

Nextcom

特集 行動経済学と 行動ファイナンスに 関する論考



Feature Papers

論文

ビッグデータとAIによる 行動ファイナンス研究の新段階

岡田 克彦 関西学院大学 大学院 経営戦略研究科 教授
／株式会社 Magne-Max Capital Management CEO/CIO

Articles

5年後の未来を探せ

好田 誠 東北大学大学院准教授に聞く スピントロニクスが起こす コンピューターの飛躍的發展

船木 春仁 ジャーナリスト

論文

行動経済学が政策手段を豊かにする ——アーキテクチャと規範を政策に生かす——

久米 功一 東洋大学 経済学部 准教授

特別論文

米国のインセンティブオークション

山條 朋子 株式会社KDDI総合研究所 シニアアナリスト

明日の言葉

人間の合理性には限界がある
……ハーバート・A・サイモン

サイモンの「限定合理性 (bounded rationality)」という考え方は、合理的な行動を取るという人間像を前提にしていた経済学に大きな影響を与え、行動経済学の出発点となった。

Nextcom ネクストコム

特集

行動経済学と 行動ファイナンスに 関する論考

- 2 | すでに始まってしまった未来について
消えた店、残った店
平野 啓一郎 作家

- 4 | 論文
ビッグデータとAIによる
行動ファイナンス研究の新段階
岡田 克彦 関西学院大学 大学院 経営戦略研究科 教授
／株式会社 Magne-Max Capital Management CEO/CIO

- 14 | 論文
行動経済学が政策手段を豊かにする
——アーキテクチャと規範を政策に生かす——
久米 功一 東洋大学 経済学部 准教授

- 24 | 特別論文
米国のインセンティブオークション
山條 朋子 株式会社 KDDI 総合研究所 シニアアナリスト

- 34 | 5年後の未来を探せ
好田 誠 東北大学大学院准教授に聞く
スピントロニクスが起こす
コンピューターの飛躍的發展
船木 春仁 ジャーナリスト

- 40 | お知らせ
「Nextcom」論文公募のお知らせ
2018年度 著書出版・海外学会等参加助成に関するお知らせ

- 42 | 情報伝達・解体新書
自然環境に潜む情報を昆虫から探る
神崎 亮平 東京大学 先端科学技術研究センター 所長／教授

- 44 | 明日の言葉
不合理でも大丈夫
高橋 秀実 ノンフィクション作家

すでに始まってしまった未来について—— ③⑤

文：平野啓一郎

絵：大坪紀久子

消えた店、
残った店

京都の景観問題は、いつも話題に上るが、象徴的な建物以外の街並みは、詳しく見ていると時の流れと共にそれなりに変化している。

昔話になるが、私は京大生の頃、左京区の北白川や一乗寺に住んでいて、そこでせっせと小説を書いていたので、今でも白川通のあの辺りに行くと何とも言えず懐かしい。

当時私がよく立ち寄った喫茶店やパン屋、スーパーなどが、四半世紀経った今でも営業している一方で、当然あるだろうと思っていた人気店が消えていたりする。閉店の理由は、必ずしも経営不振ばかりではないだろうが、やはり寂しさはある。

私が意外なのは、洋服のリフォームのチェーン店が今も残っていることだった。というのも、当時は、古い洋服を大事にリフォームして着続ける、という文化も、いずれは廃れるだろうと思っていたからだった。ファスト・ファッションの荒波は、まだ打ち寄せてはいなかったが、それでも新品を買った方が簡単だという感覚だった。

東京の今の私の自宅近くにも同様の店があり、見たところ繁盛している。実は、私自身も、ここ数年、頻繁に足を運ぶようになった。

理由は、やはりネットである。昨今では、通販で洋服を買う機会も増えたが、ズボンの裾上げなどで、新たに顧客となった人たちが少なからずいるようである。また、不況だけでなく、モード自体がかつてのように強力なトレンドを形成することが出来なくなり、ネット上には数年落ちの高級ブランドの服がいつまでも安価で残り続けている。そうすると、ムキになって流行を追う必要もなく、気に入った服を補修しながら大事に着続ける、という感覚も戻ってくる。メルカリのような中古市場も活性化している。

更に、ウェブサイトを通じて、近隣住民だけでなく、全国の顧客を相手に出来るようになった。どんな仕事が将来の時代のニーズに応えるかというのは、なかなか複雑である。

Keiichiro Hirano

小説家。1975年生まれ。1999年京都大学在学中に『日蝕』により芥川賞を受賞。

以後、『葬送』、『ドーン』、『かたちだけの愛』、『空白を満たしなさい』、

『私とは何か—「個人」から「分人」へ』、『透明な迷宮』、

『生命力』の行方—変わりゆく世界と分人主義』、『マチネの終わりに』など、数々の作品を発表。

最新刊は『自由のこれから』（ベスト新書）。

特集 行動経済学と 行動ファイナンスに 関する論考

2002年のノーベル経済学賞は、
行動経済学という新分野を拓いた功績をたたえて、
ダニエル・カーネマンとバーノン・スミスに授与された。
以来、脚光を浴びるようになった
行動経済学・行動ファイナンスについて論じる。

行動経済学と 行動ファイナンスに 関する論考 1

ビッグデータとAIによる 行動ファイナンス研究の新段階

■ 関西学院大学 大学院 経営戦略研究科 教授／株式会社 Magne-Max Capital Management CEO/CIO

岡田 克彦 Katsuhiko Okada

21世紀になって三つのノーベル経済学賞を受賞した行動経済学・行動ファイナンスであるが、この新しい知見に基づいた資産運用などの実務的応用という点において、これまでほとんど確立したものはない。これは、同じく90年代にノーベル賞を受賞した資本資産評価モデル (CAPM) やオプション評価理論とは対照的である。80～90年代に登場した新理論は、ファンド評価や恐怖指数 (VIX) 算出など広範囲に実務的応用が浸透しているが、行動ファイナンスの知見がシステマティックに金融実務に応用されている例は少ない。投資家のバイアスや心理的要素が資産価格をゆがめているという考え方は、事後的な解釈としては成立するが、資産価格のゆがみを予見することはできず、運用におけるシステマティックな貢献があるわけではない。そこで、本稿ではAIを用いた行動ファイナンスの実務的応用について考察する。

キーワード

AI 行動ファイナンス 株式市場 Asset Pricing Model (資産評価モデル)

1. はじめに

行動ファイナンスと呼ばれる分野に光が当たるようになり、かれこれ20年近くが経過した。2002年に実験心理学者であった Daniel Kahneman がノーベル経済学賞を受賞してから、これまで亜流とされていた行動ファイナンスに光が当たるようになったのである。伝統的ファイナンスと行動ファイナンスの差異を一言で言うと、資産価格の決まるメカニズムをどう考える

かという視点の相違である。行動ファイナンスでは、資産価格は人間心理によってシステマティックにゆがめられながら、決定されていると考え、伝統的ファイナンスでは、資産価格はそのリスクに応じて決まり、リスクの高い資産には安い価格が、リスクの低い資産には高い価格が形成されると考える。私はこの概念を学生に説明する際、以下のような実験をする。

今、3本のくじから1本を引くというくじ引きゲームを考える。くじの先端には赤、白、黒の色が塗られ

ているとしよう。くじを引く側にはもちろん先端は見えない。さて、このくじ引きゲームであるが、それぞれ賞金が付いてくる。ゲーム A では、赤のくじには100万円、白のくじには50万円、黒のくじには賞金ゼロである。ゲーム B では、赤くじ：70万円、白くじ：50万円、黒くじ：30万円。ゲーム C では、赤くじ、白くじ、黒くじとも50万円である（図表1）。

さて、80人の学生に対して、このようなペイオフを持つくじ引きゲームにいくらの参加費を払って参加するかを尋ねてみた。すると、ゲーム A については平均で約10万円、ゲーム B については平均で約35万円、ゲーム C について平均で約49万円という回答を得た。学生たちは、ゲーム A、ゲーム B、ゲーム C のそれぞれの不確実性（リスク）に対して、金融市場と同じような評価をしたことになる。期待ペイオフは全てのゲームで50万円と等しく、学生たちの期待リターンを計算すると、最もリスクの高いゲーム A については400% $\{(期待ペイオフ 50万円) \div (参加費 10万円) - 1\}$ のリターンを求めたこととなる。同様にゲーム B については期待リターン 43%、ゲーム C は期待リターン 2% となる。リスクの順番は A>B>C であり、期待リターンの順番は A>B>C であるから、ハイリスクにはハイリターンを求める我々人間の行動原理が明白に示されている。

このように伝統的ファイナンス研究のパラダイムでは、金融市場では高いリスクの見返りとしてのみ高いリターンが存在するのである。従って、観察される金融資産のリターンはリスクの関数となっているはずであり、リスクの関数で説明できない資産価格の変動はノイズであり、期待値ゼロで分散だけ持つのである。

一方、行動ファイナンスの研究者は、人間には認知バイアスがあるため、客観的なリスクの定量化でリターンの説明はできないと主張する。例えば、次のような確率計算の例でそれは示すことができる。これも私が学生に対して行う実験であるが、以下のような質問を投げ掛ける。

あなたの隣家には二人の子供がいる。どちらか片方が女の子だということは分かっている。さて、もう一人の子供は以下のうちどれか。

- ①女の子である確率が高い。
- ②男の子である確率が高い。
- ③どちらも同じである。

さて、読者の皆さんはどうお感じになるだろうか。この質問を投げ掛けると、ほとんどの学生は③と回答するが、しっかりと確率計算を行うと②であることが分かる。なぜなら、2人の子供というから、可能な組み合わせを全列挙すると、「女・女」「男・女」「女・

図表1 くじ引きゲームのペイオフ

	ゲーム A	ゲーム B	ゲーム C
赤くじ (1/3)	100万円	70万円	50万円
白くじ (1/3)	50万円	50万円	50万円
黒くじ (1/3)	0万円	30万円	50万円

男」「男・男」の四つしかない。この中で、「男・男」の組み合わせは、「片方が女の子」という情報で消去できる。従って残る三つのパターンの中では、男の子である可能性が2/3、女の子である可能性が1/3となる。ただ、私たちは直感的に1/2と感じてしまう。つまり、確率計算が直感に支配されてしまうのである。

理論的には、株式価値は当該企業の期待将来キャッシュ・フローの現在価値だと定義される。投資家は確率分布している未来のキャッシュ・フローの値を計算しながら、現在の株価を決めているわけである。伝統的ファイナンスでは、入手可能な全ての情報は株価に反映されていると考えるが、果たして客観的に確率計算できない人間が株価を正しく評価できるのだろうか。むしろ、直感で判断する人間が形成している市場で観察される株価は、認知バイアスを反映し、価格はしばしば間違っていると考える方が自然ではないだろうか。価格が間違っている状態にあるのかどうかを、行動ファイナンスの知見に基づいて正確に判断できるようになれば、行動ファイナンスの金融実務における応用は実現するだろう。

2. 資産評価モデルの歴史

ファイナンス研究の重要な関心は、リスクのある資産価格をどう評価するかという点にある。これまでの研究を概観すると、あるパターンが浮かび上がる。最

初に仮説を立て、資産価格の変動要因についてのデータを収集し、帰無仮説を棄却しながら自らの仮説の正しさ、新しいリスクファクターの存在を証明するという一連の流れである。ここで用いられる方法論は統計学である。例えば、投資家が取ったリスクの見返りとして株式のリターンが得られ、その全てのデータが観察されるとしよう。世界の上場株式だけでも数万という種類があり、時々刻々と数万行のベクトル X （独立変数）の入力に対して、マーケットから Y （従属変数）という反応が吐き出されていると考えることができる。投資家はベクトル X を観察して Y という結果を出しているわけであるから、この X が何かを突き止めようとしているということである。

伝統的ファイナンス研究は、応用ミクロ経済学の側面を色濃く持ち、厳密な仮定を置きながら合理的な投資家の選択行動のあるべき理論、規範理論を考えた。その中の一つで、最も実務界で応用されているものが資本資産評価モデル (CAPM) である。CAPM はいくつかの前提条件の下に、理論的に β (ベータ) と各資産価格の期待リターンには線形の関係があることを証明した。従って、この理論モデルの検証には線形回帰を用いる。

CAPM が示唆するとおりの資産価格形成がなされているかどうかを検証することは易しい。観察される過去データから β を推定し、結果として平均リターンと β の関係性が線形関係にあるかどうかを確認すれば

図表2 資産評価モデルの検証



いいからである。多くの実証研究の結果、株式の平均リターンは β との線形の関係を示す証券市場線上から外れていることが分かってきた。規範理論に合致しないこうした現象をアノマリーと呼んでいる。ただ、実証研究の限界を指摘しながら数学的に美しい規範理論であるCAPMを守ろうとする研究者もいる。例えば、真の β は時系列に変動するものであり、観察できないというのもその一つである。過去のデータから β を推定、それと平均リターンの関係が規範理論どおりとなっていないのは、真の β は時系列に変動しており、推定値が誤りだというのだ。別の研究者は、通常の状態ではノイズが多く真の β は観察できないが、市場が真にリスクを考えているときには、CAPM理論どおりだと主張する。例えば、Savor and Wilson (2014)では、通常はほとんどフラットな証券市場線しか観察されないが、FOMC（連邦公開市場委員会）の発表前後では右肩上がりの証券市場線が観察され、CAPMが成立していると報告している。これらの事例が示唆するように、伝統的ファイナンスの枠組みを堅持する考え方も根強い。

これに対して行動ファイナンスでは、機械ではなく生身の人間が形成している金融市場の現実が、規範理論どおりとならないのは当然だ、との立場である。これは理論を導くために設定されたさまざまな前提条件が誤りだという指摘で、簡潔に言えば、「投資家の合理性」という前提が誤りだというのである。こうしたbehavioralな視点でCAPMの実証結果を見た場合、そもそもの依拠するところが誤っているのだから、実証結果がついてくるはずがないという解釈になる。

その後、資産評価モデル研究の中心は、期待リターンを説明するリスクファクターを、統計的手法を用いて探索する方向へと力点を移していく。こうした流れの起点になったのがFama and French (1993)の研究である。彼らはCAPMの β に加えて企業規模基準(SMB)とバリュー株基準(HML)を加味することで、 β だけで説明しようとしたときと比較すると、ずっ

とうまく平均リターンを説明できることを実証した。図表2のベクトルXに β だけでなく、新たに加えた計三つのリスクファクターで、Yを予測するモデル、Fama-FrenchのThree Factor Modelを提唱したわけである。このモデルは、その後の実証研究のスタンダードとなっていく。

3. 資産評価研究の転換とAI活用の可能性

Fama-FrenchのThree Factor ModelはCAPMの理論的アプローチとは全く異なる発想の資産評価モデルである。少し意地悪な言い方をすれば、期待リターンはリスクの関数であり、理論から導かれた β だけでは不十分なので、「規模」と「時価簿価比率」というリスクファクターを経験的に探索し、線形結合したモデルとして表現しただけである。確かに、企業規模が小さければリスクが高く、成長性に乏しければリスクが高いというのは直感と整合的である。しかし、規模と時価簿価比率は全株式のリターンをこれら二つのファクターを基準としてソートしたポートフォリオ間にはっきりとした違いが認められることから、リスクファクターとして扱っているにすぎない、いわば経験的なリスク指標である。また、期待リターンを三つのファクターの線形結合として表現しているが、規模と時価簿価比率と線形の関係にあることは理論的には示されていない。あくまでも経験的なのである。

ここに研究の流れの大きな転換が見られる。理論モデルありきから、現象を説明するモデルが模索されることになったのである。このアプローチはその後多くの研究者に採用され、Three Factor Modelでは説明できない期待リターンの説明要因の探索が行われるようになる。最近ではFama-Frenchも当初はリスクファクターというより企業属性(Quality Factor)だと批判されていた「投資(investment)」と「利益率(profitability)」のファクターを加えたFama-French Five Factor Model (Fama and French (2015))を提

唱している。

筆者はこの流れの中であって、既に統計学的手法にこだわる必要は無くなっているのではないかと考える。図表3に示すように、理論モデルから線形の関係が明らかになっている場合は、線形回帰の検証を行うのは合理的であるが、とにかく Y を説明することが重要だという視点に立てば、方法論にこだわる必要はない。多くの説明変数を X に投げ込んで、LASSO（正則化項）で変数選択をさせてもよいわけである。もっと言えば、線形関係さえも前提にする必要はなく、ニューラルネットワークで複雑な関数を学習しても構わないのではないだろうか。新しいファクターを探索するという意味では、統計学的手法にこだわる必要は全くないのである。例えば、行動ファイナンス的ファクターである、「投資家の気分」というような特徴量が株価リターンを決めているのであれば、それが資産価格とどのような関係になっているかは誰にも分から

