

# 大気環境の数値シミュレーション

Numerical Simulations in the Field of Atmospheric Environment

近藤 裕昭

独立行政法人 産業技術総合研究所 環境管理研究部門

Hiroaki Kondo

National Institute of Advanced Industrial Sciences and Technology

E-mail:kondo-hrk@aist.go.jp

## 1. はじめに

1960年代、大気汚染が公害問題として深刻であったころ、対象となる大気汚染物質は主として浮遊粒子状物質(SPM)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)と一酸化炭素(CO)であった。また、その汚染源は特定の工場あるいは不完全燃焼をする自動車であり、明確であった<sup>1)</sup>。工場の大煙突からの排煙はそのまわり20-30kmの範囲に影響を及ぼし、これらから排出される大気汚染物質の地上濃度は、風向風速や大気の安定度などの気象条件によって大きく変化する。このような大煙突や道路から生じるSO<sub>2</sub>や一酸化炭素、窒素酸化物は数時間程度では大気中で化学変化をしないものとして扱える。これらの物質の拡散について、流体力学的なアプローチがとられるようになったのはごく最近のことであり、それまではシミュレーションと言ってもNavier-Stokes方程式やその類似の方程式を解くわけではなかった。煙の拡散後の分布が定常状態でGauss分布になることを仮定し、この重ね合わせによって大気環境濃度を評価した。この手法は1年間程度の長期平均濃度については精度が高く、現在でも実用的な分野で用いられている<sup>2),3)</sup>。

その後、1970年代には、工場や自動車から排出される窒素酸化物と、非メタン炭化水素等が紫外線によって反応する光化学大気汚染が起きるようになった。光化学大気汚染では非メタン炭化水素の発生源が多様で複雑であり、また、窒素酸化物の自動車からの排出が多いことから、発生源の空間的な広がり一挙に大きくなった。さらに大気中の反応が時間の経過とともに進むことから、発生源からかなりはなれたところに大気汚染が起きることとなった。数値流体力学のアプローチはまずこの分野から起こった。大気汚染物質は発生源から数十~百km輸送されながら光化学反応を起こしていく。この輸送を担う大気現象は気象学ではメソスケールと呼ばれるスケールであり、メソスケール気象モデルの開発がまず進んだ。

## 2. メソスケール気象モデル

大気圏は下から対流圏、成層圏、中間圏、熱圏という層構造をしている。大気が等温であると仮定すると、その密度は地上から上空に向かって指数関数的に減少し、その密度が $1/e$ になる高度は約8kmである。この高度をスケールハイトと呼ぶ。スケールハイトは大気の実質的な厚さの目安であるが、地球の半径が6400kmであるのに比べてスケールハイトは極めて小さい。このよ

うな大気中で起こる、鉛直スケールが水平スケールに比べて極めて小さいような現象の記述には、鉛直方向成分の運動方程式における  $Dw/Dt$  の項を省略してしまっても誤差が小さい。ここで  $w$  は鉛直速度成分、 $D/Dt$  は Lagrange 微分である。このような近似を静水圧近似と言い、気象学でよく用いられている。また、気象の特徴として、地球の回転と大気の成層の効果を考えなくては行けない。このようなことから基本方程式系としては次のような方程式系がよく用いられてきた<sup>4)</sup>。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \rho_0 \overline{u'_j u'_i} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j \bar{u}_k \quad i=1,2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = g \frac{\theta'}{\theta} \rho_0 \quad (\text{静水圧近似}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_0}{\partial z} = g \rho_0, \bar{p} = p_0 + p', \bar{\theta} = \theta_0 + \theta' \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \rho_0 \overline{u'_j \theta'} - \bar{S}_\theta \quad (4)$$

連続の式は、現象の鉛直スケールがスケールハイトと同程度ならば、

$$\frac{\partial \rho_0 \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{非弾性近似}) \quad (5a)$$

