報を加え、ITS スポット（DSRC 路側無線装置）と無線通信を行うことによりITS スポット(ETC2.0)対応カーナビから収集される情報。

2. 共同研究の内容

産学官連携サービスとして次の例に示すサービスが考えられるが、具体には共同研究者からの提案をふまえて検討することとした。

(サービスの例)

- ・ 特定車両の走行履歴、挙動履歴を活用した物流支援サービス
- ・ 特定車両（特殊車両、土砂運搬車両等）の走行ルートのモニタリング
- ・ 高速バスの運行管理支援サービス
- ・ プローブ情報を活用した道路混雑状況の予測、最適ルート情報提供等のサービス

また、下記の項目に関する共同研究を行うこととした。

(1) サービス及びシステムの検討

産学官連携サービスについて、アップリンク情報の収集・共有方法、サービスの内容、サービスの提供主体や提供方法などについて検討するとともに、アップリンク情報の収集・共有方法など、システムについて具体的内容を検討する。

(2) システム・機器開発

- 1) アップリンク情報の収集・共有・分析・提供システム開発
(1)の検討の結果必要となるアップリンク情報を収集し、必要に応じて蓄積・共有・分析・提供するためのシステム開発を行う。
- 2) サービスシステムの開発
(1)で検討したサービスを実現するためのシステム開発を行う。
- 3) ITSスポット(ETC2.0)対応カーナビの改良・開発
アップリンク情報の収集又はサービスの提供に必要なITSスポット(ETC2.0)対応カーナビの改良・開発を行う。
- 4) ITSスポット及び処理システムの改良・開発
アップリンク情報の収集又はサービスの提供に必要なITSスポット及び処理システムの改良・開発を行う。

(3) サービスの検証

- 1) サービスの成立性の確認
(2)で開発したシステム・機器を用いて実証的にサービスの成立性を確認する。
- 2) サービス導入効果の検証
サービスを導入した場合の効果について推定し、道路管理者、サービス提供者、サービス利用者等の視点で必要な費用やどのような便益があるかについて評価する。

(4) 官民連携のための制度設計

(1)で検討したサービス実現のために必要となる官民の役割分担，費用負担，責任の分解点等について制度設計を行う。

(5) 技術基準、技術仕様、運用ガイドラインの作成、国際標準化の検討

(1)～(4)の検討結果を受けて技術基準，技術仕様，運用ガイドラインを作成する。また，国際標準化すべき部分についてとりまとめる。

3. 共同研究の期間・実施体制

(1) 共同研究の期間

自 平成 24 年 9 月 至 平成 27 年 3 月

(2) 共同研究の体制

本共同研究の実施にあたっては、参画企業と国総研が個別に秘密保持契約を包含する共同研究の協定を結び、以下①～③の検討テーマ毎に「個別会議」を設け、検討を行うこととした。また、各個別会議における検討内容については、全参画企業と国総研が意思決定や情報共有を行うために開催する会議（「全体会議」）において確認しながら進める体制とした。表 1 に全体会議の開催状況を示す。

- ① 個別会議 1（大型車両管理）
- ② 個別会議 2（物流支援）
- ③ 個別会議 3（車重推定）

表 1 全体会議開催状況

開催時期	参加メンバー	実施内容
平成 24 年 9 月 26 日	・ 沖電気工業（株） ・（株）日立製作所 ／（株）日立国際電気 ・ 三菱重工業（株） ・ パナソニック（株） ・ 三菱総合研究所（株） ・（株）JVC ケンウッド ・ 三菱電機（株） ・ 国総研 ITS 研究室	第 1 回 全体会議
平成 24 年 12 月 25 日		第 2 回 全体会議
平成 25 年 2 月 27 日		第 3 回 全体会議
平成 25 年 11 月 6 日		第 4 回 全体会議
平成 26 年 3 月 4 日		第 5 回 全体会議
平成 26 年 11 月 11 日		第 6 回 全体会議
平成 27 年 3 月 18 日		第 7 回 全体会議

4. 個別会議別の実施概要

(1) 個別会議 1（大型車両管理）

1) 検討の概要

個別会議 1（大型車両管理）では、共同研究参加者による議論を踏まえ、特に大型車両管理に焦点を当て、4つの検討テーマを設定し、サービス検討、システム機能要求検討、機器仕様案検討、検証実験等を実施することとした。4つの検討テーマを以下に示す。

- a)一般道 ITS スポットの機器仕様検討
- b)簡素型 ITS スポットの機器仕様検討
- c)保存データ量の再検討
- d)プローブデータの補完および認証方法

いずれのテーマも、平成 23 年に、高速道路上を中心に設置された ITS スポットのみでは、大型車両管理に必要なアップリンク情報を十分に収集できない点に着目し、異なる観点からその解決策を検討することを目的とした。なお、平成 26 年度に、一般国道上にアップリンク情報を収集可能な経路情報収集装置が設置される方針が明らかとなったことから、上記 4 テーマのうち、a)、c)、d)については、それまでの検討内容をとりまとめ、以降の検討は行わないこととした。

2) 開催状況と参加メンバー

個別会議の開催状況及び参加メンバーを、表 2 に示す。

表 2 個別会議 1 開催状況

開催時期	参加メンバー	実施内容
平成 25 年 1 月 29 日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 沖電気工業（株） ・（株）日立製作所 ／（株）日立国際電気 ・ 三菱重工業（株） ・ 国総研 ITS 研究室 	第 1 回 個別会議
平成 25 年 6 月 13 日		第 2 回 個別会議
平成 25 年 8 月 28 日		第 3 回 個別会議
平成 25 年 12 月 10 日		第 4 回 個別会議
平成 26 年 2 月 20 日		第 5 回 個別会議
平成 26 年 6 月 18 日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 沖電気工業（株） ・（株）JVC ケンウッド ・（株）日立製作所 ／（株）日立国際電気 ・ 三菱重工業（株） ・ 三菱電機（株） ・ 国総研 ITS 研究室 	第 6 回 個別会議
平成 26 年 10 月 27 日～ 10 月 31 日		国総研試走路での実験
平成 26 年 10 月 29 日		第 7 回 個別会議
平成 26 年 12 月 25 日		第 8 回 個別会議
平成 27 年 2 月 3 日	第 9 回 個別会議	

(2) 個別会議 2 (物流支援)

1) 検討の概要

個別会議 2 (物流支援) では、共同研究参加者による議論を踏まえ、特に物流支援に焦点を当て、5つの検討テーマを設定し、サービス検討、システム機能要件検討、機器仕様案検討、検証実験等を実施することとした。5つのテーマを以下に示す。

① サービスの検討

プローブデータを活用することにより、物流事業者に対して提供可能なサービスについて特徴等を整理した上で、本共同研究で想定するサービスについて検討した。

② システム・機器開発

官と民で互いに収集したプローブデータを共用するためのシステム等を開発する。

③ 技術基準、技術仕様、運用ガイドラインの作成

官と民で互いに収集したプローブデータを共用するための、プローブデータ共用インタフェース仕様および運用規定を策定する。

④ サービス導入効果の検証

上記②③で開発したシステム・仕様等を用いて実証実験を実施し、サービスを利用する物流事業者に対するヒアリングにより効果を検証する。

⑤ 運用形態の検討

物流事業者のニーズや道路管理者側の制約事項等をもとに、物流支援サービスを運用するために必要となる運用形態を検討する。

2) 開催状況と参加メンバー

個別会議の開催状況及び参加メンバーを、表3に示す。

表3 個別会議2開催状況

開催時期	参加メンバー	実施内容
平成24年11月19日	<ul style="list-style-type: none"> ・パナソニック（株） ・国総研 ITS 研究室 	第1回 個別会議
平成24年12月17日		第2回 個別会議
平成25年1月23日		第3回 個別会議
平成25年2月1日		第4回 個別会議
平成25年3月1日		第5回 個別会議
平成25年4月16日		第6回 個別会議
平成25年6月25日		第7回 個別会議
平成25年7月1日		第8回 個別会議
平成25年7月23日		第9回 個別会議
平成25年11月6日		第10回 個別会議
平成25年12月17日		第11回 個別会議
平成26年1月31日		第12回 個別会議
平成26年3月11日		第13回 個別会議
平成26年7月4日		第14回 個別会議
平成26年8月6日		第15回 個別会議
平成26年9月25日		第16回 個別会議
平成26年9月30日～ 10月2日		電波伝搬実験 (国総研試験走路内)
平成26年11月26日		第17回 個別会議
平成27年2月20日	第18回 個別会議	

(3) 個別会議3（車重推定）

1) 検討の概要

個別会議3（車重推定）では、規程重量を超過した過積載車両の検出方法について、ITS スポット路側機と ETC2.0 車載器を活用し、より低コストで効率的に車両を推定する方法の実現を目的として検討を行った。

具体的な検討内容は、以下に示すとおりである。

① 車両重量推定の概念及び理論検討

ITS スポット路側機と ETC2.0 車載器を活用して車両重量推定を行うための仕組みとして、①道路形状、②車載器、③路側機、④センタの4つの要素を用いた推定ロジックの検討を実施した。

② シミュレーションによる理論検証

計算機上でのシミュレーションにより車両重量の推定理論について検証を行った。

③ 実走行実験による車両重量推定の理論検証

シミュレーション分析結果を踏まえ、実走行実験を行い、実際の車両振動データの取得を通し、計測データの精度を検証するとともに、車両重量の推定可能性の検証を行った。

2) 開催状況と参加メンバー

個別会議の開催状況及び参加メンバーを、表4に示す。

表4 個別会議3開催状況

開催時期	参加メンバー	実施内容
平成25年6月25日	・パナソニック（株） ・三菱総合研究所（株） ・国総研ITS研究室	第1回 個別会議
平成25年7月29日		第2回 個別会議
平成25年8月27日		第3回 個別会議
平成25年11月1日		第4回 個別会議
平成25年12月20日		第5回 個別会議
平成26年1月28日		第6回 個別会議
平成26年3月7日		第7回 個別会議
平成26年4月4日		第8回 個別会議
平成26年6月4日		第9回 個別会議
平成26年7月9日		第10回 個別会議
平成26年9月18日～ 9月19日		国総研試走路における走行実験
平成26年12月17日		第11回 個別会議
平成27年1月16日		第12回 個別会議
平成27年2月25日	第13回 個別会議	

Ⅱ. ITS スポット共通基盤を活用した 産学官連携サービス開発に関する 共同研究

個別会議 3（車重推定）報告書

目次

Ⅱ. ITS スポット共通基盤を活用した産学官連携サービス開発に関する共同研究 個別会議 3（車重推定）報告書

1. 本研究の背景・目的.....	1-1
2. 検討内容.....	2-1
2.1 全体概念	2-1
2.2 検討体制	2-2
2.3 検討経緯	2-3
3. シミュレーションを用いた車両重量推定の理論検証.....	3-1
3.1 簡易モデルによるシミュレーション	3-1
3.2 詳細シミュレーション.....	3-10
3.3 シミュレーション結果のまとめ	3-27
4. 実走行実験による車両重量推定の理論検証.....	4-1
4.1 実施概要	4-1
4.2 実験実施結果	4-12
4.3 実走行データの解析	4-13
5. 研究成果と今後の課題	5-1
5.1 本研究の成果	5-1
5.2 今後の課題.....	5-3

1. 本研究の背景・目的

道路法では、一定の大きさや重量を超える車両（特殊車両）の通行については、道路構造や他の車両の交通に支障を及ぼす可能性があるため、道路管理者の許可を受けることを定めている。

しかし、特殊車両に該当する車両にもかかわらず、許可を受けずに通行する車両や許可されていない経路を走行する等の条件違反に該当する車両が存在している。特に規程重量を超過した車両の走行は、道路インフラに対し大きな負荷を与え、早期劣化を引き起こす要因とされている。このような規程重量を超過した重量超過車両を適切に検出し、取締りを行うことは道路管理上の課題である。

上記背景の下、現在の車両重量を測定する主な方法としては、道路脇に設置された“指導取締基地”に車両を引き込み計測する方法や道路に埋設した車両重量自動計測装置により計測する方法が導入されている（図 1-1）。



出典) 国土交通省 HP : <http://www.mlit.go.jp/common/000024127.pdf>

図 1-1 現在の主な車両重量測定方法

しかし、これらの方法を導入するには道路脇に指導取締基地を整備する必要や道路に車両重量自動計測装置を埋設する必要等、多額のコストが必要となり、数多くの路線に導入することが難しい。

そこで、本研究では、2011年より全国展開され全国に約1,600基が整備されているITSスポット路側機と、ETC2.0車載器を活用し、より低コストで

効率的に車両重量を推定する方法の検討を目的とした。

なお、車両重量測定のニーズは道路インフラ整備が進む途上国でもニーズが高い。したがって、本研究開発の成果は、国内におけるシステムの普及のみならず、将来的には ITS スポットと ITS スポットを活用したサービスのパッケージ輸出といった展開シナリオも想定される。

2. 検討内容

本研究における検討内容について、全体概念、検討体制、検討経緯を以下に示す。

2.1 全体概念

2.1.1 基本的な考え方

ITS スポットを活用した車両重量推定の仕組みは、①道路形状、②車載器、③路側機、④センタの4つの要素から構成される（図2-1）。車両重量推定に至るまでのロジックは以下のとおりである。

車両が、道路上に整備された特定の形状の区間（外部入力：パルス、正弦波系、ステップダウン等）を通過することにより、車両に振動が生じる。車両に生じた振動は、加速度センサが組み込まれた車載器にて計測する。計測した車両の振動データは、ITS スポットより収集され、センタに集約される。センタ側で事前に登録されている車両情報等と組合せ、固有振動数から車両重量及び積載重量を推定する。その上で取締対象となる重量超過の疑いのある車両を特定する。

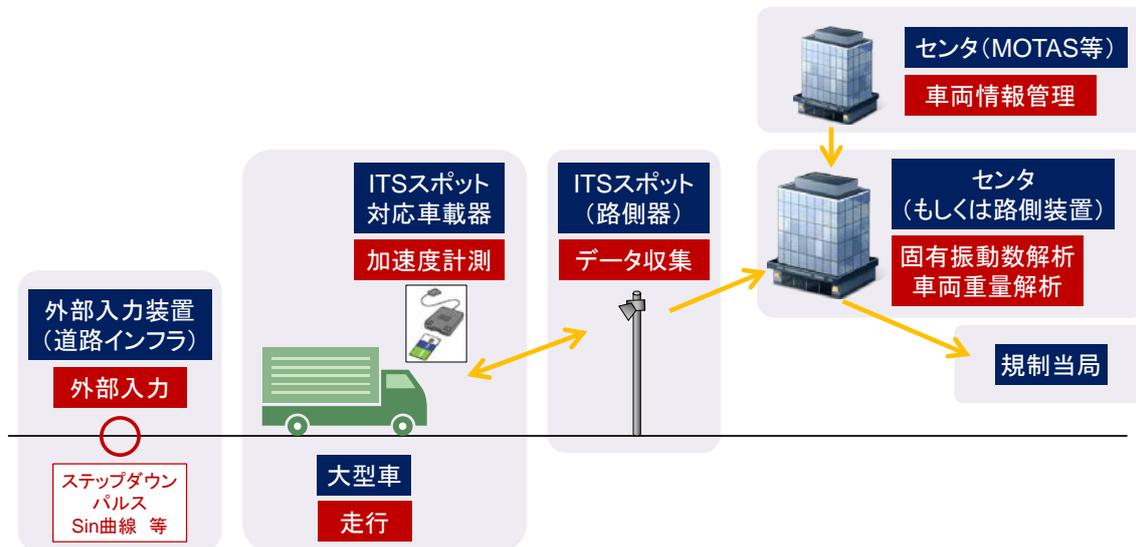


図 2-1 車両重量推定の全体概念図

2.1.2 車両重量と関係する変数

重量が w 、ばね定数が k の車両が速度 v で走行し、特定の形状の区間で振動を生じた際の上下加速度が $a(t)$ の場合、これらの各変数の関係式は、

$$w = f(k, v, a(t))$$

と表せる (図 2-2)。

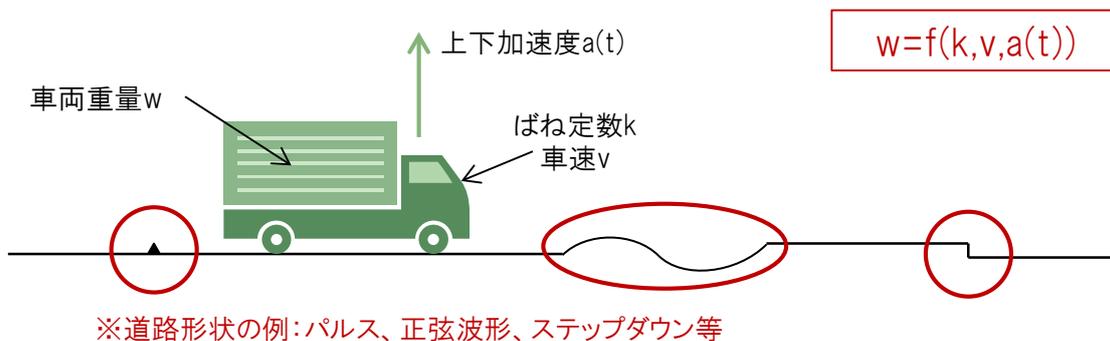


図 2-2 車両重量と関係変数

2.2 検討体制

本研究を進めるにあたっては、国土交通省国土技術政策総合研究所、パナソニック株式会社、株式会社三菱総合研究所の三社による検討体制を構築した。なお、車両重量推定のシミュレーション及びモデル構築にあたっては、東京大学生産技術研究所の須田義大教授ならびに杉町敏之特任助教に技術協力いただいた (図 2-3)。

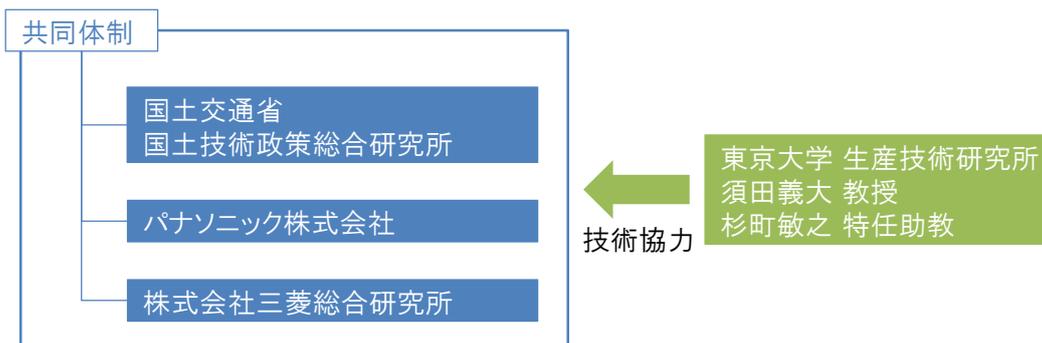


図 2-3 検討体制

2.3 検討経緯

本研究は、表 2-1 に示すとおり、共同研究各社合同の打合せならびに実走行実験を実施し、検討を進めた。

なお、検討手順としては、計算機上でのシミュレーションにより車両重量の推定可能性を確認した上で、実車によるデータ計測及び検証を実施した。

表 2-1 検討経緯

年月日	実施内容
平成 25 年 6 月 25 日	第 1 回個別会議
平成 25 年 7 月 29 日	第 2 回個別会議
平成 25 年 8 月 27 日	第 3 回個別会議
平成 25 年 11 月 1 日	第 4 回個別会議
平成 25 年 12 月 20 日	第 5 回個別会議
平成 26 年 1 月 28 日	第 6 回個別会議
平成 26 年 3 月 7 日	第 7 回個別会議
平成 26 年 4 月 4 日	第 8 回個別会議
平成 26 年 5 月 8 日	試走路下見
平成 26 年 6 月 4 日	第 9 回個別会議
平成 26 年 7 月 9 日	第 10 回個別会議
平成 26 年 9 月 18 日 ～平成 26 年 9 月 19 日	走行実験
平成 26 年 12 月 17 日	第 11 回個別会議
平成 27 年 1 月 16 日	第 12 回個別会議
平成 27 年 2 月 25 日	第 13 回個別会議

