

風洞を用いた河川周辺の大気環境に関する実験的研究

Experimental Study on Cooling effects of River using Wind Tunnel

小葉竹重機* 清水義彦** 青木律子*** 早坂文香*** 安藤 陽***

By Shigeki KOBATAKE, Yoshihiko SHIMIZU, Ritsuko AOKI, Fumika HAYASAKA and You ANDOU

The cooling effect of river on atmospheric temperature around river in summer is a well known phenomenon. To elucidate this phenomenon qualitatively, some experiments were carried out in wind tunnel having 90 x 90 cm cross section. A river channel is simulated by a long square pipe (12.5 x 8 cm cross section), and dry ice was set inside of this pipe as cooling source. Both side of this pipe, heat insulating material covered with artificial lawn as surface roughness were installed as river side area. Wind velocity was measured with 2-dimensional hot-film anemometer. Changes of values of Reynolds stress and eddy viscosity, and of their profiles were analyzed in combination with experimental conditions of cooling and wind velocity.

Keywords : Cooling effect, Heat transfer, Reynolds stress, velocity profile, wind tunnel

1. まえがき

社会の要求が量から質に変化するに伴って、河川整備の内容も親水性を考慮した質の高い整備が要求されるようになった。河川には本来、かんがいや漁業、舟運といった利用のされ方の他に、遊びやさらには広い空間、涼しい空間、静かな空間といったような環境機能を利用した利用のされ方もあったはずである。高度経済成長時代を経て作られてきた高い堤防、護岸によって人々が川の存在を忘れ、川が汚水の排水路と化してから、川の環境機能は忘れられてきた。経済が成熟期に入り、人々が周囲を見回す余裕ができたときに、再び河川本来の機能を取り戻すべきであることに気がついた、と言うべきであろうか。

将来的には、河川本来の環境機能を取り戻すべきであることはもちろんであるが、さらに積極的に河川の環境機能を利用した街作りが行われるようになるであろう。環境機能の中の重要な要素である冷却効果の利用も考えられるかも知れない。そこまではいかないにしても冷却効果を定量的に評価できるようにしておくことは重要であろう。

われわれはこうした視点に立って、実河川における周辺大気環境の観測を行ってきた。^{1)・2)} 実河川における観測は必要不可欠なものであるが、我々の意図する基礎的な研究のためにはさらに条件を自由に設定で

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

** 正会員 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科 (同上)

*** 学生員 群馬大学大学院生および学部4年生 (同上)

き、必要な情報だけを取り出すことのできる室内実験も是非必要である。

ところで、実際の河川では、一般に河道内は粗度が小さく、堤内地では相対的にこれよりは粗度が大きいのが通例であり、輸送現象を考える上ではまずこの粗度の違いが重要な役割を果たしていると考えられる。とくに川筋に平行な風が吹く場合には水平混合を助長するという意味でさらに決定的な役割を果たすであろう。このような場の中に、冷たい空気と暖かい空気が存在するというのが河川周辺の大気環境の基本的な構造である。

すでにこのような観点から、武若・池田等は、作業流体として水を使い、水路片側半分に加熱部を設けることによって対流を発生させ、熱輸送に関する検討を行っている。その結果、冷却効果の及ぶ範囲が比較的狭いこと、大規模な対流発生時には冷却域の流れが早くなることなど、興味ある事実を指摘している。³⁾

今回、われわれは金沢大学土木建設工学科の風洞をお借りできる機会に恵まれたので、ドライアイスの中に入れた鋼鉄製角パイプを水路に見立てた実験を行った。ここではまず、前述のように温熱環境とは関係なく存在する、場の特性としての乱流構造について考察したのち、その乱流構造に及ぼす冷却源の影響を明らかにする、という順序で検討を行うこととする。

2. 実験概要

実験装置は前述のように金沢大学工学部土木建設工学科防災工学講座のゲッチング型風洞を使用させて頂いた。断面形は90cm×90cmの矩形で、測定部の長さは4m、風速の範囲は2m/sec～20m/secである。この中に図-1に示すように幅12.5cm、高さ6cmの鋼鉄製角パイプを置き、その中にドライアイスを入れて冷却源とし、これを河道部とみなした。この角パイプの両横に幅30cm、高さ10cmの発泡スチロールを置き、その上に芝の高さ2.1cmの人工芝を置いて堤内地と見なした。このとき、角パイプの下に厚さ4cmの発泡スチロールを敷いて人工芝を敷く前の

