

人工衛星観測データを用いた CO₂濃度推計値に基づく 消費動向の計測モデルの構築

Measurement Model of Japanese Consumption Trend Using Estimated CO₂ Concentration Based on Satellite Observation Data

水門善之^{1,2*} 田邊洋人² 和泉 潔¹

Yoshiyuki Suimon^{1,2} Hiroto Tanabe² Kiyoshi Izumi¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
¹ Department of Systems Innovations, School of Engineering,
The University of Tokyo

² 野村證券 金融経済研究所経済調査部・データサイエンス部
² Economic Research Department, Data Science Department,
Nomura Securities Co., Ltd.

Abstract: 本研究では、昨今の気候変動リスク、及び CO₂（二酸化炭素）を中心とした温室効果ガス排出への関心の高まりを踏まえ、マクロ経済活動と CO₂排出量の関係性を検証した。はじめに、構造的な環境変化の影響を緩和するための処理を施すことで、CO₂排出量の変化率と経済成長率の間に正の相関関係が維持されていることを確認した。更に本研究では、人工衛星（GOSAT、温室効果ガス観測技術衛星いぶき）の観測情報を用いて計測された地域別の CO₂濃度の情報を用いることで、速報性の高いマクロ経済状況の把握手法を提案した。その際、従来用いられていた速報性の高い消費関連データに加えて、個別企業等の特殊要因の影響を受けにくい衛星観測情報に基づく CO₂データの推計値をモデルの特徴量として活用することで、コロナ禍においても安定したマクロ経済の動態把握が行えることを確認した。

1. はじめに

近年、気候変動への対応が重要性を増す中、様々な国で CO₂（二酸化炭素）を中心とする温室効果ガスの排出削減目標が掲げられており[外務省 21]。日本においても、これらに向けた様々な取り組みが行われている[環境省 21]。本研究では、このような CO₂の排出量への関心の高まりを踏まえ、マクロ経済活動と CO₂の排出量の関係性を分析するとともに、人工衛星（GOSAT、温室効果ガス観測衛星いぶき）からの観測情報を用いて計測された即時性の高い CO₂濃度の情報[JAXA 21][環境研 21]を用いることで、マクロ経済活動を推計する手法を提案する。その際、従来の経済関連データに加えて、粒度の細かい衛星情報をモデル特徴量として活用することで、推計精度の向上を目指す。

前述の通り、本研究では人工衛星からの観測情報

に基づく CO₂濃度の計測値を用いた分析を行うが、昨今、経済・金融の分析においては、様々なデータを活用した研究が進められている。これらはオルタナティブデータ[水門 21]と呼ばれ、多岐にわたるデータが活用されている。

例えば、位置に紐付いた経済活動を把握する上では、携帯電話の通話記録や位置情報は、有用な分析対象となる。[Toole 15]や[Almaatouq 16]は、携帯電話の通話詳細記録（Call Detail Records, CDR）を使用して雇用環境の分析をしているほか、[水門 20a][Suimon 21a]は人々の行動を捉えた携帯電話端末の位置情報（GPS データ）を用いることで、人々の行動とマクロ経済統計の関係性を示している。更に、携帯電話端末の GPS データを用いることで、製造業における人々の勤務状況を把握し、その情報に基づいて生産状況を推計すると共に、それらの情報を株式投資戦略に活用した研究も挙げられる[水門

* Email: d2018ysuimon@socsim.org

20b)[Suimon 21b].

他にも、位置に関する情報の有効性としては、[Askitas 13]が大型輸送車両による輸送活動を測定した料金データが生産量を把握する上で有用であると示しており、GDPの事前予測にも活用している。また、[Arslanalp 2019]や[Cerdeiro 2020]は、自動識別システム(Automatic Identification System, AIS)に基づく船舶交通データを用いて、リアルタイムでの貿易活動の捕捉を行っている。

更に、本研究で用いるような宇宙からのリモートセンシング情報を活用した研究としては、[Clarck 17]が中国経済の状態の把握のために、人工衛星によって観測された夜間光のデータを使用することを提案している。また、[水門 19a]も衛星写真の夜間光データを用いて工場等の夜間活動の状況を把握し、そこから日本の製造業の生産活動を計測する手法を提案している。他にも、夜間光を観測したリモートセンシングのデータは、経済活動の計測に幅広く使用されている [Chen 11][Henderson 12][Michalopoulos 13][Donaldson 16].

