

## ■ 報 文 ■

## 都市の熱環境管理と水資源配分の課題

Management of Urban Heat Environment and Water Resource Allocation Problems

新 沢 秀 則\*

Hidenori Niizawa

## 1. 序 論

エネルギー消費拡大の弊害は、資源の希少化よりむしろ熱による環境問題により早く顕在化するのではないかとされている<sup>1)</sup>。熱問題の特徴は不可逆性として表現され、通常環境保全技術が新たにエネルギーを投入することによって物質の排出形態を変化させ、さらに巨視的な意味のリサイクルに活路を見い出していることを考えると、熱問題に関しては悲観的にならざるをえない。一方、都市において地表面の人工化が進むにつれて日射収支の平衡状態が変化しつつある。自然な状況では大小さまざまな水の循環がエネルギー定常の状態を維持しているのであるが、都市では水循環そのものが阻害されている。現在の水資源政策には熱環境保全の視点はなく、アメニティー政策の一貫である都市親水空間の再生運動に潜在的な可能性を期待できるのみである。

本研究は人為的な水循環のコントロールによる、熱環境保全の計画化を意図している。まず都市的規模の熱環境管理のフレームのなかに水による熱の制御を位置付ける。そしてエネルギー消費を中心とした人工的廃熱放出構造の実態、廃熱の発生源における冷却水等の水利用の現況、気温と水需要の相関などを考察することによって、今後熱環境の保全を具体的に計画化するにあたって生ずるであろう水資源配分の新しい課題に関する導入的検討を行う。

## 2. 都市における熱環境の管理

都市的規模の熱環境に直接関係する因子は、太陽放射の収支を左右する地表面の状態と工場等からのエネルギー消費による廃熱のふたつに分けられる。現在地表面における熱変換のメカニズムに関しては気象学・水文学の分野で理論的研究が進んでおり、都市規模で

日射の収支を放射・顕熱・潜熱に分けてモデル化した例がある<sup>2)</sup>。すなわち、樹木・草・水面などで構成される自然地表では地表面の水が蒸発することによって日射のほとんどが潜熱となるのに対し、アスファルトや屋根瓦などで構成される人工地表では蒸発しうる水分が存在しないために、日射はほとんどが顕熱となる。ここで重要なのは、顕熱が直接的に大気温度に影響するのに対して、潜熱は水蒸気によって湿度変化をもたらすものの気温には直接関与しないということで、従って地表からの顕熱負荷が大きな都市地域では周辺地域にくらべて気温が高くなる。

ところが、都市の熱環境に影響するもうひとつの因子であるエネルギー消費に伴う廃熱に関しては、エネルギーの保存則を前提にエネルギー供給と廃熱を直接結びつけて拡散シミュレーションをしているのが現状で、熱を放出する際に媒体として水を使った場合の効果は考慮されていない<sup>3)</sup>。エネルギー消費による人工廃熱のアセスメントモデルなるものを考える場合、それは大きく4つのエレメントから構成される必要があろう。すなわち、第1にエネルギー需要モデル、第2に排熱構造モデル、第3に拡散モデル、第4に影響評価モデルである。本研究では特に第2の排熱構造モデルに関する基礎的考察が中心である。

日射に限らず人工的な廃熱に関しても顕熱を潜熱に転換することを「熱の処理」とみなすならば、熱環境管理の枠組の有効な再構成が可能となる。ただ、いざ定量的な分析を行おうとする場合、現在のデータ蓄積の状況ではいきなり顕熱か潜熱かというレベルの分類集計は困難なので、熱放出の一次的形態に着目した、水(冷却水)・ガスといった項目による集計方法も考える価値があろう。

図-1は水による「熱の処理」を中心に都市の熱環境管理施策の相互関係を示している。エネルギーの有

\* 神戸商科大学経済研究所助手  
〒655 神戸市垂水区星陵台4-3-3

(註)本研究会第3回研究発表会(59/4/26)で講演。  
原稿受付日(59/7/30)

