

# 都市における大気への熱流に関する研究（その2）

——臨海都市における熱流の測定解析——

赤川 宏 幸      小 宮 英 孝  
宮 川 保 之

## Research on Heat Fluxes to the Atmosphere in Urban Areas (Part 2)

——Observation of Heat Fluxes in Coastal Urban Areas——

Hiroyuki Akagawa      Hidetaka Komiya  
Yasuyuki Miyagawa

### Abstract

Daily variations of sensible and latent heat fluxes were observed on the same days in summer, autumn, and winter in the metropolitan center area, the waterfront area, and the bay of Tokyo by the eddy correlation method. Sensible heat fluxes in the center area approximately  $50\sim 100\text{ W/m}^2$  larger than those in the waterfront area and latent heat fluxes in the center area are approximately  $20\sim 70\text{ W/m}^2$  smaller than those in the waterfront area. In Tokyo Bay both sensible and latent heat fluxes are very small in summer as solar radiation is absorbed into the sea. However, this absorbed energy is discharged in autumn and winter. The average Bowen ratios in the center, the waterfront area and the bay are 2.0, 0.9, and 0.3, respectively, in summer and these values become larger in autumn and winter.

### 概 要

本研究では、渦相関法を用いて、都心、ウォーターフロントおよび東京湾上における顕熱流・潜熱流の違いを明らかにすることを目的として行ったものである。測定は、風速変動、温湿度変動、純放射量、屋上スラブへの伝導熱量または海水の鉛直温度分布についてで、1993年7月から1994年2月にわたり行われた。この結果、都心の顕熱流はウォーターフロントと比べて $50\sim 100\text{ W/m}^2$ 多く、潜熱流は $20\sim 70\text{ W/m}^2$ 少ないことが示された。海上では、夏季の顕熱流、潜熱流がともにわずかで、日射熱のほとんどが海水に吸収されており、秋季、冬季には熱流が増加し、海が大気を暖めていることが示された。顕熱流/潜熱流の値は、都心、ウォーターフロント、海上の順に小さくなり、夏季の値は都心で2.0、ウォーターフロントで0.9、海上で0.3となった。秋季、冬季の値は夏季より大きくなる。

### 1. はじめに

市街地では人工排熱量が多く、緑地面積が少ないことから水分蒸発量が少ない。このため地表から大気への顕熱流は市街地では郊外に比べて大きく、また潜熱流は逆に小さくなり、都市特有の気候（ヒートアイランド現象等）を形成すると考えられる。さらに臨海に立地する都市においては、海陸風の影響を受けるため、海水による熱的效果の影響が大きい。これまで、ヒートアイランドの気温分布や緑地の熱流測定に関する報告は多いものの、水域の効果をも含めた都市内外の熱流を同時に測定したものはほとんど見られなかった。

都市を含む地域において渦相関法により顕熱流を測定した例として、山本ら<sup>1)</sup>が航空機により千葉県および東京都上空を横断し、市街地における顕熱流は郊外の2倍程度であると報告している。片山ら<sup>2)</sup>はトラバース法を

用いて、水面を有する市街地において顕熱流の測定を行い、市街地と水面からの顕熱流の比較を行うとともにルイスの関係式より水面からの潜熱流を推定している。

海上における熱流は、渦相関法、プロファイル法等により測定されている。湾内の海上熱流を直接測定した例は少ないが、宇野木ら<sup>3)</sup>は10年前後にわたる東京湾周辺の陸上気象データを活用して、バルク法により熱流を求めている。

筆者らは既報<sup>4)</sup>で宇都宮市において市街地、住宅地、緑地の3地域で顕熱流・潜熱流を渦相関法を用いて測定した。この結果、市街地の顕熱流は住宅地、緑地に比較して $40\sim 100\text{ W/m}^2$ 多く、潜熱流は $20\sim 80\text{ W/m}^2$ 少ない。顕熱流/純放射量の値は市街地、住宅地、緑地の順に小さくなるとの結論を得た。

本報告は、臨海に立地する大都市の内外において渦相関法を適用し、顕熱流・潜熱流を明らかにすることを目

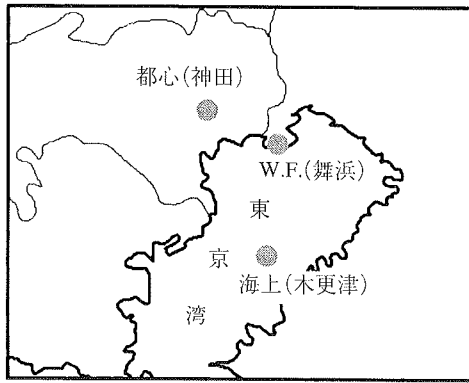


図-1 測定地点

表-1 各季の代表日

	都心, W. F.	海上 (参考)
夏	'93 8/11, 12, 13	'93 7/28, 29, 31 (8/11, 12)
秋	'93 10/26, 27, 28	'93 11/17, 19
冬	'94 1/23, 24, 25	'94 1/23, 24, 25

