

JAREFE Preprint

JP2023-01

カーボン・ファクター・ポートフォリオ

Carbon Factor Portfolios

著者 1 石島博 Hiroshi ISHIJIMA

中央大学大学院法務研究科

Chuo Law School, Chuo University

著者 2 山本匡人 Masato YAMAMOTO

イェール大学経営大学院(経営学修士課程)

Yale School of Management (MBA Candidate '24)

著者 3 前田章 Akira MAEDA

東京大学大学院総合文化研究科

Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

著者 4 後藤順哉 Jun'ya Gotoh

中央大学理工学部

Faculty of Science and Engineering, Chuo University

Keyword: 二酸化炭素排出量(Carbon Emissions)、カーボン・ニュートラル(Carbon Neutrality)、ESG 投資(ESG Investing)、ファクター・モデル(Factor Model)、ポートフォリオ選択(Portfolio Choice)

Received: April 21, 2023



JAREFE Preprintは、クリエイティブ・コモンズ 表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際ライセンス <<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>> の下に公開しています。

Except where otherwise noted <<https://creativecommons.org/policies#license>>, JAREFE Preprint on this site is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>.

カーボン・ファクター・ポートフォリオ

石島博 (中央大学大学院法務研究科)

山本匡人 (Yale School of Management (MBA Candidate '24))

前田章 (東京大学大学院総合文化研究科)

後藤順哉 (中央大学理工学部)

概要

本研究では、日本の株式市場において、株価より推定した月次のカーボン・ファクターのリスクとリターンに関する特徴を明らかにする。カーボン・ファクターとは、日本企業が二酸化炭素の排出量を1%だけ削減すると、その株価を何%だけ増加させるかを表す指標である。本カーボン・ファクターについて、これまでに株価を説明する指標として知られている9つのファクターにはない特徴付けを行う。その上で、カーボン・ファクターを考慮したポートフォリオ選択モデル「カーボン・ファクター・ポートフォリオ」を提案する。さらに、その提案ポートフォリオについて、有効フロンティアを含めたリスクとリターンに関する特徴を分析する。

1. 背景と目的

持続可能な地球環境に資すべく、気候変動を抑止するのに有効な手立てとして温室効果ガスの排出量の削減が急速に進められている。7種類ある温室効果ガスは二酸化炭素、つまりカーボンに換算して計量可能であるため、温室効果ガスの排出量の削減は、二酸化炭素の排出量の削減と換言することができる。また、二酸化炭素の排出量は、その英訳そのままにカーボン・エミッション(エミッションとも)とも呼ばれる。すなわち、気候変動を抑止のための世界的な取り組みが、2050年に向けたカーボン・エミッションのネット・ゼロ、あるいはカーボン・ニュートラルである。資本市場の機能を利用したネット・ゼロの取り組みの一つがESG投資である。ESG投資には、いくつかの投資戦略が存在する(Usher, 2022)。例えば、化石燃料を扱う産業や企業への投資を取りやめるダイベストメントや、建設的対話(エンゲージメント)や議決権行使といったコーポレート・ガバナンスの機能を活用して、企業から排出される温室効果ガスを減らす取り組みが急速に推進されている。

こうした背景より、企業の株価には二酸化炭素排出量が反映され得ることが予想される。二酸化炭素排出量と、株価の関係を分析した先行研究として、Bolton and Kacperczyk

(2021a)が挙げられる。彼らは、炭素リスクプレミアム(carbon risk premium)を、「株式投資のリスクプレミアムについて、既知のリスク・ファクターをコントロールしてもなお、二酸化炭素排出量が説明する部分」と定義した。その上で、「炭素リスクプレミアムが株式市場において統計的に有意に存在する」という炭素リスクプレミアム仮説に関して、米国市場における詳細かつ緻密な実証分析に基づいた証拠を示している。また、Bolton and Kacperczyk (2021b)では、炭素リスクプレミアム仮説が米国株式市場のみならず、世界各国の株式市場においても存在し得るかどうかの観点より、より広範な実証分析を行っている。まとめると、Bolton and Kacperczyk (2021a,b)の主要な結果として、米国や中国を中心とした世界各国の株式について、既知のリスク・ファクターをコントロールした上でも、「二酸化炭素をより多く排出する企業の株式は、より高いリターンをもたらす」という炭素リスクプレミアムが存在することを見出した。

一方で、石島ら(2021b)は、日本の株式市場において、二酸化炭素排出量が負の株価リターンをもたらす、株価を有意に押し下げる効果があることを示した。これは、Bolton and Kacperczyk (2021a,b)が唱えた炭素リスクプレミアムは、日本の株式市場においては負の値を取るということである。すなわち、日本の株式市場においては、カーボンへの投資がリスクを伴うものであると見るとき、相応のリターンが得られるわけではなく、逆に負のリターンをもたらすことを意味する。こうした日本の株式市場における負の炭素リスクプレミアムは、Bolton and Kacperczyk (2021a,b)よりも 10 年以上前に、大鹿・尾畑・阪・広瀬(2009)、阪・大鹿(2011)によって実証されている。より最近の五島・八木(2021)の研究でも、日本の株式市場における負のリスクプレミアムが報告されている。

石島ら(2021b)の見出した炭素リスクプレミアムの特徴をまとめてみよう。炭素リスクプレミアムには、いくつかの種類が存在する。本研究では、「二酸化炭素を 1 単位だけ排出すると、何%だけ株価が増加するか」という「炭素量」リスクプレミアムには着目しない。本研究では、「二酸化炭素の排出量を 1%だけ削減すると、何%だけ株価が増加するか」を表現する「炭素削減率」リスクプレミアムに着目する。というのも、ネット・ゼロ社会への移行期にあっては、排出量やその増加割合を評価するよりも、2030 年あるいは 2050 年に向けた排出量の削減割合を評価することが重要だからである。「炭素削減率」リスクプレミアムは、日本の株式市場で取引されるすべての株価に反映される。本リスクプレミアムは、任意の取引時点において動的に変化し得る。すなわち、「炭素削減率」リスクプレミアムは、任意の取引時点において、すべての株価に反映される共有ファクターであることとすることができる。これを本論文では、「カーボン・ファクター(carbon factor)」と呼ぶこととする。

