原著論文

都市内河川による暑熱環境の緩和効果

菅原 広史¹⁾ 成田 健一²⁾

1) 防衛大学校 地球海洋学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

2)日本工業大学 建築学科 (〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)

河川による都市暑熱環境の緩和効果について、実測データを基にその物理的なメカニズムを議論した.河川上で は海風の進入に伴い、水面からの加熱よりも大きな鉛直上向きの顕熱輸送が見られ、河川上の気温は市街地よりも さらに低温となった.乱流変動の4象限解析により、この上向きの熱輸送は上空からの冷気の下降によるものであ ることが明らかとなった.上空の低温の空気塊が、河川において都市キャノピー内に取り込まれていることが示さ れた.

水深が深ければ日中の水温は気温より低温となり、河川水面での顕熱輸送は下向き(大気を冷却)となる.一方、 浅い水面では水温が気温よりも高温となる.夜間はこの水温と気温の差が日中とは逆になる.これらは日中の正味 放射の大部分が貯熱に配分されるためである.河川を活用して暑熱環境の改善をはかる場合は、効果を得る時間帯 (昼か夜)により適切な水深が異なることに注意が必要である.

キーワード:都市気候、ヒートアイランド、温熱環境、熱収支、風の道

I.研究の背景

都市では全球規模の地球温暖化よりも速いペース で気温が上昇している(気象庁,2001).都市の温 暖化は,夏季におけるエネルギー消費の増加や,熱 中症などの健康影響(井原・玄地,2008)により人 間生活に直接的な影響を与える.都市温暖化現象の 主要な原因のひとつとして非透水地表面での顕熱 フラックスの増加がある(木村,1992).このため 平成16年に制定されたヒートアイランド対策大綱 (ヒートアイランド対策関連府省連絡会議,2004) では地表面被覆の改善を対策のひとつに挙げ,河川 などの水辺の再生を具体策のひとつとして示してい る.韓国ソウル市で行われた河川復元では暑熱環境 の改善が報告されている(松本ら,2009).

河川による暑熱緩和効果についてはいくつかの観 測研究がある.Suzuki (1999) は荒川において河川 と周辺市街地との熱収支の違いを明らかにしたうえ で,低温な水面の影響は上空200 m程度まで及ぶこ とを示している.また,成田ら(2001) は隅田川に おいて河川からの冷気が周辺市街地へ300~400 mに わたって流出することを示している.成田・鍵屋 (2010)はこれら既往研究を整理し、河川による気 温低下の物理的なプロセスとして次をあげている. ①低温な河川水,②沿岸域における低温な海風の水 平方向の誘導、③オープンスペースであることによ る市街地の風通しの促進である.図-1にこれらを 模式的に示す.河川の活用により暑熱緩和の効果を 得るためには、これら各プロセスの物理的な理解が 必須であるが、研究の現状は必ずしも十分であると は言いがたい.例えば①については多くの既往研究 (武若ら、1993;成田ら、2001)で取り上げられて



図-1 河川による気温低下の物理的プロセスの模式図 Fig. 1 Physical mechanism of cooling by a river.

きたが、一方で学術論文においても、"河川が低温 である理由は蒸発潜熱である"、という誤った解釈 が示されている場合がある.また、③の「風通し」 については、プロセスの理解に必要な実測研究が不 足している.既往研究(例えば、松本ら、2009;橋 本ら,2001;森脇ら,2012) において③のプロセ スが存在する根拠は、風速と気温に負の相関(強風 の地点ほど低温)が存在するという観測事実である. ただし,森脇ら(2012)は河川水の有無(出水,瀬 切れ)にかかわらず河川上での気温が周囲より低く なっていることを示している. これらの既往研究か ら③は、①とは別のプロセスとして存在すること、 また河川の幾何形状に起因するメカニズムであるこ とがわかる.幾何形状に起因するのであれば、低温 な海風に限らず上空に強風が吹いた時も③が顕在化 すると考えられる.このように鉛直方向の熱輸送が 「風通し」のメカニズムであると考えられる(持 田・石田, 2009)が、熱輸送を実際に野外で観測し た研究例はほとんどない、持田・石田(2009)が指 摘するように,ある場所での風通しの改善は,上空 大気の加熱を伴うため,風下での熱環境を悪化させ る可能性がある.この問題を解決するには、「風通 し|による熱輸送量を定量的に評価する必要がある.

