

究極のパソコン活用

～3次元流体計算の可能性と課題～

青山 貞一 鷹取 敦

パソコンのハードウェアは、「秒進分歩」の勢いで進化し続けている。そのパソコンをスーパーコンピュータの独壇場であった科学技術計算，なかんずく膨大な計算が必要となる流体力学計算，それも3次元の流体計算で使うことを思いだったのが20年前のことであった。その後，筆者はハード，ソフト両面で試行錯誤を繰り返してきた。流体計算とは複雑な地形上を流れる風や潮をコンピュータの数値計算として再現するものである。具体的には，運動方程式を一定の境界条件のもと差分法を使い数値計算し，その近似解を求めることを指す。当然のこととして，シミュレーションモデル（ソフト）は，予め風洞実験施設においてシミュレーションの精度を検証する。本稿では過去，筆者が試行錯誤し，現在，実用化に成功したパソコンによる3次元流体計算の実績と課題について述べたい。

キーワード：パソコン，スーパーコンピュータ，3次元流体計算，差分法，有限要素法

1 パソコン演算速度の推移

この20年間，大気，水質汚濁など環境影響シミュレーションを支援するコンピュータ，とくにパソコン・ハードウェア技術の進歩にはすさまじいものがある。まさに日進月歩ならぬ「秒進分歩」の勢いである。表1は，過去15年間におけるパソコン（CPU）の数値計算，とくに浮動小数点倍精度実数演算速度を示したものである。表中のMflopsは，浮動小数点倍精度実数演算速度，いわゆるLinpacテストの結果を示している。

表1 パソコン(CPU)別の倍精度浮動小数点演算速度比較(速度：Mflops)

CPU/Clock	使用コンパイラ	Mflops	年代
i486DX(25)	MS-Fortran	0.48	1990
i486DX2(66)	MS-Fortran	1.23	
i486DX2(66)	Fortran PowerStation	4	1993
PentiumMMX(200)	Fortran PowerStation	14	1997
K6(200)	Fortran PowerStation	18	1997
Pentium4(1.5GHz)	Fortran PowerStation	270	2002
Pentium4(2.5GHz)	Fortran PowerStation	350	2003
Pentium4(3.4GHz)	Fortran PowerStation	550超	2005
i860(60) Risc	Fortran (Unix)	10	1991

出典：青山貞一⁽¹⁾

ちなみに，Linpacとは米国のテネシー大学のJ. Dongarraにより開発されたプログラムで，LU分解にもとづく連立一次方程式の解法プログラムを指す。このLinpacプログラムは，著名なスーパーコンピュータの性能を比較するプロジェクトである「TOP500 Supercomputer Sites」の標準ベンチマークとして採用されている。Linpacは連立一次方程式の解を求めるプログラムであり，主に浮動小数点演算の性能を計測することが可能である。Linpacを高度に並列化したプログラム「HPL」(High-Performance Linpack)がTOP500リストでは用いられている。なお，Linpacによるベンチマークのテスト結果はスパコンのみでなく，ワークステーションからパソコンまで，数多くの計算機のベンチマークに使用されている。

表1より1990年初頭，インテル社のCPU，80486(i486，25MHz)の演算速度は0.48Mflopsであったのが，最新のPentium4 3.4GHzでは550Mflopsとなっている。単純比較すれば約15年で浮動小数点倍精度実数演算速度は1000倍以上早くなったことになる。しかもパソコン本体の実売価格は，1990年のパソコンが約40万円，2005年は約20万円である。したがって，演算速度が1000倍速くなったにもかかわらず，価格は半額になっていることになる。

ちなみに，筆者が1991年の湾岸戦争勃発時に，ペルシャ湾へ流出した原油がその後どう流れるかを日時を追って予測するために3次元流体モデルを使い潮流シミュレーションを行った。その時，できる限り高速のパソコンあるいはワークステーションが必要となり，沖電気からいわゆるアカデミックディスカウント(学術割引)で購入した当時の最新鋭スーパーパソコン(Unix，Riscマシ

