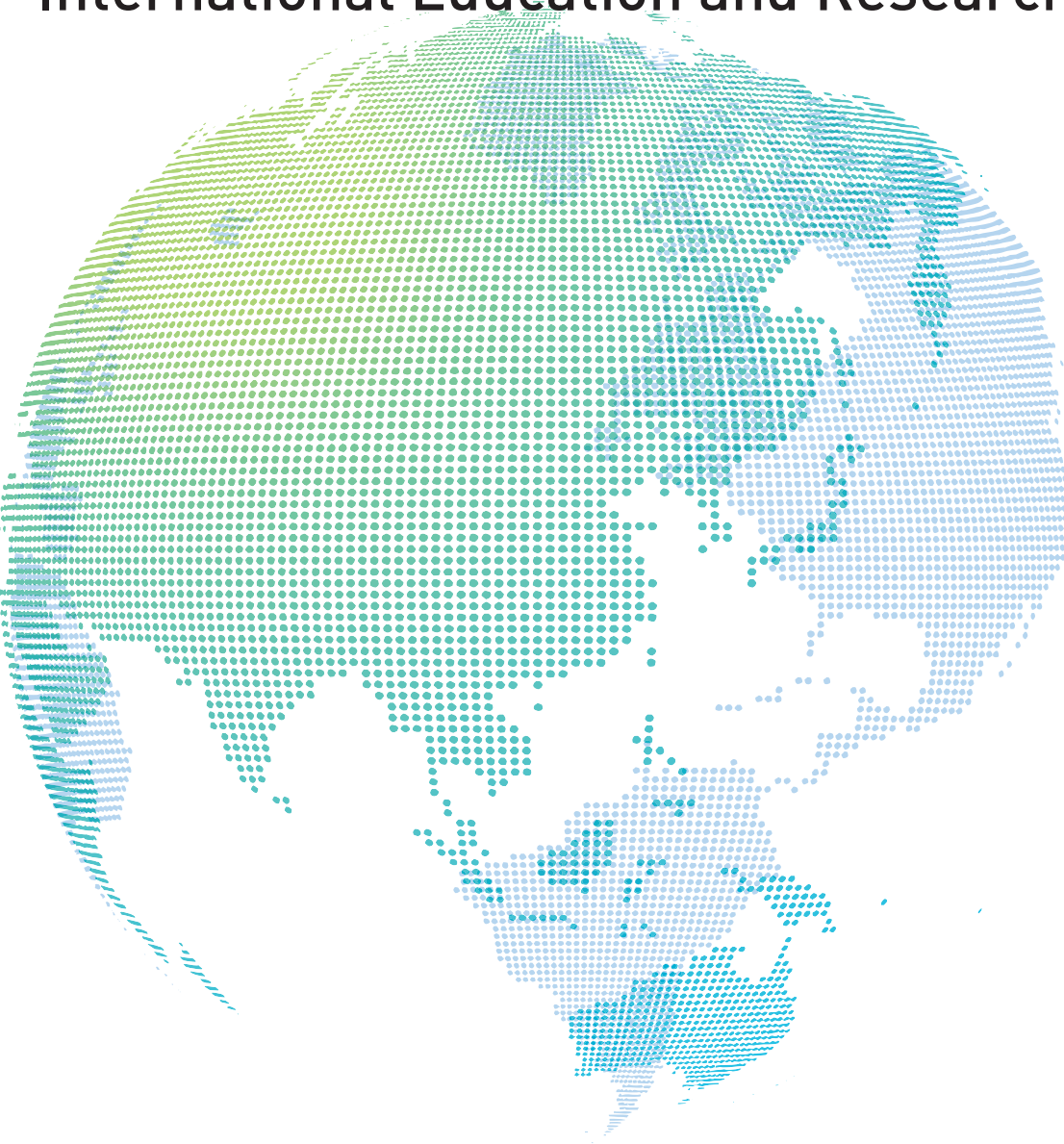


Vol.2 No.1
2024.03

名城インターナショナル研究

Journal of the Meijo University Center for
International Education and Research



● 目次

研究ノート	1 台湾植物由来ヒスピジュリンの認知症周辺症状に対する作用 —認知症モデルマウスを用いた検討—	間宮隆吉
研究報告	5 研究報告	李 秀澈
	11 配電アグリゲータの太陽光発電・蓄電池の日間運用計画 —アクティブマイクログリッドの開発に向けて—	益田泰輔
	17 「名城インターナショナル研究」投稿規則	

● CONTENTS

Note	1	Effects of hispidulin on impairments of social interaction observed in Alzheimer disease model mice.	Takayoshi Mamiya
Research Report	5	Research Report	Soocheol Lee
	11	Daily Scheduling Method for Aggregated Photovoltaic-Battery Systems —Toward Development of Active Microgrid—	Taisuke Masuta
	17	Journal of the Meijo University Center for International Education and Research Contribution Rules	

台湾植物由来ヒスピジュリンの認知症周辺症状に対する作用 —認知症モデルマウスを用いた検討—

間宮 隆吉

名城大学薬学部

要 旨

記憶障害が中核症状である認知症には、抑うつや社会性の低下なども認められ、それらの周辺症状の方が家族や介護者にとって深刻な問題である。前年度までに台湾植物から抽出されたヒスピジュリンが社会性行動障害モデル動物に対し有用であることを見出している。そこで本研究では、認知症モデルマウスで観察される社会性行動障害に対し有効であるか検討した。

実験には10ヶ月齢の雄性3xtg-ADマウス（家族性アルツハイマー型認知症モデルマウス）とそのコントロールマウスを用いた。ヒスピジュリン（10mg/kg, i.p.）を投与しその15分後から社会性行動試験を行い、相手マウスに対する追尾、においかぎ、身繕いおよびマウンティング行動時間を計測した。3xtg-ADマウスはコントロールマウスと比べ、社会性行動時間が有意に短かった。このモデルマウスに対し、ヒスピジュリンを投与すると、社会性行動の低下が有意に緩解された。

これまでの研究成果を合わせて考えると、ヒスピジュリンは、COMT阻害による前頭皮質のドーパミンレベルの上昇を介してドーパミンD1受容体を間接的に活性化することにより、行動障害を緩解した可能性が示唆された。ヒスピジュリンは、認知症の周辺症状の1つである社会性行動低下の治療に有効であるかもしれない。

キーワード：イボタクサギ, ヒスピジュリン, 社会性行動, アルツハイマー型認知症

Effects of hispidulin on impairments of social interaction observed in Alzheimer disease model mice.

Takayoshi Mamiya^{1), 2)}

1) Meijo University International Education and Research Center

2) Faculty of Pharmacy, Meijo University

Abstract

Alzheimer disease (AD) is a serious disease which has not only memory impairment as a core symptom, but also depression and social impairments, and these behavioral and psychological symptoms of dementia (BPSD) are more serious problems for the family. Previously, we found that hispidulin extracted from a Taiwanese plant was useful for animal models of social behavioral disorder. Here, we investigated effects of hispidulin on the reduction of social interaction observed in a mouse model of AD.

In this study, ten-month-old male 3xtg-AD mice (a model of familial AD) and their control wild-type mice were used. The 3xtg-AD mice showed significantly shorter social behavior time than the control mice. Hispidulin significantly attenuated the decline in social behavior.

Taken together, these findings suggest that hispidulin may have alleviated behavioral deficits by indirectly activating dopamine D1 receptors through COMT inhibition-induced increases in dopamine levels in the frontal cortex. Hispidulin may be effective in the treatment of impaired social behavior, one of BPSD.

