

## 9. 热収支構造の歪みによる都市河川生態系 (公園緑地・街路樹等)汚染影響について の基礎的研究

1. 序

2. 都市内河川と緑地の熱汚染緩和効果

3. 都市河川形態・流況の地形学的研究と景観調査

4. 結 語

広島大学総合科学部教授 福岡義隆

広島大学工学部助手 成田健一



## 1. 序

人間が住んでいる地球上の環境は多種多様であり、そこには人間が居住することによって改変された環境が存在する。都市域が郊外の田園地帯と比較すると特有の気候を呈することは、17世紀にすでにかなり認識されていた。実際に気象観測としては18世紀から19世紀にかけて欧米の諸都市で開始された。1930年以降になると、都市の発達が進んで複雑になり、都市気候について詳細な調査が必要になってきた。1965年ころからは、都市の環境問題に対する関心が高まり、それと同時に都市気候学は、大気汚染との関連で大気の熱汚染として注目されるようになり、また、都市計画などの応用面で重要な課題の一つになってきている。

さて、都市化に伴う人工熱の蓄積や熱収支構造の歪みによって生ずる熱汚染により、都市の生態系（公園緑地や街路樹など）が破壊される恐れがあり、かつ、我々の生活環境もやがては脅かされるという。そういう都市の熱汚染公害を緩和する役目を担うであろう都市内の河川と、成育障害を招くがその前に汚染や気候の緩和作用もある都市緑地との影響に関して基礎的に研究するのが本研究の主旨である。

とくに、都市内河川の水温が周辺環境に及ぼす影響に関しては、大小様々な都市における実測による現象の実態把握と、風洞実験による水の影響調査、そして各地の都市気候調査資料や人工衛星LANDSATの画像解析など、文献資料による解析という3本立てで進めた。

なお、河川水の環境への影響を論ずるためには、河川の構造や流況を明らかにしておくことも必要であるし、また、河川とその周辺の景観と生態系との関係も認識しておかねばならないと考える。それらのことは、都市環境へ積極的に水環境を活用する上での示唆を与えることにもなる。

## 2. 都市内河川と緑地の熱汚染緩和効果

### 2-1. 現象把握のための実態調査

#### ① 热汚染現象としての都市気温分布

都市域がその周辺より高温となる気温分布図のようすが、海に浮かぶ島の地形図の等高線に似ていることから「熱の島（heat island）」と呼ばれている。その中心では気温が高いばかりでなく、相対的に湿度が低く、そのため都市生態系を破壊し始めて居り、「熱汚染公害」という評価がされるようになってきている。その形成要因の研究過程で、都市内河川が熱汚染（heat pollution）の緩和効果があることが分かってきた。本年度を含むここ数年の調査研究の結果をまとめてみよう。

#### i. 広島市と三次市など

広島市については、かつて筆者らが1978年の春夏秋冬の各季に、延べ21回の気温分布観測（自動車による移動観測）を行った。広島のデルタにおいては、一般的な都市の気温分布とは違って、一つの大きいヒートアイランドはできず、太田川を分流する6本の川で囲まれた各島に小さいヒートアイランドが幾つか形成される傾向があることを見出した。言い換えれば、各川が熱収支的ヒートアイランド形成の上でマイナスの要因、すなわち緩和作用を演じていると言える。

このことを熱収支的に確証づけるために、福岡・小林らは1985～1988年の間、広島市内と三次市内の河川において、福岡・井上らは1986～1989年の間、三次市内の河川において、成田らは広島市内の

河川において、それぞれ河川を横断する形で特別観測を実施してきている。

広島市の場合は、潮の満干との関係で水温が低い時と暖かい時がある。断面観測による結果、冷水時のみに河川水面上の気温と都市気温の差に比例し、暖水時には気温差がないことが分かった。ということは、広島市の場合は、河川は冷源としてのみ都市大気に作用している。メカニズムの詳細は②の立体構造解析結果のところで触れる。

ここでは、河川水がなぜ冷源として作用しているのかについて、熱収支的に考察しておくことにする。地表面での大気や水中での大半の物理現象のエネルギー源は太陽放射であることは言うまでもない。それが大気を透過して地表面で放射収支した残差、すなわち、正味短波放射量と正味長波放射量の差、正味放射量  $R_n$  が地表面（水面）で乱流・対流による顯熱  $H$  と蒸発・凝結による潜熱  $L_E$  及び地中（水中）への伝動熱  $G$  に配分されバランスされている。次の方程式で表される、

$$R_n = H + L_E + G$$

河川水が低温で冷源となっているとすれば顯熱  $H$  が、水の蒸発による潜熱吸収で冷却されるならば潜熱  $L_E$  が関与していると考えられる。 $H$  と  $L_E$  は、地表面（水面）近くと、そのすぐ上の 2 高度における気温  $\theta_0$ ,  $\theta_1$  および湿度（計算上は水蒸気圧） $e_0$ ,  $e_1$  測定値から  $H = h (\theta_0 - \theta_1)$ ,  $L_E = k (e_0 - e_1)$  により表される（係数  $h$ ,  $k$  は風速の関数として表される）。

三次市の場合については、市内を流れる 4 河川の各橋で水温を測定した時のヒートアイランドの例について考察してみよう。この場合も、広島市の時と同様に、車の先頭にセットしたサーミスタ温度計による移動観測結果である。第 2 図に示すように西城川と馬洗川によって分断される形で 2 つのヒートアイランドが形成されやすい傾向がある。特に西城川岸では第 1 表からも明らかなように、最も低温の河川水の影響で気温も低くなっている（水温は橋の上から赤外放射温度計で測定）。

なぜ、この川だけがほかより低いのかは、推測の域を出ないが次のように考えられる。この西城川の上流沿岸に小さいダムがあり、そこからの放流水が地下を流れてきて、この川に流入することと、この谷が比較的深いため、日影効果による加熱不足によるとも考えられる。

ヒートアイランドを緩和する冷源としては、河川水のほかに水田とか緑地（畠地も含む）などもあるので、移動観測の各ポイントを囲む円内（半径は従来の経験から 200m が妥当とした）における土地利用占有面積（率）を地図上で読み取り、これらと気温や湿度などの気象要素との関係を調べた。その結果の一部が第 3 図である。図中の  $\Delta e$  は前述のように、移動用の車の先端に設置した 2 高度の湿度  $e_0$  と  $e_1$  の差から求めた水蒸気傾度である。これは蒸発に伴う潜熱交換量  $L_E$  に比例する値である。土地利用率の図に大体の傾向として見られるように、主として河川水面  $W$ 、畠地も含む緑地  $G$ 、水田  $R$  などが大きい所で相対的に気温が低いのは、単に低水温などの冷源によるのみならず、水面や植物体からの蒸発散の際、潜熱交換によって冷却されるものと考えられる。この効果は特に水の張っている夏に顕著であり、水のない冬には冷却効果が弱い傾向にある。

ほぼ同様の調査を東広島市において実施した（福岡、1989）。影響がありそうな川は黒瀬川だけであるが、溜め池の多い地域で、水面と緑地の気温緩和効果はここでも認められた。

## ii. 名古屋と犬山市など

大都市の名古屋とこれに隣接する小都市として犬山市（愛知県）と各務原市（岐阜県）などで都市

気候調査を実施した。ただし、名古屋市の方については気象台と郊外（空港）の比較で見たものと、大和田ら（愛教大）による調査結果を参考にする。また、犬山市などについては団地気候レベルにヒートアイランド現象がどの程度みられるかという目的と、水面（水田）や植生（畑地）の冷却効果の有無を確認するのが主目的である。

まず、名古屋についてであるが、名古屋地方気象台と名古屋空港での平均気温で比較した結果では、夏の数カ月間は都市気候現象すなわちヒートアイランドは現れず、秋から冬、春にかけて都市部の方が高温であるような季節変化を呈している。夏にあまり都市気候現象が出現しないのは、夏に海風が発達するために、熱汚染が相殺されるとも考えられる。

名古屋市内には木曾川という大きい川が流れているが、これは西部から北部にかけての郊外域であることと、都心部を流れる庄内川などは比較的小さいので、河川水は気温緩和にはあまり寄与していないと考えられる。事実、大和田らによるヒートアイランド調査の結果では、その等温線には河川水の冷源としての効果は殆ど見られない。ただ、夏季の不快指数分布図のなかで、庄内川の辺りで不快指数の高い地域が分断されている。すなわち、辛うじてこの比較的小規模の河川水によって、気温の緩和作用かなにかが働いて、その周辺よりは多少、不快指数が低くなっているようである。

むしろ大気の熱汚染が強力であることと、産業排水や生活排水による河川水の熱汚染が平均水温度を年々高めていることが報告されていて、冷源どころか熱源となっていると思われる。

さて、名古屋市の北、愛知県の北端に位置する犬山市の日の出団地における都市気候観測結果について概観する。筆者等はこの団地については1987年以来、気温や湿度の分布観測を、1988年12月からは更に団地内外のセットで温湿度の自動記録調査を継続している。

本調査地域は木曾川からはやや離れており、さらには団地内外に目立った河川はないので河川水の影響は皆無と思われる。しかし、今年に入ってから、車での移動による気温の分布観測に並行して実施した表面温度測定（赤外放射温度計使用）の結果、水田面や小さい「かんがい」用水路で、周辺の気温より低い温度を示していることから考え、植物体や水体からの蒸発散とともに潜熱交換による冷却効果が働いていることは確かである。

特に水田の影響については、これまでの気温の分布観測結果にも現れている。ただし水田に水が張っていない春の場合（4月の例）は余り効果は明瞭でなく、都市気候現象が比較的現れにくい夏にも拘わらず、水の張っている8月には冷却効果が現れている。

