

機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル 表現言語 FBRL の開発

Design of a Functional Representation Language FBRL Based on an Ontology of Function and Behavior

笹島 宗彦*
Munehiko Sasajima

來村 徳信*
Yoshinobu Kitamura

池田 満*
Mitsuru Ikeda

溝口 理一郎*
Riichiro Mizoguchi

* 大阪大学産業科学研究所
I. S. I. R., Osaka University, Osaka 567, Japan.

1995 年 9 月 29 日 受理

Keywords : model-based problem solving, functional modeling, function and behavior, ontology.

Summary

The significance of functional representation has been pointed out by a lot of researchers, while the general relations between function and behavior is not fully understood yet. We consider a functional model of each component in a system as consisting of two elements. One is a necessary and sufficient information for simulating behavior of the component which we call a behavior model. The other is the interpretation result of the behavior under a desirable state which the component is expected to achieve, which we call function. By identifying primitives necessary for the interpretation of the behavior in various domains, we can capture what function is and represent it by selection and combination of them. As the representation of function and behavior plays an important role in modeling domain knowledge, identification of each of them contributes to organizing domain ontology. This paper proposes **FBRL**, a language for representing function and behavior with the primitives we identified and discuss its application to explanation generation. First half of this paper briefly explains **FBRL**. We also investigate the relation between function and behavior based on the primitives of **FBRL**. As **FBRL** can represent concepts at various levels of abstraction, it contributes to explanation generation by providing informations for mapping behavior of a component to a term which represents its function. Second half of this paper shows an example which shows how **FBRL** contributes to explanation generation. We conclude this paper with our next step toward the redesign task.

1. ま え が き

モデルベースの問題解決システムの課題の一つとして、優れた定性モデルを構築する方法論を整備することがあげられる。近年、モデルベースの問題解決システムが扱う問題が高度化するにつれて、対象モデルが表現すべき知識の内容を議論し、計算機や人間の間で共有・再利用できる知識を記述することの重要性が高まってきている[溝口 95]。対象モデルに基づくタスクにおいて、重要な役割を担っているのが振舞いと機能の概念である。振舞いはシミュレーションと密接に関

係し、機能は概念レベルにおける推論と深く関連している。また、両者は対象を理解するために不可欠なドメインオントロジーの中心的な要素であり、対象モデル表現の中核をなす概念でもある。両者を深く理解しその表現方式を確立すること、言い換えれば、機能と振舞いの本質的な違いを理解しその表現方式を確立することは、モデルベース推論が扱うべき知識の内容を議論し規定するために必須の課題であるといえる。

対象モデル記述方式の一つとして、あらかじめシステムに部品単位でモデルを準備しておいて、その組合せ、修正によって対象モデルを記述するというものがある。この方式はモデル構築の労力を削減することに

大いに貢献すると考えられるが、de Kleer [de Kleer 84b]が指摘するように、部品単位のモデル構築時には、部品の振舞いを導出するために必要な知識と機能の知識が混在しがちであり、細心の注意を払う必要がある(*No Function in Structure*)。これら2種類の知識の混在は部品モデルの再利用性を低下させるので、それらを明示的に分離して記述する必要がある。

これまでも対象の機能モデルを記述し、問題解決に応用するための研究がさまざまに行われてきた。de Kleer [de Kleer 84a]は部品を、因果性を持つ複数の入出力関係、すなわち振舞いを持つものとして捉え、そこから適切な振舞いを選択した結果機能が認識されるとした。de Kleerの手法は、振舞いのパターンをすべて数え上げ、その一つ一つに対して機能語彙を割り振る方式に頼っており、振舞いとその振舞いを表現する機能語彙との関係は暗黙的である。また、B. Chandrasekaran [Chandrasekaran 93]は、部品の機能を副部品の機能と振舞いを適切に組み合わせることで表現する枠組みを提案している。この方式では、あるグレインサイズにおける振舞いモデルが異なったグレインサイズでは機能を表現することになり、機能と振舞いの本質的な相違が捉えられていない。これらの記述方式に見られるように、これまでに提案されてきた方式は望ましい機能モデル記述方式の要件を満たしていない。

筆者らは、機能と振舞いには本質的な差があると考えている。この考えに基づいて、機能と振舞いの概念に対して従来とは異なった定義を与える。振舞いとは、時間とともに変化する対象の状態遷移であり、利用者が必要とする対象のシミュレーションの結果と定義する。シミュレーションを行うために必要十分な情報、すなわち対象の状態を表すパラメータの集合や、それらの間に成り立つ制約式などを表現したものを振舞いモデルと呼ぶ。次に、部品をシステムに組み込む場合、その部品に対して意図された望ましい状態を認識することができる。これを目標と呼ぶ。最後に、目標のもとで振舞いを解釈することができる。例えば、熱交換器から出力されてくる冷却媒体の温度が入力時より低い状態、という目標のもとで、その熱交換器の振舞いは熱エネルギーを除く、と解釈される。このように、目標のもとで振舞いを解釈した結果を機能と呼ぶ。

以上の議論に基づいて、我々は対象部品の機能と振舞いの概念を深く追求し、振舞いと機能のオントロジーを整備してきた。そのうえで機能と振舞いのオントロジーに基づいて部品の機能モデルを表現するための言語 **FBRL** を設計した[Sasajima 94a, 笹島 94b,

Sasajima 95]。機能と振舞いのオントロジーは、ドメインオントロジーの重要な部分要素であり、その記述方式の確立はドメインオントロジーの整備に貢献する。本研究は、オントロジーの形式的に厳密な公理化ではなく、その開発方式の規定、表現すべき概念の切出しとその意味の確定に重点を置いて機能モデル表現の標準化と機能語彙の組織化を行う[溝口 95]。

FBRLは振舞いモデルに我々が **Functional Toping (FT)**と呼ぶ、振舞いモデルを解釈するための情報を加えたものとして機能モデルを表現する。この振舞いモデルと **FT**を記述するためのプリミティブを整備することによって、対象の機能モデルをプリミティブの組合せによって記述することができるようになる。さらに筆者らは、**FBRL**モデルの有効性を検討するために、**FBRL**を従来の振舞いモデルのみに基づくモデルベースシステムにとって困難であった機能レベルの語彙を用いた説明生成に適用した。機能レベルの説明は対象の振舞いを解釈することが困難なユーザの対象理解を助けることができると考えられる。

本論文は五つの章からなる。2章は、**FBRL**の言語仕様と表現能力について述べる。3章は、**FBRL**の説明タスクへの適用実験について述べる。4章は、関連する研究との比較を行い、5章で総括と今後の展望を述べる。

