

第

章

5

排ガス拡散予測の
新しい技術開発

第5章 排ガス拡散予測の新しい技術開発 目次

粕江研究所大気科学部 上席研究員 佐田 幸一
粕江研究所大気科学部 研究員 佐藤 歩

5 - 1 実験的アプローチ79
5 - 2 数値計算からのアプローチ81
5 - 3 まとめ84

佐田 幸一（18ページに掲載）



佐藤 歩（1996年入所）
濃度変動を考慮した大気拡散予測に関する研究を行ってきた。現在は、災害時を対象とした大気拡散予測手法の開発に取り組んでいる。

コラム9 濃度変動測定システムの原理84
コラム10 環境計算科学と数値乱流風洞85

佐藤 歩（上記掲載）

佐田 幸一（上記掲載）

5 - 1 実験的アプローチ

5-1-1 濃度変動の重要性

環境影響評価に係わる現行の風洞実験においては、対象となるガス濃度の時間平均値のみを評価している。しかし、大気中における汚染物質の移動現象や気象のメカニズムを正確に解析するためには、濃度変動値に関する高次の統計量を評価する必要がある。また、事故等により毒性ガスや可燃性ガスが漏洩した場合、時間平均濃度のみの評価だけでは不十分であり、漏洩後短時間に生じる平均濃度の数倍あるいは十数倍といった高濃度値の予測を行うことが重要である。

5-1-2 濃度変動測定手法

風洞実験において、これまで濃度変動の測定を困難にしていた最大の理由は装置の応答性能である。従来、風洞実験で濃度測定を行う際にはFID(Flame Ionization Detector)型の全炭化水素濃度計が広く用いられてきた。FIDは、水素を燃料とした燃焼室にトレーサガスを吸引し、トレーサガス中に含まれる炭化水素を燃焼させることによって生じるイオンを電極により測定し、濃度を算出する。これまで用いられてきたFID型のガス分析計では、測定点で吸引したサンプリングガスをテフロンチューブ等により燃焼室まで導いていた。一般的に、燃焼室は風洞測定部外に設置されるため、測定点と燃焼室の間には一定の距離が生じる。よって、測定点でガスをサンプリングしてから燃焼室で濃度値を検出するまでに時間の遅れが生じる。そのため、従来型の濃度計は周波数応答性が低く、瞬間濃度を測定することが困難であった。しかし、近年、濃度計の改良が進み、燃焼室を測定点の近傍に設置することができるようになり、高周波数までの濃度変動の測定が可能となってきた。

5-1-3 濃度変動を測定する風洞実験

災害時を想定した風洞実験においては、従来の風洞

実験で対象としてきた濃度の平均値の他に、濃度変動の標準偏差やパワースペクトル、確率密度関数、最大瞬間濃度などを評価することが求められる。風洞実験では、先にも述べたような高周波数応答性を有する濃度計を用い、100Hz程度の高周波で瞬間濃度の測定を行う。測定した瞬間濃度の平均値からの偏差を算出することにより濃度変動を求める。以下では、濃度変動の自乗平均値を分散、その平方根(root-mean-square: RMS)値を濃度乱れと称す。

平地の風洞実験では、平均濃度と濃度乱れの分布形の相違が検討されている。図5-1に平均濃度と濃度変動の分散の測定例として、上空放出について示す。ブルームが地表付近から放出された場合、濃度乱れは煙源からの距離にかかわらず鉛直方向に自己相似な分布を示す。また、地表煙源時の濃度乱れの値は小さく、煙源の大きさなどの煙源条件にはほとんど影響されない。一方、ブルームが上空から放出された場合、煙源近傍の濃度乱れの分布は平均濃度と類似の分布形を示す。煙源からの距離が増加するにしたがい、平均濃度と濃度乱れの分布の間には違いが見られるようになり、平均濃度が最大となる高さは上空から地表方向へと下降するのに対し、濃度乱れが最大となる高さはさらに上空へと上昇する。瞬間濃度の出現頻度を表す確率密度関数は、濃度乱れの強さに依存して、対数正規型の分布から指数型の分布を示すことが報告されている¹⁻³⁾。

