

B-16. 地球温暖化抑制のための汚水・廃棄物処理処分システムの確立と評価に関する研究
(3) 廃棄物の減量化・リサイクルのための製品設計変更の評価と解析に関する研究

研究代表者 工業技術院機械技術研究所 服部 光郎

通商産業省 工業技術院機械技術研究所

生産システム部	複合加工研究室	服部 光郎
物理情報部	数理工学研究室	野村 昇
生産システム部		井上 英夫

平成4-6年度合計予算額 24,401千円
(平成6年度予算額 8,149千円)

〔要旨〕

製品の製造、使用、廃棄の各段階で温室効果ガスが排出される。また、製品が寿命などで廃棄品化すると、多くは廃棄物として排出され、処理システムが必要になるだけでなく、資源の新たな消費を意味することにもなる。そこで温室効果ガス排出抑制にとって、廃棄物減量化が重要であり、少ない資源消費、資源リサイクルを意味する効果的な対策となる可能性がある。廃棄物をできるだけ出さない製品が期待される。

本研究では、廃棄物、汚水の排出後の適正な処理をめざす他のサブテーマとやや異なり、廃棄物減量化、温室効果ガス排出抑制を製品のライフサイクルの上流、製品設計で考慮することを目指し、設計内容やその変更が製品のライフサイクルで温室効果ガスなどの環境負荷に対しいかなる効果を持つかを評価、解析する手法を開発するとともに、設計対象製品の環境負荷評価ツールを効果的に組み込んだ設計支援システムの開発を行った。

具体的には、CADシステムやデータベースシステムをウインドウタイプの統合化した環境として、会話型設計支援環境を構築し、そこへ環境負荷評価ツールの組み込みを進めた。そのためにCADシステムのコマンドを別のアプリケーションからも発行可能とするプロセス間通信手法とCADカスタマイズを組み合わせる作業を行った。

また、環境負荷評価を考慮する設計について検討、考察を行い、設計の占める位置の重要性、評価項目間で矛盾するトレードオフの存在、その解消など設計の特徴を明らかにした。初期設計段階では材料選択と構造決定が重要であり、前者については、機能、経済性、環境負荷削減の評価項目から、軽量化と材料強度の両立問題を導出する乗用車設計例を通して設計戦略のあり方を考察し、後者については製品のリサイクル性に大きく影響する易解体性構造の評価法として人間工学的手法の適用を試みた。これらの設計手法を開発を進めた設計支援システムに反映させた。

〔キーワード〕 温室効果ガス、廃棄物、リサイクル、ライフサイクルアナリシス、設計

1. 序

温室効果ガス排出を抑制する方策として、個々の排出源での削減を講ずるだけでなく、製品の生産から、使用、廃棄にいたる全プロセス（製品のライフサイクル）にわたる総排出量を低減することが、とりわけ製造分野からの地球温暖化防止への貢献として、求められている。なぜならば、原材料から素形材への処理、加工、組立、使用、廃棄処理などの個々のプロセスで独立に温室効果ガス削減の方策を構じた場合には、別のプロセスでの排出量を増やしたり、対策を困難にするなど、総排出量の削減のためには、さまざまなトレードオフ関係が発生すると考えられ、個々の対策が全体として効果的であるか評価することが困難な場合が有りうるからである。

生産プロセスにおいて設計プロセス内容は、設計より下流の加工、組立などで発生する問題、たとえば加工の容易さ、組立手順などに決定的影響を持つ。とすれば、各プロセスでの環境負荷発生にも大きな影響を持つことになる。今後は、加工の容易さなど従来の生産性、経済性に関連する評価に加えて、温室効果ガス抑制といった地球環境負荷の評価を含む必要がある。設計段階での設計変更や、代替案が、製品のライフサイクルでの環境負荷、たとえば温室効果ガス排出抑制の観点から予め評価できる手法が求められる。

環境負荷の評価では、製品のライフサイクルについて温室効果ガスをはじめとする様々な負荷を評価しようとする手法としてライフサイクルアナリシス（LCA）の研究が行われている。しかし、設計者の意志決定を支援するツールとしては未開発である。

環境負荷評価を進めながら設計を行えるこうしたツールを備えた設計支援システムが必要となっている。さらに、廃製品後のプロセス、解体、再生までを視野に入れて、設計における意志決定で特に重要な材料選択や構造決定などでトレードオフ問題を解決しながら進めるべき基本的設計手法の確立が必要である。

2. 研究目的

消費物資や製品は、大量の資源・エネルギーを投入し生産され、その過程や廃棄物になって処理される過程で多量の温室効果ガスを発生する。廃棄物の減量化及びリサイクルを意図する製品設計変更について、従来型の製品設計に比し、温室効果ガス排出抑制の観点から、その対策効果を評価・解析する。

