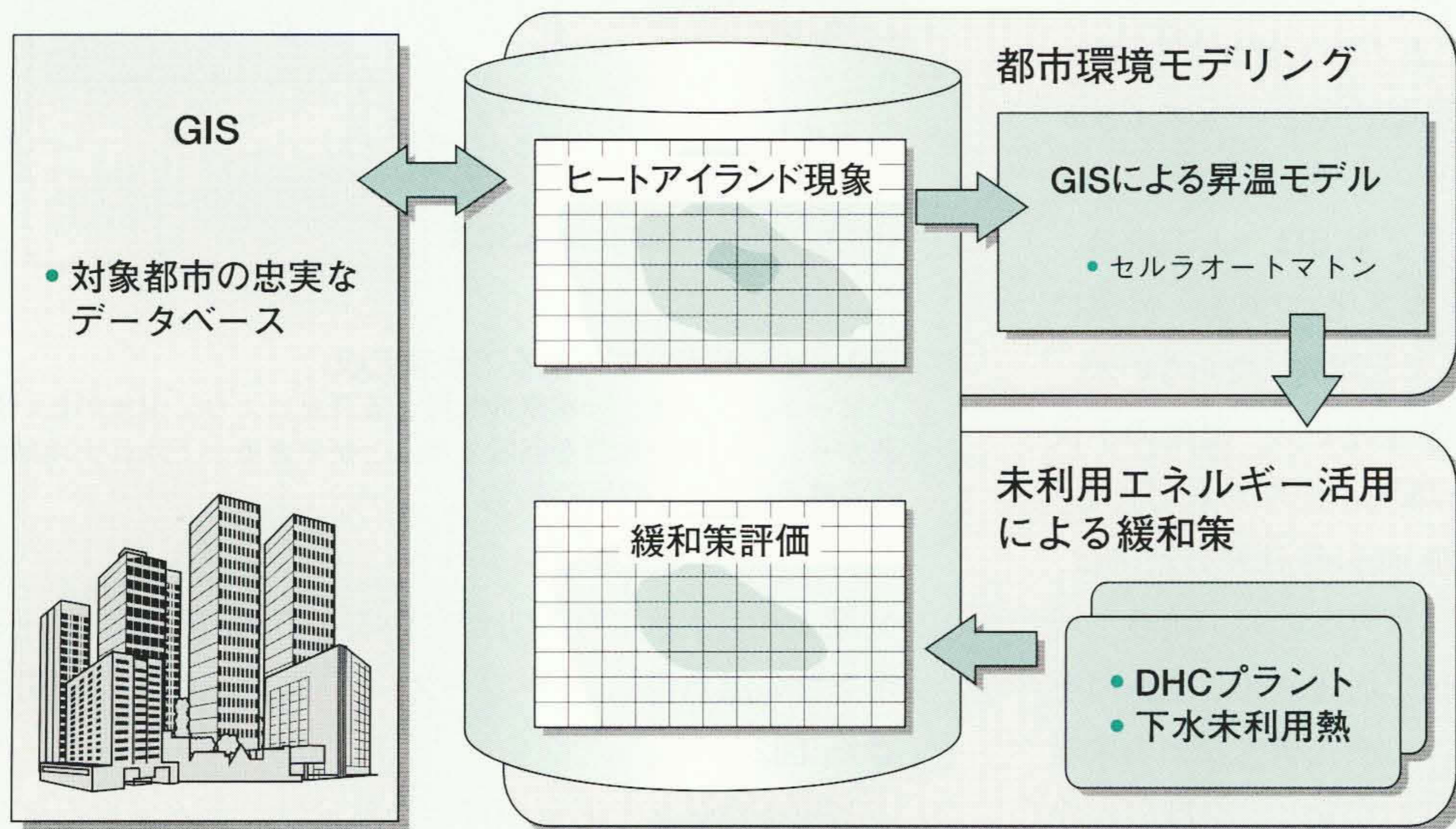


下水未利用熱活用のための 都市環境モデルシミュレーション

Urban Environmental Model Simulation for Estimation of Unutilized Heat of Sewage

圓佛伊智朗 *Ichirô Embutsu* 福島 学 *Manabu Fukushima*
岡憲一郎 *Ken'ichirô Oka* 植木 茂 *Shigeru Ueki*



注：略語説明
 GIS (Geographic Information System；地理情報システム)
 DHC (District Heating and Cooling；地域冷暖房)

