

着氷雪送電線の空気力特性予測システムの開発

Development of a web-based ice-accreted transmission line aerodynamic analysis system

清水幹夫¹⁾

岡 新一²⁾

石原孟³⁾

Mikio SHIMIZU¹⁾, Shinichi OKA²⁾ and Takeshi ISHIHARA³⁾

ABSTRACT

Aerodynamic forces are key parameters to an evaluation of ice-accreted transmission line galloping problem. A web-based aerodynamic analysis system for ice-accreted transmission line has developed using LES. A user can access the analysis system remotely via internet from a PC in which web browser and mail software are enough to be installed. The easy-to-use system enables a user to streamline time-consuming modeling and post process work load, and also to get the results faster. The predicted aerodynamic forces calculated by the analysis system have compared with that using the conventional method in which aerodynamic forces are derived by interpolation using existing experiments data. It is found that the analysis system has advantage over the conventional interpolation approach, particularly in capturing the peaks of lift coefficients observed in the experiments. Finally, we address that the visualization capability of the analysis system is useful to investigate for further understanding of flow phenomenon.

Key Words: Ice-accreted transmission lines, aerodynamic forces, LES, web-based system

1. はじめに

架空送電線は都市を支える重要なインフラストラクチャーであるが、冬季に氷雪が付着することにより送電線に加わる空気力は変化し、空力減衰が負になればギャロッピングと呼ばれる大振幅自励振動が発生することが知られている¹⁾。ギャロッピング振動は電气的地絡事故や碍子・支持物等の損傷の原因となり時には広範な停電に至ることや損傷物が車に直撃する被害が発生することもある。これらの事故を未然に防ぐために現象の解明、振幅予測および対策法の確立が必要不可欠である。ギャロッピングと考えられる事故原因の解明や耐ギャロッピング設計を行うときには応答解析を行い送電線振動の不安定性を判断する手法が用いられている²⁾。また、風応答解析には送電線を対象としたソフトもあり、清水ら³⁾は、送電線の幾何学的非線形性を考慮した有限要素法解析プログラムを開発し、ギャロッピングや相間スパーサのシミュレーションや振動特性の分析などの解析的研究を実施している⁴⁾。こうした解析の入力条件には着氷雪送電線の空気力係数データが必要である。着氷雪送電線の空気力係数は風洞実験^{5),6)}により求めることが可能であるが、実験のための模型をその都度作る必要があり時間と費用がかかるため、既存の風洞実験から得られた空気力係数の内外挿値をデータベース化して使用しているのが現状である⁷⁾。しかし、内外挿により求められた空気力係数は精度の点で不明なことが多く、任意形状を有する着氷雪送電線の空気力係数を迅速かつ正確に評価する手法の確立が強く望まれている。

1) 財団法人電力中央研究所 材料構造部 主任研究員(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

2) フルーエント・アジアパシフィック(株) (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-10-1)

3) 東京大学 工学系研究科総合研究機構 助教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16)

最近、計算機の著しい性能向上と並列計算処理技術の進展により、LES を用いて空気力係数を精度高く求めることが2次元断面形状については実用化レベルまで達しており⁸⁾、着氷雪送電線の空気力計算への適用も期待される。しかし、流体解析を行うためには、形状モデル化や格子作成、境界条件や乱流定数等の計算パラメータの設定、計算結果のポスト処理等煩雑で時間の要する作業が必要である。

最近のインターネットやイントラネットの急速な普及により、誰もが日常的に Web やメールを利用できる環境にある。そこで、最近の Web 技術を利用してネットワーク上に着氷雪送電線の空気力特性解析を行うサーバを置き、ユーザはインターネットを利用して Web ブラウザから条件を入力すればサーバ上で解析が行われるシステムがあれば、流体解析をどこからでも活用することができて便利である。

以上を踏まえ、本研究では、Web ベースによる着氷雪送電線空気力特性解析システムを開発する。次に、本解析システムを利用して単導体を対象とした送電線着氷雪の空気力解析を行い、従来の内外挿により求められた空気力係数の精度との比較を行い、結果の可視化機能を用いて流れの現象をより深く理解する。

2. 着氷雪送電線の空気力特性予測システムの概要

本研究で開発した解析システムの全体構成を図1に示す。本解析システムはサーバ機とクライアント機で構成され、それらはインターネットで結ばれている。ユーザはクライアント機からネットワークを介してサーバにアクセスし、サーバ上のソフトウェアを稼働させ本解析システムを利用する仕組みになっており、次の特長を有している。

