

東京湾上の大気構造に関する集中観測

OBSERVATIONAL STUDY ON THE ATMOSPHERIC STRUCTURE OVER TOKYO BAY

森脇亮¹・石井宏明²・神田学³

Ryo MORIWAKI, Hiroaki ISHII and Manabu KANDA

¹正会員 工学 東京工業大学 工学部土木工学科助手 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科国際開発システム工学専攻 (同上)

Field observation was performed to investigate the atmospheric structure and concentration of CO_2 , SPM(Suspended Particle Matter) over Tokyo Bay by using Radio Sonde, Doppler Sodar and airplane in summer 1999.

The following results were obtained; 1) There is a descent-flow over Tokyo Bay. The peak value exists at the height of 300m. This expects the existence of circulation flow between Tokyo Bay and surrounding area. 2) The rise in potential temperature in the daytime is caused by the local descent-flow. 3) The vertical and horizontal distribution of SPM and CO_2 is different each other. Vertical gradient of CO_2 is positive over the bay. CO_2 is transported over Tokyo Bay from surrounding high emission area. Vertical gradient of SPM is negative. The profile is affected by the emission of sea-salt at the surface of the bay and Pacific ocean.

Key Words: Tokyo Bay, Local circulation, airplane, Doppler sodar, Radio sonde, CO_2 , SPM

1. はじめに

都市の拡大や自動車の増加により、ヒートアイランドや光化学スモッグ、浮遊粒子状物質(以下、SPM)による大気汚染などが、大きな問題となっている。大気汚染の現象把握や予測を行うには、排出源だけでなく気象場の影響も同時に考慮する必要がある。東京湾岸に存在する火力発電所や工場から排出される汚染物質は、東京湾からの海風によって都市内部に移流拡散される。これまで海風の侵入と汚染物質の輸送の関係を調べる研究は数多くあるが¹⁾、東京湾上空の大気構造、物質濃度の立体分布そのものが着目され測定された研究例はない。

東京湾は、図-1に示すように半閉鎖性の水域であり、都市域と水域における顕熱フラックスのコントラストから、東京湾から周辺部への発散風が観測される。著者ら²⁾は、1998年夏期におこなった東京湾におけるラジオゾンデ観測によって、東京湾上空で陸域からの乾いた空気層の侵入を観測し、地表発散風の反流として都市域の気塊が東京湾上空に集積される可能性を指摘している。また若松ら³⁾は航空機観測によって、相模湾や駿河湾上空で陸域よりも高濃度の汚染大気を観測しており、陸上で発生した汚染物質が海上に長距離輸送されることを指摘している。

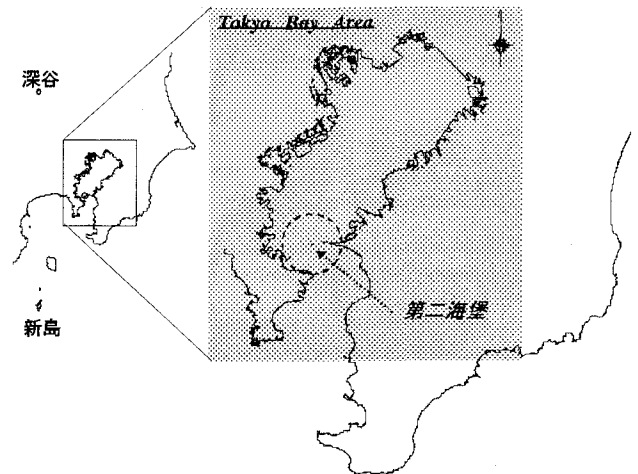


図-1 東京湾と第二海堡の位置図

本研究では、1998年の観測で得られた東京湾上空大気の層構造に関する知見を承けて、新たに物質濃度の挙動に主眼をおいた現地計測を行った。今回の測定では、東京湾内に位置する第二海堡(図-1)においてラジオゾンデ・ドップラーソーダーによる上空の気象観測のほか、航空機観測により二酸化炭素(以下、 CO_2)・SPM濃度の立体観測を行った。今回はこれまで行った解析結果のうち、ラジオゾンデと航空機観測の結果を中心に東京湾上空の大気構造およびSPM・ CO_2 濃度の空間分布について報告する。