具体的にどのくらいの冷却効果かを、8月4～9日の観測結果を見てみると。表面温度の違いで言うと、アスファルト面に比べ水田面は5°C（夜間）～15°C（昼間）も低い。かんがい水路面は水田より2°C（夜間）～8°C（昼間）低い。もちろん、この日の出団地での現象が一般的か否かが問題になる。そこで、同じく平野部にあってほぼ同規模の隣接団地として各務原市の丸子団地で同時観測を試みている。この団地には周辺に水田がなく畑だけなので、両者を比較することによって、日の出団地の方の水田などの冷却効果を評価することができる程度は可能である。昨年12月から両団地の内外に自記録温度計を設置して継続観測を行っている。団地内外の温度差をヒートアイランド強度（HI強度）とみなせば、冬には両者に違いは認められないが、春は日の出団地の方のHI強度が大きい。これは水田が多い日の出団地周辺が土壤水分が相対的に多く、その蒸発に伴う冷却効果が強いためと言える。

この夏の観測結果については目下解析中であるが、8月上旬の移動観測12回（1日3回、最高気温の頃、日の入りの2時間後、日の出の2時間前、これを4昼夜実施）の概要で言うと、先にも触れたように、団地周辺の土地利用の違いがよく現れている。特に季節的に水田や畠地における作物の有無とか、水分の多寡が変化することが熱収支の上で影響受けることは確かである。

### 並、岡山市と津山市など

岡山市のほぼ中心を南北に旭川が流れている。これは岡山県の3大河川の一つで水量も豊かであり、この水体の影響が都市気候現象特にヒートアイランド形態にどのように反映されるかを、筆者等の実測結果に基づいて、考察して見よう。第6図は冬の観測結果の一部であるが、川岸で温度傾度がやや大きくなっている。河川水の影響が見られる。緑地帯の多い郊外は当然低温域となっている。なお、図のベースには建坪率と容積率の分布を描いてあるので、建物の密集度や高さに比例して気温が高いことも読み取れる。

一方、岡山県の内陸部に位置する小都市、津山市の場合は、夏の例を掲げたが（第7図）、市の南辺を東西に流れる吉井川の岸に添ってやや低温の地域が観測された。約8万人の都市であるが、この場合も最も建物の密集している地域が高温域であり、それが吉井川によって緩和されているのが分かる。

#### ② 热汚染の立体構造と河川水の関係

ヒートアイランドの立体構造の実測例はあまりない。特に河川付近での比較観測は皆無に等しい。福岡・井上らは三次市の都市気候調査の際、ヒートアイランドの中心部（三次小学校）と郊外としての西城川河原においてカイツーンを使用して温湿度の垂直分布観測を実施した。1988年の春夏秋の3シーズン行ったが、結果の一部を第8図に示す。2-1。（①i）で述べたように、西城川の水温が最も低いことから、接地面層（100m以下）は常に都心部より低温である。しかし、気温の垂直分布が都心部と河原とで交差する、いわゆる「クロスオーバー」現象が、40～110m（平均70～80m）辺りに認められる。これまでの内外の研究結果によるとクロスオーバーの高さは都市域における建物の平均の3倍くらいとされているが、三次市の一つのヒートアイランドが出現する旧市街地（三次町）の中心部は大体4～5階の建物（20mくらい）であるから、ほぼ経験則に合っていると言える。このような気温の垂直分布だけでなく水平分布などの上に、時に異常な値を示すことがあるが、本地域では川筋に添って発生する霧が関わっていることが、別の調査で確認された。

1988年の12月に川霧とヒートアイランド（=HI）強度との関係を調べた。車による気温の移動観測と同時にスポンジ吸着法で霧の濃さを定量的に調べた。その結果は第9図に示した。明らかに霧が濃い程、HI強度が小さくなることが分かる。要するに川霧が都市気温（热汚染）を緩和させているのである。

さて、広島市における河川近くの立体構造については、成田らがこの数年間観測している。太田川放水路（三滝橋）と京橋川（鶴見橋）における河道内の断面温度分布の一例を第10図(1)と(2)に示す。図からも明らかなように、春と夏は河川水が冷源となって居り、秋と冬は影響範囲は狭いが熱源となっている。春季の冷却効果は比較的小さく、水温と市街地気温の差はせいぜい2～3°Cである。夏季にはその差が5～7°Cと大きく冷却効果が年間で最も大きい。

冷却効果の水平方向の影響範囲（河に対して直角方向に）は風向と風速によって異なる。このことに関しても成田らは、太田川放水路と東隣の天満川について同時比較観測を行った。前者は川幅が広く沿岸の家屋密度がやや小さいのに対して、後者は川幅が狭く建物の密集した市街地を流れているので、川（水量）の規模と都市化の規模の違いについても検討できる。広島のデルタには海陸風の影響もあって、川の流路に沿った風が吹きやすく、川に直角方向への影響をとらえるにはあまり良い条件は期待できない。辛うじてやや斜めに吹く風の時について、冷却効果の影響範囲を調べた結果、家屋密度の小さく川幅の大きい太田川放水路についてみると温度の影響範囲は、大体 300~400 m とかなり大きい。それに対して、川幅の小さい天満川のほとりで家屋密度の大きい所では、冷気の輸送が抑制されるためか、冷却範囲はわずかに 50~100 m である。もう少しでも直角に風が吹けば距離が延びる可能性はあるが、あまり風が強すぎても拡散希釈効果が働いて、温度差を減少させることになる。とにかく野外での実測だけでは普遍的な傾向は見出せないので、風洞によるモデル実験が必要となる。次項でその結果について考察する。

## 2 - 2 風洞実験による水の影響調査

成田らは前述のように、広島市内の河川を想定して風洞実験を行った。

### 実験方法

風洞内に幅 200mm・長さ 1000mm の水路を設け、その両側に建物に見立てたブロックを配列し、気流の方向と直角方向へ高さ約 10mm での風速と温湿度とを測定した。温湿度の測定にはサーミスタ温度計および容量型湿度計をそれぞれ 2 台用い、水路の風上側に設定した基準点と各測定点とで同時に比較観測を行った。なお、ブロックの配列の例を第11図(2)に示した。同図の(1)は本実験で使用した広島大学工学部所属のゲッチンゲン型風洞装置概観図である。

### 実験結果

市街地（建物密集地）への河川水の影響範囲の指標として、ここでは湿度比（VP）湿度変動（RH）を用いて考察する。ここには結果の一部を示す。第12図は建物密度による差異を示したものである。11図に示した基本的な配列  $S_1$ （低層の建物のみ、間隔  $b = 10\text{mm}$ ）に比べて、 $b = 20\text{mm}$  ( $S_2$ ) および  $b = 30\text{mm}$  ( $S_3$ ) では気流と直角方向へ  $Y = 120 \sim 200\text{mm}$  の間で、湿度比も湿度変動も増加している。建物の間隔を広げると僅かであるが水温の影響範囲が拡大することが確認できた。

第12図の(2)には容積率を変えずに建物の集合化させた場合について比較したものである。平面的に集合させた場合（4Sh モデル）も、立体的に集合させた場合（4Sv モデル）も、河川水の影響範囲は拡大するが、立体的集合化の方が効果が大きいことも分かった。このほか河川と直交する街路の幅をいろいろ変えた場合についても、同じような実験を行った結果、街路幅が大きくなるのに比例して水温の影響範囲が増加することが分かった。

以上の一連の実験結果から明らかなことは実際の都市において、市街地の建物の密集度（建坪率や容積率）が小さい程、河川水の気象緩和作用が強く働くということである。

今回は河川の流路に沿った風が吹く場合の実験と実態調査であるが、河川に直角方向に風が吹く場合は影響範囲が大きくなることは、確かであろう。今後の調査に待ちたい。

## 2-3 文献資料による解析

### ① 全国主要都市の熱汚染度(Heat-island HI強度)

都市気温、すなわち「熱の島」(heat island)の形成成因の主なものとして、[1]人工的排熱、[2]大気汚染による温室効果、[3]非蒸発被覆面(コンクリート、アスファルトなど)増加・緑地や水面の減少による冷却効果の低下、[4]ビルの林立による大気拡散希釈の低下、などが考えられている。

これらのうち、特に[1]と[2]は都市活動度、すなわち生産活動や消費活動の大きさに比例する。生産・消費活動の大きさは人口数に比例する。都市人口が急増すれば、諸施設も多く必要となり、コンクリート建築物も増えるので、間接的には[3]や[4]の要素も人口数に関係してくる。

都市の人工熱を間接的に評価するものとして、人口数そのものよりは、人口集中地区(DID=densely inhabited district)あるいは中心業務地区(CBD=central business district)における人口数の方が妥当な指標であるとする見方もある。しかし、DIDにしてもCBDにても、そこに集中している諸施設や交通機関などは、そこに住む人々だけのためにあるわけではなく、都市全体の人々のために冷暖房が使われ車が行き交うのであるから、行政的な都市の人口数そのものが、都市気温(HI強度)に反映されると考えられる。

そこで、筆者は我国の都市について、カナダのOke氏は欧米の都市について、都市の人口数と都市の内外の気温差、すなわちHI強度(熱汚染度)の年間最大値との間の関係を調べてみたのが第13図である。我国の分は、筆者自身による調査結果も含め、東京以西の各地の気候学者などが実測した都市気温、都心と郊外の温度差の年最高値(年間数回～数10回観測したもののうち)と、観測当時の人口数との関係である。

この図からいえることは、北米諸都市の場合、人口増加に伴う都市気温(都市熱)増加がかなり大であり、西欧はそれにくらべやや緩やかであること、そして日本の場合は、小さい都市・集落に関しては人口増に伴う都市気温の上昇は小さいが、中規模から大都市へ発展していくと、北米よりも急激な昇温現象が認められる。

