

図-2 「下水道システム・シミュレーションモデル」による回収可能熱量算定結果表示例⁷⁾
 下水道幹線情報単位:t/h(流量):kcal/h(回収熱量):t/h(処理水需要):kcal/h(温熱需要)

び給湯における熱需要(詳細については前報⁷⁾参照)を意味する。また、それを用いて東京23区の事例を対象に下水熱有効利用可能性の検討を試みたが、熱の需給関係や利用可能熱量の多寡が地域の土地利用に依存していることが確かめられた。さらに、地域(下水処理区)毎の熱の需給関係の特徴及び地理的影響要因についても考察を試みたが、解析対象領域が一部の地域に限定されていたことなどもあり、熱の需給関係や利用可能性による地域熱供給事業適性評価を地域別に示すには至らなかった。本研究では解析対象領域を東京23区全域に拡張し、熱の需給関係や利用可能性の類型化を通じて地域別の熱供給事業適性評価を試みた。

熱需要特性(熱需要密度や熱需要変動パターン)による地域冷暖房導入適性にもとづいた東京の地区分類事例としては、下水処理水を含む低温熱媒について行われたもの¹⁰⁾¹¹⁾もある。それらの事例では、終末下水処理場及びポンプ場のみを利用可能な下水熱源と位置づけている。著者ら⁷⁾⁸⁾⁹⁾は下水道が広域的に展開していることに着目し、下水道幹線を流下中の下水についても利用可能な下水熱源と考え、実際の下水道幹線の分布情報をGISに取り込んで解析に用いている。

2. GISの概要

今回解析のために用いられた「下水道システム・シミュレーションモデル」⁷⁾は土地利用種、建築階数に関するラスタデータや、下水道幹線座標のポリゴンデータを有し、各種算定機能やマップ表示機能を備えたものであり、GISとしての特徴を有している。また、東京都都市計画局¹²⁾から求められた250mメッシュ毎の建物用途別床面積、業種別単位床面積当たりエネルギー消費量¹³⁾に加え、建物用途別の熱負荷データ¹⁴⁾等を主な入力データとしている。

都市内未利用エネルギーの有効利用に当たっては、未利用熱と熱需要との時間的、空間的な整合性が確保されていなければならない。本シミュレーションモデルは、250mメッシュ毎の熱需要量の計算、下水道幹線結合点メッシュにおける下水流量の計算、結合点及び周辺メッシュにおける下水熱回収可能量^(註1)等の計算等を行うことができる(図-2)。よって本シミュレーションモデルにより、回収可能熱量と温熱需要量とを属地的に比較することが可能である。

表-1 落合処理区における下水熱回収施設の配置案⁷⁾ (利用可能熱量の比較: Gcal/hour)

落合処理区	回収可能熱量	温熱需要量	1ヶ所の場合	2ヶ所の場合	3ヶ所の場合	4ヶ所の場合	5ヶ所の場合
P0	4.6	10.7					
P1	11.7	11.7				11.7	
P2	13.6	21.9					
P3	18.2	26.0			18.2	6.5	
P4	25.8	19.6					
P5	42.2	19.3					
P6	59.6	20.1		20.1	20.1	20.1	
P7	67.4	17.3					
P8	97.2	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8	
総利用可能量			21.8	41.9	60.1	60.1	
利用率 (%)			22.4	43.1	61.8	61.8	
1基当たり			21.8	21.0	20.0	15.0	

