

## 平成 30 年度 研究報告および今後の計画

### 【担当：阪本憲司・山岸幸正・関田隆一】

1. テーマ名 プロジェクト 2 「瀬戸内の里山・里海における生態系機能の解明に向けた研究拠点の形成」

テーマ③：**集団構造** 芸予諸島周辺海域の藻場に生息する魚介類（アミメハギ・ガザミ）および藻類（アカモク）、ならびに里山の河川に生息する魚類（カワムツ）および雑木林に生息する両生類（カスミサンショウウオ）を対象に、ミトコンドリア DNA およびマイクロサテライト DNA を用いて、集団構造の解明を目指す。

**陸と海をつながり** 地球観測衛星画像データを用いて因島周辺海域の藻場分布の定量解析を行う。

### 2. 研究目的

#### 【担当：阪本憲司】

「瀬戸内海沿岸の藻場および里山の河川に生息する魚類、ならびに里山の雑木林に生息する両生類の遺伝的集団構造および遺伝的多様性の解明」

(1) 瀬戸内海におけるアミメハギのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析

アミメハギ *Rudarius ercodes* はフグ目カワハギ科の魚で、全長 10cm も満たない小型種で、体は強い側扁で、茶色、褐色、黄褐色、灰緑色などの体に散らばっている小さな白斑が網目状に見えることから名付けられている。本種は、北海道～九州南岸の太平洋沿岸（種子島と屋久島除く）、青森県～九州南岸の日本海・東シナ海沿岸、瀬戸内海、朝鮮半島南岸、広東省に生息している（中坊 2013）。水深 20m より浅いアマモ場やガラモ場などの藻場や岩礁域に生息し、瀬戸内海においては流れ藻に付随する魚類の優占種でもある（山本ら 2002）。

本種の生態については古くから研究されており、繁殖期に当たる 6 月始めから 9 月初・中旬に産卵場所を探す一匹の雌のあとに、数匹の雄が一列に続いて追尾する。産卵活動は日の出前後の早朝の海草に、1 匹の雌と複数の雄によってカジメなどの付着基質に産卵し、2～3 日で孵化する。雌は産卵後、最短

5日 で再び産卵を行う (赤川 1995)。稚魚は流れ藻に付随する習性があり、20mm 前後で沿岸の藻場へと移動する (内田 1927)。

今回解析領域に選んだ mtDNA とは、細胞小器官のミトコンドリアの中にある DNA のことで、母性遺伝する特徴をもつ。D ループは、その mtDNA の中にある非遺伝子領域である。塩基配列の変異が蓄積しやすくそれが遺伝的変異として受け継がれる。そのため、集団間の類縁関係や遺伝的分化などの系統解析に多用される。

アミメハギを解析対象とした理由は、付着卵であり遊泳力が低いため拡散しにくいことが挙げられる。また、水産利用されていないため、種苗生産や放流などがされておらず人為的な遺伝的攪乱の可能性は低いからである。

水族遺伝育種学研究室では、瀬戸内海における本種のミトコンドリア DNA (mtDNA) D-loop 領域における遺伝的集団構造の解明を目指している。本研究では流れ藻に付随する稚魚の起源を検討するうえで必要な知見を得るため、芸予諸島を中心とし、東は香川県志度湾、西は山口県屋代島までの各所で採集を行った。今回は、これらの地点において採集した本種の D-loop 領域におけるハプロタイプ構成の解析から、瀬戸内海における遺伝的集団構造の解明を目的とした。

## (2) 瀬戸内海におけるガザミのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析

ガザミ *Portunus trituberculatus* は、北海道以南の本州、四国、九州、沖縄のわが国周辺水域をはじめ、台湾、朝鮮半島、中国に分布するワタリガニ科の甲殻類で、とくに三河湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海等内湾性の強い海域に多く、日本海にも生息する(萱野 2010)。

本種は甲殻が 15cm を超える大型のカニで、水深 5~30m の砂・砂泥域に生息し、寿命 2~3 年程度のカニである (柳 1997)。甲羅は菱形状になっており、鉗脚と第二脚から第四脚までは普通のカニと同じ脚をしているが、第五脚は脚の先が平たく変形した遊泳脚となっている。

本種の産卵期は 4~9 月ごろであり、小型の雌ガニの産卵回数は 2 回、大型雌ガニで 3~4 回である。産卵数は雌ガニの大きさに比例し、80~450 粒である。抱卵した親ガニからゾエアでふ化し、プランクトン生活をする。ゾエア期では、4 回脱皮してメガロパとなり、メガロパは 1 回の脱皮で稚ガニになる。稚ガニになると、プランクトン生活から低生生活に移行するが、一部は流れ藻中に紛れて分布を広げるものもある (山口県 2012)。

本種は秋から冬にかけての一般的な食用ガニで、近年では主に小型底曳網や刺網で多く漁獲されており、瀬戸内海で漁獲されるカニ類の中では最も価格が

高く、古くから多くの府県で栽培対象種として取り上げられ、瀬戸内海でも兵庫、岡山、広島、山口、愛媛、香川などで放流が行われている。瀬戸内海では、ガザミの生息に適した砂泥域が多く、2008年では全国で漁獲されるガザミの58%が瀬戸内海で漁獲されている。1982年以降種苗放流量が増加しているが、漁獲量はこれと一致した増加が認められない(萱野 2010)。

本種は稚ガニ期に流れ藻に付着し分布を広げ、他地域との遺伝的な交雑が行われている可能性がある。また、人工種苗の放流等による自然集団への遺伝的な影響の大きさを把握するためには、まず自然集団の遺伝的集団構造を明らかにすることが重要である。

ミトコンドリア DNA は、多くの生物で母系遺伝することから、生物種の母系を検出することで個体群の遺伝的多様性を評価することに利用される。また、ミトコンドリア DNA の D-loop 領域は、非遺伝子領域であるため塩基に変異が入りやすく且つ蓄積しやすいという特徴がある。このため、遺伝的変異を検出することに適している。

ガザミのミトコンドリア DNA を用いた全国的な遺伝的集団構造の調査は、今井・沼地(2002)により行われているが、瀬戸内海での流れ藻と遺伝的集団構造との関係性は調べられていない。そこで本研究では、瀬戸内海を調査範囲として、各島に生息しているガザミのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop 領域)における遺伝的集団構造を明らかにすることを目的とした。

### (3) 西日本におけるカワムツのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域 (D-loop) に基づく遺伝的集団構造の解析

日本には、一級河川 14,065、二級河川 7,081 の計 21,146 を超える河川があり(国土交通省)、亜種を含め 318 種類の淡水魚類が生息していることが知られている(細谷 2003)。しかし、その中にはオオクチバスやニジマスなどの外来種も多く含まれている。また、近年では開発や異常気象による環境変化などで淡水魚類の生息域は一段と狭められ、荒廃傾向にある。既に絶滅した種もあり、生態系への影響が懸念されている。

カワムツ(学名：*Candidia temminckii*)は、コイ科カワムツ属に属する純淡水魚であり、本州中部以西、四国、九州、朝鮮半島、台湾、中国などの東アジアに自然分布している。河川上中流域の流れの緩やかな淵に多く生息し、雑食性で底生動物、落下昆虫、付着藻類を捕食する(日本魚類館 2018)。また、水質悪化にも弱く水質汚濁の指標生物として利用されている。

ヌマムツ(学名：*Candidia sieboldii*)とカワムツの両種は、従来同一種とされ「カワムツ A」および「カワムツ B」の 2 型として扱われてきたが、2003 年

に「カワムツ A」はヌمامツ、「カワムツ B」はカワムツとして再記載された。しかし、それ以降も属名が変更されるなど議論が続いている。また、ヌمامツは 12 府県でレッドリスト（山口県、愛媛県で絶滅危惧Ⅰ類、大阪府、香川県で絶滅危惧Ⅱ類）に記載されており、従来低地の流れの緩やかな小河川に広く生息していたと考えられたが、生息環境が限られている場に生息しているため、河川改修や水質悪化など河川環境の人為的な改変の影響を受けやすく、個体数や生息域の減少が生じたと考えられている。本種もヌمامツ程ではないが、名古屋市レッドデータブックなごや 2015 で絶滅危惧ⅠB類に指定されるなど、地域によっては減少傾向ある。今後は名古屋市だけでなく他の地域においても絶滅危惧に指定される可能性は捨てきれない。

ヌمامツとカワムツの遺伝的集団構造に関し、静岡県以西の本州、四国、九州北部の広域に及ぶ河川 37 地点 107 個体を用いて遺伝子解析が行われた（松岡ら 2015）。その結果、①東海、②近畿、中国、四国の一部、③中国、四国、九州の 3 系統に別れた。しかし、本種 3 系統の分布成立過程は不明であり、狭域での遺伝的集団構造の解析もほとんど行われていない。また、「広島県備後地域におけるカワムツのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域 (D-loop) に基づく遺伝的集団構造の解析」の研究（北村 2018）により、有地川、羽原川、本郷川、藤井川の計 53 個体で Hap1、山南川の計 11 個体で Hap2 が検出されている。しかし、解析された個体数は少なく、本種の遺伝的集団構造の解明にはさらなる調査・解析が必要とされる。そこで本研究では、より広範囲な近畿、中国、四国および九州地方に生息するカワムツのミトコンドリア DNA D-loop 領域に基づき、各河川およびその水系における本種の遺伝的集団構造を解析し、各地点における遺伝的多様性の評価を目的とした。

#### （4）広島県に生息するカスミサンショウウオの遺伝的集団構造

カスミサンショウウオ *Hynobius nebulosus* は有尾目サンショウウオ科に属する小型サンショウウオの一種であり、西日本に広く分布している。成体は主に里山などの林床に生息し、産卵は水田の畔や湿地で行われることが多い。孵化幼生は一定期間を水中で過ごした後、変態し上陸する。このように、本種の生活史は人間活動の影響を受けやすい環境に依存しているため、近年では宅地開発や耕作放棄、畔のコンクリート化などにより本種の生息環境は年々失われている。そのため、環境省レッドリストで絶滅危惧Ⅱ類に指定されているほか、島根県を除くすべての生息府県でレッドリストに掲載されているなど、生息域全域で保全が求められる現状にある。

本種は形態および繁殖生態に差異のある個体群が複数存在することが知られており、これらは「地域型」と呼ばれる。広島県内には瀬戸内型、安芸型、移行

型、高地型、石見型の5型が生息することが報告されている。これらの地域型間には物理的な要因による生殖隔離があると考えられる一方で、これらの地域型間の遺伝的関係は明らかになっていない。

本研究では、広島県内から各地域型を採集し、ミトコンドリアDNA(以下 mtDNA)の塩基配列解析によって遺伝的集団構造を明らかにし、本種の保全単位を設定するための知見を得ることを目的とした。

**【担当：山岸幸正】**

**「瀬戸内海沿岸域の藻場生態系における海藻類の種構成および  
系統地理的解析」**

海藻類はいわゆる「藻場」を形成し、多様な海洋生物の生育場・産卵場となるなど、沿岸の生物多様性の維持に重要な機能を持つと考えられている。またある種の海藻は、もともと生育していた藻場において基質から脱落しても、流れ藻となって異なる場所へと移動しながら種々の海洋生物に生活場所を提供する。瀬戸内海における藻場の構成種を把握し、さらに各地の藻場間の海藻集団にどの程度交流があり、どのような地理的系統群が存在しているのかを把握することは、藻場の保全や利用のために必要である。本研究では、瀬戸内海における藻場の調査を継続的に行い、藻場を構成する海藻種およびその経年変化を明らかにする。また、藻場や流れ藻優占種である褐藻アカモクを対象として、しまなみ海域周辺の各海岸のアカモク集団の系統解析を行い、集団の遺伝的構成を明らかにする。

**【担当：関田隆一】**

**「衛星画像藻場分布」**

里海の豊かさを、持続可能性を伴って維持するには、海の状態やその植生を表すパラメーターについて季節や経年化変化を計測することが不可欠となる。本研究は地球観測衛星によるリモートセンシングデータから瀬戸内海の藻場の分布状況を精度付きで観測し、里海の豊さを定量的に把握するものである。

里海の豊かさを藻場の状態(色や面積)で地球観測衛星によるリモートセンシングデータを使って定量化し、持続的な状態モニターにより藻場の経年変化を把握する技術の確立が本研究の目的である。特に本研究では、藻場が海岸周辺の人々の活動により受ける影響及び里山から河川を伝って排出する砂等で受ける影響をモデル化する技術の確立まで踏み込む計画であり、これは従来研究にないもので意義が大きいと言える。

### 3. 30 年度の実施目標及び実施計画

#### 【担当：阪本憲司】

「瀬戸内海沿岸の藻場および里山の河川に生息する魚類、ならびに里山の雑木林に生息する両生類の遺伝的集団構造および遺伝的多様性の解明」

- (1) 瀬戸内海におけるアミメハギのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析
- (2) 瀬戸内海におけるガザミのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析
- (3) 西日本におけるカワムツのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析
- (4) 広島県に生息するカスミサンショウウオの遺伝的集団構造

#### 【担当：山岸幸正】

「瀬戸内海沿岸域の藻場生態系における海藻類の種構成および系統地理的解析」

- (1) 因島の藻場の定量的調査  
藻場の状況を把握するために、これまで行ってきた藻場の種組成による調査に加えて、平成 30 年度は藻場を定量的に把握することを目的として、因島八重子島の海岸で調査ラインを設定し、コドラートを用いた海藻種の被度の計測を行う。同一地点で 2008 年度に実施した調査データがあるため、これとの比較を行い 10 年間の変化について明らかにする。
- (2) アカモクの *cox3* による系統地理的解析  
アカモクの系統地理的解析として、しまなみ諸島や、本州および四国側の海岸から材料となるアカモクを追加して採集し、解析地点および個体数を増やして *cox3* による解析の精度を高める。
- (3) アカモクのマイクロサテライトによる系統地理的解析  
アカモクの系統地理的解析に用いる DNA 領域として、新たにマイクロサテライト領域の解析を行い、変異が多くみられ解析に適すると考えられる領域の選定を行う。

#### 【担当：関田隆一】

「衛星画像藻場分布」

瀬戸内の藻場の現状を現地検証し、様々な観測データを活用した藻場の定量

化技法を明確にすることで、持続的なデータ観測方法を明確にすることが平成30年度の目標である。

具体的には、海洋観測技術と大気補正法、浅瀬の藻場観測に適したセンシングと解析技法及び藻場の生育増減に影響する陸域の要因について先行研究論文サーベイで明らかにし、更に環境省の調査結果報告書をベースに、本研究対象の因島一周の海岸で現地データ取得を行い環境省データの検証と今後の研究基盤として精細化を行う。

解析技法の研究としては、藻場の定量化技法とデータ補正方法を先行研究の中から適切なもの（NDVI 値活用、マルチスペクトル画像とパンクロマティック画像の活用及び大気と海洋の補正技法など）を選定するが、前述したとおり水中の藻の識別は従来から困難が多く、更に海洋観測ではセンサーに適した大気と海中のデータ補正がキーとなる。瀬戸内に適した定量化技法とデータ補正方法を創造するチャレンジングな研究である。

更に海洋観測衛星から本研究対象域が判別可能な画素でのデータ入手方法の具体化が急務であるが、前述したとおり無料で入手できるデータでは画素数が粗い。その対策としては有料データの購入及びNASAの研究コミュニティへの参加を検討する。

東京大学の岩崎先生から紹介いただいた広島大学大学院の作野准教授と海洋観測衛星データからの藻場分布計測をテーマに研究討議を行いながら推進する計画である。

#### 4. 研究成果

##### 【担当：阪本憲司】

##### 「瀬戸内海沿岸の干潟・藻場および河川に生息する魚類の 遺伝的集団構造および遺伝的多様性の解明」

(1) 瀬戸内海におけるアミメハギのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析

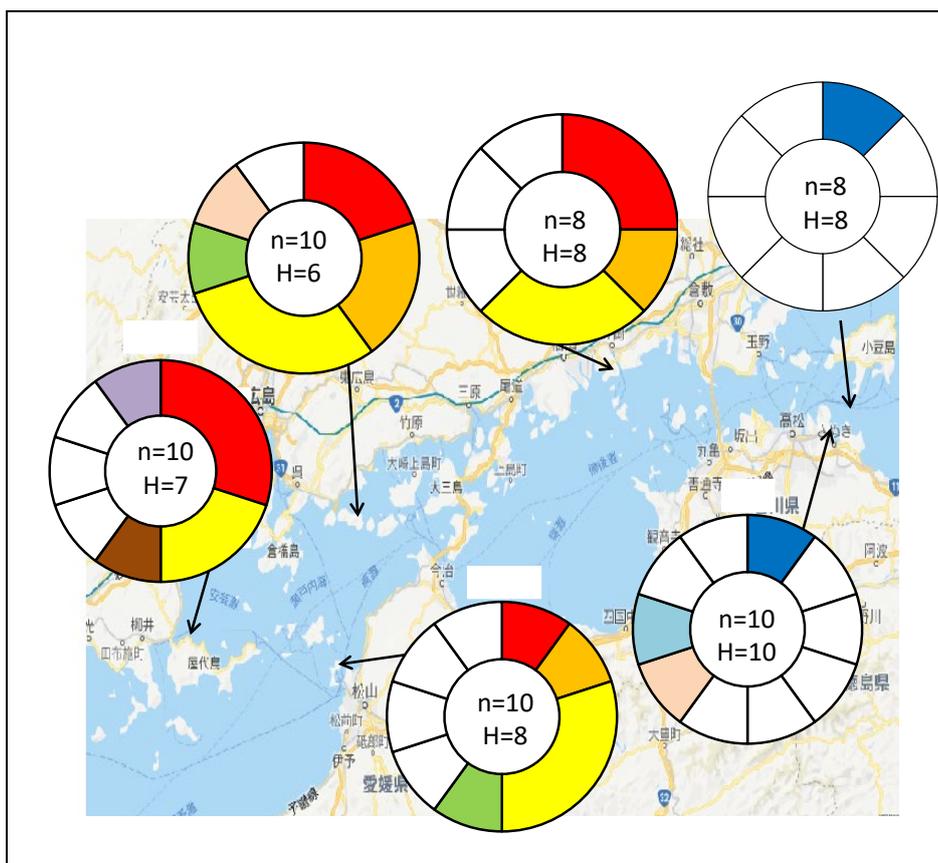
瀬戸内海・芸予諸島東部海域より採集された、高松 (n=10)、笠岡 (n=8)、大浜 (n=9)、折古ノ浜 (n=10)、生口島 (n=10)、伯方島・新開橋 (n=9)、伯方島・沖浦 (n=9)、大三島 (n=9)、大島 (n=10)、上蒲刈島 (n=10)、興居島 (n=10)、屋代島 (n=10) のサンプル、および流れ藻から採集された志度湾 (n=8)、多々羅大橋南 (n=7)、大三島～伯方島間 (n=6) のサンプル (n=135) から68種類のハプロタイプが検出された。

他の地点間で出現した共通ハプロタイプは、高松と吉海町名以外で出現した Hap1、笠岡・折古ノ浜・新開橋・生口島・大三島・吉海町名・上蒲刈島・興居島で出現した Hap3、笠岡・折古ノ浜・生口島・大三島・吉海町名・上蒲刈島・興居島・屋代島で出現した Hap4、生口島・沖浦・屋代島で出現した Hap5、大浜・大三島～伯方島間で出現した Hap8、大浜・折古ノ浜・新開橋・上蒲刈島・興居島で出現した Hap9、大浜・生口島で出現した Hap14、高松・折古ノ浜・志度湾・大三島～伯方島間で出現した Hap19、高松・生口島・上蒲刈島で出現した Hap25、高松・沖浦で出現した Hap26、吉海町名・屋代島で出現した Hap48、大三島～伯方島間・多々羅大橋で出現した Hap64、の 12 種類だった。ハプロタイプは大きく分けて、3 つのクラスターに分かれた。

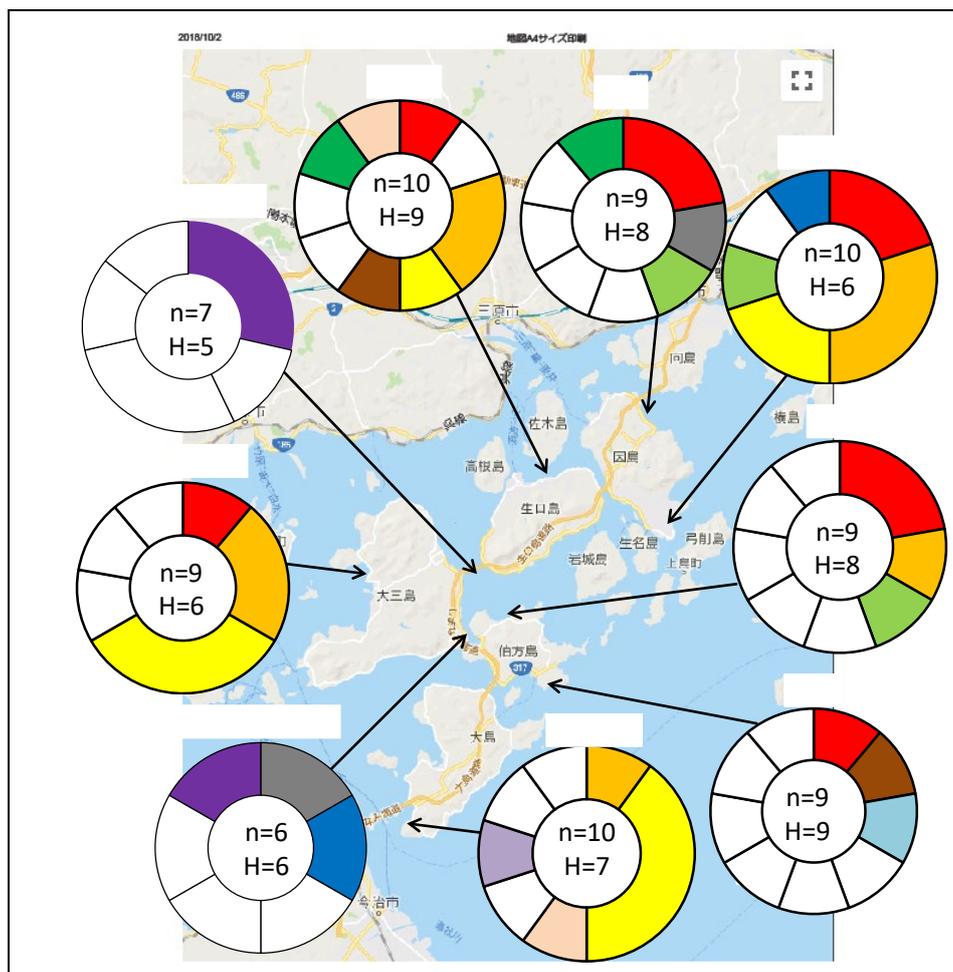
流れ藻と共通するハプロタイプが出現したのは大三島～伯方島間に出現した大浜の Hap8、志度湾と大三島～伯方島間に出現した折古ノ浜と高松の Hap19 だった。

