

特別研究報告書

## 逐次参加型投票メカニズムの分析

指導教員 松原 繁夫 准教授

京都大学工学部情報学科

鍵福 竜也

平成 23 年 1 月 31 日

## 逐次参加型投票メカニズムの分析

鍵福 竜也

### 内容梗概

投票は優れた意見集約方法の一つである。しかし、個々の投票者にとっては、候補案を十分に検討したり、どのような投票が行われているかを常に監視したりといった負荷（費用）が生じるため、コミュニティメンバー全員に投票参加を強いることは難しい。一方で、投票者の人数が少ない場合は、投票結果がコミュニティ全体の選好を反映しているのかどうか（意思決定の質）は疑問である。つまり、投票参加にかかる費用の総和と意思決定の質のバランスをどのように釣り合わせるのかといった問題が生じる。

この問題に対しては投票によって得られるコミュニティの社会的余剰の最大化を考えるのが有望である。社会的余剰は、投票によってコミュニティの各メンバーが得られる期待効用の総和と考えることができ、社会的余剰の値が大きい投票方式ほど、意思決定の質と投票に要するコストのバランスが優れているものとする。

本研究では、選挙などの一般に用いられる投票方式とは異なる特性を持ったオンラインの投票方式の性質を、社会的余剰の観点から明らかにすることを目指した。そこで、実際にオープンソースソフトウェア Apache プロジェクトで用いられている投票方式を参考にモデル化し、その分析を行う。Apache で用いられている投票方式には以下のような特徴がある。

1. 逐次参加型の投票
2.  $m$  票先取りの可決ルール
3. 投票行動の可視性

1. は、投票者の負荷軽減に役立つもので、2. は意思決定の迅速化に役立つものであると考えられる。3. は投票が全てメーリングリスト上で行われることによって生じる特徴である。つまり、投票者は投票が行われていることに気がついて時点で、自己より前に投票に気がついた人がどういった行動をとったか分かるようになっている。

さて、ある Apache プロジェクトは、10~20 名程度のコミュニティで、3 票先取りの可決ルールが採用されている。ここで疑問となるのは、意思決定の質である。つまり、3 票先取りによる可決案がより多くのメンバーから選好されて

いる代替案であるかどうかである．この疑問を明らかにするにあたって，以下のような課題が存在する．

- Apache の投票方式の特性を反映させた投票モデルの構築  
投票方式を定式的に分析するには，以上に挙げた Apache の投票方式の三つの特徴を反映させた投票モデルの構築が必要である
- 投票結果や社会的余剰に影響を与える要因の発見  
3 票先取りの可決ルールが投票結果や社会的余剰にどのような影響を与えるのか明らかにする必要がある．

まず，前者の課題に対しては，単純に各要素をモデルに取り込むと投票行動分析が困難になるため，投票者の参加順に関する仮定を設けることとした．その投票モデルにおいて，各投票者がどういった行動をするのか，ゲーム理論的に分析した．各投票者が得られた行動戦略に基づくと仮定したもとの，投票結果の判断手法や社会的余剰の計算手法を示した．最後に，得られた手法に基づき，投票結果や社会的余剰が投票者数や可決に必要な票数にどういった影響を受けるのかを解析し，最後にモデルと実際の調査によって得られた Apache 投票結果との比較を行った．

本研究の貢献は以下の通りである．

- Apache の投票方式の特性を反映させた投票モデルの構築  
先述した Apache の投票方式の特徴を反映させた投票モデルを構築した．このモデルを用いることで，投票者数，可決に必要な票数，選好比率を与えた場合の可決確率や社会的余剰の計算が可能になった．
- 投票結果や社会的余剰に影響を与える要因の発見  
投票結果については，可決に必要な票数が一定の場合，投票者数が増えても投票結果は影響を受けにくく，可決に必要な投票数が多い場合，代替案のうちメンバー多数の支持案が可決案となる確率が大きくなることがわかった．また，選好比率，投票者数が決まれば，その場合の社会的余剰を最大とする可決に必要な投票数が存在することを示した．

# Analysis of a Voting Mechanism with Sequential Participation

RYUYA KAGIFUKU

## Abstract

Voting is an effective way to make a collective decision. However, a voter incurs costs by examining the alternatives and monitoring the process of voting. Thus, forcing all the members in the community to participate in the vote seems difficult. On the other hand, the decision made by a few members causes a question whether the result of the voting is an appropriately one that aggregates the preferences of all the members. That is, balancing the cost and the quality of a collective decision making. This problem can be tackled by introducing social surplus. Social surplus means the sum of all members' utilities. A voting mechanism that attains a larger amount of social surplus is more desirable mechanism in balancing the cost and the quality of a collective decision making.

The goal of this study is to make the characters clear in social surplus. Then, this study modeled of Apache voting system, which is used actually in the online community, and analyzed the voting model. In Apache voting system, there are some features as follows.

1. **voting with sequential participation**
2. **the condition of approving is receiving  $m$  votes in advance**
3. **the visibility of the voting behaviors of other voters**

It is thought that the cost are cut to some extent because of 1 and the collective decision making gets prompt because of 2. And the voting in Apache are performed through mailing list of community members. Because of that, there is 3. In short, the voter can see how the previous voters do when the voter notice the vote.

A project in Apache has 10~20 members, and the decision is officially determined solely by whether at least 3 agree votes were registered. This case causes a question about the quality of a collective decision making. , there is the question about the quality of making decision. This is, it is question whether the result in such voting is appropriately one that aggregates the preferences of all the members. In disclosing this question, there are problems as follows.

- **requirement of voting model of Apache voting system**

To considering of the characters of such a voting system requires the voting model which reflects the characteristics of Apache voting system.

- **finding the factors which effects on result of the vote and social surplus**

It is required that by means of analyzing this voting system with the model, the factors which effects on the result of the vote and social surplus are found.

For the former problem, this study take some assumption on the order of the voters because it gets difficult to analyze the voting behaviors if the model reflected all characters. By using the model, the behavior of each voter can be analyzed in game theory. Given that the voters follows the model, the way to judge the voting result and the way to calculate social surplus are proposed. Finally, using proposed ways, the factor which effects on the voting result and social surplus are analyzed and this study aims to compare the model to Apache voting system.

The contributions of this paper are following.

- **Modeling of the voting system which reflects the characteristics of Apache voting system**

This study modeled of Apache voting system which reflects the aforesaid characteristics. This model enable us to calculate the probability which majority approves and social surplus when the some conditions are given.

- **Finding factors which effects on result of the vote and social surplus**

If the number of the community members is constant, the larger the quorum gets, the higher the probability which majority approves, but when the number of the community members is large, the probability hardly change. About social surplus, there is the optimal quorum which makes the social surplus maximized, when the other parameters are set.

