

機械システム設計における最適化



研究ノート

伊東弘一*

機械設計のプロセスは、企画段階から基本設計、細部設計等を経て製図に至る迄、多種多様な作業内容を含んでいる。それらの作業プロセスにおいて、設計者は極めて多くの意志決定を行っていかねばならないが、その際種々の制約条件を考慮しながら性能の向上や製造コストの低減化をたとえ無意識下であれ目指しているに違いない。換言すれば、機械技術者はより高性能で無駄の無い機械を作り出そうと努力しているのである。ただ、それらの意志決定は、多分過去の経験やデータに基づいてエンジニアリング的直感力を試行錯誤的に働かせながら行われていることは事実である。しかしながら、設計対象とする機械システムがより複雑化すると、エンジニアリング的直感力で適切に判断したり、試行錯誤的な設計ルーチンで合理性に富む設計案を導出することが次第に困難となってくる。すなわち、総合化的側面の強い設計計画に対する適切なシンセシス手法が必要となってくるのである。精度よい実験データやシミュレーション計算と結果を十分活用してより望ましい機械システムを構築していくためには、アナリシスの精度にバランスしたシンセシス手法の適用も重要となってくるのである。

筆者は、シンセシス手法の一つである最適化法を各種機械システムの設計問題に適用し、より合理性に富む解を導出するための方法論について研究を行ってきた¹⁾。最適化とは、種々の制約条件の下に、設定した目的関数を最大化または最小化する未知変数を決定することである。上記最適化法は、機械設計以外に工学の広範囲な分野に応用されている。また、光は2点間の最短時間経路を通過すること、しゃぼん玉は球

という表面積最小形状にふくらむことや力学におけるハミルトンの変分原理などの例が示すように、自然法則の中に最適化という原理が包含されていると考えることもできる。

さて、機械設計では、一般に各種の物理関係式やエンジニアリング的諸条件などが制約条件として、製造コストあるいは機械効率に代表される性能特性などが目的関数として、また機械の規模や形状、各種状態量などに関連した設計変数が未知変数として選ばれる。このようにして構成された最適設計問題に対する解を求めるために、応用数学の分野で開発された各種の数理計画法が適用される。採用される手法は、目的関数や制約条件式が未知数変に関して線形か非線形か、未知変数が有限個の変数かそれとも無限個か、未知変数が連続値的か離散値しか取り得ないのか、目的関数が単一か複数か、また問題を確定的でなく確率的に取り扱うことが必要か否かなどによって異ってくる。代表的ないくつかを列挙すれば、線形計画法、二次計画法、多種多様な非線形計画法、整数計画法、変分法、動的計画法、最大原理等々である。

研究対象として取り上げたものは、船用ハッチカバー開閉機構、フォークリフト用リンク機構、パワーショベル・リンク機構、半没水浮体などの形状設計問題、電気式連続加熱炉、ヒートポンプシステム、吸収冷凍機・冷却塔システム、蓄熱システム、地域冷暖房熱供給システム、LNG船を含む船用エネルギー供給プラント、各種コージェネレーション・システムなどの各種機械システムに対する設計計画問題である。これらの設計問題に対して、種々の計画手法およびその効果について研究を行ってきたが、以下ではエネルギー有効利用技術の一つとして最近注目を集めているコージェネレーション・システムについての研究成果を紹介しよう²⁾。

*伊東弘一 (Koichi ITO), 大阪大学工学部, 産業機械工学科, 助教授, 工学博士, 機械システム設計

コージェネレーション・システムとは、その言葉通りに解釈すれば「二つ以上の有効な二次エネルギーを同時に発生するシステム」と定義できる。一般には、熱電併給システムと訳されているように上記の有効な二次エネルギーとして熱と電力が考えられ、ガスエンジンやガスタービンなどの熱機関の軸出力で発電機を駆動するとともに、その際の排熱を冷暖房・給湯などの熱供給にカスケード的に有効利用しようとするものである。大規模発電プラントの熱効率は現在も高々40%強であるのに対し、発電時排熱の積極的有効利用により総合熱効率を70~80%迄飛躍的に高め得るコージェネレーションの考え方は基本的に自然の理にかなった方策といえる。

コージェネレーション技術のキー・ポイントは、基本的に発電や熱供給を単独で行うのではなく、各要素機器を上手く組み合わせてエネルギーの総合的有効利用を計っていく点にあり、その意味でシステム技術が非常に重要となってくる。すなわち、電力や熱の需要量に合わせて、適切なシステムの機器構成を計画し、また需要変動に対して上手くシステムを運用していくことが成功の鍵となる。その際、単に熱需要といっても冷房や暖房・給湯・蒸気というように要求される温度レベルは多様である。また、時々刻々変動する需要量を年間を通じて考慮していくことは当然必要となるが、一方電力と熱はある意味で非常にエネルギー需要特性が異なっていることを認識しておかねばならない。すなわち、例えば最近計算機用電力の瞬時停電がホットな話題になっているように、電力は非常に敏感で神経質なエネルギー需要であるという特徴があり、電圧や周波数の変動もきめ細かに制御される必要がある。一方、熱エネルギーの方は電力程神経質ではなく、例えば部屋を暖房する場合でも部屋自身の熱容量が結構あるので急に室内温度を上昇させること自体不可能であり、また室内温度が設定値から数度ずれていても我々はあまり神経質にはならない。

