

## 厚岸湾アイニンカップのオオアマモに対する崖崩れの影響評価

国立科学博物館標本資料センター 伊藤 美菜子

国立科学博物館植物研究部 田中 法生

### はじめに

海産の種子植物である海草によって形成されるアマモ場は、多様な動植物の生息場所や産卵・稚仔魚の生育場として利用される、生態学的にも水産学的にも重要な沿岸生態系である (Nordlund et al. 2016; UNEP 2020)。また近年は大気や海水中の二酸化炭素を海草が固定、貯留する役割が注目され、ブルーカーボンとしての機能も重要視されている (堀・桑江 2018)。しかしながらアマモ場は自然活動や人間活動による影響を強く受けることから (Orth et al. 2006)、日本国内を含む世界的にアマモ場面積は減少しており (Waycott et al. 2009; Dunic et al. 2021; Sudo et al. 2021)、アマモ場および海草の適切な保全は人類にとっても重要な課題である。

アマモ場が形成される沿岸域は陸域と海域の境界に位置することから、アマモ場は河川由来の栄養塩供給、土砂による濁度の低下、崖崩れによる攪乱など、陸域環境の影響を強く受けることが知られている (Shaffer & Parks 1994; Carr et al. 2012; Serrano et al. 2016; Bainbridge et al. 2018; Deb & Mandal 2021)。崖崩れや地すべりなどの土砂災害は代表的な攪乱の例であるものの、崖崩れがアマモ場に及ぼす影響についての理解は乏しい。気候変動により大雨の増加や台風の激甚化などが予想されており、それに伴い土砂災害の頻度や程度も増すことが予想されている (Yasuhara et al. 2010; Gariano & Guzzetti 2016; IPCC 2021; Mori et al. 2021; 国土交通省 2022)。このような状況において、崖崩れによるアマモ場への影響の評価はアマモ場の保全にあたって必要不可欠であると考えられる。

海草の一種であるオオアマモ (*Zostera asiatica*) は日本近海固有種であり、IUCNのレッドリストでは準絶滅危惧種 VUに指定され、国内では環境省によって絶滅危惧II類に指定されている絶滅危惧種である (環境省 2020; IUCN 2023)。オオアマモは一般的には水深1m以深の潮下帯に生育するが (Nakaoka & Aioi 2001; 大場・宮田 2020)、北海道厚岸町アイニンカップでは世界で唯一の潮間帯群落の存在が知られている貴重な場所である (渡辺 2003; Watanabe et al. 2005)。アイニンカップを含む厚岸町の沿岸域は一帯が「釧路―厚岸海岸の地すべり地形」として北海道地質百選にも選ばれ、地すべりや崖崩れが頻発する地域として知られている (田近ほか 1994; 北海道地質百選検討グループ 2009)。アイニンカップに生

育するオオアマモの貴重性や地域一帯の地質学的特徴からも、崖崩れや地すべりがオオアマモやアマモ場に与える影響の評価が求められる。

2021年5月にアイニンカップで崖崩れ（地すべり）跡地に分布を拡大した潮間帯オオアマモ群落が発見された。2021年の調査から、崖崩れの影響を受けた群落では影響を受けていない群落よりも有意に繁殖率が高く、花序や種子の成熟が遅い傾向が示唆された。しかしながら、このような形質の違いが何に由来するのか、また崖崩れ影響により変化した形質は長期的に維持されるのかなど不明な点が多く残されている。またこのような変化の要因には、環境変化への生態的反応や遺伝的に異なる個体群の定着などが考えられるが、分布拡大したオオアマモ群落の由来は不明である。

本研究ではアマモ場に対する崖崩れのより長期的な影響評価と関連する要因の探索を目的に、2021年に崖崩れの影響を受けた潮間帯オオアマモ群落の追跡調査を行った。本報告書では、ドローン撮影によるアマモ場の分布変化の評価、崖崩れ影響の有無による潮間帯オオアマモ群落間の形質の比較、崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落の集団遺伝的解析の3点について、2021年の結果やそれ以前に得られたデータも交えて報告する。