ないのであるから、機械学習的アプローチで複雑な関数を探索すればよいのである。

4. 実務的応用に向けて

4-1 大量のファクター時代に

資産価格は完全にリスクの関数になっているわけではないが、ケインズの美人投票で決まっているわけでもない。多くの要因が絡み合って決定されていると想像されるが、その中身は複雑であり、多くのファクターはその一断面を捉えているにすぎない。ファイナンス研究者の多くは Fama-French (1993) 以降、Cross sectional な predictor を探索してきた。Carhart (1997) は規模や時価簿価比率に加えて過去の収益率（モーメンタム）が predictor になっていることを明らかにした。1997年以降は、米国の Asset Pricing Model による検証は Fama-French の Three Factor

図表3 統計学とAIの違い



Modelにモーメントファクターを加えたCarhartのFour Factor Modelを用いることがスタンダードとなった。その後も新しいファクター発見の報告は続く。いわゆる一流金融経済雑誌に掲載された、あるいは、される見込みがある論文が発見したファクターの数も年々増加している。この状況をHarvey et al. (2016)が調査した結果、累計で240を超えるという。図表4に示すのは、1962年から2012年までの期間に新たに発見されたCross sectional predictorの数である。

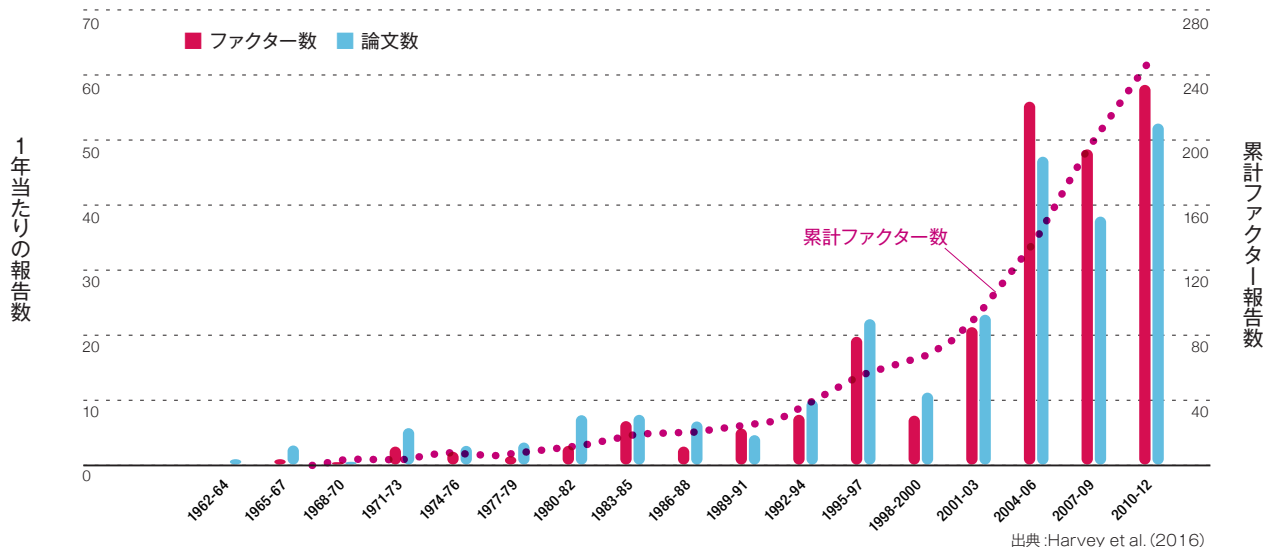
このような多くのファクターは同時に資産価格に影響を与えているものではないが、明らかに既存のリスクファクターでは捉えられていない資産評価の側面を捕捉していると考えられる。

4-2 次元の呪い (Curse of Dimensionality)

Fama-French (1993)の新しいファクターの検証は、

ポートフォリオソートという方法を使っている。規模と時価簿価比率で全上場銘柄を5分位×5分位、計25分位のポートフォリオを作成し、それぞれのポートフォリオにおける平均リターンを計算するのである。その結果、規模が大きくなればなるほど平均リターンは低下し、時価簿価比率が高くなればなるほど平均リターンは低下することが確認できる。しかし、ファクターの数が増えれば増えるほどポートフォリオソートで対応することはできなくなる。ファクターが一つ、ないし二つであれば問題ないが、五つのファクターを5分位に分けて同時に検証しようとする、 $5^5=3,125$ 通りのポートフォリオを作成する必要があり、該当分位に十分に分散された銘柄数を確保できないという状態に陥る。いわゆる次元の呪い (Curse of Dimensionality) に直面するのである。従って新しいファクターの確認は、以下の手順で行われる。まず、新たに発見されたファクターでポートフォリオを構築

図表4 上位学術誌に掲載された(される可能性の高い)新しいファクター数の推移

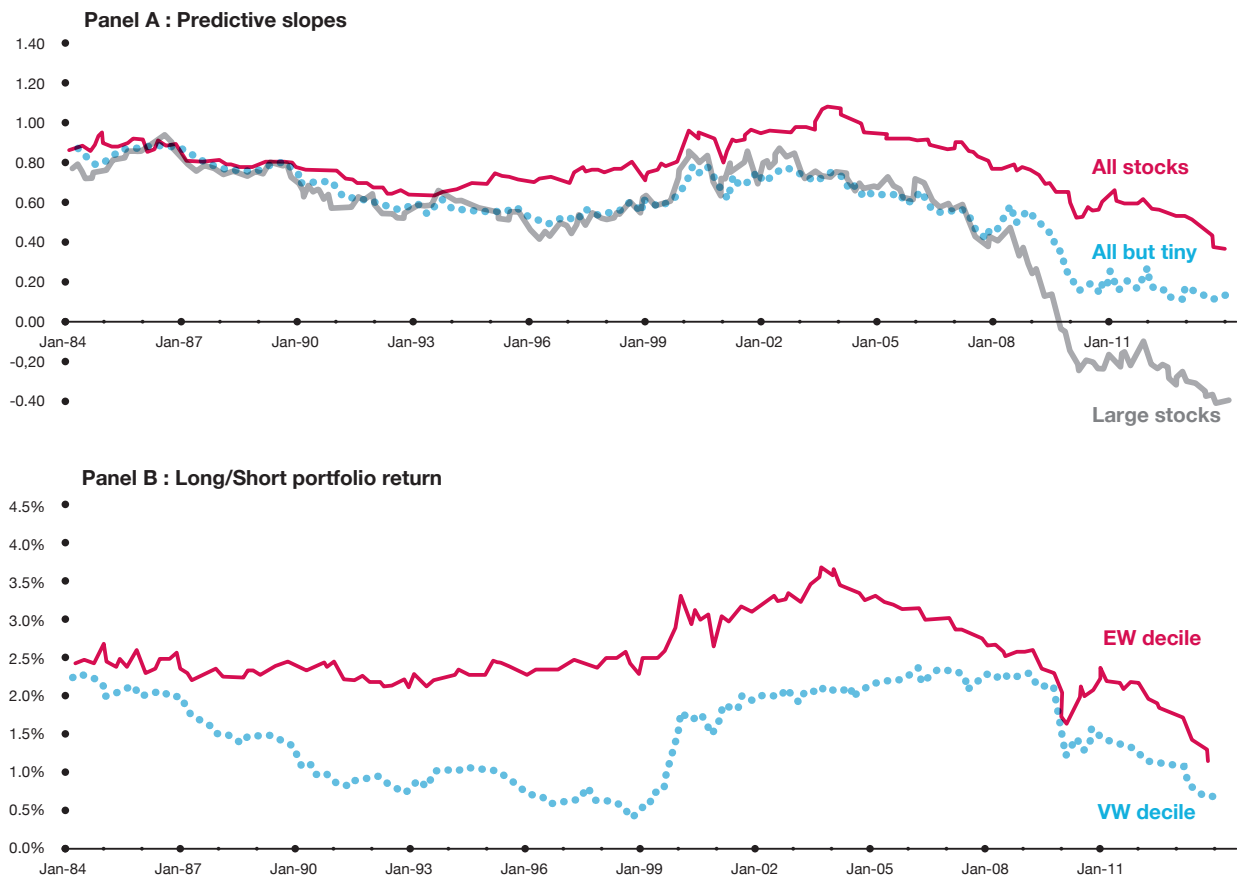


し、ファクターベースのソーティングを行い、ファクターの強弱によって5分位に並べる。次に、第1分位の買い持ち (Long) と第5分位の空売り (Short) の組み合わせである Long/Short ポートフォリオのリターンを時系列観察する、という手法を取る。こうしたポートフォリオが規模と時価簿価比率をコントロールした Fama-French Three Factor Model あるいは Carhart Four Factor Model で回帰したときに、有意な α (アルファ) を示せば新たなファクターの誕生となるので

ある。

新しいファクターが240を超える現状を考えるに、資産運用者の立場で最も気になるところは、果たしてそれらのファクターは真に Cross sectional predictor になっているのかどうかという点である。仮に全てのファクターが Cross sectional predictor になっているのであれば、一体どのファクターに重みを持たせたポートフォリオを組むのが最も α を獲得できるのだろうか。長期的に α は獲得できるのかもしれないが、

図表5 Cross sectional predictorの予測能力の時系列推移



出典: Lewellen (2015)

time variant な predictor であれば、資産運用に応用できないのではないか。こうした疑問に答えるのが、Lewellen (2015)である。

Lewellen (2015)は、時価簿価比率や会計発生高などの企業属性が期待リターンの形成に関係していることは事後的には指摘されたが、果たしてリアルタイムでそうした属性が予測力を持っているかどうかに着眼した。彼は手法として Fama-MacBeth 回帰を援用し、過去の企業属性に基づく期待リターンの推定が out of sample 検証でどのくらい実現するかを調査したのである。仮に過去データを用いたファクターモデルが完全に機能しているのであれば、次年度 (out of sample) 以降の期間に実現したリターンを被説明変数、本年度のファクターを用いて予測するリターンを説明変数とする場合の回帰係数は1となるはずである。もし、過去データから推定される期待リターンにノイズが乗っている場合や、あるいはファクターの効果が時系列変動するのであれば、回帰係数は1から乖離するだろう。

検証の結果は図表5のとおりである。ここでは規模、時価簿価比率、モーメンタム、ROA (総資産利益率)、配当利回り、会計発生高、 β 、新株発行、負債、売り上げ、出来高、成長率などの15のファクターを考慮したモデルの結果を示している。投資家は t 時点の情報に依拠して投資ポートフォリオを作り、 $t+1$ のリターンを予測する。そこで、Fama-MacBeth (1973) の手法に準拠し、過去10年間のデータで、15のファクターの重みを推定する。その推定値を用いて、将来のリターンを予測する。予想された月次リターンを説明変数、実現月次リターンを被説明変数として1年間のデータを用いて線形回帰し、その傾きを観察するのである。10年のローリングウィンドウ方式で時系列に移動させるため、データは1974年から使っているが、図表5では1984年が起点となっている。

Panel A では傾きの時系列推移を以下の三つのユニバース別に示している。全上場銘柄で検証した“All

stocks”、NYSE (ニューヨーク証券取引所)の時価総額下位20%を除いて検証した“All but tiny”、また、NYSE の時価総額の中央値以上の“Large stocks”である。全体を概観すると、ファクター効果は時系列の変動を繰り返していることが分かる。とりわけ、金融危機時には“Large stocks”のユニバースで、ファクターモデルの予想と反対の結果が出ている。この中身を見ると、大型株においてモーメンタムファクターが強く負の効果をもたらしているのが大きな原因と考えられる。金融危機時には、過去の winner を購入すると大きく売り込まれ、過去の loser のパフォーマンスが相対的に高いという、これまでとは真反対の状況になったのだ。全体に傾きは小さくなる傾向にあるが、1990年代中ごろにも同様の傾向が見られてから、また拡大しているので、一定の傾向を示しているとは言い難い。

Panel B はファクターモデルが予測する期待リターンに基づき、期待リターンの高い10%を買い持ち (Long) し、低い10%を空売り (Short) するという Long/Short portfolio を構築した場合の実現リターンを示している。単純平均 (EW) と時価総額加重平均 (VW) の双方とも正のリターンを示すが、差異は金融危機時に小さくなり、これまでのファクターに依存したポートフォリオ構築に不安を投げ掛ける結果となっている。

4-3 LASSO による変数選択

2011年の AFA (American Finance Association) の会長講演で John Cochrane はこのように述べている。「現在の Asset Pricing Model の研究分野には新たなファクターが動物園のようにあふれ返っている。このような状況に対処するために我々には新しい方法論が必要だ」。数多くのファクターの中で、どのファクターが追加的説明力を持つのかを特定する手法として、線形回帰の手法では対処しきれない状況になってきているからである。図表5の検証結果からも分かるように、ファクターの効果について短期的な予測は不

可能である。運用者の立場から考えると、長期の期待値としてはプラスであっても、単年度で大きな損失を出す可能性が大きいファクターに過度に依拠してポートフォリオを組成することはリスクである。例えば、モーメンタムファクターは金融危機前までは非常にロバストであったが、このファクターに過度に依拠したポートフォリオで臨めば、金融危機後には大きな損失を抱えることになる。ここに、どのファクターにも過度には依存せず、高い期待リターンを達成したいという切実な実務的ニーズが存在する。

こうしたニーズに応えるには、現在のファイナンス研究の主流である分位ポートフォリオの作成による検証方法は大きく三つの問題をはらんでいるといえよう。第一に、先に述べたとおり、同時に考慮できるファクター数に限界があること。第二に、分位間の他のファクターの影響が常に観察できるわけではないということである。仮に規模で5分位に分け、小型株に属する企業間にのみ時価簿価比率による平均リターンの差異が認められたら、時価簿価比率はファクターとして無視すべきだろうか。小型株だけにバリュー効果が見られる場合はどう扱うのが難しいという点。第三に、期待リターンは時系列に一定だとの前提で分位ポートフォリオを作成するが、時系列に変動している場合、分位ポートフォリオによる検証は機能しない点。そこで、実務的ニーズに応える一つの方向性として、最小二乗法 (OLS) で考えるのではなく、非線形の推定を行った場合にどのような結果になるかを検証したのが、Freyberger et al. (2017) である。彼らは変数選択の手法として、Huang et al. (2010) の推奨している adaptive group LASSO という手法を用いて、ファクター選択をし、非線形の推定を行った。その結果、線形で推定するよりもノンパラメトリックな LASSO 推定に基づいてポートフォリオを構築した方が良い結果が出ることを発見した。具体的には、1963年から1990年までのデータで LASSO を用いて全てのファクター（彼らは36のファクターを列挙）から変

数を選択させ、そのモデルを使って1991年から2014年までの out of sample 期間でテストしたのである。LASSO モデルが算出する最も期待リターンの高い第1分位と、低い第10分位の Long/Short ポートフォリオでテストした結果と線形モデルが算出する同様の Long/Short ポートフォリオのパフォーマンスを比較したところ、LASSO モデルは1.24のシャープ・レシオに対して線形モデルは1.01であった。LASSO モデルを用いて、どの程度ファクターの time variation を予測できるかについては、はっきりした証拠は提示されていないが、機械学習的アプローチの有効性を実証したといえるだろう。

機械学習の要は訓練誤差とテスト誤差の差異をどう縮めていくかにある。トレーニングデータで良い結果が出たとしても、それは過学習の危険性を含んでおり、out of sample 期間において大きく外すリスクを抱える。Freyberger et al. (2017) の結果は、この懸念をある程度払拭するものであり、機械学習のアプローチが実務的課題を解決する有効な手段となり得ることを示している。

5. 結論

これまでファイナンス領域の研究者は、市場の効率性 (EMH) や人間の合理的意思決定に対する信念によって、二つに分かれていた。しかし、今後はそのような宗教論争に終止符が打たれることになるだろう。その契機となるのが、ビッグデータと AI の普及である。行動ファイナンス理論を実証する際に壁となるのはデータの収集である。投資家の気分や文脈によって資産価格が決まっているという視点で分析するためには、投資家心理の代理変数が必要となる。投資家数は多く、属性も幅広いので、多種多様なビッグデータを AI で解析することによってのみ精度の高い代理変数を作ることが可能なのである。こうした取り組みを通じて、人間投資家が資産価格にどのような影響を与え

るのが明らかにされていくことだろう。

これまで概観してきたように、従来型資産価格評価モデルのアプローチは限界に達している。これまで発見されたファクターを機械学習で選択するという最新研究の方向性は、従来アプローチの限界から生まれたものであるが、今後は、より多くのデータを活用する方向性に拡張していくことは間違いない。既に、グーグルの検索量を使った Search Volume Index を活用した研究も存在する。また、企業のホームページへのアクセス数を使って、IPO（新規公開株）の初期収益率を予測するモデルも報告されている。取引関係の情報を使い、情報伝播速度の差異を利用して高い投資収益率を達成する可能性も指摘されている。新たなデータ群が、人間心理の変動を定量的に捉えることを可能にし、行動ファイナンスが真に金融実務に大きな影響を与える時代が来ようとしている。