2. 機能モデル表現言語 **FBRL**

言語設計においては記号の形式的な表現を持つ **Semantics**とその言語によって表現したいと考えている **meaning**に関する議論が必要である。筆者らは後者に重点を置いて、ドメインの知識をより簡単に記述できるようにモデル構築を支援することを目標として、機能モデル表現言語 **FBRL**を開発してきた。その結果 **FBRL**は、表現できる概念とその体系の点で豊富な機能表現言語となっている。本稿では、**FBRL**の形式的な表現を持つ意味論についての詳細な議論は行わない。本章では、部品の振舞いと機能を記述するための基本方針を述べた後、**FBRL**について概説する。

2.1 基本方針

振舞いと機能の違いを特徴づけるために、機能モデルを振舞いモデルにその解釈情報を付加したものとして記述する方針をとり、目標のもとでの解釈行為を説明するための視点、すなわち **FT**を同定することを目指して検討を行った。このための方法として、まず機能と振舞いの概念を深く理解し、そしてそれを表現するために必要な語彙の体系である機能と振舞いのオン

トロジーを整理し、それを表現するために必要な記述プリミティブを検討した。その結果、対象の振舞いを捉えるための視点と四つのFTを同定した。これら四つのFTは、その必然性を示すことはできない性質のものであるが、有用性は、振舞いと機能の差を明示的に表現することだけでなく、説明や5章で述べる再設計のための対象理解などに貢献する本質的な情報を提供する性質によって示されていると考えている。

2・2 機能モデル記述のためのテンプレート

部品の機能と振舞いのモデルを記述するためのFBRLテンプレートを図1に示す。ObjectsからQN-Relationsまでの七つの属性に値を与えることによって、対象モデルの振舞いを導出するために必要なシステムの入出力関係を表現する。

システムに組み込まれた一つの部品が複数の機能を発揮することがある。そのような対象モデルを表現するためにFBRLテンプレートは、一つの振舞いモデルに対して複数の解釈情報を記述することを許す。一つの解釈情報、すなわちFT-setは、O-FocusからNecessityまでの四つの属性値の組合せで表現され、一つの振舞いモデルに対応するFT-setの集合を属性FT-setsに記述する。

2・3 振舞いモデルの記述方針

本節では、振舞いモデル記述方式を概説する。より詳細な議論については、[Sasajima 94a]を参照のこと。

以下、本稿ではFBRLの属性に属性値を与えることを次のように表現する。

属性：属性値

(1) デバイス中心の部品記述

振舞いを、システムを構成する個々の部品の入出力関係、すなわち振舞いモデルから導出されるシステム

Behavior:	
Objects:	/* 対象物の集合 */
SubComponents:	/* 副部品のID */
MP-Relations:	/* 原料-生成物関係 */
SameClass:	/* 対象物のクラスの同一性 */
InherentParams:	/* 部品固有のパラメータ */
Ports:	/* 部品の接続関係 */
QN-Relations:	/* パラメータ間の量的関係 */
FT-sets:	
FT-set₁	
O-Focus:	/* 注目する出口パラメータ */
P-Focus:	/* 解釈時に注目するポート */
FuncType:	/* 機能タイプ:維持,保持,達成 */
Necessity:	/* 対象物の必要性 */
FT-set₂	

図1 機能モデルクラスのテンプレート

の状態の系列として捉える。入出力関係の表現方式としては入力されたものがどのように加工されて出力されるかというプロセス中心のオントロジーによるものと、システムを部品単位で捉え、そこに入力されたものと出力されたものの関係、すなわちデバイスオントロジーによるものが考えられる。本研究では後者の方式を取り、部品を入力口と出力口を持ったブラックボックスとして表現する。部品の入力口からあるものを入力すると、出力口から違うものが出力されてくる。部品には、入力されたものを部品内部に取り込んでしまうものや部品内部から出力しかないものもある。部品に入力されるもの(入力物)や部品から出力されるもの(出力物)、部品内部に存在するものをまとめてその部品の対象物と呼ぶ。対象物としては、部品の機能を発揮させるような物質や熱、光のようなエネルギーを記述する。すべてのエネルギーは媒体によって運搬されるものとして捉え、その量は媒体の状態を表すパラメータによって表現される。対象物の入出力関係を捉える際には、磁場の力、重力などの場の力による影響は無視する。

以上の議論をふまえて、部品の振舞いを対象物と対象物間の関係によって記述する。また、部品や対象物の記述はオブジェクト指向に基づいて行う。

(2) 振舞いの表現方式

振舞いモデルは部品の機能を表現するために必要な対象物の集合と、それらの関係によって表現される(2・3節(1)項)。FBRLでは、図1で示したテンプレートの次の七つの属性に値を与えることによって、対象の振舞いモデルを表現する。図2は、In₁とOut₁の間を流れる高温の流体とIn₂とOut₂の間を流れる低温の流体の間で熱エネルギーの受渡しをさせる、熱交換器の振舞いモデルである。この図を例として振舞いモデルを表現するための各属性が持つ意味を説明する。

• **Objects**: 部品の機能を表現するために必要な対象物の集合を記述する。対象物の集合とは、対象物クラスのインスタンスの集合である。図2の場合、Obj₁からObj₁₂までの対象物のインスタンス

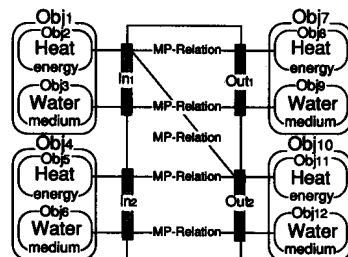


図2 熱交換器

を記述する。

- **SubComponents** : 部品には、いくつかの副部品から構成されているものがある。このような部品を階層的に表現する場合に、その副部品の ID のリストを記述する。例えば、ノズルと回転羽根から構成されるタービンを

SubComponents : (ノズル 回転羽根)

と表現する。

- **MP-Relation** : 出力物には、それがどのような原料、すなわち入力物から生成されたかを認識することができるものがある。このような、生成物(Product)とその原料(Material)の関係にある対象物を原料-生成物関係と呼ぶ

MP-Relations : (((生成物のリスト)(原料のリスト))...)

によって記述する。図2の場合、低温側の出口にある熱エネルギー(Obj_{11})は、高温側の入口から入力された熱エネルギー(Obj_2)と低温側の入口から入力された熱エネルギー(Obj_5)から生成されることを認識できる。その表現は、次のようになる。

MP-Relations : (((Obj_{11}) (Obj_2 Obj_5)))

- **SameClass** : 「エネルギーを変換する」のように、抽象度の高い機能モデルを表現する場合、対象物のクラスどうしの同一性が重要な意味を持つことがある。対象物のクラスの同一性を

SameClass : ((関係演算子 対象物₁ 対象物₂)...)

