

1. はじめに

近年深刻化しているヒートアイランド現象緩和対策の一つに、河川の冷源を効果的に都市部に引き込む「風の道」の創出がある。この河川が周辺に与える熱環境緩和効果を評価することは重要であり、村川ら¹⁾をはじめ多くの研究者が河川周辺で気象観測を行っている。しかしそれらの観測は事例研究として完結しており、一般論への展開や現象の理解にまで至っているものは少ない。また、水面幅50m以下の小河川周辺の気温特性については、事例はあるものの評価が不十分である。本研究は水面幅や風、周辺土地利用等が異なる様々な都市河川周辺で気象観測を行い、河川の持つ熱環境緩和効果を定量的に評価することを目的としている。

2. 河川周辺における気象観測の概要

2.1 大河川周辺における気象観測

図-1に各観測サイトの位置関係、表-1に各観測サイトの概要と観測項目を示す。大河川である荒川は複断面形状を有しており、水面幅は200~440mで、下流ほど水面幅が大きい。サイト1は河川が西から東に流れるのに対して日中に南からの海風が河川を横切るように吹いている。一方、サイト2,3は北から南に流れる河川を遡上するように南風が吹いている。また、サイト1,2は堤防の一部が高規格堤防で整備されている。

観測は土地利用や堤防形状の違いごとに河川直交方向に観測ラインを設け、機材を設置し気温、湿度、風向、風速の定点観測を行った。また、定点観測では捉えられない空間的に高密度な計測をするため、機材を持ち運び移動しながら計測を行う移動観測を同時に行った。

2.2 小河川周辺における気象観測

小河川である目黒川は単断面河道で、水面は地上から5~8m低い所にある。水面幅はサイト内の上流側が12~15m、下流側が25~30mとなっている。河川右岸側の50~300mに河川と平行して片側2車線の自動車道路があり、この自動車道路と河川の間には5階建て以上のビル・マンション等が立ち並んでいる。

小河川の持つ熱環境緩和効果を詳細に捉えるために、観測機器を河川周辺に高密度に設置し定点観測を行った。また、定点観測でも捉えることのできないさらに空間的に高密度な計測を行うため、自転車や徒歩で移動しながら1秒間隔で気温計測を行う移動観測を同時に実施した。

