特集2・大気拡散モデル，風洞実験と環境アセスメント

数値シミュレーションモデルの 大気環境アセスメントへの適用性

北 林 興 二*

キーワード：数値シミュレーション，大気環境アセスメント，シミュレーションモデル，大気拡散

1. はじめに

近年，コンピュータの性能向上，価格の低下と普及，汎用数値シミュレーションソフトの性能向上，低価格化等に伴い，科学技術計算のみならず，設計・製作・性能評価など広範囲の部門・分野でCAE（Computer Aided Engineering）が活用されている。特に自動車などの空力性能評価，車体設計，衝突安全評価などに関しては，数多くの汎用ソフトが使用されている。このような数値シミュレーションモデルの信頼性向上と普及により，実機や縮尺モデルによるモデル実験などは次第に衰退してゆくことと予想される。

大気環境や海域環境における汚染物質拡散に関しても，従来の大学や研究所で研究用に開発されたモデルだけでなく，数は多くはないものの，一応の結果の出せる汎用モデルも利用できる状況となってきた。しかしながら，現在の大気環境

アセスメントにおいては，未だ，従来からのブルーム・パフモデルをベースとした解析解モデルが一般的であり，数値シミュレーションモデルの利用・活用は進んでいるとはいえない。本文では，数値シミュレーションモデルの大気環境アセスメントへの普及を妨げている原因について考察し，それを取り除くために数値シミュレーションモデルソフトの側，あるいは，アセス評価の側で検討すべきと思われる事柄について考察する。勿論，本文の考察は私見であり，異なる意見をお持ちの方も多いと思われるが，議論の発端にでもなれば幸甚である。

2. 大気環境問題における数値シミュレーションモデルの活用

大気環境問題において，活用されているシミュレーションモデルの状況を取り纏めてみると表1のようになろう。ここでは，現象の規模，モデル

表1 大気環境問題に関連したシミュレーションの状況

現象の規模	現 象	モデルの実施者	アセス対象？	備 考
マクロ	気候温暖化	大学，研究所	NO	規制に関係なし
メソ α	酸性雨	大学，研究所	NO	規制に無関係なし
メソ β	光化学Ox	大学，研究所	NO	規制に関係有り，ただし，単独自治体では不可能
メソ γ	ヒートアイランド	大学，研究所	NO	規制に関係なし
メソ γ	SO ₂ , NO _x 等（平坦地）	コンサル，自治体	YES	規制対象，ブルーム，パフが主体，平坦地のみ
メソ／ミクロ	SO ₂ , NO _x 等（複雑地形）	大学，研究所，コンサル	YES	汎用モデルの可能性有り
ミクロ	風害	大学，研究所，コンサル	YES	風洞実験が主，汎用モデルの可能性有り
ミクロ	排気筒白煙化	コンサル	YES	解析解モデルが主，汎用モデルの可能性有り

Some discussion of the applicability of numerical simulation model on the air quality assessment

*工学院大学機械システム工学科 Koji KITABAYASHI

の使用者、アセスの対象かどうか？状況等を私見を含めて取り纏めてみた。表で明らかのように、シミュレーションモデルがまだ研究段階にあるもの、規制等の対象となっていない現象に関しては、大学や研究所によるモデル開発が行なわれている。一方、大気汚染（硫黄酸化物、窒素酸化物、粒子状物質）の予測には、現在、主に平坦地を対象としたブルーム・パフモデルが一般的である。しかしながら、地形や建物の影響を受けた大気拡散予測には、まだ、ブルーム・パフを基本とし、地形による修正を加えたISCモデル（米国EPAのモデル）やそれを改良したMETILIS（経済産業省の開発したモデル）の他、電力中央研究所の数値シミュレーションモデルが使われている程度である。一方、高層ビル等の建設に伴う風害の予測は従来は風洞実験が主体的であったが、最近、数値シミュレーションも利用されている。

近年、建設の増加しているIPP（独立系発電事業）では、従来の電力会社の発電所と異なり規模も小さく内陸部に建設されることもあり、海水冷却でなく冷却塔による蒸気冷却が行なわれることが多い。冷却塔は臨海部での立地が少ない欧米では、大規模な発電所にも多く使われており、巨大な冷却塔を内陸部で目にする機会が多い。冷却塔では、二次冷却水に淡水を利用し空気による冷却効果も併用されているため、冷却水の一部は蒸気や水滴となって大気中に放出される。この蒸気が気象条件によっては白煙化し視程障害を起こす可能性があることから、環境アセスメントの項目に取り上げられている。現在のアセスでは白煙化のシミュレーションは、解析解モデルを基本としたFOGモデル等が用いられている。

以上の様に、現在のところ、環境アセスメントの対象事象に関しては、解析解モデルや模型実験などによる予測手法が一般的である。以下で、表1に示した事象の内の幾つかについて数値シミュレーションモデルの状況および環境アセスメントに採用される為に改良すべき点について概説する。