## 調査方法

### ・調査地点および対象

調査は北海道東部の厚岸町アイニンカップのアマモ場で行った（図1）。アイニンカップは厚岸湾に面した小さな湾を持ち、南東部に急な斜面（崖）がある。今回の調査目的である崖崩れが起きたのもこの南東の崖である（図2）。2021年5月26日に行われたアイニンカップの調査時に、大規模な崖崩れの発生および崖崩れ跡地に生じた潮間帯オオアマモ群落を確認した。

なお、アイニンカップのアマモ場は北海道大学厚岸臨海実験所が実習や研究に用いるなど、定期的に関係者が調査を行っている場所であったが、2020年に始まったコロナ禍の影響により2020年度の調査が行われなかったことから、実際に崖崩れが起きた時期は特定できていない。このため本研究においては、崖崩れの発生を確認した2021年を基準として、2019年以前を「崖崩れ前」、2021年を「崖崩れ直後」、2023年を「追跡調査」としてまとめている。



図1：調査地の地図。北海道東部厚岸郡厚岸町アイニンカップは厚岸湾に面した小さな湾であり、アイニンカップの南東部の崖付近で調査を行った。



図2：アイニンカップ南東部にある崖崩れの発生現場（A）と崖崩れの影響を受けたオオアマモ群落（B）、および（B）と同時期に撮影された崖崩れの影響を受けていないオオアマモ群落（C）の写真。2021年5月26日に崖崩れの発生を確認し（A）、2021年6月9日第1回目の調査を行った（B,C）。

#### ・ドローンによるアマモ場分布調査

ドローンを用いてアイニンカップ上空からの画像撮影を行い、アマモ場の分布がどう変化したのかを評価、比較した。

ドローンを用いた分布調査は、2019年から2023年にかけて計6回行った（表1）。各年に複数のドローン調査が行われた場合、分布の比較には採集調査と同時期である各年夏季（6月、7月）のデータを利用した。なお、ドローン撮影にあたってはDJI Mavic2 Proを使用し、撮影時期に合わせて適切な資格や経験をもつ人物が操縦、撮影を行っている。

アマモ場上空で連続撮影された画像は、Metashapeを用いてオルソ画像化を行った。作成されたオルソ画像に対して、Google Earth ProやQGISを用いてジオリフェレンスを行い、ジオリフェレンス済みの画像を使ったアマモ場の分布比較を行った。

表1：ドローンを用いた画像撮影の概要。各撮影日にアイニンカップの上空から撮影を行った。崖崩れの影響評価以外の目的で撮影したものも含まれており、撮影範囲や状態はさまざまである。分布比較には、分布比較用（○）となっている撮影日に取得された画像を用いた。

撮影日	撮影範囲	状態	分布比較用
2019年7月4日	アマモ場全体	崖崩れ前	○
2019年9月25日	崖付近のみ		
2019年11月1日	アマモ場全体		
2021年6月9日	潮間帯のみ	崖崩れ後	○
2023年6月20日	アマモ場全体	さらに崖崩れが進行	○
2023年11月16日	アマモ場全体		

・崖崩れ影響の有無によるオオアマモ形質の比較

崖崩れによるオオアマモへの影響を明らかにするために、オオアマモの生活史をもとにオオアマモの繁茂期・繁殖期である夏季（6月～8月）に採集調査を行った。

2023年の採集調査は2021年の調査より得られたオオアマモの生活史を参考に、繁殖期の始め（5月下旬～6月上旬）、最盛期（7月）、終わり（8月下旬～9月上旬）の計3回行った（表2）。2021年は同期間中に計5回の採集調査を実施したが、2023年の結果と比較するため、同時期の3回分のデータのみを利用している。

2021年第1回目の調査時に、崖崩れの「影響あり」と「影響なし」とした二つの潮間帯オオアマモ群落を選定し、それぞれの群落においてオオアマモの株密度や繁殖率（生殖株の占める割合）を計測したうえで、栄養株および生殖株の草体採集を行った（各群落、各調査日で5反復ずつ）。採集した草体は長さや幅、葉数などの形態形質および花序数やその成熟段階などの繁殖形質を測定した後、乾燥重量（60℃で48時間）を計測した。成熟段階の基準はAlexandre et al. 2005に準拠している。

