



小地域を対象とした都市エネルギー計画支援システム

辻 毅一郎*

A Computer Assisted System for Energy Systems Planning in Metropolitan Area

Key Words : Energy systems planning, Distributed generation, Cogeneration, Computer assisted system

1. はじめに

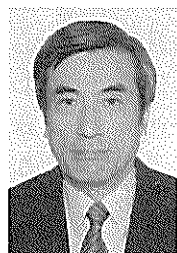
1997年12月に採択された京都議定書により、わが国は2010年を中心とする5年間の平均で、二酸化炭素排出量を1990年実績値比で6%削減することを目標としている。この達成が容易でないことは、様々な試みにも関わらず、1997年度における二酸化炭素排出量が1990年比ですでに8.4%増加していることから明らかである。エネルギーの消費は二酸化炭素の排出と密接に関係しており、エネルギー消費の削減を図ることが望まれるが、これは経済の発展を抑制することにもつながるため、この排出量削減の目標を達成することには非常な困難が伴うことは想像に難くない。エネルギー利用の高効率化と環境影響低減化は今後も継続的に推進すべき重要なキーワードであるといえよう。筆者は、日本学術振興会未来開拓学術研究プロジェクト「環境負荷低減を目的とした新しい自律分散型都市エネルギーシステム」(JSPS-RFTF97P01002)(平成9年度~13年度)¹⁾において、都市域の比較的小さな地域を対象に、電力・都市ガス・熱供給を総合的に行う地域特定型の総合エネルギーサービスシステムをエネルギーの高効率利用と環境影響低減化の面から望ましいシステムと

して提案している。本稿では、総合エネルギーサービスを念頭に都市エネルギーシステムの多目的最適化を行うモデルと、そのモデルに基づく具体的な検討を容易にするために開発したコンピュータ支援システムについて、その概要を紹介する。

2. 総合エネルギーサービスシステムとその計画

二酸化炭素の排出を削減しなければならないといっても、一般の人々にとってエネルギーは、空気と同様どこからか与えられるもので、生活水準の向上と共に自然にその消費が増えているにすぎず、貴重な化石資源を浪費している、あるいは多量に二酸化炭素を排出しているという実感はないのが実状であろう。しかし、エネルギーの主たる消費部門は過去においては確かに産業であったが、近年では民生(家庭および業務)・運輸部門での消費が約半分を占めており、今後は、一般の人々が各自エネルギー問題に関心を持ち、より身近なところから積極的にエネルギー利用の高効率化と環境影響低減化を図っていくことが重要である。そのためには、各需要家における個別の努力も必要であるが、一つの方法として、自治体、デベロッパー、エネルギー供給事業者などが中心となり、都市内の比較的小さな地域(例えば2km四方位)を対象とし、その地域の諸特性を考慮に入れた地域密着型の、総合的なエネルギーサービスを行うことが効果的であると筆者は考えている。

図1はそのイメージを示したものである。そこでは地域の熱併給発電所を中心とする都市エネルギーネットワーク、すなわち電力、都市ガス、熱供給、廃熱利用ネットワークがイメージされているほか、各都市施設には、それぞれ個別のコージェネレーションシステム(以下ではCGSと記す)や、ヒートポンプシステム、太陽エネルギー利用システムが設置さ



* Kiichiro TSUJI
1943年9月18日生
1966年3月 大阪大学工学部電気工学科卒業
1968年3月 同大学院修士課程修了
1973年6月 ケースウェスタンリザーブ大学大学院博士課程修了
現在、大阪大学・大学院・工学研究科・電気工学専攻、教授、Ph. D., 電力・エネルギーシステム工学
TEL 06-6879-7709
FAX 06-6879-7713
E-Mail tsuji@pwr.eng.osaka-u.ac.jp

