

相互自由な委任により選出した代表者による段階的議決のモデル化

Modeling A Stepwise Voting System utilizing Mutually Unrestricted Commission Network

山川 宏*¹ 丸橋 弘治*¹ 仲尾 由雄*¹
 Hiroshi Yamakawa Koji Maruhashi Yoshio Nakao

*¹(株)富士通研究所
 FUJITSU LABORATORIES LTD.

We propose a indirect vote number counter method for estimating entire poll results and an adaptive voter choice method for promoting powerful voter's voting, when similarity of sense of values between each pair of voters are stored as a commission network. In the multi agent simulation, we assumed that 50 voters are arranged on different position on a one dimensional value space. Each voter has ten friends and knows these sense of values and gives the commission of authority to some of them. The voter was selected one by one by using adaptive voter choice method, and indirect vote number counting is used for evaluating voting distribution. Six voters using proposed method can outperform the half voters, concerning capability for estimating entire poll results.

1. はじめに

様々な組織において有権者が議論を行い最終的に選択肢へ投票する民主的な議決場面が存在する(例えば、労働組合の選挙、株主総会、集合住宅の管理組合、社会問題の意見集約、表彰者等の決定など)。また最近では企業内で社員の知識を集約して、社内外の現象予測や、新たなイノベーションや価値を生み出す試みもあり、今後は多くの企業でも複雑な環境に対応すべく民主的な議決を活用する場面が増えるであろう。

勿論、全有権者が参加してすべての選択肢を比較評価すれば、決議結果に対して妥当性と納得性が得られ、実行時のコミットメントを引き出しやすくなる。しかしリソースが有限な有権者による参加の範囲は限定されるため、現実にはしばしば参加意欲旺盛な一部の有権者の投票により、有権者全体の意見を反映しない結論に達するといった事態に陥る。

十分に参加できない有権者の意向を反映するため、委任状などにより決議権を他有権者に委託する方法がしばしば用いられる。しかし通常の委任関係では委任先が投票実施有権者に制限され、しばしば適当な委任先を見つけられずに議長等(運営側)一任となる。これは、議決全体からみれば有権者の意志を取り込む機会の損失であり、有権者全体の意見を反映する可能性を低くしている。そこで、議長等が適切な有権者を探し出して参加促進を行うことも可能だが、それ自体が難しい場合も多いし、仮にうまく参加促進できたとしても議長らの労力が大きくなる問題がある。

また、議決前半の発散フェーズでは多数の有権者の参加が多様な選択肢の発見に結びつくが、後半の収束フェーズでは参加有権者が多いほど議論コストが増大する。大規模な民主的議決(国や地方自治体等)では後半の問題を回避するために、代表制を採用している。しかし、ある時期に選出された特定の代議員によって、性質の異なる多くの議題について長期間にわたり代表権を行使し続ける現状制度では、民意を反映した議決の維持に困難が伴う。つまり、これまでの委任や委託などを用いた議決方法や制度では、有権者や議長らのコストを低減しつつ、妥当な議決を行うことが困難であるという問題がある。

そこで我々は2章で、有権者間の委任関係を利用して組織内

(1) 代表性(公正性)

全有権者が参加した場合に最大となる評価。

(1-a) 価値分布推定性

全有権者の価値の平均に近いか否かという評価。

(1-b) 選択肢総票数

委任投票を含めて選択肢に投票された得票数。

(2) 多様性

参加有権者の価値観の多様性の豊かさに対する評価。

少数派からの優れた意見を見出しやすい状況で高い。

図 1: 価値集約に関わる議決の評価基準

の意見集約や議決を改善する新技术を提案する。3章で、段階的議決プロセスをマルチエージェントによりモデル化し、計算機実験により性能評価を行うことで、提案技術により代表性の高い段階的議決プロセスを実現できる可能性を示すとともに、その効果が得られる条件の一部を明らかにする。

1.1 議決プロセスの評価

妥当な議決とはいかなるもので、どう評価されるべきだろうか。我々は、M. A. Robert は優れた議決とは正しい結論よりも、正しいプロセスにあると述べている [1] と同じ立場をとる。ここには、現実の議決では最終的な結論の正しさを評価することは困難で、仮にそれを事後に行なっても現に議決を行う時点では役立たないという背景があるであろう。

また、議決結果が予測である場合には有権者の知識が集約されるのに対し、実行を伴う意思決定では有権者の知識と価値の双方が集約される。本研究では、後者における価値判断の集約に着目するので、「できるだけ少人数ながら有権者の価値観の点からバランスよく参加させることができれば、優れた議決プロセスである」と評価する。