表-1 実験ケース名

	4m/sec	9m/sec
cooling	C-4	C-9
non-cooling	N-4	N-9

堤内地の高さと河道部の高さとを一致させた。測定部上部の観測窓から2次元の熱線風速計IHW100のプロープを支持棒とともに入れて計測した。図-1ではプロープの向きを横を向いた状態で描いているが、実際には流れ方向（紙面に垂直方向）に向けている。気温は熱線風速計プロープの直横にセットした熱線風速計温度プロープによって計測した。これらの測定位置を示したものが図-2である。測定は半断面とし、横断方向には角パイプ中央を0として右岸側約16cmまで11断面、鉛直方向には角パイプ上面を0として約20cmまでの間を11断面、計121測点で計測した。風速は9m/secと4m/secの2ケース、その各々についてドライアイスで冷却したものとし、計4ケースの実験を行った。表-1は各々の実験ケース名をまとめたものである。

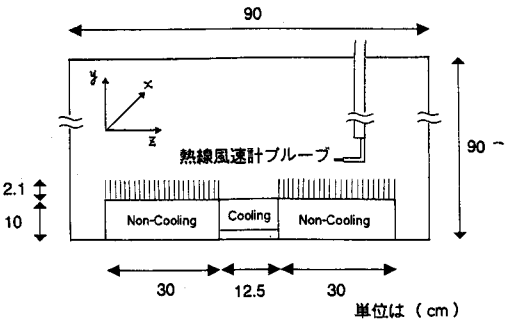


図-1 横断面の概要

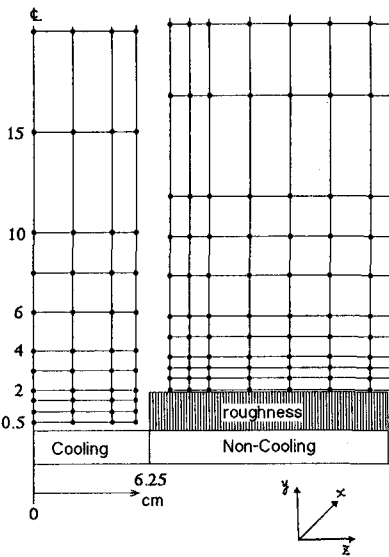


図-2 計測点位置図

3. 温熱環境とは関係なく存在する場の特性としての乱流構造

図-1に示したように横断方向に粗度が変化するような場での気流乱流構造については、すでに中川らによって縦渦に注目した検討がなされており⁴⁾、滑面上で上昇流、粗面上で下降流が生じることが報告されている。図-3～図-5はわれわれが行ったN-9の場合の、主流速 U 、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 、レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の鉛直分布を示したものである。ここに、 U は流下方向 x の平均流速、 V は鉛直方向 y の平均風速、 W は横断方向 z の平均風速、 u 、 v 、 w は各々の変動成分である。各図とも左の図は河道内の測線($z=0\text{cm}\sim5\text{cm}$ 、滑面域に相当)、中央の図は粗度領域に少し入った地点から 10.5cm までの測線($z=6.5\text{cm}\sim10.5\text{cm}$)、右側の図はさらに河道から離れた測線($z=12.5\text{cm}\sim16.5\text{cm}$)、の結果をまとめて示している。図-3の主流速の分布について見ると、まず、 $y=10\text{cm}$ 程度から上の点では測線によらず風速がほぼ一致しており、底面摩擦の影響を受ける範囲(境界層厚さ)は高さ $y=10\text{cm}\sim15\text{cm}$ 程度までであり、それより上部ではポテンシャル流れに近い流れ場となっていることがわかる。ただし、後述のレイノルズ応力の値から判断すると、もう少し高い $y=20\text{cm}$ 程度からポテンシャル流近似が充分成立する領域であることがわかる。河道内で境界層より下では、河道中央から粗度領域に近づくにしたがって、同一高さの風速は著しく減速されることがわかる。一方、粗度領域に入ってから $z=10.5\text{cm}$ の範囲までは減速しながら外側の速度分布に近づいていくが、その変化率は前