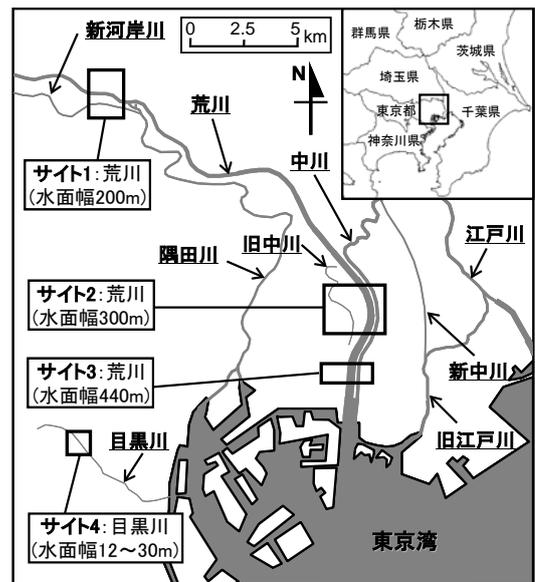


図-1 気象観測を行った全4地域の位置関係

表-1 観測サイトの概要と観測項目一覧

対象河川	水面幅	河口からの距離	エリア面積	対象エリアの風況	周辺の土地利用	観測実施期間	観測項目(カッコ内は計測高度)					
							平面気温 [固定]	鉛直気温 [固定]	風向・風速 [固定]	平面気温 [移動]	風向・風速 [移動]	日射量 [固定]
荒川	200m	21~23km	2.2km ²	河川が西から東に流れているのに対し河川を横断する南風が吹く。	左岸側の河口から21~22kmまでの1km区間に高規格堤防が整備されている。堤内は低層住宅地域である。	2006/7/12~8/22 (42日間連続)	32地点 (1.5m)	3地点 (1~15m)	5地点 (15m)	—	—	1地点 (15m)
	300m	6~8km	2km ²	河川が北から南に流れているのに対し河川を遡上する南風が吹く。	上流側から低層住宅、高規格堤防が整備されている高層住宅、公園地域となっている。	2006/8/4, 7 (7:00~18:00)	—	—	4地点 (2.5m)	—	—	1地点
	440m	3.5km	—	左岸側に水面幅140mの中川が平行に流れている。堤内は低層住宅地域である。	2010/8/22 (9:30~18:30)	5地点 (3m)	1地点 (0.25~7m)	1地点 (2m)	1ライン (1.5, 3m)	—	—	1地点 (2m)
目黒川	12~30m	4~7km	3km ²	河川は北西から南東方向に流れている。地上風は複雑な構造をしており、水面幅の狭い上流部は上空の風によって河川を遡上する風、横断する風が吹いている。下流部は河川を遡上する風が吹いている。	河川右岸側の50~100m離れた場所に河川と並行して片側2車線の自動車道路がある。河川と自動車道路の間には高層住宅が立ち並び、他のエリアは低層住宅地域である。河川両岸には植生が立ち並んでいる。	2007/7/18~8/31 (45日間連続)	24地点 (1.5, 2.5m)	5地点 (2~44m)	4地点 (25~44m)	—	—	1地点 (44m)
						2007/8/7, 10 (8:00~18:00)	—	—	79地点 (1.5m)	79地点 (1.5m)	—	—
		4.8~6.2km	1.5km ²	2008/7/23~9/5 (45日間連続)	63地点 (2.5m)	—	5地点 (3.5m)	—	—	—	—	1地点 (44m)
				2008/8/1, 9 (8:00~18:30)	—	—	—	9ライン (1.5m)	96地点 (1.5m)	—	—	—
				2009/7/24~8/26 (35日間連続)	6地点 (3.5m)	—	6地点 (3.5m)	—	—	—	—	1地点 (44m)
2009/8/7, 12 (9:00~17:00)	2地点 (2m)	2地点 (0.25~4m)	2地点 (2m)	8ライン (1.5m)	11地点 (1.5m)	—	—	—	—			

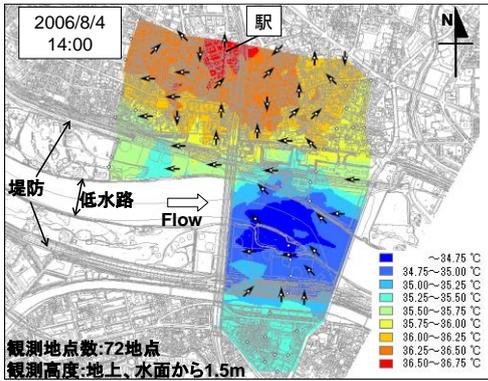


図-2 大河川(水面幅 200m)周辺における気温の平面分布(サイト1)

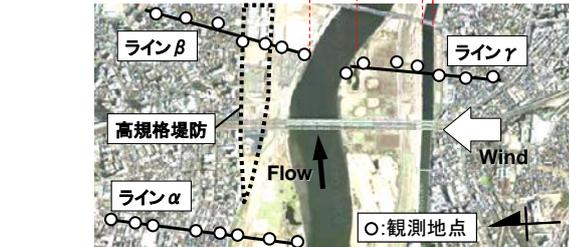
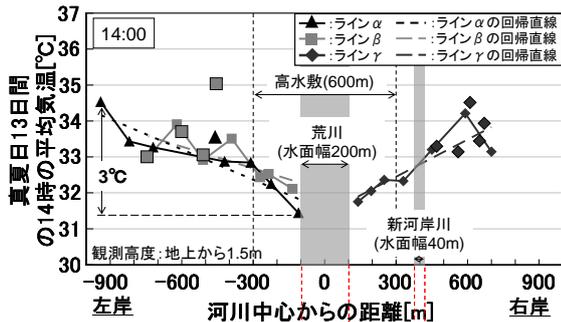


図-3 大河川(水面幅 200m)からの距離と気温の関係(サイト1)