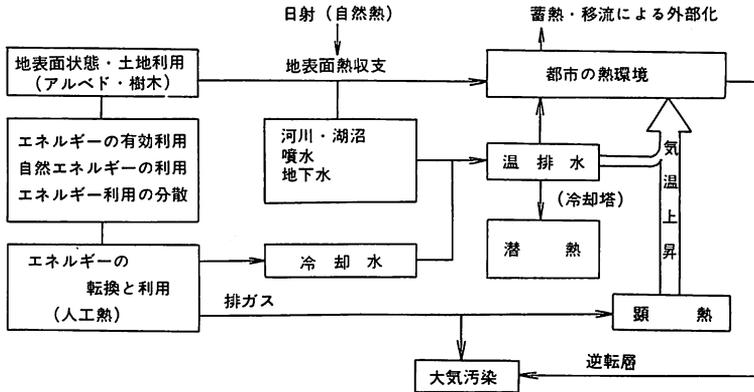


図-1 都市熱環境の管理

効利用は熱環境を悪化させずに都市のエネルギー消費活動を拡大する手段として位置付けられ、また自然エネルギーの利用も域外からのエネルギー流入を最小限にするという意味において熱環境保全に貢献しうる。そのほかにはエネルギー利用の分散化も確かに有効な施策であろう。しかしこれらの施策はあくまで補助的で、熱環境問題に根本的な効果は期待し難い。そもそもエネルギー利用の分散化を実施するには、ガイドラインとするべき熱環境の基準の設定が必要である。水による「熱の処理」については、エネルギー消費にもとづく廃熱の発生源における処理方法として、一度冷

却水に吸収した顕熱を湿式冷却塔によって潜熱に転換する方法が代表的であり、そのほか土地利用政策に至るまでに水の時空間的配分のパターンは多様である。

熱環境の管理という場合、いかなる温度範囲を制御の対象とし、在来型の冷房を含めたいくつかの施策の分担をどのように結びつけるかが基本的課題となる。自然的要因の変動のなかで、摂氏1度や2度という気温変化の地域的な制御が可能であると直ちに断定することは困難であるが、水資源量を指標とした間接的制御の可能性が見込まれる。

表 1 大阪府における人工廃熱の実態(昭和53年) 単位: 10<sup>12</sup> kcal

廃熱発生源	エネルギー消費量   燃料消費量   一般廃棄物			廃熱量				
	エネルギー消費量	燃料消費量	一般廃棄物	気体 顕熱 燃焼排ガス	液体 冷房	水蒸気 冷却水	潜熱 燃焼排ガス	冷房
製造業	90.6	76.6	-	4.5	x	15.5	5.1	x
電力業	28.3	43.6	-	3.3	-	26.0	2.8	-
	(55.4)	(85.4)						
業務	11.5	6.5	-	0.5	0.7	-	0.5	4.4
家庭	25.1	17.7	-	x	0.7	x	1.3	-
自動車	43.0	43.0	-	15.2	x	-	2.8	-
その他	22.0	18.4	-	x	-	x	1.2	-
合計	220.5	205.8	-	x	x	x	13.8	x
	(247.6)	(247.6)						
清掃事業	(-x)	-	8.4	x	-	x	2.2	-

出典 1) エネルギー及び燃料消費量: 大阪府「統計からみた大阪のすがた(昭和54年度版)」, 但し原表で電力の発熱量が2450kcal/kwhとなっているので、これを860kcal/kwhに変更し、残りを電力業のエネルギー消費とみなした。さらに昭和53年次、総電力需要の約49%が府外で発電されているので、その分を電力業のエネルギー消費量・燃料消費量からそれぞれ除外した(参考としてカッコ内に府外の発電量を含めた値を示す。)

2) 廃熱量: 鈴木胖「地域エネルギー」エネルギー・資源, Vol.2 No.4 (1981), 60~67. 大阪工業会「大阪府ローカルエネルギー開発利用調査 ワーキンググループ報告書(廃熱エネルギー)」, 1981. 但し冷房廃熱と燃焼排ガス蒸気の廃熱については筆者が推計した。