- (1) 煩雑なパラメータの設定は不要で、且つ、特殊なケースについてもパラメータの変更は可能であり、推奨値があるものについてはデフォルト値として表示する。また、様々な迎角のケースの設定は、迎角 0°の基本形状から回転させながら自動的に生成するためケース毎の煩雑な設定作業を行う必要が無い。
- (2) サーバ・クライアントのため、ユーザのパソコン(クライアント)には Web ブラウザとメールさえあればインターネットを通してどこからでも並列計算機で構成される本解析システム(サーバ)にアクセスできる。また、解析はサーバで実行するため、ユーザのパソコンは高性能である必要は無い。
- (3) 従来の内外挿により空気力係数データを求める方法と比べ、特に、迎角の変化に対してピークが生じる場合、より精度の高い空気力係数データを迅速に得ることができる。
- (4) 計算結果出力は入力データや図を自動で出力するため煩雑なポスト処理作業を行う必要がなく、また、可視化機能を利用して圧力分布や流速分布等の流れ場の理解に役立つ包括的な図やデータを得ることができる。

クライアント機は、Web ブラウザ(例えば Internet Explorer)とメールソフトが動作する一般的なパソコンであるが、一方、サーバ機は AMD 2CPU が搭載されたマシン4台で構成される Linux クラスタである。サーバ機の開発環境を表1に示す。

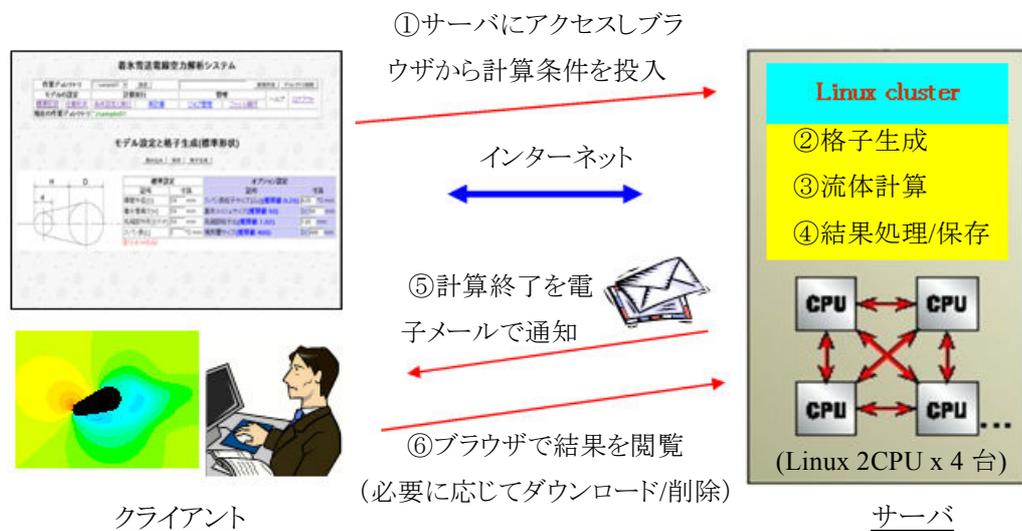


図1 システムの全体構成

表 1 サーバ機の開発環境

機能	ソフトウェア	機能説明
OS	Linux	基本システムの管理
流体解析	名称未設定	流体解析と解析結果のデータ及び図化
Web サーバ	Apache/PHP4	クライアントからのデータおよび結果プロット図等の受け渡し
ジョブ管理	Sun Grid Engine	計算プロセスの実行、停止、実行状況の表示
ファイル管理	PHPEXPLORER	ディレクトリの作成、ファイルの閲覧やダウンロード/削除
メールサーバ	Sendmail	計算終了のメール通知