Keywords : Clerodendrum inerme (CI), hispidulin, social interaction, Alzheimer disease

1. はじめに

イボタクサギ (Clerodendrum inerme (CI)) は、台湾をはじめ中国南部、東南アジアおよびインドの河口および海岸に分布する低木で¹⁾、民間療法として皮膚病や発熱を和らげる目的で用いられるいわゆる漢方植物である²⁾。また、イボタクサギ抽出物には、抗侵害受容作

用³⁾、抗ウイルス作用²⁾、抗真菌作用⁴⁾があることも報告されている。イボタクサギの葉から単離されたヒスピジュリン (図1) はフラボノイドに分類され⁵⁾、臨床的に難治性チック障害に治療効果があると報告された⁶⁾。これまでに我々のグループは、このヒスピジュリンにはGABA_A受容体 α_6 サブユニットの正のアロステリックモジュレーター作用およびcatechol-O-methyltransferase (カテコール-O-メチル基転移酵素; COMT) 阻害作用

を有していること、精神疾患における感覚運動ゲーティング障害に対する有効な薬となりうることを明らかにしてきた⁷⁾。2020年度の本助成研究では、精神疾患の統合失調症の陰性症状（自閉（引きこもり）、意欲の低下、感情の平板化など）には有効な治療薬がないことに着目した。フェンシクリジン（PCP）連続投与誘発統合失調症陰性症状モデルマウス^{8,9)}に対して、ヒスピジュリンを投与し作用を検討したところ、行動薬理学的及び神経化学的に有効性を見出すことができた^{10,11)}。

一方、近年我が国における認知症患者は700万人を超えると推計されており、大きな社会問題となっている。2023年には我が国においても抗体医薬に分類されるレカネマブが上市され話題となった。しかし認知症に伴った「抑うつや社会性の低下」なども家族や介護者にとって深刻な周辺症状であり、有効な治療薬が求められている。そこで本研究では、遺伝子改変家族性アルツハイマー型認知症モデルマウス（3xtg-ADマウス）で観察される社会性行動の低下に対するヒスピジュリンの作用を行動薬理学的に検討した。

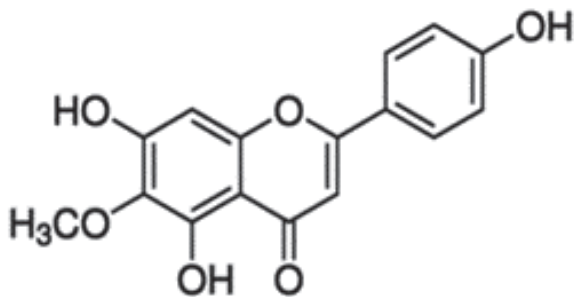


図1 イボタクサギから抽出されたヒスピジュリンの構造式

2. 方法

実験には10ヶ月齢以降の雄性3xtg-ADマウス（IMSR_JAX: 008880, Jackson Laboratory, USA）およびそのコントロールマウスを用いた。マウスは1ケージ8匹までとし、12時間の明暗サイクル（8:00点灯、20:00消灯）、室温23℃下で飼育した。なお、実験内容を、事前に名城大学動物実験委員会に申請し承認を受けて実施した（承認番号：2022PE-11）。

社会性行動試験

装置は、灰色の非反射性アクリル製板で作られた箱（25×25×30cm）で、間接的に照明した。社会性行動試験

訓練日の前日に、各マウスを単独で装置に10分間入れて、馴化させた。社会性相互作用テストの前に、ヒスピジュリン（邱麗珠教授より供与；10 mg/kg, i.p.）を15分前に投与し、装置内に入れた。その直後に同様に馴化させた12週齢のC57BL/6J系雄性マウス（日本SLC、静岡）を装置内に入れ、初めて出会ったパートナーに対する行動を録画した。10分間の社会性行動（追尾、においかぎ、身繕い、マウンティング）時間を計測した。実験結果について、Mann-Whitney U testを用いて統計学的に検定した。

3. 結果

社会性行動試験において、3xtg-ADマウスは、社会性行動時間が対照群（コントロール群）マウスのそれよりも有意に短かった。このモデルマウス群に、ヒスピジュリン（10 mg/kg）を投与したところ、社会性行動時間の短縮が、コントロール群マウスのレベルにまで有意に回復した（表1）。一方、ヒスピジュリンは、健常マウス（生理食塩液を投与したマウス）の社会性相互作用時間に影響を与えなかった。また、新奇物体認知試験および自発的交替行動試験（Y字型迷路試験）を行い、認知機能および短期記憶機能についても評価したところ、ヒスピジュリン（10 mg/kg）の投与によって、3xtg-ADマウスで観察される認知機能および短期記憶障害も緩解した（データ示さず）。

表1 社会性行動試験のまとめ

	社会性行動
アルツハイマー型認知症モデルマウス	↓↓
+ヒスピジュリン (10mg/kg)	緩解

4. 考察

この研究内容は、2020年度の名城大学アジア研究センターアジア研究公募型プロジェクト研究助成に引き続き、邱麗珠教授（国立台湾大学）研究室との相互交流研究を目標として申請し採択された。それまでも、

支援のない私的な共同研究を10年以上進め、民間で古くから知られていたイボタクサギ中に有効成分ヒスピジュリンがあることを見出してきた。本研究で用いたヒスピジュリンは、邱麗珠教授および李欣蓉研究員らが、そのイボタクサギの葉から抽出し精製したものである。2018年にはヒスピジュリンには、GABA_A受容体 α_6 サブユニットに対するアロステリックモジュレーター作用及びCOMT抑制作用を有することを見出した。さらに、2020年にはヒスピジュリンの社会性行動障害緩解作用やその作用機序を見出し、統合失調症の陰性症状治療薬としての可能性を報告してきた^{10,11)}。

2022年度は、まとめ(表1)に示したように、ヒスピジュリン(10 mg/kg)は世界的に家族性アルツハイマー型認知症モデルとして認められている3xtg-ADマウスが示す社会性行動時間の短縮を有意に緩解することを見出した。加えて、認知症の中核症状である記憶障害に対しても有効であることも確認している。この作用機序としては、過去の実験結果と合わせて考えると、前頭皮質のドーパミンレベルを上昇させ、ドーパミンD₁受容体の機能を高めることによるものと推察される。

5. まとめ

ヒスピジュリンは、統合失調症における陰性症状(引きこもり行動)だけでなく、アルツハイマー型認知症の治療に有効であるかもしれない。ここ数年は、COVID-19の世界的蔓延によって共同研究だけでなく、次世代研究者との直接的文化交流も遅れた。プロジェクト研究の採択の有無にかかわらず、次年度以降も邱麗珠教授や李欣蓉研究員との共同研究を通じ、台湾の研究者との文化交流も進めていきたい。さらに中国、韓国、インドネシアの研究仲間たちとも持続的な共同研究を進め、発展させていきたい。

謝辞

本研究は、国立台湾大学・脳與心智科学研究所邱麗珠教授との10年以上にわたる共同研究の成果の一部である。また、実施するにあたり、文部科学省の科学研究費補助金(基盤研究(C)22K06655)および2022年度名城大学アジア研究センターアジア研究公募型プロジェクト研究助成を受けた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Wiart C. (2006) Medicinal plants of Asia and the Pacific. CRC Press, New York.
- 2) Gopal N., Sengottuvelu S. (2008) "Hepatoprotective activity of Clerodendrum inerme against CCl₄ induced hepatic injury in rats", *Fitoterapia.*, **79**, 24-26.
- 3) Parveena M., Khanama Z., Alib M., et al. (2010) "A novel lupene-type triterpenic glucoside from the leaves of Clerodendrum inerme", *Nat. Prod. Res.*, **24**, 167-176.
- 4) Prasad V., Srivastava S., Varsha., et al. (1995) "Two basic proteins isolated from Clerodendrum inerme Gaertn. are inducers of systemic antiviral resistance in susceptible plants", *Plant Sci.*, **110**, 73-82.
- 5) Huang WJ., Lee HJ., Chen HL., et al. (2015) "Hispidulin, a constituent of Clerodendrum inerme that remitted motor tics, alleviated methamphetamine-induced hyperlocomotion without motor impairment in mice", *J. Ethnopharmacol.*, **166**, 18-22.
- 6) Fan PC., Huang WJ., Chiou LC. (2009) "Intractable chronic motortics dramatically respond to Clerodendrum inerme (L) Gaertn.", *J. Child Neurol.*, **24**, 887-890.
- 7) Chiou LC., Lee HJ., Ernst M., et al. (2018) "Cerebellar α_6 -subunit-containing GABA_A receptors: a novel therapeutic target for disrupted prepulse inhibition in neuropsychiatric disorders", *Br. J. Pharmacol.*, **175**, 2414-2427.
- 8) Noda Y., Yamada K., Furukawa H., et al. (1995) "Enhancement of immobility in a forced swimming test by subacute or repeated treatment with phencyclidine: a new model of schizophrenia", *Br. J. Pharmacol.*, **116**, 2531-2537.
- 9) Mouri A., Noda Y., Enomoto T., et al. (2007) "Phencyclidine animal models of schizophrenia: approaches from abnormality of glutamatergic neurotransmission and neurodevelopment", *Neurochem. Int.*, **51**, 173-184.
- 10) Mouri A., Lee HJ., Mamiya T., et al. (2020) "Hispidulin attenuates the social withdrawal in isolated disrupted-in-schizophrenia-1 mutant and chronic phencyclidine-treated mice", *Br. J. Pharmacol.*, **177**, 3210-3224.
- 11) 間宮隆吉 台湾由来イボタクサギより抽出したヒスピジュリンの社会性行動障害モデルマウスに対する作用(2020年度名城大学アジア研究センターアジア研究公募型プロジェクト研究助成報告)(2022)名城アジア研究, **11**(1), 41-44.

