

博 士 論 文

直交表－GA ハイブリッド解析法を用いた
再生可能エネルギーを伴う
複合エネルギーシステムの運用解析

2018 年 3 月

渡邊 聖司

担当教員 小原伸哉 教授

Ph.D. thesis

Operation Planning of a Compound
Energy System accompanied by
Renewable Energy using
Orthogonal Table-GA Hybrid
Analysis Method

March 2018

Seizi WATANABE

Supervisors Prof. Shin'ya OBARA

直交表－GAハイブリッド解析法を用いた再生可能エネルギーを伴う 複合エネルギーシステムの運用解析

要 旨

再生可能エネルギーの導入は、温室効果ガスの排出から地球環境を保全するために必要不可欠であり、世界各国において積極的な導入がなされている。また、再生可能エネルギーの導入に伴い、スマートグリッドやマイクログリッドによるエネルギーの地産地消や効率化なども進められている。そのため、マイクログリッドに代表される複合エネルギーシステムでは、多様な出力特性を有する複数のエネルギー機器を連系する必要がある、連系時の運用最適化の技術が必要となる。

本研究では、多変数の非線形問題であるエネルギーシステムの運用最適化に対して、従来の遺伝的アルゴリズム(GA)による最適解を探索する方法を改善するために、最初に、実験計画法に用いられている直交表実験の解析から得られる要因効果図を用いて、最適運用を含むと考えられる各設計パラメータの探索範囲を堰堤してGAの初期染色体情報を得る直交表－GAハイブリッド解析法を提案する。この解析法は、複合エネルギーシステムの最適化解析の高速化と精度の改善に寄与できる可能性がある。

初めに、札幌市の冬季(2月)の代表日において、太陽光発電、発電機器、バッテリー、蓄熱槽、ヒートポンプなどを伴う30住宅で構成される独立マイクログリッドに対して、電力および熱を供給する発電機器(固体高分子膜形燃料電池、固体酸化物形燃料電池、ガスエンジン発電機)の燃料消費量の最小化を目的関数として直交表解析を行い、要因効果図を作成することで、燃料消費量の低減に寄与すると考えられる設計パラメータの探索範囲を限定し、GAによる探索範囲を予め限定することで、最適運用解を求めた。また、上で述べた解析結果とGAによる従来の解析方法を比較して、解析精度が向上することを明らかにした。

GAのみの従来の解析方法では、多くの反復計算によって最適解を得ており、収束しない場合や最適解と大きく外れる場合があった。しかしながら、本稿で提案する直交表－GAハイブリッド解析法では、最適解または最適解近傍の解にほぼ収束することが明らかとなった。また、GAのみの解析に比較して、最適運用解および准最適解の出現頻度が向上し、解析精度の向上に寄与できることを示した。

そこで本稿では，直交表－GA ハイブリッド解析法を提案し，従来の GA のみによる解析方法と比較して述べることで，提案解析方法が，複合エネルギーシステムの設備計画及び運用計画の最適化について，効率的で高精度となることを述べる．

目 次

第 1 章 緒 言	1
1.1 複合エネルギーシステム技術の背景	1
1.1.1 地球環境問題	1
1.1.2 エネルギー問題	5
1.2 スマートグリッド・マイクログリッド	11
1.3 エネルギーシステムの従来のデザイン方法	16
1.4 エネルギーシステムのデザインの課題	19
第 2 章 研究背景と目的	21
2.1 研究背景	21
2.2 研究の着目点	22
2.3 研究目的と意義	22
第 3 章 基本技術	23
3.1 実験計画法および品質工学（タグチメソッド）	23
3.1.1 直交表	24
3.1.2 要因効果図	24
3.2 遺伝的アルゴリズム (GA)	27
第 4 章 GA によるエネルギーシステムのデザイン	29
4.1 複合エネルギーシステムの最適化における課題	29
4.2 複合エネルギーシステムへの GA の適用	29
第 5 章 直交表－GA ハイブリッド解析法の基礎	31
5.1 直交表－GA ハイブリッド解析法のねらい	31
5.2 解析に用いる複合エネルギーシステム	34
5.3 直交表－GA ハイブリッド解析法の解析フロー	36
5.3.1 染色体モデル	36
5.3.2 目的関数（適応度）	38
5.3.3 解析フロー	39
5.3.4 直交表の導入	41
5.3.5 直交表と設計パラメータの水準	42

5.3.6 直交表による設計パラメータの評価	43
5.3.7 要因効果図を用いた GA の初期値の決定	44
5.4 システムのエネルギー収支	45
5.4.1 エネルギー収支式	45
5.4.2 発電機器の出力特性	46
5.4.3 ヒートポンプと蓄熱槽	49
5.4.4 目的関数（最適値）	50
5.5 解析条件	51
5.5.1 電力および熱需要	51
5.5.2 直交表解析における複合エネルギーシステムの設計パラメータ	51
5.5.3 解析条件	53
(a) 日射量	53
(b) 各機器の効率	53
(c) GA の解析パラメータ	54
 第 6 章 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 型)直交表を用いた解析結果	55
6.1 直交表-GA ハイブリッド解析法に使用される初期値	55
6.2 GA 解析結果および考察	58
6.3 GA 再解析結果および考察	60
6.4 最適運用計画	65
6.4.1 発電機器	65
6.4.2 熱機器	68
6.4.3 解析アルゴリズムの検証	71
 第 7 章 $L_{18}(6^1 \times 3^6)$ 型)直交表を用いた解析結果	73
7.1 直交表の変更	73
7.2 直交表の変更による GA 解析に使用される初期値	75
7.3 GA 解析結果および考察	78
 第 8 章 結 言	79
 記号表	82
 参考文献	85

謝 辭	90
研究業績一覽	91

第 1 章 緒 言

1.1 複合エネルギーシステム技術の背景

1.1.1 地球環境問題

1945 年の第 2 次世界大戦終了以降，特にアジア・アフリカなど数多くの開発途上国が存在する大陸での人口増加は著しく，図 1.1.1-1 に示すように世界の人口は 2050 年にはおよそ 98 億人に達すると予測されている[1]．人口の急激な増加や経済成長に伴うエネルギー需要の拡大により，図 1.1.1-2 に示すように化石燃料の消費量は，年々増加しており，図 1.1.1-3 に示すようにアジア大洋州での消費量の増加が近年著しい[2]．また，今後は図 1.1.1-4 に示すように 2011 年度に比べ，2035 年度では中国が 1.5 倍，インドが 2.1 倍，世界全体では 1.3 倍のエネルギー消費量が見込まれている[3]．

現在の一次エネルギー消費量と確認可採埋蔵から算出すると可採年数は，石油が 53 年，石炭が 109 年，天然ガスが 53 年となり，地球規模で化石燃料の枯渇問題や資源価格の不安定化が深刻な問題になっている[3]．また，化石燃料の使用時に排出される二酸化炭素の量は図 1.1.1-5 に示すように，エネルギー需要の増大とともに増加しており地球温暖化の原因になっている[4]．

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の 2001 年報告によれば，地球の平均地上気温は 1861 年以降上昇し続け，20 世紀中に $0.6\pm0.2^{\circ}\text{C}$ 上昇しており，早急に対策を行わなければ今世紀末には平均気温が 2.6 から 4.8°C 上昇して，これに伴う海面上昇は 0.45 から 0.82m に達する[5]．この規模の環境変化が起きれば地球規模での大規模な気候変動が発生し，大気中の二酸化炭素の増加をさらに加速するような形で炭素循環過程へ影響を与えたとの報告がなされている[6]．したがって，気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)におけるパリ協定に基づく，地球規模での二酸化炭素排出削減が急務であり，二酸化炭素を排出しない自然エネルギーの積極的な利用に注目が集まっている．

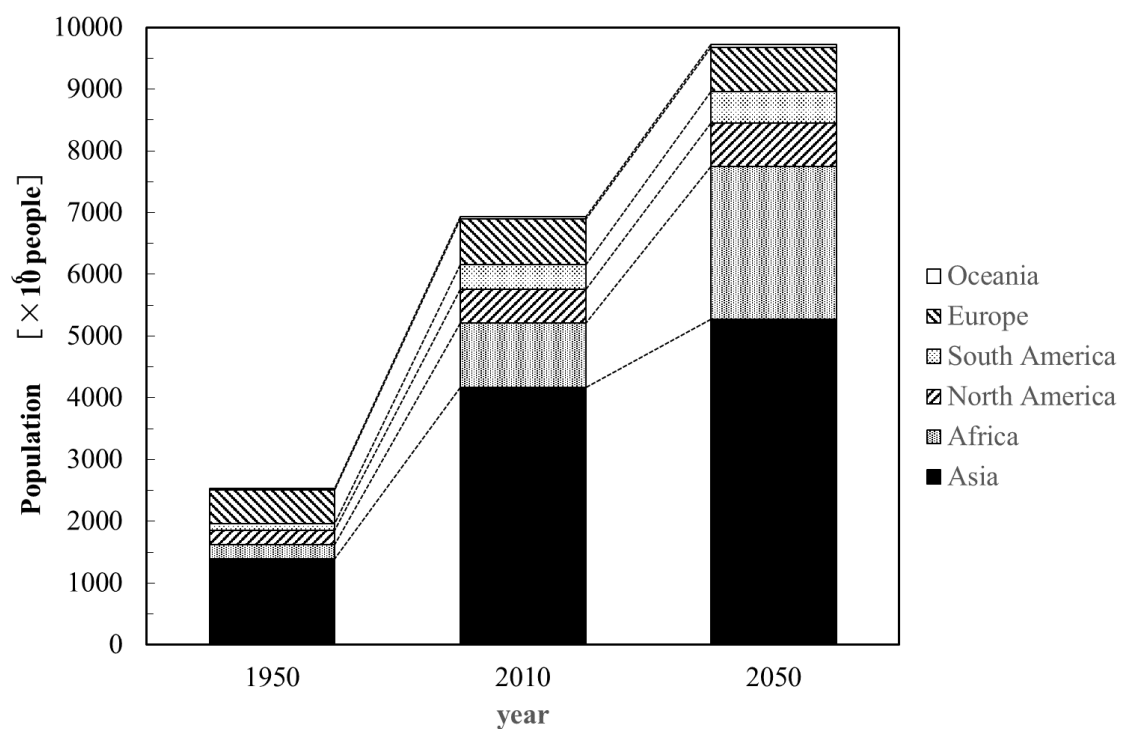


図 1.1.1-1 世界人口の推移（2050 年は推計値）

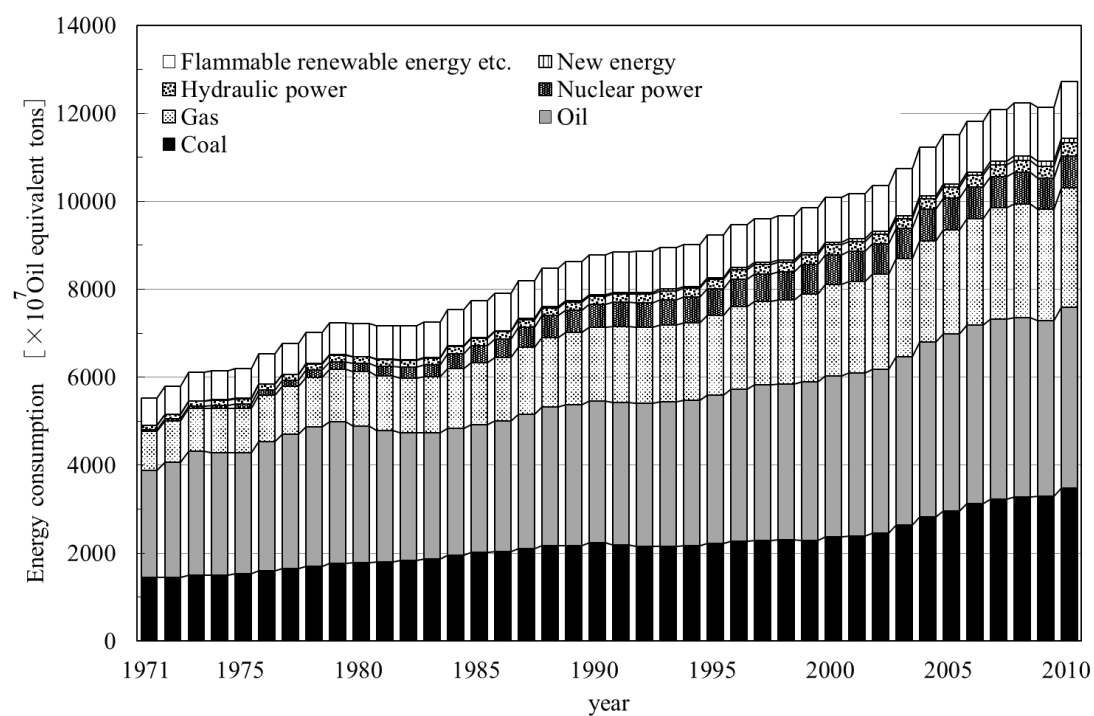


図 1.1.1-2 世界の一次エネルギー消費量の推移
（エネルギー源別）

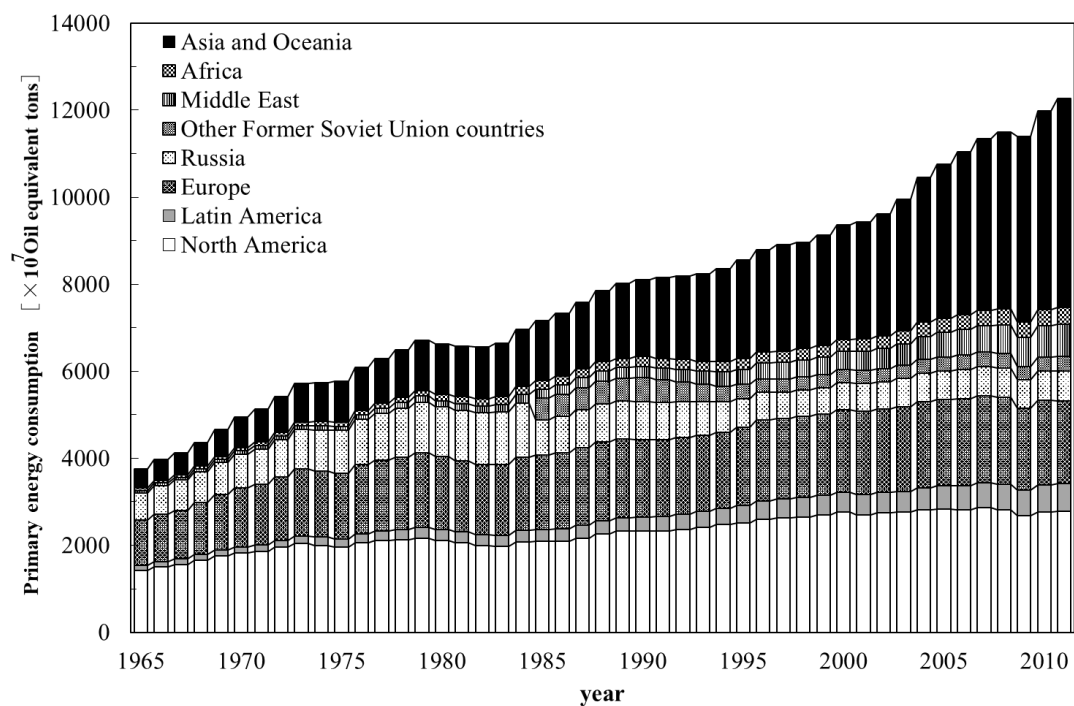


図 1.1.1-3 世界の一次エネルギー消費量の推移

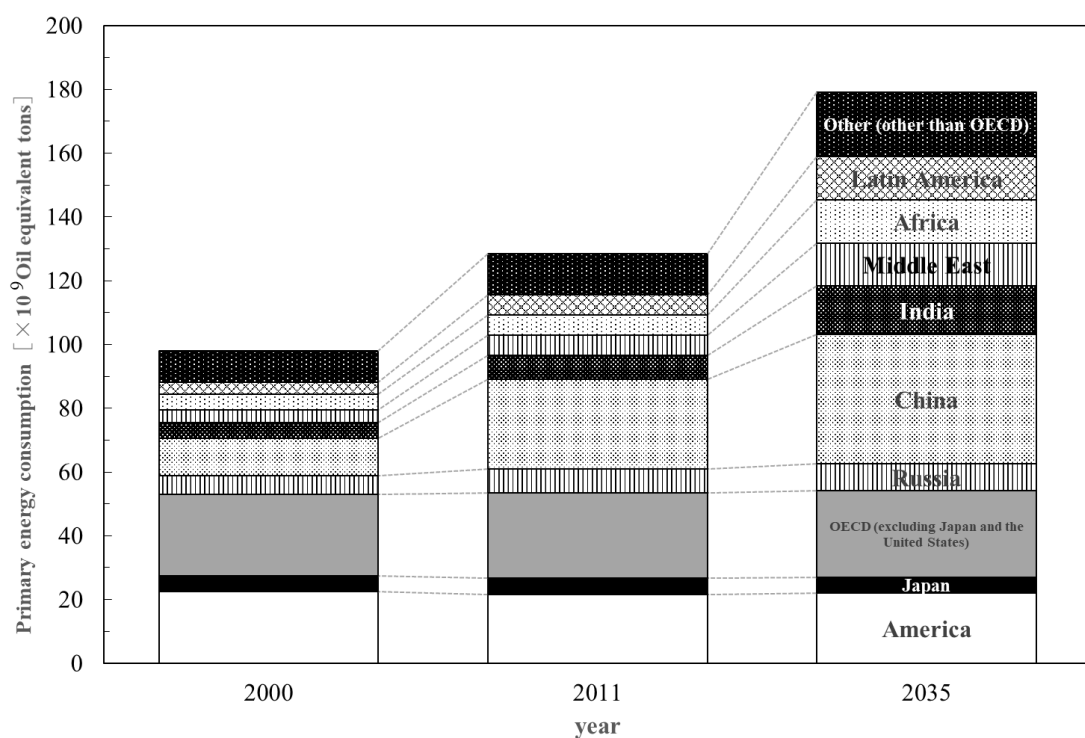


図 1.1.1-4 世界の一次エネルギー消費量の予測

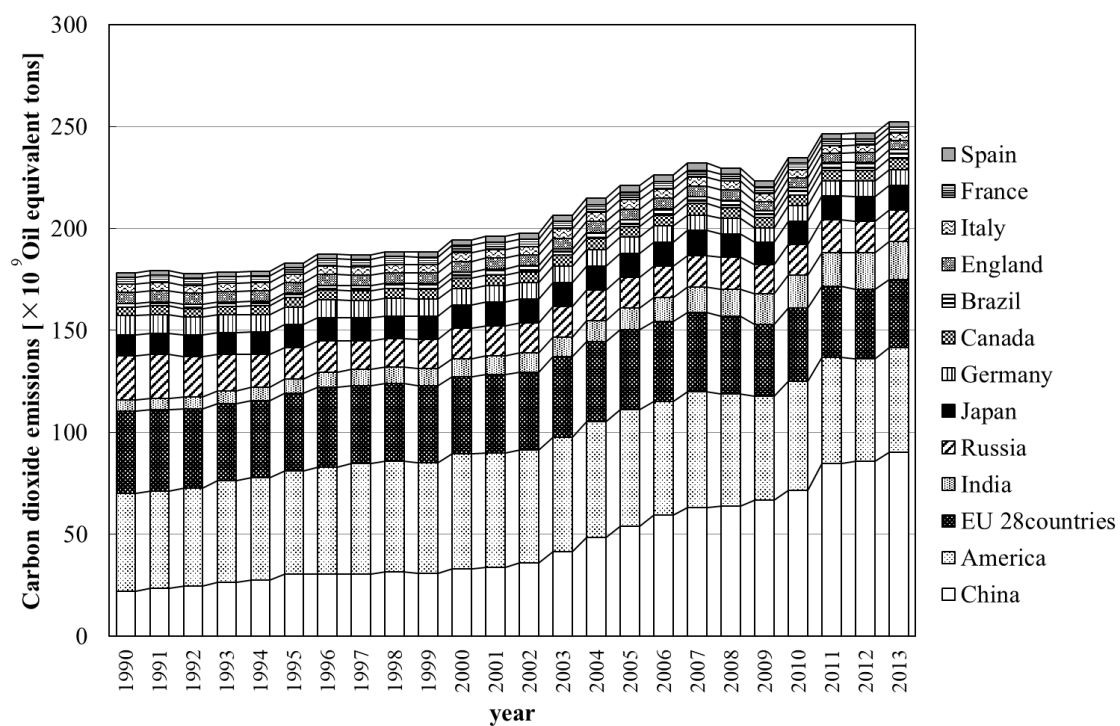


図 1.1.1-5 世界主要国の二酸化炭素排出量の推移

1.1.2 エネルギー問題

日本はかつて国内産石炭や水力などの天然エネルギー資源を利用していたため、図 1.1.2-1 に示すように 1960 年度のエネルギー自給率は 58%であったが、1970 年代の高度経済成長期以降、エネルギー需要の急激な増大に伴い、石油が大量に輸入されるとともに石炭も輸入へと移行したため、2012 年の一次エネルギー自給率は 6.0%となっている[7,8]。これは図 1.1.2-2 に示すようにフランスを除く諸外国と比べてもエネルギー自給率は低く、図 1.1.2-3 に示すように石油・天然ガス・石炭に代表される一次エネルギー資源のほとんどを輸入に依存しており、特に石油は中東の石油産出国への依存度が 83%と非常に高いため、一次エネルギーの供給やコストは世界情勢による変動する[9,10]。そのため、燃料となるウランの供給源の国の情勢が安定し、供給やコストの変動リスクも低い原子力発電の導入を推進してきたが、2011(平成 23)年 3 月 11 日に発生した東日本大震災および東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、エネルギー政策の根本的な見直しを迫られており、新エネルギーとして再生可能エネルギー（自然エネルギー）に注目が集まっている。

再生可能エネルギーには定常的または反復的に補充される太陽光、風力、海洋（潮力（潮流・潮汐力）・波力）、地熱、バイオマスなどのエネルギー資源としたものがあり、半永久的に利用が可能で、発電による二酸化炭素の排出を抑制できるため地球温暖化防止対策や石油・石炭・天然ガス等に代表される化石燃料やウランの地下資源価格の高騰、枯渇性資源が持つ有限性への対策等として有効である。ただし、風力、海洋、地熱はエネルギー資源が偏在しており、事前に調査して発電施設の設置場所や規模を決める必要がある[11]。また、環境や気象条件等によって発電電力量が不安定であるため、この問題を解決するための研究が行われている[12-14]。

また、バイオマスには家畜排泄物、稲ワラ、林地残材、生ごみ等の多種多様な資源があるが、穀物等を発酵させることにより生成されるメタノールに代表されるバイオ燃料として利用した場合、燃料としての穀物の需要が高まることによって穀物全体の価格が上昇し、貧困層に十分な量が供給されず飢餓を生む恐れがある。食料として

の穀物の量を維持しながらバイオ燃料に利用する穀物を生産するには、現在よりも広い農地を確保するための森林伐採が懸念され、森林が減ることによる生態系への影響や保水力が失われるために水資源が確保できなくなる恐れが懸念される。さらに、二酸化炭素の固定能力が低下するため、地球温暖化につながると考えられる。

本研究でも採用している再生可能エネルギーがエネルギー消費量に占める割合は年々増加し、図 1.1.1-2 に示したように世界規模では 2010 年度は約 10% を占めるようになった。しかしながら、図 1.1.2-4 に示すように日本国内でのエネルギー供給割合において再生可能エネルギーの占める割合は、世界規模の半分以下である全エネルギーの 4.8% ほどしかない[15]。したがって、さらに再生可能エネルギーの利用を加速させることが求められている。そのため、図 1.1.2-5, 1.1.2-6 に示すように 2030 年度までに再生可能エネルギーがエネルギー供給割合の 23 から 25% とする長期目標と、再生可能エネルギーの構成見通しが定められている[15,16]。