委任を用いた議決プロセスの価値集約からみた妥当性には図に示すような側面があると考えられ、本報告では、議決の収束フェーズで特に重要な代表性に関わる価値分布推定性と選択肢総票数についての評価を、最初から固定した選択肢への投票について行う。(発散フェーズで重要な多様性は扱わない。)

価値分布推定性に関連する先行分野として、友人関係のネットワークを用いて麻薬中毒患者数などの推定精度をを高めるネットワークサンプリング分野がある [5, 2, 3]。

連絡先: 山川宏, (株)富士通研究所 IT コア研究所,
 〒 211-8588 川崎市中原区上小田中 4-1-1, tel:044-754-2658, fax:044-754-2693, e-mail:ymkw@jp.fujitsu.com

2. 段階的議決プロセスと支援技術の提案

2.1 委任ネットワークと間接得票数計算の提案

今回提案する委任ネットワークは、議決等に参加する有権者が選択肢に投票する可能性とは独立に、他の有権者をどのくらい委任するかの配分を自由に書き込むことで構成される。

そして委任関係に推移律（つまり、「自分が信頼する人が信頼している人は、おそらく信頼できる」ということ）が成立すると仮定することで、固有ベクトル中心性を利用して間接的な選択肢に投票を含めた得表計算を行う^{*1}。よって、各有権者は直接に選択肢の優劣を判断せずとも、他の有権者への委任を介して議決に参加することが容易になる。

ここで、 N 人の有権者と選 M 個の択肢をノードとし、ノード間の委任および投票関係とをエッジとする有向グラフから、間接得票計算手法を提案する。具体的には委任関係をあらわす $L \times L$ 委任行列 $W (= \{w_{ij}\})$ に基づいて繰り返し票の伝搬を行う ($L = N + M$)。この際に、委任の伝達率を $0 < r < 1$ とし、委任のステップ t を繰り返すと影響が弱まる効果をあらわす。

はじめに L 行の列ベクトルである票フローを全て一票に初期化する ($f(0) = (1, \dots, 1)^T$)。そして、委任伝達率 r を乗じた委任行列の W を、票フローベクトル $f(t)$ に乗ずる計算を、収束条件 ($\max(f_i) < 0.0001$) を満たす T 回まで繰り返す。なお w_{ij} は、有権者 i から他有権者への委任配分を決める L 行の列ベクトルで、 $\sum_j w_{ij} = 1$ を満たす。

$$f(t+1) = rWf(t) \quad (1)$$

票フローベクトル $f(t)$ の総和を、得票数ベクトル F とする。

$$F = \sum_{t=0}^T f(t) \quad (2)$$

この結果は $T \rightarrow \infty$ の極限において、Bonacich 中心性（固有ベクトル中心性）を適切に規格化した結果に一致する。この中心性はネットワーク解析に関わる研究 [4] でよく利用される。

なお、選択肢の得票数計算では、初期値に一票を配置したので、その分は差し引くことにする。また、委任の伝播を伴わない直接得票数は $T = 1$ とすれば得られる。

この方法では、委任先を選択肢への直接投票者のみに制限する必要が無く、任意の有権者に対して委任が可能で、有権者が相互に委任を行なって関係にループが生じても問題がない。

2.2 段階的議決プロセスと適応的投票者選択の提案

段階的議決プロセスでは、議案ごとにある一定期間において、議論を行いながら同時に選択肢の提案^{*2} とそれに対する評価を行い続ける。各有権者は選択肢への投票と他有権者への委任の両方またはいずれかを行い、なおかつ、それらの態度を期間中はいつでも変更できるダイナミックなプロセスである。

しかし、特定の有権者グループ内で相互に委任をしても、そこに属するいずれの有権者も選択肢へ投票しなければ、間接得票計算を行っても議決妥当性の向上は望めない。仮に議長等が

*1 委任関係における推移律の成立性の仮定や、その伝播に伴う減衰表現の妥当性について、今後の議論が必要であり、ここで以下の諸要素を意識する必要がある。委任関係には、予測課題で必要な他有権者の知識や専門性に基づく信頼感要素と、価値判断課題で重要な価値共有要素を含む。さらに間接得票が前提とした場合は、信頼できる人を知っている (Know Who) という要素が、新たに加わる。

