

IV-30

Wavelet 解析を用いた列車動揺管理手法の検討

北海道旅客鉄道(株) 正員 白川 龍生  
北見工業大学工学部 正員 川村 彰

1・緒言

近年の高速化に伴い、列車の走行安定性に加え、良好な乗心地確保のため、よりきめ細かい軌道管理が求められるようになった。これは、軌道狂い(静的な軌道の変化量)と列車動揺値が必ずしも相関しないためであり、所定の乗心地の確保という見地から、実際に営業運転している車両へ上下・左右方向へ負荷する振動加速度を測定するものである。

この列車動揺値を短期間で効率的に抑制するためには、動揺値が卓越している箇所について作業地点の始点および終点位置を特定し、適切な方法で補修する必要がある。加えて、今後引き続き破壊されにくい軌道構造にするためには、いかなる手法で解析しなければならないのか、そのメカニズムを把握することが極めて重要である。

そこで軌道の特徴を明確にするため、周波数の情報と時間的(空間的)な情報を得ることが可能である Wavelet 解析を用いて、列車動揺管理手法について検討し、その有用性の是非を検討した。

2・現行の軌道整備における問題点

通常、在来線で行われている軌道整備は、マヤ車(高速軌道検測車)による軌道狂い管理、又は列車の動揺度に対し保守するという手順で行われている。

前者は10m弦正矢法(Fig.1)による軌道の上下・左右方向の狂い量を算出するものである。これは3点式によるもので、両端の間隔を10mとし中央の測定輪の変化量を狂い量としている。しかし、この10m弦正矢法によって得られる検出値はFig.2の様な検出特性を有しており、波長30m程度以上もしくは波長5m程度以下の軌道狂いに対しては、その特性が著しく低下することになり、近年の高速化等、軌道を強化する必要のある長波長及び短波長領域の軌道狂いについて、十分な対応が出来にくい。このための対策としては、鉄道総研により開発されたMicro LABOCS 2+による復元波形で軌道狂いの絶対形状を推定する必要がある。

次に後者は可搬式もしくはICによる自動式の動揺測定装置による振動加速度試験結果によるものである。

これは先述の10m弦正矢法とは異なり、車上へ伝播してきた振動加速度を測定しているため、長波長をはじめ、継目落ちなどの短波長に至り、その相関を抽出することができる。この列車動揺試験で問題となるのは、1.車両形式によって測定結果にばらつきがある点。2.列車動揺に関する保守判断基準がG値のみである点、つまり測定結果を振幅の大きさのみで判断しているのである。大別して、この2点に絞られる。特に1点目は、特別急行列車の車両型式が2系統ある場合等で発生する問題である。つまり、保守基準とする優等列車が全く別の車両を使用しているため、台車の軸バネや振り制御装置からその影響が伝達され、そのまま波形の違いとなって現われる。仮に、地上設備側に全

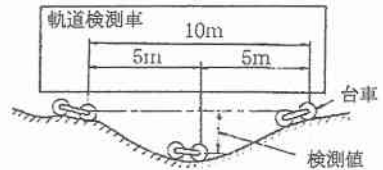


Fig.1 10m弦正矢法による測定原理

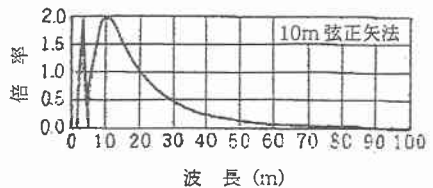


Fig.2 10m 弦正矢法による検出特性

Research on the Method to Car-body Vibration by use of Wavelet Analysis  
By Tazio SHIRAKAWA and Akira KAWAMURA

く狂いが無い場合に車両側の整備不良による過渡的応答が発生した場合、従来では定められた期間内に軌道側で保守を行わなければならないことになる。

この様に、現行の軌道整備指針には問題点が介在しており、これら影響に因らない列車動揺管理手法が求められている。

### 3・Wavelet 変換について

#### 3-1 Wavelet 変換による時間一周波数解析

Wavelet 変換とは、任意に選択された Wavelet と解析対象となる関数（又は信号）の相関を調べるための変換である。換言すれば、任意の時間（空間）領域の関数（信号）を伸縮（スケール） $a$  と平行移動（シフト） $b$  により 2 次元平面へ写像する変換であり、式(1)、(2)で定義されている。ここで Wavelet とは、Mother-Wavelet と呼ばれる元の Wavelet  $\psi(x)$  に伸縮と平行移動を演算処理したものをいう。