本論文では、石島ら(2021b)が推定した 2014 年 10 月から 2020 年 9 月までの月次のカーボ

ン・ファクターを用いて以下の分析を行う。第 2 節では、カーボン・ファクターのリスクとリターンに関する特徴を、既存の 9 つのファクターと比較しつつ明らかにする。第 3 節では、カーボン・ファクターを考慮した最適なポートフォリオであるカーボン最適ポートフォリオ「カーボン・ファクター・ポートフォリオ」を提案し、リスクとリターンの観点よりその特徴を分析する。第 4 節でまとめとする。

2. カーボン・ファクターとリスク・リターン・プロフィール

本節では、カーボン・ファクターのリスクとリターンの特徴を、これまでに株価を説明する指標として知られている 9 つのファクターと比較しつつ明らかにする。

2.1. 構築方法と定義

本研究で利用するカーボン・ファクターは、石島ら(2021b)が 2014 年 10 月から 2020 年 9 月までの期間を対象として推定した月次時系列である。以下に、石島ら(2021b)によるカーボン・ファクターの推定方法を要約する。

株式市場には n 個の株式が離散時点 $t (= 0, \dots, T)$ で取引されているとする。時点 $t - 1$ と t で挟まれた時間間隔のことを期間 t と呼ぶ。市場で観測される株価のレート・リターン $R_{i,t}$ ($i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T$) を被説明変数として、次式で表されるクロスセクション回帰を行う。

$$R_{i,t} = \alpha_t \cdot CO2_{i,t} + c'_t CTRL_{i,t} + \tau \cdot \mathbf{1}_{\{TIME\ t\}} + \gamma \cdot \mathbf{1}_{\{SECTOR\ j\}} + \eta \cdot \mathbf{1}_{\{FIRM\ i\}} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

関心のある説明変数は、期間 t における企業 i の「二酸化炭素排出量の削減率 $CO2_{i,t}$ 」である。その回帰係数である α_t は、「日本の株式市場において、上場企業の株式に投資したとき、1 期間後に得られるレート・リターンについて、その企業が二酸化炭素排出量を 1% だけ削減すると、何% だけ株価が増加するか」を表す「炭素削減率リスクプレミアム」である。炭素削減率リスクプレミアムは、株価を説明する既知の説明変数 c_t や、月次時点ダミー $\mathbf{1}_{\{TIME\ t\}}$ 、産業(東証 33 業種)ダミー $\mathbf{1}_{\{SECTOR\ j\}}$ 、企業ダミー $\mathbf{1}_{\{FIRM\ i\}}$ をコントロールしてもなおレート・リターンを有意に説明する。なお、石島ら(2021b, 表 1)が導入したコントロール変数は 8 つある。付録にて [図表 7](#) として再掲する。

石島ら(2021a)によれば、日本企業が報告する年次の二酸化炭素排出量データには、ONTAI と SCOPE3 の 2 種類がある。前者の ONTAI は、温対法(地球温暖化対策の推進に関する法

律)を根拠として報告される。また前者は、日本国内のビジネスから排出される温室効果ガス(二酸化炭素換算)に限定すれば、直接排出量と間接排出量の合計であり、GHG プロトコルのスコープ1と2の合計とみなすことができる。後者の SCOPE3 は、GHG プロトコルに沿って報告されるいわゆるサプライチェーン排出量である。これらを東洋経済 CSR データベース・環境編より取得した。但し、当データベースには異常値が含まれているため、石島ら(2021a)に記されている補正を行った。その上で、2種類の二酸化炭素排出量データのそれぞれについて、前年度から当年度にかけての削減率を求めている。2014年10月から2020年9月までの72か月にわたり、ONTAIとSCOPE3のそれぞれについて式(1)を毎月推定

して、2種類の炭素削減率リスクプレミアムに関する月次時系列を得る： $\{a_t^{(ONTAI)}: t =$

$2014.10, \dots, 2020.9\}, \{a_t^{(SCOPE3)}: t = 2014.10, \dots, 2020.9\}$ 。こうして得た2種類の炭素削減率リスクプレミアムの月次時系列のことを、本論文では「カーボン・ファクター」と呼ぶこととする。