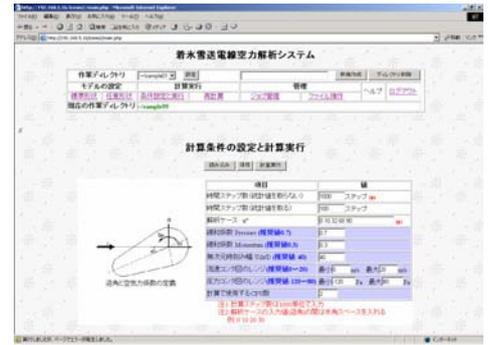


図 2 「計算条件設定と計算実行」画面

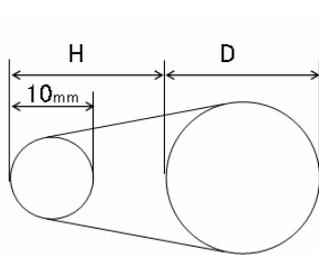


図 3 着氷雪形状

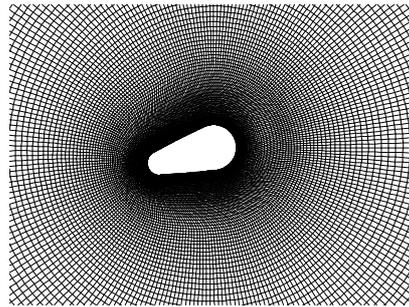


図 4 導体近傍の格子分布

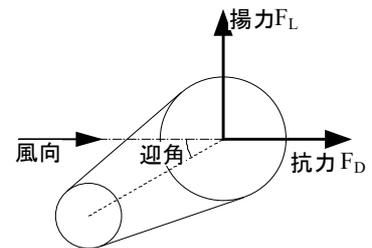


図 5 迎角と空気力の定義

次に、図 1 で示すシステムの処理の基本的な流れを図中の番号に添って示す。

- ① まず、本解析システムを利用するためにクライアント機の Web ブラウザを起動し、サーバにアクセスする。最初に表示される画面は、図 3 に示す「ログイン画面」である。ユーザ ID とパスワードを入力しホームページに移動する。ホームページでは作業ディレクトリの作成を行う。
- ② 次に、格子作成のためモデル設定と格子作成に移動する。パラメータ入力後実行ボタンによりメッシュジェネレータがバックグラウンドで起動し、基本形状の格子(迎角 0°)を生成する。着氷雪形状は標準形状だけでなく点座標データファイルによる任意形状の格子作成も可能である。
- ③ 格子生成が完了した後、計算条件の入力と計算を実行するため、図 2 に示す「計算条件の設定と実行」に移動する。計算条件を入力した後、実行ボタンをクリックするとソルバがバックグラウンドで起動し、各ケースの計算設定ファイルを作成し、流体計算を実行する。計算の実行状況は、ジョブ管理画面で確認することができる。
- ④ 計算が終了すると結果のデータファイル、圧力分布図、流速分布図、平均空気力係数の迎角の変化によるプロット図や時系列図を①で作成した作業ディレクトリに出力し保存する。
- ⑤ 利用者に計算の終了を知らせるためメールで通知する。
- ⑥ 計算結果のデータや図等のファイルの閲覧、ダウンロード、削除は、ファイル管理画面で行う。

3. 着氷雪送電線の空気力特性解析

本研究で開発した Web ベースの着氷雪送電線空気力特性解析システムを利用して、単導体着氷雪送電線周りの空気力特性を解析し、従来の内挿法による空気力係数との比較及びギャロッピング振動への影響を検討し、最後に、可視化機能を利用して流れ場や圧力分布から流れ現象を調べる。

3.1 数値解法と計算条件

図 3 に示すような着氷雪送電線周りの空気力特性解析を行う。ここで D は導体直径、 H は着氷雪高さで D を基にそれぞれ $H=1D, 0.5D, 0.25D$ の着氷雪形状を対象とする。

空気力の予測には乱流モデルとして LES を用いる。LES で用いる支配方程式は、空間フィルタリング操作を施したナビエ・ストークス方程式である。サブグリッドスケールの乱流粘性係数 μ_t には Smagorinsky⁹⁾モデルを用い、定数

C_s は 0.0032 とした. 数値解法は、コロケート格子に基づく非構造格子有限体積法を用いている. 支配方程式の離散化は、対流項と粘性項に2次精度中心差分、非定常項に2次精度陰解法をそれぞれ用い、離散化した方程式の数値解法には半陰解法の SIMPLE 法を適用した¹⁰⁾.

図4に導体近傍の格子分布を示す. 導体周りの円は任意に回転させることができるようになっており、迎角を自由に設定できる. また、導体に近い部分程格子を細かく切ることによって渦や剥離を再現できるようにしている.