〈研究報告〉

研究代表者：李 秀澈

経済学部教授

1. はじめに

本研究報告は、2022年度名城大学アジア研究センター「公募型プロジェクト」に採択されたプロジェクト、「日中韓のカーボンニュートラルに向けた脱炭素技術革新と共同炭素市場構築：E3MEモデルを利用した分析」に関する研究成果の報告である。

地球温暖化防止に向けて今世紀半ばに温室効果ガス実質ゼロの達成は、もはや避けて通れない世界共通の課題となっており、日中韓においても例外ではない。ただし今後30年ほどで化石エネルギーの使用量を限りなくゼロに近づけさせるためには、画期的な脱炭素技術革新と効果的な脱炭素関連制度構築が欠かせない。本研究の目的は、日中韓がカーボンニュートラル（以下、CN）の達成と同時に明るい経済ビジョンを示すための経済各部門からの脱炭素技術革新と日中韓の共同炭素市場構築のための条件と課題を明らかにすることである。その際に、分析のツールとしてE3MEグローバル計量経済モデルを用いる。

2. プロジェクトの内容

2020年10月に、日中韓ともに2000年代半ばに温室効果ガス排出の実質ゼロ、すなわちCN達成を宣言した。CNは、我々の社会がこれまでの化石エネルギー依存から脱却し、再生可能エネルギーを主力エネルギーとするエネルギー利用の大転換を意味する。そのためには、電力部門だけでなく、産業、交通、商業、家庭など経済全部門での化石エネルギー依存からの脱却が求められている。こうした中、研究代表者は、日中韓3国ともに、経済各部門へ主要素材を供給し、産業部門の中で二酸化炭素排出量の割合が最も高い（日本約35%、中国約30%、韓国約30%）鉄鋼部門のCNは避けて通れない課題であると判断した。

そこで、研究代表者は、日中韓の鉄鋼産業のCNの達

成のために必要な政策設計、その政策が実施された場合、日中韓の鉄鋼産業の生産と雇用構造の変化と各国のGDPに与える影響に関して、大規模グローバルマクロ計量経済モデルによりシミュレーション分析を行った。

プロジェクトの内容は、以下のものである。鉄鋼部門のCN達成のためには、既存のコークスを活用する高炉製法から水素を活用する水素還元製鉄への転換が決め手であるといわれている。水素還元製鉄は、既存の製鉄方式から全く新しい製鉄方式への転換を意味している。水素還元製鉄は、まだ技術的にも確立されておらず、還元剤としての水素の価格も高く、市場に任せては育て難い技術である。そこで日中韓政府ともに、鉄鋼メーカーの水素還元製鉄方式に対する技術開発への補助金の提供、そして水素価格の低下と供給の安定化に向けた取り組みも始めている。

そこで、本研究では、日中韓における鉄鋼部門のCN達成を可能とする、カーボンプライシング（本研究では「炭素税」）、補助金、そして規制的手法のポリシーミックスを用いた政策設計を行う。そして、これらが現実の政策として実施された場合、水素還元製鉄を中心とした鉄鋼部門の脱炭素技術革新の過程をE3ME—FTT：Steelモデルを用いて2050年までシミュレーションを行う。さらに本研究は、鉄鋼部門のCNの達成が、マクロ経済全体へ与える影響も推定する。

本研究の分析ツールであるE3MEモデルは、発電部門で24の電源技術（石炭火力など従来型と太陽光、風力など再エネ発電技術）、交通部門で8の交通機関（EV、FCVなど）、鉄鋼部門で18の製鉄技術（電気炉、水素還元など）、空調部門の9つの技術が、投資費、維持補修費、燃料費と合わせて学習効果による技術革新スピードがボトムアップで内生的に決定されるメカニズムを持っている。E3MEモデルは技術革新スピードが技術類型によって適切に反映されるので、2050年CN社会の姿をより科学的に描けるメリットを有している。さらに、E3MEモデルのサブモデルであるFTT：Steelは、鉄鋼部門の中で既存のコークス炉をはじめ水素還元製鉄、スマルト還元法（smelt reduction）、直接還元法（ガス、石炭）な

ど26つの製鉄技術のコストと需要（市場シェア）が、2050年までに内生的に決定されるメカニズムをもつ最先端のモデルである。

3. プロジェクトの成果

本プロジェクトを遂行するために、研究代表者は、中国の専門家（Wendan Zhang（人民大学助教授）、Jun Pang（人民大学教授））、韓国の専門家（Yongsung Cho（高麗大学教授））、日本と中国の両国の専門家（Xu Han（京都大学博士課程））、そしてE3MEモデルの専門家（Pim Vercoulen（Senior Researcher, Cambridge Econometrics））をプロジェクトメンバーとして招いた。

本プロジェクトの成果は、下記のようにピアレビュージャーナルである「Energies」に掲載されている。「Energies」は、優れたジャーナルの尺度といえるSCIの掲載誌である。

Pim Vercoulen, Soochool Lee, Xu Han, Wendan

Zhang, Yongsung Cho, Jun Pang (2023) 「Simulating Decarbonization of the Iron & Steel Industry in China, Japan, and Korea using E3ME-FTT: Steel」 *Energies* 2023, 16(11), 4498; <https://doi.org/10.3390/en16114498> 論文の文末には、下記のように本プロジェクトの名称が明記されている。

Funding; This research was funded by the Asia Research Project of Meijo University.

以下、上記論文の概要である。詳しい内容は、上記のdoiアドレスを参考されたい。

鉄鋼の生産は、多様な技術の組み合わせで行われており、FTT: Steelモデルで分析可能な鉄鋼生産方式は、上述のように26つが存在する（Figure 1）。ただし鉄鋼生産は、大きく、鉄鉱石に石炭からのコークス（鉄鋼から酸素を取り除く還元剤として）を入れて鉄を作る高炉方式（BF-BOF）、鉄のスクラップを電気炉に入れて電気熱によりリサイクル鉄を作る電気炉方式（EAF）に分けられる。鉄鋼産業からの二酸化炭素の大半は、コークスによる高炉方式から発生する。ここで還元剤とし

