

[別紙1]

## 論文の内容の要旨

論文題目 A Framework for Generation and Evaluation of Design Alternatives  
in Product Life Cycle Design  
(和訳 ライフサイクル設計における設計代替案の生成と評価)

氏名 于随然

持続可能な資源循環型社会の実現と、ユーザが要求するサービスを適切に提供するため、製品設計は、設計の初期段階においてその製品のライフサイクル全体での関係主体（メーカ、ユーザなど）の利害関係を考慮に入れながら、ライフサイクル全体を適切に設計しなければならない。ライフサイクル設計（LCD: Life Cycle Design）とは、製品設計の初期段階において、製品設計だけでなく、さまざまな視点（目標）を考慮しながら製品のライフサイクル全体を設計することである。したがって、ライフサイクル設計においては、従来の製品設計は、製品単体の品質追求から想定する製品ライフサイクルに適合させることが求められる。加えて、アップグレード、メンテナンスのような製品のライフサイクルで生じるイベント群をライフサイクルシナリオとして設計するとともに、製品設計とライフサイクルシナリオの整合性を実現することも求められる。このようにライフサイクル設計においては、さまざまな視点（目標）を考慮しながら、製品とそのライフサイクルを設計するという非常に複雑な問題を取り扱うことになる。

このような複雑なライフサイクル設計問題を解くために、本研究では二つのプロセスを導入する。前半のプロセスでは、ユーザの要求や技術的可能性に加えて、製品のライフサイクルシナリオを表現するライフサイクル変数を用いて、設計代替案を数多く生成させる。後半のプロセスでは、前半のプロセスで得られた数多くの設計代替案から、ライフサイクル全体を考慮した評価を行うことにより、最適な代替案を選択する。このような二段階のプロセスを用いることにより、ライフサイクル設計という複雑な問題を解くことが可能となる。

現在、さまざまなライフサイクル設計方法が提案されているが、これらの多くは製品設計者が自らの経験に基づいて複数の設計代替案を提案し、ライフサイクルシミュレーションによりその妥当性を検証するというものである。この方法における問題点は、設計者の自らの経験に基づいて代替案の生成を行っているため、ライフサイクルパラメータが適切に考慮されているとは限らず、また、設計代替案に偏りがある可能性がある。

本研究では、既存のライフサイクル設計方法の弱点に対して、新しいライフサイクル設計方法を提案する。具体的に次の特徴を持つ。(1) 設計代替案の生成は、設計者の経験によるのだけではなく、製品ライフサイクルを規定するライフサイクル変数を定義し、これを設計変数と同じように扱うライフサイクルモデル(計算機で扱うことのできる製品変数の関係性を表現したモデル)を構築し、最適化手法と感度解析を組み合わせることで、ライフサイクル全体を考慮した比較的適切な設計代替案を生成する(図1)。(2) 設計代替案の評価手法として、ライフサイクルシミュレーションに加えて、MCDM (Multi-Criteria Decision Making) と AHP (Analytical Hierarchy Process) の方法を導入することにより、定量的に取り扱うことのできない評価基準も考慮して設計代替案を評価する(図2)。

設計代替案の生成は次のようなステップがある。①製品単体の要求機能を決定する。これは従来の製品設計で考慮されていた項目で、いわゆる製品仕様値と同じ意味である。これは従来の製品設計と同様に、市場分析 (Voice of Customers)、QFD(品質機能展開、Quality Function