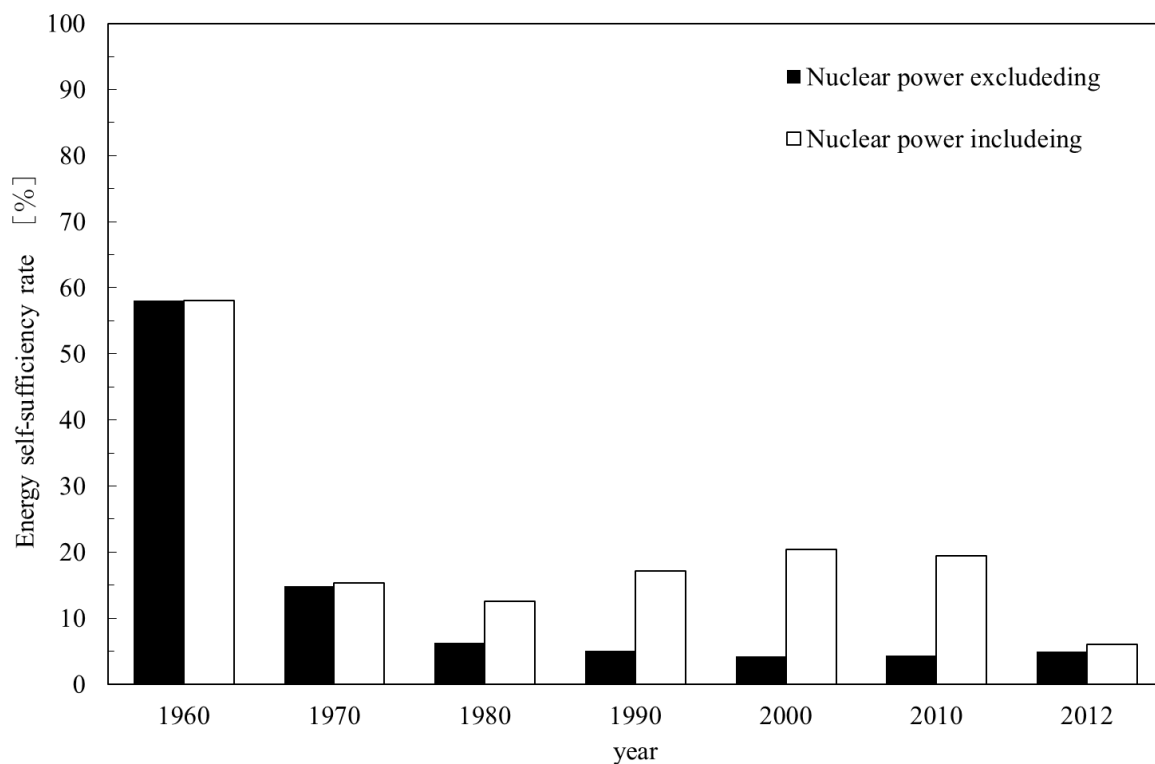


図 1.1.2-1 日本のエネルギー自給率の変遷

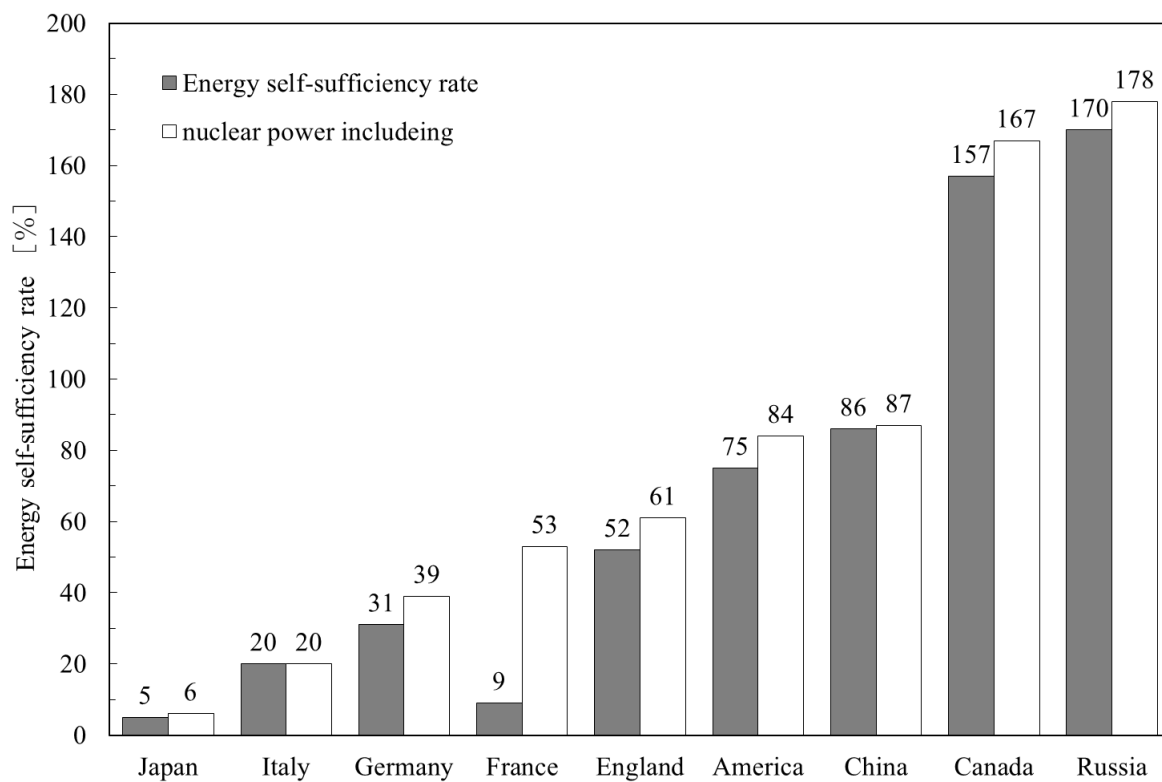


図 1.1.2-2 世界のエネルギー自給率

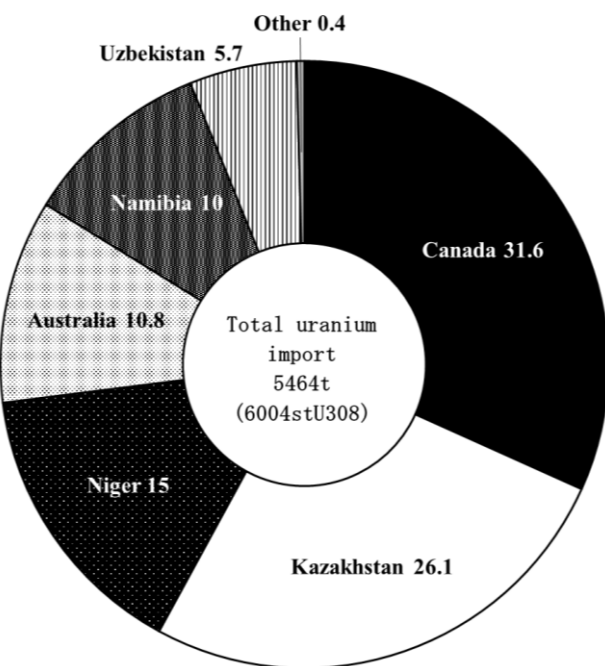
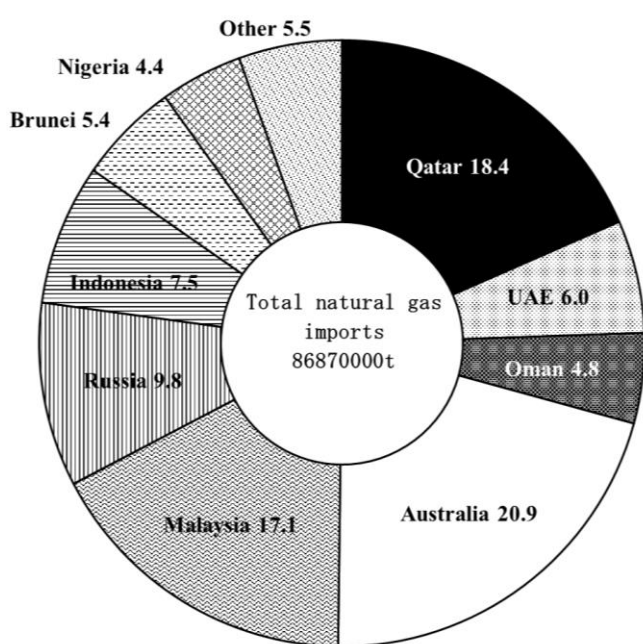
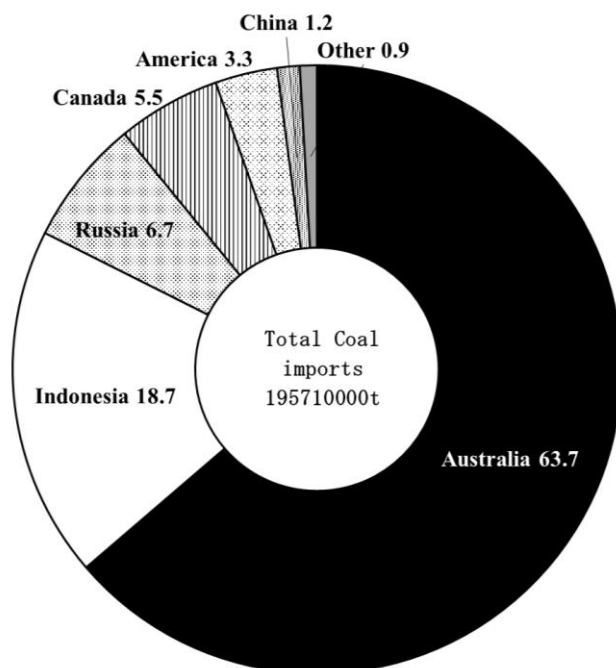
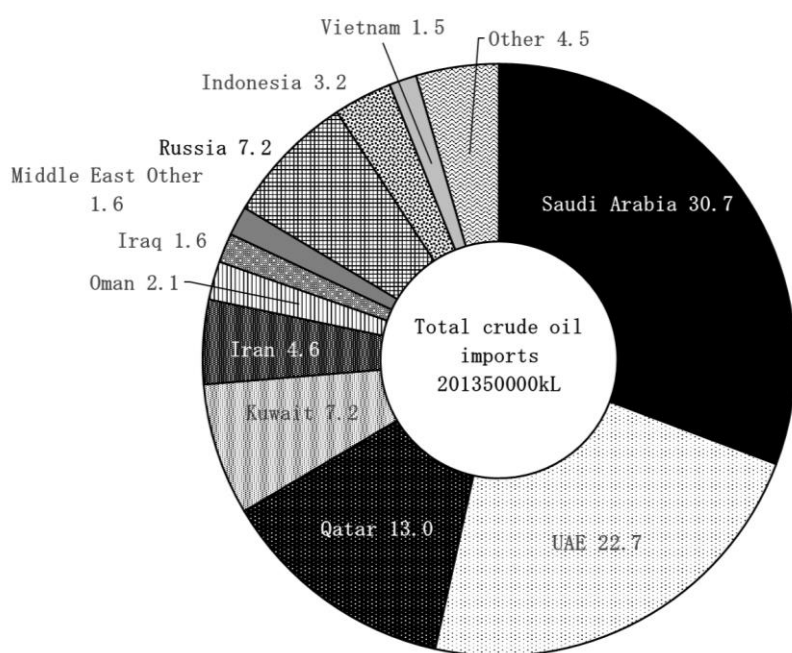


図 1.1.2-3 日本のおもなエネルギー資源の輸入先

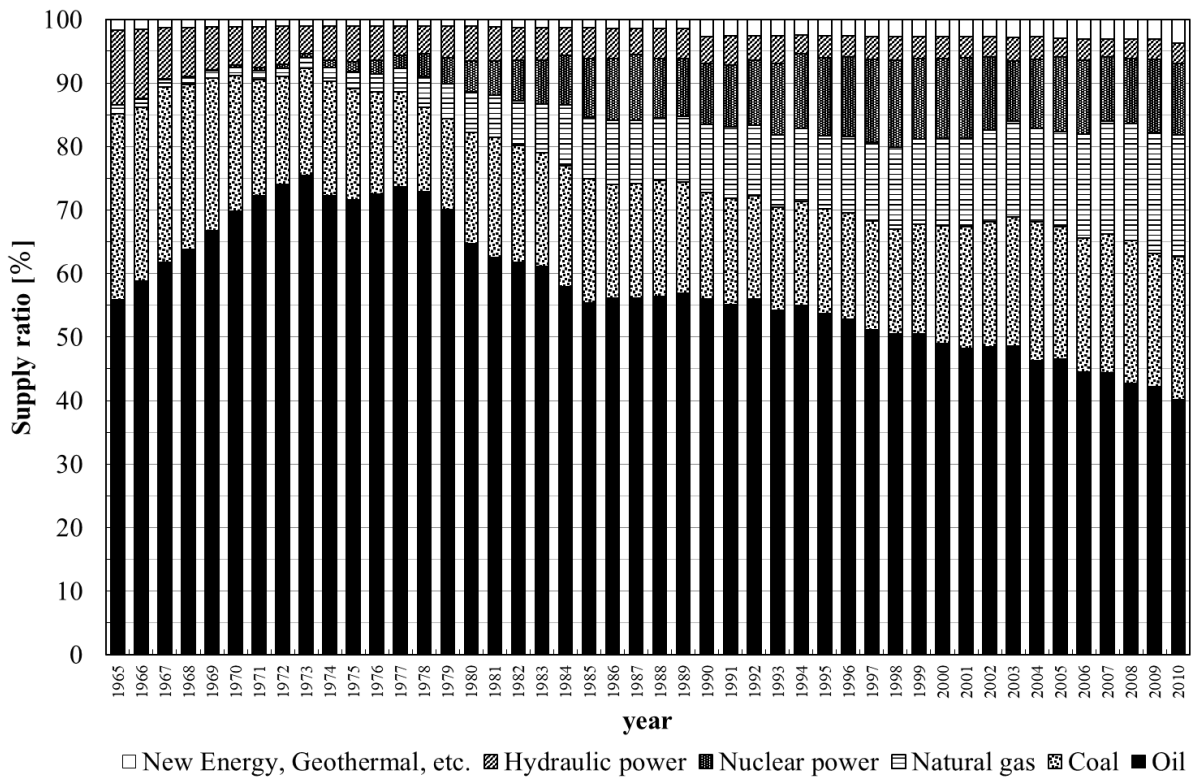


図 1.1.2-4 日本の一次エネルギー国内供給割合の推移
(エネルギー源別)

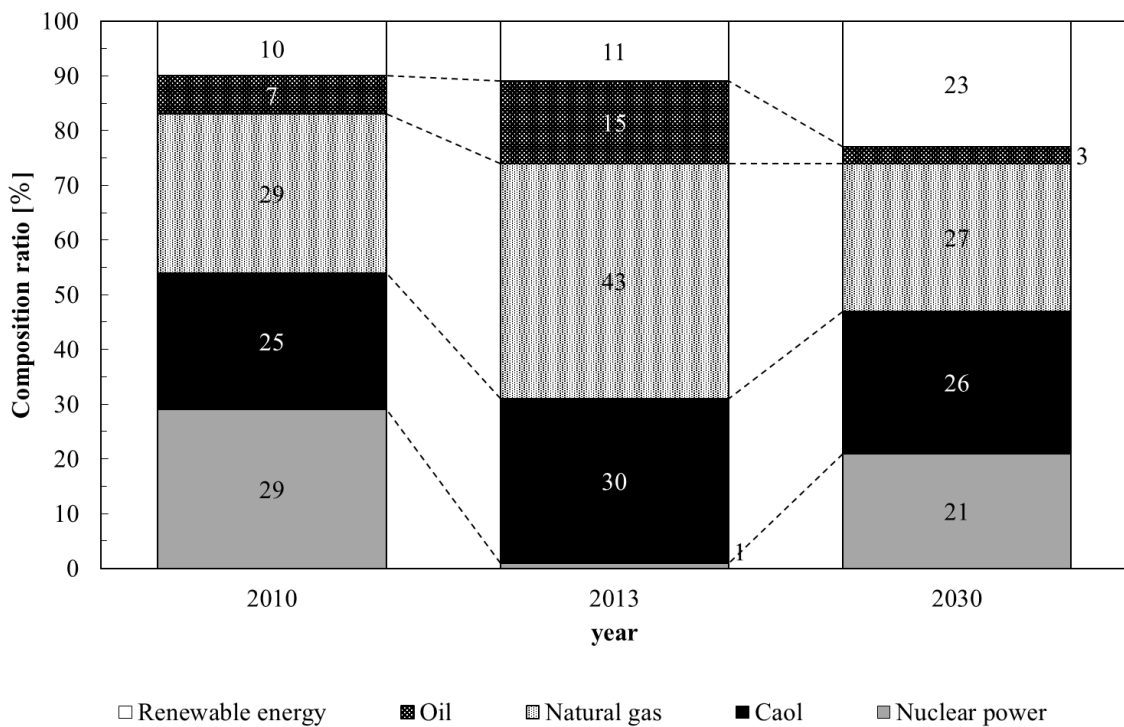


図 1.1.2-5 日本のエネルギー供給見通し (電源構成別)

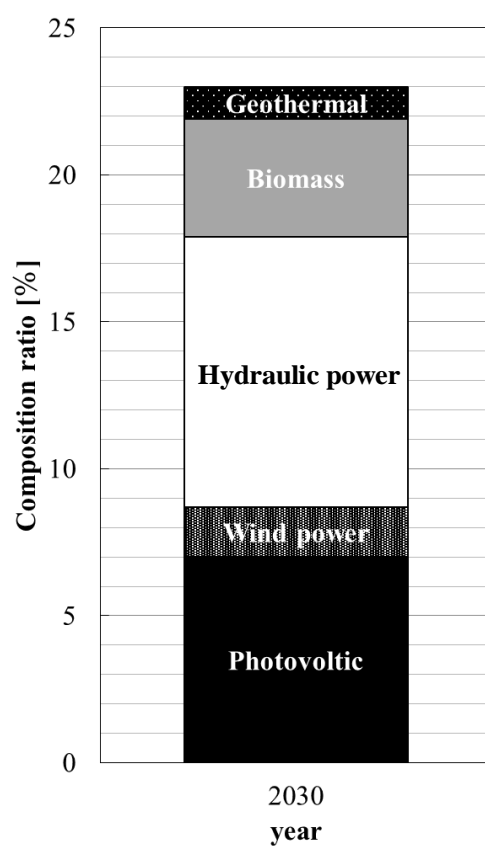


図 1.1.2-6 再生可能エネルギーの構成割合（2030 年度見通し）

1.2 スマートグリッド・マイクログリッド

スマートグリッド (Smart Grid, 次世代送電網)とは, スマート (Smart, 賢い／洗練された)なグリッド(Grid, 電力網)の通称で, 分散ネットワークの一形態であり, IT(Information technology, 情報技術)をさらに進めた ICT (Information and Communication Technology, 情報通信技術)を用いて, これまでの電力量計に代わって, スマートメーター, ホームゲートウェイやモニタリングシステムによって電力の流れを供給側／需要側の双方向から制御し, 最適化ができるようにした送電網のことである. 送電部門では, 停電などが発生した場合に, 停電箇所の特定や補修などを自動化することや, 効率的な送電網の運用が該当する. これには, 再生可能エネルギー(自然エネルギー)の電力を自動的に蓄電, 放電する技術も含まれる. また, 需要者(消費者)に近いところでは, スマートメーターと呼ばれる情報化された電力計によって, 電力需給の逼迫時や電力価格が高い時間帯での制御, 電力消費の時系列記録などが行えることも含まれている. ただし, スマートグリッドの定義自体は, 非常に曖昧でスマート (Smart, 賢い／洗練された)の程度をどのように考えるかは明確に規定されていない.

従来の送電線は, 大規模な発電所から一方的に電力を送り出す方式であるが, 需要のピーク時を基準とした容量設定ではムダが多く, 送電網自体が自然災害などに弱く, 復旧に手間取るケースもある. そのために送電の拠点を分散配置し, 需要側と供給側との双方向から電力のやり取りができるスマート (Smart, 賢い／洗練された)なグリッド(Grid, 電力網)が望まれている.

スマートグリッドの目的は, 電力事業の効率化, 温室効果ガスの削減, より快適なエネルギーサービスの提供などにまで拡張されており, 実現のためには電力関連の技術のみに留まらず, 他分野の技術が必要となっている. このため, 電気事業を含めた公共事業のあり方そのものがパラダイムシフト(発想の転換)をし, 公共事業の ICT 化が必要となっている[17-20]. 図 1.2-1 に日本型スマートグリッドの完成予想図を示す[17].

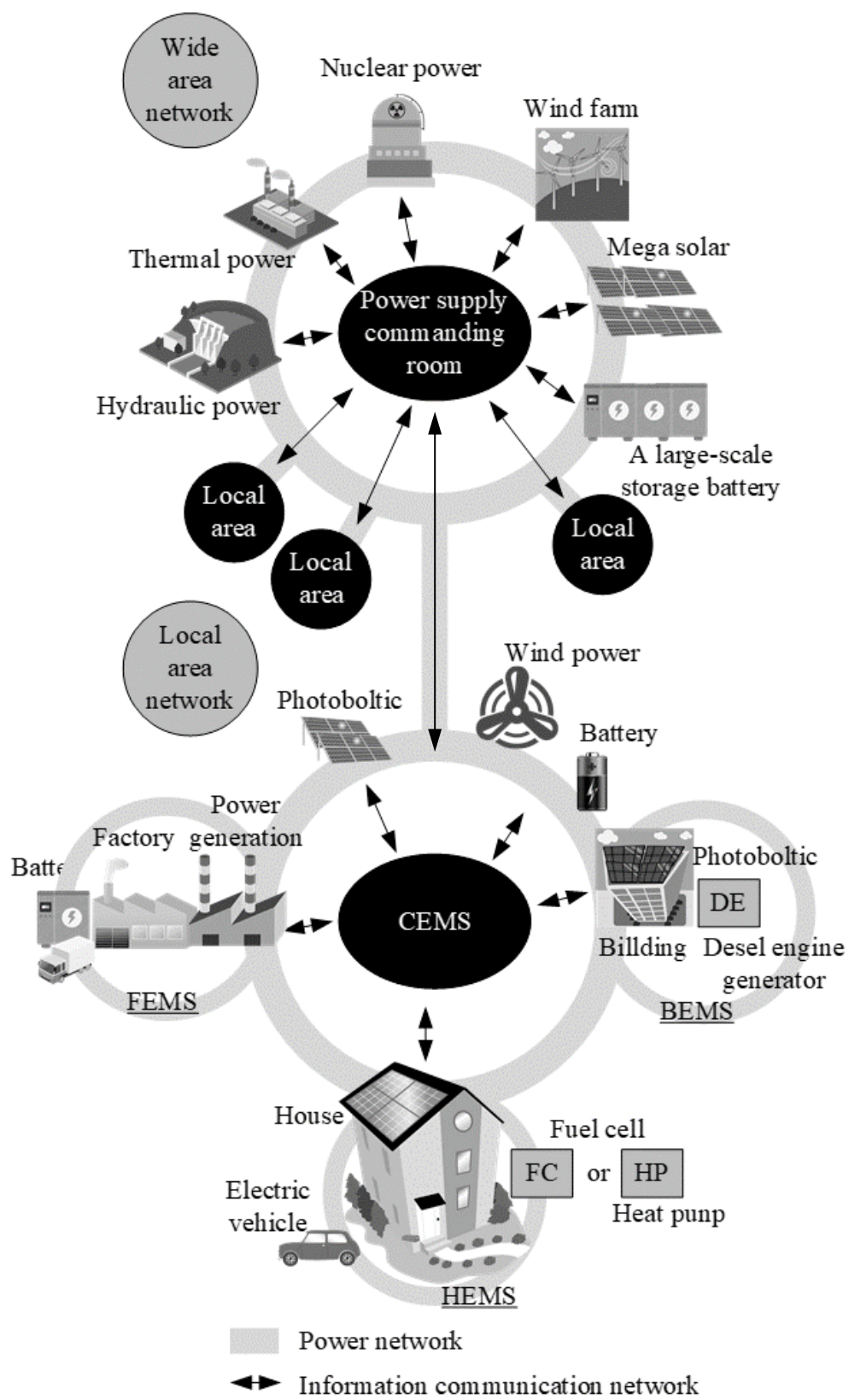


図 1.2-1 日本型スマートグリッド完成予想図

スマートグリッド化を進めることによる利点には以下のようなことが挙げられる[20].

