

集合知に基づく予測ツールとしての 予測市場技術とその需要予測への応用

水山 元

予測市場とは、市場メカニズムの持つ情報集約機能を予測のためのツールとして利用する技術であり、「集合知に基づく予測」を実現し得る手段の一つとして注目されている。需要予測への応用を考えると、新製品の需要を予測したい場合や、需要パターンに構造変化が生じやすい場合など、過去の需要実績に頼った予測が難しい場合に特に有効になると考えられる。本稿では、まず、予測市場技術の概要を述べた上で、それを需要予測に応用した事例を紹介する。また、予測市場を用いた需要予測の従来法をさらに発展・洗練させていくための研究開発の現状についても触れる。

キーワード：予測市場，集合知，集合知メカニズム，市場メカニズム応用

1. はじめに

製品の多品種化、短命化が進んだ近年の市場環境では、過去の需要実績が得られない新製品の需要量を予測しなければならない局面が増えている。また、社会の成熟化、情報化に伴って、既存製品の需要量の推移にも、大きな構造変化が生じやすくなっている。これらのことは、過去の需要実績から何らかのパターンを抽出し、それを未来に外挿する時系列分析型の予測手法では扱いにくい、困難な需要予測問題が増えていることを示している。過去の需要実績からだけでは満足な予測が得られないのであれば、予測の手がかりとなる入力情報を増やせばよいともいえるが、どのような外部要因を追加すればよいかを事前に決定することがまた難しい。

一方で、人間は、入力情報を明示的に指定されなくとも、状況に応じて無意識に情報を取捨選択し、柔軟に判断や予測を行うことができる。経営工学・科学の分野では、人間の判断や予測は、勘と経験に依存しており、科学的根拠に欠けるとして、忌避されることが多いが、上述のような不確実性の高い環境下で、明示的には定式化しにくい困難な予測問題に直面している際には、むしろそのフレキシビリティが大きな利点となる。さらに、個々人の予測性能が低くとも、集団としての多様性、独立性、分散性[1]が確保されていれ

ば、個々人の予測の集約で総合的に高い性能が達成可能なことは、アンサンブル学習の教えるところでもある。

本稿では、変化の激しい市場環境の中で、需要予測を支援し得る新たなリソースとして、社内外の関係者の間に分散して存在している、公式、非公式を問わない、上述のような柔軟な判断や予測の集まり、すなわち「集合知」に注目する。そして、「集合知に基づく予測」を実現するための手段の一つとして、予測市場技術を取り上げ、その概要、需要予測への応用例、研究開発の現状などを紹介し、今後の展望を述べる。

2. 予測市場技術の概要

予測市場とは、形式的には、予測の対象となるある変数の未知の実現値に依存して、事後的に価値が決まる仮定の証券（予測証券と呼ぶ）を売買する一種の先物市場であり、機能的には、そこで時々刻々変化する予測証券の時価から、対象変数に関する、市場参加者の集合知を反映した、動的な予測を得ることを目的としている[2][3]。これは、市場メカニズムの持つ情報集約機能を予測のために利用しようという企てであり、もとをたどると、実験経済学の分野から派生してきたアイデアである。ここでは、インターネット上で公開されている代表的な予測市場のフィールド実験サイトの一つである、アイオワ大学ビジネススクールの IEM (Iowa Electronic Markets)[4]を例にとりあげながら、予測市場技術の概要をみていこう。

IEM は、1988 年の合衆国大統領選挙の当選者予測市場として始まった[5]。そして、それ以降も、選挙

みずやま はじめ

京都大学 機械理工学専攻生産システム工学分野
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

結果の予測市場を中心に様々な予測市場を運営してきた[6][7]。例えば、1988年の当選者予測市場では、「Dukakis」、「Bush」、「Jackson」、「Rest of Field」の4種類の予測証券が発行された。それぞれの証券は、開票後に当該候補者の得票率に\$2.50を掛けた額の配当が得られる契約になっている。このように、得票率などの数値に比例した配当が得られるタイプの予測証券をVS (Vote-Share) 型と呼ぶ。一方、実際に当選した候補者に該当する予測証券のみに、事後的に固定額の配当を与えるような契約形態も考えられるが、そのようなタイプの予測証券はWTA (Winner-Takes-All) 型と呼ばれる。選挙結果の予測市場では、各候補者の得票率の予測を得たい場合には前者が、当選確率の予測を得たい場合には後者が、それぞれ適しているとされている。

