

# 2022 年度 サステナビリティ研究所

## 事業報告書

Sustainability Research Institute  
Business Report 2022

## 巻 頭 言

2022年度の事業報告書の発刊に際しまして、一言ご挨拶を述べさせていただきます。

本年に入ってwithコロナの方向性が明確になり、5類感染症としての対応に社会が移行したものの、昨年度の大半、我々サステナビリティ研究所の活動は依然新型コロナウイルス対策対応の影響を大きく受け、本来目指した取り組みが限定的になってしまいました。また加えて、昨年2月に開始されたロシアのウクライナ侵攻による戦禍も継続され、人的、物的被害拡大のほか、エネルギー供給バランスが崩れることによって、日本においてもガソリンや電気、ガス価格の高騰の影響を受けるなど、本学並びに本研究所が目指す社会のサステナビリティ・持続可能性に対する危機的な状況が継続されたと言えます。

このような背景の中、サステナビリティ研究所の活動として、昨年度より学生向けに開始した「SDGs活動推進助成制度」で5件の個人及び団体への助成を行い、SDGs活動を増強して行いました。ロシアのウクライナ侵攻に対しても、SDGsが目指す目標のひとつである「平和と公正をすべての人に」を達成すべく、「ウクライナ避難民の支援と人類社会の未来像」と題して本研究所主催で学術講演会を開催いたしました。この講演会は、本学がウクライナからの避難民として受け入れているユリア・メドベージェワさんの研究発表会を兼ね、加えて翌日開催したウクライナ民族楽器バンドウーラの演奏者であるナターシャ・グジーさんのウクライナ支援演奏会とも関連付けて実施したものです。

コロナ禍やウクライナの戦禍があっても、このように社会の情勢に合わせて、社会の持続可能性を目指す活動を実施できたことは、中国の諺にあり私の座右の銘でもある、「人間万事塞翁が馬」に例え、どのような状況でも、志が正しければ災いが福に転化できることを示していると確信するところです。

年度が変わり本年4月末には、本学と鳥取市らが共同提案していた環境省の「脱炭素先行地域プロジェクト」が採択され、本研究所もこのプロジェクトを助成する研究開発をスタートしています。社会全体の脱炭素の動きは、SDGsの目標にも掲げられていると同時に、政府等が主導する「GX (Green Transformation)」と呼ばれる社会全体のしくみを化石燃料から脱却する取り組みであり、研究開発の新しい方向性の胎動が生じてきています。このような本研究所の今後の活動に、ご期待頂ければ幸甚に存じます。

最後になりますが、本学内及び鳥取県、鳥取市、鳥取商工会議所等、SDGs諸活動に日頃よりご協力頂いている皆様に感謝申し上げるとともに、この報告書の成果が、将来社会をより良くする人類の英知の一端になることを期待して、私の巻頭言に代えさせていただきます。

2023年9月吉日  
サステナビリティ研究所長  
田島 正喜

# 目次

ウクライナ避難民の支援と人類社会の未来像 －多民族共生／ごちゃまぜ型の居場所に係わる考察－…………… 2	環境学部環境学科 浅川 滋男
鳥取県若桜町と八頭町の農山地の持続的管理・利用のための超学際的研究…………… 4	環境学部環境学科 加藤 禎久
鳥取ブルーカーボンプロジェクト： 磯焼け対策としてのムラサキウニ駆除活動の効果把握のための基礎調査（報告）…………… 9	環境学部環境学科 太田 太郎 須藤 小雪 上田 啓太
鳥取県における熱中症リスクの評価 －IoT技術を用いた熱中症予測の確立－……………16	環境学部環境学科 重田 祥範 大谷 一貴 佐々木琴奈
中小企業における創発型責任経営の実践 －鳥取県内企業を対象として－……………25	経営学部経営学科 島田 善道 関西大学総合情報学部 中尾悠利子
19世紀前半の英領インドにおける銀貨統一政策と貨幣鑄造額 －英領インドとベンガル－……………26	経営学部経営学科 谷口 謙次
Sentinel-2 衛星データと機械学習を用いた浅海域水深情報の抽出……………35	環境学部環境学科 佐川 龍之

## 研究成果報告

# ウクライナ避難民の支援と人類社会の未来像 －多民族共生／ごちゃまぜ型の居場所に係わる考察－

環境学部環境学科 浅川 滋 男

## 《研究概要》

2022年2月24日以降、ロシアによってなされたウクライナ侵攻はあまりにも衝撃的であり、いったい私たちに何ができるか、を考えさせられた。その結果、チャリティ活動等による避難民窓口への寄付とともに、日本に逃れてきた人々の支援の課題を発見し解決することがまずは必要だとの認識に至る。とくに後者については、海外からの避難民の受け入れが多民族共生社会への第一歩になるという期待を込めている。この場合、避難民を単独に扱うのではなく、障害者・高齢者等と健常者・若者・子供らを融和的に交流させる福祉系「ごちゃまぜのまちづくり」が有効な参照モデルとなりうる。また、在日ウクライナ避難民の大半が東京など大都市に集中するなかで、日本海側の過疎地に定着しつつある人々の意識を「田舎暮らし」の観点から捉えることも目標の一つとした。こうした前提の下、以下の活動に取り組んだ。

- 1) 日本海側過疎地に居住する避難民の取材： 昨年6月、4名のロシア人が出雲に逃れてきた。サンクトペテルブルグの日系企業で雇用された4名のうち1名の男性が、モスクワで反戦デモに参加して拘留され、罰則としてウクライナ前線に派兵される可能性が高まったため、日本人CEOが4名を日本に連れ帰り、知人のつてから出雲を居地とし、IT技術を駆使したウクライナ避難民の支援活動を行っている。来日直後に出雲を訪ね、4人のロシア人や支援者と面談した。続く9月には、彦根（キッチンカー経営）、福井（ランゲージ・アカデミー）、石川（日本航空高校石川）のウクライナ避難民を訪ねた。
- 2) ウクライナ避難民の支援に係る講演会： 10月4日、本学サス研究主催の講演会で浅川が「ウクライナ避難民の居場所を読み解く」を講演した。内容は、おもに1)の成果による。
- 3) 龍岩寺ごちゃまぜBOX：「ごちゃまぜのまちづくり」を実践する就労継続支援A型の社会福祉法人「佛子園」（石川県）と、佛子園をモデルにして「生涯活躍のまち」の拠点整備全国展開する青年海外協力協会J O C Aのスタッフを招聘し、岩美町の龍岩寺でシンポジウムを開催した(11月19日)。

- 4) 和洋折衷・新旧融合型の古民家再生：新潟の限界集落に定住して古民家再生に取り組む旧東ドイツ出身の建築家、カール・ベクス氏の手法にならう新しいスタイルの古民家再生を将来的に実践するため、鳥取市河原町の旧地主住宅T家を実測調査し、分譲型の再生案を提示した。また、新しい古民家再生の在り方を吸収するため、上方往来用瀬、丹波篠山、那覇などを視察した。今後、詳細を詰める。

## 《研究成果》

研究概要の番号にあわせて成果と展望を述べる。

- 1)～2) 出雲のロシア人たちは、田舎は物価や住宅費用が安くて暮らしやすく、ネット上の支援活動にも支障がないとして出雲での生活に肯定的である（鳥取在住のウクライナ人2名も同じ）。日本に逃れてくる日本人は東京以外の日本を知らないの、ドポモガ（dopomoga.jp）という支援サイトでは、地方の良好な仕事や住宅を斡旋中。一方、彦根や北陸では、親類のつてや語学学校・高校のネット上オファーに申請した結果での定着であり、とくに田舎暮らしの指向はなく、将来は大都市での就職に意欲を示した。ネットの情報に接するのはウクライナ都市部の居住者に偏向しがちであり、地方の、とくに農村部に広報が及んでおらず、農民たちが移住避難のための手段や保証人の確保ができない状況とも関係がある。世界有数の農業国ウクライナの農民の多くは、海外への避難ができない状態にあり、かれらにも都市居住者と同じように避難のオファーが出せるようになれば、日本海側の過疎地で農業など第一次産業に従事する移住者が増える可能性がある。
- 3) 佛子園の福祉事業は、障害者等を隔離する旧来の「特養」的介護を否定し、施設の中にジム、プール、食堂、保育園などを設けて障害者と健常者を自由に交流させるものである。それは「支援する側／される側」の二極構造ではなく、両者が入れ替わる双方向の支援である。一方が他方に寄り添うのではなく、双方が寄り合うことで健全な支援が成立する。この方式は、国外からの避難民や移住者にもそのまま応用可能であり、この場合、障害者や避難民の労働（雇用）が交流の鍵を握る。
- 4) T家の再生活用は幕末に遡る土蔵など付属施設に限定し、和洋折衷・新旧融合だけでなく、中国茶館のシノワズリ的フレイバーを備えるものとして提案した。今後、詳細を詰める。

《成果報告書》 浅川（編）『居場所とマイノリティ ブータンとウクライナ、そして過疎社会』ASALAB 報告書第41輯、2023：124p.

# 鳥取県若桜町と八頭町の農山地の持続的管理・利用のための超学際的研究

環境学部環境学科 加藤 禎久

## 1. 研究の背景

本研究の着想は、研究代表者が2021年4月に本学に着任して以来、専門とする緑地計画学およびグリーンインフラ（※）研究分野で思考している、「都市部と農山村部で必要とされるグリーンインフラは異なるのではないか、どういったグリーンインフラが適切なのか」という学術的な疑問から出発している。本研究の構想の背景には、農山村部の「緑は豊富だが価値が低い・管理する人が不足している」という課題への問題意識がある。農山地には、生態系サービス分類でいえば食料生産や木材の供給などの供給サービスをはじめとする多面的な機能が期待できるが、担い手不足や高齢化により、本来の多様な機能を発揮できなくなっている。この状況は、手入れが行き届いていない人工林、耕作放棄地、低・未利用地の増加といった形で現れている。この問題は、人口減少、少子高齢化が進んでいる農山村部で特に顕著である。

※グリーンインフラとは「自然の持つ多機能性やしなやかな回復能力などの特性を賢く活用するインフラ整備・国土の管理手法の新しい概念」である（研究代表者が2015年の設立当初から参画しているグリーンインフラ研究会による）。

管理作業量の算出については、これまで都市緑地・森林や里山の管理作業量の算出等の研究があるが、事例の蓄積や地域特性の差異を比較分析する必要があるため、本研究のような中国地方の事例が求められている。生態系サービス評価は国内外で多様な研究が行われているが、統合的機能評価や文化サービスの定量化に関する研究が十分とは言えない。本研究では経済学などの視点を取り入れることにより、農山地の多機能性の総合評価にも挑戦する。

## 2. 研究目的

本研究ではこうした地方の二次的自然の管理と機能評価という課題を、林野率が8割を超える典型的な中山間地域である鳥取県若桜町と、隣接する八頭町を対象に考える（表1）。研究目的は、全域の森林と農地を対象に、(1) 農山地の維持管理に要する作業量（以下、管理作業量）および農山地の有する多面的機能（生態系サービス）を定量化、また、GIS（地理情報システム）を用いて可視化する、さらに、(2) シナリオ分析を用いて、2050年の地域の将来像を実現するための異なる政策・行動シナリオごとのコスト（管理作業量）とベネフィット（生態系サービス）を全体として勘定し分析することで、人口減少下で現実的なベストバランスを導き出すことである。バックキャストによるいくつかのシナリオごとに、それを実現するためのコスト（管理作業量）とベネフィット（生態系サービス）を考え、定量的・空間的に分析する。

### 3. 申請当初の研究計画

研究計画の内訳は、①緑地管理GISベースマップの構築、②管理作業量の定量化、③生態系サービスの定量化、④シナリオ分析である。研究期間は、①～④のすべてを完了するのに3年間を想定している。研究手法は、共同研究者の川口ら（2019）が開発した手法を応用し、本研究独自の手法を加える。本報告では、1年目の研究成果を報告する。

表1 鳥取県若桜町と八頭町の特徴

自治体	人口（人）	高齢化率（%）	林野率（%）	面積（km <sup>2</sup> ）
若桜町	2,864	48.6	93	199.3
八頭町	15,937	36.3	80	206.7

### 4. 研究手法

#### 4. 1. 土地利用図の作成

令和4年度は、今後の生態系サービス分析や地域の将来像の基盤になるGIS（地理情報システム）ベースマップの構築を、衛星画像判読の専門的技術をもった環境コンサルティング会社と連携して行った。鳥取県若桜町および八頭町全域の土地利用図を作成した。

##### 4. 1. 1. 使用した衛星画像および公開情報

土地利用図は着葉期および紅葉期の衛星画像判読により作成した。着葉期の衛星画像としてSPOT 6衛星画像（2020年6月23日撮影、PMS\_N-パンシャープン1.5mオルソ補正）を、紅葉期の衛星画像としてSPOT7衛星画像（2021年11月11日撮影、PMS\_N-パンシャープン1.5mオルソ補正）を使用した。使用した衛星画像を図1に示す。また、判読の補助として、インターネット上で公開されている農地の区画情報（筆ポリゴン）や自然環境調査Web-GIS「植生調査（1/2.5万）」等のGISデータを使用した。これらのデータをGISソフト上で衛星画像と重ねあわせ、利用状況や境界に大きな変化が見られない場合はその境界に準拠することとした。

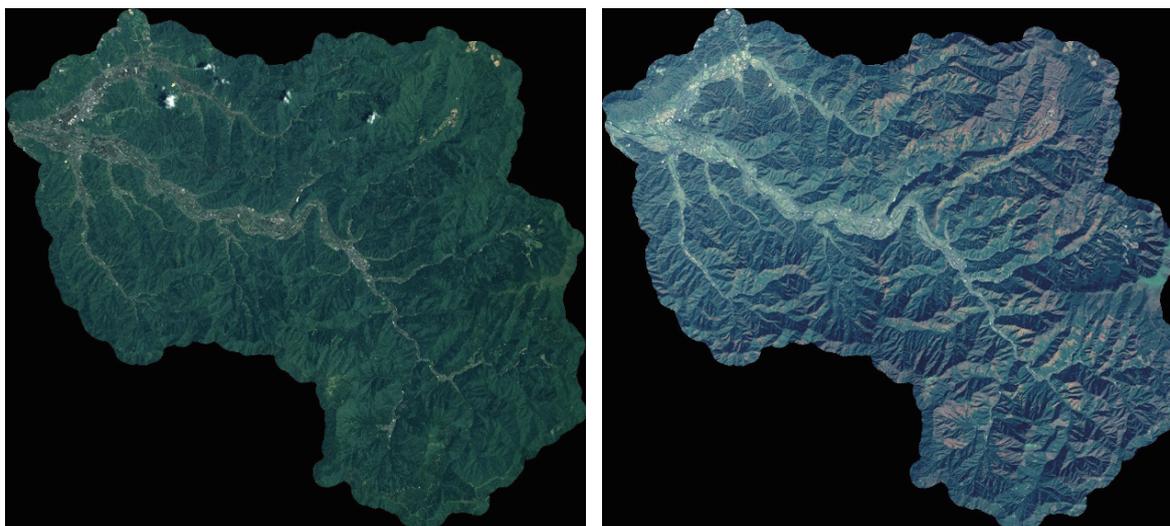


図1 判読に使用した衛星画像（着葉期：左、紅葉期：右）

#### 4. 1. 2. 現地確認調査

衛星画像や公開情報を基に素判読を実施し、土地利用状況が不明であった箇所について現地確認調査を実施した。

#### 4. 1. 3. 土地利用図の判読および土地利用図の作成

土地利用図の凡例は土地利用細分メッシュ（国土地理院、国土数値情報（土地利用細分メッシュ））で使用されている土地利用種別に準拠した。土地利用図の凡例を表2に示す。作成に当たっては、まず、最小図示単位5mのポリゴンデータを作成し、GISソフト上で空間分解能5mのメッシュデータに変換した。

表2 土地利用図の凡例

コード	種別	定義
1	田	湿田・乾田・沼田・蓮田及び田とする。
2	その他の農用地	麦・陸稲・野菜・草地・芝地・りんご・梨・桃・ブドウ・茶・桐・はぜ・こうぞ・しゅろ等を栽培する土地とする。
3	森林	多年生植物の密生している地域とする。
4	荒地	しの地・荒地・がけ・岩・万年雪・湿地・採鉱地等で旧土地利用データが荒地であるところとする。がけ崩れ、土砂崩れ、空地、道路脇の空き地（放置されたような場所）もこれに含める。
5	建物用地	住宅地・市街地等で建物が密集しているところとする。
6	道路	道路などで、面的に捉えられるものとする。
7	鉄道	鉄道・操車場などで、面的にとらえられるものとする。
8	その他の用地	運動競技場、空港、競馬場・野球場・学校港湾地区・人工造成地の空地等とする。面（植生なし）、太陽光発電、鉄塔の土台、作業道脇の空き地（目的がありそうな場所）、駐車場、公園、広場、学校の敷地、墓地などもこれに含める。
9	河川地及び湖沼	人工湖・自然湖・池・養魚場等で平水時に常に水を湛えているところ及び河川・河川区域の河川敷とする。
10	海浜	海岸に接する砂、れき、岩の区域とする。
11	海水域	隠顕岩、干潟、シーパースも海に含める。
12	ゴルフ場	ゴルフ場のゴルフコースの集まっている部分のフェアウェイ及びラフの外側と森林の境目を境界とする。

#### 4. 2. 植生図の作成

本研究では、農地と森林に着目し、詳しく区分した図を「植生図」と呼称している。植生図も土地利用図と同様に衛星画像判読により作成した。対象地域の植生は景観レベルで判読し、空間分解能は5mである。

#### 5. GISベースマップの作成結果

作成した土地利用図と凡例は以下のとおりである（図2）。各土地利用種別（凡例）の面積と割合を表3に示す。若桜町・八頭町の88.3%を森林、3.5%を田、1.9%をその他の農用地が占めていた。なお、若桜町・八頭町は海に面していないので、海浜、海水域は存在しない。