建物まわりの風洞実験では、建物屋根面からのガス放出⁴⁾や建物近傍の地表からのガス放出⁵⁾が模擬されている。いずれの場合も平均濃度の分布と濃度乱れの分布はよく対応しており、平均濃度が高く濃度勾配の大きいところでは、濃度乱れが大きくなることが示されている。また、建物屋根面からガスが放出された場合には、ガスは建物風下側に生じる渦領域に取り込まれ大きく拡散し、建物後流域における濃度乱れ強度(濃度乱れを平均濃度で除したもの)は鉛直方向に様な分布を示す。建物後方におけるその値は1より小さく、これは平地上のブルーム中心軸上の値より小さい。

電力中央研究所では、これまで建物模型として広く用いられてきた立方体あるいは直方体だけでなく、図

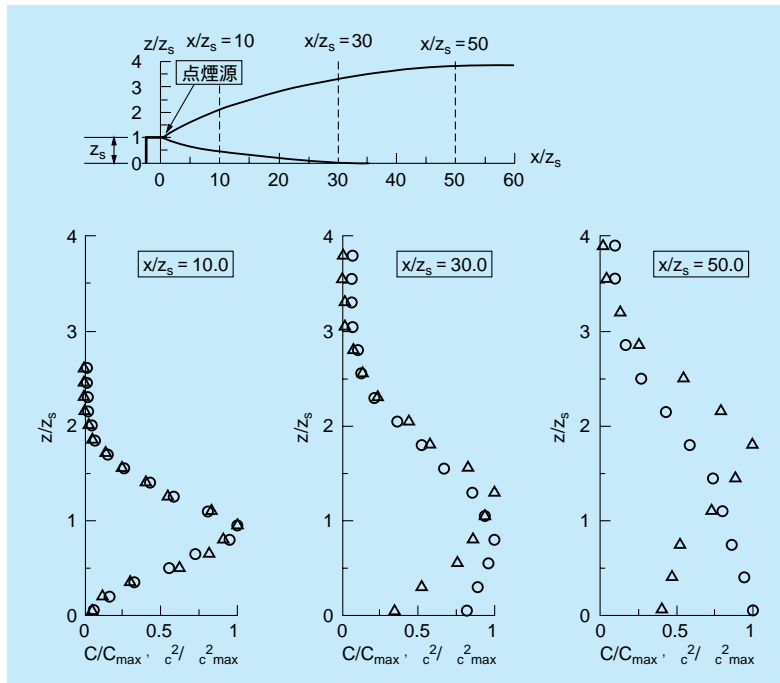


図5-1 平地上での濃度変動測定：平均濃度と濃度変動の分散の測定例（ Δ ；平均濃度 C 、 \circ ；分散 c^2 ）

5-2に示す実際のプラントにより近い形状の模型を用いた実験を行った⁶⁾。配管系を模擬した建物模型後方では、立方体模型後方とは異なり、気流の巻き込みが少ないため、屋根面から放出されたガスの地表付近への拡散

は抑制される。また、濃度乱れ強度は立方体模型に比べ大きな値となり、平地上と立方体模型の中間の分布を示す。図5-3に建物周辺での濃度変動測定結果を示す。

プラント等における事故時のガス漏洩を想定した場合、特に高濃度値の出現割合が問題となる。そこで、風洞実験において平均濃度や濃度乱れと最大濃度の関係を予め求めておき、その関係と拡散モデルで計算した平均濃度、濃度乱れから最大濃度を推定する試みが行われている。これまでの実験では、濃度乱れに対する最大濃度の比は、建物形状にかかわらず一定値を示す結果を得た。

地形⁷⁾や熱⁸⁾の影響を対象とした濃度変動の風洞実験も行われている。様々な条件下における濃度変動特性が次第に明らかになってきたが、まだまだ十分ではない。また、これまで行われてきた風洞実験では、放出ガスの温度や密度、ガスの放出速度などの条件はほとんど考慮されていない。今後は実現象にあったガス放出条件を考慮した風洞実験手法の開発を行う。

