

(5) 都市河川が周辺地の微気象に及ぼす効果

THE EFFECT OF URBAN RIVER ON MICROCLIMATE OF THE SURROUNDING REGIONS

武若 聡¹, 池田駿介¹, 平山孝浩², 島谷幸宏³
Satoshi TAKEWAKA¹, Syunsuke IKEDA¹,
Takahiro HIRAYAMA² and Yukihiro SHIMATANI³

ABSTRACT: Field data obtained at Ara river flowing through metropolitan Tokyo area were analyzed to evaluate the effect of urban rivers on the microclimate of the adjacent city region. The data obtained at the fixed stations revealed that the temperature in the river course is usually low in the diurnal time of summer and is high in the nocturnal time of winter, compared with the ensemble-averaged temperature of the surrounding city region. It is observed that the temperature difference affects the temperature recorded at the stations which locate downwind area of the river, where the air is cooled in summer and warmed in winter. The data collected by using the captive balloons showed that the atmosphere exchanges heat with the water surface and the vegetated flood plains. It is found that the floodplain plays an important role in exchanging heat, especially in summer season. Computations of internal boundary layer which develops in the river course showed the formation process of the vertical temperature and humidity profiles.

KEYWORDS: microclimate, urban river, heat exchange, internal boundary layer

1. 緒言

都市の気象環境は周辺郊外地と比較して高温・低湿度で特徴付けられる。この都市に特有の気象はヒートアイランド現象として知られており、その原因には舗装による地表面の被覆、密集した建造物の立地、経済活動に伴う人工排熱等が挙げられる。この気象環境、特に熱的な環境を都市域内にある河川・池(水面)、公園・緑地(植生)等の冷域(クールアイランド)を積極的に利用して改善することが考えられる。この種の提案は特に目新しいものではないが、個々の改善効果の微細なプロセス、影響が及ぶ範囲等についての議論は定性的であり、その能力が大きなものになり得ることが推測されているに過ぎない^{1),2)}。

本研究は水面、特に河川に着目する。都市面積に占める河川の割合は高水敷まで含めると予想以上に大きい。例えば、東京都(葛飾区、江戸川区等)では1割、広島市では2割に達する。これの影響が及ぶ範囲と強さを評価するためには河川周辺の微細な気象プロセスの把握が必要である。これまでも都市河川周辺の気象観測^{3),4),5)}はいくつか行なわれてきたが現象の詳細に立ち入った議論はなされていない。本研究では建設省土木研究所都市河川研究室が収集した気象データの解析⁶⁾を行ない、都市河川周辺気象プロセスの詳細の解明を試みる。解析の対象とした気象データは1)河道内と周辺市街地の1年間にわたる定点観測データ(気温、湿度、風向、風速)および2)河道内の係留気球観測データ(気温、湿度の鉛直分布)である。また、数値計算により内部境界層の発達に関する検討を行なう。

2. 定点観測データの解析

観測は建設省土木研究所都市河川研究室が1年間(1986年4月-1987年3月)にわたり、東京都荒川周辺(四つ木大橋付近、葛飾区および墨田区)にて行なった。図-1に観測地点(A~G)の位置を示す。各観測地点には百葉箱を設置し、気温、湿度、風向、風速を30分毎に測定した。設置場所はD地点を除き地表面の状況がほぼ同じ条件になるように配慮されている。河道外の観測地点周辺は住宅地であり、右岸側(A~C地点)には左岸側(E~G地点)に比較して高層住宅が多い。

2.1 河道内外の気温変動

ここでは1986年8月10日~19日および1987年2月2日~11日の各地点の気温変動について考察する。各観測地点の気温変化から河川の影響およびその地点の特性を直接に読み取ることは難しい。そこで各観測地点の気温からその時

¹東京工業大学工学部土木工学科 Tokyo Inst. Tech., Dept. of Civil Eng.

²東京工業大学大学院 Tokyo Inst. Tech., Graduate Student

³建設省土木研究所都市河川研究室 Public Works Research Inst., Ministry of Construction

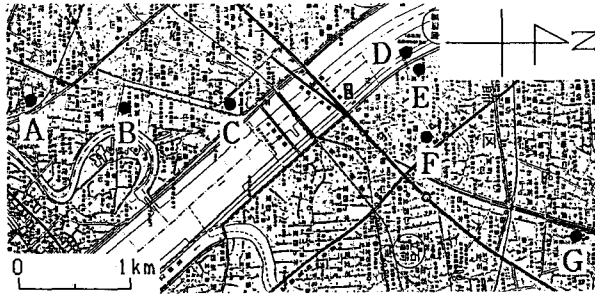


図1: 気象観測地点(定点観測)

