

修士論文

（題 目）

グループ意思決定支援システムのための
エージェント間の合意形成機構に関する研究

指導教官 石井 直宏 教授

新谷 虎松 助教授

工学研究科博士前期課程電気情報工学専攻

平成7年4月 入学

（氏名） 伊藤 孝行

論文要旨

グループ意思決定支援システムに人工知能の技術を導入することによって、効果的な意思決定の支援が期待されている。本研究では、人工知能の分野で最近注目されているマルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに導入することにより、より知的で効果的なグループの意思決定の支援を目指している。特に自律的なエージェントの機能の一つである合意形成を用いることによって、グループの意思決定を支援する。既存のシステムにおいては合意形成を単に投票方式で行なう場合が多い。投票方式は人間の社会で広く用いられ、馴染みのある方式であるため、分かりやすいという長所がある。しかし、投票方式には様々な矛盾が含まれていることも指摘されている。そこで本研究では、投票方式を補う方式として、説得による交渉方式を提案する。本論文では、説得を用いた合意形成に基づくグループ意思決定支援システムとして、会議スケジューリングシステムとグループ代替案選択支援システム

を試作する。会議スケジューリングシステムにおいては、合理的なエージェントという観点から説得による交渉プロトコルを構築する。ここで提案する説得による交渉方式は、合意を保留する。これにより、エージェント間において合理的な取り引きが可能な状況をつくり出すことが可能である。説得による交渉方式では、エージェント間の効用の受渡しを考える必要はないので、異なる人間の間での効用の違いを考慮する必要がない。そして、ここではエージェントは個々の合理性を単に追求することによって、全体として合意をより多く得ることが可能であることを実験を通して示す。会議スケジューリングシステムは、アプリケーション記述言語 Tcl/Tk を用いて試作。グループ代替案選択支援システムでは、エージェントは、AHP (Analytic Hierarchy Process) によってユーザの主観的な評価を定量化して知識として持つことができる。AHP における曖昧な (Fuzzy な) 言葉による (Verbal な) 比較尺度に注目し、エージェントがユーザの主観的判断を適当に調整することによって、説得という交渉を実現する。AHP を用いることによって、ユーザは自分がなぜ説得されたのかということが分かり易くなる。そして、グループ代替案選択支援システムをプログラミング言語 Java を用いて試作する。本論文では、マルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに応用できることを示し、エージェント間の説得という交渉方式の実現方法を示す。

Abstract

Group decision support systems are being investigated very actively in the field of operations research. If we introduce Artificial Intelligence (AI) methods into the Group decision support systems, we can expect to further enhance the intelligence of their support. In general, a group reaches consensus by use of a vote. But the result of voting are often inconsistent, largely due to the inconsistency of voting rules: Majority Rule, Single Voting Rule, etc. Arrow's impossibility theorem has shown that no voting method exists which satisfies all of the following four conditions: positive association of social and individual values, independence of irrelevant alternatives, citizen's sovereignty and no-dictatorship. In this paper we propose a persuasion mechanism rather than voting methods for negotiation among agents. In this work, we implement a meeting scheduling system and a group choice design support system. In the meeting scheduling

ing system, the persuasion mechanism is based on rationality of agents. In this persuasion mechanism, agents can suspend a proposition rejected by other agents. By suspending a consensus, agents can rationally deal with each other. The results of our current experiments demonstrated that the persuasion mechanism is an effective method to reach a lot of consensus. The meeting scheduling system is written in Tcl/Tk. The group choice design support system helps a group decision to make a reasonable choice from alternatives. In the system, each user manages a system for an Analytic Hierarchy Process (AHP) and an agent. Each user subjectively constructs a decision hierarchy and determines the various weights of alternatives by using AHP. Based on the hierarchy and weights, agents negotiate with each other on behalf of their users. During the negotiation, agents persuade one another. Adopting some of the features of AHP, we implement a new persuasion mechanism. We have implemented the group choice design support system to see how effectively the persuasion mechanism can be used. The results of our current experiments demonstrated that the persuasion mechanism is an effective method for a group decision support system based on multi-agent negotiation.

目 次

1	序論	12
1.1	マルチエージェントシステムのグループ意思決定支援システムへの応用	12
1.2	エージェント間の合意形成における問題点	16
1.3	エージェント間の説得機構	17
1.4	本論文の構成	19
2	関連研究	22
2.1	エージェント間交渉	22
2.1.1	ゲーム理論的アプローチ	23
2.1.2	交渉プロトコル	28
2.1.3	合意形成	37
2.2	グループ意思決定支援	41

2.2.1 グループ意思決定支援システム	42
2.2.2 AHP によるグループ意思決定支援	43
2.2.3 会議スケジューリングシステム	44
2.3 本研究の位置付け	49
3 会議スケジューリングシステム	51
3.1 会議スケジューリングシステムの概要	51
3.2 システム構成	52
3.3 会議スケジューリングにおける説得	53
3.4 実験と評価	60
3.5 まとめ	63
4 グループ代替案選択支援システム	65
4.1 グループ代替案選択支援システムの概要	65
4.2 システム構成	66
4.3 AHP の利用	69
4.4 説得機構と説明機構	73
4.5 実行例と議論	79
4.6 まとめ	83

5 議論	85
5.1 本研究の要約	85
5.2 成果	88
5.3 今後の課題	89
6 結論	91
A AHP の概要	105

図 目 次

1.1 エージェント	14
1.2 本論文の構成	21
2.1 エージェントの目標間の関係	25
2.2 タスクアナウンスメント	30
2.3 タスクアナウンスメント(相互選択)	31
2.4 入札	32
2.5 入札(相互選択)	33
2.6 落札	34
2.7 オークションの例	37
2.8 最高値で落札	38
2.9 相手の入札が察知可能である時	39
2.10 Vickrey オークション	40

2.11 本研究の位置付け	50
3.1 システム構成	52
3.2 エージェントの交渉の例	56
3.3 会議 M_1 を提案	57
3.4 会議 M_1 の評価	58
3.5 会議 M_1 の保留	58
3.6 会議 M_2 の提案	59
3.7 説得	60
3.8 説得成功	61
3.9 実験結果	62
3.10 ユーザインターフェース	63
4.1 システム構成	67
4.2 ユーザ, AHP 及びエージェントの関係	68
4.3 AHP における一対比較の尺度	70
4.4 エージェント間の交渉の流れの例	73
4.5 2 エージェント間の説得の流れ	75
4.6 重み付けの調整の例	76
4.7 一対比較行列における重み付けの調整の例	77

4.8 実行例 (1)	80
4.9 実行例 (2)	81
A.1 海外旅行の行き先選択問題の階層構造	106
A.2 より複雑な階層構造のサポート	108

表 目 次

2.1 クラーク税の例	48
A.1 “海外旅行の行き先の選定” について	108
A.2 “知的興味” について	108
A.3 “治安” について	109
A.4 “費用” について	109
A.5 一対比較の尺度	112
A.6 ”知的興味” に関する一対比較行列	112
A.7 ランダム整合度	115

Chapter 1

序論

本論文の主題であるエージェント間の合意形成について，それがマルチエージェントシステムに関する研究の流れとグループ意思決定支援システムに関する研究の流れという2つの研究の流れにおいてどのような位置付けにあるかを説明する。

1.1 マルチエージェントシステムのグループ意思決定支援システムへの応用

人工知能(Artificial Intelligence)では，人間をモデル化し単体のシステムによる問題解決を目指す。一方，分散人工知能(Distributed Artificial

Intelligence)においては、社会をモデル化し複数のシステムによる問題解決を目指している。人間をモデル化するか社会をモデル化するかが相違点となる。分散人工知能は、マルチエージェントシステム (Multi-Agent System) と分散問題解決 (Distributed Problem Solving) の研究分野に分類できる¹。マルチエージェントシステムと分散問題解決を比較した場合、マルチエージェントシステムとは複数のエージェントと呼ばれる問題解決器が合理的に自己の利益（または各エージェントの設計者の利益）を追求し、大域的な効用といったような概念が存在しないシステムとして定義される。つまり、マルチエージェントシステムにおいては、各エージェントが個々に自己の利益を追求した結果として、なんらかの問題解決が行なわれるというシステムである。一方、分散問題解決は、複数の問題解決器²にわたる広域的な効用や共有ゴールを仮定するため、マルチエージェントシステムとは明確に区別される。

マルチエージェントシステムにおいてエージェントとは、自らの知識、意図、信念、願望を持つシステムであり、自律的に環境から必要な情報を知覚し、熟考プロセスを経て、環境に対して何らかの行動を働きかけるシステムと定義できる（図 1.1）。本論文では説明を簡単にするために、

¹協調問題解決 (Cooperative Problem Solving) と交渉・均衡化 (Negotiation and Balancing) という分類もある [24][30]

²エージェントと呼ばれる場合もあるが、ここではマルチエージェントシステムにおける自律性を持った問題解決器のみをエージェントと呼ぶ

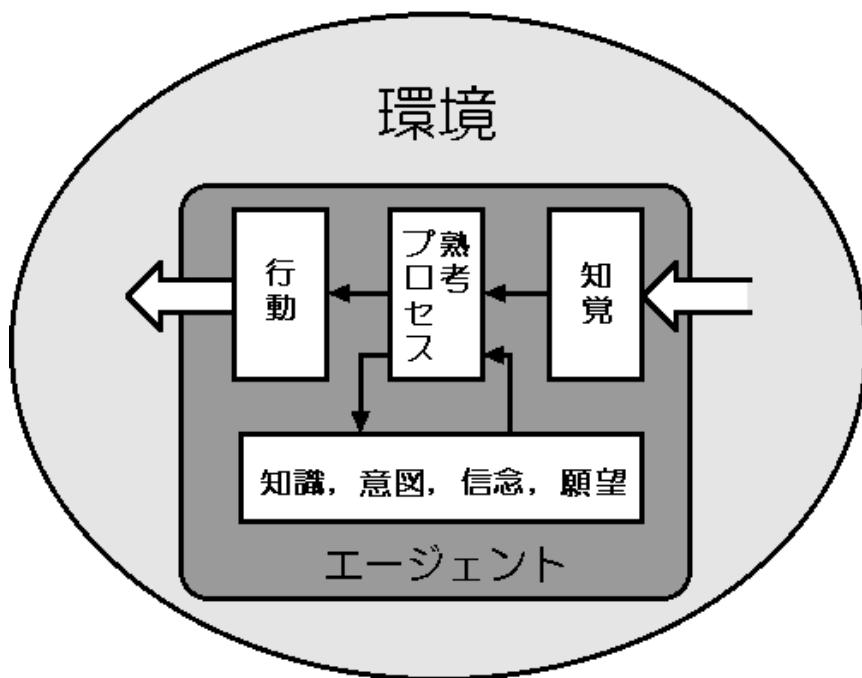


Figure 1.1: エージェント

エージェントを擬人化する場合がある。

一方、オペレーションズ・リサーチの分野では、グループ意思決定支援システム (GDSS : Group Decision Support System) の研究が盛んに行なわれている。グループ意思決定支援システムは、ユーザ間の共通のコミュニケーション障壁を取り除くことにより、グループの意思決定プロセスを改善することをねらいとするものであり、そのために決定分析を構造化し、議論のパターン、タイミング、内容にシステムティックな指示を与える技術を提供するものである。近年、グループ意思決定支援シ

システムに，人工知能の技術を応用することによる知的な支援効果が期待されている．そこで，人工知能の技術といえるマルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに応用することにより，より知的で効果的なグループ意思決定支援システムを実現することを本研究の目的とする．

グループ意思決定支援システムとしてのマルチエージェントシステムという枠組で，エージェントには，合意形成のための機能や，ユーザとのインタラクションのための機能，などが必要である．グループ意思決定支援システムでは，グループの意思決定プロセスの各場面での様々な合意を得ることが必要であるが，それは多大な労力，時間を費やす作業となる．そこでユーザの代理として合意を効果的に得ることがエージェントに求められる．さらに，ユーザの代理としてエージェントが他のエージェントと合意を形成したり，なんらかの相互作用を持つからには，ユーザのエージェントに対する信頼性も重要な鍵となる．つまり，ユーザとの柔軟なインタラクションもエージェントに求められる機能であるといえる．

1.2 エージェント間の合意形成における問題点

マルチエージェントシステムとしてのグループ意思決定支援システムにおけるエージェントの重要な機能として合意形成を挙げた。合意形成において重要な点は、個人の好みをグループの決定にうまく反映することである。人間社会の合意形成では、一般的に投票によって合意を得る。しかし、投票による合意形成には幾つかの問題点がある。まず、民主的とされる集計方法が存在しない問題。投票によって合意形成を行なった場合、結果が予想通りである場合もあるが、予想が全く外れて以外な結果を示すことも多い。これは、多数決原理の矛盾、単記投票方式の矛盾などによって、投票された票の集計方法によって全く異なった結果を示す場合があるからである。また、投票による決定方法で、「個人選好の無制約性」「市民の主権性・パレート最適性」「無関係対象からの独立性」、「非独裁性」の民主的とされる4つの公理を満たす決定方法は存在しないことがArrowの一般可能性定理によって示されている[31]。次に、不満に関する問題。投票した結果、グループの合意として決定された案以外に投票したメンバーが不満を持つことなるだろう。つまり、結果は出すことは可能だが、メンバーの好みをグループの決定に本当に反映させているのか疑問が残る。一方、投票方法は、メンバーに分かりやすい決定

方法を提供することが可能であるという長所も持っている。例えば多数決原理などは一般に理解が比較的容易であり、人間社会では、広く受け入れられていると言える。つまり、投票方法はそれ単独で持ち入れるよりも、他の何らかの方法と組み合わせることによって、より効果的な合意形成を期待できる。

1.3 エージェント間の説得機構

投票方式と組み合わせることによって効果の期待できる交渉方式として説得がある。人間社会において合意形成を行なう際に、反対する相手を説得するという方法も多く見受けられる。合意形成の最初の段階で説得が行なわれる場合もあるが、投票などの他の方法を用いた後に説得を行なう場合もある。本研究では、エージェントの合意形成に説得方式を用いる。説得方式はそれ単独で用いられる場合と投票方式などと組み合わせて用いられる場合がある。

説得による合意形成をエージェントが行なうにはどのような仕組みが必要であろうか？それにはまず、一般的な人間社会の説得を分析することが必要である。文献 [28] では、説得を次のように定義している。説得とは「主として言語を用いて、相手方をして自発的に自己の求める行動

を取らしめる作業」である。そして、説得を次の3つのタイプに分類している（1）感情的説得（2）論理的説得（3）功利的説得である（1）感情的説得とは相手の感性に訴えかけるメッセージを送ることによって、行動を促す方法である（2）論理的説得とは、論理的筋道を立ててこちらの主張を相手方に受け入れさせる方法である。論理的説得では、説得する側と説得される側との間に一般的に規範となる命題が必要となる。規範的な命題（～すべきだ）は記述的な命題（～である）からは演繹不可能であるため、この一般的に規範となる命題を双方が受け入れる必要がある（3）功利的説得とは、こちらの主張するように行動することが結果的に相手にとって得であることを理解させることによって、相手の自発的行動を促す方法である。

現時点においてエージェントの間で（1）感情的説得を実現するのは困難である。感情的説得を実現するためには、人間の感情の作用といったものをもう少し解明する必要がある（2）論理的説得を実現するのは感情的説得と比較すれば実現し得る。規範的な命題、記述的な命題をどのように知識として表現し蓄えておくことは容易だろう。どのような規範的命題を定めるかということがポイントとなる（3）功利的説得は、ゲーム理論における効用最大化原理を用いることによって容易に分析できる。しかし、実際にエージェントに実装する場合、説得によって効用を変化

させうる枠組を考案できるかどうかがポイントとなる。

ソフトウェアであるエージェントによる説得を考える場合に重要なことは、被説得エージェントに自発的な行動を起こさせることである。そこで、本論文では2つのエージェント間の説得を次のように定義する。エージェント間の説得とは「説得する側のエージェントが送信した説得のメッセージを説得される側のエージェントが受けとり、説得される側のエージェントが自らの知識に関する信念を変更することによって、説得のメッセージに同意すること」である。複数のエージェントが存在する場合、説得するエージェントは、どのエージェントを説得すれば合理的で効率的な合意を得られるかということも考慮に入れなければならない。実装においては与えられた問題領域によって、異なる実装方法が考えられる。本論文では、会議スケジューリングシステムとグループ代替案選択支援システムにおいて、それぞれのエージェントの合意形成機構のためのエージェント間の説得機構を実装、評価をして有用性を示す。

1.4 本論文の構成

本論文では、会議スケジューリングシステムとグループ代替案選択支援システムにおけるエージェント間の説得による合意形成機構を中心に

述べる。第 2 章では、本研究の関連分野を概観し、本研究との関係を述べる。第 3 章では、会議スケジューリングシステムを試作し、会議スケジューリングの領域におけるエージェント間の説得による合意形成について述べる。第 4 章では、グループ代替案選択支援システムを試作する。グループ代替案選択支援システムは AHP (Analytic Hierarchy Process) に基づいており、ここでは AHP に基づいたエージェント間の説得による合意形成について述べる。第 5 章では、まず本論文の要約をする。次に、マルチエージェントシステムの研究とグループ代替案選択支援システムの研究における本論文の位置付けを明確にすることにより、本研究の成果を示す。最後に今後の展望、課題を述べる。第 6 章では、本論文の結論を述べる。