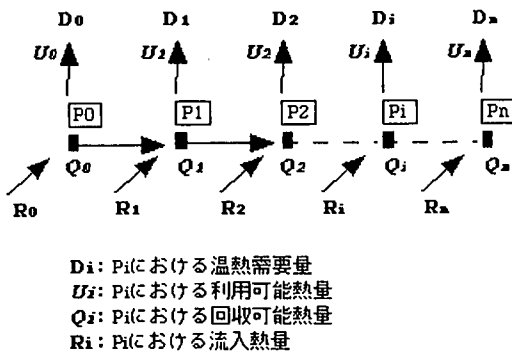


図-3 下水道幹線沿いにおける温熱需給関係の模式化

3. 下水処理区主要地点での回収可能熱量の算定

(1) 算定結果の表示例

本シミュレーションモデルを用い、東京 23 区内全 11 下水処理区における主要 216 地点 (下水道幹線結合点) での回収可能熱量の算定を行った。図-2 において、下水道幹線情報のウィンドウ (1) はある幹線上の地点 (上流側より P0, P1, ...) における下水道ポイント情報及び下水道沿線情報を示したものである。適切な熱源水配管距離^(註2)を考慮して、ここでは下水道沿線情報として 1,250 m 四方の領域 (下水道沿線情報取得領域, 下水熱回収地点を含むメッシュを中心として 5×5メッシュ) において集計された値等を示す。また温熱需要量算定/算定結果表示のウィンドウ (3) は、下水道ポイント情報の回収熱量と下水道沿線情報の温熱需要量とを主要地点毎にグラフ化したものである。

(2) 温熱利用からみた下水熱回収施設の配置案

以上にもとづいて、前述の 1,250 m 四方を供給対象領域とし、ある幹線上のトータルの利用可能熱量が最大となるような下水熱回収施設 (ヒートポンプ) の配置案の検討を試みた。

ある幹線 (落合処理区) に沿ってヒートポンプを 1~数ヶ所設置するというそれぞれのシナリオに対し、回収可能熱量と温熱需要量の関係より選定された設置箇所及びそこにおける利用可能熱量の値を表-1 に示す。利用可能熱量は回収可能熱量と温熱需要量のうち小さい方に一致する。また利用率は、終末処理場 (落合処理区では P8) における回収可能熱量に対する総利用可能量の割合である。併せてヒートポンプ 1 基当たりの利用可能熱量を示した。

回収可能熱量が場所により異なるという条件の下では、限られた個数の下水熱回収施設を配置するに当たり、より多くの下水熱を回収し得る配置案が最善であることは自明であろう⁷⁾。これらの配置案 (最適解) は図-3 に示されるモデルにおいて以下の式を満たしている。

$$Q_i \geq U_i \quad (1)$$

$$D_i \geq U_i \quad (2)$$

$$Q_i = \sum_{j=0}^i R_j - \sum_{j=0}^{i-1} U_j \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n U_i \rightarrow \max \quad (4)$$

Q_i : P_i における回収可能熱量

U_i : P_i における利用可能熱量

D_i : P_i における温熱需要量

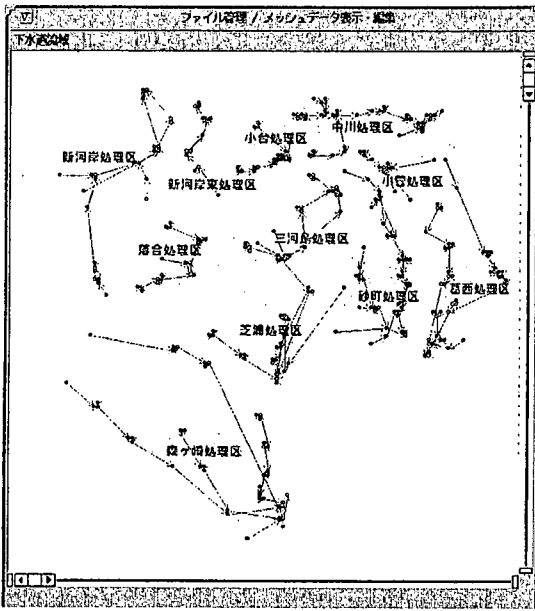


図-4 下水道幹線の抽出状況

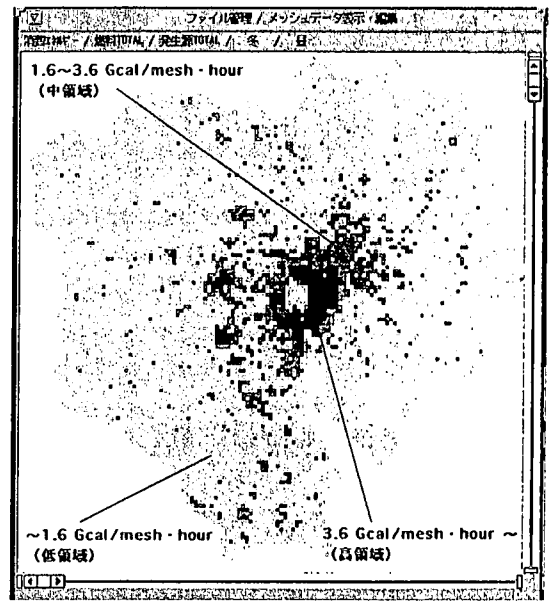


図-5 東京 23 区における冬期屋間の温熱需要分布
(メッシュサイズは 250 ㎡ 四方)

