The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現方式に関する研究
Author(s)	笹島, 宗彦
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129114
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現方式に関する研究

1997年1月

笹島宗彦

機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現方式に関する研究

1997年1月

笹 島 宗 彦

内容梗概

本論文は筆者が大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程 (物理系専攻情報工学分野) 在学中に行った機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現方式に関する研究の成果をまとめたものであり，次の 6 章をもって構成されている．

第 1 章は序論であり，本研究の目的および工学上の意義について, 従来の機能モデル研究と比較しながら述べ，本研究により得られた諸成果を概説している．

第 2 章では本研究で開発された機能モデル表現言語 **FBRL**(Function and Behavior Representation Language) の設計方針, 表現方式について説明する．

まず, 概念レベルでの説明生成, 設計支援といった対象モデルに基づく高度な問題解決を支援するためには機能モデルが必要とされていることを述べる．その上で, 現状で求められている機能モデルとは, 機能と振舞いの概念を明示的に区別して表現する能力を持ち, しかも記述されたモデルが高い再利用性・共有性を持つものであることを既存の機能モデル記述方式で代表的なものを取り上げながら述べる．次に, これらを満たす機能モデルの記述方式を実現するためには対象領域, すなわち表現したいものの分析が特に重要であることを, 筆者が設計した機能モデル表現言語 **FBRL** の仕様, 開発の過程, 様々なモデル表現例を交えながら示す．**FBRL** を設計するにあたって筆者らは, 機能と振舞いの差が現れる様々な例を分析し, 機能とは振舞いを望ましい目標状態の下で解釈した結果であると捉え, 機能モデルを

機能 = 振舞い + 振舞いの解釈情報

としてモデル化する基本方針を採用する．この方針に基づく **FBRL** は機能と振舞いの概念を明示的に違うものとして表現することができる性質を持ち, さらに, 一般的には再利用ができない機能の知識と振舞いの知識を明示的に分離してモデル化するため, 再利用性の高い機能モデルを表現することができることを示す．

第 3 章では，**FBRL** によって表現された機能と振舞いの概念をライブラリ化し, それを参照することによってユーザにとってより分かりやすい説明を生成するシステムの設計とプロトタイプの作成について示す．

振舞いモデルのみを用いて故障診断や設計などの問題解決を行うシステムでは, 対象の振舞いをパラメータ集合とその変化によって表現し, 説明生成を行ってきた．しかしパラメータ変化の解釈はユーザに委ねられていたため, 対象について理解が浅いユーザには説明を理解することが困難であると考えられる．また, 専門書や百科事典などの説明文に見られるように, ユーザの対象理解はパラメータの変化としてのみではなくそれを解釈した結果, 即ち機能をベースにして行われる場合もある．以上の背景に基づき, まず, 我々の考える望ましい説明が **FBRL** モデル表現された機能と振舞いの知識を様々に活用するこ

とによって実現可能であることを, 既存の説明生成システムと比較しながら示す. 次に, 概念設計した説明生成システムのプロトタイプの作成とそのランキンサイクルへの適用実験を示し, **FBRL** が説明生成システムの能力を向上させることを述べる.

第 4 章では, 機能理解問題に **FBRL** 機能モデルを適用するために不可欠な要素技術である機能依存関係導出システムの概念設計について述べる.

まず, 従来の機能表現方式が機能と機能間関係という 2 つの異なる概念を混同しており, その分離が必要であることを代表的な研究事例を用いて述べる. 機能間関係は貢献・阻害の 2 つに大きく分類され, さらに貢献関係は 5 つに小分類される. 機能モデルの明示性を高めるためには機能と機能間関係を区別することが必要であり, 機能の概念は部品ごとに記述し, 機能間関係は動的に導出する枠組みが可能となることを述べる. 機能間の貢献関係を判定するシステム **CPF**(Contributive Path Finder) は, 機能モデルの処理系と対象の振舞いをシミュレートする定性シミュレータからなり, 与えられたシステム中 2 つの機能間にある貢献関係を判定する. さらに,**CPF** で導出された貢献関係が, どのような性質を持ったパラメータを介して達成されているかは **FBRL** モデルを参照することで判定される.

第 5 章では, 本研究で体系化した概念, 概念の表現方式, および説明生成への応用の 3 つの観点から, 関連する研究と本研究を比較し, 本研究の位置づけを示す.

第 6 章では本研究で得られた主な成果をまとめ, 今後の展望をしめす.

関連発表論文

A. 学会誌掲載論文

[A1] 笹島, 來村, 池田, 溝口: 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, 人工知能学会誌 Vol.11,No.3, pp.420-431(1996)

[A2] M.Sasajima, Y.Kitamura, M.Ikeda, S.Yoshikawa, A.Endou and R.Mizoguchi: A Representation Language for Behavior and Function:FBRL, Expert Systems with Applications Vol.10, No.3/4,pp.471-479(1996)

B. 国際会議発表論文

[B1] M.Sasajima, Y.Kitamura, M.Ikeda, S.Yoshikawa, A.Endou and R.Mizoguchi: An Investigation on Domain Ontology to Represent Functional Models, *Proc. of the Eighth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, Nara, Japan, pp.224-233(1994)

[B2] M.Sasajima, Y.Kitamura, M.Ikeda, S.Yoshikawa, A.Endou and R.Mizoguchi: Domain Ontology for Representing Behavior and Function, *Proc. of PACES'95*, Huangshan, China, pp.147-154(1995)

[B3] M.Sasajima, Y.Kitamura, M.Ikeda, and R.Mizoguchi: FBRL:A Function and Behavior Representation Language *Proc. of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)*, Montréal, Canada, pp.1830-1836(1995)

C. 研究会

[C1] 笹島, 來村, 池田, 溝口: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, 人工知能学会研究会資料,SIG-KBS-9304,pp.9-16(1994)

[C2] 笹島, 來村, 池田, 溝口:機能モデル表現言語 FBRL を用いたプラントの挙動説明システムの開発, 人工知能学会研究会資料,SIG-J-9401-11,pp.79-86(1994)

[C3] 笹島, 來村, 池田, 溝口:機能モデル表現言語 FBRL とその説明生成システムへの適用, 計測自動制御学会第 33 回ヒューマン・インターフェース研究会資料, pp.169-176(1995)

D. 全国大会発表

[D1] 笹島, 來村, 池田, 吉川, 遠藤, 溝口:知識コンパイラのための対象モデル構築と定性推論方式 ー高速増殖炉常陽におけるモデル構築と推論方式の検証ー, 第 6 回人工知能学会全国大会論文集,pp.241-244(1992)

[D2] 笹島, 來村, 池田, 溝口:機能と振舞いに着目したドメインオントロジーに関する検討, 第 7 回人工知能学会全国大会論文集, pp.631-634(1993)

[D3] 笹島, 來村, 宋, 吉川, 遠藤, 池田, 溝口: 機能モデル記述のためのドメインオントロジーとその説明への応用に関する検討, 第 8 回人工知能学会全国大会論文集, pp.461-464(1994)

[D4] 笹島, 來村, 三谷, 池田, 溝口:プラントの機能モデルに基づく説明生成, 第 9 回人工知能学会全国大会論文集, pp.65-68(1995)

[D5] 笹島, 來村, 池田, 溝口:動的システムにおける機能依存関係の導出, 第 10 回人工知能学会全国大会論文集,pp.187-190(1996)

E. その他

[E1] 來村, 笹島, 池田, 吉川, 遠藤, 溝口:知識コンパイラのための対象モデル構築と定性推論方式ー定性推論方式の提案ー, 第 6 回人工知能学会全国大会論文集,pp.237-240(1992)

[E2] 來村, 笹島, 池田, 吉川, 遠藤, 溝口:原子力プラント「常陽」のための対象モデルと定性推論方式, 人工知能学会研究会資料,SIG-KBS-9203-9(1992)

[E3] Y.Kitamura,M.Sasajima,M.Ikeda and R.Mizoguchi:Model Building and Qualitative Reasoning for Diagnostic Shell, *proc.of JKJCES* pp.41-46(1994)

[E4] 來村, 笹島, 池田, 吉川, 遠藤, 溝口: 因果指定に基づいた定性的モデリングと推論機構, 人工知能学会研究会資料, SIG-KBS-9501-4, pp.25-32(1995)

[E5] 來村, 笹島, 溝口:再設計支援のための動的システムの機能理解について, 第 14 回設計シンポジウム講演論文集,pp.64-71(1996)

[E6] Y. Kitamura, M. Sasajima, M. Ikeda, S. Yoshikawa, A. Endou, O. Kakusyo, R. Mizoguchi:A method of qualitative reasoning for model-based problem solving and its application to a nuclear plant, *Expert Systems with Applications*, Vol.10, No.3/4, pp.441-448(1996)

[E7] 來村, 笹島, 池田, 吉川, 小澤, 溝口: モデルに基づく問題解決のための流体と時間のオントロジーの構築とその評価, 人工知能学会学会誌, Vol.12, No.1, 1997 (掲載予定)

[E8] 三谷, 笹島, 宋, 來村, 池田, 吉川, 遠藤, 溝口:機能モデル表現言語 FBRL に関する検討, 平成 6 年電気関係学会関西支部連合大会,p.294(1994)

[E9] 三谷, 笹島, 宋, 來村, 池田, 溝口:機能モデル表現言語 FBRL によるランキンサイクルのモデルと説明生成, 第 9 回人工知能学会全国大会論文集,pp.395-398(1995)

[E10] 三谷, 笹島, 來村, 池田, 溝口:ランキンサイクルのモデル化と説明生成ー機能モデル表現言語 FBRL による記述ー, 第 51 回情報処理学会全国大会論文集第 3 分冊, pp.193-194(1995)

[E11] 三谷, 笹島, 來村, 池田, 溝口:機能モデルに基づく説明生成のための情報軸の整理, 第 33 回人工知能学会研究会資料,SIG-KBS-9503-7,pp.43-50(1995)

[E12] 植田, 笹島, 來村, 吉川, 遠藤, 池田, 角所, 溝口:対象モデルに基づく故障診断エキスパートシステム KCIII, 第 8 回人工知能学会全国大会論文集, pp.469-472(1994)

[E13] 植田, 笹島, 來村, 池田, 小堀, 角所, 溝口:KCIII における故障の分類と故障診断方式, 第 9 回人工知能学会全国大会論文集, pp.471-474(1995)

[E14] 植田, 笹島, 來村, 池田, 小堀, 角所, 溝口:故障診断のための故障モデルと推論方式, 第 51 回情報処理学会全国大会論文集第 3 分冊,pp.185-186(1995)

[E15] 植田, 笹島, 來村, 吉川, 遠藤, 池田, 角所, 溝口:故障オントロジーと診断方式, 人工知能学会研究会資料 (1995)

[E16] 川村, 笹島, 來村, 池田, 溝口:機能モデル表現言語 FBRL を用いた機能階層モデル—制御系統を例題として—, 第 10 回人工知能学会全国大会論文集,pp.191-194(1996)

[E17] 川村, 笹島, 來村, 池田, 溝口:機能階層関係の導出システムの概念設計, 第 7 回 AI シンポジウム合同研究会論文集, 掲載予定,(1996)

目 次

内容梗概 i

第 1 章　序論 1

第 2 章　機能モデル表現言語 FBRL 7

2.1 緒言 7
2.2 意味と形式的表現 7
2.3 機能概念同定の必要性 7
2.4 機能概念モデル化の従来の試み 8
2.4.1 J.de Kleer のアプローチ 8
2.4.2 B.Chandrasekaran らのアプローチ 10
2.5 機能モデル記述の基本方針 14
2.6 機能モデル記述のためのテンプレート 17
2.7 振舞いモデルの記述 18
2.7.1 デバイス中心の部品記述 18
2.7.2 対象物の記述方式 19
2.7.3 振舞いの表現方式 24
2.8 FT:Functional Topping の記述 26
2.8.1 O-Focus:解釈時に注目するパラメータのクラス 26
2.8.2 P-Focus:解釈時に注目するポート 26
2.8.3 FuncType:目標状態への指向の形態 28
2.8.4 Necessity:対象物の必要性 29
2.9 FT による機能概念間の関係表現 30
2.10 抽象度のきりかえ 33
2.11 結言 34

第 3 章　FBRL の説明タスクへの適用 35

3.1 緒言 35
3.2 説明生成システムの開発例 35
3.3 システム設計方針 37
3.4 説明生成システムの枠組み 37
3.5 機能語彙ライブラリ 38
3.5.1 機能語彙を規定する軸 39
3.6 説明生成システムの概念設計 46
3.6.1 説明の分類 46
3.6.2 システムを構成する部品の機能の説明 47
3.6.3 望ましい説明の要件 47
3.6.4 機能レベルでの説明生成の困難さ 48
3.6.5 機能モデルの記述 48
3.6.6 主経路の同定 52
3.6.7 表層文の生成 52
3.7 プロトタイプの作成 54
3.7.1 説明生成器の構成 55
3.7.2 ランキンサイクルのモデル記述 55
3.7.3 モデル記述例:蒸気タービン 56
3.7.4 機能語彙マップモジュール 59
3.7.5 説明の内容を規定するための情報軸 61
3.7.6 説明のための補助的な情報 65
3.7.7 説明生成例 1:ランキンサイクルに関する説明 66
3.7.8 説明生成例 2:故障診断システムとの連動 68
3.8 説明生成器の評価 71
3.9 結言 72

第 4 章 機能依存関係の導出 73

4.1 緒言 73
4.2 機能間関係分類の必要性 73
4.3 部品単体の機能に関する諸定義 75
4.4 依存関係:貢献・阻害 76
4.4.1 貢献関係の導出方式 77
4.5 貢献関係の分類 80
4.5.1 操作対象量貢献 80

4.5.2 補助量貢献 81
4.5.3 防止貢献 82
4.5.4 可能貢献 83
4.5.5 効率貢献 84
4.5.6 ランキンサイクルにおける機能依存関係 84
4.6 結言 85

第5章 関連研究 **87**
5.1 緒言 87
5.2 動詞を分析・分類する試み 87
5.2.1 国語研究の分野における動詞の意味分析 87
5.2.2 価値工学における機能用語の選定 89
5.3 機能モデルを利用した問題解決への取り組み 90
5.3.1 How Circuits Work 91
5.3.2 Functional Representation とその応用 91
5.3.3 知的 CAD への応用 92
5.3.4 機能モデルの説明生成への応用 93
5.4 結言 93

第6章 結論 **95**

謝辞 **98**

付録A 媒体機能語彙ライブラリ **99**

参考文献 **107**

図目次

2.1 ブザーの機能モデル記述 11
2.2 ブザーの構造の記述 12
2.3 BEHAVIOR の記述 13
2.4 GENERIC KNOWLEDGE の記述例 13
2.5 ASSUMPTIONS の記述例 13
2.6 B.Chandrasekaran らによる機能と振舞いの捉え方 14
2.7 タービンの振舞いモデル 15
2.8 タービン振舞いの解釈例:エネルギーを変換する 16
2.9 設計方針:プリミティブの整備 16
2.10 FBRL による部品の機能モデルクラステンプレート 18
2.11 基本対象物の例:水 1 20
2.12 混合物 21
2.13 対象物記述のためのテンプレート 22
2.14 対象物「熱湯」の記述例 23
2.15 熱交換器 24
2.16 エネルギー機能概念の関係図 (部分) 31
2.17 エネルギー機能概念の階層的組織化 (部分) 32

3.1 説明生成システムの枠組み 38
3.2 エネルギー機能語彙を規定する情報軸一覧 40
3.3 エネルギー機能語彙ライブラリ (1/2) 42
3.4 エネルギー機能語彙ライブラリ (2/2) 43
3.5 エネルギー機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (1/2) 44
3.6 エネルギー機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (2/2) 45
3.7 原子力発電プラントのモデル例 49
3.8 **FBRL** による第 1 熱交換器の機能表現 (一部省略) 50
3.9 説明生成器 55

3.10 ランキンサイクルの構成 56
3.11 蒸気タービン 57
3.12 **FBRL** による蒸気タービンの機能表現 58
3.13 蒸気タービンへの機能語彙割り当て 62
3.14 情報軸の定義 63
3.15 タービン:振舞いレベルでの説明 66
3.16 タービン:機能語彙を用いた説明 66
3.17 説明生成例 67
3.18 熱輸送系 69
3.19 KCIII の推論結果例 69
3.20 定性シミュレータとの連動 70

4.1 Contributive-Path Finder 77
4.2 ボイラのタービンに対する操作対象量貢献 81
4.3 燃焼室のボイラに対する補助量貢献 82
4.4 過熱器のタービンに対する防止貢献 83
4.5 電源のトランジスタに対する可能貢献 83
4.6 ランキンサイクルにおける機能間依存関係 85

A.1 媒体機能語彙ライブラリ 1 100
A.2 媒体機能語彙ライブラリ 2 101
A.3 媒体機能語彙を規定する情報軸一覧 (1/2) 102
A.4 媒体機能語彙を規定する情報軸一覧 (2/2) 103
A.5 媒体機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (1/2) 104
A.6 媒体機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (2/2) 105

表目次

2.1 同じ振舞いに対する機能の違い 8
2.2 抵抗の因果パターンと機能 9
2.3 各機能を表現する FT の組み合わせ例 33

第 1 章

序論

工業プラントをはじめとする人工物はその構築技術の進歩にともない, ますます巨大化・複雑化している. 複雑な人工物を低コストで設計・構築するためには, 対象のモデルを構築し, モデル上での設計, シミュレーションなどを可能にする技術が不可欠である. これまで, 対象のモデルに基づく問題解決を計算機で支援することを目的として様々な研究が人工知能の分野で行われてきた. しかし近年, 対象の複雑化に伴って, モデル構築に必要なコストが無視できなくなった. すなわち, 対象モデル構築のコストを削減するために対象モデルの共有性や再利用性を向上させることが必須となった. さらに, 設計や診断, 対象についての説明など, 人間が行う知的活動を分析しその定式化を目指す研究が進歩するにつれて, 対象の物理的状態をシミュレートするための情報だけでなくより抽象的な概念も表現できるような優れた対象モデルを構築する方法論への要求が高まってきている.

こうした背景の下, 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指摘されはじめた [溝口 97]. 設計や診断, 説明生成などの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, その組み合わせ, 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[dJ84] 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* 原理). 例として, 車のエンジンルームに組み込まれたラジエータの振舞いをモデル化する場合を考える. 冷却材の温度を下げる振舞いのみをモデル化したものはラジエータの「冷やす」機能を反映してしまっているためにこの原理に反している. なぜならラジエータは, 空気を暖めるヒーターとして, また単純に冷却材から空気へ熱を伝える熱交換器としても利用できる. 温度を下げる振舞いのみをモデル化したものは, ラジエータが「冷やす」以外の使われ方をする場合に利用することができない. このように機能と振舞いの知識が混在すること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. 言い換えれば, 部品がどのような状況で使われても変わらないモデルと, 使われる状況に応じて変化するモデルを明示的に分離することが必要である.

これまでに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様々に行なわれてきた. de Kleer[de 84] は部品を, 因果性を持つ複数の入出力関係, 即ち振舞いをもつものとして捉え, 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1つ1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[CGI93] 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.

筆者らは, 望ましい機能モデル記述方式とは次の2つの要件を満たすものであると考えた.

1:機能と振舞いの本質的な差を表現できること

機能と振舞いの間にある本質的な差を表現できなければ, 記述した知識が暗黙的になり, 知識の再利用性・共有性が損なわれる.

2:モデル記述を容易にできること

対象モデル記述の方式としては, プリミティブ (表現素) を組み合わせて記述する方式が望ましい.

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, 特に第1の要件を満たしていない.

筆者らは機能とは部品の振舞いをその組み込まれた系に応じて解釈した結果であると

考えた. すなわち,

機能 = 振舞い + 解釈情報

と捉えた. この考え方に基づくモデル表現方式は, 再利用性の高い振舞いモデルと, 部品が組み込まれた系に依存して変わる解釈情報のモデルを明示的に分離して表現する. よって, 従来の機能モデルで暗示的であった振舞いと機能の関係が明示され,

機能モデルの再利用性・共有性

が高められる. さらに, 機能の概念を深く分析し, 機能モデル表現に必要な視点を数え挙げ, 記述のためのプリミティブを整備すれば, モデル記述の労力を削減することができると考えられる.

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. 本稿ではその主要な成果として, 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**[SKIM95] [SKI+94] [笹島 94] を提案し, その有用性を示す応用研究について述べる. 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. **FBRL** の設計において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り出しとその意味の確定に重点をおいて [溝口 97] 機能モデル表現方式の提案と機能語彙の組織化を行う.

第 2章では, 本研究の最も重要な成果である **FBRL** についてその設計思想, 表現力に重点をおいた説明を行う. **FBRL** は, 振舞いモデルに Functional Topping(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. 筆者らは様々なドメインにおいて, 人工物の機能と振舞いの認識に差が現れる例を分析し, 解釈情報を表現する視点, すなわち FT を 4 つ捉えた. また, プリミティブの規定にあたっては, 特定のドメインやタスクに依存しないものを採用したため, **FBRL** は色々なドメインの対象を様々な抽象度で表現することが可能となった. さらに, **FBRL** で表現可能な概念を, エネルギーに関する機能概念と媒体に関する機能概念に分けて体系化し, それらの概念と概念を表現する語彙のセットをライブラリ化することができる. 機能語彙ライブラリは, 主に次の 2 つのタスクに貢献すると考えられる.

機能モデル構築 ライブラリ中の機能概念を具体化することによって機能モデルを構築することができる.

機能モデルへの語彙のマップ ユーザが入力した機能モデルに対してそれをもっとも良く表現する機能語彙をマップすることができる.

さらに**FBRL**モデル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説明生成に適用することによって, 提案する記述方式の有用性が示されると考えられる. 第3章は,**FBRL**の説明タスクへの適用, および, 機能レベルでの説明生成システムの実現について述べる.

説明生成システムの必要性は教育, 設計, 故障診断など様々な研究分野で指摘されてきたが, 特に人工物についての説明生成タスク研究では, 説明生成のタイミング, ユーザ理解のモデル化などに重点を置いたものが多く, 説明としてユーザに伝えるべき情報が何であるか, その情報をいかに記述するかと言った点についての検討はあまりなされていなかった. また, 概念レベルの設計支援や高い抽象度の説明を生成するために, 振舞いモデルだけでなく機能モデルを利用し, 機能レベルでの説明生成を試みた研究もあるが, その多くは対象モデルのインスタンスとその機能を表現する機能語彙が1対1でアド・ホックにマップされていた. そのため, 機能レベルの語彙を使っての説明生成は実現できたもののなぜその機能語彙が機能モデルを表現すると言えるのかという点が暗黙的であった.

以上の背景から, 望ましい説明生成システムとは, 次の2つの要件を満たすものであると考えた.

- ユーザにとって有益な情報を出力すること
- 使う語彙の意味定義が明示的であること

そのうえで, これらの要件を満たすようなユーザにとって望ましい説明とは何であるかを検討するため, 各種の技術専門書や百科事典から説明文を抽出, 分析した. そのうえで, 人工物の機能や振舞い, 異常時の動作, など問題解決器が生成すべき望ましい説明を7つに分類した. 次に, **FBRL**モデルに基づいてそれらの説明を生成するシステムを設計し, プロトタイプを実装した. 実装した説明生成方式には, 次の2つの特徴がある.

- 多様な観点から説明を生成する
- 説明に用いる機能語彙がモデルから完全に分離されている

第1の特徴によって, ユーザが振舞いレベルの理解を望むときには振舞いレベルの説明を, 機能レベルを望むなら機能語彙を利用した抽象度の高い説明を生成することができる. また第2の特徴は, 対象の**FBRL**モデルと機能語彙ライブラリ中の機能語彙を, 説明生成時に動的にマップするという方式で実現されており, 機能レベルの説明で用いた語彙の意

味は, ライブラリ中に明示的に定義されている. この特徴によって, 従来の説明生成器が抱えていたアド・ホックな単語のマップという問題を解消することができる.

第 4 章では,**FBRL** を再設計支援問題へ展開するために必要な要素技術である機能間の照応関係を同定する枠組みとシステムの概念設計を示す.

従来の機能モデル表現形式に関する研究では, 機能の概念と機能間関係についての概念を混同しているものがあった. 機能表現に機能間の関係に関する概念が混在することは, 振舞いモデルに機能モデルが混在した場合と同様に, 機能表現の暗黙性を高める結果を招いてしまう. そこで筆者らは, 機能間の関係について考察し,5 種類の貢献関係と阻害関係に分類した. さらに, **FBRL** モデルと定性シミュレータを連動させることによって機能間の関係を導出するシステムを概念設計し, ランキンサイクルの機能モデル上で導出実験を行った.

最後に, 再設計問題とは, システムの振舞いモデルを与えられてその機能を同定し, さらによりよい機能へと改善する問題を指す. 一般に, 部品が発揮する可能性のある機能は多数あるが, 部品をシステムに組み込んだ時点で人間が認識する機能は少数である. システムに組み込まれた部品に対して人間が認識する機能とは, 他の部品の機能になんらかの影響を与える機能であると考えれば, 筆者が概念設計したシステムは再設計支援問題における機能の同定に貢献すると考えられる.

第 5 章は関連する研究との比較を通じて, 本研究の位置づけを行い, 第 6 章で総括と今後の展望を述べる.

第 2 章

機能モデル表現言語 FBRL

2.1 緒言

本章では, 筆者が機能モデル表現のために開発した表現言語 **FBRL** について, その基本的設計思想を述べ, 仕様を概説する. また,**FBRL** モデルによる機能モデルの再利用向上について例題を用いて検討する.

2.2 意味と形式的表現

言語設計においては記号の形式的な表現がもつ 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おいて, 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. 本論文では **FBRL** の形式的な表現が持つ Semantics についての詳細な議論は行なわない.