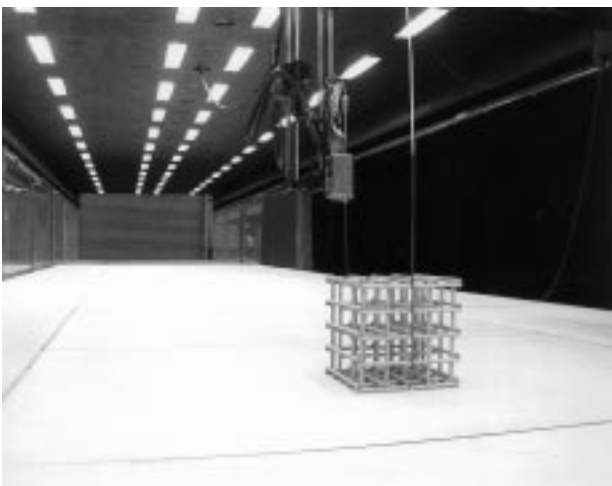


図5-2 配管系模型の風洞実験

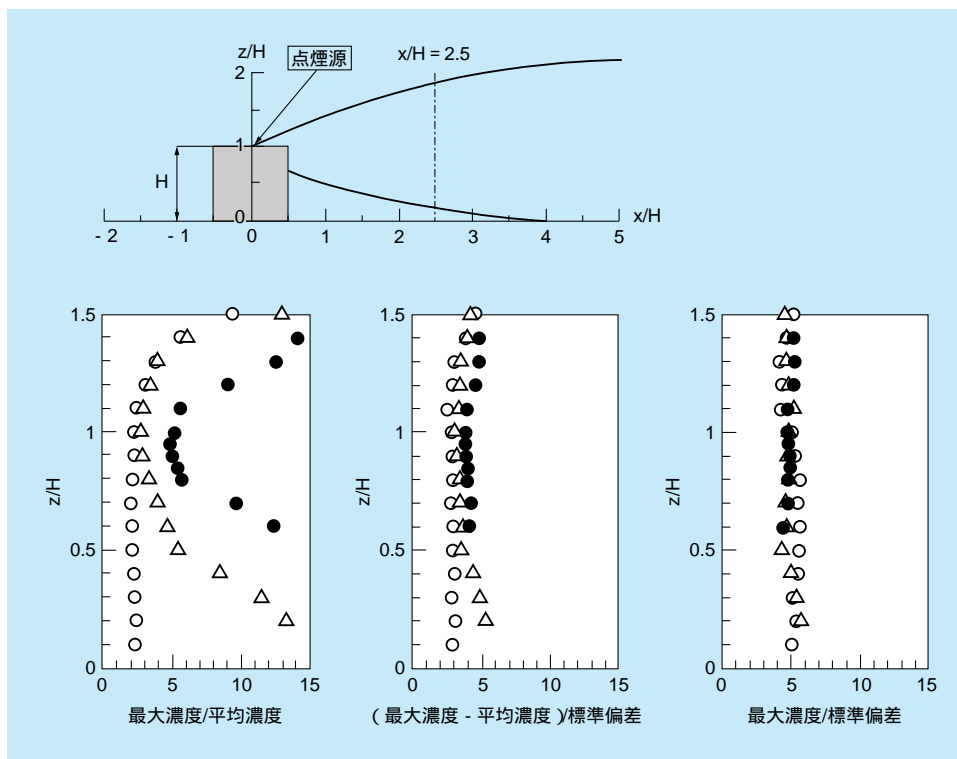


図5-3 建物周辺での濃度変動測定結果（ \circ ；立方体建屋、 \triangle ；配管系建屋、 \square ；平地）

5 - 2 数値計算からのアプローチ

5-2-1 実現象に近づけるために

近年、排ガス拡散予測に、数値モデルが適用されるようになり、2-14節や3-4節で示したように実用化研究が進んでいる。しかし、これらの数値モデルは、地形あるいは建屋のいずれか一方のみを対象とし、時間平均濃度の予測を行っている。一方、最近の乱流計算手法の発展とともに、今まで考慮されなかった現象も予測できる可能性がある⁹⁾。例えば、時間平均量に加えて、瞬間的な変動を予測する数値計算により、瞬間濃度の評価が可能となれば、毒性ガスや可燃性ガス等の安全対策に貢献するだろう。また、地形や建物が共存する条件で数値計算ができれば、より一層現実的な環境影響評価が可能となる。

