

金融研究

2025 年 7 月 / 第 44 卷 第 3 号

ファイナンス・ワークショップ
「気候ファイナンス研究の進展」の様

気候ファイナンス：研究の進展と今後の課題 平木一浩

	田村裕子 / 阿部正幸
	奥田哲矢 / 津川天祐 / 宮澤俊之
台帳を用いない決済方式に関する	山村和輝 / 赤羽喜治 / 田口智貴
技術面からの一考察	平栗勇人 / 増田博人 / 山田健斗

日本銀行金融研究所

日本銀行 金融研究所

Institute for Monetary and Economic Studies (IMES)

Bank of Japan

特別顧問

星 岳雄 東京大学教授

国内顧問

大橋 和彦 一橋大学・東京科学大学教授

粕谷 誠 東京大学教授

神田 秀樹 東京大学名誉教授

塩路 悦朗 中央大学教授

福田 慎一 東京大学教授

海外顧問

Markus K. Brunnermeier

Edwards S. Stanford Professor of Economics, Princeton University

Athanasios Orphanides

Professor of the Practice, Global Economics and Management, Massachusetts Institute of Technology

所 長

渡辺 真吾

本誌に掲載されている論文等の内容や意見は、執筆者個人に属し、日本銀行あるいは金融研究所の公式見解を示すものではありません。

金融研究

2025 年 7 月 / 第 44 卷 第 3 号

目次

- 1 ファイナンス・ワークショップ
「気候ファイナンス研究の進展」の様

- 15 気候ファイナンス：研究の進展と今後の課題

平木一浩

- 79 台帳を用いない決済方式に関する
技術面からの一考察

田村裕子／阿部正幸
奥田哲矢／津川天祐／宮澤俊之
山村和輝／赤羽喜治／田口智貴
平栗勇人／増田博人／山田健斗

- 137 金融研究所の概要等

ファイナンス・ワークショップ 「気候ファイナンス研究の進展」の 模様

1. 概要

日本銀行金融研究所は、2024年11月8日に「気候ファイナンス研究の進展」と題するファイナンス・ワークショップを対面・オンラインのハイブリッド形式で開催した¹。3つの研究報告が行われ、指定討論者、参加者、報告者との間で活発な議論が行われた。本稿では、ワークショップの模様を順に紹介する。

2. 開会挨拶

諏訪園健司（日本銀行理事）は、日本銀行の気候変動に関する取組みについて、金融機関との対話や国際的な議論への参画を積極的に進めつつ、物価の安定と金融システムの安定という使命に沿って進めていると述べた。金融研究所においても、経済学・ファイナンス・法学・会計学の分野でリサーチ論文を公表するなど、調査研究の観点から気候変動に関する取組みを続けていると紹介した。とりわけ、ファイナンス分野の研究では、近年、データ活用や分析手法の開発が進むことで、さまざまな切り口から研究が急速に進展しており、今回のワークショップで活発な議論が期待されると述べて、開会の挨拶を締めくくった。

.....
本稿に示された意見はすべて発言者たち個人に属し、その所属する組織の公式見解を示すものではない。

1 プログラムは参考1、参加者リストは参考2を参照。所属と肩書はワークショップ開催時点のもの。

3. 研究報告セッション

(1) 気候ファイナンス：研究の進展と今後の課題

報告者の平木一浩（国際通貨基金）は、近年急速に研究が進展する気候ファイナンスについて、金融市場の価格発見・リスク移転機能と金融仲介機能の切り口から、最新の研究動向と課題を概観した。

平木は、最初に、金融市場の価格発見・リスク移転機能がしっかりと発揮されるもとで、気候関連リスクが金融資産価格に適切に反映されているかどうか検証した文献を紹介した。一例として、炭素排出量が少ないグリーン銘柄と、排出量が多いブラウン銘柄の株価リターンを比較し、ブラウン銘柄のリターンはグリーン銘柄よりも高く、移行リスクは株価に織り込まれているとする Bolton and Kacperczyk [2023] を紹介した。最近の研究ではグリーン銘柄がより高いリターンを示すとする実証研究も数多く報告されていると付言し、これらの相反する結果を解釈することは容易ではないが、現在は気候関連リスクが十分に考慮されていないという意味でのミスプライシングが修正されていく過渡期にある可能性があるとした。また、平木は、リスク移転のための手段の提供は、金融市場が果たす重要な役割の1つと述べたうえで、気候変動は極めて広範な経済主体に対して共通の影響を及ぼすことから、大数の法則を利用したリスク管理は難しいと指摘した。こうしたもと、近年では、気候変動リスクをヘッジする株式のロングショート・ポートフォリオの構築に関する研究が進展していることを紹介した。そのうえで、平木は、気候関連リスクの資産価格への織込みにしてもロングショート・ポートフォリオの構築にしても、データの蓄積とともに実証研究を積み重ねていくことが重要であると主張した。

平木は、次に、気候変動対応には多くの資金が必要とされることから、金融市場における金融仲介機能が重要であると指摘したうえで、近年、サステナブル投資が増えていると述べた。続けて、サステナブル投資の最も重要な目的は、企業に排出量を減らすような行動を促すことであると述べ、サステナブル投資が企業の行動に与える影響を分析した文献を紹介した。そのなかで、最近の研究結果は、サステナブル投資が気候変動対応を効果的に促していくためには、現在の炭素排出量ではなく、将来の排出量削減に着目して投資先企業を選定することが望ましいことを示唆していると論じた。また、企業への投資が環境技術に活用されていないなど、グリーンウォッシュと呼ばれる見せかけの取組みの存在を示唆する研究が散見されており、分析の進展が重要であると述べた。今後の課題として、平木は、投資主体が

より適切に投資先企業を選定し、サステナブル投資の実効性を高めるためには、実証研究の積重ねに加え、ESG（Environment, Social, Governance）スコアなどの気候関連データの整備なども欠かせないと指摘した。

指定討論者の篠潤之介（早稲田大学）は、本研究の重要な貢献として、気候ファイナンスに関する実証分析のサーベイに加えて、多くの実証分析結果を評価するうえで有益な理論的枠組みを整理したことを挙げた。特に、ESG 投資を考慮した CAPM（ESG-adjusted Capital Asset Management Model、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021]）を用いて、投資先企業の選定の際に ESG スコアを利用するか、あるいは ESG スコア自体に非金銭的効用を見出すかといった投資家タイプの違いが、金融資産価格に異なる影響を及ぼしうることを体系的に解説した点を高く評価した。また、投資家タイプの構成比に応じて、グリーン銘柄が割高になったりブラウン銘柄が割高になったりするため、相反する実証分析の結果を解釈するうえで、ESG 投資を考慮した CAPM は有益であると論じた。さらに、気候変動を考えるうえでの社会的割引率について、複数の見方を体系的に整理した点も本サーベイの貢献の 1 つであると評価した。最後に、篠は、今後の研究の方向性として、ESG 投資を考慮した CAPM における ESG ファクターの回帰係数と ESG スコアの関係を調べることで、ESG スコア自体に非金銭的効用を見出す投資家がどの程度存在するかを考察することや、日本政府が発行を開始した GX（Green Transformation）債に関する情報を用いて、グリーンアム（グリーン債の利回りとグリーン特性以外同等な債券の利回りとの差異）の存在や価格形成メカニズムを分析することは、非常に興味深いと述べた。

フロアから、大橋和彦（一橋大学・東京科学大学）は、気候関連リスクが適切に資産価格に織り込まれているかどうかを理論モデルにより把握する際の留意点や、複数の先によって算出・提供されている ESG スコアのばらつきを勘案した調査・研究について質問した。平木は、気候関連リスクの資産価格への織込みについては、モデル分析だけに依存して評価するのではなく、グリーンアムの状況等も確認するなど総合的に評価することが重要であると回答した。また、気候ファイナンス研究をサーベイするなかで、ESG スコアを算出するにあたって提供先の重視するポイントの相違ではなく、テクニカルな手法の違いを背景とした ESG スコアのばらつきについては、ある種のノイズとして好ましくないとする研究が多いという印象を持っていると述べた。渡部敏明（一橋大学）は、ESG 投資を考慮した CAPM を使用するうえでの留意点と、気候変動リスクの把握に天候デリバティブ等の市場情報を活用する可能性について問うた。平木は、今回紹介した ESG 投資を考慮した CAPM は、通常の CAPM に ESG 要素を加えた比較的簡便なモデルであり、モデルの内容や結果を解釈しやすい一方、気候関連リスクの資産価格への織込み等をより定量的に考察するには、モデルを精緻化していくことも重要であると指摘した。

また、気候変動問題は、極めて広範な経済主体に対して共通の影響を及ぼすことから、天候デリバティブを用いてリスクヘッジすることは容易ではないとする研究を紹介しつつ、天候デリバティブの価格から気候変動リスクを把握することは難しいのではないかと述べた。

鷹岡澄子（成蹊大学）は、信用格付けの研究では、格付け機関による格付けのばらつきが市場参加者にとって有益な情報になっていると指摘する研究が存在するが、ESG スコアに関する研究では、スコアのばらつきはどのように評価されているかと質問した。これに対し、平木は、論文サーベイでは、ESG スコアのばらつき自体が有益な情報を有していると報告する研究は見当たらなかったが、そうした視点で調査することは興味深いと応じた。この点、白須洋子（青山学院大学）は、ESG スコアのばらつきについて、投資家自身が提供先の算出方法を理解し、ばらつきの背景を考察するという機会を与えるという意味において、前向きに評価する最近の研究を紹介した。

白須は、気候ファイナンス研究で聞かれるグリーンiumを含むリスクプレミアムと伝統的ファイナンス研究の文脈で用いられるリスクプレミアムとの相違について問うた。平木は、リスクプレミアムには先行きの不確実性が反映されている点に違いはないと述べつつ、気候関連リスクについては、近年のリスク認識の醸成がリスクプレミアムとして徐々に現れていると指摘した。有村俊秀（早稲田大学）は、米国市場と欧州市場における実証研究の結果の違いについて、五島圭一（横浜国立大学）は、実証研究を行ううえでのデータベースの重要性について尋ねた。平木は、論文をサーベイしたなかで、実証分析の結果に顕著な違いはみられなかったとの印象を持っていると言及したうえで、欧州は他の国・地域と比べて、気候変動に関する制度や意識の面に加え、実証研究やデータ整備の面でも進んでいると述べた。沖本竜義（慶應義塾大学）は、投資家の気候関連リスク認識を促し金融安定を図るために、中央銀行が果たす役割について問うた。これに対し、平木は、金融安定の観点から、中央銀行がシナリオ分析やヒアリング等を行い、その内容を情報発信することが重要だろうとの見解を述べた。

(2) Credit Default Swaps and Corporate Carbon Emissions in Japan

沖本は、世界の ESG 投資が過去 15 年で急速に拡大してきたことを紹介し、金融市場が企業の炭素排出量を金融資産価格にどのように反映してきたか把握することの重要性を指摘した。そのうえで、炭素排出量に対する市場の評価について、クレジット・デフォルト・スワップ（Credit Default Swap: CDS）に着目して実証分析を

行い、その結果を紹介した（鷹岡との共同研究）。

まず、**沖本**は、市場参加者が炭素排出量を活発な企業活動の裏返しとみなしていると、炭素排出量と企業のリスクを示す CDS スプレッドには負の関係が生じると考えられると説明した。他方、市場参加者が炭素排出量を将来の規制対応へのコスト（カーボン・リスク・プレミアム）とみなしていると、炭素排出量と CDS スプレッドには正の関係が観察されることが予想されると述べた。こうしたもと、**沖本**は、2005 年から 2019 年までの本邦 CDS 市場のデータを用いて、カーボン・リスク・プレミアムの存在とその時系列変化を推計した。その際、企業の炭素排出量の扱いについては、事業者自らによる温室効果ガスの直接排出（Scope 1）、他社から供給された電気・熱・蒸気の使用に伴う間接排出（Scope 2）、事業者の活動に関連する他社の排出（Scope 3）に分類したうえで、外れ値への対処や技術進歩の勘案を目的として、推計にあたっては、排出量そのものではなく、各分類の排出量から計算される順位を用いたことを解説した。

沖本は、推計結果を示しつつ、国際連合を中心に責任投資原則が提唱された 2006 年以前は、炭素排出量と CDS スプレッドには負の関係が存在するなど、顕著なカーボン・リスク・プレミアムは確認されないと指摘した。もっとも、年々投資家の ESG への認識が高まるに連れて、同プレミアムは拡大しており、炭素排出量は規制コストとして認識されてきていると指摘した。また、カーボン・リスク・プレミアムの大きさはセクターに依存すると述べ、ヘルスケア・通信・テクノロジー・金融といった排出量削減が容易と分類されているセクターでは、エネルギー・素材といった削減が難しいと分類されているセクターと比べて、同プレミアムが大きいとの結果を示した。さらに、排出量削減が容易と分類されているセクターでは、格付けが低い企業ほどカーボン・リスク・プレミアムが大きく、排出量削減が難しいと分類されているセクターでは、格付けと同プレミアムには明確な関係性が確認されないと指摘した。最後に、**沖本**は、政策インプリケーションとして、炭素排出量の削減が難しいと分類されているセクターでは、カーボン・リスク・プレミアムが小さく、炭素排出が CDS スプレッドの拡大につながらないなど、金融市場の評価が企業にとって排出量削減のインセンティブになり難いとの見解を述べたうえで、こうしたセクターに属する企業については、排出量削減技術導入に対する補助金などを活用して、排出量削減に取り組んでいくことが重要であろうと論じた。

指定討論者の**白須**は、本研究は、本邦企業の CDS スプレッドの長期データと信用度の高い気候関連データベースを用いて、さまざまな頑健性チェックも含む豊富な実証分析を行っている力作であると評価した。そのうえで、本研究では、炭素排出量の順位を指標として用いているが、炭素排出量を使った実証分析では、見せかけの関係を排除する目的もあって、炭素排出量を売上高等で除した指標（炭素強度）を用いることが少なくないと論点提起した。また、最近の研究を紹介しつつ、

2015年のパリ協定の採択に伴い、例えば欧州以外の国・地域では、サステナブル投資手法がダイベストメントからエンゲージメントに移行している可能性を指摘した。さらに、エネルギー消費量が多く技術開発により積極的に取り組んでいるとみられる企業では、はっきりとした炭素排出量の削減が確認されるとの分析結果を示しつつ、炭素排出量削減がCDS スプレッドに及ぼす影響は、排出量削減の背景が技術開発か事業縮小かによっても異なりうると指摘した。そのほか、本研究において、投資家のESGへの認識を捉える変数として用いられている責任投資原則への署名数について、署名した投資家間においても環境への取組み姿勢が異なっているとの見方を示した。最後に、白須は、これらの点に注目してさらに分析を深めていくことは、カーボン・リスク・プレミアムを丁寧に評価するうえで有益であると述べた。

これに対して、沖本は、本研究では、炭素排出量の順位の代わりに炭素強度を用いた分析も行っており、得られた結果に顕著な違いはみられないと述べたうえで、過去と現在の1トンの炭素排出量の意味合いはその間の技術進歩等を背景に異なっていると説明しつつ、この点からすると、炭素排出量や炭素強度を用いて分析するよりも、順位に変換して分析の方が適切と考えられると主張した。続けて、分析を行うにあたり投資家の認識変化を勘案することは重要であると同意したうえで、2010年代半ば以降にダミー変数を加えて分析しても、結果に明確な違いは確認されないと述べた。また、分析には排出量削減の背景を考慮していないものの、事業縮小が主な要因であれば、炭素排出量の削減はCDS スプレッドの拡大に寄与すると考えられると説明したうえで、本研究ではこれとは反対の結果が得られており、排出量削減の主な要因は企業の技術開発ではないかとの見方を示した。最後に、責任投資原則に署名した投資家の中にも環境への取組み姿勢が必ずしも積極的でない投資家が存在することは否定しないが、その割合が安定的であれば、責任投資原則への署名数は投資家の認識を捉える妥当な変数と考えられると返答した。

フロアから、水門善之（野村證券）は、分析期間にCDS市場の流動性が著しく低下していたリーマン・ショック時が含まれていることから、推計のコントロール変数としてCDS インデックス等を用いることが望ましいと指摘した。これに対し、沖本は、コントロール変数としてCDS インデックスを用いていないものの、金融市場全体を表すボラティリティを使用していると応じた。さらに、共著者の鷹岡は、推計では、個別銘柄のCDSの流動性を示す指標を用いて、流動性の影響をコントロールしていると付言した。

渡部は、社債超過プレミアムと景気予想との関係性に言及しつつ、本研究を活用して炭素排出量を考慮した超過プレミアムを計測することも興味深いと述べた。また、セクター別の分析において、相対的に排出量削減が容易なセクターと難しいセクターをどのように分類しているかと質問した。沖本は、質問に対して、何かの

データを基に固有の排出量削減の困難度合いを計測している訳ではなく、広く用いられている世界産業分類基準による分類を使用していると回答した。篠は、炭素排出量を順位に変換せずに分析した方が、政策への活用という点からは受け入れられやすいのではないかと質問した。また、推計結果によると、どのセクターにおいても、Scope 1 の炭素排出量の順位が、CDS スプレッドに大きく影響している点について見解を求めた。沖本は、順位ではなく炭素強度を用いて分析しても、得られる結果は相応に頑健であると改めて説明したうえで、各セクターの上位 2 社に投資するといった投資家行動を例示し、投資に際して順位を重視する場合もありうると応じた。また、責任投資原則が提唱される以前の 2005 年については、Scope 1 の炭素排出量が増えると CDS スプレッドがはっきりと低下するという特徴がみられるが、その後の動きについては、Scope 1 とそれ以外に顕著な差異はみられていないとの見方を示した。

(3) 気候関連リスク分析のためのシナリオ作成

竹山梓（日本銀行）は、気候変動やその対策が金融システムや金融機関に及ぼす影響に金融当局や金融機関の注目が高まるもとの、そうした影響を評価するために参照すべき適当な過去の事象やデータが不足していることから、既存の金融リスク管理手法を直接適用することは難しいと指摘した。そうしたもとのシナリオ分析を活用したリスク計測・管理の検討が進められており、近年わが国を含む 60 以上の国・地域の中央銀行・金融監督当局がシナリオ分析を実施していることを紹介した。多くのシナリオ分析において、気候変動やその対策が金融安定に及ぼす影響は限定的との結果が得られているものの、こうした結果に対して金融機関や政策当局者の納得感は必ずしも高くはなく、シナリオ分析の枠組みについて再検討する余地があると指摘した。続けて、竹山は、シナリオを作成するために用いられる主要なモデルである統合評価モデルを解説し、シナリオ分析のうち特にシナリオ作成に関する論点と今後の課題を整理した（松井祐依＜国際通貨基金＞、南井敬晶＜日本銀行＞との共同研究）。

まず、竹山は、2018 年にノーベル経済学賞を受賞したウィリアム・D・ノードハウスによって提唱された DICE モデル（Dynamic Integrated Climate-Economy Model、Barrage and Nordhaus [2024]）を例示しながら、標準的な経済成長理論に、経済活動によって生じる温室効果ガス排出がもたらす気温上昇、その結果としての経済成長の低迷、温室効果ガス排出量削減に要する費用を組み入れた費用便益分析型統合評価モデルを紹介した。DICE モデルは、気候変動と経済成長の相互依存関係に関する洞察を提供する一方、主要なパラメータの値がわずかに変動するだけで、費用便

益分析の観点から最適な政策目標の水準などに関する分析結果が大きく変わってしまうなど、不確実性が大きく定量的政策評価に応用することは難しいと指摘した。

次に、竹山は、このような不確実性に対処しつつ、気候変動やその対策が金融システムや金融機関に及ぼす影響を考察するには、再生可能エネルギーの普及状況や、同エネルギー発電に係る設備を設置するための土地などの設備設置余力を考慮することが重要であると述べ、国際機関等において公表されているシナリオの作成には、これらの点を勘案したプロセス細分化型モデルが使われていると紹介した。このモデルは、費用便益分析型統合評価モデルと比べて、再生可能エネルギーと非再生可能エネルギーの代替関係や、エネルギーと他の生産要素との代替関係等を丁寧に勘案していることから、エネルギーシステム転換が経済活動に与える影響をより詳細に描写できると述べた。一方、同モデルは、モデルのパラメータが膨大であるため、モデル・ユーザーの視点でみると、同モデルに基づくシナリオがブラックボックス化する傾向があることに課題があると指摘した。さらに、いずれのモデルも、市場メカニズムを通じた円滑な需給調整等が想定されていることから、モデルを基に作成されたシナリオは、経済成長を阻害する摩擦やショックを想定しないベースライン・シナリオのような位置付けとして評価すべきとの見解を示した。

最後に、竹山は、ベースライン・シナリオで想定される摩擦のない状況から乖離が発生した事例としてオイルショックを取り上げて、資源価格の上昇に対して生産技術が適応するには相応の時間を要したと述べた。そのうえで、今後の課題として、先行きについて不確実性が大きい気候関連リスクを適切に計測・管理していくためには、過去の事例や各国の経済環境、産業構造などを踏まえ、シナリオのバリエーションを増やしていくことが重要であると指摘した。

指定討論者の水門は、本研究について、シナリオ作成のためのモデルの構造と、それを用いて作成されるシナリオの論点をわかりやすく整理していると評価した。また、シナリオ分析の目的と限界を示しつつ、シナリオのストレス強度という観点から、広く使われている長期的な最適成長経路に沿ったシナリオだけではなく、一時的に最適成長経路から逸脱するシナリオや、経済成長の持続可能性が脅かされるシナリオを作成することの重要性を強調している点は、実務家として非常に興味深いと述べた。今後の展望として、水門は、ブラックボックス化が指摘されているモデルの透明性向上や、国・地域ごとの前提条件の整合性や経済活動の相互作用をモデルに勘案していくことを取り上げた。加えて、シナリオ分析に関する論点を踏まえた金融経済政策のあり方など、政策へのインプリケーションについて論点提起した。

これに対して、竹山は、モデルの透明性向上への取組みとして、本研究が企図したように、モデル開発者と利用者の双方が丁寧にコミュニケーションを図ることで、モデルに関する理解を深めていくことが一案であると応じた。また、国・地域

特性を踏まえたモデルの精緻化については、国・地域によりデータの粒度にばらつきがあり、現状では、例えば国・地域特性を映じた生産関数の代替弾性値を使って分析すること等は難しいと回答した。政策へのインプリケーションとしては、単一のシナリオで検証すべきリスクを網羅することが難しいことから、政策当局者は複数のシナリオを用いてより多角的な分析を実施していくことが、政策判断を行ううえで重要ではないかとの見解を示した。

フロアから、大橋は、現実の世界において脱炭素を進めるうえでのリスクとして、脱炭素に必要な技術や資源が一部の国に集中している事実を、シナリオ分析ではどのように取り扱うべきかと問うた。竹山は、当該リスクは太陽光パネルや電気自動車において顕著であるものの、気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク（Network for Greening the Financial System: NGFS）シナリオを含む多くのシナリオには勘案されていないと指摘し、シナリオ分析を行ううえでは、太陽光パネルや電気自動車に関する代替の弾性値を低く設定することは1つの対応として考えうると回答した。高橋亮太（農林中央金庫）は、金融機関がストレステストに用いるダウンサイド・シナリオの作成について、圓花弘樹（三井住友銀行）は、NGFS シナリオ等の気候シナリオに関して実務家の理解深耕に向けた最近の取組みについて見解を求めた。竹山は、金融機関のストレステストについて、NGFS シナリオをベースとしたうえで、各金融機関のリスク・プロファイルやリスクテイク姿勢に応じて、シナリオのバリエーションを増やしていくことも検討すべきであると述べた。そのためには、既存のシナリオに対する理解を深めていく必要があるものの、NGFS シナリオの技術文書などは必ずしも実務家にとってわかりやすいとはいえないと述べ、本研究がシナリオ分析に関する理解の深耕に役立つことを期待していると述べた。鷹岡は、シナリオ分析で用いられている割引率の水準について問うた。これに対し、竹山は、シナリオ分析の割引率は、その値によって得られる結果が大きく変わりうるため、分析を行ううえで非常に重要であると述べたうえで、シナリオ分析の割引率は、遠い将来に発生する炭素排出削減がもたらす便益をどう評価するかに依存しており、明確なコンセンサスは得られていないと応じた。

4. 閉会挨拶

渡辺真吾（金融研究所長）は、一連の研究報告を振り返り、近年、気候ファイナンス研究が急速に進展しており、脱炭素の流れに資する研究も増えていると述べた。他方で、各研究報告で議論されたように、金融市場のミスプライシング、気候関連リスクの計測方法やその前提条件、気候関連データベースの整備をはじめ、多くの課題が残されており、今後の取組み余地はなお大きいと指摘した。脱炭素に

向けた取組みについては、進んでいるといわれる欧州においても、例えば、英国におけるガソリン車・ディーゼル車や石油・ガス暖房に関する規制の先送りなど、最近、巻戻しの動きがみられていると指摘した。そして、こうした動きは、長期的な脱炭素の流れは変わらないとしても、現実の移行は簡単ではないことを示していると述べた。そのうえで、それぞれの立場から脱炭素の流れに資するような研究や議論を続けることが重要であると強調し、閉会の挨拶を締めくくった。

参考文献

- Barrage, Lint, and William Nordhaus, “Policies, Projections, and the Social Cost of Carbon: Results from the DICE-2023 Model,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(13), 2024, e2312030121.
- Bolton, Patrick, and Marcin Kacperczyk, “Global Pricing of Carbon-Transition Risk,” *Journal of Finance*, 78(6), 2023, pp. 3677–3754.
- Pedersen, Lasse H., Shaun Fitzgibbons, and Lukasz Pomorski, “Responsible Investing: The ESG-Efficient Frontier,” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp. 572–597.

参考 1：プログラム

司会：池田大輔（日本銀行）

開会挨拶：諏訪園健司（日本銀行）

研究報告 1「気候ファイナンス：研究の進展と今後の課題」

報告者：平木一浩（国際通貨基金）

指定討論者：篠潤之介（早稲田大学）

研究報告 2 “Credit Default Swaps and Corporate Carbon Emissions in Japan”

報告者：沖本竜義（慶應義塾大学）

—— 鷹岡澄子（成蹊大学）との共同研究

指定討論者：白須洋子（青山学院大学）

研究報告 3「気候関連リスク分析のためのシナリオ作成」

報告者：竹山梓（日本銀行）

—— 松井祐依（国際通貨基金）、南井敬晶（日本銀行）との共同研究

指定討論者：水門善之（野村證券）

閉会挨拶：渡辺真吾（日本銀行）

参考2：対面参加者リスト（敬称略）

有村 俊秀	早稲田大学
池田 大輔	日本銀行
圓花 弘樹	三井住友銀行
大橋 和彦	一橋大学・東京科学大学
沖本 竜義	慶應義塾大学
五島 圭一	横浜国立大学
篠 潤之介	早稲田大学
白須 洋子	青山学院大学
水門 善之	野村證券
諏訪園 健司	日本銀行
鷹岡 澄子	成蹊大学
高橋 亮太	農林中央金庫
竹山 梓	日本銀行
平木 一浩	国際通貨基金
松尾 啓吾	大和証券グループ本社
宮下 裕美	みずほフィナンシャルグループ
吉羽 要直	東京都立大学
渡辺 真吾	日本銀行
渡部 敏明	一橋大学

※オンライン参加者を含めた全体では、約 150 名が参加した。

気候ファイナンス： 研究の進展と今後の課題

ひらきかずひろ

平木一浩

要 旨

本論文では、急速に研究が進展する気候ファイナンスの文献について、「価格発見およびリスク移転機能」、「主体間の資金仲介機能」、「異時点間の資源配分機能」という、金融市場の3つの基本的機能を切り口にサーベイした。第1の切り口については、気候関連リスクは徐々に資産価格に織り込まれているものの、引き続きミスマプライシングが残存している可能性が指摘されている。また、気候関連リスクのヘッジに関する研究が進展を見せている。第2の切り口に関して、サステナブル投資の急速な規模拡大に合わせる形で、こうした投資行動が資産価格に与える影響を実証した結果の蓄積が進んでいる。一方、サステナブル投資が、より実効性を高めていき、低炭素社会への移行をさらに後押ししていくためには、発行体企業に対するインセンティブや、データ整備などの、さまざまな課題が存在することも明らかになってきている。最後に、第3の切り口に関連して、社会的割引率に関する主要なアプローチである、規範的アプローチ・実証的アプローチ・持続可能性アプローチをサーベイし、社会的割引率を取り巻く議論のポイントを整理した。近年の気候ファイナンス研究は、市場参加者に対するサーベイの多くにおける指摘と共通する形で、気候変動リスクの資産価格への織込みが十分ではないことや、環境（Environment）・社会（Social）・ガバナンス（Governance）要素を考慮したESG投資家層の拡大やデータ面での整備が今後の課題であることを示唆している。引き続き、金融実務の発展とファイナンス研究の知見の蓄積の両者があいまって、気候変動対応において金融市場が重要な役割を果たしていくことが望まれる。

キーワード： 気候変動、気候ファイナンス、物理的リスク、移行リスク、サステナブル投資、資産価格評価、社会的割引率

.....
本稿の作成に当たっては、内山朋規氏（東京都立大）に査読いただき、多岐にわたる貴重なコメントを頂戴した。また、竹原浩太氏、室町幸雄氏、吉羽要直氏、ならびに金融研究所スタッフから有益なコメントを頂戴した。ただし、本稿に示されている意見は、筆者個人に属し、日本銀行、国際通貨基金、同理事会および同マネジメントの公式見解を示すものではない。また、ありうべき誤りはすべて筆者個人に属する。

平木一浩 日本銀行金融研究所企画役
(現・国際通貨基金、E-mail: khiraki@imf.org)

1. はじめに

気候変動は現在人類が直面する最も大きな問題の1つであり、その緩和や適応に向けてさまざまな対応が進んでいる。こうした気候変動問題への対応を進めるうえでは、気候変動がもたらすリスクや機会を的確に評価することが、適切な対応手段をとっていくうえで重要である。なかでも、金融市場が適切に気候変動リスクを資産価格に反映することや、十分かつ効率的に資金仲介機能を発揮することで、気候変動問題への対応を後押ししていくことの重要性が指摘されている（Giglio, Kelly, and Stroebe [2021], G20 [2023] など）。

金融市場の主要な機能としては、不確実性・リスクに関する価格発見機能やヘッジ手段の提供、資金余剰主体と資金不足主体間での資金仲介機能、貯蓄手段の提供による異時点間の資源配分機能があげられる。気候変動問題に対処していくためには、こうした金融市場の機能を活かしていくことが重要となる。まず、気候変動問題は、多岐にわたる大きな不確実性・リスクをもたらしうる。このため、気候関連リスクが資産価格に適切に反映されることは、効率的な資源配分の達成や金融安定の観点から極めて重要である。また、気候変動問題への対応にあたっては、膨大な資金が必要になることが指摘されている¹。このため、こうした膨大な投資資金が十分かつ効率的に調達できるよう、発行体や投資家のインセンティブを踏まえた金融市場の制度設計を行っていくことが望まれている。さらに、気候変動問題は、極めて長期の時間軸で人々の経済厚生に影響を及ぼすという特徴がある。このことは、気候変動対策の費用便益分析にあたっては、将来世代の便益をどのような割引率で割り引いて現時点での対策費用と比較するかという点が課題となることを意味する。

こうした気候変動問題に関する金融面の論点について、金融経済学の立場から研究する分野は「気候ファイナンス（climate finance）」と呼ばれており、近年、急速に研究が発展している。また、研究の急速な蓄積に合わせて、多くのサーベイ論文も公表されている。例えば、Furukawa, Ichiue, and Shiraki [2020] は、金融安定の観点から気候ファイナンス関連論文をサーベイしている。また、Giglio, Kelly, and Stroebe [2021] は、金融経済学理論を意識しつつ、気候ファイナンス研究のサーベイを行い、今後の研究の展望を示している²。

.....
1 例えば、GFANZ（Glasgow Financial Alliance for Net Zero）の試算によると、低炭素社会への移行のためには、総額100兆ドルを超える資金が必要とされている。また、IMF [2023a] は、新興国・発展途上国を中心に、2030年までに移行ファイナンス投資額を年額2兆ドルまで増加させる必要があると指摘している。

2 経済・ファイナンス分野において気候変動問題に関する研究が急速に進展することにあわせて、気候ファイナンスに限らず、気候変動の経済学に関するサーベイ研究もみられている。統合評価モデル

本論文における気候ファイナンス研究のサーベイは、以下の点が特徴である。まず、既存の気候ファイナンスの実証研究では、データ制約などの問題もあり、企業のグリーン度指標と株価リターンの関係をはじめとして、正反対の実証分析結果が得られるケースが散見されている。こうした状況のもとでは、理論的枠組みをガイドラインとして、既存の研究成果を整理していくことが、学術研究・投資実務の双方の面から有益と考えられる。このため、本論文ではまず、資産価格評価理論 (asset pricing theory) に基づいた理論研究をサーベイすることで、気候変動問題が資産価格に影響を与える経路を整理したうえで、実証研究を概観している。次に、気候ファイナンス研究は、データの蓄積やサステナブル投資の発展といった実務面での取り組み進展に応じる形で、日進月歩で発展している。本論文では、こうした最先端の研究、なかでも、グリーンウォッシュや、サステナブル投資の実効性に関する研究などの、気候変動対応の実効性を高めるうえで、実務的にも極めて重要なテーマをカバーしている。最後に、気候変動への政策対応を考えるうえで極めて重要なパラメータである、社会的割引率に関するサーベイを行っている点も特長である。

本論文の以下の節では、冒頭にあげた金融市場の3つの機能を意識しつつ、気候ファイナンス論文をサーベイしていく。はじめに、気候関連リスクに関する価格発見機能やヘッジ機能を取り上げる。もし、気候関連リスクが資産価格に適切に反映されていない場合、非効率な資源配分につながるだけでなく、気候関連リスクが顕現化した場合に資産価格が急落する可能性がある。資産価格の急落は、投資家や金融機関の健全性に影響を与えることを通じて金融システムの安定を脅かす懸念があることから、金融監督当局などを中心に、気候関連リスクに関するシナリオ分析の整備などが進められている。このため、気候関連リスクが資産価格に及ぼす影響について、理論・実証の両面から理解を深めていくことは、学術的観点からだけでなく、政策対応の観点からも必要不可欠である。

まず2節では、気候関連リスクや投資家行動の変容が資産価格に与える影響を描写する理論的枠組みを紹介する。具体的には、ESG投資を明示的に考慮した資産価格評価モデルの代表例である Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] のモデルを概観しつつ、理論的なポイントを整理する。そのうえで、3節では、気候関連リスクの資産価格への織込み状況に関する実証研究を中心としたサーベイを行う。まず、気候関連リスクが資産価格に与える影響を分析した研究を、気候変動等に伴う異常気象などの自然災害がもたらす物理的リスクと、低炭素社会移行の過程で資産価値が毀損する移行リスクに関するものに分けて整理する。次に、気候関連リスクのヘッジや、ミスプライシング (気候関連リスクの不十分な織込み) に関する研究を概観する。

や最適課税 (炭素税) に関する研究など、気候変動問題に関する代表的な経済学研究をサーベイしたものとしては有賀ほか [2022] がある。

次に、気候変動対応のための資金仲介に関連する話題を取り上げる。気候変動の緩和や気候変動への適応のために必要となる巨額の資金は、公的部門のみでカバーすることは不可能である。また、低炭素社会への移行計画と統合的な形で投融資を進めていくことも、気候変動対応の実効性の観点から重要である。このため、金融市場・金融システムの適切なデザインを通して、気候変動対策に資する形で、民間投融資を進めるインセンティブが確保されることが重要である。近年では、こうした取組みが進む中で、サステナブル投資の規模が急速に拡大している。また、民間投資主体だけではなく、中央銀行においても、気候変動問題を考慮した金融政策運営や保有資産の管理について情報発信がみられている³。

4節では、サステナブル投資に関連する研究を取り上げる。まず、サステナブル投資から非金銭的効用を得ている投資家が存在するか、という論点に関連して、グリーンニウム（greenium、グリーン銘柄と通常銘柄のリターン格差）に関する研究を概観する。次に、サステナブル投資が資産価格にどのような影響を与えているかを確認したうえで、サステナブル投資の実効性に関する論点として、企業行動への影響、グリーンウォッシュ懸念、気候関連データの整備に向けた課題に示唆を与える研究を紹介していく。4節の最後では、中央銀行に関連する研究を取り上げる。具体的には、中央銀行が金融政策運営にあたって、気候変動問題をどのように考慮すべきかや、資産買入れにあたって買入れ対象資産のグリーン度をどのように考慮すべきか、といった論点を取り上げる。

最後に、異時点間の資源配分に関連して、社会的割引率に関する議論を概観する。冒頭で述べたとおり、気候変動対策を考える際には、短期的に発生する対策費用と極めて長期ホライズンにわたって発生する便益に関する費用便益分析を行う必要があるため、社会的割引率の設定が分析結果に大きな影響を及ぼす。もっとも、どのような割引率が適切かについてはさまざまな考え方が存在しており、現状では必ずしもコンセンサスが得られていない。このような中で、金融経済学の観点から、社会的割引率に関する規範的・実証的な研究成果や議論を整理することは、統合評価モデルによる分析の解釈や情報発信、炭素価格に対する理解を深めるなどの観点から、重要な貢献になると考えている。本論文の5節では、社会的割引率の設定に関する3つの代表的なアプローチである、規範的アプローチ、実証的アプローチ、持続可能性アプローチをそれぞれ概観する。

.....
3 日本銀行による情報発信の一例としては、日本銀行〔2022〕を参照。

2. 気候変動問題と資産価格：理論

気候変動問題は、主に2つの経路を通して資産価格に影響を与えると考えられる。まず、気候変動は、金融資産のファンダメンタルに影響を及ぼすリスク要因となる。例えば、海面上昇や自然災害の激甚化といった物理的リスクは、企業活動や不動産価値などに影響を与える。また、低炭素社会への移行がもたらす制度変更や技術進歩、人々の行動変化が企業活動に及ぼす移行リスクも、株式や債券をはじめとする資産価格に影響を与える。もう1つの経路は、投資家・発行体の行動変化を背景とした需給の変化である。例えば、ESG要素を考慮して投資を行う市場参加者が増加した場合、各銘柄のESG特性に応じて需給が変化することで、資産価格に影響が及ぶ可能性がある。

気候変動問題が資産価格形成に与える影響を分析する理論的枠組みとしては、現代ファイナンス理論における基本モデルである資産価格評価モデル（Capital Asset Pricing Model: CAPM）を拡張する研究がみられている。本節では、ESG-adjusted CAPMとも呼称されるこうしたモデルの代表例である Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] の理論モデルを、古典的な CAPM と対比しつつ概観することで、理論面でのポイントを整理する。

(1) 古典的 CAPM の概要

Sharpe [1964]、Lintner [1965]、Mossin [1966] が提唱した CAPM は、市場均衡理論に基づいて、個別株式の期待超過リターン（リスクプレミアム）の理論式を導出しており、現代ファイナンス理論における最も基本的なモデルの1つとなっている。

CAPM の主要な仮定と理論的結果は、以下のとおりである。ただし、ここでは、危険資産（株式）に加えて、無リスク資産も取引可能な状況を考える。

- 危険資産のリターンや分散共分散行列に関する投資家の予想は同質的であり、平均分散効用を最大化するように投資ポートフォリオを選択する。
- 最適投資ポートフォリオは、シャープ・レシオ（Sharpe ratio、ポートフォリオの期待リターンの期待標準偏差に対する比率）が最大となる。とくに、市場ポートフォリオのシャープ・レシオは、（選択可能なポートフォリオの中で）最大となる。
- 最適ポートフォリオは、市場ポートフォリオと無リスク資産の2資産の組み合わせで構成できる。この結果は、「2資産分離定理（two-fund separation theorem）」と呼ばれる。

- 個別株式の期待超過リターンは、(1) 式のとおり、マーケット・ベータをもとに定まる。

$$E[r_t^i] - r_t^f = \beta^i (E[r_t^M] - r_t^f). \quad (1)$$

ただし、 r_t^i, r_t^M はそれぞれ、銘柄 i と市場ポートフォリオのリターン、 r_t^f は無リスク金利、 $\beta^i = \text{Cov}(r_t^i, r_t^M) / \text{Var}(r_t^M)$ はマーケット・ベータである。

CAPM では、現実とは必ずしもそぐわない強い仮定が置かれている。例えば、将来のリターンやボラティリティに関する各投資家の予想が異なる可能性があるほか、非金銭的効用などの存在から投資家ごとに効用関数の形状が異なる可能性などが指摘されている⁴。こうした論点を考慮した後続研究は多数存在するが、なかでも、Fama and French [2007] が著名である。当該論文は、各投資家が想定する危険資産リターンの確率分布が異なる可能性（disagreement）や、特定の資産への投資から非金銭的効用を得る投資家が存在する可能性（taste）を考慮して、CAPM を拡張している。

気候変動問題の文脈に即して Fama and French [2007] の着眼点をみると、ESG 関連情報を活用するかどうかに応じて、各投資家の想定リターンの確率分布が異なる可能性や、ESG 投資から非金銭的効用を得る投資家が存在する可能性が考えられる。これらの論点を具体的に定式化することで、ESG 投資を考慮する形で CAPM を拡張したのが、以下で解説する Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] の理論モデルである。

(2) Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] による ESG-adjusted CAPM

イ. モデル設定

Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] のモデルでは、各銘柄は「ESG スコア」と呼ばれる特性を持っている。ESG スコアは、各銘柄の将来株価を予測するうえで有用な情報を含んでおり、ESG スコアと予想配当額に（例えば高 ESG スコア銘柄ほど予想配当額が高いといった）関係があることが仮定されている⁵。このため、ESG スコアを予想形成の際に考慮することで、より効率的な投資判断を下すことができる設定となっている。

4 このほか、投資家ごとに直面する制約条件（例えば、担保制約や借入制約）が異なる可能性もある。制約条件の異なる投資家の存在を考慮して CAPM を拡張した研究としては、例えば Frazzini and Pedersen [2014] を参照。

5 モデル上、ESG スコアと予想配当額の対応関係は正負どちらにもなりうる。詳細については、本節(2) ハ. を参照。

当該論文では、CAPM の同質的投資家の条件を緩めて、以下の 3 タイプの投資家が存在する状況を分析している。

1. タイプ U (Unaware) : ESG スコア情報を利用しない (ESG スコアの有用性を認識していない) 投資家。平均分散効用を最大化するようにポートフォリオを選択するが、その際に利用する予想リターン・共分散には ESG スコア情報は反映されていない。
2. タイプ A (Aware) : ESG スコアの有用性を認識している投資家。平均分散効用を最大化するようにポートフォリオを選択する点はタイプ U 投資家と同じだが、利用する予想リターン・共分散には ESG スコア情報が反映されている。
3. タイプ M (Motivated) : ESG 投資意欲がある投資家。ESG スコア情報を考慮して平均と分散の予想を形成する点はタイプ A 投資家と同じだが、タイプ M 投資家はさらに、ESG 投資から非金銭的効用を得ることが仮定されている。

各投資家の効用最大化問題は、以下のとおり、期待効用 U を最大化するように危険資産の「ポートフォリオ」(各危険資産銘柄への投資ウェイトのベクトル) x を決定する問題として定式化できる⁶。

$$\max_x U = E[\widehat{W}^x | I] - \frac{\gamma}{2} \text{Var}(\widehat{W}^x | I) + W \cdot f(\bar{s}). \quad (2)$$

ただし、 γ は絶対的リスク回避度パラメータ、 W は初期時点での総資産額、 $\widehat{W}^x = W(1 + r^f + x'r)$ はポートフォリオ運用後の総資産額である。将来の総資産額 $\widehat{W}^x$ の条件付き期待値・分散を算出する際に投資家が利用する情報集合は I であらわす。また、 $\bar{s}$ はポートフォリオの加重平均 ESG スコアであり、 s を銘柄別 ESG スコアのベクトルとしたとき、 $\bar{s} = x's/x'1$ である。 $f(\bar{s})$ は ESG 投資による非金銭的効用を表す項である。非金銭的効用項は $\bar{s}$ について非減少 (ESG スコアが高いほど非金銭的効用も高まる) である。

タイプ U 投資家は、平均や分散の予想を形成する際に ESG スコア情報を利用しないため、 $E[\widehat{W}^x | I] = E[\widehat{W}^x]$ となる (条件付き分散も同様)。一方、タイプ A およびタイプ M 投資家は、ESG スコア情報を利用した予想形成を行うことから、 $E[\widehat{W}^x | I] = E[\widehat{W}^x | s]$ となる。また、タイプ U およびタイプ A 投資家の非金銭的効用項は $f(\bar{s}) \equiv 0$ である一方、タイプ M 投資家の非金銭的効用項は正の値を取りうる。

ロ. 各投資家の最適投資行動

上述の定式化のもと、まず、3 タイプの投資家それぞれの期待効用最大化問題 (2) 式) を解くことで、それぞれの投資家の最適ポートフォリオを導出できる。タイプ U およびタイプ A 投資家の最大化問題は非金銭的効用項を含まないため、最

6 初期時点での総資産の一部は、無リスク資産でも運用される。このため、ポートフォリオ・ウェイト x の総和は必ずしも 1 とはならない。

適ポートフォリオは通常の平均分散ポートフォリオとなる。ただし、条件付き期待リターン・分散に ESG スコア情報が織り込まれているかどうか異なることから、両者の最適ポートフォリオは異なる。