2.3 機能概念同定の必要性

一般に人工物の動作を理解しようとするとき, または, 理解した動作について他人に説明を試みる場合, 我々人間は, 無意識のうちに, しかも適切に, 振舞いと機能の概念を使い分けることができる. 例えば, 表 2.1に示す 3 つの部品, 蒸気発生器 (ボイラの一種), エアコン, ラジエータについて考えてみる. 3 つの部品の振舞いを原理的なレベルで捉えたものは, 高温の流体と低温の流体の間での熱交換であり, 共通である. しかし, 我々は蒸気発生器の機能を説明するときには「(低温流体である) 水を温めている」と表現し, エアコン

の機能を説明するときには「(高温流体である) 空気を冷やしている」と表現する. さらに, 同じ冷やしている部品であってもラジエータに対しては「(熱を) 除いている」と表現する.

部品名	振舞い	機能
ボイラ	熱交換	水を温める
エアコン	熱交換	空気を冷やす
ラジエータ	熱交換	熱を除く

表 2.1: 同じ振舞いに対する機能の違い

我々の経験に照らし合わせると, 表 2.1に示した例のみならず, 同じ振舞いを持った部品であってもその使用される場面に応じて異なる機能を認識できる例は多数ある. よって経験的事実から, 人工物の機能と振舞いは本質的に異なるものであると考えられる.

2.4 機能概念モデル化の従来の試み

文献 [dJ84] において de Kleer は, 部品の組み合わせとしてシステムを記述しシステムの挙動を予測するという問題に対して, 各部品の記述は *no-function-in-structure* 原則を遵守しなければならないと主張している. de Kleer の主張は, 「部品の機能は部品が使用される状況に応じて変化するものであり, 機能に関する知識が混在した部品モデルを使ってシステムの振舞いを予測することは間違った振舞いを予測してしまう結果を招くので, 振舞いモデルに混在させてはいけない」と解釈することができる.

de Kleer の主張に見られるように, 機能モデル記述に関する研究分野では, 部品の機能とは部品が使用される状況に依存するものであるという合意は既に形成されている. そのうえで, これまでにも様々な問題解決を目的として機能モデルを利用する試みはいくつか行われてきた.

2.4.1 J.de Kleer のアプローチ

J.de Kleer[de 84] は, 電子回路の構造 (structure) から因果推論 (causal reasoning) によって回路の挙動 (behavior) を推論し, さらに推論された挙動のパターンに対して目的論的推論 (teleological reasoning) を行なうことによって回路の機能, 即ちその目的を導出する理論を提案している.

提案された理論の第 1 段階である因果推論は, 対象の構造記述のみからその挙動を導出するものである. はじめに, 対象の構造を記述する (構造記述). 構造記述は, 対象の制

約型の表現をその基礎とし, さらに動的な対象を表現するために定性微分の概念を加えたものである. 次に, 構造記述, 対象に加わる作用, 挙動生成一般則から, 対象の挙動状態が時間的に推移する状態遷移の生成に基づいて, 対象の可能な挙動を状態変化の系列や分岐も含めて予測する (挙動推論). 因果推論の結果, 対象と挙動を有向グラフによって因果的に表現したものであるメカニズムグラフが生成される.

第 2 段階は目的論的推論 (teleological reasoning) である. 目的論的推論は, 第 1 段階で得られたメカニズムグラフから対象の機能を推論・解釈する時に働く. この推論の基になる teleological knowledge は, ある分野の対象についての機能の知識である. 目的論的推論の主要なタスクは次の 2 つである.

第 1 のタスクは,teleological parse と呼ばれるものである. 因果推論の出力であるメカニズムグラフは, 部品の入出力関係を因果的に表したものを組み合わせたものである. teleological parse では, 個々の構成部品の因果パターンに基づいて部品単位での機能を推論する. そしてこれを順次統合し, より大きな部品単位での機能に置き換えてゆき, 対象全体の機能を推論する. このためには, ある分野の対象について, その部品や部品を機能単位として組み合わせたものについての機能のライブラリを用意する必要がある. de Kleer は, 入出力関係とその入出力関係によって達成される機能を組み合わせたものをライブラリとして用意した. 表 2.2は, 電気回路の部品である抵抗の機能ライブラリである. 例えば

表 2.2: 抵抗の因果パターンと機能

Input\Ounput	i_1	i_2
i_1	*	BIAS
v_1	V-LOAD	V-TO-I-COUPLE
$v_{1,2}$	V-SENSOR	V-SENSOR

電子回路の抵抗は, 両端の電圧 ($v_{1,2}$) が入力で, そこに流れる電流 (i_1) が次の構成部品を駆動するという因果パターンで使用されている時,V-SENSOR 機能を果たしていると見なされる. これら部品の機能は, 結合している他の部品の機能と統合されて, さらに高レベルの機能を表すライブラリに把握し直されて, 最終的に対象全体の機能が, 例えばフィードバックアンプであることが推論される.

目的論的推論の第 2 のタスクは, 因果推論の結果導出された複数の挙動から, 本来の対象の設計者が意図したものを選択することである. これには, いくつかの目的論的基準によって無意味な挙動を排除する推論 (teleological criteria) と現実にある機能を果たしているという証拠から, その機能を果たす挙動だけが適切であるとする推論 (functional

evidence) がある. 例えば電子回路では,0 電流や 0 電圧を伝播させるような挙動は, 目的論的に不適切である. また,functional evidence の例として, de Kleer はブザーの機能推論の中で, ブザーが鳴らないという解釈を導く因果モデルを目的論的推論の段階で排除するというものを挙げている.

振舞いモデルから機能概念へのマップを実現するために, 目的論的推論の第 1 タスクにおいて, de Kleer は部品について因果性を持つ入出力関係を全て数えあげ, それらの 1 つ 1 つに機能概念のラベルを付けた振舞いと機能の対応表を作る方式を提案している. しかしこの方式では, 振舞いを機能概念にマップするメカニズムが暗黙的である. 振舞いモデルと機能モデルの差は振舞いに対応づけられた V-LOAD 等のラベルのみであり, 機能と振舞いの差分は明示的に区別されていない.

2.4.2 B.Chandrasekaran らのアプローチ

V.Sembugamoorthy and B.Chandrasekaran[SC86] は, 人間の専門家が故障診断の過程において, 原理的な知識である対象の機能の知識を「コンパイル」して兆候と故障仮説を関連づけることがあるという点に注目し, 対象の系の機能モデルから故障診断を行なう Expert System のための対象モデルの導出を行なう枠組を提案している.

「一般に機能モデルは様々な抽象度で構築されるので, 機能記述方式は 1 つの対象について抽象度の異なる複数の機能モデルを記述できるものでなければならない」という主張に基づいて, 彼らの方式は, 次の 5 つの視点から対象の機能モデルを記述する.

STRUCTURE: 部品間の関係の記述に基づく対象の構造の記述

FUNCTION:

外部から, あるいは内部からの駆動要因に対する系の反応の記述

BEHAVIOR:

FUNCTION で記述された系の反応が起きる過程の因果連鎖による記述.

GENERIC KNOWLEDGE:

因果関係についての深い知識をチャンクして, 典型的な対象に特化したもの.

例:キルヒホッフの法則をブザー回路に特化したもの

ASSUMPTIONS:

複数の振舞いから, ある機能を達成するためのものを選択する時に参照する条件記述.

(1)FUNCTION:の記述方式

FUNCTION:とは, ある条件の下である BEHAVIOR:によって達成される状態を言う. 例えば,「buzzer という device の function は, manual-switch が押された状態を繰り返すと, assumption1 という前提条件の下で, 初期状態から behavior1 によって buzzing(buzzer) という状態を達成するものである.」という機能は, 図 2.1に示すように記述される. なお, 図の中で

state(object)*

は,object が状態 state を繰り返すことをあらわす.

FUNCTIONS:
buzz: **TOMAKE** buzzing(buzzer)
IF pressed(manual-switch)*
PROVIDED assumption1
BY behavior1
stop-buzz:...
END FUNCTIONS

図 2.1: ブザーの機能モデル記述

(2)STRUCTURE:の記述方式

対象 (部品) の構造は, その構成部品 (部品の構成部品) を抽象化したものとそれらの間の関係によって記述される. 図 2.1でその機能モデルを記述したブザーの構造は, 図 2.2 のように記述される.

(3)BEHAVIOR:の記述方式

BEHAVIOR は, 対象の設計者が部品をどのように構成して系の機能を達成させたかを表現することを目的とし, 系の状態をノードとする有向グラフによって表現される.

ノード間のリンク, 即ち系の状態遷移には 3 種類ある. 1 つめは, 他の BEHAVIOR による状態遷移であり, 図 2.3の (a) のフォーマットに従って記述する. ここで,$< name - of - behavior >$は振舞いの記述へのポインタであり, 機能モデル記述者の意向に応じて振舞いの記述の詳細度を変えることが出来る. 2 つめは, 部品の FUNCTION による状態遷移であり, 図 2.3の (b) のフォーマットに従って記述する. 3 つめは, ある条件の下である状態に対してキルヒホッフの法則のような原理的な知識 (深い知識) を電気回路など特定のドメインに特化したものを適用することによる状態遷移であり, 図 2.3の (c) のフォーマットに従って記述する. $< name - of - knowledge - chunk >$の実体は, **GENERIC**

```
STRUCTURE:
    COMPONENTS:
        manual-switch(t1,t2),battery(t3,t4),
        coil(t5,t6,space1),clapper(t7,t8,space2)
    RELATIONS:
        serially-connected(manual-switch,battery,coil,clapper)
        AND includes(space1,space2)
    ABSTRACTIONS-OF-COMPONENTS:
        COMPONENT clapper(t1,t2,space)
            FUNCTIONS:    magnetic,acoustic,mechanical
            STATES:       elect-connected(t1,t2),
                          repeated-hit(clapper)
            ASSUMPTIONS:assumption2,assumption3
        END COMPONENT
        COMPONENT coil(t1,t2,space)
            ..........
        END COMPONENT
    END ABSTRACTIONS-OF-COMPONENTS
END STRUCTURE
```

図 2.2: ブザーの構造の記述

KNOWLEDGE:スロットに記述される.

(4)GENERIC KNOWLEDGE:の記述方式

前述した **BEHAVIOR** の記述では, 状態遷移を駆動する知識として深い知識をある特定のドメインに特化したものを用いた. その実体を GENERIC KNOWLEDGE として記述する. 図 2.4は, キルヒホッフの法則をあるブザーの回路に特化した知識の記述である.

(5)ASSUMPTION:の記述方式

専門家は振舞いや機能が成立するための暗黙的な前提条件を知っていると考えられ, ASSUMPTION:でそれを明示的に記述する図 2.5は, 磁力を利用するブザーの動作のための前提条件を記述したものである.

以上述べてきたように, Chandrasekaran らの枠組において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. また, 系の機能は, 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として記述される. 大規模な系を機能的にモデル化するためにこのように階層的な記述方

state1
↓ BY< *name − of − behavior* >
state2

(a)

state1
USING FUNCTION< *name − of − a − function* >
↓ OF< *component* >

state2

(b)

state1
AS-PER< *name − of − knowledge − chunk* >
↓ IN-THE-CONTEXT-OF< *a − state − description* >

state2

(c)

図 2.3: BEHAVIOR の記述

Generic Knowledge
knowledge1:
voltage-applied(T1,T2)
AS-PER kirchoff's-law
↓ IN-THE-CONTEXT-OF elect-connected(T1,T3)
∧ elect-connected(T2,T4)
voltage-applied(T3,T4)

図 2.4: GENERIC KNOWLEDGE の記述例

式の考察は重要であると考えられる．また, この記述方式は, 大規模な系の機能モデル構築に適しているという特性を活かして, 様々な研究に応用されている．なお, 応用研究に

ASSUMPTIONS:
assumption1:IF magnetized(space) THEN
magnetic-force > spring-force
assumption2:IF not magnetized(space) THEN
magnetic-force < spring-force
END ASSUMPTIONS

図 2.5: ASSUMPTIONS の記述例

ついては第5章で詳しく述べる.

しかしながら, この方式において, 機能と振舞いの概念は相対的なものとして捉えられている. 即ち, 図 2.6に示すように, ある粒度で機能とされている状態 (図中では "F" と表示) は, 状態をより大きな粒度で捉えた場合に振舞い (図中では "B" と表示) として認識される. つまり, ミクローマクロの観点をかえることによって同じ状態が機能であると認識されたり振舞いであると認識されたりする. よって, この方式でも機能と振舞いの本質的な差は捉えられていない.

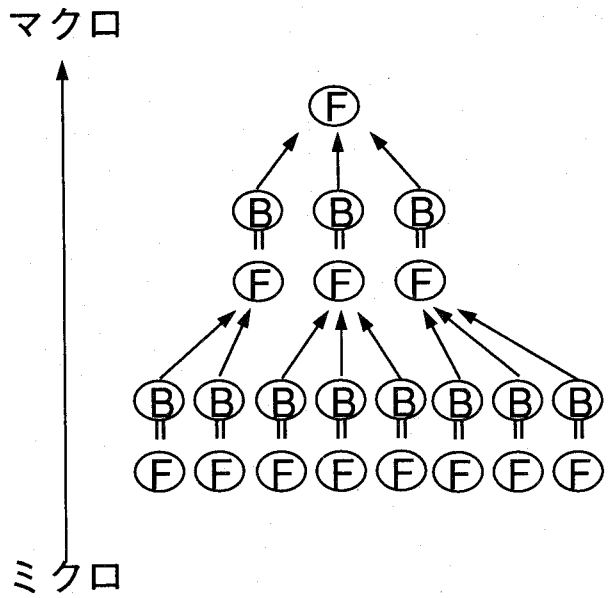


図 2.6: B.Chandrasekaran らによる機能と振舞いの捉え方

2.5 機能モデル記述の基本方針

我々は振舞いと機能は本質的に異なっていると考えているが, de Kleer, B.Chandrasekaran らの表現方式をはじめ, 既存の機能モデル表現方式では我々が要求する最も重要な仕様である,

機能と振舞いの概念を全く異なったものとして表現すること

言い換えれば,

機能と振舞いの差分を明示的に表現すること

を満足するものはなかった.

そこで本研究では, 機能と振舞いの概念に対して従来の研究とは異なった定義を与える. 部品の**振舞い**とは, 時間とともに変化する対象の状態遷移のことを言う. 部品の振舞

いは, 部品の状態を表現するパラメータ, パラメータ間に成り立つ制約式, 部品間の接続情報など, 部品の入出力関係を表現した振舞いモデル上でシミュレーションを行うことにより導出できる. 次に, ある振舞いを持った部品をシステムに組み込むことによって, その部品が達成するべき望ましい状態を認識することができる. これを**目標**とよぶ. 最後に, 目標の下で振舞いを解釈した結果が**機能**である.

図 2.7は, 蒸気タービンの振舞いを表現したものである. 蒸気タービンの振舞いは, 熱エネルギーが乗った蒸気を入力すると, 熱エネルギーの一部をシャフトの回転エネルギーに変換して出力し, 残った蒸気はそのままシャフトと別の出口へ出力する. タービンの振舞いモデルは, タービンに入出力される蒸気の温度や速度, シャフトの回転数などをはじめとするパラメータと, それらの間に成り立つ制約式からなる.

次に, タービンのシャフトを発電機に接続し, 発電プラントの部品として利用する場合を考える. この時, シャフトにとって望ましい状態, すなわち目標とは熱エネルギーから変換された発電機の回転エネルギーが発電に十分な量になることであり, この解釈を行うとき我々は, 図 2.8 に矢印で示すエネルギーの流れに注目していると考えられる. この目標の下でタービンの振舞いを解釈したもの, すなわちタービンの機能は, 「熱エネルギーを回転エネルギーに変換する」である.

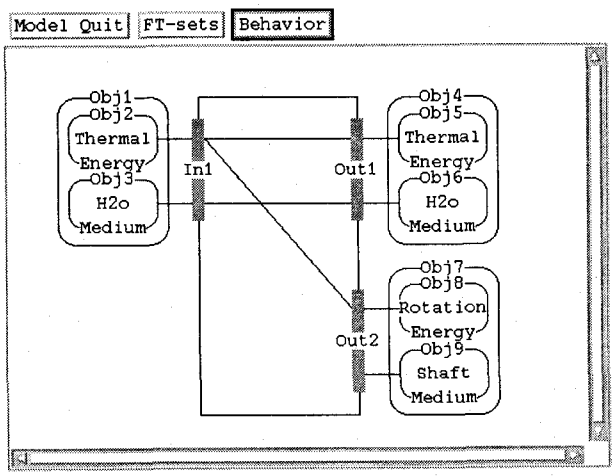


図 2.7: タービンの振舞いモデル

以上述べてきたように, 我々は機能モデルを,

機能モデル = 振舞いモデル + 解釈情報

と捉える. また, 解釈情報の導出源である解釈行為を説明するための視点を,

FT:Functional Topping

とよぶ.

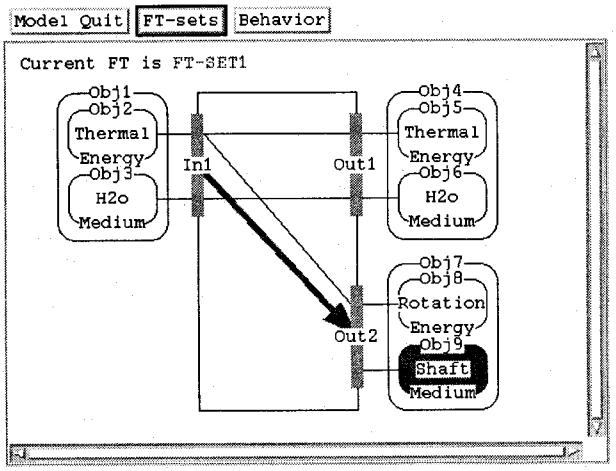


図 2.8: タービン振舞いの解釈例:エネルギーを変換する

次に, モデル構築のコスト削減という観点から言えば,

記述されたモデルの再利用性が高い

モデル構築が容易である

記述方式が望ましい. 我々の機能概念定義に基づくモデル記述方式は, 振舞いの知識と解釈情報を明示的に分離することで既存の表現方式に対してモデルの再利用性をより高めることができると考えられる. さらに, 図 2.9に示すように振舞いと 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, プリミティブを取捨選択することによる部品のモデル構築, および, 部品モデルの接続によるシステムのモデル構築が可能になり, モデル構築を容易にすることができると考えられる.

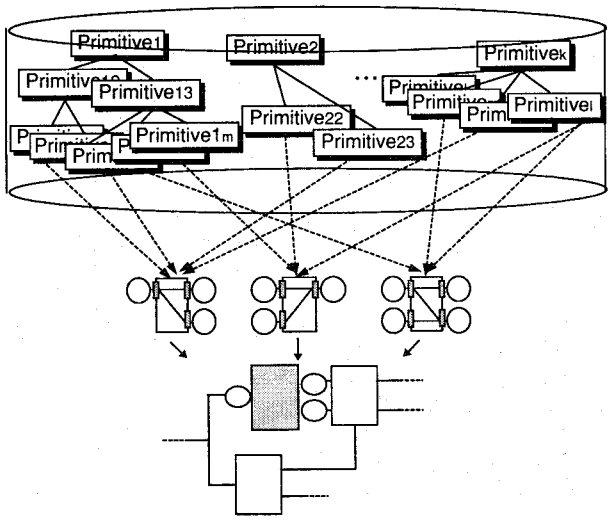


図 2.9: 設計方針:プリミティブの整備

本研究では以上の要求仕様を満たす機能モデル表現言語**FBRL**(*Function and Behavior Representation Language*) を開発することを目的とし, はじめに目標の下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 4 つの FT を同定した. これら 4 つの FT はその必然性を示すことは出来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, 説明や再設計のための対象理解等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.

以下では, 我々が設計した機能モデル表現言語 FBRL について説明する.

2.6 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 2.10に示す. Objects から QN-Relations までの 7 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. また, システムに組み込まれた 1 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, 1 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. 1 つの解釈情報, すなわち FT-set は, **O-Focus** から **Necessity** までの 4 つの属性値の組合わせで表現され, 1 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.

部品によっては振舞いのモードを複数もち, それらを特定の入力に応じて切り替えるものもある. 部品の機能は振舞いの解釈の結果なので, 振舞いモードが変われば部品が発揮し得る機能も変わる. **FBRL** テンプレートはモード切り替えの条件 (**ModeChangeCond**), 各振舞いモード毎の機能モデルの集合 (**Mode**$_{\mathbf{x}}$), によってそれを表現する. 振舞いモード毎の機能モデルは, そのモードでの振舞いを表現する **Behavior** と, それに対して可能な解釈の集合, 即ち **FT-Sets** からなる.

さらに, 特殊な入力により, 部品がその機能を正常に発揮できない異常状態に陥る場合もある. 異常状態への移行条件は **IW** として表現する.

```
Component:
  ModeChangeCond:     /* モード切り替え条件 */
  Mode1
    Behavior
      Objects:        /* 部品に入出力される対象物 */
      SubComponents:  /* 副部品の名前 */
      MP-Relations:   /* 入力物から生成された出力物 */
      SameClass:      /* 入出力物の種類の同一性 */
      InherentParams: /* 部品に固有のパラメータ */
      Ports:          /* ポートの接続関係 */
      QN-Relations:   /* パラメータの関係式 */
    FT-Sets:
    FT-Set1
      FuncType:       /* 機能タイプ:達成, 保持, 維持 */
      O-Focus:        /* 主機能が注目する対象物のクラス */
      P-Focus:        /* 主機能が注目する入出力関係 */
      Necessity:      /* 出力物の必要性 */
      Info:           /* 情報と見なせる属性 */
    FT-Set2
      .....
  Mode2
    Behavior
      ......
    FT-Sets:
      ......
  IW:/* 機能が正常に発揮できない異常状態への移行条件 */
```

図 2.10: FBRL による部品の機能モデルクラステンプレート

2.7 振舞いモデルの記述

本節では振舞いモデル記述方式について述べる．また, 以下では **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

2.7.1 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とり, 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物を入力すると出力口から違う物が出力されてくる．部品には入力された物を部品内部

に取り込んでしまうものや部品内部から出力しかしないものもある. 部品に入力される物 (入力物) や部品から出力される物 (出力物), 部品内部に存在する物をまとめてその部品の対象物とよぶ. 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. 全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なう.

2.7.2 対象物の記述方式

対象物としては, 1 種類の物質またはエネルギーから成るものと, 複数の対象物から成るものの 2 種類が考えられる. 前者を基本対象物, 後者を混合対象物と呼ぶ.

基本対象物

1 種類の物質またはエネルギーからなる対象物を次の 6 つの属性によって記述する. これらを用いて, 水クラスに属する基本対象物「水 1」は図 2.11のように表現される.

E-Flag:エネルギーであるか物質であるか

対象物は, 水や金属のような物質と, 概念的なエネルギーに分けられる. この属性は, 対象物が物質であるかエネルギーであるかを表し, 対象物がエネルギーである時, 値 **T** をとる.

Location:部品に対してどの位置に存在するか

この属性は, 対象物が部品の入力口 (*In*) や出力口 (*Out*), 部品内部 (*Inside*) など, どの位置に存在するかを表す.

ISA:対象物が属するクラス

鉄, ナトリウム, 熱エネルギーなど, 対象物の属する物質またはエネルギーのクラスを表す.

Params:対象物を表す物理的パラメータの集合

質量, 体積, 速度, などが考えられる.

Para-Relations:パラメータ間の関係式の集合

体積 = 密度*質量

のような, パラメータ間の関係式を記述する.

Phase:対象物の相

固相 (*Solid*), 液相 (*Liquid*), 気相 (*Gas*) のうち, どれに対象物 (物質) が属しているかを表す. 対象物がエネルギーの場合には, 値をとらない.

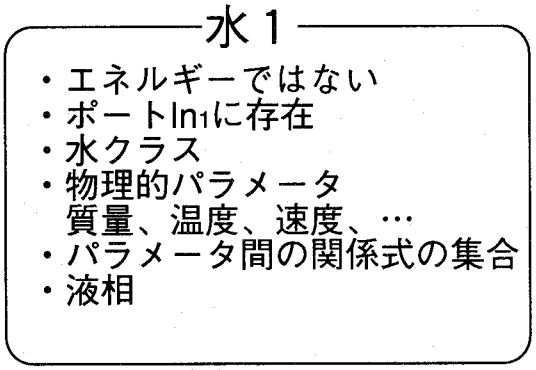


図 2.11: 基本対象物の例:水 1

混合対象物

対象物には, 食塩水や合金のように複数の対象物から構成されるものも考えられる. これを混合対象物とよび, 混合対象物を構成する個々の対象物を混合対象物の構成物とよぶ. ただし, 以下の記述では, 特に区別する必要がない限り, 「1 種類の物質またはエネルギーからなる対象物」と「混合対象物」を「対象物」と総称する. 例えば食塩水の場合は, ある対象物の中に特定の関係が成り立っている構成物 (食塩と水) が含まれていると捉える. 混合対象物の構成には次の 4 つの形態があり (図 2.12) それぞれ述語によって記述する. 例えば食塩水は

Dissolve(水, 食塩)

のように記述される.

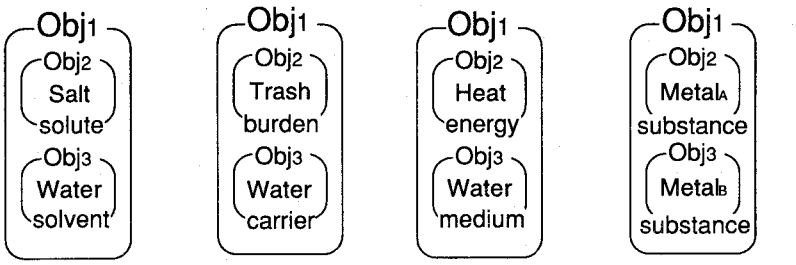


図 2.12: 混合物

Solute and Solvent

食塩水を構成する食塩と水のように一方の構成物が他方に溶けている.

