

# 経時的に変化する効用に基づく エージェント間交渉の仲介メカニズムの提案

原 圭佑<sup>1,a)</sup> 伊藤 孝行<sup>1,b)</sup>

**概要:** マルチエージェントシステムの研究分野において複数論点交渉問題が注目されている。特に、実世界の交渉問題は複数の論点が相互依存関係にある場合が多いことから、筆者らは複数の論点が依存関係をもつ、すなわちエージェントの効用が非線形の効用関数で表現される交渉問題に注目している。既存研究では、効用空間の経時変化を考慮していなかったが、経済学の分野では動的に変化する効用関数が仮定されることが多い。本論文では、効用の経時変化を考慮したメディエータ主導の交渉モデルを提案する。提案モデルでは、メディエータが各エージェントの選好をランキング情報として受け取り交渉を進め、交渉問題で重要とされるパレートフロントを探索し、効用の高い解を得ることを試みる。実験により、提案モデルでは効用空間が経時的に変化しても効用の高い解が得られることを示し、またエージェント数が100という大規模な交渉問題の場合でも、合意形成が可能なことを示す。

## 1. はじめに

マルチエージェントの研究分野において複数の論点が存在する交渉問題 (複数論点交渉問題: Multi-issue negotiation problem) が注目されている。ソフトウェアエージェントによる合意形成の開発が進むことにより、将来的にはソフトウェアエージェントが人の代理として交渉を行い、交渉の自動化が促進されると期待できる。これまでに複数論点交渉問題に関して多くの研究が行われている [1], [2], [3], [4]。既存の研究の多くは論点同士が互いに独立している問題を対象としている。しかし、実世界における交渉問題は複雑であり、複数の論点が相互に依存関係にあるケースが多い。例えば、複数の設計者が共同で車の設計を行う場合、キャブレターの選択と、採用するエンジンには高い依存関係が存在する。設計者はこの依存関係を考慮しながら、部品を選択を決定する必要がある。本研究では、以上のような複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉を対象とする。

本研究と同様に、複雑な効用空間を対象とする交渉問題に関する研究 [5], [6], [7], [8] が行われているが、既存の研究は全て効用空間の経時変化を考慮していない。

経済学では、動的に変化する効用関数が仮定される事が多い。例えば、[9], [10] に代表される動学的非整合性モデル

では、個人の選好が時間を通じて変化すると考え、現在の個人は、将来の自分の選好変化を予想した上で現在の意思決定をするというのが基本的な考え方である。[11], [12] は誘惑の特定化の下で現在バイアスとして知られている異時点間の選好逆転現象を説明している。[13], [14], [15] では、時間によるリスク態度の変化を報告している。

そこで本論文では、経時的に変化する複雑な効用空間と、効用の経時変化を考慮したメディエータ主導の交渉手法を提案する。本論文では、いくつかの論点のみを割引または割増しすることで、一様な効用空間の変化だけではなく、効用空間の形状の変化にも着目して議論する。

また交渉問題において、パレートフロントを求めることが重要である。パレートフロントとは、パレート最適合意点集合のことを言う。パレートフロントを求めるには、単一解を求める Simulated Annealing[16] などの最適化手法よりも、複数解を同時に扱う GA の方が親和性が良い。多目的最適化の分野でも、各目的関数に対するパレートフロントを求める際に GA が用いられる。

本論文では、まず GA の性能評価について実験を行い、次に効用空間全体が単純に一樣に変化する場合、効用空間の形状が複雑に変化する場合、変化率が経時変化する場合、エージェント数が多い場合において提案モデルの評価実験を行う。また実験により、提案モデルでは効用空間が経時的に変化しても効用の高い解が得られることを示し、またエージェント数が100という大規模な交渉問題の場合でも、合意形成が可能なことを示す。

<sup>1</sup> 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市昭和区  
Nagoya Institute of Technology,  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan

a) hara.keisuke@itolab.nitech.ac.jp

b) ito.takayuki@nitech.ac.jp

本論文の構成を以下に示す。第2章では、多論点交渉問題について示す。第3章では本論文で提案する経時的に変化する効用空間を示す。第4章では、GAに基づくメダイエータ主導の交渉メカニズムを提案し、第5章で評価実験とその結果を示す。第6章で関連研究を述べ、第7章で本論文をまとめる。

## 2. 多論点交渉問題

まず、 $N$  エージェントが合意形成を試みる状況を考える。論点が  $M$  個存在し、個々の論点を  $s_j \in S$  と表す。効用空間の次元数は、論点数+1である。例えば、論点が2個ある交渉問題では、効用空間は3次元となる。論点  $s_j$  は  $[0, X]$  の範囲の整数を値として持つ(すなわち、 $s_j \in [0, X]$ )。交渉の結果得られる合意点は、各論点の値のベクトル  $\vec{s} = (s_1, \dots, s_M)$  として表現される。

本論文では、エージェントの効用関数は制約を用いて表現する。 $l$  個の制約が存在するとし、個々の制約は  $c_k \in C$  と表す。制約は、単一、もしくは複数の次元(論点)に関して、制約充足条件となる値の範囲、および効用値を持つ。制約  $c_k$  は、合意  $\vec{s}$  によって充足される場合にのみ、 $w_i(c_k, \vec{s})$  を効用値としてもつことができる。交渉に参加する全てのエージェントは、個々にユニークな制約集合を持つ。

本論文では、車の設計問題のような、基本的な意思決定問題の形式を想定しており、具体的な例として、学会や会議などのために手配する会場仕様の決定といった問題も挙げられる。本例では、コストやキャパシティなどが具体的な論点として考えられ、それぞれに関して、“50-70万円”又は“70-90万円”、及び“50-100人”又は“100-150人”といった形式で選択肢が与えられるケースが考えられる。各選択肢に対して、個々の論点、および他の論点との関係を考慮して評価値を決め(例えば、「より大きな会場が確保できるならば、コストが多少大きくなって良い」など)、各論点に関する解を決定する。ここで、エージェントが持つべき選好情報は、各論点に関して希望する代替案、および他の論点に関する希望代替案との組合せと、その評価値である。本論文で用いる制約表現では、これらの情報を表現するために十分であり、想定する問題を扱うことが可能である。