AOYAMA Teiichi

武蔵工業大学環境情報学部環境情報学科教授

TAKATORI Atsushi

株式会社環境総合研究所調査部長

ン)の速度も表1に示した。表の最下段にある i860 がそれである。その沖電気のスーパーパソコンで使用されていた演算装置(CPU)はインテル i80860(60MHz)で Linpac は 10Mflops であった。この i860 の演算速度は現在使われている平均的パソコンの CPU, Pentium4 の速度の 1/50 以下である。当時は、現在のパソコンの 1/50 以下の速度のスーパーパソコンで湾岸戦争に突入する直前から 3次元流体モデルによる潮流や大気シミュレーションを行ったのである²⁾。

表1には掲載していないが、20年以上前のパソコンで使われた i8086 や i80286 にコプロセッサ i8087 や i80287 を付け浮動小数点倍精度実数演算した速度と比較すると、表1にある最新パソコンの速度は 3000 倍以上高速となっている。

2 主記憶・外部記憶容量の推移

次にパソコンの主記憶容量や外部記憶容量だが、1980年後期のパソコンの主記憶容量はせいぜい 1MB であったが、現在はデスクトップパソコンのみでなく、ノートパソコンでも 1~2GB が搭載可能となっている。今後、さらに大きな主記憶容量の搭載が実用化される見込みもある。

当然のこととして、主記憶容量は CPU の演算速度の飛躍的向上との関連で実用的意味と価値がある。1990年初頭に比べ現在の演算速度が約 1000 倍早くなったことと、主記憶が 1990年初頭の 1MB から現在の 1GB となったことがまさに、それを証明している。同様に外部記憶容量も当初、数 10MB で出発したパソコンのハードディスク等の外部記憶は、現在は標準でも 100GB 超となっており、ここでも 1000 倍増加していることが分かる。

このように、パソコンのハードの進歩はめざましく隔世の感がある。まさに驚異である。

3 計算プログラムにおけるメモリ管理の推移

3.1 MS-DOS (8086, V30) 時代

筆者らがパソコンで大気拡散計算をはじめた 1980 年代中頃、パソコン用オペレーティング・システム(OS)の主流は MS-DOS (DOS) であり、主記憶容量は 640KB ないし上述のようにせいぜい 1MB が最大であった。MS-DOS やデバイスドライバが使用する分も含めると、流体計算で頻繁に使用する主記憶上の静的、動的配列(倍精度実数)のメモリはまさに「雀の涙」しかなく、3次元どころか、2次元レベルの流体計算でも格子(メッシュ)の数はさして大きくはとれなかった。ちなみに、解析解モデルの標準となっている正規プリュームモデルによる大気拡散の場合でも 40 メッシュ×40 メッシュがやっとの状

態であった。

このパソコン初期段階で筆写らは XMS や EMS など、わずかなメモリの隙間や外部のバンクメモリを切り替えて使うまさに「裏技」を使い主記憶なりデータ領域を拡張したが、アクセス速度や切り替えのオーバーヘッドがあり、またメモリ節約のためにプログラム記述に難点があった。この時期、青山はおそらく我が国で初めて解析解モデルをベースとしたパソコン用大気拡散シミュレーションシステムを MS-DOS と Basic 言語で開発し、国及び 20 以上の自治体に提供している。当時は流体モデルではなく、解析解モデルによるシミュレーションなので、これでも十分実用となった。

3.2 MS-DOS (80286, 80386) 時代

筆者らは、当時、旧帝大系大学などの計算機センターに導入されていた大型汎用コンピュータやつくば研究学園都市の気象研究所や国立環境研究所などの国立研究所などに導入されていたスーパーコンピュータでしか計算できないとされた流体計算をこの頃からパソコン上で試みた。

1980年代後半に出た i286 や i386 は MS-DOS を使う限りいくつかの制約があったが、CPU 自体は広いメモリマップを持っていた。当時、MS-DOS 上のプログラムからアクセスできない範囲は拡張メモリと呼ばれ、RAM ディスクなどの目的に使われることが多かった。

2次元及び3次元の本格的な流体計算プログラムは、もともと大型汎用機あるいはスパコン上で稼働させるためフォートランで記述されていたが、この頃、いかに 1MB を超えるメモリにプログラムからアクセスするかに関連し、DOS エクステンダ及びそれに対応した Fortran コンパイラが開発されるようになった。筆者らはそれを活用することにより、バンク切り替え等のオーバーヘッドやメモリ管理に係わる面倒なプログラミングを行うこと無しに、DOS であっても PC に実装した広い主記憶にアクセスすることが出来るようになった。これにより速度はともかく、メモリ管理の呪縛からすこしではあるが解放されることとなった。

