

# 複合的合意形成プロセスの開発

## Development of the Composite Consensus Building Process

朝 康博<sup>1</sup> 加藤 猛<sup>2</sup> 嶺 竜治<sup>1</sup>

Yasuhiro Asa<sup>1</sup>, Takeshi Kato<sup>2</sup>, and Ryuji Mine<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日立製作所 日立京大ラボ

<sup>1</sup>Hitachi Kyoto University Laboratory, Hitachi Ltd.

<sup>2</sup> 京都大学 日立京大ラボ

<sup>2</sup> Hitachi Kyoto University Laboratory, Kyoto University

**Abstract:** To support consensus-building (defined here as an acceptable compromise that not everyone rejects), we developed a composite consensus-building process. The process developed is a combination of "permissible meeting analysis," which derives consensusable choices that fall within everyone's permissible range, and "compromise choice search," which derives consensusable choices that emphasize fairness and equality for all. When both permissible meeting analysis and compromise choice exploration do not arrive at a consensus, a facility is provided to create a sublated choice among those provided by them. The trial experimental results confirmed that permissive meeting analysis and compromise choice exploration are sufficiently useful for deriving consensusable choices. Furthermore, we found that compromise choice exploration is characterized by its ability to derive choices that control the balance between compromise and fairness.

### 1. はじめに

今日の社会課題は、国際紛争などの秩序形成、地球温暖化対策などの環境保全、コロナ感染対策などのパンデミック、ウェルビーイングやジェンダー平等などの人権問題のように、多様な価値観による社会的な対立が起因となり問題を悪化させている。すなわち、社会課題には集団における意見対立問題が深く関わっており、この問題を解決するための集団意思決定方法が求められている。

集団意思決定の代表的方法として、選好集計ルールによる投票が実社会では広く用いられている。選好集計ルールには、単純多数決をはじめ、ボルダルールなどのスコアリングルール、累積投票など多種の方法が存在する[1, 2]。しかし、これらの選好集計ルールでは、循環的選好が生じ合意不可能になり得ること(コンドルセのパラドックス)があるうえ[3]、公正性の条件であるパレート効率性(全員一致性)、選好関係の完備性と推移性、選択肢の独立性、非独裁性を同時に満たすことが出来ないことが証明されており(アローの不可能性定理)、投票によって一意で公正な意思決定を行うことはできない[4]。

全ての社会構成員にとって望ましい社会的な集団意思決定を行うための学術分野として社会的選択理

論がある。この理論における思想の1つが、哲学者ベンサムが提唱する、格差社会において多数の貧困層を救済することを正義とする「最大多数の最大幸福(功利主義原理)」である[5]。これに対して、哲学者ロールズは、ベンサムが前提とする格差社会そのものを平等で公正な社会にすることが正義であるとし、「自由な幸福への追求(自由の原理)」、「最不遇者の便益最大化(格差原理)」、「公正な職務・地位の機会均等(機会均等原理)」を提唱している[6]。ベンサムの原理に基づく集団意思決定は、上述した投票と同じく決定結果が多数派に偏る問題がある。一方、ロールズの原理は、多様性と公正性を重んじ不遇な少数派を尊重するものであるが、投票で実現することは難しい。

このような個人の自由・平等・公正を重視する集団意思決定方法として合議・熟議がある。社会哲学者のハーバーマスは、議論でのコミュニケーション行為による相互主観性を重視した集団意思決定の重要性を唱えている[7]。また、政治学者のフィッシュキンは討議型世論調査により熟議の前後における参加者の意見の変化を踏まえた意思決定の重要性を述べている[8]。政治学者ガットマンは、議論による民主制の形態として他者の意見に耳を傾ける熟議民主主義を提唱し[9]、日本においても教育分野や街づく

りにおける熟議民主主義の必要性や実用性が検討されている[10, 11].

合議・熟議による集団意思決定では、そのプロセスが重要となる。社会心理学者のティボーやウォーカーは、参加者の自由討議が結果に対する満足感や公正感を抱かせることを示し[12], また心理学者のレーベンソールは、プロセスにおける公正感の促進要因(手続き的公正基準)を論じている[13]. 人類学者のグレーバーは本来の民主主義とは「誰もが同意を拒むほどではない妥協と総合のプロセス(全員のコンセンサス)」であると述べている[14]. このようなプロセスの具体的方法として、類縁グループ単位でスポーク(代表者)を立てて議論を行うスポークス・カウンスル[15]や都市計画学者のサスカインドが提唱するコンセンサス・ビルディング手法がある[16].