合意  $\vec{s}$  に関するエージェントの効用を以下の式(1)のように定義する。

$$u_i(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s}) \quad (1)$$

ここで、 $x(c_k)$  は、制約  $c_k$  を充足可能な合意点の集合である。論点が相互に依存する効用グラフを図1に示す。効用グラフとは各エージェントの効用空間をグラフを用いて表現したものである。ノードが論点を示し、エッジが制約を表現している。本グラフ表現により論点1、論点2及び論点3に関連する単項制約、2項制約及び3項制約を表現する

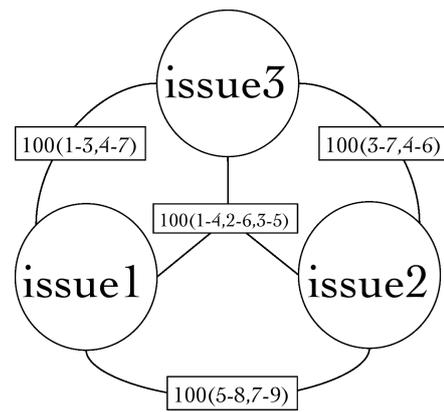


図1 論点が相互に依存し合う効用グラフ  
Fig. 1 Utility graph

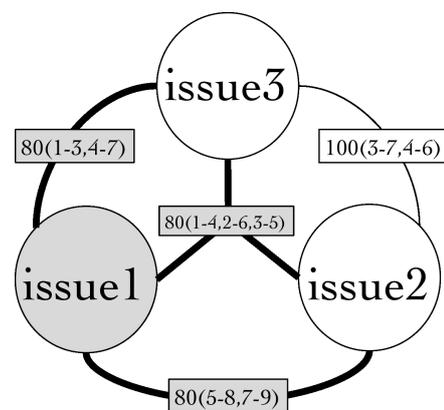


図2 論点1のみを割引した場合  
Fig. 2 Utility decreasing on issue1

ことが可能である。本例において、論点2に関しては[3,7]、論点3に関しては[4,6]の範囲で合意が得られた場合に制約が充足可能であり、その場合に得られる効用は100であることを示している。同様にして、論点1に関しては[1,4]、論点2に関しては[2,6]、論点3に関しては[3,5]の範囲で合意が得られた場合に制約が充足可能であり、その場合に得られる効用は100であることを示している。

## 3. 経時的に変化する効用空間

前節で示した効用グラフに基づいて、変化率(割引率または割増率)を導入することで、効用空間を経時的に変化させることを考える。本例では割引についてのみ考える。一般的に、人間の交渉における効用の経時的変化は論点に依存する[9], [10], [11], [14]。例えば、車の設計を考えた際に、交渉開始時にはデザインを重要視していた人が、交渉を重ねることでデザインの重要性が低下していくというのは、現実的に起こりうる現象である。よって、本論文では論点に依存する効用空間の経時的変化を考える。図2に図1の論点1を割引したものを示す。論点1を割引すると、論点1に関する制約(太い線)から得られる効用が減少する。本例では、割引率を0.8とし、割引回数を1回としている。図1

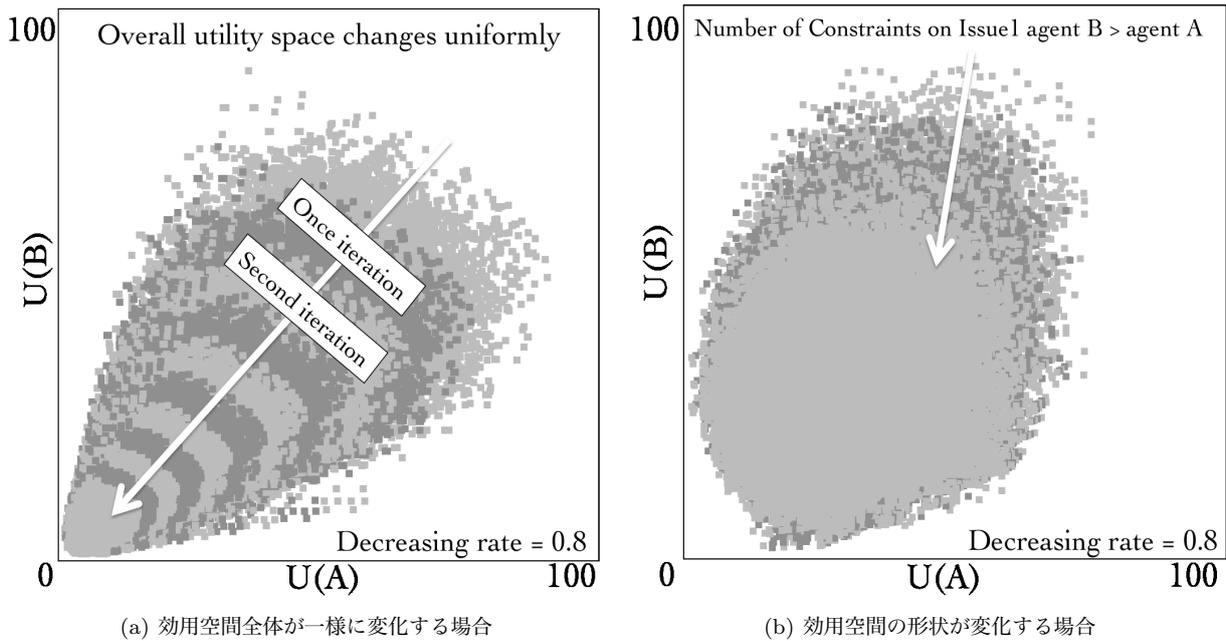


図 3 経時的に変化する交渉可能領域  
 Fig. 3 Pareto front changes over time

と図 2 を比較すると、論点 1 に関する制約から得られる効用は、100 から 80 に減少している。一方で、論点 1 が関わらない制約から得られる効用は 100 のままで変化していない。このモデルにより、論点毎の効用の経時変化を表現する。