述語:**Dissolve**(Obj_x,Obj_y)

Obj_x:solvent,Obj_y:solute

Carrier and Burden

ゴミの混じった水を構成するゴミと水のように, 一方が他方に溶けていないが移動能力を他方に頼っている.

述語:**Carry**(Obj_x,Obj_y)

Obj_x:carrier,Obj_y:burden

Medium and Energy

熱湯を構成する水と熱エネルギーのように媒体がエネルギーを運んでいる.

述語:**CarryE**(Obj_x,Obj_y)

Obj_x:medium,Obj_y:energy

$Substance_A$ and $Substance_B$

合金のように構成物どうしが移動能力その他の点において互いに干渉せずに存在している.

述語:**Coexist**(Obj_x,Obj_y)

Obj_x:$substance_A$,Obj_y:$substance_B$

構成物のパラメータ間の関係

構成物を表すパラメータ間の関係も, **Para-Relations:**に記述する. 例として, 熱湯(熱エネルギーを運ぶ水) を考えてみる. 熱エネルギーの量は媒体である水の温度と体積に比例する. この関係を記述しておけば, 媒体の温度や体積の変化から熱エネルギーの増減が推論できる.

対象物を記述するためのフォーマット

本節の議論を踏まえて, 対象物を記述するためのフォーマットを次のように定めた. (図2.13):

Class Name:Compo-Obj
Attributes:
- Name:
  - 対象物のID
- ISA:
  - 対象物の属するクラス
  - 例：水,熱エネルギー,ナトリウム,etc.
- Params:
  - 物理的なパラメータの集合
- E-Flag:
  - 対象物がエネルギーであるときT
- Location:
  - 対象物が存在するポート：In_j,Out_k,etc.
- Para-Relations:
  - パラメータどうしの関係式
- Phase:
  - 対象物の相:Solid,Liquid,Gas
- Sub-Objs:
  - 対象物の構成要素である対象物
- Sub-Relations:
  - 対象物の構成要素の間に成り立つ関係

図 2.13: 対象物記述のためのテンプレート

図2.14は, このテンプレートを用いて, 対象物「熱湯」を「熱エネルギーを運ぶ水」として記述した例である.

熱エネルギーを運ぶ水
Name: Obj_1
ISA: Water
Params: Mass,Volume,Temp,.....
E-Flag: F
Location: In_1
Para-Relations:
Density * Mass = Volume
Specific Heat * Volume = Heat Capacity
.....
Phase: Liquid

水に運ばれる熱エネルギー
Name: Obj_2
ISA: Heat Energy
Params: Amount
E-Flag: T
Location: In_1

熱湯
Name: Obj_3
ISA: Null
Params: Mass,Volume,Temp,.....
E-Flag: F
Location: In_1
Para-Relations:
Obj_2.Amount = k * Obj_1.Temp
Specific Heat * Volume = Heat Capacity
.....
Phase: Liquid
Sub-Objs: Obj_1,Obj_2
Sub-Relations: **CarryE**(Obj_1,Obj_2)

図 2.14: 対象物「熱湯」の記述例

2.7.3 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 (2.7.1節). **FBRL** では, 図 2.10で示したテンプレートの, 7 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. 2.15は,In_1と Out_1の間を流れる高温の流体と In_2と Out_2の間を流れる低温の流体の間で熱エネルギーの受け渡しをさせる, 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.

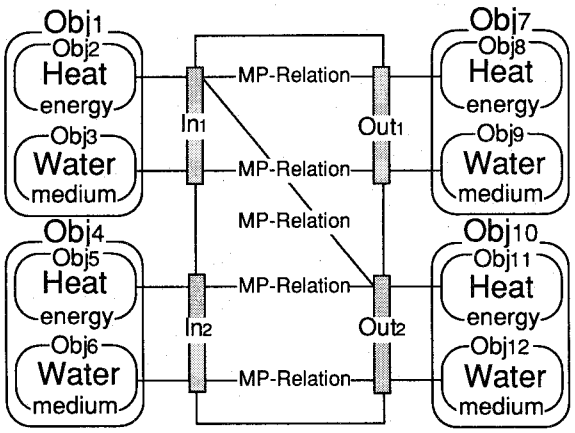


図 2.15: 熱交換器

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 2.15の場合,Obj_1から Obj_{12}までの対象物のインスタンスを記述する.

SubComponents

部品には, 幾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-Relations

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出来るものがある. 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ー生成物関係と呼び,

MP-Relations:(((生成物のリスト)(原料のリスト))...)

によって記述する. 図 2.15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) から生成されたことを認識できる. 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 2.15の熱交換器を熱伝達率の他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 には, ポートの接続情報を記述する. 例えば図 2.15の Out$_1$ポートが発電プラントの 2 次系ループホットレグの In$_1$ポートに接続しているという事を, 熱交換器の属性 Ports に, 次のように記述する.

Ports:(Out$_1$ 2 次系ループホットレグ In$_1$)

QN-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 2.15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,Obj$_{11}$の熱量は Obj$_2$

の量に Obj_5の量を加えたものとなる. これは

(= Obj_{11}.Amount

(+ Obj_2.Amount Obj_5.Amount))

と表現することができる.

2.8 FT:Functional Topping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4つの観点からプリミティブを抽出した.

2.8.1 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. 一般に部品は様々な振舞いをあわせ持つ. 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あわせ持つ. 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に, 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.

2.8.2 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2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, 各々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等の受け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っ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. 2.15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,2.15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「取り去る」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, 高温側から低温側への流れに注目す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))

高温側から低温側への流れに注目 P-Focus:((In_1)(Out_2))

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方が適切である. 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 2 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 2 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. 説明生成への適用例を第 3章で示す.

2.8.3 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 4 つに分類した [Keu91]. 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各々の部品の機能に注目するのか, 部品の機能どうしの関係に注目するのかという議論がされていない. 例えば, ヒーター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ーの中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ーヒートを「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様子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全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常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 2 つの軸から Keuneke の分類を再解釈し, 各々の概念を再定義した. 属性 FuncType は, 達成, 保持, 維持の 3 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通りである.

達成 入力値に応じて, 出力値を望ましい値にする機能

保持 入力値と出力値を等しくする機能

維持 入力値に関わらず, 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, 空気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ー, 熱エネルギーから回転力を生成するタービン等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[Keu91] は達成機能，維持機能の他に制御機能，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 の時に 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規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．なお導出の枠組みについては，本稿の第 4章で述べる．

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分かり，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．

2.8.4 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，Out_2

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 Out$_2$ 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とは 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中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.

2.9 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様々な視点を検討し, 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, および, 概念間の関係を表現することが可能になる. 機能概念を単語で表現したものが機能語彙であり, 機能語彙をその意味に注目して体系化したものが機能語彙ライブラリである. 機能語彙ライブラリには, 部品の振舞いをエネルギーに対する働き掛けとして解釈した結果を表現するためのエネルギー機能語彙ライブラリと, その他の物質に対する働き掛けとして解釈した結果を表現する媒体機能語彙ライブラリがある.

2.16は, 我々が試みたエネルギー機能語彙のライブラリ, 言い換えればエネルギーに関する機能オントロジーの一部である. 個々のノードは **FBRL** で表現できる機能の概念を表し, 有向リンク上に記述された知識はそのリンクで結ばれた 2 つの概念の差を表現する. つまり, ノードに対応する概念にリンク上の知識を加えたものがリンク先ノードの概念となる. なお, エネルギー機能語彙ライブラリと媒体機能語彙ライブラリを, 付録の章に掲載する.

エネルギーを「与える」という機能概念は, 2 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 上にあるエネルギーのパラメータについての入出力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」機能から, RCP 注目という情報を除いたものは「移す」機能概念になり,「移す」概念に SRC 注目, という情報を加えたものは「取り除く」機能概念になる.

機能概念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2.17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. なお, 機能語彙ライブラリを利用したマップのメカニズムについては第 3章でより詳しく説明する.

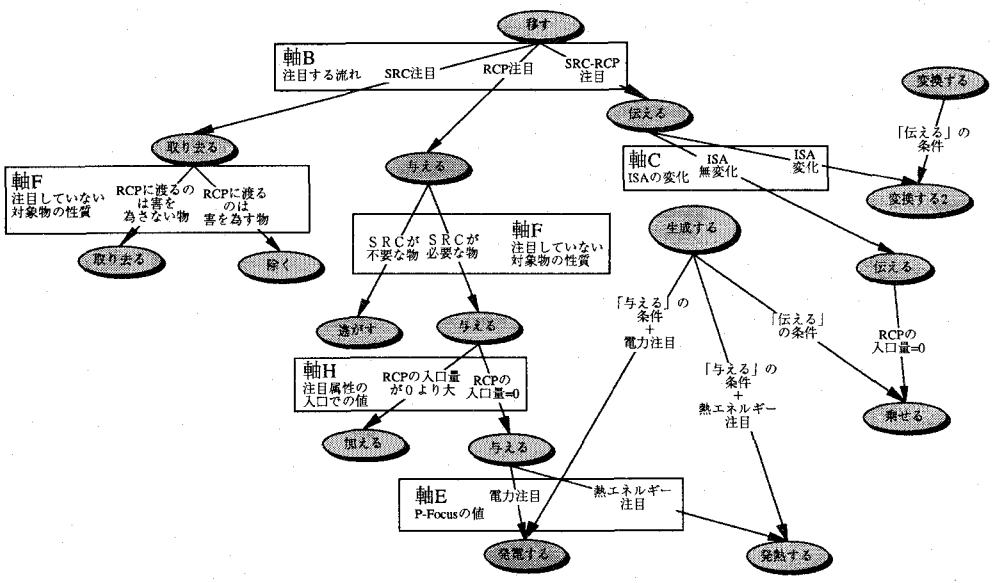


図 2.16: エネルギー機能概念の関係図 (部分)

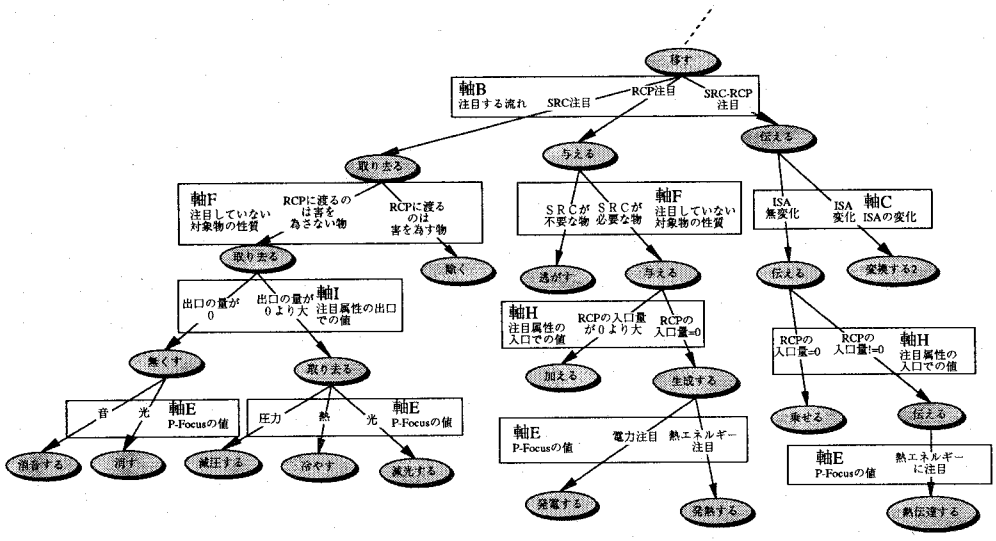


図 2.17: エネルギー機能概念の階層的組織化 (部分)

2.10 抽象度のきりかえ

FBRL は様々なドメインの対象を様々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 2.3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 の各要素を媒体やポート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.

機能		O-Focus	P-Focus	FuncType	Necessity
部品名	ドメイン				
通す		D	((入口 1 つ)(出口 1 つ))	D	D
パイプ	プラント	体積	((入口)(出口))	保持	()
導線	電気回路	電位	((入口)(出口))	保持	()
血管	人体	質量	((入口)(出口))	保持	()
伝える		Energy	((SRC)(RCP))	D	D
熱交換器	プラント	温度	((高温入口)(低温出口))	達成	()
変圧器	電気回路	電圧	((1 次電圧)(2 次電圧))	達成	()
軸継ぎ手	機構部品	回転力	((シャフト)(シャフト))	保持	()
加える		D	((RCP)(RCP))	D	D
ヒーター	プラント	温度	((低温流体)(低温流体))	達成	()
ポンプ	プラント	圧力	((入口流体)(出口流体))	達成	()
油圧ポンプ	油圧回路	圧力	((入口流体)(出口流体))	達成	()
心臓	人体	圧力	((血液)(血液))	達成	()
胃腸	人体	血糖値	((血液)(血液))	達成	()
除く		D	((SRC)(SRC))	D	((NoNeed ポート 除く物))
脱塩装置	プラント	純度	((海水)(海水))	維持	((NoNeed 海水の出口 食塩))
ラジエータ	プラント	温度	((冷却材)(冷却材))	達成	((NoNeed 冷却材の出口 熱))
腎臓	人体	純度	((血液)(血液))	維持	((NoNeed 血液出口 不純物))
フィルタ	油圧回路	純度	((潤滑油)(潤滑油))	達成	((NoNeed 潤滑油の出口 ゴミ))
冷やす		温度	((SRC)(SRC))	達成	D
クーラー	プラント	温度	((動作流体)(動作流体))	達成	()
復水器	プラント	温度	((動作流体)(動作流体))	達成	()
変換する 1		Energy	((入口 1 つ)(出口 1 つ))	達成	D
ノズル	プラント	運動力	((熱)(運動力))	達成	()
変換する 2		Energy	((SRC)(RCP))	達成	D
モーター	電気回路	回転力	((電圧入口)(シャフト))	達成	()
タービン	プラント	回転力	((蒸気入口)(シャフト))	達成	()
アクチュエータ	油圧回路	運動力	((油圧入口)(動作部))	達成	()
筋肉	人体	運動力	((血液)(筋肉))	達成	()
溜める		D	((入口)())	達成	D
コンデンサ	電気回路	電荷	((電荷入口)())	達成	()
タンク	プラント	質量	((流体入口)())	達成	()
肝臓	人体	糖	((糖入口)())	達成	()

表 2.3: 各機能を表現する FT の組み合わせ例

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ーの機能は, 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無いので 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.

2.11 結言

本章では, 本研究の最も重要な成果である機能モデル表現言語 **FBRL** について述べた. 既存の機能モデル表現方式と異なる概念定義, すなわち振舞いを解釈した結果が機能であるという考えに基づき, **FBRL** は対象の機能モデルを, 入出力関係として表現される振舞いモデルに 4 つの視点から捉えた解釈情報である FT-set を加えたものとして表現する. さらに **FBRL** の設計においては, 特定のタスクやドメインに依存しないプリミティブを収集したため,**FBRL** は様々なドメインにおける対象を様々な抽象度で記述することができる性質を持つ. この性質によって, 一般的な機能概念を収集した **FBRL** 機能語彙ライブラリを構築することができた. ライブラリは媒体機能語彙 64 単語, エネルギー機能語彙 36 単語から構成されており, 各機能語彙は全て **FBRL** 記述によって規定されている.

本章で述べた **FBRL** の各プリミティブ, および機能語彙ライブラリは, その十分性を主張できる性質のものではないが, 有用性については,

プリミティブの組み合わせ, 修正によるモデル構築の簡単化

説明生成タスクへの貢献 (第 3章)

機能依存関係導出の実現 (第 4章)

などにより示されると考えている.

機能語彙ライブラリを利用することによって, 問題解決器の生成する説明をより高度なものにすることができる. 次章では,**FBRL** モデルを用いた説明生成器とその実現について述べる.

第 3 章

FBRL の説明タスクへの適用

3.1 緒言

FBRL 記述された機能や振舞いの概念を単語で表現することができる. 機能の概念を表現する単語を機能語彙とよぶ. 機能語彙のライブラリを利用することによって, 計算機は機能の概念を利用した説明生成を行うことができるようになると考えられる.

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様々なタイプの説明を実現することが出来る. 本節では, モデルベースシステムに実装することが望ましい様々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挙げられる. いずれも重要な視点であるが, 本章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.

3.2 説明生成システムの開発例

設計, 診断などの対象のシミュレーションに基づく問題解決システムにとって, シミュレーションによる問題解決と同様に重要なことは, その解決過程や結果, 利用した知識などをユーザに説明し, その理解を助けることである.

これまでにも説明生成に関する研究はいくつか行われてきた. W.Swartout らは, 設計タスクを行な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

行っている.

1. システムの動作の正当性
2. 一般的な問題解決戦略がどのように特化されたか
3. システムのターミノロジについての陳述

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を構築している [SPM91]. W.Swartout の枠組みは,*Program Enhancement Advisor* と名付けられた Lisp プログラム記述を支援するシステムとして実現されている.

また, ユーザにエキスパートシステムが保持している知識, および, それに基づく動作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 and Patrice O.Gautier[GG93] らによってもなされている. Gruber らの枠組みは, スペースシャトルの Reaction Control System(RCS) に関する説明生成に適用されており, 次のような説明を実現している.

- RCS 構成部品の説明
- RCS の状態を表現するパラメータの説明
- RCS の振舞い (状態遷移) の説明
- RCS モデルパラメータ間の関係

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言うまでもないが, 説明のタイミングや提示の仕方に重点をおいた議論に基づいて設計されており, 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, という議論についてはあまり深く検討されていない. その結果, 振舞いモデルから得られる情報に基づく振舞いレベルの説明しか生成できない.

対象領域の専門家ではない一般のユーザは対象とその挙動を, 時間とともに変化する値の変化, すなわち振舞いのレベルだけではなく, その変化を解釈した機能レベルで理解していることも多いと考えられる. また人間の対象理解は, 振舞いレベルの説明だけでなく機能レベルでの抽象的な説明も加えることによって促進されると考えられる. これは一般のテキスト, 百科事典などにおける説明文にも反映されており, 例えば, 機械の仕組みを一般向けに紹介した百科事典 [渡辺 91] では, 蒸気タービンを次のように「変える」という機能レベルでの語彙を利用して説明している.

説明文 1 :蒸気タービン *[渡辺 91, p.139]*

蒸気タービンはある圧力のもとで蒸気がもっているエネルギーを機械的回転運動に変え

て発電に使ったりする機械である. …

よって, 対象について振舞いレベルで十分に理解している専門家のみでなく抽象的レベルでしか理解していない, あるいは全く無知なユーザに対しても有効な説明を生成することができるようにするためには, 問題解決システムが対象の機能モデルを参照できる枠組みが必要であり, 機能モデルを表現するための方式が必要である.

これまでにも, 機能モデルに基づく説明生成を試みる研究はあった. B.Chandrasekaran [CGI93] は, 対象の機能モデルを機能語彙を使って表現し, 設計と診断タスクに活用するための枠組みを提案している. しかし,[CGI93] をはじめとして従来の機能モデル表現方式の多くは, 機能語彙を機能モデルのインスタンスに直接マップしており, なぜその機能語彙が対象の機能をもっとも良く表しているのかという点で暗黙的である. つまり, 機能語彙を使った説明を生成しても, 機能語彙の意味が明示的に定義されていないため, 説明の受け手が機能概念を理解できないことがありえる.

3.3 システム設計方針

前節までの議論に基づき, 望ましい説明生成システムとは, 次の 2 つの要件を満たすものであると考える.

- ユーザにとって有益な情報を出力すること
- 使う語彙の意味定義が明示的であること

これらを満たすためにまず, ユーザにとって有益な情報とは何であるかを規定する必要がある. そこで筆者らは, 熱力学, 流体力学, 流体機械に関する各種の専門書 [不二 78] [井上 89] [武山 83], および一般の機械について動作原理を説明した百科事典 [vAM72a] [vAM72b] [渡辺 91] などから実際の説明文を抽出, 一般化することによって説明のタイプを 7 つに分類しそれらを実現する枠組みを構築した. そのうえでこれらの枠組みを実現するために, **FBRL** の開発において整理した対象の振舞いや機能を捉えるための視点を再分類し, 説明すべき内容を規定するための情報軸を整理した [三谷 95]. 情報軸の組み合わせ方により生成される説明が決まり, 組み合わせ方を変えることで我々が分類した 7 種類の説明を初め多くの種類の説明を生成できる.

3.4 説明生成システムの枠組み

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, 3.1 に示す.

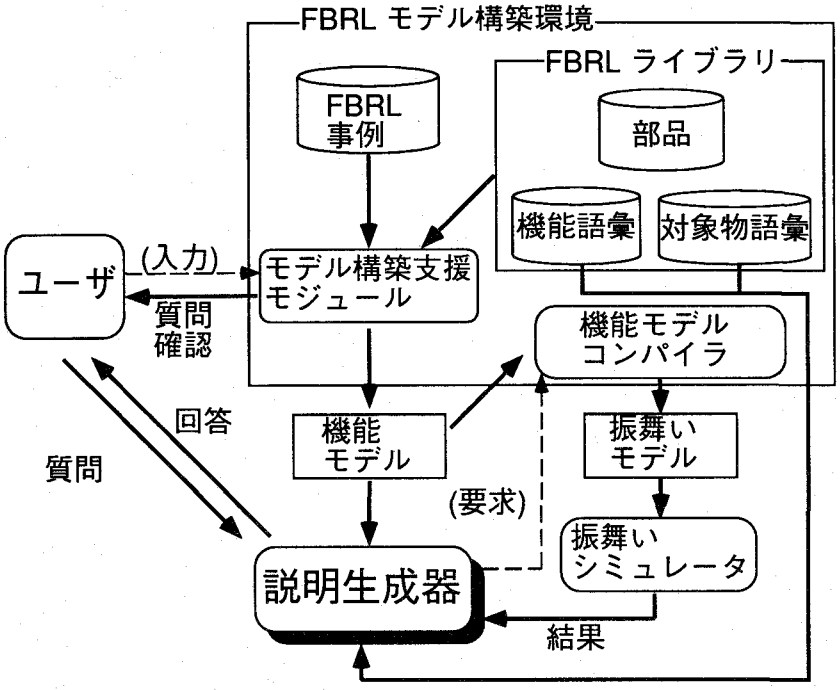


図 3.1: 説明生成システムの枠組み

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.

説明文生成のタイミングや方式には様々なものが考えられるが, 本研究ではユーザが様々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採る. システムは, ユーザからの様々な要求や質問に応じて適切な回答文を出力するためのテンプレートを説明文のフラグメントから動的に生成し, 適切な語彙を割り当て, さらに必要に応じて対象のシミュレーションを行ない, 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.

3.5 機能語彙ライブラリ

機能語彙ライブラリとは, **FBRL** 表現された機能の概念とそれをもっともよく表す語彙, すなわち機能語彙を結び付けたものを体系化し, 集積したものである. 第2章でも述べ

た通り, 機能語彙ライブラリには, 部品の振舞いをエネルギーに対する働き掛けとして解釈した結果を表現するためのエネルギー機能語彙ライブラリと, その他の物質に対する働き掛けとして解釈した結果を表現する媒体機能語彙ライブラリがある.

機能語彙ライブラリは, 説明生成時に参照される. 我々が実現した説明の1つに, エネルギー変化に注目した説明と媒体の動作に注目した説明をユーザの要求に応じて切り替えるというものがある [三谷 95]. 例えば蒸気タービンの機能をエネルギーに注目して表現すれば「媒体の熱エネルギーをシャフトの運動エネルギーに変換する」となり, 媒体に注目して表現すれば「シャフトを回す」となる. この説明は, 機能語彙ライブラリを2つに分け, 参照するライブラリを変えることで実現されている. 例えば上述した蒸気タービンの FBRL 表現に対して, エネルギー機能語彙ライブラリを参照すれば「変換する」という語彙がマップされ, 媒体機能語彙ライブラリを参照すれば「回す」という語彙がマップされる.

3.5.1 機能語彙を規定する軸

各機能概念は, 筆者らが情報軸と呼ぶ, 機能概念を規定する複数個の視点 (エネルギー機能語彙は9個, 媒体機能語彙は13個) によって定義される. また, 各情報軸の値は **FBRL** テンプレートのスロットによって制約される. エネルギー機能語彙は, 図 3.2に示す A 軸から I 軸まで9個の情報軸によって定義される.

A 軸:振舞いの選択-どのような振舞いに注目しているか-

値 意味

1. 2つの不連続媒体間でエネルギーが移動する
2. 1つの媒体に乗って, エネルギーが移動する
3. 1つのエネルギーが2つ以上のエネルギーに分かれる
4. 2つ以上のエネルギーが合わさって1つになる
5. エネルギーが部品に入るが出てこない
6. エネルギーが部品から出るだけ

B 軸:Focus している流れの種類

値 意味

1. SRC
2. RCP
3. SRCtoRCP

C 軸:エネルギーの種類 (ISA) が入り口と出口でどう変化したか

値 意味

1. 同じ
2. 違う

D 軸:注目するエネルギーの量が入り口と出口で変化したか

値 意味

1. 同じ
2. 違う

2.1 In < Out

2.2 In > Out

E 軸:O-Focus している属性のクラス

値 意味

1. Thermal
2. Kinetic
3. Pressure

F 軸:機能の結果出力された, 機能が注目していない対象物の必要性

1. 必要
2. 不要

G 軸:機能タイプ

1. 達成
2. 維持
3. 保持

H 軸:入口での属性値

1. 0
2. not 0

I 軸:出口での属性値

1. 0
2. not 0

図 3.2: エネルギー機能語彙を規定する情報軸一覧

図 3.3,3.4に, エネルギー機能語彙ライブラリの概念間関係図を示す. 各ノードがエネルギーに関する機能概念の 1 つに対応する. また, ノードと隣接するノードの差は, それらを結ぶリンク上に記述されているとおりである. 例えば, 機能概念「取り去る」は, 軸 E の条件「P-Focus の値」すなわち機能が注目する属性の違いによって, 3 つの概念に細分化される.

