

卒業論文

列車通過時の分岐器の振動現象解明のための
実機試験データの不確かさ解析

平成 29 年 1 月 26 日 提出
指導教員 泉 聡志 教授
150222 田處 恵大

目次

目次.....	2
第1章 序論.....	8
1.1 背景.....	8
1.2 先行研究 [1].....	8
1.3 研究目的.....	9
1.4 本論文の構成.....	9
第2章 鉄道分岐器について.....	10
2.1 緒言.....	10
2.2 分岐器 [2].....	11
2.3 分岐器の種類 [2].....	12
2.3.1 普通分岐器.....	12
2.3.2 特殊分岐器.....	13
2.4 分岐方式 [2].....	14
2.4.1 関節方式.....	14
2.4.2 弾性方式.....	14
2.5 転てつ装置の仕組み [4].....	15
2.5.1 電気転てつ機.....	15
2.5.2 トングレール.....	16
2.5.3 スイッチアジャスタ.....	17
2.5.4 フロントロッド.....	17
2.6 考察.....	18
第3章 実測データとウェーブレット変換.....	19
3.1 緒言.....	19
3.2 普通分岐器における実測波形データ [1] [5].....	20
3.2.1 測定条件.....	20
3.2.2 営業線振動波形データ.....	22
3.2.2.1 一般的な波形傾向.....	22
3.2.2.2 前軸の影響を考慮した車軸の分類 [1].....	24
3.2.2.3 列車種別ごとの波形最大値統計量 [6].....	25
3.2.2.4 階層的クラスタ分析 [7].....	27
3.2.2.5 編成ごとの平均値の比較.....	29
3.3 時間 - 周波数解析 [8].....	34
3.3.1 短時間フーリエ変換.....	34
3.3.2 ウィグナー分布.....	35

3.3.3	ウェーブレット変換	35
3.3.4	考察	36
3.4	ウェーブレット変換の変換方法	37
3.4.1	変換条件	37
3.4.2	周波数	38
3.4.3	ウェーブレット関数	38
3.4.4	変換データの縮約 [7]	40
3.5	ウェーブレット変換結果	42
3.5.1	後端部加速度	42
3.5.2	肘金部加速度	46
3.5.3	フロントロッド軸力	49
3.6	まとめ	51
第4章	多変量解析	52
4.1	緒言	52
4.2	主成分分析	53
4.2.1	定義 [7] [10] [11]	53
4.2.2	解析条件	54
4.2.3	解析結果	55
4.2.3.1	後端部加速度	55
4.2.3.2	肘金部加速度	56
4.2.3.3	フロントロッド軸力	57
4.3	重回帰分析	58
4.3.1	定義 [7] [10]	58
4.3.2	解析条件	59
4.3.3	解析結果	60
4.3.3.1	後端部加速度	60
4.3.3.2	肘金部加速度	61
4.3.3.3	フロントロッド軸力	61
4.3.3.4	考察	62
4.4	説明変数の効果	63
4.4.1	説明変数の効果の検定	63
4.4.2	説明変数ごとの効果	63
4.5	主成分の考察	64
4.5.1	条件ごとの主成分の予測式	64
4.5.2	主成分負荷量	66
4.6	まとめ	69

第 5 章	確率的データ予測.....	70
5.1	緒言.....	70
5.2	予測手法 [7].....	71
5.2.1	平均.....	71
5.2.2	分散.....	71
5.3	比較.....	73
5.3.1	説明可能な分散の割合.....	73
5.3.2	予測例.....	74
5.3.2.1	肘金部加速度.....	74
5.3.2.2	フロントロッド軸力.....	77
第 6 章	結論.....	81
6.1	結論.....	81
6.2	課題.....	81
付録 A	波形振幅の確率分布.....	82
A.1	確率紙 [12].....	82
	謝辞.....	85
	参考文献.....	86

目次

図 2.1 分岐器全体図	11
図 2.2 普通分岐器の種類 [3]	12
図 2.3 特殊分岐器の種類 [3]	13
図 2.4 トングレール継目（関節方式）	14
図 2.5 転てつ装置全体図	15
図 2.6 電気転てつ機	16
図 2.7 ロックピース	16
図 2.8 トングレール	17
図 2.9 スイッチアジャスタ	17
図 2.10 B821 型フロントロッド	18
図 3.1 計測箇所 [3]	21
図 3.2 後端部鉛直方向加速度	23
図 3.3 肘金部鉛直方向加速度	23
図 3.4 フロントロッド軸力	24
図 3.5 鉄道車両における車軸の位置 [1]	25
図 3.6 デンドログラム（樹形図）	27
図 3.7 階層的クラスター分析（後端部加速度）	28
図 3.8 クラスターごとの波形データ	29
図 3.9 編成ごとの平均値（後端部加速度）	31
図 3.10 編成ごとの平均値（後端部加速度・補正後）	31
図 3.11 編成ごとの平均値（肘金部加速度）	32
図 3.12 編成ごとの平均値（肘金部加速度・補正後）	32
図 3.13 編成ごとの平均値（フロントロッド軸力）	33
図 3.14 編成ごとの平均値（フロントロッド軸力・補正後）	33
図 3.15 短時間フーリエ変換の分解能	34
図 3.16 ウェーブレット関数の例（メキシカンハット関数）	35
図 3.17 ウェーブレット変換の時間および周波数分解能	36
図 3.18 ガウシアンウェーブレット	39
図 3.19 200Hz と 50Hz の合成波	39
図 3.20 200Hz と 50Hz の合成波のウェーブレット変換	40
図 3.21 変換データの時間方向の縮約	41
図 3.22 後端部加速度・平均	42
図 3.23 後端部加速度・標準偏差	43
図 3.24 後端部加速度・変動係数	44

図 3.25 後端部加速度 800Hz の平均値・標準偏差 (条件 3)	45
図 3.26 肘金部加速度・平均	46
図 3.27 肘金部加速度・標準偏差	47
図 3.28 肘金部加速度・変動係数	48
図 3.29 フロントロッド軸力・平均	49
図 3.30 フロントロッド軸力・標準偏差	50
図 3.31 フロントロッド軸力・変動係数	51
図 4.1 各変数の分散, 総分散, 各主成分の分散	53
図 4.2 パス図	58
図 4.3 主成分負荷量 (後端部加速度)	66
図 4.4 主成分負荷量 (肘金部加速度)	67
図 4.5 主成分負荷量 (フロントロッド軸力)	68
図 5.1 標準偏差の予測値	72
図 5.2 説明可能な分散の割合	73
図 5.3 平均の比較 (肘金部加速度)	74
図 5.4 標準偏差の比較 (肘金部加速度)	75
図 5.5 車軸ごとの平均値の比較 (肘金部加速度)	75
図 5.6 種別ごとの平均の比較 (肘金部加速度)	76
図 5.7 平均の比較 (フロントロッド軸力)	77
図 5.8 標準偏差の比較 (フロントロッド軸力)	78
図 5.9 車軸ごとの平均の比較 (フロントロッド軸力)	79
図 5.10 種別ごとの平均の比較 (フロントロッド軸力)	80
図 A.1 グンベル分布確率紙 (後端部加速度)	82
図 A.2 グンベル分布確率紙 (肘金部加速度)	83
図 A.3 グンベル分布確率紙 (フロントロッド軸力)	84

表目次

表 3.1 測定分岐器.....	20
表 3.2 列車通過条件.....	20
表 3.3 測定位置と測定箇所.....	21
表 3.4 測定機器.....	21
表 3.5 A 分岐器の測定対象列車.....	22
表 3.6 列車種別ごとの最大値の各種統計量.....	26
表 3.7 貨物と他の列車種別の間の 2 標本検定.....	26
表 3.8 クラスターとそこに含まれる編成.....	28
表 3.9 編成ごとのドリフト補正の値.....	30
表 3.10 ウェーブレット変換条件.....	37
表 4.1 主成分分析解析条件.....	54
表 4.2 主成分分析結果（後端部加速度）.....	55
表 4.3 主成分分析結果（肘金部加速度）.....	56
表 4.4 主成分分析結果（フロントロッド軸力）.....	57
表 4.5 ダミー変数.....	59
表 4.6 重回帰分析解析条件.....	59
表 4.7 重回帰分析の結果と分散説明率（後端部加速度）.....	60
表 4.8 重回帰分析の結果と分散説明率（肘金部加速度）.....	61
表 4.9 重回帰分析の結果と分散説明率（フロントロッド軸力）.....	62
表 4.10 説明変数の効果の検定（p 値）.....	63
表 4.11 決定係数と説明変数ごとの寄与率.....	64
表 4.12 予測式の係数.....	65

第1章 序論

1.1 背景

多くの鉄道では分岐器を用いることで列車の進行方向の変更を行っている。分岐器では、電気転てつ器と呼ばれる装置によってトングレーलと呼ばれる可動レールを動かすことで、列車の進路を定めており、そのトングレールを動かす機構のことを総称して転てつ装置と呼ぶ。この転てつ装置が不備により転換不能が発生してしまうと、設置されている路線の列車に遅延や運転中止などの大きな影響が生じてしまう。

転てつ装置を構成する部品の一つに、左右のトングレールの先端部をつなぐフロントロッドと呼ばれる部品がある。列車が分岐器を通過する際に振動が発生し、その振動がトングレールを通してフロントロッドに伝わり、フロントロッドの接続部分に使用されている軸受の摩耗を引き起こして転換不能につながってしまう。そのため、フロントロッドを含む転てつ装置に対して定期的な点検・交換が行われているが、交換周期は経験的に定められたものであり、明確な根拠に基づいたものではない。最適な周期で部品交換がなされない場合は、交換基準に達する前の部品も交換されることになってしまい、余計なコストが生じてしまう。そこで、軸受摩耗量等の実測データに基づいた交換周期を提言する必要がある。

先行研究において、分岐器の振動の入力と応答を確認するために営業線の普通分岐器において列車通過時の振動波形測定が行われた[1]。その際、測定で得られた振動波形データの振幅などに大きなバラツキが見られた。しかし、そのバラツキについてはまだ定量的な評価がなされていない。また、分岐器内で生じる振動は、通過する車両の種類や継目の状態、分岐器周辺の軌道の環境などによって左右すると考えられる。そこで、測定対象の普通分岐器において、車両の種類などの条件に応じて周波数ごとの振動の大きさやその分散がどの程度変化するかを定量的に評価することができれば、分岐器振動の大きさと分散を確率的に予測する手法を考案することができる。そして、継目の状態や分岐器周辺における軌道の環境などの条件などからも分岐器振動を予測する手法を確立できれば、様々な種類や条件の分岐器に対して列車通過時の振動を予測することができ、最適な保守計画を提言することが可能となる。

1.2 先行研究 [1]

2014 年度における近藤の先行研究 [1]では、普通分岐器の衝撃入力時の応答を把握するために、JR 東日本営業線に設置されている普通分岐器に対して複数の加速度センサと歪ゲ

ージを設置し、列車通過時に発生する振動の測定を行った。この測定では数種類の列車について測定が行われ、列車の種類や車両内の車軸の位置などの条件が異なる場合でも大まかな波形傾向は一致したが、同じ条件の場合においても振動の振幅の最大値などの分散が大きい結果が得られた。先行研究では波形の振幅の最大値に注目し、車軸の位置ごとにデータを分類し差の検定や相関を分析したが、それ以外の条件や統計的手法については分析がなされていない。また、振動現象について分析する際にはFFTなどに代表される波形を周波数方向に変換する手法がよく用いられているが、測定された波形を周波数ごとに分解することや、そのデータに対して分析を行うことはまだ行われていない。

1.3 研究目的

先行研究 [1]により、列車通過時の衝撃振動によるフロントロッド軸受の摩耗に着目した普通分岐器のフロントロッドの交換周期を算出する手法が提言された。本研究では、先行研究の際に行われた、JR 東日本の営業線の普通分岐器を対象とした波形測定データに対して、時間一周波数解析の手法の一つであるウェーブレット変換を行い、分岐器の時間や周波数ごとの振動特性を明らかにする。そして、多変数からなる変換されたデータに対して、多変数に対して適用できる統計手法である多変量解析を用いて、車両の種類などの条件に応じて周波数ごとの振動の大きさや分散がどの程度変化するのかを定量的に評価すること、その結果を用いて分岐器振動の大きさと分散を確率的に予測する手法を考案することを本研究の目的とする。

そして、将来的にはこの手法を他の分岐器にも応用し、継目の状態や分岐器周辺の軌道の環境などの条件などからも分岐器振動を予測する手法を確立することを目標とする。

そして、以上の手法を応用することで、様々な種類や条件の分岐器の最適な保全計画を作成することを JR 東日本との共同研究の最終目標とする。

1.4 本論文の構成

第 1 章では研究の背景および目的について述べた。

第 2 章では分岐器の機構について説明する。

第 3 章では実測データとそれを変換したデータを示し、考察する。

第 4 章では多変量解析について説明し、解析結果の考察を行う。

第 5 章では第 4 章の結果を用いたデータ予測手法について述べる。

第 6 章では本論文の結論と今後の展望を述べる。

第2章 鉄道分岐器について

2.1 緒言

フロントロッド軸受の摩耗につながる分岐器振動は、分岐器内の継目を列車の車輪が通過する際に発生すると考えられている。したがって、分岐器振動の特性を解析するために分岐器の仕組みを理解することが重要である。本章では、分岐器および転てつ装置の仕組みや用語、部品の役割について述べる。

2.2 分岐器 [2]

可動レールを用いて線路を分岐させ、列車の進行方向の変更を行う機構を分岐器と呼ぶ。分岐器は、ポイント部、リード部、クロッシング部の3つの部分からなる。分岐器の全体図を図 2.1 に示す。

ポイント部とは、トンブレールが基本レールに接する部分のことを表す。そして、クロッシング部とはレールが交差する部分を表す。クロッシング部では分岐器の構造上レールが分断される箇所があるため、車輪が進路と反対側のレールに乗り上げないようにガードレールが置かれている。最後に、リード部とはポイント部とクロッシング部の間の部分のことをさす。

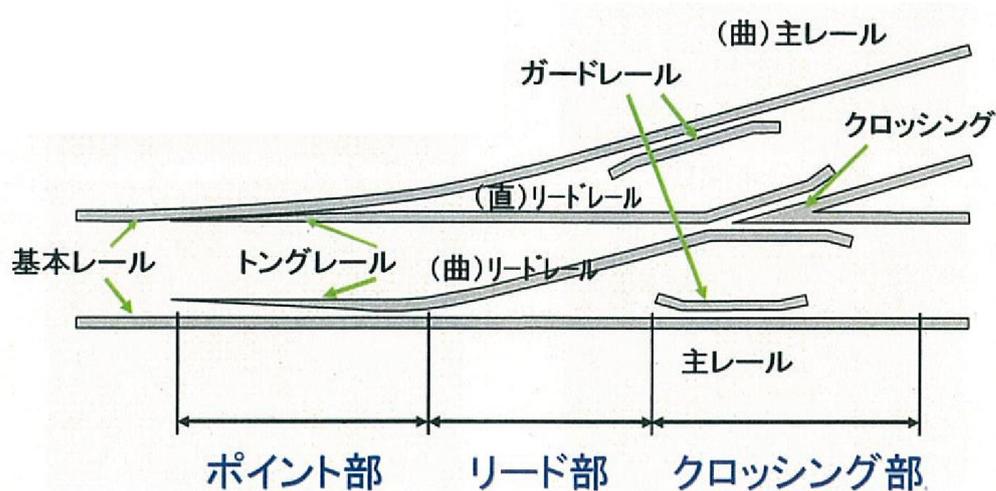


図 2.1 分岐器全体図

分岐器には定位と反位という状態が存在する。定位とは通常の場合に列車を進入させる方向に分岐器が開通している状態で、反位とは定位ではない方向に列車を進入させる状態である。通常の場合に列車を進入させる方向は分岐器ごとに定められている。

2.3 分岐器の種類 [2]

分岐器には、普通分岐器と特殊分岐器の2種類の分岐器が存在する。

2.3.1 普通分岐器

普通分岐器は鉄道において最も使用されている分岐器である。1本の軌道を2本の軌道へと分岐させる機構を持ち、その形状や寸法が規格化されている。形状については、片方の軌道が直線でもう片方の軌道が曲線の片開き分岐器、2本の軌道が左右対称の曲線として分岐する両開き分岐器などが存在する。寸法については、分岐点から、2本の軌道間の距離が1m 離れる地点までの距離の値を用いて規格化している。例えば、分岐点から軌道間の距離が1m になる地点までの距離が12m である分岐器を12番分岐器と呼ぶ。

普通分岐器は規格化されているため大量生産や部品交換が容易であり、コストを抑えることが可能である。一方で、形状や寸法が規格化されたものしかないため、用地の制約がある場所では場合によっては設置できない可能性がある。

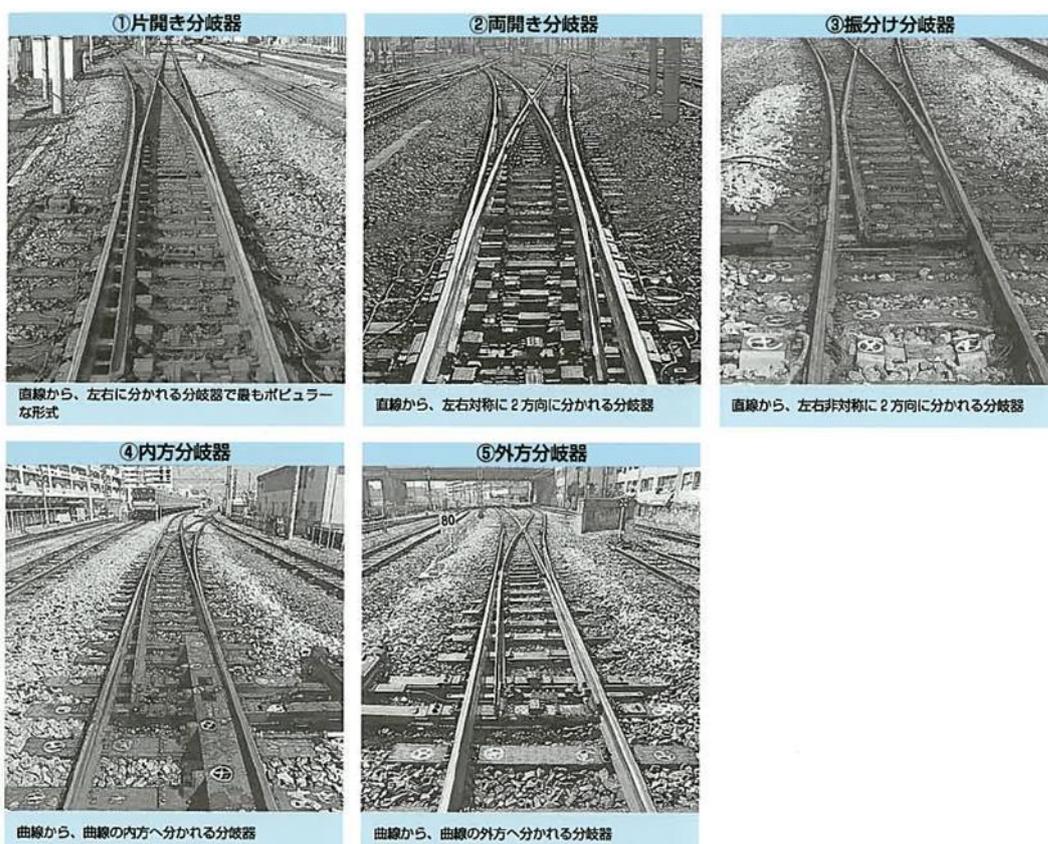


図 2.2 普通分岐器の種類 [3]

2.3.2 特殊分岐器

特殊分岐器とは、2方向だけでなく多方向に進路を設定することができるなど、様々な用途に合わせて使用されている分岐器である、規格化されていないため、設置場所の用地に合わせて形状や寸法を決めることができ、用地を有効活用することができる。

一方で、構造が複雑で可動部が多いことから、継目や接続箇所が多いために耐久力が低くなり交換周期が短くなることや、部品が規格化されていないために生産コストが大きくなるといった欠点がある。

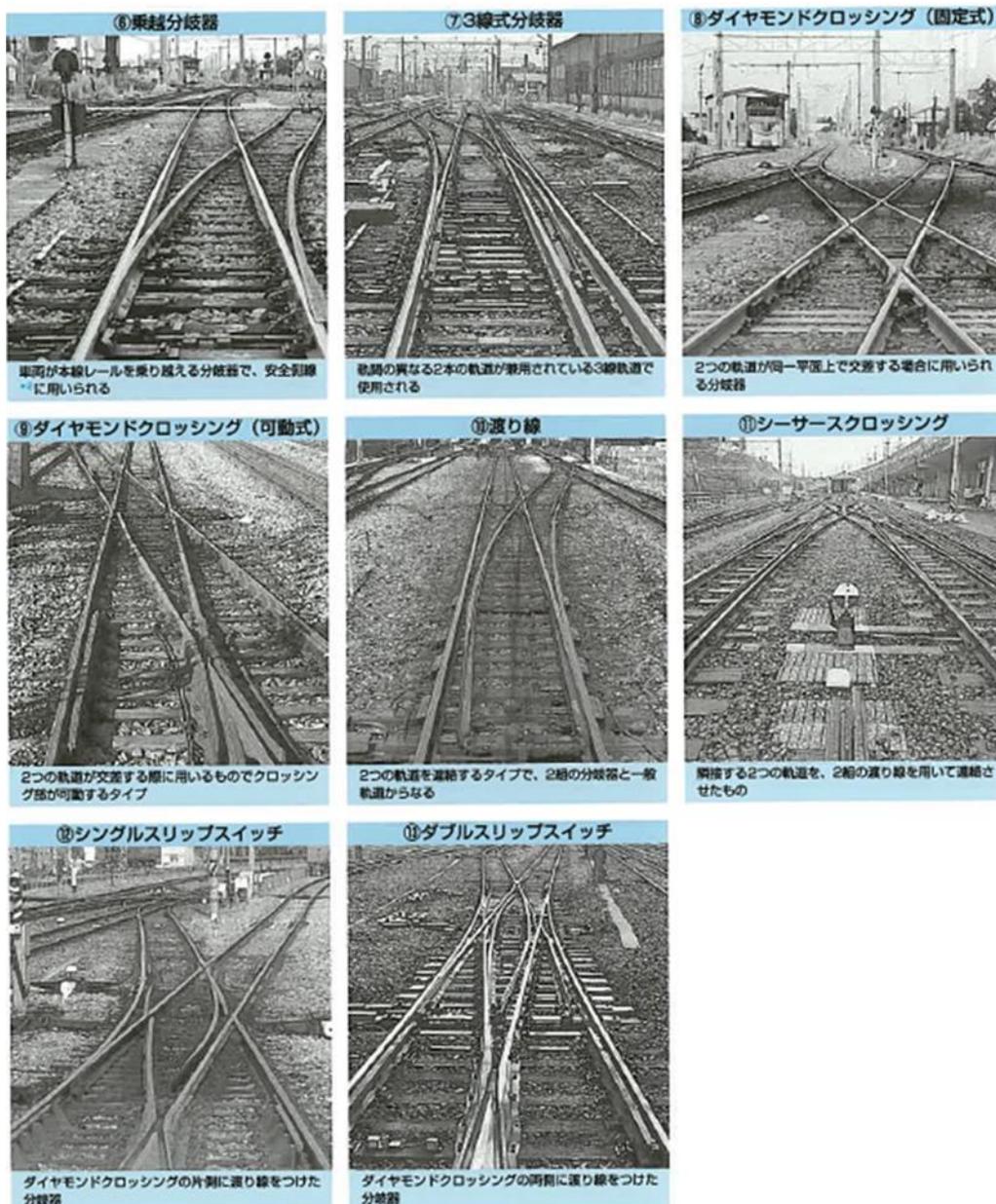


図 2.3 特殊分岐器の種類 [3]

2.4 分岐方式 [2]

分岐器におけるトングレールとリードレールとの間の接続方法については大きく分けて2種類の方式が存在し、それぞれ関節方式と弾性方式と呼ばれている。

2.4.1 関節方式

関節方式とは、トングレールとリードレールが別々の部品になっており、トングレールがリードレールとの間の継目(図 2.4)を中心に回転することで分岐器の転換を行う方式のことである。転換や列車通過の際の継目部分での部品の損傷や、列車の継目通過時に生じる振動や騒音が問題となる。



図 2.4 トングレール継目 (関節方式)

2.4.2 弾性方式

弾性方式とは、トングレールとリードレールが一体化しており、トングレールをたわませることで分岐器の転換を行う方式のことである。トングレールとリードレールとの間に継目が存在しないため転換や列車通過の際の損傷が少なく、列車通過時の振動や騒音が抑えることができる。しかし、トングレールをたわませるため転換時の負荷が大きく、関節方式に比べ高価になってしまう。

2.5 転てつ装置の仕組み [4]

分岐器において、トングレールを転換することで左右どちらかの基本レールに密着させる装置と、その状態を保持する鎖錠装置のことを総称して転てつ装置と呼ぶ。トングレールの転換には非常に大きな力が必要であり、動力を使用して分岐器を転換するために用いられている。ここでは、一般的な片開き普通分岐器の全体図を図 2.5 に示し、転てつ装置を構成する各装置の役割を説明する。

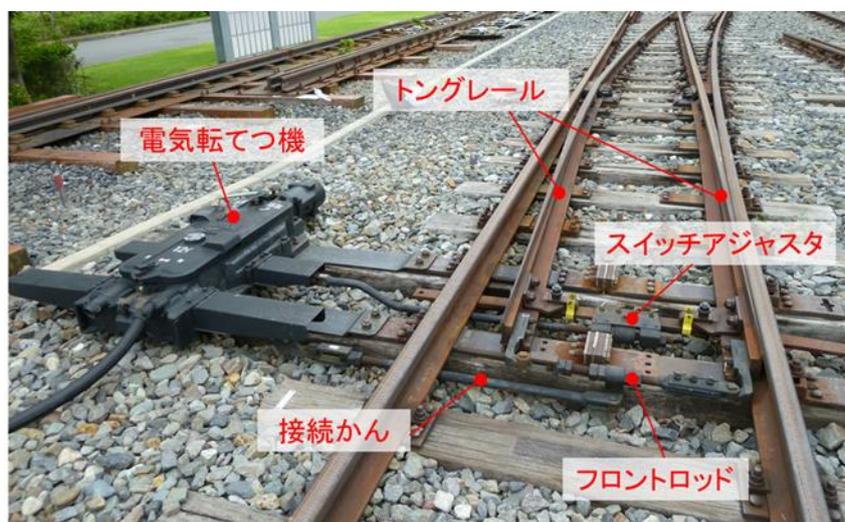


図 2.5 転てつ装置全体図

2.5.1 電気転てつ機

電気転てつ機（図 2.6）とは、電気を動力に用いて分岐器を転換する装置で、ほとんどの分岐器に使用されている。転換の際は、動作かんと呼ばれる部品を介してスイッチアジャスタという部品に動力が伝えられる。また、転換が終了した際に、フロントロッドからのびる接続かんと呼ばれる部品から鎖錠かんと呼ばれる部品を通して位置情報が送られ、電気転てつ機内部（図 2.7）にあるロックピースが鎖錠かんの切欠きにはまることによって分岐器の転換が正常に完了したと判断される。



図 2.6 電気転てつ機



図 2.7 ロックピース

2.5.2 トングレール

トングレールとは、分岐器内のレールのうち転換を行うために可動になっている部分である(図 2.8)。後端部が固定されており、先端部に 2.5.3 項以降で説明するスイッチアジャスタやフロントロッドが取り付けられている。後端部から先端部にかけて連続的に変化しているため、滑らかに基本レールと車輪の受け渡しを行うことが可能な形状になっている。転換時以外は、電気転てつ機が動作かんとスイッチアジャスタを介して、片側のトングレールを基本レールに押し付けることによって固定されている。