2. CO₂排出量とマクロ経済活動

CO₂排出量と経済活動の関係については、これまで様々な研究が行われてきた[宇仁 12][RITE 17]. 本章では始めに、両者の関係を確認したい。図1に世界銀行データに基づく各国・地域における各年のCO₂排出量と実質GDP(2010年米ドル基準)の関係を示した。これによると、各国・地域ともに両者の概ねの連動が確認できる一方で、近年においては、欧州、米国、日本、中国の順に、CO₂排出量と実質GDPの間の水準ベースでの正の相関関係が崩れつつあることが見て取れる。

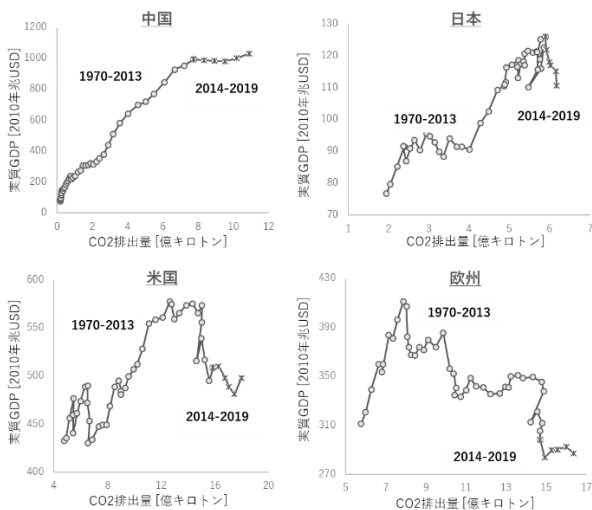


図1: CO₂排出量と実質GDPの水準比較

CO₂排出量と実質GDPのデカップリングについては近年、様々な研究が行われている[RITE 17]. 米国のデータを用いて、CO₂排出量と実質GDPの前年比の相関係数を算出すると(図3)、前年比の単年ごとの比較では、2000年以前の期間に比べて、2001年以降の期間において、両者の相関係数が大きく低下していることが分かる。

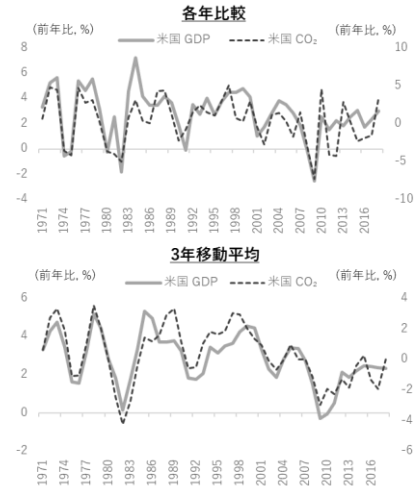


図2: CO₂排出量と実質GDPの比較(米国)

一方で、前年比系列を移動平均値に変換したものを図2の下段に掲載したが、これを見ると両者の連動は概ね保たれていることが分かる。実際、両者の相関係数は、2000年以前と2001年以降ともに同程度に高い(図3)。産業構造や様々な環境変化に伴う基調的な変化(図1で示されたような欧米を中心とした単位CO₂排出量当たりの実質GDP水準の変化)等の影響を、一定程度緩和できる前年比ベースのCO₂排出量の値は、依然として経済環境の変化を把握する上で有用であることが窺える。