的として、都心、ウォーターフロント、東京湾上の3地点で気流、温湿度変動等の同時測定を行ったものである。夏季、秋季、冬季それぞれの同時測定が行えた3日間程度のデータを整理し、各地域における顕熱流・潜熱流の日変動を把握した。

—記号—

- HS : 顕熱流 ( $W/m^2$ )
- HL : 潜熱流 ( $W/m^2$ )
- QG : 屋上スラブへの伝導熱流 ( $W/m^2$ )
- QS : 海水中への熱流 ( $W/m^2$ )
- $R_n$  : 純放射量 ( $W/m^2$ )
- $T'$  : 温度変動 ( $^{\circ}C$ )
- $U_m$  : 平均風速 (m/s)
- $u'$  : 水平方向の風速変動 (m/s)
- $w'$  : 鉛直方向の風速変動 (m/s)
- Z : 高さ (m)
- $Z_0$  : 粗度定数 (m)

## 2. 測定概要

### 2.1 測定地点および測定期間

測定地点は東京の神田にある事務所ビル屋上(都心, 測定高さ約46m)、千葉県浦安市舞浜にある小学校屋上(ウォーターフロント, 同約13m)、同県木更津市の沖合い5kmにある測量台上(海上, 平均測定高さ約10m)の3地点である。図-1に、各測定地点の位置を示す。地形はいずれの地点も平坦である。都心は6~15階の商業建築、事務所ビルが密集している。ウォーターフロント(以下W.F.と略す)は主として画一的な2階建て戸建て住宅地域であり、公園、学校等が点在するとともに、測定地点の北、西側は道路等をはさんで運河がはしっている。海上は半径5km以内には障害物はなく、0~1.0m程

