

協調推論型知識情報処理の一方式†

——列車スケジューリングを具体例とした提案と評価——

鶴田 節夫†† 鬼塚 武郎††

産業分野におけるエキスパートシステムの開発が盛んであるが、1人の専門家を代行するエキスパートシステムが中心である。現実社会では複数専門家の協議の必要な大局判断が判断業務のネックとなる場合が多いが、目標や制約が複雑・不明確かつ競合するため、その計算機化は難しい。例えば、列車ダイヤ作成など列車(運行)スケジューリングでは、列車・旅客・運用など各関係の専門家間の利害調整や協議がネックになる。本論文では、列車スケジューリングを具体例に、大局判断ネックの軽減を目的として複数専門家の推論・協議を計算機と1人の人間(熟練者でなくても良い)により代行可能とする協調推論型知識情報処理の一方式を提案する。提案方式は、オブジェクト指向¹⁾やアクタ理論²⁾をベースとするが、「オブジェクトの理論的表現であるアクタ理論のアクタとは異なり、1人の専門家に相当するオブジェクトをアクタ(俳優、登場人物、ただしユーザである1人の人間もアクタと考える)として、一般のオブジェクトと区別して概念化し、複数のアクタが互いに関連する要求や問題点をメッセージパッシング³⁾により交信するための枠組としての協議劇」として、スケジュール立案のための複数専門家の推論や協議すなわち協調推論をモデル化するものである。実験システムを開発し、その有用性を示す。

1. はじめに

知識工学が産業分野へ応用されつつある^{1),2)}。

さて列車(運行)スケジューリング、すなわち、列車ダイヤ作成や運転整理(列車の乱れの回復のためのダイヤ変更)では、局所的な判断^{3),4),17)-21)}だけでなくシステム全体にわたる大局判断が重要である。例えば、列車の発着時刻を決めるには、列車速度や線路・駅設備などの物理条件だけでなく、列車運行に必要な車両や乗務員の運用および旅客サービス要求(運転間隔や接続など)といった人為的・社会的条件、さらには路線間の乗入れ条件などの複雑な絡みを総合的に判断しなければならない。実際そのため、列車運転関係や旅客関係や運用関係などの多数専門家が多大の時間・労力をかけて協議をすることが多く⁵⁾、大局判断が判断業務のネックとなっている。列車運行スケジューリングを具体例に、この大局判断の機械化を目的として、複数専門家の推論・協議を代行するための協調推論型知識情報処理の一方式を開発、実験システムを作成して、有効性を確認した。

以下、第2章では、まず列車運行スケジューリング問題の性質を述べる。次に、その機械化には、協議や判断過程の全体構造が不明確なため数式モデル化が困

難、モデル化できても最適性や応答時間の保証が困難などの問題があることを明らかにする。また、大局判断支援用マンマシンインタフェースが不可欠なことを示す。第3章では、その解決に知識工学、特にオブジェクト指向アプローチが有効なことを示し、これを用いた協調推論型知識情報処理方式を提案する。このため準備として、スケジューリングやその管理のための知識を組み込むべきオブジェクトをアクタ(俳優、オブジェクトの理論的表現であるアクタ理論⁶⁾のアクタとは異なる。ユーザ、すなわち人間もアクタに含める)として定義する。そしてアクタをベースとした複数専門家の協議の情報処理モデルを提案する。これは、人間を含む各アクタが、推論時に、関係する他のアクタへ要求や問題点をメッセージパッシング^{7),8)}により交信して、スケジューリングに必要な大局判断を行う、協調推論のための枠組みとしてのモデルである。第4章では、提案方式の実現機構すなわち上記の協議劇モデルの舞台装置を具体化する。すなわち、各アクタ間で競合するリソースのスケジューリングの整合をとる機構、効率的な協議のための協議管理機構、人間もアクタとして協議に介入して劇に参加するための介入機構、などである。提案方式は、各部署の専門家の知識を組み込んだ(計算機内の)各アクタ間での効率的な協議を可能とする。その上、いつでも人間が主導権を奪い、マルチウィンドウに並列表示される(計算機内の)各アクタとのマウスを介した直接的な対話により、直観的・常識的判断(例えば、乗務員の休憩時

† A Knowledge-Based Cooperative Information Processing Method—Proposition and Estimation through Prototyping Train Scheduling Expert Support Systems— by SETSUO TSURUTA and TAKERO ONIZUKA (Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.)

†† (株)日立製作所システム開発研究所

間の上限などは労働協定にはないが常識的な判断が必要)を發揮して協議し、計算量の組合せ論的爆発を制御しながら満足解を作成できる。このように異種複数の専門家の協議をアクタ間の通信で代行することにより、多数の専門家の総合判断を要するスケジューリングを1人の人間(熟練者でなくても良い)で可能とする。最後に第5章では、提案方式の有用性を確認するために、簡単な専門知識を組み込んだ列車運行スケジューリングエキスパート実験システムを作成し、非熟練者でも効率良くダイヤ作成ができることを示す。

2. 列車運行スケジューリング機械化の問題点

2.1 列車運行スケジューリング問題の性質

列車ダイヤ作成や運転整理は、駅設備・線路・車両・乗務員などのリソースや社会的条件などの制約下で、安全性・高速性・コスト・快適性といった目標を満たす列車運行スケジューリング問題と考えられる。

これらの目標や制約は以下の特徴を持つ。

(1) 前述のように、物理的なものから人為的なものまで多種多様、かつ相互依存的で各部署の利害と絡む。

(2) 乗務員運用規則など、「…した方が良い。ただし…」式の制約、すなわち例外条件が多い。また、非優等列車(普通列車)の遅延の評価など、状況依存的で事前に定式化・明確化するのが困難である。

(3) 上記の乗務員運用の制約のように人間の運用に関するため感覚的なもの、また営業方針や社会と切り離せない総合的なものが多い。

列車運行スケジューリングでは、これらの目標や制約を総合的に評価するための大局判断が必要となる。実際、(1)に対しては、多数の専門家が利益代表や調整役として多角的協議を重ね、(2)に対しては、条件を徐々に明確化しながら妥当な許容解(満足解・妥協案)を作成していく。これには多大の時間や労力がかかる上、考え落としや不合理の入る可能性も高い。そのため、計算機化が必要となるが、(3)で述べたように感覚的・社会的で計算機化困難な判断も多い。

2.2 列車運行スケジューリング計算機化の問題点

列車スケジューリング計算機化の研究は昔から行われているが、従来システムは列車ダイヤや車両運用など個々の問題の局所的な最適化が中心であり、マンマシン機能も貧弱であった^{9), 4), 13), 14), 17)~21)}。前節で述べたことから列車スケジューリング計算機化における従来方式の問題点を以下のように考える。