上述の4種類の予測証券を1枚ずつセットにしたポートフォリオの価値は、選挙結果にかかわらず、\$2.50となる。市場参加者は、例えば、\$2.50でこのセットを購入した後、それをばらして、予測証券ごとに個別に市場で売買することができる。市場制度としては、IEMは、コンピュータ上で連続的に決済されるDA (Double Auction) 方式を用いている。この方式では、各市場参加者は、任意のタイミングで、購入したい、あるいは売却したい予測証券の種類、枚数、価格を入力していく。そして、マッチング可能な買い注文と売り注文のペアが現れるたびに、それらの間で、自動的に取引が成立していく。決済頻度でみると、この方式は連続決済であるが、一定の時間間隔などで区切って、離散的にまとめて決済するバッチ決済 (板寄せ) 方式も考えられる。

DA方式は、買い手が見つからないと売れない、売り手が見つからないと買えない、という意味で、市場参加者が多数存在することが前提となっている。これに対して、少人数でも予測証券の流動性を確保できるようにするための方式として、MM (Market Making) 方式がある。これは、市場参加者からの買い注文や売り注文に応えるMMA (Market Maker Agent) を用意しておくものである。予測市場におけるMMAには、予測証券の価格を提示し、すべての市場参加者の売買注文に応えるという働き、すなわち、市場を完全に取り仕切る働きをさせることが一般的である。この場合、市場参加者は価格受容的に振る舞うことになる。WTA型の予測証券に対する代表的なMMAのアルゴリズムとして、MMAが被り得るロ

表1 予測市場を特徴づける主な属性

予測証券	VS 型	WTA 型
市場制度	DA 方式	MM 方式
決済頻度	連続決済	バッチ決済
市場参加者	一般公開	限定・非公開
取引通貨	実通貨	仮想通貨

スの上限を指定できるLMSR (Logarithmic-Market-Scoring-Rule) がある[8]。

いずれの方式でも、予測市場は、市場参加者個々人にそれぞれの主観的な予測を予測証券の売買注文として表出化させ、それらを予測証券の価格情報として統合し、各市場参加者にフィードバックするというサイクルを繰り返すことによって、集合的な予測を獲得していく。この意味で、この予測手段は、あたかも自動化されたデルファイ法のように働くといえる。

市場参加者については、一般の不特定多数が参加できる公開設定と、あらかじめ指定したメンバーのみに限定した非公開設定とが考えられる。また、取引通貨は、実通貨 (日本円、米ドルなど) の場合と仮想通貨 (ゲーム通貨、ポイントなど) の場合とがある。IEMの特徴は、実通貨で取引する一般公開型の予測市場であるという点である。一部、ビジネススクールの講義の受講者のみに限定した限定・非公開型の市場も開設されているが、選挙結果予測などの市場は、基本的に一般公開されている。また、研究・教育目的の運営で、参加者1人あたりの取引金額の上限を\$500に抑えることで、実通貨での取引が認められている。ただし、予測性能の面では、仮想通貨での予測市場も実通貨の場合と遜色はないとの報告もある[9]。

表1は、以上で述べてきた、予測市場を特徴づける主な属性をまとめたものである。IEMの1988年の選挙結果予測市場は、VS型、DA方式、連続決済、一般公開、実通貨の設定であった。最後に、その予測性能であるが、世論調査と比較して遜色のない、むしろより良好な性能が得られたと報告されている。また、IEM以外のものも含めて、種々の予測市場が良好な予測性能を示すことはScience誌にも報告されている[10]。これらを受けて、予測市場の予測ツールとしての可能性が広く認識され、欧米を中心に、需要予測をはじめとする、企業の様々な予測問題への応用が活発化していくこととなる。

3. 予測市場技術の需要予測への応用例

予測市場技術の企業での応用例は、残念ながら、その性格上、詳細に公表されることは少ない。それでも、これまでにいくつかの事例研究については報告されている。例えば、初期の事例研究として、ソフトウェア開発プロジェクトのリードタイム予測に応用した事例[11][12]や、製品の販売量予測に応用した事例[13]などが報告されている。ここでは、予測市場技術を需要予測に応用した事例として、後者について少し詳しくみてみよう。