そのため、製品の生産プロセス及びその廃棄物処理プロセスの解析・評価、温室効果ガスの排出モデル等を組み込んだ設計支援システムを開発して、廃棄物減量化、リサイクルを考慮する製品設計変更の効果を評価しながら環境負荷の少ない製品の設計を進める手法を確立する。

3. 研究の内容

(1) LCAの動向

温室効果ガスなどの環境負荷を、製品のライフサイクル（資源採取－素形材－生産－配送－使用－廃棄／リサイクル）の全プロセスで総合的に分析・評価しようとする試みは、環境問題への認識の深まりとともにライフサイクルアナリシス（LCA）として始められてきた。設計段階で環境負荷の小さな製品設計を行うためにはこうした負荷の評価手法、ツールが必要である。そこで本研究と関連が深いと考えられるLCAの最近の動向について調査した。

アメリカSETAC（Society of Environmental Toxicology and Chemistry）によると、LCA

は、Goal Definition（目的の明確化）、Inventory（データ収集）、Classification（解析）、Evaluation（評価）の手順に分けて考えることができる¹⁾。データ収集のためには、目的、スコープ、問題の境界、対象とする製品グループ、機能などの明確化と、注目する環境負荷を決定しなければならない。また、データ収集にあたっては、対象製品の定義、ライフサイクルに何を含めるか、エネルギー源／タイプの選択、副産物の取扱などが結果を左右することに十分な注意が必要である。

これまでに取り上げられたパラメータとしては、生態系／社会／商業行為への効果、エネルギー、資源、品質（耐久性など）、大気排出物質（NO_x、CO、CH₄、SO₂、CO₂など）、水質汚濁物質、土壌汚染物質、放射性排出物質などがある。

ライデン大学、ボルボ社のE P S（環境インパクトシステム）、エコビラン社、プロクター＆ギャンブル社などから事例が発表されている。複数の環境負荷の評価を一本化した指標（エコユニットなど）をトータルな評価に利用する場合と、個々の環境負荷評価を並列に扱う場合に大別される。L C Aを進める目的には、複数製品の比較、製品改良効果の評価、改善すべきプロセスの発見などが指摘されている。

また、機械技術研究所で提唱している環境調和型生産技術“エコファクトリー”²⁾をはじめとして生産分野の研究者による環境に配慮した製品設計・生産への関心は近年一気に高まっている³⁻⁴⁾。L C Aはここでも重要性が指摘されている。

環境負荷とくに廃棄物の減量化や資源消費の削減にはリサイクルが注目され、製品の設計段階での易解体性への考慮の研究の重要性が指摘されている。

(2)環境負荷を考慮する設計支援システムの要件

加工組立製品の製品設計およびその変更が、製品のライフサイクルにおける資源消費、エネルギー消費、産業廃棄物排出量、市場での資源消費などに係わる影響、効果を解析・評価するフレームの確立に資するため、要求されるモデル、機能、データなどについて検討した。本研究では、この検討を基礎にしてプロトタイプ的な設計支援システムを構築した。

加工組立製品の設計段階において、設計対象を、概念設計、詳細設計と具体化させる過程で、設計変更や、代替案の選択が必要となる。従来は、コスト、納期、強度、工場設備、加工性、組立性などから評価されるのが一般的であった。したがって廃棄物量や、リサイクル量、さらには温室効果ガスなど環境負荷を指標にして設計を行う場合でも、上記のような評価も必要である。いわゆる機械設計で当然検討すべきマシプロパティ、強度、衝突チェックなど設計計算は含まれているべきであり、設計変更時になどに自動的に計算、評価が実行されることが望ましい。

以上のような評価を可能とするために、まず基本的な3つのモデルが必要である。すなわち、図1に示すように、製品モデル、製品のライフサイクルモデル、及びプロセスモデルである。設計を通じてこれらのモデルが詳細化されていくと考えることができる。

製品モデルには、素材形状、部品形状、材料、要求属性などが記述される。

製品のライフサイクルモデルは、対象とする製品について資源採取から廃棄／再生に至る履歴を表現する。ツリーなど構造を持ったプロセスや、さらに詳細にサブプロセスの集合として記述される。同じ製品でも、ライフサイクルモデルが異なれば、環境負荷の評価は変化する。

