

リアクティブシステムの分析・設計向き ドメインモデル：Asdreas STD Triad

杵 嶋 修 三[†] 伊 藤 潔^{††}

リアクティブシステムの開発環境 Asdreas (Architecture for the Specification and Design of REActive Systems) の目的は、リアクティブシステムの要求分析と主要な基本的な機能の列挙をサポートすることである。リアクティブシステムは、プラントの計測・制御・監視を目的としたリアルタイムシステムである。Asdreas を構成する際に、現実のリアクティブシステムの問題領域とシステムにまつわるさまざまな要因について、十分に分析を行った。その結果、リアクティブシステムの要求分析と機能列挙向きのドメインモデル、三群状態遷移モデル (STD Triad) を考案した。Asdreas では、リアクティブシステムは、制御する側のリアクティブスーパーバイザと、制御される側のリアクティブプラントから構成されるものと認識する。これらは、互いに相手のアクションに対してリアルタイムなリアクションを行う。Asdreas の要求分析・設計手法の特徴は次の2点である。A) プラントの挙動をシステムの分析と設計上の問題として明確に認識。B) リアクティブシステムの挙動を、STD Triad の構組みに基づいて(1)自然状態群、(2)作用状態群、および(3)目標状態群の3つの状態群に類別されたプラントの状態遷移図 (Plant STD) として分析。本稿は空調制御リアクティブシステムを事例とする。

Domain Model for Analysis and Design of Reactive Systems: Asdreas STD Triad

SHUZO KISHIMA[†] and KIYOSHI ITOH^{††}

The main purpose of Asdreas (Architecture for the Specification and Design of REActive Systems) is to support system requirements analysis and primary function enumeration. The target environments of Asdreas are reactive systems which measure, control and monitor target plants. In constructing Asdreas, we performed the domain analysis fully on the problem domain of actual reactive systems and the features of the systems. As a result, the State Transition Diagram (STD Triad), which is the new domain model for reactive systems, was devised. Asdreas regards Reactive Systems as consisting of a Reactive Plant and a Reactive Supervisor. Each part reacts according to the action of the other part in real time. The following two characteristics of development methodologies are emphasized in Asdreas. (A) In Reactive Systems, the specification and design of the total system includes the behavior of the plant. (B) The Reactive Plant is specified in the form of a STD Triad (named Plant STD) which is categorized into three sets of states: (1) Set of Uncontrolled States (i.e., State Group by Nature Dynamics), (2) Set of Controlled States (i.e., State Group by Artificial Enforcements), and (3) Set of Decision States (i.e., State Group by Heuristic Thresholds). The process of specification and design is exemplified using an Air Conditioning Control Reactive System.

1. リアクティブシステムと Asdreas の開発アプローチ

近年、リアクティブシステムという概念に基づいたアプローチが、リアルタイムシステムとソフトウェア生産技術の研究で一つの新しい流れを形成しつつ

ある。リアクティブシステムは、プラントの計測・制御・監視を目的としたリアルタイムシステムであり、コンピュータシステムとその制御対象となる外界（プラント、プロセス、ライン、装置等）とを、密接に相互干渉するものとして明確に認識する。

リアルタイムシステムを対象とした従来のソフトウェア生産技術の研究では、主に、トランザクション処理を中心としたデータシステム (EDP, オンラインバンキング等) を対象とした。そこでは、主に、コンピュータシステム内部でのタスクの機能設計と性能評価の観点から、リアルタイムシステムのソフトウェア開

[†] 山武ハネウェル(株)アドバンステクノロジーセンター
Advanced Technology Center, Yamatake-Honeywell

^{††} 上智大学理工学部機械工学科情報システム講座
Laboratory of Information and Systems
Engineering, Sophia University

発の問題をとらえた。

一方、リアクティブシステムのアプローチでは、コンピュータシステム内部での機能の設計に加えて、計測・制御・監視の対象となるプラントを明確に認識する。そのプラントの中で関与する人間や各種装置の役割も対象とする。リアクティブシステムの制御対象とするプラントの状態は、さまざまな物理的特性に支配される。例えば、空調制御システムのプラントの状態は、温度・湿度・塵埃・におい等に支配される。

Asdreas (Architecture for the Specification and Design of REActive Systems) は、リアクティブシステムのための、システム要求の分析と設計の環境である。Asdreas では、対象プラントとその制御コンピュータシステムを全体として分析の対象とする。Asdreas は、現実の開発作業から遊離しないことを絶対的な制約条件とする。しかし、これは、現実に行われている開発作業を、単にそのままの手順で CASE 的に実現するために分析しようとするものではない。Asdreas では、複雑で大規模な現実の開発対象システムの問題領域に含まれている、対象問題自身の本来的な各種の性質の十分な分析（この作業はドメインアナリシスと呼ばれる）を起点とする。この分析の結果として得られた、対象問題自身の本来的な各種の性質を積極的に利用する。そして、現実のリアクティブシステムの要求分析とシステムの主要な機能の列挙を連動して行うための新しいドメインモデルを構成した。

2. リアクティブシステムに対する Asdreas の分析

2.1 ドメインモデルの必要性

ドメインアナリシスは、文献2), 17) 等の多くの文献で述べられているとおり、ソフトウェアの開発における生産性の向上と再利用の促進のために必要な作業である。文献2)によると、“ドメインアナリシスは、問題のクラス、即ち問題領域についての知識を認識し組織化するプロセスである。これにより、個々の問題領域に固有な概念構造が得られる。”

この概念構造をドメインモデルと呼び、議論されている目的は次のとおりである。

- (1) 個々の問題領域向きに再利用部品群を用意する。
- (2) 個々の問題領域向きに一般的な開発手法を特化する。
- (3) 個々の問題領域に固有の開発手法を考案

する。

Asdreas では上記(3)の目的でリアクティブシステムに固有の開発手法を構成するためのドメインモデルを考案する。

2.2 リアクティブシステムの構造

リアクティブシステムについては、この分野の研究者の間で、統一された概念に基づいた議論が必ずしも展開されていない。Asdreas の定義を次に述べる。

【定義】 リアクティブシステム：リアクティブシステムは、制御する側のリアクティブスーパーバイザと、制御される側のリアクティブプラントからなる（図1 参照）。これらは、互いに相手のアクションに対してリアルタイムなリアクションを行う。