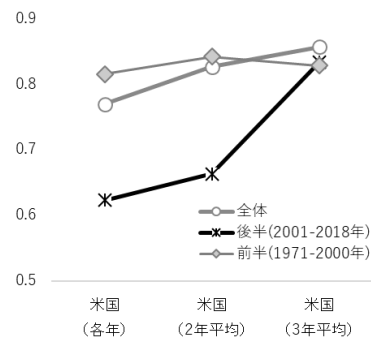


図3: CO₂排出量と実質GDPの相関係数(米国)

3. 衛星観測データを用いた CO₂濃度の計測と経済活動の推計

2章で示した通り、マクロ経済活動を捉える上では、CO₂排出量のデータは有用だろう。一方で、2章で用いたCO₂排出量のデータは、世界銀行が様々な主体からの集計データ等を基に公表しているものであり、公表までに時間を有する。そこで本研究では、人工衛星からの物理的な観測データを用いて推計されたCO₂濃度の値に着目する。

3.1 衛星観測データの活用

本研究では、主要な温室効果ガスであるCO₂（二酸化炭素）、CH₄（メタン）の濃度の観測等を目的として打ち上げられたGOSAT（温室効果ガス観測技術衛星いぶき、Greenhouse gases Observing SATellite）の観測データに基づく分析を行う。GOSATプロジェクト[JAXA 21][環境研 21][松永 19]は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、環境省（MOE）、国立環境研究所（NIES）、が共同で推進している。GOSATは地上約666 kmの高度を飛行しながら約100分で地球を一周し、3日間で同じ軌道に戻る。その間、全球にわたり満遍なく56000地点の観測を行う。

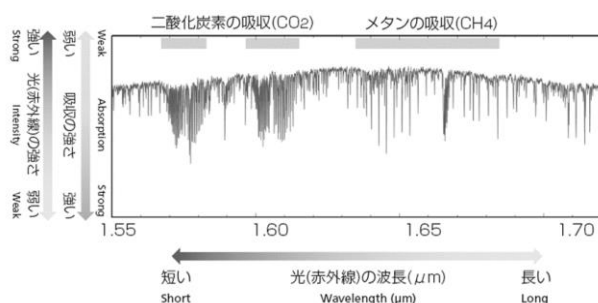


図4: 観測した太陽光スペクトルと吸収線 [JAXA 21]より作成

GOSATは地表面で反射した太陽光を計測することから、CO₂によって特定の波長域の光が吸収される特性を踏まえると、大気中に存在するCO₂濃度の推計が可能となる。このようにして求めた分析対象メッシュごとのCO₂濃度を集計することで、各国・地域のCO₂濃度を概算する。図5では日本を対象として、GOSATデータに基づくCO₂濃度の推計値と、世界銀行が公表しているCO₂排出量を比較した。両者の概ねの連動が確認できよう。

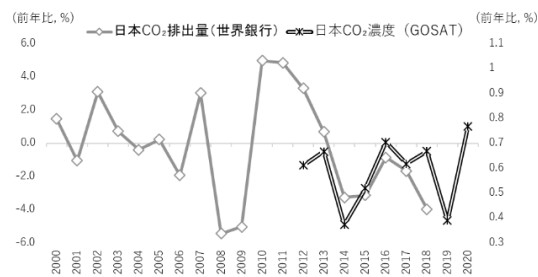


図5: CO₂排出量とCO₂濃度推計値の比較

前述の通り、GOSATは3日間で全球のデータを取得することから、即時性の高いデータの分析が可能である。このようなGOSATデータに基づくCO₂濃度の推計値の有用性を踏まえ、以下では同推計値を用いて日本のマクロ経済環境に関する分析を行う。GOSATデータに基づいて計測されたCO₂濃度の推移とGDP関連系列の相関係数（2010年から2019年までの四半期ごとの前年比を対象として算出）を図6に載せた。CO₂濃度の系列は、名目ベースに比べて実質ベースのGDP系列との相関が高くなる傾向が確認できる。これはCO₂濃度の推移が実質的な経済活動（インフレの影響を除いた経済活動）と連動していることを意味しており、自然な結果と言えよう。

