

風工学のための数値乱流風洞開発の展望

Development of Numerical Wind Tunnel Concerned with Wind Engineering

村上周三*・加藤信介**・持田 灯*・日比一喜***

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Akashi MOCHIDA and Kazuki HIBI

1. 序 一 数値乱流風洞の必要性

理工学の分野では流れに関係する問題が数多く存在するがほとんどの場合乱流である。乱流の動きを正しく知ることは多くの理工学の研究において極めて重要であり、過去に多くの試みがなされてきたが、それらは主として実験的手法によるものであった。これは風工学の分野でも例外ではない。しかし風工学を始めとする多くの

分野の実験では、しばしば、①大きすぎる流れや小さすぎる流れを対象とするため、通常の規模での実験が難しい場合が多い。②有効な実験手法が確立されていない。③莫大な費用と労力を要する等の問題点があり、実験的研究を進める上での支障となっている。一方、近年の大型計算機の発達はめざましいものがあり、従来ほとんど不可能と考えられていたような大規模な乱流シミュレーションの実行が可能となってきた。これに伴って多

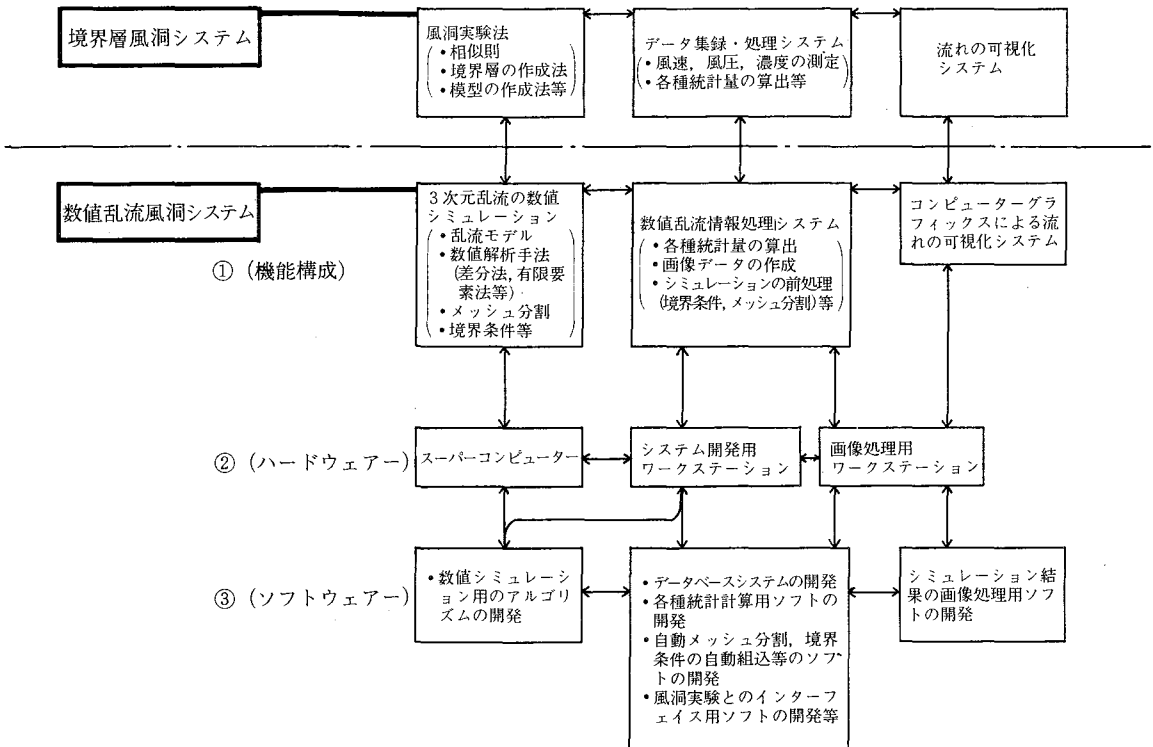


図 1 風工学のための数値乱流風洞の概念図

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

** 東京大学生産技術研究所 第5部

*** 民間等共同研究員 清水建設(株)技術研究所

研究速報

くの分野で、乱流のシミュレーションに対する関心が急速に高まってきており、その実用化への期待も大きくなってきている。特に莫大な量の風洞実験を行ってきた航空工学の分野において実用化を望む声が強くなり、数値シミュレーションによって風洞実験の機能を代替しようとする「数値風洞」の開発が現実的なものとなりつつある¹⁾²⁾³⁾。風工学の分野でも、要求される風洞実験の量は増加する一方であり、実験のある部分を数値シミュレーションで補完、代替するための研究を始めるべきだという声が強くなりつつあり、筆者らも近年、風工学を対象とする数値乱流風洞の開発を目標としての検討を開始している⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本報では筆者らが現在検討を進めている数値乱流風洞の概念やプロトタイプシステムの概要について報告する。