# 逐次参加型投票メカニズムの分析

## 目次

第1章	はじめに	1
第2章	関連研究	3
2.1	費用を要する投票	3
2.1.1	Börgers の投票モデル	3
2.1.2	投票方式の比較	4
2.2	投票行動モデル	4
2.2.1	Downs によるモデル	5
2.2.2	Riker と Ordeshook によるモデル	5
第3章	Apache の投票方式	6
3.1	投票方式の特徴	6
3.2	Apache の投票結果の調査	7
第4章	Apache の投票方式の特徴を反映させた投票モデルの構築	10
4.1	投票モデル	10
4.2	問題設定	11
第5章	投票者の最適行動戦略	12
5.1	投票行動の分析	12
5.2	投票モデルにおける投票結果と社会的余剰	14
第6章	投票結果と社会的余剰の分析	16
6.1	分析方法	16
6.2	投票結果の分析結果	18
6.3	社会的余剰の分析結果	20
第7章	Apache の投票方式の評価およびモデルとの比較	22
7.1	分析結果による Apache の投票方式の評価	22
7.2	投票モデルとの比較	22
第8章	おわりに	23
	謝辞	25



## 第1章 はじめに

投票は優れた意見集約方法の一つである。投票に関しては、ゲーム理論の分野で投票理論が存在し、また近年では、マルチエージェントシステム研究においても、投票方式に関する議論が盛んに成っている [1]。さらに実フィールドにおいても投票はコミュニティの意思決定の際に広く用いられている。しかしながら、投票参加者が人間である場合、特にオンラインコミュニティにおいては、投票参加には以下のような負荷が生じる。

- どのような投票が行われているか常に監視する負荷
- 選択肢選択の意思決定にかかる負荷（二つの代替案のうち、ぼんやりと一方の案が良いと思っけていても、実際に意見表明するには十分な吟味が必要である。）

- 可決後に問題が生じた場合に、賛成したことに対して説明を求められる恐れしたがって、コミュニティのメンバー全員に投票参加を強いることは難しい。

一方で、投票者の人数が少ない場合は、意思決定の質つまり、投票結果がコミュニティ全体の意見を反映できているかどうかは疑問である。例えば、コミュニティのメンバー全員が投票に参加した場合に決まる結果と同じ結果が得られることが望ましいが、一部のメンバーしか投票に参加しない場合、それと異なる結果が得られるかもしれない。つまり、投票参加にかかる費用の総和と意思決定の質のバランスをどのように釣り合わせるのかといった問題が生じる。

この問題に対しては投票によって得られるコミュニティの社会的余剰 (*social surplus*) の最大化を考えるのが有望である。社会的余剰は、一般に個々のメンバーが得られる余剰の総和をもって定義され、オークションなどの評価にも用いられる [2]。投票方式の社会的余剰を考える場合、投票によってコミュニティの各メンバーが得られる期待効用の総和と考えることができ、その値が大きい投票方式ほど、意思決定の質と投票に要するコストのバランスが優れているものとする。

本研究では、選挙などの一般に用いられる投票方式とは異なる特性を持ったオンラインの投票方式の性質を社会的余剰の観点から明らかにすることを目指した。そこで、実際にオープンソースソフトウェア Apache プロジェクトで用いられている投票方式を参考にモデルを作成し分析を行う。Apache で用いられている投票方式には以下のような特徴がある。

1. 逐次参加型の投票
2.  $m$  票先取りの可決ルール
3. 投票行動の可視性

これらについて，オンラインコミュニティの意思決定において，1. は，投票者の負荷軽減に役立つもので，2. は意思決定の迅速化に役立つものであると考えられる．3. は投票が全てメーリングリスト上で行われることによって生じる特徴である．つまり，投票者は投票が行われていることに気がついた時点で，自己より前に投票に気がついた人がどういった行動をとったか分かるようになっている．

さて，ある Apache プロジェクトは，10~20 名程度のコミュニティで，3 票先取りの可決ルールが採用されている．ここで疑問となるのは，意思決定の質である．つまり，3 票先取りによる可決案がより多くのメンバーから選好されている代替案であるかどうかである．この疑問を明らかにするにあたって，以下のような課題が存在する．

- Apache の投票方式の特性を反映させた投票モデルの構築  
投票方式を定式的に分析するには，以上に挙げた Apache の投票方式の三つの特徴を反映させた投票モデルの構築が必要である．
- 投票結果や社会的余剰に影響を与える要因の発見  
3 票先取りの可決ルールが投票結果や社会的余剰にどのような影響を与えるのか明らかにする必要がある．

まず，前者の課題に対しては，単純に各要素をモデルに取り込むと投票行動分析が困難になるため，投票者の参加順に関する仮定を設けることとした．得られた投票モデルにおいて，各投票者がどういった行動をするのか，投票者が合理的であることを仮定し，ゲーム理論的に分析した．ここで合理的な投票者であるとは，常に自己の得られる効用が最大となるような行動を選択する投票者のことを言う．次に，各投票者が投票モデルにより得られた行動戦略に基づく仮定したもとで，投票結果の判断手法や社会的余剰の計算手法を示した．最後に，得られた手法のもとで投票結果や社会的余剰が投票者数や可決に必要な票数にどういった影響を受けるのかを解析し，最後に実際の Apache の投票で見られる投票行動とモデルによって得られた結果との比較を行った．

本稿の構成は以下のとおりである．まずは次の 2 章ではいくつかの関連研究を紹介する．3 章では調査の結果得られた Apache の投票方式の特徴について説

明する．第4章では投票モデルについて問題設定や，本研究で設けた分析における仮定について述べる．第5章では，投票モデルにより投票者の最適行動戦略を考え，その行動に基づくとした場合の投票結果の求め方，社会的余剰の求め方について説明する．第6章では，実際に投票モデルを用いていくつかの比較を行い，その分析結果についてまとめる．7章では，分析結果をもとに Apache の投票方式を評価し，さらに構築した投票モデルと実際の投票方式の比較を行う．最後に8章をまとめとして本稿をしめくくる．

## 第2章 関連研究

投票方式については，ゲーム理論や社会的選択理論の中で多く議論されてきている．本章では，投票に費用を要する場合の投票方式に関する先行研究と，投票参加行動モデルに関する先行研究について説明することで，本研究の位置づけを明らかにする．

### 2.1 費用を要する投票

Börgers は，投票には費用を要すると仮定し，意思決定の品質と投票に要する費用の観点から，任意参加の多数決投票，強制参加の多数決投票，代替案の中からランダムに可決案を選択するランダム意思決定の三つの意思決定方式を比較した [3]．ここでの意思決定の品質とは，より多くのメンバーから好まれている代替案が可決されるかどうかを表わし，投票の費用とは，各投票者が投票参加に対する負荷の総和とされる．

#### 2.1.1 Börgers の投票モデル

投票はパレート原理，匿名性，中立性など様々な観点からその良否を議論可能である．Börgers は，集合的意思決定の質と投票に要する費用のバランスをどう釣り合わせるか，という問題の議論を社会的余剰の上で行った．この場合，社会的余剰は一般的にコミュニティの個々のメンバーが得られる余剰の総和として定義されるが，ここでは，コミュニティの個々のメンバーが投票により得られる期待効用の総和と考えることができる．つまり， $n$  人の投票者がいる場合，投票者  $i (1 \leq i \leq n)$  の投票により得られる期待効用を  $U(i)$  で表すことにすると，社会的余剰は以下の式で表される．

$$\text{social surplus} = \sum_{i=1}^n U(i) \quad (1)$$

表 1: 意思決定方式の比較

	意思決定の質	投票に要する費用
強制参加の多数決	最良	最大
任意参加の多数決	中程度	中間
ランダム意思決定	最悪	最小

社会的余剰が大きくなる投票方式ほど、意思決定の質と投票に要するコストのバランスが上手く取れている投票方式であると考えられる。

### 2.1.2 投票方式の比較

先に挙げた三つの方式を意思決定の質と投票に要する費用の観点から表 1 にまとめた。

強制参加の多数決投票では、コミュニティのメンバー全員が参加するため、より多くのメンバーから選好されている代替案が可決案となり、意思決定の質は最良となる。しかし、投票に要する費用は個々のメンバーの費用の総和となるため最大となってしまう。

代替案の中からランダムに可決案を選択する方法では、投票に要する費用は最小となるが、コミュニティのメンバーの選好によらず可決案が決定されてしまうため、意思決定の質は最悪と言える。

任意参加の多数決投票は、メンバーに投票参加を強いるのではなく、投票するかしないかを投票者の意思に任せる方法であり、強制参加の多数決投票とランダム意思決定の方式の中間の性質を持っていると言える。

