

東京湾におけるエネルギー・H₂O・ CO₂フラックスの季節変化

SEASONAL AND DIURNAL EVOLUTION OF ENERGY, H₂O AND CO₂ FLUXES OVER TOKYO BAY

小田僚子¹・森脇亮²・神田学³

Ryoko ODA, Ryo MORIWAKI and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 I4-9)

²正会員 博(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 助手(同上)

³正会員 工博 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 助教授(同上)

In this study, we have investigated the fluxes of energy, H₂O and CO₂ between the water surface and the atmosphere over Tokyo Bay. And we compared these fluxes with those at a suburban area (Kugahara) in Tokyo, Japan. From recent observations (2004/12-2005/8), the interesting features of energy and scalar fluxes in Tokyo Bay were verified: 1) Sensible heat flux was positive in winter whereas it was negative in summer. 2) Positive latent heat flux was large in winter and it was dependent on wind speed. 3) The CO₂ flux in the suburban area was positive (CO₂ source), whereas that in Tokyo Bay was negative (CO₂ sink). These results were probably due to the advection of air from the urban area.

Key Words : Tokyo Bay, Semi-Closed water, Urban area, Field observation, Flux, Seasonal pattern, Advection

1. はじめに

首都圏は現在、ヒートアイランドや大気汚染といった深刻な問題が顕在化している。都市圏に着目したヒートアイランド研究については、AMeDASなどのルーチン観測データ解析に加え、大気-陸面相互作用に着目したタワーフラックス観測の実施などにより急速にその物理現象の理解が進みつつあるが、一方で都市圏に隣接した水圏(内湾・沿岸部)が周辺大気にもたらす環境影響については詳細に議論されてこなかった。近年になって、半閉鎖性水域である東京湾上空の大気は明瞭な多層構造をなし温位が時間単位で変化しており、日変化のない海上混合層とは性質を異にしていること(石井他¹⁾)、東京湾沿岸の表層水温が月によっては経年的に上昇していること(木内²⁾)など、東京湾を中心に興味深い観測事実が指摘され始めたが、上記知見はいずれも既存の観測インフラか短期集中観測によって得られたものであり、限界がある。

このような東京湾の環境影響を定量的に評価する上で大きなボトルネックとなっているのが、地上の気象観測網と比較して、湾上における観測データの不足が挙げられる。とりわけ、熱・水蒸気・運動量・汚染物質が東京湾によってどれだけ吸収・放出されているかを定量的に把握することが重要である。

以上のような背景を踏まえ、首都圏に隣接して存在する水圏である東京湾の特徴・役割を把握するために、東京湾海上に大気環境観測機器を設置し、長期連続的なフラックス現地観測が実施できるシステムを構築した。

本論文では、2004年12月から2005年8月までに得られたエネルギー・水蒸気・二酸化炭素フラックス、放射収支の季節変化および冬季・夏季に着目した上記フラックスの日変化の特徴について、既存の陸域フラックスネットである東京都大田区久が原で観測された結果との比較を交え、報告する。

