

Research on Optimal Microgrid System Configuration for Mitigating Carbon Dioxide

二酸化炭素削減のためのマイクログリッドの最適構成に関する研究

指導教員

影本浩 教授

阿久津好明 助教授

Yuki Usui

薄井由紀

No.56736, Global Environmental Engineering Laboratory
Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences
The University of Tokyo

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 地球環境工学研究室 56736

February 2007

2007年2月

Table of contents

1.	はじめに	3
1.1.	研究の背景	3
1.2.	研究目的	6
1.3.	研究の構成	7
2.	マイクログリッドの概要	8
2.1.	マイクログリッドの定義	8
2.2.	マイクログリッドの分類	8
2.3.	マイクログリッドの構成要素.....	8
2.4.	各国のマイクログリッド事情および研究対象	8
2.5.	既存の研究	10
3.	需要施設組み合わせモデル	11
3.1.	設備利用率最大需要モデル.....	12
3.2.	電力分散最小化モデル	19
3.3.	熱電需要相似モデル	25
4.	分散型電源選択モデル	30
4.1.	はじめに	30
4.2.	分散型電源選択モデル	31
4.3.	モデルの改良点	32
4.4.	インプットデータ	34
5.	用途地域の比較と考察	36
5.1.	用途地域の説明	36
5.2.	各地域に建築可能な需要構造と需要統合モデルの比較.....	38
5.3.	制約条件強化での分散最小化需要統合分析	52
5.4.	用途地域の考察	67
6.	まとめ	68
7.	参考文献	69

1. はじめに

1.1. 研究の背景

1.1.1. 地球温暖化と二酸化炭素削減目標

産業革命以降、大気中温室効果ガス濃度の上昇により、地球温暖化がおきていると報告されているⁱ。温室効果ガスとは、地表から放出される熱(赤外線)を吸収して地表へと再放射する、赤外線吸収能を持つガスの総称であり、二酸化炭素、メタンと亜酸化窒素ガスなどがあげられるⁱ。二酸化炭素、メタンと亜酸化窒素の大気中濃度はそれぞれ0.4%、0.8%、0.3% yr⁻¹の割合で増加しており、現在のそれぞれの温暖化寄与率は二酸化炭素が60%、メタンが20%、亜酸化窒素が6%であるⁱ。地球の平均気温は20世紀にはいり約0.6℃上昇しており、それに伴い海面上昇や降水量の変化などの影響が現れているⁱ。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第3次評価報告書によると、地球平均気温は2100年までに1.4~5.8℃上昇し、生態系の崩壊、干ばつの激化、食糧生産への影響、洪水・高潮の頻発、熱帯病の増加など広範の分野において大きな被害が予測されているⁱ。そのような損害を防ぐため、大気中の温室効果ガス濃度を安定化させること必要である。この安定化レベルに関して、中央環境審議会では、IPCCの報告書などに基づき気温上昇幅を産業革命以前の水準から2℃以下に抑えることと提言している。その実現のためには、2100年以降の温室効果ガス濃度を二酸化炭素換算で475ppmに(現在約370ppm)、世界全体の排出量を1990年に比べ2020年で約10%、2050年に約50%、2100年に約75%削減することが必要との試算が国立環境研究所が中心となって開発した「アジア太平洋地域における温暖化対策分析モデル(AIMモデル)」ⁱⁱの予測から報告されている。

このような状況の中で、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的として、1992年の地球環境サミットで気候変動枠組条約(気候変動に関する国際連合枠組条約, United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)が署名のため開放され1994年に発効している。この気候変動枠組条約の目的を達成するためCOP3(第3回締約国会議)で京都議定書が採択され、先進国等に対し、温室効果ガスを1990年比で、2008年~2012年に一定数値(日本6%、EU8%)を削減することを義務づけている。また、削減を達成するための京都メカニズム等が導入されている。日本は平成14年6月4日締結している。ロシアの締結により発効要件が満たされ、2005年2月16日に発効した。ところが日本の2005年度の排出量(速報値)ⁱⁱⁱは、1990年と比べて逆に8.1%増えており、義務達成には今後14.1%減らさなければならない厳しい状況である。

1.1.2. 日本のエネルギー需要構造

日本における温室効果ガス排出量の約9割は、日常生活や経済活動と密接不可分のエネルギー消費に伴い不可避免的に発生する二酸化炭素である。これらエネルギー起源の二酸化炭素は日本の地球温暖化対策の重点対象である。しかし、エネルギー消費は増大を続けており、特に近年は民生部門のエネルギー需要が大幅に増加している。民生部門は、家庭部門と業務部門の2部門から構成され、2004年度の最終エネルギー消費全体の31%を占める。家庭部門は、自家用自動車等の運輸関係を除く家庭消費部門でのエネルギー消費を対象とし、民生部門の42%を占める。業務部門は、企業の管理部門等の事務所・ビル、ホテルや百貨店、サービス業等の第三次産業等におけるエネルギー消費を対象としており、民生部門の58%を占める^{iv}。

1.1.2.1. 家庭部門のエネルギー消費の動向

家庭用エネルギー消費は、生活の利便性・快適性を追求する国民のライフスタイルの変化、世帯数の増加及び高齢者比率上昇等の社会構造変化の影響を受け、個人消費の伸びとともに、総じて堅調な伸びで推移している。第一次石油ショック当時に比べて、現在の家庭では2倍以上のエネルギーを消費している。用途別に見ると、家庭用エネルギー消費は、冷房用、暖房用、給湯用、厨房用、動力・照明他の5用途に分類することができる。1965年度におけるシェアは、給湯(34%)、暖房(31%)、動力・照明(19%)、厨房(16%)、冷房(0.4%)の順だったが、家電機器の普及・大型化・多様化や生活様式の変化等に伴い、動力・照明用のシェアが増加した。またエアコンの普及等により冷房用が増加し、相対的に暖房用・厨房用・給湯用が減少した。この結果、2004年度には動力・照明(37%)、給湯(28%)、暖房(25%)、厨房(7%)、冷房(2%)の順となっている。家庭におけるエネルギー源は、電気をもっとも多く、そのシェアは2004年度で約46%に達している。なお、家庭において最も電気を消費しているのはルームクーラーや冷暖房兼用エアコンといった空調機器であり、2003年度では家庭用電力消費の約1/4を占めている^{iv}。

1.1.2.2. 業務部門のエネルギー消費の動向

業務部門のエネルギー消費を見ると、かつては、ホテルや事務所・ビルがエネルギー消費の多くを占めていたが、近年では、卸・小売業が最も大きなシェアを占め、次いで事務所・ビルとなっている。業務部門のエネルギー消費を用途別に見た場合、暖房、冷房、給湯、厨房、動力・照明の5用途に分けられる。用途別の延床面積当たりエネルギー消費原単位の推移を見ると、動力・照明用のエネルギー消費は、OA化等を反映して高い伸びを示している。その結果、動力・照明用の業務部門のエネルギー消費全体に占める割合は、2004年度では約35%に達している。一方、冷房用のエネルギー消費原単位は、第一次石油ショックまでは年率10%を超える勢いで伸びていたが、それ以降は省エネルギーの進展、空調機器購入が一巡したことにより、ほぼ横ばいで推移している。また、業務用のエネルギー源は、動力・照明等の消費増加を反映して、電力やガスが増加傾向にある一方、石油は減少傾向にある^{iv}。

1.1.3. 二酸化炭素削減対策

京都議定書目標を達成するには、環境と経済を両立させながら、効率的に化石エネルギー起源の二酸化炭素の排出を抑制することが必要である。有効な手段のひとつとしてエネルギー転換部門のエネルギーロスの低減と非化石エネルギーへの転換があげられる。発電所では、多くのエネルギーが海水中や大気中に使われずに熱として発散されている。このようなエネルギー転換部門の「エネルギーロス」の低減により、必要な化石燃料量を抑えることができる。さらに、同じエネルギーを得るにも、二酸化炭素を排出しない、またはより二酸化炭素排出量が少ない燃料を利用することにより、二酸化炭素排出量を抑えることが可能となる。^{iv}

1.1.3.1. コージェネレーション

化石燃料から二次エネルギーである電気等へのエネルギーの形態の転換にあたって生じる転換ロス対策には発電所の発電機の効率向上とともにコージェネレーションの推進があげられる。発電する時に捨てられている熱を有効に使えば更にエネルギーの有効利用が可能となる。現在、家庭や業務部門等の消費者の多くは電気を電力会社から、温水の給湯に必要なガスや電気はガス会社や電力会社から購入している。発電所で電力

を発生させる段階では熱が発生しており、この熱が排熱として捨てられロスとなる一方で、温水の給湯等にガスや電力を別途購入していることになる。これに対して、発電と発電に伴う熱を同時に利用することにより、エネルギー使用量を減らすことができる。このような発電と熱利用を同時に行うシステムをコージェネレーションという。発電のみの従来のシステムでは、エネルギー変換効率は35%程度である。コージェネレーションは、石油や天然ガス、LPガス等の燃料でガスタービンやピストンエンジン、さらには燃料電池により電力（動力）を作ると共に、排熱を給湯や冷暖房の熱源に利用して、最終的に70~80%のエネルギー変換効率を得られるともいわれている。^{iv}

ただし、発生する熱を効率的に使用できなければ、高いエネルギー変換効率は実現できないため、熱需要に合った適正な規模のシステムの導入を図るなど、エネルギー効率の高いコージェネレーションシステムが必要とされている。

1.1.3.2. 自然エネルギー

エネルギーを得る際に二酸化炭素を排出しない、または二酸化炭素の排出量がより少ない太陽光発電、風力発電等の自然エネルギーを利用することも大きな対策となる。

太陽光電池はシリコン半導体で構成され、光が当たるとプラスとマイナスの電荷が発生し電気を発生する現象を利用する。現在の主流は結晶シリコン系であるが、低コスト化、高効率化を目指した非結晶系、化合物系の開発が進められている。太陽光発電は無電化地域の電源として独立系から始まったが、現在の住宅用や公共・産業用のシステムはほとんどが系統連結方式である。系統に連結することにより、日射量に応じた発電出力を最大限生かすことが可能となり、逆流ありの形態では余剰電力の売電をも可能にする。電力会社の余剰電力買取制度や住宅用太陽光発電の補助などにより、国内の太陽光発電の導入容量は原油換算にして21万klと世界の中でも群を抜いている。しかし、今後特定の地域に局所集中的に太陽光電池が連系された場合、電圧変動等、系統への影響が顕在化し、普及拡大に制約をうける可能性が指摘されている^v。

風力発電の出力は風速の約3乗に比例するため風況の良い場所を選ぶ必要があり、年平均6m以上が望ましいとされている。日本の風力は近年著しい伸びを見せているが、総電力消費量に占める割合は0.1%程度と欧州と比べるとまだまだ小さい。2010年に風力発電を300万kW導入することを目的として掲げているが、その課題として系統連結容量の問題があげられる。風力発電は出力が安定しないために、規模が拡大すれば、系統の電圧、周波数が安定に維持されなくなるという問題が指摘されている。連系点近傍で発生する電圧変動の問題は、分散型電源の連系問題として対策が講じられるが、周波数問題は系統で変動しうる調整容量の問題であり、電力会社のネットワーク全体の問題としてとらえられる。つまり、調整能力を超える風力発電の系統への連系により、周波数を目標値内におさめられなくなる危険性がある。これは風力発電導入の阻害要因となっており、実際東北電力、北海道電力で発表されている風力発電の導入量の上限は47万kW、25万kWである^{vi}。

1.1.3.3. マイクログリッド

天然ガスコージェネレーションや太陽光発電等は、1997年に施行された「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」において、「新エネルギー利用等」として規定されていて、石油代替エネルギーを製造、発生、利用すること等のうち、経済性の面での制約から普及が進展しておらず、かつ石油代替エネルギーの促進に

特に寄与するものとして、我が国が積極的に導入送信を図るべき政策的支援対象と位置づけられている。政府は京都議定書目標達成計画において、義務達成のためにさらなる新エネルギーの導入促進をあげている。新エネルギー導入の観点から、風力・バイオマス・太陽光発電、コジェネレーションシステム、燃料電池等の複数の分散型電源をIT制御装置等と組み合わせてネットワーク化し、エネルギーの効率的利用を図る小規模なシステムであるマイクログリッドを、既存ネットワークとの連系に係る技術的な課題等を踏まえつつ導入することをめざしている。これにより、地域全体で新エネルギー等の導入を促進し、省二酸化炭素型のエネルギーシステムの実現を図る。このため、先導的なモデル事業の実施、技術開発・実証等が進められている^{vii}。

1.1.4. 地域新エネルギービジョン策定等事業の概要

エネルギー消費が増大する民生部門の省エネルギーを図っていくためには、従来から進められてきた単体の機器や建物の省エネルギー対策だけではなく、地域・コミュニティレベルの省エネルギー対策を推進する必要がある。地域新エネルギービジョン策定等事業は、地域レベルでの新エネルギー導入を推進するにあたって、取組みを円滑化するため、地方公共団体等が当該地域における新エネルギー導入を図るための「ビジョン」策定等に要する費用の定額を補助するものである。この報告書の多くには、将来的にはマイクログリッドを導入するための調査やビジョンが盛り込まれている^{viii,ix}。しかし、技術情報や都市計画を踏まえた最適な導入方法や汎用的な設計・評価技術については、さらなる進展が期待されている。

1.2. 研究目的

本研究では、小規模で散在していることの多い新エネルギーを大量導入するため地域内で複数の分散型電源や需要施設を適切に組みあわせて制御するマイクログリッドコンセプトに注目した。電力と熱の配給システムであるマイクログリッドは、効率的なコジェネレーションが行えるとともに、その内部で電熱バランスを維持し電力系統から独立した運転もできると考えられている。そして一つの安定した集合体としてマイクログリッドが複数電力系統と連結することで、電力系統側の負担の軽減やピーク電力への対応が期待されている。