3. シミュレーションを用いた車両重量推定の理論検証

固有振動数を用いた車両重量推定について、実車におけるデータ計測及び解析を実施する前に、シミュレーションによる試算を行い、その可能性について検討した。なお、シミュレーションは、はじめに簡易モデルを用いて実施し、その結果を踏まえてより実車に近いモデルによるシミュレーションを実施した。

3.1 簡易モデルによるシミュレーション

はじめに簡易モデルを用いたシミュレーションを実施し、変数として設定した各データの関係性の確認を行った。

3.1.1 シミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルの概要を図 3-1～図 3-3 に示す。

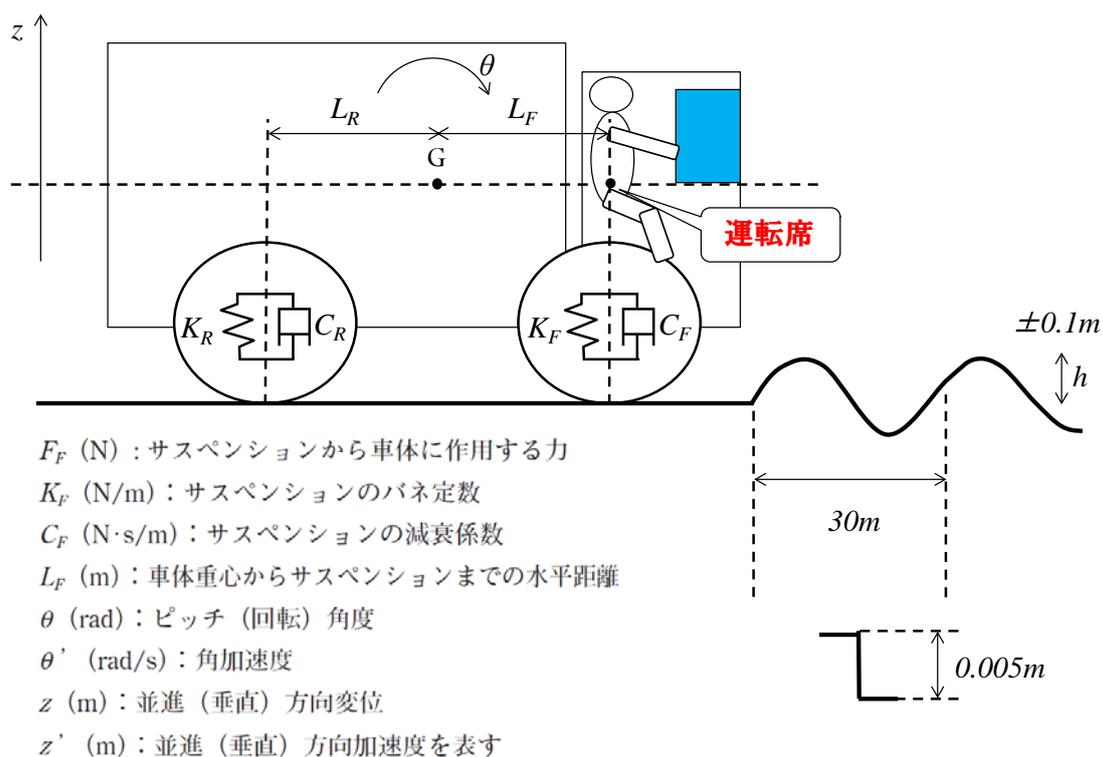


図 3-1 簡易シミュレーションモデルの概要

垂直方向への自由度に対して与える影響

$$F_F = 2K_F(L_F \cdot \theta - z) + 2C_F(L_F \cdot \theta' - z')$$

$$F_R = 2K_R(L_R \cdot \theta - z) + 2C_R(L_R \cdot \theta' - z')$$

サスペンションによるピッチモーメント (N・m)

$$M_F = -L_F \cdot F_F$$

$$M_R = -L_R \cdot F_R$$

これらの間に次の関係式が成り立つ

$$M_b \cdot Z'' = F_F + F_R - M_b \cdot g$$

$$I_{yy} \cdot \theta'' = M_F + M_R \cdot g$$

ここで、

M_b (kg) : 車両重量

g (m/s²) : 重力加速度

I_{yy} (kg・m²) : 車両重心回りの慣性モーメント

図 3-2 簡易シミュレーションモデルの概要

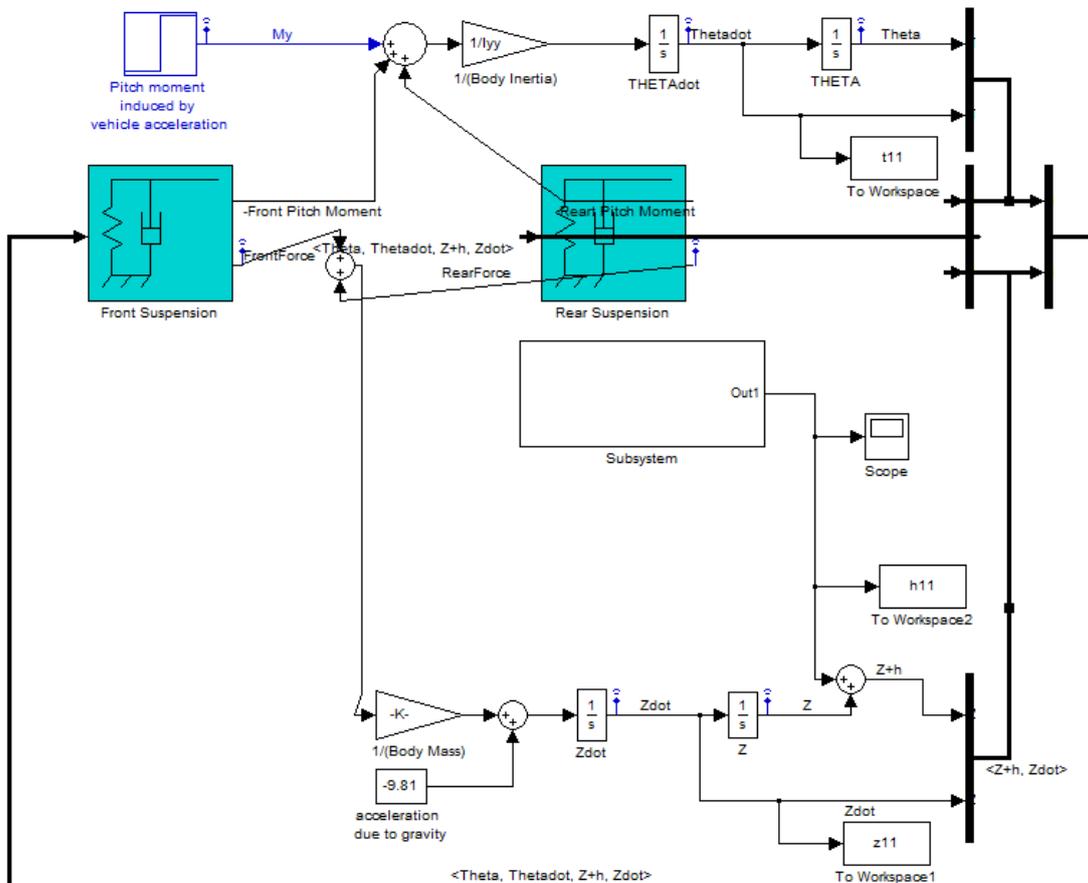


図 3-3 簡易シミュレーションモデル

車両に係る各種パラメータは実存する車両（日野：プロフィア）のデータを基に以下のとおり設定した。なお、実際の車両は前輪と後輪の二軸が存在するが、本モデルでは重量が重心の1点に掛かる形となっている。また、上下加速度の計測位置は、車載器の設置が想定される運転席周りを想定し、前輪の軸直上に設定した。

- $L_f = 4.0$; % front hub displacement from body gravity center (m)
- $L_r = 1.5$; % rear hub displacement from body gravity center (m)
- $I_{yy} = 2100$; % body moment of inertia about y-axis in (kg m^2)
- $k_f = 28000$; % front suspension stiffness in (N/m)
- $k_r = 25000$; % rear suspension stiffness in (N/m)
- $c_f = 2500$; % front suspension damping in (N sec/m)
- $c_r = 2000$; % rear suspension damping in (N sec/m)

3.1.2 分析条件

車両に振動を発生させるための外部入力として、正弦波とステップダウンの2通りを設定した。その上で、車両重量を4パターン、車速を3パターン設定し、各パターンの組合せによる分析を実施した。分析条件を表3-1に示す。なお、ここで使用する簡易モデルでは、外部入力の正弦波とステップダウンは前後輪に同時に入力される。そのため、ステップダウンでは速度の影響を考慮できないため、車速は正弦波のみに対する条件となる。

表 3-1 分析条件

条件	パターン
外部入力	正弦波：振幅±0.1m・波長 30m ステップダウン：-0.005m（幅 0）
車両重量 ^{※1}	11t(0t)・17t(6t)・23t(12t)・29t(18t)
車速 ^{※2}	20km/h、40km/h、60km/h

※1 カッコ内は積載物の重量。18t は重量超過の状態。

※2 速度は正弦波の外部入力に対する条件

また、外乱（ノイズ）が含まれる状態で外部入力を行わないよう、図3-4に示すような安定状態になった段階で外部入力を発生させるようにした。

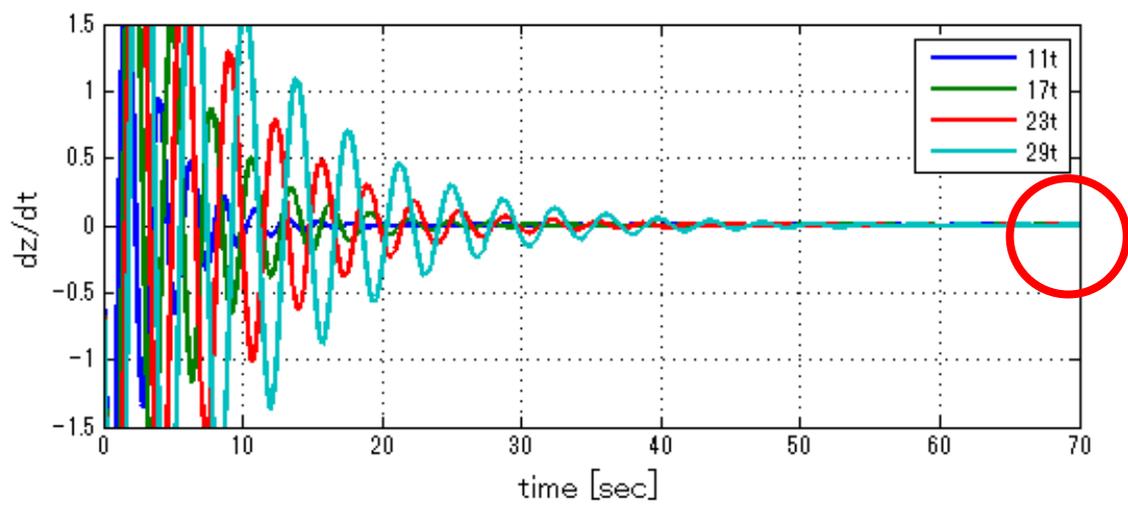
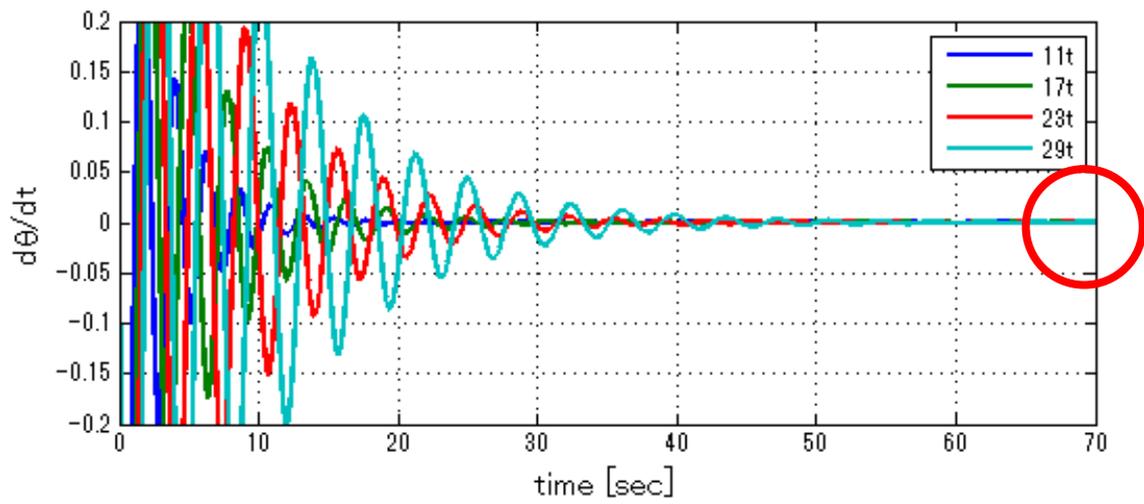


図 3-4 外部入力の発生タイミング

3.1.3 シミュレーション結果

シミュレーションを行った結果を図 3-5～図 3-8 に示す。外部入力に関しては、正弦波よりもステップダウンの方が、車両重量の違いによる上下加速度の違いが分かりやすい形で出現した。

1) 正弦波

① 車速 20km/h

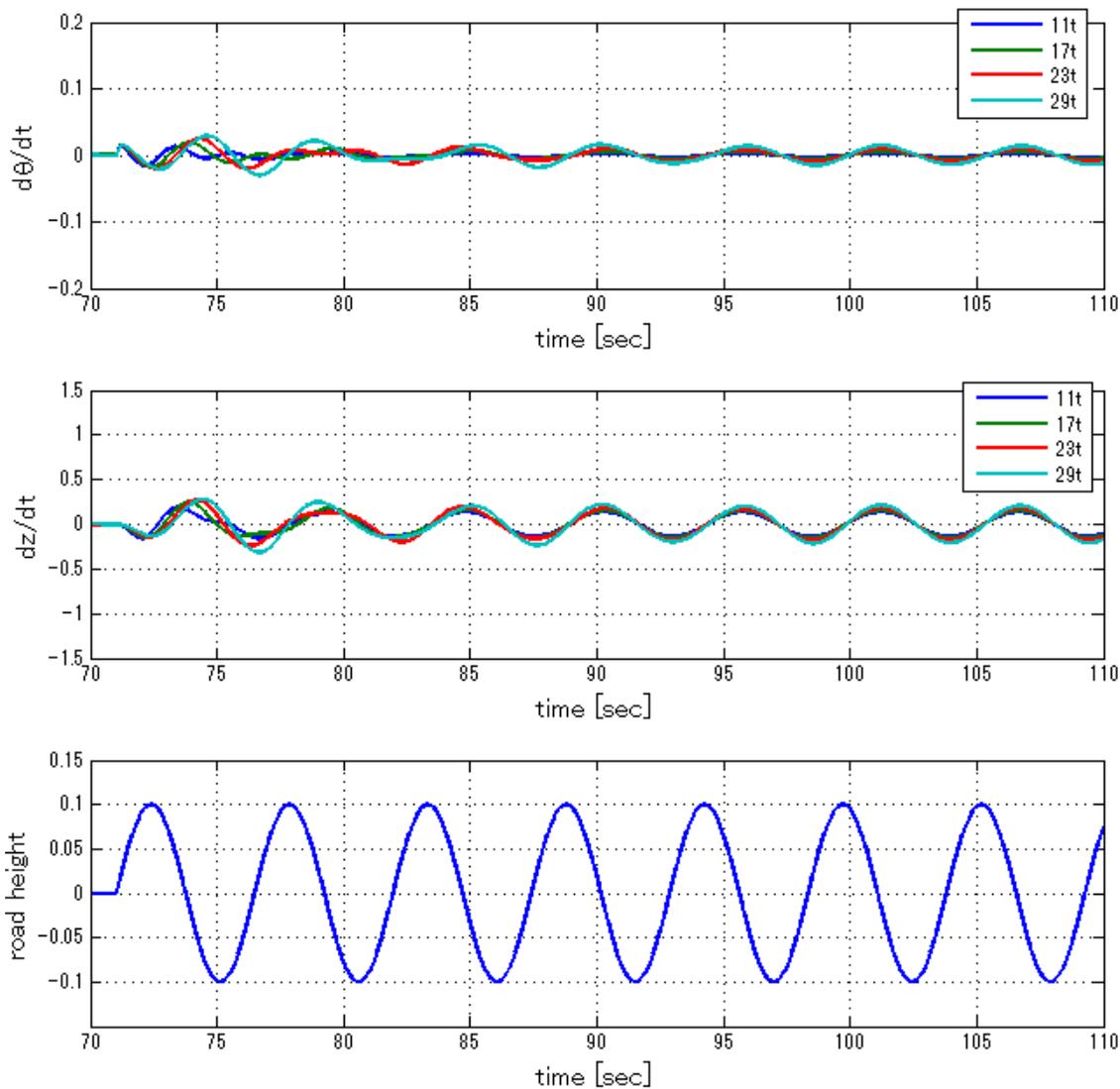


図 3-5 シミュレーション結果（正弦波・車速 20km/h）

② 車速 40km/h

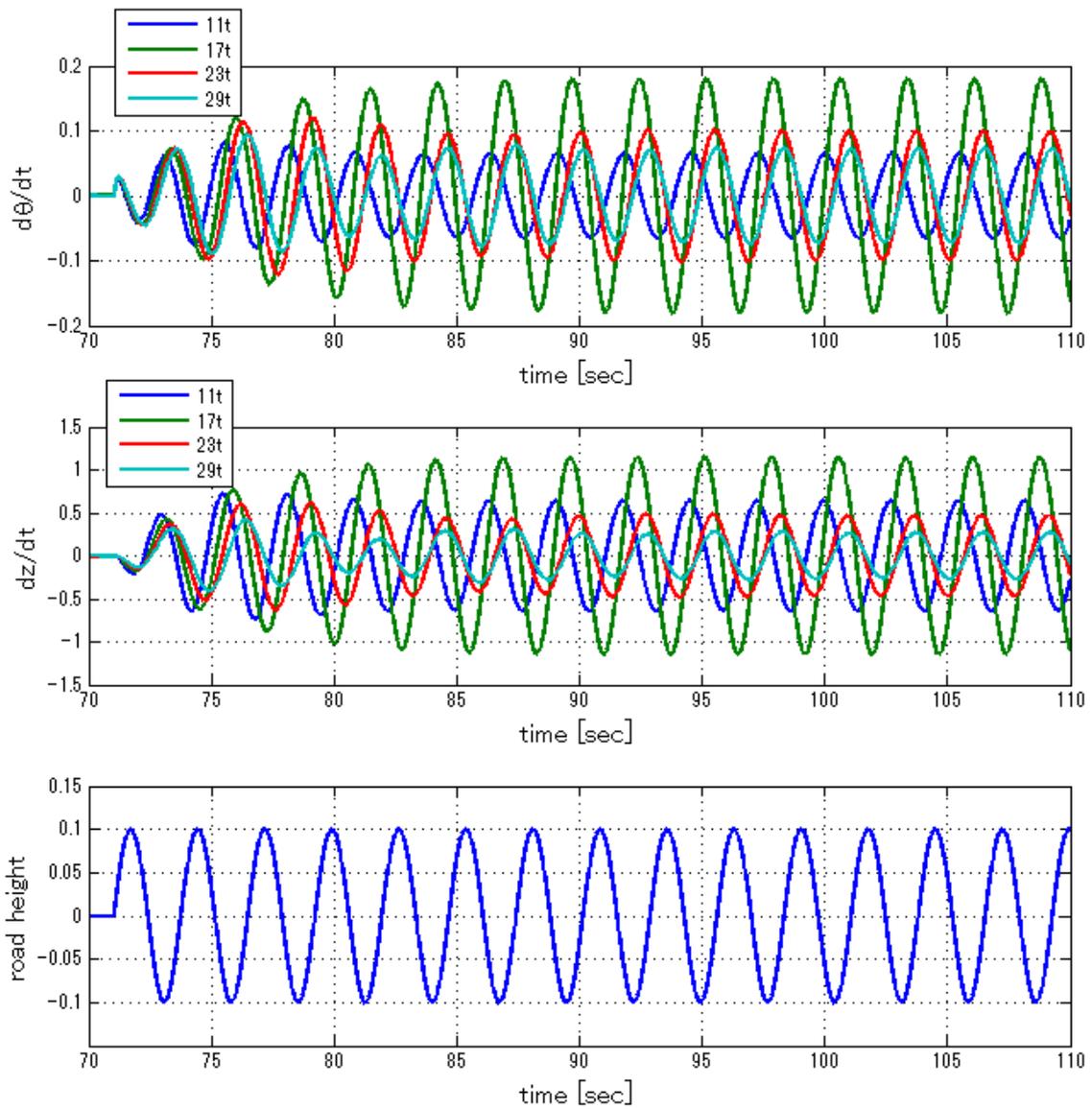


図 3-6 シミュレーション結果 (正弦波・車速 40km/h)