タイプ M 投資家については、非金銭的効用項が含まれることから、最大化問題の解法は複雑になる。この点、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] は、タイプ M 投資家の最大化問題が以下の最大化問題に帰着できることを示している (Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] Proposition 1)。

$$\max_{\bar{s}} SR(\bar{s})^2 + 2\gamma f(\bar{s}). \quad (3)$$

ただし、 $SR(\bar{s})$ はポートフォリオの加重 ESG スコアが $\bar{s}$ に等しいという制約条件下で達成可能なシャープ・レシオの最大値を表す。

(3) 式によると、タイプ M 投資家は、以下の 2 段階の最適化によってポートフォリオを決定していると解釈できる。まず、加重平均 ESG スコアを所与としてシャープ・レシオを最大化する問題を解く。次に、この結果を所与として、(3) 式を最大化する最適な加重平均 ESG スコアが選択される。なお、(3) 式は、リスク調整済の収益性を表すシャープ・レシオの 2 乗項と、非金銭的効用項の加重和を最大化する問題である。この結果は、代表的投資家がシャープ・レシオを最大化するポートフォリオ (市場ポートフォリオ) を選択する、という CAPM の結果を拡張したものとなっていると捉えることができる。

このように期待効用最大化問題を解くことで、タイプ M 投資家の最適ポートフォリオを次のとおり導出できる。

$$x = \frac{1}{\gamma} \Sigma^{-1} (\mu + \pi (s - 1\bar{s})). \quad (4)$$

ここで、 r を各危険資産銘柄の (無リスク・リターン対比の) 超過リターンのベクトルとすると、 $\mu = E[r|s]$ 、 $\Sigma = Var(r|s)$ である。すなわち、 μ, Σ はそれぞれ、ESG スコア情報を考慮した条件付き期待超過リターンと条件付き分散共分散行列である。また、 π はモデル・パラメータや加重平均 ESG スコアから定まる正の定数である。

(4) 式は、タイプ M 投資家の最適ポートフォリオが、通常の平均分散ポートフォリオ ($\Sigma^{-1}\mu/\gamma$) と比べたときに、期待リターン部分を ESG スコアに応じて「調整」した形になっていることを示している。実際、ESG スコア項を無視すると、(4) 式は通常の平均分散ポートフォリオに帰着する。ESG スコア項を考慮すると、平均より高い (低い) ESG スコアの銘柄は、期待リターンが高め (低め) に調整されることで、オーバーウエイト (アンダーウエイト) される。さらに、(4) 式は、タイプ M 投資家の最適ポートフォリオが「平均分散ポートフォリオ ($\Sigma^{-1}\mu$)」、「ESG ポートフォリオ ($\Sigma^{-1}s$)」、「最小分散ポートフォリオ ($\Sigma^{-1}1$)」、および「無リスク資産」の 4 資産の組み合わせで構築できることを示している。この結果は、CAPM におけ

る 2 資産分離定理（任意の最適ポートフォリオは市場ポートフォリオと無リスク資産の 2 資産から構築可能）の拡張となっており、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] は「4 資産分離定理（four-fund separation theorem）」と呼んでいる。

ハ. ESG-adjusted CAPM

通常の CAPM では、投資家の最適化条件から導出される平均分散ポートフォリオ（需要）が、市場ポートフォリオ（供給）と一致するという均衡条件に基づいて、個別銘柄の期待リターンに関する式（(1) 式）が導出される。ESG 情報をリターン分布の予想形成に利用しているかどうかや、ESG 投資から非金銭的効用を得ているかどうかが異なる複数タイプの投資家が存在する場合でも、原理的には、各投資家の投資需要の総和が市場ポートフォリオと均衡するという条件から、個別銘柄の期待リターンを導出することが可能である。もっとも、このときの均衡は、各投資家タイプの構成比率や ESG スコア情報とファンダメンタルとの関係性にも依存するため、一般的な状況における式を明示的に導出することは難しい。このため、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] は、ESG スコア情報とファンダメンタルとの関係性に一定の仮定を置いたうえで、すべての投資家が 3 タイプの投資家のいずれか 1 タイプになっている状況それぞれについて、CAPM と類似した個別株期待リターンの表現を得ている。

具体的には、ESG スコアとファンダメンタル（配当金額） v_t の関係について、 $E[v_t|s] = \hat{\mu} + \lambda(s - s^m)$ という線形関係が仮定されている。ただし、 s^m は市場ポートフォリオの加重平均 ESG スコアである。 λ は ESG スコアに対して期待配当金額がどのように変化するかを表すパラメータで、 λ が正のとき、ESG スコアが高い銘柄ほど将来の配当金額も高いことを意味する。ESG 経営が将来のリスク軽減や消費者の信頼獲得といった正の効果につながる場合、このような関係が成立すると考えられる。一方、 λ が負のとき、ESG スコアが高い銘柄ほど将来の配当は低くなる。環境対策やチャリティー活動などが、費用面から業績を圧迫する場合などで、このような負の関係となると考えられる。このように、 λ の符号は理論的には定まらず、実証的な問題である。関連する議論については、3 節（2）イ. を参照されたい。

以下では、説明の簡単化のため、 λ が正であるとの前提を置いて、定常状態における期待リターンを、いくつかの投資家構成比率のもとで導出する（ λ が負の場合は、以下で説明する各種の関係性や符号は反転する）。

まず、すべての投資家がタイプ U のとき、市場ポートフォリオはタイプ U 投資家の平均分散ポートフォリオと一致し、通常の CAPM と同様の公式が成り立つ。すなわち、個別銘柄の期待リターンは、 $E[r_t^i] - r_t^f = \beta^i (E[r_t^m] - r_t^f)$ を満たす。ただし、期待値やマーケット・ベータ中に現れる共分散は、ESG スコア情報を考慮せずに形成された、ESG スコア s によって条件付けられていない期待値や共分散に基づいたものとなる。

この状況下では、ESG スコアに含まれる有益な情報が一切活用されずに株価が形成されている。このため、ESG スコアが高い（低い）銘柄が、割安（割高）となっていると考えられる。実際、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] は、ESG スコア情報で条件付けた期待リターンが、以下のとおりとなることを示している（ p^i は株価を表す）。

$$E[r_t^i|s] - r_t^f = \beta^i (E[r_t^m] - r_t^f) + \lambda \frac{s^i - s^m}{p^i}. \quad (5)$$

すなわち、ESG スコアが高い銘柄（ $s^i > s^m$ ）は、右辺第 2 項が正であるため、通常の CAPM の場合と比べて期待リターンが高くなる。このことは、当該銘柄が割安となっていることを意味している。この結果は、大多数のタイプ U 投資家の中に、（マーケット・インパクトを与えない規模の）ごく少数のタイプ A 投資家が存在する場合、タイプ A 投資家が ESG スコア情報を活用することで、CAPM 対比のアルファを獲得できることを意味している。

次に、すべての投資家がタイプ A のとき、市場ポートフォリオはタイプ A 投資家の平均分散ポートフォリオと一致するため、通常の CAPM と同様の式が成り立つ。上記のタイプ U 投資家のケースとの違いは、期待リターンやマーケット・ベータの算出において、ESG スコア情報を考慮している点である。このように、ESG スコア情報が投資家行動に織り込まれることから、このケースでは、(5) 式が示すようなアルファ獲得機会は発生しない。

最後に、すべての投資家が同一の非金銭的効用関数を持つタイプ M 投資家であるケースを考える。このとき、期待リターンは下記のとおりとなる（Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] Proposition 7）。

$$E[r_t^i|s] - r_t^f = \bar{\beta}^i (E[r_t^m|s] - r_t^f) - \pi (s^i - s^m). \quad (6)$$

ただし、 $\bar{\beta}^i$ は ESG スコアで条件付けた共分散等をもとに算出されるマーケット・ベータである。 π は、(4) 式内のものと同じ正の定数である。

(6) 式は、タイプ M 投資家が市場を占有しているとき、ESG スコアの高い銘柄ほど期待リターンが CAPM 対比で低くなることを示している。これは、高い ESG スコアから非金銭的効用を得る投資家は、低い期待リターンであっても投資を行うことから、均衡リターンが低下するためである。別の解釈として、高 ESG スコア銘柄に対しては、非金銭的効用に起因する強い需要が発生することから、（タイプ M 投資家が存在しないケースに比べて）高 ESG 銘柄が割高化すると理解することも可能である。

本節の冒頭で、気候変動問題が資産価格に影響を及ぼす 2 つの経路として、ファンダメンタルへの影響と投資家行動の変化を指摘した。この点について、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] は、いくつかの理論的示唆をもたらしている。例え

ば、ESG スコアがファンダメンタルに関する有益な情報を含むとしても、こうした情報が株価に織り込まれるためには、ESG スコアを予想形成に活用する投資家が十分存在する必要があることが示唆される。逆に、($\lambda > 0$ の仮定のもとでは) 有用な ESG スコア情報を利用しない投資家が多く存在する場合、高 ESG スコア銘柄は割安となり、その後のリターンが高くなることも示唆される。また、投資家行動に関連する論点として、ESG 投資から非金銭的効用を得る投資家が多い場合、高 ESG スコア銘柄に強い需要が生まれることで割高化につながる。この点は、4 節 (1) で詳しく紹介するグリーンアムムの存在と統合的な理論的結果といえる。

(3) その他の理論研究

ESG 投資を考慮した理論モデルとしては、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] 以外にも多くの研究がみられている。Baker *et al.* [2022] は、タイプ A およびタイプ M 投資家の 2 種類の投資家が存在するモデルを、タイプ M 投資家の非金銭的効用項がポートフォリオの加重平均 ESG スコアに等しいという設定のもとで解いている。そのうえで、CAPM 対比でみて ESG スコアが高い銘柄ほど期待リターンが低くなるという、(6) 式に相当する表現を導出し、ドイツ国債におけるグリーンアムムの存在の理論的根拠としている。Zerbib [2022] は、CAPM を拡張した枠組みに基づいて、サステナブル投資手法が資産価格に与える影響を分析している。具体的には、通常の投資家、一部の銘柄への投資を行わない（スクリーニング）投資家、外部性によるコストを考慮した最適化行動（ESG インテグレーション）を行う投資家の 3 タイプの平均分散効用投資家が存在するモデルを分析し、スクリーニングや ESG インテグレーションが資産価格に与える影響を表す理論式を導出している。

Pastor, Stambaugh, and Taylor [2021] は、ESG 投資への選好の強さが異なるさまざまな M 投資家が存在する状況を分析している。具体的には、各投資家の ESG 選好パラメータを d_i 、(2) 式の非金銭的効用項を $f(\vec{s}) = d_i \vec{s}$ としている。この具体的な非金銭的効用関数のもとで、さまざまな有用な式や理論的予想を導出している。例えば、Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] の 4 資産分離定理と類似する定理として、最適ポートフォリオが「無リスク資産」、「マーケット・ポートフォリオ」、「ESG ポートフォリオ」の 3 資産の組み合わせで構築できるという「3 資産分離定理」を導出している。また、各株式の超過リターンが、市場ポートフォリオ・ファクターと ESG ポートフォリオ・ファクターの 2 ファクターを用いて、次式のとおりに表せることも示している。

$$\tilde{r} = \beta_m \tilde{r}_m + \beta_g \tilde{r}_g + \tilde{v}. \quad (7)$$

ただし、 $\tilde{r}_m, \tilde{r}_g$ は、それぞれ市場ポートフォリオと ESG ポートフォリオの超過リターン、 $\tilde{v}$ はノイズ項である。

(7) 式は、高 ESG スコア銘柄（グリーン銘柄）のリターンの振舞いについて重要な示唆を与える。まず、ESG ベータ β_g は、ESG スコアに比例することが示されており、グリーン銘柄は ESG ファクターが正となる局面でオーバーパフォームする。Pastor, Stambaugh, and Taylor [2021] は、ESG ファクターが正となる局面として、消費者によるグリーン選好が予想外に強まることでグリーン財生産銘柄の業績が予想外に上振れる状況や、投資家のグリーン選好（非金銭的効用項のパラメータ d_i ）が予想外に上昇する状況が該当する、と論じている。このように、消費者や投資家のグリーン選好が強まる局面では、グリーン銘柄はアウトパフォームすることとなる。一方、平均的な投資家が ESG 投資を選好する場合、グリーン銘柄の ESG ファクター項の期待値は負となる。このことは、消費者や投資家のグリーン選好の高まりは、一時的にグリーン銘柄のリターンを押し上げるものの、期待リターンを押し下げることを意味する。新倉・内山・角間 [2023] も同様の理論モデルを導出している。こうした理論モデルから導出されるインプリケーションは、最近のグリーン銘柄の好調なパフォーマンスを考える際によく言及される点である。詳細については、3 節（4）で改めて議論する。

これまでみてきた理論モデルでは、企業が生産する財の異質性は捨象されてきた。もっとも、各企業が生産する財のグリーン度は実際には異なっており、環境意識の高い消費者はグリーン財をより選好していると考えられる。このような財のグリーン度に関する異質性は、投資行動に一見逆説的な影響を与えうること複数の研究が指摘している（Baker, Hollifield, and Osambela [2022]、Sauzet and Zerbib [2024]、Chen, Garlappi, and Lazrak [2023]）。すなわち、ある個人が、消費者としてはグリーン財の消費をより選好する場合、投資家としてポートフォリオを選択する際には、むしろブラウン銘柄への投資を選択するメカニズムの存在が指摘されている。

この結果は、以下のとおり理解可能である。まず、消費者としてグリーン財を選好する主体は、予期せぬショックによりグリーン財生産が落ち込む局面で経済厚生が大きく悪化する⁷。さらに、グリーン財の需要の価格弾力性が高い場合、生産減少による価格上昇は限定的であることから、グリーン財の生産減少は生産企業の業績悪化につながり、株価を低下させる⁸。このように、グリーン財を選好する消費

.....
7 Sauzet and Zerbib [2024] は、グリーン財生産を低下させるショックの例として、地政学上の要因によるレアメタルの禁輸や天然ガス火力発電から石炭火力発電への切替えを挙げている。また、景気低迷は安価な石炭火力発電などのウエイトを引き上げる傾向にあるため、景気へのショックもグリーン財生産を低下させるショックとなることを指摘している。

8 化石燃料とグリーンエネルギーに関する分析などから、グリーン財とブラウン財の代替の弾力性は十分に大きいことが知られている（例えば、Papageorgiou, Saam, and Schulte [2017]）。

者にとって、グリーン銘柄は経済厚生悪化時にリターンが低迷するという意味で、リスクな投資対象である。逆に、グリーン財生産ショックの発生時には、グリーン財からブラウン財への代替によりブラウン財への需要が増加するため、ブラウン銘柄への投資はグリーン財生産ショックをヘッジする働きを持つ。このヘッジ動機によるブラウン銘柄への投資需要は、ブラウン（グリーン）銘柄の期待リターンの下押し（押上げ）効果がある。このリターンの下押し・押上げ効果は、上述の議論を踏まえると、需要の価格弾力性が高い財を生産している企業ほど大きくなると考えられる。この理論的予想と整合的な形で、Chen, Garlappi, and Lazrak [2023] は、推計された需要の価格弾力性をもとに企業をグループ分けしたところ、需要の価格弾力性が高い企業のグループにおいて、グリーン銘柄とブラウン銘柄のリターン格差がより大きいことを実証している。

この財の異質性に起因する経路は、多くの ESG-adjusted CAPM が描写するメカニズムとは逆に、ブラウン銘柄の期待リターンを押し下げる方向に働かう。このため、財市場における消費者の嗜好の変化や、グリーン度が異なる財の間の代替の弾力性が資産価格に及ぼす影響についても、より理解を深めていくことが今後の課題と考えられる。

(4) 本節のまとめ

本節では、ESG 投資が資産価格や期待リターンに与える影響を、CAPM を拡張したモデルに基づいて理論的に分析した研究を紹介してきた。これらのモデルは、詳細な定式化では異なる部分があるものの、以下のインプリケーションを持つ点では共通している。

- ESG スコアが持つ有用な情報を無視するタイプ U 投資家が存在するとき、ミスマッチが発生する。例えば、高 ESG スコアが将来の好業績を意味する場合、タイプ U 投資家の存在は、グリーン銘柄の割安化につながる。
- ESG 投資から非金銭的効用を得るタイプ M 投資家が存在するとき、グリーン銘柄（ブラウン銘柄）の期待リターンは、CAPM ベンチマーク対比、低く（高く）なる。
- 投資家のグリーン選好が強まるとき、グリーン銘柄はアウトパフォームする。

こうした理論的インプリケーションを踏まえつつ現実のデータを観察していくうえでは、いくつかの重要な論点が存在している。まず、理論モデルでは、ESG スコアが企業業績に関する有益な情報を含むことが所与となっていた。しかし、現実には、ESG スコアをはじめとする気候変動・環境関連データと企業業績や株価パフォーマンスとの関係は、必ずしも明確ではない。また、4 節 (3) で述べるとお

り、気候変動・環境関連データがノイズやバイアスを含んでいる可能性が、近年の研究によって指摘されている点にも留意が必要である。

また、実証分析結果の解釈を複雑にする要因として、上述のとおり、グリーン銘柄リターンの押上げ・下押しにつながる理論的メカニズムがどちらも存在している点が挙げられる。このため、どの理論的経路が優勢となるかは実証的な問題であり、分析対象時期や対象市場によって異なると考えられるほか、各経路の寄与度の識別も容易ではない。この点については、3 節（4）で改めて触れる。

このほか、タイプ M 投資家が実際に存在しているかや、資産価格にどの程度影響を与えているかは、実証研究のみならず実務的観点からも重要な論点である。とくに、グリーン投資家による投資ポートフォリオ選択実務においてはさまざまな手法が存在しているため、各手法の特徴や効果について、理論面・実証面双方から分析を進めていくことが重要である。

3. 気候変動問題と資産価格：実証

本節では、気候関連リスクの資産価格への織込み状況に関連する実証研究を概観する⁹。気候関連リスクは、豪雨・海面上昇・酷暑などの自然災害が激甚化することで、企業活動や不動産価格などに悪影響を及ぼす物理的リスクと、低炭素社会への移行に伴って、化石燃料関連事業などを中心に企業や資産の価値が毀損する移行リスクに大別される。なお、気候変動はこうした負の影響である「リスク」だけではなく、正の影響である「機会」をもたらす可能性もある¹⁰。例えば、温暖化の進展は現在の寒冷地での活動に好影響を与える可能性があるほか、低炭素社会への移行はグリーン財・技術を供給する企業のビジネスチャンスにつながると考えられる。もっとも、以下では、これまでの先行研究の蓄積や足もとでの発展動向を踏まえて、気候変動がもたらす負の影響である気候関連リスクに焦点を当てて関連研究を紹介する。本節（1）では主に物理的リスクに関する研究、本節（2）では主に移行リスクに関する研究を紹介する。本節（3）では、これらの気候関連リスクのヘッジに関連する議論を紹介する。

現時点では、気候関連リスクの資産価格への織込みは完全ではなく、ミスプライ

9 近年では、気候関連リスクのほかに、自然関連リスク（nature-related risk）や、その代表例である生物多様性リスク（biodiversity risk）に関する注目度が高まっている。例えば、生物多様性が失われることによる、第1次産業などへの悪影響や自然災害の激甚化リスクや、こうしたリスクが金融システムに及ぼす影響について検討が進んでいる。詳細については、NGFS [2023] を参照。

10 ファイナンス研究における「リスク」は、ペイオフやリターンの不確実性を指すものであり、上下両方向の不確実性を含むものである。一方、気候関連の文脈では、下方向の不確実性を「リスク」、上方向の不確実性を「機会」と表現することが多い点に留意されたい。

シングが存在していることが、学術研究だけでなく市場参加者を対象としたサーベイでも指摘されている。このようなミスプライシングが存在する状況では、2 節で解説した Pedersen, Fitzgibbons, and Pomorski [2021] のモデルが描写するメカニズム以外にも、ミスプライシングの方向（割安だったか割高だったか）に応じて、ミスプライシング修正の過程でグリーン銘柄のアウトパフォーマンスやアンダーパフォーマンスが生じうる。本節（4）では、こうした議論も踏まえつつ、気候関連リスクの織込み状況や、グリーン銘柄とブラウン銘柄の相対的パフォーマンス格差に関する分析を整理する¹¹。

（1）物理的リスク

気候変動がもたらす物理的リスクには、海面上昇やハリケーン等の風水害リスクや、酷暑・熱波リスクなどがある。研究面では、とくに海面上昇が不動産価格などに与える影響に関する分析が多くみられている。例えば、Keenan, Hill, and Gumber [2018]、Bernstein, Gustafson, and Lewis [2019]、Baldauf, Garlappi, and Yannelis [2020] などは、海面上昇リスクが海岸沿いの不動産価格に対して有意に負の影響を与えていることを実証している。一方で、Murfin and Spiegel [2020] は、海面上昇リスクの不動産価格への影響は有意には観察されないと報告しているほか、Hino and Burke [2021] は、リスク量対比、価格への織込みは十分ではないと指摘している。日本を対象とした研究では、齋藤 [2005] は水害リスクが首都圏の地価に有意な負の影響を与えているとする一方、森・西村・谷口 [2016] や佐藤ほか [2016] は水害リスクが地価に与える影響は有意ではない、または極めて限定的であると報告している。不動産価格以外を対象とした分析としては、Painter [2020] や Goldsmith-Pinkham *et al.* [2023] が、長期債を中心として、海沿いの自治体が発行する地方債のスプレッドが高いことを報告している。このほかの風水害リスクに関する研究として、Correa *et al.* [2022] は、ハリケーン・リスクへのエクスポージャーが貸出スプレッドに影響を与えていることを報告している。

このように、海面上昇を含む水害リスクの織込み状況に関する分析結果はまちまちとなっているが、その理由として、不動産保有者や投資家のリスク認識のばらつきが影響している可能性が指摘されている。例えば、Murfin and Spiegel [2020] は、海面上昇リスクの影響が有意に確認されなかった要因として、海岸沿いの居住者が気候変動問題について懐疑的な傾向にあることが影響している可能性があるとして指摘している。また、Hino and Burke [2021] は、気候関連リスク認識が強い投資家が多

11 本論文の以下の記述では、ブラウン（グリーン）銘柄は、炭素排出量や環境負荷が高く気候変動に關する負の外部性を与える銘柄を指す言葉として利用する。

い商業用不動産については、海面上昇リスクが有意な影響を与えていることを報告している。Muller and Hopkins [2019] は、水害に対する意識が高い地域ほど、2012年のハリケーン・サンディ後の不動産価格下落率が大きかったことを示している。理論面では、Bakkensen and Barrage [2022] が、海面上昇リスクに関する信念が人々によって異なるモデルを構築し、米国ロードアイランド州で実施したサーベイ調査などに基づいてカリブレーションしている。その結果、海岸沿いの居住者は海面上昇リスクを過小評価する傾向にあり、海岸沿いの不動産価格の過大評価（6%から13%程度）につながっている可能性があることがわかった。

水害リスク以外では、干ばつ被害が食品会社の株価に与えた影響を分析した Hong, Li, and Xu [2019] が著名である。当該研究では、31カ国の食品会社の株価と各国の干ばつリスク指標の関係を分析し、干ばつリスクの株価への織込みが十分ではないことを指摘している。また、近年、気温上昇や酷暑がもたらすリスクに関する研究が進展している。まず、Bansal, Ochoa, and Kiku [2016] は、長期的な気温トレンドとリターンの共分散が大きい株式銘柄ほどリターンが高い傾向にあること、すなわち、長期的な気温上昇リスクがリスクプレミアムとして価格付けられていることを報告している。一方、Cuculiza *et al.* [2022] は、月次の気温変動に対するリターン感応度が高い株式ほど将来のリターンが低い傾向にあることを報告している¹²。この結果を得た理由として、Cuculiza *et al.* [2022] は、気温変動へのリターン感応度が高い銘柄が過大評価されている可能性を指摘しており、その傍証として、投資家が気候変動リスクを過小評価していることや、株式アナリストがリスクを適切に評価できないことを示唆する分析結果を示している。このほか、Acharya *et al.* [2022] は、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）が公表している気候変動シナリオの1つである RCP8.5 シナリオのもとで、2100年までに最高気温の確率分布がどのようにシフトするかを米国の郡レベルで推計し、熱波リスク指標を構築している。そのうえで、熱波リスクは GDP の下押しにつながることや、当該地域の地方債スプレッドや所在企業の社債スプレッドや株式リスクプレミアムを押し上げる効果があるとの推計結果を得ている。

なお、投資家が豪雨や猛暑などに関するリスク認識を改めた場合に、資産価格へのリスクの織込みが進むことを指摘する研究がみられている。例えば、Hallstrom and Smith [2005] は、1992年のハリケーン・アンドリューが「かすめた（near-missed）」地域の不動産価格が大きく下落したことを示している。このことは、ハリケーンの直接的な被害がなくても、風水害リスク認識の高まりが不動産価格の下落につながることを示している。また、Addoum *et al.* [2024] は、2012年のハリケーン・サン

12 Bansal, Ochoa, and Kiku [2016] は、年次の平均気温の10年変化幅に対するリターン感応度を計測しているため、長期的な気温変動への感応度の計測値とみなせる。一方、Cuculiza *et al.* [2022] は、各月の平均気温の平年からの乖離の絶対値に対する感応度を計測しているため、短期的な気温変動への感応度の計測値とみなせる。こうした違いが、両者の結果が異なる要因となっている可能性がある。

ディ襲来は、直接被害を受けたニューヨークのほか、同じ東海岸北部の都市であるボストンの物件価格の下落につながった一方、シカゴの物件価格には影響がなかったことを報告している。この結果は、直接被害がなかった地域であっても、被災地域との地理的近接性に依じてリスク認識が更新されることで、不動産価格に影響が及ぶことを示唆している。猛暑についても同様の結果が得られている。例えば、Choi, Gao, and Jiang [2020] は、平均以上の高温を経験した地域では、（グーグル検索件数などに基づいて計測した）気候変動に対する関心度が高まるほか、高温の発生地域に所在する企業のうち、炭素排出強度の高い企業の株価がアンダーパフォームすることを示している。Alekseev *et al.* [2022] は、高温等の異常気象の発生時における投資家行動の変化（保有ポートフォリオの変化）をもとに、気候変動リスク指標を作成している。

(2) 移行リスク

移行リスクは、低炭素社会への移行が進む過程で、既存の事業や資産の価値が毀損するリスクである。例えば、炭素排出量規制や炭素税の導入などにより化石燃料関連の事業資産が座礁資産化するリスク、消費者のグリーン嗜好が強まることでブラウン財の売上が急落するリスク、投資家や金融機関がグリーン投資を進めることでブラウン事業向けの資金調達が困難化するリスクなどが具体例として考えられる。移行関連政策の展開や消費者・投資家の行動変化には不確実性が大きいことから、移行リスクへのエクスポージャーが大きい企業は、大きな不確実性に直面していると考えられる。

実際の自然災害に関するリスクである物理的リスクに比べると、移行リスクは、その源泉が多岐にわたるほか、定量化も難しい。そうした中で、移行リスクが資産価格に与える影響を分析した研究では、イ．企業のグリーン度指標（炭素排出量や ESG スコア）と資産価格の関係を分析する、ロ．ニュース記事のテキストデータから移行リスク指標を作成して資産価格との関係を分析する、ハ．移行リスクに大きな影響を与えたイベントに着目してイベント・スタディを行うといったアプローチがとられている。以下では、それぞれのアプローチについて関連研究を概観する。

イ．グリーン度指標と株価パフォーマンス

企業の炭素排出量や ESG スコアなどは、当該企業の移行リスクの代理変数と考えられる。すなわち、炭素排出量の少ない企業や ESG スコアの高い企業は、低炭素社会への移行過程における座礁資産化リスクが少ないことから、移行リスクへの

エクスポージャーが小さいと捉えることができる (Ambec and Lanoie [2008])¹³。一方で、Friedman [1970] による議論以来、環境対策投資は企業の収益性を悪化させるコスト要因であるため、環境関連変数と企業業績や株価は負の関係になりうる、とする指摘もみられている。こうした中で、企業のグリーン度指標と株価の関係について、多数の実証研究が行われてきた¹⁴。

Bolton and Kacperczyk [2021, 2023] は、炭素排出量の多い銘柄ほど平均リターンが高い傾向にあることを報告している。この結果は、炭素排出量の多い銘柄に対して、リスクプレミアム（カーボン・プレミアム）が生じていることを示している。同様に、Hsu, Li, and Tsou [2023] は、有害物質排出量の多い銘柄に対してリスクプレミアムが発生していることを示す結果を得ている。Ilhan, Sautner, and Vilkov [2021] は、オプション価格データを分析し、炭素排出量の増加が株価のダウンスайдリスクを高めていることを示している。Cao *et al.* [2023] も、投資家はオプションを利用して ESG 関連事象に起因して株価がジャンプするリスクをヘッジしている可能性があるため、低 ESG スコア銘柄のオプションが割高になっていると論じている。Cenedese, Han, and Kacperczyk [2023] は、ネットゼロ排出量目標とのアライメントを意識した形で移行リスク指標を作成している。具体的には、2050 年のネットゼロ目標達成と整合的な炭素排出量上限のパスに沿って年次で定まる「炭素予算」を満たすポートフォリオ（ネットゼロ・ポートフォリオ、Net-Zero Portfolios: NZP）を考え、ある銘柄が NZP から除外されるまでの残り年数である「distance-to-exit (DTE)」を算出している。DTE は、当該銘柄がダイベスト¹⁵ されるリスクを定量化しており、移行リスク指標の一種と捉えることができる。Cenedese, Han, and Kacperczyk [2023] は、DTE が短い銘柄、すなわち移行リスクへのエクスポージャーが大きい銘柄ほど、リターンが高いとの結果を報告している。

上記の研究は、移行リスクへのエクスポージャーは、正のプレミアム要因であり、炭素排出量の多いブラウン銘柄のリターンが高いことを示唆している¹⁶。もっとも、逆の結果を得ている研究も少なからず存在している。In, Park, and Monk [2019] や Cheema-Fox *et al.* [2021] は、とくに 2010 年代以降の米国や欧州の株式市場にお

.....
13 このほか、積極的な環境対策を行うことは、顧客や取引先などの、株主以外のステークホルダーからの信頼を獲得することにつながるため、移行リスクの低減や企業業績の向上に資するとの指摘が多くみられている (Jensen and Meckling [1976], Porter and Kramer [2011])。

14 企業のパフォーマンス（利益率や資本コスト等）とグリーン度指標との関係についても多数の研究がみられている。詳細については、有賀・五島・千葉 [2021] による文献レビューなどを参照。

15 グリーン投資などの観点から、ブラウン銘柄などを投資対象から除外すること。詳細は 4 節 (2) 参照。

16 この結果は、資産価格評価理論に基づくと、移行リスクへのエクスポージャーが大きい銘柄ほど、不況期やマーケット下落時に低リターンになる可能性（を投資家が想定していること）を示唆している。気候関連リスクの顕現化は移行対策を強化する方向に働くと考えられるため、この可能性は、気候関連リスクの顕現化が経済活動に負の影響を与えるという、いわゆる“disaster view”と整合的である (disaster view の詳細については、5 節 (3) を参照)。

いて、グリーン銘柄がアウトパフォームする傾向にあることを報告している。また、日本の株式市場を分析した五島・八木 [2022]、久保・小田 [2023] も、グリーン銘柄がアウトパフォームする傾向にあるとの結果を得ている。伊藤 [2023] は、日本市場に関するサブサンプル分析を行っており、パリ協定採択以降の時期にあたる 2016 年以降では、グリーン銘柄がアウトパフォームしていたことを報告している。また、同時期におけるブラウン銘柄のアンダーパフォームの背景として、これらの銘柄に対して投資家が要求するプレミアムが上昇していた可能性を指摘している。こうした相反する実証分析結果がみられている背景については、本節（4）で改めて議論する¹⁷。

ロ. ニュース記事と移行リスク

気候変動リスク、とりわけ移行リスクを定量化する有力な手法として、ニュース記事などのテキストデータを用いる方法がある¹⁸。ニュース記事には、新しい情報を伝達することで、人々の認識をアップデートさせる機能がある。一方、報道機関が読者の興味関心を意識して掲載記事を選択する傾向にあること踏まえると、掲載されたニュース記事は人々のそのときどきの関心を映じている側面もあると考えられる。いずれにせよ、気候変動に関するニュース記事データを利用することで、新たなニュースによる気候リスク認識の変化や、人々の気候変動問題への関心度の動向に関する定量的な指標を作成できると考えられる¹⁹。

このアプローチにおける先駆的な研究は、Engle *et al.* [2020] によるものである。当該研究では、2つの気候変動ニュース・インデックスが作成されている。1つ目の指数は、国連や IPCC などの公式文書と、Wall Street Journal (WSJ) の記事の類似度に基づいて作成されており、ある日の WSJ の記事が気候関連公式文書と似ている場合、高い指数値となる²⁰。2つ目のインデックスは、記事のトーン情報を含むデータベース上で集計した、“climate change”を本文に含むネガティブなニュースの記事数である。1つ目の指数と異なり、リスクの高まりを示す記事のみを集計し

17 なお、炭素排出量と株式リターンに関する研究の多くでは、企業の生産活動等による直接排出 (Scope1)、あるいはこれに電力消費等に起因するもの (Scope2) を加えた排出量に基づいた分析が行われている。その一方で、Scope1、Scope2 を除き、原材料の生産から製品の使用、廃棄までのサプライチェーン全体で生じる排出量 (Scope3) に基づいた分析の重要性に関する指摘もみられている (詳しくは、佐々木 [2023] を参照)。

18 なお、ニュース記事には自然災害に関する記事も含まれるため、物理的リスクも一部反映されるが、説明の便宜上、移行リスクを扱う本節において解説する。

19 ニュース記事のテキストデータから不確実性やリスクに関する指標を作成する研究は、経済学・ファイナンス分野で多くみられており、Baker, Bloom, and Davis [2016] による経済政策不確実性指数などが有名である。日本を対象とした研究としては、例えば、篠原・奥田・中島 [2020] を参照。

20 具体的には、WSJ 記事と気候関連公式文書に現れる単語について、それぞれ「tf-idf スコア」を算出し、そのコサイン類似度を算出している。なお、tf-idf スコアは、ある文章に特徴的な単語に高いスコアを付与するもので、特定の文章内でのみ多く現れる単語ほど高いスコアとなる。

ている点が利点である。Engle *et al.* [2020] は、ESG スコアをもとに構築したポートフォリオのリターンが、2つの気候変動ニュース・インデックスの変動と正の相関を持つことを示している。このことは、気候変動ニュース・インデックスを気候関連リスク指標とみなしたときに、ESG スコアを利用することで、気候関連リスクのある程度ヘッジ可能なポートフォリオを構築できることを意味している。

後続の研究では、Engle *et al.* [2020] の手法をさまざまに拡張する試みがみられている。まず、気候変動問題全体に関する単一の指数ではなく、より細分化されたトピックに関する指数の作成が試みられている。例えば、Bua *et al.* [2024] は、Engle *et al.* [2020] の WSJ 指数と同様の作成手法を採用しており、公的文書とロイターのニュース記事テキストの類似度を算出している。このとき、物理的リスクと移行リスクのそれぞれに別々の公的文書を利用することで、物理的リスク指標と移行リスク指標をそれぞれ作成している。Faccini, Martin, and Skiadopoulos [2023] は、Latent Dirichlet Allocation (LDA) と呼ばれる教師なし自然言語処理手法を利用して記事コーパスのトピック構造を推計している。これにより、自然災害・米国政治・国際会議などのトピックを特定し、それぞれのトピックに関する気候変動インデックスを作成している。このほか、記事のトーンや不確実性に関する単語も考慮しつつ指数を構築する手法も考えられている。例えば、Bessec and Fouquau [2024] や Ardia, Boudt, and Inghelbrecht [2023] は、気候変動関係の単語に加えて、トーンや不確実性の度合いを表す単語の個数も考慮した気候変動ニュース・インデックスを作成している。これらの研究では、作成された指数が上昇する局面では、グリーン銘柄がアウトパフォームするといった実証の結果が報告されている。

上記の研究は、いずれも米国の株式市場を念頭に置いた研究であるが、それ以外の市場を対象とした研究もみられている。Kapfhammer, Larsen, and Thorsrud [2020] は、資源国8カ国（ロシア、豪州、カナダ等）それぞれについて、気候変動が当該国に及ぼす懸念の大きさを指標化している。これらの指標を用いた分析は、気候変動への懸念が高まると資源国通貨が減価することを示している。

ハ. イベント・スタディ

上記の2つのアプローチは、将来発生する可能性のある移行リスクについて、炭素排出量データや人々の気候変動問題への関心度などに基づいて分析したものといえる。一方、パリ協定採択や、米国のインフレ抑制法をはじめとする気候変動対策の政策パッケージの成立など、移行リスクに大きな影響を与えるイベントがすでに発生している。こうした実際に発生した移行イベントの影響を分析することは、移行リスクの定量的インパクトを把握するうえで有益な情報を与えるものであり、実際に、多くのイベント・スタディが行われている。

対象となる移行イベントとしては、米大統領選の結果判明やパリ協定の採択などの、今後の政策対応見通しに大きな影響を与えたイベントが考えられる。こうした

イベントを対象とした研究として、例えば、Ramelli *et al.* [2021] は、2016 年と 2020 年の米国大統領選に着目した分析を行っており、炭素排出強度の高い銘柄は、ランプ氏が当選した 2016 年の選挙後にアウトパフォームした一方、バイデン氏が当選した 2020 年の選挙後にはアンダーパフォームしたことを報告している。また、Barnett [2023] は、2015 年のパリ協定採択などをはじめとする移行リスクに関連するさまざまなイベントのリストを作成したうえで、気候変動対応の厳格化につながるとみられたイベントの発生時では、原油価格変動へのリターン感応度が高い銘柄ほどリターンが低かったことを示している。Cassidy [2024] は、ホワイトハウスによるプレスリリース情報とイントラデイの株価データを組み合わせることで、気候関連政策の発表が株価に影響を与えていることを示している。

また、炭素税や補助金政策の導入または否決など、実際の移行イベントの発生を対象とした研究もみられている。Carattini and Sen [2019] は、米国ワシントン州において炭素税法案が否決されたイベントに着目した分析を行い、当該法案否決イベントにワシントン州所在の企業株価が大きく反応していたことを示している。Bauer, Offner, and Rudebusch [2023] は、米国における大規模な気候変動対応の政策パッケージである「インフレ抑制法 (Inflation Reduction Act: IRA)」採択の行方に大きな影響を与えたマンチン上院議員²¹の動向に着目したイベント・スタディを行っている。その結果、炭素排出強度の高い（低い）銘柄は、IRA 成立見込みが低下（上昇）したイベント後に相対的にアウトパフォーム（アンダーパフォーム）するなど、移行イベントに対して想定される反応を示したことが確認された。Känzig [2023] や Hengge, Panizza, and Varghese [2023] は、EU 域内排出量取引制度 (EU Emissions Trading System: EU ETS) における制度変更に着目した分析を行い、EU ETS の制度変更が欧州企業の株価や経済活動に影響を与えていたことを示している。

株価以外を対象とした分析としては、Du and Karolyi [2023] が、2010 年代以降に産出量や雇用が急減した米国の石炭産業に着目した分析を行い、石炭産業の衰退が石炭産出地域に所在する銀行の収益悪化や貸出量の減少につながったことを報告している。また、京都議定書の批准やパリ協定の採択が、銀行貸出や財務レバレッジに与えた影響をイベント・スタディした研究もみられている (Nguyen and Phan [2020]、Ginglinger and Moreau [2023]、Reghezza *et al.* [2022])。

.....
21 マンチン上院議員は、ウェストバージニア州選出の民主党議員（2024 年以降は無所属、2025 年引退）。Bauer, Offner, and Rudebusch [2023] によれば、2022 年当時、民主党と共和党がどちらも 50 議席を有していた上院において、票決に最も大きな影響を及ぼす議員となっていた。IRA 関連では、2022 年 7 月 14 日に「新たな気候変動関係法案を支持しない」と語ったとの報道により IRA 不成立の可能性が高まったものの、7 月 27 日にマンチン議員とシューマー上院院内総務が IRA 成立に合意したとのアナウンスにより、IRA 成立が織り込まれた。

(3) 気候関連リスクのヘッジ

将来の不確実性に対するヘッジ手段の提供は、金融市場や金融機関が果たす重要な役割の1つである。ヘッジ手段の存在は、価格変動リスクに対する許容度の低い経済主体から、許容度やリスク管理能力が高い経済主体へのリスク移転を可能とすることで、社会厚生を改善できる。気候関連リスクに関するリスクヘッジ手段の提供についても、効果的なリスク管理や効率的な資源配分達成のために重要と考えられる。その具体例として、天候デリバティブの登場により、天候要因によるキャッシュ・フローの不確実性を抑制できるようになったことから、電気・ガス企業の借入、設備投資や時価総額が増加したことを示す研究がみられている (Perez-Gonzalez and Yun [2013])。この結果は、天候デリバティブ市場の発達により局地的な天候リスクのヘッジが可能となり、社会厚生が改善したことを示唆している。

一方、一般的な気候関連リスクを直接ヘッジする金融商品の組成は容易ではないことが指摘されている。これは、気候変動問題は、極めて広範な経済主体に対して共通の影響を及ぼす性質を持つことから、大数の法則を利用したリスク管理という保険の原理を働かせづらいためである (Engle *et al.* [2020])。こうした中、Engle *et al.* [2020] 以降の研究では、取引が容易な個別株をもとに気候関連リスクのヘッジ・ポートフォリオを構築する手法を中心に研究が進められている²²。こうした研究では、銘柄ごとの気候関連リスクへの反応の違いを利用して、ロングショート・ポートフォリオを構築することが基本的な考え方であり、主に以下のいずれかのアプローチがとられることが多い。

- グリーン度の高い銘柄（炭素排出量が少ない銘柄や ESG スコアが高い銘柄など）をロング、低い銘柄をショートする。
- 気候ベータ（気候関連リスク・ファクターへのリターン感応度）の高い銘柄をロング、低い銘柄をショートする²³。
- 実際に気候関連ショックが発生した際に需要が増加する銘柄をロング、減少する銘柄をショートする。

1 つ目のアプローチは、環境負荷の低い銘柄ほど気候関連リスクに耐性があるとの考えに基づいている。気候関連ショックが発生したとき、耐性の高いグリーン銘柄

22 なお、Huynh and Xia [2021] は、気候関連リスク上昇時に価格が上昇する傾向にある社債銘柄（高気候ベータ銘柄）ほど、リターンが低いことを報告している。このことは、気候変動リスクに対するヘッジ手段として働く銘柄については、社債投資家は低リターンを許容していることを示唆している。

23 ここでは、気候関連リスク・ファクターの符号について、リスクが増加した際により大きな値をとるものとしている。後述のとおり、テキスト分析などから作成されたインデックスを分析に用いる場合は、当該インデックスの上昇が、リスクの増加または低下のどちらに対応するのかを確認する必要がある。

柄が相対的にアウトパフォームすることで、ロングショート・ポートフォリオは正のリターンを得ることとなり、気候関連ショックに対するヘッジとなる。本節(2)ロ.で述べたとおり、Engle *et al.* [2020] は、ESG スコアに基づいて構築したロングショート・ポートフォリオが、彼らが作成した気候変動ニュース・インデックスの変動と正に相関していることから、気候関連リスクに対する有効なヘッジ手法の構築に成功したと主張している。

2つ目のアプローチは、ファクターモデルに基づいた資産価格評価の理論的枠組みと整合的な手法である。気候ベータは、気候関連ショックへのリターン感応度そのものである。このため、(ベータが正しく推計されている限り) 構成上、このロングショート・ポートフォリオは気候関連ショック発生時に正のリターンを得ることから、ヘッジ手段として機能する。Faccini, Martin, and Skiadopoulos [2023] は、彼らが作成したトピック別の気候変動ニュース・インデックスのうち、「米国の気候変動関連国内政策」インデックスについて詳細に分析し、当該インデックスの上昇は、移行リスクの低下を示唆することを示している。また、当該インデックスに対する個別銘柄のリターン感応度に基づいてロングショート・ポートフォリオを構築したところ、標準的なファクターモデルでは説明できない正の超過収益(アルファ)を獲得したことを報告している。すなわち、当該ロングショート・ポートフォリオの逆ポジションは、気候関連リスクが上昇する際に高いリターンをあげるヘッジ・ポートフォリオとなっており、そのアルファは負であることから、彼らの結果はヘッジの議論と整合的である。

なお、第2のアプローチにおいては、気候ベータの安定的な推計を行えるかどうかは制約となる。すなわち、気候関連リスクが株価のリスク要因として認識されてから、さほど時系列データが蓄積されていない現時点では、気候ベータを高い精度で推計することが難しい可能性がある。さらに、気候関連リスクへの感応度は、市場参加者のリスク認識の変化などに応じて変化する、時变的なパラメータである可能性が高い。この点は、気候変動問題に対する投資家の認識が大きく変化している局面ではとくに重要である。また、気候ファクターはさまざまな特定手法が提案されているが、異なる手法間での相関は必ずしも高くないことから、利用する気候ファクターに応じて計測される気候ベータの結果も相応に変化する点にも留意が必要と考えられる。

Alekseev *et al.* [2022] が提案する第3のアプローチは、気候変動ショック発生時における実際の投資家の売買行動に基づいており、顕示選好に基づくアプローチと捉えることができる。すなわち、米国の郡レベルで計測された気候関連ショック²⁴に対する、当該郡に拠点を置くファンド・アドバイザーの反応を計測している。具

24 具体的な気候変動ショックとしては、異常気象発生時の超過死亡者数、農産物の作付け不良に関する保険金支払額、気温の長期平均からの乖離の3つを考えている。

体的には、運用する投資信託ポートフォリオの産業分類ウエイトが気候関連ショックにどのように反応したかを、産業分類ごとに推計している。そのうえで、推計された感応度をウエイトとして各産業ポートフォリオを保有するポートフォリオをヘッジ・ポートフォリオとしている。この構成方法は、郡レベルの「局所的な」気候変動ショック発生を受けて、投資信託が保有量を増やす産業をロング、減らす産業をショートすることで、「広域的な」気候変動ショックに対するヘッジが可能という考え方に基づいている。このように構成されたポートフォリオは、そのほかのヘッジ・ポートフォリオ（グリーンETFのロング、ブラウンETFのショート、ESGスコアに基づいて作成したポートフォリオなど）と比べて、幅広い気候変動リスク指標をヘッジできているとの結果が報告されている。このような良好な結果には、実際の投資家行動に基づいた顕示選好に基づく構成手法であることが寄与している可能性がある。この点は、グリーン度指標とリターンの関係性や気候ベータなどの、高精度の推計が必ずしも容易ではない関係性に依拠した他の2つのアプローチにはない特長と考えられる。

(4) 気候関連リスクとミスプライシング

気候関連リスクが資産価格に適切に反映されていない場合、金融市場における効率的な資金配分を阻害する可能性があるほか、リスクの顕現化時やリスク認識の急変時に急激な資産価格の調整が起こる可能性がある。とくに、低炭素社会への移行に伴って化石燃料関連事業をはじめとして座礁資産が相応の規模で発生することが懸念されている。座礁資産の発生は、当該資産へ投融資を行っている投資家や金融機関の健全性への影響を通じて、金融安定上の問題を引き起こす可能性が指摘されている²⁵。このため、気候関連リスクの織込み状況をモニターすることは、投資家や金融機関のみならず政策当局にとっても非常に重要である。

現状における市場参加者のリスク認識については、各種のサーベイ調査結果が参考となる。まず、米国等の市場参加者等を対象として行われたサーベイでは、気候変動リスクの資産価格への織込み状況は完全ではないとの評価となっている。例えば、Krueger, Sautner, and Starks [2020] は、「一部の株価については気候変動リスクを十分に反映していない²⁶」と指摘している。また、Stroebel and Wurgler [2021] は、「極めて多くの回答者は、資産価格は気候変動リスクを過小評価している」と考

.....
25 気候変動問題と金融安定に関する研究については、Furukawa, Ichioe, and Shiraki [2020] によるサーベイを参照。また、気候変動リスクに関するシナリオ分析の概要や課題については、竹山・松井・南井 [2023] や、Noels *et al.* [2023] を参照。

26 [...] some equity valuations do not fully reflect climate risks, [...] (Krueger, Sautner, and Starks [2020], p.1067).