実証実験段階にあるマイクログリッドコンセプトをより現実的なものにするにあたり、システム制御ロジック構築、制御装置や遮断装置の開発とともに、経済的なシステム設計に関する研究も必要とされている。既往の研究ではシステム総コスト・需要家コスト・二酸化炭素排出量などを最小化する機器選択・運転計画モデルの開発や、炭素税の影響評価などがある。これら多くの研究はインプットとして需要を固定し、マイクログリッドの構成機器とその運転計画を最適化するものであり、マイクログリッドを構成する需要に言及しているものは少ない。しかし、複数の建物を適当に組み合わせることで電熱比や設備利用率が高いエネルギー需要を創出することは、システムの経済性や二酸化炭素排出量削減に大きく貢献できると考えられる。

また、既存の建物を組み合わせるよりも、市街地再開発事業を契機に、マイクログリッドに適した建物配置を行うと伴に、インフラの一体的な整備を図るほうが容易であると考えられる。実際、同じく熱と電力システムである地域冷暖房システムやコジェネレーションシステムにおいては都市計画と連携してシステム設計が行われている場合が多い。

そこで本研究では、天然ガスコジェネレーション主体のマイクログリッドを再開発地域に構築する際、温暖化対策に有利な需要施設構成を明らかにすることを目的とする。

1.3. 研究の構成

研究方法を Fig. 1 に示す。まず、需要統合モデルを作成し、電熱比や設備利用率が高い建物の組み合わせを導く。この際都市計画法における用途地域条件を制約条件とする。次に総エネルギーコスト最小化及び二酸化炭素最小化する分散型電源選択モデルを DERCAM^{*}を元に構築する。需要統合モデルの結果を分散型電源選択モデルのインプットとし、コスト最小化及び二酸化炭素排出量最小化の観点から最適な建物構成を分析する。

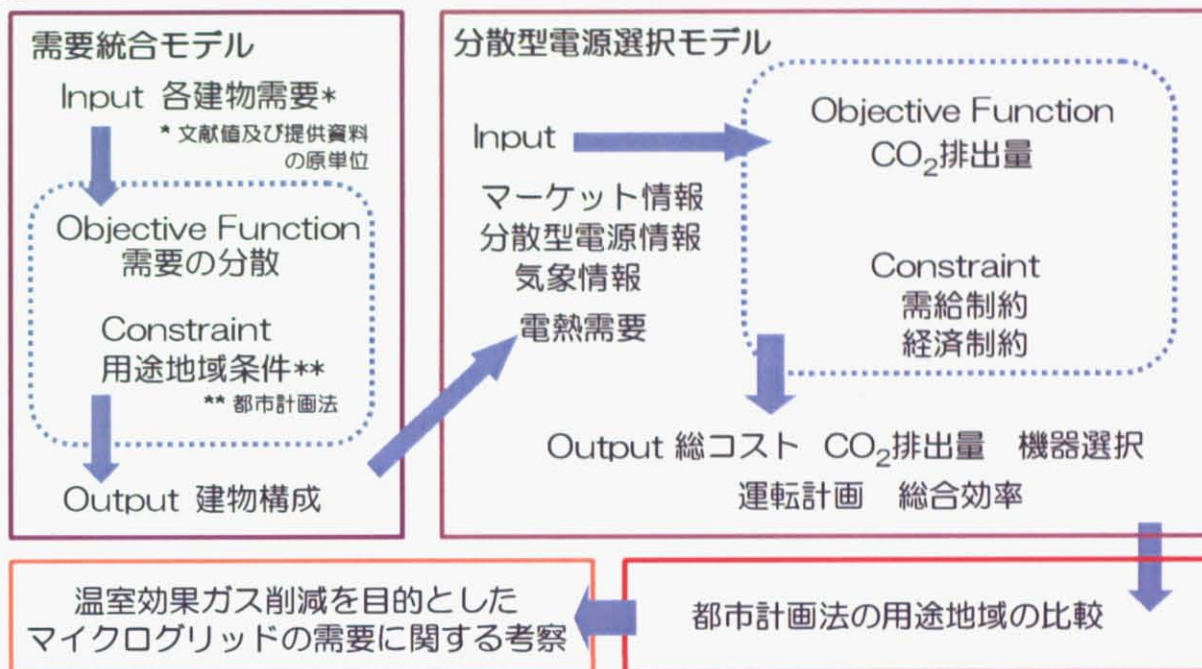


Fig. 1 研究方法

2. マイクログリッドの概要

2.1. マイクログリッドの定義

マイクログリッドとは、「複数の小さな分散型電源と電力貯蔵装置、電力負荷がネットワークを形成するひとつの集合体」のことを指す。DOE 参加の Lawrence Berkeley 国立研究所が中心に CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) において提案した^{xi}。新エネルギーをはじめとする分散型電源を、電力貯蔵装置などとともに連結し、IT 技術で制御することにより、需要値に即したリアルタイムエネルギー制御が可能となる。電力の品質・信頼性の面からも、マイクログリッドに対して様々な効果が期待されている。都市では品質の向上、自然エネルギーの活用拡大、総合効率の向上などが挙げられる。非電化地域では電力供給の安定、信頼度の向上などが求められている^{xii}。

2.2. マイクログリッドの分類

大まかなマイクログリッドの分類としては、地域エネルギー型、工業団地型、コンビナート再生型があげられる。工業団地型では再生エネルギーとともに化石燃料が中心であり、コンビナート再生型は化石と副生燃料が中心となる。地域エネルギー利用型では再生可能エネルギーを中心とし、数百 kW から数万 kW 程度の規模と考えられている^{xiii}。本研究ではこの地域エネルギー利用型のマイクログリッドを取り扱う。

2.3. マイクログリッドの構成要素

マイクログリッドは基本的には、電熱源、電熱貯蔵装置、電熱ネットワーク、IT 活用制御システム、電熱負荷から構成されると考えられている。商用との大きな違いは、熱エネルギーの活用が可能であること、電熱貯蔵装置が存在することである。商用システムでは、その目的が電気エネルギーの供給であるため、熱エネルギーの活用は発電所近辺に限られ、需要地において活用されることがない。これに対して、マイクログリッドは電熱供給によるコスト削減が目的のひとつと考えられており、熱の有効利用が図れる。地域型エネルギーシステムの電源としては再生可能エネルギーやコジェネレーションシステムがあげられる。電熱貯蔵施設としては、鉛蓄電池、NAS 型蓄電池やレドックスフロー電池などが考えられる。ネットワークとしては電力会社の託送とともに自営線を建設する手もある。熱輸送としてはパイプラインによる蒸気輸送や温水配管などがある。制御装置としては、需給制御装置のほかには事故時の保護装置や遮断機などがあげられる^{xiv}。

2.4. 各国のマイクログリッド事情および研究対象

2.4.1. アメリカ

マイクログリッドコンセプトはもともとアメリカで、電力システムの信頼性が相対的に低い背景のもと電力系統を補強することを目的に提唱された。そのため、アメリカではマイクログリッド自身の機能として、高信頼性・高品質電力供給及び配電線の電圧維持を特徴としている。またそれだけでなく、マイクログリッド外部（電力系統等）に対する機能として、Good Citizen 機能（システムに悪影響を及ぼさない）、Modern Citizen 機能（マイクログリッド外部へのアンシラリーサービスの提供）、ヴァーチャル・ユーティリティ（需要家サイドでの利用だけでなく、一種の仮想電気事業者として、電力の販売を行う）、マイクログリッド相互のネットワーク、及び系統との一体的運用を指向している。これは、マイクログリッドを単に需要家向けのエネルギー

ギーシステムとして使用するだけでなく、もっと積極的に活用して、電力系統全体にプラスの貢献をさせようという意欲から来ると考えられる。高信頼性・高品質電力供給の分野において商業化も行われており、テロ対策としても注目を浴びており今後も発展が予想されている。^{xv}

2.4.2. EU

欧州では、再生可能エネルギーの影響抑制機能に重点が置かれたマイクログリッドの研究開発が進んでいる。欧州における積極的な環境保護意識、環境政策を背景とする再生可能エネルギーの普及促進意欲によるものと考えられる。現時点では、マイクログリッドはまだ研究ベースであり、ビジネスとしては成り立っていない。費用対効果が低いことが問題としてあげられ、実用化にあたってはまずは発展途上国や離島など電力系統未整備地域をターゲットに商業展開をしている状況である^{xvi}。しかし環境政策という強力な後押しもあり、EUとして組織的に研究開発を進めており、最終的には大規模系統の一部をマイクログリッド化する方向に向かうと考えられる。

2.4.3. 日本

日本では、ユーティリティ総合サービス（エネルギーだけでなくセキュリティ、水道、ごみ処理等も含めた総合的な公益事業）機能を目指す線電源プロジェクト（青森県八戸市）^{xvii}、再生可能エネルギーの影響抑制機能とコスト・エネルギー効率・環境負荷の最適制御機能を目指す沖縄電力、高信頼性・高品質電力供給及び系統との一体的運用など幅広い機能の実現を目指す FRIENDS^{xviii}、分散型電源の大量導入に備えて系統との一体的運用及び配電線の電圧維持を目指す需要地系統^{xix}、新エネルギーのみで発電を目指す愛知万博での NEDO パビリオンなど^{xx}、機能が広範囲にまたがる複数のプロジェクトが進められている。特に日本ではヨーロッパのように大陸間での電力融通ができないため、自然エネルギーの変動を緩和剤として、系統と連結する技術のひとつとして注目されている^{xxi}。

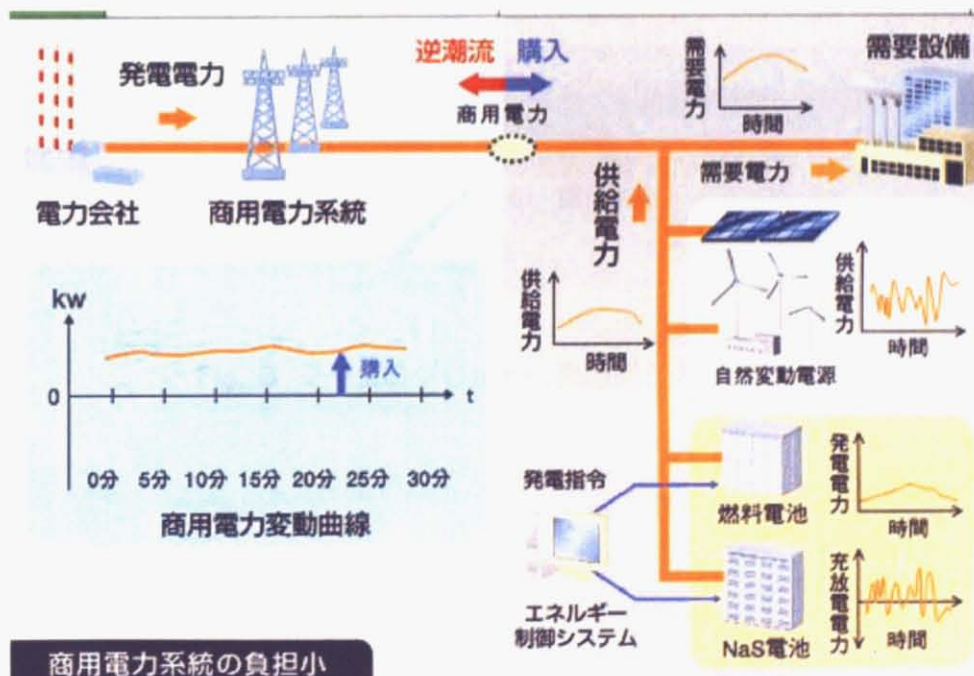


Fig. 2 愛知万博の概念図^{xxii}

2.5. 既存の研究

マイクログリッドには品質の管理から自然エネルギーの変動緩和など様々な効果が期待されているが、それぞれに多くの課題が残されており、現在多方面からの研究が進められている。特にマイクログリッドが商用系統から切り離され、独立して運転する場合の需給制御は、商用系統に比べて小さい系統内でおこなわなければならないため大変難しく、周波数や電圧の調整に関する研究が盛んである。その他、品質別マイクログリッドの経済性や最適運転に関する研究が CERTS をはじめ数多く行われている^{xviii}。しかし、どのような需要構造がマイクログリッド化することによってその多くの効果を高めることができるかに関してはあまり研究はなされていない。

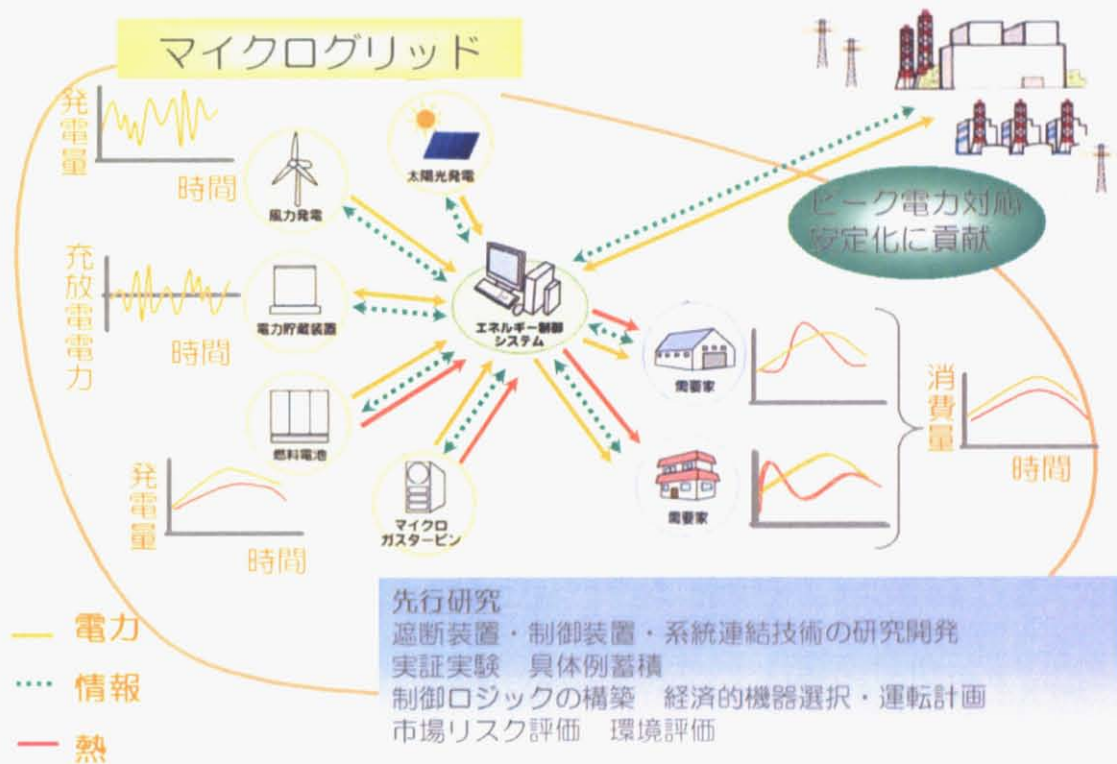


Fig. 3 マイクログリッドの概念図と先行研究

3. 需要施設組み合わせモデル

一般的にコジェネレーションに適した需要の特徴としては、年間を通じて安定した電力負荷・熱負荷をもっている、電力負荷と熱負荷の時刻別発生パターンが類似している、需要の熱電比(発生電力あたり回収し利用できる熱量)が発電機の熱電比に近い、などがあげられる^{xxiv}。さらに独立型マイクログリッドの場合、そのシステム内で需給調整を行うため、ピーク電力を抑えることで設備投資を軽減できると考えられる。これらをふまえて①設備利用最大需要構成、②電力分散最小需要構成、③熱電需要相似需要構成の三種類の需要統合モデルを構築した。数値計算ソフト GAMS(General Algebraic Modeling System)^{xxv}を使用し、それぞれの目的関数を線形計画法(CPLEXLP ソルバー)^{xxvi}により最小化することで目的の建物構成を求めた。各種建物ごとの電力、冷熱、暖房、給湯のインプットとして提供資料^{xxvii}及び文献値の原単位^{xxviii}から計算した 1 時間ごとの値を用いた。制約条件には都市計画法で定められた用途地域の建物制限と一般的な建物構造割合を用いた^{xxix}。なお、本章では制約条件なしのそれぞれのモデルでの試算を紹介する。