プロセスモデルは、ライフサイクルの各々のプロセスを表現する。加工、組立、使用などの各

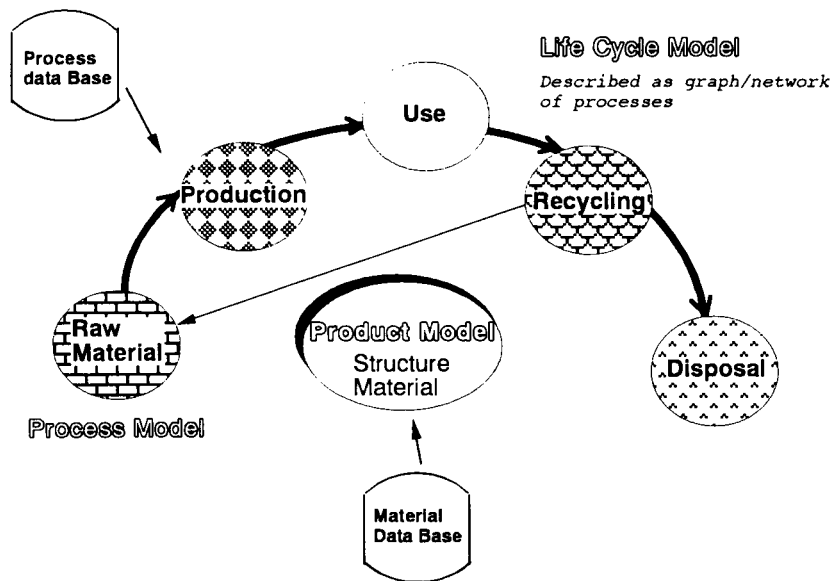


図1 環境負荷を考慮する設計支援システムに必要なモデル

プロセスは、複数のサブプロセスが用意される。たとえば加工プロセスでは、研削、旋削、ドリルなど様々なサブプロセスが考えられる。プロセスモデルは、資源、エネルギー、環境負荷物質などの入出力関係、関数などで記述されると予想される。製品やいろいろなプロセスを統一的にモデル化する手法は、生産ソフトウェアの分野で未だ研究途上であり決定版は現れていない。

次に、いくつかのデータベースが必要である。第1に材料に関するデータベースが必要である。機械設計に必要な材質データ（密度、弾性係数、熱伝導率、強度などの属性）などと、素形材製造のためのエネルギー源単位、廃棄物・量、などの環境負荷に関連するデータの両者が蓄積されねばならない。第2にはプロセスごとのデータベースが必要である。プロセスモデルに対応して、入出力関係、環境負荷物質算出関数、あるいは様々な源単位表などが用意される。

設計計算、工程設計、組立性／解体性評価、経済性評価、環境負荷評価などは、モデルとデータベースを利用するプロセッサ群として用意するのが望ましい。知識ベース、シミュレータなどもその中で必要なツールと考えられる。

評価・解析のためのツールは、設計者の意志決定を効率的に支援でき、従来からの設計評価と温室効果ガス排出抑制効果などの地球環境負荷に関する評価が行えることが重要である。

(3)ソフトウェア環境

前項で述べたような検討の結果、設計支援システムのソフトウェアの大枠としては、ワークステーション上のウインドウシステムに、CADシステムおよびデータベースシステムを組合わせ、そのベースの上に、マルチウインドウタイプの会話型システムを構築することとした。

CADシステムは、カスタマイズ可能なアプリケーションシステムを導入し、データベースシステムは、グラフィック機能も使えるものを導入した。

たとえば設計に関するウインドウは、CAD及び設計入出力ブラウザの2種類で構成し、個々の部品の幾何形状、材質などのほか素形材形状などの情報を含む製品モデルを作り上げていく。素材の選択があれば製品モデルに取り込まれる。また、ライフサイクルモデルの素形材製造部分

のデータが書き込まれる。以降の各プロセスでのモデルの詳細化、データ交換など試行錯誤を含む自然な設計行為を可能とするよう、システムを中心部分として機能の詳細な検討を進めた。

CADシステムに固有のコマンドを別のソフトウェアによって起動されたプロセスからも発行できるようプロセス間通信手法とCADシステムを組合せる作業を行った。これは、製品を構成する部品の強度など、いわゆる設計計算や、材質、加工プロセスなどのデータとCAD上での形状データとの対応づけのために必要であり、また、ライフサイクルの各プロセス間での共通的なデータ交換のためにも有用となろう。最近パソコンCADでもこうした他のアプリケーションとの透明なやりとりを可能としたものが現れているが先行したことになる。

一例として、表形式データベース上に、簡単な軸の設計問題の設計諸元を入力して、設計結果図面をCADシステムに出力し、そこでCADシステム上の関数を利用して部品体積を求めることが可能となっている。さらに、データベースにこの計算結果の値を返すこともできる。

