

日本グローバル・インフラストラクチャー研究財団 委託研究

# インフラのOR的展望 研究会 2020年度 最終報告書

2021年4月

「インフラのOR的展望」研究部会  
公益社団法人 日本オペレーションズ・リサーチ学会  
公益財団法人 日本グローバル・インフラストラクチャー研究財団



表紙：東京都東京ヘリポート

東京都東京ヘリポートは年間 11,000 回を超える着陸回数がある日本最大の公共用ヘリポートである。写真は 2017 年 9 月に撮影されたものである。

撮影：鳥海重喜（中央大学）

# 目次

緒言

研究会の記録

報告書の概要

## 第 I 部【エネルギー・環境インフラ】

エネルギーインフラとマイクログリッド群とのインセンティブ・ゲーム

—再生可能エネルギーの大規模導入がもたらす課題の解決のために—

高森 寛

パリ協定運輸部門目標値達成のため必要な我が国の電気自動車普及台数とその実現に向けて

高井 麻衣, 三浦 英俊

## 第 II 部【輸送インフラのリスクマネジメント】

海賊活動に関する地理的特性分析

渡部 大輔

競争環境下における港湾区域の排出規制と技術選択

高嶋 隆太, 伊藤 真理, 吉田 百花, 鳥海 重喜

## 第 III 部【インフラストラクチャーのモデリングと分析】

コロナ禍の財政赤字とキャットボンド

浦谷 規

建物壁面間の距離の最大値分布と最小値分布

薄井 宏行

## 緒言

### 【研究部会】

本報告書は、公益財団法人 日本グローバル・インフラストラクチャー研究財団(以下、日本GIF研究財団とする)の委託に基づき日本オペレーションズ・リサーチ学会(以下、日本OR学会とする)の「インフラのOR的展望」研究部会(主査 高嶋 隆太, 幹事 鳥海 重喜)が、2020年度に遂行した研究の内容を報告書としてまとめたものである。当研究部会は、以下に示す9つの研究部会の活動成果を踏まえており、2019年度に日本OR学会の承認を受けて発足した。

- 「巨大プロジェクトのOR」1992-1994 (主査 柳井 浩, 幹事 栗田 治)
- 「広域インフラストラクチャー計画に関するOR」1995-1998 (主査 高森 寛, 幹事 栗田 治)
- 「インフラストラクチャー問題」1999-2000 (主査 柳井 浩, 幹事 栗田 治)
- 「グローバル・プロジェクトのOR」2001-2003 (主査 浦谷 規 & 高森 寛, 幹事 三浦 英俊)
- 「世界のインフラストラクチャー」2004-2006 (主査 栗田 治, 幹事 三浦 英俊 & 高嶋 隆太)
- 「未来のインフラストラクチャー」2007-2009 (主査 栗田 治, 幹事 高嶋 隆太)
- 「持続可能社会のためのインフラストラクチャー戦略」2010-2012 (主査 三浦 英俊, 幹事 高嶋 隆太)
- 「大規模インフラストラクチャーのOR」2013-2015 (主査 三浦 英俊, 幹事 鳥海 重喜)
- 「ORによる大規模インフラストラクチャー分析」2016-2018 (主査 三浦 英俊, 幹事 鳥海 重喜 & 渡部 大輔)

### 【研究計画と報告書内容概観】

「グローバル・インフラストラクチャーのOR研究会」は、主として日本GIF研究財団会議室にて1か月に一度の頻度で開催された。本報告書は、研究会の議論をもとにメンバーがそれぞれ執筆した論文をまとめたものである。研究部会が取り組んだ2020年度の研究テーマは次の3つである。

#### (1) エネルギー・環境インフラ

近年、温室効果ガスを削減すべく環境適合性を備えたエネルギーインフラシステムの普及が進んでいる一方、それに伴う社会経済的問題が世界規模で顕在化している。そこで、本研究課題では、エネルギー、環境に係るハードインフラの設置とそれに伴う法規制、政策等に係るソフトインフラとの相互作用について考察する。

#### (2) 輸送インフラのリスクマネジメント

世界各国の社会経済的影響により、北極海航路のような海上輸送や各国の経済圏構想における輸送網など、輸送に係るインフラが大きく変容し、それに係る各国の社会的関係も変貌しつつある。本研究課題では、GIS や OR 的手法等により、輸送に係る見える化を行うことで、関係国間の地政学的リスクや安全保障について明らかにする。

#### (3) インフラストラクチャーのモデリングと分析

ハード、ソフトそれぞれのインフラと我々の社会経済活動をつなげる AI, IoT, GIS 等の新しいインフラ技術の進展により、これまで、そのときの時代の精神とインフラで構成されてきた文明論が大きな変革を迎えている。本研究課題では、OR 的手法を用いて、この変革に内在する諸問題を構造化、分析することで、新しいインフラシステムについて議論する。

本報告書は、2020年度の研究成果として6編の論文を収録している。これらは、上記テーマ(1)に対応して第I部【エネルギー・環境インフラ】、テーマ(2)に対応して第II部【輸送インフラのリスクマネジメント】、テーマ(3)に対応して第III部【インフラストラクチャーのモデリングと分析】にそれぞれ分類した。

これら6編の論文は、萌芽的な分析手法の提案から政策への提言、さらには、実データによる分析、評価に関する研究まで内容は多岐にわたっている。また、論文の完成度についてもそれぞれ差異はある。しかしながら、いずれの論文も持続可能な社会の実現を目指したグローバル・インフラストラクチャーに関する諸相にオペレーションズ・リサーチの視点からアプローチをして、一定水準以上の成果を上げたものになっていると考えている。限られた時間と人員の制約下での研究成果であることから、不十分な点が多々あることは承知している。これらの研究に対し、忌憚のないご叱正と助言を頂戴できれば幸甚である。

最後に、研究部会に参加された研究者の真摯なる努力に加えて、日本G I F研究財団からの懇切ご丁寧なる情報提供、簡潔かつ要を得た会合記録のまとめ、さらに研究環境への深いご配慮を頂戴した。この場をお借りして深甚なる謝意を表す。

2021年3月

「インフラのOR的展望」研究部会主査 高嶋 隆太

## 研究会の記録

本研究会は、日本OR学会会員に対して公開されている。そのため各回の研究会における参加者は固定されていなかったが、日本OR学会側からの主たる参加者は、次のとおりである。

高嶋 隆太 (主査)	東京理科大学
鳥海 重喜 (幹事)	中央大学
森村 英典	東京工業大学名誉教授
柳井 浩	慶應義塾大学名誉教授
高森 寛	青山学院大学名誉教授
鈴木 久敏	筑波大学名誉教授
腰塚 武志	筑波大学名誉教授
栗田 治	慶應義塾大学
古藤 浩	東北芸術工科大学
三浦 英俊	南山大学
鵜飼 孝盛	防衛大学校
田中 健一	慶應義塾大学
渡部 大輔	東京海洋大学
小林 隆史	立正大学
宮川 雅至	山梨大学
八木 恭子	東京都立大学
本間 裕大	東京大学
佐藤 公俊	神奈川大学
伊藤 真理	東京理科大学
柴崎 隆一	東京大学
薄井 宏行	東京大学
稲川 敬介	秋田県立大学

一方で、日本G I F研究財団からは主として、次の方が参加した。

坂本 晶子

研究会はこれまで、原則として月に一度、主として日本G I F研究財団会議室を会場として実施されてきたが、本年度は、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、ふた月に一度のオンライン開催を余儀なくされた。表1に研究会発表内容を示す。日本G I F研究財団からのグローバル・インフラストラクチャーに関する情報提供と問題提起、日本OR学会側からの基礎的概念の整理と諸問題に対するモデル分析といった発表がなされ、活発な研究活動が展開された。また、インフラストラクチャーの未来論・文明論、輸送インフラへのアプローチに関し、参加者相互の情報提供、文献紹介なども積極的に行われた。

表 1 : 2020 年度研究会発表内容

回	月日	場所	出席者数	テーマ・講師・概要
1	6月12日	オンライン開催	16	田中健一:『p-メディアン問題の新しい定式化－経路決定を含むモデル化と応用－』
2	7月10日	オンライン開催	18	鳥海重喜:『フライトスケジュールの遅延分析』 高嶋隆太:『インフラシステム輸出戦略』
3	5月24日	オンライン開催	15	鵜飼孝盛:『DH 運用の効率測定』
4	6月28日	オンライン開催	15	薄井宏行:『建物壁面間距離の最大値分布と最小値分布:実市街地における計測と理論分布の導出・比較』
5	7月24日	オンライン開催	15	栗田治:『定期船並びに連絡船に配備するドローンによる沿岸地域ならびに島嶼部の配送システム』 三浦英俊:『街路の歩行者すれ違いを考慮した感染モデル』
6	8月26日	オンライン開催	18	栗田治:『定期船ならびに連絡船に配備するドローンによる沿岸地域ならびに島嶼部の配送システム』

## 報告書の概要

本報告書に所収された論文は、研究会参加者による原著論文である。緒言において述べたように、エネルギー・環境インフラ、輸送インフラのリスクマネジメント、インフラストラクチャーのモデリングと分析の3部から構成される。各部および論文の概要は、次のとおりである。

### 第I部【エネルギー・環境インフラ】

#### エネルギーインフラとマイクログリッド群とのインセンティブ・ゲーム

—再生可能エネルギーの大規模導入がもたらす課題の解決のために—

高森 寛

エネルギーをめぐる経済は、電力ネットワークというインフラを介して展開するが、このインフラの供給サイドにも、需要サイドにも、再生可能エネルギーの比率が高まると、電力インフラの運用に大きな支障と課題をもたらし、社会的な費用が増大する。近年、需要サイドにも、マイクログリッドやプロシューマーと呼ばれる各種エネルギー・リソースを保有し、柔軟に運用できる需要体が増加してきた。この論文では、社会厚生最大化の観点から、電力インフラの運用サイドは、これらエネルギー・リソースを保有する需要プレイヤーの柔軟性を、いかに動員して、課題解決ができるかを分析する。

#### パリ協定運輸部門目標値達成のため必要な我が国の電気自動車普及台数とその実現に向けて

高井 麻衣, 三浦 英俊

本研究では、パリ協定の枠組みの中で日本が掲げた目標値を2030年に達成するためにはどうしたらよいか、運輸部門の自家用乗用車に注目して、必要な電気自動車の台数を求めた。我が国の運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量は2018年データで2億1000万トンであるが、パリ協定における2030年の目標排出量は1億6300万トンとなっている。この目標達成のために必要な電気自動車台数を算出したところ、概算で180万台となった。2019年のデータで電気自動車台数は11万台であり、このままの推移では2030年の予測台数は37万台に過ぎないので、180万台を達成するためには、補助金などの普及促進政策が必要となるだろう。



## 第 II 部【輸送インフラのリスクマネジメント】

### 海賊活動に関する地理的特性分析

渡部 大輔

海に囲まれた我が国において、海上輸送は貿易量の 99.7%（重量ベース）を担っており、我が国に必要な交通インフラストラクチャーである。持続可能社会のためのインフラストラクチャー戦略として、我が国の安定的な貿易を確保するために、国際海運の安全性を高める必要がある。本研究では安全・安心な国際海運のためのインフラストラクチャーの数理地政学的研究の観点から、海賊出没に関する地理的特性分析を行った。まず、近年の海賊出没に関する概況についてまとめた上で、中でも海賊活動の発生が著しい中東・アフリカに主眼を置いて動向を分析した。そして国際機関による海賊出没の統計データを用いて、地図上にプロットし、海岸からの距離等を用いて各国の海賊出没の地理的特性を分析した。

### 競争環境下における港湾区域の排出規制と技術選択

高嶋 隆太, 伊藤 真理, 吉田 百花, 鳥海 重喜

国際貿易の増加に伴い、海上輸送による炭素排出量は年々増加傾向にある。2014年に国際海事機関が行った調査では、海上輸送による2012年のCO<sub>2</sub>排出量は約9億3800万トンであり、これは世界のCO<sub>2</sub>排出量の2.2%であった。航行時に船舶が大気汚染物質を排出することに加え、輸送を担う船舶が増えることで、港湾に起因する温室効果ガスの排出も増える。特に、停泊中の船舶の発電機の使用によるCO<sub>2</sub>排出量は大部分を占める。その対策として、停泊中の船舶が発電に使用可能な燃料の限定と陸上から電力を供給するシステムの導入の2つがあげられる。陸上電力の供給には、船舶の受電設備とターミナルの供給設備の双方の取り組みが必要となる。これまで港湾のサプライチェーン全体の分析を行った先行研究は多くはないが、貨物輸送にはさまざまな利害関係者がいるため、温室効果ガス削減のためにはサプライチェーン全体で取り組む必要がある。そこで本研究では、垂直統合により利潤、輸送量、サービス価格にどのような影響があるか分析する。特に、排出量取引制度と炭素税導入時で炭素価格（炭素税）が与える影響について考察する。さらに、社会厚生関数を用いて炭素排出によるダメージコストと社会厚生との関係を明らかにする。

## 第 III 部【インフラストラクチャーのモデリングと分析】

### コロナ禍の財政赤字とキャットボンド

浦谷 規

コロナウィルス・パンデミックは平時における最も破壊的な影響を経済に与えている。罹患

はその人に悲惨な最後をもたらし、その恐怖は世界を支配している。ワクチン接種による集団免疫という対抗策には数年を要するだろう。政府はそれまでに人々にステイホームと企業活動の制限を強制せざるを得ない。そのための政府の経済的補償は膨大な額となる。近年続いている著しく低いインフレ率と超低金利は、日本における財政債務の拡大を許してきた。IMFの報告では、日本の公的債務残高の対名目GDP比率は2020年末には266%となり、スーダンに次いで高く、ギリシャを遥かに超えている。財政赤字の要因には、高齢化の急速な進展による年金・医療・介護費用の急拡大に対応が遅れたことに起因することに加えて、阪神・淡路大震災、東日本大震災や巨大台風などに対する復興経費の拡大もある。さらに、南海トラフ地震とその巨大津波は今後の心配な要因である。本論文では、日本を襲う自然災害などの巨大なテールリスクとみなされる災害の復興に、世界銀行が近年導入しているキャットボンド (Catastrophe Bond) の活用を提案する。CAT Bond をオプション理論を用いて分析し、巨大災害の支援・復興経費に資本市場を活用し、財政負担軽減の可能性を考察する。

## 建物壁面間の距離の最大値分布と最小値分布

薄井 宏行

隣棟関係にある建物の壁面間距離（以降、「壁面間距離」と記す。）は、密集市街地等における住環境の安全性（延焼リスク）や快適性（通風、採光、遮音等）を評価するために重要である。ところが、隣棟関係の判定と壁面間距離の計測を行うことは難しい。本稿では、建物の位置関係に基づき壁面間距離を計測する方法を構築し、建物ごとに壁面間距離の最小値と最大値を計測し、地域におけるそれぞれの統計分布を明らかにした。

## 第 I 部

エネルギー・環境インフラ



# エネルギーインフラとマイクログリッド群

## とのインセンティブ・ゲーム

- 再生可能エネルギーの大規模導入がもたらす課題の解決のために -

高森寛

### 1. はじめに

一国のエネルギーミクスの中に、再生可能エネルギーの大規模な参入が予想される将来において、(メイン) グリッドと呼ばれる送電インフラの運用は、再エネ電源供給量の不確実な乱高下の問題に直面する。

グリッドには、通常、石炭火力発電、石油火力発電、LNG 発電、原子力発電、再エネ発電など、異なる発電テクノロジーの電源設備が連なっていて、エネルギー供給に向けて待機している一方、需要側には、家計消費の需要に加えて、各種産業の重要な投入要素資源としての需要がある。

それぞれの発電テクノロジーでのエネルギー供給では、固定費（主に、設備投資規模に依存）と可変費用（主として燃料費）が大きく異なるので、時間とともに変動する需要に応じて、各電源設備は、起動・停止の実行や稼働レベルの調整など、大きく稼働状態を変動する。しかし、このような発電設備の起動・停止や、稼働レベルの調整は、電力エネルギー供給側に大きな費用負担を課し、また、送電線ネットワーク内の運用にも課題を与えることになる。

今後に大量投入が予想される再生可能エネルギーの特性は、その発電量の予測が難しいことに加えて、その発電量を制御することも難しいことが挙げられる。今後にもう一つ予想されることとして、需要側に、いわゆるプロシューマーと呼ばれる主体（プレイヤー）が多く現れることが挙げられる。このプロシューマーと呼ばれる需要プレイヤーは、基本的には自ら、エネルギーへの需要をもっているが、同時に、自らにも、再エネ発電や、各種の発電・貯蔵設備をもっている生産工場や、コミュニティなどである。このプロシューマーの行動特徴として、自らの再エネ発電は、すべて自らのエネルギー需要に充てることが挙げられる。それで充当しきれない需要については、グリッド側から購入するか、自らの設備で発電するかを選択できる。グリッド側の電力価格が市場ベースで決まる場合、時間帯によって電力価格が変動するので、プロシューマーは、エネルギーを購入（消費）したり、売却（供給）したりするプレイヤーとなる。

このように、グリッドの供給サイドの発電セクターにも、また、需要サイドにも、再エネ発電が大規模に存在する状況では、再エネ発電が、天候条件などで、一斉にダウンしたときには、グリッド側では、急遽、石油火力発電、LNG 発電設備などの起動や稼働

レベルアップなどのランプ・アップ (ramp up) 対応が迫られる。このような急激なランプ・アップは、過大な費用負担を課し、また、対応できない状況さえありうる。

近年、再エネ発電の不確実性と急変性に起因する系統側の課題への解決策として提唱されているのが、マイクログリッド群の柔軟性 (flexibility) の動員である。本稿で扱うマイクログリッドは、上に挙げたプロシューマーに類似の主体であり、自ら、エネルギー需要をもっていると同時に、自らにも、再エネ発電や、各種発電・貯蔵のエネルギー・リソースを有する生産工場や、コミュニティなどのプレーヤーである。ただ、再エネ発電の一部を、グリッド側に売却 (供給) できるほどの容量はない。基本的には、自らのエネルギー・リソースで賄いきれないネットのエネルギー需要をグリッドから購入する主体である。しかし、自らの再エネ発電および分散発電・貯蔵設備のリソースを運用・活用して、グリッド側から購入する需要パターンを変更できる柔軟性 (flexibility) を有する主体である。

本稿は、Nguyen, K. 等により文献 [3] に提唱されているマイクログリッド群の柔軟なエネルギー・リソースを活用しての解決策を紹介する。

規制緩和のもと、市場ベースで電力エネルギーが取引される世界において、各マイクログリッドは、自らのエネルギー需要を最小費用で調達するように、グリッドからの購入スケジュールを決定することは自然なことである。しかし、それでは、グリッド側は過大な供給ランプ (ramp) の乱高下の負担を被る。本稿では、そのようなメイングリッド側の問題を解決するために、各マイクログリッドに、何らかのインセンティブを与えて、その費用最小の購入スケジュールから乖離するように誘導できるかの問題を考察する。そういう意味で、これは、如何にして、デマンド・レスポンスを誘導できるかの問題でもある。

## 2. DSO(Distribution System Operator)対マイクログリッド群の問題

前節に述べたように、再生可能エネルギーが大規模に系統 (メイングリッド) に統合されるようになると、一日の時間帯におけるネットの負荷の変動が極度に大きくなる。図 1 は、カリフォルニアにおいて、典型的な春の一日間において、このネット負荷の変動が、年々に、大きくなっていくことが推定されている例である。

このように、一つの時間帯から次の時間帯へのネット負荷の変動分は負荷ランプ (ramp) とよばれるが、この負荷ランプの大きさを抑制するために、マイクログリッド群の各種エネルギー・リソースを誘導的に活用するのが、ここでの問題である。

ここでは、系統側に立って、マイクログリッド群とコミュニケーションする主体は、**DSO (Distribution System Operator)** とも呼ばれる配電事業者とする。配電事業者は、自らが管轄する地域の居住者の電力需要に加えて、複数のマイクログリッドからの電力需要の総和としてのネット負荷の乱高下、すなわち、ランピング (ramping) を解決することを問題とする。図 2 は、DSO とマイクログリッド群とで構成する電力ネットワークの全

体像を概念的に示したものであり、このネットワーク内では、電力エネルギーの流れと、その流れをコントロールしようとするコミュニケーションの流れがある。

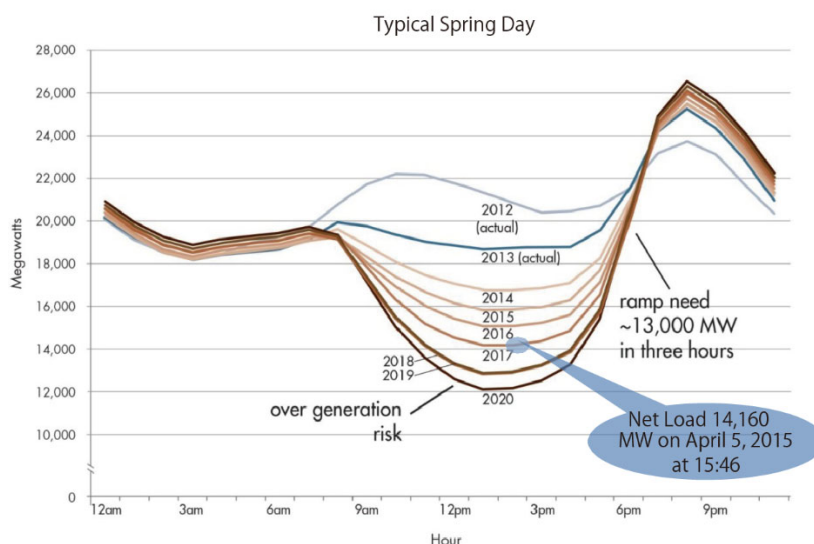


図 1 再エネの系統導入によるランピング効果の典型、カリフォルニアの例、  
出所： C. Louten, “Briefing on the Duck Curve and Current System Conditions,”  
California ISO, July 15, 2015

図 2 に示されるように、各マイクログリッドは、前節に言及したプロシューマーなるプレーヤーに相当する各種エネルギー・リソースを保有するエネルギー需要体である。

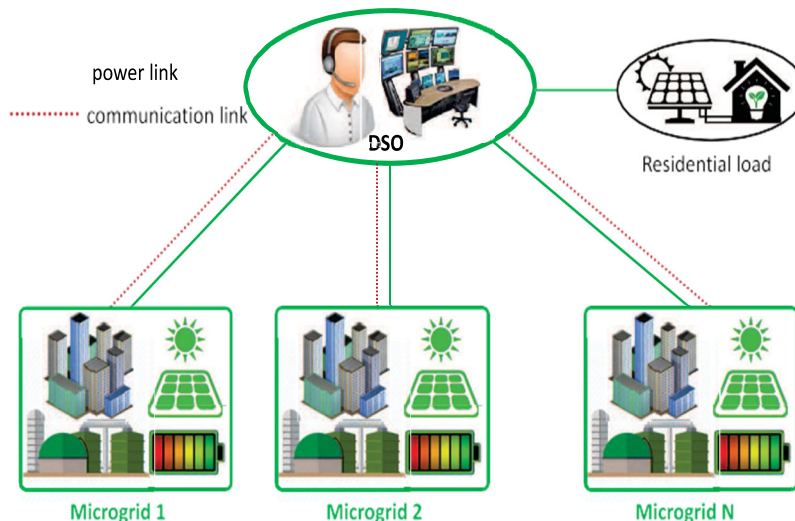


図 2 DSO とマイクログリッド群からなる電力ネットワークのシステム  
出所： 文献 [3]

## 2.1. DSO 対マイクログリッド群のシステム・モデル

各マイクログリッドが保有する主たるエネルギー・リソースは、再エネ発電設備、通常発電設備、エネルギー貯蔵設備（バッテリー）である。

各マイクログリッドは、電力をメイングリッドから得ることもできるし、みずから擁する分散電源 (DER) での発電をもって、自らのローカルの負荷需要に供給することができる。エネルギースケジューリングは、1 日間を  $T$  個の時間帯  $T \in \{1, 2, \dots, T\}$  に分けて考察する。

いま、 $\mathbf{D}_n = \{D_{n,1}, D_{n,2}, \dots, D_{n,T}\}$  は、マイクログリッド  $n$ （以下では、MG\_n と記す）における所与の需要ベクトルである。各時間帯  $t$  での負荷需要を満たすために、MG\_n は、 $g_{n,t}$  の量のエネルギーを発電し、以下のように制約される。

$$0 \leq g_{n,t} \leq g_n^{\max} \quad (1)$$

ここで、 $g_n^{\max}$  は、MG\_n の発電容量である。

さらに、MG\_n は、エネルギー貯蔵設備をもっていて、 $e_{n,t}^+$  あるいは、 $e_{n,t}^-$  の量のエネルギーを充電、あるいは放電することができる。これらは、各時間帯において、以下のように上限がある：

$$0 \leq e_{n,t}^+ \leq e_n^{\max} \quad (2)$$

$$0 \leq e_{n,t}^- \leq e_n^{\max} \quad (3)$$

これら充電、放電レートから、MG\_n の貯蔵エネルギーレベルの推移は、以下のように計算できる：

$$s_{n,t+1} = s_{n,t} + \beta_n^+ e_{n,t}^+ - \beta_n^- e_{n,t}^- \quad (4)$$

ここで、 $0 < \beta_n^+ \leq 1$  および  $0 < \beta_n^- \leq 1$  は、それぞれ、充電効率、放電効率である。貯蔵システムのエネルギーレベルには、いかのように、上下限がある。

$$B_n^{\min} \leq s_{n,t} \leq B_n^{\max} \quad (5)$$



ただし、 $\beta_n^{\min}$  は望ましい最低貯蔵レベルであり、 $\beta_n^{\max}$  は貯蔵容量である。

MG\_n は、自らの発電量、充電、放電の量に依存して、メイングリッドからも電力を購入して、以下のように、各時間帯での自らの負荷を満たす：

$$d_{n,t} = D_{n,t} - g_{n,t} + e_{n,t}^+ - e_{n,t}^- - W_{n,t} \quad (6)$$

ただし、 $W_{n,t}$  は、MG\_n が再エネ源から得るエネルギー量である。

ここでは、マイクログリッドの中央コントローラは、過去のデータや機械学習法などで、スケジュール期間の再エネ供給量を予測できると仮定している。なお、本稿では、再エネ供給量の変動の不確実性は考慮しないが、このモデルは確率計画法やロバスト最適化により、不確実性を取り込むことは可能である。

