

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

実験モード解析のための  
新たな周波数応答関数推定方法の研究

A Study on Improvement in  
Frequency Response Function Estimation for  
Experimental Modal Analysis

申 請 者

成田 正夫

Masao Narita

2007 年 3 月

機械の振動・騒音問題への解決方法として、古くからさまざまな実験的な方法が用いられてきた。その中で、機械構造に人為的な加振力を加えて加振力と振動応答とを計測し、それらの関係の分析にもとづいて対象構造の振動特性の数学モデルを得る手段がある。この方法は実験モード解析と呼ばれる方法である。実験モード解析は実用面で活用されているものの、解決すべき技術課題が存在する。

実験モード解析は、一般に振動試験による周波数応答関数推定の第一の工程と、この周波数応答関数データの分析にもとづく数学モデル同定の第二の工程から成る。第一の周波数応答関数推定の工程では、加振機により機械構造に加振力が加えられ、これと同時に加振力信号と振動応答信号とが計測される。つぎにこれらの計測データの数値処理によって両者の間の周波数応答関数が推定される。以上の工程は構造にあらかじめ設定された複数の測定点について行なわれ、それぞれの周波数応答関数の推定結果は加振点と応答点に関する位置と方向の情報を伴って記憶装置に保存される。第二の数学モデル同定の工程では、まず同定結果の利用目的を考慮して種々の方法の中から適切な同定方法が選択される。つぎに選択された方法によって第一の工程で取得された周波数応答関数データの分析がおこなわれ、構造の振動挙動を表す数学モデルが導き出される。

これらの工程のうち周波数応答関数の推定の工程において、測定点が不適切であったり、推定値に偏り誤差が含まれると、数学モデルの同定の工程でいかに優れた方法が使われたとしても同定される数学モデルの信頼性が低下する。したがって、実験モード解析において構造の振動特性を忠実に表す数学モデルを得るためには周波数応答関数の推定が特に重要である。

しかし、周波数応答関数の推定には未解決の課題が多く残されており、その中のいくつかは数学モデルの同定に深刻な影響を及ぼす。したがって、これらの課題の解決が重要と考えられる。この点から、本論文では実験モード解析のための周波数応答関数推定方法の改良に重点を置き、研究の目的としている。

まず論文の構成の概略を述べておく。論文では研究の背景・目的、および論文の構成について説明している。つぎに周波数応答関数の推定の過程において解決が必要な具体的な課題を挙げている。この中から特に重要であると思われる課題を抽出し、これらの課題に関係する従来の研究の調査を行い、研究の現状と問題点の整理を行なっている。つぎにこれらの課題それぞれについての解決方法を提案し、提案する方法に関する実験を行い、その有効性を実証をしている。最後にそれぞれの実験で得られた結論にもとづいて、本論文の目的である周波数応答関数推定方法の改良の成果についてまとめている。

具体的には本論文は5章から構成されており、以下に各章の内容を述べる。

第1章では、まず振動・騒音問題の解決手段としての実験モード解析の役割について述べ、周波数応答関数推定の重要性と解決すべき問題点の存在を示している。つぎに周波数応答関数の推定過程を、試験の準備の過程、加振と信号取得の

過程，および信号処理による周波数応答関数の推定演算の過程に大別し，それぞれに関する残された課題を挙げ，その中から優先して解決することが必要な課題を選択している．つぎにそれらの課題のそれぞれに関係する文献を調査し，従来の研究の現状と問題点の整理を行っている．その結果から本研究では以下の三つの課題を取り上げている．

- (1) 周波数応答関数推定の基準点となる参照点の位置，方向，および個数を迅速に選ぶための合理的でかつ実用的な方法が確立されていない．
- (2) 多点同時加振による周波数応答関数推定に関し，加振力の相関に起因する推定誤差を回避する方法が確立されていない．
- (3) 低振動減衰構造を対象とする周波数応答関数推定に関し，信号標本化に起因する推定誤差を回避する方法が確立されていない．

最後に論文の構成を示している．

第2章から第4章は課題の解決方法の提案と実験に関する章である．それぞれの章において以上の課題に対する解決方法を提案し，提案した方法に関する実験を行い，実験結果に基づいて提案した方法の有効性について示している．

第2章では，周波数応答関数の推定のための適切な参照点の位置・方向と個数とを選択するための合理的な方法が確立されていないという周波数応答関数推定に共通する課題に対し，以下の方法を提案している．