(1) 実用困難な数式モデル

前節で述べたとおり、列車スケジューリングは線形化困難な多種多目的問題の上、これらの目的や制約は例外的で事前には明確にならない。乗務割当の公平さや列車間隔(ヘッド)のばらつきの許容度のように、状況に応じて感覚的に決まるものが多い。個々の状況に対する断片的なノウハウは専門家から引き出せても、全体を通して代数的に定式化したり、アルゴリズム的な共通解法を得ることは困難である。すなわち、従来からのORなどによる数式モデル化および最適条件や実行可能条件の定式化は実用上困難である。これには次のように性能上の問題もある。

(2) 実用規模での信頼性の急速な低下

多種多量かつ例外的な処理のため計算量や複雑度が組合せ論的に増大し、実用規模では計算完了時間(解の収束や応答性)の保証困難などの性能不良やソフトウェアの論理不良による信頼性の急速な低下が生じる。

(3) 総合判断モデルの欠如

専門家は個々の列車のスジ(列車運転軌跡)を決めるなどの局所判断と同時に、運用や旅客サービスに関する大局判断も行っている。このような総合判断のモデル、すなわち大局判断のために局所判断中に他の判断処理モジュールや人間の判断を取り込んで推論できる協調推論モデルが必要である。従来は局所的な実行可能解や最適解の保証が中心であり、局所判断の途中に判明した大局的な問題処理のための他モジュールや人間との協調推論が容易なアルゴリズムやソフトウェア構造に関する提案は見られない。

(4) 解の理解・修正が困難

完全な機械化が困難であり最終的にはユーザが責任を持つことから、ユーザは理解・納得できる解しか受け入れない。従来の数理計画アルゴリズムのように、ユーザの判断方法と異なる追いつらい論理で作成された解は理解や修正が困難なため受け入れられにくい¹⁴⁾。

(5) 大局判断用マンマシンインタフェースが貧弱

大局判断には関連部署の立場や関係する対象の状況を十分に把握する必要がある⁵⁾。このためには判断に必要な各種情報の並列的・多角的な表示による関連部分への視点の連続移動が重要である¹⁵⁾。従来は、単面のディスプレイのこともありこれが実現されていない。また、列車の発着順序などを計算機が一方向的に提案するだけである。すなわち、ユーザが提案理由を納

得して関連部署を説得するのに必要となる計算機の推論状況の説明や、ユーザが途中介入して自動処理中のモジュールと直接に交信し直観的な高次の判断を加えて協調推論をするためのマンマシンインタフェースに欠ける。

3. 協調推論型知識情報処理方式の提案

以上の問題を解決するため、機械化困難な判断の対話処理と機械化可能な大局判断や局所判断の自動処理とを効率良く統合して、車両や乗務員の運用も考慮した総合的な列車スケジューリングを可能にする協調推論型知識情報処理の基本的考え方を以下に述べる。

3.1 基本的アプローチ

(1) 知識工学的アプローチ

数式モデル化が困難、また協議や判断過程の全体アルゴリズムが不明確であっても、判断や協議に対する断片的な知識や概念は専門家から引き出すことができる。したがってこれらの知識を計算機に組み込み、それを効率良く利用するための枠組みを提供する知識工学的アプローチが有効と考える。有能な専門家の知識を組み込めば、数学的な最適性は保証できなくても専門家レベルの解は得られるので前節(1)の問題に対処できるからである。計算機は専門家の経験的知識を使って解を形成するので、ユーザの理解や修正が容易で前節(4)の問題の解決にも有用である。

(2) オブジェクト指向アプローチ

列車運行スケジューリングへの知識工学的アプローチとしてはプロダクションシステム(PS)を用いた運転整理手法が提案されている⁴⁾。PSは知識工学の有用なパラダイムでその応用例も多いが、システムが大規模・複雑になると、性能や信頼性が問題となる^{11),16),22)}。したがって、列車運行スケジューリングを乗務員などの運用も含めて総合的に考えようとする場合、システム規模や複雑性のため、PSよりもオブジェクト指向^{6)-10),12)}アプローチが有用と考える。オブジェクト指向はPSのように知識を羅列するのではなく抽象化し組織化して行くため性能や信頼性が高く、前節(2)の問題の解決に有用だからである。マルチウィンドウやマウスとの融合性も良いから、多角的・並列的表示による説明・修正が容易となり、前節(5)の問題の解決にも有用と考える。

3.2 協調推論のための協議劇モデルの提案

オブジェクト指向では知識を抽象化し組織化するため、知識構成法つまり知識の構成のための自然な枠組

みが重要であり、それがシステムの拡張性・信頼性・性能を左右すると考える。そこでこの枠組みとして、複数専門家の協議によるスケジューリングを協議劇としてモデル化した協調推論型知識情報処理方式を提案する。この協議劇モデルの基本的な考え方は以下のとおりである。まず、スケジュールの専門家やその管理者に対応するオブジェクトだけを(専門家代行)アクタとし、それ以外のオブジェクトと区別する。アクタ理論⁹⁾のアクタはオブジェクトの理論的表現と考えられるので本論文のアクタとは異なる。本論文のアクタはスケジューリングに直接関係する専門知識(ノウハウ)、および協議や管理に関する専門知識を持つが、他のオブジェクトはこれらを持たない。他のオブジェクトは、乗務員オブジェクトのように人間であってもスケジュールされるだけのもの、および協議に使われるメモのような道具である。これらはスケジュールを立てたり協議やその管理をしたりはしない。アクタが、協議や管理の専門知識を用いて、これらの協議用オブジェクト(提案や問題点のメモとしてのオブジェクト)を作成し、メッセージパッシングにより交信してスケジューリングのための協議劇を進めて行く。つまり、協議劇の登場人物はアクタ(俳優)だけである。この考え方によると、2.1節(3)の感覚的で機械化困難な判断をし、スケジュール案の修正を行う人間(システムのユーザ、経験の浅い専門家または非熟練者でも良い)もアクタとなる。アクタの概念をこのように定義すれば、通常は観客である人間も必要時にはアクタとして協議劇に登場し、協議(や局所判断)の途中に介入して制御の主導権を得て、提案・修正を行うことにより2.2節(2)、(3)、(5)の問題が解決できる(図1)。ただし、計算機が代行する各アクタはユーザである人間アクタに対して局所推論の状況や協議の状況をマルチウィンドウにより多角的・並列的に説明すること、(代行)アクタと人間とのスケジュール上の競合を防止し協調をはかるためにウィンドウに対する人間の介入操作をデモン¹⁵⁾に監視させメッセージパッシングにより管理元アクタへ伝えることが必要と考える(4.1節参照)。

以上のようにオブジェクト指向をベースにした本提案の協議劇モデル(図1)においては、(1)視点の連続性の良い多角・並列的な画面インタフェースと、(2)メッセージパッシング(現実世界の交信と似ているので人間に理解しやすい)を用いた協議用オブジェクトの交信により、各アクタ(人間も含む)が協調推