しかし、ここでは、マイクログリッドと DSO との間のインセンティブ・デザインの問題に、焦点を絞ることにする。

関数  $f_n(g_{n,t})$  は、MG\_n が、時間帯  $t$  において、 $g_{n,t}$  の発電をする費用関数で、凸関数とする。また、 $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  は、メイングリッド（系統）からの電力購入の一日前価格である。よって、MG\_n は、一日間のエネルギーコストを次のように計算できる：

$$C_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n) = \sum_{t=1}^T p_t d_{n,t} + \sum_{t=1}^T f_n(g_{n,t}). \quad (7)$$

ここで、各マイクログリッドの一日あたりのエネルギーコストは、変数  $(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, \mathbf{e}_n)$  に依存することに留意しよう。しかし、 $\mathbf{e}_n$  は、ベクトル  $\mathbf{d}_n$  と  $\mathbf{g}_n$  を生成するための内生変数であるので、(7)式の一日あたりのエネルギーコスト関数では、 $\mathbf{e}_n$  は省略されている。

総費用を最小化するために、各マイクログリッドは、その発電と貯蔵資源のスケジュールを決めるべく以下の最適化問題を解く

MG n の最適需要スケジュール・モデル：

$$\min \sum_{t=1}^T p_t d_{n,t} + \sum_{t=1}^T f_n(g_{n,t}) \quad (8)$$

$$d_{n,t} = D_{n,t} - g_{n,t} + e_{n,t}^+ - e_{n,t}^- - W_{n,t}, \quad \forall t. \quad (9)$$

$$s_{n,t+1} = s_{n,t} + \beta_n^+ e_{n,t}^+ - \beta_n^- e_{n,t}^- - W_{n,t}, \quad \forall t. \quad (10)$$

$$B_n^{\min} \leq s_{n,t} \leq B_n^{\max}, \quad \forall t. \quad (11)$$

$$0 \leq e_{n,t}^+ \leq e_n^{\max}, \quad \forall t. \quad (12)$$

$$0 \leq e_{n,t}^- \leq e_n^{\max}, \quad \forall t. \quad (13)$$

$$|g_{n,t} - g_{n,t-1}| \leq \Delta R_n^{\max}, \quad \forall t. \quad (14)$$

$$0 \leq g_{n,t} \leq g_n^{\max}, \quad \forall t.$$

$$\text{変数: } \{\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, \mathbf{e}_n\} \quad (15)$$

ただし、(14) は、ローカル発電のランピングの上限制約である。

ここで、 $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$  は、最適化問題(8)～(15)を解いて得られる MG\_n の最小費用発電・貯蔵のプロファイルであるとしよう。このとき、MG\_n が、メインインフラ（システム）とのピーク・ランプ最小化計画に参画しないなら、その一日間エネルギーコストは、以下のように計算できる：

$$C_n^\circ = \sum_{t=1}^T p_t d_{n,t}^\circ + \sum_{t=1}^T f_n(g_{n,t}^\circ). \quad (16)$$

すべてのマイクログリッドから要請される需要と居住者需要に基づいて、システム全体のネットの需要負荷は、各時間帯において、以下のようにきまる：

$$\ell_t = \text{Pr}_t + \sum_{n=1}^N d_{n,t}, \quad \forall t. \quad (17)$$

ただし、 $\text{Pr}_t$  は、時間帯  $t$  における居住者需要で、あらかじめわかっていると仮定する。

継続する二つの時間帯における負荷ランプは、以下のように決まる：

$$r_t = \ell_t - \ell_{t-1} = \text{Pr}_t - \text{Pr}_{t-1} + \sum_{n=1}^N (d_{n,t} - d_{n,t-1}). \quad (18)$$

ただし、 $t=1$  の場合には、ランプ  $r_1$  は時間帯  $t=1$  のネット負荷と前日の最終時間帯のネット負荷の差である。このように、最適化の過程は前日の最終時間帯に始まる。よって、システム全体のスケジュール期間のランプ・ベクトルは以下となる

$$\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_T). \quad (19)$$

かくして、スケジュール期間中にメイングリッドが被るピーク・ランプは、以下のように、ランプ・ベクトルの最大値ノルムとして決まる

$$\|\mathbf{r}\| = \max \{ |r_t| : t = 1, 2, \dots, T \}. \quad (20)$$

配電事業者 (DSO) は、マイクログリッドにその発電、貯蔵資源のスケジュール変更のインセンティブを与えることにより、システムのピーク・ランプを削減することができる。

## 2.2. マイクログリッドの利得

MG<sub>n</sub> は、その発電・貯蔵資源の最適スケジュールを変更して、DSO 側のネット負荷のピーク・ランプの減少に協力することはありうる。しかしながら、これは、マイクログリッド自身の最小費用運用から解離するため、より高いエネルギーコストを被る。本来の費用最小の発電・貯蔵プロファイル  $\{d_n^\circ, g_n^\circ\}$  から解離することによる MG<sub>n</sub> の余分のエネルギーコストは、次になる

$$\Delta C_n = C_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n) - C_n^\circ. \quad (21)$$

ただし、 $C_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n)$  は費用最小の  $(d_n^\circ, g_n^\circ)$  以外のスケジュール  $(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n)$  の運用費用で (7) 式に得られるものであり、 $C_n^\circ$  は最小の運用費用 (16) 式である。

ピーク・ランプの最小化を誘導するために、DSO は、MG<sub>n</sub> がその本来の最適運用点  $\{d_n^\circ, g_n^\circ\}$  からの乖離に対して、 $z_n$  の支払いをする。それにより、MG<sub>n</sub> の本来の最適スケジュール  $(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n)$  から乖離の利得は、次のように定義できる

$$U_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, z_n) = z_n - \Delta C_n = z_n - (C_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n) - C_n^\circ). \quad (22)$$

この (22) 式から、MG<sub>n</sub> が DSO のピーク・ランプ最小化に参画しないときは、この利得は  $U_n^\circ = 0$  であることがわかる。

## 2.3. DSO の利得

マイクログリッドにその発電・貯蔵スケジュールを変更するよう金銭的インセンティブを与えて、スケジュール期間中のピーク・ランプを減らすことが可能であり、それは、また、DSO を利することになる。

ここで、DSO が被るピーク・ランプの費用関数は凸関数  $h(\cdot)$  であるとする。よって、各マイクログリッドがピーク・ランプ最小化に参画したときの費用削減  $\Delta h$  は、以下のようにかける

$$\Delta h = h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}\|). \quad (23)$$

本論文では、DSO の費用はピーク・ランプ  $\mathbf{r}$  の関数としていることに留意しよう。しかし、本研究は、(23) のような特定の費用関数  $h(\cdot)$  に限定しているものではない。一般

論として、本研究のインセンティブ・メカニズムは、DSO がランプ最小化の便益を数量化できるならば、より一般的な関数にも適用できる。

以上から、DSO の利得は、ピーク・ランプ最小化による節約費用として、以下のよう  
に定義できる

$$U_{dso}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) = \Delta h - \sum_{n=1}^N z_n = h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}\|) - \sum_{n=1}^N z_n. \quad (24)$$

DSO がピーク・ランプ最小化問題に参加しないときは、その利得は、 $U_{dso}^\circ = 0$  である。

## 2.4. 社会厚生最大化

社会厚生は、各マイクログリッドの利得と DSO の利得の総和として、つぎのように、  
定義できる

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}, \mathbf{d}, \mathbf{g}, \mathbf{z}) &= U_{dso}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) + \sum_{n=1}^N U_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, z_n) \\ &= \Delta h - \sum_{n=1}^N z_n = h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}\|) - \sum_{n=1}^N z_n + \sum_{n=1}^N \left[ z_n - (C_n(d_n, \mathbf{g}_n) - C_n^\circ) \right] \\ &= h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}\|) - \sum_{n=1}^N (C_n(d_n, \mathbf{g}_n) - C_n^\circ) \end{aligned} \quad (25)$$

□  $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{d}, \mathbf{g})$ .

ここで、DSO から各マイクログリッドへの支払い額は(25)では相殺されるので、システム  
の社会厚生は変数  $\mathbf{z}$  から独立であることに注目しよう。

定義(25)に基づいて、社会厚生最大化問題は、次のように定式化できる

$$\max \psi(\mathbf{r}, \mathbf{d}, \mathbf{g}) \quad (26)$$

制約:

$$r_t = \ell_t - \ell_{t-1} = \text{Pr}_t - \text{Pr}_{t-1} + \sum_{n=1}^N (d_{n,t} - d_{n,t-1}), \quad \forall t \quad (27)$$

$$d_{n,t} = D_{n,t} - g_{n,t} + e_{n,t}^+ - e_{n,t}^- - W_{n,t}, \quad \forall t, \forall n \quad (28)$$

$$s_{n,t+1} = s_{n,t} + \beta_n^+ e_{n,t}^+ - \beta_n^- e_{n,t}^- - W_{n,t}, \quad \forall t, \forall n \quad (29)$$

$$B_n^{\min} \leq s_{n,t} \leq B_n^{\max}, \quad \forall t, \forall n \quad (30)$$

$$0 \leq e_{n,t}^+ \leq e_n^{\max}, \quad \forall t, \forall n \quad (31)$$

$$0 \leq e_{n,t}^- \leq e_n^{\max}, \quad \forall t, \forall n \quad (32)$$

$$|g_{n,t} - g_{n,t-1}| \leq \Delta R_n^{\max}, \quad \forall t, \forall n \quad (33)$$

$$0 \leq g_{n,t} \leq g_n^{\max}, \quad \forall t, \forall n$$

$$\text{変数: } \mathbf{r}, \{\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, \mathbf{e}_n\}_{\forall n} \quad (34)$$

問題(26)～(34)を解くことで、システムの社会厚生最大化を得ることができる。しかしながら、この問題(26)～(34)を解くことでは、各マイクログリッドへの支払い額についての情報を得ることができない。次節では、ナッシュ交渉理論をもって、ピーク・ランプ最小化問題のインセンティブ・メカニズムを明らかにする。

## 2.5. ナッシュ交渉解 (Nash Bargaining Solution)

メイングリッド側の DSO 利得とマイクログリッド群の利得の総和である社会厚生を最大化する問題(26)～(34)を、もうすこし、整理する。

各 MG\_n についての変数  $\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, \mathbf{e}_n$  に関する制約(28)～(34)は、MG\_n についての可能解領域  $F_n$  を定義している。すなわち、

$$F_n = \{(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, \mathbf{e}_n) \mid (28)-(34)\}. \quad (35)$$

また、(25)に定義される社会厚生  $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{d}, \mathbf{g})$  を最大化する問題では、 $h(\|\mathbf{r}^\circ\|)$  と  $C_n^\circ$  は定数であるので、 $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{d}, \mathbf{g})$  を最大化するには  $h(\|\mathbf{r}\|) + \sum_{n=1}^N C_n(d_n, g_n)$  を最小化することになる。

以上の整理のもとで、社会厚生最大化問題(26)～(34)は、以下のようにまとめることができる。

**社会厚生最大化問題：**

$$\min h(\Gamma) + \sum_{n=1}^N C_n(\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n) \quad (36)$$

制約：

$$\begin{aligned} -\Gamma &\leq r_t \leq \Gamma, & \forall t \\ r_t &= \text{Pr}_t - \text{Pr}_{t-1} + \sum_{n=1}^N (d_{n,t} - d_{n,t-1}), & \forall t \\ (\mathbf{d}_n, \mathbf{g}_n, \mathbf{e}_n) &\in F_n, & \forall n \in N \end{aligned} \quad (37)$$

このように定義された社会厚生最大化問題は、DSO側の利得とマイクログリッド群の利得の和を最大化する問題である。この問題の最適解を、 $\{\mathbf{r}^*, (\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*)_{\forall n}\}$ としよう。ここで、最適貯蔵スケジュール $\mathbf{e}_n^*$ は、 $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ から内生的にきまるので省略している。

本稿では、関数 $h(\Gamma)$ は凸関数と仮定しているので、問題(36)、(37)の解においては、 $\Gamma^* = \|\mathbf{r}^*\|$ であることを示すことができる。

これに対し、2.1節に定義したMG\_nの発電・貯蔵のプロファイル $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ は、費用最小化問題(8)～(15)の解であり、各マイクログリッドが個別に、独立に、行動する解である。このとき、DSOが直面し対応するランプ・ベクトル $\mathbf{r}^\circ$ は、(18)から、

$$r_t^\circ = \text{Pr}_t - \text{Pr}_{t-1} + \sum_{n=1}^N (d_{n,t}^\circ - d_{n,t-1}^\circ), \quad \forall t. \quad (38)$$

となる。この解のセットを $\{\mathbf{r}^\circ, (\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ)_{\forall n}\}$ と記すことにしよう。

各マイクログリッドの最適スケジュール $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ から乖離して、 $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ の運用に誘導するには、どのようなインセンティブを与えることで可能であるかを考察する。

MG\_nが $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ から乖離して、 $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ に変更することによる余分のエネルギー費用は、(21)式から、

$$\Delta C_n = C_n^* - C_n^\circ \quad (39)$$

である。ただし、 $C_n^* \equiv C_n(\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*)$ である。

一方、DSOは、各マイクログリッドが $(\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ)$ から $(\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*)$ の運用変更することによ

り、(23)から、

$$\Delta h = h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}^*\|) \quad (40)$$

の利得（費用削減）を得る。

### ナッシュ交渉解（Nash Bargaining Solution）

社会厚生最大化問題(36)、(37)の最適解 $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ が、DSO およびすべてのマイクログリッドにとって受け入れ可能であるためには、次を満たすように、DSO から各 MG\_n への支払い $z_n, n=1,2,\dots,N$ 、が可能でなければならない。

$$(1) \quad U_n(\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*, z_n) = z_n - \Delta C_n = z_n - (C_n^* - C_n^\circ) > 0$$

$$(2) \quad U_{dso}(\mathbf{r}^*, \mathbf{z}) = \Delta h - \sum_{n=1}^N z_n = h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}^*\|) - \sum_{n=1}^N z_n > 0$$

上で条件(1)は、スケジュール $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ から $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ に変更することによるMG\_nの損失を超える支払い $z_n$ がなされることを意味する。また(2)は、ピーク・ランプ抑制によるDSOの利得（費用削減）が、マイクログリッドへの支払い総額 $\sum_{n=1}^N z_n$ よりも大きいことを意味する。

以上を満たす解 $\{\mathbf{r}^*, (\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*)_{\forall n}, \mathbf{z}\}$ は、ナッシュ交渉解と呼ばれる[3]。文献[3]では、ゲーム理論のフレームワークで、より厳密なナッシュ交渉解の定義がなされている。また、どのように支払い $z_n$ を決めるかの一般式が与えられている。

以下では、MG\_nの需要スケジュール $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ と社会厚生スケジュール $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ から、ナッシュ交渉解を見出せることを述べる。

$\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ から $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ への変更によるマイクログリッドの損失の総和は、(39)から

$$\sum_{n=1}^N \Delta C_n = \sum_{n=1}^N [C_n^* - C_n^\circ] \quad (41)$$

で求めることができる。もし、 $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$ から $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$ への変更によるDSOの利得（費用削減額） $\Delta h$ 、(40)、の方が大きければ、ナッシュ交渉解がきまる。 $\Delta h$ が、 $\sum_{n=1}^N \Delta C_n$ より小さければ、ナッシュ交渉解存在しない。すなわち

$$h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}^*\|) > \sum_{n=1}^N [C_n^* - C_n^\circ] \quad (42)$$

であるとき、また、そのときにのみ、ナッシュ交渉解が存在する。

また、その解において、DSO から MG<sub>n</sub> への支払いは、以下となる：

$$z_n = \frac{1}{N+1} \left( h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}^*\|) - \sum_{n=1}^N [C_n^* - C_n^\circ] \right) + (C_n^* - C_n^\circ), \quad \forall n \in N \quad (43)$$

この(43)の第一項は、 $\{\mathbf{d}_n^\circ, \mathbf{g}_n^\circ\}$  から  $\{\mathbf{d}_n^*, \mathbf{g}_n^*\}$  への変更によるシステムのトータルのネット利得を、N+1 人のプレーヤーに均等に分けている。第二項は、MG<sub>n</sub> の損失を補填している。

さらに、DSO に関しては、

$$h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}\|) - \sum_n z_n^* = \frac{1}{N+1} \left[ h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}\|) - \sum_{n=1}^N (C_n - C_n^\circ) \right] \quad (44)$$

となることを示せる。これは、DSO のネットの利得は、(44)の第一項に等しいことを証明している。

### 3. DSO とマイクログリッド群のピーク・ランプ調整交渉：数値例

ここでは、DSO（配電事業者）に対して、二つのマイクログリッド MG<sub>A</sub> および MG<sub>B</sub> との間でのピーク・ランプ調整問題を、数値例で、示す。ある一日の時間帯別の電力需給スケジュールに関連して、DSO とマイクログリッド群との間で、利害が異なることの問題である。

DSO とマイクログリッド群との間で、ある一日の時間帯別の電力需給スケジュールの問題についてのモデルは前節に記述されている。各マイクログリッドのリソースと、スケジュールの交渉において、前日において既知の情報等を以下に記述する。

#### 3.1. マイクログリッド A および B のリソースと既知の情報

マイクログリッド A および B、それぞれのエネルギー・リソースは表 1 の通りとする。

**表 1 マイクログリッド A、B のエネルギー・リソース**

	マイクロ	マイクロ
--	------	------



	グリッドA	グリッドB
通常発電設備容量 (MW/h)	5	5
発電コスト (円/kWh)	23	22
発電設備のランプ上限 (MW/h)	3.5	3.5
再エネ発電設備容量 (MW)	5	5
貯蔵設備容量 (MW)	2	2
充放電率の上限 (MW/h)	0.18	0.2
充放電効率	0.95	0.95

一日間のエネルギースケジュールの問題を扱うにあたり、ここでは、1日を6個の時間帯からなるとする。すなわち、一つの時間帯は4時間である。この一日間のスケジュールは、DSO、マイクログリッドA、Bとも、その前日に計画するものとする。

この前日の計画時点においてすでに既知の情報は、以下である：

A) 系統（マイングリッド）から、供給される電力の各時間帯別の価格スケジュール：

$$\mathbf{p} = (10, 10, 20, 20, 20, 10) \quad (\text{円/kWh}) \quad (45)$$

このように、DSO（配電事業者）から、まいくろグリッドに供給する電力の価格は、時間帯によって、10（円/kWh）か、20（円/kWh）かのいずれかである。

B) DSO（配電事業者）の居住者の電力需要スケジュール

$$\mathbf{Pr} = (1, 1, 2, 3, 7, 4) \quad (\text{MW/h})$$

これら系統（DSO側）から供給される電力の時間帯別価格  $\mathbf{p}$  と DSO の居住者需要  $\mathbf{Pr}$  のパターンを図 3 に示す。

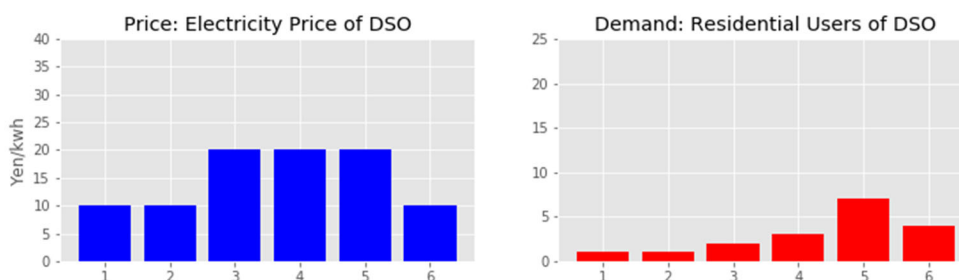


図 3 DSO の時間帯別電力価格と居住者需要のスケジュール

C) マイクログリッド A 内における電力需要および再エネ発電スケジュール：

需要 MG\_A:  $D_A = (3, 2, 3, 2, 7, 3)$  (MW/h)

再エネ発電 MG\_A:  $W_A = (0.5, 4, 1, 0.3, 0.5, 1)$  (MW/h)

D) マイクログリッド B 内における電力需要および再エネ発電スケジュール :

需要 MG\_B:  $D_B = (1, 1.5, 2, 2.5, 8, 2.5)$  MW/h

再エネ発電 MG\_B:  $W_B = (0.7, 5, 1, 0.5, 0.4, 0.5)$  (MW/h)

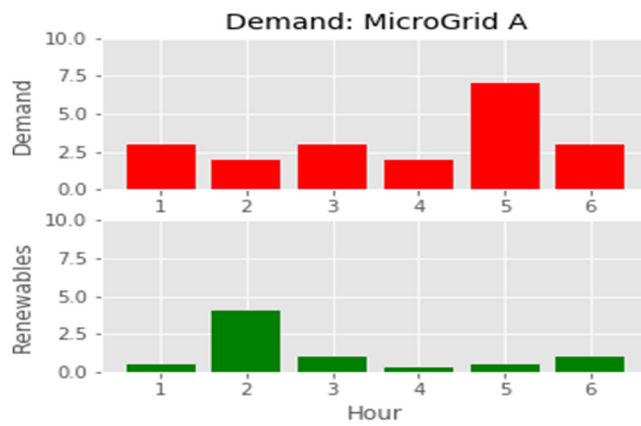


図 4 マイクログリッド A の時間帯別の需要と再エネ発電量

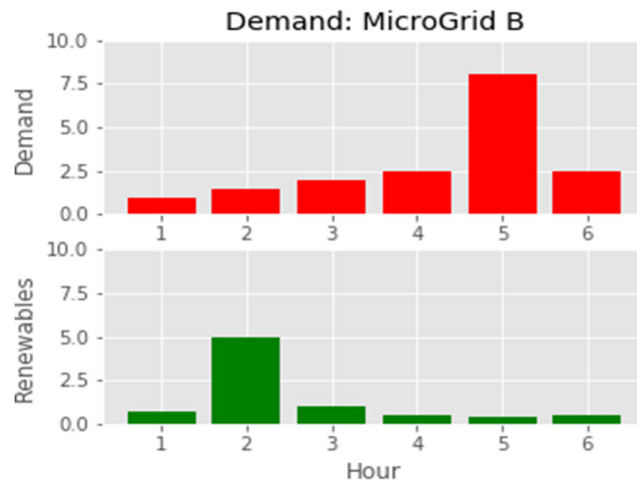


図 5 マイクログリッド B の時間帯別の需要と再エネ発電量

### 3.2. 各マイクログリッドの個別最適化での電力購入スケジュール

図 4 マイクログリッド A の時間帯別の需要と再エネ発電量および図 5 マイクログリッド B の時間帯別の需要と再エネ発電量に見られるように、両マイクログリッドにおいて、電力への需要は、時間帯 5 において、一番大きくなっている。これに対して、再エネ発電量が一番大きいのは、時間帯 2 である。この大きな再エネ発電量は、可能な限り貯蔵しておいて、後の時間帯での需要に充当しようとする行動が自然である。そして、充当しきれない需要については、自らの発電設備の発電で供給するか、(45)に与えられた価格で DSO から購入するかの決定がなされるであろう。

このように、各マイクログリッドにおいては、それぞれのエネルギー・リソースをフルに活用して、自らの費用最小化する目的のもとに、DSO からの購入スケジュールを決定するモデルが、前節に提示した「MG n の最適需要スケジュール・モデル」(8)～(15)である。

このモデルで計算して、各マイクログリッドの最適需要スケジュールとして、以下が得られた。

#### A) MG\_A の購入スケジュールと自己発電スケジュール

DSO からの電力調達： $\mathbf{d}_A^\circ = (2.7, 0, 1.8, 1.5, 6.4, 1.8)$  (MW/h)

MG\_A での自己発電： $\mathbf{g}_A^\circ = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$  (MW/h)

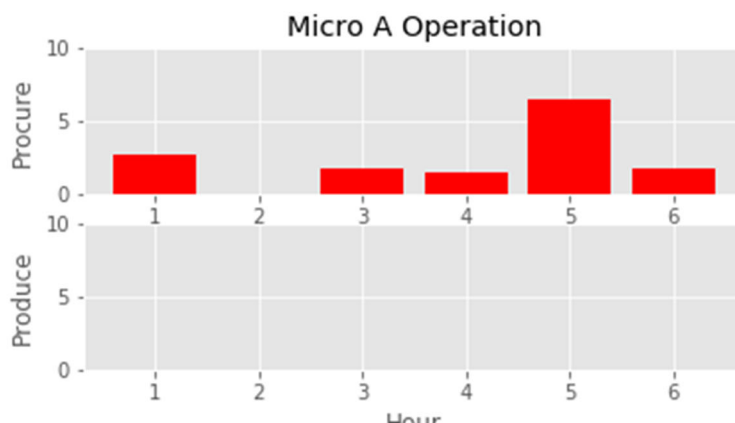


図 6 MG\_A の電力購入と自己調達のスケジュール

この電力購入スケジュール  $\mathbf{d}_A^\circ$  と自己発電スケジュール  $\mathbf{g}_A^\circ$  では、MG\_A の総費用は、 $C_A^\circ \equiv C_A(\mathbf{d}_A^\circ, \mathbf{g}_A^\circ) = 96.3$  (万円/日) となる。

#### B) MG\_B の購入スケジュールと自己発電スケジュール

DSO からの電力調達： $\mathbf{d}_B^\circ = (0.17, 0, 0.8, 1.8, 7.4, 1.8)$  (MW/h)

MG\_A での自己発電： $\mathbf{g}_B^\circ = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$  (MW/h)

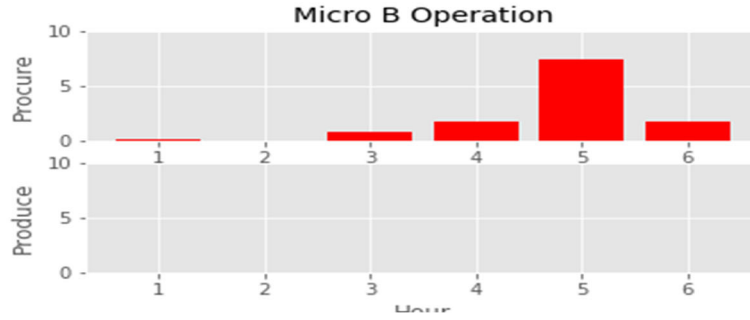


図 7 MG\_B の購入と自己調達スケジュール

この電力購入スケジュール  $\mathbf{d}_B^\circ$  と自己発電スケジュール  $\mathbf{g}_B^\circ$  では、MG\_A の総費用は、 $C_B^\circ \equiv C_B(\mathbf{d}_B^\circ, \mathbf{g}_B^\circ) = 87.9$  (万円/日) となる。