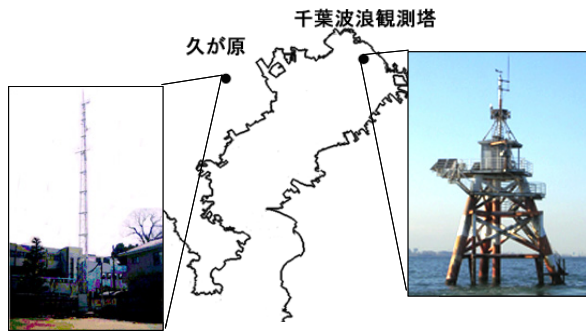


図-1 観測場所

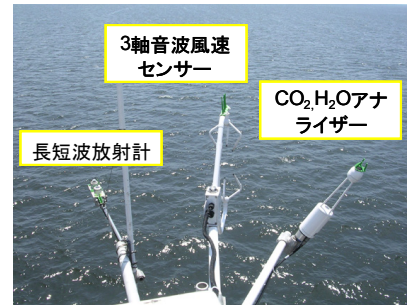


図-2 東京湾上に設置した観測機器の様子

表-1 測定項目および測定機器一覧

測定項目	東京湾		久が原	
	測定機器	サンプリング	測定機器	サンプリング
風速3成分	3軸音波風速センサー (Campbell 社; CSAT3)	10Hz 平均化なし 観測高度: 平均潮位より12m	3次元超音波風速温度計 (Metek 社; USA-1)	8Hz 平均化なし 観測高度: 29m
気温			オープンパスアナライザー (Li-Cor 社; LI-7500)	
CO2濃度	オープンパスアナライザー (Li-Cor 社; LI-7500)	1Hz 10分平均 観測高度: 平均潮位より12m	ネオ目射計(英弘精機; MS-42)	1Hz 20分平均 観測高度: 25m
水蒸気密度			短波放射計(キップ&ゾネン 社; CM3)	
全天日射量	赤外放射計(Kipp&Zonen 社; CG3)	赤外放射計(英弘精機; MS-202)		
上向き短波放射量		赤外放射計(英弘精機; MS-201)		
大気放射量				
上向き長波放射量				

2. 観測概要

(1) 観測場所

a) 東京湾-千葉波浪観測塔

北緯35°36', 東経140°01' に位置する既存の潮位測定用水中立地形タワー(千葉波浪観測塔)の甲板に観測機器を設置した。甲板は、平均潮位から約12mの高さにある。陸域との最短距離は北東方向に約3kmであり、観測高度が海上の内部境界層内に入ることを理論上確認している³⁾。沿岸部はほとんどが食品コンビナート、鉄鋼・石油関連企業の専用岸壁として使用される工業地帯となっている。千葉波浪観測塔の位置を図-1に示す。

b) 都市-久が原タワー⁴⁾

北緯35°34', 東経139°41', 海拔高度18mの位置(東京都大田区久が原)に、約30mのトラス式自立型タワーを建設し、測定機器を設置した(図-1)。観測タワー周辺の地域は、1km四方に渡って高さのほぼ均一な低層住宅地が広がっており、用途地域としてはその大部分が第一種低層住居専用地域に指定されている。レーザー距離計を用いて測定した平均建物高さは7.3mである。

(2) 観測機器

上記両地点において風速(3成分)、気温、二酸化炭素濃度、水蒸気密度、放射強度を測定している。使用している観測機器の一覧を表-1に示す。

(3) データ解析手法

本研究では、観測データを1時間平均値の統計量として扱っており、8時のデータとは8:00~9:00(JST)まで

のデータの平均値を指す。なお、東京湾における7月中旬までの放射強度結果は各時間の瞬間値として出力していたため、1時間平均値ではない。また、東京湾上において測定した超音波風速計による気温に見られたトレンドを除去するため、海沿いに位置する最寄りの測候所による気温と照らし合わせて補正を行った。

顕熱・潜熱・CO₂フラックスの算定には渦相関法を適用し、さらに水蒸気とCO₂フラックスに関しては空気密度変化による誤差を補正するためにWPL補正⁵⁾を加えた。また、超音波風速計の傾斜誤差を除去するため、McMillen⁶⁾に従い傾度補正を行った。

a) 季節変化

季節変化を論じる際、日平均値を用いて議論することが一般的であるが、東京湾では欠測が多く日平均値の信頼性を保ち得るデータ量ではないと判断したため、今回はある時間帯に着目し、季節変化を議論することにした。本論文では、日射強制力が強く、東京湾と都市とのコントラストが最も大きく現れると考えられる12時のデータを用いた。具体的には、2004年12月~2005年8月までに観測された風速・気温・表面温度・比湿・二酸化炭素濃度の各月における12時の平均値を季節変化として求めている。ここで風向はベクトル平均により算出した。また同様に顕熱・潜熱・CO₂フラックスも各月における12時の平均値から季節変化を求めた。フラックスは上向きを正としている。