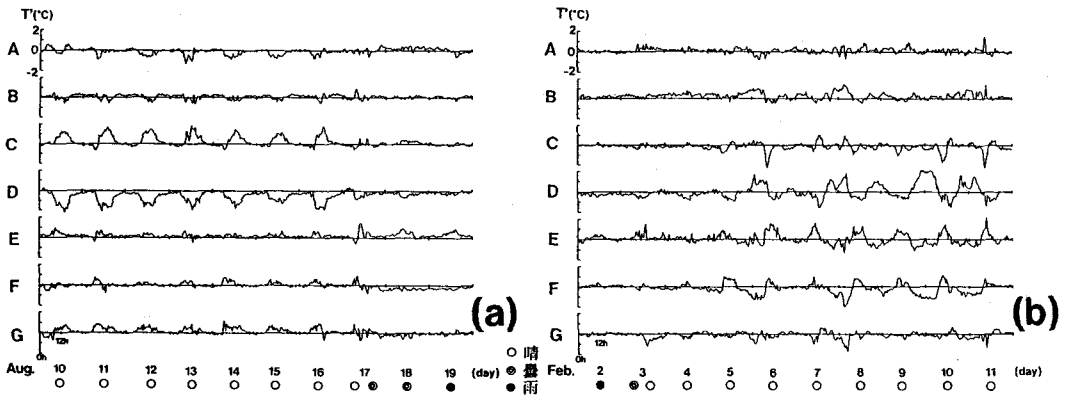


図2: (a)1986年8月, (b)1987年2月 各観測地点の平均気温からの変動

の7地点の平均気温を差し引いた量を算出し(図-2(a),(b)), これから河道内と市街地の測定点の気温変動に関する特徴を調べる。図より、雨および曇りの天候の日には各地点の気温差が小さくなり、河道内外の気温は均一化される。8月の晴天日の日中にはD地点(河道内)の気温が他の地点よりも相対的に低くなり、これは河道内の水面および高水敷の効果が見られたものと考えられる。逆に2月のD地点の気温は晴天日の夜間に他の地点よりも相対的に高くなり、日中には相対的に低くなる。このように河道内の気温は周辺市街地の平均的な気温変動に対して、夏の日中に上昇量が、冬の夜間に低下量が抑えられることが示された。

冬の夜間には放射冷却により地表面付近の気温が低下し、これが著しく進行した日を東京タワーで観測された気温データ(高度250mまでの気温の鉛直分布、東京都大気保全局測定)から特定することが可能である。図-3は1987年2月7日~11日の間の気温の鉛直分布を等値線の形で示したものである。一般に東京では冬の夜間にも地上付近に不安定な温度成層が形成されていることが多い。しかしながら、図中のハッチングを施した領域では放射冷却の作用により逆転

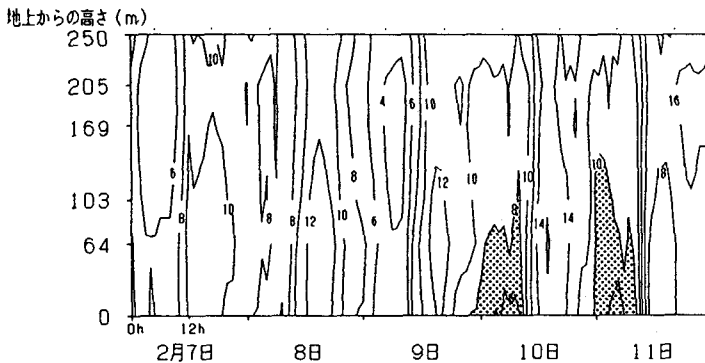


図3: 東京タワーで観測された気温変動の時空間分布(1987年2月)

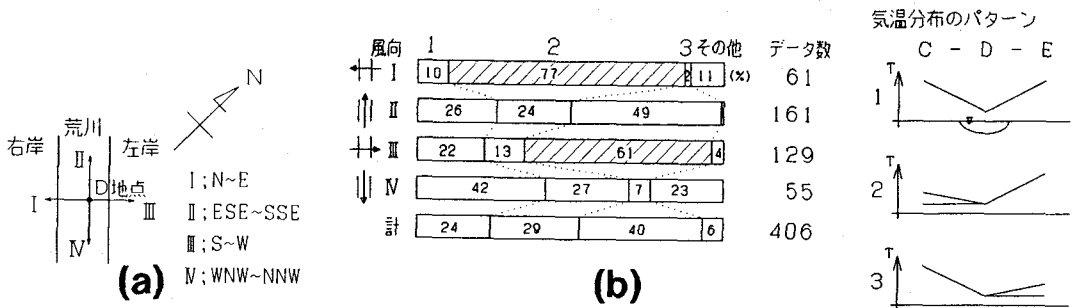


図4: (a) 風向の分類, (b) 風向と気温分布パターンの関係 (1986年8月)