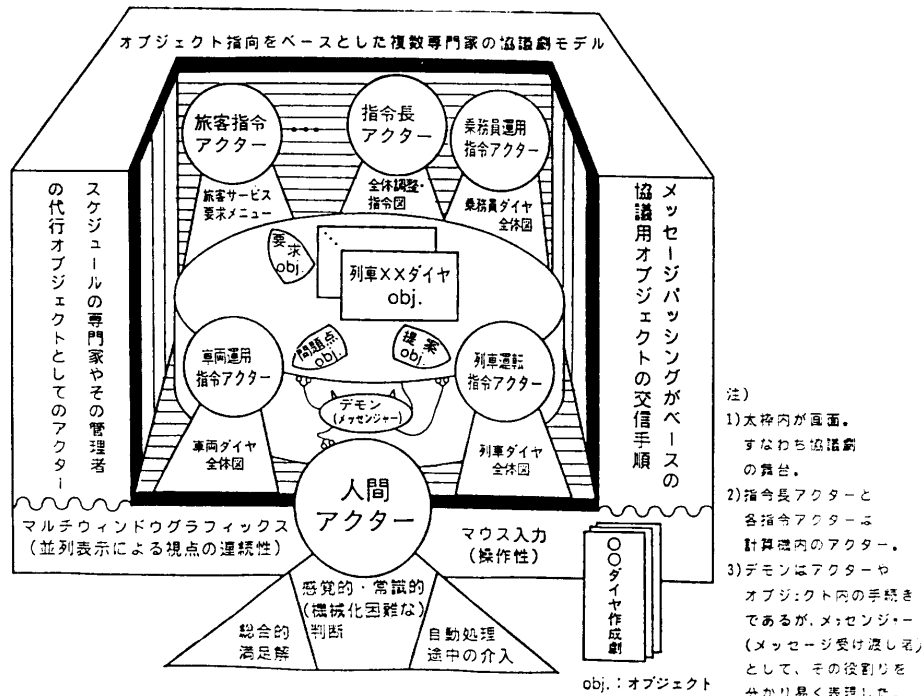


図1 本提案方式の基本的な考え方
Fig. 1 Explanatory diagram of the proposed idea.

論を行える。したがって、大局的にも満足なスケジュールの立案が期待できる。次章では本提案方式をその実現方式を含めて具体化する。

4. 本提案の協調推論方式の具体化

列車運行スケジュールリングを例に対象世界の知識モデルと個々の知識の表現法とそれらを用いた協調推論方式を明らかにして、本提案方式を具体化する。

4.1 オブジェクト指向による対象世界のモデル化

列車運行スケジュールリングの世界を次のようにモデル化する(図2, 図3)。まず、(1)列車運転指令(列車運転関係の専門家)を始めとする各指令員および指令長などの専門家、(2)管理対象であるダイヤやリソース、(3)協議対象となる提案や問題、などをオブジェクトとする。次に、部署内の責任ある管理と部署間の

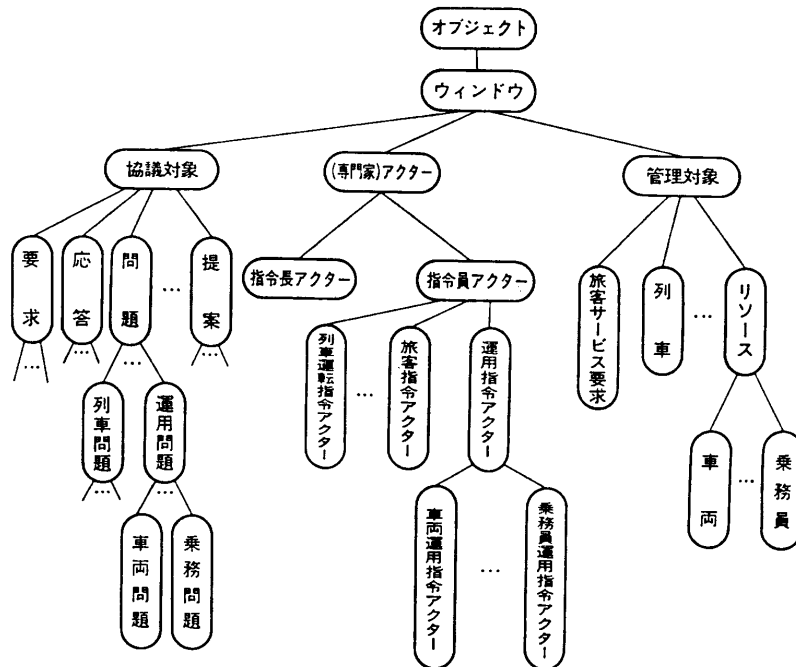


図2 オブジェクト指向による対象世界の知識モデル
Fig. 2 Object-oriented knowledge model of the target field.

協調に必要な判断を代行・支援するために、(1)指令長や指令員に対応するオブジェクトを専門家(代行)アクタとし、(2)指令員アクタには担当部署の管理対

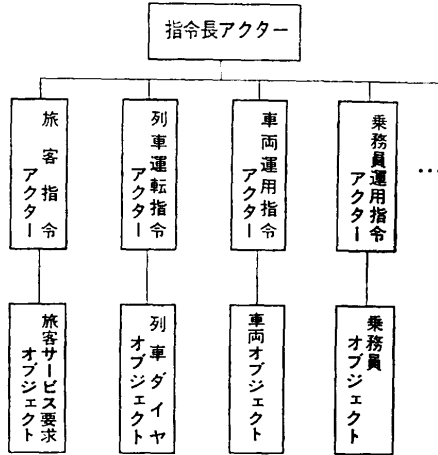


図3 管理関係のオブジェクト指向モデル
Fig. 3 Object-oriented model of management relation.