各エージェントの効用空間が経時的に変化している様子をパレートフロントの変化として図 3 に示す。横軸がエージェント A の効用値 ( $U(A)$ )、縦軸がエージェント B の効用値 ( $U(B)$ ) を表す。濃い灰色の部分と、薄い灰色の部分、それぞれ交渉可能領域を示しており、割引するたびに描写の色を交互に変えている。交渉可能領域とは、合意点として取り得る点を網羅的にプロットした点である。

図 3(a) はすべての論点を割引した場合である。この場合、効用空間全体が一様に変化するため、交渉可能領域は単純に一様に変化する。論点間の独立を仮定している多くの研究では、図 3(a) のような単純な変化しか考えることができない。一方本研究では、各論点の重要性が選好情報に基づいて複雑に変化するという状況を想定する。

図 3(b) は、論点 1 のみを割引した場合である。本論文では、各エージェントはそれぞれの効用空間を持っており、論点に対する依存度、すなわち、論点に対する制約数が異なる。従って、効用空間は、各エージェントの論点に対する依存度に応じて経時的に変化する。図 3(b) は、エージェント B の方が論点 1 に関する制約数が多い場合であり、エージェント B の方が効用値の減少幅が大きく、パレートフロントはエージェント B に偏って変化する。

以下にパレート支配、パレート最適、及びパレートフロントについての一般的な定義を示す。

**【パレート支配】** 2 つの利得ベクトル  $x =$

$(x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n)$  について、すべての  $i = 1, \dots, n$  に対して、 $x_i > y_i$  となるとき、 $x$  は  $y$  をパレート支配するという。すべての  $i$  について  $x_i \geq y_i$  であり、少なくとも一つの  $i$  について  $x_i > y_i$  となるとき、 $x$  は  $y$  を弱パレート支配するという。

**【パレート最適】** 利得ベクトル  $x$  がいかなる  $y$  によっても弱パレート支配されないとき、 $x$  はパレート最適であると言う。パレート支配されない場合は、弱パレート最適であると言う。

**【パレートフロント】** パレート最適解の集合をパレートフロントと言う。

#### 4. GA に基づくメディーエータ主導の交渉メカニズムの提案

GA を用いたエージェント間の合意形成手法は、[17] により示されている。表 1 に示すように、エージェント間の交渉に GA を適用する場合、交渉における合意点を染色体、合意点の論点を遺伝子座、論点の値を遺伝子とすることが可能である。

表 1 交渉問題と GA のマッピング

Table 1 Mapping a negotiation problem into a GA

交渉	合意点	論点	論点の値
GA	染色体	遺伝子座	遺伝子

提案アルゴリズムでは、メディーエータが各エージェントの選好をランキング情報として受け取り交渉を進め、なるべく効用の高い合意点を得ることを試みる。図 4 にアルゴリズムの概要を示す。図 4 は、2 エージェントの場合を記述

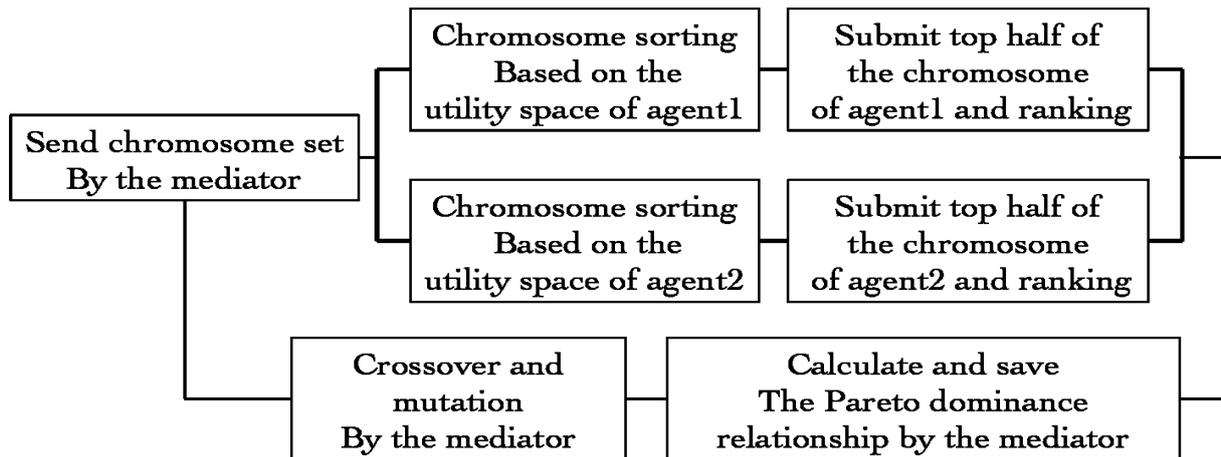


図4 アルゴリズムの概要

Fig. 4 Flow of proposed method

しているが、 $n$  エージェントに容易に拡張可能である。まずメディエータが染色体集合を各エージェントに分配する。各エージェントは染色体を、自分自身の効用空間に基づいてソートする。すなわち、合意点が各エージェントの効用値の大きい順でソートされることになる。そして、各エージェントは、メディエータに上位半分の染色体集合と、各染色体のランキング情報を提出する。メディエータはパレート支配関係を計算し、パレート支配されていない染色体（より良い染色体）のコピーを作成し、必ず次の世代に残すように保存する。そして、メディエータによって交叉と突然変異が行われる。以上が、最初に定義した回数だけ、繰り返される。

特徴は、各エージェントが染色体にランキング情報を付加情報としてメディエータに送付することで、パレート支配している合意点（染色体）を、後の世代に引き継ぐ（優性遺伝）ことを可能にしている点である。これにより、メディエータは各染色体の具体的な効用値を知ることなしに、染色体同士のパレート支配関係を判定することが可能となる。

## 5. 実験

### 5.1 設定

本実験では、ランダムに生成された効用関数を持つエージェント間の交渉を 100 回試行した結果の平均値を取る。1つの試行につき 20 回の割引または割増しを実施することで、効用空間が経時的に変化していることを表現している。本実験では提案手法の性能評価のために、合意案の厳密解を網羅的に探索を行うことで算出した。実験では図 5 に示したメディエータが GA を用いない手法 HC (Hill climbing) と比較する。

本実験におけるパラメータは以下の通りである。

- エージェント数：2, 20 および 100
- 論点数：5
- 論点の値域：[0,9]