東京湾上の観測では観測機器の設置位置から北東方向の甲板上に小屋が存在しているため、その影響があると判断される風向が北東である時のデータは除いた。また、とりわけ東京湾において鳥の影響と思われる欠測が多いため、明らかにノイズと判断できる値は除いた。なお、

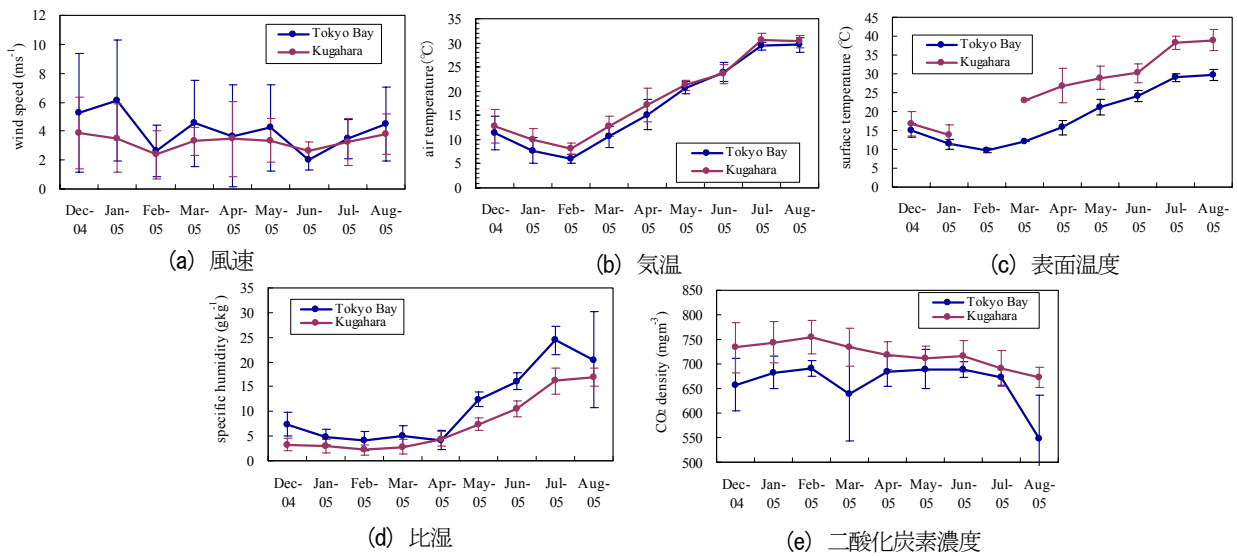


図-3 風速・気温・表面温度・比湿・二酸化炭素濃度の各月における平均値の季節変化

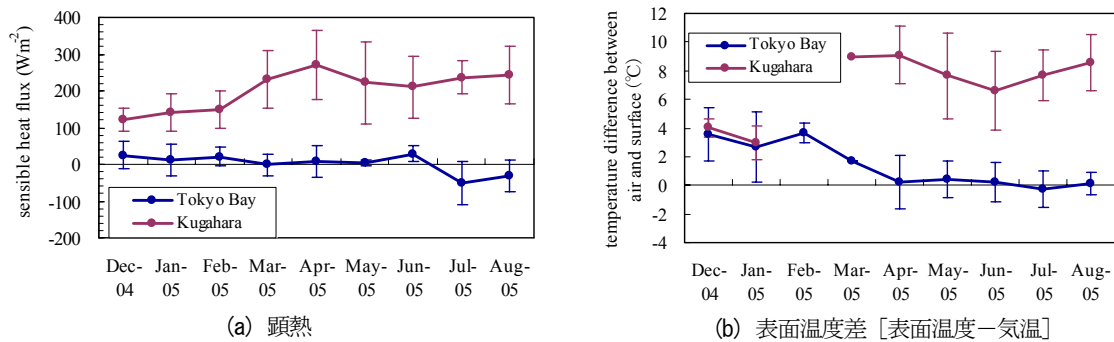


図-4 顕熱および表面温度差の季節変化

各平均値にはデータのバラツキを明らかにするため、標準偏差を誤差バーとして付加した。

(b) 冬季・夏季の日変化

季節の特徴を捉え、データ欠損の少ない2004年12月23日、2005年7月29日をそれぞれ冬季・夏季の代表日と選定し、顕熱・潜熱・CO₂フラックスの日変化を議論する。