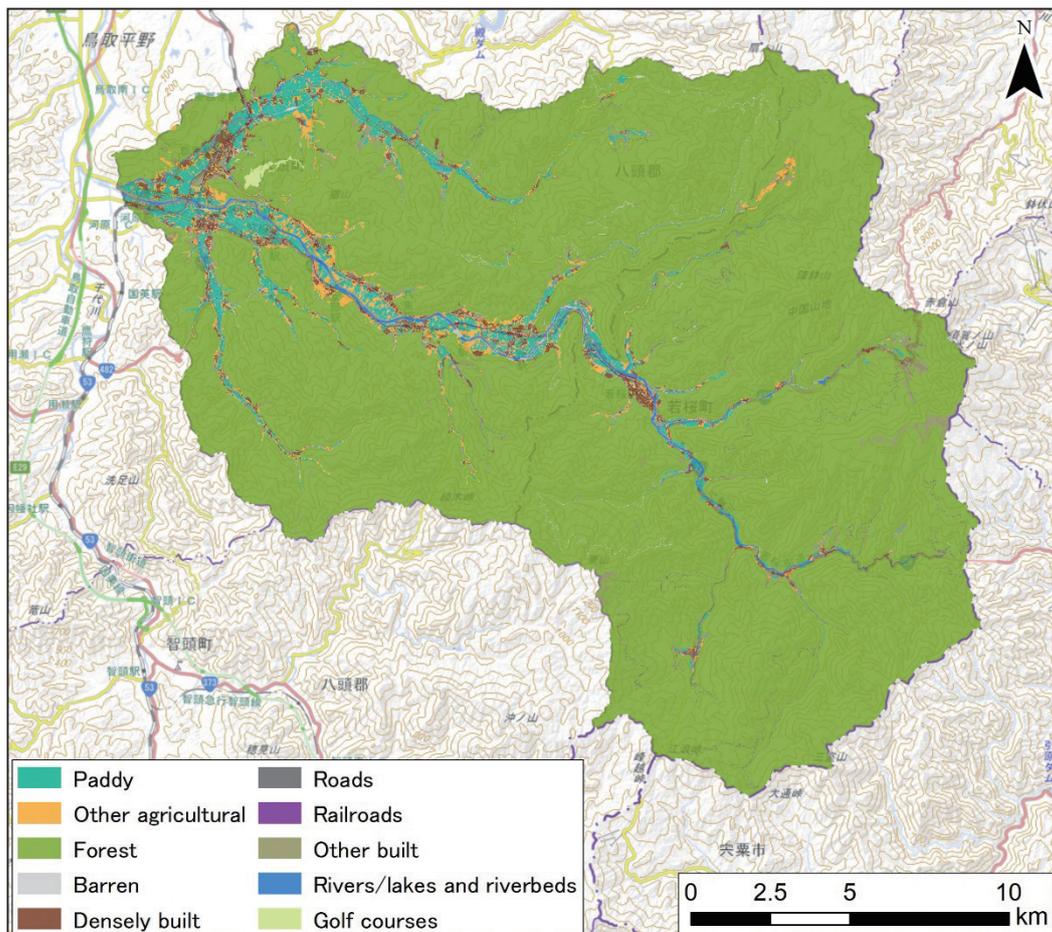


図2 鳥取県若桜町・八頭町の土地利用図

表3 土地利用図の凡例の面積とその割合

凡例	面積 (ha)	割合
1 田	1439.5	3.5%
2 その他の農用地	788.5	1.9%
3 森林	35849.8	88.3%
4 荒地	432.3	1.1%
5 建物用地	581.8	1.4%
6 道路	226.9	0.6%
7 鉄道	30.4	0.1%
8 その他の用地	879.0	2.2%
9 河川地及び湖沼	309.5	0.8%
10 海浜	0.0	0.0%
11 海水域	0.0	0.0%
12 ゴルフ場	42.2	0.1%
合計	40579.9	

## 6. ランドスケープ構造の分析および解像度の変化がランドスケープ構造指標に及ぼす影響

作成した土地利用図の空間構造を代表的なランドスケープ構造指標 (landscape metrics) で分析し、ランドスケープ構造指標が異なる解像度 (空間分解能) 下でどのように変化するかの解析を行った。本研究では、解像度を変えた (5、10、30、50、100 m) 同一の土地利用地図を用いて、6つのクラスレベルのランドスケープ指標と2つの景観レベルのランドスケープ指標の値の変化を分析した。その結果、解像度の変化がランドスケープ構造指標に及ぼす影響は、ランドスケープ指標と指標内の土地利用種別の面積割合によって異なることが判明した。結果の詳細は現在、学術雑誌に投稿中であるため、本報告では概要に留める。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたって、アジア航測株式会社の本部星氏に協力をいただいた。

## 参考文献

- [1] 川口暢子、林希一郎、藤井実：都市緑地管理活動に伴う投入作業量とCO<sub>2</sub>排出量の特徴 一名古屋市での事例研究一、環境共生、35(1)：18-29、2019
- [2] 国土地理院：国土数値情報ダウンロードサイト、国土数値情報、土地利用細分メッシュ、<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>、最終確認2023年4月28日

# 鳥取ブルーカーボンプロジェクト：磯焼け対策としての ムラサキウニ駆除活動の効果把握のための基礎調査（報告）

環境学部環境学科 太田 太郎  
須藤 小雪\*・上田 啓太\*\*

## 1. はじめに

藻場（海藻群落）が有する多面的な機能は、沿岸海域にとどまらず沖合海域にまで及ぶ海洋生態系全体の健全性の維持に重要な役割を果たしている。中でも、最も着目されている機能が、「海のゆりかご」としての機能である。海藻自体がアワビ類やサザエ*Turbo cornutus*などの有用植食貝類の餌料として利用されるほか（殖田・岡田 1939、山川・林 2004）、海藻に小型生物が付着することで、藻場に蛸集したメバル*Sebastes inermis*などの有用魚類への餌料供給機能を有している（畑中・飯塚 1962）。さらに、アオリイカ*Sepioteuthis lessoniana*などの沿岸性の有用水産資源だけでなく（上田ら 1995）、ハタハタなど成魚期に沖合の水深200m前後の海域に分布する有用魚類も藻場を産卵場として利用している（落合・田中 1984）。このように、多様で豊かな水産資源を育む場として、藻場は極めて重要な役割を果たしている。

また、海藻類の持つ光合成機能は極めて高く、浅海域では植物プランクトンの光合成能力を上回るとの試算もある（堀 2017）。光合成によって二酸化炭素を吸収して酸素を生産すると共に、藻体の成長に伴う栄養塩の吸収、蓄積によって周辺の海域の水質を浄化し、富栄養化の防止にも寄与している。この大気中の二酸化炭素を海洋生態系に取り込む機能、すなわち「ブルーカーボン機能」の地球温暖化対策としての有用性が、近年世界的に注目を浴びている。

一方で、我が国沿岸域では、藻場の衰退（磯焼け）が問題となっている。磯焼けの原因は温暖化による海水温の上昇による枯死、さらには生態系の攪乱による植食性動物の著しい増加などが主な要因と考えられている（水産庁 2021）。地球温暖化により磯焼けが進行すると、磯焼けの進行によりブルーカーボン機能も低下し、温暖化を加速するという悪循環のシナリオも想定され、対策を講じる必要性が生じている。

ところで、著者らは、「公立鳥取環境大学むらなかキャンパス」を拠点とし、鳥取県東部に位置する大谷海岸（鳥取県岩美郡岩美町）において、藻場の定性的なモニタリングを継続しており（太田ら 2018、2020）、さらに2021年度からは同海岸における海藻類の主要食害生物であるムラサキウニの年齢と成長の関係など、個体数動態を推定する上で必要な基礎生態に関する調査に着手した。一方、漁業関係者から、県内各地先の海でムラサキウニの増加により藻場の荒廃が進んでいるとの声が聞かれ、2022年度より漁業関係者および市民団体の連携による大規模なムラサキウニ駆除活動を展開する事業

---

\* 公立鳥取環境大学環境学部環境学科 2021年度卒業生

\*\* 公立鳥取環境大学環境学部環境学科 2022年度卒業生

が、鳥取県（水産振興局）により予算化され（鳥取県公式ホームページ（水産振興局漁業調整課）、ウニ駆除・養殖による鳥取の豊かな藻場再生プロジェクト、[http://db.pref.tottori.jp/yosan/R4Yosan\\_Koukai.nsf/4e3186b0e6a7e8b4492574810035b17f/3e7f239dela3857f492587d80037b4be?OpenDocument](http://db.pref.tottori.jp/yosan/R4Yosan_Koukai.nsf/4e3186b0e6a7e8b4492574810035b17f/3e7f239dela3857f492587d80037b4be?OpenDocument)）、大谷海岸でも駆除活動が行われることとなった。

このような取り組みを持続的なものとするために必要なことが、効果把握調査である。ウニ類の駆除効果を把握する最も単純な手法は、駆除海域における潜水目視計数による分布密度の推定である。しかしながら、ウニ類はコンクリートブロックが積まれた潜堤や、海底地形の複雑な磯場に生息し、石やブロックの裏など見えにくいところにも生息していることから、実際には目視計数による密度把握は容易ではない。そこで、本研究では大谷海岸におけるムラサキウニの駆除海域において、定期的なムラサキウニのサンプリングを実施し、口器中間骨に形成される年輪を計数し、年齢と成長の関係を調べる。得られた年齢-成長関係式をベースに、サイズ組成データを年齢組成に変換し、駆除区と非駆除区に分布するムラサキウニの年齢組成の違いから、活動1回当たりの駆除率を推定する。さらに、漁業者の駆除実績の推移を基に水産資源学的解析を行い、中長期的な駆除率についても推定する。ムラサキウニ駆除活動は鳥取県内各地で展開されることから、その効果把握のモニタリング手法は簡易なものでなければ継続が困難となる。本研究の結果より得られるムラサキウニの成長や成熟に関する基本パラメータを用い、ムラサキウニの駆除活動についてより簡易な効果把握手法を提示し、県内各地の駆除活動のモニタリング体制の構築を目指すものである。

本稿では、2022年度の調査実施状況を報告するとともに、当該調査に関する啓発活動も行ったので合わせて報告する。

## 2. 大谷海岸におけるムラサキウニの駆除活動

大谷海岸は鳥取県岩美郡岩美町大谷に位置し、北東側の網代漁港の岸壁、南西側の駟馳山に囲まれた海岸である。網代漁港の岸壁の基部から南西方向に約400m延びる砂浜海岸と、駟馳山の麓から広がる礫浜が隣接しており、砂浜海岸の沖合約200mの位置にはコンクリートブロック製の潜堤が2つある。この潜堤と礫浜から続く転石帯に藻場が形成されている。ムラサキウニの駆除活動は2022年6月から10月にかけて、東側の潜堤の10×80mの範囲で実施した（図1）。

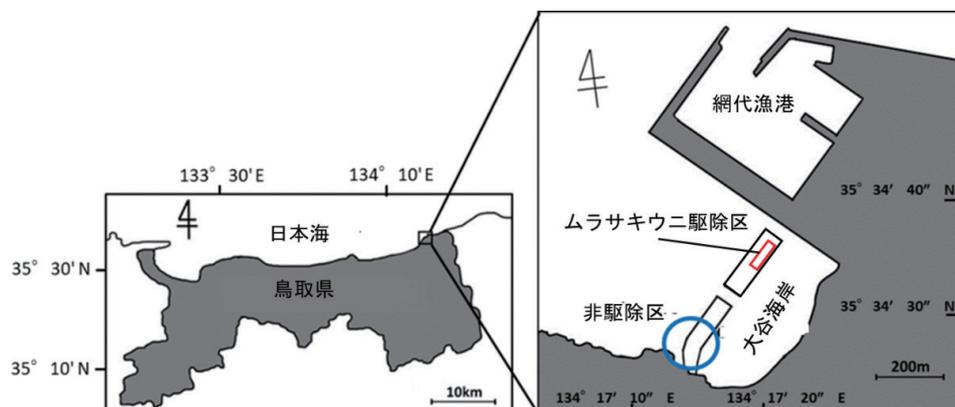


図1 大谷海岸における駆除区および非駆除区の位置

表1 大谷海岸におけるムラサキウニの駆除活動の実績

日付	駆除数(個体)	累積駆除数(個体)	参加人数(人)
2022/6/10	不明	—	17
2022/7/1	2377	2377	18
2022/7/25	2986	5363	19
2022/8/22	2107	7470	19
2022/9/12	1187	8657	19
2022/10/1	1038	9695	20



図2 大谷海岸におけるムラサキウニの駆除の様子(2022年7月25日、ムラサキウニの駆除はシュノーケリングにて行い、金属製のバールを用いてウニを叩き割る)

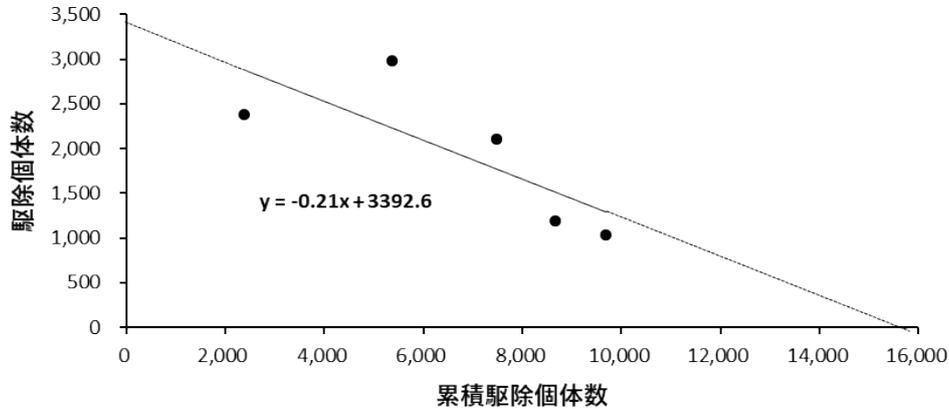


図3 大谷海岸におけるムラサキウニの累積駆除個体数と1回当たりの駆除数の関係(回帰直線を延長したx軸との交点が推定初期資源個体数となる)

駆除活動の実績を表1に、様子を図2に示す。なお、2022年6月10日については駆除数が把握されていない。1回当たりの活動の参加人数は17～20人で、活動時間は概ね1.5から2時間程度であった。7月1日から10月1日の駆除活動で合計9,695個体が駆除され、1回当たりの駆除数は徐々に減少する傾向が確認された。横(x)軸に累計駆除数、縦(y)軸に1回当たりの駆除数を取った散布図を作成し(図3)、両者の関係について直線で回帰したところ、式1が得られた。

$$y = -0.2x + 3393.6 \cdots \text{(式1)}$$

式1から除去法(Delury 1947)により駆除区における初期資源個体数を求めたところ、1回当たりの駆除割合は約20%、初期資源個体数は15,662個体と推定された。

### 3. 大谷海岸におけるムラサキウニの採集調査の実績

駆除区に加え、非駆除区（対照区）として南西側の潜堤と礫浜から続く転石帯を調査区に設定した（図1）。駆除区、非駆除区の2箇所において、スキューバ潜水によりムラサキウニの採集を行った。採集は2名で1箇所につき30分ずつ行い、2022年4月17日、5月21日、6月27日、7月29日、8月30日に行った。なお、11月8日にも調査を実施したが、荒天のため駆除区での採集が行えなかった。駆除区、非駆除区の水深は1～3mであった。

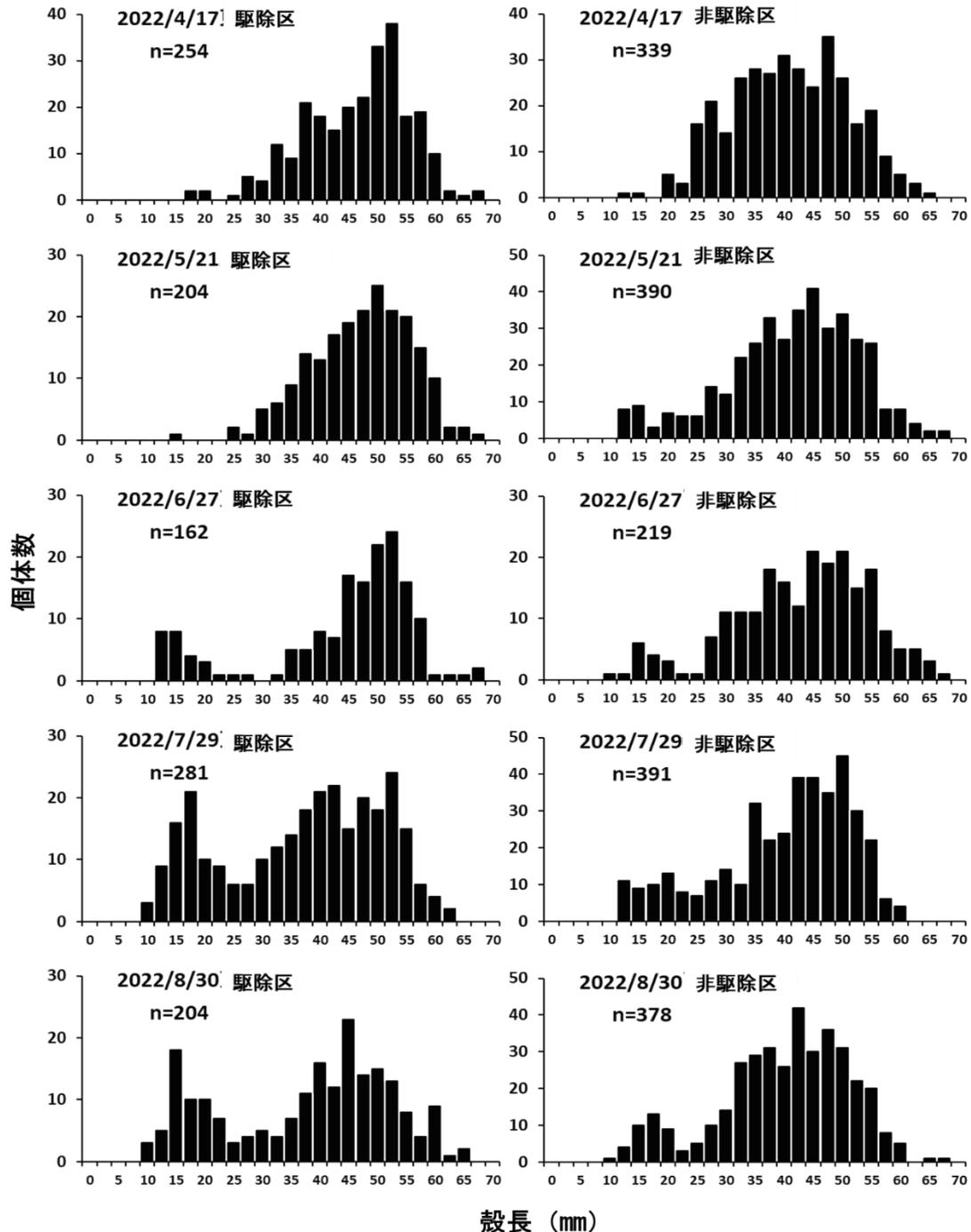


図4 大谷海岸におけるムラサキウニの駆除区と非駆除区の殻長組成

ムラサキウニの採集個体数は、駆除区では4月に254個体、5月に204個体、6月に162個体、7月に281個体、8月に204個体、非駆除区では4月に339個体、5月に390個体、6月に219個体、7月に391個体、8月に378個体であった（図4）。本調査で採集した全ての個体のうち最小の個体は6.7mm、最大の個体は66.9mmであった。駆除区および非駆除区とも、調査期間を通じ40～50mm付近の最頻値を持つ群が採集された。加えて、6月以降は15mm前後に最頻値を持つ小型群が出現した。小型群の割合は非駆除区よりも、駆除区の方が高い傾向が認められた。