C) DSO の需要負荷と負荷ランプおよびその費用

上記 A), B) のように、MG\_A と MG\_B が、それぞれ個別に、また、独立に、自らの観点からの最適行動をすることで、DSO 側のネットの需要負荷は、

$$\ell_t^\circ = Pr_t + d_{A,t}^\circ + d_{B,t}^\circ, \quad \forall t \quad (46)$$

で求められるので、これらを計算すると以下になる。

$$\bar{\ell} = (3.7, 1, 4.6, 6.3, 20.8, 7.6)$$



図 8 マイクログリッドの個別最適下での DSO ネット需要負荷

また、負荷ランプは、

$$r_t^\circ = \ell_t^\circ - \ell_{t-1}^\circ, \quad \forall t \quad (47)$$

で求めるので、以下となる。

$$\mathbf{r}^\circ = (3.4, -2.9, 3.6, 1.7, 14.5, -13.2) \quad (48)$$

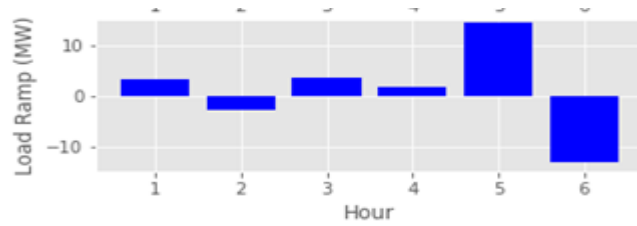


図 9 マイクログリッドの個別最適下での DSO の需要負荷ランプ

以上から、MG\_A と MG\_B が、個別に最適化行動をとった場合、DSO のネット需要のピーク負荷は

$$\|\mathbf{r}^{\circ}\| = 14.5 \quad (\text{MW}) \quad (49)$$

ということになる。

前節では、DSO のピーク・ランプ  $\mathbf{r}$  に依存する費用負担を、一般的に、ピーク・ランプの凸関数  $h(\|\mathbf{r}\|)$  として議論した。ここでは、線形関数として、

$$h(\|\mathbf{r}\|) = c_g \cdot \|\mathbf{r}\| \quad (50)$$

$c_g = 200$  と設定することにする。この場合、上記の数値例では、DSO のピーク・ランプ費用は、

$$h(\|\mathbf{r}^{\circ}\|) = c_g \cdot \|\mathbf{r}^{\circ}\| = 200 \times 14.5 = 2905 \quad (\text{万円/日}) \quad (51)$$

ということになる。

### 3.3. DSO 側と各マイクログリッドのトータルの社会厚生最大化の解

前節の DSO, MG\_A および MG\_B のデータの状況で、2.5 節に提示した社会厚生最大化モデル(52)、(37)を解くと以下の解が得られる。

A) MG\_A の電力購入スケジュールと自己発電スケジュール

$$\begin{aligned} d_A^* &= (0.2, 0, 0.8, 2.7, 3.9, 1.8) \\ g_A^* &= (0, 0, 0, 0, 3.5, 0) \end{aligned} \quad (\text{MW})$$

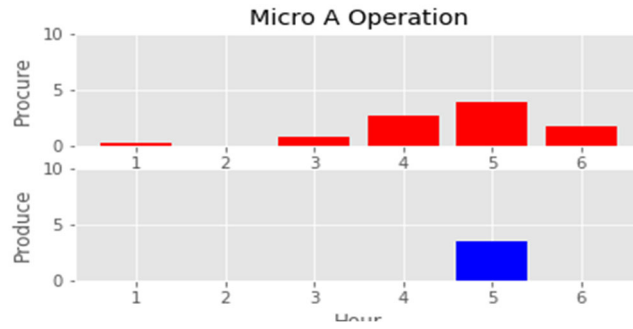


図 10 社会厚生最大化の MG\_A の運用

B) MG\_B の電力購入スケジュールと自己発電スケジュール

$$d_B^* = (2.3, 0, 1.8, 2.2, 2.8, 2.1) \quad (\text{MW})$$

$$g_B^* = (0, 0, 0, 0, 3.5, 0)$$

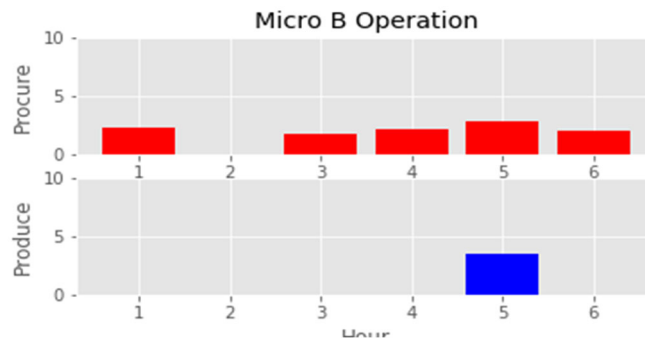


図 11 社会厚生最大化の MG\_B の運用

C) 社会厚生最大化の解でのピーク・ランプと各プレイヤーの利得

ピーク・負荷ランプ :  $\Gamma^* = 5.8$  (MW/h)

DSO\_費用 :  $h(\|\mathbf{r}^*\|) = c_g \Gamma^* = 200 \times 5.8 = 1168$  万円/日

Mg A 費用 :  $C_A^* = 102.6$  (万円/日)

Mg B 費用 :  $C_B^* = 99.8$  (万円/日)

D) ナッシュ交渉解 (Nash Bargaining Solution)

以上の 3.2 節での各マイクログリッド個別最適化での各プレイヤー費用と 3.3 節での社会厚生最大化での各プレイヤーの費用を比較・勘案することで、ナッシュ交渉解を以下のように求めることができる。

社会厚生最大化のスケジュールに移行することによる MG\_A と MG\_B の損失とその和は以下になる。

$$\Delta C_A = C_A^* - C_A^\circ = 102.6 - 96.3 = 6.3$$

$$\Delta C_B = C_B^* - C_B^\circ = 99.8 - 87.9 = 11.9$$

$$\sum_{A,B} \Delta C_n = 6.3 + 11.9 = 18.2$$

一方、DSO の利得（費用減少）は以下である。

$$h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}^*\|) = 200 \cdot 14.5 - 200 \cdot 5.8 = 2905 - 1168 = 1737$$

社会厚生最大化の解のセットに移行することによるシステムのネットの利得は、以下になる。

$$R = h(\|\mathbf{r}^\circ\|) - h(\|\mathbf{r}^*\|) - \sum_{n=1}^N [C_n^* - C_n^\circ] = 1737 - 18.2 = 1719 \quad (\text{万円})$$

これを3プレーヤーで均等に分けると  $R/3 = 1719/3 = 673$  (万円) である。よって、ナッシュ均衡解では、DSO から、MG\_A と MG\_B への支払い額は、以下になる。

$$z_A = \frac{R}{2+1} + \Delta C_A = 673 + 6.3 = 679.3$$

$$z_B = \frac{R}{2+1} + \Delta C_B = 673 + 11.9 = 684.9$$

(万円)

#### 4. 本稿のまとめとして

本稿では、文献[3]のモデルを紹介しながら、電力インフラ上で利害を異にするプレーヤーの間で、システムのトータルの便益を改善する仕組みを考察した。電力産業の規制緩和が進行中であるが、そこでの取引を、すべて、市場の原理にゆだねるだけで、社会厚生が最大化されるわけでないことが明らかにされた。市場原理での均衡解よりも、パレート効率的な状況が存在して、それは、本稿で紹介したナッシュ交渉解で到達できることを示した。

本稿では、まだ、文献[3]が提示しているすべての論点を紹介できていない。それは、社会厚生最大化のモデルは、利害を異にする複数のプレーヤーの間では、使うことができないという状況である。なぜなら、DSO なるプレーヤーは、各マイクログリッドのエネルギー・リソースにかかわるすべてのデータ・情報を把握することができないからである。文献[3]では、そのような状況でのナッシュ交渉解を求める方法をも提唱している。

#### 参考文献

1. Boyd, S., and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press, 2004.

2. Farzin, H., M. Fotuhi-Firuzabad and M. Moeini-Aghaie, "Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.7, No.6, November 2016.
3. Nguyen, K.N., A. Khodaie and Z. Han, "Incentive Mechanism Design for Integrated Microgrids in Peak Ramp Minimization Problem," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.9, No.6, November 2018.
4. Wang H., and J. Huang, "Cooperative Planning of Renewable Generations for Interconnected Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.7, No.5, September 2016.



# パリ協定運輸部門目標値達成のため必要な我が国の電気自動車普及台数とその実現に向けて

高井 麻衣 (花王)      Mai Takai  
三浦 英俊 (南山大学)    Hidetoshi Miura

## 概要

本研究では、パリ協定の枠組みの中で日本が掲げた目標値を 2030 年に達成するためにはどうしたらよいか、運輸部門の自家用乗用車に注目して、必要な電気自動車の台数を求めた。我が国の運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量は 2018 年データで 2 億 1000 万トンであるが、パリ協定における 2030 年の目標排出量は 1 億 6300 万トンとなっている。この目標達成のために必要な電気自動車台数を算出したところ、概算で 180 万台となった。2019 年のデータで電気自動車台数は 11 万台であり、このままの推移では 2030 年の予測台数は 37 万台に過ぎないので、180 万台を達成するためには、補助金などの普及促進政策が必要となるだろう。

## 1 はじめに

温暖化による地球環境への影響は大きいと予想されるため、未来の地球のために誰もが目を背けてはならない問題となっている。世界各国はそれぞれ地球温暖化防止策を打ち出しており、日本では 2020 年から始まったレジ袋の有料化なども取り組みの一つである。そのような中で、2015 年に採択されたパリ協定は多くの国が合意している地球温暖化防止のための国際的枠組みである。本研究では、パリ協定の枠組みの中で日本が掲げた目標値を 2030 年に達成するためにはどうしたらよいか、運輸部門の自家用乗用車に注目して考える。

## 2 パリ協定について

パリ協定とは、2015 年 12 月にパリで開催された COP21 において採択され、2016 年 11 月 4 日に発効した気候変動に関する国際的枠組みである。1997 年に採択された京都議定書では、温室効果ガスの排出量削減義務は先進国だけに限られていたが、パリ協定は気候変動枠組条約に加盟する全 196 カ国全てが参加する枠組みである [1]。パリ協定では、すべての参加国が削減目標を 5 年ごとに提出・更新すること、世界全体として気温上昇を 2 度未満に抑えるという長期目標の実施状況を検討することが約束されている。そのため、温室効果ガスの削減についての国ごとの取り組みは他の国から評価され、パリ協定で掲げた目標の達成を目指すことはその国の政府や国民の環境保護への意識と努力を表す。したがってパリ協定での目標は、環境のためにも国のためにも重要な達成目標であるといえるだろう。

我が国は、2030 年までに 2013 年比で、温室効果ガス排出量を 26 %削減するという目標を掲げている。数値にすると、全体では 3 億 800 万トン削減する目標であり、このうち運輸部門については 6,200 万トンの削減を目標に定めている [2]。表 1 は、2013 年の部門別 CO<sub>2</sub> 排出量と 2030 年の部門別 CO<sub>2</sub> 排出量目標値を表にまとめたものである。表内の単位は百万トンである。我が国の運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量は 2013 年当時 2 億 2500 万トンであったが、パリ協定における 2030 年の目標排出量は 6,200 万トンの削減による 1 億 6300 万トンである。

## 3 自家用乗用車 CO<sub>2</sub> 排出量削減目標値の設定

図 1 は我が国の 2018 年の運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量とその内訳を表したものである [3]。この図のうち自家用乗用車が排出した CO<sub>2</sub> の量と、パリ協定における運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量目標値を比較し、今後削減しなければならない日本の CO<sub>2</sub> 削減必要量を求める。図 1 を見ると、2018 年の運輸部門全体での CO<sub>2</sub> 排出量は 2 億 1000 万トンで、そのうち自家用乗用車は 46.1 %にあたる 9697 万トンを占めている。そこで、パリ協定における運輸部門の CO<sub>2</sub> 排出量目標値 1 億 6300 万トンのうち、46.1 %にあたる 7514 万 3000 トンを 2030 年の自家用乗用車の CO<sub>2</sub> 排出量目標値とする。2018 年の自家用乗用車 CO<sub>2</sub> 排出量とパリ協定における自家用乗用車 CO<sub>2</sub> 排出量目標値を比較すると、2030 年までに必要な CO<sub>2</sub> 削減量は 2182 万 7000 トンである。

表1 パリ協定による日本のCO<sub>2</sub>排出量目標値(単位:百万トン)(文献[2]環境省 地球環境・国際環境協力「日本の約束草案」より引用)

		2030年度の各部門の排出量の目安	2013年度 (2005年度)
エネルギー起源CO <sub>2</sub>		927	1,235 (1,219)
	産業部門	401	429 (457)
	業務その他部門	168	279 (239)
	家庭部門	122	201 (180)
	運輸部門	163	225 (240)
	エネルギー転換部門	73	101 (104)

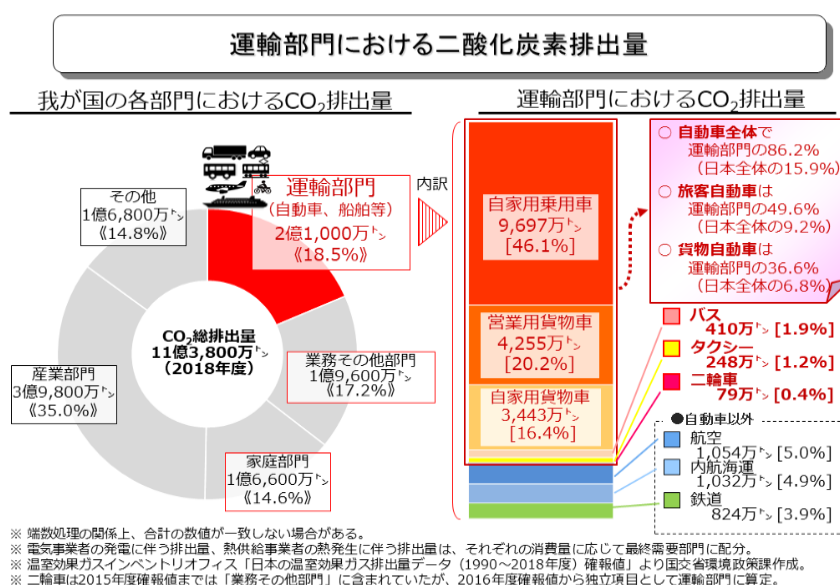


図1 2018年の運輸部門CO<sub>2</sub>排出量とその内訳(文献[3]国土交通省 政策・仕事「運輸部門における二酸化炭素排出量」より引用)

## 4 記号の導入と定式化

以下のように記号を定めて、2030年に必要なガソリン車にとってかわる電気自動車の必要普及台数を求める。将来2030年には、ガソリン車、ハイブリッド車、電気自動車が走行していると想定されるが、ハイブリッド車についてはとってかわる必要なくそのままとし、CO<sub>2</sub>排出量の多いガソリン車にとってかわるべき電気自動車の台数を求める。

$E$ : ガソリン車にとってかわる電気自動車の台数

$N_i$ : 車種  $i$  の2030年普及予測台数 ( $i = g$  の場合ガソリン車,  $i = h$  の場合ハイブリッド車,  $i = e$  の場合電気自動車をそれぞれ表す)

$d$ : 自動車1台当たりの標準的な年間走行距離

$C_i$ : 車種  $i$  の1kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量 ( $i \in \{g, h, e\}$ )

$K_i$ : 車種  $i$  の年間CO<sub>2</sub>排出量 ( $i \in \{g, h, e\}$ )

$X_i$  : 2030 年車種別年間総 CO<sub>2</sub> 排出量 ( $i \in \{g, h, e\}$ )

$T$  : パリ協定によって定められた 2030 年の運輸部門 CO<sub>2</sub> 排出量

$R$  : 運輸部門の中で自家用乗用車が占める CO<sub>2</sub> 排出量の割合

$P$  : 2030 年自家用乗用車 CO<sub>2</sub> 排出量目標値

$Q$  : 2030 年自家用乗用車 CO<sub>2</sub> 削減必要量

現在の電気自動車台数は非常に少ないので (6 章で述べるように 2019 年現在 11 万台), 電気自動車はゼロ台であり, ガソリン車とハイブリッド車だけが走行しているとして定式化を行う。

ガソリン車, ハイブリッド車, 電気自動車それぞれの年間 CO<sub>2</sub> 排出量  $K_i$  は, 標準的な年間走行距離  $d$  に比例するとして, それぞれの年間 CO<sub>2</sub> 排出量  $X_i$  を以下の式で表す. 車種別 1km あたりの CO<sub>2</sub> 排出量  $C_i$  と車種別 2030 年普及予測台数  $N_i$  は別途推定が必要となる。

$$K_i = d \times C_i \quad (i \in \{g, h, e\}), \quad (1)$$

$$X_i = N_i \times K_i \quad (i \in \{g, h, e\}). \quad (2)$$

一方で, 2030 年の自家用乗用車 CO<sub>2</sub> 排出量目標値  $P$  と削減必要量  $Q$  は以下のようになる。

$$P = T \times R, \quad (3)$$

$$Q = (X_g + X_h) - P. \quad (4)$$

これらからガソリン車にとってかわるべき電気自動車の台数  $E$  は以下のように求められる。なお, 先に述べた通りハイブリッド車については電気自動車に変更する必要はないものとする。

$$E = \frac{Q}{K_g - K_e}. \quad (5)$$

## 5 ガソリン車とハイブリッド車の CO<sub>2</sub> 排出量の算出

### 5.1 ガソリン車の CO<sub>2</sub> 排出量

はじめに年間走行距離  $d$  を求める。自動車燃料消費量調査の自家用乗用車の 2018 年走行キロは約 670,000(百万) キロメートル, 自動車保有台数は約 62 万台であるので, 1 年間 1 台当たりの平均年間走行距離は約 1 万キロメートルとなることから, 年間走行距離  $d = 1$  万 km とする [11, 13]。

次に, ガソリン車の 1km 走行あたりの CO<sub>2</sub> 排出量  $C_g$  を求める。1km 走行あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は車種ごとのカタログに環境仕様として掲載されており, インターネットで簡単に調べることができるため, これを利用する。ガソリン車は様々なタイプが存在するため, 2019 年 1 年間の乗用車, 軽自動車それぞれの販売台数ランキング [4, 5] の総合的な上位 10 車種のデータをもとに, 1km あたりの CO<sub>2</sub> 排出量の平均を求める。ハイブリッドモデルがある車についてはメーカーごとのガソリン車販売割合 [6] を用いてガソリン車モデルの販売台数を求めた。今回は, ガソリン車モデルのみの販売台数ランキング上位 10 台の CO<sub>2</sub> 排出量を用いる。

同じ車名でも型式ごとに CO<sub>2</sub> 排出量が異なる場合は, 全型式の平均値を使用する。カタログに記載されている走行時の CO<sub>2</sub> 排出量には, 算出基準として WLTC モードと JC08 モードがある。WLTC モードは世界基準の試験方法で, JC08 モードは日本独自基準の試験方法により算出されたものである。WLTC モードの測定試験の特徴は, 車種ごとに 3 つのモード, 「市街地モード」, 「郊外モード」, 「高速道路モード」が設定されている。従来の計測モードよりも実際の走行条件に近い状態で測定されるため, 従来の計測方法よりも実燃費を推定できるとされている。

2018 年 10 月以降に日本国内で発売される車からは WLTC モードでの測定が義務付けられている。そのため, 2018 年 10 月に発売された車は JC08 モードで測定された CO<sub>2</sub> 排出量がカタログに載っており, 今回使用した 2019 年 1 年間の販売台数上位 10 位の車は, WLTC モードで測定されたものと JC08 モードで測定されたものが混在している。より実際の CO<sub>2</sub> 排出量に近い値を用いたため, WLTC モードで測定した場合の値に統一する。はじめに, 今回使用したガソリン車の車名と 1km 走行あたりの CO<sub>2</sub> 排出量, 測定されたモードを表 2 に表す。1. ホンダ N-BOX, 3.

表2 2019年の販売台数上位10位までの車種別CO<sub>2</sub>排出量と測定モード

順位	車名	CO <sub>2</sub> 排出量	測定モード
1.	ホンダ N-BOX	115.1 g/km	(WLTC モード)
2.	ダイハツ タント	91.5 g/km	(JC08 モード)
3.	日産 デイズ	118 g/km	(WLTC モード)
4.	ダイハツ ムーヴ	117.5 g/km	(WLTC モード)
5.	トヨタ ルーミー	134 g/km	(WLTC モード)
6.	ダイハツ ミラ	68.6 g/km	(JC08 モード)
7.	トヨタ タンク	CO <sub>2</sub> 排出量不明	—
8.	スズキ アルト	CO <sub>2</sub> 排出量不明	—
9.	トヨタ シエンタ	128 g/km	(JC08 モード)
10.	トヨタ カローラ	153 g/km	(WLTC モード)

表3 CO<sub>2</sub> 排出量がJC08モードで測定されている車とCO<sub>2</sub> 排出量が不明の車の燃費値と測定モード

順位	車名	燃費値	測定モード
2.	ダイハツ タント	25.4 km/l	(JC08 モード)
6.	ダイハツ ミラ	33.8 km/l	(JC08 モード)
7.	トヨタ タンク	23.0 km/l	(JC08 モード)
8.	スズキ アルト	25.8 km/l	(WLTC モード)
9.	トヨタ シエンタ	18.4 km/l	(JC08 モード)

表4 WLTCモードへの燃費変換

順位	車名	変換燃費値
2.	ダイハツ タント	20.0km/l
6.	ダイハツ ミラ	24.1km/l
7.	トヨタ タンク	20.5km/l
9.	トヨタ シエンタ	15.5km/l

日産 デイズ、4.ダイハツ ムーヴ、5.トヨタ ルーミー、10.トヨタ カローラはWLTCモードによるCO<sub>2</sub>排出量が掲載されているのでそのまま用いる。次に、CO<sub>2</sub>排出量がJC08モードで測定されている車とCO<sub>2</sub>排出量が不明の車の燃費値を調べた。CO<sub>2</sub>排出量がJC08モードで測定されている車の中には、カタログにWLTCモードの燃費も載っているものがあり、そういった車はWLTCモードによる燃費をもとにWLTCモードによる1km走行当たりのCO<sub>2</sub>排出量を求める。

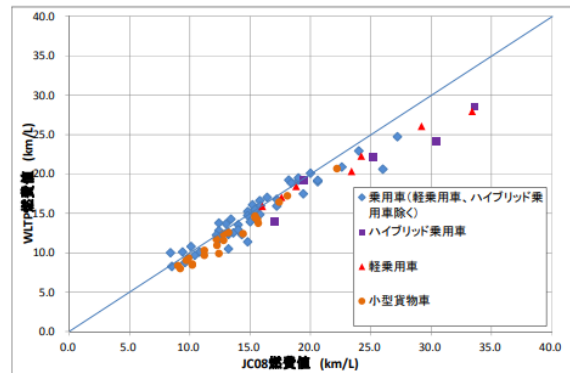
カタログにJC08モードによる燃費しか載っていない場合は、JC08モードによる燃費からWLTCモードによる燃費を求め、それをもとにWLTCモードによるCO<sub>2</sub>排出量を求める。表3はCO<sub>2</sub>排出量がJC08モードで測定されている車とCO<sub>2</sub>排出量が不明の車の燃費値と測定されたモードである。8.スズキ アルト以外の4台は、国土交通省が掲載している「JC08モード燃費とWLTCモード燃費の関係の分析」(図2)を参考にJC08モードでの燃費をWLTCモード時の燃費に変換すると表4のようになる[7]。

そして、自交総連「燃料種別によるCO<sub>2</sub>排出量の計算について」よりガソリン1lあたりのCO<sub>2</sub>排出係数は2.32kg/lであるので(表5)[8]、WLTCモードの燃費値から1km走行当たりのCO<sub>2</sub>排出量を計算すると表3の5台の1km走行当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、表6のとおりとなる。

以上より先ほどの10台のWLTCモードによる1km走行当たりのCO<sub>2</sub>排出量は表7のようになる。表7の数値より10台の1km走行当たりのCO<sub>2</sub>排出量の算術平均を求めると、120.3g/kmとなる。よって、ガソリン車の1kmあ

## JC08モード燃費とWLTCモード燃費の関係の分析

WLTCモードは試験時の車両重量が増加する等、より直近の使用実態を反映。  
→これにより、WLTCモード燃費はJC08モード燃費に比べ、同水準又は低くなる傾向。



同じ車両におけるJC08モード燃費とWLTCモード燃費(車種別にマーカーを変更)

図2 JC08モード燃費とWLTCモード燃費の関係の分析(文献[7]国土交通省 JC08モード燃費とWLTCモード燃費の関係の分析より引用)

表5 燃料種別CO<sub>2</sub>排出係数(文献[8]自交総連「燃料種別によるCO<sub>2</sub>排出量の計算について」より引用)

◎燃料を使用した場合に排出されるCO<sub>2</sub>(燃料使用量に一番右の数値をかけたものが排出されるCO<sub>2</sub>の量となる)

燃料	使用量の単位	単位発熱量 MJ/単位	炭素排出係数 kg-C/MJ	l,kg当たりCO <sub>2</sub> 排出係数 kg-CO <sub>2</sub> /l,kg
ガソリン	l	34.6	0.0183	2.32
軽油	l	38.2	0.0187	2.62
LPG	l*	28.0	0.0163	1.67
LPG	kg	50.2	0.0163	3.00

\* LPG(自動車用ブタン8:プロパン2)の液密度0.5570kg/lで換算  
 以上は、環境省地球環境局2007.3「温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン」より

たりのCO<sub>2</sub>排出量  $C_g$  を120.3g/kmとする。

## 5.2 ハイブリッド車のCO<sub>2</sub>排出量

つづいてハイブリッド車の1km走行あたりのCO<sub>2</sub>排出量  $C_h$  を求める。ガソリン車の計算の際にも用いた2019年の乗用車、軽自動車それぞれの販売台数ランキングと各メーカーのハイブリッド車販売割合から販売台数ランキング上位5台のCO<sub>2</sub>排出量の平均値を用いる。計算に使用した5台のハイブリッド車の車名とCO<sub>2</sub>排出量1km走行あたりのCO<sub>2</sub>排出量、測定されたモードを表8に表す。これらのうち1.スズキ スペースシアと3.トヨタ アクアについては、ガソリン車と同様に国土交通省が掲載しているJC08モードでの燃費をWLTCモード時の燃費に変換し、ガソリン1lあたりのCO<sub>2</sub>排出係数は2.32kg/lとする[5][6]。WLTCモードの燃費に変換すると、