スケールハイトの数分の1程度であれば、

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{Boussinesq 近似}) \quad (5b)$$

を用いる。また  $\theta$  は温位で、 $\bar{\theta} = \bar{T} \left( \frac{1000 \text{hPa}}{\bar{p} (\text{in hPa})} \right)^{R_d/C_p}$ 。ここで  $T$  は気温、 $R_d$  は乾燥空気の気体定数、 $C_p$  は定圧比熱、 $\Omega_j$  はコリオリパラメータの成分、 $S_\theta$  は大気への直接加熱・冷却である。グローバルスケールでは、さらに鉛直座標を気圧座標に変換することがしばしば行われる。

メソスケール気象モデルが対象とするのは、海陸風や山谷風などの比較的大気静穏な時に生ずる局地風と呼ばれる風系である。例えば関東地方では、これらが連携をしてかなりの長距離にわたって大気汚染物質を輸送することがある。

### 3. 地形による局地風の連携

1980年代はじめ、東京から長野県への光化学オキシダントの輸送が問題となった。1990年代には初冬期に関東地方で二酸化窒素や浮遊粒子状物質が高濃度となることが問題となった。これらの現象には関東地方から中部地方に存在する山岳地形が作り出すメソスケール気象が大きな影響を及ぼしている。メソスケール気象モデルをこれらの現象に応用することにより、大気汚染とメソスケール気象とのかかわりが明らかになった。

関東地方の夏によく発達する日変化する局地風は、当初は海陸風であろうと考えられていた。夏には日射が強く、昼間の陸面温度が海面温度よりもかなり高くなる。このため、内陸の地上気圧が海上に比べて少し下がる。このように熱的な要因で生じた低気圧を熱的低気圧(thermal low)と呼ぶ。海風は重力流ヘッドという密度流独特の構造を示すが、その進入距離は日本ではせいぜい海岸から数十 km に限られる。ところが、現実には海岸から 70~100km 入った熊谷や高

崎などの内陸の地点でも風は大きな振幅で日変化し、しかも午前中に内陸に向かう風がすでに強くなる。そして内陸へ向かう風の厚さは 1km を越え、通常の高風の 2 倍程度の厚さを持つことが観測から示された<sup>5)</sup>。この風系は関東南岸から群馬・長野県境の碓氷峠まで一続きのように見え、東京の大気汚染物質を長野県まで輸送するものとして注目された。

はじめに、内陸で吹く日変化する風は山岳の影響であることが示唆された<sup>6)</sup>。次に、ある程度高い標高のところから熱的境界層が発達する長野県では、大気境界層の海拔高度が地表面高度の分だけ下駄をはき、関東平野上の熱的境界層よりも高いところに発達する。この結果、同じ高度でみた気圧が長野県の方が低くなるというメカニズムが考えられた<sup>7),8)</sup>。つまり、海岸のところに海風を生成する一つの気圧差があり、もう一つ内陸の山と平野の境にも気圧差がある二段構えの熱的低気圧が海岸から中部山岳にかけてできるというものである。

Kondo<sup>9)</sup>は、海、平野、斜面、谷などの地形の組み合わせが引き起こす局地風について調べた。Fig.1 は計算に用いた地形で、(a)は海岸を挟んで海と陸のみが存在し、16:00 の時点では海風のみが発達する(図 2)。(b)は平野と斜面と台地の組み合わせで、斜面上昇流と台地上に内陸へ向かう風が生成される。(c)は(b)に海が加わったものであるが、海風と台地上の風が発達しているが、両者の間の風は弱い。これが二段構えに対応する。(a)-(c)は 2 次元の計算であるが、(d)では 3 次元の谷と台地と平野の組み合わせである。(b)と似たような風が生成されているが、斜面とその下の部分の風が強くなっている。さらに海が加わった(e)では、風が海から台地上までつながったよう