図2に、開発を進めた設計支援システムの概略を示す。プロトタイプとしては、メニューで示した材料選択と、易解体性の評価として分解作業性の評価を組み込んでいる。前述のように市販のCADシステムとデータベースにも連結するI/O用ウィンドウをもとにメニュー駆動、会話形式で設計を進める。たとえば、材料選択メニューを選ぶと重量最小などの設計戦略を決め、必要な材料特性を入力してトレードオフ関係を解いて材料候補を提示するというプロセスをとることができる。また、複雑形状でなければ製品を3次元ソリッドモデルで表現して衝突チェックなどを行うCADシステムの機能を効果的に利用して分解作業性を評価して設計者の意志決定を支援する。

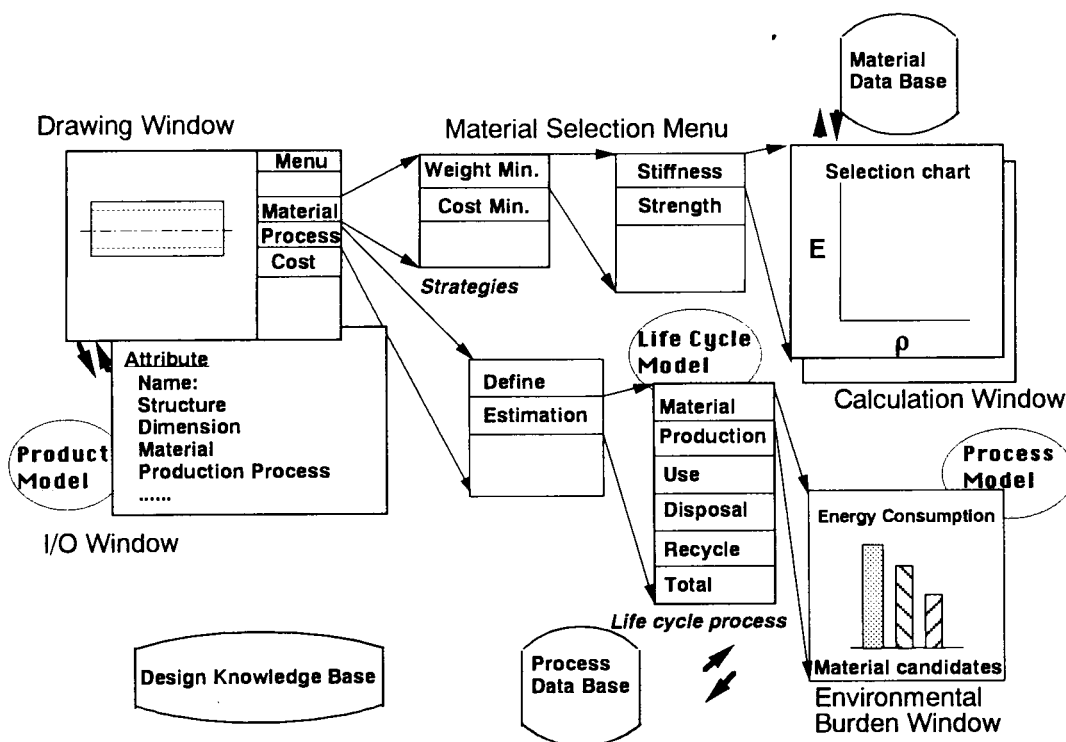


図2 設計支援システム概略図

(4) 環境負荷を考慮する製品設計手法（材料選択の場合）

環境負荷を考慮する製品設計では、従来の評価要素と環境負荷評価要素をグローバルな視点で最適化しなければならない。この場合、コンカレントエンジニアリング手法が非常に有効である。生産系、市場、還元系のすべてを製品設計評価領域とするコンカレント設計での評価要素を考慮する必要がある。製品設計の場合、製品を構成する材料選択と構造設計が最適化対象となる。

各評価項目間を両立させるために、製品設計では図3に示すように、相反するトレードオフ問題を解決しながら最適化させていく手法・戦略が重要である。設計意図や、製品開発意図によってきまる評価項目の優先度を考慮しつつ、各評価項目を評価、満足させることが設計の目的となる。開発を進めたマルチウインドウによる設計支援システムでは、前述のように概念設計段階で材料選択のメニューを選ぶと、次にどの戦略によってトレードオフ解決を図るか選択し、必要な強度特性を選択すると、戦略と特性とから適切な選択チャートを提示するなど材料候補の決定に支援が得られる。

