

埋立地と運河を含む沿岸域での微気象観測

中川 康之*・鶴谷 広一**・橋立 洋一***

1. はじめに

これまで埋立を中心とした沿岸域での開発が各地で進められてきたが、最近では空港島に代表されるような大規模な人工島形式の沿岸域利用も行われるようになった。この場合、それまで海面であった場所を陸域化することにより周辺地域の温熱環境にも影響を及ぼすことが予想される。今後の新たな埋立を伴う開発や、あるいは産業構造の改編による大規模な沿岸域の再開発も考えられるが、より快適な沿岸域の空間利用を可能とするためにも計画段階において対象地域の熱的環境の変化を考慮することは大変重要である。沿岸域を対象とした温熱環境に関するこれまでの研究としては、粗度や地表面温度の変化に伴う海風の内部境界層の発達への影響を数値的に検討したもの(木村・竹内, 1978; 河原ら, 1994)や、埋立地造成前後の気象データの比較からその影響を検討した例(武若ら, 1995)がある。また砂浜域を対象とした現地観測と数値シミュレーションにより、海岸空間における温熱環境の検討も行われている(灘岡ら, 1996)。

ところで、近年増加しつつある人工島形式の埋立の場合には周囲に運河等の残水面が存在するため、埋立地によるヒートアイランド化が懸念される一方で、水面による気候緩和効果が期待できる。そこで本研究では、埋立地や残水面の温熱環境を定量的に予測可能な手法の開発をめざし、まずは実態の把握を目的とした現地観測とその結果を基にした熱収支解析を行うことにより埋立地周辺の温熱環境について検討した。

2. 観測概要

(1) 観測場所および時期

観測は東京湾のほぼ湾中央部西岸に位置する神奈川県川崎市の東扇島と京浜運河を隔てた対岸の千鳥町にて(図-1)、1995年9月13日の午前6時より午後6時まで行った。ここでは、夏季に海風が吹き込む際の熱源と

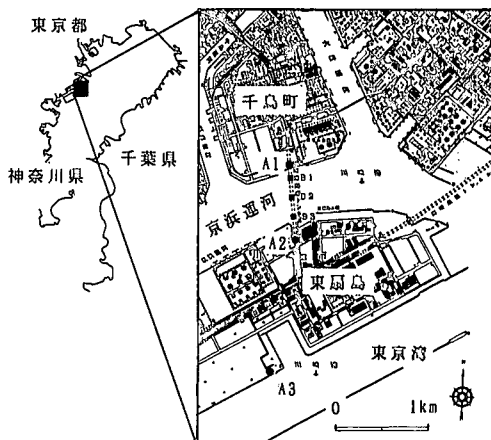


図-1 現地観測実施場所

としての埋立地の影響と、運河域による気候緩和効果を調べることを主たる目的としていることから、海風の埋立地への流入時、埋立地通過後、さらに運河域通過後における各点での大気の状態を測定するため、図-1中A1～A3の3箇所に気温、湿度、風向、風速の鉛直分布等の測定点を設けた。また運河内においても同図中B1～B3の3カ所において水温の鉛直分布および風速、気温、湿度等の測定を船上にて行った。

尚、観測期間中の天候は移動性高気圧の影響により、晴で雲もほとんど無かった。

(2) 観測内容

a) 係留気球による鉛直分布測定

上述のA1～A3地点において係留気球ゾンデにより、気温、相対湿度、風向、風速の鉛直分布測定を1時間毎に行なった。測定高度は50mまでとし、バルーンの上昇途中に所定の観測高度(1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50m)で1分間係留し、その時の各測定項目の平均値を求めた。ただし、A1～A3地点が比較的近接していたためゾンデからの無線を地上部で受信する際に混線する恐れがあったので、A3地点での観測を毎正時に開始し、終わり次第以下A2, A1地点の観測をそれぞれ行った。

b) 地上部での測定

A1～A3各地点での地上部では長さ5mの観測用

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部水理研究室

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部環境評価研究室長

*** 正会員 (現)高知県土木部港湾局長
(前)運輸省第二港湾建設局 工務第一課長

ポールに風車型微風向風速計と白金抵抗・静電容量式温湿度計を取付け、地表付近での風向・風速ならびに気温・湿度の測定を行った。また、熱収支を算定する際に必要となる正味放射量を全地点において放射収支計により測定し、A3地点では日射計、赤外放射計による短波放射、長波放射量それぞれの測定も行った。短波、長波各放射量については対象領域の空間スケールから1カ所での値で代表できるものと考え、A3地点のみでの測定とした。さらにA3地点では地中温度と地中伝導熱の測定を水銀棒状温度計と熱流量計を用いて行った。