図 2.8 トングレール

2.5.3 スイッチアジャスタ

スイッチアジャスタとは、図 2.9 において左側からのびる動作かんと呼ばれる棒によって電気転てつ機からの動力をトングレールに伝達するという仕組みを持つ部品である。転換時以外には、片側のトングレールに密着力を加えて拘束し、その力の調整も行う。



図 2.9 スイッチアジャスタ

2.5.4 フロントロッド

フロントロッドとは、トングレール先端部に接続され、接続かんを介して位置情報を電気転てつ機に送るための部品である。電気転てつ機からの動力をトングレールへと伝達するスイッチアジャスタとは違い、フロントロッドがトングレールに合わせて動くことにより、

電気転てつ機内部で物理的に位置の照査を行うだけであり、動力は伝達しない。

接続かんの位置が適切でない場合、ロックピースが切り欠きにはまらず、転換完了と判断できないため信号が切り替わらない。接続かんの位置は接続されているフロントロッドの位置によって定まるため、フロントロッドは位置決めという点から重要である。

フロントロッドの両端部分は、トングレール先端部に締結されている肘金部と呼ばれる部分と接続されており、その接続要素に軸受が使用されている。また、フロントロッドと接続かんを接続する部分にも軸受が用いられている。

JR 東日本では、トングレールに締結されている肘金部とフロントロッド、もしくはフロントロッドと接続かんの接続部に使われている軸受が摩耗することで、フロントロッドの位置不備につながる可能性があると考えている。本研究で取り扱うデータは、近藤の先行研究 [1]の際に B821 型という型番のフロントロッド（図 2.10）に対して第 3 章で述べる測定を行ったデータである。肘金部との接続には球面すべり軸受が使用されている。

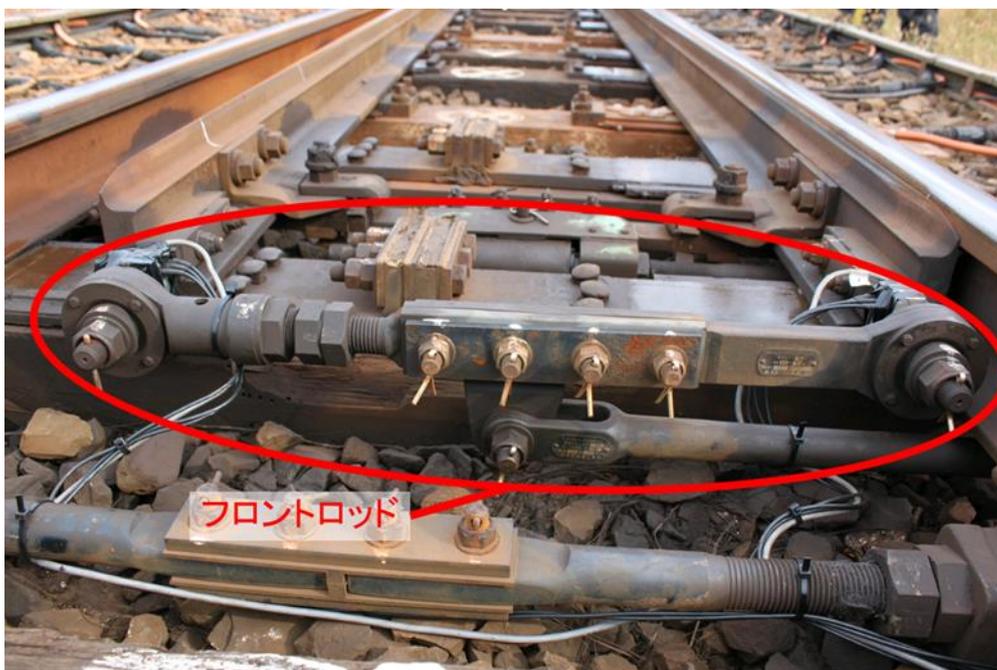


図 2.10 B821 型フロントロッド

2.6 考察

分岐器の仕組みや用語などを理解することで、実測データに対しての統計分析の結果を適切に評価できると考えられた。関節方式の分岐器ではトングレール後端部の継目で衝撃振動が発生し、その振動が肘金部やフロントロッドなどの各部品に伝達していくので、そのことを考慮に入れてデータの変換方法や統計分析手法を決める必要がある。

第3章 実測データとウェーブレット変換

3.1 緒言

分岐器は様々な部品から構成されているため、測定される波形には複数の周波数成分が含まれると考えられる。そこで、振動の周波数ごとの成分の時間変動を明らかにできる解析手法を用いるのが有用と考えられる。

本章では列車通過時の分岐器の振動波形データについて説明し、そのデータに対し、振動波形を時間 - 周波数解析の手法の 1 つであるウェーブレット変換を行い、その結果について考察する。

3.2 普通分岐器における実測波形データ [1] [5]

近藤の先行研究 [1]の際に、JR 東日本管内の営業線の複数の分岐器について、トングレー
ル後端部および肘金部の加速度、そして肘金部にかかる荷重の波形データの測定が JR 東日
本と吉原鉄道工業の協力のもと行われた。本研究では、その実測データを使用して波形の分
散の評価を行う。

3.2.1 測定条件

まず表 3.1 に測定が行われた分岐器の条件を示す。形状など基本的な条件は同一である
が、継目の段違い量に差が見られる。次に表 3.2 に測定分岐器の列車の通過条件を示す。列
車の種類は大きく分けて 3 種類である。進行方向はトングレールを叩く方向である背向の
ため、衝撃が大きくなると予想される条件である。

表 3.3 に波形の測定位置と測定箇所を、表 3.4 に測定に使用した機器を、図 3.1 に測定
機器を分岐器のどの部分に設置したかを示す。トングレール後端部とは衝撃振動が発生す
るトングレール後端部継目の付近、フロントロッド肘金部とはトングレールとフロントロ
ッドを接続させている部分のことを表している。また、測定機器のサンプリング周波数は
2000Hz で 1000Hz のローパスフィルタをかけている。

本論文では、図 3.1 での x 軸方向を軌間内外方向、y 軸方向を鉛直方向、z 軸方向を軌道
平行方向と呼ぶこととする。軌間内外方向では図 3.1 での右側を正、鉛直方向では図 3.1
での紙面の表から裏への方向を正、軌道平行方向では図 3.1 での上側を正とする。また、図
3.1 において左側にあるトングレールを左側トングレール、右側のトングレールを右側トン
グレールとする。

表 3.1 測定分岐器

分岐器番号	A 駅 A 号
分岐器種類	片開き 12 番普通
転換方式	関節方式
フロントロッド型番	B821
段違い量 [mm]	(ステップダウン) 3.5

表 3.2 列車通過条件

列車種別	貨物, 特急, 普通
進行方向	背向
分岐方向	定位

表 3.3 測定位置と測定箇所

測定位置	測定値 [単位]
トングレール後端部	鉛直方向加速度 [m/s ²]
	軌間内外方向加速度 [m/s ²]
	軌間平行方向加速度 [m/s ²]
フロントロッド肘金部	鉛直方向加速度 [m/s ²]
	軌間内外方向加速度 [m/s ²]
	軌間平行方向加速度 [m/s ²]
フロントロッド肘金部	フロントロッド軸力 [kN]

表 3.4 測定機器

測定波形	測定機器名
トングレール後端部	3軸型加速度変換器
フロントロッド肘金部	3軸型加速度変換器
フロントロッド軸力	汎用箔ひずみゲージ (歪から荷重を算出する)

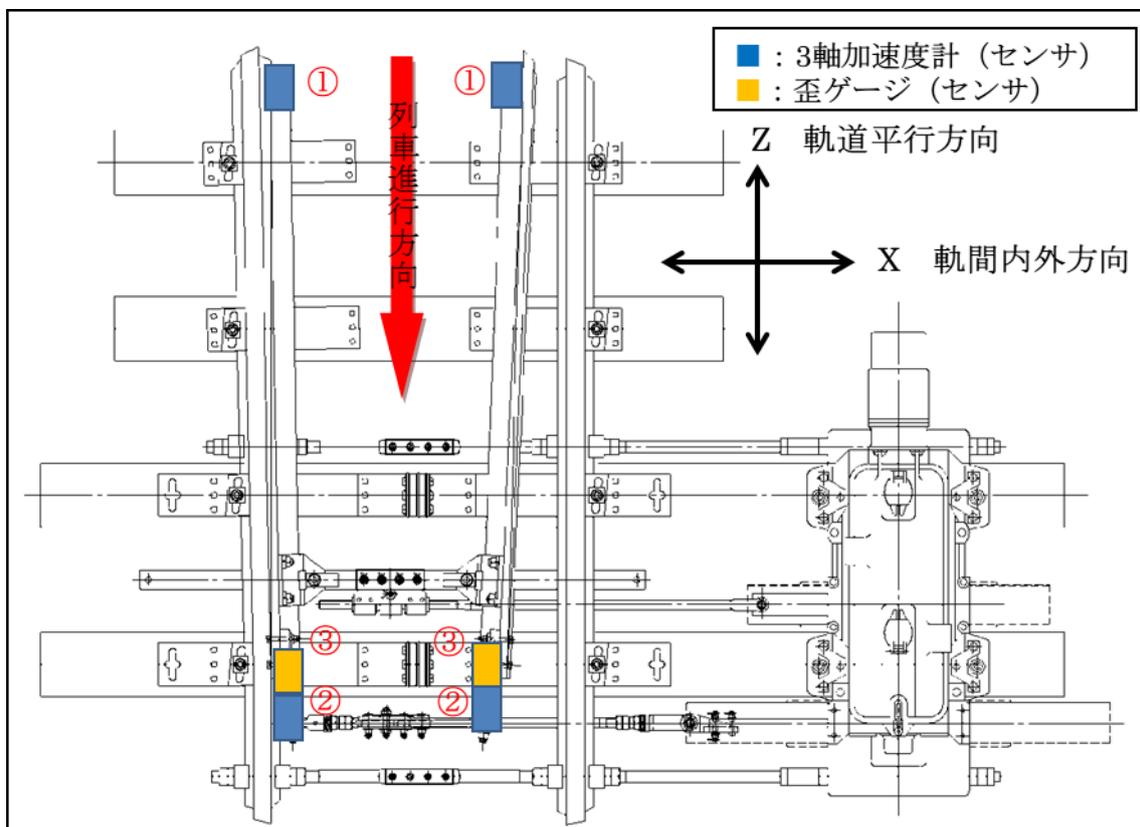


図 3.1 計測箇所 [3]

3.2.2 営業線振動波形データ

本研究では、近藤の先行研究 [1]において有限要素法モデルの妥当性確認に用いた A 号分岐器の左側トングレールの後端部鉛直方向加速度、肘金部鉛直方向加速度、フロントロッド軸力の各波形について解析を行う。そこで、測定された時刻歴のデータの一般的な波形傾向や、編成ごとの平均値などについて述べる。

3.2.2.1 一般的な波形傾向

表 3.5にA分岐器で波形が測定された列車についての緒言を示す。特急列車に関しては、2種類の形式の列車を測定したので、特急1、特急2と区別することとする。また、各車両には基本的には4本の車軸があるが、貨物列車の先頭車両の機関車のみ1両に6本の車軸が付いている。一般的な波形傾向を把握するにあたって、列車A、列車B、列車C、列車Eの各種別の列車の先頭車両の一番先頭の車軸が継目を通過した時の波形を比較することとする。また、測定された波形データの中で次の車軸までの時間間隔が一番短い、つまり測定された時間が一番短い波形データが約0.85秒の長さのため、全てのデータを0秒から0.08秒までに揃えて比較や解析を行う。

表 3.5 A分岐器の測定対象列車

編成	列車種別	総通過車両数	総通過車軸数
列車A	貨物	21	86
列車B	特急1	7	28
列車C	特急2	6	24
列車D	貨物	21	86
列車E	普通	4	16
列車F	特急1	7	28
列車G	普通	2	8
列車H	特急1	7	28
合計		75	304

まず後端部鉛直方向加速度の波形を図 3.2 に示す。列車種別ごとに振幅などが異なるが、どの種別でも継目通過により正方向にインパルス状の 700~800Hz ほどの高周波振動が 1 山生じ、その後すぐに減衰するという様子が見られる。

次に、肘金部鉛直方向加速度の波形を図 3.3 に示す。列車種別ごとに振幅などで違いが見られるが、トングレール後端部での振動が肘金部にも伝達するような形で 250Hz ほどの高周波の振動が観測された。

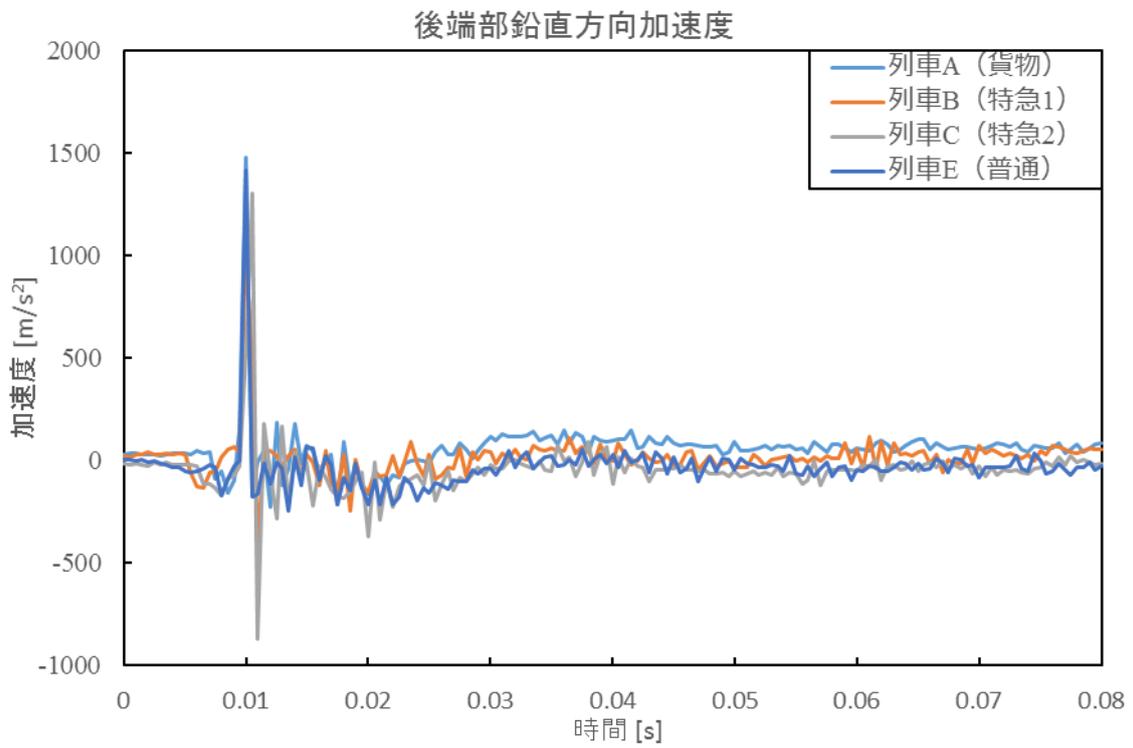


図 3.2 後端部鉛直方向加速度

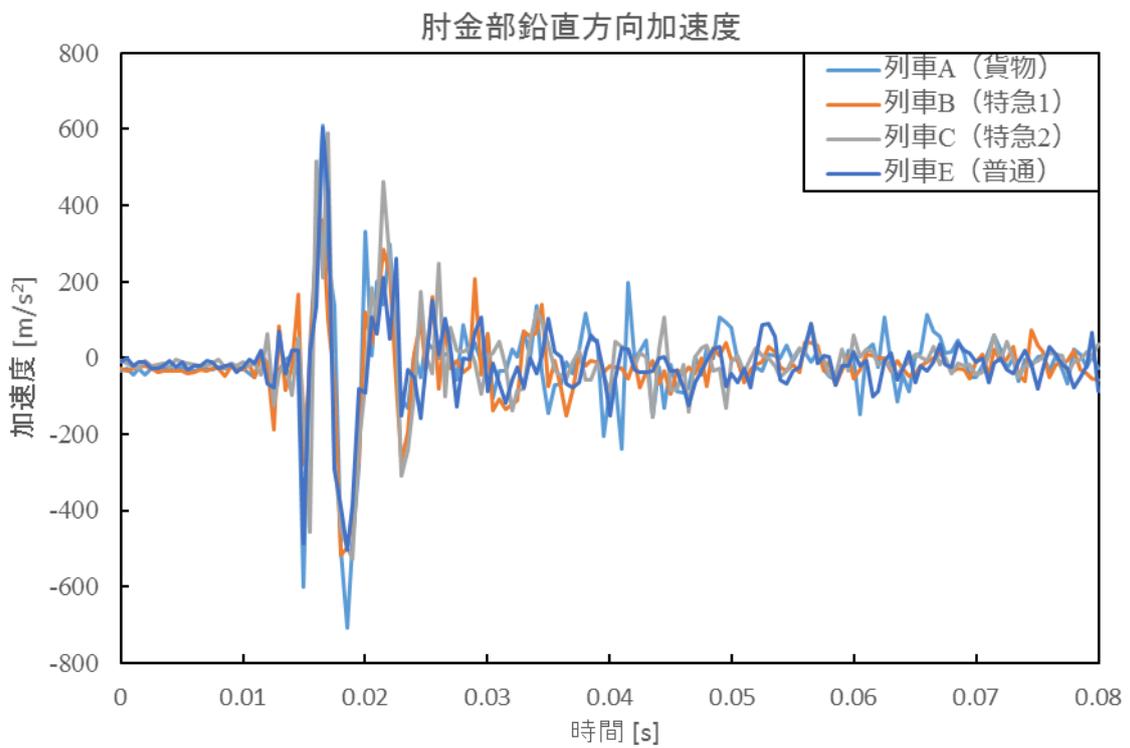


図 3.3 肘金部鉛直方向加速度

フロントロッド軸力の波形を図 3.4 に示す。列車種別ごとに振幅などが異なっているが、肘金部加速度と同様に後端部から振動が伝わることで 250Hz ほどの高周波振動が見られる。ただし、肘金部加速度とは違い振動がただちに減衰せず、低周波振動がしばらく継続することが特徴的である。

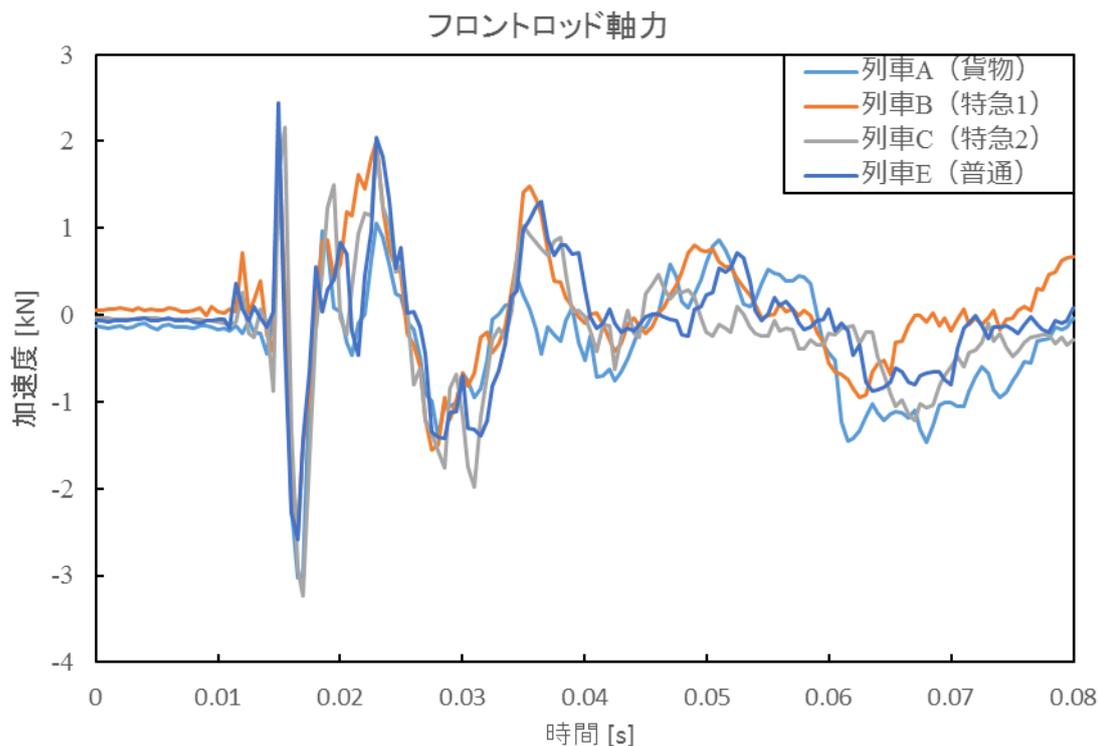


図 3.4 フロントロッド軸力

以下の項では、後端部鉛直方向加速度と肘金部鉛直方向加速度を、それぞれ後端部加速度と肘金部加速度と略して述べる。

3.2.2.2 前軸の影響を考慮した車軸の分類 [1]

一般的な鉄道車両には車両 1 両につき 2 個の台車が存在し、それぞれの台車に 2 本の車軸がついている。本論文では図 3.5 のように、進行方向前側から順に車軸の軸番号を定義する。次の車両に移った場合は連番にせず、1 軸目から始める。また、貨物列車の先頭車両である機関車は例外であり、1 両につき 3 個の台車があるため車軸が 6 本存在する。

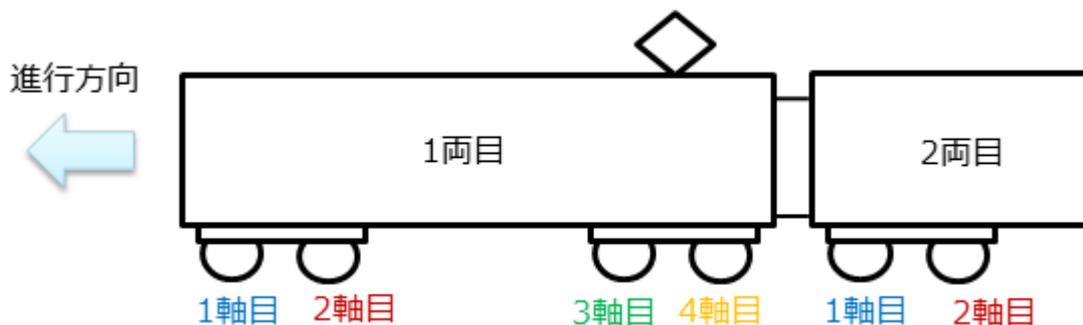


図 3.5 鉄道車両における車軸の位置 [1]

台車内の 2 本の車軸の間隔は約 2m である。波形測定を行った分岐器のトングレールの長さが約 7m であるため、2 軸目と 4 軸目は前の車軸の車輪がトングレールに乗っている状態でトングレール継目を通過することになる。また、図 3.5 に示すように一般に 2 両目以降の 1 軸目の車軸と前の車両の 4 軸目の車軸の間隔もトングレールの長さよりも短くなるため、同じような状態になる。車輪がトングレールに乗っていると拘束条件が変化するため、後端部やフロントロッド部の波形に影響を与えられられる。一方で、各車両の 3 軸目は前軸と距離があり、また 1 両目の 1 軸目は前に車軸が存在しないため前軸の影響は受けられないと考えられる。

そこで、本研究では車軸がトングレール上に乗っている影響を考慮して、先ほど定義した車軸の軸番号を説明変数として重回帰分析を行うこととする。ただし、各編成の先頭車両の 1 軸目は前軸の影響を受けないため 3 軸目に分類することとし、それに伴い先頭車両の 2 軸目を 4 軸目に分類することとする。

3.2.2.3 列車種別ごとの波形最大値統計量 [6]

先行研究 [1]では車軸番号ごとに波形の最大値をまとめ、平均値や分散を算出し、3 軸目の平均値と他の車軸の平均値との間に有意な差があるかどうかを検定で明らかにした。今回は、列車種別に対しても同様の処理を実施し列車種別ごとの平均値の間に有意な差があるかどうかを検定する。最大値の算出方法は、衝撃振動部の正方向と負方向の最大値の和、つまり最大振幅とする。列車種別ごとの後端部加速度、肘金部加速度、フロントロッド軸力の各種統計量を表 3.6 に示す。後端部加速度では特急 2 の平均値が他の平均値に比べ小さい値になった。肘金部加速度およびフロントロッド軸力では、特急 2 と普通の平均値が貨物と特急 1 の平均値に比べ高い値を示した。

表 3.6 列車種別ごとの最大値の各種統計量

列車種別		貨物	特急 1	特急 2	普通
後端部加速度	平均 [$\times 10^3 \text{ m/s}^2$]	1.667	1.479	1.661	1.622
	標準偏差 [$\times 10^3 \text{ m/s}^2$]	0.5231	0.2556	0.2958	0.2430
肘金部加速度	平均 [$\times 10^3 \text{ m/s}^2$]	0.6923	0.6487	0.8162	0.8419
	標準偏差 [$\times 10^3 \text{ m/s}^2$]	0.2672	0.2547	0.4214	0.2924
フロントロッド軸力	平均 [kN]	2.930	2.867	3.427	3.293
	標準偏差 [kN]	1.070	1.143	1.439	1.176

貨物と他の列車種別との間に平均値の有意な差があるかどうかの検定を行う。今回は波形の最大値をとった関係で、それぞれの平均値の大きさによって分散が異なる可能性があるため、母分散が異なる場合の 2 標本検定を行う。貨物の最大値の平均値を μ_1 、他の列車種別の最大値を μ_2 とすると、帰無仮説は

$$\mu_1 = \mu_2$$

となり、対立仮説は

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

である。今回は有意水準を 95% とし両側検定の t 検定を行った。その結果を表 3.7 に示す。 $|t| > t_{0.05}(v^*)$ である場合は帰無仮説が棄却され、貨物の平均値と他の列車種別の平均値の間には有意な差があると言えるが、表 3.7 よりその条件を満たしているのは、後端部加速度の貨物と特急 1 の間と、肘金部加速度の貨物と普通の間のみだった。そのため、列車種別に関しては最大値の平均値を用いて振動の大きさや分散の評価を行うのは適当でないと考えられる。

表 3.7 貨物と他の列車種別間の 2 標本検定

列車種別		特急 1	特急 2	普通
後端部加速度	t	3.856	0.082	0.701
	$t_{0.05}(v^*)$	1.969	1.973	1.973
肘金部加速度	t	1.259	1.374	2.327
	$t_{0.05}(v^*)$	1.969	1.973	1.973
フロントロッド軸力	t	0.423	1.597	1.405
	$t_{0.05}(v^*)$	1.969	1.973	1.973

3.2.2.4 階層的クラスター分析 [7]

階層的クラスター分析とは、多数の変数からなるデータ群を、データ間の類似・非類似にもとづいて対象のデータ群をグループ分けすることを目的とした手法である。対象間の類似度を計算し、類似度が一番高い対象同士を1つのクラスターに統合する。次に、統合したクラスターを1つの対象とみなした上で再び類似度を計算し、類似度が一番高い対象同士を1つのクラスターに統合する。同じ作業を繰り返していき、1個の群に統合されたら分析終了となる。

階層的クラスター分析では図 3.6 のようなデンドログラムが結果として出力される。図 3.6 において下部の方で結合している対象ほど対象間の類似度が高いことを表す。

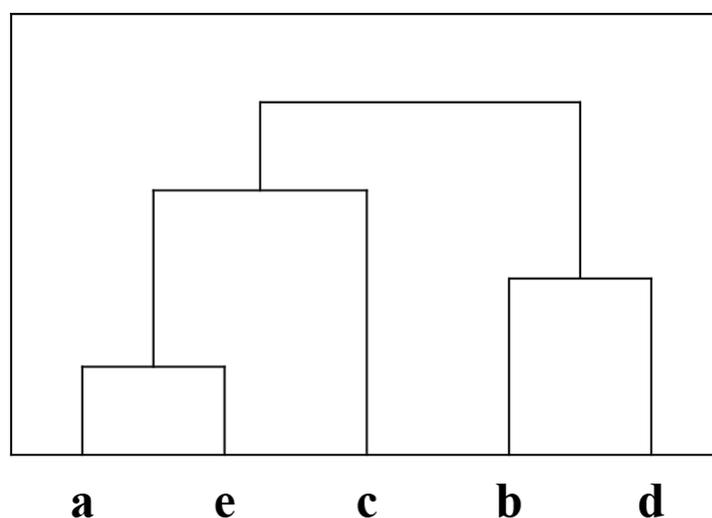


図 3.6 デンドログラム (樹形図)