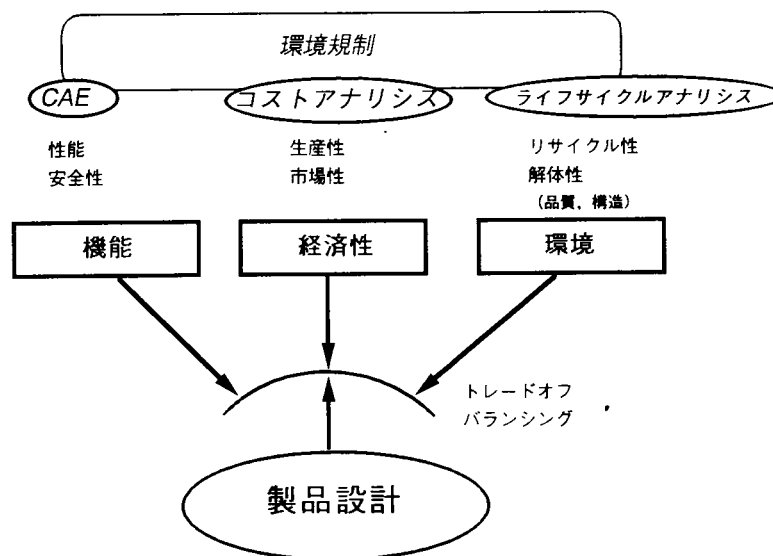


図3 製品設計におけるトレードオフ問題

乗用車の材料選定を例にして、開発中の支援システムにおける製品設計の方法、戦略について説明する。図4に示すように、ここでは機能としての安全性（強度）、経済性として使用時の燃料消費、材料コストなど、また環境負荷として廃棄物、使用時の二酸化炭素排出量などを評価項目と考える。

3評価基準（強度、経済性、環境）のトレードオフ関係を考える場合、たとえば経済性、環境負荷（廃棄物削減）の両基準から軽量化を設計指針とできる。そこで、軽量化と強度とのトレードオフが問題となる。両者の関係を定式化できれば軽量化、強度を同時に満足する材料候補を選ぶ。この場合、製品のどの場所のコンポーネント、パーツであるかによって特に要求される剛性、強度が異なる。例として図5に自動車の各部位で考慮すべき強度を示した。具体的に材料選択を進めるためには、材料データベースから比強度、比剛性などのデータを参照することにな