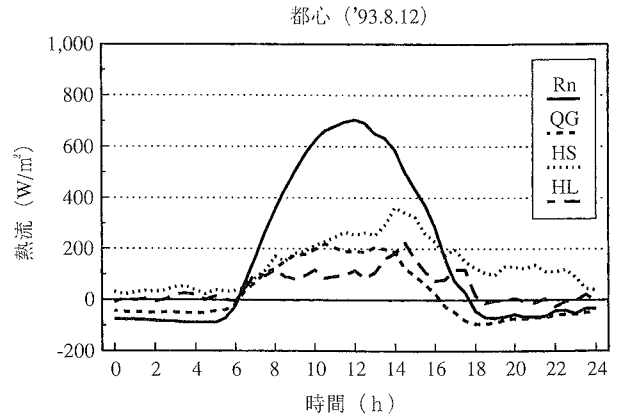


図-2(a) 夏季都心における熱流日変動

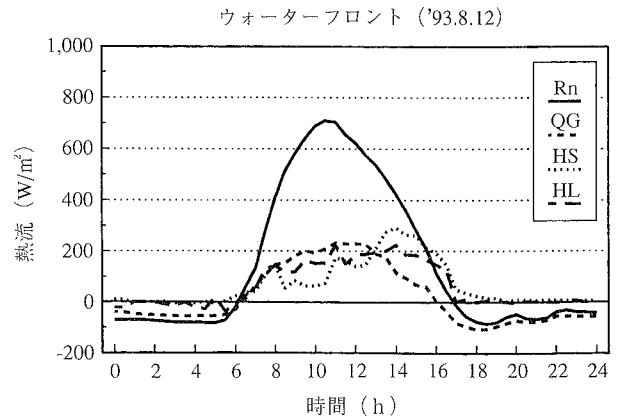


図-2(b) 夏季 W. F. における熱流日変動

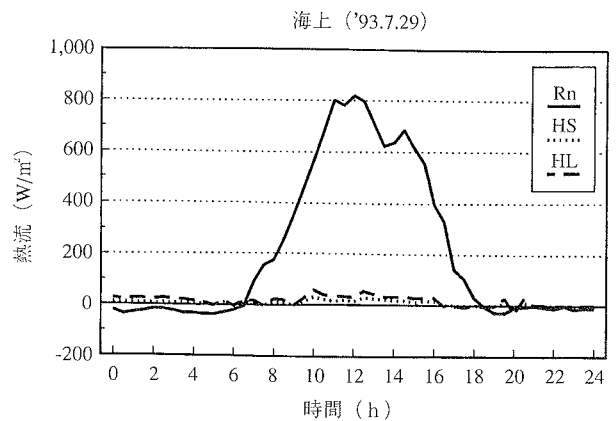


図-2(c) 夏季海上における熱流日変動

度の波高が多かった。

測定は、1993年7月から1994年2月まで断続的に行われたが、上記3測定地点において概ね同時測定が行えた表-1に示した日のデータを各季の代表とした。但し、海上地点においては、測定日が重ならない季節もある。また、各季とも概ね晴天日のデータが得られた。代表日の日平均気温(測定値)と代表日を中央とする1カ月間の晴天日だけの日平均気温(東京における気象庁のデータ)との差は、夏季、秋季、冬季それぞれ0.4、1.2、1.0 $^{\circ}C$ であり、各代表日は各季の晴天日を概ね代表していると考えられる。

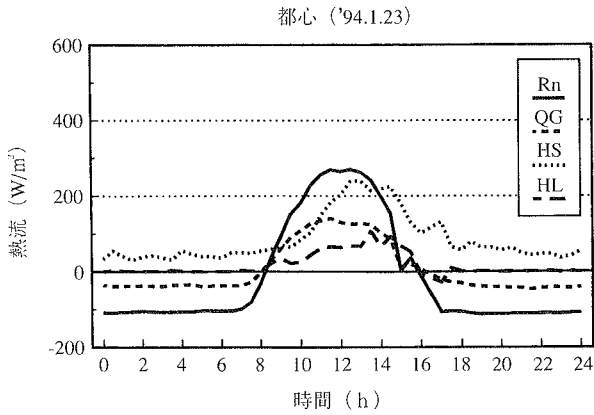


図-3(a) 冬季都心における熱流日変動

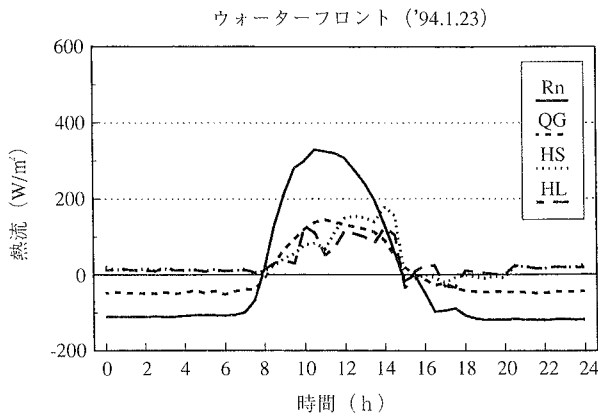


図-3(b) 冬季 W. F.における熱流日変動

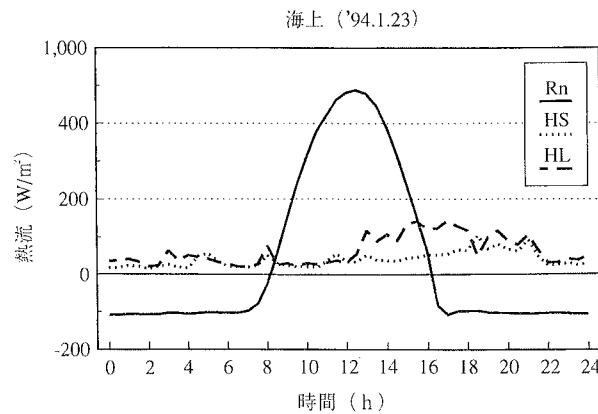


図-3(c) 冬季海上における熱流日変動

## 2.2 測定装置および測定方法

測定装置は既報<sup>4)</sup>とほぼ同様であるが、風速計を2次元から3次元に変更した。測定用ポール上に3次元超音波風速計、高感度極細K型(クロメル・アルメル)熱電対( $\phi 0.1$  mm)および高分子抵抗型湿度計を取り付け、水平・垂直方向の風速、温湿度を測定した。温度変動は基準温度を百葉箱中の厚さ5 mmの鉄筒中の温度とし、その温度との差を温度変動として記録した。絶対湿度は相対湿度から算出し、湿度変動を求めた。風速、温度、湿度は1秒間隔でデータレコーダに記録され、10分間の熱