【定義】 作用・反作用関係：リアクティブシステムでは、スーパーバイザを制御対象となるプラントとの関わりとして認識する。スーパーバイザとプラントは、互いに、相手の作用（Action）に応じて必要な反作用（Reaction）を行うことができる。この関係を作用・反作用関係と呼ぶ。

スーパーバイザがプラントを制御する場合、その機能はプラントに対して作用的（Active）に動作すると見る。この際に、プラントはスーパーバイザからのアクションに応じて反作用的（Reactive）に動作すると見る。例えば、冷却機構は、スーパーバイザのアクションである。プラントは、このアクションに反応して温度が下降する。

一方、プラントがその性質や状態に応じて何らかの自律的な挙動を行うとき、プラントは、スーパーバイザに対して作用的（Active）に動作すると見る。この際に、スーパーバイザはプラントからのアクションに応じて反作用的（Reactive）に動作すると見る。例えば、プラントの自然温度下降は、プラントのアクションである。

2.3 リアクティブシステムのドメインの性質

リアクティブシステムのプラントとスーパーバイザの挙動を分析し、その挙動を実現する主要な機能を列挙

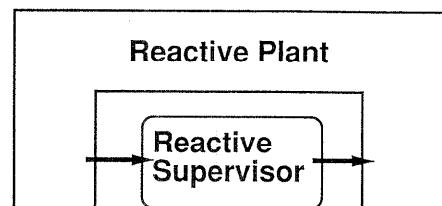


図1 リアクティブシステムの構造
Fig. 1 Reactive system's organization.

するためには、現実のリアクティブシステムのドメインに存在する、例えば、次のさまざまな性質や情報を考慮しなければならない。

[1] プラントは、放置しておくと、自然にその状態が変化する可能性がある（例えば、プラントの自然な温度上昇、反応の自然停止）。

[2] プラントは、予期された状態変化速度を越えて、急激な状態変化を起こす可能性がある（例えば、異常な反応・発酵による急激な温度や圧力の上昇）。

[3] プラントは、必ずしも理想的な環境に置かれているわけではなく、外界から影響を受けて、状態が少なからず変化する可能性がある（例えば、外気からの塵埃の流入、壁面からの熱の伝導・放射、日射）。

[4] スーパバイザは、あらかじめ組み込まれたプランに従って、プラントの状態を変化させる（もしくは維持する）ために、プラントに対してアクションを行う。

[5] スーパバイザは、あらかじめ組み込まれたしきい値で、プラントの状態を判断する。

[6] プラントには、スーパバイザではセンスすることが容易ではない情報が存在する（例えば、ゾーン内の居住者の感覚、その感覚の個人差、醸造工場の社氏が発酵プロセスの総合的な状況判断を行うためにセンスする情報）。

2.4 Asdreas の分析の観点とドメインモデル

リアクティブシステムの開発に対する、Asdreas の主要な分析の観点は以下の 3 点である。

(1) リアクティブシステムにおいて、プラントの挙動をシステムの分析と設計上の問題として明確に認識する。このためには、現実の開発対象システムの問題領域に含まれている、対象問題自身の本来的な各種の性質の十分な分析（ドメインアナリシス）が必要である。

(2) プラントとその制御コンピュータシステム（スーパバイザ）を全体として、システム構造を決定する。このためには、プラントとスーパバイザの間での作用・反作用関係を認識することが必要である。

(3) 現実のリアクティブシステムの開発のために、システムの要求分析とシステムの主要な機能の列挙を連動して行う。このためには、(1)の分析の結果と、(2)のプラントとスーパバイザの間での作用・反作用関係を基礎とした、リアクティブシステムのためのドメインモデルが必要である。

Asdreas の要求分析は、プラントとスーパバイザ

を包括したシステムの挙動を捉えて、リアクティブシステムを構成する主要な機能を認識し列挙することである。このためには、プラントとスーパバイザの挙動を、おのおの単独に定義するのではなく、相互のインタラクションで結合されたものとして分析定義する必要がある。

リアクティブシステムを構成する主要な機能の認識と列挙は、スーパバイザ側から見た場合、プラントを目標とする状態に推移させるための強制的なアクションの認識と列挙である。一方、プラント側から見た場合は、プラント自体の自然な性質や状態の変化に応じて自律的に行われるアクションの認識と列挙である。

3. リアクティブシステムのためのドメインモデル: Asdreas STD Triad

以上に示したリアクティブシステム内のアクションを認識し列挙するために、Asdreas では、リアクティブシステムのためのドメインモデルとして STD Triad を考案した。

図 2 のとおり、STD Triad ではプラントとスーパバイザの挙動を、次の 3 つの状態群に類別した状態遷移図を作成し、リアクティブシステムの挙動を分析し主要な機能を列挙する。STD Triad は、(1)自然状態群 (Set of Uncontrolled States; State Group by Nature Dynamics), (2)作用状態群 (Set of Controlled States; State Group by Artificial Enforcement), (3)目標状態群 (Set of Decision States; State Group by Heuristic Threshold) から成る。

〈自然状態群〉

プラントが自然に変化しうることがリアクティブシステムの必要条件である。すなわち、プラントの自律的挙動を明確に認識することが必要である。自然状態はプラントが生来の性質に従って自然に性状変化を起

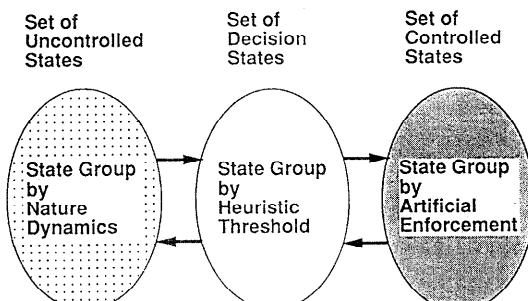


図 2 リアクティブシステム向き三群状態遷移モデル
Fig. 2 STD triad for reactive systems.