計算領域は1辺長が $D=19\text{mm}$ の60倍の正方形領域に設定した. スパン方向の長さは $2D$ である. 風の入口側は一樣流を与え風速は 10m/s , 出口側は自由流出とし、側面壁および上下面境界は対称境界条件を用いた.

図5に迎角と空気力の定義を示す. 各格子点における迎角については、導体の側面が風に対して垂直になる状態を迎角とし、反時計回りを正とする. 導体の抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L は各点の圧力係数を導体の周りに積分した値である.

3.2 着氷雪形状の違いによる空気力特性と予測精度

ギャロッピングの発生原因は揚力係数の勾配が負の空力減衰をもたらすことによるものと知られている²⁾. ここでは、本予測システムを用いて着氷雪高さの違いによる平均空気力を調べ、特に、揚力のピークの変化に着目し LES の結果と実験結果を比較する. 図6に着氷雪高さの違いによる平均揚力係数の迎角による変化を示す. 図6(b)に示すように着氷雪高さが $1D$ から半分になった $0.5D$ のモデルの揚力係数を見ると $1D$ のケースで迎角 12° 付近で見られたピークが迎角 20° 付近までシフトしている. 更に半分の高さ $0.25D$ にしたときについては、明らかにピークが弱まっており、これらの解析結果は実験結果とほぼ一致している. したがって、本解析手法により着氷雪高さの違いによる揚力係数のピークを精度高く捉えることができることが分かった.

3.3 従来の内挿法による空気力の予測精度との比較

現在、任意形状の着氷雪送電線の空気力は既往の風洞実験の結果から内外挿して求めているが精度上不明な点が多い⁷⁾. ここでは、その精度を検証するため着氷雪高さ $0.5D$ の場合の空気力を $1D$ と $0.25D$ の実験空気力から線形で内挿して求め、本手法による解析結果および実験により得られた結果と比較する.

図7に雪高さ $0.5D$ での各手法で求めた平均空気力係数を示す. 図中の破線は線形補間により内挿して求めた値であるが、図に示すように揚力係数のピークはほとんど出ていないことが分かる. 抗力係数についてもピーク付近は実験値と一致していない. つまり、内挿によって求めた空気力係数はピークが生じるような着氷雪形状では信頼できる結果が得られない可能性があることが分かった. 一方、本解析では揚力係数のピークを捉えており、本解析システムによる結果は、従来の内挿による方法よりも良い結果が得られていることが分かった. 更に、本予測システムで得られた空気力特性の結果と内挿した値の違いによるギャロッピング振動の影響を調べるため、垂直方向の振動を考慮した1自由度系のギャロッピング応答解析を行い比較する. 次式に、無次元化した振動方程式を示す.

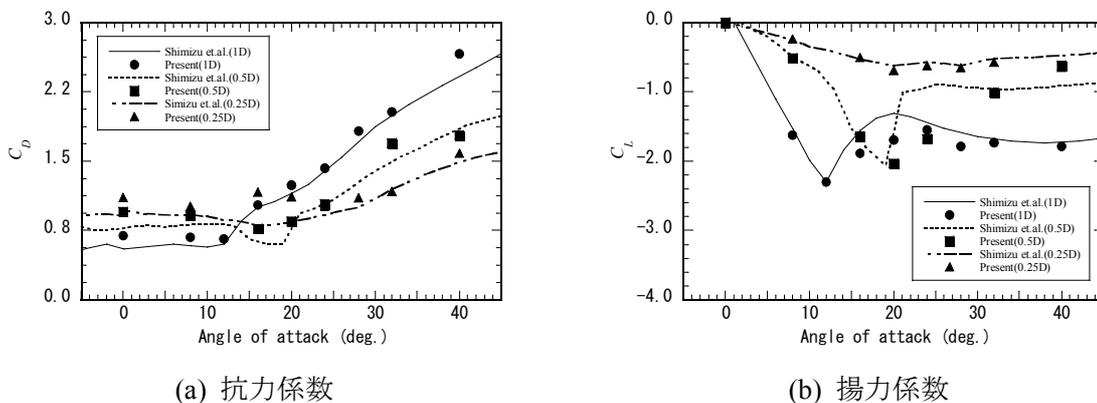
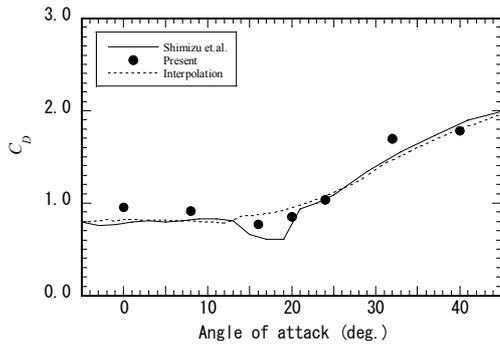
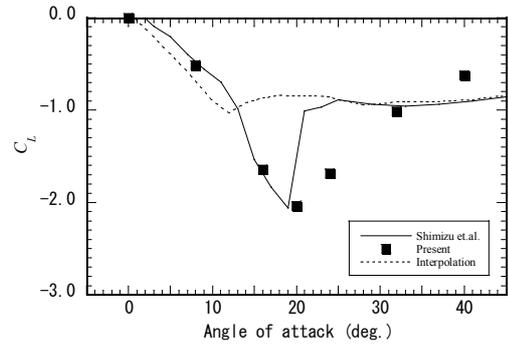