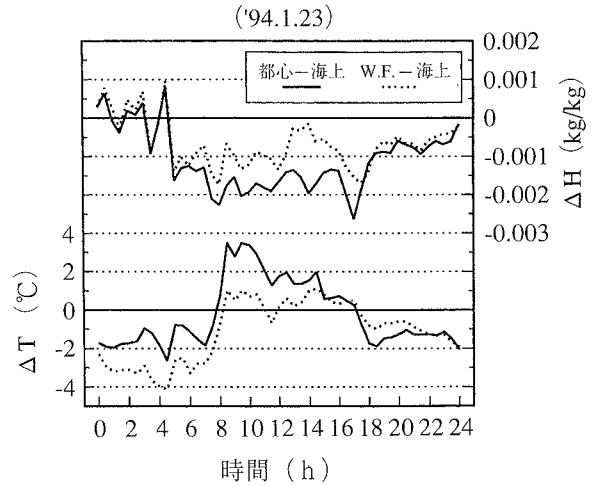


図-4 冬季の $\Delta T$ と $\Delta H$ (海基準)の日変動

流値を求めた後、30分間の平均値を用いた。詳細は既報<sup>4)</sup>に記載してある。その他、放射収支計により純放射量、熱流板により屋上スラブへの伝導熱流を測定した。海上の測定点では、海水温の垂直分布の計測を行った。水深25 mの測量台では、常時3, 12.5, 22 mの3点の計測が行われているが、熱流測定時にはさらに0.5 mから24 mまでの6点の計測を行った。

## 3. 測定結果

### 3.1 各季熱流の測定結果

測定データから各熱流を算出する方法については、既報<sup>4)</sup>に記載してあるので省略した。夏季における都心、W. F.および海上の熱流(純放射量 $R_n$ 、屋上スラブへの伝導熱流 $Q_G$ 、顕熱流 $HS$ 、潜熱流 $HL$ )の日変動を図-2(a), (b), (c)に示す。いずれも典型的な晴天日であり、都心、W. F.は8月12日を、海上は他地点と同一日の完全なデータが得られなかったので7月29日を示した。都心においては、屋上スラブへの伝導熱流が午前中に多く、午後は減少する。一方これに対応して顕熱流は午前中少なく午後増加する傾向が見られる。しかし風向風速による差異は見出せなかった。顕熱流のピークは約370  $W/m^2$ で午後2時頃出現し、夜間においても上向き50~100  $W/m^2$ 前後である。これに対して、日中の潜熱流は顕熱流の約半分の80~180  $W/m^2$ で明確な変動は見られず、夜間はほぼゼロとなる。

W. F.では都心と比較して、顕熱流の割合が小さくなり潜熱流の割合が大きくなる。日中の顕熱流は80~290  $W/m^2$ 、潜熱流は120~220  $W/m^2$ であり、顕熱流と潜熱流は概ね同程度である。さらに、両熱流とも午前より午後の方が大きく、午後2時頃ピークが出現するが、潜熱流は日変化が少ない。夜間は両熱流ともほぼゼロである。都心、W. F.における $R_n$ と $Q_G+HS+HL$ との差は、12時にそれぞれ145, 69  $W/m^2$ 、0時にそれぞれ-53, -19  $W/m^2$ である。また、この差は8時頃負から正へ、13時頃正から負へと移行する。これらの値には人工排熱量、屋上スラブへの伝導熱流 $Q_G$ と地域平均地盤伝熱量との

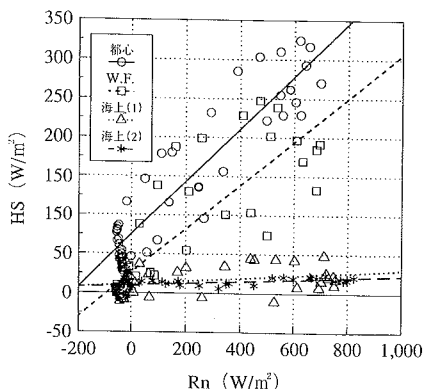


図-5(a) HS と  $R_n$  の関係(夏)

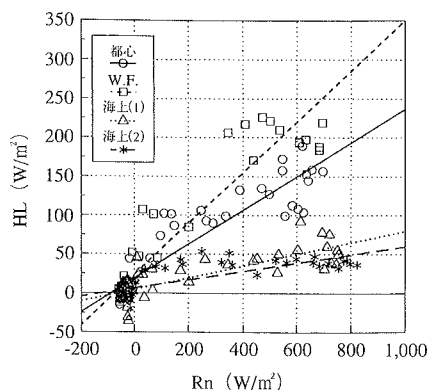


図-6(a) HL と  $R_n$  の関係(夏)

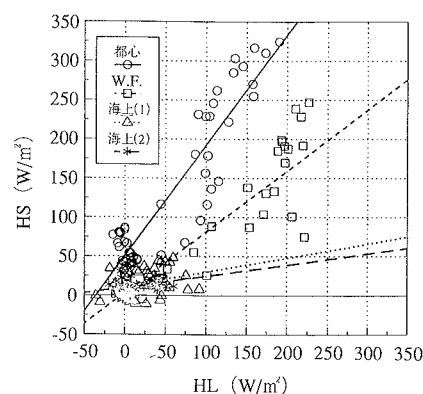


図-7(a) HS と HL の関係(夏)