こしていることを表す。例えば、プラントの温度の自然上昇等はこの状態群に属する。また、2.3節で述べたドメインの性質や情報[1][2][3]は、この状態群で使われる。

〈作用状態群〉

プラントの自律的挙動のみでプラントが維持されるとすれば、プラントが達成すべき目標値からのずれが生じる。さらに、プラント内に関与する人の行為も目標に影響を与える。

作用状態はプラントが達成すべき目標を維持するために、スーパーバイザの何らかの強制力が働いていることを表す。例えば、プラントの自然な温度上昇に対して冷却機構が稼働すること等はこの状態群に属する。また、2.3節で述べたドメインの性質や情報[4]は、この状態群で使われる。

〈目標状態群〉

リアクティブシステムには、必ず、何らかの操業上の判断基準となる目標値に關わる経験的なしきい値が存在すると、Asdreasでは認識する。目標状態は、プラントの状態がこのしきい値の近傍にあることを表す。例えば、プラントの温度が Too Hot であることはこの状態群に属する。また、2.3節で述べたドメインの性質や情報[5][6]はこの状態群で使われる。

リアクティブシステムは、プラントとスーパーバイザを全体で統合して構成したシステムである。

Asdreasの要求分析設計では、この統合を目標状態群の定義から行う。これは、目標状態群が、プラントとスーパーバイザの双方で共有され、相互にインターフェースを取るための唯一の状態群であるためである。すなわち、プラントが、その自然な性質や状態の変化の結果として到達する状態群と、スーパーバイザが、プラントを次に移行するための目標としての状態群とを、目標状態群は同時に表す。

4. 空調制御リアクティブシステムのシステムチャート

図3は、空調制御リアクティブシステムのプラントとスーパーバイザを示す。スーパーバイザは、プラントの状態をセンサからの入力に基づいて同定し、プラントの状態が一定の目標になるように必要な制御出力をを行う。

図4のとおり、空調制御リアクティブシステムの制御対象とするプラントは、(1)

外界、(2)空調装置、(3)空調ゾーンの3つの基本要素から構成される。通常、空調制御のリアクティブプラントは複数のゾーンを有する。

図5のとおり、空調装置は、(a) Heating Unit、(b) Cooling Unit、(c) Humidifying Unit、(d) Fanから構成される。また、ゾーンは、(a) Temperature & Humidity Sensor、(b) Air Input Unit、(c) Air Output Unit、(d) Control Panel、(e) Residentから構成される。

図6は、システムチャートである。スーパーバイザは、ゾーンの状態を温湿度センサからの入力に基づいて同定し、常に快適な状態になるようにゾーンのAir

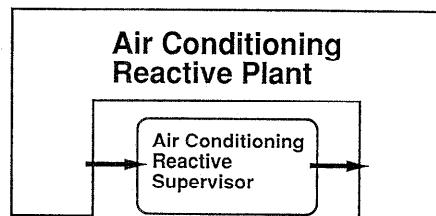


図3 空調制御リアクティブシステムの構造
Fig. 3 Reactive system's organization in air conditioning.

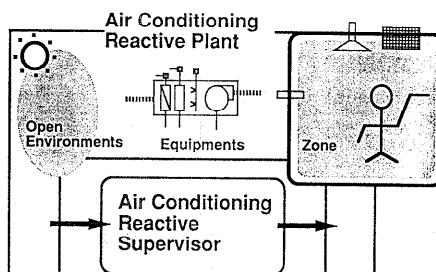


図4 空調制御リアクティブシステムの構成要素
Fig. 4 Reactive system's components in air conditioning.

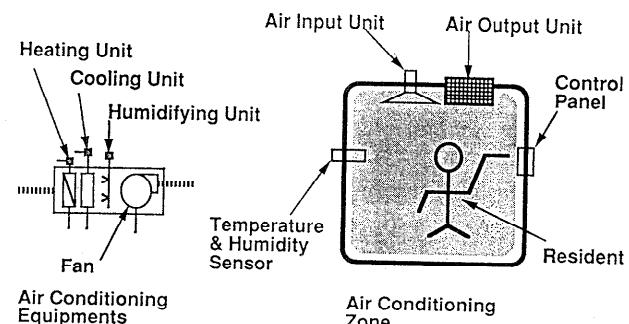


図5 図4の構成要素の説明
Fig. 5 Explanation of components in Fig. 4.

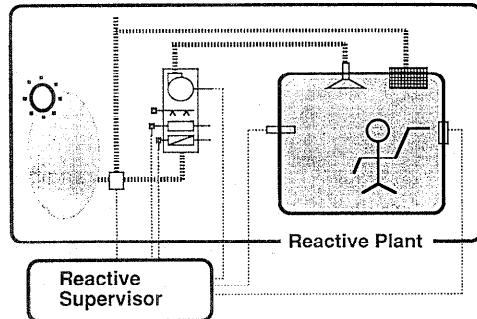


図 6 空調制御リアクティブシステムのシステムチャート
Fig. 6 System chart for inter-relationship between reactive system's components in air conditioning.

を空調機を介して循環させて制御する。

空調機には冷房・暖房の運転モードがあり、これら切り替えはスーパーバイザの指示により行われる。

ゾーン内の居住者はプラントの中のアクティブな主体であり、スーパーバイザとは独立した個人的な感覚に基づいてゾーン環境が快適か否かを判別し、独自に冷暖房の切り替えをスーパーバイザに指示する。

ゾーン内の状態は、ゾーン内で発生する負荷（人の数、人の活動量、人の着衣量、照明等）と、外界の状態（外気温度、日射量、方位等）に依存して常時変動する。

5. 空調制御リアクティブシステムの分析と設計

Asdreas の要求分析とシステム設計は、システムチャートに対してプラントとスーパーバイザの挙動を詳しく分析し、システム全体の挙動として主要な機能を列挙する。

5.1 要求分析と機能列挙の主要な戦略

Asdreas では、システムチャートに対して、システムの挙動を STD Triad を使って、Plant STD として詳細に同定する。

5.2 Plant STD とその構成手順

Asdreas で使用する Plant STD は、図 7 のとおり、以下の点で通常の STD と異なった性質を持つ。

A) Plant STD は、STD Triad の構組みに基づいて構成される。STD Triad の中のすべての状態は、(1)作用状態群、(2)自然状態群、(3)目標状態群の3つのいずれかに類別される。