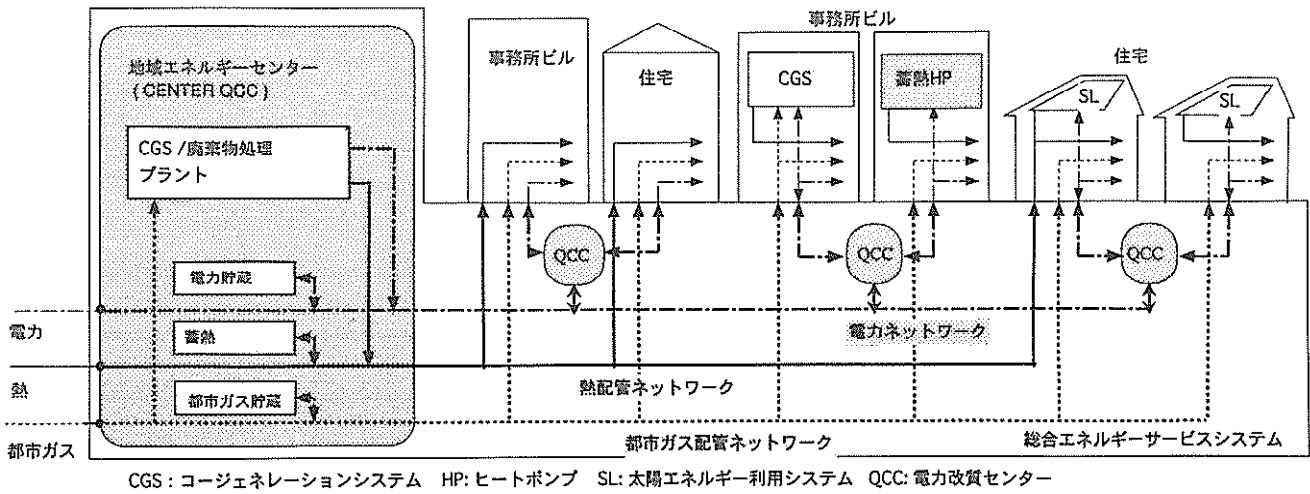


図1 総合エネルギーサービスシステムのイメージ

れる可能性を考えている。

地域熱供給を行うCGSは、将来の都市エネルギーシステムにおいて中核的役割を果たす。業務地域においては昼間にエネルギー需要のピークが起こり、住宅地域では早朝と夕方以降にピーク需要が発生する。そこで地域熱供給を行う場合、業務地区だけでなく住宅地区も熱供給の対象とすれば、負荷が平準化され、より高効率なシステムとなり得る。ビルなどを対象とする個別のCGSも、エネルギーの高効率利用を実現できる構成要素の一つとして考慮すべきである。

太陽光発電は設置費用が大きいものの、発電時にCO₂を発生しないことからCO₂排出削減に大きく寄与し得る。また、近年、技術進歩の著しいマイクロガスタービンや固体高分子型燃料電池(PEFC)は、住宅用CGSとしてもその導入が考えられている。また、多機能ヒートポンプも、電力の高効率利用が可能となることから、住宅、業務商業ビル等で考慮すべき構成要素となる。

これらの構成要素を視野に入れ、最適な組み合わせを探求し、併せて需要家における省エネを徹底する方策を講じるなど、総合的な検討を行えば、対象地域における一次エネルギー消費量、あるいはCO₂排出量の大幅な削減を可能とする都市エネルギーシステムのベストミックス(最適な組み合わせ)を明らかにすることができるであろう。これらの計画・運用最適化問題は、つねにエネルギー・経済・環境にまつわる多目的の最適化問題である。多目的であるが故に、一つの望ましい姿を描くことは困難で、ま

ずは一次エネルギー削減とコスト、あるいはCO₂排出削減とコストの間のトレードオフ関係(1単位削減するには何単位のコストがかかるかの関係)を十分検討する必要があるだろう。