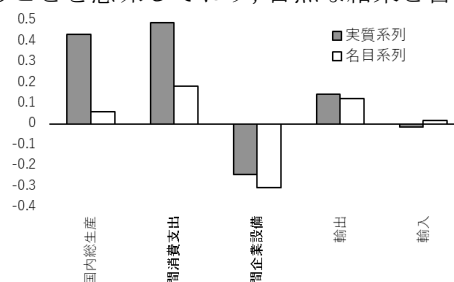


図6: CO₂濃度推計値とGDP統計の相関係数

更にGOSATデータが計測するCO₂濃度と相関が高いのはGDPの構成項目の中でも実質民間消費支出となっている（図6）。民間消費に関する需要側と供給側の様々な経済活動は、その経済規模の大きさからCO₂濃度と相関が高くなることは違和感の無い結果と考える。

3.2 マクロ経済活動の推計モデル

本節では、これまでの検証結果を踏まえ、GOSATデータに基づくCO₂濃度の計測値を用いて経済活動を推計する機械学習ベースのモデル構築を行う。前節で用いた日本のCO₂濃度の推計値は、図7に示した12区域における推計値（本研究ではGOSATプロダクトのL3全球CO₂カラム平均濃度データの対象エリアの区域別データを使用）の平均として定義し

てきた。

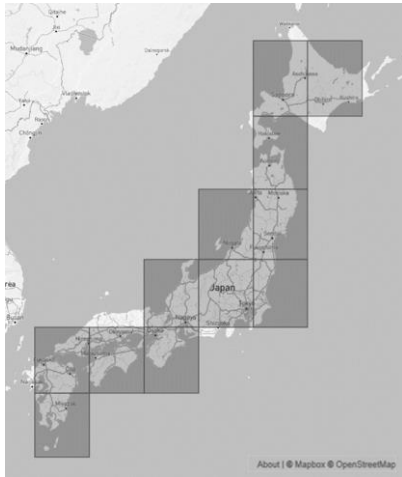


図 7: 日本付近のメッシュ別分析区域

以下では 12 区域における CO₂濃度の細かい粒度の情報をを用いることで、経済活動の推計モデルにおける特徴量の拡充を行う。参考までに、図 8 に 6 地点における CO₂濃度の推計値の推移を掲載した。図中の凡例は各メッシュの緯度・経度を表している。

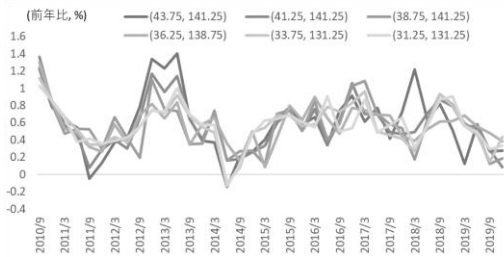


図 8: 日本付近のメッシュ別分析区域の CO₂濃度推計値

これによると、地域によって CO₂濃度の変化のパターンに違いはあるものの、概ね類似・連動していることから、以下では 12 区域の CO₂濃度の前年比系列に対して主成分分析を通じて、これらの変数の次元数の削減を行う。図 9 に各主成分ファクターの寄与度を掲載した。これによると第 3 主成分までの累積寄与度が 9 割を超えていることが分かる。

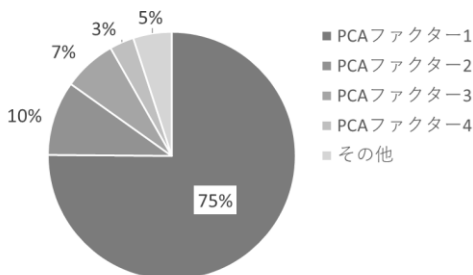


図 9: 主成分ファクター寄与度

次に、これらの情報を用いた実質民間消費の推計モデルを構築する。本分析では 2010 年第 3 四半期から 2021 年第 2 四半期までの四半期のデータを使用する。被説明変数は実質民間消費（前年比）とし、説明変数は、各 CO₂濃度の推計値（前年比）から算出された第 1-3 主成分ファクターの当該期及び一期前の情報とする（説明変数①）。