えている²⁷⁾」とのサーベイ結果を報告している。

日本市場については、2022 年より日本銀行金融市場局が「気候変動関連の市場機能サーベイ」を開始し、投資家・金融機関のほか、事業法人や格付け会社等を含む幅広い市場関係者に対して、日本の株式市場や社債市場における気候変動リスクの織込み状況や今後の課題などに関する設問について調査を行っている。2022 年に行われた第 1 回調査では、気候変動リスクの織込み状況について、「一定の織り込みは見られるものの、一段の織り込み余地がある」との評価している（日本銀行金融市場局 [2022]）。2023 年に行われた第 2 回調査では、「気候関連リスク・機会、価格にある程度織り込まれているものの、一段の織り込みの余地がある」との見方を示している（日本銀行金融市場局 [2023]）。このように、気候関連リスクの株価や社債価格への織込みは十分ではないものの、徐々に織込みが進展していることが窺われる。

気候関連リスクの織込みが不十分なとき、リスクが十分に価格に反映されていないという意味でミスプライシングが発生しており、ブラウン銘柄が割高、グリーン銘柄が割安になっていると考えられる。こうしたミスプライシングが生じる背景には、Pastor, Stambaugh, and Taylor [2021] のモデルにおけるタイプ U 投資家のように、気候関連リスクを適切に考慮しない投資家層の存在が考えられる²⁸⁾。逆にいえば、タイプ U 投資家が減少し、タイプ A・タイプ M 投資家が拡大していくことで、こうしたミスプライシングは修正されていくと考えられる。この修正過程では、割安（割高）状態が修正されるグリーン（ブラウン）銘柄はアウトパフォーム（アンダーパフォーム）する。ただし、このような修正過程が完了すると、タイプ M 投資家が十分存在するもと、グリーン銘柄はブラウン銘柄対比、低リターンになることが理論的に予想される。このように、ミスプライシングの修正段階に応じて、グリーン銘柄とブラウン銘柄の相対的なパフォーマンスは複雑に変化することが予想される。

本節（2）イ. でみたとおり、グリーン度指標と株価リターンの関係に関する実証分析結果はまちまちとなっているが、このことは上記の議論をもとに整合的に理解可能である。例えば、グリーン銘柄が相対的に高いリターンを獲得していることを報告している Engle *et al.* [2020]、五島・八木 [2022]、久保・小田 [2023] は、ミスプライシングの修正過程を捉えていた可能性がある。一方、Bolton and Kacperczyk [2021] などが報告するカーボン・プレミアムは、気候関連リスクが一定以上織り込まれた状況下で観察されている可能性がある。Karolyi, Wu, and Xiong [2023] は、こ

27 By an overwhelming margin, respondents believe that asset prices underestimate climate risks rather than overestimate them. (Stroebe and Wurgler [2021], p.487).

28 本節では、株価形成に係る気候関連情報を考慮しない投資家が存在することに起因する価格の歪みを「ミスプライシング」と呼んでいる。これは、理念的には、Pastor, Stambaugh, and Taylor [2021] モデルにおいてタイプ U 投資家が存在しない場合の株価を基準とした判断に対応している。

の議論と整合的な結果として、全期間サンプル（2012 年 11 月～2021 年 12 月）からはグリーン銘柄の相対的なアウトパフォーマンスが観察されたものの、2021 年のデータに限定すると、ブラウン銘柄がアウトパフォームしはじめていることを報告している。なお、需給面に着目した場合、グリーン銘柄の割安感の修正過程では、グリーン銘柄に投資資金が流入することが予想される。実際に、グリーン ETF のリターンを分析した Briere and Ramelli [2022] は、グリーン銘柄への投資資金の流入という需給要因を背景として、グリーン ETF 銘柄のアウトパフォーマンスが観察されたことを報告している。

なお、気候関連リスクの織込み状況は、リスクの適切な反映という市場機能や金融安定上の観点以外にも、グリーン投資を推進する観点からも重要な論点となりうる。すなわち、グリーン投資を推奨する根拠の 1 つとして、上記の一部先行研究でも観察されたような、グリーン銘柄の相対的なアウトパフォーマンスが挙げられることがある点に留意が必要である²⁹。仮に、グリーン銘柄の相対的なアウトパフォーマンスがミスマーケティングの修正に起因していた場合、こうした良好なパフォーマンスは一時的なものにとどまる可能性がある。とくに、ESG 情報を考慮する投資家層の増加が一段落した段階で、ブラウン銘柄とリターン成績が逆転する可能性がある点には留意が必要である³⁰。

いずれにせよ、気候変動問題を受けた投資家行動やリスク認識の変化が進展したのは、ここ 10 年程度のこととみられる。このため、頑健な実証分析結果を得るためには、データの蓄積が十分ではない可能性があるほか、国・地域によってその進展度合いには相応のばらつきがあると考えられる。このため、個別株のリスクプレミアムと気候関連リスクの関係を扱った文献をフォローするうえでは、分析対象国や時期などに留意する必要があるほか、データの蓄積が進む中で関係性が変化していく可能性にも留意する必要がある。

4. 低炭素社会への移行と金融市場

3 節では、気候変動問題が資産価格に与える影響のうち、資産のファンダメンタルズに関連する研究を中心に紹介してきた。すなわち、気候変動がもたらす物理的

.....
29 例えば、年金基金の運用を行う機関投資家に対するサーベイ調査では、回答先の約 70%が、ESG 投資の運用パフォーマンスへの影響について「中長期的なリターン向上が期待できる」と回答している（企業年金連合会 [2023]）。

30 一方、2 節（3）で紹介したとおり、Chen, Garlappi, and Lazrak [2023] や Sauzet and Zerbib [2024] は、グリーン財に対する需要動向まで含めて考えると、グリーン銘柄のリスクプレミアムが高まる経路が存在することを指摘している点にも留意が必要と考えられる。

リスクや移行リスクが資産価格に与える影響に関する研究のほか、こうしたリスクの織込み状況やヘッジに関する研究をまとめてきた。このように、リスク要因が資産価格に適切に織り込まれているかどうかは、気候関連リスクに限らず、あらゆるリスク要因に共通する重要な論点である。一方、気候ファイナンスに特徴的な論点として、金融市場がより能動的な役割を果たすことを期待されている点が指摘できる。すなわち、金融市場が効果的に金融仲介機能を発揮することで、気候変動の緩和策や気候変動への適応策を実行するために必要となる膨大な資金需要に応え、低炭素社会への移行を後押しすることが期待されている点が、気候ファイナンスの特徴である³¹。

こうした背景のもと、金銭的リターンのみならず社会や環境に好ましい影響を生み出すことも目的とした「インパクト投資」や、投資戦略や運用資産を気候変動目標（2050年までのネットゼロ排出量の達成など）と整合的なものとする「アライメント」をはじめとするサステナブル投資に対する注目度が高まっている³²。サステナブル投資の代表的な手法としては、ダイベストメント（divestment、投資撤退）やエンゲージメントと呼ばれる手法などがある。各サステナブル投資手法が資産価格にどのような影響を与えるかや、どの手法がより望ましい結果をもたらすかは、学術的にも実務的にも重要な論点である。また、サステナブル投資の究極的な目的は、低炭素社会への移行を促進することである。このため、サステナブル投資が意図通りに企業活動のグリーン化を後押ししているかや、「グリーンウォッシュ」と呼ばれる、みせかけの取組みとなっていないかなどを明らかにしていくことも極めて重要である。

サステナブル投資は、民間部門だけではなく、中央銀行とも関連する論点である³³。例えば、中央銀行が政策運営にあたって気候変動問題をどのように考慮していくべきかについては、政策当局者からさまざまな情報発信がみられている。ま

.....
31 気候変動の緩和（mitigation）は、再生可能エネルギー比率の向上や、炭素税・排出権取引などを通して温室効果ガスの排出量を抑制すること、気候変動への適応（adaptation）は、防災インフラへの投資などを通して、気候変動の影響に対応していくことを指す。本節で取り上げる研究の主要分析対象である先進国の金融市場では、低炭素社会に移行することで気候変動の緩和を進めることが念頭に置かれることが多い。一方、新興国・発展途上国を中心に、気候変動への適応にも膨大な投資が必要となるため、さまざまな政策対応が必要であることが指摘されている。例えば、IMF [2022] は、パリ協定の平均気温上昇目標が達成されない場合、2050年以降の適応策への投資必要額は最大年額1.75兆ドルに達するとの試算値を示している。

32 ESG投資は、環境（E）・社会（S）・ガバナンス（G）要素を考慮した投資、サステナブル投資は、持続可能な社会を実現するために気候変動・環境問題・人権問題などを考慮した投資、グリーン投資は、気候変動を含む環境問題を考慮した投資、インパクト投資は、社会や環境に望ましい影響を及ぼすことを目指した投資を指す。このように、これらの用語が指すものは、重なる部分が大きいものの同一ではない。本節では、簡単のため、主にサステナブル投資という用語を用いる。

33 中央銀行等が結成したネットワークである NGFS（Network for Greening Financial System）では、“Net Zero for Central Banks”をテーマとした作業部会が設置されており、中央銀行自身が保有する資産のグリーン化や、中央銀行の業務運営に関する環境関連開示の整備などが議論されている。

た、中央銀行の責務である物価安定との関係において、どのように気候変動問題を考慮すべきかや、中央銀行が金融政策を通じて気候変動問題に取り組む場合に、どのような政策手段を用いて、どのように政策運営を行っていくことが望ましいか、などの論点に関する研究も急速に発展している。

本節では、まず (1) で「グリーンニアム」(グリーン資産の利回りが、グリーン特性以外同等な商品の利回りよりも低い現象) に関する研究をまとめる。グリーンニアムの存在は、サステナブル投資から非金銭的効用を得ている投資家が実際に存在していることを示唆する。このため、サステナブル投資を考えるうえでの基礎的かつ主要な実証研究トピックである。本節 (2) では、ダイベストメントやエンゲージメントなどのサステナブル投資手法が、資産価格などに及ぼす影響を分析した研究を概観する。本節 (3) では、サステナブル投資が実効性を持つ形で、低炭素社会への移行の後押しにつながっているかという論点を念頭に、サステナブル投資が企業行動に与えるリアル・エフェクト、グリーンウォッシュ、環境・ESG 関連データに関する研究を紹介する。本節 (4) では、グリーン金融政策に関連する研究をまとめる。

(1) サステナブル投資による非金銭的効用

サステナブル投資による非金銭的効用の存在を検証するためには、グリーン特性の有無のみが異なり、その他の商品性が同じ資産のペアを比較する方法が考えられる。例えば、グリーン債への投資から非金銭的効用を得る投資家は、グリーン債の利回りが相対的に低い(価格が相対的に高い)場合でも、グリーン債に対して投資を行うと考えられる。これは、サステナブル投資家がプレミアムを支払ってでもグリーン債への投資を行っている、と解釈できる。このため、サステナブル投資から非金銭的効用を得る投資家が十分に存在する場合は、「グリーンニアム」と呼ばれる利回り格差が生じる。

グリーンニアムが存在しているかどうかを検証した先行研究では、債券市場を対象とした分析が多くみられている³⁴。初期の研究としては、Zerbib [2019] が 2017 年までのグローバルな債券流通市場でデータが利用可能だった 110 銘柄のグリーン債を分析し、2bps 程度のグリーンニアムが存在すると報告している。Pastor, Stambaugh, and Taylor [2022] は、ドイツ国債には数 bps 程度のグリーンニアムが存在している

.....
34 債券以外では、不動産賃料を対象とした研究がみられており、例えば、東京では環境性能や省エネ性能が高いオフィスの賃料が2~5%程度高くなっていることが報告されている。詳細については、Onishi, Deng, and Shimizu [2021] および同論文の引用文献を参照。このほか、株価リターンにおけるカーボン・プレミアムの存在 (Bolton and Kacperczyk [2021]) は、グリーンニアムと表裏一体の議論といえる。

ことを報告している。Baker *et al.* [2022] は、米国の地方債や社債の発行市場において、6bps 程度のグリーンプレミアムが存在することを報告している。Fricke, Jank, and Meinertding [2024] によるユーロ圏の流通市場に関する分析からは、期間平均で 3bps 程度のグリーンプレミアムが存在していたほか、グリーンプレミアムが年々拡大傾向にあることを報告している。このほか、Dorfleitner, Utz, and Zhang [2022] は 1,200 銘柄を超えるグリーン債の流通市場データを分析しており、最大で 5bps 程度のグリーンプレミアムが観察されたとしている。一方、Larcker and Watts [2020] は、米国の地方債発行市場では有意なグリーンプレミアムは観察されなかったと主張しているほか、Flammer [2021] や Tang and Zhang [2020] も同様にグリーンプレミアムの存在に否定的な結果を得ている。

ここで、グリーンプレミアムの推計に関する留意点として、社債市場を中心として、グリーン特性のみが異なる債券ペアのサンプル数を十分に得るのが難しいことが挙げられる。このため、先行研究では、一定程度の満期日の違いなどを許容することで債券ペア数を確保しているケースがみられる。このほか、税制面での扱いの違いや、発行規模の違いに起因する流動性の違いなども、グリーン債と通常債の利回り格差に影響を与える (Baker *et al.* [2022])。こうしたさまざまな要因を考慮しつつ適切にグリーンプレミアムを推計することは、必ずしも容易ではない。このことが、グリーンプレミアムの存在を支持する研究が多くみられる一方で、少なくない数の研究が相反する結果を報告している背景にあると考えられる。

上述の分析結果は、平均的なグリーンプレミアムに関するものである。一方で、グリーンプレミアムの大きさは、銘柄の属性に応じて相応の異質性を持つことが明らかになってきている。例えば、グリーン認証を受けている銘柄 (Kapraun and Scheins [2021]) や、政府や国際機関が発行する債券 (Fatica, Panzica, and Rancan [2021]) などの、グリーンウォッシュ懸念が相対的に低い銘柄ほど、グリーンプレミアムが大きくなることが明らかになってきている。また、Fatica, Panzica, and Rancan [2021] は、大企業事業法人の社債ではグリーンプレミアムが観察された一方、金融機関が発行する社債ではグリーンプレミアムは観察されなかったと報告している。当該論文では、その理由として、グリーン事業に直接投資を行うことが多い事業法人に比べて、金融機関が調達したグリーン資金は、最終的な投資先に関する透明性が低いと指摘している。

どのような投資主体が、どのような特徴を持つ銘柄にグリーンプレミアムを支払っているかは、現状把握や今後の政策対応を考えるうえで重要な論点である。まず、グリーン債への投資主体については、Baker *et al.* [2022] が、グリーン債の保有主体は一部の (社会的責任投資などを標榜する) グリーン投資家に集中していることを明らかにしているほか、Fricke, Jank, and Meinertding [2024] は、ユーロ圏の債券保有主体データを分析し、銀行、投資ファンド、保険会社が、グリーン債の主な保有主体かつグリーンプレミアムの払い手となっていることを明らかにしている。Pietsch and Salakhova [2022] は、個人投資家の動向がグリーンプレミアムに大きな影響を与えて

いる可能性を指摘している。これらの結果は、個人投資家をはじめとするグリーン投資選好を持つ投資家や、こうした投資家からの資金調達を進める投資ファンド・保険会社などが、グリーンアムの主な支払い手となっていることを示唆している。また、サーベイ調査からも、グリーン債への強い選好を示す機関投資家や事業法人が存在していることが確認されている（Sangiorgi and Schopohl [2023]、Krueger, Sautner, and Starks [2020]）。

以上のとおり、債券市場に関する多くの先行研究は、グリーンアムが存在することを示唆している³⁵。もっとも、すべてのグリーン債にグリーンアムが発生しているわけではなく、グリーン投資の実行に対する信認が高い銘柄にのみグリーンアムが発生するという、一定の選別メカニズムが働いている可能性が示唆されている。

(2) サステナブル投資が資産価格に与える影響に関する研究

インパクト投資や気候変動目標へのアライメントを進めるにあたっては、ダイベストメントと呼ばれる手法が著名である。ダイベストメント法は、環境負荷の大きい企業から投資資金を引き揚げると同時に、環境負荷の小さい企業に資金を振り向けることを企図している。このような投資資金の再配分によって、環境負荷の高い企業の資本コストを（相対的に）上昇させることで、各企業に気候変動問題に対応するインセンティブを与えることや、グリーン投資案件向けの資金調達を容易にすることが期待されている。

ダイベストメントが資産価格に与える影響については、Heinkel, Kraus, and Zechner [2001] 以来、多く研究がみられている³⁶。初期の著名な論文である Hong and Kacperczyk [2009] では、酒・たばこ・ギャンブル関連銘柄を分析している。こうした銘柄は“sin stocks”と呼ばれており、倫理的な観点から投資を禁止するファンドが存在している。Hong and Kacperczyk [2009] は、年金基金などで sin stocks への投資を実際に控えている先があることや、sin stocks 銘柄が割安（発行体企業からみると高資本コスト）であることを示している。こうした現象は、軍需関連企業・ゲーム関連企業・環境負荷の高い企業などでも確認されている（Fabozzi, Ma, and Oliphant [2008]、El Ghoul *et al.* [2011]、Salaber [2013]、Chava [2014]、Statman and

35 なお、機関投資家が非金銭的効用のために金銭的リターンを犠牲にすることが受託者責任上認められるかについては、さまざまな議論がみられている。英米法における当該議論の概要については、小藺 [2020] を参照。なお、米国では 2021 年に従業員退職所得保障法（ERISA 法）が改正され、気候変動やその他の ESG 要素を考慮した年金基金の運用が可能であることが明記された。このほか、気候変動目標へのアライメントと受託者責任の関係については、Gosling and MacNeil [2023] を参照。

36 社会的責任投資（Socially Responsible Investment: SRI）や ESG 投資と株価リターンに関する研究については、Renneboog, Ter Horst, and Zhang [2008]、Friede, Busch, and Bassen [2015]、湯山・白須・森平 [2019] などのサーベイを参照。

Glushkov [2016]、Barber, Morse, and Yasuda [2021]、Boustanifar and Schwarz [2023] など)。関連する研究として、Hartzmark and Sussman [2019] は、2016 年に投資調査会社 Morningstar が投資信託のサステナビリティ・スコアの公表を始めたことに着目したイベント・スタディを行っている。その結果、スコアの高い（低い）投信への投資資金の流入（流出）が相応の規模で起きていたことがわかった。この結果は、投資家が投信のサステナビリティ特性を考慮した投資行動をとっていることを示している。

では、ブラウン銘柄に対するダイベストメントは、資産価格に対してどの程度影響を与えているだろうか？ Berk and van Binsbergen [2021] は、ダイベストメントを考慮した資産価格評価モデルを構築し、投資家全体に占める（ダイベストメントを行う）グリーン投資家の割合や、ダイベストメントの対象となる銘柄が全銘柄に占める割合などが、ダイベストメントの定量的効果の決定要因であると指摘している。そのうえで、当該理論モデルとデータに基づいた分析から、ダイベストメントが株価リターン・資本コストに与える影響は数 bps 程度と、非常に小さいと主張している。一方、Cheng *et al.* [2024] は、ダイベストメントは無視できない規模の効果を有しており、対象企業の資本コストを 20bps 以上押し上げると報告している。Cheng *et al.* [2024] が、Berk and van Binsbergen [2021] と異なる結果を得た理由としては、パッシブ投資家の存在を考慮していることが挙げられる。グリーン投資家によるダイベストメントは、ブラウン銘柄の期待リターンを押し上げる。このとき、金銭的リターンを追求するアクティブ投資家は、期待リターンの高まりに応じてブラウン銘柄への投資需要を高めることから、ダイベストメント効果が減殺される。このため、アクティブな投資行動をとらないパッシブ投資家の割合が多いほど、ダイベストメント効果が大きくなる。このように、ダイベストメントの効果は、理論上も実証上も、グリーン投資家、（非グリーン・）アクティブ投資家、パッシブ投資家の割合に大きく依存すると考えられる。

ダイベストメントは、投資を撤退してブラウン企業と関係を断つ手法であるが、その対極にある手法である、株主として積極的に経営に関与することで気候変動への対応を促す「エンゲージメント」手法も幅広く実践されている。例えば、機関投資家にサーベイを行った Krueger, Sautner, and Starks [2020] は、ダイベストメントを行う投資家は 20% 程度と必ずしも多くなく、むしろ株主として経営陣との対話や議決権行使などにエンゲージすることが主流だと報告している。なお、McCahery, Sautner, and Starks [2016]、Dimson, Karakaş, and Li [2015]、Krueger, Sautner, and Starks [2020] によると、半数程度の機関投資家は、気候変動への対応方針について、経営陣とプライベートな対話を行っているほか、こうした対話に満足できない場合に、議決権の行使や公開の場での経営陣の批判などへとエスカレートするというステップを取る傾向にある。

では、ダイベストメントとエンゲージメントは、どちらがより効果的な手法だろうか？ 上述の Berk and van Binsbergen [2021] は、ダイベストメントが資本コストに与える影響は限定的という結果を踏まえて、積極的なエンゲージメント活動にリソースを投下する方がより効果的である、と主張している。より理論的に両手法を比較分析した研究としては、Broccardo, Hart, and Zingales [2022] がある³⁷。当該論文のモデルでは、企業は生産の際に h の被害を及ぼす環境汚染を起こすが、環境対策コスト δ を支払うことで汚染を防ぐことができる。企業は、環境対策コストを支払わずに環境を汚染する「ダーティ企業」か、コストを支払って汚染対策をする「クリーン企業」のどちらにとなる。社会的には、汚染を防ぐコストが被害額よりも小さい ($\delta < h$) 場合に、クリーン企業となることが望ましい。もっとも、投資家の最適化行動の結果が、社会的に望ましい選択と一致するとは限らない。実際に、当該論文は、投資家全員が金銭的リターンのみしか考えない場合、環境汚染による外部性は内部化されず、全企業がダーティ企業となることを示している。

Broccardo, Hart, and Zingales [2022] は、少なくとも一部の投資家が「社会的責任投資家」、すなわち、他の経済主体の効用も考慮して最適化を行う投資家である状況を想定して、エンゲージメント（環境対策を実施するように議決権を行使）と、ダイベストメント（ダーティ企業からの投資撤退）、それぞれの理論的性質について分析している。その結果、社会的責任投資家が過半数を占める場合は、エンゲージメントによって社会的に最適な企業行動（対策コストが汚染被害額を上回る企業が環境対策を行い、それ以外の企業は環境対策を行わない）を達成できることを示している。一方、社会的責任投資家が少数派となっている場合は、エンゲージメントはあまり効力を発揮できず、ダイベストメントの方が相対的に社会厚生 の改善度合いが大きくなる。もっとも、ダイベストメントでは、社会的な最適解は達成できないことも示されている。例えば、ダイベストメントでは、環境対策コストが被害額を上回るような、環境対策を行うことが（ネットでみた経済的利得の意味で）望ましくない企業も対象になりうるといった欠点が存在している。Jagannathan *et al.* [2023] も同様に、ダイベストメント、エンゲージメント、ボイコットの効果を分析しており、いずれの手法についても、十分なアクティビストが存在する場合、ダーティ企業の株価下落や環境対策の実施につながることを示している。さらに、ダーティ企業の行動変容を引き起こすために必要なアクティビスト割合の閾値が相対的に低いという意味で、エンゲージメントがより効果的な手法であることを示している。

ダイベストメントとエンゲージメントは、それぞれ、完全な投資撤退または企業経営への積極的な関与を意味しており、ある意味で両極端な手法といえる。より中

.....
37 なお、当該論文では、投資ポートフォリオ選択だけではなく、消費バスケットの選択問題も定式化されており、消費者によるブラウン財のボイコットがもたらす効果も分析されている。

間的な投資手法としては、ティルト (tilt) と呼ばれる手法がある。ティルトでは、グリーン銘柄に投資ウェイトを傾斜するものの、ブラウン銘柄から完全にはダイベスしない。Pastor, Stambaugh, and Taylor [2024] は、市場ポートフォリオからの銘柄別保有ウェイトの乖離をティルトと定義し、米国の機関投資家の株式保有データをもとに、機関投資家の ESG 投資に起因するティルトの状況を分析している。その結果、当該論文のデータ終期である 2021 年時点では、ESG ティルトは総運用資産残高の 6% 強の規模であることが報告されている。総運用資産残高対比ではティルトの規模は大きくないように映るが、運用資産の約 3 分の 1 を占めるアクティブ運用資産残高対比では、ESG ティルトは年々増加傾向にあり、2021 年時点で約 22% に匹敵している。この ESG ティルトの増加は、グリーン銘柄の保有ウェイトの増加 (インテンシブ・マージン) でほぼ説明可能であり、ブラウン銘柄のダイベスメント (エクステンシブ・マージン) によるティルトへの寄与はわずかであることも報告している。

(3) サステナブル投資の実効性に関連する研究

サステナブル投資を行う究極的な目的は、持続可能な社会・低炭素社会への移行を促進していくことである。このため、サステナブル投資が単に投資ポートフォリオのグリーン度を高めるだけに留まらず、実効性を伴う形で社会全体のグリーン化に寄与していくことが重要である。言い換えると、Atta-Darkua *et al.* [2023] の論文タイトルにあるとおり、サステナブル投資が「地球のグリーン化を進めている (helping to green the planet)」のか、「単にポートフォリオをグリーン化している (just greening your portfolio)」のかを明らかにすることが重要である。

以下、3 つの論点からこの問いについて議論する。第 1 の論点は、サステナブル投資がリアル・エフェクトを持つか、すなわち、実体的な企業行動の変化につながっているかである。サステナブル投資が企業行動を望ましい方向に変容させているかは、低炭素社会への移行を効果的に進めていくために極めて重要である。第 2 の論点は、「グリーンウォッシュ」である。株式や債券の発行体側も、ESG ファンド等の投資家側も、環境対策やサステナブル投資への積極姿勢をアピールするインセンティブを持つ³⁸。一方で、こうしたアピールが見せかけのものにとどまり、実際には適切な対応がとられていないことを懸念する声が多くみられている。このため、グリーンウォッシュを抑制することは実務上の主要課題の 1 つとなっている。最後の論点は、データ整備である。的確な投資判断のためには、透明性とカバレッ

.....
38 例えば、社債発行企業に対してサーベイ調査を行った Sangiorgi and Schopohl [2023] は、投資家からの評判を高めることが、企業がグリーン債を発行する主要な動機だと指摘している。

ジの高いデータの存在が不可欠である。このため、環境情報開示の推進や ESG スコアの透明性向上をはじめとするデータ面の整備は、サステナブル投資の実効性を高めていくうえでの重要な論点である。

イ. サステナブル投資のリアル・エフェクト

サステナブル投資のリアル・エフェクトについては、銀行貸出の撤退およびそれに伴う財務レバレッジへの影響を分析した研究がみられている。これらの研究は共通して、脱炭素化の流れの中、炭素排出強度の高い企業では、財務レバレッジの低下や貸出の減少がみられていることを示している。例えば、Nguyen and Phan [2020] による京都議定書の批准に着目したイベント・スタディや、Ginglinger and Moreau [2023]、Reghezza *et al.* [2022] によるパリ協定採択に着目したイベント・スタディは、こうしたグリーン・イベントの発生に直面したブラウン企業が、増大したリスクに対応する形で、財務レバレッジを低下させる傾向にあることを示している。

もっとも、ブラウン企業の資本コスト上昇が、望ましい結果につながっているかという点については、否定的な結果を示唆する研究がみられている。まず、米国の上場企業の炭素排出強度と資本コストの関係について分析した Hartzmark and Shue [2023] は、排出強度の低いグリーン企業は、資本コストが低下したとしても排出強度が有意に変化しなかった一方、排出強度の高いブラウン企業は、資本コストが上昇した場合に有意に排出強度が上昇するとの関係性を報告している。Lanteri and Rampini [2023] も同様に、ブラウン企業が資本コスト上昇時に炭素排出量を増やすことを示している。このような関係性が生じる要因として、一般に環境対策投資は投資コストの回収に長い期間を要する点がある。すなわち、資本コストが上昇し借入制約が厳しくなった企業は、短期的な収益確保のために、負担の大きいグリーン技術からブラウン技術への傾斜を強める傾向にあることが示されている。この結果は、ダイベストメントの進展が、産業全体の排出強度をむしろ高めてしまうことを意味しており、サステナブル投資が「逆効果 (counterproductive)」となりうる可能性を示している。また、Cohen, Gurun, and Nguyen [2024] は、再生可能エネルギーに関する特許の多くは化石燃料企業が保有しているため、現在の炭素排出量が多いことを理由にこうした企業をスクリーニングすることは、グリーン技術の発展のためにはむしろ逆効果である、と指摘している。

こうした研究結果は、サステナブル投資が実効性を持つためには、将来の炭素排出量の削減につながる設備投資等を進めるインセンティブを企業に与えるように、投資先企業の選定基準などを設計していく必要があることを示唆している。この観点からは、現時点での炭素排出量の水準を基準とした投資行動は望ましくない可能性がある。例えば、上述の Cohen, Gurun, and Nguyen [2024] が指摘するように、この基準は化石燃料企業による再生可能エネルギー技術への研究開発などをむしろ阻害する可能性がある。また、Hartzmark and Shue [2023] は、環境へのインパクトを

考えると、排出量の変化率ではなく変化幅に着目することが、効果的な排出量削減の観点から適切であると主張している。Edmans, Levit, and Schneemeier [2023] は、ブラウン企業からの単純なダイベストメントではなく、環境対策を行わない場合にブラウン企業からダイベストメントするという条件付き手法によって、ブラウン企業が環境対策を行うインセンティブを持たせることが効果的なことを理論的に論じている。Oehmke and Opp [2025] も、社会的責任投資ファンドが、投資先が生み出す社会的コストの水準のみを考慮する「狭義の責任 (narrow mandate)」を追求する場合、単にグリーン企業のみ投資が行われることになり、リアル・エフェクトを生まないことから、望ましくないと指摘している。むしろ、社会的責任投資を実行することで削減される社会的コストの大きさに基づいた「インパクト責任 (impact mandate)」を追及することで、社会的コスト削減余地の大きいブラウン企業にも投資が行われることとなり、リアル・エフェクトが生じることを理論的に示している。

関連して、多様な投資家が存在する世の中において、ゴーイング・コンサーンとしての企業活動をどのようにグリーン化すべきかという点も論点となろう。本節(2)イ.で議論したとおり、グリーン投資家がダイベストを進めたとしても、(金銭的リターンのみを追求する)アクティブ投資家からのサポートにより、ブラウン企業は大きな支障なく企業活動を継続できる可能性がある。これに類似する議論として、Duchin, Gao, and Xu [2025] は、環境汚染物質を排出する工場を売却した企業はESG 的観点から名声を高めるものの、売却先が工場の操業を継続するため、社会全体の汚染状況には大きな変化はみられなかった、と指摘している。

ロ. グリーンウォッシュ

グリーンウォッシュに関する研究は、足もと急増しており、その多くはグリーンウォッシュが実際に懸念すべき問題であることを示唆する結果を報告している。まず、Kacperczyk and Peydro [2022] は、脱炭素化を推進する銀行はScope1 排出量の多い企業への貸出を減少させていることを示したうえで、その後の企業の反応を調べている。その結果、貸出が減少した企業では、環境意識に関するスコアは改善したものの、炭素排出量などのハード・データについては改善がみられなかったと報告している。Giannetti *et al.* [2023] は、ユーロ圏の商業銀行を対象とした分析を行い、環境開示に積極的な銀行が、実際にはブラウン企業への貸出を維持していることを示している。さらに、こうした貸出が環境技術への投資に利用されていないことも示しており、イメージ戦略と貸出実態には大きな乖離がみられると主張している。Couvert [2020] は、ESG 投信の議決権行使ガイドラインと投資先企業の企業行動の関係を分析し、被投資企業は、投信のガバナンス (G) 関連ポリシーには対応を進めていることが窺われる一方、環境 (E)・社会 (S) 関連ポリシーには特段の対応を取らない傾向にあることを報告している。このため、被投資企業は投信の E・S 関連ポリシーを単なるマーケティング上の条項と認識している可能性がある、と指

摘している。また、Bingler *et al.* [2022] は、気候関連財務情報開示タスクフォース（Task force on Climate-related Financial Disclosures: TCFD）に賛同した企業の年次報告書を、自然言語処理手法に基づいて分析し、TCFD への賛同後でも環境関連の情報開示は増加していないことを指摘している。この結果は、TCFD への賛同は、実効性のある開示行動につながっていないという意味で、チープトーク（コストがかからず拘束力もない情報発信）となっている可能性を示唆している。

投資家サイドについても、グリーンウォッシュを示唆する研究が多くみられている。Parise and Rubin [2023] は、代表的な ESG 指数（MSCI USA ESG Leaders Index）に対する投資信託の日次リターンの感応度（ESG ベータ）を推計し、毎四半期末最終営業日の直後に ESG ベータが急低下することを示している。毎四半期末最終営業日は、米国の投信に義務付けられた保有資産情報の開示基準日にあたるため、この結果は、米国の投信が開示基準日に高 ESG 銘柄を保有するものの、基準日の直後に銘柄を入れ替えていることを示唆している。実際に当該論文では、開示基準日時点の保有ポートフォリオを固定して算出したその後の日次リターンの推移が、実際の投信の日次リターンよりも低いことなどを報告している。このため、当該論文はこのパターンを「グリーン粉飾（green window dressing）」と呼んでいる。Atta-Darkua *et al.* [2023] は、環境非営利団体である Carbon Disclosure Project（CDP）や機関投資家による気候変動イニシアティブである Climate Action 100+ などの取組みに賛同する投資家について、保有ポートフォリオ構成企業の炭素排出量の推移を分析している。その結果、ポートフォリオ構成企業の炭素排出量は減少していたものの、その主因は炭素排出量の少ない銘柄への入替えであり、各構成企業の排出量減少による影響は有意には確認できなかった。この結果は、グリーン投資家はエンゲージメント活動を行っておらず、社会全体のグリーン化には寄与していない可能性があることを示唆している。このほか、Ceccarelli, Glossner, and Homanen [2023] は、責任投資原則（Principles for Responsible Investment: PRI）署名ファンドのサステナブル投資動向を分析し、PRI ファンドの運用資産が多い国、すなわち社会的責任投資を行う投資家が多い国でのみ、ESG レポートで好スコアを獲得したファンドへの資金流入がみられたとしている。

ハ．環境・ESG 関連データの整備

環境関連変数の開示推進や ESG スコアの透明性向上などのデータ面での整備は、気候関連リスクの正確な理解や、効果的なサステナブル投資のために必要不可欠である（例えば、TCFD [2017]、日本銀行金融市場局 [2022, 2023]）。情報開示の進展や信頼性の高い ESG スコアの存在は、企業と投資家間の情報の非対称性を軽減し、より効率的な投資の意思決定に寄与すると考えられる。もっとも、利用可能な環境関連データや ESG スコアにノイズやバイアスが含まれる場合、非効率的な投資行動につながり、低炭素社会への移行の観点からも悪影響が生じる可能性がある。こ

のような問題意識のもと、ごく最近の学術研究では、環境関連変数や ESG スコアに含まれるノイズやバイアスに関する分析がみられている。

現在、複数のデータ・ベンダー等によってさまざまな ESG スコアが算出されているが、各 ESG スコアには相応のばらつきがみられている。ESG スコアのばらつきは、それがスコア作成者の評価軸の違いに起因する場合は、多様な観点からの評価を提供するというメリットがある。一方で、評価軸は類似のものであるにもかかわらず、データ計測方法やスコア算出方法に起因してばらつきが生じる場合は、ある種のノイズとして好ましくない影響を与える可能性がある。こうした観点を踏まえて、ESG スコアの特性やばらつきの発生原因を分析した研究がみられている。Berg, Kölbel, and Rigobon [2022] は 6 つの代表的な ESG スコアを比較し、ESG スコア間の違いは、算出に利用する項目のカバレッジの違いではなく、各項目の計測方法の違いに起因していることを指摘している。また、湯山・白須・森平 [2020] は、4 つの ESG スコアを分析し、企業の収益性に関する変数が ESG スコアに大きく影響していること指摘している。株価形成への影響という観点では、Avramov *et al.* [2022] は、観察される企業の ESG 特性に観測誤差があり真の ESG 特性の観測が難しい場合、当該銘柄への需要が減少し、リスクプレミアムやベータが上昇するという好ましくない影響が生じることを理論的に示している。そのうえで、ESG スコアのばらつきが大きい銘柄を、真の ESG 特性の観察がより難しい銘柄とみなしたときに、理論的予想と整合的な実証的な結果が得られたことを報告している。

ESG 投資が低炭素社会への移行に向けてリアル・エフェクトを持つためには、投資判断の材料となる ESG スコアが、企業がもたらす将来の環境負荷に関するフォワード・ルッキングな指標になっていることが望ましいと考えられる (van Binsbergen and Brügger [2023])。この観点からは、ESG スコアや関連する環境関連変数が、将来の環境負荷の大きさに関する予測力を持っているかどうか論点となる。この点、いくつかの研究は、こうした変数の作成手法に留意すべき点があることを指摘している。van Binsbergen and Brügger [2023] は、ESG スコアと炭素排出量の変化の関係についてグレンジャーの因果性分析を行ったところ、ESG スコアは将来の炭素排出量の変化に予測力を持たない一方、炭素排出量の変化はその後の ESG スコアの変化に予測力を持つとの結果を得ている。この結果は、ESG スコアはバックワード・ルッキングな情報に基づいて算出されており、将来の環境インパクトに関する予測力を持たないことを示唆している。Aswani, Raghunandan, and Rajgopal [2024] は、企業の炭素排出量データについて、企業が報告した実績値とデータ・ベンダーによる推計値に分けて分析している。その結果、実際に企業が報告した実績値データに限定して株価リターンとの関係をみた場合、Bolton and Kacperczyk [2021] などが報告する有意な関係性が消滅するという結果を報告している。同論文では、データ・ベンダーによる炭素排出量の推計値が売上高や収益な

どと強く相関していることを示しており、推計ベースのデータを含めた排出量と株価リターンの有意な関係は、単に企業業績と株価リターンの関係を捉えているだけの可能性がある。

(4) 気候変動問題と金融政策

気候変動問題は、金融システム・金融市場を含む社会全体に広範な影響を及ぼす問題であり、中央銀行もさまざまな観点から対応を進めている³⁹。金融政策運営の観点では、中央銀行の本来の責務である物価安定との関係において、どのように気候変動問題を考慮すべきかが重要な論点となっている。また、中央銀行が金融政策を通じて気候変動問題に取り組む場合、どのような政策手段を用いて、どのように政策運営を行っていくことが望ましいか、といった論点も非常に重要である。こうした背景から、政策当局者によるさまざまな議論や情報発信がみられている⁴⁰ほか、関連研究も急速に発展している。以下では、グリーン資産買入れ政策などの、金融市場にかかわる研究結果を中心に関連研究を紹介する⁴¹。

気候変動問題と金融政策運営を扱った理論的研究としては、ニューケインジアン・モデルに気候ブロックを加えたモデルに基づいたものがみられている (Abiry *et al.* [2022]、Nakov and Thomas [2023] など)⁴²。こうした理論分析は、概ね以下の2点を支持する結果を得ている。第1に、気候変動問題への対応ツールとしては炭素税が最も効果的であり、伝統的な政策金利操作に基づく金融政策は、気候変動対策ツールとしては限定的な役割しか果たさない。例えば、Nakov and Thomas [2023]

39 日本銀行における気候変動問題に対する取組み内容については、日本銀行 [2021] を参照。

40 Powell [2023] は、気候関連リスクに関連する金融監督業務を除いて、立法府の法制化なしに米国連邦準備制度が気候変動問題に取り組むことは不適切であるとしている。一方、欧州中央銀行は、2021年に公表した金融政策の戦略レビュー結果の中で、気候変動問題は経済構造や景気変動への影響を通して物価安定に大きな影響を与えることを理由に、金融政策運営にあたって気候変動問題を考慮することを宣言している (ECB [2021])。雨宮 [2022] は、『『物価の安定』と『金融システムの安定』を責務とする中央銀行の立場から、民間における気候変動への対応を支援していくことは、長い目でみたマクロ経済の安定に資するもの』と指摘している。

41 気候変動問題と金融政策に関する研究では、グリーン経済移行がインフレ率や経済成長率などのマクロ経済変数に与える影響が焦点となっているが、気候ファイナンスを扱う本論文の範囲からは外れるため、詳細は省略する。マクロ経済モデルに基づいた分析としては、Del Negro, Giovanni, and Dogra [2023]、Nakov and Thomas [2023]、Olovsson and Vestin [2023]などを参照。気候変動がインフレ率に与える影響に関する政策当局者の情報発信としては、例えば Schnabel [2022] を参照。

42 これらの研究では、Golosov *et al.* [2014] 型の気候ブロックと、標準的なニューケインジアン・モデルを組み合わせた理論モデルが分析されている。Golosov *et al.* [2014] モデルは、化石燃料使用による負の外部性を内部化する税率として、最適な炭素課税率を導出した著名論文である (詳細については、日本銀行金融研究所 [2021a] を参照)。このモデルにおける金融政策は、最終財価格が粘着的なもとのインフレ率・景気の安定という伝統的な役割のほか、生産活動への影響を通して、生産に伴う炭素排出による負の外部性の大きさに影響を与える働きがある。

は、最適な炭素課税が行われているもとでは、中央銀行は物価安定に専念することが最適になるという理論的結果を導出している。また、炭素課税が最適税率から乖離する場合でも、標準的なモデル・カリブレーションのもとでは、最適金融政策は厳格な物価安定政策とさほど異ならないこと、すなわち、中央銀行は物価安定に大きなウェイトを置いていくことが望ましいことを示している。

2つ目は、グリーン部門・ブラウン部門を区別して資産買入れを行う、いわゆる「グリーン QE（量的緩和）」には、最適な炭素課税が行われていない際に、炭素税を一定程度代替する効果がある点である。すなわち、グリーン企業の社債を傾斜的に買い入れることは、ブラウン企業の資本コストを相対的に高めるため、炭素税に類似した効果を生むこととなる（Abiry *et al.* [2022]、Nakov and Thomas [2023]、Ferrari and Nispi Landi [2024]、Diluiso *et al.* [2021]）⁴³。関連する研究として、Giovannardi *et al.* [2023] は、中央銀行に社債を担保として差し入れる際にグリーン企業とブラウン企業で異なる担保掛目を適用することで、グリーン QE と同様の効果が生じることを示している。