1.スズキ スペースシア 22.2km/l

3.トヨタ アクア 30.0km/l

となるので、2台のWLTCモードによるCO<sub>2</sub>排出量は、

表6 CO<sub>2</sub> 排出量が JC08 モードで測定されている車と CO<sub>2</sub> 排出量が不明の車の WLTC モードの場合の推定 CO<sub>2</sub> 排出量

順位	車名	WLTC モードの場合の推定 CO <sub>2</sub> 排出量
2.	ダイハツ タント	1/20.0km/l × 2.32kg/l × 1000=116.0g/km
6.	ダイハツ ミラ	1/24.1km/l × 2.32kg/l × 1000= 96.3g/km
7.	トヨタ タンク	1/20.5km/l × 2.32kg/l × 1000=113.2g/km
8.	スズキ アルト	1/25.8km/l × 2.32kg/l × 1000= 89.9g/km
9.	トヨタ シエンタ	1/15.5km/l × 2.32kg/l × 1000=150.0g/km

表7 WLTC モードによる 1km 走行あたりの CO<sub>2</sub> 排出量

順位	車名	WLTC モードの CO <sub>2</sub> 排出量
1.	ホンダ N-BOX	115.1g/km
2.	ダイハツ タント	116g/km
3.	日産 デイズ	118g/km
4.	ダイハツ ムーヴ	117.5g/km
5.	トヨタ ルーミー	134g/km
6.	ダイハツ ミラ	96.3g/km
7.	トヨタ タンク	113.2g/km
8.	スズキ アルト	89.9g/km
9.	トヨタ シエンタ	150g/km
10.	トヨタ カローラ	153g/km

表8 ハイブリッド車の CO<sub>2</sub> 排出量 1km 走行あたりの CO<sub>2</sub> 排出量と測定モード

順位	車名	CO <sub>2</sub> 排出量	測定モード
1.	スズキ スペーシア	CO <sub>2</sub> 排出量不明	—
2.	トヨタ プリウス	81g/km	(WLTC モード)
3.	トヨタ アクア	66g/km	(JC08 モード)
4.	日産 ノート	81.7g/km	(WLTC モード)
5.	スズキ ハスラー	101.6g/km	(WLTC モード)

1. スズキ スペーシア  $1/22.2\text{km/l} \times 2.32\text{kg/l} \times 1000=104.5\text{g/km}$

3. トヨタ アクア  $1/30.0\text{km/l} \times 2.32\text{kg/l} \times 1000=77.3\text{g/km}$

である。したがってハイブリッド車5台のWLTCモードによるCO<sub>2</sub>排出量は表9のようになる。

この5台の1km走行あたりのCO<sub>2</sub>排出量の平均値を求めると、89.2g/kmとなった。よって、ハイブリッド車の1kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量  $C_h$  を89.2g/kmとする。

### 5.3 電気自動車のCO<sub>2</sub>排出量の算出

電気自動車の1kmあたりCO<sub>2</sub>排出量  $C_e$  を求める。電気自動車は走行時CO<sub>2</sub>を排出しないため、電気自動車が走行するのに必要な電力を生成する際のCO<sub>2</sub>排出量を求めることとする。各発電方法別CO<sub>2</sub>排出量から石炭火力、石油火力、天然ガス火力のそれぞれの1kwhあたりCO<sub>2</sub>排出量を引用すると、石炭：864g/kwh、石油：695g/kwh、天然ガス：476g/kwhである(図3)[9]。一方で2030年発電方法構成目標から、2030年の目標として発電方法のうち火力発電が56%を占め、さらにその内訳として石炭26%、石油3%、天然ガス27%の割合での発電を目標として掲げていることがわかった(図4)[10]。

表9 ハイブリッド車のWLTCモードによるCO<sub>2</sub>排出量

順位	車名	CO <sub>2</sub> 排出量
1.	スズキ スペーシア	104.5g/km
2.	トヨタ プリウス	81g/km
3.	トヨタ アクア	77.3g/km
4.	日産 ノート	81.7g/km
5.	スズキ ハスラー	101.6g/km

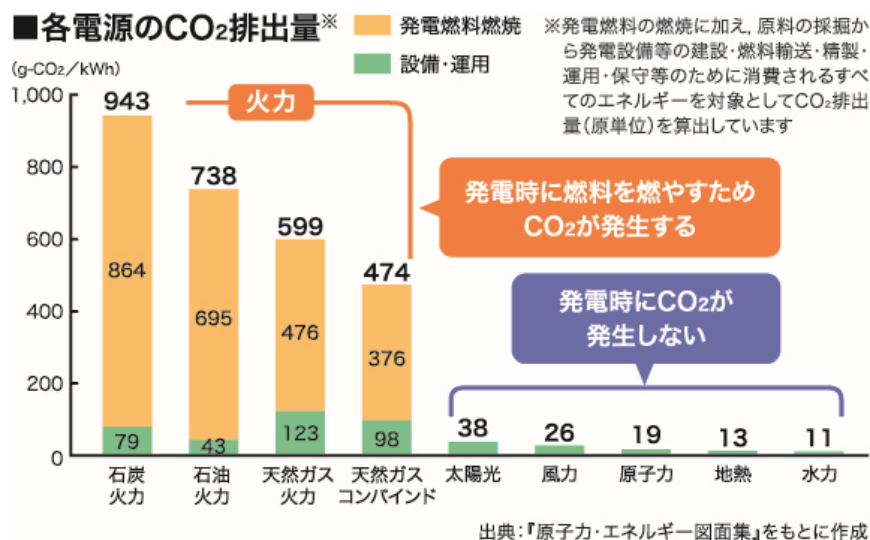


図3 電源種別発電時CO<sub>2</sub>排出量(文献[9]中国電力 発電と二酸化炭素 より引用)

これらの数値から、2030年において1kwh発電するのに排出されるCO<sub>2</sub>は(各発電方法の1kwhあたりCO<sub>2</sub>排出量)×(各発電方法の2030年構成比)の計算により以下のようになる。

石炭：864g/kwh × 26% = 224.6g/kwh

石油：695g/kwh × 3% = 20.9g/kwh

天然ガス：476g/kwh × 27% = 128.5g/kwh

右辺の数値を合計すると、1kwh発電するのに排出されるCO<sub>2</sub>は、374g/kwhとなる(原子力と再生可能エネルギーによる発電はCO<sub>2</sub>を排出しないとする)。次に電気自動車の電費について考える。今回は日産リーフの電費を使用する。リーフのカタログより、62kwhバッテリー搭載車と40kwhバッテリー搭載車の平均をとり、電気自動車の電費を0.130kwh/kmとする。1kwh発電するのに排出されるCO<sub>2</sub>と電気自動車の電費をかけて、374g/kwh × 0.130kwh/km = 48.6g/kmとなるので、電気自動車の電力発電時のCO<sub>2</sub>排出量をC<sub>e</sub> = 48.6g/kmとする。

以上の計算結果をまとめると、C<sub>g</sub> = 120.3g/km, C<sub>h</sub> = 89.2g/km, C<sub>e</sub> = 48.6g/kmとなった。電気自動車のCO<sub>2</sub>排出量はガソリン車の約4割である。

## 6 2030年車種別普及台数予測

2019年までの1年ごとの自動車保有台数の推移[11]とハイブリッド車および電気自動車保有台数の推移[12]の値をもとに、2030年の普及台数を予測する。

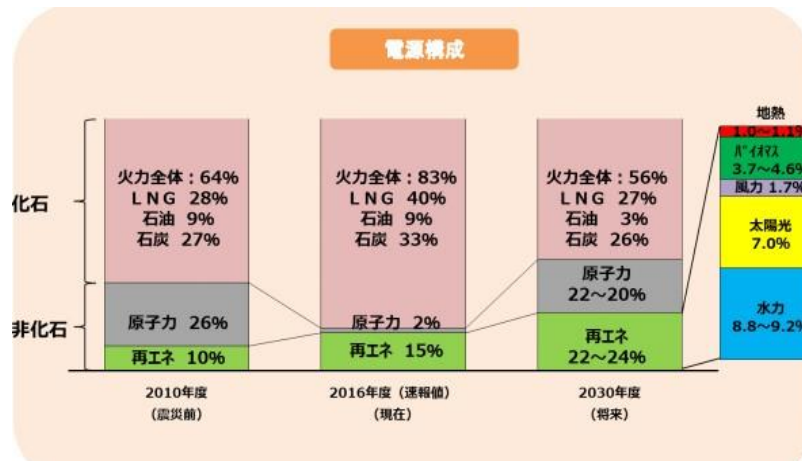


図4 2030年電源構成比 (文献 [10] 資源エネルギー庁 2030年エネルギーミックス実現へ向けた対応について～全体整理～ より引用)

図5は自動車全体の普及台数の実績と予測のグラフを、図6と図7はハイブリッド車と電気自動車のグラフと回帰近似曲線をそれぞれ示す。近似曲線は2次式を使用した。近似曲線の2030年のおおよその値から、2030年の自動車全体の普及台数  $N_g + N_h + N_e$  は7,000万台、また、ハイブリッド車の普及台数  $N_h$  は、2,500万台であると読み取れる。図7の電気自動車の台数は少なく(縦軸は100倍に拡大している)、2019年は11万台であり、このままの推移では2030年において37万台程度に過ぎない。

ガソリン車が何台電気自動車にとってかわるべきか求めるため、ここでは簡単のため2030年の自家用乗用車がハイブリッド車以外すべてガソリン車と仮定すると、ガソリン車の普及台数  $N_g$  は、7,000万台 - 2,500万台 = 4,500万台となる。

## 7 2030年にパリ協定の目標を達成するために必要な電気自動車台数と普及計画

### 7.1 電気自動車普及パターン

電気自動車のみでの普及で目標値を達成するパターンについて検討する。

$C_g = 120.3\text{g/km}$ ,  $C_h = 89.2\text{g/km}$ ,  $C_e = 48.6\text{g/km}$ ,  $d = 1$ 万 km であるので、(1)より、車種別年間  $\text{CO}_2$  排出量  $K_i$  はそれぞれ1台あたり、 $K_g = 1.203$ トン、 $K_h = 0.892$ トン、 $K_e = 0.486$ トンとなる。次に(2)より、2030年の車種別年間総  $\text{CO}_2$  排出量  $X_i$  はそれぞれ、 $X_g = 5,413$ 万5000トン、 $X_h = 2,230$ 万トンとなり、 $X_g + X_h = 7,643$ 万5000トンとなる。つづいて(3)より、パリ協定によって定められた2030年の運輸部門  $\text{CO}_2$  排出量  $T = 1$ 億6,300万トン、運輸部門の中で自家用乗用車が占める  $\text{CO}_2$  排出量の割合  $R = 46.1\%$  となるから、2030年自家用乗用車  $\text{CO}_2$  排出量目標値  $P = 7,514$ 万3000トンとなる。(4)より、2030年自家用乗用車  $\text{CO}_2$  削減必要量  $Q = 7,643$ 万5000 - 7,514万3000 = 129.2万トンである。6章で述べた通りにハイブリッド車がこのままの傾向で普及すれば、目標達成まではあとわずかである。

最後に(5)より、ガソリン車にとってかわるべき電気自動車の台数を求めると、 $E = 181$ 万台となった。よって、2030年に約181万台の電気自動車が普及すればパリ協定の目標値を達成できる。実際、2030年の普及台数を、 $N_g = 4319$ 万台、 $N_h = 2500$ 万台、 $N_e = 181$ 万台として年間総  $\text{CO}_2$  排出量を計算すると、 $X_g = 5196$ 万トン、 $X_h = 2230$ 万トン、 $X_e = 88$ 万トンとなり、合計7514万トンとなり  $P$  を下回る数値となる。しかし先に述べた通り2030年の電気自動車予測台数は現在の推移では37万台であり、このままでは達成は難しい。



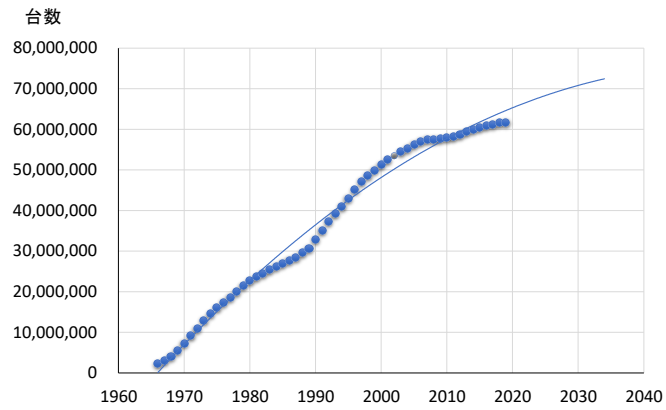


図5 自動車普及台数予測

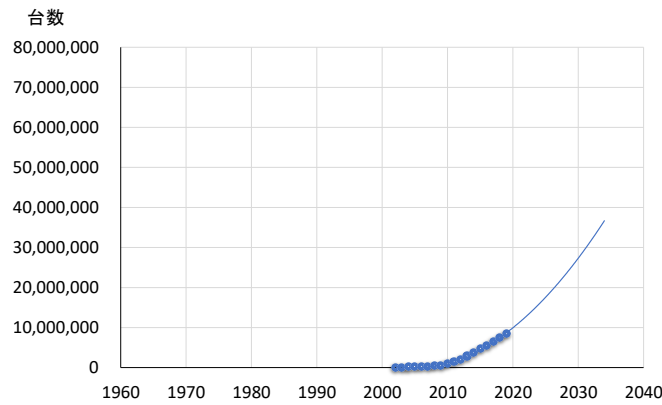


図6 ハイブリッド車普及台数予測

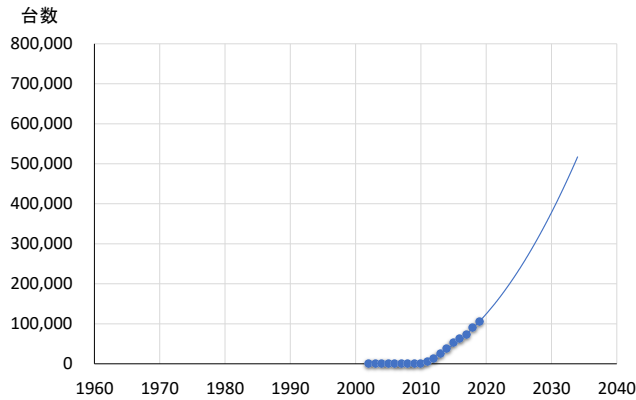


図7 電気自動車普及台数予測

## 7.2 プラグインハイブリッド車普及パターン

ここからは電気自動車のみの普及で目標値を達成するパターン以外について検討する。まずハイブリッド車でありながら充電ができ、電力による走行が可能なプラグインハイブリッドを普及させることで目標を達成するパターンについて考える。プラグインハイブリッド車は電気自動車より安価かつ充電が無くなった時にはハイブリッド車として走行でき、長距離走行が可能というメリットもあり、電気自動車よりも普及させやすいと考える。

プラグインハイブリッド車の1台あたりの年間CO<sub>2</sub>排出量を求めるにあたって、2019年現在国内で販売されてい

表 10 ハイブリッド車の WLTC モードによる CO<sub>2</sub> 排出量

順位	車名	電力走行時 CO <sub>2</sub> 排出量	電力走行可能距離 (航続距離)	ハイブリッド走行時の CO <sub>2</sub> 排出量
1.	トヨタ プリウス	40g/km	60km	74g/km
2.	トヨタ RAV4	58g/km	95km	105g/km
3.	ホンダ クラリティ	51.8g/km	101km	95.9g/km
4.	三菱 アウトランダー	79.9g/km	57.6km	152g/km
	平均	57.4g/km	78.4km	106.7g/km

る主要な 4 つのモデルの平均を用いることとする。表 10 は今回使用したモデルとその電力走行時 CO<sub>2</sub> 排出量と電力走行可能距離 (航続距離)、ハイブリッド走行時の CO<sub>2</sub> 排出量である。電力走行時 CO<sub>2</sub> 排出量は電気自動車の CO<sub>2</sub> 排出量計算時に求めたものと同じく、1kwh 発電する際の CO<sub>2</sub> 排出量を 374g/kwh として計算した。

4 つのモデルの平均値は、電力走行時 CO<sub>2</sub> 排出量、電力走行可能距離、ハイブリッド走行時の CO<sub>2</sub> 排出量の順に、57.4g/km、78.4km、106.7g/km となる。次に電力走行時とハイブリッド走行時の CO<sub>2</sub> 排出量が異なるため、それぞれの年間走行距離を考える必要がある。今回はガソリン車やハイブリッド車の年間 CO<sub>2</sub> 排出量を算出する際にも用いた、年間平均走行距離  $d=1$  万 km を利用して、1 年 52 週で計 1 万 km 走行する次のシナリオを考えた。

- 週 5 日：通勤片道 15km, 往復 30km
- 週 2 日：どちらか 1 日 10km 移動
- 年 4 回：少し遠出, 120km の移動
- 年 2 回：旅行, 600km の移動

プラグインハイブリッド車の電力走行可能距離は 78.4km なので、このシナリオにおいてハイブリッド走行を使用するのは、年 4 回の 120km の遠出と年 2 回の 600km の旅行の時のみになる。遠出と旅行の時は、最初の 78.4km は電気で走行し、残りの距離をハイブリッド走行すると考える。

まず電力走行時の年間 CO<sub>2</sub> 排出量を求める。年に 6 回電力走行可能距離の 78.4km 以上走ることから、電力走行距離は、電力走行距離=年間 52 週 × 5 日 × 通勤 30km + 52 週 × 週 1 日 × 10km + 年 6 回 × 78.4km = 8,790.4km, となる。よって電力走行による年間 CO<sub>2</sub> 排出量は、57.4g/km × 8,790.4km=0.505トンとなる。次にハイブリッド走行時の CO<sub>2</sub> 排出量を求める。年間総走行距離 1 万 km から電力走行距離の合計 8,790.4km を引き、1,209.6km をハイブリッドで走行することとする。よってハイブリッド走行による年間 CO<sub>2</sub> 排出量は、106.7g/km × 1,209.6km=0.129トンとなる。

電力走行時とハイブリッド走行時の CO<sub>2</sub> 排出量を合わせると、0.505トン+0.129トン=0.634トンとなる。したがって、プラグインハイブリッド車 1 台あたりの年間 CO<sub>2</sub> 排出量を 0.634トンとなる。

プラグインハイブリッド車が何台ガソリン車にとってかわればパリ協定の目標を達成できるのか計算する。(5) の  $K_e$  の値をプラグインハイブリッド車の 1 台あたりの年間 CO<sub>2</sub> 排出量に置き換えると、プラグインハイブリッド車の必要普及台数は 230 万台と求められる。

### 7.3 その他の普及パターン

電気自動車とプラグインハイブリッド車の普及必要台数が 5 : 5 になる計算を行ったところ、100 万 5,000 台ずつ普及すると 129 万 2,430トンの CO<sub>2</sub> が削減でき、目標を達成できる。

最後に、ガソリン車よりも CO<sub>2</sub> 排出量が少なく、現在すでに幅広く普及しているハイブリッド車をより普及させることで目標を達成するパターンについて検討した。ハイブリッド車が 420 万台普及すると目標を達成できるとわかった。2030 年のハイブリッド車の普及台数  $N_h$  は約 2500 万台であるので、さらに 17 % 程度の増加で目標達成が可能である。

表 11 自動車保有世帯数の推移 ([14] より引用)

年 月	世帯当たり 普及台数	保有台数	世帯数
平成 24 年 3 月末	1.080	58,483,021 (101.0%)	54,171,475 (100.7%)
平成 25 年 3 月末	1.083	59,113,976 (101.1%)	54,594,744 (100.8%)
平成 26 年 3 月末	1.069	59,810,485 (101.2%)	55,952,365 (102.5%)
平成 27 年 3 月末	1.069	60,278,643 (100.8%)	56,412,140 (100.8%)
平成 28 年 3 月末	1.064	60,595,249 (100.5%)	56,950,757 (101.0%)
平成 29 年 3 月末	1.062	61,018,814 (100.7%)	57,477,037 (100.9%)
平成 30 年 3 月末	1.058	61,354,808 (100.6%)	58,007,536 (100.9%)
平成 31 年 3 月末	1.052	61,543,555 (100.3%)	58,527,117 (100.9%)

## 8 電気自動車を所有しやすい世帯について

電気自動車は充電が必要になることや、ガソリン車と比べると航続距離が短いことから、所有できる世帯には一定程度の制約があるだろう。ここで電気自動車を所有しやすい世帯数について考える。まず、自宅で充電できるという条件から一戸建ての住居に住む世帯に限定する。次に航続距離が短いため、世帯の2台目の車としての需要に期待し、車を複数台所有する世帯に限定する。以上の条件から、2030年の全世界帯のうち電気自動車を所有しやすい世帯として、「一戸建てに居住し」かつ「複数台の乗用車を所有する」世帯数を推定する。

一般財団法人自動車検査登録情報協会のデータから、自動車保有世帯数の推移は表11のようになり、2019年の保有世帯数は58,527,117世帯である[14]。表11のデータをもとに2次式を用いて2030年の自動車保有世帯数を予測すると、約6250万世帯となる。

次に日本自動車工業会のデータを見ると、(6年前のデータとなるが)2015年に複数台の乗用車を所有している世帯の割合は36.5%であった[15]。

平成30年住宅・土地統計調査のデータから、2018年の総住宅数は6242万戸であった[16]。空き家数は846万戸、うち空き家の一戸建て数は317万戸であった。また、居住世帯のある住宅は5366万戸、うち人が住んでいる一戸建て数は2876万戸であった。住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数のデータから、2018年の全世界帯数は5801万であった[17]。これらの数値から1つの住宅に複数世帯住んでいる住宅数を、全世界帯数と居住世帯のある住宅数の差から推定すると、1つの住宅に複数世帯住んでいる住宅数=全世界帯数-居住世帯のある住宅数=5801万世帯-5366万戸=435万戸となる。複数世帯にはすべて2世帯が居住していると仮定して、一戸建てに住んでいる世帯数=人が住んでいる一戸建て数+1つの住宅に複数世帯住んでいる住宅数=2876万+435万=3311万世帯となる。したがって一戸建てに住んでいる世帯の割合は、一戸建てに住んでいる世帯数/全世界帯数=3311万世帯/5801万世帯=57.1%と推定される。

2030年に「一戸建てに居住し」かつ「複数台の乗用車を所有する」世帯数を推定してこれを電気自動車を所有しやすい世帯数とすれば、世帯数予測値×複数台所有世帯割合×一戸建てに住んでいる世帯割合=6250万×36.5%×57.1%=1303万世帯となる。したがって電気自動車を所有しやすい世帯数は約1303万世帯、世帯数全体における割合は20.8%となった。パリ協定の目標達成のための2030年の電気自動車台数は180万台であったので、1303万世帯の約15%程度が2台目の乗用車として電気自動車を保有すれば目標が達成できる。今後はこのような電気自動車を所有しやすい世帯を対象とした補助金などを設定するなどして、電気自動車普及のための政策を推進することが望まれる。

## 9 おわりに

電気自動車にはいまだデメリットも多く、2030年に180万台の普及は難しく、現状のままではパリ協定の目標は達成できない。しかし、ハイブリッド車はすでに多く普及していることやプラグインハイブリッド車の普及も進んでいることから、環境に優しい車全体の普及率が上がれば目標達成も不可能ではないと思う。そのためにも電気ステーションの設置やエコカーに対する補助金の上乗せなど、さらなる政府の取り組みに期待したい。

本研究は主として2019年の新車の販売実績データを使用したもので、CO<sub>2</sub>排出量が多いであろう車齢が古い車のことについては考慮していない。また、得られた数値は必ずしもすべての実態や将来予測を反映した計算とはなっていない。CO<sub>2</sub>排出量や走行キロ数など計算に使用した数値は、販売台数などを考慮せず単純な算術平均である。シナリオもごく単純なものである。将来はエンジンやモーター、バッテリーなどの技術改良により電気自動車の電費は向上し、今よりも価格が低下して、普及の速度が高まることが期待される。これらのことに留意して内容をご理解いただければ幸いである。電気自動車のCO<sub>2</sub>排出量はガソリン車の約4割であると算出され、ガソリン車やハイブリッド車よりも大幅に少ないことを明示することができた。再生可能エネルギーによって安価かつ効率的・安定的に発電できるようになれば、運輸部門におけるCO<sub>2</sub>排出量は大きく削減できるであろう。

## 参考文献

- [1] 外務省： 外交政策 気候変動 「2020年以降の枠組み：パリ協定」(<https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w\000119.html>)
- [2] 環境省： 地球環境・国際環境協力 「日本の約束草案」(<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2020.html>)
- [3] 国土交通省： 政策・仕事 「運輸部門における二酸化炭素排出量」([https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html))
- [4] 一般社団法人 日本自動車販売協会連合会： 乗用車ブランド通称名別順位 2019年1月～12月 (<http://www.jada.or.jp/data/month/m-brand-ranking/>)
- [5] 一般社団法人 全国軽自動車協会連合会： 軽四輪車通称名別新車販売確報 2019年度 (<https://www.zenkeijikyoo.or.jp/statistics/tushokaku/tushokaku-nendo-5140>)
- [6] 一般社団法人 日本自動車販売協会連合会： 燃料別販売台数 (乗用車) 2019年12月 (<http://www.jada.or.jp/data/month/m-fuel-hanbai/>)
- [7] 国土交通省： 「JC08モード燃費とWLTCモード燃費の関係の分析」(<https://www.mlit.go.jp/common/001191357.pdf>)
- [8] 自交総連：「燃料種別によるCO<sub>2</sub>排出量の計算について」(<http://www.jikosoren.jp/seisaku/CO2/CO2-3.html>)
- [9] 中国電力： 発電と二酸化炭素 (<https://www.energia.co.jp/kids/kids-ene/learn/environment/CO2.html>)
- [10] 資源エネルギー庁：2030年エネルギーミックス実現へ向けた対応について～全体整理～ ([https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/025/pdf/025\008.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/025/pdf/025\008.pdf))
- [11] 一般財団法人 自動車検査登録情報協会： わが国の自動車保有動向 自動車保有台数推移表 (<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/ub83e10000000wo-att/hoyuudaisuusuihyou.pdf>)
- [12] 一般財団法人 自動車検査登録情報協会： わが国の自動車保有動向 ハイブリッド車・電気自動車の保有台数推移表 ([https://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000ogys-att/\(4\).pdf](https://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000ogys-att/(4).pdf))
- [13] 国土交通省： 交通統計資料 「自動車燃料消費量調査」結果の概要 (<https://www.mlit.go.jp/k-toukei/nennryoukekka.html>)
- [14] 一般財団法人 自動車検査登録情報協会： 自家用乗用車 (登録車と軽自動車) の世帯当たり普及台数 (<https://www.airia.or.jp/publish/file/r5c6pv000000mhvq-att/r5c6pv000000mhv5.pdf>)
- [15] 一般社団法人 日本自動車工業会： 2015年度 乗用車市場動向調査 ([http://www.jama.or.jp/lib/invest\\_](http://www.jama.or.jp/lib/invest_))

analysis/pdf/2015PassengerCars.pdf)