3.1. 設備利用率最大需要モデル

3.1.1. モデルの説明

設備利用率が高い需要の組み合わせを創出するため、電力需要の最大値との差が小さくなるよう目的関数を設定した。Fig. 4 にその概念を Fig. 5 及び Fig. 6 にその計算式の概略を示す。

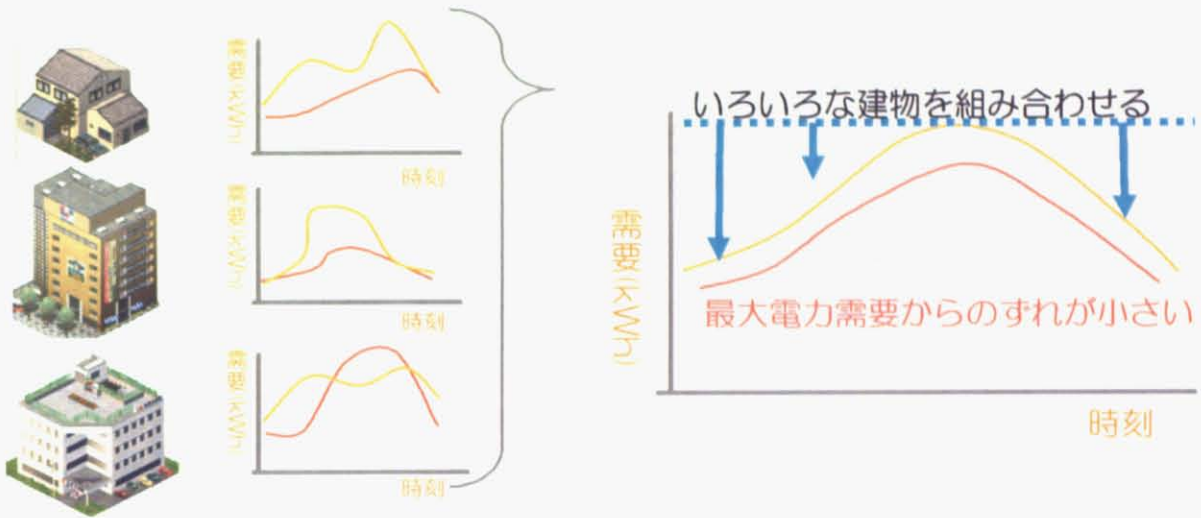
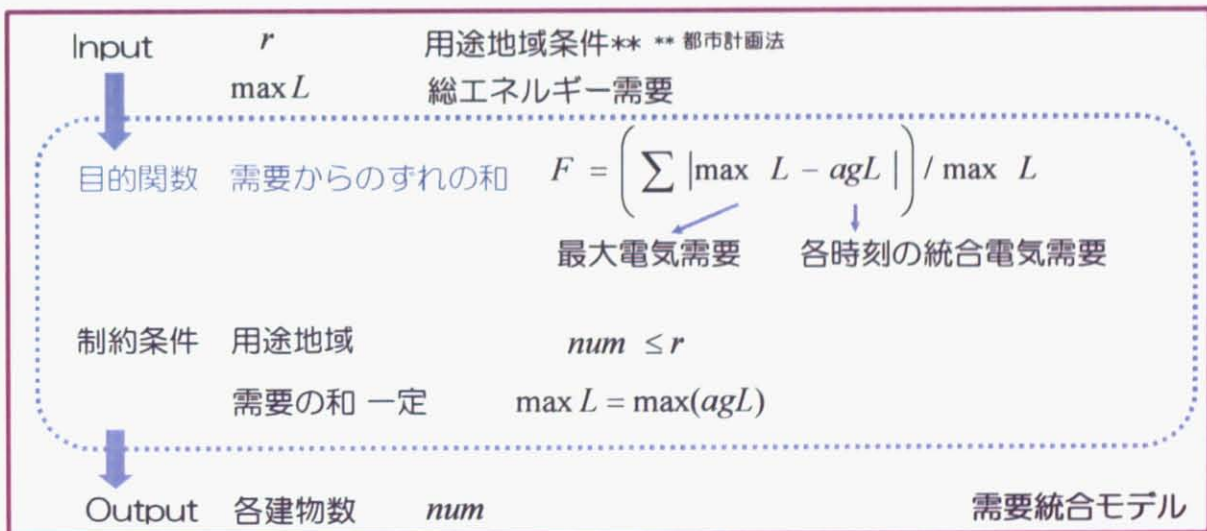


Fig. 4 設備利用率最大化モデル概念



最大電力需要からのずれが小さく
なるような建物構成を計算

Fig. 5 設備利用率最大化モデル概要

input	建物別電気需要/時間	$load_{bemh}$	建物種	b
	用途地域別建物制限	$restriction_{ab}$	需要種電力	e
	合計統合電気需要	$loadsum_{ae}$	用途地域種	a
variable	建物面積	num_b	時間	h
	統合電気需要/時間	$agload_{aemh} = \sum_b (load_{bemh} \cdot num_{ab})$	月	m
	平均統合電気需要	$aveload_{ae} = \sum_{mh} (agload_{aemh} / 288)$		
constraint	用途地域制約	$num_{ab} \leq restriction_{ab}$		
	合計統合電気需要	$max\ eload_a = \max(agload_{aemh})$		
objective	目的関数	$F_{ae} = (\max\ eload_a - agload_{aemh}) / \max\ eload_a$		

Fig. 6 設備利用率最大化モデル計算式

3.1.2. モデルの試算(1-24時間)

制約なし、1-24時間の間で目的関数が最小になるよう分析し、実際にとがったピークがなくなっているかを確認した。Fig. 7に建物構成の面積比を示す。アパート 60%近くを占め、その他医療業務 27%、寺・教会等が 7%と続いた。1月から12月各月の24時間分を足した需要が100,000kWの場合の時刻別電力需要を月別に Fig. 8に示す。またそれぞれ1月および7月の電力、冷房、暖房、給湯の需要について Fig. 9、Fig. 10では用途別に、Fig. 11、Fig. 12では建物別に示す。一年を通しての建物別・需要別のエネルギー需要を Fig. 13に示す。Fig. 9の1月の19時あたりにみられるように、アパートと医療業の組み合わせにより、電力がたいらになっていることが確認できる。また、深夜から早朝にかけて両建物には電力需要があるため、1-24時間で分析した場合、より選択されやすくなったと考えられる。

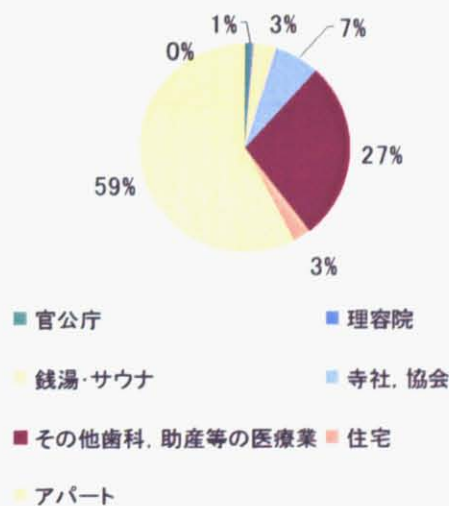


Fig. 7 建物構成の面積比

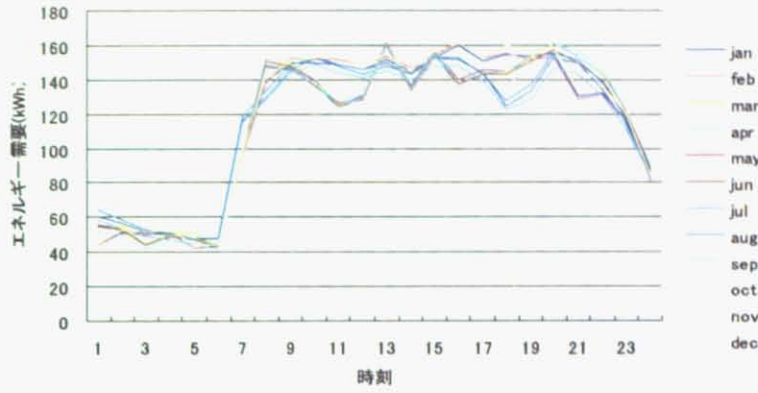


Fig. 8 時刻別電力需要

1月

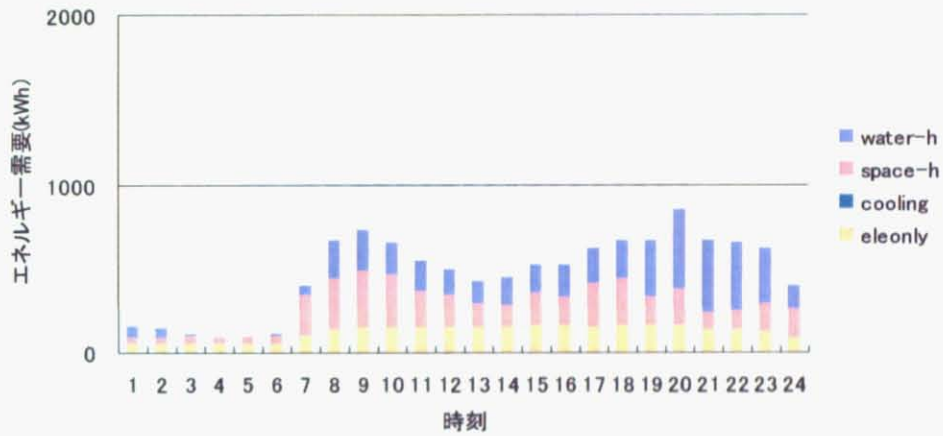


Fig. 9 エネルギー需要 (用途別 1月)

7月

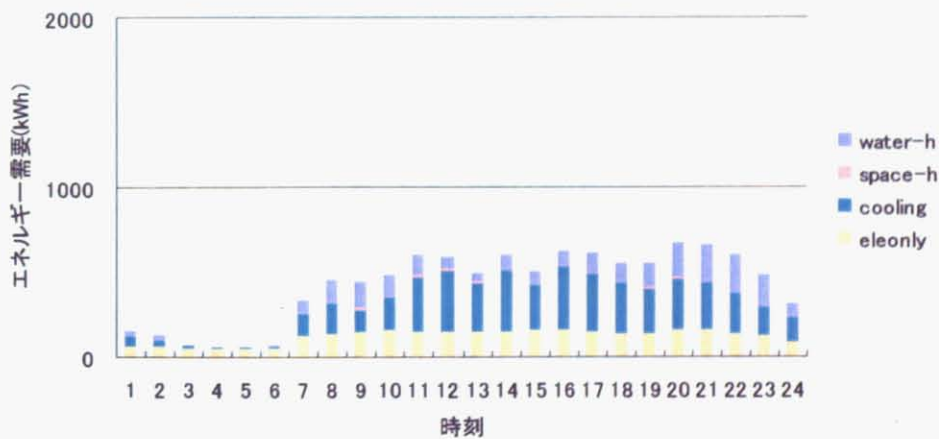


Fig. 10 エネルギー需要 (用途別 7月)

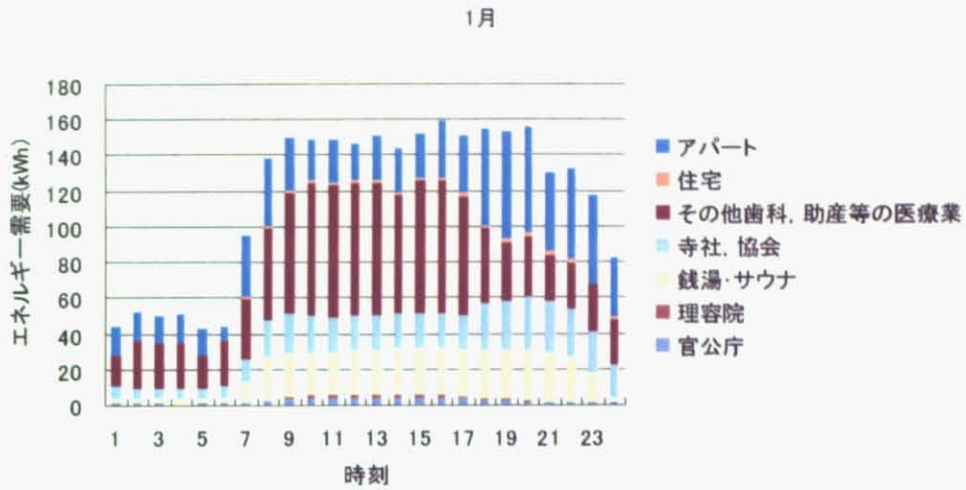


Fig. 11 エネルギー需要 (建物別 1月)