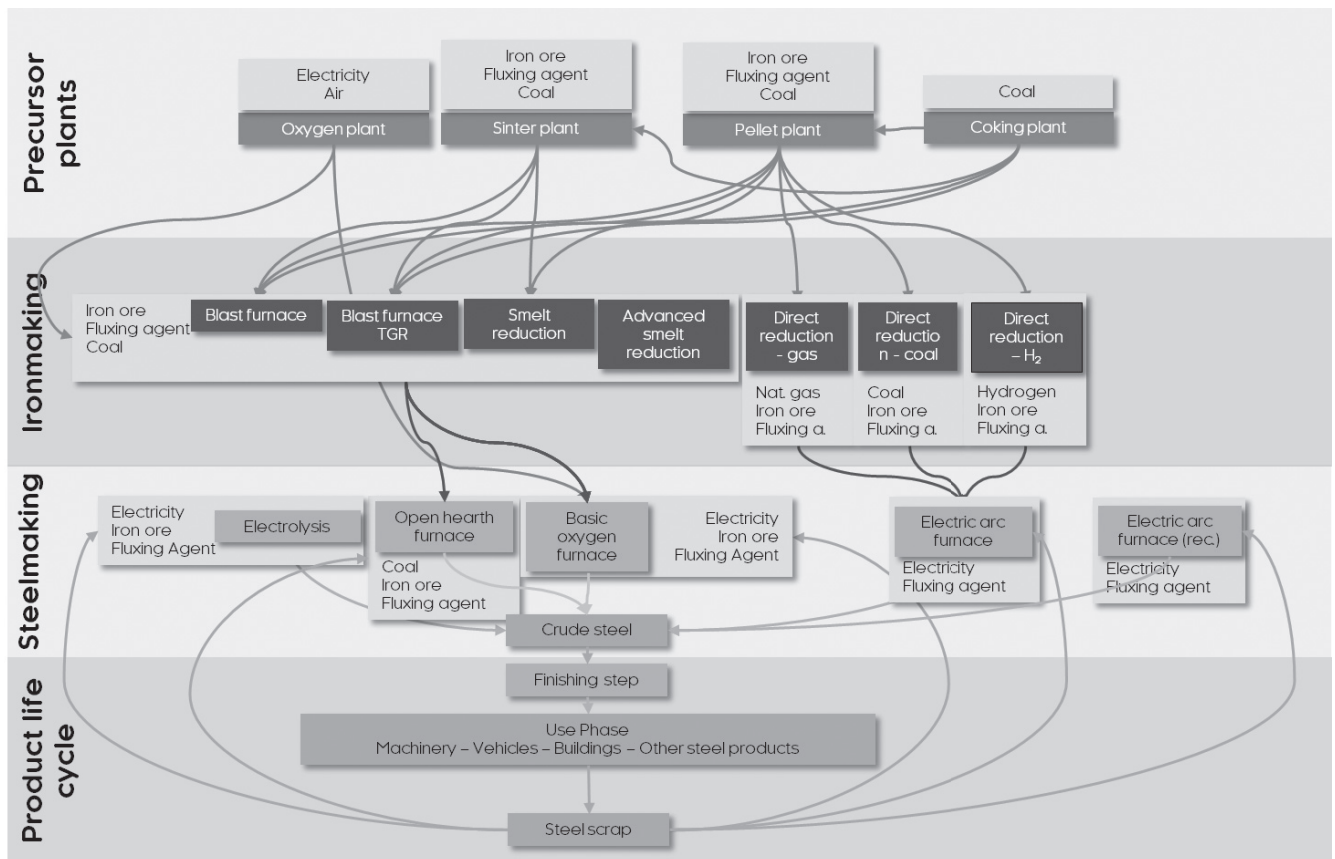


Figure 1 Overview of the energy/material flow and interconnections between processes. Carbon capture and storage and bio-based options are not shown

出所：本プロジェクトの著者らにより作成。

てのコークスの代わりに水素を使用する場合（図1で、Direct Reduction-H₂）、二酸化炭素は発生せずに水蒸気だけ発生することとなる。この方式を水素還元製鉄という。ただし、水素還元製鉄はまだ商業ベースでの鉄鋼生産には技術として確立されておらず、コスト的にも高炉方式より不利である。

そこで、本研究では、鉄鋼産業がCNに達成するための政策シナリオとして、1. 炭素税の導入と水素還元製鉄への補助金（S1）、2. コークスによる高炉方式の2050年までのフェースアウト（S2）、3. 炭素税、水素還元製鉄への補助金、そして高炉製法のフェースアウト（S3）の3つの政策組合せを採用した（Table 1, Table 2）。

これらの政策組合せが実際の政策として施行された時に、2050年までに日中韓の鉄鋼産業の1. 生産構造の変化、2. 熱エネルギー使用による二酸化炭素排出量（直接排出量）、3. 電気使用による二酸化炭素排出量（間接排出用）、4. 鉄鋼製法別投資額、5. エネルギー類型別最終消費量をE3ME-FTT：Steelモデルにより推定した（Figure 2、ここでは紙面関係上日本のみ掲載）。このシミュレーションの結果、CNに向けて特別政策を実施しておらず現状政策のままでは（ベースラインケース：Figure 2の左端列）、日本の鉄鋼産業は、殆ど電気炉と

高炉に依存することになり、2050年の二酸化炭素排出量も現状より30%ほど削減することに留まることが予想された（Figure 2の左端列の2列目）。

ただし3つの政策シナリオによって、鉄鋼産業の政策方式は低・脱炭素製法が増えることになるが、究極的にCNが達成できる政策シナリオは、炭素税＋補助金＋規制の3つの政策組合せ（S3）のみとなることが示された（Figure 2, Table 3）。ここで本研究では、CN達成が可能な（吸収源により排出された二酸化炭素がすべて吸収できるレベル）二酸化炭素排出量の削減率を90%程度として想定した。

そして2050年までにシナリオ別、国別の経済影響を推定したのがFigure 3である。鉄鋼産業の脱炭素に向けた政策実験は、いずれの国においてもベースラインケースに比べてGDPはプラス影響を与えることが示された。GDPに良い影響を与える要因としては、2050年CNに向かう過程で、多様な脱炭素投資需要が経済と雇用を刺激することが取り上げられる。またCNに向かう過程における既存の化石エネルギーから再生可能エネルギーへのエネルギー転換が進むことになり、化石エネルギー輸入の大幅な削減が貿易収支を改善することもGDPの一因になることが示された（Figure 3）。

Table 1 Overview of the policy levers for each scenario

Scenarios	Subsidies	Phase-out regulations	Carbon tax on all industries	Financialization of policy costs via carbon tax revenues from the ISI	Financialization of policy costs via other fiscal rates	Decarbonization policies for the power sector
S1 Carbon tax + subsidies	Y	N	Y	Y	N	Y
S2 Subsidies + phase-out regulations	Y	Y	N	N	Y	Y
S3 Carbon tax + subsidies + phase-out regulations	Y	Y	Y	Y	N	Y

出所：本プロジェクトの著者らにより作成。

Table 2 Overview of decarbonization policies in the power generation sector

Policy	Details
Subsidies on upfront investment	A 20% rate of upfront investment applied to nuclear power from 2023 and 2030, and a 50% rate of upfront investment applied to all CCS applications from 2023 to 2035
Feed-in tariffs	Applied to onshore and offshore wind power and bio-based electricity generation from 2023 to 2035
Kick-start program	Government programs to kick-start bio-energy with CCS (BECCS) between 2023 and 2026
Phase-out regulations	All carbon-intensive power generation technologies from 2025 and onwards

出所：本プロジェクトの著者らにより作成。

Japan

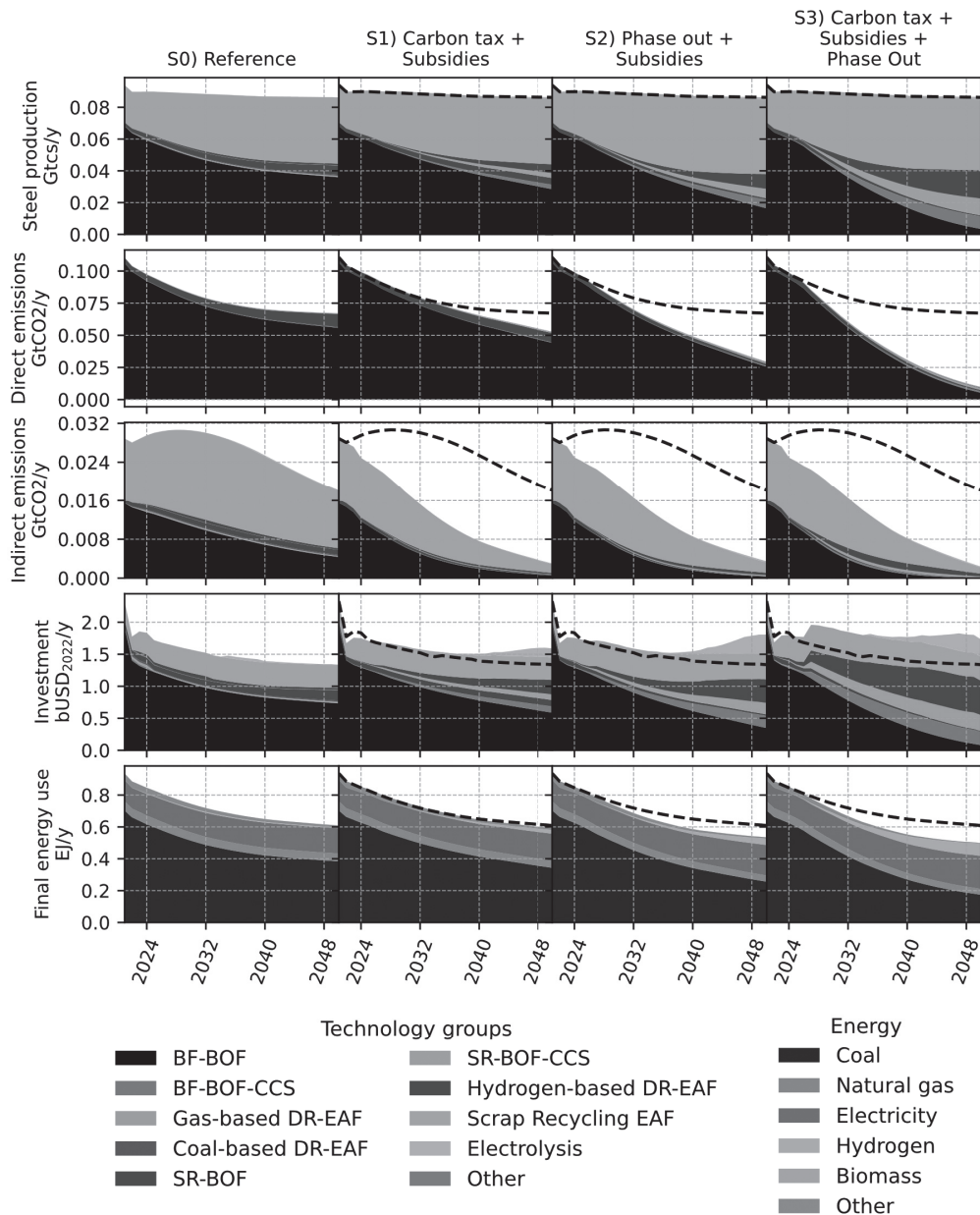


Figure 2 Overview of technology deployment (first row), direct emissions (second row), indirect emissions (third row), upfront investment in new capacity and depreciation (fourth row), and final energy use (fifth row) in Japan for each scenario (by columns).