3. 最適化モデルに基づく分析

筆者らは、前節で述べた多目的最適化を行うための数理計画モデル²⁾を開発した。本モデルでは、まず、業務商業部門を5種類(事務所、ホテル、病院、小売り店舗、飲食店)、住宅部門を2種類(一戸建て住宅、集合住宅)の需要家で表現し、道路によって区切られたブロックごとに、これらの需要家の床面積を与える。次に、これらのブロックごとに、需要家別用途別最終エネルギー需要(冷房・暖房・給湯・厨房・電力特定)を、季節ごとの平均的な日負荷曲線として与える。

対象地域のエネルギーシステムは、各需要家について採択可能なエネルギーシステム代替案を設定し、各ブロックの需要家の何%がどの代替案を選択する

表1 業務部門におけるエネルギーシステム

記号	構成機器
ARH	吸収式冷温水器 + ボイラ
ER	ターボ冷凍機 + ボイラ
HP	蓄熱式ヒートポンプシステム
GE1, GE2	ターボ冷凍機 + ボイラ + CGS
FC1, FC2*	+ 吸収式冷凍機
DHC	地域冷暖房 (DHC)

* CGSの種類・運転パターンにより異なる

かという、代替案のシェアで表現する。したがって、これがモデルにおける最適化の主要な変数となる。代替案として考慮するエネルギーシステムの例を表1に示した。配管から温熱や冷熱の供給を受ける地域熱供給システムもエネルギーシステム代替案の中に含めている。

エネルギーシステムの運用に関する最適化は、地域熱供給以外の代替案については行わず、各システムの構成機器の容量は需要を賄うのに必要な容量で固定する。地域熱供給はCGSによって行うものとするが、電力は熱供給範囲に限らず、対象地域にも供給可能とする。対象地域内で発生する電力が需要に満たない場合は、対象地域外から電力を購入することができるものとする。それらのことを考慮し、地域熱供給については、その供給範囲、構成機器の容量、ならびに運用について簡略化したモデルを立てて最適化を行う。

最適化の目的関数としては一次エネルギー消費量、CO₂排出量及び設備・運用コストの3つを考え、これらの多目的最適化を行う。一次エネルギー消費量とCO₂排出量とは必ず競合するわけではないが、対経済性の効果は異なるので、両者ともに考慮している。最適なシステムは当然対象地域に依存して決定されるが、これまでの試算結果から、例えばCO₂排出を極力抑制するためには、業務地で電動ヒートポンプの導入を進めること、住宅地で太陽エネルギーの利用を最大限進めることが効果的であるのに対し、一次エネルギー消費を抑制するためには、業務地では個別のCGS、住宅地では燃料電池CGSの導入が有効であることが明らかとなってきている。

開発したモデルは線形計画モデルで、代替案の追加・削除がモデルの構造に影響を与えず任意に行え、シェアの変更により対象地域のエネルギーシステムを広範囲に変化させることができるという利点を持っている。モデルの定式化に関しては参考文献[2]を参照されたい。

地域熱供給システムに関しては、CGSの主機の種類と容量、配管ルートに関する詳細な最適化が必要である。筆者らの研究プロジェクトでは、大阪府立大学の伊東教授・横山助教授らにより地域熱供給システムの最適化モデル³⁾が開発されており、上述のモデルで暫定的に決定した熱供給範囲に対して、配管も含めた詳細な最適化を行うことが可能となっているが、紙面の関係でその部分は割愛する。