Fig. 12 エネルギー需要 (建物別 7月)

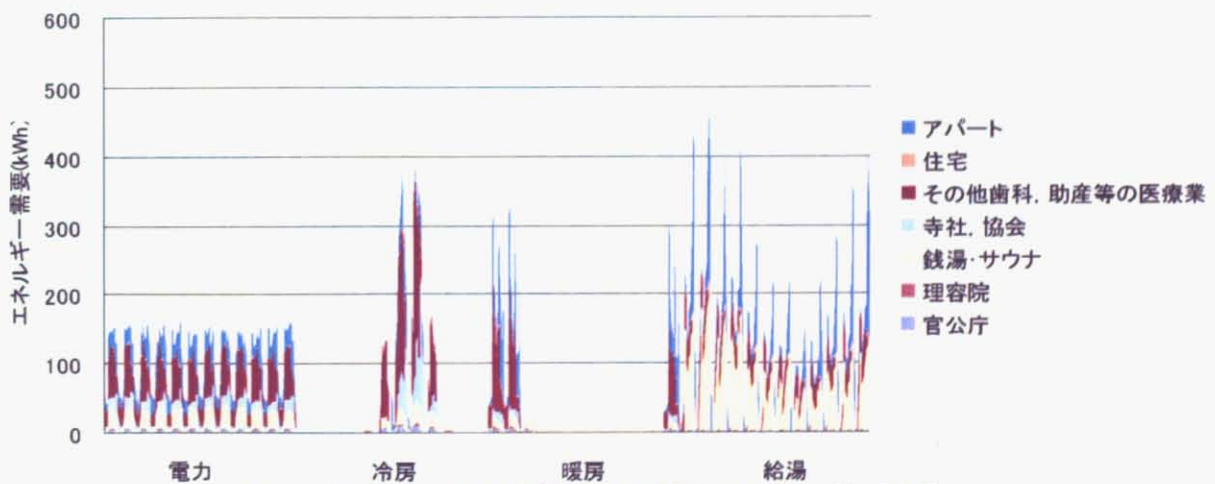


Fig. 13 一年を通しての建物別・需要別のエネルギー需要

3.1.3. モデルの試算(9-21時間)

次に、ピーク時間 9-21 時の間で目的関数が最小となるよう分析を行った。Fig. 14 に建物構成の結果を示す。アパートが 45%を占め、住宅が 26%を占めるという住宅中心の結果となった。その他大病院 10%、銭湯・サウナ 7%、寺・教会 5%、保健所 5%で構成された。1 月から 12 月各月の 24 時間分を足した需要が 100,000kW の場合の時刻別電力需要を月別に Fig. 15 に示す。またそれぞれ 1 月および 7 月の電力、冷房、暖房、給湯の需要を Fig. 16、Fig. 17 に、建物別需要を Fig. 18、Fig. 19 に示す。1-24 時間で分析した場合に比べて、昼間の電力変動が小さくなり、夜間の電力需要が減少した。年間を通してみても、電力需要のするどいピークがほとんど見られない結果となった。

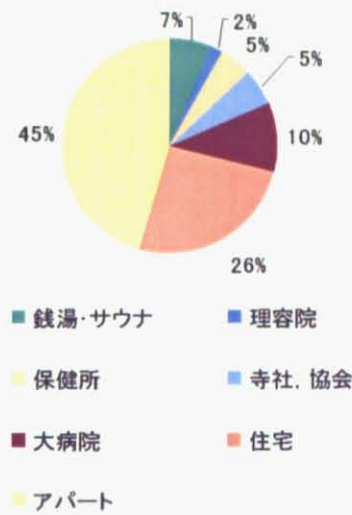


Fig. 14 建物構成の面積比

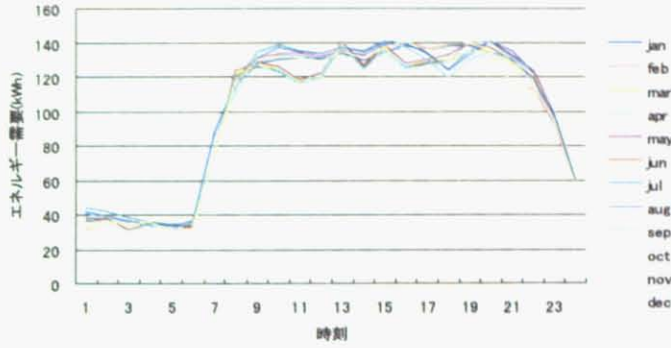


Fig. 15 時刻別電力需要

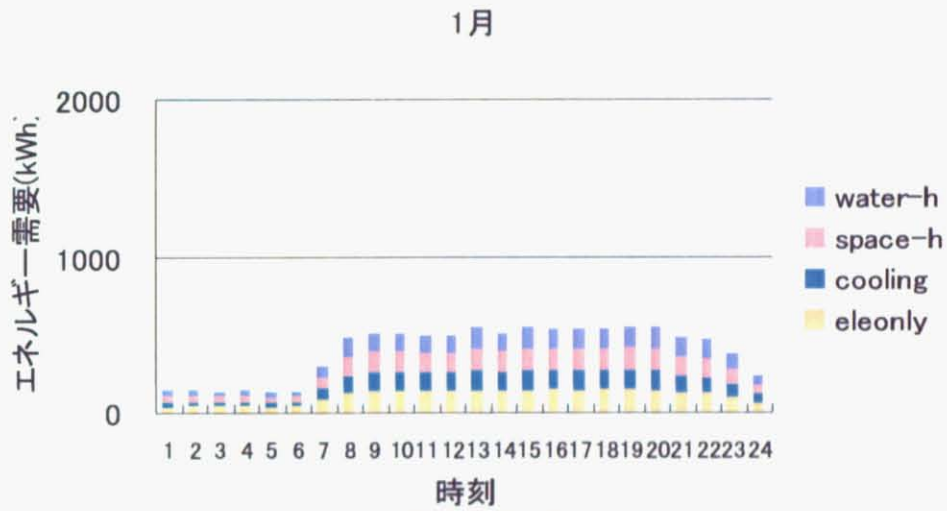


Fig. 16 エネルギー需要 (用途別 1月)

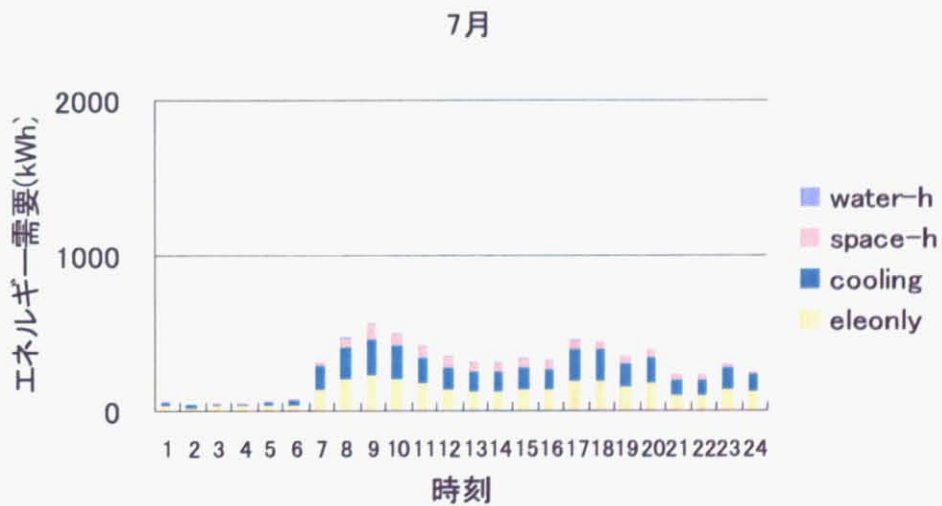


Fig. 17 エネルギー需要 (用途別 7月)