*2 段階的議決プロセスでの前半では、多様な参加者による優れた選択肢の動的な提案が良い議決結果に必要なだが、本報告では選択肢を固定して代表性を評価する範囲にとどめる。

有権者に投票を呼びかけても、広報などで広く呼びかけるだけでは効果が薄く、だからといって全有権者に直接的に働きかけることはコストが高すぎる。

そこで議長らが働きかけるべき有力有権者を委任ネットワーク上で発見する適応投票者選択手法のひとつとして、選択肢を直接投票した場合に投票率が上昇する有力有権者を選択する、選択肢総票数グリーディー・サンプリングを提案する。

有権者 i の投票行動は、委任行列 W の i 列における知人への委任を取消し、選択肢への投票を y_i に置き換えることであらわす。次に、既に選択肢に投票している有権者の部分集合を s とし、その際の委任行列を $A(s)$ とすれば、得票数ベクトルを $F(s)$ に対する、選択肢総票数 $\Phi(s) = \sum_{c \in C} F_c(s)$ となる。この状況でまだ選択肢に投票していない有権者 i が新たに選択肢に投票したときの有権者部分集合を $s+i$ と記述すれば選択肢総票数の変化量は次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta_i \Phi(s) &= \Phi(s+i) - \Phi(s) \\ &= \sum_{c \in C} (F_c(s+i) - F_c(s)) \end{aligned} \quad (3)$$

適応投票者選択では、次式により、未だ選択肢投票していない有権者中で最も選択肢総票数を増大させる一人の有権者 $\tilde{i}(s)$ を選び出す、グリーディーなサンプリングを行う。

$$\tilde{i}(s) = \arg \max_{i \notin s} \Delta_i \Phi(s) \quad (4)$$

選択され催促をうけた有力有権者が投票行動を行えば、効果的に得票数を上昇させられ、多くの有権者の価値観を反映した投票状況を実現できる可能性が高まる。

実験では、適応的投票者選択の基本性能評価のため、有権者による自発的な投票行動の存在を無視し、初期段階 ($s = \emptyset$) から、指定された投票者が順次投票を行うものとする。

3. モデル化と計算機シミュレーション実験

実験では、有権者数 $N = 50$ 人の投票をモデル化し (3.1 節)、次に委任ネットワークをモデル化する (3.2 節)。また投票者選択手法毎に、二通りの得票数計算を行う (委任伝達率 $r = 0.80$)。

得票数計算手法		間接得票数	直接得票数
投票者の 選択手法	適応選択	Avc-I	Avc-D
	ランダム選択	Rnd-I	Rnd-D

Avc-D, Avc-I, Rnd-I では、100 通りの委任ネットワークを生成してその結果を平均する。そして、Rnd-I は、各ネットワーク構成で有権者数 n 毎に 3 通りの有権者部分集合 s に対する結果を平均し、さらに 100 通りのネットワークで平均する。ネットワークを用いない Rnd-D では、有権者数 n 毎に 1000 通りの有権者部分集合 s を抽出した結果を平均する。

3.1 有権者の投票モデル

今回は、選択肢が一次元価値空間 v (区間 $[0, 1]$) 上に配置されているものとし、有権者 i の価値中心 v_i は二つのベータ分布の合成分布 ($2B(1.2, 5.0) + B(5.0, 1.2)$)/3 に従うと仮定する。これは、図 2 の下図に示すような、多数派が $v = 0.05$ 付近に、少数派が $v = 0.95$ 付近に局在する、二極化した分布であり、この分布は実験を通して固定とする。

有権者は、持ち票を価値中心周辺の正規分布の割合で複数の選択肢に対し分配投票する。ここで、選択肢は価値空間上における、 $v_c = [0.05, 0.15, \dots, 0.95]$ の 0.05 刻みの等間隔に