Katsuhiko Okada

岡田 克彦

関西学院大学 大学院 経営戦略研究科
教授／株式会社 Magne-Max Capital
Management CEO/CIO
モルガン・スタンレーのニューヨーク
と東京でトレーダー、UBS証券東京
FVP、シンガポールのヘッジファンド
Halberdier Capital社の共同創業者。
2011年、(株) Magne-Max Capital
Management社を創業、現在CEO/
CIO兼務。同社は2015年にYahoo!
Japanのグループ企業となり、大阪
大学、名古屋大学、関西学院大学、国
立情報学研究所(NII)の研究者とともに
共同研究を常時実施。そこで得られ
た研究知見に基づいてAIファンドを運
営。現在、行動経済学会会長、『行動
経済学』編集長、公認会計士二次試験
委員。近著に『ヤフーのビッグデータ
とAIが教える21世紀の投資戦略』（講
談社）。

参考文献

- Bouman, B and Jacobsen, S, 2002, The Halloween indicator, 'Sell in May and Go Away': Another Puzzle, *American Economic Review*, 92, 1618-1635.
- Breiman, L., 2001, Statistical modeling: The two cultures, *Statistical Science* 16, 3, 199-231.
- Carhart, M., 1997, On Persistence in Mutual Fund Performance, *Journal of Finance* 52, 57-82.
- Cochrane, J., 2011, Presidential address: Discount rates, *Journal of Finance* 66 (4), 1047-1108.
- Fama, E., and K. French, 1993, Common risk factors in the returns on stocks and bonds, *Journal of Financial Economics* 33, 3-56.
- Fama, E., and K. French, 1997, Industry costs of equity, *Journal of Financial Economics* 43, 153-193.
- Fama, E., and K. French, 2015, A five-factor asset pricing model, *Journal of Financial Economics* 116, 1-22.
- Fama, E. and J. MacBeth, 1973, Risk, return and equilibrium: Empirical tests, *Journal of Political Economy* 81, 607-636.
- Freyberger, A., A. Neuhierl and M. Weber, 2017, Nonparametric dissection of the cross section of expected stock returns, AFA Conference paper
- Harvey, C., Y. Liu and H. Zhu, 2016, ... and the cross-section of expected returns, *Review of Financial Studies* 29 (1), 5-68.
- Huang, J., J. Horowitz and F. Wei, 2010, Variable selection in nonparametric additive models, *Annals of Statistics* 38 (4), 2282-2313.
- Lewellen, J., 2015, The cross section of expected stock returns, *Critical Finance Review* 4 (1), 1-44.
- Savor, P. and M. Wilson, 2014, Asset pricing: A tale of two days, *Journal of Financial Economics* 113, 2, 171-201.

行動経済学と 行動ファイナンスに 関する論考 2

行動経済学が 政策手段を豊かにする ——アーキテクチャと規範を政策に生かす——

東洋大学 経済学部 准教授

久米 功一 Koichi Kume

法や市場メカニズムを使った政策は、人びとの合理性を前提とする。
しかし、ライフスタイルや価値観が多様化する中、政策の推進に向けて、
経済合理性だけに訴えることにも限界が出てきた。
行動経済学の特徴の一つは、人びとの選好の異質性を考慮して生かすことにある。
その応用として、合理性を前提としない政策手段としてのアーキテクチャと規範の活用が期待されている。

キーワード

選好 アーキテクチャ 規範 公共心 異質性

1. はじめに

経済学には、「人間は、自分の喜びのために生きており、一定の制約の下で、その喜びを最大化するように行動する」という人間観がある。こうした経済主体のある種の合理性を前提として、さまざまな制度・政策が提案されてきた。この人間観には、三つの特徴がある(多田2003)。それは、利用可能な情報を駆使して、自らの効用を最大化するような行動を選択する(超合理的)、一度決めた行動を将来においても覆さない(超自制的)、行動を決定する際に自分の利得のみ

を考える(超利己的)というものである。この「合理的人間」というベンチマークを通して現実を眺めることによって、人間の行動に関する相互理解を促し、合意形成を円滑にして、ひいては、社会の秩序や紐帯の醸成につなげてきた。

しかし、先進国では、経済成長の鈍化と少子高齢化に伴い、ライフスタイルや価値観の多様化が進んで、こうした合理性に一元的に訴えるだけでは、人びとの行動に変化を起こすことが難しくなってきた。より積極的に現実の人びとの多様な好みや、一面から見ると必ずしも合理的とは言えないような選択の自由さえも許容した政策を講じることが求められるようになって

た。このような人びとの選好の異質性を考慮した経済学が「行動経済学」である。本稿では、特に、人びとの合理性を前提としない政策手段としての「アーキテクチャ」と「規範」に着目して、行動経済学的なアプローチがもたらす政策のユニークさを示したい。

2. 政策手段の四つのモード

図表1を見てみよう。どちらも上海浦東国際空港のロビーチェアの写真である(大屋2012)¹⁾。両者の違いはお分かりだろうか。Aにはひじ掛けがなく、Bにはひじ掛けがある。国際空港では、乗り継ぎに時間がかかる。次のフライトまでの間、体を横にして休みたい人はAを選ぶだろう。しかし、皆が体を横たえてしまえば、座れない人も出てくる。できるだけ多くの人に座ってもらうにはBが望ましい。ひじ掛けのあるロビーチェアでは、きちんと座らざるを得ない。体を横たえたいならA、座りたいならBのロビーチェアを自ら選ぶようになる。ひじ掛けのある・なしが、人びとを特定の行動に導いているのである。

この「ひじ掛け」のように、「選択を禁じることも、インセンティブを損ねることもなく、人びとの行動を予測可能な形で変える選択アーキテクチャのあらゆる要素」のことを「ナッジ」という(Thaler and Sunstein 2003, 2009)。ナッジは、人間特有の認知パターンや

行動のクセに働きかける。そして、このような人を頻繁かつ反復的に誤らせる心理的機制(錯覚、バイアス、ヒューリスティックス)こそが、人の行動を強制なしに誘導するための梃子^{てこ}の役割を担い得るのであり、人間の体系的^{かびょう}可謬性を一種の能力ないし政策資源として見なしたところに、サンスティーンとセイラーが唱えたりバタリアン・パターンナリズムの独創性がある(那須2016)。

一般に、ある目的を遂行するための方針・手段は「政策」と呼ばれるが、Lessig (1998, 2008)によれば、政策手段には四つのモードがある。一つは、法である。ルールに従わなければ公権力により、これを罰するもので、刑事罰則の制定や警察力による取り締まりがこれに当たる。二つ目は、規範である。共同体的な価値観に照らし合わせて「望ましさ」を説いて「すべし」と命令する。三つ目は、市場であり、代替可能な財・サービスの価格を操作することで、経済的なインセンティブに訴えて、人びとの行動を変える。そして、最後に、アーキテクチャである。物理的に作られた環境であり、上述の「ひじ掛け」はこれに当たる²⁾。

伝統的な経済学は、市場機能を重視して、人びとの経済合理性を政策の前提に置いていた。しかし、それだけでは、異質な合理性を持つ人びとの厚生を高めるには十分とは言えないだけでなく、外部不経済の発生に対しても対処しなければならなくなっている³⁾。

図表1 上海浦東国際空港のロビーチェア



写真提供: Smart Travel Journal URL <https://www.smarttraveljournal.info>

これに対して、人びとの選好の異質性を想定して生かす行動経済学では、アーキテクチャや規範を用いた政策も提案する。つまり、人びとの好み(危険に対する好み、時間に対する好みなど)と行動特性との関係を踏まえた上で事態の改善を試みるのである。では、アーキテクチャや規範に着目すると、どのような政策が講じられるのか、その政策の可能性を具体的に見てみよう。

3. アーキテクチャを政策に生かす

不遇な状況にある人びとを助けるために、行動経済学的に何ができるだろうか。これを考えるためには、人びとの選好や行動特性と貧困の状況との関係を把握する必要がある。久米他(2013)は、日雇い派遣労働者⁴⁾を主たる対象として、彼らの相対的剥奪⁵⁾や社会的排除⁶⁾の状況と、彼らの選好や行動特性との関係を分析している。ここでは、貧困の状況として、基本ニーズの欠如、社会関係の欠如、制度からの排除、主観的貧困を取り上げる⁷⁾。

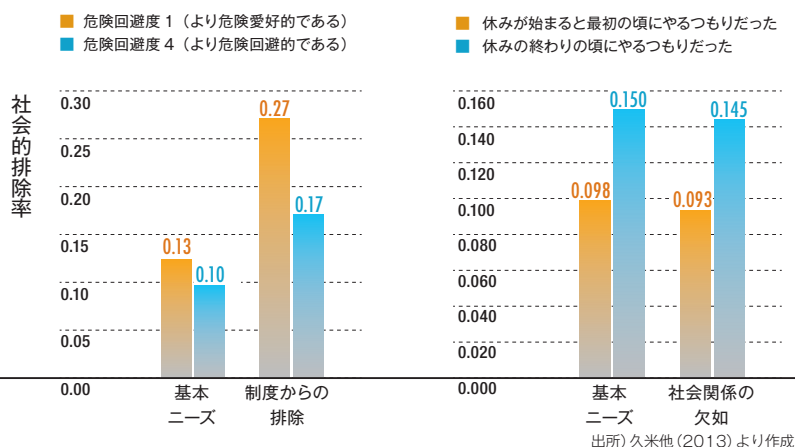
選好については、いわゆる経済選好と呼ばれる危険選好と時間選好に着目する。いずれも不確実性下にお

ける人間の意思決定を左右する重要なパラメータである。危険選好は、危険に対する好みであり、仮想的な質問から4段階の危険回避度の尺度を作成した⁸⁾。時間選好については、「夏休みの宿題にいつ取り組んだか」という設問⁹⁾と双曲割引¹⁰⁾(近い将来の異時点間選択における時間割引率が、遠い将来の異時点間選択に用いられる時間割引率よりも高い)を用いる。夏休みの宿題の設問は、宿題という苦痛を先送りすることで、現在に対する選好が高いことを意味する。

図表2左に危険選好と貧困/社会的排除指標の関係を示す。縦軸は社会的排除率(社会的排除の状態にある人の割合)を表す。危険愛好的な人は、社会的排除率が高いことが分かる。リスクを取らなければ高いリターンを得られない面はあるものの、この事例では、危険愛好的な人は、より深刻な貧困状態に陥りやすいことを示している。

次に、図表2右のとおり、時間選好と貧困/社会的排除指標の関係をみると、夏休みの宿題を先送りする人は、社会的排除率が高いことが分かる。近視眼的で、苦痛を先送りする態度が、貧困をより厳しいものになっている。また、図表は割愛するが、双曲割引の傾向がある人ほど、基本ニーズや主観的貧困において厳

図表2 危険選好(左)時間選好(右)と貧困の状況



しい状況にあった。

続いて、行動特性について、給与の支払い方法や頻度に注目してみよう(図表3)。給与の支払い方法が銀行振り込みの場合、手渡しに比べて、社会的排除率が低く、月払いの方が、日払いや週払いよりも、社会的排除率が低い。本人が意図するかしないかにかかわらず、報酬の支払われ方によって、社会的排除の程度が明確に異なることが分かる。

貧困から脱するためには、蓄財して将来の生活や予期しないリスクに備える必要がある。しかし、貧困状態に置かれた人びとの選好と行動特性を見ると、彼らは、リスクを好み、近視眼的で、手渡しによる現金給付を受ける人が多く、蓄財が難しい状況にある。

では、どのような政策が考えられるか。前述の政策手段の四つのモードに沿うならば、報酬の何割かを強制貯蓄させる法案を制定する(法)、儉約・貯蓄は美德であると説得する(規範)、貧困者を優遇した預金金利や取引手数料を設定する(市場)などが考えられるが、アーキテクチャとして、報酬の支払い方法を月払い・銀行振り込みとしてデフォルト(初期設定)にすることも一案となる。貧困な状況にある人は、近視眼的であり¹¹⁾、現金・手渡しで報酬を受け取ったなら

ば、すぐに使い切ってしまうおそれがある。そうであるならば、多少の不便を被ることになるが、支払い時期を遅らせ、かつ、銀行口座という蓄財手段を与えることによって、意図せざる蓄財を促して、貧困解消の可能性を開くことができるのではないだろうか。

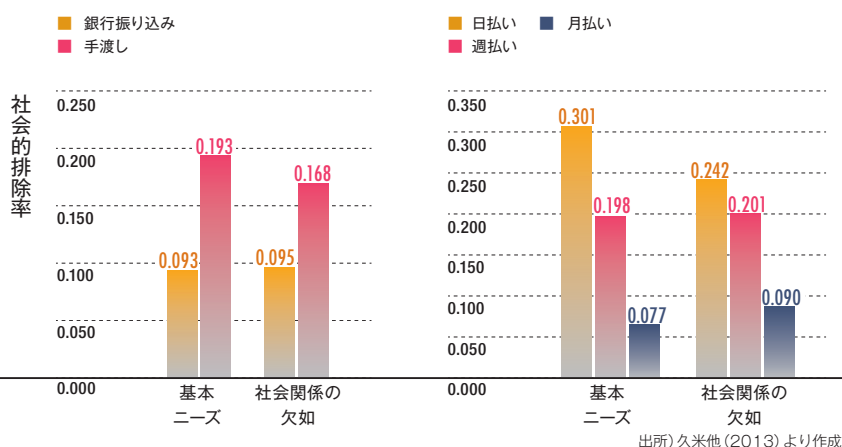
4. 規範意識を政策に生かす

4.1 労働に関する規範意識

次に、規範について考えてみよう。規範とは、判断、行動の基準である。人びとはそれぞれに何らかの規範意識を持って生きており、「すべし」を押し付けられるような倫理高圧的な社会には誰も住みたいとは思わないだろう。そこに、規範を政策に活用することの難しさがあるのだが、だからといって、政策手段としての規範の一切を放棄すべきではないだろう。その活路を探るべく、久米(2014)に示された労働に関する規範意識とアーキテクチャの関係を見てみよう。

日本人は勤勉か?といった議論がよくなされる¹²⁾。勤勉が奨励されるのは、個人の宗教的な精神の表れ・道徳的行為であるだけでなく、社会全体の富の蓄積に寄与し得るからである¹³⁾。戦前の日本では、国家に自

図表3 行動特性と貧困の状況



主的に献身・奉公する国民を育成するために、この「勤勉」思想を教育に取り入れたが、その一例として、江戸期の農政家・思想家である二宮尊徳(幼名:金次郎)像の普及がある。その像の存在は、勤勉の規範的なメッセージを送り続けるとともに、農政を軸とした社会的な紐帯・統合を促す役割を果たしてきた。

では、現代において、そのメッセージは有効なのだろうか。図表4左に、二宮尊徳像の有無(「あなたが通っていた小学校あるいは中学校に、二宮金次郎の像があったか」と、労働に関する規範意識(「働かないでお金を受け取ることは恥ずかしいことである」)の関係が世代別に示されている。平均的に見て、焼け跡世代の規範意識が高く、氷河期世代の規範意識が低い。しかし、ほとんどの世代で、二宮尊徳像が「あった」と認識している人の方が、「なかった・わからない」人に比べて、規範意識が高いことが分かる。

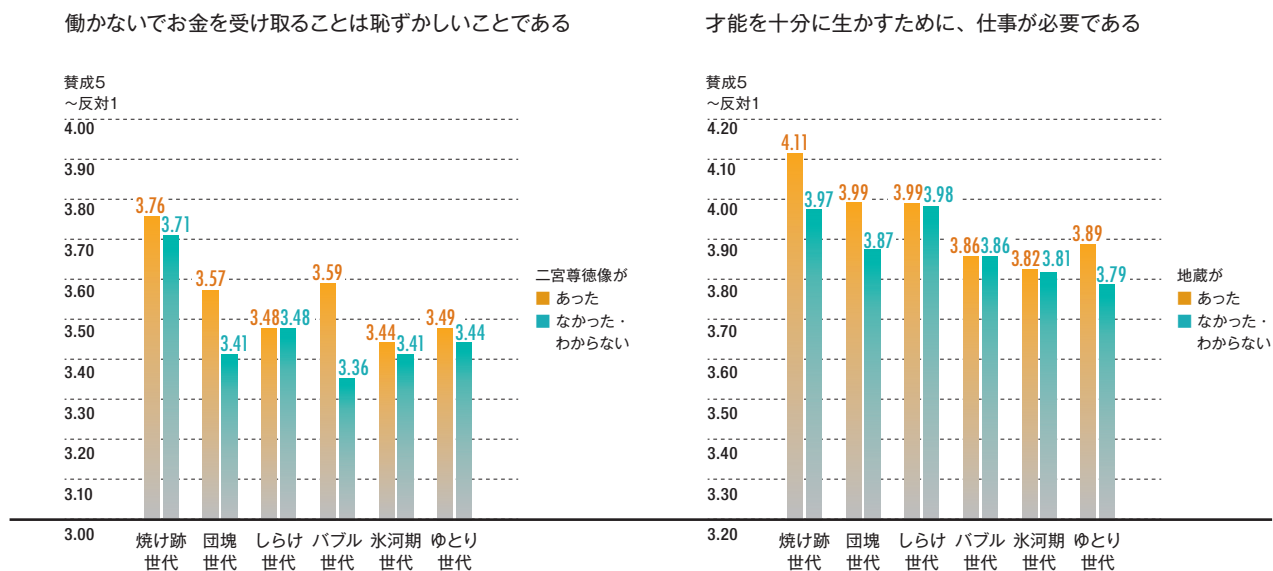
もう一つの例として、地蔵を考えてみよう。地蔵は、

仏教の信仰対象である菩薩の一尊であり、村の外れ、四つ辻、峠などの野外に置かれていることが多い。子どもにとっては、別世界につながる入り口であり、危険の警告でもある。また、昔話として有名な「笠地蔵」は、正しいことを行う者が救われることを伝えている。生活世界において、「地蔵が見ている」、「地蔵に見られている」という意識を経験することは、正しいことを行う意識の内面化を促すと推測される¹⁴⁾。