合議による集団意思決定のプロセスを支援するため、オンラインによる意見集約機能やチャットによる意見交換機能を持つ技術が複数提案されている。例えば、Decidim[17]はアンケートやブログなどの補助コンポーネントが充実し、vTaiwan[18]は参加者の意見を自動的にグループ化し、Loomio[19]やLiqid[20]は円グラフやワードクラウドによって意見を可視化し、D-Agree[21]は意見の自動構造化やAIによるファシリテーション機能を持っている。しかし、これらの技術では、意見の活性化や整理に大きな効果が見込めるものの、意見対立時の支援機能が無く、グレーバーの提唱するような全員のコンセンサスへ導くことが難しい。

意見対立の解消に向けた数理的なフレームワークとして GMCR (Graph Model for Conflict Resolution)がある[22-26]. GMCR は、意見の対立構造をグラフモデルで表現し、意思決定者の各意見に対する選好順序に基づいて数理解析することで、合理性や効率性を考慮した合意可能案を導出する。しかし、解析する状態数が  $A^N$  ( $A$ : 選択枝数,  $N$ : 意思決定者数)と膨大になってしまう問題がある(計算量オーダー  $O(k^n)$ , 指数時間)。そこで、GMCR の考え方を参考にしつつ、その問題を回避する技術として Permissible Meeting Analysis (PMA)が提案されている[27, 28]. PMA は、意思決定者の選択枝に対する選好順序とその許容範囲に基づいて数理解析することで、許容性を考慮した合意可能案を導出する。解析する状態数は選択枝数  $A$  であるため十分実用的である(計算量オーダー  $O(n)$ , 線形時間)。ただし、PMA では全員の許容範囲を調整する際に、その合計調整量の少ない合意可能案を優先的に導出するため、多数派の負担が少ない合意可能案が導出されやすく、少数派を含めた全員のコンセンサスが得られにくい可能性がある。

以上を踏まえて、我々の目的は、全員のコンセンサスを目指した新しい合意形成支援技術と、それを用いた新しい合意形成プロセスを提供することにある。具体的には、従来技術である PMA に加えて、我々は新たに Compromise Choice Exploration (CCE)を提供する。そして、両者から導出される2つの合意可能案を組み合わせた複合的合意形成プロセスによって全員のコンセンサスの実現を支援する[34].

先に述べたように、PMA だけでは多数派に偏りがちな合意可能案が提示されやすい問題がある。そこで我々は、PMA によって全員のコンセンサスに至らない場合に、CCE によって全員の妥協度合いが平等となる公正性を重視した合意可能案を提示する技術を提供する。新しい複合的合意形成プロセスでは、PMA と CCE を組み合わせることによって、公正性を重視しながら全員の許容範囲や妥協範囲に収まるコンセンサスを得ることを可能にする。これらの技術とプロセスは、ロールズの格差原理、ガットマンらの熟議民主主義、レーベンソールの手続き的公正、グレーバーの妥協と総合という研究の流れを引き継ぐものであり、従来の意見交換ツールや数理解析モデルをさらに発展させる点で新しい研究を切り拓くものである。

本報告の残りの部分は次のように構成されている: 2 章では従来の PMA とともに我々が新たに提案する CCE と、それらを組み合わせた新しい複合的合意形成プロセスについて説明する。3 章では、例題に対する我々の技術とプロセスの試行実験結果を示し、4 章では、我々の技術やプロセスの効果や残された課題などについて考察を行い、最後の章で結論を述べる。

## 2. 提案方法

### 2.1 許容会議分析 (PMA)

まず、従来の意見対立解消技術である PMA について説明する。我々の提案する複合的合意形成プロセスでは、PMA を機能の1つとして採用するからである。

合議において、参加者の集合を  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ , 選択枝の集合を  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 参加者  $i \in M$  の選択枝に対する選好順序を  $\succsim_i = x_{i1} \succ x_{i2} \succ \dots \succ x_{in}$  とする。ここで、 $x_{ij} \in X$ ,  $j$  を選好順位として、参加者  $i$  の許容する選択枝の集合を  $\max P_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik_i} | k_i \leq n\}$ ,  $\max P_i$  の許容範囲を  $l$  だけ拡張した

集合を  $\max P_i^l = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik_i}, \dots, x_{i(k_i+l)} | (k_i + l) \leq n\}$  とする。

PMA のアルゴリズムを図 1 に示す。PMA では、全参加者の許容範囲内に存在する選択肢を合意可能案とするため、まず Step 1 では、式(1)により参加者  $i (= 1, 2, \dots, m)$  の許容する選択肢の積集合  $U_o$  を導出し、 $U_o = \emptyset$  であるか否かを判断する。そして、 $U_o = \emptyset$  ではない場合は、Step 2 へ移行し、式(1)で導出した選択肢の集合  $U_o$  を合意可能案  $X_o$  として出力し終了する。

Step 1 で  $U_o = \emptyset$  である場合は、Step 3, 4 そして 6 のループにおいて各参加者  $i$  の許容範囲  $l_i$  を 1 つずつ広げていき、式(2)に示すように参加者  $i (= 1, 2, \dots, m)$  の許容範囲の積集合  $U_{l_i}$  をそれぞれ導出し、 $U_{l_i} = \emptyset$  であるか否かを判断する。そして、Step 4 で  $U_{l_i} = \emptyset$  ではない場合、Step 5 では積集合  $U_{l_i}$  の中で許容範囲  $l_i$  の広げ具合が小さい選択肢、すなわち式(3)において最小となる選択肢の集合  $X_l$  を合意可能案とする。

$$U_o = \bigcap_{i=1}^m \max P_i \quad (1)$$

$$U_{l_i} = \bigcap_{i=1}^m \max P_i^{l_i} \quad (l_i = 0, \dots, n - k_i) \quad (2)$$

$$X_l = \underset{U_{l_i}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^m l_i \quad (3)$$