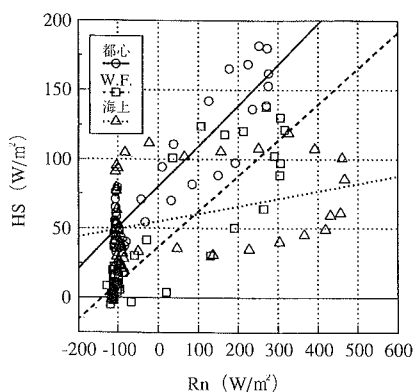


図-5(b) HS と  $R_n$  の関係(冬)

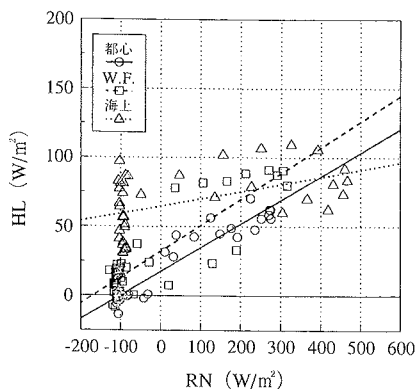


図-6(b) HL と  $R_n$  の関係(冬)

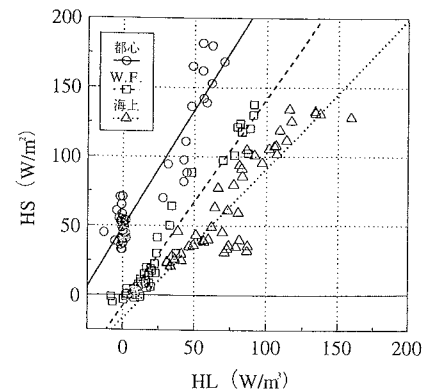


図-7(b) HS と HL の関係(冬)

差が含まれることになるが、日中は後者の影響が大きいと思われる。

海上では、一日を通して顕熱流、潜熱流ともにわずかで変化が小さい。 $R_n$  と  $HS+HL$  との差が地上の  $Q_G$  に相当し、その莫大な量が海に吸収される。

冬季における都心、W. F. および海上の熱流量の日変動を図-3(a), (b), (c) に示す。夏季と比較すると、純放射量が約半分になったのに対応して、都心、W. F. の日中の顕熱量はそれぞれ  $180\sim 220\text{ W/m}^2$ 、 $150\sim 180\text{ W/m}^2$ 、潜熱量は  $50\sim 100\text{ W/m}^2$ 、 $60\sim 120\text{ W/m}^2$  と減少している。なお秋季は夏季と冬季の間を推移している。海上では夏季と比較して、秋季、冬季と顕熱流・潜熱流ともに増加している。このことは、秋季から冬季にかけて海が大気を暖めていることを示している。また熱流の日変動を見ると、地上では純放射量との関係が見られるが、海上では大気湿度、海水温等により決定される。

冬季における海上を基準とした他地点との温湿度差の日変動を図-4 に示す。都心と海上との気温差は、夜間  $3\text{ }^\circ\text{C}$  程度、日中  $2\sim 3\text{ }^\circ\text{C}$  程度であり、W. F. と海上との気温差は、夜間  $2\text{ }^\circ\text{C}$  程度、日中  $1\text{ }^\circ\text{C}$  程度である。このことは、日中は海上よりも都心、W. F. といった陸上の気温が高いが、夜間は海水の熱容量の効果のために海上の方が都心、W. F. よりも暖かいことを示している。さらに、都心は周辺部 (W. F.) と比較して  $1\sim 2\text{ }^\circ\text{C}$  程度高温となっている。一方、絶対湿度は高い順に海上、W. F.、都心となり、都市が乾燥していることが示されている。夏季、