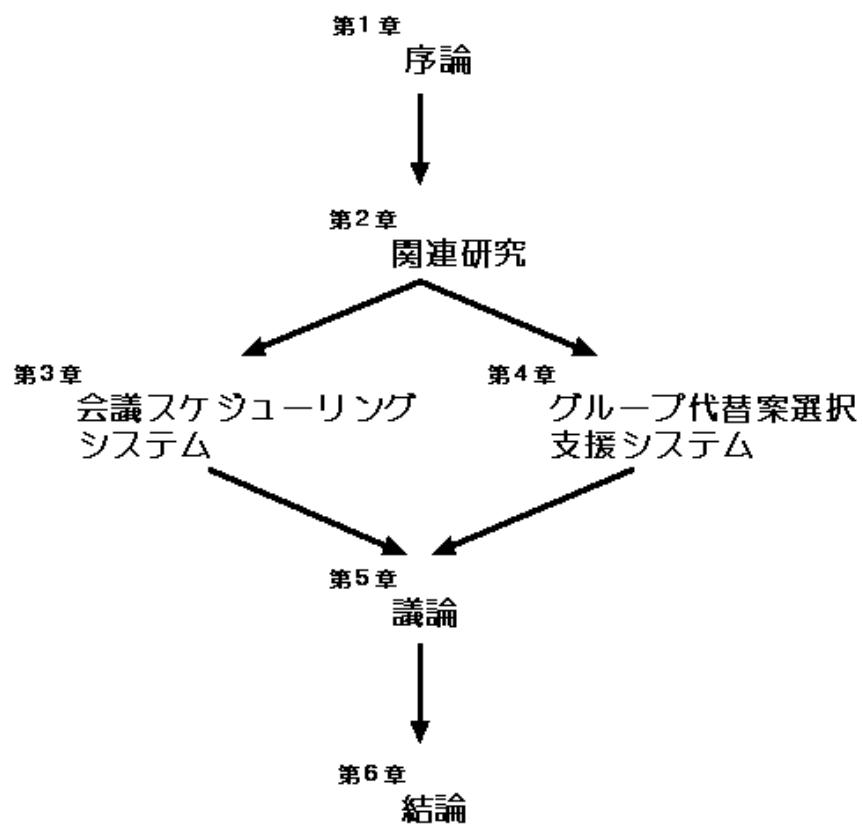


Figure 1.2: 本論文の構成

Chapter 2

関連研究

本章では、エージェント間交渉とグループ意思決定支援システムの分野の関連研究を示すことにより、本研究との相違点と共通点を明らかにする。そして本研究の位置付けを示す。

2.1 エージェント間交渉

エージェント間交渉に関しては、マルチエージェントプランニングの分野を中心としたゲーム理論を用いたアプローチがある。交渉のプロトコル（やりとりの手続き）に関しては人間の社会の交渉のプロトコルを手本にしたもののが提案というよりは発見されている。さらに、エージェ

ントが交渉をすることによって合意形成するシステムやそのプロトコルの研究もなされている。

2.1.1 ゲーム理論的アプローチ

ゲーム理論的アプローチでは、合理的なエージェントの交渉に関する研究が中心である。エージェントの合理性には経済的合理性(効用最大化原理)や論理的合理性(論理的整合)が考えられる。ここではエージェントの交渉をゲーム理論[20][11]によって特徴付けるため、合理性とは経済的合理性つまり効用最大化原理を指す。

エージェントが交渉において、それぞれ独立な目標を持ち、各自の目標を個別に達成しようとしているとき、目標をすべて同時に達成することが不可能になる場合がある。この時、エージェントが互いに交渉することによって協調的な動作をすることが重要となる。交渉の結果として得られる合意はすべてのエージェントに受け入れられねばならない。合意の候補を妥結案と呼ぶ。妥結案によってすべてのエージェントの効用が最大になるなら良いが、一般的にそのような妥結案は得られない。このとき、ゲーム理論における交渉観である個合理性、共同合理性を基にして、エージェントの交渉に関する分析、プロトコルの提案がされている。

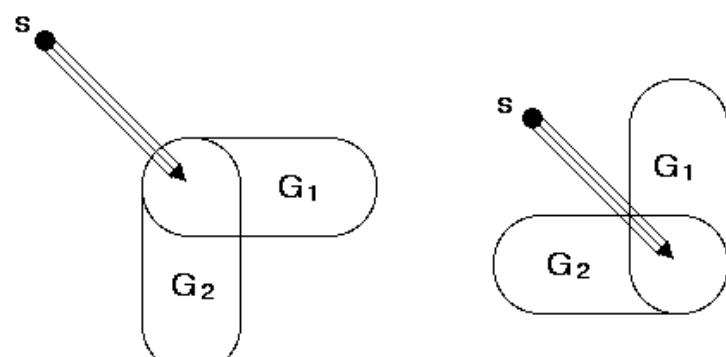
- 個合理性妥結点における各エージェントの効用は、交渉が不成立の場合に得られる効用未満であってはならない。
- 共同合理性交渉は、双方のエージェントの効用がより良くなる妥結案がある限り継続される。つまり、合意が得られた場合、双方のエージェントの効用をさらに改善する妥結案は存在しない。

個合理性と共同合理性を満たす妥協案の集合を交渉集合と呼ぶ。

統合交渉プロトコル 統合交渉プロトコル [15] は、2つの異なる目標を持つエージェントにおいて、協調の可能性（妥協的状況）や競合的状態がある場合に合意を得るための交渉プロトコルである。統合交渉プロトコルは特にマルチエージェントによるプランニングの分野を対象としている。

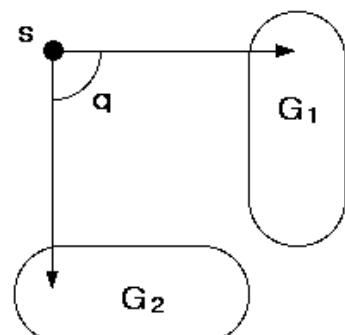
まず、2エージェント間の相互作用の状況を次の3つに分類する。図2.1に図を示す。ここで、 s は初期状態、 G_A はエージェント A の目標、 G_B はエージェント B の目標である。図中の距離はコストを表す。三重線は共同プラン、一重線は単独プランを表す。

1. 協調的状況 (cooperative situation) 交渉集合は空でない。共同プランを実行することによってエージェントは互いに利益を得ることが可能。



(a) 協調的状況

(b) 妥協的状況



(c) 競合的状況

Figure 2.1: エージェントの目標間の関係

2. 競合的状況 (conflict situation) 交渉集合は空である . 状態 s から

$G_A \cap G_B$ へ至る共同プランは存在しない .

3. 妥協的状況 (compromise situation) 交渉集合は空でない . 状態 s か

ら $G_A \cap G_B$ へ至る共同プランは存在する . しかし , 共同プランを実行することによって , 少なくとも一方のエージェントは利益を得ることができない .

協調的状況 , 競合的状況では , エージェントはそれぞれ計算した妥結案を自分にとって効用の高いものから順に提示し , もし相手の提示した案と比較したとき自分の効用が低くならないならば , その妥結案が合意となる .

競合的状況では , 混合共同プランにより妥結案を拡張する . 混合共同プランとは , 共同プランのどの部分をどのエージェントが実行するかを確率的に決定する (コイン投げなどによる) ものである . 混合共同プランを用いて , 協調的 , 妥協的 , 競合的状況において妥結案を拡張可能にしたものが統合交渉プロトコルである .

Zlotkin と Rosenschein らは , このアプローチをさらに発展させて , 領域理論に発展させている . さらにタスク指向領域において , エージェントが提携を形成するという枠組の交渉プロトコルも提案されている [22] .

そこではゲーム理論の提携ゲームやシャープレイ値などの理論が応用されている。

交渉プロトコルに求められる性質 複数のエージェントが同等の立場で、独立の目標を持ち、独立の価値観に基づいて意思決定を行なう場合に、その交渉プロトコルに望まれる性質として次の5つが挙げられる。

- 有用性 (Efficiency) 合意に達成したエージェントはそれ以上資源を無駄にすべきではない。つまり、無駄な効用があつてはならない。例えば、パレート最適¹の基準が満たさるべきである。
- 安定性 (Stability) どのエージェントも合意案から逸脱するような動機を持ち得るべきではない。これはゲーム理論では、均衡 (equilibrium) と呼ばれる。
- 単純性 (Simplicity) エージェントが交渉を行なう環境 (それは計算機上でも実世界でも構わない) では、エージェントの計算量は低く、通信のオーバーヘッドも小さくしなければならない。これは有用性や安定性にも関係する。

¹他のエージェントの効用を下げることなしに、あるエージェントが他の合意案に移ることはできない状況

- 分散性 (Distribution) 交渉においては，中心的な意思決定者となるようなエージェントは必要とすべきではない。それはパフォーマンスのボトルネックとなったり，1つの故障が全体に影響したりするためである。
- 対象性 (Symmetry) 不適切な基準に基づいては，どのエージェントにも特定のタスクを割り当てるべきではない，また，どのエージェントも同じように扱うべきである。しかし，不適切な基準が何かということはそのドメインによる。

2.1.2 交渉プロトコル

本節では，人間社会の交渉方法を手本に考案されたより一般的な交渉プロトコルとして，契約ネットプロトコル，マルチステージネゴシエーションについて概説する。契約ネットプロトコルの一つと考えられ，多くのマルチエージェントシステムで導入されているオークションについて説明する。

契約ネットプロトコル 契約ネットプロトコル [19] は，人間社会の様々な契約プロセスをモデルにしたタスク割り当てのために提案された交渉プロトコルである。ある契約において，契約を提案するエージェントは

マネージャ(manager) , 請け負うエージェントを契約者(contracter)と呼ぶ . マネージャと契約者はネットワーク内に同時に複数存在し得る . 典型的な契約ネットプロトコルは , マネージャのタスクアナウンスメント 2.2 , 契約者の入札 2.4 , マネージャの落札 2.6 の順でメッセージが送信され契約が成立する . 契約ネットプロトコルの特徴は , 入札と落札に関して , マネージャと契約者が互いに独立の評価基準を持ち得ることである . タスクアナウンスメントのメッセージは契約者側から見ると , 多数存在し得る 2.3 . 契約者は自分の評価基準で多くのタスクアナウンスメントの中から選択し入札を行なう . また , 入札に関してはマネージャから見れば多くの入札が存在する . マネージャも自分の評価基準で多くの入札の中から選択を行ない落札する . この様子は契約ネットプロトコルにおける相互選択(mutual selection)と呼ばれる .

マルチステージネゴシエーション 契約ネットプロトコルの拡張として , マルチステージネゴシエーション [3] がある . マルチステージネゴシエーションは資源割り当てのために考案されたプロトコルであり , 大域的な制約があることを前提としている . ここではエージェントは大域的な制約が満足されるまで何度も交渉を繰り返す . 契約ネットでは , すべての契約は互いに独立であり影響し合わない . つまり大域的な制約は考慮され

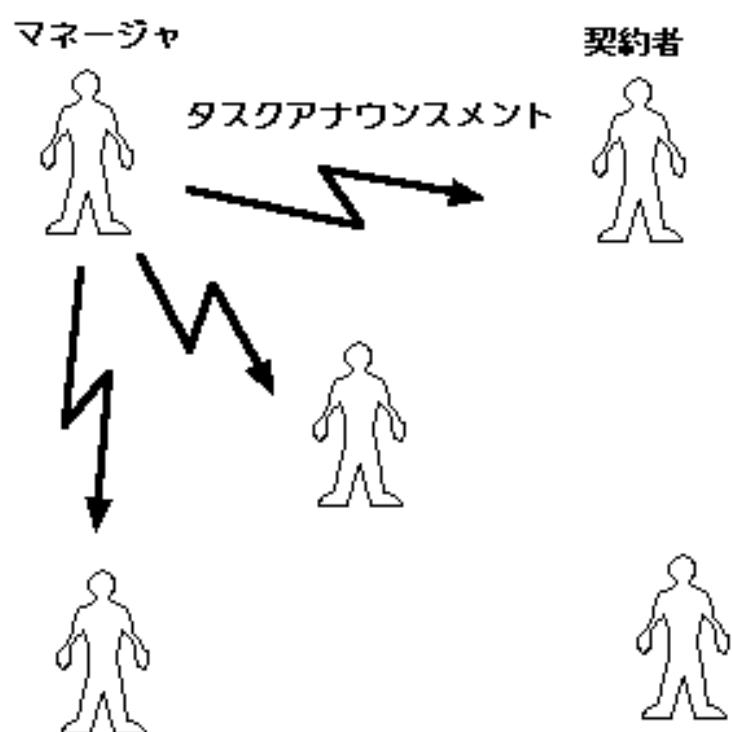


Figure 2.2: タスクアナウンスメント

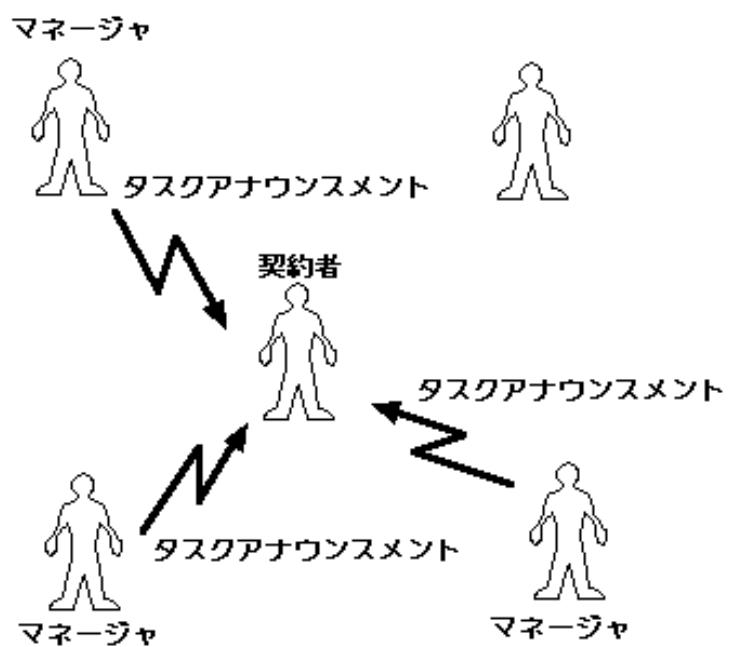


Figure 2.3: タスクアナウンスメント (相互選択)

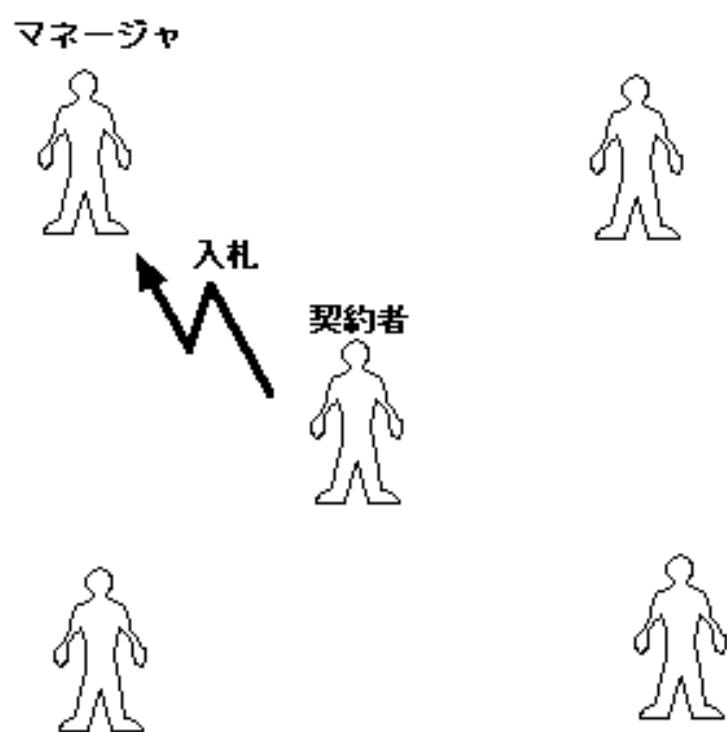


Figure 2.4: 入札

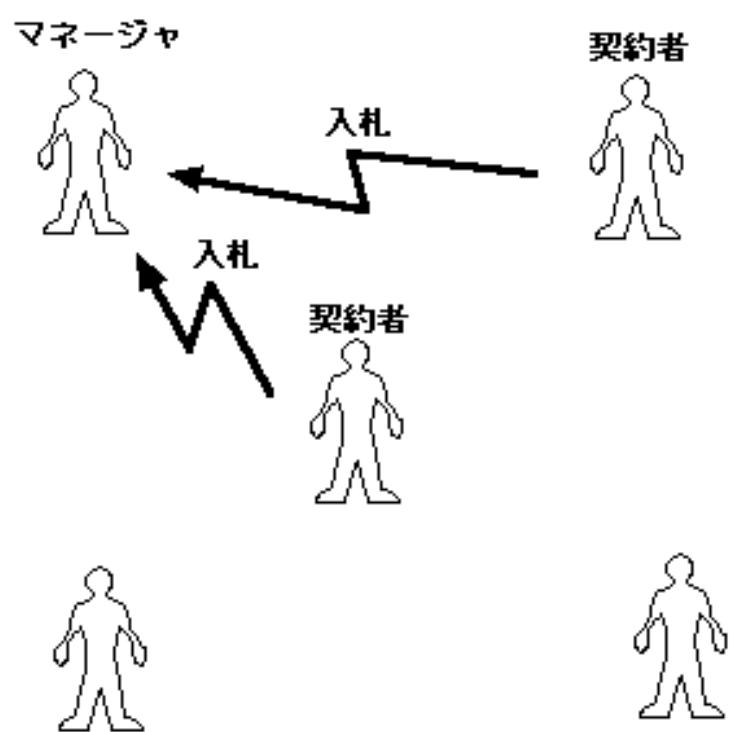


Figure 2.5: 入札 (相互選択)