3.1 Chen と Plott の事例研究

この事例研究は、HP (Hewlett Packard) 社の研究員の K. Y. Chen と、実験経済学の大家であるカリフォルニア工科大学の C. R. Plott が、HP 社の実際のいくつかの製品を対象に、予測市場技術を用いてそれらの販売量予測を試みたものである。一部例外もあるが、典型的には、四半期先の1カ月あたりの販売台数を予測対象変数としている。表1の属性に沿って、そのアプローチの概要を追っていこう。

まず、予測証券については、対象製品の販売量を10程度の区間（例えば、 $[0,100]$, $[101,200]$, $[201,300]$, ...）に分け、それらの区間（予測区間と呼ぶ）にそれぞれ対応した WTA 型の予測証券（区間証券）を発行し、利用している。これは、販売量の実現値を含む区間に対応する証券にのみ、事後的に固定額の配当が与えられるという契約形態になっている。なお、このタイプの区間証券を、筆者は、固定区間型予測証券 (Fixed Interval Prediction Security: FIPS) と呼んでいる。Chen と Plott は、区間証券を用いた理由を、VS 型よりも WTA 型の方が情報集約機能を発揮しやすいからとしているが、IEM でのフィールド実験では VS 型証券も情報集約に有効であることが示されている。これに対して、筆者は、別の理由で区間証券の利用を勧めたい。

需要予測は需要量という数量についての予測なので、VS 型の予測証券の事後配当をその数量の実現値に比例させることで、容易に需要予測のための予測証券を構成することができる。しかしながら、この予測証券の市場価格から得られる予測は、当該需要量の点推定値でしかない。一方、需要予測は、その結果を、例えば、生産や販売の計画に生かしてこそ価値があるものである。そして、そうした計画業務では、需要量の平均に加えてそのばらつきも重要な情報となる。したが

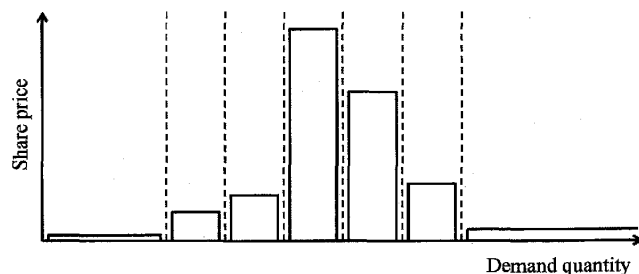


図1 区間証券の価格分布

って、需要予測では、需要量の点推定値だけではなく、その区間推定や予測分布が得られることが望ましい。区間証券を用いた場合は、各予測区間に対応する WTA 型証券の価格（の比率）が得られるので、それらを図1のような棒グラフに表すと、それを需要量の確率分布とみなすことができるのである。なお、WTA 型証券の価格（の比率）を確率とみなすことに関する数理的な議論については文献[14][15]を参照してほしい。

Chen と Plott がこの事例研究で用いた市場制度と決済頻度は、コンピュータ上での連続決済の DA 方式であり、市場参加者は HP 社のマーケティング部門、ファイナンス部門、研究所から合わせて 20~30 人程度であったとされている。各市場の開設期間は1週間程度で、本業に支障がないように、予測証券の取引は、昼休みと夕方にものみ許可された。また、実験経済学の原則にのっとり、実際に金銭インセンティブが設定されていたようである。予測結果は次のようにして算出されている。まず、各予測区間に対応する区間証券の出力価格を、取引履歴の後半 50%での決済価格を出来高で加重平均することによって定義する。そして、各予測区間の出力価格の比率で、販売量の離散的な予測分布を得る。また、各予測区間内の確率は均等と仮定して、販売量の期待値を算出し、点推定値とする。ただし、右端の区間は ∞ に開いた开区間になるので、その区間は無視、あるいは当該区間の下限値で代表させている。

最後に、気になる予測性能であるが、(1)予測市場を用いて得られた点推定値は HP 社のオフィシャルな予測値よりも精度が高かった、(2)予測市場を用いて得られた販売量の予測分布は妥当と判断できる、(3)予測市場はオフィシャルな予測値からみて実際の販売量がプラス・マイナスどちらの方向にずれるかを正しく予測した、と報告されている。要するに、非常に良好な結果が得られたわけである。これは、予測市場技術が

企業内予測ツールとしても有効であることを示しているといえる。

では、自社で試してみようと思った場合、単純にこのアプローチを真似すればよいのであろうか。実は、必ずしもそうではない。このアプローチにはいくつか限界があるからである。次に、このアプローチの主な限界について考える。