注: 電力業で先に定義したエネルギー消費量が廃熱量より小さいのは、廃熱量を20°C基準で求めているためと、発電効率を一律に35.1%としたことによると考えられる。

### 3. 都市人工廃熱の実態

表1に大阪府における人工廃熱の形態別構成を示した。表の左半分は通常のエネギー需給データそのもので、廃熱量の上限の目安となる。発電所では大量の廃熱が発生することが知られているが、大阪府の電力自給率は50%にすぎず、ここに熱環境管理に地域的な相互関係を含めて考察する必要性が生じる。表1の右半分には大阪府地域エネルギー調査の結果から顕熱廃熱量(燃焼排ガス、冷却水)を示し<sup>4)</sup>、さらに冷房による顕熱・潜熱廃熱量と燃焼排ガス水蒸気潜熱量の推計結果を記した。地域エネルギー調査によれば昭和53年の大阪府全製造業による廃熱量は $24.8 \times 10^{12}$  kcalで、そのうち燃焼排ガス廃熱は18% ( $4.5 \times 10^{12}$  kcal)、冷却水としての廃熱は63% ( $15.5 \times 10^{12}$  kcal)である。冷却水としての廃熱は、冷却水の循環によって最終的には潜熱として放出されている分が多いと考えられる。燃料の燃焼時に水蒸気が生成するが、その際発熱量の一部が潜熱化する。表1の燃焼排ガス蒸気廃熱量は、完全燃焼を仮定した場合の燃料種別水生成量を気化潜熱に換算した値である<sup>5)</sup>。また冷房は屋内の冷房負荷を屋外にはき出すために動力を消費するので、廃熱量は冷房負荷と冷凍機運轉動力の合計である。冷房対象延床面積を $43 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (大阪府における商業用途と官公署建物の合計値、昭和55年)、最大冷房負荷を100 kcal/hour・m<sup>2</sup>、年間全負荷相当運轉時間を900 hours、冷凍機運轉動力を32kwh/year・m<sup>2</sup>と設定すると、廃熱量は $5.1 \times 10^{12}$  kcalと見積られる。廃熱の最終的な顕熱と潜熱の比は代表的な冷却塔の形式と運轉状況を想定して0.15とした。

しかし、表から明らかなように、エネルギー消費量全体からみると説明された廃熱量は一部分にすぎず、地域的な廃熱量データの整備は今後の課題である。このような廃熱データの整備が進めば、現在大気中に放出されている顕熱をどの程度潜熱化できるのかということなどが検討可能となる。どの程度の廃熱量が発生源で制御しうかは、大気環境の保全や燃焼効率、さらに付加的に生じるエネルギー需要などを考慮のうえで判断する必要がある<sup>6)</sup>。

### 4. 熱環境制御のための水利用の現状

現在熱制御を目的として意図的に水を使用しているのは、製造業・電力業・ガス業(冷却水、冷房用水)、さらに各種事業所(ビル冷房用水)など生産主体に限

られている。一方消費主体については、住居の小規模な冷房に湿式冷却塔を使うのはまれで、むしろ気温上昇の結果、各種飲料水・風呂水・洗濯用水・散水・プール用水などの需要が増大することに注目する必要がある。ここでは各種水資源統計から熱制御にかかわる需要だけをとりだして積算する方法と、マクロな水需要量データと気温に関する統計的処理の方法を併用して、熱環境と水需給バランスのかかりについて検討する。

#### 4.1 冷却水の使用実態

工業統計表によれば、昭和55年の大阪府下全製造業による冷却水使用量は $2,452 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/年(淡水)、 $530 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/年(海水)である。これは全使用水量の83.4%と99.7%で、冷却用途の水の比率が非常に高いことがわかる。特に海水はすべてが冷却水として使われているとみなしてさしつかえない。また淡水全用途平均の循環率が84%であるのに対し、冷却水の循環率は88%と高い(国土庁「昭和52年度水需給動態調査」)。従って大阪府下全製造業に対する淡水冷却水の補給水量\*は $294 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/年と推定される。