- なぜ、このように欧・米・日で傾向線が異なるのであろうか。一応、考えられることは
- A. 都市構造のちがい～構築物・材質のちがいのほか、道路の構造・公園緑地の多少
  - B. 都市活動のちがい～都市の機能やエネルギー消費のちがい
  - C. 気候帯のちがい～気候因子(標高・緯度・水陸分布など)

などがあげられる。このうちAの要因が本研究のテーマである。公園緑地や水面の効果について次に考察する。

### ② LANDSAT画像解析

都市内の土地利用形態の違いが都市気温に反映されていることは、これまでにも随所で触れてきた。土地利用の各項目が占める面積の比率によって、都市気温形成のプラス要因の大きさやマイナス要因の大きさが決定づけられ、これらを関数とする多元回帰式から都市気温を評価する試みは、福井(1956)らによって行われている。

航空写真などを用いて、緑地G、商工業地I、水面W、住宅地H、裸地と畠地Bなどに土地利用区

分し、一定の大きさの半径で円を描き、それぞれの面積の百分率を求めるとき、次のような回帰式によって任意の地点の気温  $\theta$  が表される。

$$\theta = a + b G + c I + d W + e H + f B$$

ここで定数  $a$ 、係数  $b \sim f$  は半径や季節などで異なるが、緑地  $G$  と水面  $W$  の係数  $b$  と  $d$  は大体マイナスであり、都市気温を下げる要因となっていることを示している。逆に商工業地や住宅地・裸地・畠地などはコンクリートやアスファルト、圧密土面などの不透水性面で覆われ、気温を高める効果を示すことが多い。筆者等は広島市や三次市、東広島市などのヒートアイランドについて、2万5千分の1の土地利用図を用いて、この種の研究を行った。その一部（三次市の分）はすでに2-1①iで紹介した。

ここでは日本全国の主要都市について、都市全体に関して、 $G+W$  が占める面積（大きさ）が都市気温に負の効果を示すかどうかをみるために、ランドサット写真の画像解析を行った。ナック社の画像解析装置によって各土地利用面積率を求め、そのうちの水面  $W$  と緑地  $G$  及び畠地  $F$  の合計と、先に示した各都市内外の最大気温差  $\Delta\theta$  との関係を第14図に示した。この図から明らかのように、 $\Delta\theta$  と  $G+W+F$  は反比例（双曲線）の関係にあることが分かる。東京の  $G+W+F$  が大阪と比べると大差ないにも関わらず、 $\Delta\theta$  が極端に大きいのは3倍の人口数が物語るように、人工排熱量の差も考えられる。都市の面積の上でもほぼ3倍と大きく、そのことは海拔高度などの地理的条件の違いが東京の  $\Delta\theta$  を大きくしていることは、Price のデータに基づく都市の面積と  $\Delta\theta$  の関係からも明らかである（第15図）。このことは理論的に Summers の次式で証明される。

$$\Delta\theta = \left( \frac{2Q \cdot \alpha \cdot L}{U_0 \cdot C_p \cdot \rho} \right)^{0.5}$$

ただし、 $Q$ ：人工熱、 $\alpha$ ：郊外での気温遞減率と乾燥断熱減率の差、 $L$ ：都心と周辺の距離、 $U_0$ ：郊外の地上風速、 $C_p$ ：空気の定圧比熱、 $\rho$ ：空気密度。

上式の右辺で、 $L$  以外の変数を  $f(Q, U_0)$  で変換すると、次のように書き替えられる。

$$\Delta\theta = f(Q, U_0) \cdot \sqrt{L}$$

要するに、15図でも示されたように、他の条件が一定であれば、都市気温（H I 強度、ここでは  $\Delta\theta$ ）は都市の大きさ（ $L$ ）に比例すると結論できる。

### ③ 土壌水分・温排水源としての河川水

最近の大都市において、地下鉄や地下街からの排熱によって大地の熱汚染が問題になっている。これは熱の運び屋である浅い地下水が不足していることなどが主な原因とされる。都市内河川でもその沿岸では土壌水分が豊富であること、そしてそのことが熱拡散を左右することを、東京都の保谷市から武蔵野市にかけて地中温度と土壌水分の分布観測の結果（福岡、1965）から明らかにした。すなわち、川岸に近付くほど土壌水分が漸増し、それに伴い温度拡散率  $\kappa^2$  が増大するが、ある距離まで接近した後は逆に水分が多くて温度拡散が鈍ることが分かった。このことは温度拡散率が  $\lambda$ （熱伝導率）と  $c\rho$ （比熱と密度の積）の比であることから理解できる。すなわち、土壌水分の増加とともに熱伝導率が大きくなり、温度の拡散がよくなるが、水分がある臨界値を越えると、熱容量が大きくなり過ぎて温度拡散が鈍るようになるわけである。

さて、都市河川水そのものに高温の鉱山排水が流入しているために、農業用水として使用できないばかりでなく、都市域に入って周辺大気の熱収支に歪みをもらたし、気温を高くしたり霧を発生させた例が、いわき市（福島県）小名浜で観測で明らかにされた（福岡、1978）。この現象が上流の炭鉱が廃鉱になった後はまったく見られなくなった。この顛末は廃鉱前後の気温分布観測（第16図）で実証された。すなわち、炭鉱操業中である1974年8月6日の小名浜（いわき市）における気温分布の中で、都心を流れる藤原川に沿って30～31°Cの高温域が認められたのが、廃鉱（1976年）直後の1977年8月22日の観測結果には全く見られない。市街地で高温というパターンになっている。

これは稀に見る現象であるが、河川水が都市気温を緩和する作用とは逆で、今後、温排水による都市環境への影響がないとは言えない。先にも述べたように、河川水の平均温度が漸昇して平衡温度（熱収支の上で年平均状態で接地気温と平衡になる温度）より高い都市河川（例えば東京都の荒川で約1°C高く、名古屋市の長良川でも0.9°C高い）が増えていることも報告されている。見逃せない環境問題である。

### 3. 都市河川形態・流況の地形学的研究と景観調査

都市大気の熱汚染を緩和させる都市河川を評価する意味でも、また、後述する都市生態系との関係を論ずる上でも、河川の形態や流況の特性を把握しておく必要がある。特に昨今のウォーターフロント時代でもあり重要な課題の一つではある。

#### 3-1 河川形態の地形学

河川については、地形地理学上とか河川工学上あるいは法規上など、さまざまな立場から分類されている。分類するということは、分類の基準によって川の特性が評価されることになるので、たとえば流域形態の分類などは重要である。

河川の流域形態には、(a)放射状流域、(b)平行流域、(c)羽状流域、および(d)複合流域、の4つある。放射状というのは、流域中央に四方から支流が集まり、円形か扇状の流域を呈するもので、阿賀野川がこの例である。これに多少似ているのが北上川などの例に見る羽状河川である。同じくらいの水系が互いに平行に発達し、最終的には合流するのが平行状流域である。阿蘇の盆地などにみられる。

これらの流域形態に基づき、都市内河川の平面的な関係を分類すると、(A)網状河川（ネットワーク）、(B)放射状（扇状）河川、(C)平行河川、(D)単一河川、の4つで、広島市の太田川は放射状河川の一種であり、大阪の淀川は網状河川である。

これらの流域の形態的特徴を定量的に表現するのに、流域形状係数というのがある。流域の面積をAとし、本川（幹流）の長さをLとすると、流域の平均幅 ( $W = A/L$ ) とLとの比が流域形状係数Fである。すなわち、

$$F = (A/L) / L = A / L^2$$

この係数は放射状河川や網状河川で大きく、流出量と時間の関係図（ハイドログラフ）から言えることは初めのうちは徐々に流れ、本流に集まって一举に流出するというタイプである。Fが小さい北上川や吉野川などは早いうちに支流から本流に入り時間的には平均的に流出するタイプである。この

ことは河川水の環境汚染や河川生態系に密接に関係してくる。

流域形態を決定づける要因の一つに流況があり、それは流路形態に大きく左右される。特に蛇行している場合は、堆積斜面（攻撃斜面の反対側）は浅瀬になり、流れも渓み勝ちで水質などの上で問題である。たとえば、蛇行の波長は流量の平方根にほぼ比例するとか、蛇行波長が河床堆積物に占めるシルト・粘土の割合と深い関係があるともされる。河川水質の潜在的性質に反映されているわけである。

河内は主として広島市とその周辺の河川の蛇行の地形学的研究を進めてきている。とりわけ中国地方に多い穿入蛇行と、例は少ない自由蛇行についていろいろな角度からアプローチしている。昨今の土石流・山地崩壊などの災害が発生しやすい花岡岩風化土質の地域と、古生層地域（石灰岩）の穿入蛇行について比較調査している。一般に花岡岩地域の穿入蛇行の方が蛇行帯の幅や谷幅が広い。蛇行の湾曲度S (sinuosity)は流路に沿った長さd (distance)と軸距a (axial-distance)の比で表わされるが、古生層地域で平均1.96、花岡岩地域で2.10であり、分散度がそれぞれ0.59、0.75で、前者の方が湾曲度が大きく、しかもバラツキが大きい。すなわち、花岡岩の方が一般に風化に弱いため谷幅は古生層地域より早く広がる傾向にあり、また花岡岩地域には節理に制約された蛇行が多く、流路はしばしばジグザグのパターンをとり不規則で、それゆえ湾曲度頻度にもバラツキがでてくると言える。

また、中国地方の穿入蛇行について、蛇行の波長 $\lambda$ と流域面積Aとの関係を調べると次式のようになる。

$$\lambda = 98.8A^{0.42}$$

このように自由蛇行でない穿入蛇行においても、蛇行の規模を評価するのに妥当な指標である波長と、流量の函数である流域面積との間に高い相関関係(0.900)が得られ、欧米での穿入蛇行のそれとほぼ同じ函数関係を示すことが分かった。