図 3.7 に貨物列車の先頭車両の車軸のデータ 12 個を除いた 292 個の後端部加速度の実測波形データに対して階層的クラスター分析を行った結果とそれぞれのデータがどの編成のデータなのかを示す。解析ソフトは JMP Pro 13 を使用し、手法は Ward 法を用いた。

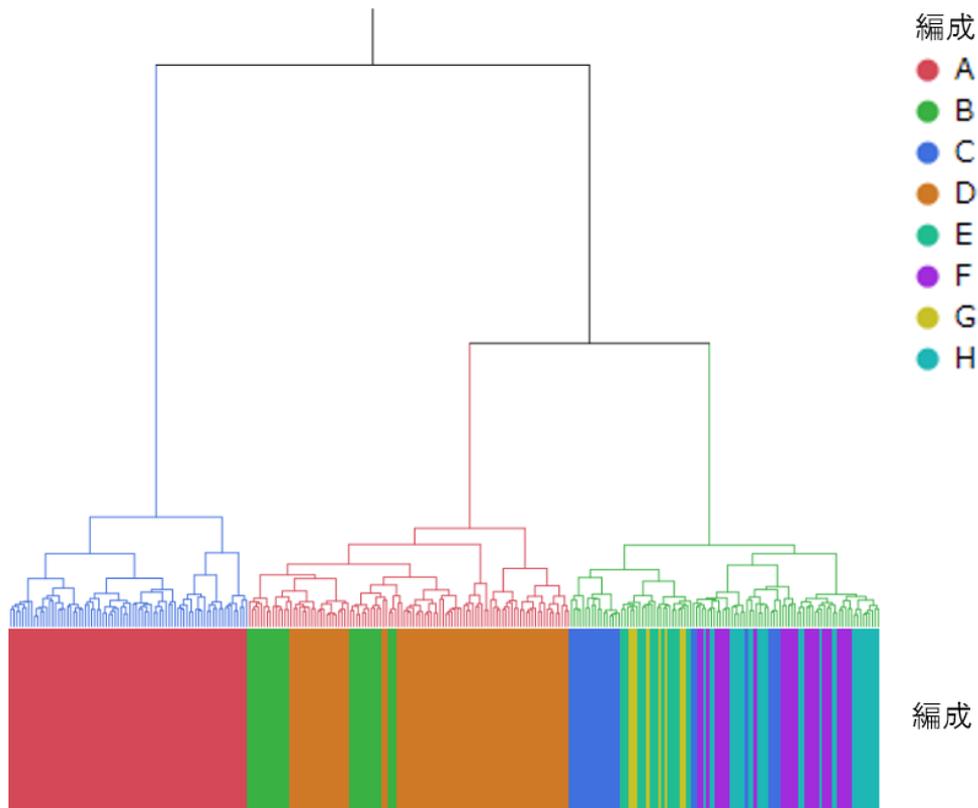


図 3.7 階層的クラスター分析（後端部加速度）

3 つのクラスターに分割した場合に着目する．図 3.7 において一番左側のクラスターをクラスター1（デンドログラムが青色の部分）、中央のクラスターをクラスター2（デンドログラムが赤色の部分）、一番右側のクラスターをクラスター3（デンドログラムが緑色の部分）と呼ぶと、表 3.8 のように列車 A のデータは全てクラスター1、列車 B は全てクラスター2、というようにある編成に含まれるデータは全て同じクラスターに含まれる結果となった．同じ列車種別・車両形式の列車 B と列車 F が違うクラスターに含まれるので、編成の違いが波形データに何らかの影響を与え、このようなクラスター分析の結果につながったと考えられる．

表 3.8 クラスターとそこに含まれる編成

クラスター	クラスターに含まれる編成
クラスター1	列車 A
クラスター2	列車 B, 列車 D
クラスター3	列車 C, 列車 E, 列車 F, 列車 G, 列車 H

また、3 個のクラスターに分けられた実測波形データについて、それぞれの時刻について

て、平均に比べて比較的大きな値をとるものを赤、平均に比べて比較的小さな値をとるものを青に着色したものを図 3.8 に示す。クラスター1 のデータは全体的に赤く、クラスター3 の結果は全体的に青くなっていることがわかる。

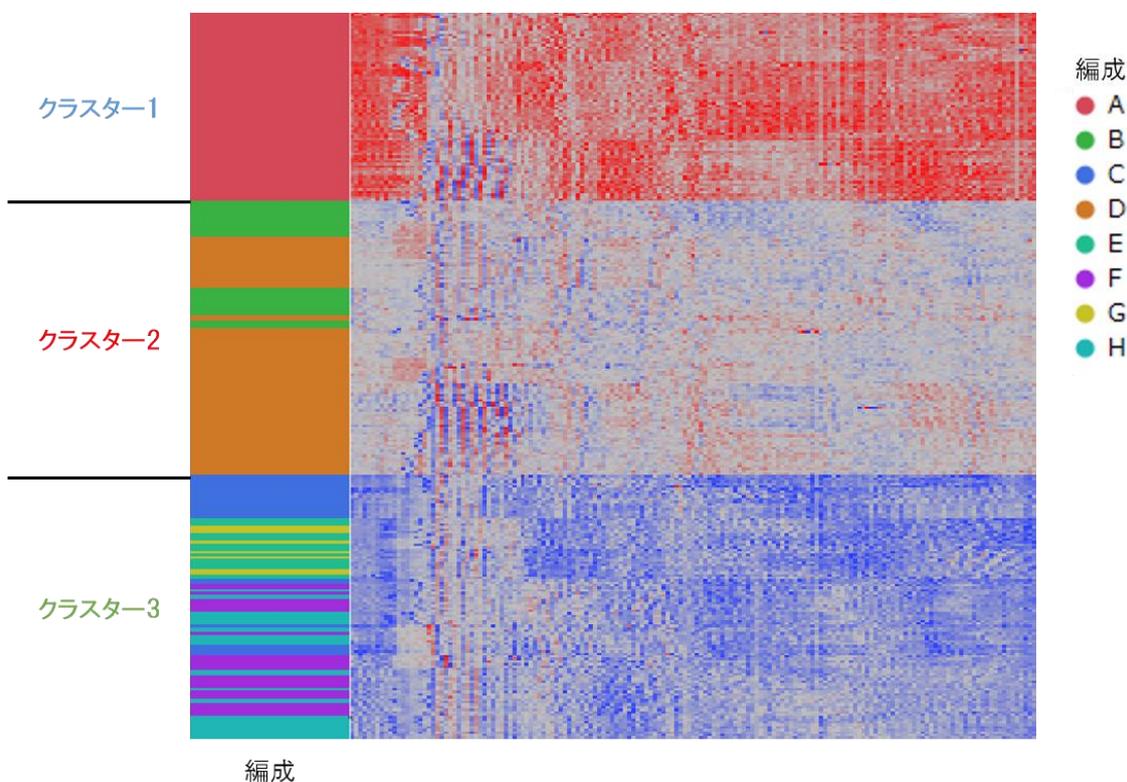


図 3.8 クラスターごとの波形データ

3.2.2.5 編成ごとの平均値の比較

後端部加速度の波形データに対して編成ごとに平均値をとったものを図 3.9 に示す。振動が発生する前の 0 秒付近や、振動が減衰してほとんど収まったと考えられる 0.06 秒以降においても編成ごとに加速度の値の違いが見られる。3.2.2.4 項の結果と図 3.9 を考慮すると、加速度センサに編成ごとに異なるドリフトが生じて、編成ごとの平均値に違いを与えている可能性が高い。

また、肘金部加速度とフロントロッド軸力の波形データに対して編成ごとに平均値をとったものを図 3.11 と図 3.13 にそれぞれ示す。後端部加速度よりは程度が小さいが、振動が発生する前の平均値に編成ごとの違いが同じく確認できる。そこで、各測定箇所の波形データに対して、編成ごとにドリフト補正を行い、そのデータに対して解析を行うこととする。ドリフト補正の値については、振動が発生する前または振動が減衰してほとんど収まった後の時間帯のデータごとの平均値に対し、更に編成ごとの平均値をとったものを使用する

こととする。後端部加速度と肘金部加速度については振動が減衰するのが速いので、0.07 秒から 0.08 秒まで測定された各時間のデータごとの加速度の平均値の、編成ごとの平均値を用いる。フロントロッド軸力については振動が減衰するのに時間がかかるため、振動が発生する前の 0 秒からの 0.01 秒までのデータごとの荷重の平均値の、編成ごとの平均値を用いる。表 3.9 に各波形について編成ごとのドリフト補正に使用した値を示す。また、ドリフト補正を行った後の各測定箇所の編成ごとの平均値を図 3.10, 図 3.12, 図 3.14 に示す。

以後、本研究ではウェーブレット変換に使用する後端部加速度、肘金部加速度、フロントロッド軸力の波形データに対して、編成ごとにドリフト補正を行い、そのデータに対して解析を行うこととする。

表 3.9 編成ごとのドリフト補正の値

編成	後端部加速度 [m/s ²]	肘金部加速度 [m/s ²]	フロントロッド軸力 [kN]
列車 A	125.2053	28.3675	-0.1338
列車 B	50.3289	-14.6581	0.03623
列車 C	-2.5544	-2.2885	-0.1334
列車 D	53.4192	-38.9424	-0.0163
列車 E	-4.8502	-20.7662	-0.0328
列車 F	8.6924	1.8024	-0.1397
列車 G	-4.8342	-14.6828	-0.1159
列車 H	5.9076	-2.3449	-0.0184

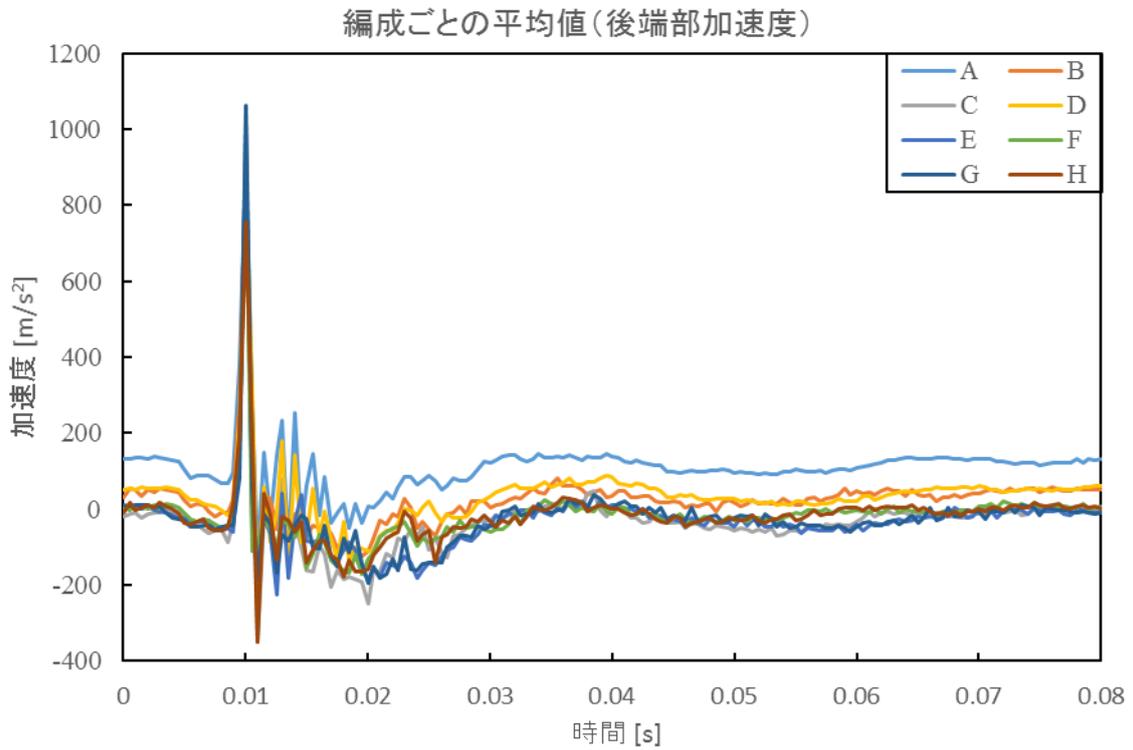


図 3.9 編成ごとの平均値 (後端部加速度)

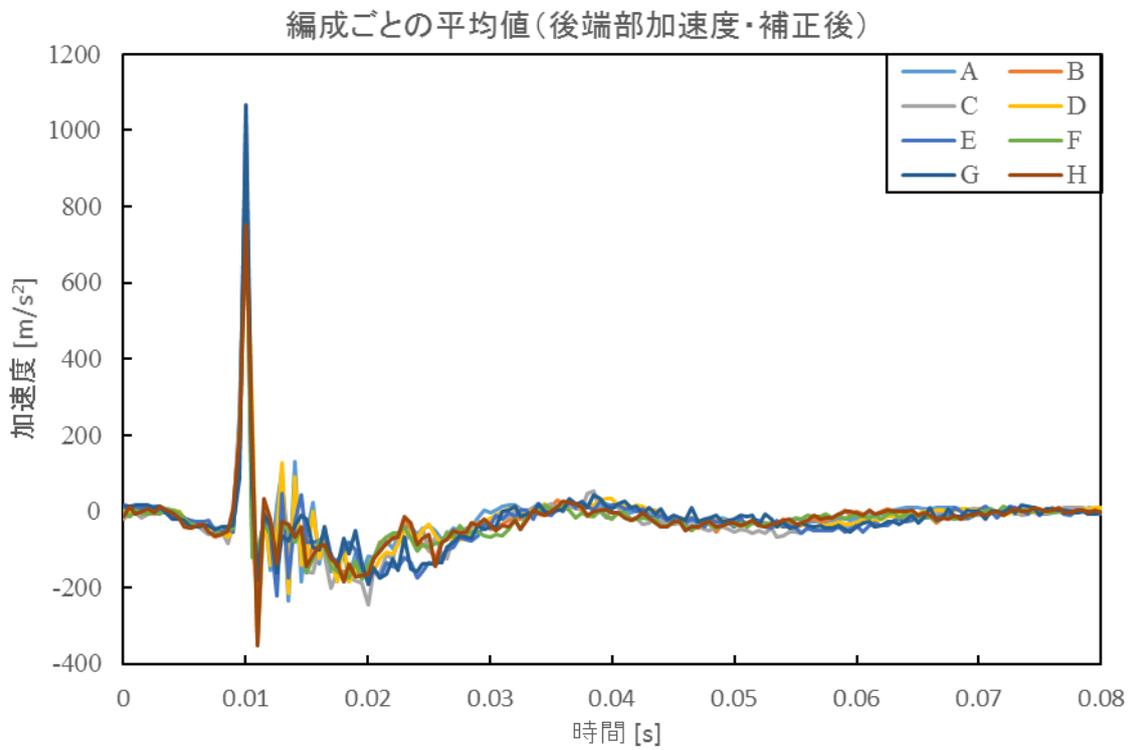


図 3.10 編成ごとの平均値 (後端部加速度・補正後)

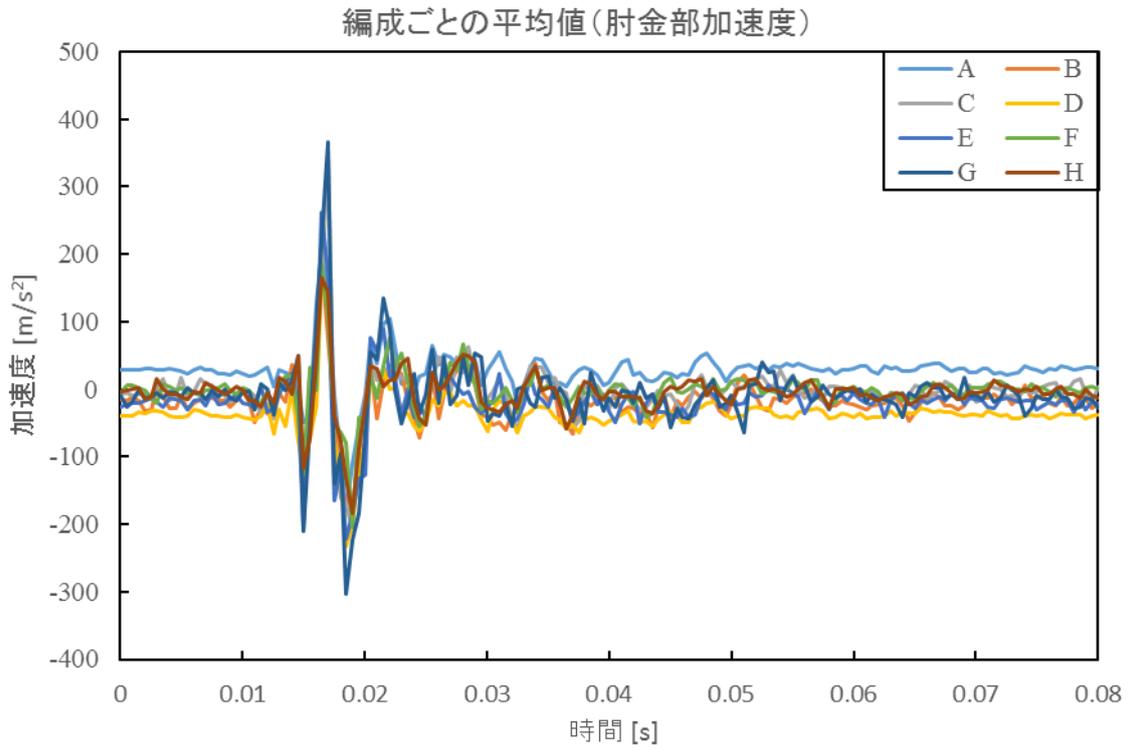


図 3.11 編成ごとの平均値 (肘金部加速度)

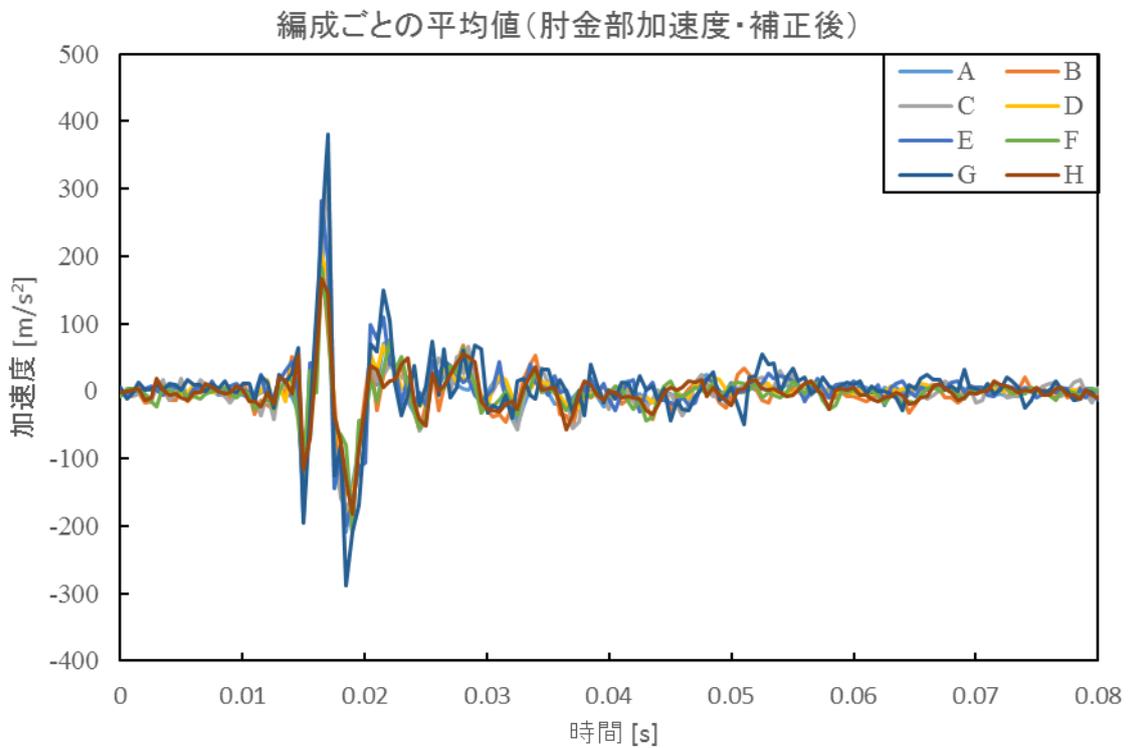


図 3.12 編成ごとの平均値 (肘金部加速度・補正後)

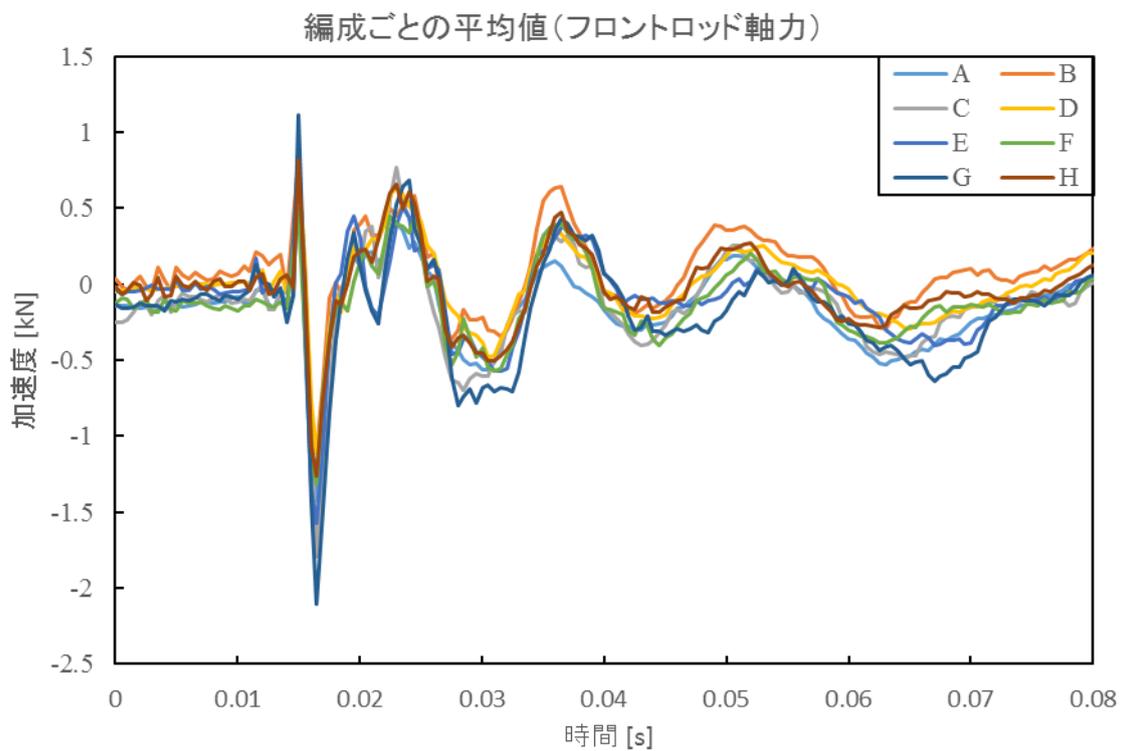


図 3.13 編成ごとの平均値 (フロントロッド軸力)

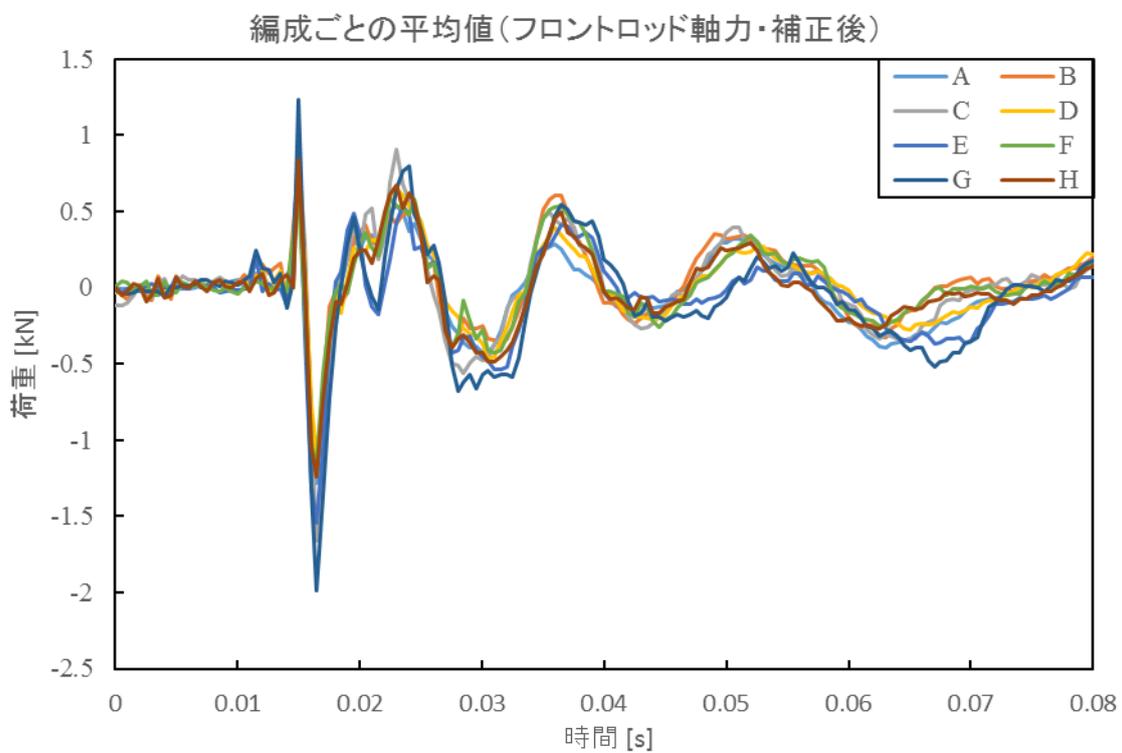


図 3.14 編成ごとの平均値 (フロントロッド軸力・補正後)

3.3 時間 - 周波数解析 [8]

分岐器は材質や形状などが異なる様々な部品から構成されており，加速度センサや歪ゲージなどで測定される波形には複数の周波数成分が含まれる可能性が高い．そのため，実測された振動波形に対して，信号が時系列的にどのような周波数変動を示すかを明らかにできる時間 - 周波数解析を用いることが効果的と考えられる．

本研究では，ウェーブレット変換という手法を用いることとする．他にも時間 - 周波数解析には，短時間フーリエ変換，ウィグナー分布などの手法が存在する．そこで，振動波形に対してどの手法を用いるのが最適であるか，これらの手法について比較した．

3.3.1 短時間フーリエ変換

短時間フーリエ変換（STFT：short time Fourier transform）とは，信号を一定時間幅ごとに切り出し，それぞれに対してフーリエ変換を行うことで，時間と周波数変動の関係を明らかにする手法である．

短時間フーリエ変換は，時間 - 周波数解析の手法の中ではもっとも単純で扱いやすい手法である．一方で，時間分解能と周波数分解能の間にトレードオフの関係があり，図 3.15 (a) のように時間分解能を改善するために時間幅を小さくすると，時間幅あたりの信号のサンプル数が減少するために周波数分解能が低下し，逆に図 3.15 (b) のように周波数分解能を改善するために時間幅あたりのサンプル数を増やすと，時間幅が大きくなるために時間分解能が低下してしまうことになる．