- ① ピークシフト(昼間電力消費の一部を夜間電力に移行させる方法)による電力設備の有効活用と需要側の省エネルギー
- ② 再生可能エネルギーの導入
- ③ 電気自動車のためのインフラ整備
- ④ 停電時対策

一方では、スマートグリッド化における欠点も指摘されている。例えば、スマートグリッド化によって、高度な情報通信システムや ICT がさまざまなものに連携されることとなるが、不正操作やウイルス感染などの情報セキュリティ対策は不十分であり、その脆弱性を克服する必要がある。また、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーによる発電量は、天候や気候により左右されるため、非常に不安定であり、電力需要が少ない時間帯に電力供給量が増加すると、配電線に大量の電力が送られ、負荷をかけることとなる。このため、電力の需要と供給のバランスを調整するなどの系統安定化のための対策が必要不可欠となる。この対策としては、大型蓄電池の設置や電気自動車の蓄電池としての代替利用、ヒートポンプ給湯器やコージェネレーション(熱電供給)やガスエンジンなどの機器の電力源への利用など、他の設備へ余剰電力を回す方法やスマートメーターによる発電の休止、大需要地への送電システムの確立があるが、その仕組みづくりには、関連する多くの分野からの協力体制が必要である。また、日本では、集中型電源と再生可能エネルギーなどによる分散型電源の融合もスマートグリッドの普及には欠かさせない。集中型電源とは、水力・火力・原子力などを利用した大型発電所で製造した電気を電力網によって一般家庭などに一方的に送る方法である。分散型電源とは、住宅やオフィス・工場などにおいて個別に比較的小規模な発電設備を設けて発電する方法である。電力の自由化により、従来の大型発電所に加え、自宅に設置された太陽光発電や風力発電などの発電システムも電力供給が可能となったが、集中型電源と分散型電源とでは異なる電気の流れがある。すでに、メガソーラーや一般家庭

での太陽光発電システムの導入による売電において、電気の流れは、上流(電力会社などの電力供給側)から下流(一般家庭やオフィス、工場などの電力需要側)への一方向だけではなく、下流から上流へも双方向に流れ始めている。このような双方向の電気の流れを把握し、正確に制御しなければ、安定的な電力供給ができなくなる恐れがある。分散型電源は、エネルギーの効率的な利用、送電ロスの減少、災害時などにおける電力網停止時における電力供給などのメリットがある一方で、双方向に電気が流れることによる品質低下の懸念、日常的な電気の管理や制御の複雑化、太陽光や風力による発電の不安定さといったデメリットもある。集中型電源から分散型電源へ移行していく中で、こうしたメリットを活かし、デメリットをなくしていくための大きな鍵となるのがスマートグリッドの導入である。

集中型電源において発電設備が災害や事故などにより停止した場合、電力供給に大きな影響が生じるが、分散型電源とスマートグリッドの導入により、上流からの電力供給が遮断されても、分散された複数の電源から電力を効率的に融通し合うことにより、災害時の影響を少なくすることも可能となる。また、蓄電池や電気自動車を家庭などに導入し、電気を蓄えることにより自然に左右される太陽光発電や風力発電による電力を平準化し、夜間や電力が不足する時間帯には蓄えておいた電気を使うことも可能となり、電力網全体の安定化に寄与することができる。すでに、世界各国においてスマートグリッドに関連するインフラ整備などへ積極的な取り組みが開始されているが、それぞれの国や地域によりスマートグリッドに対する考え方は異なっている。アメリカでは、比較的小規模な電力会社が数多くあるため、老朽化した電力網が多く、インフラ整備は十分ではない。そのため、ITを活用しコストを抑えつつ電力供給の信頼性の向上と高機能化、さらに新たな関連ビジネスの創造を目指している。また、ヨーロッパでは、再生可能エネルギーの利用拡大など地球温暖化防止対策の一環としての考え方が強く、イギリスやフランスのようにスマートメーターの導入を義務化している国もある。表 1.2-1 にスマートグリッドの種類および導入目的を示す[20]。

表 1.2-1 スマートグリッドの種類と導入目的

種 類	目 的	該当地域
(1) 供給信頼度強化型	老朽化した電力網の更新 保全コストを抑制しつつ 供給信頼性を向上させる．	アメリカ
(2) 再生可能エネルギー大量導入型	再生可能エネルギーを 積極的に導入する． 低炭素型社会の街づくり	日本 ヨーロッパ
(3) 急成長需要充足	急成長する新興国のエネルギー需要を充足する． 盗電を含む損失の削減を図る．	インド 中国 ブラジル
(4) ゼロベース都市開発型	低炭素型の新都市をゼロベースで構築する． 社会システム一式の輸出	ポルトガル 中国(沿岸部) シンガポール

マイクログリッドとは、複数の小規模な発電施設で発電した電力を特定地域内で利用する仕組みで、分散型電源や分散型電力網と同意である。エネルギー供給源には、再生可能エネルギー(太陽光、風力、バイオマスなど)や燃料電池が利用され、蓄電池も併設されている。これらの発電施設を地域内に作り、更にネットワーク化して連結したものである。再生可能エネルギーは、一般的に出力が不安定であるという欠点があるが、複数の発電機器を利用して電力需要にあわせた最適制御を行うことにより、需要と供給のバランスを調整し、安定的に電力を供給することができる。また、大型発電施設(集中型電源)に比べ、建設費用が安価であり、送電によるエネルギー損失も少ないというメリットがあるが、実用化にはコスト面の課題がある。特に蓄電池が高コストであり、更なる高性能化・長寿命化が求められている[21]。

1.3 エネルギーシステムの従来のデザイン方法

従来型の電力系統は，大型の発電所から長距離送電線を経由して都市のような大消費地に送ることが役割であった．電力会社がすべての需要家に電気を送ることを義務付けられたため，遠距離にある中小の需要地に電力を送るための送電網・配電網が整備された．電力供給の歴史は，1881年(明治14年)にアメリカではじめられた．日本での供給開始は，1883年(明治16年)に民間会社である東京電燈が設立し，1887年(明治20年)に東京都日本橋茅場町に直流発電機を導入した火力発電所が建設され，これを機に続々と電力会社が設立された．当初は，直流送電を行っていたが，その特性から小規模の電力供給システムが主体であった．しかし，需要の増加に伴って，直流送電では供給が追いつかなくなり，1897年(明治30年)にドイツ製交流発電機を導入した浅草火力発電所が建設された．この発電機によって50Hzの交流送電の基礎が築かれた．また，同時期に関西ではアメリカ製交流発電機を導入したことにより交流60Hzの送電電力供給システムとなった．これにより，現在の関東以东では50Hz，以西では60Hzの電力供給システムとなった．これらが現在の集中型電源による発電方式となっているものである[22]．集中型電源とは，電力会社が所有する大型の火力発電所や水力発電所にて大量の電力を発電する方式のことである．集中型電源の特徴は，発電規模が大きいことと，電力の大量消費地から遠方に設置されていることである．火力発電所は大量消費地に近接した場所に設置されている場合も多数あるが，水力発電所や原子力発電所は，大規模設備あるためや事故発生時の被害最小化の観点などから大量消費地から遠方に設置されている．集中型電源の利点と欠点は以下のとおりである[23]．

利点

- ① 発電量が大きい．
- ② 安定して良質の電力を発電できる．
- ③ 分散型電源と比較して発電効率が良い．
- ④ 事故発生時の被害を最小限に抑制することができる．

欠点

- ① 電力の大量消費地から遠方にあるため，送電時損失がある．
- ② 送電設備などの発電所以外の設備投資が必要である．
- ③ 発電時に発生する排熱(廃熱)を分散型電源に比べ，有効活用できない．
- ④ 複数の発電所が発電を停止すると電力の安定供給に支障を来す場合がある．

第二次世界大戦以前には，全国各地に電力会社が設立され，約 470 社余りの電力会社が存在したが，日本が本格的に戦時下に突入するのに伴い，電力供給システムは，国家統制に下におかれ，国策会社である日本発送電株式会社が 1938 年(昭和 13 年)に設立され，1941 年(昭和 16 年)には発電，送電，配電事業のすべてが，国家統制下となった．戦後の 1951 年(昭和 26 年)に日本発送電株式会社は，現在の 9 電力会社(北海道電力，東北電力，北陸電力，東京電力，中部電力，関西電力，中国電力，四国電力，九州電力)に分割され，のちの沖縄電力を含む 10 社の現在の構成となった．

現在の発電方式は，火力発電(石炭)，火力発電(石油)，火力発電(LNG，液化天然ガス)，原子力発電，水力発電，太陽光発電，風力発電の 7 種類がある．日本の電力供給の主事業者である一般電気事業者(前述の電力 10 社)と卸電気事業者(電源開発と日本原子力発電の 2 社)の発電能力は，図 1.3.1-1 に示すように東日本大震災前の 2010 年(平成 22 年)時点において火力発電が約 60%，水力発電が約 20%，原子力発電が約 20%の構成となっている[23]．2011 年(平成 23 年)3 月 11 日の東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響などもあり，現在稼働中の原子力発電所は，九州電力川内原子力発電所 1 号機，2 号機，四国電力伊方原子力発電所 3 号機，関西電力高浜原子力発電所 3 号機，4 号機の 5 基のみである．

2000 年(平成 12 年)4 月からの電力自由化により，特定規模電気事業者(PPS)による電気小売りが可能となったが，現在の PPS は一般電気事業者(電力 10 社)の所有する送電網を用いて託送する形式で需要家に電力を供給している．このため，一般電気事業者の所有する送電網を別の新会社を設立して所有する発送電分離が議論されている．

これは、一般電気事業者も PPS 化することとなり、託送料金を下げ、現在の PPS との平等な価格競争が発生することにより、電気料金の引き下げやメガソーラー(大型太陽光発電)や風力発電などの再生可能エネルギーを利用した新規 PPS の参入を容易にすることとなった。しかし一方で、電力の自由化と発送電分離が進んでいる海外では、電気価格の上昇や大規模停電が発生するなどの電力の安定供給についての課題も出ているのが現状である[23]。

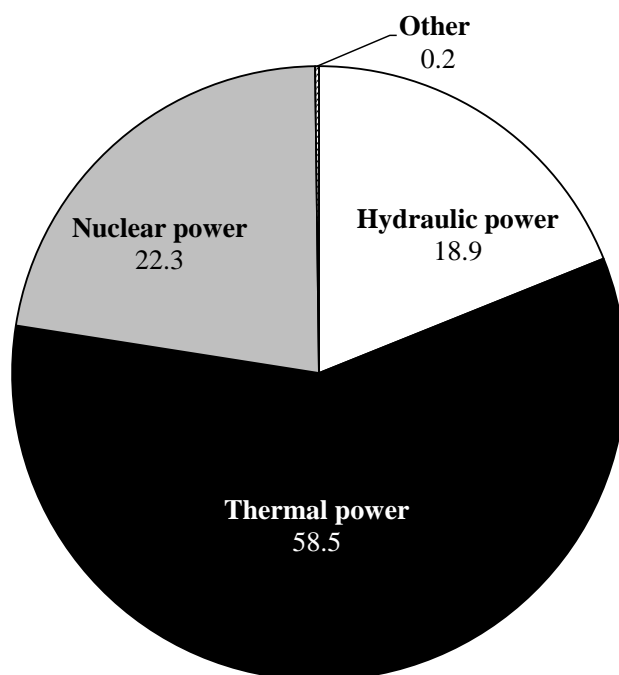


図 1.3.1-1 全国の発電構成(2010 年)

1.4 エネルギーシステムのデザインの課題

都市や地域におけるエネルギーシステムを計画する上で、考慮しなければならない点として、1つは、人が求めるエネルギーへの要求を満たすことができるシステムとすることである。都市や地域において消費されるエネルギーの多くは、知的な生産活動や生活のために利用されている。このため、どのようなエネルギーを、どのくらいの量、どの程度の供給信頼性をもって供給するかという要求性能を明らかにし、それを満たすことができるエネルギーシステムを計画する必要がある。もう1つは環境への影響を極小にできるエネルギーシステムを計画することである。エネルギー消費により発生する環境負荷は、地球温暖化や気候変動を引き起こす要因と考えられる炭酸ガス(CO₂)および窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)などの排出や、都市のヒートアイランド化の要因の1つと考えられる排熱がある。環境の視点から、エネルギーシステムは効率的で、必要とするエネルギー量および排熱量が少なく、炭酸ガスなどの発生量も少ないシステムにする必要がある。そのため、エネルギーの質に合ったエネルギー源によって、適材適所のエネルギー供給を行うシステムの構築が求められる。発電や熱供給のシステムは、規模が大きいほど効率が高い傾向があるため、集中型が望ましいが、製造した電気や熱を需要地まで搬送する過程で、電気は送電損失が、熱は熱損失や運搬動力が問題となり、広範囲に搬送することは不利になる。地域の需要密度が高ければ、この度合いは小さくなるため、熱に比べて電気は広範囲に搬送が可能となっている。一方、地震などの災害時を考慮すると、大規模集中型よりも分散型の拠点を設けて、それらを相互連携した方が有利になるとも考えられる。技術的な進歩により比較的小規模でも高効率のシステムもできており、必ずしもスケールメリットが得られるとはいえない場合もある。これらのことより、地域特性をふまえた適正な計画を行う必要がある。

都市や地域で使用されるエネルギーは電力会社からの電気供給やガス会社からのガス供給であり、供給施設の計画や設計は、電力会社ガス会社に任されていた。エネルギー事業者は需要家に対して平等性、安定供給に努めることが基本的な考えとされてきた。しかし、低炭素地域づくりへの社会的要請や防災的な観点から、太陽光、風力な

どの再生可能エネルギーやごみの排熱の利用，マイクログリッドに代表される分散型電源の導入など需要家に近い地域に存在する未利用エネルギーの活用が求められるようになった．このように，地域の特性を生かし，状況に対応した地域づくりを促進するためには，従来からの電力会社やガス会社に任せるだけではなく，自治体なども含めて考えることが必要である．したがって，地球温暖化や気候変動を軽減する緩和策となる日常の省エネルギーや CO₂ 対策，気候変動に伴う極端気象，生物多様性喪失に伴う災害への脆弱性，地震などの非常時の災害への適応策となる総合的な解を提示することが求められる．さらに，2011 年(平成 23 年)3 月 11 日の東日本大震災での東京電力福島第一原子力発電所の被災をふまえて，都市以外の遠隔地にリスクを負わせず，リスクの高い原子力発電への依存度を小さくするシステムとしなければならない．これらが，これからのエネルギーシステムをデザインする課題となる．そのため，従来の集中型電源から集中型電源と分散型電源の連携への移行や再生可能エネルギーの導入促進などが不可欠である [23]．

第 2 章 研究背景と目的

2.1 研究背景

マイクログリッドのような複合エネルギーシステムでは、安定供給のために複数の多様なエネルギー機器を連系する必要がある。そのため、多様な出力特性を有する複数のエネルギー機器を連系するときの運用最適化の技術が重要となる[24-26]。一般に再生可能エネルギーを伴うマイクログリッドでは、電力および熱を貯蔵して利用する場合が多いため、動的な運用最適化を必要とする。さらに導入するエネルギー機器の入出力特性は線形ではないことが多いため、システムの運用計画では非線形の多変数問題を解く必要がある。

これらの問題を解決するため、エネルギーシステムの運用最適化問題の解析方法としては、共役勾配法による探索、混合整数計画法による線形式近似や遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を用いた方法が開発されている[27-30]。このうち、GA による解析方法は、多変数の非線形問題への導入がしやすく、比較的容易に複雑なエネルギーシステムに適応が可能である[29]。しかしながら、変数を増加させた場合や高い解析精度を要する場合には、GA での染色体モデルの増加と染色体モデルを構成する遺伝子数の増加を伴うことから、非常に長い演算時間を必要とする場合や準最適解しか得られない場合、さらに、エネルギー収支式を満たす解が得られず収束しない場合などが生じる。したがって、従来の GA による解析方法では、同じ条件の解析を繰り返し実行することにより最適解と考えられる解を取得するなどしていた[30]。

2.2 研究の着目点

本研究では、GA を用いた複合エネルギーシステムの運用解析の改善方法として、実験計画法や品質工学（タグチメソッド）の手法である直交表解析と要因効果図の導入について着目した[31-34].

直交表解析は、多変数問題において、複数変数(例えば、3 つの変数 a, b, c)に対して複数の水準(変数 a であれば a_1, a_2, a_3 の 3 つの水準、 b は b_1, b_2, b_3 、 c は c_1, c_2, c_3)を設定して、定められたパターンの実験や解析を行うことにより、1 変数(変数 a)の 1 つの水準(a_1)に対して、他の複数の変数(変数 b や c)の複数の水準(b_1, b_2, b_3 や c_1, c_2, c_3)を積極的にばらつきとして与えた場合の効果の大きさを得ることができ、その結果を基に作成した要因効果図により、効率よく効果的な解析を行うことができる実験方法である[35-39].

2.3 研究目的と意義

本研究の目的は、複雑で大規模な複合エネルギーシステムの運用を解析できるコンピュータアルゴリズムを開発することである。そこで、GA による複合エネルギーシステムの運用解析の改善方法として、GA による探索に先立って、直交表解析と、その解析結果より作成される要因効果図を用いて GA の探索範囲を限定する方法を調査する。これにより、複合エネルギーシステムの最適運用を短時間に高精度で行うものである。すなわち、少ない回数の実験や解析によって、GA での探索範囲を限定した上で、マイクログリッドのような複合エネルギーシステムの運用最適化を行う。

第 3 章 基本技術

3.1 実験計画法および品質工学（タグチメソッド）

一般的な実験方法は、基準となる水準の組合せがあり、他の因子の水準は基準のままで、一つの因子の水準を変えて実験し、それを各々の因子について実験して、各因子の効果をまとめる。しかしながら、基準の水準を使用する方法は、複数の因子の水準を変化させた実験をしないために必ず見逃しが発生する場合がある。一方、実験計画法は、見逃しのない実験条件の組み合わせを用いている[36-40]。

実験計画法とは、実験のための計画の方法（サンプリングの計画方法）と、そのデータの解析方法の 2 段階で構成され、効率のよい実験方法を設計し、結果を適切に解析することを目的とする統計学の応用分野で、1920 年代にイギリスの統計学者であるロナルド・エイルマー・フィッシャーが農学試験から着想して発展させたものである。実験計画法は、対象システムの入力である制御因子の変化に対して出力である特性値がどう変化するかを見る。最適条件は一番望ましい出力が得られる条件となる[35-39]。

一方、品質工学（タグチメソッド）は、技術開発・新製品開発を効率的に行う開発技法で、システムの応答（出力）ではなく、入出力関係の安定性を見る。また、安定性の評価尺度に SN 比（シグナル・ノイズ比、有効信号と有害信号との比）を用い、最適条件は応答（出力）ではなく、一番安定性のよい条件となる[35-39]。

実験計画法と品質工学は、共に後述する直交表を使用しているが、使用目的が異なる。実験計画法では制御因子を直交表に割り付けて出力に大きく影響する因子を探し出し、最適条件を見つけるため、効率的に応答（出力）を研究する手段として直交表が用いられる。一方、品質工学では SN 比の一番よい条件を効率的に探すという点では実験計画法と同様であるが、採用した SN 比の妥当性も併せて確認する。直交表実験における現行条件と最適条件による確認実験の利得の再現性が悪い場合や、制御因子の効果を示す要因効果図が山型や谷型になる場合には、制御因子の水準の取り方だけでなく、採用している SN 比の良否を検討する必要がある、そのような検討の必要性を

確認するのが品質工学となる[35-39].

3.1.1 直交表

直交表とは，少ない実験で要因効果が得られる方法である[31-33]. 工業実験等で成果を上げるには，より多くの因子を扱うと有効であるが，すべての組み合わせでは膨大な数の実験することとなるため，一部の組み合わせを実験して統計的に要因効果を評価する．代表的な直交表として，本研究でも採用した $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表を表 3.1.1-1 に示し，説明する．なお，直交表には 2 水準直交表と 3 水準直交表があるが， $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表は混合型直交表と呼ばれ，交互作用が少ないことが特徴である．

8 つの因子のうち，1 つの因子が 2 水準，残りの 7 つの因子が 3 水準である場合，すべての組み合わせは $2^1 \times 3^7 = 4734$ 通りで，膨大な数となる．しかし， $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表は，4734 通りの中の一部である 18 通りを実行し，統計的に要因効果を評価する．

2 水準の A 列と 3 水準の他の 7 列(B から H 列)のいずれか 1 列の 2 列を見ると，(1, 1)(1, 2)(1, 3)(2, 1)(2, 2)(2, 3)の 6 個の組み合わせがそれぞれ 3 回現れ，同じ回数の実験が行われたこととなる．また，2 水準の A 列以外の他の 7 列(B から H 列)のいずれか 2 列を見ると，(1, 1)(1, 2)(1, 3)(2, 1)(2, 2)(2, 3)(3, 1)(3, 2)(3, 3)の 9 個の組み合わせがそれぞれ 2 回現れ，同じ回数の実験が行われたこととなる[35-39].

3.1.2 要因効果図

要因効果図とは，直交表解析を実施した後に作成する各パラメータの水準別の平均的な効果の示す図である．本研究で採用した $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表を解析に用いた場合の要因効果図を図 3.1.1-1 に示す．この図では L_{18} 直交表を用いた実験により得られた 18 個のデータを用いて，各パラメータの水準ごとの効果の大きさを表している．例えば，A 列では 2 つの水準（水準 1 と水準 2）であるため，それぞれの水準の平均的な効果を得るためには，水準 1 の場合は実験番号 ex1 から ex9 のデータから，水準 2 の場合は実験番号 ex10 から ex18 のデータから平均値を算出することにより得られる．同じく B 列の場合で

は 3 つの水準（水準 1，水準 2，水準 3）であるため，水準 1 の場合は実験番号 *ex1*, *ex2*, *ex3*, *ex10*, *ex11*, *ex12* のデータから，水準 2 の場合は実験番号 *ex4*, *ex5*, *ex6*, *ex13*, *ex14*, *ex15* のデータから，水準 3 の場合は実験番号 *ex7*, *ex8*, *ex9*, *ex16*, *ex17*, *ex18* のデータから平均値を算出することによりえられる[35-39].

表 3.1.1-1 $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表

		Row number (Design parameter)							
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
Experiment number	<i>ex1</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>ex2</i>	1	1	2	2	2	2	2	2
	<i>ex3</i>	1	1	3	3	3	3	3	3
	<i>ex4</i>	1	2	1	1	2	2	3	3
	<i>ex5</i>	1	2	2	2	3	3	1	1
	<i>ex6</i>	1	2	3	3	1	1	2	2
	<i>ex7</i>	1	3	1	2	1	3	2	3
	<i>ex8</i>	1	3	2	3	2	1	3	1
	<i>ex9</i>	1	3	3	1	3	2	1	2
	<i>ex10</i>	2	1	1	3	3	2	2	1
	<i>ex11</i>	2	1	2	1	1	3	3	2
	<i>ex12</i>	2	1	3	2	2	1	1	3
	<i>ex13</i>	2	2	1	2	3	1	3	2
	<i>ex14</i>	2	2	2	3	1	2	1	3
	<i>ex15</i>	2	2	3	1	2	3	2	1
	<i>ex16</i>	2	3	1	3	2	3	1	2
	<i>ex17</i>	2	3	2	1	3	1	2	3
	<i>ex18</i>	2	3	3	2	1	2	3	1

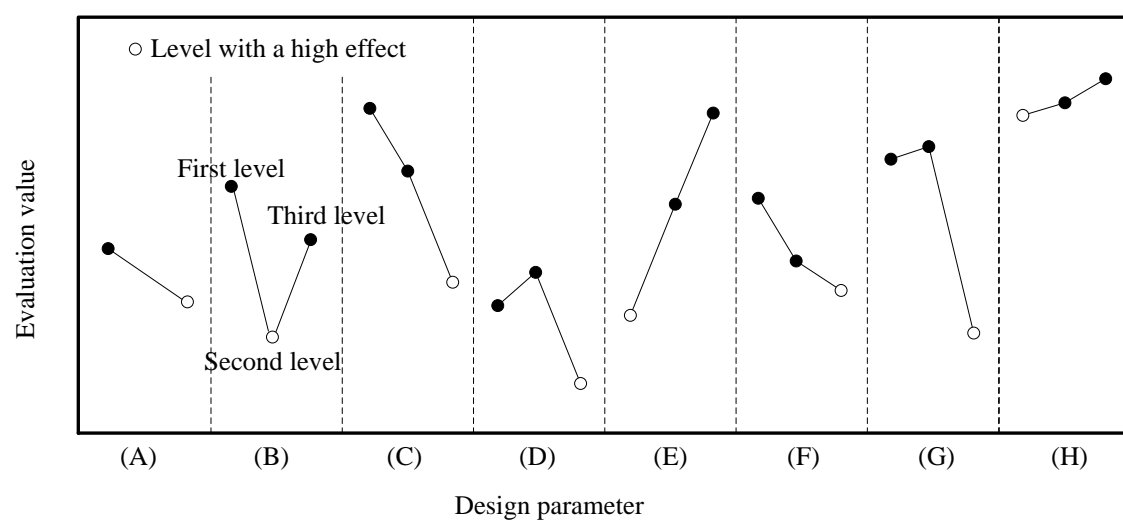


图 3.1.1-1 要因效果图

3.2 遺伝的アルゴリズム(GA)

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)は, Charles Robert Darwin の進化論をモチーフにし, 1975 年にミシガン大学の John Henry Holland により提案された生物界の進化の仕組みを工学的に模倣し, 近似解を探索するメタヒューリスティックアルゴリズムで, 4 つの主要な進化的アルゴリズムの一つであり, その中でも最も一般的に使用されている[40-44].

自然界における生物の進化過程では, ある世代を形成している個体の集合の中で環境に適応した個体が高い確率で生き残り, 次の世代に子を残す. このメカニズムをモデル化し, 環境に対して最もよく適応した個体, すなわち目的関数に対して最適値を与えるような解を求めようというのが GA の概念である.

GA では, 個体は設計変数の値がコーディングされた染色体と呼ばれる文字列上で表現され, この染色体をデコーディングすることにより設計変数を読み出し, 目的関数の値を計算する. このとき, 染色体の構造のことを遺伝子型, これによって定まる個体の形質を表現型と呼ぶ. また, 個体の集団のことを母集団と呼ぶ. GA はこの母集団に対して選択, 交叉, 突然変異などの遺伝的操作を繰り返し行うことによって解探索を行う. 図 3.1.1-2 に一般的な GA のフローチャートを示す.

Goldberg によれば, GA は従来の最適化手法と比較して次の 4 つの特徴を持つとされている. ①設計変数を直接操作せずにコード化した状態で扱う. ②一点探索ではなく, 多点探索である. ③サンプリングによる探索で, ブラインドサーチである. ④決定論的規則ではなく, 確率的オペレータを用いる探索である

また, GA の長所と短所[45]としては,

- 長所
- ① 実用時間内に比較的優れた解を求めることができる.
 - ② 幅広い応用範囲を持っており, さまざまな問題に適応できる.
 - ③ 多点探索アルゴリズムのため, 関数の連続性の影響を受けにくい.