さて、湾曲度は地形図上での平面形で計測したものである。これを横断面形でみたらどうなっているか。たとえば、横断面の非対称度とは如何なる関係にあるかについて、広島市佐伯区の八幡川で調べてみた。その結果、両者の対応がよく、湾曲の程度の著しいところで横断面形の非対称性が強く、比較的直線状の河道はその横断面形が対称的なことがわかった。この他の地形の諸変数とともに、上流から下流への変化は、欧米、とくにイギリスの例に比べてかなり著しいことも分かった。

ここで、興味ある作業結果が得られた。地形図には各種の縮尺のものがあるが、八幡川の平均湾曲度を5種類の地図で読み取って、それらの値と縮尺の逆数の関係を求めたのが第17図である。この図は地形計測に限らず、地図を使用する環境調査研究にとって重要な問題を提言しているといえる。

### 3-2 河川景観調査と生態系の関係

都市の熱汚染が河川水の熱的特性によって直接的に緩和されることは、これまでにも各種の実態調査に基づいて述べてきた。しかし、河川水面は見た目にも涼しさを呼ぶような一種の心理的効果も大きい。

そのような意味から、河川の景観が持っている周辺環境へのインパクト、あるいは沿岸住民からみ

た都市河川の景観としてのあるべき姿などを、次に実情調査により考察した。また、河川景観の構成員でもある生態系（河川沿岸植生や水中生物）についても概観してみた。

### 広島市太田川における景観調査

フィールドとしては、広島のデルタを貫流する太田川とその各支流である。それらの河川とその周辺の環境について、景観的に評価することを試みた。とくに、河川周辺の人間環境との関わりを把握する上で、川に掛かる橋は、景観視点として恰好な場所である。

橋は河川によって隔てられた人々の親しい往来を容易にしてくれる。まさに「橋渡し」の重要な意味を有する。幾筋かの川によって細分されたデルタの島々を橋が繋ぎ合わせ、ひとつの街をなしている。だからこの街から橋をなくすと都市としての機能は失われてしまう。

広島は橋の多い街である。四国五郎という郷土画家の本に「広島百橋」というのがあるが、かつては日本の気候風土にあった木製の「仮橋」が大半であったらしい。日本語の橋を「かける」（掛ける、懸ける）というのは、もともと「危険な谷川をまたいで橋を掛け渡す」ことからくる仮設橋が第一の目的であった。しかし、ここ広島は原爆でことごとく壊滅されたため、戦後は鉄筋コンクリートなどによる歐米並の「永久橋」に様変わりした。

広島市（旧市内）の各河川について、それぞれに掛かる各橋において次のような項目を設定して、橋そのものの計測などとともに、橋周辺の景観調査を実施した。

#### [調査用チェックリスト]

##### I. 橋の名前と完成年

##### II. 橋の大きさと形

長さ（地図上判読と歩測）、

幅（歩測）、

形（タイプをスケッチ）

##### III. 橋の材質と「みばえ」と用途

材質（コンクリートかどうか）

「みばえ」（近代的かオーソドックスか、美しいか否か）

用途（人だけ、人+自転車、人+自転車+自動車、など）

##### IV. 橋周辺の土地利用

河川敷（河原）の利用（公園、運動場、駐車所、畑など）

土手（堤防）（人道、車道、サイクリング道、緑地帯など）

川岸周辺の土地利用との関連

##### V. 橋近くの流況

水量

流速（歩速に比べて）

水質（みかけ上の濁りなど）

水草の有無、中洲の有無など

## VII. 橋周辺の全般的な環境

周辺の景色の善し悪し

周辺の建物の混み具合

周辺の自然破壊の程度（川としての自然度）

生活の場としての安全性（洪水、氾濫、水難事故などにたいして）

以上の内容について、複数の調査補助員によって実態調査をし、関連した文献などを参考にしてディスカッションすることにより、少しでも客観性を持たせるように努めた。その調査結果のまとめは各調査補助員の直筆のままで示したのが第2表である。個々の河川に関する具体的な内容は表の通りであるから、ここでは全般的な特徴などを述べるにとどめる。

広島市内を貫流する6つの河川は、いずれも大きい。しかし、いずれも両岸はコンクリートで護岸工事されていて、自然性の乏しい川ばかりである。橋は戦後、すなわち原爆投下後、全面的に作り変えられて、殆どが近代的な橋である。辛うじて元安川や猿侯川の一部にレトロ調のものが2～3あって、情緒を誘う。

都市環境の上では、河川敷内か土手沿いに公園緑地化を徹底すべきところであるが、河原の公園は太田川放水路の半分くらいと猿侯川の一部に見られるだけである。土手沿いの公園緑地化は、京橋川には全面的に存在し、天満川は半分くらいといったところで、その他の川には殆どない。

高層ビルなどが接近して林立していて、沿岸の景観は決してよくない。河口近くの埋め立て地などは、工場や倉庫などが立ち並び、風情がないが、川幅の広い、ゆったりした流れの河口近くでは、蠣の養殖がまだ残っていて、ホットさせてくれる風景もある。

流量はいずれも豊かであり、満潮時には海水が入ってくるので、汚染は比較的和らげられているようと思われる。そのことと関連して水中生物について、今回の目視観察と文献により考察する。

### 広島市太田川における生態系

太田川の水質汚濁をBODでみると、水道2級、水産1級に対する基準値2mg/1を越える河川がある。年平均値でいうと猿侯川など2～3あり、最大値でいうと殆どの川が基準値を越えている（広島県環境白書、昭和62年版）。昨今、酸性雨の時代であるが、PH濃度は7～9とアルカリ性を呈している。このような化学的に濃度を測定する方法に代わるものとして、水中生物を指標する方法が工夫され実用化にむけて開発されている。

生物からは、化学的な数値からは評価しえない総合的な環境の善し悪しが読み取れる。環境条件を表現する一つの手法として「生物指標」が考え出されてきた。すなわち、ある水域の水質を、そこにすむ生物（群集）により判定するのである。

太田川における生物による環境調査が、建設省中国地建太田川工事事務所によって実施された（昭和47年）。ここでは、結果の概要だけ紹介するに止どめる。調査対象の生物群集は底棲動物、浮遊性生物、付着性生物、底質生物の4群である。

底棲動物としては、感潮帯ではイトミミズやゴカイ、ヤマトシジミなど、上流ではカゲロウ、カワゲラ、ユスリカなどが優占している。イトミミズ（モドキ）などが多いことはかなり汚染が進んでいることを示す。

浮遊性生物群としては、動植物性プランクトンで、この場合、感潮河川においては干潮によって群集に差異が存在するようである。しかし、海産が優占種である。

付着生物群としては珪藻類、藍藻類のほか緑藻類、原生動物などが出る。川幅が大きくなると、右岸左岸によっても生物環境が変化することがあることを示した。

底質生物群は底泥の表面に生息する生物を総括したものである。

以上の調査などから総合して、最も汚染のひどいのは猿侯川の東大橋より下流部と、太田川放水路の中流部の三滝橋と己斐橋の間であり、次にやや汚れが目立つのは、猿侯川上流と放水路上・下流、および他の河川の極く下流部（河口近く）である。

その他、河川沿岸の環境と生態系の関係として、樹木の年輪成長量の調査も試みている。ただし、旧市内の河川近くの樹木は、大半が戦後になって植林や移植されたものが多く、河川との関係を見るためのサンプルは得られない。もちろん、都心部的な場所の年輪と、郊外的な場所の年輪の比較は可能であった。その結果の一部を示したのが第18図である。この種の研究例は国内外で少なく、これだけでは断言できないが、都市内の年輪成長量は自然の、すなわち気候変動による気温の変化には関係ない加熱分として、ヒートアイランド効果が働いて、郊外の樹木の一般的成長とは異なることは確認できた。このことは、以前に筆者が東京や福島で類似の調査を試みてある程度確証づけていたことがある。また、単に都心部の気温が高いだけではないことは、東京都心部ではむしろ郊外より常に成長が悪いこととか、工業地帯近くで年輪成長量が小さいことなどの事実からも、大気汚染の影響も作用していると言える。

#### 4. 結語

本研究において、都市の気温などに郊外と異なる特殊な気候が形成され、特に気温が高いヒートアイランド形成（熱汚染）の原因は幾つかあることを述べた。その中の一つに河川や緑地の減少、すなわち蒸発散に伴う潜熱交換による冷却作用の弱化があげられる。この場合は水や緑地の気候緩和（熱汚染緩和）というポジティブな関係であるが、温排水による大気の高温化とか、熱汚染による植生破壊のようなネガティブな関わりの面もあることを論じてきた。

このような都市大気に対する河川水や緑地の熱的・物理的な作用・反作用ばかりでなく、人の心理面へのインパクトや水質・水中生物などの環境条件としても重要な意味があることを、景観的な実態調査や各種の文献資料によって考察してきた。