以後、2021年第2回～第5回の調査までは同じ調査群落で採集調査を行ったが、2023年6月の調査時に2021年の「影響あり」群落がほぼ消失したことが判明した。このことから、2023年の調査では2021年「影響あり」群落の近くにある別の潮間帯オオアマモ群落を「影響あり」群落として選定し直した。また残存する2021年「影響あり」群落については、参考値として各調査日1反復のみ調査を実施した。

得られたデータはまず年ごとに分けて崖崩れの影響を評価した。事前の検定により、株密度と繁殖率は調査日による影響がなかったことから、調査期間をまとめて崖崩れ影響のありなしのみを比較した。一方、調査日の影響があった形態形質、花序数、成熟段階については、各調査日のデータに分けて、崖崩れ影響の評価を行った。崖崩れ影響の評価には測定項目ごとに統計解析を行い、株密度と繁殖率については調査日をランダム項に含めた一般化

混合線形モデル（GLMM）、成熟段階の比較についてはFisherの正確確立検定、その他の項目については一般化線形モデル（GLM）を用いた。

その後、崖崩れ影響の時間的な変化を調べるため、2021年の統計解析の結果と2023年の結果を比較し、崖崩れ影響の有無や程度の傾向を評価した。

表2：潮間帯オオアマモ群落の計測、採集を行った各調査日の情報。各調査日における繁殖期の状況と、調査の対象とした群落を示している。2021年は計5回の調査を行ったが、形質比較には形質比較用（○）となっている調査日に取得されたデータを用いた。

調査日	繁殖期	調査群落	形質比較用
2021年6月9日	始め	影響あり、影響なし	○
2021年7月13日	最盛期	影響あり、影響なし	
2021年7月22日	最盛期	影響あり、影響なし	○
2021年8月7日	終わり	影響あり、影響なし	
2021年8月24日	終わり	影響あり、影響なし	○
2023年6月6日	始め	影響あり(2023年)、影響なし；影響あり(参考値)	○
2023年7月21日	最盛期	影響あり(2023年)、影響なし；影響あり(参考値)	○
2023年8月30日	終わり	影響あり(2023年)、影響なし；影響あり(参考値)	○

#### ・オオアマモ群落の集団遺伝的解析

崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落の由来を推定するために、崖崩れ前後のアイニンカップのオオアマモ群落および北海道内のオオアマモ群落との集団遺伝解析を行った。

集団遺伝解析には、ゲノムワイドな検出が可能なMIG-seq法（Suyama & Matsuki 2015）を用い、集団遺伝学的な解析を試みた。解析には本調査で得られたオオアマモ試料の他、他の調査の際に北海道内のオオアマモ群落から得られた試料を用いた（表3）。道内他地域の試料を含めることで、近隣のオオアマモ集団を含めた遺伝子解析および比較が可能となり、崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落の由来を推定することが可能となった。なお、研究成果として発表準備中であることから、本調査および2021年の調査以外で得られた試料の詳細は本報告書においては割愛する。

MIG-seqによって得られた結果、Stacks ver 2.66を用いてSNP変異を検出した。またSNP変異の情報をもとに、SplitsTree 4 ver4.192を用いて、Neighbor-Netを描画した。SNP変異の検出ならびにNeighbor-Netの描画は、北海道内の集団解析とアイニンカップの集団解析の2つに分けて行った。

表3：集団遺伝解析に用いたオオアマモ試料の情報。崖崩れ影響の評価のために2021年および2023年の採集調査で得られた試料（表上側）と、由来推定のために2019年以前に得られた

北海道内の試料（表下側）を用いた。それぞれの試料の採集年（あるいは年月日）、採集場所、解析に用いた個体数を示している。

採集年月日	採集場所	崖崩れ影響	個体数
2021年7月13日	アイニンカップ	あり	5
2021年7月13日	アイニンカップ	なし	4
2023年7月21日	アイニンカップ	あり	15
2023年7月21日	アイニンカップ	あり(2021年と同じ場所)	3
2023年7月21日	アイニンカップ	なし	15
2019年	アイニンカップ		25
2005年	道東・浜中町		10
2005年	道北・稚内市		10
2005年	道北・猿払村		10
2005年	道北・浜頓別町		10
2006年	道南・福島町		3