短所 ① パラメータやコーディングに対する一般的な規範がない。
② 問題に適用する一般的な方法が存在しない。
が挙げられる。

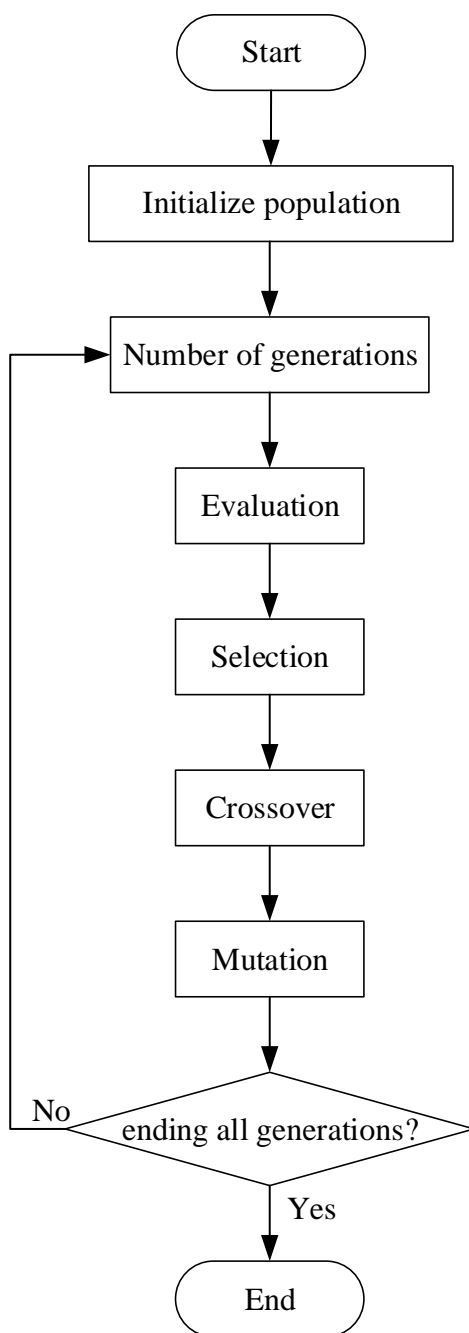


図 3.1.1-2 一般的な従来の単純 GA のフローチャート

第 4 章 GA によるエネルギーシステムのデザイン

4.1 複合エネルギーシステムの最適化における課題

マイクログリッドのような複合エネルギーシステムの最適化問題では、エネルギーシステムを構成する複数の各種機器容量の最適化とエネルギーシステム全体の運用計画の最適化という 2 種類の最適化問題を同時に考える必要がある。これらは独立した問題ではなく、エネルギーシステムに使用される複数の各種機器の特性(性能)を介して、互いに密接な関係にあるため、それぞれを単独で解析することはできない。そのため、エネルギーシステムを構成する複数の各種機器容量とエネルギーシステム全体の運用計画の 2 つの最適化問題を結び付け、同時に最適化を図る必要がある[46]。

4.2 複合エネルギーシステムへの GA の適用

遺伝的アルゴリズム(GA)は、最適化問題を生物の進化の過程に模倣した方法によって解く組合せ最適化手法の 1 つであり、エネルギーシステムのような変数の組合せが膨大な量で、すべての組合せを網羅して検討・比較することが不可能または困難な問題に対して、最適解や、その近傍の準最適解を効率的に広範囲にわたって探索する能力に優れている。GA では最適解候補となる組合せを個体と呼び、生物とみなしている。生物の進化と同様に、個体情報は染色体と呼ばれる記号列により記述されている。GA では、各個体の染色体に対して選択、交叉、突然変異などの操作を行い、変数の組合せを変更して、それぞれの組合せにおける解析解の適合度(目的関数への適合度)を評価する。1 世代目の個体群の中で適合度の高い個体は、生き延びて次世代へ個体情報(染色体情報)を残し、逆に適合度の低い個体は淘汰されていく。これらの操作を適切な世代数だけ繰り返し、探索した全ての個体の中で最も適合度が高い個体が最適個体となり、その染色体情報(変数の組合せ)が探索範囲内の最適解となる。GA は効率よく解が探索できるが、探索した全ての個体の中で最も適合度が高い個体であるだけなので、通常の GA では反復実行による数多くの探索計算を必要とする。また、その解の周辺では最適解であるが、広範囲で

見ると最適解ではない部分的最適解(局所解)に陥る場合もある．GAを適用したエネルギーシステムの解析では，このような問題を解決するためには，GA解析の反復実行により最適解や最適解近傍の準最適解を得ている[46]．

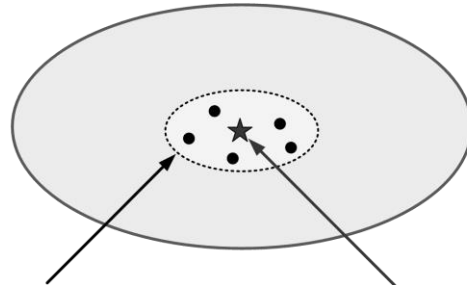
第 5 章 直交表－GA ハイブリッド解析法の基礎

5.1 直交表－GA ハイブリッド解析法のねらい

従来の GA 解析と直交表－GA ハイブリッド解析法の違いを図 5.1-1 に示す．エネルギーシステムの分散化は，送電損失の低減，排熱の有効利用，自然エネルギーの利用促進を拡大すると考えられるが，再生可能エネルギーを伴うエネルギーシステムの安定供給には，複数のエネルギー装置を組み合わせる必要がある．最近では，マイクログリッドによる分散エネルギーのネットワーク化が広く研究されており[47-49]，さらにマイクログリッドは様々な付加価値を伴うスマートグリッドへの進化が期待されている[24-26]．そこで，多様な出力特性を伴うエネルギー装置のネットワーク化を考慮した，複合エネルギーシステムの運用最適化の技術が重要となる．一般に，再生可能エネルギーを伴うシステムでは蓄電と蓄熱を伴う例が多いことから，動的な運用最適化を要する．さらに，エネルギー機器の入出力特性は非線形であるので，複合エネルギーシステムの運用計画では，非線形の変数問題を解く必要がある．エネルギーシステムの運用最適化問題の解析方法としては，これまでに共役勾配法や，整数計画法，遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた技術が開発されている[27-30]．このうち GA による解析方法は，変数の非線形問題に導入しやすく，比較的容易に複雑なエネルギーシステムに適応可能である[29]．しかしながら，変数を増加させた場合や高い解析精度を求める場合には，GA での染色体モデルの増加と，染色体を構成する遺伝子モデルの増加を伴うことから，非常に長い演算時間を要する．また，上述の場合には，評価関数（適応度）の値が近い多くの準最適解が得られることもある．したがって従来の GA を用いた解析方法では，同じ条件の解析を何度も繰り返すことで最適解と考えられる解を得るなどしていた[31]．本研究の目的は，複数の設計パラメータを伴う複合エネルギーシステムの運用を，GA によって高精度で計画するためのコンピュータアルゴリズムを開発することである．そこで，直交表－GA ハイブリッド解析法は，最初に実験計画法のテクニックとして知られている直交表と要因効果図[31-34]を導入して，複合エネルギーシス

テムの運用最適解に近いと考えられる運用方法を得る．次に，前述の運用方法を初期値として GA に与えてから最適運用方法を探索する．これにより，GA では最適解に近い運用領域を主に探索することから，従来方法に比べて効率良く最適運用と考えられる解を得ることができる．

Wide analysis range of
every design parameter by GA



Suboptimal solutions

Optimal solution

Conventional GA analysis method

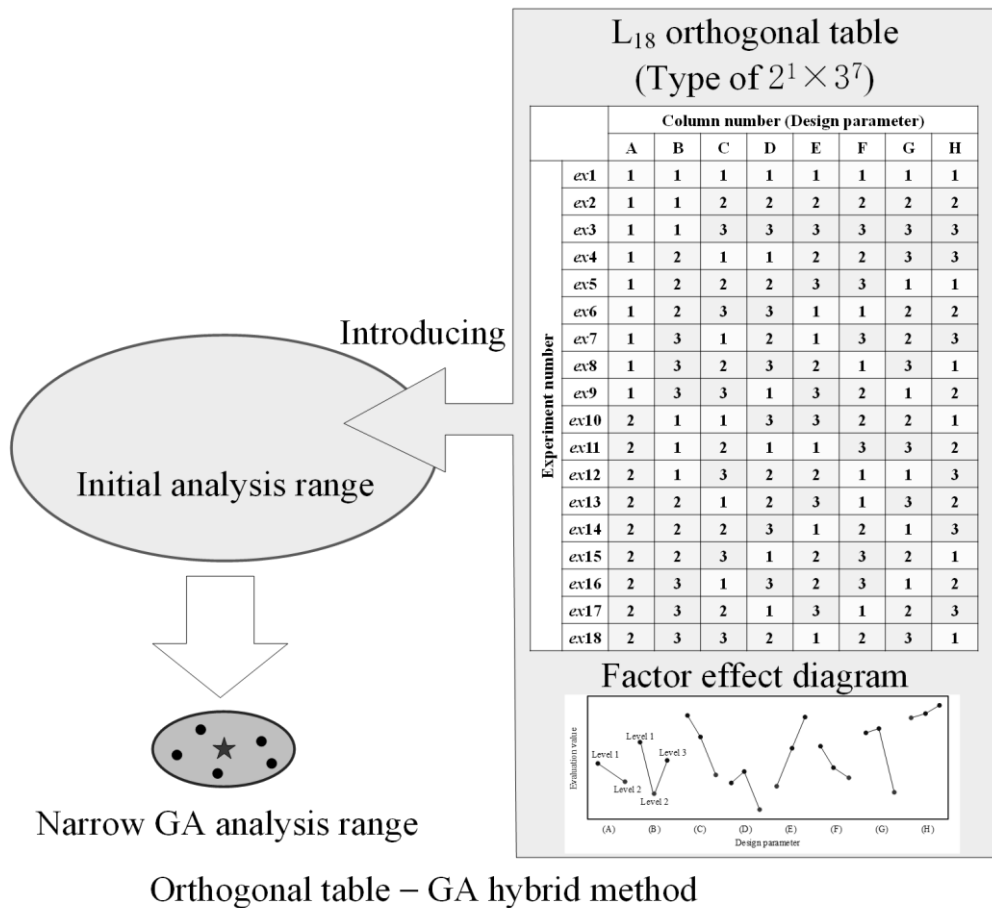


図 5.1-1 従来の GA 解析と直交表 – GA ハイブリッド解析法

5.2 解析に用いる複合エネルギーシステム

図 5.2-1 に本研究の解析に用いる複合エネルギーシステムを示す。札幌市の 30 住宅に電力及び熱を供給する、自然エネルギーを伴う独立マイクログリッドの概要である。このシステムは、電力グリッドと熱グリッド（温水）からなり、発電機器である燃料電池（固体酸化物形燃料電池（SOFC）と固体高分子膜形燃料電池（PEFC））またはガスエンジン発電機、太陽光発電、電力変換装置(1)と(2)、ヒートポンプ、バッテリー、蓄熱槽で構成される。ただし、図中の機器 A 部は、発電機器により電力変換装置(1)の構成が異なるため、図 4.2-2 に示す。発電機器に天然ガス（CH₄）を供給すると、電力変換装置(1)から電力グリッドに交流電力（200V, 50Hz を想定）が出力される。また、天然ガスの供給量を調整することにより発電機器の出力は変更できる。ただし、発電機器の発電効率は負荷率に依存するため、本研究では、発電機器の電力および熱の出力特性の実験値を導入する[50-52]。これにより発電機器の容量によらずに負荷率から電力および熱（排熱）の出力割合を得ることができる。一方、太陽光発電による電力は、電力変換装置(2)から電力グリッドへと供給される。発電機器と太陽光発電の電力は、バッテリーに蓄えることができる。また、燃料電池と連結した電力変換装置(1)と太陽光発電と連結した電力変換装置(2)のそれぞれにインバータ（DC-AC コンバータ）があるため、電力変換装置(1)のインバータをマスターインバータ、電力変換装置(2)のインバータをスレーブ機として、交流電力の周波数を制御している。ただし、2つの電力機器は、慣性力を持たないため、周波数変動が調整できないほど大きくなった場合は、補償電源として慣性力の大きい発電機または外部電源（商用電力）を導入することも想定している。解析では電力変換装置(1)と(2)、およびバッテリーの充放電の損失について考慮する。システムの熱源は、発電機器の排熱と空気熱源ヒートポンプの熱である。また、発電機器の排熱を蓄熱槽に蓄えることで時間をずらして需要側に供給することもできるが、蓄熱槽の運用には放熱を伴うためこの損失についても解析では考慮する。

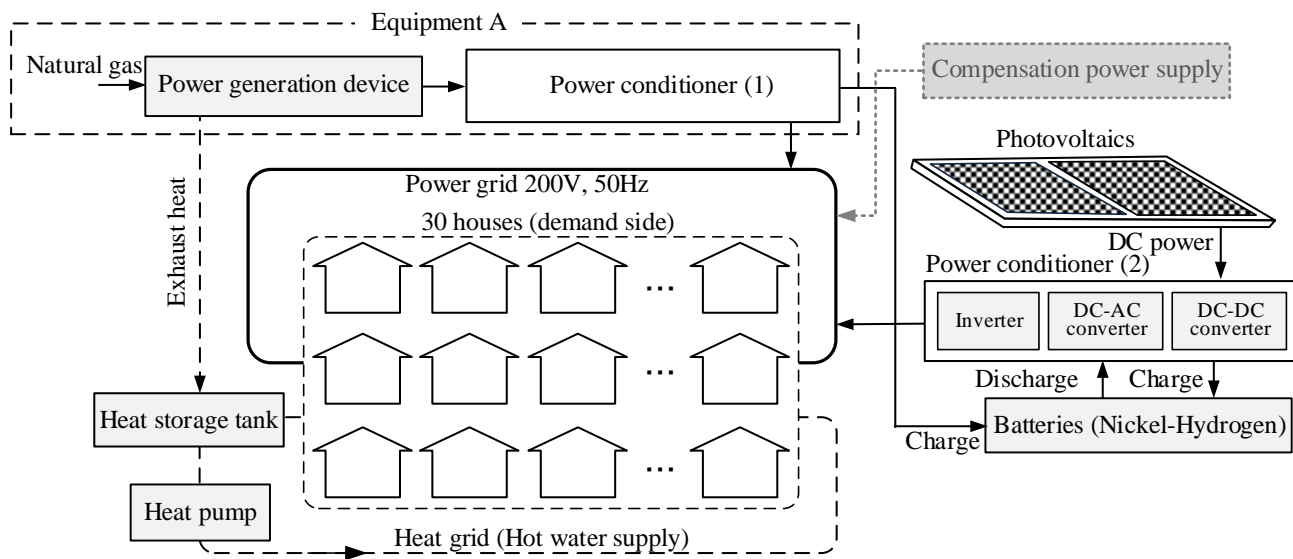


図 5.2-1 解析システムの構成

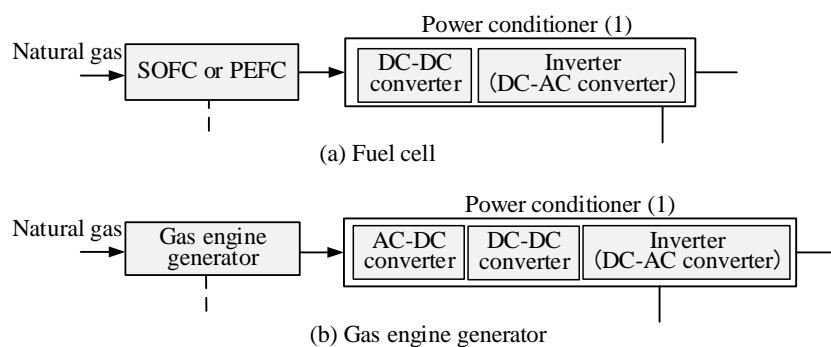


図 5.2-2 発電機器の構成

5.3 直交表－GA ハイブリッド解析法の解析フロー

5.3.1 染色体モデル

エネルギーシステムの電力および熱の入出力の関係を、式(5.3.1)及び式(5.3.2)に示す。ただし、両式の左辺はサンプリング時刻 t での電力または熱の供給項で、右辺は電力または熱の消費に関する項である。一方、両式の右辺の第 1 項は、電力及び熱の需要量である。式(5.3.1)の左辺は、例えばエンジン発電機、燃料電池、太陽電池などの発電機器による電力出力を想定しており、この際の発電機器の総数を M 台とする。また、式(5.3.2)の左辺は、ボイラ、ヒートポンプ、エンジン発電機や燃料電池などの排熱、太陽熱などの熱機器による熱出力を想定しており、この際の発電機器の総数を N 台とする。式(5.3.1)および式(5.3.2)の右辺第 2 項は、総数 I 台及び J 台の機器による電力及び熱の消費量である。蓄電と蓄熱での、エネルギーを蓄える項は各式の右辺第 2 項に含み、エネルギーを放出する項は両式の左辺に含む。

$$\sum_{m=1}^M p_{m,t} = p_{needs,t} + \sum_{i=1}^I \Delta p_{i,t} \quad (5.3.1)$$

$$\sum_{n=1}^N h_{n,t} = h_{needs,t} + \sum_{j=1}^J \Delta h_{j,t} \quad (5.3.2)$$

この際に代表日の電力需要 $p_{needs,t}$ と熱需要 $h_{needs,t}$ は既知であるとして、式(5.3.1)及び式(5.3.2)中の $p_{m,t}$ 及び $h_{n,t}$ を、図 5.3.1-1 に示す構造を持つ染色体モデルで表す。図 5.3.1-1 の染色体モデルは、 t での各発電及び熱機器の出力 $p_{n_{cr},m,t}$ 、 $h_{n_{cr},n,t}$ を表す。ここで、 n_{cr} は染色体番号、 m 及び n は発電機器及び熱機器の番号である。図中の破線で囲んだ部分は 1 つの染色体に含まれる遺伝子情報である。遺伝子は $p_{n_{cr},m,t}$ または $h_{n_{cr},n,t}$ の情報で表記され、1 個の染色体の情報は、エネルギーシステムの代表日での運用方法を表す。

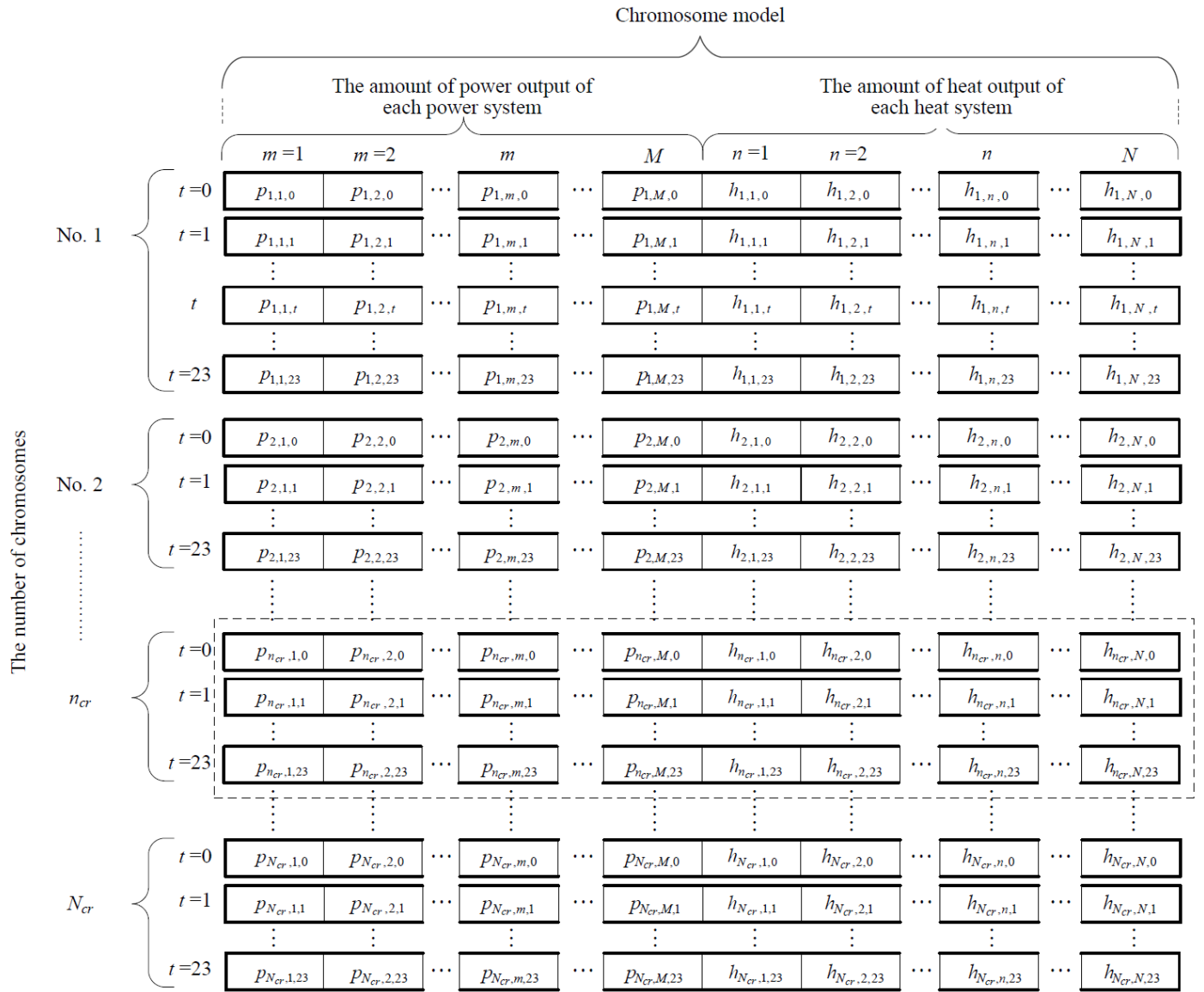


図 5.3.1-1 染色体モデル

5.3.2 目的関数（適応度）

式(5.3.3)にエネルギーシステムの目的関数を示す．式(3)では，設備費，燃料費，環境負荷，維持費を考慮しており，各項をコスト（日本円）で表している．

$$\begin{aligned}
 F_{obj} = & \alpha_1 \cdot \left(\sum_{m=1}^M C_m + \sum_{n=1}^N C_n \right) + \sum_{mh=1}^{12} \left\{ \alpha_2 \cdot \lambda \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\theta_p \cdot \sum_{m=1}^M f_{m,mh,t} + \theta_h \cdot \sum_{n=1}^N f_{n,mh,t} \right) \right. \\
 & \left. + \alpha_3 \cdot \lambda \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(\varphi_p \cdot \sum_{m=1}^M f_{m,mh,t} + \varphi_h \cdot \sum_{n=1}^N f_{n,mh,t} \right) \right\} + \alpha_4 \cdot \lambda \cdot C_k
 \end{aligned} \tag{5.3.3}$$

ここで，式中の α_1 ， α_2 ， α_3 ， α_4 は重み係数で， λ は運転期間， C_m ， C_n ， C_k は発電機器の設備費，熱機器の設備費，システムを 1 年維持するのに要するコストである．また， θ_p と θ_h は発電機器及び熱機器の燃料単価， f_m と f_n は各燃料消費量である．式(5.3.3)の右辺第 2 項括弧内の第 2 項は，システムの環境負荷に関するコストを表すが， φ_p と φ_h は，発電機器及び熱機器による温室効果ガス排出に伴う単価である．

一方，エネルギーシステムを簡単に評価する方法として，式(5.3.4)に示す償却年数 λ_{year} の計算が広く使われている．ただし θ_{conv} と f_{conv} は，従来のエネルギーシステムなどの比較するシステムで消費する燃料の単価と燃料量である．

$$\lambda_{year} = \left(\sum_{m=1}^M C_m + \sum_{n=1}^N C_n \right) / \sum_{mh=1}^{12} \left[\sum_{t=1}^{24} \left\{ \theta_{conv} \cdot f_{conv,mh,t} - \left(\theta_p \cdot \sum_{m=1}^M f_{m,mh,t} + \theta_h \cdot \sum_{n=1}^N f_{n,mh,t} \right) \right\} \right] \tag{5.3.4}$$

5.3.3 解析フロー

図 5.3.3-1 に GA を用いたエネルギーシステムの運用最適化の解析フローを示す．最初に，5.3.1 節で述べた N_{cr} 個の染色体モデルをコンピュータ内でランダムに多数発生する（図 5.3.3-1 中の(a)部）．これらの染色体モデルを解読することで，各発電機器及び熱機器から出力する電力及び熱が決まる（同(b)部）．これらの値から，各機器の負荷率，排熱量，発電効率，熱出力効率を得ることができる（同(c)部）．次に，電力の収支式(5.3.1)に各値を導入して（同(d)部），蓄電池への電力貯蔵もしくは蓄電池からの電力出力量を計算する（同(e)部）．熱については，熱収支式(5.3.2)に染色体モデルを解読して得られた各熱機器の熱出力量と，発電機器の排熱量を与えることで（同(f)部），蓄熱槽での蓄熱量もしくは蓄熱槽からの熱出力量を計算する（同(g)部）．(b)部から(g)部の計算を代表日のサンプリング時刻毎に繰り返して計算し（同(h)部）．代表日各時刻での機器の運用方法を決定する．さらに(b)から(h)の計算をすべての染色体モデル数繰り返し（同(i)部），各染色体モデルの適応度（式(5.3.3)）を計算する（同(j)部）．適応度をより満たす順番に染色体モデルを順位付けして（同(k)部），適応度の低い染色体モデルを淘汰して適応度の高い染色体モデルを増殖させる（同(l)部）．さらに， N_{cr} 個の染色体モデルに多様性を持たせるために，予め与えた確率の下でランダムに染色体モデルを抽出して，交叉および突然変異の遺伝子操作を加える（同(m)部）．(a)部から(n)部の計算を，あらかじめ予め与えた世代数繰り返して，最終世代の染色体モデルのうちで最も適応度の高い個体を最適解と決める（同(o)部）．