「取り去る」+「圧力」に注目 = 減圧する

「取り去る」+「熱」に注目 = 冷やす

「取り去る」+「光」に注目 = 減光する

ユーザが **FBRL** フォーマットで記述されたモデルを入力すると, 機能語彙マップモジュールは機能語彙ライブラリから概念定義モデルを順に取り出し, それぞれの語彙の意味を規定している各軸の条件について, 入力されたモデルが満たしているか, 満たしている場合はどのように満たしているかを調べる. 順次機能語彙ライブラリと照合し, 最も条件が一致するものと機能モデルとをマップする. 例えば, ユーザが入力した **FBRL** モデルが

A 軸に関して「値 1:2 つの不連続媒体間でエネルギーをやりとりしている」,

B 軸に関して「値 1:SRC に注目」,

F 軸に関して「値 2:注目していない対象物は系に不要」

という 3 つの条件を満たせば, そのモデルに対して「除く」という機能語彙がマップされる.

モデルが満たす条件と各軸がとる値についての知識を図 3.5,3.6に示す. なお, 媒体機能語彙ライブラリに関する同様の議論を, 付録として掲載する.

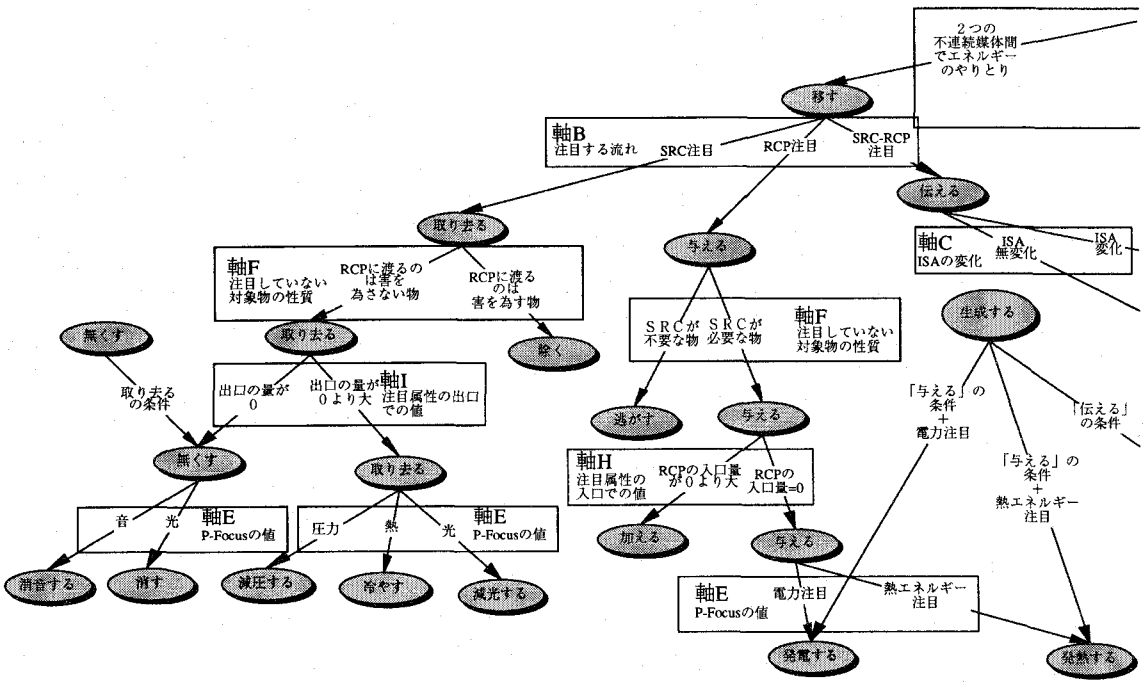


図 3.3: エネルギー機能語彙ライブラリ (1/2)

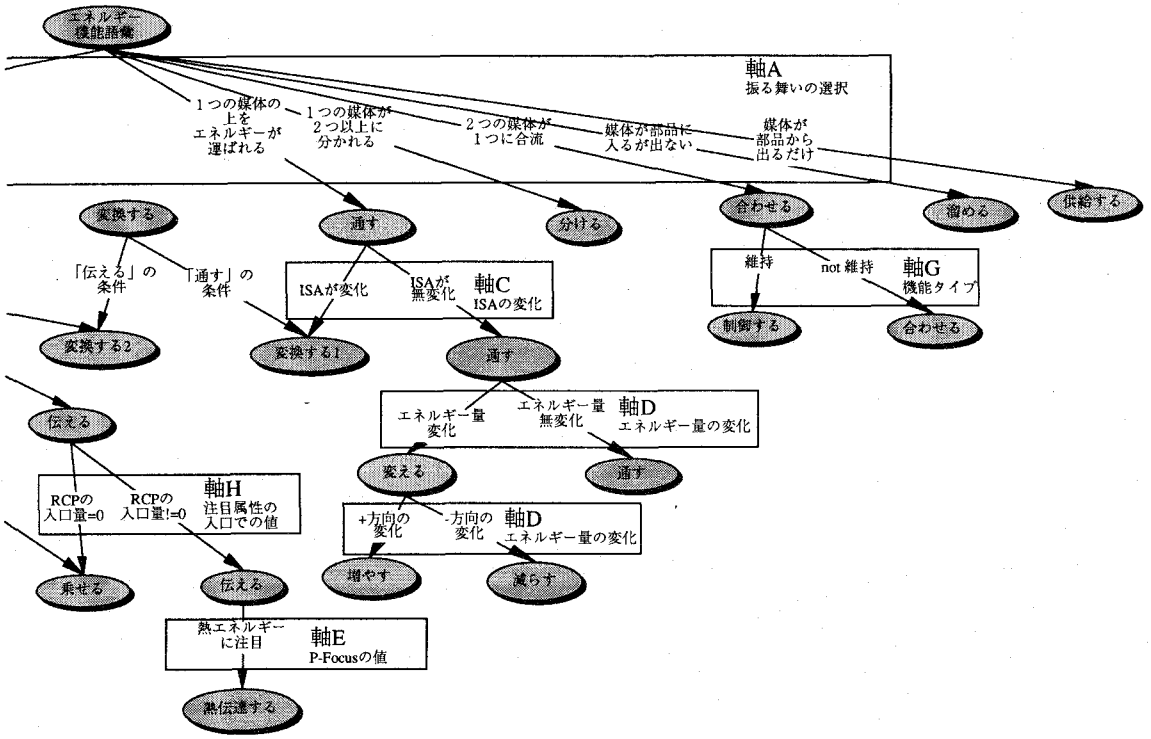


図 3.4: エネルギー機能語彙ライブラリ (2/2)

A軸:振舞いの選択

1,2の順でモデルを調べる.

1:モデルの入口ポートと出口ポートの数を調べる

1対1なら, 値2

1対0なら, 値5

0対1なら, 値6

2対2, かつ媒体間のエネルギー移動があれば, 値1

2:モデルのP-Focusを調べる.

入口1つのポート, 出口複数のポートにP-Focusしている場合:値3

入口多数のポート, 出口1つのポートにP-Focusしている場合:値4

入口1つのポートだけにP-Focusしている場合:値5

出口1つのポートだけにP-Focusしている場合:値6

入口ポート1つ, 出口ポート1つにP-Focusしている場合:

注目している入口ポートにある媒体と出口ポートにある媒体が

1.MP-Relationで結ばれている(連続), かつ,

2.媒体上のエネルギーが他の媒体上のエネルギーとMP関係にない

ならば, 値2.

注目している入口ポートにある媒体と出口ポートにある媒体が

1.MP-Relationで結ばれている(連続), かつ

2.媒体上のエネルギーが他の媒体上のエネルギーとMP関係にある

ならば, 値1.

注目している入口ポートにある媒体と出口ポートにある媒体が

1.MP-Relationで結ばれていない(不連続), かつ

2.入口ポートにある媒体上のエネルギーが出口ポート

にある媒体上のエネルギーとMP関係にある

ならば, 値1.

B軸:注目する流れ

A軸の値1を満たす, つまり,2つの媒体間でエネルギーを受け渡す

モデルに対してのみ有効. エネルギー放出側がSRC, 受け取り側がRCP.

P-FocusがSRCの流れにあたっていれば値1

P-FocusがRCPの流れにあたっていれば値2

P-Focusが入口SRC, 出口RCPにあたっていれば値3

C軸:エネルギー種類の変化

P-Focusが入口ポート1つ, 出口ポート1つに当たっているときのみ

有効となる軸.

出口側のエネルギーでP-Focusが当たり,O-Focusされた属性を持つ

出力物Obj_{out}と, 入口側のエネルギーで,P-Focusの当たるポート

にありObj_{out}とMP関係にあるエネルギーObj_{in}のISAを比較.

Obj_{in}が複数ある場合, 値2.1つだけのとき,ISAスロットの値が同じ

なら値1, 違うなら, 値2.

図3.5: エネルギー機能語彙の情報軸とFBRLモデルの関係(1/2)

D 軸:エネルギー量の変化

P-Focus が入口ポート 1 つ, 出口ポート 1 つに当たっているときのみ有効となる軸.
出口側のエネルギーで P-Focus が当たり,O-Focus された属性を持つ出力物 Obj_{out}と, 入口側のエネルギーで,Obj_{out}
と MP 関係にあるものの間で, 量パラメータ "Amount" を比較する.

E 軸:O-Focus している属性のクラス

O-Focus スロットの値を参照する.

F 軸:注目していない対象物の必要性

P-Focus が入口 1 つ出口 1 つのポートに当たっていて, かつ注目しているポートから入力されたエネルギーが 2 つに分かれる場合のみ有効. 出口側の P-Focus されている媒体が運ぶエネルギーについて,

Necessity スロットの値が Need であれば値 1
Necessity スロットの値が NoNeed であれば値 2

G 軸:機能タイプ

FuncType スロットを参照する.

H 軸:入口での属性値

(1) エネルギーを運ぶ媒体が入口から出口へ連続している場合
条件 1 と 2 を満たすエネルギー対象物の量を表現する属性"Amount"の値を見る. 値が 0 ならば, 軸の値 1, そうでなければ, 軸の値 2
条件 1:P-Focus が当たっている入口ポートにある
条件 2:出口側で注目しているエネルギー対象物と MP 関係にある

(2) エネルギーを運ぶ媒体が, 入口と出口で不連続の場合
条件 1 と 2 を満たすエネルギー対象物全てについて, その種類を表す属性"ISA"の値を見る.ISA の値が, 出口側で注目している対象物と違っていれば, 軸の値 1, 同じなら軸の値 2
条件 1:P-Focus が当たっている入口ポートにある
条件 2:出口側で注目しているエネルギー対象物と MP 関係にある

I 軸:出口での属性値

次の条件を満たすエネルギー対象物の, 量を表現する属性"amount"の値をみる.0 ならば軸の値は 1, そうでなければ軸の値は 2.
条件 1:P-Focus が当たっている出口ポートにある
条件 2:O-Focus している属性によって, その量が決定される

図 3.6: エネルギー機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (2/2)

3.6 説明生成システムの概念設計

FBRLに基づく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 and Steinberg [SS81] は, 説明タスクの分類を試みている. 筆者らは [SKIM95] 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. 本稿ではその1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.

3.6.1 説明の分類

筆者らは, 特に流体を扱うプラントに関する各種専門書 [井上 89] [武山 83][不二 78], 人工物の機能に関する百科事典 [vAM72a][vAM72b] などから説明文を抽出し, 機能を理解しやすく説明するために必要な要素を分析した. そのうえで Stevens and Steinberg[SS81] が行なっている説明タスクの分類に関する議論にさらに考察を加え, **FBRL**を用いた故障診断システムのための次の7つの種類の説明を生成するための機構とテンプレートを設計した.

システムを構成する部品の機能:

このタイプの説明は, システムを構成する個々の部品の機能を述べる. 説明を受けるユーザの理解を促進するために, 個々の部品単体の機能だけではなく, その部品がシステムの主機能にどのように貢献するかということも述べる.

粒度を変化させた説明:

説明を受けたユーザは, より詳細にまたはより大雑把にその説明を言い替えて欲しいと考えることがある. このタイプの説明は, ユーザの要求に応じて説明対象の粒度を変化させる.

故障の発生:

部品の故障状態とは部品が正常に機能していない状態として捉えられる. このタイプの説明は部品の機能がどのように壊れているか, またその意味を述べる.

いつ, なぜ「防止」機能タイプの部品が機能するか:

防止機能をもつ部品はある異常な状況を検知した上で設計者が想定した最悪の状況に陥らないように機能を発揮する. このタイプの説明はこれらについて述べる.

ある出力値が生成された理由:

このタイプの説明は, ある出力値がどのような過程から生成されたかを述べる.

ある出力値が生成されなかった理由:

このタイプの説明は, シミュレーションの結果, 期待していた出力値が生成されなかった時にその理由を述べる.

故障仮説に基づくシミュレーション:

システムの故障仮説は, パラメータが異常値をとった状態として表現することができる. このタイプの説明は, 故障仮説からどのような影響がシステム全体に及ぶかを述べる.

本節ではこれら7つの説明のうち, システムを構成する部品の機能の説明を生成する枠組みを例にして説明生成システムの概念設計を示す.

3.6.2 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3.7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2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.

3.6.3 望ましい説明の要件

ここで図3.7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 2 :Pressurized-water reactor *[vAM72b, pp.26-27]*

これは, 最も単純な形式の原子炉で, 水が, 冷却剤と, 核分裂で生成される中性子のスピードを殺すモデレーターの, 両方の役割をはたす. … <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2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が何であり, 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出来る.

3.6.4 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2つの理由か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. 2.8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様々に変わる. 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出来る. しかし, 系の異なる2つの部品に関する機能を与えられた時, 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3.7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他, 熱の伝達率など, 様々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2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.

3.6.5 機能モデルの記述

3.7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

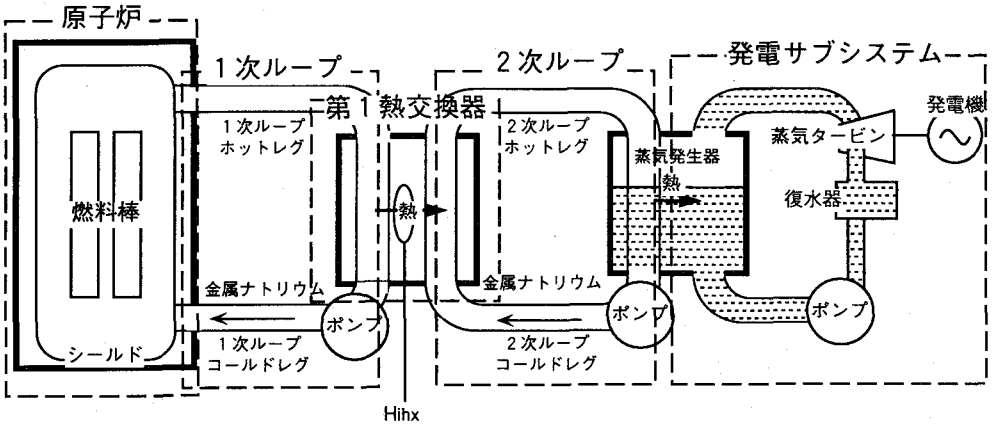


図 3.7: 原子力発電プラントのモデル例

してそれが発揮する機能を全て 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 3.7中の第 1 熱交換器の機能モデルを熱エネルギーに注目して記述したものは図 3.8のようになる.

```
Behavior:
  Objects:
    /* Obj1:1次ループホットレグ流体 */
    /* Obj4:2次ループコールドレグ流体 */
    /* Obj7:1次ループコールドレグ流体 */
    /* Obj10:2次ループホットレグ流体 */
  SubComponents:
    Nil
  MP-Relations:
    (((Obj8 Obj11)(Obj2)) ((Obj11)(Obj5 Obj2)))
  SameClass:
    ((Obj2 Obj8)(Obj5 Obj11)(Obj3 Obj9)(Obj6 Obj12))
  InherentParams:
    Hihx
  Ports:
    ((In1 RX Out1)(In2 IHX2 Out1)(Out1 RX In1)(Out2 IHX2 In1))
  QN-Relations:
    ((= Obj2.Amount (+ Obj8.Amount Obj11.Amount))
     (= Obj11.Amount (+ (* k Obj2.Amount) C))
     (> Obj2.Amount Obj8.Amount)
     (> Obj2.Amount Obj11.Amount)
     (= Obj3.Mass Obj9.Mass)
     (= Obj6.Mass Obj12.Mass)
     (> Obj3.Pressure Obj9.Pressure)
     (> Obj3.Temp Obj9.Temp)
     (< Obj3.Volume Obj9.Volume)
     (> Obj3.Dryness Obj9.Dryness)
     .....
FTsets:
FTset1:      /* エネルギー:冷やす */
  O-Focus:   温度
  P-Focus:   ((In1)(Out1))
  FuncType:  達成
  Necessity: NIL
FTset2:      /* エネルギー:熱伝達する */
  O-Focus:   温度
  P-Focus:   ((In1)(Out2))
  FuncType:  達成
  Necessity: NIL
FTset3:      /* エネルギー:熱を加える */
  O-Focus:   温度
  P-Focus:   ((In2)(Out2))
  FuncType:  達成
  Necessity: NIL
```

図 3.8: **FBRL** による第1熱交換器の機能表現 (一部省略)

第1熱交換器のFTsetsの記述および各FTsetに割り当てられる機能語彙について説明する．なお，図3.8は熱交換器の熱に関する機能のみを抽出したものであり，その他の機能記述，対象物モデル，およびパラメータ間の関係式については省略している．

$FTset_1$は，炉心(RX)のOut1ポートから出力された高温冷却材を冷やす機能である．出口パラメータとしては冷却材の温度に注目していると考えられるので，O-Focusを

O-Focus:温度

と記述する．次にP-Focusは，この機能が熱交換の結果温度が下がる媒体，すなわち1次ループホットレグ(In1)から1次ループコールドレグ(Out1)への流れに注目していることを表現して，

P-Focus:((In1)(Out1))

と記述する．そして，Out1へ流出する冷却材の温度は,In1から流れ込む冷却材の温度とともに変動するので,**FuncType**の値は達成となる．最後に，この機能が注目している出口の温度は必要であり，他の対象物は必要でも不要でもないので**Necessity**の記述はデフォルト，すなわちNILとなる．このFT-setの記述に対し，エネルギーに関して「冷やす」という機能語彙が，機能語彙ライブラリを参照することにより割り当てられる．

次に，熱エネルギーを伝える機能($FTset_2$)について説明する．出口パラメータとしては流体の温度でその量が表現される熱エネルギーに注目していると考えられるので，**O-Focus**を

O-Focus:温度

と記述する．次に，**P-Focus**はこの機能がエネルギーの移動に注目していることから，

P-Focus:((In1)(Out2))

と記述する．そして，入力流体の熱エネルギーが変動すれば流体の出口における温度も変動するので，**FuncType**の記述は達成となる．最後に，この機能が注目している出口の温度は必要であり，他の対象物は必要でも不要でもないので**Necessity**の記述はデフォルト，すなわちNILとなる．このFT-setの記述に対し，エネルギーに関して「熱を伝える」という機能語彙が割り当てられる．

最後に，熱を加える機能($FTset_3$)について説明する．出口パラメータとしては加熱される流体の温度に注目していると考えられるので，**O-Focus**を

O-Focus:温度

と記述する．次に，**P-Focus**はこの機能が低温から高温になる流体の流れに注目していることから，

P-Focus:((In2)(Out2))

と記述する．そして，入力流体の熱エネルギーが変動すれば流体の出口における温度も変動するので，**FuncType**の記述は達成となる．最後に，この機能が注目している出口の温度は必要であり，他の対象物は必要でも不要でもないので**Necessity**の記述はデフォルト，すなわちNILとなる．このFT-setの記述に対し，エネルギー機能語彙ライブラリから「熱を加える」という機能語彙が割り当てられる．

3.6.6 主経路の同定

次に，3.7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，即ち，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熱交換器に伝播される．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．1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1つは，1次ループを流れる流体を「冷やす」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播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「冷やす」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向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言えない．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．

3.6.7 表層文の生成

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み合わせによって階層的に表現されたシステムにおけるある部品の機能$_A$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 :2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全ての部品について, 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.

さらに, 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付けるために次の戦略1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文は,「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時には,「対象物」を主語にする.

以上述べてきた手順と戦略1に従って図 3.7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と, 説明文 3のようになる.

説明文 3 :図 3.7の燃料棒の機能

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.
熱エネルギーは *1*次ループによって第 *1*熱交換器の金属ナトリウムに伝えられます.
熱エネルギーは第 *1*熱交換器によって *2*次ループの金属ナトリウムに伝えられます.
熱エネルギーは *2*次ループによって発電サブシステムの水に伝えられます.
熱エネルギーは発電サブシステムによって電力に変換されます.

説明文 3の第 3 文以降を見てみると, 熱エネルギーは発電サブシステムまで別の種類のエネルギーに変換されていないことが分かる. 熱エネルギーを主に扱う流体系のドメインでは, 冷却材を循環させるループや異なったループの間での熱伝達を行なう熱交換器のような機能的側面から見れば熱エネルギーを伝えるだけで熱エネルギーの変換に影響し

ない部品がシステムに組み込まれていることが多い. このような場合, 注目している部品から出力された熱エネルギーが通る部品の機能を述べることが説明の受け手に対して有益な情報を与えるとは考えにくい. そこで, 流体系のドメインに限定して, 回答簡略化戦略として次の戦略2をを適用し, 有益でない情報を削除する.

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...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4のように生成することができる.

説明文 4 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, 発電サブ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出来る.

3.7 プロトタイプの作成

筆者らは前節で設計した説明生成システムのプロトタイプを, UNIX Workstation 上に言語 Allegro Commom Lisp を用いて実装した. 例題としては動作流体を循環させて発電を行うランキンサイクルを用いた.

プロトタイプの実装においては, 質問に対して説明を生成するシステムを, ユーザの行う質問を解釈する質問解釈器とユーザに説明を行う説明生成器に分けて考えた. ユーザが構築したモデルについての質問を行うと, まず, 質問解釈器が質問の内容を解釈して情報軸の組合わせなどの説明生成器に入力するための情報を作り出す. 次に, 説明生成器は質問解釈器が生成した情報を用いて説明を生成する. なお本研究は, 説明を生成するために必要なドメイン知識と説明生成技術開発に重点をおき, 質問解釈器を研究の対象外とした.

3.7.1 説明生成器の構成

図 3.9は説明生成システムの中核を為す説明生成器の構成であり, 説明生成器は次のように動作する. まず, コンパイラがユーザから要求された説明のタイプに応じて説明生成のために必要なフラグメントを組み合わせる. 次に, 表層文生成器がフラグメントの組合わせを部品名, 機能語彙, 対象物語彙などを用いて埋めて説明文を生成し, ユーザに示す.

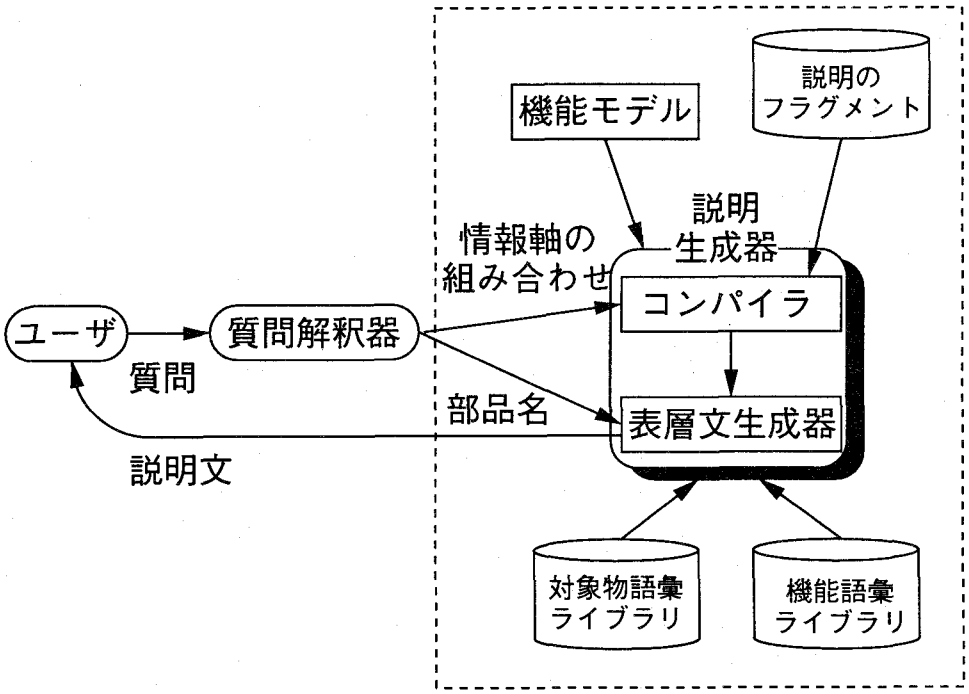


図 3.9: 説明生成器

以下に, 我々が実装したモデルの例, 機能語彙のマップメカニズム, 説明文の生成例を示す.