連続 Wavelet 変換では、

$$(W_{\psi}f)(b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (1)$$

離散 Wavelet 変換では、

$$(W_{\psi}f)(2^{-j}, 2^j) = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $f(x)$  を元の関数（信号）、 $\psi(x)$  を Mother-Wavelet、 $(W_{\psi}f)(b,a)$ 、もしくは  $(W_{\psi}f)(2^{-j}, 2^j)$  を Wavelet 係数（Wavelet 変換で求められる値）とする。

この Wavelet 係数を用いて、元の関数（信号）は、重み付けされた各 Wavelet の和として表現される。Wavelet 係数を用いた表現は、時間的（もしくは空間的）に過渡的な形状を有する関数（信号）の分析に有利と言えよう。著者らは、これら利点を考慮した上で列車動揺解析へ応用することとした。

#### 3-2 Mother-Wavelet について

Wavelet 変換において、Mother-Wavelet はユーザ側で自由に選択することができる。それゆえ、Mother-Wavelet の特性により様々な分野への応用が可能となる訳だが、その反面、Mother-Wavelet 次第で同じ関数（信号）を解析しても全く違った結果を生じる。ゆえに Wavelet 変換では、解析目的を明確化し、それに応じた Mother-Wavelet を適切に選択することが重要である。

Fig.3-a 及び Fig.3-b は、点枠で囲んだ同一の列車動揺波形について Mother-Wavelet を変えて解析

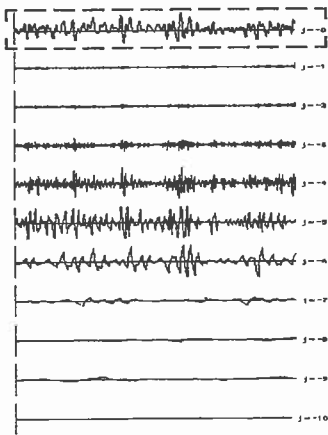


Fig.3-a Daubechies N=2

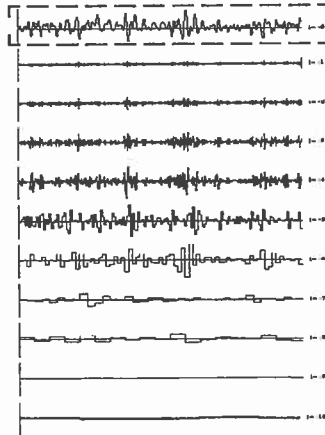


Fig.3-b Haar

した結果を示したものである。分解波形を比較すると、形状が異なる点が明らかである。

今回著者らは、様々な試行の結果、Mother-Wavelet として Daubechies  $N=2$  (Fig.4) を選んだ。選択の根拠としては、列車動揺波形が離散値系であり、かつ過渡的応答を検出する目的から、 $\psi(x)$  が解像度の面で有利であるからである。

ここで、離散値系と呼ばれる

言葉は、連続関数をサンプリングして量子化されたデータを扱う系に対して用いられるが、Wavelet 解析における離散値系とは、最初から離散化されたデータを前提とする線形変換をいう。

また、大きな特徴としては、離散化されたデータの個数が2のべき乗でなければならないことである。近年のデジタル化された測定機器は、解像度とサンプリング個数がいずれも2のべき乗であるため、離散値系 Wavelet 解析は、こうした意味からデジタル測定器と相性が良く、解析法として大変興味深い。

#### 4・解析結果

##### 4-1 解析対象の測定データ

鉄道では秋季を中心に、Fig.5-a,5-bの様な空転が発生するケースが少なからず見受けられる。これは、落葉がレール頭面に載った際などの場合に見られる。車輪踏面とレール面との間でスリップ現象が生じ、レールがえぐり取られるものを空転という。重量のある貨物列車の機関車が原因となる場合が多い。

こうした空転摩擦によるレール頭部凹凸(短波長軌道狂い)は列車の振動乗心地を大きく低下させるとともに、道床バラスト部における噴泥の発生原因になるなど、軌道構造に大きな損傷をもたらすことになる。