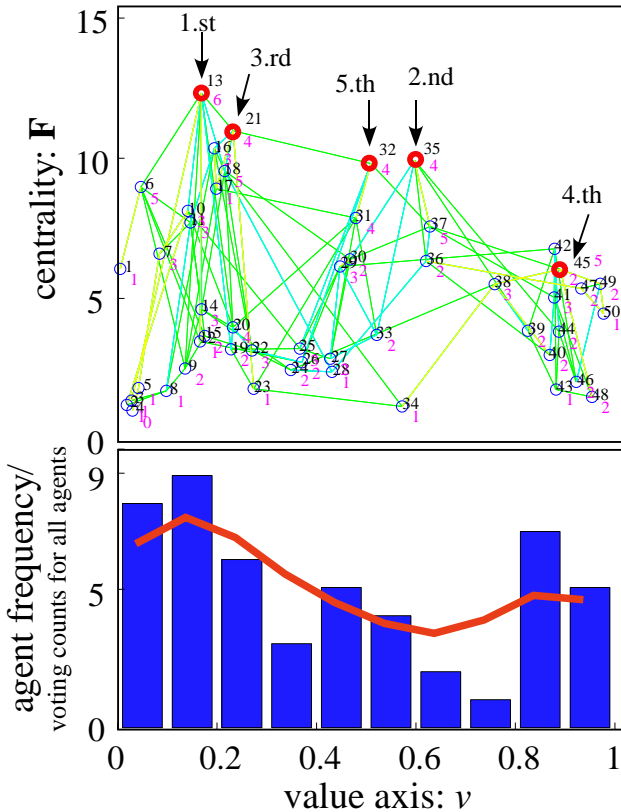


図 2: 価値空間における委任ネットワークの一例

価値空間 (横軸) における 50 人の有権者の分布。下図のヒストグラムは有権者の価値中心の分布。下図の赤線は全有権者が投票した場合の総投票数。上図は委任関係を表したネットワークで、ノードは有権者をあらわす。黒字で ID を赤字で入リンクの次数を示す。リンク自体は片方向のみでも表示する。縦軸は間接得票数 (中心性) である。また、適応投票者選択による最初の五人の有権者を赤丸で示す。

$M = 10$ 箇所に配置されている。価値中心が v_i である有権者の、投票ベクトル y_i の選択肢毎の値 y_{ic} を次式で得る (c は選択肢のインデックス)。

$$y_{ic} = \frac{\exp(\beta(v_c - v_i)^2)}{\sum_c \exp(\beta(v_c - v_i)^2)} \quad (5)$$

実験では、 $\beta = 15.7$ とし、価値空間での半値幅が約 0.4 となる。

3.2 ソーシャル・キャピタルのモデル

有権者 i が有権者 j の価値観を知っている関係を知人関係として、知人ネットワークをモデル化する。各有権者は自分以外の $N - 1$ 人の中の、ランダム選択した k 人を知人としてネットワークを構築する。ここで、知人関係は非対称で、有権者 i が有権者 j を知っていても、その逆は常には成立しない。

各有権者は、自分の価値観を最も反映するような割合で、 k 人の知人への委任配分を調整することにより、知人ネットワークから委任ネットワークを構築する。

有権者 i は、自身の投票ベクトル y_i を知人集合 (インデックスを K_i とする) への委任の線型和として近似した場合の誤差が最小となるように、二次計画法を用いての委任ベクトルを $w_i (= \{w_{ij} | j \in K_i\})$ を決定する。ここで、 ϵ は小さな正値。

$$\text{minimize}_{w_i} \left[|y_i - \sum_{j \in K_i} w_{ij} y_j|^2 + \epsilon |w_i|^2 \right] \quad (6)$$

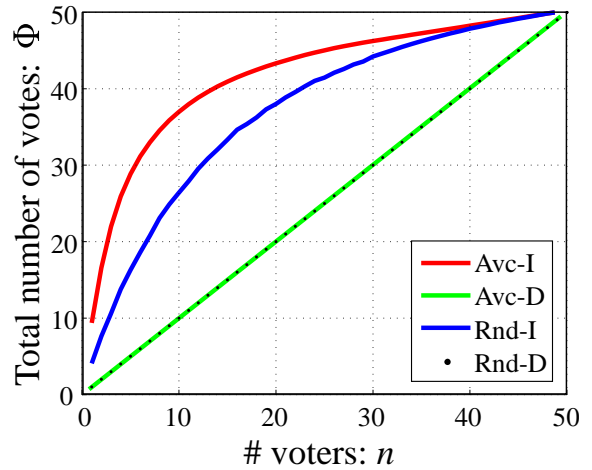


図 3: 選択肢総票数の投票者数による変化 (知人数: $k = 10$)
有権者数 50 人, 委任伝達率 0.80

最後に、 $\sum_j w_{ij} = 1$ を満たすように規格化を行う。

構成された委任ネットワークの一例を、図 2 の上図に示す。ここで縦軸は間接得票数 (中心性) であり、有権者間の委任関係は片方向、両方向は区別なく表示している。

3.3 代表性 (公正性) とコストの評価

議決のコストは投票者数と考える。代表性評価は、1 章で述べたように選択肢総票数と価値分布推定性の二つの評価指標を用い、選択肢総票数は $\Phi(s) = \sum_{c \in C} F_c(s)$ である。