B) 作用状態群と自然状態群の間の状態の遷移は、目標状態群を経由して行われる。

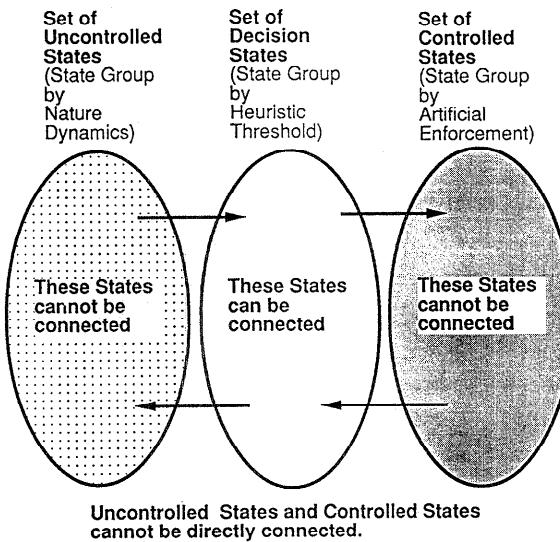


図 7 三群状態遷移モデルを用いたプラント状態の類別
Fig. 7 Categories of plant status in the form of STD triad.

作用状態群は、スーパーバイザの何らかの強制力が働き、プラントの挙動が強制的に制御を受けていることを示す。

自然状態群は、スーパーバイザとは独立してゾーン内で発生する負荷や外界の状態の変化により、プラントが自然に変動していることを表す。

目標状態群は、スーパーバイザまたはプラント内の居住者が、感覚的な基準に基づいて判断したプラントの状態を表す。

C) 状態遷移を表すアーケには、(1)人の判断、(2)スーパーバイザの判断、あるいは、(3)プラントの自然な状態変化を起こす契機となる事象を記述する。

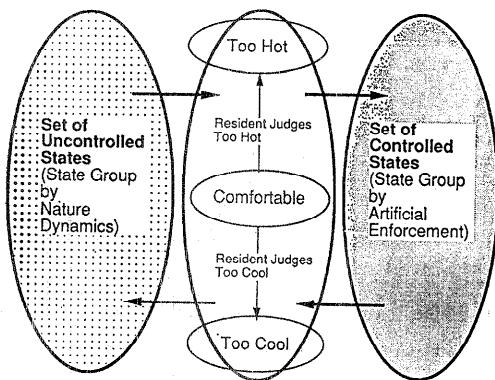
図 8 の Plant STD は、以下の手順で構成される。

(1) 図 7 の中央に対応する目標状態を列挙して、各状態に感覚的な基準に従った状態名を付ける。(図 8 (a) の Too Hot, Comfortable, Too Cool の 3 状態)

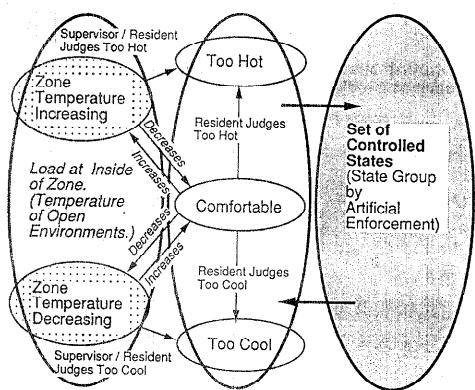
目標状態間の直接的な状態遷移の有無を分析して STD 内にアーケを記入する。多くの場合、このアーケにはプラント内に存在する人の判断を記入する。(図 8 (a) の Resident Judges Too Hot, Resident Judges Too Cool の 2 つの判断)

(1) で作ったアーケごとに、以下の(2)～(5)の手順を繰り返す。

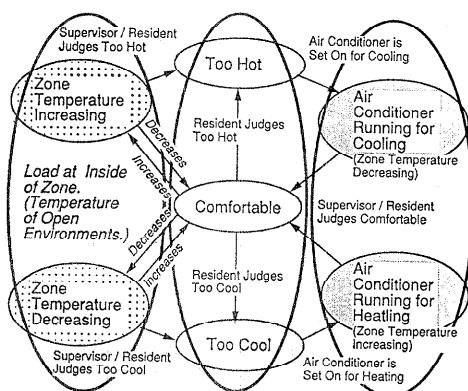
(2) アーケで結合された 2 つの目標状態に着目し、その左側に、この 2 つの目標状態間の状態遷移に



(a) 目標状態の決定
(a) Defining of the decision states.



(b) 自然状態の決定
(b) Defining of the uncontrolled states.



(c) 作用状態の決定
(c) Defining of the controlled states.

図 8 空調制御リアクティブプラントの三群状態遷移モデル
Fig. 8 State transition diagram of air conditioning reactive plant in the form of STD triad.

関連して、プラントの自然な挙動を認識し、自然状態群として定義する。状態には、プラントの自然な状態変化を表す名称を付ける。(図8(b)の Zone Temperature Increasing, Zone Temperature Decreasing の2つの状態)

(3) 自然状態と、2つの目標状態間の状態遷移を分析してアーケを記入する。このアーケには人とスーパーバイザの判断 (Supervisor/Resident Judges too Hot.), わよりプラントの自然な挙動の契機となる事象 (Decreases/Increases) を記述する。

(4) アーケで結合された2つの目標状態に着目し、その右側に、この2つの目標状態間の状態遷移に関連して、制御として働く強制作用を認識し、作用状態として定義する。状態にはスーパーバイザの強制力の行使を表す名称を付ける。(図8(c)の Air Conditioner Running for Cooling, Air Conditioner Running for Heating の2つの状態)

(5) 作用状態と、2つの目標状態間の状態遷移を分析してアーケを記入する。このアーケには人とスーパーバイザの判断を記入する。

以上のように Plant STD により、3種類の状態群とさまざまな状態遷移が分析される。

5.3 Plant STD のトポロジカルな性質

図7と図8を参照すると、Plant STD は、次のトポロジカルな性質を持つ。

(a) 作用状態同士をアーケで直接連結できない。すなわち、作用状態間での直接的な状態遷移は存在しない。

(b) 自然状態同士をアーケで直接連結できない。すなわち、自然状態間での直接的な状態遷移は存在しない。

(c) 作用状態群と自然状態群とをアーケで直接連結できない。すなわち、作用状態群と自然状態群との間での直接的な状態遷移は存在せず、必ず、目標状態群を介した間接的な状態遷移が行われる。