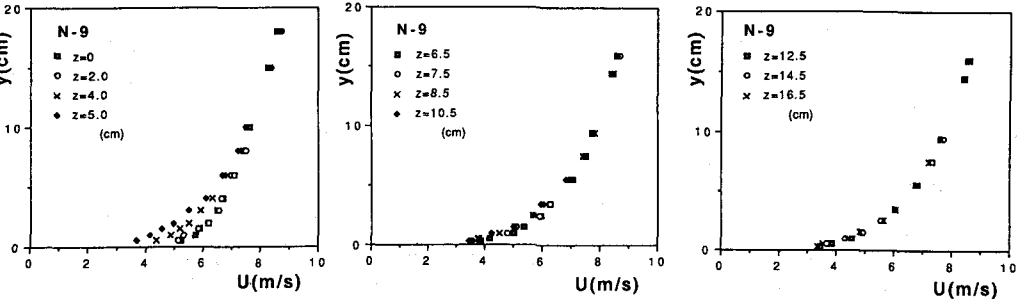


図-3 N-9の場合の主流速鉛直分布

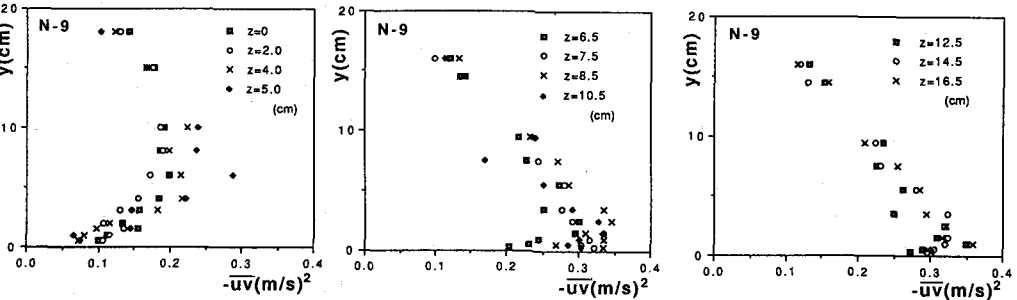


図-4 N-9の場合のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直分布

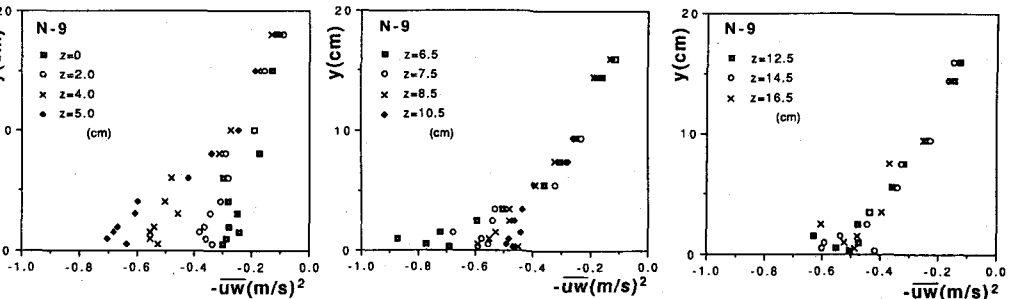


図-5 N-9の場合のレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の鉛直分布

者に比べてかなり小さい。z=12.5cmより外側の領域では風速分布は一様であり、底面粗度に支配されるものとなる。つぎに、図-4の $-\overline{uv}$ の分布について見ると、河道内と粗度領域とで顕著な違いのあることがわかる。すなわち、河道内ではレイノルズ応力の直線分布から大きく内側に曲がり、ある高さ(y≒10cm)で極大値をもつ分布形状となっている。粗度領域に入ってからz=10.5cmまでの領域では、z=12.5cmより外側の領域でのほぼ一様な直線分布に近づいていく。図-5の $-\overline{uw}$ の鉛直分布も前述の $-\overline{uv}$ の変化に対応した変化を示しており、まず河道内では中央のほぼ0に近い分布(厳密にはZ=0では $-\overline{uw}=0$ とならなければならないが)から、負の値をとって粗度領域に近づくに従って小さく(絶対値は大きく)なり、粗滑境界付近で最小値(絶対値では最大値)をとった後、再び大きくなってz=12.5cmより外側の領域での直線分布に近づいていく。

この特徴的なレイノルズ応力の鉛直分布について若干検討を行う。

いま、二次流を考慮して十分に発達した流れの流下方向の運動方程式は、

$$V \partial U / \partial y + W \partial U / \partial z = -dp / \rho dx + \partial (-\overline{uv}) / \partial y + \partial (-\overline{uw}) / \partial z + \nu (\partial^2 U / \partial y^2 + \partial^2 U / \partial z^2) \quad (1)$$

となる(p: 圧力、 ν : 動粘性係数)。これをy=0で $V=0$ 、 $-\overline{uv} + \partial U / \partial y = \tau_w / \rho$ という境界条件のもとで、yに関して積分し、さらに、y=δのとき、 $V=0$ 、 $-\overline{uv}=0$ という境界条件を用いると、

$$-\overline{uv} + \nu \partial U / \partial y = U_x^2 (1-y/\delta) + UV + \int (\partial (-\overline{uw} - \nu \partial U / \partial z) / \partial z) dy \quad (2)$$