Börgers は、社会的余剰の観点から、三つの方式のなかで最も優れているのは任意参加の多数決投票であるということを、論理的に示している。Börgers の議論は、同時参加、単純多数決の投票方式に限定されているおり、本研究で扱う投票方式は、逐次参加の  $m$  票先取りの可決条件を扱う点で異なっている。

## 2.2 投票行動モデル

本研究で扱う逐次参加型の投票方式における社会的余剰を求めるには、まずは投票者がどういった行動をとるべきなのかを考える必要がある。つまり、どのような状況であれば投票者は投票に参加すべきであるのかを論理的に考えることを可能にする投票行動モデルが必要である。投票行動モデルにおいては、投票者が自分の得られる利益（効用）を最大とさせるように行動するという仮

定のもとで，投票者は投票にかかるコストよりも投票により得られる効用が大きい場合に投票者は投票に参加するとされる．次に二つの投票行動モデルを紹介する．

### 2.2.1 Downs によるモデル

投票参加モデルの研究の先駆者とされる Downs は，二つの代替案  $X$ ， $Y$  のうち投票後に  $X$  が可決された場合と  $Y$  が可決された場合に得られる期待効用を比べることにより投票者の行動を考えた [4]．つまり， $X$  が可決された場合に得られる期待効用を  $E(U^X)$ ， $Y$  が可決された場合に得られる期待効用を  $E(U^Y)$  とした場合，期待効用差  $B$  を，

$$B = E(U^X) - E(U^Y) \quad (2)$$

の式で定義し，次に従って投票者の行動を規定した．

- $B > 0$  の時は， $X$  に投票する
- $B < 0$  の時は， $Y$  に投票する
- $B = 0$  の時は，投票しない

しかし，Downs の議論では，投票参加による費用が考慮されていない．この考えを発展させたのが，次に説明する Riker と Ordeshook である．

### 2.2.2 Riker と Ordeshook によるモデル

Riker と Ordeshook はある投票者が投票に参加するかしらないかを，投票参加による効用に基づいて決定すると考え，投票者の得られる効用を以下の式で表されるとした [5]．

$$R = P \times B + D - C \quad (3)$$

彼らは上式における 4 変数は全て独立であるとし，次のように定義した．

- $R$ …投票参加により得られる投票者の期待効用
- $P$ …自己が投票に参加した場合に結果に影響を与える確率．
- $B$ …代替案の価値の差
- $D$ …投票に参加しなければならないという義務感
- $C$ …投票参加に要する費用

Downs が，上式の  $B$  のみに注目していたのに対して，Riker と Ordeshook は投票者が投票に参加するかしらないかに影響を与える要因として， $C$  と  $D$  の二つの独立変数を定義した．

投票者の行動は、 $R > 0$  であれば投票に参加し、 $R \leq 0$  であれば投票に参加しないとされる。例えば、二つの代替案 A, B が存在し、世論調査で全体の選好比率が同程度であった場合、自分の投票が結果に影響を与える確率は大きくなり P の値が大きくなり、全体の投票率は上がると考えられる。逆に、選好比率に大きな差があることが分かれば、P の値は小さくなり投票率は下がると考えられる。

D には、自分が投票に参加することで得られる、自己の意見を表明したことによる満足感なども含まれるとされる。投票期間を長く設けることは、投票者の費用軽減つまり C を小さくするため、投票率が上がる。

Riker と Ordeshook によるモデルはこのように投票者の得られる効用を 4 つの要因に分けることで投票の投票率を下げている要因を明らかにしたり、また逆に投票率を上げるための方策の検討に役立つとされる。

上述の投票モデルに関する研究は、例えば、国会議員選挙など、個人の行動が投票結果に与える影響が小さいと考えられる場合に、なぜ人が投票に参加するかを説明しようとしたものである。本研究では、投票の順序が投票行動に与える影響を調べることに焦点を当てるために、D は無視するものとし、投票者がある費用を支払って投票に参加した場合に得られる効用と投票に参加しなかった場合、つまり参加費用をかけなかった場合に得られる効用の大小関係を考えて、その投票者の行動を決定する。

## 第 3 章 Apache の投票方式

本章では、Apache プロジェクトにおける投票方式の特徴について説明する。また調査によって得られた実際の投票結果についてもまとめる。

### 3.1 投票方式の特徴

世界的に有名なオープンソースソフトウェアの一つである Apache ではいくつかの開発プロジェクトが存在し、各プロジェクトは 10 ~ 20 のメンバーからなり、意思決定の際はこのコミュニティ内で投票が行われる。例えば、コード修正やパッケージリリースの可否などが投票によって扱われている。Apache の投票方式には、選挙などに用いられる一般的な投票方式と異なり、次のような特徴がある [6]。

- 逐次参加型の投票

一般的な投票方式では、投票参加者はある決められた投票日に一斉に投票を行い、終了後に開票されるといった同時投票であるのが一般的である。一方、Apache で用いられる投票方式では投票期間は三日間であることが多く、各投票者が投票に参加し得る時間が異なる。つまり、投票者は逐次的に投票に参加していく。Apache のようなオンラインコミュニティの場合、コミュニティのメンバーはボランティアである場合が多く、逐次参加的な投票であることは投票者の負荷軽減に役立つものと考えられる。

- $m$  票先取の可決条件

可決条件にも特徴がみられた。Apache では多くのプロジェクトが 3 票先取りの可決条件を採用している。つまり、3 票集めた時点でその代替案が可決案となる。一般に投票といえば多数決のように、各代替案の集めた票数を比較して、より多く票を集めた代替案を可決案とするのが普通である。中には、可決には最低でも全体の 75% の投票参加が必要であるなどの条件が付加されることもあるが、Apache の投票方式のように  $m$  票先取の可決条件は一般的でない。これは、オンラインコミュニティにおける投票者の意思決定の迅速化に役立っていると考えられる。

- 投票行動の可視性

Apache における投票方式では、投票は全て開発コミュニティのメーリングリストを通して行われる。つまり、誰がどの代替案に投票したかが、投票参加者全てに分かるようになっている。この点は、選挙などに用いられる投票方式と大きく異なる点であると言える。

### 3.2 Apache の投票結果の調査

ここでは Apache の投票結果の調査によって得られたデータについて扱う。各プロジェクトは、10~20 名程度のメンバーからなり、さらに、PMC(Project Management Committee) メンバーとコミッターと呼ばれるメンバーに分けられる。可決には PMC メンバーによる投票が 3 票集まった時点で可決となるといった可決ルールがあり、PMC の投票はコミッターの投票に比べて重要視されている。

投票は、ある PMC メンバーによる提案の可否を扱うのが基本である。投票開始は、その PMC メンバーが開発コミュニティのメーリングリストに提案を

知らせるメールを流した時点で投票開始となる ..

投票者は、提案に対して自己の意思を+1（賛成）、-1（反対）、0（白票）で表すことによって投票を行う。投票はメーリングリスト上で行われ、投票期間が終了すれば提案者によって結果が知らされる (図 1)。<sup>1)</sup>

## Mailing list archives

[Site index](#) · [List index](#)

**Message view**

<b>From</b>	Jukka Zitting <jukka.zitt...@gmail.com>
<b>Subject</b>	[RESULT] [VOTE] Release Apache Jackrabbit 2.0.3
<b>Date</b>	Fri, 29 Oct 2010 14:10:34 GMT

Hi,

On Mon, Oct 25, 2010 at 6:07 PM, Jukka Zitting <jukka.zitting@gmail.com> wrote:  
> Please vote on releasing this package as Apache Jackrabbit 2.0.3.