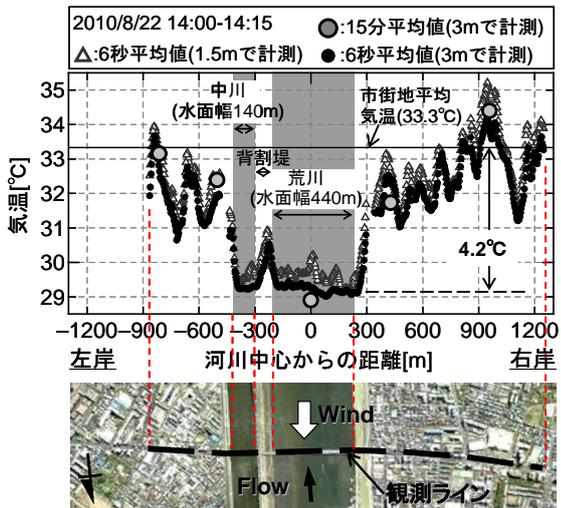


図-4 大河川(水面幅 440m)からの距離と気温の関係(サイト3)

3. 河川周辺における気象観測の結果

3.1 大河川が周辺に与える熱環境緩和効果

(1) 大河川が周辺に与える熱環境緩和効果の範囲 図-2に荒川を直行する風が吹くサイト1における河川周辺の気温コンターを、図-3に河川からの距離と気温の関係を

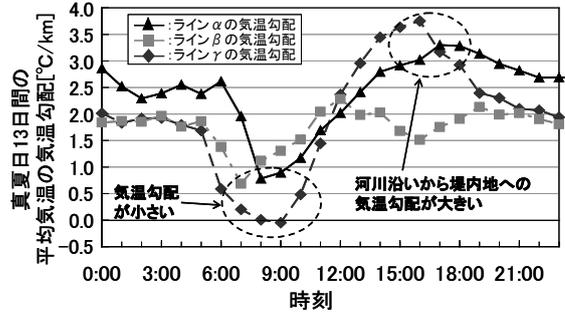


図-5 大河川(水面幅 200m)横断方向の気温勾配の時系列(サイト1)

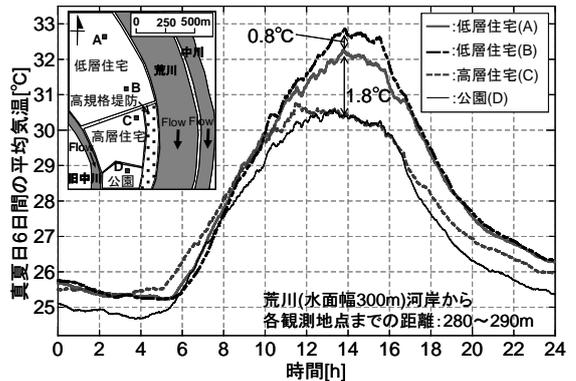


図-6 大河川(水面幅 300m)周辺における土地利用ごとの気温の時系列(サイト2)

示す。河川付近の気温は堤内地と比べて最大約3°C低く、河川から離れるほど気温が徐々に高くなり、河川周辺の温度境界層が明瞭にみとれる。また、河川の冷却効果は河岸から約500m程度まで及んでいると考えられる。

一方、荒川を遡上する風が吹くサイト3における河川からの距離と気温の関係を図-4に示す。河川上の気温は市街地気温と比べて4.2°C低く、河川が周辺に対して冷源となっていることが顕著にみとれる。右岸側の気温分布が市街地平均気温に到達するまでの距離は荒川河岸から約600mであり、水面幅の約1.5倍まで河川の冷却効果は及ぶと考えられる。

(2) 風通しの良さとの関係 図-5に、図-3中に示す気温分布の回帰直線の勾配を1時間毎にプロットしたものを示す。各ラインともに朝は気温勾配が小さく日中になると大きくなる傾向が見られる。ラインβが他と比べて日中の勾配が小さいのは、高規格堤防が整備されており、河川からの南風が低内地に侵入しやすい土地利用をしているためだと考えられる。

(3) 土地利用の違いとの関係 図-6に荒川を遡上する風が吹くサイト2における土地利用ごとの気温の時系列を示す。観測地点は河岸から280m前後の位置にある4地点を選定した。高層住宅、公園地域と比べて低層住宅地域の気温は最大で1.8°C以上高い。高規格堤防が整備されている地域は河川からの風が堤内地に流入しやすくなっていることが考えられる。