3. 季節変化

(1) 気象場および二酸化炭素濃度の季節変化

フラックスの季節変化を示す前に、バックグラウンドとなる気象条件を概説する。図-3(a)~(e)に、2004年12月~2005年8月までに観測された風速・気温・表面温度・比湿・二酸化炭素濃度の各月における12時の平均値を示す。ただし東京湾と久が原では計測高度が異なり、気象要素の直接比較は意味がないため、ここでは東京湾の季節変化に論点を絞る。

風速(図-3(a))は、冬季に比べ夏季に弱い傾向がある。主に冬季は季節風による北風が卓越し、夏季は南西風が卓越する。12時の気温(図-3(b))は、2月に最低で6°C前後であるが、海上であるにも関わらず夏季は30°Cに

も達する。後述するように、東京湾の表面水温も日中30°C程度まで上昇することからも、この結果は妥当である。石井ら¹⁾は、東京湾上の大気が海風のリターンフローによる局地循環の結果、断熱昇温によって高温化すると報告しており、本結果とあわせて興味深い。12時の表面温度(図-3(c))は、冬季に10°C、夏季に30°C程度である。陸域から離れた同緯度帯の太平洋上では、通常は水温の年格差は10°C程度である⁷⁾が、これに比べ東京湾では20°Cに達している。比湿(図-3(d))は冬から夏にかけて上昇し、二酸化炭素濃度(図-3(e))は冬季に比べて夏季に減少している。

(2) フラックスの季節変化

2004年12月~2005年8月までに観測された顕熱および気温と表面温度の差、潜熱および飽差、CO₂フラックスに関する12時の季節変化をそれぞれ図-4(a)(b)、図-5(a)(b)、図-6に示す。

顕熱は図-4(a)より、都市と比較して東京湾上では小さく、また冬季は正の顕熱であるのに対し、夏季(7,8月)は負になっている。このことから夏季は東京湾がシンクとしての役割を果たしていると考えられる。この傾向は、図-4(b)に示す表面温度差に対応している。一般

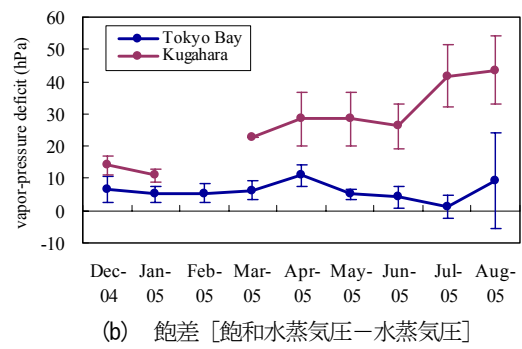
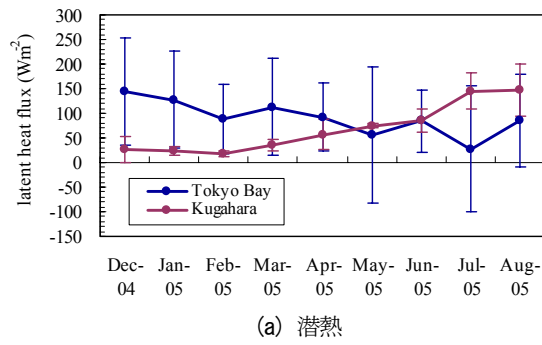