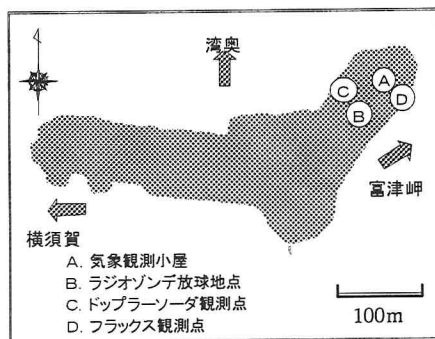


図-2 第二海堡における観測場所

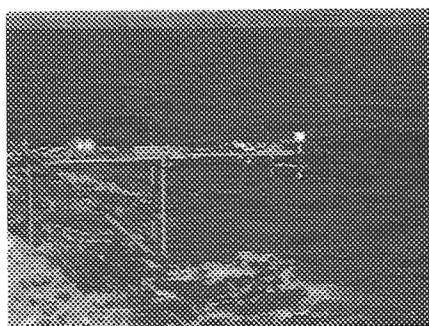


写真-1 フラックス測定の様子

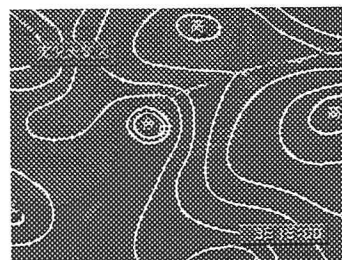


図-4 1999年8月3日の地上天気図

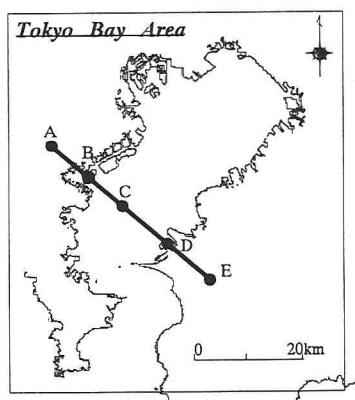


図-3 航空機観測経路図
(図中の太線が経路を示す)

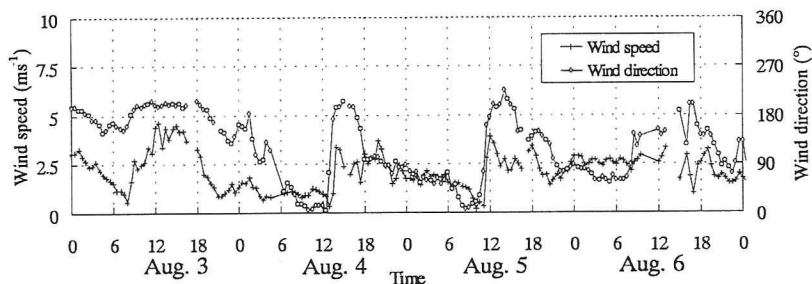


図-5 風向風速の経日変化(1999年8月3日～6日, 東京湾第二海堡)

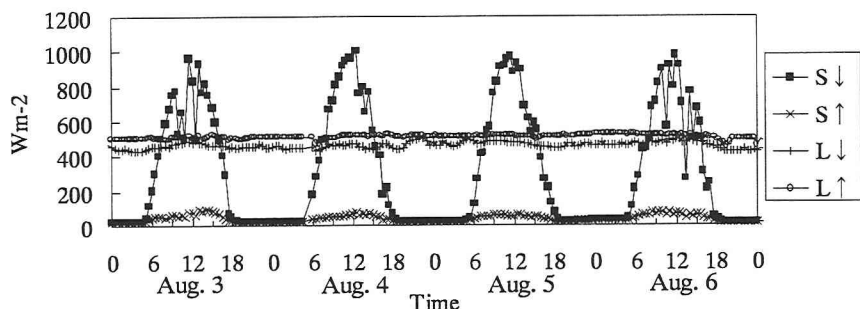


図-6 海面上における放射収支の経時変化(1999年8月3～6日, 東京湾第二海堡)