③ 車速 60km/h

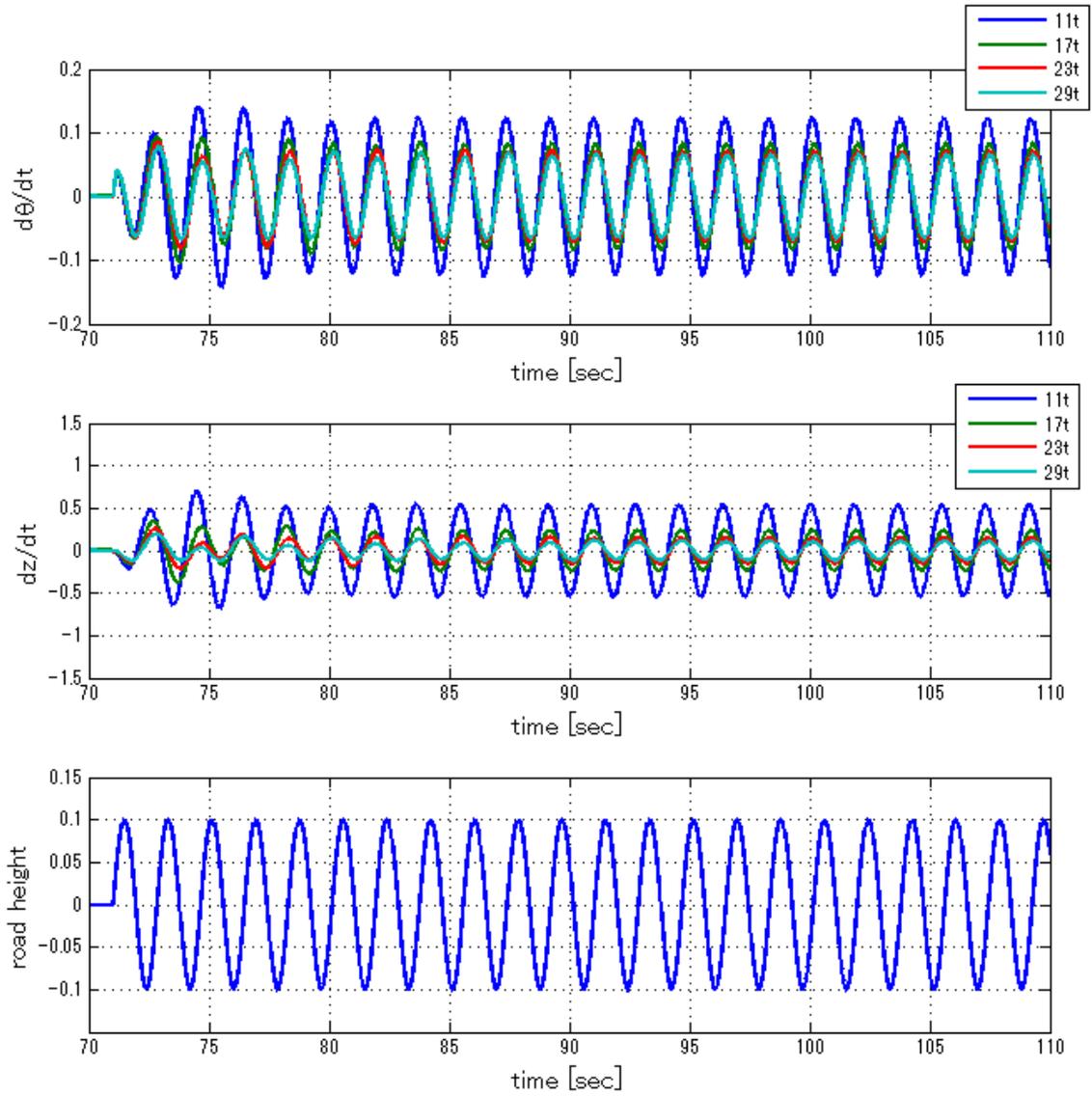


図 3-7 シミュレーション結果 (正弦波・車速 60km/h)

2) ステップダウン

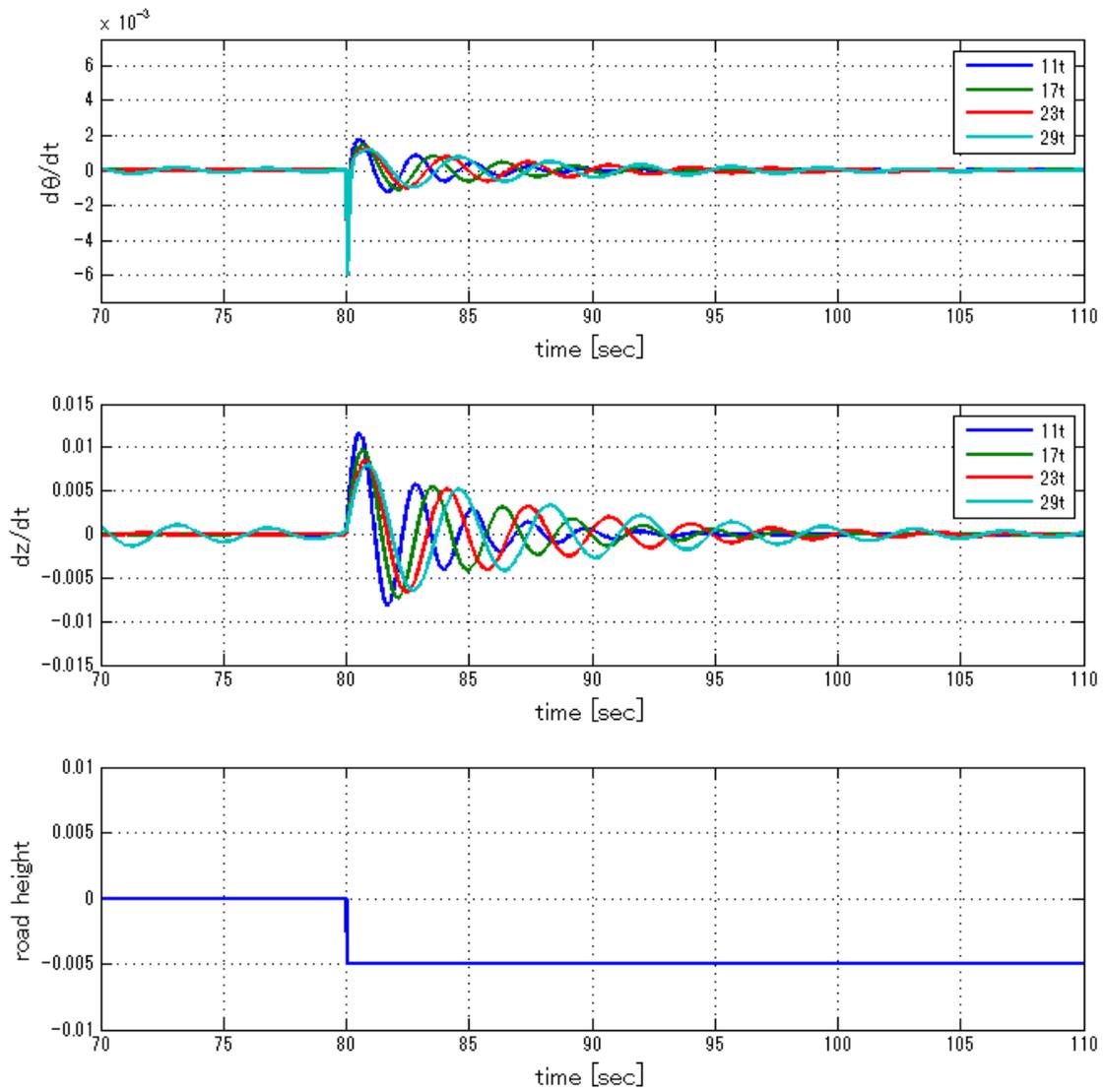


図 3-8 シミュレーション結果 (ステップダウン)

3.2 詳細シミュレーション

簡易モデルによるシミュレーション結果を踏まえ、詳細シミュレーションを実施し、より多くの変数設定等を行い、変数として設定した各データの関係性の確認を行った。

3.2.1 シミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルの概要を図 3-9～図 3-12 に示す。

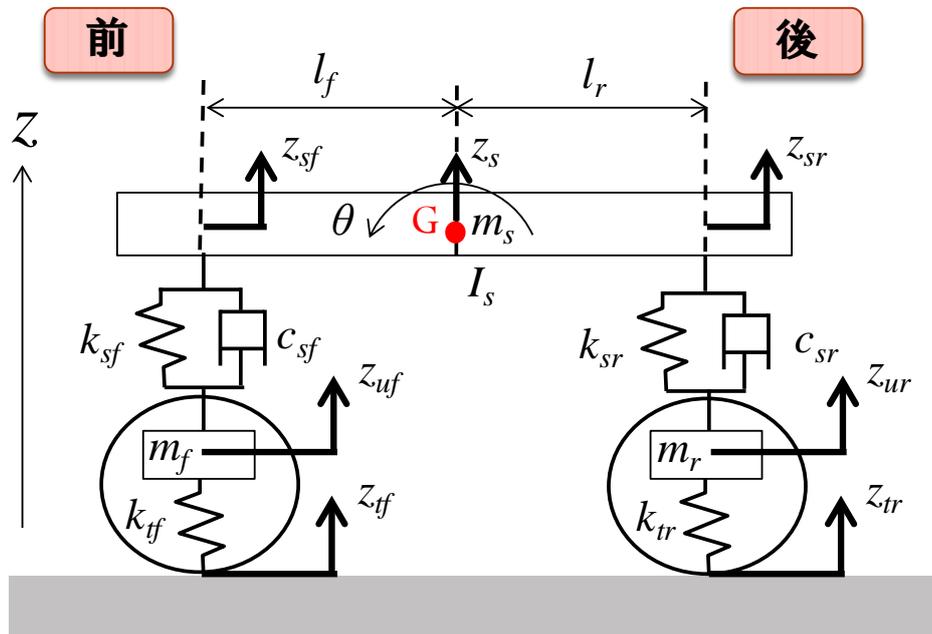


図 3-9 シミュレーションのモデル構造

変数	内容
m_s	ばね上質量
$m_f \cdot m_r$	前後軸のばね下質量
$k_{sf} \cdot k_{sr}$	前後軸の懸架ばね定数
$c_{sf} \cdot c_{sr}$	前後軸の懸架減衰係数
$k_{yf} \cdot k_{yr}$	前後軸のタイヤばね定数
$z_{yf} \cdot z_{yr}$	前後軸のタイヤ接地面変位
$z_{uf} \cdot z_{ur}$	前後軸のばね下質量変位
z_s	ばね上質量の重心位置変位
$z_{sf} \cdot z_{sr}$	前後軸の変位
I_s	ばね上慣性モーメント
θ	ばね上ピッチング角

図 3-10 シミュレーションのモデル構造

ばね上の垂直運動のつりあい式

$$m_s \ddot{z}_s = -C_{sf}(\dot{z}_{sf} - \dot{z}_{uf}) - C_{sr}(\dot{z}_{sr} - \dot{z}_{ur}) - k_{sf}(z_{sf} - z_{ur}) - k_{sr}(z_{sf} - z_{ur})$$

ばね上のピッチング運動のつりあい式

$$I_s \ddot{\theta} = l_f \{c_{sf}(\dot{z}_{sf} - \dot{z}_{uf}) + k_{sf}(z_{sf} - z_{uf})\} - l_r \{c_{sr}(\dot{z}_{sr} - \dot{z}_{ur}) + k_{sr}(z_{sr} - z_{ur})\}$$

前後軸のばね下運動のつりあい式

(前軸)

$$m_{uf} \ddot{z}_{uf} = c_{sf}(\dot{z}_{sf} - \dot{z}_{uf}) + k_{sf}(z_{sf} - z_{uf}) - k_{tf}(z_{uf} - z_{tf})$$

(後軸)

$$m_{ur} \ddot{z}_{ur} = c_{sr}(\dot{z}_{sr} - \dot{z}_{ur}) + k_{sr}(z_{sr} - z_{ur}) - k_{tr}(z_{ur} - z_{tr})$$

その他

$$z_{sf} = z_s - l_{sf} \theta$$

$$z_{sr} = z_s + l_{sr} \theta$$

< 状態方程式 >

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \ddot{z}_s \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{z}_{uf} \\ \ddot{z}_{uf} \\ \dot{z}_{ur} \\ \ddot{z}_{ur} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{10} & A_{11} & A_{20} & A_{21} & A_{30} & A_{31} & A_{40} & A_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{10} & B_{11} & B_{20} & B_{21} & B_{30} & B_{31} & B_{40} & B_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ C_{10} & C_{11} & C_{20} & C_{21} & C_{30} & C_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ D_{10} & D_{11} & D_{20} & D_{21} & 0 & 0 & D_{40} & D_{41} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ z_{uf} \\ \dot{z}_{uf} \\ z_{ur} \\ \dot{z}_{ur} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ C_{60} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & C_{60} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{tf} \\ z_{tr} \end{bmatrix}$$

$$A_{10} = -\frac{k_{sf} + k_{sr}}{m_s}$$

$$B_{10} = \frac{l_f k_{sf} - l_r k_{sr}}{I_s}$$

$$C_{10} = \frac{k_{sf}}{m_{uf}}$$

$$D_{10} = \frac{k_{sr}}{m_{ur}}$$

$$A_{11} = -\frac{C_{sf} + C_{sr}}{m_s}$$

$$B_{11} = \frac{l_f C_{sf} - l_r C_{sr}}{I_s}$$

$$C_{11} = \frac{C_{sf}}{m_{uf}}$$

$$D_{11} = \frac{C_{sr}}{m_{ur}}$$

$$A_{20} = \frac{k_{sf} l_f - k_{sr} l_r}{m_s}$$

$$B_{20} = -\frac{l_f^2 k_{sf} + l_r^2 k_{sr}}{I_s}$$

$$C_{20} = -\frac{l_f k_{sf}}{m_{uf}}$$

$$D_{20} = \frac{l_r k_{sr}}{m_{ur}}$$

$$A_{21} = \frac{C_{sf} l_f - C_{sr} l_r}{m_s}$$

$$B_{21} = -\frac{l_f^2 C_{sf} + l_r^2 C_{sr}}{I_s}$$

$$C_{21} = -\frac{l_f C_{sf}}{m_{uf}}$$

$$D_{21} = \frac{l_r C_{sr}}{m_{ur}}$$

$$A_{30} = \frac{k_{sf}}{m_s}$$

$$B_{30} = -\frac{l_{sf} k_{sf}}{I_s}$$

$$C_{30} = -\frac{k_{sf} + k_{tf}}{m_{uf}}$$

$$C_{40} = -\frac{k_{sr} + k_{tr}}{m_{ur}}$$

$$A_{31} = \frac{C_{sf}}{m_s}$$

$$B_{31} = -\frac{l_{sf} C_{sf}}{I_s}$$

$$C_{31} = -\frac{C_{sf}}{m_{uf}}$$

$$C_{41} = -\frac{C_{sr}}{m_{ur}}$$

$$A_{40} = \frac{k_{sr}}{m_s}$$

$$B_{40} = \frac{l_{sr} k_{sr}}{I_s}$$

$$C_{60} = \frac{k_{tf}}{m_{uf}}$$

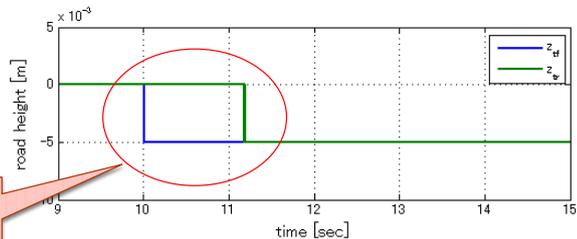
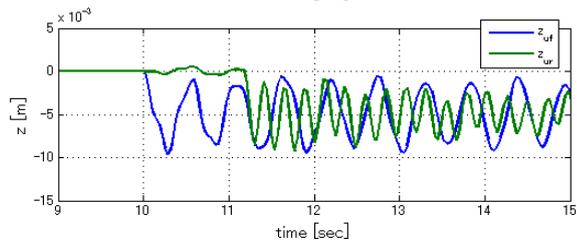
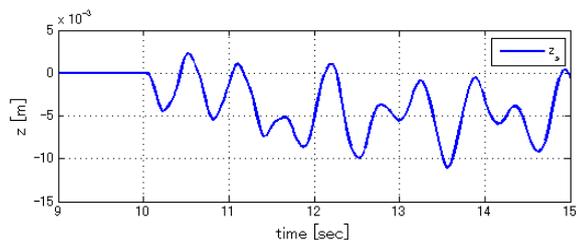
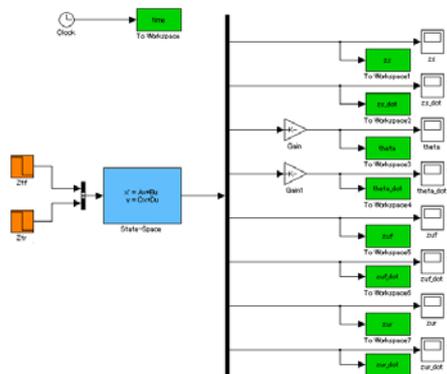
$$D_{60} = \frac{k_{tr}}{m_{ur}}$$

$$A_{41} = \frac{C_{sr}}{m_s}$$

$$B_{41} = \frac{l_{sr} C_{sr}}{I_s}$$

図 3-11 シミュレーションのモデル構造

Simulink



前輪と後輪に対して
独立にSTEP入力

図 3-12 簡易シミュレーションモデル

固有振動数を算出し、車両重量を推定する算出式を図 3-13 に示す。各固有振動数とばね上質量との相関表を作成し、実車に生じる上下加速度とピッチのピーク周波数より車両重量を推定する。

振動モードの固有振動数算出 (ばね上の車両モデル)