- [16] 総務省統計局：平成 30 年住宅・土地統計調査 住宅数概数集計 結果の概要 ([https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2018/pdf/g\\_gaiyou.pdf](https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2018/pdf/g_gaiyou.pdf))
- [17] 総務省：住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数 ([https://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/jichi\\_gyousei/daityo/jinkou\\_jinkoudoutai-setaisuu.html](https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/daityo/jinkou_jinkoudoutai-setaisuu.html))



## 第Ⅱ部

### 輸送インフラのリスクマネジメント





# 海賊活動に関する地理的特性分析

東京海洋大学 渡部大輔

## 1. 研究の背景と目的

海に囲まれた我が国において、海上輸送は貿易量の 99.7% (重量ベース) を担っており、我が国に必要不可欠な交通インフラストラクチャーである。持続可能社会のためのインフラストラクチャー戦略として、我が国の安定的な貿易を確保するために、国際海運の安全性を高める必要がある。現に、我が国はソマリア周辺海域において海上自衛隊の護衛艦等を派遣するとともに、マラッカ・シンガポール海峡を始めとする東南アジア海域においても海賊対処活動を積極的に進めている。しかし、国際的な協力体制を構築した対策が行われているにも関わらず、海賊活動は世界的に近年増加傾向が見られており、特に東南アジアやアフリカにおいて発生件数が多く見られる。

そこで本研究では海賊活動に関する地理的特性について、安全・安心な国際海運のためのインフラストラクチャーの数理地政学的研究の観点から、海賊出没に関する地理的特性分析を行う。まず、近年の海賊出没に関する概況について、渡部 2019 を基にまとめた。中でも海賊活動の発生が著しい中東・アフリカに主眼を置いて動向を分析した。まず 2019 年 5 月の米国による対イラン制裁を契機に続発したホルムズ海峡を中心とした原油タンカーなどの商船への攻撃に対する国際社会による安全確保の取り組みを整理した。また 2020 年には西アフリカの海域での海賊被害が急増していることから、近年のギニア湾周辺各国とともに国際社会による安全確保の取り組みの現状を整理した。そして国際機関による海賊出没の統計データを用いて、地図上にプロットし、海岸からの距離等を用いて各国の海賊出没の地理的特性を分析した。

## 2. 海賊活動に関する概況

海賊活動は、時期によって発生個所が大きく変化しており、各国政府を始めとして、国際連合、国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO)、国際海事局 (International Maritime Bureau: IMB) 等の様々な機関が連携して海賊対策を行った対策の結果、発生件数が著しく減少している。近年の傾向として、1990 年代後半からマラッカ・シンガポール海峡を始めとする東南アジア海域を中心に増加傾向が見られ、2000 年をピークに一度減少傾向が見られた後、また増減が繰り返し見られている。これに対して、我が国の海上保安庁を中心として各国が協力し対策を進め、アジアの海賊問題に有効に対処すべく地域協力促進のための法的枠組みとして、「アジア海賊対策地域協力協定」(ReCAAP: Regional Cooperation Agreement on Combating Piracy and Armed Robbery against Ships in Asia) が、2006 年 9 月に発効した。そして、情報共有センター (ISC: Information Sharing Centre) がシンガポールで同年 11 月に設立された。

そして、2006 年頃からアフリカ、特にソマリア周辺海域にて急増傾向が見られた後、国際機関の連携による対策が進み 2012 年以降急減した。この海域に出没する海賊の特徴としては、遠方への航行能力を有する母船と攻撃用の高速航行が可能である小型ボートを使用

した攻撃が多く行われており、特に 2009 年以降よりインド洋上の遙か沖合にまで海賊被害が広がった。2008 年 6 月に採択された国連安保理決議 1816 号等の一連の決議に基づき、各国及び国際機関は軍艦・哨戒機を派遣し、航行する船舶の護衛活動を行っている。各国による海賊対策や国際協力の調整・情報交換を目的として、ソマリア沖海賊コンタクトグループ (Contact Group on Piracy off the Coast of Somalia) が 2009 年 1 月に設置された。そして IMO により「ジブチ行動指針」が 2009 年 1 月に採択され、沿岸国の海上保安能力向上支援として、ジブチに訓練センター、イエメン、ケニア、タンザニアに情報共有センター (ISC) を設置することとなった。その他、根本的な問題解決であるソマリアの安定化のために、治安向上への支援や人道支援・インフラ整備への支援が行われている。

### 3. 中東・アフリカにおける動向

#### 3. 1 ホルムズ海峡

ホルムズ海峡は、世界で海上輸送される原油の 3-4 割、日本へ輸送される原油の約 9 割が通過するエネルギー供給の大動脈である。2018 年のイラン核合意を巡る米国とイランとの関係悪化、そして 2019 年 5 月の対イラン制裁を開始により、表 1 のように原油タンカーなどの商船が攻撃を受けるという事案が続発した。同年 7 月には米国は「海洋安全保障イニシアティブ」 (International Maritime Security Construct: IMSC) と呼ばれる有志連合への参加を呼び掛け、11 月には「センチネル作戦」 (Operation Sentinel) が開始された。「センチネル連合任務部隊」 (CTF Sentinel) と総称され、本部はバーレーンに置かれ、活動水域はホルムズ海峡、ペルシャ湾、イエメン沖、バブルマンテブ海峡、オマーン湾である。

我が国の対応としては、有志連合には参加せず、中東地域における平和と安定及び日本関係船舶の安全の確保のための独自の取組として、自衛隊による情報収集活動を実施することとした。2019 年 12 月に閣議決定がなされ、図 1 のような範囲を対象として、ソマリア周辺海域での海賊対処部隊の航空機を活用するとともに、新たな艦艇 1 隻の派遣が行われることとなった。

表 1 ホルムズ海峡周辺における主な攻撃事案 (2019 年)

月	場所	事案
5 月	UAE 沖	サウジアラビア籍原油タンカーを含む 4 隻
6 月	オマーン湾	日本企業が運航するパナマ籍ケミカルタンカーなど
	ホルムズ海峡	米国の無人偵察機を撃墜 (イラン革命防衛隊)
7 月	ホルムズ海峡	英国籍タンカー 2 隻拿捕 (イラン革命防衛隊)
9 月	サウジアラビア	石油施設へのドローン攻撃 (イエメン反政府武装組織フーシ派)
10 月	サウジアラビア沖	イラン籍原油タンカー、2 度の爆発・炎上

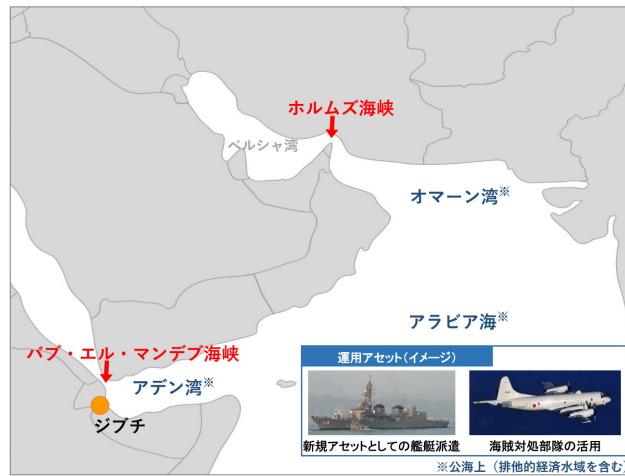


図 1 自衛隊による情報収集活動[10]

### 3. 2 西アフリカ

2000年代後半より西アフリカ，ギニア湾付近の海域での海賊被害が急増した．多くが金品盗取を目的とした武装強盗であり，主に市場で売買できるタンカーに積載されている石油製品を標的としている一方，近年は身代金目的の乗組員の誘拐事案も発生している．当初，沿岸各国が主体的に海賊対策を進められて来っており，前述のような国際的な対策が進められてこなかった．

そこで，2013年5月，ギニア湾での海上安全保障に関する専門家会合であるG7++ギニア湾フレンズ・グループ（FoGG: Friends of the Gulf of Guinea）が発足し，ギニア湾周辺各国での包括的な能力開発及び人材育成への支援が行われることとなった．そして，2014年10月には，海上トレード情報共有センター（MTISC-GoG: Maritime Trade Information Sharing Center-the Gulf of Genie）が設置された．同センターは，設定海域における海賊情報の提供や沿岸国の軍への海賊襲撃情報を報告する等の機能を有するとともに，航行船舶における注意点をまとめた「Maritime Security Guidance - Gulf of Guinea」（MSG-GoG）が発行されている．

2016年6月には，MTISC-GoGは，英国とフランスの協力の元，ギニア湾商船向け海洋状況把握（MDAT-GoG: Marine Domain Awareness of Trade – Gulf of Guinea）へと組織改組された．また国際海運会議所等により「Guidelines for Owners, Operators and Masters for protection against piracy in the Gulf of Guinea region」（2013年発表，2016年第二版）が発表され，ソマリア沖を対象としたBMP（Best Management Practice）と併用し，MDAT-GoGへの報告等，ギニア湾における航行安全に関するガイドラインをまとめている．更に海運業界として，「Global Counter Piracy Guidance for Companies, Masters and Seafarers」（2018年発表）とともに，2020年3月には「BMP West Africa Best: Management Practices to Deter Piracy and Enhance Maritime Security off the Coast of West」（BMP-WA）として，西アフリカ沿岸における海賊行為の防止と海事セキュリティ

強化の実践事例を公表している。

また、中・西部アフリカにおける海賊・武装強盗及び海上不法行為の防止に係る行動規範（UN Security Council Resolutions 2018 and 2039 on acts of piracy and armed robbery at sea off the coast of the states of the Gulf of Guinea），通称「ヤウンデ行動規範」（Yaounde Code of Conduct）が国際海事機関（IMO）の支援を受け、中部アフリカ経済共同体（ECCAS）及び西アフリカ経済共同体（ECOWAS）によって策定され、2013年6月に中・西部アフリカの22か国（内陸国を含む）により署名された。

我が国の対応としては、国際海事機関（IMO）の中・西部アフリカ海上安全信託基金への拠出や海上犯罪の取締能力向上を目指す研修などの取り組みを進めてきた。2020年12月には外務省より、ギニア湾における海賊等事案に関する注意喚起がなされた。

このように2013年前後から継続的な対策が取られてきたにも拘わらず、2020年になり沖合を含めて顕著な増加が見られた。これまでは石油関連施設などの周辺にある港湾に停泊中の船舶を狙った事案が多かったものの、近年の傾向として、マグロやカツオなどの豊かな漁場であるギニア湾の沖合で操業中の中国や韓国などの漁船が狙われる事案が増加している。韓国政府は、韓国人船員を狙った海賊による拉致事件が相次いだことから、独自の対策が進められている。2020年7月には海賊による拉致などの危険性が高い「海賊高危険海域」（32万3000平方キロ）に設定し、同海域での操業停止を勧告、9月には西アフリカ沿岸国に海洋警察の職員1名を派遣し、さらに操業する韓国人に対し罰金を科すことを検討している。このように活動範囲を沖合へと展開する海賊行為に対して、広域的かつ国際的な協力関係が益々重要となっていると言える。

#### 4. 海賊出没位置に関する地理情報システムを用いた分析

##### 4. 1 海賊出没に関する地理情報データベースの構築

本研究では、IMBが公開している海賊出没地図のデータを用いて、地理情報システム（GIS）上にデータベースを構築した。

- ・データ元：IMB Piracy & Armed Robbery Map（2005年～2020年の15年間）
- ・データ：位置情報の取得できた事象
- ・発生場所の位置情報：Mapの緯度経度データ
- ・最寄りの国の結合：ArcGIS テーブル結合（空間的位置関係、国境ポリゴンデータと海賊ポイントデータ）→発生場所毎に最寄り国の海岸線からの距離の計算

##### 4. 2 地理的分布

海岸からの平均距離は図2のように2007年から増加傾向が見られ、2009年に2倍以上になった。一方、2012年以降急減し20海里程度で推移していたものの、2010年付近ではソマリア周辺海域での海賊活動活発化に伴い大きく増加した。その後、同海域での鎮静化にもとない減少したものの、2020年には再び増加へと転じた。国別では図3のように、2020年にはナイジェリアにおいて急増しており、ギニア湾沖合での増加が影響しているものと

考えられる。その他の国は沿岸での発生が多いことが分かる。なお、海岸線が最寄りの国家に割り当てているため、実際の関係国と異なる場合がある。

海岸からの距離分布は図4のように、2012年以降は10海里までで半分以上を占めていることから、主に港湾域内での事象が多いと言える。しかし、2020年には50海里以上の事象が増加していることから、沖合での事象が増えていると言える。

発生海域は、沿岸国の主権が及ぶ領海（12海里＝約22km）、排他的経済水域（200海里＝約370km）、公海に分けると図5のように表すことができる。領海上で発生した件数を集計すると、150件程度で推移している。割合で見ると、2005年には約2/3であったのが、2009-2011年には約1/3程度となっている。2012年以降には公海上での発生が急減していることから、ソマリア周辺海域における国際的な協力体制による海賊対策が有効であることが分かる。一方、領海における発生が増加していることから、沿岸国の海上保安能力向上の重要性が高まっていると言える。

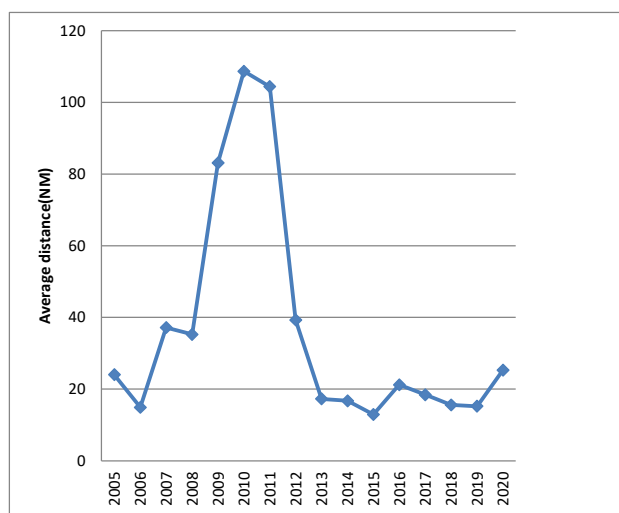


図2 海岸からの平均距離

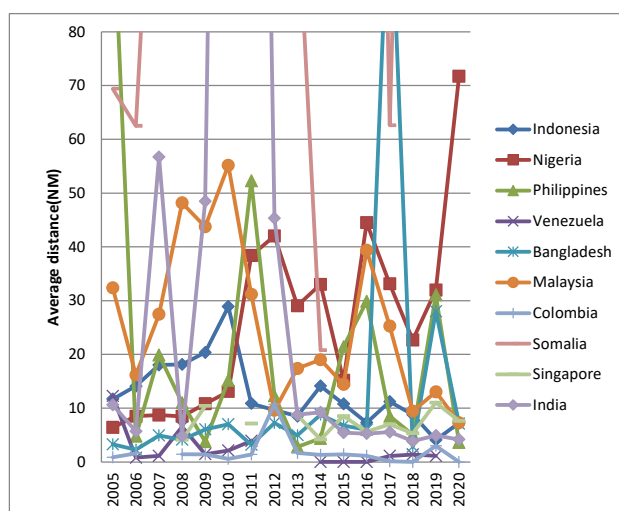


図3 国別海岸からの平均距離

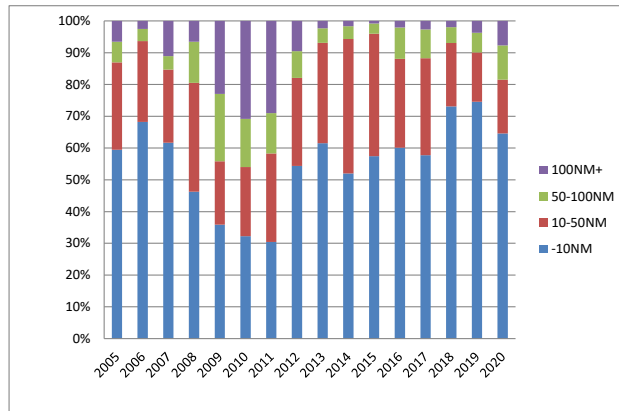


図 4 海岸からの距離分布

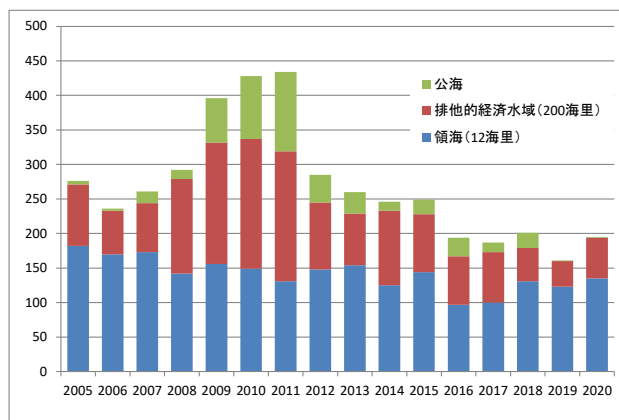


図 5 発生海域

## 5. まとめと今後の展望

本研究では、安全・安心な国際海運のためのインフラストラクチャーの数理地政学的研究の観点から、海賊出没に関する地理的特性分析を行った。その結果、東南アジアやソマリア周辺海域での発生が減少し海賊対策が有効である一方、近年、ホルムズ海峡や西アフリカのギニア湾沿岸に対する安全確保が急務となっている現状が明らかになった。特に後者はナイジェリアの石油や天然ガスなどのエネルギー資源とともに、ギニア湾の豊富な漁業資源など、様々な経済活動と関係してことから、早急な安定化が望まれている。そこで、ナイジェリアなど西アフリカやマレーシア・シンガポールなど東南アジアにおいて、ReCAAP やMDAT-GoG 等による広域的な海賊対策を継続的に行うことが重要である。

今後の課題として、欧州・中東・アジアを中心とした主要物流ルートにおいて、シベリア鉄道や中欧班列のようなランドブリッジの活用、北極海航路の開発、クラ地峡などの運河・パイプライン等のインフラ整備による物流リスクの低減効果について考察する必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18K04601 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] BIMCO, ICS, IFSMA, IGP&I, INTERTANKO, INTERCARGO, INTERMANAGER and OCIMF: Global Counter Piracy Guidance for Companies, Masters and Seafarers, 2018.
- [2] ICC International Maritime Bureau: IMB Piracy & Armed Robbery Map, <https://www.icc-ccs.org/piracy-reporting-centre/live-piracy-map>
- [3] ICS, BIMCO, IGP&I Clubs, INTERCARGO, INTERTANKO and OCIMF: BMP West Africa Best: Management Practices to Deter Piracy and Enhance Maritime Security off the Coast of West Africa including the Gulf of Guinea, 2020.
- [4] Nwalozie, C.: Exploring Contemporary Sea Piracy in Nigeria, the Niger Delta and the Gulf of Guinea, *Journal of Transportation Security*, 13, 159-178, 2020.
- [5] 海上自衛隊幹部学校: ホルムズ海峡の封鎖について, コラム 137, 2019.
- [6] 外務省 : ギニア湾における海賊問題の現状と取組 , [https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page22\\_000613.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page22_000613.html), (2021/1/6 閲覧).
- [7] 神田英宣 : ギニア湾の海賊対策 – 国際協力と課題 –, *海事交通研究*, 65, 43-52, 2016.
- [8] 佐藤量介: ホルムズ海峡と有志連合, *国際法学会エキスパート・コメント*, No.2019-10, 2019.
- [9] ソマリア沖・アデン湾における海賊対処に関する関係省庁連絡会「2020年 海賊対処レポート」, 2021.
- [10] 防衛省: 中東地域における日本関係船舶の安全確保に関する政府の取組, 2020/3.
- [11] 連合ニュース (韓国) : 西アフリカ・ギニア湾での操業に罰金を検討 海賊対策＝韓国政府, <https://news.yahoo.co.jp/articles/b4967e2762305ee32c01cf664f7197e1c0e87edc> (2021/1/6 閲覧).
- [12] 渡部大輔 : 海賊対策 : グローバル・ロジスティクス・リスクへの対応, 『グローバル・ロジスティクス・ネットワーク』(柴崎隆一編) , 74-84, 成山堂書店, 2019.





# 競争環境下における港湾区域の排出規制と技術選択

東京理科大学  
東京理科大学  
東京理科大学  
中央大学

高嶋 隆太  
伊藤 真理  
吉田 百花  
鳥海 重喜

## 1 はじめに

近年、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガス (Green House Gas; GHG) 排出による地球温暖化は世界で大きな関心を集めており、GHG 排出削減は重要な解決すべき問題の一つとして挙げられている。温室効果ガスとは本来、地表から放出される熱を吸収して地球の地表面の温度のバランスを保つ役割がある。しかし、温室効果ガスが増加しすぎると、吸収される熱も増え、結果として地球規模の気温上昇、すなわち地球温暖化を引き起こす。地球温暖化の支配的な原因は、人間活動による GHG の増加であるという見方が一般的である。また、GHG の中でも CO<sub>2</sub> の割合が最も大きくなっている [1]。そのため、温暖化対策として CO<sub>2</sub> 排出削減に取り組むことは重要であると言える。

2015 年の国連気候変動枠組条約では、196 の国と地域全てが世界の気温上昇を 2℃未満に抑える取り組みを規定したパリ協定が採択された。炭素排出規制への圧力を受け、各国は低炭素化にむけた取り組みを進めている。具体的には、炭素税、排出量取引制度、カーボンオフセットなどの施策がある。このうち、炭素排出量に対して価格付けを行う「カーボンプライシング」と呼ばれる経済的手法は幅広い地域で取り入れられている。カーボンプライシングは、価格を固定する炭素税と排出量を固定する排出量取引制度に大きく分けることができる。

各国での対策はもちろんのことであるが、産業界の自主的な取り組みも進んでいる。国際海事機関 (International Maritime Organization; IMO) が 2014 年に行った調査では、2012 年の全世界の CO<sub>2</sub> 排出量は 356 億トンであり、国際海運はそのうちの 2.2% を占めていた [2]。そのため、IMO では技術的指標として「エネルギー効率設計指標 (Energy Efficiency Design Index; EEDI)」, 運航的手法として「船舶エネルギー効率マネジメントプラン (Ship Energy Efficiency Management Plan; SEEMP)」などについての議論がされている。また、特定海域で船舶から発生する汚染物質の排出をより厳しく規制する排出規制海域 (Emission Control Area; ECA) の導入が各海域で進んでいる。2018 年には、第 72 回海洋環境保護委員会 (Marine Environment Protection Committee; MEPC72) において 2050 年までに 2008 年比で CO<sub>2</sub> 排出量を半減させることが決定されたことで、今後はこの目標のために更なる規制が進むと考えられている。

国際貿易の活発化により海上輸送の取扱量が今後さらに増えることは避けられない。そして海上輸送量の増加に伴い、港湾に起因する CO<sub>2</sub> 排出量も増えるとされている。国土交通省が 2008 年に東京港をモデルに概算した結果、停泊中の船舶の発電による CO<sub>2</sub> 排出量は港湾地域で発生する CO<sub>2</sub> 排出量の半数を占めていた。そのため、国土交通省は船舶のアイドリングストップの促進など、停泊中の船舶からの排出量の削減に取り組む必要があるとしている [3]。現在、停泊中の船舶からの CO<sub>2</sub> 排出量の削減として、船舶の低硫黄燃料 (Low Sulphur Fuel Oil; LSO) の使用またはターミナルからの陸上電力供給の 2 つの対策が多く の国と地域でとられている。

地球温暖化対策として、航行中の船舶が環境に与える影響を分析した研究は多く見受けられる一方で、停泊中の船舶が与える影響を分析した研究は多くない。また、港湾のサプライチェーンも含めた分析はまだ少ない。Yang et al.[4] は、排出量取引制度の下で海運会社1社とターミナルが1社が存在すると仮定し、船舶に陸上電力を供給する場合と停泊中の船舶内で発電する場合を考えた。また、海運会社とターミナルのどちらかが先に意思決定を行う寡占モデルの一つであるシュタッケルベルク競争と同時に意思決定を行う場合の3パターンを仮定した。以上の条件のもとで、海運会社、ターミナル、サプライチェーンそれぞれの利潤、社会厚生、炭素排出量を分析した。Álvarez-SanJaime et al.[5] は、近年のトレンドでもある海運会社とターミナルの垂直統合を使用可能なターミナルごとに4パターンに分け、それぞれの場合における利潤、輸送量、サービス価格に与える影響を分析した。

上記で述べたとおり、港湾のサプライチェーン全体の分析を行った研究は多くない。しかし、貨物輸送にはさまざまな利害関係者がいるため、GHG削減のためにはより一層サプライチェーン全体で取り組む必要がある。そこで、Yang et al.[4]の研究にÁlvarez-SanJaime et al.[5]の垂直統合の要素を組み合わせ、排出量取引制度下において、垂直統合した場合に、技術選択の違いによって利潤、輸送量、サービス価格にどのような影響があるか分析する。また、社会厚生分析にはCui and Notteboom[6]のモデルを用いる。さらに、モデルを変更し、炭素税導入時と排出量取引制度下での違いについての分析も行う。

## 2 モデル

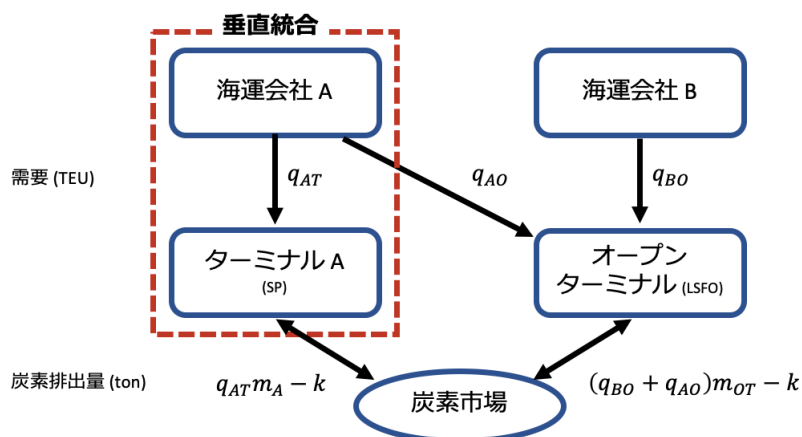


図 1: モデルの概要図

Álvarez-SanJaime et al.[5]より、垂直統合したターミナルとオープンターミナルを併用した場合の利潤の方が、垂直統合したターミナルのみを使用した場合よりも大きくなるのが分かっている。そこで本研究では、垂直統合した海運会社 A はターミナル A とオープンターミナルの両方を使用できるものとする。また、本研究におけるサプライチェーンとは、ターミナルと垂直統合した海運会社 A、海運会社 B、オープンターミナルの3つを合わせたものとする。図1にモデルの概要図を示す。海運会社 A からターミナル A への輸送量を  $q_{AT}$ [TEU]、A からオープンターミナルへの輸送量を  $q_{AO}$ [TEU]、B からオープンターミナルへの輸送量を  $q_{BO}$ [TEU] とする。同様にサービス価格  $f$ [\$/TEU] を  $f_{AT}$ ,  $f_{AO}$ ,  $f_{BO}$  と表す。海運会社 A はコンテナ輸送と排出量取引による収益、海運会社 B はコンテナ輸送による収益、オープンターミナルは海運会社のターミナル利