2. 数値乱流風洞の概念

数値乱流風洞の基本的機能構成を、実際の風洞実験システムと対応させて図1に示す。数値乱流風洞のシステムの中で、大型計算機により3次元乱流場を予測する機能が最も基本的要素であることは言うまでもない。しかし数値シミュレーションの結果は、これに何の処理も施さなければ単なる数字の羅列にすぎず、これにより複雑な乱流構造を理解することは不可能である。したがって乱流現象の詳細な解析を行うためには、シミュレーション結果を画像データ等の人間が理解しやすい形に変換し、表示するための大規模多次元数値情報処理の技術やコンピュータグラフィックスのシステムも必要不可欠の要素である。以下において、風工学における乱流の数値シミュレーション手法の現状および問題点についてまず整理し、次に筆者らが現在検討を進めている数値乱流風洞のプロトタイプシステムの構成について述べる。

3. 風工学における風洞実験と数値シミュレーション

現在風工学の分野では、

- ①ビル風問題に関する風環境評価
- ②建物に作用する風圧力の評価
- ③通風、漏気現象の解明
- ④煙突排ガス等の拡散現象の解明

等の目的で頻繁に風洞実験が行われている。風洞実験には多くの研究の蓄積があり、現在風工学の分野で最も信頼性の高い予測方法といえるが、依然として数多くの問題点が残されている。たとえば

①通常の風洞設備でシミュレートできる流れ場の種類は限られている。たとえば大気中に強い温度勾配のある流れを再現するには特殊な風洞が必要であるし、地球の自転の影響が問題となるような広範囲の流れを予測対象とすることには大きな困難がつきまとう。

②風洞で容易に再現し得るのは風速、風圧等の時間平均値であり、それらの変動値を再現することには種々の問題

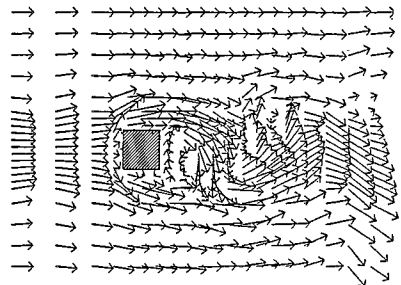
が残されており、正確な再現が保証されないことも多い。

③模型の製作日数も含めると1ケースの測定に多くの労力と日数が必要となり、数多くのケースに関する系統的な検討が困難である。

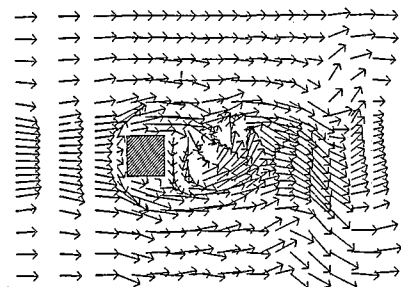
これに対して数値シミュレーションは、

①風洞実験がしばしば直面する設備上の制約——たとえば高レイノルズ数の流れを実現することが困難であるというような——が存在しないので、風洞内で再現することが不可能であるさまざまな乱流場を予測対象とすることができる可能性を持つ、

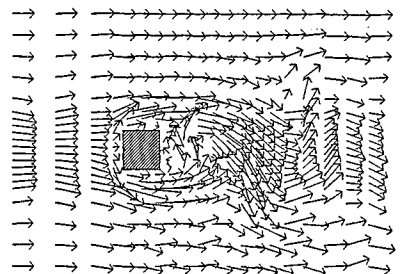
②数多くのパラメータを系統的に変化させた多角的な検討を短時間で行うことができる、
等、風洞実験が原理的に乗り越えられない問題を解決し



(1) 計算開始後2秒



(2) 計算開始後5秒



(3) 計算開始後10秒

図2 Large Eddy Simulation による角柱後流のカルマン渦の再現(角柱幅 20 m, 代表風速 10 m/s)