また、消費動向を捉えた速報性の高い消費関連データとしては、クレジットカードの取引データ（JCB 消費 NOW 指数）、百貨店売上高（日本百貨店協会統計）、新車販売台数（日本自動車販売協会連合会統計）が挙げられる。これらは当該月の翌月初に消費動向の速報値が公表されることから、総務省家計調査や経済産業省商業動態統計等の主要な消費関連の政府統計に比べて、1 カ月程度早く消費動向を把握できるデータである。

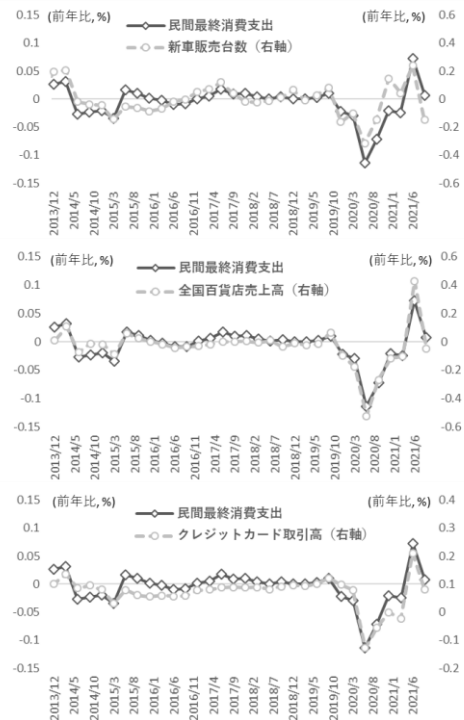


図 10: 消費関連データと GDP ベースの民間消費支出の関係

既存の手法[水門 19b]では、これらのデータ（説明変数②）を用いた消費推計の有効性が示されている点を踏まえ、以下でも同手法に基づく推計を行う。なお、JCB 消費 NOW 指数は 2015 年 4 月以降のみデータが公表されていることから、それ以前は、サービス産業動態統計調査に基づくクレジットカード取引高データを用いた。

更に、消費関連データ（説明変数②）に、衛星観測情報に基づくデータ（説明変数①）を加えた分析も行う（説明変数③）。これにより、各 12 区域にお

ける CO₂濃度情報のモデル特徴量としての有効性を検証する。

説明変数①：

衛星系列 (CO₂濃度推計値の主成分第 1, 第 2, 第 3 ファクター：当該期及び一期前)

説明変数②：

消費系列 (クレジットカード取引データ, 百貨店売上高, 新車販売台数：当該期)

説明変数③：

合成系列 (説明変数①と説明変数②)

実質民間消費の推計に使用する数理モデルには、標準的な線形回帰に加えて、リッジ (Ridge) 回帰, ラッソ (Lasso) 回帰, エラスティックネット (Elastic Net) の計 4 モデルを用いる。

線形回帰: $y = w_0 + w_1x_1 + \dots + w_nx_n + \varepsilon$ (ε は誤差項)

線形回帰のモデルパラメタ $w_0 \sim w_n$ は、次式の残差平方和 (RSS, Residual Sum of Squares) を最小化するように推計する。

$$RSS = \sum_{i=1}^p \{y^i - (w_0 + w_1x_1^i + \dots + w_nx_n^i)\}^2$$

また、リッジ (Ridge) 回帰, ラッソ (Lasso) 回帰, エラスティックネット (Elastic Net) では、RSS に以下の正則化項を加えることで、パラメタ推計時に生じる過学習の影響の軽減を試みている。

リッジ回帰: $RSS + \lambda \sum_{k=1}^n w_k^2$

ラッソ回帰: $RSS + \lambda \sum_{k=1}^n |w_k|$

エラスティックネット: $RSS + \lambda \sum_{k=1}^n [\alpha |w_k| + (1 - \alpha)w_k^2]$

本研究では各推計時点において (推計時点のデータを除く), 過去 3 年分もしくは過去 4 年分のアウトオブサンプルのデータを用いてモデルの学習を行い、各推計時点では学習済みのモデルに各説明変数を入力することで、実質民間消費を推計する。