と表現する。関係演算子は、対象物のクラスが同じときには=、異なる場合は≠である。

- **InherentParams** : 部品には、熱伝達率のように対象物の影響を受けない固有のパラメータを持つものもある。そのようなパラメータのリストを記述する。図2の熱交換器を熱伝達率のほかにポートの断面積なども対象物の影響を受けないものとしてモデル化した場合、InherentParamsの記述は

InherentParams : (熱伝達率 ポート断面積)

となる。

- **Ports** : 振舞いのシミュレーションや、後述する異なる部品の機能どうしの関係を推論したりする場合に、部品の接続情報は重要である。属性 Ports は、ポートの接続情報を記述する。例えば、図2の Out₁ポートが発電プラントの2次系ループホットレグの In₁ポートに接続しているということを、熱交換器の属性 Ports に、次のように記述す

る。

Ports : (Out₁ 2次系ループホットレグ In₁)

- **OS-Relations** : 対象の振舞いや属性間の因果関係を導出するために必要な、属性間の関係を表現する式の集合を記述する。図2において、熱交換器をエネルギーロスがない理想的な部品としてモデル化した場合、熱エネルギーの総量が保存され、Obj₁₁の熱量は Obj₂の量に Obj₅の量を加えたものとなる。これは

(=Obj₁₁.Amount

(+Obj₂.Amount Obj₅.Amount))

と表現することができる。

2.4 FT の記述

機能の側面から部品を記述するために、①注目する出口パラメータ、②注目するポート、③目標状態を実現する入出力関係、④対象物の必要性の四つの観点からプリミティブを抽出した。

[1] O-Focus : 解釈時に注目するパラメータのクラス

属性 O-Focus は、解釈時に注目するパラメータのクラスをその値としてとる。一般に部品はさまざまな振舞いを併せ持つ。O-Focus は、部品が持つ複数の振舞いのうち、どれに着目したかを見分ける重要な視点を提供する。例えば、ランキンサイクルなどに使用されるボイラは、水を水蒸気に変換する振舞いと水蒸気を高圧にする振舞いを併せ持つ。ボイラの場合、水蒸気の発生という振舞いに注目することを

O-Focus : 相

と表現し、圧力を与える振舞いに注目することを

O-Focus : 圧力

と表現する。O-Focus の値を指定することによって、ある機能を果たしている部品の振舞いについての説明を生成するときは、説明すべきパラメータとそうでないパラメータをシステムに区別させることができる。例えば、ボイラが水を相変化させる機能に注目して説明するときには圧力パラメータの変化を述べる必要がないので省略することもできる。

[2] P-Focus : 解釈時に注目するポート

属性 P-Focus は、解釈時に注目するポートを表現し、属性値として二つの要素からなるリストをとる。

P-Focus : (要素₁ 要素₂)

要素₁, 要素₂は、おのおの解釈時に注目する入力側と出力側のポートのリストである。

部品には複数の媒体間でエネルギーなどの受渡しをするものがあり、どの媒体の動作に注目するかによ

てその解釈が異なったものになる。P-Focus の記述によって、解釈時に注目する媒体やエネルギーの流れを表現することができる。図2の熱交換器の振舞いの解釈は、エネルギーを放出している流体の動作(流れ)と、エネルギーを受け取る流体の動作(流れ)のどれに注目するか、または注目しないかによって変わる。エネルギーを放出している流体をSRC、受け取る流体をRCPと呼ぶ。例として、図2の振舞いモデルを熱エネルギーに注目して解釈することを考える。熱エネルギーのSRC、すなわち In_1 と Out_1 の間を流れる高温流体の流れに注目すれば、高温側の流体から熱エネルギーを「取る」と解釈される。熱エネルギーのRCP、すなわち In_2 と Out_2 の間を流れる低温流体の流れに注目すれば、低温側の流体に熱エネルギーを「与える」と解釈され、どちらの流れにも注目しなければ、高温側から低温側に「伝える」と解釈される。上述の熱交換器の場合、P-Focus の値を次のようにすることによって、それぞれの注目の仕方を表現することができる。

高温側の流れに注目する場合：P-Focus : ((In_1) (Out_1))

低温側の流れに注目する場合 P-Focus : ((In_2) (Out_2))

どちらにも注目しない場合：P-Focus : (() ())

より詳細な議論をすれば、P-Focus 記述は、注目する媒体の動作(流れ)を指定するだけでなく、どのパラメータの変化(差異)に注目するのかを指定すると考えるほうが適切である。例えば、熱交換器の振舞いを、低温流体に熱を与えていると解釈する場合、我々は低温流体の入口と出口での温度差に注目している。また、プラントにおける流量調整弁が出力流量を維持していると解釈する場合、我々は部品の出口流量のみに注目しており、車の差動装置(ディファレンシャル、デフ)が二つの車輪の回転差を生成していると解釈している場合には、出力媒体である二つのシャフトの回転数の差に注目している。流量調整弁とデフの注目の仕方は次のように表現できる。なお、説明の都合上、P-Focus の値をそのポートに存在する媒体名で表現する。

流量調整弁の場合：P-Focus : (() (流体))

デフの場合：P-Focus : (() (シャフト₁ シャフト₂))

P-Focus は、他の FT とともに振舞いモデルを適切な機能語彙にマップするための情報となる。また、システムを構成するある部品の機能が別の部品の機能に対してどのような経路をたどって貢献しているか、すなわち、機能どうしの照応関係を導出する手続きで中心的な役割を果たす。その説明生成への適用例を3章で示す。

[3] FuncType : 目標状態への指向の形態

Anne M. Keuneke は、機能の概念を達成、制御、維持、防止、の四つに分類した[keuneke 91]。しかし、この分類を行うための視点の議論が不十分である。まず、部品の機能を分類するときにおのの部品の機能に注目するのか、部品の機能どうしに関係に注目するのか、という議論がされていない。例えば、ヒータが流体の温度を高める機能を「達成」していることは、ヒータのなかを流れる流体の温度の変化に注目すれば同定できるが、車のラジエータが冷却媒体から熱を取り除くことによってエンジンルームのオーバヒートを「防止」していることは、ラジエータの機能とエンジンルームの機能の関係に注目しなければ同定できない。

さらに、部品の入出力関係に注目するのか、特定のパラメータが時間とともに変動するようすに注目するのか、という議論もなされていない。一般に、定常状態にあって入力値が安定しているために出力値がまったく変動しない部品の機能と、入力値が多少変動しても制御機構によってつねに一定の出力流量を得る流量制御弁の機能は、出力値を維持する機能として混同されがちであるが、前者が維持しているのは入出力関係であり、後者が維持しているのは出力値である。よって、互いに異なる機能として分類されるべきであるが、Keuneke の分類では、これらを区別することができない。