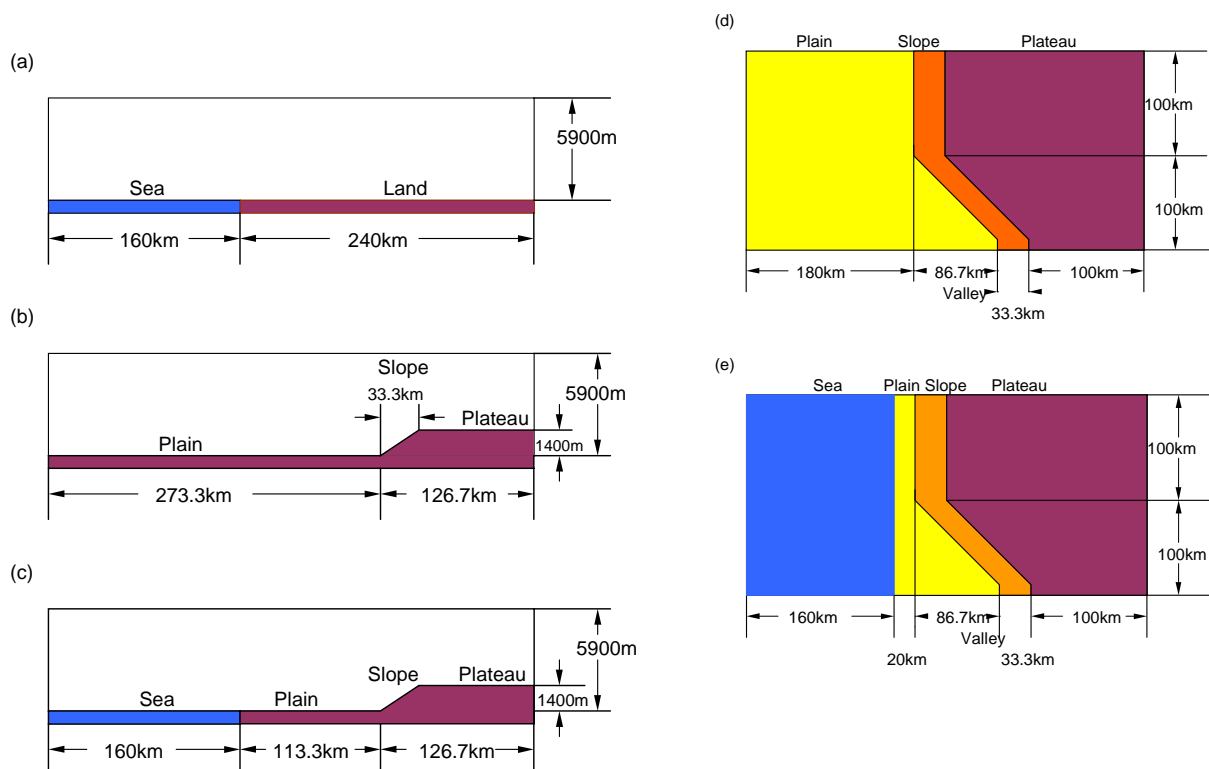


Fig.1 Topography used in the calculation. The figures (a),(b) and (c) show the cross sections in the two-dimensional simulations. The figures (d) and (e) display the plan view of the topography in the three-dimensional calculations where mirror symmetric boundary condition as specified along the bottom side boundary.

に見える。このような平野上の風の強化は、3次元の谷状地形による一次的な循環が谷の上空

で下降流を生成し、そこで断熱加熱が起こって谷の部分の地上気圧が下がり、熱的な低気圧が新たにできたことによって起きる。

関東平野は平野の北西部は北側と西側の山に挟まれていわば谷状地形となっており、これらの斜面を上る斜面流循環の反流が上に述べたようなメカニズムで前橋付近で強い下降流を生成し、この付近にも熱的な低気圧を生成する。つまり関東地方の空気は直接秩父を越えるわけではなく、一旦高崎線沿いに集積した後、碓氷峠付近を越える。熱的な低気圧は二段構えではなく実は三段構えであった。そしてこれらの熱的な低気圧が互いに100kmを少し下回るような距離で存在してほぼ同様な位相で発達することが広域的な局地風を引き起こすことが最終的に明らかとなった。

