

氏 名	みなと じゅんこ <b>湊 順子</b>
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 5 8 5 号
学位授与の日付	平成 22 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 情報・生産科学専攻
学 位 論 文 題 目	<b>高層建築物を想定した数値計算用模擬風力波形の生成と構造物の状態推定</b>
審 査 委 員	(主査)教授 曾根 彰 教授 森迫清貴 教授 村田 滋 准教授 澤田祐一 名誉教授 大住 晃

## 論文内容の要旨

本学位申請論文は、近年研究が盛んになってきている超高層建築構造物の風外乱による不規則振動の制御問題に関連した基礎的事項である構造物の数学モデルの構築、不規則風外乱の模擬風速と風圧波形のコンピュータによる生成法、および統計量が未知の風をうける構造物の振動状態の推定について論じている。論文は全 7 章から成り立っている。

第 1 章は本研究の意義と研究の背景について述べている。

第 2 章は、曲げ変形とせん断変形の両方を考慮した高層建築構造物の数学モデルを構築している。高層建築構造物は軽量化が計られることから低層建築物に比べて柔軟な構造を有する。したがって、曲げ変形が無視できない。そのような曲げおよびせん断変形を考慮した数学モデルはすでに建築関連の学会でも提案されてはいるが、その導出については詳らかでない。本申請者は軒高 200 m、見附幅 36 m の 50 階建て柱状構造物を想定して数学モデルを構築している。さらに、地震荷重および風荷重に対して我国の法令で定められた数値を用いながら、構造物の変形を指定した剛性設計の方法を数値シミュレーションにより確認している。また、本章で導出された数学モデルに対する状態方程式を求め、外乱入力から構造物の出力である変位と曲げ回転角への伝達マトリクスを求めている。この数学モデルが以下の章での議論に用いられている。

第 3 章は、高層建築構造物に作用する風外乱の統計的性質について論じている。風は構造物の各層に連続して分布するので、空間的な相関をも考慮しなければならないことから、それを考慮した風のパワースペクトル密度に基づいて論じ、想定建築構造物の応答予測値をシミュレーションにより求めている。

第 4 章では、第 3 章の議論を踏まえ、模擬風速波形をコンピュータで発生が容易な正規性白色雑音から生成する方法について 3 つの方法を提案している。いずれも基本的には、多次元正規性白色雑音を線形システムの入力としその出力が多次元風速波形になると考え、そのときその線形システムの伝達マトリクスが出力スペクトル密度の表現にかかわってくることから、逆に出力の空間相関をもつスペクトル密度を与えれば伝達マトリクスが得られるという考えに基づいている。

風力波形は風速波形を線形システムに通した出力とみると、第 4 章で得た模擬風速波形を用い

ればコンピュータで発生させた正規性白色雑音から直ちに生成させることができる。そこで、第 5 章ではこの考え方に基づいた時系列風力波形の模擬生成方法について述べ、併せて数値シミュレーションでその有効性を確認している。

実在の高層建築構造物では統計的性質が分からない風外乱が作用し、それによって構造物が不規則振動を起こす。風外乱が直接計測できれば、構造物の変位と曲げ回転角は構造物の各層に設置したセンサーにより振動データを得ることによってカルマンフィルタを構成すれば容易に構造物の状態を推定することが可能であるが、未知の風外乱、すなわち入力未知である場合には構造物の状態推定は容易ではない。そこで第 6 章では、まず風外乱のスペクトル密度を推定することによって風外乱のモデルを構築する方法を述べ、ついでその同定した風外乱入力を用いて構造物の状態推定問題をカルマンフィルタを構築することによって解決するという新しい方法を提案している。