都市昇温モデルに基づく 下水熱利用シナリオ評価 の概要

都市ヒートアイランド現象の緩和策として、地域冷暖房プラント導入による下水未利用熱の活用に着目した。下水と外気との温度差を利用し、夏は冷房用冷熱、冬は暖房用温熱をそれぞれ回収することにより、未利用熱の活用を図る。GIS上で昇温モデルを構築し、ヒートアイランド現象の緩和効果の定量的な評価を可能とした。

東京などの大都市では、近郊部よりも気温が数度以上高くなる「ヒートアイランド現象」が観測され、各種の弊害が起きている。最大の要因である人工排熱増大を抑えるためには、いわゆる「未利用エネルギー」の導入などの省エネルギー施策が求められている。

日立製作所は、利用可能熱量が多く、かつ熱需要家に近い地点での回収が可能な未利用エネルギー源として、都市下水に着目した。具体的には、DHC(地域冷暖房)プラント内のヒートポンプを用いて下水から空調用冷熱を回収し利用することにより、省エネルギーと排熱低減を同時に実現するものである。米国カリフォルニア大学と共同で、米国サンノゼ市を対象に、この方式によるヒートアイランド現象の緩和効果を、GIS(地理情報システム)上に構築した昇温モデルで評価した。

1 はじめに

上下水システムやDHC(地域冷暖房)システムなどの公共・都市関連システムの計画は、水質汚濁や都市の温暖化などに代表される都市環境問題の改善を意図して行われる時代になっている。すなわち、要素技術としての個別の都市のインフラストラクチャーを取り扱うだけでなく、各インフラストラクチャーの一つ一つが視野に入るような都市のスケールの中で、トレードオフ(相互補完)による広域最適化を考慮するマクロシステムの考え方が導入されるようになってきている。

都市環境モデリングとは、水質汚濁や温暖化などの現象を定式化することにより、公共・都市関連システムに

よる環境改善策の検討と効果定量化を可能にする手法である。日立製作所は、カリフォルニア大学の米国立地理情報解析センタ(UCSB/NCGIA)と共同で、地理情報利用による都市環境モデリング技術を開発した。この技術では、都市環境とかかわりの深いエネルギー消費の分布情報などを集約したGIS(Geographic Information System)と、都市昇温などの環境モデルを組み合わせることにより、都市内の未利用エネルギー回収・利用といった具体的なシナリオの実施効果を評価できる。

ここでは、米国サンノゼ市を対象に、下水を熱源としたDHCプラントの導入を想定し、都市ヒートアイランド現象の緩和効果を予測した事例について述べる。

2 都市のヒートアイランド化と下水熱

2.1 都市のヒートアイランド現象とその弊害

都市のヒートアイランド化とは、都市内での気温がその周辺部に比べて高くなる現象である。東京などの大都市では、都心部の気温が周辺部よりも数度高くなることが知られている¹⁾(図1参照)。これらの大都市以外でも、程度の差はあるものの、世界中の都市でヒートアイランド現象が観測されている。

ヒートアイランド現象発生 の 主 要 因 は、人工排熱の増加と都市被覆の変化(アスファルト化)である。昇温による影響は、欧州の都市ではほとんど問題にならないが、わが国や米国などの中緯度以下の地域では、夏期の不快指数の増大により、快適な都市環境が損なわれている。また、不快指数の増加による冷房機器稼働率の増加は、空調用電力消費の増加とともに、戸外への人工排熱を増やし、これがヒートアイランド化を加速させる悪循環を引き起こす。電力消費の増加は、二酸化炭素などの環境負荷を増大させるだけでなく、電力需要ピーク時の大停電を誘発する。

2.2 下水未利用熱と利用可能熱量の評価

都市域で利用が可能な未利用エネルギーとしては、ごみ焼却施設の廃熱などが知られているが、熱量がさらに大きいものとして、下水廃熱がある。下水廃熱は、DHCプラントでのヒートポンプを用いて、熱需要家の近くで回収が可能であり、熱輸送時の損失が少なく済むという利点がある。