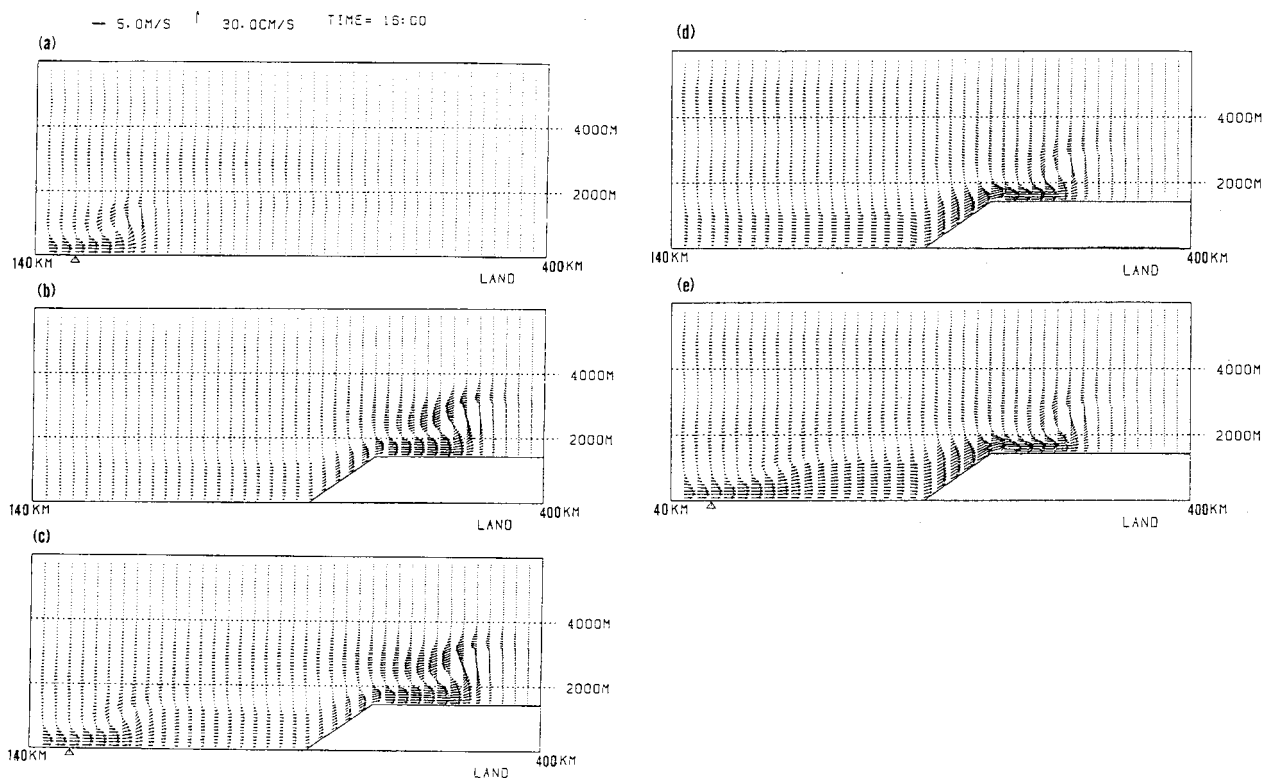


Fig.2 Flow patterns for the topographic conditions shown in Fig.1. The figures (d) and (e) show the wind field in the vertical section along the bottom side boundary in Fig.1.

