

## 概念設計における設計情報表現と時間・空間関係管理支援

大阪大学・工・生産科学専攻 妻屋彰

### 1. はじめに

現在の日本の製造業は、中国をはじめとする人件費が安く低コストで製品製造のできる国の台頭により、単純に価格競争では勝てなくなっている。そのため、低コスト製造国に追いつかれないよう、次々に新材料・新技術を開発し、それをすぐに製品に適用して、製品開発サイクルを短縮していくことが必要とされている。また、みなが同じ物を持つという時代から人とは違う個性のあるものを持ちたいという消費者ニーズの多様化により、従来の少品種大量生産に変わり多種多様な製品の開発が求められている。

このような状況下、製品設計の側面からみるとCAD/CAM/CAEなどの計算機による設計支援によって設計期間の短縮が図られ、効果を挙げている。しかしこれらのほとんどは設計活動の下流工程である実体設計や詳細設計のフェーズを対象としており、上流工程である概念設計段階での計算機利用はほとんど行われていない。これは、概念設計段階では設計情報が抽象的かつあいまいな部分が多く、計算機による取り扱いが困難であることに起因している。しかし、製品設計では、設計活動の上流段階で決定された設計情報に基づいて設計が進められるため、この段階での設計の良否が製品の成否や製品開発期間の短縮に大きく寄与することができる。また、概念設計段階での設計活動では市場調査等から得られる要求仕様をどのように実現するかを決定する段階であるため、開発された新材料・新技術をどのように適用するのか検討・決定するフェーズであると言える。逆に、概念設計段階で得られた設計情報は研究部門にフィードバックすることにより、新材料・新技術開発の方向性を見いだす材料にもなる。

そこで本研究では、概念設計中の設計者の思考過程を考慮しながら計算機で概念設計段階の設計情報を取り扱うための表現と方法論を提案し、計算機で支援する枠組みを構築することを目標とする。ここで一口に概念設計と言っても実際は材料・設備・製品機能など様々な観点からなる。本報では主として機械設計における設計物の持つ機能と実体の関係表現を中心に研究を進めたのでその内容を紹介する。

### 2. 機能と実体の関係を扱う概念設計情報表現手法

#### 2-1 機能と実体の関係

製品設計は、一般に次のようなプロセスで行われるとされている<sup>(1)</sup>。

- (1) 製品の持つ役割や目的の明確化する。
- (2) 製品に要求される機能をより単純な機能に分解しながら機能を満たす設計解を探索する。
- (3) 詳細なレベルに機能が分解されたら対応する機構を導出する。
- (4) 導出された機構を整合性を保ちながら組み合わせ実体化する。

逆に製品を理解しようとするときには、製品を部品レベルまで展開し、いくつかの部品の組み合わせで構成されている機

構から、その機構が実現している機能を導き出すという思考を行っている。

このように要求機能とそれを満足する実体や実体とその果たしている機能の導出関係は、分析による詳細化と組み合わせによる統合化というプロセスで表現することができる<sup>(2)</sup>。すなわち、設計者は機能の階層性と実体の階層性を利用して設計を行っていると言える。実際に設計解を導出する過程では、設計者はただやみくもに機能分解を行っているわけではなく、経験や知識を用い実体のイメージを思い浮かべていると考えられる。

この考えに基づき、以下では概念設計段階で扱っている機能と概念的な抽象実体イメージを同時に表現する手法を提案する。

#### 2-2 機能の表現

ここでは、機能と実体を同時に扱うための機能表現方法について述べる。機能を実体との関係に注目し物理的な観点から分類すると物理的、挙動、変換、作用の3つに分けられるとされている<sup>(3)</sup>。しかし、この分類は機能の発揮する対象の違いであり、機械メカニズムそのものに対する種類の違いではないと考える。そこで、本研究では機能を次のように定義する。

定義1： 機能とは、設計者が意図して主体に付した対象物に対して何らかの影響を与える役割である。

ここで、先に挙げた分類に当てはめると、挙動の場合は主体と対象物が同一であり、変換の場合は対象物が流れのような形のない媒体となり、作用の場合は形を持つ主体とは異なる機構となる。このように機能を「～を…する」という形式で表現し、そのときの対象物の種類を変えることによって、3つの分類全てが表現できる。この考え方はオントロジー工学に基づくデバイスオントロジーの考え方<sup>(4)</sup>にも親和性が高く、機能と実体の関係を表現するのに適していると言える。