電力業については、発電出力に対する原単位から冷却水使用量を求めた。大阪府内には火力発電所が6ヶ所あり、昭和55年度の発電量は $15530 \times 10^6$  kwhであった。火力発電所の復水冷却水使用量は、出力100MW当り4 m<sup>3</sup>/secが平均とされている<sup>7)</sup>。よって電力業の冷却水使用量は約 $2,236 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/年となるが、工業用水道から供給を受けている場合は100%に近い循環が行われている。冷却水として使われている水のうち製造業では約18%が海水で、発電所でも工業用水道が未整備の地区では海水を使っている。海水の場合、量は豊富で問題ないが、約10℃温度の高い冷却水が放出された後、沿岸の大気に顕熱負荷を与えることの影響が問題となる。

ガス業および清掃・下水処理などの公共事業については、工業用水道資料(昭和55年、57年)から集計した。いずれも全サンプルではないので参考値にとどまる。事業所ビルでは通常冷房システムに湿式冷却塔が使われており、そのための水需要は大阪府域全体の冷房廃熱量を $5.1 \times 10^{12}$  kcalと見積った場合(表1)、使用水量原単位730 l/USRt・hと補給水量原単位(17 l/USRt・hから<sup>8)</sup>、使用水量は $1,220 \times 10^6$  m<sup>3</sup>、補給水量は

\* 水道によって供給を受けた水量が補給水量で、それをもとに各々の利用主体が独自に循環を行った場合の全体を使用水量という。

表2 大阪府における冷却水の使用実態(昭和55年基準)

単位: 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

	淡水使用量	淡水補給量	海水使用量
製造業冷却水 (製造業全用途合計)	2452 2938	294 477	530 532
電力業冷却水	2236	x	x
ガス業冷却水	67	2	277
公共事業冷却水	7	3	—
事業所ビル冷房用水 (都市活動全用途合計)	1220 x	28 356	— —
府下全用途総需要	x	1530	x

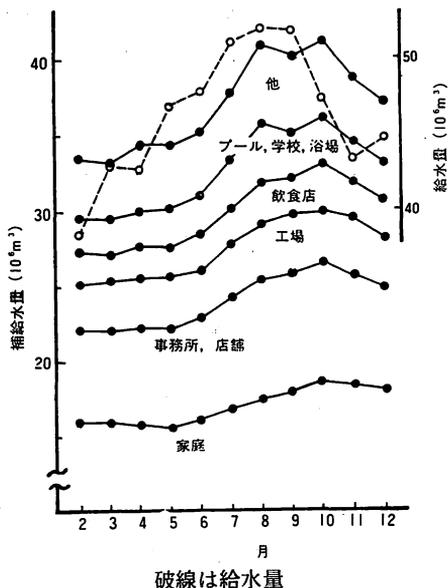
\* 電力業については、淡水と海水の分担は明らかでない。

28 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>となる。

以上の数値を整理したのが表2である。表2によると、現在熱の制御を目的として使われている水は全水需要の約21%である。使用量では製造業あるいは電力業の冷却水と事業所ビル冷房用水が同じオーダーであるが、補給水量では後者は前者の1/10である。本来データの集計期間は熱環境管理の対象期間と無関係ではあり得ないが、すでに示したデータはすべて年間値である。冷房用水の需要は夏期に集中するので、その点を考慮して評価せねばならない。

4.2 気温と水需要

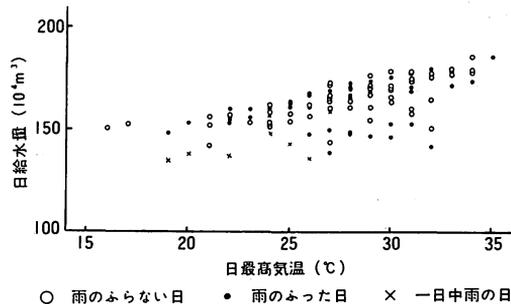
水需給のひっ迫した状況では、水道の送水側の圧力操作が原因となって水需要は本来の姿を示さなかった