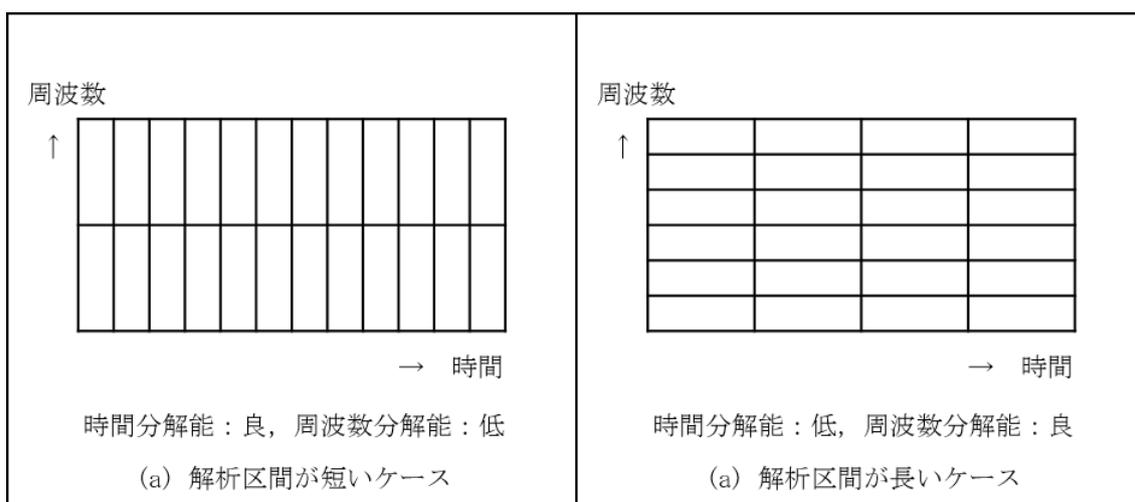


図 3.15 短時間フーリエ変換の分解能

3.3.2 ウィグナー分布

ウィグナー分布 (Wigner distribution) とは、自己相関関数とパワースペクトルの関係性を表すウィナー-ヒンチンの定理を利用した手法であり、(3.1) 式のように定義される。

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} g\left(t + \frac{\tau}{2}\right) g^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.1)$$

ウィグナー分布は信号の時間変動や周波数変動を捉えるうえで有効な指標である。一方で、信号が2つの周波数成分を含むような場合には、2つの中間の周波数の位置にスペクトル成分を生成する性質がある点を配慮する必要がある。

3.3.3 ウェーブレット変換

ウェーブレット変換 (wavelet transform) とは、図 3.16 に示すような振動しながら減衰するウェーブレット関数と呼ばれる関数を窓関数として適用する手法である。

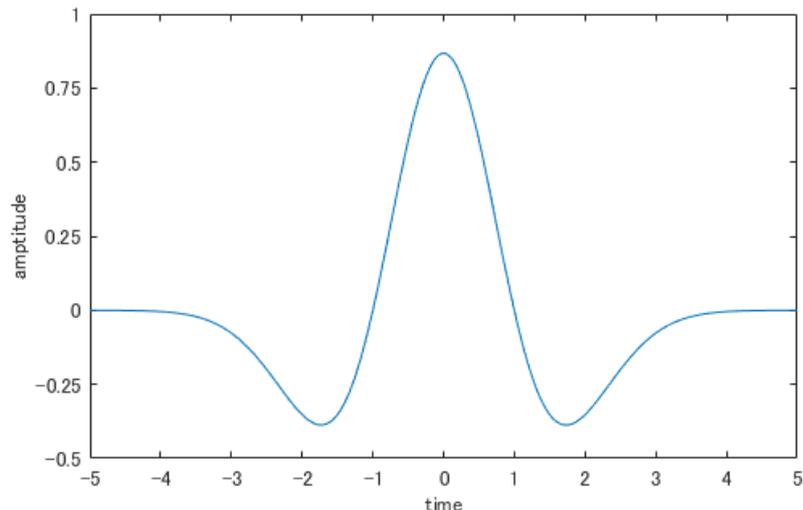


図 3.16 ウェーブレット関数の例 (メキシカンハット関数)

ウェーブレット変換では、ウェーブレット関数を時間方向に拡大縮小や平行移動させて変換を行うので、図 3.17 のように高周波成分では時間分解能が上がり、逆に低周波成分では周波数分解能が上がる。したがって、変動が緩やかな低周波成分に対しては長い解析区間で、変動が速い高周波成分に対しては短い解析区間で処理できるため、非定常的あるいは過渡的な変動特性を捉えるのに効果的な手法である。

ウェーブレット変換は大きく分けて連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換の 2 つに分けられる。連続ウェーブレット変換とは、連続量を取り扱う連続ウェーブレット関数を用いるもので、時間 - 周波数解析に有効な手法である。一方で、離散ウェーブレット変換とは、連続ウェーブレット関数を 2 進分割した離散ウェーブレット関数を用いる手法である。対象信号を高周波成分と低周波成分に分解することから、多重解像度解析とも呼ばれ、主に信号や画像の分離や圧縮処理などに利用されている。

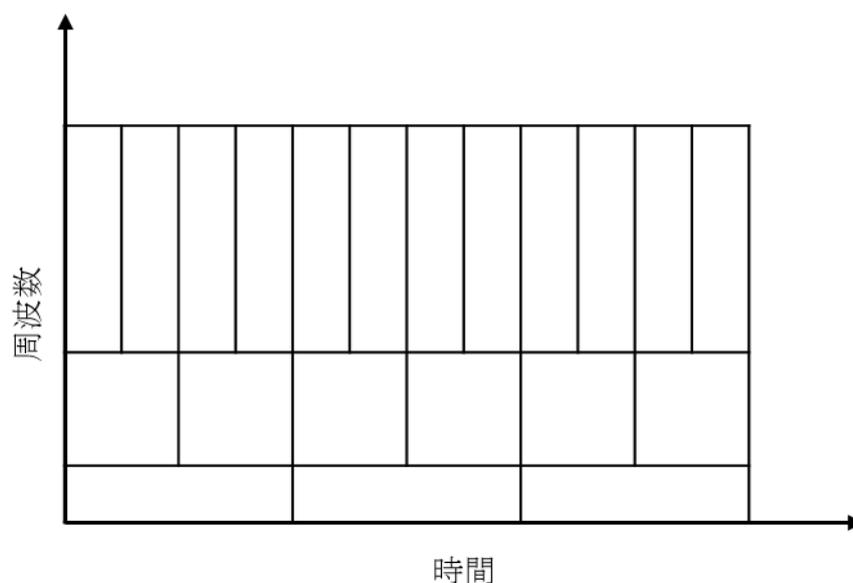


図 3.17 ウェーブレット変換の時間および周波数分解能

3.3.4 考察

短時間フーリエ変換はもっとも単純で扱いやすい時間 - 周波数解析の手法であるが、高周波成分と低周波成分で同じ時間および周波数分解能になってしまうという問題点がある。ウィグナー分布は時間変動や周波数変動を把握するうえで有用だが、元の信号が複数の周波数成分を含むような場合には、元の信号には含まれない周波数の位置にもスペクトル成分が生成してしまい、どのスペクトルが元の信号の成分なのかを判別するのが難しくなるという問題点が存在する。

以上のことを考慮すると、分岐器振動を解析するにあたっては、ウェーブレット変換を用いるのが一番効果的と考えることができる。また、時間 - 周波数解析なので連続ウェーブレット変換を適用するのが妥当と考えられる。

3.4 ウェーブレット変換の変換方法

本研究では MATLAB を使用して連続ウェーブレット変換を行った。MATLAB で連続ウェーブレット変換を行う際には、窓関数となるウェーブレット関数の種類や計算する周波数の値などの変換条件などを設定する必要がある。そこで、本研究で使用した変換条件について述べる。

また、実測したデータのデータ数の関係で、変換したデータに対して第 4 章で述べる多変量解析を行うためには変換したデータの変数の縮約を行う必要がある。そこで、本研究で用いた縮約方法についても述べる。

3.4.1 変換条件

第 3 章および第 4 章では、実測波形データに対して 3 種類の変換方法でウェーブレット変換を行い、各条件を比較することとする。表 3.10 に 3 種類の変換条件を示す。変換に使用したソフトは MATLAB 2016b である。周波数刻み幅については 3.4.2 項、ウェーブレット関数については 3.4.3 項、時間方向の変数の縮約については 3.4.4 項で述べる。時間方向の変数の数が一番多いのは条件 1、周波数方向の変数の数が一番多いのは条件 3 である。

また、貨物列車の先頭の機関車のみ 1 両に 6 本の車軸があり、それ以外の 1 両に 4 本の車軸がある車両とは異なる振動特性を持つ可能性がある上に、1 両に 6 本の車軸のある車両が測定対象の中では 2 両しか存在せずデータ数的に統計的に信頼できる結果を得るのが困難なため、貨物列車の先頭車両以外の 292 本の車軸を変換対象とする。

表 3.10 ウェーブレット変換条件

番号	周波数刻み幅	ウェーブレット関数	時間方向の変数の縮約	変数
条件 1	2 倍の周波数ごと 25Hz~800Hz (6 個)	gaus8	時間方向の変数 10 個 ごとに最大値をとる	96 個
条件 2	$2^{\frac{1}{3}}$ 倍の周波数ごと 25Hz~800Hz (16 個)	gaus8	時間方向の変数 20 個 ごとに最大値をとる	128 個
条件 3	$2^{\frac{1}{5}}$ 倍の周波数ごと 25Hz~800Hz (26 個)	gaus8	時間方向の変数 20 個 ごとに最大値をとる	208 個

3.4.2 周波数

3.3.3 節で述べたように、ウェーブレット変換では低周波領域では周波数分解能が良く、高周波領域では逆に低くなる。そのため、低周波領域では細かい周波数刻みでスケールファクタを計算し、高周波領域では粗い周波数刻みでスケールファクタを計算した方が、より少ない変数で効率よくウェーブレット変換の情報を表現できると考えられる。そこで、本研究では $2^{\frac{1}{n}}$ 倍になる周波数ごとにスケールファクタを計算することとした。本研究では $n = 1, 3, 5$ の場合について計算し、それぞれの結果を比較することとする。

また、近藤の先行研究 [1]により、列車が対象分岐器のトンダレール後端部継目を通る際に、トンダレール後端部に設置された加速度センサで 700~800Hz ほどのインパルス状の高周波振動が、トンダレール肘金部に設置された歪ゲージで 80Hz ほどの低周波振動が、それぞれ観測されたことが分かっている。そこで、今回は 800~25Hz の範囲の周波数で計算することとする

3.4.3 ウェーブレット関数

ウェーブレット関数の 1 つにメキシカンハット関数というものがある。メキシカンハット関数はガウスの確率密度関数を 2 回微分した関数であり、時間と周波数の両方で良い局在性を有している [9]。また、メキシカンハット関数と同じようにガウスの確率密度関数の導関数として定義されるガウシアンウェーブレット (Gaussian wavelets) という関数があり、本研究ではこの関数を使用する。MATLAB ではガウス関数を微分する回数に応じて 1 から 8 までの次数のガウシアンウェーブレットが存在し、2 次のガウシアンウェーブレットはメキシカンハット関数と同じ関数である。 p 次のガウシアンウェーブレット $f_p(x)$ は (3.2) 式のように定義される。

$$f_p(x) = C_p \frac{d^p}{dx^p} (e^{-x^2}) \quad (3.2)$$

また (3.2) 式での係数 C_p は (3.3) 式を満たすように定義される。

$$\|f_p(x)\|^2 = 1 \quad (3.3)$$

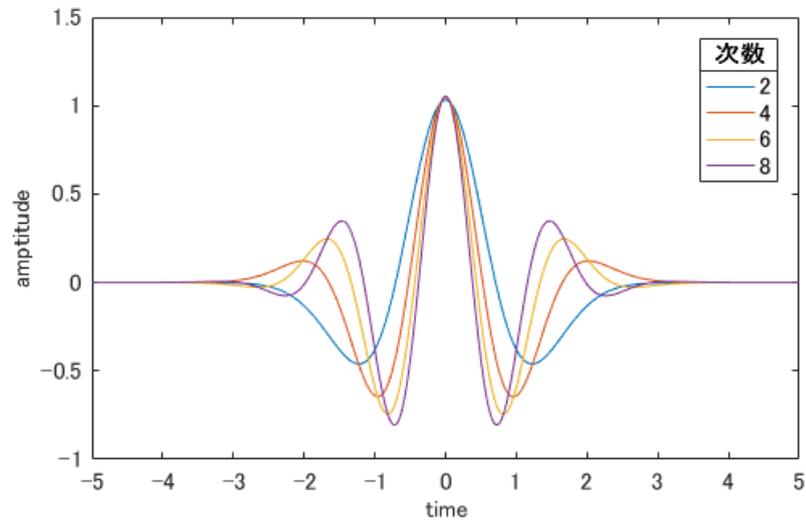


図 3.18 ガウシアンウェーブレット

ここで、どの次数のガウシアンウェーブレットを使用するか比較検討する。ガウシアンウェーブレットは、次数が奇数の場合は左右非対称、次数が偶数の場合は左右対称になる性質がある。左右非対称の場合だと変換したデータの解釈が複雑になるので、偶数の 2, 4, 6, 8 の次数で比較する。各次数の場合のウェーブレット関数を図 3.18 に示す。

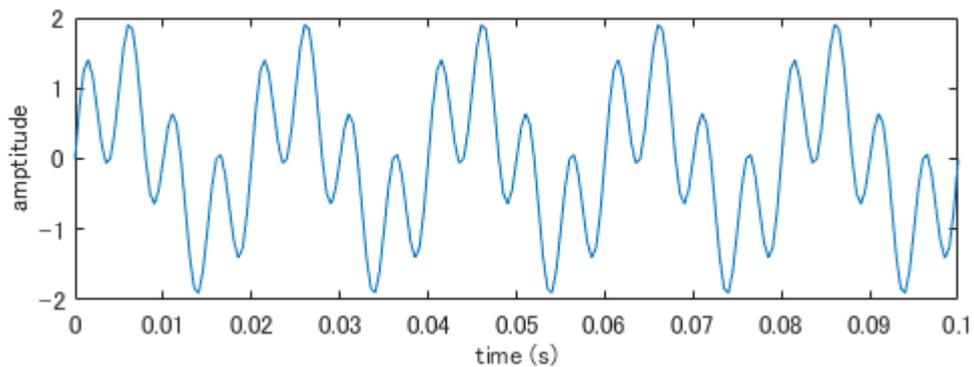


図 3.19 200Hz と 50Hz の合成波

比較のために今回は例として、図 3.19 のような振幅 1 の 200Hz と 50Hz の正弦波を合成した信号に対してウェーブレット変換を行った。

ウェーブレット変換の結果を図 3.20 に示す。次数が大きいほど周波数の局在性が良くなる傾向があり、次数が 8 のガウシアンウェーブレットで変換した場合が一番周波数傾向が良くなった。そこで、本研究では次数 8 のガウシアンウェーブレットを用いることにする。

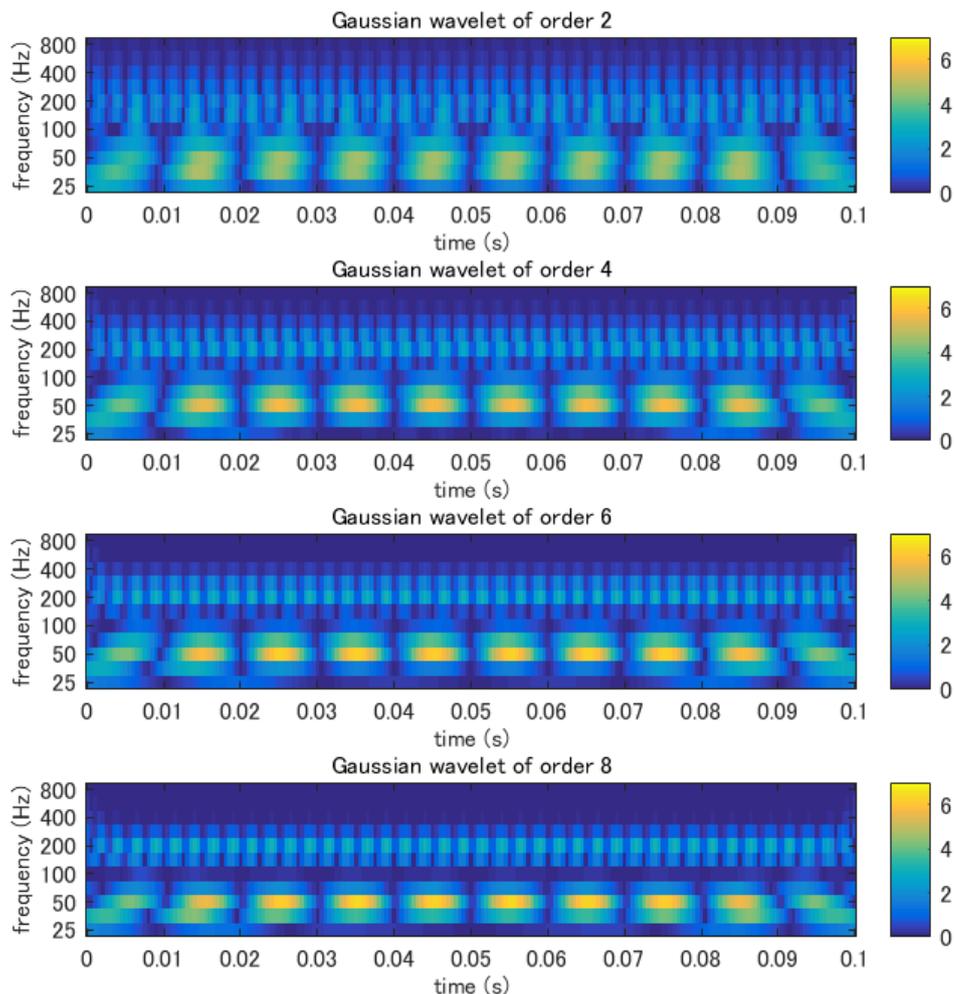


図 3.20 200Hz と 50Hz の合成波のウェーブレット変換

3.4.4 変換データの縮約 [7]

第 4 章で行う主成分分析は、データ数より変数の数が多い場合でも適用できる分析手法ではあるが、変数の数に比べてデータ数が多いほど信頼できる分析結果になるので、変換データの変数を減らしたほうが信頼できる結果を得られると考えられる。MATLABで行う連続ウェーブレット変換では、スケールの刻み幅を自由に決めることはできるが、時間方向の変数の数は変換前のデータのサンプル数で決まる。そこで、時間方向に変換データの変数を縮約したい場合には、時間方向の何個かの変数ごとに平均値や最大値、最小値などを求めるなどして 1 つの変数にまとめるなどの方法が考えられる。本研究では、各時間と各周波数でどのくらいの振幅で振動するのかを解明することが目的のため、平均値と最大値をとった場合を比較する。

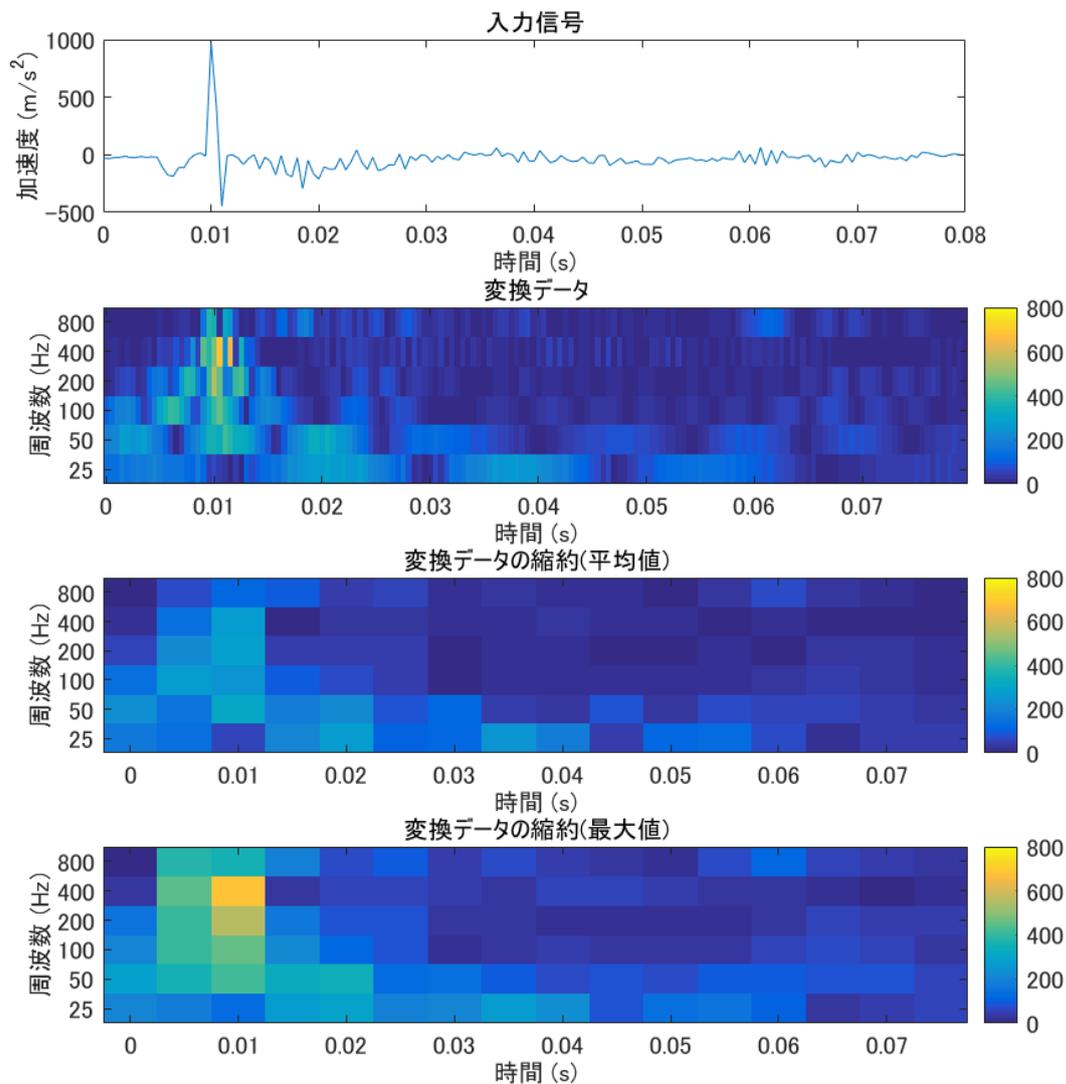


図 3.21 変換データの時間方向の縮約

列車 B の 1 両目の 1 番先頭の車軸が通過した際の後端部加速度の波形データにウェーブレット変換を行い、変換したデータを時間方向に 10 個ずつ絶対値の平均値と最大値をとって時間方向の変数の数を少なくしたものを図 3.21 に示す。平均値や最大値をとる前のデータでは 0.01 秒付近の 400Hz の成分が特に大きくなっているが、平均値をとったデータでは高周波成分がならされて 0.01 秒付近の 50Hz や 200Hz の成分と同じような値の成分になっている。一方で、最大値をとったデータでは元のデータと同じように 0.01 秒付近の 400Hz の成分が特に大きくなっている。本研究では、どの時間にどの周波数の振動が大きいかどうか解明することが目的のため、高周波成分がならされて小さくなる平均値ではなく、時間方向の何個かの変数ごとに最大値をとったデータを用いることとする。

3.5 ウェーブレット変換結果

ウェーブレット変換した各データの平均値や標準偏差などを計算した結果を述べる.

3.5.1 後端部加速度

後端部加速度の各条件での変換結果の平均を図 3.22 に示す. どの条件においても 0.01 秒の高周波の成分が大きくなっている. また, どの条件の場合も高周波成分は減衰が速く, 低周波成分は減衰が遅い様子が確認できる.

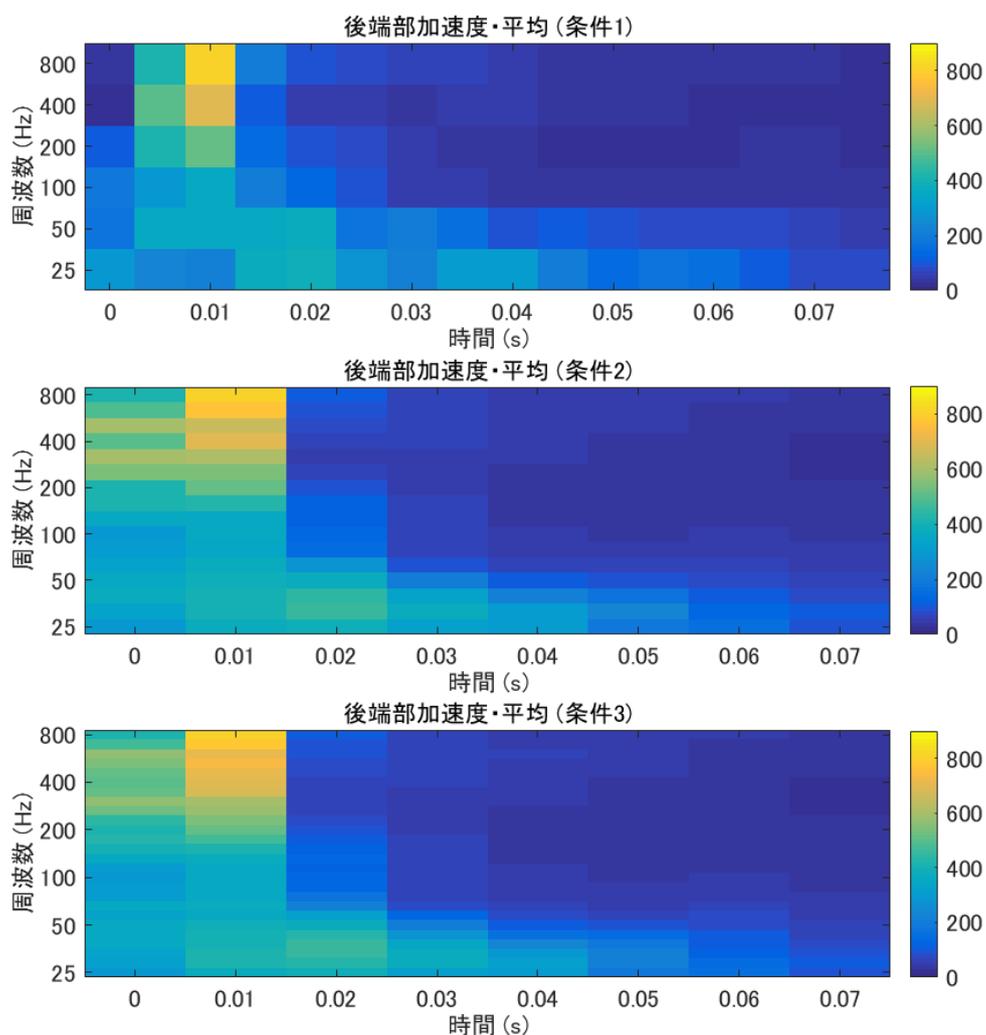


図 3.22 後端部加速度・平均

次に、後端部加速度の各条件での変換結果の標準偏差を図 3.23 に示す。平均と同じく、どの条件においても 0.01 秒の高周波の成分が大きくなっている。また、時間経過による各周波数の成分の変化も平均の場合と同じような傾向が見られる。

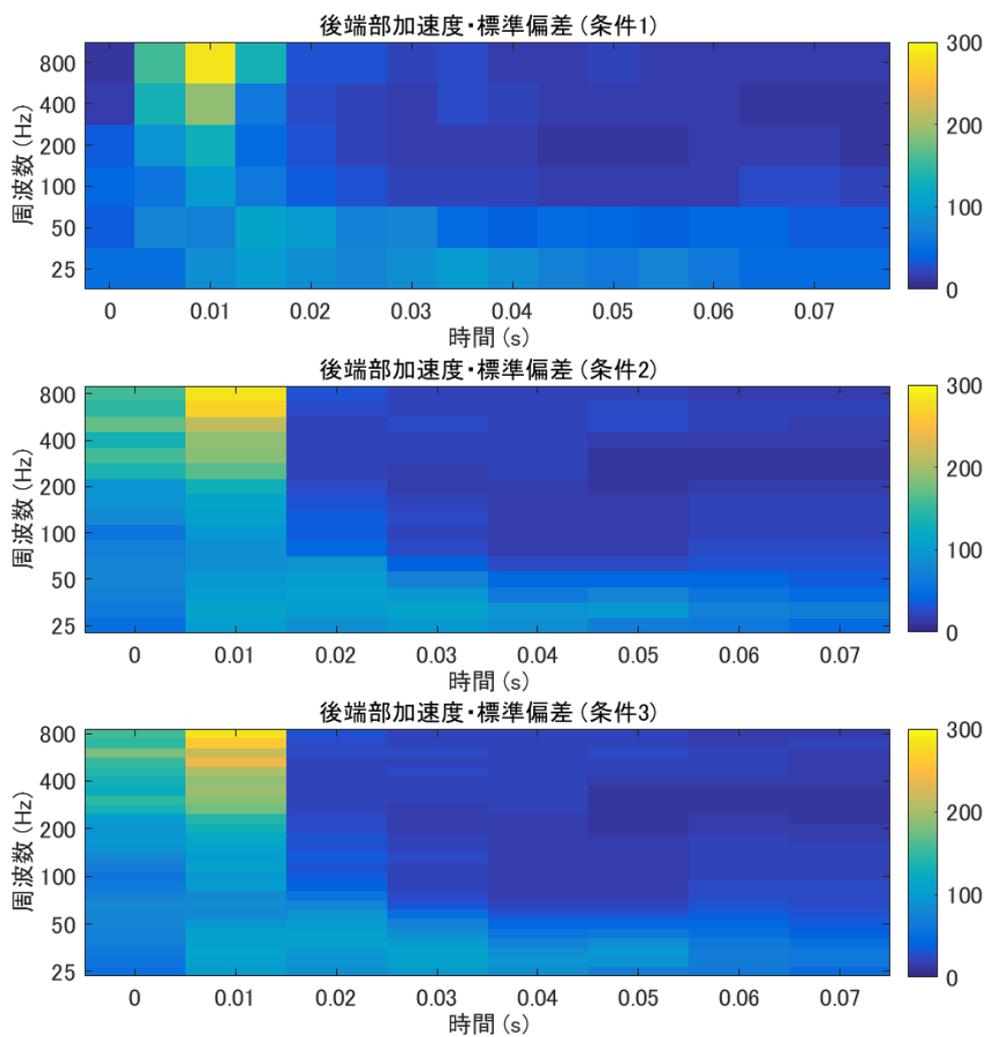


図 3.23 後端部加速度・標準偏差

後端部加速度の各条件での変換結果の変動係数を図 3.24 に示す. 条件 1 の場合のみ 0 秒から 0.02 秒の間の高周波成分に大きい変動係数が見られる箇所があるが, どの条件においても時間が経過するにつれて変動係数が大きくなる傾向にある.