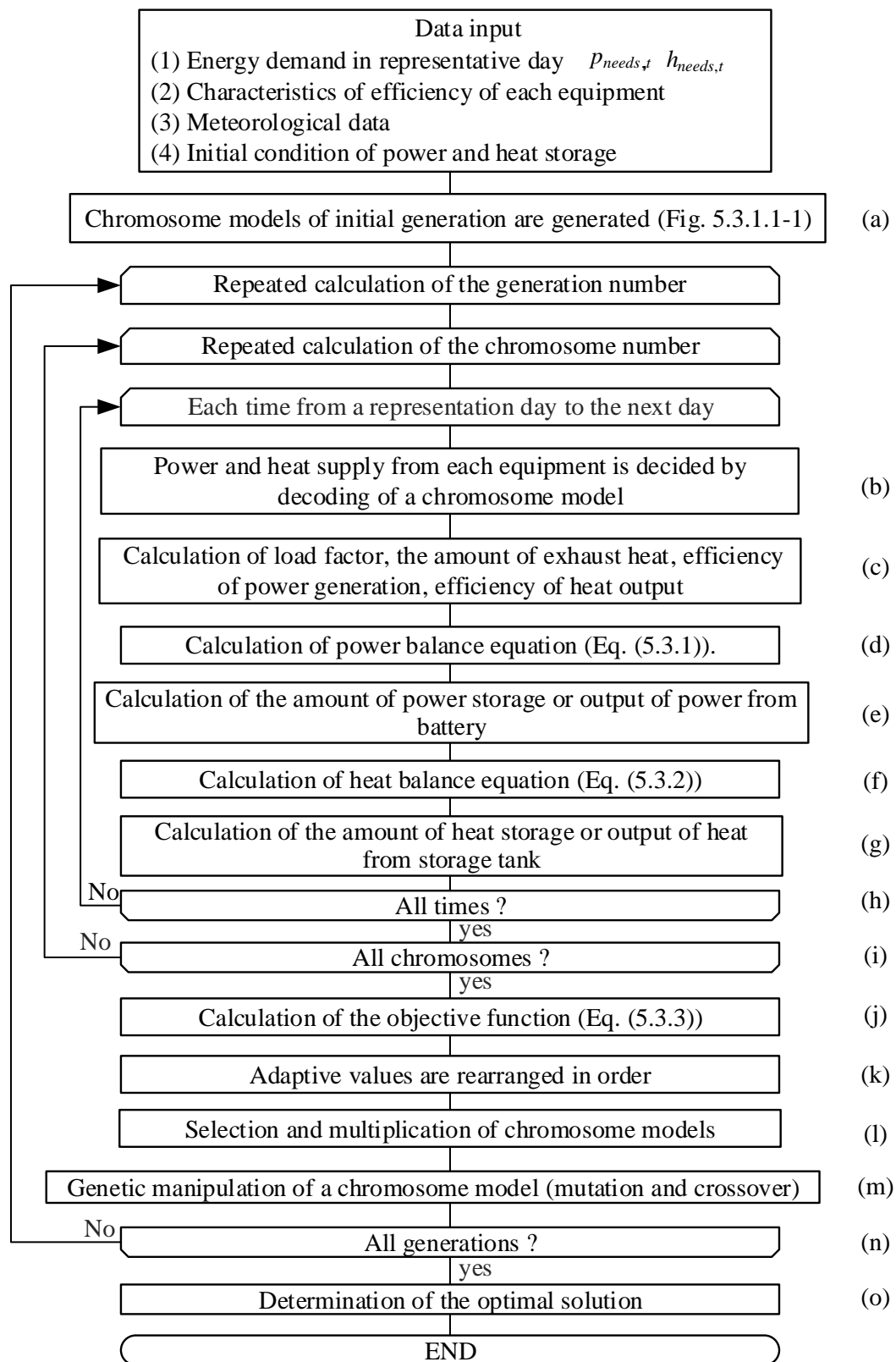


図 5.3.3-1 単純 GA を用いた代表日でのエネルギーシステム運用最適化に関する従来の解析フロー

5.3.4 直交表の導入

実験計画法では、実験を効率的に行うことを目的としており、直交表の導入によってすべての設計パラメータ（因子）の組み合わせについて試行しなくても、各設計パラメータの効果を調査することができる。直交表の列に記載した設計パラメータ間の相関関係はゼロである。すなわち、直交表では設計パラメータ間の関係は直交（独立）するように配置される。従って、直交表の各列を集計することで、それぞれの設計パラメータの効果を独立に評価することができる。直交表を導入すると、試行回数を大幅に減らせることができる。例えば 8 個の設計パラメータがあり、そのうちの 1 つの設計パラメータが 2 つの設計値（実験計画法では水準と呼ぶ）をとり、7 つの設計パラメータが 3 つの設計値をとるものとする。この場合に総当たりの試行回数は、 $2^1 \times 3^7 = 4374$ 通りである。一方、実験計画法で使われる直交表のタイプはさまざまであるが、例えば L_{18} 直交表（表 4.3.4-1）を用いると、8 設計パラメータ（図中の(A)から(H)）での試行回数は 18 通り（ex1 から ex18）で済むこととなる。

表 5.3.4-1 L_{18} 直交表

		Row number (Design parameter)								Calculation results of system fuel consumption			
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	t1	t2	.....	t24
Experiment number	ex1	1	1	1	1	1	1	1	1	$f_{e1,t1}$	$f_{e1,t2}$	.....	$f_{e1,t24}$
	ex2	1	1	2	2	2	2	2	2	$f_{e2,t1}$	$f_{e2,t2}$	.....	$f_{e2,t24}$
	ex3	1	1	3	3	3	3	3	3	$f_{e3,t1}$	$f_{e3,t2}$	.....	$f_{e3,t24}$
	ex4	1	2	1	1	2	2	3	3	$f_{e4,t1}$	$f_{e4,t2}$	.....	$f_{e4,t24}$
	ex5	1	2	2	2	3	3	1	1	$f_{e5,t1}$	$f_{e5,t2}$	.....	$f_{e5,t24}$
	ex6	1	2	3	3	1	1	2	2	$f_{e6,t1}$	$f_{e6,t2}$	.....	$f_{e6,t24}$
	ex7	1	3	1	2	1	3	2	3	$f_{e7,t1}$	$f_{e7,t2}$	.....	$f_{e7,t24}$
	ex8	1	3	2	3	2	1	3	1	$f_{e8,t1}$	$f_{e8,t2}$	.....	$f_{e8,t24}$
	ex9	1	3	3	1	3	2	1	2	$f_{e9,t1}$	$f_{e9,t2}$	.....	$f_{e9,t24}$
	ex10	2	1	1	3	3	2	2	1	$f_{e10,t1}$	$f_{e10,t2}$	.....	$f_{e10,t24}$
	ex11	2	1	2	1	1	3	3	2	$f_{e11,t1}$	$f_{e11,t2}$	.....	$f_{e11,t24}$
	ex12	2	1	3	2	2	1	1	3	$f_{e12,t1}$	$f_{e12,t2}$	.....	$f_{e12,t24}$
	ex13	2	2	1	2	3	1	3	2	$f_{e13,t1}$	$f_{e13,t2}$	.....	$f_{e13,t24}$
	ex14	2	2	2	3	1	2	1	3	$f_{e14,t1}$	$f_{e14,t2}$	.....	$f_{e14,t24}$
	ex15	2	2	3	1	2	3	2	1	$f_{e15,t1}$	$f_{e15,t2}$	.....	$f_{e15,t24}$
	ex16	2	3	1	3	2	3	1	2	$f_{e16,t1}$	$f_{e16,t2}$	.....	$f_{e16,t24}$
	ex17	2	3	2	1	3	1	2	3	$f_{e17,t1}$	$f_{e17,t2}$	.....	$f_{e17,t24}$
	ex18	2	3	3	2	1	2	3	1	$f_{e18,t1}$	$f_{e18,t2}$	.....	$f_{e18,t24}$

5.3.5 直交表と設計パラメータの水準

表 5.3.4-1 に示した直交表中には 1 から 3 までの数字が記述されているが、これは設計パラメータの水準を表す。また、表 5.3.5-1 はパラメータ 1 からパラメータ 8 までの各水準（水準 1，水準 2，水準 3）の値（ x ）を記述した水準表である。水準表はあらかじめ作成しておく必要がある。例えば、パラメータ 2 の各水準値 $x_{p2,1}$ ， $x_{p2,2}$ ， $x_{p2,3}$ を決める場合には、パラメータ 2 で許される最小値と最大値をそれぞれ $x_{p2,1}$ と $x_{p2,3}$ として、その中間値を $x_{p2,2}$ に設定する。しかしながら何らかの理由がある場合は、 $x_{p2,1}$ と $x_{p2,3}$ をパラメータ 2 の取り得る範囲内で設定して、 $x_{p2,2}$ をそれらの中間値に設定してもかまわない。 $x_{p2,1}$ から $x_{p2,3}$ の範囲外に最適解がある場合でも、GA による解析ではこうした範囲外の領域についても自動的に探索を行う。この理由は、GA ではより目的関数を満たす解が出現すると、パラメータの範囲にとられずにその解に近い値を持つ染色体を増殖させるためである。

表 5.3.5-1 各設計パラメータの水準

Design Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
(A) Parameter 1	$x_{p1, 1}$	$x_{p1, 2}$	
(B) Parameter 2	$x_{p2, 1}$	$x_{p2, 2}$	$x_{p2, 3}$
(C) Parameter 3	$x_{p3, 1}$	$x_{p3, 2}$	$x_{p3, 3}$
(D) Parameter 4	$x_{p4, 1}$	$x_{p4, 2}$	$x_{p4, 3}$
(E) Parameter 5	$x_{p5, 1}$	$x_{p5, 2}$	$x_{p5, 3}$
(F) Parameter 6	$x_{p6, 1}$	$x_{p6, 2}$	$x_{p6, 3}$
(G) Parameter 7	$x_{p7, 1}$	$x_{p7, 2}$	$x_{p7, 3}$
(H) Parameter 8	$x_{p8, 1}$	$x_{p8, 2}$	$x_{p8, 3}$

5.3.6 直交表による設計パラメータの評価

直交表による各設計パラメータ(A)から(H)の評価は、図 5.3.4-1 の右側の列にあるサンプリング時刻 t_1 から t_{24} での評価値 f_{ek,t_1} から $f_{ek,t_{24}}$ (ただし、添え字 k は試行番号で、 $k=1, 2, \dots, 18$ である) の合計値 f_{ek} で比較する。ここでは評価値として、式(5.3.3)で示した目的関数中の燃料費の項を用いることとして、式(5.3.5)で計算する。

$$f_{ek} = \sum_{t=1}^{24} f_{ek,t} = \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{m=1}^M f_{m,t} + \sum_{n=1}^N f_{n,t} \right) \quad (5.3.5)$$

本研究ではエネルギーシステムの運用最適化の解析について、最初に実験計画法による直交表と要因効果図を用いて設計パラメータの効果を調査し、最適解に近いと考えられる各機器の出力を決める。次に上で決めた各機器の出力を、GA による運用最適化プログラム (図 5.3.3-1) の初期値として導入して詳細に最適解を探索する。この結果、GA の探索範囲が最適値付近に集中するため、解析効率は大幅に上昇するものと予想される。

5.3.7 要因効果図を用いた GA の初期値の決定

直交表 (図 5.3.4-1) 中の (A) から (H) の各設計パラメータの水準値を使って, 実験 $ex1$ から $ex18$ の評価値 f_{ek} ($k=1, 2, \dots, 18$) を式 (5.3.5) から計算する. さらに, 設計パラメータ pl の水準値 ls の評価値の平均を $\overline{f_{pr,ls}}$ とする. これは例えば, 設計パラメータ (B) の第 2 水準の平均評価値 $\overline{f_{(B),2}}$ は, 表の実験番号 $ex4, ex5, ex6, ex13, ex14, ex15$ の評価値 $f_{e4}, f_{e5}, f_{e6}, f_{e13}, f_{e14}, f_{e15}$ の平均値である. この結果から, 例として図 5.3.7-1 に示す要因効果図が得られたとする. $\overline{f_{pr,ls}}$ が小さい値ほどより目的関数を満たす場合には, 設計パラメータ (A) から (H) で最適解に近いと考えられる水準は, 図中の白丸の値を用いた場合である. 上で述べた最適解に近いと考えられる水準を, 以下に効果の高い水準と述べる. 図 5.3.7-1 の場合では, 設計パラメータ (A) と (B) については表 5.3.5-1 中の第 2 水準 (即ち中間値付近) に, (C), (D), (F), (G) については第 3 水準 (即ち最大値付近) に, (E) と (H) については第 1 水準 (即ち最小値付近) に最適解を満たす値があると考えられる. そこで本研究では, 5.3.3 節で述べた GA の初期値として, 上で述べた効果の高いと考えられる各水準値を与えることとする.

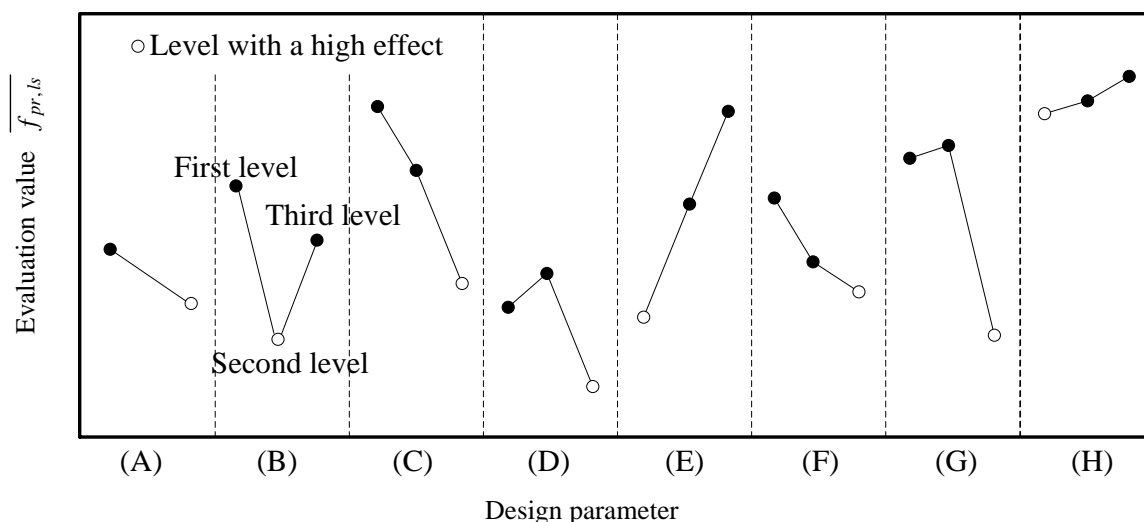


図 5.3.7-1 要因効果図

5.4 システムのエネルギー収支

5.4.1 エネルギー収支式

式(5.4.1)から(5.4.4)は，図 5.2-1，5.2-2 に示したマイクログリッドの電力および熱の収支式である．各式の左辺と右辺は，それぞれ入力項と出力項を表す．それぞれの式の右辺の $E_{need,t}$ と $H_{need,t}$ は電力および熱需要で，本研究では 4.5 節 解析条件に示す 2 月(冬)の札幌市の平均的な住宅に適応される負荷パターンを用いる[53]．電力負荷には，電灯と家電が含まれる．一方，熱負荷には，暖房負荷，給湯負荷，浴槽の温水が含まれる．電力変換装置(1)の損失は，各サンプリング時間における発電機器（燃料電池またはガスエンジン発電機）の出力に含まれている．

燃料電池（SOFC,または PEFC）

$$E_{fc,t} + E_{pv,t} \varphi_{cd,t} + E_{btd,t} \varphi_{btd} = E_{need,t} + E_{hp,t} + E_{btc,t} \varphi_{btc} \quad (5.4.1)$$

ガスエンジン発電機

$$E_{ge,t} + E_{pv,t} \varphi_{cd,t} + E_{btd,t} \varphi_{btd} = E_{need,t} + E_{hp,t} + E_{btc,t} \varphi_{btc} \quad (5.4.2)$$

燃料電池（SOFC,または PEFC）

$$H_{fc,t} + H_{hp,t} + H_{st,out,t} \varphi_{st,out} = H_{need,t} + H_{st,in,t} \varphi_{st,in} + H_{rad,t} \quad (5.4.3)$$

ガスエンジン発電機

$$H_{ge,t} + H_{hp,t} + H_{st,out,t} \varphi_{st,out} = H_{need,t} + H_{st,in,t} \varphi_{st,in} + H_{rad,t} \quad (5.4.4)$$

5.4.2 発電機器の出力特性

発電機器の負荷率 $\eta_{fc,t}$ または $\eta_{ge,t}$ は，式(5.4.5)により得られ，式(5.4.6)から(5.4.9)に代入することにより，各発電機器の発電効率 $\varphi_{fc,\eta_{fc,t}}$ または $\varphi_{ge,\eta_{ge,t}}$ および燃料消費量 $F_{fc,t}$ または $F_{ge,t}$ が得られる．式(5.4.6)中の C_{fc} または C_{ge} は発電機器の定格容量を表す．式(5.4.6)から(5.4.8)の各係数の値は，図 5.4.2-1 に示した各発電機器の出力特性の近似式から得られた．燃料電池 SOFC または PEFC の近似直線の破線は，燃料電池の下限を下回る負荷率の場合の発電効率を示している[50-52]．

発電機器の負荷率

燃料電池の場合

ガスエンジン発電機の場合

$$\eta_{fc,t} = E_{fc,t} / C_{fc} \text{ または } \eta_{ge,t} = E_{ge,t} / C_{ge} \quad (5.4.5)$$

発電効率

SOFC

$$\varphi_{fc,\eta_{fc,t}} = -6.11 \times 10^{-5} \eta_{fc,t}^2 + 9.46 \times 10^{-3} \eta_{fc,t} + 0.167 \quad (5.4.6)$$

PEFC

$$\varphi_{fc,\eta_{fc,t}} = -8.90 \times 10^{-6} \eta_{fc,t}^2 + 1.97 \times 10^{-4} \eta_{fc,t} + 0.2171 \quad (5.4.7)$$

ガスエンジン発電機

$$\varphi_{ge,\eta_{ge,t}} = -4.20 \times 10^{-6} \eta_{ge,t}^2 + 1.09 \times 10^{-3} \eta_{ge,t} + 0.20 \quad (5.4.8)$$

発電機器の燃料消費量

燃料電池の場合

ガスエンジン発電機の場合

$$F_{fc,t} = E_{fc,t} / \varphi_{fc,\eta_{fc,t}} \text{ または } F_{ge,t} = E_{ge,t} / \varphi_{ge,\eta_{ge,t}} \quad (5.4.9)$$

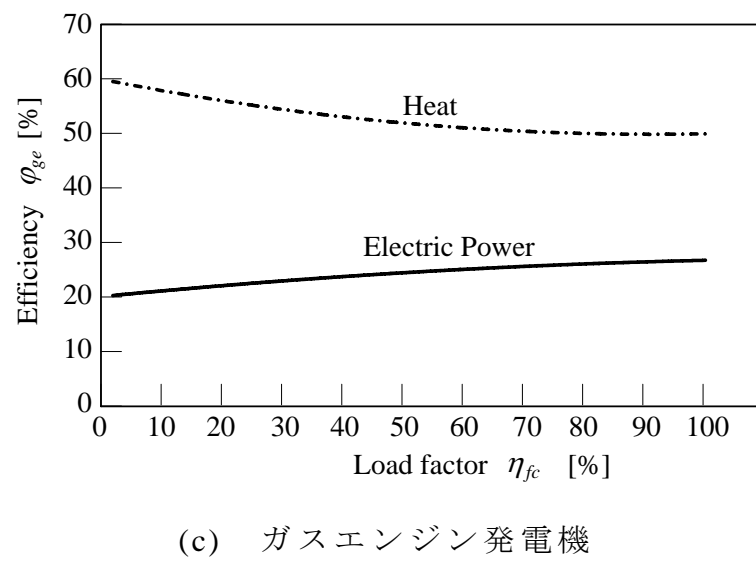
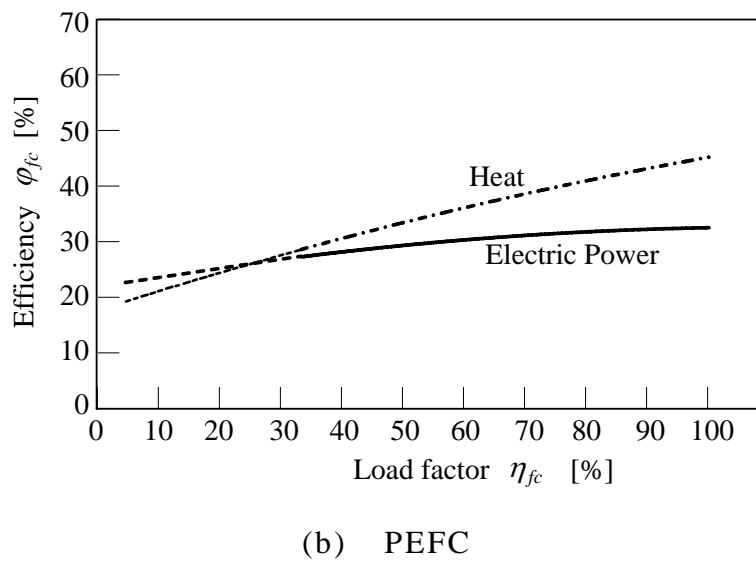
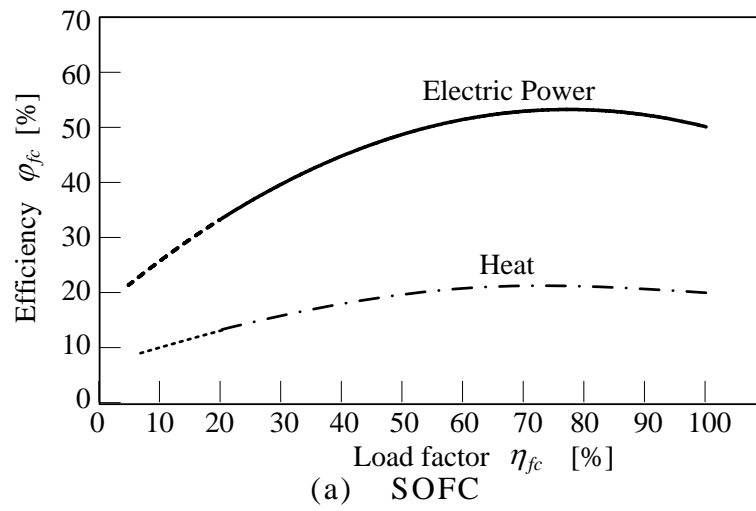


図 5.4.2-1 各発電機器の出力特性

各発電機器の熱出力効率 $H_{fc,t}$ または $H_{ge,t}$ は，式(5.4.10)から(5.4.12)に発電機器の負荷率 $\eta_{fc,t}$ または $\eta_{ge,t}$ を代入することにより得られる [50-52].

熱出力効率

SOFC

$$H_{fc,t} = -2.45 \times 10^{-5} \eta_{fc,t}^2 + 3.78 \times 10^{-3} \eta_{fc,t} + 0.0667 \quad (5.4.10)$$

PEFC

$$H_{fc,t} = -7.99 \times 10^{-6} \eta_{fc,t}^2 + 3.56 \times 10^{-3} \eta_{fc,t} + 0.177 \quad (5.4.11)$$

ガスエンジン発電機

$$H_{ge,t} = 1.22 \times 10^{-5} \eta_{ge,t}^2 - 2.23 \times 10^{-3} \eta_{ge,t} + 0.6013 \quad (5.4.12)$$

5.4.3 ヒートポンプと蓄熱槽

ヒートポンプの負荷率 $\eta_{hp,t}$ は、ヒートポンプの熱出力 $h_{hp,t}$ と容量 C_{hp} を用いて式(5.4.13)より得られる。式(5.4.14)と(5.4.15)はヒートポンプの成績係数(COP)と消費電力量を表している。式(5.4.14)の各係数の値は、図 5.4.3-1 に示したヒートポンプの性能曲線に式(5.4.5)より得られた発電機器の負荷率 $\phi_{fc,t}, \eta_{fc,t}$ を代入して得られた成績係数(COP)の近似式から得られた。図中の破線は、ヒートポンプの下限を下回る負荷率の場合の成績係数(COP)を示している[54]。

ヒートポンプの負荷率

$$\eta_{hp,t} = H_{hp,t} / C_{hp} \quad (5.4.13)$$

ヒートポンプの成績係数

$$COP_{hp,t} = 2.70 \times 10^{-6} \eta_{hp,t}^3 - 8.11 \times 10^{-4} \eta_{hp,t}^2 + 0.0813 \eta_{hp,t} + 0.879 \quad (5.4.14)$$

ヒートポンプの消費電力量

$$E_{hp,t} = -H_{hp,t} / COP_{hp,t} \quad (5.4.15)$$

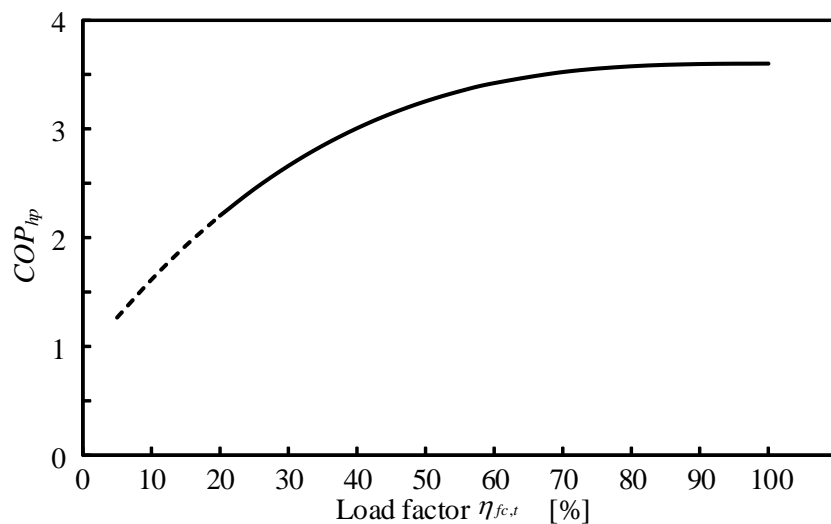


図 5.4.3-1 ヒートポンプの性能曲線

発電機器の排熱が熱需要を上回る場合 ($H_{fc,t} > H_{need,t}$ または $H_{ge,t} > H_{need,t}$) は、ヒートポンプは運転しない。この際には、余剰熱 ($H_{st,in,t} = H_{fc,t} - H_{need,t}$ または $H_{st,in,t} = H_{ge,t} - H_{need,t}$) が蓄熱槽に貯蔵される。この際に、余剰熱 $H_{st,in,t}$ が蓄熱容量 C_{st} を上回ると、蓄熱槽の余剰熱 $H_{rad,t}$ はラジエータから大気に放出される。

一方、熱需要が発電機器の排熱を上回る場合 ($H_{fc,t} < H_{need,t}$ または $H_{ge,t} < H_{need,t}$) には、蓄熱槽に蓄えられていた熱 $H_{st,out,t} \cdot \varphi_{st,out}$ が供給される。さらに、発電機器の排熱と蓄熱槽の熱出力では、熱需要が満たさない場合 ($H_{fc,t} + H_{st,out,t} \varphi_{st,out} < H_{need,t}$ または $H_{ge,t} + H_{st,out,t} \varphi_{st,out} < H_{need,t}$) は、不足分をヒートポンプの熱 $H_{hp,t}$ で賄う。熱需要の不足分を賄うヒートポンプの熱 $H_{hp,t}$ が決まると、式 (5.4.13) から式 (5.4.15) を計算することで、ヒートポンプの電力消費量 $E_{hp,t}$ が決定する。