This vote passes as follows:

- +1 Claus Koll
- +1 Jukka Zitting
- +1 Thomas Müller

Thanks for voting! I'll push the release out.

BR,

Jukka Zitting

**Mime** • [Unnamed text/plain](#) (inline, Quoted Printable, 327 bytes)  
[View raw message](#)

[Top](#)

図 1: Apache メーリングリスト

開発コミュニティのメンバー間でやり取りされるメールは、メールアーカイブとして全て保存されている。そこから得られたデータについて以下にまとめる。

- 投票結果

表 2 は、10 人の PMC メンバーと、4 人のコミッターより成る Apache のあるプロジェクトにおける 1 年間の投票結果を、表 3 は PMC、コミッターによる各投票 (+1, -1, 0) の投票された回数をまとめたものである。これらの表によれば、次のことが言える。

- PMC メンバーによる投票がほとんどである

<sup>1)</sup> [mail-archives.apache.org/mod\\_mbox/jackrabbit-dev/201010.mbox/%3CAANLkTi=Q7VdrO12+SZANsg0tHffAE9STRP2gMNdz60Tx@mail.gmail.com%3E](http://mail-archives.apache.org/mod_mbox/jackrabbit-dev/201010.mbox/%3CAANLkTi=Q7VdrO12+SZANsg0tHffAE9STRP2gMNdz60Tx@mail.gmail.com%3E)

表 2: Apache 投票データ (投票結果)

提案の可決回数 (回)	提案の否決回数 (回)	合計 (回)
20	2	22

表 3: Apache 投票データ (投票の種類)

	+1 の投票 (票)	-1 の投票者 (票)	0 の投票者 (票)
PMC	71	1	1
コミッター	7	0	0
合計	78	1	1

コミッターによる投票はほとんど見られず、多くの投票は PMC メンバーによる投票であることが分かる。

- ほとんどの票が賛成意見を表わすものである  
提案に対して賛成意見を投票する投票者がほとんどであり、反対意見や白票を投票する投票者はほとんどいないことが分かる。
- 投票一度あたりの投票参加者が少ない  
計 14 人のメンバーから成るコミュニティにも関わらず、投票 1 度あたりの投票者の数は  $80 \div 22 = 3.63$  であり、メンバーの人数に対して投票に参加する人数が少ないことが分かる。

#### ● 投票行動

次の表 4 では、各投票者が投票に参加する場合、投票が開始されてどの程度時間が経過してから (投票開始当日、翌日、二日目、三日目のいずれか) 参加するのかについてまとめた。たとえば、投票者 SL は、全 22 回の投票のうち 3 回は投票開始当日、9 回は翌日、3 回は二日目、5 回は三日目の計 20 回の投票に参加していることが分かる。この表からは以下のことが言える。

- 投票者による偏り  
投票者による投票回数の偏りが見られた。開発コミュニティにおいて、中心的な開発者と補助的な開発者がいることが予想できる。
- 時間による偏り  
投票期間中の特定の日に投票が集中することはなく、時間的な偏りは見られない。つまり、各投票者が投票に気がつく時間は一様に分布し

表 4: Apache 投票データ (投票者の投票行動)

投票者	PMC							コミッター	
	JZ	SL	MR	CK	TM	MD	...	PA	...
当日 (回)	22	3	4			1	3	3	
翌日 (回)		9	2	2	1				2
二日目 (回)		3	2	3	3		1		1
三日目 (回)		5	5		1	1	1	1	
合計 (回)	22	20	13	5	5	2	5	4	3

表 5: 投票モデル

投票者の数	$n$
代替案	A または B
コスト (費用)	$c (0 < c < 1)$
代替案の価値	1 または 0
可決に必要な票数	$m (0 < m \leq n)$

ているといえる。

## 第 4 章 Apache の投票方式の特徴を反映させた投票モデルの構築

本章では，Apache の投票方式の特徴を反映させた投票モデルを構築する。

### 4.1 投票モデル

まず投票モデルにおける主要な変数を表 5 にまとめる。本稿で用いる投票モデルにおいては， $n$  人の投票者がいて，代替案 A と B の二つから可決案を決定する場面を考える。Apache の投票の場合は，提案に対して賛成票，反対票，白票の三種類があった。代替案が 3 つ以上存在する投票においては，コンドルセー矛盾として知られる問題が起こる可能性があるが [7]，ここでは議論を簡単にするため白票は考えないものとする。次に投票可能な期間はあらかじめ決められており，投票者は順に投票機会が与えられるものとする。これは，投票者によって投票が行われていることに気がつく時刻が異なることなることを想定してい

表 6: 投票により得られる効用

	選好案が可決	選好案が否決
投票参加	$1 - c$	$-c$
投票不参加	1	0

る (投票者は常にメーリングリストから通知される投票開始メールに注意を払っている訳ではない)。次に投票者は自己の投票機会に、A 案に投票、B 案に投票、投票しない、のいずれかの行動をとることができ、投票する際は、これまでの投票者がどういった投票行動を行ったか分かるものとする。つまり、それまでの投票結果を観測できる。ここでは、投票が開始していることに気がついた時点、つまり投票機会が与えられた時点で投票に参加するかしないかを決定し、決定を先延ばしにすることはできないと考える。先に  $m$  ( $0 < m < n$ ) 票集まった時点で、その代替案に決定され、投票プロセスはそこで終了するものとする。

各投票者は代替案 A と B のいずれかを選好しており、同順位である場合は考えないものとする。また、自己の選好している代替案が可決された場合に価値 1 を得、そうでない場合は価値 0 を得るものとする。また、投票に参加した場合は、費用  $c$  ( $0 < c < 1$ ) が生じ、各投票者は可決案の価値と費用の差を効用として得る。投票者の獲得し得る効用をまとめると表 6 のようになる。

- 投票に参加せず自己の選好する案が可決する … 効用 1 を得る
- 投票に参加せず自己の選好する案が否決となる … 効用 0 を得る
- 投票に参加して自己の選好する案が可決する … 効用  $1 - c$  を得る
- 投票に参加して自己の選好する案が否決となる … 効用  $-c$  を得る

$n$  人の投票者に関して効用の総和を計算したものが社会的余剰であり、社会的余剰をもってその投票方式の性能を評価する。

## 4.2 問題設定

さらに、本研究では、投票者の投票行動の分析を可能にするため次の仮定の下で解析を行うものとする。

- 投票者の投票順序と選好の可視性  
投票者は自己が何番目に投票に参加し、さらに他の全ての投票者がどちらの案を選好しているのか知っているものとする。
- 投票者の対称性

投票参加に要する費用はどの投票者も同じであり，同様の状況にある投票者は全て同様の行動を選択するものとする．

- 投票者の合理性

全ての投票者が合理的であるものとする．つまり，投票者は自己の得られる期待効用が最大となるように行動を選択するものとする．

## 第5章 投票者の最適行動戦略

本章では，いくつかの例をもとに投票モデルにおける投票者の最適行動戦略を考え，投票結果の判定手法，社会的余剰の計算手法について説明する．ここでは，投票者の投票行動をゲーム理論的に考える [8]．ただし，投票者の得られる効用は，先の表 6 に従う．

- 自分の投票にかかわらず自己の選好している案が可決となる場合

この場合は，投票者は投票に参加した場合は  $1 - c$  の効用を得るが，投票しなかった場合に得ることのできる効用は 1 となる．つまり， $(1 - c) < 1$  となるため，投票者が合理的であれば投票に参加しないことが分かる．

- 自分が投票した場合は可決，投票しない場合は否決となる場合

この場合は，投票に参加した場合効用  $1 - c$  を得るが，参加しない場合は効用 0 を得ることとなる．つまり  $1 - c > 0$  により，投票者は投票に参加する．