そこで今回、当社営業線(根室本線:御影一上芽室間)において10月中旬に発生した52箇所の空転傷について、10m弦復元波形を用いた軌道の高低狂い及び列車動揺試験結果(283系振子式特急気動車)をWavelet解析した。

解析は、試験区間を空転付近の600m分を抽出し、0.25m間隔で合計2,400箇所の地点データを採取して行った。前述した通り、Mother-Waveletとして、Fig.4のDaubechies N=2を用いる。

##### 4-2 解析結果

###### (a)パワースペクトルによる解析

従来より、溶接部及び波状摩耗の凹凸より長い波長の軌道狂いに関する特性を判断する方法として、パワースペクトル密度を用いた解析が頻繁に活用されていた。

一般に、高低狂いについては右下がりの曲線となっており、波長が短くなるに従いその成分が少なくなることと、10m(0.1c/m)付近で屈折し、これより長い波長については、PSD値の増加の程度が少ない傾向を有している。今回解析した空転発生区間についてはFig.6-a,6-bの様な結果が得られた。Fig.6-aは10M弦復元波形によるものであるが、空間周波数0.3c/m,0.5c/m,0.7c/m等、波長10m未満の短波成分のピークが幾つも発生している。この事は、

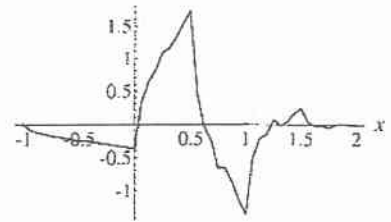


Fig.4 Mother-Wavelet (Daubechies N=2)

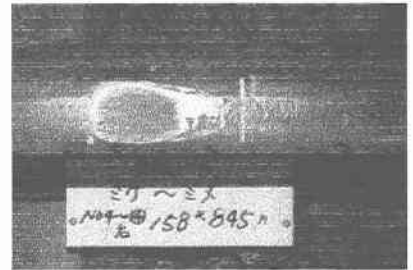


Fig.5-a 空転レール (その1)



Fig.5-b 空転レール (その2)

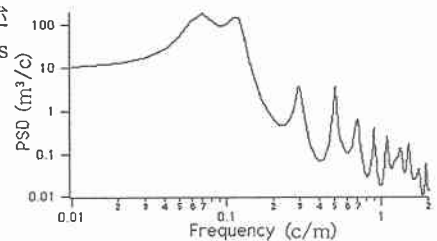


Fig.6-a 復元波形のパワースペクトル

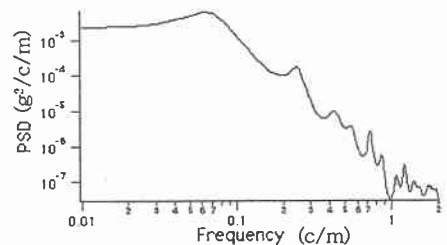


Fig.6-b 動揺波形のパワースペクトル

空転現象の特異性を示している。また、列車動揺値より Fig.6-b) を算出したが、こちらも右下がり曲線部分に細かなピークが現われており、その影響を確認することができる。

しかしながら、このパワースペクトル密度を用いた解析は、以上の様な波長特性を捉える上で非常に有用な手法として評価出来るが、測定データ全体が対象となるために時間（もしくは空間）領域に関する情報を有しない。このため、「信号のどの部分が、局部的にどのような周波数を持っているのか」といった実際の軌道保守現場で要求される部分については十分ではない。

これに対し、Wavelet 解析では時間領域と周波数領域を同時に表現し、その影響を解析することが可能となる。換言すれば、軌道保守管理における実務レベルで求められてきた時間周波数解析が可能という事である。この点に着目し、以下に解析を行った。

(b)Wavelet 解析

Fig.7は、10m弦復元波形による軌道狂い（高低狂い）をWavelet解析した結果である。Mother-Waveletについては、Daubechies N=2を用いた。図中、点枠で示された箇所が、空転の発生した区間である。また、縦方向の破線で示した部分は、分岐器・踏切、及び噴泥による継目落がある箇所である。

