

# 流体・拡散方程式の環境問題への応用と高速数値解法

Applications of Fluid and Diffusion Equations into Environmental Issues

And Its High Speed Numerical Analysis

大場 良二

三菱重工(株)長崎研究所

Ryohji Ohba

Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries

Email: ryohji\_ohba@mhi.co.jp

気象、大気拡散、並列計算

Keywords: Meteorology, Atmospheric Diffusion and Parallel Computing

## 1. まえがき

流体および拡散方程式の数値解析システムを応用した研究開発例として、原子力施設の放射性ガス拡散予測システムと NBC(Nuclear, Bio and Chemical Agents)テロ被害予測システムを紹介する。放射性ガス拡散予測システムは、米国 ATMET 社およびイタリア気象研究所との共同研究で開発され、MEASURES というコード名で、実際の原子力施設で実用化されている。また、NBC テロ被害予測システムは、文部科学省振興調整費 PJ「共有情報の活用による減災の研究 (NBC 災害拡散推定技術)」で開発され、危機管理システムとして実用化されている。

## 2. システムの概要

### 2.1. 基礎式と数値解法

流体力学の基礎式である Navier-Stokes 式に日射/放射、雲物理、陸海面収支過程などを追加した気象力学の基礎式で気流場を解析し、この結果を利用して、大気中のガス拡散現象を解析する。(図1)気流場は、通常の数値法で解析するが、拡散場は、モンテカルロ法を発展させた Lagrangian 粒子法で解析する。気象力学方程式の数値解析コードとしては、MM5,WRF,RAMS,ARPS などの公開コードがあるが、ここでは、RAMS とその専用拡散解析コードである HYPACT を利用したシステムを紹介する。[1]

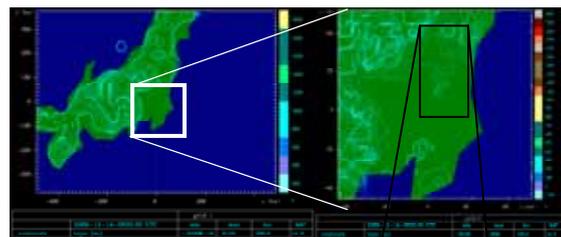
気象力学方程式 (差分法)

拡散方程式 (粒子法)

図1 大気拡散予測システムの概要

気象力学方程式の数値解析では、計算時間短縮のため、Nesting (多重格子法の1種)と呼ばれる差分格子が使用されている。(図2)この差分格子の境界条件および初期条件は、地球規模の気象データベース(約200kmメッシュ)から決定される。この気象データベースは、過去50年程度が無料で公開されており、地球温暖化の影響を再現した今後100年程度のデータベースも、現在、整備中である。気象モデルとこれらのデータベースを利用すれば、任意の時刻の気象(風向、風速、気温、降雨量など)を数100mメッシュで再現計算可能である。国内の天気予報および原子力施設拡散予測システムでは、気象業務支援センターから、インターネットで6時間毎に更新・配信される数10kmメッシュの日本周辺気象データベース(GPV: Grid Point Value)を利用している。

a) 16kmメッシュ b) 4kmメッシュ



c) 1kmメッシュ

d) 250mメッシュ

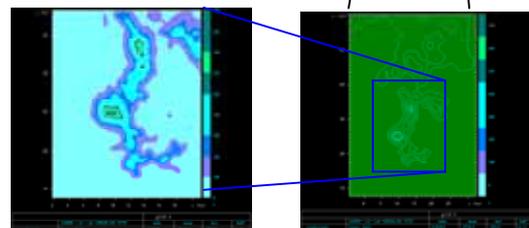


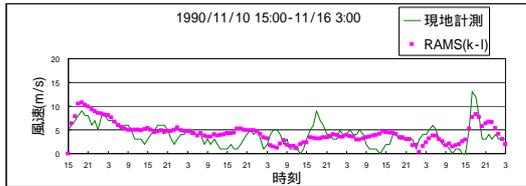
図2 Nesting 格子と計算領域、差分格子メッシュ幅

## 2.2.計算結果

### 2.2.1.気流計算結果

大気拡散予測システムの利用においては、野外実測データによる検証が必要であるので、日本原子力研究所が1989、1990年に筑波山周辺で実施した野外拡散実験結果[2]と比較検証を行なった。気象モデル(RAMS)で計算した筑波山周辺の風速時間変化は、現地気象観測結果が地点毎に異なる特徴を再現していることが確認された。(図3)