- 自分の投票にかかわらず自己の選好している案が否決となる場合

この場合，投票に参加した場合は効用  $-c$  のを得ることとなるが，投票に参加しない場合は効用 0 を得る．つまり  $-c < 0$  により，投票者は投票に参加しない．

以上のように，投票者は常に合理的な選択をするものとし，以下の最適行動を考えていく．

### 5.1 投票行動の分析

ここでは例を用いて，投票者の最適行動戦略を考える．例えば， $i$  番目に投票機会を与えられる投票者を単に  $i$  とし，代替案の A 案 B 案のいずれを選好しているかをそれぞれ単に A, B で表すものとする．そこで， $n=8$ ,  $m=3$  とした場合に，以下のような投票順序を考える．

1.A 2.B 3.A 4.B 5.A 6.A 7.B 8.A

この場合各投票者の戦略は以下の通りである。

投票者1は投票しない。なぜなら自己がAに投票しなくても、投票者5,6,8がA案に投票することで、自己が選好するA案が可決するからである。

次に投票者2を考える。ここで、B案に投票してB案が可決されるには、投票者4,7がB案に投票し、かつ、投票者1,3が投票しないといった状況が生じる必要がある。しかし、2がB案に投票すれば、B案への可決を阻止するために、投票者3がA案に投票し、結局投票者3,5,6がA案に投票することでA案が可決される。よって、2の投票行動を後続の投票者が観測可能である場合、B案が可決されることはない。投票者2はB案に投票すれば、効用 $-c$ を得、投票しなければ効用0を得ることができるため、「投票しない」を選択することが最適行動となる。

投票者3については、投票者1と同様、自己が投票しなくても後続のA案を選好する投票者によってA案が可決されるため「投票しない」を選択するのが最適行動である。

また、続く投票者4,7は、参加しても可決に必要な投票数に達することはない、B案が可決することはないので投票せず、投票者5,6,8は自己が投票すれば効用 $1-c$ を得るが、参加しなければ効用0しか得ることができないため「投票する」を選択することとなる。

もう一つ、以下のような投票順序を考えよう。

1.A 2.A 3.B 4.B 5.A 6.B 7.A 8.A

この例では、A案B案それぞれを選好する投票者の人数は先の例と同じであるが、投票順序が先ほどと異なる。この場合、各投票者の投票行動は次の通りである。

投票者1,2のいずれかが参加しなかった場合、これらの行動はB案を選好する投票者3,4,6の投票によりB案が可決されてしまうため、投票者1,2は「投票する」を選択するのが最適行動である。この場合、投票者3,4は自己がB案に投票したとしても、後続の投票者5のA案への投票によりA案が可決されてしまうため、「投票しない」を選択する。結局、この例では投票者1,2,5の投票のみによりA案が可決されることとなる。

またこれらの例より、各代替案を好むメンバーの人数つまり選好比率と、投票者数、投票順および可決票数が与えられた場合の投票者の取り得る戦略は、パレート最適であると言える。パレート最適とは、コミュニティ内の誰かの効用を犠牲にしなければ他の誰かの効用を高めることができない状態をさす。

## 5.2 投票モデルにおける投票結果と社会的余剰

- 投票結果

ある投票者の列が与えられれば、その列に対する可決案は決まる。実際の投票者を規定することなく先に  $m$  票集まる代替案が可決案と判断することができる。例えば、次のような投票順序を考える。

1.A 2.A 3.B 4.B 5.A 6.B

この場合、1, 2, 3, ... と各投票者の選好している代替案を順に見ていくと、投票者 1, 2, 5 により、先に A 案を選好している投票者が 3 人見つかる。この場合、実際の投票者も 1, 2, 5 であり確かに A 案が可決となる。もうひとつ、次の例を考える。

1.A 2.A 3.B 4.B 5.A 6.A 7.B

この例では、先の例と同様に、前から順に見ていくと投票者 1, 2, 5 により A 案を選好している投票者が先に 3 人得られる。この場合、投票者 1 は投票しない。なぜなら、自己が投票しなくても投票者 2, 5, 6 の投票により、自己の選好する A 案が可決となるからである。しかし、誰が投票するかは考えずに前から投票者列を順に見ていく方法で得られる投票結果と、実際の投票結果は一致していることがわかる。

- 期待効用

von Neumann と Morgenstern は、不確実な事象に対して選好と効用を関係づける「期待効用理論」を発展させた [9]。ここでの期待効用もこの理論に基づくものとする。

事象  $x_i (0 \leq i \leq n)$  が起こる確率を  $P(x_i)$  とし、 $x_i$  によって得られる効用を  $u(x_i)$  で表すとすると、得られる期待効用は以下の式で表される。

$$\text{expected utility} = \sum_{i=0}^n P(x_i) \times u(x_i) \quad (4)$$

次に簡単な例を与える．例えばサイコロをふって，奇数が出れば100円，偶数が出れば-20円もらえる，つまり20円支払うものとする．ある人にとって100円をもらうことの効用は  $u(100)$  と表わされ，20円支払うことの効用は  $u(-20)$  で表され，それぞれ起こる確率は  $\frac{1}{2}$  である．つまり，この場合得られる期待効用は

$$\text{expected utility} = \frac{1}{2} \times u(100) + \frac{1}{2} \times u(-20)$$

で求められる．

- 社会的余剰

どちらの案が可決されるか，つまり投票結果は全ての投票者の共有知識となるため，否決案を選好する投票者は投票には参加しない．また，可決案を選好する投票者についても，可決に必要な  $m$  票集まれば投票プロセスは終了となるので  $m$  票以上の票が集まることはない．

例えば，代替案 A が可決すると分かり，投票者数と各案を選好している人数が分かった場合，効用  $1 - c$  を得る投票者の数は  $m$  と等しく，効用  $1$  を得る投票者の数は (A を選好する人数  $- m$ ) で表される．つまり，可決案と代替案 A, B を好むメンバーのメンバーの人数が分かれば，個々のメンバーが得られる効用の総和が計算できる．しかし，可決案は投票者の投票順序によって A 案 B 案のどちらにもなり得るため，代替案 A が可決する確率を  $P(A)$  で表すとする．この場合，代替案 A を選好する各メンバーの得られる期待効用の和は

$$\begin{aligned} & (1 \times (n(A) - m) + (1 - c) \times m) \times P(A) \\ & = (1 \times n(A) - c \times m) \times P(A) \end{aligned}$$

(ただし， $n(A)$  は代替案 A を選好する人数とする)

で表される．代替案 B を選好する投票者の得られる期待効用も同様に考えるとすれば，投票によってコミュニティの得られる社会的余剰は次の式により求められる．

$$\begin{aligned} \text{social surplus} & = (1 \times n(A) - c \times m) \times P(A) \\ & + (1 \times n(B) - c \times m) \times P(B) \\ & = 1 \times P(A) \times n(A) + 1 \times P(B) \times n(B) - c \times m \end{aligned}$$

(ただし， $P(A) + P(B) = 1$ )