$R_i : P_i$ における流入熱量

(3) 落合処理区の例

まず幹線上の 1ヶ所だけにヒートポンプを設置する場合は、回収可能熱量と温熱需要量のうち小さい方が最大となる地点を選択すればよい。この方法では利用可能な熱量は 20 Gcal/hour (84 GJ/hour) 以上に達する。また 2ヶ所以上に設置する場合は、上流部での回収に伴う熱量の減少などを考慮する必要がある⁷⁾。さらに、計算を煩雑にしないため、供給対象領域が重複しないことなども制約条件に加えている。2ヶ所の場合も 40 Gcal/hour (168 GJ/hour) 以上の温熱利用が可能である。

一方、落合処理区には 4ヶ所 (60.1 Gcal/hour (252 GJ/hour)) の設置が可能である。しかし最後の 1ヶ所については、他の回収地点との間に利用可能熱量の競合関係が生じるため、これを設置してもトータルの利用可能熱量は変わらず、設置のコスト等を考えれば好ましくない。

4. 熱の需給関係・利用可能性からみた地域の類型化

(1) 地域熱供給事業適性評価における問題点

著者ら⁷⁾は、処理区毎の熱の需給関係の特徴及び地理的影響要因について以下のような考察を行った。利用可能熱量の多い事例 (落合処理区、三河島処理区)

では、一般に幹線が長く、回収候補地点が多い。また業務地区等温熱需要量の大きな地点が多いため、ヒートポンプ 1基当たりの利用可能熱量も多い。一方、流量 (回収可能熱量) が制約条件となるケースは少なかった。幹線が主に住宅地を流下する場合 (中川処理区) は、沿線の温熱需要は小さくなる。

本シミュレーションモデルでは回収候補地点は幹線結合点のみに限定されているが、実際には幹線上のどの場所においても熱の回収は可能なはずである。よって表-1 のような手法で幹線毎に熱供給事業の適性評価を行った場合、結果は幹線結合点の位置に影響されるため、必ずしも公正な評価であるとは言いがたい。

そこで本研究では、各幹線もしくは各処理区における熱の需給関係の特徴をより一般的に表現し得る指標を求めるため、ヒートポンプの設置数の増加に伴う利用率とヒートポンプ 1基当たりの利用可能熱量の変化に着目した。

(2) 利用率とヒートポンプ 1基当たりの利用可能熱量による地域の評価

本シミュレーションモデルに組み込まれている下水道幹線 (図-4) のほとんど (40 本) を対象に表-1 に例示した解析を行い、ヒートポンプの設置数の増加に伴う利用率 (図-6)、ヒートポンプ 1基当たりの利用可能熱量 (図-7) の変化を調べた。ここでは各幹線の上流端から終末処理場までを 1本と数えているため、下流側の回収候補地点には幹線間での重複がある。な