まず参照点の候補点について測定された周波数応答関数行列を対象として，離散周波数ごとに特異値分解を行なう．つぎにその過程で得られる特異値に対応する固有ベクトルと参照点を表すベクトルとの方向の同一性を離散周波数ごとに調べ，その結果を周波数関数として表す．上記同一性の大きさを参照点選択の指標とし，同一性の小さな点を参照点として選択することを避ける．

提案した方法を検討するため，ばね-質点系のいくつかの構造モデルを想定し，それらの構造に設定した測定点を上記指標で評価している．その結果，提案した方法によると参照点として選択することを避けなければならない測定点，すなわち固有モードの節と一致する測定点や固有モードの振動の方向と直交する方向の測定点を明確に特定できることを示している．さらに周波数応答関数推定値の振幅表示において隣り合う二つの固有振動数のピークの一方が他方のピークの裾野に埋没し，見かけ上，固有振動数の存在が認識できない場合においても，それらのピークそれぞれに対応する固有モードを最も強く励起する加振点，すなわち，参照点としてふさわしい測定点を選択できることを示している．

第3章では，構造と加振機との相互作用によって加振力の間に相関が生じるために周波数応答関数の推定値の信頼性が低下するという，多点同時加振試験における周波数応答関数推定の課題に対し，以下の方法を提案している．

まず加振機の駆動信号と構造への加振力信号との間の周波数応答関数，および加振機の駆動信号と構造の振動応答信号との間の周波数応答関数を推定する．複

数の加振機に対する駆動信号は相互に無相関であることが保たれるため，これら二種の周波数応答関数は入力信号の相関性に起因する推定精度の低下が起こらない．目的とする加振力信号と振動応答信号の間の周波数応答関数は，これら二種の周波数応答関数の演算によって推定できるため，この方法によって加振力の相関の影響を受けずに精度の良い周波数応答関数を得ることができる．

提案した方法の有効性を検討するため，実際の構造を対象とする周波数応答関数の推定実験を行い，提案した方法と従来の方法との間で推定結果を比較している．その結果から従来の方法では固有振動数の近傍の周波数において周波数応答関数の推定精度が著しく低下する現象が起こり，またこれが原因となって，数学モデルの同定の工程において，正しい固有モードを得ることができないことを示している．これに対して提案した方法によると，加振力信号相互間に相関がある場合においても周波数応答関数の推定精度が低下する現象が発生せず，固有モードを精度良く同定できることを確認している．

第4章では，低減衰構造の周波数応答関数推定において信号の標本化に起因する推定誤差を回避する方法が確立されていないという課題に対し，以下の方法を提案している．

まず構造への加振力信号，および，振動応答信号に対して十分長い時間の標本化を行い，零値から始まり零値に収束する孤立波として両信号を取得する．つぎにそれぞれの信号標本に周期インパルス関数のたたみ込み演算を行なう．これは信号標本の周期的な加算を意味し，その結果信号標本は周期関数に変換される．変換後の信号標本にもとづいて周波数応答関数の推定演算を行なうことにより，偏り誤差のない推定値を得ることができる．

提案した方法を検討するため，自由支持のはり構造物の有限要素モデルを対象とし，従来法と提案した方法との周波数応答関数推定過程を再現する数値シミュレーションをおこなっている．また一方で，実構造物の周波数応答関数推定試験に従来法と提案する方法とを適用し，両者を比較している．その結果，数値シミュレーションと実構造物の試験の両方において，従来の方法で発生する推定誤差を提案する方法では回避できることを確認している．

第5章では，以上で得られた成果を総括し，本論文の結論を導いている．本論文では，実験モード解析における周波数応答関数推定についての優先課題，すなわち，参照点の選択に関する課題，加振力の相関に起因する誤差に関する課題，および，信号の標本化に起因する誤差に関する課題に対し，それぞれの解決方法を提案し，それぞれの有効性を実験によって実証できたとしている．

以上から，提案した方法は本研究の目的である周波数応答関数の推定方法の改良に寄与し，実験モード解析における数学モデルの同定精度の向上に大きく貢献するものであるという結論を得ている．最後に本論文の成果は，各種の実機械構造製品の振動・騒音問題の解決に資すること大であることにも言及している．