価値分布推定性を評価するために、部分有権者 s による選択肢投票状況 $F_c(s)$ の投票分布と全有権者が投票した場合の状況 y_{ic} による投票分布 (図 2 の下図の赤線) の対数絶対値誤差 $e(s)$ を用いる。

$$e(s) = \log \sum_c \left| \frac{F_c(s)}{\Phi(s)} - \frac{\sum_i y_{ic}}{N} \right| \quad (7)$$

式 2 による間接得票数の計算では F を得るために T を十分に大きくとるが、直接得票数の場合には $T = 1$ とする。

対数絶対値誤差 $e(s)$ による効果把握が困難なため、ランダム選択した有権者が何人が直接得票した程度対数絶対値誤差 $e(s)$ であるかという実行有権者数で評価する。つまり、Rnd-D における $\hat{e}(n)$ のシグモイド関数 ($\lim_{n \rightarrow 0} \hat{e}(n) = +\infty$, $\lim_{n \rightarrow N} \hat{e}(n) = -\infty$) でフィッティングした逆関数を得て、これを用いて他の場合の $e(s)$ を実効有権者数に変換する。

3.4 知人数 k を 10 人に固定した結果

各人が ($k = 10$) 人の知人から委任先を選択することで構成される委任をするネットワークを用いた場合の実験結果を示す。

逐次投票者選択を行うと基本的には間接得票数 (中心性) が大きな有権者から順に選択される。図 2 の例では、最初から 5 人目までに選択された有権者を赤丸で示す。ここで、はじめに有権者 13 が選択され、次に有権者 35, 21, 45, 32 とつづくが、その順番は間接得票数の順とはやや異なる。

順序が入れ替わる現象は以下の機構による。たとえば、ある有権者 i から別の有権者 j に対して強い委任関係が存在する場合、有権者 i が選択肢への投票を行うと、有権者 j への委任が減少して間接得票が小さくなる。逆に有権者 j が選択肢への投票を行った状態では、有権者 i が選択肢へ投票しても選択肢総票数の増加に貢献しづらく選択されにくい。

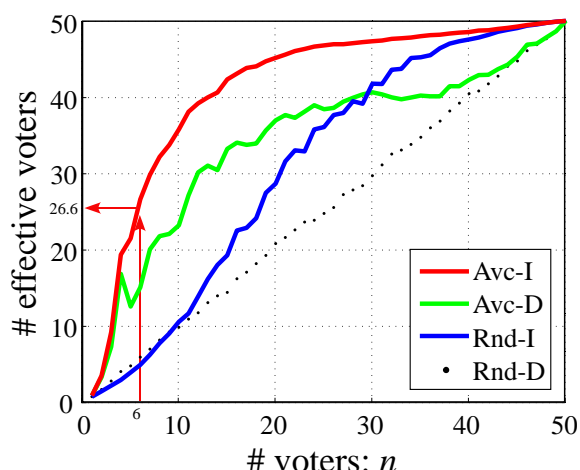


図 4: 価値分布推定性の投票者数による変化 (知人数: $k = 10$)
有権者数 50 人, 委任伝達率 0.80, 縦軸: 実効有権者数

以上のように, 強い委任関係をもつ有権者は連続的に選択されずらく, 価値観が類似した有権者間に強い委任関係が存在すれば, 価値観に近い有権者は連続的に選択されづらい。

投票者の増加に伴う選択肢総票数の平均的な変化を図 3 に示す*3。有権者をランダムに選ぶ Rnd-I での間接得票数は, 投票者が 15 人程度のときに特に大きく 35 名分の選択肢総票数を得られる。さらに, 適応投票者選択を用いた Avc-I での間接得票数は, さらに少ない人数で多くの選択肢総票数を得られ, 投票者 10 名で 37 名分の選択肢総票数を得られ, わずか 4 名で過半数を得ることができる。

次に価値分布推定性を評価する実効有権者数 (Rnd-D の場合で正規化している) の投票者増加に伴う平均的な変化を図 4 に示す。間接得票数を用いる Rnd-I では, 30 人程度の投票で 40 人強の実効有権者となる。適応投票者選択のみを用いた Avc-D は, 10 人程度の投票で 25 人程度の実効有権者となるが, 個々の結果は変動が激しい欠点がある (グラフは 100 回の平均値のためあまり目立たない)。そこで, 適応投票者選択に間接得票数を用いる Avc-I では, 変動が激しい欠点が緩和され, さらに 15 人の投票で 45 人近くの実効有権者となり, 6 人の投票で過半数の効果を得ることができる。