図表4右には、「才能を十分に生かすために、仕事が必要である」という規範意識と、「子どもの頃、近所や登下校の道端にお地蔵様があったか」という地蔵の有無との関係が示されている。特に、焼け跡世代、団塊世代、ゆとり世代において、地蔵があった人の方が、より高い労働の規範意識を持っていることが分かる¹⁵⁾。

これらの結果は、二宮尊徳像や地蔵というアーキテクチャが、労働に関する規範意識の内面化に寄与

図表4 労働の規範意識とアーキテクチャ(左・二宮尊徳像、右・地蔵)



出所)久米(2014)

していたことを示唆している¹⁶⁾。では、こうした規範意識はどのような果実をもたらしているのか。久米(2014)によると、労働の規範意識の高い人は、仕事満足度が高く、労働時間も長い。アーキテクチャが意図したように、人びとを労働に向かわせて、そうでない場合よりも高い満足と(労働時間で代理される)就業意欲を引き出しているのである¹⁷⁾。

4.2 性別役割分業意識

規範意識が政策の推進を妨げている例も考えてみよう。女性の活躍やワークライフバランス施策が推進されているが、根強い性別役割分業意識が女性の就業促進を妨げているという見方もある。例えば、鶴・久米(2017)では、「夫に十分な所得があるならば、妻は働くべきではない」、「夫は外で働き、妻は家を守るべきである」などの言説への賛成(そう思う=5～そう思わない=1)で代理される性別役割分業意識について、

夫の性別役割分業意識が強いほど、夫の家事・育児参加時間が少なく、それゆえ、妻が就業しにくいことが示されている。また、夫が勤務地限定の働き方になることによって、妻の就業確率が5.5%ポイント、職務限定の場合には4.2%ポイント高まるのに対して、夫の性別役割分業意識(「夫に十分な所得があるならば、妻は働くべきではない」)が1段階変化することによる、妻の就業確率への影響は3.3%ポイント、「夫は外で働き、妻は家を守るべきである」では、4.9%ポイント高めることを試算している。これらの結果は、性別役割分業意識の変革が、近年話題となっている働き方改革における、多様な働き方の導入と同じくらい、夫の家事・育児参加を通して、妻の就業確率を高めることを示唆している¹⁸⁾。

4.3 公共心

最後に、公共心(civiness)がもたらす政策上の影

図表5 公共心と大きな政府の志向

変数をつずつ入れ替えながら推計：

ベース(社会保障縮小・増税なし)、多項ロジットモデルによる推定

今後、増税をして、社会保障を拡大する必要がある(社会保障拡大・増税あり)

		係数	相対リスク比
信頼	政府は信頼できる(政府への信頼)	+++	1.370
	大部分の人びとは信頼できる(周りの人への信頼)	+++	1.223
公共心 Algan et al. 2016 と同じ	受給資格もなく年金などを要求するのは間違っている(不正受給)	---	0.797
	機会に乗じて脱税することは間違っている(脱税)	+++	1.187
	職務上で賄賂を受け取ることは間違っている(収賄)	+++	1.193
	公共の場所へのゴミのポイ捨ては間違っている(ゴミのポイ捨て)	++	1.151
	盗難品とわかっていて買うことは間違っている(盗難品購入)	+	1.106
公共心 追加した変数	国民年金を納付しないことは間違っている(年金保険料未納付)	+++	1.221
	生活困難な親族を養わないで生活保護を受給させることは間違っている(生活保護不正)	---	0.848
政府と市場の役割	自立できない貧しい人の面倒をみるのは政府の責任だ(政府責任重視)	+++	1.360
	格差が拡大するとしても市場経済は人々を豊かにする(市場経済重視)	--	0.899

+++は1%、++は5%、+は10%で正に有意、---は1%、--は5%、-は10%で負に有意、

コントロール変数は、性別、年齢、教育年数、婚姻状態、子どもの有無、雇用形態、時間当たり所得、居住地域

出所)久米他(2017)から作成

響を見てみよう。この分野の研究の先駆けとなったのは Putnum (1993) によるイタリアの地方政府の分析であり、市民参加に関する規範とネットワークを体現するソーシャル・キャピタルが、地域の活況の違いをもたらすことを示した。Knack and Keefer (1997) は、Putnum (1993) の仮説を検証して、信頼や規範が経済成長をもたらすことを示している。この延長線上に、Algan et al. (2016) があり、公共心が低く、他人を信頼する人ほど福祉国家を支持するという結果を得ている。久米他 (2016) では、Algan et al. (2016) に倣って、信頼や公共心などの個人の意識が、増税の是非や社会保障の縮小・拡大という政策の選択にどのように影響するかを分析している。

図表5 (前頁) のとおり、政府への信頼が高く、政府責任重視である人ほど、大きな政府を志向する。また、脱税、収賄、ゴミのポイ捨て、盗難品購入といった公共心も正で有意である。このことは、公共心の醸成が大きな政府への支持につながることを示唆している。一方、不正受給、生活保護不正は、有意に負である。年金や生活保護といった社会保障の寛大な受給を求める人は、大きな政府を支持する傾向がある。今後の拡大が予想されている社会保障支出について、増税などで財源を確保するためには、政府に対する信頼や責任を重視することは言うまでもないが、公共心の涵養や給付と負担に関する財政数理的な教育も有効となるであろう。

5. おわりに

本稿では、人びとの合理性を必ずしも前提としない政策手段としてのアーキテクチャと規範に着目して、その概要と応用の可能性について議論した。その特徴は、人びとの認知パターンや行動のクセに見られるような選好の異質性を踏まえて、それを積極的に生かすところにある。環境変化が激しい中、より迅速で実効性の高い政策・施策が求められている。アーキテクチャや規範は、法や市場に比べて、手続きや取引にか

かるコストが安価であるという利点があり、これを生かさない手はないだろう。

このような政策を講じていくためには、政策担当者の判断の倫理的妥当性や手続き上の正統性を明らかにして、人びとの警戒心を和らげる必要があることは言うまでもない。しかし、それ以上に、アーキテクチャや規範が最前線の現場での創意工夫を引き出せる余地が大きいことに鑑みると、それらを政策手段としてより積極的に活用できるか否かは、私たち一人ひとりの実践的かつ実験的な精神にかかっていると言えよう。



Koichi Kume

久米 功一

東洋大学 経済学部 准教授
大阪大学大学院経済学研究科博士課程修了。博士(経済学)。三菱重工業、世界銀行、関西情報・産業活性化センター、経済産業省、名古屋商科大学、リクルートワークス研究所を経て、2017年より現職。専門は、労働経済学、行動経済学、経済政策。論文「人工知能等の新しいテクノロジーを活かす能力とは何か 自己変化能と情報提供・働き方の変化に対する態度に関するアンケート分析」RIETI Discussion Paper Series 17-J-053 (2017年、共著) など。

注

- 1) 図表1の空港ロビーチェアの比較の例は、大屋(2012)に拠っている。また、写真はSmart Travel Journal様からの許諾を得て、掲載している。記してお礼申し上げたい。
- 2) 大屋(2012)がまとめているように、アーキテクチャによる規制には、いくつかの特徴がある。法は、刑罰の形で事後的に制裁を科すが、アーキテクチャは、事前規制となっており、行動の可能性を意識しないうちに制限する。また、刑罰や経済的報酬に対して合理的に反応しないような、強い意志や特殊な選好を持つ人に対しても、アーキテクチャは確実に効果をもたらす。
- 3) 例えば、本人の不摂生による健康被害に対して医療サービスを提供したり、放蕩浪費の結果として多重債務に陥ったとしても生活を救済したりすることで、その費用を第三者が負担することになる。
- 4) 日雇い派遣労働者とは、労働契約の期間が30日以内の派遣労働者を指す。労働者派遣法の改正により、平成24年10月1日より原則禁止となった。
- 5) 相対的剝奪とは、社会の中で当然に享受できる財・サービス・制度をどれだけ剝奪されているかを表す。
- 6) 社会的排除とは、人びとが社会関係から隔離・排除されることを言う(Townsend(1979))。
- 7) 基本ニーズとは、金銭的な理由によって食糧、衣類、医療、医療(歯科)の財やサービスを購入できないことを指す。社会関係の欠如は「人とのコミュニケーション(人との会話の有無)」、「交友(友人・家族・親戚に会いに行くことが経済的にできるか否か)」、「親戚とのつながり(親戚の冠婚葬祭への出席)」の三つから計測される。制度からの排除は、公的雇用保険、公的医療保険、公的年金の加入の有無で定義される。主観的貧困は、主観的な生活水準と貯蓄できるか否かで測られる。
- 8) 危険回避度とは、危険を回避する程度の尺度である。ここでは、仕事に対する報酬の支払い方法として、月収が半々の確率で現在の月収の2倍になるか30%減になる仕事と、現在の月収の5%増しが確定している仕事のどちらを好むかについて4通りの質問をして、変動リスクの小さい報酬体系を選ぶ人を危険回避的であるとした。
- 9) 宿題に取り組むつもりであったか、だけでなく、実際に取り組んだか否かも重要である。コミットメントについては、O'Donoghue and Rabin(1999)を参照されたい。
- 10) ここでの「双曲割引あり」とは、2日後に受け取る1万円を9日後に延ばした場合に要求する利息が、90日後に受け取る1万円を97日後に延ばした場合に要求する利息よりも大きいことを示すダミー変数である。
- 11) なぜ近視眼的になってしまうのか。Mullainathan and Shafir(2014)は、欠乏の悪循環を指摘する。つまり、貧しい状態が、処理能力の低下を招き、さらに貧しい状態に陥るというものである。
- 12) 山本(1984)は、勤儉貯蓄は、日本人の徳目であり、宗教的修行、仏行として仕事を見ているが、武田(2008)は、近代化の中で、労働力が工場労働として組織化される過程で与えられた時間の規律としての勤勉が定着したと見ている。
- 13) Weber(1885)は、天職理念を土台として、キリスト教的禁欲の精神から資本主義を支える合理的な生活態度が生まれたと述べている(いわゆる非合理による合理化)。しかし、近年、Cantoni(2015)は、プロテスタンティズムは経済成長に寄与していなかったことを実証しており、その後も議論が活発化している。
- 14) 見られることによる規範意識の内面化については、Bateson et al.(2006)、Oda et al.(2011)を参照されたい。
- 15) 伊藤・窪田・大竹(2017)は、近所に神社仏閣・地蔵があった人ほど、一般的に人を信頼し、人から恩を受けると返したいと思い、利他的な傾向が高いことを示している。
- 16) 久米(2014)では、労働の規範意識の形成要因として、幼い頃の手伝い経験を挙げている。また、久米他(2015)では、こうした幼い頃の生活経験が非認知能力の形成に影響することを明らかにしていることに鑑みると、規範意識は、非認知能力を経由して、さまざまな経済的成果をもたらしている可能性が考えられる。

注

- 17) その他のアーキテクチャとしては、例えば、創業者の銅像は、企業の理念や使命を可視化したものであり、そこから新規事業の方向性や社員の行動規範を感じることもあるだろう。また、経済学の学習にもアーキテクチャの考え方は役立つ。香西(1998)は、経済学の学習法として、経済学の古典、有名な論文、経済史書などを覗いて、机の上に並べておくこと、論文のコピーを持ち歩くことを勧めている。「ツン読んでいるだけで内容に親しみがわいて」きて、「意外に霊験あらたか」だそうだ。理解したい本・文献が視界にある、手元にある、その存在の身近さが、意識に働きかけて、学びを大いに励ますのである。
- 18) 英国の性別役割分業意識の変化を分析したScott(2006)によると、その変化に最も寄与するのは世代効果であり、意識の変化には、大きな時間の流れを要する。

参考文献

- 伊藤高弘・窪田康平・大竹文雄(2017)「寺院・地蔵・神社の社会・経済的帰結：ソーシャル・キャピタルを通じた所得・幸福度・健康への影響」ISER DP, No.995.
- 大屋雄裕(2012)「アーキテクチャと政策について」総務省 地方分権の進展に対応した行政の実効性確保のあり方に関する検討会 平成24年9月26日
- 久米功一(2014)「労働に関する規範意識の形成とその影響」『季刊 家計経済研究』102号 pp.44-56.
- 久米功一・大竹文雄・鶴光太郎・奥平寛子(2013)「非正規労働者における社会的排除の実態とその要因」『日本労働研究雑誌』No. 634, pp.100-115.
- 久米功一・鶴光太郎・安井健悟・佐野晋平(2017)「社会保障の給付負担に対する選択を決定する要因は何か——個人の意識と教育の役割」RIETI Discussion Paper Series, 17-J-021.
- 久米功一・花岡智恵・水谷徳子・大竹文雄・奥山尚子(2015)「パーソナリティ特性の形成要因——家庭・学校・職場の経験から」『行動経済学』7, pp.50-54.
- 香西泰(1998)「経済を学ぶ(3) 市場の力 実感し理解を」1998年4月1日付 日本経済新聞朝刊
- 武田晴人(2008)『日本人の経済観念——歴史に見る異端と普遍』岩波書店
- 多田洋介(2003)『行動経済学入門』日本経済新聞社
- 鶴光太郎・久米功一(2016)「夫の家事・育児参加と妻の就業決定——夫の働き方と役割分担意識を考慮した実証分析」RIETI Discussion Paper Series, 16-J-010.
- 那須耕介(2016)「リバタリアン・バターナリズムとその10年」『社会システム研究』19, pp.1-35.
- 山本七平(1984)『勤勉の哲学——日本人を動かす原理』PHP文庫
- Algan, Y., P. Cahuc, and M. Sangnier(2016) “Trust and the Welfare State: The Twin Peaks Curve.” *Economic Journal*, 126, pp.861-883.
- Bateson, M., Nettle, D., and Roberts, G. (2006) “Cues of being watched enhance cooperation in a real-world setting.” *Biology Letters*, 2 (3), pp.412-414.
- Cantoni, D. (2015) “The Economic Effects of the Protestant Reformation: Testing the Weber Hypothesis in the German Lands,” *Journal of the European Economic Association*, Vol. 13, N. 4, pp. 561-598.
- Knack, S. and P. Keefer (1997) “Does Social Capital Have an Economic Payoff? A Cross-Country Investigation.” *Quarterly Journal of Economics*, 112 (4), pp.1251-1288.
- Lessig, L. (1998) “The New Chicago School,” *Journal of Legal Studies* Vol. XXVII (2) pp. 661-691.
- Lessig, L (2000) *Code: And Other Laws of Cyberspace*, Basic Books, 山形浩生・柏木亮二訳(2001)『CODE——インターネットの合法・違法・プライバシー』翔泳社
- Mullainathan, S. and E. Shafir (2014) *Scarcity: Why Having Too Little Means So Much*, Times Books 大田直子訳(2017)『いつも「時間がない」あなたに:欠乏の行動経済学』早川書房
- Oda, R., Niwa, Y., Honma, A., & Hiraishi, K. (2011) “An eye-like painting enhances the expectation of a good reputation.” *Evolution and Human Behavior*, 32 (3), pp.166-171.