## 結果と考察

### ・崖崩れによるアマモ場分布の変化

ドローンを用いた分布調査の結果、崖崩れ前後ならびにその後の追跡調査ではアイニンカップ全体のアマモ場分布には大きな変化がないものの、崖付近で大きな変化が見られることが分かった（図3、4）。

崖から離れたアマモ場は、2019年7月の崖崩れ前から2023年の追跡調査まで、大まかな分布は変わらず、安定して群落が維持されていることがうかがえた（図3）。採集調査で「影響なし」群落として選定している潮間帯オオアマモ群落の付近では多少の分布変化はみられるものの、沖合にある潮下帯群落の分布は非常に安定しており、アマモ場のギャップの位置が5年間ほぼ変化していないことが見てとれた。

対して崖付近では、まず2019年と2021年の分布を比較した結果、崖崩れが起きて土砂が堆積した場所では浅瀬方向にアマモ場が拡大したことが分かった（図4）。これは底質が岩礁から砂に変化したことで、海草（オオアマモ）の生育に適するようになったことが要因だと考えられる。その一方、2023年の分布を比較すると、2021年9月から2023年6月（追跡調査）までに崖崩れがさらに進行したことが今回の調査で判明した（図4）。この崖崩れの進行に

より、2021年に「崖崩れ影響あり」としてた潮間帯群落の大半が消失した。そのため、採集調査においては近くの地点を新たに「崖崩れ影響あり」群落として選定する必要が生じた。

分布調査の結果より、アマモ場分布の変化は主に崖付近でのみ生じていることから、アイニンカップにおけるアマモ場分布の変化は崖崩れの影響によって起きていることが示唆された。その一方、大規模な崖崩れによる岩礁潮間帯の消失、生息適地拡大による崖崩れ跡地へのオオアマモ群落の形成、小規模な崖崩れ進行によるオオアマモ群落の消失、と崖付近では頻繁な変化が生じていることも判明した。このことは、アイニンカップのように崖崩れの影響を強く受ける場所では、潮間帯オオアマモ群落は形成、消失を繰り返すこととなり、安定的な群落拡大は難しい可能性を示している。地域の地質学的な特徴からも、アイニンカップを始めとした厚岸町内では今後も崖崩れが頻発することが予想される中、潮間帯オオアマモ群落やその他の潮間帯生態系がどのように変化していくかを注意深く見守っていく必要がある。

### 地すべり前：2019年



### 地すべり直後：2021年 地すべり現場



### 追跡調査：2023年 地すべり現場



図3：アイニンカップ全体の地すべり前（2019年）、地すべり直後（2021年）、追跡調査（2023年）のアマモ場分布の様子。画像の右上が崖崩れの起きた現場である。崖崩れ現場近くの赤色の枠内では大きな変化が起きているが、画像下部の薄い緑色で囲った部分のアマモ場分布には大きな変化は見られない。2021年、2023年の図内、赤枠内のピンク色で囲った部分が崖崩れ影響ありの調査群落、同図内中央左にある青色で囲った部分が崖崩れ影響なしの調査群落である。





図4：アイニンカップの崖付近の崖崩れ前（2019年）、崖崩れ直後（2021年）、追跡調査（2023年）の様子。画像の右側が崖とその堆積物である。崖崩れ前には岩礁潮間帯に海藻とスガモが分布していたが、崖崩れ直後に岩礁が消失してオオアマモ群落が拡大した。また追跡調査時には、崖崩れがさらに進行したことで2021年度の調査群落がほぼ消失した。

#### ・崖崩れによるオオアマモ形質への影響

崖崩れによるオオアマモ形質への影響を評価した結果、崖崩れはオオアマモの株密度を有意に低下させることが分かった(図5)。またこの傾向は2021年、2023年ともに同様であった(GLM 2021年  $p < 0.001$ ; 2023年  $p < 0.001$ )。その一方、繁殖率への影響は年ごとに異なっていた(図6)。崖崩れ直後の2021年には崖崩れ影響あり群落で有意に高かった繁殖率が(GLM  $p < 0.001$ )、2023年には崖崩れ影響の有無で有意な差は見られなかった( $p = 0.75$ )。成熟段階では、2021年と2023年を比較すると2023年の方が全体的に成熟が早い傾向が見られ、2021年8月には採取できた生殖枝が2023年8月は枯死により採取できなかった(表4)。また調査月ごとに花序の成熟段階に対する崖崩れの影響を比較した結果、2021年、2023年ともに6月は崖崩れの影響を受けないものの、7月には崖崩れ影響ありの方が成熟が遅い傾向を示した(Fisher 2021年6月  $p = 0.46$ , 7月  $p = 0.036$ ; 2023年6月  $p = 0.68$ , 7月  $p = 0.029$ )。