図-5 潜熱および飽差の季節変化

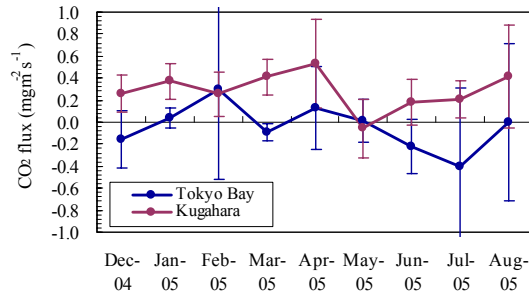


図-6 CO₂フラックスの季節変化

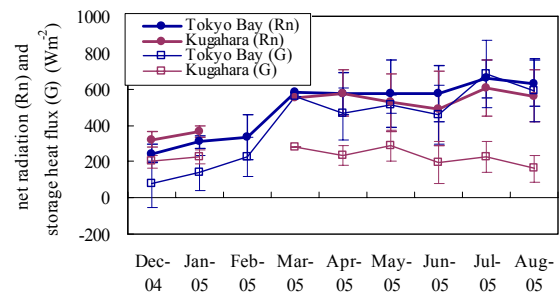


図-7 正味放射量(Rn)と海中/地中蓄熱量(G)の季節変化

的に、海上は冬季に水温が大気よりも高くなり顕熱をよく放出し、夏季は水温と大気温度の差が小さくなり、顕熱の放出は抑えられるとされる。東京湾では、上空の気温は陸域の影響を強く受けているものと考えられる。冬季は季節風により都市域の空気塊が東京湾上に直接的に移流する。また夏季は東京湾スケールで卓越するものの上空では海陸風のリターンフローによって都市域の空気塊が海域に戻され、東京湾上空で沈降が生じ、断熱昇温が生じる。したがって東京湾の場合は、冬場の顕熱の放出は抑制され、夏場は負のフラックスが増長されるようなシステムになっていると予想される。

潜熱は図-5(a)に示すように、夏季も冬季も基本的に正である。つまり東京湾は水蒸気のソースとなっている。前述のように東京湾上空の大気は陸域の影響を強く受けるため、陸域の乾燥した空気塊が東京湾の水蒸気放出を促していると考えられる。季節変化を見ると、冬季は都市と比較して東京湾上での放出が大であるが、夏季には逆転し、東京湾上における潜熱放出量は小さくなる傾向にある。しかし、飽差の季節変化(図-5(b))を見ると、顕著な季節変動は見られない。これは、潜熱が風速にも依存しているためであると考えられる。図-3(a)に示すように風速は夏季に弱くなる傾向があるため乱流輸送が弱まり潜熱が小さくなったと考えられる。風速への依存性は次章でも述べる。

図-6より、CO₂フラックスは、都市では常に正であるのに対し、東京湾では月によって符号が逆転する。標準偏差を見てもわかるようにデータのバラツキが非常に大きいので明確には結論づけられない。しかし全体的な傾

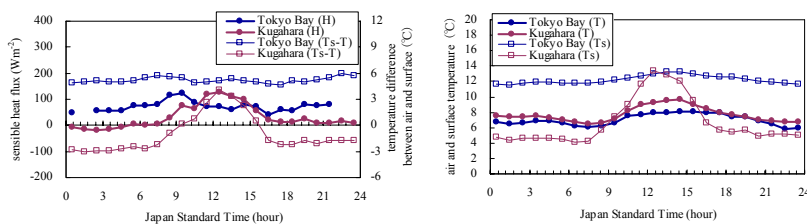
向としては若干負になる傾向があり、東京湾は二酸化炭素の吸収源としての働きがあることを示唆している。これもやはり、都市域の影響を受けているためと考えられる。既述したとおり、冬季は季節風、夏季は海陸風循環の影響で、東京湾は常に陸域の影響を受けている。東京湾上で二酸化炭素の放出源となるものではなく、陸域の高濃度二酸化炭素が低濃度場である東京湾海上に移流し、海上上空と下層の濃度差によって下向きのフラックスとなる場合が多いと考えられる。図-3(e)より、東京湾上空の二酸化炭素濃度は久が原よりも低い値であるが、人為的影響を受けない地点である綾里のデータ⁸⁾と比較すると、綾里(北緯39°02', 東経141°49')では約385ppmであるのに対し東京湾上では500ppmにも達し、これは明らかに都市域の影響を受けている結果であると言える。