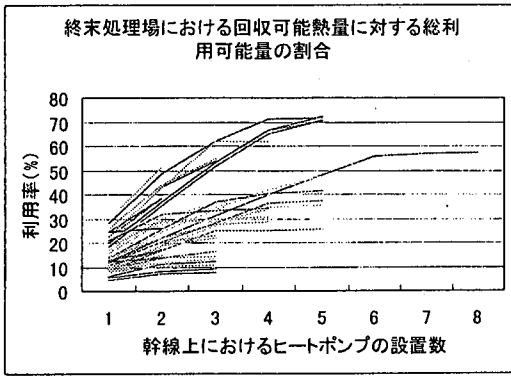


図-6 ヒートポンプの設置数の増加に伴う利用率の変化

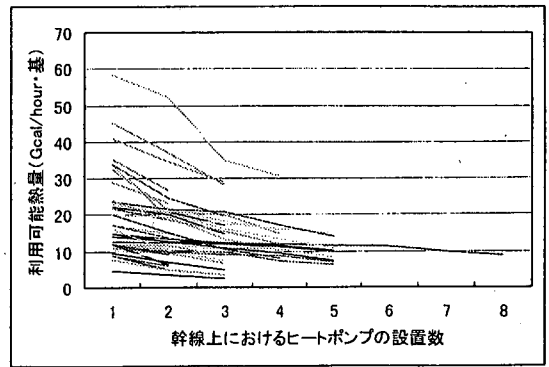


図-7 ヒートポンプの設置数の増加に伴うヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量の変化

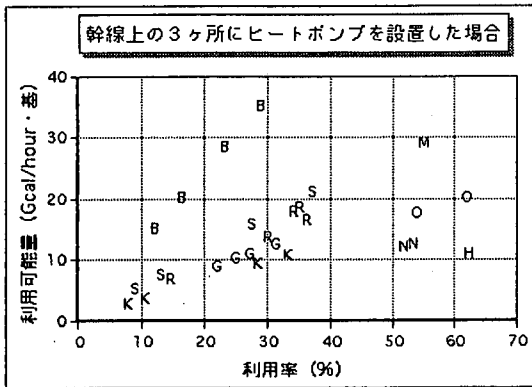


図-8 利用率とヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量の関係

お、図-4 と対比させるため、図-5 に冬期屋間の温熱需要分布を示す。色の濃い地域が大きな温熱需要を示す。

図-6、図-7 とともに、類似の変化を示す幹線群の存在を示している。また、各幹線に相当するグラフは複雑に交差しておらず、相互の大小関係はあまり変化していない。よって、幹線群の形成状況を考慮し、3ヶ所にヒートポンプを設置する場合の利用率、ヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量を、幹線毎の熱の需給関係の特徴を代表させる指標として選んだ。

図-8 は3ヶ所以上に設置が可能な28本の幹線を対象に、利用率とヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量の関係をプロットしたものである。表-2 に図-8～図-10 における各処理区の略称を示す。同一の処理区に属する幹線同士は相互に近い場所にプロットされて群をなし、かつ原点を通る直線上に乗っているように見える。利用率が小さくヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量が大きいのは芝浦処理区である。これは豊

表-2 図-8～図-10 における各処理区の略称

B	芝浦処理区
D	小台処理区
G	新河岸処理区
H	新河岸東処理区
K	葛西処理区
M	三河島処理区
N	中川処理区
O	落合処理区
R	森ヶ崎処理区
S	砂町処理区
U	小菅処理区

富な下水の発生源として都心の広大な業務地域を抱えている上、幹線沿線の温熱需要も大きいことを意味している。それと対照的なのは、利用率が大きくヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量が小さい中川処理区である。ここでは主な下水の発生源は住宅地であり、下水流量はあまり豊富ではない。また沿線の温熱需要も住宅によるものであるため、あまり大きくはない。三河島処理区や落合処理区では沿線の温熱需要は大きい、下水の発生量は芝浦処理区のように大きくはない。砂町処理区、葛西処理区、森ヶ崎処理区、新河岸処理区はともに原点よりにプロットされる。これらは東京23区の周辺に位置し、住宅地が中心的な土地利用であるが、中川処理区に比べ幹線が長く集水面積が広い、下水流量は豊富である。しかし温熱需要は小さい。

利用率がそれほど大きくない場合は、将来新たな温熱需要を立地させることが可能である。また、ヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量が大きいことは地域熱供給の事業化にとって有利である。その意味では、芝浦処理区は現状でも既に地域熱供給事業の適性が高