る。車全体としては、各部について材料選択が必要であり、全体としての強度、環境負荷が評価

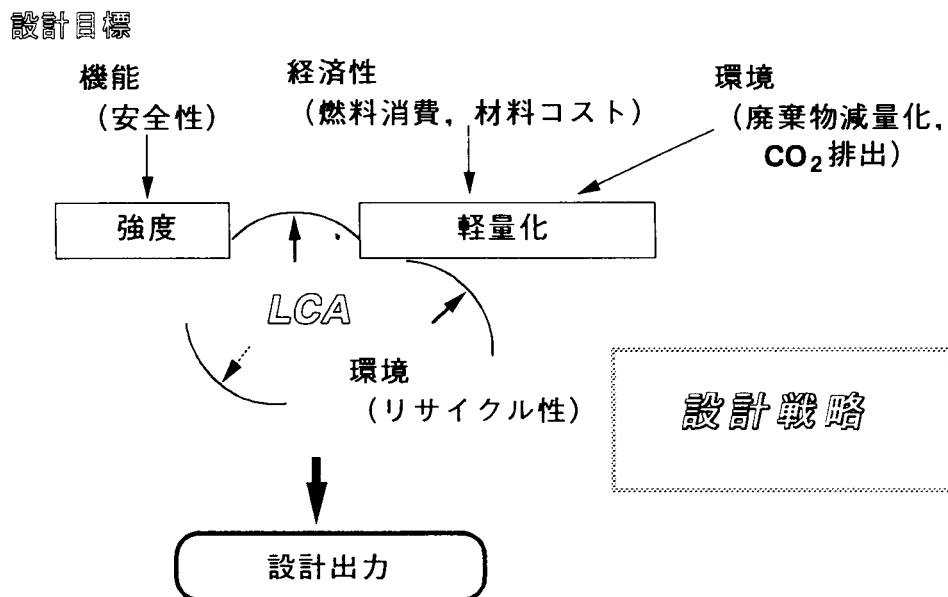


図4 概念設計段階のトレードオフ（乗用車の例）

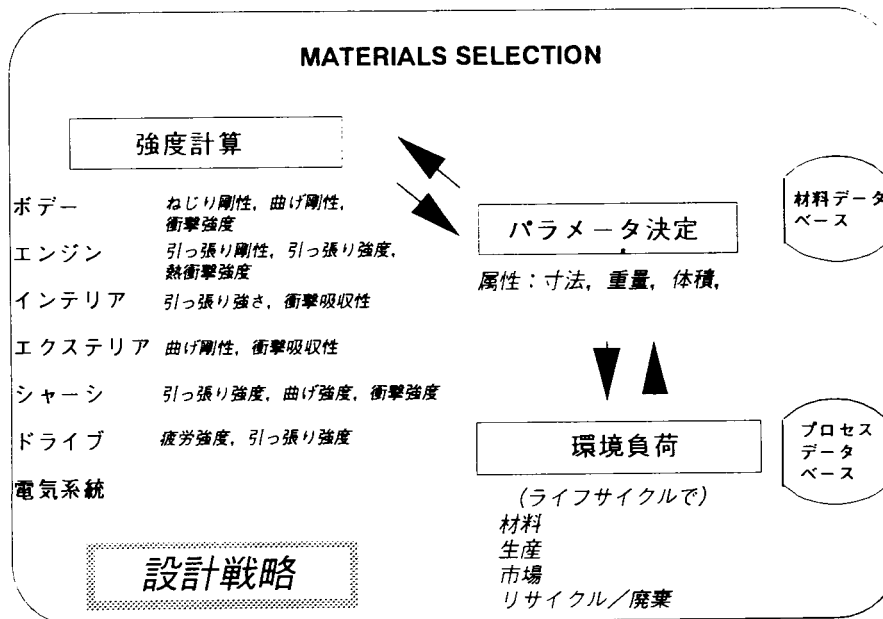


図5 材料選択と部位別の要求強度

される。

ここで、代表的な部位であるボデーの材料選択を例に支援システムの役割を示す。図6に示すようにボデーを正方形断面の薄肉管と単純化し、断面まわりのねじり剛性と管の曲げ剛性が要求されると仮定する。すなわち、軽量化と剛性の確保がトレードオフ関係となる。そこで、支援システムでは、材料データベースが参照され、材料の諸データが検索される。図7は、プロトタイプシステムでの出力例である。左側がCADウィンドウ、右側がI/O関連ウィンドウで