3.7.2 ランキンサイクルのモデル記述

ランキンサイクルは水などの動作流体を加熱し, その熱エネルギーを用いて仕事を行うサイクルである. 図 3.10 は給水ポンプ, 蒸気ボイラ, 過熱器, 蒸気タービン, 復水器からなるランキンサイクルの仕事を発電に利用した例であり, 矢印の方向に動作流体が循環する.

ランキンサイクルの動作を動作流体が水である場合を例にして述べる. 給水ポンプは, 水を断熱圧縮して圧力を高める. 蒸気ボイラは給水を等圧加熱後, 等圧等温膨張させて温度を高めて蒸気にし, さらに過熱器が等圧加熱して温度を高める. 蒸気タービンが断熱膨

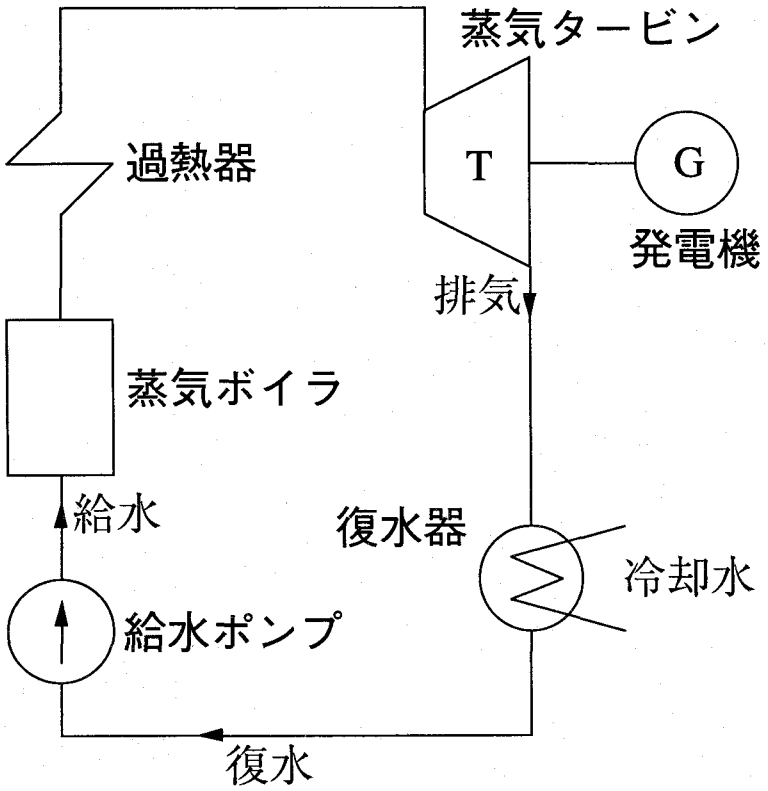


図 3.10: ランキンサイクルの構成

張させて行った仕事により蒸気は圧力·温度が降下し, 復水器で等温等圧冷却されて水に戻る.

3.7.3 モデル記述例:蒸気タービン

説明生成システムに関する実験で用いたタービンのモデルを示す. なお, 対象物の記述については省略している. また,/* */で囲まれた部分はコメントを表している. なお, 機能モデルの記述については, 各機能を表現する FT-set の記述についてのみ説明する.

蒸気タービンの振舞いは, 入力流体の熱エネルギーの一部をシャフトの回転エネルギーにする部品としてモデル化できる (図 3.11). 図 3.12 は蒸気タービンの機能モデルを **FBRL** の機能モデルクラステンプレートを用いて記述したものである.

蒸気タービンの振舞いに対して, 入力流体の熱エネルギーからシャフトの回転エネルギーを生成する (FT-set1), および, ランキンサイクルの循環機能に着目した, 入力流体の熱エネルギーを除く (FT-set2), という 2 通りの解釈が可能であり, 蒸気タービンを 2 つの機能を持つ部品としてモデル化した.

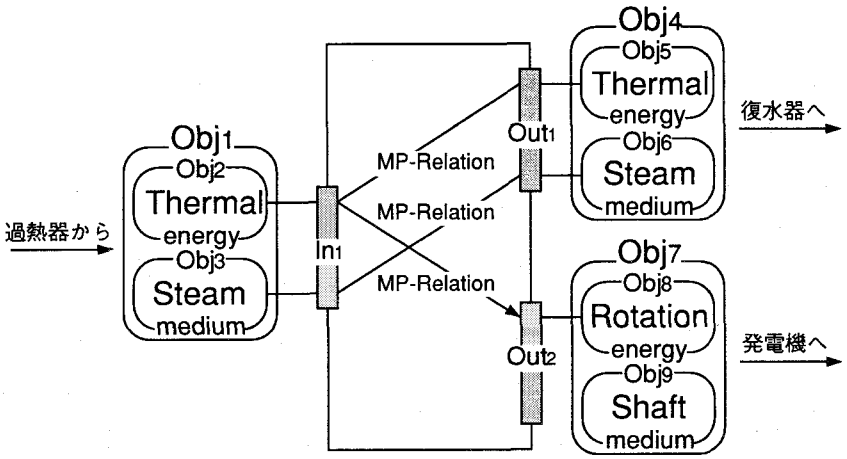


図 3.11: 蒸気タービン

FT-set1:入力流体の熱エネルギーから回転エネルギーを生成する

この機能は, 出口パラメータとしてはシャフトの角速度に注目していると考えられるので,

O-Focus:角速度

と記述する. 次に, **P-Focus** はこの機能がエネルギーが変換される流れに注目していることから,

P-Focus:((In1)(Out2))

となる. そして, 蒸気タービンは, 入力流体の熱エネルギーの一部を用いてシャフトを回転させているが, 入力流体の熱エネルギーが変動すればシャフトの回転数も変動するので, **FuncType** の記述は

FuncType:達成

となる. 最後に, この機能が注目している出口の回転エネルギーは系にとって必要であり, 他の対象物は必要でも不要でもないので **Necessity** の記述はデフォルト, すなわち

Necessity:NIL

となる.

FT-set2:動作流体の流れから熱エネルギーを除く機能

この機能は出口パラメータとして動作流体の熱エネルギーに注目していると考えられるので,

O-Focus:温度

Behavior:

Objects:	/* Obj1:熱エネルギーを運ぶ過熱蒸気 */
	/* Obj4:熱エネルギーを運ぶ湿り蒸気 */
	/* Obj7:回転エネルギーをのせたシャフト */
SubComponents:	(先細ノズル 回転羽根)
MP-Relations:	(((Obj5 Obj8)(Obj2)) ((Obj6)(Obj3)))
SameClass:	((= Obj2 Obj5) (= Obj3 Obj6) (≠ Obj2 Obj8)
	(≠ Obj3 Obj9))
InherentParams:	(turbine-efficiency)
Ports:	((In1 Superheater Out1)
	(Out1 Condenser In1) (Out2 Generator In1))
QN-Relations:	((= Obj2.Amount (+ Obj5.Amount Obj8.Amount))
	(= Obj8.Amount (+ (* k Obj2.Amount) C))
	(> Obj2.Amount Obj5.Amount)
	(> Obj2.Amount Obj8.Amount)
	(= Obj3.Mass Obj6.Mass)
	(> Obj3.Pressure Obj6.Pressure)
	(> Obj3.Temp Obj6.Temp)
	(< Obj3.Volume Obj6.Volume)
	(> Obj3.Dryness Obj6.Dryness)
	(> Obj3.Temp 沸点)
	(= Obj6.Temp 沸点)
	(= Obj6.Dryness 0.5))

FT-sets:

FT-set1:	/* 角速度を得る */
O-Focus:	角速度
P-Focus:	((In1)(Out2))
FuncType:	達成
Necessity:	NIL
FT-set2:	/* 流体の熱を除く */
O-Focus:	熱エネルギーの量
P-Focus:	((In1)(Out1))
FuncType:	達成
Necessity:	((**NoNeed**(,O)ut1 熱エネルギー))

図 3.12: **FBRL** による蒸気タービンの機能表現

と記述する. 次に, **P-Focus** はこの機能が動作流体の流れに注目していることから,

P-Focus:((In1)(Out1))

と記述する. そして, 蒸気タービンは, 入力流体の熱エネルギーの一部を除いて流体の温度を下げているが, 入力流体の熱エネルギーが変動すれば流体の出口における温度も変動するので, **FuncType** の記述は

FuncType:達成

となる. 最後に, 系にとっては動作流体が運んでいる熱エネルギーは必要であるが, 蒸気タービンの出力ポートにつながっている復水器にとっては出口流体の熱エネルギーは不要であり, 注目されていない対象物は必要でも不要でもないので, **Necessity** の記述は

((NoNeed Out1 熱エネルギー))

となる.

3.7.4 機能語彙マップモジュール

本節では図 3.12に示したタービンの **FT-set1**, つまり, エネルギーを変換する機能の記述を例にして, 機能語彙マップモジュールがエネルギー機能語彙を割り当てる仕組みを説明する.

まず,FT-Set1 が注目するエネルギーが何であるかを導出する. FT-Set1 の O-Focus 記述は,

O-Focus:角速度

と記述されており, 注目する属性が角速度であることがわかる. また,P-Focus の値が

P-Focus:((In1)(Out2))

となっていることから,Out2 ポートにある物質, つまりシャフト (Obj_9) の角速度にこの機能が注目していることがわかる. 次に, シャフト上に乗っているエネルギーで, 角速度によってその量が規定されるものは, 対象物シャフトの記述中, 次の 2 つから導出される.

Sub-Relations:((CarryE Obj_9 Obj_8))

Para-Relations:((= Obj_8.Amount (* k Obj_9.Angular-Velocity))

前者の記述から, シャフト (Obj_9) が回転エネルギー (Obj_8) に対して CarryE, つまり, 媒体とそれに運ばれるエネルギーの関係にあることが導出される. さらに後者の, 混合物を構成する物質どうしについての式から, 回転エネルギーの量 (Obj_8.Amount) が, シャフトの角速度 (Obj_9.Angular-Velocity) に対して比例関係にあることが導出される. 以上の情報から, 出力側に関して機能が最も注目するエネルギーはシャフトの角速度パラメータに

よってその量が規定される回転エネルギーであることが導出される．次に，入口側の注目エネルギーであるが，タービンモデルのMP-Relationsの記述

MP-Relations:(((Obj5 Obj8)(Obj2)) ((Obj6)(Obj3)))

より回転エネルギー (Obj_8) の原料になったのは熱エネルギー (Obj_2) であることが分かる．よって，この機能が注目しているエネルギーは，回転エネルギー (Obj_8) とその原料である熱エネルギー (Obj_2) であることが導出された．

注目するエネルギーが何であるかを同定すると，機能語彙マップモジュールは，まずA軸，つまり，機能がどの振舞いを選択しているかを調べる．タービンFT-Set1のP-Focusの値は，

P-Focus:((In1)(Out2))

となっている．さらに,In1とOut2のポートにあるエネルギーを運ぶ媒体について振舞いの記述を見ると，

MP-Relations:(((Obj5 Obj8)(Obj2)) ((Obj6)(Obj3)))

の記述から，

Obj5,Obj8のそれぞれとObj2の間には連続性がある

Obj6とObj3の間には連続性がある

ことが導出される．ここから，熱エネルギーを乗せた入力媒体である蒸気 (Obj_3) と回転力を乗せた出力媒体であるシャフト (Obj_9) の間に連続性が無いが，それらの上に乗った熱エネルギー (Obj_2) と回転エネルギー (Obj_8) には連続性があることが分かる．よって，

注目ポートの媒体どうしが不連続

注目ポートの媒体上のエネルギーが連続

というA軸の値1，つまり「不連続媒体間でエネルギーが移動」という条件を満たすことがわかる．この時点でエネルギー機能語彙ライブラリを参照すると,A軸が値1の条件を満たす語彙は「移す」であることが分かる．

エネルギー機能語彙ライブラリ中の「移す」という機能概念は，軸B，すなわち，部品中のどの流れに注目しているか，という条件に応じて細分化されているので，次はタービンのFT-set1がB軸に関して満たしている条件を調べる．まず，媒体とエネルギーのMP-Relationsを検証する．MP-Relationsの記述からは，上述した通り，ポートIn1からOut1に流れる蒸気は，その上に乗った熱エネルギーをシャフトに対して放出していることが導出される．言い換えれば，

SRCの流れ:In1-Out1

RCP の流れ:Out2

であることが導出される. 次に,P-Focus の値は

P-Focus:((In1)(Out2))

であり, ポートの表記を SRC,RCP に置き換えると,

P-Focus:((SRC)(RCP))

となる. よって, タービンの FT-set1 が軸 B に関して値 3 の条件, すなわち,「SRC-RCP の流れに注目する」を満たすことがわかり,FT-set1 を表現する語彙は「伝える」であることが導出される.

「伝える」という概念は, 軸 C, すなわち, 注目しているエネルギーの種類が入口と出口で変化したかどうかでさらに分類される. 上述したように,FT-set1 が注目するエネルギーは,

入口側:熱エネルギー, 出口側:回転エネルギー

である. これらのエネルギーについて種類, つまり,ISA スロットの値を比較すると, 異なっているので,C 軸値 2 の条件を満たすことが分かる. 機能語彙ライブラリを参照すると,「伝える」の下位概念で C 軸値 2 の条件を満たすものは「変換する 2」となっている. エネルギー機能語彙ライブラリ中には「変換する」の下位概念として「変換する 1」「変換する 2」の 2 つが用意されている. 両者はその **FBRL** モデルが「変換する」という概念のモデルと異なるが, 変換するという語彙よりふさわしいものが今のところ無いので上記のような語彙で仮に表現している.

以上示したように, 機能語彙マップモジュールは,**FBRL** モデルのインスタンスを入力し, 使用するライブラリがエネルギーであるか媒体であるかを指定すると, モデルが各軸に対してどのような条件を満たしているか検証し, 指定されたライブラリから最も適切な機能語彙を割り当てる. 図 3.13は, 機能語彙マップモジュールが図 3.12の FT-set1,FT-set2 に対してエネルギー機能語彙ライブラリから機能語彙を割り当てた実行例である. タービンの FT-1, すなわちエネルギー変換という機能に対して「変換する」, FT-2, すなわち動作流体から熱を除くという機能に対して「除く」という機能語彙が割り当てられている.

3.7.5 説明の内容を規定するための情報軸

対象そのものや振舞いに関する質問には様々なタイプがあり, 当然回答もそれに応じて変化する. 我々は, 説明を生成するための様々な視点について考えてきた. この視点を表すものとして, 説明の内容を規定するための情報軸とその値を図 3.14のように定義し

```
部品名?turbine

loading model/turbine.lisp
;   Loading model/turbine.lisp

(変換する サ変)
(除く 五段)
部品名?

[----]--**-NEmacs: *ACL*          (JJUE:Inferior Common Lisp)--Bot--------
```

図 3.13: 蒸気タービンへの機能語彙割り当て

た. 図 3.14において, 太字の部分が各情報軸の取る値であり, それに続く部分は値についての説明である.

1. 注目すべき部品の関係 :

対象にもいろいろな関係があり, 対象の振舞いに注目するか, 構造に注目するかによって生成すべき説明は異なる. この軸は対象のどのような関係に注目して説明するかを指定するためのものである. この軸の値が '構造' のときは部品の接続関係または部品がどのような副部品から構成されているかを説明し, '振舞い' のときは部品の入出力関係について説明する.

2. 説明を行う部品のレベル :

システム/部品には副部品が存在することがあり, どの部品のレベルで説明を行うかにより生成される説明は変わる. この軸はどの部品のレベルで説明するかを指定するためのものである. すなわち, この軸の値が '単体' のときは説明対象の部品のレベルで説明し, '集合体' のときは副部品のレベルで説明する.

3. 入力と出力の関係 :

互いに接続されている部品では, 上流の部品の出力物と下流の部品の入力物は同一のものである. このため, 互いに接続されている部品を説明する際には, 上流の部品の出力物か, 下流の部品の入力物のどちらかを示せば十分である. そこで, 我々は上流の部品の出力物のみを示し, 下流の部品の入力物を示さずに説明する方法を取ることにした. すなわち, この軸により, 部品の入力物について説明中で示すか示さないかを指定することができる. ただし, 当然のことではあるが, 最初に説明する部品

1. 注目すべき部品の関係
   構造: 接続関係, 包含関係
   振舞い: パラメータの時間変化
2. 説明を行う部品のレベル
   単体: 説明対象の部品
   集合体: 説明対象の部品の副部品
3. 入力と出力の関係
   相対: 入力と出力の関係を説明
   絶対: 出力のみを説明
4. 注目する対象物
   媒体: 媒体に注目
   エネルギー: エネルギーに注目
5. 説明する言葉のレベル
   パラメータレベル: パラメータの変化を説明
   概念レベル: 概念的な言葉により説明
6. 使用する部品モデル
   振舞いモデル: 振舞いモデルを使用
   機能モデル: 機能モデルを使用
7. システム/部品の状態
   正常状態: 正常に動作している状態
   異常状態: 異常動作している状態
8. 防止部品の扱い
   無視: 説明中では述べない
   許容: 他の条件を満たせば述べる
9. 副部品を用いた説明方法
   接続順: 副部品の接続順に説明
   単独: 副部品ごとに述べる

図 3.14: 情報軸の定義

の入力物, および途中の部品の入力物でも説明中で現われないものについてはいつでも示す必要がある.

4. 注目する対象物 :

部品には様々なクラスの対象物が存在するが, そのうちどれに注目するかによって生成すべき説明が異なる. この軸は対象物のうち, 媒体とエネルギーのどちらのクラスの対象物に注目して説明するかを指定するためのものである.

5. 説明する言葉のレベル :

対象とするドメインによっては, 対象物の一般的な名称を用いるのではなく, 概念的な名称を使用することがある. 例えば, 一般的には H_2O の気相は蒸気と呼ぶが, ランキンサイクルの説明の際には同じ H_2O の気相でも, 状態に応じて飽和蒸気, 過熱蒸気といったさらに概念的な名称を用いる. また, 部品の振舞いを概念的に説明することができる. 例えば, 2又パイプにおける流体の流れを "2つにする" 振舞いは, 概念的には流体の流れを "分ける" と言える. すなわち, この軸により, どのレベルの名称を使用して説明を行うかを指定する. より詳しく言うと, 対象物に対して概念的な名称を使用するために対象物語彙ライブラリが用意されており, また, 機能語彙ライブラリを参照することにより, 部品の振舞いを概念的に説明できるので, この軸は対象物語彙ライブラリおよび機能語彙ライブラリを参照するかしないかを指定する軸となる.

6. 使用する部品モデル :

部品モデルは振舞いモデルと **FT-sets** の集合から構成されている. この軸の値が '振舞いモデル' のときは振舞いモデルのみを参照して説明を行うが, '機能モデル' のときは振舞いモデルに加えて **FT-sets** の集合および機能語彙ライブラリを参照して説明を行う. つまり, この軸の値を '機能モデル' にすると, 対象物の流れが複数存在してもある機能にとって重要な対象物の流れのみを参照し, さらに機能語彙ライブラリを参照して機能語彙を用いて説明を行う.

7. システム/部品の状態 :

システム/部品の振舞い, 構造などは, 状態が正常なときと, 異常なときでは異なる. したがって同じシステム/部品であっても, その状態に応じて生成すべき説明の内容が変わることになる. この軸はシステム/部品の状態を指定するためのものである.

8. 防止部品の扱い：

系には, 系が故障状態に陥るのを防ぐための部品, すなわち防止部品が組み込まれていることがある. 系に組み込まれた防止部品は, 系が故障するような値が入力されたときにのみ働き, 系が正常に動作しているときには何もしていない. このため, 正常に動作している系を説明するときには, 系を構成する部品のうち, 防止部品については省略することができる. この軸は防止部品を説明を生成する際に, どのように扱うかを指定するためのものである.

9. 副部品を用いた説明方法：

説明対象の副部品のレベルで説明を行う際には, 副部品を 1 つずつ独立させて単独で説明する場合と, 副部品をそれらの接続順に説明する場合の 2 つがあると考えられる. この軸により, この 2 つの方法のどちらを取るかを指定できる.

3.7.6 説明のための補助的な情報

説明生成を行うためには, 情報軸の組合わせだけでは与えることのできない, 部品名などの補助的な情報を与える必要がある. 補助的な情報には以下の 3 つがあり, 生成する説明に応じて適宜与える.

1. システム/部品名：

説明を行う対象となるシステム/部品名を指定する.

2. 対象物/パラメータ名：

説明対象に存在するどの対象物 (エネルギー, 媒体) に, または対象物のどの属性に注目して説明生成するかを指定する.

3. 関連づける部品/機能：

システムに組み込まれた部品は相互に関係しあって機能を発揮することが多い. このため, システムの機能を説明するときには, システムを構成する部品の機能を単に列挙する説明だけでなく, 2 つの部品の機能間の関係についても説明できる必要がある. この情報に部品/機能を指定すると, この部品/機能が説明対象にどのように関連しているかを説明させることができる. この情報を指定すると, 機能間の関連を説明する際に必要ではない機能は省略される.

3.7.7 説明生成例1:ランキンサイクルに関する説明

本節では, 我々が作成した説明生成器の実行例として, ランキンサイクルの部品モデルに関する機能レベル, および振舞いレベルの説明生成例を示す.

我々の説明生成手法では, 与える情報軸の組合わせ方を変えると生成される説明が変わる. そこで情報軸の組合わせの変化により, 生成される説明がどのように変わるかを検討するために, 与える情報軸の組合わせ方を変えて蒸気タービンの説明を生成した. 図3.15と図3.16は, 同じタービンのモデルに対して与える情報軸の組み合わせを変えると説明が振舞いレベル (図3.15) と機能レベル (図3.16) で変化する例である.

```
部品名は? turbine
各軸の値の組合わせを番号で選んでください.
1:振舞い-単体-相対-エネルギー-概念レベル-機能モデル-正常-許容-単独-
2:振舞い-単体-相対-エネルギー-概念レベル-振舞いモデル-正常-許容-単独-
3:振舞い-単体-相対-エネルギー-パラメータレベル-機能モデル-正常-許容-単独-
番号?:2
軸の組合わせは ((BEHAVIOR INDIVIDUAL RELATIVE ENERGY CONCEPT BEHMODEL NORMAL
                IGNORE INDEPENDENT)) です.

loading model/turbine.lisp
        Turbineは過熱蒸気に乗ったthermalを湿り蒸気に乗ったthermal,
        shaftに乗ったrotationに分ける.
部品名は? ■

[----]--**-NEmacs: *ACL*              (JJJE:Inferior Common Lisp)--Bot-------
```

図 3.15: タービン:振舞いレベルでの説明

```
部品名は? turbine
各軸の値の組合わせを番号で選んでください.
1:振舞い-単体-相対-エネルギー-概念レベル-機能モデル-正常-許容-単独-
2:振舞い-単体-相対-エネルギー-概念レベル-振舞いモデル-正常-許容-単独-
3:振舞い-単体-相対-エネルギー-パラメータレベル-機能モデル-正常-許容-単独-
番号?:1
軸の組合わせは ((BEHAVIOR INDIVIDUAL RELATIVE ENERGY CONCEPT FUNCMODEL NORMAL
                IGNORE INDEPENDENT)) です.

        Turbineは過熱蒸気のthermalをshaftのrotationに変換する.
        Turbineは過熱蒸気のthermalを除く.
部品名は? □

[----]--**-NEmacs: *ACL*              (JJJE:Inferior Common Lisp)--Bot-------
```

図 3.16: タービン:機能語彙を用いた説明

図3.17は説明生成器が生成したタービンに関する説明の特徴的なものをいくつか集めたものであり, 情報軸の値のうち異なっている部分に下線を引いてある.

(1) システム/部品名: 蒸気タービン
情報軸の組合わせ:
振舞い-単体-相対-媒体-パラメータレベル- 振舞いモデル-正常状態-許容-単独

蒸気タービンでは蒸気は圧力が減少し, 温度が減少し, 体積が増加し, 乾き度が減少し, 出力される. その結果, シャフトの回転数は正になる.

(2) システム/部品名: 蒸気タービン
情報軸の組合わせ:
振舞い-単体-相対-媒体-概念レベル- 振舞いモデル-正常状態-許容-単独

蒸気タービンは**過熱蒸気**を減圧して, **膨張させ**, **湿り蒸気**にする. その結果, シャフトは**回転する**.

(a) 説明生成例 1

(1) システム/部品名: 蒸気タービン
情報軸の組合わせ:
振舞い-単体-相対-エネルギー-概念レベル- 振舞いモデル-正常状態-許容-単独

蒸気タービンは過熱蒸気に乗った熱エネルギーを湿り蒸気に乗った熱エネルギー, シャフトに乗った回転エネルギーに分ける.

(2) システム/部品名: 蒸気タービン
情報軸の組合わせ:
振舞い-単体-相対-エネルギー-概念レベル- 機能モデル-正常状態-許容-単独

蒸気タービンは過熱蒸気の熱エネルギーをシャフトの回転エネルギーに**変換する**.
蒸気タービンは過熱蒸気の熱エネルギーを**除く**.

(b) 説明生成例 2

(1) システム/部品名: 蒸気タービン
関連づける部品/機能: 蒸気ボイラ
情報軸の組合わせ:
振舞い-単体-絶対-媒体-概念レベル- 機能モデル-正常状態-許容-単独

蒸気ボイラは圧縮水から過熱蒸気を生成して出力する. 次に, 過熱器で加熱されて過熱蒸気になる. 次に, 蒸気タービンはシャフトを回転させる.