先にも述べたように挙動、変換、作用で分類される機能はそれぞれ対応する概念機構を考えると時空間上での機構の振る舞いとして現れることになる。そのため、機能と実体の関係を示しこれらを同時に取り扱うためには、設計者のイメージする概念的な実体を時空間上で表現する必要がある。そこで、本研究ではこのような概念実体を表すため機能ブロック表現を導入する。ここで提案する機能ブロックは以下のように定義する。

定義2： 機能ブロックは何らかの機能を有する実体を表現した物である。

定義3： 機能ブロックは全ての面が三次元直交座標系の座標軸のいずれかに垂直である直方体とする。

定義4： 機能ブロックが発揮する機能は、対象物と対象物へ与える影響をそれぞれ目的語と動詞を用い「～を…する」という短文形式で表現する。

これらの定義に基づく機能ブロックによって機能を有する概念実体を空間上に表現することができる。

### 2-3 概念実体の空間関係記述の方法

機能に基づいて機構が構成されるとき、機構をどのように配置するか、機構間の干渉をどのように回避するか、などの問題が生じる。概念設計段階では機構に関する定量的な情報はまだ決定されていないため、従来これらの問題を明示的に扱うことはされていなかったが、これを定性的なレベルであっても表現可能とすることにより、設計初期段階での評価を可能とし、空間関係記述を通して設計意図を他の設計者へ伝達することもできる。そこで、機能ブロック間の空間関係を定性的に取り扱うための表現方法を提案する。

ここでは、空間関係を図1に示すAllenの時空間関係<sup>(5)</sup>を用いて表現することにする。ここで示されている13通りの関係は2体間の一軸方向の相対位置関係を示したもので、AがBに対して取り得る全ての関係を表現している。これを機能ブロック間の定性的な相対位置関係に適用する。前節の定義3より、ブロックは三次元直交座標系上にあり、全ての面がいずれかの座標軸に垂直であるため、一軸方向の関係を三次元に拡張<sup>(6)</sup>する。この結果、機能ブロックA、Bがあるとき、ブロックAのブロックBに対する定性的空間関係は次式で表される。

$$SR(A, B) = (R_x, R_y, R_z) \quad (1)$$

ここで、 $R_x, R_y, R_z$ は各々x、y、z軸方向のブロックAとブロックBの相対位置関係であり、Allenの時空間関係で表現できる。

状態記述	状態図
A before B	
A meets B	
A overlaps B	
A equal B	
A overlapped-by B	
A met-by B	
A after B	
A finished-by B	
A contains B	
A started-by B	
A starts B	
A during B	
A finishes B	

図1 Allenの時空間関係表現

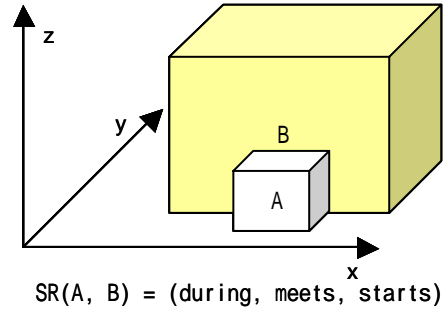
例えば2つのブロックが図2の関係にある場合、定性空間関係は、

$$SR(A, B) = (\text{during, meets, starts}) \quad (2)$$

と記述することができる。この表現方法を用いて概念設計段階で定性的な空間関係を記述することにより、この段階での

配置、干渉についてのチェックができるとともに、概念設計後の設計過程で制約として用いることもでき、設計意図の伝達に有効であると考えられる。

図2 定性空間関係の表現例



### 2-4 機能発現の時間順序関係記述の方法

近年の製品の省スペース化の流れから、一つの機構に複数の機能を持たせる設計が多くなされている。このような機構では、機能の発現順序によって、機構の状態、ひいては次にこの機構が実現できる機能や製品全体としての機能に大きく関係している。そこで、概念実体の持つ機能発現順序の時間関係を表現する方法について述べる。

時間情報の表現方法の基本単位として事象を中心とした時点と状態を中心とした区間に大きく分けられるとされる<sup>(7)</sup>。このとき状態の開始時点と終了時点が決定されれば、その対関係から区間を表現することができ、逆に状態を表す区間関係よりその状態変化を起こした事象である時点を表現することも可能である。そこで、それぞれの表現方法の得手不得手も考慮し、機能発現の記述は事象として捕らえやすい時点で記述を行い、それらの関係から状態を表現している区間関係を導出して時間関係の管理を行う。