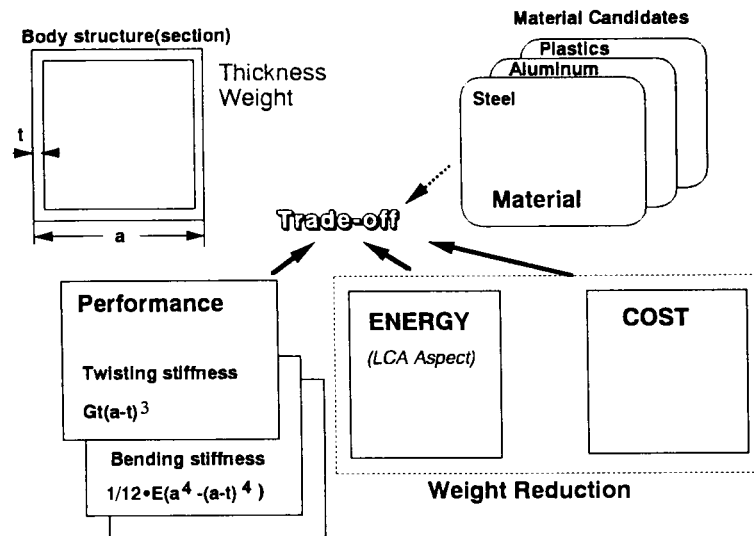


図6 ボディー肉厚設計例

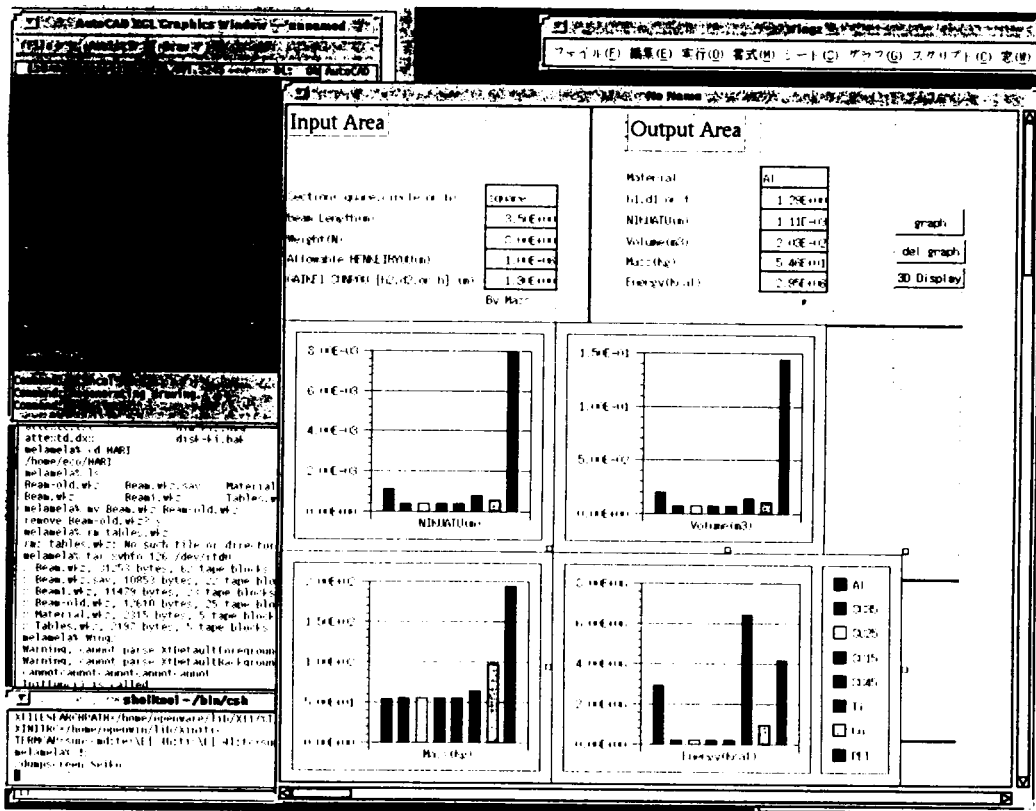


図7 プロトタイプ設計支援システムの出力例

ある。このボデー形状の場合、鋼とアルミのねじり、曲げとも比剛性にほとんど差が無く、鋼と同一の剛性を確保するためには、アルミは鋼の約3倍の板厚が必要となり、ほとんど鋼と同一の重量となり軽量化に寄与しないこと、材料製造に消費されるエネルギーも重量あたりでアルミが

鋼の10倍ほどになることなどが示されている。ここでは表示されていないが、再生アルミでようやく鋼の6%増し程度に近づくことや、車の使用中の消費エネルギー（燃費）も鋼とアルミで差がないこと等も提示でき、設計者の材料選択を支援する。剛性の確保ではなく曲げ強度確保が要求なら、アルミの比強度が鋼の1.8倍であり軽量化に寄与できることも示している。

以上述べたように、環境に配慮した製品の実現には設計が決定的な役割を果たし、各評価項目間のトレードオフ問題を解決し、各評価項目を最適化する設計戦略が必要であることを明らかにし、これをふまえた環境に留意した設計支援システムの概要を示した。

(5) 易解体性評価

リサイクルしやすい機械の設計を支援するための分解作業性の評価を行う機能を付加する方法についての考察を行った。その結果、インダストリアル・エンジニアリングで行われている、動作分析の手法を取り入れるのが一つの方法であるという結論を得た。部品形状、配置、締結箇所と部品への操作手順を与えて、実行時の干渉のチェック、所要時間を評価する。作業動作は動作分析から基本的動作モードに分解する。これを実現するために、システムに動作分析を支援する機能を付加する作業を行った。このシステムでは、図8に示すように、分解手順の評価の対象とする部品の形状をCADシステムで扱い、分解する作業者の動作を図ではControl Programと表示した別のアプリケーションソフトウェアで扱うようになっている。作業者の動作の動作距離等の情報をCADシステムで扱うので、動作分析をより効率的に行えるようになった。作業性が高いことはリサイクルへ向けての部品分解、材料分別へ有利であるとする。設計者は、評価される作業時間からリサイクル性向上への設計変更を探ることができる。