以上の背景から本研究は大横川(東京都江東区) における実測データをもとに,先に述べた①水面の 冷熱効果,および③風通しの2つについて議論する. 大横川は川幅が20m程度の比較的規模の小さい都市 内河川である.既往研究ではどちらかというと隅田 川(東京)のような大規模な河川が対象とされてき た(成田ら,2001;Suzuki,1999).しかし,小河 川は都市内のオープンスペースであることから,街 区の換気(風通し)に寄与していると考えられる (橋本ら,2001).また,人間の生活空間のごく近傍 に存在することから小河川は親水公園などとして活 用されることがあり,暑熱緩和効果の点では検討に 値する.

なお、本研究では河川による気温低下を議論する が、一般には暑熱環境の改善策として体感温度の低 下もある.河川における体感温度の低下には、河岸 の緑陰による日射遮蔽や低温な河川水および風通し が重要となる(環境省,2010).気温と体感温度で はそれぞれを支配する物理プロセスが異なるため、 暑熱環境緩和策としても明確に分けて議論する必要 がある.

Ⅱ.測定と気象概況

実測は東京都江東区にある大横川について行っ た.水深の異なる2地点を観測対象とし、周辺市街 地においても気温の測定を行った.以後,それぞれ の地点を浅水面,深水面と呼ぶ.両地点は海岸から 約6 km内陸にあり,水面観測地点はいずれも河川が 南北方向に向いている.図-2に観測地点の概要を, 表-1に測定項目と測定高度を示す.長期測定 (2007年7月~8月の約2ヶ月間)では主に河川及び周 辺市街地での気温と風速の測定を行い,短期測定 (2007年8月18~21日)では水面の熱収支や河川上で の乱流フラックスの計測を行った.深水面地点は川 幅が20 mで平均水深が2 m,干潮による水位変動が 1.5 m程度ある.浅水面地点は1600 m²ほどのエリア に人工的に水を入れた河川で,水深は数センチ程度 である.

短期測定では両地点において、3次元超音波風速 計(Kaijo WAT-359)による渦相関法による顕熱フ ラックスの測定を行った.浅水面地点では図-2(B) の中央に見えるやぐらに測器を設置した.深水面地 点では、図-2(A)の矢印の地点で、護岸から2m, 平均水面から3.5 mの位置に測器を設置した.複雑 地形上において渦相関法を用いる際は、風速データ の座標変換を行い、気流に対して直交上向きのフ ラックスを算出するのが一般的である(塚本ら、 2001).一方、キャノピー内では気流場が複雑な構 造をしていることから、座標回転を行っていない研 究もある(Christen *et al.*, 2009).本研究では McMillen(1988)による2回の座標回転を適用した

表-1 測定項目と測定高度

Table 1 Specification of measurements. Measurement height is shown in brackets.

	長期測定 (2007年7月~8月)	短期測定 (2007年8月18~21日)
深水面	水面上の短・長波放射量 気温(高度2.6 m) 風速(高度5.1 m) 水温(水深0.2, 0.3, 0.5 m)	3次元超音波風速温度計に よる乱流計測(高度3.5 m)
浅水面	水面上の短・長波放射量 気温(高度1 m) 風速(高度3.5 m) 水温(水深1 cm)	3次元超音波風速温度計に よる乱流計測(高度1m)
市街地	気温(地上高3.5 m)	道路面の表面温度(放射温度計) 風速(2次元超音波風速計, 地上高3.5 m)





- 図-2 観測地点の地図と測器の設置状況.地図中のSが浅水面,Dが深水面,丸印,菱印,三角印,がそれぞれ気温, 道路面温度,気温と風速の観測点.写真A:深水面.写真奥が南で下流側.矢印が測器の位置.写真B:浅水 面.写真奥が北で上流側.
- Fig. 2 Observation sites. S and D on the map respectively denote shallow and deep water sites: circles, temperature measurements; diamonds, road surface temperature measurements; triangles, temperature and wind measurements. Panel A: Deep water site seen from north (upstream side). An arrow indicates the sensor position. Panel B: Shallow water site seen from south (downstream side).