成熟段階の結果より、年による成熟段階の差はみられるものの、崖崩れの影響を受けると成熟が遅くなるという傾向が示された。オオアマモの生活史において6月は繁殖期の始め、7月は繁殖期の最盛期であることを考えると、6月あるいは5月下旬の繁殖が始まるタイミング自体は変わらないが、何らかの影響で成熟が遅れが生じることで、繁殖が進んだ7月には統計的に有意となるほど成熟の差が顕著となることが想定される。成熟段階の遅れと株密度の低下を合わせて考慮すると、崖崩れはオオアマモのクローン繁殖および性繁殖の両方に影響を及ぼしていることが示唆される。

一方で、2021年には見られた崖崩れ影響による繁殖率の増加が、2023年には見られなくなっていることから、崖崩れによる影響は時間的に変化することを表している。このように崖崩れによる影響が一時的なものなのか、より長期的に影響するものなのかが、対象とする形質によって傾向が異なることから、影響評価のためには適切な形質を選定する必要があることが示された。今後、崖崩れ影響の全貌の解明に向けてはより長期的な調査が必要となるが、その際には測定対象とする形質の選定、崖崩れの頻度や程度による差の評価など、複数の点を考慮して調査を行う必要がある。

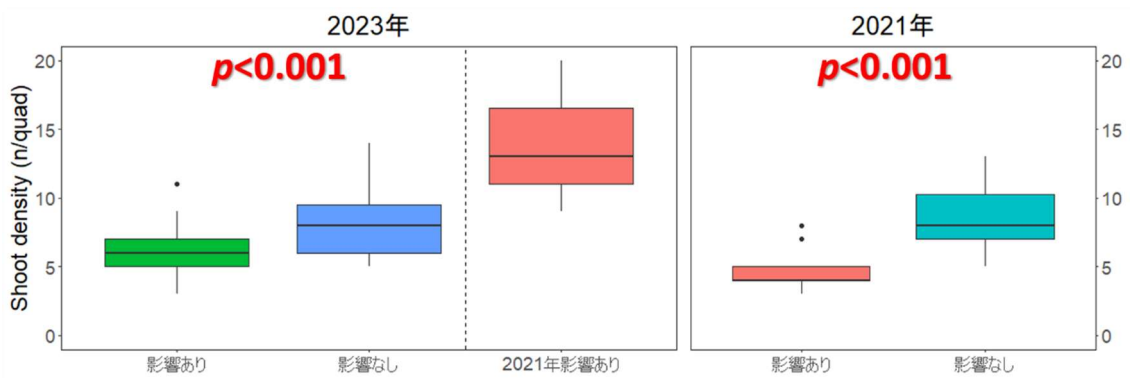


図5：2023年（左）と2021年（右）の株密度の結果を示した箱ひげ図。プロットの色が群落の違いを示しており、青色が崖崩れの影響を受けていない群落、赤色が2021年の崖崩れ影響ありの群落であり、2023年の図では参考値として示している。緑色は2023年に新たに選定された崖崩れ影響ありの群落を示す。