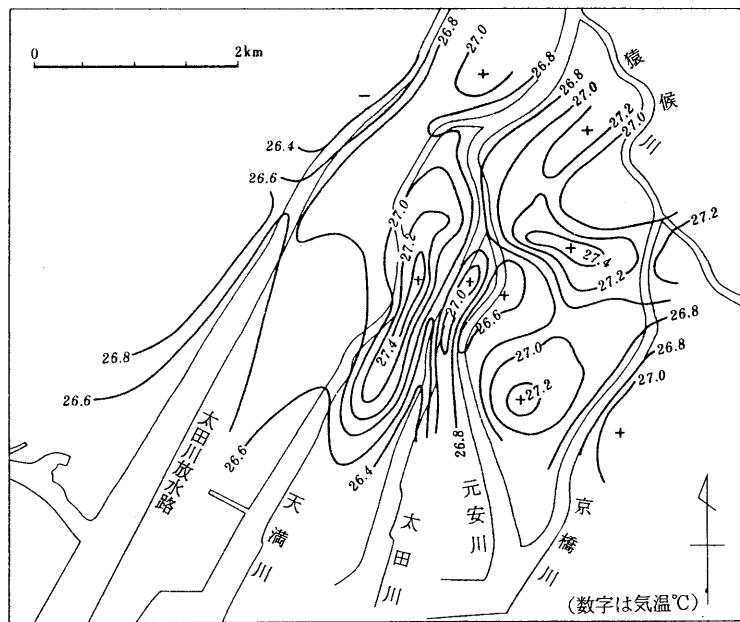
以上のことからも明らかに、住みよい理想的な都市環境として、河川水や緑地面は不可欠であることは言うまでもない。都市の熱汚染緩和の上でそれがどのくらい必要であるかということになると、具体的にはあまり定量的な結論は出ないが、LANDSAT画像解析の結果からは、水面と緑地などの合計の占有面積率は30%は必要であると言える。特に人口密集地の都心部で必須の条件である。広島市のように市街地に大きい河川が6本も貫流し、その上、100m通りの幅広い街路樹を含む緑地率があれば、かなりの緩和効果が期待できることは、本論で述べた通りである。

都市に単に自然をというだけでは不十分である、すなわち、河川があればよいというのではなくて、河川水路に対してどういう方向に、どの位の間隔で道路や建物などが配置するのが熱的環境として妥

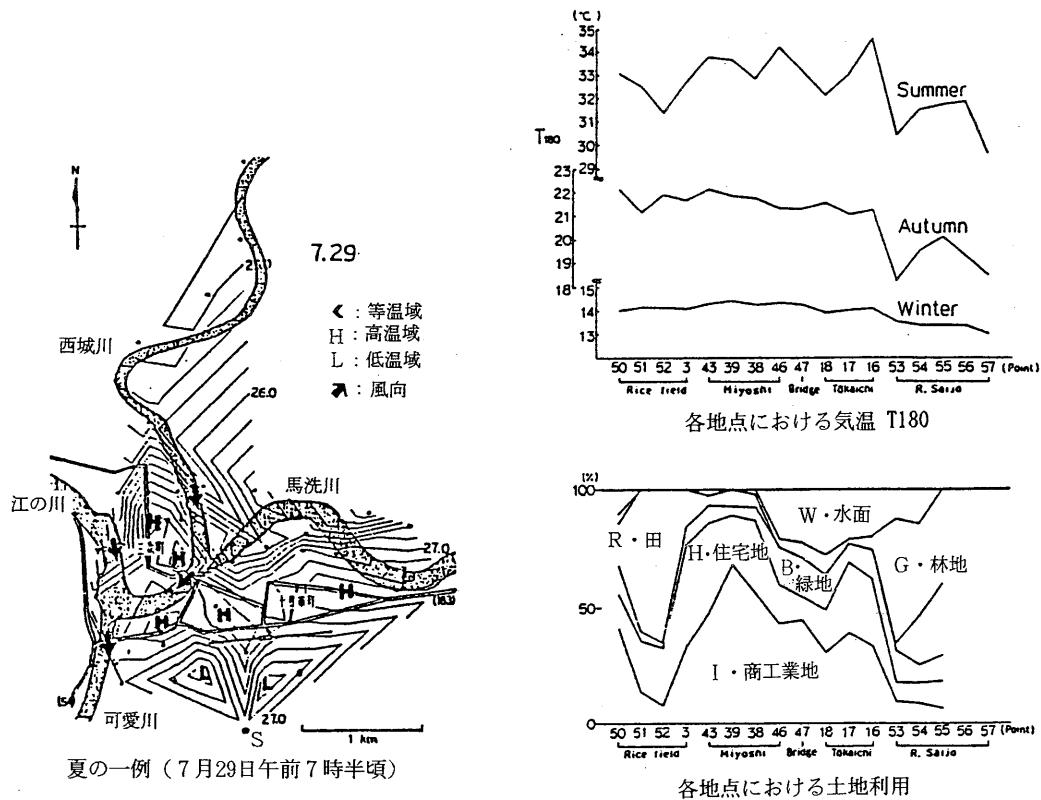
当なのか。風洞実験と広島市内での実態調査によって一応の方向づけは試みた。

緑地の場合も面積だけでなく樹木密度も重要であるが、緑地面積が増えれば確実に温度が緩和されることは、Myrup(1969) のシミュレーションにより明らかにされている。すなわち、緑地率が10%増えるごとに2°C位ずつ降温することが示されている。

都市の公園面積は、ニューヨークですら人口一人当たり20m<sup>2</sup>で、欧米の諸都市は殆どが2坪である。それに対して我国の主要都市は最近よくなってきたとは言え、大きい所で神戸市の8 m<sup>2</sup>/人や北九州市の7 m<sup>2</sup>/人で、大半が2~3 m<sup>2</sup>/人である。日本は山がちな国で森林緑地や水量の豊富な川も多いが、そのためか都市の中の自然を大切にしない傾向がある。都市計画の上で緑化とウォーターフロントの強化は火急の課題である。