また、図には示していないが埋立地域内と千鳥町側の内陸域(A1地点より3km内陸の地点まで)の複数点において、通風式アスман乾湿計による気温・湿度の移動測定を路上にて行った。

c) 運河域での測定

さらに運河域では図-1中のB1~B3の3カ所にて、STD計による塩分、水温の測定と風向・風速(ビラム式風向風速計)および気温、相対湿度(通風式アスманの乾湿計)の測定を船上にて行った。ただし、同運河は船舶の航行が頻繁であるため、計測時にアンカー等による作業船の係留は困難であったため、風向・風速の測定精度は著しく低いものと思われ参考データとして取り扱った。

3. 観測結果

(1) 観測期間中の風の変化

まず、観測当日(9月13日)にA3地点に設置された観測ポールの高度5mにおいて測定された風向・風速の結果を図-2に示す。今回の観測目的は海風時における埋立地の熱源としての影響と、その背後の運河域による気候緩和効果を検討することであり、したがって南(S)から南西(SE)の範囲の方向より吹く風が観測条件として好ましいことになる。図-2からわかるように、観測当日の風は午前中は北東(NE)よりの風が吹いていたが、午後1時過ぎから南よりの海風が安定して吹くようになり、その強さは午後3時以降では5m/s程度となっている。尚、A3地点は港湾施設としての岸壁整備中の土地であり、周囲には特に建造物はないため今回の観測対象領域の代表的な風向・風速を表していると考えられる。

(2) 地上部での気温・比湿

図-3は観測期間を通じてのA1~A3地点の地上部で計られた高度5mでの気温と比湿の経時変化を示したものである。まず気温についてみると埋立地内のA2地点での値が、他の2点に比べて常に高くなっていることがわかる。一方、比湿については正午頃までは全地点とも同様な値を示していたのに対し、その後はA3以外の地点での比湿の減少が顕著である(この差は相対

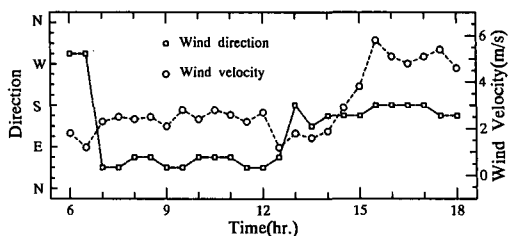


図-2 観測期間中の風向・風速

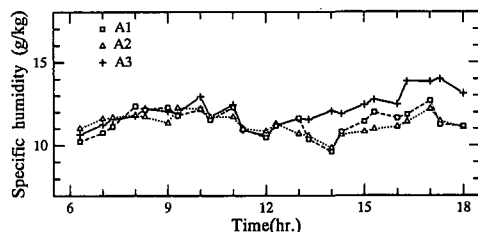
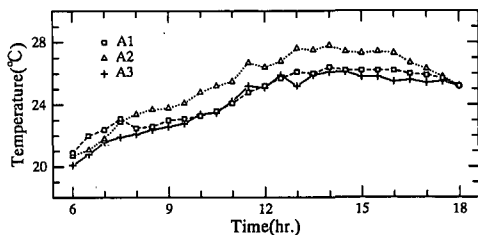


図-3 気温・比湿の日変化

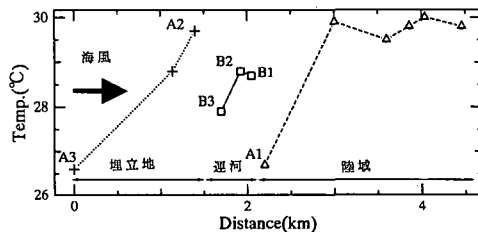


図-4 地上気温の空間変化

湿度として比較した場合には現れない)。ここで注目したいのは、このA1, A2地点での比湿の急激な減少が先に示した風向の結果(図-2)において風向きが南に変わった時期にぴたりと一致していることである。これは先に示した風のデータ(図-2)における風向の変化、すなわち風向きが南よりに変わった時間にぴたりと一致していることが両図の比較からわかる。つまり午後2時過ぎから吹き始めた海風が埋立地を横切る際に乾燥化し、それがA1地点にも影響しそこでの比湿も減少したものと思われる。さらに、海風の風速が大きくなる時間帯(午後3時以降)においてはA1地点での比湿がA2地点に比べて大きくなっており、運河水面からの水蒸気の供給がさかんにおこなわれてるようになった結果と思われる。