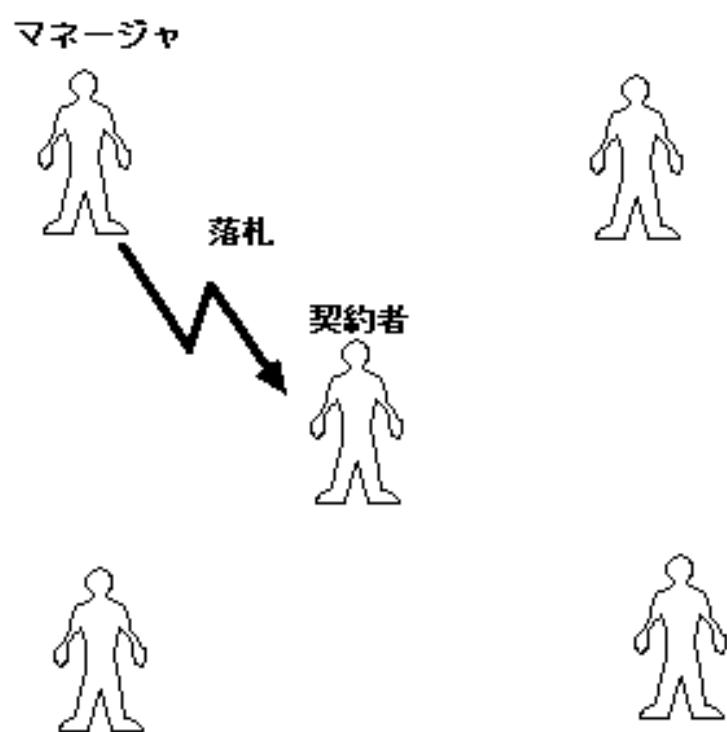


Figure 2.6: 落札

ていなかった。この点がマルチステージネゴシエーションと契約ネットプロトコルの相違点である。最近の研究では、マルチステージネゴシエーションをさらに一步進め、大域的な制約を満たしながら最適な解（または準最適な解）を求めるプロトコルとして扱う。しかし、多数のエージェントが全体としてよりよい契約を成立させるための交渉プロトコルに関する研究はまだ少ない。そこで本研究ではエージェントの交渉プロトコルに人間社会ではごく自然に行なわれる説得という手法を導入し、全体としてよりよい契約、つまり合意を得るプロトコルを提案する。

オークション オークションは契約ネットプロトコルの 1 つと考えられる。一般的にオークション [16] は、売り手と買い手により行なわれる。売り手はより高く品物を売る 것을 望み、買い手はより安く品物を買うことを望む。オークションには次の 4 つのプロトコルがある。(1)English (first-price open-cry) オークション、(2)First-price sealed-bid オークション、(3)Dutch(descending) オークション、(4)Vickrey (second-price sealed-bid) オークション。(1)English オークションでは、買い手は自分の入札価格を自由に何度も引き上げることができ、その入札価格は公開される。最も高額な入札価格を示したものに商品が落札される。(2)First-price sealed-bid オークションでは、入札価格は非公開であり、買い手は入札を 1 度だけ

行なうことが可能である。(3)Dutch オークションでは、売り手が徐々に値段を下げていく。そして、最初に入札した買い手に落札される。(4)Vickrey オークションでは、入札価格は非公開、かつ買い手の入札は一度限りである。商品は最も高額な値段を入札として示した売り手に落札されるが、値段は入札として示された値段の中の 2 番目のものが採用される。

Vickrey オークションは他の 3 つのオークションと比較して、マルチエージェントシステムに求められる効率性、安定性、単純性、分散性、公平性などを満たすことができる。以下に例を示す。今、ある商品をめぐつて売り手と買い手 1、買い手 2 及び買い手 3 の間でオークションが行なわれているとする。いま入札価格として図 2.7 に示すように、買い手 1 が 160 円、買い手 2 が 200 円、買い手 3 が 230 円を入札価格として提示したとする。売り手は、この中から最高値を示した買い手 3 に商品を落札する(図 2.8)。しかし、もしここで買い手 3 が何らかの方法によって他の買い手の入札価格を察知することができたとすると、買い手 3 は自分の入札価格を 210 円と嘘をつくことによって、20 円の利益を得ると同時に商品も落札できてしまう(図 2.9)。このように相手の入札価格を予測などによって察知可能であるとすると、マルチエージェントに求められる性質の 1 つの安定性が失われてしまう。それによって単純性、効率性なども失われてしまう。そこで、考案されたのが上で述べた Vickrey

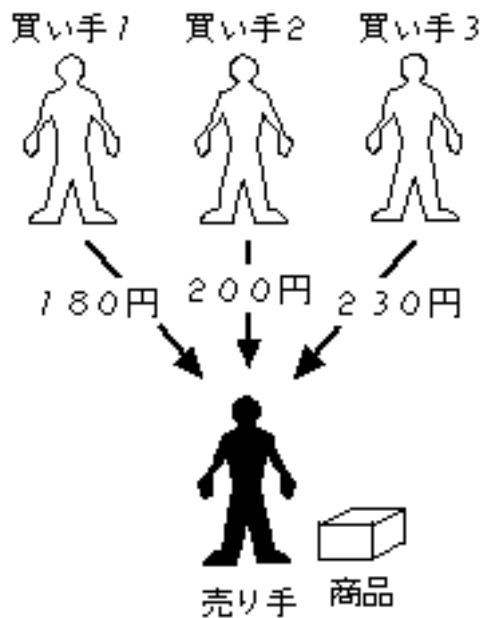


Figure 2.7: オーケションの例

オークションである (図 2.10) . この場合 , 買い手は真の入札価格を提示することが望ましくなり , 安定性 , 単純性 , 効率性を満たすことが可能となる . しかし , さらに一般的に , 買い手の共謀 , 売り手の嘘などを考慮に入れると , Vickrey オークションであってもマルチエージェントシステムの求められる諸性質を満たすことが困難となる .

2.1.3 合意形成

マルチエージェント環境において , エージェントが他のエージェントと交渉し折衝することによって , 合意を得ることを合意形成と呼ぶ .

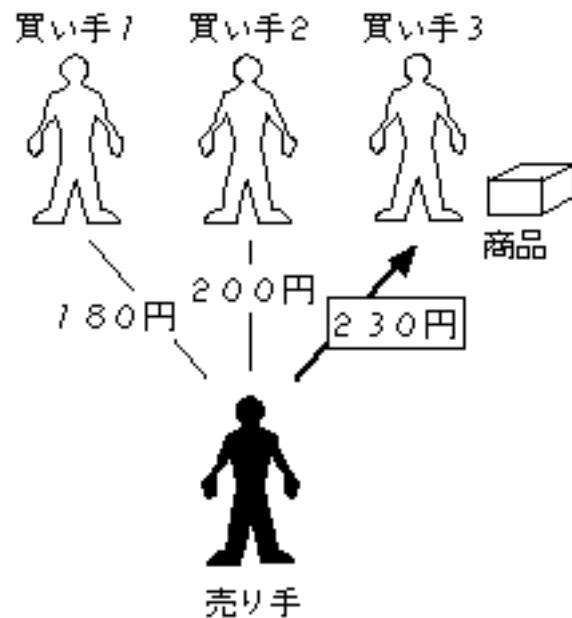


Figure 2.8: 最高値で落札

人間のグループによる合意形成は投票によって合意を得るのが一般的である。投票によって合意形成を行なった場合、結果が予想通りである場合もあるが、予想が全く外れて以外な結果を示すことが多い。これは、多数決原理の矛盾、単記投票方式の矛盾などによって、投票された票の集計方法によって全く異なった結果を示す場合があるからである。また、投票による決定方法で、「個人選好の無制約性」、「市民の主権性・パレート最適性」、「無関係対象からの独立性」、「非独裁性」の民主的とされる4つの公理を満たす決定方法は存在しないことが Arrow の一般可能性定理によって示されている [31]。つまり、エージェントの合意形成においても

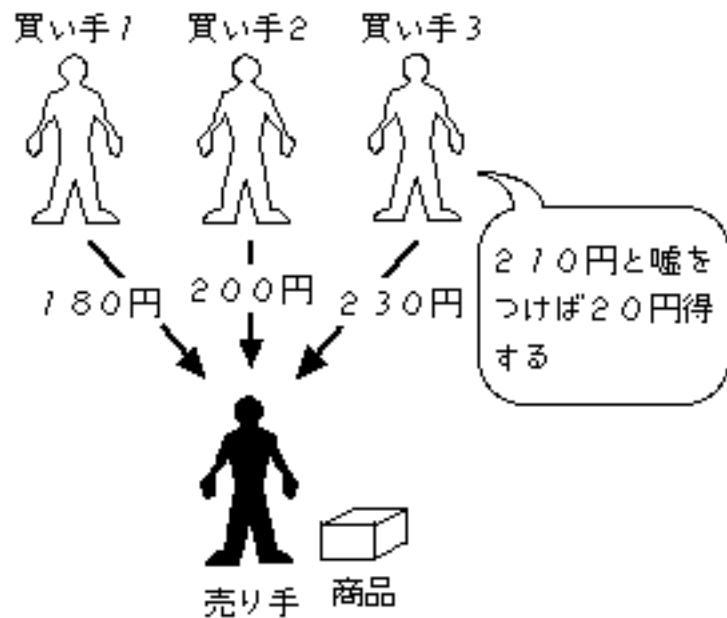


Figure 2.9: 相手の入札が察知可能である時

投票を導入する場合には注意が必要である。

エージェント間の合意形成においてエージェントが自分の好みを他のエージェントに明かすことを表明と呼び、表明の収集方法を表明収集プロトコルと呼ぶ。そして、エージェントが表明収集プロトコルに従って繰り返し表明を行なうプロトコルを反復表明収集プロトコルと呼ぶ。表明収集プロトコルは表明を収束させ、合意を成立させるための重要な要因である。表明収集プロトコルには、一極集中型、二分木集中型、回覧板型、同報型が挙げられる。回覧板型の表明収集プロトコルは、表明参加度が他の 3 つの型の表明収集プロトコルよりも高いことが示されている

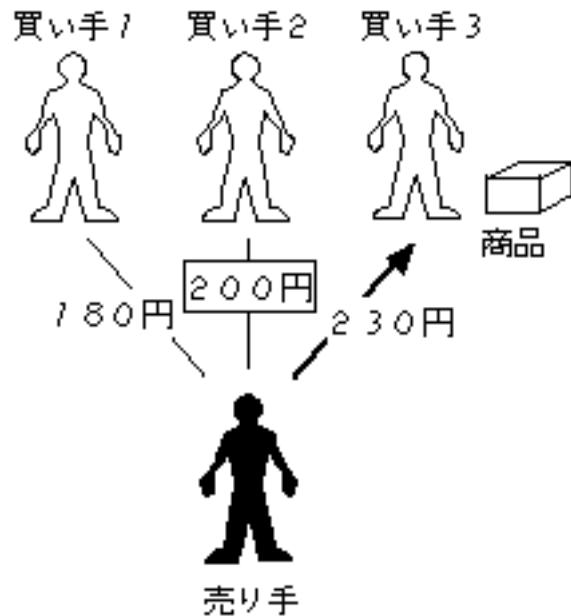


Figure 2.10: Vickrey オークション

[9] . 回覧板型表明収集プロトコルでは , エージェントに表明を回覧する順序が予め与えられ , その順序に従って表明を集め . この時 , i 番目のエージェントは 1 から $i - 1$ 番目のエージェントまでの表明を参照することができる . 回覧板型表明収集プロトコルの問題点は , 回覧板を廻す順番をいかにして決定するかである .

人間の代理としてエージェントが合意を形成システムは合意形成システムとも呼ばれる [12][13] . 合意形成システムはグループ意思決定支援システムと言える . エージェント間の合意形成をうまく実現することによって , グループ意思決定支援システムの効果的な実現が期待できる

2.2 グループ意思決定支援

グループ意思決定支援は、グループの能力をうまく引き出すための方
法を用いて行なわれる。従来、グループの能力を高めるために、KJ法、
ブレーンストーミング法などの方法が用いられ、グループの問題解決、意
思決定に用いられて大きな成果を挙げている[23]。近年、情報技術の発達
に伴って、情報技術を用いたグループの能力を高めるためのシステムに
関する研究が盛んである。このようなシステムは、グループウェアと呼
ばれ、最近、目まぐるしく発達している。特にグループの問題解決、意
思決定に関する能力を高めるためのシステムはグループ意思決定支援シ
ステムと呼ばれる。本節では、まず、グループ意思決定支援システムに
ついて概観し、人間の主観的評価を定量化するAHPを用いたグループ意
思決定支援について説明する。そして、マルチエージェントシステムの
適用が大きく期待されている会議スケジューリングシステムについて説
明する。会議スケジューリングシステムは、グループ意思決定支援シ
ステムよりはどちらかと言えばエージェント寄りの応用として捉えること
ができる。

2.2.1 グループ意思決定支援システム

オペレーションズ・リサーチの分野を中心として，グループにおける意思決定を支援するシステム GDSS (Group Decision Support System) の研究が盛んに行なわれている [26][27] . GDSS は，共通のコミュニケーション障壁を取り除くことにより，グループの意思決定プロセスを改善することをねらいとするものであり，そのために決定分析を構造化し，議論のパターン，タイミング，内容にシステムティックな指示を与える技術を提供するものである . GDSS はその支援機能に関連して，3 つのシステム型に分けられる . 第 1 のシステム型はメンバー間の情報交換を容易にするためのサポートが中心である . 第 2 のシステム型は，意思決定モデルやグループ意思決定技術を提供することによって，グループの意思決定プロセスの中で生じる情報の不確実性を減らすことをねらいとするものである . 第 3 のシステム型は，マシンによって誘導されるグループのコミュニケーションの支援として特徴づけられる . ここでは，メンバー間の情報交換のパターン，タイミング等に関して専門家のアドバイスがルール化され，ミーティングをリードする必要がある [4][23] . 第 3 のシステム型では AI の導入による知的な支援効果が期待できる . 現在，GDSS の研究において第 3 のシステム型の効果的な実現が強く要望されている .

2.2.2 AHP によるグループ意思決定支援

Dyer ら [5] によって , AHP (Appendix A 参照) によるグループ意思決定支援が提案されている . グループ意思決定に AHP を用いる理由は次の通りである . (I) AHP によって , ユーザは代替案よりもむしろ目標 , 評価基準についてを中心に議論できる . つまり , 多くの情報や競合目標がある場合でも , ユーザは , AHP ではない他の単純化された意思決定のための方法を使うことを避けることができる . (II) AHP を用いることにより , ユーザ間の議論は構造化されるので , ユーザは自分の意見をグループに反映させることができが保証される . (III) AHP を用いることによって , ユーザは , 知識や経験 , または , 他の数学的方法による信頼できるデータに基づいて判断を下すことができる . (IV) グループの問題解決は , 問題の各側面に対する比率尺度を明らかにしながら効果的に進む . 議論において話題が次々と変化し , 問題解決の進捗を妨げることはない . (V) AHP のモデルは , 付加的な情報や洞察を利用するための修正をすることが可能である . AHP は , 柔軟に構造化されているために , 強力で率直な方法となつてあり , あらゆるグループ意思決定支援システムに組み込むことが可能である .