時点間の関係は、点の相対位置関係として表現できるため、機能ブロックが発現する機能の開始時点と終了時点の関係を図1で説明した13通りの関係のうち{before, after, equal}の3つを用いて表現することができる。すなわち、2時点間の時間関係は表1のように表される。

表1 2時点間の時間順序関係表現

時間順序関係記述	2時点間の関係
A before B	時点Aが時点Bよりも前である。
A equal B	時点Aと時点Bは同時である。
A after B	時点Aは時点Bよりも後である。
A equal B or A after B	時点Aは時点Bの前であってはならない。
A after B or A before B	時点Aは時点Bと同時にあってはならない。
A before B or A after B	時点Aは時点Bの後であってはならない。

時点間の順序関係記述を進めていくと、それを基に時区間の関係を表現することができる。時区間関係は図1で表されたAllenの時区間関係で表現できるため、表2に従って時点関係から区間関係を導出する。この表現方法を用いて機能間の相対的な時区間関係を記述することができる。

ここで取り扱っている関係は定性的ではあるが、機能発現

順序について時区間の定性関係の推移律を用いることにより整合性チェックを行うことができるため、設計者の思い違いや見逃し等を減らすことができる。また、この情報は空間関係記述同様機能発現に関する意図として、詳細設計を行う設計者に伝達することができ、これによってミスコミュニケーションによる設計失敗を防ぐことができると考えられる。

表2  
時点関係から時区間関係の導出

開始時点の関係	終了時点の関係	時間区間関係
As before Bs	Ae before Be	A before B
		A overlaps B
		A meets B
As before Bs	Ae equal Be	A finished-by B
As before Bs	Ae after Be	A contains B
As equal Bs	Ae before Be	A starts B
As equal Bs	Ae equal Be	A equal B
As equal Bs	Ae after Be	A started-by B
As after Bs	Ae before Be	A during B
As after Bs	Ae equal Be	A finishes B
As after Bs	Ae after Be	A after B
		A overlapped-by B
		A met-by B

### 2-5 時間関係と空間関係の統合

前節までに、概念実体の定性空間関係と機能発現順序の時間関係について説明した。ここで、概念実体として表されている機構がその持つ機能に従って何らかの振る舞いを行うと概念実体の空間関係が変化する。また、機能が設計者の意図する順序通りに発揮できるかどうかは、機能発現によって変化する実体の状態が実現可能であるかどうかにかかっている。このことは、機能由来の時間関係と実体由来の空間関係を統合的に扱う必要性を示しており、概念設計段階の定性的なレベルにおいてもこれらを統合的に取り扱うことによって設計失敗を減らすことにつながると考えられる。

ここで、設計者の思考過程についてもう一度おさらいすると、機能の階層性より機能分解によって機能の詳細化を行い詳細化された機能レベルで対応する実体である機構を探索するというものであった。このとき、詳細化された機能では、機能は実体の時間的な状態変化を表す挙動や実体へ挙動を促すための操作と同等の表現になっている。また、この詳細化過程において、機能発現の時間順序も詳細化されていると考えられる。

そこで、これまで機能発現の時間順序関係を表現する手法として提案した手法を機構の動きを表す挙動と挙動を発現する操作の関係表現にも適用することとする。挙動はブロックの動きとして表現されるが、機能との関係を考慮する場合には時間軸だけを考えればよいいため、機能の時間順序関係と同様の記述形式とする。これによって、ブロックの動きの時間順序関係と機能の時間順序関係は同じ記述形式となるため、この両者に対応関係がある場合には対応付けを行うことによって統合的に取り扱うことができる。

次に挙動の順序関係と空間関係の変化についてであるが、

先にも述べたように挙動とは実体の時間的な状態変化であるから、挙動が発現すると空間上の状態も変化する。すなわち、挙動に関する時間関係記述のある部分においては、空間の関係記述も変化していることになる。そこで、挙動の発現時間順序表現にあわせて空間関係記述にブロックの移動方向情報を付加することにする。ここで移動方向としてはx、y、zの三軸についてそれぞれ正負で表現することとする。このように挙動に関する情報を四次元時空間で表現することにより挙動の時間と空間の関係を表現することができる。