秋季における温湿度差の日変動も同様の傾向を示した。

### 3.2 純放射量、顕熱流および潜熱流相互間の関係

夏季、冬季の顕熱流  $HS$  と純放射量  $R_n$  の関係を図-5(a), (b) に、潜熱量  $HL$  と純放射量  $R_n$  の関係を図-6(a), (b) に示す。但し本章では、各季の平均日の熱流の値を用いている。都心と W. F. において顕熱流  $HS$  と純放射量  $R_n$  の間には概ね直線的な関係がある。都心の  $HS$  は W. F. に比べ、夏季では  $50\sim 100\text{ W/m}^2$ 、冬季では  $30\sim 50\text{ W/m}^2$  多い。 $HS/R_n$  の値は、都心では W. F. より大きく、夏季日中の値は都心で  $0.7\sim 0.45$ 、W. F. で  $0.4\sim 0.33$ 、冬季日中の値は都心で  $0.50\sim 1.1$ 、W. F. で  $0.38\sim 0.7$  である。さらに、都心と W. F. において潜熱流  $HL$  と純放射量  $R_n$  の間にも概ね直線的な関係がある。都心の  $HL$  は W. F. に比べ、夏季では  $20\sim 70\text{ W/m}^2$ 、冬季では  $10\sim 20\text{ W/m}^2$  少ない。 $HL/R_n$  の値は、W. F. では都心より大きく、夏季の値は W. F. で  $0.45\sim 0.37$ 、都心で  $0.3\sim 0.25$  である。また冬季には  $0.2$  前後となり純放射量  $R_n$  に対する割合も、地域差も小さくなる。

海上においては、顕熱流・潜熱流ともに純放射量  $R_n$  に対してほぼ一定値となっている。これは海水の熱容量の効果が大きく、海上における熱流と純放射量  $R_n$  との関係は余り意味を持たないことを示している。また夏季において異なる2期間のデータが比較的良く一致しているのは、熱流が少量で変化が少ないためである。

顕熱流  $HS$  と潜熱流  $HL$  の関係を図-7(a), (b) に示す。都心、W. F. において、顕熱流と潜熱流の間には、直

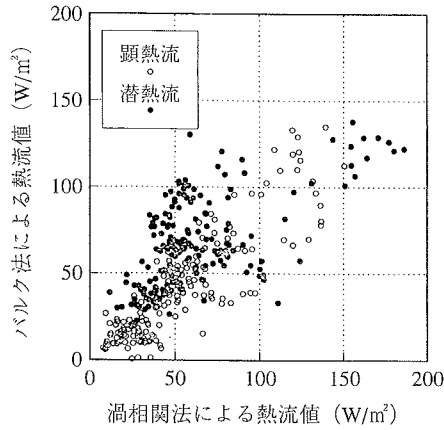


図-8 渦相関法とバルク法の熱流の比較

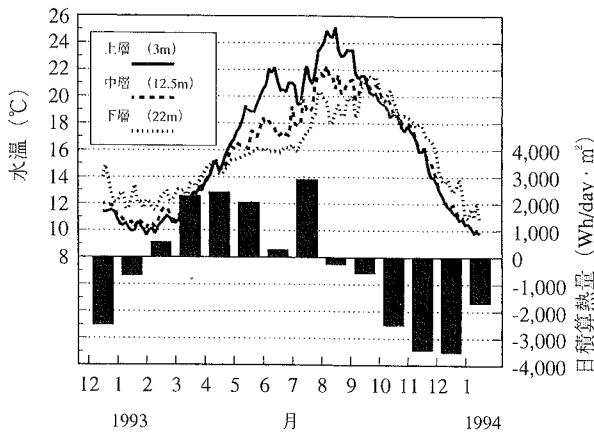


図-9 海水温変動と推定蓄放熱量

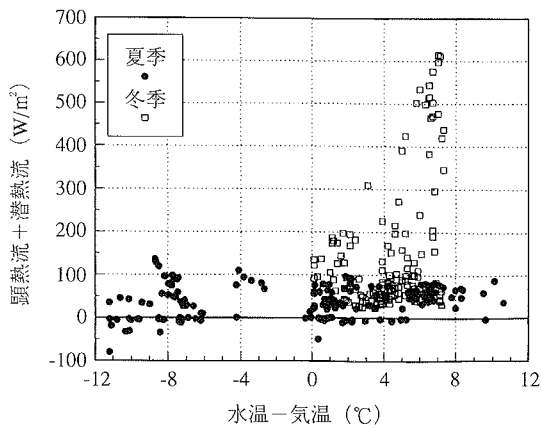


図-10 海水温-気温と顕熱流+潜熱流の関係

線的な関係がある。HS/HL の値は、都心、W. F.、海上の順に小さくなり、夏季の値は都心で2.0、W. F.で0.9、海上で0.3である。同一の順序で、冬季は3、1.5、1となる。この数値は平均的なボーエン比を示していることになる。

### 3.3 海水の熱的效果

渦相関法による熱流算出結果を検証するためにバルク法との比較を試みた。渦相関法とバルク法により求めた顕熱流・潜熱流の比較結果をそれぞれ図-8に示す。風速、大気湿度、海水温は測定地点における実測値を用

