

ネストグリッドシステムを用いた 環八雲の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF KANPACHI STREET CLOUD USING NEST GRID SYSTEM

井上裕史¹・神田学²・鵜野伊津志³
Yushi INOUE, Manabu KANDA and Itsushi UNO

¹学生会員 東京工業大学大学院 土木工学専攻 (〒152 東京都目黒区大岡山二丁目 12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 工学部開発システム工学科 (同上)

³正会員 工博 国立環境研究所 大気圏環境部室長 (〒305 茨城県つくば市小野川 16-2)

Numerical simulation of Kanpachi cloud, i.e. generated just over the Kanpachi Street under calm and clear atmospheric conditions, has been performed by RAMS (Regional Atmospheric Modeling System). The method of Four-Dimensional Data Assimilation (4DDA) and Nest Grid System, the most advanced meteorological prediction techniques, are used in this simulation.

Simulated wind field and cloud in the morning predicted by the model agree very well with those of the observation by Kai et al. (1995)¹⁾. Additionally, the cloud line that was observed in the afternoon and a local convergent flow due to two sea breezes (one from Sagami Bay and another from Tokyo Bay) could also be simulated although the simulated cloud is rather underestimated. These numerical results suggest that Kanpachi cloud in the afternoon has some different mechanism from that in the morning such as aerosol effect of urban pollution to cloud formation.

Key Words: Kanpachi cloud, 4DDA, Nest Grid System, Anthropogenic heat

1. はじめに

近年、環状八号線沿いに発生する、いわゆる「環八雲」が注目されており、都市がつくり出す雲、というイメージでマスコミにもしばしば取り上げられている。環八雲に関してはこれまでに塚本¹⁾や甲斐²⁾らが精力的に観測を中心とした研究を行っており、その発生機構に関して海風の収束、ヒートアイランド現象、汚染物質濃度などといったキーワードが提示されている。しかし、観測による研究でその発生機構を解明することは、発生日を特定できないこともあってなかなか容易ではない。

そこで本研究では、数値シミュレーションによりこの環八雲を解析することを試みる。水蒸気の雲水への相変化、総観場の影響を初期条件及び境界条件として取り込む四次元データ同化、大局的な風系を再現しつつ注目すべき局所場において解像度を上げて計算を行うネストグリッドシステムといった手法を用いることの出来るRAMSをベースとしたモデルによって環八雲の再現性を検討した。

2. モデル及び計算条件の概説

数値計算モデルとして、Pielk et al. (1992)³⁾によるRAMS (Regional Atmospheric Modeling System) をベースに、陸面過程に改良を施したものを用いた。本モデルは乱流モデルや水蒸気の扱いなどに関していくつかの選択が可能であるが、その中で今回の計算で用いたオプションを表-1に示す。

表-1 モデルでのパラメータ手法

鉛直基礎式	非静水圧分布
放射計算	Chen & Cotton
乱流モデル	Mellor & Yamada 2.5 Closure
相変化過程	凝結のみ (微物理過程は含まず)

(1) 計算条件

a) 初期条件及び境界条件

環八雲の発生要因の一つとして、東京湾海風と相模湾海風による海風の収束が挙げられている。つまり環八雲のシミュレーションを行う上で風系をよく再現することは不可欠である。そこでまずECMWFとS

DPのデータを用いて6時間毎に客観解析を行い、これを初期値及び境界条件として計算に連続的に取り込む4次元データ同化手法 (Four-Dimensional Data Assimilation) を用いることで、一般風を与えるといった従来の簡易的な計算よりも風系場の再現性を高めた。ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) は水平方向0.5度間隔、鉛直13層に水平風、相対湿度、気圧、気温の情報を持ち、SDPは気象官署のデータであり、地表面風及び気圧、気温、露点温度の情報を持つ。