2. 観測概要

(1) 観測場所

観測は、千葉県富津岬沖にある第二海堡にて行った(図-1)。第二海堡は東京湾の中心部からやや南寄りに位置し、真南に湾口部を臨む位置にある。この島は明治時代に東京湾の防衛目的に作られた人工島であり、現在は東京湾航路を誘導する灯台の役目を果たしている。形状は図-2のように扇の要状であり、島の中心から端部までは約100m、海面からの高さは最も高いところで10m程度である。図-2の点Aに運輸省の気象観測小屋があり、ここを拠点にして観測を行った。

(2) 観測方法

a) ラジオゾンデ観測

東京湾上空の風向・風速・温位・比湿を測定するために、ラジオゾンデ(Vaisala社, RS80)を放球した。観測は午前9時から3時間毎に午後9時まで行った。

気球にはTA200を用いて、図-2の点Bから上昇速度 5ms^{-1} で放球した。ロランCの測位システムを用いてゾンデの位置を評定し風向風速を計算した。

b) 航空機観測

東京湾上空の大気構造を断面的に捉えるため航空機による計測を行った。航空機には新日本航空(株)のセスナ機172型を使用し、翼に取り付けられた吸気口からダクトによって外気を機内に誘導し、気温・相対湿度・ CO_2 濃度・SPM濃度を測定した。飛行経路は東京湾を横断するようにとり(図-3のA-E)、測定は300m, 600m, 900m, 1200mの4高度で行った。測定は1999年8月3日に行い、11:50から13:20の間に上記の航路を飛行した。

c) ドップラーソナー

Sintec社の超小型フラットアレイソナー FAS64を用いて、図-2の点Cにて測定を行った。10波長のマルチモードで平均時間10分で計測を行った。

d) 海表面フラックス観測

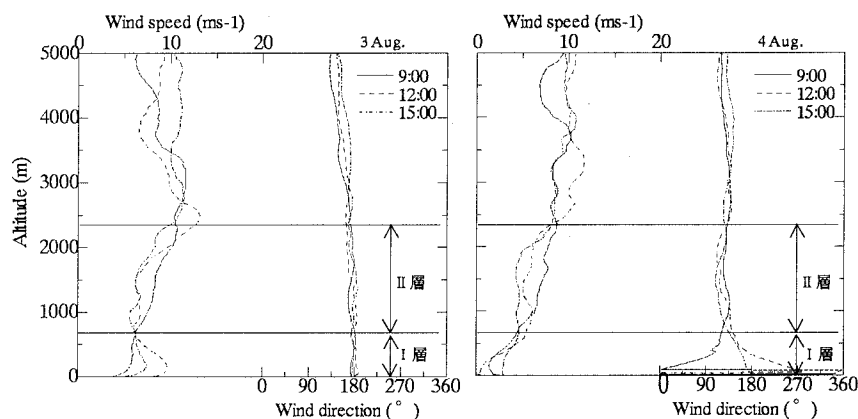


図-7 風向風速の鉛直分布 (1999年8月3・4日, 東京湾第二海堡)

I層: 海風の進入層, II層: 反流が起きる層

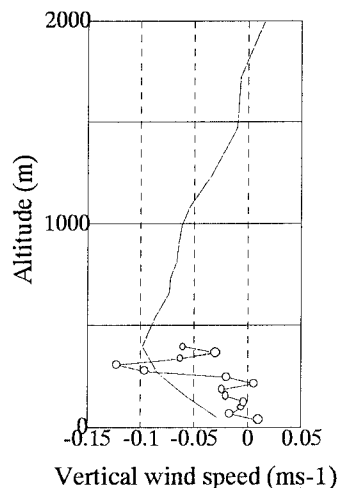


図-8 東京湾上の鉛直風速のプロファイル。

プロット: ドップラーソーダーによる測定結果

(1999年8月3～5日のアンサンブル平均)