(d) 2つの目標状態をアーケで直接連結できる。すなわち、目標状態間では直接的な状態遷移が存在する可能性がある。

STD Triad の右側の作用状態群は、スーパーバイザの強制力が行使されていることを示し、その際、空調プラントは、リアクティブに反応して指示された状態に向かった強制的な推移を行う。

STD Triad の左側の自然状態群は、空調プラントの性質や状態の自然な変化を示す。

STD Triad の中央の目標状態群を STD Triad の右側の作用状態群から見た場合、各目標状態は、スーパーバイザが空調プラントを次に移行させたい目標となる状態である。

STD Triad の中央の目標状態群を STD Triad の左側の自然状態群から見た場合、各目標状態は、空調プラントが、その自然な性質や状態の変化の結果として、到達する状態を示す。

リアクティブプラントとリアクティブスーパーバイザが全体で統合されたリアクティブシステムを構成するためには、STD Triad の左右から見た目標状態群はユニークな同一の状態群でなければならない。すなわち、左右、おのとのの状態群からの遷移は、必ず、中央の状態群を経由して相互のインタラクションを形成する。

これは、上記の(a), (b), (c)の性質を満たすように STD を構成するための原理として働く。

目標状態群は、プラントの連続的な状態変化をいくつかのしきい値で定性的に類別した状態群である。この目標状態間の状態遷移は、間接的には作用状態群と自然状態群を介して行われる。プラント内で、人等の主体が自身で判断した場合に直接的な状態遷移が行われる。

これは、上記の(d)の性質を満たすように STD を構成するための原理として働く。

5.4 STD Triad を用いた実際の空調制御プラントのシステム分析

空調制御の実際の対象となる空調ゾーンプラントには、温度、湿度・塵埃・におい等の複数の制御目標がある。実際の空調制御リアクティブシステムを分析・設計するためには、互いに関連したいくつかの制御目標を組み合わせて連携した制御を行うことができるよう、目標を統合した制御システムを分析する必要がある。

図9は、この内の温度制御と湿度制御を統合した実際の空調制御システムの全体を、STD Triad を用いて分析している。紙面の関係上、(a)(b)(c)(d)の4枚に分けた。完全な状態遷移モデルはこの4枚を重ね合わせて得られる。

温度と湿度は互いに関連した制御目標であり、これを統合した制御システムは単に温度のみを制御目標とした制御システム（図8のSTD Triad）と比べて、きめ細かな制御のしきい値が認識されている。図8の3つの目標状態群（Too Hot, Comfortable, Too Cool）

に対して、図9では、居住者の自然な感覚により近い細分化された目標状態群に展開されている。

すなわち、図9の細分化された目標状態群の中では、次のように、居住者の自然な感覚を特に強調している。

- (1) Too Hot & Too Wet 状態が、居住者の蒸し暑いという感覚に対応する。
- (2) Too Cool & Too Wet 状態が、居住者の底冷えがするという感覚に対応する。
- (3) Too Cool & Too Dry 状態が、居住者の肌を刺すような寒さという感覚に対応する。
- (4) Too Hot & Too Dry 状態が、居住者の咽の乾きを訴えるような暑さという感覚に対応する。

細分化された目標状態間の直接的な状態遷移は、ゾーンの環境に対する居住者の感覚のさまざまな個人差を考慮したものとして分析している。これは、図9の中央にある目標状態群の中心にあるComfortable状態を起点とし、その回りを取り巻いている他の非 Comfortable な目標状態への放射状のアーケークに対応付けられた、居住者の感覚に基づく独自の判断 (Resident Judges) によって示されている。

温度制御と湿度制御を統合した空調制御システムの実際の挙動では、温度を主体とした状態変化によって到達する自然状態群と、それを制御する作用状態群が存在している。また同時に、湿度を主体とした状態変化によって到達する自然状態群と、それを制御する作用状態群が共存している。

空調ゾーンプラントの自然な状態変化を示す自然状態群と、その状態変化に対して制御として働く強制作用を示す作用状態群は、Comfortable 目標状態とその回りの非 Comfortable な目標状態を結ぶ放射状の一つ一つの状態遷移に関連して分析している。

図9(a)は、温度を主体とした状態変化（中央上下の Too Hot, Too Cool）に関連したシステムの挙動を表している。これに、湿度を主体とした状態変化（中央左右の Too Hot & Too Wet, Too Cool & Too Wet, Too Hot & Too Dry & Too Cool & Too Dry）が、温度を主体とした状態変化と連絡した挙動としてその周囲で認識されている。外側左の上下では、温度を主体とした状態変化の結果としてプラントが到達している自然状態群（Zone Temperature Increasing, Zone Temperature Decreasing）を示している。外側右の上下では、スーパーバイザの強制力が行使されてい