$F_{ST}$  値は各地点間での分化の程度を表したもので、0.25 以上で非常に大きな遺伝的分化、0.15～0.24 で大きな遺伝的分化、0.05～0.14 で中程度の遺伝的分化となっている。分化の程度が高ければ地点間の交流が少なく、低ければ交流が頻繁に起きていることを表す。今回の解析結果から算出された  $F_{ST}$  値は、因島(大浜)から伯方島(沖浦)・大島(吉海町名)・興居島・上蒲刈島の間、因島(折古ノ浜)から高松・伯方島(沖浦)・大島(吉海町名)の間、笠岡から伯方島(沖浦)・大島(吉海町名)・興居島の間、高松から伯方島(沖浦)・大島(吉海町名)・興居島・上蒲刈島・大三島の間、伯方島(沖浦)から屋代島の間、伯方島(新開橋)から大島(吉海町名)・興居島の間、大島(吉海町名)から屋代島の間、興居島から屋代島の間で中程度の遺伝的分化があり、そのほかの地点間では遺伝的分化は小さかった。中程度の遺伝的分化のあった地点間の数はそれぞれ、高松が 6、笠岡が 3、因島(大浜)が 4、因島(折古ノ浜)が 3、伯方島(新開橋)が 2、伯方島(沖浦)が 5、大三島が 1、大島(吉海町名)が 6、上蒲刈島が 2、興居島が 5、屋代島が 3 で、全体では 20 だった。

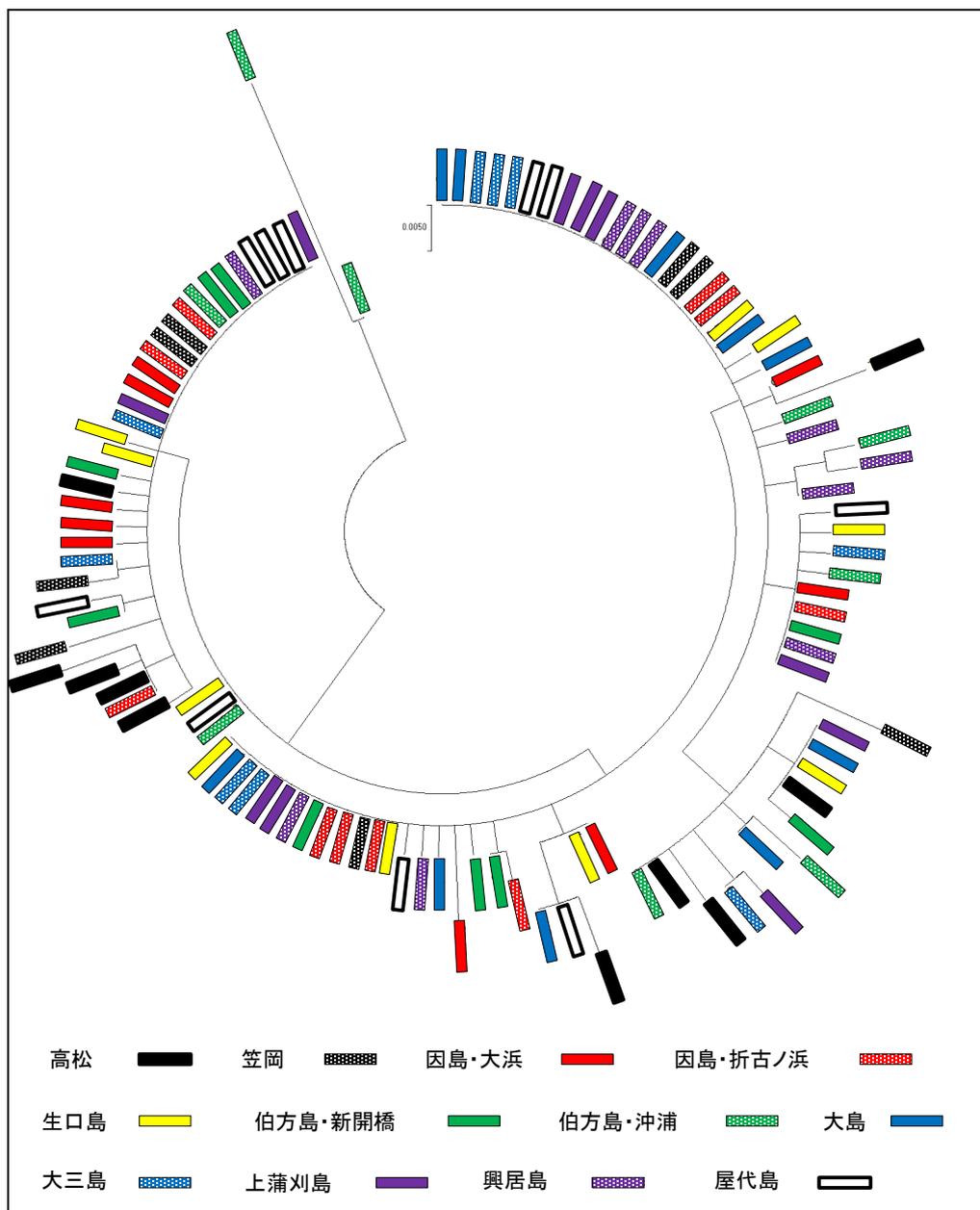
検出されたハプロタイプ 68 種類の内、他の地点と共通するハプロタイプは 12 種類であった。しかし、 $F_{ST}$  値を算出した結果、 $-0.092\sim 0.2033$  となり、いくつかの地点間で中程度の遺伝的分化が認められたものの、芸予諸島海域においては遺伝的分化の程度は低い結果となった。



瀬戸内海における本種のハプロタイプ構成



芸予諸島における本種の解析結果



瀬戸内海における本種の系統樹

採集地点間の Fst 値

	生口島	因島 (大浜)	因島 (折古ノ浜)	笠岡	高松	伯方島 (沖浦)	伯方島 (新開橋)	大島 (吉海町名)	興居島	上蒲刈島	屋代島
生口島											
因島(大浜)	0.00859										
因島(折古ノ浜)	-0.05601	-0.02191									
笠岡	-0.01241	-0.05009	-0.04702								
高松	0.0493	0.02608	0.05018	0.00596							
伯方島(沖浦)	0.02289	0.07861	0.0591	0.06401	0.05134						
伯方島(新開橋)	-0.04	-0.04944	-0.05394	-0.06764	0.02064	0.03879					
大島(吉海町名)	0.02419	0.20331	0.1059	0.139	0.12451	0.04766	0.13531				
興居島	-0.01548	0.13368	0.0265	0.10445	0.1358	0.04537	0.07836	0.004			
上蒲刈島	-0.05475	0.07827	0.00174	0.03129	0.05532	0.00836	0.01038	-0.03299	-0.2388		
屋代島	-0.02924	-0.05254	-0.04788	-0.0589	0.0364	0.05833	-0.06273	0.1453	0.07749	0.03509	
大三島	-0.06531	0.0452	-0.04566	-0.00237	0.05634	0.01994	-0.00588	-0.01717	-0.03738	-0.09205	0

0.05~0.14・・・中程度の遺伝的分化

0.15~0.24・・・大きな遺伝的分化

0.25以上・・・非常に大きな遺伝的分化

アミメハギの遺伝的多様度は、全体で 0.934 となり非常に高かった。同じく藻場に生息しているメバルの遺伝的多様度は 0.981(村上ら 2006)、0.93 (Higuchi and Kato、2002)、ヒラメは 0.82~0.95(朝日ら 1996)であることから、本種は他の海洋魚類と同程度の遺伝的多様性を持っていることが明らかとなった。

本研究の解析により検出された 68 種類のハプロタイプの内、①クレード 1 で全てのハプロタイプが、②クレード 2 で伯方島(沖浦)以外のハプロタイプが、③クレード 3 では大島以外のハプロタイプが含まれていた。海洋生物において、分散能力と遺伝子流動の度合いは強く関連していると考えられている (Shulman and Bermingham 1995)。アミメハギは付着卵であり且つ遊泳力が低いことから分散能力は低いと考えられる。しかし、今回調査した海域において遺伝的分化の程度が低かったことから、流れ藻に起因する遺伝子流動の影響が窺えた。

今回解析した流れ藻に付随していた本種のハプロタイプの内、大三島～伯方島間で採集したものから大浜の Hap8 が検出され、志度湾と大島～伯方島間で採集したものから折古ノ浜と高松の Hap19 が検出された。

流れ藻は、藻体が十分に成長して成熟期に入り付着動物の増加などから重量を増し、波浪に耐えられなくなって仮根からあるいは仮根付近の主枝から流出すると思われる（大野 1984）。流れ藻の標識放流の調査では、30 日以上かけて 80km 近く漂流する流れ藻がある一方で、放流後最初の 5 日間で岸に打ち上げられる割合が最も多いとされている（千田 1996）。今回の調査結果から、本種の遺伝的多様度は非常に高いことが分かり、各地点で非常に多くのハプロタイプが存在しているため、採集できず未解析の個体のなかにはさらに異なるハプロタイプも多く存在していることが推察される。さらに、今回採集した大三島～伯方島間の流れ藻からは、折古ノ浜と高松に共通するハプロタイプ

(Hap19) が検出され、また、志度湾と大島～伯方島間の流れ藻からは大浜と共通するハプロタイプ (Hap8) が検出された。このことから、流れ藻による本種の分布拡大とそれに伴う遺伝子流動が示唆された。

流れ藻を介した地域間交流については、更なる解析と検討が必要である。今後は、未解析サンプルの DNA と流れ藻に付随した稚魚の DNA の解析を継続し、今回の解析データと併せることで、瀬戸内海における本種の遺伝的集団構造を明らかにする必要がある。

## (2) 瀬戸内海におけるガザミのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域(D-loop)に基づく遺伝的集団構造の解析

採集を行った 9 地点の解析結果から、向島 (n=10)、大浜 (n=5)、重井 (n=8)、折古ノ浜 (n=5)、生口島 (n=6)、伯方島 (n=4)、大島 (n=4)、上蒲刈島 (n=4)、香川県志度湾 (n=22) の合計 68 個体 54 のハプロタイプが検出された。【重井・生口島・香川県志度湾】、【向島・生口島・香川県志度湾】、【重井・伯方島・上蒲刈島】、【折古ノ浜・香川県志度湾】で共通するハプロタイプが検出された。また、各地点に固有のハプロタイプが複数検出された。

各地点のハプロタイプ多様度は 0.9523 から 1 と極めて高く、全地点で遺伝的多様性は非常に高かった。

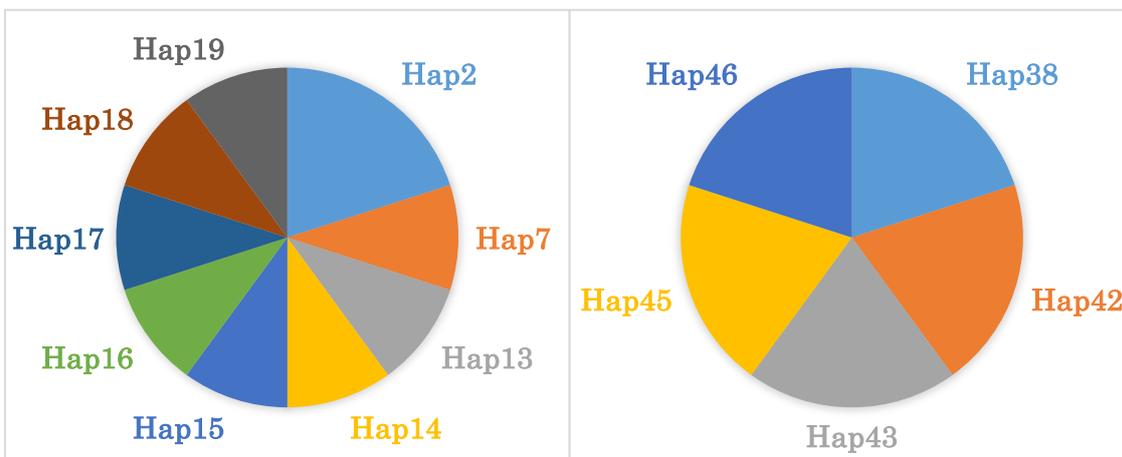
本研究で採集を行った地点間の  $F_{ST}$  値は以下のようなになった。多くの地点において遺伝的分化の程度が非常に低い結果となった。各地点の値では、向島－香川県志度湾間で最も低く (0.003)、伯方島－上蒲刈島間で最も高かった (0.18)。

系統樹は地点ごとにクラスターは少なく、それぞれ入り混じっており、各地

点で複雑に交流が起きていることが分かった。

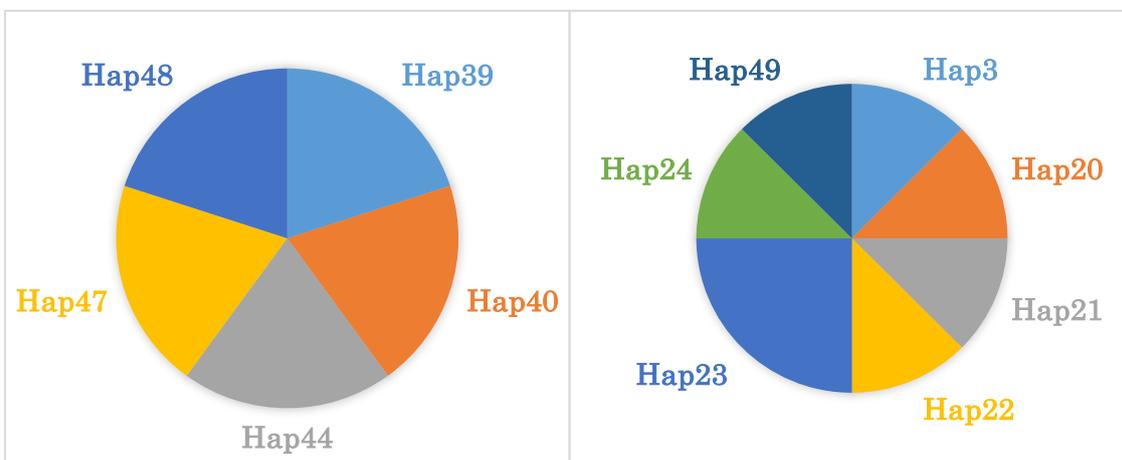
採集地点間の  $F_{ST}$  値

	向島	因島 大浜	因島 折古ノ浜	因島 重井	伯方島	生口島	大島	上蒲刈島	香川県 志度湾
向島	—								
因島大浜	-0.05	—							
因島 折古ノ浜	-0.03	-0.08	—						
因島重井	0.07	-0.02	0.01	—					
伯方島	-0.04	-0.06	-0.09	-0.03	—				
生口島	-0.03	-0.04	-0.06	-0.01	-0.03	—			
大島	0.15	0.02	0.13	0.09	-0.03	0.15	—		
上蒲刈島	-0.001	-0.03	-0.03	-0.1	-0.18	-0.02	0.001	—	
香川県 志度湾	0.003	-0.02	0.02	0.02	0.02	-0.02	0.16	-0.03	—



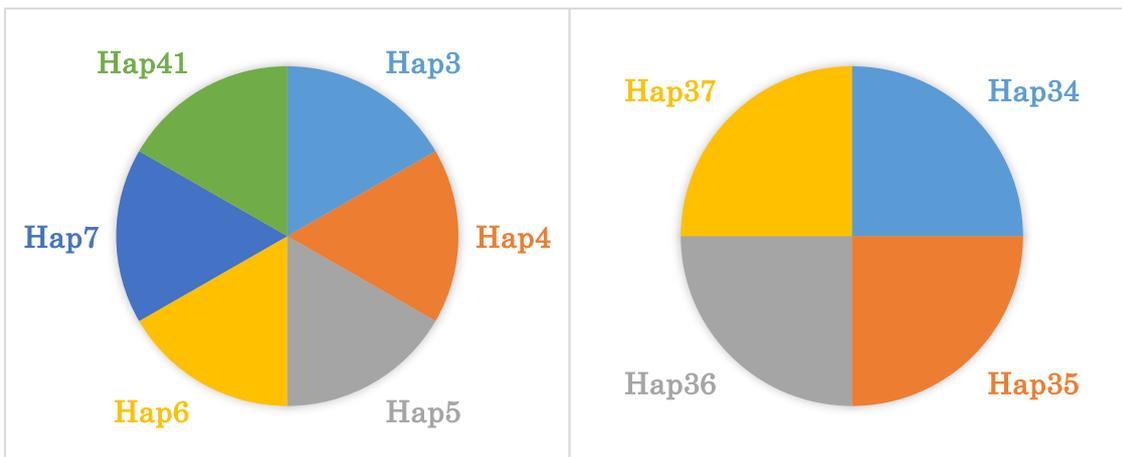
向島 (n=10)

因島・大浜 (n=5)



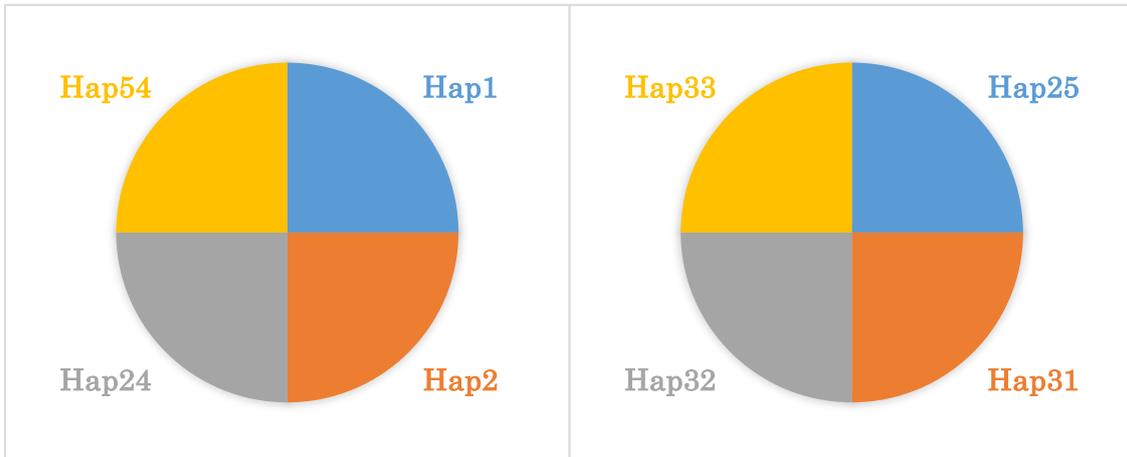
因島・折古ノ浜 (n=5)

因島・重井(n=8)



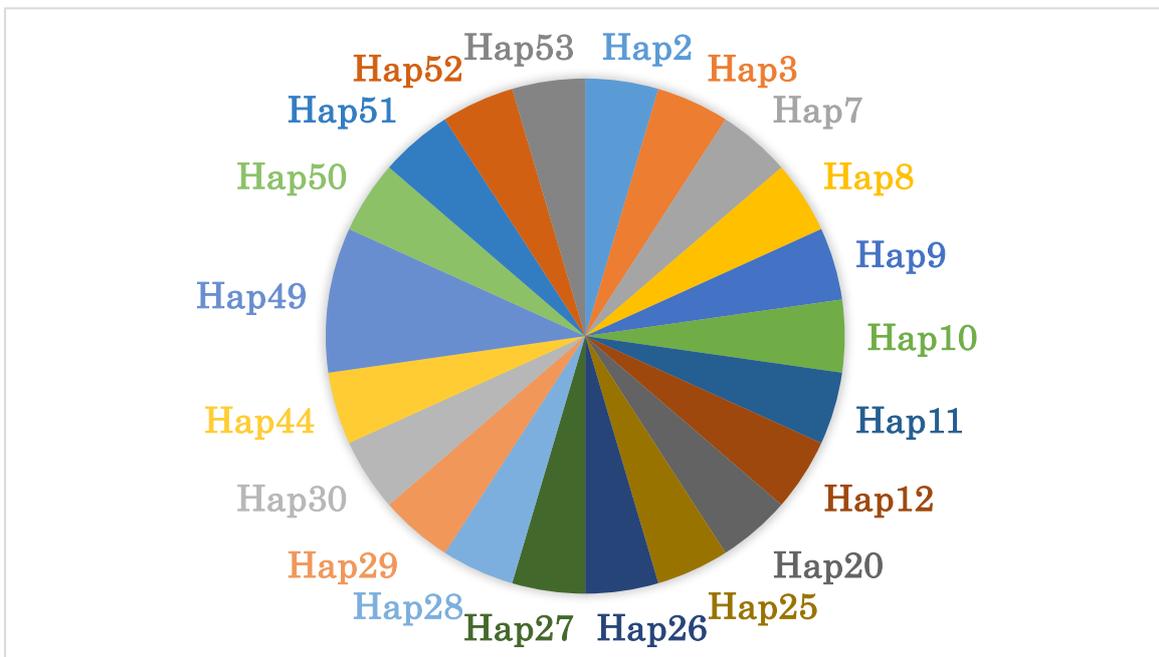
生口島(n=6)

大島(n=4)



伯方島(n=4)

上蒲刈島(n=4)

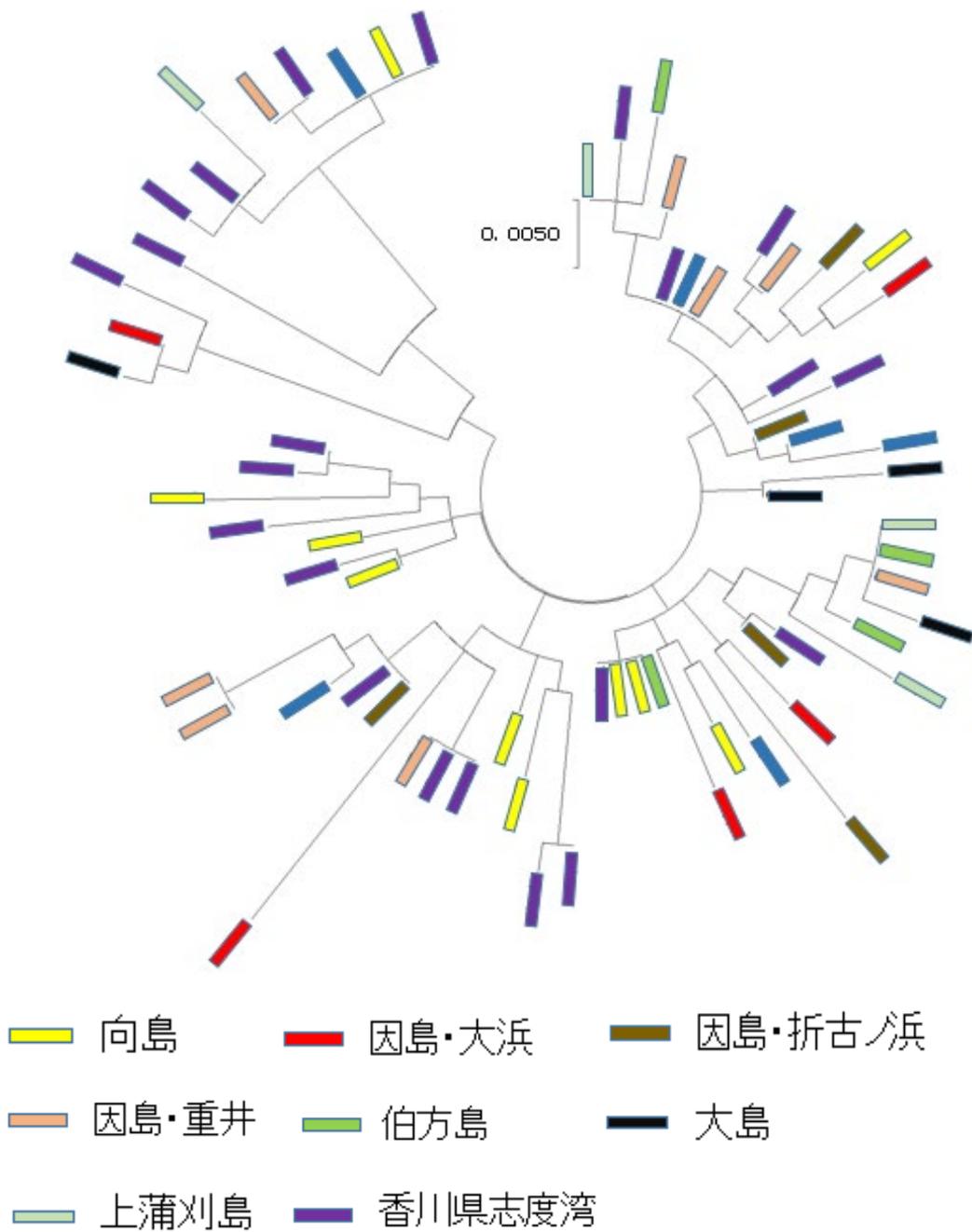


香川県志度湾(n=22)