得るような利点や魅力を有しており、将来この方法が確立されれば、風工学の研究を大きく進展させる原動力となることは間違いない。

4. 風工学における乱流数値シミュレーションの現状

4.1 乱流モデル

乱流の数値シミュレーション手法の中で最も原理的なものは、Navier-Stokes の方程式をそのままの形で解く方法である。この方法は Direct Simulation と呼ばれているが、Direct Simulation で正しい予測を行うためには $R^{3/4}$ のオーダーのメッシュ分割数が必要となる⁷⁾。風工学で対象とする流れのレイノルズ数が少なく見積っても 10^6 のオーダーであることを考えると、Direct Simulation により風工学で扱う流れを正しく予測することは到底不可能であり、乱流モデルの導入が不可欠であることがわかる。乱流モデルは、 $k-\epsilon$ モデルに代表される平均流場を解析対象とするモデルと、瞬時瞬時の流れ場を時系列で解析する Large Eddy Simulation (LES) に大別することができる。平均流場を解析するモデルは計算量が少なくてもすむという点で LES より秀れている。一方 LES の利点は、瞬時瞬時大きく変化する建物周辺の気流性状を知ることができる点にあり、詳細な乱流構造を解析対象とするためには、LES が現在われわれにとっても最も希望の持てる手法であるといえる。

図 2 に LES により計算された角柱後流のカルマン渦の時間的変化を示す。このように LES では時々刻々の流れ場を再現することが可能であるので、風洞実験や $k-\epsilon$ モデルの計算と比べて、非常に大量の流れに関する情報を得ることができる。

4.2 風工学における数値シミュレーションの問題点

建物周辺の流れを数値シミュレーションにより予測する場合、船空機や車両まわりの流れの解析と比較して特に留意すべき点として以下の 2 点が考えられる。

①複雑な市街地における接地境界層内の流れを予測対象としているため、地上面や流入側の境界条件が極めて複雑である。

②建物高さ等に代表される非常に大きな長さスケールを持った流れを対象としている。したがって、現在の計算機の能力が多少向上したとしても、分割可能なセルの大きさが粘性底層のスケールよりはるかに大きくなることを避けることはできない。このため、単純に地上面や建物壁面に no-slip の境界条件を適用することが困難となり、境界条件に関する大がかりな近似が必要となる。

風工学の分野に適用可能な数値シミュレーション手法を確立するためには、これらの問題は避けて通ることができないが、現状では十分な検討がなされるとはいえず、今後多くの課題を残している。

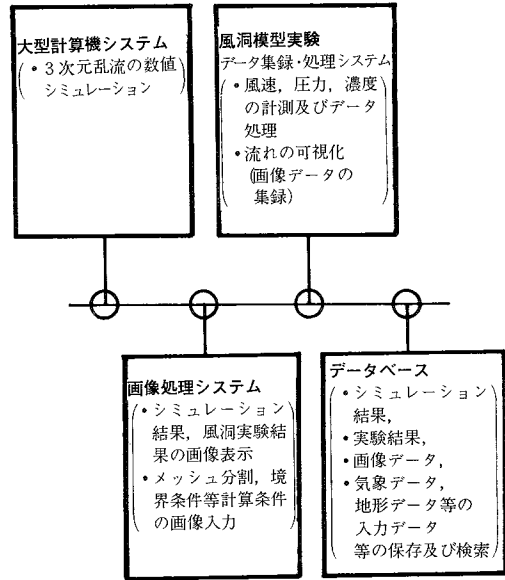


図 3 望ましいシステムの構成
— 数値シミュレーションと風洞実験の有機的結合 —

5. 数値乱流風洞のシステム構成

5.1 要求されるシステムの内容

将来、風洞実験の多くの部分が数値シミュレーションによって代替されるようになって、風洞実験との照合による予測結果の検証の必要性がなくなることはありえない。したがって数値乱流風洞のシステムにおいては、数値シミュレーションと風洞実験との詳細な比較検討が可能であることが要求される。また、数値シミュレーションにより予測された流れ場の性状を理解し、詳細な検討を効率的に行う上で、コンピュータグラフィックスのシステムを導入して、計算結果を画像情報に変換することは極めて有効であると考えられる。一方、数値乱流風洞では数値シミュレーション結果、風洞実験結果、画像データ、気象データや地形データ等のシミュレーションへの入力データ等の多様なデータが取り扱われることになるので、これらの莫大な数値情報を要領よく整理、保存しておくために、データベースのシステムと大容量の記憶装置が必要である。以上のような要求を満たすためには、図 3 に示されるように大型計算機、風洞模型実験データ処理システム、画像処理システム、データベースシステムの 4 つのシステムが有機的に結合されたシステムが必要となる。また、これら 4 つのシステム間で大量のデータのやりとりを行うためには、システム間は高速のネットワークで結ばれる必要がある。