グループ意思決定の状況として , (1) 共通目標状況 , (2) 非共通目標状

況，(3) コンフリクト状況がある。ここで目標とは具体的には AHP における評価基準を指す。(1) 共通目標状況では，すべてのユーザが同じ目標を持つ。(2) 非共通目標状況では，ユーザは非共有な，または隠された目標を持つ。例えば，多くの部門からなる大企業における意思決定を考えると，社会に貢献することは第一の目標として共有されている。しかし，各部門は非共有な副次的な目標を持ち，それらの目標はコンフリクトを起こす可能性がある。(3) コンフリクト状況では，対立するパーティーが存在し，互いに相手の譲歩を求めている。ここでは，パーティーが過去の被害から相手のパーティーへの報復を考えている場合も含まれる。

本研究との相違点は，本研究では，ユーザの代理人となるエージェントによって，動的な階層構造の管理，他のエージェントとの交渉が行なわれる点である。

2.2.3 会議スケジューリングシステム

会議スケジューリングシステムは，分散環境においてメンバーの個人的なスケジュールとグループのスケジュールである会議を効果的にスケジューリングすることを狙いとしたシステムである。ここでは会議スケジューリングシステム(分散スケジューリングシステムとも呼ばれる)に

関する既存の研究を概説する。

マルチエージェントシステムによる会議スケジューリングシステムの基本的な枠組は、システムのユーザにはそれぞれエージェントが割与えられ、ユーザはカレンダーに自分のスケジュール、好みなどを入力する。そしてエージェントはユーザのスケジュールや好みを基本情報として交渉を行なうことによって会議をスケジューリングする。

最近のマルチエージェントによるアプローチでは、同時に多くの会議をスケジューリングするシステムが一般的である。まず、興味深い研究は Sen と Durfee[17] の研究である。彼らは契約ネットプロトコル、マルチステージネゴシエーションを用いてスケジューリングを担う中心的なエージェントを仮定し、スケジューリングのためのヒューリスティックな戦略を探索手法、アナウンス手法、入札手法、及びコミットメント²のあるなしについて分類し、それぞれについて、スケジュールが成功する可能性についての解析を行ない、いかに効率良くスケジューリングを行なうかについて議論している。しかし、ユーザの好みは考慮に入れられて

²コミットメント [18] とは、将来に何かをする場合の合意や約束を指す。例えば、まず、エージェント 1 がエージェント 2 に月曜日の午前中に会議を開くという提案をしたとする。そして、エージェント 1 とエージェント 2 がなんらかの交渉を行なっている途中に、エージェント 3 がエージェント 2 に月曜日に丸 1 日会議を開くという提案をしたとする。このとき、エージェント 2 は、エージェント 1 と交渉を続けるか、または、エージェント 3 と交渉を始めるかということは問題になる。エージェント 2 がコミットメントを必ず行なう戦略であれば、エージェント 2 はエージェント 1 と交渉を続けるが、そうでなければエージェント 3 と新たに交渉を始めることになる。

いない。

マルチエージェント環境において、あるエージェントの他のエージェントの好みの学習についての Bui らの研究 [1] も興味深い。エージェントは他のエージェントのスケジュールや好みに関する知識を最初は持たないが、繰り返しスケジューリングを行ない、統計的に他のエージェントの好みを学習する。学習の結果、エージェント間の通信料のコストを減らすことが可能となる。この研究では効果的な学習を実現するために反復な日程のスケジューリング（例えば毎週水曜日に会議を設定するなど）を前提とする。ユーザの好みは考慮に入れられていない。

ユーザの好みを考慮に入れながら中心的なエージェントを前提としたい会議スケジューリング [7] も提案されている。ここでは、エージェントは順に候補を提案する。あるエージェントが候補を提案し、1人でも受理しなければ次のエージェントが制約を緩めた他の候補を提案する、という流れを繰り返す。この方式によって自律的なエージェントによる中心的なエージェントを前提としない会議スケジューリングが可能となる。ここでは、すべてのエージェントは合意を得ることに失敗した場合、すぐに妥協をすることが前提とされる。一般的に人間による交渉では、すぐに妥協する場合もあるが、妥協の前段階として説得という行為が行なわれる。

会議スケジューリングに操作不可能な交渉メカニズムを実現可能なクラーク税を導入した研究 [6] も興味深い。この研究の会議スケジューリングの枠組は各エージェントが重み付きの投票を行なう。重み付きの投票では、各エージェントが各選択肢に対して好みの度合に応じた金額を提示し、最も金額の大きかった選択肢が選ばれ、その候補に投票したエージェントは提示した金額を支払う。重み付き投票の欠点は、最終結果が変わらない範囲で真の好みの度合よりも少ない金額を提示すれば（嘘をつければ）利益があり得るということである。この問題を解決するための方法として彼らはクラーク税の手法を導入した。クラーク税のもとでの重みつき投票では提示した金額ではなく、意思決定への影響の度合に応じた金額として税金（クラーク税）を支払う。ここでは、各エージェントの提示した金額を除いた合計を計算し、除いた場合の結果が本来の結果と異なる場合、本来の結果に戻すために必要な金額をそのエージェントの支払う税金とする。つまり、真の選好を表明することが最適となる。

クラーク税の例を表 2.1 に示す。エージェント a_1, a_2, a_3, a_4 及び a_5 が代替案 A_1, A_2 及び A_3 に重み付きの投票をする。エージェントは 108 ポイントを各代替案に振り分ける。まず各エージェントの各代替案に対する好みの合計を計算する。次にエージェント i が投票しなかった場合の合計を各エージェント i の行に示す。アスタリスクは合計を表す各行に

	各代替案 に対する好み			a_i が投票しな かった場合の合計			a_i に対する税
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	
a_1	63	3	42	98	167*	167*	0
a_2	0	48	60	161*	122	149	12
a_3	27	60	21	134	110	188*	0
a_4	18	21	69	143	149*	140	9
a_5	53	38	17	108	132	192*	0
合計	161	170	209*				

Table 2.1: クラーク税の例

おいて最もポイントの多い代替案の合計ポイントを示す。もし、すべてのエージェントが投票すれば代替案 A_3 が選ばれる。ところが、もしエージェント a_2 が投票しない場合、合計が $< 161, 122, 149 >$ となり、代替案 A_1 が選ばれるだろう。ここで代替案 A_1 は代替案 A_3 より 12 ポイント勝っている。つまり、エージェント a_2 の投票が、12 ポイント分結果に影響しているといえる。そこで、エージェント a_2 は 12 ポイントの罰金を支払うことになる。エージェント a_1, a_3 及び a_5 は罰金は課せられない。なぜなら彼らが投票しなくとも結果には影響しないからである。この手法によって重み付き投票において、真の選好を表明することが期待できる。しかし、いくつかのエージェントが結託して嘘をつくことが可能な状況では、本来の投票結果自体の信頼性が低くなり得るため、クラーク税を用いても真の選好の表明は期待できない。

Computer Supported Cooperative Work (CSCW)[21] の分野などで会議全体のサポートの一部としての会議スケジューリングを行なうシステムが開発されている。EuroCoOp Task Manager を提案した Busbach [2] は、会議のサポートに関連して会議サポートシステムがサポートする事項として、会議の場所の決定、日付の決定、参加者の招待、会議事項の製作、関連文書の配布、ホテルの予約、会議中の議事録の記録、などをサポートすることなどを挙げている。

2.3 本研究の位置付け

本研究の位置付けを図 2.11 に示す。本研究は、マルチエージェントシステム (MAS) とグループ意思決定支援システム (GDSS) を背景とする。マルチエージェントシステムは人工知能 (AI) における分散人工知能 (DAI) の中で重要な研究分野であり、分散問題解決 (DPS) とは明確に区別される。マルチエージェントシステムに関する研究分野のうち本研究に関連する研究分野は、合意形成、交渉プロトコル、ゲーム理論的アプローチである。グループ意思決定支援システムに関する研究分野は、意思決定支援システム (DSS) に関する分野とグループウェア (GroupWare) に関する分野がある。本研究に特に関連するグループ意思決定支援シス

テムの研究分野は、タイプ3(AIによるコミュニケーションのリード)の
グループ意思決定支援システムに関する研究分野である。

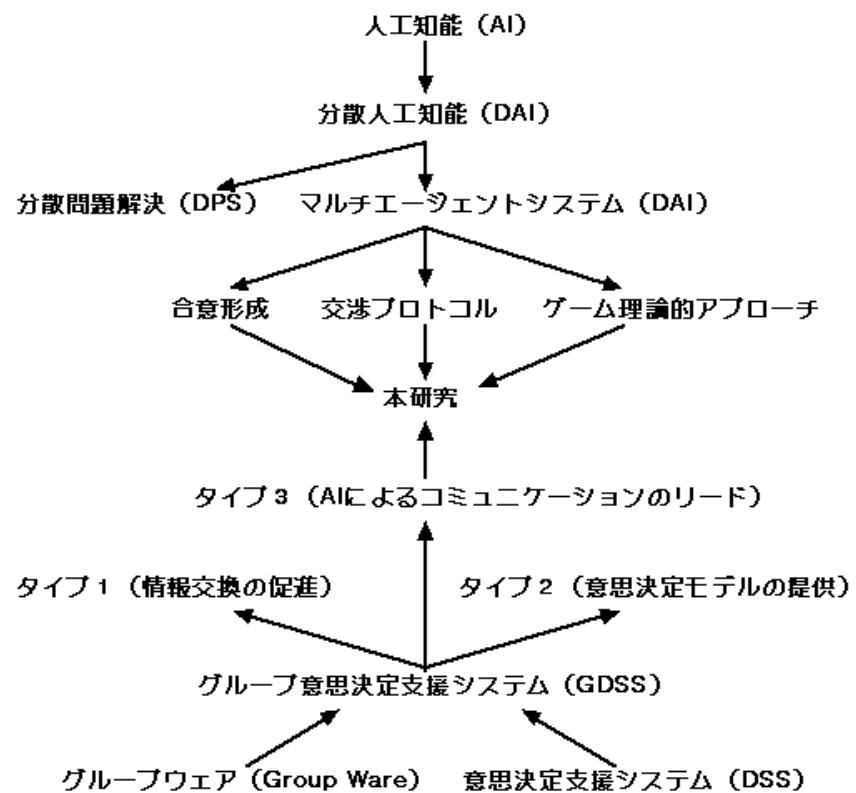


Figure 2.11: 本研究の位置付け

Chapter 3

会議スケジューリングシステム

3.1 会議スケジューリングシステムの概要

本節では、エージェント間の説得による合意形成を提案し、会議スケジューリングシステムを試作することによりその有用性を示す。ここでエージェント間の説得は、エージェント間での効用の変化を狙ったものであり、説得の3つの分類で言えば、功利的説得と言える。会議スケジューリングシステムでは、グループ内の人間であるユーザ1人1人にカレンダーとエージェントが割り当てられ、ユーザは個人的なスケジュールをカレンダーに書き込む。この個人的なスケジュールを基にしてエージェントが交渉し、会議を開くべき日付けについての合意を得る。

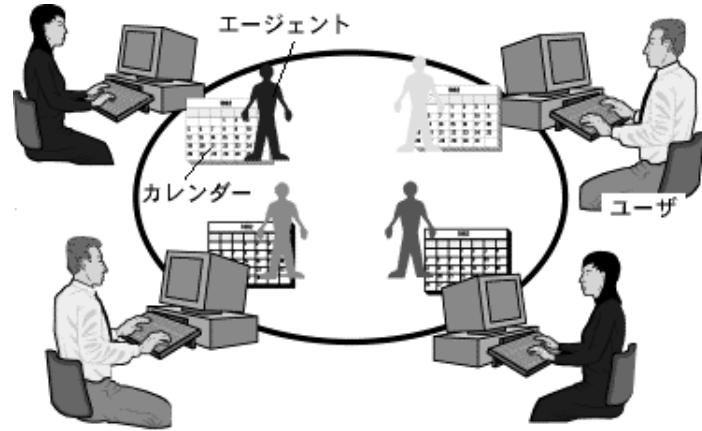


Figure 3.1: システム構成

3.2 システム構成

システムの構成を 3.1 に示す。各ユーザは 1 エージェントを持ち、エージェントはユーザのスケジュールを管理する。ユーザはカレンダに自分のプライベートなスケジュールを入力しておく。それと同時に各スケジュールの重要度を 1 日ごとに添付しておく。重要度は、9 段階の数字によって表す。1, 3, 5, 7, 9 はそれぞれ，“やや重要”，“重要”，“かなり重要”，“非常に重要”，“極めて重要”を示す (2, 4, 6, 8 は中間に用いる)。0 は個人的スケジュールがない場合に用いられる。例えば、ある 1 日に個人的なスケジュールがあり、非常に重要であれば 7 を入力する。

3.3 会議スケジューリングにおける説得

まず，エージェント集合を $N = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，会議を行なう候補日の集合を $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ とする。候補日 d_j にあるスケジュールに対するエージェント a_1 の重要度を $W_{a_1}(d_j)$ とする。

本システムにおける，エージェント間の合意形成機構を実現した。ま
ず，基本的な合意形成のためのプロトコルを示す。

1. 会議の提案：ユーザから会議のスケジューリングを依頼されたエージェント $a_{proposer}$ が他のエージェントに会議 m_{new} の提案を行なう。会議の性質としては，日付，参加人数がある。ここで，提案された会議 m_{new} の日付を $d_{m_{new}}$ とする。
2. 受理または却下の報告：各々のエージェントが，提案された会議について受理または却下の返事を会議を提案したエージェントに返信する。このとき，エージェントは提案された日付にスケジュールがあれば，提案された会議を却下，なければ受理する。つまり，エージェント a_i が日付 $d_{m_{new}}$ にスケジュールを持っていて，そのスケジュールの重要度 $W_{a_i}(d_{m_{new}}) > 0$ であれば却下， $W_{a_i}(d_{m_{new}}) = 0$ であれば受理する。

3. 集計 : 会議を提案したエージェントは , 各エージェントの受理 , または却下の返信を集計し , 始めに決定した参加人数を超えていればその会議については合意が得られたとする . そして , 合意が得られたか得られなかったかについてを他のすべてのエージェントに報告する .

以上の基本的な合意形成機構に加えて , より多くの合意を得るための方法として , 説得を導入し以下のようにプロトコルを改良する .

1. 会議の提案 : ユーザから会議のスケジューリングを依頼されたエージェント $a_{proposer}$ が他のエージェントに会議の提案を行なう . 会議の性質としては , 日付 , 参加人数がある . ここで , 提案された会議の日付を $d_{m_{new}}$, 重要度を $W_{a_{proposer}}(m_{new})$ とする .

2. 提案の受理または却下の報告 : 各々のエージェントが , 提案された会議について受理または却下の返事を会議を提案したエージェントに返信する . このとき , エージェントは提案された日付にスケジュールがあれば , 提案された会議を却下 , なければ受理する . つまり , エージェント a_i が日付 $d_{m_{new}}$ にスケジュールを持っていて , そのスケジュールの重要度 $W_{a_i}(d_{m_{new}}) > 0$ であれば却下 , $W_{a_i}(d_{m_{new}}) = 0$ であれば受理する .

3. 集計：会議を提案したエージェント $a_{proposer}$ は、各エージェントの受理、または却下の返信を集計し、始めに決定した参加人数を超えていればその会議については合意が得られたとする。合意が得られた会議については合意が得られたことを他のエージェントに報告する。合意が得られなかった会議の決定については保留しておくということを他のエージェントに報告する。会議の決定を保留する点が本システムにおける説得の特徴である。
4. 説得：提案された会議について合意が得られなかった場合、説得を行なう。エージェント $a_{proposer}$ 以外のエージェント a_i が、過去に自らが提案したが、合意が得られず保留した会議の中の 1 つを m_{old} とする。 m_{old} の日付は $d_{m_{old}}$ 、重要度は $W_{a_i}(m_{old})$ とする。ここで、エージェント a_i は、提案された会議の日付におけるスケジュールの重要度 $W_{a_i}(d_{m_{new}})$ と保留した会議の重要度 $W_{a_i}(m_{old})$ を比較し、 $W_{a_i}(d_{m_{new}}) < W_{a_i}(m_{old})$ であれば、この会議 m_{old} を用いて、 $a_{proposer}$ を説得する。エージェント a_i は、会議 m_{new} に参加する代償として、 m_{old} にエージェント $a_{proposer}$ の参加を要求するためのメッセージ（説得メッセージ）を $a_{proposer}$ に送信する。
5. 説得の受理または却下の報告： $a_{proposer}$ は、 a_i から説得メッセージを受

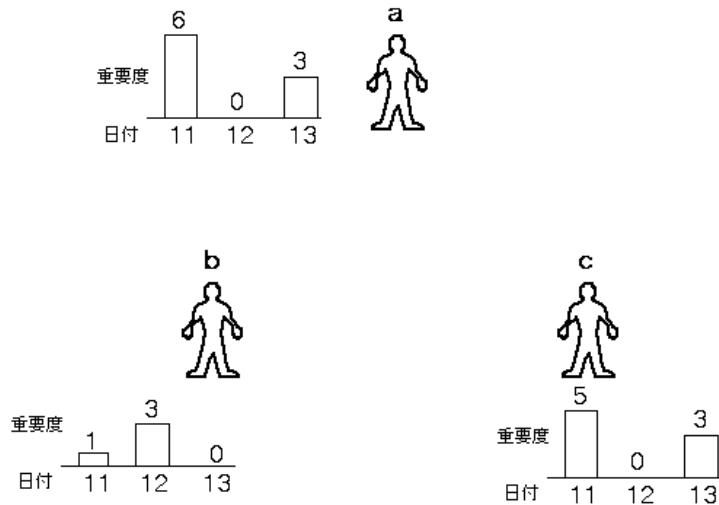


Figure 3.2: エージェントの交渉の例

けとり， $W_{a_{proposer}}(d_{m_{old}}) < W_{a_{proposer}}(m_{new})$ であれば，会議 m_{old} を受理し，参加する．そうでなければ，却下する．ここで，会議 m_{new} ， m_{old} について，参加者の人数が必要な人数を越えていれば，合意を得られた会議とする．

ここで本システムにおける説得の例を示す．今，3人のエージェント a, b , 及び c が図 3.2のように重要度付きのカレンダーを持っているとする．ここでは，可能な候補日の日付は 11 日，12 日，13 日とする．会議が一つ提案されるごとにステップが 1 進むこととする．

ここでエージェント c のユーザが，会議 $M1$ のスケジューリングをエージェント c に依頼したとする．このユーザは会議 $M1$ の重要度を 5

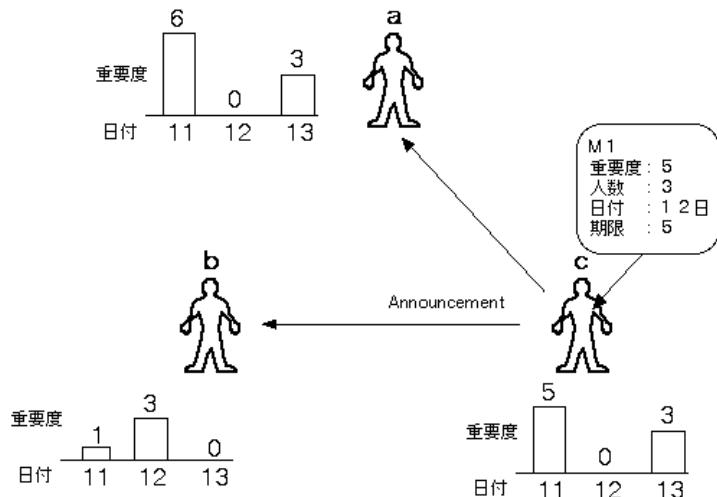


Figure 3.3: 会議 M1 を提案

とし、出席人数を 3 人、日付は 12 日としている。エージェント c は会議 M1 を提案し、エージェント a と b にアナウンスする。会議の重要度 5 は、このユーザの主観的な重要度であり、他のスケジュールの重要度と比較した時のこの会議の重要度を表している（図 3.3）。

提案を受けとったエージェント a は、12 日にはスケジュールがないのでこの提案を受理（Accept）する。一方エージェント b は、12 日にスケジュールがあるのでこの提案を拒否（Reject）する（図 3.4）。