3.2 Chen と Plott のアプローチの限界

第一の限界は予測証券として FIPS を用いる場合、初めに予測区間を設定しておく必要があるが、適切な区間の区切り方は、捕捉したい分布に依存しており、事前にはわからないという点である。これは、予測証券に関する限界であるといえる。FIPS では、事前情報に基づいて、需要量はだいたい $[L, U]$ の範囲に入りそうだと想定し、この領域 $[L, U]$ をいくつかの区間に等分割するとともに、その外側は、 $[0, L-1]$, $[U+1, \infty)$ などとしてそれぞれひとまとめにしてしまうことが多い。この区間設定は、事前情報を反映した予測分布を捕捉するのには適しているかもしれない。しかしながら、予測市場開設後に様々な情報が得られ、予測の精密さが向上していくと、これでは予測区間が粗すぎるということになりがちである。また、事前情報に基づいて設定した領域 $[L, U]$ が見当違いだった場合は、どちらかの端の区間のみに予測が集中してしまうことになる。

第二の限界として、市場制度の面にも問題がある。予測市場を企業における需要予測のツールとして用いる場合、社内の関係者などを中心とした限定・非公開型の設定になることが多い。したがって、市場参加者数は、一般公開型の予測市場と比べると大幅に少なくなってしまう。これによって生じる問題が、予測証券の流動性不足である。予測証券を売りたいのに買い手が見つからない、買いたいのに売り手が見つからない、という事態が発生し、市場参加者が予測対象変数に関する新たな情報を入手したとしても、それが予測証券の価格に織り込まれていかないという事態につながる。Chen と Plott 自身も、流動性が十分であれば消失するはずの裁定機会が残存していたことを挙げ、流動性が不十分であったと結論づけている。これは、予測市場の企業内での少人数運営において、単純な DA 方式を用いることの限界を示しているといえる。

また、企業内予測市場の参加者は、通常は、予測証券の取引以外に、本業としての業務を抱えているため、予測市場への参画が本業に差し支えることのないよう

に配慮する必要がある。Chen と Plott の事例研究では、そのために予測証券の売買を昼休みと夕方に限定していた。それでも、連続決済方式の下では、市場取引が可能になるたびに、できるだけ早く注文を入力するための競争が生じ、混乱をきたす恐れも残る。また、本業への影響を抑えるという点では、市場に参加して予測証券を取引することに対する認知負荷をできるだけ低減することが重要であるが、DA 方式は、証券売買に馴染みのない市場参加者にとって、必ずしも認知負荷が小さいとはいえない。市場制度に関しては、こうした面からも検討の余地が残されている。

4. 予測市場技術を用いた需要予測についての研究開発の現状

では続いて、予測市場を用いた需要予測の従来法をさらに発展・洗練させていくために、どのようなアプローチが試みられているかを概観していこう。ここでは、筆者らの研究を中心に、まずは予測証券に関する工夫を紹介し、続いて、市場制度上の工夫について述べる。

4.1 予測証券に関する工夫

FIPS の限界を解消するためのアプローチとして、自律的区間調整機能を持つ区間証券 (Self-adjustable Interval Prediction Security: SIPS) と、可変区間型予測証券 (Variable Interval Prediction Security: VIPS) の二つを紹介する。まず、SIPS は、予測市場を運営していく過程で、任意の予測区間を細分割したり、隣り合った予測区間を統合したりすることによって、時々刻々変化していく集合的な予測分布を捕捉するのに適したように、予測区間の分割の仕方を動的に調整していく機能を持った区間証券である [16]。具体的には、区間証券の価格分布から、その背後にある集合的な予測分布を大まかに推定し、任意の予測区間を細分割することでその捕捉精度がどの程度向上するかを近似的に評価する。そして、その評価値がある閾値を超えると実際に分割し、同時に、区間数が膨大になることを防ぐために、捕捉精度を阻害しにくい区間のペアを統合するというものである [17]。これによって、予測証券の区間設定が実態にそぐわなくなっても、事後的に適切な区間設定に調整されていくようになる。