出典：大阪市水道局「統計月報」昭和57年より  
注：実線は料金徴収ベースの補給水量で、破線は浄水場送水ベースの給水量

図-2 水需要の月変化

が、施設に余裕ができた段階になって気温と送水量の変動に高い相関が確認されている。大阪府水道部の調査によれば、気温と送水量の相関は夏期に顕著で、特に最高気温が21℃を越える場合に相関が高くなる傾向が認められる<sup>9)</sup>。電力需要のピークが夏の冷房によってもたらされることはよく知られているが、水需要のピークも夏に発生し、そのピークが年々尖鋭化している点も電力と同様である。地域の水需要構成はその土地の産業構造を反映し、大阪市の場合、夏期のピークはおもに冷房需要と洗濯・風呂・散水・プールなどの水需要に起因していることがデータ\*から読みとれる(図-2)。これらの水需要は気温上昇に伴う快適性の減少が原因となっていると言ってよいだろう。大阪市全体としては、日最高気温が1℃上昇すれば日給水量が約2万5千m<sup>3</sup>増加する(図-3)。



出典：大阪市水道局「統計月報」昭和57年7月~10月のデータより

図-3 気温と給水量の相関

このように考察を進めると、気温上昇を事前に抑制するための水と気温上昇の事後的結果としての水というように熱環境にかかわる水需要を2つの局面でとらえ、その相互関係のなかから水資源政策上の効率性基準を導くことが可能と考えられる。しかし熱環境管理を論ずるにあたって、これより先の段階では現行の水資源配分システムを前提とした考察は大した示唆をもたらさないだろう。

5. 都市地表の熱環境保全

人工的なエネルギー消費と地表面の改変は、都市の熱環境に対して大体同程度の効果があるということが従来言われてきた。しかし日射の熱収支に関しては、

\* 現在水道の料金徴収制度は4ヶ月点検2ヶ月徴収が一般的で、実際には毎月の需要別水使用量データは存在しない。図-2の値は当月調定なので、比較対照のため送水側で計測可能な給水量を示した。

表3 大阪府の土地利用現況(昭和55年)

単位: ha, (%)

地域	総計	農用地	森林原野	水面	道路	建築用地				公園緑地	他
						住宅地	工場用地	事務所店舗等	公共施設等		
大阪府	186416 (100.0)	21897 (11.7)	58991 (31.6)	8160 (4.4)	13357 (7.2)	33247 (17.8)	7841 (4.2)	5075 (2.7)	6890 (3.7)	6161 (3.3)	24797 (13.3)
大阪市	21095 (100.0)	274 (1.3)	—	1728 (8.2)	3587 (17.0)	7110 (33.7)	1995 (9.5)	2061 (9.8)	1322 (6.3)	820 (3.9)	2198 (10.4)

出典:大阪府土木部都市整備局総合計画課「風土利用計画関係資料集」昭和56年度版

注:公共施設等には学校を含み,公園緑地にはゴルフ場,神社を含める。

地域的な日射収支における(顕熱/潜熱)比の基準をいかなるレベルに設定するかによって,現状の評価は大きく変わりうる。極端な場合,大阪府全域(1,864km<sup>2</sup>)が密な緑草地であるとすれば,総蒸発散量は可能蒸発散量を800mm/年として $1.49 \times 10^9 \text{ m}^3$ になり,その際潜熱に転換される熱量は $870 \times 10^{12} \text{ kcal}$ である。一方現在大阪府の土地利用は表3に示す状態で,不浸透で粗度が少なく保水・遊水能力のない人工的な地表が拡大しつつある。