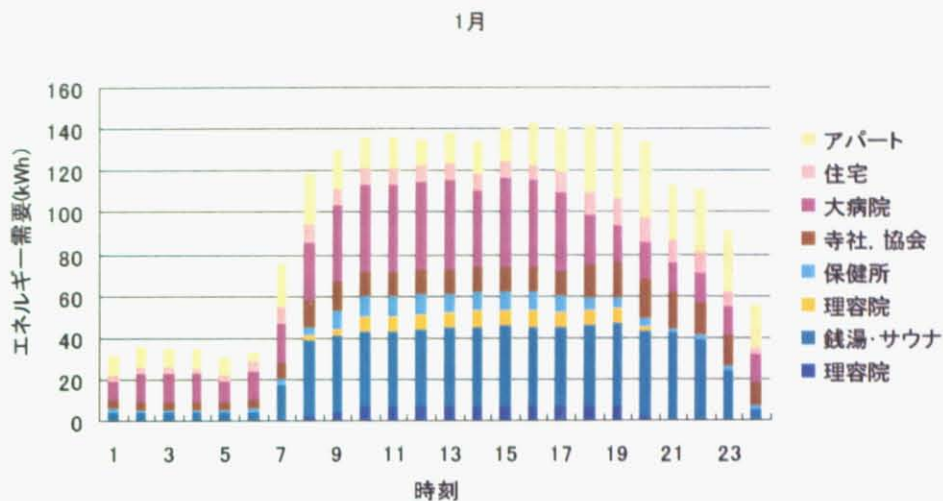


Fig. 18 エネルギー需要（建物別 1月）

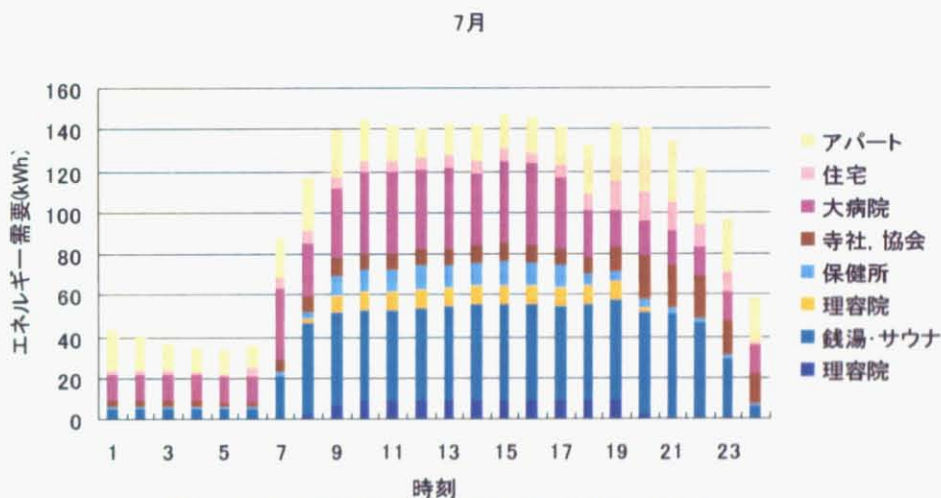


Fig. 19 エネルギー需要（建物別 7月）

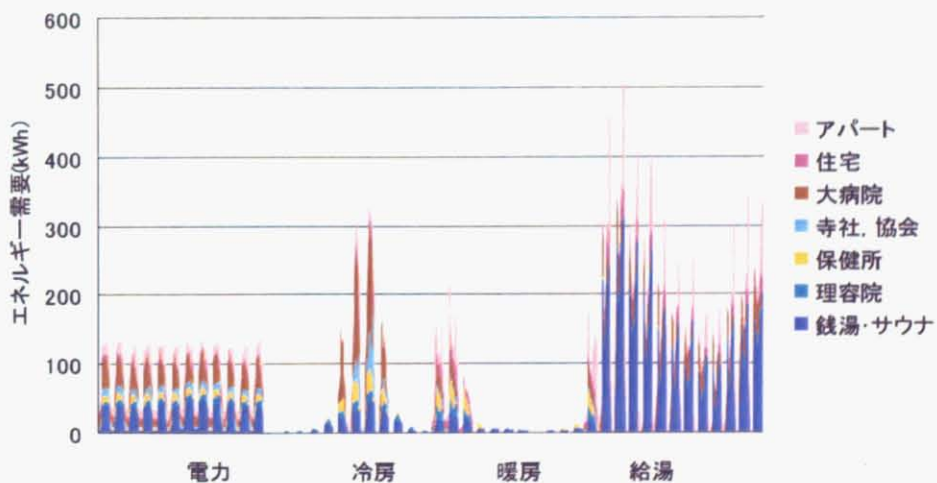


Fig. 20 一年を通しての建物別・需要別のエネルギー需要

3.2. 電力分散最小化モデル

3.2.1. モデルの説明

電力変動が小さくなるよう、電力の分散を最小化する目的関数を設定した。Fig. 21、Fig. 22 及び Fig. 23 にその概念と概略を示す。

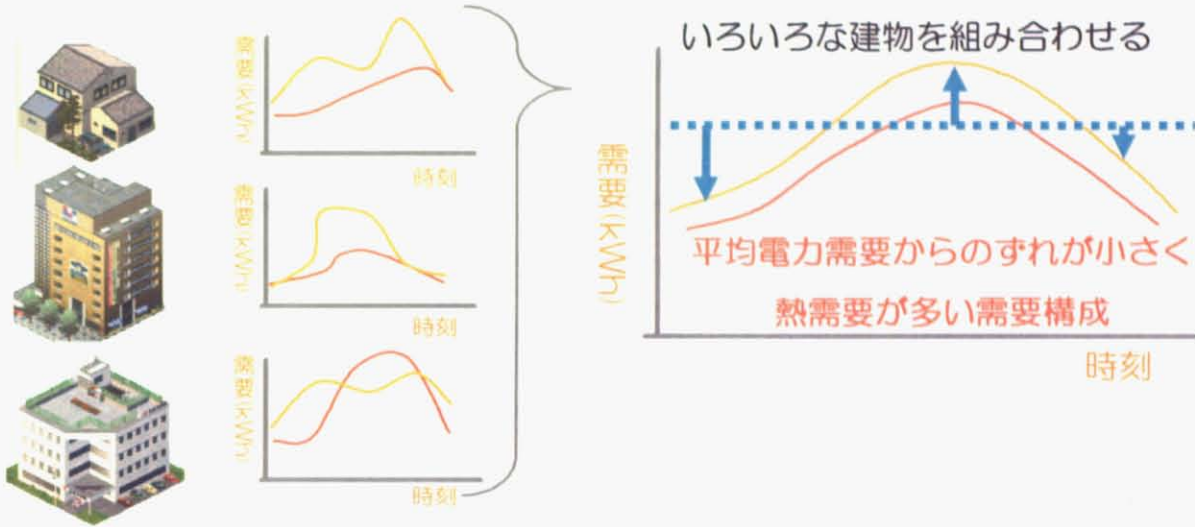
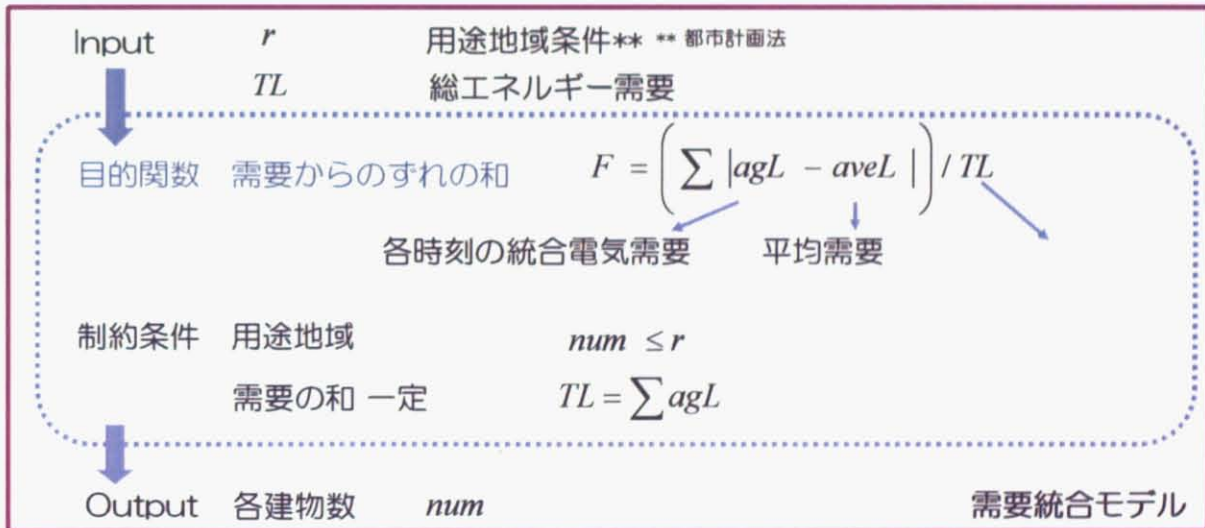


Fig. 21 分散最小化モデル概念



平均電力需要からのずれが小さく
なるような建物構成を計算

Fig. 22 分散最小化モデル概要

input	建物別電気需要/時間	$load_{bemh}$	建物種	b
	用途地域別建物制限	$restriction_{ab}$	需用種電力	e
	合計統合電気需要	$loadsum_{ae}$	用途地域種	a
			時間	h
variable	建物面積	num_b	月	m
	統合電気需要/時間	$agload_{aemh} = \sum_b (load_{bemh} \cdot num_{ab})$		
	平均統合電気需要	$aveload_{ae} = \sum_{mh} (agload_{aemh} / 288)$		
constraint	用途地域制約	$num_{ab} \leq restriction_{ab}$		
	合計統合電気需要	$loadsum_{ae} = \sum_{mh} agload_{aemh}$		
objective	目的関数	$F_{ae} = \left(\sum_{mhh} agload_{abemh} - aveload_{ae} \right) / loadsum_{ae}$		

Fig. 23 分散最小化モデル計算式

3.2.2. モデルの試算(1-24時間)

まずは制約なし、1-24時間で分析し、電力の分散が実際に小さくなっているかを確認した。Fig. 24に建物構成の結果を示す。アパート84%、老人ホーム6%、ファッションホテル10%という構成になった。総エネルギー量100,000kWの場合の時刻別電力需要を月別にFig. 25に示す。またそれぞれ1月および7月の電力、冷房、暖房、給湯の需要をFig. 26、Fig. 27には用途別、Fig. 28、Fig. 29には建物別に示す。一般的に商業施設は夜間および早朝の電力が昼間に比べ著しく低いため、1-24時間で分析した結果変動が大きくなり、除外されたと考えられる。一日中ある一定以上需要のある、24時間人間のいるアパート、老人ホーム、ファッションホテルが選択されたと考えられる。また、電力の分散を全エネルギー需要で割った値を最小化しているため、相対的に電力需要の小さいものが選択されたとも考えられる。

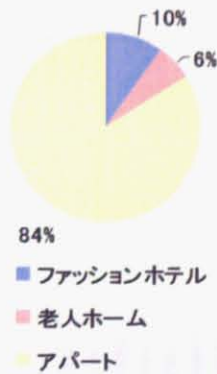


Fig. 24 建物構成の面積比

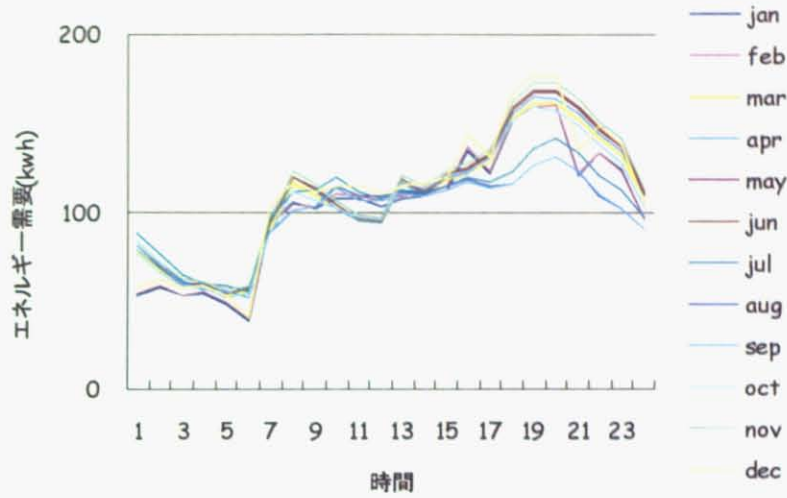


Fig. 25 時刻別電力需要

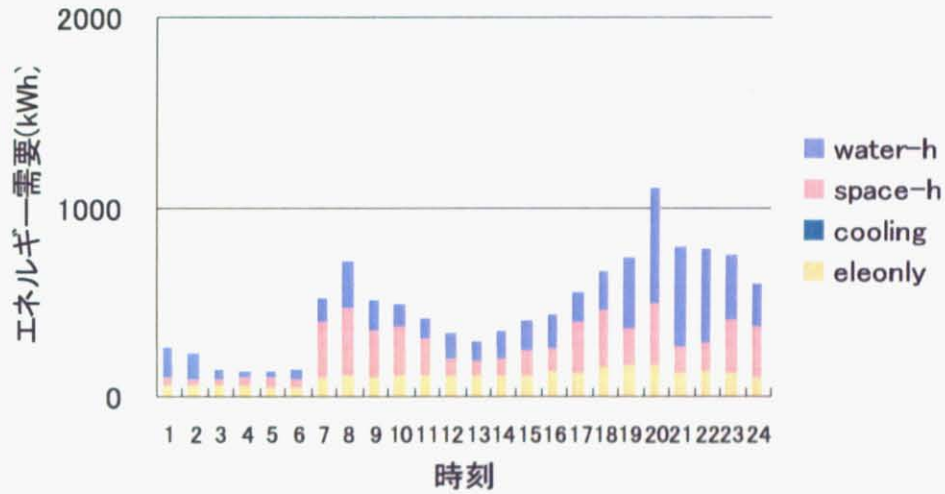


Fig. 26 エネルギー需要 (用途別 1月)

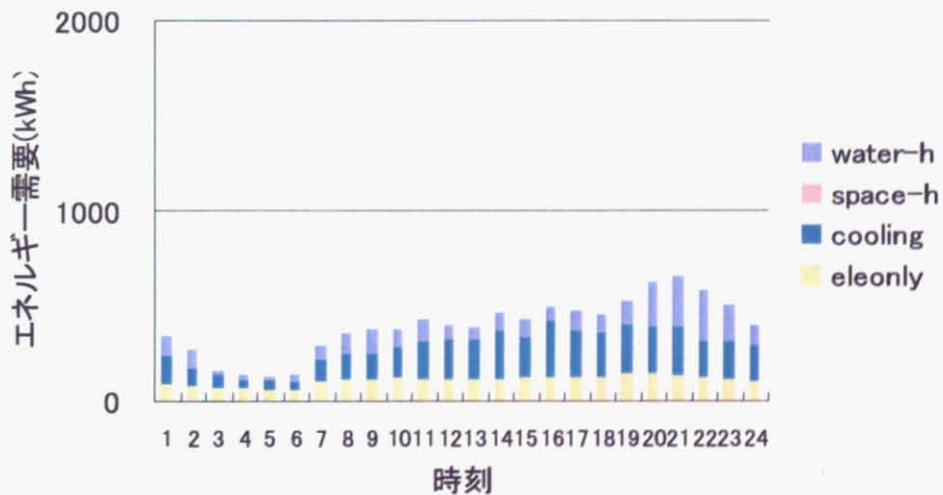


Fig. 27 エネルギー需要 (用途別 7月)

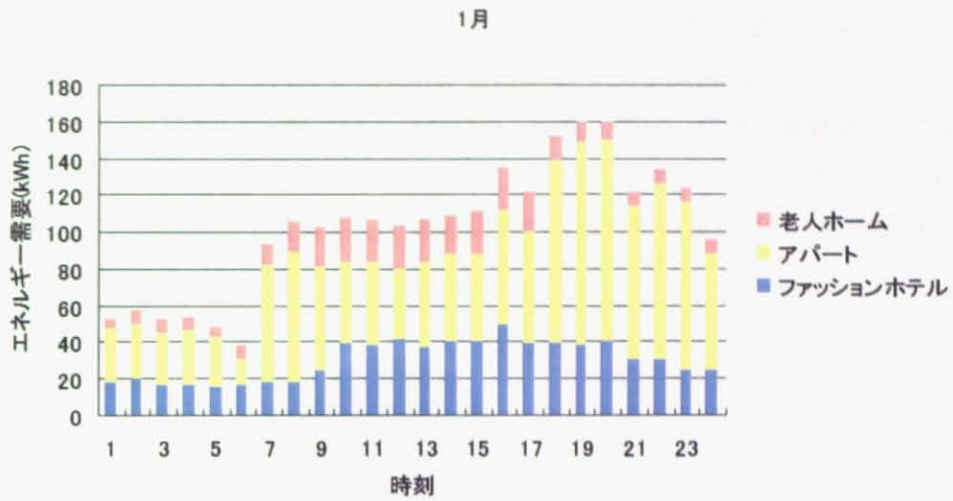


Fig. 28 エネルギー需要 (建物別 1月)

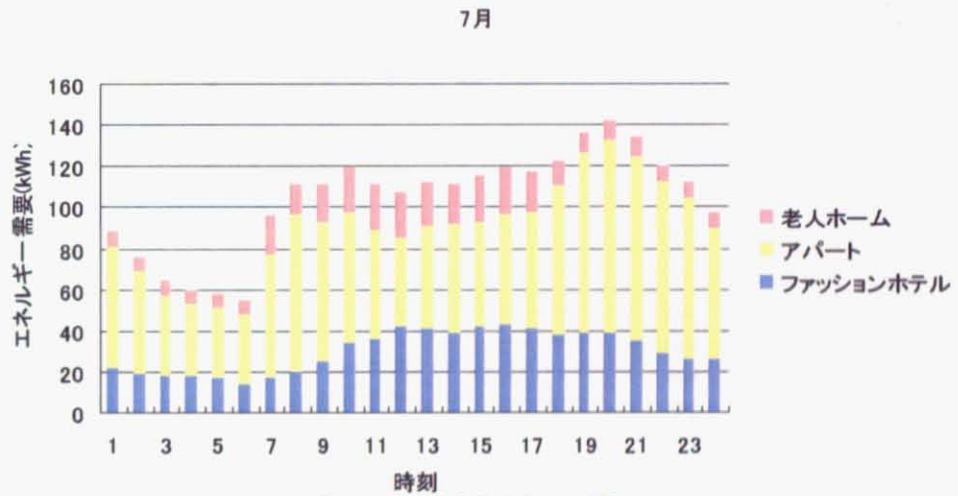


Fig. 29 エネルギー需要 (建物別 7月)

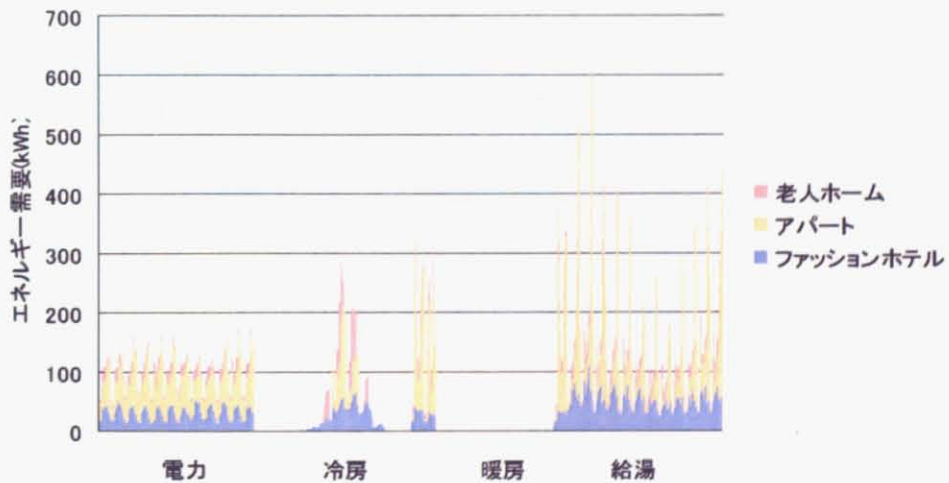


Fig. 30 一年を通しての建物別・需要別のエネルギー需要

3.2.3. モデルの試算(9-21時間)