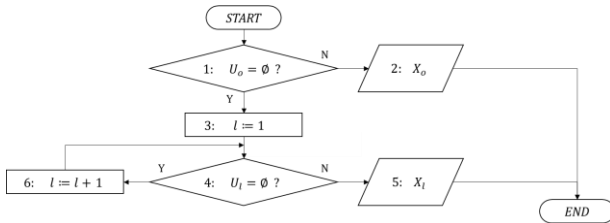


図 1: 許容会議分析のフローチャート

ここで、Step 2 の集合  $X_o$  あるいは Step 5 の集合  $X_l$  に複数の合意可能案が含まれる場合は、それら全てを PMA の導出結果とする。なお、Step 3, 4 そして 6 のループ処理では、必ず  $U_{l_i} \neq \emptyset$  となる許容範囲  $l_i$  が存在するため、無限ループに陥ることはない。

## 2.2 妥協案探索 (CCE)

前節で説明した PMA を踏まえて、我々の新たな合意可能案の導出技術である CCE を提案する。PMA では、選択肢の選好順序に対する許容範囲を広げることが参加者の妥協行為であり、全体での妥協行為が最小となる合意可能案を導出するため、妥協行為が多数派よりも少数派に偏ってしまい公正性に欠け

る状況となりやすい。そこで、CCE では、参加者の選好順序に対する入替え操作を行うことを参加者の妥協行為とし、各参加者の入替え操作回数なるべく平等となるような共通の選好順序を合意可能案とする。これにより、公正性の高い合意可能案を導出する。

CCE のアルゴリズムを図 2 に示す。CCE では、選択肢  $X$  の全ての選好順序のリスト  $(\succsim)_{all}$  の中から、各参加者  $i$  の初期の選好順序  $\succsim_i$  からの順序の置換回数が等しくなるものを探索する。まず Step 1 では、 $n!$  個のリスト  $(\succsim)_{all}$  を生成する。次に、このリストに対して各参加者  $i$  の選好順序  $(\succsim_i)_{i \in M}$  と  $(\succsim)_{all}$  の各選好順序との入替え回数を算出するため、Step 3 では式(4)のように参加者  $i$  の選好順序の各要素を置換規則  $Rule_i$  に従って昇順の数値に置換する。ここで  $Rule_i$  は、 $x_{i1}$  を数値 1、 $x_{i2}$  を数値 2、 $x_{i3}$  を数値 3、 $x_{in}$  を  $n$  に置き換えることを意味する。

$$Rule_i = \begin{pmatrix} x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ 1 & 2 & \dots & n \end{pmatrix} \quad (4)$$

Step 5 では、式(5)のように選好順序リスト  $(\succsim)_{all}$  の各選好順序に対して式(4)と同じ規則  $Rule_i$  で置換を行う。ここで、 $j = 1, \dots, n!$  である。

$$\succsim'_j = \begin{pmatrix} x_{j1} & x_{j2} & \dots & x_{jn} \\ x'_{j1} & x'_{j2} & \dots & x'_{jn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Step 6 では、式(6)に示すように、式(5)によって置換した選好順序リスト  $(\succsim')_{all}$  の各選好順序を昇順に並べ替え、式(7)にしたがってその時の並べ替え回数を算出する。ここで、 $Sort(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  は、バブルソートによって任意の選好順序  $(\succsim_i)_{i \in M}$  を昇順にソートする処理を表し、 $SortCount(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  は、その時のソート回数を求める処理を表すとする[35]。

$$\succsim'_{js} = Sort(x'_{j1}, x'_{j2}, \dots, x'_{jn}) \quad (6)$$

$$r_{js} = SortCount(x'_{j1}, x'_{j2}, \dots, x'_{jn}) \quad (7)$$

Step 7 と 8 および Step 9 と 10 のループでは、Step 3, 5 そして 6 の処理を全ての参加者  $i$  と全ての選択肢  $j$  に対して行う。

Step 11 では、各参加者の選好順序  $\succsim_i$  からの選好順序リスト  $(\succsim')_{all}$  の各リストの置換回数に基づいて、 $(\succsim)_{all}$  の中から全参加者の置換回数が等しいものを探索する。具体的には、式(8)と式(9)に基づいて  $(\succsim')_{all}$  の各リストに対する各参加者  $i$  の置換回数  $r_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) の平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  を導出し  $Score$  を算出する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (r_i - \mu)^2} \quad (8)$$

$$Score = \mu + \sigma \quad (9)$$

Step 12 では、式(10)において  $Score$  が最小となる選

好順序のリストを選択する．平均値 $\mu$ は，初めの選好順序からの妥協が少ないほど値が小さくなる．標準偏差 $\sigma$ は，参加者全員の置換回数が等しいリストほど値が小さくなる(値が0の時，参加者全員の置換回数が等しい)．したがって，式(9)は各参加者の妥協がなるべく少なく，且つ公平性が高いほど小さなScoreとなり，式(10)ではこのScoreが最も小さい選択肢を合意可能性の高い妥協案として導出する．

$$X_s = \underset{(\mathbf{z})'_{all}}{\operatorname{argmin}} \operatorname{Score} \quad (10)$$