結果を示す. 座標回転を行わなかった場合と比べて, フラックス値には日中(9-16時)の平均で10 Wm⁻² (深水面), 3 Wm⁻²(浅水面)の違いがあったが, 日変化の傾向には違いはなかった.

本論文では水表面温度として,水面上で測定した 上向き長波放射量からステファンボルツマン則によ り算出した温度を使用する.その際水面の射出率を 0.98とし水面での反射・射出の補正を行った.また 長波放射計と水面との間での放射の吸収・射出の影 響は1 Wm²以下であったため無視した.

Ⅲ. 冷熱源効果

1. 水温と気温の関係

図-3に水表面温度と気温,道路面温度の日変化 を示す.道路面は南北,東西それぞれの方向の街路 において,アスファルト面の表面温度を放射温度計 により計測したものである.

日中,深水面では表面温度が気温より低く,浅水 面では逆になっている.しかし,夜間には浅水面が 深水面および気温よりも低温である.すなわち,冷 熱源効果という点から見れば,より低温(有効)な 水面が日中と夜間で異なる.この違いについて検討



図-3 水表面温度,気温と道路表面温度.2007年8月21日.道路面温度は日向・日陰および道路方位(EW:東西, NS:南北)で分けてある.*T*。表面温度,*T*。気温.

Fig. 3 Diurnal variation of water surface temperature (T_s), air temperature (T_a), and road surface temperature (sunny area and shadow area). EW and NS respectively indicate street orientations. 21 August 2007.

するため、次節で水面の熱収支を議論する.

日中の浅水面では表面温度が気温より高く,水面 は大気を加熱している.ただし,それでも日向道路 面よりは低温であり,顕熱輸送効率(バルク係数) の違いを考慮しても,顕熱量は浅水面の方が日向ア スファルト面よりも小さい.すなわち,気温より高 温の浅水面であっても日向アスファルト面よりは暑 熱環境の緩和に寄与している.暑熱環境の緩和策を 議論する際には,大気に対する積極的な冷却(マイ ナスの顕熱輸送)と顕熱輸送量の相対的な抑制とい う2つの視点を混同しないように注意する必要が ある.

2. 熱収支

水面の熱収支を次の方法で推定した.4成分放射 計により測定される正味放射量と,バルク法により 得られる顕熱・潜熱フラックスを用い,水中貯熱量 は収支の残差として求めた.バルク係数は次の方法 で求めた.深水面においては熱収支残差として得ら れる水中貯熱量と,水温(3深度)の時間変動から 計算される貯熱量の比較を行い(図-4),両者が合 うようにバルク係数を決定した.

水温から貯熱量を算出する際,水平移流は無視している.その理由は次の2つである.近藤(1995)に よる河川水温の時間変化を参考にすると,源流から



図-4 水温から推定した貯熱量 (S_{wi}) と熱収支残差 (S_{res})の比較. 深水面.水深は相対値である.

Fig. 4 Comparison of heat storage by water at deep water site: S_{wt} , evaluated from water temperature; S_{res} , evaluated from the heat budget; water level is a relative value.

流れ出た水は水深にもよるが数日程度で周辺環境に 馴染む.また都市内河川では例えば道路に降った雨 水が高温の状態で河川に流入することがあるが(木 内ら,2004),図-4に示す期間の8日前まで1 mm/日 以上の降水は観測されていない.ただし,図-4を見 ると夕方の時間帯に大きな差が現れており,これは 満潮時に海水が逆流することにより熱の移流が生じ 水温の時間変化が大きくなったためであると考えら れる.