3.3 MS-Windows 3.1, 95 以降 (80386, 80486, Pentium 等)

Windows そのものはバージョン 1.0 が 1986 年に発売されたが、実際は 1992 年に発売された Windows 3.1 が PC/AT 互換機用の標準 OS として爆発的に普及した。実はそれより少し前、筆写らを含むシステムハウスに OS/2 開発キットが提供された。Unix ライクな OS/2 プログラムがもたしているうちに、後発の Windows が世界を席巻することになる。しかし、Windows では CPU が広大なメモリマップに対応するようになったため、DOS エクステンダのような

特殊な「仕掛け」や「裏技」に頼らずとも広いメモリにアクセスできるようになった。さらにWindows 95以降では仮想メモリにより実際にメモリが実装されていない範囲までアクセスが可能となった。そこではWindowsが「裏方」としてハードディスクとの間で、データの置き換えをすることが可能となる。実際のメモリ容量を超えたアクセスが続くと実行速度が遅くなるものの、プログラムが動かなくなってしまうことはなくなった。

この後は、現在のXPやVistaを含めCPUの高速化と相まって主記憶1～2GBの広大なメモリに流体計算に必要な静的、動的配列を存分にとることが可能となり、プログラムからのアクセスも難なく可能となったのである。

4 プログラムの具体的実行環境

流体計算などの数値計算（シミュレーション）プログラムは、コマンドライン・プログラム、コンソールアプリケーションなどと呼ばれるテキストベースのプログラムとして実行する。メモリおよびCPU等のリソースの管理はWindowsの支配下にあるが、ウィンドウへの表示は行わず、画面への出力はDOSやUNIXのシェルと似たテキスト出力のみに限られる。メモリの制約はWindowsに準ずるため、仮想メモリ（実際にPCに搭載されている以上のメモリにアクセスできる。ただし速度は著しく低下する）にも対応し広大なメモリを利用することが出来る。

MS-FortranはWindowsバージョンとDOSバージョンがありDOSバージョンはMS-DOSのメモリの制約を受ける、Fortran PowerStationはWindows上のコンパイラである。

第3章で述べたように、MS-DOS上でもDOSエクステンダと対応したコンパイラを利用することにより、DOSの制約をうけずCPUのサポートしているメモリを利用できる。これらは80286、80386時代の技術と言える。なお80286で数値計算を行う時は数値演算プロセッサ80287をPCに装着しないと計算速度が著しく遅くなる。80386以降は浮動小数点倍精度演算装置はCPUに内蔵されている。

5 大気拡散予測の手法

ところで、もうひとつの本題、大気拡散シミュレーション（予測）だが、その手法には、図1にあるように大別して①コンピュータ計算によるもの、②統計的手法によるもの、③模型実験によるものの3種類がある。

これら3種のうち、コンピュータを用いた

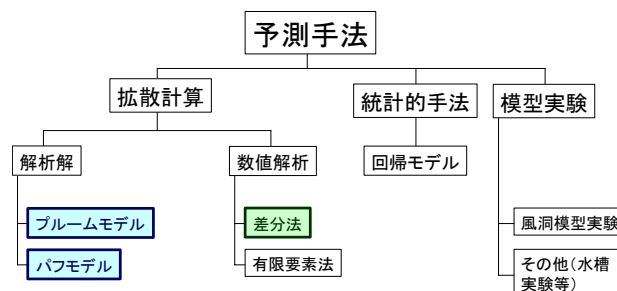


図1 主要な大気拡散予測手法の分類
参考：道路環境整備マニュアル，平成元年1月，
(社)日本道路協会

計算（拡散計算）の場合、解析解モデルと言われている正規プリュームモデルが国、自治体の環境アセスメント等で頻繁に使用されている。このモデルは、地形、建築物、構造物などを考慮せず煙突から出る煙の風下における濃度を計算するもので計算量は非常に少なくパソコン計算、たとえばMS-DOSとBasic言語によるプログラミングが容易である。しかし、地形、建築物、構造物等を考慮出来ないという致命的な欠点を持っている。