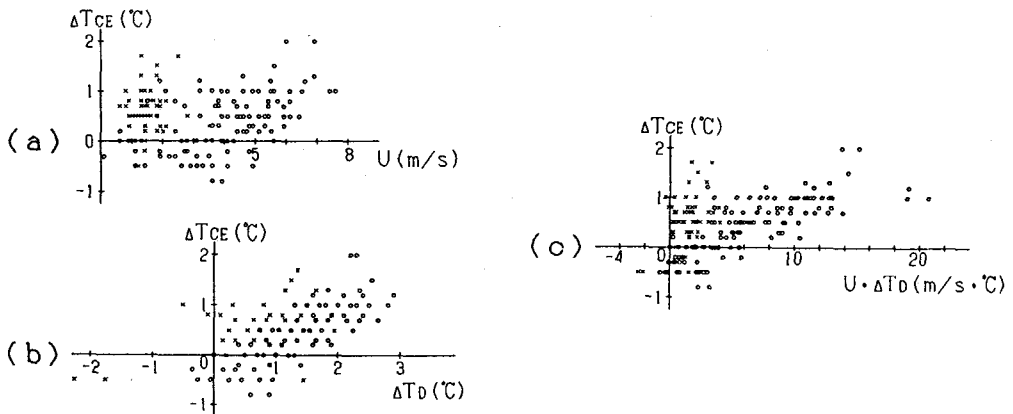


図5: 気温変化量と各パラメータの関係 (1986年8月) (風向I...x, 風向III...o)

層が形成され、大気は安定な状態にあった。この逆転層が形成された時間帯(2月9日,10日)には図-2(b)のD地点(河道内)において、各観測地点の平均気温との気温差の値が特に大きくなっている。これは放射冷却が進んだ時の河道内と市街地の地表面温度低下量の差が反映されたものであり、この時、市街地では地表面からの大気への熱放射量から地中伝熱量を差し引いた、地表面が失う正味の熱量が河道内に比較して大きくなっていったと推測される。

2.2 風況と河道内外の気温・水蒸気量分布の関係

河川周辺の気象は河川からの熱と水蒸気の輸送により影響を受ける。熱・水蒸気は1)一般風が強い場合には風による吹送、2)一般風が弱いときには河川と市街地の表面温度の差により生じる対流、により移流・輸送されている考えられる。本研究では前者の風の吹送による効果に着目し、風況(風向、風速)と風上、風下に位置する観測地点間の気温・水蒸気量分布の関係を調べ、河川の気象学的な影響が及ぶ範囲と強さの評価を試みた。当初はこの目的に沿って全ての観測地点(A-G地点)を対象にした解析を行なったが、風況と気温・水蒸気量分布を関連付けることは困難であった。ここでは右岸近傍のC、河道内のDおよび左岸近傍のEの各地点のデータを対象にした解析結果について述べる。

風況はD地点(河道内)で観測された風向と風速により代表させ、これとC,D,E地点の気温・水蒸気量の関係を調べた。風向は図-4(a)に示すように、川を横断する方向と平行な方向に吹送する場合の4種類(I~IV)に分類した。ここでは8月および2月の1ヶ月間のデータについての解析結果を示す。

図-4(b)は8月の日中の晴天の時間を対象にして、各風向に対するC,D,E地点の気温分布パターン(1~3,その他)の出現頻度を示したものである。気温分布のパターンは図中に示されているように、河道内のD地点の気温がCおよびE地点より低くなっていた時を1から3に分類し、これ以外をその他とした。気温分布パターン2と3には河道内気温と両岸側市街地気温の内の一方が一致していた場合も含まれる。図-4(b)より風が河川を横断的に吹いた時には多くの場合に風下側の市街地の気温が低くなる(Iと2, IIIと3の対応関係)ことがわかる。この時、河道内の冷気は吹送により風下市街地へ移流されていたと考えられる。風向がIあるいはIIIの時のデータを対象として、気温変化量 ΔT_{CE} (CとE地点