表-2 各季の日積算熱流

		Wh/day · m <sup>2</sup> (%)			
		都心	W. F.	海上(1)	海上(2)
夏	R <sub>n</sub>	4,042( 100)	3,686( 100)	5,200( 100)	4,752( 100)
	QG/QS*	566( 14)	444( 12)	4,434( 85)	3,949( 83)
	HS	3,212( 79)	1,670( 45)	311( 6)	332( 7)
	HL	1,393( 34)	2,043( 55)	455( 9)	471( 10)
	ΔQ*	-1,129( -28)	-471( -13)	-	-
秋	R <sub>n</sub>	880( 100)	888( 100)	1,038( 100)	-
	QG/QS*	136( 15)	-103( -12)	-1,886(-182)	-
	HS	1,893( 215)	1,289( 145)	899( 87)	-
	HL	635( 72)	620( 70)	2,025( 195)	-
	ΔQ*	-1,784(-203)	-918(-103)	-	-
冬	R <sub>n</sub>	-341(-100)	-382(-100)	696( 100)	-
	QG/QS*	121( 35)	-66( -17)	-2,752(-395)	-
	HS	1,819( 533)	791( 207)	1,597( 229)	-
	HL	359( 105)	656( 172)	1,851( 266)	-
	ΔQ*	-2,640(-774)	-1,763(-462)	-	-

\*: 計算値 都心、W. F.: 8/11, 12, 13 海上(1): 7/28, 29, 31 海上(2): 8/11, 12

いている。図に示されているように、顕熱流に関しては比較的良好な、また潜熱流に関してもばらつきはやや大きいものの平均的には一致する傾向が見られる。

海上の測量台において各水深別に測定された海水温変動、並びに海水温変動から求めた月平均の蓄熱量を図-9に示す。但し、同図の蓄熱量は、当月16日から翌月15日までの水温変動から求めた月平均値を一日当たり換算したものである。夏季は日射により表層が加熱されるため、上下の温度差が明確につく。一方、冬季は表層の冷却による対流の発達と風による海水の上下混合が進むためほぼ均一温度となる。また、冬季の下層の水温がやや高めで温度逆転が生じているのは、文献<sup>3)</sup>においても指摘されており、同文献によると海水温の逆転による密度の減少は、下層に向かっての塩分増加により補償され、密度逆転は生じていないとしている。

上述のように、海上での顕熱流・潜熱流は陸上のように明確な日変動を示さず、純放射量との相関は見られなかった。図-10は海水温と気温の差と熱流(顕熱流+潜熱流)との関係を夏季、冬季について示したものである。夏季は温度差にはよらず、わずかではあるが海から熱が放出されている。一方、冬季は温度差が大きくなるほど海から放出される熱流が増加する傾向にあり、温度差が熱流変化の主な要因の一つであることが分かる。

### 3.4 各点の熱収支

表-2に各季の平均日積算熱流を示す。平均日とは、複数日の同時刻の熱流を平均して求めているものを示す。本報告も既報<sup>4)</sup>と同様に、各季毎の表-1に示された3日間程度のデータから求めた。都心、海上の純放射量、都心の屋上スラブへの伝導熱流は、測定地点周辺の形態、材質等からおおよそ該当地域の値を代表しているものと思われる。W. F.において緑地を考慮すると、地域の平均的な値は測定値と比較して、純放射量は多めに、地盤伝熱量は少なめになるものと思われるが、緑地面積の割合が12%程度であることから、その差は大きくないものと

思われる。さらに、海上の場合の QS は  $R_n$  から HS+HL を引いた海水中への熱流であり、海水の移流、降雨等による熱の移動がないとした場合の測定地点における海水蓄熱量を示すことになる。同表による平均日の蓄熱量が、7, 8 月が +3,950, 4,340 Wh/day・m<sup>2</sup>, 11, 1 月が -1,890, 2,750 Wh/day・m<sup>2</sup> であるのに対し、図-9 に示された月平均の海水蓄熱量の変化を一日当たりに換算した値は、7~8 月が +約 2,910 Wh/day・m<sup>2</sup>, 11~12 月が -3,440 Wh/day・m<sup>2</sup>, 1~2 月が -1,680 Wh/day・m<sup>2</sup> である。平均日が快晴日のデータであることから、夏は蓄熱量が多めに、冬は放熱量が少なめに出ることを考慮に入れば妥当な値と言えよう。さらに宇野木らが、バルク法を用いた熱バランスから求めた蓄熱量の 7, 8 月の値は、+2,360, +1,540 Wh/day・m<sup>2</sup>, 一方 11, 12, 1 月の値は、-3,900, -4,110, -3,020 Wh/day・m<sup>2</sup> と図-9 の値と比較的良く一致している。都心、W. F. における  $\Delta Q$  は  $R_n$  と  $QG+HS+HL$  の差であり、この値には人工排熱量、屋上スラブへの伝導熱流 QG と地域平均地盤伝熱量との差が含まれている。都心、W. F. の夏季、秋季、冬季の値は、それぞれ 47, 74, 110 W/m<sup>2</sup> および 20, 38, 73 W/m<sup>2</sup> となる。この値は、既報<sup>4)</sup>の小都市の値よりも大きなものとなっている。