我々は、①部品の入力値の変動に対して出力値が変動するかしないか、②出力が入力と同じか異なるか、という二つの軸から Keuneke の分類を再解釈し、おのの概念を再定義した。属性 FuncType は、達成、保持、維持の三つのいずれかを値としてとる。それぞれの表す意味は次のとおりである。

- (1) 達成：入力値に応じて、出力値を望ましい値にする機能。
- (2) 保持：入力値と出力値を等しくする機能。
- (3) 維持：入力値にかかわらず、出力パラメータを望ましい値にする機能。

達成機能は、入力値に応じて出力値を変動させる。流体に熱エネルギーを与えることによってその温度を高めるボイラ、空气中に熱エネルギーを放射することによって冷却するラジエータ、熱エネルギーから回転力を生成するタービンなどが達成機能に分類される。

保持機能は、出力値を入力値と同じにするが、出力値は入力値に応じて変動する。パイプやシャフトは保持部品の例である。

維持部品は、制御機構を利用することによって、入力値の変動にかかわらず出力値をある一定の値にす

る。制御機構には、フィードバック制御機構のように人工的なものと物理原理によるものがある。前者を利用した維持部品の例としては流量や圧力の調整弁が、後者の例としては温度に注目した蒸気発生器があげられる。流量制御弁の出口流量は制御機構によって維持されているが、蒸気発生器が出力する蒸気の温度は、水が持つ物理的性質、すなわち飽和状態の水に熱エネルギーを加えてもその温度は変化しないという性質によって100度に維持されている。

Keuneke [keuneke 91]は、達成機能、維持機能のほかに制御機能、防止機能を提案している。前者は我々の枠組みにおける維持機能の構成要素である制御機構の機能に対応する。後者を我々は、「ある異常な入力値 X によって故障状態に陥る部品 A が系に組み込まれているとする。入力値が X のときに X ではない安全側の出力値を生成する部品の機能」として定義する。維持、達成および保持機能と防止機能の違いは、前者の機能が部品単独で観定できるのに対して、後者の機能はそれが働かなかったときに異常状態に陥る部品の存在がなければ認識・規定できないという点にある。我々の枠組みでは、ある部品が防止機能を果たしていることを直接には記述せず、FBRLによるシステムのモデルから推論エンジンが導出する。

機能タイプを参照することによって、目標状態に至る振舞いを抽象的に説明するための語彙がわかり、例えば流量調整弁について「出力流量を一定に維持する」という抽象的な説明を生成することができる。

(4) Necessity : 対象物の必要性

部品が入力物から取り出しているものが、系にとって不必要であるかそうでないかによってその解釈が異なる場合がある。例えば、高温の流体の熱エネルギーを低温の流体に伝える熱交換器の機能は、何もコンテキストを考えなければ熱エネルギーを「伝える」と解釈されるが、自動車のエンジンルームで冷却媒体の温度を低くして出力するラジエータの機能は、冷却媒体から熱エネルギーを「除く」と解釈される。前者と後者の差は機能の対象となった熱エネルギーが系にとって不要であるかないか、という観点から捉えられる。FBRLでは、あるポートに所属するあるクラスに属する対象物が系にとって必要であるか不要であるか、またはどちらでもないということを、3要素のリスト

(必要性 ポート 対象物のクラス)

によって表現する。第1要素「必要性」は、対象物が必要であるとき“Need”，不要であるとき“NoNeed”，どちらでもないとき“Neutral”をそれぞれ値としてとる。属性 Necessity の値は、対象物の必要性を表現

するリストを要素とするリストで表現される。例えば、Out₂ポートから出力される熱エネルギーが系にとって不要であることを、

Necessity : ((NoNeed Out₂ 熱))

と表現する。デフォルトでシステムは、部品が注目している対象物を“Need”，他の対象物は“Neutral”とみなす。部品が注目している対象物は、O-FocusとP-Focusによって特定される。モデル記述者がNecessityの値を特に指定しなかったり空リストにした場合には、部品が注目している対象物を“Need”とみなし、それ以外の対象物を“Neutral”とみなす。

Necessityは、他のFTとともに振舞いモデルを適切な機能語彙にマップするための情報を提供する。また、ある機能の出力物にNoNeed指定をすることによって、その機能の副作用を明示的に表現することもでき、さらに故障診断に利用することができる。例として、ある電子回路に副作用として熱を発生する抵抗が組み込まれている場合を考える。副作用を考えない診断モードでは、電子回路のなかに熱に弱い部品が組み込まれていても抵抗が発する熱では故障しない、と考えて診断し、副作用を考えるモードでは熱による故障も考える、というように、故障原因の範囲を変える故障診断を実現できる。

2.5 FTによる機能概念間の関係表現

我々は部品の振舞いと機能を捉えるためのさまざまな視点を検討し、それらを統合して記述するための言語FBRLを定義した。FBRLにより、振舞いと機能の概念の関係を表現することが可能になる。図3は、我々が試みた機能のオントロジーの語彙分類の一部であり、個々のノードはFBRLで表現できる機能の概念を表している。あるノードの概念にFTの解釈情報を付加・削除すると、隣接するノードの機能概念になる。

エネルギーを「与える」という機能概念は、二つ以上の媒体の間で種類やその変化の仕方は問わないが、

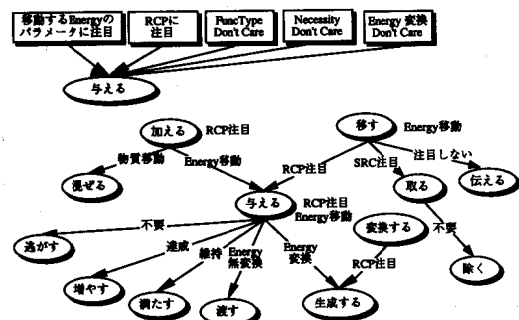


図3 機能の概念の関係図(部分)

エネルギーが移動しており、そのエネルギーを受け取る媒体、すなわち RCP のエネルギーパラメータの入出力値の関係によって目標状態が表現されるもの、として捉えることができる。「与える」機能に、移動するエネルギーの種類を変えない、という解釈情報を加えた概念は「渡す」という機能語彙で表現され、エネルギーの種類を変える概念は「生成する」という機能語彙で表現される。逆に、「与える」機能概念からエネルギーを受け取る側、すなわち RCP に注目するという解釈情報を取った概念は、「移す」という機能語彙で表現され、RCP に与えるものがエネルギーであるという解釈情報を取った概念は「加える」と表現される。

図3から推定できるように、機能のオントロジーは全体としてグラフ構造を形成するが、特定の視点からグラフを捉えて再構築することによって、例えば図4のようにエネルギーを媒体間で移動させる機能概念の関係を階層構造として表現することもできる。このオントロジーを利用することによって、エキスパートシステムは FBRL モデルを適切な機能概念および語彙にマップすることができるようになる。