(c) 説明生成例 3

図 3.17: 説明生成例

図3.17(a)に示した説明例は, 補助的な情報のうち1. システム/部品名のみ, 蒸気タービンとしたときのものであり, 後の2つは与えていないすなわち, 蒸気タービンを単独で説明したものである. また, 情報軸の組合わせのうち, 軸 [説明する言葉のレベル] の値のみが異なっている. この軸はパラメータを用いて説明するか, 概念的な名称/語彙を用いて説明するかを決定するためのものである. この軸の値を変えたことにより, (1) は蒸気タービン内で媒体の属性値がどのように変化したかを列挙して説明しているが, (2) は蒸気タービンに存在する媒体に対して "過熱蒸気","湿り蒸気" という対象物語彙を用い, さらに属性値の変化についても "体積の増加" を "膨張する" という概念的な語彙を用いて説明している.

次に, 図3.17(b)に示した説明例を生成するために与えた補助的な情報は, 図3.17(a)と同じである. また, この例では軸 [使用する部品モデル] の値のみを変化させている. この軸は部品モデルのFT-setsおよび機能語彙ライブラリを参照するかしないかを指定するものである. この軸の値を変えたことにより, (1) は全ての入出力物についてどのように変化するかを説明しているが, (2) は機能語彙ライブラリを参照することにより, "変換する","除く" という機能語彙を用いて蒸気タービンの各機能を説明している.

最後に, 図3.17(c)に示した説明例は, 補助的な情報のうち1. システム/部品名を蒸気タービン, 3. 関連づける部品/機能を蒸気ボイラとしたときのものである. 3. 関連づける部品/機能を指定したことにより蒸気タービンと蒸気ボイラの機能を関連づけた説明が生成される. 説明中で述べられている部品は複数の機能を持っているが, 蒸気ボイラと蒸気タービンの機能を関連づけて説明する際に必要な機能のみを選んで説明を行っている. また, より自然な説明文となるように, 最初の部品のみ部品を主体として説明し, タービンでエネルギー変換が行われるまでは熱エネルギーが受ける影響のみを説明している.

3.7.8 説明生成例2:故障診断システムとの連動

來村らが開発した**KC III**は, 対象の振舞いモデルに基づく故障診断を行い, その結果を出力する [來村97]. 図3.18は, **KC III**が診断対象とした1つ, 原子力プラントの熱輸送経路である. **KC III**は, 対象の振舞いモデル上でシミュレーションを行い, その結果をパラメータレベルで表現された状態遷移情報として出力する.

図3.19は,**KC III**が,

故障が発生した部品:IHX

初期異常兆候:hihx[-]

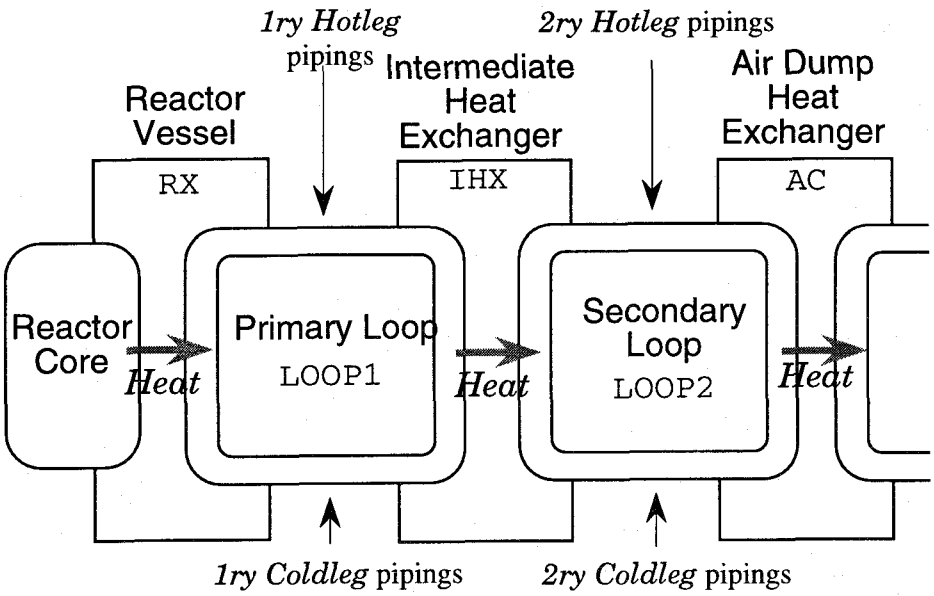


図 3.18: 熱輸送系

すなわち, 中間熱交換器 (IHX) の, 熱伝達率 (hihx) が, 異常に低くなった, という異常兆候を入力として与えられ, 系のシミュレーションをした経過を出力したものである.

このような振舞いレベルの情報を与えられると, 熱輸送系に精通している専門家は, どのような異常が発生しそれがどのような意味を持つのか理解できるが, そうでない者には理解できない.

```
ihx; hihx[-],
ihx; hihx[-], q1out[-], q2in[-], t1cold[+], t2hot[-],
pump1; temp_in[+],
pump1; temp_in[+], temp_out[+],
rx; t1cold[+],
rx; t1cold[+], t1hot[+], trx[+],
ihx; hihx[-], q1out[-], q2in[-], t1cold[+], t1hot[+], t2hot[-],
ihx; hihx[-], t1cold[+], t1hot[+],
heat_loop1; q1[+], t1cold[+], t1hot[+],
heat_loop1; q1[+], t1cold[+], t1hot[+],
ac; t2hot[-],
ac; q2out[-], q3in[-], t2cold[-], t2hot[-], t3hot[-],
ac;
ac;
```

図 3.19: KCIII の推論結果例

そこで,**KC III** の対象モデルを **FBRL** で記述し,

故障 = 機能が注目している属性値が異常値をとること

と故障を定義することによって,**KC III** の出力を機能レベルで説明することが出来るよう

になる.

図3.20は,**KC III** を用いて得られた図3.19中の推論結果を機能レベルで説明するシステムの動作例である.

```
振舞いのシミュレーションのために,KC-IIIを呼びます.
初期異常兆候を入力してください.
部品名?:IHX
パラメータと値?:hihx[-]
KC-IIIを,初期異常兆候 IHX hihx[-]を与えて起動しました.

 KC-IIIの推論結果ファイルが生成されたら,何かキーを押してください.

KCout file is KCout2.dat.

原因:hihx(IHX熱伝達率) [-](異常に低い) のため,部品 中間熱交換器(IHX) は次のように故障しました.
 伝える, 即ち,Q2IN (IHX→2次系ループ伝熱量) を目標値に維持する機能が壊れ,Q2IN は [-]になりました.
 冷やす, 即ち, T1COLD (1次系ループコールドレグ温度) を目標値にする機能が壊れ,T1COLD は [+]になりました.
 加熱する, 即ち, T2HOT (2次系ループホットレグ温度) を目標値にする機能が壊れ,T2HOT は [-]になりました.

 以上を含めて, 部品 中間熱交換器(IHX) は次のような状態になりました.

  hihx (IHX熱伝達率): 異常に低い
  q1out (1次系ループ→IHX伝熱量): 異常に低い
  q2in (IHX→2次系ループ伝熱量): 異常に低い
  t1cold (1次系ループコールドレグ温度): 異常に高い
  t2hot (2次系ループホットレグ温度): 異常に低い

 (Proceed to Next state?[y/n])

[----]--:**-Emacs: *ACL*          (JJUE:Inferior Common Lisp)--36%----------
```

図 3.20: 定性シミュレータとの連動

説明生成器にはあらかじめ,

熱輸送系の **FBRL** モデル

が与えられている. そのうえで,

熱輸送系統の部品 IHX の熱伝達率が低下したらどうなるか?

という意味の質問をユーザからうけると, まず, 異常状態がどのように波及していくかを **KC III** にシミュレートさせる.

初期値:hihx[-]

を **KC III** に与えて推論させると,3.19の情報を含んだ出力ファイルを生成する.

次に説明生成器は,**KC III** 出力ファイルを解析し, 最初に故障が発生した部品の機能表現を全て調べる. その上で, 注目しているパラメータが異常値をとっている機能は故障していると判定する. 図3.20に見られるように, 熱輸送系統の中間熱交換器には, 熱を伝える機能,1次系ループを冷やす機能,2次系ループを加熱する機能の3つが記述されている. **KC III** の推論結果をみると, 初期状態は

ihx; hihx[-]

初期状態によって IHX が移行した状態は,

ihx; hihx[-], q1out[-], q2in[-], t1cold[+], t2hot[-],
である. ここで,IHX の 3 つの機能が注目するパラメータ全てが異常値を取ったので, 説明生成器は図 3.20のように, 伝える, 冷やす, 加熱する, という 3 つの機能すべてが故障したことを表示する.

3.8 説明生成器の評価

本章で述べてきた説明生成器のプロトタイプは, UNIX Workstation 上で Common Lisp を用いてインプリメントされており, 本章で用いた画面例はいずれもその実行例である.

情報軸の組合わせおよび必要な情報を入力すると, 機能モデル, 機能語彙ライブラリ, 対象物語彙ライブラリを参照して説明生成器は説明文を生成する.

情報軸の組合わせは論理的に 512 通りあるが, そのうち, インプリメントされた説明生成器が生成できるのは, 28 通りの組み合わせに対してのみである. この軸の組み合わせを入力することによって, ランキンサイクルの各部品につき, 9 から 15 の説明文を生成する. また, 情報軸の組み合わせ方によって, 第 3.6節で我々が概念設計した 7 種類の説明のうち, 次の 4 つについて説明を生成できた.

- 部品の機能に関する説明 (図 3.17(c))
- 粒度を変化させた説明
- 故障の発生 (図 3.20)
- 故障仮説に基づくシミュレーション (図 3.20)

残りの 3 種類の説明についてもテンプレートなどの概念設計は終了している.

説明生成システムに関して残された課題は, 次の通りである.

- 機能モデルコンパイラの設計と実現 (FBRL モデルから KC モデルの生成)
- 表層文生成器の工夫 (助詞, 接続語, 等の工夫)

また, プロトタイプは適用事例がランキンサイクルを構成する部品と **KC III** が対象としてきた部品, すなわち, 流体系プラントを構成する部品に限られ, 数が少ない. より多くの事例に本枠組みを応用することによって機能語彙ライブラリと説明生成器の一般性を検証する必要がある.

3.9 結言

本章では,本研究の重要な成果の1つである機能語彙ライブラリについて説明した.さらに,機能語彙ライブラリを利用することによって,ユーザにとってより分かりやすい説明生成を実現する枠組みを述べた.振舞いの知識のみでなく,機能を表現する知識も援用することによって,システムにおける主たる経路をたどるような説明をはじめ,機能レベルの知識を活用した様々な説明を生成することが可能になった.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無かった.結果として,従来の方式では機能モデルと機能語彙のマップが暗黙的になってしまい,機能モデルの共有を難しくする原因の1つとなっていたが,本研究はそれを解消することに貢献したと言える.

しかし一般に,大規模なシステム全体の機能は,主系統だけでなくその機能の実現を支える多数の副機能によって実現される.例えば,高圧蒸気を循環させるシステムにおける逃がし弁は,蒸気の圧力が主機能を阻害しない範囲内にあるときは全く機能しないが,蒸気圧が異常になったときのみ他の部品が破壊されて機能不全に陥ることを防止するために機能する.本章で述べた枠組みによって,システムにおける主要な機能系統を同定し,主系統の機能がどのような順で実現されるかを説明することができるようになった.しかし,主系統を構成する個々の機能や,その他,主系統に現れないような機能について,本枠組みではそれらがそこに存在していることしか説明できず,存在の意義を述べることはできない.筆者は,個々の機能の存在意義というものは,その機能と他の機能の関係によって説明できるものであると考えた.そして,前述の欠点を解消し,システムを構成する個々の機能についてその存在意義を説明することができるような説明生成器を実現するために,機能間の関係を一般的に分類し,さらに機能間の関係を同定するための枠組みを概念設計した.次章ではその枠組みを説明する.

第 4 章

機能依存関係の導出

4.1 緒言

大規模システム全体の機能は, そのシステムを構成する部品の機能によって実現される. 前章ではシステム全体の主機能がどのような機能の系列によって実現されるかを導出する枠組みを述べた. 本章ではこれをさらに, **FBRL** 表現されたシステムのモデルから主機能系列を構成する個々の機能どうしの関係や, 主機能系列に現れない機能と主機能の関係などを導出する枠組みへと拡張する. 本章で提案するシステムをさらに発展させることによって, 個々の機能がそのシステムに存在する意味を説明するような説明生成器の実現, および, 機能理解タスクへ貢献することが期待できる.

4.2 機能間関係分類の必要性

文献 [SC86] の機能表現において機能とは望ましい状態を達成 (To Make) するものとしてのみ, 記述されていた. Anne M.Keuneke[Keu91] 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,

- 達成 (To Make)
- 維持 (To Maintain)
- 防止 (To Prevent)
- 制御 (To Control)

の 4 つに分類し, 部品のモデルにそれぞれを記述することによって, 部品が目標状態をどのような傾向をたどりながら達成するかという知識を表現することを提案している.

しかし, Keuneke による機能タイプの議論には, それをどのようなグレインサイズの機能モデルから判定するか, という視点が欠けている. 具体的に言えば, 達成, 維持の2つの機能タイプは, 部品の入口と出口でパラメータがどのように変化したか, すなわち, 1つの部品を捉えた範囲のみで規定されるものである. 例えば, ボイラーの機能タイプは, 入口で液体だった水が出口で気体になり, 相が変わったという意味で達成とされる. それに対して, 防止するという機能は, なんらかの異常状態に陥りそうになった機能や部品がその機能によって異常事態を免れることがわかって初めて認識されるものである. 例えば, ランキンサイクル構成部品の1つである過熱器は蒸気の温度を高める機能を発揮しているが, 実はもう1つ重要な役割を持っている. もし過熱器の出口, およびタービン入口で蒸気の温度が著しく低下してしまうと, 蒸気の湿り度, すなわち, 蒸気中の水滴の量が増える. 水滴が高速でタービンの羽根に衝突すると, タービンの羽根を破損してしまい, 蒸気流から回転力を生成するという機能が阻害されてしまう. この意味において, 過熱器が「動作流体を高温にする」ことを「達成」する機能は, 同時に「タービンの破損」を「防止」していると言える.

この例に見られるように, 従来の研究では振舞いがどのようにして機能として認識されるかというメカニズムを十分に検討してこなかったため, 部品単独のモデルを参照して記述できる知識と複数の部品モデルを参照しなければ記述できない機能間関係についての知識を混同していた. つまり, ある部品の機能タイプを To Prevent と記述することは, 異常状態に陥ることを防止してもらう他の部品の存在をもその部品に記述したことになり,

機能モデルの暗黙性が高くなる

機能モデルの共有性が低くなる

結果を招くと考えられる. そこで筆者らは, 機能間の関係を分類し, 関係を導出する枠組みを設計することによって, 機能間関係についての知識を部品の機能モデルに記述する必要性をなくすことを目指した. これにより, 機能モデルの明示性をさらに高めることができる.

さらに, このような機能間の関係を同定するための枠組みは, 対象の機能を理解するタスクに貢献すると考えられる. ここで対象の機能を理解するタスクとは, 多数の機能を発揮する可能性がある部品があるシステムにおいてどの機能を発揮しているのかを同定するタスクである. 一般に1つの部品が発揮しうる機能は多数あり, 部品がシステムに組み込まれたとき, そのうちの幾つかが他の部品の機能実現に対して影響を与える. ここで,

他の機能の実現に影響を与える機能とその影響を受ける機能は, 機能依存関係にあるとよぶことにする. 機能依存関係にはいくつかの種類がある. 例えば, 電源装置によって生成される電力が電球を点すのに使われる場合と, トランジスタの動作モードを切り替えるのに使われる場合とでは電力生成機能の意味合いが異なってくる. 前者の電源は電球が出す光の原材料としての電力を供給しているのに対して, 後者の電源は, トランジスタの振舞いを切り替えるためのスイッチとしての電力を供給している. このような, 機能間に認識される意味のある関係を, 機能間の照応関係と呼ぶ. **FBRL** の表現方式を拡張することによって, **FBRL** 形式で表現された対象モデルから機能間の照応関係を導出することができるようになる.

以下では, 発電プラントで一般的に用いられる熱サイクルであるランキンサイクルを例題として, 照応関係を導出する枠組みの概念設計について述べる.

4.3 部品単体の機能に関する諸定義

FBRL モデルにおいて部品の振舞いとは, エネルギー, 媒体, 等の入力物を受け取り, それに対して操作を行い, 出力物を生成する過程における部品の状態の系列であり, 言い替えれば, 入力物の属性値を操作することによって設計者の意図する出力物を生成する過程である. 部品の振舞いを導出するに十分なモデルを振舞いモデルとよび, **FBRL** では部品の入出力関係としてそれを表現する. 機能が注目する特定の属性を機能注目属性とよび, 機能注目属性の変化に対して直接的な因果関係のある属性を, 機能対象属性と呼ぶ. **FBRL** 表現において, 機能注目属性は, FT-Set の O-Focus, および,P-Focus によって表現される. 部品の振舞いや機能の知識を用いると, その部品が機能対象属性に対して意図した変化の方向性や変化の結果を導出することができる.

例として, ランキンサイクル (図 3.10) における過熱器について考える. 過熱器は, 熱源から得た熱エネルギーと水蒸気を入力すると, 熱エネルギーを水蒸気に与えることによって水蒸気を高温にして出力する. この振舞いにおける動作流体の温度変化に注目すると, 過熱器の機能は「蒸気を高温にする」と解釈できる. この機能における機能注目属性である動作流体の温度に対して直接的な因果関係のあるパラメータ, すなわち機能対象属性は, 水の温度, 水の体積, 水に加えられる圧力, 燃焼ガスの温度などである.

部品がその機能を正常に発揮するとき, 機能注目属性は増加, 減少などの変化を見せる. これを, 正常機能変化とよぶ. 例えば前述した過熱器の「加熱する」機能の機能注目

属性である動作流体の温度は機能の達成に伴って増加方向に正常機能変化する．機能対象属性の変化は正常機能変化に対して,2種類の影響を与える．1つは,正常機能変化を起こす,または,促進するような影響,もう1つは,それを妨げるような影響である．前者の影響を与えるような属性の変化を,正の相関関係にある変化,後者のそれを,負の相関関係にある変化,とよぶ．例えば,過熱器が加熱機能の結果として出力する流体の温度に対して,加熱に利用される燃焼ガスが与える影響を考えると,燃焼ガスの温度が上昇するという変化は加熱機能を促進するので,加熱機能に対して正の相関関係があるという．逆に燃焼ガス温度の下降は加熱機能を妨げるので,負の相関関係にある．簡略化のため本稿では,正の相関関係にある変化のことを正方向の変化,負の相関関係にある変化のことを負方向の変化とよぶ．

パラメータ間の因果関係,およびパラメータ値の変化がどのように波及するか,といったシミュレーションは,振舞いモデルの定性シミュレータによって行う．來村ら [來村 97] は流体を扱うプラントの挙動を定性的にシミュレートする技法を開発しており,本研究が必要とする因果解析,およびシミュレーションに適用できると考えている．よって,本研究は定性シミュレーションの技術開発を対象外としている．

4.4 依存関係:貢献・阻害

システムに組み込まれた部品の機能にはその実現を他の機能に依存するものがある．依存にはいくつかの種類があり,**FBRL** 表現された対象モデルからシステムを構成する異なる2つの部品,または機能の間に存在する依存関係を同定することができる．

システムに組み込まれた部品の機能は,他の部品の機能対象属性値に対して直接的,または間接的に様々な影響を与える．ある部品$_A$に属する機能$_1$の機能注目属性が別の部品$_B$に属する機能$_2$の機能対象属性と因果関係にあるとき,部品$_B$の機能$_2$は,その実現を部品$_A$の機能$_1$に依存しているとみなすことができるので,機能$_1$に対して依存関係にある,という．またこのとき,機能$_1$を,機能$_2$に対して機能の実現に深く関わっているものを提供しているという意味で,機能的提供者 (Functional Donor, F-DNR),機能$_2$を,機能的受領者 (Functional Recipient, F-RCP) とよぶ．

さらに機能依存関係は,貢献と阻害の2つに大きく分けることができる．上述した機能$_1$の機能注目属性を A_{F1},機能$_2$の機能対象属性で,A_{F1}と因果関係にあるものを B_{F2}とする．機能$_1$による A_{F1}の変化が,機能$_2$と正の相関関係にある変化を B_{F2}に起こすとき,機能$_1$は機能$_2$に対して貢献しているという．逆に,負の相関関係にある変化を B_{F2}に対して起

こせば, 機能$_1$は機能$_2$に対して阻害しているという.

また, 貢献関係, 阻害関係は, 推移律を満たす. すなわち, 機能$_1$が機能$_2$に対して貢献 (阻害) しているとき, 機能$_x$が機能$_1$に対して貢献 (阻害) しているならば, 機能$_x$は機能$_2$に対して貢献 (阻害) しているという.

4.4.1 貢献関係の導出方式

本節では定性シミュレータと連動して貢献関係を導出するモジュール,**CPF**(Contributive-Path Finder) について述べる. 図 4.1に, そのブロック図を示す.

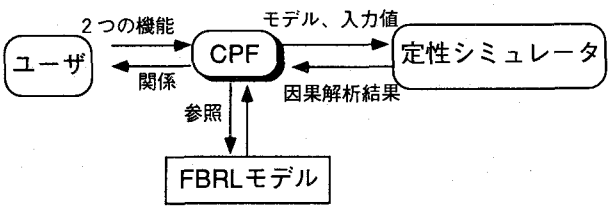


図 4.1: Contributive-Path Finder

CPF は,

システム全体のモデル

関係を判定したい 2 つの機能の指定

を入力すると, 機能モデル表現の参照, および, 必要に応じた振舞いモデル上でのシミュレーションを実行し, 2 つの機能モデル間にある依存関係を判定する. 例題として, ランキンサイクルのモデルを与え, かつ,2 つの機能

過熱器の機能「蒸気を高温にする」

タービンの機能「回転力を生成する」(第 3章図 3.12参照)

の依存関係を判定することを要求した場合にシステムがどのような導出過程をたどるかを示し, 貢献関係の導出方式を説明する.

はじめに **CPF** は, 2 つのうち一方の機能について機能注目属性と操作対象量を同定する. タービンの「回転力を生成する」機能は, タービンモデルの FT-Set1 で表現されている. 機能注目属性は, タービンの振舞いモデル, および O-Focus と P-Focus の記述より,

Obj$_9$. 角速度

すなわち, シャフトの角速度であることが分かる. 次に, 定性シミュレータを用いて, タービンの状態を表現するパラメータのうち機能注目属性と因果関係にある属性, すなわち機能対象属性を, QN-Relations に記述されている振舞いの式から導出する. 図 3.12に示さ

れるように, タービンモデルの振舞いの式には, パラメータ Obj_9. 角速度 を引数にするものがない. ユーザが振舞いモデルを記述するときには, エネルギーの観点から記述する場合と媒体のパラメータで記述する場合の両方が考えられるので, 次は Obj_9. 角速度 によって表現される回転エネルギー, すなわち

Obj_8.Amount

つまり, 角速度によって表現される回転エネルギーを機能注目属性と考えて, 因果解析を行う. 流体系プラントのモデル上で定性的推論の技法を用いてパラメータ間の因果解析を行う手法は, 來村 [來村 97] らによって確立されている. 我々が用いたタービンモデルに関しては, その **QN-Relations** スロットに記述された制約式から, 次のような因果関係が導出される.

Obj8.Amount:Obj2.Amount の影響をうける

Obj2.Amount:Obj8.Amount に影響を与える

Obj3.Temp:Obj2.Amount に影響を与える

Obj3.Pressure:Obj2.Amount に影響を与える

Obj3.Phase:Obj2.Amount に影響を与える

Obj2 の熱エネルギー量が Obj8 の回転エネルギー量を決定する. さらに, Obj3 で表される水蒸気が熱エネルギーを運ぶ媒体であり, その温度, 圧力, 相が入力される熱エネルギー量を決定する.

これらの因果情報から, 機能対象属性は, 次の 5 つであることが導出される.

Obj8.Amount(機能注目属性)

Obj2.Amount(機能注目属性に影響を与える)

Obj3.Temp(Obj2.Amount に影響を与える)

Obj3.Pressure(Obj2.Amount に影響を与える)

Obj3.Phase(Obj2.Amount に影響を与える)

次に **CPF** は, タービンの FT-set1 が,Obj8.Amount を増やすことと減らすことのどちらを意図しているのかを判定する. 機能注目属性 F_aとそれによって表現される対象物 Objo について, 次のルールに従って判定する.

IF Objoがどの入力媒体とも不連続

THEN F_aを増やすことを機能が意図する

Else 連続している入力媒体の機能注目属性と同じ属性 F_{a2}について,

($F_a > F_{a2}$) ならば F_aを増やす意図

($F_a = F_{a2}$) ならば F_aを保持する意図

($F_a < F_{a2}$) ならば F_aを減らす意図

ENDIF

タービンが注目しているシャフトと入力媒体である蒸気は, MP-Relations の記述から不連続であることが導出されるので, 条件節の 1 番目に該当する. すなわち, タービンの「生成する」機能は, 機能注目属性である角速度を増やすことを意図した機能であることが分かる.

次に **CPF** は, 過熱器の機能モデルを参照する. 過熱器の「蒸気を高温にする」機能は, 次の FT-set で表現されている.

FT-set1:

O-Focus: 温度

P-Focus: ((In1)(Out1))

FuncType達成

Necessity:NIL

CPF は定性シミュレータと連動してタービンの時と同様の推論を行い, 過熱器が, 蒸気の温度を入力時よりも高めることを意図した機能であることを導出する.