出所：本プロジェクトの成果からである。

Table 3 Summary of emission reductions in the iron and steel industry in each country and scenario by 2050 compared to the baseline

	S1			S2			S3		
	Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total
China	-33%	-73%	-38%	-52%	-72%	-54%	-91%	-77%	-90%
Japan	-21%	-83%	-35%	-56%	-81%	-61%	-85%	-89%	-86%
Korea	-65%	-87%	-72%	-82%	-89%	-84%	-88%	-101%	-91%

出所：本プロジェクトの成果からである。

結論的に、本研究で示された政策シミュレーションに基づいて、日中韓における大規模な脱炭素化を達成するには、低炭素技術を支援する政策とコークス高炉を中心とした炭素集約型鉄鋼製法を制限する政策を組み合わせることが必要であるということが示唆された。同時に、鉄鋼産業の脱炭素化が必ずしも経済に悪影響を与えとは限らない。最も脱炭素化が進んだ政策シナリオ（S3）では、3カ国すべてでマクロ経済的な好結果が示されている。日中韓の経済は、炭素税の導入により炭素コスト

を負担することになるが、CNの移行に必要な多様な低・脱投資需要による乗数効果によって牽引されている。そして鉄鋼産業の脱炭素化は雇用創出につながる。ただし、CNへの移行には勝者と敗者が存在する。中国の石炭採掘業と日本のガス、石油精製など化石エネルギー関連産業は、国内の関連需要が低下するため、生産と雇用両方で減少が予想される。

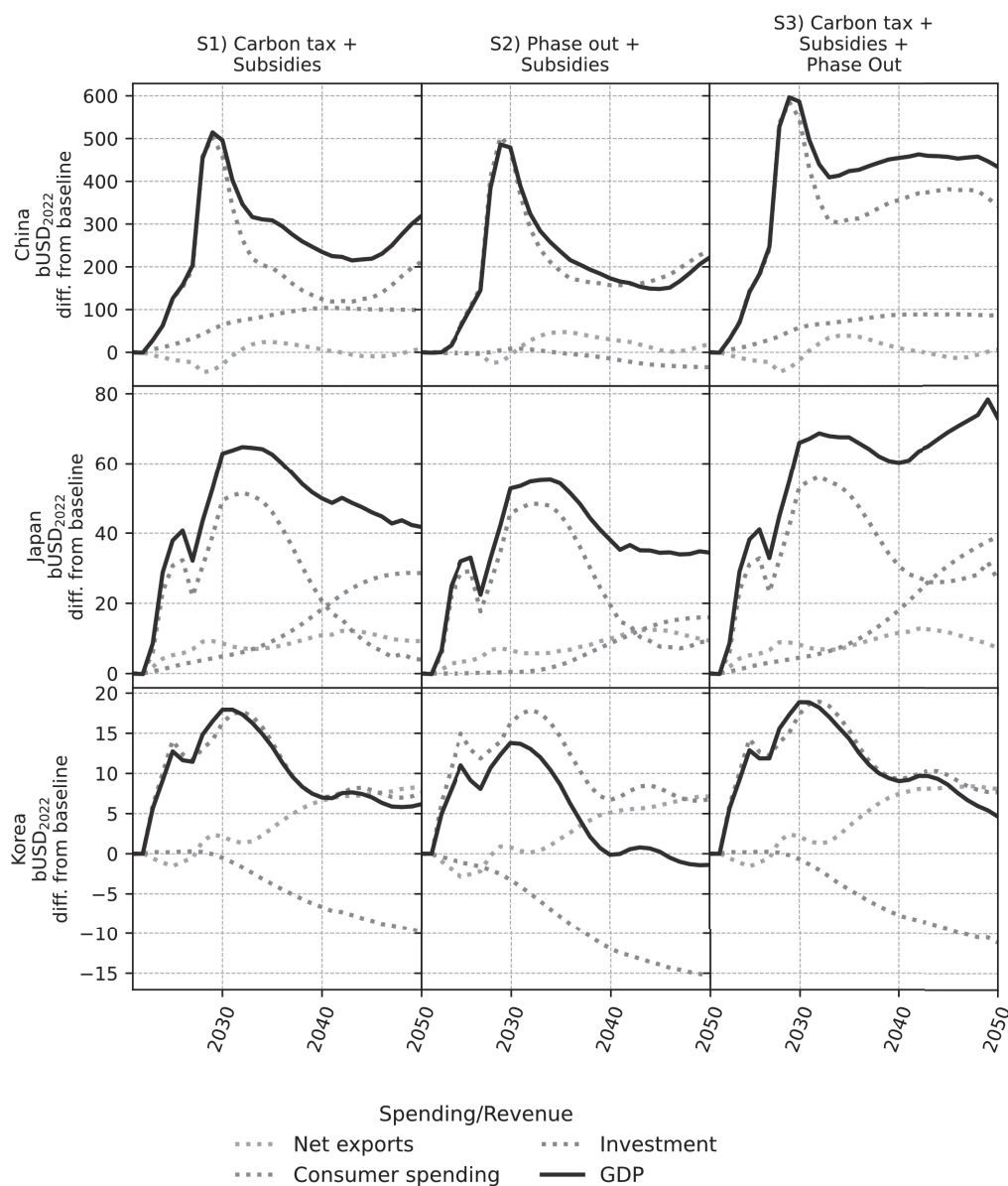


Figure 3 GDP and its components by scenario for China, Japan, and Korea compared to the baseline. 出所：本プロジェクトの成果からである。

配電アグリゲータの太陽光発電・蓄電池の日間運用計画 —アクティブマイクログリッドの開発に向けて—

益田 泰輔¹⁾

1) 名城大学理工学部電気電子工学科

要 旨

本研究グループでは、設備をあらかじめマイクログリッド (Microgrid: MG) 化するのではなく、緊急時に即席のMGを形成することで既存の電力システム全体の信頼性を向上させるアクティブMGの開発を目指している。アクティブMGは緊急時にMGが構成されればよいため、常時は必ずしも物理的なMGである必要はない。本稿では、アグリゲータを常時のバーチャルなMGの1つとみなし、多数の太陽光発電 (Photovoltaic power generation: PV) と蓄電池システム (Battery Energy Storage System: BESS) を集約する配電アグリゲータの日間需給計画・運用について紹介する。この際、運用前日に配電事業者 (Distribution System Operator: DSO) がアグリゲータにネットワーク制約に関する情報提供を行うものとする。

キーワード: マイクログリッド, アグリゲータ, 蓄電池システム, 配電系統, 配電事業者, 太陽光発電

Daily Scheduling Method for Aggregated Photovoltaic-Battery Systems —Toward Development of Active Microgrid—

Taisuke Masuta¹⁾

1) Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Science and Technology, Meijo University

Abstract

Our research group has developed a concept of active microgrid, which is composed instantaneously at the emergency state rather than installed in advance, for the reliability enhancement of the entire power systems. Because the active microgrid is for the emergency state, the physical microgrid is not necessarily composed at the steady state. Hence, considering the aggregator as a virtual microgrid, a scheduling and operation of the distribution aggregators with a number of photovoltaic power systems as well as battery energy storage systems is introduced in this paper. It is assumed that the distribution system operator informs the aggregators of the information on the distribution network constraints.