5-2-2 瞬間値を予測する気流モデル

乱れが存在する場を対象に気流計算を行う際には、

乱れをモデル化して与える必要がある。乱れのモデル化、すなわち乱流モデルの分類を図5-4に示す。瞬間的な変動を予測するためには、時間平均化操作を行わずに気流場を取り扱う必要がある。すなわち、乱流モデルの内、細かい計算格子によって空間平均化を行う手法（Large Eddy Simulation：LES）を用いる。この空間平均化操作により、細かい変動成分は多少平準化されるものの、気流場の大きな渦スケールは直接計算される。そのため、LESは瞬間値の予測が可能で、予測精度の向上が期待できる。ところが、LESは普遍的な構造を有する渦スケールに至るまで計算格子を十分に細かく与え、かつ瞬間的な変動に追従した非定常計算を行う必要がある。そのため、多大な計算機記憶容量と計算時間を必要とする。LESの大気への適用は、その研究の初期の段階では平地に制限されていた。最近では単純な幾何学形状の建屋へも適用されている。

さらに予測精度が高い気流モデルとして、直接（計算）法が提案されている。直接法では、乱流のモデル化を何

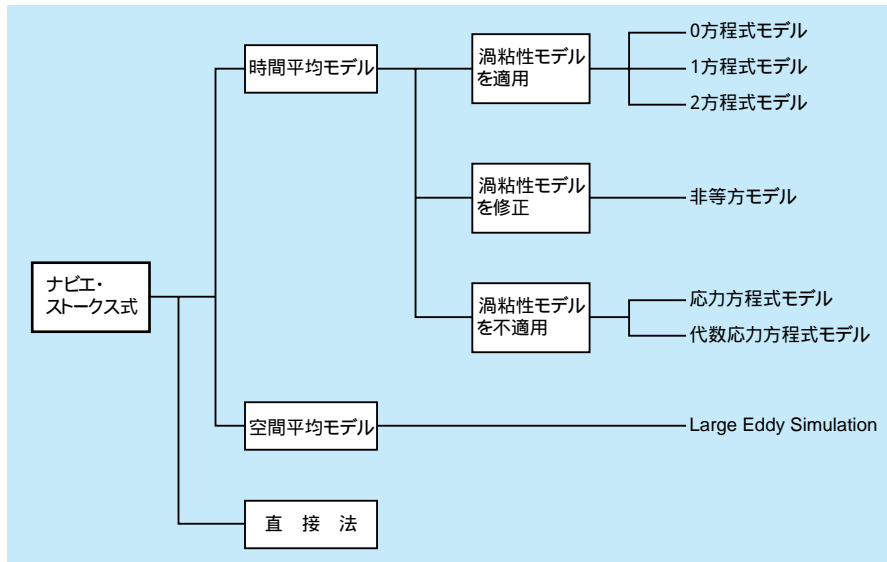


図5-4 乱流モデルの分類

ら行わず、気流場に存在する大小の渦を細かい計算格子で解像する。また、乱流の非定常性、すなわち瞬間値も計算することが可能である。しかし、計算機負荷はLES以上に大きい。そのため、直接法は流速の遅い気流場、単純形状まわりの気流場への適用に限られている。

5-2-3 瞬間値を予測する拡散モデル

前項で示した瞬間値を予測する気流モデルの考え方を大気拡散に適用し、排ガス濃度の瞬間値を予測する試みも見られる。例えば、建屋周辺の排ガス拡散に対して、前項で示したLESの考え方を拡張している。

また、LESの考え方にもとづかず、濃度の瞬間値を計算する手法も提案されている¹⁰⁾。この方法では、排ガスを小さな煙の断片(パフ)に分割し、計算格子ごとにパフの分割、結合を繰り返す。この繰り返しを非常に短い時間間隔で行うことにより、濃度の瞬間値を得る。パフによる拡散計算に必要な気流場の瞬間値は、前項で示したLES等により与える。一般に、発電所煙突などの排ガスの発生源は、計算領域の大きさと比べて小さく、大きな計算格子では精度よく解像することが困難である。パフを用いて排ガス拡散を予測する場合、任意の寸法で煙源を与えることができる。そのため、パフを用いた拡散計算では、煙源付近における予測精度が向上する。しかし、煙源から遠い位置では、排ガスの出現頻度を過小に評価することが指摘されている。