象 (例えば乗務員) の管理やスケジュールおよび他のアクターとの協議のための知識を属性として組み込み、(3)指令長アクターには指令員の管理や効率的協議のための知識を組み込む。また、舞台上に登場あるいは画面に表示できるように、各オブジェクトにはウィンドウ属性を持たせる。

図2は以上のオブジェクトを属性の継承 (インヘリタンス)^{6), 8), 12)} 関係により組織化した対象の知識モデルの全体構成図である。例えば、車両(運用)指令アクターや乗務員(運用)指令アクター (それぞれ車両運用や乗務員運用の専門家を代行する) は運用指令アクターを、運用指令アクターは指令員アクターを上位クラス (「クラス」はオブジェクト指向の文献⁷⁾などを参照) に持ち、それぞれ上位クラスの属性を継承する。

図3はアクターとその管理対象オブジェクトの間の管理関係による知識の組織化を示す。指令長アクターは協議の効率に関して指令員アクターを管理する (4.3節参照)。指令員アクターは、自部署に対する要求やリソースなど自分の管理する管理対象オブジェクトに関する局所的なスケジューリングや問題点の処理を行う。管理対象オブジェクトは問題点 (例えば、リソース割当の競合) を検出し、管理者である指令員アクター (管理元アクターと呼ぶ) に報告する。

さて、人間もアクターとして協議への介入やスケジュールの変更ができるから、各アクター間で管理やスケジュールの不整合 (例えば、上述のリソース割当の競合) が生じ、協調推論ができなくなる可能性がある。そこで、アクター間の協議は指令長アクターが、管理対象オブジェクトのスケジュールはその管理元アクターが、

一元管理する方式にした。これは、管理対象オブジェクトや指令員アクターが人間の介入操作をスケジュール要求や協議への介入要求としてメッセージに変換し直属の管理元アクターに知らせることにより実現する。

知識は、例えば指令員アクターには、管理や協議のための以下のような知識をオブジェクトのスロット値やメソッドなどの手続きおよびルールの形でダイヤ作成劇の台本として組み込む。

(1) 列車ダイヤの作成・管理およびリソース運用のための定石手順 (例: 列車ダイヤ作成は、急行などの優等列車から先に発着時刻を定め、発着番線の割当を行い、次に、もし…なら、次に…) や運転・運用の基本規則や旅客サービス要求

(2) 自部署内の問題検出や許容条件設定用の知識 (例: 追越不良は列車遅延問題を引き起こす。非優等列車の許容遅れは通常3分。)

(3) 自部署内での調整用知識 (例: 追越不良で追越地点が着駅に近いなら、着時刻を変更する。)

(4) 他部署も含めた大局的問題状況を監視し、調整・協議の要否やその相手を判断する知識 (例: 運用不能なら、発時刻調整を提案し協議をする。発時刻変更は旅客指令アクターに報告・協議する。規定回数以上の試行が必要なら、指令長アクターに報告し協議する。)

(5) 妥協のために制約条件を緩和したり、相手側に次善策や折衷案を提案する知識 (例: 調整がつかない時、自部署と他部署の譲歩度や妥協歴を比較して便乗 (他の乗務員の運転する列車に乗って乗務開始場所まで移動するあまり好ましくない乗務形態) 回数や発車時刻などの制約条件を緩和する。だめなら次善策として車両の回送を提案する。)

4.2 知識表現方式

まず、専門家代行アクターの例として乗務員 (運用) 指令アクターの表現例を図4に示す (プログラムの都合上、スロットのみ漢字を使用)。本アクターは乗務員の運用・管理 (管理対象~管理規則スロット, request~reschedule メソッドなど) や協議 (受付要求~問題状況スロット, デモン, appear 以下のメソッドなど) の知識を持つ。デモン actor-watcher は、問題状況スロット値が変化した時に必要な協議・調整処理を起動したり (4.1節の(4)の知識の一部)、人間が画面操作により (乗務割当の) 管理表スロット値を変更した時の処理や警告を行う。このうち、乗務員運用に特殊な処理は joumu-unyo-watcher が行う。request や delete はリソースの使用要求や解放要求処理用, appear や

<乗務員運用指令>

スロット	メソッド
クラス	request
職務	check
管理者	delete
管理対象	reschedule
管理表	...
管理規則	appear
受付要求	disappear
問題状況	zoom
要求処理歴	move
...	...
	find - resource - picture

デモン

actor - watcher
joumu - unyo - watcher

図 4 乗務員運用指令 (クラス) の表現例

Fig. 4 Knowledge representation of a crew dispatcher actor (class).

<乗務員運用指令 0001>

クラス: 乗務員運用指令
職務: 乗務員運用
管理者: 指令長 0001
管理対象: 乗務員リスト A
管理表: 乗務員運用管理表 0002
管理規則: 乗務員運用規則
受付要求: 乗務員要求 0035
問題状況: (列車問題 0011 乗務問題 0006)
要求処理歴: (乗務員要求 0035 ...)
...

図 5 乗務員運用指令 (インスタンス) の例

Fig. 5 Knowledge representation of a crew dispatcher actor (instance).

<列車>

スロット	デモン
クラス	ressya-watcher
管理者	メソッド
名前	init
始発駅	draw-daiya
終着駅	set-all-relative-slot
...	intercept-check
車両	...
接続列車	
始発時刻	
終着時刻	
列車速度	

図 6 列車オブジェクト (クラス) の例

Fig. 6 Knowledge representation of a train object (class).

zoom などは画面制御用のメソッドである。図 5 は乗務員 (運用) 指令アクタのインスタンス (実体)⁷⁾ である。乗務員要求 0035 や乗務問題 0006 は協議対象オブジェクト (図 2, 図 9) である。

管理対象オブジェクトの表現例として列車オブジェクトを図 6 に示す。これは、始発駅、終着駅、...、(使用) 車両などのスロットやその変化を監視する ressy-watcher デモン、init (初期化用)、draw-daiya (ダイヤ表作画用) その他のメソッドを持つ。そのクラススロット値を列車としたものが、列車オブジェクトのインスタンスで、列車オブジェクトの属性を継承する。列車の名前、始発駅...などのスロットは画面に表示し (図 10 中央右)、オブジェクトの状態の直観的把握を容易にする。人間がこれらを変更すると、デモンがそれを管理者である列車 (運転) 指令アクタに伝える。図 8 (a) は列車監視ルールの日本語記述例、(b) はそのオブジェクト指向⁸⁾ による表現例である。最初の条件文は列車 (ressya, 例えば <H0917>)

指令長	旅客指令	列車指令	車両指令	乗務員指令
		X 列車発時刻設定		
	OK	↓ 試行回数=1 (代替案をさがす。指令長には知らせない。)	OK	乗務員割当不能
		↓ X 列車発時刻調整 (競合列車の時刻調整含む)	OK	OK
	OK	↓ 競合列車発時刻再調整	OK	乗務員割当不能
	⋮	↓ 試行回数=2 (同上)	⋮	⋮
	⋮	↓ 試行回数=3 (同上)	⋮	⋮
	OK	↓ X 列車発時刻再々調整	車両割当不能	OK
	OK	↓ 競合列車発時刻再々調整	OK	便乗必要
	⋮	↓ 試行回数=4 (指令長に知らせる)	⋮	⋮
	⋮	↓ 妥協案提案	OK	(妥協 乗務問題記録)
	妥協要求	↓ 妥協案として X 列車の ダイヤ設定・表示 (調整歴、問題状況記録)	OK	