図6 着氷雪高さの違いによる空気力係数の迎角による変化との比較



(a) 抗力係数



(b) 揚力係数

図7 着氷雪高さ0.5Dにおける平均空気力係数の迎角による変化と内挿値との比較

表2 無次元変数と無次元パラメータの定義

	定義	値
Y	y/D	—
τ	ωt	—
n	$(\rho D^2 l / (2m))$	0.000314696
B	$c / (2m\omega)$	0.0473068
Cy	$-(C_L + C_D \tan \alpha) \sec \alpha$	—

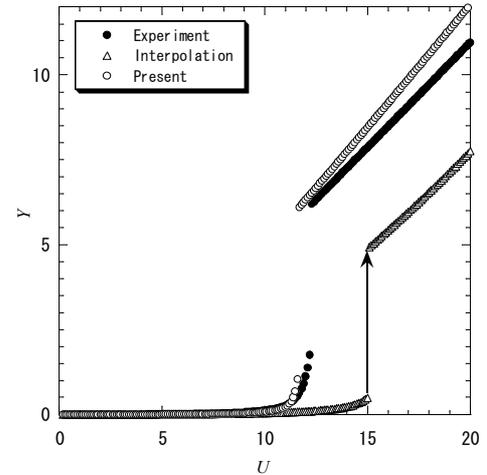


図8 着氷雪高さ0.5Dにおけるギャロッピング振動の比較

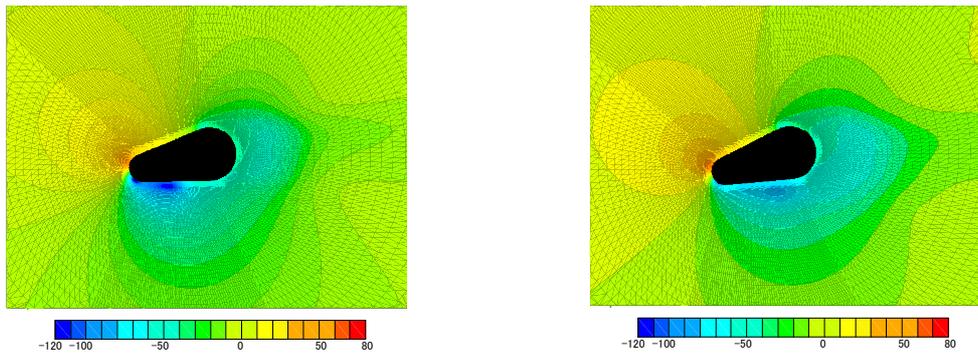
$$\ddot{Y} + Y = nU^2 C_y - 2B\dot{Y}, \quad \dot{Y} = \frac{dY}{d\tau} \quad (1)$$

ここで、 Y は無次元振幅、 U は風速、 τ は無次元時間、 n は質量比、 B は構造の減衰定数、 C_y は風直角方向の空気力係数である。これらの無次元変数と無次元パラメータの定義を表2に示す。数値積分には4次精度のルンゲ-クッタ法を用いた。初期振動振幅は0、初期速度は0.00001、また無次元時間間隔は0.001とした。図8にギャロッピング応答解析の結果を示す。図に示すとおり、発振風速および無次元振幅とも本解析システムによる予測値を用いた結果の方が内挿値を用いた場合よりも実験値に近く、より精度の高い結果が得られることが分かった。