Keywords : Microgrid, Aggregator, Battery Energy Storage System, Distribution Network, Distribution System Operator, Photovoltaic Power Generation

1. はじめに

近年、小規模な電力ネットワークを構成して電力システムの信頼性を向上させるマイクログリッド (Microgrid, 以下MGと表記) に関する研究開発が進められている。単一需要家 (ビル, 工場など) が電力を地産地消する第1世代MGの制御・運用はほぼ確立され、現在は、配電網によって複数の需要家群を集約する第2世代MGの実証研究が始まっている⁽¹⁾。ただし、第1～2世代MGの概念では電力システムの全てをMG化することは難しく、あくまでMGに適した箇所をMG化して電力システムの信頼性を部分的に向上することを目的としていた。本研究グループでは、設備をあらかじめMG

化するのではなく、緊急時に即席のMGを形成することで既存の電力システム全体の信頼性を向上させるアクティブMGの開発を目指している。アクティブMGは、災害や事故に合わせて機動性を有するリソース (電源車, 電気自動車など) によって即座に電力ネットワークを構成する新しいMGである。

アクティブMGは緊急時にMGが構成されればよいため、常時は必ずしも物理的なMGである必要はない。常時の配電系統運用においては、配電アグリゲータの需要家リソース集約による経済運用に注目が集まっている。本稿では、アグリゲータを常時のバーチャルなMGの1つとみなし、文献 (2) の内容を中心に、多数の太陽光発電 (Photovoltaic power generation: 以下, PVと表記) と蓄電池システム (Battery Energy Storage System: 以下,

BESSと表記)を集約する配電アグリゲータの日間需給計画・運用について紹介する。

2. 想定する配電系統・アグリゲータ運用⁽²⁾

本稿では、配電系統内に多数のPVと定置型BESSを有する需要家が存在し、複数のアグリゲータによって集約される状況を想定する。この際、運用前日に配電事業者(Distribution System Operator: 以下、DSOと表記)がアグリゲータにネットワーク制約に関する情報提供を行うものとする。以上の前提のもとで、文献(2)では、アグリゲータがDSOから提供される情報に基づき需給計画を作成する手法を提案し、同手法の運用損益をシミュレーションによって評価した。ここでは、図1に示すフローチャートを用いて文献(2)で提案された配電系統運用について説明する。DSOは運用前日に配電系統内に存在する全ての需要家のPV出力と負荷需要を予測して最適潮流計算(Optimal Power Flow: 以下、OPFと表記)を実施し、各時間断面におけるネットワーク制約を考慮した逆潮流可能電力をアグリゲータごとに計算し、各アグリゲータに通知する(①)。各アグリゲータは当該情報を基に需給計画を作成する(②)。当日運用では、アグリゲータは原則として前日の需給計画通りの需給運用を実施する(③)が、DSOはネットワーク制約に違反がないかどうか確認する(④)。制約違反が生じた際、DSOは配電系統内の電力機器を用いて対応するが、本稿では、さらに必要に応じてPVとBESSの運転を制限する(⑤)ことができるものとする。アグリゲータはネットワーク制約に違反する需給計画・運用を行う可能性があるため、本稿では、DSOが直接または間接的に需要家のPVやBESSを制御できる状況を想定している。

以下、配電系統運用における各事業者の想定条件について述べる。

(1) アグリゲータ

本稿では、複数の需要家の電力を集約して前日スポット市場(または相対)で電力取引を行うアグリゲータを想定し、PVとBESSを有する需要家がアグリゲータと契約するものとする。アグリゲータは、前日スポット市場での取引価格を予想して各需要家が所有するPVとBESSを計画・運用し、買電電力の削減と売電電力の増

加を図って利益を最大化する。また、アグリゲータはそれに応じた利益を適切に需要家に分配するものとする。アグリゲータによる前日計画は二次計画問題として定式化する。目的関数および制約条件の詳細については文献(2)を参照されたい。

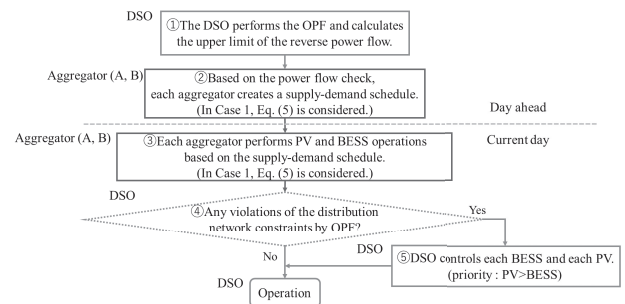


図1 配電系統運用の手順⁽²⁾

(2) DSO

DSOは配電ネットワークの適切な潮流状態を維持する責任を持つ。各アグリゲータは前日にBESS充電とPV出力制御(抑制)を計画し、当日はその計画に基づいて運用する。ただし、配電系統のネットワーク制約に違反する際には、DSOは各PVおよびBESSの出力を制御して緊急的に制約違反を回避できるものとする。運用においてDSOが緊急制御を行った場合、運用における発生または消費電力量が前日スポット市場で約定した電力量から乖離すると、アグリゲータはインバランス料金を支払う必要がある。よって、前述した通り、DSOは運用前日の段階で各時間断面におけるアグリゲータごとの逆潮流可能電力を各アグリゲータに対して通知し、アグリゲータはその情報に基づいてインバランスが発生しないような計画を作成することになる。DSOによる前日の潮流チェックおよび当日運用はOPFとして定式化する。目的関数および制約条件の詳細については文献(2)を参照されたい。

3. シミュレーション⁽²⁾

前章で述べた本稿における配電系統の計画・運用についてシミュレーションを行い、DSOはアグリゲータに対してどのような情報を提供すべきか評価する。アグリゲータはDSOが通知した逆潮流可能電力を上限として計画を作成するものとする。

(1) シミュレーション条件

図2にシミュレーションに用いる配電系統モデルとアグリゲータ構成を示す。当該モデルは、文献(3)の住宅地区の配電系統モデルを参考に作成している。当該モデルは配電用変電所主変圧器に接続される複数の配電フィーダのうち1つを模擬したモデルで、アグリゲータ数は2、負荷母線数は46である。全ての高压需要家と低压需要家にPVとBESSが接続されており、ベース電圧は6.6kV、各線路のインピーダンスは $0.0551 + j0.0886 \Omega/\text{km}$ (線路互長は3.89km)とする⁽³⁾。変電所送出力電圧は1.07puで一定とし、当該モデル以外のフィーダの電圧維持のため主変圧器タップ制御は既に実施しており、ネットワーク制約に違反する場合はPV出力を抑制する以外に電圧維持が困難である状況を想定する。DSOは母線3-59の電圧を基準値(上限:1.07pu, 下限:0.95pu)を満たすように監視・制御する。

シミュレーションに用いる配電系統モデルは、2つのアグリゲータ(A, B)を想定する。アグリゲータAは配電用変電所に近い23母線の需要家を、アグリゲータBは配電用変電所から遠い23母線の需要家を集約する。

高压需要家の負荷需要は1母線あたり最大150kW(配電系統全体で1200kW)、低压需要家の負荷需要は1母線あたり最大135kW(配電系統全体で5130kW)とする。PVの設置容量は、高压需要家・低压需要家ともに1母線あたり270kW(配電系統全体で12420kW)とする。また、BESSの設置容量は、高压需要家・低压需要家ともに1母線あたり125kW/250kWh(配電系統全体で5750kW/11500kWh)、充放電効率は80%とする。PV、BESSの設置容量は母線ごとにそれぞれ同一とする。

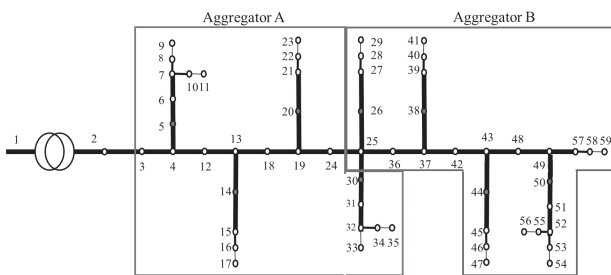


図2 配電系統モデル⁽²⁾

図3にシミュレーションに用いる時間断面ごとの各母線のPV出力と負荷需要を示す。図3に示す負荷需要の時系列データは、文献(4)の春秋平日の住宅負荷の日負荷曲線をもとに作成している。DSOおよび各アグリゲータは、図3に示すPV出力および負荷需要を前日

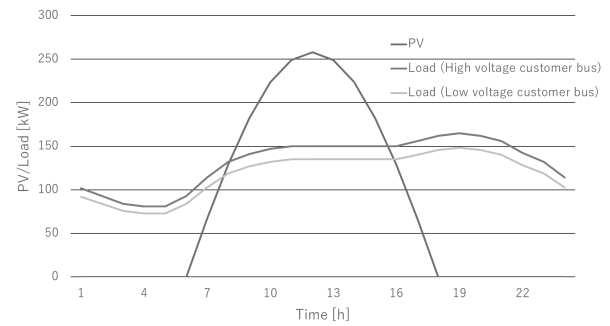


図3 予測PV出力と負荷需要⁽²⁾

の時点で正確に予測できるものとする。

前日スポット市場における取引価格(買電価格と売電価格)は、8時から16時までの間を15JPY/kWh、それ以外の時間帯では20JPY/kWhとする。簡単のため昼間と夜間の2通りの価格を設定している。