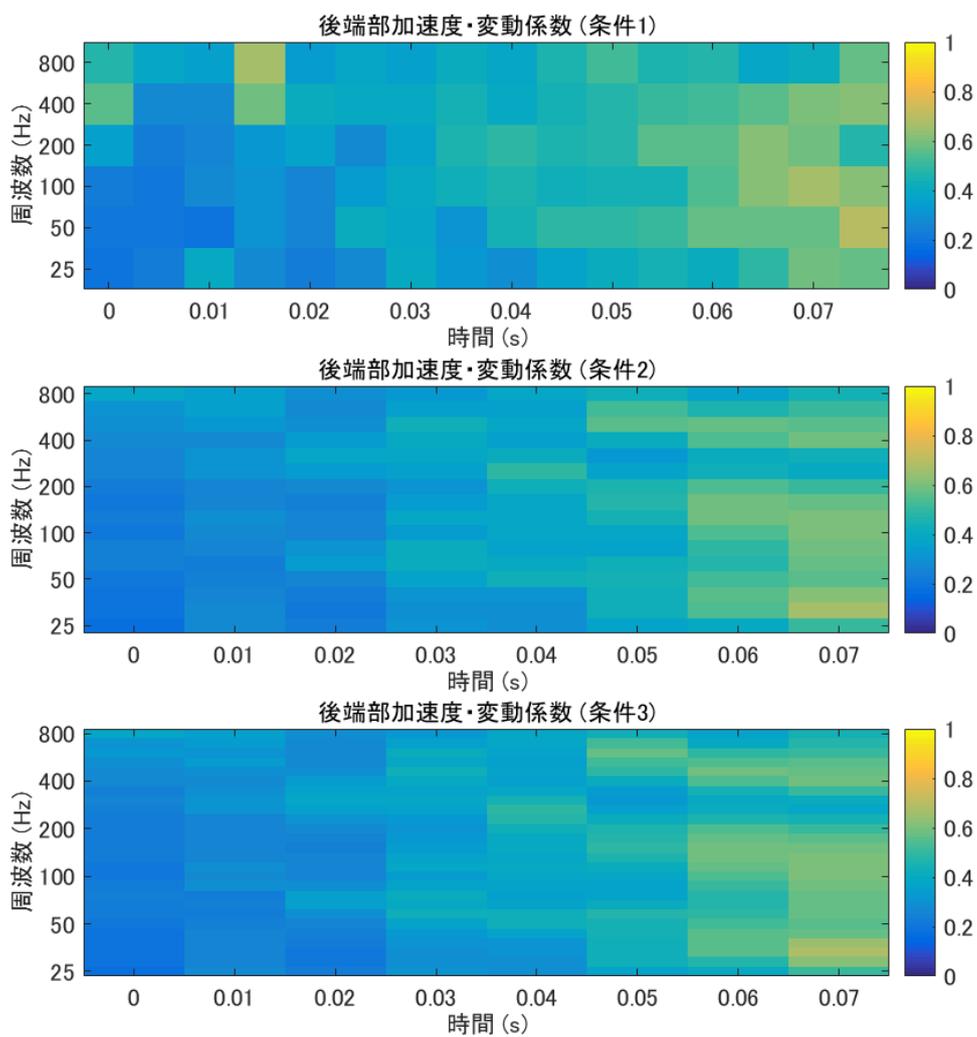


図 3.24 後端部加速度・変動係数

条件 3 の 800Hz の各時間の成分について、平均および平均に標準偏差を加えたものと差をとったものを図 3.25 に示す。時間が経過するとともに標準偏差が減少していくが、それ以上の割合で平均が減少しており、そのために図 3.24 において時間が経過するにつれて変動係数が大きくなる傾向が現れたと考えられる。

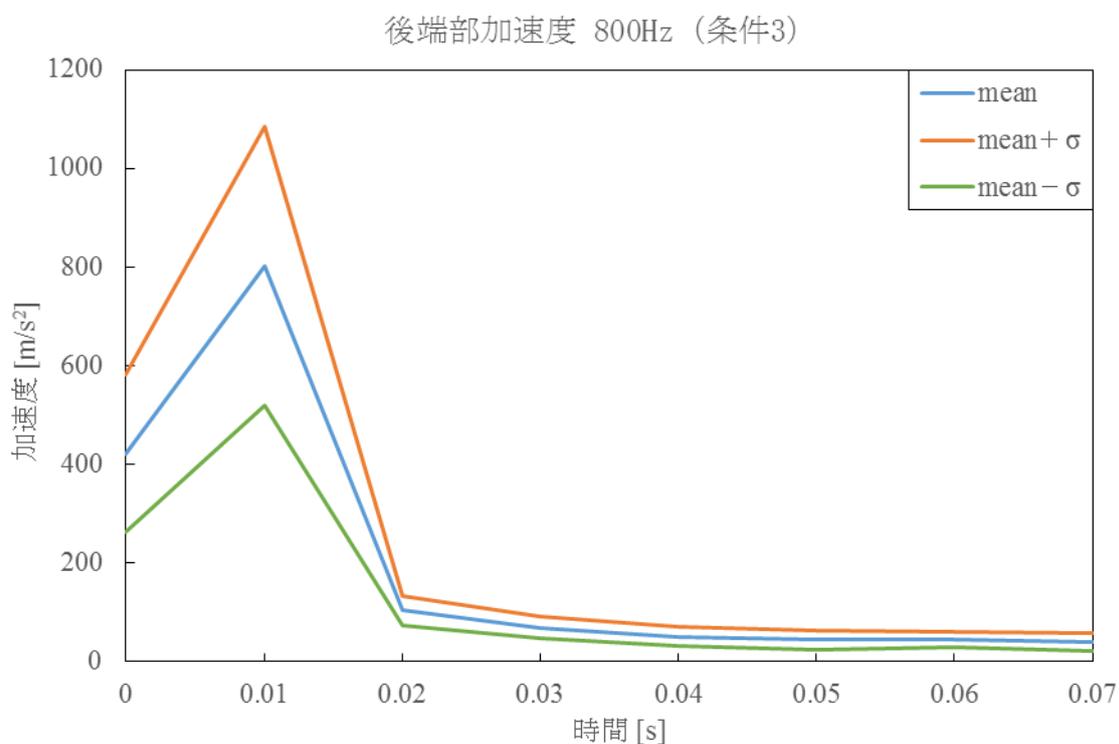


図 3.25 後端部加速度 800Hz の平均値・標準偏差 (条件 3)

3.5.2 肘金部加速度

肘金部加速度の各条件での変換結果の平均を図 3.26 に示す。どの条件においても 0.015 秒付近の高周波の成分が大きくなっている。また、後端部加速度と異なり、どの条件の場合も高周波成分の減衰が遅い様子を確認できる。

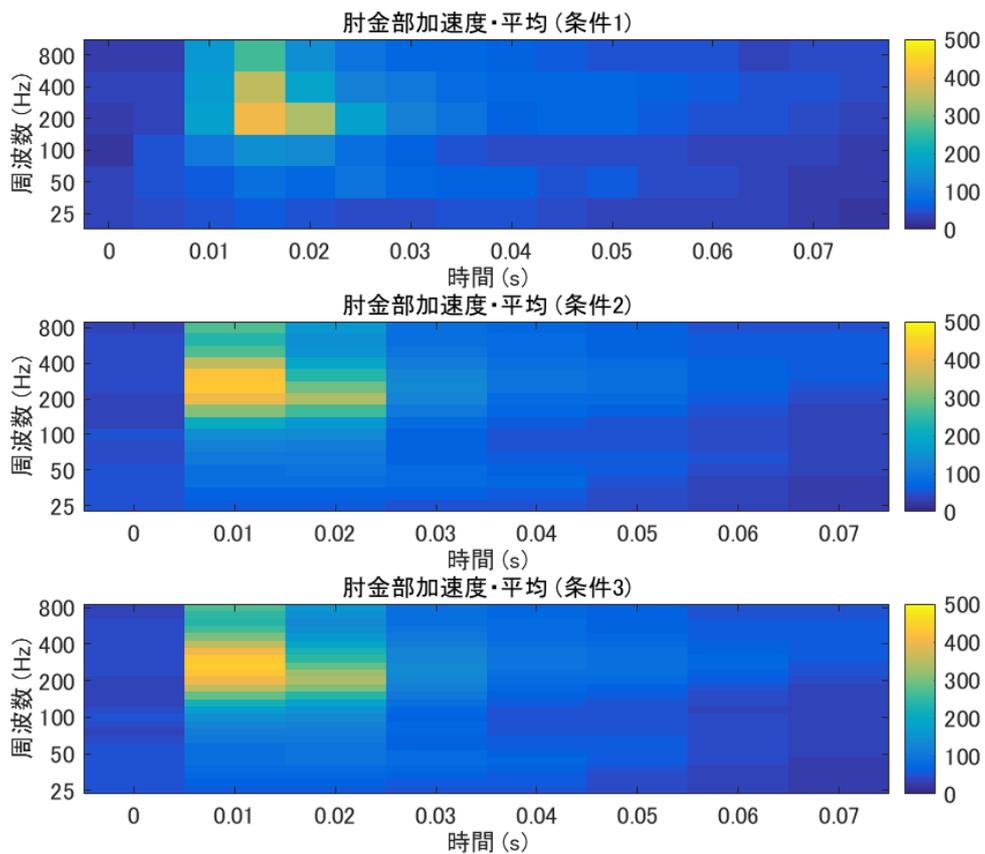


図 3.26 肘金部加速度・平均

次に、肘金部加速度の各条件での変換結果の標準偏差を図 3.27 に示す。平均と同じように、どの条件においても 0.015 秒付近の高周波の成分が大きくなっている。また、時間経過による各周波数の成分の変化も平均の場合と同じような傾向が見られる。

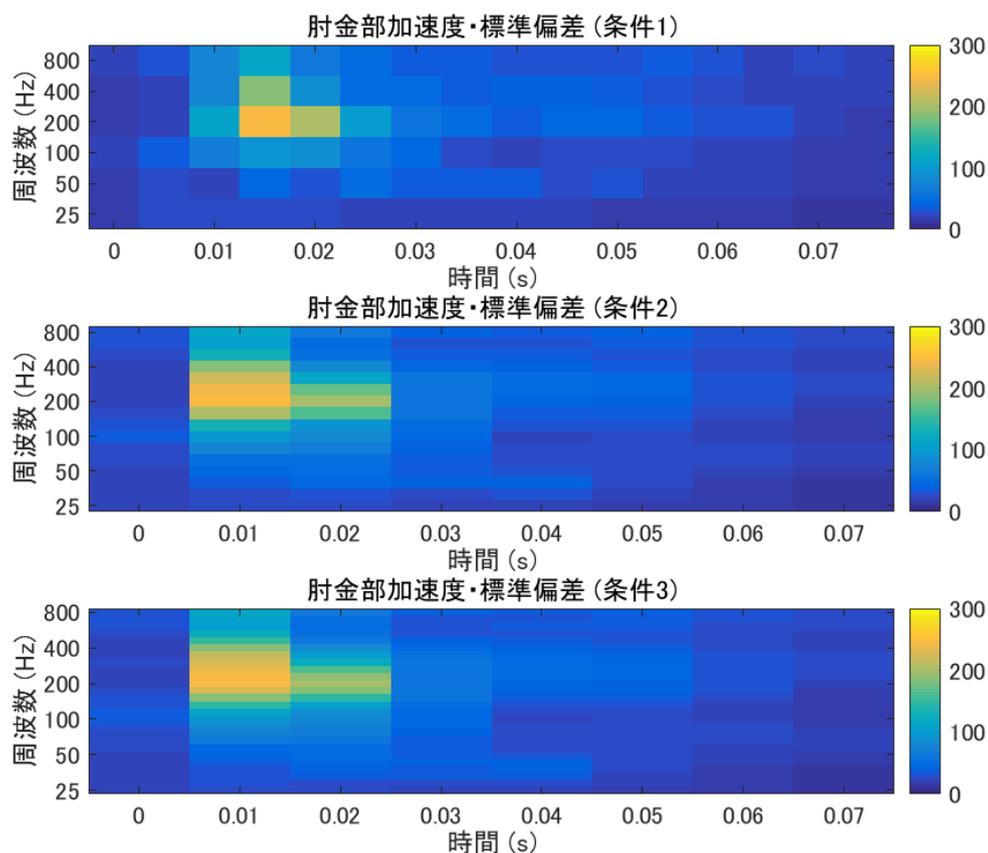


図 3.27 肘金部加速度・標準偏差

肘金部加速度の各条件での変換結果の変動係数を図 3.28 に示す。後端部加速度とは異なり、どの条件の場合でも 0 秒から 0.01 秒の間に大きい変動係数が見られる箇所があり、特に条件 1 では 1 を超える、すなわち平均値よりも標準偏差大きいような箇所も存在する。また、後端部加速度とは異なり、どの条件においても 0.04 秒以降は変動係数に顕著な変化が見られなかった。

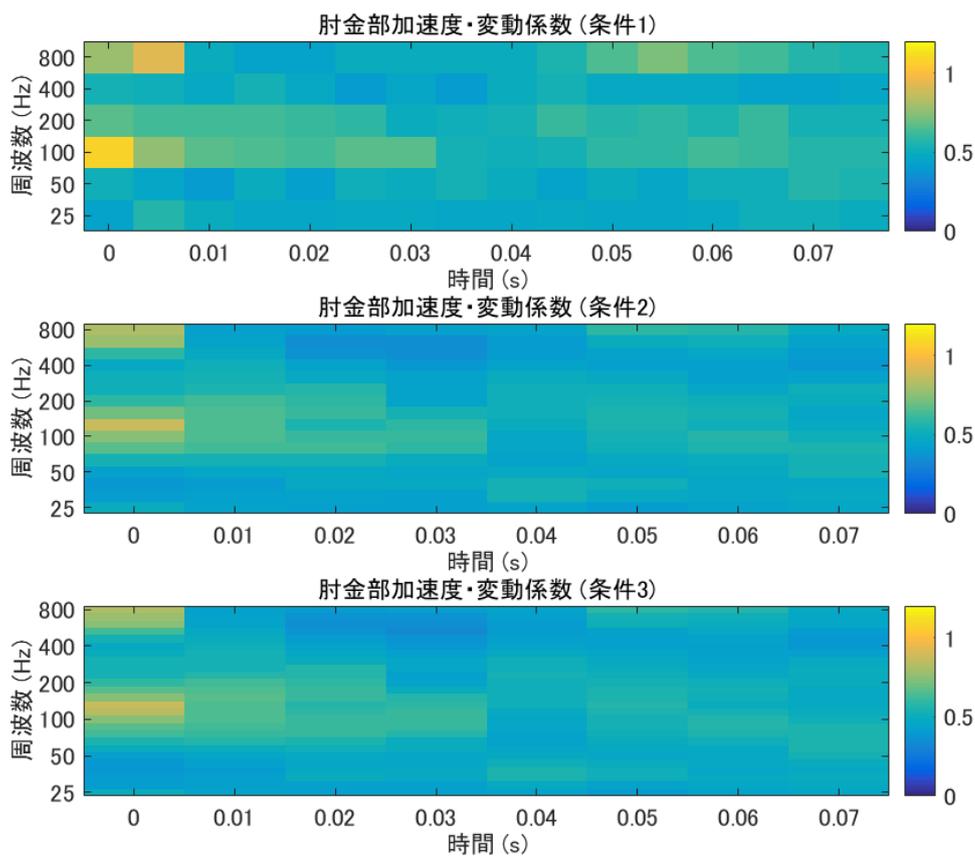


図 3.28 肘金部加速度・変動係数

3.5.3 フロントロッド軸力

フロントロッド軸力の各条件での変換結果の平均を図 3.29 に示す. どの条件においても 0.02 秒から 0.04 秒にかけての 80Hz 付近の成分が大きくなっており, 条件 2 と条件 3 では条件 1 よりその傾向が顕著である.

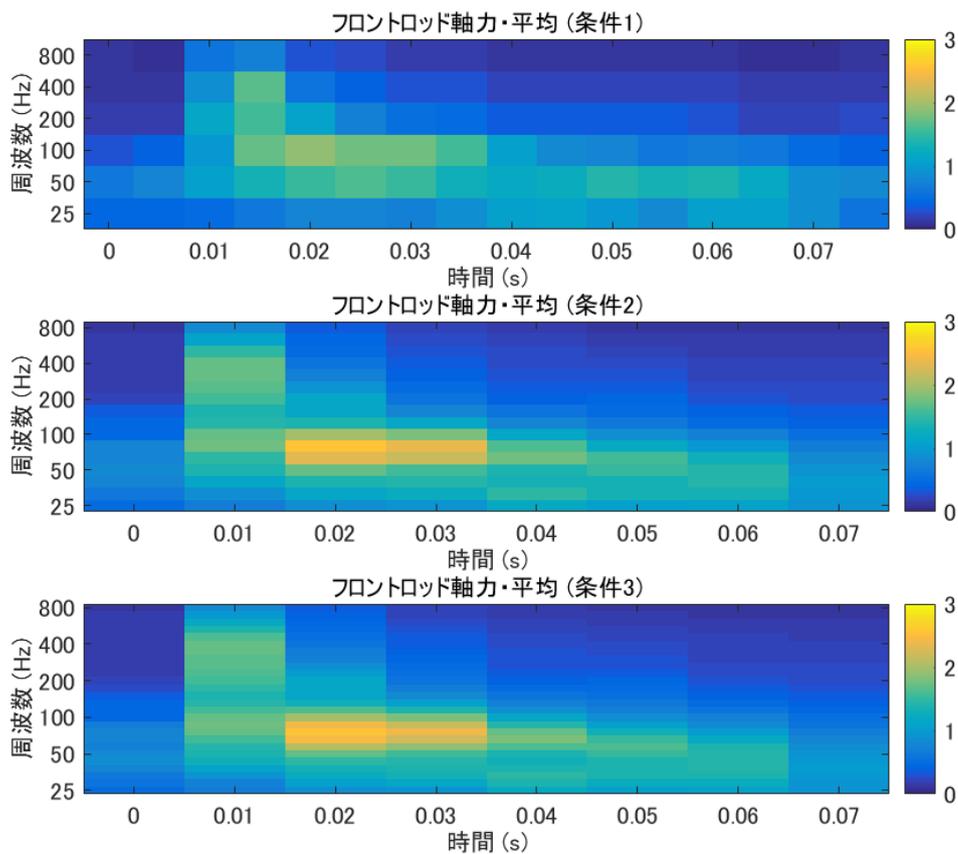


図 3.29 フロントロッド軸力・平均

次に、フロントロッド軸力の各条件での変換結果の標準偏差を図 3.30 に示す。平均と同じく、0.02 秒から 0.04 秒にかけての 80Hz 付近の成分が大きい傾向が見られる。また、時間経過による各周波数の成分の変化も平均の場合と同じような傾向が見られる。

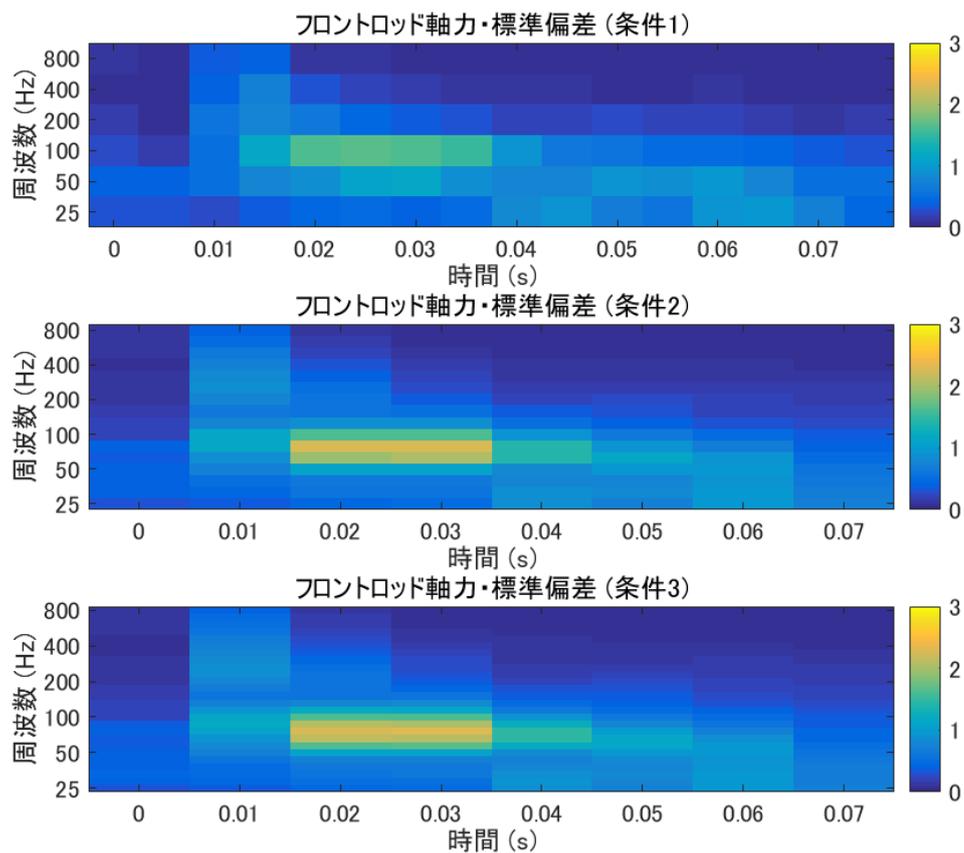


図 3.30 フロントロッド軸力・標準偏差

フロントロッド軸力の各条件での変換結果の変動係数を図 3.31 に示す。平均値や標準偏差と同じく、0.02秒から0.04秒にかけての80Hz付近の成分が特に大きい値を示している。また、どの条件においても低周波成分は全体的に大きい値を示す傾向にある。

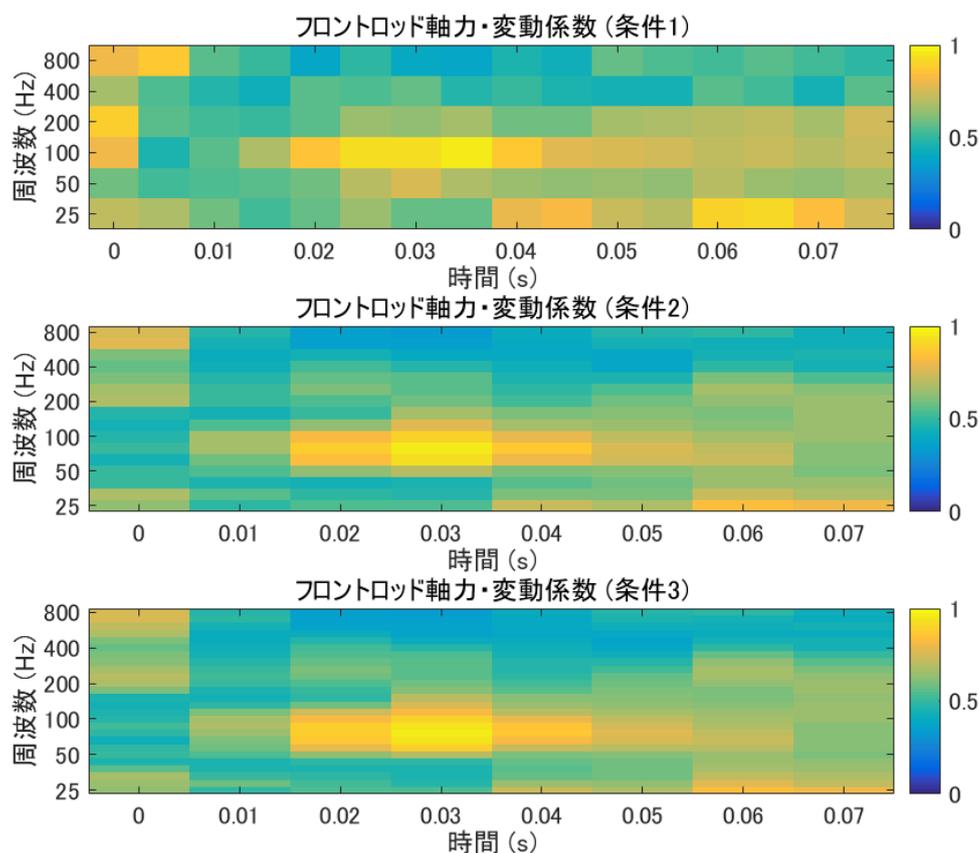


図 3.31 フロントロッド軸力・変動係数

3.6 まとめ

ウェーブレット変換を行うことによって、測定波形を時間や周波数ごとの成分に分解することができた。後端部加速度では800Hzの振動、肘金部加速度では200～300Hzの振動、フロントロッド軸力では約80Hzの振動が大きいということがわかった。

しかし、ウェーブレット変換したデータは変数の数が多く、これらのデータに対して統計的処理を行う際には多変量解析を用いる必要がある。そこで、第4章では多変量解析を行い変換データの定量的な評価を行う。