3.4 可視化による現象の理解

既往の風洞実験⁶⁾では揚力が回復することは明らかにされたが、その揚力回復メカニズムについては解明されていない。ここでは、流れ場と圧力場が同時に得られる本解析手法によってその原因を調べる。

ギャロッピングの発生原因となる揚力係数の負勾配等の空気力係数の迎角による急激な変化などは風洞実験により計測することはできるものの、このような急激な変化をもたらす原因を明らかにするには流れの可視化や圧力の測定などが必要である。数値解析ではすべての物理量が包括的に得られるため揚力係数のピークの発現メカニズムを調べることが可能である。着氷雪高さ1D型について、迎角12°の時に大きな揚力を発生するメカニズムを明らかにするため、迎角12°と16°の平均圧力分布を図9示す。この図から、迎角12°の時には着氷雪送電線下面前縁に剥離泡が存在しており、それに対応して着氷雪送電線下での負圧も大きくなっていることが分かる。一方、迎角が少し大きくなった迎角16°では着氷雪送電線下面の剥離泡は迎角12°の時より後ろに流れていると考えられ、平均負圧も小さくなっていることが分かった。



(a) 迎角 12°

(b) 迎角 16°

図 9 着氷雪送電線近傍の平均圧力分布 (H=1D の場合)

4. まとめ

Web ベースによる着氷雪送電線空気力特性解析システムを開発し、本解析システムを利用して単導体を対象とした送電線着氷雪の空気力解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 本解析システムを利用することで、煩雑なパラメータの設定が不要となり、また、様々な迎角のケースの設定も基本形状から自動的に生成できるため従来の設定作業工数を大幅に節減できるようになった。
- (2) サーバ・クライアントの Web ベースシステムを構築し、ユーザのパソコン(クライアント)から Web ブラウザとメールさえあればインターネットを通してどこからでも本解析システム(サーバ)にアクセスすることができるようになった。また、解析はサーバで実行するため、ユーザのパソコンは高性能で無くても本解析を行うことができた。
- (3) 従来の内外挿により空気力係数データを求める方法と比べ、特に、揚力係数において迎角の変化に対してピークが生じる場合、より精度の高い空気力係数データを迅速に得ることができることが分かった。
- (4) 計算結果出力に必要なポスト処理を自動で行うため従来の煩雑な作業が大幅に節減することができた。また、可視化機能を利用して、圧力分布からピーク揚力の発生は着氷雪送電線下面前縁の剥離泡の滞留に関係し、それに伴う大きな負圧の発生が原因となっていることが分かり、本解析システムで得られた包括的なデータから流れ現象の理解を深めることができた。

謝辞: 本研究では、システム開発には(株)ベストシステムズ(研究当時)中田寿穂博士に、数値解析の実施に当たっては東京大学工学部社会基盤工学専攻 4 年(研究当時)長谷川信幸氏に協力をして頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中村泰治 坂本雄吉: ケーブルの風による振動, 日本風工学会誌第 20 号 pp.129~pp.140, 1984.6.
- 2) Parkinson, G. V.: Aeroelastic galloping in one degree of freedom, Proc. Int. Conf. Wind Effects on building and structures, 1963.
- 3) 清水幹夫 他: 送電線のギャロッピングの幾何学的非線形解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.951~pp.960, 1998.
- 4) 清水幹夫, 佐藤順一: 4 導体送電線のギャロッピング観測およびシミュレーション, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.479~pp.488, 2001.
- 5) 田中伸英: 着氷多導体送電線の大振幅対風挙動, 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻修士論文, 1998.
- 6) 清水幹夫, 石原孟, ファフックバン: 3分力天秤実験に基づく着氷雪多導体および単導体送電線の空力特性に関する検討, 構造工学論文集 Vol.50A, pp.647~pp.656, 2004.
- 7) 架空送電線のギャロッピング現象・解析技術調査専門委員会: 電気学会報告, 第 844 号, 2001.
- 8) 石原孟, 岡新一: 一様流中に置かれた正方形角柱の空気力特性の数値予測に関する研究, 土木学会論文集, Vol62. No.1, pp.78~pp.90, 2006. 1.
- 9) Smagorinsky, J.: General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, *Month. Wea. Rev.*, Vol. 91, pp. 99-164, 1963.
- 10) ファフックバン: 高性能 PC クラスターの構築と新しい並列解法の提案, 東京大学工学部土木学科卒業論文, 2003.