これら提案した表現方法を用いることにより、挙動を仲介とした機能の時間順序関係と実体の空間関係を統合的に扱うことができる。

## 3. 概念設計支援システムの実装

### 3-1 システムの構成

本研究で開発したシステムは、設計者の思考過程を考慮した機能ブロック表現を導入し、付随する定性的な設計情報を管理することにより、概念設計段階における設計活動支援と設計情報の伝達・共有支援を目的としたものである。

システムは、ユーザインターフェースを含むメインシステムであるブロック表現によるソリッドモデリングシステムと、ブロック間の空間位置関係を管理する空間関係管理システム、機能・挙動の発現順序を管理する時間順序関係管理システム、設計者の意図記述を管理する設計意図管理システムの3つのサブシステムから構成される。図3にシステム構成を示す。

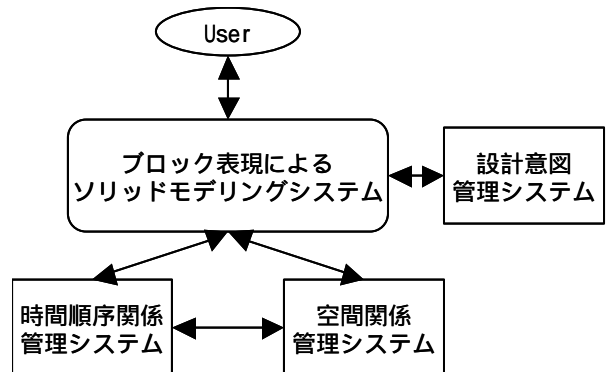


図3  
システム構成図

それぞれのシステムの担っている役割の詳細について以下に述べる。

#### (1) ブロック表現によるソリッドモデリングシステム

このシステムは設計者が持つイメージを表現することを目的としたものである。このシステムでは、ブロックの追加、ブロックの分割、ブロックサイズの変更、ブロックの配置場所の設定という操作が可能であり、これらの操作によって設計者のイメージする実体を概念実体として、ブロック間の相対的な大きさや位置関係を含めて具現化することができる。さらに、このシステムではブロックに対する操作を行うとそのブロックが発現する機能の記述を促す画面が表示され、対象物とそれに及ぼす影響（機能）を記述することになる。ここで記述した機能に関する設計情報や、設計情報記述に基づくブロック間の関係は設計意図管理システムにより任意のタイミングで参照することができるよ

うになっている。

## (2) 空間関係管理システム

このシステムは三次元に拡張した Allen の時区間関係によって記述されたブロック間の定性空間関係記述を格納し、その記述を用いてブロックの干渉チェックやブロックの配置可能位置の検索を行うものである。ブロック間の定性位置関係は、ソリッドモデリングシステムのブロックの描画情報から自動的に生成される。ブロック間の干渉を許さないという条件は複数のブロックが共通の部分空間を持つことを許さないと言い換えることができるため、この条件を満たす、少なくとも一つの軸について関係が{before、meet、met-by、after}のいずれかになるという条件を用いてチェックすることができる。ブロックの配置可能な位置の検索は、干渉チェックの手法を適用して干渉が起こらない位置を検索している。

## (3) 時間順序関係管理システム

これは機能や挙動・操作の開始・終了時点の入力画面と時区間関係の推移律を用いた整合性チェック機能よりなる。機能の開始・終了時点の入力はソリッドモデリングシステムでの機能の記述の際に行うようになっており、入力がないとそれまでに記述された時間順序関係との整合性がチェックされ、矛盾や条件の不足を検出する。

## (4) 設計意図管理システム

設計者の意図の伝達、共有を実現するための情報を管理するのがこのシステムである。ここでは機能情報を管理する他、ソリッドモデリングシステム上に表現されたブロックとそれに付随する機能情報や時空間情報との関係、を管理している。これらの情報はソリッドモデリングシステムを通じたユーザからの要求により、検索・提示される。設計意図として「なぜその機能を追加したのか」、「どのようにその機能を実現するのか」に対する記述が必要であるので、ブロック間の物理的關係や実現のために必要な材料や属性などのデータとの連携も必要となると考えられるが、本年度はまず機能と実体の関係に絞って研究を進めたためここでは取り扱っていない。