下水温度は、夏期には気温よりも低いため、冷房用の冷熱源(ヒートシンク)として、後述するヒートアイランド現象の緩和策に用いることができる。他方、冬期には

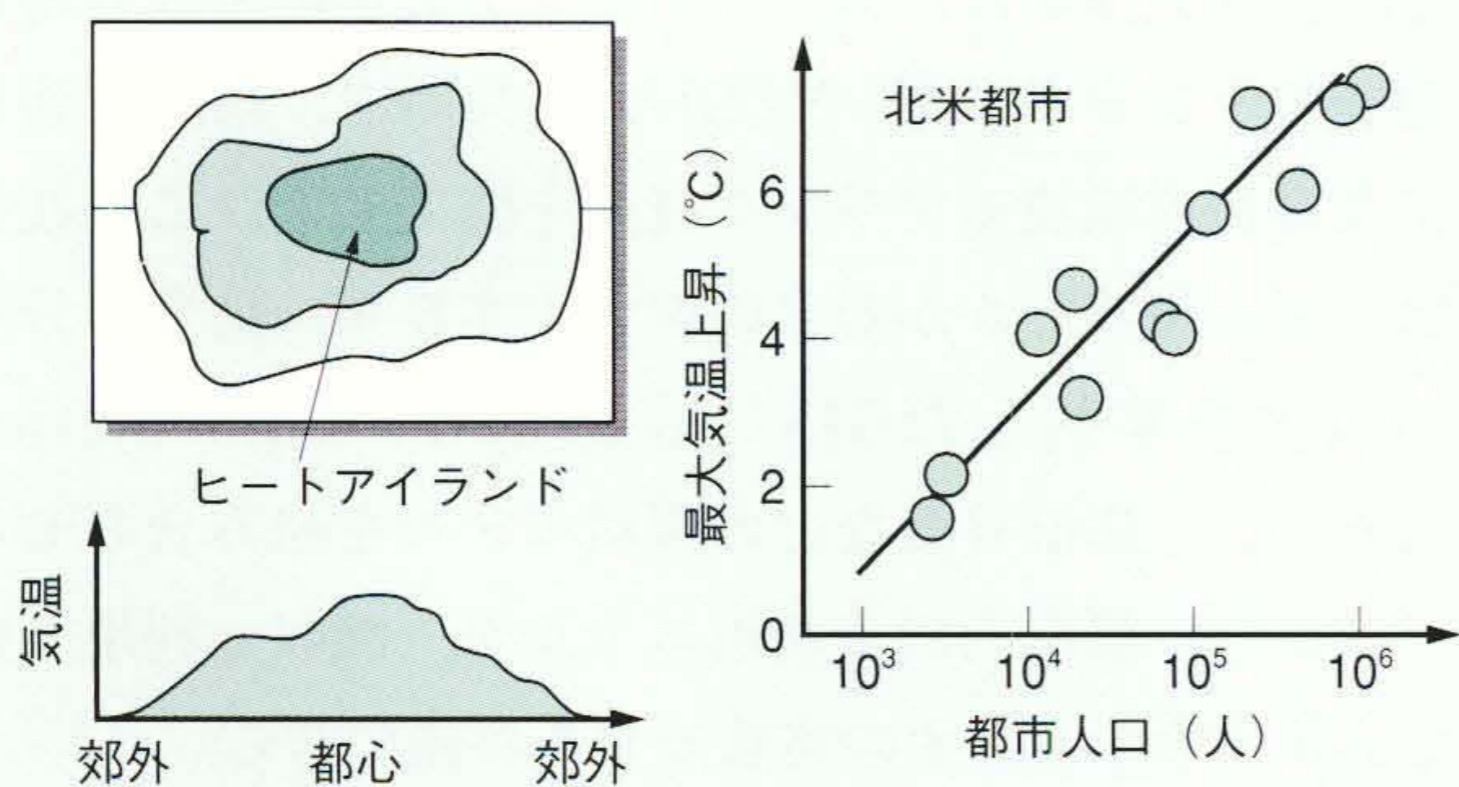


図1 都市ヒートアイランド化の現状

都心部の気温が周辺部に比べて高くなるヒートアイランド現象は、夏期の夕方に顕著となる。都市人口が大きいほど、昇温の度合いが大きくなる。

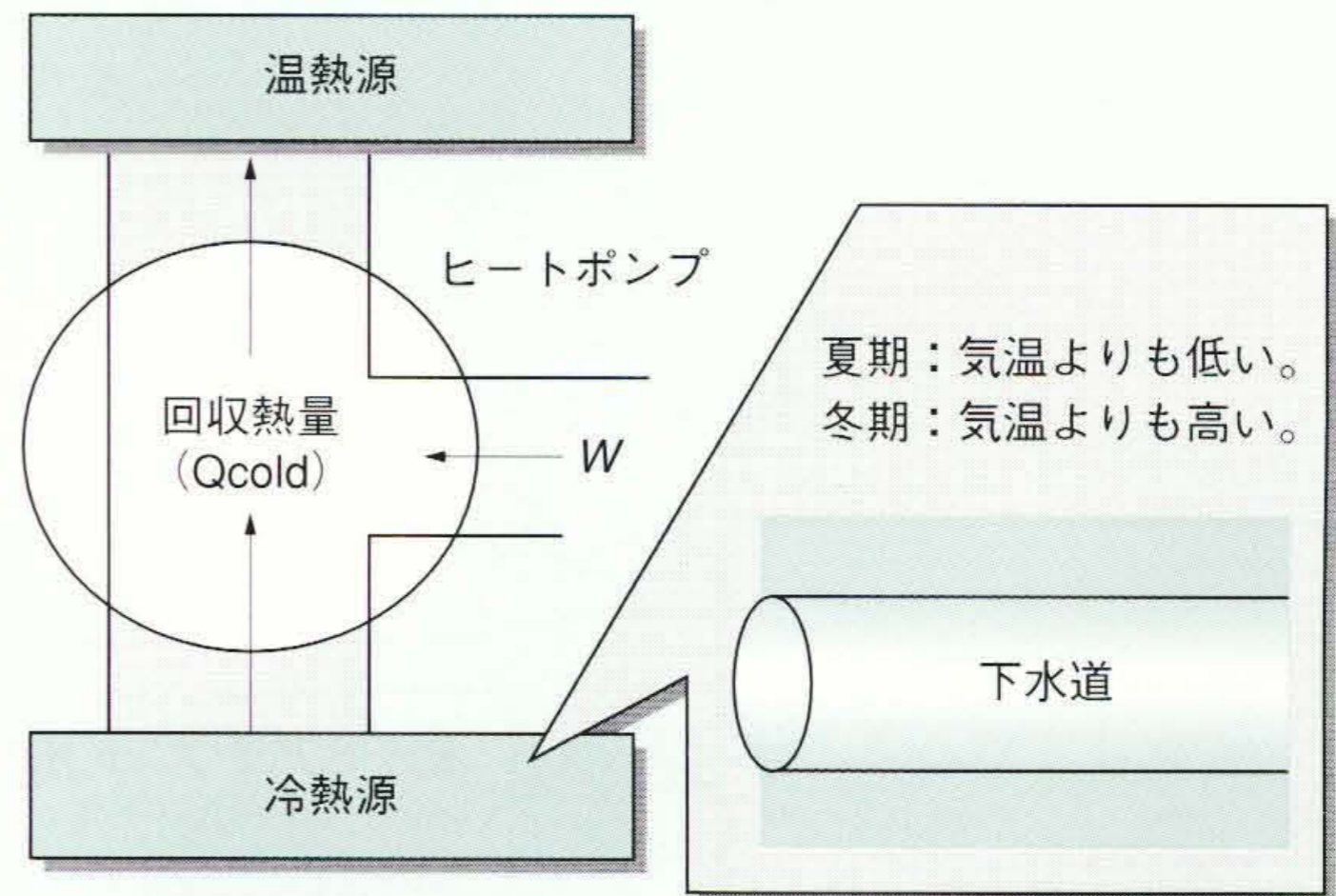


図2 ヒートポンプによる下水熱回収

ヒートポンプは、仕事量 W を加えることにより、温度の低い熱源から、より高い熱量を回収することができる。下水は、冷熱源と温熱源の両方に利用できる。

気温よりも下水温度の方が高いことを利用して、ヒートポンプの温熱源(ヒートソース)として、熱回収に利用できる(図2参照)。

ヒートポンプで回収が可能な熱量は、下水温度などに依存し、理論的にはエクセルギー^{*1)}という物理量で評価できる。GIS上に下水流量や熱需要量などの分布情報を準備することにより、回収可能量と需要量とのバランスが取れる地点をDHCプラント設置個所として選定できる。

2.3 都市昇温モデルの構築

都市のヒートアイランド現象を再現するモデルとして、都市の気温を予測するモデルが必要である。従来モデルとしては、都市内の熱の流れを三次元解析するモデルなどが提案されているが、モデル調整に必要な三次元データの計測値が十分でなく、現実の都市での解析には適さない場合が多い。日立製作所は、入手が可能なデータを用いて、各都市の昇温傾向に合った簡便な経験モデルを構築した。このモデルでは、(1)対象エリアの特性(地表面のタイプ別の熱吸収率など)によってモデル化できる「熱移動現象」と、(2)対象エリアとその近傍エリアとの相互作用でモデル化できる「熱移動現象」に大別した。前者を既存の物理モデルで、後者を地理情報の基本的なデータ形式であるラスタデータの扱いに有利な「セルラオートマトンモデル」で、それぞれ定式化したところが特徴である。

*1) エクセルギー(Exergy)：環境温度 T_0 で、熱量 Q 、温度 T の媒体物質から回収が可能な最大熱量 E は、 $dE = dQ \cdot (T - T_0) / T$ で表すことができる(d は微分記号)。