となる。⁹⁾ ただし、δは境界層厚であり、積分の範囲はyからδである。

式(2)において、粘性項と、 UW の項を $-\overline{uw}$ の項に比較して無視すると、

$$-\overline{uv} = U_x^2 (1-y/\delta) + UV + \int (\partial (-\overline{uw}) / \partial z) dy \quad (3)$$

となる。ただし、 U_x は場の平均的な摩擦速度である。右辺第1項はレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の直線分布を表し、第2項以下が存在することによって直線分布からのずれを生じることになる。

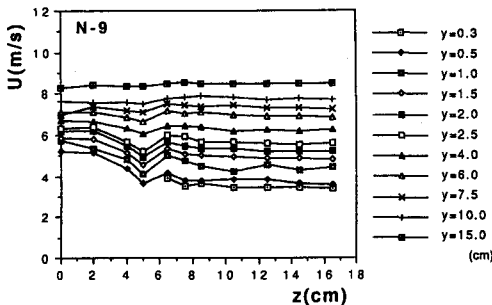


図-6 N-9の場合の主流速の横断方向分布

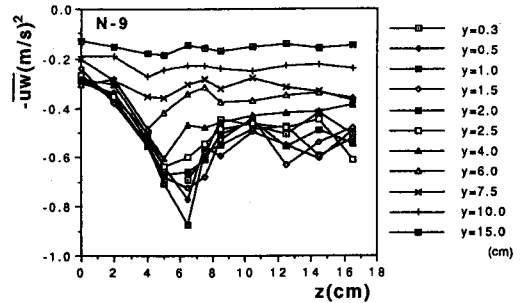


図-7 N-9の場合の $-\overline{uw}$ の横断方向分布

図-6、図-7はそれぞれN-9の場合の、ある高さに沿っての主流速の横断方向分布、同じくレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の横断分布を示したものである。図-6から粗滑境界に近い5cmの付近で大きな流速の落込みが見られ、底面からの上昇流の存在が示唆される。後述するように図-8に示す鉛直速度vの分布図からも、河道内(滑面)ではほぼ全域で上昇流が生じ、縦渦構造の存在が認められる。したがって、式(3)における UV の項は河道内では正の値をとることとなる。一方、図-7の $-\overline{uw}$ の分布では、 $-\overline{uw} \propto \partial U / \partial z$ であるから図-6の主流速の横断分布からもわかるように、河道中央から粗度領域に近づくにしたがって速度勾配の大きな負の値を持つ領域で、 $-\overline{uw}$ は負の値が大きくなり、粗滑境界付近で極小値をとったのち、主流速の速度勾配が小さくなるにしたがって負の値も再び小さくなっていく。したがって、式(3)における $\partial (-\overline{uw}) / \partial z$ の符号は、河道内では負、粗度領域に入ってから正の値となる。以上の考察から、河道内では UV と $\partial (-\overline{uw}) / \partial z$ は前者が正、後者が負の値をとり、これによってレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の直線分布からの歪(増加、減少傾向)が表現される。図-4の $-\overline{uv}$ 分布図を見ると、河道内でレイノルズ応力は直線分布より小さくなっており、 $-\overline{uw}$ の影響が支配的であって、二次流の項 UV の影響は小さいことが推論される。

さて、これまでも滑面上で上昇流が発生していることは述べてきたが、図-8は風速4m/secの場合のN-4

の鉛直速度 v の値を格子点ごとに、 0.01cm/sec 以上を有意な値として示したもので、値の無記入の点はこれ以下の値である。なお、向きは矢印で示している。この図から、粗滑境界を挟むようなセルが存在していることが明瞭である。

4. 冷却による影響

以上、河道内と河道外（市街地）として設定した境界条件の違いによって生じる、せん断乱流場の構造について考察してきた。そこで、以下ではこうした乱流構造が温度の影響をどのように受けるかについて検討する。

図-9はN-9とC-9の場合の主流速の鉛直分布を比較したものである。上の3つの図は河道内、下の3つは粗度領域内でのものである。これらの図から、分布形の概略はほとんど等しいものの、もう少し詳しく見ると、とくに粗滑境界に近い $z=5\text{cm}$ の位置の $y<4\text{cm}$ の範囲で明瞭であるが、 dU/dy の値が冷却した場合の方が緩くなっていることがわかる。すなわち、冷却すると鉛直方向の輸送を抑制する向きの働きをすることがわかる。ただし、図-9からもわかるように速度分布はほぼ一致しており、勾配の差も小さく、後述の横断輸送の抑制効果に比較するとほとんど無視してもよい程の抑制効果といえる。このことをさらに明確にしているのが、図-10の