3. 数値シミュレーションモデルの現状と問題点

ここでは、表1に示したモデルのうち大気汚染、風害、排気筒白煙化を取り上げて環境アセスメン

トの視点から数値シミュレーションモデルの現状とその適用性を論じてゆく。特に大気汚染物質拡散モデルに関しては、地形、構造物の影響する場合に関してのみ取り上げる。これは、平坦地、あるいは、地形地物の影響が無視できる場合には、実績のあるブルーム・パフモデルで十分と考えられるからである。

一般に、地表面境界が平坦でない複雑地形や建物の影響を受けた乱流境界層の気流シミュレーションには $K-\varepsilon$ モデル、LES (Large Eddy Simulation)、クロジャモデルなどが用いられる。このうち、LESは格子サイズ以上の乱流の変動成分を直接再現できるモデルであるが、実地形などの複雑な境界に対しては計算時間等が膨大となり、研究用以外にはまだ適用できない。一方、 $K-\varepsilon$ モデル、クロジャモデルは平均流の計算であり乱流変動は計算できないが、空間平均の乱流強度は求めることが出来る。 $K-\varepsilon$ モデルは建物周りの気流について、風洞実験などと比較されており、細かい部分では不一致はあるものの、ある程度信頼性のあるモデルである（例えば、村上）。

クロジャモデルは大気乱流のシミュレーションを目的としてMellor-Yamadaにより開発されたモデルであり、大気境界層のシミュレーションでは信頼性の高いモデルである。また、大気境界層で重要な因子である熱輸送も再現でき、このため、熱対流、接地安定層のシミュレーションも可能である。

3.1 複雑地形・建物上の大気汚染物質拡散モデル 3.1.1 建物周辺の気流と拡散

市街地建物の周辺の気流と拡散の数値シミュレーションは道路近傍での自動車排出ガスの拡散やビル風のシミュレーションに関連して行なわれている。ビル風に関しては専用のシミュレーションモデルも開発されているが、汎用モデルでもかなりの計算が可能である。 $k-\varepsilon$ モデルが一般的である。図-1に市街地ビル街の風のシミュレーションの例を示す。この例では、ビル街上流からの流跡線を示しているが、ビル上流側での迂回流、後流側渦流域での巻き込みなどが良く再現されていると言えよう。また、ビル街のストリートキャニオン内の道路から排出された物質が風上側のビルに沿って上昇してゆく様子が再現されており、

図-1 ビル街における気流と拡散の数値シミュレーション結果の例 (三菱自動車エンジニアリング(株)提供)

定性的には実際の流れを再現していると考えられる。

3.1.2 雑地形上の気流と拡散

複雑地形上の気流と拡散は煙突からの排ガスの拡散シミュレーションや、風力発電システムの適地選択などに関連して研究が進められている。従来は風洞実験などが主流であったが、最近の10年程度でコンピュータの性能が急速に進歩し、価格が低下し、それと同時に数値シミュレーションモデルも大きく進歩したため、今では数値計算が主流になりつつある。大気の流れを対象とした数値シミュレーションモデルとしては $k-\epsilon$ モデル

ル、応力方程式モデルとその改良型として Mellor-Yamada のクロージャーモデルなどがある。

YAMADA はクロージャーモデルを用いて実地形上の気流・拡散シミュレーションの結果を発表している。クロージャーモデルは大気中の気流のシミュレーションを目的としているため、太陽放射による大気加熱や地表面の赤外放射による冷却、それに伴って発生する混合層や逆転層を再現することが出来る。

YAMADA は米国中西部の発電所からの煙の拡散を $250 \times 350 \text{ km}$ の範囲で11日間連続に、一般風の時間変化を含めて再現した。図-2 は数日間計算したときの濃度の分布を表す。前日に放出された煙と当日の煙が混在し、また、地形を原因とする斜面風や谷地形による風により、濃度の分布は極めて複雑となる。このときの測定濃度とシミュレーション値の時間変化の比較を図-3 に示す。8 測定地点における測定値とシミュレーション値の相関係数は $0.779^{(8)}$ であったと述べている。

このシミュレーションはワークステーションにより行なわれており、今や、かなりの長期間の連続シミュレーションもワークステーションあるいはPCにより可能となってきた。

3.2 冷却塔排気の白煙化シミュレーション

我国でも中小の発電施設の蒸気冷却に冷却塔が採用されるケースが増えてきている。冷却塔から

図-2 複雑地形上の拡散の継続的シミュレーション結果の例 (Yamada(2000))

図-3 トレーサ実験濃度とシミュレーション濃度時間変化の比較 (Yamada, T (2000)より)

は蒸気を含んだ空気が排出されるため、湿度が高く気温の低い日には排気中の蒸気が霧となり白煙化を呈する場合がある。白煙はその周辺の視程や景観を悪化させるため、環境アセスメントの評価項目となっている。白煙化の予測モデルにはブルームモデルをベースとしたFOGモデルやShatzmanの常微分方程式モデルなどがある。