次に、ピーク時間 9-21 時のみで分析を行った。Fig. 31 に建物構成の結果を示す。銭湯・サウナが 100% という結果になった。1 月から 12 月各月の 24 時間分を足した需要が 100,000kW の場合の時刻別電力需要を月別に Fig. 32 に示す。またそれぞれ 1 月および 7 月の電力、冷房、暖房、給湯の需要を Fig. 33、Fig. 34 に示す。9-21 時の間の電力需要が平坦であるとともに、給湯による熱需要が大きく選択されたと考えられる。Fig. 35 から明らかのように、年間を通して安定した電力需要と大きな熱需要があり、目的関数は電力変動を抑え、熱需要が大きくなる建物を選択できうと考えられる。

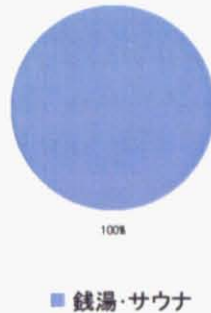


Fig. 31 建物構成の面積比

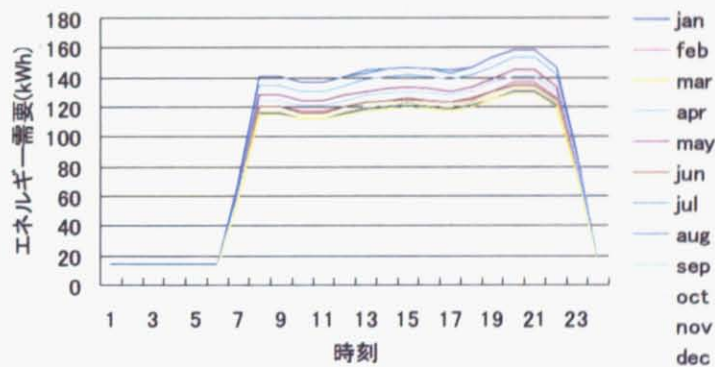


Fig. 32 時刻別電力需要

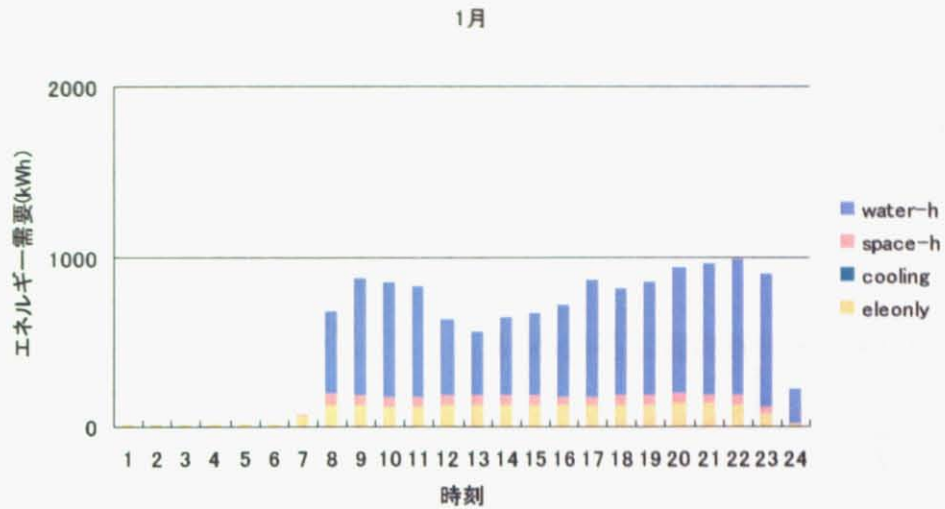


Fig. 33 エネルギー需要 (用途別 1月)

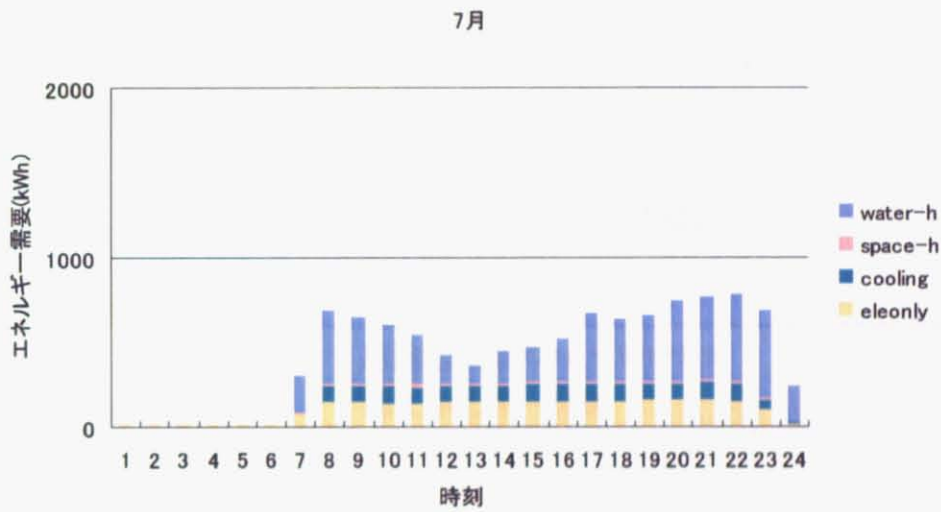


Fig. 34 エネルギー需要 (用途別 7月)

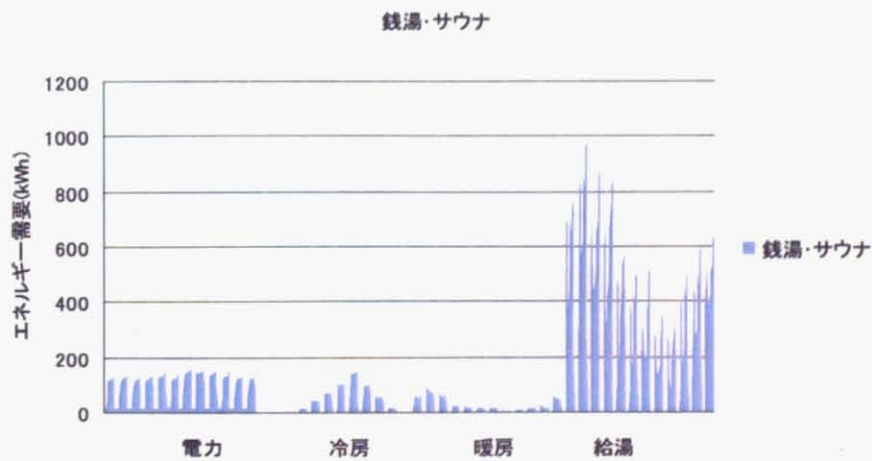


Fig. 35 一年を通しての建物別・需要別のエネルギー需要

3.3. 熱電需要相似モデル

3.3.1. モデルの説明

電力変動が小さくなるよう、電力の分散を最小化する目的関数を設定した。Fig. 36 に概念を Fig. 37 及び Fig. 38 には計算式の概略を示す。

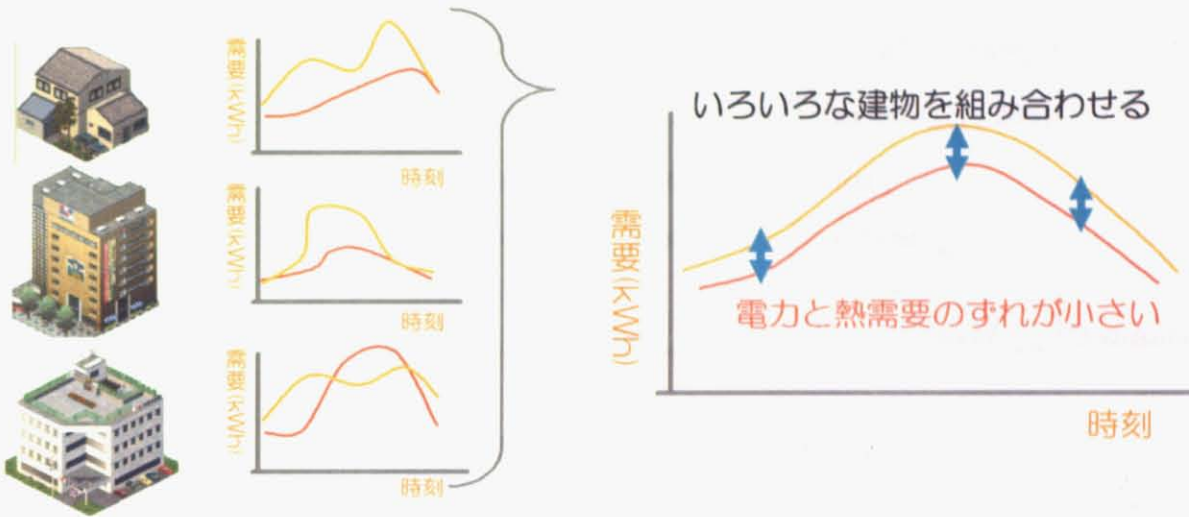
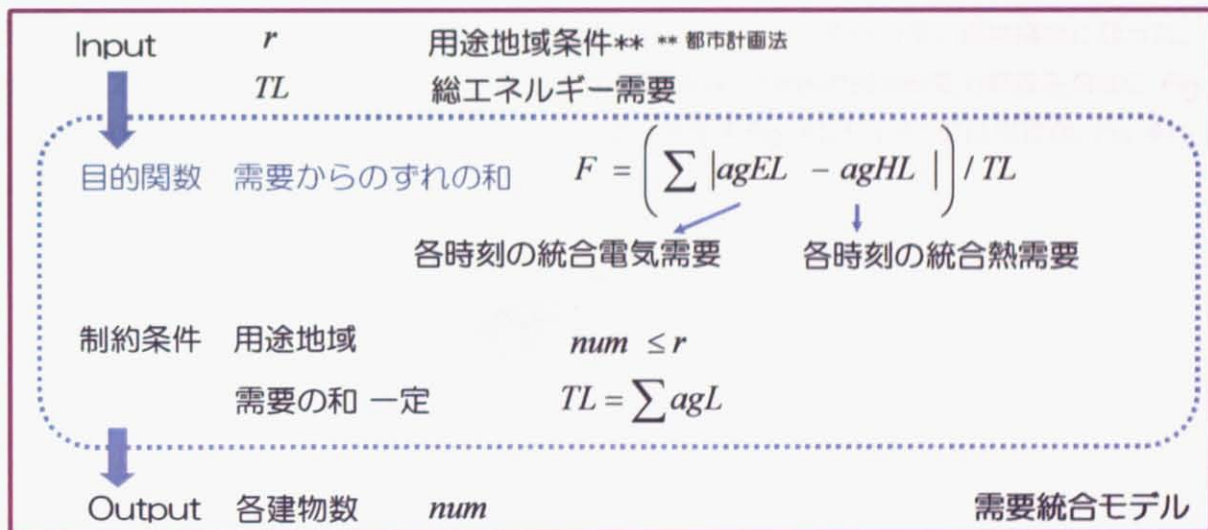


Fig. 36 熱電需要相似モデルの概念



電力と熱需要のずれが小さく
なるような建物構成を計算

Fig. 37 熱電需要相似モデルの概要

input	建物別電気需要/時間	$load_{bemh}$	建物種	b
	用途地域別建物制限	$restriction_{ab}$	需要種電力	e, c, s, w
	合計統合電気需要	$loadsum_{ae}$	用途地域種	a
variable	建物面積	num_b	時間	h
	統合電気需要/時間	$agload_{aemh} = \sum_b (load_{bemh} \cdot num_{ab})$	月	m
	平均統合電気需要	$aveload_{ae} = \sum_{mh} (agload_{aemh} / 288)$		
constraint	用途地域制約	$num_{ab} \leq restriction_{ab}$		
	合計統合需要	$loadsum_a = \sum_{emh} agload_{aemh}$		
objective	目的関数			
				$F_{ae} = (agload_{aemh} + agload_{acmh} - agload_{asmh} - agload_{awmh}) / loadsum_a$

Fig. 38 熱電需要相似モデルの計算式

3.3.2. モデルの試算(1-24 時間)

本モデルにおいても制約なし、1-24 時間で分析し、電力と熱需要が似たような需要曲線を描くか確認した。

Fig. 39 に建物構成の結果を示す。ファッションホテルがもっとも多く 36%、続いてクリーニングリネンサプライが 33%、パン小売 20%、コンビニ 9%という結果になった。上記ふたつのモデルではアパートが選択される割合が多かったが、本モデルにおいてはホテルやクリーニングなど熱需要の多い建物構成となった。また、1月から12月各月の24時間分を足した需要が 100,000kW の場合の時刻別電力需要を月別に Fig. 41 に示す。それぞれ1月および7月の電力、冷房、暖房、給湯の需要を Fig. 41、Fig. 42 には用途別、Fig. 43、Fig. 44 には需要別を示す。