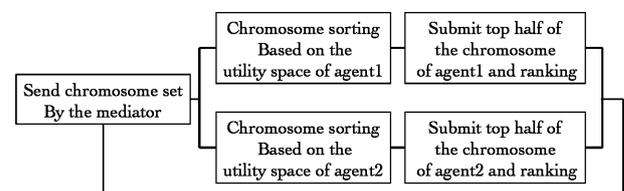


図5 メディエータのみの交渉アルゴリズム (HC)

Fig. 5 Flow without GA (HC)

- 制約数：30（単項制約）,30（二項制約）,30（三項制約）
- 制約の最大効用： $100 \times (\text{論点数})$ 。従って、多くの論点に関して条件を満たす制約は、平均して効用がより高くなる。
- 制約の最大範囲：7。本設定の下では、例えば、以下の制約が妥当なものとして生成される。(論点1, 論点2, 論点3)=[2,6],[2,9],[1,3]。
- 染色体数：10-100
- 世代数：5-100
- 割引率：0.8
- 割増率：1.1

### 5.2 GA の性能評価に関する結果

まず、エージェントの効用の経時的变化を考慮せずに GA の性能評価の結果を示す。メディエータ主導の交渉手法では、交渉結果の精度がメディエータの性能（本論文では GA の性能）に対する依存度が大きくなるためである。

図 6(a) に GA 及び HC のパレートフロントの探索精度の結果を示す。黒い点が GA で得られた上位の合意点であり、白い点が HC で得られた上位の合意点を示している。濃い灰色の領域は、全ての合意案候補（10 の 5 乗個）を網羅的に描写した交渉可能領域である。

本例では、GA のパラメータの設定を染色体数を 20 個、世代数を 20 としている。通常の最適化手法として用いられる GA のパラメータ設定としては比較的小さい数値に設定

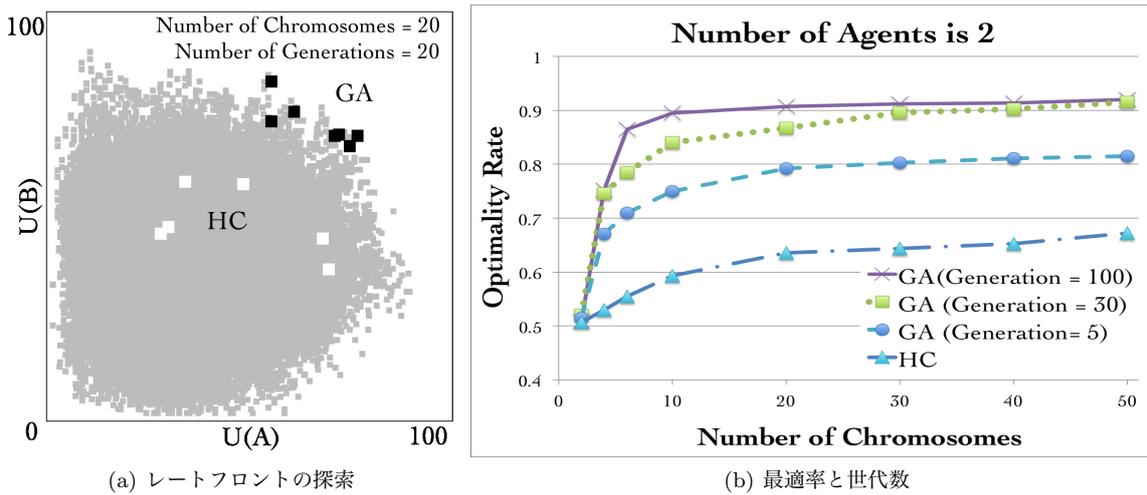


図 6 GA の性能評価

Fig. 6 Effectiveness of GA

した理由は、単に最適解を求めるだけでなく実世界の交渉問題への適用を考慮したためである。染色体数（合意点候補数）が少ないことは、各ユーザーに対する負担を軽減することを意味している。例えば、染色体数を 300 個と設定すると選択肢の候補が 300 個存在することになり、300 個の中から自身にとって効用の高い点を選ぶのは困難である。

図 6(a) を見ると、GA ではパレートフロント近傍を探索可能なことに対し、HC ではパレートフロントを探索不可能なことが分かる。理由は、GA ではメディエータが染色体を更新させることでよりパレートフロントの探索が可能となる。一方で、HC では初期解から解が更新されないの、パレートフロントの探索が不可能となる。

次に図 6(b) の説明をする。横軸が染色体数、縦軸に最適率を示している。本例で得られた結果は実験を 100 回試行した平均を取ったものである。折れ線グラフの上から順に、世代数が 100, 30, 5 及び HC を表現している。最適率は、全ての合意案候補の中から網羅的に探索して得られた最大社会的効用値と、GA 及び HC で得られた最大社会的効用値の比較と定義した。社会的効用値とは交渉に参加する全てのエージェントの効用の和である。

図 6(b) から分かるように、どのプロトコルでも染色体数及び世代数が増えるほど、最適率が向上していることが確認できる。GA を用いた手法では最適率が対数関数的に増加する。すなわち、染色体数及び世代数が 20 程度と比較的少ない値でも、最適率はほぼ最大に近づき、パレートフロントの探索が可能である。本研究では、交渉問題を単なる最適化問題と捉えるのではなく、実世界への適用を考慮した問題設定にしているの、染色体数及び世代数はなるべく少ない方が良い。本研究で提案している GA に基づくメディエータ主導の交渉手法では、染色体数及び世代数が少ない状況下においても優れた性能を発揮できる。