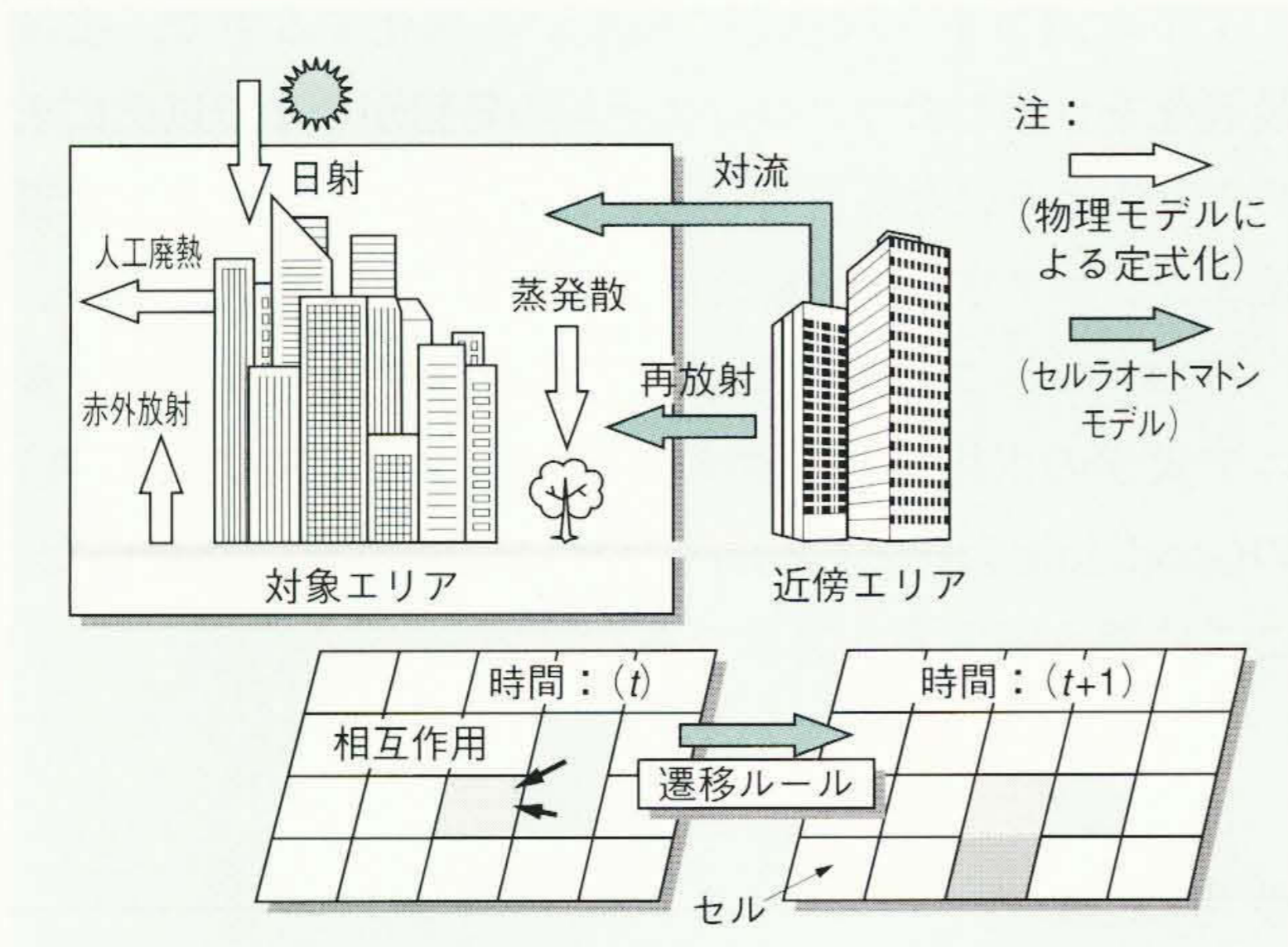


図3 セラオートマトンによる昇温モデル
対流と再放射による熱移動を、「セル」と呼ばれるメッシュ間の相互作用のルールによって記載している。

セラオートマトンモデルでは、対象とする空間をメッシュ(セル)に分割し、近傍間の相互作用を記載した遷移ルールにより、熱移動による気温の変化をシミュレートする(図3参照)。ここで必要な遷移ルールは、日立製作所がすでに開発済みの「ニューロ応用ルール獲得方式²⁾」により、対象とする都市の昇温傾向に合うように準備した。