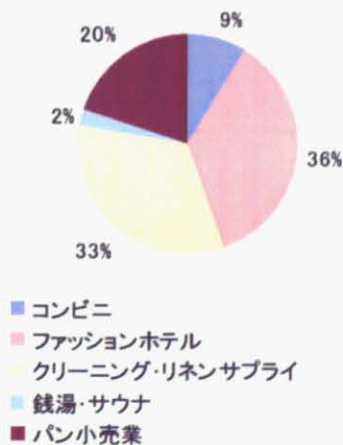


Fig. 39 建物構成の面積比

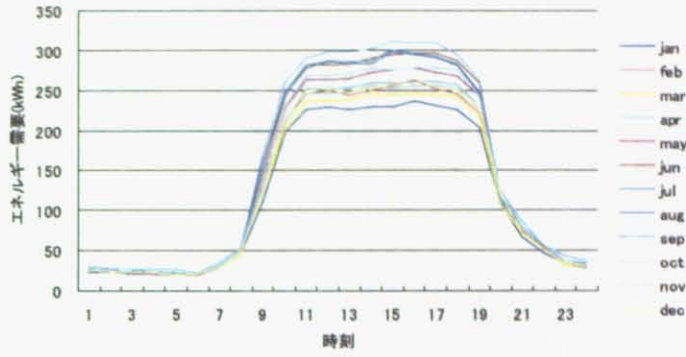


Fig. 40 時刻別電力需要

1月

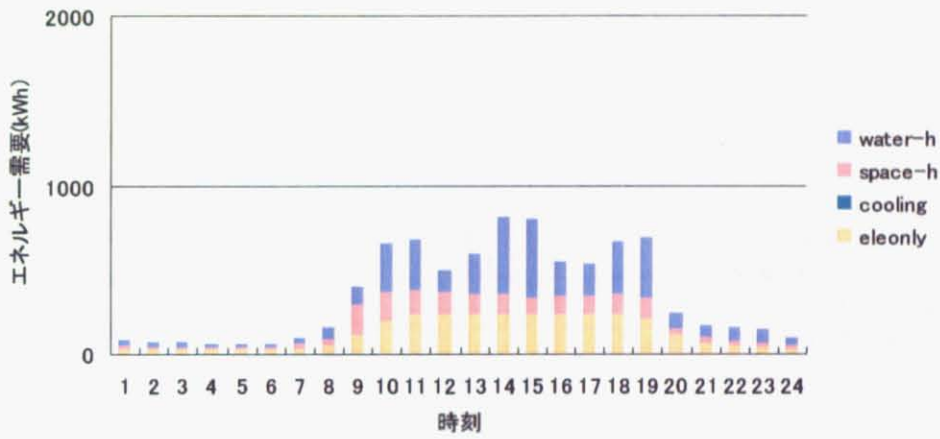


Fig. 41 エネルギー需要 (用途別 1月)

7月

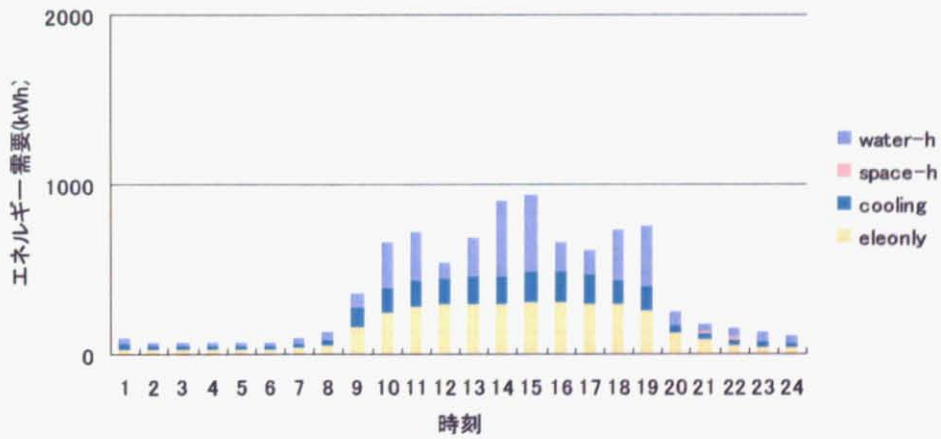


Fig. 42 エネルギー需要 (用途別 7月)

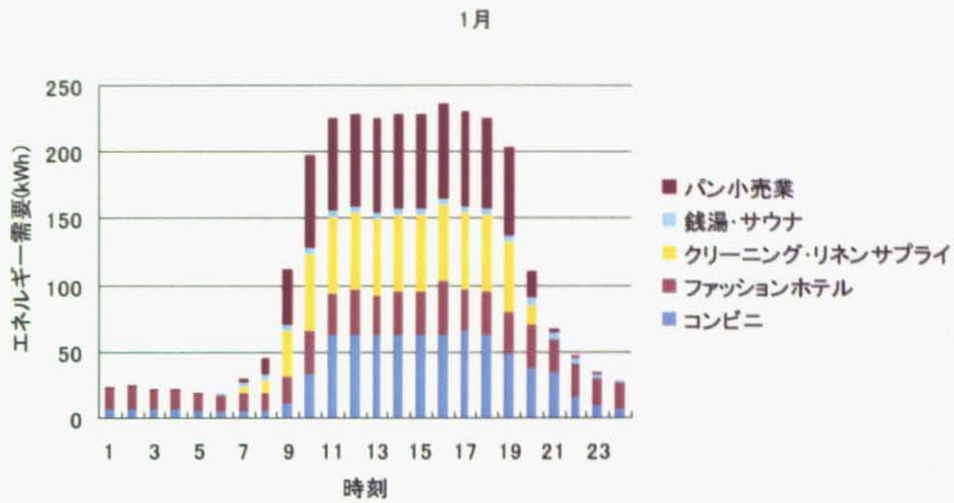


Fig. 43 エネルギー需要 (建物別 1月)

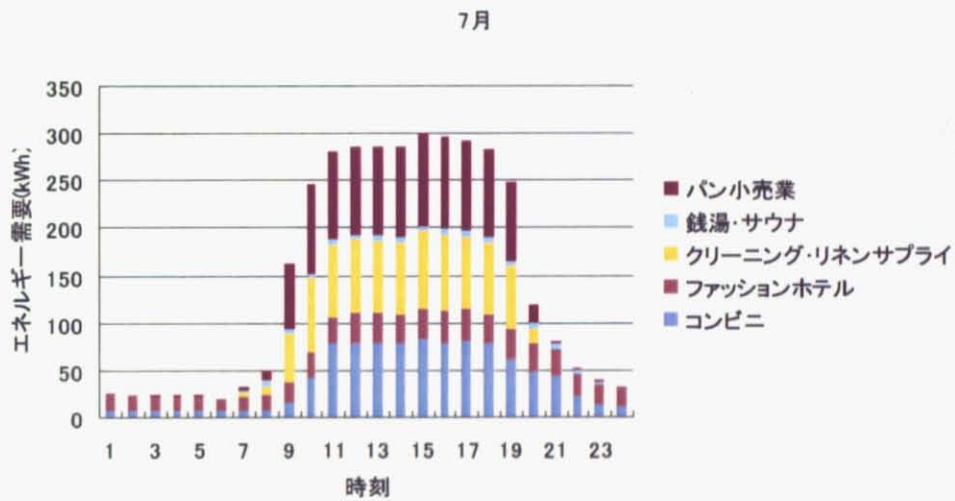


Fig. 44 エネルギー需要 (建物別 7月)

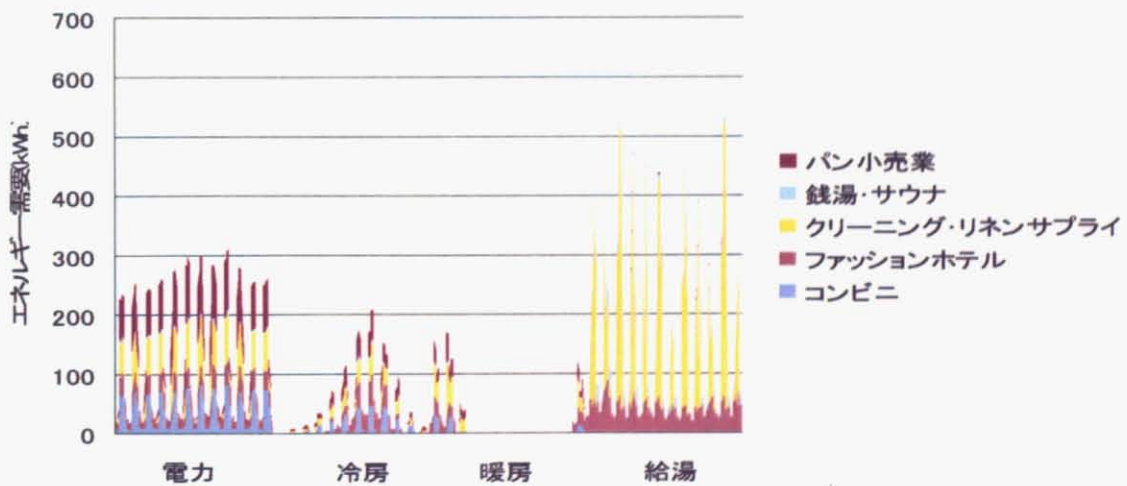


Fig. 45 一年を通しての建物別・需要別のエネルギー需要

時刻別の電力変動は小さいものの、年間の電力変動が上記の二つのモデルにくらべて大きくなった。熱電比を時刻別に計算した結果を Fig. 46 に載せる。Fig. 41 及び Fig. 42 を比べると、熱電比の変動は給湯需要の多さに大きく起因していると考えられる。本モデルでは電力と熱需要が似たような需要曲線を描く結果となったとは言いがたい。さらなる計算式の見直しが必要と問がえらる。なお今後の分析は期待した結果が得られた①設備利用率最大及び②分散最小化のふたつのモデルのみを使用する。

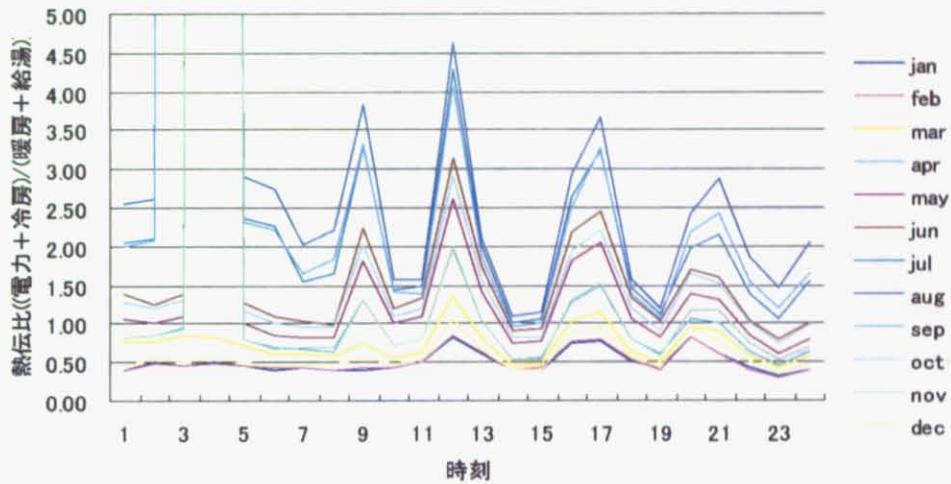


Fig. 46 熱電比の時間変動

4. 分散型電源選択モデル

4.1. はじめに

一般的にコジェネレーションシステムの導入条件を決定する方法としては、システムシミュレーションによる方法や、最適化手法によるものがある^{xxxv}。システムシミュレーションによる分散型電源の分析評価システムについてはいくつかあり、ワシントン州立大学 ENERGY PROGRAM が開発した分散型システム分析ソフトウェア HEATMAP^{xxxvi}や空気調和・衛生工学会が販売している評価プログラム CASCADE (Computer Aided Simulation for Cogeneration Assessment & Design)^{xxxvii}などがある。HEATMAP は導入しようとする分散型電源および CHP システムプラントの最適な容量、運転スケジュール、ネットワーク内パイプのサイズまで決定することができる。さらに熱の伝送システムを決め、全体コスト及び環境性などの予測ができる。しかし、これは導入しようとするシステムと技術がある程度確定し、その評価を行うというシナリオである。用途別、規模別の建物に対してどのような技術がもっとよいのかという課題を自動的に最適化することができない。CASCADE はホテルや病院など 5 種類の建物用途の負荷データを内蔵しており、環境性、省エネルギー性と経済性を総合的に評価できる。与えられたエネルギー需要負荷に対して、各種条件設定に応じた導入効果をみるのが可能となる。DOE の HOMER^{xxxviii}は特に発展途上国の非電化地域での分散型電源導入評価に使用される。WEB 上でのオンライン会議では世界中の科学者とその分析ツールを用いた研究情報を交換することが可能である。

しかし、多様な運転特性を持つコジェネレーションシステムが利用可能な近年では、導入条件に関するパラメータの組み合わせパターンが非常に多くなるため、このようなシミュレーションシステムでは最適な導入・運転条件を導きだすことが困難となる^{xxxv}。一方、最適化手法による方法としては、数理計画法によるものや、遺伝アルゴリズムによるものなどが報告されている^{xxxix}。これらの方法では、最適な容量、運転条件などを決定することが可能であり、計算事例も多い。

以上、分散型電源ならびに CHP 導入に関する評価ツールが数多く存在するが、デマンドサイドから導入のメリットと最適な技術選択、システム設計があまり行われていない。一方、アメリカローレンス・バークレー国立研究所によって開発している分散型エネルギー資源顧客導入モデル (Distributed Energy Resources Customer Adoption Model、DERCAM)^{xxxiv}は特定顧客のエネルギーコストを最小限にするための分散型電源の技術選択を最適化するツールである。電力負荷、熱負荷、技術と DER (Distributed Energy Resources) 設備の仕様など入力データをベースに、DERCAM はもっとも経済的な形で、コジェネレーションを含めた最適の技術組み合わせと需要家の電力、熱負荷需要に合わせるための基本的な運転スケジュールを決定する。

4.2. 分散型電源選択モデル

総エネルギーコストを最小化する分散型電源選択モデル DERCAM を改良し、二酸化炭素最小化モデルを構築する。Fig. 47にDERCAMモデルの構造フローチャート及びFig. 48に改良したDERCAMの概要を示す。