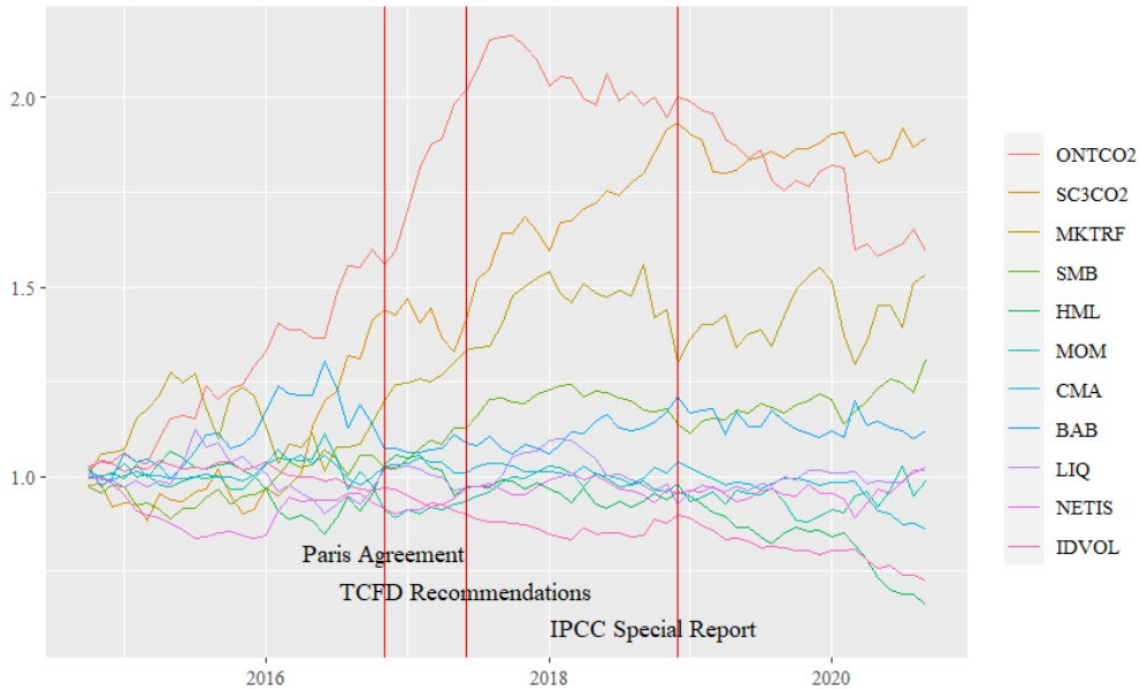
2.2. インデックスファンドとしての運用パフォーマンス

カーボン・ファクターをインデックスファンドとしてみなし、これがどの程度の運用パフォーマンスをもたらすのかが最初の関心である。2014年9月において、2つのカーボン・ファクターにそれぞれ1円を投資し、その後2020年9月までの72か月の追跡期間において、どのような運用パフォーマンスを生んだのか、運用残高の軌跡を図表1に示す。ファイナンス研究において、企業の株価レート・リターンに関する共通の説明変数として知られている9つの共有ファクターの運用残高についても比較のため示している。ここで、9つの共有ファクターは、それらの定義とともに付録の図表8にまとめている。

ONTAI(図表1 ONTCO2)の運用パフォーマンスは、2016年11月のパリ協定発効を契機として急激な上昇を見せている。パリ協定は、国際連合気候変動枠組条約(UNFCCC)の締約国会議(COP)である COP21 で採択され、各国に二酸化炭素削減目標を掲げることを求めている。本協定の前身であり、二酸化炭素削減のための世界的な取り組みの嚆矢となった京都議定書は、1997年の COP3 で採択され 2005年に発効している。本議定書が日本国内にて実効あるものとするべく、温対法が1998年に交付され 2005年に改正されている。温対法の2005年の改正に伴い、環境省の「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度」が導入され、企業など温室効果ガスを多量に排出する特定事業所には報告義務がある。本報告は、法的な義務であり、「報告を怠ったり虚偽の報告を行った場合には、20万円以下の過料が課される」という罰則がある。したがって、正確性が担保されるものと思料される。このような経緯で ONTAI が報告されることとなったため、パリ協定の発効により、日本の株式市場

はより明確に、企業の二酸化炭素削減努力を評価することとなった。すなわち、**図表 1** の ONTAI カーボン・ファクターの運用パフォーマンスが示すように、本協定の発効後、株価に反映される ONTAI 炭素削減率リスクプレミアムが急上昇したことを示唆している。

SCOPE3 (**図表 1** SC3CO2) の運用パフォーマンスは、ONTAI を追随する形で、2017 年 6 月の TCFD 最終報告書の発行から、2018 年 10 月の IPCC1.5°C 特別報告書の発行にかけて、安定的な上昇を見せている。SCOPE3 は、「温室効果ガスプロトコル(GHG Protocol)」に基づいて報告される二酸化炭素排出量の 1 つの分類である。本プロトコルでは、報告すべき二酸化炭素排出量を 3 つに分類している。すなわち、SCOPE1: 企業から直接排出される CO₂、SCOPE2: 電力・熱・蒸気の消費により企業から間接排出される CO₂、SCOPE3: 企業のサプライチェーンより排出される CO₂ という 3 つの分類である。本プロトコルは初版が出版されたのが 2001 年である。それから年月を経て、本プロトコルが一躍脚光を浴びたのは、TCFD が 2017 年に公表した最終報告書で、企業等に本プロトコルに沿った二酸化炭素排出量を報告することを推奨したためである。特に、金融機関にとって融資先、投資先の企業が排出する二酸化炭素は、本プロトコルのいう SCOPE3 に該当する。こうした経緯より、ONTAI 削減よりも、SCOPE3 削減への取り組みの方を、日本の株式市場は評価することとなった。**図表 1** の SCOPE3 カーボン・ファクターの運用パフォーマンスが示すように、TCFD 最終報告書の発行後、株価に反映される SCOPE3 炭素削減率リスクプレミアムが急上昇したことが現れている。一方で、SCOPE3 の上昇に伴い、ONTAI はピークアウトしている。こうした現象も、投資家が ONTAI から SCOPE3 へのフォーカスを推移しつつあることを支持しているといえよう。