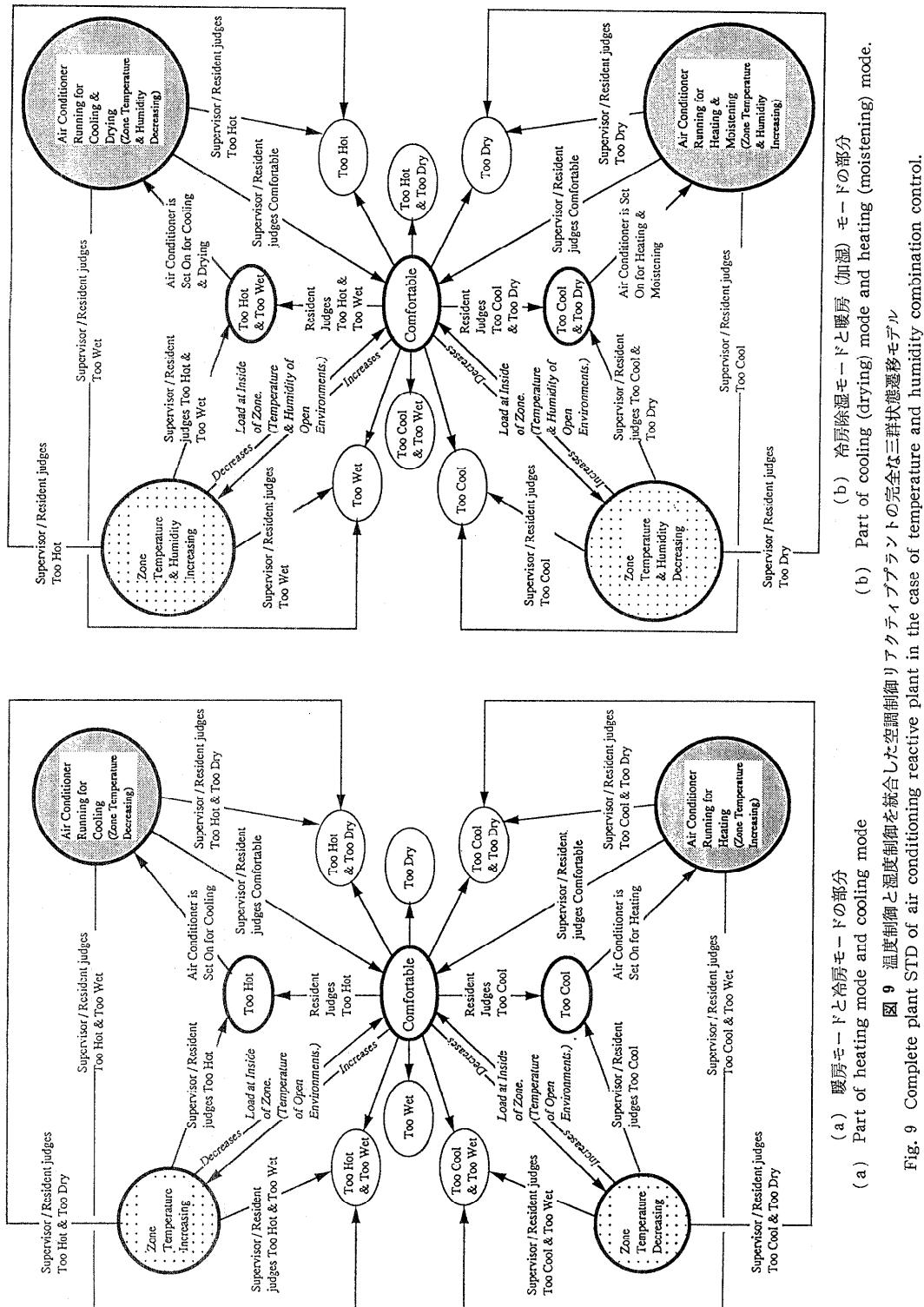


Fig. 9 Complete plant STD of air conditioning reactive plant in the case of temperature and humidity combination control.

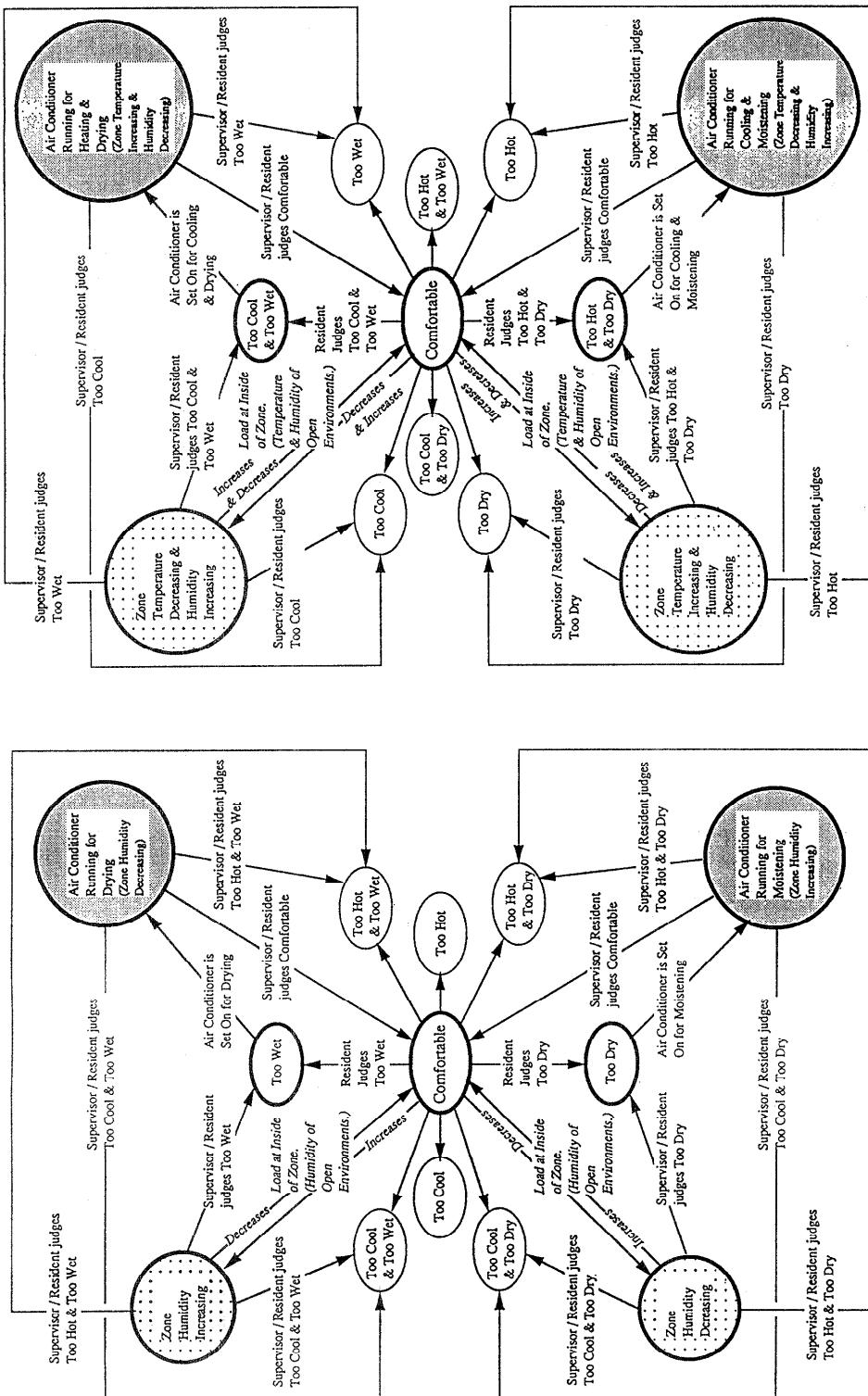


図 9 (つづき)
Fig. 9 (Continued)