る。

なお午前中の比湿の結果については、いずれの地点でもほとんど同程度の値となっているが、これは北西の風が運河とほぼ平行な方向から吹いてくるため水面上を十分な距離だけ吹送してきた大気が各地点に到達しているためと考えられる。

一方、移動観測により測定された地上部(高度1 m)での気温(午後2時台)の空間分布を図-4に示す。これを見ると、運河を横断することによる大気の冷却効果があるものの、約1 km内陸に入ると地上気温はすでに3°C近くも上昇している。内陸域の地上部では建物や排気ガス等の廃熱の影響を強く受けることになるが、冷涼な海風を利用したこれらの地域の気候を緩和するには別途検討が必要である。

(3) 運河域の水温と気温、比湿の日変化

幅約500 m運河域のほぼ中央で計られた表層水温(T_s)、水面上3 mにおける気温(T)と比湿の測定結果を図-5に示す。水温の日変化量は非常に小さく、午後1時から4時を除いては水温の方が高くなっている。一方、A1地点の気温および比湿($z=2.4$ m)と運河水面上のそれらを比べると、いずれも運河部のほうが常に高い値となっている。

(4) 海風時の風速、気温、比湿の鉛直分布

海風が埋立地域および運河域の横断する際の大気状態の鉛直構造の変化をみるため、係留気球により午後3時台に測定された各点での風速、気温、比湿の鉛直分布を図-6に示す。まず、埋立地域を横断した後(A2)の結果を海風の進入時(A3)と比べてみると、地表面粗度の増加や人口廃熱等の影響によると思われる風速、気温、比湿の全ての鉛直分布の変化が生じていることがわかる。しかも、埋立地上空での高温・乾燥化は今回の観測高度である地上50 m以上にまで及んでいる。一方、この高温・乾燥化した空気が運河水面上を横断したA1地点では、A2地点に比較して気温が低減し比湿も上昇しており、水面の影響は高度50 m以上にまで及んでいることがわかる。尚、夕刻の日射量の減少による気温の低下がおこるまでは、海風が吹いている期間の測定結果はいずれもこれと同様な傾向となっている。

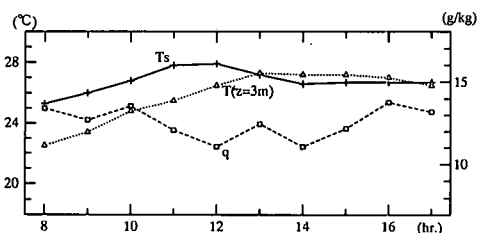


図-5 運河における水温と気温、比湿

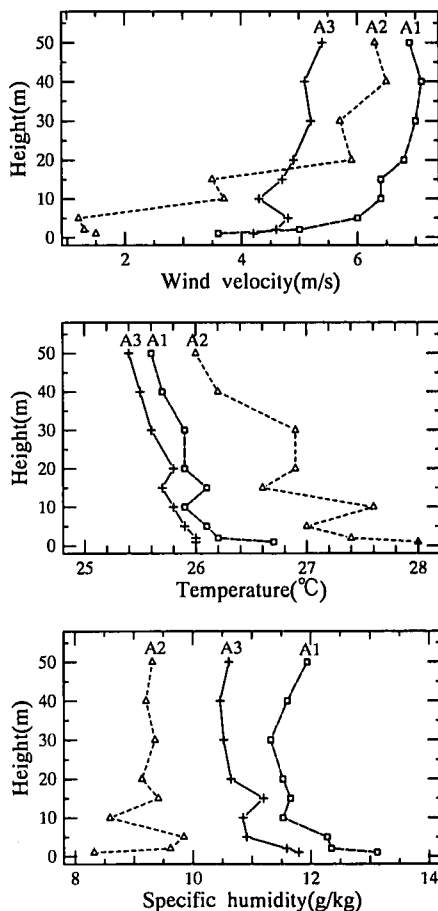


図-6 風速、気温、比湿の鉛直分布

以上の結果より、海風は埋立地域にて高温、乾燥化が著しく進行するものの、背後の運河水面の影響により対岸の地点では埋立地による上記の影響はかなり軽減されていることがわかった。