図表1 カーボン・ファクターと既存ファクターの運用パフォーマンス比較

2.3. リスク・リターン平面上の特徴

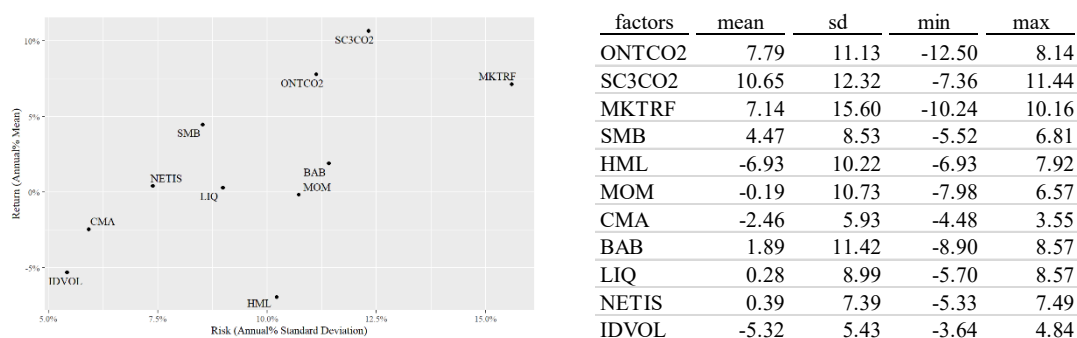
カーボン・ファクターはリスク・リターン平面上でどの位置付けとなるのかが次の興味である。図表2は、2014年10月から2020年9月までの72か月における、カーボン・ファクターと既存の9つの共有ファクターのリスクとリターンに関する散布図である。リターンに着目すれば3つのグループに分類することができる。すなわち、7%のリターンを生むハイ・リターンのグループ、0%から5%のリターンを生むロー・ミドル・リターンのグループ、そして、マイナスのリターンを生むグループである。

ハイ・リターンのグループに属するファクターは、MKTRF、ONTAI、SCOPE3である。2012年12月を起点とするアベノミクスの恩恵を受けてMKTRFは良好なリターン(7.14%)を、許容可能なリスク(15.6%)で提供している。一方、ONTAIやSCOPE3はMKTRFを超えるリターン(7.79%, 10.65%)を、より低いリスク(11.13%, 12.32%)で提供していることが分かる。すなわち、日本の株式市場は企業の炭素削減の取り組みを高く評価しており、市場全体よりも優れたリスクプレミアムを提供している、と解釈することができる。

ロー・ミドル・リターンのグループに属するファクターは、SMB、BAB、NETIS、LIQ、MOMである。そのうちSMBはローリスク(8.53%)かつローリターン(4.47%)という妥当な特徴を有する。それ以外の、BAB、NETIS、LIQ、MOMといったファクターは、ほぼゼロのリターンしか生まないことが分かる。

マイナスのリターンのグループに属するファクターは、CMA、IDVOL、HML である。CMA や IDVOL はマイナスのリターン(-2.46%、-5.32%)をもたらすが、リスク(5.93%、5.43%)も低い。しかし、HML はリスク(10.22%)が高いにもかかわらず、リターン(-6.93%)が大きくマイナスとなっている。

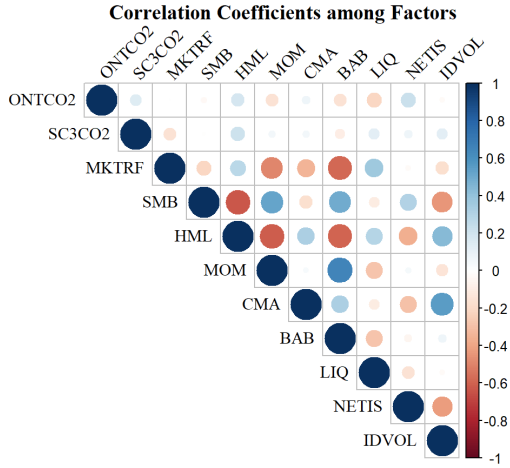
本節をまとめると、日本の株式市場においてリスクとリターンのトレードオフを適切に反映しているファクターは 4 つに限られることが分かる。具体的には、MKTRF、ONTAI、SCOPE3 はハイリスク・ハイリターンを、SMB はローリスク・ローリターンを提供するファクターであるといえる。



図表 2 カーボン・ファクターと既存ファクターのリスク・リターン・プロフィール

2.4. カーボン・ファクターの相関分析

カーボン・ファクターは既存の 9 つの共有ファクターとどのような相関構造を有しているかを分析する。図表 3 に 2 種類のカーボン・ファクターと 9 つの共有ファクターの相関係数行列を示す。ONTAI と SCOPE3 という 2 種類のカーボン・ファクターは両者とも、他の 9 つの共有ファクターと低い相関を持つことが分かる。具体的には、ONTAI は-0.22 から 0.22 の相関を、SCOPE3 は-0.16 から 0.21 の相関を持つ。ONTAI や SCOPE3 というカーボン・ファクターは、ハイリスク・ハイリターンという特徴(図表 2)と合わせて、他の 9 つの共有ファクターが捉えていない日本の株式市場のリスク・リターン構造を表現している可能性が示唆される。



	ONTCO2	SC3CO2	MKTRF	SMB	HML	MOM	CMA	BAB	LIQ	NETIS	IDVOL
ONTCO2	1.00	0.14	0.00	-0.04	0.18	-0.16	0.07	-0.16	-0.22	0.22	-0.03
SC3CO2	1.00	-0.16	-0.01	0.21	0.05	0.05	-0.10	0.12	0.07	0.13	-0.18
MKTRF	1.00	-0.22	0.27	-0.50	-0.34	-0.59	0.36	-0.03	-0.18		
SMB	1.00	-0.64	0.52	-0.18	0.49	-0.11	0.30	-0.45			
HML	1.00	-0.62	0.32	-0.60	0.29	-0.37	0.43				
MOM	1.00	0.03	0.65	-0.29	0.04	-0.15					
CMA	1.00	0.32	-0.11	-0.30	0.55						
BAB	1.00	-0.29	-0.06	0.07							
LIQ	1.00	-0.16	-0.03								
NETIS	1.00	-0.43									
IDVOL	1.00										