5.4.4 目的関数（最適値）

式 (5.4.16) に本研究の複合エネルギーシステムの目的関数を示す。本研究の解析では、代表日における燃料消費量の最小化と定義した。これは、5.2.1 節の図 5.2.1-1 に示した複合エネルギーシステムの発電機器である燃料電池またはガスエンジン発電機に起因する。

燃料電池の場合

ガスエンジン発電機の場合

$$\sum_{t=0}^{24} F_{fc,t} \rightarrow \text{minimize} \quad \text{または} \quad \sum_{t=0}^{24} F_{ge,t} \rightarrow \text{minimize} \quad (5.4.16)$$

5.5 解析条件

5.5.1 電力および熱需要

本研究では，図 5.5.1-1 に示す 2 月(冬)の札幌市の平均的な住宅に適応される代表日の負荷パターンを用いる[53]．2 月代表日の電力および熱需要は，夏季よりもはるかに大きいため採用する．

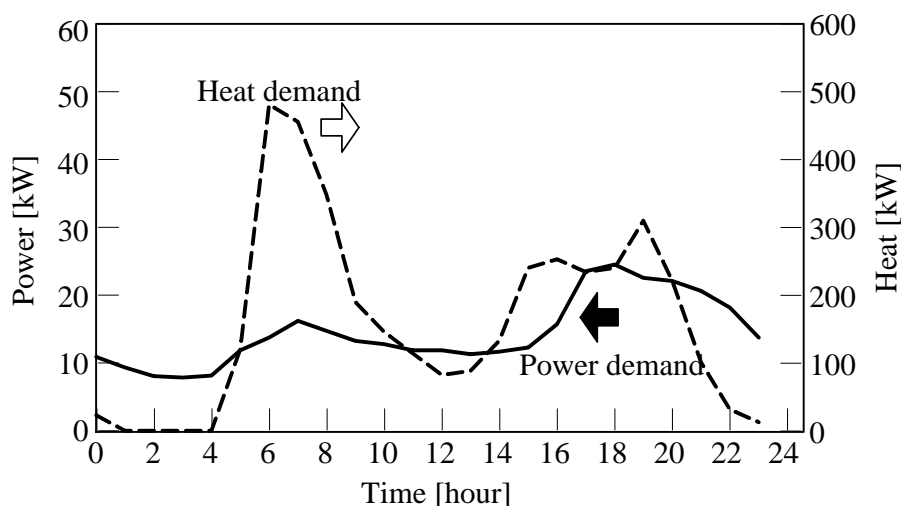


図 4.5.1-1 代表日の負荷パターン(2 月，札幌市)

5.5.2 直交表解析における複合エネルギーシステムの設計パラメータ

設計パラメータの数と直交表に導入する水準数によって，5.3.4 節で述べた直交表の種類を選択する必要がある．直交表は 3 種類に大別することができる． L_4 ， L_8 ， L_{12} ， L_{16} ， L_{32} ， L_{64} ， L_{128} ， L_{256} といった直交表は，2 水準を使用する場合に用いられ， L_9 ， L_{27} ， L_{81} ， L_{243} といった直交表は，3 水準を使用する場合に用いられる．また， L_{18} や L_{36} は，2 水準と 3 水準の水準数の混合した直交表である．2 水準の直交表は，機器の ON と OFF を表現するのに都合がよく，3 水準よりもさらに多い水準数の直交表も作成できる．本研究では，表 5.5.2-1 に示した(A)から(G)の 7 つの設計パラメータとする．また，表中に示すように太陽電池については 2 水準，他の機器については 3 つの水準を設定する．設計パラメータの数と水準数から，本研究では 3.1.1 節の表 3.1.1-1 で示した $2^1 \times 3^7$ 型の L_{18} 直交表を採用した．

設計パラメータとしては複合エネルギーシステムに使用されている各機器の容量と，バッテリー放電量 E_{btd} およびバッテリー充電量 E_{btc} とした．太陽電池の容量 C_{pv} は，1 住宅あたり 3.3kW 程度の太陽光発電を利用すると想定し，太陽光発電による発電の有無を評価できるように 2 水準の設計パラメータ(A)に入れ，最大値（第 2 水準）を 100kW とした．設計パラメータ(B)，(E)，(F)，(G)は，それぞれバッテリーの容量 C_{bt} ，発電機器（燃料電池またはガスエンジン発電機）の容量 C_{fc} または C_{ge} ，蓄熱槽の容量 C_{st} ，ヒートポンプの容量 C_{hp} である．このうち，蓄熱槽については最小値（第 1 水準）を 0，すなわち，蓄熱をしないという水準を設けたが，他の設計パラメータについては，水準値の範囲外に最適値があった場合を想定し，直交表－GA ハイブリッド解析法を評価するために最小値を 0 以外に設定した．また，各設計パラメータの最大値については，電力および熱負荷の最大値を考慮した上で設定した．

表 5.5.2-1 設計パラメータと水準

Design parameters				Level 1	Level 2	Level 3
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0	100	
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	5	15	25
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	0	4	8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0	4	8
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	350	400	450
	Capacity of gas engine generator	C_{ge}	[kW]	700	750	800
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	0	100	200
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	500	600	700

5.5.3 解析条件

(a) 日射量

太陽光発電の容量 C_{pv} と太陽電池の発電効率から，電池の導入面積が決まる．この導入面積に時刻 t での日射量を乗じることで，太陽電池の発電量は得られるが，さらにパワーコンディショナでの損失を考慮することで太陽光発電の電力量 $E_{pv,t}$ が得られる．本研究の解析では，図 5.5.3-1 に示す札幌市の 2 月代表日の日射量を用いる [55]．

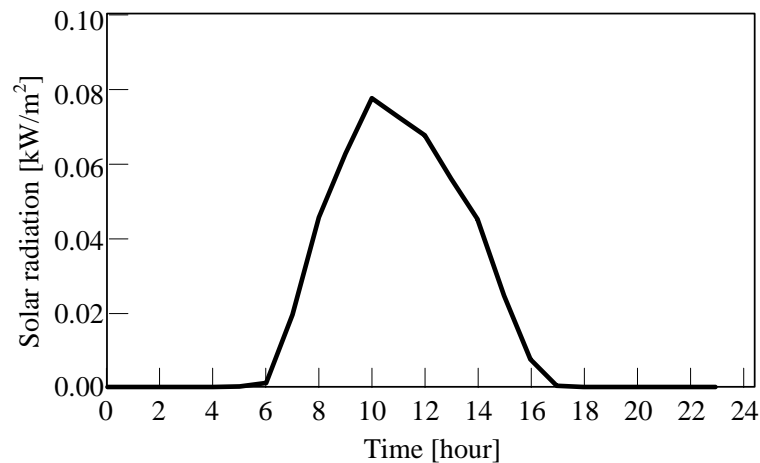


図 4.5.3-1 札幌市 2 月の日射量

(b) 各機器の効率

5.2 節の図 5.2-1 および 5.2-2 に示した解析システムにて使用する各機器の効率を表 5.5.3-1 に示す．電力グリッドの送電効率および熱グリッドの熱供給効率は考慮していない．

表 5.5.3-1 各機器の効率

Solar cell (with power conditioner (2))	$\varphi_{cd,t}$	0.15
Heat storage tank	$\varphi_{st,in,t}, \varphi_{st,out,t}$	0.8
Battery (efficiency of charge and discharge)	$\varphi_{btc}, \varphi_{btd}$	0.9
Power conditioner (1)		0.9
Power transmission of power grid		1.0
Heat supply to heat grid		1.0

(c) GA の解析パラメータ

GA で用いた解析パラメータとしては，世代数 40，染色体数 300，突然変異確率 0.3，交差確率 0.3 である．これらの解析パラメータは，解析を繰り返して試行錯誤により決定した．

第 6 章 $L_{18}(2^1 \times 3^7 \text{ 型})$ 直交表を用いた解析結果

6.1 直交表－GA ハイブリッド解析法に使用される初期値

5.5.2 節の表 5.5.2-1 に示した設計パラメータを用いて，直交表解析を実行した結果，図 6.1-1 に示す各発電機器における要因効果図が得られた．図中の☆印は，各設計パラメータにおいて燃料消費量の低減に最も寄与する水準を示している．

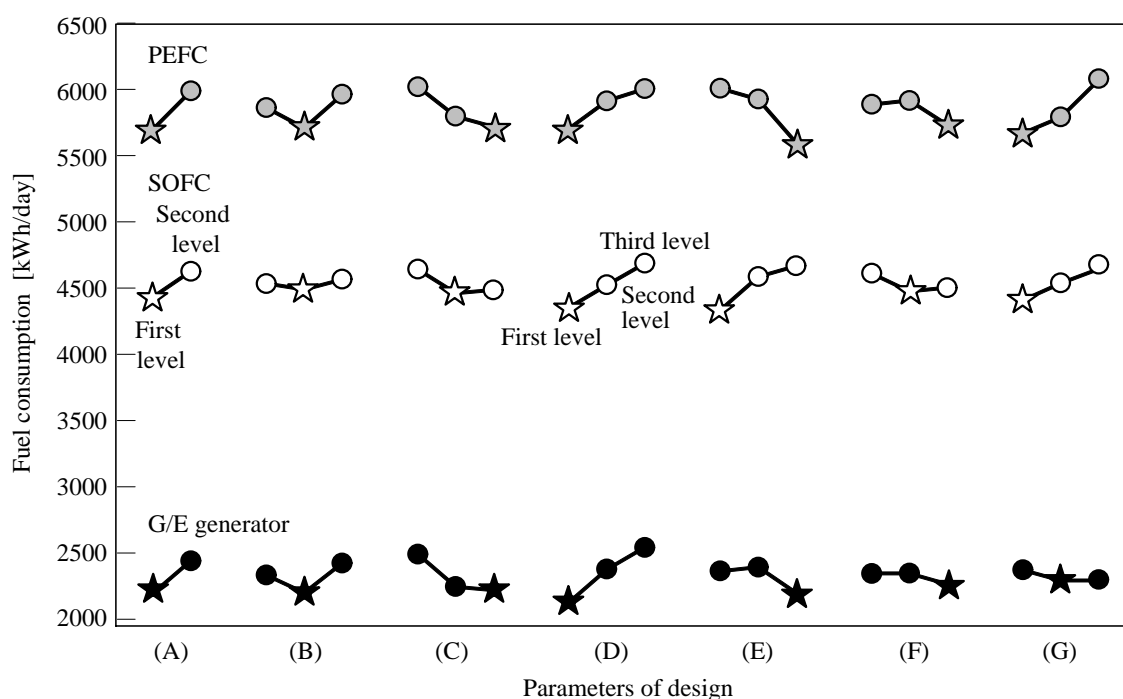


図 6.1-1 要因効果図

GA に導入する設計パラメータの初期値を発電機器別に表 6.1-1 から 6.1-3 に示す．表中の各値は，図 6.1-1 で示した要因効果図の各設計パラメータについて，最もシステムの燃料消費量の低減に寄与する水準値から GA 解析の値または値の範囲を決定した．各設計パラメータの中間値である水準 2 が燃料消費量の低減に寄与する値となった場合は，最小値である水準 1 と水準 2 の中間値から水準 2 と最大値の水準 3 の中間値までとした．最小値である水準 1 となった場合は水準 1 以下に，最大値である水準 3 の場合は水準 3 以下とした．いずれの発電機器においても太陽光発電の容量は水準 1 の 0kW，バッテリーの容量は水準 2 の 15kWh，バッテリーの充電量は水準 1 の 0kW となった．燃料電池 SOFC と PEFC では，バッテリーの放電量が水準 1 の 4kW と水準 2 の 8kW，燃料電池の容量が水準 1 の 350kW と水準 2 の 450kW，蓄熱槽の容量が水準 2 の 100kWh と水準 3 の 200kWh と違いが現れたが，ヒートポンプの容量は水準 1 の 500kW で同じであった．ガスエンジン発電機では，バッテリーの充電量は水準 3 の 8kW，ガスエンジン発電機の容量は水準 3 の 800kW，蓄熱槽の容量は水準 3 の 200kWh，ヒートポンプの容量は水準 1 の 500kW となった．

表 6.1-1 SOFC の各設計パラメータの GA 解析範囲

Design parameters				SOFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	2.0-6.0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	less than 350
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	50-150
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

表 6.1-2 PEFC の各設計パラメータの GA 解析範囲

Design parameters				PEFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	lea than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	less than 450
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	less than 200
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

表 6.1-3 ガスエンジン発電機の各設計パラメータの GA 解析範囲

Design parameters				Gas engine generator
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	less than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of gas engine generator	C_{ge}	[kW]	less than 800
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	less than 200
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	550-650

6.2 GA 解析結果および考察

6.1.節の表 6.1-1 から 6.1-3 の各設計パラメータを GA 解析の初期値として代入してえられた各設計パラメータの解析結果を表 6.2-1 から 6.2-3 に示す.

表 6.2-1 SOFC の各設計パラメータの GA 解析結果

Design parameters				SOFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	0
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	146
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	66
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	469
Fuel consumption		F_{fc}	[kWh]	3210

表 6.2-2 PEFC の各設計パラメータの GA 解析結果

Design parameters				PEFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	0
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	142
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	0
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	454
Fuel consumption		F_{fc}	[kWh]	4692

表 6.2-3 ガスエンジン発電機の各設計パラメータの GA 解析結果

Design parameters			Gas engine generator
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv} [kW]	0
(B)	Capacity of battery	C_{bt} [kWh]	0
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd} [kW]	0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc} [kW]	0
(E)	Capacity of gas engine generator	C_{ge} [kW]	769
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st} [kWh]	62
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp} [kW]	0
Fuel consumption		F_{ge} [kWh]	1910

6.1.節の表 6.1-1 から 6.1.3 において、いずれの発電機器も太陽光発電の容量が 0kW であったため、太陽光発電の導入は考慮されなかった。これは、太陽光発電の導入により発電機器の負荷率が低下し、発電効率が低下することを回避したためと考えられる。同様に、バッテリーの充電量も 0kW であったため、バッテリーの導入も考慮されなかったが、バッテリーの導入は、充電・放電による損失を考慮すると代表日 1 日では蓄電は有利とならないためと考えられる。表 6.2-1, 6.2-2 の燃料電池 SOFC, PEFC の場合、5.4.2 節の図 5.4.2-1(a)から(c)の発電機器の出力特性と 5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したようにエネルギー需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいいため、ガスエンジン発電機に比べ、熱出力効率の小さい燃料電池は、ヒートポンプが要求される結果となった。一方、表 6.2-3 を見ると、ガスエンジン発電機の容量は燃料電池と比較して、非常に大きくなっている。これは、5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したようにエネルギー需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいために、ガスエンジン発電機では排熱の出力が優先されて、機器容量が大きくなり、低負荷率で運転するためである。

6.3 GA 再解析結果および考察

6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 の GA 解析の結果, いずれの発電機器においても太陽光発電およびバッテリーの導入は考慮されなかったが, 太陽光発電の導入によって, 発電機器の燃料消費量が減少することは明らかである. このため, 6.1.節の表 6.1-1 から 6.1-3 の太陽光発電の容量 C_{pv} を, 5.5.2 節に示した表 5.5.2-1 の水準 2 である 100kW 以下に設定し直し, その他の設計パラメータは変更せずに, 表 6.3-1 から 6.3-3 に示す各設計パラメータを GA 解析の初期値として再度, GA 解析を実行した. 各設計パラメータの再解析結果を表 6.3-4 から 6.3-6 に示す.

表 6.3-1 SOFC の各設計パラメータの GA 再解析範囲

Design parameters				SOFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	less than 100
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	2.0-6.0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	less than 350
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	50-150
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

表 6.3-2 PEFC の各設計パラメータの GA 再解析範囲

Design parameters				PEFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	less than 100
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	lea than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	less than 450
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	less than 200
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

表 6.3-3 ガスエンジン発電機の各設計パラメータの GA 再解析範囲

Design parameters				Gas engine generator
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	less than 100
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	less than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of gas engine generator	C_{ge}	[kW]	less than 800
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	less than 200
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	550-650

表 6.3-4 SOFC の各設計パラメータの GA 再解析結果

Design parameters			SOFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv} [kW]	13
(B)	Capacity of battery	C_{bt} [kWh]	0
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd} [kW]	0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc} [kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc} [kW]	146
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st} [kWh]	66
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp} [kW]	470
Fuel consumption		F_{fc} [kWh]	3087

表 6.3-5 PEFC の各設計パラメータの GA 再解析結果

Design parameters			PEFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv} [kW]	13
(B)	Capacity of battery	C_{bt} [kWh]	0
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd} [kW]	0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc} [kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc} [kW]	143
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st} [kWh]	0
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp} [kW]	454
Fuel consumption		F_{fc} [kWh]	4457

表 6.3-6 ガスエンジン発電機の各設計パラメータの GA 再解析結果

Design parameters			Gas engine generator
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv} [kW]	13
(B)	Capacity of battery	C_{bt} [kWh]	0
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd} [kW]	0
(D)	Amount of battery charge	E_{btc} [kW]	0
(E)	Capacity of gas engine generator	C_{ge} [kW]	776
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st} [kWh]	62
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp} [kW]	0
Fuel consumption		F_{ge} [kWh]	1478

表 6.3-4 から 6.3-6 を見ると、いずれの発電機器においても太陽光発電の容量は、13kW の導入がなされた。6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 における太陽光発電の未導入に比べ、表 6.3-4, 6.3-5 の発電機器が燃料電池 SOFC, PEFC の場合の燃料消費量は、それぞれ 3.9%, 5% 減少した。また、表 6.3-6 のガスエンジン発電機では燃料消費量が 22.6% 減少した。この結果より、太陽光発電の容量を 2 つの水準である A 列にて解析を実行した場合、太陽光発電の容量は、導入の可否判断(導入しない／導入する)となるため、太陽光発電の導入による燃料消費量低減の効果を考慮しなければならず、解析精度が低下することが明らかとなった。表 6.3-4, 6.3-5 の発電機器が燃料電池 SOFC, PEFC の場合、6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 と同様にバッテリーの充電量は 0kW であったため、バッテリーの導入は考慮されなかった。バッテリーの導入は、充電・放電による損失を考慮すると代表日 1 日では蓄電は有利とならないためと考えられる。また、6.2 節の表 6.2-1, 6.2-2 と同様に燃料電池 SOFC, PEFC の場合、5.4.2 節の図 5.4.2-1(a)から(c)の発電機器の出力特性と 5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したように需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいため、ガスエンジン発電機に比べ、熱出力効率の小さい燃料電池は、ヒートポンプが要求される結果となった。一方、6.2 節の表 6.2-3 と同様に、表 6.3-6 のガスエンジン発電機の容量は燃料電池と比較して、非常に大きくなっている。これは、5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したように需要パターンの熱電比に

において熱需要が相当大的いために，ガスエンジン発電機では排熱出力が優先されて，機器容量が大きくなり，低負荷率で運転するためである．6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 と比較して，燃料電池とヒートポンプの容量は，太陽光発電が未導入の場合と大きな差はないが，太陽光発電の導入により負荷率が減少して発電効率と熱出力効率が低下することに伴い，発電機器として燃料電池 SOFC,PEFC を導入した場合，燃料電池またはヒートポンプの容量の微増が見られる．一方，発電機器がガスエンジン発電機の場合では燃料電池に比べて，容量の増加がやや大きくなった．これは，太陽光発電の導入に伴い，負荷率の減少による発電効率の低下を補うためである．図 6.3-1 は，太陽光発電導入の有無による GA 解析の各世代と燃料消費量の解析結果を示す．太陽光発電が未導入の場合は，いずれの発電機器も第 5 世代以降，太陽光発電が導入された場合は，第 14 世代以降，それ以前の燃料消費量を下回る運用計画は現れない．

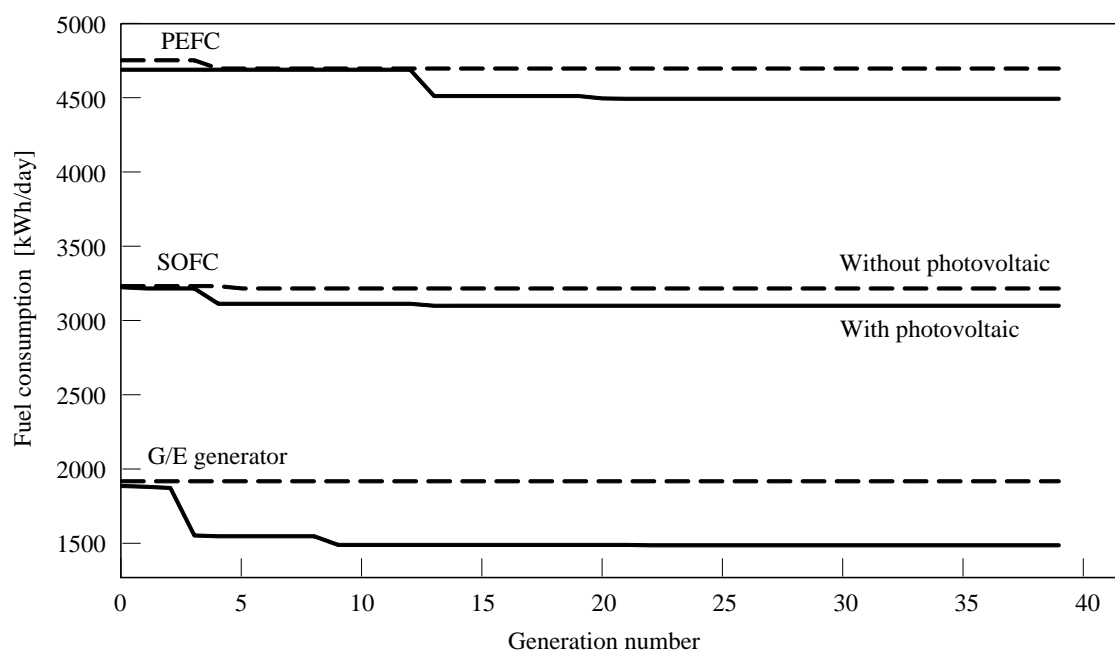


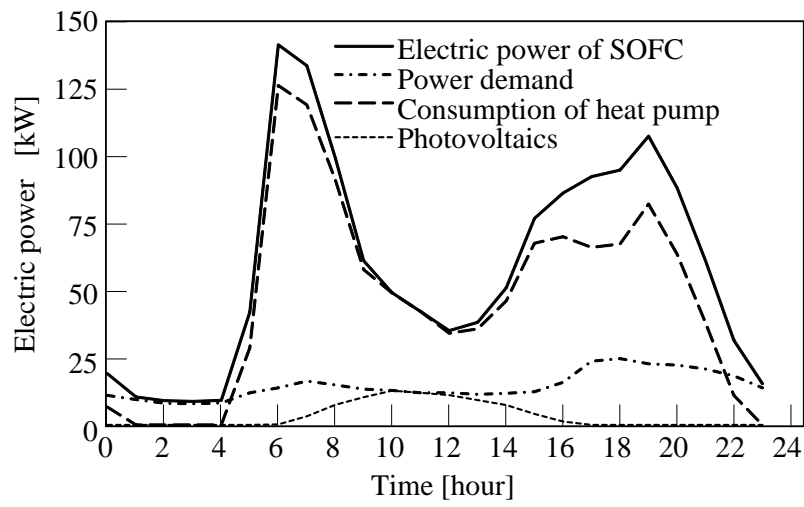
図 6.3-1 太陽光発電導入の有無による各世代の燃料消費量
(40 世代)

6.4 最適運用計画

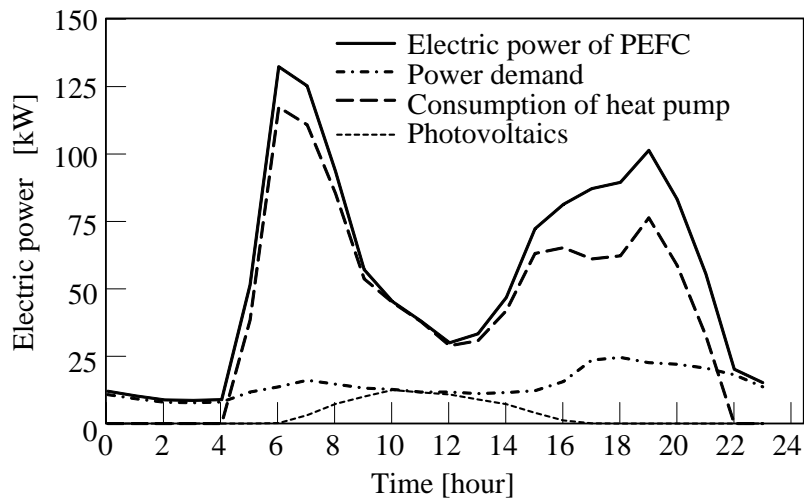
6.4.1 発電機器

図 6.4.1-1 は，6.3 節の表 6.3-4 から 6.3-6 の結果に基づく，発電機器（燃料電池またはガスエンジン発電機，太陽光発電）と電力消費の要素（電力需要，ヒートポンプ）の最適運用の結果である．また，図 6.4.1-2 は，発電機器の排熱出力と負荷率の最適運用の結果である．