他方、本論の中心テーマとなっている数値解析法（流体計算）では、差分法あるいは有限要素法を用いることにより運動方程式の近似解を求める。それにより地形、

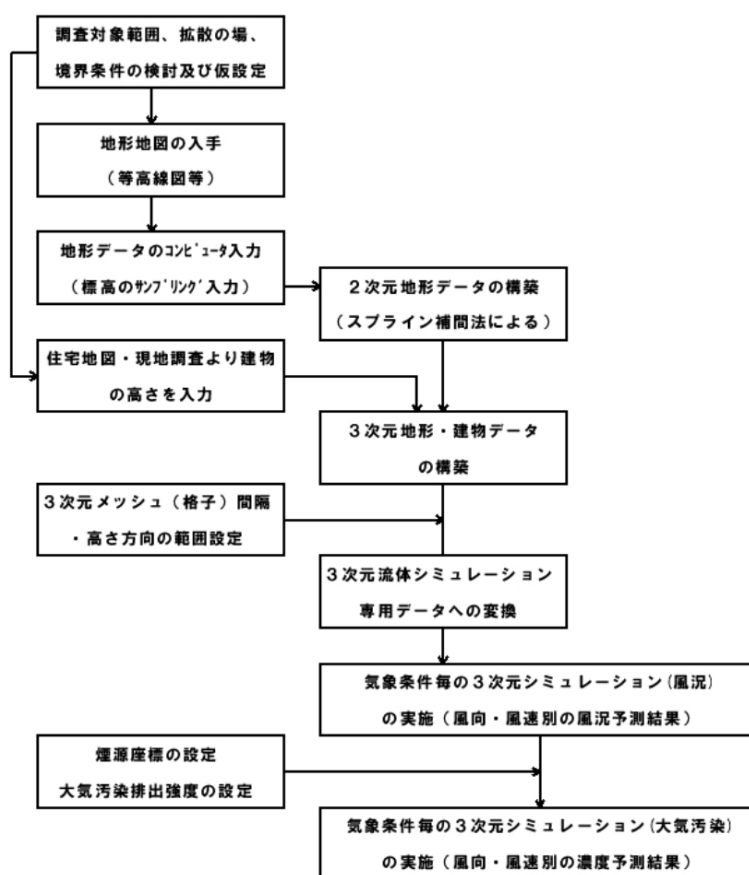


図2 3次元流体モデルによる大気拡散シミュレーション（数値計算）の手順例

建築物、構造物などを考慮可能となるが、計算量は膨大となる。同一地域を対象として解析解モデル（プルームモデル）と数値解析モデル（流体モデル）の計算時間を単純に比較すると、数値解析モデルの方が解析解モデルよりも、2次元流体モデルで10倍から50倍、3次元流体モデルでは100倍から1000倍も計算量が多い。

図2に最も計算量が多い3次元流体モデルによる大気拡散シミュレーション（数値計算）の手順を示す。大気汚染の年平均濃度をシミュレーション（予測）する場合は、下記の結果を元に年間に出現した気象条件の頻度に応じて加重平均したものが年平均濃度となる。

6 3次元流体計算の事例

以下に筆者が行った最も計算時間がかかる3次元流体計算の具体的事例を示す。

6.1 プログラムの実行環境

- ・実行OS : Windows 2000, Windows XP
- ・メモリ : 512MB～2GB
- ・コンパイラ : Fortran PowerStation 4.0
(米マイクロソフト社, 1994-1995), 現在, マイクロソフトの開発用製品にFortranは含まれていない
- ・出力形式 : コンソールアプリケーション (ウィンドウを表示しないタイプのプログラム, メモリのアクセス制限はOSに準ずる)

6.2 圏央道八王子ジャンクション^{(3), (4)}

- ① メッシュ (グリッド) 数及び1配列容量 : $211 \times 155 \times 43$ (=11.25MB)
- ② 実際に使用される主記憶 : 500MB～1GB
- ③ 風速ファイル規模 : 63MB
- ④ 1風向1風速当り計算時間 : 5時間～数日
- ⑤ 2002年3月頃のデータ (Pentium4(1.5GHz))



図3 圏央道八王子JCTのソリッドモデル

6.3 中央環状新宿線・中落合換気塔⁽⁶⁾

- ①メッシュ (グリッド) 数及び1配列容量
 $218 \times 218 \times 36$ (=13.6MB)
- ②実際に際に使用される主記憶 : 500MB～1GB
- ③風速ファイル規模 : 79MB
- ④1風向1風速当り計算時間 : 6時間程度～数日
- ⑤2002年3月頃のデータ (Pentium4(1.5GHz))