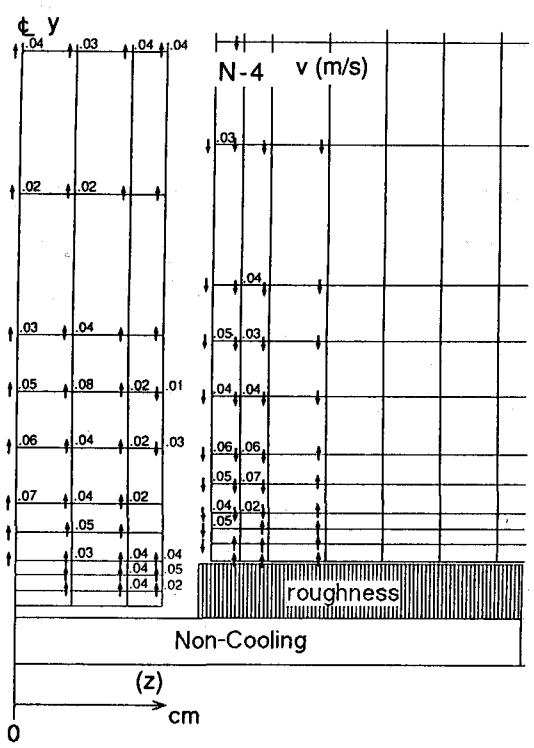


図-8 鉛直方向速度の向きと大きさ

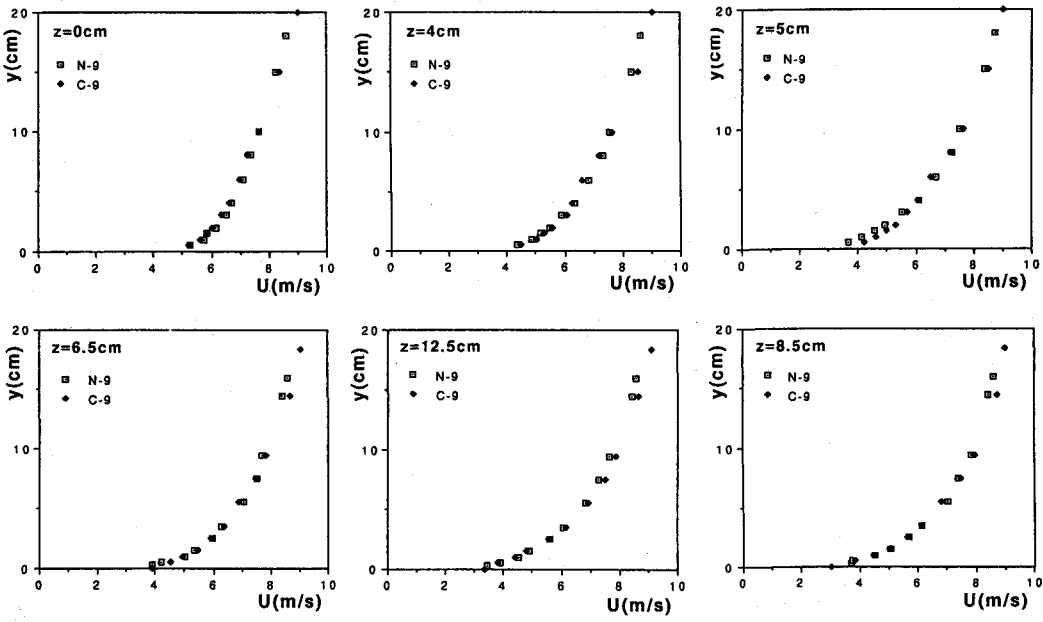


図-9 冷却した場合（C-9）としない場合（N-9）の主流速鉛直分布の比較

レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直分布であり、C-9とN-9について比較したものである。前図と同様に上の3つが河道内、下の3つが粗度領域内のものである。この図からも冷却した場合のC-9の $-\overline{uv}$ が冷却しない場合のN-9と比較して若干小さいようではあるが顕著には差がないことがわかる。風速4m/secの場合にもこの傾向は変わらない。

つぎに、図-11 は同様にC-9とN-9の場合の $-\overline{uw}$ を比較したものである。 $-\overline{uw}$ の分布には冷却の効果が顕著に現れており、分布形状は相似形であるが冷却した場合の方が絶対値が小さくなることがわかる。すなわち、