以上、フラックスの季節変化について述べたが、これらフラックスに関しては、次章において夏季と冬季に分け、詳しく議論する。

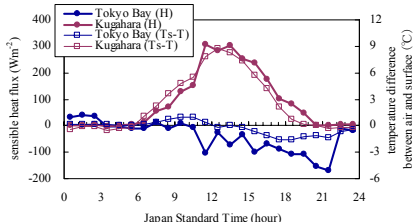
(3) 放射収支の季節変化

東京湾と久が原で得られた2004年12月～2005年8月までの正味放射量(Rn)と海中/地中貯熱量(G)の季節変動を図-7に示す。データはフラックスの季節変化と同様、12時の値を用いている。正味放射量とは下向き短波・長波放射量から上向き短波・長波放射量を引いた値であり、海中/地中貯熱量とは正味放射量から顕熱・潜熱量を差し引いて求めた値である。久が原の2月は放射強度データ欠損のため、空白となっている。

正味放射量は東京湾、久が原とも冬季から夏季にかけて上昇傾向にある。放射収支図は割愛するが、図-3(c)

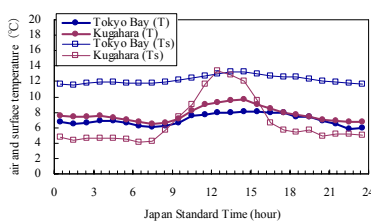


(a) 2004年12月23日

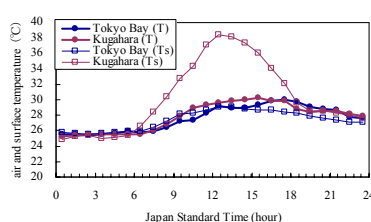


(b) 2005年7月29日

図-8 顕熱(H)および表面温度差(Ts-T)の日変化



(a) 2004年12月23日



(b) 2005年7月29日

図-9 気温(T)と表面温度(Ts)の日変化

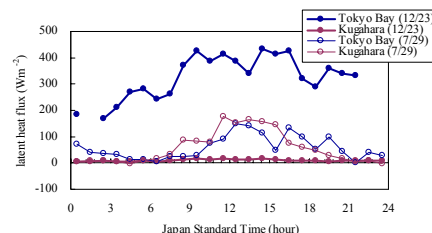


図-10 潜熱の日変化

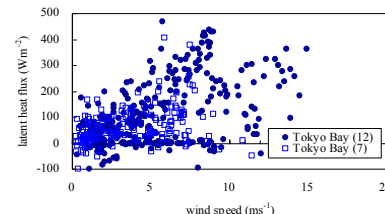


図-11 潜熱と風速との関係

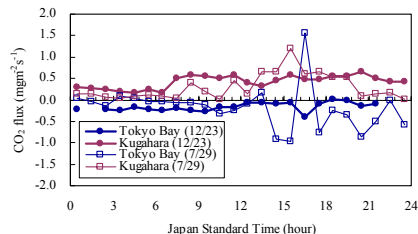


図-12 CO₂フラックスの日変化

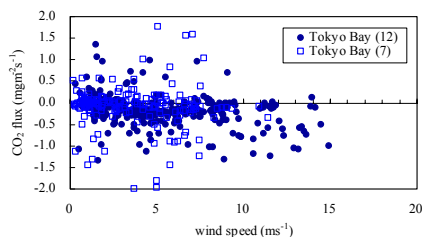


図-13 CO₂フラックスと風速との関係

に示したように、夏季は東京湾の表面温度が相対的に小さいため、上向き長波放射量も久が原と比べて小さくなる。これが結果として正味放射量の大小を決定している。貯熱量は、久が原ではあまり季節変化がないのに対し東京湾では夏季に上昇している(図-7)。これは3(2)で触れたように、潜熱・顕熱の季節変化が、久が原では正味放射量の挙動と同様に上昇し、逆に東京湾では減少しているためである。夏季の東京湾はエネルギーを海中に溜め込み、大気中への熱の放出を抑えていることがわかる。