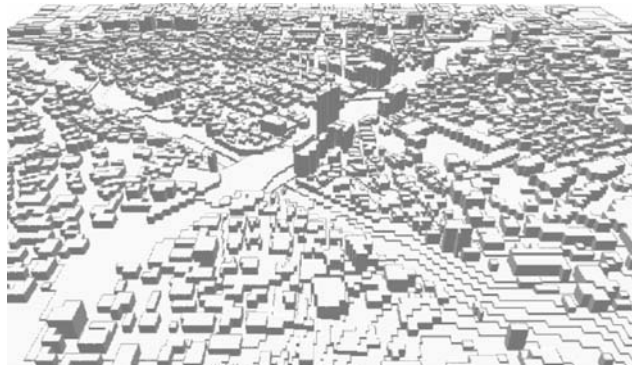


図4 中央環状新宿線・中落合換気塔ソリッドモデル

6.4 国立感染症研究所⁽⁶⁾

- ①メッシュ (グリッド) 数及び1配列容量 : $219 \times 210 \times 56$ (=20.5MB)
- ②実際に際に使用される主記憶 : 1GB～2GB
- ③風速ファイル規模 : 114MB
- ④1風向1風速当り計算時間 : 8時間程度～数日
- ⑤2002年9月頃のデータ (Pentium4(1.5GHz))



図5 国立感染症研究所ソリッドモデル

6.5 日の出・エコセメント工場⁽⁷⁾

- ①メッシュ (グリッド) 数及び1配列容量 : $184 \times 184 \times 80$ (=21.5MB)
- ②実際に際に使用される主記憶 : 1GB～2GB
- ③風速ファイル規模 : 122MB
- ④1風向1風速当り計算時間 : 8時間程度～数日
- ⑤2002年12月頃のデータ (Pentium4(1.5GHz))

なお、3次元流体シミュレーションによる大気汚染濃度の推定例として、図7に日の出町谷戸沢最終広域処分場の北東風における日の出事例の汚染濃度推定結果を示す。



図6 日の出・エコセメント工場ソリッドモデル

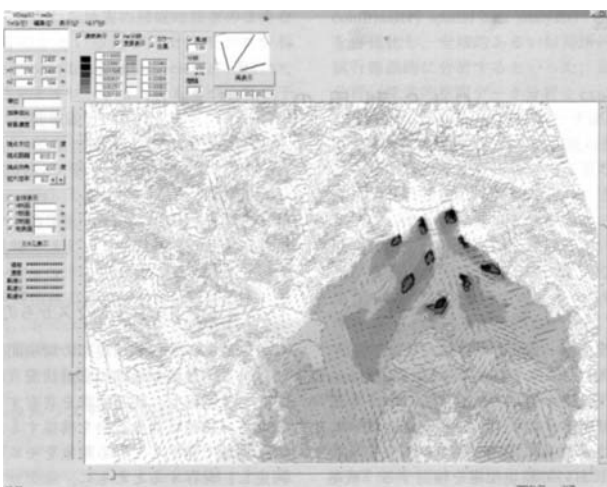


図7 北東風における汚染濃度推定

7 パソコンによる3次元流体計算の可能性

上記6. 2～6. 5の事例では、計算時間が5～8時間となっているが、上記の事例では気象条件として1風向1風速当たりの計算時間を示している。実際には、風向が16ケース、風速は4ケース（階級）を計算し、それらの計算結果（メッシュ別濃度データファイル）を重合することになる。したがって全体の計算時間は準備時間を除いても（5～8時間）×16風向ケース×4風速ケース＝320～512時間、すなわち2～3週間かかることになる。ただし、6. 2～6. 5の事例はいずれもCPUにPentium4(1.5GHz)を用いているので、最新のパソコンの場合にはその3倍程度の速度で演算できるので、単純計算時間が1週間前後となる。いずれにしても3次元流体計算がいかに膨大な計算量かつ計算時間であるかが分ると同時に、パソコンでも3次元流体計算は十分実用とすることが分かった。

ちなみに、図8はパソコンとスパコンの浮動小数点倍精度実数計算の速度を比較したものである。図より明らかかなように、現在のパソコンの速度は最大で約1000Mflopsである。驚く事なかれ、これは20年前のス