図 6(b) において最適率が最大でも 0.9 程度に留まり、1.0

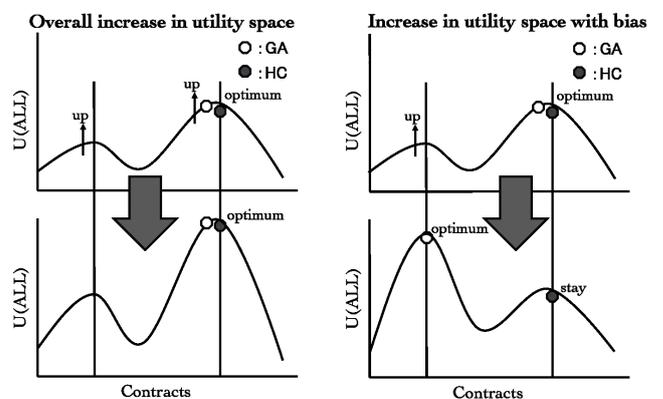


図 7 最適率が減少する理由

Fig. 7 The shape of the utility space

に近づかない理由を述べる。本研究では交渉プロトコルの目的関数を、社会的効用の最大化ではなく、パレートフロントと定義している。パレートフロントとは前述したように、他の誰かの効用を悪化させない限り誰の効用も改善できない状態の集合である。すなわち、パレートフロントに属していることは、社会的効用が高いのは間違いないが、社会的効用が最大とは限らないということである。例えば、図 6(a) を見ると分かるように、交渉可能領域は複雑な形をしているので、パレートフロントに属していても社会的効用が最大ではないということが確認できる。

### 5.3 効用空間全体が変化した場合の結果

本節では、効用空間全体が変化した場合、すなわち全ての論点を割引または割増した場合について述べる。図 8(a) に全ての論点を割引した際の交渉結果を描写したものを示す。図 8(a) の見方は図 3(a) と同様である。黒い点は GA で求めた合意点を表している。

図 8(a) を見ると分かるように、割引しても GA ではパレートフロントを求めることが可能である。全ての論点

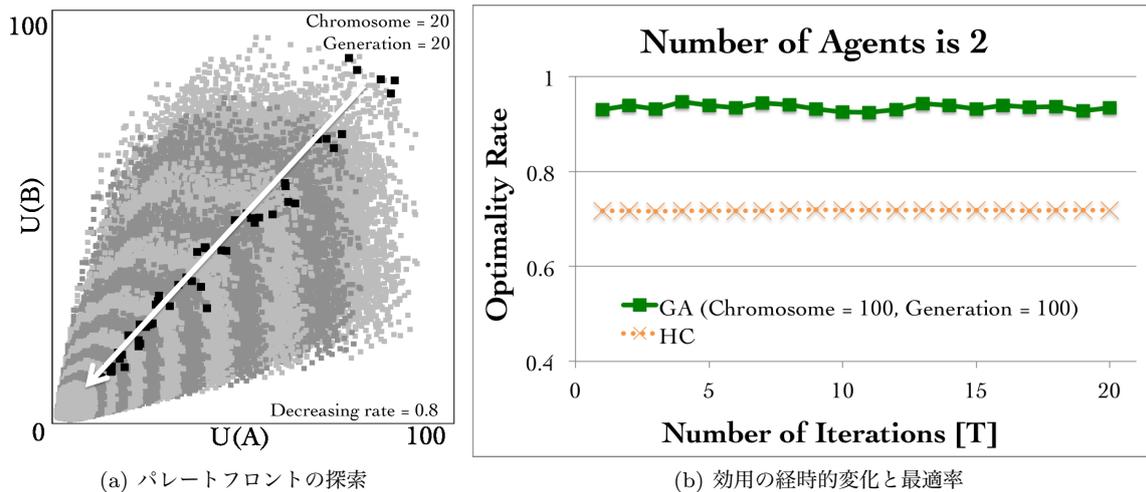


図 8 効用空間全体が一様に変化する場合  
Fig. 8 Overall utility space changes uniformly

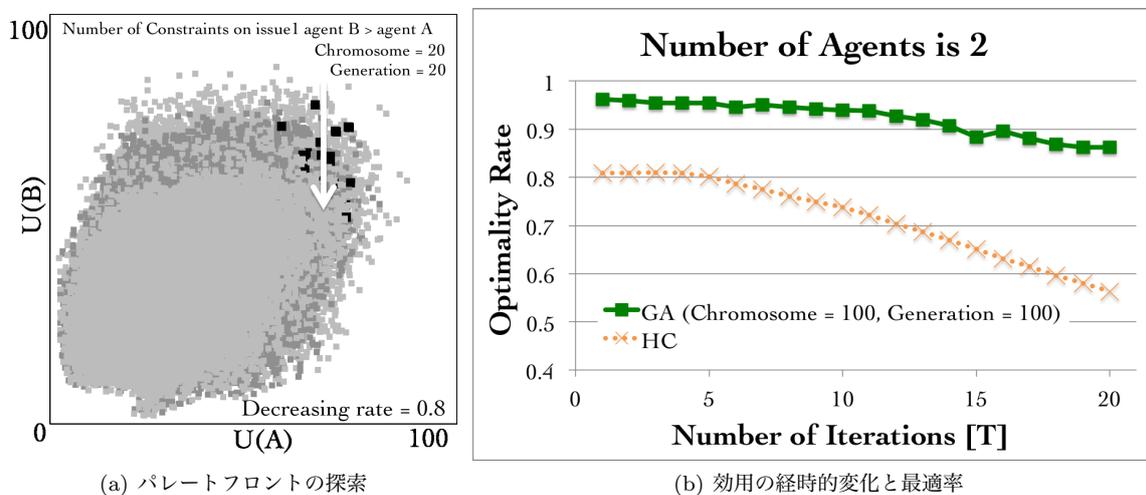


図 9 効用空間の形状が変化する場合  
Fig. 9 Utility space changes with a bias

を割引しているため、交渉可能領域は一様に小さくなっている。

図 8(b) に全ての論点を割増しして効用空間全体を変化させた場合の最適率の変化の様子を示す。横軸が割増し回数で、縦軸が最適率である。最適率の定義は前述の通りである。割増しとは、割引の反対で各エージェントの効用が増加する場合である。本研究で扱う効用グラフでは、各論点に対して割引及び割増しをすることでエージェントの効用の複雑な変化が可能なのは第 3 章で述べた。

図 8(b) を見ると分かるように、効用空間全体を変化させた場合、GA 及び HC では効用の経時的変化の影響を受けていない。効用空間全体が変化する場合、各エージェントの効用空間の形状は変化せず、図 8(a) のように全体としての交渉可能領域の形状も変化しないためである。