採集したムラサキウニのうち合計421個体について、口器中間骨の薄片標本を作製し、このうち、輪紋の観察が可能だった382個体の年齢査定を行った（図5）。今後、さらに年齢査定の分析個体数を増やし、年齢と成長の関係式を求め、殻長組成のデータについて年齢組成に変換し、駆除区と非駆除区の組成の違いから駆除率を推定する予定である。

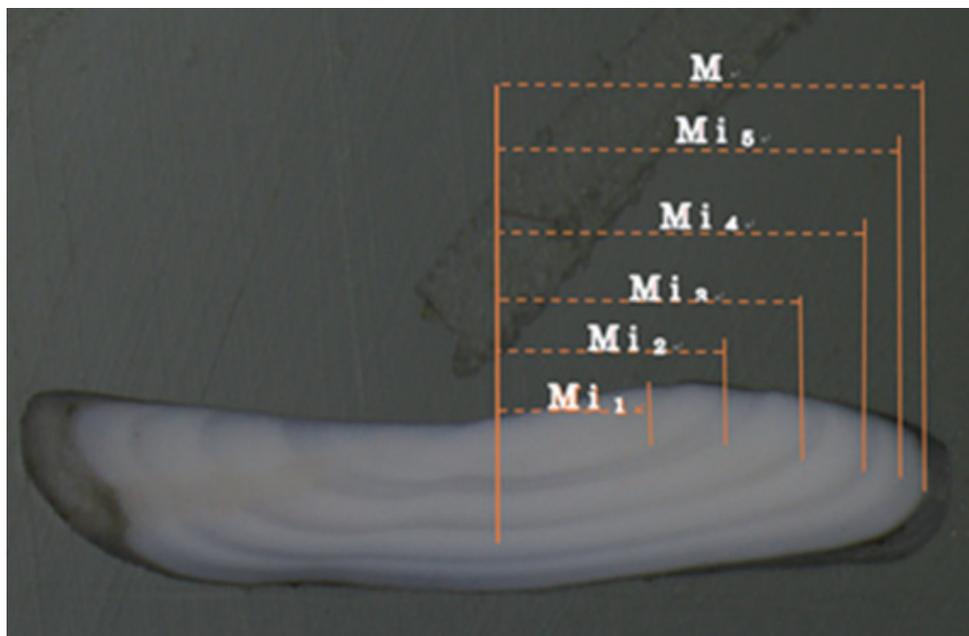


図5 ムラサキウニの口器中間骨の薄片標本（年輪）

#### 4. 藻場再生のためのウニ駆除事業に関する啓発活動

当該研究に係る研究成果の公表および啓発活動を以下の通り実施した。

##### 4. 1. 鳥取ブルーカーボンプロジェクトキックオフ！『とっとりの海のごちそう祭』への参画

2022年9月10日に鳥取県漁業協同組合賀露本所の市場荷さばき施設で開催された『とっとりの海のごちそう祭』において、地元漁業関係者と共に申請者である太田がトークセッションに参加した（<https://tottori-bluecarbon.jp/cat-project02/122/>）。セッションでは、鳥取の藻場の現状、さらにはムラサキウニの駆除活動の意義について話をした。また、このイベントにおいて、ワークショップコーナー「海藻を使ったハーバリウム体験」を太田研究室の学生が企画、運営した。ワークショップでは地域の子供達を中心に150名が体験し、ハーバリウム作りを通して藻場の重要性を学んだ（図6）。



図6 『ととりの海のごちそう祭』の様子

#### 4. 2. NHK鳥取制作「海底で事件です!～ムラサキウニの大量発生に挑む～」に出演

鳥取の海で起きているムラサキウニの大量発生と、それに伴う藻場の荒廃について特集した「さんいんスペシャル 海底で事件です!～ムラサキウニの大量発生に挑む～（初回放送日: 2022年10月7日）」に出演した(<https://www.kankyo-u.ac.jp/tuesreport/2022nendo/20220930/>)。この番組において、本研究により実施しているムラサキウニの駆除活動の効果把握調査について紹介した。

#### 4. 3. 水産研究実践活動報告会での研究成果の報告

鳥取県水産振興課の主催で開催された「第23回水産研究・実践活動報告会（令和5年3月3日 於 倉吉市）」において、研究成果を報告した(<http://db.pref.tottori.jp/pressrelease.nsf/webview/F4A8A881BC13C18D492589640003918C?OpenDocument>)。漁業関係者からは、「駆除活動について、実際に数値で効果を示してもらえることはありがたい」「当該研究で得られた結果をもとに、他地域での効果把握にも応用できる」といった意見があった。

#### 5. 今後の展開

2022年度の調査によりムラサキウニの駆除活動が個体数の減少に及ぼす影響を数値的に示すことが出来た。しかしながら、その効果が長期的に持続するかについては検証できていない。2023年度も引き続き採集調査を行い、活動から1年以上経過しても駆除の効果（ムラサキウニの個体数密度の減少）が維持されているのかを検証する必要がある。また、2023年度に新たな駆除区が設定される予定もあり、前年と同様の調査を行い、再現データを取得する。さらに、ムラサキウニの駆除により個体数密度を減らすことが、本当に藻場の再生に寄与するのかについて、海外での検証事例はあるものの (Valentine and Johnson 2005)、我が国における知見は断片的であり、山陰周辺海域で検証した事例はほとんどない。2022年度の駆除区域における藻場の繁茂状況についてモニタリングを行う必要がある。

本研究の最終的な目的は、ムラサキウニの駆除活動などの藻場再生事業をカーボンクレジット化することにある。鳥取県における藻場の再生活動は全国でも先駆的であり、ムラサキウニの駆除活動についても全県的に大規模に実施する事例はなく、このような調査研究は他の海域では実施できない。これまで藻場の再生活動は、漁業者のための活動（アワビやサザエの餌場、魚類など水産資源の育成場としての機能）として行われ、この活動資金については行政の補助金に依存する部分が大きかった。藻場の再生活動による二酸化炭素吸収能を科学的に評価する事で、活動の社会的価値が高まり、クレジット化も現実味を帯びるものと考えられる。売るための魚を育てる「漁場環境づくりと」して取り組まれてきた藻場の再生活動自体が商品化されれば、漁業者、漁村の新たな価値の創造に繋がり、現在停滞傾向にある水産業の成長産業化にも大きく寄与することが期待される。

## 参考文献

- [1] DeLury DB (1947) On the estimation of biological populations. *Biometrics*, 3, 145-167
- [2] 畑中正吉・飯塚景記 (1962) モ場の魚の群集生態学的研究-II モ場周辺の魚群集。日本水産学会誌, 28, 155-161
- [3] 堀 正和(2017) ブルーカーボンとはー海洋が有する二酸化炭素の隔離・貯留機能の特徴。「ブルーカーボン 浅海におけるCO<sub>2</sub>隔離・貯留とその活用(堀 正和・桑江朝比呂 編)」地人書館, 東京。1-32
- [4] 太田太郎・森田貴斗・吉永郁生 (2018) 鳥取県東部大谷海岸における藻場の季節消長と魚類相把握の試み。地域イノベーション研究, 5, 24-33
- [5] 太田太郎・吉永郁生・大河内美帆 (2020) 鳥取県東部大谷海岸における2019年春季から秋季の藻場の現状。地域イノベーション研究, 7, 31-37
- [6] 落合 明・田中 克 (1984) ハタハタ。「新版 魚類学(下)」恒星社厚生閣, 東京。773-780
- [7] 水産庁 (2021) 第3章 磯焼けとは。「磯焼け対策ガイドライン」水産庁, 東京。18-35
- [8] 殖田三郎・岡田喜一 (1939) 巻貝類の天然餌料に関する研究 I. 鮑。日本水産学会誌, 8, 51-56
- [9] 上田幸男・北角 至・瀬川 進・天真正勝・城 泰彦・福永 稔・寒川友華 (1995) アオリイカの産卵場所および卵塊付着構造物の選択性。日本水産工学会誌, 31, 189-194
- [10] Valentine, J.P., and Johnson, C.R. (2005) Persistence of the exotic kelp *Undaria pinnatifida* does not depend on sea urchin grazing. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 285, 43-55
- [11] 山川 紘・林 育夫(2004) 新潟県粟島におけるサザエの消化管内容物と海藻植生の関係。水産増殖, 52, 57-63

# 鳥取県における熱中症リスクの評価 -IoT技術を用いた熱中症予測の確立-

環境学部環境学科 重田 祥 範  
大谷 一貴・佐々木 琴奈

## 1. はじめに

昨今、地球温暖化やヒートアイランド現象の影響で、夏季日中の気温上昇が懸念されている。日本の夏、特に8月の平均気温は、1898年（明治31年）以降、100年あたり1.13℃の割合で上昇している（文部科学省・気象庁、2020）。この気温上昇に伴い、熱帯夜（日最低気温 $\geq 25.0^{\circ}\text{C}$ ）や猛暑日（日最高気温 $\geq 35.0^{\circ}\text{C}$ ）、真夏日（日最高気温 $\geq 30.0^{\circ}\text{C}$ ）の日数が増加している（文部科学省・気象庁、2020）。2018年7月28日には、埼玉県熊谷市で日最高気温が $41.1^{\circ}\text{C}$ を記録し、2020年8月17日に静岡県浜松市で $41.1^{\circ}\text{C}$ 、同年9月3日には新潟県三条市で $40.4^{\circ}\text{C}$ と、様々な地域で日中の気温が $40^{\circ}\text{C}$ 以上となった。2020年8月は浜松市以外にも全国各地で $40^{\circ}\text{C}$ を超える気温が記録されるなど、近年は日中における気温上昇が目立っている。

このような厳しい暑熱環境が継続した場合には、我々の身体に不調を引き起こす。その最たる例が熱中症である。2013年から2022年の熱中症による救急搬送人員数（総務省）のデータを見てみると、2015年から2017年までは減少傾向がみられ20000人を下回っていた。しかし、2018年以降は搬送数が著しく増加しており、2022年には60000人を超えるなど、決して軽視できないものとなってきている（第1図）。そのため、熱中症に関する研究は多岐にわたりおこなわれてきた。例えば、人口動態統計や救急搬送データ、気象庁の観測データに基づき、熱中症死亡者数と熱帯夜・真夏日などの気象統計項目や熱中症発症リスクと日最高気温の関係性が明らかにされてきた（中井、1993；入來、2000）。南（2004）では、現在厳しい暑熱期間が長引く傾向にあることや今後気候の高温化に拍車がかかっていくことにより、熱中症患者のさらなる増加が予想されている。そのため、今後の暑熱環境の悪化にともなう熱中症リスクに備え、夏季猛暑下の気象情報を把握し、適切な対策を取っていくことが必要となってくる。

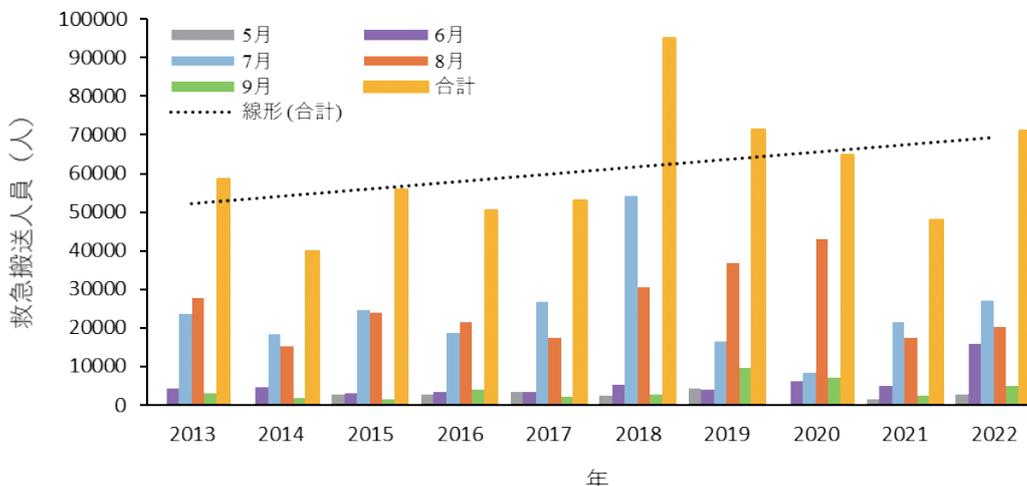


図1 全国の熱中症救急搬送人員数の経年変化（総務省の統計データより作成）

## 2. 暑熱障害

### 2. 1. 熱中症

熱中症とは、暑熱障害の総称である。症状により、熱失神、熱けいれん、熱疲労、熱射病（日射病）などの病型で分類される。人間の体は、運動や内臓の働きにより常に熱エネルギーが生み出される。そのため、暑熱環境下でも異常な体温上昇を抑えるための、効率的な体温調節機能が備わっている。体温が上昇すると主に2つの体温調節方法により平熱が保たれる。1つは、皮膚表面からの熱放散である。高温環境にさらされると自律神経を介して体表面付近の末梢血管が拡張する。血管が拡張することで、血流量が増加するため外気へと熱が放散され、体温低下を図ることができる。2つ目は発汗である。汗の蒸発にともない、気化熱により体温が低下する。平時であれば、これらの調節機能により体温が維持されるが、熱産生量と熱放散量のバランスが崩れると体温は急激に上昇する。その状態が熱中症である。多量の発汗により体水分量が減少すると、血流量の減少により意識障害が生じる。また、高体温は脳や肝臓、腎臓の機能障害にもつながる。そのため、適切な予防法及び処置の周知が重要とされている（環境省、2018）。

一般的に、脱水状態にある人、高齢者、乳幼児、障害を患っている人、肥満の人、過度の衣服を着ている人、普段から運動をしていない人、暑さに慣れていない人、病気の人、体調の悪い人等の条件に当てはまる人が熱中症になりやすいとされている（環境省、2018）。乳幼児と高齢者の熱中症リスクについては、成人に比べ劣った熱放散特性や暑熱順化の影響が指摘されている（井上、2004）。図2に2011年から2020年までの8月の年齢区分別搬送割合を示す。過去10年全てにおいて65歳以上の高齢者の搬送割合が高くなっている。上記のような問題から、高齢者を対象とし熱中症の認知度を調査した研究に注目が集まっている（例えば、柴田ほか、2010）。一方、少年（7歳以上18歳未満）やそれ未満の年齢区分は合計しても20%を超えていない。これは、教育機関等の健康管理により発症リスクが抑止されているものと考えられる。

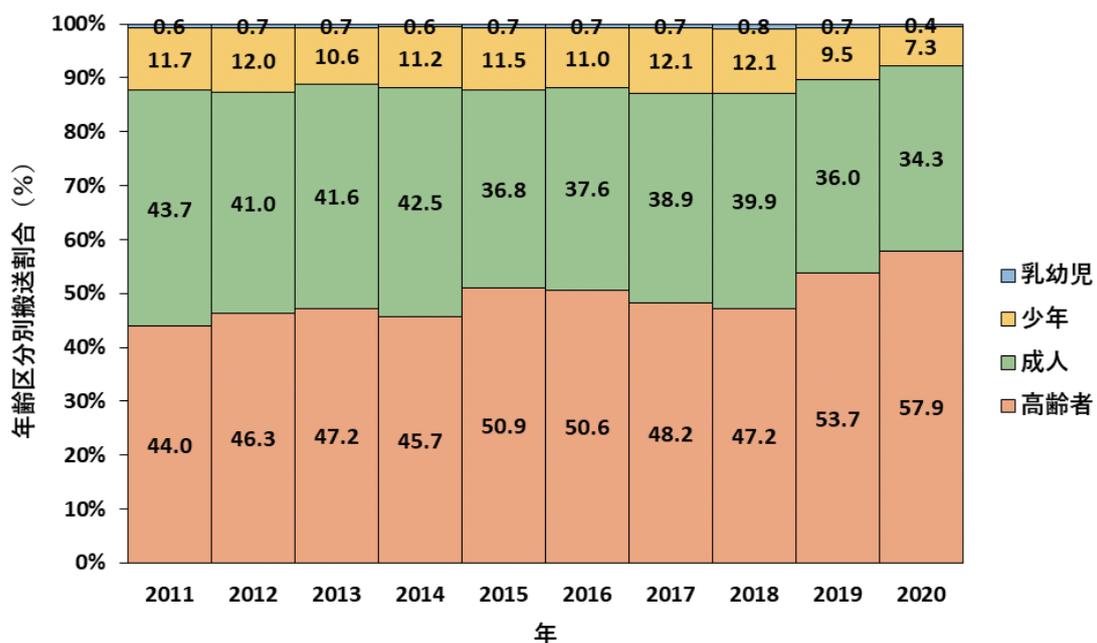


図2 年齢区分別搬送割合（2011～2020年8月統計データ）数値の単位は%

## 2. 2. WBGT

人が感じる温熱感覚は、気温だけでなく相対湿度、風速、放射を含む気象条件に大きく左右される。人間の身体は、高温下にさらされると、発汗や不感蒸泄（肺や皮膚からの蒸発）、末梢血管の拡張による血流調節などの体温調節機能がはたらく。この機能により皮膚温度、中枢神経温度、体深部温度が決まり、その過程で人は温熱感覚を覚えることになる。このような温熱感覚や生理現象を数値化し、表現したものが温熱指標である（大橋、2010）。