なお、中央銀行がマーケット・オペレーションを通して気候変動への対応を進めるにあたっては、市場中立性との関係性が議論となる。すなわち、中央銀行は、可能な限りミクロの資源配分に介入しないことが基本となる中で、グリーン QE をどう位置付けるか、という論点が存在する。この点を議論する際には、市場中立性の意味を検討することが有益であろう。例えば、雨宮 [2022] は、民間投資家が炭素排出による負の外部性を考慮していない場合、現状の投資動向に中立であることは、ブラウン部門への偏った資源配分を温存することになる、と指摘している。この考え方のもとでは、負の外部性を内部化する配分に基づいた買入れを行うことが中立的となる。Papoutsis, Piazzesi, and Schneider [2022] は、市場中立性を、すべての企業の資本コストを比例的に低下させることと定義している。そのうえで、市場ポートフォリオの構成比率と同じ比率でグリーン社債とブラウン社債を買い入れる政策は、彼らの定義する市場中立性を満たさないことを指摘している。この指摘の根拠として、当該論文では、資産買入れによる資本コスト押下げ効果は、リスクの高いセクターほど大きくなることを示している。ブラウン・セクターは、環境関連リスクに起因して事業リスクが高いほか、財務レバレッジも高い傾向にあることが実証的に知られているため、市場ポートフォリオに沿った買入れは、ブラウン銘柄の資本コストを相対的により大きく下げることが示唆される。この結果は、彼らの定義する市場中立性の観点からは、グリーン企業に傾斜した買入れを行うことが望ましいことを示唆している。

43 グリーン QE の理論的分析においては、通常、Gertler and Karadi [2011] 型の金融摩擦の存在が仮定され、社債スプレッドが民間部門での社債保有量に応じて拡大する。このため、中銀による社債買入れは、社債スプレッドを縮小させる効果を持つ。さらに、グリーン社債とブラウン社債間での裁定行動を抑制するために、民間主体による社債取引に取引コストが発生することが仮定される。

5. 社会的割引率に関する研究

温室効果ガスは長期間大気中に残存するため、現時点での温室効果ガスの排出は、極めて長期間にわたって人々の効用を押し下げる。カーボン・プライシングなどを通して、こうした炭素排出に伴う負の外部性を内部化していくためには、その外部性のコストを適正に値付けすること、すなわち「炭素の社会価格」(Social Cost of Carbon; SCC) を適正に設定することが重要となる。もっとも、SCC の算出にはさまざまな困難が伴う。具体的には、SCC の算定のためには、① 1 単位の温室効果ガスの追加的排出が将来の経済活動に与える損害額の算定、② 将来の損害額を割引現在価値に割り戻す際に用いる割引率の設定の 2 点が重要となるが、いずれについても明確なコンセンサスが得られていない。

①については、温室効果ガスの増加が気温に与えるインパクト、一定の気温上昇が引き起こす異常気象や海面上昇の規模、これらの物理的リスクが経済活動に与える影響、のそれぞれについて大きな不確実性が存在しており、IPCC 等による試算値にも大きな幅がある⁴⁴。とくに、気候変動がもたらすコストは、気温上昇がある閾値(ティッピング・ポイント)を超えた際に発生しうる破局的な災害に起因するものが多くを占めるなど、非線形性が高いことが推計を困難にしている(Pindyck [2019])。もっとも、こうした物理的コストの推計はファイナンス研究の範囲を超えることから、本論文では取り扱わない。

②について、SCC 算出において用いられる割引率は「社会的割引率」と呼ばれる。社会的割引率は、より一般に、気候変動対策や公共インフラ投資などの、便益の発生が将来世代を含む長期にわたって発生する投資案件の費用便益分析に用いられる割引率であり、政策判断に大きな影響を与えうる重要な変数である。例えば、気候変動問題の文脈では、1 単位の炭素排出削減によって得られる便益は SCC にほかならないことから、ある気候変動対策の(削減量 1 単位当たりの)費用が SCC を下回る場合には、その対策を行うことが望ましいとの判断になる。遠い将来に発生する排出量削減がもたらす便益の現在価値は、わずかな社会的割引率の違いでも、大きく変化する。例えば、50 年後の 1 単位の便益の現在価値は、社会的割引率が 1% の場合は 0.6 程度であるが、社会的割引率が 2% となると 0.37 程度まで大きく減少する。このように、社会的割引率の違いによって、SCC が大きく変化し、ひいては推奨される気候変動対応の強度も大きく変化するという、政策上極めて重要な影響をもたらす。このため、どのような考え方に基づいて、どの程度の値に社会的割引率が設定されるのかについて、多くの議論が繰り広げられてきた。

44 例えば、平衡気候感度(大気中の二酸化炭素濃度が倍になった際の平均表面気温の上昇幅)について、IPCC [2021] の最良推計値は 3℃、5～95% 範囲は 2～5℃となっている。

社会的割引率の設定にあたっては、大きく分けて3つの考え方が存在している。1つ目は、「規範的 (normative) アプローチ」と呼ばれるもので、世代間の衡平性に関する倫理的基準をもとに社会的割引率を設定する考え方である。このアプローチは ethical approach や prescriptive approach と呼ばれることもある。規範的アプローチは、現役世代と将来世代を等しく扱うことが倫理的に正しいとする立場のため、将来世代の効用をあまり割り引かないよう、社会的割引率を非常に低い値に設定する。2つ目は、「実証的 (positive) アプローチ」と呼ばれるもので、市場で観察される国債金利や資本収益率などをもとに社会的割引率を設定する考え方である。このアプローチは market-based approach や descriptive approach と呼ばれることもある。後述のとおり、規範的アプローチと実証的アプローチでは、設定される社会的割引率が相応に異なり、費用便益分析が示唆する最適な気候変動対策の強度も大きく異なる。このことから、両陣営間で激しい論争が繰り広げられてきた。3つ目は、本論文では「持続可能性アプローチ」と呼ぶ考え方で、持続可能性 (sustainability) 条件と呼ばれる制約を課した多期間の貯蓄・消費最適化問題を考え、持続可能性条件を満たす最適な消費パスと整合的な「割引率」を社会的割引率とする方法である。

以下では、まず、本節 (1) で社会的割引率を考える際の基本的な枠組みである Ramsey モデルを導入する。本節 (2) 以降では、3つのアプローチそれぞれについて概観していく。なお、社会的割引率に関する日本語による包括的なサーベイとしては、赤尾・大沼・阪本 [2016] が非常に参考になる。

(1) 社会的割引率を考える際の枠組み

社会的割引率に関する研究の歴史は古く、Ramsey [1928] の最適成長理論より始まる。当該理論では、以下の将来期間にわたる効用を代表的経済主体が最大化する問題を考える。

$$U_t = \int_t^{\infty} e^{-\rho(s-t)} u(C_s) ds. \quad (8)$$

ただし、 ρ は純粋時間選好率、 $u(C_t)$ は各時点の消費から得られる効用を表す。このとき、効用最大化問題の最適化条件から、次式が成り立つ。

$$r_t = \rho + \eta \cdot \% \Delta C_t = \rho + \eta g. \quad (9)$$

ここで、 r_t は無リスク資産の資本収益率、 η は限界効用の消費弾力性 (相対的リスク回避度)、 $\% \Delta C_t$ は実質消費成長率である。右辺の2つ目の等号は、消費成長率が実質経済成長率 g (定数) に等しいという追加的な仮定をおいて導出したものである。

(9) 式は、代表的個人が異時点間の効用を比較する際に用いる割引率を定めており、両辺のどちらも社会的割引率を定める式である。もっとも、この等号が成り立つのはシンプルなモデルに限られており、現実的なさまざまな摩擦が存在するもとでは、(9) 式の等号は成り立たないことが知られている。このとき、(9) 式のどちらの辺に着目して社会的割引率を考えるかに応じて、異なるアプローチが存在することとなる。具体的には、左辺の資本収益率に着目して社会的割引率を設定するアプローチが実証的アプローチ、右辺の代表的経済主体のパラメータなど $(\rho + \eta g)$ に着目して設定するのが規範的アプローチに概ね対応する。

(9) 式は、消費の成長率に不確実性が存在しないという設定のもと導出される点に留意が必要である。もっとも、一般に消費（経済）成長率は不確実に変動するものであり、この不確実性は社会的割引率にも影響を与えることから、多くの研究がみられてきた（概要については、Gollier [2012] や Arrow *et al.* [2014] を参照）。以下、この論点について簡単にポイントを述べる。

まず、消費に不確実性があるもとでは、効用最大化問題（(8) 式）は、期待効用最大化問題

$$\widetilde{U}_t = E \left[\int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} u(C_s) ds \right], \quad (10)$$

に置き換えられる。そのうえで、(9) 式がどのように変化するかは、消費の不確実性に関するモデル定式化に依存する。ここでは、最も単純な、消費の成長率が独立同分布な正規分布 $\Delta\%C_t \sim N(g, \sigma_g^2)$ に従うケースを考える。このとき、最適化条件は以下のとおりとなる。

$$r_t = \rho + \eta g - \frac{1}{2} \eta (\eta + 1) \sigma_g^2, \quad (11)$$

すなわち、不確実性がない場合（(9) 式）と比較すると、不確実性の大きさ σ_g^2 に比例して割引率が低下することがわかる。右辺第3項は、予備的貯蓄を表す項と解釈される。すなわち、不確実性が存在する場合、経済主体は将来のショックに備えて貯蓄を行う動機が生じるため、より低い金利でも貯蓄を行うというメカニズムを捉えている。なお、先進国での消費成長率の時系列データを基にすると、この予備的貯蓄動機による割引率の下押し幅は 0.4%ポイント程度と、さほど大きくないことが指摘されている。この点に関連する研究として、非常に低い発生確率ではあるものの発生時に極めて大きな被害をもたらす災害を定式化した rare disaster モデル（Barro [2006] など）がある。Pindyck and Wang [2013] は、rare disaster モデルに基づいて気候変動などが引き起こしうる破局的事象の影響を分析し、破局的事象の発生可能性を考慮すると、割引率は 1%ポイント以上低下しうる、と指摘している。

上記の設定のもとでは、割引対象のキャッシュ・フローの年限にかかわらず社会的割引率は一定、すなわち、社会的割引率の期間構造はフラットとなる。一方、消

費成長率に対するショックが正の自己系列相関を持つ場合は、長期年限ほど割引率が小さくなり、社会的割引率は右下がりの期間構造となることが指摘されている。割引率が年限に関して減少することから、この特徴は DDR (Decreasing Discounting Rate) と呼ばれることが多い (詳細については、Gollier [2012] などを参照)。これは、ショックの自己相関が大きい場合、遠い将来の消費ほど不確実性が高くなるため、より長期年限ほど予備的貯蓄動機が強くなると解釈される (Arrow *et al.* [2014])。気候変動問題のように非常に長い期間に関する費用便益分析を行う際には、超長期年限の割引率が割引現在価値に大きく影響する。このため、期間構造の形状は、SCC に大きな影響を与える非常に重要な論点である。

Weitzman [2001] は、消費成長率の不確実性だけでなく、割引率そのものに関する不確実性も DDR を生じさせることを指摘している。当該論文では、2,000 人を超える経済学者を対象に、望ましい割引率に関するサーベイを行っている。その結果、回答値の平均値は約 4%、標準偏差は約 3% と、専門家の中でも大きなばらつきがあることを報告している。このように、望ましい割引率に関する専門家の意見にばらつきがみられるときには、以下の「平均的な」割引率を用いることが考えられる。専門家 i が望ましいと考える割引率を r_i としたとき、 t 年先のキャッシュ・フローは、 $(1/(1+r_i))^t$ が割引係数となる。この割引係数は専門家によって異なるため、回答値の分布に関して割引係数の期待値を取ったうえで、その期待値に対応する確実等価割引率 r_t^y を、以下の関係式をもとに定めることができる。

$$\left(\frac{1}{1+r_t^y}\right)^t = E\left[\left(\frac{1}{1+r_i}\right)^t\right], \quad (12)$$

Weitzman [2001] は、専門家の回答値の分布 ((12) 式の期待値 E の算出に用いる分布) がガンマ分布でよく近似できることから、 r_t^y をガンマ割引率と呼んでいる。ガンマ割引率は、DDR になることが示されている。これは直感的には、年限が長くなると割引率が高い回答者の割引係数は急速に 0 に近づくため、長期年限の期待割引率の決定にあたっては、割引率が低い回答者の回答値が支配的になるためである。

(2) 規範的アプローチ

規範的アプローチでは、(9) 式の右辺にあらわれる 3 つのパラメータ、 ρ, η, g を与えることで社会的割引率を設定する (Drupp *et al.* [2018])。ここで、 g は実質経済 (消費) 成長率に関する観察データから定まるため、規範的アプローチにおける社会的割引率の設定は、純粋時間選好率 ρ と限界効用の消費弾力性 (相対的リスク回避度) η という、代表的個人に関する 2 つのパラメータをどう設定するか、という問題と言い換えることができる。

純粋時間選好率 ρ を高く設定する場合、例えば 50 年先の世代の割引現在効用は極めて小さいものとなり、実質的に将来世代の効用を無視することとなる。Ramsey [1928] は、世代間衡平性の観点から、このような事態となることについて否定的な立場をとっており、純粋時間選好率 ρ は 0 であることが望ましいとしてきた。Cline [1992]、Stern [2007]、Stern and Stiglitz [2021] など同様の立場を支持している。例えば、Stern [2007] は、時間選好率は $\rho = 0.001$ (0.1%) という非常に小さい値とし、 $\eta = 1$ 、 $g = 1.3\%$ という設定と合わせて、社会的割引率は 1.4% 弱が望ましいと主張している。一方、Nordhaus [2007] は、規範的アプローチは実際の人々の消費・貯蓄行動に関する観測事実を考慮せずに、時間選好率 ρ を非常に小さい値に設定していると批判している。また、低い社会的割引率を背景に強力な気候変動対策の実行を主張する Stern Review (Stern [2007]) を批判的に論じている。具体的には、Nordhaus [2007] は、後述の実証的アプローチに基づいた推計により、2015 年時点の SCC を 35 ドルと算出している一方、Stern Review に基づいた場合の SCC は 360 ドルと、大きく乖離した値となることを報告している。そのうえで、算出手法によってこのような大きな乖離が生じることを踏まえて、Stern Review の強力な政策提言の根拠について疑義を呈している⁴⁵。

このように、規範的アプローチでは、消費者の選好に関するパラメータを規範的な観点から外生的に設定することとなる。このため、専門家（経済学者）がこれらのパラメータについてどのような考えを持っているかを把握することは、社会的割引率に関する立場にかかわらず有益であろう。Drupp *et al.* [2018] は、経済学者に対するサーベイを行い、この論点に関する興味深い結果を報告している。当該サーベイの設問には、望ましい社会的割引率のほかに、実質無リスク金利（(9) 式左辺）および、(9) 式右辺に現れる 3 つのパラメータそれぞれに関する定量的評価が含まれている。また、社会的割引率の設定の際に、規範的アプローチと実証的アプローチを、それぞれ、どれくらいのウエイトで重視するかという問も設けている。この設問設計から、各回答者の社会的割引率を「要因分解」することが可能である。

サーベイの主要な結果は以下のとおりである。まず、社会的割引率の平均値は約 2.3%、メディアンは 2.0% であり、Weitzman [2001] によるサーベイ結果対比、やや低めである。次に、純粋時間割引率 ρ は 0 が最頻値であり、規範的アプローチの立場をとる経済学者が相応に存在することを示唆している。もっとも、メディアンは 0.5%、平均は 1.1% であるため、Drupp *et al.* [2018] は、純粋時間割引率が（ほぼ）0 であることに幅広いコンセンサスが存在しているとはいえない、と述べている⁴⁶。このほか、規範的アプローチには約 7 割、実証的アプローチには約 3 割のウエイト

.....
45 より最近の Nordhaus [2017] による推計でも、2015 年の SCC は、Stern Review に基づいた場合は 197.4 ドル、実証的アプローチに基づいた場合は 31.2 ドルと大きな乖離がみられている。

46 [...] we cannot confirm the IPCC's [...] conclusion that “a broad consensus for a zero or near-zero pure rate of time preference” exists among experts (Drupp *et al.* [2018] p.120).

において社会的割引率を決定すべき、との回答結果も得られている。この結果は、規範的・倫理的な観点と、実証的なデータに基づいた観点の双方が重要だと多くの経済学者が考えていることを示唆している。

(3) 実証的アプローチ

実証的アプローチは、(9) 式の左辺に着目して、無リスク資産の資本収益率として社会的割引率を定める考え方である。実証的アプローチを採用する根拠として、Nordhaus [2019] は、気候変動対応向け投資の割引率は気候変動対応以外の投資案件も含めた、投資の機会費用と整合的である必要があるため、市場金利や資本収益率をもとに社会的割引率を設定する必要がある、と論じている。実証的アプローチは、気候変動がマクロ経済に及ぼす影響を分析する際に標準的に用いられる、マクロ経済モデルと気候変動モデルを統合した「統合評価モデル (Integrated Assessment Model, IAM)」で広く採用されている。例えば、William D. Nordhaus が 2018 年にノーベル経済学賞を受賞した業績としても著名な、代表的 IAM である DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy) モデルでは、実証的アプローチに基づいた高めの社会的割引率が利用されることが多い (Nordhaus [1994] など)⁴⁷。

DICE モデルの発展期にあたる 2000 年代前半までは、市場金利が高かったこともあり、実証的アプローチに基づく社会的割引率は 4~6% 程度とされることが多く、規範的アプローチと比べて大幅に高い値となる状況が続いてきた。もっとも、市場から観察される実質金利は趨勢的に低下してきており、とくに世界金融危機以降、継続的な低金利環境についてさまざまな議論が行われている (例えば、Rachel and Summers [2019]、IMF [2023b]、Obstfeld [2023])。このような実質金利の低下は、実証的アプローチに基づいて設定される社会的割引率の低下につながる。実際、Bauer and Rudebusch [2021] は社会的割引率の期間構造を推計し、社会的割引率も実質金利と同様、趨勢的に低下してきたことを報告している。さらに、推計された社会的割引率の期間構造を DICE 型モデルに投入することで、1990 年から 2019 年にかけて SCC がどの程度変化したかを算出している。その結果、社会的割引率の推計モデルの定式化によるばらつきはあるものの、約 30 年間で SCC は 2 倍から 5 倍程度 (最大で 10 倍以上) になったとの結果を示している。こうした結果を踏まえて、近年の低金利環境のもとでは、規範的アプローチと実証的アプローチの立場の違いがもたらす社会的割引率の差は小さくなっており、低い社会的割引率と高い SCC を前提とした、相応に厳格な気候変動対応をとることが望ましい、と主張している。

47 DICE モデルの概要については、日本銀行金融研究所 [2021b] を参照。

実証的アプローチに関連するもう 1 つの論点として、超長期年限の実質金利の推計がある。すなわち、十分な流動性のある長期債市場は通常 30～40 年程度の年限までに限られているため、気候変動問題で考慮すべき遠い年限に関する金利は、何らかの方法で推計する必要がある。この点、理論的には、本節 (1) で紹介したとおり、DDR (右下がりの期間構造) を支持する研究がみられている。また、Newell and Pizer [2003] は、200 年にわたる米国債の長期時系列データを用いた実証分析から DDR が成立することを報告しており、実質金利は短期年限では 4%、年限 100 年では 2%、年限 200 年では 1% と低下するとしている。また、上述の Bauer and Rudebusch [2021] の推計値も右下がりの期間構造を示唆している。

ただし、こうした研究は国債市場のデータに基づいた推計であるため、気候変動対策プロジェクトのリスク特性を考慮した割引率に必ずしもなっていないことを Giglio *et al.* [2021] が指摘している。当該論文では、気候変動対策プロジェクトの評価に用いるべき割引率は、気候変動が損害をもたらすタイミングが好況期か不況期かによって異なることを指摘している。気候変動がもたらす損害と景気循環との関係としては、「気候変動は破局的な自然災害を引き起こすことで経済活動にも大きなショックを加える」という “disaster view” (Weitzman [2012, 2014]) と、「好況期ほど温室効果ガス排出量が増加し、(気温上昇などに起因する) 損害が大きくなる」という “tax view” (Nordhaus [2008]) という正反対の考え方が存在する。Disaster view のもとでは、気候変動がもたらす損害は景気後退期に発生することになる。このとき、気候変動対策プロジェクトは、景気後退期における損害を軽減する、言い換えれば景気後退期にペイオフが発生する「ヘッジ」として機能する。このため、気候変動対策プロジェクトに対する割引率は、無リスク資産の割引率よりも低くなる。一方、tax view のもとでは、気候変動がもたらす損害は好況期ほど大きくなる。言い換えると、気候変動対策プロジェクトの対策効果 (ペイオフ) は、好況期ほど大きくなるという意味で、気候変動対策は「リスク」なプロジェクトとなる。このため、disaster view とは逆に、気候変動対策プロジェクトの割引率は無リスク金利よりも高くなる。

Giglio *et al.* [2021] は、気候変動対策プロジェクトに対する割引率の期間構造についても検討を加えている。その際、気候災害の発生は、短期的には大きな損害を与えるものの、中長期的には新しい気候への適応が進むもとで、気候災害がもたらす負の影響が減衰していくという観測事実がカギとなる。このことは、短期年限のキャッシュ・フローは気候リスクの影響を大きく受ける一方、長期年限のキャッシュ・フローへの影響は減衰していくことを意味しており、年限が長くなるほど割引率は無リスク金利に近づいていくことを意味している。このため、前段の結果と併せると、短期の割引率が無リスク金利対比下振れる disaster view のもとでは割引率の期間構造は右上がりになる一方、tax view では逆に右下がりの期間構造になる

ことが示唆される。Giglio *et al.* [2021] は、disaster view に基づくカリブレーションによって、観測データとモデルをマッチできたと報告している。そのうえで、気候科学や気候変動と経済の相互関係に関するさらなる研究の発展は、気候変動対策の費用便益分析や SCC の推計精度の改善のために重要であると指摘している。

(4) 持続可能性アプローチ

本節 (1) でみたとおり、社会的割引率を理論的に考える際の出発点は、無限期間にわたる効用最大化問題 (8) 式、(10) 式) であった。この最大化問題は、現時点 (t 時点) での (期待) 効用最大化のみを考えており、将来のそれぞれの時点での効用については直接的には考慮されていない。このため、最適消費経路の上での消費が、今期や近い将来に過剰に消費する一方で、遠い将来の消費が極めて低水準な経路である可能性もある。もっとも、こうした消費経路は、将来時点を起点に効用を考える将来世代にとっては、公正なものとはいえないだろう。

こうした点を踏まえて提唱されたのが、持続可能性アプローチである。持続可能性アプローチでは、各時点の期待効用 $\bar{U}_t$ ((10) 式) が減少しない、すなわち $d\bar{U}_t/dt \geq 0$ となるという条件を課すことで最適消費経路を求めるアプローチである⁴⁸。この制約条件は、将来世代が少なくとも現役世代と同等かそれ以上の生活水準を達成できるという条件を表しており、World Commission on Environment and Development [1987] が提唱した「持続可能性 (sustainability)」を具現化したものである。

持続可能性に関する研究の概要をまとめた論文としては、Arrow *et al.* [2004] が参考になる。当該論文では、持続可能性条件が満たされる具体的な条件として、経済が財を生み出すために必要な「生産基盤 (production base)」が非減少となる必要がある、という条件に着目している。なお、ここでいう生産基盤は、機械をはじめとする有形資本のほか、人的資源、天然資源や、社会制度や社会的共有知なども含まれる概念である。Arrow *et al.* [2004] は、世界各国の生産基盤の構成要素の変化について分析を行い、一部のアフリカ諸国などでは、天然資源の減少を補うだけの有形資本や人的資本の蓄積が進んでおらず、持続可能性条件が満たされていない、と報告している。

Arrow *et al.* [2004] をはじめとする多くの研究は、経済成長に不確実性の無い設

48 規範的アプローチ・実証的アプローチはともに、Ramsey モデルにおける効用最大化原則に基づいて導出されることから、「帰結主義」の考え方に基づくものと分類される (Drupp *et al.* [2018])。一方、持続可能性アプローチでは、将来世代の効用水準が減少すべきではないという制約を課していることから、「義務論」の考え方に基づくものと分類される。とくに、持続可能性アプローチは、Rawls [1999] の正義論とも整合的な議論であることが指摘されている (Campbell and Martin [2021])。

定を考えている。一方、近年の研究では、経済成長の不確実性と持続可能性条件の
 関係に関する理論的分析が進展している。例えば、Campbell and Martin [2021] は、
 消費成長率が確率的に変動する連続時間モデルに基づいて、持続可能性条件を満
 たす資産消費比率 ($\theta_t = C_t/W_t$) と、それに対応する割引率を解析的に導出してい
 る⁴⁹。とくに、持続可能性条件を満たす資産消費比率の最大値 θ_{sus} は、純粋時間割
 引率 ρ によらず、消費の成長率や不確実性に関するパラメータから定まる定数とな
 る。これは、消費の成長率などから定まる閾値よりも多く消費してしまうと持続可
 能性条件が満たされないという、直感的な結果である。また、持続可能性条件を考
 慮しない場合の最適資産消費比率 θ_{unc} が、(13) 式で与えられることを示している。

$$\theta_{unc} = \frac{\rho}{\gamma} + \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \theta_{sus}. \quad (13)$$

(13) 式は、 θ_{unc} が θ_{sus} と純粋時間割引率 ρ の加重平均として表されることを示して
 おり、いくつかの重要な示唆を持つ。まず、 θ_{unc} は時間割引率 ρ が高いほど高くな
 る。これは、 ρ が高いほど、より現在の消費を重視することから、資産消費比率が
 高まると解釈可能である。次に、純粋時間割引率が $\rho > \theta_{sus}$ を満たすほど高い場合、
 $\theta_{unc} > \theta_{sus}$ となる。このことは、純粋時間割引率がある一定以上の水準の場合、持
 続可能性の制約を考慮しない最適消費が、持続可能性条件を満たさないという意味
 で過剰になることを意味している。言い換えると、制約なしの最適解が持続可能性
 条件を満たすためには、純粋時間割引率が十分低いこと、具体的には $\rho \leq \theta_{sus}$ と
 なる必要があることを (13) 式は示している。

Pindyck [2024] は、人口成長を考慮する形で Campbell and Martin [2021] モデルを
 拡張している。人口成長は、1 人当たり消費への影響を通して経済厚生に直接的な
 影響を与えるほか、人口成長それ自体も社会厚生に影響を与えると考えられてき
 た。もっとも、人口増加の具体的な評価としては、(人間の生それ自体に内在的価
 値があることから) そもそも倫理的に望ましいとする考え方、労働力供給や技術
 革新の観点から望ましいとする考え方がある一方で、環境問題を悪化させること
 から望ましくないとする考え方も存在するなど、コンセンサスは得られていない。
 Pindyck [2024] は、人口成長と社会厚生との関係は、持続可能性条件に大きな影
 響を与えることを示している。また、もっともらしいパラメータ設定のもとでは、
 持続可能性条件を満たすためのコスト（持続可能性条件を考慮しない場合に得られ
 る社会厚生との差分）は、相応の大きさとなることを示している。このため、持続
 可能性の達成を政策目標とするかどうかについて、十分に議論されることが望まし
 いと主張している。

以上でみてきたとおり、社会的割引率の設定にあたっては多数の論点が存在して

49 Campbell and Martin [2021] などでは、相対的リスク回避度が一定の CRRA 型効用関数を仮定してい
 る。このとき、最適な資産消費比率は資産の水準によらず一定となる。

いる。なかでも、規範的アプローチや持続可能性アプローチが示すように、世代間衡平性や人間の存在の内在的な価値に関する規範的な判断が主要な要素となっている。この点、論者によって規範的な立場に相応の違いが存在しているなかで、建設的な政策的議論を進めていくためには、どのような規範的立場がどのような政策上や社会厚生面での帰結と対応するかを、経済理論面から理解することが重要と考えられる。このほか、金融市場から得られる割引率のデータは、規範的な立場をとる場合であったとしても、有益な参照点を提供する。本節（3）でみたように、気候変動問題特有のリスク特性や時間軸の長さを踏まえると、金融市場のデータから気候変動問題に関する割引率を推計するという実証研究の次元においても、さらなる研究の発展が望まれている。

6. おわりに

本論文では、急速に研究が進展する気候ファイナンスの文献について、価格発見およびリスク移転機能、主体間の資金仲介機能、異時点間の資源配分機能という、金融市場の3つの基本的機能を切り口としてサーベイを行った。

金融市場は、将来の不確実なキャッシュ・フローに関する価格発見機能やリスクの移転機能を提供することが基本的な役割の1つである。気候関連リスクは、とりわけ不確実性が高く、広範囲に大きな影響を与えるリスクであることを踏まえると、金融市場が適切な価格発見機能やリスク移転機能を発揮することが重要である。この点、3節でみたように、気候変動がもたらす物理的リスクや移行リスクは、徐々に資産価格に織り込まれているとみられるものの、ミスプライシングがまだに残存していることを示唆する研究も多くみられている。引き続き、気候関連リスクへの投資家のリスク認識の高まりや、グリーン投資を志向する投資家層の拡大が進むもとで、気候関連リスクの資産価格への織込みが進んでいくものとみられる。今後も、継続的に分析を積み重ねていくことで、こうした状況の進展を把握していくことは、投資家や政策当局者にとっても重要と考えられる。

気候変動の緩和や低炭素社会への移行のためには莫大な資金が必要となることから、金融市場が円滑な資金仲介機能を果たすことが期待されている。これに加えて、投資や貸出面から経済のグリーン化を促進することが期待されているほか、パリ協定をはじめとする気候変動対策目標と整合的な資産運用を行うことの重要性が指摘されており、ESG投資やインパクト投資などの投資手法の規模は拡大傾向にある。4節でみたとおり、こうしたサステナブル投資から非金銭的効用を得る投資家が一定数存在することや、サステナブル投資が資産価格に影響を及ぼしていることを示す実証的結果の蓄積が進んでいる。一方で、サステナブル投資が、より実効

性を高めていき、低炭素社会への移行をさらに後押ししていくためには、発行体企業に対するインセンティブ面での工夫や、データ面の整備など、さまざまな課題が存在することも、近年の研究から明らかになってきている。

異時点間の資源配分機能について、金融市場で形成される金利の期間構造は、将来時点のキャッシュ・フローの評価と密接にかかわっている。気候変動問題の文脈では、気候変動対策に関する費用便益分析を行う際に必要となる社会的割引率と密接に関連する。5節でみたとおり、社会的割引率の設定にあたっては、世代間衡平性などの倫理的な観点が重視されているが、これと同時に、金融市場で形成される金利の期間構造も重要な参照点となっている。社会的割引率についてはさまざまな立場が存在しており、必ずしもコンセンサスは得られていない。もっとも、金融市場のデータをもとに、実証的根拠を伴う形で将来の割引率に関する参照点を提供することは、立場にかかわらず重要な貢献であると考えられる。

なお、学術研究が指摘する今後の課題は、市場参加者が課題とする点と共通する部分が多い。例えば、日本銀行が市場参加者などを対象として2022年より実施している「気候変動関連の市場機能サーベイ」では、現状は気候変動リスクの織込みが十分ではないことや、ESG投資家層の拡大が課題であることを指摘している（日本銀行金融市場局〔2022, 2023〕）。また、情報開示推進などを通じたデータのアベイラビリティの向上、データの標準化やESG評価基準の透明化といった、環境・ESG関連データのカバレッジと質の拡大も課題として指摘されている。引き続き、金融実務面での進展、理論・実証両面でのファイナンス研究の知見の蓄積の両者があいまって、気候変動対応において金融市場が重要な役割を果たしていくことが望まれる。

参考文献

- 赤尾健一・大沼あゆみ・阪本浩章、「割引率は何を意味しどのように発展してきたか」、『環境経済・政策研究』、第9巻第2号、2016年、1～20頁
- 雨宮正佳、「気候変動と金融（日本金融学会における講演）」、日本銀行、2022年
- 有賀 涼・五島圭一・千葉貴司、「CO2 排出量と企業パフォーマンス：Double Machine Learning を用いた日本の実証研究」、金融研究所ディスカッションペーパー No. 2021-J-11、日本銀行金融研究所、2021年
- ・池田大輔・篠原武史・笹木琢治・武藤一郎・米山俊一、「『気候変動の経済学』：欧米における主要研究の紹介」、『金融研究』第41巻第3号、日本銀行金融研究所、2022年、88～122頁
- 伊藤敬介、「グリーン企業のリターンが高いのはいつか」、『証券アナリストジャーナル』、第61巻第3号、2023年、46～52頁
- 企業年金連合会、「資産運用会社におけるスチュワードシップ活動に関する実態調査（資産運用会社へのアンケート調査結果）」、企業年金連合会、2023年
- 久保太基・小田剛正「本邦株式市場における気候関連要因の反映状況 個別銘柄株価にもとづく定量分析」、日銀レビュー、2023-J-4、2023年
- 五島圭一・八木厚樹、「東京株式市場におけるカーボンプレミアム」、『証券アナリストジャーナル』、第60巻第8号、2022年、67～80頁
- 小藺めぐみ、「ESG 投資と機関投資家の受託者責任の関係についての一考察：英国における取締役の義務の捉え方を足掛かりとして」、金融研究所ディスカッションペーパー No. 2020-J-12、日本銀行金融研究所、2020年
- 齋藤良太、「首都圏における浸水危険性の地価等への影響」、『住宅土地経済』、第58号、2005年、19～27頁
- 佐々木隆文、「気候変動リスクとリスクプレミアム」、『証券アナリストジャーナル』、第61巻第10号、2023年、48～53頁
- 佐藤慶一・松浦広明・田中陽三・永松伸吾・大井昌弘・大原美保・廣井 悠、「災害リスク情報と不動産市場のヘドニック分析」、ESRI Discussion Paper Series No. 327、内閣府経済社会総合研究所、2016年
- 篠原武史・奥田達志・中島上智、「マクロ経済に関する不確実性指標の特性について」、日本銀行ワーキングペーパー No. 20-J-7、日本銀行、2020年
- 竹山 梓・松井祐依・南井敬晶、「気候関連リスク分析のためのシナリオ作成ー統合評価モデルの応用と課題ー」、日本銀行ワーキングペーパー No. 23-J-8、日本銀行、2023年
- 新倉広子・内山朋規・角間和男、「サステナブル投資の機能とポートフォリオ選択への応用」、『証券アナリストジャーナル』、第61巻第10号、2023年、85～99頁
- 日本銀行、「気候変動に関する日本銀行の取り組み方針について」、日本銀行、2021年

- 、「FOCUS→BOJ[39] 日本銀行の気候変動に関する取り組み 総力戦で世界が直面する課題に挑む日本銀行の気候連携ハブ」、『にちぎん』、No. 69 2022 年春号、2022 年、22～27 頁
- 日本銀行金融研究所、「気候変動の経済学 初回号：気候変動とマクロ経済の関係を捉える」、『金研ニュースレター』、日本銀行金融研究所、2021 年 a
- 、「気候変動の経済学 第 2 号：気候変動と最適課税」、『金研ニュースレター』、日本銀行金融研究所、2021 年 b
- 日本銀行金融市場局、「気候変動関連の市場機能サーベイ（第 1 回）調査結果—市場機能向上の進展状況と今後の課題—」、日本銀行調査論文、日本銀行、2022 年
- 、「気候変動関連の市場機能サーベイ（第 2 回）調査結果—市場機能向上の進展状況と今後の課題—」、日本銀行調査論文、日本銀行、2023 年
- 森 英高・西村洋紀・谷口 守、「水害リスク情報提示が地価の変動に与える影響—『地先の安全度マップ』を活用して—」、『公益社団法人日本都市計画学会都市計画報告集』、第 14 巻、2016 年、276～280 頁
- 湯山智教・白須洋子・森平爽一郎、「ESG 開示スコアとパフォーマンス」、『証券アナリストジャーナル』、第 57 巻第 10 号、2019 年、72～83 頁
- ・——・——、「ESG スコアに関する実証分析」、青山学院大学経済研究所ワーキングペーパー第 13 号、2020-3、青山学院大学、2020 年
- Abiry, Raphael, Marien Ferdinandusse, Alexander Ludwig, and Carolin Nerlich, “Climate Change Mitigation: How Effective Is Green Quantitative Easing?” IMES Discussion Paper No. 2022-E-11, Institute for Monetary and Economic Studies, Bank of Japan, 2022.
- Acharya, Viral V., Timothy Johnson, Suresh Sundaresan, and Tuomas Tomunen, “Is Physical Climate Risk Priced? Evidence from Regional Variation in Exposure to Heat Stress,” NBER Working Paper, No. 30445, National Bureau of Economic Research, 2022.
- Addoum, Jawad M., Piet Eichholtz, Eva Steiner, and Erkan Yonder, “Climate Change and Commercial Real Estate: Evidence from Hurricane Sandy,” *Real Estate Economics*, 52(3), 2024, pp. 687–713.
- Alekseev, Grigory, Stefano Giglio, Quinn Maingi, Julia Selgrad, and Johannes Stroebl, “A Quantity-Based Approach to Constructing Climate Risk Hedge Portfolios,” NBER Working Paper, No. 30703, National Bureau of Economic Research, 2022.
- Ambec, Stefan, and Paul Lanoie, “Does It Pay to Be Green? A Systematic Overview,” *Academy of Management Perspectives*, 22(4), 2008, pp. 45–62.
- Ardia, David, Kris Boudt, and Kris Inghelbrecht, “Climate Change Concerns and the Performance of Green Versus Brown Stocks,” *Management Science*, 69(12), 2023, pp. 7607–7632.

- Arrow, Kenneth, Partha Dasgupta, Lawrence Goulder, Gretchen Daily, Paul Ehrlich, Geoffrey Heal, Simon Levin, Karl-Göran Mäler, Stephen Schneider, David Starrett, and Brian Walker, “Are We Consuming Too Much?” *Journal of Economic Perspectives*, 18(3), 2004, pp. 147–172.
- , Maureen L. Cropper, Christian Gollier, Ben Groom, Geoffrey M. Heal, Richard G. Newell, William D. Nordhaus, Robert S. Pindyck, William A. Pizer, Paul R. Portney, Thomas Sterner, Richard S. J. Tol, and Martin L. Weitzman, “Should Governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis?” *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(2), 2014, pp. 145–163.
- Aswani, Jay, Aneesh Raghunandan, and Shivaram Rajgopal, “Are Carbon Emissions Associated with Stock Returns?” *Review of Finance*, 28(1), 2024, pp. 75–106.
- Atta-Darkua, Vaska, Simon Glossner, Philipp Krueger, and Pedro Matos, “Decarbonizing Institutional Investor Portfolios: Helping to Green the Planet or Just Greening Your Portfolio?” Swiss Finance Institute Research Paper No. 25–42, Swiss Finance Institute, 2023.
- Avramov, Doron, Si Cheng, Abraham Lioui, and Andrea Tarelli, “Sustainable Investing with ESG Rating Uncertainty,” *Journal of Financial Economics*, 145(2), 2022, pp. 642–664.
- Baker, Malcolm, Daniel Bergstresser, George Serafeim, and Jeffrey Wurgler, “The Pricing and Ownership of U.S. Green Bonds,” *Annual Review of Financial Economics*, 14, 2022, pp. 415–437.
- Baker, Steven D., Burton Hollifield, and Emilio Osambela, “Asset Prices and Portfolios with Externalities,” *Review of Finance*, 26(6), 2022, pp. 1433–1468.
- Baker, Scott R., Nicholas Bloom, and Steven J. Davis, “Measuring Economic Policy Uncertainty,” *Quarterly Journal of Economics*, 131(4), 2016, pp. 1593–1636.
- Bakkensen, Laura A., and Lint Barrage, “Going Underwater? Flood Risk Belief Heterogeneity and Coastal Home Price Dynamics,” *Review of Financial Studies*, 35(8), 2022, pp. 3666–3709.
- Baldauf, Markus, Lorenzo Garlappi, and Constantine Yannelis, “Does Climate Change Affect Real Estate Prices? Only If You Believe in It,” *Review of Financial Studies*, 33(3), 2020, pp. 1256–1295.
- Bansal, Ravi, Marcelo Ochoa, and Dana Kiku, “Climate Change and Growth Risks,” NBER Working Paper, No. 23009, National Bureau of Economic Research, 2016.
- Barber, Brad M., Adair Morse, and Ayako Yasuda, “Impact Investing,” *Journal of Financial Economics*, 139(1), 2021, pp. 162–185.
- Barnett, Michael, “A Run on Fossil Fuel? Climate Change and Transition Risk,” Available

- at SSRN 4346525, 2023.
- Barro, Robert J., “Rare Disasters and Asset Markets in the Twentieth Century,” *Quarterly Journal of Economics*, 121(3), 2006, pp. 823–866.
- Bauer, Michael D., Eric A. Offner, and Glenn D. Rudebusch, “The Effect of U.S. Climate Policy on Financial Markets: An Event Study of the Inflation Reduction Act,” CESifo Working Paper No. 10739, CESifo, 2023.
- , and Glenn D. Rudebusch, “The Rising Cost of Climate Change: Evidence from the Bond Market,” *Review of Economics and Statistics*, 105(5), 2021, pp. 1255–1270.
- Berg, Florian, Julian F. Kölbel, and Roberto Rigobon, “Aggregate Confusion: The Divergence of ESG Ratings,” *Review of Finance*, 2022, pp. 1–30.
- Berk, Jonathan, and Jules H. van Binsbergen, “The Impact of Impact Investing,” Available at SSRN 3909166, 2021.
- Bernstein, Asaf, Matthew T. Gustafson, and Ryan Lewis, “Disaster on the Horizon: The Price Effect of Sea Level Rise,” *Journal of Financial Economics*, 134(2), 2019, pp. 253–272.
- Bessec, Marie, and Julien Fouquau, “A Green Wave in Media, a Change of Tack in Stock Markets,” *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 86(5), 2024, pp. 1026–1057.
- Bingler, Julia Anna, Mathias Kraus, Markus Leippold, and Nicolas Webersinke, “Cheap Talk and Cherry-Picking: What ClimateBert Has to Say on Corporate Climate Risk Disclosures,” *Finance Research Letters*, 47, 2022, p. 102776.
- Bolton, Patrick, and Marcin Kacperczyk, “Do Investors Care about Carbon Risk?” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp. 517–549.
- , and Marcin Kacperczyk, “Global Pricing of Carbon-Transition Risk,” *Journal of Finance*, 78(6), 2023, pp. 3677–3754.
- Boustanifar, Hamid, and Patrick Schwarz, “Measuring Business Social Irresponsibility: The Case of Sin Stocks,” Available at SSRN 4395028, 2023.
- Briere, Marie, and Stefano Ramelli, “Green Sentiment, Stock Returns, and Corporate Behavior,” Available at SSRN 3850923, 2022.
- Broccardo, Eleonora, Oliver Hart, and Luigi Zingales, “Exit versus Voice,” *Journal of Political Economy*, 130(12), 2022, pp. 3101–3145.
- Bua, Giovanna, Daniel Kapp, Federico Ramella, and Lavinia Rognone, “Transition versus Physical Climate Risk Pricing in European Financial Markets: A Text Based Approach,” *The European Journal of Finance*, 30(17), 2024, pp. 2076–2110.
- Campbell, John Y., and Ian W. R. Martin, “Sustainability in a Risky World,” NBER Working Paper, No. 28899, National Bureau of Economic Research, 2021.
- Cao, Jie, Amit Goyal, Xintong Zhan, and Weiming E. Zhang, “Unlocking ESG Premium

- from Options,” Available at SSRN 3878123, 2023.
- Carattini, Stefano, and Suphi Sen, “Carbon Taxes and Stranded Assets: Evidence from Washington State,” CESifo Working Paper, No. 7785, CESifo, 2019.
- Cassidy, William, “Elections Have Consequences: The Impact of Political Agency on Climate Policy and Asset Prices,” Working Paper, The University of Chicago, 2024.
- Ceccarelli, Marco, Simon Glossner, and Mikael Homanen, “Catering through Transparency: Voluntary ESG Disclosure by Asset Managers and Fund Flows,” Available at SSRN 4110596, 2023.
- Cenedese, Gino, Shangqi Han, and Marcin T. Kacperczyk, “Carbon-Transition Risk and Net-Zero Portfolios,” Available at SSRN 4565220, 2023.
- Chava, Sudheer, “Environmental Externalities and Cost of Capital,” *Management Science*, 60(9), 2014, pp. 2223–2247.
- Cheema-Fox, Alexander, Bridget R. LaPerla, George Serafeim, David Turkington, and Hui Shan Wang, “Decarbonization Factors,” *Journal of Impact and ESG Investing*, 2(1), 2021, pp. 47–73.
- Chen, Xuhui, Lorenzo Garlappi, and Ali Lazrak, “Responsible Consumption, Demand Elasticity, and the Green Premium,” Available at SSRN 4557543, 2023.
- Cheng, Gong, Eric Jondeau, Benoît Mojon, and Dimitri Vayanos, “The Impact of Green Investors on Stock Prices,” NBER Working Paper, No. 32317, National Bureau of Economic Research, 2024.
- Choi, Darwin, Zhenyu Gao, and Wenxi Jiang, “Attention to Global Warming,” *Review of Financial Studies*, 33(3), 2020, pp. 1112–1145.
- Cline, William R., *The Economics of Global Warming*, Columbia University Press, 1992.
- Cohen, Lauren H., Umit G. Gurun, and Quoc H. Nguyen, “The ESG-Innovation Disconnect: Evidence from Green Patenting,” NBER Working Paper, No. 27990, National Bureau of Economic Research, 2024.
- Correa, Ricardo, Ai He, Christoph Herpfer, and Ugur Lel, “The Rising Tide Lifts Some Interest Rates: Climate Change, Natural Disasters, and Loan Pricing,” International Finance Discussion Papers, No. 1345, Board of Governors of the Federal Reserve System, 2022.
- Couvert, Maxime, “What Is the Impact of Mutual Funds’ ESG Preferences on Portfolio Firms?” Swiss Finance Institute Research Paper, No. 21–42, Swiss Finance Institute, 2020.
- Cuculiza, Carina, Alok Kumar, Wei Xin, and Chendi Zhang, “Temperature Sensitivity, Mispricing, and Predictable Returns,” Available at SSRN 3331872, 2022.
- Del Negro, Marco, Julian Di Giovanni, and Keshav Dogra, “Is the Green Transition Infla-