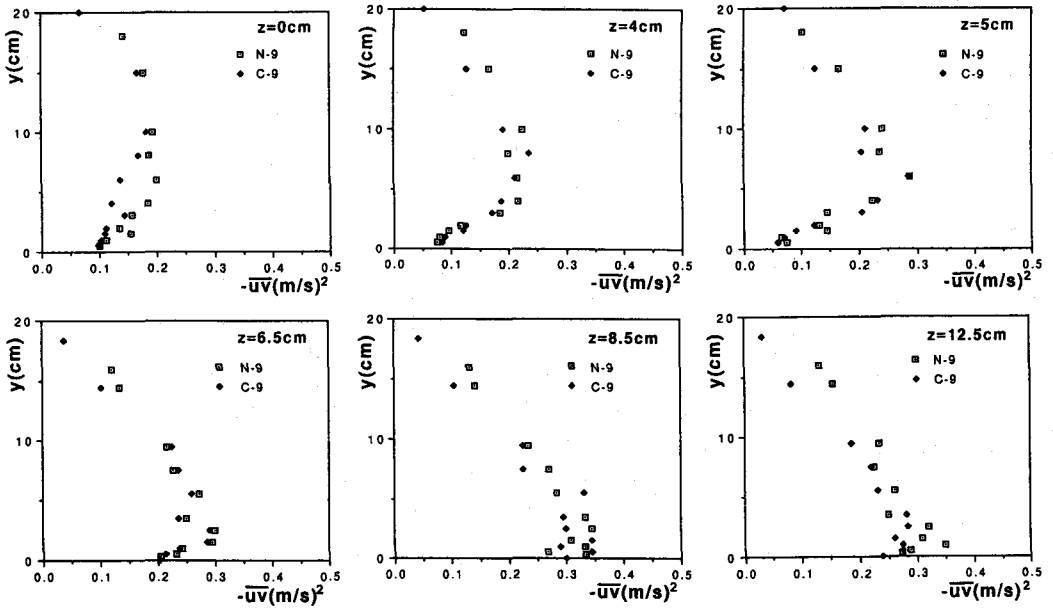


図-10 冷却した場合 (C-9) としない場合 (N-9) のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 分布の比較

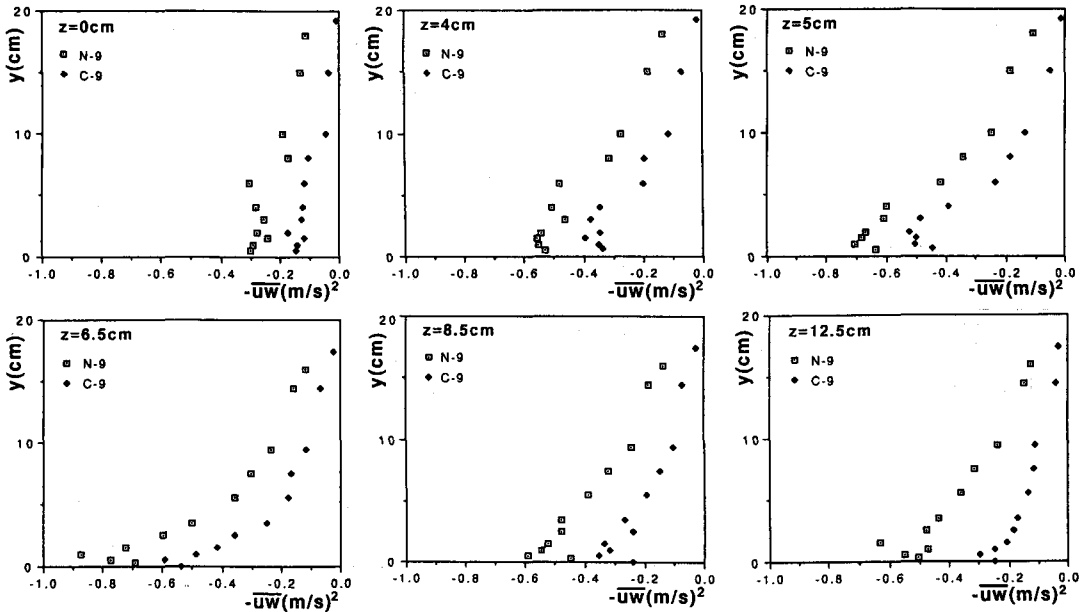


図-11 冷却した場合 (C-9) としない場合 (N-9) のレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ 分布の比較