会議 M1 は、エージェント b の拒否により不成立になる。エージェント c は M1 の提案を期限である 5 ステップだけ保留（Suspend）する（図 3.5）。

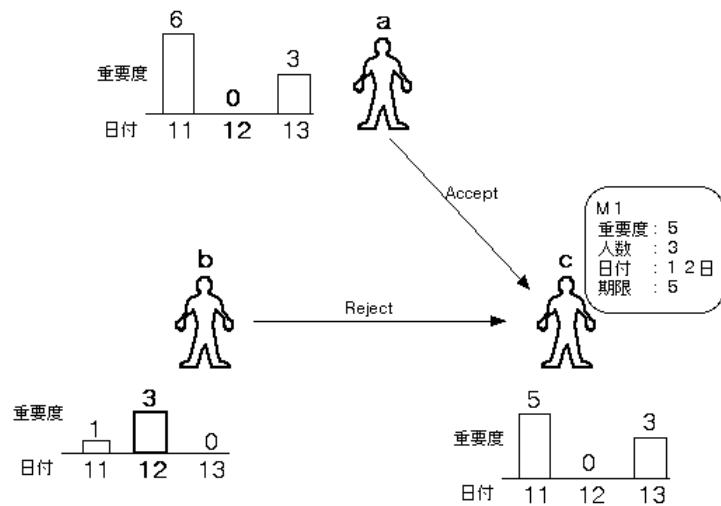


Figure 3.4: 会議 M1 の評価

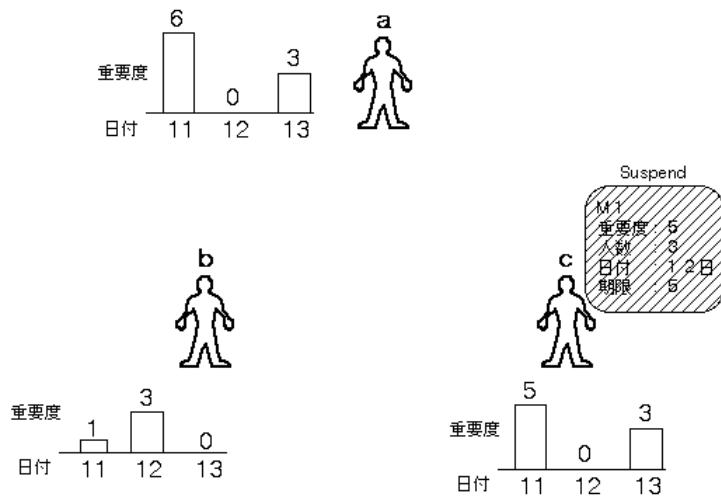


Figure 3.5: 会議 M1 の保留

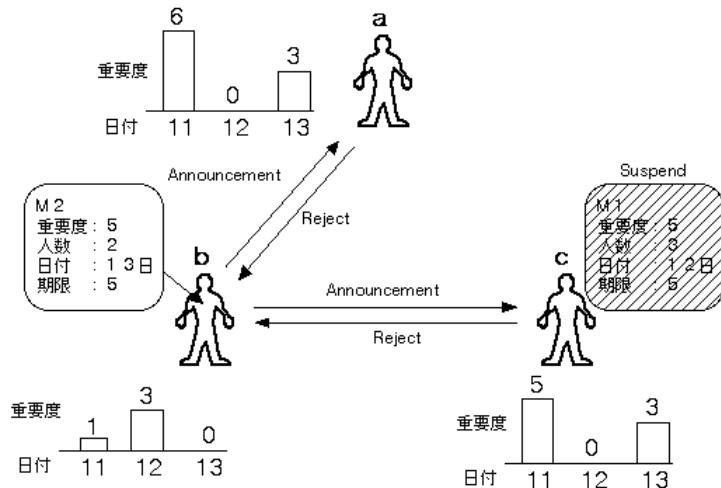


Figure 3.6: 会議 M2 の提案

次のステップにおいて，会議 M2 の提案をエージェント b がして，アナウンスをしたとする。会議 M2 の重要度は 5，人数は 2，候補日は 13 日，期限は 5 ステップである。会議 M2 は，候補日が 13 日であり，エージェント a もエージェント c も 13 日スケジュールがあるので会議 M2 の提案は，両方のエージェントに拒否される。

そこで，エージェント b は，エージェント c の提案した会議 M1 が保留されたことを知っているので，エージェント c を説得する。ここで，エージェント c が，13 日のスケジュールをキャンセルして，会議 M2 を受理すれば，会議 M2 は成立する。そこで，エージェント b は，エージェント c の提案する会議 M1 を受理すればよい。会議 M1 の日付は 12 日で

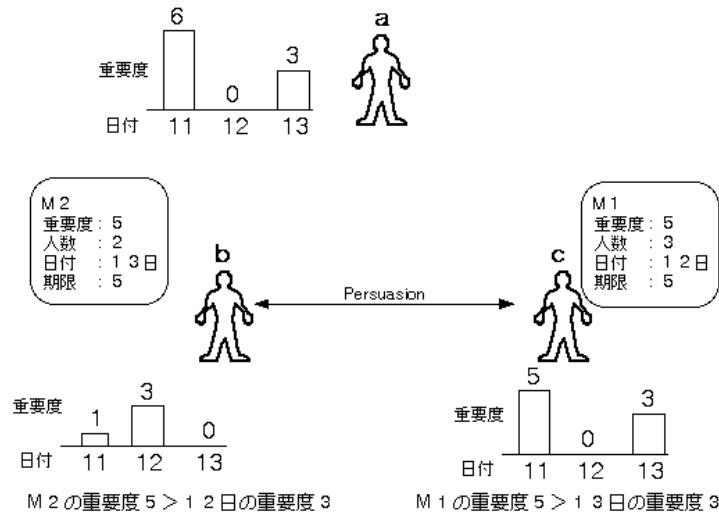


Figure 3.7: 説得

あり、エージェント b の 12 日のスケジュールの重要度は 3。今エージェント b が提案している会議 $M2$ の重要度は 5 であるから、会議 $M2$ が成立するならば、12 日のスケジュールはキャンセルしても合理的である。同じようにエージェント c にとってもこの状況は合理的といえる（図 3.7）。そこでエージェント b は会議 $M1$ を受理し、エージェント c も会議 $M2$ を受理する（図 3.8）。

3.4 実験と評価

本システムに導入した説得による合意形成の効果を確認するための実験を行なった。実験では、エージェントの数が 5、候補日となる日付

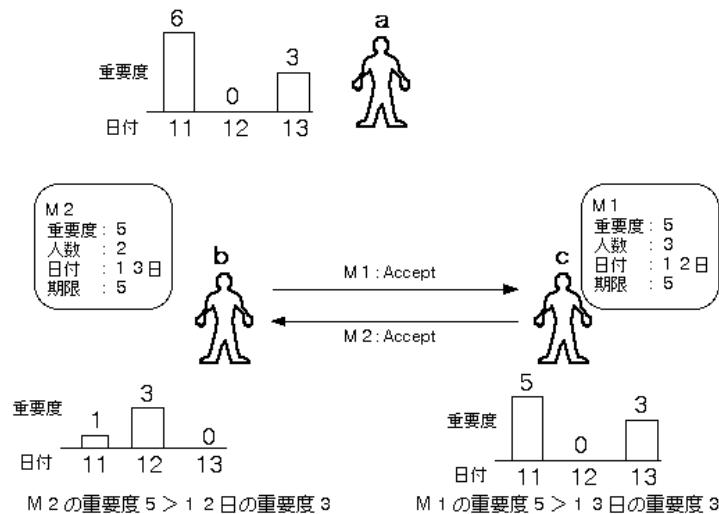


Figure 3.8: 説得成功

を 1000 日 (0 ~ 999) を用意し , 各エージェントは , 1000 日の中にスケジュールを持たせた . そして , 上で示した基本的な合意形成と説得を導入した合意形成のながれを 1 ステップとして 50 ステップ繰り返した . 各ステップにおいてエージェントは 30 % の確率で会議を提案する . 各エージェントのスケジュールの密度 (1000 日のうちどの程度スケジュールが入っているか) を , 0 % ~ 100 % と変化させ , 得られた合意の数を図 3.9 に示した . 縦軸が得られた合意のパーセンテージ , 横軸がスケジュールの密度である . 得られた合意のパーセンテージは , 提案された会議のうちどの程度の数の会議が合意を得られたかと示す .

スケジュールの密度が 60 % , 80 % の場合など , スケジュールの密度

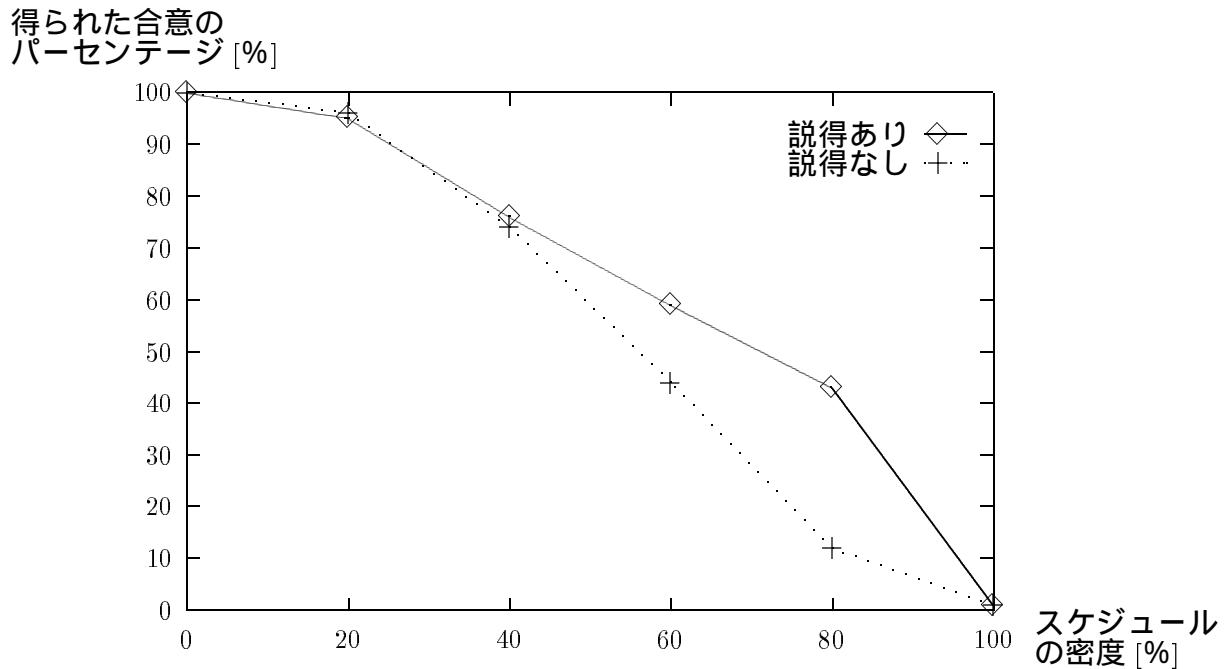


Figure 3.9: 実験結果

が高い場合に，説得が有効であることが図 3.9から分かる．また，スケジュールの密度が低い場合には，説得を用いた場合も用いなかった場合も差が少ないうことが分かる．会議の参加人数の条件や，全体のエージェントの数や，提案される会議の数についても考える必要があるが，より合意の得にくい場合に，本システムで提案する説得の方法が有効であることが分かった．

さらに，本システムのユーザインターフェースを図 3.10に示す．本システムはアプリケーション記述言語 Tcl/Tk を用いてインプリメントされている [14]．図 3.10の左のウィンドウはカレンダーを示し，ユーザはカレンダーからスケジュールを入力することができる．右したのウィンド

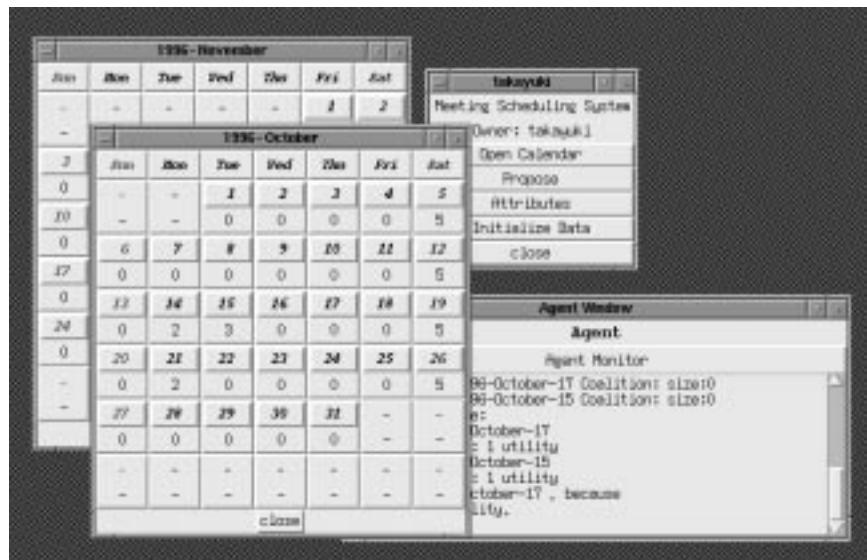


Figure 3.10: ユーザインターフェース

ウはエージェントの交渉の過程をエージェントがユーザに知らせるためのウィンドウである。右上のウィンドウは、ユーザが会議を提案しエージェントに知らせる時に用いるウィンドウである。

3.5 まとめ

本章では、エージェント間の合意形成に基づく会議スケジューリングシステムを試作した。エージェント間の合意形成機構には、合意の保留というアイデアを導入することによるエージェント間の説得が実現されている。ある会議の合意を保留し、後に保留した会議の合意と現在得な

ければならない会議の合意を交換することによって説得を実現した。そして、実験により、より多くの合意を得ることを目的とした状況では、本システムにおける説得が効果的であることを示した。

Chapter 4

グループ代替案選択支援システム

4.1 グループ代替案選択支援システムの概要

本節では、エージェント間の説得による合意形成に基づくグループ代替案選択システムを試作する。本システムではユーザは AHP (Analytic Hierarchy Process) とエージェントを持つ。ユーザは主観的評価によって、各々に AHP を用いて問題の構造を明らかにし、代替案の重要度を決定する。その問題の階層構造と代替案の重要度を基本情報としてエージェントは交渉し、グループとして最も好ましい代替案を 1 つ得るために合意を形成する。既存のシステムではエージェントの合意形成方式として投票方式が一般的であった。しかし投票方式はさまざまな矛盾を包含し

ていることが指摘されている。そこで、本システムでは単純な投票方式は使わず、説得による交渉によってエージェント間の合意形成を実現する。本システムでは AHP の特長の曖昧な尺度による重み付けに注目して説得機構を構築する。説得機構には、なぜ説得されたのか、どのように交渉が進んだのかなど、ユーザの交渉内容に対する納得を得るための説明機構が含まれる。本節の最後に本システムの実験に基づいて、説明機構の重要性、恣意的な偏った意見を持つユーザが存在する場合についての有用な知見を示す。

4.2 システム構成

本グループ代替案選択支援機構の構成を図 4.1 に示す。本グループ代替案選択支援機構では、各ユーザの意思決定は階層化意思決定支援機構によって支援する。各階層化意思決定支援機構はエージェントが管理する。エージェントは階層化意思決定支援機構における情報を参照することにより、他のユーザのエージェントと交渉をする。本システムは、ネットワーク環境における計算機を前提とする。階層化意思決定支援機構には、ユーザが、代替案を決定し、AHP によって問題を階層化し、一対比較を行なうことによって代替案の重要度を決定を決定する機能として、代替

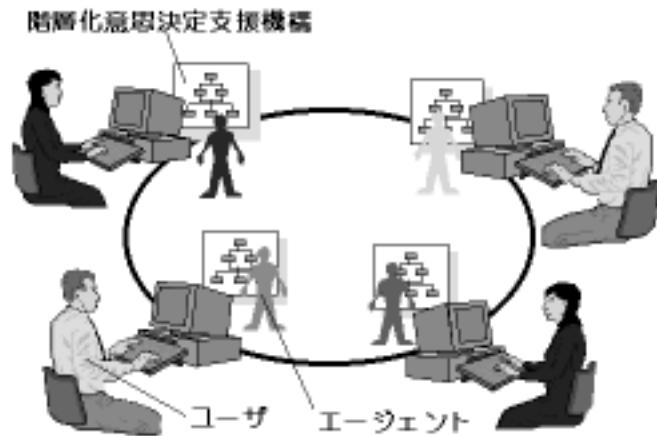


Figure 4.1: システム構成

案決定支援機能 , 階層構築支援機能 , 一対比較機能が含まれる . 各機能はユーザの負担を軽減するために直観的に分かりやすい GUI (Graphical User Interface) を用いて構築する . ユーザと AHP , エージェントの関係を図 4.2 に示す . ユーザは自分の主観的な評価を定量的な情報として得るために AHP を用いて問題を分析する . エージェントは AHP によって構築された階層構造からユーザの代替案の好みに関する定量的な情報を得る . そしてエージェントは他のエージェントとの交渉において階層構造における重みを調整することにより合意可能かどうかを判断する . さらに , エージェントは交渉に関する説明をユーザに与えることによってユーザの納得を得る .

本システムによるグループ意思決定支援過程は以下の流れで行われる .