b) 地表面条件

陸面過程はTremback and Kessler (1985) ⁴⁾による2層モデルをベースとしている。国土数値情報に

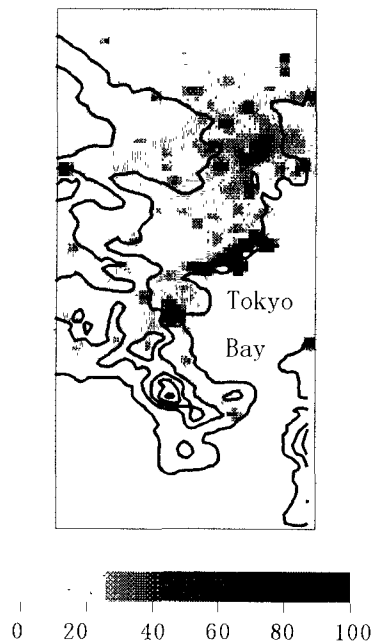


図-1 都心における人工廃熱の分布図

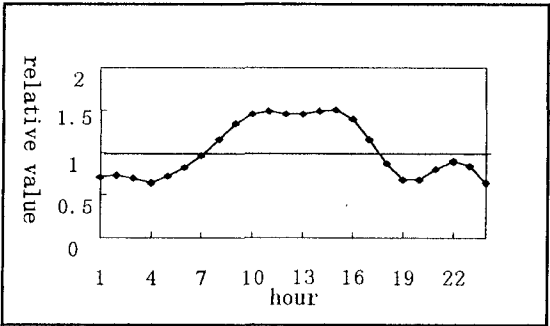


図-2 日平均を1とした人工廃熱量の時間変化

よる土地利用データを用いて地表面を海面・都市・田畑・森林の4種に分類してそれぞれに異なる土壌物性値を与えることで熱収支に差を持たせ、この情報が地表面の核計算格子点に配分されることで実現象に近い陸面過程の再現を可能とした。この国土数値情報は、後で述べる計算解像度の細かさに対応できるよう、100mほどに細分化された情報を取り込んだ。これは、都心部における皇居や明治神宮といった緑地、及び荒川、多摩川といった河川の情報も表現されている。さらに、環八雲は都市がつくり出す雲、といわれていることから都市化の影響を考慮するために地表面に時間変化を持たせた人工廃熱データを取り込んだ。図-1, 2に都心における人工廃熱量の分布図と計算で与えた時間変化を示す。また、もう一つの都市化の指標とされているエアロゾル濃度の増加による凝結促進効果については今回はモデルには取り込んでいない。

c) 計算領域の設定

環八雲は個々の雲スケールが1km未満であり、気象現象としては都市域に限られた非常に局所的な現象である。四次元データ同化によって取り込んだ総観場の影響を反映しつつ局所場の解析を行うために、ネストグリッドシステムを用いて複数の計算領域を設定し、計算解像度を徐々に上げながら同時並行的に計算を行った。グリッド毎の計算条件を表-2に、ネストグリッドシステムの概要を図-3に示す。なお、Grid 3とGrid 4の図中に白線で示すのが環状八号線の位置である。

Grid 1では大局的な風系場を再現するための計算領域として設定し、Grid 2では東京湾及び相模湾からの局所的な海風をとらえることを狙いとして解像度を3倍に上げ、Grid 3ではさらに解像度を4倍に上げて環状八号線を中心とした領域を設けた。そしてGrid 4においては解像度をさらに4倍に上げて、水平方向200m程度の解像度とすることで環八雲のような局所的な現象をとらえるに十分な解像度での計算を行った。この際、先に述べたように陸面には100mほどの解像度を持つ土地利用情報を用いているためgrid 4における200mの計算解像度にも対応している。

d) その他の条件

計算対象日は表に示すように甲斐ら (1995) ²⁾が世田谷上空で環八雲の観測を行った1994年8月8日とする。温位分布の履歴を考慮するために計算は前々日の6日の21時から48時間積分を行った。計算には、東京工業大学のスーパーコンピュータCRAY C90を用いた。