一方、VIPS は、市場運営側が予測区間を設定するのではなく、市場参加者側が任意に予測区間を指定できるようにしようというアイデアである [18]。これ

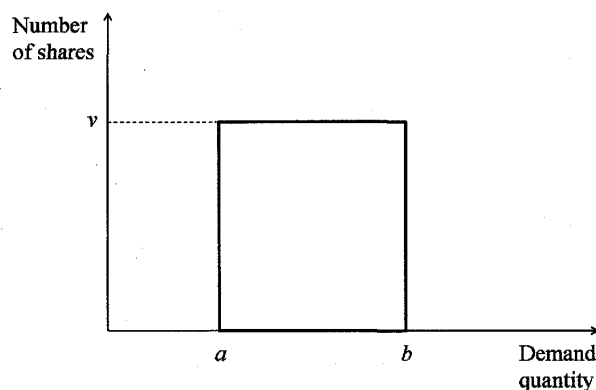


図2 VIPSの所持ポジションの設定

によって、事前にどのような区間設定をすればよいかという問題自体を回避できる。また、市場参加者は、図2のような長方形を描くことで、所持したい予測区間 $[a, b]$ と証券枚数 v を容易に指定することができるため、認知負荷の点でもメリットが期待できる。

4.2 市場制度上の工夫

予測市場の少人数運営における流動性不足の問題に対しては、基本的にはDA方式のままで、流動性を補う補助的な売買エージェントを追加するアプローチと、MM方式を採用し、市場を取り仕切るMMAを導入するアプローチ、の二つが考えられる。いずれのアプローチにおいても、エージェントの設計は、予測証券の設計に依存する。例えば、MMAの場合、予測証券がFIPSであれば、LMSRをそのまま適用することができる。前田[17]は、SIPSを取り扱えるように、LMSRを拡張している。また、区間幅1の細かな大量のFIPSをLMSRで売買するシステムを背後に用意しておき、市場参加者側からはVIPSに見えるようなシステムも提案されている[19]。ただし、これでは少人数市場の場合は価格分布の不連続性が強調されてしまうので、筆者らは、連続的な価格密度分布を前提としたVIPSのためのMMAを用いている[20]。

LMSRは基本的には連続決済方式のMMAであるが、社内予測市場では、バッチ決済方式のMMAが求められることも多い。しかしながら、バッチ決済方式では、(A)ある予測区間の証券を大量に購入（空売り）し、当該区間の価格を上昇（下落）させた後、それらをすぐに売却（買戻し）することで差益を得る、(B)所望の区間とは異なる区間をまず大量に購入（空売り）し、所望の区間の価格を下落（上昇）させた後、その区間を安値で購入（高値で空売り）する、などと

いった、MMAの「裏をかく」売買行動が入り込む余地（裁定機会）が生じやすい。また、少人数での市場運営では、これらの裁定機会が明白になりやすい。したがって、バッチ決済方式のMMAを考える際には、これらへの対処がポイントとなる[21]。筆者らのVIPSのためのMMAでは、予測証券の簿価という概念を導入し、感度を多少犠牲にして、これらの防止を試みている[20]。

DA方式ではバッチ決済の実現は容易なので、バッチ決済が好ましい場合は、DA方式の予測市場に流動性補充エージェントを追加するのも一つの方法である。また、認知負荷の点では、証券市場を正確に模擬することは必ずしも得策ではない。市場らしくない予測市場を目指すのもまた一つの方法であるといえる。例えば、参加者がそれぞれ予測区間を投票し合うような需要予測のアプローチも提案されている[22]。このように、予測市場技術を企業の需要予測問題に適用するためのアプローチには唯一の解があるわけではなく、様々なバリエーションが可能であり、今後の展開が期待される。

5. おわりに

本稿では、企業における需要予測への応用という観点から、予測市場技術の概要、応用事例、研究開発の現状などについて紹介してきた。今回は、主に、ある企業・組織に閉じた適用を想定してきたが、複数の企業・組織にまたがった予測市場や、一般公開型の予測市場にもそれぞれ利用価値がある。例えば、Guoら[23]は、サプライチェーンのパートナー企業間で需要予測のための予測市場を運用することの有効性を論じている。また、予測市場自体は、需要予測だけではなく、企業内の様々な予測問題、さらには、アイデア評価や合意形成に至るまで、多くの面で期待されている技術である。予測市場技術の研究開発は欧米が先行している感があるが、最近では、我が国でも予測市場についての研究開発が活発化してきている[24][25]。産業応用もまだまだ始まったばかりで、今後の展開が期待される技術である。本稿が本技術への関心につながり、様々な研究開発の端緒を開く一つのきっかけになれば幸いである。

参考文献

- [1] J. Surowiecki, *The Wisdom of Crowds*, Doubleday, 2004.