ばね上の垂直運動のつりあい式

$$m_s \ddot{z}_s + k_{sf} z_{sf} + k_{sr} z_{sr} = 0$$

ばね上のピッチング運動のつりあい式

$$I_s \ddot{\theta} - l_f k_{sf} z_{sf} + k_{sr} z_{sr} = 0$$

補助方程式

$$z_{sf} = z_s - l_{sf} \theta$$

$$z_{sr} = z_s + l_{sr} \theta$$

$$I_s = m_s r^2 \quad r \text{は回転半径}$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_s + A z_s + B \theta = 0 \\ \ddot{\theta} + \frac{B}{r^2} z_s + C \theta = 0 \end{cases} \quad A = \frac{k_{sf} + k_{sr}}{m_s} \quad B = \frac{l_{sr} k_{sr} - l_f k_{sf}}{m_s} \quad C = \frac{l_f^2 k_{sf} + l_{sr}^2 k_{sr}}{m_s r^2}$$

$$\begin{cases} z_s = z_s \sin \omega t \\ \theta = \theta \sin \omega t \end{cases} \quad \text{とおくと} \quad -z_s \omega^2 \sin \omega t + A z_s \sin \omega t + B \theta \sin \omega t = 0$$

$$\Rightarrow (A - \omega^2) z_s + B \theta = 0$$

$$\Rightarrow \frac{z_s}{\theta} = -\frac{B}{(A - \omega^2)}$$

$$\text{同様に} \quad \frac{z_s}{\theta} = -\frac{r^2 (C - \omega^2)}{B}$$

振動モードの固有振動数

$$B_{20} = -\frac{l_f^2 k_{sf} + l_{sr}^2 k_{sr}}{I_s}$$

$$B_{21} = -\frac{l_f^2 c_{sf} + l_{sr}^2 c_{sr}}{I_s}$$

$$B_{30} = -\frac{l_{sf} k_{sf}}{I_s}$$

$$B_{31} = -\frac{l_{sf} c_{sf}}{I_s}$$

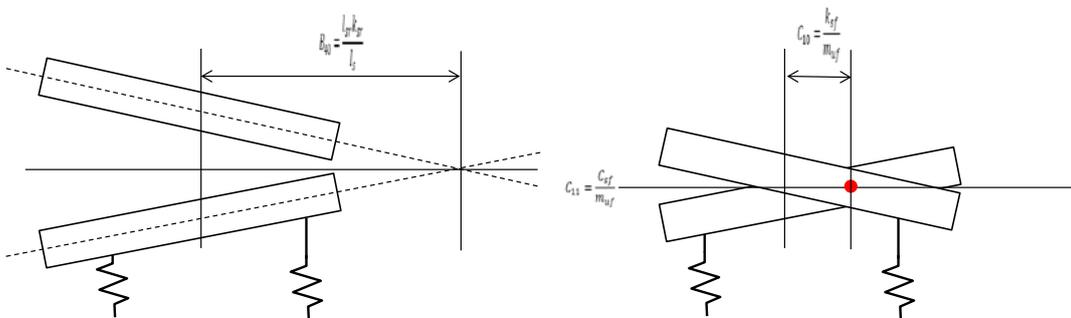


図 3-13 固有振動数の算出

車両に係る各種パラメータは実存する車両（日野：プロフィア）のデータを基に以下のとおり設定した。

- $m_s = 11t$ (0t); %重量 [kg]
- $m_f = m_s/2$; % 前軸のばね下質量 [kg]
- $m_r = m_s/2$; % 後軸のばね下質量 [kg]
- $k_{sf} = 28,000$; % 前軸の懸架ばね定数 [N/m]
- $k_{sr} = 25,000$; % 後軸の懸架ばね定数 [N/m]
- $c_{sf} = 2,500$; % 前軸の懸架減衰係数 [N/m/s]
- $c_{sr} = 2,000$; % 後軸の懸架減衰係数 [N/m/s]
- $k_{tf} = 16,000$; % 前軸のタイヤばね定数 [N/m]
- $k_{tr} = 25,000$; % 後軸のタイヤばね定数 [N/m]
- $I_s = m_s \times r \times r$; % ばね上慣性モーメント [N/m] $r=4.15$
- $l_f = 4.393 \pm 1$; % 重心から前軸までの距離 [m]
- $l_r = 2.162; \pm 1$ % 重心から後軸までの距離 [m]

3.2.2 分析条件

車両に振動を発生させるための外部入力として、-0.005m のステップダウンを設定した。その上で、車両重量を 4 パターン、車速を 3 パターン設定し、各パターンの組合せによる分析を実施した。また、ほかの条件としてばね係数を±2%及び±4%変化させた場合、重心位置を±1m 変化させた場合の分析も実施した。分析条件を表 3-2 に示す。

表 3-2 分析条件

条件	パターン
外部入力	ステップダウン：-0.005m（幅 0）
車両重量※	11t(0t)・17t(6t)・23t(12t)・29t(18t)
車速	20km/h、40km/h、60km/h
ばね係数	96%・98%・100%・102%・104%
重心位置	基準値-1m・基準値・基準値+1m

※カッコ内は積載物の重量。18t は重量超過の状態。

また、外乱（ノイズ）が含まれる状態で外部入力を行わないよう安定状態になった段階（10 秒後）で外部入力を発生させるようにした。

3.2.3 シミュレーション結果

シミュレーションの実施結果について、設定条件別の結果を図 3-14～図 3-19 に示す。

1) 積載重量を変数としたケース

① 車速 20km/h

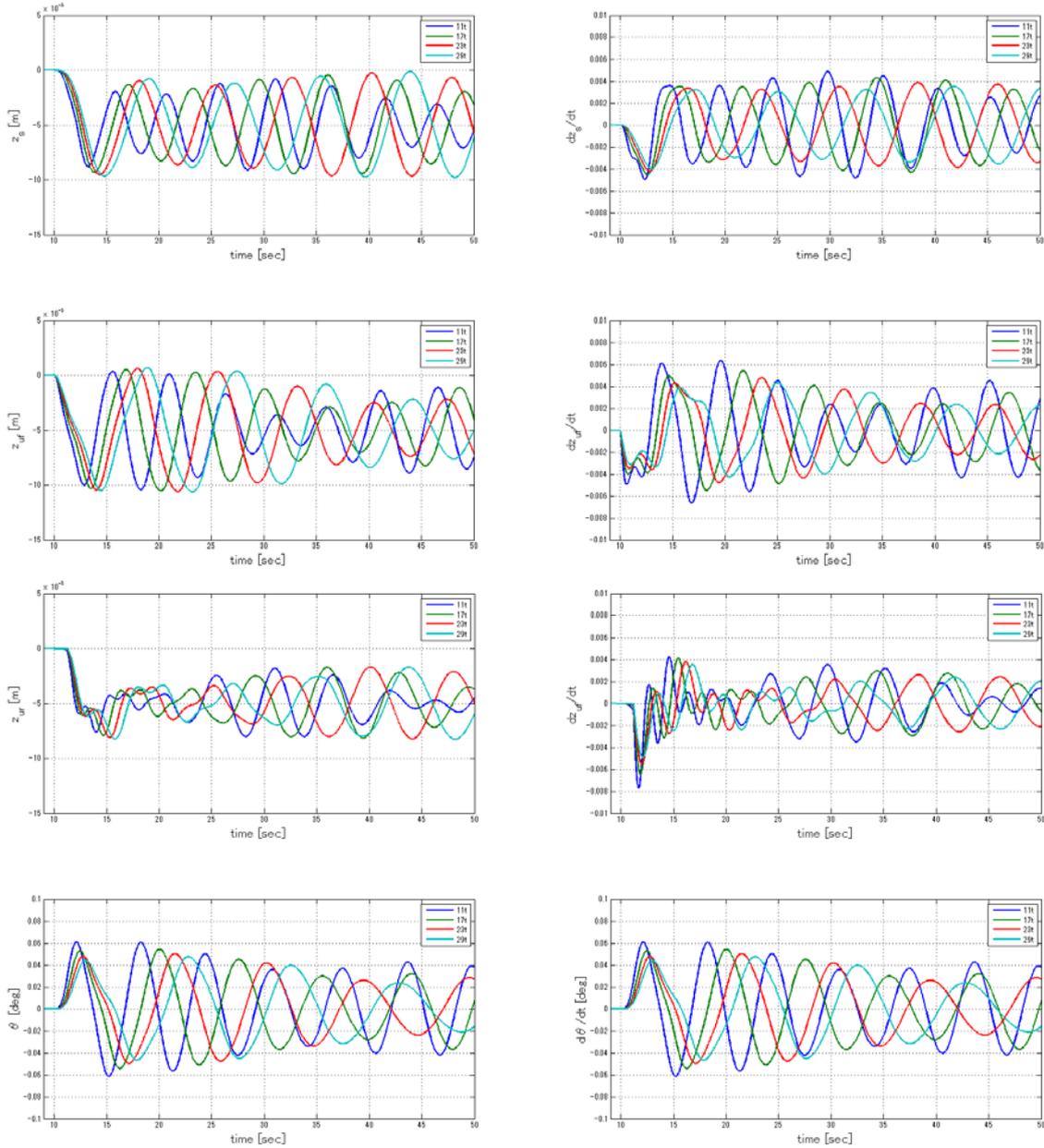


図 3-14 シミュレーション結果 (変数：重量、車速 20km/h)

② 車速 40km/h

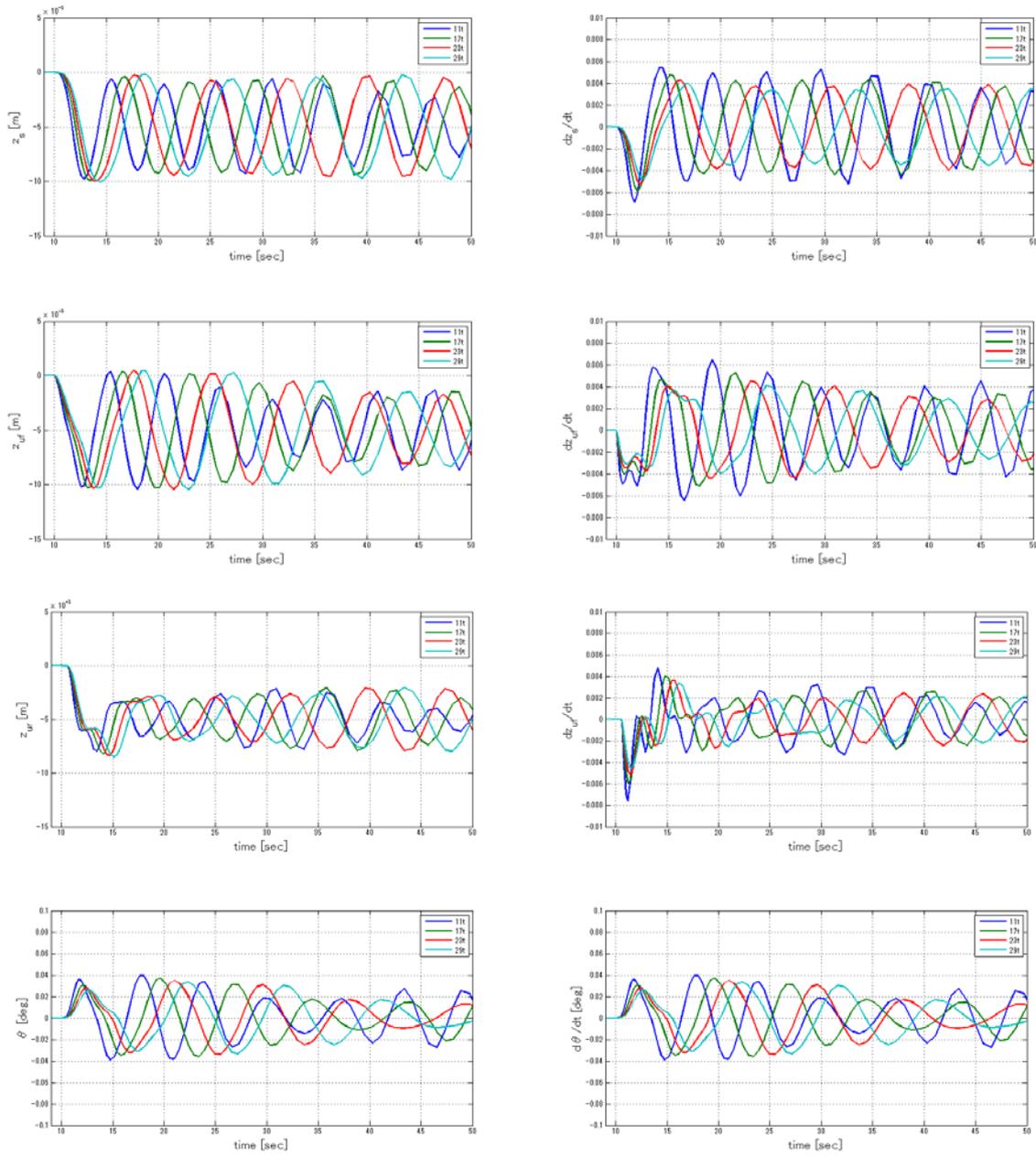


図 3-15 シミュレーション結果 (変数: 重量、車速 40km/h)

③ 車速 60km/h

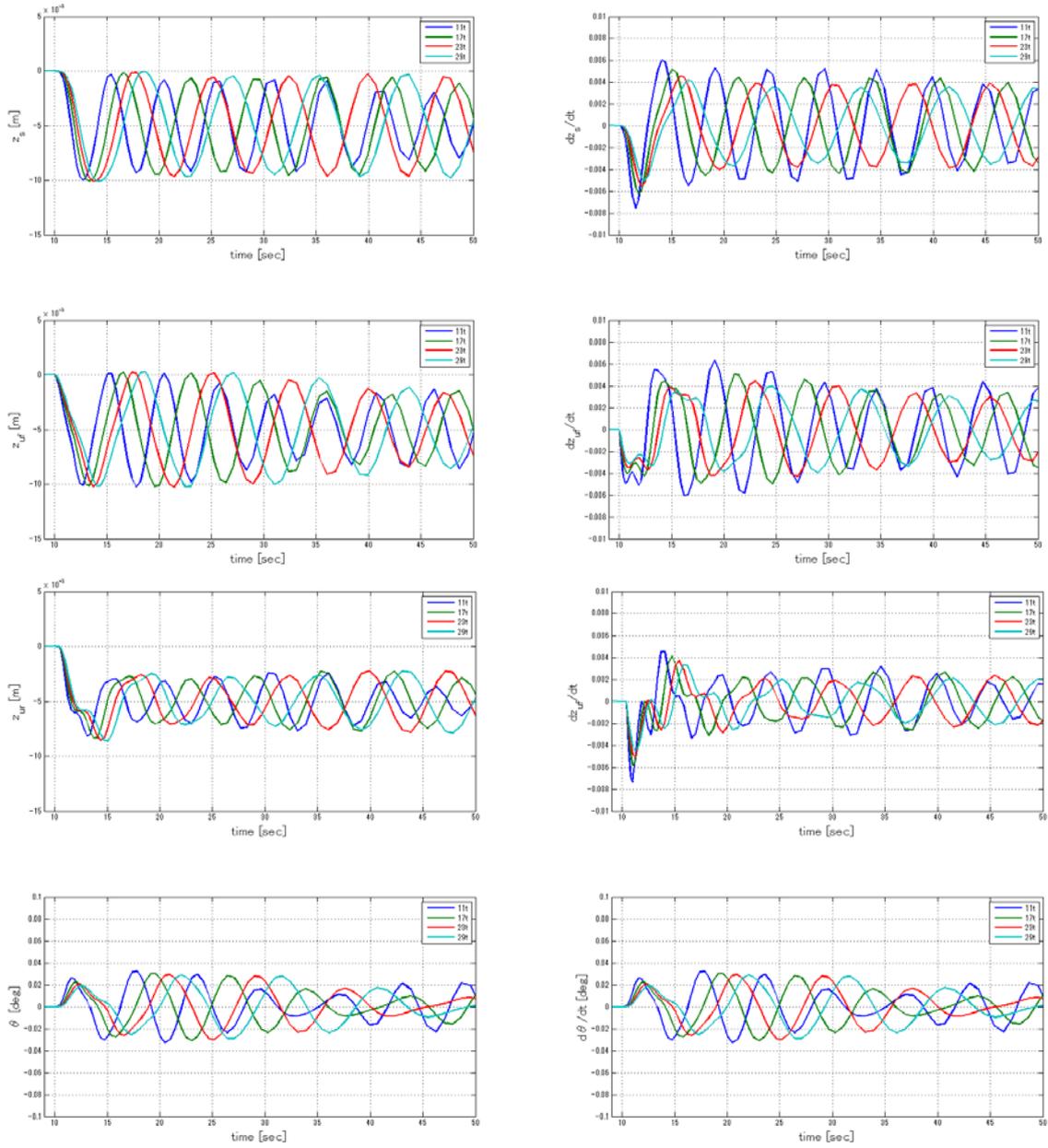


図 3-16 シミュレーション結果 (変数：重量、車速 60km/h)

シミュレーションの結果、積載重量と固有振動数の関係は表 3-3 に示すとおり、積載重量が重くなるほど固有振動数が小さくなる傾向が確認された。

表 3-3 積載重量と固有振動数の関係

積載重量	固有振動数 (Hz)
11t	0.5038
17t	0.4053
23t	0.3484
29t	0.3103

2) ばね定数を変数としたケース

① 車速 20km/h

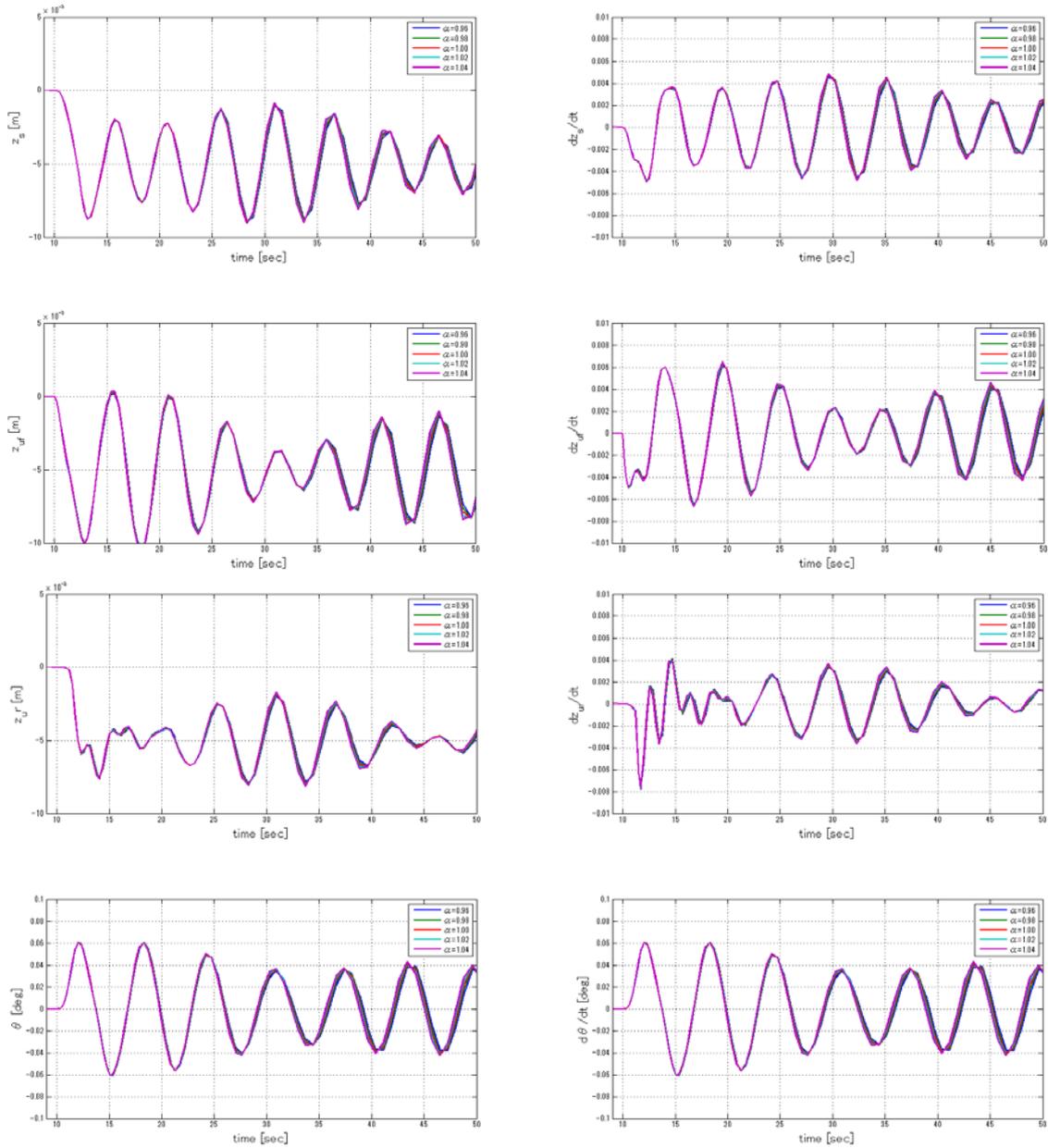


図 3-17 シミュレーション結果 (変数：ばね定数、車速 20km/h)