2.6 FBRL モデルの再利用性

FBRL はさまざまなドメインの対象をさまざまな抽象度で記述できる。ドメインのどのような対象の機能モデルの記述に際してどのような概念記述を再利用できるかを表1に示す。表中の“D”は、“Don't Care”の意味であり、その属性値が何であっても構わないことを示す。ただし、“D”は伝える、与えるといった機

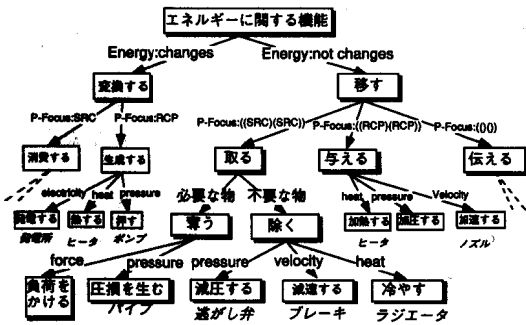


図4 機能の概念の階層的組織化(部分)

表1 各機能を表現する FT の組合せ

機能	O-Focus	P-Focus	FuncType	Necessity
部品名/リメイク				
与える	Energy	((O))	D	D
熱交換器	流量	((O))	速度	0
燃費効率	燃費効率	((O))	保持	0
与える	Energy	((RCP)(RCP))	D	D
ヒータ	流量	((低温流体)(低温流体))	速度	0
心臓	圧力	((血液)(血液))	速度	0
置く	位置	((SRC)(SRC))	D	((NoNeed ギョト 置く物))
調理装置	流量	((湯水)(湯水))	維持	((NoNeed 湯水の出口 変速))
フィルター	流量	((濁り液)(濁り液))	速度	((NoNeed 濁り液の出口 変速))

能概念のモデルを記述するときだけに利用し、そのインスタンスである部品の機能モデルを記述するときには利用しない。また、説明の便宜上 P-Focus の各要素を媒体の名称で記述しているが、インスタンスレベルで実際に記述するのはその媒体が存在するポートである。

例えば、「エネルギーを与える」という概念は、属性 O-Focus の値として与えるエネルギーのクラス “Energy” をとり、エネルギーを受け取る媒体、すなわち RCP の入出力関係に注目しているので、属性 P-Focus は値 “((RCP)(RCP))” をとる。機能タイプと Necessity は定義に関係しないので、値 “D” をとる。「与える」クラスに属し、熱エネルギーを低温の流体に与えるヒータの機能は、O-Focus の値を “温度” にし、P-Focus の値を “((低温流体)(低温流体))”，機能タイプを “達成”，特に記述すべき必要な対象物や不要な対象物がないので Necessity を “()” (空リスト) とすることで表現される。これらの概念レベルでの機能モデルの記述を具体化し、必要に応じて対象物の量的関係式を付加することによって、対象の機能モデルが記述できる。

3. FBRL の説明タスクへの適用

筆者らは、FBRL で記述したモデルを説明生成タスクに適用することによって、その有効性を検討した。FBRL によって記述された機能モデルを利用することによって、さまざまなタイプの説明を実現することができる。本章では、モデルベースシステムに実装することが望ましいさまざまな説明に関する検討と、それぞれの説明の実現に FBRL がどのように貢献するかを述べる。

説明生成を検討するための視点として、説明に利用するドメイン知識の質、説明を出力するタイミング、生成された表層文の自然さ、説明を受けるユーザへの適応などがあげられる。いずれも重要な視点であるが、本研究は最も基本的であるドメイン知識に注目し、対象の機能と振舞いを適切に捉えて記述し、説明生成に利用するための要素技術の研究開発をその目的としている。

3.1 説明生成の枠組み

説明生成システムを含むモデルベースシステム全体の構成を、図5に示す。

まず、ユーザがタスクに応じて対象の機能モデルを構築する。機能モデル構築支援モジュールは、機能モ

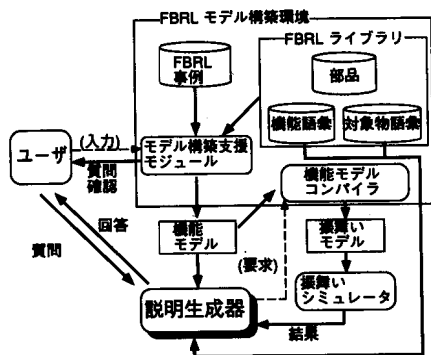


図5 説明生成システムの枠組み

デルのライブラリや機能モデルの事例などを利用してそれを支援する。

説明生成器は構築された機能モデルを用いて説明文を生成する。その際に、機能語彙や対象物語彙のライブラリを参照することによって、ユーザが記述したモデルに対して適切な機能語彙をマップし、それを用いて説明の表層文を生成する。我々の機能語彙に相当するものが従来の機能説明生成方式では対象モデルのインスタンスと直接にマップされており、我々のように機能語彙を独立したライブラリとして用意しておくような枠組みはなかった。

説明文生成のタイミングや方式にはさまざまなものが考えられるが、本研究では、ユーザがさまざまな要求を質問文の形式で入力するとそれにシステムが応えて説明文を生成する、という方式をとる。システムはあらかじめ、さまざまな種類の要求や質問に回答するためのテンプレートを準備しており、ユーザの要求や質問に応じて適切なテンプレートを検索し、必要に応じて対象のシミュレーションを行い、それらを統合して説明文を生成する。対象のシミュレーションをする必要が生じた場合、説明生成器は振舞いシミュレータに振舞いモデルと適当な初期値を与えてそれを実行させる。対象の振舞いモデルは、機能モデルコンパイラがFBRLで表現された対象モデルから生成する。

3.2 機能レベルの説明生成

FBRLに基づいて機能モデルを説明生成に適用することによって、振舞いモデルに基づく問題解決システムにとって困難であった機能レベルの説明の生成を実現することができる。StevensとSteinberg [Stevens 81]は、説明タスクの分類を試みている。筆者らは[Sasajima 95]において、その分類を振舞いと機能の観点から再検討し、7通りの説明を実現するための機構と枠組みを設計した。本稿では、これらの一つであ

る「システムを構成する部品の機能の説明」について述べ、FBRLの説明タスクに対する有効性を議論する。

[1] システムを構成する部品の機能の説明

モデルベースシステムのユーザは、対象としているシステムや構成部品どうしの機能の関係に興味を示し、例えば図6に対して、次のような質問をすることがある。

ユーザ> “原子炉”はどのように発電に貢献しているのか?