- tionary?” Federal Reserve Bank of New York Staff Reports, No. 1053, Federal Reserve Bank of New York, 2023.
- Diluiso, Francesca, Barbara Annicchiarico, Matthias Kalkuhl, and Jan C. Minx, “Climate Actions and Macro-Financial Stability: The Role of Central Banks,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 110, 102548, 2021.
- Dimson, Elroy, Oğuzhan Karakaş, and Xi Li, “Active Ownership,” *Review of Financial Studies*, 28(12), 2015, pp. 3225–3268.
- Dorffleitner, Gregor, Sebastian Utz, and Rongxin Zhang, “The Pricing of Green Bonds: External Reviews and the Shades of Green,” *Review of Managerial Science*, 16(3), 2022, pp. 797–834.
- Drupp, Moritz A., Mark C. Freeman, Ben Groom, and Frikk Nesje, “Discounting Disentangled,” *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(4), 2018, pp. 109–134.
- Du, Ding, and Samuel A. Karolyi, “Energy Transitions and Household Finance: Evidence from U.S. Coal Mining,” *The Review of Corporate Finance Studies*, 12(4), 2023, pp. 723–760.
- Duchin, Ran, Jiawei Gao, and Qiping Xu, “Sustainability or Greenwashing: Evidence from the Asset Market for Industrial Pollution,” *Journal of Finance*, 80(2), 2025, pp. 699–754.
- Edmans, Alex, Doron Levit, and Jan Schneemeier, “Socially Responsible Divestment,” ECGI Working Paper Series in Finance, No. 823/2022, European Corporate Governance Institute, 2023.
- El Ghouli, Sadok, Omrane Guedhami, Chuck C. Y. Kwok, and Dev R. Mishra, “Does Corporate Social Responsibility Affect the Cost of Capital?” *Journal of Banking & Finance*, 35(9), 2011, pp. 2388–2406.
- Engle, Robert, Stefano Giglio, Heebum Lee, Bryan Kelly, and Johannes Stroebe, “Hedging Climate Change News,” *Review of Financial Studies*, 33(3), 2020, pp. 1184–1216.
- European Central Bank (ECB), “The ECB’s Monetary Policy Strategy Statement,” European Central Bank, 2021.
- Fabozzi, Frank J., K. C. Ma, and Becky J. Oliphant, “Sin Stock Returns,” *Journal of Portfolio Management*, 35(1), 2008, pp. 82–94.
- Faccini, Renato, Rastin Matin, and George Skiadopoulos, “Dissecting Climate Risks: Are They Reflected in Stock Prices?” *Journal of Banking & Finance*, 155, 106948, 2023.
- Fama, Eugene F., and Kenneth R. French, “Disagreement, Tastes, and Asset Prices,” *Journal of Financial Economics*, 83, 2007, pp. 667–689.
- Fatica, Serena, Roberto Panzica, and Michela Rancan, “The Pricing of Green Bonds: Are Financial Institutions Special?” *Journal of Financial Stability*, 54, 100873, 2021.
- Ferrari, Alessandro, and Valerio Nispi Landi, “Whatever It Takes to Save the Planet? Cen-

- tral Banks and Unconventional Green Policy,” *Macroeconomic Dynamics*, 28(2), 2024, pp. 299–324.
- Flammer, Caroline, “Corporate Green Bonds,” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp. 499–516.
- Frazzini, Andrea, and Lasse Heje Pedersen, “Betting Against Beta,” *Journal of Financial Economics*, 111(1), 2014, pp. 1–25.
- Fricke, Daniel, Stephan Jank, and Christoph Meinerting, “Who Finances the Green Transition? Evidence from the Green Bond Market,” Available at SSRN 4314538, 2024.
- Friede, Gunnar, Timo Busch, and Alexander Bassen, “ESG and Financial Performance: Aggregated Evidence from More than 2000 Empirical Studies,” *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), 2015, pp. 210–233.
- Friedman, Milton, “A Friedman Doctrine- The Social Responsibility of Business Is to Maximise Its Profits,” *The New York Times Magazine*, September 13, 1970, p. 17.
- Furukawa, Koichiro, Hibiki Ichiue, and Noriyuki Shiraki, “How Does Climate Change Interact with the Financial System? A Survey,” Bank of Japan Working Paper No. 20-E-8, Bank of Japan, 2020.
- Gertler, Mark, and Peter Karadi, “A Model of Unconventional Monetary Policy,” *Journal of Monetary Economics*, 58(1), 2011, pp. 17–34.
- Giannetti, Mariassunta, Martina Jasova, Maria Loumiotis, and Caterina Mendicino, “‘Glossy Green’ Banks: The Disconnect between Environmental Disclosures and Lending Activities,” Available at SSRN 4424081, 2023.
- Giglio, Stefano, Bryan Kelly, and Johannes Stroebe, “Climate Finance,” *Annual Review of Financial Economics*, 13, 2021, pp. 15–36.
- , Matteo Maggiori, Krishna Rao, Johannes Stroebe, and Andreas Weber, “Climate Change and Long-Run Discount Rates: Evidence from Real Estate,” *Review of Financial Studies*, 34, 2021, pp. 3527–3571.
- Ginglinger, Edith, and Quentin Moreau, “Climate Risk and Capital Structure,” *Management Science*, 69(12), 2023, pp. 7352–7398.
- Giovanardi, Francesco, Matthias Kaldorf, Lucas Radke, and Florian Wicknig, “The Preferential Treatment of Green Bonds,” *Review of Economic Dynamics*, 51, 657676, 2023.
- Goldsmith-Pinkham, Paul, Matthew Gustafson, Ryan Lewis, and Michael Schwert, “Sea Level Rise Exposure and Municipal Bond Yields,” *Review of Financial Studies*, 36, 2023, pp. 4588–4635.
- Gollier, Christian, *Pricing the Planet’s Future: The Economics of Discounting in an Uncertain World*, Princeton University Press, 2012.
- Golosov, Mikhail, John Hassler, Per Krusell, and Aleh Tsyvinski, “Optimal Taxes on Fossil

- Fuel in General Equilibrium,” *Econometrica*, 82(1), 2014, pp. 41–88.
- Gosling, Tilla, and Iain MacNeil, “Can Investors Save the Planet? NZAMI and Fiduciary Duty,” *Capital Markets Law Journal*, 18(2), 2023, pp. 172–193.
- Group of Twenty (G20), “2023 G20 Sustainable Finance Report Volume I,” Group of Twenty, 2023.
- Hallstrom, David G. and Vernon K. Smith, “Market Responses to Hurricanes,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 50(3), 2005, pp. 541–561.
- Hartzmark, Samuel M. and Kelly Shue, “Counterproductive Sustainable Investing: The Impact Elasticity of Brown and Green Firms,” Available at SSRN 4359282, 2023.
- , and Abigail B. Sussman, “Do Investors Value Sustainability? A Natural Experiment Examining Ranking and Fund Flows,” *Journal of Finance*, 74(6), 2019, pp. 2789–2837.
- Heinkel, Robert, Alan Kraus, and Josef Zechner, “The Effect of Green Investment on Corporate Behavior,” *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 36(4), 2001, pp. 431–449.
- Hengge, Martin, Ugo Panizza, and Rui Varghese, “Carbon Policy Surprises and Stock Returns: Signals from Financial Markets,” IMF Working Paper, WP/23/13, International Monetary Fund, 2023.
- Hino, Miyuki and Marshall Burke, “The Effect of Information about Climate Risk on Property Values,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(17), e2003374118, 2021.
- Hong, Harrison and Marcin Kacperczyk, “The Price of Sin: The Effects of Social Norms on Markets,” *Journal of Financial Economics*, 93, 2009, pp. 15–36.
- , Frank Weikai Li, and Jiangmin Xu, “Climate Risks and Market Efficiency,” *Journal of Econometrics*, 208(1), 2019, pp. 265–281.
- Hsu, Po-Hsuan, Kai Li, and Chih-Yung Tsou, “The Pollution Premium,” *Journal of Finance*, 78(3), 2023, pp. 1343–1392.
- Huynh, Thanh D. and Yihui Xia, “Climate Change News Risk and Corporate Bond Returns,” *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 56(6), 2021, pp. 1985–2009.
- Ilhan, Emirhan, Zacharias Sautner, and Grigory Vilkov, “Carbon Tail Risk,” *Review of Financial Studies*, 34(3), 2021, pp. 1540–1571.
- In, Soh Young, Ki Young Park, and Ashby Monk, “Is ‘Being Green’ Rewarded in the Market?: An Empirical Investigation of Decarbonization and Stock Returns,” Available at SSRN 3020304, 2019.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers,” Working Group I Contribution to the Sixth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2021.
- International Monetary Fund (IMF), “Scaling Up Private Climate Finance in Emerging Market and Developing Economies: Challenges and Opportunities,” Global Financial Stability Report, International Monetary Fund, 2022.
- , “Financial Sector Policies to Unlock Private Climate Finance in Emerging Market and Developing Economies,” Global Financial Stability Report, International Monetary Fund, 2023a.
- , “The Natural Rate of Interest: Drivers and Implications for Policy,” World Economic Outlook, International Monetary Fund, 2023b.
- Jagannathan, Ravi, Soohun Kim, Robert McDonald, and Shixiang Xia, “Environmental Activism: Endogenous Risk and Asset Prices,” Working Paper, The University of Houston, 2023.
- Jensen, Michael and William Meckling, “Theory of the Firm: Managerial Behavior, Agency Costs and Ownership Structure,” *Journal of Financial Economics*, 3, 1976, pp. 305–360.
- Kacperczyk, Marcin T. and José-Luis Peydro, “Carbon Emissions and the Bank-Lending Channel,” Available at SSRN 3915486, 2022.
- Känzig, Diego R., “The Unequal Economic Consequences of Carbon Pricing,” NBER Working Paper, No. 31221, National Bureau of Economic Research, 2023.
- Kapfhammer, Felix, Vegard H. Larsen, and Leif Anders Thorsrud, “Climate Risk and Commodity Currencies,” Available at SSRN 3754679, 2020.
- Kapraun, Julia, Carmelo Latino, Christopher Scheins, and Christian Schlag, “(In)-Credibly Green: Which Bonds Trade at a Green Bond Premium?” Available at SSRN 3347337, 2021.
- Karolyi, George Andrew, Ying Wu, and William W. Xiong, “Understanding the Global Equity Greenium,” Available at SSRN 4391189, 2023.
- Keenan, Jesse M., Thomas Hill, and Anurag Gumber, “Climate Gentrification: From Theory to Empiricism in Miami-Dade County, Florida,” *Environmental Research Letters*, 13(5), 2018, 054001.
- Krueger, Philipp, Zacharias Sautner, and Laura T. Starks, “The Importance of Climate Risks for Institutional Investors,” *Review of Financial Studies*, 33(3), 2020, pp. 1067–1111.
- Lanteri, Andrea and Adriano A. Rampini, Financing the Adoption of Clean Technology, Working Paper, Duke University, 2023.
- Larcker, David F. and Edward M. Watts, “Where’s the Greenium?” *Journal of Accounting and Economics*, 69(2–3), 2020, 101312.
- Lintner, John, “The Valuation of Risk Assets and the Selection of Risky Investments in

- Stock Portfolios and Capital Budgets,” *Review of Economics and Statistics*, 47(1), 1965, pp. 13–37.
- McCahery, Joseph A., Zacharias Sautner, and Laura T. Starks, “Behind the Scenes: The Corporate Governance Preferences of Institutional Investors,” *Journal of Finance*, 71(6), 2016, pp. 2905–2932.
- Mossin, Jan, “Equilibrium in a Capital Asset Market,” *Econometrica*, 34(4), 1966, pp. 768.
- Muller, Nicholas and Christine Hopkins, “Hurricane Katrina Floods New Jersey: The Role of Information in the Market Response to Flood Risk,” NBER Working Paper, No. 25984, National Bureau of Economic Research, 2019.
- Murfin, Justin and Matthew Spiegel, “Is the Risk of Sea Level Rise Capitalized in Residential Real Estate?” *Review of Financial Studies*, 33(3), 2020, pp. 1217–1255.
- Nakov, Anton and Carlos Thomas, “Climate-Conscious Monetary Policy,” ECB Working Paper Series, No. 2845, European Central Bank, 2023.
- Network for Greening the Financial System (NGFS), “Nature-Related Financial Risks: A Conceptual Framework to Guide Action by Central Banks and Supervisors,” Network for Greening the Financial System Technical Document, Network for Greening the Financial System, 2023.
- Newell, Richard G. and William A. Pizer, “Discounting the Distant Future: How Much Do Uncertain Rates Increase Valuations?” *Journal of Environmental Economics and Management*, 46(1), 2003, pp. 52–71.
- Nguyen, Justin H. and Hieu V. Phan, “Carbon Risk and Corporate Capital Structure,” *Journal of Corporate Finance*, 64, 2020, 101713.
- Noels, Julie, Chloé Pouille, Raphaël Jachnik, and Michel Rocha, “Climate Change Mitigation Scenarios for Financial Sector Target Setting and Alignment Assessment: A Stock-take and Analysis of Their Paris-Consistency, Practicality and Assumptions,” OECD Environment Working Papers, ENV/WKP(2023)15, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2023.
- Nordhaus, William D., *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, 1994.
- , “A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change,” *Journal of Economic Literature*, 45, 2007, pp. 686–702.
- , *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*, Yale University Press, 2008.
- , “Revisiting the Social Cost of Carbon,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 2017, pp. 1518–1523.
- , “Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics,” *American Economic*

- Review*, 109(6), 2019, pp. 1991–2014.
- Obstfeld, Maurice, “The Mayekawa Lecture: Perspectives on $\bar{r}$ and r^* ,” *Monetary and Economic Studies*, 41, Institute for Monetary and Economic Studies, Bank of Japan, 2023, pp. 31–48.
- Oehmke, Martin and Marcus M. Opp, “A Theory of Socially Responsible Investment,” *Review of Economic Studies*, 92(2), 2025, pp. 1193–1225.
- Olovsson, Conny and David Vestin, “Greenflation?” Sveriges Riksbank Working Paper Series, No. 420, Sveriges Riksbank, 2023.
- Onishi, Junichiro, Yonghua Deng, and Chihiro Shimizu, “Green Premium in the Tokyo Office Rent Market,” *Sustainability*, 13(21), 2021, 12227.
- Painter, Marcus, “An Inconvenient Cost: The Effects of Climate Change on Municipal Bonds,” *Journal of Financial Economics*, 135(2), 2020, pp. 468–482.
- Papageorgiou, Chris, Marianne Saam, and Patrick Schulte, “Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs: A Macroeconomic Perspective,” *Review of Economics and Statistics*, 99(2), 2017, pp. 281–290.
- Papoutsis, Melina, Monika Piazzesi, and Martin Schneider, “How Unconventional Is Green Monetary Policy?” Working Paper, Stanford University, 2022.
- Parise, Gianpaolo and Mirco Rubin, “Green Window Dressing,” Available at SSRN 4459352, 2023.
- Pastor, Lubos, Robert F. Stambaugh, and Luke A. Taylor, “Sustainable Investing in Equilibrium,” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp. 550–571.
- , ———, and ———, “Dissecting Green Returns,” *Journal of Financial Economics*, 146(2), 2022, pp. 403–424.
- , ———, and ———, “Green Tilts,” NBER Working Paper, No. 31320, National Bureau of Economic Research, 2024.
- Pedersen, Lasse Heje, Shaun Fitzgibbons, and Lukasz Pomorski, “Responsible Investing: The ESG-Efficient Frontier,” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp. 572–597.
- Perez-Gonzalez, Francisco and Hayong Yun, “Risk Management and Firm Value: Evidence from Weather Derivatives,” *Journal of Finance*, 68(5), 2013, pp. 2143–2176.
- Pietsch, Andreas and Dilyara Salakhova, “Pricing of Green Bonds: Drivers and Dynamics of the Greenium,” ECB Working Paper Series, No. 2728, European Central Bank, 2022.
- Pindyck, Robert S., “The Social Cost of Carbon Revisited,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 94, 2019, pp. 140–160.
- , “Population, Productivity, and Sustainable Consumption,” *American Economic Journal: Macroeconomics*, 16(4), 2024, pp. 218–238.

- and Neng Wang, “The Economic and Policy Consequences of Catastrophes,” *American Economic Journal: Economic Policy*, 5(4), 2013, pp. 306–339.
- Porter, Michael and Mark Kramer, “Creating Shared Value,” *Harvard Business Review*, 89(1–2), 2011, pp. 62–77.
- Powell, Jerome H., “Statement by Chair Jerome H. Powell on Principles for Climate-Related Financial Risk Management for Large Financial Institutions,” Board of Governors of the Federal Reserve System, 2023.
- Rachel, Łukasz and Lawrence Summers, “On Secular Stagnation in the Industrialized World,” *Brookings Papers on Economic Activity*, Spring 2019, 2019, pp. 1–54.
- Ramelli, Stefano, Alexander F. Wagner, Richard J. Zeckhauser, and Alexandre Ziegler, “Investor Rewards to Climate Responsibility: Stock-Price Responses to the Opposite Shocks of the 2016 and 2020 U.S. Elections,” *Review of Corporate Finance Studies*, 10(4), 2021, pp. 748–787.
- Ramsey, Frank P., “A Mathematical Theory of Saving,” *Economic Journal*, 38(152), 1928, pp. 543–559.
- Rawls, John, *A Theory of Justice*, revised edition, Belknap Press of Harvard University Press, 1999.
- Reghezza, Alessio, Yener Altunbas, David Marques-Ibanez, Costanza Rodriguez d’Acri, and Martina Spaggiari, “Do Banks Fuel Climate Change?” *Journal of Financial Stability*, 62, 101049, 2022.
- Renneboog, Luc, Jenke Ter Horst, and Chendi Zhang, “Socially Responsible Investments: Institutional Aspects, Performance, and Investor Behavior,” *Journal of Banking & Finance*, 32(9), 2008, pp. 1723–1742.
- Salaber, Julie, “Religion and Returns in Europe,” *European Journal of Political Economy*, 32, 2013, pp. 149–160.
- Sangiorgi, Ivan and Lisa Schopohl, “Explaining Green Bond Issuance Using Survey Evidence: Beyond the Greenium,” *British Accounting Review*, 55(1), 101071, 2023.
- Sauzet, Maxime and Olivier D. Zerbib, “When Green Investors Are Green Consumers,” Available at SSRN 4098124, 2024.
- Schnabel, Isabel, “A New Age of Energy Inflation: Climateflation, Fossilflation and Greenflation,” speech at a panel on “Monetary Policy and Climate Change” at The ECB and Its Watchers XXII Conference, in Frankfurt on 17 March 2022, 2022.
- Sharpe, William F., “Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk,” *Journal of Finance*, 19(3), 1964, pp. 425–442.
- Statman, Meir and Denys Glushkov, “Classifying and Measuring the Performance of Socially Responsible Mutual Funds,” *Journal of Portfolio Management*, 42(2), 2016,

- pp. 140–151.
- Stern, Nicholas, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, 2007.
- and Joseph Stiglitz, “The Social Cost of Carbon, Risk, Distribution, Market Failures: An Alternative Approach,” NBER Working Paper, No. 28472, National Bureau of Economic Research, 2021.
- Stroebel, Johannes and Jeffrey Wurgler, “What Do You Think about Climate Finance?” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 2021, pp. 487–498.
- Tang, Dragon Yongjun and Yupu Zhang, “Do Shareholders Benefit from Green Bonds?” *Journal of Corporate Finance*, 61, 2020, 101427.
- Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD), “Final Report: Recommendations of the Task Force on Climate-Related Financial Disclosures,” Bank for International Settlements, 2017.
- van Binsbergen, Jules H. and Andreas Brogger, “The Future of Emissions,” Available at SSRN 4241164, 2023.
- Weitzman, Martin L., “Gamma Discounting,” *American Economic Review*, 91(1), 2001, pp. 260–271.
- , “Rare Disasters, Tail-Hedged Investments, and Risk-Adjusted Discount Rates,” NBER Working Paper, No. 18496, National Bureau of Economic Research, 2012.
- , “Fat Tails and the Social Cost of Carbon,” *American Economic Review*, 104(5), 2014, pp. 544–546.
- World Commission on Environment and Development, “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future,” United Nations, 1987.
- Zerbib, Olivier D., “The Effect of Pro-Environmental Preferences on Bond Prices: Evidence from Green Bonds,” *Journal of Banking & Finance*, 98, 2019, pp. 39–60.
- , “A Sustainable Capital Asset Pricing Model (S-CAPM): Evidence from Environmental Integration and Sin Stock Exclusion,” *Review of Finance*, 26(6), 2022, pp. 1345–1388.

台帳を用いない決済方式に関する 技術面からの一考察

たむら ゆうこ あべ まさゆき おくだ てつや つが わひろまさ みやざわ としゆき やまむら
田村裕子／阿部正幸／奥田哲矢／津川天祐／宮澤俊之／山村
かずき あかはね よしはる たぐち ともき ひらくり ゆうと ますだ ひろと やまだ けんと
和輝／赤羽喜治／田口智貴／平栗勇人／増田博人／山田健斗

要 旨

本稿は、サービス事業者を介さず、台帳を用いることなく決済を可能とする決済方式について、その技術的側面から考察を行うものである。これは、現金に見立てた電子データの送受信によって決済を行う手段であり、暗号技術に関する研究分野では、「電子現金」という名称で検討が進められてきた。1990年代にはいくつかの実証実験が行われたが、当時の技術水準ではユーザビリティを確保することが難しかったものと推測される。そこで、本稿では、この間の技術進展および社会ニーズを踏まえて電子現金方式の再整理を行うとともに、スマートフォンを用いた実機検証を通して、現在の技術水準であればユーザビリティの高い電子現金を提供できる可能性があることを示す。また、技術的側面から、電子現金のさらなるユーザビリティ向上とプライバシー強化に向けて、電子現金を任意の金額に分割・集約可能な方式、および、同一ユーザが使用した電子現金の相互の関連付けを困難とする方式を提案する。なお、本稿はあくまで電子現金にかかる技術面からの考察を行うものであり、法律や制度、実運用等、社会実装に向けた実現可能性は検討の対象外であることに留意されたい。

キーワード： スマートフォン決済、デジタル決済、電子現金、電子マネー、プライバシー保護

.....
本稿の作成に当たっては、藤岡淳教授（神奈川大学）と國廣昇教授（筑波大学）から有益なコメントをいただいた。ただし、本稿に示されている意見は、筆者たち個人に属し、日本銀行、NTT 株式会社、および、株式会社 NTT データの公式見解を示すものではない。また、ありうべき誤りはすべて筆者たち個人に属する。

田村裕子 日本銀行金融研究所（E-mail: yuuko.tamura@boj.or.jp）

阿部正幸／奥田哲矢／津川天祐／宮澤俊之／山村和輝

NTT 株式会社社会情報研究所（E-mail: msyk.abe@ntt.com）

赤羽喜治／田口智貴／平栗勇人／増田博人／山田健斗

株式会社 NTT データ第三金融事業本部

（E-mail: yoshiharu.akahane@nttdata.com）

（宮澤俊之は、現・NTT 株式会社サービスイノベーション総合研究所）

1. はじめに

現在普及しているキャッシュレス決済には、「台帳」を用いて行う方式を採用したものが多く、ここでの台帳とは、ユーザからの指図に応じて取引内容を記載するデータベースであり、全ユーザのすべての取引内容や残高等がそこに集約管理されるものを指す。その代表例は預金取引であり、近年普及しているコード決済も同様の方式を採用しているとみられる。また、台帳の管理主体・方法に違いがあるものの、暗号資産¹も台帳を用いた方式の一例として挙げられる。こうした台帳による方式では、ユーザがインターネットを介してサービス事業者（暗号資産の場合はブロックチェーンのノード）に送金指図を行い、サービス事業者が台帳を更新することで決済が実行される。

これに対し、「電子現金」²（岡本・太田 [1993]、中山ほか [1997]）は、台帳を用いることなく決済を行うものであり、既存のキャッシュレス決済とは大きく異なる。電子現金とは、現金に見立てた電子データの送受信によって決済を行う手段であり、あたかも現金を受け渡すかのように、送金元と送金先の二者間におけるデータ通信によって決済を実行することができる。そのため、サーバ等の障害耐性、ネットワーク障害耐性、決済処理性能、外部システムとの相互運用性等の面で、台帳を用いた方式対比、メリットを有する可能性がある。また、決済が二者間に閉じることから、サービス事業者に対して取引内容を秘匿しうるほか、デバイスの近距離通信を使用すればインターネットから遮断された環境でも決済を実行することが可能である。

電子現金については、これまでいくつかの実証実験を通して、実運用性の検証が行われてきた³。1998年に行われた「インターネットキャッシュ」の実証実験では、インターネットを介して発行されたインターネットキャッシュ（電子現金）をICカードに保存し、インターネット上の店舗や友人に送信するシステムの動作検証が行われた。しかしながら、当時の技術水準ではユーザビリティ⁴を確保することが

.....
1 2020年5月に施行された資金決済法の改正前は「仮想通貨」と呼称されていた。

2 中山ほか [1997] は、提案する決済方式を「電子マネー」と呼んでいたが、近年は非接触型ICカードを用いた決済方式を電子マネーと呼ぶことが多いため、本稿では、岡本・太田 [1993] での呼称である「電子現金」を用いることとする。なお、本稿で考察を行う「電子現金」は、政府・日本銀行において検討を行っている中央銀行デジタル通貨（Central Bank Digital Currency: CBDC）とは異なるものである。

3 電子現金方式をベースとした実証実験には、日本電信電話株式会社 [1995, 1996]、サイバービジネス協議会 [2000]、エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社 [2000] の4つがある。

4 ユーザビリティとは、ユーザにとっての使いやすさを示す。利便性も類似語ではあるが、本稿では、2節(2)で定義する電子現金に求められる性質（安全性、利便性、現金がもつメリットの継承、透明性）の1つを指すものとする。

難しく、電子現金が実現することはなかった。その後、非接触型 IC カードを用いた電子マネーが普及したこともあり、電子現金に関する検討はいったん終息した。

近年、政府によるキャッシュレス推進の取組みにより、電子マネーをはじめとする各種キャッシュレス決済サービスの利用は年々増加している。2023 年には、国内のキャッシュレス決済比率が約 4 割まで上昇した（経済産業省 [2024]）。政府は、キャッシュレス決済比率の最終目標を 8 割に据えており（経済産業省 商務・サービスグループ消費・流通政策課 [2018]）、キャッシュレス決済サービスの利用は、今後より一層増えていくものと想定される。その場合、サーバ等の障害やネットワーク障害が国内の決済サービスに及ぼしうる影響について、より一層の考慮が必要になるように思われる。このように、安定したキャッシュレス社会の実現に向けては、台帳を用いない方式についても検討を進めておくことが有益であろう。

そこで、本稿では、まず、この間の技術進展および社会ニーズを踏まえて電子現金方式の再整理を行うとともに、現在広く利用されている一般的なスマートフォンを用いて実機検証を行った結果を報告する。さらに、電子現金のさらなるユーザビリティ向上に向けた方法、および、ユーザのプライバシーを強化する方法について考察を行う。なお、本稿はあくまで電子現金にかかる技術面からの考察を行うものであり、法律や制度、実運用等、社会実装に向けた実現可能性についての検討は行っていない。

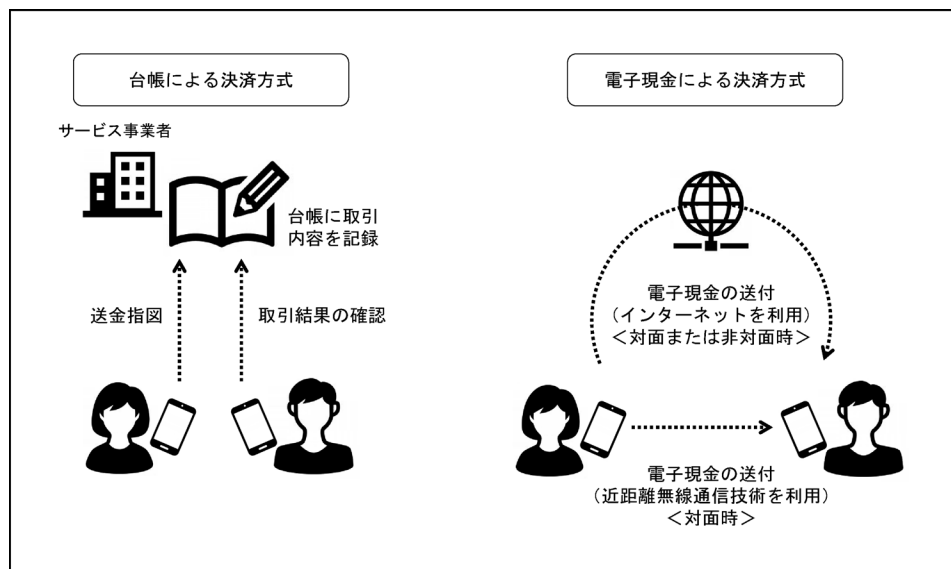
本稿の構成は以下のとおりである。まず、2 節において電子現金方式の基本的な構成とともに電子現金に求められる性質を整理するほか、プライバシー保護と透明性のバランスについて考察を行う。3 節では、電子現金の送受信に関する実機検証の結果を整理したうえで、現行の技術水準を前提とした場合のユーザビリティについて評価を行う。4 節では、電子現金方式の効率化に向けた検討として、送受信にかかる効率化方式、還収にかかる効率化方式、電子現金の分割・集約を可能とする方式について整理するほか、プライバシーを強化した方式の考察を行う。最後に、5 節において今後の展望等を述べ、本稿を締め括る。

2. 電子現金方式の基本構成

(1) 台帳方式と電子現金方式との違い

現在提供されている決済サービスの多くは、サービス事業者が決済を仲介する方式となっており、ユーザから送金の指図を受けたサービス事業者がその内容を台帳に記載することで決済が行われる。預金取引の例であれば、金融機関が台帳にある

図表 1 台帳による決済方式と電子現金による決済方式



送金元ユーザの口座残高を減額するとともに、送金先ユーザの口座残高を増額することで、送信処理（振込処理）が実行される（図表 1 参照）。

一方、こうした台帳を用いずに決済を可能とする方法についても、従来検討が行われてきた（岡本・太田 [1993]、中山ほか [1997]）。これらは、現金がそうであるように、送金元から送金先に電子データを送ることによる決済を目指したものであり、「電子現金」と呼ばれた。電子現金は、ユーザがもつスマートフォン等のデバイスに保管され⁵、その送付はインターネットを介して行われるほか、対面であればデバイスの近距離無線通信技術を利用して行うことも想定される（図表 1 参照）。

このように、電子現金では、サービス事業者の関与なしに決済を行いうる。ユーザ登録や電子現金の発行時にはサービス事業者の関与が必要となるが、送信処理は、送金元ユーザと送金先ユーザの二者間でのデータ通信に閉じることができる。そのため、電子現金の送受信処理においては、サーバ等障害耐性（サーバ等による障害の影響を受けにくい）、ネットワーク障害耐性（インターネットへ接続せずに決済できる可能性がある）、決済処理性能（サーバの処理能力や通信速度ではなく、デバイスの処理能力に依存する）、サービス事業者に対する取引内容の秘匿性

.....
5 本稿ではユーザが使用するデバイスとしてスマートフォンを想定するが、電子現金方式は eSE (embedded Secure Element、埋込型セキュア・エレメント) と同様の耐タンパ性をもつ装置を具備した計算機にも実装可能である。SE (セキュア・エレメント) は、外部からの攻撃に対して高い安全性をもつモジュールであり、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせることで実現される。スマートフォン内部に組み込まれるタイプは eSE と呼ばれる。なお、耐タンパ性については、脚注 9 を参照。耐タンパ性の必要性については、本節 (4) で整理する。

(サービス事業者がリアルタイムで取引内容を知ることはない)を有すると整理することができる。

また、電子現金方式は、複数のサービスを容易に連携可能という特長も有する。例えば、複数のサービス事業者から発行された異なる電子現金を組み合わせた支払いや、異なる電子現金の交換といったニーズがあるとき、台帳を用いた方式であれば、サービス事業者がそれぞれに管理する台帳を API (Application Programming Interface) 等により接続することで、これらサービスを連携させる必要が生じる。これに対し、電子現金方式では、そもそも台帳が存在しないことから、API 接続といったサービス事業者間の連携は不要である。なお、どちらの方式においても、ユーザ側では必要なアプリケーションをデバイスにインストールすることで、サービス連携への対応を行うことになる。

このほか、サービス事業者側のシステム改修を必要とせず、ユーザ側におけるアプリケーションによってサービス形態の変更に対応するという特徴を活かして、電子現金にプログラマビリティ⁶を与えることが考えられる。ここでのプログラマビリティとは、サービス事業者以外の主体であっても電子現金の使用にかかる独自のルールを適用可能であることを指し、適用範囲内のユーザがそれぞれに同ルールをデバイスにプログラムすることで独自ルールを実行することをいう。また、電子現金の発行時、サービス事業者が電子現金の使用にかかるルールを同電子現金に書き込むことで、プログラマブル・マネーを実現することも考えうる⁷。例えば、電子現金に使用期限を設けたり、電子現金の使用範囲を限定したりすること等が考えられよう。

一方、電子現金方式における留意点としては、電子現金がデバイスの上に保管されることに伴う影響が挙げられる。台帳方式では、すべての資産データをサービス事業者が管理しているため、仮にユーザがデバイスを紛失した場合であっても、ユーザ本人であることを確認さえできれば、当該ユーザのデータへのアクセスを許可することが考えられる。これに対し、電子現金方式では、ユーザのデバイス内に電子現金が格納されるため、デバイスを紛失すれば電子現金も紛失することになる⁸。こうした性質は現金と同様である。また、ユーザが使用するデバイスには、

.....
6 決済システムにおけるプログラマビリティとは、決済システムの運営者のみならず、さまざまな主体が、個別のニーズにあわせて決済機能をプログラムできることをいう (北條・鳩貝 [2022])。

7 プログラマブル・マネーは、資金データという「オブジェクト」に固有の属性情報やプログラムを格納し、個別の振舞いを制御することに着目したコンセプトである (北條・鳩貝 [2022])。電子現金は、シリアル・ナンバに対するサービス事業者のデジタル署名として発行されるものであることから (本節 (3) BOX1 参照)、同署名のメッセージ部分に、電子現金の使用にかかるルールを書き込むことが考えられる。

8 デバイスの紛失に備え、サービス事業者がすべての電子現金をバックアップしておくという対応も考えられるが、その場合にはバックアップデータの送信や保全が必要となることから、台帳方式と同様の障害リスクを有することになる。

一定の耐タンパ性⁹が必要となる（本節（4）参照）点にも留意が必要である。

本稿では、電子現金を保管する媒体として、ユーザが所有するスマートフォンのようなデバイスを想定しているが、将来的には、デバイス外のセキュアな領域で電子現金を保管できるようになることも考えられる。第6世代移動通信システム（6G）におけるネットワークの高度化¹⁰に向けた検討では、モバイル・ネットワーク自体にユーザの情報を強固に守るセキュリティ確保のための高度な暗号化・秘密計算機能をもたせることが検討されており、TEE（Trusted Execution Environment）環境¹¹もその対象となっている（日本電信電話株式会社ネットワークサービスシステム研究所 [2023]）。こうしたネットワークの高度化が実現した際には、デバイス所有者の電子現金をデバイスに紐付くエッジ（モバイル・ネットワークの入り口となる基地局等）上の TEE 環境に格納することで、デバイスの紛失リスクに対応することが考えられる。

（2）電子現金方式に求められる性質

電子現金に求められる性質として中山ほか [1997] が挙げている、安全性、利便性、現金がもつメリットの継承について、その概要を説明する。さらに、決済方式の提供に当たっては、マネー・ロンダリング・テロ資金供与防止（Anti-Money Laundering/Countering the Financing of Terrorism: AML/CFT）への考慮が必要となることから、本稿では、決済の透明性を電子現金に求められる性質に加えることとする。

（安全性）

① 電子現金の偽造・改ざん、および、複製・二重使用が困難であること

電子現金の安全性については、現金と同様、偽造や改ざんが困難であることが求められる。また、複製データの見分けが難しいという電子データの特性に伴い生じ

.....
9 具体的な機能には、不正アクセスの証拠を残すタンパ・エビデンス、不正アクセスからデータを防護するタンパ・レジスタンス、不正アクセスに対してデータを消去する対抗動作を行うタンパ・レスポンスがある（田村・宇根 [2007]）。

10 モバイル・デバイスを支える移动通信システムの高度化に伴い、データ転送だけでなくさまざまな情報処理機能をモバイル・ネットワークの入り口であるエッジ（基地局等）に配備する議論が進んでいる。デバイスはエッジとの間で機能分散を図り、モバイル・ネットワークを介してインターネット上のサービスにアクセスすることになる。

11 TEE は、高いセキュリティが要求される処理のための実行環境を提供する機能である。こうした実行環境（TEE 空間）は、通常のアプリケーションが動作する空間（Rich Execution Environment: REE）と分離され、両空間の間の通信は厳格なアクセス制御のもとで実行されるように設計される。

る複製使用や二重使用が困難であることも必要な要件となる。安全性の観点から電子現金に想定される不正行為は、以下のとおりである。

- 電子現金の偽造・改ざん：発行者以外が電子現金を偽造したり、電子現金の金額等を改ざんしたりすること
- 電子現金の複製使用：他人が所有する電子現金を複製して使用すること
- 電子現金の二重使用：自分が所有する電子現金を複製して使用すること

電子現金方式では、デジタル署名と呼ばれる暗号技術を使用することで、電子現金の偽造・改ざんを防止する。また、第三者による複製使用については、電子現金に所有者の情報を付加することで防止する。二重使用については、台帳方式のように、決済サービス事業者がリアルタイムで検知することが困難であることから、デバイスの耐タンパ性によって防止する（本節（4）参照）とともに、耐タンパ性が低下した場合であっても事後検知できるよう、サービス事業者がシリアル・ナンバによって管理を行う¹²。

（利便性）

- ② 電子現金を任意の単位に分割して利用できること
- ③ 対面および非対面での決済が可能であること
- ④ 電子現金の発行・管理にかかる処理コストが低いこと

電子現金方式の利便性とは、ユーザおよびサービス事業者における便利さの程度が現金決済におけるそれより高いことをいう。ユーザの視点では、電子現金を任意の単位に分割して利用できる性質や、対面・非対面決済のどちらにも利用できるといった性質へのニーズが高いと考えられる（性質②、③）。また、サービス事業者の利便性としては、発行・管理にかかる処理コストが現金のそれより低いことが挙げられる（性質④）。

ただし、本節（3）で紹介する基本方式、および、3節で行う実機検証では、電子現金の単位を固定することとし、性質②を充足可能な方式は次の検討課題とすることとした。なお、電子現金を任意の単位に分割・集約を可能とする方式については、4節（3）で整理している。

.....
12 電子現金方式においては、複製・二重使用の事後検知のために、シリアル・ナンバのデータベース（DB）を必要とするが、決済を記録するための台帳とは異なる。

(現金がもつメリットの継承¹³⁾)

- ⑤ 電子現金から過去の取引ユーザの特定が困難であること (匿名性¹⁴⁾)
- ⑥ 同一ユーザが使用した電子現金の相互の関連付けが困難であること (関連付け不能性)
- ⑦ インターネットから遮断された環境でも決済が可能であること
- ⑧ 受領した電子現金を別の決済に使用できること
- ⑨ 電子決済に必要なデバイスを容易にもち運びできること

現金が有する性質の1つに匿名性 (Anonymity) がある。現金の匿名性とは、現金を受け取った際、当該現金から過去の取引に関する情報を知ることができないことをいい、小売店や金融機関等が結託しても情報が露呈しないことをいう (古市 [1995])。電子現金についても、プライバシー保護の観点から同様の性質を有することが望ましく、過去に電子現金を使用したユーザの特定が困難といった性質が求められる (性質⑤)。また、大量のデータを収集し解析しうる状況においても、複数の電子現金から過去の取引が関連付けできないことが望ましい。具体的には複数の電子現金があるとき、それらが以前に同一ユーザの取引に用いられたものであっても、その事実が露呈しない性質は関連付け不能性 (Unlinkability) と呼ばれる (性質⑥)。

現在普及しているキャッシュレス決済の多くは、インターネット通信の利用が前提となっている。しかし、自然災害等によるネットワーク障害の発生時においても決済できるようにしておくというニーズも少なくないことから、インターネットから遮断された環境でも決済できることが望ましい (性質⑦、中田 [2021])。また、ユーザビリティの観点からは、受領した電子現金をサービス事業者に還流させることなく、そのまま別の決済に使用できる性質 (転々流通性¹⁵⁾) が求められるほか、いつでもどこでも決済を可能とするよう、デバイスのポータブル性も必要と考えられる (性質⑧、⑨)。

(透明性)

- ⑩ 必要に応じて、サービス事業者は電子現金を追跡できること

.....
13 中山ほか [1997] では、⑤と⑥の性質に加えて、複数金融機関対応という性質が挙げられている。中山ほか [1997] は、電子現金が預金を見合いとして発行され、預金に戻されることが想定されていることから、発行した金融機関以外への預入を可能とする性質が望ましいとされていた。しかし、本稿では、決済サービスの提供者が電子現金を発行する想定としており、金融機関の関与を必須としないことから、複数金融機関対応という性質は含めないこととする。

14 中山ほか [1997] では、ユーザの「追跡不能性」と説明されている。

15 本性質を有する方式はオープンループ型と呼ばれ、そうでない方式はクローズドループ型と呼ばれる。

決済サービスには、AML/CFT の観点から、必要に応じて資金の流れを追跡可能とする決済の透明性が求められる。資金の流れを追跡するには、ユーザ情報の把握が必須であり、ユーザから提示された本人情報（氏名、住所等）に誤りがないことを確認する本人確認が必要となる。

ただし、サービス事業者がユーザに関するすべての情報を管理すれば、還収した電子現金の履歴からユーザを特定することが可能となりうる。そのため、ユーザの本人確認はサービス事業者とは独立した認証機関が行うこととする¹⁶。なお、ユーザのプライバシー保護と透明性については、本節（5）で整理する。

（3） 基本方式

ここでは、上記性質を有するよう設計された電子現金方式（中山ほか [1997]）を紹介する。電子現金方式を構成する主たるエンティティは、サービス事業者、認証機関¹⁷、ユーザ（電子現金の送受信者、店舗等を含む）、ユーザのデバイス（電子現金の送受信や保管を行うデバイス）である。基本となる電子現金方式は、ユーザ登録と証明書の発行¹⁸、電子現金の発行、電子現金の送信、電子現金の還収、電子現金の二重使用チェックのフェーズで構成される¹⁹（図表 2 参照）。具体的な流れは以下のとおり。なお、詳細な暗号処理の方法等については、BOX1 を参照されたい。

イ. ユーザ登録と証明書の発行

電子現金の利用に当たり、ユーザは暗号処理に必要な鍵ペア²⁰の生成を行い、認証機関から証明書の発行を受ける。

- ① ユーザは、証明書発行に必要な本人情報を認証機関に提出する。

.....
16 ユーザのプライバシー保護の観点から、中山ほか [1997] と同様、ユーザの情報を管理する機関を独立に設けることとした。もっとも、本稿では現行法制度に照らした考察は検討の対象外としていることから、法制度との関係については別途の検討が必要である。

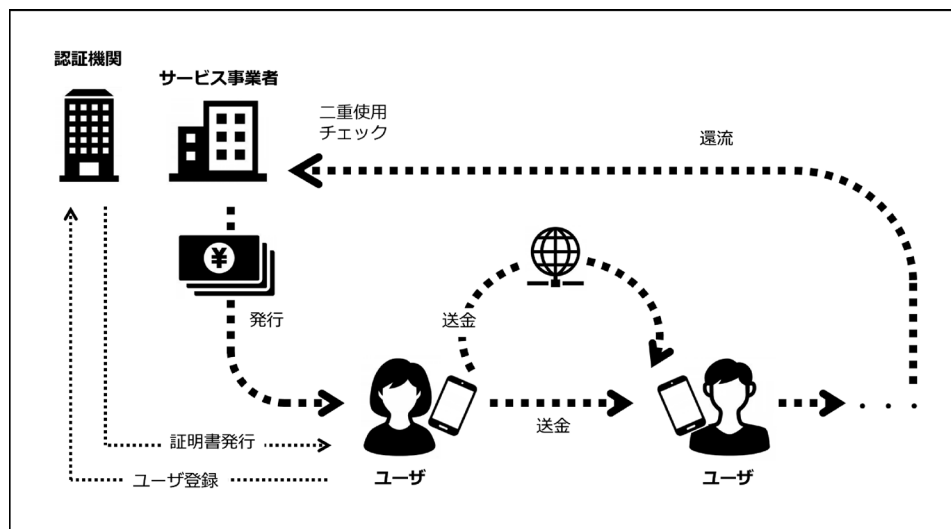
17 認証機関は、ユーザの本人確認を行ったうえで、ユーザの公開鍵に対する証明書を発行する。複数のサービス事業者が 1 つの認証機関と連携することも考えられる。