冷却することによって横断方向の輸送が顕著に抑制されることを示している。このことについて以下でさらに検討を行ってみる。

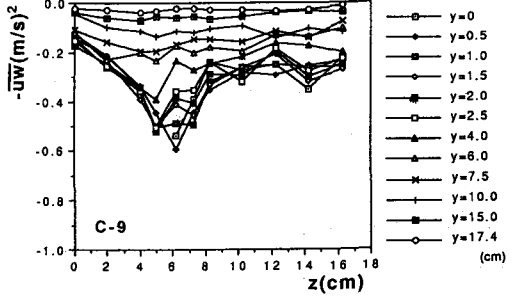
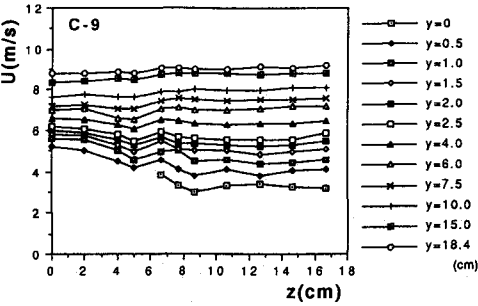


図-12 C-9の場合の主流速の横断方向分布

図-13 C-9の場合のレイノルズ応力の横断分布

図-12、図-13はそれぞれ図-6、図-7に対応するもので、冷却した場合の主流速とレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の横断分布である。冷却しない場合の図-6、図-7と比較して、粗滑境界付近の風速の凹凸が小さくしたがって横断勾配 $\partial U / \partial z$ が小さいこと、また、 $-\overline{uw}$ の値も絶対値が小さくなっていることがわかる。これをさらに直接的に比較するために、高さ1cm、1.5cm、2cmの位置での主流速と $-\overline{uw}$ の横断分布を取り出して比較したものが図-14、図-15である。図-14からは冷却した場合には粗滑境界近傍での速度勾配 $\partial U / \partial z$ が小さくなることが明瞭にうかがえる。また、粗度領域に入ってから両者ともほぼ同じ値となることも明瞭である。図-15の $-\overline{uw}$ の比較では、分布の形状は相似であること、冷却すると値は絶対値が小さくなることが明解に把握できる。

さて、横断方向の運動量拡散係数 ε は、渦動粘性モデルを用いると、 $-\overline{uw} = \varepsilon (\partial U / \partial z)$ で表されるから、冷却される場合とされない場合の ε は次のように異なるであろう。

粗滑境界の付近を除けば、図-14から $\partial U / \partial z$ は両者ともほぼ同じであるから、 $-\overline{uw}$ の差だけ拡散係数 ε

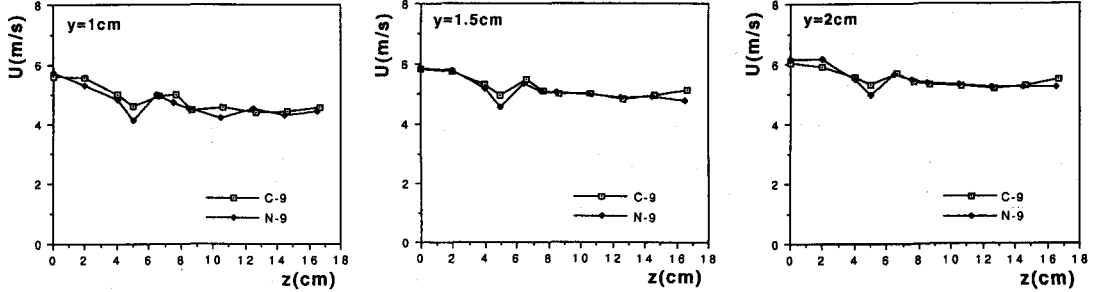


図-14 冷却した場合（C-9）としない場合（N-9）の主流速の横断分布の比較

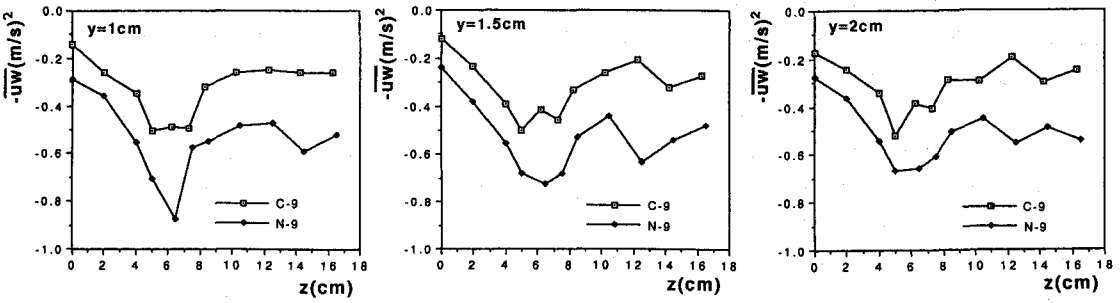


図-15 冷却した場合（C-9）としない場合（N-9）の $-\overline{uw}$ の横断分布の比較

の差であるということになる。このことから、図-15 より判断すると冷却した場合には、輸送が抑制されることにより、 ε は半分程度になるということが予想される。このことは、実河川においても、水温と気温との差によって拡散係数が変化することを意味しており、温度差が大きいときには拡散係数の評価には十分な注意が必要であるということになる。