WBGT（Wet-bulb Globe Temperature：湿球黒球温度）は、軍隊訓練において熱中症予防のため Yaglou and Minard（1957）によって考案された熱中症発症の可能性の大小を評価する指標の一つである。この指標は1982年に有効な指針であることが認められISO-7243に規定された。それ以降は、日本においても労働環境や教育現場など、さまざまな場面で用いられるようになった（福井、2018）。WBGTは、人体の熱収支に大きな影響を与える気温、相対湿度、輻射熱などの要素を考慮した指標であり、以下の定義式（1）・（2）より算出される。（1）式は日中、（2）式は夜間の算出に用いる。なお、ここで $T_w$ は湿球温度、 $T_g$ は黒球温度、 $T_a$ は乾球温度を示しており、単位はすべて℃である。

$$WBGT_d = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (1)$$

$$WBGT_n = 0.7 T_w + 0.3 T_g \quad (2)$$

日本において、日本生気象学会や日本体育協会などが熱中症予防にWBGTを用いてそれぞれの指針を公開している。その中で日本生気象学会は、日常生活における熱中症予防指針（第1表）にて4段階の温度基準を設定し暑熱リスクを評価している。一方、日本スポーツ協会は熱中症予防運動指針を公表している（表2）。そのような中、環境省では2006年より「環境省熱中症予防情報サイト」を開設し、熱中症の知識やメカニズムを説明するほか、WBGTを暑さ指数と称し、全国の暑さ指数の予測値や実況値の情報提供をおこなっている。

WBGTに関する既往研究も種々存在し、WBGTの数値は日最高気温より熱中症患者数と指数関数的な相関が明瞭にあらわれることや嚴重警戒（28.0～30.0℃）の領域内で特に熱中症発症数が多くなること、WBGTが急に上昇した日は熱中症の危険性がさらに高くなることなどが明らかにされている（大橋、2010；中井、2011；登内、2012）。一方で、WBGTの算出に必要な3種類の測定項目のうち、湿球温度と黒球温度は東京や大阪などの管区気象台以外では、一般的に観測されていない。黒球温度に関しては、環境省の管轄の下、観測がおこなわれているが、全国11地点のみにとどまっている。また、公式のベルノン式グローブ温度計などはその場の景観に影響を与えること、維持管理をこまめにおこなう必要があるなどの面から長期的な観測には不向きであるといえる。そのため、従来のWBGTに関する研究の多くは、気温、相対湿度、日射量、風速などの気象庁の観測データを用いて、推定式（例えば、小野・登内、2014）よりWBGTを算出し議論している（福井、2016）。しかし、大橋ほか（2010）は、熱中症の発生は活動空間ごとに形成される局所的な微気象の影響を強く受けるため、その空間ごとに計測したWBGTを考察することが望ましいと指摘している。

表1 日常生活における熱中症予防指針

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31℃以上)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 (28～31℃)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25～28℃)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる。
注意 (25℃未満)	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

※「日常生活における熱中症予防指針」Ver.3 確定版（日本生気象学会）より作成。

表2 熱中症予防運動指針

気温 (参考)	暑さ指数 (WBGT)	熱中症予防運動指針	
35℃以上	31以上	運動は原則中止	特別の場合以外は運動を中止する。特に子どもの場合には中止すべき。
31～35℃	28～31	厳重警戒 (激しい運動は中止)	熱中症の危険性が高いので、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。10～20分おきに休憩をとり水分・塩分の補給を行う。暑さに弱い人(体力の低い人, 肥満の人, 暑さに慣れていない人など)は運動を軽減または中止。
28～31℃	25～28	警戒 (積極的に休憩)	熱中症の危険が増すので、積極的に休憩をとり適宜、水分・塩分を補給する。激しい運動では、30分おきくらいに休憩をとる。
24～28℃	21～25	注意 (積極的に水分補給)	熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。熱中症の兆候に注意するとともに、運動の合間に積極的に水分・塩分を補給する。
24℃未満	21未満	ほぼ安全 (適宜水分補給)	通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩分の補給は必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。

※日本スポーツ協会「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」(2019)より作成。

### 3. 研究背景および目的

熱中症の発生は各活動空間で形成される局所的な微気象の影響を強く受ける。そのことを踏まえ、定点型観測や移動観測を実施した研究もおこなわれている。大橋ほか(2009)は、岡山市街地を対象としてビル街や住宅街、スポーツトラックなど6種の異なる活動空間でWBGTの観測をおこなった。その結果、屋外空間では地点間で最大3.4℃の差異が認められ、それは主に黒球温度の影響であり、活動空間における人体への入力放射量の違いによると明らかにした。さらに、その結果より乾球温度(気温)と湿球温度のみでWBGTを推定することは、注意が必要であると言及している。河野ほか(2018)は、都市街区スケールにおいて晴天時と曇天時の熱ストレスを把握するため、東京都市街地を対象に約3kmの経路においてWBGTの移動観測をおこなった。その結果、平均WBGTは晴天時と曇天時で日射量が大きく異なるにも関わらず29.0℃を記録した。そのことを踏まえ、WBGTの構成要素に着目した結果、晴天時は黒球温度、曇天時は湿球温度が支配的であり、WBGTが同程度であっても人体が感じる暑さの感覚は異なることを考察している。日下ほか(2019)は、商業地、住宅地、緑地という異なる土地利用を1～2km以内に有する東京都渋谷区を対象にして、土地利用や人間活

動の違いが、気温とWBGTに及ぼす影響を観測によって明らかにした。その中で、同一空間で気温とWBGTの数値に非一様性がみられる原因は、湿度によるものと言及している。以上のように、街区スケールで観測を実施し、活動空間の違いによるWBGTの特徴や形成要因について明らかにした研究は複数存在する。しかしながら、観測をおこない得られたデータより、暑熱環境の地域性について言及した研究は数少ない。

そこで、本研究では猛暑期の鳥取県を対象に沿岸、都市、内陸部を網羅するように乾球温度（気温）、相対湿度、黒球温度の定点型観測をおこない、WBGTを算出することで、各地区およびそれぞれの地区内の熱中症リスクの特徴や時空間変動を明らかにする。さらに、地理的要因が暑熱環境の形成にどのように寄与しているかを分析し考察する。本研究が対象とした鳥取県は、日本海側に位置しているため、夏季にフェーン現象が発生すると、地域によっては40℃近い猛暑を記録することもある。そのような中、鳥取県の熱中症搬送者数（人口10万人あたり）は全国的にみても常に上位である。なかでも2019年と2020年は、2018年より搬送数が少なかったものの、順位の高さが目立った。このように、鳥取県は熱中症が発生しやすい地域と言っても過言ではない。

## 4. 研究概要

### 4. 1. 対象地域

鳥取県は、中国地方の北東部に位置し、東西約126km、南北約62kmと東西に幅広い県である。県西部には、中国地方最高峰の大山（標高 1729m）が存在し、東部には氷ノ山（標高 1510m）や扇ノ山（標高 1310m）が存在している（図3）。海岸線の入り込みは少ないが、中国山地を主とした比較的標高の高い地域が沿岸部付近まで迫り、起伏の大きい地域もみられる。このように、鳥取県は山地が多く、平野はごく一部に限られている。また、各地区には一級河川〔東部（鳥取地区）：千代川、中部（倉吉地区）：天神川、西部（米子地区）：日野川〕が中国山地を起点に日本海にかけて流れている。3本の河川の流域には平野が形成され、それぞれ鳥取市（185943人）、倉吉市（45215人）、米子市（146110人）が流域の中心都市として存在している（2022年11月1日現在）。鳥取県の気候は日本海側気候に属し、小気候区で分類すると平野部は山陰型気候区、山間部は中国山地気候区に分けられる（鳥取地方气象台）。

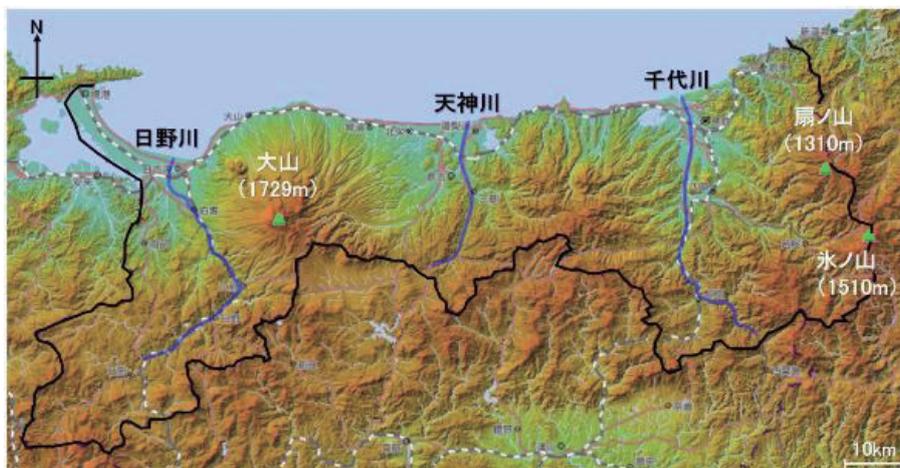


図3 鳥取県の地形図（地理院地図より作成）

## 4. 2. WBGT観測

本研究では、鳥取県を対象に沿岸部から内陸の山間部にかけて西部10地点、中部7地点、東部12地点の計29地点で定点型WBGT観測をおこなった。観測地点は、各地区の沿岸部から山間部にかけて約3km毎に設定した(図4)。観測期間は、2022年8月5日から9月11日である。気象観測には、自然通風式シェルターと小型黒球温度計を作成して使用した。自然通風式シェルターに温湿度センサ(IFS-TH1Mini:INKBIRD社)を用いて、気温・相対湿度を測定した。また、小型黒球温度計には、温湿度センサ(IFS-TH1:INKBIRD社)を用い、黒球温度を測定した。サンプリング間隔は、気温と相対湿度および黒球温度ともに1分である。観測機器は、各地点の街区公園や公共施設の外灯等を利用し、地上から約2.5mの高さに設置した(図5)。

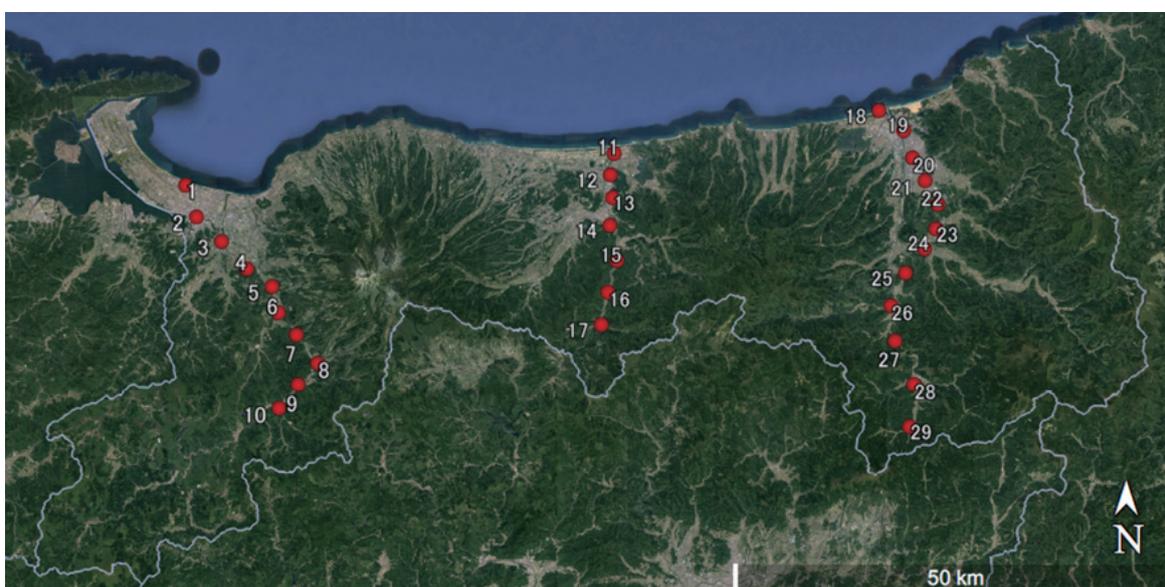


図4 観測地点(1～10を西部、11～17を中部、18～29を東部)

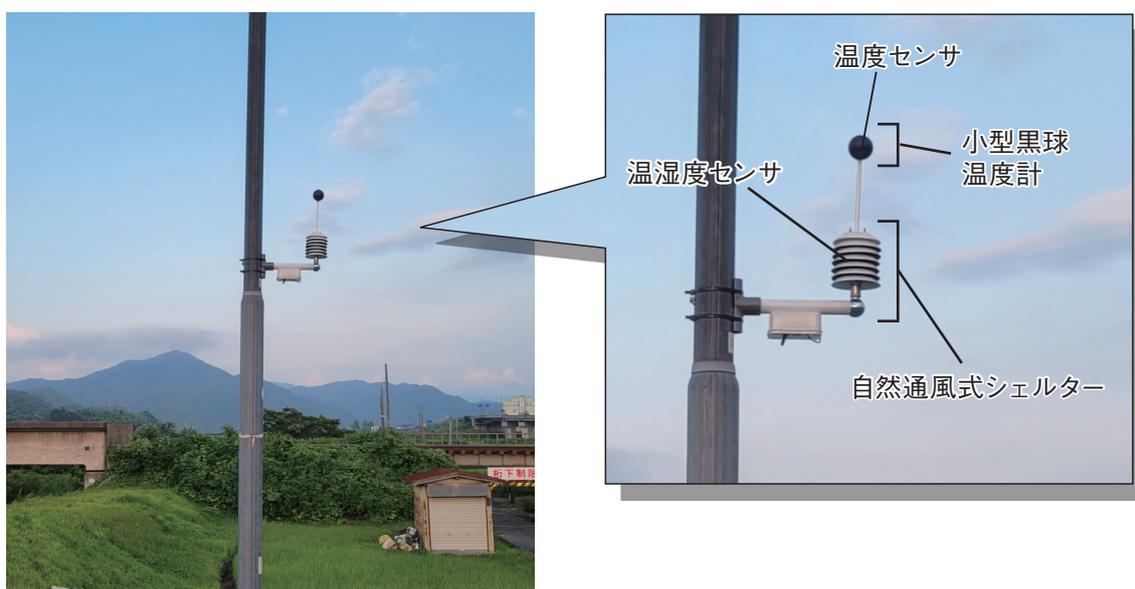


図5 観測機器

## 5. 結果

### 5. 1. 地点別日最高値の比較

日降水量0.0mm以下かつ日照率60%以上だった7日間における各観測地点の暑熱環境を比較した。その結果、日最高気温と日最高湿球温度は都市部で高くなり、気温においては、人工土地被覆率の高い山間部でも高値（最大36.8℃）を示した。また、日最高黒球温度は、地点間に10.0℃以上の差異が見られ、日最高WBGTについては、地点間に最大4.9℃の差が認められた。これより、活動空間によって暑熱環境は異なり、1地点の計測データを広域に適用するには注意が必要であることが示唆された。

### 5. 2. 暑熱環境と熱中症救急搬送人員数

熱中症搬送者数に違いが見られた2日間を比較した。全地点でWBGT31.0℃以上を記録した8月9日は、熱中症搬送者数7人中6人が中等症であり、搬送者数が最も多かった9月4日は、13人中10人が軽症であった。9月4日は、8月9日に比べて気温などの最低値が低く、日最大差が大きかった。これより、暑熱環境の日変化は熱中症発症リスクにWBGTは症状の重さに寄与することが示唆された（図6）。

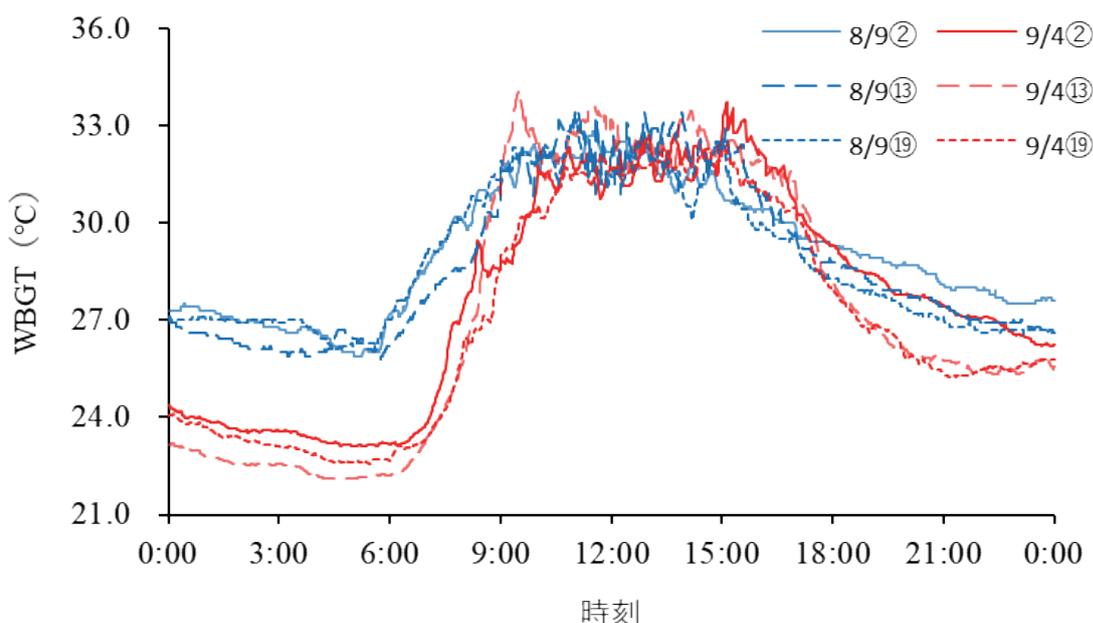


図6 WBGTの時間変化

### 5. 3. 暑熱環境と地理的要因の関係性

地形（海岸距離、標高）および周辺環境（天空率、人工土地被覆率）との相関分析をおこなった。その結果、地形との間にはほぼ相関は見られなかったが、フェーン現象発生日において、気温との間に有意な負の相関（海岸距離： $r = -0.84$ 、標高： $r = -0.88$ ）が認められた。また、天空率との間には負の相関（最大 $r = -0.54$ ）、人工土地被覆率との間には正の相関（最大 $r = 0.70$ ）が認められた。これより、周辺環境が暑熱環境に与える影響は、地形に比べて大きいことに加え、フェーン現象発生日は、気温と地形の関係性が大きくなることが明らかとなった（図7）。