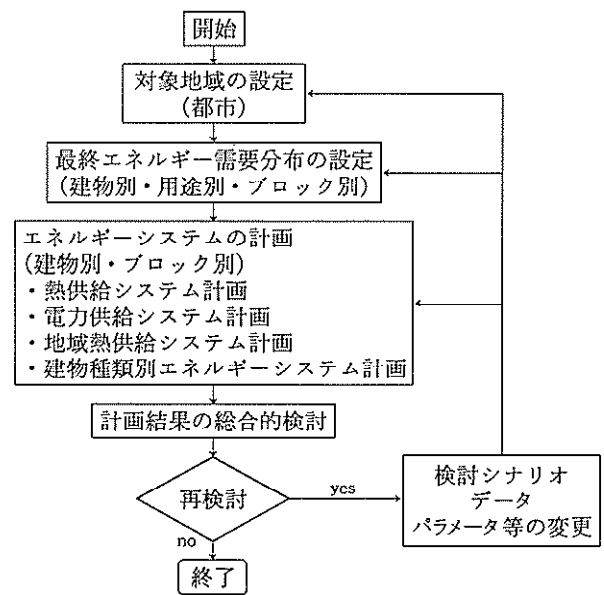


図2 最適化モデルによる検討手順

図2に、ある対象地域について、開発した最適化モデルを中心とした総合的な検討を行う際の作業の流れを示す。

4. 支援システムとその基本構成

与えられた対象地域について、上述した最適化モデルを使用すれば、図2の手順に従い望ましいエネルギーシステムの構成に関する総合的な検討を行うことができるが、準備すべきデータや計算結果データの量が膨大で、その実行は一般には容易ではない。もし、自治体やデベロッパー、エネルギー供給事業者、あるいは需要家自身が比較的簡単にこれらの検討作業を実行できれば、各地域ごとに最適な都市エネルギーシステムの望ましい姿が描き易くなり、総合エネルギーサービスも実現可能となって石油資源消費の削減や、CO₂排出削減に寄与できるものと考えられる。そこで、筆者らはこの総合検討作業を支援するコンピュータ支援システム(ソフトウェア)の開発を行っている。以下では、開発を進めている支援システムについて述べる。

本システムの構成は図3に示す通りで、インターネットを介して利用するシステムである。図3に示されているように、言語としては基本的にJAVAを用いている。JAVAには強力なセキュリティ機構や豊富なネットワーク関連の機能が標準で搭載されているため、ネットワーク上で使用するのが容易である。またJAVAのソースコードは、JAVAバイトコー

ドと呼ばれる中間形式にいったん変換されるため、JAVA仮想システムが実装されていればどんなプラットフォームでも動作可能であるという利点がある。そのためユーザはWebブラウザがあれば本システムを利用することができ、ソフトウェアのバージョンアップを必要とせず、最新のシステムを利用することができる。さらにユーザの使用するマシンが変わってもサーバ上にある共通のデータを常に使用できるという利点もある。

またWebブラウザからの要求に応じてプログラムを起動するため、CGI(Common Gateway Interface)を使用することとし、CGIで使用する言語はPerlとした。データベースにアクセスするためのインターフェースにはPerlのpgsql_perl5モジュールを使用している。後述するように、データの可視化を図るため対象地域の3次元景観表示を行う機能を持たせているが、これには、Web上で3次元グラフィックスを表現するための言語であるVRML(Virtual Reality Modeling Language)を使用している。

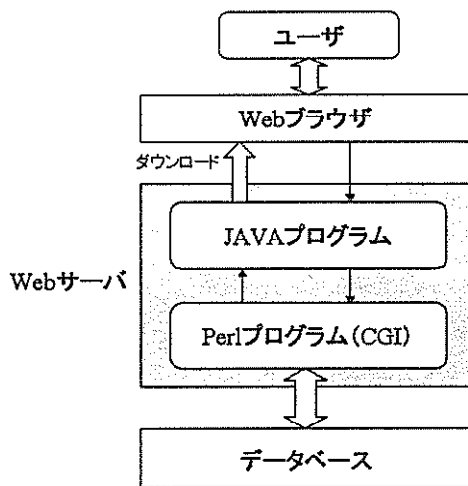


図3 支援システムの基本構成

5. 支援システムの具体的機能

支援システムは基本的に、1)アセスメント管理部、2)都市設定部、3)エネルギーシステム設定部、4)計画モデルインターフェイス部、5)可視化表示部および6)都市エネルギー関連データベースから成る。1)はユーザが支援システムにログインして最初に起動する部分で、ユーザ認証、ユーザの設定情報・モデル解析の進行状況の管理・表示を行う。さらにこの