## 3-2 ケーススタディ

本研究で構築した試作システムを用い、「土砂を運搬する」という要求機能を満足する製品の概念設計を行った。

図4は設計者の思考に従って、(a)土砂を押す機能を持つブロック1の配置、(b)ブロック1を押しみ自ら前進する機能を持つブロック2の配置、(c)ブロック1の片側を押すことにより方向転換の機能を持たせることができるとの考えから、ブロック2をブロック2-1と2-2に分割、(d)駆動力を発生する機能を持つブロック3の配置、(e)発生した力の向きを変える機能を持つブロック4の配置、(f)駆動力をブロック2-1、2-2に伝達する機能を持つブロック5と6の配置を行った時のソリッドモデリングシステムの画面である。このようにソリッドモデリングシステム上で設計を進めていきながら、機能情報、機能発現の時点情報を入力することにより、計算機内でこれらの機能ブロックに関し、機能発現の時間順序関係と機能ブロック間の空間関係を管理し、矛盾や干渉をチェックするシステムが動作することを確認した。

## 4. 終わりに

本研究では製品の開発・設計というフェーズ、その中でも概念設計段階について、製品の機能と実体の関係に注目して

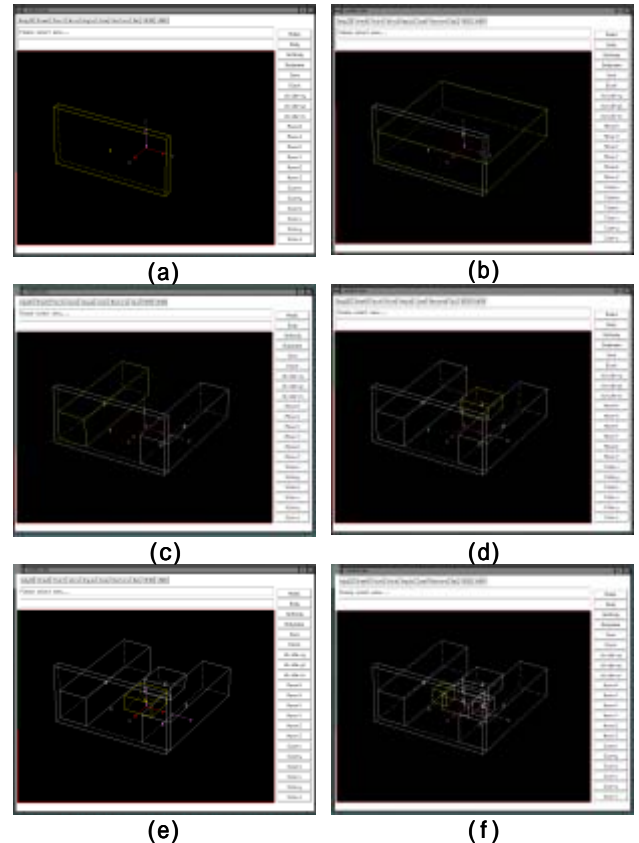


図4  
システム実行例

機能ブロックと時空間関係表現手法を提案し、それらを用いることにより、概念レベルでの機能と実体の統合化およびこの段階での機能間・概念実体間の関係表現とその定性レベルでの評価、設計意図の伝達・共有を支援できることを示した。今後は、概念設計段階において本来考慮している材料や設備に関する情報も統合的に取り扱えるような方法論へと拡張する予定である。また、これを進めていくことにより、次期新規設計のための技術開発や材料開発へのフィードバックをも行えるような手法へ展開できるものと考えている。

## 5. 文献

- (1) G. Pahl, W. Beitz, "Engineering Design: Systematic Approach", Springer-Verlag, Berlin (1997).
- (2) T. Tomiyama, M. Yoshioka, and A. Tsumaya, "Engineering Design Synthesis - Understanding, Approaches, and Tools", Springer-Verlag, London, (2002) 67-90.
- (3) 小野里雅彦, "博士論文:機械設計の高度計算機支援のための対象表現論" 東京大学大学院工学系研究科, (1994).
- (4) 來村徳信, 溝口理一郎, 人工知能学会論文誌, 17 (2002) 61-72.
- (5) J.F. Allen, Commun. ACM, 26 (1983) 832-843.
- (6) 劉繼紅, A. Saetang, 井越昌紀, 荒井栄司, 日本旗か医学論文集(C編), 62 (1996) 381-388.
- (7) M. Onosato, K. Iwata, S. Nishida, JSME Int. Journal, 35-324C (1992) 207-213.