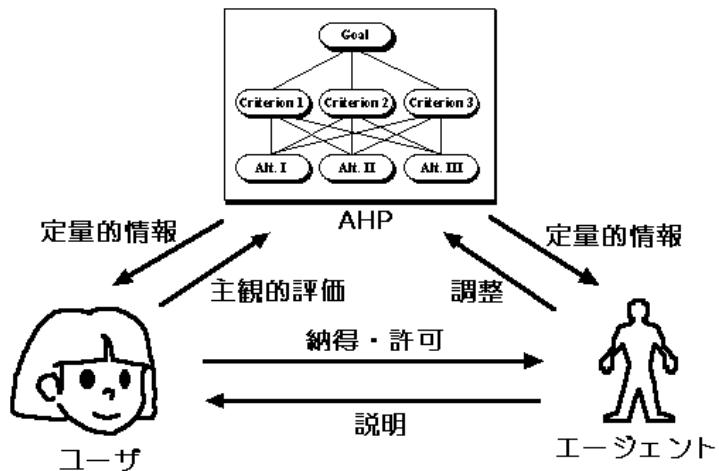


Figure 4.2: ユーザ , AHP 及びエージェントの関係

まず , 決定自体を提案する主催者となるユーザである主催ユーザが , 決定を行なうことを他のユーザに伝える . 次にユーザは , 代替案決定支援機能を用いて相互に対話しながら , 多数の選択肢の中から選択対象とする代替案の候補をいくつか決定する . 代替案決定支援機能において , ユーザは共有する代替案のデータベースから代替案としたい案を選びだし , 他のユーザに提案する . 代替案はブレーンストーミングなどで決定する . 代替案が決定したら , 各ユーザは階層構築支援機能 , 一対比較機能を用いて , 決定された代替案について , 個別に主観的評価に基づいて問題を AHP の手法を用いて分析し , 各代替案の重要度を決定する . そして , ユーザごとの代替案の重要度 , 階層構造を基本情報としてエージェントは他のユーザのエージェントと交渉を始める . エージェントの交渉は説得機構を用

いた説得を基本とした交渉である。エージェントの交渉の結果、候補の代替案から一つの代替案を選択するための合意を得る。最後に合意を得られた代替案についての情報がユーザ全員に通知される。

4.3 AHP の利用

本システムでは AHP (Appendix A 参照) を利用する。一般的に、明確な尺度を持たない要素間の比率をユーザが厳密に答えるのは不可能である。そこで AHP では、一対比較値を獲得するために，“非常に重要”，“かなり重要”，“重要”，“やや重要”，“同じように重要”といった言葉による (verbal な) ファジィな表現を用いることによってつかみどころのない要因を含む問題に関する主観的な分析を可能にし、ユーザの負担を軽くする。つまり、AHP における一対比較値は人間の意思を厳密に表すのではなく、だいたいこれぐらいという人間の主観的評価値を表すのである。そこで本システムでは人間の主観的評価が、ある値を中心とした 2 区間の範囲を含むと考える。1 区間は 9 点法の最小単位で、図 4.3 では 1 目盛である。例えば、AHP の一対比較において，“かなり重要” と評価された重みは AHP の内部では 7 の重みとされるが、2 区間分もその範囲と考え、重みが 6,7,8 のいずれかであるとする (図 4.3)。

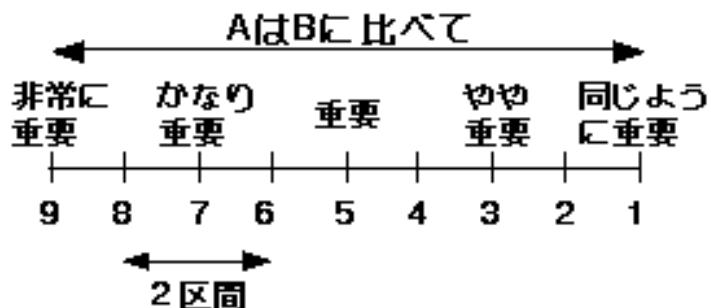


Figure 4.3: AHP における一对比較の尺度

さらに本システムでは、一对比較において、ユーザの一对比較に対する信念を表すための 2 つの状態として”確定” および”仮定” を用意する。例えば、ユーザによって確定とされた一对比較は、その重みが確定的（つまり、信頼できる）な値として扱われ、仮定とされた一对比較はその重みが仮定的（つまり、不確か）な値として扱われる。エージェントは説得において、全体的なウェイトの変化を要求された場合に、仮定とされた一对比較の重みを 2 区間の範囲で微調整することによって、全体的な代替案の重要度を変化させることができかどうかを調べる。この時、非整合度尺度 I.R. が 0.1 以下という制約の中で微調整が行なわれる。

エージェントは、ユーザが主観的な評価で AHP による階層構造の構築、一对比較行列を動的に管理する。一般に AHP では、ユーザに大量の一对比較を要求する。階層の各レベルでひとつの評価基準に対して n 個

の要素があれば $n(n - 1)/2$ 回の一対比較を行う必要がある。階層のレベルや各レベルでの要素数が大きくなると、非常に多くの一対比較が必要になる。エージェントは、ユーザの負担を減らすために以下の方法を用いて一対比較の回数を効果的に減らす。そして、一対比較の回数を減らすと同時に、一対比較行列全体の整合性を動的に保つことができるよう、ユーザをリードする。

本システムでは、一対比較要素の全要素の初期値として，“どちらも同じくらい重要”を意味する 1 を仮定な値として与える。ユーザは自分にとって確信のできる一対比較を確定とし、「確信はできないがどちらかといえば」という一対比較については仮定とする。そして、そのどちらでもない決め難い一対比較については、初期値のまま”どちらも同じくらい重要”を意味する値 1 とし、仮定とする。

AHP では、整合度のある(つまり非整合度尺度 I.R.=0 の)一対比較行列には要素間に推移性が成り立つ。例えば、要素 a_{12} の重みは W_1/W_2 、要素 a_{23} の重みは W_2/W_3 であることから、要素 a_{13} の重みが $a_{12} \times a_{23} = W_1/W_2 \times W_2/W_3 = W_1/W_3$ となる。本システムでエージェントは、一対比較の効率化のために Harker 法 [8] などの一対比較を補間する方法以外に、単に推移性を用いて確定的とされた一対比較から推移的に求められる要素を動的に求める。推移的に求めた要素がすでにユーザによって確定的ま

たは仮定的に決定されていた場合はユーザに一対比較のやり直しを促し，ユーザによって1度も触れられていない場合は，求めた値を仮定的な一対比較の値とする。Harker法は，カバリングという条件を満たす時のみ適用可能[29]なことが知られており，カバリングの条件を満たすためには，少なくとも一対比較行列の中の要素が推移性によってすべて予想可能になる程度の一対比較値が必要となる。実際のシステムにおいてはユーザにカバリングを意識させることは負担が大きい。本システムでは初期値をすべて”どちらでもない”と置くことによって，ユーザに対する無理な一対比較を強制することを避けた。

一対比較において，非整合度尺度I.R.の値が0.1より大きくなった場合には，一対比較に整合性（すなわち，一対比較の推移性）がないことを意味しており，一対比較のやり直しが必要となる。一般に，AHPでは，一対比較のやり直しは，煩わしい比較作業の繰り返しを再度強いることになり，意思決定者にとり大きな負担になる。本システムでは，ユーザが一対比較において重み付けをすると同時にエージェントが非整合度尺度I.R.の値を動的に監視し，I.R.が0.1を越えた場合は，ユーザにGUIによって視覚的に分かりやすく伝えることによって，一対比較のやり直しを促す。以上のように非整合度尺度I.R.をエージェントがユーザを導く形で動的に管理することによって，一対比較行列全体のやり直しの回

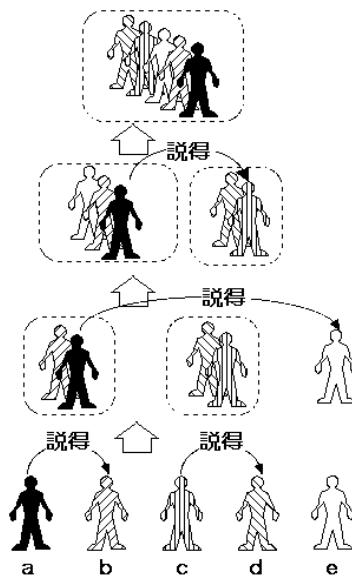


Figure 4.4: エージェント間の交渉の流れの例

避を可能にし，整合度の高い一対比較行列を実現できる．

4.4 説得機構と説明機構

本システムのエージェント間の合意形成は，2つのエージェントの説得を積み上げた合意である．ここでは，まず，エージェント全体の交渉の流れを示し，次に2エージェント間の説得の流れを示す．

エージェント全体の交渉の流れの例を図4.4に示す． a, b, c, d, e をエージェントとする．エージェントはまず2つ1組になる．図4.4では，まず a が b を， c が d を説得し，説得が成功したとする． a と b ， c と d がグ

ループを作る。説得したエージェントがグループの代表のエージェントとなる。もし説得が失敗したならば、説得する側と説得される側を入れ替わって説得を行なう。例えば、 a と b で説得が失敗したなら、 b が a を説得する。図 4.4 では説得は成功したとし、 a と b のグループ、 c と d のグループができる。 a と b のグループでは a が代表、 c と d のグループでは c が代表となる。次からは、グループの代表と残ったエージェントの交渉となる。つまり a, c, e での交渉となる。ここでは a が e を説得し、成功したとする。 a, b, e と c, d のグループができる。最後に a と c の交渉となり、 a が c を説得に成功し最後に合意に達成する。

エージェント間の説得の基本となる 2 つのエージェント間の説得の流れを図 4.5 に示す。説得するエージェントを説得エージェント、説得されるエージェントを被説得エージェントとよぶ。まず、説得エージェントは、説得案を被説得エージェントに提示する。説得案は、ユーザが AHP によって主観的評価によって決定した重要度の順が最も高い代替案である。被説得エージェントは以下の流れで説得案を受理するかしないかを決定する。

第一に、説得案の受理のチェックを行う。説得案の受理のチェックにおいて、説得案を受けとった被説得エージェントは、自分の選好順序の最も高い代替案が説得案として提示された代替案と同じであれば説得案

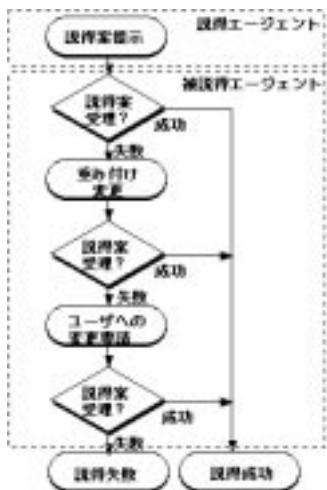


Figure 4.5: 2 エージェント間の説得の流れ

を受理するが、異なれば受理しない。説得案を受理したら説得は成功となる。

第二に階層構造の中の一対比較行列の重み付けを変更することによって、代替案の選好順序に変更を試みる。例を図 4.6 に示す。あるエージェントの選好順序の変更前が図 4.6 の上図、変更後が図 4.6 の下図だとする。

図 4.6 の上図においては選好順序に関して代替案 I が代替案 II および代替案 III に勝っているとする。この時、代替案 II が説得案として提示されるとすると、このエージェントは代替案 II の重要度を増加し、代替案 I と選好順序を逆転できないかを試みる。本システムでは選好順序を変更するためのヒューリスティクスとして、代替案を直接、一対比較要素と

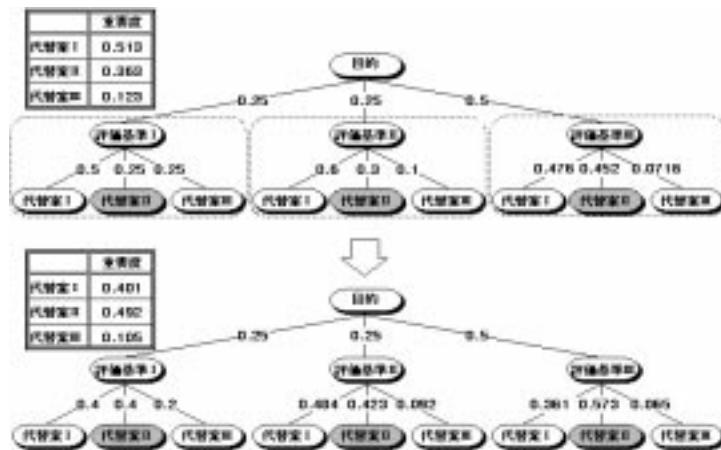


Figure 4.6: 重み付けの調整の例

して持つ一対比較行列に関してのみ，重要度を増加させるべき代替案に関する仮定的な一対比較の変更を行う。その他の一対比較行列に関しては変更は行なわない。図 4.6 の例では，点線で囲んだ階層の一対比較行列が対象となる。これは，各階層における一対比較は他の一対比較とは関係なく独立に行なわなければならないという AHP の特長のためである。つまり，図 4.6 では，目標に関する一対比較と，評価基準 I に関する一対比較とは全く独立したものとして扱わなければならないのである。

代替案を直接一対比較要素として持つ一対比較行列に対して次の戦略で調整を行なう。AHP の特徴から，代替案 I_i に関する重要度を増加させるためには，一対比較行列の第 i 行の対角要素以外の要素の値を増加させれば良い。つまり本システムのエージェントは，代替案 I_i に関する重

The diagram illustrates the adjustment of weights in a pairwise comparison matrix. It consists of two tables. The top table shows the initial matrix with weights and their corresponding importance values. The bottom table shows the matrix after adjusting the weight for '代替案 II' (Alternative II) from 0.250 to 0.400. Circles highlight the row and column for '代替案 II' in both tables, and an arrow points from the top table to the bottom table.

	代替案 I	代替案 II	代替案 III	重要度
代替案 I	1	2	2	0.500
代替案 II	1/2	1	1	0.250
代替案 III	1/2	1	1	0.250

	代替案 I	代替案 II	代替案 III	重要度
代替案 I	1	1	2	0.400
代替案 II	1	1	2	0.400
代替案 III	1/2	1/2	1	0.200

Figure 4.7: 一対比較行列における重み付けの調整の例

要度を増加させるために，一対比較行列の第 i 行の仮定的な要素の値を 9 点法の尺度において 1 区間ずつ，最大 2 区間の範囲で全体的な代替案の選好順序に変化があるまで増加させる．例を図 4.7 に示す．簡単のために図 4.7の一対比較行列の要素はすべて仮定的とする．今，図 4.7 の上の図において代替案 II の重要度を増加させたいとする．この時，エージェントは代替案 II の代替案 I および代替案 III に対する重みを 1 区間分増加させ，代替案 II の重要度を増加させる．重要度を変更するときに，エージェントは変更する案をユーザに提案し，ユーザの許可があれば実際に変更し，許可しなければ変更は行なわない．

第三に重みの微調整を行なった結果，説得案を受理することが可能かチェックし，受理可能なら説得成功とする．第四にユーザへ重み付けの変更依頼をする．現在までどの代替案について，どのような部分集合ができているかを説明機構によってユーザに提示し，ユーザに変更を依頼する．第五にもう一度，説得案の受理をチェックする．以上が本システムにおける 2 エージェント間の説得機構である．第二段階のユーザの変更許可機能，第四の段階を設けることによって，ユーザのエージェントに対する信頼性を高める．

エージェントは，交渉途中，交渉終了直前にユーザへ交渉の経緯についての説明を行なう．説明は GUI によって行なわれる．交渉のある時点で，どのエージェントに説得されたか，どの一対比較値を変更するか，どのエージェントを説得したか，現在どのようなエージェントの部分集合が存在するか，などの説明を提示する．エージェントが説明機構を持つことによって，どの程度ユーザが安心して仕事を依頼できるかという信頼性を増加させることが可能である．信頼性はインターフェースエージェント¹を実装するために重要な要因である．

¹ 本システムのエージェントのように，ユーザの代理人としてユーザから権限を委任されてユーザの作業を代行したり，ユーザに示唆を与えていたりするエージェントをインターフェースエージェントとよぶ [10]．

4.5 実行例と議論

本システムは，プログラミング言語 Java によって実装されている。Java の特長により，ユーザはインターネットを通じて，プラットフォームに依存することなく本システムを実行できる。実験として，メンバー 10 人程度の大学の研究室においてコンピュータを購入する時にコンピュータの選択を決定するために，本システムを用いた。コンピュータを購入する場合に各研究グループにおいてその目的が異なっており，非共通目標状況であった。共通な目標つまり評価基準として，論文の執筆，プログラムのコーディングなどがあった。非共通な目標つまり評価基準として，ゲーム，音楽などがあった。図 4.8 は，ユーザがコンピュータ選択に関して AHP を用いて主観的な評価を行なう画面を示している。左上のウィンドウは階層構築支援機構である。白で示される評価基準，つまり目標が公開される目標であり，黒で示される目標は非公開となる。ここでは，公開される目標として「Writing」「Programming」があり，非公開の目標として「Game」がある。左下，右下のウィンドウが一対比較機構である。右上のウィンドウは代替案選択支援機構である。右下のウィンドウは，一対比較を行なうウィンドウで，ユーザの理解を容易にするために GUI を工夫した。左下のウィンドウは一対比較行列を示すが，色に