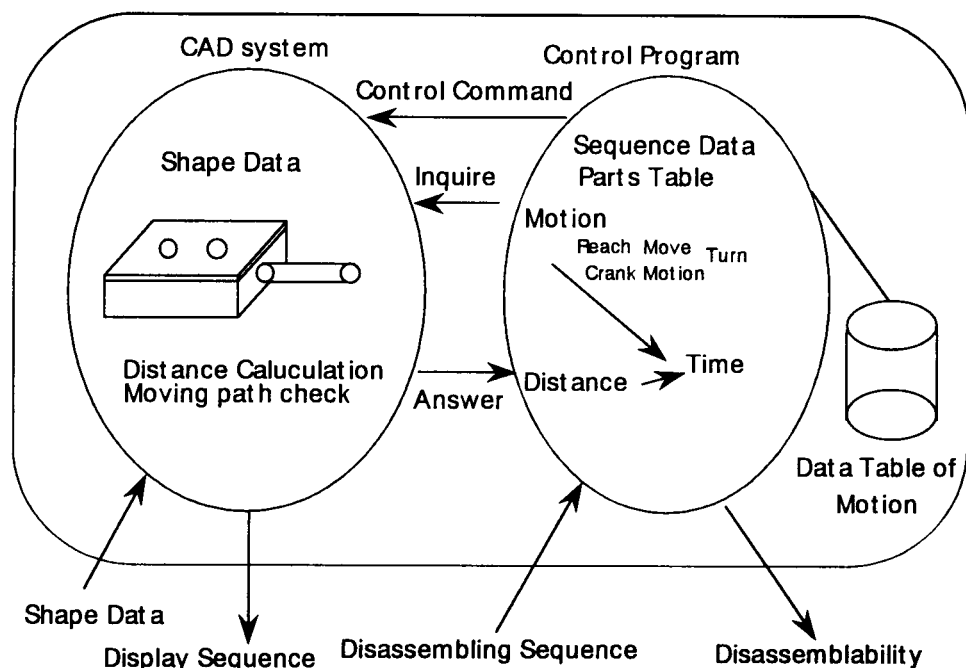


図8 分解作業性の評価支援

4. まとめ

廃棄物、温室効果ガスなどの環境負荷を低減するためには、環境負荷に配慮した製品設計、設計変更がきわめて重要であり、経済性等の従来評価項目に加えて環境負荷評価項目を評価領域とし、その間のトレードオフ問題を解決し、各評価項目を最適化する設計戦略が必要であることを明らかにした。これをふまえて環境に配慮した設計支援システムの要件を考察し、CADシステムとデータベースシステムを基本としたソフトウェア環境による環境負荷評価ツールを含むプロトタイプ支援システムを構築した。また、材料選択を中心に設計戦略、実現したプロトタイプ支援システムの機能を示した。

5. 参考文献

- 1) Bo Pedersen: "A Meta-review on Product Life Cycle Assessment", "Product Life Cycle Assessment", PP24-104, The Nordic Council of Ministers (Report Nord 1992:9)
- 2) たとえば、井上英夫：エコファクトリー技術、日本機械学会誌、95-884(1992)612
- 3) Boothroyd, G. and L. Alting: "Design for Assemblability and Disassemblability", Ann. CIRP, Vol.41/2(1992)625
- 4) Jovane, F., L. Alting, A. Armillotta, W. Eversheim, K. Feldmann, G. Seliger, N. Roth, "A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly", Ann. CIRP, Vol.42/2(1993)651

国際共同研究等：

(客員研究員受け入れ) ベルリン工科大学、ホスト研究者：服部光郎 6. 3～

研究発表

[誌上]

- 1) 井上英夫：グローバル コンカレント エンジニアリング，日本電気学会誌，11-3(1993)101-107，5年3月
- 2) Mitsuro Hattori, Hideo Inoue: Concept of Ecofactory, Proceedings of 1993IEEE/Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics, pp3～8、平成5年11月
- 3) 服部光郎：リソース・ユース・マネージメントのモデリング - 「統合化FAの標準化に関する調査研究」成果報告書第5章、(財)国際ロボット・FA技術センター，pp67～76、平成6年3月
- 4) Mitsuro Hattori, Noboru Nomura and Hideo Inoue: Ecofactory from Product Life Cycle Aspects, Advancement of Intelligent Production, Eiji Usui(Editor), (1994)pp63-68
- 5) 服部 光郎：環境負荷を考慮する製品設計手法、機械研ニュース、1994 No.7、平成6年7月
- 6) 服部光郎：環境負荷を考慮した設計プロセスの概念と設計支援システムの開発、M&E、1994年9月号
- 7) Mitsuro Hattori, Noboru Nomura, Dirk Sommer, Hideo Inoue: Fundamentals of Envi-

ronmentally Conscious Product Design, International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing (to be appeared in 1995)

[口頭発表]

- 1) Mitsuro Hattori, Hideo Inoue: Concept of Ecofactory, 1993 IEEE/Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics, 5. 11
- 2) 服部光郎：エコファクトリー，通商産業省工業技術院環境技術研究総合推進会議第2回合同講演会，5. 6
- 3) 服部光郎，野村昇，井上英夫：製品ライフサイクルの評価フレーム，機械技術研究所研究発表会，5. 9
- 4) 服部光郎、野村 昇、井上英夫：環境負荷を考慮した製品設計の一方法論、機械技術研究所研究発表会、6. 4
- 5) 服部光郎、野村 昇、井上英夫：環境負荷を考慮した製品設計の一方法論、日本機械学会／精密工学会東海支部岐阜地区講演会、6. 7
- 6) Mitsuro Hattori, Noboru Nomura and Hideo Inoue: Ecofactory from Product Life Cycle Aspects, 7th International Conference on Production/Precision Engineering、6. 9
- 7) 服部光郎：エコファクトリーにおける設計、自動車関連技術セミナー（能率協会）、7. 3