バルク法は蒸発量を推定する有用な方法である

が、地表面状態によって異なるバルク係数を既知と して与える必要がある.深水面で得られたバルク係 数(0.003)は、近藤(1994)による有限広さの水面で の値とほぼ一致した.このとき吹走距離は風上側の



 図-5 バルク法 (bulk) と渦相関法 (eddy) による顕熱 フラックス測定の比較.浅水面.

Fig. 5 Comparison of sensible heat flux at a shallow water site:bulk, evaluated using bulk method; eddy, evaluated using eddy correlation method. 橋までの距離として50 m, 平均風速2 m/s, 風速計 の水面からの高さ3.7 mとした.なお,潮汐による 水位変動のため気温と風速の測定高度が変化する が,気温と風速のプロファイル関数を元に検討した ところ水位変動によるバルク係数の変化は4 %程度 であったのでバルク係数は一定値とした.

浅水面では、短期測定期間に行った乱流計測によ り得られた顕熱フラックス(図-5)を真値として、 バルク係数を求めた.図-5には最適化したバルク 係数による顕熱フラックスも示してある。午前中に バルク法の過小評価が見られるのは、この場所の東 西が高い建物で囲まれており水面が部分的に日陰と なるためである。バルク法で用いた水表面温度は長 波放射計で測定した半径1 m程度の領域の温度であ るため、建物の日陰に入ると周囲の日向の水面より も低温となる.なお深水面で浅水面と同様の方法で バルク係数を求めなかったのは、設置許可の問題か ら水面近傍に計測機器を設置することができなかっ たためである.



以上の方法で推定した水面の熱収支を図-6に示

図-6 バルク法により推定した水面熱収支. A:深水面, B:浅水面. R_{net} 正味放射量, H 顕熱フラックス, IE 潜熱フ ラックス, S_{res} 貯熱, T_s 表面温度, T_a 気温.



す.深水面では日中の正味放射量(R_{net})の大部分 が水中への貯熱(G)に配分されており,蒸発潜熱 (IE)よりも大きい.日中(10-15時)の積算値で比 をとると G/R_{net} は0.7である. IE/R_{net} は0.1ほどしかな い.すなわち,日中の表面温度を低く抑えている主 要な要因は潜熱ではなく大きな貯熱である.なお, 浅水面では G/R_{net} は0.2, IE/R_{net} は0.4である.潜熱の 割合が大きいのは表面温度が高いことの表れである とも言える.

また,深水面で夜間の表面温度があまり下がらないのは,日中の大きな貯熱のためである.浅水面では日中の貯熱が少ないために夜間は深水面よりも低温となる.したがって,水深が水温の日変化を特徴付ける要素となっている.暑熱環境緩和策としてアスファルトなどの人工地表面を水面へと改修する場合は,水深に配慮する必要がある.今回の浅水面では,水温が市街地の気温より4℃以上高い状態が見られている(図-3).浅い水溜りのような水面では日中の緩和効果はあまり期待できない.

Ⅳ.風の道効果

1. 河川による市街地への海風導入効果

図-7に観測地点周辺での8月19日の風の状況を示 す.この日は典型的な海風前線が見られた日で,内 陸側の北千住では湾岸部の新木場より遅れて海風前 線の通過に伴う風向変化及び風速増加が見られる. 図-7の観測地点データから推察される大横川地点 での海風通過時刻は8時である.図-8(A)には深 水面地点で測定された風向風速を示す.8時に風速 の増加が見られ,この時刻に海風前線が通過したこ とがわかる.風向に変化が見られないのは,右岸左 岸それぞれに建物が立ち並んでいるためと考えられ る.市街地では上空風向に関わらず道路(ストリー トキャニオン)に沿った方向の風が吹くことが知ら れている(Sugawara *et al.*, 2008).