各地点で検出されたハプロタイプ

各採集地点のハプロタイプ多様度

向島	因島 大浜	因島 折古ノ浜	因島 重井	生口島	伯方島	大島	上蒲刈島	香川県 志度湾
0.97778	1	1	0.95238	1	1	1	1	0.99524



各地点で採集した個体の系統樹

検出された 54 のハプロタイプのうち、Hap3 が重井・生口島・香川県志度湾のサンプルで共通して検出され、Hap7 が向島・生口島・香川県志度湾で、Hap20 が

重井・香川県志度湾で検出された。また、Hap24 は重井・伯方島・上蒲刈島で、Hap44 は伯方島・香川県志度湾で検出された。各地点間で遺伝的分化の程度にはばらつきがあるものの、距離が離れている地点間で共通するハプロタイプが検出され、遺伝子流動が起きていると考えられた。その要因として、瀬戸内海で稚ガニや親ガニがかなりの距離を移動していることが推察される。まず、①流れ藻に付随し、潮流の影響を受け各地に分散していることが考えられる。瀬戸内海では、潮流が西側から東側に大きく流れる動きがあり、安芸灘諸島から芸予諸島に流れている。また、芸予諸島から四国方面に流れていることも考えられる。香川県志度湾の個体は流れ藻から採集したものを解析したが、流れ藻に付随している時点で多様性が非常に高く、ハプロタイプ多様度が高いため、各地点から流れて来た流れ藻が潮流を受けることで、他地点の流れ藻と合流していることが考えられる。

本種と同じく流れ藻に付随するアミメハギでも、各地点のハプロタイプ多様度は非常に高く、距離が離れた地点でも同一のハプロタイプが確認されたことから（深坂 2019）、流れ藻を利用する生物は遺伝的多様性が高く、遺伝的な交流の機会が多くなっていることが考えられる。

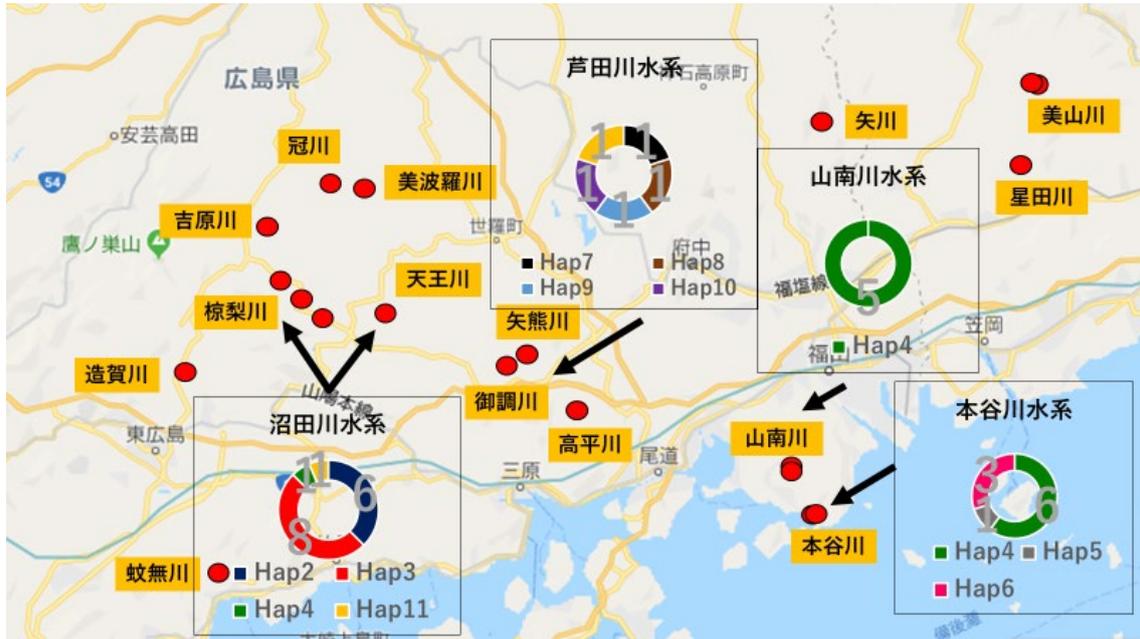
本研究では、各島間で流れ藻を採集し、交流が行われている由来を調査する予定だったが、大雨や台風の影響で採集が困難になったため、今回は各島での調査結果となった。

ガザミの稚ガニ、幼ガニは同じワタリガニ科であるタイワンガザミと酷似している。今回 2 種の判別をするにあたり、鋏脚長節の棘の数（ガザミは 4 本、タイワンガザミは 3 本）で判断した。解析を行った個体の中から他のサンプルとクラスタの異なる個体が 3 個体現れた。形態は他のガザミと変わらないため、タイワンガザミなど近縁種との交配が考えられる。同じワタリガニ科であるアカテノコギリガザミとアミメノコギリガザミの間では、交雑が起きていることが遺伝的手法で確認されているため（阪地ら 2015）、今後解析を行う必要がある。

### （3）西日本におけるカワムツのミトコンドリア DNA 非遺伝子領域 (D-loop) に基づく遺伝的集団構造の解析

採集した山南川…5 個体、本谷川…10 個体、御調川…5 個体、椋梨川…8 個体、三椒川…5 個体、為石大川…5 個体、天王川…8 個体、鷹の巣川…2 個体、妙之谷川…6 個体、吉野川…2 個体、下払川…4 個体、西深田川…4 個体、小園川…5 個体の計 13 地点 69 個体の DNA 分析の結果、大きく 2 つのクレードに別れた。





広島県の各河川におけるハプロタイプ構成

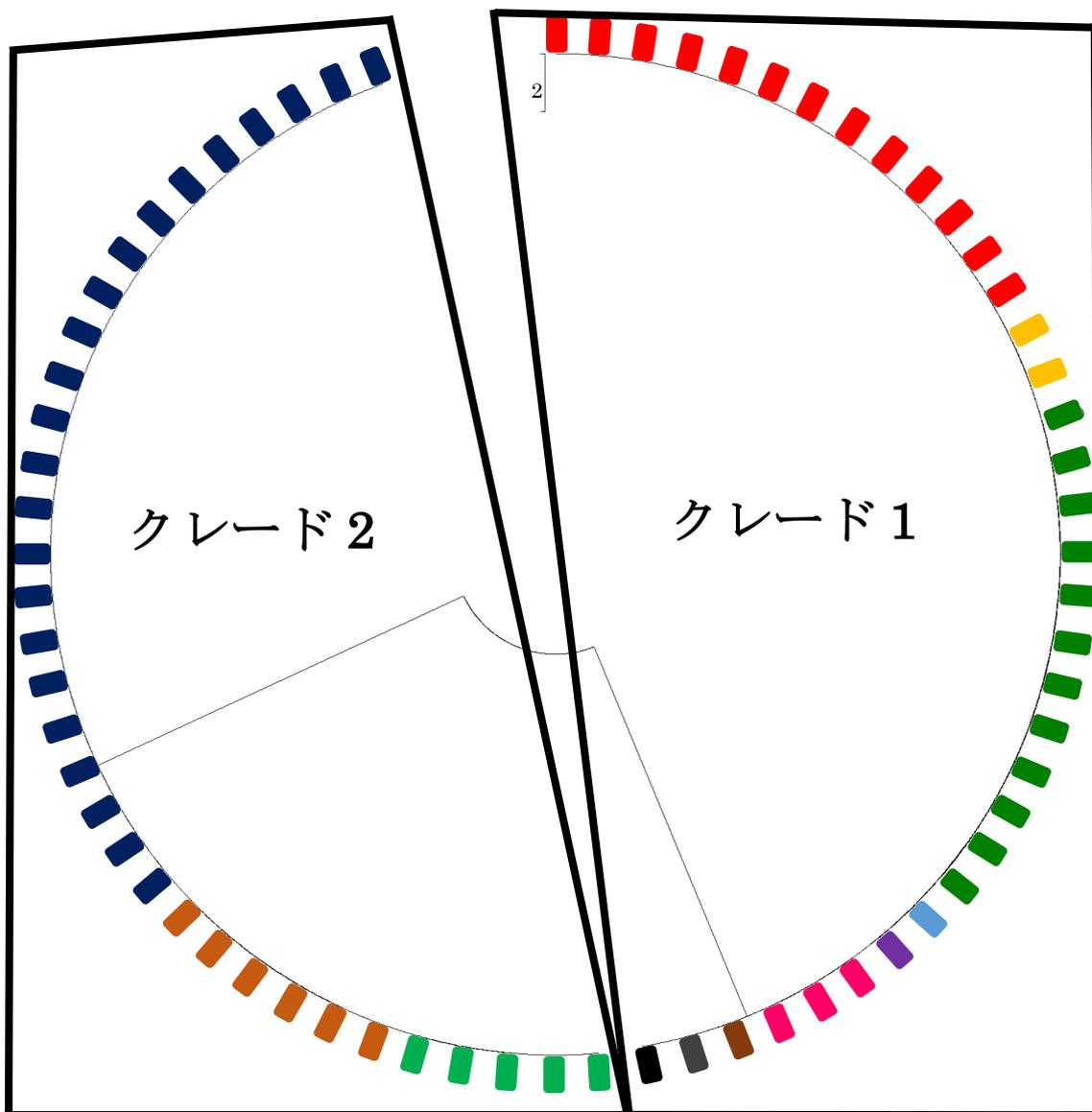
採集した各河川間の Fst 値

	妙之谷川	西深田川	小園川	為石大川	天王川	本谷川	山南川	御調川	棕梨川	三椒川	下払川	鷹の巣川	吉野川
妙之谷川	-												
西深田川	1	-											
小園川	1	0	-										
為石大川	1	1	1	-									
天王川	0.19503	0.14286	0.14286	0.71429	-								
本谷川	0.99662	0.99659	0.99659	0.75556	0.71003	-							
山南川	1	1	1	1	0.71516	0.26667	-						
御調川	0.97748	0.97727	0.97727	0.23438	0.68655	0.25485	0.3875	-					
棕梨川	0.99771	0.99769	0.99769	0		0.58889	0.75	0.2	-				
三椒川	1	1	1	1	0.22209	0.99665	1	0.97769	0.99773	-			
下払川	1	0	0	1	0.14286	0.99659	1	0.97727	0.99769	1	-		
鷹の巣川	1	0	0	1	0.14286	0.99659	1	0.97727	0.99769	1	0	-	
吉野川	1	0	0	1	0.14286	0.99659	1	0.97727	0.99769	1	0	0	-

### 採集河川の水系

県名	本流(水系)		支流	
広島県	藤井川	高平川		
	山南川	山南川		
	本谷川	本谷川		
	戸田川	御調川	矢川	矢熊川
	沼田川	棕梨川	遠賀川	天王川
	三津大川	軟無川		
	江の川	美波羅川	冠川	吉原川
岡山県	高梁川	皇田川	美山川	
山口県	由宇川	鷹の巣川		
愛媛県	中山川	妙之谷川		
高知県	吉野川	吉野川		
兵庫県	円山川	三瓶川		
福岡県	遠賀川	彦山川		
	今川	今川	十津川	
佐賀県	有田川	有田川		
長崎県	大川	為石大川		
大分県	青江川	小園川		
	西深田川	西深田川		
熊本県	球磨川	下払川		

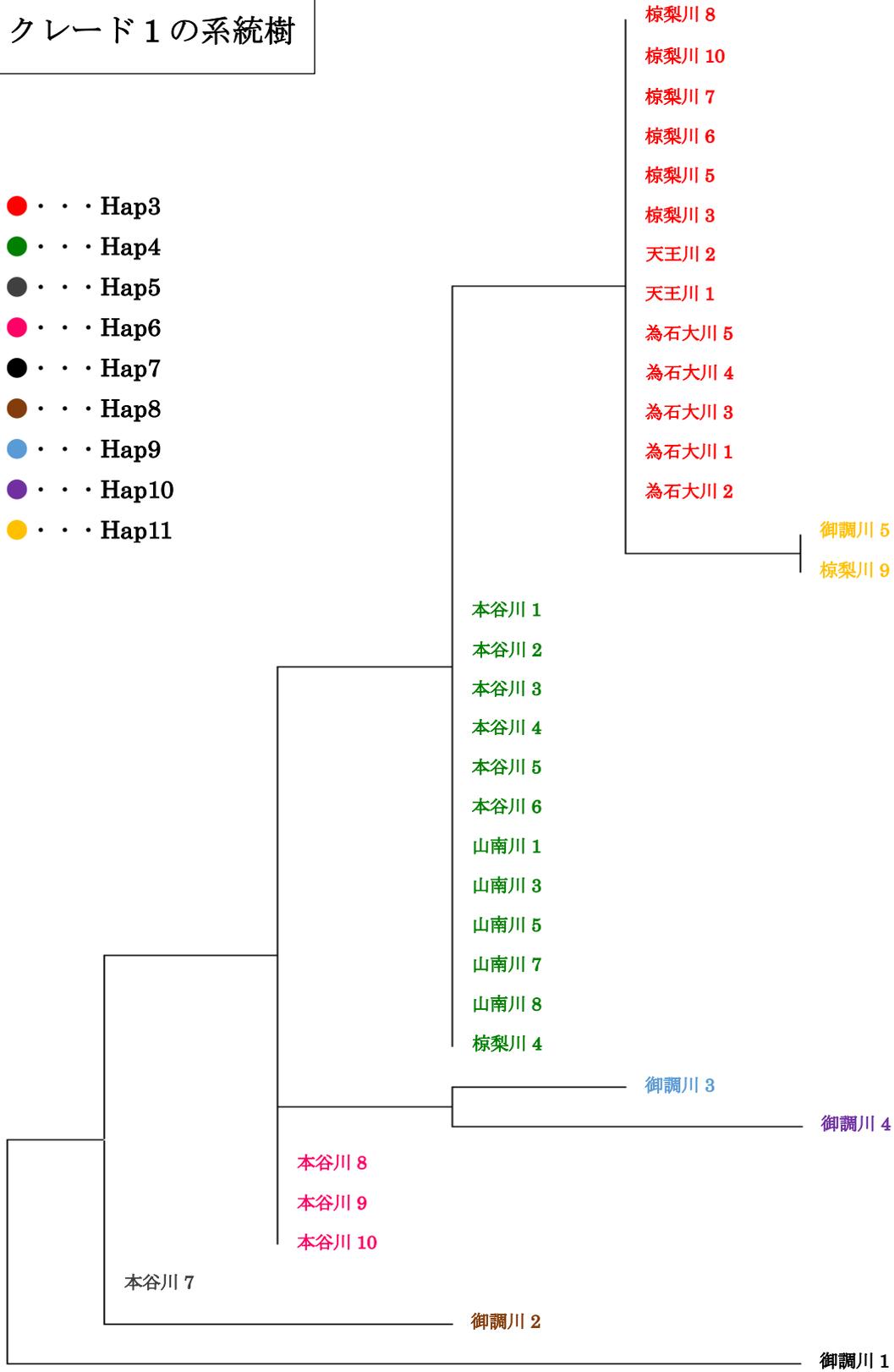
### ハプロタイプ系統樹



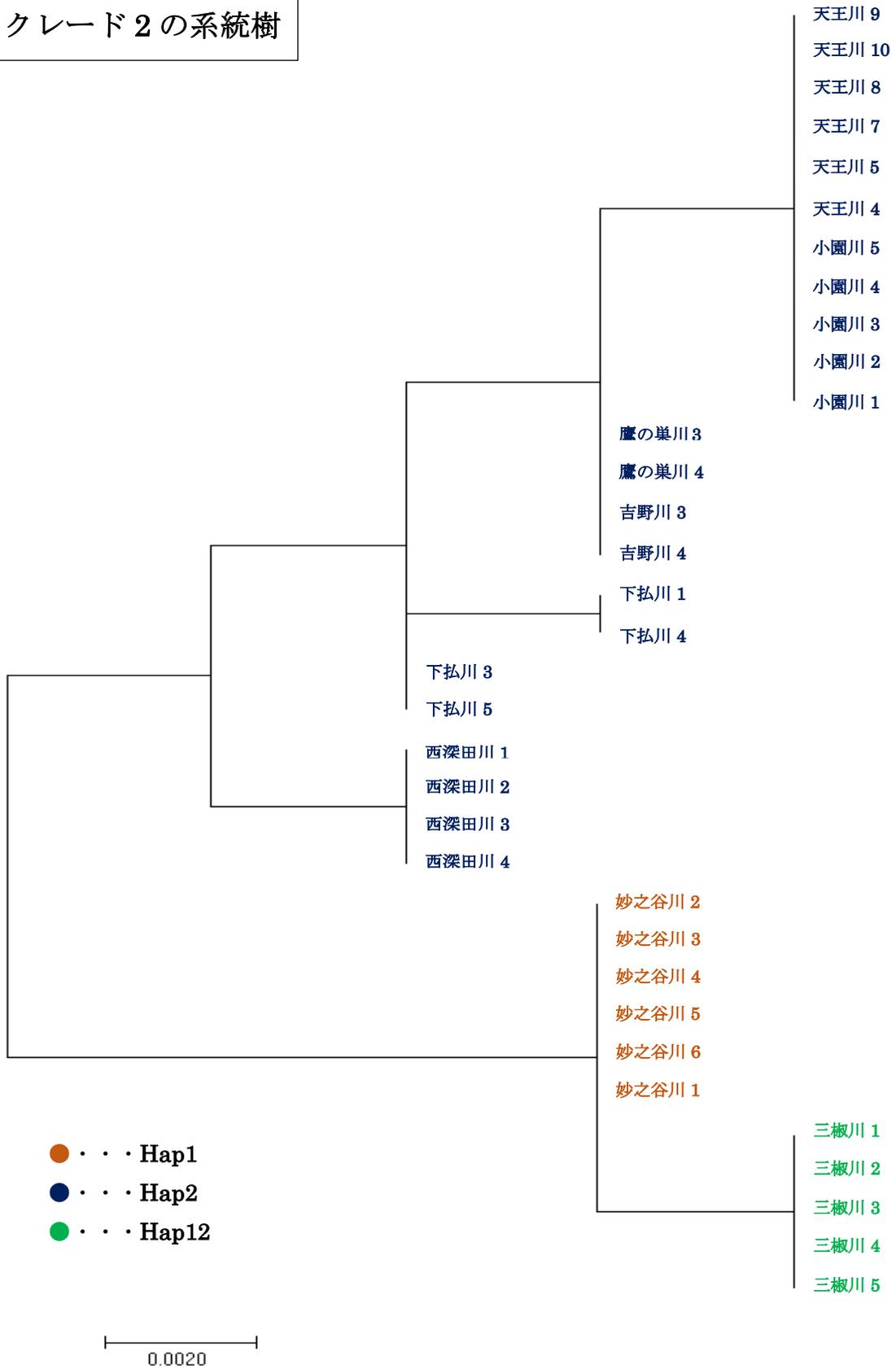
- |              |               |               |               |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| ● . . . Hap1 | ● . . . Hap2  | ● . . . Hap3  | ● . . . Hap4  |
| ● . . . Hap5 | ● . . . Hap6  | ● . . . Hap7  | ● . . . Hap8  |
| ● . . . Hap9 | ● . . . Hap10 | ● . . . Hap11 | ● . . . Hap12 |

クレード 1 の系統樹

- . . . Hap3
- . . . Hap4
- . . . Hap5
- . . . Hap6
- . . . Hap7
- . . . Hap8
- . . . Hap9
- . . . Hap10
- . . . Hap11

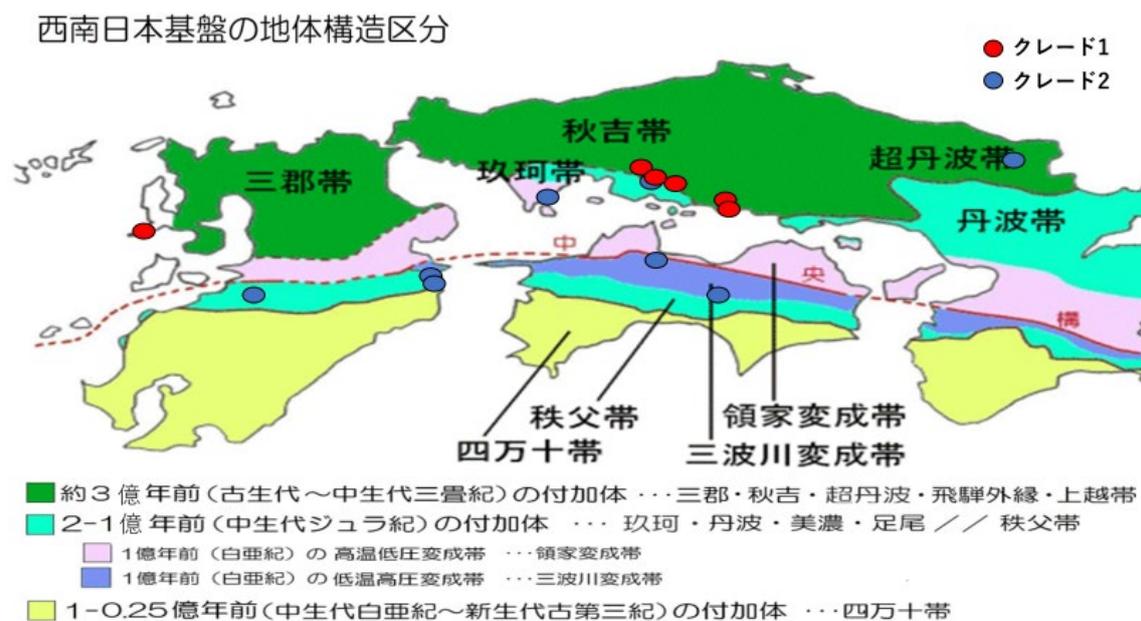


クレード 2 の系統樹



解析済みの計 13 地点 69 個体より、第 1 クレード(広島県の山南川・本谷川・御調川・椋梨川・天王川、長崎県の為石大川)と第 2 クレード(広島県の天王川、山口県の鷹の巣川、愛媛県の妙之谷川、高知県の吉野川、兵庫県の三椒川、熊本県の下払川、大分県の西深田川・小園川)の 2 つのクレードが検出された。この結果を西南日本基盤の地帯構造区分に当てはめると、第 1 クレードは、三郡・秋吉・超丹波・飛騨外縁・上越帯にあり、第 2 クレードは、玖珂・領家変成帯・三波川変成帯に存在した。第 1 クレード、第 2 クレードの両方に存在した広島県の天王川は、秋吉帯と玖珂帯の間に位置していた。つまり、本種の遺伝的集団構造と西南日本基盤の地帯構造区分に大きな関連性があると考えられる。