信号分解の考え方としてはFig.8に示す多重解像度解析を用いた。すなわち、信号Sを長波成分 $cA_1$ ・短波成分 $cD_1$ へ分解し、以下長波成分について演算を繰り返す。3段階の場合、 $S = cA_3 + cD_3 + cD_2 + cD_1$ で元の信号を再現することが出来る。この際、レベルを1段階下げる毎に解

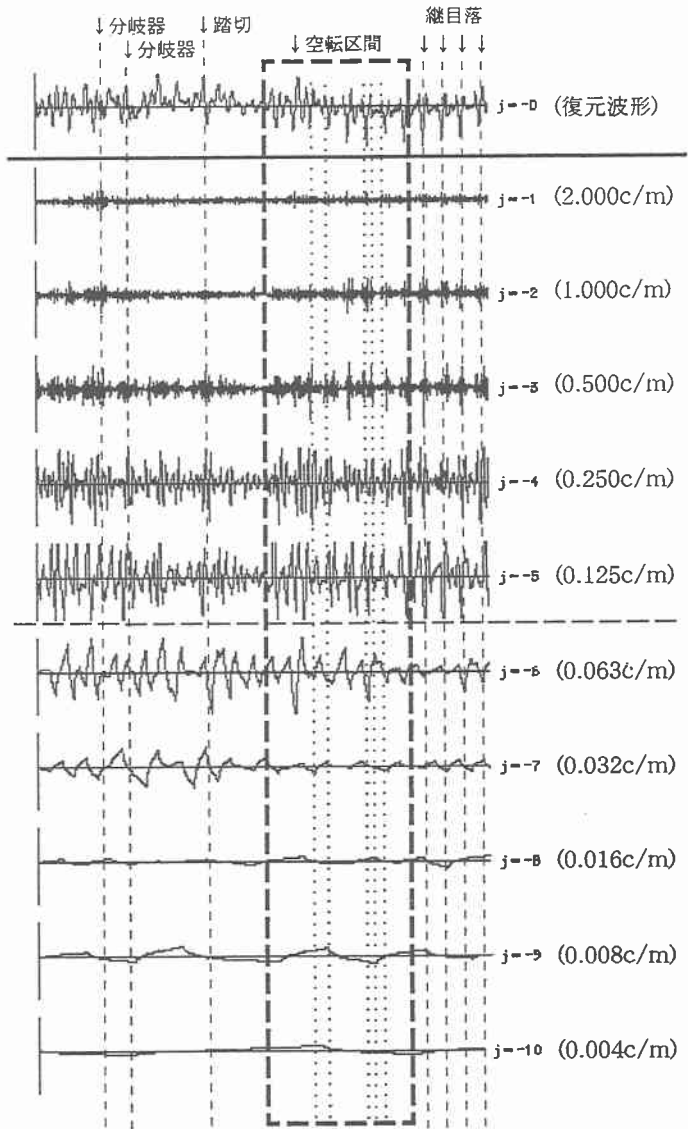


Fig.7 10m 弦復元波形による高低狂いのWavelet 解析結果 (Daubechies N=2 を Mother-Wavelet とする)

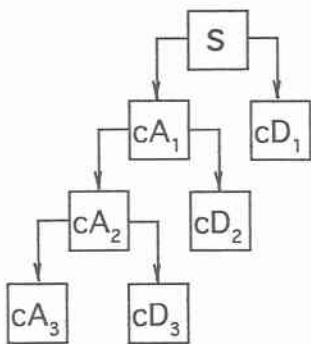


Fig.8 信号分解の考え方 (3段階の例：Sは信号)

像度は半分になる。今回の解析ではレベルを10段階で構成した。

Fig6-aで解析した様に、空間周波数 $0.3c/m, 0.5c/m, 0.7c/m$ 等、波長10m未満の短波成分のピークが幾つも発生していた。横方向の破線より上の波長( $0.125c/m = \text{波長}8m$ )が相当する。パワースペクトル解析結果で明らかとなった空間周波数の影響に併せ、時間の概念を加味すると非常に理解しやすい。この事からも、Wavelet解析が振動解析に適した合理的な手法であることがわかる。