第1図 広島市におけるヒートアイランドの河川による分断（夏の例）

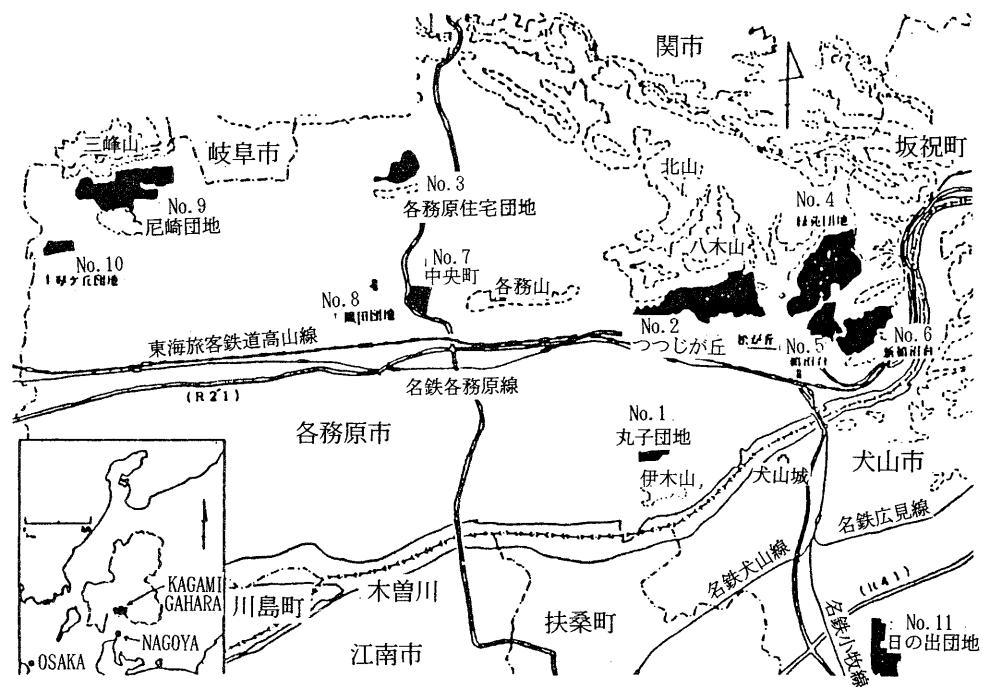


第2図 三次市におけるヒートアイランドの河川による分断（夏の例）

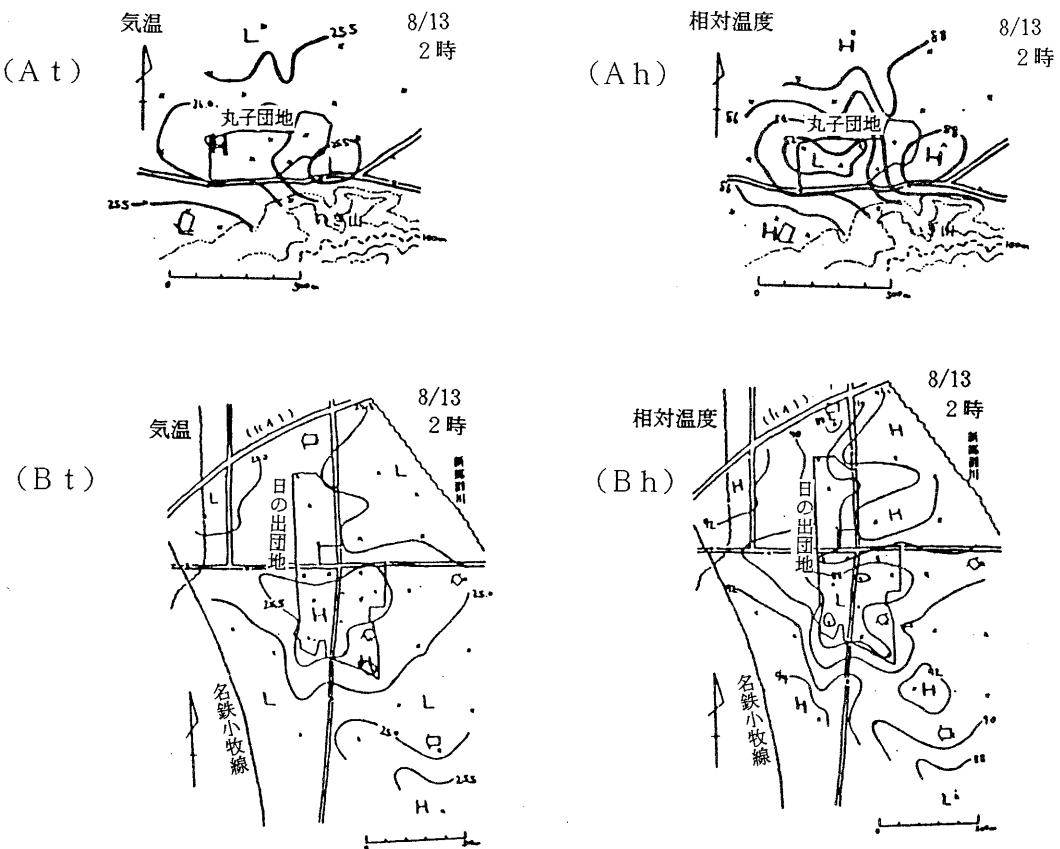
第3図 土地利用率と各季節における気温との関係

表1 各橋で観測した水温 (°C) 1986年7月29日夜～30日朝・昼

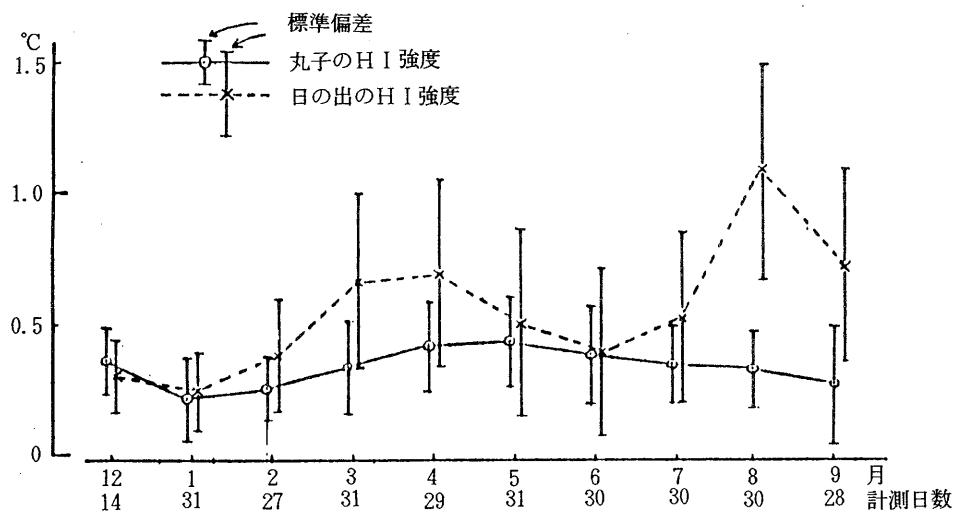
橋 観測日	ことぶき	祝	旭	熊野	巴
7.29(夜)	28.8	25.2	22.5	29.3	25.6
7.30(朝)	27.6	23.8	21.2	28.2	26.0
7.30(昼)	29.6	26.4	23.6	31.0	27.7
川名	可愛川	江の川	西城川	馬洗川	西城・ 馬洗川合流



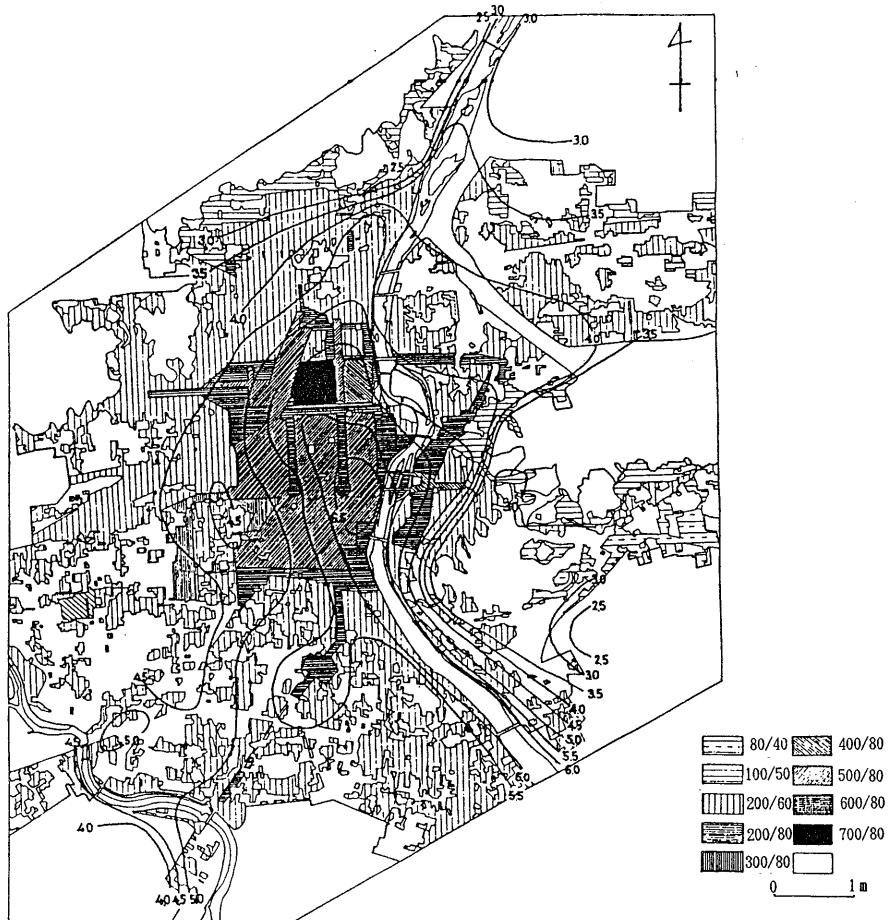
第4図 観測団地の配置及びその周辺地図



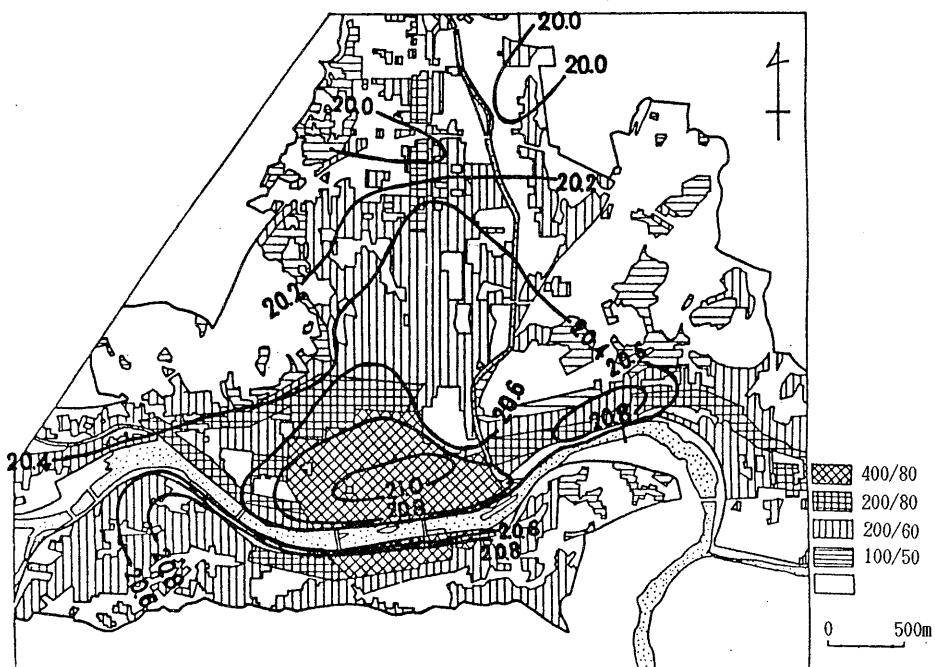
第5図 (1) 丸子団地(A)と日の出団地(B)の気温(t)と湿度(h)分布の例。