海風前線通過時の気温(図-9(A))を見ると, この時刻を境に気温上昇の鈍化が見られる. 観測地 点は海岸から6 kmの位置にあり, Suzuki (1999)に



図-7 風の日変化.8月19日.矢印が風向あるいは風速の変化から推定される海風進入時刻.新木場は気象庁のアメ ダス,小岩および北千住は(株)ライフビジネスウェザーによる建物屋上での測定値.黒四角が本研究の観 測地点.

Fig. 7 Diurnal variation of wind. 19 August. Arrows indicate passage of the sea breeze front: Shinkiba, routine observations by Japan Meteorological Agency; Koiwa and Kitasenju, observations by Life Business Weather Inc. Filled square shows observation sites set up for this study.

よれば、東京での海風は内陸20 km程度まで低温な 空気塊として到達する.したがって、この上昇鈍化 は海風による冷却があったためと言える.同様の現 象は片山ら(1990)でも指摘されており、これを根 拠として河川には都市に海風を導き入れる効果があ るとされている.さらに、上昇鈍化の開始時刻は河 川の方が市街地よりも10分程度早いことがわかる. 図-9(B)にはこの時間差がより顕著に見られた例



図-8 深水面における各要素の日変化. 8月19日. Fig. 8 Diurnal variation of meteorological factors. 19 August.

(8月7日,時間差39分)も示した.両日とも海風進 入を境に気温差が増大し,河川が市街地よりもさら に低温になっている.観測期間中に見られた全18事 例での海風前線通過の時間差を図-10に示した. 河川では市街地よりも平均で12分早く海風前線が通 過している.

河川による海風導入効果の原因は,河川が市街地 に比べて幾何学的に開けた構造となっているためと 考えられる.深水面地点での天空率(天空のうち遮 蔽されずに空が見えている割合.ここでは天頂角の 重みをつけない値)は68%であるのに対して,周 辺市街地での平均的な天空率は48%である.図-11に図-9(A)と同じ日の,河川と市街地での風速 を示した.市街地では気流が複雑な分布をしており, さらに風速計は街路灯に添わせる方式(街路灯と風 速との距離は50 cm)で設置したため,数地点程度 の測定では市街地の代表風速を得ることは難しい. 少なくとも図に示した地点では海風前線通過後の風 速の増加は河川のそれよりは顕著ではなく,河川は 市街地よりも風通しが良いことがわかる.



図-10 海風進入の時間差(市街地マイナス河川). Fig. 10 Delay of sea breeze front passage in downtown areas relative to the river.



図-9 河川上と市街地での気温変化(8月19日と8月7日). 矢印は海風前線の通過時刻. 測定間隔は2分. Fig. 9 Time series of air temperatures above the river and in downtown areas. Arrows indicate the passage of a sea breeze front. The data time interval is 2 min.



Fig. 11 Time series of wind speed above the river and in downtown areas. 19 August.

2. 河川における上空への熱輸送

風通しによる河川での気温上昇抑制について熱輸 送の観点から見てみる. 図-8(C) に深水面地点の 河川上での乱流計測で得られた顕熱フラックスを 示す.図にはバルク法により求めた水面での顕熱フ ラックスも示した.8時の海風前線の通過に伴い, 河川上の顕熱フラックスが増加し12時には40 Wm⁻² に達している.水面での顕熱フラックスは5 Wm⁻²以 下であり、河川上の大気は水面から加熱される以上 に上空へ放熱している. それでも気温が低下しない のは水平方向からの熱の流入のためである. 市街地 と河川で大きな気温差があることを考えれば、市街 地の熱が河川上へ流入していると考えられる.これ は市街地からすると河川に冷却されていることを意 味する.この顕熱フラックスの増加と同時に、河川 では気温上昇が鈍化し、市街地との気温差が大きく なっている.12時には水面の顕熱フラックスは負 (大気を冷却)となっており、河川上での空気塊は 上下両面から冷却されている.この事例では風通し による冷却は低温な水面による冷却よりも大きい.