管理部は、都市エネルギー計画に関する各種の解析作業を実行する際必要となる各種モジュールの呼び出しを行う役割も果たしている。6)は、支援システムの中核となるデータベースで、総合的な検討作業に必要な情報、計算結果を格納している。

以下では2)-5)で実現された本支援システムの具体的な機能について述べる。

5.1 検討対象地域の設定

検討対象地域の設定は、都市施設やエネルギー需要の分布に関する情報を入力することによって行う。入力すべきデータは膨大で、支援システムにはこの設定を支援する機能が不可欠である。本システムでは、基本的に画面に表示された地図上でこれらの情報を設定する。数値地図データ(国土地理院「数値地図2500(空間データ基盤)」)が利用できる地域では、これをあらかじめサーバ上に格納しておき、対象地域を指定することにより対象地域の地図データを切り出して作成する。その後画面にこの地図を表示し、道路で囲まれたブロックごとに、建物種別別床面積のデータを指示に従い入力する。この際、敷地面積、建蔽率・高さ制限・容積率も入力する(これらのデータは景観表示に使用する)。建物種類の特定にはゼンリンの地図などを利用する。

5.2 エネルギー需要データの設定

エネルギー需要は、先に述べた用途別の日負荷曲線(通常1時間ごとの建物床面積あたり需要原単位)を建物種別別に設定する。この原単位は、現在の支援システムでは通常地域で共通に設定することとしているが、とくに必要であればブロックごとの設定にも対応可能である。原単位に床面積を乗ずることによりブロックごとの建物種別別用途別日負荷曲線が得られ、この結果は都市エネルギー関連データベースに格納される。

5.3 エネルギーシステムの設定

エネルギーシステムの設定とは、建物種別別に選択可能なエネルギーシステムの代替案を設定することである。本支援システムでは、ガスエンジン、ヒートポンプ、吸収式冷凍機、ボイラーといったエネルギーシステムの基本的構成要素を組み合わせて任意のエネルギーシステムを定義する作業を、画面上でマウスを使用して簡単に行える機能を有している。各基本的構成要素の効率などの技術パラメータもここで設定する。