#### a)筑波山頂



#### b)B地点(ガス放出点)

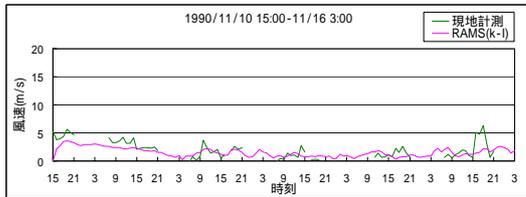
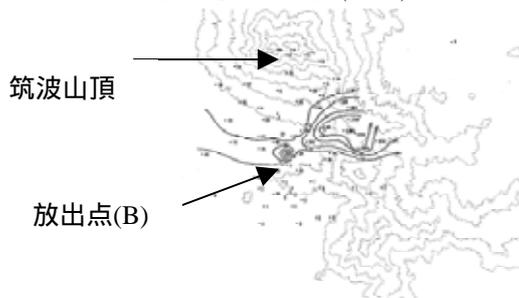


図3 風速時間変化の比較

### 2.2.2.濃度計算結果

拡散モデル(HYPACT)で計算した筑波山周辺の地上濃度分布は、現地測定結果と対応していることが確認された。(図4)



#### a)現地測定結果

#### b)地上濃度分布の比較

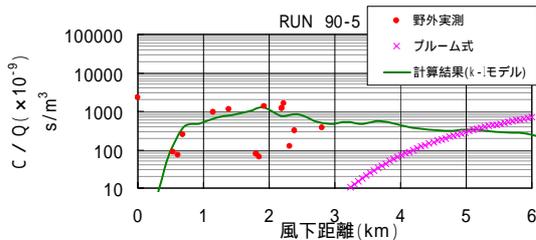


図4 数値計算結果と現地測定結果の比較 (ブルーム式は、環境アセスに利用されている簡易計算式)

## 3.高速数値解法

### 3.1. 並列計算手法

大規模計算の高速数値解法として、並列計算機を用いた領域分割法(Domain Decomposition Method)が、幅広く、利用されている。この方法は、計算領域を数10~100に分割して、同数のCPUで並列計算する。汎用的な並列計算機で、気象モデル(RAMS)の領域分割計算を行なうと、CPU数の増加とともに、CPU間のデータ転送時間が増加し、全体的な計算時間がCPU数に反比例しなくなる。この問題を解決するために、領域分割と時間分割を併用した4次元分割法(4D Decomposition Method)を開発した。[3]この方法は、Nesting計算領域の粗格子は、領域分割法で計算し、細格子は時間分割法で計算する方法であり、高速化率は、ほぼ100%であることを確認した。(図5)

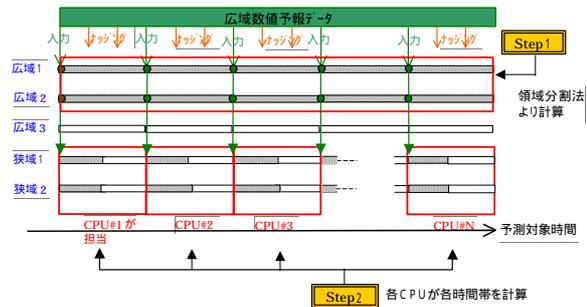


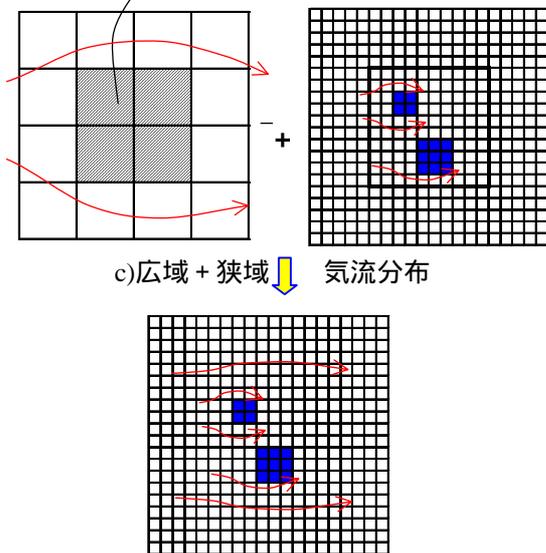
図5 4次元(領域+時間)分割法の概要

### 3.2. 同化計算手法

数値計算結果を現地測定結果に近づける手法として、同化計算手法(Assimilation Method)が地球物理分野では利用されている。この手法は、基礎方程式に重み関数付きの残差項を追加して、この残差項を4次元領域で最小にする近似解法である。この同化計算手法を拡張して、建物周りの気流を数mメッシュで高速計算する手法を開発した。気象モデルの計算時間は、メッシュ幅に反比例して増加するので、1年間の気象再現計算を数mメッシュで実施するには、数10CPUの並列計算機では、約10年かかる。今回、開発した手法は、数100mメッシュの領域までは、4次元分割法で計算し、数10mメッシュ以下の領域については、予め、16方位分の定常な気流計算結果をデータベースとして準備しておく。数100mメッシュ領域の気流は、時々刻々、