河川上の顕熱フラックス増加の原因を調べるため、このフラックスの成分を検討する. 渦相関法により測定される顕熱フラックス<T'w'>は変動成分の符号により次の4つの成分に分解できる.

①暖気の上昇(T'>0,w'>0,i=1)
 ②冷気の上昇(T'<0,w'>0,i=2)
 ③冷気の下降(T'<0,w'<0,i=3)
 ④暖気の下降(T'>0,w'<0,i=4)
 これら各成分の寄与をS_iで表す.

$$S_i = \frac{\langle T'w' \rangle_i}{|\overline{T'w'}|} \tag{1}$$

$$\langle T'w' \rangle_i = \frac{1}{\tau} \sum_j T'_j w'_j I_i$$

$$I_i = \begin{cases} 1 \ (i - th \ quadrant) \\ 0 \ (otherwise) \end{cases}$$

$$(2)$$

$$|\overline{T'w'}| = \frac{1}{\tau} \sum_{j} T'_{j} w'_{j} \tag{3}$$

である. T' は温度変動, w' は鉛直風速の変動であ り, <> は時間平均を意味する. 顕熱フラックスが 正(熱が上向きに輸送)の場合, S₁とS₃が熱輸送の アクティブな成分であり, S₁は暖気上昇, S₃は冷気 下降の寄与率である. なお式(2)右辺を条件付総 和にして,比較的大きな乱流変動のみを解析対象と する方法もあるが,ここでは測定された全ての大き さの乱流変動を解析対象とした.本研究の事例では 顕熱フラックスは比較的大きな乱流変動で構成され ており,平均値の10倍以上の乱流変動のみを対象と して顕熱フラックスを求めても,全データを用いて 求めた顕熱フラックスの70%に達した.

 S_I , S_3 の時系列(図-8(D))を見ると,海風前線 通過時に S_3 が S_I に比べて相対的に増加している.す なわち,冷気下降成分が増加することにより顕熱フ ラックスが増加したことがわかる.冷気下降成分に ついて詳しく見るため図-12に海風前線進入前後



図-12 気温(T')および鉛直風速(w')の乱流成分. 海風前線通過前(07:00)と通過後(10:00). nは各象限のデータ数. Fig. 12 Turbulence components of air temperature (T') and vertical wind speed (w'): n denotes the number of data; before passage of sea breeze front (07:00) and after passage (10:00).

での乱流成分を示した.第1象限(暖気上昇)と第3 象限(冷気下降)を比較すると,変動の出現数はど ちらの時刻でもほぼ同じであるが,海風進入後に第 3象限では大きな(原点から離れた)変動成分が増 えている.この大きな変動が図-8(D)で見られた S_3 の増加の原因である.なお,ここで言う「冷気」 とは地表面付近と比べて相対的に低温な上空の空気 塊のことを指している.海風による輸送されてきた (陸よりも低温な)海上の空気塊とは限らない.

ここで、海風進入後の熱輸送について鉛直スケー ルを検討する.計測された温度変動は、上空の空 気塊が断熱的に降下して計測機器の高度に達した ことで現れたと考える.海風進入後に見られるよ うになった温度変動の代表値を1 Kとし、大気成層 が中立であると仮定すると、大気の乾燥断熱減率 (9.8 K/km)から約100 mの高度にあった空気塊が地 表付近に達したものと考えられる.不安定成層し ている場合、この高度は低くなる.Yoshikado and Kondo (1989)の観測事例によれば海風の厚さは最 大で1.5 km、午前の早い時間でも数百メートルはあ ると考えられることから、本研究で見られた冷気下 降は海風層内の現象であると言える.

このような海風進入に伴う冷気下降の増加には次 の2つ原因が考えられる.A)海風の進入による風 速の増加という力学的な原因,とB)海風により上 空に低温空気塊が流入したことで大気成層が不安定 化する熱的な原因である.Aは海風に限らず陸側か らの風でも風速の増加により発現するプロセスであ る.一般に海風の進入により風速は増加し,上空で の風速の増加によりキャノピー内への運動量輸送が 増大する.Bについては本研究では地表面付近(都 市キャノピー内)での計測しか行わなかったため, 明らかにすることができなかった.