3.2 小河川が周辺に与える熱環境緩和効果

(1) 河川沿いと自動車通り沿いの気温差と風の関係 小河川周辺の気温特性をみるために、並行する自動車通り

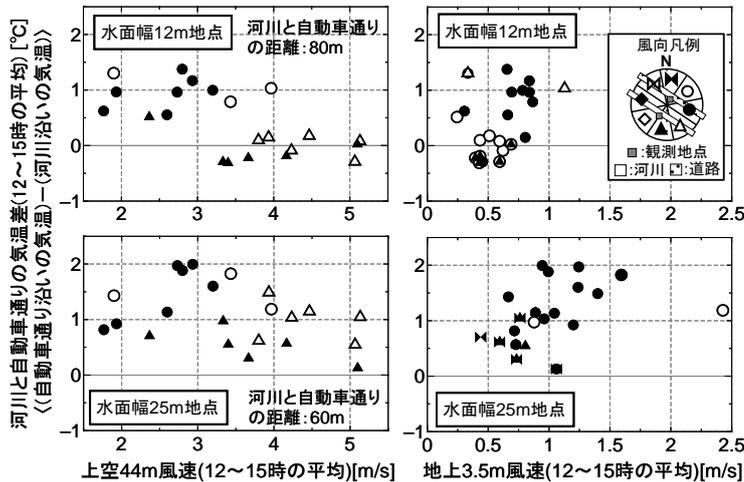


図7 小河川(水面幅 12, 25m)沿いと自動車通り沿いの気温差と風の関係(サイト4)

を代表気温として、河川沿いの気温差と風の間をみたものが図-7である。上空風向風速と気温差の関係は、風速が小さい東風時に気温差が大きく、風速が大きい南風時に気温差が小さい。地上風向風速と気温差の関係は、河川遡上風時に気温差が大きくなり河川横断風時に気温差が小さくなる。ここから河川遡上風時と横断風時で小河川周辺の気温特性が異なることがいえる。

(2) 熱環境緩和効果の範囲 図-8に河川横断風時と遡上風時の河川からの距離と気温の関係を示す。河川横断風時と比較して遡上風時は河川付近の気温が低いことがわかる。横断風時の気温分布は市街地平均気温とほぼ同じであり、河川の冷却効果はあまりみられない。

次により明確に小河川の冷却効果の範囲を示すために、河川遡上風時に着目した。図-9に河川遡上方向に約1.2m/sの風が吹いていた日の13時における河川からの距離と気温の関係を示す。河川上の気温は周辺に比べて約1°C低く、冷気が周囲に拡散している様子が明瞭にわかる。地上から3mの気温から、左右岸ともに20m程度まで河川の効果が及んでいると考えられる。

3.3 河川の熱環境緩和効果の範囲の定量的評価

大小河川ともに、河川が周辺に対して冷源となっていた河川遡上風時に着目し、各河川における水面幅と河川の冷却効果が及ぶ範囲、河川上と市街地の気温差の関係を示したのが図-10である。著者らが行った観測結果のみではプロット数が少ないため、村川ら(1988, 1990)の結果を同時にプロットしている。水面幅と市街地気温に達するまでの距離の関係はほぼ線形の関係である。近似直線の勾配からその距離は水面幅の約1.4倍となる。水面幅と河川上と市街地の気温差の関係は、水面幅が約150mまでは気温差が徐々に増加しており、150m以降は気温差の増加率が徐々に小さくなるように見える。河川周辺の気温分布は水面幅のみでなく風や土地利用の違いで異なるが、単純な条件を考えれば水面幅に応じた冷却効果の範囲や気温低下量を示すことができた。

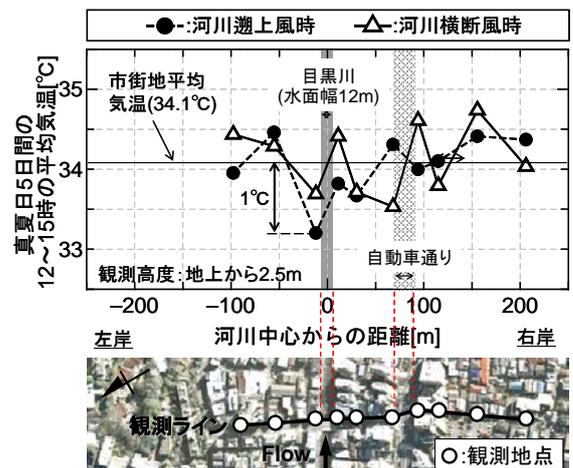


図8 河川横断風時と遡上風時の小河川(水面幅12m)からの距離と気温の関係(サイト4)