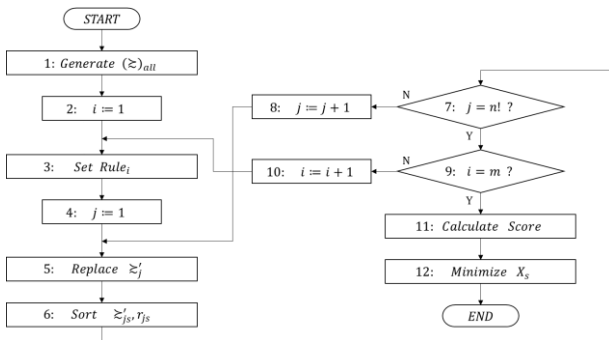


図 2:妥協案探索のフローチャート

なお, CCE で全数探索される $(\mathbf{z})_{all}$ の数は $n!$ であるため(計算量オーダーが $O(n!)$ , 階乗時間), 選択肢数の増加とともに計算負荷が大きくなる．ただし, 実際の合意形成の現場で扱われる選択肢数は高々10個程度であり, 実用上は全数探索でも問題ないと考えられる．なお, ここでは全数探索を用いたが, その代わりに参加者の初期の選好順序から次第に置換ネットワークを広げていきながらScoreが小さい選択肢を探索するような, より効率的なアルゴリズムも考えられる．

### 2.3 複合的合意形成プロセス

これまで説明した PMA と CCE を組合せた新たな複合的合意形成プロセスを提案する．「複数の選択肢の中から参加者全員が同意する 1 つの選択肢を決定する問題」に関する合意形成プロセスのフローを図 3 に示す．

まず, Step 1 では, 2.1 節のアルゴリズムに基づいて PMA を行い, その結果に基づいて Step 2 では, 参加者間で合意可能か否かの議論を行う．この議論において, 初めから全員の許容範囲内に同じ選択肢が存在し, コンセンサスが得られれば議論を終了すればよい．同じ選択肢が存在しない場合は, Step 1 の PMA で導出された合意可能案とその時の許容範囲条件を参加者に提示し, 全員のコンセンサスが得られればプロセスを終了する．

Step 2 で全員のコンセンサスが得られない場合は, Step 3 に進み, 2.2 節のアルゴリズムに基づいて CCE を行う．PMA で導出される合意可能案は, 多数派に偏りがちな選択肢が導出されやすいという性質を持つため, もし Step 2 で合意に至らなかった場合の原因は参加者に対する公平性にあると考えられる．CCE で導出される合意可能案は公平性を重視した選択肢であるため, 全員のコンセンサスが得られやすいと考えられる．そこで, Step 4 では CCE で導出された合意可能案を参加者に提示し合意可能性の議論を行う．この議論において全員のコンセンサスを得て合意案が決定できればプロセスを終了する．

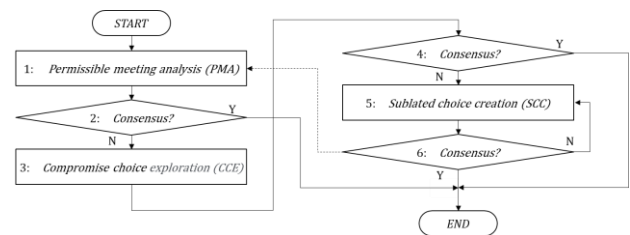


図 3:複合的合意形成プロセス

Step 4 で全員のコンセンサスが得られない場合は, Step 5 に進み, Step 1 の PMA および Step 3 の CCE の結果に基づいて新たな止揚案を生成する．具体的には, PMA で導出された全員の許容範囲内に収まりやすい選択肢の内容と, CCE で導出された公平性に基づく選好順序上位の選択肢の要因を抽出し, これらの要因を統合した新たな選択肢(止揚案)を生成する．そして, Step 6 において, この止揚案に基づいて合意可能性の議論を行う．この議論において全員のコンセンサスを得て合意案が決定できればプロセスを終了する．

Step 6 でもなお全員のコンセンサスが得られない場合は, Step 5 に戻り, PMA と CCE から導出される合意可能案を増やし, 新たな止揚案を再生成する．具体的には, PMA では式(3)が最小の選択肢だけでなく 2 番目に小さい選択肢も用い, CCE では式(9)が最小の選択肢だけでなく 2 番目に小さい選択肢も用いることで, それらの要因を統合した新たな止揚案を再生成する．そして, 再生成した止揚案に基づいて Step 6 で再び議論を行う．

ここで, 再生成した止揚案が複数生成された場合は, これら複数の止揚案に対する参加者の選好順序と許容範囲によって PMA および CCE が可能となるため, Step 1 のプロセスに戻ることも可能である．

このように, 我々が新たに提案する複合的合意形成プロセスでは, 全員のコンセンサスを目指して, まずは PMA を用いて全員の許容範囲に収まる合意

可能案に基づいて議論を行い、そこで合意に至らない場合は、CCE を用いて公平性を考慮した合意可能案に基づいて議論を行う。そして、両者を用いてもコンセンサスに至らない場合は、PMA と CCE の合意可能案を総合することで止揚案を生成し議論を行う。

従来のプロセスでは、参加者の意見対立時に全員のコンセンサスを得るための効果的な支援方法が無かったが、本プロセスにより効果的な合意可能案を提示しファシリテーションを支援することができる。