図表3 カーボン・ファクターと既存ファクター間との相関

3. カーボン・ファクター・ポートフォリオ

本節では、カーボン・ファクターを考慮したポートフォリオを提案する。そのうえで本ポートフォリオを日本の株式市場へ応用し、その特徴を明らかにする。

3.1. 定式化

市場には n 個の資産が離散時点 $t (= 0, \dots, T)$ で取引されているとする。市場で観測される資産のレート・リターン $R_{i,t} (i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T)$ は、カーボン・ファクターを含めて、 K 個の共通ファクター $F_{k,t} (k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T)$ で表現されるとする。共通ファクターは以下の正規分布に従うと仮定する。

$$\mathbf{F}_t \sim \mathcal{N}_K(\boldsymbol{\mu}^F, \boldsymbol{\Sigma}^F) = \mathcal{N}_K \left(\begin{pmatrix} \mu_1^F \\ \vdots \\ \mu_k^F \\ \vdots \\ \mu_K^F \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sigma_{1,1}^F & \cdots & \sigma_{1,k}^F & \cdots & \sigma_{1,K}^F \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{k,1}^F & \cdots & \sigma_{k,k}^F & \cdots & \sigma_{k,K}^F \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{K,1}^F & \cdots & \sigma_{K,k}^F & \cdots & \sigma_{K,K}^F \end{pmatrix} \right) \quad (2)$$

共通ファクター \mathbf{F}_t を用いて、期間 t における資産 i のレート・リターンを次のマルチファクターモデルで表現する。

$$R_{i,t} = \alpha_i + \sum_{k=1}^K \beta_{i,k} F_{k,t} + \varepsilon_{i,t} \quad \text{or} \quad \mathbf{R}_t = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\beta} \mathbf{F}_t + \boldsymbol{\varepsilon}_t \quad (3)$$

但し、 $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_n)' \in \mathbb{R}^n$, $\boldsymbol{\beta} = (\beta_{i,k})_{i=1 \cdots n; k=1 \cdots K} \in \mathbb{R}^{n \times K}$ とおいた。また、誤差項は以下の正規分布に従うとする。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_t \sim \mathcal{N}_N(\mathbf{0}, \text{diag}(\boldsymbol{\sigma})) = \mathcal{N}_N\left(\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_n^2 \end{pmatrix}\right) \quad (4)$$

マルチファクターモデルの下で、レート・リターンの期待値と分散は次式で与えられる。

$$E[\mathbf{R}_t] = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\mu}^F \quad (5)$$

$$V[\mathbf{R}_t] := \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\Sigma}^F\boldsymbol{\beta}' + \text{diag}(\boldsymbol{\sigma}) \quad (6)$$

投資家が期間 t で保有するポートフォリオを各資産への投資金額比率(ポートフォリオ・ウェイト)によって特徴づける。

$$\boldsymbol{\pi}_t = (\pi_{1,t} \cdots \pi_{i,t} \cdots \pi_{n,t})' \quad (7)$$

期間 t におけるポートフォリオのレート・リターン $R_t^P := \boldsymbol{\pi}_t' \mathbf{R}_t$ の期待値と分散は次式の通りである。

$$E[R_t^P] = \boldsymbol{\pi}_t' E[\mathbf{R}_t] = \boldsymbol{\pi}_t' (\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\mu}^F) \quad (8)$$

$$V[R_t^P] = \boldsymbol{\pi}_t' (\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\Sigma}^F\boldsymbol{\beta}' + \text{diag}(\boldsymbol{\sigma})) \boldsymbol{\pi}_t \quad (9)$$

投資家は期間 t の期首において以下の2次計画問題を解くことにより最適な平均・分散ポートフォリオを得ることができる。

$$\left| \begin{array}{ll} \min_{\boldsymbol{\pi}_t} & V[R_t^P] = \boldsymbol{\pi}_t' (\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\Sigma}^F\boldsymbol{\beta}' + \text{diag}(\boldsymbol{\sigma})) \boldsymbol{\pi}_t \\ \text{s. t.} & E[R_t^P] = \boldsymbol{\pi}_t' (\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\mu}^F) = \text{Target Return} \\ & \boldsymbol{\pi}_t' \mathbf{1} = 1 \\ & \boldsymbol{\pi}_t \geq \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (10)$$

式(10)を解いて得た解 $\boldsymbol{\pi}_t^*$ を、カーボン・ファクター・ポートフォリオ(carbon factor portfolio)と呼ぶことにする。