兵庫県の三椒川は、第 2 クレードであるが、西南日本基盤の地帯構造区分では超丹波帯に分布している。これは、人為的放流の可能性も考えられる。



### 西南日本基盤の地帯構造区分

また、約 8 万年前～約 1 万年前は最終氷河期であり、瀬戸内海は現在よりも 130m 低かったことがわかっており、その影響から中国地方と四国地方が陸続きになっていた。また、現在の本流である太田川、芦田川などを 1 つにしていた豊予川が、この時代には中国・四国地方を流れていた。これにより、鷹の巣川に生息している本種が四国に渡り独自の遺伝的分化を行い、交流を広げていったと考えられる。また、オオサンショウウオは中国・四国の広範囲に生息しているが、九州では大分県だけにしか存在していない。これは、この最終氷河

期に豊予川によって中国地方から大分県や四国地方に分布を広げたと考えられている。つまり、本種もオオサンショウウオ同様、四国地方だけでなく大分県から九州地方へと、河川の成り立ちとともに分布を広げることができたと考えられる。また、福岡県における純淡水魚類の地理的分布パターン(中島ら 2006)より、本種は 50 万年前から日本列島に生息していたとされており、第 2 グループのクレードに属する結果が得られたとしてもおかしくはない。



約 1 万年前の瀬戸内海地形

各河川におけるハプロタイプ構成より、広島県の芦田川水系、沼田川水系は他地域の水系に比べてハプロタイプ数が多く、本種の遺伝的多様性が大きい場所であることがわかる。しかし、吉野川水系、球磨川水系(下払川)、大川水系(為石大川)などは、支流も多い河川でありながらもハプロタイプは 1 つしか検出されていない。これは、河川水系ごとによる DNA 解析個体数の差が影響していると考えられる。また、広島県の瀬戸内海の地史、広島県の地形と何らかの関係性があり、本種にとって広島県の河川は、遺伝的分化や分布拡大が生じた重要な地域であるとも考えられる。

本研究では、西日本 13 地点 69 個体から計 12 のハプロタイプが検出されたが、他の淡水魚と比較すると、横浜市を流れる河川におけるアブラハヤの遺伝的多様性と交雑に関する調査(樋口・渡辺 2004)では、計 7 ハプロタイプが検出されている。また、ミトコンドリア DNA によるドジョウの遺伝特性に関する調査では(小出水ら 2009)、40 道府県から計 147 ハプロタイプが検出されて

いる。本研究において、カワムツの遺伝的多様性が比較的低いことは、非常に興味深い結果となった。今後は、地史や同水系における遺伝的集団構造について、さらなる詳細な調査が必要であろう。

今回は、ミトコンドリア DNA を用いて母系の遺伝解析を行ったが、本種には雄が雌を巡る順位関係や縄張りがあり、順位が高い雄から優先的に産卵行動をとる。そのため、父系遺伝も本種の遺伝的集団構造に大きく影響を与えていると考えられる。また、河川環境の悪化により生息域が減少し、「カワムツ属 2 種とオイカワの交雑個体の形態比較およびミトコンドリア DNA 解析」の研究より本種とオイカワとの交雑個体も検出されている(松岡ら 2016)。そこで今後は、核 DNA にも着目し、マイクロサテライト DNA 解析や SNP(一塩基多型)解析など、他の解析方法を試みさらに解析を行う必要があると考える。

#### (4) 広島県に生息するカスミサンショウウオの遺伝的集団構造

広島県 8 地点、長崎県 1 地点より、本種計 97 個体の標本を得た。本研究での福山・尾三地域での採取実績から、これまで採取報告のない芸予諸島向島および因島においても本種の生息が可能であると推察した地点において複数回にわたり調査を実施したが、本年度の調査では発見に至らなかった。

本研究では主に幼生をサンプルとして使用した。地域型の分類には成体の外部形態が分類指標として用いられるため、成体が未採取の地点について各サンプルがどの地域型に該当するかは大川ら (2007) の分布図に従い、暫定的に地域型を決定した。本研究で採取した各地域型のサンプル数および塩基配列解析数を、以下の表に示した。

**各地域型のサンプル数および塩基配列解析数**

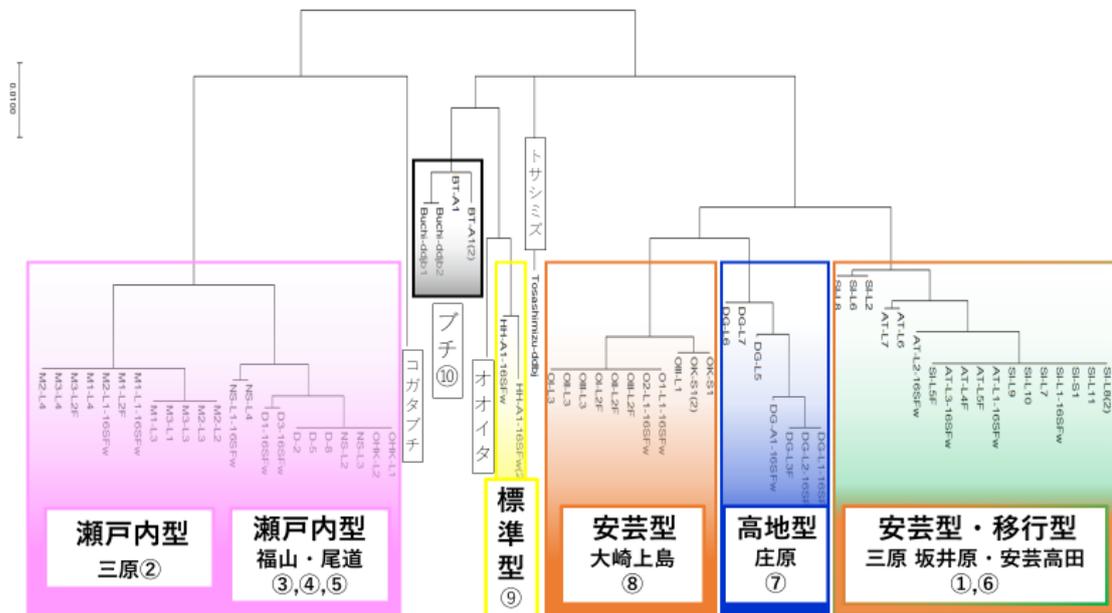
地域型	地点数	個体数	解析数
標準型	1	1	1
瀬戸内型	4	45	23
安芸型	1	12	10
安芸(島嶼)型	1	16	10
移行型	1	10	7
高地型	1	13	7
計	9	97	58

Sugawara et al. (2018) のプライマーの内、リバーズ側 (16SR) では増幅が不十分となり、塩基配列を決定することができなかった。フォワード側 (16SF) では mtDNA 16S rRNA 領域約 750bp を増幅することができた。フォワード側プライマーによって増幅した PCR 産物からシーケンス解析を行った結果、波形が明瞭に見られ、塩基配列を決定できたサンプルは計 58 個体となった。

得られた塩基配列から、近隣接合法による系統樹を作成した。大川ら (2007) により瀬戸内型の分布域とされた地域から採取したサンプル (地点②、③、④、⑤) は、系統樹においても一群を形成する単系統となり、他の地域型とは大きく異なるクラスターとなった。瀬戸内型群内においては三原 (地点②) と福山、尾道 (地点③、④、⑤) の二群が細分化される結果となった。

標準型 (地点⑨)、安芸型 (地点⑧)、高地型 (地点⑦) では採取地点ごとに単系統となったが、安芸型 (地点①) と移行型 (地点⑥) の 2 地点のサンプルは分化せず一群を形成した。

また、外群の内オオイタ、コガタブチ、ブチ、トサシミズは、標準型、安芸型、高地型、安芸・移行型と大きく同群となった。一方でコガタブチは瀬戸内型と同じルートを取り、系統樹においてはこれらが他と大きく二分する結果となった。



近隣接合法による系統樹

Fst 分析の結果を、つぎの表に示す。

各地点間の Fst 値

	三原 坂井原	三原 深町	尾道 原田町	福山 堂々川	福山 西清水川	安芸高田	庄原	大崎上島
①坂井原	—							
②三原	0.97778	—						
③尾道	0.99530	0.97590	—					
④堂々川	0.98728	0.96214	0.25000	—				
⑤西清水川	0.96773	0.92684	0.33333	0.13333	—			
⑥安芸高田	0.12302	0.96737	0.98627	0.97830	0.95874	—		
⑦庄原	0.88889	0.95032	0.97409	0.96662	0.94797	0.86299	—	
⑧大崎上島	0.96797	0.97791	0.99406	0.98582	0.96663	0.94217	0.92108	—

2 個体以上採取できた地点間について Fst 分析を行った結果、28 通り中 26 の組み合わせにおいて非常に大きな遺伝的分化とされる 0.25 以上の数値となった。最大値となった組み合わせは安芸型（地点①）と瀬戸内型（地点③）間で 0.99530 であったほか、21 組が 0.9 を超える値をとった。最小値をとった組み合わせは安芸型（①）と移行型（⑥）間で、0.12302 と中程度の遺伝的分化であることがわかった。

系統樹において単系統にまとまったものの、三原グループと福山・尾道グループに細分化された瀬戸内型の遺伝的集団構造は Fst の結果からも支持され、尾道、福山のサンプルから構成されるグループ（以下福山・尾道グループ）と三原のサンプルから構成されるグループ（以下三原グループ）間の Fst 値は 0.92684 ～0.97590 と非常に高かった。

一方、グループ内での Fst 値は福山・尾道グループ内で 0.13333, 0.25000, 0.33333 であり、三原グループ間と比較すると低度の遺伝的分化となった。

ハプロタイプは全 58 サンプルから 17 検出され、ハプロタイプ多様度は 0.911 となった。

系統樹及び Fst 分析の結果から、多くの採取地において遺伝的に固有性の高い集団となっており、本種は広島県内において、非常に複雑な遺伝的集団構造をとっていることが明らかとなった。

系統樹では単系統群となった瀬戸内型も、Fst 分析の結果から三原グループと

福山・尾道グループ間には非常に大きな遺伝的分化が起こっていると言え、この2グループ間においては遺伝的交流がすでに途絶えているものと推察される。また、安芸型（地点①）と移行型（地点⑥）が系統樹において単系統となり、Fst値も最小の値となった点については、地点①と地点⑥で結ばれる範囲内においては、中程度の遺伝的分化をもつ集団が広く分布していることが示唆されるほか、本研究での暫定的な地域型の決定が不確実であったことも考えられる。

このように、一地域型内にも中程度の遺伝的分化が見られることを考えると、単一の祖先種が各地に分散する過程において、地理的要因によるボトルネック効果や適応放散によって、現在知られている複数の地域型が確立したのではなく、こうした地域型の由来は、それぞれ異なった祖先種にあるとも考えられる。

同属の他種についてのDNA解析（ミトコンドリアDNA）を用いた報告として、坂本ら（2007）は、チトクロームb領域の解析から、九州産のコガタブチ（*H. stejnegeri*）は大きく分化した南北2群に分かれ、それらの間に共通するハプロタイプは全く見られなかったとした。

また、高知県土佐清水市のオオイタサンショウウオ（*H. dunni*）は、これまで、九州の個体群と同種とされていたが、Sugawara et al.（2018）によるミトコンドリアDNA 16S およびチトクロームb領域の解析および形態学的特徴から、土佐清水市の個体群は、九州の個体群とは遺伝的に異なっており、別種であることが明らかとなった。

このように、*Hynobius*属においては、形態などから同一種とされる場合にも、DNA解析の結果から独立した個体群および種が内包されていることが明らかとなった例もある。

本種においても、地域型間で非常に大きな遺伝的分化が起こっているだけでなく、一地域型内においても遺伝的分化が進んでいる現状を踏まえると、本種の保全を考える場合には、各地域型の保護を実践してだけでなく、一地域型の分布範囲内に複数のメタ個体群を維持することが本種の遺伝的多様性を維持する上では不可欠であると考えられる。

一方で、地域により条例等で保護されており、地域絶滅の可能性も否定できない本種の現状から、本種のみを対象とした保全活動を進めてはならない。本種と捕食-被食、あるいは競合関係にある他の在来生物の個体数などを人為的にコントロールすることは、里山という環境の下で構成された現在の生態系を崩壊させることに直結しかねない。

環境全体を良好な状態で管理していくことによって、本種のみならず、里山を利用する多くの生物-里山の生物相-の保全が可能となるのではないだろうか。

本研究では、サンプルがどの地域型に属するかの決定について、成体が未採取の地点においては、すでに報告されている分布域から暫定的に決定せざるを得

なかった。次年度の解析に向けたサンプリングでは、成体の採取を行うため、各地域型の産卵期に合わせてサンプリングを行っていかなければならない。

また、これまでに知られている地域型の内、「阿武型」および「石見型」についてはサンプリングを行っていないため、この 2 型のサンプリングも進める必要がある。

これらの地域型の分布境界または遺伝的な個体群間の境界を明らかにするため、今後のサンプリングおよび調査にあたっては、より密な調査地点の設定が不可欠といえる。

本研究では遺伝子領域であるミトコンドリア DNA 16S rRNA のみの解析を行ったが、今後、一地点での遺伝的多様性を評価するためには、非遺伝子領域である D-loop 領域や、核 DNA による解析も視野に入れなければならない。

#### 【担当：山岸幸正】

#### 「瀬戸内海沿岸域の藻場生態系における海藻類の種構成および系統地理的解析」

##### (1) 因島の藻場の定量的調査

因島八重子島における海藻種の調査は、2018（平成 30）年 4 月 17 日、6 月 14 日、8 月 9 日、10 月 29 日、11 月 27 日、12 月 12 日、2019 年 2 月 22 日に、干潮時に胴付長靴を着用して行った。なお、被度調査は海藻種の多い春（5 月）の時期を予定していたが悪天候のために実施できず、6 月 14 日に実施した。4 月、8 月、10 月、12 月には八重子島でみつかった全海藻種を記録した。

6 月に実施した被度調査では、2008 年 6 月 5 日に八重子島北東部の岩場で実施した被度調査における長さ 18 m の調査ラインと同一のライン (Fig. 1) で調査を行った。調査ラインの最上部から、調査ラインの左側に 50 cm×50 cm のコドラートを順次海の方角にずらしてあてていき（それぞれコドラート No. 1、2、3…11 とした）、大きな岩からなる No. 1～6 はコドラートの間を空けずに連続して計測し、なだらかな海底からなる No. 7～11 は 3m ごとにコドラートをあてて (Fig. 1)、コドラート内の海藻の種類と被度の記録を行った。計測方法として、コドラートの縦横にそれぞれ等間隔で 10 本ずつタコ糸を張って合計 100 個の交点を作り (Fig. 2)、調査ラインの各コドラートにおいて 100 個の交点と重なった海藻種を記録し、交点 1 個を被度 1% とみなす簡便法を用いた。

コドラートによる調査の結果、2018 年 6 月は調査ラインから合計 43 種の海藻（緑藻 7 種・褐藻 12 種・紅藻 24 種）が確認され、一方、2008 年 6 月は合計 44 種（緑藻 6 種・褐藻 17 種・紅藻 21 種）であった (Table 1)。出現種数により 10 年間の変化を比較すると、両年度とも海藻全体の種数はほぼ同じであり、褐藻は

減少していた。

調査ラインの各コドラートにおける 2008 年 6 月および 2018 年 6 月の海藻種の被度を Table 2 および 3 に示した。両年度を比較すると、いくつかの海藻種に被度の量的な変化が認められた。2008 年には被度総和が高い種としてヒジキ（被度総和 195）、フクロフノリ（157）、クロメ（104）があげられるが、2018 年にはヒジキは被度総和が 53、フクロフノリは 21、クロメは 0 に減少した。一方、2018 年に被度が増加した種として、エゾミル（被度総和 0 から 115 に増加）、ミツデソゾ（5 から 46）、カイノリ（5 から 28）、ワカメ（0 から 19）などがあげられる。2008 年と 2018 年で海藻グループごとの被度総和の変化を比べると、緑藻のみ 28 から 129 に増加したが、褐藻は 376 から 120 に減少し、紅藻は 290 から 230 に減少し、海藻全体で 694 から 479 に減少した。緑藻が増加したのはエゾミル 1 種が多かった（被度総和 115）ためであり、これを除くと緑藻も 28 から 14 に減少したとみることができる。

今回の被度調査により、八重子島の海藻が種数のみならず量的にも減少傾向にあることが示された。特に藻場の主要構成種であるホンダワラ類のヒジキやコンブ目のクロメが減少したことは大きな変化と言える。2018 年のヒジキは 2008 年に比べて藻体の長さが短く、生育範囲もコドラート No. 4~9 に広がっていたのが、No. 4 と 5 のみに狭くなっていた。クロメは八重子島において調査ライン以外の場所でも消失しており、入れ替わるようにワカメが広がっていた。

今後も同様の調査を行うことで、年ごとおよび長期間の藻場の量的な変動を比較することができると思う。ただし調査時期を春の海藻が衰退する 6 月半ばではなくもっと早い時期にすべきことや、1 本の調査ラインのみでは出現海藻に偏りが生じる可能性があるため、調査範囲の設定についても検討したい。

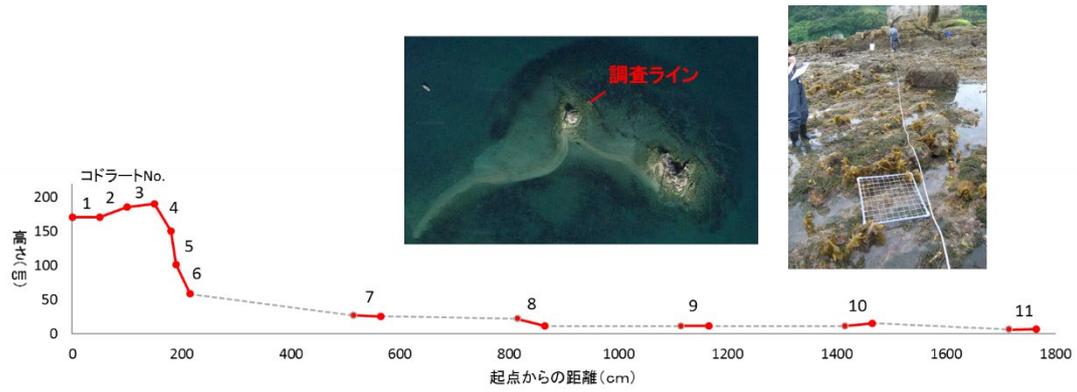


Fig. 1. 因島八重子島の海藻調査ライン. 下グラフは調査ラインの垂直断面図であり、赤線はコドラートの位置を示す.

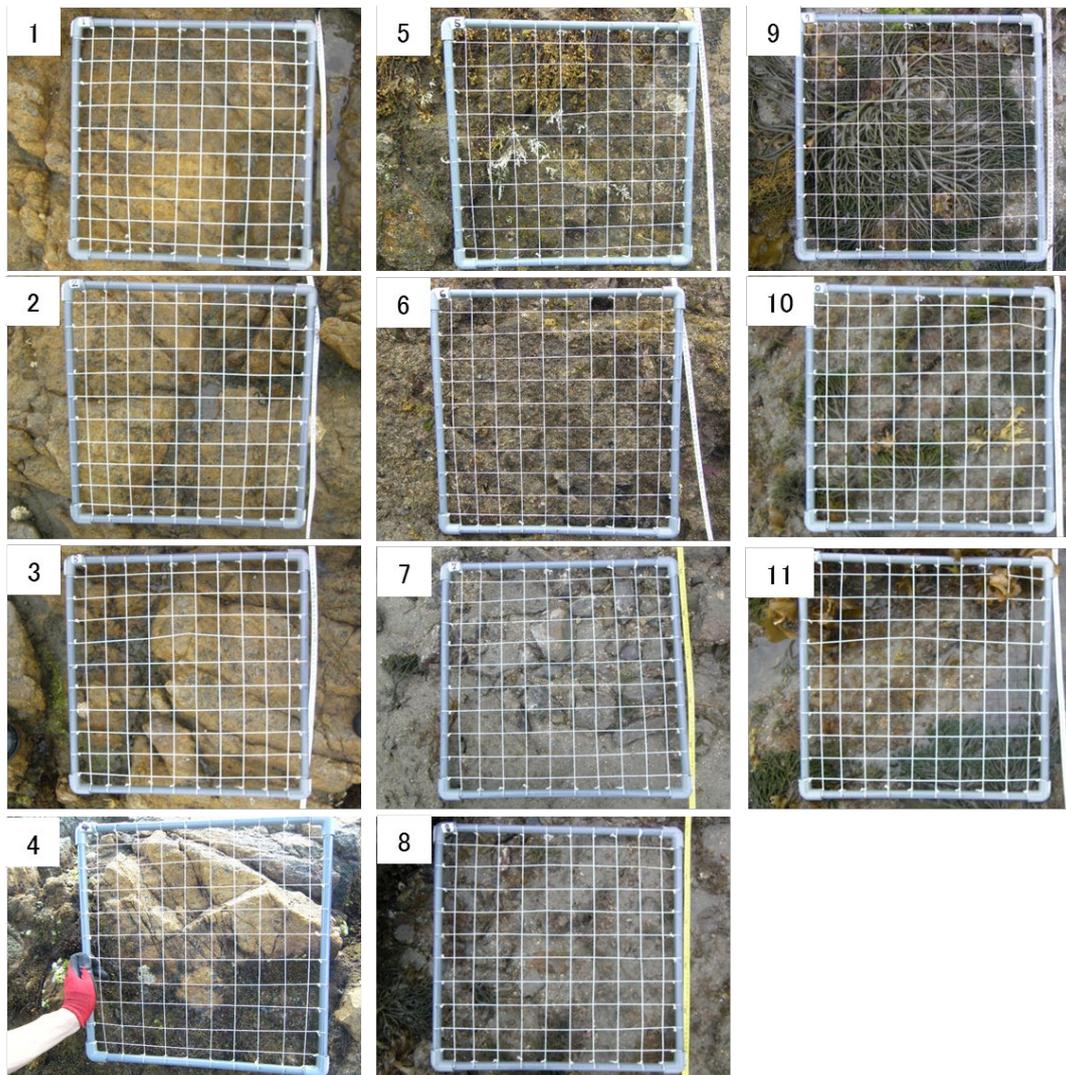


Fig. 2. 因島八重子島における 2019 年 6 月 14 日の各コドラートの図.

Table 1. 因島八重子島の調査ラインにおける 2008 年 6 月 5 日および 2018 年 6 月 14 日のコドラート調査において見つかった海藻種リスト.

海藻種名	2008年	2018年	海藻種名	2008年	2018年
ヒメアオノリ	○	○	フクロフノリ	○	○
ヒトエグサ	○	○	ヒメテングサ	○	○
カイゴロモ	○		イソダンツウ	○	○
アオノリsp.	○		カイノリ	○	○
アアナオサ	○		ミツデソゾ	○	○
シオグサsp.	○		ビリヒバ	○	○
タレツアオノリ		○	ツノマタ	○	○
ミヤビシオグサ		○	ワツナギソウ	○	○
ツヤナシシオグサ		○	ウスカワカニノテ	○	○
エゾミル		○	オキツノリ	○	○
クロミル		○	シキンノリ	○	○
<b>緑藻計</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	マクサ	○	○
ヒジキ	○	○	ホソヤナギノリ	○	○
ウミトラノオ	○	○	カバノリ	○	○
イシゲ	○	○	ミゾオゴノリ	○	○
アミジグサ	○	○	ユナ	○	○
ネバリモ	○	○	ホソバミリン	○	
フトモズク	○	○	ウブゲグサ	○	
カゴメノリ	○	○	ウミサビ	○	
ハバモドキ	○	○	ニクムカデ	○	
ヤハズグサ	○	○	フシツナギ	○	
クロガシラsp.	○		マギレソゾ		○
カヤモノリ	○		エンドウイトグサ		○
イロロ	○		シラモ		○
シワノカワ	○		ヒライボ		○
タマハハキモク	○		カタソゾ		○
クロメ	○		カズノイバラ		○
ウミウチワ	○		扁平ソゾsp.		○
イシモズク	○		マサゴシバリ		○
アミジグサsp.		○	<b>紅藻計</b>	<b>21</b>	<b>24</b>
ワカメ		○	<b>海藻計</b>	<b>44</b>	<b>43</b>
シワヤハズ		○			
<b>褐藻計</b>	<b>17</b>	<b>12</b>			

Table 2. 因島八重子島における 2008 年 6 月 5 日のコドラート調査で記録された各海藻種の被度 (%).