## 第6章 投票結果と社会的余剰の分析

本章では，投票者数  $n$  や，可決票数  $m$  が，投票結果や社会的余剰にどういった影響を与えるのか調べる．

### 6.1 分析方法

解析においては，以下の手順に従った．図2は，その流れをフローチャートで表わしている．

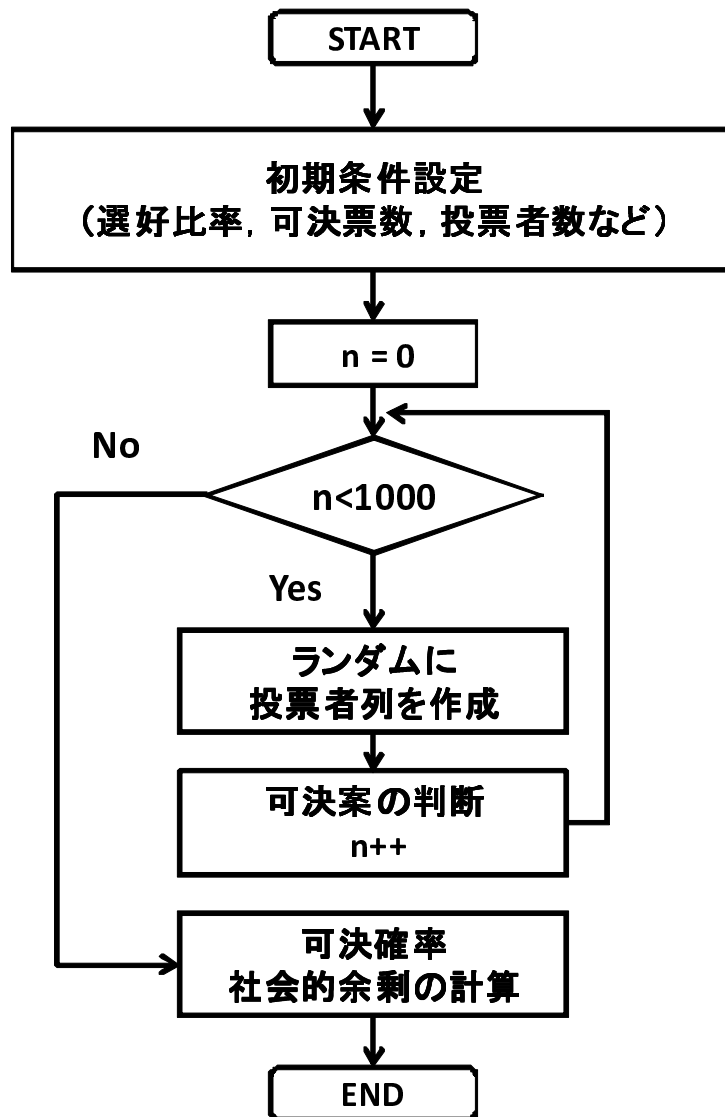


図2: 分析の流れ

### 1. パラメータの設定

解析においては、まず投票者数  $n$  と可決票数  $m$  を初期パラメータとして与える。さらに、 $n$  人のうち A 案 B 案を愛好する投票者比、つまり愛好比率を与える。愛好比率は例えば  $A : B = 8 : 2$  のように与え、以下単に  $8 : 2$  のように表わすものとする。

### 2. 投票者列の生成

次に、1 で与えた条件に合致するような投票者列をランダムに生成する。例えば、 $n = 10$ 、愛好比率  $8 : 2$  であれば、以下のような列をランダムに生成することとなる。

AABBAAAAAAAA,

ABABAAAAAAAA,

...

### 3. 各列に対する可決案の決定

ランダムに与えられた投票者列に対して、先に述べた手法で可決案が A、B のどちらになるかを決定する。

### 4. 2,3 をくり返す

2, 3 のステップを 1000 回繰り返す。すなわち、これにより 1000 回のうち A 案と B 案が可決するそれぞれの回数を求められる。可決回数に分かれれば、それぞれの代替案が可決する確率が以下の式で求められるのは明らかである。

$$P(A) = \frac{(\text{A の可決回数})}{1000}$$

$$P(B) = \frac{(\text{B の可決回数})}{1000}$$

### 5. 確率と社会的余剰の算出

確率が求められれば、社会的余剰を求める式に代入することにより、そのコミュニティの規模と愛好比率における社会的余剰が計算できる。例えば、A 案が可決する確率が 0.7 であり、それぞれの案を愛好する人数が A 案は 8 人、B 案は 4 人、さらに投票に要するコスト 0.2、可決票数を 3 とすると、この場合の社会的余剰は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{social surplus} &= 1 \times 0.7 \times 8 + 1 \times 0.3 \times 4 - 0.2 \times 3 \\ &= 6.2 \end{aligned}$$

以上の手順で求められた可決確率と社会的余剰について，4.2 節で定めた設定のもとで分析を行う．

## 6.2 投票結果の分析結果

意思決定の質の観点からは多数派，つまりより多くのコミュニティメンバーによって選好されている代替案が可決することが望ましい．そこで多数派が可決する確率が投票者数や可決票数にどういった影響を受けるかを調べた．ここではまず，可決票数  $m=3$ (図 3),  $m=5$ (図 4) で固定した場合，投票者の数つまりコミュニティの規模が変化した場合に，多数派が可決する確率を選好比率 9 : 1, 8 : 2, 7 : 3, 6 : 4 の場合についてそれぞれ調べた．次のグラフ(図 3, 図 4) に関して，横軸は投票者数，縦軸は多数派が可決する確率を表わし，プロットされた各点は，ある選好比率に対して，ある投票者数が与えられた場合に多数派が可決する確率を表わす．次に，投票者数  $n=20$  で固定し，可決票数を多くし

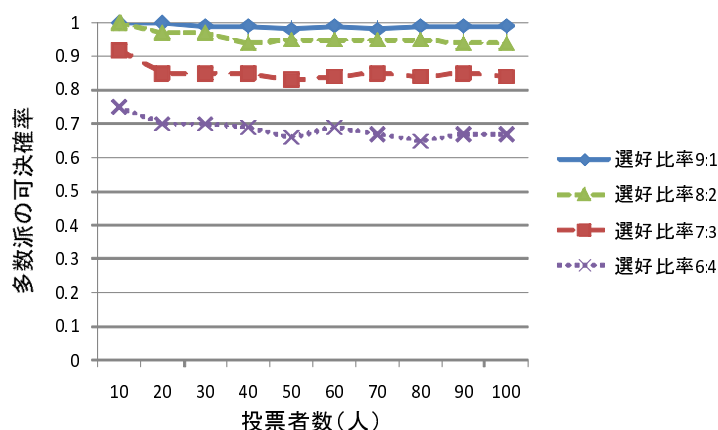


図 3: 投票結果 ( $m=3$ )

た場合，多数派が可決する確率を各選好比率について求めたものを図 5 にまとめた．このグラフに関して，横軸は可決票数，縦軸は多数派が可決する確率を表わし，プロットされた各点は，ある選好比率に対して，ある可決票数が与えられた場合に多数派が可決する確率を表す．

以上の分析結果より，投票結果については以下のことが言える．

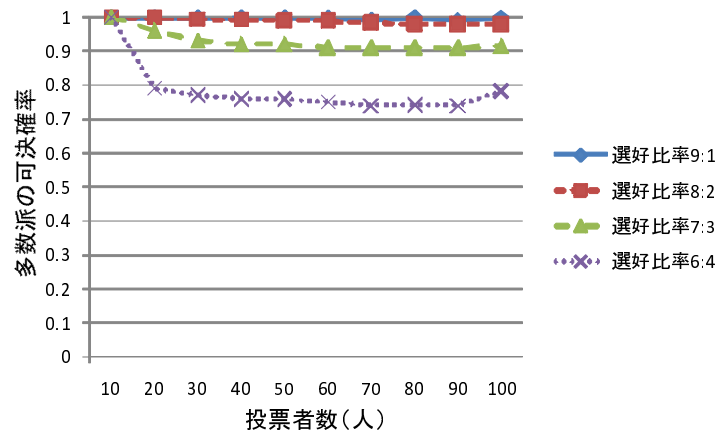


図 4: 投票結果 (m=5)