る作用状態群 (Air Conditioner Running for Cooling, Air Conditioner Running for Heating) を示している。

図9 (b)は、中央上下に Too Hot & Too Wet, Too Cool & Too Dry を配置しこれに関連したシステムの挙動を表している。図9 (c)は、中央上下に Too Wet, Too Dry を配置し、図9 (d)は、中央上下に Too Cool & Too Wet, Too Hot & Too Dry を配置している。

6. 他研究機関の方法論や研究との違い

Asdreas の STD Triad は、現実のリアクティブシステムのドメイン分析の結果として、発見的に創出された方法であり、ドメインを強く意識している。このように、対象システムのドメインを強く意識することが、他の一般的な手法との根本的な発想の違いとして、Asdreas STD Triad のアイデアの根幹に存在している。Asdreas のアプローチは、他の一般的な手法を改良・改善することが目標ではない。

他の一般的な手法との真の比較・評価は、おののの方法・ツールを、実際の開発現場に数多く適用して得られる定量的なデータを蓄積しそれを比較分析することによって明らかにすべきである。しかしながら、現段階では、そのようなデータをあらかじめ揃えることは不可能である。このため、以下のような他研究機関等との比較を行う。

Real-Time Structured Analysis (Real-Time SA)^{13), 18)}, Object-Oriented Analysis and Design (OOA/OOD)^{1), 4)~6), 8), 9), 15), 16)}, ADISSA¹¹⁾, Trans-Obj¹⁴⁾, Statechart^{10)~12)}, および ESTEREL⁷⁾との違いを、(1)理論的な基礎、(2)グラフィックス記法、(3)分析と設計のプロセスの観点から述べる。最後の2つの Statechart と ESTEREL は、Asdreas と同じくリアクティブシステムの開発のために作られたものである。他は、通常のリアルタイムシステム用である。この中で Statechart は、道具として STD を用いることも同じなので、以下の全般的な比較の後に、分析と設計のプロセスの観点に特に着目してさらに詳しく比較する。

〈理論的な基礎〉

Real-Time SA の理論的な基礎は、データフローモデルと有限状態機械 (FSM) である。OOA/OOD は、意味データモデル、FSM、メッセージ送受に、ADISSA は FSM に、TransObj は トランザクション指

向のシミュレーションの概念と記法に、Statechart は FSM に、ESTEREL はリアクティブシステムの同期性に、おののに基づく。Asdreas は、リアクティブシステムに対するオリジナルな概念である STD Triad に基づく。

〈グラフィックス記法〉

Real-Time SA と OOA/OOD は、グラフィックス記法として、データフロー図 (DFD), 状態遷移図 (STD), およびエンティティ・リレーションシップ図 (ERD) を用いる。ADISSA は、DFD, STD とトランザクショングラフを、TransObj は、テキスト言語に対応するグラフィックス記法を、Statechart は拡張された STD を、おのの用いる。ESTEREL は、グラフィックス語法ではなくテキスト言語を用いる。Asdreas は、3つの状態群に類別された STD 記法として STD Triad を用いる。

〈分析と設計のプロセス〉

Real-time SA では、まず、対象システムを刺激と応答でモデル化する。次に、データフローに基づいて機能分割を行う。

OOA/OOD では、まず、オブジェクトを列挙する。次に、オブジェクト内の主なデータの値の変化に基づいて STD を定義する。さらに、オブジェクトの振る舞いを詳細に表すために、その他のデータの値を用いて詳しく STD を強化する。最後に、STD の各状態のオブジェクトの詳細な機能を定義する。結果として、OOA/OOD を用いると、ソフトウェアは、メッセージを互いに送受するオブジェクトの集合体として定義される。

ADISSA は、SA のトランザクション指向の増強版である。トランザクション仕様は FSM に基づく形式仕様に変換される。

TransObj はソフトウェアの設計プロセスをトランザクション指向のパラダイムからオブジェクト指向のパラダイムへの変換ととらえる。

ESTEREL は制御システムをリアクティブシステムとしてとらえる。

Asdreas は、計測と制御の専門家の経験的な知識を用い、プラントとスーパバイザの相互のインタラクションに基づいて、システム全体としてリアクティブシステムを分析する。この分析の結果、システムの全体モデル (Plant STD) が構成され、主要な機能が列挙される。

〈Statechart と Asdreas の比較〉

Statechart では、リアクティブシステムの設計を、イベント処理ソフトウェアシステムの設計と考えて行っているのに対して、Asdreas では、STD Triad を構成して、リアクティブシステムをプラントとコンピュータ双方の機能が統合されたシステムとして組織化している。

Statechart は、リアクティブシステムを、外界からのイベントに反応 (Reaction) する、コンピュータの内部の機能集合 (ソフトウェア) で構成されたシステムと認識する。すなわち、リアクティブシステムの設計を、イベント処理ソフトウェアシステムの設計と考えて行う。これは、外界の挙動は、ソフトウェアシステムの設計のために、すでに与えられていることを前提とする。外界がイベントを発生するに至った元々の挙動、すなわち、外界そのものの自然な挙動 (ダイナミックス) については、関知しない。

Statechart では、このイベントに反応するソフトウェアを順次詳細にブレークダウンする手順を与える。このブレークダウンのために、STD の階層化設計を行なう。