用費と排出量取引により収益をあげる。

## 2.1 排出量取引制度下でのモデル

輸送量は, Álvarez-SanJaime et al.[5] のモデルを用いる。  $a$  は, それぞれの輸送サービスに対する支払い意思額であり, 垂直統合によりサービスの質は向上し,  $AT$  に対する支払い意思額は  $AO, BO$  よりも高くなるとする ( $\bar{a} > a$ )。  $b$  は, サービスの差別化を表す係数であり,  $(0, 0.5)$  の値をとる。

輸送量はそれぞれ以下のように表される。

$$q_{AT} = \bar{a} - f_{AT} + b(f_{AO} + f_{BO}) \quad (1)$$

$$q_{AO} = a - f_{AO} + b(f_{AT} + f_{BO}) \quad (2)$$

$$q_{BO} = a - f_{BO} + b(f_{AT} + f_{AO}) \quad (3)$$

利潤関数は Yang et al.[4] のモデルを参考に設定する。海運会社 A の利潤  $\pi^A$ , 海運会社 B の利潤  $\pi^B$ , オープンターミナルの利潤  $\pi^O$  はそれぞれ以下のように表される。

$$\pi^A = (f_{AT} - c)q_{AT} + (f_{AO} - c - u)q_{AO} - (q_{AT}m_A - k)p_c - F \quad (4)$$

$$\pi^B = (f_{BO} - c - u)q_{BO} \quad (5)$$

$$\pi^O = u(q_{AO} + q_{BO}) - [(q_{AO} + q_{BO})m_O - k]p_c \quad (6)$$

それぞれのターミナルには同量の炭素排出枠  $k$  が割り当てられている。本モデルでは, 停泊中の船舶の電力をターミナル A では陸上電力の供給によるもの, オープンターミナルでは船内で低硫黄燃料 (LSFO) を用いた発電によるものとする。ターミナルの炭素排出量はそれぞれ単位排出係数  $m_A, m_O$  を輸送量にかけることで得られる。陸上電力の供給による炭素排出量は船内の発電によって生じる炭素排出量よりも少ないと仮定する ( $m_A < m_O$ )。また, ターミナル A の管理費には固定費  $F$  がかかるものとする。

## 2.2 炭素税を導入した場合のモデル

排出量取引制度と炭素税を導入した場合を比較するために, 海運会社 A とオープンターミナルの利潤関数を以下のように変化させる。炭素排出枠  $k$  がなくなる代わりに, 炭素排出量に対して炭素税  $r$  をかける。海運会社 B の利潤関数は (5) をそのまま用いて分析を行う。

$$\pi^A = (f_{AT} - c)q_{AT} + (f_{AO} - c - u)q_{AO} - q_{AT}m_A r - F \quad (7)$$

$$\pi^O = u(q_{AO} + q_{BO}) - (q_{AO} + q_{BO})m_O r \quad (8)$$

本研究では, 排出量取引制度と炭素税を導入した場合の社会厚生をそれぞれ算出する。社会厚生はの算出に Cui and Notteboom[6] のモデルを用いる。炭素排出によるダメージコスト  $ED$  はサプライチェーン全体の炭素排出量に係数  $\eta$  をかけることで得られる。社会厚生は, 消費者余剰とサプライチェーン全体の利潤から炭素排出によるダメージコストを引いたものである。

$$CS = \frac{q_{AT}f_{AT} + q_{AO}f_{AO} + q_{BO}f_{BO}}{2} \quad (9)$$

$$ED = \eta T^2 = \eta [q_{AT}m_A + (q_{AO} + q_{BO})m_O]^2 \quad (10)$$

$$SW = CS + \pi^A + \pi^B + \pi^O - ED \quad (11)$$

利潤関数 (4) と (5) をそれぞれサービス価格で偏微分し,  $\frac{\partial \pi^A}{\partial f_{AT}} = \frac{\partial \pi^A}{\partial f_{AO}} = \frac{\partial \pi^B}{\partial f_{BO}} = 0$  であることを利用すると, 排出量取引制度下での最適サービス価格は以下のように表せる.

$$f_{AT}^* = \frac{1}{4(b+1)(b^2+2b-2)} \left[ \bar{a}(b+2)(b-2) - 3ab(b+2) + 2c(b+1)(b-2) - ub(b+1)(b+2) + m_{APc}(b+1)(b^2+4b-4) \right] \quad (12)$$

$$f_{AO}^* = \frac{1}{4(b+1)(b^2+2b-2)} \left[ -\bar{a}b(b+1) - a(b^2+2b+4) + 2c(b+1)(b-2) + u(b+1)(b^2+2b-4) - m_{APc}b^2(b+1) \right] \quad (13)$$

$$f_{BO}^* = \frac{1}{2(b^2+2b-2)} \left[ -\bar{a}b + a(b-2) + 2c(b+1)(b-1) + u(b^2-2) + m_{APc}b(b-1) \right] \quad (14)$$

最適サービス価格  $f_{AT}^*$ ,  $f_{AO}^*$ ,  $f_{BO}^*$  を式 (1), (2), (3) に代入することで, 最適輸送量が得られる.

$$q_{AT}^* = \frac{1}{4(b+1)(2b-1)(b^2+2b-2)} \left[ \bar{a}(8b^4 + 20b^3 - 15b^2 - 20b + 12) + ab(b-2) + 2c(b+2)(b-1)(2b-1) + ub(3b^2 + 5b - 6) + m_{APc}(b^3 - 3b^2 - 4b + 4) \right] \quad (15)$$

$$q_{AO}^* = \frac{1}{4(b+1)(2b-1)(b^2+2b-2)} \left[ -\bar{a}b^2 + a(8b^4 + 20b^3 - 13b^2 - 22b + 12) + 2c(2b^3 + b^2 - 5b + 2) + u(b^3 - b^2 - 6b + 4) + m_{APc}b(3b^2 + 3b - 4) \right] \quad (16)$$

$$q_{BO}^* = \frac{1}{2(b+1)(2b-1)(b^2+2b-2)} \left[ -\bar{a}b + a(4b^4 + 10b^3 - 8b^2 - 11b + 6) - 2c(b+1) - u(b^2 + 3b - 2) + m_{APc}b(b-1) \right] \quad (17)$$

### 3 分析結果と考察

本分析では, Yang et al.[4] を参考にパラメータを設定した. 表 1 に本数値分析で使用したパラメータを記す.

#### 3.1 垂直統合による影響

本節では, 海運会社 A からターミナル A, オープンターミナル, 海運会社 B からオープンターミナルの 3 ケースのサービス価格, 輸送量, 利潤を比較し, 垂直統合による影響を分析する. 図 2 に, サービス価格と炭素価格の関係を示す. 前章で求めた最適サービス価格のとおり, 全てのサー

表 1: 使用したパラメータ

パラメータ	記号	値	単位
支払い意思額 (⇔ターミナル A)	$\bar{a}$	25	\$
支払い意思額 (⇔オープントーミナル)	$a$	20	\$
差別化係数	$b$	0.4	—
限界費用	$c$	3.6	\$/TEU
オープントーミナル使用料	$u$	5	\$/TEU
ターミナル A の単位排出係数	$m_A$	2.0	t/TEU
オープントーミナルの単位排出係数	$m_{OT}$	3.0	t/TEU
炭素排出割当量	$k$	100	t
ターミナル A の管理費	$F$	500	\$
二酸化炭素排出によるダメージコスト係数	$\eta$	(1, 10)	—
炭素価格	$p_c$	(1, 10)	\$/t
炭素税	$r$	(1, 30)	\$/t

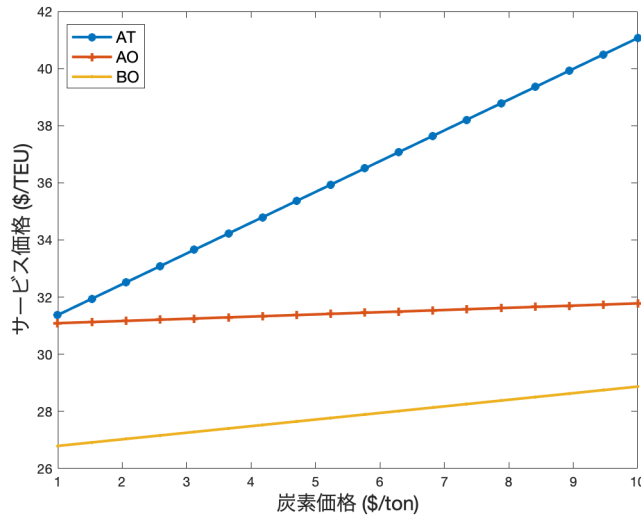


図 2: サービス価格と炭素価格の関係

ビス価格は炭素価格と共に上昇している。また、 $f_{AT}$  は最も炭素価格の影響を受けやすく、 $f_{AO}$  が最も安定したサービス価格である。炭素税を導入した場合でも同様の結果が得られた。図 3 に、輸送量と炭素価格の関係を示す。海運会社 A の全体輸送量は、炭素価格の上昇とともに増加する。ターミナル別の輸送量は、前章で求めた最適輸送量のとおり、輸送量  $q_{AT}$  は炭素価格の上昇と共に増えるが、輸送量  $q_{AO}$  は減少する。同様に、海運会社 B もオープントーミナルを使用しているため炭素価格の上昇とともに輸送量  $q_{BO}$  は減少する。

図 2 と図 3 からわかるとおり、海運会社 A からターミナル A へのサービス価格は炭素価格とともに上昇するが、輸送量も炭素価格の上昇とともに増加する。これは、ターミナル A への支払い意思額  $\bar{a}$  がオープントーミナルへの支払い意思額  $a$  よりも高いためであると考えられる。一方で、オープントーミナルを使用する輸送においては、サービス価格が低い方が輸送量が多くなると考えるのが自然であるが、得られた結果ではサービス価格も輸送量も海運会社 A の方が海運会社 B よりも高くなった。これは、海運会社 A の利潤関数に排出量取引による収益が含まれ、その取引量は輸送量によることが影響していると考えられる。炭素税を導入した場合でも、利潤関数に含まれる炭素税の支払額は輸送量に影響をうけているため、排出量取引制度下と同様、 $f_{AO} > f_{BO}$  かつ  $q_{AO} > q_{BO}$  という結果が得られた。

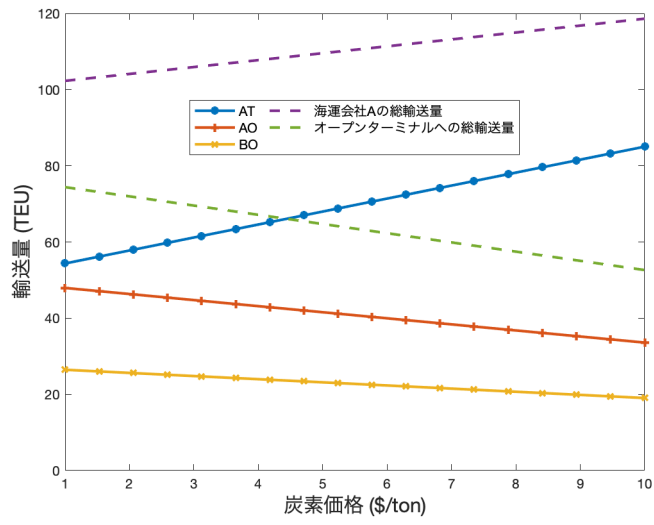


図 3: 輸送量と炭素価格の関係

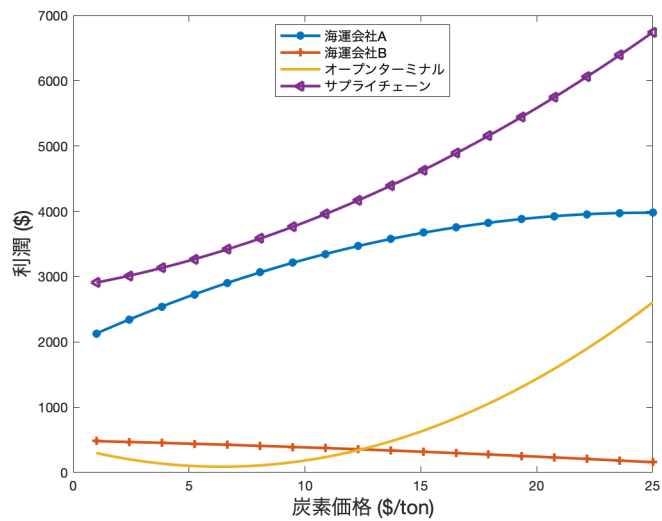


図 4: 利潤と炭素価格の関係

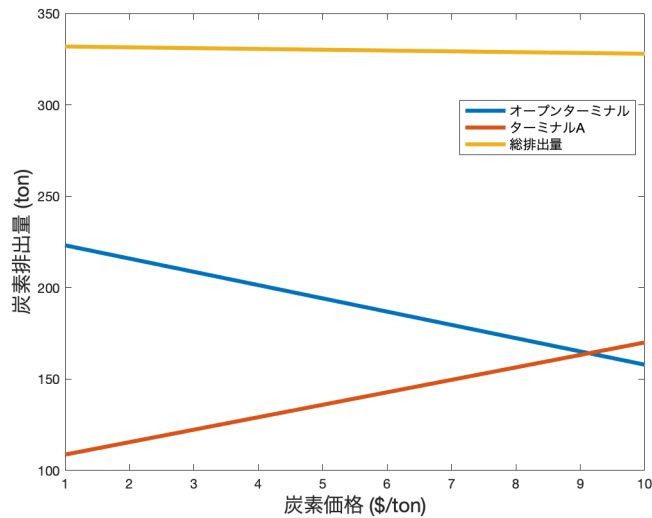


図 5: 炭素排出量と炭素価格の関係

図4に、利潤と炭素価格の関係を示す。利潤の違いをより広範囲で見るために、炭素価格を(1,25)で変化させた。海運会社Aは、炭素価格の上昇とともに少しずつ利潤の増加が小さくなっている。自社ターミナルへの輸送量は炭素価格とともに上昇するため、それに伴い炭素市場で炭素枠を購入する必要がある。炭素価格が高くなるにつれて、コンテナ輸送による収益に対して炭素排出枠を購入するコストが大きくなり、傾きが少しずつ小さくなったと考えられる。一方のオープンターミナルは、炭素価格の上昇とともに輸送量が減るため、ターミナル使用料による収益が減少していく。代わりに排出量取引により収益をあげるため、利潤が高くなったと考えられる。海運会社Bは、輸送量もサービス価格も炭素価格による影響をあまり受けないため、大きな変化はないが、利潤は炭素価格の上昇とともに少しずつ減少していることが読み取れる。サプライチェーン全体の利潤は炭素価格の上昇とともに増加している。

### 3.2 ターミナルの技術選択の影響

ターミナルAは船舶に陸上電力を供給し、オープンターミナルはLSFOの使用を課しているため、単位排出係数に違いが現れている。炭素排出量に与える影響について分析する。図3の輸送量にそれぞれ単位排出係数をかけた結果が図5となる。図3からわかるとおり、炭素価格が\$1の時点で既に $q_{AT} > q_{AO} + q_{BO}$ となっているが、炭素排出量はオープンターミナルの方が多くなっている。これは $m_O > m_A$ であることに起因する。しかし、炭素価格の上昇とともに輸送量も減少するため、炭素排出量も減少していき、炭素価格が\$9.14で炭素排出量は逆転する。ターミナルAもオープンターミナルと同様の理由で炭素排出量が増加している。ターミナル同士の輸送量の増減が相殺され、全体の炭素排出量はほぼ変わらず、やや増加する程度である。

### 3.3 炭素税の導入

排出量取引制度の代わりに炭素税が導入された場合の利潤を分析する。図6に、利潤と炭素税の関係を示す。まず海運会社Aに注目すると、炭素税の上昇とともに少しずつ利潤は減っている。コンテナ輸送による収益に対して炭素税の支払いが増えていくためであると考えられる。オープ

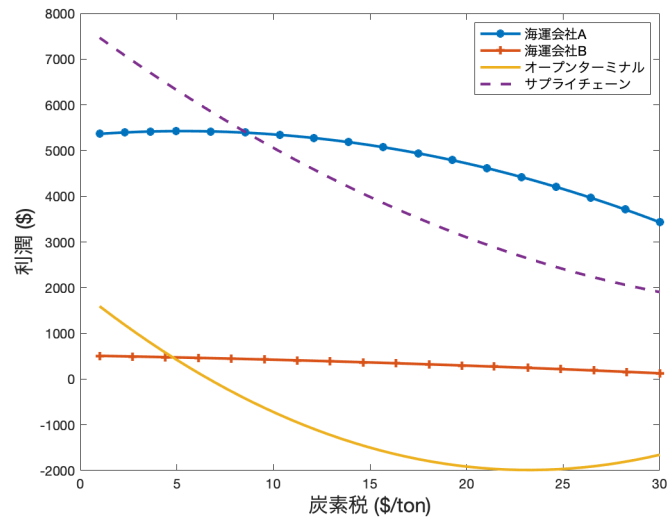


図 6: 利潤と炭素税の関係

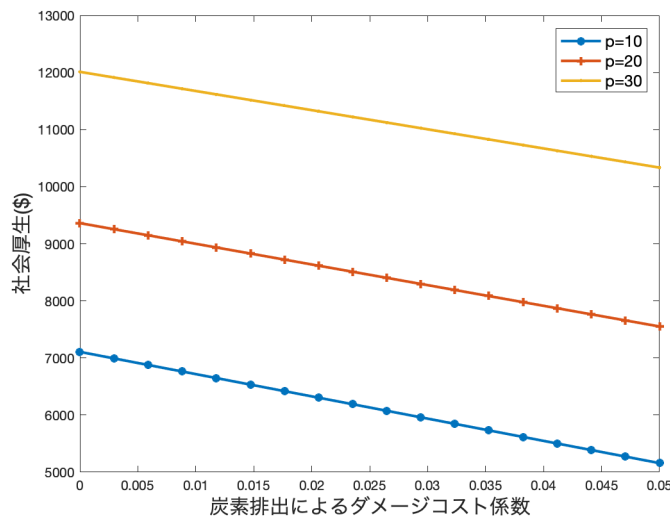


図 7: 排出量取引制度下での社会厚生と炭素排出によるダメージコスト係数の関係

ンターミナルは、利潤が大きく減ってマイナスになっていることが確認できる。排出量取引制度下では輸送量が減り、ターミナル使用料による収益が減っても、排出量取引によって収益をあげることができた。しかし、炭素税導入下では収益源が海運会社からのターミナル使用料のみであるため、輸送量が減少したことで収益もそのまま減少したと考えられる。海運会社 B は排出量取引制度下でのモデルと同様に、利潤に大きな変化はない。サプライチェーン全体の利潤は排出量取引制度下とは異なり、炭素税の上昇とともに大きく減っていることが確認できた。

### 3.4 社会厚生

異なる制度下での社会厚生を分析する。図 7 に排出量取引制度下での炭素排出によるダメージコスト係数と社会厚生の関係を示す。炭素価格  $p_c$  を 10, 20, 30 の 3 通りと変化させた場合の社会厚生と炭素排出によるダメージコスト係数の関係を分析した。炭素排出に対するペナルティとな



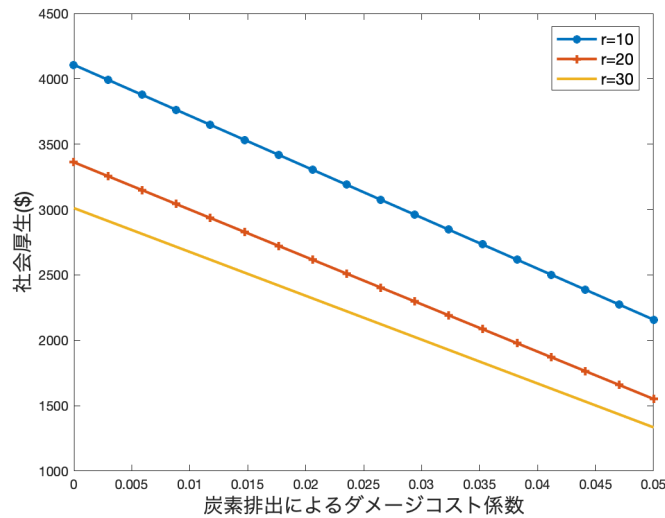


図 8: 炭素税導入時の社会厚生と炭素排出によるダメージコスト係数の関係

る炭素価格が高いほど社会厚生は高くなり、炭素排出によるダメージコストが大きくなるほど社会厚生は低くなるという結果が得られた。これは Yang et al. [4] の結果と同じである。

図 8 に炭素税導入時の炭素排出によるダメージコスト係数と社会厚生の関係を示す。炭素税率  $r$  を 10,20,30 と変化させた場合の社会厚生とダメージコスト係数の関係を分析した。排出量取引制度下と同様に炭素排出によるダメージコストの重みが大きくなるにつれて社会厚生は低くなる。しかし、炭素排出のペナルティである炭素税が低いほど社会厚生は高くなり、これは排出量取引制度下とは逆の結果となった。

## 4 おわりに

本研究では、Yang et al.[4] と Álvarez-SanJaime et al.[5] のモデルを参考に排出量取引制度下での海運会社とターミナルの垂直統合がサービス価格、輸送量、利潤に与える影響を分析した。また、2つのターミナルが異なる技術を導入することで炭素排出量にどのような影響が現れるかを分析した。最後に炭素税を導入した場合を考え、利潤と社会厚生の比較を行った。

分析の結果、輸送量は  $AT > AO > BO$  となり、垂直統合により海運会社 A の輸送量は海運会社 B よりも多くなり、利潤に大きな差をつけた。ターミナルとしての側面を見ると、オープンターミナルよりも利潤は大きいですが、炭素価格の上昇とともに増加する輸送量を賄うために高額な炭素排出枠を購入する必要があるため、少しずつ利潤の増加が減ることが分かった。次に、ターミナルの異なる技術導入による影響を分析した結果、輸送量は少ないが、炭素排出係数が大きいオープンターミナルの排出量はターミナル A よりも炭素排出量が大きくなることを確認した。最後に炭素税を導入した場合の利潤を分析した結果、排出量取引制度下とは一部異なる結果が得られた。社会厚生の分析では、排出量取引制度下では先行研究で得られた結果のとおり、炭素価格の上昇とともに社会厚生は上がり、CO<sub>2</sub> 排出によるダメージコストの重みが大きくなるにつれて社会厚生は下がることを確認した。一方で、炭素税導入時はペナルティが大きくなるにつれて社会厚生が低くなるという真逆の結果になった。

今後の展望として、利潤関数に排出量取引の上限を定めたり、最適輸送量とサービス価格を求める際に排出量取引による収益があることを加味したりすることで、より現実に即したモデルに拡張できるのではないかと考えられる。また、本研究では先行研究で多く用いられている線形の需要曲線を用いたが、他の需要曲線を用いた場合や海運会社と利用できるターミナルがさらに増

えた場合、ターミナルごとに異なる炭素排出枠を与えた場合、炭素税と排出量取引を組み合わせた場合などを考慮した分析を行うことも今後の課題とする。

## 参考文献

- [1] 全国地球温暖化防止活動推進センター, ”地球温暖化の原因と予測”, [https://www.jccca.org/global\\_warming/knowledge/kno02.html](https://www.jccca.org/global_warming/knowledge/kno02.html)(accessed 17/1/2021).
- [2] International Maritime Organization, ”Third IMO GHG Study 2014”, <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Greenhouse-Gas-Studies-2014.aspx>, (accessed 16/01/2021)
- [3] 国土交通省 港湾局, ”地球温暖化に起因する気候変化に対する港湾政策のあり方”, <https://www.mlit.go.jp/common/000025618.pdf> (accessed 16/01/2021)
- [4] Lei Yang, Yiji Cai, Yunlei Wei, Shuo Huang.: Choice of technology for emission control in port areas: A supply chain perspective., *Journal of Cleaner Production*, 240, 118105, 2019.
- [5] Óscar Álvarez-SanJaime, Pedro Cantos-Sánchez, Rafael Moner-Colonques, José J. Sempere-Monerris.: Vertical integration and exclusivities in maritime freight transport., *Transportation Research Part E*, 51, 50-61, 2013.
- [6] Han Cui, Theo Notteboom.: Modelling emission control taxes in port areas and port privatization levels in port competition and co-operation sub- games., *Transportation Research D*, 56, 110-128, 2017.