#### 5.4 効用空間の形状が変化する場合の結果

本節では、効用空間が偏って変化した場合、すなわち全

ての論点ではなく、いくつかの論点のみを割引または割増した場合について述べる。図 9(a) に論点 1 のみを割引した際の交渉結果を描写したものを示す。図 9(a) の見方は図 4 と同様である。黒い点は GA で求めた合意点を表している。本例では、論点 1 に関する制約数が、エージェント A よりエージェント B の方が 10 個多い場合を示している。図 6(a) と同様に、染色体数及び世代数は 20 に設定してある。

論点 1 のみを割引する場合、論点 1 に関する制約の多いエージェントの方が効用の減少幅が大きいため、図 9(a) のように交渉可能領域が白い矢印の向きに偏って変化する。全ての論点を割引したときと同様に Pareto フロントを探索可能なことが図 9(a) から確認できる。

図 9(b) にいくつかの論点のみを割増しして効用空間を偏って変化させた場合の最適率の変化の様子を示す。横軸が割引回数で、縦軸が最適率である。最適率の定義は前述の通りである。

図 9(b) から分かるように、GA では平均して 0.9 程度の

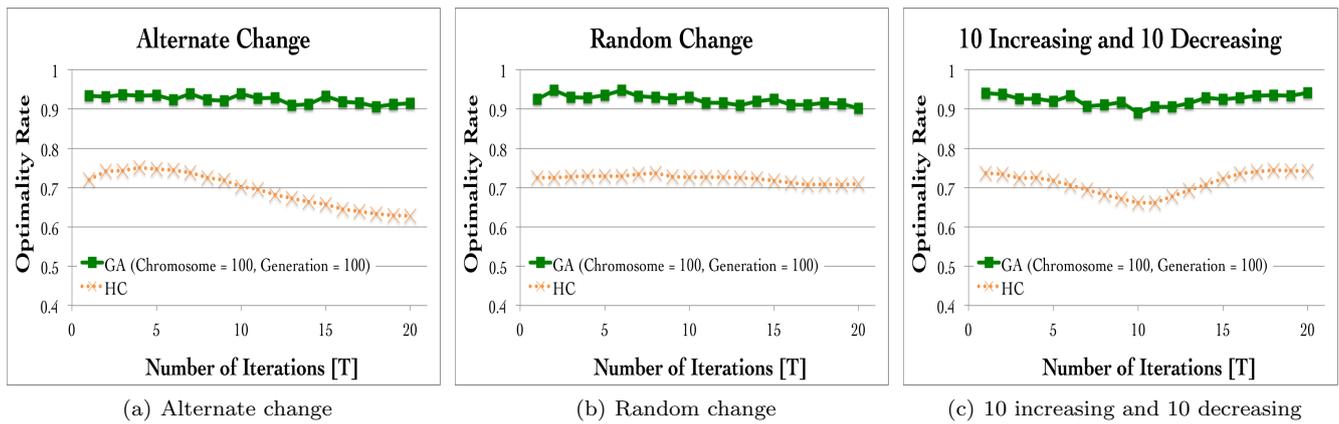


図 10 変化率が複雑に変化する場合 (エージェント数 2)  
Fig. 10 Complex utility space change (number of agents is 2)

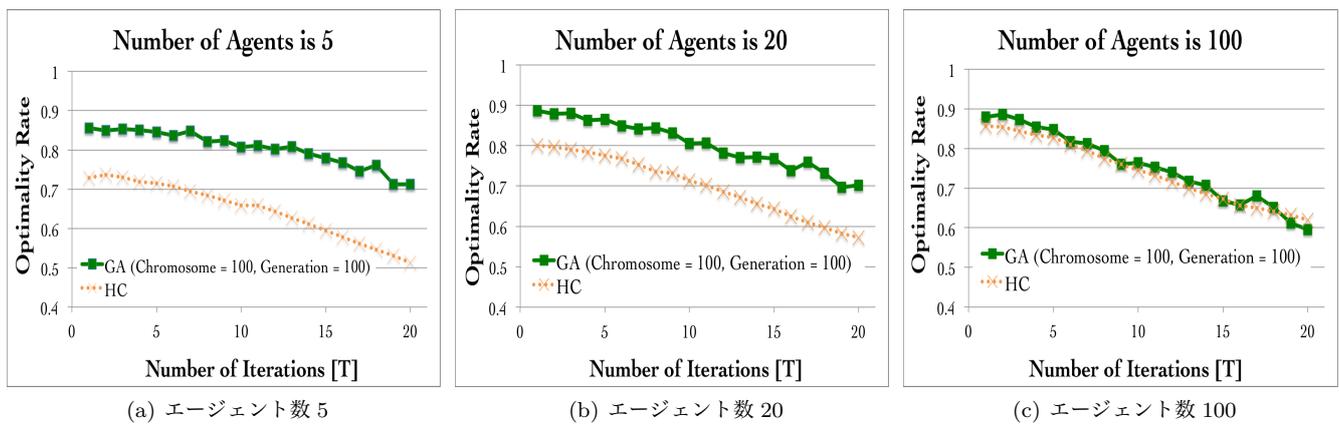


図 11 エージェント数が多い場合 (効用空間が複雑に変化する場合)  
Fig. 11 5 agents and 20 agents and 100 agents (utility space changes with bias)

最適率が期待できる。一方で、HC では割増しするたびに、すなわちエージェントの効用が経時的に変化するたびに減少しており、20 回の割増しにより最適率が 0.8 から 0.6 程度へ減少している。原因を図 7 を用いて以下に述べる。

図 7 は、複雑な効用空間の変化の様子を 2 次元で簡潔に表現したものである。左の図が効用空間全体が変化する場合で右の図が効用空間全体が偏って変化する場合である。横軸は効用空間の軸を足し合わせたものであり、縦軸は社会的効用値である。白丸が GA の最適解、黒丸が HC の最適解である。

図 7 左のように効用空間全体が変化する場合、社会的効用値は上昇するが効用空間の形状は変化しない。すなわち GA と HC とともに合意点の位置は変化しない。従って図 8(b) で示したように GA 及び HC において、エージェントの効用が経時的に変化しても最適率に影響はほとんど無い。一方で、図 7 右のように効用空間全体が偏って変化する場合、効用空間の形状は変化する、すなわち GA では合意点の位置が変化する。GA では交渉を繰り返す中で各エージェントにとって、望ましい染色体が後の世代に残り進化しながら、社会的にも望ましい染色体が残る傾向が高まるためである。