ライン: メソ気象モデルによる計算結果

(1998年8月10日12:00)

第二海堡の海岸部(図-2中の点D)に測定用のやぐらを組み(写真-1), 測定機器をつけたブームを海上に伸ばすことにより, 岸から2m, 平均海面から1.5mの高さで測定を行った。測定項目は, 風向風速, 全天日射量, 上向きの短波放射, 大気からの長波放射, 海面からの赤外放射, 気温, 湿度などである。また超音波風速計, 赤外線吸収式 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 変動計を設置し, 海面の熱・水蒸気・ CO_2 フラックスを渦相関法により直接測定している。

(3) 観測期日と気象条件

観測は, 1999年8月3日から8月6日まで行った。図-4に8月3日の地上天気図を, 図-5, 図-6に観測期間中に第二海堡で測定した風向風速, 放射収支の結果をそれぞれ示す。例年, 夏の高気圧は小笠原地方に中心を持つが, 今年の高気圧は北方の三陸の沖にずれていた。このため, 南東寄りの一般風が比較強い日が続いた。また高気圧から吹き込む湿った空気が流れ込んだため雲が出やすく, 観測期間後半の5・6日にはわか雨が降ることもあった。以下では, 以下では, 南風が一様に吹いていた3日と風向の変化により海風の侵入が明確に見られた4日の結果を中心に議論する。両日とも日中のピーク時の日射量は 1000Wm^{-2} に達していた。一般に夏期に都市の内部では日射量が 1000Wm^{-2} を超えることは希であり, 観測期間中の東京湾上空の大気懸濁度は低かったと考えられる。

3. 観測結果

(1) 風速の鉛直分布に見られる海風の侵入高度

図-7にラジオゾンデによる風向風速の鉛直分布を示す。3日の風向は地上から5000mまで一様に南風であり, 9:00, 12:00, 15:00と顕著な変化は見られない。一方, 水平風速の鉛直分布を見ると, 地表から700m

までの層(I層)で時間とともに風速が変化し, 12:00が最も強くなっている。また4日は700m以上では南東風が定常的に吹き続けているが, それ以下では9:00から3時間毎に風向が北, 西, 南へと変化し, 15:00には海風の侵入が認められ風速が増大している。次に700mから2000mの高さ(II層)に注目する。両日とも風向に有意な変化は認められない。9:00の風速を基準にしてみると, 海風が侵入したと考えられる時間帯(3日は12:00, 4日は15:00)の風速は減少している。これらの結果をまとめると, 以下のように考察できる。海風の侵入厚さは約700mである。この海風の侵入に伴う反流がII層目で起きる。この反流は気圧傾度風の向きを逆転させるほどではないが風速を減少させる。ここで示した海風の侵入厚さは, 東京湾奥部でMurayama et al.⁴⁾がライダーによるエアロゾル分布から推定した海風高度とほぼ一致している。

(2) 鉛直下降流のプロファイル

下降流の存在を明らかにするためにドップラーソーダーの結果から鉛直風速を調べたが, 変動が大きく顕著な下降流は検出できなかった。そこで, 3日間のアンサンブル平均をとり, 鉛直風速のプロファイルを求めた(図-8中のプロット)。その結果, 全体的には最下層を除いてすべて下降流となっていることがわかった。東京湾上での下降流の存在は, ここを中心とする局地循環の存在を示唆するものである。最下層で上昇流がおきた理由は, 第二海堡自体の地形的影響により, 水平風速の流線が上方に曲げられたためと考えられる。鉛直風速は300mあたりでピークを示す結果となった。筆