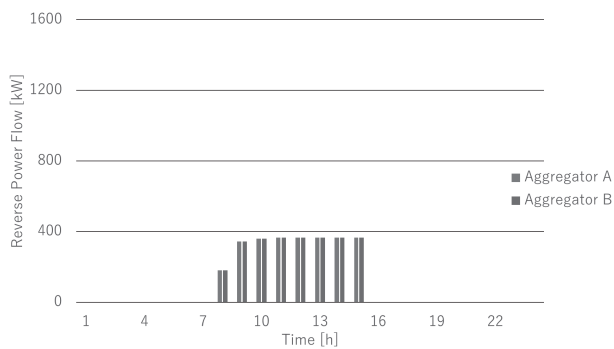
本稿では、異なる2通りの方法(Case 1, Case 2と表記)で逆潮流可能電力を算出し、DSOがアグリゲータに情報を提供するとして、その違いについて分析・評価する。Case 1(公平性を重視する基本ケース)では、需要家ごとのPV出力抑制が偏らないようにするため、各PVが設置容量に応じて出力する。Case 2(売上を重視する参考ケース)では、配電系統全体でできるだけアグリゲータ全体としての売上が大きく(逆潮流可能電力が大きく)なるように、各PVが自由に出力する。

(2) 潮流チェック

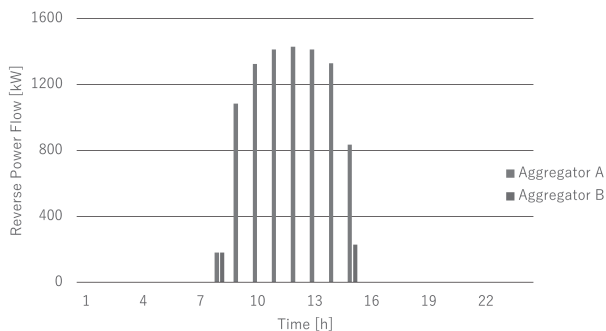
DSOがPV出力と負荷需要の予測に基づきOPFを実施し、Case 1(公平性を重視する基本ケース)とCase 2(売上を重視する参考ケース)の二種類の方法で計算した逆潮流可能な最大電力について、各アグリゲータの合計を図4に示す。図4(a)は図4(b)と比べて電力が小さいが、これは、Case 1ではどのPVも同じ割合だけ出力抑制するためである。図4(b)では、アグリゲータBの逆潮流可能な最大電力がアグリゲータAよりも小さいが、これは、Case 2では需要家ごとの出力抑制の大きさの違いを許容しており、電圧制約違反の原因となる配電用変電所から遠いアグリゲータBが集約する需要家のPV出力がより大きく抑制されることによる。

(3) 前日計画

図4(a)の情報に基づき、各アグリゲータが前章で述べた文献(2)の提案手法で作成したCase 1における需給計画を図5に、図4(b)の情報に基づき各アグリゲータ



(a) Case 1



(b) Case 2

図4 逆潮流可能電力の上限⁽²⁾

タが同手法で作成したCase 2における需給計画を図6に示す。図では、各アグリゲータの合計PV出力抑制、各アグリゲータの合計BESS充電電力、各アグリゲータの合計売電電力、各アグリゲータの合計BESS放電電力、各アグリゲータの合計PV出力、各アグリゲータの合計買電電力を示している。また、実線は各アグリゲータの合計負荷需要である。Case 1では、各アグリゲータが集約するリソースの種類・容量・数が同じで通知される逆潮流可能電力も同値であるため、アグリゲータAとアグリゲータBの計画は同一であり、図5では1つの図のみを示している。図5、6より、逆潮流可能電力以上の売電は計画しないため、8時から15時の間で必要に応じてPV出力抑制が行われていることが確認できる。図4の情報に基づいて計画を作成するため、Case 1ではアグリゲータAとBの売電電力が等しいが、Case 2ではアグリゲータAよりBの売電電力が小さいことが確認できる。また、Case 2はCase 1よりもBESSの充放電電力が小さくなっていることが分かる。これは、Case 2では逆潮流可能電力が大きい母線の充電電力は小さく計画され、結果としてアグリゲータが集約する需要家全体としての充電電力が小さくなることによる。

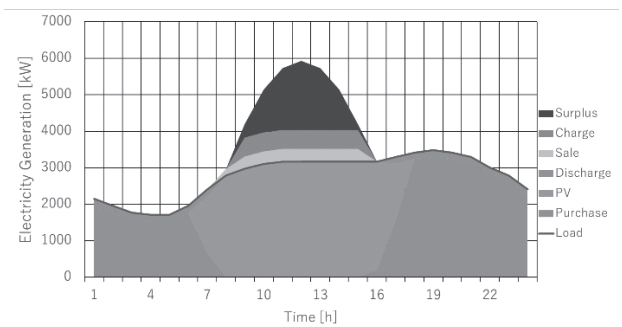
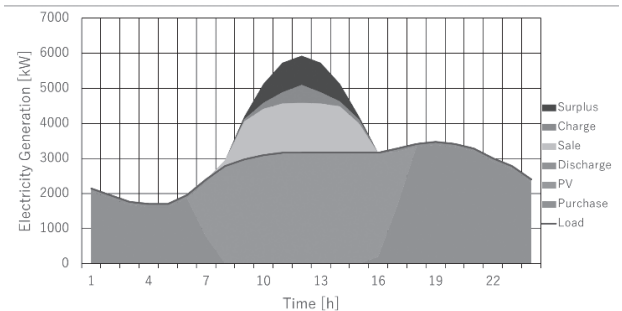
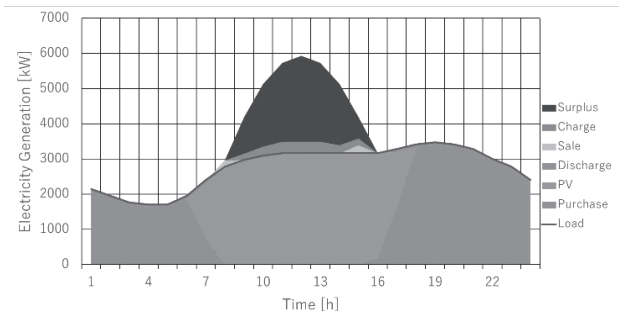


図5 Case 1における前日需給計画 (アグリゲータ A・B)⁽²⁾



(a) アグリゲータ A



(b) アグリゲータ B

図6 Case 2における前日需給計画⁽²⁾

(4) 当日運用

図5、6に示したCase 1とCase 2の需給計画に基づく当日運用をシミュレーションしたところ、Case 1、Case 2共にいずれのアグリゲータも運用が計画と同一となった⁽²⁾。これは、DSOが通知した需要家ごとの逆潮流可能電力に基づいてアグリゲータが需給計画を作成したことでネットワーク制約に違反することなく配電系統運用が実施できることを示している。

Case 1, 2の当日運用における24時間の合計コスト(買電費用およびインバランス料金から売電利益を差し引いたもの)を図7に示す。Case 2ではアグリゲータAよりアグリゲータBの合計コストが大きい。これは配電系統全体としての逆潮流可能電力ができるだけ大きくなる

ように上限を設定したため、アグリゲータAよりアグリゲータBの売電が小さくなっていることによる。図7より、Case 1、Case 2の合計コストの差はほとんど見られない。この原因を考察するため図8に、Case 1、2の当日運用における24時間の配電系統全体の合計充電電力量および合計PV出力抑制量を示す。図8より、Case 2はCase 1より合計PV出力抑制量が小さいが、合計充電電力量も小さくなっている。Case 2では母線ごとに設定された逆流可能電力をもとに計画するため、売電電力はCase 1と比べて大きくなり、売電利益は増加する。ただし、Case 2では前述した通りBESS充放電電力が小さく計画されて夜間の放電が小さくなり、買電費用も増

加する。今回のシミュレーション条件（需要家数、需要家ごとの需要、PV、BESSの設置規模、買電および売電単価等）では、売電利益の増分と買電費用の増分が同等であったため、結果としてCase 2とCase 1の合計コストがほぼ同一となったと考えられる。

4. おわりに

本稿では、文献(2)の内容を中心に紹介し、PVとBESSが大量導入された配電系統において、運用前日にDSOから逆流可能電力の情報が提供されると想定した場合の、アグリゲータによる需給計画とDSOによる当日運用のシミュレーション評価結果を示した。本稿では常時のMGのあり方の1つとしてアグリゲータによる計画・運用を取り上げたが、今後は、緊急時のMGを構成するリソースの1つとして、可搬型BESSである電気自動車に注目し、多数の電気自動車を集約する緊急時のアクティブMGについて検討を進める。