気流が変化するので、この非定常的な気流場とデータベースの定常的な気流場の残差が最小となるような16方位の線形結合として、数mメッシュの気流場を時々刻々、計算する。

a)数100mメッシュ領域 b)数mメッシュ領域 (建物は抵抗体で近似) (16方位データベース)



c)広域+狭域 ↓ 気流分布

図6 同化計算手法を利用した詳細格子計算法

この計算手法を利用した新宿副都心周辺の気流計算結果を図7に示す。

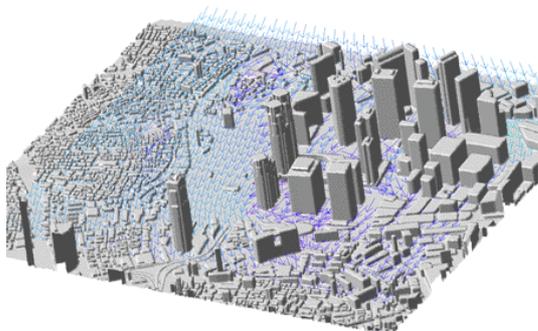


図7 建物周りの気流計算結果(数mメッシュ)

### 3.3. 粒子拡散計算手法

粒子拡散計算手法の特徴は次のとおりである。

- 差分法に特有の数値計算誤差が無い。
- 濃度計算精度が差分格子幅に依存しない。
- 粒子状物質の重力による沈降、沈着現象再現が容易である。

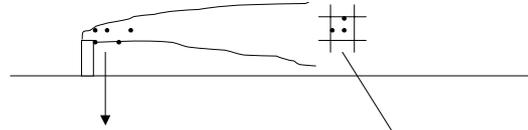
以上の他に、粒子モデルの特徴を生かして、多種類のガスがそれぞれ異なる放出量で非定常的に放出された場合の濃度分布を高速で拡散計算する手法を開発した。[4]

大気中のガス濃度は、放出量に比例する。

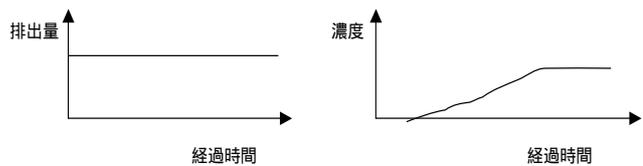
また、粒子拡散モデルで計算した数万個の各粒子は、時々刻々の位置座標(x, y, z)とともに、放出開始後の経過時間(t)および粒子強度(q)を属性として記憶している。空間中の濃度は、単位体積中に存在する粒子強度(q)の積算値から計算される。今回、開発した手法では、以上の特徴を利用して、次の順序で拡散計算を行なう。

時間によって変化しない定常な放出量(=1.0)で長時間の粒子拡散計算を行い、時々刻々の粒子属性を記録する。(図8のa))

時間によって変化する非定常な放出量(=Q(t))に対応するように、各粒子の強度をq(t)に変化させ、この粒子強度に対応した濃度を計算する。



a)単位一定排出量(Q;m3/sec)の計算



b) 時間変化排出量(q(t); m3/sec)の計算

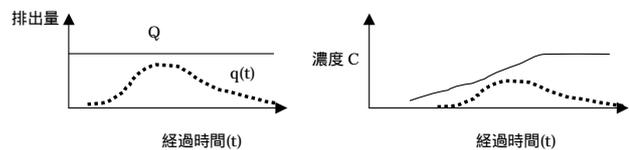


図8 非定常な放出量に対応した濃度分布の換算法

通常、原子力発電所の想定事故では、100種類以上の放射性核種が放出されるが、それぞれ放出量の時間変化が異なるため、従来は、100回以上の拡散計算を実施する必要があった。今回、開発した計算法では、粒子拡散計算は1回だけで良く、核種に応じた濃度換算計算は、短時間で終了する。