おおよその人工地表率を住宅地(0.7),工場用地(0.7),事務所・店舗等(1.0),公共施設等(0.7)と仮定し,蒸発比を水面(1.2),森林原野(1.0),農用地(0.7),その他の自然地表は裸地とみなし(0.5)と仮定した場合,実際の蒸発散量は約 $0.76 \times 10^9 \text{ m}^3$ となる\*。その際潜熱に転換される熱量は $438 \times 10^{12} \text{ kcal}$ にすぎず,先に示した仮想的な場合と比較すると $432 \times 10^{12} \text{ kcal}$ の顕熱-エネルギー消費量の約2倍一が都市化によって発生しているということになる。蒸発散量の減少分は地中-地表-大気の水循環を形成せずに,下水道などによって都市外に一気に排出されているのである。

エネルギー消費が原因の廃熱をすべて発生源で制御することが技術的に困難あるいは非効率的で,さらに地表面の人工材質化によって日射が顕熱に転換する量がエネルギー消費量に匹敵するという状況に対し,都市内に自然地表をふやせば熱環境を快適な状態に回復しうることが実証されていて,しかも都市計画的手法によって都市内に空地を造りだすことは今なお不可能ではない。しかしいきなり都市計画サイドに問題を転化しても,手段が一元的であるために都市の経済的効率性基準との間に解消困難なトレード・オフを生むこ

\*蒸発比は,地表面状態によって異なる蒸発散量を可能蒸発散量に対する比として表わしている。なお,人工的な非浸透性の地表では平常時の蒸発をゼロとしてよい。

とが予想される。人工的な地表上でも人為的に熱処理機能を促進し,あわせて都市の水循環を回復する施策を,なるべく新たにエネルギーを投入せずに実現できないだろうか。この場合,制御の中心的な対象は地表面およびその付近の温度である。しかしその部分には多様な都市的活動がひしめいていて,水を時間的にストックするのは困難である。想定する水の存在様式によって,水に熱交換の機能だけを期待する場合と蒸発の効果を折込む場合とでは,水需要量の評価が大幅に異なってくる。次にひとつの具体的な事例を示そう。

琵琶湖淀川水系における水供給はすでに限界に達しており,すでに配分されている水の再配分が雨水・廃水・地下水など未利用の地域水源が都市地表の熱環境保全に利用しうる。特に地下水は水温が一定しているので,適正な管理のもとで利用すれば都市の熱環境保

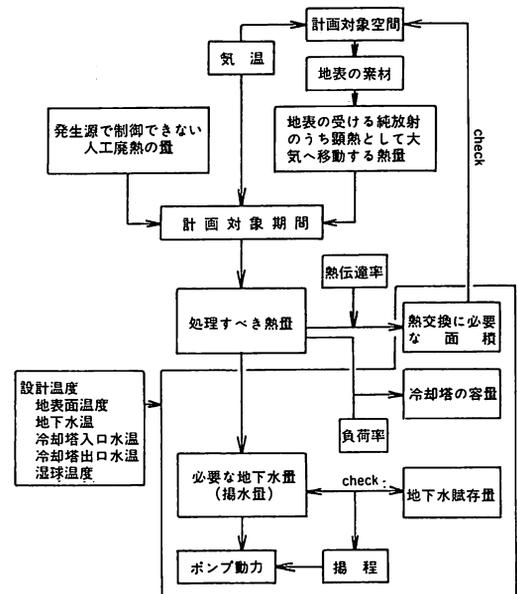


図-4 都市地表冷却システムの設計

全に果たす役割は大きい。そこで、水温の低い地下水に何らかのかたちで熱を吸収させるシステムを想定する<sup>10)</sup>。システム設計の手順を図-4に示す。処理すべき熱量として、先に求めた地表に水が不足しているため潜熱に転換できなくなった熱量の20%を考え、 $86 \times 10^{12}$  kcalを設定する。大阪地域の地下60mの水温は18℃程度であるので、35℃ぐらいまで水温が変化することを想定して設計温度差を17℃とする。この設計温度差で上記の熱量を吸収するためには、 $5 \times 10^9$  m<sup>3</sup>の地下水が必要となる。これはあくまで対象地域が密な緑草地であることによって実現する熱環境を基準として得られた数値であるが、年間降水量の約2倍にも及んでいる。但しこの計算では熱交換の場で期待しうる蒸発の効果を考慮していない。地域的な水資源計画の視点としては、蒸発によって熱処理に携わる水と吸収した顕熱の時空間的外部化による処理に携わる水の間に、それぞれの熱処理の速度を制御パラメーターとして、地域の水資源量にみあう均衡点を見出すことが課題となる。