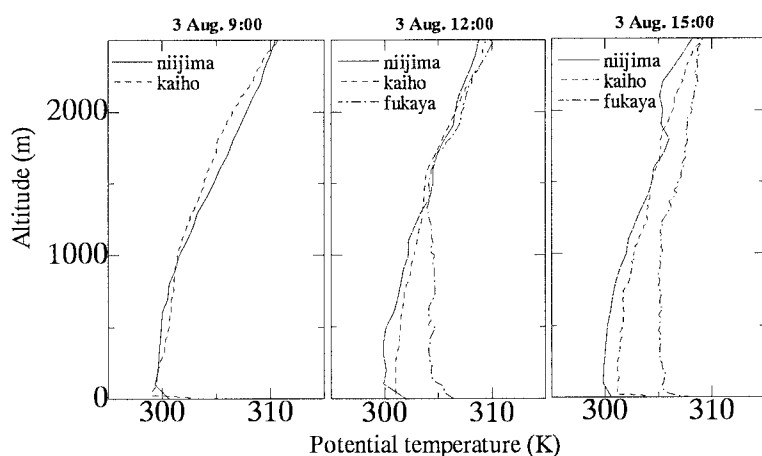


図-9 新島、第二海堡、深谷の温位分布。

左から、1999年8月3日9:00, 12:00, 15:00

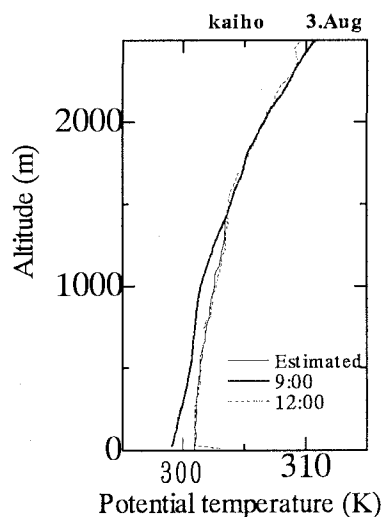


図-11 第二海堡の温位の鉛直分布。

Estimated: 9:00の温位分布を元に断熱昇温を与えた結果

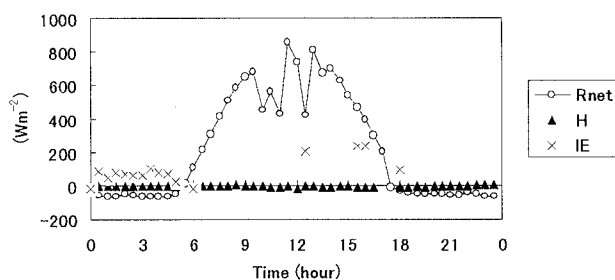


図-10 海面上における熱収支の経時変化。

(1999年8月3日、東京湾第二海堡)

者らはメソスケール気象モデルを用いて、東京湾で起きる微気象の再現計算を行っている。異なる日の結果ではあるが、計算によっても東京湾の影響による下降流が確認され、そのピーク位置はほぼ同じ高度に存在している。ここではその結果を図-8のラインで示すのみとし詳細については割愛する。石井ら²⁾の観測では上空の一般風が弱い場合に循環風が存在が指摘されたが、本研究のように南風が一様に吹いている場合でも、同様の現象が起こるようである。

(3) 東京湾における温位の昇温メカニズム

図-9に、3日9:00・12:00・15:00における新島・第二海堡・深谷の温位分布を比較した。各地点の位置は図-1を参照されたい。伊豆諸島に属する新島では温位の日変化はほとんどなく、海洋に一般的に見られる挙動⁵⁾を示している。一方、内陸の深谷では地上から1300m付近まで混合層の発達認められる。これに対し、第二海堡では9:00から12:00までの間に地上から1400m付近まで昇温しているものの、温位勾配は新島のそれに近い。大気の昇温には、イ)地表面からの熱供給、ロ)水平方向からの熱の移流、ハ)下降流による断熱昇温、の3つが考えられる。図-10は渦相関法によって直接測定した海面の熱収支である。顕熱輸送量Hはかなり小さく、9:00から12:00の間の平均値