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	<p>○(1) 実験モード解析における参照点の選択方法, 日本機械学会論文集, 65 巻 636 号, C 編, 1999-8, pp. 3161-3166, 成田正夫.</p> <p>○(2) 加振実験に基づく構造物のモデリング (第 1 報, 時間窓に起因する周波数応答関数推定誤差の回避方法), 日本機械学会論文集, 60 巻 569 号, C 編, 1994-1, pp. 38-43, 成田正夫・小泉孝之.</p> <p>○(3) 多点加振による構造物のモード解析 (第 1 報, 加振機の駆動信号を用いた周波数応答関数の推定法), 日本機械学会論文集, 56 巻 523 号, C 編, 1990-3, pp. 537-543, 成田正夫・山崎芳昭・小泉孝之.</p> <p>○(4) Modal Parameter Estimation Based on Multi-point Excitation, The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP Vol.179, 1989, pp. 43-47, Koizumi, T., Narita, M. and Yamazaki, Y..</p>
2. 講演	<p>(1) 多点加振による構造物の振動解析 (第一報, 加振機の駆動信号を用いた周波数応答関数の推定法), 日本機械学会第 67 期全国大会講演会, 1989 年 9 月, 成田正夫・山崎芳昭・小泉孝之.</p> <p>(2) 多点加振による大型衛星の動特性同定, 日本航空宇宙学会第 32 回宇宙科学技術連合講演会, 1988 年 10 月, pp. 92-93, 山崎芳昭・成田正夫・小泉孝之.</p>
3. その他	<p>(論文)</p> <p>(1) 真空遮断器の動作特性の最適化に関する研究, 日本機械学会論文集, 62 巻 596 号, C 編, 1996-4, 小泉孝之・辻内伸好・平床 嘉英・成田正夫.</p> <p>○(2) Microcomputer Based Multi-Dimensional Dynamic Simulation for Boardsailing, Intl. Conf. On Industrial Electronics, Control and Instrument, pp. 205-210, 1984, Koizumi, T. and Narita, M..</p> <p>(総説)</p> <p>(1) CAE システムの構造設計への適用 (遮断器の設計・開発システム), 日本機械学会関西支部第 208 回講習会, 1998-12, 成田正夫.</p> <p>(刊行物)</p> <p>(1) エレベータの振動解析-居室騒音低減への応用, 三菱電機技報, Vol. 57, No. 6, 1983, pp. 442-445, 杉山美樹・成田正夫.</p> <p>(2) 工業用千鳥縫いミシンの振動対策, 三菱電機技報, Vol. 53, No. 4, 1979, pp. 321-325, 石井明・村松直樹・吉本宰・成田正夫.</p>

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>(3) ミシンの新形布押さえ装置 , 三菱電機技報, Vol. 52, No. 2, 1978, pp. 188-192, 井上登志男・成田正夫・堀本耕一.</p> <p>(4) 誘導電動機の電磁騒音低減法, 三菱電機技報, Vol. 51, No. 8, 1977, pp. 548-522, 小泉孝之・成田正夫・山田一秀・持永元喜.</p> <p>(講演)</p> <p>(1) 真空遮断器におけるチャタリング現象の動特性およびその低減に関する研究, 関西支部 第 73 期定時総会・講演会・見学会・懇親会・ 関西学生会学生員卒業研究発表講演会開催日 1998 年, 畠山 哲, 辻内伸好, 小泉孝之, 成田正夫.(添付せず)</p> <p>(2) 振動減衰材の基礎的な特性試験, 第 29 回宇宙科学技術連合講演会, 1987, pp. 432-433, 三津間秀彦・山本昌孝・成田正夫・谷沢一雄・小泉孝之.</p> <p>(3) モード解析による構造物の動解析, 日本航空宇宙学会 第 16 期年会 講演集, 1985, pp.224-225, 成田正夫・小泉孝之・山本和夫.</p> <p>(4) モーダルアナリシスを用いた構造物動特性の抽出, 日本機械学会 第 925 回講演会 機械力学, 1984-7, pp. 109, 小泉孝之・成田正夫.</p> <p>(5) 空転前駆現象を利用した車両のアンチスリップに関する研究 (第 1 報 空転前駆現象の理論解析), 日本機械学会講演論文集 No.840-16, 1984 年 11 月, 成田正夫・寺沢英男・小泉孝之・伊藤高広.</p> <p>(6) 電気機関車の振動特性に関する研究 (第 2 報 実車での走行性能試験結果), 日本機械学会講演論文集 No.840-16, 1984 年 11 月, 関根康祐・村瀬誠一・成田正夫・Egana, J. M.・Jimenez, J. G..</p> <p>(7) 電気機関車の振動特性に関する研究 (第 1 報 振動特性シミュレーションと実物大モデルによる検証), 日本機械学会講演論文集 No.840-11, 1984, 関根康祐・村瀬誠一・成田正夫・小泉孝之.</p> <p>(8) 六軸地震シミュレータの開発 (第 1 報 多軸加振に於ける制御方式とシミュレータの試作), 日本機械学会講演論文集 No.834-12, 1983, 岸本福太郎・小泉孝之・成田正夫・花島真人.</p> <p>(9) ビルディングブロック法によるエレベータ・建物系の振動解析”, 日本機械学会講演論文集 No.830-15, 1983, “杉山美樹・成田正夫.</p> <p>(10) Application of Modal Analysis Techniques to Electric Appliances and Machines, Euromech 168, Manchester June 1983, Koizumi, T., Kishimoto, F., Narita, M.</p> <p>(11) 大形加振機による正弦 3 波加振試験”, 電気学会全国大会, 1980 年, 高橋康英・奥津尚宏・本吉健郎・成田正夫.</p> <p>(12) Electromagnetic noise in large induction motors, The Journal of the Acoustical Society of America, Nov. 1979, Vol. 66, Issue S1, pp. S73, Koizumi, T. and Narita, M..</p>