図4に設定されたエネルギーシステムの例を示す。

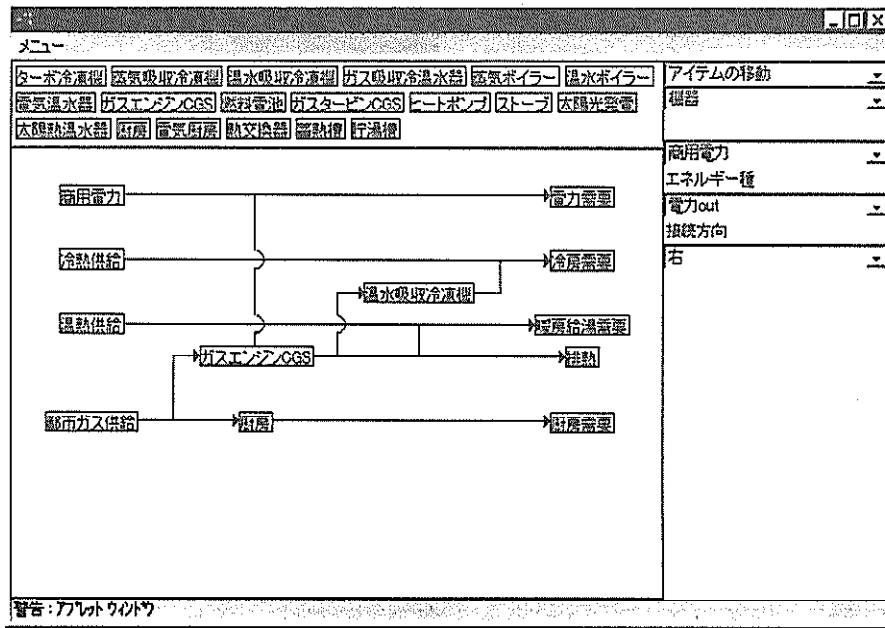


図4 設定されたエネルギーシステムの表示例

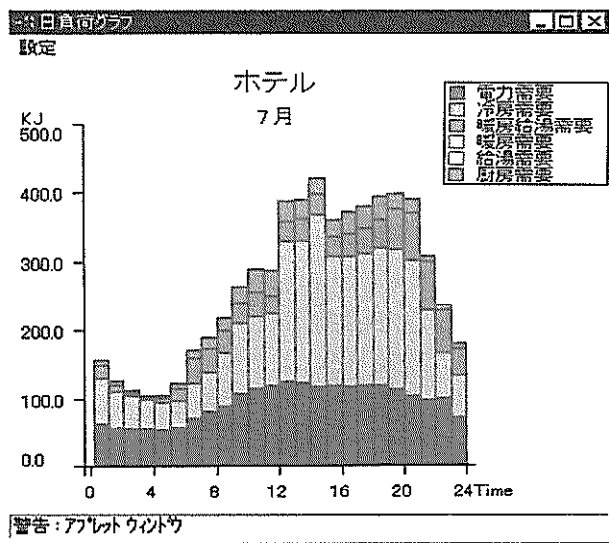


図5 最終エネルギー需要日負荷曲線の表示例

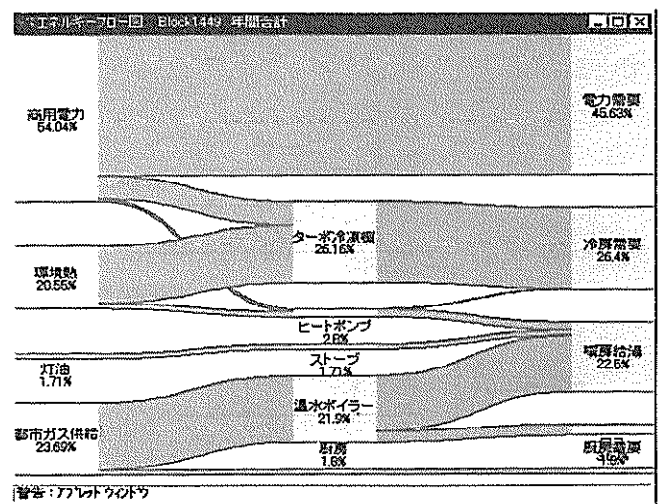


図6 エネルギーフロー図の表示例

エネルギーシステムが設定されると、用途別最終エネルギー需要データから、シミュレーションにより2次エネルギー需要(電力・都市ガス・灯油)と機器を流れるエネルギー量が計算できる。この結果は、図5に示すように個々のエネルギーシステム、建物、ブロックあるいは都市全体について日負荷曲線の形で表示できる。また、この結果は図6に示すようなエネルギーフロー図の形で表示することもできる。エネルギーフロー図は年間トータルのフローだけでなく、他のモジュールから時間を指定することで時

間断面についても表示することができる。

5.4 最適化モデルに基づく分析の実行

最適化モデルを実行するためには、ブロック別建物種類別用途別日負荷曲線やエネルギーシステム代替案の他、最適化の前提条件(シナリオ)を規定する各種のパラメータが必要となる。最適化モデルを使用した分析の手順は無数に考えられるが、ここではこれまでに実施した各種分析を踏まえ、実行頻度が高いと思われる分析に関し、その手順を順次ユーザに指示する形を取っている。図7に画面からの指示の例を示した。