3 緩和シナリオの評価結果

3.1 対象都市(米国サンノゼ市)

ケーススタディのモデル都市として、米国カリフォルニア州サンノゼ市を選定した。選定の条件としては、(1) ヒートアイランド現象が顕在化する程度の人口があること、(2) DHCプラントが設置できるような温冷熱需要があること、(3) 都市の熱環境に影響するような特殊な気候条件がないこと(例えば、風の街として知られるミシガン州シカゴ市などは不適)、などを考慮した。

サンノゼ市は、シリコンバレーとして知られる人口約80万人の工業都市であり、両側を山に挟まれた谷部に位置し、北端がサンフランシスコ湾内の浅瀬に面している。気候条件は、デGREEデー^{※2)}で見ると、暖房に関しては水戸市と、冷房に関しては鹿児島市とそれぞれほぼ同じ気候であり、DHCプラント設置を想定できるだけの温冷

※2) デGREEデー (Degree Day)：暖房に要する熱量、または冷房に必要なエネルギーを見積もるための指数。空調の要否のしきい値温度と気温との偏差の年間積算値で表す。

熱需要が存在する。

3.2 ヒートアイランド現象の緩和シナリオ

ヒートアイランド現象の緩和策としては、都市の緑被率を向上させることなどが知られている。この研究では、上述した下水廃熱に着目した緩和シナリオを検討した。昇温緩和のポイントは、(1) 昇温に寄与する人工排熱を低減するか、または(2) 人工排熱を回収し、回収熱を大気中に再放出することなく再利用、排除することにある。そのため、DHCプラント内のヒートポンプにより、下水を冷熱源として冷熱を生成し、空調用の冷熱として供給することを想定した(図4参照)。この場合、従来の個別空調機をDHCによる冷房に置き換えることにより、室外機からの排熱をなくすことができる。室内から奪った熱は、DHCラインを通して気温の上昇に寄与させることなく、下水へ排除する。

上記の緩和策との効果を比較するために、代替案として、大規模熱源(工場、発電所など)から熱回収するシナリオも設定した。この場合には、回収熱をDHCラインによって温水として供給し、利用した熱は、温排水として下水に排除する。

3.3 緩和シナリオの評価解析結果

上述した緩和策により、個別空調機の室外機からの廃熱相当分(エネルギー消費の12.8%相当)が総人工排熱から低減できるとした場合の降温試算結果を図5に示す。夏期の午後のオフィス地区平均で、0.22℃の降温効果があるという試算結果が得られた。商業地区では、その効果が最高で0.85℃にまで達し、十分な効果があると言え