## 第Ⅲ部

### インフラストラクチャーのモデリングと分析



# コロナ禍の財政赤字とキャットボンド

浦谷 規\*

(株) MIC.9

法政大学名誉教授

## 1 はじめに

コロナウィルス・パンデミックは平時における最も破壊的な影響を経済に与えている。罹患はその人に悲惨な最後をもたらし、その恐怖は世界を支配している。ワクチン接種による集団免疫という対抗策には数年を要するだろう。政府はそれまでに人々にステイホームと企業活動の制限を強制せざるを得ない。そのための政府の経済的補償は膨大な額となる。

近年続いている著しく低いインフレ率と超低金利は、日本における財政債務の拡大を許してきた。IMFの報告 [3] では、日本の公的債務残高の対名目 GDP 比率は 2020 年末には 266% となり、スーダンに次いで高く、ギリシャを遥かに超えている。

財政赤字の要因には、高齢化の急速な進展による年金・医療・介護費用の急拡大に対応が遅れたことに起因することに加えて、阪神・淡路大震災、東日本大震災や巨大台風などに対する復興経費の拡大もある。さらに、南海トラフ地震とその巨大津波は今後の心配な要因である。

本論文では、日本を襲う自然災害などの巨大なテールリスクとみなされる災害の復興に、世界銀行が近年導入しているキャットボンド (Catastrophe Bond) の活用を提案する。CAT Bond をオプション理論を用いて分析し、巨大災害の支援・復興経費に資本市場を活用し、財政負担軽減の可能性を考察する。

---

\*科研費 (C) No.19K04912

## 2 コロナ禍

### 2.1 人的被害

ワクチンが次々と承認、接種が進行する中で COVID-19 は変種の感染の拡大が心配されている。次の表 1 は The Economist Covid-19 data [2] から抜粋した超過死亡率であり、想定される死亡率を超える人口千人あたりの超過を以下の国について比較した。ただし、超過死亡率とは通常の人口動態変化と比較した人口千人当たりの観測期間内の超過死者数の比率である。

表 1: Covid-19 による超過死亡

国	観測期間	コロナ死者数	超過死者数	人口千人当り
Belgium	3月16日～1月24日	20,780	20,290	1.77
米国	3月8日～1月9日	360,370	448,550	1.38
France	3月11日～1月14日	69,420	65,460	1.01
Israel	3月30日～1月24日	4,400	3,590	0.39
日本	3月1日～11月30日	2,070	-11,800	-0.09
Australia	4月8日～10月27日	860	-5,190	-0.02

さらに死亡者の殆どが高齢者であることから、ヨーロッパおよび米国では、人口における高齢者率に変化があったと考えられる。Goodhart & Pradhan [1] にもある最も不道德な論理では、「コロナ対策は全く行わないのが最善である。コロナによる平均死者の年齢は80歳であり、介護を必要とする世代であり、高齢化問題の解決にもなる」。トランプやボルソナーロはこれに類する論理で動いていたのかも知れない。

ところが、表 1 にある通り世界一の高齢化が進んだ日本はコロナ禍において人口減少率が減少している。外出せずにインフルエンザにも罹患しなかったためであろうか。さらに、ステイホームによる運動不足はフレイルを加速することになり、介護を必要とする高齢者数を増やしているかもしれない。

## 2.2 経済的影響

COVID-19の保険会社への保険請求額は今後も増加するだろうが、その額は2020年度では500億ドルから800億ドル(US\$)と再保険会社 Swiss Re [7]によって想定されている。現段階では、米国のハリケーンの請求額である2017年のHavey,Irma,Mariaによる950億ドルや2005年のハリケーン Katarina の800億ドル以下であるとしている。彼らの2020年度決算は赤字であるがCOVID-19による赤字は制御可能な範囲だとしている[7]。一方、政府のコロナ対策支出は表2にあるようにGDPの20%から40%という巨大な支出になっている。日本ではいまだに完了できていない巨大地震・津波への復興支出が重なってくる。COVID対策費の規模と政府債務への影響を表2で比較できる。

表 2: 政府の COVID 対策予算と財政債務

国	対策費	GDP 比率 (%)	債務残高%
日本	233.9 兆円	42	266
米国	3.3 tril \$	15	131
フランス	0.59 tril €	24	119
ドイツ	1.3 tril €	37	73
イタリア	0.61tril €	34	162
UK	0.57 tril £	25	108

IMF 2020.11 Fiscal Monitor[3]

日本の財政赤字は20年以上続き、内戦に悩むスーダンのGDP比率295%に次いで日本のGDP比率は第2位の266%である。通貨危機のあったギリシャの200%を遥かに超える債務残高である。表3に示した2つの巨大地震災害は少なからず、この長期的に続く財政赤字の影響を及ぼしている。東日本震災とそれに伴う津波によって人的および物的に甚大な被害を出した。現時点ではCOVID-19による日本の死者数は欧米に比べ多くない。表4にはその保険金額及び政府の復興支援額とその後の政府債務残高のGDP比率をまとめた。

表 3: 大災害の損失

年	災害	規模	死者	被害家屋
1995	阪神淡路	M7.9	6,439	640,000
2011	東日本	M9.0	20,960	1,138,000
2020	COVID-19	-	8,300	-
?	南海トラフ	M7	320,000	2,380,000

表 4: 大災害の経済的損失 (円)

年	死亡保険額	火災保険額	政府支出	債務残高
1995	480 億	780 億	8 兆 (16)	45%
2011	1520 億	1,2650 億	37 兆	144 %
2020	-	-	234 兆	266 %
南海トラフ地震	-	-	215 兆	?

近年の日本の膨大な財政債務とデフレに近い経済は Japanification と呼ばれて研究されている。その定義は (1) デフレギャップ (需要がその供給力より少ない) (2) ゼロに近いインフレ率 (3) ゼロ以下にもなる超低金利 (4) 高齢化社会の進展 という 4 項の指標により特徴付けられ、さらにこれらの指標により Japanification の深刻度を計量化している。この経済状態の継続可能性は、従来の経済学の均衡理論では説明が出来ないとする経済学者のグループは Modern Monetary Theory (MMT) と称する理論を展開している。彼らは日本のような財政赤字 (Japanification) は高いインフレが進行しない限り持続可能だとする。しかし、2020 年の出版以来注目されている Goodhart ら著書 [1] によれば、Japanification は中国と東欧圏の生産能力が市場に参入した過程に発生した現象であり、コロナ後の経済では同じ状況の継続は期待できないとしている。

均衡財政に向けては、3 つの方策が考えられる。第 1 は特別税である。東日本震災後の増税では、(1) 復興特別法人税は 3 年間の 10 % の追加徴収、(2) 復興特別税は 25 年間に所得税額に 2.1 % の上乘せとし、(3) 住民税は 10 年間にわたって千円の引き上げて徴収されている。震災後 10 年目の今年までには 37 兆円が復興支援として支出されている。

第 2 の財政均衡の方策はインフレーションによる債務負担緩和策であ



る。例えば、債務残高を半減するためには、単純計算ではインフレ率が年率8%であれば、およそ9年を可能になり、インフレ率が年率4%では18年間もかかってしまう。ところが人口の30%にもなる高齢世帯は、年金制度のマクロスライドによって多少は緩和されても、このインフレーションによってその多くは疲弊するであろう。

第3の方策には、大災害に対する補償支援資金にCAT Bond (Catastrophe Bond) を活用し、資本市場を組み入れることである。事前に資金を提供し災害がなければ収益を上げ、大災害にはその元本が毀損するという保険の仕組みを資本市場を活用する債券であり、2007年以降にその市場は急速に拡大している [6]。

特に世界銀行は近年、CAT Bond を途上国の災害に対する保険制度として積極的に活用してきている。2020年9月のAPECのCAT Bondのワークショップ [8] では「政府と投資家に win-win の関係によって自然災害リスク移転」として広報している。事実、世銀はこの時までには28 US 億ドル CAT Bond を発行している。特に、太平洋の日本の反対側に位置する諸国チリ、コロンビア、メキシコ、ペルーは共同で地震に対する Cat Bond として13.6 億 US ドルを2018年2月から3年間の契約を世界銀行と締結している。

## 3 CAT Bond

### 3.1 その仕組みと Payoff

この節では CAT bond の仕組みとオプション理論による理論価格を解説する。一般的な保険では、保険会社に保険料を支払って、事故時には保険金を受け取る。図1の下段のように通常の保険では、保険会社が保険会社の支払い能力（資産総額）を超える保険額に足しては、さらに再保険をかけて大災害を補償する。

CAT Bond では保険市場を超えて、図1の上段のように資本市場において債券発行により資金を集めSPV(Special Purpose Vehicle) と呼ばれる特別信託で管理される。その資金は事故の支払いが発生しないときは、保険料などからCAT Bond への利払いがなされ満期には元金が返済される。事故が発生すると免責額以上でかつ上限補償額までは保険金が支払われ、CAT Bond 保有者はその元金を棄損する。

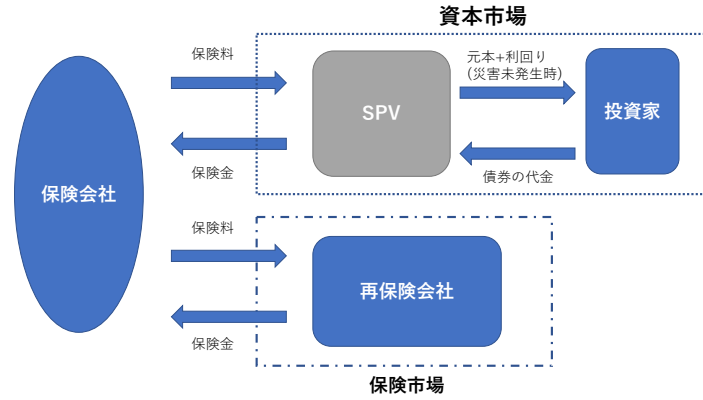


図 1: キャットボンド (CAT Bond) の仕組み

損失額をを  $L_I(t)$  とし、次の確率微分方程式を満たすとする

$$\frac{dL_I(t)}{L_I(t)} = \mu_I dt + \sigma_I dW_I(t) + (Y_i - 1) dN_t. \quad (1)$$

その変化率は平均  $\mu$ , ボラティリティ  $\sigma$  の拡散項及びジャンプ項からなる。ただし  $N_t$  は強度  $\lambda$  の Poisson process であり、そのジャンプ幅  $Y_i$  の対数値は正規分布に従い、

$$Z_i := \log(Y_i) \sim N(a, b^2)$$

であるとする。ただし  $N(a, b^2)$  は平均的  $a$ , 分散  $b^2$  の正規分布とする。

初期値を  $L_I(0)$  とすると、伊藤の公式より求められる損失額は

$$L_I(t) = L_I(0) \exp\left\{(\mu_I - \sigma_I^2/2)T + \sigma_I W_I(T) + \sum_{j=1}^{N_t} Z_j\right\} \quad (2)$$

である。

満期における保険支払開始損害額 (attachment point) とその上限額 (detachment point) をそれぞれ  $H_{CB}$ ,  $H_{CB} + M_{CB}$  とする。満期時点  $T$  の Payoff は図 2 の通りである。損害額が  $H_{CB}$  以上の額から  $H_{CB} + M_{CB}$  までに対して損害額から  $H_{CB}$  を控除した保険金が支払われる。

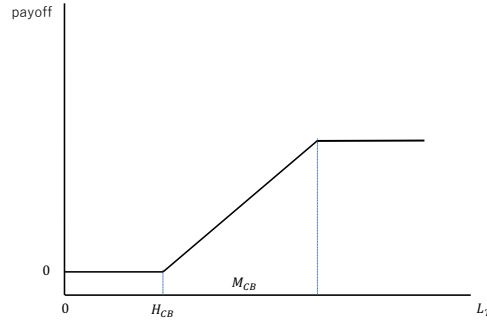


図 2: 保険金の attachment and detachment point  $B_I$

### 3.2 オプションによる Cat Bond の理論価格

損害額の 0 から  $M_C$  までは免責であり、損害額  $H_C$  から  $H_C + M_C$  までに対して保険金を受け取る。

満期  $T$  における CAT bond SPV から受け取る保険金を  $B_I$  とすると

$$B_I = \min\{(L_I(T) - H_C)^+, M_C\},$$

CAT bond 保有者の  $T$  における payoff  $B_C$  は

$$B_C = \min\{M_C, (H_C + M_C - L_I(T))^+\}$$

である。明かに

$$B_I + B_C = M_C \tag{3}$$

を満たす。

$B_I$  の payoff は図 3 のように 2 つのコールオプション Payoff の差に分解できる。

$$\begin{aligned} B_I &= \min\{(L_I(T) - H_C)^+, M_C\} \\ &= (L_I(T) - H_C)^+ - (L_I(T) - (H_C + M_C))^+. \end{aligned}$$

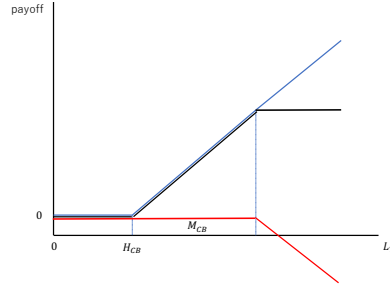


図 3: Payoff of Cat Bond by two options

その保険料はリスク中立確率を  $Q$  とすると

$$\begin{aligned}
 \pi_C(H_C, M_C) &= E^Q[e^{-rT} B_I] \\
 &= E^Q[e^{-rT} \{(L_I(T) - H_C)^+ - (L_I(T) - (H_C + M_C))^+\}] \\
 &= Call(L_I, H_C, T) - Call(L_I, H_C + M_C, T). \quad (4)
 \end{aligned}$$

ただし  $Call(L_I, H_C, T)$  は  $L_I$  に対する行使価格  $H_C$ 、満期  $T$  のヨーロッパ型コールオプション価格とする。 $Call(L_I, H_C + M_C, T)$  はその行使価格を  $H_C + M_C$  としたコールオプション価格とする。

ジャンプによって極値分布の事象を表す仮定しすると、Jump diffusion モデルと呼ばれる (1) に対するオプション価格は Merton [4] からそれぞれのコールオプション価格は次の通りである。

$$\begin{aligned}
 Call(L_I, H_C, T) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda' T)^n}{n!} \exp(-\lambda' T) \\
 &\quad \times C_{BS}(L_I, H_C, T, \sigma_n, r_n) \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Call(L_I, H_C + M_C, T) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda' T)^n}{n!} \exp(-\lambda' T) \\
 &\quad \times C_{BS}(L_I, H_C + M_C, T, \sigma_n, r_n) \quad (6)
 \end{aligned}$$

ただしブラックショールズのオプション価格を次の通りとする。

$$C_{BS}(L_I, H_C, T, \sigma_n, r_n) = L_I(0) N(d_n^1(H_C)) - H_C e^{-r_n T} N(d_n^2(H_C))$$

パラメータは以下のように定める。

$$d_n^1(K) = \frac{\log\{L_I/K\} + (r_n + \sigma_n^2/2)T}{\sigma_n\sqrt{T}}, d_n^2(K) = d_n^1(K) - \sigma_n\sqrt{T}$$

$$\lambda' = \lambda m, m = E(Y) = e^{a+b^2/2}$$

$$\sigma_n^2 = \sigma_I^2 + \frac{nb^2}{T}, r_n = r - \lambda(m-1) + n \log(m)/T$$

### 3.3 Cat bond 満期償還額の価値

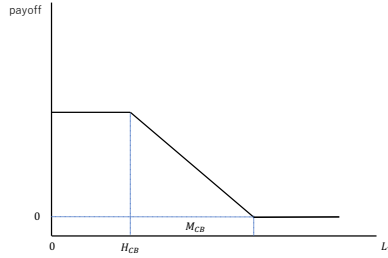


図 4: CAT bond 満期  $T$  における Payoff

満期償還額は図 4 実線のように損害額が  $H_C$  以下であれば元金が戻り、 $M_C$  以上であれば損害額  $H_C + M_C$  までは元金から保険料を控除した額が償還される。

満期  $T$  における Payoff は図 5 から明らかなように 2 つのプットオプションの Payoff の差で表せる。

$$B_C(T) = \min\{M_C, (H_C + M_C - L_I(T))^+\}$$

$$= (H_C + M_C - L_I(T))^+ - (H_C - L_I(T))^+$$

損失額  $L_I(t)$  に対する行使価格  $H_C$  満期  $T$  のヨーロッパ型プットオプション価格を  $Put(L_I, H_C, T)$  とすると、CAT Bond の初期価格は

$$B_C(0) = Put(L_I, H_C + M_C, T) - Put(L_I, H_C, T). \quad (7)$$

CAT Bond 価格 (7) と保険料 (4) の和は (3) からプット・コールの parity

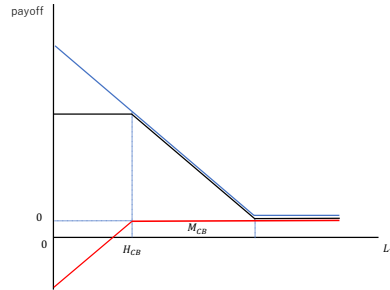


図 5: two put options

と呼ばれる関係を満たす。従って CAT Bond の価格はこの関係から明らかになる。

$$\begin{aligned}
 B_C(0) &= Put(L_I, H_C + M_C, T) - Put(L_I, H_C, T) \\
 &= M_C e^{-rT} - \pi_C \\
 &= M_C e^{-rT} - \{Call(L_I, H_C, T) - Call(L_I, H_C + M_C, T)\}
 \end{aligned}$$

さらに (5) および (6) を代入すると CAT Bond 価格が定まる。

## 4 数値計算例および結論

### 4.1 CAT Bond 価格の数値例

式(1)の損失のプロセス  $L_I$  のパラメタを Trottier [5] により以下のように定める。

$$\frac{dL_I(t)}{L_I(t)^-} = \mu_I dt + \sigma_I dW_I(t) + (Y_i - 1) dN_t(\lambda)$$

$$\sigma_I = 0.5, Z_i = \log Y_i, Z_i \sim N(a = 0.179, b^2 = 0.083^2), \lambda = 0.1, \\
 L_I(0) = 120M, r = 0.02$$

さらに免責限界額の Attachment point  $H_C = 0.7L_I(0) = 84M$  とし保険額の上限額となる Detachment point の追加額  $M_C$  を  $100M$  から  $600M$  とする。

表5に示したように、災害の被害額が  $84M$  以上で  $184M$  までの保険料は  $35.5M$  であり、保険料率は  $19.2\%$  である。さらに、被害額の

上限が684 Mまでに補償額を増加させると保険料は減少しその料率は6.5 %となる。これは極値分布の特徴を表している。同様にCAT Bond 価格は災害補償額が増加しても、表5のようにその価格の減少率は小さい。しかも、損害が $M_C$ 以下であった時の収益率は表5の最後の行にあるように、極めて高い事が特徴である。CAT Bond 保有者は災害が限界被害 $M_C$ を超えないときは大きな収益を上げ、大災害時には被災者へ保険金を支払うという仕組みである。

表 5: CAT Bond 補償上限, 保険料率, CAT Bond 価格

補償上限への $M_C$	100	200	300	400	500	600
保険料 $\pi_C$	35.48	42.33	43.70	44.01	44.10	44.12
保険料率 %	19.2	14.9	11.4	9.1	7.6	6.5
CAT B 価格 $B_C(0)$	82.1	75.3	73.9	73.6	73.5	73.5
収益率% (無保険支払)	46	59	62	63	63	63

以上の資本市場を利用した保険の仕組みは、従来の災害後の救済のための援助金を国庫が負担し、それ以降の増税やインフレ政策という事後的対処ではなく、保険の機能と資本市場を利用して、災害の起こる前に準備をしておくやり方である。

## 4.2 将来のためのCAT Bond

日本の財政赤字はコロナ禍でGDPのおよそ2.5倍以上になり、またコロナ禍は高齢化社会をさらに進行させつつある。この結果、増大する社会保障費には何らか手を打たなければ破綻してしまいかねない。さらに20年以内に確率70%で、高さ20メートル以上の津波を伴う南海トラフ地震が予測され、その対策が内閣府中央防災会議のもとに詳細な対策が計画されている。しかし、災害時の復旧予算の財源に対しては殆ど考察されていない。国土強靱化などの土木工事と災害警告と避難訓練が中心である。表4の最後の行に示したように、中央防災会議は南海トラフ地震の復興経費を推定215兆円にもなるとしている。しかし、その復興資金の負担方法については全く検討されていないのではないだろうか。

災害には我々は通常、保険によって対処してきている。恐るべき南海トラフ地震の大災害に対しても事前に資金を、南米の世界銀行 CAT Bond に倣って資本市場を利用して調達すべきである。万一、災害の起こらない場合には投資家である国民は収益を上げ、大災害時には出資資金をその対策に投じることになっても、それに異議のある投資家は少ないであろう。さらに、通常の投資対象の市場リスクと CAT Bond 投資のリスクの相関は小さいことも市場における魅力となっている。CAT Bond の発行によって、今後の災害による日本の財政債務の拡大を少しでも食い止めるものと期待したい。

## 参考文献

- [1] Charles Goodhart, Manoj Pradhan "The great demographic reversal", Palgrave Macmillan 2020
- [2] The Economist Covid-19 data, <https://www.economist.com/graphic-detail/coronavirus-excess-deaths-tracker>
- [3] IMF Fiscal monitor reports October 2020
- [4] Merton, R. C. "Option pricing when underlying stock returns are discontinuous". Journal of Financial Economics. 1976
- [5] D. Trottier and V. S. Lai, "Reinsurance or CAT Bond? How to optimally combine both", The Journal of Fixed Income, Fall 2017
- [6] <https://www.artemis.bm/dashboard/cat-bond-ils-market-statistics/>
- [7] Swiss Re Annual Report 2020, <https://www.swissre.com/dam/jcr:ad6e66d0-afdc-4f7a-9d43-4119fe3a9c83/2020-financial-report-doc-en.pdf>
- [8] The world bank press release Sep. 24, 2020  
World bank treasury and APEC Catastrophe Bond Workshop
- [9] Uratani, T. "Pandemic, Insurance and Extreme Value Theory," Waseda Cherry Blossom workshop on topological data science, March 19-23, 2021, Tokyo



# 建物壁面間の距離の最大値分布と最小値分布

薄井 宏行

## 1. はじめに

既成市街地は様々な形状をもつ建物の集合で構成される。既成市街地における良好な住環境を確保するために、個々の敷地において建蔽率（建物面積／敷地面積）が規制されている。建蔽率を規制する主な目的は、建物の周辺に空地を確保するためである。ところが、建蔽率規制は建物壁面の位置を直接規制しないため、敷地の規模と形状が多様かつ実建蔽率の値が多様であるほど、敷地境界線と建物壁面の位置関係は多様となる。個々の敷地における建物壁面位置の多様さは、建物群の相隣関係を定量的に評価することを困難にしている。とくに、隣棟関係にある建物の壁面間距離は、地域における住環境の安全性（延焼リスク）や快適性（通風、採光、遮音等）を評価するために重要である（青木, 2006; 小浦, 2001）。

ところが、ある建物と隣棟関係にある建物の特定や壁面間距離の計測を恣意性なく行うことは難しい。本稿では、建物の位置関係に基づき、建物の隣棟関係を定義する。建物の平面形状を表す建物ポリゴンを生成元とする面ポロノイ図を生成し、面ポロノイ図を構成する領域（面ポロノイ領域）の隣接の有無に基づいて、建物の隣棟関係を定義する（第3節にて詳述）。続いて、面ポロノイ図を生成する過程で生じる点ポロノイ領域を用いて、隣棟関係にある建物の壁面間距離（以降、「壁面間距離」と記す。）を定義する（第4節にて詳述）。任意の建物について、壁面間距離の最小値、最大値、そして最大値と最小値の差を計測し、地域におけるそれぞれの統計分布と建物棟数密度及び道路幅員との関係を考察する。

## 2. 既往研究の整理と本稿の位置づけ

本稿に関連する既往研究として、隣棟関係の定義としてVoronoi型、Euclid型、Vertical型を提案し、それぞれの定義に基づく隣棟関係の相違を明らかにしたものがあ

る。建物棟数、2)壁面間距離の最小値、最大値、平均値に着目し、隣棟関係の定義の違いによる各指標値の相違を詳細に考察した結果、隣棟関係の定義の違いは壁面間距離の最小値の相違に影響を及ぼさない一方、壁面間距離の最大値の相違に影響を及ぼすことが明らかにされている。さらに、各近接指標と敷地面積、建物面積及び建蔽率との相関係数を算出した結果、建蔽率と各近接指標の相関係数は敷地面積や建物面積との相関係数よりも弱いことから、建蔽率の値が同じであっても、各近接指標は多様となることが明らかにされている（市古・権, 2002）。上述の各近接指標を街区単位で評価する方法も提案されている（市古, 2004）。

また、市街地の平均的な相隣関係を表す指標として、建物棟数密度（グロス）の逆数の平方根に着目したもの（腰塚, 1988）、市街地の平均的な物的環境を表す情報として、建物棟数密度と敷地面積の統計分布の重要性を指摘したものがあ

る（腰塚・古藤, 1989）。また、敷地形状は矩形かつ建物の平面形状と敷地は互いに相似であると仮定することで、敷地奥行と建物奥行の差として定義される「建物前面配置自由度」と道路延長密度および建蔽率の関係が定式化されている（薄井・浅見, 2011）、さらに、均一な面積をもつ正方形建物の格子状モデルを拡張し、1)任意の正方形敷地とフォン・ノイマン近傍にある隣接敷地の面積は等しい、2)敷地と建物の図心は互いに一致する仮定のもとで、建物敷地の確率密度関数（対数正規分布）の変数変換により、壁面間距離の確率密度関数が導出されている（薄井・寺木, 2018）。ところが、壁面間距離の最大値と最小値の各統計分布と建物棟数密度及び道路幅員との関係は十分に明らかにされていない。

前述のように、都市計画において、隣棟関係にある建物の壁面間距離は、地域における住環境の安全性（延焼リスク）や快適性（通風、採光、遮音等）を評価するた

めに重要である。とくに、各建物における壁面間距離の最小値とその統計分布は延焼リスクを安全側に（厳しく）評価するために重要である。また、壁面間距離の最大値と最小値の差（以降、「壁面間距離の範囲」と記す。）の分布（以降、「壁面間距離の範囲の分布」と記す。）に基づいて、壁面間距離の多様さや均一さを評価することができる。もし、壁面間距離の範囲の分布がゼロの近傍に分布すれば、壁面間距離は均一の傾向にあると評価できる。他方、壁面間距離の範囲の分布の標準偏差が大きければ、壁面間距離は大小さまざまな傾向にあると評価できる。

このように、本稿は新規性と独自性だけでなく、都市計画における高い実用性を有するものと思われる。以降、第3節において、建物の位置関係に基づき建物の隣棟関係を定義する方法を詳述する。第4節において、壁面間距離の定義と計測方法を詳述し、任意の建物について、壁面間距離の最小値、最大値、壁面間距離の範囲を計測する。第5節において、実市街地における壁面間距離の最大値、最小値、範囲の各統計分布と建物棟数密度及び道路幅員との関係を考察する。第6節において、結論と都市計画への示唆を述べるとともに今後の研究課題を示す。

### 3. 建物の隣棟関係の定義

前節において詳述したように、隣棟関係の定義としてVoronoi型, Euclid型, Vertical型が提案されている。本稿では、Voronoi型に基づいて建物の隣棟関係を定義する。

Voronoi型は、建物の平面形状を表す建物ポリゴンを生成元とする面ボロノイ図を生成し、面ボロノイ図を構成する領域（面ボロノイ領域）の隣接の有無に基づいて、建物の隣棟関係を定義する。図1のように、面ボロノイ図は、理論的には点ボロノイ図と同様に定義される。実用的には、生成元となる建物ポリゴンの辺を十分多くの離散点群にすることで、点ボロノイ図を生成し、建物ポリゴンのIDと同一のIDをもつ点ボロノイ領域を融合することで、面ボロノイ図を生成することができる（薄井・浅見, 2013 ; Usui, et al, 2020）。以降、建物ポリゴン $B_i$ を生成元とする面ボロノイ領域 $AV(B_i)$ を建物敷地と定義する。