3.5 知人数 k を変化した Avc-I の結果

適応投票者選択と間接得票数を共に用いる Avc-I に対する実効有権者数について知人数 k を変化した場合の振る舞いを図 5 に示す。知人数 k が 5 人を超えると実効有権者数の増大効果は明らかになり始め, 知人数が 15 名を超えるとそれ以上の性能向上はない。一方, 知人数 k が 3 人以下では, むしろ弊害が現れている可能性が示された。

4. まとめ

段階的議決プロセスに参加する有権者間の価値共有を相互自由な委任関係のネットワークとして表現できれば, 提案した間接得票数計算と適応投票者選択を用いて, 少数有権者の参加でも代表性 (選択肢総票数と価値分布推定性) を備えた結論を得やすくなる可能性を, 計算機シミュレーションにより示した。

*3 当然, 直接得票数 Avc-D, Rnd-D は選択肢総票数に比例する。

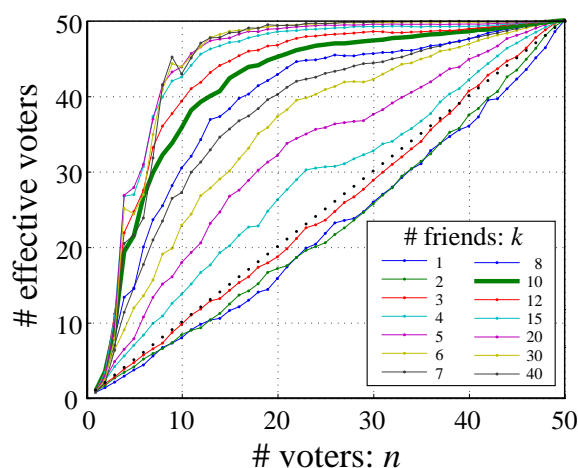


図 5: 価値分布推定性の知人数による変化 (Avc-I)
有権者数 50 人, 委任伝達率 0.80, 縦軸: 実効有権者数

一次元の価値空間上の異なる立場をとる 50 人の有権者は, 各々が 10 人の知人の価値観を知っていると, その中から価値観に近い数名に委任した場合の価値分布推定性を実効有権者数により評価した。すると, 適応投票者選択により 6 人の投票者を選べば, 平均的に約半数 (25 人) が参加したのと同程度の価値分布推定性が得られること, さらに各有権者が 5 名以上の知人をもてば, 提案手法の効果を得られることを示した。

今後, 計算機実験アプローチでは, 様々な性質 (規模変更, ネットワークの性質, 有権者固有属性, 委任関係の複数側面) などの影響調査を進めたい。また, 有権者による動的な選択肢提案とそれに対する評価変化の実験 [6] と組み合わせたい。特に議決プロセス前半では, 多様な価値観を持つ参加者からの優れた選択肢提案が良い議決結果を得るために必要なため, 今回は無視した参加者の多様性からの評価が重要であろう。

本報告では, 段階的議決に関わる課題の提案を目的としており, 未だ最適手法を得られたレベルには到達していない。よって今後は, 上記アプローチなどを通じて, 代表性と多様性をみたと段階的議決プロセスを, 低コストで実現するための, ルール (制度), ソーシャルキャピタル蓄積方針の解明を進めたい。

参考文献

- [1] マイケル・A・ロベルト. 決断の本質 プロセス志向の意思決定マネジメント. 英治出版, 2006.
- [2] Monroe G. Sirken. A short history of network sampling. In *Proc. SRMS*, 1998.
- [3] Steven K. Thompson. Adaptive web sampling. *Biometrics*, Vol. 62, No. 4, pp. 1224-1234, 2006.
- [4] 友部博教, 松尾豊, 武田英明, 安田雪, 橋田 浩一満. Semantic web のための人の社会ネットワーク抽出と利用. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 6, pp. 1470-1479, 2005.
- [5] クラウスクリッペンドルフ, 三上ら (翻訳). メッセージ分析の技法 「内容分析」への招待. 勁草書房, 1989.
- [6] 山川宏, 仲尾由雄. 非同期分散環境での段階的議決モデルの構築. エージェント合同シンポジウム (JAWS 2006) 講演論文集, 2006.