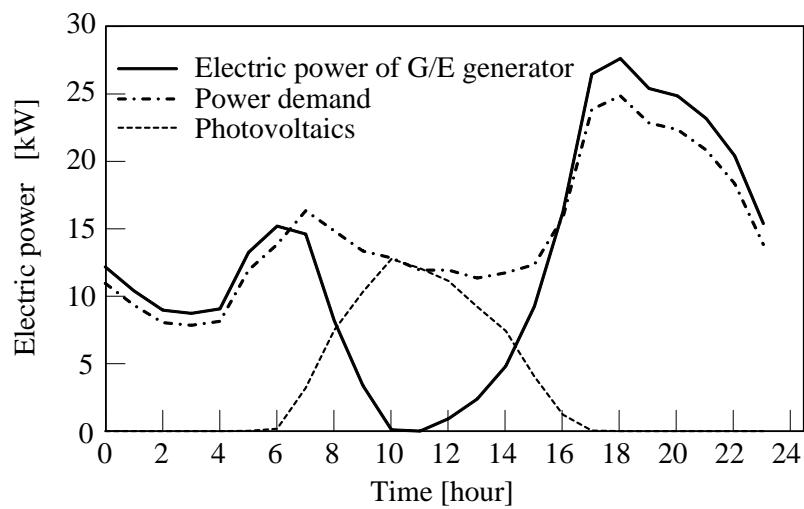
5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したように需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいため，熱需要が燃料電池の負荷率に大きく影響する．このため，燃料電池の運用は電力需要とヒートポンプの電力消費の合計値に対応して，電主熱従運転となる．この結果，負荷率の日変化は 6%から 100%まで大きく変化する．一方，ガスエンジン発電機の運用は，機器特性により発電効率よりも熱出力効率が高いため，大きな機器容量に対して，低負荷率での運転により電力需要が賄え，エネルギー需要パターンの熱需要は一部を除き満足しているため，負荷率への影響は見られない．



(a) SOFC

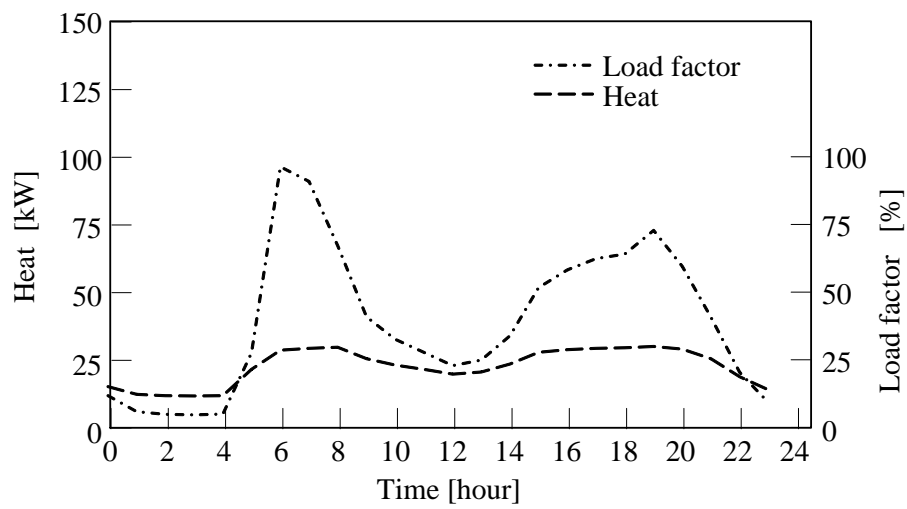


(b) PEFC

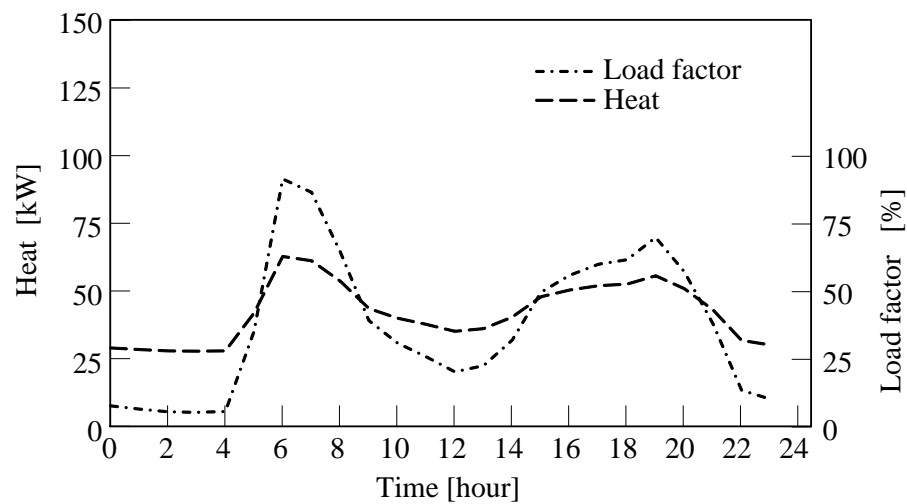


(c) G/E generator

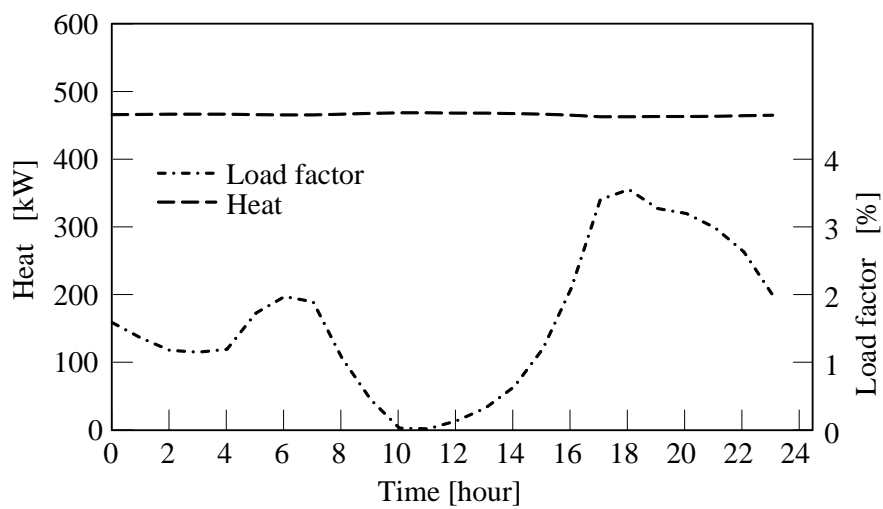
図 6.4.1-1 発電機器の最適運用結果（電力）



(a) SOFC



(b) PEFC

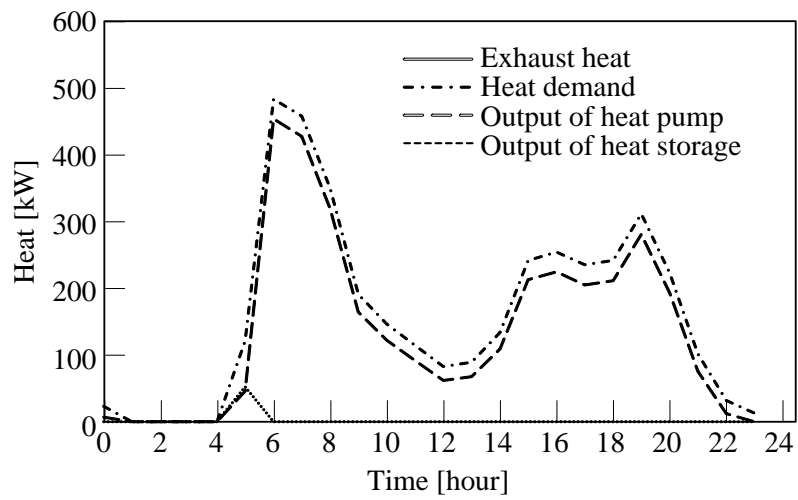


(c) G/E generator

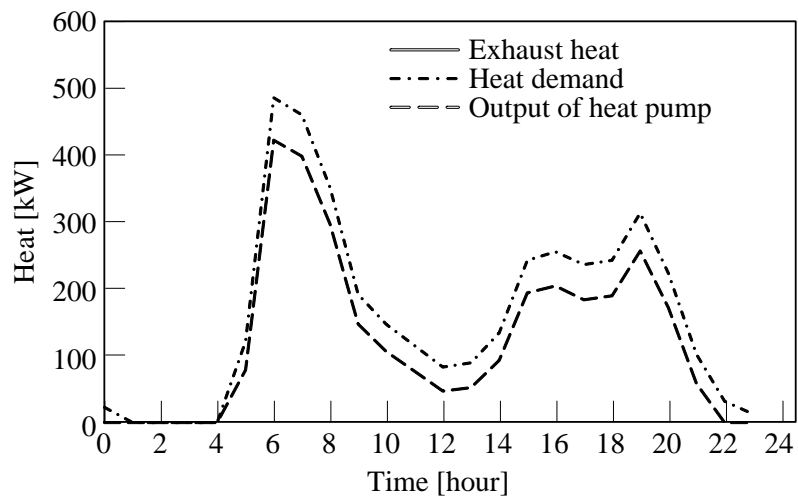
図 6.4.1-2 発電機器の最適運用結果（排熱）と負荷率

6.4.2 熱機器

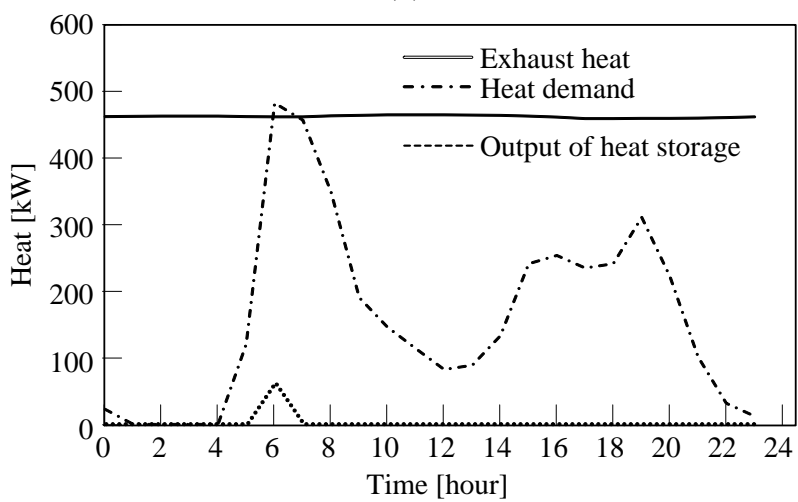
図 6.4.2-1 は、6.3 節の表 6.3-2 の結果に基づく、熱機器の最適運用の結果である。燃料電池は排熱量が少ないため、熱負荷への対応はヒートポンプによるところが大きい。一方、ガスエンジン発電機の排熱はほぼすべての常に熱需要を上回っており、余剰熱の排出が多い。図 6.4.2-2 は、ヒートポンプの負荷率と COP の運用解析の結果である。負荷率の変化に伴って、COP は大きく変動する。PEFC は SOFC に比べ排熱が多いため、負荷率と COP が若干低い値を示している。



(a) SOFC

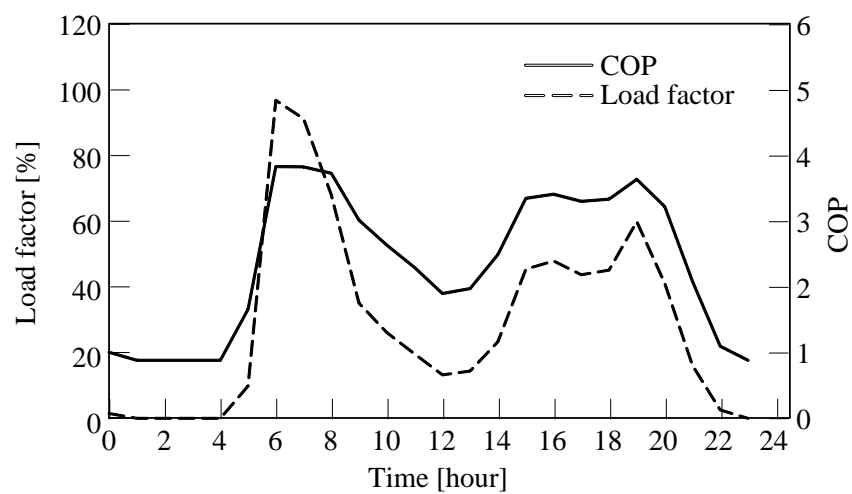


(b) PEFC

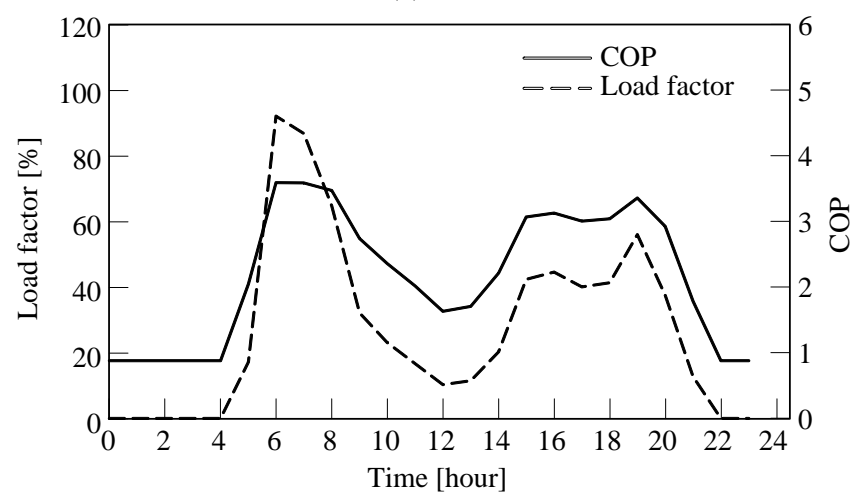


(c) G/E generator

図 6.4.2-1 熱機器の最適運用結果



(a) SOFC



(b) PEFC

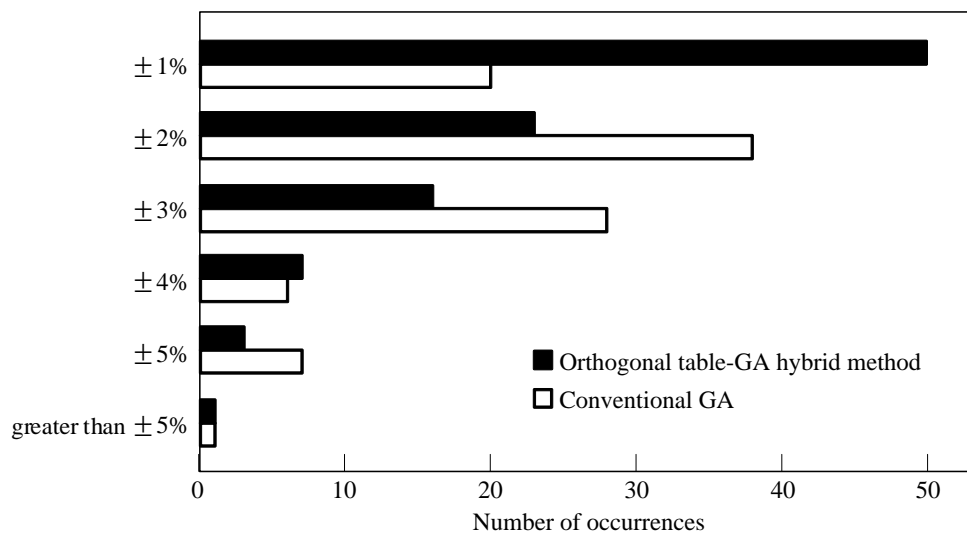
図 6.4.2-2 ヒートポンプの最適運用結果

6.4.3 解析アルゴリズムの検証

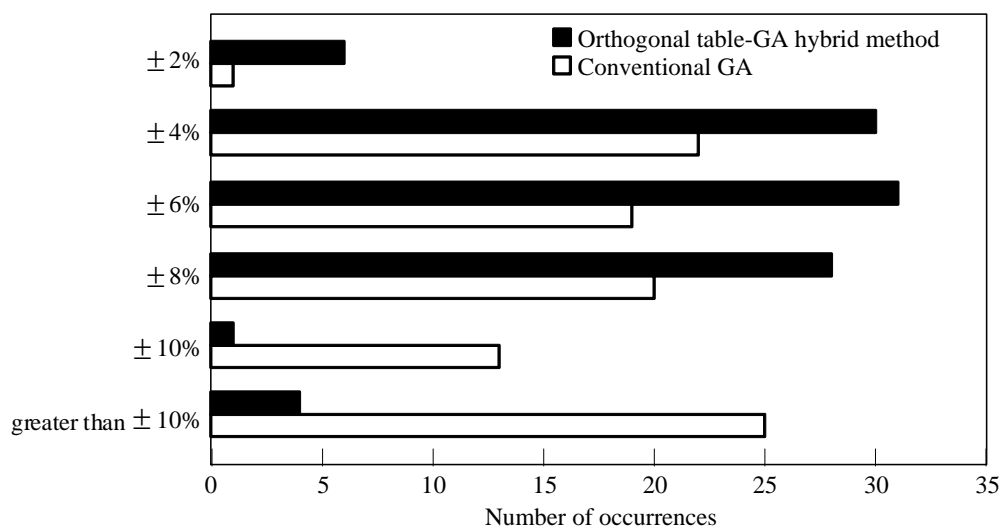
図 6.4.3-1 は、各発電機器を使用して構成されたマイクログリッドにおける単純 GA と直交表－GA ハイブリッド解析法との収束誤差の頻度を示している。解析パラメータは、世代数 40, 染色体の数 300, 突然変異率および交叉率 0.3 および試行回数 100 回である。

図 6.4.3-1(a)と(c)から SOFC とガスエンジン発電機は、上述の解析パラメータにて必ず収束したが、PEFC は収束しない場合があり、収束は単純 GA では 8 回に 1 回、直交表－GA ハイブリッド解析法では 2 回に 1 回であった。発電機器に PEFC を採用した場合に解が収束しづらい原因は、最適解および準最適解でのシステム構成機器である太陽光発電、PEFC、ヒートポンプが 3 つの機器に加えて、蓄熱槽の導入があり、前述の 3 つの機器容量が縮小されることとなり、図 4.5.1-1 代表日の負荷パターン(2 月、札幌市)に示す熱需要が、急激に上昇する朝 5 時以降から 8 時までの間において、5 時は PEFC の排熱、ヒートポンプおよび蓄熱槽に貯蔵してある 0 時から 4 時までの間の熱出力により熱需要を賄うことができるが、6 時から 8 時までの間と夜 19 時は、蓄熱槽の熱貯蔵がないため、PEFC の排熱とヒートポンプによって熱需要を満たさなければならず、ヒートポンプの成績係数 (COP) を上げるために負荷率が 100%を超過する値に取り、電力を熱に変換していることにより解から除外されるためである。

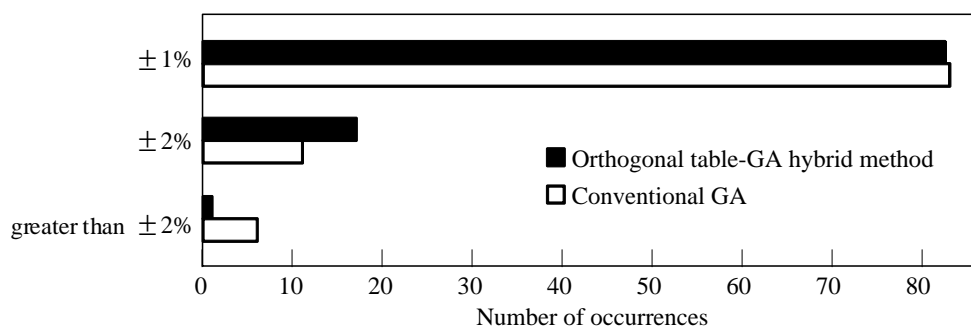
図 6.4.3-1(a)と(b)から SOFC と PEFC の収束誤差は、直交表－GA ハイブリッド解析法を用いたことによって大幅に低減された。SOFC での 2%以下の収束誤差は試行回数 100 回で 73 回、単純 GA では試行回数 100 回で 73 回であった。PEFC での 8%以下の収束誤差は試行回数 100 回で 94 回、単純 GA では試行回数 100 回で 65 回であった。また、ガスエンジン発電機の収束誤差は、単純 GA に対して十分に小さいので、直交表－GA ハイブリッド解析法に優位性がある。



(a) SOFC



(b) PEFC



(c) Gas engine generator

図 5.4.3-1 最適解の収束誤差の頻度（試行回数 100 回）

第 7 章 $L_{18}(6^1 \times 3^6 \text{ 型})$ 直交表を用いた解析結果

7.1 直交表の変更

これまでの直交表－GA ハイブリッド解析法では，直交表に $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表を用いてきたが，5.5.2 節の表 5.5.2-1 に示したように (A)太陽光発電の容量が 2 水準であるため，6.1 節の図 6.1-1，表 6.1-1，6.1-2 に示すように太陽光発電の容量が水準 1 の 0kW が燃料消費量の低減に寄与するとなった．しかし，太陽光発電の導入により燃料消費量の低減が見込めるため，太陽光発電の容量が水準 2 の 100kW 以下とし，再解析を実行していた．この解決策として，(A)列が多水準である L_{18} 直交表の $6^1 \times 3^6$ 型 L_{18} 直交表を用い，(A)太陽光発電の容量を 20kW ごとに等間隔にして解析を実行した．表 7.1-1 に $6^1 \times 3^6$ 型 L_{18} 直交表を，表 7.1-2 に設計パラメータと水準を示す．

表 7.1-1 $6^1 \times 3^6$ 型 L_{18} 直交表

		Row number (Design parameter)						
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Experiment number	ex1	1	1	1	1	1	1	1
	ex2	1	2	2	2	2	2	2
	ex3	1	3	3	3	3	3	3
	ex4	2	1	1	2	2	3	3
	ex5	2	2	2	3	3	1	1
	ex6	2	3	3	1	1	2	2
	ex7	3	1	2	1	3	2	3
	ex8	3	2	3	2	1	3	1
	ex9	3	3	1	3	2	1	2
	ex10	4	1	3	3	2	2	1
	ex11	4	2	1	1	3	3	2
	ex12	4	3	2	2	1	1	3
	ex13	5	1	2	3	1	3	2
	ex14	5	2	3	1	2	1	3
	ex15	5	3	1	2	3	2	1
	ex16	6	1	3	2	3	1	2
	ex17	6	2	1	3	1	2	3
	ex18	6	3	2	1	2	3	1

表 7.1-2 設計パラメータと水準

Design parameters				Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	0	20	40	60	80	100
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	5	5	25			
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	0	4	8			
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0	4	8			
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	350	400	450			
	Capacity of gas engine generator	C_{ge}	[kW]	700	750	800			
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	0	100	200			
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	500	600	700			

7.2 直交表の変更による GA 解析に使用される初期値

直交表解析を実行した結果，図 7.2-1 に示す各発電機器における要因効果図が得られた．図中の☆印は，各設計パラメータにおいて燃料消費量の低減に最も寄与する水準を示している．また，実線は A 列が 6 水準の場合，破線は A 列が 2 水準の場合を表す．

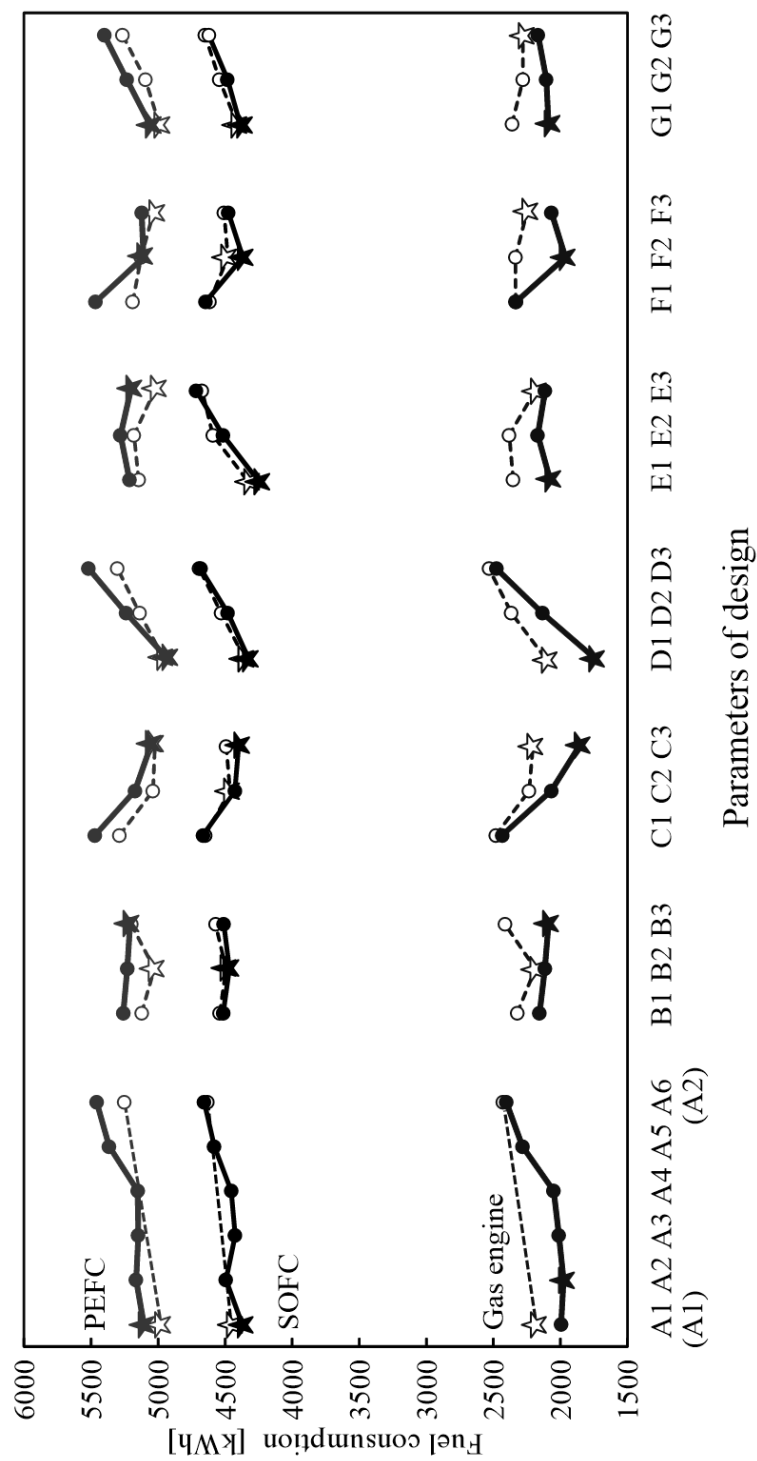


図 7.2-1 要因効果図

A 列を 6 水準に変更したことにより，2 水準では見られない B から G 列と同様な屈曲が見られるようになり，A 列の太陽光発電の容量について GA 探索範囲を限定することが可能となった．また，B から G 列の GA 探索範囲には若干の違いが見られた．GA に導入する設計パラメータの初期値を表 7.2-1 から 7.2-3 に示す．表中の各値は，図 7.2-1 で示した要因効果図の各設計パラメータについて，最もシステムの燃料消費量の低減に寄与する水準値から GA 解析の値または値の範囲を決定した．各設計パラメータの中間値である水準 2 が燃料消費量の低減に寄与する値となった場合は，最小値である水準 1 と水準 2 の中間値から水準 2 と最大値の水準 3 の中間値までとした．最小値である水準 1 となった場合は水準 1 以下に，最大値である水準 3 の場合は水準 3 以下とした．