- [2] C. R. Plott, "Markets as Information Gathering Tools," *Southern Economic Journal*, 67, 1-15, 2000.
- [3] J. Wolfers and E. Zitzewitz, "Prediction Markets," *Journal of Economic Perspectives*, 18, 107-126, 2004.
- [4] <http://www.biz.uiowa.edu/iem/>
- [5] R. Forsythe, F. Nelson, G. R. Neumann and J. Wright, "Anatomy of an Experimental Political Stock Market," *The American Economic Review*, 82, 1142-1161, 1992.
- [6] R. Forsythe, T. A. Rietz and T. W. Ross, "Wishes, Expectations and Actions: A Survey on Price Formation in Election Stock Markets," *Journal of Economic Behavior & Organization*, 39, 83-110, 1999.
- [7] J. E. Breg, F. D. Nelson and T. A. Rietz, "Prediction Market Accuracy in the Long Run," *International Journal of Forecasting*, 24, 283-298, 2008.
- [8] R. Hanson, "Combinatorial Information Market Design," *Information Systems Frontiers*, 5, 107-119, 2003.
- [9] E. Servan-Schreiber, J. Wolfers, D. M. Pennock and B. Galebach, "Prediction Markets: Does Money Matter?," *Electronic Markets*, 14, 243-251, 2004.
- [10] D. M. Pennock, S. Lawrence, C. L. Giles and F. A. Nielsen, "The Real Power of Artificial Markets," *Science*, 291, 987-988, 2001.
- [11] G. Ortner, "Forecasting Markets—An Industrial Application Part I," *A Working Paper in Department of Managerial Economics and Industrial Organization at TU Vienna*, 1997.
- [12] G. Ortner, "Forecasting Markets—An Industrial Application Part II," *A Working Paper in Department of Managerial Economics and Industrial Organization at TU Vienna*, 1998.
- [13] K. Y. Chen and C. R. Plott, "Information Aggregation Mechanisms: Concept, Design and Implementation for a Sales Forecasting Problem," *California Institute of Technology. Social Science Working Paper*, #1131, 2002.
- [14] S. Gjerstad, "Risk Aversion, Beliefs, and Prediction Market Equilibrium," *A Working Paper in ESL at University of Arizona*, 2004.
- [15] J. Wolfers and E. Zitzewitz, "Interpreting Prediction Market Prices as Probabilities," *National Bureau of Economic Research Working Paper*, #12200, 2006.
- [16] Y. Maeda and H. Mizuyama, "A Prediction Market System for Demand Forecasting with Division and Merger of Fixed-Interval Prediction Securities," *The 3rd World Conference on Production and Operations Management*, 2008.
- [17] 前田悠図, 「予測区間の自律的調整機能を備えた需要予測のための予測市場システム」, 京都大学工学研究科機械理工学専攻修士論文, 2010.
- [18] 水山元, 鎌田瑛介, 「予測市場システムに基づく衆知集約型需要予測法の研究」, 日本経営工学会論文誌, 59, 330-341, 2008.
- [19] S. Goel, D. Pennock, D. Reeves and C. Yu, "Yoopick: A Combinatorial Sports Prediction Market," *The 23rd AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 1880-1881, 2008.
- [20] 水山元, 「可変区間型予測証券を用いた衆知集約型需要予測法のための間欠更新マーケットメーカー」, 精密工学会誌, 掲載予定.
- [21] H. Mizuyama, M. Ueda, K. Asada and Y. Tagaya, "Experimental Testing of Prediction Market System using VIPS, Gaussian Price Density and a Weighted-Average-Type Market Maker," *Journal of Japan Industrial Management Association*, to appear.
- [22] 岡村秀一郎, 勅使河原元, 「投票方式による数値範囲指定予測の実証実験結果」, 日本経営工学会「予測市場と集合知活用」研究部会第2回会合資料, 2009.
- [23] Z. Guo, F. Fang and A. B. Whinston, "Supply Chain Information Sharing in a Macro Prediction Market," *Decision Support Systems*, 42, 1944-1958, 2006.
- [24] 佐藤哲也, 「予測市場による雰囲気計測」, 日本経営工学会「予測市場と集合知活用」研究部会第1回会合資料, 2009.
- [25] 山口浩, 「予測市場と集合知メカニズムの現状と展望」, 日本経営工学会「予測市場と集合知活用」研究部会第2回会合資料, 2009.