次に **CPF** は, 定性シミュレータによって過熱器の機能注目属性である蒸気の温度がタービンのどの機能対象属性と因果関係にあるかを導出する. 定性シミュレータは, 部品の振舞いモデルに加えて部品の接続関係を参照し, 2 つの機能間の因果関係を導出する. 過熱器とタービンの場合, 過熱器が出力する蒸気の温度がタービンの機能対象属性の 1 つである入力蒸気の温度に影響を与えることが導出される.

CPF は, 2 つの機能間に因果関係があることを推論すると, 因果的上流にある機能を機能的提供者, 下流にある機能を機能的受領者と認識する. そのうえで, 機能的提供者が機能しなくなることによって機能的受領者に何が起きるかを定性シミュレータに推論させる. タービンの例と同様に過熱器に関するシミュレーションを行うと, 過熱器の機能は蒸気の温度を高めて出力することであることが分かる. よって, 過熱器の機能が全く発揮されない状態では, 過熱器出口の蒸気温度, およびその影響を受けるタービン入口の蒸気温度が異常に低くなることが導出される. この状態でタービンの機能が発揮されるかどうかを検証するため, 定性シミュレータに

タービンの振舞いモデル

初期値:入口蒸気温度低下

を与え, シミュレーションを行う. その結果, タービンの出力回転数が正常時より低くなることがわかる. つまり, 過熱器の機能が無ければタービンの機能は異常になる. ここから **CPF** は, 過熱器の蒸気を高温にする機能はタービンの機能に対して正の相関関係にあり, 貢献の関係にあると判定する.

4.5 貢献関係の分類

貢献という概念は, F-RCP が操作することを意図して注目している属性に対して F-DNR が貢献しているのか, 違う属性に対して貢献しているのか, という観点から操作対象量貢献, 補助量貢献, の 2 つに分類することができる. また, 機能や振舞いの決定に対して特殊な意味を持つパラメータに対する貢献と, そうでないパラメータに対する貢献という観点から見ると, 貢献の特殊形として防止貢献, 可能貢献, 効率貢献の 3 つを考えることができる.

つまり,2 つの機能を入力として与えられたとき, その照応関係を同定する手順は次の通りである.

Step1: 2 つの機能間に貢献関係があるか判定する

Step2: 貢献関係があれば, 機能的提供者が貢献しているパラメータの性質を調べる.

Step3: Step4.5の結果に応じて, どの貢献関係か判定する

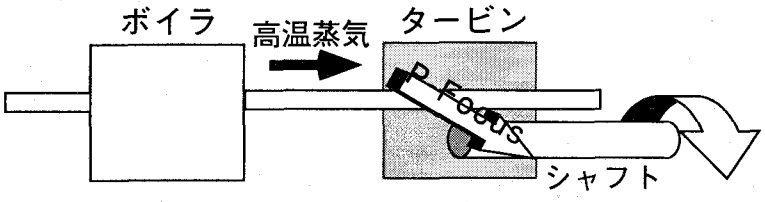
次節以降, 我々が分類した 5 つの貢献について, その定義と判定方式を説明する.

4.5.1 操作対象量貢献

機能注目属性と因果関係にある属性, すなわち機能対象属性には, 機能がそれを操作することを意図したものとそうでないものがある. 前者に対して機能の操作は, 特に注目していると考えられる. 機能が注目する属性は **FBRL** の P-Focus, および O-Focus の記述で表現されている. FBRL 表現において, 次のいずれかの条件を満たす属性を, 機能操作対象属性とよぶ.

- 機能注目属性
- 機能対象属性のうち,P-Focus が当たっているポートに存在するもの.

機能$_1$が別の機能$_2$に対して操作対象量貢献するとは, 機能$_1$が機能$_2$の機能注目属性に対して機能操作対象属性を介して貢献することをいう.



シャフトの回転数∝蒸気の温度、蒸気の質量、etc.

図 4.2: ボイラのタービンに対する操作対象量貢献

例えば, 図 4.2に示すランキンサイクルのタービンがシャフトを回す機能とボイラ本体の「蒸気を加熱する」機能について, 4.4.1節で示した方式にしたがって, 貢献関係が導出される. この貢献において, タービンの機能対象属性のうち, ボイラが直接的に影響を与えているのは, In1 ポートからの入力動作流体の温度である. さらにタービン FT-Set 記述中の **P-Focus**

P-Focus:((In1)(Out2)) より,In1 ポートは P-Focus の対象であり, 入力動作流体の温度は機能操作対象量の 1 つであることが分かる. よって, ボイラーはタービンに対して操作対象量貢献していることが導出される.

4.5.2 補助量貢献

機能が注目し意図的に操作しようとしている属性が機能操作対象属性であり, その他の機能対象属性, すなわち, 機能注目属性と因果関係にあるが P-Focus の当たらないポートに存在する属性は, 機能を実現するための補助的な役割を果たしていると見なすことができるので, これを補助量とよぶ.

機能$_1$と機能$_2$が次の条件を満たすとき, 機能$_1$は機能$_2$に対して補助量貢献している, という.

- 機能$_1$が機能$_2$の補助量に対して貢献している.

図 4.3に示すように燃焼室から出力される燃焼ガスの温度はボイラ本体の流体を温める機能に貢献しているが, 燃焼室がボイラの入口側で貢献しているパラメータは P-Focus の当たらないポートにある補助量である. よって, 燃焼室の熱エネルギーを生成する機能はボイラの流体を温める機能に対して補助量貢献している, という.

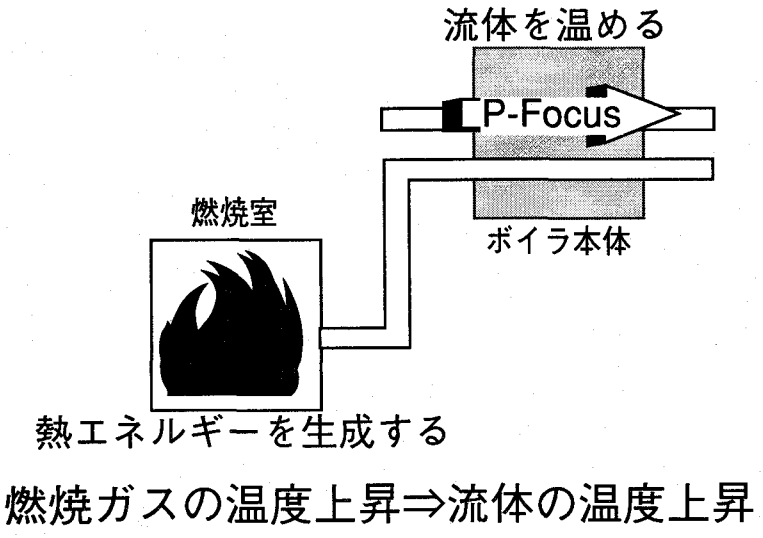


図 4.3: 燃焼室のボイラに対する補助量貢献

4.5.3 防止貢献

部品には, 入力が特定の閾値を越えてしまうと, 破損などの異常状態に陥ってしまうものがある. そのような異常状態を防ぐために, システムには特定の部品が異常状態に陥ることを防止する機能が組み込まれている場合がある. ある部品$_A$に入力されるパラメータ P が値 X_{TH}以上になることによって, 部品$_A$がなんらかの異常状態に陥ってしまうとき, 次の条件を全て満たす機能$_1$は, 部品$_A$に対して防止貢献しているという.

- 機能$_1$の機能注目属性は,P と因果関係にある.
- 機能$_1$は, その機能注目属性を減少方向に変化させて出力する.

もし部品$_A$が, パラメータ P が値 X_{TH}以下になったときに破損するのであれば,3 番目の条件の「減少方向」は「増加方向」に変わる.

例えばランキンサイクル中のタービンは, 回転力生成の原料としてある温度以下の蒸気を受け取った場合, タービン羽根に当たる蒸気中の水滴が増加し, それによって破損してしまう (図 4.4). タービン羽根破損の条件はタービンモデルの IW に,

IW:IF 入力蒸気.Temp < 閾値 THEN 羽根破損

のように記述されている. ボイラーと過熱器の動作流体を高温にする機能は, それぞれ動作流体の温度を増加方向に変化させており, かつ, タービン入口の蒸気温度に対して因果関係にあることが振舞いのシミュレーションによって導出できる. よって, ボイラ, 過熱器の流体を温める機能はともにタービンに対して防止貢献していることが同定できる.

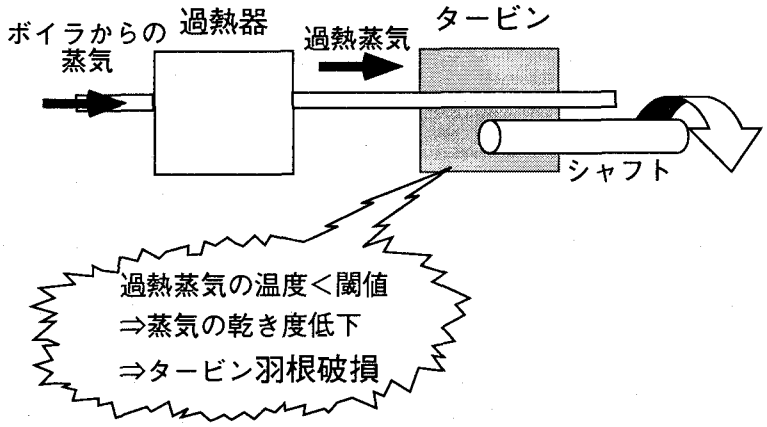


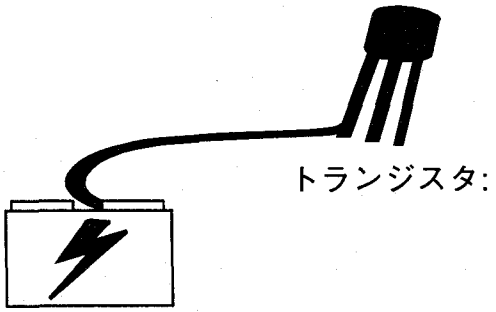
図 4.4: 過熱器のタービンに対する防止貢献

4.5.4 可能貢献

部品の機能には, 入力属性が特定の値になったとき初めて発揮されるものもある. 部品の振舞いを切り替えて特定の機能を発揮させる, いわばスイッチの性質を持った機能対象属性に関して依存関係にある 2 つの機能間の関係を, 可能貢献関係とよぶ.

ある部品$_A$に入力されるパラメータ P の値が Y_{TH}以上になることによって部品$_A$の振舞いモードが切り替わり, 機能$_2$を発揮することができるようになるとする. このとき, 次の条件を満たす機能$_1$は, 機能$_2$に対して可能貢献しているという.

- 機能$_1$の機能注目属性は,P とクラスが同じである.
- 機能$_1$の機能注目属性は,P と正の相関関係にある.



ModeChangeCond:バイアス電圧が閾値を越える⇒増幅モード

図 4.5: 電源のトランジスタに対する可能貢献

トランジスタを, その入力の 1 つであるバイアス電圧がある閾値 Hi 以上の時に電流を増幅し, それ未満のときには動作しない, 2 値的に振舞いが切り替わる部品としてモデル化した場合を考える. モデル表現としては, トランジスタの振舞い切り替え条件である

ModeChangeCond スロットに,

IF バイアス電圧入力 > 閾値 **THEN** 増幅モード

という式を記述しておく. この記述から, バイアス電圧入力がトランジスタの振舞いを切り替えるスイッチの役割を果たしていることが同定でき, その値変化によって初めてトランジスタの増幅機能を発揮させることが可能となる. このとき, 電源回路の「電力を生成する」機能は, バイアス電圧に対して貢献しており, トランジスタの増幅機能に対して可能貢献している.

4.5.5 効率貢献

システムが持つ機能には, それが存在しなくてもシステムを正常動作させることは可能であるが, 存在することによって別の部品の機能の効率を高めることができるものがある.

ある部品$_A$に入力されるパラメータ P の値が Y_{TH}以上になることによって部品$_A$の機能$_2$がより効率よく発揮されるようになるとする. このとき, 次の条件を満たす機能$_1$は, 機能$_2$に対して効率貢献しているという.

- 機能$_1$の機能注目属性は,P に対して因果関係にある
- 機能$_1$は, その機能注目属性を増加方向に変化させて出力する.

なお, もし部品$_A$の機能$_2$が, パラメータ P の値が Y_{TH}以上になったときに発揮されるのであれば, 2 つめの条件文中の「増加方向」は,「減少方向」に変わる.

効率という概念は非常に多岐にわたっており, 一般的に定義することが難しい. そこで, どのパラメータが効率を決定するかという情報をあらかじめモデルに記述しておく. そのパラメータに対する貢献が認識されれば効率貢献と見なす.

4.5.6 ランキンサイクルにおける機能依存関係

ランキンサイクルの **FBRL** モデルについて各機能間の依存関係をハンドシミュレーションによって導出したものを図 4.6に示す. 本章で説明に用いた例題は, これらの一部である.

効率貢献関係については「効率を高める」という概念が一義的に定義できていないため, どれが効率を高めるパラメータであるかという判断はモデル記述者に委ねているのが現状である. 今後の課題としては, 効率を高めるという概念を分析し定式化すること, および, 他のモデルに適用し実験することによって導出枠組みをさらに検証し洗練すること

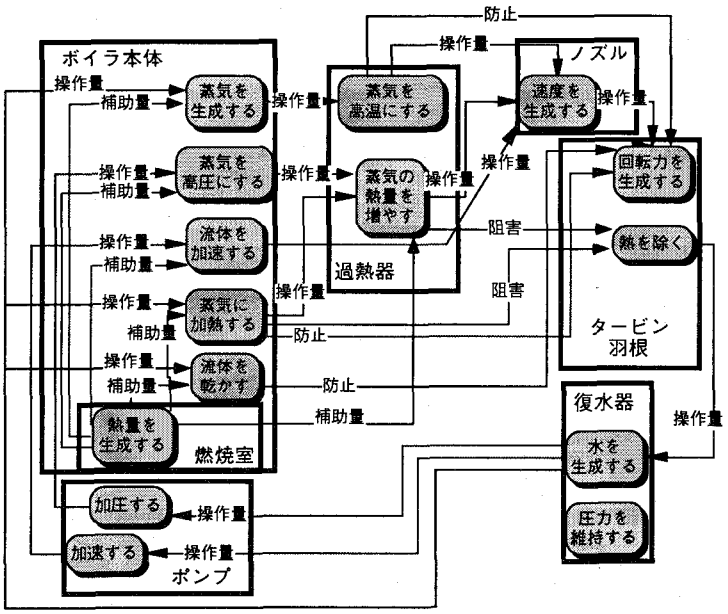


図 4.6: ランキンサイクルにおける機能間依存関係

があげられる.

4.6 結言

本章では, 従来の機能モデル研究で曖昧に扱われてきた機能間の関係を新たに分類した. そのうえで, **FBRL** モデルに基づく機能間依存関係同定の枠組みを述べた. 依存関係導出モジュール **CPF** は, システムの機能モデル, および関係を判定する 2 つの機能を指定すると, まず 2 つの機能について,**FBRL** モデルを参照しながら機能が注目し, 操作する属性を導出する. 次に, 定性シミュレータと連動して 2 つの機能間の因果関係を判定する. 因果関係があれば, さらに定性シミュレーションを用いて 2 つの機能間に正の相関関係があるかどうか, すなわち, 貢献関係の有無を判定する. 最後に, 貢献関係を仲介するパラメータの性質を **FBRL** 記述から判定し, どの貢献関係にあるかを同定する. 機能間関係についてさらに分析をすすめることによって, 本研究は再設計タスクの中核を成す, 機能理解タスクへと発展させることができると考えている [来村 96].

次章では, 関連研究との比較によって本研究の位置づけを行う.

第 5 章

関連研究

5.1 緒言

本章では, 機能概念を分析し捉える試み, および, 捉えた概念を計算機上に構築し問題解決に活用する試みの代表的なものをいくつか紹介し, これら関連研究との比較を通して本研究の位置づけを行う.

5.2 動詞を分析・分類する試み

本研究では機能の概念を捉え, それを機能語彙と呼ぶ動詞によって表現する枠組みを提案した. 我々は機能の概念を捉えるためにまず機能と振舞いの領域で使用される概念の分析を行った. その結果, 機能モデル表現言語 FBRL は表現できる意味について, リッチな言語になっている. 機能概念を捉えることと動詞の意味を解析することは本研究と深く関わっていると言える.

5.2.1 国語研究の分野における動詞の意味分析

動詞の意味・用法の記述的研究 [国立 82] は, 動詞の使用例とその意味を分類・分析し, 個々の動詞が持つ意味を捉えることを目指した研究の報告書である.

[国立 82] は, 次の 3 つの理由から, 既存の辞書や辞典を学問的な意味記述としては不完全であると批判している.

1. 実用性を重視するため,1 単語に対する意味の記述量が少ない. 結果として, 曖昧な意味を排除し, 意味を 1 面的に述べる傾向に陥っている.
2. 単語の意味が断定的に述べられているのみで, その意味を同定するに至った過程が

記述されていない.

3. 見出し語が50音順やアルファベット順など, 意味とは関係ない順に並べられている. そのため, 単語が実際に使用される場面で, 周りの語彙からどのような意味的制約を受けるかが不明確である.

これらの, いわば辞書が持つ欠点を克服するために, 次の3つの方針に基づいて動詞の意味記述を行っている.

1. 記述は詳しい説明でなければならない.
   例えば, 辞書では語彙の用法について肯定的な説明のみに留まっているが, 否定的な意味の記述もする. また, 中心的な用法のみでなく, 周辺的な用法も含めるように説明する.
2. 意味だけでなく, その意味を同定するに至った過程も示す.
   言語の意味や用法が現象として形を成すのは言語的活動が行われたときである. よって, 言語の意味や用法を同定する過程は, 言語活動の1つである書籍での用例を比較し検討する過程であり, それを示す.
3. 言語の意味的な体系を記述する.
   単語同士の意味の比較を集めることで, さらに多くの単語同士の意味の体系ができあがる.

さらに, 意味記述の土台となる動詞の分析においては, 次の3つの方針を取っている

1. 成分分析をしない
   ある単語の意味について成分分析をするとは, その単語をその特徴を表す意味素に分解し尽し, 成分を再構成したものを単語の意味と捉えることである. 概念に対する意味の表現形式を固定的にしてしまうと, 表現しきれない意味が常に漏れてしまう.
2. 分析の対象範囲を限定しない
   (1) 文学作品:52作 (8047ページ), (2) 科学説明文・論文:24作 (1409ページ), (3) 現代雑誌90誌 (1956年1月号から12月号まで), (4) 総合雑誌13誌 (1953年7月号から1954年6月号まで).
   (1) と (2) から, 用例約30万.(3) から約10万,(4) から約5万.
3. トップダウン的な分析をしない.
   動詞のトップダウン的な分析手法とは, 動詞のトップレベルに抽象的なの意味カテ

ゴリーを設定し, それを徐々に細分化して詳細な意味カテゴリーを作ることを言う. しかし, トップレベル付近にある抽象レベルの高い語彙については実際の用例が少なく, 用例の比較によって対立や特徴を見いだすことが難しいので, 本研究の手法に合わない.

以上の方針に基づいて, 見出し語 2008, 接尾語の見出し語 16 について意味・用法の分析を行っている.

以上述べたように, 研究の方針としては我々と同様に対象領域の分析を重視しているが, 研究目的が大きく異なるために分析の手法とその結果が違っている. [国立 82] は, あらゆる文章執筆者が動詞によって意図を曖昧さ無く読者に伝えることを支援する, 一種の意味辞書を目指している. これに対して我々の研究を含むドメインオントロジー研究は, 人間と人間の間のみならず, 人間と計算機の間でも概念とその意味を共有することを目指している. 計算機上に概念とその意味を表現するにはそれらを成分分析し形式的にモデル表現することが必要である. モデルは所詮, 概念の近似でしかなく, この点に対する [国立 82] の批判は上述した通りである. しかし我々の研究目的に対しては, 本質的な意味だけをモデル表現できれば十分であり, 周辺的なものまで捉える必要性は無いと考えている. ここで, 人間がある概念を他人と共有することを目的として言語活動を行う場合を考える. その言語活動において, 人間は自分が他人に伝えようとする概念をもっとも良く表現する意味を持った単語を利用するのだが, その単語を選択する場合に人間が考慮する意味とは, その単語の本質的な意味であると考えて差し支えないと思われる. なぜなら, 周辺的な意味を想定して単語を選択し利用することは, 意味を他人へ伝達する際に誤解を招く可能性が高いからである. 成分分析手法を批判する一方で国立国語研究所は, 「定義的なかたちで, 意味の本質的な部分は説明できる. ([国立 82],p.4)」という見解も示している. つまり, 成分分析でも本質的な意味に限って言えばそれを表現する形式を定義することは可能であると考えられ, 我々の目的に対しては, 成分分析手法とそれを反映した形式的な意味表現が十分有効であると考えられる.

5.2.2 価値工学における機能用語の選定

文献 [日本 81] は, 設計物の機能的価値を評価する価値工学 (Value Engineering,VE) を実践する人が機能を表現するための語彙, すなわち, 機能用語を選定し, 分類してまとめたものである. VE とは,「最低のライフサイクルコストで必要な機能を確実に達成するために製品, またはサービスの機能的研究に注ぐ組織的な努力である.」と定義されている.

より具体的には, 次の2つの技術に基づいて製品やサービスの改善を行う.

1. VE の対象物が有する機能に着目して, そこに焦点を当てた発想を行うことによって, 改善案を出す.
2. VE の対象物が有する機能の目的に焦点を当てた発想を行うことによって, 改善案を出す.

改善の過程において重要なのは, その過程に関わってアイデアを出すメンバー全員が対象の機能を正しく理解し共有することであって, その支援をすべく本報告書で選定されたのがのべ158の機能用語である. 機能用語はそれが表現する意味に応じてAグループからHグループまでの8つに分類されている. この用語集について特筆すべきは, 機能改善の過程においてはVEの対象である各機能にたいしてそれを拡大・発展させるような考え方を促すことが必要であるとの立場に立って, 各用語の具体的な意味を定義されていないという点である. しかし,

1. 語彙に対する具体的定義なしで各部品の機能をメンバーが共有できたと言えるのか?
2. 基本となる機能の意味記述なしで「機能の発展」が評価できるのか?

といった問題点があげられる. また,VE用語表を, 計算機上でVE情報を処理する場合のシソーラスとして活用することを研究の目的の1つに掲げているが, 各語彙の意味を形式的に表現しない限り, 単なる語彙集にとどまってしまうと考えられる.

FBRLの語彙ライブラリは抽象的な概念から具体的な概念までを取り込んでおり, それぞれの語彙について形式的な意味表現を与えている. 表現する対象の範囲は流体を対象とする人工物の機能と振舞いであり, VE用語の対象とする範囲より狭いが, その範囲に限って言えば, 機能語彙のみを用いれば上述の「VE実践者によるアイデアの発展」を実現することができ, また, 計算機上でのライブラリ実現もより容易であると言える. さらに, 各概念が形式的に表現されているので, 計算機を利用した「より抽象的な概念」「より具体的な概念」の検索も実現可能である.

5.3 機能モデルを利用した問題解決への取り組み

我々の研究は, 計算機上に機能モデルを構築し, それを利用することによって計算機が行う問題解決をより知的なものにする試みであると捉えることができる. 本節では機能モデルを問題解決に応用するいくつかの代表的研究と本研究を比較する.

5.3.1 How Circuits Work

[de 84] において de Kleer は電子回路上で行なうシミュレーションの曖昧さを減らすために系全体の機能を推論したものを利用する方式を提案している．この方式においては, 部品は「因果関係によって記述される複数の入出力関係を持つもの」と捉えられており部品の機能は「入出力関係の 1 つを選択することによって決定されるもの」とされている．振舞いモデルから機能概念へのマップを実現するために, de Kleer は部品の因果性を持つ入出力関係を全て数えあげて, それらの 1 つ 1 つに機能概念のラベルを付けた振舞いと機能の対応表を作る方式を提案している．この方式では, 振舞いを機能概念にマップするメカニズムが暗黙的であり, 機能と振舞いの差分を明示的に区別するものではない．

5.3.2 Functional Representation とその応用

文献 [CGI93] [IFVC93] [SC86] [VIFC93] 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み合わ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は重要であると考えられる．しかし, 第1章で述べた通り, 彼らの枠組みではあるグレイン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ンサイズでは機能モデルとして捉えられる．つまり機能と振舞いの 2 つの概念は相対的であり, 振舞いと機能の本質的な差を見いだしてはいない．

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ン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, 接続して出来るものはグレイン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** の方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．これは第 6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われる．

文献 [SC86] 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[Keu91] 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4つに分類した. Keunekeはある機能として振舞いが解釈される時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1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2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.

彼女の機能の分類はB.Chandrasekaranらの設計原理を記述するための機能表現の枠組にも採用されている [CGI93]. [SC86] を拡張した [CGI93] では機能表現の枠組が様々のタスク, 特に設計と診断の支援に活用できることを示している. 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3つの階層に分けて記述する方式を提案している [AHBJ91]. 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4つのFTの組み合わせによって表現できる. 一方, 文献 [AHBJ91] 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, 我々の研究の方が, 完備性は言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言える.

また,M.Pegahらは,[SC86] の機能表現の枠組を大規模な系であるF/A-18の燃料系統に適用し, 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 [PSB93]. 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**[KSIM94] に機能記述の方式を適用している.

5.3.3 知的CADへの応用

人工物の設計において一般的に用いられるCADをより知的なものにするための研究が吉川らのグループによって成されている [YTKU94][桐山 94][UTYS94][吉岡 95].