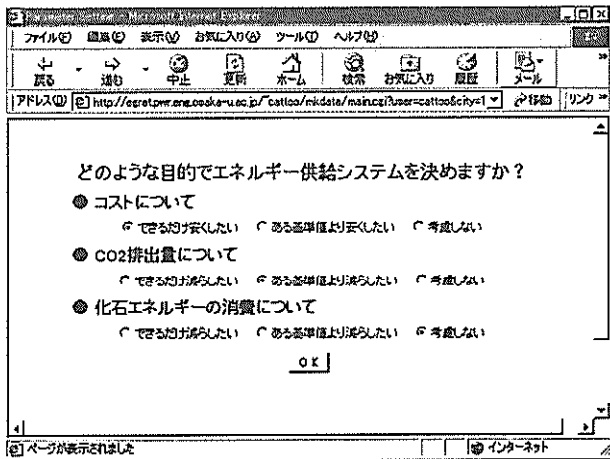


図7 最適化のパラメータ設定画面

配管の最適化も考慮した地域熱供給システムの最適化プログラムは、現在のところまだこの支援システムには組み込まれていないが、オフラインでは実行可能である。

5.4 可視化表示機能

データの入力・確認、最適化の結果の検討などの際、データを可視化して表示することが有効であることは論を待たない。本支援システムでは、できるだけ多くの表示機能を開発し実装している。とくに対象地域の3次元景観表示と、そこからの都市エネルギー関連データベースへのアクセスは、このようなエネルギー計画策定には極めて有効である。本システムの景観表示では、ブロックごとの敷地面積、建蔽率と床面積から建物の大きさ(1階床面積と階数)を自動的に決定し、建物種類別のプロトタイプを変形して表示している。図8及び図9にそれぞれ地図表示の例と景観表示の例を示した。後者では最適化された地域熱供給の範囲も合わせて表示している。図10は地図上でDHC熱供給範囲と熱供給のための最適配管ルートを示した例である。地図表示においては入力されたデータに応じて配管の太さ、流れの方向も表示できるようになっている。3次元景観表示においては、円柱を配置することで地下埋設の配管を表示する。今後、配電線の表示も行う予定である。

図11は、最適化結果の表示例で、2つの指標(この場合は、コスト対CO₂排出量)間のトレードオフ関係を表している。この図では、原点がいわゆる従来型のエネルギーシステムを採用した場合(基準ケー