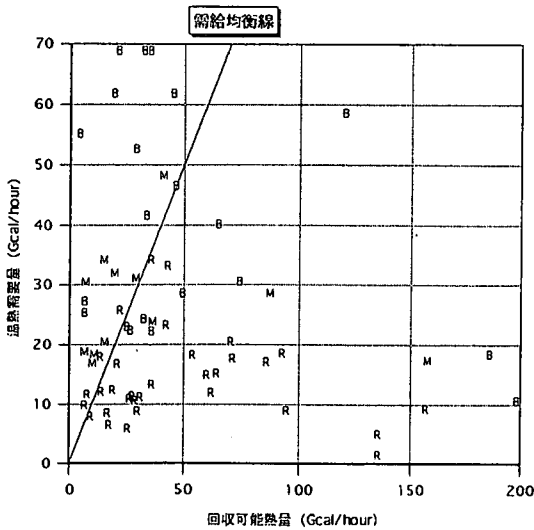


図-9 幹線結合点における需給関係（芝浦処理区，三河島処理区，森ヶ崎処理区）

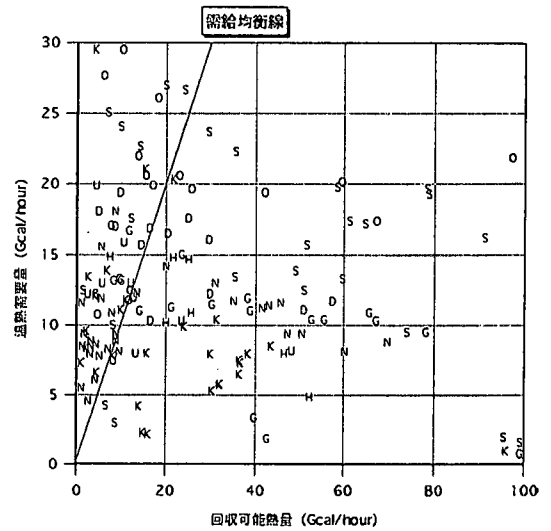


図-10 幹線結合点における需給関係（その他の8処理区）

いといえ、河原らの結論¹¹⁾とも一致する。このように、ここでとり上げた2変数により、周辺の土地利用に由来する処理区毎の熱の需給関係の特徴を説明づけることが可能である。

(3) 熱の需給関係のみによる地域の評価

前節では、幹線単位で得られる指標をもちいて処理区毎の適性評価を行ったが、回収候補地点毎の需給関係から処理区の評価を行うことも可能であると思われる。よって幹線の長さに関わらず、全幹線の回収候補地点（216地点）における需給関係を重複しないようにプロットした。

三河島処理区、芝浦処理区は需要供給の均衡線よりやや需要過剰の位置に分布しているが、芝浦処理区では高い値にまで分布しており、分散の程度も大きい（図-9）。集水域の上流部が、需要の大きな都心に当たっていることが原因と思われる。一方、森ヶ崎処理区では供給過剰であり、終末処理場付近には需要の著しく小さな地点も存在する。これは、終末処理場がオフィスビルや高層住宅などからは離れて立地していることに関係する。このような傾向は他のいくつかの処理区でも見られる（図-10）。なお、この他の処理区は原点に近い位置に分散している。その中では新河岸処理区において需要過剰の地点が目立ち、需要の値も比較的大きい。

5. まとめ

本研究においては、下水から得られる温熱エネルギーを都市内で有効に再利用するための地域熱供給施設の立地について、専用に開発されたGISにより、東京23区内の全11下水処理区を対象とした温熱需要と熱供給事業における排熱利用との空間的整合性に対する解析を行った。地域熱供給事業適性評価を地域別に示すため、熱の需給関係や利用可能性の類型化を試みた。下水道幹線上の3ヶ所にヒートポンプを設置する場合の利用率、ヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量を、幹線毎の熱の需給関係の特徴を代表させる指標として解析した。その結果、利用率が小さくヒートポンプ1基当たりの利用可能熱量の大きい芝浦処理区は、現状でも既に地域熱供給事業の適性が高いことが明らかになった。また、回収候補地点毎の需給関係から処理区の適性評価を行った結果も、芝浦処理区における適性の高さを示していた。

なお実際の地域熱供給事業の多くは、経済性を考慮して夏期の冷熱供給と組み合わせられた形で実施されるものと考えられることから、冷温熱同時率¹¹⁾の考慮が必要となろう。また本研究では言及していないが、地域内熱搬送の効率¹¹⁾や温度レベル別の熱需要¹¹⁾、地域熱供給施設の建設段階～運用段階を通じた省エネルギー効果、環境負荷削減効果等の見積¹⁵⁾が、事業の実施に際して検討されるべきである。

謝辞：本研究を行うに当たり、GISでの作業を手伝って頂いた東京理科大学経営学部学生の畠山寛君（当時）に感謝します。

付録（註）

1) 本シミュレーションモデルにおいては、下水の持つ回収可能な熱量は次式によって求められる⁷⁾。

$$SH = Q \times 5 \times 1,000 \quad (5)$$

SH (kcal/hour) : 回収可能熱量

Q (t/hour) : 毎時流量（ここでは年平均値）

5 (°C) : 実用的に回収が可能な下水温と気温との温度差⁹⁾（年平均値として）

1,000 (kcal/t・°C) : 比熱

実際下水道幹線上で熱回収を行った場合、流量がそのままであるのに対し下水温が下がり、下流においては新たな熱の流入があるものの、次第に熱回収が困難となるように思われる。よって流速を落とし、ヒートポンプにおける下水の接触時間を確保するなどの対応が必要である。