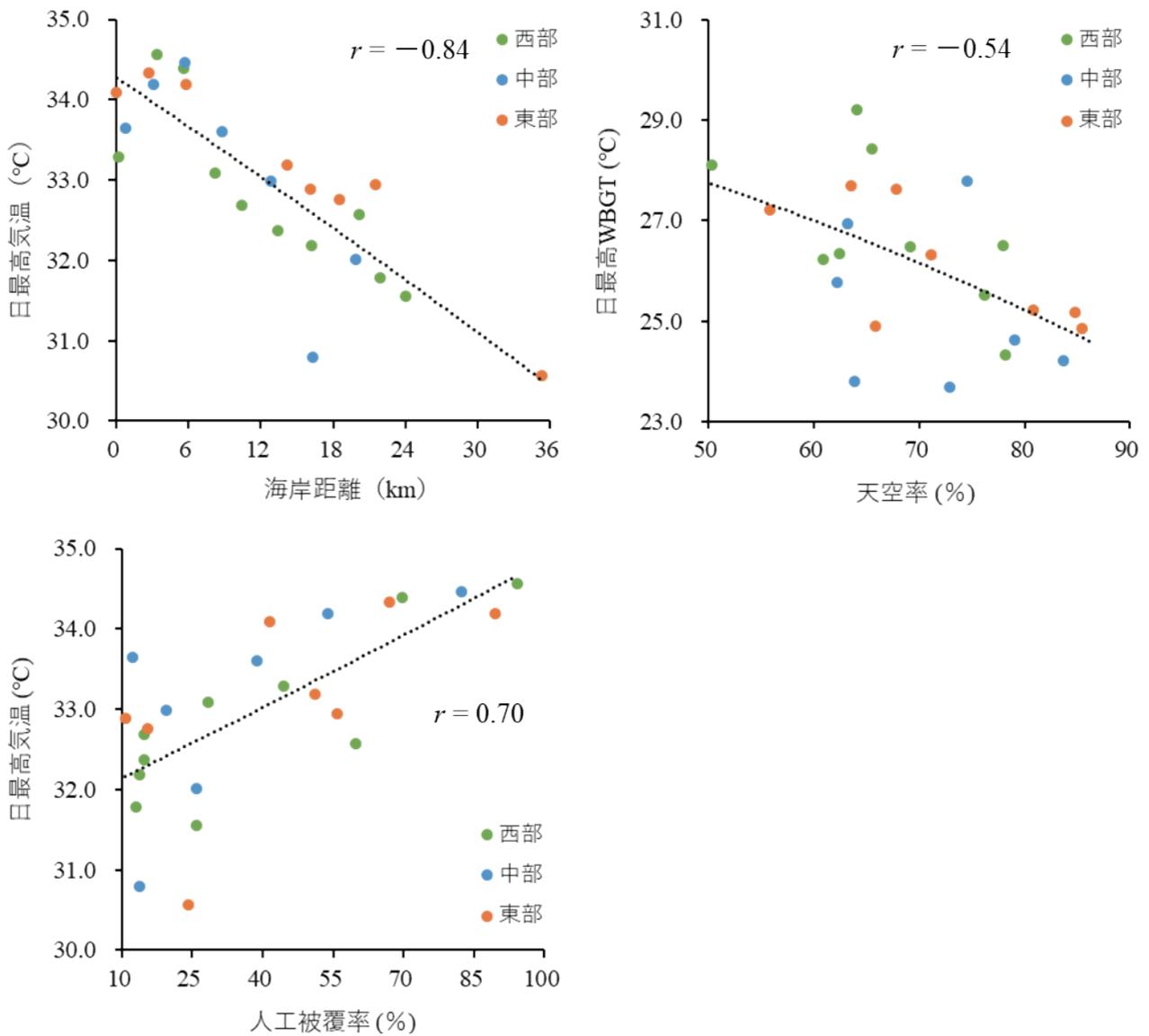


図7 相関分析の結果

## 引用文献

- 福井健弘, 2016: 日本の夏季におけるWBGTの地域性とその経年変化. 法政地理 48: 61-70.
- 福井健弘, 2018: 日本における夏季のWBGT (湿球黒球温度) の地理的分布に関する気候学的考察. 法政地理 50:1-14.
- 井上芳光, 2004: 子供と高齢者の熱中症予防策. 日生氣誌, 41 (1) : 61-66.
- 入來正躬, 2000: 1995—1999年夏の山梨県での熱中症に関する研究. 日生氣誌, 37 (2) :63-72.
- 環境省, 2018: 熱中症環境保健マニュアル2018.
- 河野恭佑, 植田弥月, 稲垣厚至, 小田僚子, 2018: 街区領域における晴天時と曇天時のWBGT 分布の特徴. 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.74, No.4, I 247- I 252.
- 日下博幸, 狩浩介, 久保礼子, 藤拓人, アングアンヴァン 2019.: 地利用と人間活動が都市中心部の 気温と暑さ指数の分布特性に及ぼす影響. E-journal GEO 14: 180-196.

- 南利幸, 2004: 地球の温暖化と熱中症の予報について. 日生氣誌, 41 (1) :41-44.
- 文部科学省, 気象庁, 2020: 日本の気候変動2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書.
- 中井誠一, 1993: 熱中症死亡数と気象条件－日本における21年間の観察－. 日生氣誌, 30 (4) :169-177.
- 中井誠一, 2011: 熱中症の定義と発生の実態. ウォーキング研究 15, 13-17.
- 大橋唯太, 竜門洋, 重田祥範, 2009: 都市域のさまざまな活動空間でのWBGTの比較. 日生氣誌, 46 (2) : 59-68.
- 大橋唯太, 2010: 温熱指標. 天気, 57 (1) : 57-59.
- 小野雅司, 登内道彦, 2014: 通常観測気象要素を用いたWBGT (湿球黒球温度) の推定. 日生氣誌, 50 (4) ,147-157.
- 柴田祥江, 飛田国人, 松原斎樹, 藏澄美仁, 2010: 住宅内の熱中症に対する高齢者の認知度と暑熱対策の実態. 日生氣誌, 47 (2) : 119-129.
- 登内道彦, 2012: 日本の夏の気象と熱中症. 日本臨床, 70-6, 981-985.
- Yaglou, C.P. and Minard, D. (1957) : Control of Heat Casualties at Military Training Centers, American Medical Association Archives of Industrial Health, Vol. 16: 302-316.

# 中小企業における創発型責任経営の実践 —鳥取県内企業を対象として—

経営学部経営学科 島田善道  
関西大学総合情報学部 中尾悠利子

## 要約

本稿では、「無限責任の考え方に基づき、従業員による主体的な活動を奨励して、創発的な実践を生み出す経営」としての創発型責任経営に着眼し、鳥取県地域の中小企業を対象としてその実践事例を取りあげた。先行研究から中小企業の創発型責任経営実践の条件として、(1)レスポンスビリティとしての責任を軸に従業員が主体的かつ能動的に環境・社会課題対応に取り組むことを促すマネジメント、(2)地域社会や組織内外の人々との関わりの中で当初は想定されていなかった「創発」とそれによる価値創造、(3)従業員が主体的にかつ能動的に、活動が自然といかせる責任を模索する場のデザインの創出の三点を抽出した。その上で、鳥取県内企業の中で、SDGsが提唱される以前から環境課題や社会課題に取り組む4社の実践が上記三条件に合致し、従業員による主体的かつ能動的な創発型責任経営が実践されていることを明らかにした。

本文は、中尾悠利子・島田善道（2023）「中小企業における創発型責任経営の実践—鳥取県内企業を対象として—」『サステイナブルマネジメント』第22巻、認定特定非営利活動法人 環境経営学会、64-75頁に掲載。

# 19世紀前半の英領インドにおける銀貨統一政策と貨幣鑄造額 —英領インドとベンガル—

経営学部経営学科 谷口謙次

## 1. はじめに

18世紀半ば、ベンガル州の植民地化を開始したイギリス東インド会社（以下EICと略す）はその後およそ100年を費やし、インド全体をイギリスの植民地としていった。広大な領土を獲得した一方、EICは様々な問題に直面した。その中でも植民地獲得直後から大きな問題になっていたのは貨幣問題であった。

貨幣問題には二つの側面が存在した。第一は、貨幣の多様性である。16世紀前半に政権を樹立したムガル帝国はアクバル帝の時代に制度を整え、北インド支配を確立した。アクバル期に導入された貨幣制度は高品質な貴金属貨幣を供給する、優れて精緻で洗練されたものであった。17世紀に入りヨーロッパから大量の銀が流入したことで、領内の主要貨幣が銀貨となった。元々、ムガル帝国は摩滅などで重量が減少した銀貨の流通を制限するため、年次割引の制度を導入していた。その上、17世紀後半からの経済発展と領土拡大により各地に鑄造所が開設されたこともあり、銀貨の重量・純度を統一することが難しくなった。こうして、18世紀に入るところにはインド各地で多様な銀貨が流通するようになっていた(谷口 [2012b] 311ページ～316ページ、325ページ～327ページ)。

第二は、銀不足問題である。「銀不足問題」とは、EICによるベンガルへの銀輸出停止に伴う経済停滞のことを指した。これは18世紀後半と19世紀前半では異なる要因で生じている。18世紀前半まで、EICはベンガルなどで綿織物などのインド産品を購入するために大量の銀地金を輸出していた。なぜなら、南アジアは貴金属以外の物産が豊富で、毛織物などのイギリス産品は売れなかったためであった。しかし、ベンガル植民地化による徴税権の獲得により税収余剰を輸出品支払いに充てることとなり、18世紀後半にはイギリスからの銀輸出が停止し、ベンガル経済は著しいデフレーションに見舞われた(谷口 [2012a] 72ページ～73ページ)。

19世紀に入ると状況は変化する。18世紀末にイギリスからの銀輸出は再開され、銀不足は解消された。しかし、産業革命の影響により、インドからイギリスへの綿織物輸出は減少し、代わりに一次産品輸出が増加することになった。しかし、一次産品輸出はイギリスや中国など貿易相手国の需要や景気変動に大きく左右された。19世紀第二四半期のイギリスは度重なる金融恐慌が生じて不況となっており、中国でも不況やアヘン戦争が起こっていた。その結果、一次産品価格は低迷し、インド国内で農業不況が生じていた。その結果、輸入の対価であるイギリスからの銀輸出は大幅に減少することになった。(谷口 [2016] 78ページ～79ページ)。

報告者はこれまで18世紀後半の貨幣問題を明らかにするため、ベンガルの貨幣状況とEICの植民地政府による貨幣政策について論じてきた(谷口 [2009]、谷口 [2012a]、谷口 [2012b]、谷口 [2016])。本報告の目的は、19世紀前半の貨幣政策が上記2つの貨幣問題にどのように対処してきたのかを明らかにすることである。英領インドの統一銀貨ガヴァメント・ルピーが1835年にインド全土で導入され、これ

により貨幣の多様性は解消されたと考えられている。他方で、プリンセプが示したように、19世紀にあってもなおインドでは多様な貨幣が流通しており、それが35年を境にすぐに統合されたのかには疑問が残る (Prinsep[reprint 2013, original 1858]pp.52-60)。

本報告では、まずガヴァメント・ルピー導入の経緯を明らかにする。英領インドでの銀貨統合政策はベンガルから始まり、19世紀初頭にはシッカ・ルピーに統合された。しかし、シッカ・ルピーは統一銀貨にならず、ファルカバード・ルピーが統一銀貨の基準となった。どのようにガヴァメント・ルピーが導入されたのか、ファルカバード・ルピーが基準となったのはなぜなのか、などの点を見ていくこととしよう。

次に、19世紀前半英領インドにおける貨幣製造額の推移を見ていこう。とりわけ、ガヴァメント・ルピーが正式に統一銀貨となった1835年前後から1840年代の傾向に注意を払う。また、最後にガヴァメント・ルピーを採用したベンガルの傾向を特に追うこととしよう。これは、植民地政府やベンガル管区が貨幣需要を満たすために十分な貨幣製造を行ったのかを見るためである。

## 2. 本位貨幣ガヴァメント・ルピーの導入

S. アンビラジャンの研究に基づいて、19世紀前半英領インドにおける銀貨統一政策、ガヴァメント・ルピーの導入までの過程を概観しよう。ここでは、マドラスとボンベイの動向が重要になる。18世紀後半にマドラスとボンベイでは複本位制導入が図られた。しかし、ベンガル同様これらの試みは失敗したとされる。特にマドラスでは、ベンガルとは異なり、元々金貨流通地域であったにもかかわらず、ルピー銀貨流通を促すため、銀貨高金貨安の公定レートを採用した。その結果、金貨が市場から退出して混乱が生じることとなった。マドラスで銀貨が流通するようになったのは、第三次マイソール戦争によるティプ・スルタンによる多額の賠償金が流入したことによる。マドラス政府はこの時期に銀貨流通を促進するため、銀貨をより過高評価して金貨を市場から退場させたのであった (Ambirajan [1984] pp.14-15)。

19世紀に入って、マドラスとボンベイで貨幣政策が行われるようになった画期は、1806年4月にEICのイギリス本国取締役会によって提出された文書にあった。ここには取締役会の議論が集約されていたが、重要なのは銀貨単一本位制の導入を強く主張した点であった。アンビラジャンによれば、マドラス政府はこの文書に刺激を受けたのではなく、世紀転換期に広大な支配地域を獲得したことで、効率的な徴税様式を形成する一環として貨幣システムの改革が必要とされたとしている (Ambirajan [1984] p.16, pp.21-22)。

マドラス政府では1802年から議論が行われていたが、本格化したのは1805年からであった。当初、政府内の委員会はベンガル貨幣制度の導入、つまり、マドラスで製造されるルピー銀貨をシッカ・ルピーと同重量・同純度にし、これを法貨とする銀貨本位制を答申した。これによってベンガル管区とマドラス管区間の両替問題を解消し、サラーフの影響力を削ぐことが目的であった。この答申と取締役会からの指示があつたにもかかわらず、当時のマドラス知事ベンティンク (William Bentinck) はその保守的な思想から大胆な改革を否定した。また、シッカ・ルピー導入によって金貨と銀貨の価値比率が変化し、結果的にマドラスへの銀流入が減少すると考えられたことも改革が進まなかった理由であった。結局、1810年前後にルピー銀貨が主要貨幣となったことから、ようやく、マドラス政府内で議論が再開された。しかし、取締役の意向に反して政府の議論は複本位制を志向し、結局、1818年にマドラス・ルピー

が1ルピーにつき重量180グレインで純度11/12、公定レートが金貨：銀貨=1：14 1/4という複本位制導入を決定した（Ambirajan [1984] pp.22-27）。

ボンベイでは銀貨流通が中心であったが、ボンベイ・ルピーだけでなく、北部の都市ラクナウやファルカバードで鑄造された、多様なルピー銀貨が流入していた。ボンベイとの貨幣交換をスムーズに行えるよう、マドラス政府はボンベイ政府にマドラスと同じ基準の導入を促した。しかし、ボンベイ政府は貨幣改革を緊急のものとは看做さず、改革が実行されたのは1824年になってからであった。この年、インド植民地政府はファルカバード・ルピーがマドラス・ルピーと同重量、同純度であることから、ボンベイ政府にファルカバード・ルピーを法貨にするよう提案した。ボンベイ政府もそれによってマドラス・ルピーとの交換がスムーズになり、財政負担もないことからこれに同意して、マドラスとの銀貨統合が行われた（Ambirajan [1984] pp.28-30）。

ボンベイ政府がマドラス・ルピーを導入したことにより、取締役会はベンガルでも同じルピーを導入して貨幣を統一するよう主張したが、インド省担当大臣が難色を示した。彼によれば、シッカ・ルピーをマドラス・ルピーに変更することで貨幣価値が下落し、物価上昇や軍隊での給与問題につながるということであった。ベンガル総督ベンティンク（1800年代のマドラス知事と同一人物）もマドラス・ルピー導入に反対した。しかしその後、北部の都市ラクナウでもファルカバード・ルピーが導入され、ベンガルが取り残される状況になったことで状況は変わる事となった。1835年にベンティンクの後任としてメトカルフが総督に着任してすぐ、ベンガルでマドラス・ルピー導入が決定される。取締役会も、今後ファルカバード・ルピーはガヴァメント・ルピー（the Government Rupee）として、これを今後法貨とすることを決定した。こうして、南アジア全体の本位貨幣ガヴァメント・ルピーが導入されたのであった（Ambirajan [1984] pp.30-37）。

ガヴァメント・ルピーの導入までの貨幣政策と18世紀の貨幣政策との類似性は二点存在する。第一に、銀単一本位制が志向された点である。第二に、取締役会の意向が政策に強く反映した点である。この二つは相互に関連しあっていた。アンビラジャンによれば、取締役会の認識は次のようなものであった。18世紀後半の南アジアにおける貨幣システムは十分に機能しておらず、多様な貨幣の存在によりEICは莫大な損失を被っていた。また、複本位制にも不信感を抱いており、南アジアでは銀を中心とした単一本位制を導入すべきであるとした（Ambirajan [1984] pp.16-17）。