排ガス拡散にLESの考え方を適用した場合、煙源位置における予測精度の低下が懸念される。極端な場合、煙源付近で負の濃度変動値が予測される可能性があり、非現実的である。

以上の観点から、電力中央研究所では、煙源近傍ではパフ、煙源から遠い位置ではLESにもとづく手法を採用し¹¹⁾、両手法の優れた点を取り入れた。このように、両手法を切り替えることにより、濃度の瞬間的な変動を精度よく再現することができた。排ガス濃度の変動波形の例を図5-5に示す。排ガスの中心軸付近では、濃度が0になることはなく、瞬間的な高濃度が見られる。中心軸から遠くなると、濃度ゼロの出現頻度が多くなり、瞬間的に生じる高濃度の値は低下する。以上の特徴は数値計算、風洞実験ともに見られる。また、図5-5に示される濃度変動を解析処理した結果、大きい方から1~10%に相当する高濃度の計算値は、ほぼ風洞実験と一致することが確認された。

5-2-4 複雑な形状を有する場への数値モデルの適用

大気中で排ガス拡散の計算を行う場合、予測対象は地形や建屋が複合した条件である。そのため、境界の幾何学的形状が任意に変化する条件へも、数値モデルを適用しなければならない。境界の形状が複雑な条件を対象とする数値計算では、乱流モデルの選択よりも、

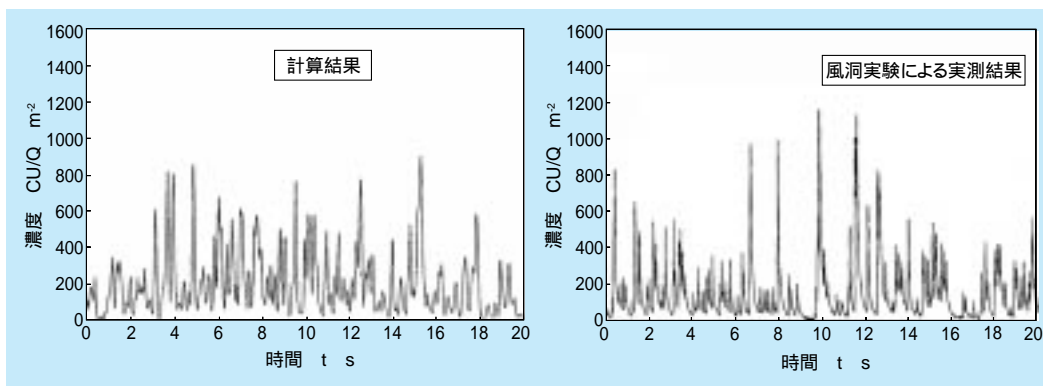


図5-5 排ガス中心軸上位置における濃度変動波形の計算結果と風洞実験結果の比較

どのような計算格子で対象物を表現するのが問題となる。例えば、実際の複雑な建屋が複合した条件に、十分に細かい計算格子を与えさえすれば、わざわざ高度な数値モデルを用いなくても、計算結果は風洞実験結果に一致する傾向があると指摘されている。

数値計算科学が実際の問題への適用になかなか応えられない原因の一つとして、複雑な形状を解像するための計算格子の生成に時間がかかり過ぎることがある。例えば、図5-6に示すように、計算格子は構造物の境界に適合するように曲率をもち、乱流量の大きな変化に

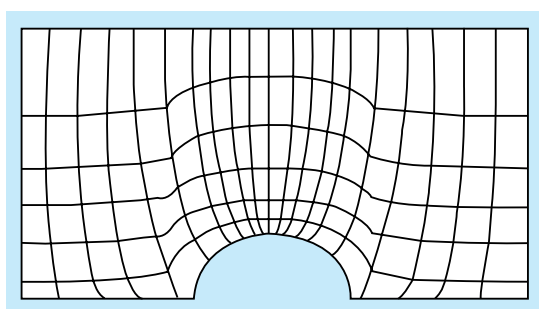


図5-6 半円状構造物まわりの計算格子の例

対応させるため細かくなっている¹²⁾。実際の発電所構内はさらに複雑で、複数の建屋が任意の方向を向いている。こういうケースでは、規則的な手順に従い、計算格子を生成することは難しい。