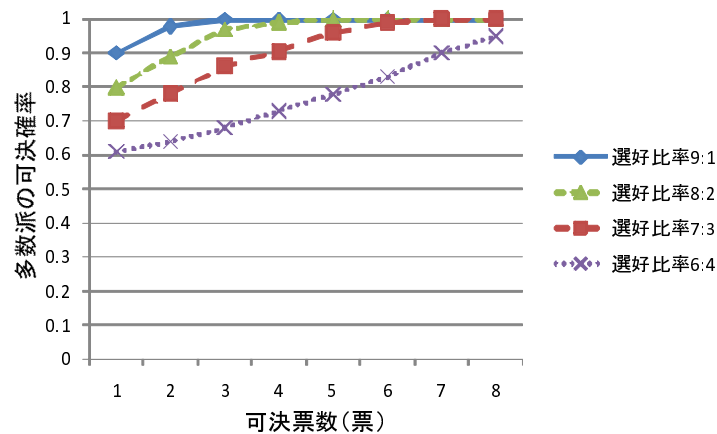


図 5: 投票結果 (n=20)

- 可決票数の影響

可決票数と、可決確率はほぼ比例関係のあることが分かった。つまり、可決票数が大きいほど多数から選好されている代替案が可決する確率が大きくなることが明らかになった。これは、より多くの投票者の意見を投票結果に反映させることができるからであると考えられる。

- 投票者数の影響

可決票数が一定の場合、投票者数が増えても投票結果に及ぼす影響はほとんどなく、多数派が可決する確率は投票者数によらずほぼ一定である。意思決定の質の観点からは、多数派が可決するほうが望ましいが、可決票数

が大きい場合の方が，高確率で安定することが分かった．

### 6.3 社会的余剰の分析結果

次に社会的余剰についての分析結果について説明する．まずは，投票者数が少ない場合，つまりコミュニティの規模が小さい場合の社会的余剰が，可決票数を多くした場合にどういった影響を受けるかを各選好比率において図6にまとめた．ただしここでは，投票参加に要する費用を0.2としている．さらに，コミュニティの規模を  $n = 20$  (図7)， $n = 30$ (図8)とした場合についても同様に調べた．また，これらのグラフ(図6，図7，図8)に関して，横軸は可決票数，縦軸は社会的余剰を表わし，プロットされた各点は，ある選好比率に対して，ある可決票数が与えられた場合に得られるコミュニティの社会的余剰を表わす．

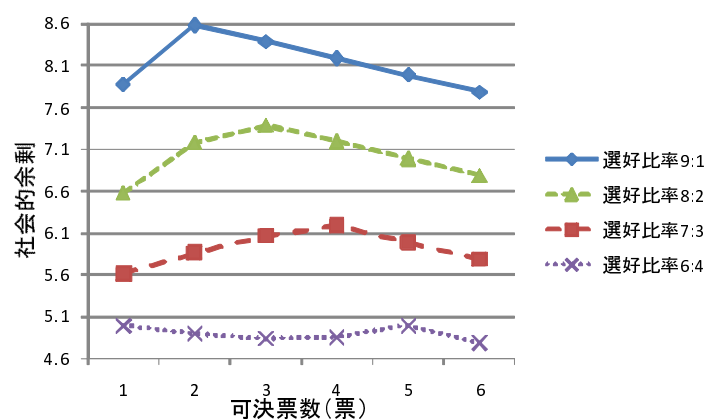


図6: 社会的余剰 ( $n=10$ )

これらの結果により，社会的余剰については以下のことが言える．

- 可決票数による影響

選好比率と，投票者数が与えられている場合，社会的余剰を最大にする可決票数が存在することが分かった．例えば， $n=10$ ，選好比率が9：1である場合は， $m=2$ とするのが最適であることが分かる．同様に投票者数  $n=10$  の時，選好比率が8：2，7：3，6：4の場合は可決票数をそれぞれ3，4，5，6と設定するのが望ましいことが分かる．つまり，可決票数を変化させることによりパレート改善を図れる．パレート改善とは，あるコミュニティ内の余剰の分配を変更することで，どのメンバーの効用も悪化させること

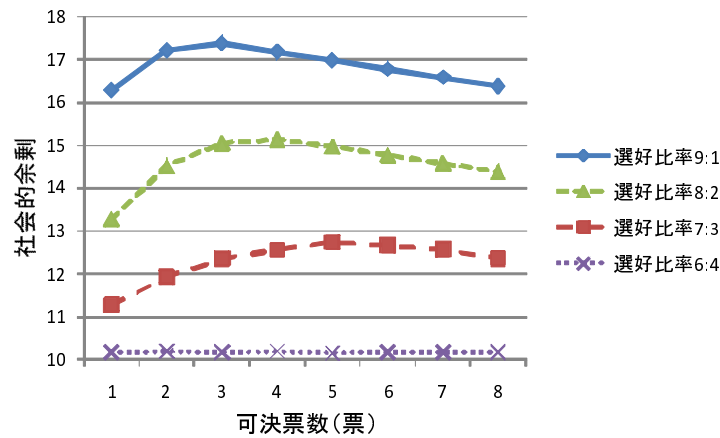


図 7: 社会的余剰 (n = 20)

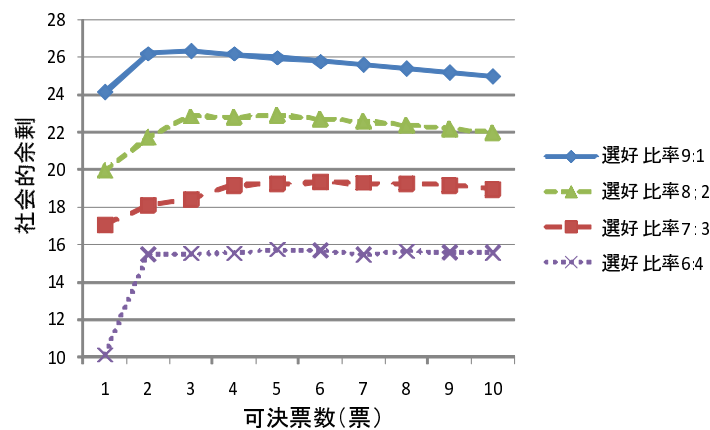


図 8: 社会的余剰 (n = 30)

なく少なくとも一人のメンバーの得られる効用を高めることのできるようにすることを指す。コミュニティの規模が大きくなった ( $n=20,30$ ) 場合にも同様のことが言える。

- 投票者数による影響

投票者数が多くなるほど、社会的余剰は可決票数による影響を受けにくく、投票者数が少ない場合は可決票数による影響を受けやすい。すなわち、投票者数が少ない場合ほど、より注意深く可決票数を設定することが必要となる。

- 選好比率による影響

選好比率が均衡してくると，社会的余剰を最大にする可決票数が大きくなる傾向があることが分かる．また，選好比率が5：5に近づくほど社会的余剰が可決票数によって受ける影響は小さく，選好比率に差がある場合ほど影響を受けやすい．つまり，二つの代替案の選好比率に差がある場合は，より注意深く可決票数を定める必要があることが分かる．

## 第7章 Apache の投票方式の評価およびモデルとの比較

本章では，モデルより得られた分析結果から Apache の投票方式を評価し，優れている点と問題点に分けて議論する．また，今回のモデルと，実際に得られた調査結果について比較を行う．

### 7.1 分析結果による Apache の投票方式の評価

- 優れている点

Apache での投票方式では，投票者の投票が無駄になることが少ない．例えば，提案に対して反対意見を持つ投票者は，自己が投票しても提案が可決となることが予想できる場合は投票に参加しない（自己が投票が開始されていることに気がついた時点で賛成票が2つ集まっていれば，自己の反対意見への投票は無駄になりやすい）．つまり，投票者の行動はパレート最適になりやすく，社会的余剰の観点から望ましい性質をもつ．