② 車速 40km/h

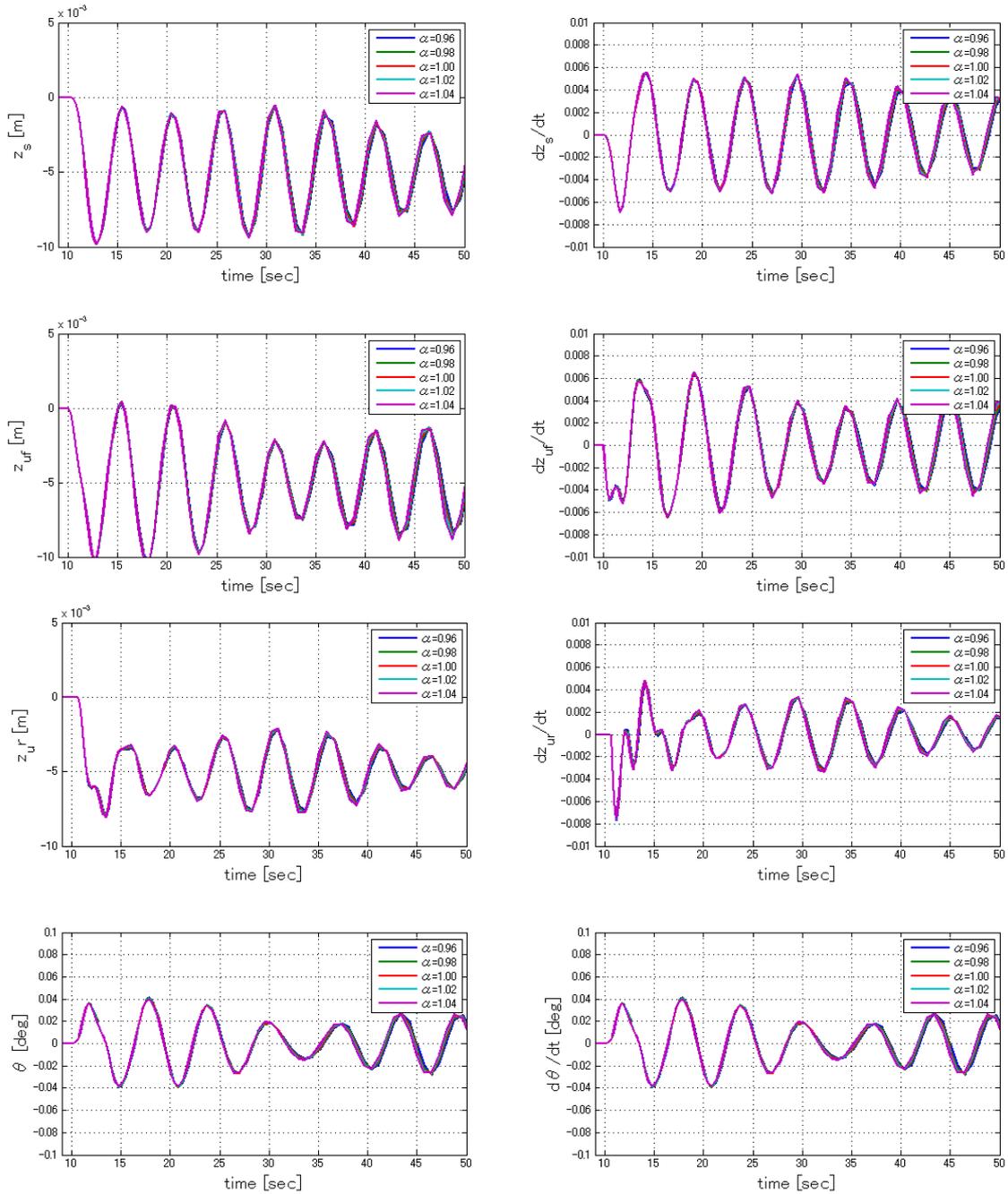


図 3-18 シミュレーション結果 (変数：ばね定数、車速 40km/h)

③ 車速 60km/h

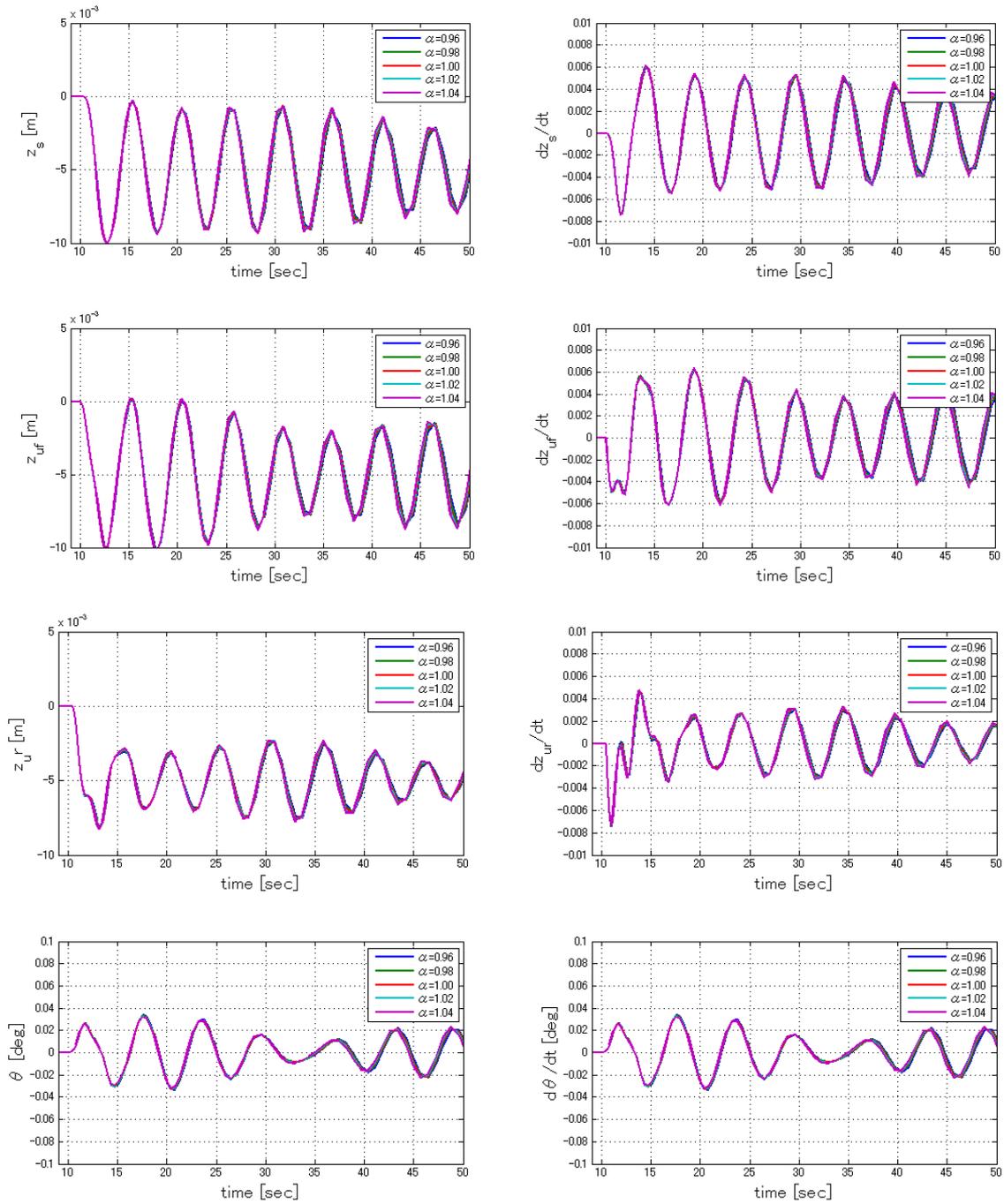


図 3-19 シミュレーション結果 (変数:ばね定数、車速 60km/h)

シミュレーションの結果、表 3-4 に示すとおり、ばね定数の値の大きさと固有振動数には正の相関関係が確認された。しかし、積載重量と固有振動数の関係と比較し、固有振動数の変化の幅は小さいことが確認された。

表 3-4 積載重量・ばね定数と固有振動数の関係

積載重量	固有振動数 (Hz)				
	96%	98%	100%	102%	104%
11t	0.4937	0.4988	0.5038	0.5089	0.5138
17t	0.3971	0.4012	0.4053	0.4093	0.4133
23t	0.3414	0.3449	0.3484	0.3519	0.3553
29t	0.3040	0.3072	0.3103	0.3134	0.3165

3) バウンシングとピッチングの固有振動数の算出

① ばね定数を変数としたケース

シミュレーションの結果、表 3-5 と表 3-6 に示すとおり、ばね定数の値の大きさとバウンシングとピッチングの固有振動数には正の相関関係が確認された。しかし、積載重量と固有振動数の関係と比較し、±4%のばね定数の変化の影響による固有振動数の変化の幅は小さいことが確認された。

表 3-5 積載重量・ばね定数とバウンシング固有振動数の関係

積載重量	ω 1 固有振動数 (Hz)				
	96%	98%	100%	102%	104%
11t	0.3755	0.3794	0.3832	0.3870	0.3908
17t	0.3020	0.3052	0.3083	0.3113	0.3144
23t	0.2597	0.2624	0.2650	0.2677	0.2703
29t	0.2313	0.2337	0.2360	0.2384	0.2407

表 3-6 積載重量・ばね定数とピッチング固有振動数の関係

積載重量	ω 2 固有振動数 (Hz)				
	96%	98%	100%	102%	104%
11t	0.2460	0.2486	0.2511	0.2536	0.2561
17t	0.1979	0.2000	0.2020	0.2040	0.2060
23t	0.1702	0.1719	0.1737	0.1754	0.1771
29t	0.1515	0.1531	0.1547	0.1562	0.1577

② 重心位置を変数としたケース

シミュレーションの結果、表 3-7 と表 3-8 に示すとおり、重心位置を基準値に対して±1m で変化させた場合、積載重量とバウンシングとピッチングの固有振動数には正の相関関係が確認された。重心位置を基準値に対して+1m とした場合は、基準値と比較してバウンシングの固有振動数が大きく、ピッチングの固有振動数が小さくなることが確認された。また、重心位置を基準値に対して-1m とした場合は、基準値と比較してバウンシングの固有振動数が小さく、ピッチングの固有振動数が大きくなることが確認された。

表 3-7 重心位置・ばね定数とバウンシング固有振動数の関係

積載重量	ω 1 固有振動数 (Hz)		
	基準値+1m	基準値	基準値-1m
11t	0.4307	0.3832	0.3517
17t	0.3465	0.3083	0.2829
23t	0.2979	0.2650	0.2432
29t	0.2653	0.2360	0.2166

表 3-8 重心位置・ばね定数とピッチング固有振動数の関係

積載重量	ω 2 固有振動数 (Hz)		
	基準値+1m	基準値	基準値-1m
11t	0.2234	0.2511	0.2736
17t	0.1797	0.2020	0.2201
23t	0.1545	0.1737	0.1892
29t	0.1376	0.1547	0.1685

3.3 シミュレーション結果のまとめ

シミュレーションモデルを用いて、車両重量と固有振動数の関係进行分析した。その結果、数%程度のばね定数の変化が推定精度に大きな影響を与える可能性は低いことが確認されるとともに、重心位置が前後どちらの位置にあっても重量が大きくなるほど固有振動数は低くなる傾向が確認された。ただし、重心位置が変化する方向によって、基準値の重心位置の固有振動数と比較してバウンシングとピッチングの固有振動数の変化の傾向が異なることが確認された。

4. 実走行実験による車両重量推定の理論検証

シミュレーション分析を通して車両重量推定の可能性を確認した結果を受け、実走行実験を行い、実際の車両振動データの取得を通し、計測データの精度を検証するとともに、車両重量の推定可能性を検証した。

4.1 実施概要

実走行実験の実施概要を以下に示す。

4.1.1 実施場所

国土交通省国土技術政策総合研究所の試験走路（図 4-1）にて実走行によるデータ計測を行い、その結果を用いて車両重量推定の理論検証を実施した。

試験走路の概要

- 総延長：約 6.2km
- 車線数：3 車線（1 車線当りの幅員 3.75m）
- 直線部：往路（コンクリート舗装） 延長約 2.2km
復路（アスファルト舗装） 延長約 0.7km
- 曲線部：北ループ（半径 147.5m・最大傾斜角 28 度・設計速度 100km/h）
南ループ（半径 222.5m・最大傾斜角 27 度・設計速度 120km/h）



図 4-1 試験走路の概要

4.1.2 使用機材

実走行実験に用いた車両及び積載物、データ計測装置は、以下に示すとおりである。

1) 使用車両

使用車両は、東京大学生産技術研究所須田研究室が保有するいすゞ・エルフ（3t 車）を使用した（図 4-2）。



図 4-2 使用車両

2) 積載物

車両重量を増加させる際に使用する積載物は、1t 及び 2t の載荷板を使用した（図 4-3）。



図 4-3 載荷板

3) 計測装置

上下加速度の計測にあたっては、東京大学生産技術研究所須田研究室保有の 3 軸加速度センサ及びパナソニックオートモーティブ&インダストリアルシステムズ社が開発した試作機を搭載した（図 4-4）。



図 4-4 計測装置

4.1.3 実験条件

実走行実験の条件として以下に示す条件を設定した。

1) 車両重量及び走行速度

車両重量及び積載重量は、約 2.7t (0t)、約 4.7t (2t)、約 5.7t (3t)、約 6.7t (4t) の 4 パターンを設定した。なお、約 6.7t (4t) は重量超過のケースとして設定した。また、走行速度は、40km/h と 60km/h の 2 パターンを設定した。実験条件パターンを表 4-1 に示す。

表 4-1 実験条件パターン

		走行速度	
		40km/h	60km/h
車両重量 (カッコ内は積載重量)	約 2.7t(0t)	パターン 1	パターン 2
	約 4.7t (2t)	パターン 3	パターン 4
	約 5.7t (3t)	パターン 5	パターン 6
	約 6.7t (4t)	パターン 7	パターン 8

※当初は、過積載かつ走行速度の高いパターン 8 の実験は想定していなかったが、パターン 7 の実験状況及び試験当日の実験実施状況より、実施することとした。

2) 走行回数

走行回数（データ計測回数）は、各パターン 3 回ずつとした。

3) 外部入力

外部入力は、既存の試験走路上に生じている段差を活用した（図 4-5、図 4-6）。

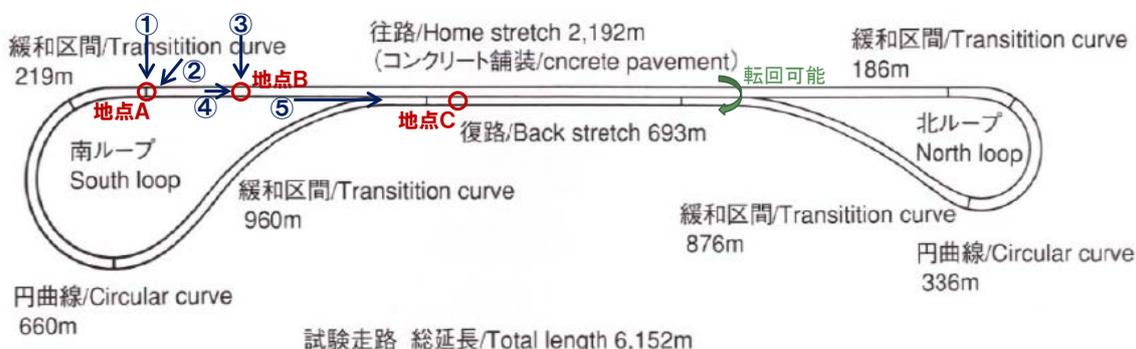


図 4-5 外部入力箇所

[地点A]
アスファルト舗装
-コンクリート舗装
の継ぎ目



写真①



写真②

[地点B]
コンクリート舗装同士
の継ぎ目



写真③



写真④

[地点C]
既存の路面凹凸



写真⑤

図 4-6 外部入力箇所 (写真)

4.1.4 実験実施計画の作成

実走行実験の実施にあたっては、以下に示す実験計画を事前に作成した。

車両重量推定 データ計測実験実施計画

1. 実験実施概要

(1) 実験実施目的

- 走行中の車両に外部入力を与えた際に生じるバウンス及びピッチングの2つの固有振動を用いて、車両重量の推定可能性を検証するために必要なデータ計測を目的とする。

(2) 実施期間

- 事前準備：2014年9月18日（木）
- 実験実施：2014年9月19日（金）

※雨天決行。荒天時は日程を再調整し、後日実施。

(3) 実施場所

- 国土交通省 国土技術政策総合研究所 試験走路



図1 実施場所

(4) 使用機材等

1) 使用車両

- いすゞ・エルフ (3t 車)：東京大学 生産技術研究所 須田研究室保有

2) 計測装置

- 3軸加速度センサ：東京大学 生産技術研究所 須田研究室保有
- 3軸加速度センサ：パナソニックオートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 開発試作品

3) 載荷板

- 1t 及び 2t の載荷板

(5) 実験条件

1) データ計測条件パターン

- 車速及び車両重量について、下記に示す計 7 パターンの条件を設定し、データ計測実験（走行実験）を実施。
- 各パターンでのデータ計測回数は、3 回ずつとする。

表 1 データ計測条件パターン

		走行速度	
		40km/h	60km/h
総重量 (カッコ内は 追加積載重 量)	約 2.7t (0t)	○	○
	約 4.7t (2t)	○	○
	約 5.7t (3t)	○	○
	約 6.7t (4t)	○	—

※総重量約 6.7t のケースは、1t 重量超過であり制動が効き難い状況が想定されるため、安全性を考慮し走行速度は 40km/h のケースのみ実施。

2) 外部入力

- 外部入力は既存の路面段差（下図 3 地点）を活用。



3) 走行方向・経路

- 試験走路を右回り（時計回り）で走行。距離は約 4,000m。

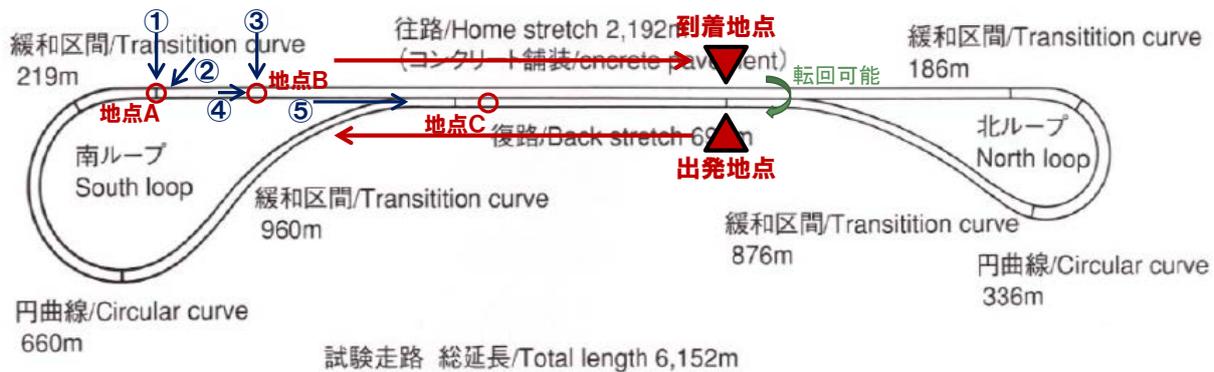


図 3 走行方向・経路

(6) データ取得方法

- 試験データの収集は、各実験機器におけるデータ記録方法に準じる。なお、データファイルの命名規則は、以下の通り。

日付 (8桁) _積載重量 (1桁) _走行速度 (2桁) _実験回数 (1桁)