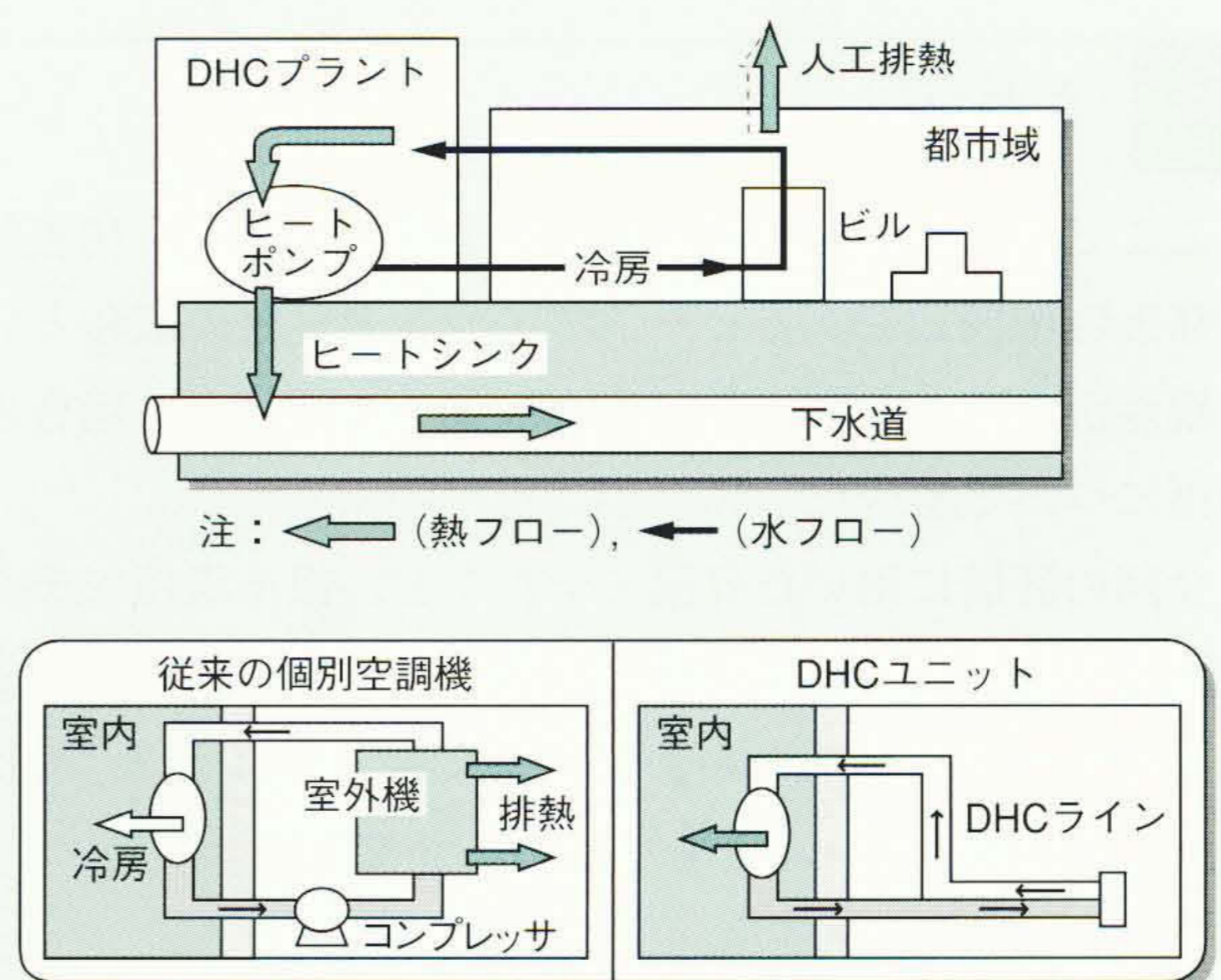


図4 ヒートアイランド化緩和策の概要
従来の個別空調機をDHCでの冷房に置き換えることにより、室外機からの排熱をなくすことができる。

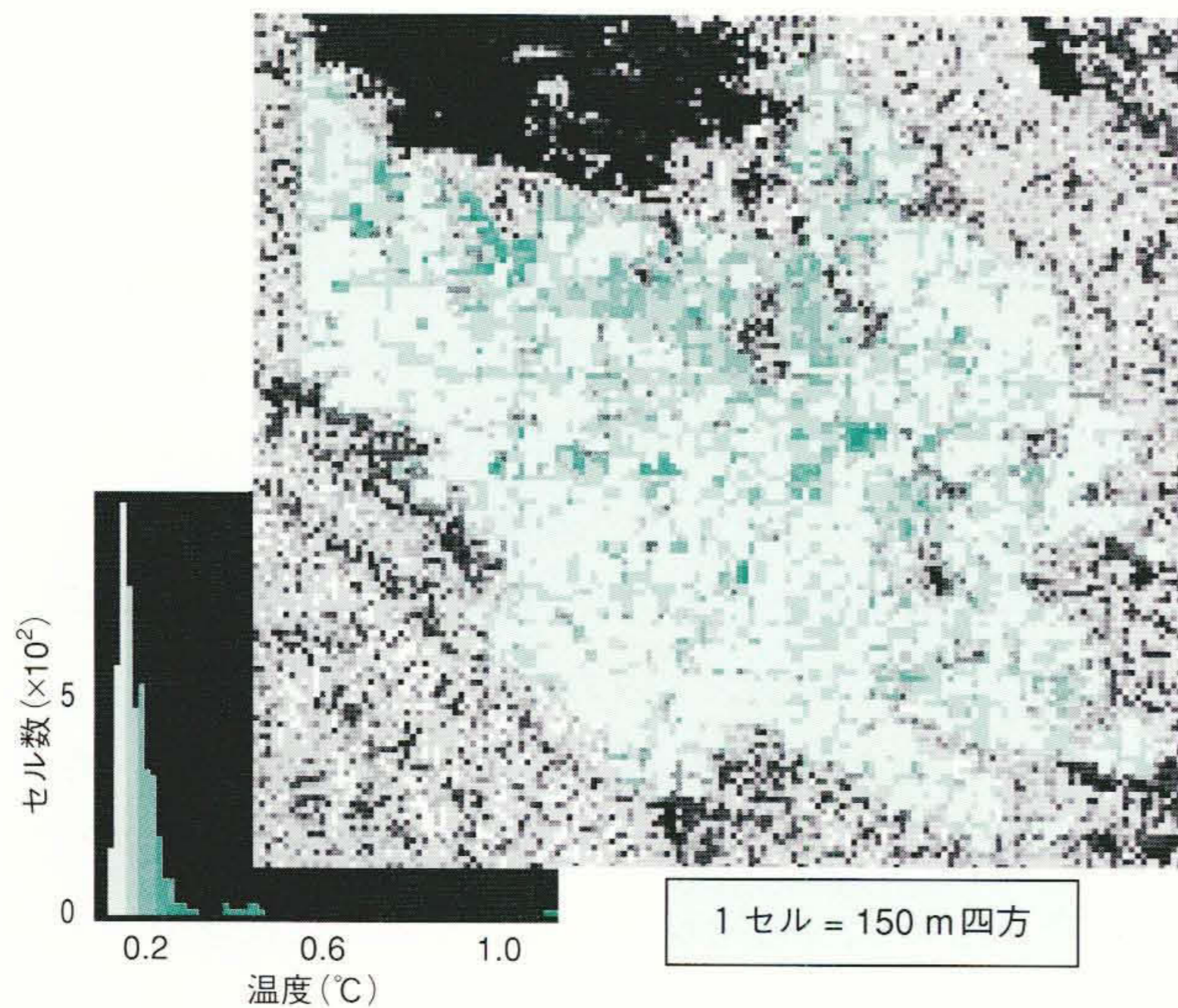


図5 サンノゼ市でのヒートアイランド化緩和の評価例

下水を冷熱源とするDHCプラントの導入により、オフィス地区平均で0.22℃(1992年7月30日15時)の降温効果があるとの試算結果が得られた。

る。大規模熱源から人工廃熱の20%相当を回収する代替案でも、その効果は工業地区にとどまるが、平均で0.20℃降温する結果となり、同等の効果が期待できる³⁾。

サンノゼ市のように冬期に暖房が必要な都市の場合、冬期のヒートアイランド化は、暖房用エネルギーの低減に有利である。そこで、冬期には、下水を、ヒートシンクではなくヒートソースとして温熱回収を行うこととした。この場合、エクセルギーが最大の個所では、約2万人相当の暖房を供給する熱量の800 GJ/dを回収できるという結果を得た。この熱量は、米国での電力発電工程換算でCO₂72 t/d, NO_x190 kg/dの低減に相当し、環境負荷の低減にも寄与することができる。

4 おわりに

ここでは、未利用熱源としての下水に着目し、代表的な都市環境問題であるヒートアイランド現象の緩和という観点から、この熱源をDHCプラントで活用する場合の評価について述べた。

今回の評価に用いた昇温モデルなど、都市環境モデルを現実の都市で運用する際の成否は、対象都市に関する忠実なデータベースをいかに構築できるかによる。GISは、このためのツールとして威力を発揮した。

上下水道事業を取り巻く環境が多様化する中で、広域最適化を目指したマクロシステムの発想が今まで以上に求められるようになる。今後も、GISをコアとした上下水環境エンジニアリング技術の開発を進めていく考えである。

終わりに、この論文の執筆にあたっては、カリフォルニア大学の米国立地理情報解析センタ(UCSB/NCGIA)のGoodchild教授とChurch教授にご協力をいただいた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) G. Moll : Cooling Our Baking Cities, American Forests, Vol. 95(1989)