### 3. 試行実験の結果

#### 3.1 実験設定

我々の提案する合意形成支援技術を評価するため、表 1 に示すテーマで PMA と CCE のそれぞれについて試行実験を行った。テーマは「日本における原子力発電の今後の扱い方について」、参加者数は 5 人(A さん～E さん)、選択肢は、(1)2030 年までに原発ゼロとする、(2)国有化し廃炉、(3)新設不可・安全性と地元同意を条件に再稼働可、(4)新設不可・代替発電法の確立まで再稼働可、(5)廃炉を視野に再稼働可・次世代型原子炉開発を推進、(6)安全性を重視し原発可、(7)積極的に原発活用 of 7 つである。

表 1:合意形成のテーマと選択肢

テーマ	議論内容	選択肢
原子力発電	今後の日本のエネルギー政策において、原子力発電はどのように扱うべきか？	(1) 2030 年までに原発による発電量をゼロにする。 (2) 国有化し公共事業として廃炉を推進する。 (3) 新設は認めない。再稼働は安全性と地元合意が条件。 (4) 新設は認めない。他の電力源が確立するまでは原発を活用する。 (5) 既存原発の再稼働は容認するが廃炉を視野に入れる。次世代型原子炉の開発を推進する。 (6) 安定的な電力源として安全第一で活用する。 (7) 積極的に再稼働を推進する。

合議にはオンラインプラットフォーム D-Agree を用い、テーマに対して、チャット機能を用いて、各参加者の意見、そして選択肢に対する選好順序と許容範囲を収集した。先に述べた通り、D-Agree には自動ファシリテーション機能が備わっており、参加者から意見が投稿されるとその内容を受けて他の人の投稿を促すような介入が行われ、議論の活発化が図られる。

#### 3.2 実験結果

前節で説明した表 1 のテーマについて、5 人の参加者の 7 つの選択肢に対する選好順序と許容範囲を取得した結果を表 2 に示す。

表 2 に対して 2.1 節の方法にしたがって PMA を行なった結果、全員の許容範囲内に選択肢(4)「新設不可・代替発電法の確立まで再稼働可」が存在する

表 2:選好順序と許容範囲  
(白：許容する、グレー：許容しない)

	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
Rank1	(5)	(4)	(4)	(5)	(4)
Rank2	(4)	(3)	(3)	(4)	(2)
Rank3	(3)	(2)	(2)	(3)	(1)
Rank4	(2)	(6)	(1)	(2)	(3)
Rank5	(1)	(1)	(5)	(1)	(5)
Rank6	(6)	(7)	(6)	(6)	(6)
Rank7	(7)	(5)	(7)	(7)	(7)

ため、これが合意可能案となった。なお、表 2 の結果に対して本論文の 2.2 節で述べた方法で CCE を行った結果については、文献[33]の 4.2 節を参照されたい。

先に述べたとおり、表 2 で示した参加者の選好順序と許容範囲では、初めから全員の許容範囲内に選択肢(4)が存在するため、PMA で選ばれた選択肢(4)と CCE で選ばれた選択肢(4)が一致し、意見対立の状態になっていなかった。そこで、意見対立のある場合を試行するため、例えば表 3 のように、全員の許容範囲内に合意案が存在しない場合を想定する。これは、図 1 の Step 1 から Step 3 and 4 へ進むプロセスに相当する。

表 3:選好順序と許容範囲  
(白：許容する、グレー：許容しない)

	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
Rank1	(5)	(4)	(7)	(5)	(6)
Rank2	(4)	(3)	(6)	(4)	(7)
Rank3	(3)	(2)	(2)	(3)	(1)
Rank4	(2)	(6)	(1)	(2)	(5)
Rank5	(1)	(1)	(4)	(1)	(3)
Rank6	(6)	(7)	(3)	(6)	(4)
Rank7	(7)	(5)	(5)	(7)	(2)

表 4 に、表 3 の想定例に対して PMA を行なった結果を示す。この場合、全体の許容範囲の広げ具合を表す  $\sum_{i=1}^5 l_i$  の値が最小の 2 となる選択肢(1)「2030 年までに原発ゼロとする」が合意可能案として導出され、その時の許容範囲条件は、B さんと D さんの 2 名の許容範囲をそれぞれ 4 から 5 に 1 だけ広げることである。表 3 の例は人数が少ないものの、このことは A さん、C さん、E さんの 3 名は許容範囲を広げる必要がなく、PMA が多数派に偏る傾向があることを示唆している。

なお、表 4 を見ると、 $\sum_{i=1}^5 l_i$  の値が 3 となるものが 3 件存在し、それらの合意可能案は(2), (4), (3)とそれぞれ異なる。このことは、表 3 の想定例では一つの合意可能案を選択できたが、場合によっては  $\sum_{i=1}^5 l_i$  の値だけで合意可能案を一つに絞れない場合が存在することを示唆している。これについては、4 章において後述する。

表 4:許容会議分析の結果 (表 3 の場合)