例：追加積載重量 3t、走行速度 40km/h にて、2 回目の走行の場合、

「20140919_3_40_2」

とする。

2. 実験実施スケジュール

(1) スケジュール検討にあたっての条件

- スケジュールを検討するにあたっての各作業に要する時間を以下の通り想定。
 - ◇ 試験前日に初期条件のセッティングを実施する。
 - ◇ 走行試験区間の一周の距離は、約 4,000m。
 - ◇ 到着地点から出発地点までの移動及び出発準備を 2 分に設定。
 - ◇ 載荷板の載せ替え作業を 30 分に設定。
 - ◇ 2 時間おきに 30 分の休憩を設定。

(2) タイムスケジュール

- 実験前日及び当日のタイムスケジュールは、以下の通りとする。

表 2 データ計測条件パターン名称

		走行速度	
		40km/h	60km/h
総重量 (カッコ内は 追加積載重 量)	約 2.7t (0t)	0-40	0-60
	約 4.7t (2t)	2-40	2-60
	約 5.7t (3t)	3-40	3-60
	約 6.7t (4t)	4-40	—

表3 タイムスケジュール

日	時間帯	実施内容
18日(木) [前日]	15	準備担当者現地到着・集合(16:00)
	16	車両搬入 機材設定
	17	
	18	事前準備終了・解散(18:00)
	19	
19日(金) [当日]	8	担当者現地到着・集合(8:30) 試験開始準備(~9:00)
	9	パターン0-40(24分)
		パターン0-60(18分)
	10	載荷板追加(30分+予備)
		パターン2-40(24分)
	11	パターン2-60(18分)
		載荷板追加(30分+予備)
	12	休憩・昼食(12:00~13:00)
	13	パターン3-40(24分)
		パターン3-60(18分)
	14	載荷板追加(30分+予備)
		パターン4-40(24分)
	15	載荷板返却(30分+予備) 実験終了・撤収作業(15:30~16:00)
16		
17		
18		

3. 実験実施時の安全対策及び緊急時連絡体制

(1) 安全対策

- 実験の実施は、実験実施主体者間（共同研究者間）で合意した実験計画に基づき、無理のない体制、スケジュールにて実施する。
- 万一事故が発生した場合は、緊急時連絡体制に基づき連絡報告を行う。また、状況に応じて速やかに消防・警察・救急病院に通報する。

(2) 緊急時連絡体制

- 緊急時の連絡体制は、下記の通りとする。

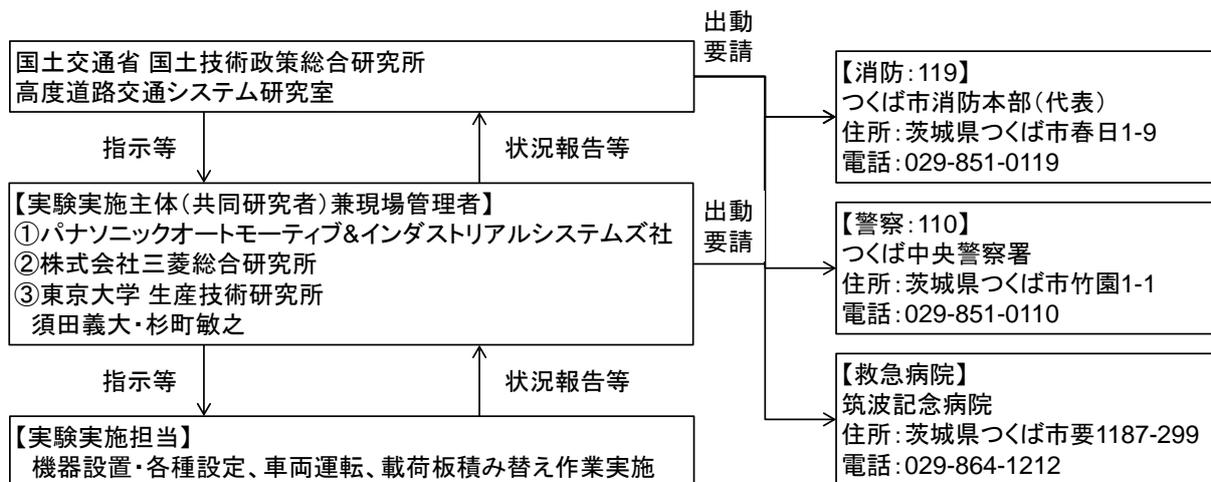


図 4 緊急時連絡体制

4.2 実験実施結果

実走行実験の実施結果を以下に示す。

4.2.1 実験実施日時

実走行実験は、当初の予定通り、2014年9月19日（金）に実施した。

4.2.2 実験実施状況

実験実施の様子を図4-7に示す。



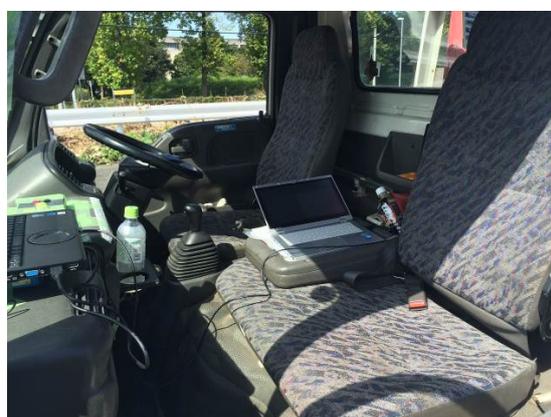
(載荷板積載時の実験)



(載荷板非積載時の実験)



(走行の様子)



(車内の各種計測機器)

図4-7 実験実施の様子

4.3 実走行データの解析

1) 実験パターン

車速及び車両重量について表 4-2 に示す計 8 パターンの条件を設定してデータ計測実験（走行実験）を実施し、各パターンでのデータ計測回数は 3 回ずつとした。

表 4-2 実験条件パターン

		走行速度	
		40km/h	60km/h
車両重量 (カッコ内は積載重量)	約 2.7t(0t)	パターン 1	パターン 2
	約 4.7t (2t)	パターン 3	パターン 4
	約 5.7t (3t)	パターン 5	パターン 5
	約 6.7t (4t)	パターン 7	パターン 8

外部入力については既存の路面段差（図 4-8 に示す A～C の 3 地点）を活用し、試験走行路を右回り（時計回り）で走行した。距離は約 4,000m である。

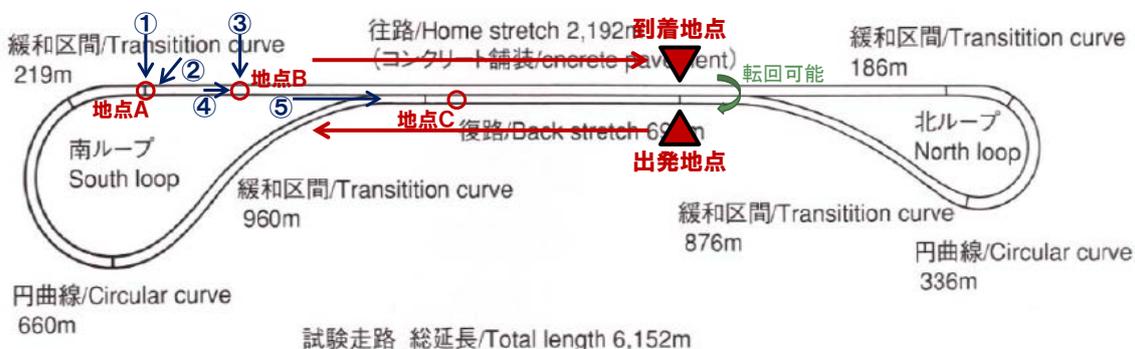


図 4-8 走行経路及び外部入力箇所

2) 計測データの加工

計測データについてはサンプリング時間の異なる GPS (20msec) と 3 軸加速度センサ (10msec) との計測データの同期をとる必要がある。そのため、以下の手順で両データの同期を行った。

- 【手順 1】 GPS 計測データの加速度データと 3 軸加速度センサの Y 軸のデータから走行開始のタイミングを合わせる。
- 【手順 2】 サンプリングタイムをもとに GPS と 3 軸加速度センサの同期を行う。
- 【手順 3】 実験時に計測した外部入力個所の GPS 座標データをもとに、評価地点を求める。実験時に 10 秒ほど外部入力個所で停車し、GPS 座標を計測した (平均値を外部入力個所の座標とした)。
- 【手順 4】 3 か所の外部入力箇所について周波数解析を実施した。

3) 実験結果

走行実験にて取得したデータの解析結果について、走行速度や外部入力
の地点別に以下に示す（図 4-9～図 4-20）。

① 計測結果・地点 A（40km/h）

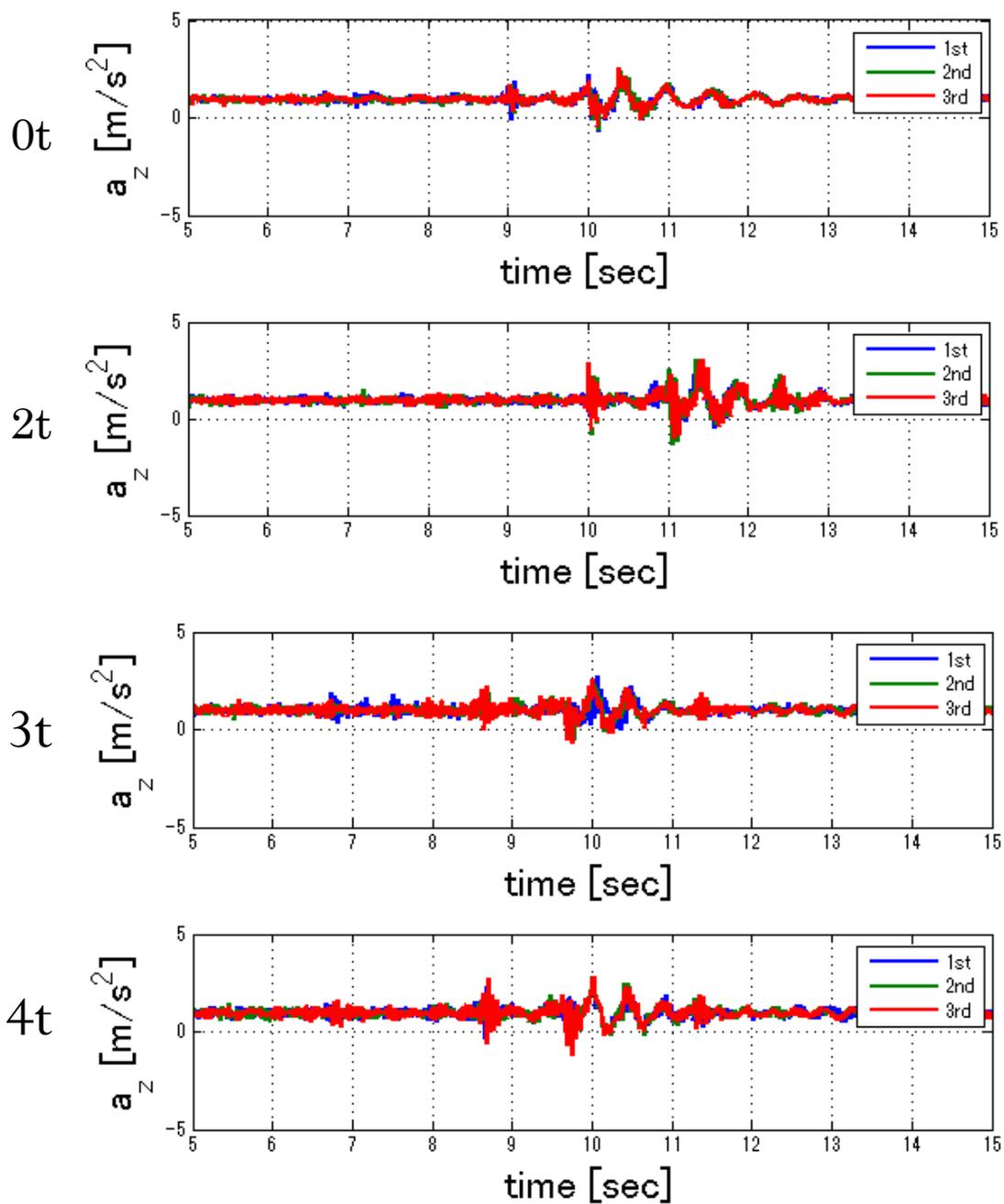


図 4-9 地点 A の上下加速度の結果（40km/h）

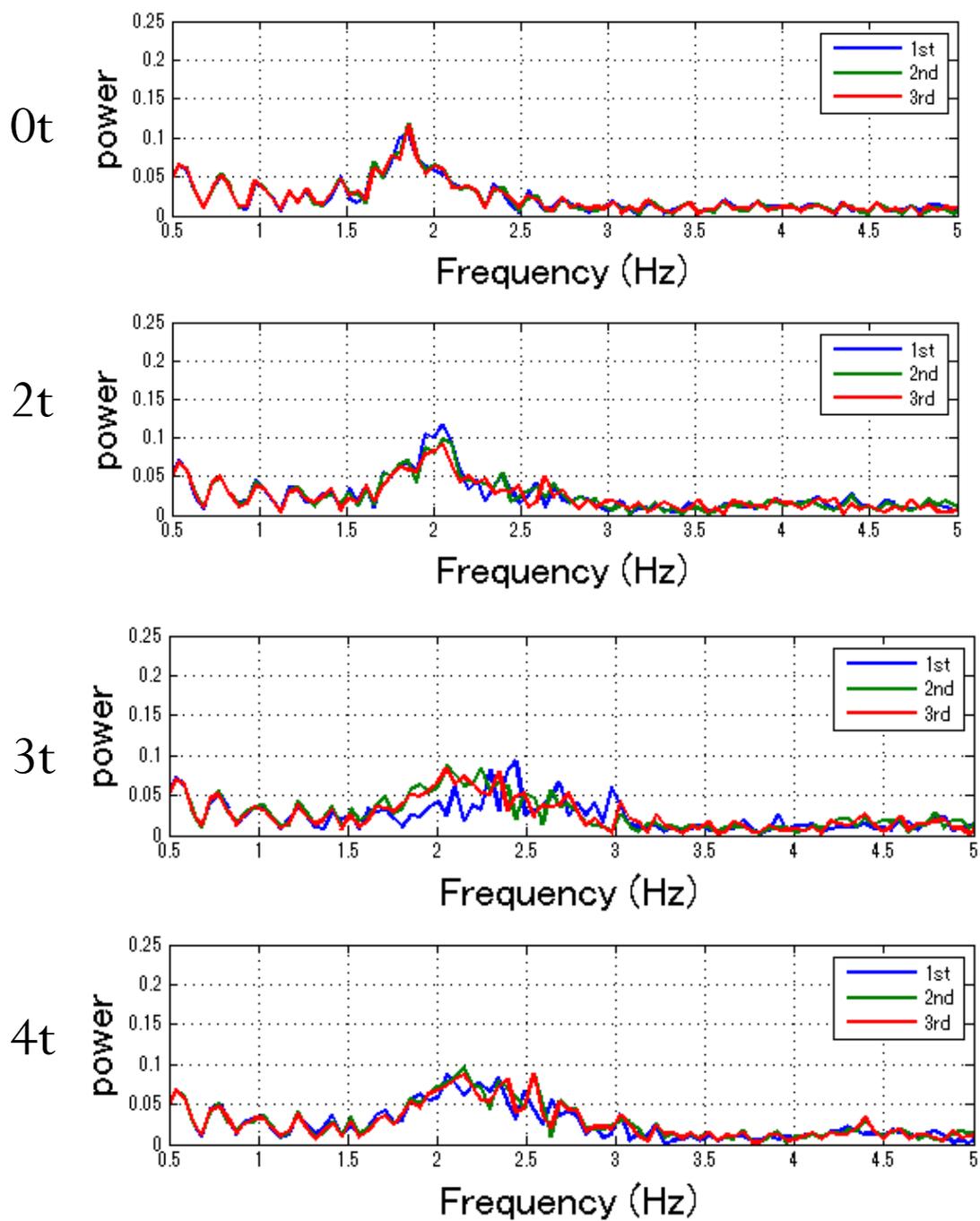


図 4-10 地点 A の周波数解析の結果 (40km/h)

② 計測結果・地点 A (60km/h)

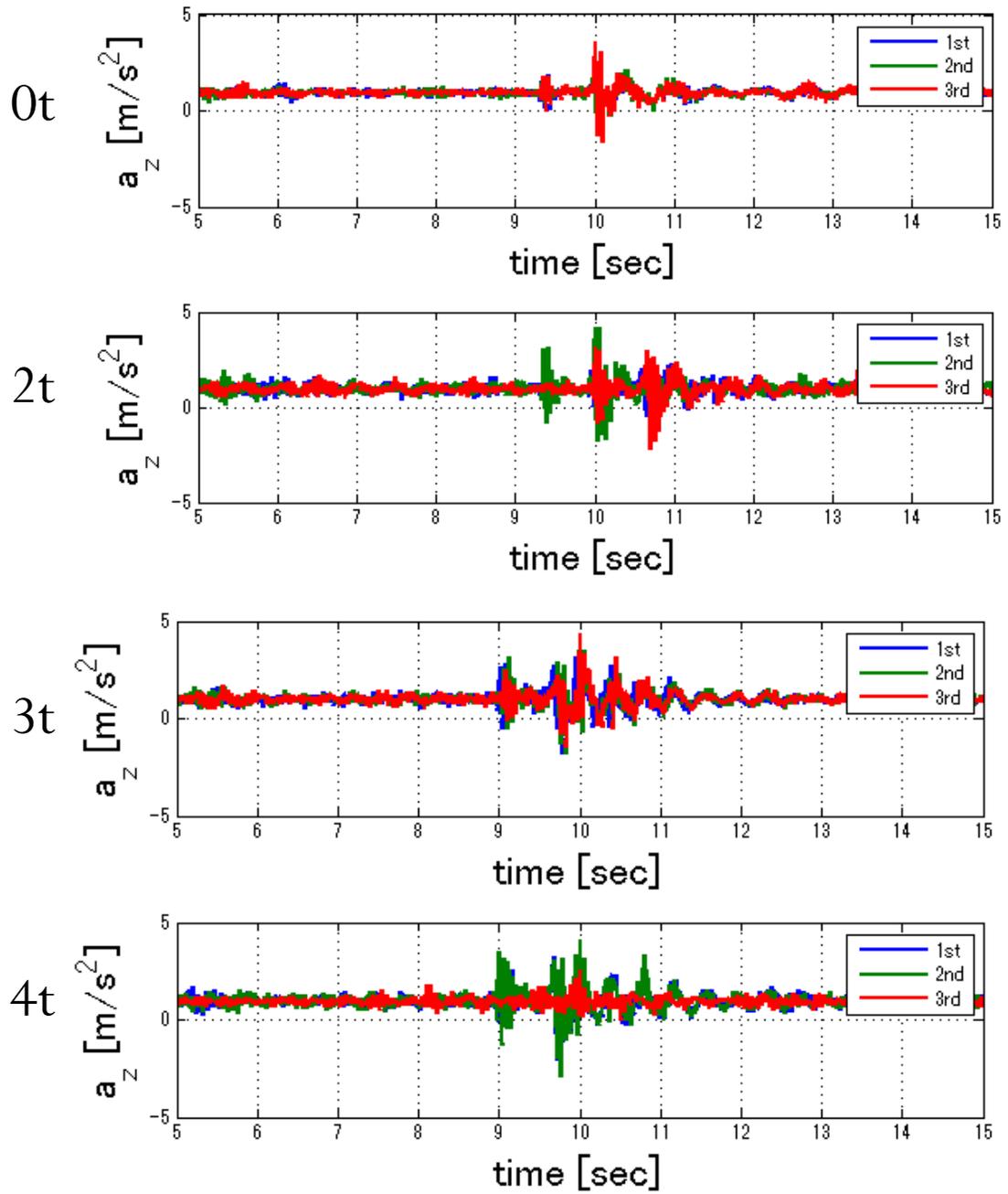


図 4-11 地点 A の上下加速度の結果 (60km/h)