図 7 協議による妥協案作成プロセスの例

Fig. 7 Example of negotiation process for making a compromised plan.

```

if (旅客サービス要求を満足する)
  (運転禁止時間に走行することはない)
  (場合のない駅番線で待避・追越が可能)
  . . .
  (列車運行に必要な車両の割り当てが可能)
  (列車運行に必要な乗務員の割り当てが可能)
then (車両指令に車両を要求する)
      (乗務員指令に乗務員を要求する)
      . . .
      (各駅の発着時刻を設定する)
      (旅客指令にダイヤ変更を知らせる)
      (a) 発着時刻監視ルールの例

(rule hatsujikoku-kanshil
  if (send ryokaku-shirei :check ressyu )
      (send ressyu-shirei :check-unten-kinshi-jikan ressyu )
      (send eki-shirei :taihi-oikoshi ressyu )
      . . .
      (send syaryo-shirei :check ressyu )
      (send jomuin-shirei :check ressyu )
  then (send syaryo-shirei :request ressyu )
        (send jomuin-shirei :request ressyu )
        . . .
        (send ressyu-shirei :set-daiya ressyu )
        (send ryokaku-shirei :notify-change ressyu ))
      (b) オブジェクト指向による表現
  
```

図 8 列車発時刻監視ルールの例とそのオブジェクト指向による表現例
 Fig. 8 Example of a train departure time monitor rule and its object-oriented representation.

```

<乗務問題0006>
  クラス:乗務問題
  内容:"乗務員J20は、便乗が必要となる"
  問題対象:J20
  対応要求:乗務員要求0005
  問題提起元:乗務員運用指令0001
  問題提起先:列車運転指令0001
  問題種別:便乗
  協議者範囲:(担当 指令長 人間)
  許容条件:許容条件0051
  報告先:(指令長 人間)
  問題度:(便乗コスト)
  . . .
  
```

図 9 乗務問題オブジェクト (インスタンス) の例
 Fig. 9 Knowledge representation of a crew problem object (instance).

のダイヤが旅客サービス条件を満足するかを旅客指令アクタに問い合わせメッセージである。本方式では、このようなメッセージ送信^{8),9)}により、(図8では発時刻変更)に 関係する専門家と協議するための知識が自然に表現できる。提案、要求、問題点などアクタ間協議の対象となる協議対象オブジェクト (図2参照、協議用オブジェクト) の表現例として、乗務問題オブジェクトのインスタンスを図9に示す。問題提起元(先)スロットは問題の提起元(先)アクタを、報告先スロットは問題の報告先(提起先以外)のアクタを示す。これらは協議者範囲、許容条件、問題度などのスロットとともに、乗務問題(乗務員の運用上の問題)の協議に必要な知識を表現する。以上を利用した協調推論方式を次節で述べる。

4.3 協調推論方式

本方式によるダイヤ作成システムにおいては、列車(運転)指令アクタは、旅客サービスに関する知識およびダイヤ作成の定石手順や自部署内の問題検出・調整用知識(図4のようなオブジェクトに台本として記述する。4.1節の(1)~(3)参照)に従って局所推論を行う。さらに4.1節の(4)や(5)などの知識に基づきアクタ間協議による協調推論を行い、列車運転条件と車両や乗務員の運用を総合的に判断しながら旅客サービス要求に合う列車ダイヤを作成して行く。以下では後者、すなわち、(人間も含む)アクタ間協議用の協調推論方式について述べる。

列車指令アクタは、局所推論中に乗務員が必要となれば、乗務員要求オブジェクトを作成し、メッセージパッシングにより、乗務員指令アクタにこれを送る。乗務員指令アクタは request メソッドに組み込んだ台本に従って、管理規則スロットの乗務員運用規則(図5)を満足する乗務員オブジェクトを探す。見つければ、応答オブジェクトを作成しメッセージパッシングにより返す。見つからなければ(乗務)問題オブジェクト(図9)を返す。問題オブジェクトは、その付加手続き(デモン)によって、問題提起元と提起先の両アクタにメッセージパッシングされ、それらのアクタの問題状況スロットに加えられる。アクタのデモン actor-watcher (図4)は、問題状況スロット値の変化を監視しており、台本(4.1節の(4)の知識、例えば図9の協議者範囲スロット値)に従って、メッセージパッシングにより問題オブジェクトに関連する他のアクタに伝える。人間には、関連するアクタを示す画面と問題オブジェクトを並列表示してこの問題を伝える。こ

の問題を解決するためのアクタ間協議による妥協案作成プロセスを図7の例を用いて説明する。

(1) 列車指令アクタは試行回数を1にセットし妥協案作成プロセスを開始する。まず、解決案(発時刻調整などによる)を推論し、その結果を、提案オブジェクトとして、メッセージパッシングにより、関係アクタに伝える。解決案に対しても問題オブジェクトが返れば、試行回数を更新し、代替案を推論し、上記と同様にメッセージパッシングにより提案する。

(2) 試行回数更新時、指令員アクタは、問題オブジェクトをメッセージパッシングすることにより、指令長アクタに協議状況を知らせたり人間に問い合わせたりする。これは、次のような経験則(ルール)に従って行う。すなわち、条件部には、試行歴や問題歴および最新の問題オブジェクト(図5の問題状況スロット参照)やその協議者範囲や問題度(図9最下段)などを持つ。結論部には、協議状況の報告や問合せのタイミングや範囲を持つ。これにより、例えば図7では、試行3回目までは指令員アクタ間で協議しているが、試行4回目には、3回も試行を重ねていることと3回目に報告された問題が軽度なことから判断して、指令長アクタに協議状況を報告している。

(3) 指令長アクタは効率的協議や協議への人間の介入を処理するための協議管理知識を持つ。効率的協議のための知識は、上記報告と他の大局的な状況(協議時間、過去の協議効率、外部環境、etc.)から協議方針変更や妥協の要求や協議中断などの処理を行う。一方、人間の介入を処理するための知識は人間に協議の主導権を渡したり必要な説明を行う。図7の例では、指令長アクタは効率的協議のための協議管理知識を用い、列車指令アクタの協議状況(前述の試行4回目のもの)の報告に対して、メッセージパッシングにより妥協要求オブジェクトを返す。列車指令アクタはこのオブジェクトに含まれる妥協方針に従って妥協案を提案オブジェクトとして作成し、メッセージパッシングにより関連(する)アクタに提案する。関連アクタは、この妥協案と、3回目の試行までに問題状況スロット(図5参照)に保存された他部署(図9の問題提起元スロットの値からわかる)の問題状況と、4.1節の(5)の知識から、制約条件の緩和や妥協の判断をする。妥協成立の場合、関連アクタは問題状況スロットに問題点を記録し、説明・修正や今後の妥協や制約緩和の判断に利用する。妥協不成立の場合、前述の妥協要求オブジェクト中に指示された妥協方針に従って列