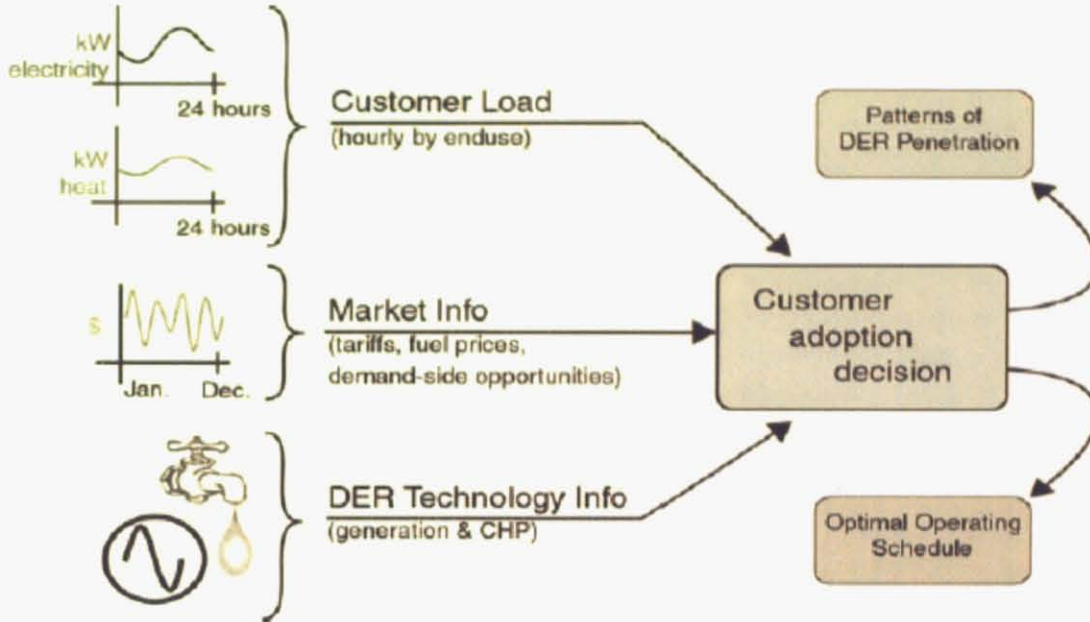
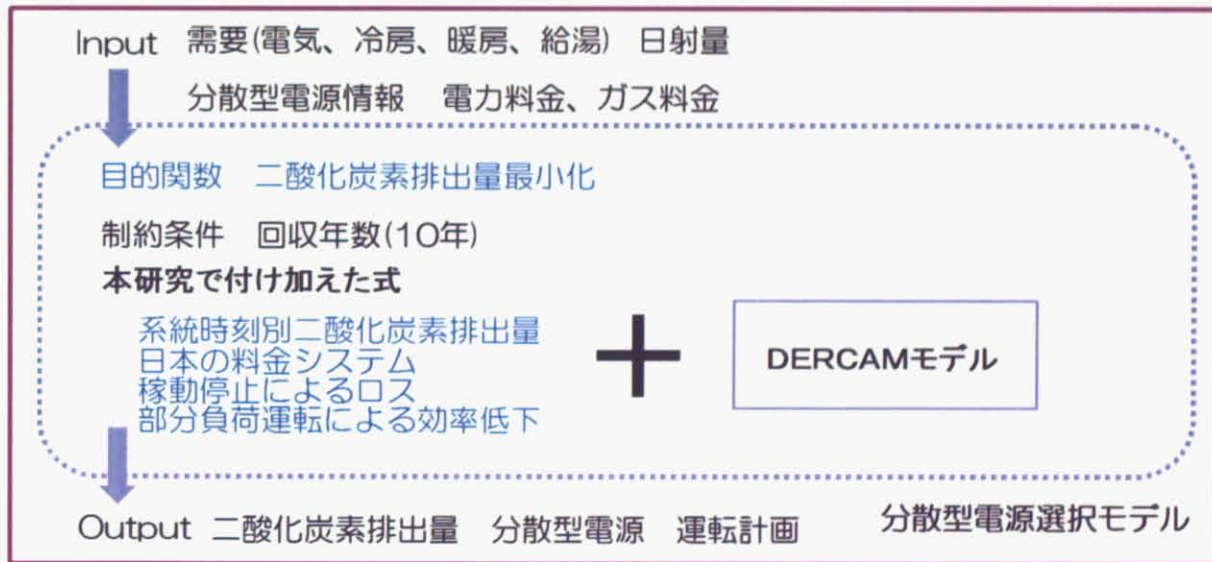


Fig. 47 DER-CAMモデルの構造フローチャート



二酸化炭素を最小化する分散型電源を選択し、その運転計画を求める

Fig. 48 DERCAM を改良して作成した分散型電源選択モデルの概要

4.3. モデルの改良点

4.3.1. 部分負荷運転

部分負荷などの機器特性を省略した数理計画モデルでは導入効果が過大となっている可能性がある。DERCAM は CERTS のマイクログリッドコンセプトを元にして作成されたモデルであり、系統との連結点において自由に電力の売買ができると仮定している。そのため、部分負荷特性を考慮した場合、系統より購入したほうが安くなると、分散型電源が全く導入されない、もしくは常に定格運転をとり、売電することとなる。また部分負荷及び稼働率の下限値を設定することで、過大評価をさけていると考えられる。本研究では二酸化炭素の最小化を目的関数とするため、燃料ロスの試算は重要と考え、部分負荷によるロスを評価できるように改良をおこなった。Fig. 49 に DERCAM に組み入れた計算式の概要を示す。

input	最大定格発電量(kWh)	$CapL_t$	発電機種	t
	発電効率	ef_t	時間	h
	最低発電量(kWh)	$mnL_t = CapL_t * 0.5$	月	m
	部分負荷効率低下率	0.3		
	最低負荷時の効率	$mnEf_t = ef_t - (1 - mnL_t / capL_t) * 0.3$		
	最低負荷時の誤差	$mnFplus_t = mnL_t / mnEf_t - mnL_t / ef_t$		
	部分負荷に対する誤差	$P_t = (mnFplus_t) / (capL_t - mnL_t)$		
variable	発電量(kWh)	Gen_{tmh}		
objective	発電に必要な燃料(kWh)	$F_{tmh} = (capL_t - Gen_{tmh}) * P_t + Gen_{tmh} * ef_t$		

Fig. 49 部分負荷運転を考慮した燃料消費量の定式化

本モデルは線形計画問題で構築されているため、線形近似にて部分負荷特性を組み入れた。具体的にコージェネレーションの部分負荷効率を定式化する方法として、コージェネレーションマニュアルによるガスタービンの部分負荷による効率低下率を求め、定格以下で運転した場合のペナルティとして部分負荷割合に対する効率低下に値する燃料を課した。Fig. 50 にガスタービンの負荷に対する効率を示す。部分負荷に対する効率の低下率は 0.1-0.3 の間にはいり、0.1 程度のものが多かった。ガスエンジン及びマイクロガスタービンに関する部分負荷特性のデータを入手することができなかったが、部分負荷効率の特に悪いガスタービンに合わせることで課題評価を防ぐことができるとし、一律部分負荷に対する効率低下率を 0.3 とした。なお、燃料電池に関しては部分負荷による効率低下の程度は低いとみなし、0.1 を採用した。

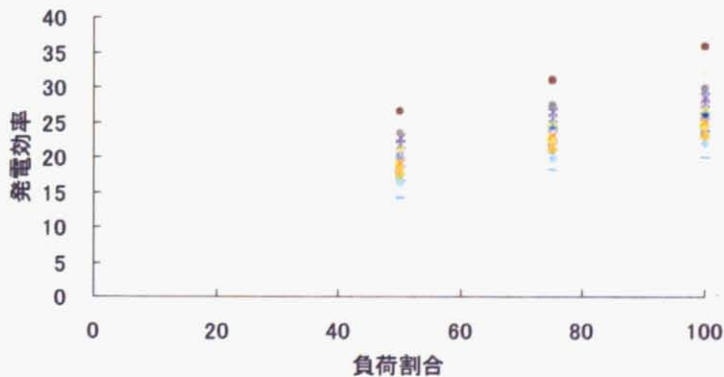


Fig. 50 負荷割合と発電効率

4.3.2. 運転の稼働・停止制御の定式化

経済制約のもとコジェネレーションを行うと、その発電機器の設備利用率を必然的にあげることになるため、頻繁な稼働・停止が起こることは少ない。しかし二酸化炭素最小化の際には、毎回定格で運転できる機器が選択されたほうが排出量は減ることになる。すると単純回収年制約内いっばいに分散型電源を購入し、設備利用率は低くなると考えられる。したがって、コスト最小化の際には重大ではなかった運転の稼働・停止制御の定式化が二酸化炭素最小化の場合には必要になる。開始と停止回数に対して一定量のペナルティーを課す制約式を作成した。Fig. 51 以下に DERCAM に組み込んだ稼働停止に必要な燃料の計算式の概要を示す。

input	発電機別稼働停止燃料消費(kWh)	$stst_t$	発電機種	t
variable	稼働発電機数(kWh)	$CurOp_{tmh}$	時間	h
	開始回数	$CurOp_{tmh+1} \geq Start_{tmh} \geq 0$	月	m
	停止回数	$CurOp_{tmh} \geq Stop_{tmh} \geq 0$		
constraint	稼働停止回数制約	$CurOp_{tmh+1} - CurOp_{tmh} = Start_{tmh} - Stop_{tmh}$		
objective	稼働停止に必要な燃料(kWh)	$ststF_{tmh} = (Start_{tmh} + Stop_{tmh}) * stst_t$		

Fig. 51 稼働停止に伴う燃料消費の定式化

m 月 h+1 時に稼働している発電機数が m 月 h 時に稼働している発電機数よりも多い分発電機が稼働を開始したと考える。また m 月 h+1 時に稼働している発電機数が m 月 h 時に稼働している発電機数よりも少ない分発電機が稼働を停止したと考える。どちらの時間も稼働している発電機の数と同じ場合、開始回数と停止回数はともに 0 となり継続とみなされる。なおここでは、文献値^{xxxv}を参考に稼働・停止に伴うエネルギー消費量は最低負荷率地時の燃料消費量の 12 分間分として仮定して計算を行った。

4.3.3. その他の改良点

一般的にコジェネレーションと系統電力の二酸化炭素排出量を比較する際、環境省のガイドラインで示されている全電源平均 0.098(kgC/Kwh)が使用される。本研究では昼間の負荷平準化をも考慮した運転計画を試算するために、原子力中心の夜間は 0.0728(kgC/Kwh)、火力発電も含まれる昼間は 0.0971(kgC/Kwh)の値を用いた。オリジナルの DERCAM では時刻別の二酸化炭素排出量に差をつけていないため、コードを改良した。

日本と欧米のガスシステムの大きな違いとして月最大流量に対して月額基本料金が増えることがあげられる。この違いを考慮するため DERCAM を改良した。

4.4. インプットデータ

4.4.1. 電力料金

電力料金は東京電力の業務用季節別料金と自家発電Aの料金体系を用いた。Table. 1 にその詳細を示す。

Table. 1 東京電力の料金体系^{xxxvi}

業務用季節別電力				自家発補給電力A+業務用季節別電力			
	流量基本(円/kW・月)	単位料金(円/kWh)		流量基本(円/kW・月)	単位料金(円/kWh)		
	1,560	ピーク	昼間 夜間	1,716	ピーク	昼間 夜間	
January	14.15	12.2	7.1	January	15.57	13.42	7.81
February	14.15	12.2	7.1	February	15.57	13.42	7.81
March	14.15	12.2	7.1	March	15.57	13.42	7.81
April	14.15	12.2	7.1	April	15.57	13.42	7.81
May	14.15	12.2	7.1	May	15.57	13.42	7.81
June	14.15	12.2	7.1	June	15.57	13.42	7.81
July	14.15	13.5	7.1	July	15.57	14.85	7.81
August	14.15	13.5	7.1	August	15.57	14.85	7.81
September	14.15	13.5	7.1	September	15.57	14.85	7.81
October	14.15	12.2	7.1	October	15.57	13.42	7.81
November	14.15	12.2	7.1	November	15.57	13.42	7.81
December	14.15	12.2	7.1	December	15.57	13.42	7.81

4.4.2. ガス料金

ガス料金は分散型電源導入をする場合コジェネレーション専用料金を用い、分散型電源を導入しない場合は季節別料金を用いた。Table. 2 にその詳細を示す。

Table. 2 東京ガスの料金体系^{xxxvii}

	季節別料金	コジェネレーション専用契約
定額基本(円/月)	18,585	22,575
流量基本(円/kWh・月)	37	90
January	6.2	3.9
February	6.2	3.9
March	6.2	3.9
April	5.9	4.2
May	5.0	4.2
June	5.0	4.2
July	5.2	4.4
August	5.2	4.4
September	5.2	4.4
October	5.1	4.3
November	5.1	4.3
December	5.1	4.3

4.4.3. 分散型電源データ

分散型電源データは文献の調査結果を用いた。調査により得られたアメリカにて主に使われている分散型電源と CHP の情報である。ガスエンジン、ガスタービン、マイクロガスタービンと燃料電池、廃熱利用できるものとできないものとに分かれている。各種設備定額発電、効率、寿命とコストなどの分散型電源技術などがある。日本においての大手平均コストと比較して、3000kW から 5000kW 以上のものは日米で大きな差がなく、大きくなるほど日本の方が安くなり、1000kW 以下は規模が小さくなるほど日本の価額が高くなり、1000kW なら 1.2 倍程度の差だが、600kW 級は 1.5 倍、200 から 300kW 級は 2 倍程度の差がつくことと報告されている。全体的に日本の分散型電源がアメリカのものよりも高い。本研究では導入に約 1/3 の補助金が適応されるとし、補助金が適応されたあとのコストがほぼアメリカのコストになるので、アメリカの技術情報をもとに解析を行う。

Table. 3 分散型電源データ^{xxxviii}

		定格出力	耐用年数	初期投資 (円)	OM費用 (円)	OM変動費 用(円)	発電効率
Fuel Cells	FC-200	200	10	643963	1163	3.5	0.36
Gas Turbines	GT-01000	1000	20	256392	1244	1.2	0.219
	GT-05000	5000	20	137897	483	0.7	0.271
	GT-10000	10000	20	122990	331	0.7	0.29
	GT-25000	25000	20	103035	255	0.6	0.343
	GT-40000	40000	20	89579	226	0.5	0.37
Microturbines	MT-028	28	10	365465	2819	1.8	0.226
	MT-060	60	10	290354	2340	1.8	0.25
	MT-067	67	10	264125	1904	1.8	0.252
	MT-076	76	10	266947	2031	1.8	0.242
	MT-100	100	10	241836	1712	1.8	0.26
Natural Gas Engines	NG-030	30	20	243437	2707	2.4	0.2752
	NG-060	60	20	222148	2271	2.2	0.2874
	NG-075	75	20	215525	2141	2.0	0.2913
	NG-0100	100	20	212935	1982	2.2	0.3
	NG-0300	300	20	175850	1450	1.6	0.31
	NG-1000	1000	20	134044	836	1.1	0.34
	NG-3000	3000	20	124525	524	1.1	0.35
	NG-5000	5000	20	116049	413	1.0	0.37
Photovoltaics	PV-010	10	30	1048800		0.0	
	PV-025	25	30	976800		0.0	