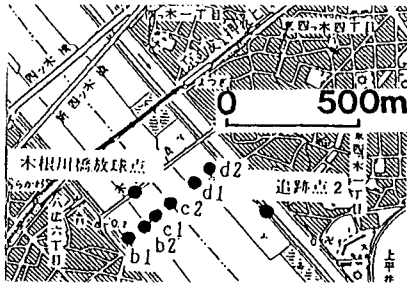


図 6: 気象観測地点 (係留気球観測)

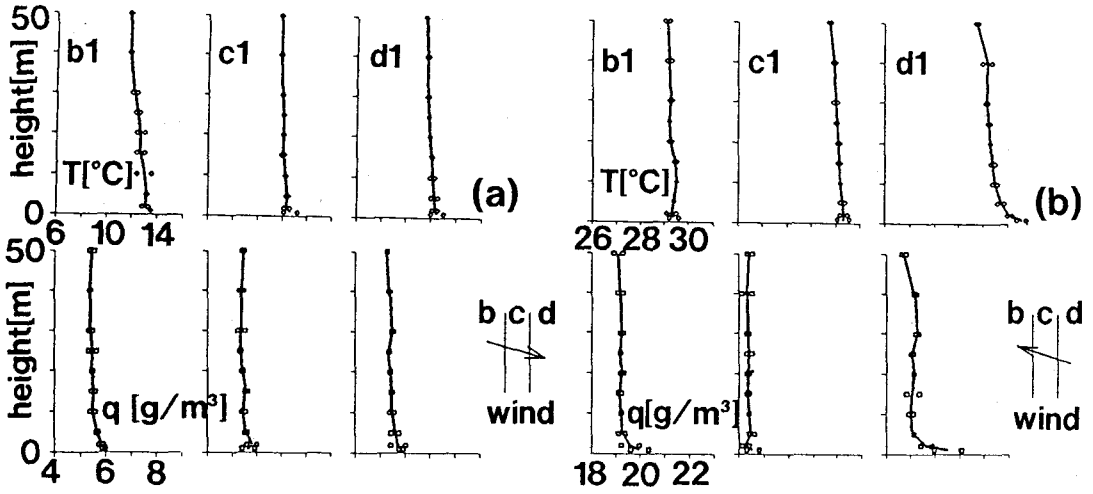


図 7: (a)1988年3月28日13時, (b)1988年8月24日15時 気温, 水蒸気量の鉛直分布

の気温差, 吹送方向に低下した時に正)と(a)D地点の風速 U , (b)河道内外気温差 ΔT_D (CとE地点の平均気温とD地点との気温差), (c)風速と河道内外気温差の積 $U \cdot \Delta T_D$ の関係を示したのが図-5(a),(b),(c)である。風速と河道内外気温差の積は河道内からの冷気の熱フラックスを代表すると考えられる。気温変化量 ΔT_{CE} と各パラメータ U , ΔT_D および $U \cdot \Delta T_D$ の間には比例関係が認められる。同様の解析を2月の夜間の晴天の時間を対象に行ない、河道内の気温がCおよびE地点より高くなった時点に着目した。ここでも風下側に河道内気温の影響が現れ、8月の場合と逆に風下側の気温が風上側に比較して上昇する機会が多かった。

水蒸気量についても上と同様の解析方法により、風況とその分布パターンを関連付けることを試みたが、明確な対応関係は得られなかった。

3. 係留気球観測データの解析

観測は建設省土木研究所都市河川研究室が日本気象協会に委託し、両者の協力により行なわれた^{6),7)}。この観測の目的は都市河川周辺の気候境界層の鉛直構造を調べることであり、図-6に示す東京都荒川(四つ木大橋付近)の河道内で係留気球を用いた高度50mまでの温度、湿度の鉛直分布測定がなされた。観測は1988年3月28日および同年8月24日に行なわれ、高水敷上(右岸:b, 左岸:d)および水面上(c)で気球を係留した。同時に河川近傍のノンリフトバルーンで放球し、その飛行軌跡ならびに河川水表面温度の測定も行なった。

3.1 河道内の気温, 水蒸気量の鉛直分布

観測は日中の2時間毎に行なわれ、図-7に代表的な b_1, c_1, d_1 地点の気温, 水蒸気量の鉛直分布を示す。図中の点は気球の上昇・下降時に取得した値を示し、実線はこれらの平均値である。これらの観測が行なわれた時には、河川水表面温度は全ての高度の気温よりも低かった。観測値のばらつきは3月時が8月時に比較して小さく、大気の流れは3月の観測時には小さかったことを示唆している。高水敷の地表近傍の気温, 水蒸気量の鉛直勾配は8月の観測時に概して大きく、3月時に比較してこれらの鉛直上向きフラックスが大きくなっていったと考えられる。特に8月の敷上の水蒸気量およびその鉛直勾配は、日射がある時間帯に水面に比べて大きな値をとり、これは高水敷上の植生(芝、葦等)群落による蒸