パコンの速度に比肩する。価格で見ると、現在も20年前もパソコン本体の価格はせいぜい20万円程度であるが、20年前のスパコンの価格は10億円以上していた。価格比で5000倍、要するに現在のパソコンは20年前10億円以上していたスパコンと同程度のパフォーマンスを持っているということである。

8. 今後の課題：デュアルコアプロセッサの活用

以上を総括すると、筆者が20年前、当時スパコンでしかできないと言われていた3次元流体計算をパソコンで出来ないかと考え試行錯誤を繰り返してきたわけだが、図8に示すように、現在のパソコンの速度は当時のスパコンに比肩しており、結果的に本体価格で1/5000の費用で3次元流体計算が可能となったことになる。

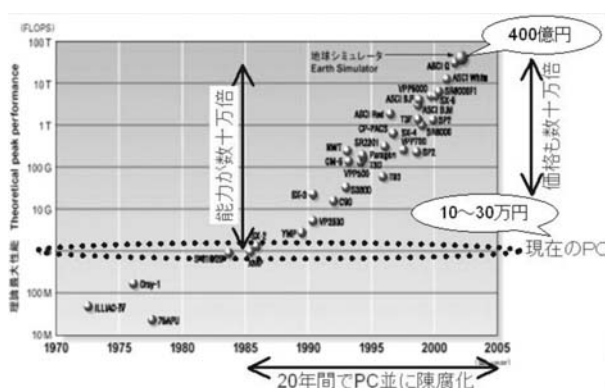


図8 スパコンの能力の変遷とパソコン能力の比較

出典：科学技術政策研究所の資料をもとに作成

とはいえ、事例に示した実用ケースに要する単純計算時間は最低でも1～2週間かかる。しかもそれは計算が発散せずに収束した場合のことである。

今後、パソコンで計算速度を向上させるには、アルゴリズムの改良やFortranコンパイラの最適化の改良などの方法もあるが、最近パソコンに装着され出したデュアルコアプロセッサの活用もある。

デュアルコアプロセッサは1つのCPUの内部に2つの独立した計算機能を含んでいる。そのため、マルチスレッドタイプのプログラムを2倍近い速度（メモリアクセスのオーバーヘッドがあるので純粋に2倍にはならない）で処理したり、複数のプログラムを同時に処理する時の速度の低下を防ぐことが可能となる。

3次元流体計算などの数値計算を行う場合には、マルチスレッド対応のコンパイラを用いて、マルチスレッドのプログラムを記述するか、メモリの制約を受けない状態で（大きなメモリを搭載したPCで）2つの数値計算プログラムを平行して動かすなどによって、デュアルコアプロセッサの恩恵を受けることが可能となる。

簡単に言えば、2つの風向ケースなり2つの風速ケースを一台のパソコンで計算をシェアすることが可能となる。これにより一気に2倍の計算速度が実現することになる。さらに複数のパソコン、それも今後はデュアルコアプロセッサ付きのパソコンを4台、6台、8台と同時に稼働させる、すなわち並列処理させることで結果的に飛躍的な高速化が可能となる。いずれにしてもデュアルコアプロセッサ付きの最新パソコンでも本体価格は10万円そこそこであることを考えると、きわめて費用対効果の高い3次元流体計算システムが構築できることになる。

参考文献

- [1] 青山貞一, 今, なぜ環境政策支援ソフトか! ~ 21世紀は「環境と情報」の時代~, 環境技術 Vol. 29, 2000年2月号
- [2] 青山貞一, 湾岸戦争の地球環境への影響, 環境総合研究所, 1992年6月
- [3] 鷹取敦, 青山貞一, 地形・構造物を配慮した道路大気環境アセスについて~圏央道裏高尾 JCT アセスを事例として, 環境アセスメント学会誌, Vol. 1, No. 1, 2003年
- [4] 環境総合研究所, 圏央道八王子ジャンクション建設事業に関する環境への影響予測・評価等についての調査業務~二酸化窒素濃度予測編~, 2002年4月
- [5] 環境総合研究所, 都市高速中央環状新宿線中落合換気所大気拡散調査業務, 2002年9月
- [6] 環境総合研究所, 新宿区戸山 国立感染症研究所周辺地域 大気拡散調査, 2002年10月
- [7] 環境総合研究所, 多摩地域廃棄物エコセメント化施設に関する大気汚染予測の検証調査, 2006年3月
- [8] 青山貞一, 環境アセスとGISの連携・統合について~3次元流体計算を事例として~環境アセスメント学会誌, Vol12, No. 1, 2004年
- [9] 青山貞一, 大気汚染に関する予測・評価技術~実務編~, 環境アセス学会誌, Vol13, No. 2, 2005年
- [10] 青山貞一, 大気環境シミュレーション演習~3次元モデルと広域モデルの教育への適用, 2006年度環境報告書, 武蔵工業大学環境情報学部, 2006年3月