許容範囲						$\sum_{i=1}^5$	$\max P_A^{I^A}$	$\max P_B^{I^B}$	$\max P_C^{I^C}$	$\max P_D^{I^D}$	$\max P_E^{I^E}$	$\bigcap_{i=1}^5 \max P_i^{I^i}$
$k_A + 1$	$k_B + 1$	$k_C + 1$	$k_D + 1$	$k_E + 1$	$k_F + 1$							
5	5	4	5	4	2		5(4)(3)(2)(1)	4(3)(2)(6)(1)	7(6)(2)(1)	5(4)(3)(2)(1)	6(7)(1)(5)	(1)
5	4	4	4	7	3		5(4)(3)(2)(1)	4(3)(2)(6)	7(6)(2)(1)	5(4)(3)(2)	6(7)(1)(5)(3)(4)(2)	(2)
5	4	5	4	6	3		5(4)(3)(2)(1)	4(3)(2)(6)	7(6)(2)(1)(4)	5(4)(3)(2)	6(7)(1)(5)(3)(4)	(4)
5	4	6	4	5	3		5(4)(3)(2)(1)	4(3)(2)(6)	7(6)(2)(1)(4)(3)	5(4)(3)(2)	6(7)(1)(5)(3)	(3)

表 5 に、表 3 に対して CCE を行なった結果を示す。Score が最小となる選好順序  $\{(4),(6),(7),(5),(3),(2),(1)\}$  と、その 1 位の選択肢(4)「新設不可・代替発電法の確立まで再稼働可」が合意可能案として導出される。ただし、表 5 を見ると、Score または標準偏差  $\sigma$  が同じ値となるものが複数存在する。このことは、表 3 の想定例では一つの合意可能案を選択できたが、場合によっては Score または標準偏差  $\sigma$  だけでは合意可能案を絞り込めない場合が存在することを示唆している。これについては、4 章において後述する。

表 5:妥協案探索の結果 (表 3 の場合)

$(\succeq)_{all}$	$r_{js}$ for $\succeq_A$	$r_{js}$ for $\succeq_B$	$r_{js}$ for $\succeq_C$	$r_{js}$ for $\succeq_D$	$r_{js}$ for $\succeq_E$	Average " $\mu$ "	Standard deviation " $\sigma$ "	Score " $\mu + \sigma$ "
$\{(4),(6),(7),(5),(3),(2),(1)\}$	9	8	10	9	8	8.8	0.748	9.548
$\{(4),(6),(7),(5),(2),(3),(1)\}$	10	9	9	10	9	9.4	0.49	9.89
$\{(4),(7),(6),(5),(3),(2),(1)\}$	10	9	9	10	9	9.4	0.49	9.89
$\{(4),(6),(5),(2),(7),(1),(3)\}$	9	10	10	9	10	9.6	0.49	10.09
$\{(6),(4),(5),(2),(7),(3),(1)\}$	9	10	10	9	10	9.6	0.49	10.09
$\{(6),(4),(5),(2),(1),(7),(3)\}$	9	10	10	9	10	9.6	0.49	10.09
$\{(4),(7),(5),(6),(3),(2),(1)\}$	9	10	10	9	10	9.6	0.49	10.09
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

表 3 の想定例では、PMA で導出された選択肢(1)と CCE で導出された選択肢(4)が一致しなかった。これは、PMA が許容範囲の拡大、CCE が選好順序の置換に基づくことに由来する。また、CCE では、選好順序 1 位の選択肢だけに意味があるのではなく、上位の選択肢にも妥協範囲としての意味があると考えられる。そこで、CCE で 1 位の選択肢(4)と 2 位の(6)、PMA の選択肢(1)の要因を改めて並べると、「(4)新設を認めず、他の電力源が確立するまでは原発を活用、(6)安定的な電力源として安全第一で原発を活用、(1)2030 年までに原発による発電量をゼロにする。」である。これらの選択肢(4)(6)(1)を統合すると、「新設を認めず、他の電力源が確立するまで安全第一で原発を活用し、2030 年までに原発による発電量ゼロを目指す。」という選択肢が現われてくる。したがって、選択肢(4)(6)(1)は対立していると言うよりも、これらを合わせた止揚案を示唆していると言える。すなわち、PMA と CCE を組み合わせた合意形成プ

ロセスでは、両者の結果を折衷しながら止揚を目指すことが可能になる。

## 4. 考察

従来の合議支援技術では意見の集約が難しく、従来の意見対立解消技術の GMCR では計算量が膨大になる問題（計算量：選択肢数の人乗）があったが、意見対立解消技術の一つである PMA（計算量：選択肢数）と今回新たに提案した CCE（計算量：選択肢数の階乗）は計算量を抑えつつ全員のコンセンサスに向けた合意可能案を提示し、ファシリテーションを支援することができる。

PMA では、表 4 で示したように、参加者全員の許容範囲内に収まる選択肢を選ぶことで全員のコンセンサスに向けた合意可能案が導出される。ただし、この合意可能案は、参加者全体の許容範囲の広げ具合が最小となる選択肢であるため、多数派に偏った合意可能案が導出されやすいという傾向がある。

CCE では、表 5 で示したように、Score が最小となる選択肢を選ぶことで、各参加者の妥協がなるべく少なく、且つ公平性が高い合意可能案が導出される。なお、Score の計算に用いた式(9)では平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  が同じ重みの係数で加算されているが、妥協を減らし多数派を重んじたければ  $\mu$  の係数を大きく、少数派を尊重し公平性を重んじたければ  $\sigma$  の係数を大きくすればよい。社会課題に応じて、妥協度と公平性の重みづけを変えることができる。