- 問題点

モデルの分析によれば，ある選好比率に対して最適となる可決票数が存在する．Apache の投票方式のように，常に  $m=3$  とするのではなく，過去の投票者の行動結果によりある程度選好比率を予測し，可決票数を定めるのが望ましい．

### 7.2 投票モデルとの比較

ここでは，投票モデルと実際の投票方式との比較を，特に投票者の投票行動の観点から比較を行う．

- 一致する点

実際の投票結果を調査して得られたものは，先に表2にまとめた．ここで

は、投票者が投票に参加した場合、ほぼ全ての投票が可決となっていることが分かる。このことは、投票モデルについても同様である。また、実際の投票に、時間的な偏りはなかった。例えば、全体的に見ると投票開始直後に投票に参加している投票者数と、投票期間終了直前に投票に参加している投票者数は同程度である。これは投票モデルにおいても、選好比率の異なる場合の投票が何度か行われることを想定すれば説明できる。

- 異なる点

モデルにおいて、投票に参加する投票者数は、必ず可決票数  $m$  と等しくなった。一方で、実際の調査によれば一度あたりおよそ 3.63 人の投票者数がいた。つまり、一度の投票において、投票者数が採用されている可決票数 3 より多くなる場合がある。これは、今回の投票モデルでは、2章の式(3)における  $D$ (投票に参加しなければならないと感じる義務感)を考慮に入れていないことが原因であると考えられる。また、Apacheでの投票は、PMCメンバーとコミッターにより行われているが、今回のモデルではこれらの投票者の区別はできない。これは、投票者の非対称性を考慮に入れていないことが原因である。

## 第8章 おわりに

本研究では、Apacheの投票方式を調査し、そこで用いられる投票方式では、選挙などの一般的な投票方式と異なる次のような特徴があることが分かった。

- 逐次参加型の投票

投票の開始は開発コミュニティのメーリングリストによって知らされるが、投票が開始されていることに気がつくのは投票者によってそれぞれ異なる。つまり、投票開始直後か投票期間終了直前であるかなどの情報を得ることができる。

- $m$  票先取りの可決ルール

単純多数決とは異なり、 $m$  票先取りの可決ルールが採用されている。つまり、 $m$  票集まった時点で可決案が決定される。

- 投票行動の可視性

投票自体もメーリングリストを通して行われるため、別の投票者がどの代替案に投票を行ったのかを知ることができる。

以上の特徴を持つ投票方式の性質を分析した。本研究の貢献は以下の通りである。

- Apache の投票方式の特性を反映させた投票モデルの構築  
投票者の参加順に関する仮定を設けることで投票モデルを構築した。その投票モデルにより，Apache の投票方式における投票者の行動の分析や，社会的余剰の計算を可能にした。
  - 投票結果や社会的余剰に影響を与える要因の発見  
次の仮定のもとで，投票結果や社会的余剰がどういった要因に影響を受けるかを分析した。
    - － 各投票者の選好と投票順序の可視性  
各投票者は，別の投票者の選好と投票の順番を知っている。
    - － 投票者の投票行動の対称性  
投票者の投票に要する費用は，どの投票者についても同じであるとし，さらに同様の状況にある投票者は全て同様の行動を選択する。
    - － 投票者の合理性  
全ての投票者は合理的であり，投票者は自己の得られる期待効用が最大となるように行動を選択する。
- 得られた分析結果をまとめると以下のようなになる。
- － 可決票数  
可決票数が大きくなった場合，当然多くのメンバーから選好されている代替案が可決案となる確率が高くなる。しかしながら，社会的余剰は，ある選好比率，投票者数が与えられた場合，ある可決票数で最大となり，それ以上可決票数を大きくした場合は減少する傾向があることが分かった。すなわち，ある投票者数，選好比率が与えられた場合，社会的余剰を最大化する，つまりパレート最適となるような可決票数が存在することが分かった。
  - － 投票者数  
可決票数を一定にし，投票者数を大きくした場合，多数派が可決となる確率はほぼ一定であり，投票者の数が投票結果に与える影響は小さいことが分かった。  
投票者数を大きくすると，可決票数による社会的余剰の変化は小さくなる分かった。したがって，投票者が少ない場合はより注意深く可決票数を決める必要がある。

#### – 選好比率

選好比率が均衡している場合，可決票数による社会的余剰の変化は小さくなる．一方で，選好比率に偏りがある場合，可決票数による影響が大きいため，より注意深く可決票数を設定する必要があることが分かった．

本研究によって得られた知見は，次のような場合に利用できると思われる．

京都大学情報学科のある一学年内（80名程度）で，投票を用いて二つの代替案から可決案を決定する場合を想定する．このとき，例えば可決票数を  $m=1,2,3,\dots$  と変化させていくと，それぞれの  $m$  に対する少数派が可決となる（意思決定のリスク）確率は各選好比率に関して分かる．Apache で  $m=3$  とされているからといって，それをそのまま適用させる，つまり意思決定のリスクなどを考えないのと，どの程度の確率でリスクが起こり得るかを認識しているのとでは，後者の方が，投票を用いるのかどうか，結果をどう解釈するかといった点で，より適切な意見集約が可能になる．これが本研究の社会に対する貢献である．

また，本研究では投票モデルにおいて投票の順番や投票者の対称性に関する仮定をしていた．今後の課題としては，特に投票の順序に関する仮定を緩和することがあげられるが（例えば，自己より後に投票に気がついた投票者の順番は分からない，など），今回と同様に多数派の可決確率や社会的余剰を求めるには，投票者の最適行動戦略を考える必要がある．そこで本研究における仮定のもとで得られた行動戦略を利用し，その場合の行動戦略を求めることができると考えている．

## 謝辞

本研究を行うにあたり，熱心なご指導，ご助言を賜りました松原繁夫准教授に厚くお礼申し上げます．また，日頃より，有益な御助言を与えてくださりました石田亨教授に心から感謝致します．そして最後に，日頃から様々な御助言，御協力を頂きました石田・松原研究室の皆様にも心から感謝致します．

## 参考文献

- [1] Jeremy Pitt, Lloyd Kamara, M. S. and Artikis, A.: Voting in Multi-Agent Systems, *The Computer Journal*, Vol. 49, pp. 156–170 (2006).

- [2] 櫻井祐子, 岩崎敦, 横尾真: 適切な掲載数を決定するキーワード広告オークションプロトコルの提案 (〈特集〉エージェント), コンピュータソフトウェア, Vol. 25, No. 4, pp. 60–67 (2008-10-28).
- [3] Börgers, T.: Costly Voting, *American Economic Review*, Vol. 94, pp. 57–66 (2004).
- [4] Downs, A.: An Economic Theory of Political Action in a Democracy, *The Journal of Political Economy*, Vol. 65, pp. 135–150 (1957).
- [5] Riker and Ordeshook: A theory of the calculus of voting, *American Political Science Review*, pp. 25–41 (1970).
- [6] The Apache Software Foundation, Licensed under the Apache License, Version 2.0: The Apache Software Foundation, [http://www.apache.org / foundation/voting.html](http://www.apache.org/foundation/voting.html).
- [7] Alan Bullock, S. T.: *The New Fontana Dictionary of Modern Thought*, HarperCollins; Third edition edition (1999).
- [8] 岡田章: ゲーム理論, 有斐閣 (1997).
- [9] von Neumann, J. and Morgenstern, O.: Theory of Games and Economic Behavior, Princeton Classic Editions, *Princeton University Press* (1944).