第4章 多変量解析

4.1 緒言

ウェーブレット変換したデータは変数が多く，統計解析を通してデータの分散を評価するためには，主成分分析や重回帰分析などの多変量解析の手法を用いる必要がある．

本章では，ウェーブレット変換を行ったデータに対して用いた多変量解析の手法を説明し，その結果について考察する．

4.2 主成分分析

ウェーブレット変換したデータは一番変数が少ない条件 1 においても変数が 100 個近くある上に変数同士の相関がある場合もあるため、そのままの状態ではデータの散布の度合いを把握するのが困難である。そこで、主成分分析を用いて少ない合成変数で効率よくデータを表現することとする。

4.2.1 定義 [7][10][11]

主成分分析とは、相関のある多数の変数からなるデータを、互いに相関のない少数の合成変数で出来る限り多くの情報を表現することでデータの次数を削減するために用いられる多変量解析の手法である。各変数の分散の総和を総分散といい、各変数の分散、総分散、各主成分の分散の関係の一例を図 4.1 に示す。分散はその合成変数をもつ情報の大きさを表すため、この例では第 1 主成分のみで全体の分散の半分以上の情報を持っているということになる。

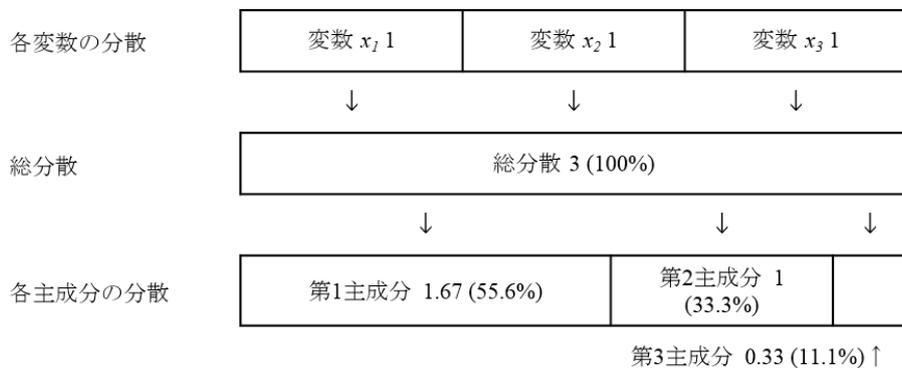


図 4.1 各変数の分散，総分散，各主成分の分散

元の変数を x_1, x_2, \dots, x_p とする。まず、対角項には変数の分散，非対角項には変数同士の共分散を並べた分散共分散行列，または対角項には 1，非対角項には変数同士の相関係数を並べた相関係数行列のどちらかを計算する。相関係数行列は元の変数が異なる単位の変数の場合でも主成分分析に適用できるが，分散共分散行列は元の変数が全て同じ単位を持つ場合のみにしか適用できない。つぎに，分散共分散行列または相関係数行列を固有値分解し，1 番大きい固有値を λ_1 ，その時の固有ベクトルを $L_1 = [L_{11} \ L_{12} \ \dots \ L_{1p}]$ (ただし $L_{11}^2 + L_{12}^2 + \dots + L_{1p}^2 = 1$) とすると，第 1 主成分 z_1 は (4.1) 式で表される。

$$z_1 = L_{11}x_1 + L_{12}x_2 + \dots + L_{1p}x_p \quad (4.1)$$

同様にして、2 番目に大きい固有値を λ_2 、その時の固有ベクトルを $L_2 = [L_{21} \ L_{22} \ \dots \ L_{2p}]$ (ただし $L_{21}^2 + L_{22}^2 + \dots + L_{2p}^2 = 1$) とすると、第 2 主成分 z_2 は (4.2) 式で表される。

$$z_2 = L_{21}x_1 + L_{22}x_2 + \dots + L_{2p}x_p \quad (4.2)$$

同様の計算を繰り返すことで第 p 主成分 z_p まで求めることができる。

第 p 主成分 z_p の持つ分散は λ_p に等しいので、第 1 主成分が一番多くの情報を表現でき、第 2 主成分がその次に多くの情報を表現できる、というように番号が若い主成分ほど元の変数が持つ情報を多く表現できるという特徴がある。番号が大きい主成分はほとんど情報を持っていないことが多く、最初のいくつかの主成分だけを取り出して考慮すれば十分な情報を表現でき、変数の数を削減することができる。

また、各主成分と元の各変数との相関係数は、主成分負荷量と呼ばれる。元の変数 x_s と第 q 主成分 z_r との相関係数を a_{sr} とすると、元の変数 x_s は (4.3) 式のように表される。

$$x_s = a_{s1}z_1 + a_{s2}z_2 + \dots + a_{sp}z_p \quad (4.3)$$

主成分分析と同じような目的で用いられる手法に探索的因子分析と呼ばれるものがある。変数の背後にある共通因子を探るためには一般に探索的因子分析を使うべきとされるが、探索的因子分析では変数の数よりデータ数が十分に多い、目安としてはデータ数が変数の数の 10 倍以上ある場合でないと信頼できる結果を得られないという問題点がある。一方で、主成分分析もデータ数が多いほど信頼できる結果を得られるが、データ数よりも変数の数が多い場合でも適用できる。本研究で取り扱うデータ数は、一番変数の数が少ない条件 1 の場合でも約 3 倍であるので、探索的因子分析ではなく主成分分析を用いる。

4.2.2 解析条件

主成分分析の解析条件を表 4.1 に示す。ウェーブレット変換したデータは全て同じ単位のため分散共分散行列を用いることとする。また、本研究では第 4 主成分までを解析の対象とする。

表 4.1 主成分分析解析条件

解析ソフト	JMP Pro 13
計算する行列	分散共分散行列
対象とする主成分の数	4

4.2.3 解析結果

3.4.1 項の 3 つの条件でウェーブレット変換したデータに対して主成分分析を行った結果について述べる。

4.2.3.1 後端部加速度

後端部加速度の変換データに対する主成分分析の結果を表 4.2 に示す。固有値はその主成分で説明できる分散を表し、寄与率はその主成分の分散が総分散に占める割合を表している。どの条件の場合でも、第 1 主成分のみで全体の分散の約 50%、第 4 主成分までで全体の分散の約 80%を説明することができ、条件 3 が一番分散の説明率が高かった。

表 4.2 主成分分析結果（後端部加速度）

条件	主成分番号	固有値（分散）	寄与率 [%]	累積寄与率 [%]
条件 1	1	197778.053	49.601	49.601
	2	47181.241	11.833	61.434
	3	35271.950	8.846	70.280
	4	28919.567	7.253	77.533
	他	89587.225	22.467	100.000
	合計	398738.036	100.000	100.000
条件 2	1	446039.987	56.874	56.874
	2	88291.119	11.258	68.131
	3	61825.773	7.883	76.015
	4	37643.727	4.800	80.815
	他	150459.313	19.185	100.000
	合計	784259.921	100.000	100.000
条件 3	1	709810.746	58.207	58.207
	2	142715.170	11.703	69.910
	3	89867.831	7.369	77.280
	4	57681.513	4.730	82.010
	他	219384.162	17.991	100.000
	合計	1219459.422	100.000	100.000

4.2.3.2 肘金部加速度

肘金部加速度の変換データに対する主成分分析の結果を表 4.3 に示す。どの条件の場合でも、第 1 主成分のみで全体の分散の 60%から 70%強、条件 1 以外は第 4 主成分までで全体の分散の約 80%を説明することができる。また、後端部加速度と同じく条件 3 が一番分散の説明率が高かった。

表 4.3 主成分分析結果 (肘金部加速度)

条件	主成分番号	固有値 (分散)	寄与率 [%]	累積寄与率 [%]
条件 1	1	180269.230	61.234	61.234
	2	21778.708	7.398	68.632
	3	10577.667	3.593	72.225
	4	7569.272	2.571	74.796
	他	74199.133	25.204	100.000
	合計	294394.010	100.000	100.000
条件 2	1	399242.890	69.651	69.651
	2	38622.330	6.738	76.389
	3	22735.250	3.966	80.355
	4	14979.109	2.613	82.968
	他	97625.244	17.032	100.000
	合計	573204.820	100.000	100.000
条件 3	1	666154.540	70.228	70.228
	2	63317.270	6.675	76.903
	3	37010.103	3.902	80.805
	4	23509.055	2.478	83.283
	他	158568.780	16.717	100.000
	合計	948559.740	100.000	100.000

4.2.3.3 フロントロッド軸力

フロントロッド軸力の変換データに対する主成分分析の結果を表 4.4 に示す。どの条件の場合でも、第 1 主成分のみで全体の分散の 70%以上、第 4 主成分までで全体の分散の 80%以上を説明することができる。

表 4.4 主成分分析結果（フロントロッド軸力）

条件	主成分番号	固有値 (分散)	寄与率 [%]	累積寄与率 [%]
条件 1	1	24.2085	70.42	70.42
	2	2.3525	6.843	77.263
	3	1.3404	3.899	81.162
	4	0.893	2.598	83.76
	他	5.5829076	16.24	100.000
	合計	34.377308	100.000	100.000
条件 2	1	47.0549	74.598	74.598
	2	4.8077	7.622	82.22
	3	2.2081	3.501	85.72
	4	1.7191	2.725	88.446
	他	7.2881646	11.554	100.000
	合計	63.077965	100.000	100.000
条件 3	1	77.4954	74.662	74.662
	2	7.9498	7.659	82.321
	3	3.681	3.546	85.868
	4	2.7955	2.693	88.561
	他	11.873269	11.44	100.000
	合計	103.79497	100.000	100.000

4.3 重回帰分析

通過する列車の種類などの条件と分岐器振動の大きさには何らかの相関があると考えられる。そこで、列車の種類や車軸の位置などの変数と、4.2項で解析した主成分との相関を重回帰分析と呼ばれる手法で分析する。

4.3.1 定義 [7][10]

ある変数で別の変数を予測するための統計手法のことを回帰分析といい、予測に用いる変数を説明変数、予測される変数を従属変数と呼ぶ。また、説明変数が複数ある場合を特に重回帰分析と呼ぶ。

説明変数を x_1, x_2, \dots, x_p 、従属変数を y とすると、(4.4) 式のような形の予測式で従属変数を予測する。このときの b_0 を誤差、 b_1, b_2, \dots, b_p を偏回帰係数と呼ぶ。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (4.4)$$

変数同士の相関を図で視覚的に表すパス図と呼ばれるものがある。パス図を用いて(4.4)(5.4) 式を表現すると図 4.2 のように表される。パス図では、観測される変数は四角で、誤差を円で表現する。

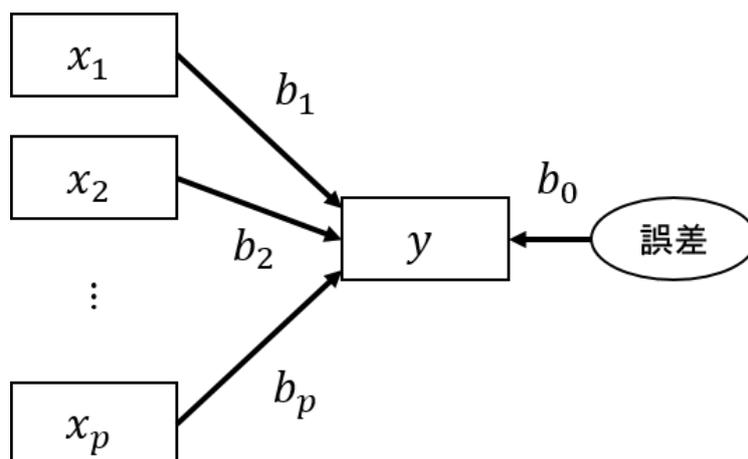


図 4.2 パス図

説明変数によって説明できる従属変数の分散の割合のことを決定係数といい、予測の正確さを表す指標になる。決定係数を R^2 、予測値の分散を V_{pre} 、従属変数の分散を V_{dep} とすると (4.5) 式で表される。

$$R^2 = \frac{V_{pre}}{V_{dep}} \quad (4.5)$$

また、誤差の分散を V_{err} とすると (4.6) 式のような関係が成り立つため、決定係数は下限 0, 上限 1 の指標である。

$$V_{dep} = V_{pre} + V_{err} \quad (4.6)$$

説明変数が名義変数の場合にはそのままでは回帰分析に用いることができないが、ダミー変数を用意することで回帰分析に用いることができる。例えば、A, B, C, D の 4 つのカテゴリからなる説明変数で従属変数 y を予測する場合、表 4.5 のように 3 つのダミー変数 x_1, x_2, x_3 を用意し、(4.7) 式のように予測式を立てることができる。 a_0 は誤差, a_1, a_2, a_3 は偏回帰係数である。

表 4.5 ダミー変数

	x_1	x_2	x_3
A	1	0	0
B	0	1	0
C	0	0	1
D	0	0	0

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (4.7)$$

4.3.2 解析条件

重回帰分析の解析条件を表 4.6 に示す。予測値の計算には標準最小二乗法を使用した。貨物, 特急 1, 特急 2, 普通の 4 種類からなる列車種別と, 3.2.2.2 項で述べた車軸番号の 2 つの名義変数を用いて, 後端部加速度, 肘金部加速度, フロントロッド軸力の各変換データの第 1 主成分から第 4 主成分までの予測を行った。

表 4.6 重回帰分析解析条件

解析ソフト	JMP Pro 13
手法	標準最小二乗法
説明変数	列車種別, 車軸番号 (ともに名義変数として処理)
従属変数	第 1 主成分, 第 2 主成分, 第 3 主成分, 第 4 主成分

4.3.3 解析結果

4.3.3.1 後端部加速度

後端部加速度の重回帰分析の結果と、その結果と主成分分析の結果を組み合わせ、2つの説明変数で変換データの全体の分散をどのくらい説明できるのかを算出したものを表4.7に示す。どの条件でも2つの変数で説明できる分散は全体の30%ほどであり、列車種別や車軸番号では説明できない要素が後端部加速度の振動に影響を与えている可能性が高い。また、一番分散の説明率が大きかったのは条件3の場合である。

表 4.7 重回帰分析の結果と分散説明率（後端部加速度）

条件	主成分番号	決定係数	固有値（分散）	予測可能な分散	誤差の分散
条件 1	1	0.4058	197778.053	80258.927	117519.126
	2	0.5513	47181.241	26009.272	21171.969
	3	0.2653	35271.950	9356.484	25915.466
	4	0.1317	28919.567	3808.071	25111.496
	他		89587.225		89587.225
	合計		398738.036	119432.755	279305.281
	割合		100.0%	30.0%	70.0%
条件 2	1	0.4301	446039.987	191826.094	254213.893
	2	0.5653	88291.119	49913.376	38377.743
	3	0.1610	61825.773	9954.836	51870.937
	4	0.2401	37643.727	9037.792	28605.936
	他		150459.313		150459.313
	合計		784259.921	260732.099	523527.822
	割合		100.0%	33.2%	66.8%
条件 3	1	0.4152	709810.746	294696.737	415114.009
	2	0.5662	142715.170	80805.382	61909.788
	3	0.1498	89867.831	13463.302	76404.529
	4	0.3050	57681.513	17594.397	40087.116
	他		219384.162		219384.162
	合計		1219459.422	406559.817	812899.604
	割合		100.0%	33.3%	66.7%

4.3.3.2 肘金部加速度

後端部加速度と同様にして、肘金部加速度の重回帰分析の結果と、2つの説明変数で変換データの全体の分散をどのくらい説明できるのかを算出したものを表 4.8 に示す。どの条件においても、2つの変数で全体の分散の50%以上を説明できる。また、一番分散の説明率が大きいのは条件3である。

表 4.8 重回帰分析の結果と分散説明率（肘金部加速度）

条件	主成分番号	決定係数	固有値（分散）	予測可能な分散	誤差の分散
条件 1	1	0.7546	180269.230	136028.093	44241.133
	2	0.4984	21778.708	10854.072	10924.635
	3	0.0694	10577.667	734.333	9843.334
	4	0.1524	7569.272	1153.814	6415.458
	他		74199.133		74199.133
	合計		294394.010	148770.313	145623.693
	割合		100.0%	50.5%	49.5%
条件 2	1	0.7381	399242.890	294673.064	104569.828
	2	0.4877	38622.330	18837.840	19784.490
	3	0.0944	22735.250	2145.704	20589.543
	4	0.1419	14979.109	2125.364	12853.744
	他		97625.244		97625.244
	合計		573204.820	317781.974	255422.850
	割合		100.0%	55.4%	44.6%
条件 3	1	0.7377	666154.540	491451.498	174703.039
	2	0.4844	63317.270	30671.846	32645.425
	3	0.0941	37010.103	3481.873	33528.229
	4	0.1724	23509.055	4053.513	19455.542
	他		158568.780		158568.780
	合計		948559.740	529658.730	418901.015
	割合		100.0%	55.8%	44.2%

4.3.3.3 フロントロッド軸力

後端部加速度などと同様に、フロントロッド軸力の重回帰分析の結果と、2つの説明変数で変換データの全体の分散をどのくらい説明できるのかを算出したものを表 4.9 に示す。

どの条件においても、2つの変数によって全体の分散の60%以上を説明することができる。また、条件1の場合に一番分散説明率が低くなり、条件2と条件3が同じ説明率になった。

表 4.9 重回帰分析の結果と分散説明率（フロントロッド軸力）

条件	主成分番号	決定係数	固有値（分散）	予測可能な分散	誤差の分散
条件 1	1	0.8364	24.2085	20.2478	3.9607
	2	0.1875	2.3525	0.4411	1.9114
	3	0.2839	1.3404	0.3805	0.9599
	4	0.1542	0.8930	0.1377	0.7553
	他		5.5829		5.5829
	合計		34.3773	21.2072	13.1702
	割合		100.0%	61.7%	38.3%
条件 2	1	0.8380	47.0549	39.4297	7.6252
	2	0.1628	4.8077	0.7829	4.0248
	3	0.1564	2.2081	0.3454	1.8627
	4	0.3322	1.7191	0.5710	1.1481
	他		7.2881		7.2882
	合計		63.0780	41.1291	21.9489
	割合		100.0%	65.2%	34.8%
条件 3	1	0.8377	77.4954	64.9197	12.5757
	2	0.1628	7.9498	1.2945	6.6553
	3	0.1529	3.6810	0.5629	3.1181
	4	0.3297	2.7955	0.9218	1.8737
	他		11.8733		11.8733
	合計		103.7950	67.6988	36.0962
	割合		100.0%	65.2%	34.8%

4.3.3.4 考察

第4主成分までの主成分が持つ分散の総分散に対する割合はどの場合でも7割以上をしめていたが、肘金部加速度とフロントロッド軸力では変換データ全体の分散の半分以上を説明できたが、後端部加速度では3割ほどしか説明できなかった。後端部加速度を測定した箇所は衝撃振動が発生するトングレール後端部継目に近く、トングレール上の車輪の有無によるトングレール上の拘束条件の変化が振動波形に与える影響が小さいと考えられ、車軸番号で分散を説明できる割合が低下し、このような結果になったと考えられる。

どの変換条件が一番効果的について比較を行う。説明率の観点から見ると、条件 3 が一番効果的あると考えられる。また、表 3.10 の変換条件より、条件 3 が一番変数の数が多い。以上より、条件 3 の結果を第 5 章のデータ予測手法に用いることが一番効果的と考えられるため、4.5 節と第 5 章では条件 3 の変換データと解析結果を用いることとする。

4.4 説明変数の効果

4.4.1 説明変数の効果の検定

条件 3 の各主成分に対する重回帰分析における、列車種別と車軸番号の 2 つの説明変数の効果が統計的に有意かどうか判定するために F 検定を行った。各主成分、各説明変数における p 値を表 4.10 に示す。信頼水準 95% の場合は p 値が 0.05 以下の場合に、「説明変数と従属変数の相関が 0 である」という帰無仮説が棄却され、説明変数の効果が統計的に有意とすることができる。表 4.10 より後端部加速度の第 3 主成分、肘金部加速度の第 4 主成分、フロントロッド軸力の第 3 主成分の列車種別は有意水準 95% の場合帰無仮説を棄却できないため、これらの主成分では車軸番号のみで予測を行うこととする。

表 4.10 説明変数の効果の検定 (p 値)

後端部加速度	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
列車種別	0.0001 以下	0.0001 以下	0.7101	0.0001 以下
車軸番号	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0001 以下
肘金部加速度	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
列車種別	0.0001 以下	0.0220	0.0006	0.3240
車軸番号	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0100	0.0001 以下
フロントロッド軸力	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
列車種別	0.0165	0.0001 以下	0.6552	0.0001 以下
車軸番号	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0001 以下

4.4.2 説明変数ごとの効果

各測定箇所の各主成分について、列車種別と車軸番号の説明変数がそれぞれ決定係数に寄与している割合を表 4.11 に示す。4.4.1 項で列車種別の効果が有意でないと検定された主成分以外では、後端部加速度の第 1 主成分、肘金部加速度の第 1 主成分と第 2 主成分、フロントロッド軸力の第 1 主成分と第 4 主成分において車軸番号の寄与率が大きかった。

特にフロントロッド軸力の第1主成分では車軸番号の寄与率が非常に高い上に決定係数も大きいので、第1主成分の値は車軸番号に非常に大きく影響される主成分であると考えられる。一方で、後端部加速度の第2主成分と第4主成分、肘金部加速度の第3主成分、フロントロッド軸力の第2主成分は列車種別の寄与率が比較的高くなった。

また、後端部加速度では肘金部加速度とフロントロッド軸力に比べて列車種別の寄与率が比較的大きくなった。トングレール後端部は衝撃振動の発生箇所近くに、前軸の位置によるトングレールの拘束条件の変化の影響を受けにくいためだと考えられる。

表 4.11 決定係数と説明変数ごとの寄与率

後端部加速度	決定係数	列車種別 [%]	車軸番号 [%]
第1主成分	0.4152	13.80%	86.20%
第2主成分	0.5662	24.42%	75.58%
第3主成分	0.1459	0.00%	100.00%
第4主成分	0.3050	48.06%	51.94%
肘金部加速度	決定係数	列車種別 [%]	車軸番号 [%]
第1主成分	0.7377	4.61%	95.39%
第2主成分	0.4844	3.47%	96.53%
第3主成分	0.0941	60.62%	39.38%
第4主成分	0.1627	0.00%	100.00%
フロントロッド軸力	決定係数	列車種別 [%]	車軸番号 [%]
第1主成分	0.8377	0.68%	99.32%
第2主成分	0.1628	50.30%	49.70%
第3主成分	0.1483	0.00%	100.00%
第4主成分	0.3297	20.54%	79.46%

4.5 主成分の考察

条件3の主成分の予測式や主成分負荷量を示し、それに対する考察を述べる。

4.5.1 条件ごとの主成分の予測式

それぞれの列車種別、車軸番号における予測式の係数を表4.12に示す。

表 4.12 予測式の係数

後端部加速度		第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
切片		55.164	111.601	-4.404	-21.470
列車種別	貨物	14.797	-97.750	0.000	-9.395
	特急 1	-372.990	-264.644	0.000	129.975
	特急 2	277.180	182.331	0.000	90.356
	普通	81.013	180.062	0.000	-210.936
車軸番号	1 軸目	-783.886	413.533	-202.554	68.335
	2 軸目	441.915	-55.405	68.683	-80.228
	3 軸目	-135.461	-271.814	62.047	116.381
	4 軸目	477.432	-86.314	71.824	-104.488
肘金部加速度		第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
切片		31.389	35.386	19.107	1.817
列車種別	貨物	-14.701	-31.324	-47.907	0.000
	特急 1	-277.832	-56.811	9.263	0.000
	特急 2	50.048	32.644	102.203	0.000
	普通	242.486	55.491	-63.556	0.000
車軸番号	1 軸目	-447.590	284.397	-34.409	91.925
	2 軸目	-482.771	-13.109	-38.194	-36.680
	3 軸目	1152.120	-85.685	38.087	18.247
	4 軸目	-221.759	-185.603	34.515	-73.492
フロントロッド軸力		第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
切片		0.00698	-0.14482	-0.01992	-0.10014
列車種別	貨物	-0.39971	0.66979	0.00000	0.01944
	特急 1	-0.77584	-0.80515	0.00000	0.65639
	特急 2	1.84471	0.88585	0.00000	0.36649
	普通	-0.66916	-0.75049	0.00000	-1.04231
車軸番号	1 軸目	-1.72072	-0.61854	0.46927	1.47776
	2 軸目	-6.51855	0.65981	-1.07481	-0.41213
	3 軸目	13.40593	-0.92126	-0.26927	-0.48572
	4 軸目	-5.16666	0.87998	0.87481	-0.57991

主成分を y , 切片を a_0 , 列車種別の係数を a_1 , 車軸番号の係数を a_2 とすると, ある列車種別, 車軸番号の場合における主成分は (4.8) 式で予測される.

$$y = a_0 + a_1 + a_2 \quad (4.8)$$

4.5.2 主成分負荷量

後端部加速度の第1主成分から第4主成分までの主成分負荷量を図4.3に示す。第1主成分の値が大きくなると、図3.22において一番平均値が大きかった0.01秒の800Hzの成分が大きくなることがわかり、表4.12より特急1や1軸目の場合はその成分の値が小さくなり、特急2や2軸目・4軸目の場合は値が大きくなる傾向にあると考えられる。

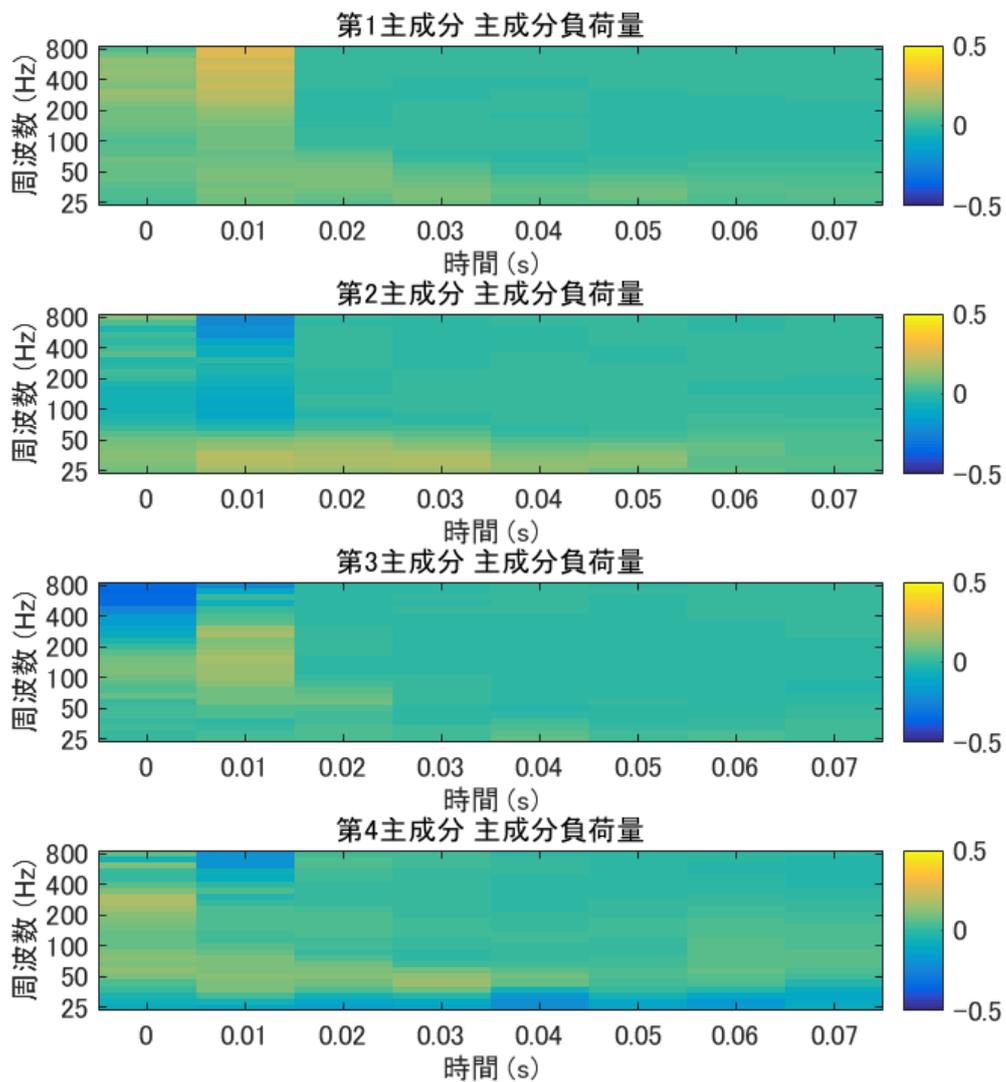


図 4.3 主成分負荷量（後端部加速度）

肘金部加速度の第1主成分から第4主成分までの主成分負荷量を図 4.4 に示す。第1主成分の値が大きくなると、図 3.26 において一番平均値が大きかった 0.01 秒の 200Hz から 400Hz にかけての成分が大きくなることからわかる。表 4.12 より特急 1 や 1 軸目・2 軸目の場合はその成分の値が小さくなり、普通や 3 軸目の場合は値が大きくなる傾向にある。特に 3 軸目の場合は第1主成分の値が大きくなるため、トングレール上に前軸がない場合、肘金部では 200Hz~400Hz で強い振動が発生すると考えられる。