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>(登録特許)</p> <p>(1) 特許 3644187 遮断器の蓄勢装置，登録 2005/2/10.</p> <p>(2) 特許 3534834 密封型開閉器，登録 2004/3/19.</p> <p>(3) 特許 3446463 リンク機構，登録 2003/7/4.</p> <p>(4) 特許 3182042 開閉装置の操作機構，登録 2001/4/20.</p> <p>(5) 特許 2737414 ガス遮断器，登録 1998/1/16.</p> <p>(6) 特許 2121597 ブレーキ装置，登録 1996/12/20.</p> <p>(7) 特許 2098604 ボードセーリングシミュレータ，登録 1996/10/2</p> <p>(8) 特許 2547535 ボードセーリング練習装置，登録 1996/8/8.</p> <p>(9) 特許 2548134 ボードセーリングシミュレータ，登録 1996/8/8.</p> <p>(10) 特許 2522763 開閉器の接触子，登録 1996/5/31.</p> <p>(11) 特許 1924424 模擬風発生装置，登録 1995/4/25.</p> <p>(12) 特許 1898528 模擬風発生装置，登録 1995/1/23.</p> <p>(13) 特許 1896957 ボードセーリングシミュレータ，登録 1995/1/23</p> <p>(14) 特許 1809831 展開型アンテナリフレクタ，登録 1993/12/10.</p> <p>(15) 特許 1794877 振動シミュレータ，登録 1993/10/28.</p> <p>(16) 特許 1769398 振動試験装置，登録 1993/6/30.</p> <p>(17) 特許 1653829 ボードセーリングシミュレータ，登録 1992/4/13</p> <p>(18) 特許 1644394 ボードセーリングシミュレータ，登録 1992/2/28</p> <p>(19) 特許 1643344 ボードセーリングシミュレータ，登録 1992/2/28</p> <p>(20) 特許 1643343 ボードセーリングシミュレータ，登録 1992/2/28</p> <p>(21) 特許 1643342 ボードセーリングシミュレータ，登録 1992/2/28</p> <p>(22) 特許 1639229 ボードセーリングシミュレータ，登録 1992/2/18</p> <p>(23) 特許 1573798 ボードセーリングシミュレータ，登録 1990/12/1</p> <p>(24) 特許 1562977 ボードセーリングシミュレータ，登録 1990/6/12</p> <p>(25) 特許 1593798 振動シミュレータ，登録 1990/8/20.</p> <p>(26) 特許 1303753 洗濯機，登録 1986/2/28.</p> <p>(27) 特許 1303752 洗濯機，登録 1986/2/28.</p> <p>(28) 特許 1260699 洗濯機，登録 1985/4/25.</p> <p>(29) 特許 1251430 遠心脱水装置，登録 1985/2/14.</p> <p>(30) 特許 1220830 ダンパ，登録 1984/7/26.</p> <p>(31) 特許 1155707 誘導加熱装置，登録 1983/7/15.</p> <p>(32) 特許 1116502 ダンパ，登録 1982/10/15.</p> <p>(登録実用新案)</p> <p>6 件</p>

以上