### 5.5 各論点の変化率が複雑に変化する場合の結果

本節では各論点の変化率が複雑に変化する場合について述べる。本論文では、論点間の相互依存関係を考慮しているため、各論点の重要性が選好情報に基づいて複雑に変化するという状況を想定することが可能である。図 10(a) にいくつかの論点のみに割引と割増しを交互に繰り返した結果を示す。GA では高い最適率を維持することができるが、HC では最適率が減少している。図 10(b) に各イテレーション毎に各論点の変化率を 0.8 から 1.2 の間でランダムに変化させた場合の結果を示す。この場合、GA および HC の最適率はほとんど変化しない。これは、各エージェントの各論点に対する依存度が反映されないためである。図 10(c) にいくつかの論点に対して、始めに割増しを 10 回、続いて割引を 10 回した結果を示す。割増し最中は HC の最適率が減少し、割引最中は HC の最適率が上昇することが分かる。

### 5.6 エージェントが多い場合の結果

前節まではエージェントが 2 の場合の議論を進めていたが、本節ではエージェント数が 5、20 または 100 の場合における交渉について述べる。本論文で提案するメディエータ主導の交渉手法では、各エージェントの役割を軽減する

ことで大規模な交渉問題を扱うことが可能な点が大きな特徴である。本節では、効用空間全体が偏って変化する場合においてエージェント数の増加が交渉結果にどのような影響を与えるかについて議論を行う。

まず、エージェント数が5および20の場合について述べる。図9(b)と同様な設定でエージェント数が20の場合においてシミュレーション実験した結果を図11(a)に示す。図9(b)と同様に、HCでは効用空間全体の形状が変化の中で初期解から合意点が移動できないので、結果的にエージェントの効用が変化するたびに最適率が減少する。GAではエージェント数が2の場合に比べて最適率が減少しているが、HCよりも最適率が高い。エージェント数が2の場合と比べて最適率が減少する理由を以下に述べる。

本研究では、各エージェントは各論点に対して依存度が異なるそれぞれの効用関数を持っている。従って、いくつかの論点のみを割引または割増した場合、各エージェントの効用空間はそれぞれ変化の仕方が異なる。すなわち、エージェント数が増えれば増えるほど、効用空間全体では変化の仕方が複雑になり、最適な合意点を探索するのが困難となる。ゆえに、エージェント数が2の場合よりも5および20の場合の方が、GAでは交渉結果のばらつきが大きくなる。

次にエージェントが100の場合における交渉結果について述べる。図9(b)と同様な設定でエージェント数が100の場合において、シミュレーション実験した結果を図11(c)に示す。エージェント数が100まで増えると、GAとHCの結果がほとんど同じになることが図11(c)から分かる。理由は前述したように、効用空間全体の変化の仕方が極めて複雑になり、最適な合意点を探索するのがGAでも困難となる。メディエータ主導の交渉メカニズムの重要な点は、エージェント数が100という大規模な交渉問題においても、合意形成が可能である点である。既存手法[18]では、エージェント数が5程度で合意形成失敗率が高まっていたが、本提案手法では、最適率は低下するが、エージェント数が100という大規模な交渉問題においても合意形成が可能である。

## 6. 関連研究

多論点交渉に関する既存研究の多くは線形の効用関数についてのみアプローチしたものであるが[1], [19], [20], [21], [22], 非線形の効用関数に注目した研究も近年多く発表されている。

文献[23]では、分散制約最適化問題として交渉問題のモデル化を行っている。ここでは、エージェントが提案の交換を介して制約緩和を行い、合意形成を試みる。エージェントの選好は、優先度付きのファジィ制約として表現され、複数の属性を扱うため、非線形の効用関数が成り立つ。本文献では、提案手法によって最適な結果が得られる事が主

張されている。しかし、本文献で示されているのは、一人の売り手（不動産業者）と一人の買い手（借家人）の交渉ケースのみであり、one-to-oneの小規模な問題に限定して議論が行われている。また、本文献ではファジィ制約に基づく選好表現を採用しており、各制約に対して満足度を付加する必要があるため、より詳細な情報が事前に必要とされる。一方、本論文では、異なる制約を持った多数のエージェントの存在を前提とした交渉手法を提案している。また、多数の制約が問題に含まれる場合、個々の制約に対して適切な満足度を設定することは負担の大きい作業である。特に、本研究では、制約間に依存関係が存在する複雑な効用空間を想定しており、依存関係を考慮した満足度の事前設定は困難である。本論文で用いている制約は、各論点に関して許容可能な代替案の集合、および制約充足時の効用のペアから成る簡潔な形式である。従って、本論文における提案手法は、実際的な利用がより容易であると言える。

文献[6]では、合意案をon/offのラベルを持つノードから成るゴールツリーとして定義し、制約解消アルゴリズムに基づいて求解する手法を提案している。本文献では、提案手法はスケラビリティが高いと主張しているが、実際に本文献で用いられている具体例は、3つの属性数を含むケースであり、可能な解の数も27個( $= 3 \times 3 \times 3$ )しか存在しない。これは明らかに小規模な問題であり、理論的な解析が不十分である。本論文では、本文献と比較してスケラビリティに関する十分な議論が行われており、可能な解の数も100000個( $= 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ )存在する。

文献[24]では、二者間の複数論点の交渉問題を取り扱っており、提案した手法がパレート最適性を満たす解を探ることが可能であることが示されている。ただし、論点間の依存関係と依存による複雑な効用空間は扱っていない。本論文では、制約を用いて効用関数をグラフで表現し、論点間の依存関係を考慮した複雑な効用空間を扱っている、[21]では電子商取引における二者間の複数の商品取引や複数論点の交渉問題に対して効用空間を効用グラフというグラフ表現を用いて取り組んでいる。論点の依存関係は扱われるが、効用モデルが異なる。