取締役会の理論的背景にはC.ジェンキンソンの議論があった。ジェンキンソンは18世紀に商務大臣を務めた政治家であり、1805年に『イギリス法貨論（The Treatise on the Coins of Realm in a Letter to the King）』という本を出していた。彼の議論は18世紀に出された貨幣論のダイジェストのようなものにすぎなかったが、補助代用貨幣を利用する単一本位貨幣の管理を初めて計画した点で重要であった。ジェンキンソンが『イギリス法貨論』で主張したのは金貨本位制であったが、それはイギリスにおいて金は豊富にあり、しかも、国内で常に行われている大規模かつ高価な取引に適しているからだとした。南アジアの本位制論において金貨はベンガルでほとんど流通しないと、ベンガル総督ショアは覚書を提出していたが、取締役会は両者の議論を基に、銀貨を中心にし、銅貨を補助貨幣とする銀貨本位制導入を強く主張した。彼らの議論は机上の空論であると非難されたが、1835年のガヴァメント・ルピー導入までの貨幣政策の基礎となったのであった（Ambirajan [1984] pp.17-21）。

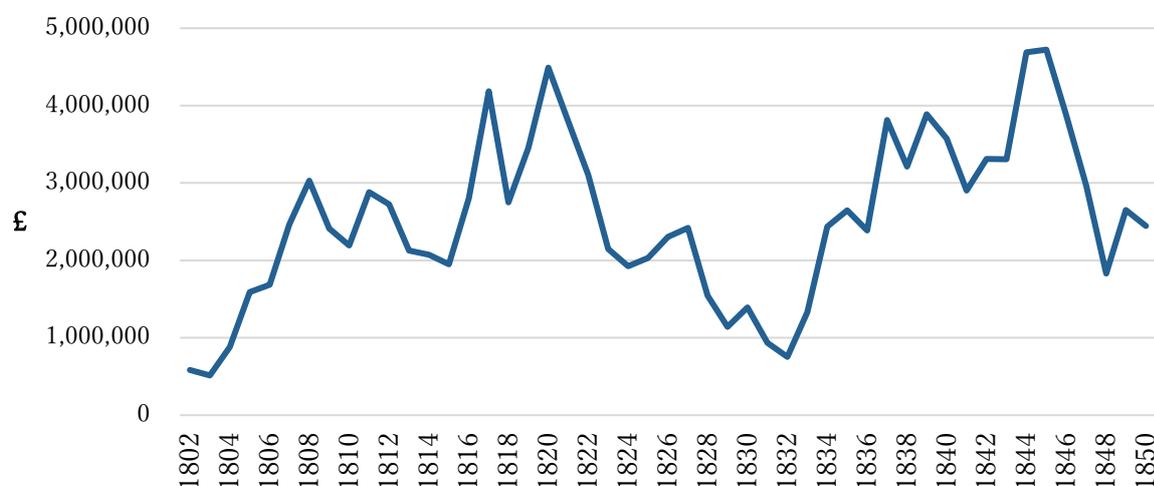
こうした議論を取締役会が採用した背景には、彼らが金銀貨複本位制でなく、銀貨単一本位制を志

向していたことがあった。その志向は18世紀ベンガルで行われた貨幣政策ですでに示されていた。取締役会がそれを志向した理由は、主要な貨幣である銀貨を統合することで取引コストや行政コストを削減することであった。こうした認識は、植民地が南アジア全体に広がった19世紀にも続いていたと考えられる。アンビラジャンの議論では、取締役会が銀貨単一本位制を志向した理由を明示しなかったが、18世紀ベンガルの貨幣政策にこそその背景があったと言えるのではないか。ベンガルではガヴァメント・ルピー導入が最後になったが、そこから18世紀ベンガルの貨幣政策と19世紀英領インドのそれに関連がないと結論付けるのは早計であろう。今後、両政策の一貫性の有無を調べることにより、南アジアの植民地化の一貫性や近代化の性格について詳細に論じることが可能になるのではないだろうか。

### 3. 19世紀前半における英領インドの貨幣鑄造額

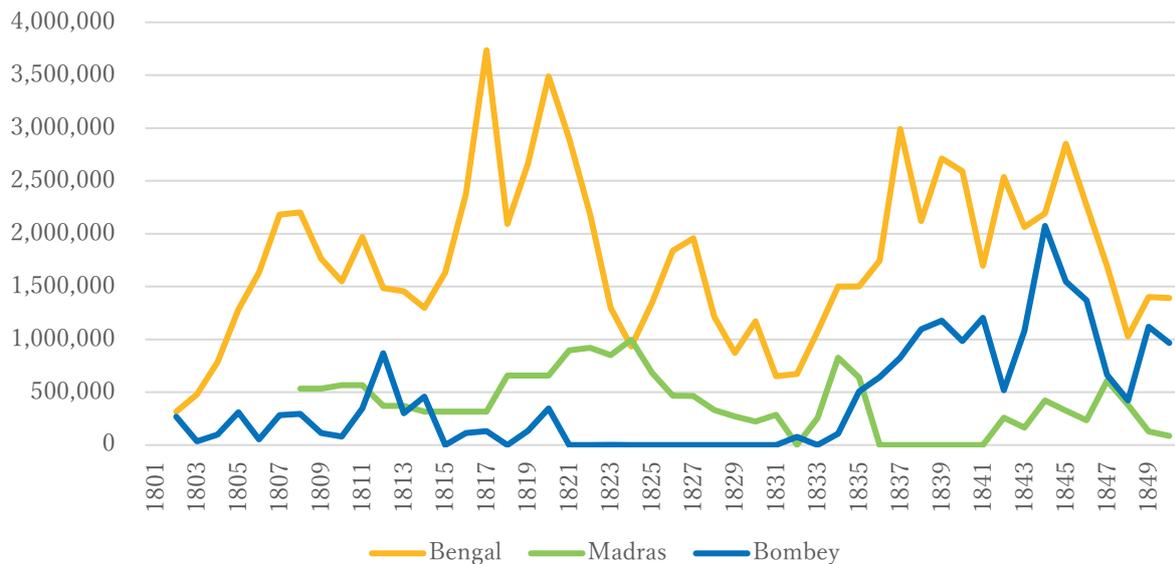
前節では、19世紀前半の銀貨統一政策を見てきたが、その実態については不明な点が多い。多くの論者は1835年以降銀貨がガヴァメント・ルピーに統合されたとするが、それまでの状況を考えるとわずかの期間で多様な銀貨が統合されたとは考え難い。また、貨幣統合を促すには鑄造所が適切な貨幣供給を行っていたのかも重要であろう。そこで、本節では、19世紀前半英領インドにおける貨幣鑄造額のデータを示し、それらを示して相互に比較し、何が問題であるかを明らかにしよう。

当該期を示すデータはいくつか存在する。しかし、それらはいずれも大きく異なり、当該期の状況を理解するのが難しくしている。1つずつ検証していこう。まず、イギリス議会資料にある1864(133) East India (bullion) は、19世紀前半のインドにおける貴金属流出入および貨幣鑄造額を表したデータである。資料3-1にあるように、1820年まで貨幣鑄造額はほぼ増加しているが、その後1832年まで大幅に減少した。これは貴金属輸入の趨勢とほぼ一致している（谷口 [2016] 96ページ）。1833年度以降、鑄造額が急増しているのは1835年のガヴァメント・ルピー導入による新貨鑄造によるものだと考えられる（谷口 [2016] 98ページ）。



資料3-1 インドにおける貨幣鑄造額：1801-1850 [East India (bullion)]

管区ごとの鑄造額を示したものが資料3-2であるが、これによればベンガル管区の鑄造額が最も大きく、1836年から1845年まで毎年200万ポンドから300万ポンド近くが鑄造されている。これはベンガル州カルカッタが英領インドの首都であり、かつアヘンやジュートなどの農産物輸出も積極的に行っており、貨幣需要が高いことが挙げられよう。また、他の管区と異なり、1835年にこれまでと異なる重量・品位の銀貨を新たに発行するため、より多くの鑄造が必要であったことも要因と考えられる。

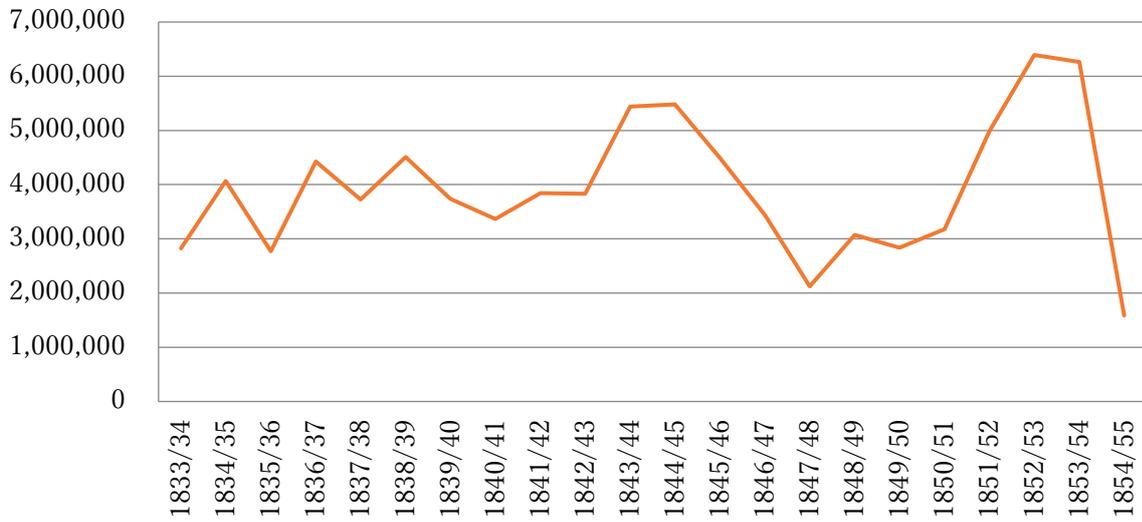


資料3-2 各管区の鑄造額1801-1850 (£) [East India]

次に、J.プリンセプによるインド貨幣史の著作 *“Essays on Indian antiquities, historic, numismatic, and palæographic, of the late James Prinsep, F.R.S., secretary to the Asiatic Society of Bengal”* に付属している *“Useful Tables, Illustrative of Indian history, chronology, modern coinages, weight measures on British India”* に当該期の貨幣鑄造額のデータが存在する (Prinsep[reprint 2013, original 1858]pp.80-1)。プリンセプ (James Prinsep : 1799-1840) は植民地官僚として働きながら、インド古代史研究を行っていた。彼は東インド会社で試金官 (assay master) としてベナレスとカルカッタの鑄造所に勤務したが、その間に西ヨーロッパ式の貨幣制度の導入に尽力、1835年のガヴァメント・ルピー導入に貢献した。その傍ら、古代インド史研究にも情熱を傾け、古代インド貨幣研究にも力を入れ、古代貨幣の碑文を手掛かりにしてアショーカ王石柱碑文の解説に成功した (辛島昇ほか監修 [1992] 649ページ、ジョナサン・ウィリアムズ編 [1998] 165ページ～169ページ)。ただ、3管区全体の鑄造額のデータは1833-4年度からの物しかなく (資料3-3)、ベンガル管区のみが1801-2年度からのものが存在する (資料3-4)。

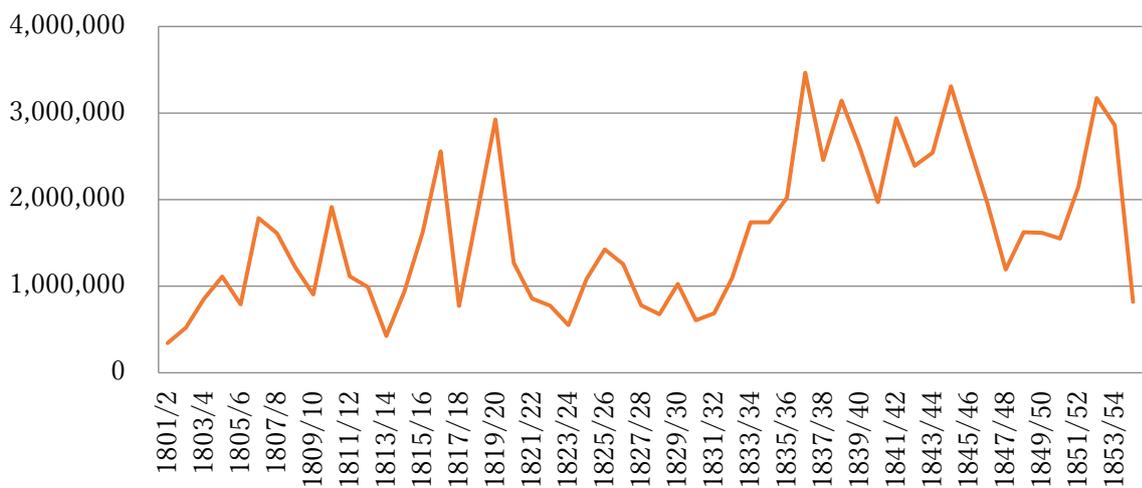
資料3-3を見ると、資料3-1とは大きく異なっている。資料3-1では1833年には約130万ポンドであったものが1837年には約380万ポンドまで急増し、その後増減しながら1844年には約480万ポンドに達している。対して、資料3-3では1833-4年度にすでに約280万ポンド鑄造され、その後緩やかに増加し1838-9年度には約450万ポンドに達した。1840-1年度までは減少したが、その後急増し、1843-4年度、1844-5年度には540万ポンドを超えたのであった。このように、プリンセプのデータの

ほうが貨幣鑄造額は多く、しかも1833-4年度から1844-5年度まで緩やかに増加したのであった。



資料3-3 インドにおける貨幣鑄造額 1833/34-54/55 (£)  
[プリンセプ]

ベンガルにおける貨幣鑄造額を見てみよう。資料3-4によると、1830-1年度は約60万ポンドであったものが1833-4年度には約170万ポンド、1836-7年度には約350万ポンドと急増した。その後、増減がありながら1840-1年度には200万ポンドを下回るほど減少、その後回復して1844-5年度には約330万ポンドとなった。この趨勢は資料3-2と大きくは変わらない。

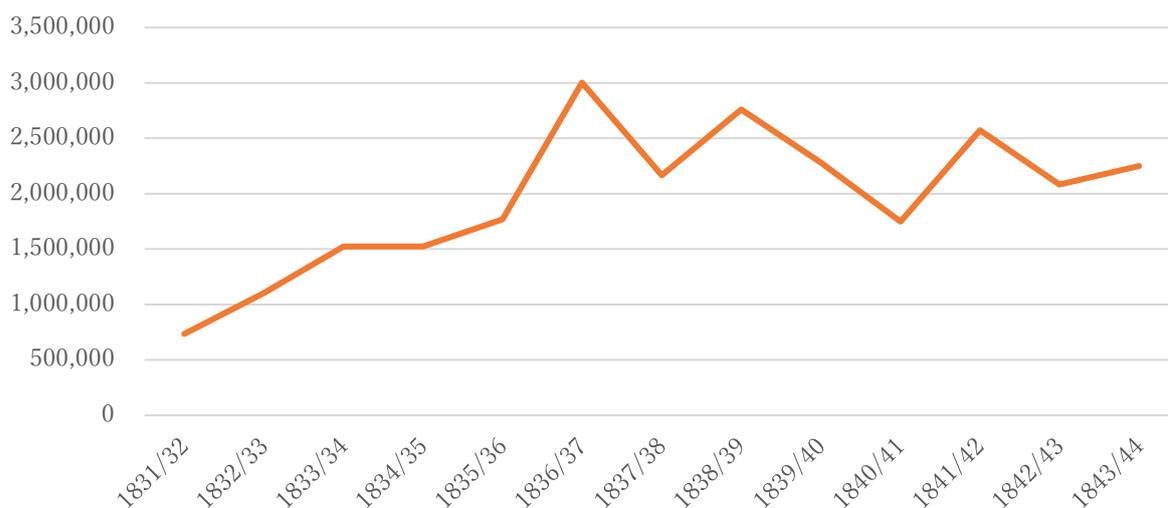


資料3-4 ベンガルにおける貨幣鑄造額 1833/34-54/55 (£)  
[プリンセプ]

最後に、同じくイギリス議会資料の '1846 (117) *Calcutta mint. Copy of the rules and regulations of the Calcutta mint, and an abstract of the operations of the mint in each year since its reform; stating the amount of coin, the number of each kind coined in each year.*' である。これは当時のカルカッタ鑄造所の業務概要を示すものである。その末尾に1831-2年度から1842-3年度までの貨幣鑄造額や各鑄貨（コイン）の鑄造枚数、運営コストなどが表として表されている。

資料3-5はカルカッタ鑄造所における鑄造額を表している。資料3-5は13ヵ年と他の二つよりも期間は短い、資料3-2と資料3-4が示す趨勢とほぼ等しい点が重要であろう。同期間を取ると、いずれのデータも1831-2年度から1836-7年度までは鑄造額が急増、その後1840-1年度まで減少、そして再び増加となっている。

年（年度）と取り上げても、1831年 (*East India (bullion)*) が約65万ポンドであるのに対して1830-1年度（プリンセプ）が約60万ポンド、1830-1年度 (*Calcutta mint*) が約73万ポンドであり、1837年 (*East India (bullion)*) が約298万ポンド、1836-7年度（プリンセプ）が約346万ポンド、1836-7年度 (*Calcutta mint*) が約300万ポンドとなっている。さらに、1841年 (*East India (bullion)*) が約170万ポンド、1840-1年度（プリンセプ）が約200万ポンド、1840-1年度 (*Calcutta mint*) が約174万ポンドとなって、それぞれの数字には誤差はあるものの。傾向は共通しているといえよう。これは年と会計年度の違いであったり、地域全体であるか、1鑄造所であるかの違いなどもあるであろう。しかし、貴金属不足の時代から銀貨統一の時代にかけて、貨幣鑄造額がはっきりと増加したことは間違いのないようである。ただ、それが地域の需要を満たすものであったのか、それまでの多様な銀貨を退出させるほどであったのか、こうした疑問点は残るであろう。