参考文献

- O'Donoghue, T. and M. Rabin (1999) "Doing It Now or Later." *American Economic Review*, 89 (1): pp.103-124.
- Putnam, R.D. (1993) *Making Democracy Work: Civic Traditions in Modern Italy*. Princeton, NJ: Princeton University Press. 河田潤一訳 (2001) 『哲学する民主主義——伝統と改革の市民的構造——』 NTT出版
- Scott, J. (2006) "Families and gender roles: How attitudes are changing" *Arxius*, 15, pp. 143-154
- Thaler, R. H. and C. R. Sunstein, (2003) "Libertarian Paternalism Is Not an Oxymoron" University of Chicago Public Law & Legal Theory Working Paper No. 43.
- Thaler, R. H. and C. R. Sunstein (2009) *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness* Penguin Books 遠藤真美訳『実践 行動経済学』日経 BP社
- Townsend, Peter (1979) *Poverty in the United Kingdom*, Allen Lane and Penguin Books
- Weber, M. (1905) *Die protestantische Ethik und der Geist des Kapitalismus*. 大塚久雄訳 (1989) 『プロテスタンティズムの倫理と資本主義の精神』岩波文庫

米国の インセンティブオークション

株式会社 KDDI 総合研究所 シニアアナリスト

山條 朋子 Tomoko Yamajo

米国の連邦通信委員会 (FCC) は、2016年から2017年にかけて、地上波放送用に割り当てられた600MHz帯をモバイルブロードバンド向けに転用するためのインセンティブオークションを実施し、一定の成功を収めた。インセンティブオークションは、既存免許人がもはや必要としていない周波数や十分に利用していない周波数を手放しやすくし、他の用途に転用するための手段として有効と考えられ、今後、他の帯域や米国以外の国でも導入に向けた検討が進む可能性がある。

キーワード

周波数 オークション 放送 モバイル 連邦通信委員会 (FCC)

1. はじめに

米国やEU各国では、2008年ごろより、地上デジタルテレビ放送への移行によって空きとなる周波数、いわゆる「アナログ跡地」を対象とした第4世代移动通信 (4G LTE) 向けの周波数オークションが盛んに行われた。しかし、第5世代移动通信 (以下5G) の時代を控え、長期的なモバイルデータの需要を満たすにはさらに数百 MHz 幅の周波数が必要であること、特に1GHz以下の低周波数帯は無線ブロードバンドの高速化や屋内のパフォーマンス向上に極めて重要であることなどから、放送用周波数をさらにモバイル向けに再

編しようとする動きが活発化している。

本稿では、米国の連邦通信委員会 (Federal Communications Commission、以下 FCC) がインセンティブオークションという新たな手法により、放送事業者が利用する周波数をモバイル向けに転用した事例について概説する。

2. インセンティブオークション実施の 背景・経緯

本章では、インセンティブオークションの実施に至る背景や経緯として、2002年に発表された FCC の周波数政策の改革に関する提言と、オバマ政権時代に策

定された国家ブロードバンド計画について紹介する。

2-1 周波数割当方法の改革についての提言

FCC の計画・政策室 (Office of Plans and Policy、以下 OPP) は、2002年11月、周波数の割当方法の大胆な改革案をまとめた報告書を発表した¹⁾。報告書では、現行の政府による管理型の割当方法は周波数不足や浪費につながると指摘し、周波数の有効利用を図るために、市場原理に基づく周波数割当へ直ちに移行する必要があると提言している。提言の主要な柱とされているのが、FCC による「周波数再編オークション」の実施である。このオークションは、まだ割り当てられていない帯域に加えて、十分に利用されていない割当済みの帯域を対象に行うもので、周波数を手放した既存免許人にオークションで得られた収入を支払うこと、既存免許人によるオークションへの参加は強制ではなく任意とすることなどを特徴としている。報告書では、種々の無線サービス用として使い勝手の良い300MHz から3000MHz のうち、700MHz 帯 (UHF テレビ)、2500 ~ 2690MHz (教育用ブロードバンド) など合計438MHz 幅を候補として選定し、2年から5年以内にオークションを通じて他の用途に再編することを提案している。主要な放送用周波数 (470 ~ 698MHz) については、放送用周波数の相当部分が既に他の用途に転用されていることや、政治的にセンシティブであることなどを理由に、即時にオークションにかけることは困難であるとして当面の再編対象から外している。

OPP の報告書は、FCC 内外の議論を活発化させることを目的に作成されており、FCC の方針の見直しや規則制定に即座に直結するものではないが、将来的な周波数政策の方向性を示すものとして広く注目を集めた。

2-2 国家ブロードバンド計画

2009年1月に発足した民主党オバマ政権は、次世代

ブロードバンドの全米普及を情報通信分野の優先課題の一つに掲げ、普及拡大のけん引役として期待のかかる無線ブロードバンド用周波数の確保に積極的に取り組んだ。これは、インターネット発祥の地である米国がブロードバンド普及で日本や韓国などの後塵を拝していることに対する危機感の表れであり、同時に、ブロードバンド整備や利活用の促進により、景気回復、雇用創出につなげようとする民主党の経済再生計画の一環でもあった。

2009年2月に成立した米国復興・再投資法では、FCC に今後10年間のブロードバンド政策の指針の策定が義務付けられた。FCC は、2010年3月、米国初の本格的な国家ブロードバンド計画 (National Broadband Plan、以下 NBP) を連邦議会に提出した²⁾。NBP には、2020年までにブロードバンドを全米に普及させるため、FCC、連邦議会、政府などが取るべき200以上のアクションが盛り込まれており、無線ブロードバンド用周波数の追加割当については、FCC および関連政府機関等の連携によって以下を実施することを勧告している。

- ・2020年までの10年間に無線ブロードバンド利用のために500MHz の周波数を新たに割り当てる。
- ・500MHz のうち300MHz はモバイル向けとし、2015年までに割当を実施する。対象の周波数は225MHz から3.7GHz の範囲とし、地上波テレビ放送用周波数 (470 ~ 698MHz) や700MHz 帯 D ブロック等を含む (次頁・図表1参照)。
- ・インセンティブオークションを通じて、既存免許人が周波数を自主的に明け渡す (売却する) 仕組みを検討する。
- ・連邦議会は、FCC にインセンティブオークションを実施する権限を与える。

インセンティブオークションは2002年に OPP が提言した周波数再編オークションを原型とするもので、免許を返上した既存免許人に対し、オークション収入という金銭的インセンティブを与えるという意味から

このような名称が付けられている。モバイル向け周波数の候補は、いずれもモバイルブロードバンドに適した帯域であることを理由に選ばれているが、放送用周波数については、特に優れた伝播特性を持ち、モバイルブロードバンドに最適であると強調されている。併せて、放送用周波数の再編を正当化する理由として、米国ではケーブルテレビや衛星放送などの有料テレビが普及しており、無料の地上波テレビ放送のみを視聴する世帯は全米世帯の10%程度にすぎないことも挙げられている。

2012年2月、NBPの勧告に基づき、インセンティブオークションの実施権限をFCCに与える法案が連邦議会でも可決され、オバマ大統領(当時)の署名により成立した³⁾。これを受け、FCCは600MHz帯の放送用周波数を対象とするインセンティブオークションの実施に向けた取り組みを開始した。

3. 放送事業者のオークション参加を促すための施策

NBPでは120MHzの放送用周波数を回収することを目指しているが、放送事業者が周波数を売却するかどうかはあくまで任意であることから、十分な量の周波数がモバイル用に割り当てられるかどうかはオークションが実施されるまで明らかではない。本章で

は、より多くの放送事業者にオークションへの参加を促すためにFCCが行った施策についてまとめている。

3-1 放送用周波数のチャンネルシェア

2010年6月、FCCは放送用周波数の再編に関する技術報告書を公表した⁴⁾。これは、NBPを策定したタスクフォースであるOmnibus Broadband Initiative(以下、OBI)による一連の技術文書のうちの一つで、放送用周波数をモバイル向けに再編することの妥当性と技術面からの実現可能性を検証した内容となっている。具体的には、OBIが新たに構築した最適割当モデルを用いることによって、インセンティブオークションへの参加が必要な放送局数と市場を決定できること、二つ以上の放送局が一つのチャンネル(6MHz)をシェアすることによって、60MHzから120MHzの周波数をモバイル用に確保できることを示している。

報告書では、放送用周波数の再編が消費者および放送事業者に及ぼす影響についても分析している。まず消費者に関しては、地域によっては地上波テレビ放送の受信が困難になるケースがあるとして、オークション収入の一部を充当し、影響を受ける消費者にはケーブルテレビなどの多チャンネルビデオサービスを無料で提供することを検討するよう提言している。放送事業者については、チャンネル再編またはチャンネル

図表1 NBP勧告による
モバイル向け周波数候補

名称	帯域幅
Wireless Communications Service (WCS)	20MHz
Advanced Wireless Services (AWS)	60MHz
700MHz D Block (注)	10MHz
Mobile Satellite Services (MSS)	90MHz
Broadcast TV (UHF Band)	120MHz
合計	300MHz

(NBPに基づき筆者作成)

(注) 公共安全ネットワークの構築に利用することを想定。2008年に実施された700MHzオークションでは最低落札価格に届かず落札されなかった。

シェアによってサービスエリアが変更となった場合、視聴率に基づく広告収入に多少影響する可能性があるとしながらも、地上波放送を続ける限り、収入への影響はわずかと予測を示している。

FCCは、この報告書の内容に基づき、2012年4月、放送用周波数のチャンネルシェアに関する以下のような規制の枠組みを決定した⁵⁾。

- ・二つ以上の地上波テレビ放送局が一つのチャンネルを任意でシェアすることを可能とする。
- ・放送局は最低1本の標準画質(SD)プログラムを維持しなければならない。この要件を満たせば、放送局は、個々のプログラミングや経済的な必要性に応じてチャンネルシェアを柔軟に行うことが認められる。
- ・チャンネルシェアに合意した放送局はチャンネルや送信施設を共有することになるが、放送免許やコールサイン、免許に付随する権利は、引き続きそれぞれの放送局に付与される。FCCの規則や政策、義務も個々の放送局に対して適用される。
- ・今回のルールは、フルパワー、クラスAの商業・非商業のテレビ放送局を対象とする。

米モバイル事業者の業界団体であるCTIAは、2014年1月末から3月にかけてロサンゼルステレビ局、KLCSおよびKJLAと共にチャンネルシェアのパイロットプロジェクトを実施し、その結果を公表した⁶⁾。KLCS/KJLAは、二つの高精細度(HD)放送を一つのチャンネルに統合することは技術的に実行可能であり、二つのHD放送に二つのSD放送を追加した場合でも、品質に関するユーザーエクスペリエンスに大きな影響は見られなかったと報告。周波数を手放した場合でも、他局とのチャンネルシェアによって放送を続けることが可能であることを実証した。

3-2 個別アプローチ

2014年10月、FCCは、放送事業者インセンティブオークションへの参加を促すため、個別のアプローチ

を開始した。まずFCCは、放送事業者がオークションで周波数を売却した場合に得られる収入の見込み額をエリアごとに公表した。FCCから委託を受けた投資会社のGreenhill and Co. Inc.が算定したもので、オークションの総収入は最大450億ドル、そのうち380億ドルが放送事業者の手に渡るとの試算を示している。FCCは、この収入見込み額とともに、インセンティブオークションの仕組みやチャンネルシェアの方法などを解説した資料を含む情報パッケージを作成し、オークションへの参加資格のある放送事業者個別に送付した。併せてFCCは、インセンティブオークションに関する放送事業者向けのウェブサイトを更新し、放送事業者がオークションに関する情報にアクセスしやすい環境を整えた。

続いてFCCは、2015年2月より、放送事業者を対象とした説明会を全米各地で実施し、オークションへの参加を直接呼び掛けた。FCCは、2015年1月に終了したAWS-3オークションの結果を踏まえ⁷⁾、周波数売却による収入見込み額を一部引き上げるなどして、放送事業者のオークションへの参加意欲を促進することに努めた。

こうしたFCCの動きに対し、一部の放送関係者からは、周波数売却収入見込み額は算定の条件が楽観的過ぎて現実的ではないとの意見や、FCCは放送事業者にプレッシャーを与えるのではなく、透明性を確保したやり方で情報開示を行うべきとの批判の声が上がった。一方FCCは、説明会を実施することによって、大手を含む複数の放送事業者からオークションへの高い関心が示されたとして、個別アプローチが有効であったと評価した。

4. オークションに向けたルール整備

本章では、オークション実施に向けてFCCが制定した数々のルールのうち、オークションの基本ルールおよび大手モバイル事業者の入札制限についてまとめ

ている。

4-1 オークションの基本ルール

2012年9月、FCC はインセンティブオークションの制度的枠組みに関する提案を発表し、関係者の意見募集に着手した。この時点でFCC は、2013年中にルール整備を終え、2014年にオークションを実施することを目指していた。しかし、世界的にも前例のない複雑なオークションであることに加え、600MHz 帯のバンドプラン（使用区分）やオークション後の免許不要利用などを巡って利害関係者の意見が対立し、議論は予想以上に長期化した。2013年12月、FCC のトム・ウィーラー委員長（当時）は、オークションの開始を2015年半ばに延期する方針を明らかにし、FCC はバンドプランやオークションデザイン、免許不要利

用など基本的なオークションルールを2014年5月に決定した（図表2参照）⁸⁾。

このルールを巡っては、2014年8月、全米放送事業者協会（National Association of Broadcasters、以下 NAB）と Sinclair Broadcast Group が一部の見直しを求めて、コロンビア特別区の連邦控訴裁判所（控訴裁）に訴訟を提起した。控訴裁は NAB らの訴えを却下したが、この裁判の影響により、オークションの開始は2016年初めに再び延期されることとなった。

4-2 大手モバイル事業者に対する入札制限

米国のモバイル市場では、加入者シェア上位2社の Verizon と AT&T がモバイルに適した1GHz 以下の周波数の大部分を保有していることについて競争への悪影響を懸念する声が上がっていた。Sprint や

図表2 インセンティブオークションの基本ルール（抜粋）

項目	概要
バンドプラン	・周波数ブロックは 5GHz×2 のペアバンド ・免許区域は全米 416 の PEA（Partial Economic Area）単位
オークションデザイン	・リバースオークション：放送局が任意で参加し、周波数を売却する。オークションの進捗に伴い価格が低下する「下降式クロックフォーマット」を採用。 ・フォワードオークション：放送局が売却した周波数をモバイル事業者等が取得する。入札ごとに価格が上昇する「複数ラウンド上昇式クロックフォーマット」を採用（通常のオークションと同様の方式）。 ・リバースオークションとフォワードオークションは一続きのセットで実施する。
免許不要利用	・全米で免許不要端末によるガードバンドの利用を認める。 ・チャンネル 37 が利用されていない地域では、当該チャンネルも免許不要端末による利用を認める。 ・600MHz 帯の再編後も、TV ホワイトスペース（未使用の放送用周波数）は免許不要端末により利用可能。
放送事業者の周波数移行	・周波数を売却した放送局は、オークション収入の一部を受領後 3 カ月以内に売却した周波数帯での運用を停止する。 ・オークション後も引き続き事業を行う放送局は、39 カ月以内に新たに割り当てられた周波数帯に移行する。
免許人の義務	・周波数を落札した免許人（モバイル事業者）は、免許取得後 6 年以内にサービスエリアの人口の 40%、12 年以内に 75% をカバーするネットワークを構築する。 ・モバイル端末は 600MHz 帯の全帯域で相互運用可能とする。

（FCC 発表資料に基づき筆者作成）

T-Mobile USを含む下位の事業者や競争当局である米司法省は、資金力のある大手2社がインセンティブオークションに入札すれば、他の事業者より多くの周波数を手にすることは確実であり、その結果、さらに周波数の集中度が増し、市場競争がゆがめられるとして、FCCに対し、下位の事業者が1GHz以下の周波数へアクセスできるような対策を講じるよう訴えた。

FCCは、オークションルールの策定と並行してモバイル事業者の周波数保有に関する方針の見直しを進め、2014年5月、モバイル事業者の合併・買収や周波数取引の審査および個々のオークションにおいて、周波数集中を防止するための新たなルールを決定した⁹⁾。新ルールでは、1GHz以下の低帯域周波数については競争上の影響をより詳細に評価する方針が示され、インセンティブオークションでは、大手および小規模の両方の事業者の参加を促すとともに、少数の事業者が周波数を独占することのないよう、次のような周波数保有制限が設定された。

- ・各免許地域で1GHz以下の帯域の周波数保有量が3分の1未満の事業者に対し、最大30MHzの周波数を確保する(周波数リザーブ)。
- ・周波数リザーブの量はオークションに供される周波数の総量に応じて決定する。

T-Mobile USや小規模無線事業者業界団体のCompetitive Carriers Associationは、周波数リザーブを40MHzに増やすようFCCに再考を求めた。しかしFCCは、周波数の過度の集中を防止すると同時に、多くの事業者に価値の高い周波数を獲得する機会を与えるためには30MHzのリザーブが適当であるとして、2015年8月、T-Mobile USらの訴えを却下した¹⁰⁾。

5. オークションの実施

本章では、インセンティブオークションの入札プロセスと結果、関係者によるオークションの評価についてまとめている。

5-1 入札プロセス

FCCは、二度の開催延期を経て、2016年3月29日、インセンティブオークションの入札プロセスを開始した。リバースオークションに参加する放送事業者は、この日までに売却する周波数とともに、オークション終了後に廃業するか、もしくは他のチャンネルに移行して事業を続けるかをコミットすることが求められていた。FCCは、放送事業者のコミットメントに基づいてバンドプランのシミュレーションを行い、最初の周波数回収目標値を最大の126MHzに設定した。オークションが成立するには、フォワードオークションでのモバイル事業者らによる落札額が周波数回収コスト、すなわちリバースオークションで放送事業者が周波数を売却した額、オークション後の放送用周波数再編のための費用(17.5億ドル)およびオークション開催に関わるFCCの事務手数料(2.26億ドル)の合計額を上回る必要がある。この額に達しない場合、FCCは周波数回収目標値を段階的に引き下げて、再度リバースオークションからやり直すことになる。