本研究の一部は、2021年度アジア研究センター公募型プロジェクト(研究課題名「アクティブマイクログリッドの開発とアジア諸国への展開」)の助成によって実施された。ここに記して感謝の意を表する。

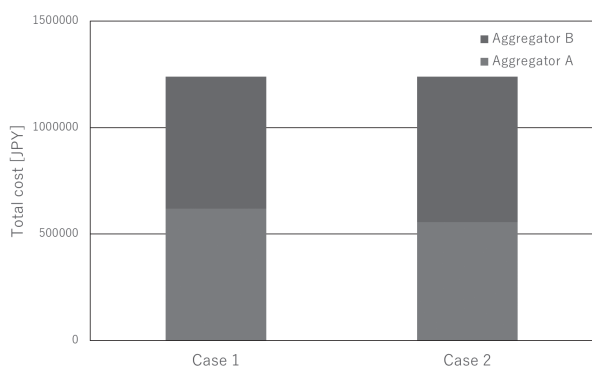
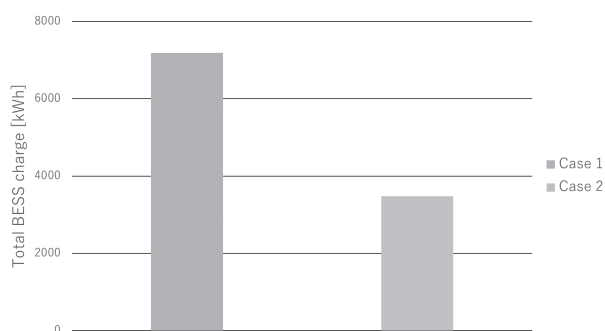
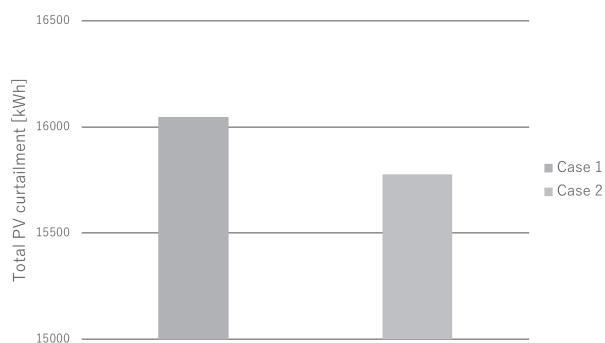


図7 当日運用における24時間の合計コスト (Case 1・2)⁽²⁾



(a) 合計 BESS 充電電力量



(b) 合計 PV 出力抑制量

図8 合計 BESS 充電電力量と合計 PV 出力抑制量⁽²⁾

参考文献

- (1) 益田泰輔：「動く蓄電池」としてEVを停電復旧に利用する緊急時マイクログリッド」電気学会誌, vol. 143, No. 9, pp. 576-579 (2023)
- (2) 兵藤文哉, 佐藤優樹, 益田泰輔, Thavatchai Tayjasanant: 「配電事業者からの情報提供に基づくアグリゲータの太陽光発電・蓄電池計画手法」電気学会論文誌B, vol. 142, No. 12, pp. 594-603 (2022)
- (3) 電気協同研究会：「配電系統における高調波障害防止対策」, 電気共同研究, vol. 37-3 (1981)
- (4) 電気学会 地域供給システムモデル：
https://www.iee.jp/pes/ele_systems/base_model/overview/

「名城インターナショナル研究」投稿規則

1. 投稿資格

投稿資格は、名城大学インターナショナル教育・研究センター（以下インターナショナル教育・研究センター）の所員および研究員、または所員の推薦を受けた者とする。

2. 投稿原稿の種類

投稿原稿はインターナショナル教育・研究センターの目的に即したテーマで、研究論文（招待論文、投稿学術論文）、研究ノート、書評、その他の種類とする。投稿学術論文は所定の査読審査を経て採用された論文が掲載される。

3. 使用言語

使用言語は、和文または英文とする。

4. 執筆要領

原稿の書き方については、「名城インターナショナル研究」執筆要領に従うものとする。

5. 提出先

原稿の提出先はインターナショナル教育・研究センターとする。執筆原稿（英文論文または英文併記の箇所は、英語母語話者による確認が済んでいるもの）が提出された日を受付日とし、査読を踏まえた加筆および修正が反映された再校原稿を受理した日を採択日とする。なお、これらの日付は原稿に記載することができる。

6. 提出期限

年度により定める。

7. 提出方法

「名城インターナショナル研究」の原稿を提出する際は、下記のとおりとする。

(1) インターナショナル教育・研究センター投稿提出票

(2) 執筆原稿提出部数

原稿1部（レイアウト見本用）。また、投稿学術論文の場合は査読用として、写しを2部提出。

(3) 執筆者が入力した原稿全体のWordデータファイル

8. 採否

投稿された学術論文の採否は、インターナショナル教育・研究センター編集委員または編集委員が委嘱した査読者の最低2名の審査に基づき、インターナショナル教育・研究センター編集委員会が決定し、ただちに投稿者に通知する。編集委員会は投稿者に査読者の推薦を求めることができる。また、すべての投稿原稿について、編集委員会は投稿者に原稿の修正を求めることができる。また、原稿は採否にかかわらず返却しない。

9. 校正

投稿原稿の執筆者による校正は、原則として初校のみとする。

10. 原稿の責任と権利

掲載された論文等の内容についての責任は一切著者が負うものとする。また、その著作権は著者に属する。編集出版権はインターナショナル教育・研究センターに属する。

Journal of the Meijo University Center for International Education and Research — Contribution Rules

1. Qualifications of contributors

Contributors should be members of research fellows of Meijo International Education and Research Center, Meijo University (hereinafter referred to as “MIERC”), or researchers recommended by MIERC members.

2. Acceptable types of articles

Types of articles include research papers (invited papers, papers submitted for publication), short notes, review and other articles on topics that are in line with the objectives of MIERC. The journal will publish papers submitted for publication that have been accepted after undergoing the prescribed review process.

3. Acceptable languages

Manuscripts should be written in either Japanese or English.

4. Writing instructions

Manuscripts should meet the requirements specified by “Instructions to Authors”.

5. Where to submit

Manuscripts should be submitted to MIERC. Dates when manuscripts (papers written in English, and/or sections where English phrases/sentences are written together, needs to be checked by a native English speaker) are submitted will be the date of receipt. Dates when refined manuscripts are submitted with all peer review processes including corrections and additions will be the date of acceptance. Please note that these dates can be written on the manuscripts as such.

6. Submissions deadlines

Varies according to the academic year

7. Method of submission

Authors are requested to submit the following items:

(1) MIERC manuscript submission form

(2) Hard copy of the manuscript

One hard copy of the manuscript should be submitted (for a sample layout). For papers submitted for publication, two printed copies of the manuscript should also be submitted for the peer review process.

(3) The entire manuscript in Microsoft Word format

8. Acceptance/Rejection

Acceptance or rejection of submitted papers will be determined by the MIERC Editorial Board after peer review by at least two reviewers comprising journal editors and/or expert(s) commissioned by the journal editor(s). Upon their decision, the result will be notified to the authors. The Editorial Board may request authors to recommend experts as possible reviewers of their papers. For all submissions, the Editorial Board may request authors to make corrections to their manuscripts. Whether accepted or rejected, manuscripts

will not be returned to the authors.

9. Proofreading

In principal, authors will read only the first proofs of their manuscripts.

10. Responsibility and rights to manuscripts

Authors shall bear all responsibility for the contents of their papers, articles, or the like published in the journal. The copyrights to such published manuscripts shall belong to the authors. MIERC shall reserve editing and publishing rights.

● 名城大学国際ナショナル教育・研究センター紀要編集委員

津村 文彦 (外国語学部)

湯川 和典 (薬学部)

Editorial board, Meijo International Education and Research Center

Fumihiko TSUMURA (Faculty of Foreign Studies)

Kazunori YUKAWA (Faculty of Pharmacy)

● 名城大学国際ナショナル教育・研究センター

発行日 / 2024年3月31日

編集・発行 / 名城大学国際ナショナル教育・研究センター

〒468-8502 愛知県天白区塩釜口1-501

TEL:052-838-2529 FAX:052-832-1410

ホームページアドレス : <https://marc.meijo-u.ac.jp/>

Meijo International Education and Research Center
Meijo University, JAPAN

Date of issue / March 31, 2024

Edit / Meijo International Education and Research Center

1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468-8502 JAPAN

TEL:+81-52-838-2529 FAX:+81-52-832-1410

<https://marc.meijo-u.ac.jp/>

<https://marc.meijo-u.ac.jp/>