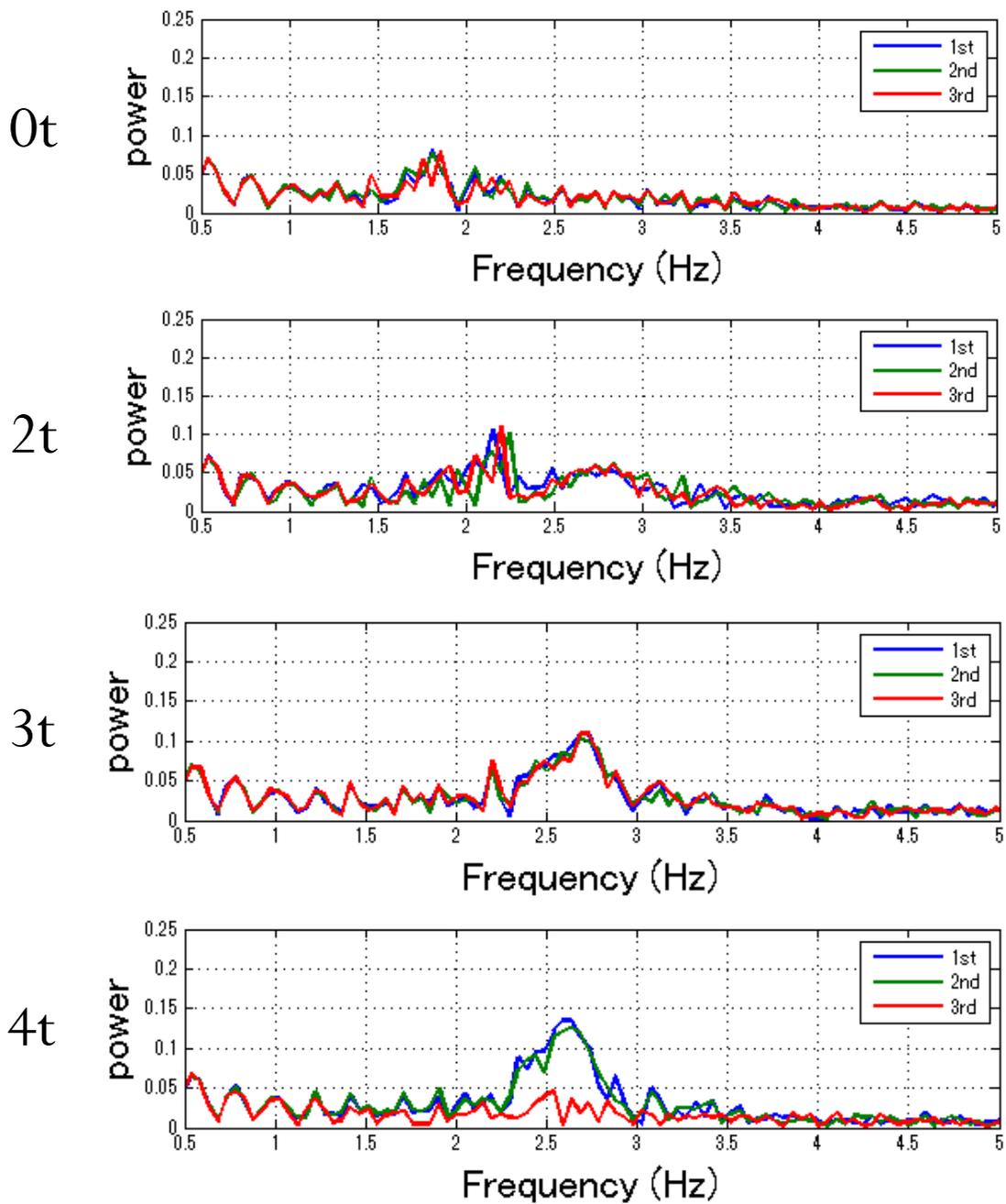


図 4-12 地点 A の周波数解析の結果 (60km/h)

③ 計測結果・地点 B (40km/h)

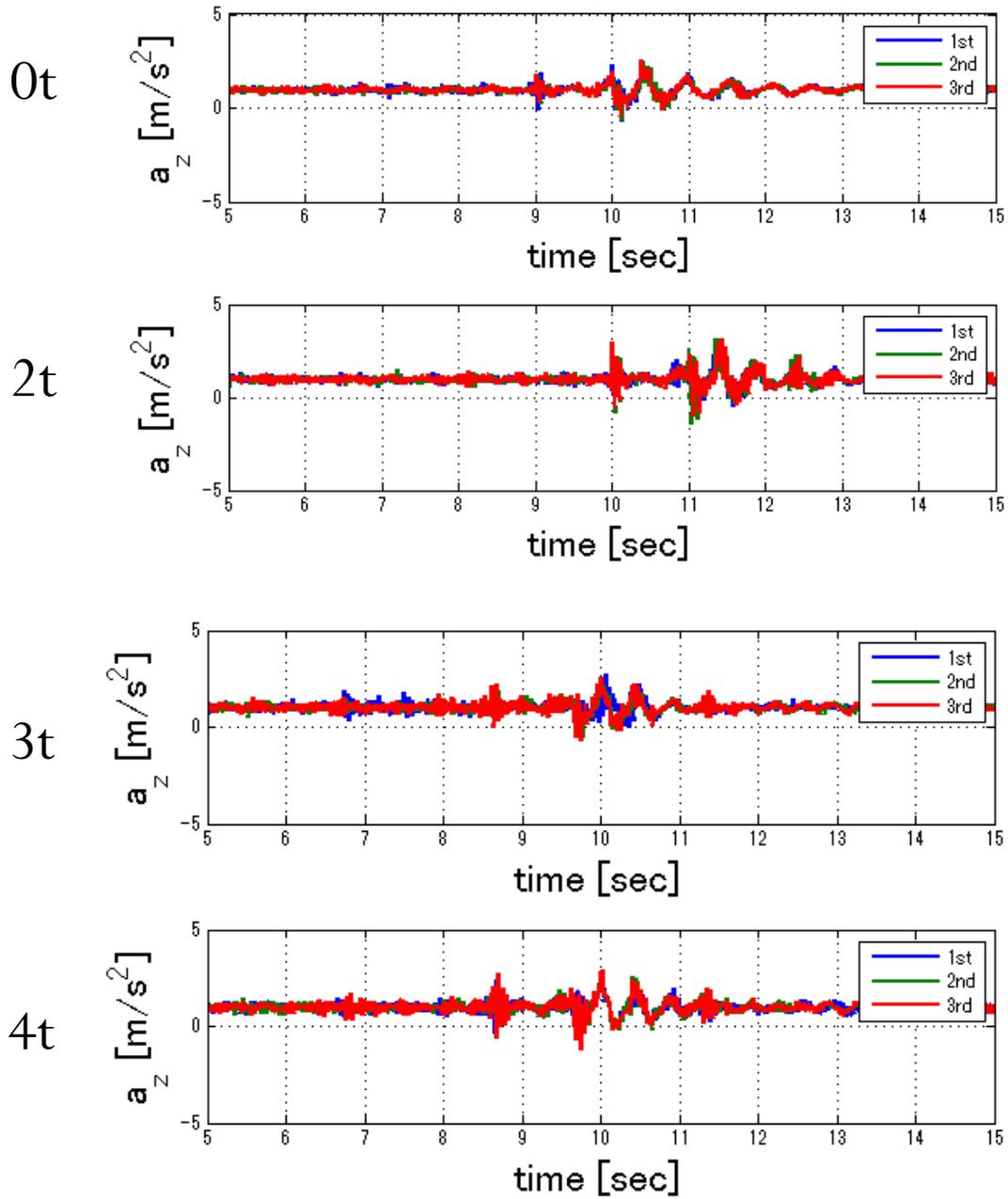


図 4-13 地点 B の上下加速度の結果 (40km/h)

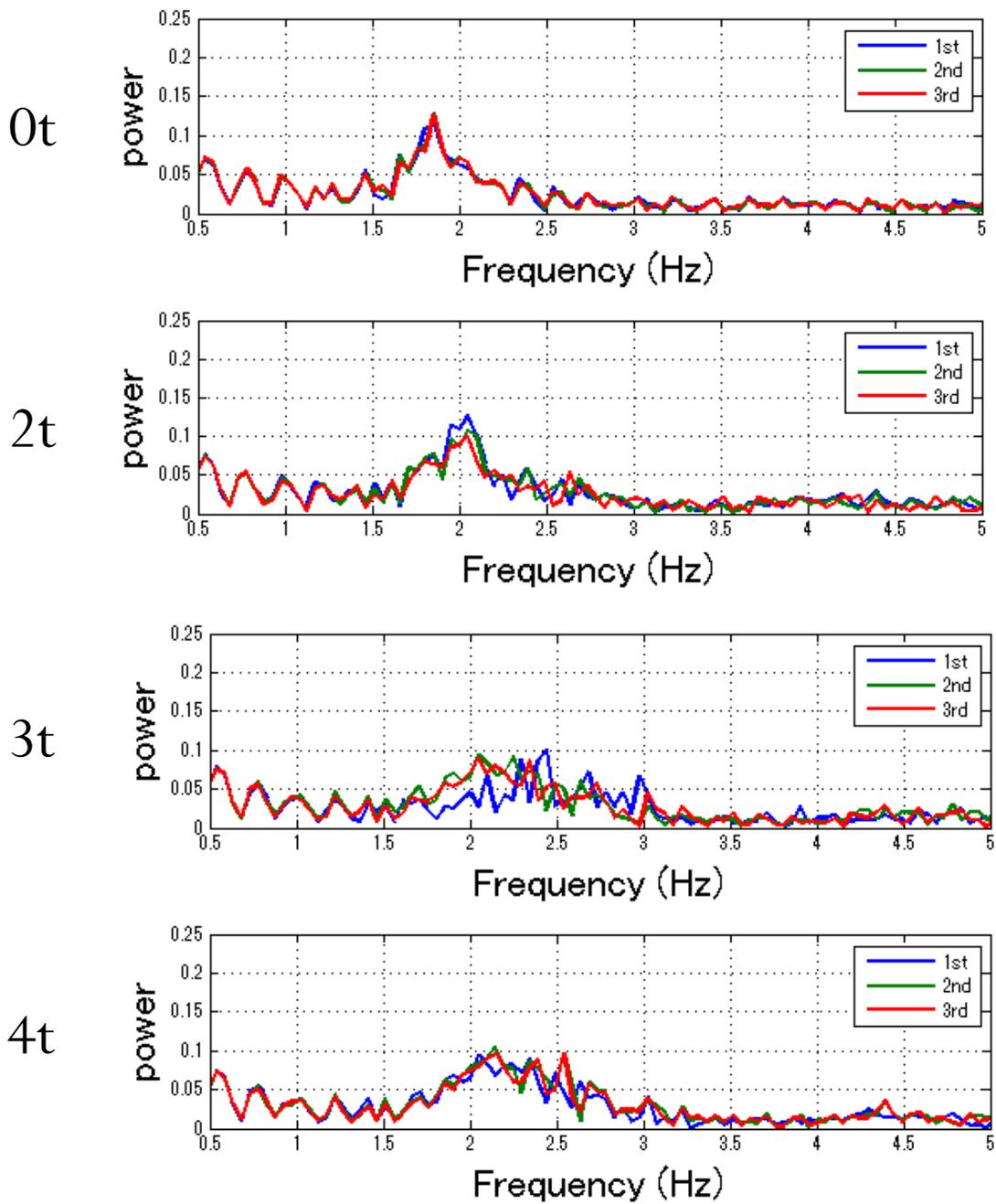


図 4-14 地点 B の周波数解析の結果 (40km/h)

④ 計測結果・地点 B (60km/h)

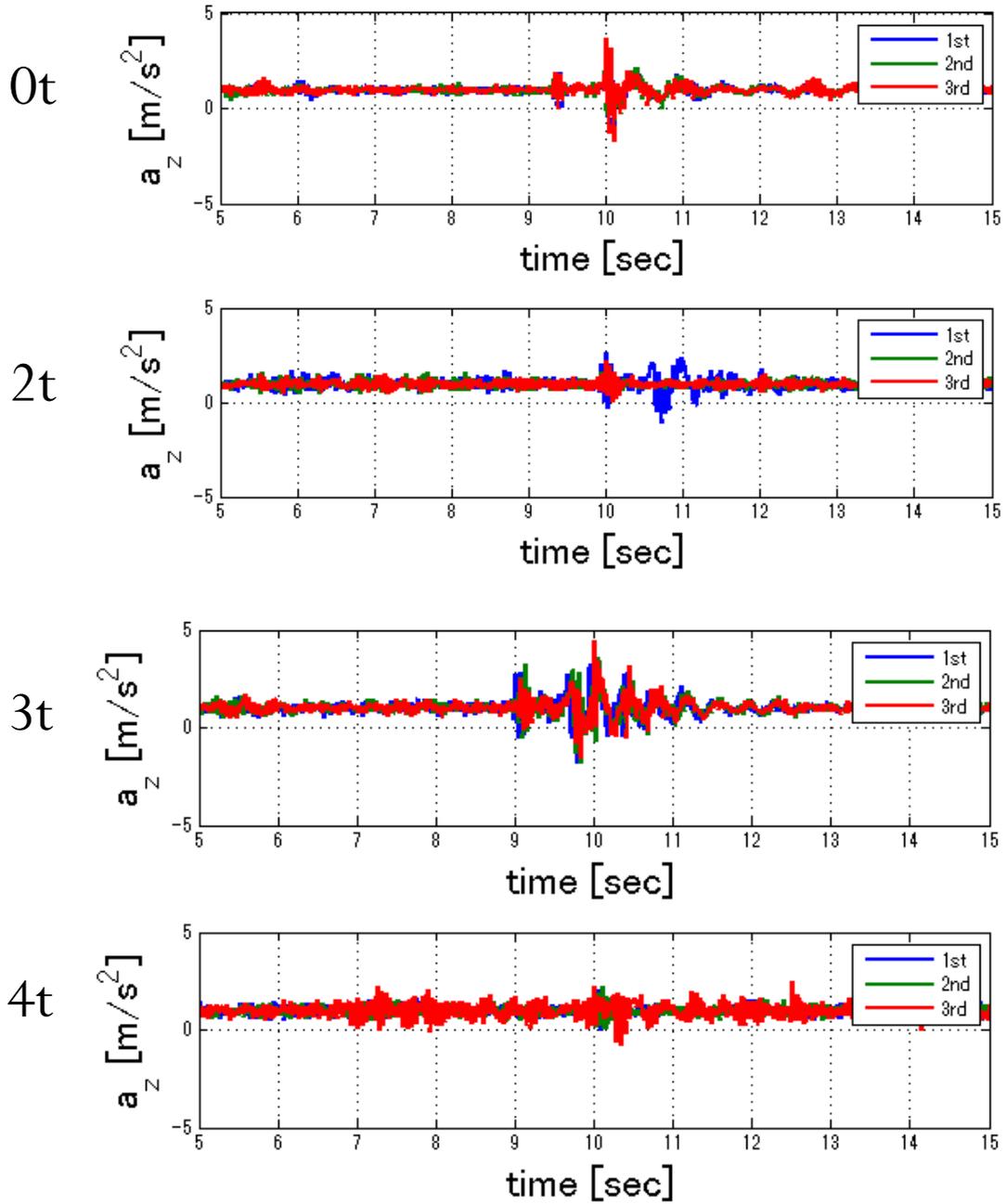


図 4-15 地点 B の上下加速度の結果 (60km/h)

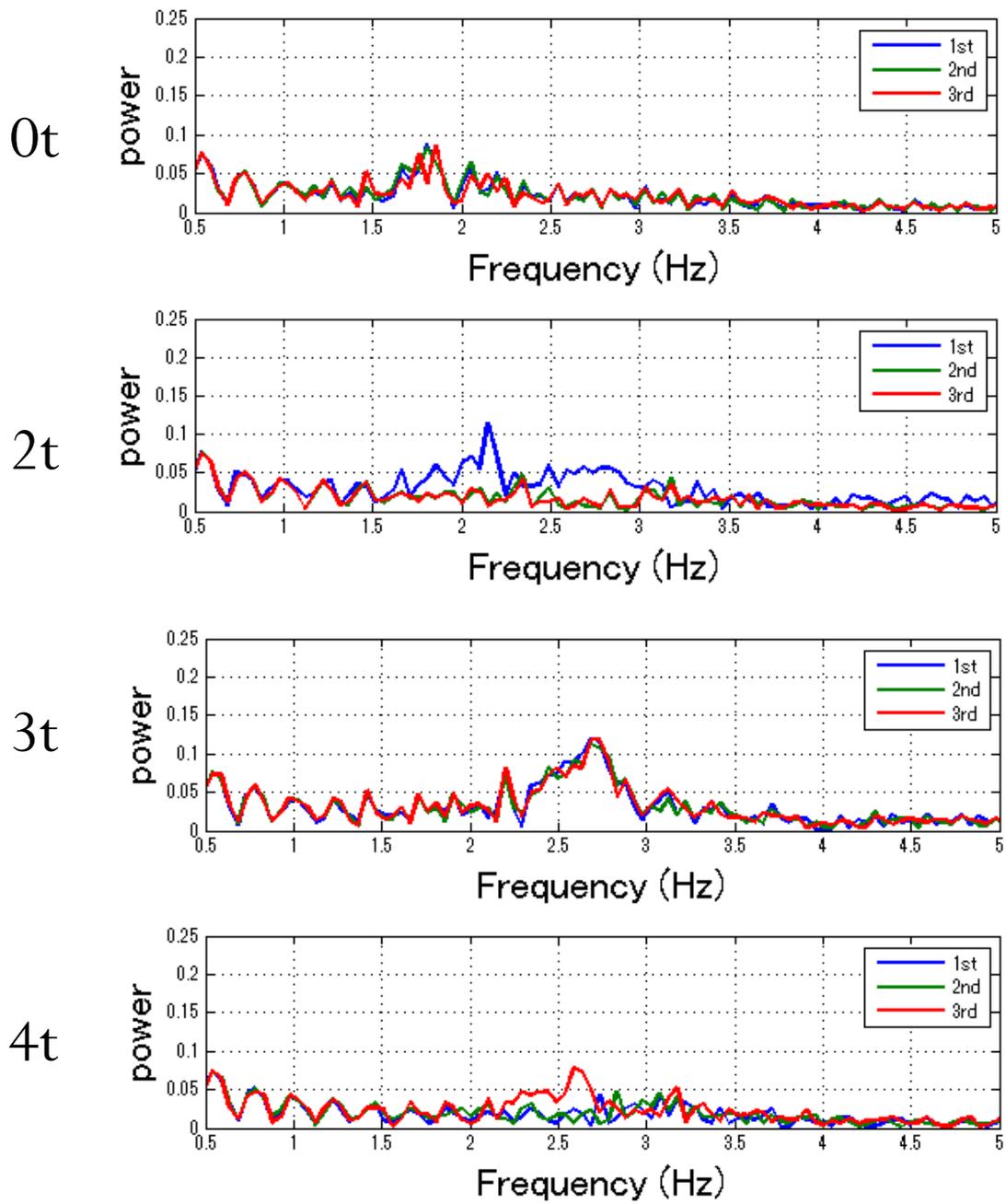


図 4-16 地点 B の周波数解析の結果 (60km/h)

⑤ 計測結果・地点 C (40km/h)