なお、表 4 や表 5 で示したように、PMA および CCE の両方において、合意可能案を 1 つに絞れない場合が存在することがある。例えば、どちらか一方でも 1 つの合意可能案を導出できる場合は、その選択肢を合意可能案として優先すればよい。両方に複数の合意可能案があって重複がある場合は、その重複の中から合意可能案を絞っていけばよい。両方に複数の合意可能案があって重複が無い場合、これは珍しいケースであるが、3.2 節の最後で述べたように、両方の合意可能案の内容に基づいて新たな止揚案を導く必要がある。また、止揚案の導出方法については、先に述べた PMA と CCE の導出結果だけでなく、全ての選択肢の要因に対する参加者の評価を加味することで、全員の価値観を取入れた新たな止揚案を生成できる。この時の要因分解や要因統合では、生成 AI の活用が期待される。

PMA と CCE を組み合わせた複合的合意形成プロセスでは、参加者全員の許容範囲内に収まる選択肢や、置換回数(妥協)と公平性をバランスさせた選択肢を合意可能案として提供できる。PMA によって全員のコンセンサスに至らなければ CCE に進み、それでもコンセンサスに至らなければ PMA と CCE の両



方の合意可能案から新たな止揚案の創出をファシリテーションすることができる。

## 5. 結論

我々は、全員のコンセンサスを得ることを目指して、新しい妥協案探索技術を開発し、従来技術の(1)許容会議分析 (PMA) と(2)妥協案探索 (CCE)を組み合わせた新しい複合的合意形成プロセスを提供した。このプロセスにしたがって試行実験を行なった結果、以下の知見を得た。

- ・ (1)PMA によって、全員のコンセンサスに繋がるような参加者全員の許容範囲に収まる選択肢が導出されることを確認した。ただし、参加者全体の許容範囲の広げ具合が最小となる選択肢を優先するため、多数派に偏った合意可能案が導出されやすい傾向があることが分かった。
- ・ (2)CCE によって、選好順序の置換回数の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  を加算した *Score* が最小となる選好順序を導出することで、参加者の妥協がなるべく少なく、且つ公平性が高い合意可能案が得られることを確認した。また、平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  の重み係数によって、全体の置換回数(妥協)と公平性のバランスを変えられることが分かった。
- ・ 複合的合意形成プロセスは、(1)PMA によって全員のコンセンサスに至らない場合に、(2)CCE によって全員の妥協度が平等となる公正性を重視した合意可能案を提示することができる。両者を用いてもコンセンサスに至らない場合でも、(1)PMA と(2)CCE の合意可能案を総合することで、止揚案を得ることが可能になる。

今回の試行実験を踏まえて、PMA または CCE において合意可能案を 1 つに絞れない場合には、選択肢の優先度や重複を考慮する必要があることが分かった。また、CCE では、社会課題に応じて *Score* の平均置換回数(妥協)と標準偏差(公平性)の重みづけを変える必要があることが分かった。さらに、PMA または CCE の両方で合意可能案が見つからない場合に向けて、将来的に止揚案を生成する技術の研究が望まれる。

今回提案した合意形成プロセスは PMA または CCE から成るが、将来的には、提案・議論・ファシリテーション・決議といった一連の機能を持つオンライン合議プラットフォームとの結合を進めていく。また、今回の試行実験は小規模であったが、今後は、統計的に有意な規模での統制実験や、自治体や地域コミュニティを対象としたフィールドワークなどを実施し、社会課題の解決に向けた集団意思決定方法

として実用化を図っていく。

## 謝辞

本研究は、JST, RISTEX, JPMJRS22J5 の支援を受けたものです。また、京都大学、東京工業大学、日立製作所の技術連携によって進められました。D-Agree の活用に関してご助言頂いた京都大学の伊藤孝行教授、丁世堯助教、そして GMCR および PMA について有益なご指摘をいただいた東京工業大学の猪原健弘教授に感謝いたします。さらに、京都大学オープンイノベーション機構日立京大ラボの皆様には、本研究の進め方について貴重なアドバイスをいただきました。深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Borda, J.-C.: Memorandum on the ballot box elections (in French). History of the Royal Academy of Sciences, Academy of Sciences (1781).
- [2] Sakai, T.: Invitation to Social Choice Theory (in Japanese). Nihon Hyoron Sya, Tokyo (2013).
- [3] Young, H.P.: Condorcet's Theory of Voting. American Political Science Review, 82(4), 1231–1244 (1988).
- [4] Arrow, K.J.: Social Choice and Individual Values. Wiley, New York (1951).
- [5] Bentham, J.: An Introduction to the Principles of Morals and Legislation (Collected Works of Jeremy Bentham). Clarendon Press, Oxford (1996).
- [6] Rawls, J.: A Theory of Justice. Harvard University Press, Cambridge (1971).
- [7] Habermas, J.: Theory of communicative action. Band 2: On the critique of functionalist reason (in German). Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main (1981).
- [8] Fishkin, J.S.: When the People Speak: Deliberative Democracy and Public Consultation. Oxford University Press, Oxford (2009).
- [9] Gutmann, A., Thompson, D.: The Spirit of Compromise. Princeton University Press, Princeton (2012).
- [10] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.: Roundtable on Education Policy Formation Based on "Deliberative Discussion" (in Japanese). [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shougai/022/index.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shougai/022/index.htm), last accessed 2022/9/29.
- [11] Cabinet Office.: "New Public" Promotion Council (in Japanese). <https://www5.cao.go.jp/npc/suishin.html>, last accessed 2022/9/29.
- [12] Thibaut, J. W., Walker, L.: Procedural Justice: A Psychological Analysis. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale (1975).
- [13] Leventhal, G. S.: What Should Be Done with 式 uity