文献[7]では、二項制約を含む中規模の双方向型の交渉問題を対象とし、シミュレーテッドアニーリングに基づくメディエータが準最適な解を得る手法が提案されている。一方、本論文では、さらに高次の依存関係と多数のエージェントが存在する、より複雑な交渉問題に関して、スケラビリティと高い最適性を議論している。

以上のように自動交渉エージェントに関する研究は数多く行われているが、交渉最中の時間的制約を考慮していない。しかし、わずかではあるが交渉最中の時間的制約を考慮した文献もあるので次に示す。

文献[22]では、時間制約が存在する場合の多論点交渉に関して、論点ごとの二者間交渉を提案しており、ナッシュ均

衡となる戦略を示している。論点間の依存関係は、論点毎に合意を形成していくモデルで、前に合意を得る論点が、後の論点に影響を与えるという意味で依存関係があるが、直接的な論点間の依存関係は扱っていない。本論文では、論点間の依存関係においては制約を用いたグラフで表現し、論点に関する制約数、すなわちどの論点をどれだけ重要視するかなども考慮されている。また、交渉最中における時間制約に関しては、交渉最中に論点を割引または割増しすることで、各エージェントの効用空間が複雑に変化し、交渉可能領域が変化しても最適な合意点を探索できることを示している。さらに、本論文では、2者間交渉だけでなく、エージェント数が100体という大規模な交渉問題においても、合意形成が可能であることを示した。

## 7. まとめ

本論文では、論点に依存して経時的に変化する複雑な効用空間と、効用の経時変化を考慮したメディアータ主導の交渉メカニズムを提案した。実験により、提案手法では、効用空間が経時的に複雑に変化しても効用の高い解が得られることを示した。また、エージェント数100という大規模な交渉問題の場合でも、合意形成が可能であることを示した。

## 参考文献

- [1] P. Faratin, C. Sierra, C. and Jennings, N. R.: Using Similarity Criteria to Make Issue Trade-Offs in Automated Negotiations, *Artificial Intelligence*, Vol. 142, pp. 205–237 (2002).
- [2] Fatima, S., Wooldridge, M. and Jennings, N. R.: Optimal negotiation of multiple issues in incomplete information settings, *Proceedings of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS2004)* (2004).
- [3] Lau, R.: Towards genetically optimised multi-agent multi-issue negotiations, *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '05)* (2005).
- [4] Soh, L.-K. and Li, X.: Adaptive, confidence-based multi-agent negotiation strategy, *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS2004)* (2004).
- [5] Hindriks, K., Jonker, C. M. and Tykhonov, D.: Eliminating interdependencies between issues for multi-issue negotiation, *Proceedings of the 10th international conference on Cooperative Information Agents*, pp. 301–316 (2006).
- [6] Barbuceanu, M. and Lo, W.-K.: Multi-attribute utility theoretic negotiation for electronic commerce, *Proceedings of the International Workshop on Agent-mediated Electronic Commerce (AMEC2000)* (2000).
- [7] Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. and Bar-yam, Y.: Negotiating Complex Contracts, *IEEE Intelligent Systems Journal, Special Issue on Agents and Markets*, Vol. 18, pp. 32–38 (2002).
- [8] Fujita, K. and Ito, T.: An Approach to Implementing A Threshold Adjusting Mechanism in Very Complex Negotiations: A Preliminary Result, *KICSS2007* (2007).
- [9] Strotz, R. H.: Myopia and Inconsistency in Dynamic Utility Maximization, *Proceedings of the 10th International Conference on Cooperative Information Agents*, Vol. 23 (1955).
- [10] Laibson, D.: Golden Eggs and Hyperbolic Discounting, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 127, pp. 267–286 (1997).
- [11] Gul, F. and W. Pesendorfer: Self-Control and the Theory of Consumption, *Econometrica*, Vol. 72, pp. 119–158 (2004).
- [12] Gul, F. and Pesendorfer, W.: Self-Control, Revealed Preference and Consumption Choice, *Review of Economic Dynamics*, Vol. 7, pp. 243–264 (2004).
- [13] Savitsky, K., Medvec, V., Charlton, A. and Gilovich, T.: 'What, me worry?': Arousal, Misattribution and the Effect of Temporal Distance on Confidence, *Personality and Social Psychology Bulletin*, Vol. 24, pp. 529–536 (1998).
- [14] Loewenstein, G., Weber, E., Hsee, C. and Welch, N.: Risk as Feelings, *Psychological Bulletin*, Vol. 127, pp. 267–286 (2001).
- [15] Sagristano, M., Trope, Y. and Liberman, N.: Time-Dependent Gambling: Odds Now, Money Later, *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol. 131, pp. 364–376 (2002).
- [16] Russell, S. J. and Norvig, P.: Artificial Intelligence : A Modern Approach, *Prentice Hall* (2002).
- [17] Ito, T. and Klein, M.: A Consensus Optimization Mechanism among Agents based on Genetic Algorithm for Multi-issue Negotiation Problems, *JAWS-2009*, pp. 286–293 (2009).
- [18] Ito, T., Klein, M. and Hattori, H.: An Auction-Based Negotiation Protocol for Agents with Nonlinear Utility Functions, *Center for Coordination Science, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology* (2006).
- [19] Lau, R. Y. K.: Towards Genetically Optimised Multi-Agent Multi-Issue Negotiations, in *Proceedings of the Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05)* (2005).
- [20] Jonker, C. M., Robu, V. and Treur, J.: An agent architecture for multi-attribute negotiation using incomplete preference information, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 221–252 (2007).
- [21] Bosse, T. and Jonker, C.: Human vs. Computer Behaviour in Multi-Issue Negotiation, *Proceedings of the First International Workshop on Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems*, pp. 11–24 (2005).
- [22] Fatima, S. S.: Approximate and online multi-issue negotiation, *Proceedings of the 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems* (2007).
- [23] Luo, X., Jennings, N. R., Shadbolt, N., Leung, H. F. and Lee, J. H. M.: A fuzzy constraint based model for bilateral, multi-issue negotiations in semi-competitive environments, *Artificial Intelligence*, Vol. 148, pp. 53–102 (2003).
- [24] L., G. and K., S.: A General Model for Pareto Optimal Multi-Attribute Negotiations, *Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems* (2008).