4. 冬季・夏季に着目したフラックスの挙動

本章では冬季と夏季のある代表的な1日に着目し、顕熱・潜熱・CO₂フラックスについて議論する。既述したように、冬季は2004年12月23日、夏季は2005年7月29日を代表日と選定した。12月23日は東京湾、久が原とも3時ころまで4ms⁻¹ほどの風速であるが、久が原では3時

以降5ms⁻¹前後の風が終日続き、さらに東京湾では6時~19時頃にかけて8ms⁻¹前後の風が吹いていた。なお風向は終日北であった。7月29日は午前中1ms⁻¹程度の風速であったが、12時以降久が原では2~3ms⁻¹、東京湾では5ms⁻¹以上の風が吹いており、風向は南よりであった。

(1) 顕熱

顕熱(H)および表面温度(Ts)と気温(T)との差の日変化を図-8(a)(b)、表面温度と気温の内訳を図-9(a)(b)に示す。ここで表面温度はステファン・ボルツマンの法則に従い、射出率は久が原では1、東京湾では0.98を用いて算出している⁹⁾¹⁰⁾。顕熱はTs-Tに対応した挙動を示し、久が原では日中大きく夜間小さいという日射強制力に依存した傾向が見られ、一方東京湾では午前9時頃から夜にかけて顕熱が減少する傾向がある(図-8(a)(b))。東京湾で見られるこうした挙動は、都市の気温が下がり始める15時以降も東京湾では気温がすぐには低下せず高い気温を維持しているためだと考える(図-9(a)(b))。このタイムラグは、東京湾と陸域の熱容量の差、および陸域の空気塊が東京湾上に循環または移流してくるまでの時間スケールと関連していると考えられる。これにより、この時間帯のTs-Tの値は減少傾向にあり、これに対応して顕熱が小さくなっている。また、東京湾では表面温度の日格差に比べ、気温の日較差が大きいことも興味深い。これは都市域の影響を強く受け、東京湾上の気温が大きく変動している可能性を示唆している。

なお、冬季の久が原においてTs-Tの符号と顕熱の符号が一致していない点が見られる。建物の凹凸で構成される都市域の射出率および温度の代表性には諸説あり、都市気候研究の最新のトピックの一つである。特に冬季の日中においては放射温度を代表温度として用いることは適切ではない可能性が指摘されている¹¹⁾。

(2) 潜熱

潜熱(IE)の日変化を図-10, 東京湾の12月と7月における潜熱と風速の関係を図-11に示す. 東京湾では潜熱が冬季に大きく夏季に小さくなり, 久が原では逆のイベントを示すことは3(2)で触れたとおりである. 東京湾では夜間においても潜熱を放出しており, 久が原で見られるような日射強制力に依存した変動傾向は明瞭に見られない(図-10). これは, 東京湾は熱容量が大きいために, 日射によるエネルギー供給のない夜間においても, 潜熱の放出をゆるやかに行うことができるためである. また, とりわけ東京湾の冬季においては風速依存性が強く見られる(図-11). 日射量の少なくなる冬季は, 日射強制力が起因となって生じる潜熱の放出だけでなく, 風速により駆動される潜熱輸送量が生じているものと思われる.