本シミュレーションモデルでは各回収地点における下水温を直接扱ってはいないが、多くの先行研究では、下水温と気温との温度差の資料を参考に、最低限回収可能な温度差を5°Cとしており、本研究でも5°Cの温度差はどの地点でも回収可能と考えている。

2) 建設コスト等経済性との関係から、熱源水配管距離は一般に500~1,000m以内が適当とされている¹⁰⁾¹¹⁾。

引用文献

- 1) 下水熱利用促進研究会：「最新下水道 未利用エネルギー活用の手引き」，山海堂，157p，1994。
- 2) 伊藤真知子，伊藤武美，花木啓祐，松尾友矩：下水を用いた地域冷暖房施設のライフサイクルアセスメント，環境システム研究，Vol.23，pp.241-247，1995。
- 3) Narita, K. and T. Maekawa: Energy Recycling System for Urban Waste Heat, *Energy and Buildings*, 15-16, pp.553-560, 1990/1991.
- 4) Nakamura, H. and N. Yoshida: Analysis of Energy Demand, and Evaluation of Energy Conservation Measures in Urban Districts, *IEA International*

Conference on Technology Responses to Global Environmental Challenges, Proceedings 1, pp.617-624, 1991.

- 5) 依田浩敏，渡辺浩文，尾島俊雄：東京都における未利用エネルギー等データベースの作成調査，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.193-196，1993。
- 6) 東京都下水道局計画部総合計画課：「第二世代下水道マスタープラン」，102p，1992。
- 7) 一ノ瀬俊明，川原博満，花木啓祐，松尾友矩：下水熱有効利用可能性解析ツールとしてのGISの開発，土木学会論文集，No.552/VII-1，pp.11-21，1996。
- 8) Ichinose, T., H. Kawahara, K. Hanaki, T. Matsuo and T. Ito: The Potential Analysis on Utilization Use of Sewage Heat with GIS and Discussion on Optimized Settlement on Heat Pumps, *The 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Proceedings, 1*, pp.83-88, 1997.
- 9) Ichinose, T., H. Kawahara, K. Hanaki, T. Ito and T. Matsuo: Feasibility Study on Effective Utilization of Sewage Heat in Urban Area with GIS, "*Urban Ecology*", Springer-Verlag, pp.162-164, 1998.
- 10) 佐土原聡，尾島俊雄：地域冷暖房の熱需要特性による東京の地区分類に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.364，pp.86-93，1986。
- 11) 河原透，佐土原聡，尾島俊雄：低温熱媒地域冷暖房導入に伴う東京の地区分類に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.448，pp.29-38，1993。
- 12) 東京都都市計画局：「東京都土地利用現況調査事業要綱・要領」，1986。
- 13) 一ノ瀬俊明，花木啓祐，松尾友矩：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析，環境工学研究論文集，Vol.31，pp.263-273，1994。
- 14) 東京都環境保全局：「地域暖冷房推進に関する指導要綱」，240p，1991。
- 15) 一ノ瀬俊明，花木啓祐，伊藤武美，松尾友矩，川原博満：地理情報システムとライフサイクルアセスメントの結合による地域熱供給事業の検討，環境科学会誌，Vol.10，pp.119-127，1997。
- 16) 外岡豊：環境とエネルギーから構想した理想都市像，月刊用地，'95.1，52-65，1995。
- 17) 建設省下水道部：「下水熱利用検討調査」，1992。

(1998.11.30 受付)

REGIONAL FEASIBILITY STUDY ON DISTRICT SEWAGE HEAT SUPPLY WITH GIS

Toshiaki ICHINOSE and Hiromitsu KAWAHARA

Spatial conformity between heat demand and waste heat supply was analyzed in Tokyo with GIS. For the regional feasibility study on the district sewage heat supply, the relationships between demand and supply, and the probability of heat use were classified. In case that heat pumps were settled at 3 points along an each series of sewer line, the percentage of total usable heat and the usable heat per a heat pump were analyzed as indicators representing the characteristics of the relationships between demand and supply in each series of sewer line. The result showed a high feasibility in Shibaura Sewage Treatment District in the central business district of Tokyo.