## 4. 応用例

### 4.1. 原子力発電所放射性ガス拡散予測

#### システム

原子力発電所やその関連施設において、万が一、大気中に放射性物質が漏洩する事故が起こった場合には、迅速かつ精度良く、その拡散状態を予測することが要求される。この要求に対し、三菱重工では、原子力緊急時対応システム(コード名 MEASURES)を開発し、その中の周辺被ばく予測システムにおいて、気象/拡散解析モデル RAMS/HYPACT を実用化している。

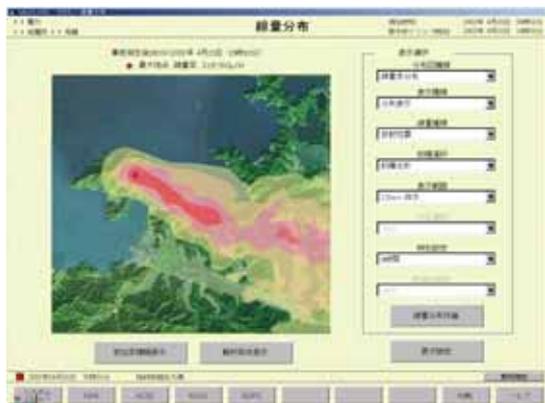


図9 原子力緊急時対応システムの被ばく線量分布表示例

#### 4.2. NBC テロ被害予測システム

NBC テロの発生確率の高い市街地では、建物影響が重要であるので、3.2 章で説明した同化計算手法を応用して、気象モデルで建物周りの気流および拡散計算が短時間で実施可能なシステムを開発し、実用化している。

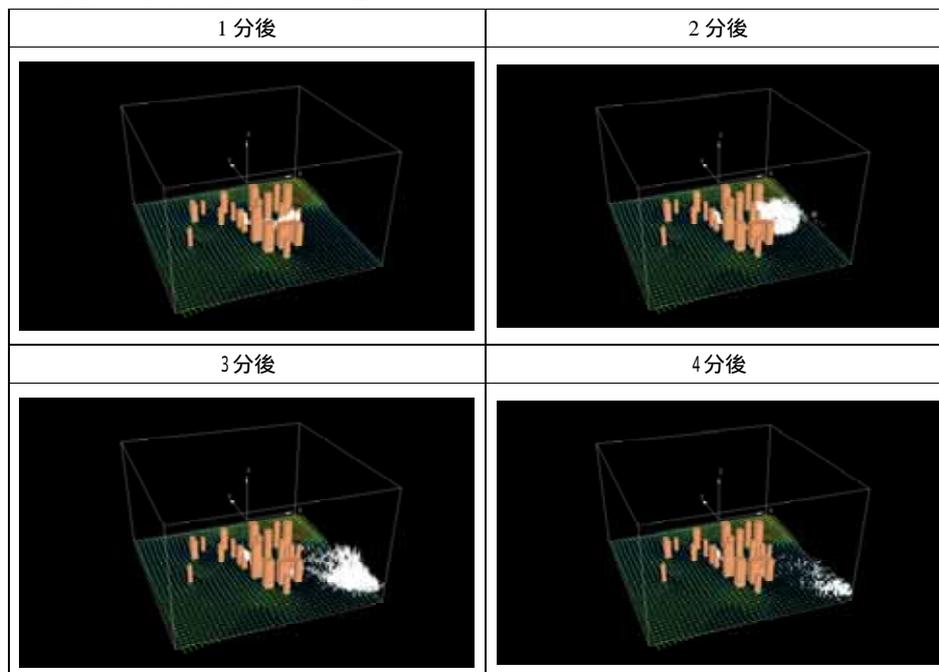


図10 市街地高層ビル周りの気流と拡散

## 5. まとめ

今回、紹介した NBC テロ被害予測システムは、三菱重工が原子力発電所緊急時対応システム (MEASURES) を利用して、文部科学省科学技術振興調整費「危機管理対応情報共有技術による減災対策 (NBC 災害拡散推定技術)」で開発したものである。

### 参考文献

- [1] [http://www.atmet.com/html/rams\\_soft.shtml](http://www.atmet.com/html/rams_soft.shtml)
- [2] 日本原子力研究所、狭域野外拡散試験データ(筑波89), JAERI-Data/Code 99-036、1999年8月
- [3] 国際特許 PCT/JP02/05096(日、米登録済)
- [4] 米国特許 US6,853,924B2