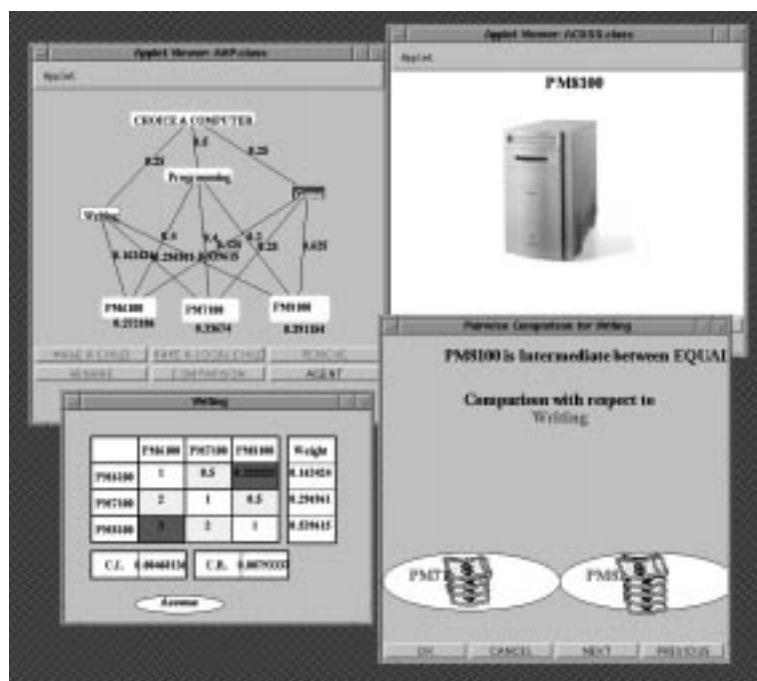


Figure 4.8: 実行例 (1)

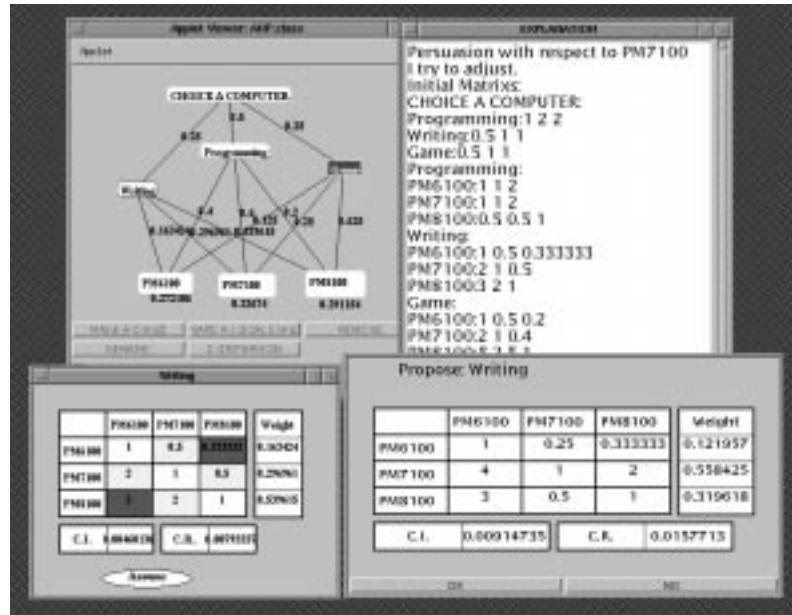


Figure 4.9: 実行例 (2)

よって，“確定”，“仮定”な一対比較を区別している。図 4.9は，エージェントの説明機構を示した例である。ここでは，代替案「PM7100」を説得案としてエージェントが受信し，エージェントが代替案「PM7100」の選好順序を最も高くするために微調整された一対比較行列を図 4.9の右下に一対比較行列を示すことによって提案している。これは，説得機構における説明機構で，エージェントがどのような変更を行なおうとしているのかを提示し，ユーザに許可を求めていることを示す。ユーザはエージェントの提案を許可し一対比較行列の変更をするなら「OK」ボタンを，不許可ならば「NO」ボタンを押す。図 4.9の右上のウィンドウは説明の詳

細である。

実験を行なった結果、以下のような知見を得ることができた。グループの中のメンバーには、極端な評価を恣意的に行なう者が現れ、全体的な合意の妨げとなることが多い。このような場合の対処法として以下のようないふたつの案が出された。(1) AHP は、グループである共有する目標については前向に決定してゆこうという前提の元で行なわれるため、極端な評価を恣意的に行なうという行為自体を禁止する。(2) 極端な評価を恣意的に行なうということ自体が意見と認められる。その場合、そのユーザを除いた部分的な合意を得るだけでも価値がある。(1) の案はすべての選択問題に適用可能であるが、ユーザにさらに制約をかけることになる。(2) の案は、全体的な合意が必要でないとき、例えば、旅行先を決定するときは部分的な合意を出すことによって、恣意的な評価を決定したユーザは旅行自体を拒否したいと判断し、それ以外のユーザでは合意が得られたとする。この場合、メンバーの間でさらに話し合いが必要であると思われる。

説得機構については次のような知見が得られた。説得には、説得する側、説得される側が存在し、説得される側の納得が必要である。当初、ユーザがエージェントの交渉には関与しないエージェントのみのインタラクションによる説得機構を構築したが、ユーザはあらかじめ説明があつ

ても、自分のエージェントが説得されてしまうと不満を感じることが分かった。つまり、インターフェースエージェントを構築する際のユーザのエージェントに対する信頼性の問題である。ユーザのエージェントに対する信頼度を増加させるには、ユーザがエージェントの行動に納得する必要がある。そこで、エージェントは最終的にユーザに確認を取るために、合意の経緯についての説明を行なう。この時、ユーザが納得のできる説明が不可欠である。本システムでは、第4章で示したとおり、エージェントは説明機構を用いてユーザの納得を得るための説明を示す。

4.6 まとめ

本論文では、エージェント間の説得による合意形成に基づくグループ意思決定支援システムとしてグループ代替案選択支援システムを構築した。エージェント間の交渉において、決定方式にさまざまなパラドックスを包含する投票方式ではなく、説得による交渉方式を提案した。説得による交渉方式では、エージェント同士が説得によって合意を形成するが、説得される場合はユーザの納得を得ることによって、エージェントの信頼性を高めなければならない。そこで本システムでは、なぜ説得されたのか、どのように交渉が進んだのかについての説明機構をエージェント

に持たせ、ユーザが交渉内容に納得ができるようなシステムを構築した。

そして、実験を行なうことによって、説得における説明機構の重要性や、

恣意的な偏りのある判断をメンバーが行った場合の対処についての知見

が得ることができた。

Chapter 5

議論

本章では、本研究を要約し、その成果を示し、今後の課題について議論する。

5.1 本研究の要約

グループ意思決定支援システムに人工知能の技術を導入することによって、より知的で効果的な意思決定の支援が期待されている。本研究では、人工知能の分野で最近注目されているマルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに導入することにより、より知的で効果的なグループの意思決定の支援を目指している。特に自律的なエー

ジェントの機能の一つといわれている合意形成を用いることによって、グループの意思決定を支援する。既存のシステムにおいては合意形成を単に多数決の投票で行なう場合が多い。投票方式は現実社会で用いられることが多く、人間にとて馴染みのある方式であるため、分かりやすいという長所がある。しかし、投票方式には様々な矛盾が含まれていることも指摘されている。そこで本研究では、投票方式を補うような交渉方式として、説得を提案した。本論文では、説得を用いた合意形成に基づくグループ意思決定支援システムとして、会議スケジューリングシステムとグループ代替案選択支援システムを試作した。

1章では、マルチエージェントシステムとグループ意思決定支援システムに関する研究のながれを示すことにより本研究の背景と動機を示し、マルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに適用する場合の問題点を示した。その問題点を考慮した上で本論文での目的であるエージェントの合意形成における説得方式について、実際の人間社会の説得を分析することによってその問題点を示した。

2章では、これまでのマルチエージェントシステムのエージェントの交渉と合意形成、及びグループ意思決定システムに関する関連研究について述べ、本研究の位置付けを明確にした (i) エージェント間交渉と (ii) グループ意思決定支援の両面から、関連研究と本研究の相違点と類似点

を明確にした。

3章では、会議スケジューリングシステムを試作した。会議スケジューリングシステムにおいては、合理的なエージェントという観点から説得という交渉プロトコルを構築した。ここで提案した説得は、合意を保留することによって、エージェント間において合理的な取り引きが可能な状況をつくり出すことが可能であることを示した。この説得プロトコルでは、エージェント間の効用の取り引きはなくてもよく、エージェントは個々の合理性を単に追求することによって、全体として合意をより多く得ることが可能であることを実験を通して示した。さらにこの説得プロトコルを基にした会議スケジューリングシステムを試作した。

4章では、グループ代替案選択支援システムを試作した。グループ代替案選択支援システムでは、エージェントは、AHP によってユーザの主観的な評価を定量化して知識として持つことができる。AHP における曖昧な(Fuzzyな)言葉による(Verbalな)比較尺度に注目し、エージェントがユーザの判断を適当に調整することによって、説得という交渉を実現した。AHP を用いることによって、ユーザは自分がなぜ説得されたのかということが分かり易くなった。そして、グループ代替案選択支援システムを試作することによって、いくつかの有用な知見を得た。

5.2 成果

エージェント間の意思決定や、エージェントとユーザとの対話に関する研究は非常に盛んに行なわれている。マルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムとして捉えた研究はほとんど見当たらぬい。グループ意思決定支援システムにおいて人工知能技術の導入が期待される中、本研究では、マルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに適用することを提案し、より知的で効果的なグループの意思決定を支援することが可能であることを示した。また、グループの意思決定を支援するために必要なエージェント間の合意形成について、既存の研究では単に投票によって合意を得ていた。しかし、人間の社会をモデル化した時、人間の社会では投票だけではなく、説得のような交渉によっても合意が形成されていく。本研究では、この点に注目し、合意形成のための説得を様々な方式によって実現した。本論文では特に 2 つの説得の実現方法を提案し、実際のグループ意思決定支援システムとして、会議スケジューリングシステムとグループ代替案選択支援システムを試作することによって、その効果と有用性を示した。

近年の人工知能研究では、完全に自律的なエージェントがユーザの日常的な業務や生活を支援するようなシステムが研究されている。この時

自律的なエージェントには、ロボットのような現実的に自立したものから、本研究で扱ったようなソフトウェアによるものまで含まれる。この自律的なエージェントが、個々の能力を単に足しただけでは処理しきれないより大きな仕事を協調することによって処理していくなければならない。このときエージェント間においてどのように合意を得るかということが大きな問題となる。本研究では、説得という交渉方式が自律的なエージェントの交渉に適用できることが可能であることを示した。

5.3 今後の課題

本研究では、説得という交渉方式に焦点を絞り、エージェントの合理性を用いた説得と、AHP による信念の変更という説得を提案した。しかし、人間の間の説得とは、人間の知識、意図、信念や効用などがより複雑に絡み合った態度の変更である。そこには感情も含まれる場合もある。説得というものをより深く解明するには、論理的なアプローチが不可欠と考える。エージェントの知識や信念を扱うために様相論理が用いられる。説得に関するも様相論理を用いることによってより深い理解が得られる分析が可能であると考えられ、今後の課題である。

また、本研究では説得という交渉方式をエージェントの交渉に取り入

れたが、人間社会の交渉方式はもちろん、投票、説得のみではない。例えば、根回しなどによる交渉方式は、日本における交渉のスタイルの1つであり、悪い側面もあるが、良い側面もある。様々な交渉方式の良い側面を取り入れることによってエージェント間の交渉をより効果的なものにすることが可能である。さらに、根回しなどは日本の交渉の典型であり、欧米諸国では見られない。エージェントの交渉の研究は欧米諸国から始まっており、その交渉方式はすべての人が平等に意見を述べる方式、つまり欧米方式である。日本の交渉方式では、必ずしも交渉に加わった全員が意見を述べるとは限らない。にもかかわらず、日本の企業の世界への進出は目覚しく、日本の企業における意思決定のための交渉方式は注目に値する。そこで、日本の会社組織における会議の方式や意思決定の方式をエージェントの交渉に取り込むことによって、今までにないユニークかつ効果的な交渉方式が期待できる。

Chapter 6

結論

本論文では、マルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムに適用することによって、グループの意思決定をより知的にそして効果的に支援することを可能にした。そして、グループの意思決定を支援するためのエージェント間の新たな合意形成として説得による交渉方式を提案し、グループ意思決定支援システムである会議スケジューリングシステムとグループ代替案選択支援システムを試作することによって、その有用性を示した。

既存の研究においてエージェントの合意形成は主に投票によって行われていた。投票による合意形成は、人間の社会で広く知られており分かりやすいという長所もあるが、投票方式は様々な矛盾を包含している

ことが指摘されている。そこで本研究では投票方式を補う形で、説得という交渉方式をエージェント間の合意形成に取り入れた。説得は、人間の社会での交渉ではもちろんよく使われる方式である。

会議スケジューリングシステムにおいては、説得をエージェントの合理性を基にして合意形成機構を構築した。本システムでは、合意の保留を可能にすることによって、エージェント間での合意に関する取り引きを可能にした。簡単に示すと「あなたの意見に賛成するので、私の意見にも賛成してください」という説得方法である。これによって、説得を用いない場合と比較してより多くの合意を得ることが可能になった。

代替案選択支援システムでは、AHP (Analytic Hierarchy Process) を用いることによって、ユーザの主観的な評価を定量化した。これにより、これまで困難であったユーザの主観的な評価をエージェントに知識として与えるが可能となった。また、AHPにおいては曖昧な (Fuzzy な) 言葉による (Verbal な) 比較尺度が用いられる。そこで本システムではエージェントはこの曖昧性を利用してユーザの主観的評価を微調整する。これによって、エージェントは合意形成において、説得された場合に妥協という行動を取ることが可能となり、説得が効果的に実現できた。本システムを使った実験により有用な知見も得ることができた。

知的なエージェントという意味でのマルチエージェントシステムの研

究が盛んになったのは最近のことである。そのため、マルチエージェントシステムを他の分野に応用する研究が増えてきたのも最近である。本研究では、マルチエージェントシステムをグループ意思決定支援システムというオペレーションズリサーチの分野に応用し、その有用性を確かめた。また、マルチエージェントシステムの研究は、社会をモデル化する研究である。しかし、現在のマルチエージェントシステムの研究は殴米諸国から生まれたものであり、殴米の社会をモデル化したものであるといつても過言ではない。日本には殴米とは異なる文化、社会があり、日本の社会をモデル化することによって、より効果的なマルチエージェントシステムの実現が期待できる。本研究では、説得という方式をエージェントの合意形成に取り入れることを提案した。さらに根回しなどの日本のスタイルの交渉方式の応用も行なう。本研究は、殴米中心のエージェントの交渉に関する研究にインパクトを与える、マルチエージェントシステムの可能性を広げたに相違ない。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，多くの方々の暖かい御支援，御協力をいた
だきました。ここに，その方々への感謝の気持ちを申し上げます。

本論文を執筆する機会を与えて下さった 名古屋工業大学 工学部 知能情
報システム学科 石井直宏教授に感謝致します。

名古屋工業大学 工学部 知能情報システム学科 新谷虎松助教授に心より
感謝致します。新谷先生には，本研究の内容の細部にわたって，貴重な
御意見を承りました。

名古屋工業大学 工学部 知能情報システム学科 新谷研究室の大園忠親君，
藤田隆久君，小林 慎治君，小川 貴彦君，永川 成基君，棚野 憲克君，福
田 直樹君，水口 卓也君，尾崎 弘幸君，川上 義雄君には，研究室でのゼ

ミ，輪講，合宿にて貴重な御意見を頂いただけでなく，研究室での花見，飲み会，スキー合宿などは大変，有意義で貴重な時間でした。

また，友人のみなさんには，貴重な御時間とかけがえのない御意見を頂いたと同時に，みなさんとの議論は，研究を行なっていく上での励みになりました。深く感謝致します。

最後に，自分の行動を認めて頂き，さらに日々の生活を支えて頂いた，父，母，弟に心より深く感謝いたします。

新緑と澄んだ日差しのまぶしい名古屋工業大学の研究室にて

1997年春

伊藤 孝行

Bibliography

- [1] Hung H. Bui, D. Kieronska, and S. Venkatesh. Learning other agents' preferences in multiagent negotiation. In *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96)*, pp. 115–119, August 1996.
- [2] Uwe Busbach and Thomas Kreifelts. Support for meetings using the eurocoop task manager. In Stephen A.R. Schrivener, editor, *Computer-Supported Cooperative Work*, Applied Information Technology series, chapter 10, pp. 149–170. UNICOM, 1994.
- [3] S.E. Conry, R. A. Meyer, and V. R. Lesser. Multistage negotiation in distributed planning. In A. H. Bond and L. Gasser, editors, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, pp. 367–384. Morgan Kaufman, 1988.

[4] Gerardine Desanctis and R. Brent Gallupe. A foundation for the study of group decision support systems. *Management Science*, Vol. 33, No. 5, pp. 589–609, May 1987.

[5] R.F. Dyer and E. Forman. Group decision support with the analytic hierarchy process. *Decision Support Systems*, Vol. 8, pp. 99–124, 1992.

[6] Ethan Ehrati, Gilad Zlotkin, and Jeffrey S. Rosenschein. A non-manipulable meeting scheduling system. In *The Thirteenth International Distributed Artificial Intelligence Workshop*, pp. 105–125, July 1994.

[7] Leonardo Garrido and Katia Sycara. Multi-agent meeting scheduling: Preliminary experiment results. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems(ICMAS-96)*, pp. 95–102. AAAI Press, December 1996.

[8] P.T. Harker. Incomplete pairwise comparisons in the analytic hierarchy process. *Mathematical Modelling*, Vol. 9, pp. 353–360, 1987.

[9] 北村康彦, 横尾真, 桑原和宏. マルチエージェント合意形成のための回

覧板プロトコル. Technical report, 電子情報通信学会, August 1995.

[10] Pattie Maes. Agents that reduce work and information overload. *Communications of the ACM*, Vol. 37, No. 7, pp. 31–40, July 1994.

[11] 鈴木光男. 社会システム -ゲーム論的アプローチ-, エンジニアリング・サイエンス講座, 第32巻. 共立出版, 1976.