4. 熱収支の計算

観測により得られたデータを基に、これらの地域での温熱環境を把握するため熱収支の計算を行った。さて、ここで注目している海風はまず埋立地上を通過し再び水面(運河域)を通過することになるわけだが、そこでは地表面の粗度や温度の変化により各領域ごとに内部境界層が形成されていることになる。この過程のイメージを表したものが図-7である。つまり海上において十分発達した境界層の大気が埋立地に入ると、まずそこでの地表条件の影響を受けた内部境界層が発達する。さらに運河域においては水面に支配される新たな境界層が発達するため、二重に内部境界層が形成されているものと考えられる。しかるに、先の観測結果(図-6)においてA3とA2、あるいはA2とA1の各鉛直分布を比較す

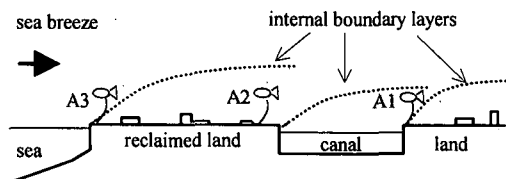


図-7 海風時の埋立地および運河域での境界層の発達のイメージ図

ることにより、各領域での内部境界層の厚さは観測高度（50 m）以上にまで達していると考えられる。その場合には、A2、A1各地点での係留気球による測定結果は、埋立域内および運河域内に形成されたそれぞれの内部境界層の内部における鉛直プロファイルを表していることになる。この考え方の基に、埋立地域および運河水面を対象とした以下の熱収支の計算を海風が吹いている時間帯について行った。

まず地表面での熱収支式は次式で表される。

$$R_{\text{net}} = H + IE + G \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R_{net} ：正味放射量、 G ：地中または水中への伝導熱、 H ：顕熱フラックス、および IE ：潜熱フラックスである。一方、顕熱および潜熱フラックスの算定には傾度法の一環である逐次近似の解法（竹内・近藤，1981）を利用した。ただし、その際に風速、気温、および比湿の鉛直勾配を規定する各普遍関数（ $\phi_{M,H,E}$ ）については、大気の状態が不安定である場合を対象とした以下の実験式（例えば近藤，1994）を用いた。

$$\phi_M = (1 - 16\xi)^{-1/4} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_H = \phi_E (1 - 16\xi)^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\xi = z/L \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$L = \frac{u_*^2}{\kappa(g/T_0)T_*} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 κ ：カルマン定数（=0.4）、 g ：重力加速度、 L ：モニン・オブコフの安定度スケール、 u_* ：摩擦速度、 T_* ：摩擦温度、 T_0 ：場の平均気温である。

（1）埋立地表面での熱収支

まずA3地点の地上部で測定された正味放射量（ R_{net} ）、さらに地中温度と地中熱伝導度の実測値から算定した地表面での地中伝導熱 G （地中方向を正とする）の結果を図-8に示す。ところで、当観測地点は当時岸壁として整備中の未舗装の土地であり、地表面は極度に乾燥した裸地であるため、日中の潜熱フラックスはほとんど無いものとここでは仮定した。すると、ここでの顕熱フラックスは式（1）により残差として推定可能となり、その結果も図-8に示した。この計算によると、午後1時の測定時には顕熱フラックスが400 W/m²を越える大きな値となっており、埋立地上空の大気の加熱に寄与して

いることがわかる。

一方、A2地点での係留気球による測定結果のうち、解析可能な時刻のデータから傾度法を用いて顕熱フラックスを求めた結果も図-8中に H' として示してある。ただし、A2地点は公園内の広場を利用していたがその周囲は2~3 m程度の木立に囲まれているため、5 m以下のデータにばらつきが大きいことから高度10 m以上のデータを用いて顕熱フラックスを推定している。これを見ると、先に貯熱量 G の残差として求めた H の値よりもかなり大きな値を示す場合があるが、その理由としては、まずA3地点は護岸までの距離も比較的小さい周囲には特に建造物もない場所であるのに対し、そこからA2へ到達するまでの間には高速道路や倉庫等が立地していることから、A2地点では人工的な廃熱の影響を受けていることが考えられる。また係留気球の鉛直分布データからフラックスを推定する際には、本来は埋立地内の建造物等によるキャノピーを考慮する必要があるが、ここではその影響は無視して計算を行っていることも理由として考えられる。

（2）運河水面での熱収支

運河水面では作業船の動揺により正味放射量の測定が困難であることから、A3地点で測定した短波および長波放射量の実測値と水面でのアルベドを0.07と仮定し、また表層水温の実測値から赤外放射量を求め最終的に R_{net} を算定した。さらに、A1地点は運河に面した公園内