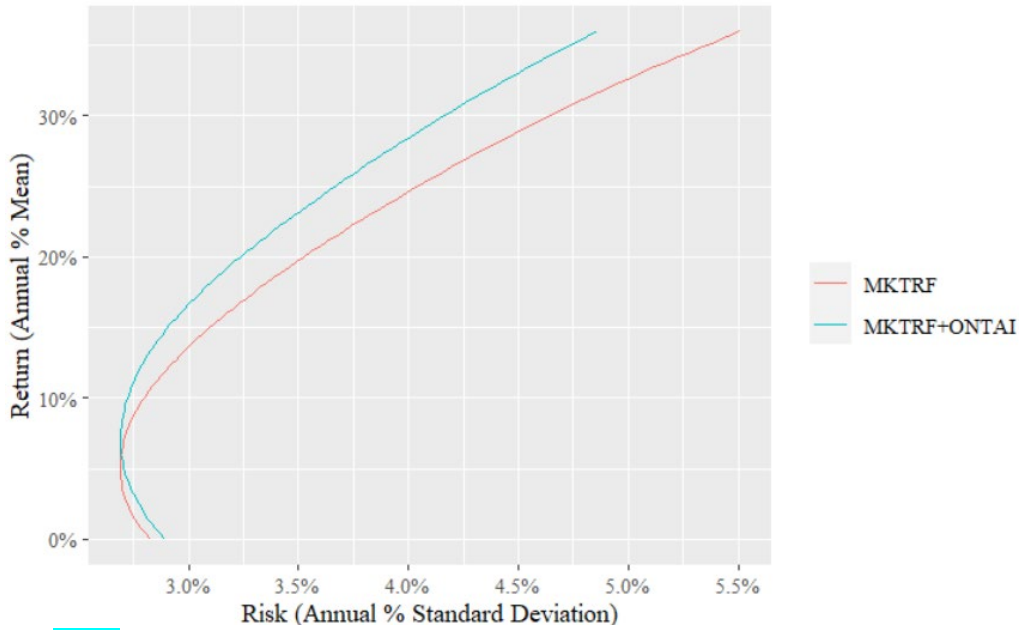
3.2. 有効フロンティアの拡張

東京証券取引所に上場されている646銘柄を対象として、カーボン・ファクター・ポートフォリオを構築する。具体的には、2014年10月から2020年9月までの72か月において、個別銘柄のレート・リターン、ONTAIカーボン・ファクター、及び既存の9つの共有ファ

クター(付録の [図表 8](#))で構成される月次データを用意する。この月次データを用いて、式(2)-(4)を構成するパラメータ $\Theta := \{\alpha, \beta, \sigma; \mu^F, \Sigma^F\}$ を推定する。推定されたパラメータ Θ を代入した式(10)について、 $Target Return = \rho \in [0\%, 36\%]$ を設定して、2次計画法のパッケージ(quadprog)を用いて求解した。その最適解が、 $Target Return = \rho$ に対応する最適なカーボン・ファクター・ポートフォリオ $\pi^*(\rho)$ となる。そして、リスク・リターン平面上の $\{risk, return\} := \{\pi^{*'}(\rho)(\beta\Sigma^F\beta' + diag(\sigma))\pi^*(\rho), \pi^{*'}(\rho)(\alpha + \beta\mu^F)\}$ の軌跡が有効フロンティアである。

まずファクター F_t として市場ポートフォリオ $MKTRF$ のみを採用したシングル・ファクター・ポートフォリオを構築する。その有効フロンティアを [図表 4](#) において赤の実線で描いた。MKTRF のリスクとリターンはそれぞれ 15.60%と 7.14%である([図表 2](#))。よって、MKTRF と比べれば、シングル・ファクター・ポートフォリオの有効フロンティアは、リスクとリターンのトレードオフを大きく改善していることが分かる。

2.3、2.4 節の結果を踏まえれば、2014年10月から2020年9月までの72か月における日本の株価を説明する共有ファクターの候補は MKTRF に加えて、カーボン・ファクターである。本研究では、カーボン・ファクターとして ONTAI を取り上げ、MKTRF と組み合わせたカーボン・ファクター・ポートフォリオを構築する。その有効フロンティアを [図表 4](#) の青緑の実線で示す。最小分散点よりも上方の曲線が平均分散の意味で有効であることに注意する。どのリスクで比較してみても、カーボン・ファクター・ポートフォリオはシングル・ファクター・ポートフォリオよりもリターンが大きく、前者は後者を支配することが分かる。したがって、日本の株式を対象としたポートフォリオ選択において、カーボンは平均と分散のトレードオフをコントロールには必須の共有ファクターであるといえよう。



図表 4 ONTAI カーボン・ファクターと 1 ファクターによる有効フロンティアの比較

3.3. MVE ポートフォリオにおけるカーボン・ファクターのリスク・リターン寄与率

ポートフォリオの期待値を表す式(8)において、ファクター k の期待値 μ_k^F を含む項をファクター k のリターン寄与度と呼ぶ：

$$\bar{\beta}_k \cdot \mu_k^F \quad (11)$$

ここで、資産 i におけるファクター k の係数 $\beta_{i,k}$ について、ポートフォリオ・ウェイト $\pi_{i,t}$ による加重平均を、ファクター k のポートフォリオ・ベータと呼ぶこととする。

$$\bar{\beta}_k := \sum_{i=1}^n \pi_{i,t} \cdot \beta_{i,k} \quad (12)$$

一方、ポートフォリオの分散を表す式(9)において、ファクター k の分散 $\sigma_{k,k}^F$ を含む項 $\bar{\beta}_k^2 \cdot \sigma_{k,k}^F$ について、その和で割ったものを、ファクター k のリスク寄与率と呼ぶ：

$$\bar{\beta}_k^2 \cdot \sigma_{k,k}^F / \sum_{l=1}^K \bar{\beta}_l^2 \cdot \sigma_{l,l}^F \quad (13)$$

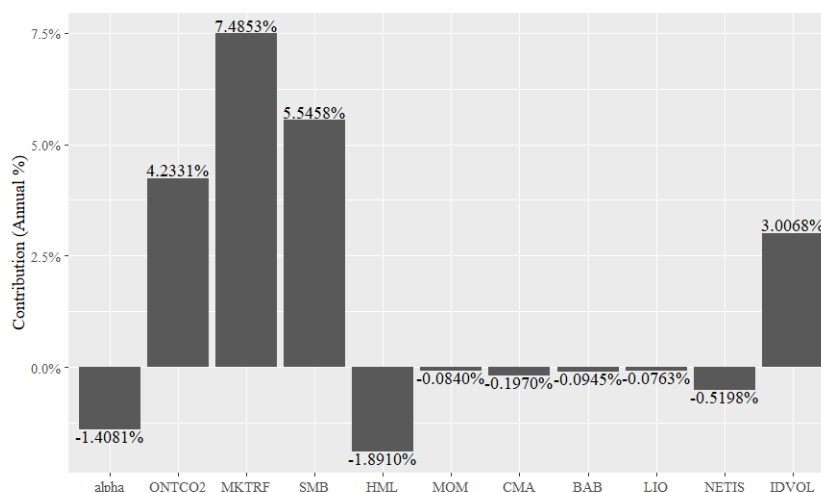
以下では、図表 4 に示すカーボン・ファクター・ポートフォリオにおいて、Sharpe Ratio が最大となる MVE(接点)ポートフォリオに着目する。MVE ポートフォリオにおける、ONTAI カーボン・ファクターのリターン寄与度とリスク寄与率をそれぞれ、図表 5 と図表 6 に示す。