【2008年6月】		各コドラートにおける被度 (%)										被度総和	
	生物名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11
1	フクロフノリ	19	34	55	46	3							157
2	ヒメアオノリ	5	2										7
3	カヤモノリ	9		6	2								17
4	カイゴロモ	1											1
5	アオノリsp.		1	2	1			5	1		6		16
6	イソダンツウ			1	3	1							5
7	ヒメテングサ			1		1							2
8	イロロ			1	3	1							5
9	ヒトエグサ				1				1				2
10	カイノリ				1		4						5
11	ヒジキ				6	83	53	18		35			195
12	ユナ				1	3	3						7
13	イシゲ				2								2
14	ピリヒバ						16						16
15	アミジグサ						8	1					9
16	ツノマタ						2		2	1	2		7
17	クロガシラsp.						1						1
18	ワツナギソウ						2						2
19	ウミトラノオ							8	3				11
20	ネバリモ							1		1	1		3
21	オキツノリ							5	11	2	11		29
22	フトモズク							3		1			4
23	シワノカワ							1					1
24	アナアオサ							1					1
25	カゴメノリ								1		1		2
26	シキンノリ								1				1
27	ホソバミリン								1				1
28	タマハハキモク								2	6	3		11
29	ミツデソゾ								2	1	2		5
30	ウスカワカニノテ								2	3	10		15
31	ヤハズグサ								1	3			4
32	クロメ									4		100	104
33	ハバモドキ									2	2		4
34	マクサ									5	9		14
35	ウブゲグサ									1	7		8
36	ウミサビ									3			3
37	シオグサsp.									1			1
38	ニクムカデ									1			1
39	ウミウチワ										2		2
40	ミゾオゴノリ										4		4
41	カバノリ										6		6
42	ホソヤナギノリ										1		1
43	フシツナギ										1		1
44	イシモズク										1		1

Table 3. 因島八重子島における 2018 年 6 月 14 日のコドラート調査で記録された各海藻種の被度 (%).

【2018年6月】		各コドラートにおける被度 (%)										被度総和	
	生物名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11
1	ヒメアオノリ	1		1	2								4
2	フクロフノリ		9	5	7								21
3	ヒメテングサ		3	1									4
4	タレツアオノリ		1	1									2
5	ミヤビシオグサ		1										1
6	ツヤナシシオグサ		3										3
7	イソダンツウ		1										1
8	カイノリ		1		8	19							28
9	ヒトエグサ			1									1
10	ヒジキ				32	21							53
11	ウミトラノオ				3	1	2						6
12	イシゲ				1	1							2
13	ミツデソゾ					10	9		7	4	14	2	46
14	ユナ					8	3						11
15	ネバリモ					5	4		1				10
16	ピリヒバ					5	31		1				37
17	マギレソゾ					4	6						10
18	エンドウイトグサ					1							1
19	アミジグサ						15						15
20	ウスカワカニノテ							3					3
21	エゾミル							1	2	65	23	24	115
22	ハバモドキ								2	1		2	5
23	マクサ								4	2	8	6	20
24	クロミル								2	1			3
25	シラモ								1		3		4
26	オキツノリ								5		3	1	9
27	ホソヤナギノリ								3				3
28	フトモズク								1	1			2
29	ヒライボ								1				1
30	ワツナギソウ								2				2
31	カタソゾ									1			1
32	カバノリ									2	5	2	9
33	アミジグサ sp.									1	1	2	4
34	ワカメ									3	2	14	19
35	シワヤハズ									2	1		3
36	カズノイバラ										5	5	10
37	シキンノリ										2		2
38	扁平ソゾ sp.										2		2
39	カゴメノリ										1		1
40	ミゾオゴノリ										2	1	3
41	ツノマタ											1	1
42	ヤハズグサ											3	3
43	マサゴシバリ											1	1



(2) しまなみ海域のアカモクの系統地理的解析 *cox3* 解析

平成 30 年度には、アカモクのサンプル数および解析地点を追加するために、因島 4ヶ所（地蔵鼻、椋浦、鏡浦、重井馬神山）、生名島、岩城島、式根島、生口島、伯方島、大島 2ヶ所（竹ヶ鼻、棚橋島）、今治市大角鼻、竹原市の各海岸からアカモクの海岸固着藻体を採集した。採集したアカモク個体は枝先部を $-80^{\circ}\text{C}$ で保存し、それらから選定したサンプル(Table 3)を DNeasy Plant Mini Kit (QIAGEN)を用いて DNA 抽出した。

*cox3* 遺伝子の解析では、前年度と同様の方法で PCR 増幅を行い、ダイレクトシーケンス法により 3130 オートシーケンサーを用いて塩基配列を決定した。*cox3* のハプロタイプ番号は Uwai *et al.* (2009)に従った。

本解析により、前年度までのデータに追加し、しまなみ海域各地のハプロタイプの分布 (Fig. 3) として次のような結果が得られた。

(1) 先行研究 (Uwai *et al.* 2009) で向島から報告されていたハプロタイプ 13 は、地理的に近い因島北部の八重子島でも優占していた。さらに大三島の宗方でも優占していた。

(2) 同じ因島でも南部の地蔵鼻ではハプロタイプ 18 が優占していた。ハプロタイプ 18 は地蔵鼻から生口島、大三島 (宗方をのぞく) にかけて優占していた。

(3) しまなみ南部の大島では 13 と 18 が同程度みられた。

(4) 四国の松山ではしまなみ海域ではほとんどみられないハプロタイプ 1 が優占し、13 および 18 は検出されなかった。四国のうちしまなみ海域に地理的に近い今治、および本州の竹原ではハプロタイプ 1 とともにしまなみ海域に多い 18 がみられた。

これらの結果から、本海域には、ハプロタイプ 13 が優占する「しまなみ海域北部 (向島・因島北部) および西部 (大三島宗方)」、ハプロタイプ 18 が優占する「しまなみ海域中部 (因島南部～宗方をのぞく大三島)」という、遺伝的に異なるアカモク集団が存在することが認められた。

本海域にはアカモクの流れ藻がみられるが、海域全体で流れ藻を介して自由に交流しているわけではなく、集団間の遺伝的交流に制限がある地域が存在していることが示唆された。ハプロタイプの分布を潮流図と重ね合わせてみると (Fig. 4)、因島の八重子島と地蔵鼻では潮流が異なっており、潮流とハプロタイプの分布に関連が示唆される。詳細についてはさらなる解析の必要がある。

Table 4. 解析に用いたアカモクサンプルリスト. *cox3* haplotype 番号 は Uwai *et al.* (2009)に基づいた.

Locality	Collection date	No. of individuals	Haplotypes (no. of individuals)
しまなみ諸島 Shimanami Isles	因島 八重子島 Innoshima Yaekojima	2012.2.27, 2017.2.27	13個体 type 13 (12), type 18 (1)
	地蔵鼻 Jizobana	2019.2.28	4個体 type 18 (4)
	生口島 弁天小島 Ikuchijima Bentenkojima	2017.3.13, 2018.2.19	7個体 type 13 (1), type 18 (6)
	大三島 古城島 Oomishima Kojojima	2016.12.18	14個体 type 13 (1), type 18 (6)
	台 Utena	2017.3.13	10個体 type 18 (10)
	宗方 Munakata	2017.3.13	12個体 type 1 (1), type 13 (11)
	大島 竹ヶ鼻 Ooshima Takegahana	20.19.2.28	5個体 type 13 (2), type 18 (3)
本州 Honshu	竹原 広大実験所前浜 Takehara Takehara Station, Hiroshima Univ.	2017.5.10, 2018.4.16	10個体 type 1 (2), type 18 (8)
四国 Shikoku	今治 大角鼻 Imabari Oosumibana	2019.1.26	6個体 type 1 (2), type 18 (4)
	松山 高浜 Matsuyama Takahama	2017.4.28	10個体 type 1 (9), type new (1)

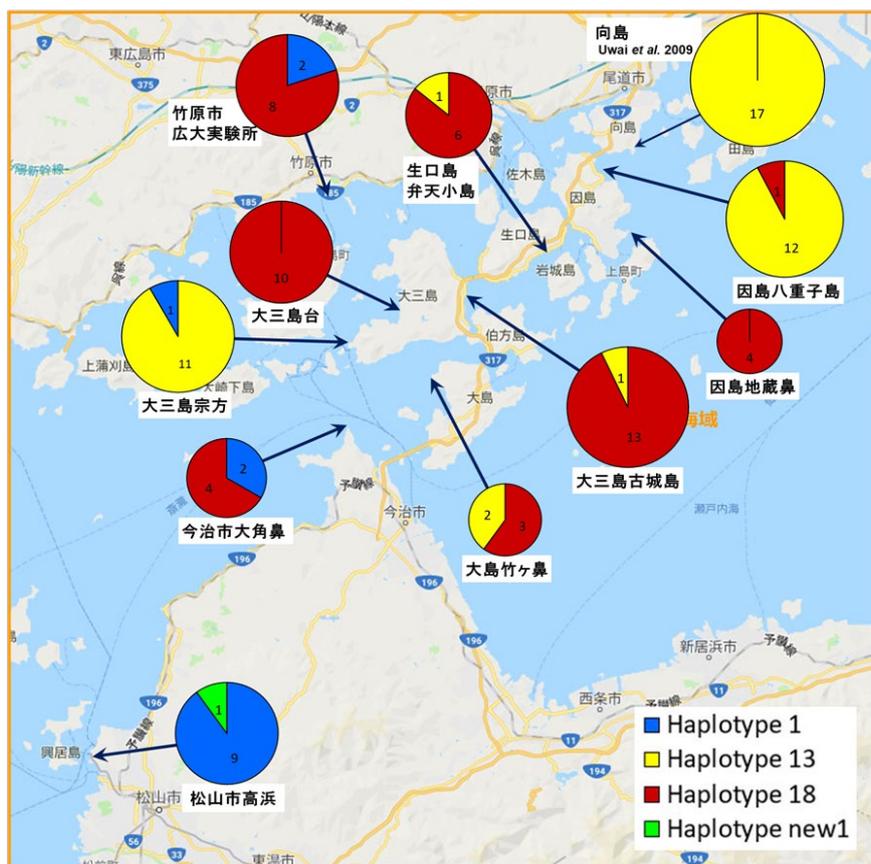


Fig. 3. しまなみ海域周辺のアカモクの *cox3* haplotype の分布. 円グラフ中の数字はアカモクの個体数を示す.

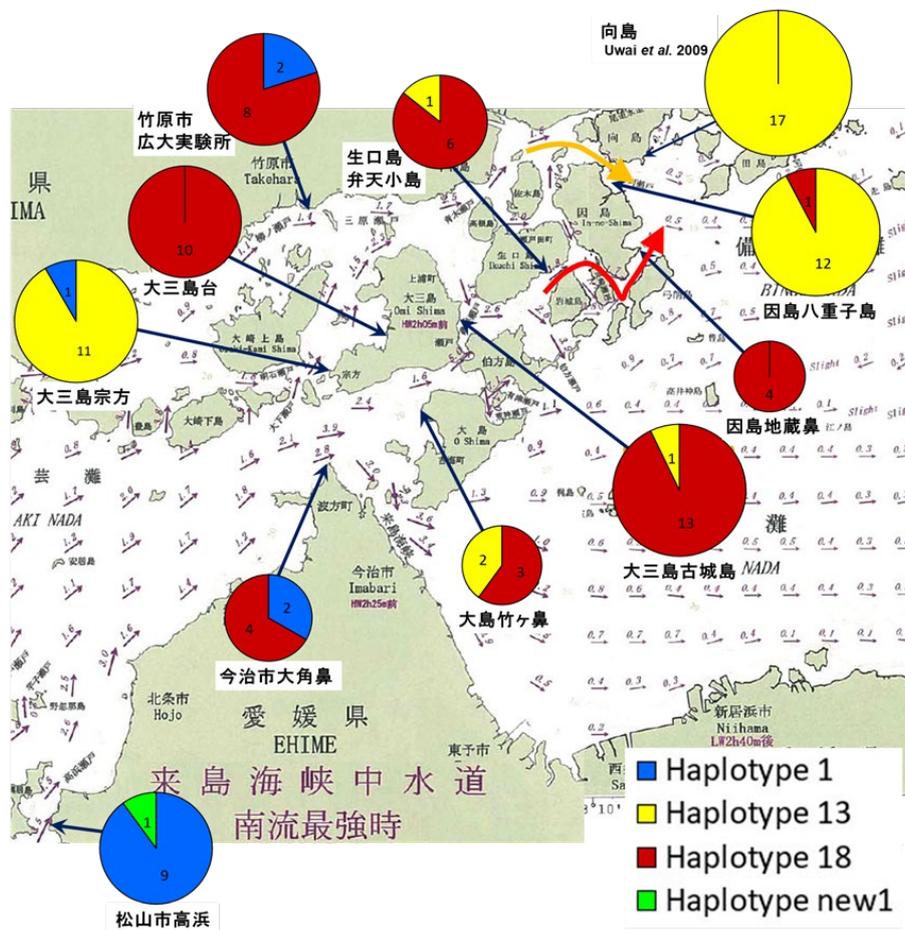


Fig. 4. しまなみ周辺のアカモクの *cox3* haplotype 分布を、南流最強時の潮流図と重ね合わせた図.

(3) しまなみ海域のアカモクの系統地理的解析、マイクロサテライト解析

Kubo *et al.* (2017) をもとに、ACA09、ACA18、ACA26、HGA05、HGA18、HGA36 の 6 つのマイクロサテライト領域の PCR プライマーを作成した。アカモクサンプルは因島八重子島、大三島の宗方・古城島、四国松山からいくつかの個体を選んで PCR 増幅を行い、大腸菌を用いて PCR 産物の DNA クローニングを行い、塩基配列を決定することによりマイクロサテライトのリピート数を直接確認した。

その結果を Table 5 に示す。各個体から検出されたさまざまなリピート数のマイクロサテライトのうち、クローン数の多いリピートを本来のアリルと考え (Table 5 のクローン数の太字部分)、クローン数の少ないリピートは PCR 時の増幅エラー (スタッター) と考えた。例えば、ACA18 の八重子 2 では、9 リピートが 7 クローン検出されたのに対して、8 リピートは 1 クローンのみであるため、アリルは 9 リピートのホモであり、8 リピートはスタッターと考えた。少な

くとも ACA09、ACA18、ACA26 領域は個体間でリピート数に変異がみられ、解析に有効なマーカーと考えられた。しかし、HGA18 の松山 1 のように、6 種類のリピートが検出されるなど、どれがアカモクの持つ本来のリピート数なのかエラーによるリピート数なのかを区別するのが難しいという問題がしばしば生じた。この問題に対しては、解析する DNA クローンの数を多くする必要があり、大変労力がかかる。

そのため、クローニングの方法よりも簡便で、PCR 増幅エラーを区別しやすい方法として、フラグメント解析も試みた。これは PCR 産物全体の DNA 断片長を読み取り、長さの違いをマイクロサテライトの変異として記録する方法であり、PCR 産物中のすべての DNA 断片を検出するため、1 回の解析でアレルやスタターの比較が可能である。平成 30 年度には、ACA09、ACA18、ACA26、HGA18 の 4 領域を用い、八重子島、宗方、松山からいくつかのアカモクサンプルを選んで、新たに作成した蛍光標識プライマーを用いて予備的に実験を行った。予備的結果ではあるが、ACA09、ACA18、ACA26 の 3 領域で断片長のピークを検出することができた。

Table 5. アカモク個体から検出されたマイクロサテライト 6 領域の反復数と得られた DNA クローン数.

マイクロサテライト 領域名	repeats	各アカモク個体から検出されたDNAクローン数													
		170227因島			170313大三島				161218大三島			170428四国			
		八重子2	八重子4	八重子5	宗方1	宗方2	宗方3	宗方4	古城島1	古城島2	古城島3	松山1	松山2	松山3	松山4
<b>ACA09</b> (AC rep.)	11repeats	2													
	12repeats	8													
	13repeats	2		1				1							
	14repeats			2				3				6			
	15repeats			6				3							
<b>ACA18</b> (CA rep.)	8repeats		1	2			9					1			
	9repeats	1	7	6								14	3		2
	11repeats	1													
	12repeats	5													1
	13repeats	8												1	
	14repeats											6			4
<b>ACA26</b> (GA rep.)	12repeats											1			
	13repeats											1		1	
	14repeats													3	2
	15repeats													6	2
<b>HGA05</b> (GA rep.)	8repeats	1					2								
	9repeats	6					7								
<b>HGA18</b> (GA rep.)	6repeats													2	
	7repeats								1	1	1	2	1		
	8repeats				1	2									
	9repeats				6	4	2		3		4	4			
	12repeats					1	2					2	1		
	13repeats										2	2			
	14repeats					2			3	1		1			
	15repeats	5				2	2			2				2	
	16repeats	3	3		1		3			2				3	
	17repeats				2					1	1	1	2		
	18repeats		5		1										
<b>HGA36</b> (GA rep.)	7repeats								1						
	9repeats						1		4						
	10repeats				4	2	2		1						
	11repeats					1	1		1	1					
	12repeats				1	4	2		2	7	2				
	13repeats				1				2		6				
	14repeats														
	15repeats					1	1		1						
	16repeats				2				2						
	17repeats								1						

【担当：関田隆一】

「衛星画像藻場分布」

(1) 研究の意義

環境省では 2015 年度から 2 年間、瀬戸内海における藻場・干潟の保全・再生・創出等を図るため、衛星画像も用いた藻場・干潟の分布状況調査を行った（環境省[1]）。そこではヒアリング等による藻場経年変化の試算は行ったが、衛星画像による藻場の経年変化解析には取り組んでいない。従って、衛星画像を活用する持続的な状態モニターにより藻場の経年変化を解析するための、瀬戸内に適した定量化技法とデータ補正方法の明確化研究は意義がある。中でも藻場が海岸周辺の人々の活動によって受ける影響や里山から河川を伝って排出する石・砂利等で受ける影響までモデル化する研究は従来には行われていないもので意義が

大きい。

## (2) 研究の目的とプロセス

持続的に発展する瀬戸内の藻場の定量的モデル構築に向けて、2018 年度には地球観測衛星画像データから因島周囲の藻場を解析・識別し、その解析精度を求めることを目的として、以下の順に具体化してある。

- ① 地球観測衛星データを用いた海洋観測、大気観測、藻場観測に関する先行研究について文献サーベイを行い、藻場の解析技法を明確にする。
- ② 無料の地球観測衛星画像データを用いて藻場識別解析をする。
- ③ 現地で藻場分布調査を行い、その結果と②で求めた無料の地球観測衛星画像データによる藻場識別解析結果を比較し精度検証を行う。
- ④ ③の精度検証結果により必要があれば有料の地球観測衛星画像（高解像度）データを用いて藻場識別解析をする。
- ⑤ 現地調査での藻場分布調査結果と④で求めた有料の地球観測衛星画像（高解像度）データによる藻場識別解析結果を比較し精度検証を行う。

## (3) 先行研究サーベイ

### (3) - 1 地球観測一般

地球観測衛星は光学衛星とレーダ衛星の 2 種類に大別される。光学衛星は、主に太陽や地表面などの自然の放射源に由来する電磁波を観測する受動型で、可視・反射赤外および熱赤外領域のセンシングによりカラー画像データが取得できるが、撮影は対象域に雲がかかっていない日中に限られる。一方レーダ衛星は、人工的に送信する電磁波を観測する能動型で、マイクロ波領域のセンシングにより天候や昼夜に左右されずデータ取得できるが、モノクロ画像データとなる。本研究では光学衛星の可視・反射赤外データを利用する。

地球観測衛星データの利用を大きく以下の 5 分野に分ける。

- I. 植生分析、森林管理・監視、魚場予測などの農林水産分野
  - II. 石油探索、水源探査、バイオマス資源探査などの資源分野
  - III. 通信施設危険予知、橋梁危険予知、水質モニターなどの社会インフラ分野
  - IV. 災害被災情報、地震モニターなどの防災分野
  - V. 海底地形図、陸上地図などの地理情報分野
- 5 分野で活用している主要な地球観測衛星を表 1 にまとめる。

5 分野共にアメリカの Landsat シリーズの活用が多いことが特徴で、Landsat-8 データは無料でダウンロードができる。他には陸域観測でアメリカの World View やフランスの SPOT が多く使われ、気象観測でアメリカの NOAA や国際協力で運用している Aqua・Terra などが使われる。現在は海洋観測専門の衛星は少なく、Landsat や Aqua・Terra の活用が一般で、本研究もそれに沿う。

表 4-3-1 5 分野の国内外事業で利用している地球観測衛星

分野		利用衛星		
		陸域観測衛星	気象観測衛星	海洋観測衛星
農林水産	農業	QuickBird, WorldView, Landsat, RapidEye, IKONOS, SPOT, UK-DMC	NOAA, Terra/Aqua	Terra/Aqua
	林業	SPOT, RapidEye, Landsat, UK-DMC, IKONOS, QuickBird, IRS, ENVISAT, RADARSAT, ERS, DEIMOS	NOAA, Terra/Aqua	Terra/Aqua, NovaSAR-S
	水産業	Landsat, RADARSAT	NOAA, Terra/Aqua	Terra/Aqua
資源	石油・ガス	Landsat, Terra, RADARSAT, ENVISAT, SPOT, Pleiades, RapidEye, TerraSAR-X, TanDEM-X, Formosat		COSMO Sky-MED
	天然資源	Landsat, RADARSAT, SPOT, Terra, IKONOS, ENVISAT, DEIMOS	Meteosat	
社会インフラ	建設・都市計画	QuickBird, IKONOS, WorldView, Pleiades, Landsat, GeoEye		
	通信・電力・ガス	Landsat, IKONOS, IRS, SPOT, QuickBird, WorldView, ENVISAT, RADARSAT		
	都市問題	RADARSAT, SPOT, Pleiades, TerraSAR-X		COSMO Sky-MED
	インフラ保全	RADARSAT, ERS, ENVISAT, ALOS, TerraSAR-X		COSMO Sky-MED
	運輸・航空・開運	ENVISAT, RADARSAT, Sentinel		COSMO Sky-MED, Jason
防災・公共	政府	SPOT, Pleiades, ALOS, TerraSAR-X, Formosat		COSMO Sky-MED
	人道・防災	Landsat, IKONOS, RADARSAT, QuickBird, WorldView, Pleiades, TerraSAR, GeoEye	NOAA	COSMO Sky-MED
	国土地理	Landsat, SPOT, RADARSAT, UK-DMC, QuickBird, WorldView		
	病院・保険・医療	Landsat		
	産業廃棄物	QuickBird, IKONOS		
	セキュリティ	IKONOS, QuickBird, WorldView, SPOT, Pleiades, Landsat, ENVISAT, ERS, TerraSAR-X, TanDEM-X, Formosat, GeoEye, EROS		COSMO Sky-MED, NovaSAR-S, WNISAT
地理情報	地図	Landsat, ALOS, UK-DMC		
	不動産	Landsat		