は -5.2Wm^{-2} である。このHが3時間の間に1400mの気柱に与える温度変化は 0.036K の冷却である。よって、大気の加熱にはほとんど寄与しておらずイ)は無視できる。また3日には風向はほぼ真南であったため、陸域からの熱の移流も考えにくい。したがってロ)の可能性も少ない。最後にハ)の下降流による断熱昇温の影響を評価する。高度500~1500mにおいて下降流による断熱昇温を定量的に見積もった。下降流の強さは図-8の計算結果にしたがって与えた。図-11にその結果を示す。細線が9:00の温位分布を元に断熱昇温を与えた結果であり、破線で示した12:00の分布とほぼ一致した。以上より、第二海堡の昇温は下降流による断熱昇温で定量的に説明でき、東京湾の温位形成には局地循環による下降流が効いていることを示した。

下降流による断熱昇温としては、Kondo et al. (1989)⁶⁾による盆地大気の昇温過程が知られている。盆地大気の場合は斜面風に対する補償流が下降流を生じさせるのに対し、東京湾の場合は海風の発散風系に起因すると考えられる。

(4) 飛行機観測結果

図-12①-③に、飛行機観測によって得られた絶対湿度・SPM濃度・ CO_2 濃度の結果をそれぞれ示す。図の横軸は経度、縦軸はそれぞれの物理量で、高度別に線種を変えて表示した。主要ポイントの経度は、A:第三京浜港北IC ($139^\circ 35.5'$)、B:横浜港 ($139^\circ 40.0'$)、C:東京湾航路 ($139^\circ 46.0'$)、D:君津 ($139^\circ 52.5'$)、E:鹿野山 ($139^\circ 57.5'$)である。