図1のように、 $AV(B_i)$ と $AV(B_j)$ が互いに接するならば、

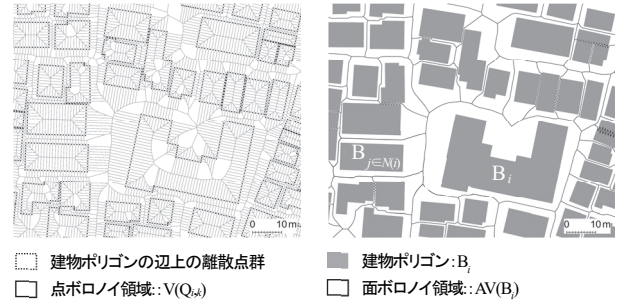


図1: 建物ポリゴンを生成元とする面ボロノイ領域。

（左：建物ポリゴンの边上における間隔1mの離散点群に基づく点ボロノイ領域, 右：建物ポリゴンのIDと同一のIDをもつ点ボロノイ領域を融合したもの）

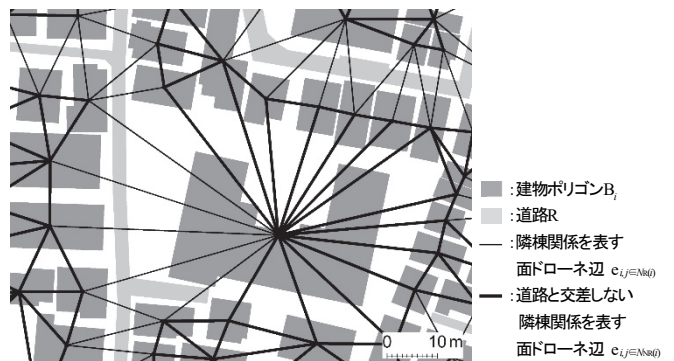


図2: 建物の隣棟関係の定義。

$B_i$ と $B_{j \in N(i)}$ は互いに隣棟関係にあると定義する。ただし、 $N(i)$ は建物ポリゴン $B_i$ と隣棟関係にある建物ポリゴンの添字集合を表す。図2のように、面ボロノイ図の双対図形として、面ドロネ図を定義する（Usui, et al, 2020）。黒色の実線は、建物ポリゴン $B_i$ の図心 $G_i$ と $B_{j \in N(i)}$ の図心 $G_j$ を面ドロネ辺 $e_{i,j \in N(i)}$ として描いたものである。任意の面ドロネ辺について、道路 $R$ との交差の有無に着目する。 $B_i$ と隣棟関係にある建物ポリゴンの集合 $\{B_{j \in N(i)}\}$ のうち、道路の対岸（隣接街区）に存在する建物ポリゴンとの壁面間距離（とくに最大値）のほうが長い傾向にあると予想される。そこで、黒色の太線のように、 $e_{i,j \in N(i)}$ が道路 $R$ と交差ししない隣棟関係にある建物 $B_j$ の添字集合を $N_{NR}(i)$ 、黒色の細線のように道路 $R$ と交差する隣棟関係にある建物 $B_j$ の添字集合を $N_R(i)$ と表記すると、添字集合 $N(i)$ は添字集合 $N_{NR}(i)$ と添字集合 $N_R(i)$ の和集合となる。

#### 4. 壁面間距離の定義と計測方法

面ボロノイ図を生成する過程で生じる点ボロノイ領域に着目する。図3のように、建物ポリゴン $B_i$ の边上における任意の離散点 $Q_{i,k}$ を生成元とする点ボロノイ領域の集合 $V(B_i) = \{V(Q_{i,k}) | k=1, \dots, m_i\}$ を考える。ただし、 $m_i$ は建物ポリゴン $B_i$ の边上における離散点群の総数を表す。集合 $V(B_i)$ のうち、 $B_i$ の頂点を含む点ボロノイ領域（図3の白色または淡灰色（道路を表す）の領域）を除くと、建物ポリゴンと重ならない領域（図3の濃赤色または淡赤色の領域）：

$$W(Q_{i,k}) \equiv V(Q_{i,k}) - \{V(Q_{i,k}) \cap B_i\} \quad (1)$$

は近似的に矩形領域と見なすことができる。以降、 $W(Q_{i,k})$ の面積を $A(W(Q_{i,k}))$  [m<sup>2</sup>]、建物ポリゴンの边上の離散点の間隔を $\varepsilon$  [m]とそれぞれ表記する。このとき、点 $Q_{i,k}$ から敷地境界線までの距離は $A(W(Q_{i,k})) / \varepsilon$  [m]となる。図3のように、互いに隣棟関係にある点ボロノイ領域 $V(Q_{i,k})$ と $V(Q_{j \in N(i), l})$ が互いに接する辺（ボロノイ辺）は線分 $Q_{i,k}Q_{j \in N(i), l}$ の垂直二等分線である。従って、任意の点 $Q_{i,k}$ について、壁面間距離 $u_{i,k}$ は次式のように定義される：

$$u_{i,k} = 2A(W(Q_{i,k})) / \varepsilon, \text{ for } \forall i, k \in \{1, \dots, m_i\}. \quad (2)$$

$B_i$ の周長が $L_i$ のとき、 $m_i$ は $\varepsilon$ の設定に依存する。以降、 $\varepsilon = 1$  [m]に設定することで、 $m_i \cong L_i$ となる。

##### 4.1. 隣棟関係にあるすべての建物の場合

道路（図3の淡灰色の領域）との交差の有無を考慮しない場合、図3の濃赤色または淡赤色の領域に着目する。このとき、壁面間距離の最大値と最小値は次式のように表記できる：

$$u_{\max, i} \equiv \max_{k \in \{1, \dots, m_i\}} u_{i, k}, \text{ for } \forall i, \quad (3)$$

$$u_{\min, i} \equiv \min_{k \in \{1, \dots, m_i\}} u_{i, k}, \text{ for } \forall i. \quad (4)$$

このとき、壁面間距離の範囲は次式のようになる：

$$u_{\text{dif}, i} \equiv u_{\max, i} - u_{\min, i} \geq 0, \text{ for } \forall i. \quad (5)$$

##### 4.2. 道路と交差しない隣棟関係にある建物の場合

道路と交差しない隣棟関係にある建物の場合、図3の濃赤色の領域のみに着目する。このとき、壁面間距

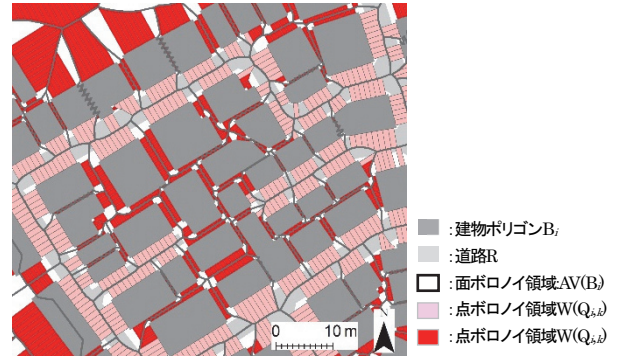


図3: 壁面間距離の定義と計測方法.

離の最大値と最小値は次式のように表記できる：

$$u_{\max, i, j \in N_{NR}(i)} \equiv \max_{k \in \{1, \dots, m_i\}} u_{i, j \in N_{NR}(i), k}, \text{ for } \forall i, \quad (6)$$

$$u_{\min, i, j \in N_{NR}(i)} \equiv \min_{k \in \{1, \dots, m_i\}} u_{i, j \in N_{NR}(i), k}, \text{ for } \forall i. \quad (7)$$

このとき、任意の建物ポリゴン $B_i$ について、壁面間距離の範囲は次式のようになる：

$$u_{\text{dif}, i, j \in N_{NR}(i)} \equiv u_{\max, i, j \in N_{NR}(i)} - u_{\min, i, j \in N_{NR}(i)} \geq 0. \quad (8)$$

#### 5. 建物壁面間の距離の最大値分布と最小値分布

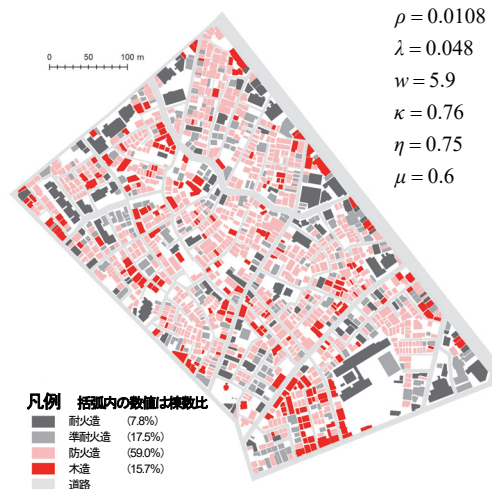
第3節で既述したように、道路と交差する隣棟関係にある壁面間距離のほうが道路と交差しない隣棟関係にある壁面間距離よりも長い傾向にあると予想される。以降、道路との交差の有無に基づいて場合分けすることで、壁面間距離の最大値分布、最小値分布、範囲の分布と建物棟数密度及び道路幅員との関係を考察する。

実市街地として、「地震時等に著しく危険な密集市街地（国土交通省都市局都市安全課・住宅局市街地建築課市街地住宅整備室，2012）」に該当し、互いに近接する町丁目として、地震に関する地域危険度が極めて高い東京都墨田区京島3丁目と東向島5丁目、戦災復興区画整理事業が施行され地域危険度が低い石原3丁目を選定する。京島3丁目と東向島5丁目の建物棟数密度（グロス）（以降、「建物棟数密度」と記す。）はそれぞれ108棟/haと71棟/haである一方、石原3丁目の建物棟数密度は54棟/haである。平均道路幅員はそれぞれ5.9m、6.5mそして10.0mである。図4は、対象町丁目における建物の配置と構造種別を描いたものである<sup>(1)</sup>。図4から、木造建物と防火造建物は互いに隣接していることがわかる。

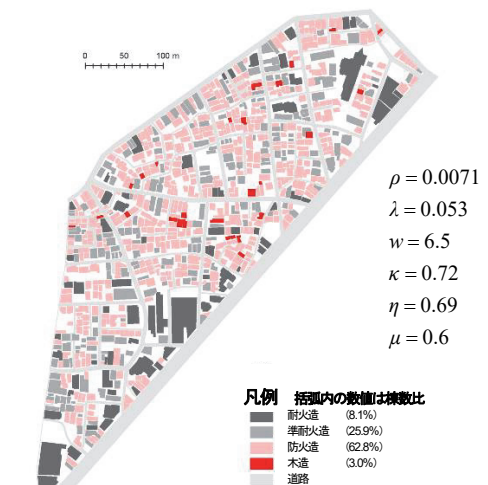


図5は、対象町丁目における、隣棟関係にあるすべての建物の壁面間距離の最大値分布、最小値分布、範囲の分布をヒストグラムとして描いたものである。図5から、壁面間距離の最小値は、建物棟数密度の大小に関らず1.5mまでの範囲に分布していることがわかる。壁面間距離の最小値の平均は、0.55m（京島3丁目）、0.54m（東向島5丁目）、0.7m（石原3丁目）である。標準偏差は、0.43m（京島3丁目）、0.52m（東向島5丁目）、0.88m（石原3丁目）であり、建物棟数密度が大きいほど標準偏差は小さい傾向にある。変動係数を算出すると、0.77（京島3丁目）、0.97（東向島5丁目）、1.22（石原3丁目）であり、建物棟数密度が大きいほど変動係数は小さい傾向にある。壁面間距離の最大値の平均は、7.52m（京島3丁目）、8.73m（東向島5丁目）、12.68m（石原3丁目）である。標準偏差を算出すると、5.39m（京島3丁目）、6.06m（東向島5丁目）、7.43m（石原3丁目）である。建物棟数密度が大きく平均道路幅員が狭いほど、標準偏差は平均と同様に小さい傾向にある。また、壁面間距離の範囲の分布と最大値分布の形状は互いに類似し、建物棟数密度が大きく平均道路幅員が狭いほど、標準偏差と平均は小さい傾向にある。

図6は、対象町丁目における、道路と交差ししない隣棟関係にある建物の壁面間距離の最大値分布、最小値分布、範囲の分布をヒストグラムとして描いたものである。図5と図6を比較すると、道路と交差ししない隣棟関係にある建物の壁面間距離の最小値分布は、隣棟関係にあるすべての場合とほぼ同じであることがわかる。ところが、道路と交差ししない隣棟関係にある建物の壁面間距離の最大値分布は、隣棟関係にあるすべての場合よりも左に歪んだ分布であることがわかる。壁面間距離の範囲の分布についても同様である。壁面間距離の最大値の平均は、3.84m（京島3丁目）、4.50m（東向島5丁目）、4.55m（石原3丁目）である。標準偏差を算出すると、4.31m（京島3丁目）、4.48m（東向島5丁目）、4.61m（石原3丁目）である。壁面間距離の最大値分布の最頻値は、建物棟数密度の大小に関らず1mである。隣棟関係にあるすべての場合と比較すると、建物棟数密度と壁面間距離の最大値の平均、標準偏差そして最頻値との間において、明瞭な大小関係はないことがわかる。壁面間距離の範囲の分布についても同様の傾向にある。



(a)京島3丁目



(b)東向島5丁目



(c)石原3丁目

図4: 建物の配置と構造種別. ( $\rho$ : 建物棟数密度 (グロス) [棟/m<sup>2</sup>],  $\lambda$ : 道路延長密度 [m/m<sup>2</sup>],  $w$ : 平均道路幅員 [m],  $\kappa$ : 1-道路率,  $\eta$ : 敷地面積の変動係数,  $\mu$ : 法定建蔽率)

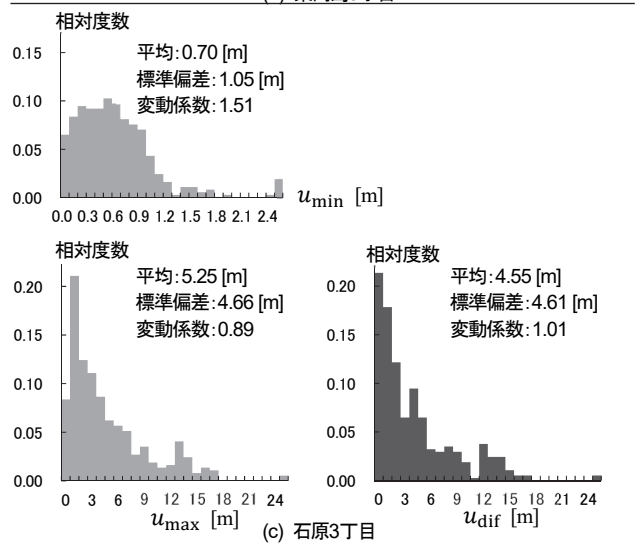
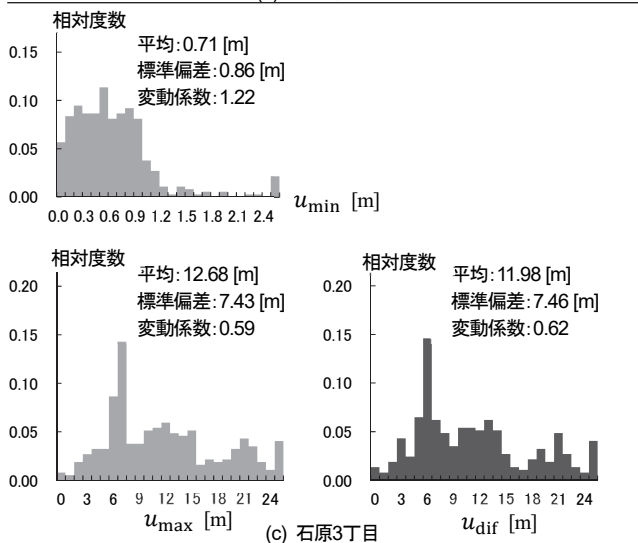
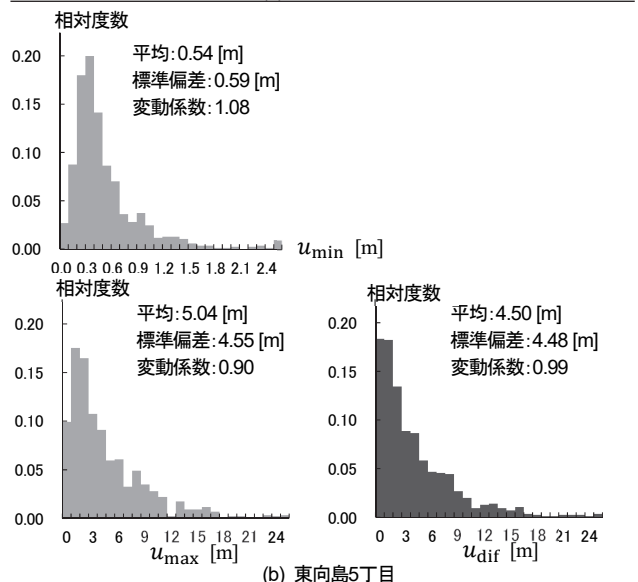
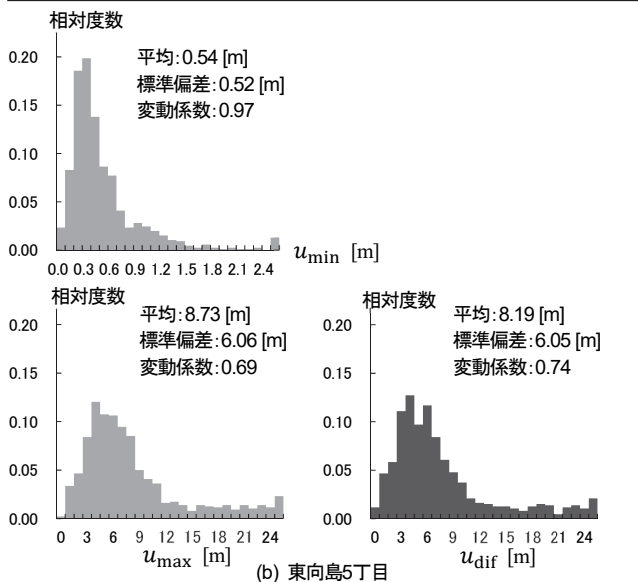
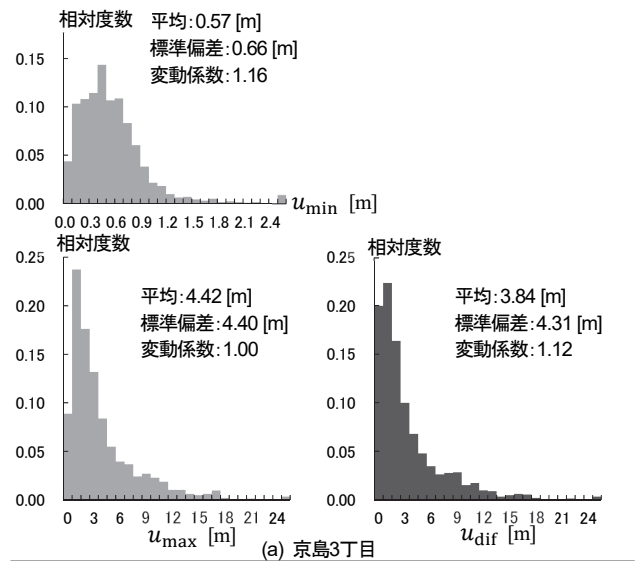
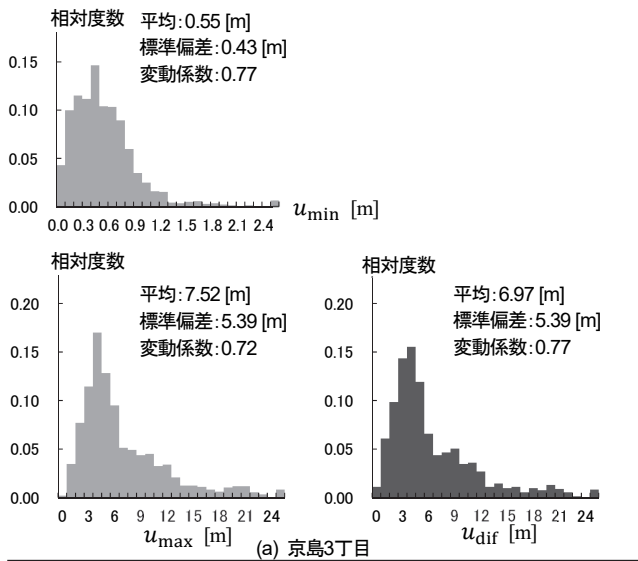


図5: 壁面間距離の最大値分布, 最小値分布, 範囲の分布.  
(隣棟関係にあるすべての建物の場合)

図6: 壁面間距離の最大値分布, 最小値分布, 範囲の分布.  
(道路と交差しない隣棟関係にある建物の場合)

## 6. おわりに

本稿では、建物の位置関係に基づき、建物の隣棟関係を定義した。隣棟関係にある建物の壁面間距離を定義し、任意の建物について、壁面間距離の最小値、最大値、壁面間距離の範囲を計測し、地域におけるそれぞれの統計分布と建物棟数密度及び道路幅員との関係を考察した。主要な結論はつぎのとおりである。

**隣棟関係にあるすべての建物の場合**、壁面間距離の最小値は建物棟数密度の大小に関らず1.5mまでの範囲に分布していることがわかった。建物棟数密度が大きいほど、壁面間距離の最小値の標準偏差と変動係数はそれぞれ小さい傾向にある。他方、建物棟数密度が大きく平均道路幅員が狭いほど、壁面間距離の最大値の平均と標準偏差は小さい傾向にあることがわかった。また、壁面間距離の範囲の分布と最大値分布の形状は互いに類似し、建物棟数密度が大きく平均道路幅員が狭いほど、標準偏差と平均はそれぞれ小さい傾向にあることもわかった。

**道路と交差しない隣棟関係にある建物の場合**、壁面間距離の最小値分布は、隣棟関係にあるすべての場合とほぼ同じであることがわかった。他方、壁面間距離の最大値分布は、隣棟関係にあるすべての場合よりも左に歪んだ分布であることがわかった。壁面間距離の範囲の分布についても同様である。壁面間距離の最大値の平均と標準偏差は、建物棟数密度が大きいほど小さい傾向にある一方、最頻値は建物棟数密度の大小に関らず1mであることがわかった。このように、隣棟関係にあるすべての場合と比較すると、建物棟数密度と壁面間距離の最大値の平均、標準偏差そして最頻値との間において、明瞭な大小関係はないことがわかった。壁面間距離の範囲の分布についても同様の傾向にある。

前述のように、都市計画において、隣棟関係にある建物の壁面間距離は、地域における住環境の安全性（延焼リスク）や快適性（通風、採光、遮音等）を評価するために重要である。とくに、各建物における壁面間距離の最小値は延焼リスクを安全側に（厳しく）評価するために重要である。一見すると、町丁目の建物棟数密度が大きいほど、壁面間距離の最小値分布は左にシフトすると思われる。ところが、道路と交差する隣棟関係にあるかどうか、建物棟数密度の大小に関らず、壁面間距離の最小値は1.5mまでの範囲に分布していることがわかった。

壁面間距離が1m未満の場合、構造種別に関らず隣棟への延焼確率は高いことから、建物の延焼防止対策は極めて重要である（青木、2006）。また、壁面間距離の範囲の分布に基づいて、壁面間距離の多様さや均一さを評価することができる。一見すると、町丁目の建物棟数密度が大きいほど、壁面間距離の範囲の分布も左にシフトすると思われる。ところが、道路と交差しない隣棟関係にある建物の場合、建物棟数密度の大小に関らず、壁面間距離の範囲の分布の形状は互いに類似し、単調減少かつゼロを最頻値とする分布である。従って、壁面間距離は均一の傾向にあると評価できる。

今後の課題は、壁面間距離の最大値、最小値、範囲の確率密度関数を導出することである。壁面間距離の最小値と最大値はそれぞれ極値分布に従うことが予想される。各分布のパラメータを建蔽率や建物棟数密度等の関数として推定することができれば、建物壁面間距離の各統計分布を簡便に推定することが可能となるだけでなく、建物棟数密度やゾーニング規制としての建蔽率の変化に対する壁面間距離の最小値や最大値の統計分布の変化を見通し良く考察することにも資するだろう。

## 補注

(1) 図4の建物構造種別については、東京都都市計画地理情報システムデータを使用して作成した。ここに記し謝意を表す。

## 参考文献

- 青木義次（2006）類焼の確率モデル、『建築計画・都市計画のための数学』、数理工学社、139-154。
- 小浦久子（2001）快適性の評価、『住環境 評価方法と理論』（浅見泰司編）、東京大学出版会、87-104。
- 腰塚武志（1988）棟数密度に関する理論的考察、「都市計画論文集」、23、19-24。
- 腰塚武志・古藤浩（1989）、棟数密度による有効空地の推定、「都市計画論文集」、24、337-342。
- 薄井宏行・浅見泰司（2013）敷地の平均奥行の推定とその精度、「都市計画論文集」、48(3)、357-362。
- 薄井宏行・浅見泰司（2011）建物後退距離と建物および道路密度、「都市計画論文集」、46(3)、829-834。
- 市古太郎・権昌希（2002）、既成市街地における建築物の

「近接性」の定量化に関する研究—世田谷区太子堂地区を対象に—, 「都市計画論文集」, 37, 7-12.

市古太郎 (2004) 法線走査法による建築隣接空間の定量化—空地の直和分解モデルとその実装—, 「都市計画論文集」, 39(3), 679-684.

薄井宏行・寺木彰浩 (2018) 建物棟数密度の減少による延焼確率の減少効果—正方形敷地の仮定に基づく延焼確率分布の導出及び密集市街地における延焼リスク評価への応用—, 「都市計画論文集」, 53(3), 1507-1614.

Usui, H., Teraki, A., Okunuki, K. and Satoh, T. (2020) A comparison of neighbourhood relations based on ordinary Delaunay diagrams and area Delaunay diagrams: an application to define the neighbourhood relations of buildings, *International Journal of Geographical Information Science*. 34(11), 2177-2203..

国土交通省都市局都市安全課・住宅局市街地建築課市街地住宅整備室, 「地震時等に著しく危険な密集市街地」について, 日本語, [http://www.mlit.go.jp/report/press/house06\\_hh\\_000102.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house06_hh_000102.html), 2020年8月27日.