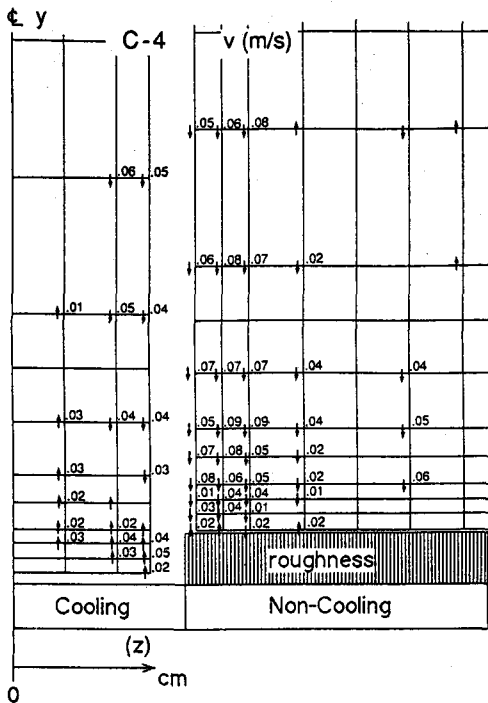


図-16 C-4の場合の鉛直方向速度の向きと大きさ

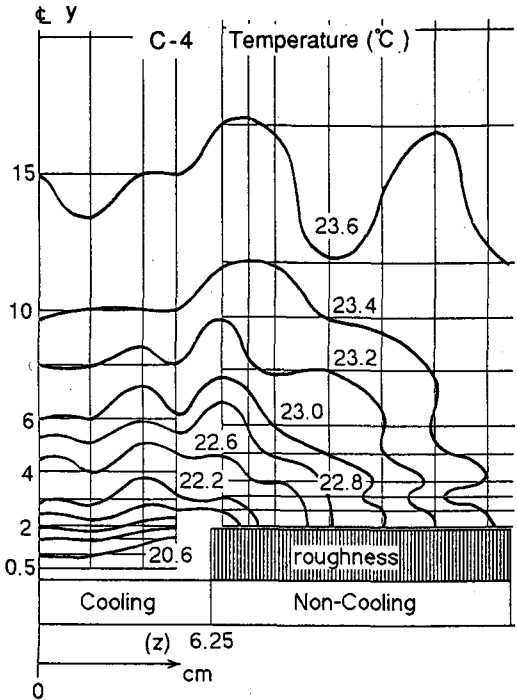


図-17 C-4の場合の温度場

図-16 はC-4 の場合の鉛直方向速度の向きと大きさを示したもので、冷却しない場合の図-8に対応するものである。下降流に大きな値が出ているのははっきりとは言えないが、上昇流の速度は図-8よりは小さいことがうかがえる。図-17 の等温線図（各パイプ表面は霜が白く付いているので0℃、風温は24℃である）にもこの上昇流、下降流に伴う凹凸が明瞭に見いだされる。 $-uw$ に代表される乱れによる輸送形態の他に、こうした組織的構造によって生ずる移流も見逃すことはできない。

5. あとがき

以上、河川周辺の大気環境に関する風洞実験の結果を、とくに風の構造という立場から解析した結果について述べた。最後に風洞の使用のみならず実験の各種手配についても多大のお世話を頂いた、金沢大学工学部土木建設工学科北浦勝先生、辻本哲郎先生に心から篤く御礼申し上げます。なお、本研究は河川環境管理財団、および科学研究費補助金の援助を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献 1) 小葉竹重機、清水義彦、青木律子、早坂文香：河川周辺の大気環境に関する観測研究、水工学論文集、第37巻、1993年、pp.817-820 2) 青木、早坂、小葉竹、清水：河川周辺の大気環境に関する観測研究、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、第2部、平成5年、pp.458-459 3) 武若聡、池田駿介、山本泰浩：都市河川周辺大気の流れ・温度場に関するモデル実験、水工学論文集、第35巻、1991年、pp.663-666 4) 中川博次、襦津家久、富永晃宏：各種河床条件における縦渦を伴う流れの乱流構造、京大防災研年報、第24号B-2、昭和56年 5) 富永晃宏：直線開水路流の三次元乱流構造に関する研究、京都大学学位論文、昭和62年