一方、コージェネレーション・システムの検討においては、電力の輸送は比較的簡単であるが貯蔵が困難であること、逆に熱は多少貯蔵が

できても輸送が困難であるという基本的特質の相違を十分認識しておく必要がある。また、外気温の季節的・時間的变化による機器特性の影響や、電力会社からの一般商用電力および都市ガスの料金が季節別および深夜電力のように時間帯により変わることや、ガス冷房料金のように用途によっても変化することを考慮しなければならない。さらに重要な事柄は、最終需要者端エネルギー需要量以外に、システム運用のための新たなエネルギー需要量が発生するという事実である。例えば、ある冷房需要量を電動ヒートポンプでまかなうものとするれば、新たな電力需要量を発生する。その電力供給のために、例えばガスエンジンを駆動すれば新たに利用可能な排熱が発生するように、熱と電力の需要と供給は複雑にからみあっており、システム運用方策の決定をより難しい問題としている³⁾。また、各構成機器の補機駆動用の電力需要量発生も考慮に入れる必要がある。

以上の問題に加えて、システム構成が複雑になればなる程指数関数的に運用方策に関する代替性が増大するという事実が、計画問題を一層複雑にしている。例えば、要素機器が10台から構成されるシステムにおいては、構成機器の運転・停止のみに関する運用方策の代替案が $2^{10} = 1024$ 通り存在するように、組み合わせに関する次元ののろいが本質的に存在するからである。さらに、機器の運転・停止条件のみならず、運転負荷レベルを同時に決定する必要があることは言及するまでもない。

コージェネレーション・システムの設計計画においては、以上述べたような諸点に注意して設計段階でシステムの運用方策を考慮しながらカスケード的エネルギー有効利用というコージェネレーションの考え方を生かした計画立案を行っていく必要がある。しかしながら、上述のようにシステムの運用計画を含めた設計計画問題は非常に複雑で、試行錯誤的手法で適切な計画立案を行うことは困難を極める問題となっている。特に、コージェネレーションのようなシステムにおいては、導入される建物や施設毎にエネルギー需要量が種々異なり、過去の経験が仲々役立たないことも問題解決を一層困難にし

ている。

上記設計問題をより合理的に計画立案する方策として、最適化法を導入した手法の検討を種々行ってきた。すなわち、システム構成機器の性能特性やエネルギー需給バランスなどの各種制約条件のもとに、単位時間当りのエネルギー・コストを最小化するシステム運用方策を求めたり、長期的経済性に優れたシステム機器構成案を最適化法により決定する考え方である。最適化法としては、各機器の負荷レベルを考える際、運転・停止条件を同時に考慮する必要性から混合整数計画法や、非線形計画法の一種である一般縮小勾配法を採用している。問題構成に当っては、補機動力、外気温の機器特性への影響、季節別・時刻別・用途別料金変動、機器の運転・停止に伴う熱損失、蓄熱槽の影響、一般電力系統との連系、ヒートポンプの運転モード選別などに対する詳細な考慮ができるように定式化を行っている。また、ガスタービン、ガスエンジン、ディーゼルエンジンを主要構成機器とする各種コージェネレーション・システムに対して、できる限り種々の機器構成を持つ代替システムが効率よく検討できるように、汎用性に富むマン・マシン対話を重視した計算機援用計画支援システムを構築した⁴⁾

上記手法の導入により、合理性に富む最適システムの計画立案が可能となった他、計画立案に要する労力と時間の短縮という面での効果も大きいことが判明した。さらに重要なことは、

コージェネレーション・システムは従来熱追従や電力追従という非常に拘束性の強い運用方策を一般に採用してきたために需要の熱電比変化に対するフレキシビリティ性が非常に低いものとなっていた。しかしながら最適化法の導入に基づき、需要量を始めとする状況変化に時々刻々フレキシブルかつインテリジェントに対応できるシステムの構築が可能となったことである。上記最適化法に基づく手法は、すでに設計計画段階においては実用化の段階となっているが、今後運用および制御段階でも実システムへ導入できるものと期待される。

以上、コージェネレーション・システムに対する最適化法の適用例について述べてきたが、このようなアプローチは勿論他の各種機械システムに対しても適用可能である。また、たとえ最適化計算を行わなくとも、どのような制約条件下に、どのような目的で何を決定するのかという問題点を明確化しつつ議論を展開できるという効果がある。一度試して見られることを期待しつつペンを置く次第である。

参 考 文 献

- 1) 伊東：日本機械学会誌，91—833 (1988)，111.
- 2) 伊東：システムと制御，32—1 (1988)，32.
- 3) 伊東：コージェネレーション，1—2 (1986)，12.
- 4) 伊東・堀井・片山：日本機械学会論文集，C編，53—491 (1987)，1607.