- 2) K. Baba, et al. : Explicit Representation of Knowledge Acquired from Plant Historical Data Using Neural Network, Proceedings of IJCNN-San Diego(1990)
- 3) I. Embutsu, et al. : A Cellular Automaton Modeling for Urban Heat Island Mitigation, Proceedings of GIS/LIS-Phoenix(1994)

執筆者紹介



圓佛伊智朗

1988年日立製作所入社、電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 環境システム部 所属
現在、上下水、水圏監視制御技術の研究に従事
日本リモートセンシング学会会員、電気学会会員
E-mail : enbutsu @ hrl. hitachi. co. jp



岡 憲 一 郎

1992年日立製作所入社、電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 環境システム部 所属
現在、水環境を中心とした環境監視・制御技術の研究に従事
E-mail : oka @ hrl. hitachi. co. jp



福 島 学

1988年日立製作所入社、電力・電機グループ 大みか電機本部 社会システム第一設計部 所属
現在、地理情報システムを応用した情報制御システムの開発・設計に従事
E-mail : fukusima @ omika. hitachi. co. jp



植 木 茂

1986年日立製作所入社、電力・電機グループ 社会システム事業部 公共電機システム部 所属
現在、上下水道情報制御システムの開発、企画に従事
環境システム計測制御学会会員
E-mail : s_ueki @ cm. head. hitachi. co. jp