資料3-5：カルカッタ鑄造所における鑄造額1831/32-1843-44 (£) [Calcutta mint]

#### 4. おわりに

19世紀前半英領インドにおけるガヴァメント・ルピー導入の経緯をみると、マドラス管区から始まったことが明らかとなった。元来、南インドは17世紀後半にムガル帝国に併合されるまで金貨流通地域であり、イギリスが植民地化した時期でさえ、ルピー銀貨を流通させるのに苦心していた。EICの取締役会は英領インドに銀本位制導入の意図があったが、マドラス管区やボンベイ管区は漸進的な貨幣政策を採用した。マドラスとボンベイは地理的に近く、ベンガルのシッカ・ルピーでなく、互いに共通するファルカバード・ルピーを統一銀貨の基準として採用した。最終的に、ベンガル管区はマドラス・ボンベイで導入されたファルカバード・ルピーを基準とする新銀貨を採用することを決定し、ガヴァメント・ルピーに統一されることとなったのであった。

当該期の貨幣製造額の推移を見ると、1864 (133) *East India (bullion)* では1820年まで製造額は増加し続け、その後1832年まで急減、1833年以降45年まで再び増加した。この傾向はインドにおける貴金属輸入の傾向とほぼ同じものであった (谷口 [2016] 100ページ)。しかし、1864 (133) *East India (bullion)* とPrinsep [reprint 2013, original 1858] の1833年以降を比較すると大きく異なっている。だが、ベンガルだけの製造額の傾向はほぼ等しいものであった。1846 (117) *Calcutta mint* を入れても、傾向は変わらなかった。

ただ、この増加傾向を理解するには二つの課題が存在する。第一に、この大量製造が需要を満たすものであったのか。ベンガル管区は他の二つと異なり、全く異なる重量・純度を採用することとなった。つまり、管区の銀貨全体を入れ替える必要がある。ベンガル管区は最も早く植民地になったこともあり、政治的にも経済的にも英領インドの中心である。そうした地域の貨幣需要を満たすことは容易ではなかったのではないか。むしろ、シッカ・ルピーと混在して流通した期間があったのではないだろうか。

第二に、大量製造を後押しした銀輸入は製造を意図したものだったのか、それとも対英貿易の復調の結果によるものだったのか。もし后者であれば、あくまで政策ありきで、植民地政府はインド経済について十分な理解がなかったと言えよう。これらの点は今後の大きな課題であろう。

## 〈参考文献〉

### 資料)

- ・ 1846 (117) *Calcutta mint. Copy of the rules and regulations of the Calcutta mint, and an abstract of the operations of the mint in each year since its reform; stating the amount of coin, the number of each kind coined in each year, British Parliamentary Papers.*
- ・ 1864 (133) *East India (bullion) , British Parliamentary Papers.*
- ・ Prinsep, James (ed. E.Thomas) [reprint 2013, original 1858] “*Essays on Indian antiquities, historic, numismatic, and palaeographic Volume2*” ,Cambrige University Press.

### 二次文献)

- ・ Ambirajan, S. [1984] *Political Economy and Monetary Management*, Affiliated East-West Press, Madras.
- ・ Chaudhuri,K.N. [1966] ‘*India’ s Foreign Trade and the Cessation of the East India Company’ s Trading Activities, 1828-40’* ,*The Economic History Review*, Vol.19, No.2.
- ・ Grag, Sanjay [2013] *The Sikka and The Raj: A History of Currency Legislations of the East India Company, 1772-1835*, Manohar, New Delhi.
- ・ 谷口謙次 [2009] 「18世紀後半のベンガルにおけるイギリス東インド会社の貨幣政策」、籠谷直人・脇村孝平編『帝国とアジア・ネットワークー長期の19世紀ー』、世界思想社。
- ・ 谷口謙次 [2010] 「18世紀末ベンガルにおけるイギリス東インド会社の鑄造所改革」、*経済学雑誌*第110巻第4号。
- ・ 谷口謙次 [2012a] 「18世紀後半のベンガルにおける銀不足問題とベンガル植民地政府財政」、*経済学雑誌*第112巻第4号。
- ・ 谷口謙次 [2012b] 「近世南アジアの貨幣制度と18世紀ベンガルにおける貨幣の多様性」、*松山大学論集*第4-2号。
- ・ 谷口謙次 [2016] 「19世紀前半のインドにおける経済不況と貨幣供給—貴金属貿易と貨幣鑄造」、*三田学会雑誌*109巻3号。
- ・ Mallick, B.S. [1991] *Money, banking, and trade in Mughal India :currency, indigenous fiscal practices, and the English trade in 17th century, Gujarat and Bengal*, Rawat Publications, Jaipur.
- ・ Mitra, D.B. [1991] *Monetary System in the Bengal Presidency*, K.P. Bagchi, Calcutta.
- ・ Perlin, Frank [1992] *Invisible City: Monetary, Administrative and Popular Infrastructures in Asia and Europ, 1500-1900*, Variorum.
- ・ Thomas, P. J. and B. Natarajan [1936] ‘*Economic Depression in the Madras Presidency’* , *The Economic History Review*, Vol.7, No.1.
- ・ Tripathi, Amal [1956] *Trade and finance in the Bengal Presidency, 1793-1833*, Oriental Longmans, Bombay.

# Sentinel-2 衛星データと機械学習を用いた浅海域水深情報の抽出

環境学部環境学科 佐川 龍之

## 1. はじめに

海底地形データは海図や様々な学術的な調査に必要な基礎データとして重要であるが、2017年時点で地球全体の約15%しか解明されていない。GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans: 大洋水深総図) と公益財団法人日本財団は、2030年までに全世界の海底地形図が完成することを目的として、2017年に共同プロジェクト「NF-GEBCO Seabed2030」を立ち上げた。GEBCOはIHO (International Hydrographic Organization: 国際水路機関) とUNESCO-IOC (国連政府間海洋学委員会) が共同で推進する世界の海底地形図作成団体である。NF-GEBCO Seabed2030では100m解像度で全世界の海底地形データを整備することを計画している。

海底地形データのうち、浅海域の水深は、航海においては座礁の危険を回避するために特に重要であり、正確な高潮や高波のシミュレーションや沿岸域の生物学的な調査のための基礎データとしても必要不可欠である。図1に、浅海域の海底地形を計測する主な技術の概要を示している。既存の測深方法には主に音響測深と航空レーザー測深がある。音響測深では船による調査を行うが、非常に浅い海域においては効率が悪く、座礁の危険性もあることからそもそも計測が困難である。航空レーザー測深では、浅海域を計測できるが、航空機が飛行できる海域である必要がある。この他、各調査に必要なコストが大きいこともあり、浅海域においてはこれまで必ずしも十分なデータが収集されていない。

これら既存の測深方法とは異なる方法として、衛星画像を解析して得られる水深情報であるSDB (Satellite Derived Bathymetry) がある。衛星画像から水深を推定する方法は、光が水中で指数関数的に減衰する原理に基づき、衛星で観測される放射輝度が水深により異なることを利用している。SDBは、航空レーザーと同じく浅海域の水深情報の取得に適している上に、衛星画像は世界中のほとんどの海域を観測でき、迅速に結果を得ることが期待できる。図2の左の画像はWorldView-2という衛星で沖縄県の波照間島沖を撮影した画像で、右の図はこの衛星画像から作成したSDBの例である。ここでは、水深0mから25mまでを推定し、カラースケールで表示している。

この他、最新の研究技術として、ドローンで多方向から撮影された画像からSfM (Structure from Motion) 写真測量の原理で水深を推定する方法なども報告されている。SfM写真測量では、海底面が河口域で石の多い場所のように画像間をマッチングするための特徴が面的に十分に分布している必要があり、砂地などでマッチングするための特徴が乏しい海域では適用できないため、活用できる範囲は限定的と考えられる。

本研究では、広範囲の海域の水深を低コストで調査できる可能性のあるSDBの技術について特に掘り下げていくことにした。SDBについてはこれまで様々な解析手法が提案されてきたが、沿岸域の光学的な物理モデルに基づいて、衛星画像のデータと水深の関係を表すモデルがしばしば用いられてき

た（例えば、Lyzenga 1978）。これらのモデルでは海域ごとに海水の透明度などの影響で変化する係数が含まれるが、衛星画像とそれに対応する測深データ（学習用水深データ）との比較でモデルの係数を回帰的に得るため、半経験的手法と呼ばれる。近年は、物理モデルにかわり機械学習で水深推定モデルを構築する方法も提案されている（Manessa et al 2016; Misra et al 2018）。しかしながら、これらの方法では衛星画像ごとに対応した学習用水深データを得るための現地調査が必要である。SDBに期待される低コストかつ迅速に情報を提供するという目的を達成するためには、現地調査を必要とせず、衛星画像のみからあらゆる海域の水深を高精度で推定可能な方法が求められる。そこで、本研究では機械学習と多数の衛星画像を活用することで衛星画像のみから効率的かつ高精度でSDBを作成する方法を考案し、その精度についての検証を行った。

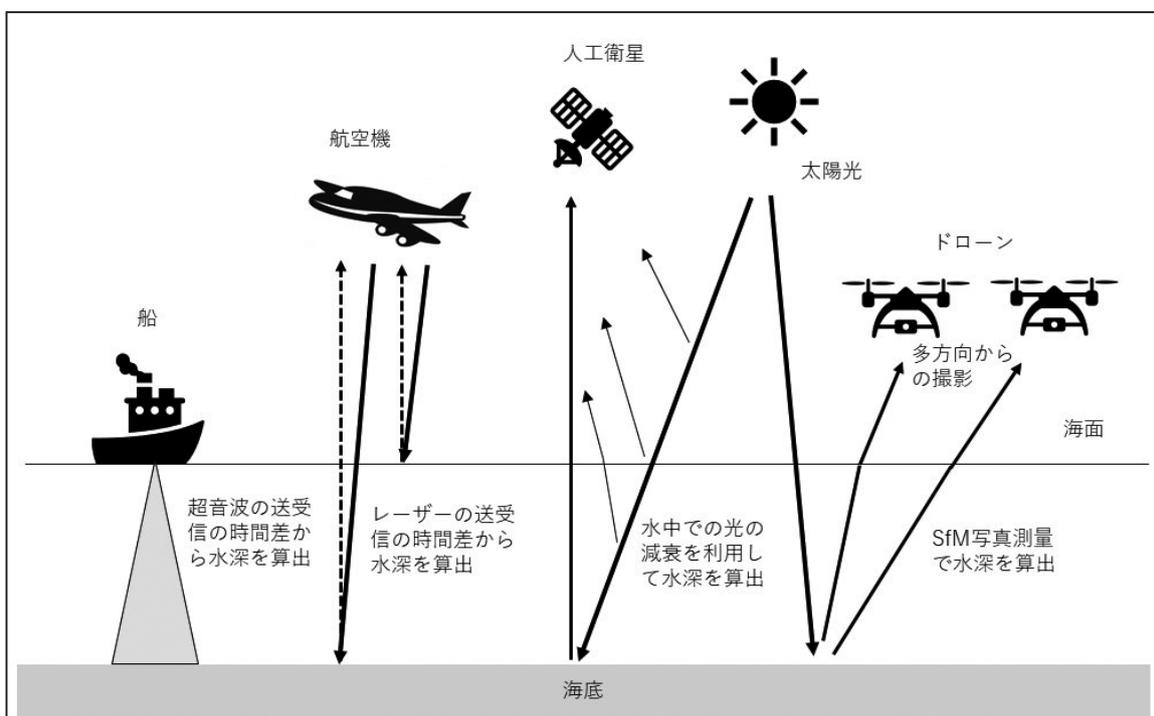


図1 浅海域を計測する様々な技術

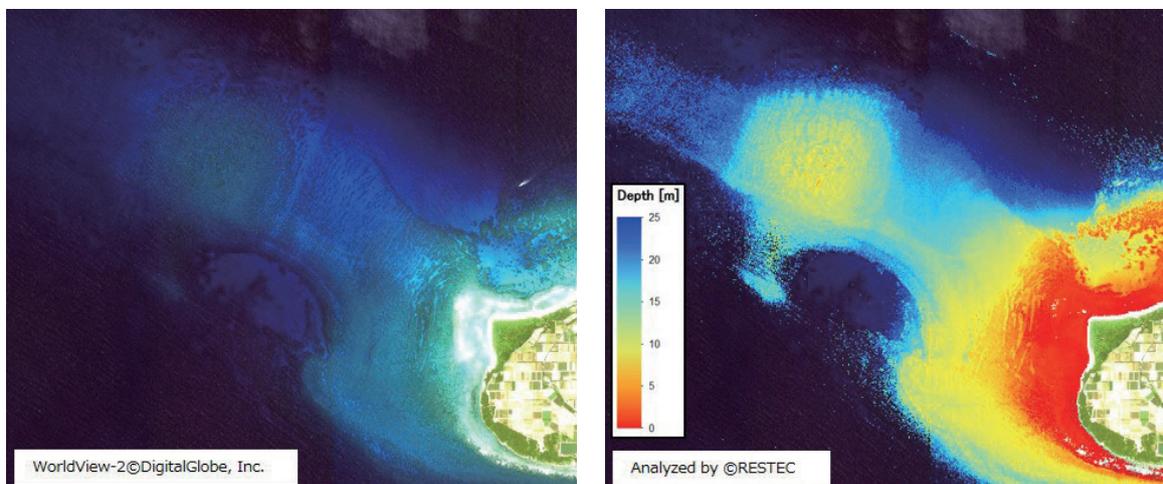


図2 SDBの例（出典：一般財団法人日本水路協会（2016））

## 2. 解析環境とデータ

Google社が提供するクラウド上の解析環境Google Earth Engine (GEE) を利用して、解析を行った。衛星画像としてSentinel-2L-2Aプロダクトを使用した (European Space Agency 2015)。同プロダクトはSentinel-2L-1Cプロダクトより作成された大気補正済み地表面反射データである。

本研究では機械学習により衛星データと水深データを対応付けるモデルを構築するが、正解とする水深データとしては、表1の測深データを用いた。各海域について、2015年6月から2021年11月までの雲量10%未満のすべてのSentinel-2の画像を取得し、測深データ (目的変数) と対応する衛星画像の画素データ (説明変数) を1組とするデータセットを衛星画像ごとに作成した。このデータセットから海域ごとに無作為に20,000点を上限としてデータを抽出し、さらに無作為に学習用と評価用に分けて学習データセットと評価データセットを構築した。

表1 測深データ

海域名	測深方法	提供機関
竹富島	シングルビームソナー	山口大学
プエルトリコ・ガウニカ	航空レーザー測深	NOAA
ハワイ・オアフ島	航空レーザー測深	NOAA
バヌアツ・エファテ島	シングルビームソナー	RESTEC
波照間島	航空レーザー測深	海上保安庁

## 3. 解析方法

水深を推定する機械学習モデルとしてはランダムフォレストを選定した (Breima 2001)。ランダムフォレストは既往研究においてもSDBの機械学習モデルとして使用されており、高い性能を発揮している (Manessa et al 2016; Sagawa et al 2019a)。

ここではすべての学習データを用いてランダムフォレストのモデルの学習を行った。ランダムフォレストでは、学習の過程で、衛星画像の反射率と水深の関係を関係づける複数の決定木を自動的に生成する。水深推定時は、入力された衛星画像の各画素の反射率データに対し、各決定木が出力した水深推定値から多数決的に最終的な水深を決定する。複数の海域を複数時期に撮影した衛星データについて、測深データとの関係を学習させることで、多様な底質や透明度に対応した決定木を生成することが想定され、汎用性を向上させることが期待できる。

学習済みのランダムフォレストモデルを用いたSDBの作成は3ステップで行うとともに、それぞれの段階で精度評価も実施した。各ステップの処理内容について以下に説明する。

### 3. 1. ステップ1

ランダムフォレストによる水深推定モデルを用いて、各衛星画像に対して0-20mの水深を推定したSDB 1を作成した。SDB 1の精度評価は学習データセットと評価データセットのそれぞれに対して行った。

### 3. 2. ステップ2

水中での減衰率の高い近赤外バンドを用いて陸域を判別し、青バンドについて十分に深い海域の統計量から深海域を分類した。SDB 1 について陸域と深海域のマスキング処理を行うことでSDB 2 を作成した。SDB 2 の精度評価は同様のマスキング処理を行った評価データセットについて行った。

### 3. 3. ステップ3

海域ごとにSDB 2 のマージ処理を実施した。解析範囲の画素ごとにSDB 2 の中央値、データ数、標準偏差を算出し、データ数が3以上、標準偏差が5.0m未満の画素について、中央値をSDB 3 の出力とした。海域ごとに測深データのある画素から10,000点を上限として検証点を無作為に抽出し、精度評価を行った。

## 4. 結果と考察

図3にSentinel-2より作成したSDBの概観を示す。水深0-20mの範囲をカラースケールで表示している。図4では、(a)波照間島周辺におけるSDBと(b)測深データの分布図を示しているが、概観は類似していることが確認できる。

全海域のSDB 1-3についての精度として、平均二乗誤差平方根 (RMSE)、平均誤差、決定係数 (R<sup>2</sup>) を表2にまとめた。SDB 1 のRMSEをみると、評価データの誤差が学習データの約1.5倍となっている。SDB 2、SDB 3 の処理で精度は改善され、最終的なSDBの0-20mの推定値についての誤差はRMSEで1.76mであった。

図5に最終的なSDBと測深データの散布図を示す。データは対角線によくまとまっていることが分かる。水深の大きさについてみると、10m以上では、SDBが実際より水深を小さく推定しているデータがやや多いことが分かる。また、どの水深においても、大きな誤差を含むデータがあり、水深5m以下においても誤差が大きい場合は約5mに達している。