※差分法による潮流の3次元流体計算(数値計算)プログラムの一部を以下に示す。以下はFortranではなく、Visual Basic.Net(オブジェクト指向のBasic)で書いたものでプログラム全体の1/200程度。

```

For i = 0 To m - 1
  For j = 0 To n - 1
    If IsWater(i, j) Then '海の場合だけ計算(陸の場合は計算する必要なし)
      Dim fUaw(1), fUae(1), fVas(1), fVan(1), fUbw(1), fUbe(1), fVbs(1), fVbn(1) As Double
      Dim fH0(1), fHe(1), fHw(1), fHn(1), fHs(1) As Double
      Dim fUwt(1), fUet(1), fVst(1), fVnt(1) As Double
      For k = 0 To 1 '0:上層・1:下層
        fUaw(k) = GetU(fUa, i, j, k) : fUae(k) = GetU(fUa, i + 1, j, k)
        fVas(k) = GetV(fVa, i, j, k) : fVan(k) = GetV(fVa, i, j + 1, k)
        fUbw(k) = GetU(fUb, i, j, k) : fUbe(k) = GetU(fUb, i + 1, j, k)
        fVbs(k) = GetV(fVb, i, j, k) : fVbn(k) = GetV(fVb, i, j + 1, k)
        fH0(k) = GetH(i, j, k) : If IsLand(i, j) Then fH0(k) = 0
        fHe(k) = GetH(i + 1, j, k) : If IsLand(i + 1, j) Then fHe(k) = 0
        fHw(k) = GetH(i - 1, j, k) : If IsLand(i - 1, j) Then fHw(k) = 0
        fHn(k) = GetH(i, j + 1, k) : If IsLand(i, j + 1) Then fHn(k) = 0
        fHs(k) = GetH(i, j - 1, k) : If IsLand(i, j - 1) Then fHs(k) = 0
        fUwt(k) = fUt(i, j, k) 'U* i-1/2
        fUet(k) = fUt(i + 1, j, k) 'U* i+1/2
        fVst(k) = fVt(i, j, k) 'V* j-1/2
        fVnt(k) = fVt(i, j + 1, k) 'V* j+1/2
      Next
      ' e', w', n', s', D' を計算
      Dim fE As Double = (((fHe(0) + fHe(1)) + (fH0(0) + fH0(1))) / 2) / (dx ^ 2)
      Dim fW As Double = (((fHw(0) + fHw(1)) + (fH0(0) + fH0(1))) / 2) / (dx ^ 2)
      Dim fN As Double = (((fHn(0) + fHn(1)) + (fH0(0) + fH0(1))) / 2) / (dy ^ 2)
      Dim fS As Double = (((fHs(0) + fHs(1)) + (fH0(0) + fH0(1))) / 2) / (dy ^ 2)
      Dim fZtt As Double 'ZttはD*
      fZtt = 1 / (fG * fD) -
        * (((fUet(0) * (fHe(0) + fH0(0)) / 2 + fUet(1) * (fHe(1) + fH0(1)) / 2) -
          (fUwt(0) * (fHw(0) + fH0(0)) / 2 + fUwt(1) * (fHw(1) + fH0(1)) / 2)) / dx -
          + ((fVnt(0) * (fHn(0) + fH0(0)) / 2 + fVnt(1) * (fHn(1) + fH0(1)) / 2) -
            (fVst(0) * (fHs(0) + fH0(0)) / 2 + fVst(1) * (fHs(1) + fH0(1)) / 2)) / dy
      fEE(i, j) = fE / (fE + fW + fN + fS) 'e'ij
      fWW(i, j) = fW / (fE + fW + fN + fS) 'w'ij
      fNN(i, j) = fN / (fE + fW + fN + fS) 'n'ij
      fSS(i, j) = fS / (fE + fW + fN + fS) 's'ij
      fZZ(i, j) = fZtt / (fE + fW + fN + fS) 'D'ij
    End If
  Next
Next

```