表 7.2-1 SOFC の各設計パラメータの GA 解析範囲

Design parameters				SOFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	less than 20
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	less than 25
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	less than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	less than 350
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	50-150
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

表 7.2-2 PEFC の各設計パラメータの GA 解析範囲

Design parameters				PEFC
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	less than 20
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	7.5-17.5
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	lea than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of fuel cell	C_{fc}	[kW]	less than 450
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	50-150
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

表 7.2-3 ガスエンジン発電機の各設計パラメータの GA 解析範囲

Design parameters				Gas engine generator
(A)	Capacity of photovoltaic	C_{pv}	[kW]	10-30
(B)	Capacity of battery	C_{bt}	[kWh]	less than 25
(C)	Amount of battery discharge	E_{btd}	[kW]	less than 8
(D)	Amount of battery charge	E_{btc}	[kW]	0
(E)	Capacity of gas engine generator	C_{ge}	[kW]	less than 700
(F)	Capacity of heat storage tank	C_{st}	[kWh]	50-150
(G)	Capacity of heat pump	C_{hp}	[kW]	less than 500

7.3 GA 解析結果および考察

7.2 節の表 7.2-1 から 7.2-3 の各設計パラメータを GA 解析の初期値として代入して得られた各設計パラメータの解析結果は、6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 と同様となった。ただし、7.1 節の表 7.1-1 の $6^1 \times 3^6$ 型 L_{18} 直交表および表 7.1-2 の A 列を 6 水準に変更した設計パラメータと水準を直交表解析に導入した結果、7.2 節の表 7.2-1 から 7.2-3 に示したようにいずれの発電機器においても A 列の太陽光発電の容量についての GA 探索範囲が燃料電池(SOFC, PRFC)の場合は 20kW 以下に、ガスエンジン発電機では 10 から 30kW に限定された。GA 解析の結果は、6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 と同様にバッテリーの充電量は 0kW であったため、バッテリーの導入は考慮されなかった。バッテリーの導入は、充電・放電による損失を考慮すると代表日 1 日では蓄電は有利とならないためと考えられる。表 6.2-1, 6.2-2 と同様に燃料電池 SOFC, PEFC の場合、5.4.2 節の図 5.4.2-1(a)から(c)の発電機器の出力特性と 5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したようにエネルギー需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいため、ガスエンジン発電機に比べ、熱出力効率の小さい燃料電池は、ヒートポンプが要求される結果となった。一方、表 6.2-3 を見ると、ガスエンジン発電機の容量は燃料電池と比較して、非常に大きくなっている。これは、5.5.1 節の図 5.5.1-1 に示したようにエネルギー需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいため、ガスエンジン発電機では排熱出力が優先されて、機器容量が大きくなり、低負荷率で運転するためである。これにより、6.2 節の表 6.2-1 から 6.2-3 と同様の結果が得られたが、更に GA 探索範囲を限定することとなり、解析速度と解析精度が改善されたと考えられる。

第 8 章 結 言

本論文では、複雑で大規模な複合エネルギーシステムの運用を解析できるコンピュータアルゴリズムを開発するために、GA による複合エネルギーシステムの運用解析の改善方法として GA による探索に先立って、直交表解析と解析結果より作成される要因効果図を用いて GA の探索範囲を限定する「直交表－GA ハイブリッド解析法」を提案した．提案方法により異なる発電機器を持つ複合エネルギーシステムの最適運用計画を調査した．この結果、以下の結論を得た．

(1) 再生可能エネルギーを伴う複合エネルギーシステムにおいて、直交表－GA ハイブリッド解析法を用いて、発電機器の燃料消費量の最小化を目的関数として、異なる出力特性を有する発電機器ごとに代表日の運用解析を実行した結果、直交表解析によって、GA の探索範囲を限定することができ、発電機器の出力特性に応じた最適運用計画を得ることができた．また、最適運用の際の各種エネルギー機器の容量も得ることができた．解析に用いた代表日のエネルギーパターンが札幌市の 2 月代表日であったため、エネルギー需要パターンの熱電比が非常に大きく、このため、燃料電池の電力出力で賄われるヒートポンプでの電力消費の割合が大きい．燃料電池の運用は電力需要とヒートポンプの電力消費の合計値であることから、電主熱従運転となった．一方、ガスエンジン発電機は、発電効率よりも熱出力効率が高いため、大きな機器容量に対して、低負荷率での運転により電力需要が賄え、エネルギー需要パターンの熱需要は一部を除き満足することから、負荷率への影響は見られなかった．

(2) 直交表－GA ハイブリッド解析法において、 $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表を採用し、太陽光発電の容量を A 列の 2 水準で解析したが、太陽光発電の導入は考慮されなかった。これは、太陽光発電の導入により発電機器の負荷率が低下し、発電効率および熱出力効率を低下させるためであるが、太陽光発電を導入することにより発電機器の燃料消費量を低減することはあきらかである。このため、2 水準の上位にて再解析を実行することにより、太陽光発電の導入量を求める操作が必要であることがわかった。また、バッテリーの導入も考慮されなかったが、これは充電・放電の損失を考慮すると代表日 1 日では蓄電は有利とならないためであることがわかった。

(3) 出力特性の異なる発電機器を使用して構成されたマイクログリッドにおける単純の GA と直交表－GA ハイブリッド解析法との収束誤差の頻度を検証した結果、SOFC とガスエンジン発電機は、直交表－GA ハイブリッド解析法によって、得られた GA 解析範囲にて、解析パラメータにて必ず収束したが、PEFC は収束しない場合があった。これは、解析に用いたエネルギー需要パターンの熱電比において熱需要が相当大きいエネルギーパターンであるため、SOFC の場合は電力から熱を生成することで対応しているのに対し、ガスエンジン発電機では、排熱の出力が大きいため、低負荷率で熱を生成し対応していることがわかった。PEFC は、導入機器の容量によっては、エネルギー需要パターンの熱需要が急激に上昇する朝と夜の 2 つの時間帯において、蓄熱槽からの熱供給がなく、PEFC の排熱とヒートポンプによって熱需要を満たさなければならず、ヒートポンプの成績係数 (COP) を上げるために負荷率が 100% を超過する値に取ることでより解から除外されるためである。

(4) 直交表－GA ハイブリッド解析法において、 $2^1 \times 3^7$ 型 L_{18} 直交表での解析において、太陽光発電の導入による燃料消費量低減が見込めるにも係わらず、導入が考慮されなかった点を改善するために、使用する直交表を $6^1 \times 3^6$ 型 L_{18} 直交表に変更し、太陽光発電の水準数を 2 水準から 6 水準にしたことにより、太陽光発電の導入量を考慮することが可能となった。

以上のことから、直交表－GA ハイブリッド解析法は、単純 GA による解析よりも高速で、高精度な解析が可能となる。また、複数の連続した代表日における解析を実行すること蓄電池の運用に係る計画についてさらに検討する必要がある。

記号表

C	：	費用	[Yen]
C	：	容量	[kW, kWh]
COP	：	成績係数	
d	：	十進数の値	
E	：	電力	[kW]
ex	：	実験番号	
F	：	燃料消費量	[kWh]
F	：	関数	[Yen]
f	：	燃料消費量	[kWh]
\overline{f}	：	平均評価値	[kWh]
f	：	評価値	[kWh]
h	：	熱	[kW]
Δh	：	熱消費	[kW]
I	：	電力の消費を伴う機器数	
J	：	熱の消費を伴う機器数	
M	：	発電機器の台数	
N	：	熱機器の台数	
N	：	数	
n	：	番号	
p	：	電力	[kW]

Δp	:	電力消費	[kW]
t	:	サンプリング時刻	[Hour]
x	:	水準値	[kW]

ギリシャ文字

α	:	重み係数	
φ	:	効率	
φ	:	コスト	[Yen]
η	:	負荷率	[%]
λ	:	期間	[Year]
θ	:	単価	[Yen/kWh]

添え字

btc	:	バッテリーの充電	
btd	:	バッテリーの放電	
cd	:	パワーコンディショナ	
$chrom$	:	遺伝子モデル	
$conv$	:	比較システム	
cr	:	染色体	
ek	:	直交表	
fc	:	燃料電池(SOFC または PEFC)	
ge	:	ガスエンジン発電機	
h	:	熱機器	
hp	:	ヒートポンプ	

<i>i</i>	：	電力の消費を伴う機器の番号
<i>j</i>	：	熱の消費を伴う機器の番号
<i>k</i>	：	システム
<i>ls</i>	：	設計パラメータの水準値
<i>m</i>	：	発電機器の番号
<i>mh</i>	：	月
<i>n</i>	：	熱機器の番号
<i>needs</i>	：	需要
<i>obj</i>	：	目的
<i>p</i>	：	水準
<i>p</i>	：	発電機器
<i>pl</i>	：	設計パラメータの番号
<i>pv</i>	：	太陽光発電
<i>r</i>	：	2 の乗数
<i>rad</i>	：	放熱
<i>st</i>	：	蓄熱槽
<i>year</i>	：	償却年

参考文献

- [1] 総務省統計局「世界の統計 2016」，世界人口の推移，available from <<http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm>> (2016c), (参照日 2017 年 5 月 20 日).
- [2] 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2015」，世界の一次エネルギー消費量の推移（地域別，エネルギー源別），available from <<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-2-1.html>> (2015c), (参照日 2016 年 5 月 22 日).
- [3] BP Energy Outlook, BP Energy Outlook PowerPoint, available from <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>> (2017c), (参照日 2017 年 8 月 10 日).
- [4] 環境省「世界のエネルギー起源 CO₂ 排出量 2013 年」，主な国別エネルギー起源 CO₂ 排出量の推移，available from <http://www.env.go.jp/earth/cop/co2_emission_2013.pdf> (2013c), (参照日 2015 年 10 月 20 日).
- [5] IPCC 第 3 次評価報告書第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約（2001, 気象庁訳），available from <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/tar/TARWGISPMJP.pdf>> (2001c), (参照日 2015 年 10 月 20 日).
- [6] IPCC 第 5 次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約（文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省），available from <http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf> (2013c), (参照日 2015 年 10 月 20 日).
- [7] 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2015」，日本のエネルギー国内供給構成及び自給率の推移，available from <<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>> (2015c), (参照日 2016 年 5 月 22 日).
- [8] 北陸電力「2.日本のエネルギー事情」，主要国のエネルギー自給率（2012 年），available from <http://www.rikuden.co.jp/sp/energiermix/situation_japan.html> (2017c), (参照日 2017 年 7 月 10 日).

- [9] 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2015」，原油の輸入先，LNG の輸入先，一般炭，原料炭輸入先，available from
<<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-3.html>> (2015c), (参照日 2016 年 5 月 22 日).
- [10] 日本は石炭火力とどう向き合うべきか（１）～エネルギー調達リスク評価，各燃料の輸入先（ウラン），available from
<http://ieei.or.jp/2015/07/special201310_01_008/>, (2015c), (参照日 2016 年 5 月 22 日).
- [11] 牧野禎紀，地熱開発促進調査の現状と見通し，日本エネルギー学会誌，Vol.87, No.10, 2008, pp.806-811.
- [12] 雪田和人，藤本晃司，後藤泰之，一柳勝宏，大島貴充，林二一，フライホイールを用いた風力発電装置の出力変動抑制の検討，日本機械学会，第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集，2008, pp.141-142.
- [13] 小林大悟，野口雄平，山暗由大，金子成彦，牛島宏太，自然エネルギー電源の出力変動抑制におけるガスエンジンの利用，Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM 論文集，2011.
- [14] 牛込和也，舟木剛，自然エネルギーの出力変動抑制に向けた EDLC の充放電制御システムに関する考察，電子情報通信学会，信学技報，EE2011-39, 2011, pp.47-52.
- [15] 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2015」，一次エネルギー国内供給及び電力化率の推移，available from
<<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>>, (2015c), (参照日 2016 年 5 月 22 日).
- [16] 地図で読む日本の再生可能エネルギー，旬永続地帯研究会，旬報社，2013.
- [17] 横山明彦，スマートグリッド，日本電気協会新聞部，2010.
- [18] 化学工学会緊急提言委員会，松方正彦，古山通久，ゼロから見直すエネルギー，丸善出版，2012.
- [19] 伊藤義康，分散型エネルギー入門，講談社，2012.

- [20] 一般社団法人日本電機工業会, スマートグリッドとは,
available from <<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/pis/smartgrid/02semantics.html>> (2017c), (参照日 2017 年 3 月 25 日).
- [21] 一般社団法人日本電機工業会, スマートグリッド導入の背景・
目的, available from <<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/pis/smartgrid/03background.html>> (2017c), (参照日 2017 年 3 月 25 日).
- [22] 佐土原聡, 村上公哉, 吉田聡, 中島裕輔, 原英嗣, 都市・地域エ
ネルギーシステム, 鹿島出版会, 2012.
- [23] スマートグリッド.net, 集中型電源, available from
<<http://xn--qckr5ash6jrdvg.net/power/shuchu.html>> (2017c), (参照
日 2017 年 3 月 25 日).
- [24] Nirmal-Kumar C. Nair, Lixi Zhang, SmartGrid: Future networks for
New Zealand power systems incorporating distributed generation,
Energy Policy, Vol. 37, No. 9(2009), pp.3418-3427.
- [25] M.P. Anastasopoulos, A.C. Voulkidis, Athanasios V. Vasilakos, P.G.
Cottis, A secure network management protocol for SmartGrid BPL
networks: Design, implementation and experimental results, Computer
Communications, Vol. 31, No.8-18(2008), pp.4333-4342.
- [26] Ryan Hledik, How Green Is the Smart Grid?, The Electricity Journal,
Vol. 22, No. 3(2009), pp.29-41.
- [27] Mehrdad Setayesh Nazar, Mahmood R. Haghifam, Multiobjective
electric distribution system expansion planning using hybrid energy
hub concept, Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 6(2009),
pp.899-911.
- [28] Zhenzhong Yang, Lijun Wang, Shilei Li, Investigation into the
optimization control technique of hydrogen-fueled engines based on
genetic algorithms, Int J Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 22(2008),
pp.6780-6791.
- [29] Garyfallos Giannakoudis, Athanasios I. Papadopoulos, Panos Seferlis,
Spyros Voutetakis, Optimum design and operation under uncertainty
of power systems using renewable energy sources and hydrogen
storage, Int J Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 3(2010), pp.872-891.

- [30] Li-jun Wang, Man-lou He, Zhen-zhong Yang, Research on optimal calibration technology for hydrogen-fueled engine based on nonlinear programming theory, Int J Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 7(2010), pp.2747-2753.
- [31] C. Y. Lin, C. H. Lay, Effects of carbonate and phosphate concentrations on hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora, Int J Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 3(2004), 275-281.
- [32] Wei-Lung Yu, Sheng-Ju Wu, Sheau-Wen Shiah, Parametric analysis of the proton exchange membrane fuel cell performance using design of experiments, Int J Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 9(2008), pp.2311-2322.
- [33] Roberto C Dante, José L Escamilla, Vicente Madrigal, Thomas Theuss, Juan de Dios Calderón, Omar Solorza, Rubén Rivera, Fractional factorial design of experiments for PEM fuel cell performances improvement, Int J Hydrogen Energy, Vol. 28, No.3(2003), pp.343-348.
- [34] Genichi Taguchi, Experimental design, The third edition, Maruzen, ISBN-10: 4621082809, (2010)
- [35] 矢野耕也, はじめての品質工学, 日本規格協会, 2006.
- [36] 矢野宏, 品質工学入門, 日本規格協会, 1995.
- [37] 矢野宏, 品質工学計算法入門, 日本規格協会, 1998.
- [38] 矢野宏, 品質工学概論, 日本規格協会, 2009.
- [39] 井上清和, 林裕人, 芝野広志, 大場章司, 中野恵司, 入門パラメータ設計, 2008.
- [40] 土木学会応用力学委員会逆問題小委員会ホームページ逆問題副読本, 井上一哉(神戸大), 遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms: GA) 入門, available from <http://tcu-yoshida-lab.org/Inverse_HP/pdf/Kihon_Inoue_GA.pdf> (2017c), (参照日 2017年3月25日).
- [41] 棟朝雅晴, 遺伝的アルゴリズム, 森北出版, 2008.
- [42] 伊庭斉志, 進化論的計算手法, オーム社, 2005.
- [43] 伊庭斉志, 岩波講座物理の世界物理と情報 5 遺伝的アルゴリズムと進化のメカニズム, 岩波書店, 2002.
- [44] 伊庭斉志, 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.

- [45] 愛媛大学工学部情報工学科知能情報工学講座画像処理・理解研究室, コラム／遺伝的アルゴリズム, available from
< <http://ipr20.cs.ehime-u.ac.jp/column/ga/index.html> > (2017c), (参照日 2017 年 3 月 25 日).
- [46] 加用現空, 大岡龍三, 多目的遺伝的アルゴリズムを用いたエネルギー消費と経済性に関する熱源最適計画, 日本建築学会環境系論文集, Vol.75, No.654, 2010, pp.735-740.
- [47] Afzal S. Siddiqui, Chris Marnay, Distributed generation investment by a microgrid under uncertainty, *Energy*, Vol. 33, No.12(2008), pp.1729-1737.
- [48] Huang Jiayi, Jiang Chuanwen, Xu Rong, A review on distributed energy resources and MicroGrid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 9(2008), pp.2472-2483.
- [49] David V. Spitzley, Gregory A. Keoleian and Scott G. Baron, Life cycle energy and environmental analysis of a microgrid power pavilion, *Int J Energy Research*, Vol. 31, No. 1(2007), pp.1–13.
- [50] NEDO Development of several 10kW-class system of disk-type intermediate-temperature SOFC (FY2008), Final report 2009.
- [51] Maeda K., Masumoto K., Hayano A., A study on energy saving in residential PEFC cogeneration systems, *Journal of Power Sources*, Vo.95, (2010), pp.3779–3784.
- [52] Wakui T., Yokoyama R., Optimal sizing of residential gas engine cogeneration system for power interchange operation from energy-saving viewpoint, *Energy*, Vo.36, (2011), pp.3816–3824.
- [53] Narita K., The Research on unused energy of the cold region city and utilization for the district heat and cooling, Ph. D. thesis, Hokkaido University, Sapporo, (1996).
- [54] Mitsubishi Electric Corporation, Chilling unit for air conditioning, available from , http://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/products/air/lineup/central/airchiller/lineup_02_print.html
- [55] NEDO Technical information database, Standard meteorology and Solar radiation data (METPV-3), available from, <http://www.nedo.co.jp>

謝 辞

本論文は国立大学法人北見工業大学において寒冷地・環境・エネルギー工学専攻博士後期課程での研究成果をまとめたものです。

本研究の遂行および本論文をまとめるにあたり，北見工業大学大学院教授 小原伸哉 博士には，大変数多くのご助言，ご指導を賜り，研究活動が停滞するたびに適切かつ的確な叱咤激励を頂きました。また，高等専門学校教員の抱える問題点へのお気遣い，お心遣いや体調面に対するお気遣い，お心遣いも的確に機会をとらえてして頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。研究成果を国内外の学会で発表する機会も数多きいただき，高等専門学校教員経験だけでは得られないような貴重な経験を重ねることができました。今後の自身の高等専門学校における研究活動や卒業研究を担当する学生への指導や接し方にこの得難い経験を活かせるようにしなければならないと考えております。

本研究を行うにあたり，モレル・ホルヘ氏には研究活動や国際会議のプロシーディングの執筆について数多くのご助言を賜りました。感謝申し上げます。

社会人学生として私より後に北見工業大学大学院に在籍し，私よりも先に学位を取得されました旭川工業高等専門学校 川江修氏，函館工業高等専門学校 川合政人氏には，大変良い刺激と数多くのご助言を賜りました。感謝申し上げます。

私が平成 26 年 5 月から平成 27 年 3 月の約一年間，内地研究員として活動して期間を含む北見工業大学大学院にて研究活動をする際や更には北見工業大学大学院を単位取得退学後も研究活動のために北見工業大学を訪れた際の約 7 年間に渡って様々な面においてご協力いただきました電力工学研究室の数多くの学部生，大学院生の皆様に感謝申し上げます。

2017 年 9 月

研究業績一覧

1. 学術論文（学位論文関係）
 - 1) Seizi Watanabe, Shin'ya Obara, Operation Analysis of Microgrids using an Orthogonal Array-GA Hybrid Method, Mechanical Engineering Journal, JSME, Vol.3, No.4 (2016), pp.1-18.
 - 2) 小原伸哉, 渡邊聖司, 直行表－GA ハイブリッド解析による複合エネルギーシステムの運用解析に関する研究, 日本機械学会論文集(B 編) 77 巻 782 号 (2011), pp.2004-2018.
2. 学術論文（その他）
 - 1) Shin'ya Obara, Seizi Watanabe, Balaji Rengarajan, Operation Planning of an Independent Microgrid for Cold Regions by the Distribution of Fuel Cells and Water Electrolyzers Using a Genetic Algorithm, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.36, Issue 22, (2012), pp.14295-14308.
 - 2) Shin'ya Obara, Seizi Watanabe, Optimization of Equipment Capacity and an Operational Method based on Cost Analysis of a Fuel Cell Microgrid, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.37, Issue 9 (2012), pp.7814-7830.
 - 3) Seizi Watanabe, Shin'ya Obara, Study on the Operation Analysis of a Compound Energy System using Orthogonal Array-GA Hybrid Analyzing Method, Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society, Springer (2012), pp.868-873.
 - 4) Shin'ya Obara, Seizi Watanabe, Balaji Rengaraja, Operation Method Study Based on the Energy Balance of an Independent Microgrid Using Solar-Powered Water Electrolyzer and an Electric Heat Pump, Energy, Vol.36, Issue 8, (2011), pp.5200-5213.

3. 国際会議プロシーディングス
 - 1) Seizi Watanabe, Shin'ya Obara, Operation Analysis of Microgrids using an Orthogonal Table-GA Hybrid Method, Proceedings of the Conference on Power and Energy Engineering 2016 (2016), PE04, London, UK.
 - 2) Seizi Watanabe, Shin'ya Obara, Study on Operation Analysis of a Compound Energy System using Orthogonal Table-GA Hybrid Method, Proceedings of the 2nd International Conference on Energy System and Technologies (2013), pp.1-11, Cairo, Egypt.
 - 3) Seizi Watanabe, Shin'ya Obara, Study on the Operation Analysis of a Compound Energy System using Orthogonal Array-GA Hybrid Analyzing Method, Proceedings of 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (2011), pp.1-6, Kyoto, Japan.
4. 国内講演予稿集
 - 1) 渡邊聖司, 小原伸哉, 直交表－GA ハイブリット法における独立マイクログリッドの運用解析－需要変動による影響－, 第 54 回日本機械学会北海道支部講演会, 日本機械学会北海道支部講演概要集 (2016), pp.115-116.
 - 2) 渡邊聖司, 小原伸哉, 鈴木茜, 直交表－GA ハイブリット解析法 における独立マイクログリッドの運用最適化（電力および熱需要の変動による影響）, 平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集 (2015), pp.1-2.
 - 3) 渡邊聖司, 小原伸哉, 直交表－GA ハイブリット解析法による独立マイクログリッドの運用計画の高精度化, 日本機械学会 2015 年年次大会, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集 (2015), S0830201, pp.1-5.
 - 4) 渡邊聖司, 小原伸哉, 直交表－GA ハイブリット解析法における独立マイクログリッドの運用最適化, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集 (2014), pp.1-2.

- 5) 渡邊聖司，小原伸哉，直交表分析－GA ハイブリット解析を用いた複合エネルギーシステムの運用最適化，第 53 回日本機械学会北海道支部講演会，日本機械学会北海道支部講演概要集 (2014)，pp.147-148.
- 6) 渡邊聖司，小原伸哉，直交表－GA ハイブリッド解析法を用いた複合エネルギーシステムの計画方法，日本機械学会第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012，日本機械学会第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012 講演論文集 (2012)，pp. 370-373.
- 7) 渡邊聖司，小原伸哉，直交表分析－GA ハイブリット解析による複合エネルギーシステムの運用最適化，第 50 回日本機械学会北海道支部講演会，日本機械学会北海道支部講演概要集 (2012)，pp. 83-84.
- 8) 渡邊聖司，小原伸哉，直交表分析－GA ハイブリッド解析による複合エネルギーシステムの運用最適化に関する研究，空気調和・衛生工学会北海道支部第 4 5 回学術講演会論文集 (2012)，pp.179-182.