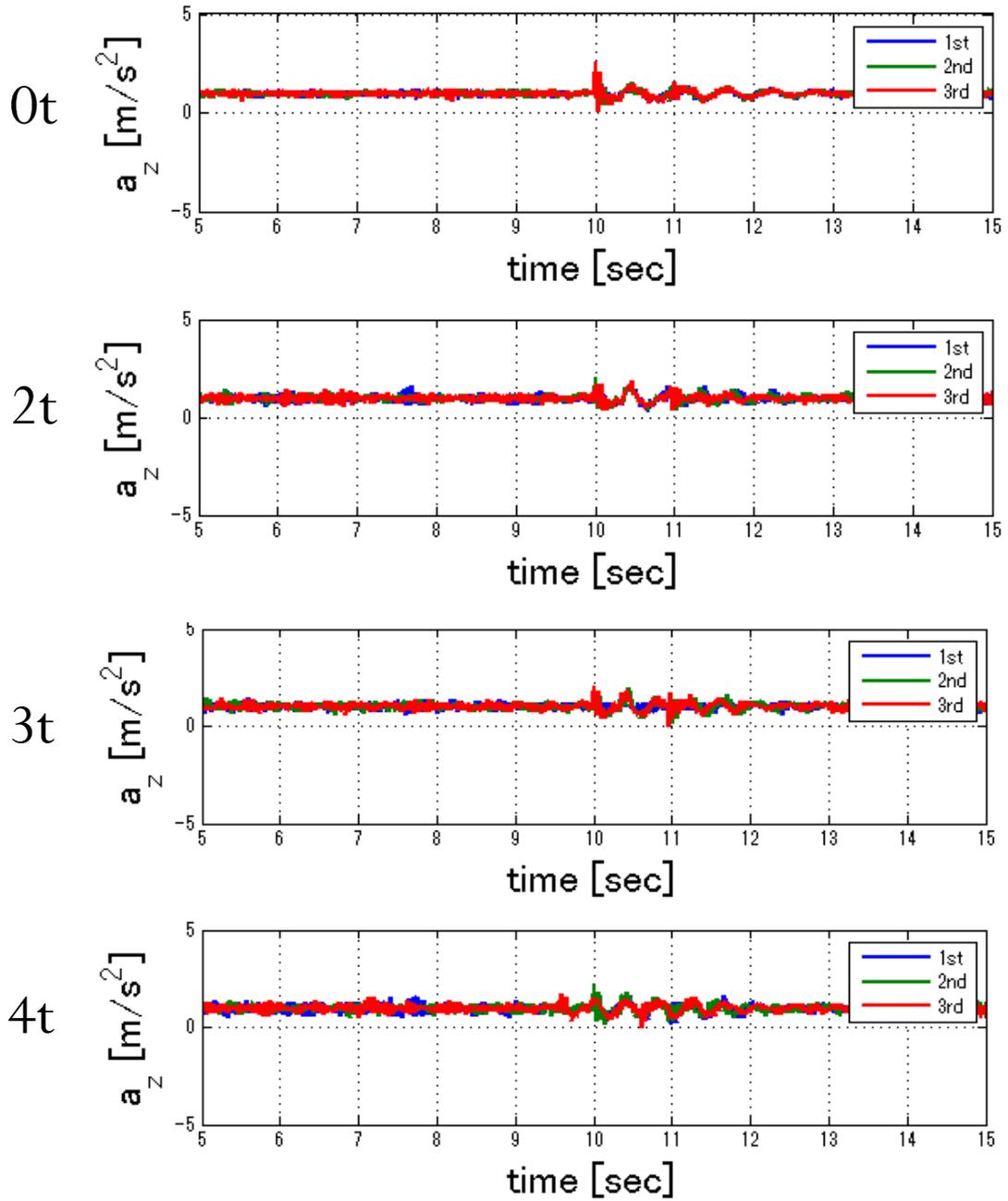


図 4-17 地点 C の上下加速度の結果 (40km/h)

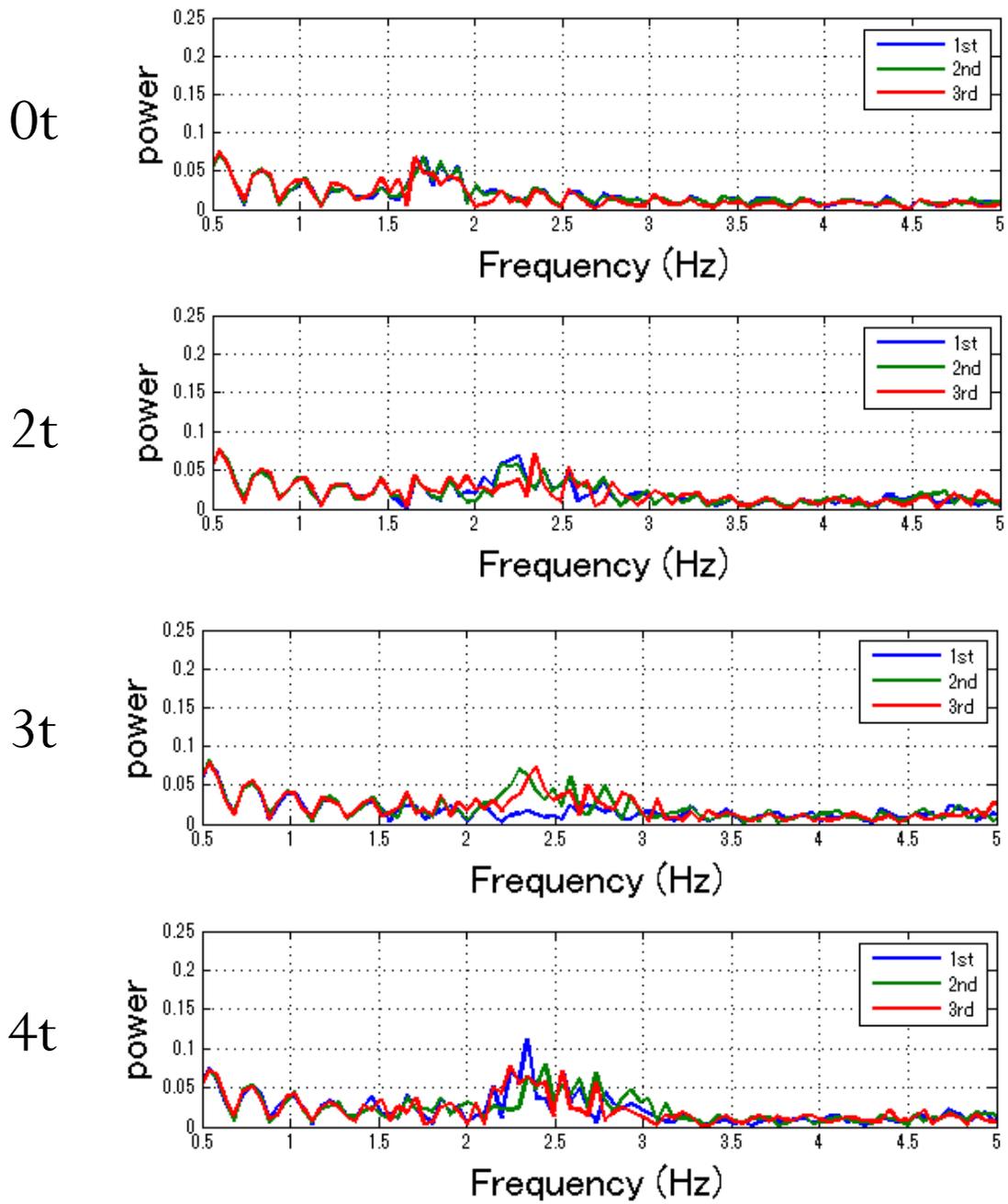


図 4-18 地点 C の周波数解析の結果 (40km/h)

⑥ 計測結果・地点 C (60km/h)

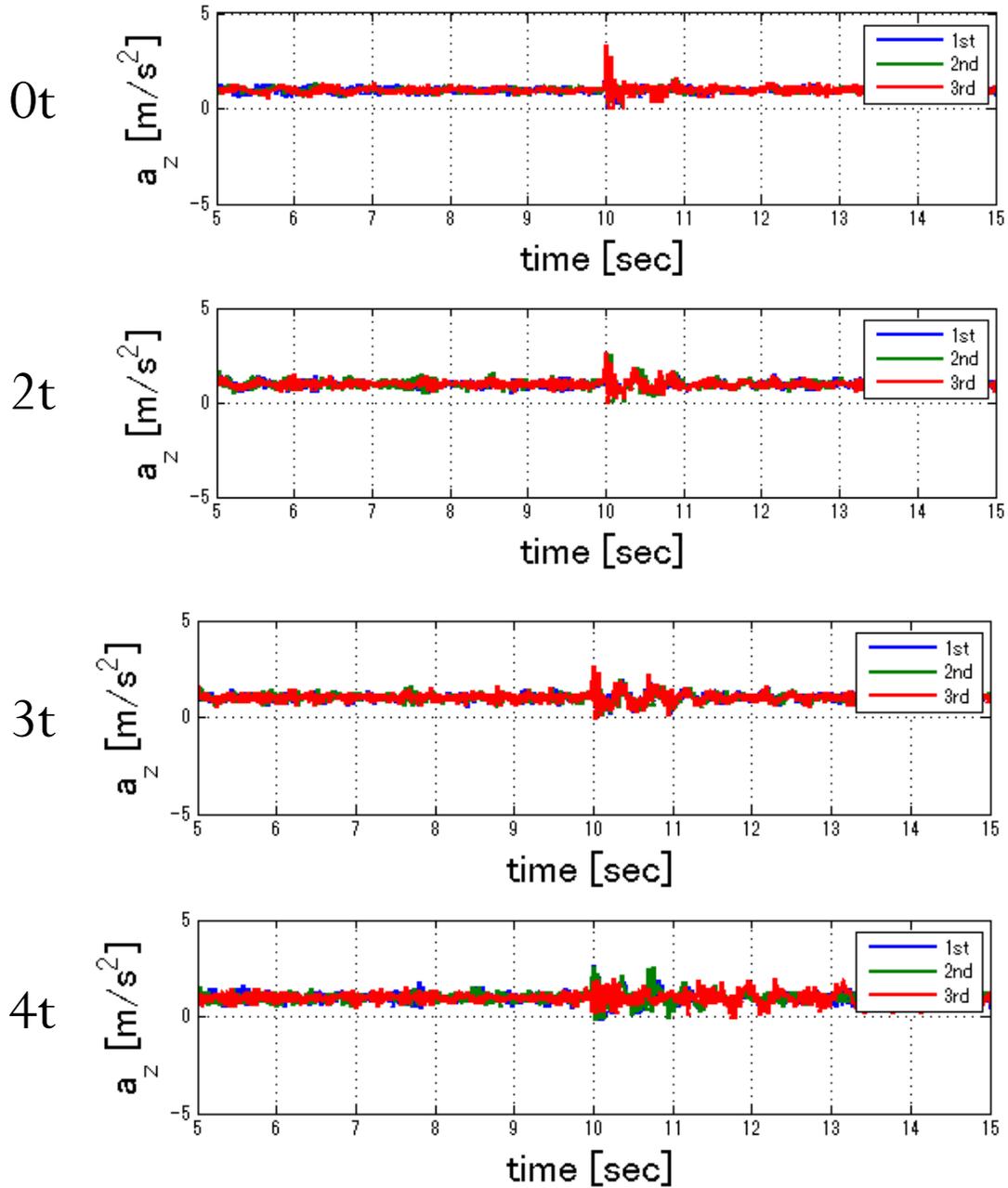


図 4-19 地点 C の上下加速度の結果 (60km/h)

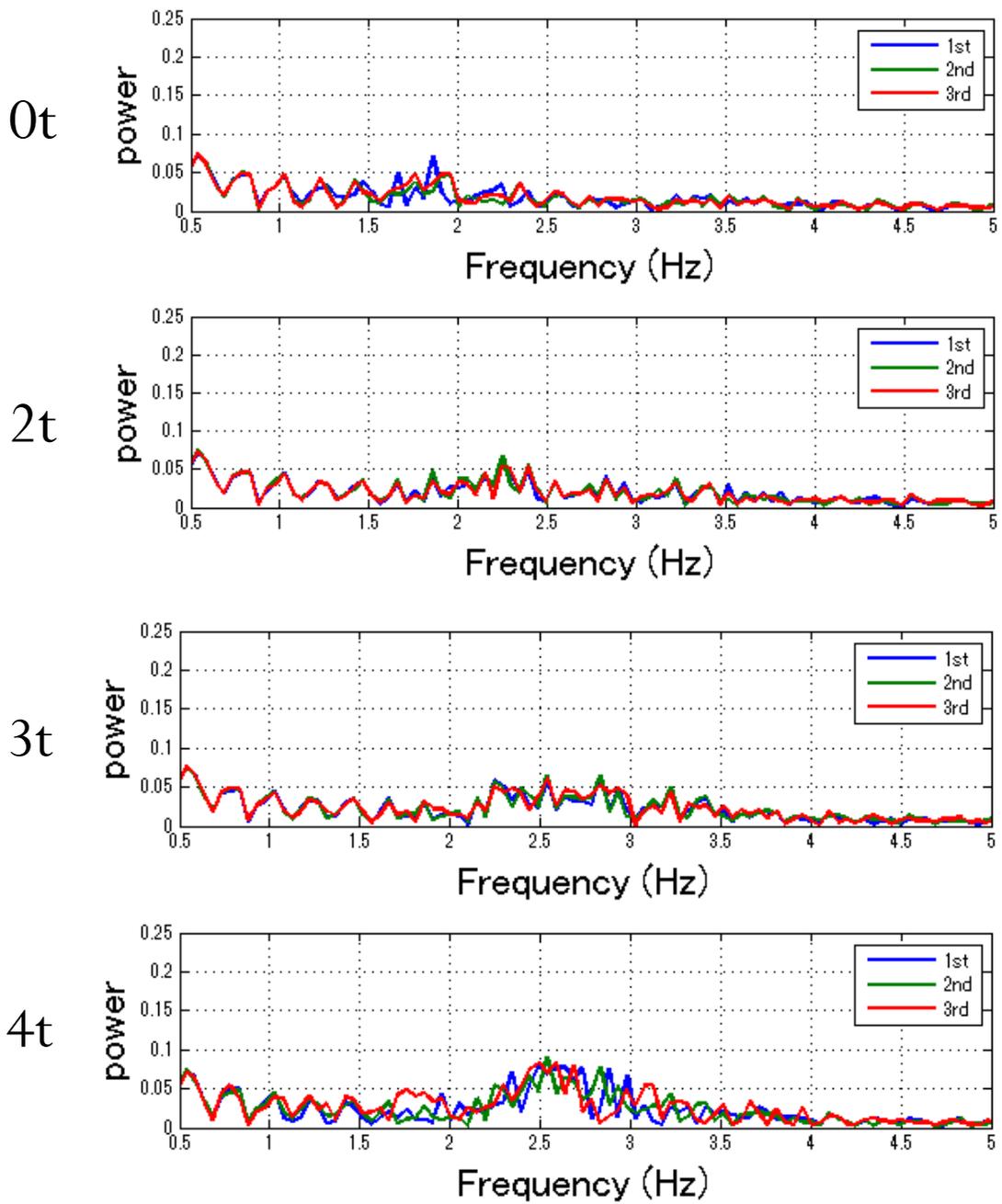


図 4-20 地点 C の周波数解析の結果 (60km/h)

4) 実験結果に対する考察

シミュレーションでは、重量の増加に伴って固有振動数が小さくなる結果を得たが、実車実験では重量の増加に伴い固有振動数が大きくなる傾向の結果となった。両者の結果より、重量と固有振動数の関係について、実車における実験結果は理論的な不整合が生じる結果となった。

この要因としては、慣性モーメントの影響の可能性が考えられる。質量・重心位置の距離の変化により、加速度センサを取り付けた位置の振動が変化し、固有振動数が大きくなる結果となったことが考えられる。また、追加積載を行い、特に前輪への荷重が増えたことで、重心位置の変化だけでなく、タイヤのコーナリングフォースが増大、すなわちばね定数が増大したことで、固有振動数が変化した可能性も考えられる。

なお、本走行実験では、既存の試験走行路上に生じている段差を活用し、データ計測を行ったため、比較的大きな上下加速度が生じた地点 A は、曲線路から直線路に移行する地点となっている。曲線路では左右方向への加速度が生じ、段差通過段階で左右方向への加速度の影響が残っていた可能性が考えられる。したがって、データ計測環境としては、左右方向やピッチング等への影響がないと考えられる地点での計測が必要であると考えられる。

5. 研究成果と今後の課題

本研究にて得られた成果と今後さらに研究を進めるべき残された課題について以下に示す。

5.1 本研究の成果

5.1.1 本研究の成果

本研究では、①道路形状、②ETC2.0 車載器、③ITS スポット路側機、④センタを活用し、より低コストで効率的に車両重量を推定する方法の検討を行った。

具体的には、車両が道路上に整備された特定の形状の区間（外部入力：パルス、正弦波系、ステップダウン等）を通過することにより、車両に生じた振動を加速度センサが組み込まれた車載器にて計測し、そのデータをITS スポットから収集、センタ側で事前に登録されている車両情報等と組合せ、固有振動数から車両重量及び積載重量を推定するという方法を検討した。

検討した手法については、シミュレーションモデルによる理論検証と実走行実験により計測した実データでの検証を行った。

シミュレーションモデルで車両重量と固有振動数の関係性を分析した結果、数%程度のばね定数の変化が推定精度に大きな影響を与える可能性は低いことが確認されるとともに、重心位置が前後どちらの位置にあっても重量が大きくなるほど固有振動数は低くなる傾向が確認された。

シミュレーションモデルでの結果を受け、実走行実験にてデータ取得を行った結果、実車実験では重量の増加に伴い固有振動数が大きくなる傾向の結果となり、重量と固有振動数の関係についてシミュレーションモデルで検証した結果と比較し、理論的な不整合が生じる結果となった。

シミュレーションモデルと実走行実験の結果で不整合が生じた要因としては、慣性モーメントの影響の可能性が考えられる。質量・重心位置の距離の変化により、加速度センサを取り付けた位置の振動が変化し、固有振動数が大きくなる結果となったことが考えられる。また、追加積載を行い、特に前輪への荷重が増えたことで、重心位置の変化だけでなく、タイヤのコーナリングフォースが増大、すなわちばね定数が増大したことで、固有振動数が変化した可能性も考えられる。

5.1.2 特許出願

本研究にて検討した道路形状、車載器、路側機、センタの4つの要素を活用した車両重量推定の理論については、特許出願を行った（表 5-1）。

表 5-1 特許出願概要

出願番号	特願 2014-241583
出願日	平成 26 年 11 月 28 日
発明の名称	車両重量監視システム、車両重量算出方法、 車両重量算出サーバ

5.1.3 論文発表

本研究にて検討した車両の固有振動数を用いた車両重量推定の考え方については、一般社団法人日本機械学会が主催する第 23 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2014) への論文投稿ならびに発表を行った（表 5-2）。

表 5-2 論文発表概要

学会	一般社団法人日本機械学会
講演会	第 23 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2014)
開催日	平成 26 年 12 月 1 日～3 日
発表論文 タイトル	車両の固有振動数を用いた車両重量推定に 関する基礎検討

5.2 今後の課題

本研究では、加速度センサを内蔵した車載器を用いて車両に生じた振動を計測することで、車両重量を推定する基本的な理論の構築を行った。しかし、実走行実験にて取得した実データを検証した結果、基本的な理論モデルとは異なる結果が得られた。

上記の通り、理論的な不整合の要因としては、慣性モーメントの影響、荷重の増加に伴うばね定数の変化等が考えられる。

今後、本研究にて得られた知見を踏まえ、慣性モーメントの影響を考慮し、車載器の設置位置と固有振動数の関係性や、荷重とばね定数の関係性等を踏まえた論理モデルの再検討、及び追加的なデータ取得と分析を行い、実展開に向け、センサの設置位置や検知精度、検知すべき軸数等を明確にする必要がある。

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.873 October 2015

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地
企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675