表-2 グリッド毎の計算条件

	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4
水平解像度 (km)	10	2.5	0.83	0.21
格子点数 (x, y, z)	(48, 38, 20)	(58, 50, 20)	(50, 110, 20)	(50, 110, 25)
Time step (sec)	60	30	15	7.5

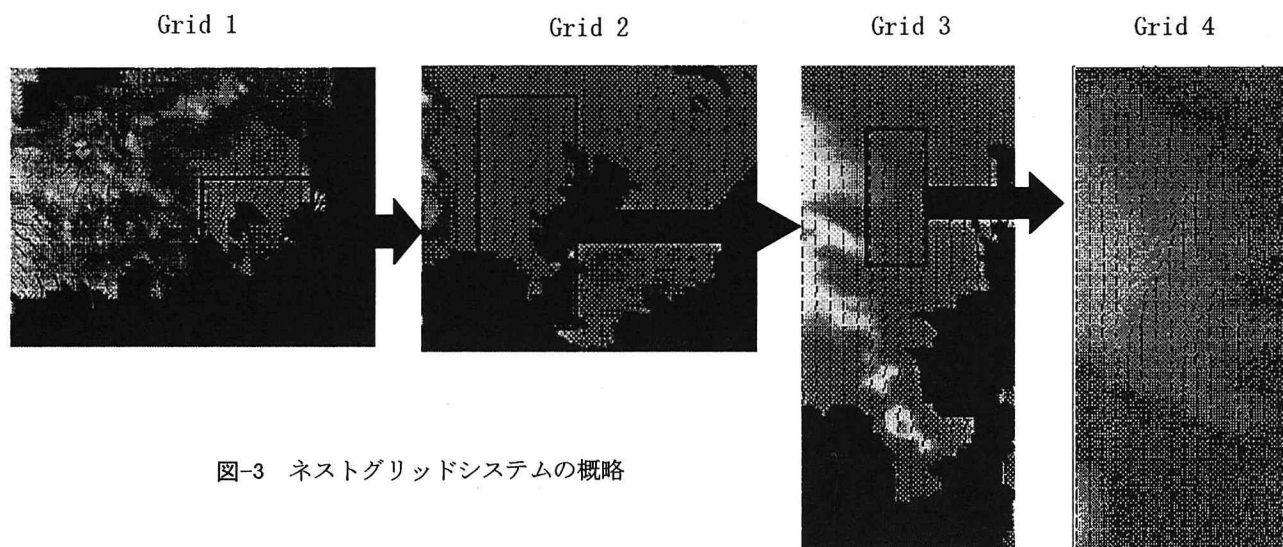


図-3 ネストグリッドシステムの概略

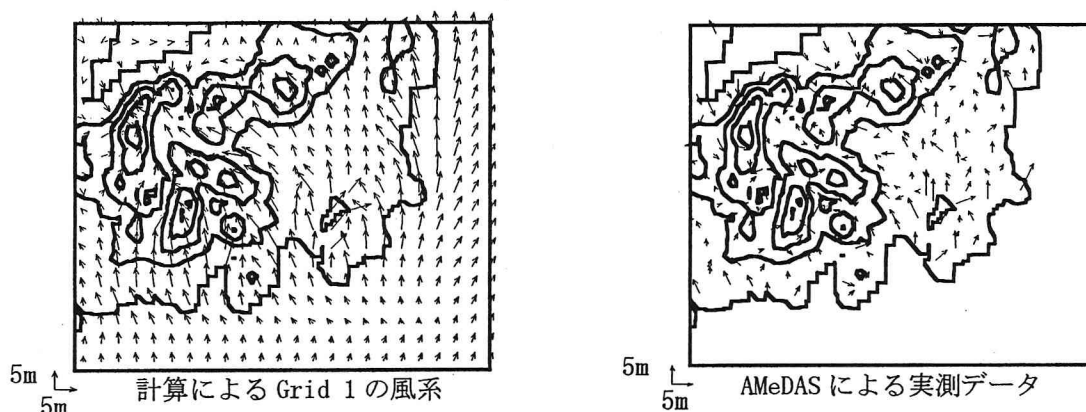


図-4 Grid 1における地表面風速の計算結果と観測結果の比較 1994/8/8 12JST

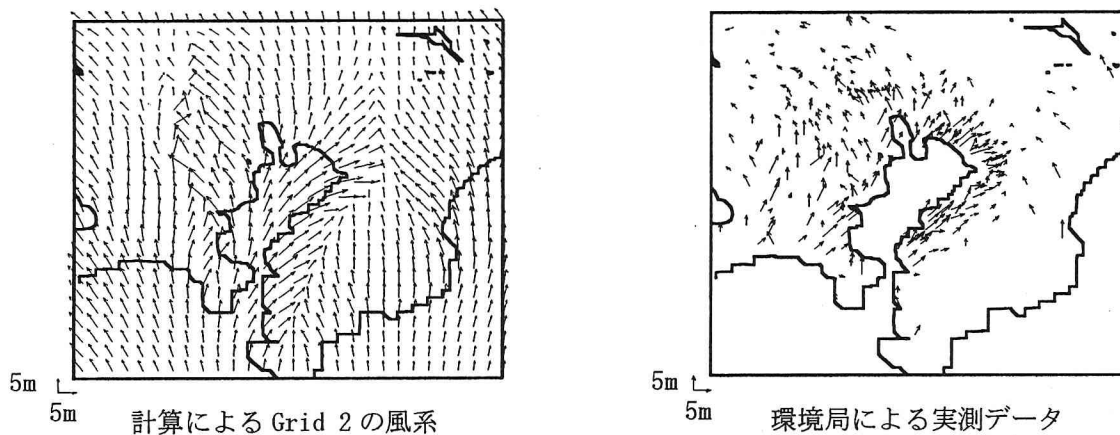


図-5 Grid 2における地表面風速の計算結果と観測結果の比較 1994/8/8 12JST

3. 計算結果と考察

(1) 風系の再現性

Grid 1及びGrid 2の結果から、地表面風の再現性を確認する。比較に用いる実測データは、同化データとして用いていないAMeDAS及び自治体の観測デー

タである。また、図に示す風ベクトルは全て地表面風である。

図-4に94/8/8 12JSTにおけるGrid 1の計算結果とAMeDAS実測データを示す。これを見て分かるように、海から陸に向かって吹く大局的な風系が良く再現されており、4次元データ同化が有効に機能していることが分かる。さらに解像度を4倍に上げたGrid 2の結果と同時刻の各自治体による実測データを図-5に示す。東京湾からの吹き出し風や相模湾からの海

風の吹き初め、房総における東京湾からの海風と九十九里方面からの海風による収束帯の形成といったような局所的な風系も良く再現されていることが分かる。ネストグリッドシステムによって、ECMWFとSDPのデータから局所的な風系場もよく再現できることが示された。

(2) 積雲の再現性

計算対象日における世田谷上空で甲斐ら(1995)²⁾が行った観測によると、午前中は9時から11時にかけて積雲が観測され、午後は15時から18時にかけて再び積雲が観測されている。以上をふまえて、数値シミュレーションの結果を示す。ここでも、鉛直断面図を除いて風ベクトルは全て地表面風を示している。