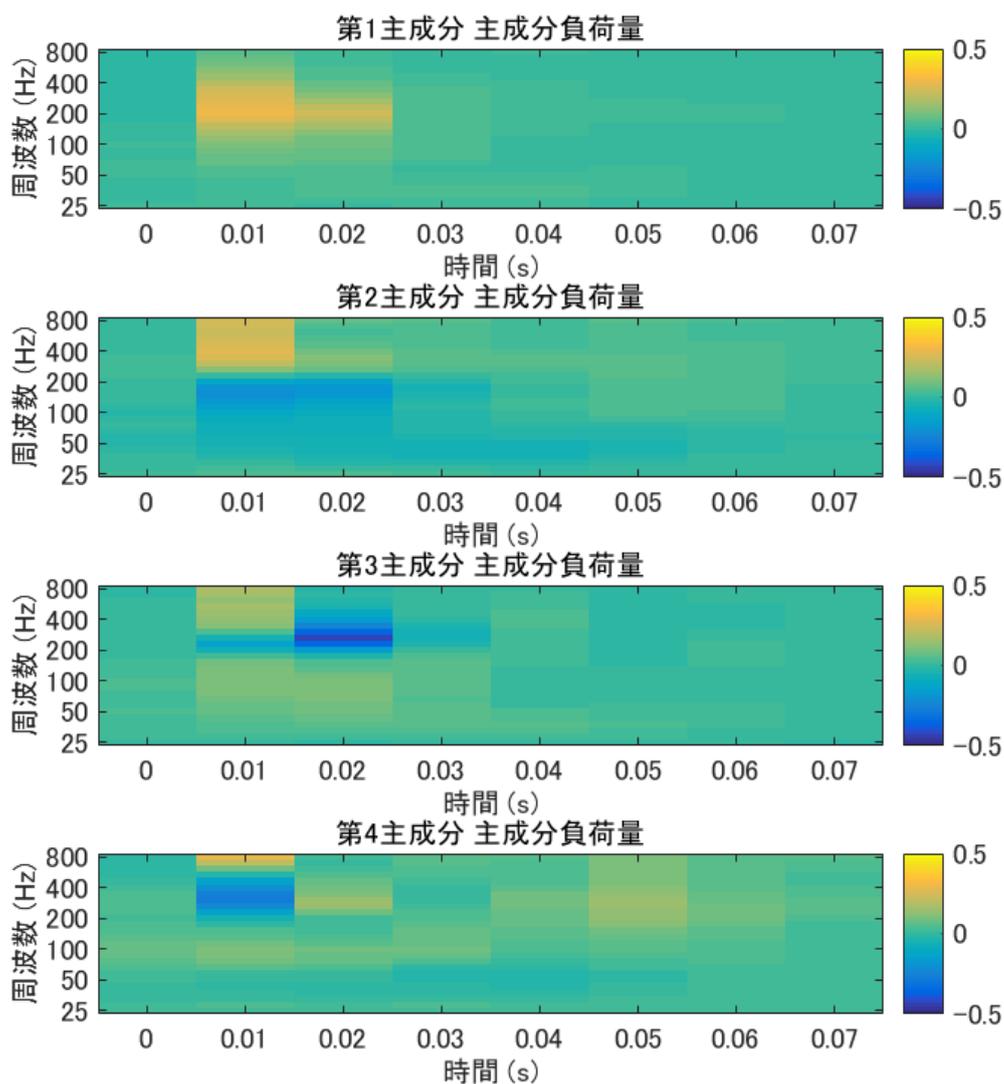


図 4.4 主成分負荷量 (肘金部加速度)

フロントロッド軸力の第1主成分から第4主成分までの主成分負荷量を図4.5に示す。第1主成分の値が大きくなると、図3.29において一番平均値が大きかった0.02秒から0.04秒にかけての約80Hzの成分が大きくなることがわかる。表4.12より特急1・普通や2軸目・4軸目の場合はその成分の値が小さくなり、特急2や3軸目の場合は値が大きくなる傾向にある。また、肘金部加速度のように特に3軸目の場合は第1主成分の値が大きくなるので、トンダレール上に前軸がない場合にはフロントロッドでは約80Hzで強い振動が発生すると考えられる。

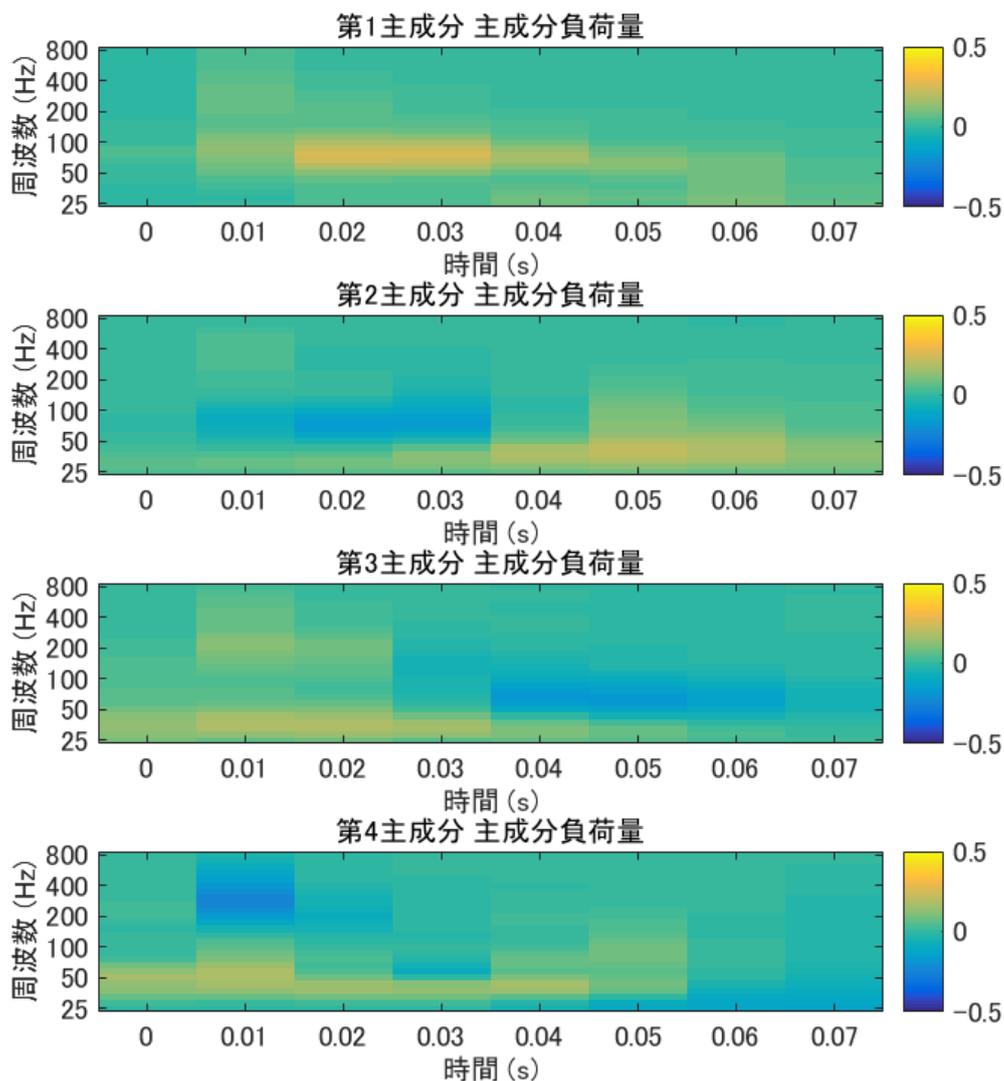


図 4.5 主成分負荷量 (フロントロッド軸力)

4.6 まとめ

ウェーブレット変換したデータに対して主成分分析を行うと第 4 主成分までの 4 つの主成分で、変換データの総分散のかなりの割合を表現できることがわかった。また、列車種別と車軸番号を説明変数として主成分に重回帰分析を行うと、肘金部加速度やフロントロッド軸力では 2 個の説明変数のみで変換データの総分散の半分以上が説明できることができた。そして、それらの結果を用いて列車の種類や車軸の位置などの変数から変換データの主成分を予測する予測式の係数を算出した。第 5 章では、本章の結果を用いて振動波形の大きさを予測する手法を考案し、その考察を行う。

第5章 確率的データ予測

5.1 緒言

第4章の結果を用いることで、列車種別や車軸の位置などの条件から各時間および周波数での成分の大きさとその分散について予測することができる。

本章では、データ予測手法の説明とその考察について述べる。

5.2 予測手法 [7]

第 4 章の結果を用いて列車種別や車軸番号ごとに平均や分散をどう予測するのかについて説明する。説明変数で説明できる部分の分散に関しては平均に加え、説明できない部分を分散として予測を行っている。

5.2.1 平均

列車種別や車軸番号ごとの周波数および時間ごとの成分の平均値は、主成分の予測値と主成分負荷量を用いて計算できる。第 i 主成分の周波数方向の上から j 行目の時間方向の左から k 列目の主成分負荷量を c_{ijk} 、(4.8) 式で予測された第 i 主成分を y_i 、 j 行目 k 列目の平均値を m_{jk} とすると、 j 行目 k 列目の予測平均値 p_{jk} は (5.1) 式のように表せる。

$$p_{jk} = m_{jk} + c_{1jk}y_1 + c_{2jk}y_2 + c_{3jk}y_3 + c_{4jk}y_4 \quad (5.1)$$

5.2.2 分散

変換データの総分散のうち、説明変数で説明しきれずに残った分散が、分散の予測値になり、各主成分の固有値と主成分負荷量、そして第 1 主成分から第 4 主成分までの決定係数で表現することができる。第 1 主成分から第 4 主成分までの説明変数で説明できなかった分散を T_{jk} 、第 5 主成分から第 208 主成分までがもつ総分散を U_{jk} とすると、 j 行目 k 列目の分散を V_{jk} は (5.2) 式のように表せる。

$$V_{jk} = T_{jk} + U_{jk} \quad (5.2)$$

第 i 主成分の固有値を λ_i 、決定係数を R_i^2 とすると、 T_{jk} は (5.3) 式のように表せる。

$$T_{jk} = (1 - R_1^2)c_{1jk}\lambda_1 + (1 - R_2^2)c_{2jk}\lambda_2 + (1 - R_3^2)c_{3jk}\lambda_3 + (1 - R_4^2)c_{4jk}\lambda_4 \quad (5.3)$$

また、 U_{jk} は (5.4) 式のように表せる。

$$U_{jk} = c_{5jk}\lambda_5 + c_{6jk}\lambda_6 + \cdots + c_{208jk}\lambda_{208} \quad (5.4)$$

以上の式を用いて計算した、後端部加速度、肘金部加速度、フロントロッド軸力の標準偏差の予測値を図 5.1 に示す。

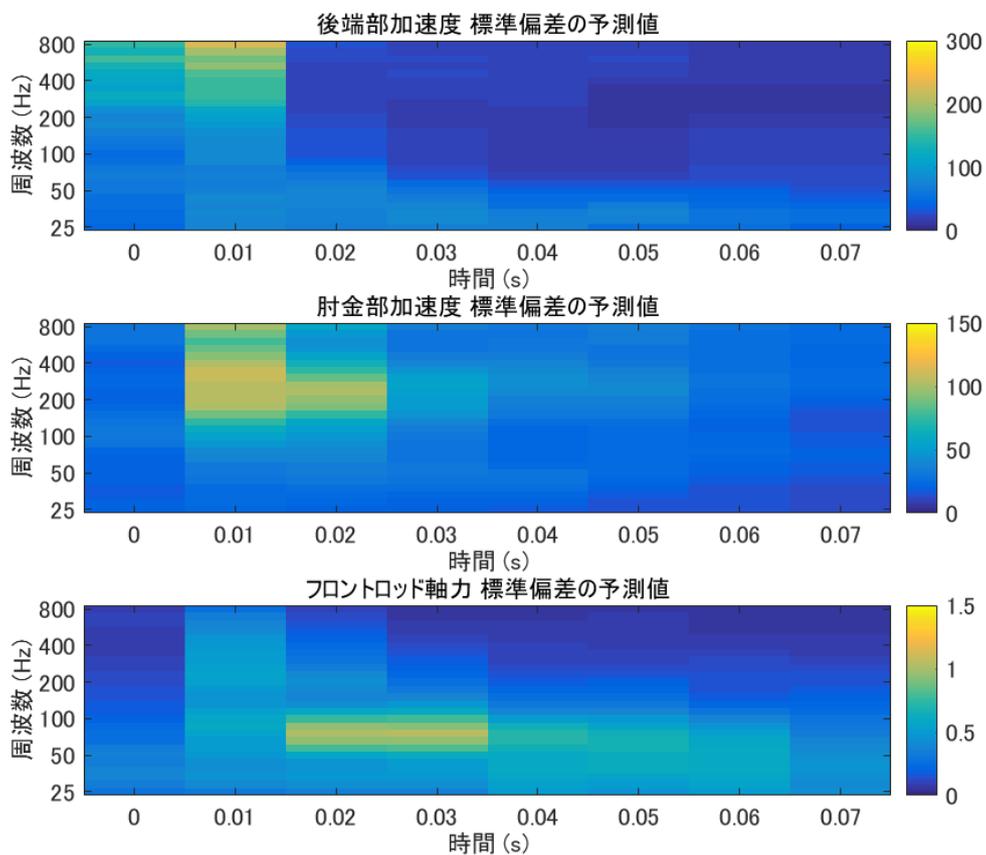


図 5.1 標準偏差の予測値

5.3 比較

5.3.1 説明可能な分散の割合

ウェーブレット変換した全データの分散のうち、どれくらいの割合の分散を 5.2 節に示した予測手法で説明できたかを図 5.2 に示す。後端部加速度は他の測定箇所比べると説明可能な分散が少ない結果となり、一番大きな平均値だった 0.01 秒の 800Hz の成分においても説明率は約 35% だった。肘金部加速度では、平均値、標準偏差ともに比較的大きな値を示した 0.01 秒の 200Hz 付近の成分が 80% 以上の高い説明率を示した。フロントロッド軸力では、平均値、標準偏差ともに比較的大きな値を示した 0.03 秒の 70Hz 付近の成分が約 80% の高い説明率を示した。また、肘金部加速度やフロントロッド軸力では平均値が高い成分では分散の説明率も上がる傾向にあり、これらの測定箇所の振動の大きさは列車種別や車軸番号などに大きく影響を受けると考えられる。

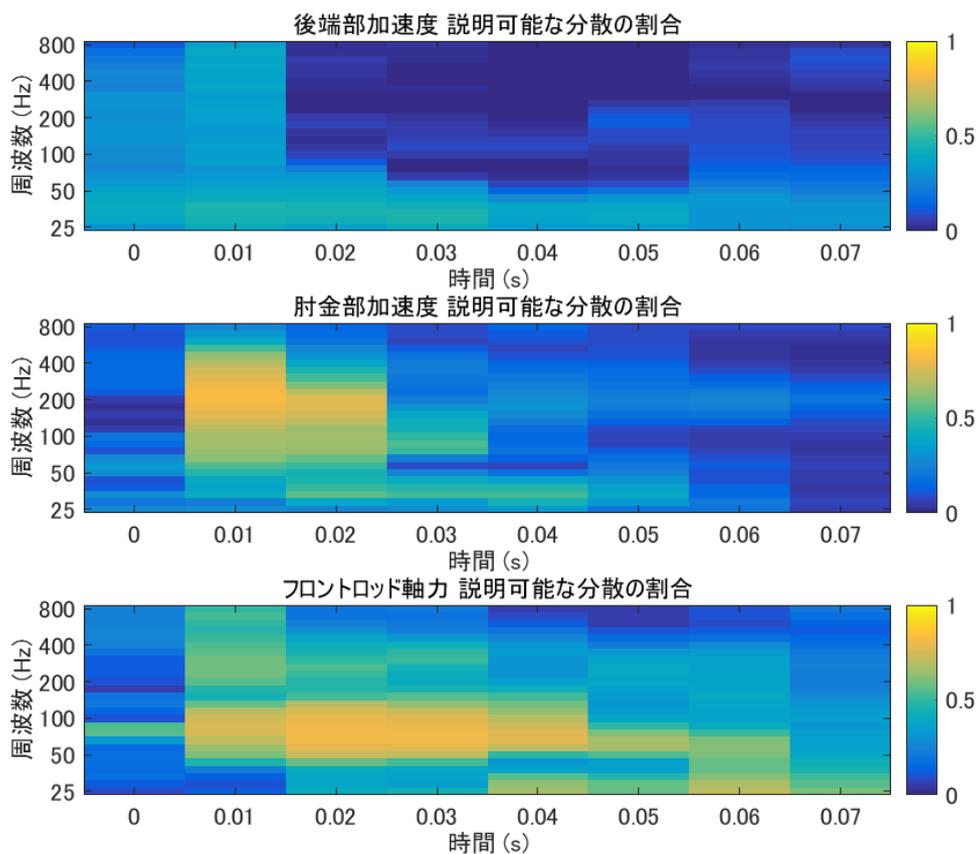


図 5.2 説明可能な分散の割合

5.3.2 予測例

約 80%の高い分散説明率を示す箇所もあった肘金部加速度およびフロントロッド軸力について、ある周波数について注目し、条件の変化によって平均と分散がどのように変化するかを確認する。

5.3.2.1 肘金部加速度

肘金部加速度については、平均値が一番大きい成分をもつ $200 \times 2^{\frac{2}{5}} \text{Hz}$ (約 260Hz) に注目する。全体の平均値と標準偏差を A、一番平均値が大きくなる普通の 3 軸目の予測値を B、一番平均値が小さくなる貨物の 1 軸目の予測値を C とすると、A~C の平均を比較したものを図 5.3、標準偏差を比較したものを図 5.4 に示す。5.2.2 項より予測値においてはどの条件においても分散および標準偏差は等しくなる。0.01 秒において、B と C の標準偏差は A の標準偏差の約半分ほどになっている。B は A に比べかなり値が大きく、0.01 秒では B の平均値から標準偏差を引いた場合でも A の平均値に標準偏差を加えた場合よりも大きい値をとっている。C は A に比べ値が小さく、0.01 秒では B の平均値に標準偏差を足した場合と A の平均値がほぼ同じような値をとっている。また、時間が経過するほど A~C 同士の平均値の差が小さくなっていることが確認できる。

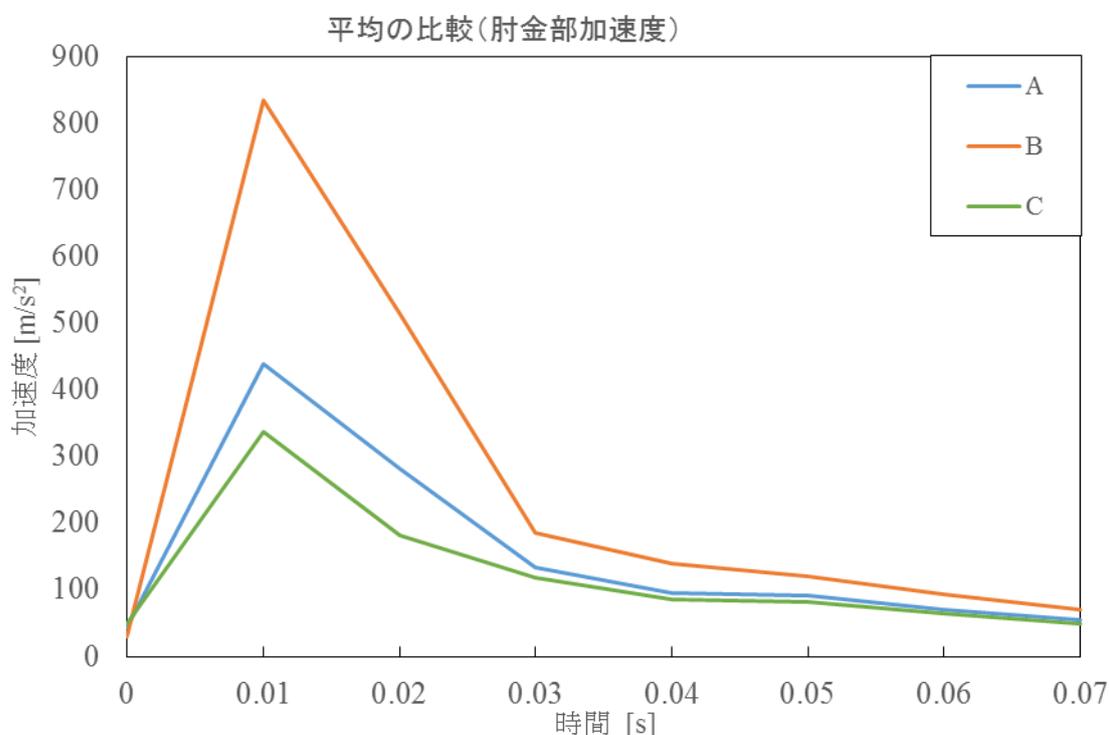


図 5.3 平均の比較 (肘金部加速度)

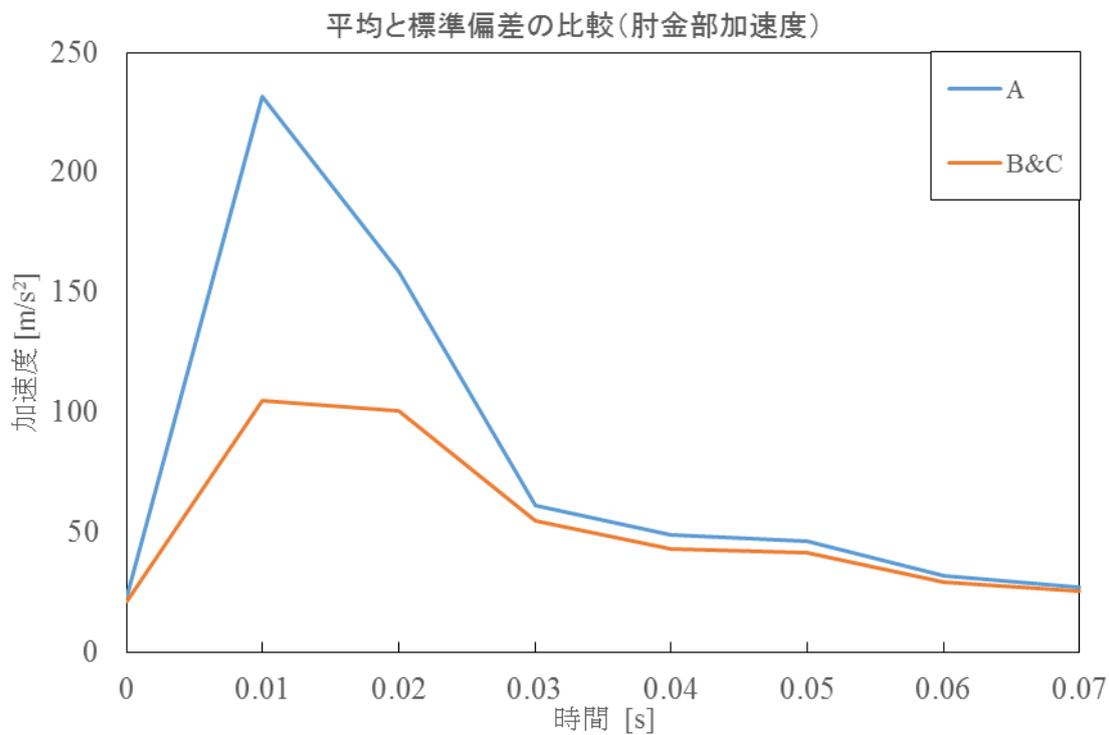


図 5.4 標準偏差の比較 (肘金部加速度)

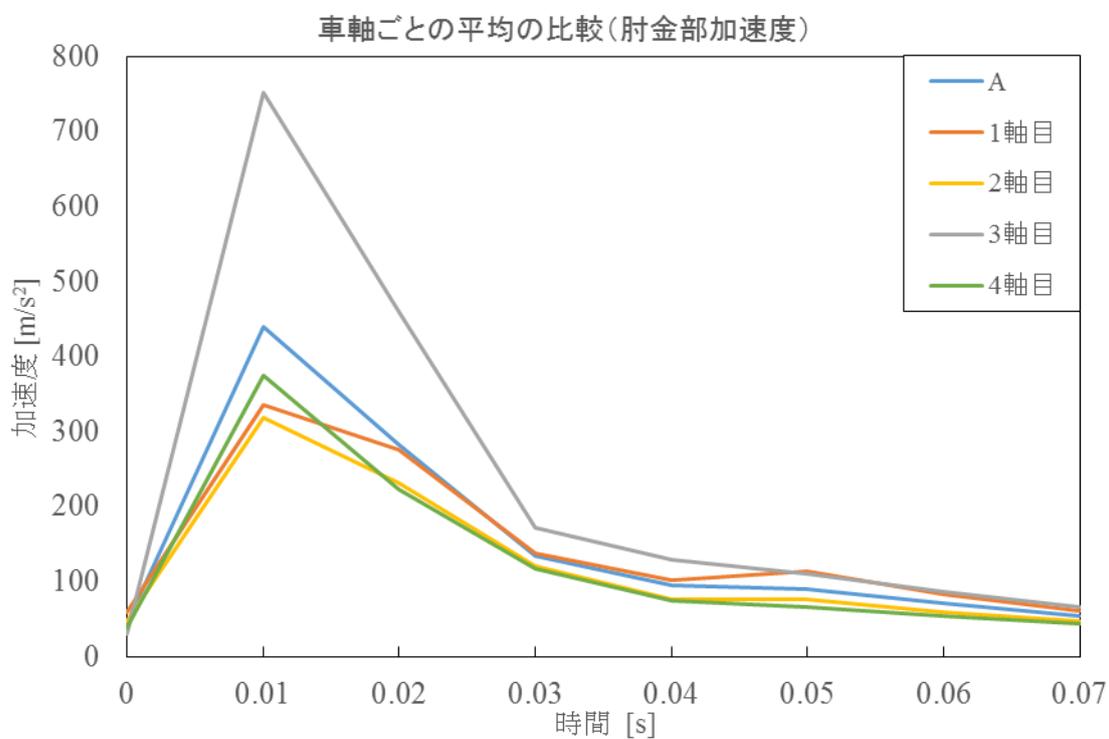


図 5.5 車軸ごとの平均値の比較 (肘金部加速度)

貨物の1~4軸目の予測値とAの値を比較したものを図5.5に示す。0.01秒の部分を見ると、3軸目はAに比べてかなり大きく、それ以外の軸はAより小さい値になっている。

また、各種別の4軸目の予測値とAの値を比較したものを図5.6に示す。0.01秒を見ると、Aと普通が同じような値、貨物と特急2はAよりも小さな値、特急1はそれよりも更に小さい値になった。また、これまでの図と同じように時間経過とともに平均値同士の差が小さくなっていく様子が確認できる。以上より、肘金部加速度の260Hz付近の振動の大きさに特に影響を与えるのは、前軸の位置とそれによる拘束条件の変化だと考えることができる。