## 6. 総括

本研究は従来決定的な対策がないとされてきた都市の熱環境問題について、水による制御・処理という考え方を示し、それが最終的には土地利用の再構成を含めた水資源配分全般の見直しにつながらざるを得ないことを述べた。さまざまな既存資料からデータを積上げている現段階では、廃熱の形態別賦存や熱関連水需要のそれぞれについて、データ全体としての精度は満足すべきものではなく、今後も検討を要する。CATVを用いた水道の自動遠隔検針システムが普及すれば、気温と水需要の相関はより顕在化するであろうし、ランドサットを使えば比較的広域の土地被覆や地表温度の同時観測が可能になるなど、新しい技術に注目する必要もあろう。

都市の熱環境容量、熱環境保全施策の分担を明らかにするために、次のような熱環境保全に関して生じる水配分のバランス及びシステムの変化にクライテリアを求めることが期待できる。

(1) 製造業等の冷却水と事業所ビルの冷房用水をあわせると、補給水ベース全水需要の2割を越えている。しかし生産プロセスに影響しないためにそのまま放出されている廃熱についても処理を考え、また家庭用冷房の普及・大型化がよりいっそう進めば、その需要量はさらに拡大する。

- (2) 気温と水需要量の相関が夏期に高く、年々ピークが尖鋭化している要因は、冷房需要と洗濯・風呂・散水・プールなど、気温上昇に対する事後的行為である。
- (3) 水資源計画の側からすれば夏の需要ピークにあわせて設備投資をせねばならず、夏期以外の負荷率は低下する。都市化による地表面熱収支の変化の効果も考えると在来型の水道による水配分だけでは熱環境保全施策として限界がある。
- (4) 今後は雨水・廃水・地下水などのオンサイトな未利用水源を熱環境保全用水として配置するためのプランづくりが必要である。その際水による顕熱移流効果だけでなく、蒸発効果を十分に利用する必要がある。

本研究は文部省環境科学特別研究「都市生態系の統合化—水をつなぎ手として」(代表 沼田真)の成果の一部をもとにしている。同研究組織に参加する機会を与えてくださった大阪大学工学部の末石富太郎教授に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 石谷清幹, ほか2名; 省エネルギーの方法論, 機械の研究, 第28巻 7号(1976).
- 2) 森山正和; 地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第4報, 日本建築学会論文報告集, 273号(1978), 69~77.
- 3) 科学技術庁資源調査所; 資料第46号, 我が国におけるエネルギー消費と大気環境に関する調査, (1977).
- 4) 鈴木胖; 地域エネルギー, エネルギー・資源, 2巻 4号(1981), 60~67.
- 5) 早川一也; 都市環境における熱と水, 文部省「環境科学」研究報告書 B211-R15-3(1984), 9~27.
- 6) 新沢秀則, 末石富太郎; 都市・産業廃熱の評価と水需要に及ぼす効果, 文部省「環境科学」研究報告書 B211-R15-3(1984), 41~56.
- 7) 吉本秀幸, 稲葉通詮; 原子力と水, 「水経済年報」, 水利科学研究所, (1973), 53~71.
- 8) 徳岡実, ほか4名; 冷却水補給水の節水方法とその問題点, 空気調和・衛生工学 51巻 5号(1977), 53~61.
- 9) 大阪府水道部; 大阪府営水道事業需要量相関係数調査報告書, (1979).
- 10) 横山孝男; 帯水層の熱循環と蓄熱利用, 「地下水ハンドブック」, 建設産業調査会, (1979).