a) 午前における風と雲の結果

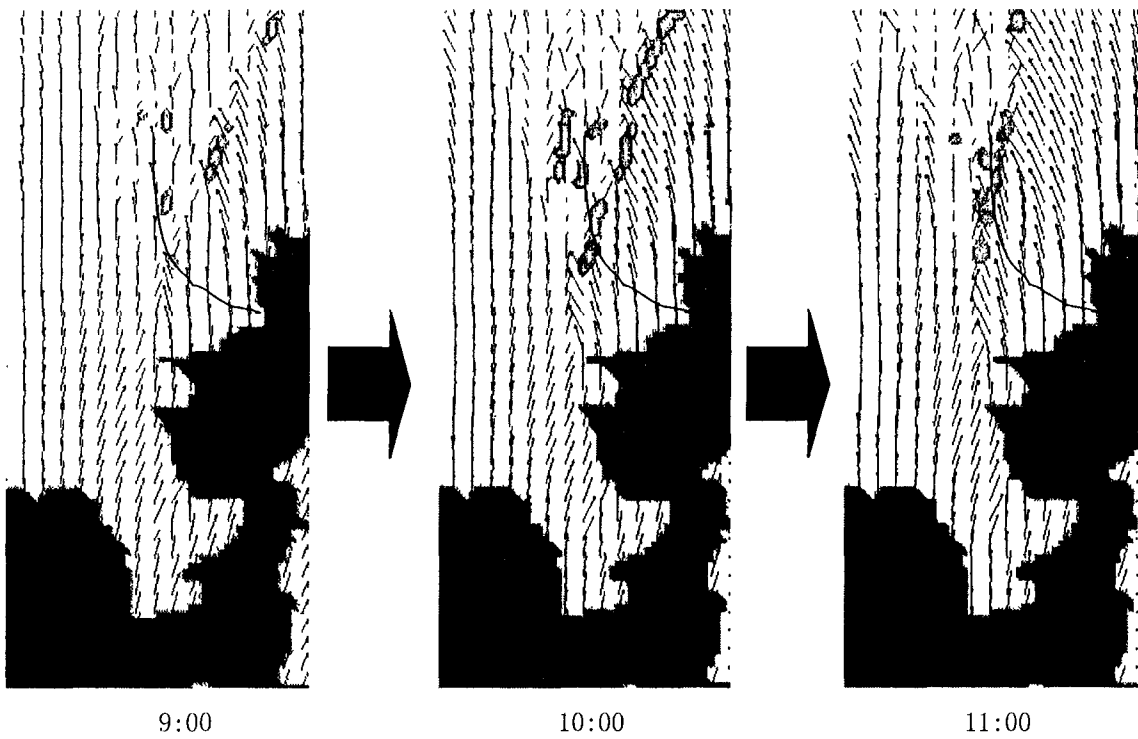


図-6 午前中での Grid 3 における風と雲の変化

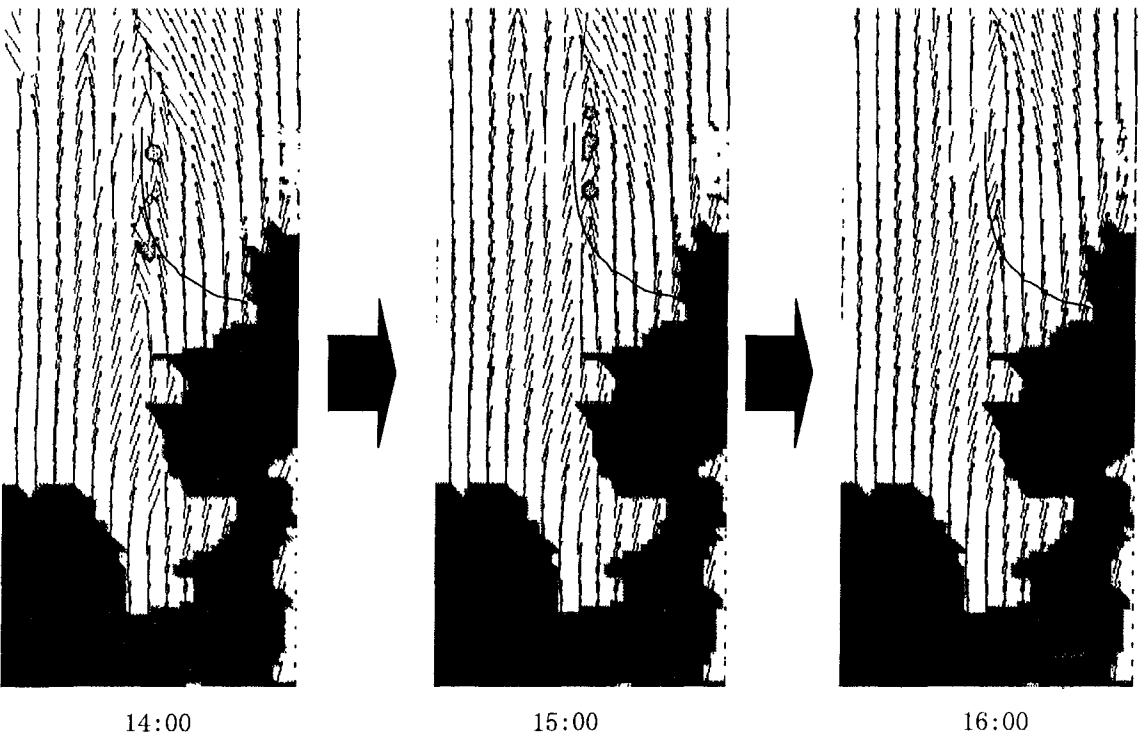


図-7 午後での Grid 3 における風と雲の変化

まず、計算対象日における午前中の風と雲の結果を図-6に示す。図中の白線は環状八号線の位置を示す。なお、本研究で用いたRAMSのネストグリッドシステムは、解像度の細かい領域の計算結果が解像度の粗い領域での結果にフィードバックされる仕組みとなっている。ここで結果を示す際に、東京湾・相模湾からの海風に着目するために基本的に海域を含み、かつGrid 4の結果をも含んでいるGrid 3の結果を示すこととする。

午前中は東京湾からの海風が支配的であり、そのフロント部において上昇流が起き、積雲が形成されている。時間が経過するとともに、海風前線は内陸の方に進行していき、環状八号線にさしかかる。ここで再現された積雲が、午前中観測された積雲に対応しているものと考えられる。

b) 午後における風と雲の結果