V. 結論

都市内の河川による暑熱環境の緩和効果につい て、実測データを基に議論した.河川が持つ熱環境 緩和のメカニズムには2つ考えられる.ひとつは河 川が都市キャノピー内の連続したオープンスペース であることから得られる風通し(街区の換気)効果 である.もうひとつは低温の水面による冷熱源効果 である.小規模河川は市街地におけるオープンス ペースとなることから、換気を促進する効果が特に 期待される.本研究では、小規模河川に注目し、大 横川(東京都墨田区)において微気象および熱環境 の実測を行った.それぞれのメカニズムについて以 下の知見を得た.

換気効果については、これまで概念的に議論され てきたメカニズムを熱輸送量という形で定量的に示 した.海風前線の通過に伴い河川上では、水面から の加熱よりも大きな上向きの顕熱輸送が見られ、河 川での気温は市街地よりもさらに低温となった.上 向きの熱輸送には暖気の上昇よりも冷気の下降が、 大きく寄与していた.すなわち上空の低温な空気塊 が地表面付近に取り込まれ、河川が市街地よりも低 温となっていることが示された.ただし、ここで見 られた換気効果が、風速の増加によるものなのか、 あるいは海から陸へ流入した(陸上よりは)低温の 空気塊によるものなのかは明らかにすることができ なかった.海風ではなく例えば陸側からの風であっ ても,風速の増加により同様の換気効果が得られる 可能性がある.

冷熱源効果については,昼と夜の効果が逆になる ことを示した.さらにそれは水深によっても異なる. 浅水面の水温は気温に対して,日中に高温,夜間に 低温となる.深水面では逆に日中に低温であった. 河川の活用により暑熱環境の緩和をはかる場合,対 象とする時間帯(昼夜)と水深を適切に選択する必 要がある.このような違いが生じるのは,水体への 貯熱フラックスが水深に強く影響を受けるためであ る.日中,太陽から水面が受ける正味放射量は大部 分が貯熱に配分されており,蒸発の潜熱輸送よりも 貯熱の方が大きかった.

謝辞

本研究は環境省による「都市内水路等によるヒー トアイランド抑制効果に関する検討会」の一部とし て実施されたものである.検討会委員の皆様には検 討会内外の場でも様々なご助言をいただいた.計測 に当たっては(社)環境情報科学センターの石丸 泰氏にご尽力いただいた.

引用文献

- Christen A, Rotach MW, Vogt R. 2009. The budget of turbulent kinetic energy in the urban roughness sublayer. *Boundary-Layer Meteorology* 131:193-222. DOI: 10.1007/s10546-009-9359-5.
- 橋本 剛・舩橋恭子・堀越哲美 2001. 海風の運河遡上による都 市暑熱環境の緩和効果:名古屋市の堀川及び新堀川における 事例.日本建築学会計画系論文集 545:65-70.
- ヒートアイランド対策関連府省連絡会議 2004. "ヒートアイランド 対策大綱" ヒートアイランド対策, http://www.env.go.jp/air/life/ heat_island/taikou.pdf. (参照:2011/12/21).
- 井原智彦・玄地 裕 2008. 被害算定型ライフサイクル影響評価 手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価. 日本建築 学会環境系論文集 73:1407-1415.

- 環境省 2010. 暑熱環境緩和のための都市内水路活用ガイドラ イン.環境省;90.
- 片山忠久・石井昭夫・西田 勝・林 徹夫・堤 純一郎・塩月義 隆・北山広樹・高山和宏・大黒雅之 1990. 海岸都市におけ る河川の暑熱緩和効果に関する調査研究.日本建築学会計画 系論文報告集 418:1-9.