実質民間消費 (前年比, %) の推計値と実績値の二乗平均平方根誤差 (RMSE, Root Mean Squared Error) を表 1 に示した。2020 年初以降は、新型コロナウイルス感染症の感染拡大が経済環境に大きな影響を与えたことから、2019 年第 4 四半期までの推計対象期間を“コロナ前”, 2020 年第 1 四半期以降を“コロナ後”とした。これによると、衛星観測情報のみ (説明変数①) から消費動向を計測した手法は、既存の消費関連データ (説明変数②) を用いた手法に比べて精度は劣るが、消費関連データを用いていないに

も関わらず、ある程度の精度で推計が行えていることが分かる。更に、既存の消費関連データに、衛星観測情報に基づくデータを加えた本提案手法では (説明変数③), いずれの正則化回帰モデル (Ridge 回帰, Lasso 回帰, Elastic Net) を用いた場合でも、既存の手法 (説明変数②) に比べて、推計精度が向上することが確認できる。

表 1: 実質民間消費のモデル別推計精度 (RMSE)

コロナ前 (-2019Q4)		線形回帰	Ridge回帰	Lasso回帰	ElasticNet
学習 3年	説明変数①	3.64	3.50	2.33	2.44
	説明変数②	2.31	2.25	1.76	1.86
	説明変数③	2.82	1.46	1.57	1.40
学習 4年	説明変数①	2.53	2.48	1.74	1.87
	説明変数②	1.13	1.12	1.00	1.01
	説明変数③	1.15	1.02	0.97	0.95

コロナ後 (2020Q1-)		線形回帰	Ridge回帰	Lasso回帰	ElasticNet
学習 3年	説明変数①	5.75	5.78	6.50	6.17
	説明変数②	4.25	3.07	1.93	2.12
	説明変数③	4.50	2.12	2.31	1.96
学習 4年	説明変数①	6.60	6.61	6.94	6.81
	説明変数②	1.46	1.40	1.50	1.18
	説明変数③	1.28	0.96	1.43	1.02

これらの推計精度 (RMSE) の改善度合を図 11 に示した。CO₂濃度の情報を追加的に用いた場合、特にコロナ後において、その改善度合いが顕著となっている。百貨店売上等の既存の消費関連系列は、コロナ禍における非常事態宣言下での営業自粛等の特殊事情の影響を強く受けてしまう。本提案モデル (説明変数③) では、個別企業データ等で見られるサンプリングバイアスの影響を受けにくい衛星観測情報に基づく CO₂濃度の情報を新たに用いたことで、特徴量エンジニアリングの観点から、推計モデルの改良を行った。結果、本研究で実装した正則化回帰モデルを用いた場合、既存手法[水門 19b]に比べて、消費動向の推計モデルの精度向上、及びコロナ禍での安定的な消費動向の推計を実現することができた。