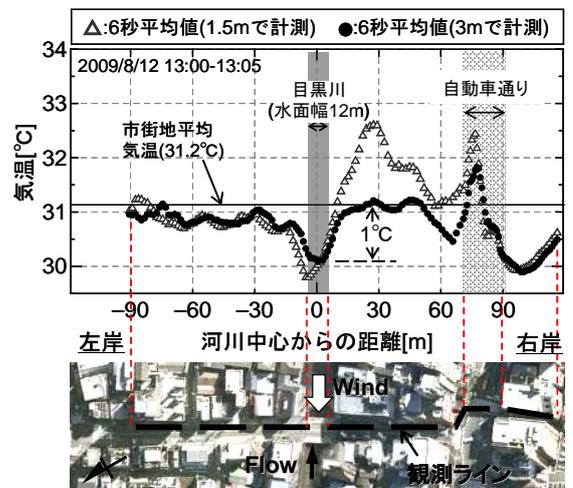


図9 河川遡上風時における小河川(水面幅12m)からの距離と気温の関係(サイト4)

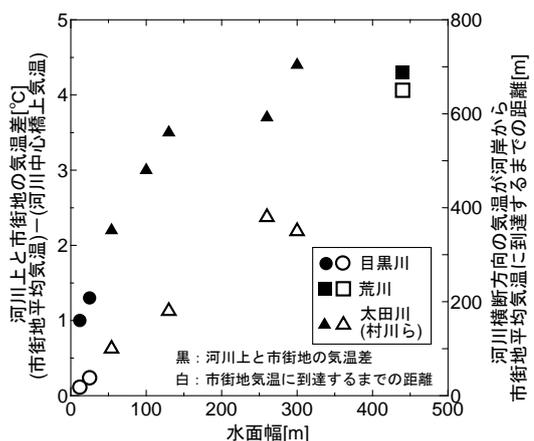


図-10 各河川における水面幅と気温差(河川上-市街地)、市街地気温までの距離の関係

4. 解析による河川周辺の温度境界層の表現

4.1 河川周辺の気温分布の解析的表現

河川周辺における冷気の広がりや移流拡散方程式に基づくと考えられる。そこで河川からの冷気の放出を、点源からの冷気の放出の重ね合わせと考え、河川周辺の気温分布を理論的に表現する。数値計算を用いて気温分

布を再現することも可能であるが、現象の物理的意味を理解するためにあえて単純化して解析解を用いる。ここでは河川流下方向に一様風が吹いている時を想定する。まず点源から冷気が定常的に放出されている時の温度分布の解析解を導出する。定常状態かつ流下方向(x)に一様風時の乱流拡散方程式は(1)式で表される。

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\theta}$: 温度[°C], \bar{u} : 流下方向(x)の平均風速[m/s], K_y , K_z : 横断(y), 鉛直(z)方向の乱流拡散係数[m²/s]である。ここで K_y は y の関数, \bar{u} , K_z は z の関数であるが、(1)式の解析解を得るため、

$$\bar{u} = const., \quad K_y = c \times \bar{u}, \quad K_z = k \times z \quad (2)$$

と仮定する。c[m], k[m/s]は定数である。ここで点(0,0,0)からの冷気の湧き出しを考えた境界条件

$$\begin{cases} \bar{\theta}(0, y, z) = \frac{q}{\bar{u}} \delta(y) \delta(z) \\ \bar{\theta}|_{y \rightarrow \infty} = \bar{\theta}|_{y \rightarrow -\infty} = \bar{\theta}|_{z \rightarrow \infty} = 0 \\ K_z \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

のもとで(1)式を解析的に解くと、点源からの冷気の湧き出しによる気温分布を表す解析解(4)式が得られる。

$$\bar{\theta}(x, y, z) = \frac{q}{2k\sqrt{\pi cx^3}} \exp\left(-\frac{y^2}{4cx} - \frac{\bar{u}z}{kx}\right) \quad (4)$$

ここに、q : 点(0,0,0)からの冷気の放出量[°C・m³/s] (q<0)である。次に図-11 に示す領域を考え、応答関数である(4)式を川幅、流下方向にたたみ込み積分を行うと、

$$F_{\theta}(x, y, z) = \int_{\eta=-l_y}^{\eta=l_y} \int_{\xi=0}^{\xi=x} \bar{\theta}(\xi, y-\eta, z) \times \{U(x-\xi) - U(x-\xi-l_x)\} \times \left\{ \frac{U(\eta+B) + U(-\eta+B)}{2} \right\} d\xi d\eta \quad (5)$$