機能は 1 つの STD で表され、その機能を実現するためには、部品群を列挙する必要がある。おののの部品の機能を表すために、同様に STD を用いる。このように上位の STD の機能を実現する下位の部品の STD 群を、上位の機能を実現する STD のグループと呼ぶ。あるグループ内の複数の STD の状態遷移を結合するために、1 対多のイベントアーケークを用いる。このようにして、イベント処理ソフトウェアシステムを組織化する。

Asdreas は、リアクティブシステムを、プラントとコンピュータの内部の機能集合 (ソフトウェア) を括した挙動として捉える。Asdreas では、プラントをコンピュータに対する外界からのイベントと同時に、外界がイベントを発生するに至った元々の挙動、すなわち、外界そのものの自然な挙動 (ダイナミックス) を含んだものとして捉える。

このシステム認識に基づいて、プラントとコンピュータ双方の機能を包括的に列挙するために、Asdreas では STD Triad を用いる。STD Triad では、リアクティブシステムの状態を 3 つの状態群、すなわち、(1) プラントのダイナミックスを表す状態群、(2) プラントが達成すべき目標を維持するための強制的な機構が有すべき状態群、(3) その目標値に関

わる経験的なしきい値を表す状態群とに類別する。そして、リアクティブシステムの根幹となるプラントとコンピュータ双方のアクションを、類似された状態群の間での STD Triad のトポロジカルな性質で、制約されたアーケークで表現する。

7. 結　　び

プラントの計測・制御・監視を目的としたリアクティブシステムの要求分析と主要な機能の設計をサポートする Asdreas の方法について詳しく述べた。Asdreas では、要求の分析と主要な機能の列挙のために、リアクティブシステム向きドメインモデル、三群状態遷移モデル (STD Triad) を新たに考案した。STD Triad は、現実のリアクティブシステムの問題領域とシステムにまつわるさまざまな要因について、十分にドメイン分析を行って得たものである。Asdreas では、リアクティブシステムは、制御する側のスーパーバイザと、制御される側のプラントから構成されるものと認識する。これらは、互いに相手のアクションに對してリアルタイムなリアクションを行う。

Asdreas の要求分析・設計手法の特徴は次の 2 点である。

A) プラントの挙動をシステムの分析と設計上の問題として明確に認識。

B) リアクティブシステムの挙動を、STD Triad の枠組みに基づいて、(1) 自然状態群、(2) 作用状態群、および(3) 目標状態群の 3 つの状態群に類別されたプラントの状態遷移図 (Plant STD) として分析。

現在、Asdreas がさまざまな分野でのリアクティブシステムに適用可能であることを確認するための実証作業を行なっている。同時に、Asdreas に基づくリアクティブシステムの開発支援のための CASE システムの設計を行なっている。

参　　考　　文　　献

- 1) Abbott, R.: Program Design by Informal English Description, *CACM*, Vol. 26, No. 11 (1983).
- 2) Arango, G. and Diaz, R.P.: Introduction and Overview: Domain Analysis Concepts and Research Directions, *Tutorial on Domain Analysis and Software Systems Modeling*, pp. 9-32, IEEE Computer Society Press (1991).
- 3) Booch, G.: Object-Oriented Design, *Ada Letters*, Vol. 1, No. 3 (1982).
- 4) Booch, G.: Object-Oriented Development, *IEEE Trans. S.E.*, Vol. 12, No. 2 (1986).

- 5) Boussinot, F. et al.: The ESTEREL Language, *Proc. IEEE*, Vol. 79, No. 9, pp. 1293-1304 (1991).
- 6) Coad, P. et al.: *Object-Oriented Analysis*, Yourdon Press (1990).
- 7) Coad, P. et al.: *Object-Oriented Design*, Yourdon Press (1991).
- 8) Harel, D.: Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems, *Science of Computer Programming*, Vol. 8, pp. 231-274 (1987).
- 9) Harel, D.: On the Visual Formalism, *CACM*, Vol. 31, No. 5, pp. 514-536 (1988).
- 10) Harel, D. et al.: Statemate: A Working Environment for the Development of Complex Reactive Systems, *IEEE Trans. S.E.*, Vol. 16, No. 4 (1990).
- 11) Hatley, D. J. and Pirbhai, I. A.: *Strategies for Real-Time System Specification*, Dorset House Publishing (1987).
- 12) Itoh, K. et al.: TransObj: Software Prototyping Environment for Real-Time Transaction-Based Software System Applications, *International Journal of S.E. and K.E.*, Vol. 2, No. 1, pp. 5-29 (1992).
- 13) Meyer, B.: *Object-Oriented Software Construction*, Prentice-Hall (1988).
- 14) Shlaer, S. and Mellor, S. J.: *Object Oriented System Analysis*, Prentice-Hall (1988).
- 15) Tracz, W.: Domain Analysis Working Group Report—First International Workshop on Software Reusability, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, Vol. 17, No. 3, pp. 27-34 (1992).
- 16) Ward, P. and Mellor, S.: *Structured Development for Real-Time Systems*, Vol. 1-3, Prentice-Hall (1985).

(平成5年1月7日受付)
 (平成5年6月17日採録)



杵嶋 修三（正会員）

1948年生。1968年佐世保高等専門学校機械工学科卒業。同年山武ハネウエル(株)入社。現在アドバンステクノロジーセンター主任研究員。研究テーマ：システムインテグレーション、アーキテクチャ、オペレーティングシステム、言語処理、記号処理、システム分析／モデリング、CASE、リアクティブシステム、ソフトウェア工学。ACM会員。ドメイン分析／モデリング研究グループ幹事。



伊藤 潔（正会員）

1951年生。1974年京都大学工学部情報工学科卒業。1979年同大学院情報工学専攻博士課程修了。京都大学工学博士。1979年より上智大学に勤務。1985年より助教授。現在、同理工学部機械工学科情報システム講座所属。ソフトウェア工学、シミュレーション手法、エキスパートシステム、定性理論の待ち行列ネットワークへの応用、三面図からのソリッドモデルの自動合成法の研究に従事。情報処理学会論文誌編集委員。著書「ソフトウェア開発のためのプロトタイピングツール」(共著)、「システムプログラム」、訳書「並行処理とUnix」(共訳)。人工知能学会、IEEE、ACMなど各会員。ドメイン分析／モデリング研究グループ主査。