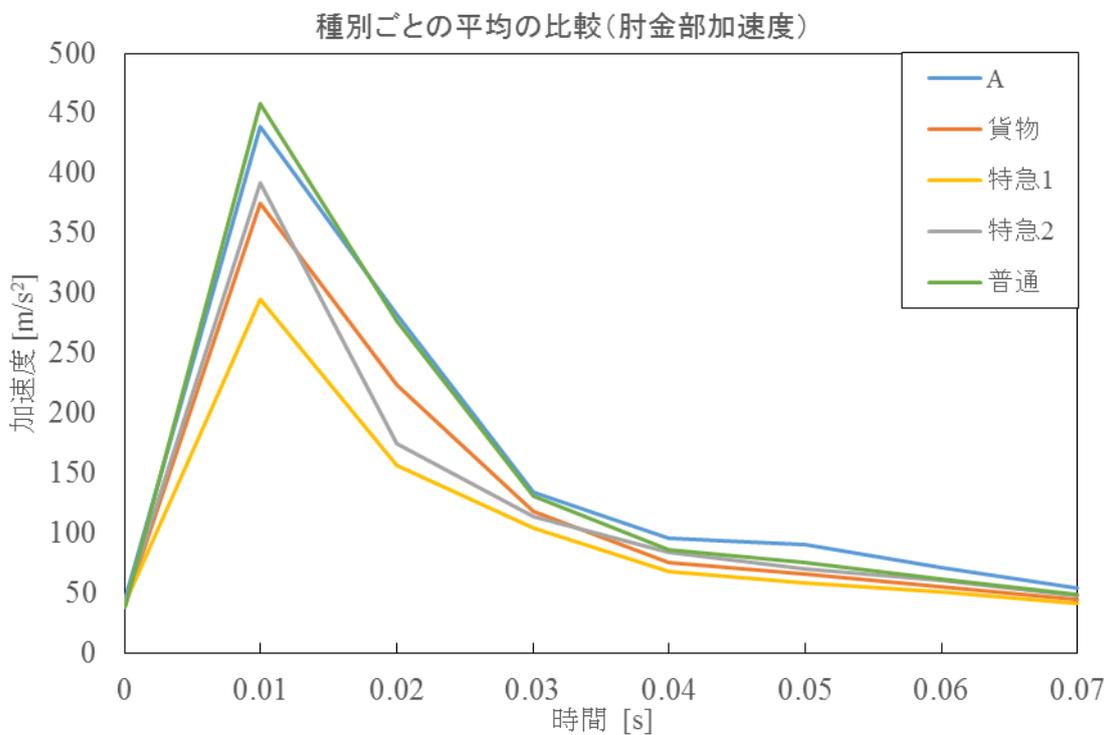


図 5.6 種別ごとの平均の比較 (肘金部加速度)

5.3.2.2 フロントロッド軸力

フロントロッド軸力については、平均値が一番大きい成分をもつ $50 \times 2^{\frac{3}{5}} \text{Hz}$ (約 75Hz) に注目する。肘金部加速度と同様にして、全体の平均値と標準偏差を A, 一番平均値が大きくなる特急 2 の 3 軸目の予測値を B, 一番平均値が小さくなる貨物の 2 軸目の予測値を C とすると、A~C の平均を比較したものを図 5.7, 標準偏差を比較したものを図 5.8 に示す。0.02 秒から 0.03 秒にかけて、B と C の標準偏差は A の標準偏差の約半分ほどになっている。B は A に比べかなり値が大きく、0.02 秒から 0.04 秒では B の平均値から標準偏差を引いた場合でも A の平均値に標準偏差を加えた場合よりも大きい値をとっている。C は A に比べ値が小さく、C の平均値から標準偏差を引いた場合には値が負になる時間も存在する。また、時間が経過するほど A~C 同士の平均値の差が小さくなっていることが確認できる。

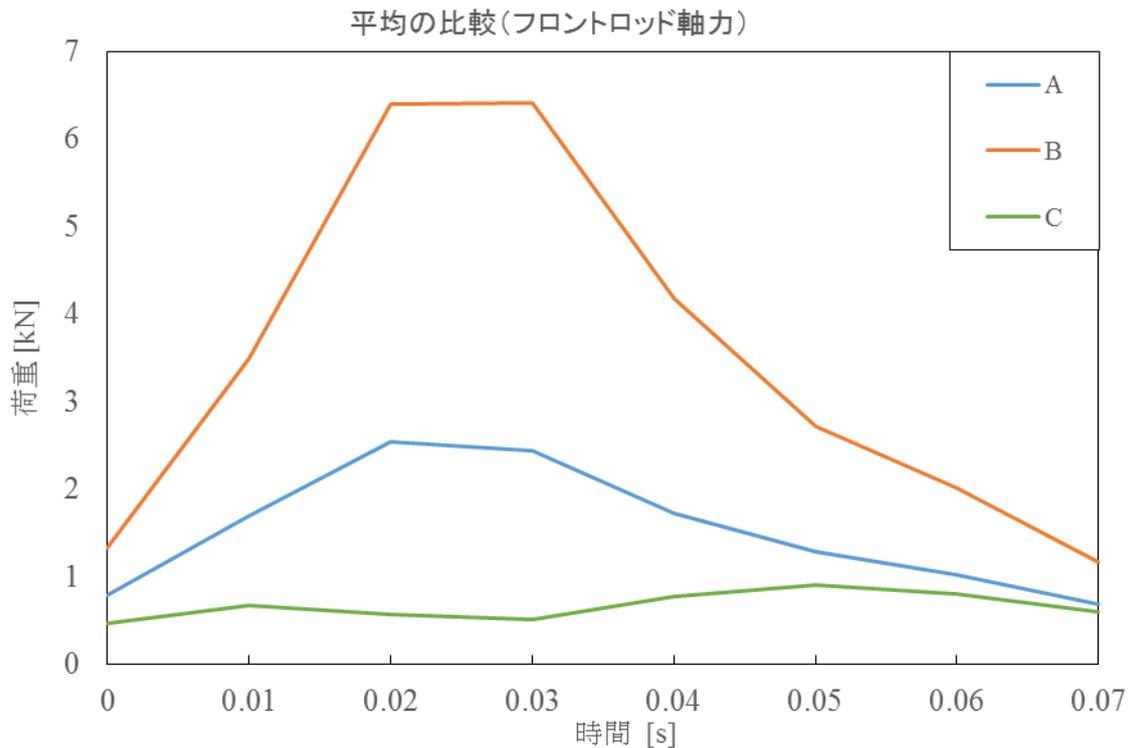


図 5.7 平均の比較 (フロントロッド軸力)

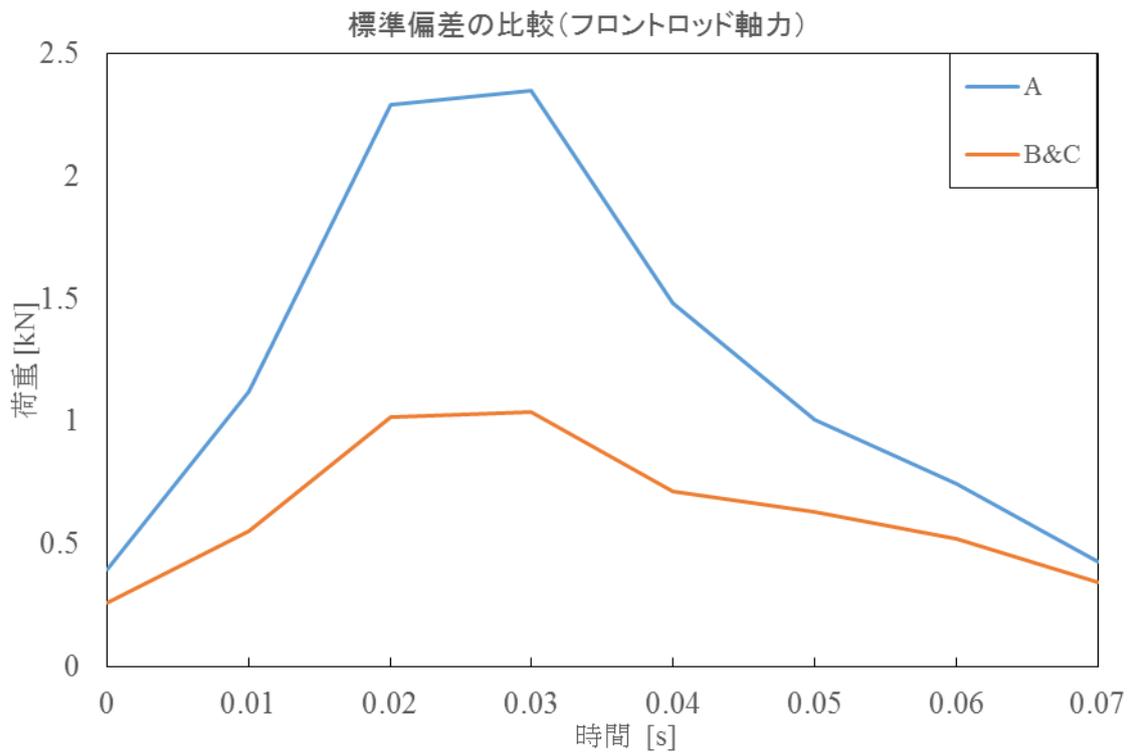


図 5.8 標準偏差の比較 (フロントロッド軸力)

貨物の 1~4 軸目の予測値と A の値を比較したものを図 5.9 に示す. 0.02 秒~0.03 秒の部分を見ると, 肘金部加速度と同様に, 3 軸目は A に比べてかなり大きく, それ以外の軸は A より小さい値になっている.

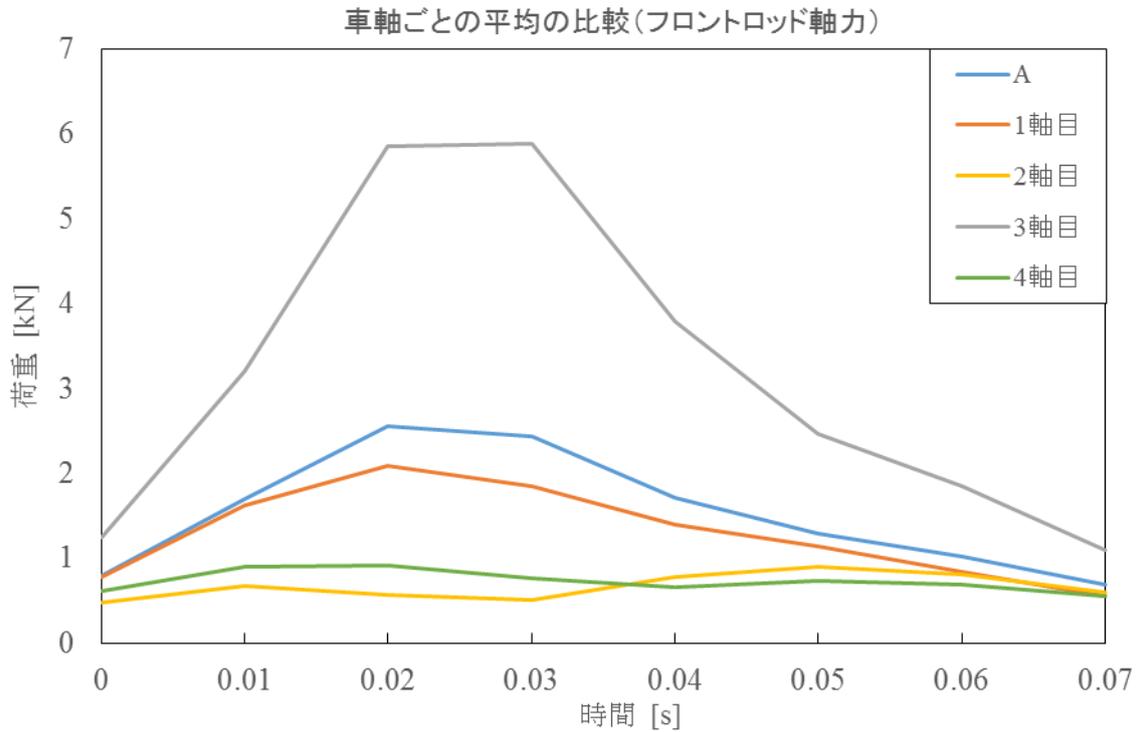


図 5.9 車軸ごとの平均の比較 (フロントロッド軸力)

各種別の 2 軸目の予測値と A の値を比較したものを図 5.10 に示す。どの種別の場合でも A より低い値となり、車軸番号よりも差が小さくなった。

以上を考慮すると、肘金部加速度と同様に、フロントロッド軸力の 75Hz 付近の振動の大きさに特に影響を与えるのは、車軸の位置とそれによる拘束条件の変化だと考えることができる。

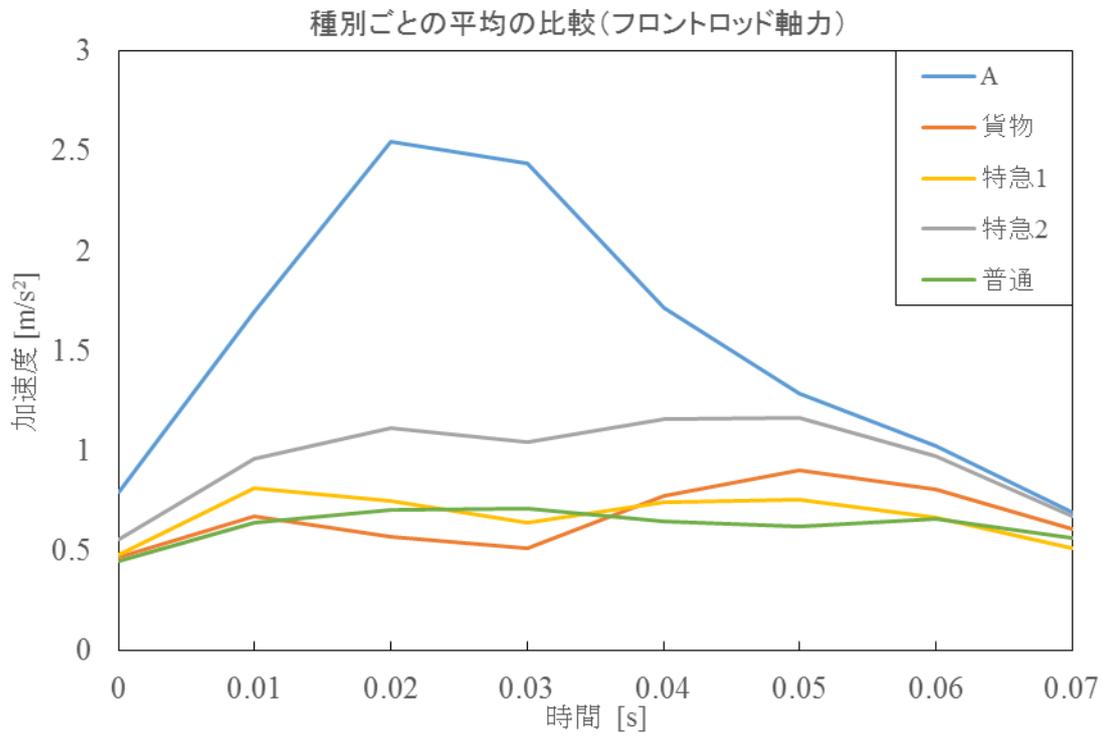


図 5.10 種別ごとの平均の比較 (フロントロッド軸力)

第6章 結論

6.1 結論

分岐器におけるフロントロッド軸受の摩耗やトングレーール肘金部の疲労の進行速度は、列車通過時の分岐器振動の大きさと相関があると推測される。本研究では、営業線の普通分岐器に対して行われた振動波形測定の実測データに対して、波形を時間-周波数領域に変換するウェーブレット変換や、主成分分析や重回帰分析などの多変量解析を行った。時間や周波数ごとに変換したデータはそれ自体では非常に分散が大きいデータであったが、列車種別と車軸番号の2つの変数を用いることで、測定箇所によっては半分以下の分散で評価することができ、より精度の高い予測を行うことが可能となった。

6.2 課題

今研究では、データ予測に2つの変数を用いたが、分岐器振動の大きさには他にも車両重量や後端部継目の継目段違い量、列車通過時のトングレーールの沈み込み量など、様々な要因が影響を与えていると考えられる。これらの要因の内の何個かを予測に用いることができれば、予測の精度を更に向上させることができると考えられる。

また、本研究では振動の大きさと分散の評価を行ったが、トングレーール後端部継目で発生した振動が分岐器の各部品にどのように伝達していくのかに関してはまだ明らかにできていない。今後は、各測定箇所の振動の相関などの分析を進めていく必要があると考えられる。

付録A 波形振幅の確率分布

A.1 確率紙 [12]

確率紙とは、あるデータ群が正規分布などの確率分布に従っているかどうかを視覚的に判別できる手法である。確率紙は横軸に各データの値、縦軸に累積確率をとり、それぞれの確率分布ごとに異なる確率紙が存在する。ある確率分布の確率紙に各データをプロットし、プロットした点が直線状に並んでいる場合、データ群はその確率分布に従っているということができる。

本研究では、各測定波形の最大値と最小値の差から最大振幅を算出し、最大値などが漸近的に従う極値分布の1つであるグンベル分布の確率紙にプロットを行った。

後端部加速度について、最大振幅を車軸の位置で分類しそれぞれについてグンベル分布確率紙にプロットしたものを図 A.1 に示す。どの車軸においても累積確率が 80% までの点は直線状に並んでいることがわかる。また、トングレール上の前軸の位置が同じである 2 軸目と 4 軸目のプロットは同じような直線で近似することができる。

グンベル分布確率紙（後端部加速度）

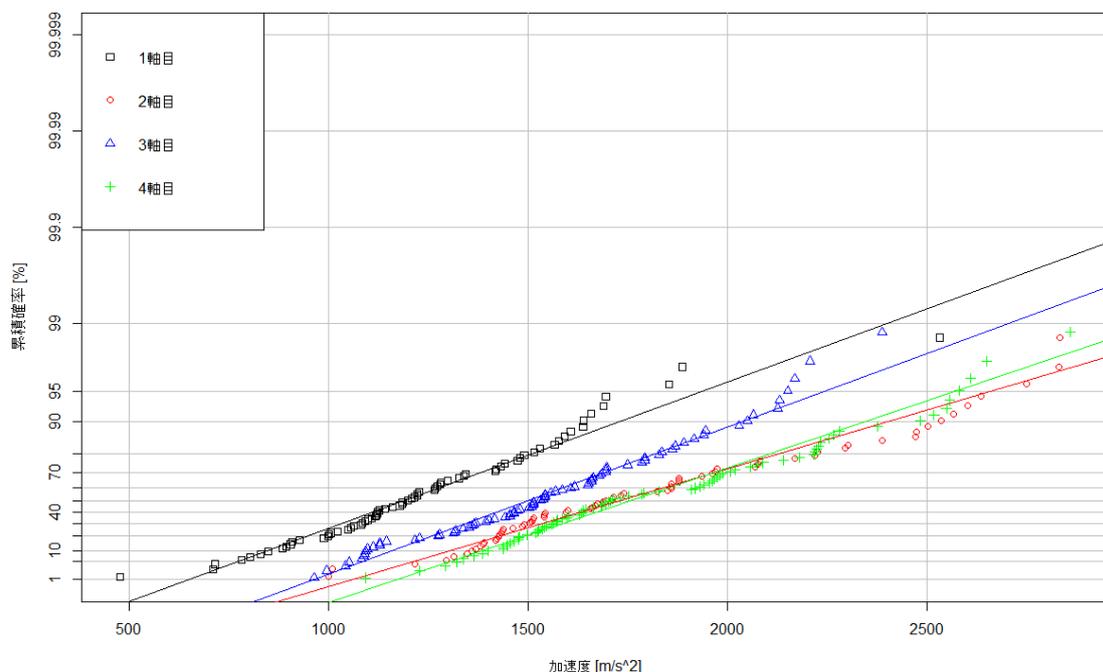
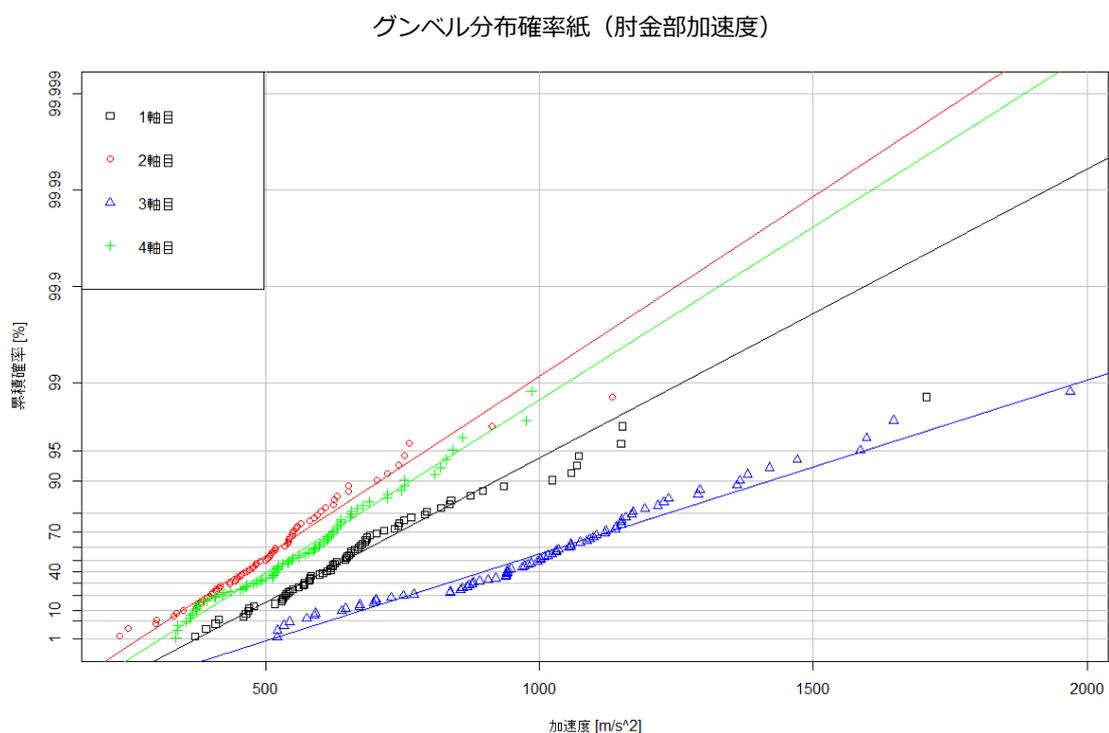


図 A.1 グンベル分布確率紙（後端部加速度）

肘金部加速度について最大振幅をグンベル分布確率紙にプロットしたものを図 A.2 に示す。トングレール上の前軸の位置が同じである 2 軸目と 4 軸目の近似直線は同じような傾きになっている。



フロントロッド軸力について最大振幅をグンベル分布確率紙にプロットしたものを図 A.3 に示す。3 軸目以外の車軸においては累積確率が 80%までの点は直線状に並んでいるが、3 軸目のみ累積確率 80%までの点においても直線状に並んでいないという結果になった。

グンベル分布確率紙（フロントロッド軸力）

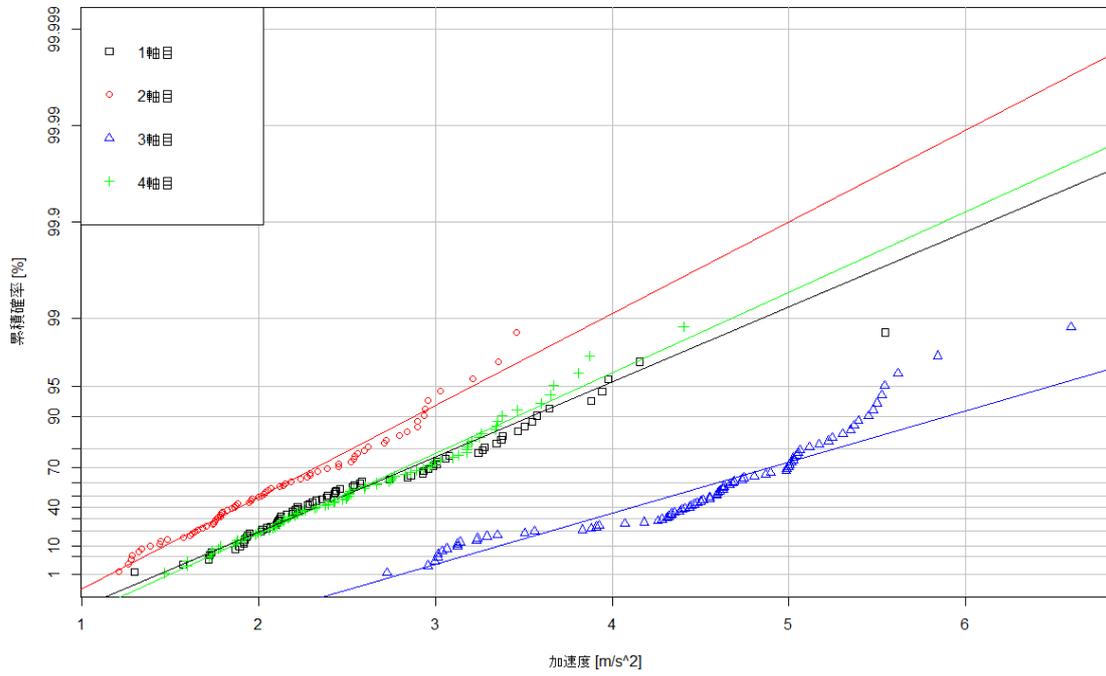


図 A.3 グンベル分布確率紙（フロントロッド軸力）

謝辞

本論文の作成にあたり，1年間指導してくださった泉教授・酒井教授・波田野助教に深く感謝いたします。特に，泉教授には研究の方針や手法について，酒井教授には統計的手法について様々なことについて相談に乗っていただきました，ありがとうございました。

東日本旅客鉄道株式会社の小林様，鈴木様，新野様には研究に必要な資料の提供や定期的な打ち合わせで貴重な意見をくださいました，本当に感謝いたします。

アルテアエンジニアリングの柴田様には研究方針や手法，ソフトの使い方など数多くの場面でお世話になりました，心より感謝申し上げます。

研究室の方々には大変お世話になりました。研究室はとても居心地が良く，良い環境で研究を行うことができました。特に，島本さんには，ソフトの使い方や研究分野の基礎知識，研究方針の相談など，本当に様々な場面でお世話になりました，感謝してもしきれません。

この他にも，家族や友人など数多くの方々に支えられてきました，本当にありがとうございました。

以上，研究に関わってくださったすべての皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 近藤祐樹, 修士論文: 列車通過時振動による分岐器付属部品の摩耗予測のための有限要素法解析, 2015
- [2] JR 東日本社内講座教本-施設技術入門-
- [3] JR 東日本社内説明資料
- [4] 近藤祐樹, 卒業論文: 有限要素法を用いた鉄道分岐器モデルにおける衝撃応答解析, 2013
- [5] 吉原鉄道工業(株) 技術開発部, 営業線実測振動データ 2014.
- [6] 森棟公夫ほか, 『統計学〔改訂版〕』, 株式会社 有斐閣, 2015
- [7] 足立浩平, 『多変量解析データ解析法 - 心理・教育・社会系のための入門 - 』, 株式会社ナカニシヤ出版, 2006
- [8] 馬杉正男, 『信号解析 信号処理とデータ分析の基礎』, 森北出版株式会社, 2013.
- [9] I. ドブシー, 『ウェーブレット 10 講』, 山田道夫ほか訳, 丸善出版株式会社, 2012.
- [10] 青木繁伸, 『R による統計解析』, オーム社開発局, 2009
- [11] Brian S. Everitt ほか, 『R による統計解析ハンドブック』, 大門貴志ほか訳, 株式会社メディカル・パブリケーションズ, 2010.
- [12] 市川昌弘, 『構造信頼性工学 - 強度設計と寿命予測のための信頼性手法 - 』, 海文堂出版株式会社, 1988