水深の計測精度の基準としてはIHO発行のS-44があり、水深100m未満かつUKC (余裕水深) が問題にならない海域では1b級の基準が示されている (IHO 2008)。同基準では、水平位置の測定の誤差の限度 (THU: Total horizontal uncertainty) および深さの測定の誤差の限度 (TVU: Total vertical uncertainty) を定めている。また、これとは異なる基準として、同じくIHOが定義しているCATZOC (Category Zones of Confidence) があるが、A1級、A2級、B級、C級の4段階のカテゴリについてTHUとTVUの基準を示しており、C級に達しない場合はD級に分類される (IHO 2014)。S-44の1b級の精度はCATZOCのA1級に相当する (厳密にはTVUの定義はやや異なる)。SDBについては、水平方向位置精度は衛星画像のプロダクトに依存するが、最も位置精度の高いWorldView-3はA1級の基準を満たしている (Mulawa et al 2018)。一方で、水深推定精度は、過去の文献 (Ashphaq 2021が調べた文献を対象とする) において水深10-20mまでを対象とした研究では、精度はCATZOCのA2級からD級に相当する結果が報告されており、手法と深さによる精度ばらつきが大きい。

本研究結果のSDB精度について、CATZOCの基準に照らし合わせてみると、水平方向の位置精度については、Sentinel-2のデータは2 $\sigma$ で20mであり (Sentinel online 2022)、B級の基準 (95%信頼

区間の許容誤差50m)を満たす。一方で、鉛直方向誤差の平均値および標準偏差は0.03mおよび1.76mであり、例えばC級の20mの95%信頼区間の許容誤差3.0mを満たさない。よって、現状の品質はD級であり、C級、B級の基準達成のためには、さらなる鉛直方向精度の向上が必要である。

図6は波照間をSentinel-2で撮影した日時に対応した潮位の変化を表している。潮位データは気象庁の最寄りの観測所である石垣島のデータを用いた。このデータの中央値の潮位は約77cmであり、本研究でのSDBは全期間のデータが有効の場合に、潮位77cmの時の海面からの水深を推定していることになる。一方で、観測所で記録した長期間のデータから得られる平均水面の潮位は107cmであり、その差約30cmは誤差となる。なお、図6のデータの平均値は約87cmであり、この場合の誤差は10cm程度小さくなる。しかしながら、SDBは画像ごとに必ずしも正しい推定ができるかわからないため、SDBの値としては全画像に対応するSDBの平均値を用いるほうが中央値より良いとは必ずしも言えない。

また、水深モデル構築時の各衛星画像に対応した水路測量データの水深に対する潮位補正処理は実施していない。この影響により、波照間の場合は図6のデータからすると、-70cm から+50cmの水深値の誤差を機械学習時に生じさせている。これについては、衛星画像観測時の潮位も衛星画像から予測して補正する方法などが考えられる (Sagawa et al 2019b)。

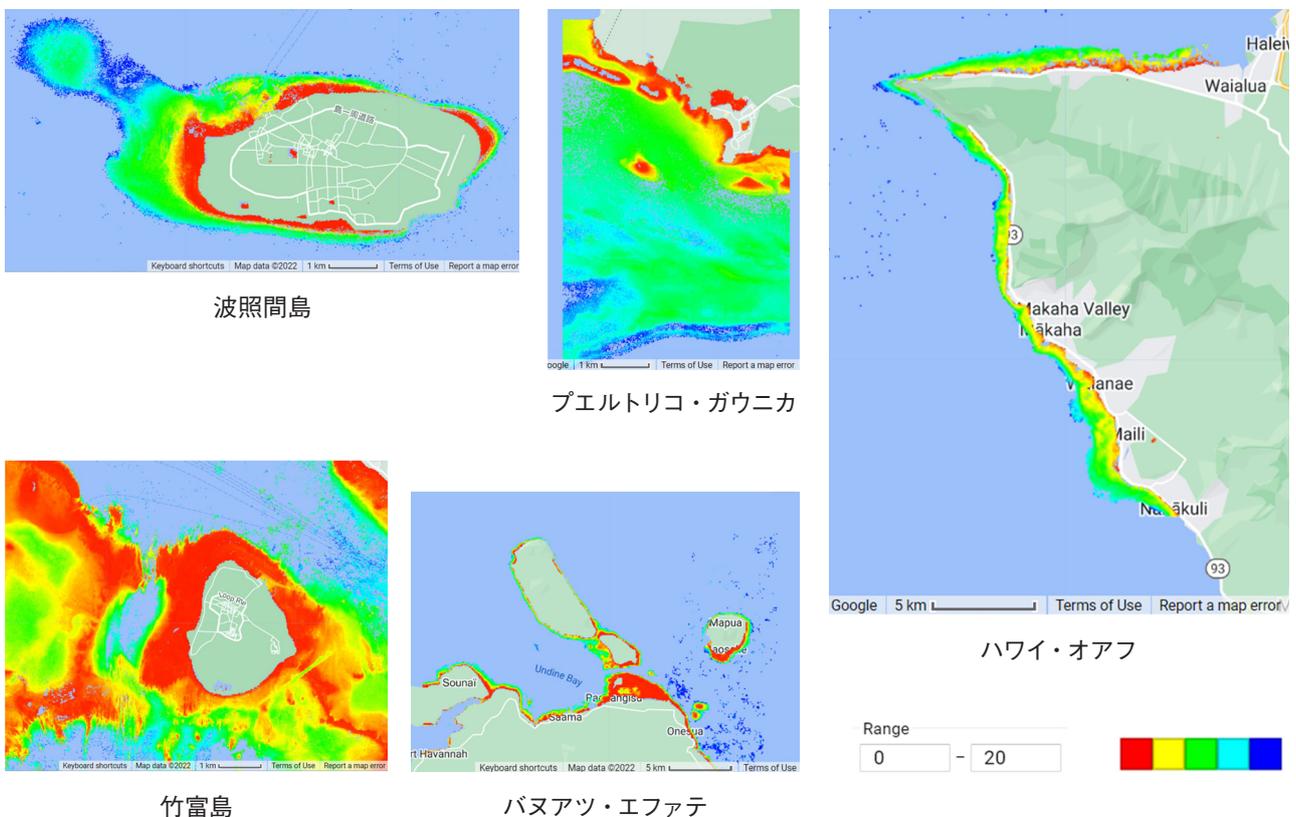
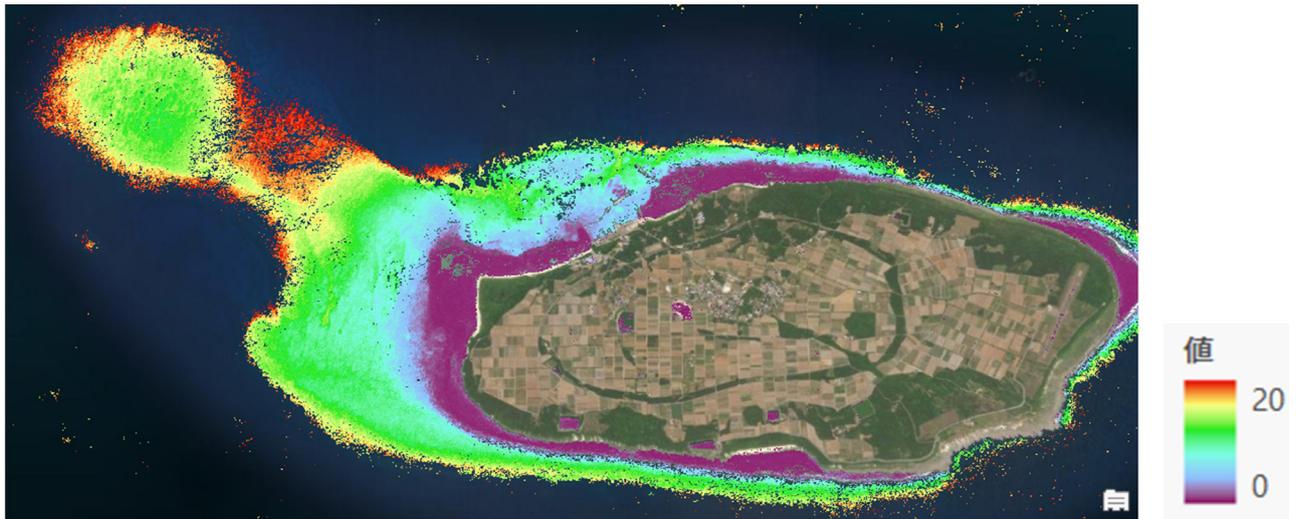
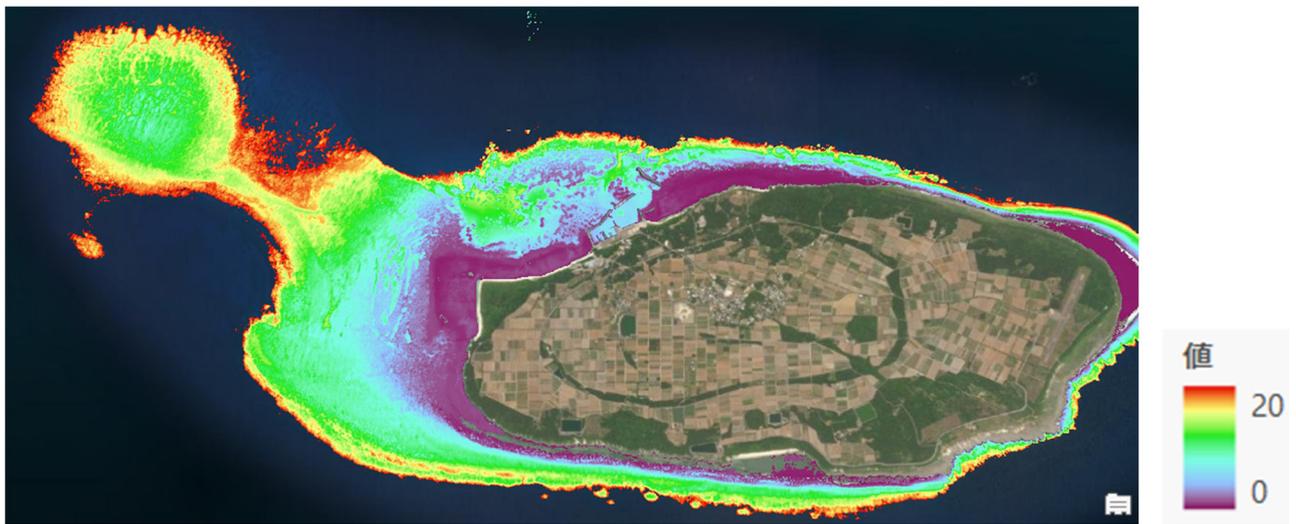


図3 Sentinel-2より作成したSDB



(a) Sentinel-2 Derived Bathymetry



(b) 測深データ (LiDAR)

図4 Sentinel-2より作成した波照間島周辺のSDBと測深データの分布図

表2 SDBの精度

	SDB 1		SDB 2	SDB 3
	学習データ	評価データ		
RMSE (m)	1.85	2.72	2.56	1.76
平均誤差 (m)	0.19	0.23	0.26	0.03
$R^2$	0.90	0.78	0.81	0.87

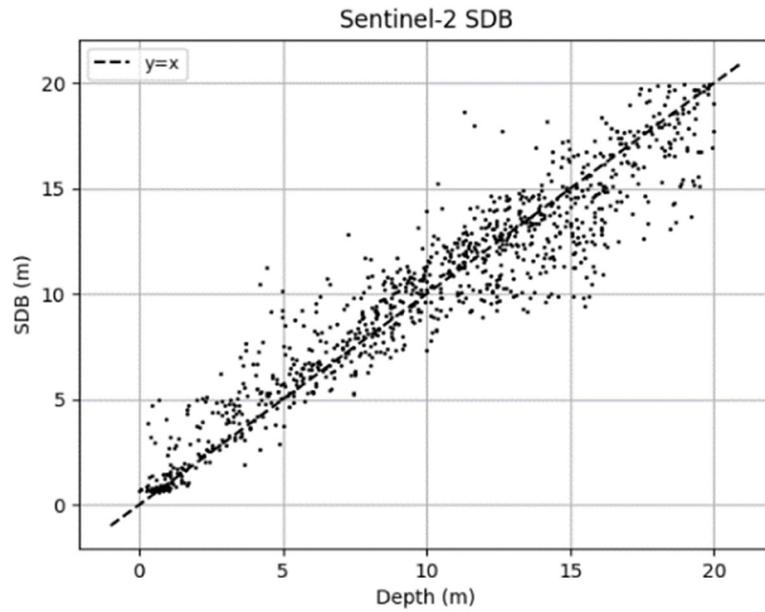


図5 SDBと測深データの散布図

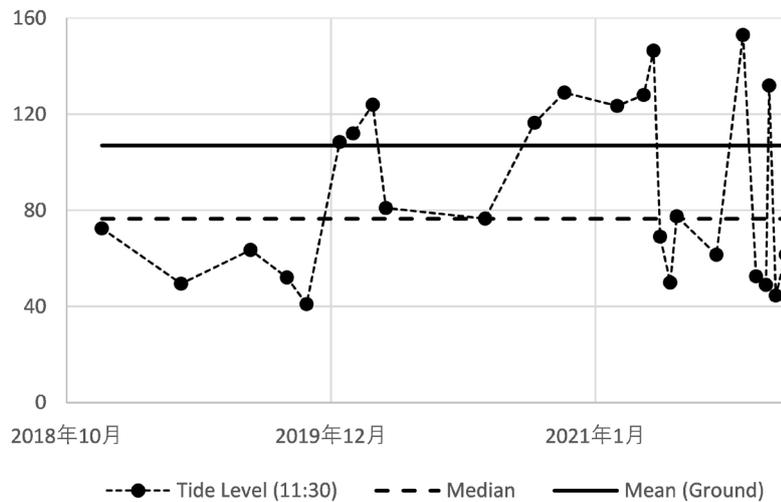


図6 波照間島のSentinel-2データの撮影日と対応する潮位

## 5. 結論

本研究で開発した水深推定モデルにより、透明度の高い浅海域について、Sentinel-2のデータのみから空間分解能10mで水深情報を得ることができるようになった。既存の深浅測量技術と比較して誤差は大きいものの、低コストで迅速に広域の海底情報を得ることができる。

精度については水平方向の位置精度はCATZOCのB級の基準を満たすが、鉛直方向精度は現状ではC級の基準に届かない。C級やB級の基準達成のためには、衛星観測時の潮位に対する補正等の実施や検証方法の見直しにより、鉛直方向精度の更なる向上が必要である。

## 6. 今後の展望

高性能の衛星センサーで撮影された衛星画像が高頻度で利用できるようになったことや、機械学習などの解析技術の向上により、SDBの精度の更なる改善が検討されている。水平方向の位置精度は、最も位置精度の高いWorldview-3衛星のデータを使用した場合で、CATZOCのA 1級の基準を満たしていることから、鉛直方向の推定精度が向上すれば、条件によっては既存の水路測量方法に迫る精度が得られる可能性もある。SDBを実用化する上で、解析条件と得られる水深推定精度の不明瞭さも主な課題であるが、SDBに用いる衛星データや対象海域と精度の関係などの整理が進めば、よりSDBを実用しやすくなり、SDBの活用が促進されることが期待される。

## 7. 謝 辞

本研究は海上保安庁海洋情報部および一般財団法人リモートセンシング技術センターとの共同研究として実施した。また、本研究の一部は公立鳥取環境大学特別研究費および公益財団法人日本財団、一般社団法人日本先端科学技術教育人材研究開発機構および株式会社リバナスの共同事業である海底探査技術開発プロジェクトの助成により実施した。測深データの一部について、山口大学神野有生准教授より提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

## 8. 参考文献

- [1] Ashphaq, M., Srivastava, P.K., Mitra, D.: Review of Near-Shore Satellite Derived Bathymetry: Classification and Account of Five Decades of Coastal Bathymetry Research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 6, 340-359, 2021. doi:10.1016/j.joes.2021.02.006.
- [2] Breiman, L.: Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5-32, 2001.
- [3] European Space Agency: Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document, Paris, France 2015. [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook) (Accessed 2022. 10. 1.).
- [4] Ghuffar, S.: DEM Generation from Multi Satellite PlanetScope Imagery. *Remote Sensing* 10, 1462, 2018.
- [5] IHO: IHO Standards for Hydrographic Surveys, Special Publication No. 44, 5th ed.; International Hydrographic Bureau: Monaco, Principality of Monaco, 2008.
- [6] IHO: Supplementary Information for Encording of S-57 Edition 3.1 ENC Data (S-57 Supplement No. 3) ; International Hydrographic Bureau: Monaco, Principality of Monaco, 2014.
- [7] Lyzenga, D.R.: Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and Bottom Features. *Applied Optics*, 17, 379-383, 1978.
- [8] Manessa, M.D.M., Kanno, A., Sekine, M., Haidar, M., Yamamoto, K., Imai, T., Higuchi, T.: Satellite-derived bathymetry using random forest algorithm and worldview-2 Imagery. *Geoplan. J. Geomat. Plan.* 3, 117-126, 2016.

- [9] Misra, A., Vojinovic, Z., Ramakrishnan, B., Luijendijk, A., Ranasinghe, R.: Shallow Water Bathymetry Mapping Using Support Vector Machine (SVM) Technique and Multispectral Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 4431–4450, 2018.
- [10] Mulawa, D., Comp C, Clarke B.: Geolocation Accuracy Performance of the DigitalGlobe Constellation During 2017 and 2018 H1, 2018. <https://calval.cr.usgs.gov/apps/sites/default/files/jacie/JACIE2018mulawadigitalglobe.pdf> (2022年12月27日アクセス) .
- [11] Sagawa, T., Yamashita, Y., Okumura, T. and Yamanokuchi, T.: Satellite derived bathymetry using machine learning and multi-temporal satellite images, *Remote Sensing*, 11, 1155, 1-19, 2019a.
- [12] Sagawa, T., Yamashita, Y., Okumura, T., Yamanokuchi, T.: Shallow Water Bathymetry Derived by Machine Learning and Multitemporal Satellite Images. In *Proceedings of the IGARSS 2019 -2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 8222–8225, 2019b.
- [13] Sentinel online. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel> (Accessed 2022. 10. 1.).

2022年度サステナビリティ研究所事業報告書

2023年9月

発行 公立鳥取環境大学サステナビリティ研究所

〒689-1111 鳥取市若葉台北一丁目1番1号

TEL (0857) 32-9100 (代)

FAX (0857) 32-9108

印刷 中央印刷株式会社