$1.000c/m \sim 0.125c/m$ の波形で、同じ位置において等間隔にピークが現われているが、これが25m毎に設けられる継目で、今回はその継目の間に細かくピークがあることを確認したい。これが空転による高低狂いである(点枠内に示した点線部分:影響の強い5箇所を表示)。マヤチャートでは、空転箇所が継目として検知された事を考慮すると、空転が列車動揺へ与える影響が大きいものと推定される。

続いて、Fig9-a,9-bに列車動揺波形をWavelet解析した。Fig.9-aは空転補修前、Fig.9-bはレール肉盛溶射工法による空転補修後の結果である。

軌道狂いと列車動揺値は縦軸の単位が異なる(Fig6-a,6-b参照)ため、軌道狂いから算出した波長と列車動揺値は必ずしも一致しない。今回の解析結果比較では、空転の影響が現われた軌道狂いの波長域は空間周波数 $=2.000c/m \sim 0.125c/m$ の範囲内であったのに対し、列車動揺値の影響が現われた波長域は空間周波数 $=0.500c/m \sim 0.032c/m$ となった。これは列車動揺値が車両上で行われるために、台車等の影響で衝撃が緩和されたため、反応時間もリアルタイムではなく、やや遅れる。

図中、丸印で囲まれた箇所は、空転補修効果が著しく現われた地点である。この試験区間については

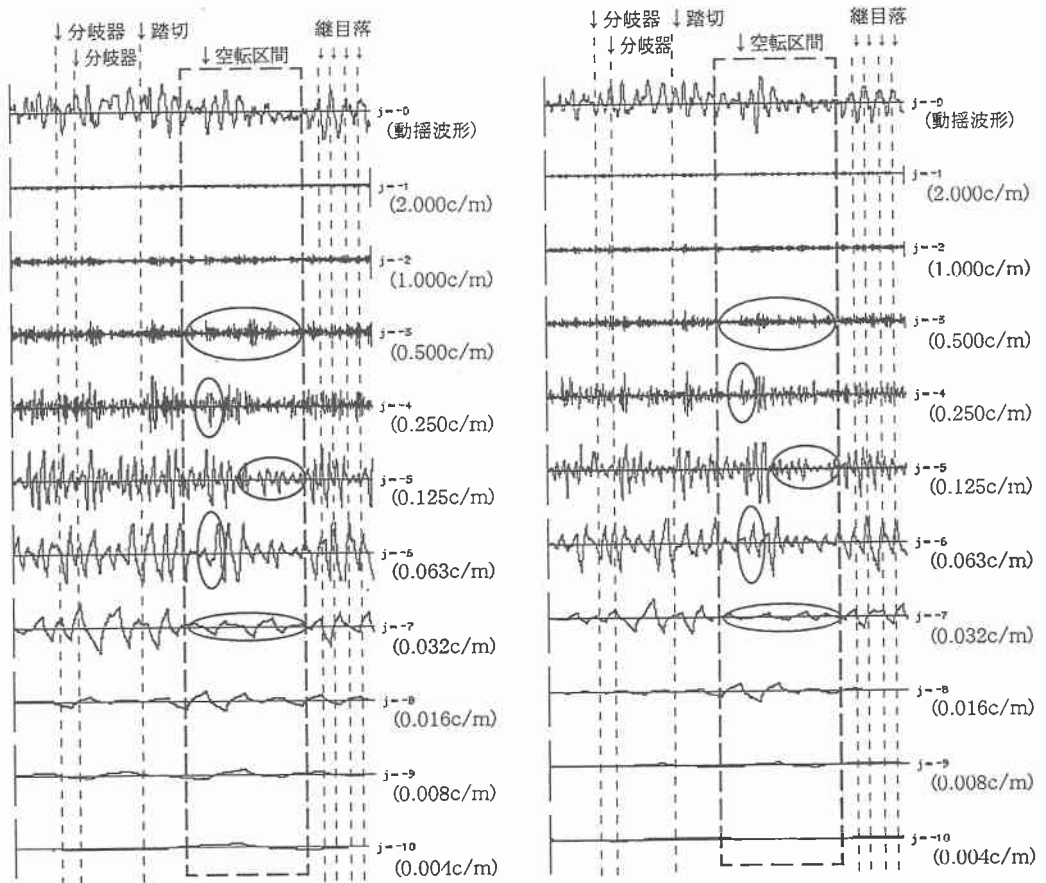


Fig.9-a 動揺波形のWavelet解析結果(補修前)  
(Daubechies N=2)