このようなメソスケール気象モデルを使用して冬季の浮遊粒子状物質の一つの構成物質である塩素イオン濃度の分布を計算した例を Fig.3 に示す。塩素イオン粒子は大気中では主に塩化アンモニウムとして存在するが、これは気温によって固相と気相に相変化する<sup>10)</sup>。東京都心で濃度が低いのはヒートアイランド現象によって郊外よりも高温になっているため、主に気相になっているためである。

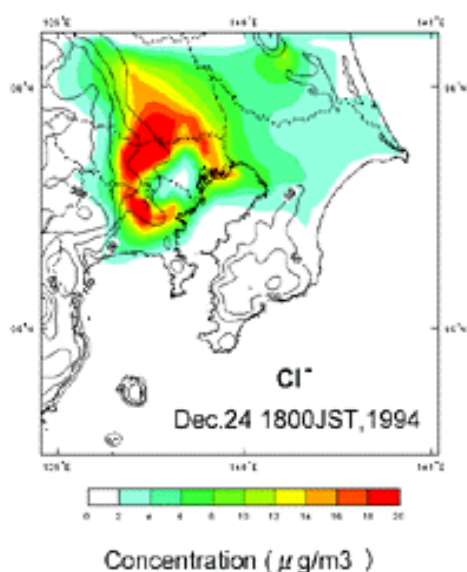


Fig.3 Cl<sup>-</sup> concentration at 18:00JST on Dec.24, 1994.

#### 4. 静水圧近似の限界

前節で述べたように、メソスケール気象モデルはまず静水圧近似モデルとして発展をした。しかし、最近では水平格子間隔のより小さいモデルが必要とされるようになり、静水圧近似を使わないモデルが使われはじめている<sup>11),12)</sup>。気象の範囲ではあまりにも静水圧近似が一般的であったため、静水圧近似を用いないシステムをわざわざ非静水圧近似モデル（あるいは非静力学モデル）と呼んでいる。

静水圧近似の主な問題点は、縦横比が同じ程度となる現象、あるいは鉛直スケールの方が水平スケールよりも大きくなる現象を正確に表現できないところにある。第3節のモデルでは、用いた格子の水平間隔が2~10kmであるのに対し、鉛直格子間隔は数10m~300m程度である。また多くの場合地表面はこの水平格子間隔の範囲内で一様と仮定される。

大気環境の問題として、例えば、交差点の改善や工場建屋からの化学物質の拡散、建物に隣接する煙突からの拡散などの小さいスケールの問題も重要である。しかしながら、例えば道路沿道での二酸化窒素の高濃度汚染時には、広域に亘って濃度が高くなっている場合が多い<sup>13)</sup>。また、近年問題となっている都市の温暖化による夏季の高温現象の改善には、都市全体のスケールと局所の放射・熱輸送構造の双方の影響があり、メソスケールからマイクロスケールの情報を加味できるモデルが必要となってくる。このようなマルチスケールのモデル開発は世界中で行われている<sup>14)</sup>。近年筆者らは、ビルまわりの熱環境を解析するためのツールとして、Fig.4のようなマルチスケールモデルを開発した<sup>15),16)</sup>。このモデルは静水圧近似をしたメソスケール気象モデルを外側に用いて一方向ネスティングを3段階行い、計算スケールを水平格子間隔で8kmから500mまでにダウンサイズする（Table 1）。さらにその内側には非静水圧近似をしたモデルを3重に二方向ネスティングし、さらに格子間隔を100mから1mまでにダウンサイズした。このモデルを用いて1998年8月4日の赤羽台団地内のアパート周辺の気流の計算に応用した例をFig.5に示す。

#### 5. 境界層近似の限界

2節で述べた静水圧近似モデルでは、式(1)および(4)におけるサブグリッド項の計算のため Mellor and Yamada が開発したクロージャー・モデル<sup>17),18)</sup>がよく用いられている。この乱流モデルでは最終段階で境界層近似を用いている。これは水平一様の大気境界層（地上2000m程度までの乱流が卓越する層）では、物理量の鉛直微分量が水平微分量に比較して大きく、水平微分項を無視するという近似である。従って、水平格子数 km の範囲で地表面条件は一様で地面の傾きが小さい場合により近似となる。また、地上付近の100m程度を除くと、特に昼間の大気境界層は熱対流が卓越する対流境界層であり、浮力による乱流生成と粘性消散がほぼ釣り合っている。