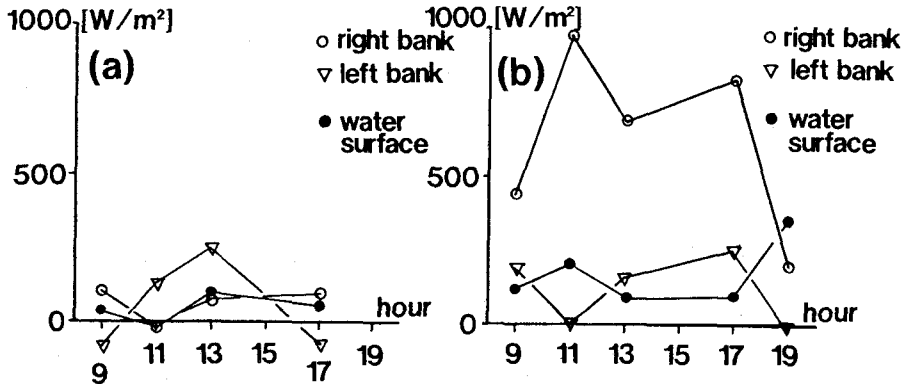


図 8: (a)1988年3月28日, (b)1988年8月24日 水面・高水敷の熱交換量(大気冷却時に正)

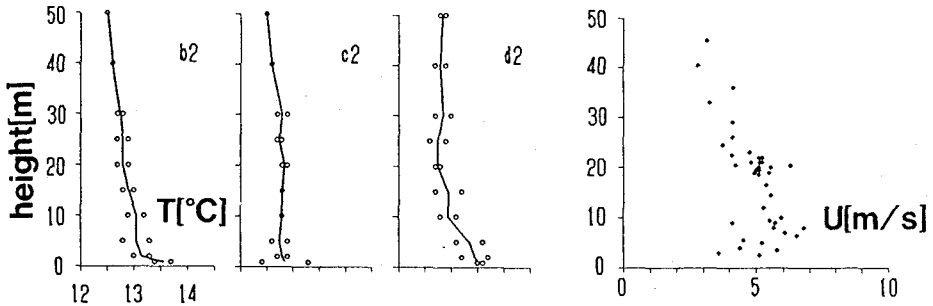


図 9: 気温, 風速の鉛直分布(1988年3月28日15時)

散の効果が見れたものと考えられる。

ここで植生群落から発生する水蒸気について考える。植生の葉表面、植生地表面からは蒸発散により水蒸気が大気中へ放出される。この量は植生域の葉総面積、葉表面の飽和水蒸気密度、蒸発散コンダクタンス等に比例する。葉総面積は葉の面積密度と植生域体積の積で与えられ、これは植生が存在する地表面積よりも大きく成り得る。また、葉表面温度は水表面温度より高温となっていることが都市河川研究室が行なったリモートセンシング解析の結果(未発表)より得られており、葉表面の飽和水蒸気量は水面上よりも大きいと考えられる。以上の要因を単純に重ね合わせて考えれば、植生域の水蒸気フラックスおよび水蒸気量の絶対値が水面よりも大きな値をとることが可能である。

3.2 大気が河道と交換する熱量

風が河道を横断する間に温度・水蒸気量の鉛直分布は各表面(水面・高水敷)からの熱・水蒸気フラックス、粗度等の違いにより変化する。図-7に示す温度分布には大気下層が吹送過程で冷却される様子が捉えられている。河道流下方向に現象が一樣であると考え、風が河道を横断して吹送した時に交換する単位面積当りの熱量は、2点間の気球の温度と風速の鉛直分布からトラバース法を用いて求めることができる。風速の鉛直分布は河道内で計測されていないので、ノンリフトバルーンの飛行軌跡から推定した。図-8に3月、8月の右岸・左岸高水敷および水面が交換する熱量の日変化を示す。両月の各表面の熱交換量には明確な日変化が認められ、その絶対値は8月に大きい。高水敷の熱交換量は春期に左岸が、夏期に右岸が大きな値を示す。その大きさは水面での交換量に匹敵、あるいは凌ぐ程であり、特に夏期の11時の右岸が交換する熱量は同時刻の日射強度、 670 W/m^2 (東京都大気保全局測定)を凌ぐ値となる。風が河道を横断的に吹送する間に形成される水面上の安定~中立成層の高さは10~15m程度の高さまで及ぶことがあり、これは測定値点周辺の都市キャノピー高さ(約10m)、堤防高さ(6m)と同程度である。この成層は市街地へ侵入すると同時に地表面からの加熱、都市キャノピー等の影響を受け、不安定な温度成層に移行することが予想される。河川周辺市街地の熱環境の改善という観点からは、この成層部を如何にしてスムーズに都市域へ侵入させるかということがポイントとなるであろう。