が得られる。以上より河川上の冷源を、点源からの冷気の湧き出しの重ね合わせと見立てることで、河川周辺の温度分布を解析的に表現することができた。

4. 2 河川横断方向気温の観測値と解析解の比較

上記から得られた解析解と、観測から得られた河川周辺の気温分布を比較した。観測値は図-4、図-9 に示した大小両河川の地上から 3m で計測した気温を用いた。図-12、図-13 に河川横断方向の気温分布の観測値と解析の比較を示す。ここで k=1[m/s] で一定とし、 \bar{u} は河川橋上 2m で計測した値を用いた。また、q は河川上と市街地平均気温の差に合うように与えた。大河川における河川横断方向の拡散係数 c は小河川と比較して 1~2 オーダー大きい。河川上と市街地の気温差の 9 割に達した地点を温度境界層とすると、大河川では c=100 のとき 1230m, c=10 で 570m, c=1 で 240m である。また、小河川では c=4 のとき 67m, c=0.4 で 38m, c=0.04 で 15m となる。

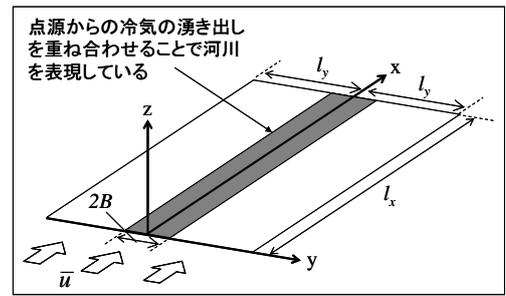


図-11 河川からの冷気拡散の解析のイメージ

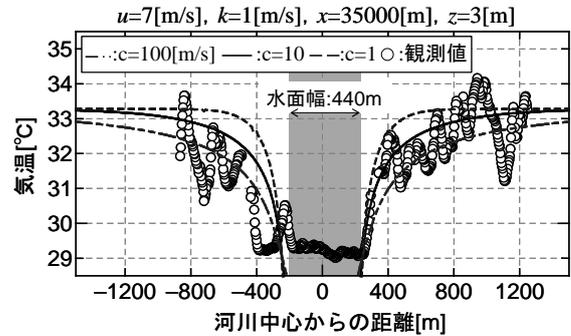


図-12 大河川周辺における河川横断方向の気温分布の観測値と解析の比較

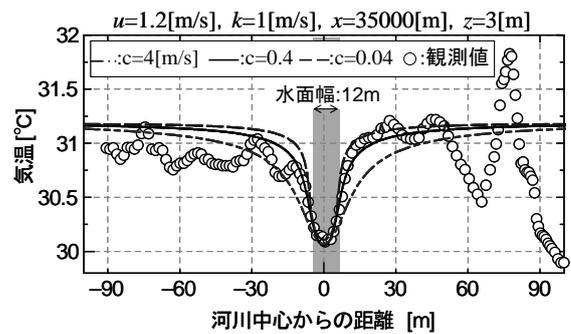


図-13 小河川周辺における河川横断方向の気温分布の観測値と解析の比較

5. まとめ

都市河川が周辺に与える熱環境緩和効果を評価するために川幅や風、周辺土地利用の異なる荒川と目黒川周辺で気象観測を行い、その結果を下に河川の冷却効果の範囲を理論的に表現した。得られた知見を以下に示す。

- (1)河川は周辺に対して冷源となっており、大河川で約 4°C, 小河川で約 1°C, 河川上の気温が低いことを示した。
- (2)土地利用や堤防形状の違いによる河川周辺の気温分布を比較し、風通しが良いほど河川沿いと堤内地の気温差が小さくなることを示した。
- (3)河川遡上風時において河川の冷却効果は水面幅の約 1.4 倍であることを示した。
- (4)現地観測をもとに河川周辺の気温分布を理論的に表現し、解析と現地観測の両方で河川周辺の温度境界層を示すことができた。

参考文献

1)村川三郎, 関根毅, 成田健一, 西名大作: 都市内河川が周辺に温熱環境に及ぼす効果に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 393 号, 1988.11