2016年5月31日、第1ステージのリバースオークションがスタートし、同年6月29日に終了した。放送事業者による周波数売却額は市場の事前予想をはるかに上回る864億ドルに達した。引き続きモバイル事業者らによるフォワードオークションが行われたが、落札総額は231億ドルで放送事業者の売却額に遠く及ばなかった。この結果を受けて、NABのデニス・ウォートン広報担当役員は、「ワシントンで広められていた『周波数危機』は政策立案者が信じ込まされていたほどには深刻ではなかったということだ」とモバイル事業者の入札が低調であることを批判した。これに対し、CTIAのスcott・バーグマン規制担当役員は、231億ドルという入札額はFCCの20年以上にわたるオークションの歴史上2番目に高いものであり、モバイル業界の周波数需要は十分に高いとして、インセンティブオークションは有効かつ効率的な周波数再編の手段であると反論した。

その後、オークションは第2ステージ、第3ステージと進められたが、いずれも不成立に終わった。2016年12月から2017年2月に実施された第4ステージで、モバイル事業者の入札額が周波数回収コストを上回り、ようやくオークションが成立した(図表3参照)。続いて、フォワードオークションの落札者によって帯域割当(位置決め)のための入札が行われ、2017年3月30日に全ての入札プロセスが終了した。最終的な落札額はフォワードオークション終了時から1億3,600万ドル増加し、約198億ドルとなった。

5-2 最終結果

2017年4月13日、FCCはフォワードオークションの落札者を発表した¹¹⁾。最大の落札者は1GHz以下の周波数をほとんど持たないT-Mobile USで、約80億ドルを投資して1,525件の免許を取得した。次いで衛星放送事業者のDish Network、大手ケーブル事業者のComcast、AT&T、US Cellularが落札額上位に名を連ねた。Verizonはオークションに参加したものの1件の免許も落札せず、Sprintは当初からオークシ

ョンへの参加を見送った。

インセンティブオークション全体の結果は図表4のとおりで、175の放送局が84MHzの周波数を約101億ドルで売却し、モバイル事業者らがガードバンド分を除く70MHzを約198億ドルで落札した。この額はFCCが過去に実施したオークションの中で、AWS-3オークションに次いで2番目の高値となった。

5-3 関係者の評価

インセンティブオークションが終了し、最終結果が判明したことを受け、FCC、放送業界、モバイル業界がそれぞれ声明やコメントを発表した。

FCCのアジト・パイ委員長は、世界初のインセンティブオークションが成功裏に終わったと評価するとともに、オークション後の放送用周波数の再編が円滑に進行するよう、FCCの最優先課題として取り組む考えを示した。NABのゴードン・スミス会長は、FCCがオークションを成功に導いたことに祝意を表す一方、今後はテレビ局のチャンネル移動という前例のないタスクが控えているとして、テレビやラジオの

図表3 インセンティブオークションの各ステージの結果

ステージ	実施期間 上段：リバースオークション 下段：フォワードオークション	リバースオークション		フォワードオークション	
		回収周波数	価格	割当周波数	価格
1	2016.5.31-6.29 2016.8.16-8.30	126MHz	864 億ドル	100MHz	231 億ドル
2	2016.9.13-10.13 2016.10.19	114MHz	546 億ドル	90MHz	215 億ドル
3	2016.11.1-12.1 2016.12.5	108MHz	403 億ドル	80MHz	197 億ドル
4	2016.12.13-2017.1.13 2017.1.18-2.10	84MHz	101 億ドル	70MHz	196 億ドル

(FCC発表資料に基づき筆者作成)

視聴者を含む全ての利害関係者にとって公平となるよう、バランスの取れたアプローチにより放送用周波数の再編を進めていく必要があると訴えた。落札額トップとなった T-Mobile US のジョン・レジャー CEO は、全米をカバーする低帯域周波数を手にしたことで全米の無線ユーザーに真の選択肢と競争をもたらすことができるとして、上位の Verizon や AT&T との競争に意欲を見せた。その後 T-Mobile US は、2019 年より 600MHz 帯を利用した 5G サービスを展開する計画を発表した。

6. おわりに

インセンティブオークションの計画が発表された当初は、その複雑な仕組みや放送業界の反発によって実現は極めて困難との見方が大勢を占めていた。結果的には、多くの放送事業者がオークションに参加し、NBP 勧告の目標である 120MHz には届かなかったものの、70MHz ものプラチナバンドをモバイル用に確保したことで、FCC の手腕は高く評価されてい

る。一方で、NAB が指摘したように、モバイル事業者の周波数需要は事前にアピールされたほどには高くなかった。この点について、アナリストや周波数オークションを専門とするコンサルタントらは、実施時期が遅れたことによって、短期間に複数のオークションが連続して実施されたこと、大手モバイル事業者の関心が 5G の展開に必要な高帯域周波数に移ったことなどが主な要因と分析している。

英国の通信・放送主管庁である文化・メディア・スポーツ省（現デジタル・文化・メディア・スポーツ省）は、2013 年 7 月に発表したメディア・通信分野の戦略文書の中で、周波数の有効利用を図るための施策の一つとしてインセンティブオークションの導入を検討していることを明らかにした¹²⁾。また、FCC は、2018 年 5 月、2.5GHz 帯の教育ブロードバンドサービス（Educational Broadband Service、以下 EBS）バンドの再編について検討を開始した¹³⁾。EBS バンドは米国の大半の地域で空き状態となっており、長年にわたって再編の候補とされてきた。FCC は、インセンティブオークションを用いて EBS をモバイル向けに

図表 4 インセンティブオークションの結果

実施期間		2016年5月31日～2017年3月30日
リバース オークション	周波数を売却した放送局数	175
	売却した周波数	84MHz
	売却総額	100 億 5,467 万 6,822 ドル
フォワード オークション	落札者数	50
	割当周波数	70MHz
	落札総額	197 億 6,843 万 7,378 ドル
	正味落札額	193 億 1,100 万 3,826 ドル(注1)
	落札免許数	2,912 件中の 2,776 件（136 件が落札されず）
	MHz-POP 当たりの平均価格(注2)	上位 40 市場：1.31 ドル / 全米平均：0.93 ドル
	上位落札者と落札額 (括弧内は落札免許数)	T-Mobile US：79 億 9,336 万 1,993 ドル（1,525 件） Dish：62 億 1,115 万 4,496 ドル（486 件） Comcast：17 億 2,487 万 7,376 ドル（73 件） AT&T：9 億 1,020 万 2,302 ドル（23 件） US Cellular：3 億 2,866 万 1,977 ドル（188 件）

(注1) 中小企業など一定の条件を満たした落札者に与えられる割引を差し引いた額。

(注2) MHz-POP は「付与された免許の周波数幅×その免許がカバーするエリアの人口」で示される。

(FCC 発表資料に基づき筆者作成)

再編する案について関係者の意見を求めている。

2020年以降には5Gの商用サービスが本格化し、高品質な画像や動画など大容量のコンテンツ利用が増えることによって周波数の需要はさらに高まることが予想される。十分に利用されていない周波数をモバイル向けに転用する手段として、今後、放送用周波数以外の帯域や米国以外の国々においてもインセンティブオークションの導入を検討する動きが広がる可能性は十分に考えられるだろう。



Tomoko Yamajo

山條 朋子

株式会社KDDI総合研究所 フューチャーデザイン1部門 3 グループ シニアアナリスト

欧米を中心とする海外の情報通信政策および市場に関する調査研究に従事。最近の主なレポート、書籍は以下のとおり：「政権交代が情報通信政策に及ぼす影響 ―米国と韓国の事例―」マルチメディア振興センター ICT World Review Vol.10 No.4（共著）（2017年10月）、「米国モバイル市場の競争政策」KDDI総合研究所 Nextcom第29号（2017年3月）、「欧米モバイル市場における公正競争の確保 ―周波数オークションと二次取引への規制当局の介入事例―」マルチメディア振興センター ICT World Review Vol.8 No.3（共著）（2015年9月）、「クラウド産業論：流動化するプラットフォーム・ビジネスにおける競争と規制」勁草書房（共著）（2014年2月）、「欧米における周波数オークションの動向」KDDI総研 Nextcom第7号（2011年9月）、「米国におけるユニバーサルサービス制度改革の動向」KDDI総研 Nextcom第2号（2010年6月）

注

- 1) Evan Kwerel, and John Williams, FCC OPP Working Paper Series 38, "A Proposal for a Rapid Transition to Market Allocation of Spectrum" (November 2002)
<https://wireless.fcc.gov/auctions/conferences/combin2003/papers/masterevanjohn.pdf>
- 2) FCC, "Connecting America: National Broadband Plan" (March 2010)
<https://www.fcc.gov/general/national-broadband-plan>
- 3) Middle Class Tax Relief and Job Creation Act of 2012。本法は、2012年2月末で期限切れとなる給与税減税や失業保険給付拡大策を同年末まで延長するもので、全体の予算規模は約1500億ドル。財源の一部を周波数オークションの収益で賄うことを想定している。
- 4) FCC, "Spectrum Analysis: Options for Broadcast Spectrum", OBI Technical Paper No.3 (June 2010)
<https://transition.fcc.gov/national-broadband-plan/spectrum-analysis-paper.pdf>
- 5) FCC, "REPORT AND ORDER In the Matter of Innovation in the Broadcast Television Bands: Allocations, Channel Sharing and Improvements to VHF" (2012年4月27日採択/発表)
https://transition.fcc.gov/Daily_Releases/Daily_Business/2012/db0427/FCC-12-45A1.pdf

注

- 6) CTIA, “Overview of the KLCS/KJLA Channel Sharing Pilot — A Technical Report” (March 28, 2014)
<https://api.ctia.org/docs/default-source/fcc-filings/technical-report-of-the-klcs-kjla-channel-sharing-pilot.pdf>
- 7) 2014年11月から2015年1月に実施されたAWS-3 オークション (1695-1710MHzおよび1755-1780/2155-2180MHz) の落札総額は約449億ドルで、米国でこれまでに実施された周波数オークションの中で最高額を記録した。
- 8) FCC, “REPORT AND ORDER In the Matter of Expanding the Economic and Innovation Opportunities of Spectrum Through Incentive Auctions” (2014年5月14日採択/6月2日発表)
<https://www.fcc.gov/document/fcc-adopts-rules-first-ever-incentive-auction>
- 9) FCC, “Report and Order In the Matter of Policies Regarding Mobile Spectrum Holdings, Expanding the Economic and Innovation Opportunities of Spectrum Through Incentive Auctions” (2014年5月15日採択/6月2日発表)
https://transition.fcc.gov/Daily_Releases/Daily_Business/2014/db0602/FCC-14-63A1.pdf
- 10) FCC, “Order on Reconsideration In the Matter of Policies Regarding Mobile Spectrum Holdings, Expanding the Economic and Innovation Opportunities of Spectrum Through Incentive Auctions” (2015年8月5日採択/8月11日発表)
<https://www.fcc.gov/document/fcc-reaffirms-pro-competitive-reserve-spectrum-incentive-auction>
- 11) FCC Announces Results of World's First Broadcast Incentive Auction (2017年4月13日)
<https://www.fcc.gov/document/fcc-announces-results-worlds-first-broadcast-incentive-auction-0>
- 12) Department for Culture, Media and Sport, “Connectivity, Content and Consumers: Britain's digital platform for growth” (July 2013)
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/225783/Connectivity_Content_and_Consumers_2013.pdf
- 13) FCC, “NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING In the Matter of Amendment of Parts 1, 21, 73, 74 and 101 of the Commission's Rules to Facilitate the Provision of Fixed and Mobile Broadband Access, Educational and Other Advanced Services in the 2150-2162 and 2500-2690 MHz Bands, Transforming the 2.5 GHz Band (2018年5月10日採択/発表)
<https://www.fcc.gov/document/fcc-seeks-transform-25-ghz-band-nextgen-5g-connectivity>

参考文献

- Paul Milgrom and Ilya Segal (2017), “Designing the US Incentive Auction”, Chapter 37 in Handbook of Spectrum Auction Design, Martin Bichler and Jacob Goeree (eds), Cambridge University Press
- 鬼木 甫 (2014) 「周波数オークションについて」 財務総合政策研究所 「効果的な政策ツールに関する研究会」報告書 第6章
- 海部美知 (2003) 「FCC Office of Planning and Policy (OPP)、周波数割当て方法の改革を提言」 (株) KDDI総研 R&A 2003 January
- 小川 敦 (2014) 「米国インセンティブオークションを巡る攻防」 (株) 情報通信総合研究所 InfoCom World Trend Report 2014年11月号 (No.308)
- 飯塚留美 (2017) 「周波数再編・周波数共用及び5G割当てをめぐる欧米動向」 内閣府規制改革推進会議 第3回投資等ワーキング・グループ 資料 2017年

5年後の 未来をを探せ

好田 誠 東北大学大学院准教授に聞く スピントロニクスが起こす コンピューターの飛躍的发展

取材・文：船木春仁 撮影：宇佐見利明

従来の技術の枠を超えた新しい理論によるITデバイスの研究が進んでいる。今、世界の研究者たちが競うのは「半導体スピントロニクス」だ。それは量子コンピューターの基礎技術競争にもつながる。半導体スピントロニクスの肝となる電子のスピン制御で、画期的な成果を連発しているのが東北大学大学院工学研究科の好田誠准教授だ。「半導体スピントロニクスの梁山泊」と言ってもいいほどの専門研究者が集まる東北大学でも異彩を放っている。

電子の電荷とスピンの「一挙両得」で 新しいデバイスを創造する

半導体スピントロニクスの研究とは、いわば「一挙両得」を狙う研究である。

トランジスタの発明と技術進化は、「革命」と呼ばれるほどの社会変革、つまりIT社会をもたらした。その主役で「産業の米」と呼ばれる半導体の技術的な肝は、電子が持っている電気としての性質の一つである「電荷（エレクトロニクス）」を利用している点にある。

現代のコンピューターは、文字や数字、色、音などの情報を、「0」と「1」を組み合わせた「2進法」で表現し、処理している。0と1は、電荷が流れているかどうか（電流）、電子のエネルギーが高いか低いか（電圧）といった状態の違いに対応している。

だが、電子は、電荷だけでなく、もう一つ別の性質を持っている。「スピン」である。電子が持つ微小な磁石としての性質や磁石の根源としての自転運動などをまとめて「スピン」と呼んでいる（図表1）。

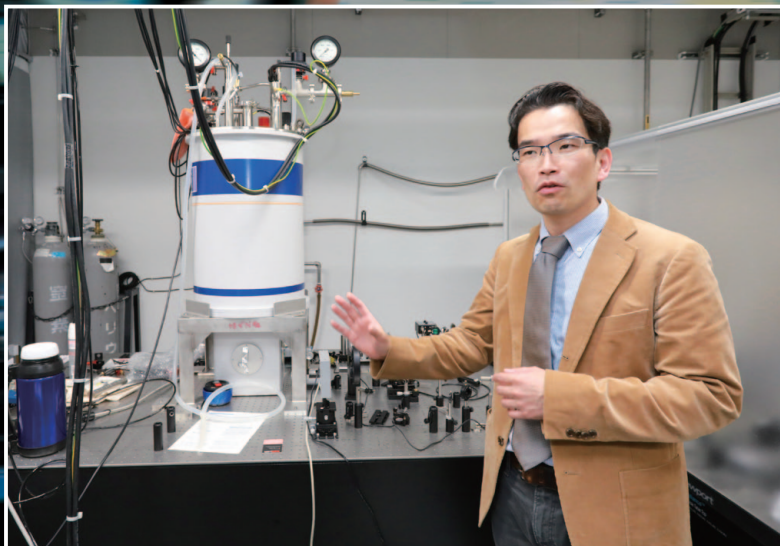
電子は原子核の周囲を軌道運動しながら、自身も自転に相当するような角運動量を有している。この角運動量、つまりスピンの存在は20世紀に入って予測され、確認された。私たちがよく知っている永久磁石は、N極とS極がはっきりと分かれている。逆にあまり磁力を持たない物質もある。その違いは、電子の軌道運動とスピンの生み出す磁力の総量の差だ。つまり電子の軌道とスピンの向きがバラバラなので磁力は生まれませんが、スピン方向がそろえば磁力が生まれ、その方向がそろえば磁力は強くなる。

半導体は、電子の電荷を利用することに力が注がれて進化してきた。一方、スピンの生み出す磁力については、主にハードディスクなど記録のための技術原理として進化してきた。それぞれの進化は、工学的な分野が異なるために別なものとしてあった。しかし、一度発想を変えて、電荷もスピンも、つまり電気と磁気の両方を併せて活用する一挙両得の技術を確立できれば、従来にはない画期的なデバイスを生み出せるのではないかと。これが半導体スピントロニクスの着想だ。