木村富士男 1992.都市の熱汚染.大気汚染学会誌 27:A87-A94.

- 木内 豪・中山 有・森脇 亮・神田 学 2004. 都市集水域にお ける水・熱輸送の実態解明とモデリング 久が原水文気象観 測データに基づいて.水工学論文集 48:175-180.
- 気象庁 2001. 20世紀の日本の気候. 気象庁; 30-32.
- 近藤純正 1994.水環境の気象学.朝倉書店; 168-174.
- 近藤純正 1995.河川水温の日変化(1)一計算モデル-異常昇 温と魚の大量死事件一.水文・水資源学会誌 8:184-196.
- 松本 太・ーノ瀬俊明・白木洋平・李 龍太 2009. 都市内河川 の大規模復元による「風の道」の効果に関する気候学的研 究一韓国ソウル市清渓川を事例として一. 日本生気象学会誌 46:69-80.
- McMillen R.T. 1988. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorology* 43: 231-245. DOI: 10.1007/BF00128405.
- 持田 灯・石田泰之 2009. 風の道. 天気 56:571-572.
- 森脇 亮・亀井祐紀・藤森祥文 2012.瀬切れによる河川表面水 の消失が河川近傍の温熱環境に及ぼす影響.土木学会論文集 B1(水工学)68:1747-1752.
- 成田健一・鍵屋浩司 2010. 臨海都市における中小河川の風の 道としての効果 東京・目黒川における微気象観測. 日本 建築学会環境系論文集 75:637-644.
- 成田健一・植村明子・三坂育正 2001. 都市気候に及ぼす河川 水の熱的影響に関する実測研究 隅田川における熱収支と周 辺影響の検討.日本建築学会計画系論文集 545:71-78.
- Sugawara H, Hagishima A, Narita K, Ogawa H, Yamano M. 2008. Temperature and wind distribution in an E-W-oriented urban street canyon. *Scientific Online Letters on the Atmosphere* 4: 53-56. DOI: 10.2151/sola.2008-014.
- Suzuki C. 1999. A Climatological Study of the Cooling Effect of Urban Rivers on Heat Island Phenomena. Doctor Thesis of Tokyo Metropolitan University; 46.
- 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~都市内河川内外の夏期の熱環 境および気象観測~.土木学会論文集 479:11-20.
- 塚本 修・文字信貴・伊藤芳樹 2001. 乱流変動法による運動 量・顕熱・潜熱(水蒸気)フラックス測定. 気象研究ノート (地表面フラックス測定法、塚本 修・文字信貴編) 199; 19-55.
- Yoshikado H, Kondo H. 1989. Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo. *Boundary-Layer Meteorology* 48; 389-407. DOI: 10.1007/BF00123061.

(受付:2012年1月4日,受理:2012年7月30日)

Mitigation of Urban Thermal Environment by River

Hirofumi SUGAWARA¹⁾ Ken-ichi NARITA²⁾

 Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy of Japan (Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka, Kanagawa, Japan)

> 2) Department of Engineering, Nippon Institute of Technology (Gakuendai 4-1, Miyashiro, Minamisaitama, Saitama, Japan)

Rivers in cities mitigate thermal environments on hot summer days. This paper presents a discussion of physical mechanisms of that mitigation effect using field measurements taken in downtown Tokyo.

Because of heat transfer upward over river surfaces affected by sea breezes, air temperatures near rivers are lower than those in surrounding urban areas. Quadrant analysis revealed that this upward transfer results from the downward motion of colder air, not upward motion of heated air. The cold air mass above intrudes into the hot urban surface layer at the river space.

In daytime, deep rivers have a water surface that is colder than the air. Consequently, heat is transferred to the water surface. However, shallow river water heats air. The temperature difference between the water surface and the air above reverses at nighttime. These features are attributable to the fact that most net radiation at the water surface is partitioned into heat storage. The effective depth of water for thermal mitigation depends on the time of day.

Key words : urban climate, heat island, thermal environment, heat balance, ventilation path