### (3) - 2 海洋観測

海洋観測に関する研究は大きく分けて以下の 4 項目である。

- I. 海水中に含まれるクロロフィル - a 濃度、懸濁物、有色溶存有機物の濃度などの水質・海色に関する研究
- II. 大気海洋相互作用の指標となる海面水温に関する研究
- III. 海底の地形（水深）と、そこに分布するサンゴ・海藻・海草などの底質マッピングやモニタリングの研究
- IV. 海氷、海面高度、表層海流、海面塩分などの観測に関する研究

#### I の研究動向

European Space Agency（欧州宇宙機関、以降 ESA）の ENVISAT に搭載された MEdium Resolution Imaging Spectrometer（中間解像度走査計、以降 MERIS）のデータを用いて月に数回のクロロフィル a 濃度の情報を得て、霞ヶ浦（茨城）の植物プランクトンの変動モニタリング（松下ほか、2015[2]）が参考になる。また、韓国の Communication, Ocean and Metrological Satellite（静止海色衛星、以降 COMS）に搭載された Geostationary Ocean Color Imager（静止海色計、以降 GOCI）のクロロフィル a プロダクト精度評価を、国際協力の Aqua・Terra に搭載された MODerate resolution Imaging Spectroradiometer（適切解像度走査計、以降 MODIS）のデータと実測データを用いて検証し、それぞれ有意な相関（相対誤差はともに 40% 程度）を確認している（作野、2012[3]）。本研究では、今後、藻場の育成と水質の相関を研究する際に参考となる。

#### II の研究動向

日米欧の 11 機の地球観測衛星データ（GHRSSST : Group for High Resolution Sea Surface Temperature）から得られる低緯度帯の海表面温度データとブイデータを比較して精度検証を行い、GHRSSST はどの海域も精度が良いことを示している（瀬森ほか、2014[4]）。本研究では、今後、藻場の育成と海面水温との相関を調査する際の参考にする。

#### III の研究動向

アメリカの衛星 Terra に搭載された Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection radiometer（資源探査用将来型センサー、以降 ASTER）データを用いて、水深を考慮したアルゴリズムで知られている Bottom Index（底質指標、以降 BI）による藻場マッピングの可能性を示している（ルイほか、2008[5]）ことが参考になる。ここでいう「底質」とは、地質学で使われる「水底を構成する岩および堆積物（bottom material）」とする狭義の意味ではなく、「藻類、砂地、岩等を構成する海底被覆物（bottom cover）」の意味であることには注意を要する。また、現地観測か

ら得る水深データを使って反射率推定とその分析を行う藻場分布推定アルゴリズム (SFFM: Shallow-water Four-Flux Model) について、リモートセンシング方法の妥当性を検証したが技術課題が残るという報告 (森ほか、2007[6]) もある。

#### IV の研究動向

韓国の静止海色衛星 COMS に搭載された GOCI を利用した東京湾における塩分分布推定モデルを提案し、COMS 衛星画像から低塩分水塊の挙動について考察し、江戸川河口付近の低塩分水塊が船橋から浦安沖にかけて広がる様子を確認している (比嘉ほか、2017[7])。本研究では、今後、藻場の育成と塩分分布との相関を調査する際の参考にする。

ここで、本研究の対象である沿岸域の地球観測と前述した海洋域の地球観測が異なる点を以下の2点にまとめる。

- ✓ 複雑な地形に囲まれた水域を解析するために「高解像度の画像」が必要であること。
- ✓ 河川からの土砂や有機懸濁物質などの流出が多く、その水質を調べるためには「高い波長分解能の画像」が必要であること。

従って海洋域と比べて沿岸域の地球観測研究は困難度が高い上に、現時点では MODIS センサー等のような沿岸域専用で水質を測定できる地球観測センサーが存在しない。そこで Landsat や Advanced Land Observing Satellite (陸域観測技術衛星、以降 ALOS) 等の陸域を観測するために設計されたセンサーを使った沿岸域の地球観測と水質測定を行わざるを得ず、更に研究の困難度が増している。

#### (3) - 3 大気補正

「海色リモートセンシングの大気補正」(虎谷、2013[8]) によると、海における水の色の変化はわずかであり、そのわずかな色の変化、海中からの放射輝度スペクトルのわずかな変化を捉えるためには、高感度、高 S/N のセンサーで得られた衛星データから海中からの放射輝度以外の成分を取り除く必要がある。

図 2 (森ほか、2007[6]) に、太陽光の伝播経路概念図を表す。衛星で観測される放射輝度から取り除かなければならない成分は、海面からの反射

光、空気中の分子に衝突した散乱光である。空気中の分子に衝突した散乱光には、気体分子とエアロゾルによる散乱がある。これらの成分を取り除いて、海中からの放射輝度スペクトルを推定し、そのスペクトルから水中に含まれる物質を推定することになる。

海中からの放射輝度は、衛星で観測される全放射輝度の 10%程度であり、残りのおよそ 90%は、空気中の分子に衝突した散乱光、海面からの反射光の影響などである。従って大気補正は、海水のわずかな放射輝度の変化を推定するために高精度で行う必要があり、大気補正における 1%の誤差は、海中からの放射輝度あたりで、10%程度の誤差になる。

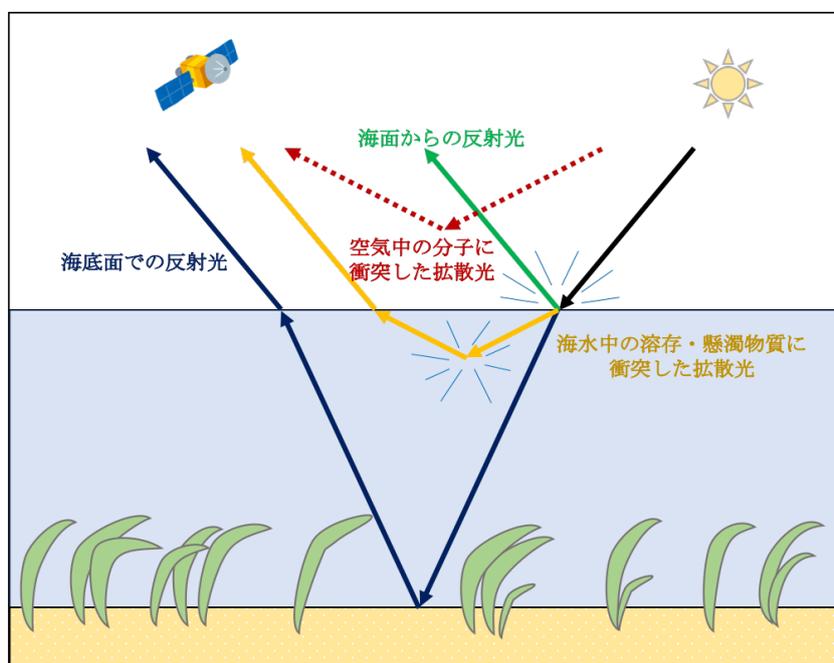


図 4-3-1 太陽光の伝播経路概念図

「MERIS データによる霞ヶ浦のクロロフィル a 濃度の長期モニタリング」(松下ほか、2015[2])によると、地球観測衛星データからクロロフィル a 濃度を高精度で推定するためには、有効な大気補正手法と有効なクロロフィル a 濃度推定手法の確立が必須条件である。前者は、外洋のような固有光学特性が比較的単純な水域で有効な大気補正法が確立されているのに対し、沿岸域は複雑な固有光学特性を持ち、大気補正法に依然として課題が多い。その中でも、the standard Gordon and Wang algorithm with an Iterative process and a bio-optical model (以降 GWI) は、NASA の標準大気補正法として SeaDAS Software Package (version 6.4, <http://seadas.gsfc.nasa.gov/>) に組み込まれている。しかし、GWI に

は中高濁度水域での補正が不正確になるといった課題が残っており、それを New-GWI (以降 N-GWI) 法は大気中の固体または液体粒子モデルを沿岸型に固定し、大気散乱係数の算出を経験式から理論式に変えることで改良した。この N-GWI も先の SeaDAS ソフトウェアパッケージに組み込まれている。しかし本研究の大気補正として N-GWI 法を適用するには、Landsat などの良く使われる地球観測衛星データの情報に含まれないパラメータが多く、この解決だけで 1 つの研究テーマにできるほどに困難度が高いことから、すぐに採用できない。

「衛星 Terra/ASTER データを使った吉名干潟における藻場モニタリング」(ルイほか、2008[5])によると、簡易的な大気補正として相対大気補正法がよく使用されているとわかる。相対大気補正法とは、時間的に反射特性が変化せず、かつ低い反射率を持つ沿岸域の地上被覆物を基準として、データ間の相対的な関係を求める方法である。

また「多時期 Landsat データを用いた宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度分布推定」(作野、2003[9])によると、湖上の水質成分で 70~90%を占める大気散乱光成分を除去する方法として、デジタル画像で最も暗く写っている画素(暗画素)を引く簡易的な大気補正法が有効であると報告されている。本研究では簡易であることから、まずこの暗画素法を大気補正法として用いる。

### (3) - 4 藻場観測

「衛星リモートセンシングを用いた小浜湾の藻場計測」(青山、2014[10])<sup>[17]</sup>では、地球観測衛星に搭載されたマルチスペクトルカメラによる Normalized Difference Vegetation Index (正規化植生指標、以降 NDVI) を用いて海藻の密集度と藻場の面積を求め、藻場増減の経年変化を調べている。NDVI は植生の分布状況や活性度を示す指標であり、可視赤・可視緑・近赤外の 3 バンドの画像から NDVI 画像を作成する。この研究では、高解像度衛星である Quick Bird 衛星(空間解像度 2.4m)、GeoEye-1 衛星(空間解像度 1.64m)、WorldView-2 衛星(空間解像度 1.84m)の画像(いずれも有料)であり、本研究では、以下の 2 点を反映している。

- ✓ NDVI による藻場分布解析技法は、季節変化による変動を含めて、藻場が存在しない海域と存在する海域を区別することが可能であること。
- ✓ 波長が長い近赤外線は海水による吸収が大きく、水深が深くなると

NDVI を用いた植物の判定が困難になること。

環境省による「瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査 調査結果（中部海域）」（環境省[1]）では、衛星画像解析手法を用いて、瀬戸内海における藻場分布調査を 2015 年度より開始しており、2016 年度には本研究対象の瀬戸内沿岸域を含む瀬戸内海中部を調査している。この研究では高解像度衛星である Rapid Eye 衛星（空間解像度 5m）の藻場繁茂期（春季）の画像（有料）を使っている。

画像解析方法は、現地調査データと地球観測衛星画像情報の比較・確認により画像解析を行い、藻場に該当する輝度（光の明るさ）の画素を藻場として識別しているが、その詳細な技法を公表していない。本研究では解析結果だけを参考にする。また、この研究では藻場の画像解析精度を 71% と検証していることから、これを本研究の解析精度基準に設定している。

「衛星 Terra/ASTER データを使った吉名干潟における藻場モニタリング」（レイほか、2008[5]）によると、BI による藻場マッピングを作成し、現地調査に基づく藻場分布と概ね一致する結果を得ている。しかし定量的な精度検証までは行っていない。ここでの BI は Lyzenga が提案した解析技法で、異なる 2 バンドの画像（例えば、青と緑バンド）を比演算することで、青と緑バンド画像の間で反射率が異なる藻類を抽出するものである。この技法には、青と緑バンド画像を比演算することにより水深の影響を除去する水深補正が含まれている。この研究では、アメリカの Terra 衛星に搭載された ASTER の画像（有料）を使っている。本研究では、水深の影響を除去できる BI を採用して、無料の Landsat 画像の解析で藻場分布を推定すると共に精度検証を行うことで研究の優位性を保っている。

#### （4）藻場分布の解析技法

##### （4）-1 BI アルゴリズムによる藻場分布解析

BI アルゴリズムは、Lyzenga の「比演算アルゴリズム」（レイほか、2008[5]）を基にしたものである。

図 4-3-2 に衛星センサが検出する放射輝度の原理を示す。Lyzenga は、地球観測衛星に搭載されたセンサが浅海域において波長  $\lambda$  で検出する放射輝度 ( $L_\lambda$ ) を次式で表した。

$$L_\lambda = L_{s\lambda} + E_\lambda r_{B\lambda} \exp(-k_\lambda f z) \quad (4-3.1)$$

ここで、

- $L_{s\lambda}$  : 空気中での放射輝度
- $E_\lambda$  : 定数（地上に到達する太陽の放射照度、大気と水面の透過率を含む）

- $r_{B\lambda}$  : 底質による分光反射率
- $k_{\lambda}$  : 水の消散係数
- $f$  : 光路長 (無次元値)
- $z$  : 水深

である。

水の消散係数とは、水中を光が伝播する際の光の散乱・吸収に起因する光の減衰の係数のことであり、水の混濁度により大幅に変化する (多田村ほか、1995[11])。

上記の各パラメータで空気中の情報は  $L_{s\lambda}$  だけであり、それ以外のパラメータは水中の情報である。

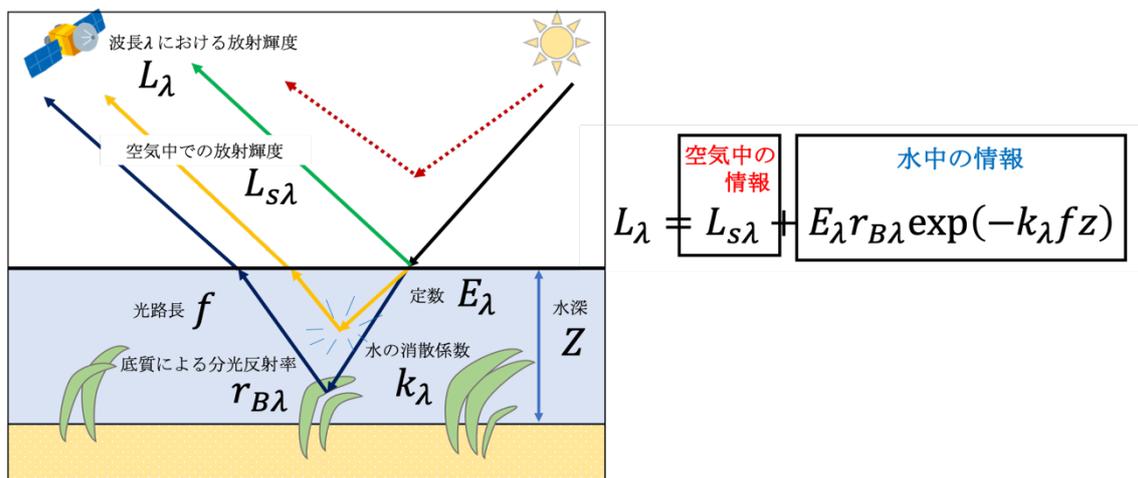


図 4-3-2 光学衛星のセンサが検出する放射輝度の原理

地球観測衛星画像から底質を判別するために最も有効な方法は (4-3.1) 式から  $r_{B\lambda}$  を求めることである。しかし、水深や消散係数に反映される水質が不明な底質環境に対して、(4-3.1) 式の  $r_{B\lambda}$  を解くことは非常に難しい。そこで、「底質が同じならば、異なる 2 バンドの底質反射率比は一定になる」という Lyzenga の理論を応用して、画像を比演算することにより水深の影響を除去する水深補正アルゴリズムが導かれる。以下にこれらの過程を式で表す。

異なる 2 バンド  $i$ 、 $j$  により地球観測衛星が観測する放射輝度は、(4-3.1) 式からそれぞれ以下の式で表される。

$$L_i = L_{si} + E_i r_{Bi} \exp(-k_i f z) \quad (4-3.2)$$

$$L_j = L_{sj} + E_j r_{Bj} \exp(-k_j f z) \quad (4-3.3)$$

以降、簡単な数式展開なので詳細を省略するが、2つの異なるバンドの消散係数  $k_i$  と  $k_j$  の比 (以降、消散係数比) である  $k_{ij}$  として次の (4-3.4) 式を得

る。

$$\frac{\log(L_i - L_{si}) - \log(E_i r_{Bi})}{\log(L_j - L_{sj}) - \log(E_j r_{Bj})} = \frac{k_i}{k_j} = k_{ij} \quad (4-3.4)$$

この (4-3.4) 式により水深や光路長などの不明なパラメータを除去していることがわかる。(4-3.4) 式の両辺を  $k_{ij}$  で割ると以下の式で表される。

$$\frac{\log(L_i - L_{si}) - \log(E_i r_{Bi})}{k_{ij} \log(L_j - L_{sj}) - k_{ij} \log(E_j r_{Bj})} = \frac{\log(L_i - L_{si}) - \log(E_i r_{Bi})}{\log(L_j - L_{sj})^{k_{ij}} - \log(E_j r_{Bj})^{k_{ij}}} = 1 \quad (4-3.5)$$

これを更に展開することで以下の式を得る。

$$\log \left[ \frac{E_i r_{Bi}}{(E_j r_{Bj})^{k_{ij}}} \right] = \log \left[ \frac{L_i - L_{si}}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (4-3.6)$$

この式で、左辺の変動の多くは「2 バンド間における海底反射率の比」支配され、底質の情報を持つといえる。そこで、これを底質指標  $BI_{ij}$  とする。

$$BI_{ij} = \log \left[ \frac{L_i - L_{si}}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (4-3.7)$$

更に、(4-3.7) 式は、地球観測衛星のセンサが観測したデジタル値 (DN: Digital Number) に置き換えることで以下の式で表される。

$$BI_{ij} = \log \left[ \frac{(DN_i - DN_{si})}{(DN_j - DN_{sj})^{k_{ij}}} \right] = \log(DN_i - DN_{si}) - k_{ij} \log(DN_j - DN_{sj}) \quad (4-3.8)$$

(4-3.8) 式より、異なる 2 バンドの地球観測衛星データの関係から消散係数比がバンド比 (異なるバンドの輝度値の対数をプロットした時の傾き) として求まり、理論的には画像のみから水深の影響を除去した藻場の判別が可能となる。

#### (4) - 2 消散係数比の算出

消散係数比は以下の方法で算出する。DN 値は 3×3 画素の平均値とする。

- ① 底質の状態がほぼ同じと仮定できる水域 50 カ所の DN を抽出する
- ② 水深が十分深いと考えられる水域 1 カ所の DN を抽出する

- ③ ①で抽出した 50 カ所から②の 1 カ所を引く
- ④ 両バンドの大気補正後の DN 値の自然対数をプロットし、その回帰直線の傾きから消散係数比を求める

本研究の消散係数算出として抽出した海域箇所を図 4-3-3 に示す。今回は、底質が砂地の生名島周辺または因島最南端の日立造船付近の水域およそ 50 カ所を抽出した。また、水深が十分深いと考えられる水域 1 カ所は、観測対象の海図を基に平内島の西側の水域を抽出した。



図 4-3-3 消散係数比の算出過程で抽出した水域箇所

#### (4) - 3 大気補正

本研究では簡易な大気補正法の 1 つである暗画素法を採用した。その方法は、対象とする画像の中で最も暗く写っている画素（暗画素）を、すべての画素から差し引いて行う。

#### (4) - 4 水深下限補正

水深 10m より深くなると太陽光が届かなくなり、藻類は光合成ができなくなるため、藻類は存在しないことが知られている。BI アルゴリズムによる藻場分布推定法で解析を行うと、海中の光の散乱・反射により水深 10m より深い領域に藻場を判別する場合があるが、これは明らかに誤判別であり解析精度低下を招く。この誤判別を無くすために水深 10m より深い領域にフィルタをかけて補正をする水深下限補正を行う。その方法を以下である。

- ① 水深が記載された因島周辺の海図を入手し、関心領域の水深 10m より深い領域と陸域を黒くする。海図に記載の水深は干潮時の値が表記してあり、1 日で潮位が変化しても水深 10m の表記エリアは潮位が 10m を下ることがないため藻類が存在しないと判断する。
- ② 色の区別をした海図をスキャンして保存する。このとき、解析に用いる

Landsat-8 画像ファイルの種類を揃えるため TIFF で保存する。

- ③ 関心領域にトリミングする。
- ④ MATLAB 上で構築した藻場識別解析プログラムで藻場の場所を特定した後に、色の区別をした海図でマスクする。このようにすることで、水深 10m より深い領域に藻場があると特定されていても、色の区別をした海図では黒色なので結果には反映されない。

#### (4) - 5 使用する地球観測衛星画像

本研究で使用する Landsat-8 衛星の画像データは、United States Geological Survey (アメリカ地質調査所、以降 USGS) のホームページ (<https://landsatlook.usgs.gov/>) にて無料で入手できる。本研究で入手するデータは Landsat-8 に搭載された Operational Land Imager (陸域イメージャ、以降 OLI) データである。Landsat-8 および OLI の諸元 (宇宙技術開発 [12]) を表 4-3-2 に示す。

表 4-3-2 Landsat-8 および OLI の諸元

衛星	軌道	太陽同期準回帰軌道
	回帰日数	16日
	周期	約99分
	高度	705km
センサ	バンド	Band2 : 青 450-515nm Band3 : 緑 525-600nm Band5 : 近赤外 845-885nm
	マルチスペクトルの分解能	30m
	観測幅	185km

本研究対象は、因島周辺水域であり、Landsat-8 衛星データは、因島周辺の水域が雲に覆われていないという条件で入手する必要がある。表 4-3-3 に観測日の天候 (国土交通省 [13]) と Landsat-8 の因島周辺水域画像データの利用可能性を示す。

表 4-3-3 観測日の天候と Landsat-8 の因島周辺水域画像データの利用可能性

観測日		生口島（因島周辺）の天気 <sup>[20]</sup>		観測対象の衛星データ	本研究での 利用可能性	備考
月	日	降水量（mm）	日照時間（h） <sup>※1</sup>	雲量 <sup>※2</sup>		
1	14	0.0	4.8	64%	×	
	30	0.0	5.2	42%	×	
2	15	0.0	0.1	97%	×	
3	3	0.0	4.6	30%	×	
	19	29.5	0.0	100%	×	
4	4	0.0	9.4	33%	×	
	20	0.0	11.7	0%	○	
5	6	10.5	0.4	97%	×	
	22	0.0	9.7	14%	○	
6	7	0.0	6.0	56%	×	
	23	1.0	0.1	100%	×	
7	9	0.0	10.7	53%	○	雲量が多いが、観測対象の因島周辺に雲が存在しないため解析可能。
	25	0.0	11.4	14%	○	
8	10	0.0	12.3	74%	×	
	26	0.0	11.0	19%	×	条件は良いが、観測対象の因島周辺に雲が存在するため解析不可。
9	11	0.0	8.7	69%	×	
	27	0.0	5.9	60%	×	
10	13	0.0	10.4	26%	○	
	29	0.0	8.2	30%	×	
11	14	0.0	7.3	36%	×	
	30	0.0	8.6	29%	○	
12	16	6.5	1.5	89%	×	

※1：日照時間が8時間以上で好条件（緑枠）とする。  
 ※2：雲量が30%未満で好条件（緑枠）とする。

本表より、4月20日、5月22日、7月9日、7月25日、10月13日、11月30日のLandsat-8画像データを解析し、季節変化を観測することとした。

#### (4) - 6 実際の解析手順

BIによる藻場識別解析の手順を説明する。解析はMathWorks社が開発した数値解析ソフトである「MATLAB」のプロット機能を使用している。

- ① 求めた Band2-Band3 間の消散係数比  $k_{23}$  を入力する
- ② Landsat-8 の青バンド (Band2)、緑バンド (Band3)、近赤外バンド (Band5) のデータ、海図 (C1) を読み込む
- ③ 各バンドの関心領域 (因島) を切り出す
- ④ Band2 と Band3 に対して暗画素を引く (簡易大気補正)
- ⑤ BI の計算をする
- ⑥ 画像ノイズ低減の目的で  $3 \times 3$  ピクセルの平均をとる
- ⑦ 平均フィルタをかけた BI (BIfilt) と平均フィルタをかけた海図 (DWfilt) を計算する
- ⑧ Band5 の輝度値で陸と海を区別する
- ⑨ 陸をマスクした底質指標の計算をする
- ⑩ 藻場の場所を特定する ( $-1.6 < BI < -1.4$ )