車指令アクタが協議を再試行したり指令長アクタに報告したりする。

さて、人間が介入して協議を要求した場合、例えば列車指令アクタでなく、人間が画面からマウスを介して直接に乗務員の割当要求を行った場合は、アクセスしたウィンドウ(すなわちオブジェクト)のデモンが、乗務員要求オブジェクトを作成し、メッセージパッシングにより乗務員指令アクタに伝える。この時も、問題があれば、乗務員指令アクタが、問題オブジェクトを作成し並列表示して人間に警告する。また同時に、この問題オブジェクトを、指令長アクタおよび関連アクタである列車指令アクタにメッセージパッシングして、人間からの乗務員割当要求と問題点を伝える。

このように、相手が指令員アクタ、指令長アクタ、人間アクタのいずれの場合でも、基本的に協議対象オブジェクトをメッセージパッシングしてアクタ間通信を行うが、この通信手順を中心に、アクタ間協議用の協調推論方式を述べた。すでに述べた対象世界のモデルや知識表現方式と合わせて、本提案の協議劇モデルすなわち協調推論形知識情報処理方式が実現方式も含めて具体化されたと考える。以上、協議対象オブジェクトによる協調推論を中心とした、オブジェクト指向^{6)~9)}型のメッセージパッシングによる統一的な協調推論インタフェースを用いて、人間を含む各アクタは協議や管理の対象となるオブジェクトの伝達およびマルチウィンドウを介した各種状況の多角・並列的説明や介入・変更が可能となる。したがって、スケジューリングやそのための協議の管理に関して、各アクタ(人間を含む)が相互の問題点を把握し調整できるため、大局的に妥当なスケジューリングが可能となる。

5. 実験システムの動作例と有効性の評価

本提案方式を評価するため、基本的な専門知識を組み込んだ実験システム(およそ、オブジェクト40、メソッド150、ルール60)を開発した¹⁰⁾。実験システムは、与えられた列車運転条件や運用条件の下で、旅客サービス要求を満足する列車ダイヤの作成や支援を行う。

5.1 実験システムの動作例

実験データ(仮定)として、(1)旅客サービス要求が「A駅-B駅間にH型列車(優等列車)4本、K型列車3本を運転する。同じ型(種別)の列車の運転間隔は3時間を原則とするが、H型列車は20分、K型列車は40分以内のずれは許容する。ただし、始発列

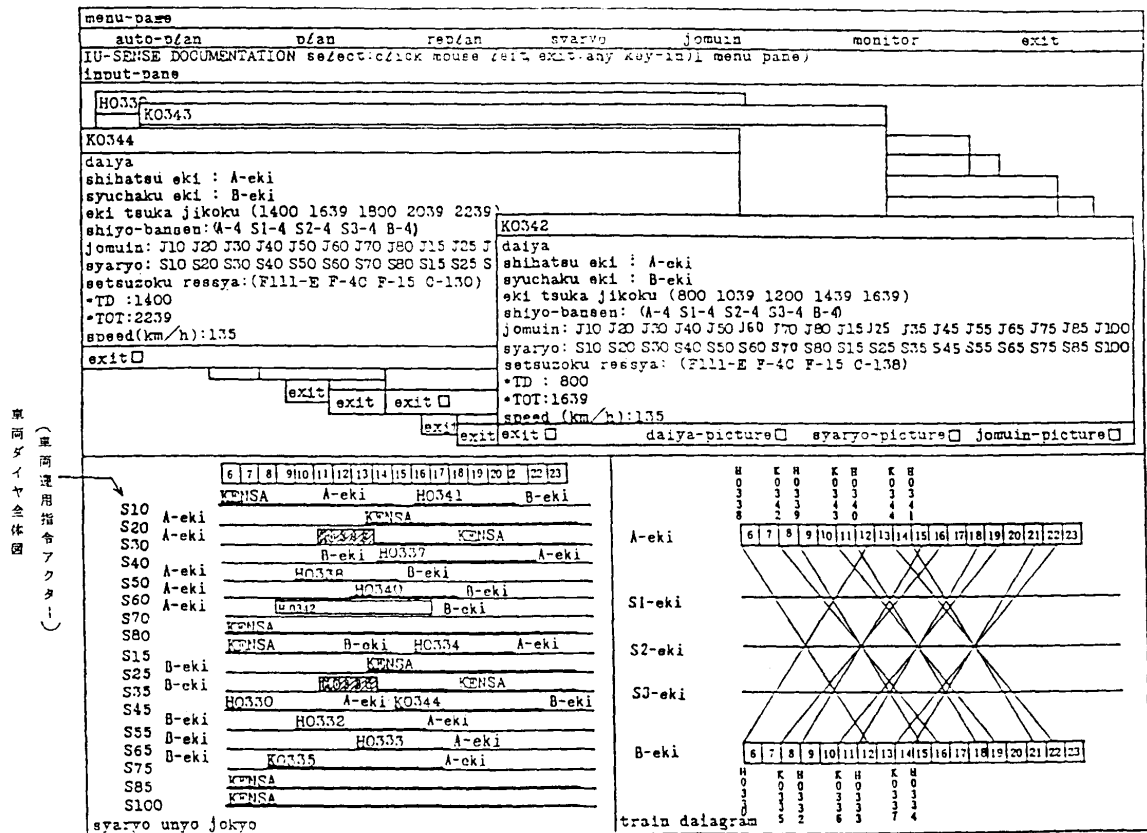


図 10 実験システムによる列車ダイヤ作成・表示例

(斜線のハッチ部は、車両運用が原則に反することを警告している)

Fig. 10 Example of the train diagram scheduled and displayed in the screen by the experimental system. (The highlighted hatching parts are the warnings by the car dispatcher actor.)

車の発時刻は H 型列車は 6 時～6 時 20 分、K 型列車は 8 時～8 時 20 分の間とする。(2)列車運転条件が「H 型列車は時速 180 キロ、K 型列車は 135 キロ、0～6 時の運転は禁止、追越し用の待避時間の最大許容値は 5 分」、(3)車両・乗務員条件が「図 10、11 のように、S80、S85、S100、J10、J15 (ケース 2 では J80)、J85、J100 は終日、S10、S15、J80 (ケース 2 では J15) は 15 時まで、S20、S30、S25、S35、J60 (ケース 2 では J25)、J70 (ケース 2 では J35) は検査や休暇のため 14 時以降は運用不可であり、S10 など数字部が偶数の車両や乗務員は A 駅の管轄、奇数は B 駅の管轄、検査 (休暇) 場所の変更は不可、休憩・折返し・出庫時分の許容最小値は 10 分」の 2 ケースを考える。図 10 の画面 1～3 段目は、指令長アクタに対応する。2 段目のコマンド入力画面から、マウスにより auto-plan を選択すると、旅客サービス要求が作成・表示される。これを受けて列車指令アクタは、4.3 節の推論処理に従って関連するアクタと協