3.3 風が河道に平行に吹送した場合

風が河道にはほぼ平行に吹いた場合(南東の風)が3月の15時の観測に見られた。この時の気温と推定された水面上の

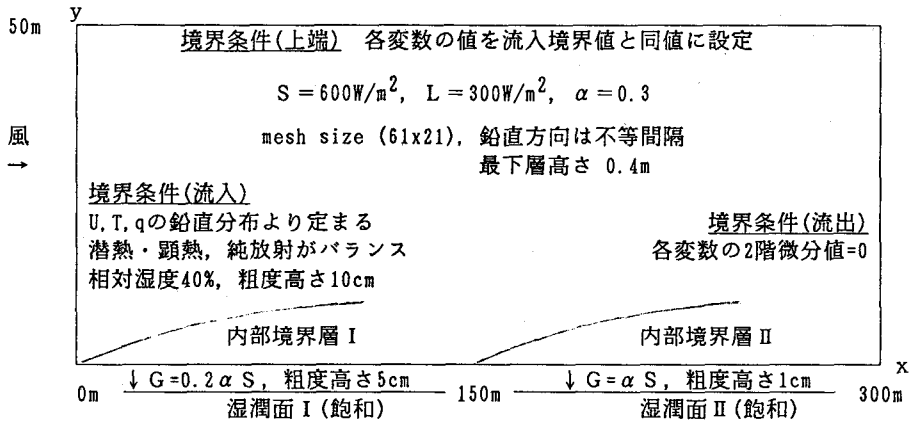


図 10: 計算領域と諸条件

風速分布を図-9 に示す。ここで特徴的なのは風速分布において約 10m 程度の高さに極大値が見られることであり、この位置は温度分布の下層に発達した安定～中立成層高さにほぼ一致する。この現象は風が河道に平行に吹いた時に特に顕著であったが、風が横断的に吹き、この種の成層が発達した場合にも観察された。この時の風速分布と高水敷、水面上の温度分布の関係から考えて、大気下層には河道流下方向に発達した熱対流性の縦渦が存在していたと推測される。

4. 湿潤面上に発達する内部境界層の数値計算

4.1 数値計算の概略

数値計算では以下に示す平均の風速 U, V (水平および鉛直成分)、温度 T 、水蒸気量 q に関する輸送方程式および連続式から成る式系を解いた⁸⁾。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} + V \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(K_q \frac{\partial q}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

ここに x, y は水平および鉛直方向座標、 t は時間、 K_m, K_h, K_q は運動量、熱および水蒸気の鉛直方向拡散係数である。

各輸送方程式中の拡散係数は Mellor and Yamada⁹⁾ により提案されている乱流モデル (Level 2) により評価した。このモデルでは拡散係数が局所的なフラックス・リチャードソン数と混合距離により算定される。また、圧力場は静水圧分布で近似し、さらに本研究で対象とする空間スケールは地衡風の空間スケールに比較して十分に小さいので、風速場は慣性力によって形成されるとして圧力勾配の効果は無視した。

計算領域の最下層では運動量、熱および水蒸気量の鉛直方向フラックスを与えなければならない。ここでは constant flux layer の仮定が成立する気層が大気下層に存在するとして、これらのフラックスを計算した⁸⁾。これと同時に熱収支式 (5) を解き表面温度 T_s を決定した。

$$(1 - \alpha)S + L - \sigma T_s^4 = H + IE + G \quad (5)$$

ここに S, L は大気からの短波および長波放射量、 α は表面のアルベド、 H および IE は顕熱、潜熱、 G は表面下方へ伝わる熱量、 σ はステファン・ボルツマン定数である。

4.2 計算結果

ここでは湿潤面上に発達する内部境界層の計算を行なう。想定する状況および計算条件を図-10 に示す。不安定な温度成層を有する比較的乾燥した気塊 (相对湿度 40%) が条件の異なる湿潤面 (I, II) 上に流入し、表面の粗度、熱収支バランスの変化の影響を受けて、内部境界層が流下方向に発達する。本来は高水敷および河川水面の各表面上の運動量・熱・