このような質問に対する望ましい説明とは、ユーザの質問中にある二つの機能どうしの関係を機能レベルで説明するような回答であると考えられる。

[2] 望ましい説明の要件

ここで図6と非常に構成が似ている加圧水型原子炉、Pressurized-water reactor (PWR)の発電プラントにおける機能を実際に説明した文章の例を示す。なお、本節では原著が英文である説明文は翻訳して引用している。

説明文1: Pressurized-water reactor [Amerongen 72, pp. 26-27]

これは、最も単純な形式の原子炉で、…〈中略〉…1次系の冷却水はポンプによって循環させられている。炉心で吸収された熱エネルギーは、熱交換によって2次系に伝えられ、そこでタービンを動かすための蒸気を生成するために利用され、タービンは電気を生成するために発電装置を起動させる。

説明文1は、PWRで発生した熱エネルギーがどのように発電に利用されるかを述べている。この例に見られるように、部品の機能についての望ましい説明とは、説明の対象である部品の入力は何であり、出力がどのような経路をたどり、他の機能の実現にどのように貢献するかを、機能の概念を表す語彙を適切に用いて述べるものであると捉えることができる。

[3] 機能レベルでの説明生成の困難さ

一般に振舞いの知識のみからこれらの要件を備えた説明を実現することは、少なくとも次の二つの理由か

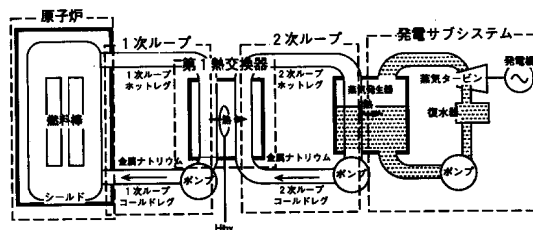


図6 原子力発電プラントのモデル例

ら困難であると考えられる。第1の理由は、振舞いモデルを機能語彙へマップすることの困難さである。2・4節で述べたように、同じ振舞いをする部品であっても解釈時の視点を変えることによってその機能はさまざまに変わる。適切な機能語彙へのマップを行うためには、どのような視点からその振舞いを解釈したかという情報が必要になる。

第2の理由は、機能が別の機能に貢献する経路を一意に同定することの困難さである。振舞いの知識から、対象のパラメータ間の因果連鎖を生成することはできる。しかし、系の異なる二つの部品に関する機能を与えられたとき、その間の経路を表す因果連鎖は一般に複数存在し、一方の機能が他方の機能に直接的に貢献する経路を一意に同定することは困難である。例えば、図6において炉心で生成された熱エネルギーは、各ループを循環する冷却材の温度や流速、それらに加えられる圧力のほか、熱の伝達率など、さまざまなパラメータの影響を受けて発電機の発電に貢献する。さらに、パラメータ間には、ループ構造によるフィードバックを受けるものもあり、全体の因果連鎖は複雑なグラフを構成する。この因果連鎖のグラフから機能間の照応関係を表す経路を導出するには、各部品の機能がどのクラスのパラメータに着目しているのか、また、どの因果の系列に注目して機能を発揮しているのか、といった特別な知識が必要である。FBRLモデルを利用すれば、属性 O-Focus, P-Focus, MP-Relations, QN-Relations の値を参照することによって二つの機能のうち一方が他方に直接的に貢献する経路を導出することができる。

〔4〕 説明生成手順

図6の金属ナトリウムを冷却材とする原子炉を組み込んだ原子力発電プラントを対象として、構成部品である燃料棒の機能の説明を生成するタスクにFBRLモデルを適用することを考える。

まず、モデル記述者がプラントのモデルを記述する。記述に際しては、個々の部品に対してそれが発揮する機能をすべて FT-Sets として記述する。モデル構築の段階で、個々の部品の機能は系の目的に応じてある程度限定される。例えば、図6を主に熱エネルギーに注目して記述することによって、第1熱交換器の機能は、原子炉の熱を「除く」というものと、熱エネルギーを2次ループへ「伝える」というものの二つに限定される。

次に、図6の燃料棒の熱を生成する機能が発電機の電力生成機能に対してどのように貢献するか、すなわち、機能間の照応関係を導出する。はじめに、燃料棒

が出力する熱エネルギーは、1次ループホットレグによって第1熱交換器に伝搬される。第1熱交換器が発揮し得る機能には、1次ループホットレグから出力されてくる熱エネルギーに注目するものが2通りある。一つは、1次ループを流れる流体から2次ループを流れる流体へと熱エネルギーを「伝える」機能、もう一つは1次ループを流れる流体から熱エネルギーを「除く」という機能である。このうち、熱エネルギーを「伝える」機能の注目する熱エネルギーは、O-Focus, P-Focus の記述から2次ループホットレグへ到達し、蒸気発生器の蒸気発生機能によって蒸気に乗せられ、蒸気タービンに伝えられることが推論される。蒸気タービンでは、伝搬されてきた熱エネルギーを原料として回転エネルギーを生成し、発電サブシステムの発電機能に必要な蒸気タービンの回転力の原料となる。一方、熱エネルギーを「除く」機能が注目する熱エネルギーは、そのP-Focusの記述から発電機の方ではなくそのまま原子炉へ戻っていくので、発電機能に直接貢献しているとはいえない。よって、燃料棒から発電機の発電機能へと直接貢献する経路における第1熱交換器の機能は、熱エネルギーを伝えることであると導出できる。

直接貢献する経路を導出することができれば、その経路に沿って説明を生成する。手順1に、複数のサブシステムの組合せによって階層的に表現されたシステムにおける部品の機能 A が別のある部品の機能 B にどのように貢献するかを述べる説明を実現するための手順の概略を示す。

手順1：二つの機能の関係を説明する手順

1. 説明対象部品の機能に注目する。初期値は機能 A 。
2. O-Focus, P-Focus, MP-Relations, QN-Relations の値を参照し、機能 A と機能 B の照応関係を同定する。機能 A が機能 B に貢献していなければ、それをユーザに示して説明終了。機能 A が機能 B に貢献していれば、次のステップへ進む。
3. 機能 A を述べる。
4. ステップ5から7を、機能 B に到達するまで繰り返す。
5. 説明対象部品を含む、最も小さなシステム S を同定する。
6. システム S に属し、説明対象部品と同じ階層に属し、かつ、機能 A が機能 B に貢献する経路に乗っているすべての部品について、その部品の機能を述べる。
7. システム S と同じ階層に属し、システム S に接続する部品を説明対象部品とする。

手順1によって生成される説明の表層文をより自然な表現に近づけるために次の戦略1を、さらに、流体系のドメインに限定して適用できると考えられる説明を簡略化するための戦略2を導入する。

戦略1：自然な表現にするための戦略

説明しようとしている部品が対象物を出力するまでの機能の説明対は、「部品」を主語にする。それ以降「部品」から生成された対象物がどのようにシステム全体の機能に貢献するかを説明するときには、「対象物」を主語にする。