議を重ね列車オブジェクトを順次作成し、これらにメッセージパッシングして図 10 のように、個々の列車ダイヤ表として画面中段 (4 段目) に表示する。この時、車両の検査・運用スケジュールを示す車両ダイヤ全体図や、各列車のスジを示すその隣の列車ダイヤ全体図 (列車指令アクタ) も並列に表示する。他の指令員アクタおよび管理対象や協議対象などのオブジェクトもウィンドウであり、メッセージパッシングして並列表示させ局所的な推論や協議の過程をモニターできる。

ダイヤ作成中、専門家アクタ (図 11 の例では、乗務員指令アクタ) は、問題を検出した場合、問題点をハイライト (白黒逆表示) して画面の前面に出、専門家代行アクタ (人間でないアクタ) 間の協議による自動調整や人間の協議参加を要求する。自動調整は 4.3 節に述べたとおりである。人間の協議参加は、自動調整の途中や不成功時に必要で、人間が介入し制御権を奪う。人間は、オブジェクトである各種ダイヤ図・表

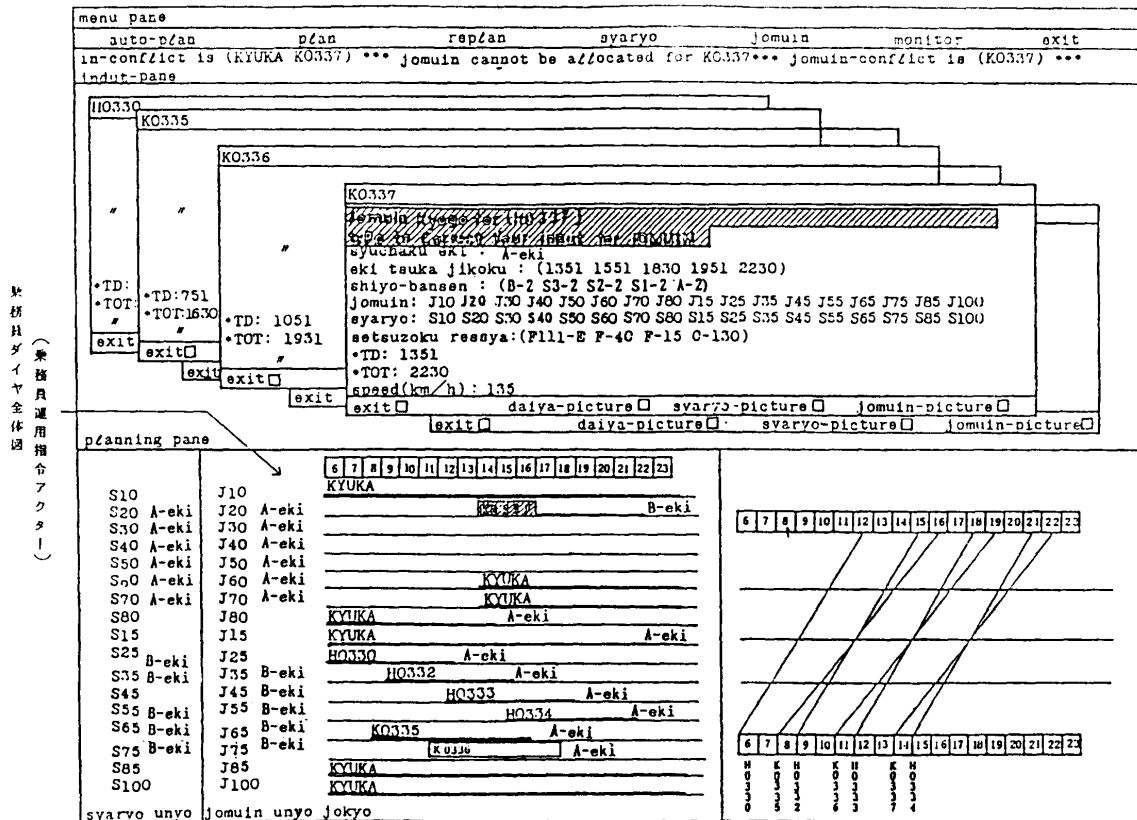


図 11 乗務員指令アクタが問題を検出して人間へ協議を求めた画面

(列車 K0337 への乗務員の割当が原則に反する。図と表の両方に警告されている)

Fig. 11 Screen where a crew dispatcher actor recognizes the problem and asks for human decision. (The crew cannot be allocated for the train "K0337". Warning are both in the train schedule table window and crew schedule picture window.)

に対しマウスを用いた直接操作により専門家代行アクタと交信し、推論・協議状況の監視や解決案の提案を行う。人間のこの操作はデモンが要求オブジェクトや提案オブジェクトに変換し、メッセージパッシングにより各専門家代行アクタに伝える。専門家代行アクタは多角的説明のためにダイヤや問題オブジェクトの並列表示・変形・スクロール・移動を行ったり、4.3節の方式に従って推論・協議し、関連値(例えば使用車両や各駅の発着時刻)の自動設定や、問題点の自動調整・警告・説明や、修正用ガイダンスなどを行う。人間は試行回数に関する提案など、協議や局所推論の管理のための提案もできる。一方、乗務員指令アクタが妥協案を提案すると同時に、問題点を伝えられた(4.3節参照)列車指令アクタは、大局判断を支援するため、列車ダイヤ表に列車指令としての問題点を並列表示し協議状況を説明する(図 11)。このような並列表示により、人間は、全体的な協議状況を判断し、ある場合には、いったん妥協案を承認して自動処理を続行

させ、後で一括して調整する。また、ある場合には、先に人間が、関連するアクタと協議して調整した後に、列車指令アクタに主導権を返し、次の列車から、あるいは最初や途中の列車に戻り、ダイヤ設定のための推論を再開させることもできる。

以上、メッセージパッシングを基本としたアクタ間協調推論を繰り返して効率良くダイヤが作成できる。

5.2 本提案方式の有効性

前節の実験例は簡単に見えるが、発着時刻や追越し条件が車両・乗務員の運用条件と絡むため、ケース2のダイヤを筆者ら(実験用では10回程度ダイヤを作っている)が手作成するのに約2日かかった。約2時間で案案を作成し、運用条件の違反や発車間隔や追越し不良などの修正を5回行って完成させた。不良や違反発見時間は回数 n に対し指数関数的(約 2^{n-2} 時間)に増加した。修正時間も各回30分~2時間で最初から作り直すのと同程度かかることも多かった。