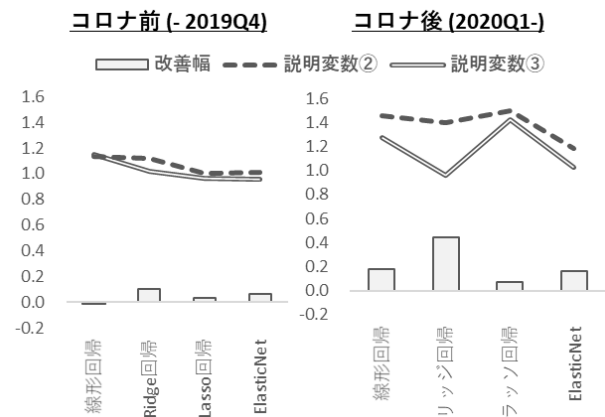


図 11: モデル別推計精度 (RMSE) の改善度合い

実際の推計結果を図 12 に示した。コロナ禍においても安定的に消費の推計が行えていることが確認できる。他方、図 10 で示した新車販売数や百貨店売上高は、コロナ禍において、データが大きく攪乱されていたほか、2019 年 10 月の消費税率の引き上げ前後でも、駆け込み需要やその反動減といった変動が生じていた。これらは、車に代表される耐久消費財への支出や、百貨店の売り上げを左右する選択的支出を捉えたサンプルにデータが偏っていたことに起因していると考えられる。図 12 に示した結果では、前述の通りアウトオブサンプルでの推計結果にも関わらず、コロナ禍においても安定的な消費動向の推計が行えている点を踏まえると、衛星観測情報に基づく CO₂濃度データの経済活動把握における有効性が窺えよう。

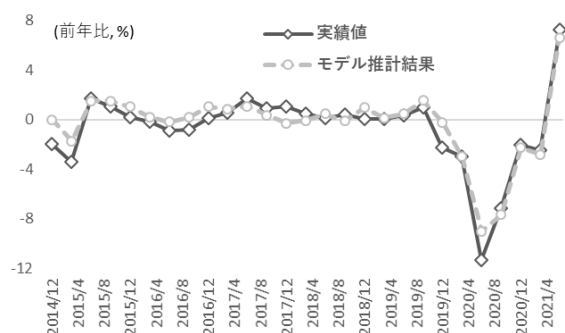


図 12: 実質民間消費の実績値とモデル推計値
(説明変数③・学習期間 4 年)

4. 結論

本研究では昨今の CO₂の排出量への関心の高まりを踏まえ、マクロ経済活動と CO₂の排出量の関係性を検証した。更に本研究では、人工衛星の観測情報を用いて計測された CO₂濃度の情報を用いることで、速報性の高いマクロ経済状況の把握手法を提案した。その際、従来用いられていた速報性の高い消費関連系列に加えて、個別企業等の特殊要因の影響を受けにくい衛星観測情報に基づく CO₂データを、新たに消費の推計モデルの特徴量として活用した。結果、従来の消費関連データを用いたモデルに比べて推計精度の向上を実現したと共に、コロナ禍においても安定した消費の推計が行えることを確認した。

本研究では日本のマクロ経済活動を対象とした推計を行ったが、人工衛星の観測エリアは国や地域を問わない。そのため、日本以外の国においても、同様の手法により経済活動の把握が可能となることが期待できる。また、本研究で用いた衛星観測情報よりも更に細かいメッシュ情報を用いることで、より詳細な CO₂濃度の空間分布の情報を用いた分析も可

能となろう。特に、産業構造が地域によって異なる国を対象とした分析では、空間分布の情報が有効な特徴量となるだろう。これらについての分析は、今後の課題としたい。

補遺

本稿は、著者らの論文「水門善之, 田邊洋人, 衛星観測データに基づく CO₂濃度計測値を用いたマクロ経済活動の推計, 人工知能学会論文誌, Vol.37, No.2, 2022」を加筆した上で、同学会第 28 回金融情報学研究会向けに編集したものである。

参考文献

- [Almaatouq 16] Almaatouq, A., Prieto-Castrillo, F. and Pentland, A.: Mobile communication signatures of unemployment, International conference on social informatics, pp 407-418 (2016)
- [Arslanalp 2019] Arslanalp, S., Marini, M., and Tumbarello, P.: Big Data on Vessel Traffic: Nowcasting Trade Flows in Real Time, IMF Working Paper, No.19/275 (2019)
- [Askatas 13] Askatas, N., and Zimmermann, K.: Nowcasting Business Cycles Using Toll Data, Journal of Forecasting, Vol.32, No.4, pp.299-306 (2013)
- [Cerdeiro 2020] Cerdeiro, D. A., Komaromi, A., Liu, Y., and Saeed, M.: World Seaborne Trade in Real Time: A Proof of Concept for Building AIS-based Nowcasts from Scratch, IMF Working Paper, No.20/57 (2020)
- [Chen 11] Chen, X. and Nordhaus, W.D.: Using luminosity data as a proxy for economic statistics, Proc Natl Acad Sci USA, Vol.108, No.21, pp.8589-8594 (2011)
- [Clarck 17] Clarck, H, Pinkovskiy, M., and Sala-i-Martin, X.: China's GDP Growth May be Understated, NBER Working Paper, No.23323 (2017)
- [Donaldson 16] Donaldson, D. and Storeygard A.: The View from Above: Applications of Satellite Data in Economics, Journal of Economic Perspectives, Vol.30, No.4, pp.171-198 (2016)
- [Henderson 12] Henderson, J.V., Storeygard, A. and Weil, D.N.: Measuring economic growth from outer space, American Economic Review, Vol.102, No.2, pp.994-1028 (2012)
- [JAXA 21] JAXA: 温室効果ガス観測技術衛星, <https://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/04/sat0>