設計物が仕様通りに動作するかどうかを設計の上流過程, すなわちより概念設計に近い段階で検証する技術を確立することは設計の効率を高めることに貢献すると考えられ

る. 概念レベルの設計は機能モデルを組み合わせる過程として捉えることができ, 設計対象の機能は FBS(Function-Behavior-State) モデラと呼ばれる枠組みによって, 機能とそれを実現する部品の振舞いを組み合わせとしてモデル化される. FBS モデルは概念設計段階にある設計物の挙動シミュレーションと評価 [YTKU94], 概念レベルから設計物の実現までを統合的に管理し扱う枠組み [吉岡 95], さらに対象の機能情報を用いて故障診断および自己修復を行うシステム [UTYS94] 等に適用されている.

FBS モデルは, 機能とは部品の状態を表現するパラメータの一部によって表現されるものとしているが, 機能とパラメータをマップするメカニズムは暗黙的であり, 機能と振舞いは明示的に区別されていない. 記述されたモデルの再利用性という観点から考えると, 振舞いレベルの知識についてはフィジカル・フィーチャー・データベース [桐山 94] によってライブラリ化され, 十分に再利用性を高められているが, 設計物の機能モデルを再利用する場合についてはマップの暗黙性がボトルネックになると考えられる.

5.3.4 機能モデルの説明生成への応用

説明機能に関しては W.Swartout らが設計タスクを行な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, などを挙げて, 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を構築している [SPM91]. 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 and Patrice O.Gautier[GG93] ら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言うまでもないが, 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 [SKIM95] 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.

5.4 結言

本章では,(1) 機能を表現する概念を分類する試み (2) 機能モデルを問題解決に適用する試み, 以上,2 つの観点から関連研究と本研究を比較した. 本研究は表現できる概念とその体系化において他の研究とは一線を画したと考えているが, その大きな要因として対象領域を限定的にしたことがあげられる. 対象領域を限定的にしなければドメインに関する

分析は無限になってしまい, 有限時間内での成分分析は不可能に近くなると考えられる. また成分分析が不十分なままに機能モデル表現を行うと, どうしても振舞いレベルの知識と機能レベルの知識をマップするメカニズムが暗黙的になってしまい, 機能モデルの再利用性を低くしてしまう. 筆者らはこれらの点に留意して **FBRL** を開発し, 結果として計算機上で操作可能な概念表現とその体系化を実現することができたと考えている.

次章では, 本研究を総括し, 今後の展望を述べる.

第 6 章

結論

本章では, 本研究を総括し, 展望を述べる.

第 2 章では, 本研究の最も重要な成果である機能モデル表現言語 **FBRL** について述べた. 既存の機能モデル表現方式と異なる概念定義, すなわち振舞いを解釈した結果が機能であるという考えに基づき, **FBRL** は対象の機能モデルを, 入出力関係として表現される振舞いモデルに 4 つの視点から捉えた解釈情報である FT-set を加えたものとして表現する. さらに **FBRL** の設計においては, 特定のタスクやドメインに依存しないプリミティブを収集したため,**FBRL** は様々なドメインにおける対象を様々な抽象度で記述することができる性質を持つ. この性質によって, 一般的な機能概念を収集した **FBRL** 機能語彙ライブラリを構築することができた. ライブラリは媒体機能語彙 64 単語, エネルギー機能語彙 36 単語から構成されており, 各機能語彙は全て **FBRL** 記述によって規定されている. **FBRL** の各プリミティブ, および機能語彙ライブラリは, その十分性を主張できる性質のものではないが, 有用性については,

プリミティブの組み合わせ, 修正によるモデル構築の簡単化

説明生成タスクへの貢献 (第 3章)

機能依存関係導出の実現 (第 4章)

などにより示されたと考えている.

第 3章では, **FBRL** が説明タスクに貢献することを示すために **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, 本章では, 本研究の重要な成果の 1 つである機能語彙ライブラリについて説明した. さらに, 機能語彙ライブラリを利用することによって, ユーザにとってより分かりやすい説明生成を実現する枠組みを述べた. 振舞いの知識のみでなく, 機能を表現する知識も援用することによって, システムにおける主たる経路をたどるような説明をはじめ, 機能レベルの知識を活用した様々な説明を生成するこ

とが可能になる. 設計した説明生成システムのプロトタイプは UNIX workstation 上で言語 Common Lisp によって実装されている.

第4章では, 従来の機能モデル研究で曖昧に扱われてきた機能間の関係を新たに分類した. そのうえで, **FBRL** モデルに基づく機能間依存関係同定の枠組みを述べ, 依存関係導出モジュール **CPF** を設計した. **CPF** は, システムの機能モデル, および関係を判定する2つの機能を指定すると, 定性シミュレータと連動して, 2つの機能間に正の相関関係があるかどうか, すなわち, 貢献関係の有無を判定する. 次に, 貢献関係を仲介するパラメータの性質を **FBRL** 記述から判定し, 我々が分類した5つの貢献関係のどれに該当するかを同定する. **CPF** をランキンサイクルに適用することによって, ランキンサイクル中の各機能間にある依存関係を導出することができた. **CPF** に関する今後の課題としては, ランキンサイクル以外の例題への適用による一般化が挙げられる.

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「分かる」ことを目的として考察を進め, 振舞いを解釈するための4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「分かる」ことが本質的に貢献するもう1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が現在進行している.

機能理解は2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み合わ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, その上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, もっとも意味のある機能, 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

るための公理系を作り, 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. この他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り替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

本研究の全過程を通じて，直接懇切なる御指導，御鞭達を賜わりました大阪大学産業科学研究所 溝口理一郎教授に衷心より深謝いたします.

本研究に関して貴重な御教示を頂きました大阪大学基礎工学部情報工学科 首藤勝教授，ならびに大阪大学産業科学研究所 豊田順一教授，北橋忠宏教授に心から感謝いたします.

大学院の全課程において御指導と御教授を賜わりました大阪大学基礎工学部情報工学科藤井護教授, 柏原敏伸教授，今井正治教授, 菊野亨教授，西川清史教授，谷口健一教授，都倉信樹教授，萩原兼一教授, 井上克郎教授, 田村進一教授, 橋本昭洋教授, 宮原秀夫教授に厚く御礼申し上げます.

本研究の全般にわたり貴重な御討論，御助言を頂きました大阪大学産業科学研究所 山下洋一講師，池田満助手に深く感謝いたします.

本研究の遂行にあたり終始有益な御助言と御鞭撻を頂きました大阪大学産業科学研究所 來村徳信助手に厚く感謝の意を表します.

更に，本研究の基盤となる研究成果を残された小澤稔弘氏 (NTT データ通信勤務), 平井賢仁氏 (NTT データ通信勤務)，説明生成研究においてシステムの設計, 実現に多大な功績を残された三谷重則氏 (新明和勤務), ならびに熱心な御討論と様々な面での御助力を頂いた溝口研 KC/D チームの皆様には大変感謝いたします.

また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頂いたことを深く感謝致します.

活発な御討論を頂いた溝口研究室の諸氏，そして，種々の面で御世話になりました溝口研究室秘書の藤原先代氏に深く感謝します.

最後に，終始あたたかく見守り叱咤激励してくれた両親と物心両面から支援してくれた丹田雅子さんに感謝申し上げます.

付録 A

媒体機能語彙ライブラリ

本章は, 本研究を通じて筆者が構築した 2 つのライブラリのうち, 本文中で説明しなかった媒体機能語彙ライブラリについて述べる.

図 A.1と図 A.2に, 媒体機能語彙ライブラリの概念間関係図を示す. なお, 紙面の都合上ライブラリを 2 つの図に分割したが, 両方の図に現れる「媒体機能語彙」のラベルで表現されるノードは共通の概念であり, ライブラリとしては 1 つである.

媒体機能語彙は, 図 A.3,A.4に示す A 軸から M 軸まで 13 の軸によって定義される. また,FBRL モデルが満たす条件と各軸がとる値の関係を図 A.5,A.5に示す.

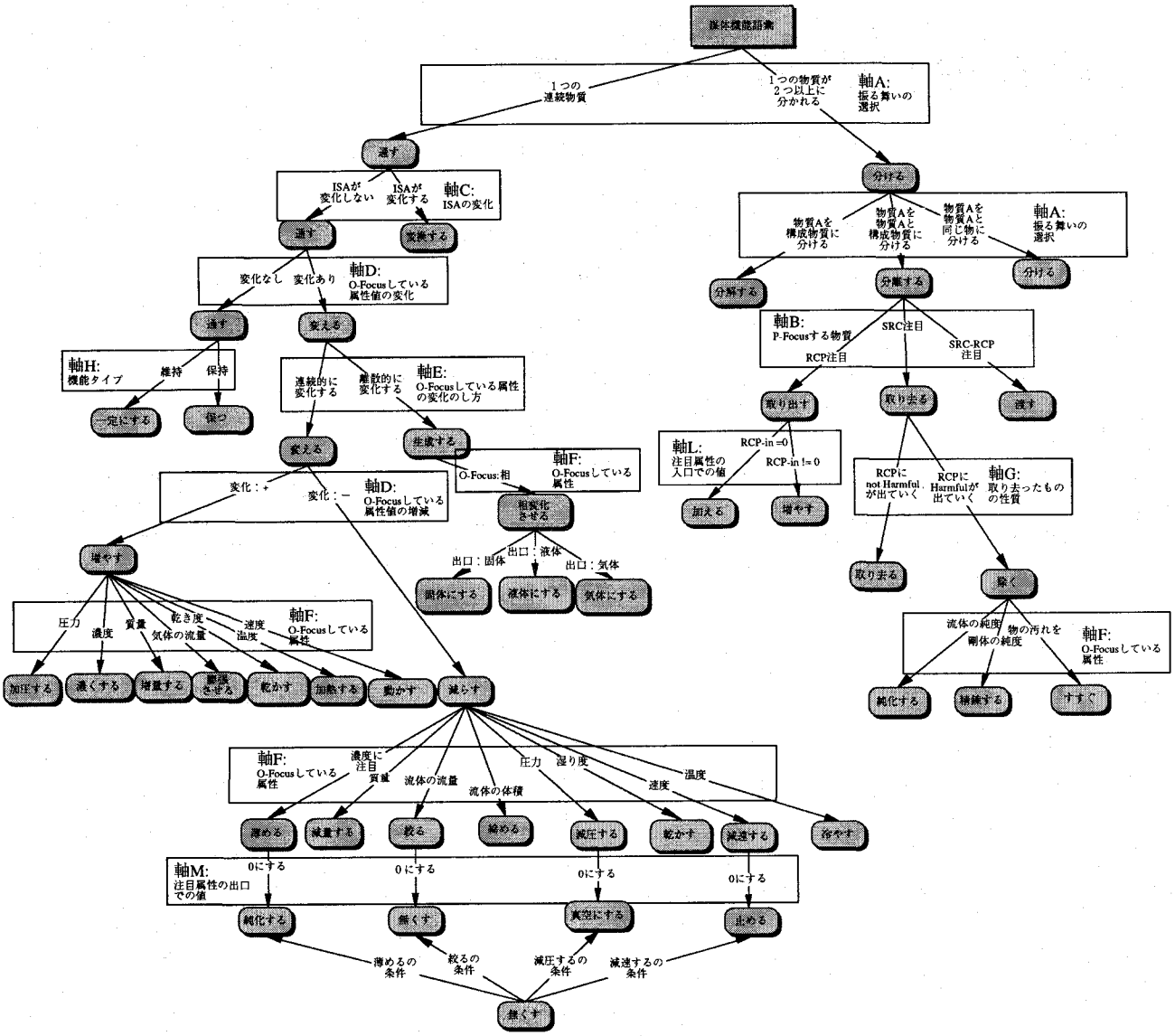


図 A.1: 媒体機能語彙ライブラリ 1

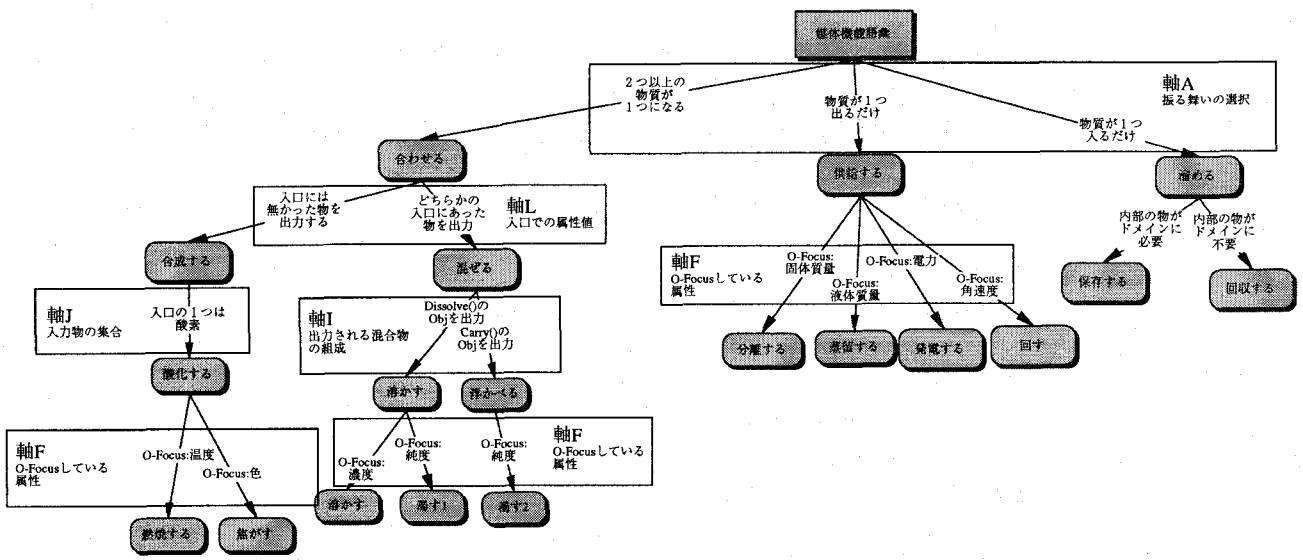


図 A.2: 媒体機能語彙ライブラリ 2

A 軸:振舞いの選択-どのような振舞いに注目しているか-

値 意味

1. 1 つの物質が入口から出口へ移動する
2. 1 つの物質が 2 つ以上の物質に分かれる
   2.1 全ての出力物について入力物と ISA が同じ
   2.2 一部の出力物について入力物と ISA が同じ
3. 2 つ以上の物質が合わさって 1 つになる
4. 物質が部品に入るが出てこない
5. エネルギーが部品から出るだけ

B 軸:Focus している流れの種類

値 意味

1. SRC
2. RCP
3. SRCtoRCP

C 軸:媒体の種類 (ISA) が入り口と出口でどう変化したか

値 意味

1. 同じ
2. 違う

D 軸:注目する属性値が入り口と出口で変化したか

値 意味

1. 同じ
2. 違う

2.1 In < Out

2.2 In > Out

E 軸:注目している属性値の変化の様子

値 意味

1. 連続的に変化する
2. 離散的に変化する

F 軸:O-Focus している属性のクラス

値 意味

1. Thermal
2. Kinetic
3. Pressure

.....

G 軸:機能の結果出力された, 機能が注目していない対象物の必要性

1. 必要
2. 不要

図 A.3: 媒体機能語彙を規定する情報軸一覧 (1/2)

H 軸:機能タイプ

1. 達成
2. 維持
3. 保持

I 軸:出力物が混合物である場合, その構成物間の関係

1. 溶液 (Dissolve())
2. 物質運搬 (Carry())
3. エネルギー運搬 (CarryE())
4. 共存 (Coexist())

J 軸:入力物が複数の場合, その種類

1. 1つは酸素

K 軸:分けた時の注目

1. 体積に注目
2. 形状に注目

L 軸:入口での属性値

1. 0
2. *not* 0

M 軸:出口での属性値

1. 0
2. *not* 0

図 A.4: 媒体機能語彙を規定する情報軸一覧 (2/2)

A 軸:振舞いの選択

(or(P-Focus が, 入口 1 つだけに当たっている)
(入口のみに対象物があり, 出口にない)) ならば, 値 4
(or(P-Focus が, 出口 1 つだけに当たっている)
(出口のみに対象物があり, 入口にない)) ならば, 値 5
(or(P-Focus が, 入口 1 つ, 出口複数に当たっている)
(P-Focus が入口 1 つ, 出口 1 つ. 出口の注目物が Need または NoNeed
指定のある対象物と混合物を形成しており, その対象物が入口で,
2 つに分離している))
ならば, 値 2
値 2 の条件を満し,P-Focus の出力物全部の ISA が入力物と同じなら値 2.1
値 2 の条件を満し,P-Focus の出力物の一部の ISA が入力物と同じなら値 2.2
P-Focus が, 入口複数, 出口 1 つに当たっているならば, 値 3
P-Focus が, 入口 1 つ, 出口 1 つに当たっているならば値 1

B 軸:注目する流れ

SRC,RCP の定義がエネルギーのそれとは異なる:
混合物 X の構成要素である物質 A が X から出て, X と異なる物質 Y に
結合し, 物質 Y' が出力されるとする.
SRC:物質 A を放出している混合物 X.X 中の A の質量は減る
RCP:物質 A を受け取っている側の対象物 Y'.Y' 中の物質 A の質量は増える
SRC-RCP:物質 X の入口側から物質 Y' の出口側へ至る, 物質 A の経路
P-Focus が SRC の流れにあたっていれば値 1
P-Focus が RCP の流れにあたっていれば値 2
P-Focus が入口 SRC, 出口 RCP にあたっていれば値 3

C 軸:媒体種類の変化

P-Focus が入口ポート 1 つ, 出口ポート 1 つに当たっているときのみ
有効となる軸. 値の判定はエネルギーの場合と同じ.

D 軸:注目パラメータの変化

A 軸の値が 1 であるときのみ, 有効となる軸.
出口物質で P-Focus が当たり,O-Focus された属性を持つ出力物
Obj_{out}のと, 入口側のエネルギーで,Obj_{out}
と MP 関係にあるものの間で,O-Focus されたパラメータを比較する.

E 軸:O-Focus しているパラメータの変化の性質

O-Focus スロットの値を参照する.
(and (O-Focus している属性が連続的に変化する性質を持つ)
(入口と出口で属性値が異なる)) ならば値 1
(and (O-Focus している属性が不連続的に変化する性質を持つ)
(入口と出口で属性値が異なる)) ならば値 2

図 A.5: 媒体機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (1/2)

F 軸:O-Focus している属性

O-Focus スロットの値を参照する.

G 軸:注目していない対象物の必要性

P-Focus が入口 1 つ, 出口 1 つのポートに当たっており, かつ,
A 軸が 2 の条件を満たしている場合に,
注目物と混合物を形成している物質が Need ならば値 1
注目物と混合物を形成している物質が NoNeed ならば値 2

H 軸:機能タイプ

FuncType スロットを参照する.

I 軸:出力混合物の組成

A 軸の値 2 の条件を満たし, かつ,P-Focus が入口ポート 1 つ, 出口ポート 1 つに当たっているとき,
P-Focus があたっているポートにあり,O-Focus されている属性を持つ対象物 (混合物) の Sub-Relations スロットを参照する.

J 軸:入口の対象物群に酸素が含まれているか

A 軸の値が 3(合わせる機能) の時,
入口の対象物で, 出口側の注目対象物と MP 関係にあり, かつ P-Focus である対象物すべての ISA を調べる.
1 つ以上, 酸素があれば値 1
1 つも酸素ではない:値 2

K 軸:対象物の分け方

A 軸の値 2(分ける機能) の条件を満たすとき,
O-Focus の値が体積なら値 1
O-Focus の値が形状なら値 2

L 軸:入口での属性値

入口側の対象物の選び方はエネルギー機能語彙の H 軸と同じ.
値を検査するパラメータは,O-Focus されているパラメータ.

M 軸:出口での属性値

I 軸と同じ方式で出力物を選ぶ. 値を検査するパラメータは,
O-Focus されているパラメータ.

図 A.6: 媒体機能語彙の情報軸と FBRL モデルの関係 (2/2)

参考文献

[AHBJ91] A. Abu-Hanna, R. Benjamins, and W. Jansweijer. Device understanding and modelilng for diagnosis. *IEEE Expert*, pp. 26–32, April 1991.

[CGI93] B. Chandrasekaran, A.K. Goel, and Y. Iwasaki. Functional representation as design rationale. *COMPUTER*, pp. 48–56, January 1993.

[de 84] J de Kleer. How circuits work. *Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 205–280, 1984.

[dJ84] J de Kleer and J.S.Brown. A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence*, Vol. 24, pp. 7–83, 1984.

[GG93] Thomas R. Gruber and Patrice O. Gautier. Machine-generated explanations of engineering models:a compositional modeling approach. In *Proceedings of the IJCAI*, pp. 1502–1508, 1993.

[IFVC93] Y Iwasaki, R Fikes, M Vescovi, and B Chandrasekaran. How things are intended to work: Capturing functional knowledge in device design. In *Proceedings of the IJCAI*, pp. 1516–1522, 1993.

[Keu91] A.M. Keuneke. Device representation:the significance of functional knowledge. *IEEE Expert*, Vol. 24, pp. 22–25, April 1991.

[KSIM94] Yoshinobu Kitamura, Munehiko Sasajima, Mitsuru Ikeda, and Riichiro Mizoguchi. Model building and qualitative reasoning for diagnostic shell. In *Proceedings of the '94 Japan/Korea Joint Conference on Expert Systems*, pp. 41–46. Japanese Society for Artificial Intelligence, 1994.

[PSB93] M. Pegah, J. Sticklen, and W. Bond. Functional representation and reasoning about the F/A-18 aircraft fuel system. *IEEE Expert*, Vol. 24, pp. 65–71, April 1993.

[SC86] V Sembugamoorthy and B Chandrasekaran. Functional representation of devices and compilation of diagnostic problem-solving systems. In J.L. Kolodner and C.K Riesbeck, editors, *Experience, Memory, and Reasoning*, pp. 47–73. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J., 1986.

[SKI+94] Munehiko Sasajima, Yoshinobu Kitamura, Mitsuru Ikeda, Shinji Yoshikawa, Akira Endou, and Riichiro Mizoguchi. An investigation on domain ontology to represent functional models. In *Proceedings of the Eighth International Workshop on Qualitative Reasoning about Physical Systems*, pp. 223–233, 1994.

[SKIM95] Munehiko Sasajima, Yoshinobu Kitamura, Mitsuru Ikeda, and Riichiro Mizoguchi. FBRL: A Function and Behavior Representation Language. In *Proceedings of the IJCAI-95*, pp. 1830–1836, 1995.

[SPM91] W. Swartout, C. Paris, and J. Moore. Design for explainable expert systems. *IEEE Expert*, pp. 58–64, June 1991.

[SS81] Albert Stevens and Cindy Steinberg. 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, March 1981.

[UTYS94] Yasushi Umeda, Tetsuo Tomiyama, Hiroyuki Yoshikawa, and Yoshiki Shimomura. Using functional maintenance to improve fault tolerance. *IEEE Expert*, pp. 25–31, June 1994.

[vAM72a] C. van Amerongen and AMICE M.Sc. *HOW THINGS WORK Volume I.* Granada Publishing Limited, 1972.

[vAM72b] C. van Amerongen and AMICE M.Sc. *HOW THINGS WORK Volume II.* Granada Publishing Limited, 1972.

[VIFC93] M. Vescovi, Y Iwasaki, R Fikes, and B Chandrasekaran. CFRL:A language for specifying the causal functionality of engineered devices. In *Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 626–633, 1993.

[YTKU94] Hiroyuki Yoshikawa, Tetsuo Tomiyama, Takashi Kiriyama, and Yasushi Umeda. An integrated modelling environment using the metamodel. *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, pp. 121–124, 1994.

[井上 89] 井上雅弘, 蒲田好久. 流体機械の基礎. コロナ社, 1989.

[吉岡 95] 吉岡真治, 中村雅彦, 冨山哲男, 吉川弘之. 複数の設計対象モデルを扱う設計過程モデル. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 61, No. 581, pp. 330–337, 1995.

[桐山 94] 桐山孝司, 冨山哲男. 機械設計のためのフィジカル・フィーチャー・データベース構築の試み. 第 8 回人工知能学会全国大会論文集, pp. 73–76. JSAI, 1994.

[溝口 97] 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, 1997. 投稿中.

[国立 82] 国立国語研究所. 動詞の意味・用法の記述的研究. 秀英出版, 1982.

[笹島 94] 笹島宗彦, 来村徳信, 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. In *SIG-KBS-9304-2*, pp. 9–16. 社団法人 人工知能学会, 1994.

[三谷 95] 三谷重則, 笹島宗彦, 来村徳信, 池田満, 溝口理一郎. 機能モデルに基づく説明生成のための情報軸の整理. 人工知能学会研究会資料 SIG-KBS-9503-7, pp. 43–50. JSAI, 1995.

[渡辺 91] 渡辺茂監訳. 小事典・機械のしくみ. BLUE BACKS, 1991. 原題:Wie Funktioniert Das?(1978).

[日本 81] 日本 VE 協会. 機能用語の選定とその分類体系ー機能定義の効率化研究ー. 社団法人 日本バリュー・エンジニアリング協会, 1981.

[不二 78] 不二越油圧研究グループ. 新版知りたい油圧/基礎編. ジャパンマシニスト社, 1978.

[武山 83] 武山斌郎, 大谷茂盛, 相原利雄. 伝熱工学. 丸善株式会社, 1983.

[來村 96] 來村徳信, 笹島宗彦, 溝口理一郎. 機能と振舞いのオントロジーに基づいた動的システムの機能理解に向けて. 第 10 回人工知能学会全国大会論文集, pp. 195–198. JSAI, 1996.

[來村 97] 來村徳信, 笹島宗彦, 池田満, 吉川信治, 小澤健二, 溝口理一郎. モデルに基づく問題解決のための流体と時間のオントロジーの構築とその評価. 人工知能学会誌, Vol. 12 No.1, pp. 132–143, 1997.