それを実現するための材料の探索や数々の現象の発

Makoto Kohda
好田 誠

東北大学 大学院 工学研究科・工学部 知能デバイス材料学専攻 ナノ材料物性学講座 量子材料学分野 准教授
1978年生まれ。2001年東北大学工学部電子工学科卒業、2005年同大学院工学研究科電子工学専攻博士課程後期修了。博士(工学)。2005年に東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻助教、2010年に准教授に就任し現在に至る。2008～2012年科学技術振興機構さがしさがけ研究員。2014～2015年IBMチューリッヒ研究所に海外派遣。受賞歴に2001年「応用物理学会」講演奨励賞、2010年「トーキン科学技術振興財団」研究奨励賞、2014年「本多記念会」研究奨励賞、2018年度「文部科学大臣表彰」若手科学者賞などがある。



見などの基礎研究だけでなく、不揮発性の磁気メモリーへの応用研究など幅広い取り組みがなされている。

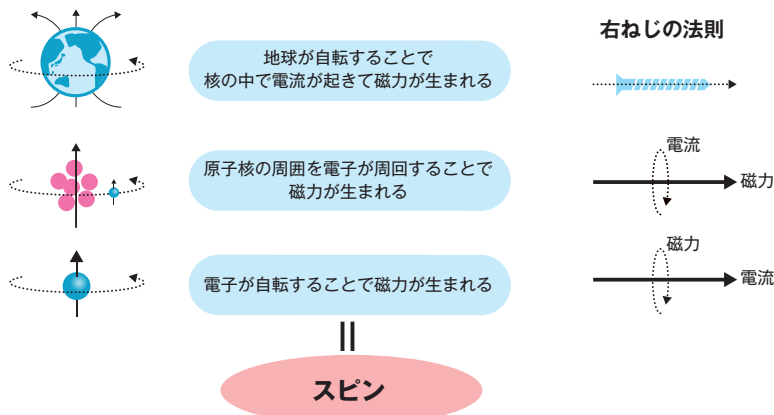
好田准教授は、「スピントロニクスは二つの視点から大いに注目されています」と言う。一つが産業的な側面からで、コンピューターシステムの消費電力の増加に対応する決定打として、スピントロニクスの技術に応用した不揮発性の磁気メモリーへの期待が高まっていること。もう一つが、従来の電荷を軸としたエレクトロニクスとは違う仕組みで動くデバイスを実現する基礎研究になること。究極は、「量子型」「脳型」などと呼ばれる新しいコンピューターシステムにつながると言う。

スピントロニクスはすでに、「1週間全番組録画」や低消費電力型新型メモリーを実現

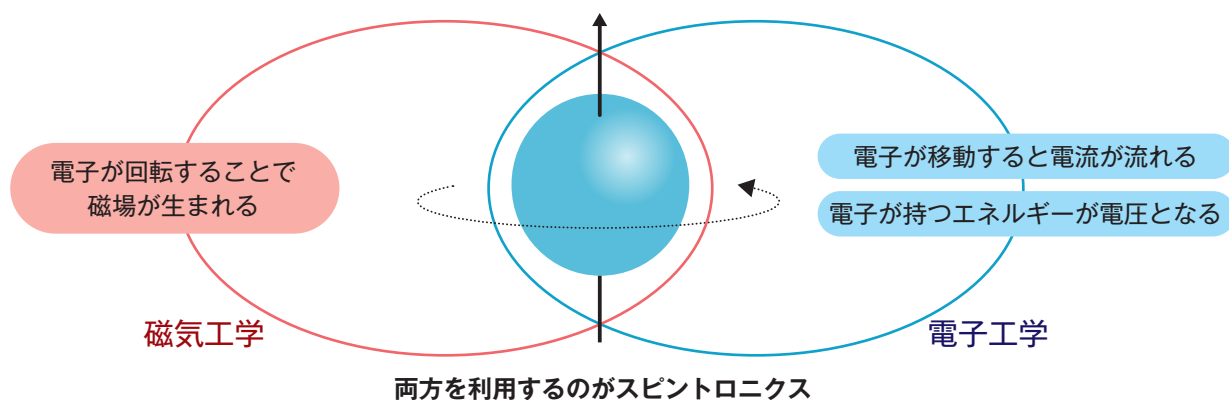
好田准教授の研究を知ってもらうために、もう少しスピントロニクスの周辺の状態を紹介した方がよいだろう。先に、「スピンの生み出す磁力は記録のための技術として」と紹介したが、それをデバイスの基本原理として実用化しているのがハードディスクだ。

ハードディスクは円盤状のディスクが磁性体で、データは、磁石のN極とS極の配列に置き換えられて記録されている(N極とS極を1、0とする)。データを読み出すのがレコード針のような磁気ヘッドだが、

図表1 電気と磁力は密接に関係している



図表2 磁気工学と電子工学は別々に発展した



ヘッド部分にスピントロニクスの現象や研究成果が採用されているのだ。

2層の磁性体の間に非磁性体や絶縁体の材料を挟み込み、両方を貫くように電流を流すと2層の磁性体の磁化する方向が同じ場合と逆向きの場合で電流の流れ方が変わり(「巨大トンネル磁気抵抗効果」「巨大磁気抵抗効果」などというスピントロニクスの現象)、結果的に電気抵抗が変化する。電気抵抗が大きくなるほど、磁界の微少な変化を正確に読み取れるようになる。虫眼鏡に例えるならば、電気抵抗が大きくなるのはレンズの倍率が上がるのと同じだ。

ハードディスクの円盤状ディスクには、1インチ(25.4ミリ)平方当たり100Gb(ギガビット)分、1bit当たりでは100ナノ平方メートル以下にまで小さくして記録できる技術がある。とすると、磁気ヘッドの電気抵抗が大きくなり磁界の微少な変化を読み取れるようになればなるほど、結果的に「読み取れる量が多い＝ハードディスクの大容量化」が実現する。



電気抵抗が大きな磁気ヘッド(倍率の高い虫眼鏡レンズ)を実現したのは、産業技術総合研究所ナノスピントロニクス研究センターの湯浅新治センター長で、「1週間全番組録画」ができるような大容量のハードディスクは、日本人研究者によるスピントロニクスの実用化研究のおかげだった。

そして、好田准教授が「コンピューターシステムの消費電力の増加に対応する決定打」と指摘したのが、磁気ヘッドで実用化を成し遂げた巨大トンネル磁気抵抗効果などを半導体集積回路と組み合わせたデータ保持の分野で生かそうとする試みであり、具体的には電源を切ってもデータが消えない不揮発性の磁気メモリー「MRAM」の開発だ。

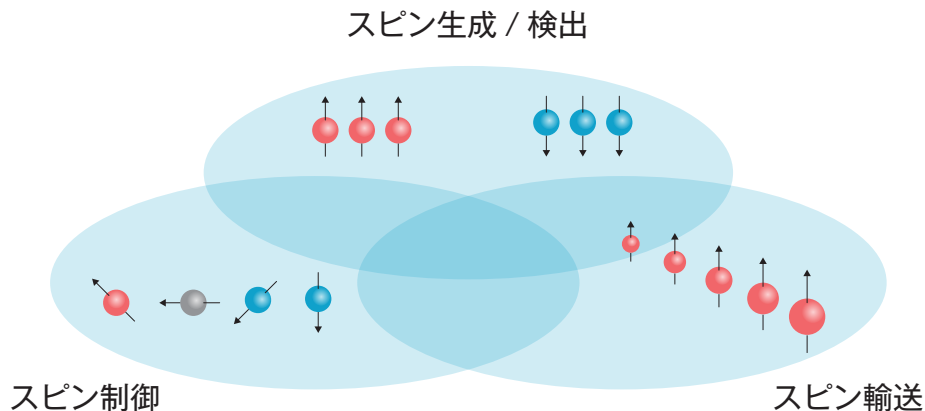
スピン現象を取り入れた省電力型メモリーの実用化が間近に

現在の半導体メモリーの主流であるDRAMは、記憶するデータをコンデンサーの電荷として蓄えるので、データを保持するためには電気を流し続けていなければならない。現在のパソコンが電源を落とすとデータが消えるのはこのためだ。

近年では、グーグルやマイクロソフト、IBMなどが、世界的な規模でクラウドサービスを展開し、AIを活用してビッグデータを解析する事業を急拡大している。ここでは膨大な量の半導体メモリーにデータを置くことで高速処理している。

必然的に、半導体メモリーを維持するために使われる電力も増える。世界のクラウドサービスの電力消費

図表3 スピントロニクスに必要な基盤技術



量は、世界の電力消費量の7%を超えたとの試算もある。電力問題が、クラウドサービスの拡充の壁になるとも指摘され始め、電力消費量の少ないデバイスが求められている。その期待に応える技術革新で、かつ對抗技術がないのがMRAMなのだ。

MRAMの最初の「M」が、磁気抵抗を示すMagnetoresistiveのMであるように、MRAMは磁気記録方式だ。磁化の方向は、一度書き換えられると、もう一度書き換えられるまでは状態を保持する不揮発性を持つ。すなわち電源が切られてもデータは消失しない。消費電力はDRAMの100分の1程度で済む。それが「早ければ1～2年以内に市場投入される」といわれ、実用化に向けて第4コーナーを回っている。

好田准教授は、「1チップの容量増加がどれぐらいのピッチで進むかは不明ですが、大容量化が進めばDRAMだけでなく、CPU内部に搭載されているキャッシュメモリーもMRAMに代わり、システム全体の電力消費量の削減に貢献していくと思います」と語る。

スピントロニクスのもう一つの実用化製品が、「家庭版MRI」だ。MRI（磁気共鳴画像装置）は、生体の微弱な磁界の状況を断層撮影して病理判定に生かす装置だ。X線撮影などと違って空気や骨による画像への影響がないので、頭部や脊髄、関節など動きの少ない部位の撮影に使われる。

ハードディスクの磁気ヘッドは磁界の微少な変化を読み取ると説明したが、これはMRIと基本発想は同じだ。MRIは、体の動きを安静にして大きな磁気ドラムで磁場の状況を捉える。これに対しスピントロニクスによる磁場観測装置は、磁界変化の読み取り範囲を狭

くしたりすれば小型化しやすく、「～しながら」の観測もできる。将来的には、スマートフォンと連動して症状の変化を報告できるようになるだろう。

外部磁場を使わずに 電荷もスピンも制御する

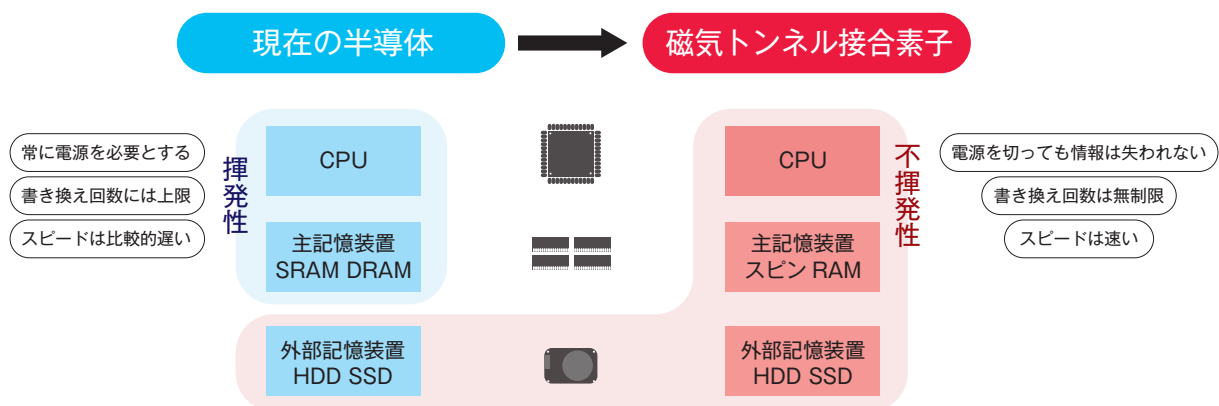
紹介したハードディスクの磁気ヘッドやMRAMの開発は、スピントロニクスの現象を最も効果的に大きく得られる素材の探究（例えば、酸化マグネシウムの活用）を軸に実現したものだ。しかし、好田准教授の研究の起点は、「スピンそのものを任意で生成したり、正確に制御できないか」にある。

研究の目標は、「電子の電荷は信号やデータ処理を行い、スピンは記録を蓄積するという二つの機能を一つの素子で同時に実現して、次世代の半導体デバイスを創造する」だ。別な言い方をすれば、「半導体の電気的な制御だけで電荷もスピンも制御する」。

それは果たして可能なのか。その方法の一つが、外部から別の磁場を加えることで電子スピンの向きや力を制御する方法だ。しかし、「外部から磁場を与えるのは、既存の半導体プロセスや集積化技術と組み合わせるのが難しく、また外部の磁場では装置の大きさの割には制御できる範囲が小さいなどの課題もあり、外部の磁場を使わず、半導体そのものによる制御によってスピンの向きがそろった電流を生み出すことが長い間、望まれていました」（好田准教授）。

そして好田准教授は、着々と目標の実現に向かう成果を生み出してきた。幸先も良かった。修士課程時代

図表4 スピントロニクスがコンピューターに革命を起こす



の研究は、いきなり高い評価を得た。強磁性体でもあり半導体でもある (Ga,Mn) As と n-GaAs を接合して電気を流すと、電子のスピンが同じ方向にそろった電流が n-GaAs に注入されることを見つけたのである。つまり「スピンは制御できる」の原点になった。

次の成果が、「永久スピン旋回状態の実現」だ。並んでいる個々の電子は、互いに独立に散乱されるのでスピンの向きはバラバラとなり、電気的な制御の場合、同じ方向にそろえて制御するのは難しいと考えられてきた。しかし、2003年にドイツの理論グループが、「隣り合う電子が別々に動いていてもスピンは常に同じ向きを保っている状態、すなわち永久スピン旋回状態は存在する」と予言した。これを実証してみせたのが好田准教授だった。

「永久スピン旋回状態の存在確認は、スピンの向きがバラバラにならず、電子1個ずつを長時間制御できる方策があることを示しました」(好田准教授)

そして2012年、遂に外部の磁場を用いずに電子のスピンをそろえることに世界で初めて成功する。しかも携帯電話や通信用レーザーなどで当たり前に使われている半導体材料である化合物半導体インジウムガリウムヒ素を使うことでスピンをそろえてみせたのである。

半導体内部で スピンを制御できることを、 世界で初めて実証

好田准教授の研究のキーワードは、「スピン軌道相互作用」という現象である。

原子核の周りを軌道運動する電子は、軌道運動から生じる磁場を感じるため、自身のスピンと生じた磁場とは互いに力を及ぼし合っている。これが「スピン軌道相互作用」だ。そして外部から磁場を加えていないのに、スピン軌道相互作用により電子スピンに対して実効的な磁場として影響し合う現象を「有効磁場」という。これらの現象を利用して、半導体内部でスピンの制御を完結させようとするのである。

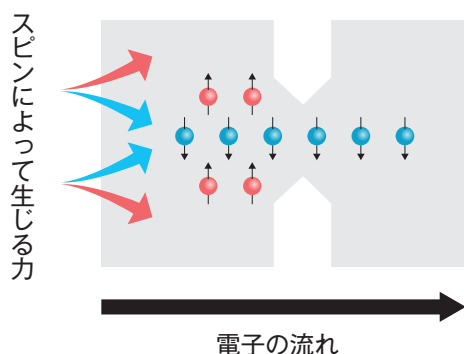
この研究での、電子のスピンを一方向にそろえる手法とはどんなものか。単純化して説明すると、まずスピンの方向がバラバラの状態になっている電子が流れるトランジスタ構造を作製する。その際、途中で量子コンタクトポイントと名付けた狭窄部分(ゲート)を作り込む。この構造の中を流れる電子に対して、電圧をかける方向やかけ方を適正に調整することで、ゲートを通り過ぎた電子のスピンの向きをそろえることができたのである(図表5)。

同じ原理を用いた従前の方法では、1メートル四方の大掛かりな装置を必要としていた手法しかなかったもので、実用にはほど遠かった。この研究は、半導体の中でスピンの電氣的生成が完結したことで、半導体デバイスへの応用の道が開けたことを意味する。

2013年には好田准教授も加わる研究チームが、電子の移動経路を適切に設計して電子の動きをコントロールすれば、スピンの向きを制御できることを発見した(移動スピン共鳴: 図表6)。デバイスの基本素子として利用するために必要な現象を生成できることが実証されたことになる。

好田准教授は、一連の成果を取り込んだ演算処理の

図表5 電子の流れの途中で狭窄構造を作りスピンをそろえる



仕組みも提案している。電子スピンの向きで0 / 1を表現することで情報の処理と記録ができる「スピントランジスタ」への応用や、集積回路へと発展させることができる仕組みである。