図表 5 を見ると、ONTAI カーボン・ファクターは、MVE ポートフォリオのリターンを構成する 3 大ファクターとなっていることが分かる。すなわち、本ポートフォリオのリターン寄与度が大きいファクターは上から順に、MKTRF ファクター(7.49%)、SMB ファクター

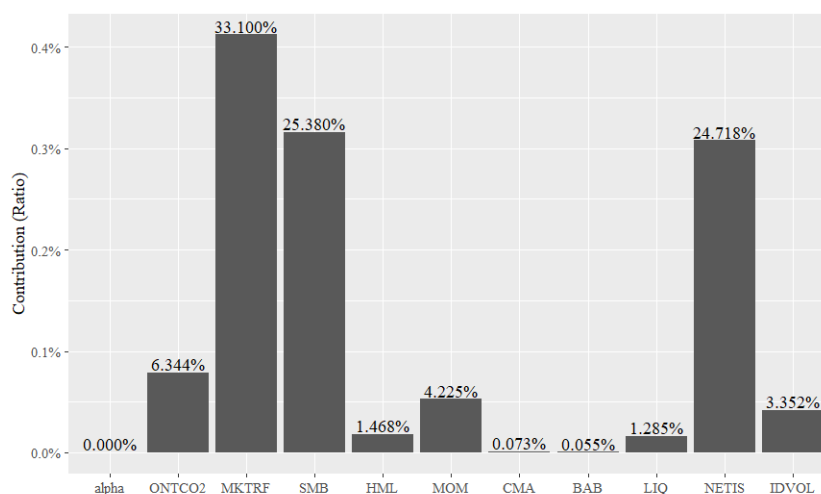
(5.55%)、ONTAI カーボン・ファクター(4.23%)である。

一方、**図表 6**より、MVE ポートフォリオのリスクを構成するファクターは、上から順に、MKTRF ファクター(33.1%)、SMB ファクター(25.4%)、NETIS ファクター(24.7%)である。これらのリスク寄与度に関する 3 大ファクターに比べると、ONTAI カーボン・ファクターのリスク寄与率は 6.3%に留まるのである。

まとめると、ONTAI カーボン・ファクターは、リスク寄与率が低いが、リターン寄与度は高いという特徴を持つ。換言すれば、ONTAI カーボン・ファクターは、他のファクターとの比較において、リスク寄与率あたりのリターン寄与度が高いといえる。つまり、ONTAI カーボン・ファクターは、より効率的に MVE ポートフォリオのリスク・リターン・プロファイルの拡張に寄与していると言えよう。この結果は、カーボン・ファクターが、日本の株式市場を対象とした資産運用において、リスクとリターンのトレードオフのコントロールという観点から重要な役割を担い得ることを示唆するものである。



図表 5 MVE ポートフォリオのリターンに占める各ファクターの寄与度



図表 6 MVE ポートフォリオのリスクに占める各ファクターの寄与率

4. 結論

本研究では、二酸化炭素の排出量を1%だけ削減すると、何%だけ株価が増加するかを表す炭素削減率リスクプレミアムをカーボン・ファクターとして着目した。カーボン・ファクターは、既存の9つのファクターにはない、リスクとリターンの特徴を持つことを見出した。そうした特徴を持つカーボン・ファクターを考慮したカーボン・ファクター・ポートフォリオを提案した。カーボン・ファクターは、MVEポートフォリオのリスク・リターン・プロフィールの拡張に寄与することが分かった。すなわち、カーボン・ファクターは、日本の株式市場を対象とした資産運用において、リスクとリターンのトレードオフのコントロールという観点から重要な役割を担い得ることを示唆する。

参考文献

Bolton, P. and Kacperczyk, M. (2021a) “Do Investors Care about Carbon Risk?” *Journal of Financial Economics*, 142(2), 517-549.

Bolton, P. and Kacperczyk, M. (2021b) “Global Pricing of Carbon-Transition Risk,” NBER Working Paper No. 28510, DOI 10.3386/w28510, URL: <https://www.nber.org/papers/w28510> (Accessed: February 12, 2023)

Usher, B. (2022) *Investing in the Era of Climate Change*, Columbia Business School Publishing.

石島博, 伊藤隆敏, 前田章, 真鍋友則 (2021a) “二酸化炭素排出量と企業財務,” JAREFE Preprint, JP2021-01, 2021.9.23.

石島博, 伊藤隆敏, 前田章, 真鍋友則 (2021b) “負の炭素リスクプレミアム,” JAREFE Preprint, JP2021-02, 2021.9.23.

大鹿智基, 尾畑裕, 阪智香, 広瀬義州 (2009) “第4部 財務報告の変革のための企業価値評価モデル,” 日本会計研究学会最終報告 財務報告の変革に関する研究, pp.35-62.

阪智香, 大鹿智基 (2011) “CO2 排出量の株価説明力と情報開示の影響,” *会計プロGRESS*, 12, pp.1-12.

五島圭一, 八木厚樹 (2021) “東京株式市場におけるカーボンプレミアム,” 日本ファイナンス学会第3回秋季大会 予稿, 2021.11.20.