戦略2：説明を簡略化するための戦略

説明する最初の部品の複数の出力のうち、次の部品にとって必要な対象物がどのような出力媒体に乗って出力されるかを説明する。必要な対象物が違う種類 (ISAの値が異なる対象物) に変換されるまで、説明のステップを飛ばす (部品 a, b, c, \dots, n を通って、とする)。

手順1, 戦略1, 戦略2に従って、燃料棒が発電機能にどのように貢献するか、という説明を説明文2のように生成することができる。

説明文2：燃料棒は原子炉サブシステムで、熱エネルギーを生成します。生成された熱エネルギーは金属ナトリウムに乗って1次ループに出力されます。生成された熱エネルギーは1次ループ、第1熱交換器、2次ループを通り、発電システムで変換されて電力になります。

以上述べてきたように、FBRLによる対象の機能モデルを利用することによって、機能どうしの関係に必要な対象物の流れのみをシミュレートすることが可能になり、その結果を利用して機能語彙を用いた説明を生成することができる。

4. 関連研究

[Chandrasekaran 93, Iwasaki 93, Sembugamoothy 86, Vescovi 93]においてB. Chandrasekaranらは、振舞いとは系の状態の系列であり、機能とは意図された望ましい状態を達成することであると捉えた。彼らの提案した枠組みにおいて、系の機能とは、系によって意図された役割を持つ個々の構成部品の機能と振舞いによって達成されるものであり、どのような振舞いの組合せによって系の機能が達成されるかという視点から機能の概念を捉えようと試みている。大規模な系を機能的にモデル化するためには、このように階層的な記述の枠組みは重要であると考えられる。しかし、1章で述べたとおり、彼らの枠組みではあるグレイ

サイズで振舞いモデルとして捉えられていたものが、異なるグレイサイズでは機能モデルとして捉えられる。よって、振舞いと機能の本質的な差を捉えてはいない。

FBRLは、システムの機能モデルをその副機能の集合体として捉えることにより、システムの階層的表現を実現しているが、Chandrasekaranらの機能の捉え方と異なり、システムやそのサブシステムを捉えるグレイサイズと機能の概念は無関係であり、システムの機能モデルを分解した結果は副部品の機能モデルを階層的に接続したものになる。逆に、振舞いモデルを分解、接続してできるものはグレイサイズの異なる振舞いモデルであり、機能モデルではない。さらに、FBRLのほうが振舞いを解釈するためのプリミティブの種類が多く、機能と振舞いの差を説明する能力が高い。これは、5章で示す振舞い理解のタスクにおいて根本的な差となって現れる。

[Sembugamoothy 86]の機能表現において、機能とは望ましい状態を達成 (To Make) するものとして記述されていた。Anne M. Keuneke [Keuneke 91]は、その機能を達成の方法や発揮されるための初期条件、持続する時間などの観点から四つに分類した。Keunekeは、ある機能として振舞いが解釈されるときには、振舞いに対して暗黙の仮定が与えられると考えてそれを捉えるための視点を分類し、記述するためのプリミティブを探すという姿勢を示している。この点で彼女の研究は、我々の研究と最も方針が近いものの一つと考えられる。

我々は彼女の分類した視点を再検討し、機能タイプを部品単独で認識できるもの (達成, 維持, 保持) と部品間の関係を参照することによって認識できるもの (制御, 防止) の二つに大きく分けた。そして、前者をモデル記述者が部品ごとに属性値として与えるものとし、後者を部品のモデルからシステムが推論によって導出するものとして、機能表現に組み込んだ。

A. Abu-Hannaらは、故障診断のコストを減らすことを目標として、対象の機能モデルを抽象度に応じて三つの階層に分けて記述する方式を提案している [Abu-Hanna 91]。対象の振舞いを抽象化したり概念化したりすることと機能の概念は、密接に関わっていると我々も考えている。なぜなら、系や部品に対して与えられる目標というものは、振舞いを解釈することができるように、高い概念レベルで語られることが多いからである。FBRLは、目標状態を表現するパラメータとその関係を四つのFTの組合せによって表現できる。一方、[Abu-Hanna 91]において抽象化のため

の視点は明示されておらず、この点で、我々の研究のほうで、完備性はいえないものの、抽象化、概念化を行うために必要な視点をより多く数え上げているといえる。

また、M. Pegahらは、[Sembugamoothy 86]の機能表現の枠組みを大規模な系であるF/A-18の燃料システムに適用し、大規模な系の振舞いのシミュレーションとその理解を狙った[Pegah 93]。我々は、定性的にシミュレートすることが困難である部品間のネガティブフィードバックを含む大規模な系を対象とする故障診断システムKC III [Kitamura 94]に機能記述の方式を適用している。

説明機能に関しては、W. Swartoutらが、設計タスクを行うエキスパートシステムがユーザに提供する説明が含むべき情報の検討を行い、システムの出力の正当性、一般的な法則があるタスクのためにどのように特化されたか、システムが説明に用いる語句の意味、などをあげて、これらに関するユーザの質問に対話形式で解答するための枠組みを構築している[Swartout 91]。ユーザに、エキスパートシステムが保持している知識とそれに基づく動作とを説明するための技法とその実現についての検討は、Thomas R. GruberとPatrice O. Gautierら[Gruber 93]によってもなされている。これらの枠組みにおいて、ドメインのモデルが重要な役割を果たしていることはいうまでもないが、ドメインモデルが表現すべき情報が何であり、それがどのように表現されるべきであるか、という議論が十分ではない。網羅的ではないが、本論文と[Sasajima 95]では説明タスクを分類し、特に機能レベルの説明生成に必要な知識とその表現にFBRLが貢献することを示している。

5. む す び

本研究では、対象モデルを振舞いと機能の視点からドメインに依存せずに記述するための語彙、すなわち機能と振舞いのオントロジーについて検討し、その記述言語FBRLを設計した。FBRLは、対象の機能モデルを振舞いモデルと我々がFTと呼ぶ振舞い解釈のための情報の組合せとして表現することによって、対象モデルは振舞いのモデルと機能のモデルを明示的に分離して表現すべきである、という我々の要求を満たしている。さらに、記述のためのプリミティブとしては特定のタスクやドメインに依存しないものを収集したため、FBRLはさまざまなドメインにおける対象をさまざまな抽象レベルで記述することができる性質を持

つ。

さらに、FBRLが説明タスクに貢献することを示すために、筆者らはFBRLモデルを利用する7種類の説明を生成する枠組みを設計した。FBRLの利用によって、モデルベースシステムは適切な機能や振舞いの概念を表す語彙による説明生成を実現できることを示した。