第 7 章は本論文に対する結論を述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本学位申請論文では、主として次の 3 つが論じられている。(i) 曲げ変形とせん断変形の両方を考慮した高層建築構造物の数学モデルの構築、(ii) 数値シミュレーション用風速あるいは風圧波形の生成法、(iii) 統計量が未知な風外乱をうける高層建築構造物の状態推定である。(i) については、これまでに建築関連の学会において曲げおよびせん断変形の両者を考慮した数学モデルは発表されてはいるが、その導出については必ずしも詳らかではなく、例えば大手企業内での設計用ソフトとしてブラックボックス化されているのが現状である。本学位申請者は曲げとせん断変形を理論面から察し、数学モデルを 2 階線形ベクトル微分方程式として求めている。さらに、我国の法令に準拠した地震荷重と風荷重の数値を用いて剛性設計を行なうことにも成功し、十分なシミュレーションによる数値的裏付けがなされている。(ii) については、高層建築構造物では軽量化がはかられていることから柔軟な構造を有し、風による不規則振動は避けられない。したがって、高層構造物を建設する場合には、その振動状態について十分に事前のシミュレーションが必要となる。本論文で提案されている模擬風速あるいは模擬風力波形の生成法は、従来より提案されている AR モデルに基づいた方法より簡便であり、また数値シミュレーション結果も十分に示されており、工学上有用である。(iii) については、建築構造物の振動状態の把握はヘルスマニタリングとも関連して重要な問題である。構造物の振動状態の推定に関する従来の研究では、風外乱は単純に正規性白色雑音としてモデル化し、その共分散マトリクスは既知であると仮定されている。しかし、現実には吹いている風外乱の統計的性質を知るとはほとんど不可能であり、しかも定常性は仮定できるとしてもそれは一般的には有色性をもつ。したがって、風外乱を既知の共分散マトリクスをもつ白色雑音と仮定することは不適切である。未知不規則外乱をうける構造物の状態を推定する問題はまだ未解決の問題のひとつである。本申請者は、まず一定時間内に得られた構造物の振動データから風外乱のスペクトル密度を推定し、それに基づいて風外乱の数学モデルを作成している。この同定されたモデルを既知外乱入力と考え、カルマンフィルタを構成することによって構造物の振動状態の推定を実現している。この一連の同定-推定法は、これまでになく十分に新規性を有している。

以上、(i)、(ii)、(iii) の内容には十分な新規性と工学的有用性を含んでいると認められる。なお、学位論文の基礎となった学術論文等は下記の 7 件（印刷中を含む）であり、そのいずれも申請者が筆頭著者である。

- [1] **J. Minato** and A. Ohsumi: Functionally Assigned Control of Buildings Subject to Wind and Seismic Disturbances, *Proc. of the 34th ISCIE Int. Symp. on Stochastic System Theory and Its Applications*, pp.219-222 (2002)
- [2] **J. Minato** and A. Ohsumi: Control for High-rise Buildings Subjected to Wind and Seismic Disturbances, *Proc. of the SICE Annual Conference in Fukui*, pp.2020-2024 (2003)
- [3] **J. Minato** and A. Ohsumi: Modeling of Wind Profile Gratifying Given Power and Cross Spectra, *Proc. of the 36th ISCIE Int. Symp. on Stochastic System Theory and Its Applications*, pp.120-125 (2004)
- [4] **J. Minato**, A. Ohsumi, and Y. Sawada: Artificial Generation of Wind and Estimation of the Spectrum of the Wind from Structural Response, *Proc. of the 41st ISCIE Int. Symp. on Stochastic System Theory and Its Applications*, pp.184-189 (2009)
- [5] 湊順子・大住晃・澤田祐一: 高層建築物の応答データに基づいた風外乱の同定モデルを使った状態推定, 計測自動制御学会主催第 10 回制御部門大会, CD-ROM(SY0004/10/000-16313) (2010)
- [6] **J. Minato** and A. Ohsumi: Modeling of Wind Profile Gratifying Given Power and Cross Spectra, *Int. J. of Innovative Computing, Information and Control*, Vol.6, No.4, pp.1667-1678 (2010)
- [7] **J. Minato**, A. Ohsumi, and Y. Sawada: Generation of Artificial Wind and Estimation of Load From Structural Response, *Int. J. of Innovative Computing, Information and Control*, Vol.6, No.10 (2010) (in press)