さらに、発電所周辺には地形がある。そのため、建屋に加えて地形高さの変化を計算格子で再現する必要がある。図5-7は地形と建屋の両方を考慮した座標系の例である。このような計算格子の生成は非常に手間がかかる。複雑な形状を効率よく計算格子で分解するため、複数の計算格子を重ねる手法、規則的でない計算格子を使用する手法などが研究されている。

より実態に即した予測を行うには、今後、数値計算手法を熱と地形・建屋が複合した場に適用する必要がある。そのために必要な数値モデルや計算手法の開発は、継続的に実施されるだろう。一方、計算機資源が限られている現状を踏まえて、合理的かつ効率的な数値計算手法も望まれている。現時点では、全ての大気現象を一つの数値モデルで再現するのではなく、環境影響評価や安全対策に必要な解析項目を明らかにして、現象を絞り込んで予測計算を行うのが現実的である。

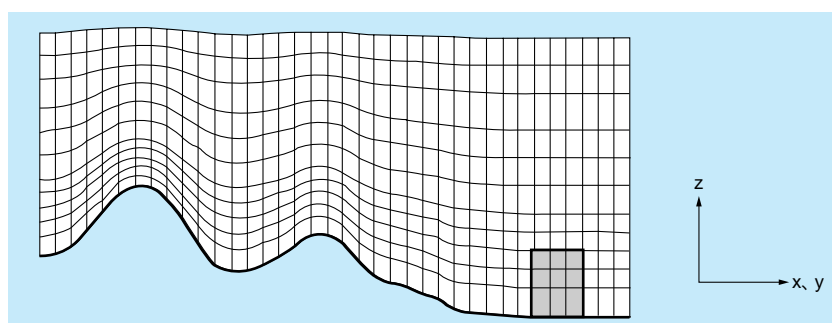


図5-7 地形および建屋の複合条件下における計算格子の例 (■は建屋に相当する)

5 - 3 ま と め

電力中央研究所では、大気拡散予測技術を防災対策等に役立てることを念頭に、これまでのように大気汚染物質濃度の平均値だけでなく、瞬間的な高濃度にも着目する研究を開始した。現在、様々なプラントの形状や排出条件に対して、大気汚染物質の濃度変動を風

洞内で測定する手法や瞬間濃度を予測する数値モデルの開発を行っている。また、環境流体計算科学の知識を十二分に活用して、複雑な現象が絡み合う大気中の物質移動現象を解明することを目指している。

コラム9 濃度変動測定システムの原理

風洞実験で濃度変動を測定するための装置（図1）は、小型の濃度測定部（サンプリングヘッド）および燃料の供給量や燃焼温度を調整するコントロール部から構成される。サンプリングヘッド内を減圧することにより、サンプリングヘッド先端に取り付けられたチューブを通じてトレーサガスを高速で吸引する仕組みとなっている。サンプリングヘッド内では、燃焼した炭化水素より生じる負イオンを捕捉し、発生した電流を電気信号として検出している。検出された電気信号は、風洞測定部外に設置されたコントロール部に送信され、コントロール部にて予め求められた係数を用いて濃度値に変換される。この係数を求めるための装置の検定は、所定のガス濃度に調整された検定ガスを用いて行う。また、サンプリングヘッド内で検出される電気信号は、燃焼室の燃焼温度や燃料の供給状態に影響されるため、装置の検定は各測定開始前に行う必要がある。一般に、サンプリングチューブには、内径 $2.5 \times 10^{-3} \text{m}$ 、全長0.2m程度の微細な金属製の管を用いる。そのため、燃焼室（すなわちサンプリングヘッド）を測定点の近傍に設定することができ、応答速度を高めることが可能となる。加えて、測定点から燃