①絶対湿度の分布を見ると、東京湾上では高度方向に湿度差があるものの、陸上ではその差が小さくなっている。陸上では混合層が発達し、鉛直方向の混合が促

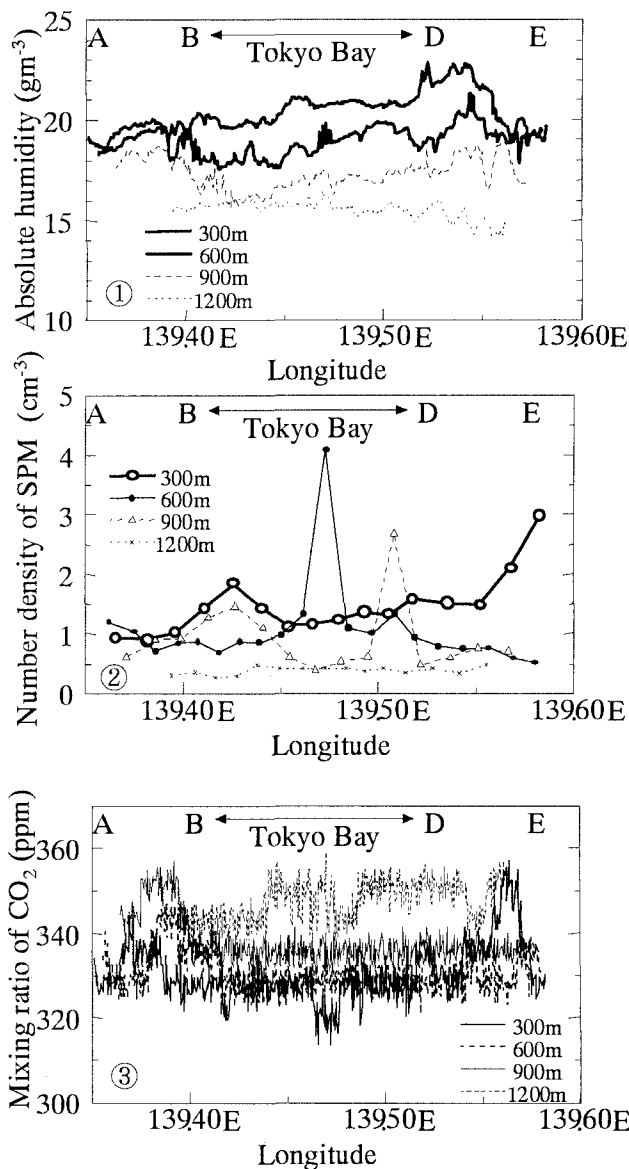


図-12 飛行機による断面観測結果
①絶対湿度②SPM③CO₂

進されている様子が示されている。

②SPMは高度が高くなるにつれて濃度は小さくなる。1200mで0.5 μ m-1.0 μ mの平均的な個数は300mの高度に比べて30%程度である。5.0 μ m以上では1200m程度に達するとほとんど存在しない。横断方向に分布を見ると海陸の差による顕著な傾向はでていない。SPMの発生源は多様で陸域だけではなく、海表面からも海塩粒子が大気に供給される⁷⁾。海塩粒子のフラックスの研究例として、Fairall and Davidson(1983, 1986)^{8,9)}が詳しく、1 μ m粒子の個数濃度フラックスを10cm²s⁻¹と見積もっている。本観測期間中に得られた海表面上1.5mで測定された個数濃度は平均で130cm³であり、上空に比べて濃度が2桁大きかった。東京湾では海表面からの飛塩の影響を強く受けていることがわかる。

③一方、CO₂濃度は低高度において海上で低く陸上で高

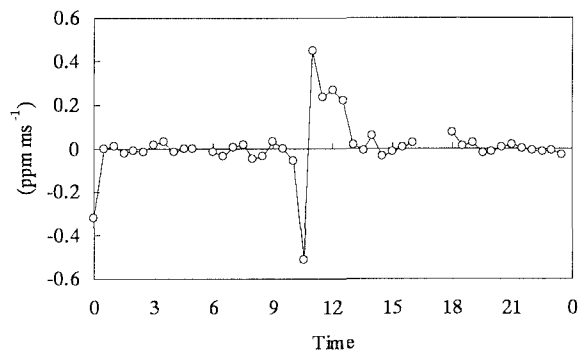


図-13 海面上におけるCO₂フラックスの経時変化。
正の値が発生、負の値が沈着を示す。

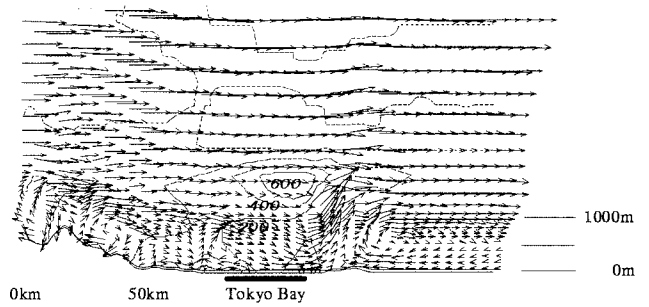


図-14 メソスケール気象モデル(RAMS)によって計算されたスカラーの等濃度線と風ベクトル。

くなっている。また陸域では濃度が急変し高度方向の差が不明確になるが、海上では高度方向の濃度差が明確で上空ほど高濃度になっている。陸域で発生した高濃度CO₂が東京湾上空に輸送され、東京湾では下方に輸送されていることが推測できる。図-13はCO₂の海表面フラックスである。フラックスは正負の値をとり、一日平均値は4.9 $\times 10^{-3}$ ppm ms⁻¹である。この日の東京湾はCO₂濃度にほとんど寄与せず、陸域の発生源が濃度分布の形成に主に影響を与えたと考えられる。図-14は気象モデルによって計算した鉛直断面におけるスカラーの等濃度線図である。スカラーは陸域の人工排熱分布に比例させて発生源を与えているので、観測によるCO₂の挙動に近い結果を表していると思われる。沿岸部で発生したスカラーは海上1000m付近で東京湾に移流されている。図-12③と図-14を比べると、その分布は定性的に似ていることがわかる。東京湾からの吹き出し風に伴い補償流として周辺地域の空気が東京湾上空に運ばれ湾上で沈降流が生じる流れ(循環流)が起きており、CO₂はこの流れにより東京湾独特の濃度場を形成していると考えられる。