18 認証機関によって発行される証明書は、暗号処理に使用された鍵ペアが認証機関に登録された正しいものであることを第三者が確認するのに用いられる。

19 特定の管理者をもたない暗号資産では、一般に、ユーザ登録や証明書の発行といった手続きはない。そのため、暗号資産ユーザが特定されることはないほか、鍵が盗取された場合であっても同鍵を無効化することができない。もっとも、暗号資産取引に暗号資産交換業者を利用する場合には、暗号資産交換業者等による本人確認が義務付けられているため、この限りではない。また、暗号資産は台帳ですべて管理されているため、還収処理も発生しない。

20 暗号処理には、秘密鍵・公開鍵と呼ばれる鍵ペアが用いられる。秘密鍵はユーザのみが知る情報として管理する必要があるのに対し、公開鍵は他ユーザへの公開が可能な情報である。デジタル署名方式では、公開鍵を用いた処理によって、署名対象であるメッセージが秘密鍵の所有者によって作成されたものであること、および、事後的に改ざんされていないことを確認できる。

図表 2 電子現金スキームの基本的構成



- ② 認証機関は、ユーザの本人確認を行い、ユーザ情報を登録する。
- ③ ユーザは、秘密鍵と公開鍵の鍵ペアを生成し、公開鍵を認証機関に送信する。
- ④ 認証機関は、公開鍵をユーザ情報に対応付けて管理するとともに、公開鍵に対する証明書をユーザに発行する。

ロ. 電子現金の発行

ユーザの依頼に応じて、サービス事業者はユーザに電子現金を発行する。電子現金には、偽造・改ざん防止対策としてサービス事業者のデジタル署名が付与されるほか、所有者を指定して発行することで複製・二重使用への対策を講じる。そのため、電子現金は、その所有者情報を記載した移転履歴と呼ばれるデータとセットで取り扱う。詳細については BOX2 を参照されたい。

- ① サービス事業者は、電子現金の発行を希望するユーザに証明書を要求し、その正当性を検証する。証明書の有効性については、認証機関による証明書失効リスト（CRL: Certificate Revocation List）で確認を行う。
- ② サービス事業者は、ユーザが希望する金額分の電子現金を発行する²¹。電子現金にはシリアル・ナンバを割り当て、発行した電子現金のシリアル・ナンバを「発行済電子現金 DB（データベース）」に追加する。さらに、それぞれの電子現金に対して、サービス事業者からユーザに発行（移転）されたことを示す

21 本電子現金方式では、発行される電子現金の額面を固定とする。現金と同じであれば、10 種類（10,000 円、5,000 円、2,000 円、1,000 円、500 円、100 円、50 円、10 円、5 円、1 円）となる。

データとなる移転履歴を付与する。

- ③ ユーザは、サービス事業者の証明書を検証するとともに、電子現金とその移転履歴が正しく生成されていること（電子現金が偽造・改ざんされたものでないこと、電子現金と移転履歴が同じシリアル・ナンバに対応していること、自分が送金先として指定されていること）を確認し、デバイス内に保存する。

ハ．電子現金の送信

ユーザは、電子現金を任意のユーザや店舗に送付することができる。その際、送付先となるユーザの情報を移転履歴に追加することで、複製・二重使用への対策を講じる（詳細は BOX2 を参照）。

- ① ユーザは、送金先ユーザの証明書を要求し、その正当性を検証する²²。
- ② ユーザは、電子現金の移転履歴に送信先ユーザの情報を追加し、電子現金、移転履歴、自身の証明書を送付する。
- ③ 送金先ユーザは、送金元ユーザの証明書を検証するとともに、受け取った電子現金と移転履歴が正しく送付されたものであること（電子現金が偽造・改ざんされたものでないこと、電子現金と移転履歴が同じシリアル・ナンバに対応していること、他人の電子現金を複製したものでないこと、自分が送金先として指定されていること）を確認する。その際、サービス事業者による発行以降のすべての移転履歴が正しく生成されていることの確認も行う²³。その後、電子現金と移転履歴をデバイス内に保存する。

二．電子現金の還収

事後的な電子現金の二重使用チェック、および、電子現金の再発行のため、一定

.....
22 証明書の検証によって、相手ユーザが認証機関に登録された正しいユーザであること、および、証明書が有効であることを確認する。後者を確認するには、認証機関による CRL を確認する必要がある。インターネットに接続できる状況であれば、最新の CRL を確認できるが、そうでない状況に備えて、インターネットに接続したタイミングで速やかに CRL をデバイスに自動的にダウンロードする仕様としておくことが必要である。

23 データに改ざんや不整合がないことを確認するために行う。改ざんや不整合があった場合、送金先ユーザは電子現金の受取りを拒否する。なお、移転履歴にあるその他のユーザの証明書は確認しないため、移転履歴の中に、サービス事業者へのユーザ登録を行っていない（証明書をもたない）ユーザや他人から盗取した秘密鍵（CRL に掲載されている公開鍵に対応する秘密鍵）を使用したユーザが紛れ込んでいたとしてもこれを検知することはできない。こうした不正なユーザが二重使用していたとしても、サービス事業者は同ユーザの情報をもたないことから、同ユーザを特定することができない。しかしながら、正しいアプリケーションを使用しているユーザであれば、証明書をもたないユーザとは取引できない（アプリケーションが取引を拒否する）はずであることから、不正なユーザに電子現金を送信したユーザ、および、不正なユーザから電子現金を受け取ったユーザは共犯者である可能性が高いといえる。このため、サービス事業者は、不正にかかわったユーザを特定することで、二重使用者を追跡できる可能性があると考えられる。

の頻度で電子現金をサービス事業者に還流させる必要がある²⁴。サービス事業者による還収は、ユーザによる電子現金の払戻し（換金）のタイミングのほか、移転回数が規定を超えたタイミングで強制的に行うことが考えられる²⁵。

- ① ユーザは、サービス事業者へ電子現金と移転履歴のセットを送信する。
- ② サービス事業者は、受け取った電子現金と移転履歴のセットが正しく送付されたものであることを確認する。その際、移転履歴については、発行以降のすべての移転履歴が正しく生成されていることを確認するとともに、移転履歴にある公開鍵の有効性を CRL の参照によって確認する。
- ③ サービス事業者は、電子現金の二重使用チェックを行う（後述）。
- ④ サービス事業者は、ユーザから電子現金の再発行依頼があれば、同金額分の電子現金を改めて発行する。

ホ. 電子現金の二重使用チェック

サービス事業者は、還収した電子現金のシリアル・ナンバを確認することで、二重使用チェックを行う。

- ① サービス事業者は、発行済電子現金 DB を参照し、還収した電子現金のシリアル・ナンバが DB にあるか否かを確認する。
- ② 発行済電子現金 DB に同シリアル・ナンバがあれば、DB から同シリアル・ナンバを削除して、還流してきた電子現金と移転履歴を「還収済電子現金 DB」に格納する。
- ③ 発行済電子現金 DB に同シリアル・ナンバがなかった場合には、二重使用されたものと判断し、還収済電子現金 DB から同じシリアル・ナンバをもつ電子現金の移転履歴を取り出し、両移転履歴から二重使用したユーザの公開鍵を特定する。
- ④ サービス事業者は、二重使用したユーザの公開鍵を認証機関に送信し、公開鍵に対応するユーザを特定する²⁶。

.....
24 電子現金に付与される移転履歴のサイズは、移転回数に比例して増加するため、移転回数が多くなった電子現金については還収のうえ再発行することが望ましい。

25 中山ほか〔1997〕では、電子現金の発行機関が金融機関であるため、口座への預入れという形で還流してきた電子現金を二重使用チェックすることができる。本方式においても、サービス事業者が金融機関と連携することで、金融機関に預け入れられた電子現金をサービス事業者に還流させて二重使用チェックを行うことも考えられる。

26 こうした対応には、サービス事業者と認証機関による別途の契約とユーザの事前許諾が必要である。

BOX 1 電子現金方式を構成する 6 つのフェーズ

(初期設定)

- ① サービス事業者 I は、額面ごとに秘密鍵と公開鍵のペアを生成し、認証機関から発行された証明書とともに公開鍵を公開する。ここで、 Y 円用の鍵ペアを $(sk_{I(Y)}, pk_{I(Y)})$ とする。
- ② 認証機関 C は、秘密鍵と公開鍵のペアを生成し、自己証明書とともに公開鍵を公開する。認証機関 C の鍵ペアを (sk_C, pk_C) とする。

(ユーザ登録と証明書の発行)

- ① ユーザ U は、証明書発行に必要な本人情報を認証機関 C に提出する。
- ② 認証機関 C は、ユーザ U の本人確認を行い、ユーザ情報を登録する。
- ③ ユーザ U は、秘密鍵と公開鍵のペア (sk_U, pk_U) を生成し、公開鍵 pk_U を認証機関 C に送信する。
- ④ 認証機関 C は、公開鍵 pk_U をユーザ情報に対応付けて管理するとともに、 pk_U に対する証明書 $Cer_U \leftarrow Sign_{sk_C}(pk_U)$ をユーザ U に発行する。 $Sign$ は署名生成関数であり、 $Sign_{sk}(m)$ はメッセージ m に対する秘密鍵 sk によるデジタル署名を表す。証明書は認証機関によるデジタル署名となっていることから、その正当性はデジタル署名の検証処理 $1/0 \leftarrow Verify_{pk_C}(pk_U, Cer_U)$ によって確認される。 $Verify_{pk}(m, \sigma)$ は、メッセージ m に対するデジタル署名 σ の検証式を表し、公開鍵 pk を用いることで、デジタル署名 σ が pk に対応する秘密鍵を用いて生成されたこと、および、メッセージ m が改ざんされていないことを確認できる。 $Verify$ は、 σ が正しい署名であれば 1、そうでなければ 0 を出力する。

(電子現金の発行)

・ サービス事業者 I がユーザ U に Y 円分の電子現金を発行する

- ① サービス事業者 I は、電子現金の発行を希望するユーザ U に公開鍵 pk_U とその証明書 Cer_U を要求し、 Cer_U の正当性を $Verify_{pk_C}(pk_U, Cer_U)$ によって検証する。また、認証機関による CRL を参照し、 pk_U の有効性を確認する。
- ② サービス事業者 I は、ユーザ U が希望する金額分の電子現金を発行する。 SN_i をシリアル・ナンバとするととき²⁷、 Y 円分の電子現金は、 SN_i に対するサ

.....
27 添字の i は、複数の電子現金を扱う場合の通番である。

ービス事業者 I のデジタル署名 $T_i \leftarrow \text{Sign}_{sk_{I(V)}}(SN_i)$ として表される。また、 T_i の移転履歴として、 $\sigma_{i(0)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_{I(V)}}(SN_i \parallel pk_U)$ を生成し、 T_i と $\sigma_{i(0)}$ をユーザ U に送信する。その際、 $(T_i, \sigma_{i(0)})$ の検証に必要となるシリアル・ナンバ SN_i もあわせて送付する。ここで、 $\parallel$ はデータの連結を表し、 $\sigma_{i(n)}$ は T_i の n 回目の移転履歴を表す（発行を 0 回目と数える）。その後、サービス事業者は、シリアル・ナンバ SN_i を発行済電子現金 DB に追加する。

- ③ ユーザ U は、サービス事業者の証明書を検証するとともに、電子現金と移転履歴 $(T_i, \sigma_{i(0)})$ が正しく発行されていることを $\text{Verify}_{pk_{I(V)}}(SN_i, T_i), \text{Verify}_{pk_{I(V)}}(SN_i \parallel pk_U, \sigma_{i(0)})$ によって確認し、いずれの出力も 1 であれば、デバイス内に保存する。

(電子現金の送信)

・ユーザ U がユーザ V に m 枚の電子現金を送信²⁸

- ① ユーザ U は、送金先ユーザ V に公開鍵 pk_V とその証明書 Cer_V を要求し、その正当性を $\text{Verify}_{pk_C}(pk_V, Cer_V)$ によって検証する。
- ② ユーザ U は、電子現金 T_i の移転履歴 $\sigma_{i(n)}$ を更新するに当たり、デジタル署名 $\sigma_{i(n+1)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_U}(\sigma_{i(n)} \parallel pk_V)$ を生成する。 $\sigma_{i(n+1)}$ のメッセージ部分には、 $\sigma_{i(n)}$ とユーザ V の公開鍵 pk_V が含まれる。ユーザ U は、電子現金とその移転履歴 $(T_i, \{\sigma_{i(\ell)}\}_{0 \leq \ell \leq n+1})$ をユーザ V に送付する。その際、これらの検証に必要となるシリアル・ナンバ SN_i 、移転履歴にあるユーザの公開鍵、自身の公開鍵と証明書もあわせて送付する。 m 枚の電子現金を送付するに当たり、これを m セット送付する。
- ③ ユーザ V は、ユーザ U の証明書 Cer_U を $\text{Verify}_{pk_C}(pk_U, Cer_U)$ によって検証するとともに、受け取った電子現金と移転履歴が正しいことを確認し、デバイス内に保存する。電子現金 T_i とその移転履歴 $\{\sigma_{i(\ell)}\}_{0 \leq \ell \leq n+1}$ の正しさとは、
- (1) T_i と $\sigma_{i(0)}$ がいずれも SN_i に対するサービス事業者の署名であること、
 - (2) $0 \leq \ell \leq n-1$ について、 $\sigma_{i(\ell+1)}$ が $\sigma_{i(\ell)}$ とユーザの公開鍵に対する署名であり、その署名者が $\sigma_{i(\ell)}$ のメッセージ部分に含まれる公開鍵に対応するユーザであること、
 - (3) $\sigma_{i(n+1)}$ が $\sigma_{i(n)}$ と自身の公開鍵に対する送金元ユーザ U の署名となっていることをいう。

なお、(1) は、あるユーザの公開鍵 pk に対して、 $1 \leftarrow \text{Verify}_{pk_{I(V)}}(SN_i, T_i)$ と $1 \leftarrow \text{Verify}_{pk_{I(V)}}(SN_i \parallel pk, \sigma_{i(0)})$ 、(2) は、 $0 \leq \ell \leq n-1$ に対し、あるユーザの公開鍵

.....
28 電子現金は額面単位で発行されるため（脚注 21）、送信の際は枚数で数えることとする。

pk について、 $1 \leftarrow \text{Verify}_{pk}(\sigma_{i(\ell+1)} \parallel pk', \sigma_{i(\ell+2)})$ と $1 \leftarrow \text{Verify}_{\tilde{pk}}(\sigma_{i(\ell)} \parallel pk, \sigma_{i(\ell+1)})$ が成り立つことをいう。このとき、 pk' は公開鍵を pk とするユーザが T_i を送付したユーザの公開鍵であり、 $\tilde{pk}$ は公開鍵を pk とするユーザに T_i を送付したユーザの公開鍵である。また、(3) は、 $1 \leftarrow \text{Verify}_{pk_U}(\sigma_{i(n)} \parallel pk_V, \sigma_{i(n+1)})$ が成り立つことを示す。

(電子現金の還収)

- ① ユーザ V は、サービス事業者に電子現金とその移転履歴 $(T_i, \{\sigma_{i(\ell)}\}_{0 \leq \ell \leq n+1})$ 、シリアル・ナンバ SN_i 、移転履歴にあるユーザの公開鍵、自身の公開鍵と証明書を送信する。
- ② サービス事業者 I は、受け取った $(T_i, \{\sigma_{i(\ell)}\}_{0 \leq \ell \leq n+1})$ が正しいものであることを確認する。移転履歴にある公開鍵の有効性については、認証機関による CRL への照会によって確認する。

(電子現金の二重使用チェック)

- ① サービス事業者 I は、発行済電子現金 DB を参照し、還収した電子現金 T_i のシリアル・ナンバ SN_i が DB にあるか否かを確認する。
- ② 発行済電子現金 DB に SN_i があれば、DB から SN_i を削除して、還流してきた電子現金と移転履歴を還収済電子現金 DB に格納する。
- ③ DB にシリアル・ナンバ SN_i がなかった場合には、二重使用されたものと判断し、還収済電子現金 DB から SN_i をシリアル・ナンバとする電子現金と移転履歴を取り出し、両移転履歴から二重使用したユーザの公開鍵を特定する。例えば、同じシリアル・ナンバをもつ2つの移転履歴について、公開鍵 pk_{U_1} に対応するユーザの送信先が、一方が pk_{U_2} 、もう一方が pk_{U_3} となっていれば、同ユーザが電子現金を二重使用したと特定できる。
- ④ サービス事業者は、二重使用したユーザの公開鍵を認証機関に送信し、公開鍵に対応するユーザを特定する。

BOX 2 電子現金の偽造・改ざん対策と複製・二重使用対策

- 電子現金の偽造・改ざん対策（発行機関以外による電子現金の偽造、発行機関以外による電子現金の金額や所有者情報等の改ざんへの対策）：電子

現金 T は、発行機関 I によるシリアル・ナンバ SN に対するデジタル署名 $T \leftarrow \text{Sign}_{sk_I}(SN)$ として表される。デジタル署名技術により、第三者による電子現金の偽造・改ざんを防止することができる。

- **第三者による電子現金の複製対策**（他人がもつ電子現金を複製して使用する不正への対策）：電子現金と所有者の対応付けにより、第三者が電子現金を複製して使用する不正を防止する。つまり、電子現金とセットとなる移転履歴にユーザの公開鍵を改ざん困難な形式で追加することで、同ユーザだけが当該電子現金を使用できるようになっている²⁹。

- **複数ユーザへの電子現金の二重使用対策**（正規所有者が電子現金を複製して使用＜受領した電子現金を複製して、複数ユーザにそれぞれ送信＞する不正への対策）：電子現金を送信する際には、秘密鍵による署名生成が必要であることから、デバイスの耐タンパ性によって不正を防止することが可能である。もっとも、技術進展によりデバイスの耐タンパ性は低下するおそれがあり、そうした事態への備えは必須である（本節（4）を参照）。そのため、サービス事業者が事後的に不正者を特定できるよう、電子現金には、その移転履歴を改ざん困難な形式で付与する。

➤ 例えば、同じシリアル・ナンバ SN_i をもつ電子現金が2つ確認され、それぞれが下記であったとき、 $\sigma_{i(\ell-1)} (= \text{Sign}_{sk_{U_1}}(\sigma_{i(\ell-2)} \parallel pk))$ のメッセージ部分に含まれる公開鍵 pk について、一方が pk_{U_2} 、もう一方が pk_{U_3} となっていれば、 $\sigma_{i(\ell-1)}$ の署名者（公開鍵 pk_{U_1} に対応するユーザ）が2人のユーザに同じ電子現金を送付したことがわかる（ pk_{U_4} と pk_{U_5} は、その後の移転先となったユーザの公開鍵）。

$$\sigma_{i(\ell)} = \text{Sign}_{sk_{U_2}}(\text{Sign}_{sk_{U_1}}(\sigma_{i(\ell-2)} \parallel pk_{U_2}) \parallel pk_{U_4}). \quad (1)$$

$$\sigma_{i(\ell)} = \text{Sign}_{sk_{U_3}}(\text{Sign}_{sk_{U_1}}(\sigma_{i(\ell-2)} \parallel pk_{U_3}) \parallel pk_{U_5}). \quad (2)$$

- **同一ユーザへの電子現金の複製・二重使用対策**（正規所有者あるいは第三者が電子現金を複製して使用＜あるユーザに送信した電子現金を複製して、当該ユーザに再送信＞する不正への対策）：移転履歴にワンタイム性を付与する（時刻情報を入れる等）、あるいは、電子現金の送信処理をチャレンジ・レスポンス方式³⁰ とすることで対応が可能である。

29 攻撃者が電子現金を複製する方法としては、ユーザ間の通信路を盗聴する、あるいは、デバイスから不正に読みだすことが考えられる。

30 検証者が毎回ランダムに生成する値を用いてリプレイ攻撃への対策を講じるもの。リプレイ攻撃と

(4) セキュリティに関する考察

イ. デバイスの耐タンパ性

電子現金方式の安全性は、デジタル署名の安全性に依拠する部分が多いことから、デジタル署名に使用する秘密鍵を安全に管理できるデバイスの利用が前提となる。耐タンパ性を有するデバイスであれば、デバイスの正規所有者であっても内部の秘密鍵を不正に読みだすことが困難であるほか、アプリケーションの改ざんも難しくできることから、電子現金の二重使用を防止することができる。もっとも、悪意のあるユーザが、意図的に耐タンパ性をもたないデバイスを利用して不正を行うことも考えられるため、サービス事業者にはユーザが使用するデバイスの耐タンパ性確認が必要となろう。例えば、ユーザがもつデバイスの耐タンパ性が確認できたときに限り、ユーザ登録を許可するといった運用とすることで、不正を試みるユーザを排除することが考えられる。

もっとも、デバイスのセキュリティ機構に対する攻撃手法の進展に伴い、耐タンパ性は低下する。そのような状況になれば、上記対策を講じていたとしても、電子現金の二重使用を防止できるとは限らない。また、サービス事業者は、デバイスに標準装備されたセキュリティ機能を前提にアプリケーションを構成するが、こうしたセキュリティ機能が期待通りに動作しないケース等においては、アプリケーションのリスク評価と管理を適切に行うことが困難との指摘もある（磯部・宇根[2021]）。このため、電子現金方式では、デバイスの耐タンパ性低下等に備え、電子現金の移転履歴を改ざん困難な形式で電子現金に付与することとし、還流してきた電子現金のシリアル・ナンバをチェックすることによって、ユーザによる二重使用を事後的に検知できるようにしている³¹。

ロ. ユーザとデバイスと鍵の関係

電子現金は、他人による複製使用といった不正を防止するため、電子現金に紐付けられた「秘密鍵」を用いてしか使用（他ユーザへの送信）できないように設計されている。このとき、「ユーザ（人）」と秘密鍵を保管する「デバイス」の関係には以下のパターンが考えられる。

は、通信路を盗聴して得たデータをそのまま利用してなりすましを行う攻撃である。検証者が送信するランダムな値をチャレンジ、それに対する証明者の回答をレスポンスと呼ぶ。

31 電子的に決済を行う方法には、電子マネーに採用されているような、他ユーザから受領した金銭的価値を合算してデバイス内に保管・管理して決済を行う方式（残高管理型と呼ばれる）もある。残高管理型においても、仮に耐タンパ性が低下してしまった場合には、デバイス内のデータを不正に操作することで、金銭的価値を無制限に増やして使用することができてしまう。こうした不正を事後的に検知するには、すべての取引をサーバ側の台帳で管理することが必要となる（祖山[2020]）。

- ケース A：デバイスをもっている者であれば、誰でもデバイス内の電子現金を使用できる（ n 対 1 対応）。
- ケース B：デバイスの正規所有者のみが、デバイス内の電子現金を使用できる（1 対 1 対応）。

ケース A は現金に近い使用方法であり、ユーザビリティも高いように考えられるが、事後的な不正検知、および、電子現金の透明性確保のため、電子現金については、ケース B での使用形態を想定する。ケース B は電子現金を「ユーザ（人）」に紐付けるものであり、当該ユーザだけが同電子現金を使用できるようにするものである。ケース B を実現する方法としては、デバイスの使用者を制限する機能を付す、あるいは、本人だけが秘密鍵を生成できる方法を採用する³² こと等が考えられる。

(5) プライバシ保護と透明性に関する考察

イ. プライバシ保護と透明性のバランス

決済サービスでは、ユーザのプライバシへの配慮が必要との意見がある。例えば、金融調査研究会〔2018〕は、新たな決済手段が受け入れられる条件として、現金と同等の安心・安全な決済手段であることを挙げており、サービス事業者はプライバシおよび個人情報の保護に努めるべきと提言している。

一方、AML/CFT の観点からは、事後的に資金の流れを探索の必要性が生じるケースがあり、そうした場合に備えて追跡可能性を有することが決定的に重要とされている（野田〔2022〕）。現金は追跡可能性をもたないが、現金の保管・流通に物理的制約があることから、マネー・ローンダリング等の媒体になる機会が限定されていた。しかし、電子的な送信・決済手段についてはマネー・ローンダリング等の媒体になるリスクがあることから、事後的な追跡ができるような手当が必要となる。

このように、事業者が決済サービスを提供するに当たっては、プライバシ保護と透明性とのバランスが重要となる。そこで、以下では、他ユーザに対するプライバシ保護とサービス事業者に対するプライバシ保護のそれぞれについて考察を行う。

ロ. 他ユーザに対するプライバシ保護

本節（3）で整理したとおり、電子現金の送受信時には、送金元ユーザと送金先ユーザ間で互いに証明書の検証を行う。そのため、個人を特定可能な情報（氏名、住所等）が証明書に含まれれば、それにより、相手ユーザの特定が可能となつてし

32 例えば、PBI（Public Biometric Infrastructure）（高橋〔2021〕）によって、ユーザの生体情報から、都度、秘密鍵を生成することが考えられる。

まう³³。店舗での支払いでは、相手ユーザの特定が不要であることから、個人を特定しうる情報は証明書に記載しないことが求められよう。

また、電子現金は移転履歴とセットで送受信され、移転履歴には電子現金の所有者であったユーザの公開鍵が含まれる。公開鍵（あるいは証明書）にユーザを特定可能な情報が含まれていなくとも、公開鍵そのものがユーザの ID となって、さまざまな情報を関連付けできてしまう可能性がある。例えば、別途のチャネル（例えば、対面決済）から取引相手ユーザに関する情報を入手できれば、ユーザと公開鍵との対応関係を知ることができ、ユーザが使用した電子現金の相互の関係性を特定できる可能性が生じる。そのため、電子現金の匿名性と関連付け不能性を満たすには、決済の都度、公開鍵を更新することが必要となる（中山ほか [1997]）³⁴。そのほか、ゼロ知識証明と呼ばれる暗号技術を使用することで、証明書そのものを開示することなく、自身が電子現金の正当な所有者であることを証明することも考えられる。ゼロ知識証明を使用したプロトコルについては、4 節で説明する。

ハ． サービス事業者に対するプライバシー保護と透明性

サービス事業者は電子現金の発行時、発行先となるユーザの証明書を検証するが、証明書に本人を特定しうる情報を記載しないといった対応により、認証機関と結託しない限り、サービス事業者に対するプライバシーは確保される。

また、電子現金の取引は、ユーザ間に閉じて実施されることから、サービス事業者がリアルタイムで取引内容を知りうることはない。また、サービス事業者は還収した電子現金の移転履歴を確認しうるが、移転履歴から入手できるのはユーザの公開鍵だけであり、認証機関と結託しない限り、ユーザを特定することはできず、電子現金の匿名性は満たされる。

さらには、認証機関における不正対策を強化する方法として、ユーザ情報の管理を行う機能と証明書の管理・発行を行う機能を分けることが考えられる。これらの機能を分割した場合の証明書発行方式については、補論 1. を参照されたい。なお、還収した電子現金から二重使用したユーザを特定できる性質を維持しつつ、それ以外のユーザに関する情報は何も得られないようにすることは技術的に可能である。こうしたサービス事業者に対するプライバシーを強化した方式については、4 節で考察を行う。

そのほか、本節（5）ロ．で整理したとおり、ユーザの取引相手においては、当

.....
33 ユーザには受信したデータの内容を開示しないようアプリケーションを構成することも考えられる。しかし、多少のスキルがあれば、スマートフォン間で送受信されるデータを複製することは可能であることから、送受信されるデータがユーザのプライバシーに与える影響について検討しておくことは重要である。

34 電子現金の使用を 1 回とすることでユーザのプライバシー保護を図る方法（例えば、Chaum [1983]）も別途存在するが、電子現金に求める転々流通性を満たさない。

該ユーザと公開鍵との対応関係を知りうる可能性がある。そのため、対応関係を知る取引相手と結託することで、サービス事業者は還収した電子現金から当該ユーザの取引を特定することが可能となる。こうした結託が行われた場合においても、電子現金の匿名性と関連付け不能性を満たすには、他ユーザへのプライバシー保護対策と同様、決済の都度、公開鍵を更新することが必要となる。

電子現金に求められる透明性の観点からは、定期的に電子現金の移転履歴を確認することが望ましいことから、移転回数が x 回を超えた場合や発行後 y 期間が経過した場合等にはサービス事業者へ還流するよう設計しておくといったことが一案となろう。こうした対応により、サービス事業者は、電子現金の不審な動向を補足できるようになると考えられる。さらに、高額送金のケースのように、必要な情報をリアルタイムで収集する必要がある場合には、インターネットに接続可能な場合に限り高額送金を許可したうえで、電子現金取引の写しをアプリケーションから自動的にサービス事業者へ送信するといった対応も考えられよう。そのほか、電子現金のブロック・リストを作成することで、不審な履歴をもつ電子現金の流通を制限することも考えられる。これらは電子現金が有するプログラマビリティによって実現することができる。

3. 電子現金方式の実機検証

(1) 過去の実証実験

電子現金方式をベースとした実証実験は、これまでに複数回行われている。いずれも接触型 IC カードに電子現金を格納し、インターネットを経由して店舗や他ユーザに送信する形態の実証実験であった。電子現金は、預金口座からの引落としという形で金融機関から発行され、それをインターネット上の店舗（バーチャル店舗）や実店舗で使うことができるものであった。当時の実証実験は、こうした電子現金が現金に代わる新たな決済手段として機能しうるかを検証したものであり、実サービスの提供に向けた課題抽出を目的として行われた。

・インターネットキャッシュ（1998 年）

「インターネットキャッシュ」の実証実験（1998 年 9 月～2000 年 2 月）は、4 つの金融機関と約 1 万人の一般参加者の協力を得て行われた。IC カードに格納されたインターネットキャッシュは、パソコンに接続されたリーダー・ライターを介して、バーチャル店舗への支払いや他のユーザへの送信に使用可能であった。また、ユー

ザ間では、インターネットキャッシュの転々流通も可能であった。金融機関から発行されたインターネットキャッシュは、預金口座への払戻しも可能とされた（サイバービジネス協議会 [2000]）。

• スーパーキャッシュ（1999 年）

「スーパーキャッシュ」の実証実験（1999 年 4 月～2000 年 5 月）は、24 の金融機関、約 1,000 の店舗、約 2.2 万人の参加者による協力のもと行われた。本実証実験は、市中での利用可能性に焦点を当てたものであったことから、バーチャル店舗に加えて実店舗での支払いも可能とされたほか、IC カードへのチャージには金融機関に設置されたチャージ機や公衆電話を利用することができた。もっとも、店舗で使用されたスーパーキャッシュは、データ・センターに伝送される仕様となっており、転々流通性は検証の対象外とされた（エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社 [2000]）。

インターネットキャッシュとスーパーキャッシュについては、当時行われた実証実験の概要が公表されているものの、電子現金の送受信にかかった時間については記載されていない。しかし、当時の IC カード仕様や通信環境を考慮すれば、ユーザビリティの確保が難しかったと推測される。

（2） 実機検証の概要

上記実証実験から約 25 年が経過し、われわれを取り巻く技術環境は大きく変化した³⁵。そこで、現在の技術レベルを前提に、改めて電子現金のユーザビリティについて検証を行うこととする。今次実機検証では、電子現金方式の実装にかかる検

.....
35 2000 年におけるインターネット利用率は 37.1%であり、電話回線によるダイヤルアップ接続が主流であった。2000 年に商用提供が開始された非対称デジタル加入者線（Asymmetric Digital Subscriber Line: ADSL）の最大通信速度は、下りが 50 メガビット毎秒、上りが 5 メガビット毎秒であった。これに対し、2023 年におけるインターネット利用率は 84.9%となったほか、2020 年に提供が開始された第 5 世代移動通信システム（5G）の最大通信速度は、下りが 4.2 ギガビット毎秒、上りが 218 メガビット毎秒となっており、それぞれ ADSL の 84 倍、約 43 倍となっている。また、1999 年頃に日本電信電話株式会社が開発した高機能用途 IC カードは、中央演算処理装置（Central Processing Unit: CPU）クロック周波数が 15 メガヘルツ、随時書込み読出しメモリ（Random Access Memory: RAM）容量が 2 キロバイト、フラッシュ・メモリ容量が 512 キロバイトであった。一方、現在の一般的なスマートフォンは、CPU クロック周波数が数ギガヘルツのマルチコア構造であり、RAM 容量が数ギガバイト、フラッシュ・メモリ容量が数百ギガバイトとなっているうえ、これらのデバイスの多くには IC カードと同様に耐タンパ性をもつ SE が内蔵されている。2022 年発売のスマートフォン（Google Pixel 7）に採用された eSE である ST54K（ST マイクロエレクトロニクス社製）は、CPU クロック周波数が 100 メガヘルツ、RAM 容量が 64 キロバイト、フラッシュ・メモリ容量が 2,048 キロバイトとなっている。なお、Google Pixel は、Google LLC の商標または登録商標である。

討の端緒として、電子現金の送信処理に焦点を当てる。また、総合的なユーザビリティの評価には、アプリケーションの操作性等も含まれるが、今次検証では、電子現金の送信にかかる時間によってユーザビリティを測ることとする。

イ. 使用する機器のスペック等

電子現金の実装には、秘密鍵等の重要な情報を格納するための耐タンパ・デバイスのほか、電子現金を送受信するための通信機能が必要となる。スマートフォンには、耐タンパ・デバイスである eSE が搭載されているほか³⁶、モバイル・データ通信、Wi-Fi³⁷、Bluetooth³⁸、NFC（Near Field Communication）といった通信機能も具備されていることから、今次検証では、スマートフォンの利用を想定することとした。なお、国内におけるスマートフォンの普及率は 2024 年時点で 97% となっており（NTT ドコモモバイル社会研究所 [2024]）、一般に広く普及したデバイスであるといえる。また、電子現金方式で使用する暗号アルゴリズムは、電子政府推奨暗号である ECDSA（Certicom Research [2000]）を採用した。

ロ. 実機検証の前提条件

（イ） 取引レスポンス時間

電子現金の送信処理にかかる時間（ターンアラウンド時間）とは、立ち上げたアプリケーションのメニュー画面から送信先を選択して送金額を入力し、送金が終了するまでの時間をいう。このうち、「送金」ボタンを押下してから、送金完了画面に推移するまでの時間は、送金元ユーザと送金先ユーザのスマートフォンでの処理時間とデータ通信にかかる時間の和（取引レスポンス時間）となる（図表 3）。具体的には、①移転履歴の更新（署名生成）にかかる時間、②電子現金の通信にかかる時間、③電子現金・移転履歴の検証（署名検証）等にかかる時間の和となる。

（ロ） 署名生成と検証にかかる処理

移転履歴の更新にかかる処理（①）では、まず、送金先ユーザの証明書を検証した後、デジタル署名の生成を行う。送信する電子現金が m 枚であるとき³⁹、送付元ユーザは移転履歴の更新に伴い、 m 回の署名生成処理を実行する必要がある。証明書検証と署名生成にかかる 1 回当たりの処理時間をそれぞれ t_{vs} 、 t_s （秒）とすれば、送信時の処理にかかる時間は $t_{vs} + t_s \cdot m$ （秒）となる。また、電子現金・移転履歴の検証にかかる処理（③）では、送金元ユーザの証明書の検証と移転履歴の検証（デ

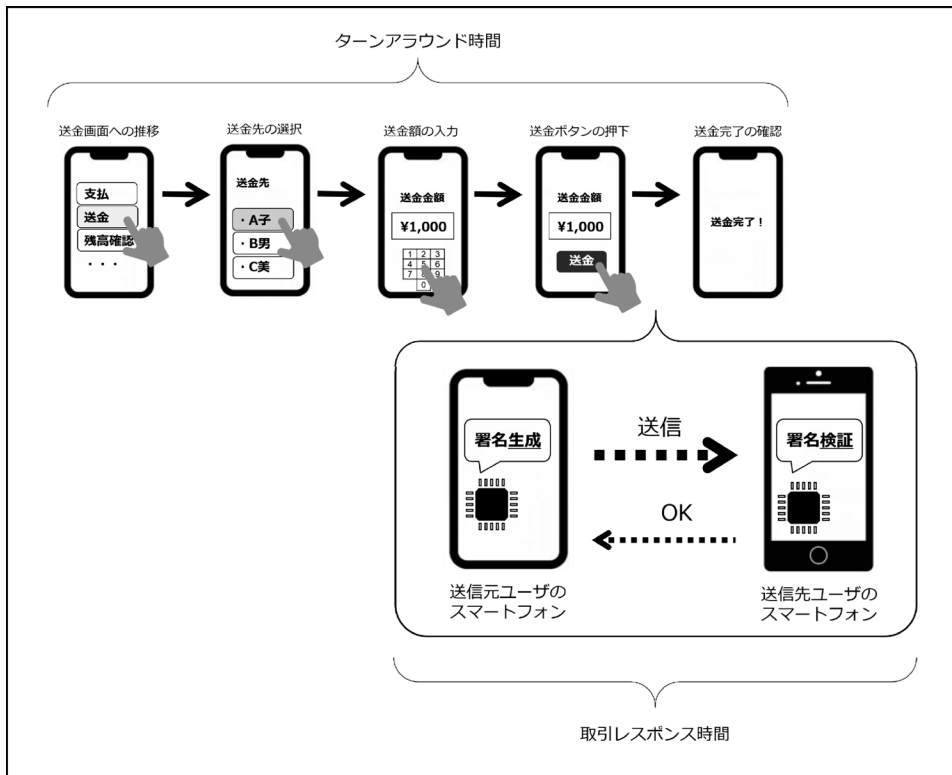
.....
36 2024 年時点では、日本国内で販売されている Android スマートフォンの約 9 割に GP-SE が搭載されている。GP-SE とは、IC カードにかかる技術の標準化を推進する Global Platform による標準仕様に準拠した SE を指す。

37 Wi-Fi は、Wi-Fi Alliance の登録商標である。

38 Bluetooth は、Bluetooth, SIG Inc. の登録商標である。

39 送金金額に応じて、最小枚数で送金するようプログラムされていることを前提とする。

図表 3 電子現金処理にかかる操作



デジタル署名の検証）を行うため、 m 枚の電子現金における発行後の移転回数がそれぞれ n_m であるとき、署名検証にかかる 1 回当たりの処理時間を t_v （秒）とすれば、受信処理にかかる時間は、 $t_{vs} + t_v \cdot \sum_m (n_m + 1)$ （秒）となる。このため、1 取引にかかる①と③の合計時間は、 $2t_{vs} + t_s \cdot m + t_v \cdot \sum_m (n_m + 1)$ （秒）となる。

電子現金方式の実装においては、秘密鍵を必要とする署名生成処理のみを SE 等の耐タンパ・デバイス上で行い、秘密鍵を必要としない署名検証処理等は TEE 等の隔離実行環境で行うといった、ハイブリッドのアーキテクチャとすることが想定される。各実行領域の処理能力を比較すると、隔離実行環境は通常的环境と同等の計算資源が利用できるのに対し、耐タンパ・デバイス（特にスマートフォンに搭載されている eSE）については、利用できる計算資源が少ない⁴⁰ ことに加え、上位レイヤからの呼出しのオーバーヘッドもかかることから、単位時間当たりの演算能力は低い。

.....
40 2024 年時点で市場に流通している eSE のスペック・シートによれば、CPU クロック周波数は 10～100 メガヘルツ・オーダー（シングル・コア）、RAM は 10～100 キロバイト・オーダーであり、通常的环境や隔離実行環境と比較すると演算能力が低い。

デジタル署名については、署名検証に比べて署名生成にかかる処理量が大いことから、耐タンパ・デバイスでは署名生成時間が性能のボトルネックとなる可能性が高い。そのため、以下では、署名生成にかかる時間 (t_s) に焦点を当てて検討を行うこととする。

(ハ) 電子現金の送信にかかる処理

スマートフォンに搭載されている通信機能のうち、近距離通信であれば、災害等によって通信障害が発生したような状況であっても使用することができる。インターネットから遮断された環境でも決済が可能であること（2 節（2）性質⑦）は、電子現金に求められる性質の 1 つでもあることから、今次実機検証では、近距離無線通信技術を使用して電子現金を送信する。なお、対面決済でのユーザビリティが確認できれば、より高速なインターネット通信による決済でのユーザビリティも確保できると考えられる。

現行のスマートフォンには、一般に、Bluetooth、Wi-Fi Direct⁴¹、NFC が標準搭載されている（図表 4 参照）。Bluetooth は、10 メートル程度の近距離の通信規格であり、主にスマートフォンの周辺機器を無線で接続するのに使用されている。Bluetooth には、大容量のデータを高速伝送できる Bluetooth Classic と、低速・超低消費電力を特徴とする Bluetooth LE（Low Energy）がある。Wi-Fi Direct は、無線 LAN ルーターを使うことなく、Wi-Fi 機能が搭載されているパソコンやスマートフォン等の機器同士を無線で直接つなぐための規格である。また、NFC は、非接触 IC カードの通信および機器間相互通信を可能とする、通信距離 10 センチメートル程度の近距離無線通信技術である。

これらを比較すると、NFC は電子マネー決済等に広く使用されている通信技術ではあるが、Bluetooth や Wi-Fi Direct と比較して通信速度が遅い⁴²。また、Bluetooth Classic については、iOS と Android で対応プロファイルが異なり、本稿執筆時点（2024 年 10 月）においてはクロスプラットフォーム⁴³でのアプリケーション間通信が不可となっていることから、異なる機種 of スマートフォン間でも電子現金の送受信を可能とするには、Bluetooth Low Energy と Wi-Fi Direct が候補となりうる。

.....
41 Wi-Fi Direct は、Wi-Fi Alliance の商標または登録商標である。

42 電子現金 1 枚当たりのデータ・サイズを約 4 キロバイトとしたとき、50 枚を送付する際のデータ・サイズは約 200 キロバイト（=1.6 メガビット）となる。NFC の通信帯域は理論上最大でも 424 キロビット毎秒であることから、50 枚の送付では約 3.8 秒かかることになる。

43 異なる複数のオペレーティングシステム（Operating System: OS）上で同じ仕様のアプリケーションを動作させるプログラム。

図表 4 近距離無線通信技術の比較

	近距離無線通信技術			
	Bluetooth Classic	Bluetooth Low Energy	Wi-Fi Direct	NFC
最大通信速度 規格仕様 (毎秒)	3 メガビット (EDR PHY (8DPSK))	2 メガビット (LE 2M PHY)	9.6 ギガビット (Wi-Fi 6)	106キロビット (Type-A/B) 424キロビット (Type-F)
iOS ^{*1} ・ Android ^{*2} 間 接続	不可 ^{*3}	可能	可能 ^{*4}	可能
接続認証	必須	必須ではない	必須	必須ではない
通信データの 暗号化	あり	あり (接続認証 した場合) ^{*5}	あり	なし ^{*6}

備考：*1 iOS は、米国およびその他の国における Cisco Systems, Inc. の商標または登録商標である。

*2 Android は、Google LLC の商標である。

*3 2024 年 6 月時点。

*4 Android 側がグループ・オーナーとなるような設計が必要。

*5 接続認証しない場合であっても、アプリケーション層で暗号化する設計は可能。

*6 アプリケーション層で暗号化する設計は可能。

図表 5 署名生成にかかる時間の比較 (50 回実施した平均時間)

	eSEの種類		
	A社製	B社製 (1)	B社製 (2)
署名生成時間	112ミリ秒	102ミリ秒	35ミリ秒

(3) 実機検証結果

イ. 署名生成にかかる時間

市場に流通している 3 種類の eSE⁴⁴ を対象に、ECDSA による 1 回のデジタル署名生成にかかる時間を評価ボードで計測したところ、A 社製は 112 ミリ秒、B 社製 (1) は 102 ミリ秒、B 社製 (2) は 35 ミリ秒であり、チップ・ベンダやチップ・バージョンによって数値が大きく異なることがわかった (図表 5)。最も高速に署名生成できる B 社製 (2) の eSE を用いた場合、28 枚であれば、理論上 1.0 秒以内にすべての署名生成 (移転履歴の更新) を実行できる計算となる。

.....
44 検証に用いた eSE は、主要なチップ・ベンダ 2 社 (A 社、B 社) の製品である (B 社製 (2) は B 社製 (1) の後継品)。

図表 6 電子現金の送付にかかる時間の比較（50 回実施した平均時間）

		送付サイズ (バイト) *	通信時間（ミリ秒）（接続確立の時間は含まない）	
			Bluetooth Low Energy	Wi-Fi Direct
枚 数	1	3,380	590	2
	50	169,000	5,580	62
	100	338,000	10,700	160