実験システムによるダイヤ作成時間は2ケースとも

約30分であった。計算機の提案には3～4の問題があったが、矛盾・違反の自動チェックや解決案自動提案や多角・並列表示などの大局判断支援の下で人間も含めて協議・調整し比較的容易に解決できた。例えば、不良原因の把握には以下のような多角的説明が有益であった。すなわち、図11の例で乗務員割当違反の理由がつかめず、列車ダイヤ表、中でも警告文「列車xxへの割当は休暇と競合」と、乗務員全体ダイヤ図とを並列表示することにより、視点の連続移動¹⁶⁾を容易にして何度も比較した。こうしてオブジェクトとしての図表に直接アクセスして関連アクタと対話的に協調推論し、ようやく理由がわかり、調整案を見出せた。

以上の実験例ではダイヤ作成効率が手作成に対し数10倍(2日が0.5時間に)向上した。これは提案方式が次の点で2.2節の問題点を解決したためと考える。

(1) 総合的満足解への修正が容易な素案の自動提案
現場の専門家の知識を組み込んだ各専門家アクタの局所推論と、大局的な問題解決のためのアクタ間協議(4.3節参照)すなわち協調推論により、運用や旅客サービスも含め総合的に見て問題点が少なく(実験例では3～4件)、人間が理解・修正しやすい(実験例では、修正時間は20分程度)ダイヤ(素案)を自動提案できる。

(2) 大局判断支援用協調推論インタフェースの提供
協議用オブジェクトのメッセージパッシングを用いたアクタ間交信を基本とした協調推論インタフェース(4章最後を参照)により、自動処理途中の介入による対話処理、見落としやすい大局的な違反や矛盾の発見、問題の全体構造の迅速な判断が容易になる。

6. おわりに

列車運行スケジューリングを具体例として、大局判断の機械化を目的に、複数専門家の推論・協議を代行・支援する協調推論型知識情報処理の方式を提案した。簡単な専門知識を組み込んだ実験システムを開発して評価し、ダイヤ作成効率が手作成の場合の10倍以上向上(2日→0.5時間)することを確認した。

提案方式は各部署の専門家や全体管理者に対応する複数のアクタ(人間も含む)を登場人物とし、協議対象オブジェクトをメッセージパッシングしてアクタ間協議を行う協議劇モデルとしての協調推論型知識情報処理の枠組みである。大局判断を必要とする複雑な計画立案などへの知識工学应用到有用と考える。

謝辞 最後に、本研究の場、および本報をまとめるに当り御討論いただいた、当所堂免信義所長、春名公一副所長、中尾和夫部長、松本邦顕主任研究員、および運転整理、乗務員運用システムの開発経験をベースに御討論・御示唆をいただいた当社水戸工場、松丸宏部長をはじめとする関係者各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) McDermott, J.: R1: A Rule-Based Configurer of Computer Systems, *Artif. Intell.*, Vol. 19, No. 1, pp. 39-88 (1982).
- 2) 井原: 知識工学の産業界への応用, *電学誌*, Vol. 103, p. 204 (1983).
- 3) 大川, ほか: 新幹線における最適待避変更アルゴリズム, 第18回鉄道サイバネ論文集, p. 145 (1983).
- 4) 荒屋, ほか: ヒューリスティクスを利用した列車運転整理手法, *電学論C*, Vol. 30, p. 249 (1983).
- 5) 柳川, ほか: 新幹線列車指令におけるマンマシンの適合について, 第14回鉄道サイバネ論文集, p. 235 (1977).
- 6) Bobrow, D. and Stefik, M.: The LOOPS Manual, Knowledge-Based VLSI Design Group Memo KB-VLSI-81-13, Xerox PARC (1982).
- 7) Goldberg, A. and Robson, D.: *Smalltalk-80, The Language and Its Implementation*, Addison Wesley, New York (1983).
- 8) Weinreb, D. and Moon, D.: Flavors: Message Passing in the Lisp Machine, MIT AI memo, No. 602 (1980).
- 9) Hewitt, C.: Viewing Control Structure as Patterns of Passing-Messages, *Artif. Intell.*, pp. 323-326 (1977).
- 10) 鶴田, ほか: オブジェクト指向型列車ダイヤ作成・運転整理エキスパートシステムの開発, 第30回情報処理学会全国大会論文集, p. 1493 (1985).
- 11) 鶴田, ほか: 連想・選別型推論のアナロジーによるプロダクションシステムの高速度実行方式, *情報処理学会論文誌*, Vol. 26, No. 4, pp. 696-705 (1985).
- 12) Minsky, M.: A Framework for Representing Knowledge, in Winston P. (ed.), *The Psychology of Computer Vision*, pp. 211-277, McGraw-Hill, New York (1975).
- 13) 福森: コンピュータ利用による列車ダイヤ作成の基本手法, 第70回京都大学情報工学研究談話会 (1981).
- 14) 坪井, ほか: 電車乗務員運用ダイヤの自動作成アルゴリズムの提案, 第16回自連合, p. 405 (1973).
- 15) 佐伯: イメージ化による知識と学習, 東洋館, 東京 (1978).

- 16) Erman, L. D., Hayes-Roth, F., Lesser, V. R. and Reddy, D. R.: The Hearsay-II Speech-Understanding System: Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty, *Comput. Surv.*, Vol. 12, pp. 213-253 (1980).
- 17) 中島, ほか: 車両充当のアルゴリズム, 第21回鉄道サイバネ, pp. 279-282 (1984).
- 18) 稲田, ほか: 電子計算機による列車ダイヤ作成, 情報処理学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 199-207 (1969).
- 19) 福森, ほか: 人工知能の手法を導入した列車ダイヤ作成のための基本アルゴリズム, 信学論, Vol. J69-D, No. 4, pp. 569-579 (1986).
- 20) 安倍, ほか: 分岐限定法を用いた列車順序最適化手法, SICE 論文集, Vol. 21, No. 5, pp. 92-99 (1985).
- 21) 駒谷, ほか: 列車運転整理支援システム—EST-RAC-III—, 電気学会システム制御研究会, SC-85-15, pp. 21-30 (1985).
- 22) Forgy, C. L.: Rete: A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem, *Artif. Intell.*, Vol. 19, pp. 17-37 (1982).

(昭和63年3月25日受付)
(平成元年2月14日採録)



鶴田 節夫 (正会員)

昭和22年3月25日生。昭和46年3月早稲田大学工学部電気通信学科卒業。昭和48年3月名古屋大学大学院電気・電子・電気第2工学研究科修士課程修了。工学博士。同年4月(株)日立製作所システム開発研究所入社。現在、指令・管制システムなどを対象に知識情報処理の研究に従事。電気学会、電子情報通信学会、ACM、IEEE 各会員。



鬼塚 武郎 (正会員)

1954年東京大学工学部卒業。同年日本国有鉄道入社、主に運転計画業務に従事。1960年日立製作所入社、ソフトウェア工場等を経てシステム開発研究所に勤務。その間、新幹線コムトラックなど輸送計画管理システムの開発に従事。計画管理業務における知識情報処理システムに関心を持つ。電気学会、計測制御学会各会員。