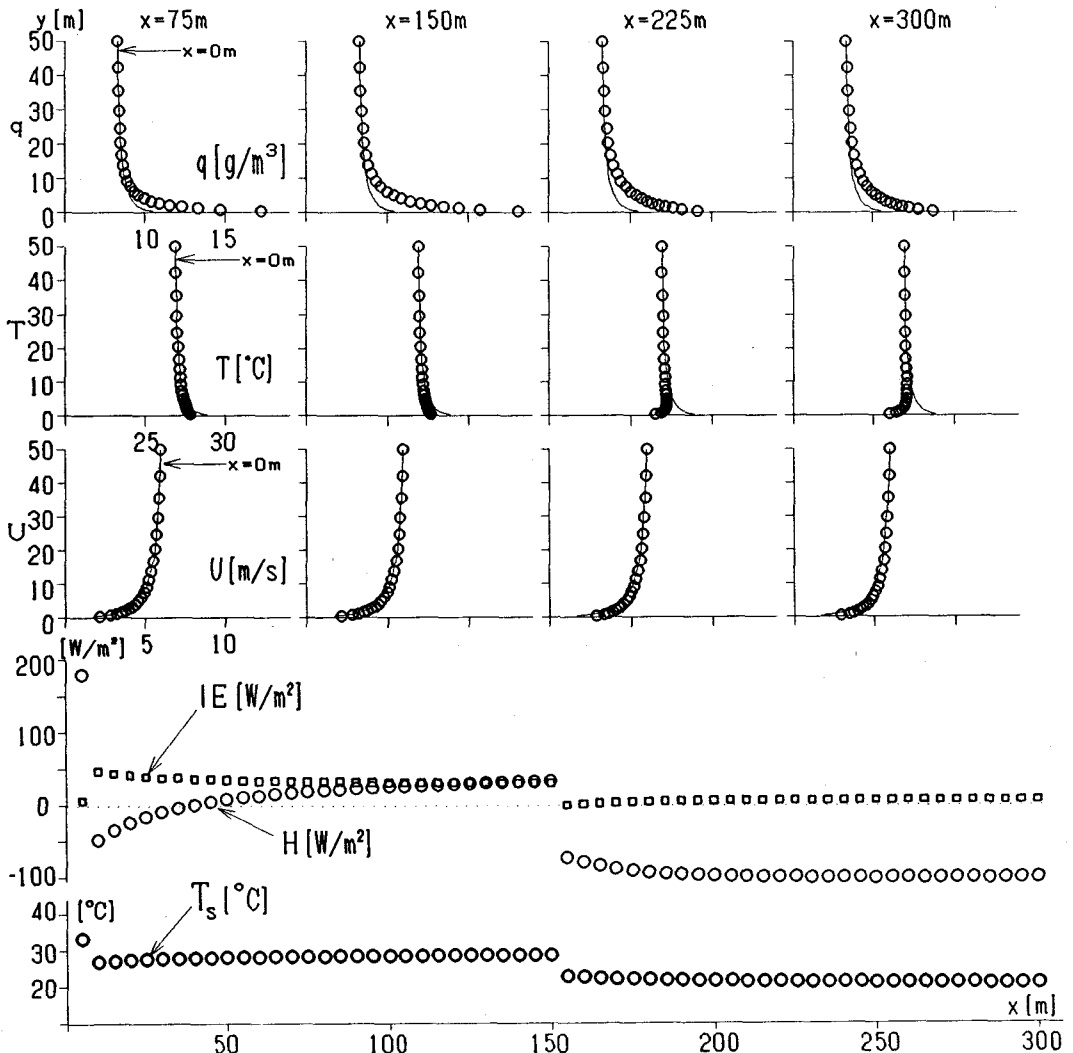


図 11: 計算結果, 上:風速, 温度, 水蒸気量の鉛直分布, 下:表面温度, 顕熱, 潜熱の分布

水蒸気量フラックス, 熱収支の特性をモデル化して数値計算に組み込まなければならないが, 現在のところこれらを十分な精度で表現し得るモデルは存在しない。従って, ここでは図-10に示すような便宜的な取扱いをした。湿潤面上の水蒸気量は飽和状態に保ち, 粗度高さおよび湿潤面下方へ伝わる熱量を変化させることにより, 両者の特性の差異を表現した。湿潤面Iは高水敷を想定したものであり, 湿潤面IIに比較して粗度高さを高く, また湿潤面下方に伝わる熱量 G を小さく設定した。