次に、8/8の午後の結果を図-7に示す。まず風系を見ると、午前とは異なり相模湾からの海風が東京湾海風と合流・収束帯を形成しており、これがちょうど環状八号線上空に位置している。そして15時まではその収束帯において小さな積雲が列をなして現れているのが分かる。東京湾海風と相模湾海風の収

束帯において小さな積雲が縦に並んでおり、これが午後に観測された積雲列に対応していると考えられる。また、観測結果と異なりこの積雲は昼間も消滅していないがその位置は収束帯とともに変動しており、観測が世田谷での点観測であったことを考えると再現性を問う上での判断材料として乏しい。そこで今後は衛星データにより当日の雲情報を抽出して比較、検討を行う予定である。

これはさらに図-8に示すGrid 4での15JSTにおける風と雲、および同時刻における混合層高さ付近($Z=1260\text{m}$)での相対湿度の分布を見ると明らかである。風と雲の結果を見ると、ちょうど環状八号線沿いに沿って収束帯が位置し、そのうちの収束の強い箇所において積雲が再現されている。一方、相対湿度の分布を見ると、95%を越える領域が収束帯に沿ってパッチ状に縦に並んでおり、南北方向にも対流が起きていることが分かる。さらに図-8の線分A-A'における鉛直断面での風ベクトルを図-9に示す。鉛直ベクトル風を見ると、収束帯付近で激しい鉛直混合がおきており、海風によって運ばれた水蒸気がここで上昇して積雲形成に至っていることがうかがえる。