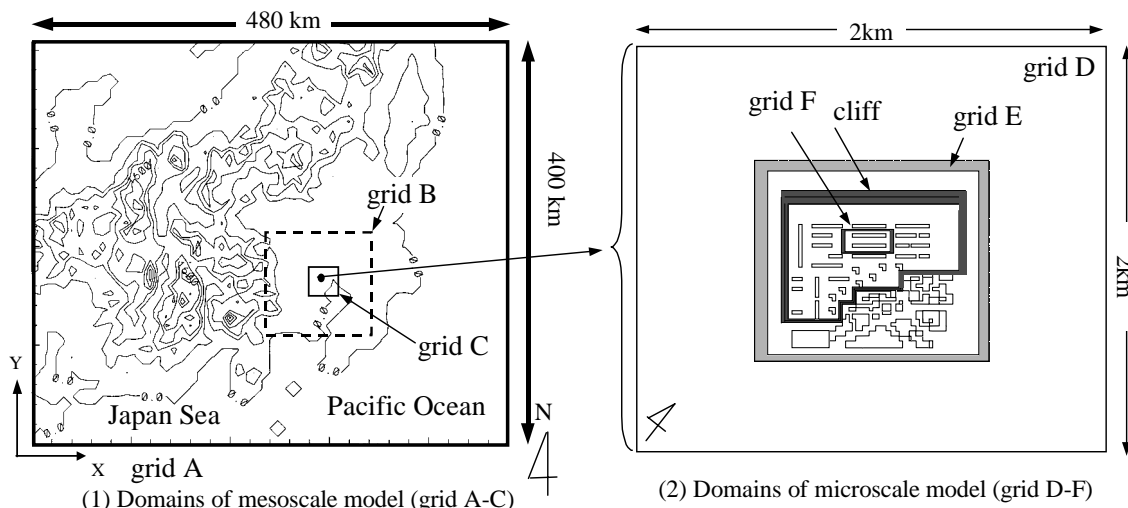


Fig.4 Domains of the multi-nested model

Table 1 Domain sizes of multi-nested model

grid	Domain size of calculation (X×Y×Z)	Grid numbers (X×Y×Z)	Grid interval in horizontal direction
grid A	480km×400km×9.6km	60×50×49	500m ~ 8km
grid B	96km×96km×9.6km	48×48×49	
grid C	32km×32km×9.6km	64×64×49	
grid D	2km×2km×500m	32×37×14	1m ~ 100m
grid E	700m×620m×300m	58×73×29	
grid F	145m×65m×154m	78×41×28	

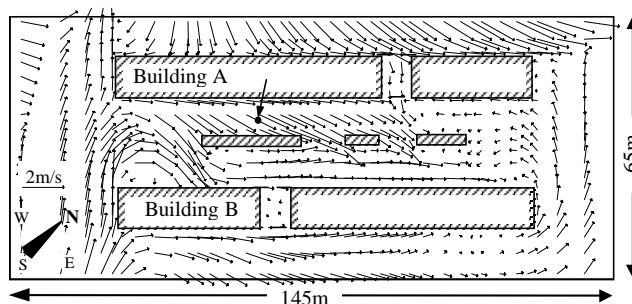


Fig.5 An example of wind vector in grid F at 1.5m above the ground. 14:30JST, Aug.4, 1998.