- ⑪ 水深が 10m よりも深いエリアをマスクする (水深下限補正)
- ⑫ 藻場を特定して Band5 画像と合成する (陸 : 1, 藻場 : 0.5, 海 : 0)
- ⑬ 陸を白、海を黒、藻場の場所を緑としてマップを作成し、表示させる

解析手順⑩では解析においてしきい値が必要であるが、現状では広島大学との技術討議で推奨された値を採用しており、最適とは必ずしも言えない。2019 年度以降に解析精度向上として研究すべき項目である。

#### 参考文献

- [1] 環境省 報道・広報 報道発表資料 瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査 (中部海域) の結果について  
<http://www.env.go.jp/press/104216.html>
- [2] 松下 文経 (筑波大学生命環境系)、  
ラルー ムハマド ジャエラニ (筑波大学大学院生命環境科学研究科)、  
楊 偉 (海洋研究開発機構)、尾山 洋一 (釧路市教育委員会マリモ研究室)、  
福島 武彦 (筑波大学生命環境系)  
「MERIS データによる霞ヶ浦のクロロフィル a 濃度の長期モニタリング」  
『Journal of Remote Sensing Society of Japan Vol. 35 No. 3 (2015)』
- [3] 作野 裕司 (広島大学助教 大学院工学研究科)  
「静止海色衛星 GOCI による内湾のクロロフィルプロダクト精度検証」  
『土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 68 No. 2 I\_582-I\_587 (2012)』
- [4] 瀬森 裕貴、鈴木 直弥 (近畿大学 理工学部)  
「複数人工衛星および再解析モデルから得られる低緯度帯海表面温度データの精度比較」  
『科学・技術研究 第 3 巻 2 号 (2014)』
- [5] ルイ ソチエー (広島大学 大学院工学研究科)、  
作野 裕司 (広島大学助教 大学院工学研究科)  
「衛星 Terra/ASTER データを使った吉名干潟における藻場モニタリング」  
『水工学論文集 第 52 巻 (2008)』
- [6] 森 信人 (大阪市立大学講師)、二宮 順一 (大阪市立大学大学院工学研究科)、  
有田 守 (大阪大学助教)、出口 一郎 (大阪大学教授)、  
芳田 利春 (特定非営利活動法人アマモ種子バンク)、矢持 進 (大阪市立大学教授)  
「SFFM を用いた藻場分布と海底地形のリモートセンシング」  
『海岸工学論文集 第 54 巻 土木学会 (2007)』

- [7] 比嘉 紘士（横浜国立大学助教 大学院都市イノベーション研究院）、  
福田 智弘、宮下 寿哉（横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府）、  
中村 由行（横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院）、  
鈴木 崇之（横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院）  
「有色溶存有機物の光学特性を利用した静止海色衛星による東京湾の塩分分布推定に関する検討」  
『土木学会論文集 B2（海岸工学） Vol. 73 No. 2 I\_1237-I\_1242（2017）』
- [8] 虎谷 充浩（東海大学工学部）  
「海色リモートセンシングの大気補正」  
『写真測量とリモートセンシング VOL. 52, NO. 5（2013）』
- [9] 作野 裕司（広島大学助手 大学院工学研究科社会環境システム専攻）、  
吉田 武史（広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻）、  
松永 恒雄（国立環境研究所主任研究員）、  
古津 年章（島根大学教授 総合理工学部電子制御システム工学科）、  
高安 克己（島根大学教授 汽水域研究センター）  
「多時期 Landsat データを用いた宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度分布推定」  
『海岸工学論文集 第 50 巻 土木学会 1011-1015（2003）』
- [10] 青山 隆司（福井工業大学電気電子情報工学科）、  
矢野 達也、八木 一平（福井工業大学電気電子情報工学科 4 年生）  
「衛星リモートセンシングを用いた小浜湾の藻場計測」  
『福井工業大学研究紀要 第 44 号,（2014）』
- [11] 多田村 克己、中前 栄八郎（広島県立大学経営学部経営情報学科）  
「水上および水中照明シミュレーション」  
『照明学会誌 Vol. 79 No. 8A（1995）』
- [12] 宇宙技術開発株式会社 衛星画像データサービス 衛星諸元とまとめ  
Landsat「ランドサット」  
[http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite\\_landsat.html](http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_landsat.html)
- [13] 国土交通省 気象庁 各種データ・資料 過去の気象データ検索 広島県  
生口島  
2018 年 1 月-12 月  
[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=67&block\\_no=0687&year=2018&month=01&day=&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=67&block_no=0687&year=2018&month=01&day=&view=)
- [14] 緒方 郁夫（九州大学大学院生物資源環境科学府動物資源科学専攻水産増殖学研究室）  
鶴田 幸成、川口 栄男

(九州大学大学院農学研究院資源生物科学部門動物海洋生物学講座水産増殖学研究室)

「福岡市周辺の海産生物調査. II. 能古島南部におけるアマモ *Zostera marina* L. の季節的変動」『九大農学芸誌 第70巻 第1号 1-6 (2015)』

(5) 地球観測衛星画像の解析結果

(5) - 1 消散係数比

図 4-3-4 に各観測日における消散係数比プロット、そこから求めた Band2-Band3 間の消散係数比  $k_{23}$  と相関関数  $R^2$  を表 4-3-4 に示す。

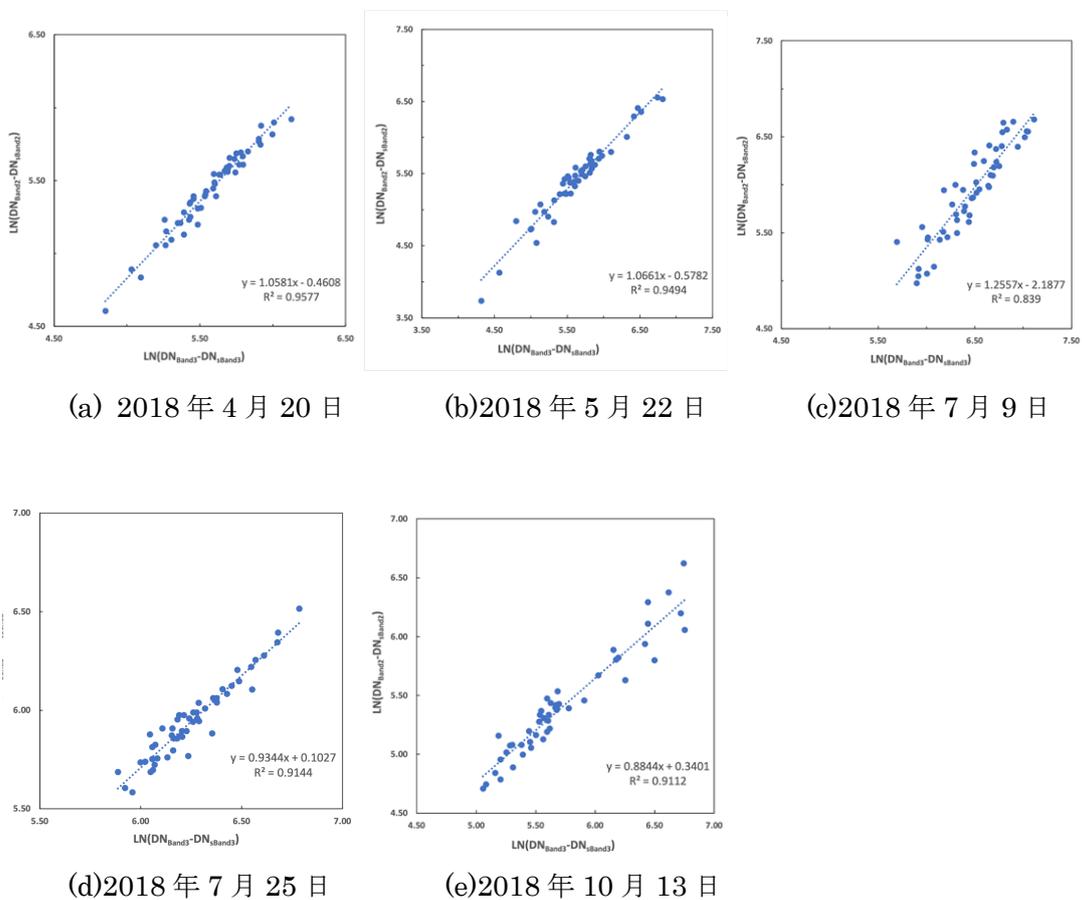


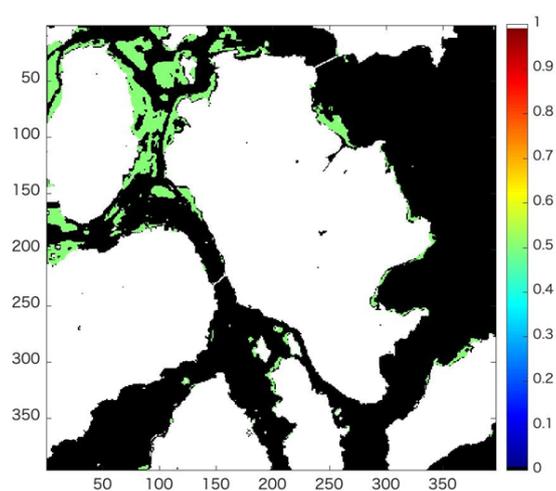
図 4-3-4 各観測日における消散係数比の算出結果

表 4-3-4 消散係数比と相関係数

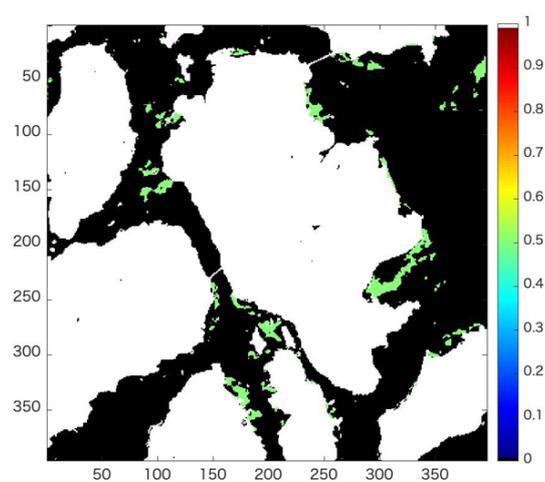
観測日	$k_{23}$	$R^2$
2018/4/20	1.06	0.96
2018/5/22	1.07	0.95
2018/7/9	1.26	0.84
2018/7/25	0.93	0.91
2018/10/13	0.88	0.91

(5) - 2 藻場の識別

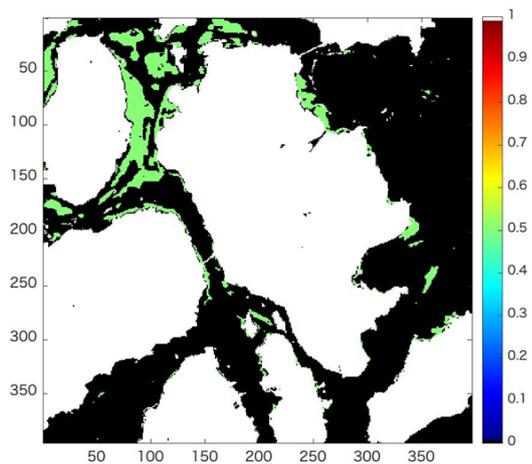
底質指標で解析した藻場識別結果を図 4-3-5 に示す。



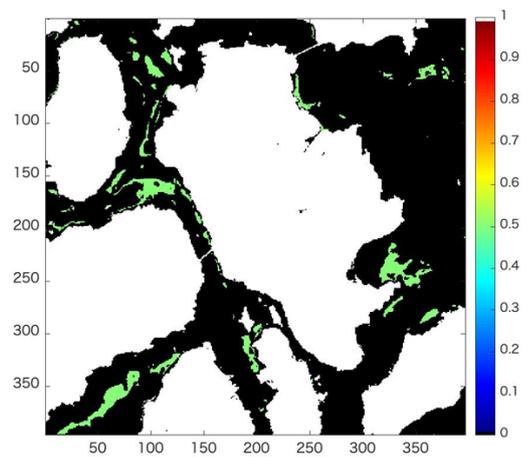
(a) 2018 年 4 月 20 日



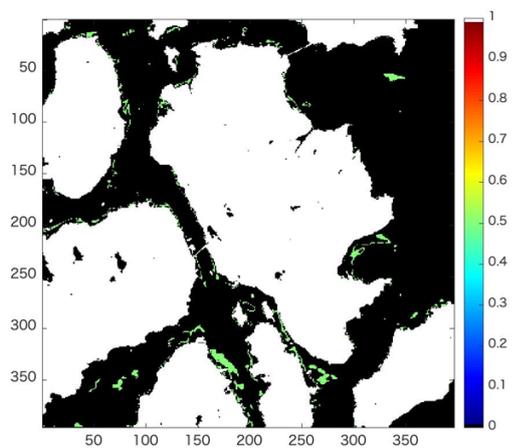
(b) 2018 年 5 月 22 日



(c)2018年7月9日



(d)2018年7月25日



(e)2018年10月13日

図 4-3-5 各観測日における藻場識別解析結果

(6) 現地調査による画像解析精度検証と考察

(6) - 1 現地調査方法

現地調査での観測点は、環境省の解析結果及び福山大学生命工学部海洋生物学の阪本准教授、山岸准教授と討議して藻場が存在するであろう12箇所(●)と藻場が存在しないであろう3箇所(●)、計15箇所を選定した(図4-3-6)。

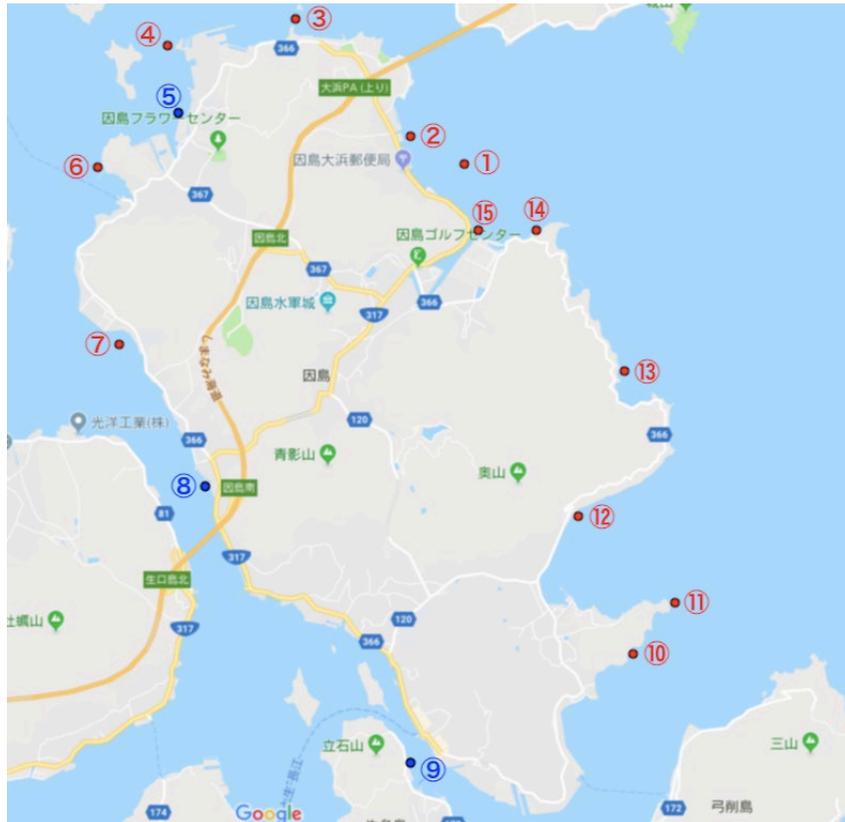


図 4-3-6 現地調査の観測地点

調査方法は、図4-3-7に示すとおり、岸近くで船を停止させ動画を取得するスポット調査と船を低速で岸から遠ざけながら動画を取得して藻場の存在限界を知るライン調査の2種類である。

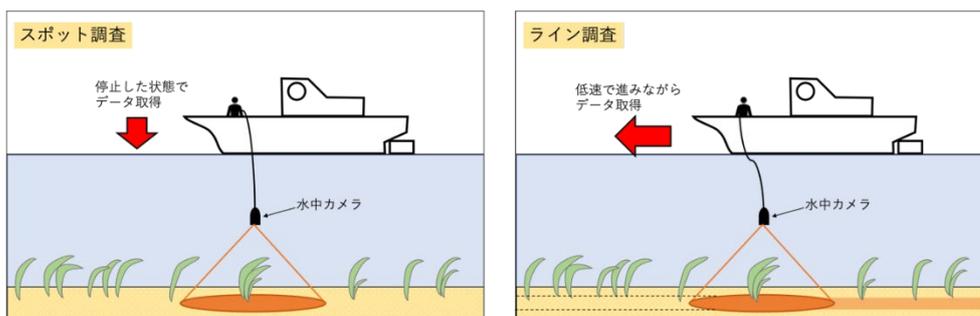


図 4-3-7 スポット調査とライン調査の方法

データ取得は、図 4-3-8 に示す釣り用の録画機能搭載赤外線水中カメラ「Big Catch LQ5050DR」で行った。本水中カメラには圧力センサを搭載しており、写真または動画の撮影画面に水温と水深の計測値が表示される。



図 4-3-8 本研究で使用した水中カメラ

また位置情報は、GPS ロガー「GT-730FL-S」を使用して取得し、付属ソフト「CanWay」により Google Map で現地検査の軌跡を表示した。

(6) - 2 秋 (2018 年 10 月 24 日) の現地調査

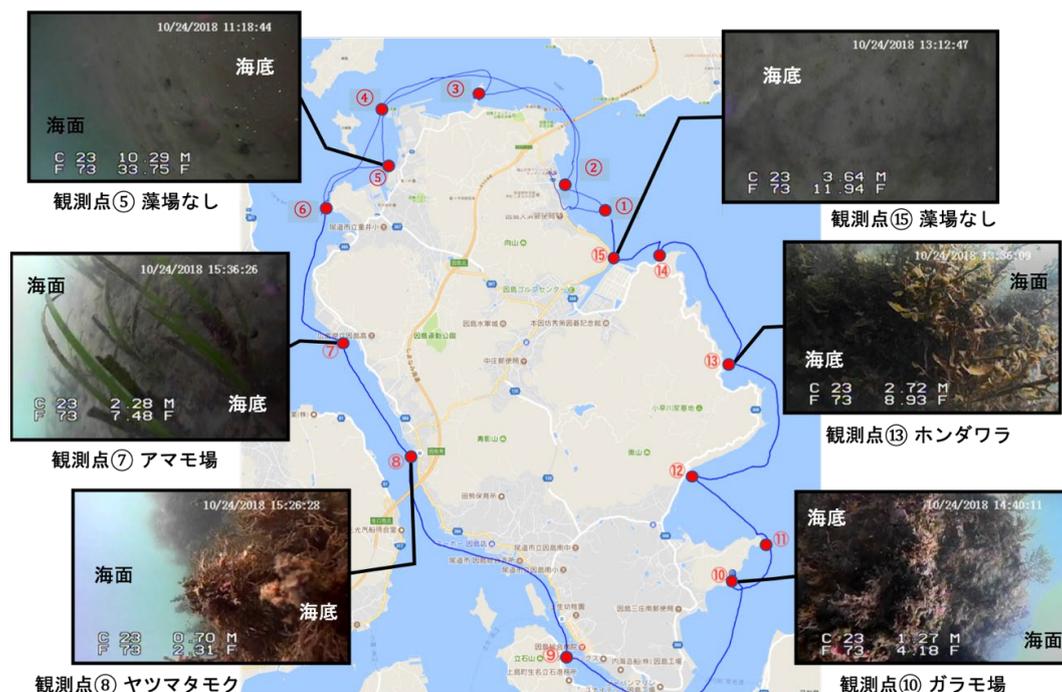


図 4-3-9 秋 (2018/10/24) の現地調査を行った観測点と藻場の様子

図 4-3-9 に秋 (2018/10/24) の現地調査を行った観測点とその時の藻場の画像を示し、調査結果のサマリーを表 4-3-5 に示す。

表 4-3-5 秋 (2018/10/24) の現地調査結果

観測点	緯度経度 (世界測地系 10進法)		ライン調査		スポット調査	備考
	緯度	経度	藻の種類	範囲*		
①	34° 20.6128'N	133° 10.9910'E	アオサ (?)	狭域		岩が多い。岩にへばりついた藻をわずかに観測。
②	34° 20.8319'N	133° 10.5743'E	アマモ	広域		砂地。全体的にアマモの葉が茶色である。
③	34° 21.5689'N	133° 09.6836'E			藻場なし	岩と砂が混在。潮の流れが速い。ホンダワラをわずかに観測。
④	34° 21.4416'N	133° 08.8095'E			藻場なし	岩にへばりついた藻をわずかに観測。
⑤	34° 20.9880'N	133° 08.8272'E			藻場なし	砂地。ところどころ穴が空いている。
⑥	34° 20.6622'N 34° 20.7119'N	133° 08.2465'E 133° 08.2230'E	アマモ ガラモ	広域		岸に近いところは岩だが岸から離れると砂地に変化。岸から離れても水深3mが続く。
⑦	34° 19.5164'N	133° 08.3598'E	アマモ	広域		遠浅。砂地。ところどころ穴が空いている。
⑧	34° 18.5674'N	133° 09.0878'E	ヤツマタモク	狭域		潮の流れが速い。
⑨	34° 16.8312'N	133° 10.6048'E			藻場なし	砂地。水質が良く、浅い。
⑩	34° 17.5603'N	133° 12.3238'E	アマモ ガラモ	狭域		砂地にアマモ場、岩場にガラモ場を観測。全体的にアマモは葉長が短い。ウニを多く観測。
⑪	34° 17.8181'N	133° 12.6442'E			藻場なし	地蔵鼻周辺は砂地で藻場なし。少し回り込んだ岩場に一部ガラモ (?) を観測。ピンク色の魚も観測。
⑫	34° 18.4051'N	133° 11.8785'E	ヒジキ (?)	狭域		砂地と岩場。岩場にヒジキ (?) を観測。
⑬	34° 19.3513'N	133° 12.2463'E	ホンダワラ	広域		岩場。魚の群れを観測。シロギスやピンク色の魚など。
⑭	34° 20.2181'N	133° 11.5875'E			藻場なし	細かな岩場。
⑮	34° 20.2251'N	133° 11.1059'E			藻場なし	砂地。ところどころ穴が空いている。

\*ライン調査の範囲は、直線距離30m未満で藻場が分散して存在する観測点を狭域、直線距離30m以上で藻場が連続して存在する観測点を広域とする。

(6) - 3 冬 (2018年 12月 22日) の現地調査

図 4-3-10 に冬 (2018/12/12) の現地調査を行った観測点とその時の藻場の画像を示し、調査結果のサマリーを表 8 に示す。なお、観測点⑦の調査中、水中カメラが海上に係留していたボートの一部に引っかかり、ケーブルが断線したため観測点⑧～⑮の調査は行えなかった。