Fig.9-b 動揺波形のWavelet解析結果(補修後)  
(Daubechies N=2)

レール肉盛溶射工法による空転補修以外の保守作業は行われていない。そのため比較検討は容易である。ここでFig.9-a及び9-bにおいて、空間周波数 $=0.016c/m$ を超過した波形を比較すると、ほとんど同じ形状である事が確認できる。保守作業が行われていないため長波長の変動は考えにくい。この点からもWavelet解析の信用度が高いことが認められる。

以上を換言すれば、Wavelet解析は任意区間における保守効果の確認にも有用であると言える。

## 5・結言

これまで、Wavelet解析を用いた列車動揺の時間周波数解析について述べてきた。本研究を総括すると、以下に要約することができる。

- (1) 従来行われてきたパワー・スペクトルによる解析は波長特性を捉えるという観点では有効であるが、時間領域の情報がないため、現場における実務レベルでは十分ではない。これに対し、Wavelet解析では、時間領域と周波数領域を同時に表現できる。つまり「信号のどの部分が、局所的にどのような周波数を持っているのか」という、保守作業へ応用するための具現化された指標を提案できる。
- (2) 軌道狂いと列車動揺は、車両の周波数伝達関数を通じて密接に関係している。このため、相互にWavelet解析を行い、保守上効果のある空間周波数領域を推定しておく必要がある。各現場には可搬式列車動揺測定装置が常備されており、空間周波数領域を特定できれば、年に数回の割合で実施されるマヤ車のデータを待たなくとも列車動揺値で短波～長波に至る様々な軌道狂いを近似・再現出来る。また、保守効果の高い作業を行うためのの始点・終点キロ程をデジタル値で変換すれば、実務レベルでの迅速な解析データ活用によるメンテナンスフリー化を推進することも可能となる。

今後の課題としては、最適化されたMother-Waveletの開発が挙げられる。今回用いたDaubechies  $N=2$ は形状が左右不均等であり $\psi(x)$ の角度も急勾配のため、長波領域ではMother-Waveletの形状に類似した波形が出力されるに至った。鉄道車両の振動特性を考慮したMother-Waveletの開発が急務である。また前述の通り、様々な作業における保守上効果のある空間周波数領域の推定も早急に行わなければならない。現在、人力で行っているTT(タイタンバ)によるむら直しは $2.000c/m \sim 0.125c/m$ 程度の波長の補修に効果があり、MTT(マルチプルタイタンバ)による総突き固めによる保守効果は $2.000c/m \sim 0.016c/m$ の広い範囲内にわたる事が解明されている。今後は、道床交換やロングレール交換、PCマクラギ化等の軌道整備作業効果の確認、無道床橋梁や踏切、分岐器といった構造物に起因する列車動揺の解析を行い、乗心地改善に向けた取り組みを活性化させたい。

なお、本研究のデータ解析に際し、北海道旅客鉄道(株)工務部保線課 橋場 孝幸氏に多大なる協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

## <参考文献>

- [1] 榊原 進 著:ウェーブレットビギナーズガイド(1995)、東電大出版局
- [2] 芦野 隆一、山本 鎮男 著:ウェーブレット解析一誕生・発展・応用(1997)、共立出版
- [3] 斉藤兆古 著:Mathematicaによるウェーブレット変換(1996)、朝倉書店
- [4] Y.T.Chan 著:WAVELET BASICS(1995)、Kluwer Academic Publishers
- [5] 佐藤吉彦、梅原利之 著:線路工学(1987)、日本鉄道施設協会
- [6] 須田征男、長門 彰、徳岡研三、三浦 重 編:新しい線路(1997)、日本鉄道施設協会
- [6] 須田義大 他:コルゲーション発生・成長過程のウェーブレット解析(1997)、第4回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、pp.91-94
- [7] 川村 彰、後藤 典次:Wavelet関数を用いた路面特性の把握方法について(1996)、土木学会北海道支部論文報告集 第52号(B)、pp.520-523
- [8] 白川龍生、川村 彰:鉄道車両の車両特性に関する研究-Wavelet理論を活用して-(1997)、土木学会北海道支部論文報告集 第53号(B)、pp.412-417