従って、浮力による乱流生成・エネルギー物質の輸送の効果を大まかに再現できるモデルであればどんなモデルでも海陸風などのメソスケールの現象を対称とする範囲では結果の差は小さい。

しかしながら、水平格子間隔を小さくして現実にいろいろな地物や建物の存在する地表面付近

に着目する場合にはもはや境界層近似はよい近似とは言えなくなる。このようなことからクロージャー・モデルと工学的モデルである k- モデルなどの接点が研究されている<sup>19)</sup>。

## 6. まとめ

以上、大気環境の分野で数値流体的な手法がまず導入されたメソスケール気象モデルを中心に大気環境分野の数値モデルの紹介を行った。はじめに述べたように、大気環境評価の分野では、ガウス分布型モデルの使用が中心である。これは、長年にわたって実用モデルとして実際の経験と多くのノウハウを蓄積していることによるが、その限界も明らかである。今後、数値流体モデルがガウス分布型モデルに取って代わるには、計算時間の問題を別にしても多くの事象について応用し、実用に対する経験とその限界を明らかにしていくことが不可欠である。

## 参考文献

- 1)横山長之, "煙", 白亜書房, 1997, 150 ページ.
- 2)環境庁大気保全局大気規制課編, "窒素酸化物総量規制マニュアル: 第2編", 公害研究対策センター, 1993.
- 3)浮遊粒子状物質対策検討会, "浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル", 東洋館出版, 1997, 398 ページ.
- 4)Pielke, R. A., "Mesoscale Meteorological Modeling", Academic Press, 1984, 612 ページ.
- 5)藤部文昭, 浅井富雄, "関東地方における局地風に関する研究, 第1部: 日変化に伴う風系の構造", 天気, 1979, 26, 595-604 ページ.
- 6)Kikuchi, Y., S. Arakawa, F. Kimura, K. Shirasaki and Nagano, "Numerical study on the effects of mountains on the land and sea breeze circulation in the Kanto district", *J. Meteor. Soc. Japan*, 1981, 59, 723-738.
- 7)Kurita, H. and H. Ueda and S. Mitsumoto, "Combination of local wind systems under light gradient wind conditions and its contribution to the long-range transport of air pollutants", *J. Appl. Met.*, 1990, 29, 331-348.
- 8)Mannouji, N., "A numerical experiment on the mountain and valley winds", *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, 60, 1085-1105.
- 9)Kondo, H., "An numerical experiment on the interaction between sea breeze and valley wind to generate the so-called "extended sea breeze"", *J. Meteor. Soc. Japan*, 1990, 68, 435-446.
- 10)兼保直樹, 吉門洋, 近藤裕昭, "組成別SPMシミュレーション・モデルの開発と初冬季高濃度大気汚染への適用(1): 高濃度時の組成および水分影響の解析", 大気環境学会誌, 2001, 投稿中.
- 11)非静力学数値モデル研究連絡会, "第3回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集", 2001, 41ページ
- 12) <http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/mrinpd/INDEXJ.htm>
- 13)近藤裕昭, 水野建樹, "NO<sub>x</sub>濃度はなぜ12月に高くなるか", 公害, 1990, 25, 25-34.
- 14) <http://www.epa.gov/asmdner/>
- 15)持田灯, 村上周三, 金相進, 近藤裕昭, 島田昭男, 大岡龍三, "ヒートアイランド現象の解析とそ

- の対策技術の総合的評価のための Software Platform の開発(その1) 概念設計と Prototype System の構成", 日本建築学会 2000 年度大会学術講演梗概集, 2000, 1099-1100.
- 16) 近藤裕昭, 村上周三, 持田灯, 金相進, 島田昭男, 大岡龍三, "ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のための Software Platform の開発(その2) 多段階 nesting によるメソ・ミクロの連成解析", 日本建築学会 2000 年度大会学術講演梗概集, 2000, 1101-1102.
- 17) 横山長之編, 大気環境シミュレーション, 白亜書房, 1992, 202ページ
- 18) Yamada, T., "A numerical simulation of pollutant dispersion in a homogeneous atmospheric boundary layer, *Atmospheric Environment*, 1977, **11**, 1015-1024.
- 19) 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, 443ページ