備考：*発行されてからの移転回数を 5 と想定した場合の電子現金と移転履歴のサイズ。電子現金（サービス事業者による署名）のサイズは 580 バイトであり、移転履歴は 560 バイトであることから、合計は $580+560*5=3,380$ バイトとなる。なお、実機検証に当たっては以下のようにサイズを見積もり、テスト・データを作成した。電子現金に関するデータ：580 バイト＝署名サイズ 96 バイト＋メッセージ・サイズ 484 バイト（公開鍵、シリアル・ナンバ等）、移転履歴に関するデータ：560 バイト＝署名サイズ 96 バイト＋メッセージ・サイズ 464 バイト（公開鍵等）。

一方、より多くの電子現金を一度に送付するニーズもありうる。4 節（1）で整理する方式は、署名対象となるメッセージを葉としたマークル木を作成し、そのルート値（ルート・ハッシュ）に対して署名を付与するものであり、送付枚数が何枚であっても、移転履歴の更新にかかる署名生成の回数を 1 回にすることができる。B 社製（2）の eSE の場合、送付する電子現金の枚数に関係なく、その署名生成時間は 35 ミリ秒となる。

ロ. 電子現金送信にかかる時間

実機検証では、Android スマートフォンを使用して、Bluetooth Low Energy と Wi-Fi Direct それぞれについて電子現金の送付にかかる時間の測定を行った。具体的には、送信する電子現金の枚数を 1 枚、50 枚、100 枚としたときの通信時間（接続確立にかかる時間は含まない）を計測した。

測定の結果、100 枚を送信するケースでは、Bluetooth Low Energy では 10.7 秒（10,700 ミリ秒）かかったのに対し、Wi-Fi Direct ではわずか 0.16 秒（160 ミリ秒）で送付でき、Wi-Fi Direct の方が高速に電子現金を送付できることが確認できた。このため、電子現金を送付する際は Wi-Fi Direct の方が効率的であると評価できる（図表 6 参照）。

ハ. 取引レスポンス時間

B 社製（2）の eSE を用いた場合、マークル木を用いた効率化を図ることで、電子現金を 100 枚送付する場合であっても、署名生成にかかる処理時間を 35 ミリ秒とすることができる。仮に、送金先における署名検証に同程度の時間がかかったとしても、送金元と送金先におけるアプリケーションの総処理時間は約 70 ミリ秒に留まる。送金元から送金先へは、Wi-Fi Direct であれば 160 ミリ秒で送信可能であることから、電子現金 100 枚の送信にかかる取引レスポンス時間は約 230 ミリ秒

(0.23 秒) と概算できる。

取引レスポンス時間については、1.0 秒以内が望ましいとする研究成果があるほか (Nielsen [2010])、クレジットカードのタッチ決済 (0.5 秒、Visa [2014]) や交通系電子マネー決済 (0.2 秒、大槻 [2011]) と比べても、0.23 秒であれば、十分なユーザビリティを確保可能と評価することができよう。もっとも、タッチ決済等とは異なり、電子現金の場合にはスマートフォン操作が必要であるほか、Wi-Fi Direct では都度の接続認証と通信データの暗号化が行われるため、それらにかかる時間について別途検討が必要である。

4. 電子現金方式の効率化に向けた検討

本節では、電子現金の送受信時に行われる処理と電子現金の還収における処理の効率化に向けた検討を行う。具体的には、複数枚の電子現金を送信する際に移転履歴の更新を一度にまとめて処理する方法と、還収時にサービス事業者が実施する電子現金と移転履歴の検証処理について、同じ署名者によるデジタル署名をまとめて効率的に検証する方法である。

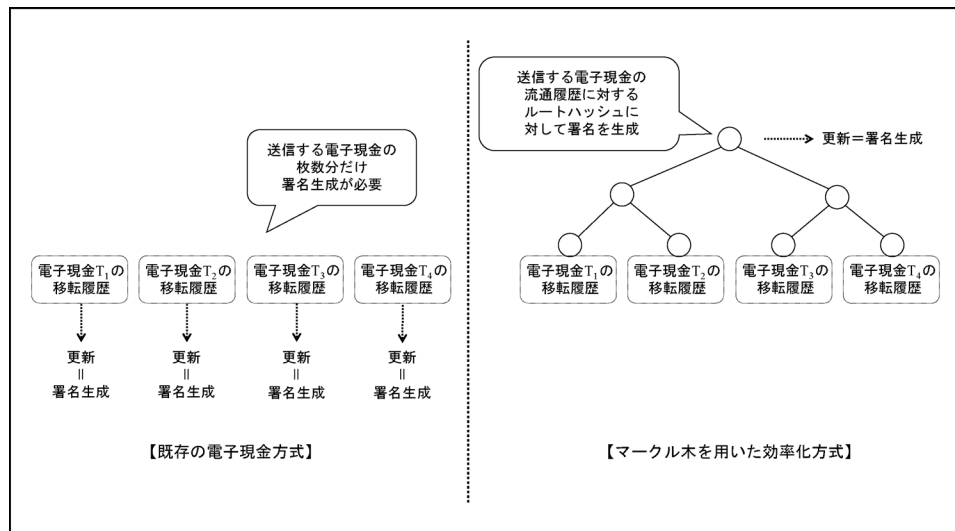
また、2 節で整理した電子現金方式では、送金額と同額の電子現金をもち合わせていない場合、釣銭を受け取る必要があった。つまり、固定額面の電子現金方式では、1 回の決済に 2 回の送金処理が必要となるケースが多い。そこで、本節では、効率化手法の 1 つとして、所有する電子現金を柔軟に分割・集約して送信することが可能な変動額面方式について考察を行う (2 節 (2) 性質②)。なお、変動額面方式の実現方法については、これまでも研究されてきているが (例えば、Okamoto and Ohta [1992])、ここでの変動額面方式は、既存方法とは異なり、デジタル署名アルゴリズム (例えば、ECDSA や EdDSA⁴⁵) を部品として使用可能な構成となっている。そのため、任意の署名アルゴリズムを使用でき、例えば、暗号移行問題にも比較的柔軟に対応できる可能性がある⁴⁶。

さらに、2 節の電子現金方式では、関連付け不能性を満たすために、ユーザは、取引の都度、公開鍵を更新する必要があった。本節では、こうした公開鍵の更新にかかる処理の効率化を企図して、ゼロ知識証明を利用することで、電子現金の関連付け不能性を充足する方法の提案を行う。

.....
45 電子政府推奨暗号の 1 つ。Edward 曲線を用いたデジタル署名方式である。

46 もっとも、耐量子計算機暗号のように、署名サイズが大幅に変更される場合には、通信プロトコルにおけるメッセージ・サイズの変更等が必要となることには留意が必要である。金融分野では、耐量子計算機暗号への移行に関する検討も進んでおり (宇根 [2023])、将来の暗号移行への対応も意識した構成としておくことは重要であると考えられる。

図表 7 マークル木を用いた効率化方式



(1) 電子現金の送受信にかかる効率化

まずは、ユーザビリティ向上の観点から、電子現金の送信にかかる処理の効率化について検討を行う。2節の電子現金方式では、送付する電子現金の枚数分だけ移転履歴の更新が必要であった。移転履歴には改ざん困難となるようにデジタル署名を付与する必要があるため、電子現金の枚数に比例して電子現金の送付にかかる処理時間が長くなる。

そこで、以下では、マークル木を用いることでデジタル署名生成を効率化するプロトコルを紹介する。マークル木とは、すべての葉ノードにデータのハッシュ値がラベル付けされ、内部ノードに、その子ノードのラベルのハッシュ値がラベル付けされている木構造をいう。マークル木を用いた効率化手法では、送付する電子現金の移転履歴からなるマークル木のルート値（ルート・ハッシュ）に対して署名を付与させる。そのため、送付枚数が何枚であっても、署名生成の回数を1回にすることができる（図表 7 参照）。

ユーザ U からユーザ V への送信時における処理の概要は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、送付先ユーザ V に証明書 Cer_V を要求し、その正当性を検証する。
- ② ユーザ U は、シリアル・ナンバを SN_i とする m 枚の電子現金 $\{T_i\}_{1 \leq i \leq m}$ の送信に当たり、移転履歴 $\{\sigma_{i(\ell)}\}_{1 \leq i \leq m, 0 \leq \ell \leq n_i}$ について、 $h_i \leftarrow H(\sigma_{i(n_i)})$ ($1 \leq i \leq m$) を求める。 n_i は電子現金 T_i が移転してきた回数であり、 $\sigma_{i(\ell)}$ は T_i の ℓ 回目の移転履歴を表す。なお、 T_i の発行時に付与される移転履歴は $\sigma_{i(0)}$ である。さらに、 $\{h_i\}_{1 \leq i \leq m}$

を葉ノードとしたマークル木 L とルート値 h を求める（マークル木の作成方法については補論 2. (1) を参照）。

- ③ ユーザ U は、電子現金の移転履歴を更新するに当たり、 h とユーザ V の公開鍵 pk_V に対してデジタル署名 $\sigma \leftarrow \text{Sign}_{sk_U}(h \parallel pk_V)$ を生成する。なお、 sk_U は、ユーザ U の秘密鍵である。
- ④ ユーザ U は、ユーザ V に移転履歴を付与した電子現金を送付する。送付するデータは、 $\{SN_i, T_i, \sigma, \sigma_{i(\ell)}\}_{1 \leq i \leq m, 0 \leq \ell \leq n_i}$ と移転履歴にあるユーザの公開鍵となる。
- ⑤ ユーザ V は、受け取った電子現金が正しく送付されたものであることをデジタル署名の検証によって確認し、デバイス内に保存する。

これにより、電子現金を受領したユーザ V においても、ユーザ U が更新した移転履歴の検証に当たり、これまで電子現金の枚数分だけ必要であった署名検証処理を 1 回にすることができる。ただし、それ以前の移転履歴 $\sigma_{i(\ell)} (0 \leq \ell \leq n_i)$ については、従来と同様の検証が必要である。本プロトコルの詳細については補論 3. を参照されたい。

(2) 電子現金の還収にかかる効率化

還収時、サービス事業者は、すべての電子現金について、発行以降のすべての移転履歴が正しく生成されていることを確認する。つまり、発行以降に移転した回数が n 回であった場合、移転履歴には $n + 1$ 個のデジタル署名が連鎖しているため、それらすべての検証を行う必要がある。還収される電子現金の枚数が多くなれば、サービス事業者における処理量もそれに比例して増加する。

署名方式 EdDSA では、同じ署名者による複数の署名検証式を線形結合することで署名検証時に必要となる楕円曲線上の掛け算の回数を減らすことができる (Bernstein *et al.* [2012]、藤崎 [2020])。還収した移転履歴について、金融機関や小売店といった大口ユーザの署名をまとめることができれば、移転履歴の検証にかかる処理量の削減が期待できる⁴⁷。EdDSA の詳しいアルゴリズムについては、補論 2. (2) を参照されたい。

.....
47 一般的なノート PC を利用して、同じ署名者による複数の署名にバッチ処理を適用した署名検証処理とバッチ処理を適用しなかった署名検証処理を比較したところ、バッチ処理を適用した場合の実行時間は、適用しなかった場合の約 45% となった (100 万回実施したときの平均値)。

(3) 変動額面方式に関する考察

2 節で整理した電子現金方式は額面が設定されているため、電子現金を分割して支払うということができない。それに対して、以下では、最小単位（例えば、1 円）を葉にもつ木構造で任意の金額を表すことができるようにするほか、柔軟な金額の分割も可能とする方法について考察する。具体的には、1 円を葉に見立てた N 分木 ($N \geq 2$) を作成し、サービス事業者は N 分木（のルート値）へのデジタル署名として電子現金を発行する。その後、ユーザが電子現金の一部を送金したい場合には、送金したい金額に該当する部分木を作成し、その部分木（のルート値）への署名を電子現金として送金する⁴⁸。このように、本方式では、移転履歴だけではなく、電子現金についても送受信の都度更新されることになる。なお、本節（1）で紹介したマークル木を用いた方法によって、分割された電子現金を再度集約して送信することも可能である。

以下では、 $N = 2$ とした場合について、具体的な事例を用いて電子現金の発行と電子現金の送信にかかるプロトコルを紹介する⁴⁹。

イ. 電子現金の発行

サービス事業者がユーザ U に 6 円分の電子現金を発行する際の手順は以下のとおりである。

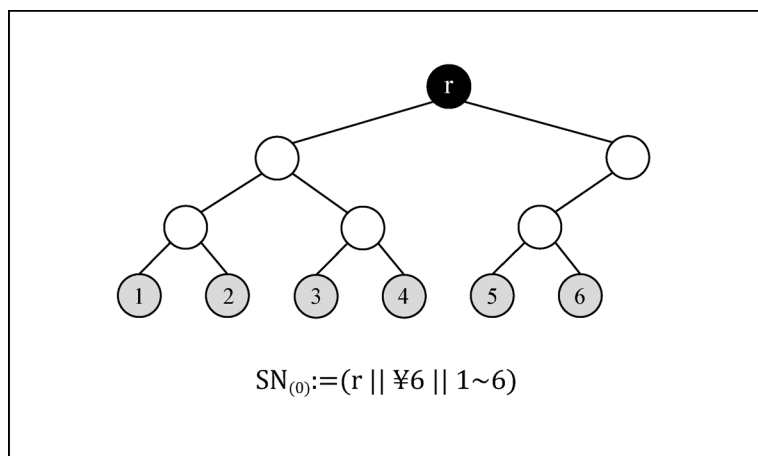
- ① サービス事業者は、秘密鍵と公開鍵のペア (sk_I, pk_I) を生成し、認証機関から発行された証明書とともに公開鍵を公開する。
- ② サービス事業者は、6 円を表すために深さ $3 = (\lceil \log_2 6 \rceil)$ の 2 分木を生成し、葉にラベルを振る。ラベルは 2 分木における葉の位置を示すものであり、左から順番に $1, 2, 3, \dots$ とする。
- ③ サービス事業者は、乱数 r を生成し、2 分木のルートに値 r を割り当てる。
- ④ サービス事業者は、6 円を示す電子現金のシリアル・ナンバ $SN_{(0)} := (r \parallel \text{¥}6 \parallel 1 \sim 6)$ を生成する⁵⁰。シリアル・ナンバ $SN_{(m)} := (r \parallel \text{amount} \parallel \text{left} \sim \text{right})$ は、電子現金の木構造を一意に特定できるデータとなっており、ルートに割り当てた乱数 r 、

.....
48 変動額面方式を実現する方法としては、ビットコインにおけるトランザクションのように、署名のメッセージ部分に金額情報を付与することが考えられる。これに対し、本プロトコルは金額数字ではなく、1 円単位の電子現金を区別できる形で送付するものであることから、二重使用された電子現金が混在してしまった場合であっても、どの電子現金が二重使用されたものかを特定することが可能という特徴をもつ。なお、実際のビットコインは台帳方式であり、二重使用チェックが速やかに実施されることから、二重使用されたビットコインが移転先で混在する可能性は低い。

49 サービス事業者による電子現金の二重使用検知プロトコルについては割愛しているが、既存方式と同様、サービス事業者は還収した電子現金をすべて保存しておき、重複がないかの確認を行う。

50 一般化する場合には、乱数 r_i に対して、シリアル・ナンバ $SN_{i(0)} := (r_i \parallel \text{¥}6 \parallel 1 \sim 6)$ となる。

図表 8 変動額面方式における電子現金のシリアル・ナンバの作り方（2 分木で 6 円を構成する場合）



金額（*amount*）、6 円の葉の場所を指定する情報（最も左にある葉のラベル<left>から最も右にある葉のラベル<right>）で構成される（図表 8 参照）。また、 n は発行後に電子現金がユーザ間を移転した回数である。

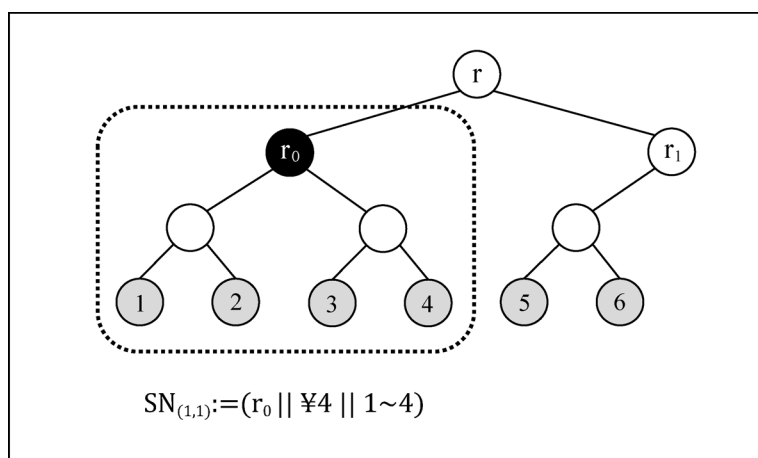
- ⑤ サービス事業者は、6 円を表す電子現金 $T_{(0)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_l}(SN_{(0)} || ¥6)$ とその移転履歴 $\sigma_{(0)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_l}(SN_{(0)} || ¥6 || pk_U)$ を生成し、 $(SN_{(0)}, T_{(0)}, \sigma_{(0)})$ をユーザ U に送信する。電子現金は、シリアル・ナンバ（ $SN_{(0)}$ ）と金額（¥6）に対するデジタル署名であり、移転履歴は、それらに発行先ユーザの公開鍵（ pk_U ）を加えて生成される。
- ⑥ サービス事業者は、発行した電子現金（ $T_{(0)}$ ）を発行済電子現金 DB に登録する。その際、 r をインデックスとして $T_{(0)}$ を検索できるようにしておく。
- ⑦ ユーザ U は、受領した $(T_{(0)}, \sigma_{(0)})$ の正当性について、下記を検証する。
 - $T_{(0)}$ と $\sigma_{(0)}$ がどちらも同じシリアル・ナンバ（ $SN_{(0)}$ ）に対するサービス事業者の署名であること、
 - $SN_{(0)}$ が発行金額に対して正しい構成となっていること、
 - $\sigma_{(0)}$ が自身の公開鍵 pk_U に対するサービス事業者の署名であること。

ロ. 電子現金の送信

ユーザ U がサービス事業者から発行された 6 円の電子現金のうち 4 円をユーザ V に送信する際の手順は以下のとおりである⁵¹。

.....
51 6 円のうち 5 円を送る場合等、送信する金額分の葉で構成される木が木全体となるケースもある。そうした場合には、 G による疑似生成乱数は不要であり、ステップ②で生成するシリアル・ナンバの第 1 要素は木のルート値 r となる。

図表 9 変動額面方式における電子現金の分割方法（6 円のうち 4 円を分割して送金）



- ① ユーザ U は、 $T_{(0)}$ のシリアル・ナンバ $SN_{(0)}$ が示す 2 分木を作成し、ユーザ V に送信する 4 円分の電子現金（ラベルは 1～4）を葉とする部分木のルートに対し、 $r_0 \parallel r_1 \leftarrow G(r)$ によって計算した r_0 を割り当てる⁵²。ここで、 G は m ビットから $2m$ ビットの疑似乱数を生成するシステムに共通の関数とする。
- ② ユーザ U は、送信する電子現金のシリアル・ナンバ $SN_{(1,1)} \leftarrow (r_0 \parallel ¥4 \parallel 1 \sim 4)$ を生成する。このとき、 $SN_{(n,k)}$ は、 $T_{(n-1,x)}$ ($x \geq k$) を分割して生成した k 個目の電子現金に付与されるシリアル・ナンバである（図表 9 参照）。さらに、電子現金と移転履歴をそれぞれ更新するため、送金先ユーザの公開鍵 pk_V に対し、 $T_{(1,1)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_U}(T_{(0)} \parallel SN_{(1,1)} \parallel ¥4)$ と $\sigma_{(1,1)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_U}(\sigma_{(0)} \parallel SN_{(1,1)} \parallel ¥4 \parallel pk_V)$ を生成し、 $(SN_{(1,1)}, T_{(1,1)}, \sigma_{(1,1)}, SN_{(0)}, T_{(0)}, \sigma_{(0)})$ を公開鍵 pk_U とその証明書とともにユーザ V に送信する。ユーザによる署名のメッセージ部分には、分割前の電子現金 $T_{(0)}$ と移転履歴 $\sigma_{(0)}$ がそれぞれ含まれ、移転とともに署名が連鎖する構成となっている。また、同一ユーザへの電子現金の複製対策として、移転履歴にワンタイム性を付与する、あるいは、チャレンジ・レスポンス方式を採用するものとする。
- ③ ユーザ U は、 $T_{(0)}$ のうちラベル 5～6 が未使用である情報とともに $(T_{(0)}, \sigma_{(0)})$ をデバイスに保存する。
 - 残りの 2 円のすべて、あるいはその一部を送信する際には、 $(T_{(0)}, \sigma_{(0)})$ を元
 に送信する電子現金とその移転履歴をステップ②と同様の手順で作成する。
- ④ ユーザ V は、受領した $(SN_{(1,1)}, T_{(1,1)}, \sigma_{(1,1)}, SN_{(0)}, T_{(0)}, \sigma_{(0)})$ の正当性について、下

.....
⁵² $G(r)$ によって生成した r_1 は、ラベル 5～6 を葉とする部分木を送付する際に使用する。

記を確認する。

- $SN_{(1,1)}$ が正しく生成されていること、
 - $SN_{(0)}$ の第 1 要素である r に対して、 $x \leftarrow G(r)$ としたとき、 x の上位 m ビットが $SN_{(1,1)}$ の要素となっていること、
- $T_{(1,1)}$ と $\sigma_{(1,1)}$ が正しく生成されていること、
 - $T_{(1,1)}$ と $\sigma_{(1,1)}$ が送金元ユーザ U の署名であること、
 - $\sigma_{(1,1)}$ が自身の公開鍵 pk_U に対する署名となっていること、
- $T_{(0)}$ と $\sigma_{(0)}$ が正しく生成されていること、
 - どちらも同じシリアル・ナンバ ($SN_{(0)}$) に対するサービス事業者の署名であること、
- $\sigma_{(0)}$ のメッセージに ($\sigma_{(1,1)}$ の署名者の) 公開鍵 pk_U が含まれていること。

(4) プライバシを強化した電子現金方式

2 節で整理したとおり、電子現金における関連付け不能性を充足させるには、電子現金の送受信の都度、公開鍵を変更することが必要となる。ただし、高頻度で公開鍵を更新すれば、認証機関側における証明書の発行・管理コストが膨大となるほか、それに伴う処理の遅延等によりユーザビリティも低下する。そこで、以下では、認証機関におけるユーザの証明書発行・管理コストを増加させることなくユーザのプライバシを強化可能とする方法について考察を行う⁵³。ただし、本方式は、ゼロ知識証明を使用することから、電子現金の送受信にかかる処理・通信コストが相対的に大きくなる。本方式を実行するには、ユーザが使用するデバイスの性能および通信速度の向上が要件となることには留意が必要である。

プライバシを強化した電子現金方式について、プライバシ保護の関連から考慮すべき要件は以下の 3 つである。

要件①：同一ユーザが使用した電子現金の相互の関係性が特定困難であること（関連付け不能性）。

- 複数の電子現金の移転履歴に同一の公開鍵が含まれていた場合、同公開鍵に該当するユーザの取引に関する情報（例えば、購買履歴）が漏洩する可能性がある。

要件②：電子現金の匿名性と関連付け不能性が充足した状況においても、電子現金の受領者は、同電子現金取引が認証機関に登録された正当なユーザによって行われたことが確認できること。

.....
53 本節で考察を行う方式は、本節（3）における変動額面方式には対応していないため、変動額面方式のプライバシ強化については別途検討が必要である。

- 従来は、認証機関によって発行された証明書の検証によって、同取引が正当なユーザによって行われたことが確認可能であった。プライバシーを強化した方式においても、同様の性質が求められる。

要件③：電子現金の匿名性と関連付け不能性が充足した状況においても、サービス事業者は電子現金の二重使用を行ったユーザを特定できること。

- 従来の電子現金方式と同様、不正者を特定できる機能は必須である。

プライバシーを強化した方式では、認証機関に登録する公開鍵とは別に取引用公開鍵を用意するほか、取引用公開鍵を取引の都度更新できるようにすることで、サービス事業者や他のユーザに対するプライバシーの保護を図る（要件①）。また、認証機関から発行された証明書と電子現金取引に用いる取引用公開鍵を対応付け、それらの関係を証明することで、ユーザが認証機関に登録された正しい鍵を用いて取引を行っていることを確認できるようにする（要件②）。さらに、基本方式と同様、プライバシー保護を強化した方法においても、ゼロ知識証明の性質を利用して、二重使用された電子現金からユーザを特定できるようにする（要件③）。

本方式では、電子現金の送信元ユーザと送信先ユーザの間で、 Σ プロトコルと呼ばれるゼロ知識証明（補論 3. (1) 参照）を非対話形式としたプロトコルを実行する。 Σ プロトコルでは、証明者が秘密にしている情報がある条件を満たしていることについて、同情報を一切明かすことなく検証者に示すことができる。本方式では、要件②を充足するため、電子現金の送信元ユーザを証明者、送金先ユーザを検証者とした Σ プロトコルを用いる。

非対話形式の場合、証明者は、コミットメント、チャレンジ、レスポンスと呼ばれる 3 種類のデータを生成して検証者に送信する。このとき、同一のコミットメントに対して、2 つの異なるチャレンジとレスポンスが存在した場合には、証明者が秘密にしている情報が露呈される性質がある。本方式では、この性質を利用して、電子現金を二重使用したユーザを特定できるようにする。具体的には、ユーザが生成するコミットメントを改ざん困難な形式でデジタル署名（電子現金の移転履歴）に埋め込ませることで、二重使用の場合であっても、コミットメントは同一となるように構成する。そのため、コミットメントについては、電子現金を送信するタイミングではなく、当該電子現金を受領するタイミングで生成させる。なお、本方式においても、プリミティブな電子現金方式と同様、電子現金 T と電子現金の移転履歴 σ がセットとして送受信される。

本方式においては、上述要件①～③を下記の方法で充足する。

- i 回目の取引に使用する取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ の生成はユーザが行い、取引の都度、ユーザが取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ の更新を行う。
- ユーザは、認証機関から公開鍵 pk に対する証明書 Cer の発行を受ける。また、

取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ には秘密鍵 sk を用いて自己署名証明書 $Cer_{(i)}$ を生成する。そのうえで、証明書 Cer と自己証明書 $Cer_{(i)}$ がともに同じ公開鍵に対応するものであることの証明によって、 $pk_{(i)}$ による取引が、サービス事業者に登録された正規ユーザによって行われたものであることを示す。また、ゼロ知識証明を利用することで、公開鍵 pk や証明書 Cer を秘匿できるため、サービス事業者に対する匿名性が満たされる。

- サービス事業者は、ゼロ知識証明の特性を利用することで、二重使用された電子現金から、不正を行ったユーザの公開鍵 pk を特定する。

具体的な手順の概要はイ. ～ニ. のとおりである。なお、プロトコルの詳細については補論 3. (2) ハ. を参照されたい。

本方式では、二重使用を行わない限り、ユーザの公開鍵がサービス事業者に知られることはない⁵⁴。そのため、AML/CFT の観点からは、例えば、高額取引の場合等においては、アプリケーション上で強制的に電子現金を二重使用した形をとらせることで、サービス事業者がユーザを特定できるようにする方法が考えられる（大塚 [2022]）。

イ. 初期設定

認証機関とユーザは暗号処理に使用する鍵ペアと証明書を以下の手順で用意する。

- ① 認証機関は、秘密鍵と公開鍵のペア (sk_C, pk_C) を生成し、自己証明書とともに公開する。
- ② ユーザ U は、鍵ペア (sk_U, pk_U) を生成し、 pk_U を認証機関に送信する。
- ③ 認証機関は、公開鍵 pk_U に対する証明書 Cer_U をユーザ U に発行する。

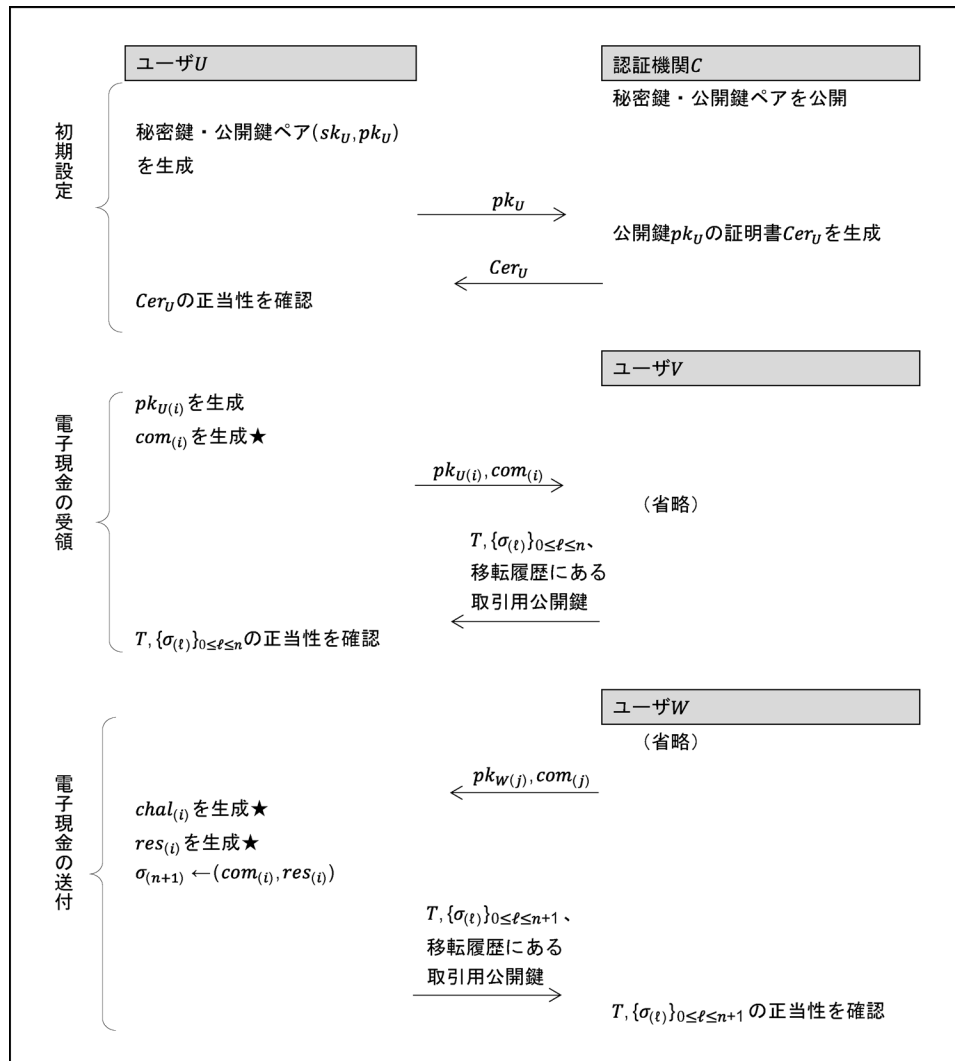
ロ. 電子現金の受領

ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受領する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、ランダムに取引用公開鍵 $pk_{U(i)}$ を生成する。 i は、ユーザ U の取引 ID である。
- ② ユーザ U は、 sk_U を用いて取引用公開鍵 $pk_{U(i)}$ の自己証明書 $Cer_{U(i)}$ を作成する。
 - 公開鍵 $pk_{U(i)}$ は、ユーザ V から受領する電子現金の取引用として生成するものである。
- ③ ユーザ U は、ユーザ V からの依頼を受け、電子現金 T に使用する取引用公開鍵

.....
54 本方式では、サービス事業者であっても還収した電子現金の移転履歴からユーザの公開鍵を知ることは困難となっている。そのため、認証機関ではなく、サービス事業者がユーザ登録業務を行い、ユーザ情報を管理していたとしても、電子現金の匿名性や関連付け不能性を充足することが可能である。

図表 10 プライバシを強化した電子現金の送受信プロトコル



備考：★は、ユーザ U がユーザ V に送信する際に実行する Σ プロトコルで使用するコミットメント、チャレンジ、レスポンスである。

$pk_{U(i)}$ と、コミットメント $com_{(i)}$ を送信する⁵⁵。

➤ ユーザ U が生成する $com_{(i)}$ は、後に電子現金をユーザ W に送信する際に実

.....
55 x のコミットメントとは、ユーザ U からユーザ V にコミットメントを送信したとき、ユーザ V がコミットメントから x の値を知ることが困難であるほか、ユーザ U はコミットメントの送信後に x の値を変更できないように生成されたデータをいう。また、コミットメントを計算するための関数をコミットメント関数と呼ぶ。

行する Σ プロトコル⁵⁶ で用いるものであるが、電子現金の二重使用者を特定できるようにするため、このタイミングで生成してユーザ V に送信する。

- ④ ユーザ U は、電子現金 T とその移転履歴 $\{\sigma_{(t)}\}_{0 \leq t \leq n}$ 、および、移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵をユーザ V から受け取る。
 - $\sigma_{(n)}$ は、ユーザ V による Σ プロトコル⁵⁷ でのコミットメント $com_{(k)}$ とレスポンス $res_{(k)}$ のセットである。 n は、電子現金 T が移転した回数である。
- ⑤ ユーザ U は、 T と $\{\sigma_{(t)}\}_{0 \leq t \leq n}$ の正しさを確認できれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。 m 枚の電子現金を送付する場合には、これを m 枚分行う。

ハ. 電子現金の送付

ユーザ U がユーザ V から受領した電子現金 T をユーザ W に送付する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、ユーザ W に対して、取引用公開鍵 $pk_{W(j)}$ とコミットメント $com_{(j)}$ を要求する。 j は、ユーザ W の取引 ID である。
- ② ユーザ U は、 $pk_{U(i)}$ を開示し、チャレンジ $chal_{(i)}$ とレスポンス $res_{(i)}$ を生成する。なお、先に生成した $com_{(i)}$ および、 $(chal_{(i)}, res_{(i)})$ を用いた以下の証明により、自分が認証機関に登録した正当なユーザであること（認証機関に登録した公開鍵に対応する秘密鍵を保持すること）を示すことができる。このとき、 $pk_{U(i)}$ は開示するが、自己証明書 $Cer_{U(i)}$ のほか公開鍵 pk_U や証明書 Cer_U は開示しない。
 - $pk_{U(i)}$ に対する自己証明書 ($Cer_{U(i)}$) を保持しているほか、自己証明書 ($Cer_{U(i)}$) の生成に用いた秘密鍵に対応する公開鍵 (pk_U) を保持していること、
 - 上記の公開鍵 (pk_U) に対して発行された証明書 (Cer_U) を保持していること、
 - $(pk_{W(j)}, com_{(j)}, com_{(i)}, T)$ が改ざんされていないこと。
- ③ ユーザ U は、 $\sigma_{(n+1)} = (com_{(i)}, res_{(i)})$ を生成し、ユーザ W に $(T, \{\sigma_{(t)}\}_{0 \leq t \leq n+1})$ 、および、移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を送る。
- ④ ユーザ W は、 T と $\{\sigma_{(t)}\}_{0 \leq t \leq n+1}$ の正しさを確認できれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。電子現金を m 枚受領した場合には、これを m 枚分行う。

二. 二重使用の検知

サービス事業者は、還流してきた電子現金のシリアル・ナンバーが、発行済電子現金 DB になれば、二重使用されたものと判断し、 Σ プロトコルの性質を利用して、二重使用者の公開鍵を求め、認証機関に照会することで該当するユーザを特定する。

.....
56 証明者をユーザ U 、検証者をユーザ W とする Σ プロトコル。

57 証明者をユーザ V 、検証者をユーザ U とする Σ プロトコル。

5. おわりに

本稿では、台帳を使用しない決済方式である電子現金に焦点を当て、改めてその特徴を整理するとともに、現在広く普及しているデバイスを前提に実機検証を行った。1990年代に実施された実証実験では、ICカードの性能や通信環境に大きな制約があったことから、ユーザビリティの確保が難しかったと想定される。これに対し、スマートフォンの使用を前提とした今次検証では、100枚の電子現金の送付であっても、理論上、既存の非接触ICカード型決済と同程度の時間で取引が可能であると示すことができた。ただし、今次検証は、取引レスポンス時間の計測を行ったものであり、実際にはアプリケーションの操作やスマートフォン同士の接続にかかる時間の考慮も必要となることには留意が必要である。もっとも、こうした評価は電子現金の送受信処理に限定したものであることから、別途検討すべき課題は少なくない。例えば、今次検討では、サービス事業者に対するプライバシー保護の観点から、ユーザの本人確認および証明書発行業務を担う独立した機関を想定したが、社会実装に向けては、現行法に照らした検討も必要である。また、AML/CFT対応についても、本稿では電子現金の事後的な追跡可能性に焦点を当てて検討を行ったが、そのほかの方法による対応可能性についても検討が望まれる。

本稿では、将来に向けた検討として、電子現金を任意の金額に分割・集約可能な方式についても考察を行った。本方式であれば、釣銭や両替にかかる取引が不要になることから、ユーザビリティの向上が期待できる。また、本稿で提案した方式は、単位金額当たりの電子現金を独立に取り扱う方式であることから、分割・集約時に金額数字を合算する方法とは異なり、仮に二重使用された電子現金が混在してしまった場合でも、二重使用された電子現金の追跡が可能となっている。こうした変動額面の方式については、今後、安全性評価についてより詳細な検討を進めるほか、実機検証も行っていく予定としている。

さらに、プライバシーを強化可能とするプロトコルについても考察を行った。本プロトコルでは、サービス事業者であっても、還収した電子現金からユーザの取引に関する情報を入手困難にすることができる。もっとも、ゼロ知識証明による処理は、通常のデジタル署名より計算コストや署名サイズが大きくなることから、その実装にはデバイスの性能や通信速度の向上が必須要件となる。そのため、現時点では机上での検討にとどまるが、将来に向けた検討としては有益であろう。

情報通信技術の発展は著しく、デバイスやネットワーク形態の変化に伴い、われわれの生活スタイルも変化していくことが見込まれる。今後は、実機検証を通して、電子現金の実現可能性に関する評価を継続するとともに、将来の技術進展を見据えた新たな可能性についても検討していきたい。今次検討の結果が、よりよい決

決済サービス実現に向けた検討の一助となれば幸いである。

参考文献

- 磯部光平・宇根正志、「スマートフォン等のスマート・デバイスにおけるセキュリティ：プラットフォーム化によるリスクの現状と展望」、『金融研究』第40巻第3号、日本銀行金融研究所、2021年、77～102頁
- 宇根正志、「量子コンピュータが暗号に及ぼす影響にどう対処するか：海外における取組み」、金融研究所ディスカッション・ペーパー No. 2023-J-13、日本銀行金融研究所、2023年
- エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社、「電子マネー『スーパーキャッシュ』に関する今後のNTTコミュニケーションズの取組みについて」、エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社、2000年
- NTTドコモモバイル社会研究所、「2024年調査スマートフォン比率97%：2010年は約4%」、NTTドコモモバイル社会研究所、2024年（<https://www.moba-ken.jp/project/mobile/20240415.html>、2024年11月1日）
- 大塚 玲、「耐タンパ性に基づくデジタル通貨ウォレットの研究動向―匿名性と透明性の両立に向けて―」、金融研究所ディスカッション・ペーパー No. 2022-J-9、日本銀行金融研究所、2022年
- 大槻知史、「Suica システムの概要」、『電気設備学会誌』第31巻第6号、2011年、408～411頁
- 岡本龍明・太田和夫、「理想的電子現金方式の一方法」、『電子情報通信学会論文誌』第76巻6号、1993年、315～323頁
- 金融調査研究会、「キャッシュレス社会の進展と金融制度のあり方」、全国銀行協会、2018年（https://www.zenginkyo.or.jp/fileadmin/res/news/news300437_1.pdf、2024年11月1日）
- 経済産業省、「2023年のキャッシュレス決済比率を算出しました～キャッシュレス決済比率は39.3%、2025年の目標年に向け堅調に拡大～」、経済産業省、2024年（<https://www.meti.go.jp/press/2023/03/20240329006/20240329006.html>、2024年11月1日）
- 経済産業省 商務・サービスグループ消費・流通政策課、「キャッシュレス・ビジョン」、経済産業省、2018年（https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/cashless/image_pdf_movie/cl_vision.pdf、2024年11月1日）
- サイバービジネス協議会、『インターネットキャッシュ検証報告書』、E ジャパン協議会、2000年
- 祖山智幸、「Suica におけるデータとサービスの在り方～オンラインとオフラインのハイブリッド～」、決済の未来フォーラムデジタル通貨分科会：ポストコロナのデジタル決済講演資料、日本銀行決済機構局、2020年（https://www.boj.or.jp/paym/outline/mirai_forum/data/rel200911b8.pdf、2024年11月1日）

- 高橋健太、「デジタル・トラスト時代の生体認証基盤～Public Biometric Infrastructure (PBI) と関連技術～」、第 22 回情報セキュリティ・シンポジウム講演資料、日本銀行金融研究所、2021 年
- 田村裕子・宇根正志、「IC カードを利用した本人認証システムにおけるセキュリティ対策技術とその検討課題」、『金融研究』第 26 巻別冊第 1 号、日本銀行金融研究所、2007 年、53～100 頁
- 中田真佐男、「対面決済のキャッシュレス化の進展に伴って検討すべき諸問題とその対応の方向性」、『国民生活研究』第 61 巻第 2 号、2021 年、32～55 頁
- 中山靖司・森島秀実・阿部正幸・藤崎英一郎、「電子マネーの一実現方式について—安全性、利便性に配慮した新しい電子マネー実現方式の提案—」、『金融研究』第 16 巻第 2 号、日本銀行金融研究所、1997 年、75～86 頁
- 日本電信電話株式会社、「電子現金方式の実験システムを開発—暗号技術によって、利用者のプライバシー保護と高い安全性を実現—」、NTT NEWS RELEASE、日本電信電話株式会社、1995 年
- 、「新しい電子マネー実験システムを試作—安全性、信頼性、効率性を一段と高めた新方式を採用—」、NTT NEWS RELEASE、日本電信電話株式会社、1996 年
- 日本電信電話株式会社ネットワークサービスシステム研究所、「6G/IOWN 時代の融合・協調ネットワーク：インクルーシブコア」、日本電信電話株式会社、2023 年 (https://www.rd.ntt/ns/inclusivecore/whitepaper_ver1.html、2024 年 11 月 1 日)
- 野田恒平、「還流する地下資金—犯罪・テロ・核開発マネーとの闘い—12 終章：デジタル革命と地下資金」、『ファイナンス』令和 4 年 7 月号、財務省、2022 年、40～50 頁
- 藤崎英一郎、「デジタル署名 EdDSA の構成の安全性に関する調査および評価」、2020 年度暗号技術関連の調査報告、CRYPTREC、2020 年 (<https://www.cryptrec.go.jp/exreport/cryptrec-ex-3002-2020.pdf>、2024 年 11 月 1 日)
- 古市峰子、「現金、金銭に関する法的一考察」、『金融研究』第 14 巻第 4 号、日本銀行金融研究所、1995 年、101～152 頁
- 北條真史・鳩貝淳一郎、「決済システムにおけるプログラマビリティの実現」、日銀レビュー No. 2022-J-12、日本銀行、2022 年
- Bernstein, Daniel J., Niels Duif, Tanja Lange, Peter Schwabe, and Bo-Yin Yang, “High-Speed High-Security Signatures,” *Journal of Cryptographic Engineering*, 2012, pp. 77–89.
- Certicom Research, “SEC 1: Elliptic Curve Cryptography (Version 1.0),” The Standards for Efficient Cryptography Group, 2000 (available at <https://www.secg.org/SEC1-Ver-1.0.pdf>、2024 年 11 月 1 日).

- Chaum, David, “Blind Signatures for Untraceable Payments,” *Proceedings of CRYPTO '82, Lecture Notes in Computer Science*, 1440, Springer, 1983, pp. 199–203.
- Nielsen, Jakob, “Website Response Times,” Nielsen Norman Group, 2010 (available at <https://www.nngroup.com/articles/website-response-times/>、2024 年 11 月 1 日).
- Okamoto, Tatsuaki, and Kazuo Ohta, “Universal Electronic Cash,” *Advances in Cryptology—Proceedings of CRYPTO'91, Lecture Notes in Computer Science*, 576, Springer, 1992, pp. 324–337.
- Visa, “Contactless Payments,” VISA Canada, 2014 (available at <https://www.visa.ca/dam/VCOM/regional/na/canada/merchants/documents/visa-paywave-put-your-customer-in-the-fast-lane-en.pdf>、2024 年 11 月 1 日).