3.5 地表面粗度定数  $Z_0$

地表面粗度定数  $Z_0$  を Lumley ら<sup>5)</sup>の推定式である(1)式、(2)式より算出した。

$$\sqrt{w'^2} = \frac{0.4\alpha_z U_m}{\ln(Z/Z_0)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\sqrt{u'^2} = \frac{U_m}{\ln(Z/Z_0)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

但し、

$$\alpha_z = 1.25$$

以上の式は、基本的に中立状態の時に適合することから、 $U_m$  と  $\sqrt{u'^2}$  または  $\sqrt{w'^2}$  との関係は、風速がある程度大きくなるとほぼ直線となる。従って、 $Z_0$  はその時の  $U_m$  と  $\sqrt{u'^2}$  または  $\sqrt{w'^2}$  との関係を用いて算出したものである。各測定点における算出結果を表-3 に示す。都心で 6.6 m, W. F. で 0.55 m, 海上で  $2.2 \times 10^{-2}$  m という結果が得られた。都心は高さ 30~60 m のビルが多い地域で、得られた風速の最大値は約 4 m/s であった。W. F. は高さ 6 m 程度の戸建て住宅が多い地域で、得られた最大風速は約 8 m/s で、最も安定した粗度が得られた。海上は、0.5~1.0 m 程度の波高が多く、最大風速は 12 m/s 程度であった。

4. 結 論

1993年7月から1994年2月まで、都心、ウォーターフロントおよび東京湾において顕熱流・潜熱流の測定を行った。

結論を以下に要約する。

表-3 各測定点における粗度

	with $\sqrt{w'^2}$	with $\sqrt{u'^2}$	平均
都心	5.7	7.5	6.6
W. F.	0.57	0.52	0.55
海上	$1.9 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-2}$

① 都心の顕熱流は、W. F. と比較して 50~100 W/m<sup>2</sup> 多く、潜熱流は 20~70 W/m<sup>2</sup> 少ない。

② 顕熱流/純放射量の値は、夏季日中の都心で 0.7~0.45, W. F. で 0.4~0.33, 冬季日中の都心で 0.50~1.1, W. F. で 0.38~0.7 であり、秋季の値は、概ね同様である。潜熱流/純放射量の値は、W. F. は都心より大きく、夏季の値は W. F. で 0.45~0.37, 都心で 0.35~0.25 である。さらに秋季、冬季には 0.20 前後となり純放射量に対する割合も地域差も小さくなる。

③ 顕熱流/潜熱流の値は、都心、W. F., 海上の順に小さくなり、夏季の値は都心で 2.0, W. F. で 0.9, 海上で 0.3 である。秋季、冬季の値は夏季より大きくなる。

④ 海上では、夏季平均日における大気への熱流(顕熱流+潜熱流)が 766 Wh/day・m<sup>2</sup> とわずかであることから、海に日射熱がほとんど吸収されていること、秋季・冬季平均日における値は 2,924, 3,448 Wh/day・m<sup>2</sup> と増加することから、この時期、海が大気を暖めていることが明らかとなった。一方、水温変動から求めた平均的な海水蓄熱量の変化は、7月16日~8月15日が +2,910 Wh/day・m<sup>2</sup>, 11月16日~1月15日が -3,440 Wh/day・m<sup>2</sup> である。

⑤ Lumley らの推定式から求めた地表粗度定数  $Z_0$  は、都心で 6.6 m, W. F. で 0.55 m, 海上で  $2.2 \times 10^{-2}$  m であった。

謝 辞

本研究は宇都宮大学、岡研究室との共同研究であり、関係各位の御指導、御協力に謝意を表する。

参考文献

- 1) 山本 晋, 他 2 名: 飛行機による乱流フラックスの観測 (その 3), 日本気象学会春季大会講演予稿集, (1974)
- 2) 片山忠久, 石井昭夫, 他 4 名: 水平面を有する市街地の熱環境に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 372, p. 21~29, (1987. 2)
- 3) 宇野木早苗, 岸野元彰: 東京湾の平均的海況と海水交流, 理化学研究所海洋物理研究室, Tech. Rep. No. 1, (1977)
- 4) 小宮英孝: 都市における大気への熱流に関する研究 (その 1), 大林組研究所報, No. 48, p. 115~120, (1994)
- 5) Lumley, J. L., Panofsky, H. A.: The Structure of Atmospheric Turbulence, Interscience Publishers, (1964)