(3) CO₂フラックス

CO₂フラックスの日変化を図-12, 東京湾の12月と7月におけるCO₂フラックスと風速の関係を図-13に示す. 図-12より, 冬季・夏季とも東京湾では負のフラックスになる傾向があり, 久が原では正のフラックス値であることがわかる. つまり東京湾では二酸化炭素を吸収し, 都市では放出するというシンク・ソースの関係にあると言える. これは3(2)でも述べたように, 冬季は北よりの風が卓越することから, 関東平野より移流してくる都市域の高濃度二酸化炭素と海上上空の低濃度二酸化炭素の濃度差により, 下向きのフラックスとなることが考えられる. 夏季は海陸風循環によって冬季と同様に都市域の影響を受けているものと思われる. また, 風速が3ms⁻¹以上になると大気-海洋間での二酸化炭素交換が行われるとされるモデル式(Tans et al.¹²⁾)や風速が11~13ms⁻¹を超えると気体輸送速度が急激に増す(森・角野¹³⁾)など, 海表面におけるガス交換については種々の研究が行われており, 本観測においても若干の風速依存性が確認でき(図-13), 特に風速約10ms⁻¹を超えたあたりで風速に伴う二酸化炭素の吸収量の増大が見られる. 今後, 海中の二酸化炭素分圧や生物活動との対応なども検討していくことが必要である.

5. 結論

2004年12月~2005年8月にかけて行った東京湾上でのフラックス現地観測結果について, 久が原における陸域フラックスと比較するという観点から得られた特徴を, 以下にまとめる.

① 顕熱は, 都市と比較して東京湾上では小さく, また冬季は顕熱を放出しているのに対し, 夏季は吸収する方向に働いている. これは表面温度と気温の差の挙動に対応している. また久が原では日中大きく夜間小さいという日射強制力に依存している傾向が見

られるが, 東京湾上では昼から夜にかけて放出量が減少する傾向がある.

- ② 潜熱は, 夏季も冬季も基本的に正である. つまり東京湾は水蒸気のソースとなっている. また冬季は日射強制力よりも風速への依存性が強い.
- ③ CO₂フラックスは, 都市では常に正であるが東京湾上では負になる傾向があり, 二酸化炭素を吸収する働きがあることを示唆している.

上記のフラックスの挙動は, 半閉鎖性水域である東京湾特有の風の場の状態に依存しており, またそれに伴い陸域の影響を強く受けているためであると考えられる.

謝辞: 本研究の実施にあたり, 千葉港湾事務所にご協力頂いた. また, 本研究は独立行政法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業(代表: 神田学)による財政的支援を受けた. 記して深甚の謝意を表したい.

参考文献

- 1) 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, pp.233-238, 1999.
- 2) 木内豪: 都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化-東京都区下水道と東京湾を事例として-, 水工学論文集, 第47巻, pp.25-30, 2003.
- 3) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉書店, 1992.
- 4) 森脇亮: 都市キャノピー層-大気間のエネルギー・物質交換に関する研究, 東京工業大学学位論文, 2004
- 5) Webb, E.K., Pearman, G.I. and Leuning, R.: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer, Quart. J. of Roy. Met. Soc. 106, pp.85-100, 1980.
- 6) McMillen, R. T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. , Boundary-Layer Meteorology, 43, pp.231-245, 1998.
- 7) 山本浩文, 山内守明, 金松敏也, 三島稔明: 本州東方海域における過去2万年の海洋環境, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第49号, pp.1-14, 2004.
- 8) 温室効果ガス世界資料センター(WDCGG): http://gaw.kishou.go.jp/wdogg_j.html
- 9) 鳥羽良明: 大気・海洋の相互作用, 東京大学出版会, 1996.
- 10) 近藤純正: 水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-, 朝倉書店, 1994.
- 11) M. Kanda, T. Kawai, M. Kanega, R. Moriwaki, K. Narita and A. Hagishima: A Simple Energy Balance Model for Regular Building Array, Boundary-Layer Meteorology (In Press), 2005
- 12) Tans P.P., Fung I.Y. and T. Takahashi: Observational Constraints on the Global Atmospheric CO₂ Budget, Science, Vol.247, pp.1431-1438, 1990.
- 13) 森信人, 角野昇八: 大気・海洋境界面における気泡と気体輸送, ながれ, 23, pp.37-46, 2004.