[12] 村上国男. 機械エージェント間の合意形成システム. 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 6, pp. 697–700, November 1993.

[13] 村上国男. マルチエージェントシステムとその応用. 電子情報通信学会誌, Vol. 78, No. 6, pp. 570–577, June 1995.

[14] John K. Ousterhout. *Tcl and the Tk Toolkit*. Addison-Wesley, 1993.

[15] Jeffrey S. Rosenschein and Gilad Zlotkin. *Rules of Encounter*. The MIT Press, 1995.

[16] Tuomas Sandholm. Limitations of the vickrey auction in computational multiagent systems. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pp. 299–305. AAAI Press, December 1996.

[17] Sandip Sen and Edmund H. Durfee. On the design of an adaptive meeting scheduler. In *The Tenth IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications*, pp. 40–46, March 1994.

[18] Sandip Sen and Edmund H. Durfee. The role of commitment in cooperative negotiation. *International Journal on Intelligent and Cooperative Information Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 67–81, 1994.

[19] Reid. G. Smith. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. In *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1104–1113, December 1980.

[20] 鈴木光男. ゲーム理論入門. 共立出版, 1981.

[21] Paul Wilson. Introducing cscw - what it is and why we need it. In Stephen A.R. Schrivener, editor, *Computer-Supported Cooperative Work*, Applied Information Technology series, chapter 1, pp. 1–18. UNICOM, 1994.

[22] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. Coalition, cryptography, and stability: Mechanisms for coalition formation in task oriented

domains. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94)*, pp. 432–437, August 1994.

[23] 宇井徹雄. 意思決定支援とグループウェア. 共立出版株式会社, 1995.

[24] 石田亨, 桑原和宏. 分散人工知能(1): 協調問題解決. 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, pp. 945–954, November 1992.

[25] 刀根薰. ゲーム感覚意思決定法 - AHP 入門 -. 日科技連出版社, 1986.

[26] 山田善靖. 集団意思決定支援システム. オペレーションズ・リサーチ, pp. 124–128, March 1988.

[27] 山田善靖. 情報技術を用いる集団意思決定の支援. オペレーションズ・リサーチ, pp. 531–537, 11 1991.

[28] 草野耕一. ゲームとしての交渉. 丸善ライブラー 130. 丸善株式会社, July 1994.

[29] 竹田英二. 不完全一対比較行列における ahp ウェイトの計算法. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 34, No. 4, pp. 169–172, 1989.

[30] 桑原和宏, 石田亨. 分散人工知能(2): 交渉と均衡化. 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 17–25, January 1993.

[31] 佐伯胖. 「きめ方」の論理 - 社会的決定理論への招待 -. 東京大学出
版, 1980.

発表論文一覧

1. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “Implementing an agent negotiation protocol based on persuasion.”, *In the Proceedings of the Second International Conference on Multiagent Systems(ICMAS-96)*, p.443, AAAI Press, 1996.
2. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “An Approach to a Multi-agent Based Scheduling System Using a Coalition Formation”, *In the Proceedings of the Ninth International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE-96)*, p.780. Gordon and Breach Science Publishers, 1996.
3. 伊藤孝行, 新谷虎松: “分散 ATMS に基づくスケジュール管理システムの実現”, 第 8 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 273–276, 1994.
4. 伊藤孝行, 新谷虎松: “事例ベース推論に基づくコンピュータ購入決定支援システムの実現”, 第 50 回情報処理学会全国大会論文集 (2), 情報処理学会, pp. 137–138, 1995.

5. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の提携形成に基づくスケジューリングシステムの実現”, 第 52 回情報処理学会全国大会論文集, 情報処理学会, pp. 3-4, 1996.
6. 伊藤孝行, 新谷虎松: “説得と根回しに基づくエージェント間の交渉とその応用について”, 第 10 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 151-154, 1996.
7. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の説得に基づくグループ意思決定支援システムの試作”, 平成 8 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, p.305, 1996.
8. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani: “Persuasion among Agents : An Approach to Implement a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation”, submitted to *15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, January 1997.
9. 伊藤孝行, 新谷虎松: “マルチエージェントにおける説得に基づく会議スケジューリングについて”, 第 27 回人工知能基礎論研究会, 人工知能学会, 1997 (発表予定).

10. 伊藤孝行, 新谷虎松: “グループ代替案選択支援システムにおけるエージェント間の説得機構について”, 電子情報通信学会論文誌, 電子情報通信学会, 1997 (投稿中).
11. 伊藤孝行, 新谷虎松: “AHP を用いたエージェント間の説得による合意形成について”, 第 54 回情報処理学会全国大会論文集, 情報処理学会, 1997 (発表予定).

Appendix A

AHP の概要

意思決定のプロセスにおいて、まず問題を明確にし、その問題を解決するための解決策や計画案などの代替案を生成する。そして、いくつか代替案がある場合、どの代替案を選択することが次の段階の問題となる。この時、代替案の客観的に比較評価が可能である場合と主観的な評価に頼らざるを得ない場合がある。AHP (Analytic Hierarchy Process) は、選択問題に威力を発揮する手法であり、主観的評価に頼らざるお得ない問題をも扱うことを可能とする手法である。

AHP では、まず意思決定の問題を分解し、問題 (Problem) または目的 (Goal)、評価基準 (Criteria) または目標 (Objectives)、代替案 (Alternatives) の関係でとらえて階層構造を構築する。例として、海外旅

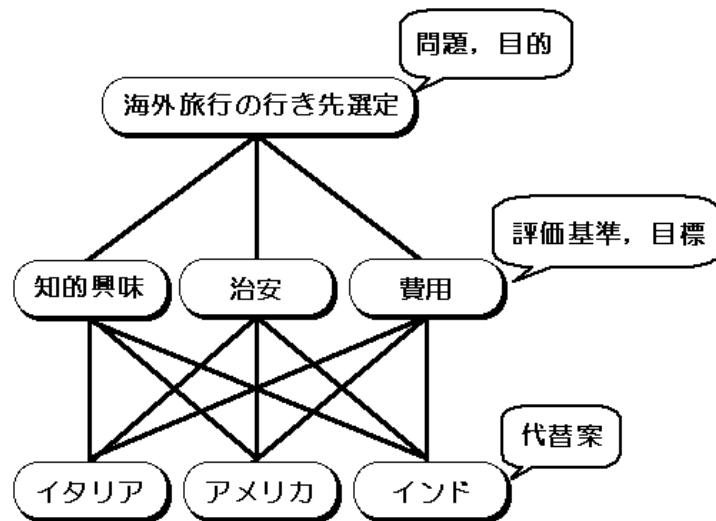


Figure A.1: 海外旅行の行き先選択問題の階層構造

行における行き先の決定に AHP を用いた場合を示す。階層構造は図 A.1 のようになったとする。

問題または目的：総合的な目標を総括したもの。図 A.1 の例では”海外旅行の行き先の選定”となる。

評価基準または目標：目的は目標を満たすことによって達成される。評価基準は、どの代替案がどれくらい目標を満たしているかを評価するに使う。評価基準と目標という言葉は、語彙論的には類義語ではないが、AHP による解析では類義語として扱われる。図 A.1 の例では”知的興味”，”治安”，”費用”である。

代替案：最終的な目的を達成するための選択肢。図 A.1 の例では，“イタリア”，“アメリカ”，“インド”である。

AHP はより複雑な階層構造もサポートできる。評価基準をさらに分解し、副評価基準、さらに分解し、副副評価基準、…、と細かく問題を分割することが可能である。細かく階層的に分析することによって、複雑でかつ構造の不明確な問題を整理することができる。例えば、図 A.1において、評価基準“知的興味”を，“自然”に関する知的興味を“人々”に関する知的興味といったように副評価基準に分解することができる(図 A.2)。

AHP では階層構造のあるレベルの要素を一つ上のレベルの要素を評価基準として一対比較を行ない、その相対的なウェイトを決定する。例えば、図 A.1では，“海外旅行の行き先の選定”を評価基準として，“知的興味”，“治安”，“費用”について一対比較を行ない、ウェイトを決定する。同様に代替案についても，“知的興味”，“治安”，“費用”をそれぞれ評価基準としてウェイトを決定する。一対比較の方法は後に述べる。例えば、A.1のウェイトが

それぞれ表 A.1、表 A.2、表 A.3、表 A.4のように決定されたとする。
以上のように決定したら、最後に“海外旅行の行き先の選定”に関する

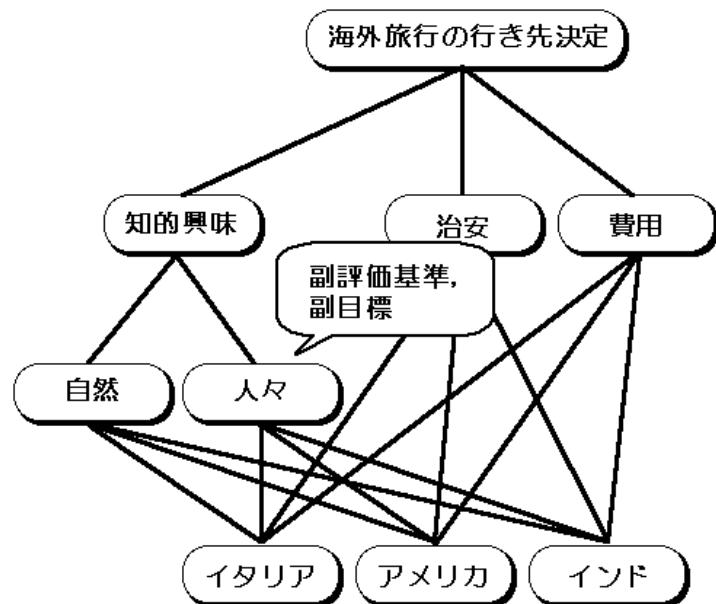


Figure A.2: より複雑な階層構造のサポート

Table A.1: “海外旅行の行き先の選定”について

評価基準	ウェイト
知的興味	0.614411
治安	0.117221
費用	0.268369

Table A.2: “知的興味”について

評価基準	ウェイト
イタリア	0.075200
アメリカ	0.182955
インド	0.748184

Table A.3: “治安” について

評価基準	ウェイト
イタリア	0.310814
アメリカ	0.493386
インド	0.195800

Table A.4: “費用” について

評価基準	ウェイト
イタリア	0.217166
アメリカ	0.717065
インド	0.065769

る各代替案の総合的なウェイトを求める。まず表 A.1 から、

$$\begin{array}{ll}
 \text{知的興味} & \begin{bmatrix} 0.614411 \\ 0.117221 \\ 0.268369 \end{bmatrix} \\
 \text{治安} & \\
 \text{費用} &
 \end{array} \tag{A.1}$$

とできる。

そして、表 A.2、表 A.3、表 A.4 より、

$$\begin{array}{c}
 \text{知的興味} \quad \text{治安} \quad \text{費用} \\
 \text{イタリア} \quad \left[\begin{array}{ccc} 0.075200 & 0.310814 & 0.217166 \end{array} \right] \\
 \text{アメリカ} \quad \left[\begin{array}{ccc} 0.182955 & 0.493386 & 0.717065 \end{array} \right] \\
 \text{インド} \quad \left[\begin{array}{ccc} 0.748184 & 0.195800 & 0.065769 \end{array} \right]
 \end{array} \quad (A.2)$$

そして、行列 A.1 と 行列 A.2 を掛け合わせる (式 A.3) .

$$\left[\begin{array}{ccc} 0.075200 & 0.310814 & 0.217166 \\ 0.182955 & 0.493386 & 0.717065 \\ 0.748184 & 0.195800 & 0.065769 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0.614411 \\ 0.117221 \\ 0.268369 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0.140918 \\ 0.362682 \\ 0.496400 \end{array} \right] \quad (A.3)$$

式 A.3 によって、結果として、代替案“イタリア”のウェイトが 0.140918 ,
 代替案“アメリカ”のウェイトが 0.362682 , 代替案“インド”のウェイト
 が 0.496400 であることが分かり、代替案“インド”が最も好ましい代替
 案であることが分かる .

一対比較はある評価基準を基にして 2 つの要素を比較する . 要素 i は
 要素 j に比べて、「どのくらい好ましいですか？」や「どのくらい重要で
 すか？」などの問い合わせる形式で行なう . 2 つの要素のみに関して比較
 するために、たくさんの要素の順序付けをする必要がなく、ユーザの負

担を減らし、ユーザのより的確な判断を得ることが可能となる。一对比較において2つの要素を比較する際に、表Aの尺度を用いる。表Aにおいて要素*i*と要素*j*を入れ換えて比較した場合は逆数をとる。2つの要素*i*と*j*を比較した値を*a_{ij}*とする。例えば、評価基準“海外旅行の行き先の選定”に関して、要素“治安”は要素“費用”より、かなり重要とすれば、AHPではその判断を値7として扱う。

ここでAHPに関して重要な点は、比較を行なう場合、ユーザは具体的な値でなく言葉によって表現すればよいということである。一般的に、明確な尺度を持たない要素間の比率をユーザが厳密に答えるのは不可能である。そこでAHPでは、一对比較値を獲得するために，“非常に重要”，“かなり重要”，“重要”，“やや重要”，“同じように重要”といった言葉による（verbalな）ファジィな表現を用いることによってつかみどころのない要因を含む問題に関する主観的な分析を可能にし、ユーザの負担を軽くする。つまり、AHPにおける一对比較値は人間の意思を厳密に表すのではなく、だいたいこれぐらいという人間の主観的評価値を表す。

評価基準“知的興味”に関して、各代替案について一对比較を行ない、表Aのように一对比較行列 $A = [a_{ij}]$ を作成する。一对比較行列では、 $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}$ である。評価対象が n であるとき、 $n(n-1)/2$ 回の一对比較が必要となる。これは n が大きくなつた場合にAHPの欠点と

Table A.5: 一対比較の尺度

要素 i は要素 j と比較して	a_{ij}
同じように重要	1
やや重要	3
重要	5
かなり重要	7
非常に重要	9
補間的に用いる	2,4,6,8

Table A.6: ”知的興味”に関する一対比較行列

	イタリア	アメリカ	インド
イタリア	1	1/3	1/8
アメリカ	3	1	1/5
インド	8	5	1

なる。表 A からウェイトを求める。求める手法は後で説明する。結果は、

表 A.2 である。

一対比較行列からウェイトを求める方法を説明する。いま n 個の項目

I_1, \dots, I_n があり、その本来のウェイトが w_1, w_2, \dots, w_n であるとする。そ

のとき、項目 I_i と I_j の一対比較値 a_{ij} は、理想的には、

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (\text{A.4})$$

という関係を満たすはずである。ここで一対比較行列 $A = [a_{ij}]$ は式 A.5

のようになる。

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

そして、 A の右側からウェイトベクトルを乗じると式 A.6 のようになる。式 A.6 から、ウェイトベクトルは A の固有ベクトルであることが分かる。

$$Aw = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

行列 A の 2 行目以下は第 1 行列の定数倍であるから、行列 A の階数（ランク）は 1 となる。つまり行列 A の n 個の固有値のうち、1 つだけが非零で、他はすべて零である。一般に、固有値の和 = 行列の対角要素の和 ($= n$) となるので、非零の固有値は n のみであり、理想的な行列 A の

最大固有値となる。

現実の一対比較行列 A は式 A.5 の形をしていることは期待できない。

もし、ほぼ式 A.5 の形に近いのなら、 A の最大固有値と固有ベクトルを求め、その固有ベクトルが各評価項目のウェイトとして採用できる。つまり、生成した一対比較行列が理想的な一対比較行列とどの程度違うかという整合性の指標が必要となる。

AHP では整合性の指標 (Consistency Index) が用意されており、式 A.7 で表される。 λ_{max} を現実の一対比較行列の最大固有値とする。

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (A.7)$$

行列 A が完全な整合性を持つ場合はこの値は 0 であり、それが大きくなるほど非整合性が高いとみることができる。C.I. の値は 0.1(0.15 の場合もある) 以下であれば整合性ありとされる。しかし、それを超える場合は、一対比較の判断を見直してみる必要があるといわれている。

式 A.7 の意味を説明する。行列 A には n 個の固有値があり、その和は n となることが分かっている。そこで、

$$\lambda_{max} - n \quad (A.8)$$

は， λ_{max} 外の固有値の大きさを示す指標とみることができる。ここで一般に $\lambda_{max} - n \geq 0$ であるから [25]，

$$\lambda_{max} - n \geq 0 \quad (\text{A.9})$$

である。 $(n - 1)$ 個の固有値でこの指標を持つので 1 個当たりの平均が式 A.7 となる。

C.I. に加えて，さらにもう 1 つ整合度を表す指標が用意されている。 $1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9$ の値をランダムに入れた行列 A (ただし対角要素は 1 で，対称要素の逆関係は成立しているものとする) の C.I. を各 n に対して 500 回計算し，その平均 R.I. を求めた (表 A.7)。この値をランダム整合度と呼ぶ。

Table A.7: ランダム整合度

n	1	2	3	4	5	6
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	12
R.I.	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53

C.I. の値を R.I. で割った値を整合比 (Consistency Ratio) と呼び，C.R. で表す A.10。

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (\text{A.10})$$

C.I. と C.R. の値が 0.1 以下 (場合によっては 0.15 以下) ならば , 整合性
がありと判断できるとされる . しかし , それを超えたら一対比較のやり
直しが必要とされる .

AHP の注意点を簡単に説明する .

- 階層構造における同一レベルに取り入れる要素 (項目) は互いに独立性の高いものを採用すること .
- 一対比較の対象となる要素数は 7 個まで , 多くとも 9 以下にする .
- 総合的なウェイトは , 通常選好度を示しており , この値の大きい順に好ましいことを表すが , この値の差にはあまり意味がないので , 注意を要する .