4. 結論

東京湾上空の大気構造およびSPM・CO₂濃度を観測した結果、以下の主要な結論が得られた。

①ドップラーソーダーを用いて、観測期間中の平均的な鉛直流を調べたところ、東京湾上空では下降流が起きていることがわかった。また鉛直流は高度300mあたりでピークを示すことがわかった。

②温位の鉛直分布を海洋(新島)、東京湾、内陸(深谷)と比較したところ、高度0-1400mに東京湾に独特の昇温があることがわかった。この昇温は下降流による断熱昇温で定量的に説明でき、東京湾の温位形成には局地循環による下降流が効いていることを示した。

③航空機観測の結果、東京湾上に比べて陸上では混合層が発達し、鉛直方向の混合が促進されている様子が示された。

④航空機観測の結果、SPM、CO₂の空間分布はそれぞれ異なる結果となった。CO₂濃度は低高度では海上で低く陸上で高く、高々度では海上で高濃度になる。この現象は、陸域の高濃度CO₂が東京湾上空に輸送されるためだと推測される。一方、東京湾上でのSPMの鉛直分布はCO₂とは逆の傾向を示す。海塩粒子の発生により下層でSPM濃度が高くなるためと考えられる。

今後は、数値シミュレーションを用いることにより、東京湾の影響による汚染物質の輸送課程をさらに詳しく検討していく予定である。

謝辞：本研究は、(財)石油産業活性化センター内のJCAP(大気改善のための自動車・燃料の技術開発)における夏期の関東平野における大気観測にて共同で実施したものです¹⁰⁾。また第三管区海上保安部横須賀航路標識事務所、第二港湾建設局京浜港湾工事事務所の協力により観測場所を提供していただきました。国立環境研究所の若松室長には新島のゾンデ測定結果を提供していただきました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

1) 河村武編：大気環境の科学 3 都市の大気環境，東京大学出版会，185，1979。

- 2) 石井宏明，神田学，森脇亮，奥園孝二：東京湾上空の大気環境計測，水工学論文集，第43巻，1999。
- 3) Wakamatsu, S.: High concentration of photochemical ozone observed over sea and mountainous regions of the Kanto and eastern Chubu districts, J. Jpn. Soc. Atmos. Environ., 32(4), 309-314, 1997.
- 4) Murayama, T., Furushima, M., Oda, A., Iwasaka, N., Kai, K.: Depolarization ratio measurements in the Atmospheric Boundary Layer by Lidar in Tokyo., J. Meteorol. Soc. Jpn., 74, 571-578, 1996.
- 5) Nicholls, S. and M. A. LeMone: The fair-weather boundary layer in GATE: The relationship of subcloud fluxes and structure to the distribution and enhancement of cumulus clouds., J. Atmos. Sci., 37, 2051-2067, 1980.
- 6) Kondo, J. Kuwagata and S. Haginoya: Heat budget analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin., J. Atmos. Sci., 46, 2917-2933, 1989.
- 7) 浮遊粒子状物質対策検討会：浮遊粒子状物質汚染測定マニュアル，243-251，1997。
- 8) Fairall, C. W. and K. L. Davidson: An analysis of the surface production of sea-salt aerosols., Tellus 35B, 31-39, 1983.
- 9) Fairall, C. W. and K. L. Davidson: Dynamic and modeling of aerosols in the marine atmospheric boundary layer., E.C. Monahan and G. Mac Niocaill (eds.), Oceanic Whitecaps, D. Reidel Publishing Company, 195-208, 1986.
- 10) (財)石油産業活性化センター：PEC-1999JC-1「夏期の関東平野における大気観測データ集(1) 上空気象データ」，1999

(1999. 9. 30 受付)