- 2.pdf (2021) (参照 2022-1)
- [Michalopoulos 13] Michalopoulos, S. and Papaioannou, E.: Pre-colonial ethnic institutions and contemporary African development, *Econometrica*, Vol.81, No.1, pp.113-152 (2013)
- [RITE 17] 地球環境産業技術研究機構 (RITE): 経済と CO₂排出のデカップリングに関する分析・評価, https://www.rite.or.jp/system/research/alps2/data/ALPS2_decoupling.pdf, (2017) (参照 2022-1)
- [Suimon 21a] Suimon, Y.: Economic analysis based on the mobile phone GPS data and monitoring consumer behavior during the COVID-19 pandemic, *Information Engineering Express*, Vol.7, No.2 (2021)
- [Suimon 21b] Suimon, Y., and Yanai, M.: Using Mobile Phone GPS Data to Nowcast Auto Production Activity and Equity Investment Strategy Based on the Activity Nowcasting, 2021 International Conference on Business Management of Technology (2021)
- [Toole 15] Toole, J.L., Lin, Y.R., Muehlegger, E., Shoag, D., González, M.C. and Lazer, D.: Tracking employment shocks using mobile phone data, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol.12, No.107 (2015)
- [宇仁 12] 宇仁宏幸: 経済成長と温室効果ガス排出の関係-累積的因果連関モデルによる分析, *季刊経済理論*, Vol.49, No.3, pp.79-89 (2012)
- [外務省 21] 外務省: 日本の排出削減目標, https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html (2021) (参照 2022-1)
- [環境研 21] 国立環境研究所衛星観測センター: GOSAT プロジェクト, http://www.gosat.nies.go.jp/jp/GOSAT_pamphlet_jp.pdf (2021) (参照 2022-1)
- [環境省 21] 環境省, 脱炭素ポータル, https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/index.html (2021) (参照 2022-1)
- [水門 19a] 水門善之, 福馬智生: 人工衛星の夜間光画像を用いた製造業の業種別の生産活動分析, 人工知能学会第 117 回知識ベースシステム研究会, pp.25-27 (2019)
- [水門 19b] 水門善之, 柳井都古杜: ビジネスデータを用いた消費のナウキャスト, *JCB 消費 NOW*, <https://www.jcbconsumptionnow.com/info/news-54> (2019) (参照 2022-1)
- [水門 20a] 水門善之, 柳井都古杜, 携帯電話 GPS データを用いた経済活動分析と COVID-19 の影響分析, 人工知能学会第 120 回知識ベースシステム研究会, pp.1-4, 2020
- [水門 20b] 水門善之, 柳井都古杜, 携帯電話 GPS データに基づく自動車生産量のナウキャストと株式投資戦略, 人工知能学会第 25 回金融情報学研究会, pp.9-12, 2020
- [水門 21] 水門善之: オルタナティブデータを用いた経済活動の把握, *人工知能学会誌*, Vol.36, No.3, pp.279-285 (2021)
- [松永 19] 松永恒雄, 横田達也: 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)の科学的成果等について, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol. 39, No.1, pp.2-8 (2019)