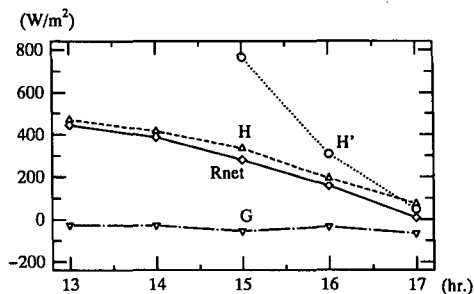


図-8 埋立地表面での熱収支

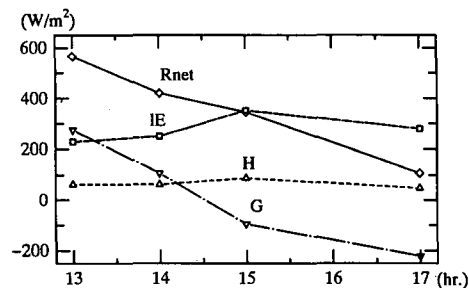


図-9 運河水面での熱収支

の護岸上に位置し、そこでの測定値は水面上の結果とほとんど変わらないものと考え、風速、気温、比湿の鉛直分布から傾度法により運河水面での顕熱フラックスおよび潜熱フラックスを求めた。図-9に午後1時以降のこれらの解析結果を示す。ここで埋立地の結果(図-8)と大きく異なるのは、貯熱量 G および潜熱フラックス IE の値が大きく日中の高温時にそれらは $200\sim 300\text{ W/m}^2$ 近くもある。これに対し埋立地域では 400 W/m^2 以上もあった顕熱フラックス H がここでは数十 W/m^2 程度に抑えられている。なお、参考のため船上で計測された風速と気温からバルク法により顕熱フラックスを求めるとほとんどゼロに近い結果となった。河川水面における同様な効果はすでに確認されているが(武若ら, 1994), 水温が比較的高い(今回の観測時には 27°C 前後)運河域でも気温の高い日中には貯熱効果と水蒸気供給による気温上昇の抑制効果があることが確認された。

5. おわりに

沿岸埋立地を海風が横断する際のそこでの大気への影響と、埋立地背後の運河による気候緩和(クールアイランド)効果を現地観測と熱収支解析により検討した。まず現地データの取得においては、埋立地域を横切るように進入した海風が埋立地上で高温・乾燥化している現象を的確に捉えることに成功した。とくに埋立地での比湿の減少が顕著であり、背後の運河水域では大気への水蒸気の補給と貯熱効果により埋立地の影響を軽減するように機能していることが明らかとなった。また気温の上昇量あるいは各地表面での熱収支の関係など、埋立地周辺での温熱環境を定量的に把握することができた。ただし、

今回の顕熱フラックスの算定には係留気球の測定結果を用いたが、わずか1分間の平均値からでは傾度法には適用が困難なデータ等もあったことから、フラックス算定における精度の改善を行う必要があると思われる。

なお、今回は現地観測を中心とした実態把握の検討にとどまったが、今後は埋立や残水面の規模あるいはそこでの土地利用形態の違いによる温熱環境の影響評価予測手法の開発をすすめていく予定である。

謝辞: 本現地観測は運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所、川崎港事務所(高木幸夫所長)の協力の下に実施されたことをここに記して心より謝意を表する次第である。また現地観測では港湾技術研究所水理研究室の野村賢之研究員、中官利之研究員(現漂砂研究室)、工藤雅春研究員の献身的な協力を得たことを付記する。

参考文献

- 河原能久・川又孝太郎・玉井信行(1994): 臨海部の開発が海風と都市熱環境に及ぼす影響に関する数値実験, 環境システム研究 Vol. 22, pp. 274-279.
- 木村富士男・竹内清秀(1978): 海風によるいぶし現象の数値実験, 気象研究所報告, 第29巻第1号, pp. 17-28.
- 近藤純正(1994): 水環境の気象学, 朝倉書店, 337 p.
- 竹内清秀・近藤純正(1981): 大気環境講座1・地表に近い大気, 東大出版会, 226 p.
- 武若 聡・池田駿介・平山孝浩・萱場祐一・財津知亨(1993): 都市内河川による大気冷却効果, 土木学会論文集 No. 479/II-25, pp. 11-20.
- 武若 聡・草場智哉・入江 功(1995): 海岸埋立が沿岸都市の気象に及ぼす影響, 海岸工学論文集第42巻, pp. 1146-1150.
- 灘岡和夫・内山雄介・山下哲弘(1996): 海岸空間アメニティ構成要素としての微気象および温熱環境の解析, 土木学会論文集 No. 533/II-34, pp. 193-204.