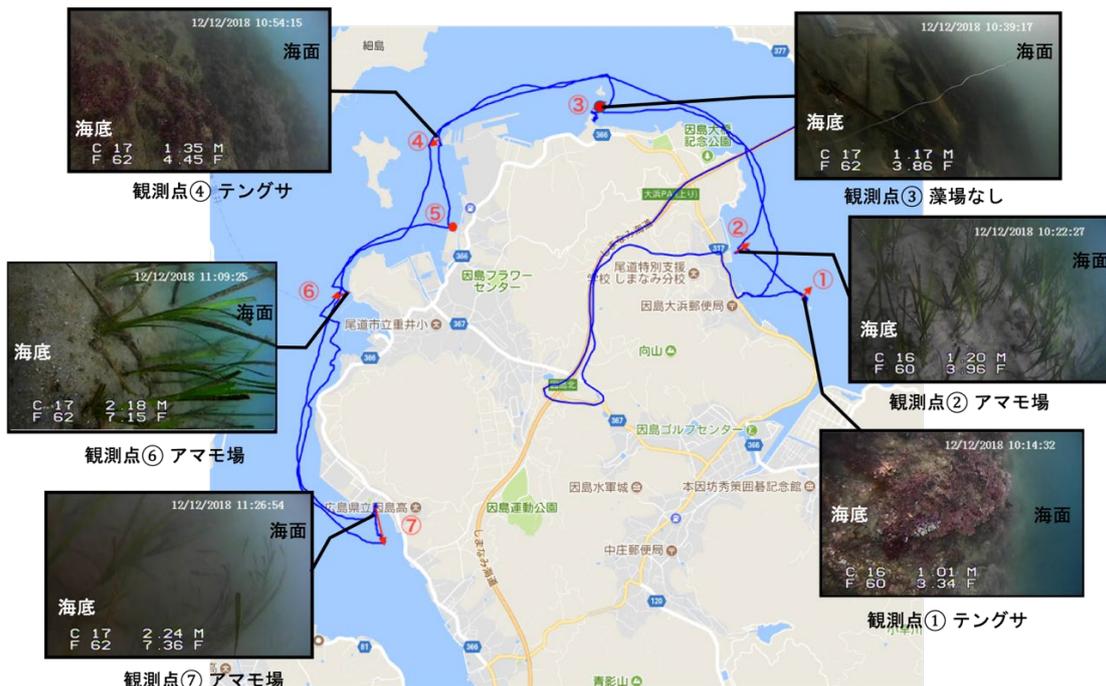


図 4-3-10 冬 (2018/12/12) の現地調査を行った観測点と藻場の様子

表 4-3-6 冬 (2018/12/12) の現地調査結果

観測点	時刻		緯度経度 (世界測地系 10進法)		ライン調査		スポット調査	備考
	開始	終了	緯度	経度	藻の種類	範囲*		
①	10:12	10:19	34° 20.6119'N	133° 11.0067'E	テングサなど	狭域		岩場が多い。八重子島の2島の間で藻場を観測。テングサ他複数の藻類を観測。
②	10:22	10:27	34° 20.8563'N	133° 10.5708'E	アマモ場	広域		砂地。広範囲に広がっている。
③	10:35	10:46	34° 21.5230'N 34° 21.5602'N	133° 09.7233'E 133° 09.7264'E			藻場なし	沿岸付近は岩場が多く、目測で20cmの魚を観測。木の枝やゴミが多い。砂が積もったような状態である。潮の流れが速く水質が悪い。ワカメの流れ藻を観測。
④	10:54	10:58	34° 21.4007'N	133° 08.8067'E	テングサなど	狭域		砂地は観測なし。岩場にテングサ他複数の藻類を観測。
⑤	11:02	11:04	34° 20.9748'N	133° 08.8805'E			藻場なし	砂地。
⑥	11:09	11:15	34° 20.6542'N	133° 08.2399'E	アマモ場	広域		全体的に葉長が長い。
⑦	11:25	11:36	34° 19.5967'N	133° 08.4054'E	アマモ場	広域		岸付近は砂地で藻の観測なし。水質が悪い。

\*ライン調査の範囲は、直線距離30m未満で藻場が分散して存在する観測点を狭域、直線距離30m以上で藻場が連続して存在する観測点を広域とする。

#### (6) - 4 解析精度検証

精度検証は、現地調査日に近い日の藻場識別解析データ 2018年10月13日と2018年11月30日をそれぞれ比較する予定としていたが、メキシコ国境の壁建設予算をめぐるアメリカ政府機関の一部閉鎖の影響で2018年11月30日のLandsat画像データは2019年2月初旬時点で入手できなかった。そこで2018年7月9日と10月13日の藻場識別解析データを精度検証対象とした。

表 4-3-7 に藻場識別解析 (2018年7月9日) の精度検証結果を示す。

表 4-3-7 藻場識別解析 (2018/7/9) の精度検証結果

観測点	藻場の有無					
	藻場識別解析結果 (2018/7/9)	現地調査結果 (2018/10/24)	比較	藻場識別解析結果 (2018/7/9)	現地調査結果 (2018/12/12)	比較
①	有	有	○	有	有	○
②	有	有	○	有	有	○
③	無	無	○	無	無	○
④	有	無	×	有	有	○
⑤	有	無	×	有	無	×
⑥	有	有	○	有	有	○
⑦	無	有	×	無	有	×
⑧	無	有	×	—	—	—
⑨	無	無	○	—	—	—
⑩	無	有	×	—	—	—
⑪	有	無	×	—	—	—
⑫	無	有	×	—	—	—
⑬	無	有	×	—	—	—
⑭	無	無	○	—	—	—
⑮	有	無	×	—	—	—
精度	6/15=0.400 (40%)			5/7=0.714 (71%)		

表 4-3-8 に藻場識別解析結果 (2018/10/13) の精度検証結果を示す。

表 4-3-8 藻場識別解析結果 (2018/10/13) の精度検証結果

観測点	藻場の有無					
	藻場識別解析結果 (2018/10/13)	現地調査結果 (2018/10/24)	比較	藻場識別解析結果 (2018/10/13)	現地調査結果 (2018/12/12)	比較
①	有	有	○	有	有	○
②	有	有	○	有	有	○
③	無	無	○	無	無	○
④	無	無	○	無	有	×
⑤	有	無	×	有	無	×
⑥	有	有	○	有	有	○
⑦	無	有	×	無	有	×
⑧	無	有	×	—	—	—
⑨	有	無	×	—	—	—
⑩	無	有	×	—	—	—
⑪	無	無	○	—	—	—
⑫	有	有	○	—	—	—
⑬	無	有	×	—	—	—
⑭	無	無	○	—	—	—
⑮	無	無	○	—	—	—
精度	9/15=0.600 (60%)			4/7=0.571 (57%)		

表 4-3-7 に示す 7 月 9 日の藻場識別解析の精度は、秋 (2018/10/24) の現地調査結果と比較して 40%で、環境省の解析精度の 71%には及ばない。この原因は西日本豪雨の影響が強いと考える。一方、冬 (2018/12/12) の現地調査と比較すると 71%の精度を得るが、時期が違い過ぎる。

また表 4-3-8 に示す 10 月 13 日の藻場識別解析の精度は、秋 (2018/10/24) の現地調査結果と比較して 60%、冬 (2018/12/12) の現地調査結果と比較して

57%である。従って本研究での解析精度は、解析日と現地検査日が近いこのデータをから 60%と評価するが、依然として環境省の解析精度の 71%より低い。

当然のことながら精度検証に使ったデータ数が 15 個と少ないため、60%が有意な解析精度とは言い難い。有意な解析精度を得るために、今後、現地調査の観測点を追加して精度検証に資するデータ取得を継続する必要がある。また、生命工学部海洋生物科学科との調整が必要となるが、因島周辺でのフィールド学生実習時に藻場の有無データを取得していただき、検証用データを充実化する考えである。

#### (6) - 5 藻場識別解析結果の考察

本研究と環境省の藻場識別解析の内、春の結果比較を図 4-3-11 に示す。

佐木島周辺や福山大学内海生物資源研究所前の沿岸域に差異が認められるが、比較的良く合致していると言える。本研究では、佐木島周辺や福山大学内海生物資源研究所前の沿岸域について現地調査で観測データを得ていないので、解析結果の精度について議論ができないため、今後、現地調査の観測点にこれらを追加する必要がある。

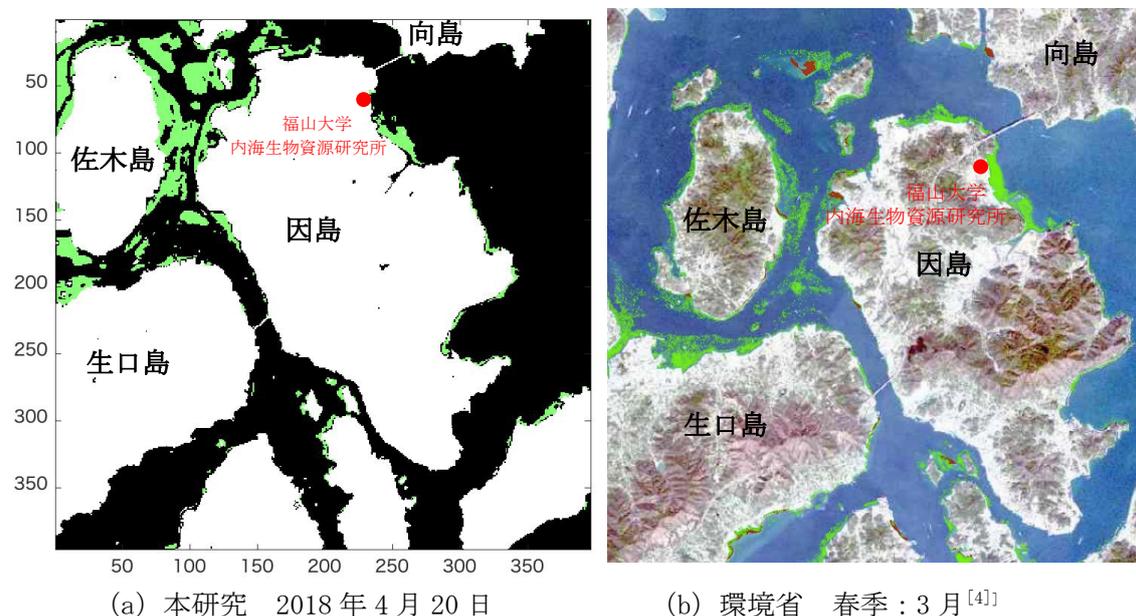


図 4-3-11 本研究と環境省の藻場識別解析結果

#### (6) - 6 藻場の季節変化について

図 4-3-12 に藻場識別解析結果の経時変化を示す。福山大学内海生物資源研究所前の沿岸域において、4 月・5 月から 7 月上旬にかけて藻場の分布が増加し、7 月下旬から 10 月にかけて藻場の分布が減少していることがわかる。「福岡市周

辺の海産生物調査. II. 能古島南部におけるアマモ *Zostera marina* L. の季節的変動」(緒方ら、2015[14])<sup>1)</sup>によると、福岡県博多湾内の能古島でのアマモ葉長の季節変動は、春(5~7月)に葉長が長く、秋(9~11月)に最も短くなることが報告されている。福岡市と尾道市という場所の違いはあるが、本研究の藻場識別解析結果の季節変化と一致していることがわかる。しかしながら本研究での解析精度が未だ高くないため現時点で明確な季節変化を識別できているとは言い難い。今後、より精度を高めた解析結果で季節変化を考察することが課題である。

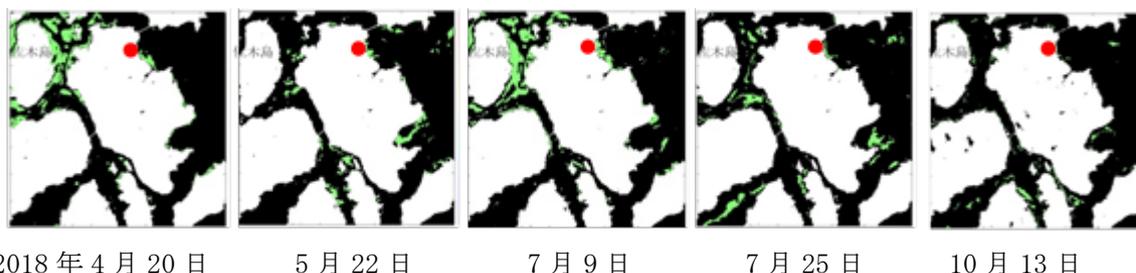


図 4-3-12 藻場識別解析結果の季節変化

#### 6 - (7) 自然環境変化が藻場へ及ぼす影響

図 4-3-12 の藻場識別解析結果の季節変化で、2018 年 7 月 9 日と 7 月 25 日の解析結果を比較すると、藻場分布の変化が大きいことがわかる。特に佐木島周辺の藻場が急激に減少している。また、前述した消散係数比の算出結果の表 6 消散係数比と相関係数において、他のデータの相関係数が 0.90 以上であるのに対して 7 月 9 日の相関係数は 0.84 であった。これは他のデータに比べてばらつきが多いことを示している。

この変動の要因として 2018 年 7 月上旬に起こった西日本豪雨で瀬戸内海全体に土砂が流入し懸濁度が高くなり、各バンドの反射率にばらつきが出たことが考えられる。

このことは懸濁度による藻場識別のばらつきを抑えるように、懸濁度データを解析へ反映させれば解析精度が向上する可能性を示唆しており、同時に、最終目的である里山から河川を伝って排出する石・砂利等で受ける影響のモデル構築で考慮すべき一つのパラメータと言える。

## 5. 今後の研究計画

### 【担当：阪本憲司】

#### 「瀬戸内海沿岸の藻場および河川に生息する魚介類、ならびに里山に生息する両生類の遺伝的集団構造および遺伝的多様性の解明」

瀬戸内海域において特徴的な生態系である藻場に生息する魚介類および里山の河川に生息する魚類、ならびに里山の雑木林に生息する両生類を対象に、オートシーケンサーを用いた DNA 多型解析により、遺伝的集団構造と遺伝的多様性を明らかにする。また、次世代シーケンサーを用いた環境 DNA 解析により、瀬戸内海沿岸域の藻場における魚類相の網羅的把握を目指す。さらに、流れ藻を介した魚類の集団間交流を明らかにする。以下の 5 つのテーマを同時並行で進めていく。

- (1) 瀬戸内海各所の藻場において、アミメハギおよびガザミをそれぞれ採集し、オートシーケンサーを用いた DNA 多型解析により、両種の遺伝的集団構造と遺伝的多様性を明らかにする。
- (2) 里山の河川に生息するカワムツを採集し、オートシーケンサーを用いた DNA 多型解析により、遺伝的集団構造および遺伝的多様性を明らかにする。
- (3) 里山の雑木林に生息し、絶滅危惧種に指定されているカスミサンショウウオ種群を採集し、オートシーケンサーを用いた DNA 多型解析により、遺伝的集団構造および遺伝的多様性を明らかにする。
- (4) 瀬戸内海芸予諸島東部海域に分布する藻場において海水をサンプリングし、次世代シーケンサーを用いた環境 DNA 解析により、魚類相を網羅的に把握する。
- (5) 瀬戸内海芸予諸島東部海域の「藻場」に生息する魚類と、同海域において採集された「流れ藻」に付随する稚魚集団の DNA 解析を行い、「流れ藻」を介した魚類の集団間交流を解明する。

### 【担当：山岸幸正】

#### 「瀬戸内海沿岸域の藻場生態系における海藻類の種構成および系統地理的解析」

藻場の状況を定量的に把握するために、因島八重子島において設定した調査ラインで継続的に海藻の定量的な調査を行うとともに、調査ライン以外でも八重子島の藻場の特色を示すと考えられる調査地点について検討し、定量的測

定を行う。

アカモクの系統地理的解析では、さらに詳細な集団の遺伝的構造を解明するために、まだ解析していない場所のアカモクサンプルも用いてさらに *cox3* 解析を行うとともに、より多型性が高いマイクロサテライトによる解析として、平成 30 年度に個体差が多く解析に有効と考えられたいくつかの領域を用いて、フラグメント解析を中心に進めていく。

【担当：関田隆一】

「衛星画像藻場分布」

(1) 平成 29 年度からの研究計画全体の流れを以下に示す。

- ① 現状を知る (H29、30 上期) ⇒ 終了
- ② 海岸・藻場の各種観測データによる定量化と補正の研究 (H30~32)  
⇒ 計画どおりに定量化まで行い、補正の研究に入れる。
- ③ リモートセンシング、航空観測、現地観測の各解析技術と仕分けの研究 (H31) ⇒ 検討のためのデータを取得しており、研究に入れる。
- ④ データ収集、解析及び検証 (H30~32) ⇒ 計画どおりに実施中
- ⑤ GIS との統合化モデル構築と考察 (H32) ⇒ 既に Google Map と解析結果を統合化しており、モデル構築を今後実施
- ⑥ 藻場の持続的発展に向けたデータ定量化とモデルの活用技法構築 (H32、33) ⇒ 今後実施

研究計画全体スケジュール図 5-3-1 に示すが、これまでの研究進捗に大きな乖離がないことから、2019 年度以降もこの計画で進捗させる。

	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度	平成 32 年度	平成 33 年度
	下期	上期	下期	上期	下期
研究マネジメントと論文					
インターフェース等調整会議		▽	▽	▽	▽
学会発表			▽	▽	▽
学術論文				▽	▽
研究報告書			進捗▽	中間▽	進捗▽
研究実施					最終▽
①現状を知る	リモセン技術	先行研究	観測対象と観測目的の整理		
②海岸・藻場の各種観測データによる定量化と補正の研究			瀬戸内へ適した定量化技法とデータ補正方法の創造	解析技術の応用	
③リモートセンシング、航空観測、現地観測の各解析技術と仕分けの研究			各解析技術の研究	仕分けの検討	
④データ収集、解析及び検証	フリーリモセンデータによる解析試行		海岸観測衛星	海岸観測衛星	
⑤GIS との統合化モデル構築と考察			現地	ドローン	
⑥藻場の持続的発展に向けたデータ定量化とモデルの活用技法構築				藻場の生成・維持・消滅する要因研究	
				GIS統合モデル構築	
				藻場の定量化	
					藻場の持続的発展に向けたデータ定量化
					藻場の持続的発展モデル構築

図 5-3-1 衛星画像藻場分布 研究全体スケジュール

(2) 平成 31 (2019) 年度の研究計画

2019 年度は、上記計画に沿って次の 3 項目について研究を進める。

- ① 定量化解析の精度を向上させる補正の研究

定量化解析の精度は前述したとおり 60%であり、次の 3 項目の実施により目標の 71%越えを達成する。

(ア)データ取得対象の地球観測衛星を追加

今年度のデータ取得対象とした Landsat-8 の分解能は、1 画素あたり 30m であり、その粗さは否めない。そこで Landsat と同様にデータを無料で公開している欧州の Sentinel-2 についてデータ解析を試行した。その結果を Landsat-8 と比較して図 5-3-2 に示す。両衛星で同じ傾向の藻場識別をしていると分かり、Sentinel-2 の 1 画素あたり 10m の分解能に対応して、藻場が点で示される様になり精度向上を期待できる。しかし Sentinel-2 の解析結果について海洋生物工学科と討議したところ、藻場がないと分かっている箇所で藻場を識別しており、補正の検討が必要である。また Landsat シリーズはアメリカの国策として衛星開発継続を期待できるが、Sentinel シリーズは欧州として所定の成果を得たところで衛星開発が止まる懸念がある。本研究では Landsat-8 と Sentinel-2 の両衛星のデータ解析を継続する。

また有料の Worldview-4 による 4 月 20 日の因島付近の画像を今年度の経費で購入してある。この分解能は 1 画素あたり 0.5m である。Worldview-4 データは、解析前のデータ処理が必要で現在それを行っており、データ解析結果は 2019 年度に考察する。

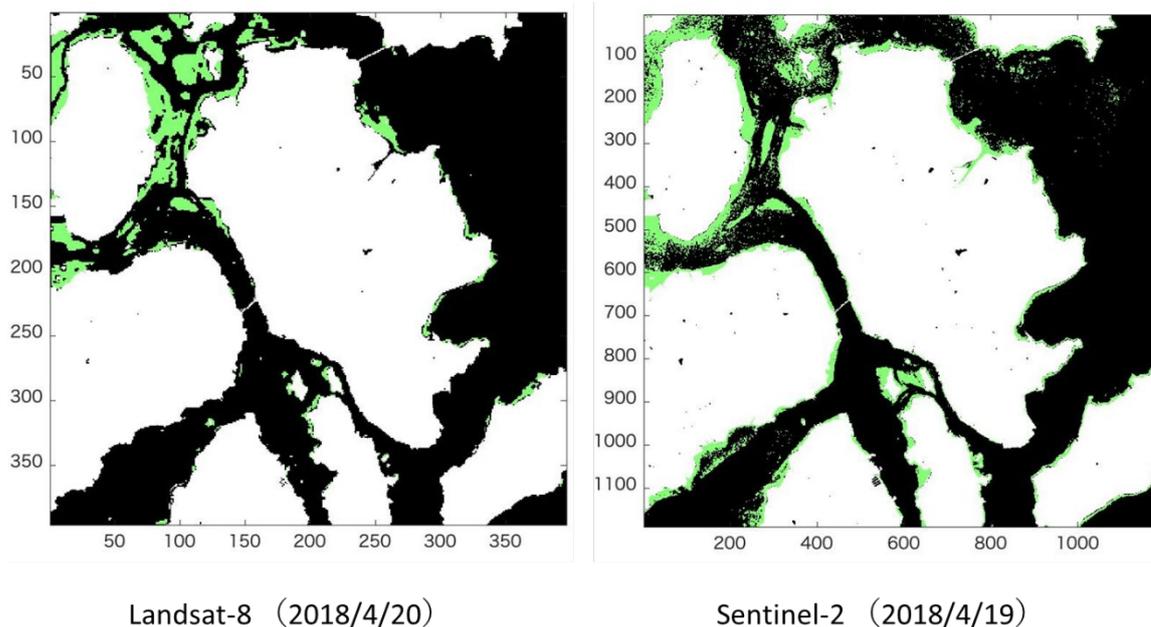


図 5-3-2 Landsat-8 と Sentinel-2 の藻場識別結果比較

(イ)大気補正

前述した相対大気補正法の適用を加えることとして、先行研究の成果を本研究にテラリングさせる。

(ウ)海中補正

消散係数比算出方法の改善、海水表面温度や海水懸濁度データを解析に反映させる方法などを検討する。

② 現地調査データの充実

因島沿岸域の藻場現地調査を 2019 年度は毎月 1 回のペースで行い、きめ細かな藻場の生育状況データを取得して、精度検証を向上させる。また現在行っている 15 点の調査に、大きな藻場はその面積を計測し精度検証に加えると共に、データ解析結果で藻場を識別した箇所を無作為に抽出して現地で藻場の有無を確認するデータも加えて精度検証を有意なものとする。更に海洋生物工学科の学生実習などで藻場の有無や状況データを取得していただき、本研究の検証データの一部とする。

③ 藻場の生成増減モデル化に向けた海中データ取得の試み

藻場の生育条件について先行研究サーベイを行い、更に阪本准教授、山岸准教授の研究成果とリンクさせて藻場の生成増減に関連する海中データを特定させる。それらのデータ取得を現地調査で試行することで、藻場識別解析精度の向上と藻場の生成増減モデルの検討に反映させる。