図-11に計算された水平方向風速, 温度, 水蒸気量の各地点での鉛直分布, 表面温度, 顕熱, 潜熱の分布を示す。風速, 温度, 水蒸気量の分布は流下するにつれて各面上で新たな平衡鉛直分布に近づく。風速分布下層の加速の原因は主に粗度高さの変化による影響であり, 大気安定度が安定側に移行することにより受けた影響は非常に小さい。大気下層には安定な温度成層が高さ約10m程まで発達し, この拡散係数は流入境界の値に比較して小さくなる。以上のことは, 従来より得られている粗度および表面温度が急変する場に発達する内部境界層の計算で得られている結果と一致する¹⁰⁾。

湿潤面での G を便宜的に与えたことにより, 湿潤面Iの表面温度および水蒸気量の値は湿潤面IIに比較して大きくなった。ここでは顕熱 H は上向きで大気を加熱し, 水蒸気フラックス (潜熱 IE) も大きくなっている。これに対して湿潤面II上では蒸発量は減少, 顕熱は下向きで大気を冷却している。以上は, 温度の鉛直分布下層の冷却は湿潤面II上で,

水蒸気量の鉛直分布下層の発達は湿潤面I上で、各々著しく進行したことの説明となる。実際の各表面(高水敷、河川水)の特性のパラメタリゼーションは複雑な素過程を忠実に反映したものでなければならないが、その概略はここで考えたメカニズムで説明できると予想される。

5. 結語

本研究では建設省土木研究所都市河川研究室が収集した荒川河道内外の気象観測データの解析を、主に風の吹送による移流効果に着目して行なった。さらに、湿潤面上に発達する内部境界層の数値計算を行なった。得られた主な結論を以下にまとめる。

- (1) 河川の気温に関する影響は吹送による移流により風下側に位置する市街地へ及び、そこでの気温降下あるいは上昇量は河道内外気温差と風速にほぼ比例する。しかしながら、水蒸気量に関してはそのような明確な関係は認められなかった。
- (2) 風が河川を横切って吹送する時には河道全体、すなわち高水敷と水面で熱交換を行ない、大気の下層が冷却される。高水敷の熱交換に対する寄与は大きく、日中には水面が交換する熱量を凌ぐことがある。また、これらの熱交換量は夏期に大きい。
- (3) 風が河川に平行に吹送した時には、風速の最大値が水面近くに現れる分布形になり、その最大値を示す位置は水面上に発達した安定～中立成層高さにはほぼ一致する。このことは風が横断的に河道を吹送し、この種の成層が形成された時にも観察された。この成層高さは10-15m程度に及ぶことがあり、これは周辺市街地キャノピー、堤防高さ等に匹敵する。
- (4) 湿潤面上に発達する内部境界層の数値計算を行なった。高水敷および河川水面の効果を模擬的に与え、河道内の温度・水蒸気鉛直分布が形成される過程の説明を試みた。

謝辞：建設省土木研究所都市河川研究室渡辺裕二建設技官には気象データを解析する際に多くの便宜をはかって頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1. 新田伸三, 東集成, 石井昭夫：環境緑化における微気象の設計, 鹿島出版会, 267p., 1981.
2. 吉野正敏：都市気候における水面の効果, 建築雑誌, Vol.98, No.1208, pp.42-45, 1983.
3. 村川三郎ら：都市内河川が周辺の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, Vol.393, pp.25-34, 1990.
4. 村川三郎ら：都市内河川が周辺の温熱環境に及ぼす効果に関する研究(統報), 日本建築学会計画系論文報告集, Vol.415, pp.9-19, 1990.
5. 片山忠久ら：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, Vol.418, pp.1-9, 1990.
6. 武若 聡, 平山孝浩, 池田駿介, 島谷幸宏：都市河川が周辺市街地の気象環境に及ぼす影響, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.44, pp.41-62, 1991.
7. 北川 明, 島谷幸宏, 渡辺裕二：河川周辺の気候の快適性, 土木技術資料, Vol.31, No.10, pp.506-511, 1989.
8. Kimura, F. : Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface; Test of a New Parameterization Scheme, J. Meteorol. Soc. Japan, Vol.67, No.3, pp.401-409, 1989.
9. Mellor, G.L. and T. Yamada : A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers, J. Atmos. Sci., Vol.31, pp.1791-1806, 1974.
10. Garratt, J.R. : The Internal Boundary Layer - A Review, Boundary-Layer Meteorol., Vol.50, pp.171-203, 1990.