- Theory? New Approaches to the Study of Fairness in Social Relationships. In: Gergen, K.J., Greenberg, M.S. Willis, R.H. (eds.) *Social Exchange*. Springer, Boston (1980).
- [14] Graeber, D.: There Never Was a West - Or, Democracy Emerges From the Spaces In Between -. In: *Possibilities: Essays on Hierarchy, Rebellion, and Desire*, AK Press, Oakland (2007).
- [15] Pickard, V.W.: Assessing the Radical Democracy of Indymedia, Discursive, Technical, and Institutional Constructions. *Critical Studies in Media Communication* 23(1), 19–38 (2006).
- [16] Susskind, L.E., Cruikshank, J.L.: *Breaking Robert's Rules: The New Way to Run Your Meeting, Build Consensus, And Get Results*. Oxford University Press, Oxford (2006).
- [17] Barandiaran, X.E., Calleja-Lopez, A., Monerde, A.: Decidim: political and technopolitical networks for participatory democracy. Decidim's project white paper, Barcelona (2018).
- [18] Hsiao, Y., Lin, S., Tang, A., Narayanan, D., Sarahe, C.: vTaiwan: An Empirical Study of Open Consultation Process in Taiwan. SocArXiv, Center for Open Science, Charlottesville (2018).
- [19] Loomio.: Loomio | decision-making for collaborative organizations. <https://www.loomio.com/>, last accessed 2022/9/29.
- [20] Liquitous.: Products aimed at democratic DX. <https://liquitous.com/product/liqid>, last accessed 2022/9/29.
- [21] Ito, T., Suzuki, S., Yamaguchi, N., Nishida, T., Hiraishi, K., Yoshino, K.: D-Agree: Crowd Discussion Support System Based on Automated Facilitation Agent. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 34(09), pp. 13614–13615. AAAI Press, Cambridge (2020).
- [22] Ali, S., Xu, H., Xu, P., Ahmed, W.: Evolutional attitude based on option prioritization for conflict analysis of urban transport planning in Pakistan. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 28(3), 356–381 (2019).
- [23] Hipel, K. W., Fang, L., Kilgour, D. M.: The graph model for conflict resolution: Reflections on three decades of development. *Group Decision and Negotiation* 29(1), 11–60 (2020).
- [24] Pourvaziri, M., Mahmoudkelayeh, S., Yousefi, S.: Proposing a Genetic Algorithm-based Graph Model for Conflict Resolution Approach to Optimize Solutions in Environmental Conflicts. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Water Resources and Environment Research* (2022). <https://www.researchgate.net/publication/360463002>, last accessed 2022/10/27.
- [25] Xu, H., Hipel, K.W., Kilgour, D.M., Fang, L.: Conflict Resolution Using the Graph Model: Strategic Interactions in Competition and Cooperation. *Studies in Systems, Decision and Control* 153, Springer, New York (2018).
- [26] Inohara, T.: Graph model for conflict resolution - GMCR: The Graph Model for Conflict Resolution - (in Japanese). In: *Operations research as a management science research* 58(4), pp. 204–211. The Operations Research Society of Japan, Tokyo (2013).
- [27] Xu, H., Addae, B. A., Wei, R.: Conflict Resolution Under Power Asymmetry in the Graph Model. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Group Decision and Negotiation* 7, pp. 42–1 (2020).
- [28] Shahbaznezhadfar, M., Yousefi, S., Hipel, K. W., Hegazy, T.: Dynamic-based graph model for conflict resolution: systems thinking adaptation to solve real-world conflicts. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Group Decision and Negotiation* (2020). <https://www.researchgate.net/publication/361017860>, last accessed 2022/10/27.
- [29] Yamazaki, A., Inohara, T., Nakano, B.: The relationship between voter permissible range and the core of the simple game (in Japanese). *Journal of the Operations Research Society of Japan* 42(3), pp. 286–301. The Operations Research Society of Japan, Tokyo (1999).
- [30] Yamazaki, A., Inohara, T., Nakano, B.: New interpretation of the core of simple games in terms of voters' permission. *Applied Mathematics and Computation* 108(2-3), 115–127 (2000).
- [31] Corbyn, J.: Digital Democracy Manifesto. [https://www.jeremyforlabour.com/digital\\_democracy\\_manifesto/](https://www.jeremyforlabour.com/digital_democracy_manifesto/), last accessed 2022/9/29.
- [32] Schneider, N.: *Everything for Everyone: The Radical Tradition that Is Shaping the Next Economy*. Bold Type Books. New York (2018).
- [33] Asa, Y., Kato, T., Mine, R.: Composite Consensus-Building Process: Permissible Meeting Analysis and Compromise Choice Exploration. arXiv:2211.08593 (2022).
- [34] Asa, Y., Kato, T., Mine, R.: Composite Consensus-Building Process: Permissible Meeting Analysis and Compromise Choice Exploration. 23rd International Conference on Group Decision and Negotiation, GDN 2023, *Proceedings*, 97–112 (2023).
- [35] Astrachan, O.: Bubble Sort : An Archaeological Algorithmic Analysis. *ACM SIGCSE Bulletin*, 35(1), 1–5 (2003).