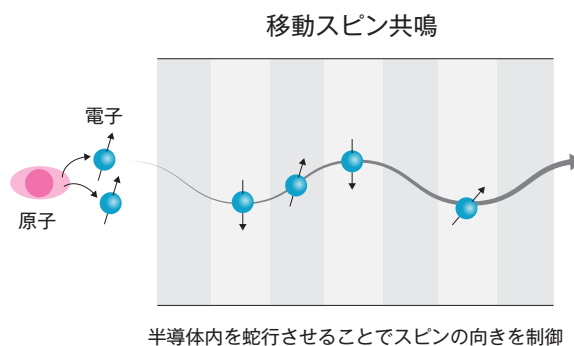
「そもそも永久スピン旋回状態を再現できる研究チームは世界に3～4チームぐらいしかなく、具体的なデバイス作りも私たち自身の手でやるしかありません」と好田准教授は笑う。

「電子スピンにダンスを踊らせる」 その夢が近づいてきた

一連の基礎研究で、スピンの生成と制御を任意に行えるとすれば、それは量子コンピュータの実現にも一歩近づく。電子スピンは、量子コンピュータの基本素子の有力候補の一つとされているのだ。ややこしい話ではあるが、量子コンピュータの情報処理の基本も0 / 1で従来のコンピュータと変わらないが、0 / 1が別なものではなく、0でもあり1でもあるとする“重ね合わせ”状態で同時計算を行い、膨大な量の情報の高速処理を実現する。

「量子コンピュータの素子候補には電子スピンだけでなく光粒子、超電導素子などがありますが、どれが本命になるかはまだ断定できません。ただ、量子コンピュータそのものは私が現役でいる間、つまり2030年から40年代にぐらいまでには、実現したいですね。もちろん電子スピンを、本命の素子に育て上げたい。その上で、生産性の効率に資するとか、セキュリティ技術の高度化のためなど、どのようなタイプの量子コ

図表6 電子のスピンの向きを制御する新しい方法



ンピューターが必要とされるのかは、この先5年ぐらいの間に、グーグルやIBMなどの実証研究で先行している巨大企業の動向から見えてくるのではないのでしょうか。それによって例えば、スピンの生成や制御方法にも工夫が必要になるかもしれません」(好田准教授)

基礎研究の未来を語るときには、不揮発性メモリーや量子コンピュータの開発など、どうしても技術の実用化という視点に力が入ってしまうが、基礎研究そのものの魅力を忘れてはならない。東北大学HPでの若手研究者インタビューで好田准教授が答えている一節が、研究の方向を上手に表現しているように感じる。

「従来の磁場による制御とは、まったく異なる新規的なアプローチで、スピンの一軸方向にそろって、まるでダンスをしているように動くミクロの世界の美しい情景を追い求めています」

ダンスの振り付けができる日は遠くない。



「Nextcom」 論文公募のお知らせ

本誌では、情報通信に関する社会科学分野の研究活動の活性化を図るため、新鮮な視点を持つ研究者の方々から論文を公募します。

【公募要領】

申請対象者：大学院生を含む研究者

＊常勤の公務員（研究休職などを含む）の方は応募できません。

論文要件：情報通信に関する社会科学分野の未発表論文（日本語に限ります）

＊情報通信以外の公益事業に関する論文も含みます。

＊技術的内容をテーマとするものは対象外です。

およそ1万字程度（刷り上がり10頁以内）

選考基準：論文内容の情報通信分野への貢献度を基準に、Nextcom 監修委員会が選考します。
（査読付き論文とは位置付けません）

公募論文数：毎年若干数

公募期間：2018年4月1日～9月10日

＊応募された論文が一定数に達した場合、受け付けを停止することがあります。

選考結果：2018年12月ごろ、申請者に通知します。

著作権等：著作権は執筆者に属しますが、「著作物の利用許諾に関する契約」を締結していただきます。

掲載時期：2019年3月、もしくは2019年6月発行号を予定しています。

執筆料：掲載論文の執筆者には、5万円を支払います。

応募：応募方法ならびに詳細は、以下「Nextcom」ホームページをご覧ください。

その他：1. 掲載論文の執筆者は、公益財団法人KDDI財団が実施する著書出版助成に応募することができます。
2. 要件を満たせば、Nextcom 論文賞の選考対象となります。
3. ご応募いただいた原稿はお返しいたしません。

「Nextcom」ホームページ

<https://rp.kddi-research.jp/nextcom/support/>

問い合わせ先：〒102-8460 東京都千代田区飯田橋3-10-10 ガーデンエアタワー
株式会社 KDDI 総合研究所 Nextcom 編集部

2018年度 著書出版・海外学会等参加助成に関するお知らせ

本誌では、2018年度も公益財団法人KDDI財団が実施する著書出版・海外学会等参加助成に、候補者の推薦を予定しています。

【著書出版助成】

助成内容：情報通信に関する社会科学分野の研究に関する著書への出版助成

助成対象者：過去5年間にNextcom誌へ論文を執筆された方*

助成金額：3件、各200万円**

受付期間：2018年5月1日～9月10日（書類必着）

【海外学会等参加助成】

助成内容：海外で開催される学会や国際会議への参加に関わる費用への助成

助成対象者：情報通信に関する社会科学分野の研究者（大学院生を含む）*

助成金額：北米東部 欧州 最大40万円 北米西部 最大35万円 ハワイ 最大30万円
その他地域 別途相談（総額300万円）**

*常勤の公務員（研究休職中などを含む）の方は応募できません。

Nextcom誌に2頁程度のレポートをご執筆いただきます。

**助成総額が上限に達し次第、受け付けを停止することがあります。

推薦・応募：いずれの助成も、Nextcom監修委員会において審査・選考し、公益財団法人KDDI財団へ推薦の上、決定されます。応募方法ならびに詳細は、以下「Nextcom」ホームページをご覧ください。

「Nextcom」ホームページ

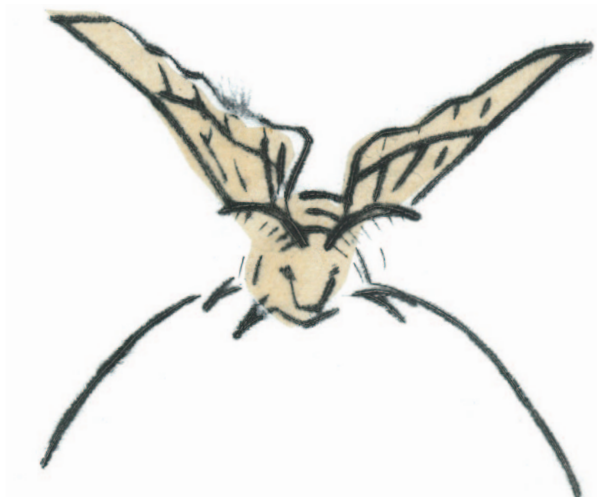
<https://rp.kddi-research.jp/nextcom/support/>

問い合わせ先：〒102-8460 東京都千代田区飯田橋3-10-10 ガーデンエアタワー
株式会社 KDDI 総合研究所 Nextcom 編集部

彼らの流儀はどうなっている？ 執筆：神崎 亮平 絵：大坪 紀久子

昆虫の脳がロボットを操作する。そんなサイボーグ昆虫の研究からは、自然が脳をつくりあげたルールが見えてくる。

自然環境に潜む情報 昆虫から探る

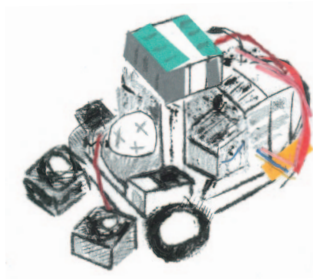


AIもかなわない能力

生物は多様な環境下で進化し、現在180万種以上が生息する。その中で実に半数(100万種)以上を占めるのが昆虫である。言い換えれば、昆虫は多様な環境下での情報を使い、どのように行動すれば課題が解決するかを教えてくれる生物ともいえる。

昆虫の行動をコントロールする脳はせいぜい数ミリの大きさだが、ヒトと同じ神経細胞(ニューロン)からできている。ヒトの脳が1000億ものニューロンからなるのに対して、昆虫はわずか10万程度と桁違いに少ない。にもかかわらず、生得(本能)的な行動はもとより、学習や情動行動、さらに顔認識などヒトにも匹敵する能力を示す。さらに、仲間に餌場の方向と距離を伝え、数キロ離れたパートナーを匂いで探し出し、アクロバティックに飛行しながら衝突を回避するなど、想像を超え

1957年生まれ。1986年筑波大学大学院博士課程修了。筑波大学生物科学系教授、東京大学大学院情報理工学系研究科教授などを経て2006年より現職。理学博士。生物の環境適応能（生命知能）の神経科学に関する研究を行う。



た行動をやっけてのける。このような能力の背景には、ヒトには見えない波長の光を検出し、嗅げない匂いを感じ、物体の角度検出だけで衝突回避するという、われわれの感覚世界とは異なる信号や、異なる特徴を利用するしくみがある。自然環境に潜む情報を検出して振る舞う昆虫には、さすがのAIもかなわないだろう。なかでも、遠く離れた匂いを嗅ぎ分けて探し出す能力は驚異的だ。

最近、このような昆虫の嗅覚能力が再現できるようになってきた。まずは匂いのセンサだが、昆虫の触角には匂いを検出するセンサとなる細胞（嗅覚受容細胞）がある。その表面にある蛋白質（嗅覚受容体）に特定の匂い分子が付くと、電流が流れてセンサが反応する。昆虫の嗅覚受容体は選択性が高く、少ない種類の匂いにしか反応しない。1種の昆虫で数十個の特性の異なる嗅覚受容体がある。昆虫は100万種もいるので、その数は無限ともいえる。

嗅覚受容体の遺伝子が特定されるようになり、受容体を遺伝子工学により自在に扱えるようになった。例えば、本来メスの匂い（フェロモン）に反応するオスの匂いセンサ（嗅覚受容細胞）に、特定の匂いに反応する嗅覚受容体を発現させると、触角はその匂いに反応するセンサとなり、オスはその匂いを探さることになる。センサが爆発物の成分に反応すれば、爆発物を探し出す「警察昆虫」となるわけだ。

サイボーグ昆虫 匂いを探索

匂い源を探索するしくみは昆虫の小さな脳に潜んでいる。昆虫の脳だと一つひとつのニューロンにまで分解してその形や機能を分析できる。匂いを探索する命令は脳内の神経回路で作られるが、その命令（行動指令信号）を運ぶニューロンが明らかになった。実際に、小型移動ロボットに昆虫を

搭載し、計測した行動指令信号でコントロールすると、昆虫のように動き出し、見事に匂い源を探索した。脳とロボットが融合した「サイボーグ昆虫」である。

匂い源探索の指令をつくる神経回路は、一つひとつのニューロンからジグソーパズルを組み立てるように、「京」スーパーコンピュータに精密に再構築され、そのシミュレーションをリアルタイムで行えるようになってきた。触角を匂いセンサとしたロボットに簡略化した神経回路モデルを搭載したところ、本物の昆虫にはまだ及ばないものの、匂い源を探索した。

自然環境にはまだわれわれの知らない有用な情報が多くある。そこに潜む情報を昆虫から探り出し、生物センサや神経回路を精緻に再現することで、その情報を活用した新しいモノづくりが始まった。生物が進化で獲得した情報伝達のしくみを活用した環境や人にやさしいモノづくりである。

人間の合理性には限界がある
……ハーバート・A・サイモン

不合理でも大丈夫

高橋秀実

昨今注目を集めている「行動経済学」は、もともと経営学者ハーバート・A・サイモンの「人間の合理性には限界がある」という言葉が端緒らしい。学術用語としては「限定合理性」。何やら科学っぽい印象があるのだが、人間のすることにはすべて限界があるわけで当たり前といえば当たり前である。しかしそれまでの経済理論は「合理的人間」を前提としていたという。同じ商品なら安いほうを買う、サービスがよいほうを選ぶなどと決めつけており、彼は「そうとは限らない」と指摘したのだ。

実は私も合理性の限界には気がついていて。例えばスーパーでの買い物。なるべく安いものを買おうとして20%引きの日に出かけたりするのだが、現場で「はて？」と思う。定価の20%引きとあるが、その定価がそもそも高くなっていないか。もしかすると隣のスーパーのほうが安いのではないか。隣の隣、あるいはそのまた隣のスーパーやネッ

ト通販のほうが実は安いのではないか。すべてを比較しないと「安い」とは言い切れず、たとえどこかに「安い」ものがあると分かってもそれを買うに行く労力や、ポイントサービスや駐車料金のことも勘案しなければならず、勘案に時間を浪費することになる。まさに合理性の限界。

しかし私は「合理的決断をした」と納得したいわけで、だから店側も後押しすべく「お買い得」などとしきりに宣伝する。要するに合理性とは、現実存在するものではなく売り買いにおける方便にすぎないのである。

サイモンはノーベル経済学賞を受賞している。私などよりはるかに深い洞察がされているのだろうと『経営行動』*を読んだのだが、経営者は合理的意思決定をするために幅広い知識が不可欠、個人の合理性を組織の合理性に合わせていく努力が必要という具合に、凡庸なことが重畳的に綴られていた。不合理を理論化、つまり合理化しよう

article: **Hidemine Takahashi**

ノンフィクション作家。1961年横浜市生まれ。東京外国語大学モンゴル語学科卒業。

『ご先祖様はどちら様』で第10回小林秀雄賞、『弱くても勝てます』開成高校野球部のセオリー』で第23回ミズノスポーツライター賞優秀賞受賞。

他の著書に『からくり民主主義』『損したくないニッポン人』『不明解日本語辞典』など。近著に『定年入門 イキイキしなくちゃダメですか』（ポプラ社）。

としているようだが、そもそも不合理という概念は合理を前提として生まれるので、堂々巡りに陥るのは必定だろう。人間の理解にはむしろ最初から「合理」という考えを捨てたほうがよいのではないだろうか。

そういえばテレビを購入するとき、私がどの機種にすべきかと悩んでいると、店員が「値段も機能も同じですが、やっぱりこれ」とある機種を指差した。「なぜ?」と問うと、「CMに吉永小百合が出てます。なんてったって吉永小百合ですから」。いきなり不合理なことを言われて、私は大笑いした。不合理には限界がない。笑い飛ばせば冷静に合理性も考えられるような気がするのである。

* 二村敏子他訳『新版 経営行動—経営組織における意思決定過程の研究』ダイヤモンド社 2009年

背景

「限定合理性」を説いたアメリカの経済学者ハーバート・A・サイモン(1916～2001年)は情報処理論、心理学、認知科学など多くの分野に影響を与えたといわれる。1978年、意思決定の理論的研究により、ノーベル経済学賞を受賞。

編集後記

理屈は分かるがどうにも納得できない、説明されても腑に落ちない……。

かつてアメリカで大論争を巻き起こし、今なお多くの人々の心を惑わす確率問題として、モンティ・ホール問題はあまりにも有名です。常にデータに基づく合理的な判断を下すことができるAIとは違って、市場経済の場においてもやはり認知バイアスに振り回されてしまう私たちですが、これもある種の人間らしさ、愛すべき個性なのかもしれません。次号の特集は「電力事業論考(仮)」を予定しています。ご期待ください。

(編集長 しのはらそうべえ)

Nextcom (ネクストコム) Vol.35 2018 Autumn
平成30年9月1日発行

監修委員会

委員長 菅谷 実(白鷗大学 経営学部 客員教授／
慶應義塾大学 名誉教授)
副委員長 辻 正次(神戸国際大学 経済学部 教授／
大阪大学 名誉教授)
委員 依田 高典(京都大学 大学院 経済学研究科
(五十音順) 教授)
川濱 昇(京都大学 大学院 法学研究科 教授)
田村 善之(北海道大学 大学院 法学研究科
教授)
舟田 正之(立教大学 名誉教授)
山下 東子(大東文化大学 経済学部 教授)

発行 株式会社KDDI総合研究所
〒102-8460 東京都千代田区飯田橋3-10-10 ガーデンエアタワー
TEL: 03-6678-6179 FAX: 03-6678-0457
URL: www.kddi-research.jp

編集協力 株式会社ダイヤモンド社
株式会社メルプランニング
有限会社エクサビーコ (デザイン)
印刷 瞬報社写真印刷株式会社

本誌は、わが国の情報通信制度・政策に対する理解を深めるとともに、時代や環境の変化に即したこれからの情報通信制度・政策についての議論を高めることを意図しています。
ご寄稿いただいた論文や発言などは、当社の見解を示すものではありません。

- 本誌は当社ホームページでもご覧いただけます。
<https://rp.kddi-research.jp/nextcom/>
- 宛先変更などは、株式会社KDDI総合研究所Nextcom (ネクストコム) 編集部にご連絡をお願いします。(Eメール: nextcom@kddi-research.jp)
- 無断転載を禁じます。