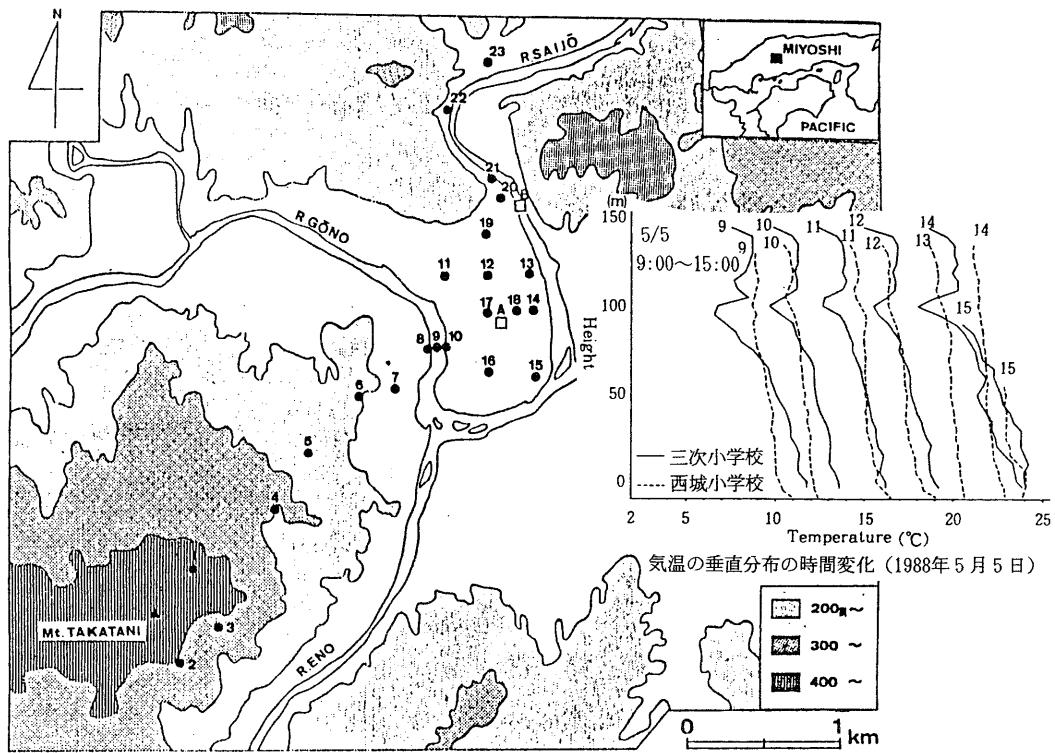
第5図 (2) 丸子、日の出両団地におけるヒートアイランド強度の月々変化



第6図 岡山市のヒートアイランドと建坪率・容積率の関係（冬の例）

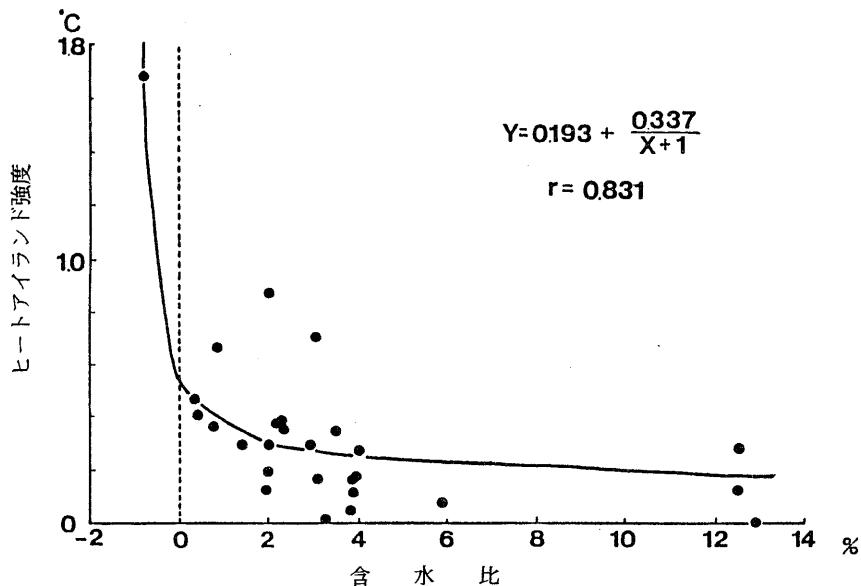


第7図 津山市のヒートアイランドと建坪率・容積率の関係（夏の例）

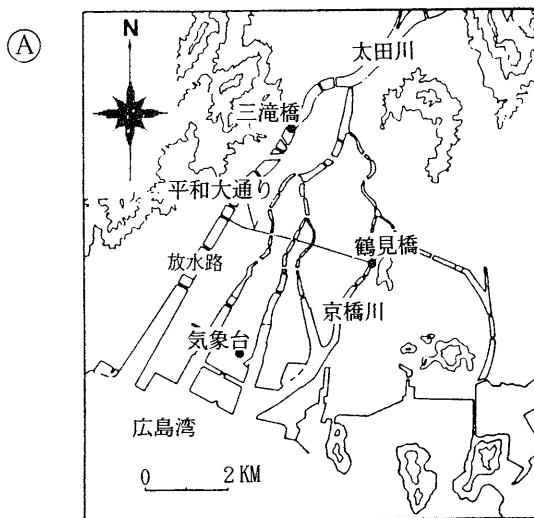


対象地域 (●移動観測地点, □定点観測地点)  
(A 三次小学校, B 西城川右岸)

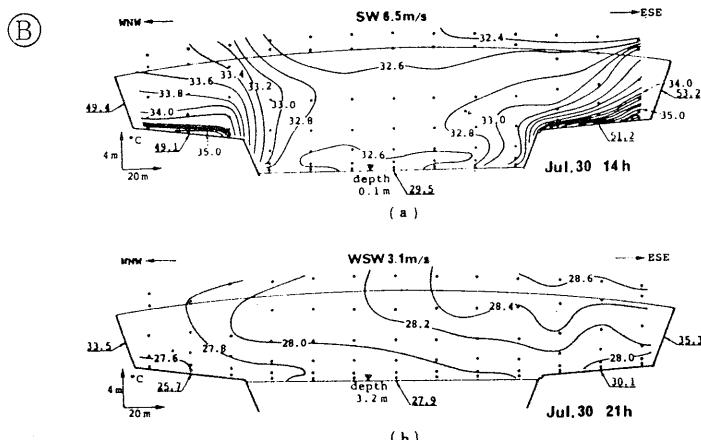
第8図 三次市の市内外における気温垂直分布観測と霧観測地点



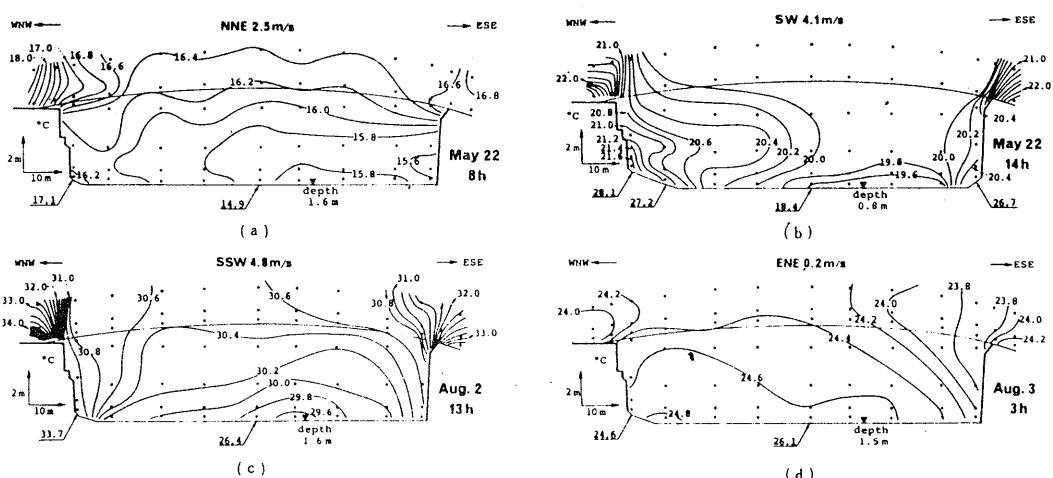
第9図 三次市における霧水量とヒートアイランド強度（市内外気温差）の関係



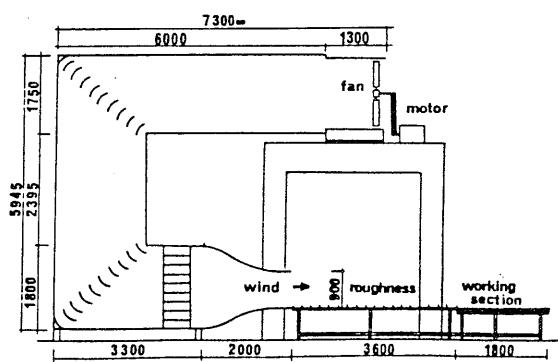
観測地点の位置



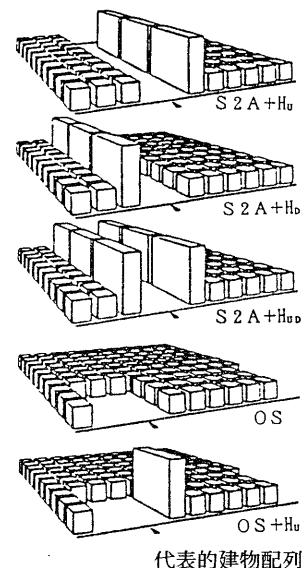
第10図(1) 広島市内三滝橋周辺の観測地点概況図Ⓐと、気温断面観測結果の一部Ⓑ