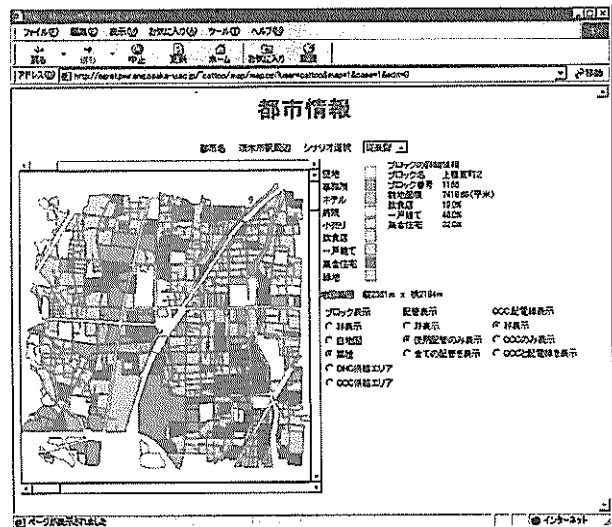


図8 地図表示の例

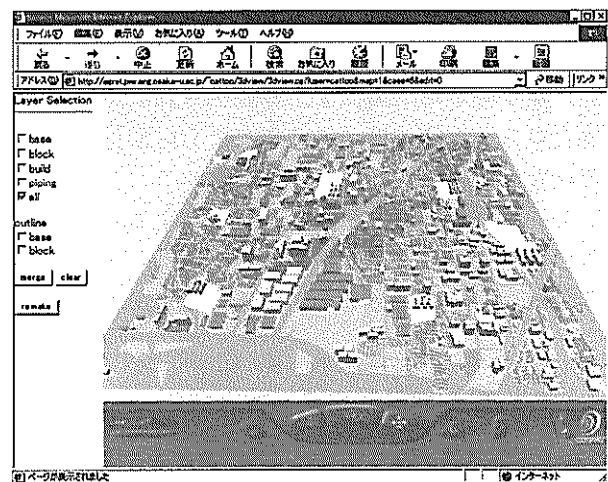


図9 都市景観表示の例

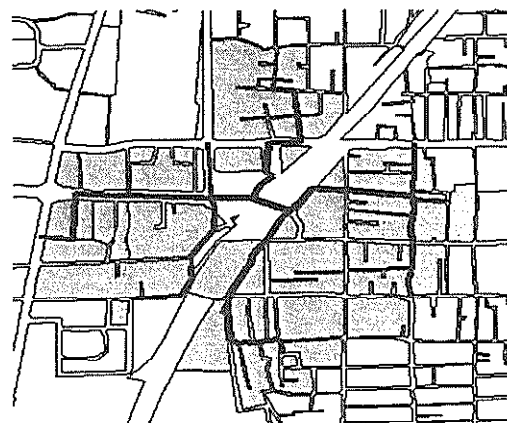


図10 熱供給の範囲と配管ルートの表示

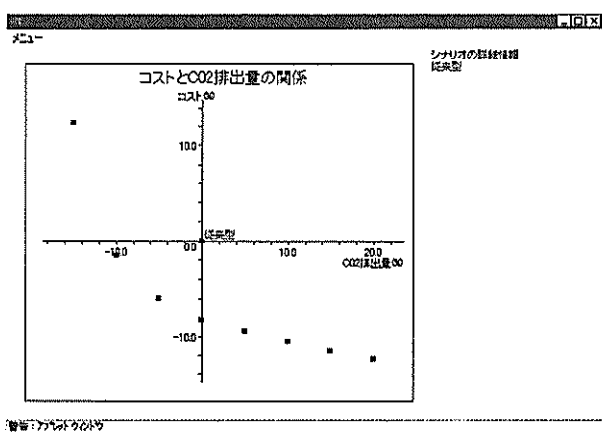


図11 2指標間のトレードオフ曲線の表示例

ス)に対応しており、プロットされた点是最適化の結果得られたパレート最適解(一方の目的関数の改善が他方の改善となるような解)で、それぞれの解が従来型より評価指標値に関してどの程度改善されているかが分かる。画面左下に表示された点は、この場合コストとCO₂排出量の双方とも従来型より削減可能なエネルギーシステムが存在することを示している。プロットされた点をクリックすると、そのときのシナリオにおける地図が表示され、そこから対象地域に関する情報を全て知ることができる。

6. おわりに

本稿では、都市域の比較的小さな地域(2km×

2km程度)を対象とし、望ましいエネルギーシステムを探索するために構築した多目的最適化モデルと、それを中心とした総合的検討を支援するために開発したコンピュータ支援システムについて、それらの概略を述べた。検討の中心となるモデルは、検討の目的あるいは切り口によって今後さまざまに構築されるであろう。それらに対応した機能を順次追加して行くことにより、支援システムの機能を充実充実にさせ、自治体等におけるエネルギービジョン策定などの総合的検討に実用されるようになることを願っている。

参考文献

- 1) 辻：未来開拓学術研究推進事業「環境負荷低減を目的とした新しい自律分散型都市エネルギーシステム」、特集プロジェクト研究，生産と技術 第51巻第1号，pp.113-117，1999
- 2) 杉原，河本，辻：「地域特定型総合エネルギーサービスにおける都市エネルギーシステムの多目的最適化モデル」，電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料，PE-01-69，PSE-01-63，pp.37-42，2001
- 3) 来田，横山，伊東，辻，杉原：「地域熱供給配管ネットワークの最適計画」第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，pp.283-288，2001