しかしながら、Grid 4の結果を見ると、ここで再

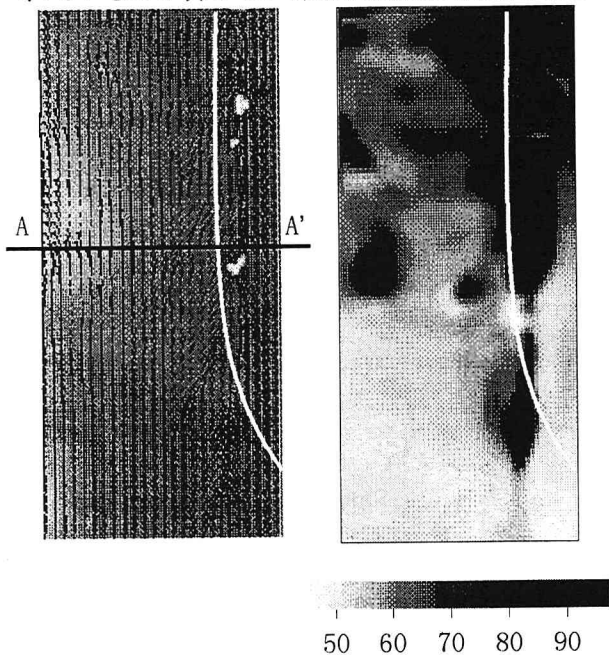


図-8 Grid 4での15JSTにおける風・雲の結果と $Z=1260\text{m}$ での相対湿度の分布(%)

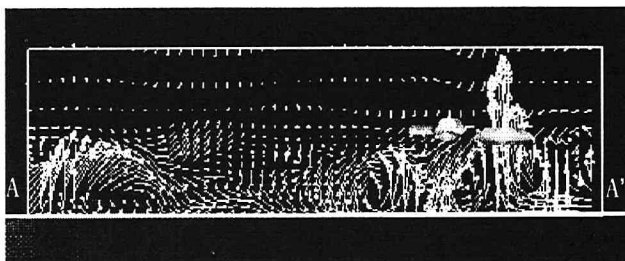


図-9 Grid 4におけるA-A'断面

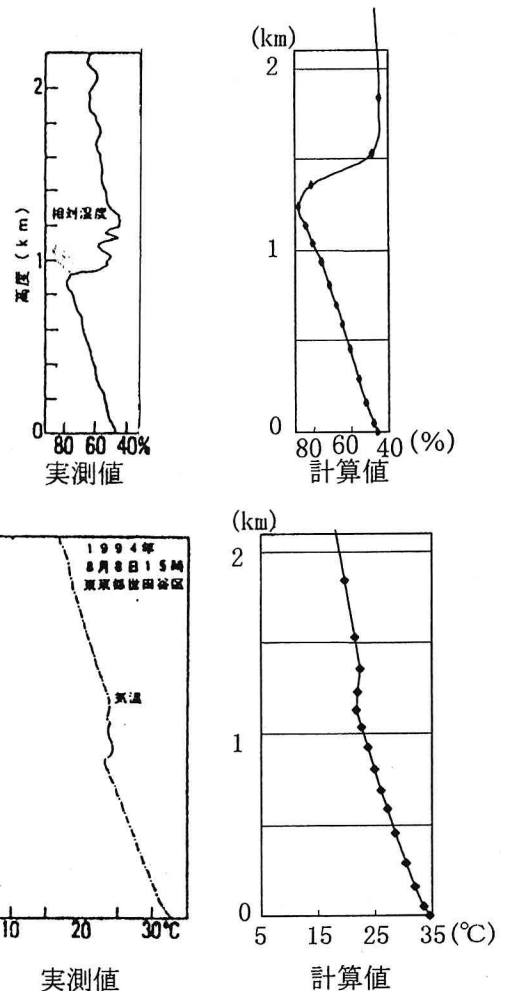


図-10 15JST世田谷付近における相対湿度・気温の鉛直分布

現された積雲は一般に言われる環八雲のように積雲がきれいな列をなして現れているとは言えない。さらに、図-7を見ると明らかなように、実測では18時頃まで確認されている積雲が、計算上では16時の段階で消滅してしまっており、特に午後に関しては積雲の発生量を過小評価している。

この理由を考えるにあたり、積雲が形成された付近における気象要素の鉛直構造を取り出して考察を加える。

(3) 鉛直構造の観測との比較

計算対象日の1994年8月8日には、甲斐ら(1995)²⁾が世田谷上空において相対湿度、気温などの鉛直分布を測っており、まず積雲形成と関わりの深い相対湿度に関して、15JSTにおける観測値とシミュレーションの結果との比較を図-10に示し、考察を加える。なお、シミュレーションの結果としてはGrid 4でのプロファイルを取り出す。