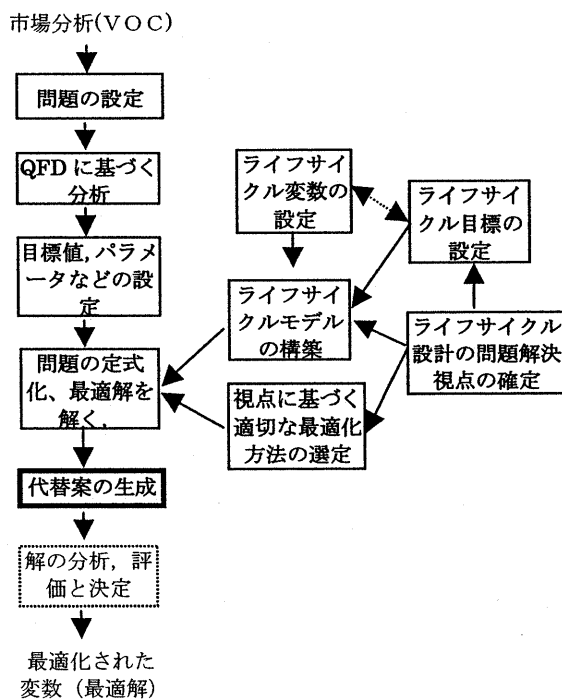


図1. 最適化手法を用いた設計代替案の生成

Deployment)などによって、目標値、パラメータなどを設定する。②製品ライフサイクルを考慮するために、製品寿命、MTBF、アップグレード時期といった製品ライフサイクルを規定するライフサイクル変数を設定する。③製品ライフサイクル全体を対象とした場合に新規に考慮しなければならない、ライフサイクルユーザコストやアベイラビリティなどのライフサイクル目標を設定する。そして、これらのライフサイクル変数とライフサイクル目標との関係性を計算機上で表現するライフサイクルモデルを構築する。④ライフサイクルモデルを定量的に扱うために、既存の製品データや要素技術のデータなどから、データ予測する手法を用いる。⑤従来の製品設計の設計変数とライフサイクル変数を用

い設計問題を定式化し、最適化手法を用いて最適解(設計案、一組のライフサイクル変数)を求める。ここでは、複数のライフサイクル目標を同時に実現することが困難であることが予想され

るため、多目標最適化手法を採用している。⑥求めた最適解には、ライフサイクル変数の係数やライフサイクル目標に不確定要素、不確実性があるため、これらの変数に対して、感度解析やパラメータ解析を行うことにより、複数の代替案（設計代替案）を作成する。

ライフサイクルモデルは、ライフサイクル目標とライフサイクル変数の関係性を計算機上で表現するモデルである。一般的なライフサイクル目標はユーザ側のライフサイクルコスト、メーカー側のライフサイクルコスト、メーカーの利益、稼働率、エネルギー消費、廃棄物量などである。また、一般的なライフサイクル変数は製品寿命、ライフサイクル管理に関するもの（メンテナンス、アップグレード）、エンドオブライフ (End-of-life) 戦略、モジュールのMTBF (Mean Time Between Failure) などがある。ライフサイクルモデルでは、これらの目標と変数の関係性を符号や関係式で関連づける。

本研究で用いた多目標最適化手法は、目標をダイレクトに表現できること、目標の優先順位がつけられること、取り扱える変数の形式に汎用性があることなどの特長を持っており、ライフサイクル設計問題において、適切な最適化手法である。この手法では、目標の優先順位をつけ、最適化することで、目標に達成までの距離（未達成の大きさ）の和を最小化することができる。

ライフサイクル目標の不確定要素、不確実性とは、新規製品の設計であって現存のデータから推測する必要があること、将来発生するライフサイクルイベントは確率的に生じることなどによるものである。そのため、得られた最適解は必ずしも真の最適とはいえない。したがって用いた変数に関して感度解析やパラメータ解析を行うことにより設計代替案を生成する。

後半のプロセスでは、生成した代替案から最適代替案を選択する。ここでは、次のようなステップがある。①評価基準の選択を行う。製品のライフサイクルを全体的に評価するためには、各方面の評価基準が必要である。これらの基準は、数学的にモデル化できる基準と数学的にモデル

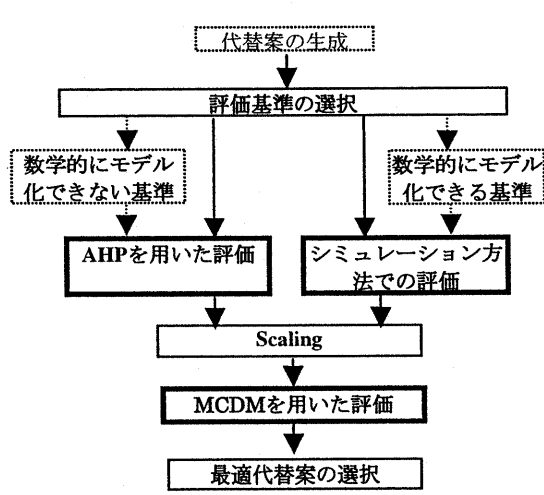


図2. 最適代替案の評価のプロセス

化が難しい基準がある。②選択した基準で設計代替案を評価する。数学的にモデル化できる基準はライフサイクルシミュレーション方法で代替案を評価する。数学的にモデル化できない基準はAHP (Analytical Hierarchy Process) 方法を用いて評価する。③二つの評価は単位が異なるので、スケーリングを行う。④MCDMを用いて総合的な評価を行い、最適代替案を選択する。

本研究は、ライフサイクル設計における設計代替案の生成と評価を行い、最適設計案を導出するフレームワークを提案した。このフレームワークを、実際の冷蔵庫などの製品に適用し、ライフサイ

クル設計を行った場合の製品設計、ライフサイクル設計の結果を求め、本フレームワークの実効性を検証した。本フレームワークを活用し、ライフサイクルモデルの精度とデータの精度を向上させることによって、さまざまな製品のライフサイクル設計を可能にすることができる。