付録

RET (i,t)	前月末最終営業日を(t-1)、当月末最終営業日をtとすると、[t-1, t]の期間における企業iの配当込み収益率(%)。
LOGSIZE (i,t)	t月末における企業iの時価総額(評価株価×発行済株式数)の自然対数値(円単位の時価総額をそのまま対数化)。
B/M (i,t)	t月末における企業iのPBRの逆数(自己資本を時価総額で割ったもの)。自己資本は、t月末時点で公表されている直近実績自己資本(本決算、連結優先)を採用。
LEVERAGE (i,t)	t月末における企業iの貸借対照表上のレバレッジ=総資産/自己資本。総資産と自己資本は、t月末時点で公表されている直近実績総資産(本決算、連結優先)と、直近実績自己資本(本決算、連結優先)を採用。自己資本がNULL or 0以下、あるいは総資産がNULL or 0の場合のレバレッジはNULL。
MOM (i,t)	企業iのt月における直近12カ月間の月次配当込みリターン(RET)の平均値(%)。計算に使用するリターンは、[t-12月, t-1月]までの12ヶ月間。直近12ヶ月の月次リターンが揃っていない企業のMOMはNULL。
INVEST/A (i,t)	企業iの資本支出(capital expenditure)を総資産で割ったもの。資本支出は、2000年3月期以降のキャッシュフロー計算書から、業態別に以下の項目を抜粋。 <ul style="list-style-type: none"> ・一般事業会社、証券→「有形および無形固定資産の増減額」 ・銀行、損保、生保→「動産不動産の増減額」 総資産と資本支出は、t月末時点で公表されている直近実績総資産(本決算、連結優先)と、直近実績資本支出(本決算、連結優先)を採用。資本支出は「支出=プラス」として計算。資本支出がマイナスの場合もある(支出よりも売却による収入の方が多い場合)。資本支出がNULL or 0以下、あるいは総資産がNULL or 0の場合のINVEST/AはNULL。
LOGPPE (i,t)	t月における企業iのPPE(property, plant, and equipment = 有形固定資産)の自然対数値(百万円単位の有形固定資産をそのまま対数化)。 有形固定資産は、t月末時点で公表されている直近実績有形固定資産(本決算、連結優先)を採用。有形固定資産は、業態別に以下の項目を抜粋。 <ul style="list-style-type: none"> ・一般事業会社、証券→「有形固定資産合計」 ・銀行、損保、生保→「動産不動産合計」
BETA (i,t)	t月における企業iのベータ(t月末時点における過去1年間の日次データを利用して計算したもの)。市場のリターンは、Fama-French3ファクターモデルの日次マーケットリターン(金融含む)を使用。ベータ計算時の回帰の被説明変数は、リスクフリーリターン除きの日次配当込みリターン。日次で直近12ヶ月間の配当込みリターンが揃っていない企業のBETAはNULL。
VOLAT (i,t)	t月において企業iの過去12カ月の月次配当込みリターン(RET)から算出した標準偏差(%) (年率換算はしていない)。直近12ヶ月の月次配当込みリターンが揃っていない企業のVOLATはNULL。

図表 7 クロスセクション回帰式(1)で用いた被説明変数と8つのコントロール変数の定義。

MKTRF (t)	Fama-French3ファクターモデルのマーケットリターン。t月の加重平均ポートフォリオの月次リターンから、月次リスクフリー・レートを差し引いたもの。
SMB (t)	Fama-French3ファクターモデルのSMBファクター。小型株をロング、大型株をショートするポートフォリオの月次リターン。金融含むデータを使用。
HML (t)	Fama-French3ファクターモデルのHMLファクター。高B/M株(バリュー株)をロング、低B/M株(グロース株)をショートするポートフォリオの月次リターン。金融含むデータを使用。
MOM (t)	モーメンタムファクター。直近1年間にリターンについて、リターン勝者株をロング、リターン敗者株をショートするポートフォリオの月次リターン。
CMA (t)	Fama-French5ファクターモデルのCMAファクター。コンサバティブな株をロング、アグレッシブな株をショートするポートフォリオの月次リターン。
BAB (t)	低ベータ株をロング、高ベータ株をショートするポートフォリオの月次リターン。5年の月次ベータ値を使用。 各企業のベータの計算は、[t-60月, t-1月]の60ヶ月間の月次配当込みリターン(リスクフリーリターン除き)を被説明変数、同期間の項番2のマーケットリターン「MKTRF」(金融含む)を説明変数として回帰した係数。月次で60ヶ月間の配当込みリターンが揃っていない企業のベータはNULLとした。 ベータが計算可能な企業群で低ベータ株と高ベータ株の2分位に分け、2つの時価加重ポートフォリオについて、[t-1月, t月]の配当込みリターンを計算し、(低ベータ株ポートフォリオのリターン) - (高ベータ株ポートフォリオのリターン)を計算してBABファクターとした。
LIQ (t)	Pastor-Stambaughの流動性ファクターの月次ファクターリターン。
NET ISSUANCE (t)	正味発行高(net issuance)の高い株をロング、正味発行高の低い株をショートするポートフォリオの月次リターン。但し、t月の正味発行高は、2年前と1年前の分割調整済みの発行済株式数の自然対数値の差。 t-25月の普通株発行済株式数とt-13月の普通株発行済株式数を、期間中の株式分割や株式併合などの影響を調整してt-1月ベースに変換した後で、NET ISSUANCE = (t-13月の普通株発行済株式数) - (t-25月の普通株発行済株式数)を計算。
IDIO VOL (t)	idiosyncraticボラティリティが低い株をロング、idiosyncraticボラティリティが高い株をショートするポートフォリオの月次リターン。Fama-French3ファクターモデルの残差リターンを使用。 idiosyncraticボラティリティは、t-1月の1ヶ月間の日次残差リターンから計算。t-1月において、1ヶ月間の日次のリターンが揃っていない企業は計算対象外とした。

図表 8 株式投資のリスクプレミアムを説明する9つの共有ファクターの定義。