補論 1. 認証機関の機能を分割した場合の証明書発行手順

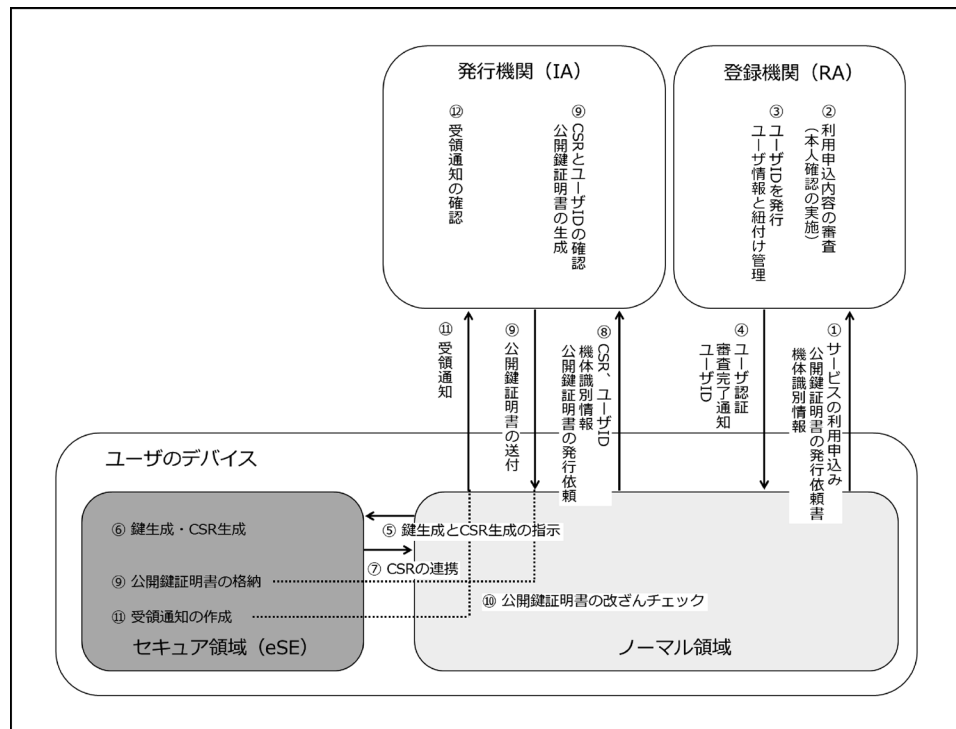
2 節 (3) におけるユーザ登録と証明書の発行において、2 つの業務を独立させた場合の手順について整理する (図表 A-1)。ここでは、ユーザ情報の管理を行う機関を登録機関 (Registration Authority: RA)、証明書の発行・管理を行う機関を発行機関 (Issuing Authority: IA)、この 2 つを合わせたものを認証機関と呼ぶこととする。

- ① ユーザは、デバイスのノーマル領域にインストールされたアプリケーション (以下、ノーマル領域アプリ) を介して、RA にサービスの利用申込みを行うとともに、証明書の発行依頼書を送付する。その際、RA は、ユーザの機体識別情報⁵⁸ をユーザのデバイスから要求する。
- ② RA は、送付された利用申込書の内容について審査を行う⁵⁹。その際、RA は必要に応じて、本人確認を実施する。
- ③ RA は、審査の結果に問題がなければ、ノーマル領域アプリに利用者識別符号を発行し、ユーザが提出したユーザ情報と紐付けて管理する。
- ④ RA は、審査完了通知と利用者識別符号をノーマル領域アプリに送付する。
- ⑤ ノーマル領域アプリは、審査完了通知を受領した後、セキュア領域にインストールされているアプリケーション (以下、セキュア領域アプリ) に対して、鍵ペアの生成、および、証明書の発行リクエスト (Certificate Signing Request: CSR) の生成を指示する。
- ⑥ セキュア領域アプリは、鍵ペアの生成、および、CSR の生成を行う。
- ⑦ セキュア領域アプリは、セキュア領域内で生成された CSR をノーマル領域アプリへ連携する。
- ⑧ ノーマル領域アプリは、CSR、利用者識別符号、機体識別情報を IA に送信し、証明書の発行を依頼する。
- ⑨ IA は、受領した CSR と利用者識別符号に問題がないこと (重複がないこと等) を確認のうえ、証明書を生成する。
- ⑩ セキュア領域アプリは、公開鍵の改ざんチェックを行い、セキュア領域に証明書を格納する。
- ⑪ セキュア領域アプリは、受領通知をセキュア領域内で作成し、ノーマル領域アプリを介して IA に送付する。
- ⑫ IA は受領通知を確認する。

.....
58 機体識別情報として使用できる情報は、国際移動体装置識別番号 (International Mobile Equipment Identity: IMEI) や各デバイスの eSE に割り振られた ID 等が考えられ、サービスに求められるセキュリティ・ユーザビリティの観点から選択する。

59 サービスを利用させることについて問題がないかを審査。例えば、過去に利用規約違反をしたユーザでないことの確認等が想定される。

図表 A-1 認証機関の機能を分割した場合の証明書発行手順



補論 2. 電子現金方式の効率化

(1) 電子現金の送受信にかかる効率化

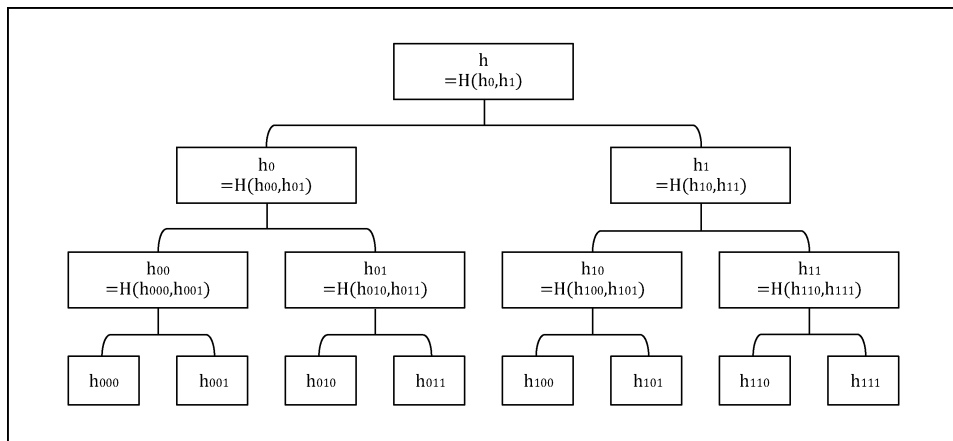
本節では、4 節 (1) で整理した電子現金の送受信にかかる効率化について、それを実現するための詳細なプロトコルを述べる。

イ. 初期設定 (3 つのアルゴリズム)

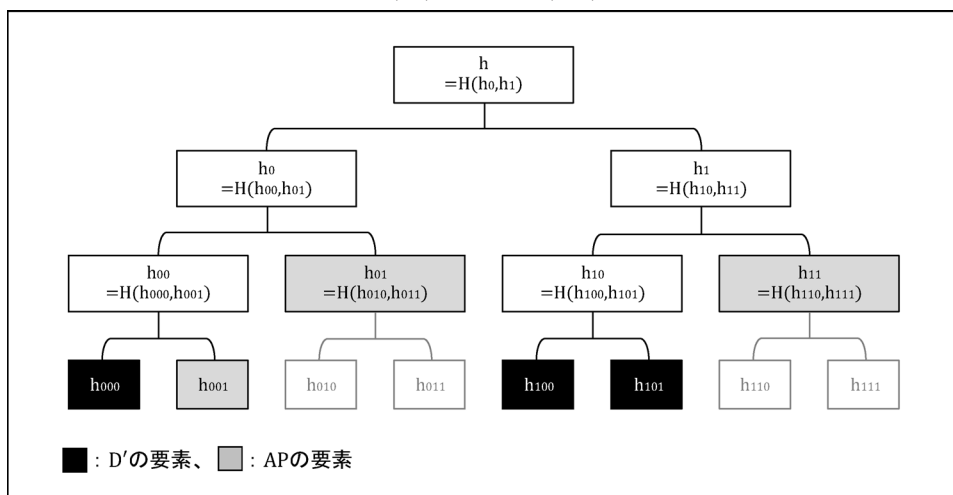
マークル木 (図表 A-2) を用いた方式では、以下の 3 つのアルゴリズム MHTree、MHPath、MHVer を使用する。

- $(L, h) \leftarrow \text{MHTree}(D)$
 - 関数 MHTree は、データセット D の入力に対し、 D の要素 $(= \{(i, h_i)\})$ を葉ノードとしたマークル木 L とルート値 h を出力する。マークル木とは、2 つの子ノードのハッシュ値を親ノードの値として割り当てる処理を繰り返して生成された木構造である。 i はノードの識別子、 h_i はノードにラベル付けされた値を示す。例えば、深さ 3 の葉ノードの識別子 i は 3 桁で表され、左から順番に 000, 001, ..., 111 となる。なお、 D の要素数が二分木の生成に足りない時は、 $h_i = \text{"00..."}$ とラベル付けしたノードを補完したマークル木を出力する。そのうえで、 H をハッシュ関数とすると、 h_{00} に $H(h_{000}, h_{001})$ を割り当て、 h_0 に $H(h_{00}, h_{01})$ を割り当てる作業を繰り返す。図表 A-2 の例では、識別子を i とするノードの値を h_i と表している。
- $(AP, h) \leftarrow \text{MHPath}(D, D')$
 - MHPath は、データセット D と D の部分集合 $D' (c D)$ の入力に対し、 D から生成されたマークル木のルート h を D' から計算するうえで必要となるパス AP とルート値 h を出力する。
 - 例えば、 $D' = \{(000, h_{000}), (100, h_{100}), (101, h_{101})\}$ であったとき、MHPath は D' の入力に対して、 $AP = \{(001, h_{001}), (01, h_{01}), (11, h_{11})\}$ と h を出力する (図表 A-3 参照)。
- $1/0 \leftarrow \text{MHVer}(D', AP, h)$
 - MHVer は、データセット D' と AP 、および、ルート値 h の入力に対し、 $D' \cup AP$ をノードとしたマークル木のルート値が h と一致するか否かを確認し、一致すれば 1、一致しなければ 0 を返す。

図表 A-2 マークル木の構造



図表 A-3 関数 MHPath の入力 (D') と出力 (AP) の関係



ロ. 電子現金の送受信にかかる処理

ユーザ U がユーザ V に電子現金を送付する際の具体的な手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、送付先ユーザ V に証明書 Cer_V を要求し、その正当性を検証する。
- ② ユーザ U は、送信する m 枚の電子現金 $T_i (1 \leq i \leq m)$ とその移転履歴 $\sigma_{i(\ell)} (1 \leq i \leq m, 0 \leq \ell \leq n_i)$ について、 $h_i \leftarrow H(\sigma_{i(n_i)}) (1 \leq i \leq m)$ を求める。 n_i は電子現金 T_i が移転してきた回数であり、 $\sigma_{i(\ell)}$ は T_i の ℓ 回目の移転履歴を表す。なお、 T_i の発行時に付与される移転履歴は $\sigma_{i(0)}$ である。さらに、 $\{h_i\}_{1 \leq i \leq m}$

を葉ノードとしたマークル木 L とルート h を $(L, h) \leftarrow \text{MHTree}(\{(i, h_i)\}_{1 \leq i \leq m})$ によって求める。

- ③ ユーザ U は、ルート h とユーザ V の公開鍵 pk_V に対するデジタル署名 $\sigma \leftarrow \text{Sign}_{sk_U}(h \parallel pk_V)$ を生成することで移転履歴を更新する。
- ④ ユーザ U は、ユーザ V に自身の証明書 Cer_U および m 枚の電子現金とその移転履歴を送付する。このとき、送付する m 枚の電子現金とその移転履歴は $(\{T_i\}_{1 \leq i \leq m}, \sigma, \{\sigma_{i(\ell)}\}_{1 \leq i \leq m, 0 \leq \ell \leq n_i})$ となる。さらに、これまでの移転履歴 $\sigma_{i(\ell)} (0 \leq \ell \leq n_i)$ の検証に必要となる $(AP_j, h_j) \leftarrow \text{MHPath}(\{\sigma_j\}, \sigma_{i(n_i-1)})$ もあわせて送信する。 $\{\sigma_j\}$ は、過去に電子現金 T_i をユーザ U_j から受け取った際、それと同時に送られてきた電子現金 $\{T_i\}(\ni T_i)$ の移転履歴を表す。
 - 更新された移転履歴 σ は、 m 枚の電子現金 T_i に共通の移転履歴であり、 $\sigma = \sigma_{1(n_1)} = \sigma_{2(n_2)} = \dots = \sigma_{m(n_m)}$ である。
- ⑤ ユーザ V は、証明書 Cer_U の正当性確認を行ったうえで、受け取った電子現金が正しく送付されたものであることを以下によって確認し、デバイス内に保存する。
 - $(L, h) \leftarrow \text{MHTree}(\{(i, \sigma_{i(n_i)})\}_{1 \leq i \leq m})$ を計算し、 σ が h に対するユーザ U の署名であることを確認する。
 - $\text{MHVer}(\sigma_{i(n_i)}, AP_j, h_j)$ によって h_j の正当性を確認したうえで、 $\sigma_{i(n_i)}$ が h_j に対する正当な署名になっていることを確認する。これをすべての移転履歴 $\sigma_{i(\ell)} (1 \leq i \leq m, 0 \leq \ell \leq n_i)$ に対して行う。

(2) 電子現金の還収にかかる効率化

EdDSA は、以下のパラメータ設定のもと、3つのアルゴリズム（鍵生成、署名生成、署名検証）で構成される（Bernstein *et al.* [2012]、藤崎 [2020]）。

【パラメータ設定】

EdDSA で使用されるパラメータは以下のとおりである。

- 奇素数 q 、有限体 $\mathbb{F}_q$
- 正整数 b ：公開鍵長。なお、 $q < 2^{b-1}$ を満たす。
- ハッシュ関数 $H: \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^{2b}$
- エンコーディング関数 $: \mathbb{F}_q \rightarrow \{0, 1\}^{b-1}$ ($\mathbb{F}_q$ の元を $(b-1)$ bit に変換)
- $\mathbb{F}_q$ 上の (Twisted) Edward 曲線
 $E(\mathbb{F}_q) : \{(x, y) \in \mathbb{F}_q \times \mathbb{F}_q : ax^2 + y^2 = 1 + dx^2y^2\}.$
 $a : \mathbb{F}_q$ 上の平方剰余、 $d : \mathbb{F}_q$ 上の (非ゼロの) 平方非剰余。

なお、 $q \equiv 1 \pmod{4}$ の時は $a = -1$ 、 $q \equiv 3 \pmod{4}$ の時は $a = 1$ 。

E の位数 $\#E = 2^c * \ell$, $c = 2 \text{ or } 3$, 2^c を cofactor と呼ぶ。

- ベース・ポイント $B \in E, B \neq (0, 1), \ell B = (0, 1)$ 、
奇素数 ℓ , B の作る巡回群の位数 $\#B = \ell$ 。

エドワード曲線の加法を下記で定義するとき、 E は、 $O = (0, 1)$ を単位元とする加法群になる。

$$(x_1, y_1) + (x_2, y_2) := \left(\frac{(x_1 y_2 + x_2 y_1)}{1 + d x_1 x_2 y_1 y_2}, \frac{(y_1 y_2 + x_1 x_2)}{1 - d x_1 x_2 y_1 y_2} \right). \quad (\text{A-1})$$

【鍵生成】

ユーザは、秘密鍵 k と公開鍵 A を下記手順で生成する：

- $k \leftarrow \{0, 1\}^b$
- $(h_0, h_1, \dots, h_{2b-1}) \leftarrow H(k)$
- $a \leftarrow 2^{2b-2} + \sum_{3 \leq i \leq b-3} 2^i h_i \in \{2^{2b-2}, 2^{2b-2}+8, \dots, 2^{2b-1}-8\}$
- $A \leftarrow aB$

秘密鍵： k

公開鍵： $\underline{A} := aB$ ($\underline{A}$ は、 A をエンコーディングした値)

【署名生成】

署名者は、秘密鍵 k から求めた $(h_b, \dots, h_{2b-1}) (= H(k))$ を用いて、メッセージ M に対する署名 $(\underline{R}, \underline{S})$ を以下のとおり生成する：

- $r \leftarrow H(h_b, \dots, h_{2b-1}, M) \in \{0, 1, \dots, 2^{2b}-1\}$.
- $R \leftarrow rB$.
- $S \leftarrow (r + H(\underline{R}, \underline{A}, M) a) \bmod \ell$.

【署名検証】

検証者は、署名者の公開鍵 $\underline{A}$ を用いて、メッセージ M に対する署名 $(\underline{R}, \underline{S})$ の正当性を以下の等式の成立によって確認する：

- $2^c S B = 2^c R + 2^c H(\underline{R}, \underline{A}, M) A$.

【バッチ検証】

公開鍵 A_i によるメッセージ M_i に対する署名を $(\underline{R}_i, \underline{S}_i)$ としたとき、これらのバッチ処理は、署名検証式を線形結合することで実行できる。

- 各パラメータと署名数に応じたビットのランダムな整数 z_i を選択し、 $H_i = H(R_i, A_i, M_i)$ を計算する。
- $(-\sum_i z_i S_i \bmod \ell) B + \sum_i z_i R_i + \sum_i (z_i H_i \bmod \ell) A_i = 0$ の成立を確認する。

補論 3. プライバシを強化した電子現金プロトコル

ここでは、4 節 (4) で提案したプロトコルの詳細に加えて、サービス事業者にはユーザの秘密鍵を登録し、不正者の特定はユーザの秘密情報によって行う方式（方式 1）と、サービス事業者にはユーザの公開鍵のみを登録するが、不正者の特定はユーザの秘密情報によって行う方式（方式 2）もあわせて紹介する。これらは、4 節で紹介した方式より運用面での安全性は劣後するが、計算処理コストが低いというメリットがある。

(1) Σ プロトコル

Σ プロトコルは、言語 $L_R = \{x \mid \exists w, (x, w) \in R\}$ に属する x のウィットネス w (x が言語 L に属することの証拠) を知っていることを示すゼロ知識証明プロトコルであり、証明者と検証者間で、「コミットメント」、「チャレンジ」、「レスポンス」と呼ばれるデータを送受信することで実行される。

証明者から検証者に対して最初に送信するコミットメント com は、公開情報 x 、ウィットネス w 、乱数 r を用いて生成される。次に検証者から証明者に送信されるチャレンジ $chal$ は十分に安全な乱数を選択する関数を用いて生成される。最後に証明者から検証者に送信するレスポンス res は、 x のウィットネス w を知っているユーザであれば、それまでに送受信された com と $chal$ に対して、 $1 \leftarrow VER(com, chal, res, x)$ となる res を生成することができる関数 RES を用いて生成される。また、 x のウィットネス w を知らないユーザが $1 \leftarrow VER(com, chal, res, x)$ となる res を生成できる確率は無視できるほど小さく、圧倒的な確率で $0 \leftarrow VER(com, chal, res, x)$ となる（図表 A-4 参照）。

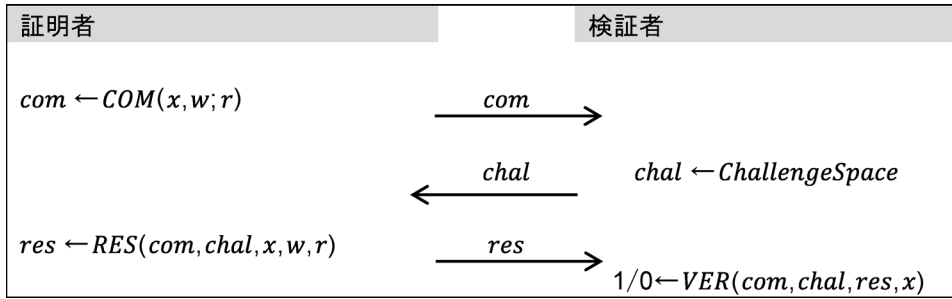
また、 $EXT(x, com, chal, chal', res, res')$ は、2 つのゼロ知識証明において、同じコミットメントを使用した際の $(chal, res)$ と $(chal', res')$ の入力に対して、 $com \leftarrow COM(x, w; r)$ をみたす w を返す。

上記 Σ プロトコルは、ハッシュ関数 H を用いることで、非対話証明とすることができる。つまり、 $chal \leftarrow H(com)$ と置き換えることで、証明者は検証者と対話することなく res を生成することができる。

プライバシ保護を強化した電子署名方式は、以下の関数で構成される。

- $(sk, pk) \leftarrow Gen(1^\delta)$

Gen は、秘密鍵と公開鍵のペア (sk, pk) を生成する関数。 δ はセキュリティ・パラ

図表 A-4 Σ プロトコル

メータ。

- $c \leftarrow Commit(x; r)$
 $Commit$ は、乱数 r を用いて x のコミットメント c を生成する関数。
- $\sigma \leftarrow Sign_{sk}(m)$
 $Sign$ は、秘密鍵 sk を用いて、 m のデジタル署名 σ を生成する関数。
- $1/0 \leftarrow Verify_{pk}(m, \sigma)$
 $Verify$ は、公開鍵 pk を用いて、メッセージ m に対するデジタル署名 σ の検証を行う関数。 σ が正しい署名であれば 1、そうでなければ 0 を出力する。
- $com \leftarrow COM(x, w; r)$
 COM は、 x のウィットネス w の保持を証明する Σ プロトコルにおけるコミットメントを生成する関数。 r は乱数。
- $chal \leftarrow H(com)$
 H は、ハッシュ関数であり、 Σ プロトコルにおけるチャレンジ生成に使用。
- $res \leftarrow RES(com, chal, x, w, r)$
 RES は、 x のウィットネス w の保持を証明する Σ プロトコルにおけるレスポンスを生成する関数。
- $1/0 \leftarrow VER(com, chal, res, x)$
 VER は、 com と res が、 x のウィットネス w の保持を証明する Σ プロトコルでのペアとなっていることの検証を行う関数。 (com, res) が正しければ 1、そうでなければ 0 を出力する。
- $w \leftarrow EXT(x, com, chal, chal', res, res')$
 EXT は、2 つのゼロ知識証明において、同じコミットメント com を使用した $(chal, res)$ と $(chal', res')$ の入力に対して、 $com \leftarrow COM(x, w; r)$ をみたす w を出力する。

(2) 3つの実現方法

イ. 方式1 (秘密鍵を認証機関に登録、二重使用者の特定は秘密鍵で行う)

方式1は、公開鍵 pk ではなく、ユーザの秘密鍵 sk を認証機関に登録し、認証機関から秘密鍵 sk に対する証明書 Cer の発行を受ける方式である。4節(4)で整理した3つの要件については、下記の方法で充足される。

- i 回目の取引に使用する取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ の生成はユーザが行い、取引の都度、ユーザが取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ の更新を行う。なお、取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ は、秘密鍵 sk をもとに生成される。
- ユーザは、認証機関から秘密鍵 sk に対する証明書 Cer の発行を受ける。証明書 Cer と取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ がともに同じ秘密鍵に基づくものであることの証明によって、 $pk_{(i)}$ による取引が、認証機関に登録された正規ユーザによって行われたものであることを示す。また、ゼロ知識証明を利用することで、秘密鍵 sk や証明書 Cer を秘匿できるため、サービス事業者に対する匿名性が満たされる。
- サービス事業者は、ゼロ知識証明の特性を利用することで、二重使用された電子現金から、不正を行ったユーザの秘密鍵 sk を特定する。

(イ) 初期設定

認証機関とユーザは暗号処理に使用する鍵ペアと証明書を以下の手順で用意する。

- ① 認証機関は、秘密鍵と公開鍵のペア $(sk_C, pk_C) \leftarrow Gen(1^\delta)$ を生成し、公開鍵を自己証明書とともに公開する。
- ② 認証機関は、ユーザ U の秘密鍵 $sk_U \in \{0, 1\}^\lambda$ を生成し、 $Cer_U \leftarrow Sign_{sk_C}(sk_U)$ とともにセキュアチャネルを通してユーザ U に発行する。なお、 λ はセキュリティ・パラメータである。
- ③ ユーザ U は、 $Verify_{pk_C}(sk_U, Cer_U)$ を計算し、結果が1であれば (sk_U, Cer_U) を受領し、そうでなければ拒否する。

(ロ) 電子現金の受領

ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受領する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、乱数 $r_{U(i)} \in \{0, 1\}^\lambda$ を選択し、取引用公開鍵 $pk_{U(i)} \leftarrow Commit(sk_U; r_{U(i)})$ を計算する。

- $pk_{U(i)}$ は、ユーザ U にとって、 i 回目の取引に使用する公開鍵である。
- ② ユーザ U は、乱数 $r_{(i)} \in \{0, 1\}^l$ を選択し、 $com_{(i)} \leftarrow COM((pk_{U(i)}, pk_C), (sk_U, Cer_U, r_{U(i)}); r_{(i)})$ を計算する。
- ③ ユーザ U は、ユーザ V に $(pk_{U(i)}, com_{(i)})$ を送信し、ユーザ V から $(T, \{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0})$ と移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を受領する。 T は、ユーザ V から送信された電子現金であり、シリアル・ナンバに対するサービス事業者の署名である。 $\sigma_{(n)}$ は電子現金の移転履歴となる (n は、電子現金 T がこれまでに移転した回数)。
- $com_{(k)}$ は、ユーザ V が公開鍵 $pk_{V(k)}$ のもとに他ユーザから電子現金 T を受け取った際に生成したもの (本プロトコルのステップ②でユーザ U が行う計算に相当)。これは、ユーザ V にとって k 回目の取引となる。
- $res_{(k)}$ は、ユーザ V がユーザ U から $(pk_{U(i)}, com_{(i)})$ の送付を受けて生成したもの (電子現金の送付プロトコルのステップ③でユーザ U が行う計算に相当)。
- ④ ユーザ U は T の検証を行うとともに、 $\{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0}$ について $VER(com_{(k)}, chal_{(k)}, res_{(k)}, (pk_{V(k)}, pk_C))$ を計算し、すべての結果が 1 であれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。なお、 $chal_{(k)} \leftarrow H(com_{(k)})$ は $com_{(k)}$ のハッシュ値である。

(ハ) 電子現金の送付

ユーザ U がユーザ W に電子現金 T を送付する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、ユーザ W から $(pk_{W(j)}, com_{(j)})$ を受領する。
 - ユーザ W にとっては、電子現金の受領プロトコルのステップ①～②に相当するものであり、 j 回目の取引となる。
- ② ユーザ U は、 $chal_{(i)} \leftarrow H(T, pk_{W(j)}, com_{(j)}, com_{(i)})$ を計算する。
 - $com_{(i)}$ は、ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受け取った際に生成したもの (電子現金の受領プロトコル：ステップ②)
- ③ ユーザ U は、 $res_{(i)} \leftarrow RES(com_{(i)}, chal_{(i)}, (pk_{U(i)}, pk_C), (sk_U, Cer_U, r_{U(i)}), r_{(i)})$ を計算する。なお、 Σ プロトコルは、 $(pk_{U(i)}, pk_C)$ が以下の言語 L に属することを証明するものである。 $L := \{(pk_{U(i)}, pk_C) \mid \exists (sk_U, Cer_U, r_{U(i)}), com(sk_U; r_{U(i)}) = pk_{U(i)} \wedge Verify_{pk_C}(sk_U, Cer_U) = 1\}$ 。
- ④ ユーザ U は、ユーザ W に $(T, \{\sigma_{(n+1)} = (com_{(i)}, res_{(i)})\}_{n \geq 0})$ と移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を送信する。
- ⑤ ユーザ W は、 T の検証を行うとともに、 $\{\sigma_{(n+1)} = (com_{(i)}, res_{(i)})\}_{n \geq 0}$ について $VER(com_{(i)}, chal_{(i)}, res_{(i)}, (pk_{U(i)}, pk_C))$ を計算し、すべての結果が 1 であれば電子

現金を受領し、そうでなければ拒否する。なお、 $chal_{(i)} \leftarrow H(com_{(i)})$ は $com_{(i)}$ のハッシュ値である。

(二) 二重使用の検知

サービス事業者が電子現金を二重使用したユーザを特定する際の手順は以下のとおりである。

- ① サービス事業者は、還流してきた電子現金 T のシリアル・ナンバが発行済電子現金 DB になれば、二重使用されたものと判断し、還収済電子現金 DB から同シリアル・ナンバをもつ電子現金とその履歴 σ' を取り出す。
- ② サービス事業者は、2 つの移転履歴 σ と σ' について、秘密鍵 $sk_U \leftarrow EXT(pk_{U(i)}, com, chal, chal', res, res')$ を計算する。
- ③ サービス事業者は、認証機関に照会することで、 sk_U を秘密鍵とするユーザを特定する。

ロ. 方式 2 (公開鍵を認証機関に登録、二重使用者の特定は秘密鍵で行う)

方式 2 は、ユーザの秘密鍵ではなく、ユーザの公開鍵に対して証明書の発行を受ける方式である。認証機関・ユーザ間における秘密鍵の送受信がないため、鍵の漏洩リスクが低減するものの、電子現金の送受信にかかる計算コストは方式 1 より増加する。4 節 (4) で整理した 3 つの要件については、下記の方法で充足される。

- i 回目の取引に使用する取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ の生成はユーザが行い、取引の都度、ユーザが取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ の更新を行う。
- ユーザは、認証機関から公開鍵 pk に対する証明書 Cer の発行を受ける。証明書の対象となる公開鍵 pk と取引用公開鍵 $pk_{(i)}$ がともに同じ秘密鍵で生成されたものであることの証明によって、 $pk_{(i)}$ による取引が認証機関に登録された正規ユーザによって行われたものであることを示す。
 - 方式 1 との違いは、認証機関による証明書が公開鍵に対して発行されることである。それに伴い、 Σ プロトコルで証明すべき命題が変わるため、コミットメントとレスポンスの生成方法が変わる。
- サービス事業者は、ゼロ知識証明の特性を利用することで、二重使用された電子現金から、不正を行ったユーザの秘密鍵 sk を特定する。

(イ) 初期設定

認証機関とユーザは暗号処理に使用する鍵ペアと証明書を以下の手順で用意する。

- ① 認証機関は、秘密鍵と公開鍵のペア $(sk_C, pk_C) \leftarrow Gen(1^\delta)$ を生成し、公開鍵を自己証明書とともに公開する。
- ② ユーザ U は、秘密鍵 $sk_U \in \{0, 1\}^\lambda$ を生成する。
- ③ ユーザ U は、乱数 r_U を選択し、公開鍵 $pk_U \leftarrow Commit(sk_U; r_U)$ を計算する。
- ④ ユーザ U は、サービス事業者 C に pk_U を送付し、 pk_U に対する証明書 $Cer_U \leftarrow Sign_{sk_C}(pk_U \| *)$ を受け取る。
- ⑤ ユーザ U は、 $Verify_{pk_C}(pk_U, Cer_U)$ を計算し、結果が 1 であれば (pk_U, Cer_U) を受領し、そうでなければ拒否する。

(ロ) 電子現金の受領

ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受領する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、乱数 $r_{U(i)} \in \{0, 1\}^\lambda$ を選択し、取引用公開鍵 $pk_{U(i)} \leftarrow Commit(sk_U; r_{U(i)})$ を計算する。
- ② ユーザ U は、乱数 $r_{(i)} \in \{0, 1\}^\lambda$ を選択し、 $com_{(i)} \leftarrow COM((pk_{U(i)}, pk_C), (pk_U, sk_U, Cer_U, r_{U(i)}, r_{(i)}))$ を計算する。
- ③ ユーザ U は、ユーザ V に $(pk_{U(i)}, com_{(i)})$ を送信し、ユーザ V から $(T, \{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0})$ と移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を受領する。
- ④ ユーザ U は、 T の検証を行うとともに、 $\{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0}$ について、 $VER(com_{(k)}, chal_{(k)}, res_{(k)}, (pk_{V(k)}, pk_C))$ を計算し、すべての結果が 1 であれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。なお、 $chal_{(k)} \leftarrow H(com_{(k)})$ は $com_{(k)}$ のハッシュ値である。

(ハ) 電子現金の送付

ユーザ U がユーザ W に電子現金 T を送付する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、ユーザ W から $(pk_{W(j)}, com_{(j)})$ を受領する。
- ② ユーザ U は、 $chal_{(i)} \leftarrow H(T, pk_{W(j)}, com_{(j)}, com_{(i)})$ を計算する。
 - $com_{(i)}$ は、ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受け取った際に生成したもの（電子現金の受領プロトコル：ステップ②）
- ③ ユーザ U は、 $res_{(i)} \leftarrow RES(com_{(i)}, chal_{(i)}, (pk_{U(i)}, pk_C), (pk_U, sk_U, Cer_U, r_{U(i)}, r_{(i)}))$ を計算する。なお、 Σ プロトコルは、 $(pk_{U(i)}, pk_C)$ が以下の言語 L に属することを証明するものである。 $L := \{(pk_{U(i)}, pk_C) | \exists (pk_U, sk_U, Cer_U, r_{U(i)}, r_{(i)}), Commit(sk_U; r_{U(i)}) = pk_{U(i)} \wedge Commit(sk_U; r_U) = pk_U \wedge Verify_{pk_C}(pk_U, Cer_U) = 1\}$ 。
- ④ ユーザ U はユーザ W に $(T, \{\sigma_{(n+1)} = (com_{(i)}, res_{(i)})\}_{n \geq 0})$ と移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を送信する。

- ⑤ ユーザ W は、 T の検証を行うとともに、 $\{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0}$ について $VER(com_{(i)}, chal_{(i)}, res_{(i)}, (pk_{U(i)}, pk_C))$ を計算し、すべての結果が 1 であれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。なお、 $chal_{(i)} \leftarrow H(com_{(i)})$ は $com_{(i)}$ のハッシュ値である

(二) 二重使用の検知

サービス事業者が電子現金を二重使用したユーザを特定する際の手順は以下のとおりである。

- ① サービス事業者は、還流してきた電子現金 T のシリアル・ナンバが発行済電子現金 DB になれば、二重使用されたものと判断し、還収済電子現金 DB から同シリアル・ナンバをもつ電子現金 T とその流通履歴 σ' を取り出す。
- ② サービス事業者は、2 つの移転履歴 σ と σ' について、 $sk_U \leftarrow EXT(pk_{U(i)}, com, chal, chal', res, res')$ を計算する。
- ③ サービス事業者は、認証機関に照会することで、 sk_U を秘密鍵とするユーザを特定する。

ハ. 4 節で紹介した方式（公開鍵を認証機関に登録、二重使用者の特定は公開鍵で行う）

方式 1 と 2 における二重使用の検知は、不正に使用された秘密鍵の暴露によってユーザを特定する。ただし、二重使用に使用された 2 つの電子現金が手元にあれば、誰でも秘密鍵を暴露することができるため、同秘密鍵を得たユーザによってさらなる不正が行われるリスクがある。これに対して、本方式は、公開情報のみから不正者の特定を可能とする特徴を有する。

(イ) 初期設定

認証機関とユーザは暗号処理に使用する鍵ペアと証明書を以下の手順で用意する。

- ① 認証機関は、秘密鍵と公開鍵のペア $(sk_C, pk_C) \leftarrow Gen(1^\delta)$ を生成し、自己証明書とともに公開する。
- ② ユーザ U は、秘密鍵と公開鍵のペア $(sk_U, pk_U) \leftarrow Gen(1^\delta)$ を生成する。
- ③ ユーザ U は、認証機関に公開鍵 pk_U を送付し、 pk_U に対する証明書 $Cer_U \leftarrow Sign_{sk_C}(pk_U \| *)$ を受け取る。
- ④ ユーザ U は、 $Verify_{pk_C}(pk_U, Cer_U)$ を計算し、結果が 1 であれば (pk_U, Cer_U) を受領し、そうでなければ拒否する。

(ロ) 電子現金の受領

ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受領する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、ランダムに取引用公開鍵 $pk_{U(i)} \in \{0, 1\}^l$ を選択する。
- ② ユーザ U は、 $Cer_{U(i)} \leftarrow \text{Sign}_{sk_U}(pk_{U(i)})$ を計算する。
- ③ ユーザ U は、乱数 $r_{(i)} \in \{0, 1\}^l$ を選択し、 $com_{(i)} \leftarrow \text{COM}((pk_{U(i)}, pk_C), (pk_U, Cer_{U(i)}, Cer_U); r_{(i)})$ を計算する。
- ④ ユーザ U は、ユーザ V に $(pk_{U(i)}, com_{(i)})$ を送信し、ユーザ V から $(T, \{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0})$ と移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を受領する。
- ⑤ ユーザ U は、 T の検証を行うとともに、 $\{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0}$ について、 $VER(com_{(k)}, chal_{(k)}, res_{(k)}, (pk_{V(k)}, pk_C))$ を計算し、すべての結果が 1 であれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。

(ハ) 電子現金の送付

ユーザ U がユーザ W に電子現金 T を送付する際の手順は以下のとおりである。

- ① ユーザ U は、ユーザ W から $(pk_{W(j)}, com_{(j)})$ を受領する。
- ② ユーザ U は、 $chal_{(i)} \leftarrow H(T, pk_{W(j)}, com_{(j)}, com_{(i)})$ を計算する。
 - $com_{(i)}$ は、ユーザ U がユーザ V から電子現金 T を受け取った際に生成したもの（電子現金の受領プロトコル：ステップ③）
- ③ ユーザ U は、 $res_{(i)} \leftarrow RES(com_{(i)}, chal_{(i)}, (pk_{U(i)}, pk_C), (pk_U, Cer_{U(i)}, Cer_U))$ を計算する。なお、 Σ プロトコルは、 $(pk_{U(i)}, pk_C)$ が以下の言語 L に属することを証明するものである。 $L := \{(pk_{U(i)}, pk_C) | \exists (pk_U, Cer_{U(i)}, Cer_U), \text{Verify}_{pk_U}(pk_{U(i)}, Cer_{U(i)}) = 1 \wedge \text{Verify}_{pk_C}(pk_U, Cer_U) = 1\}$ 。
- ④ ユーザ U はユーザ W に $(T, \{\sigma_{(n+1)} = (com_{(i)}, res_{(i)})\}_{n \geq 0})$ と移転履歴にあるユーザの取引用公開鍵を送信する。
- ⑤ ユーザ W は、 T の検証を行うとともに、 $\{\sigma_{(n)} = (com_{(k)}, res_{(k)})\}_{n \geq 0}$ について、 $VER(com_{(i)}, chal_{(i)}, res_{(i)}, (pk_{U(i)}, pk_C))$ を計算し、すべての結果が 1 であれば電子現金を受領し、そうでなければ拒否する。

(二) 二重使用の検知

サービス事業者が電子現金を二重使用したユーザを特定する際の手順は以下のとおりである。

- ① サービス事業者は、還流してきた電子現金 T のシリアル・ナンバが発行済電子現金 DB になれば、二重使用されたものと判断し、還収済電子現金 DB から同シリアル・ナンバをもつ電子現金 T とその流通履歴 σ' を取り出す。

- ② サービス事業者は、2つの移転履歴 σ と σ' について、 $pk_U \leftarrow EXT(pk_{U(i)}, com, chal, chal', res, res')$ を計算する。
- ③ サービス事業者は、認証機関に照会することで、 pk_U を公開鍵とするユーザを特定する。

金融研究所の概要

金融研究所（Institute for Monetary and Economic Studies, IMES）は1982年10月に日本銀行創立百周年を記念して、日本銀行の内部組織の1つとして設立されました。その主な目的は、（1）金融経済の理論、制度、歴史に関する基礎的な研究の充実を図り、日本銀行の政策の適切な運営に役立てること、（2）学界等との交流を促進すること、（3）外部の研究活動の便宜に資する各種情報、資料等を公に提供することです。

主な活動

研究活動

- ・金融経済の基本的問題に関する理論・実証的研究。
- ・金融関連の制度基盤（法律・会計・中央銀行制度等）に関する研究。
- ・金融関連の情報技術に関する研究。
- ・金融経済の歴史に関する研究。
- ・金融経済に関する歴史的資料の収集・保存・公開（アーカイブ・貨幣博物館）。

顧問および客員研究員の招へい

- ・国内外の有力学者若干名に研究所顧問（非常勤）を委嘱し、研究所の運営、研究活動の進め方、内外学界との交流等に関する助言を受けています。
- ・国内外より学者数名を客員研究員として招へいし、研究活動の強化を図っています。

会議の開催

- ・海外中央銀行、国際機関の研究者や内外の著名学者を交えた会議を開催。
- ・外部の研究者、専門家を交えた研究会、セミナー等を適宜開催。

刊行物の発行

金融研究、Monetary and Economic Studies、IMES Discussion Paper Series、日本銀行の機能と業務、国際コンファランス議事録等を公刊（刊行物の一覧は後掲）。

貨幣博物館

国内を中心とした貴重な貨幣や貨幣にかかわる資料を貨幣博物館に展示するとともに、貨幣に関する歴史資料をホームページ等で公開（博物館の案内は後掲）。

歴史的公文（歴史的文書）の公開

日本銀行に関連する歴史的資料のうち、歴史的価値を有するものについて、日本銀行金融研究所アーカイブで保管・整理し、一般に公開（アーカイブの案内は後掲）。

研究の委託

人員面、資料面の制約等から所内での研究が困難なテーマについて外部の学者等に研究を委託。

主な刊行物

金融研究

邦文機関誌、年4回程度発行。金融研究所の研究論文や各種ワークショップの様、研究会報告等を公表。

Monetary and Economic Studies

英文機関誌。『金融研究』と同様、金融研究所の研究論文等を公表（『金融研究』掲載論文の英訳のほか、英文オリジナル論文を含む）。

IMES Discussion Paper Series (E-Series：英語版、J-Series：日本語版)

金融研究所スタッフおよび外部研究者による研究成果の未定稿を随時公表。学界、金融機関、関係者等から、広くコメントを求めることを目的としている。

国際コンファランス議事録

- ・ *Growth, Integration, and Monetary Policy in East Asia* (*Monetary and Economic Studies*, Vol. 25, No. S-1, 2007年)
- ・ *Financial Markets and the Real Economy in a Low Interest Rate Environment* (*Monetary and Economic Studies*, Vol. 24, No. S-1, 2006年)
- ・ *Incentive Mechanisms for Economic Policymakers* (*Monetary and Economic Studies*, Vol. 23, No. S-1, 2005年)
- ・ *Challenges for Sustained Economic Growth under Changing Economic, Social, and International Environments* (*Monetary and Economic Studies*, Vol. 22, No. S-1, 2004年)
- ・ *Exchange Rate Regimes in the 21st Century* (*Monetary and Economic Studies*, Vol. 20, No. S-1, 2002年)
- ・ *The Role of Monetary Policy under Low Inflation: Deflationary Shocks and Policy Responses* (*Monetary and Economic Studies*, Vol. 19, No. S-1, 2001年)
- ・ *Monetary Policy in a World of Knowledge-Based Growth, Quality Change and Uncertain Measurement* (Palgrave, 2001年)
- ・ *Towards More Effective Monetary Policy* (Macmillan Press, 1997年)
- ・ *Financial Stability in a Changing Environment* (Macmillan Press, 1995年)
- ・ *Price Stabilization in the 1990s: Domestic and International Policy Requirements* (Macmillan Press, 1993年)
- ・ *The Evolution of the International Monetary System: How Can Efficiency and Stability Be Attained?* (University of Tokyo Press, 1990年)
- ・ *Toward a World of Economic Stability: Optimal Monetary Framework and Policy* (University of Tokyo Press, 1988年)
- ・ *Financial Innovation and Monetary Policy: Asia and the West* (University of Tokyo Press, 1986年)
- ・ *Monetary Policy in Our Times* (MIT Press, 1985年)

なお、2008年以降に開催された国際コンファランスについては、議事要旨等を *Monetary and Economic Studies* に所収。

日本銀行の機能と業務（有斐閣、2011 年発行）

日本銀行がどのような役割・機能を担い、また、これを果たすため、どのような業務を行っているのかについて、網羅的かつ具体的に解説。

貨幣博物館 常設展示図録（ときわ総合サービス、2017 年発行）

貨幣博物館の展示資料を紹介した図録です。

日本銀行金融研究所（IMES）

〒103-8660 東京都中央区日本橋本石町 2-1-1

TEL：03-3279-1111、FAX：03-3510-1265

E-mail：imes.journals-info@boj.or.jp

ホームページ：https://www.imes.boj.or.jp

資料公開サービス

以下の資料公開サービスを行っておりますので、ご利用下さい。

(1) 貨幣博物館の公開

2015年11月、貨幣博物館はリニューアルオープンしました。日本の貨幣を中心に、和同開珎や大判・小判の実物、貨幣に関する絵画など、貴重な資料を多数展示するとともに、所蔵資料を貨幣博物館ホームページ等で一般に公開しています。20名以上の団体で見学を希望される場合は予め電話でご連絡下さい。

開館時間：9時30分～16時30分（入館は16時まで）

休館日：月曜日（ただし祝休日は開館）

年末年始（12月29日～1月4日）

※最新の情報は下記の当館ホームページで

お知らせいたしますので、ご確認ください。

貨幣博物館ホームページ：<https://www.imes.boj.or.jp/cm/>

〈連絡先〉金融研究所 貨幣博物館

TEL：03-3277-3037（直通）

(2) 日本銀行が保有する歴史的公文（歴史的文書）の公開

金融研究所では、日本銀行に関連する歴史的資料のうち、歴史的価値を有するものについて保管・整理し、一般に公開しています。閲覧をご希望の方は、当館ホームページ掲載の目録で検索のうえ、予めメール・電話にてご連絡下さい。

歴史的公文の目録：<https://www.imes.boj.or.jp/archives/hozon.html>

〈連絡先〉金融研究所 アーカイブ

E-mail：imes.archives@boj.or.jp

TEL：03-3277-2151（直通）

金 融 研 究 (第 44 卷 第 3 号)

ISSN 2759-5099

2025 年 7 月 22 日 発行

日本銀行金融研究所長

編集兼発行者 渡 辺 真 吾

発 行 所 日本銀行 金融研究所

郵便番号 103-8660

東京都中央区日本橋本石町 2-1-1

電 話 : (03) 3279-1111 (大代表)

国際文献社

本誌に関する照会は、日本銀行金融研究所までお寄せ下さい。