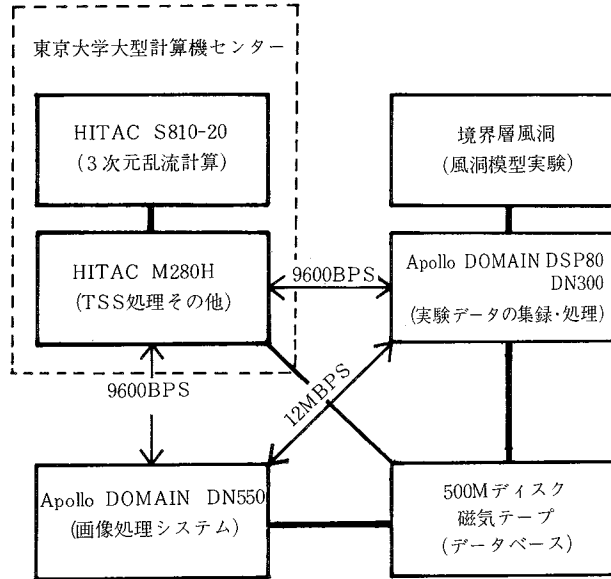


図4 開発を進めている数値乱流風洞のプロトタイプ (東大生研 村上研究室)

5.2 現在のシステムの構成

図4に筆者らの研究室において開発を進めている数値乱流風洞のプロトタイプの前段階におけるシステム構成を示す。乱流のシミュレーションには東京大学大型計算機センター HITAC S 810-20 を使用している。数値シミュレーション結果や風洞実験結果を画像情報に変換するために、本システムでは画像処理システムとして Apollo DOMAIN DN 550 を導入している。

風洞実験のデータ処理システムとしては、Apollo DOMAIN の DSP 80 と DN 300 からなるシステムが導入されている。DSP 80 には 500 M バイトのディスクと磁気テープ駆動装置が接続されている。本システムと DN 550 との間は Apollo DOMAIN のリングネットで結ばれている。リングネット間の伝送レートは 12 M ビット/秒であり、高速のデータ転送が可能である。また、DSP 80, DN 300, DN 550 の 3 台はいずれも当研究室内に設置されており、本郷の大型計算機センターとの間は構内用専用回線を通じて非同期通信の 9600 BPS で結ばれている。

数値乱流風洞のシステムでは、乱流のシミュレーション用のプログラム以外に、コンピューターグラフィックス、データベース、ネットワーク間のデータ転送、メッシュ分割や境界条件の自動入力等に関する多くのソフトウェアが必要である。

6. おわりに

風工学で対象とする流れは非常に複雑であり、数値シ

ミュレーションによる予測手法が確立されるまでには、乱流モデルや境界条件の検討、空間のメッシュ分割に関する検討等多くの課題が残されている。しかし、本報で紹介したような数値乱流風洞が完成し、数値シミュレーションと風洞実験との迅速かつ詳細な比較が可能となれば、風工学が大きく進展することはもとより、乱流のシミュレーションの予測精度も飛躍的に向上するものと期待され、それは数値乱流風洞の活用の道をさらに大きく広げるものであろう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京大学生産技術研究所に設けられた NST (乱流数値シミュレーション) 研究グループ内の討論により多くの示唆を得た。吉沢徹助教授、小林敏雄助教授をはじめとするメンバー各位に謝意を表す。なお、本研究は文部省科学研究費 試験研究(2)によるものであることを付記する。

(1985年11月12日受理)

参考文献

- 1) P. Kulte8 : AIAA Journal, vol. 23, No. 3(1985)
- 2) 三好 甫 : 日経コンピューター (1984. 1. 9)
- 3) 小株敏男 : 日本機械学会誌 vol. 88, No. 799(1985)
- 4) 村上周三 : 日本風工学会誌, vol. 20(1984)
- 5) 村上周三ほか : 生産研究 vol. 36, No. 12(1984)
- 6) S. Murakami, A. Mochida, K. Hibi : International Symposium on Computational Fluid Dynamics-Tokyo, (1985. 9)
- 7) 吉沢 徹 : 生産研究 vol. 36, No. 4(1984)p. 175