現在、FBRLとKC III [Kitamura 94]の枠組みを、モデル構築の支援と説明生成の二つの面から融合させた枠組みの構築を進めている。説明生成に関しては、故障の発生とその影響を機能語彙によって説明するシステムのプロトタイプをCommon LISPによってインプリメントした。プロトタイプは、高速増殖炉のFBRLモデルとKC IIIによる振舞いのシミュレーションの結果を参照して、どのような故障が発生し、その影響がどのように伝搬していくかを機能語彙を利用して説明する。

以上のように本研究では、ドメイン理解の基礎となる機能と振舞いの本質的な相違を「わかる」ことを目的として考察を進め、振舞いを解釈するための四つの視点を得た。機能モデル表現言語FBRLは、振舞いと機能の本質的な違いを明示的に表現し、機能レベルの説明生成タスクに貢献するという点で我々の当初の研究目的が達成されたことを示している。

この成果に基づく次のステップとして、機能と振舞いの違いを「わかる」ことが本質的に貢献するもう一つの課題である。対象の機能理解と再設計支援タスクの研究を計画している。

機能理解は二つのステップからなる。第1のステップは、対象の振舞いモデルと構造の知識に基づいて対象を構成する個々の部品の機能の候補を生成する。第2のステップは、生成された機能の候補を機能レベルで定義された公理系に基づいて検査し、対象の機能を同定する。第1のステップは、振舞いの知識を機能概念の空間へとマップするタスクであると捉えることができる。FBRLのFTは、有限個のプリミティブで機能の概念を表現する。よって、プリミティブを分類した軸の組合せで規定される機能概念の空間は有限の空間となり、ある振舞いモデルに対する解釈の候補も有限となる。しかし、de KleerやB. Chandrasekaranのように、明示的な解釈の軸を持たない表現形式ではこの機能概念空間が大きくなり、そのうえでの機能概念の探索は非常に困難になることが予想される。

第2のステップは、第1のステップでシステムに対して生成された機能の候補を検証し、最も意味のある機能、すなわち振舞いに込められた設計者の意図を同

定する。その実現のためには、意味のある機能概念間の関係を整理し、機能の系列からそれを同定するための公理系をつくり、同時に FBRL の拡張を行う必要がある。現在の FBRL モデルは、システムを構成する個々の部品の機能が他の部品の機能にとって必要なものを出力し提供するという関係と、ある部品の機能が他の部品が異常状態に陥ることを防ぐという関係を表現できている。このほかにも機能どうしの関係には、ランキンサイクルの構成要素である過熱器のように、熱エネルギーを余計に与えることによって、タービンの回転エネルギーの生成効率を高めるものや、トランジスタのバイアス電圧の供給源のように、トランジス

タを動作領域に入れて増幅機能を可能にする、というものもある。効率向上や機能の切換えをはじめとする機能間の関係を分類し、FBRL 表現からそれらを導出するような公理系を整備することで FBRL の枠組みに基づく再設計支援システムを実現できると考えている。

謝 辞

原子力プラントのモデル構築において、動力炉・核燃料開発事業団の遠藤 昭主任研究員、吉川信治副主任研究員には大変有益な助言をいただいたことを深く感謝致します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Abu-Hanna 91] Abu-Hanna, A., Benjamins, R. and Jansweijer, W.: Device understanding and modeling for diagnosis, *IEEE Expert*, pp. 26-32 (April 1991).
- [Chandrasekaran 93] Chandrasekaran, B., Goel, A. K. and Iwasaki, Y.: Functional representation as design rationale, *Computer*, pp. 48-56 (Jan. 1993).
- [de Kleer 84a] de Kleer, J.: How circuits work, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 205-280 (1984).
- [de Kleer 84b] de Kleer, J. and Brown, J. S.: A qualitative physics based on confluences, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 7-83 (1984).
- [Gruber 93] Gruber, T. R. and Gautier, P. O.: Machine-generated explanations of engineering models: a compositional modeling approach, *Proc. IJCAI*, pp. 1502-1508, (1993).
- [Iwasaki 93] Iwasaki, Y., Fikes, R., Vescovi, M. and Chandrasekaran, B.: How things are intended to work: Capturing functional knowledge in device design, *Proc. IJCAI*, pp. 1561-1522 (1993).
- [Keuneke 91] Keuneke, A. M.: Device representation: the significance of functional knowledge, *IEEE Expert*, Vol. 24, pp. 22-25 (April 1991).
- [Kitamura 94] Kitamura, Y., Sasajima, M., Ikeda, M. and Mizoguchi, R.: Model building and qualitative reasoning for diagnostic shell, *Proc. '94 Japan/Korea Joint Conf. on Expert Systems*, pp. 41-46 (1994).
- [溝口 95] 溝口理一郎, 池田 満: オントロジー工学序説, 人工知能学会誌 (1995) 投稿中.
- [Pegah 93] Pegah, M., Sticklen, J. and Bond, W.: Functional representation and reasoning about the F/A-18 aircraft fuel system, *IEEE Expert*, Vol. 24, pp. 65-71 (April 1993).
- [Sasajima 94a] Sasajima, M., Kitamura, Y., Ikeda, M., Yoshikawa, S., Endou, A. and Mizoguchi, R.: An investigation on domain ontology to represent functional models, *Proc. 8th Int. Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, pp. 223-233 (1994).
- [笹島 94b] 笹島宗彦, 來村徳信, 池田 満, 溝口理一郎: 機能モデル記述のためのドメインオントロジーに関する検討, 人工知能学会知識ベースシステム研究会資料, SIG-KBS-9304/2, pp. 9-16 (1994).
- [Sasajima 95] Sasajima, M., Kitamura, Y., Ikeda, M. and Mizoguchi, R.: FBRL: A Function and Behavior Representation Language, *Proc. IJCAI-95*, pp. 1830-1836 (1995).
- [Sembugamoorthy 86] Sembugamoorthy, V. and Chandrasekaran, B.: Functional representation of devices and compilation of diagnostic problem-solving systems, J. L. Kolodner and C. K. Riesbeck (eds.), *Experience, Memory, and Reasoning*, pp. 47-73., Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N. J. (1986).
- [Stevens 81] Stevens, A. and Steinberg, C.: A Typology of Explanations and Its Application to Intelligent Computer Aided Instruction, Report no. 4626, Bolt Berenek and Newman Inc., 50 Moulton Street Cambridge, Massachusetts 02138 (1981).
- [Swartout 91] Swartout, W., Paris, C. and Moore, J.: Design for explainable expert systems, *IEEE Expert*, pp. 58-64 (June 1991).
- [van Amerongen 72] van Amerongen, C. and Amice, M. Sc.: *How Things Work Volume II*, Granada Publishing Limited (1972).
- [Vescovi 93] Vescovi, M., Iwasaki, Y., Fikes, R. and Chandrasekaran, B.: CFRL: A language for specifying the causal functionality of engineered devices, *Proc. 11th Nat'l Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 626-633 (1993).