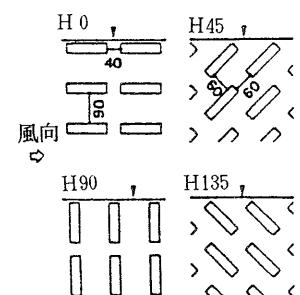
第10図(2) 広島市内鶴見橋における気温断面観測結果の一例



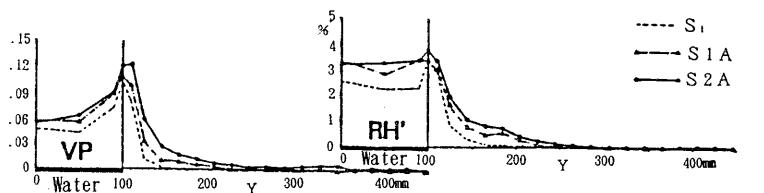
第11図(1) ゲッチング型風洞装置概観図



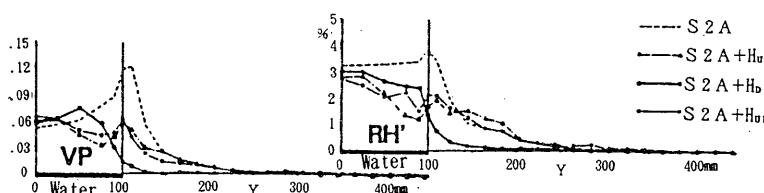
代表的建物配列



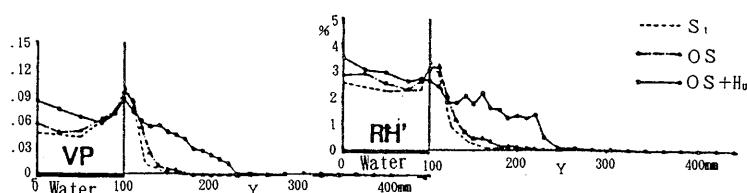
第11図(2) ブロック配列例



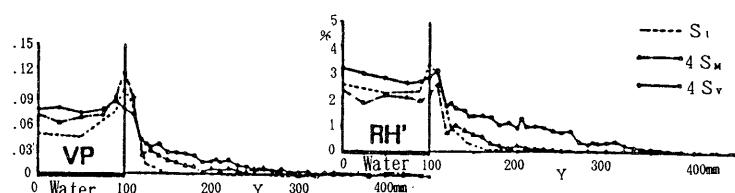
(1)(A) 広い街路を設けた場合の変化（街路幅の変化）



(1)(B) 街路沿に高層化した場合の変化

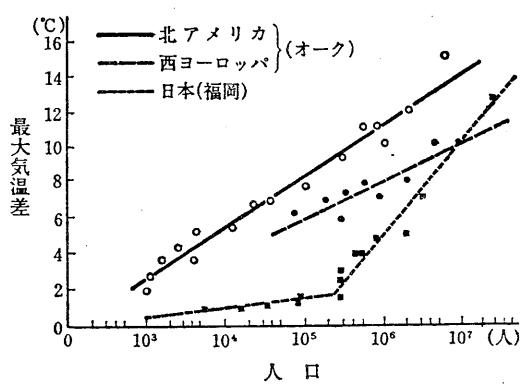


(1)(C) オープンスペースを設けた場合の変化

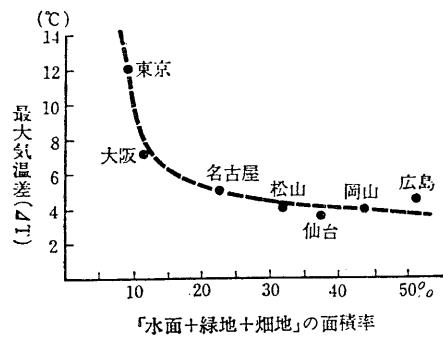


(2) 容積率一定で集合化を計った場合の変化

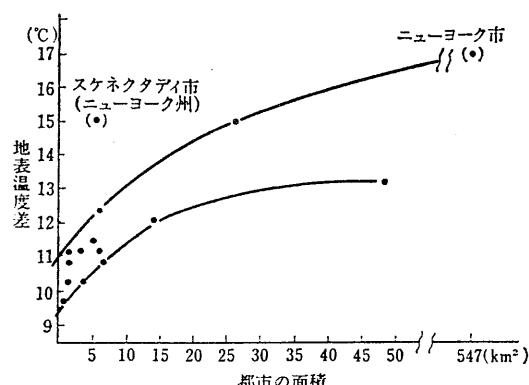
第12図 河川水 (Water) の気温に及ぼす影響範囲に関する風洞実験結果の一部



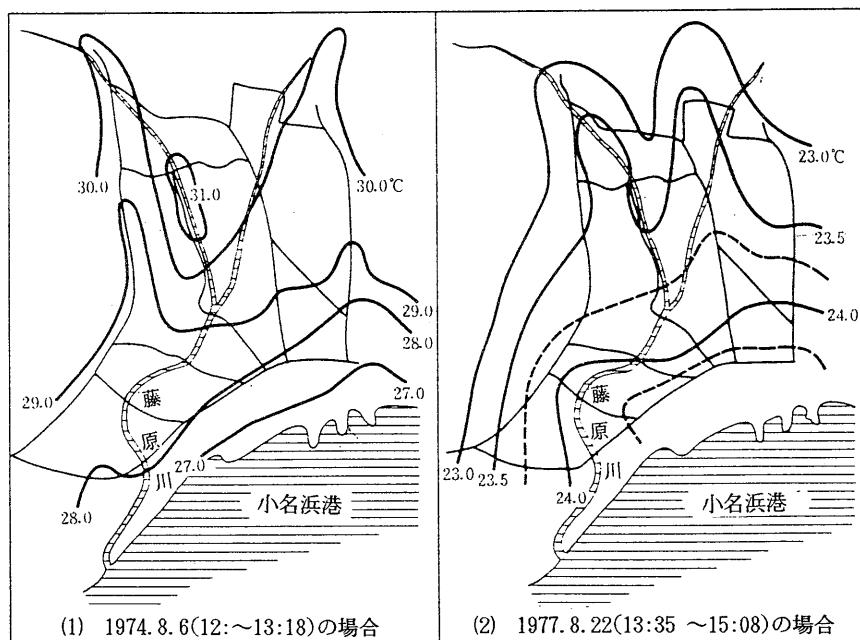
第13図 都市内外の最大気温差と人口数との関係



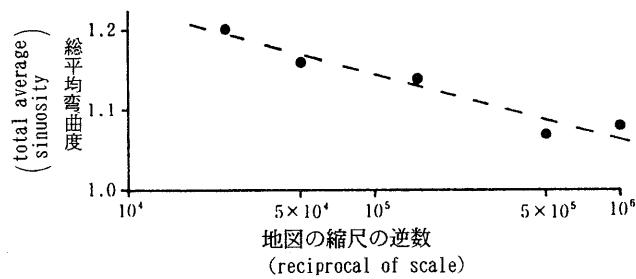
第14図 都市内外の最大気温差と LANDSAT  
画像解析による土地利用面積率  
(W.G.F.) との関係



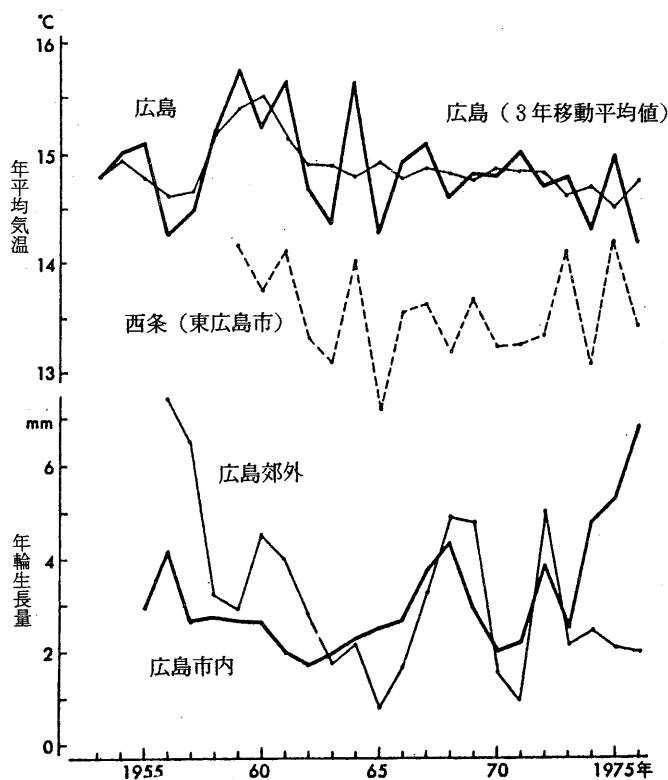
第15図 都市の面積と衛星写真から判読した地表温度差との  
関係 (Price のデータに基づく、福岡原図)



第16図 鉱山廃坑前(1)と後(2)における温排水影響の有無～  
ヒートアイランドへの影響 (福島県いわき市の例)



第17図 八幡川における総平均湾曲度と地図の縮尺との関係



第18図 広島市における気象と年輪生長量

第2表 都市内河川環境景観調査結果の一部～太田川天満川  
(太田川各支流にかかる橋とその周辺環境) 観察結果

支流名(天満川 No. 1)										
機名	横川 橋 製造年 1935年10月	横川 新橋 昭和33年2月	中庄 大橋 昭和42年2月	広瀬 橋 昭和32年1月	天瀬 橋 1953年3月	天瀬歩道橋 昭和44年11月	広電天満橋 昭和30年7月	綾大橋 昭和23年6月	綾船橋 昭和30年7月	新親音橋 1982年8月
II-①	50m *	75m *	75m *	100m *	75m *	75m *	50m *	75m *	75m *	100~125 m *
II-②	10m *	17m	14m	10m	6 m	2 m	20m *	15m	7 m	30~35m *
II-③										
III-①	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート
III-②	芸術的	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス	オーノドックス
III-③	人+自転車+自動車 +電車 歩道分離	人+自転車+自動車 歩道分離	人+自転車+自動車 歩道分離	人+自転車+自動車 歩道分離	車だけ	電車+人 歩道分離	人だけ	人+自転車+自動車 歩道分離	人+自転車+自動車 歩道分離	車だけ
IV-①	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
IV-②	車道	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道+緑地帯	車道
IV-③	横川本通り商店街	電車も通る								100m道路
V-①	豊か	豊か	豊か	豊か	豊か	豊か	豊か	豊か	豊か	豊か
V-②	満ちてきている (11:31)	満ちてきている (12:03)	やや水引く (12:18)	下流に流れれる (人と同じ 12:33)	左と同じ	左と同じ	左と同じ	左と同じ	左と同じ	左と同じ
V-③	きだない (橋のぼるため)	汚い	普通	やや汚い	普通	普通	普通	普通	普通	普通
V-④	無い	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
V-⑤	悪い	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
VI-①	無い	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
VI-②	過密	過密	過密	過密	過密	過密	過密	過密	過密	過密
VI-③	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし	自然性なし
VI-④	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う	安全と思う
VI-⑤										
備考	この付近で、せりを15ひき 大きい。小さい。	広島港の潮汐は 12:08	この付近で、せりを15ひき 大きい。小さい。	この付近で、せりを15ひき 大きい。小さい。	この橋は手すりが石で 築の上に鉄人3人。ハ セ5ひき、20cm、カレ イ1ひき					