焼室までの間において、サンプリングガスが他の気体と混合される影響が最小となる利点もある。

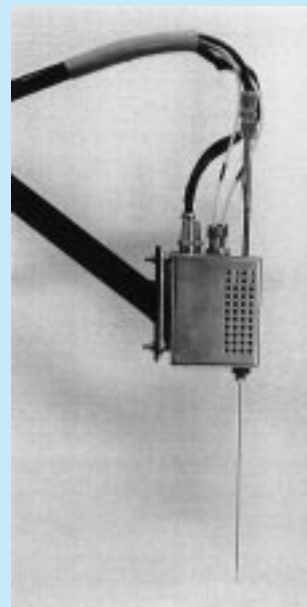


図1 濃度変動測定装置

コラム10 環境計算科学と数値乱流風洞

発電所周辺の排ガス拡散予測をはじめ、種々の大気現象の予測に、今後も数値モデルが適用されていくだろう。その際には、数値計算技術や計算機の進歩にともない、今まで予測できなかった現象も新たに予測可能になると考えられる。この数値モデルを用いた複雑な乱れ現象を解明する究極の姿の一つに、数値乱流風洞と言われるものがある¹⁾。

数値乱流風洞という言葉は、今から10年以上も前から使われ、乱流現象を把握するための実験設備としての「風洞」に対して、計算機を使って乱流現象を再現しようとする試みである。10年前の乱流モデルの研究レベルでは、LES (Large Eddy Simulation) 手法を中心に数値乱流風洞の構築が考えられていた。すなわち、乱れの細かい渦をモデル化するLES手法は、従来の時間平均モデルに比べて、より普遍的で局所的な情報を得られると期待され、開発、改良が続けられている。しかし、大気環境のように広い領域にLESを適用する際、十分に細かい計算格子が取れるのかという問題がある。大きな計算格子を使う方法は、LESと区別されてVLES (Very Large Eddy Simulation) と呼ばれることがある。一方、何らのモデル化を行わない直接法も使用されてきている。しかし、格子解像度等の点から、色々な気流条件を対象とする数値乱流風洞で使用する手法となるには、まだまだ時間が必要と思われる。

数値乱流風洞の構築には、計算機、特にスーパーコンピュータ (スパコン) の発達が大きく関わる。1990年代になると1GFLOPS (1秒当たり10億回の演算回数) に至るまで計算速度が上昇してきた。この計算速度の上昇は、主にベクトル化と呼ばれる計算手法の寄与が大きかった。しかし、このベクトル化による計算速度の上昇は最近になって限界に近づいている。例えば、次期スパコンの計算速度は、一つの演算装置で10GFLOPS程度以下に留まっている。将来的にはベクトル化に加えて、複数の演算装置を用いるパラレル化によって対応していくことになるだろう。また、計算に用いられる格子数は、現在では

1億に至るまで増加した²⁾。さらなる記憶容量の増大が、より複雑な計算を可能にする。

数値乱流風洞を具体化した一つの例として、航空宇宙研究所の「数値乱流風洞」がある³⁾。この数値乱流風洞は、1.7GFLOPSの演算装置を166台パラレルに接続している。合計で280GFLOPSの性能を有する数値乱流風洞は1993年に稼働開始し、当時、世界最高速度を有していた。数値乱流風洞により、平行平板間の直接法による数値計算が行われ、世界で最も早い気流速度条件下で解を得ている。今後は、さらに早い気流速度条件やより複雑な幾何学的条件への適用が期待されている。

数値乱流風洞の実現性を、乱流のモデル化と計算機の観点より考えてきた。大気の計算などに数値モデルを適用するには、上記に加えて、差分法等の数値計算技術、複雑な形状を有する場での格子の作成技術、得られた計算結果の可視化技術等、多くの観点から実現性を考える必要がある。特に、大気流れは実験室内の流れよりも多くのパラメータが関係する。そのため、大気現象を対象とした数値モデルの適用には、多くの困難さがつきまとう。自然界で起こる複雑な現象に対する万能の数値乱流風洞の実現はいつになるのか。夢のまま来世紀を過ごすことのないように、乱流モデルの研究者の頑張りが期待されている。

参考文献

- 1) 小林敏雄、1985、乱流の数値シミュレーション - 数値乱流風洞への夢 - 、日本機械学会誌、88、799、644-647
- 2) Murakami, S., Kato, S., Kobayashi, H. and Hanyu, F., 1995, Current status of CFD application to air-conditioning engineering, アジア地域の建築・都市環境調和技術に関する環太平洋シンポジウム
- 3) 航空宇宙技術研究所、1998、広報月刊誌「なる」、471