地表面付近では観測・計算結果ともに50%未満程度であり、よく再現できている。また、ピーク値に関してであるが、観測では積雲の発生が確認されていないが図のピーク値は80%程度であることから、積雲の位置と観測点の位置は多少ずれているものと思われる。

シミュレーションの結果を調べると、世田谷近辺の隣り合う計算格子点でも相対湿度のピーク値やその値を持つ高度に違いが見られるのだが、ここでは観測点同様に積雲が再現された箇所から若干ずれたポイントでのデータを示す。地表面から高度を上げて追ってみると、気温の減少と海風によって運ばれる水蒸気が収束帯で集まることで相対湿度はある高さでピーク値をもち、それより上空では一転して空気が乾いているという構造はよく再現されている。このピーク値を持つ高さが混合層高さに対応していると思われるが、この混合層高さに関しては観測値よりも若干高くなっている。観測点のようにピーク値が80%程度のポイントを取り出しても混合層高さは1200mを越えており、実現象よりも鉛直混合が強く起きていることがうかがえる。

また、これは温度の鉛直分布を見ても同じ事が言える。各高度における温度の値は実測に近いものが得られており、相対湿度がピークを持つ高さ付近で温度勾配に変化がある点も良く再現できているが、やはり混合層高さは実測よりシミュレーションの方が高い位置に現れている。

この原因としては、地表面の都市域の顕熱輸送量が大きめに見積もられている可能性が挙げられる。著者らのグループで都市を代表する銀座の夏季における熱収支を測定したところ、オフィスビルの冷房施設による水蒸気の放出により顕熱に匹敵するほど

の潜熱が測定されている(1997)⁵⁾。こういった人工的な潜熱の影響をまだ本研究で扱ったモデルには取り込んでいないため、結果として混合層が発達しすぎたものと思われる。

4. 結論

本研究を通して、以下のことが明らかとなった。

- ① 四次元データ同化手法およびネストグリッドシステムを用いたことで、大局的な風系だけでなく東京湾からの吹き出し風や、東京湾海風と相模湾海風による収束といった局所場における風系も良く再現できることが分かった。
- ② 午前、午後を通して観測で見られたような環八雲が再現された。風系から判断して、午前中は東京湾からの海風前線での上昇流、午後は東京湾海風と相模湾海風の収束帯に起きる上昇流により発生することが分かった。ただし午後の積雲は若干過小評価されており、人工的な潜熱が混合層高さに及ぼす影響、あるいは雲水への遷移に際して凝結核の効果が関係している可能性などが考えられる。

また今後の課題としては、混合層高さに関する議論を深めるとともに人工熱の影響を顕熱だけでなく潜熱分にも振り分けるといった数値実験的な試みや、雲水への遷移過程においてエアロゾルなどの凝結核のもたらす効果の導入などを検討していく予定である。

謝辞：本研究を進めるに当たって、筑波大の甲斐先生、東京都環境保全局、神奈川県環境科学センターよりデータを提供していただきました。ここに篤く謝意を表します。

参考文献

- 1) 塚本治弘：環八雲は都市汚染を目に見せる，科学朝日，Aug，pp. 34-38，1993
- 2) 甲斐憲次ほか：1994年8月，東京都世田谷区上空で観測された積雲列（環八雲）について，1995年気象学会春季大会予稿集，1995。
- 3) Pielke et al.: A Comprehensive Meteorological System-RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, pp.69-91, 1992
- 4) Tremback, C. J., Kessler, R.: A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models, *Preprints 7th AMS Conference on Numerical Weather Prediction*, June 17-20, Montreal, Quebec, Canada, Amer. Meteor. Soc., Boston, pp.433-434, 1985.
- 5) 神田学ほか：銀座オフィスビル街における熱収支特性，水文・水資源学会誌第10巻第4号，pp. 329-336，1997。

(1997. 9. 30受付)