しかしながら、これらのモデルは冷却塔建家による拡散への影響や複数の排気筒が集中する場合の相互作用が再現できない。近年、汎用の気流拡散シミュレーションソフトでも比較的簡単に蒸気の拡散と白煙化領域のシミュレーションが可能となっている。もちろん、シミュレーション結果の信頼性に関してはどこまで保証できるか検討はされていないものの、それなりの結果は得られる状況になっている。図-4は本学の卒業論文で得られた白煙領域のシミュレーション結果である。4筒連続放出の場合には1筒の場合より白煙領域が広く、かつ、高くなるのが簡単に読みとれる。なお、このシミュレーションは $k-\epsilon$ モデルを用いた汎用ソフトにより、PCを用いて行なわれたものである。

図-4 冷却塔排気の拡散シミュレーション
(白煙化領域の表示) (請より)

4. 数値シミュレーションモデルの実用化のために

以上で述べたように現在、数値シミュレーションモデルの進歩、コンピューター性能の向上はめざましく、大気環境アセスメントの分野でもそれを活用すべき時期に至っていると思われる。しかしながら、数値シミュレーションによる結果は、解析解モデルとは異なり、モデルにより、プログ

ラムにより異なることが予想される。また、数値シミュレーションモデルにおける環境濃度の評価時間が明確でないと言う問題もある。これらのことから、数値シミュレーションモデルの要件、それを採用するために解決すべき問題点を挙げると以下になるであろう。

4.1 拡散シミュレーションモデルの要件

- ①煙上昇が計算できること。
- ②拡散計算はFICKの拡散式をベースとしていないこと
- ③地表面濃度および任意の地点における濃度が計算できること。
- ④大気境界層の風速分布、風向などの諸特性を求められること。

4.2 数値シミュレーションモデルの問題点

- ①拡散計算結果の平均化時間をどの様に考えるか？平均化時間を決定あるいは推定出来るモデルであることが必要。
- ②通常のモデルでは大気の熱輸送を取り入れられない(クロージャーモデルを除いて)。したがって、中立条件での気流と拡散しか計算できない。
- ③計算結果の信頼性をどの様に担保したらよいのか？計算ソフトにより、また、計算のメッシュサイズにより結果が変わる。計算ソフトによる結果の相違は、共通の基本問題を解いて、その結果が許容誤差範囲にあれば良しとすることが考えられる。ただし、基本問題をどの様に定めるかが別の問題である。
- ④長期平均濃度の計算をどの様に行なうか？長期平均濃度の算出には、風向風速、大気安定度等の変化に対応できるモデルである必要がある。前出のYAMADAのように、長期間の連続的な気象条件を与え、それに対応する拡散を連続的に行えれば、有効な結果が得られる。その場合、日中、

夜間の別、晴天日、曇天日、雨天日等の気象条件も考慮出来るモデルでなければならない。

4.3 数値シミュレーションモデルの活用のために

前節で述べた問題点を解決し、アセスメントに数値シミュレーションモデルを活用するためには、性能を評価し、クリアすべき条件を設定し、プログラムソフトにより結果が変わらないことを確認しなければならない。つまり、規定条件と規定問題をクリアできたソフトの結果だけを利用可能とすることが望ましい。このためには、規定問題や規定条件を決める必要があるが、最適な気象条件で行なわれ、気象データが十分にそろい、拡散実験が慎重に行なわれ信頼できるデータの得られている実験は多くはない。今後それらの選択と準備が必要であろう。

謝辞：YAMADA Science & Artの山田哲司博士、三菱自動車エンジニアリング㈱の池田真巳氏には画像を提供、使用に関し多大なご協力を戴きました。誌上を借りて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 市川陽一他：地形影響評価のためのパソコン用排ガス拡散数値モデル，電力中央研究所報告，T99038（2000）
- 2) 請 勇：冷却塔排気の白煙化に関する数値シミュレーション，工学院大学機械システム工学科卒業論文，（2003）
- 3) 関東経済産業局：有害大気汚染物質の環境影響予測評価手法開発総合報告書（2001）
- 4) 河内昭紀他：冷却塔白煙の可視化領域に関する研究，日本風工学会誌，第76号，p.43-48（1998）
- 5) Schatzmann, M. : The Integral Equations for Round Buoyant Jets in Stratified Flows, Journal of Applied Mathematics and Physics, vol.29, p.608-629（1978）
- 6) 竹内清秀：風の気象学，東京大学出版会（1997）
- 7) 村上周三：CFDによる建築・都市の環境設計工学，東京大学出版会（2000）
- 8) Yamada, T. : Numerical Simulation of Airflow and Tracer Transport in the Southwestern United States, Journal of Applied Meteorology, vol.39, p.399-411（2000）