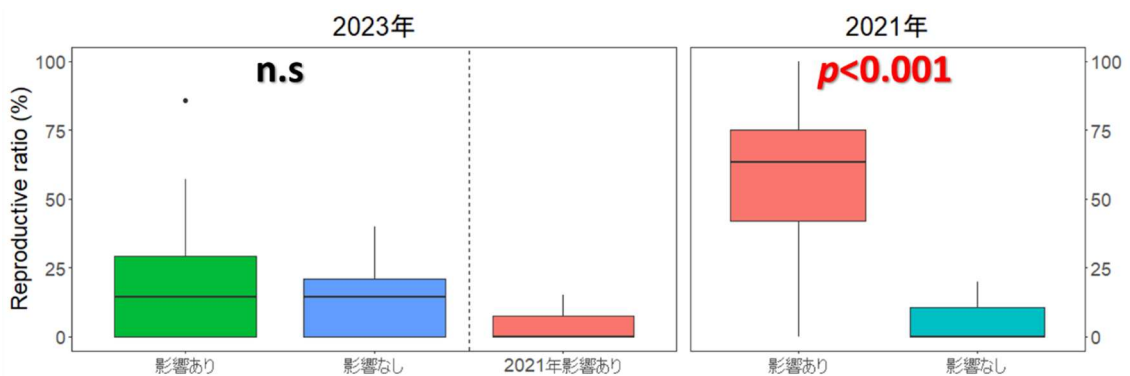


図6：2023年（左）と2021年（右）の繁殖率の結果を示した箱ひげ図。プロットの色が群落の違いを示しており、青色が崖崩れの影響を受けていない群落、赤色が2021年の崖崩れ影響ありの群落であり、2023年の図では参考値として示している。緑色は2023年に新たに選定された崖崩れ影響ありの群落を示す。

表4：2023年（左）と2021年（右）の成熟段階を比較した表。各調査月において確認された花序の成熟ステージごとの個数を、崖崩れ影響のありなしで分けて示している。成熟ステージの基準はAlexandre et al. 2005に準拠しており、成熟ステージの数字が小さいほど未成熟であり、0から4にかけて花序の成熟が進んでいく。またVa以降は果実の成熟で評価され、aからcにかけて成熟が進んでいく。

2023年										2021年											
群落	調査月	成熟ステージ									群落	調査月	成熟ステージ								
		0	1	2	3	4	Va	Vb	Vc	0			1	2	3	4	Va	Vb	Vc		
影響あり	6月		10	2	7	3					影響あり	6月	12	26	5	20	15				
	7月	1					16	3	2	7月		2	1		1	17	15				
	8月	/	/	/	/	/	/	/	/	/		8月		1	1		5	2	1	1	
影響なし	6月	1	19	5	12	15	2				影響なし	6月	3	7	1	1					
	7月	1	1				5	5	5	7月		2				11	3	2			
	8月	/	/	/	/	/	/	/	/	/		8月		1			1	1	1	1	

・崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落の由来

北海道内に生育するオオアマモ集団の遺伝的解析を行った結果、北海道内のオオアマモはアイニンカップを含む道東2地点の集団、道北3地点の集団、および道南1地点の集団と、大きく3つの地域的なまとまりを形成することが分かった(図7)。また崖崩れ跡地のオオアマモ群落(図7赤色)は、崖崩れの影響を受けていないオオアマモ群落や崖崩れ前のオオアマモ集団とともに、アイニンカップとして遺伝的なまとまりを形成することも分かった。

次に、崖崩れ影響の有無によるアイニンカップ集団の遺伝的解析を行った結果、崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落(2021年影響あり)は2021年と2023年で遺伝的に異なる個体に由来することが推測された(図8ピンク色)。また崖崩れが進行したことで2023年に新たな「影響あり」群落として選定されたオオアマモ群落(2023年影響あり)は、2021年影響ありのどちらとも異なる、別の2つの個体由来であることが示唆された(図8緑色)。対して、崖崩れ影響のないオオアマモ群落では遺伝的なまとまりを示しておらず、遺伝的に多様な個体に由来する可能性が高い(図8水色)。

これらのことから、崖崩れ跡地に生じたオオアマモが、他の地域から侵入した個体に由来する可能性は低いことが推測できる。その一方、崖崩れの影響を受ける場所では少数の個体由来の遺伝的に近縁な個体が群落を形成しながら、同地点であっても2021年と2023年では遺伝的に異なる個体に由来するなど、複数回の侵入が起きていることが示唆された。また同程度の面積であっても、崖崩れ影響なしでは遺伝的なまとまりを形成せず多様な個体を含んでいることから、アマモ場の形成過程によって遺伝的多様性に影響を及ぼす可能性が示された。

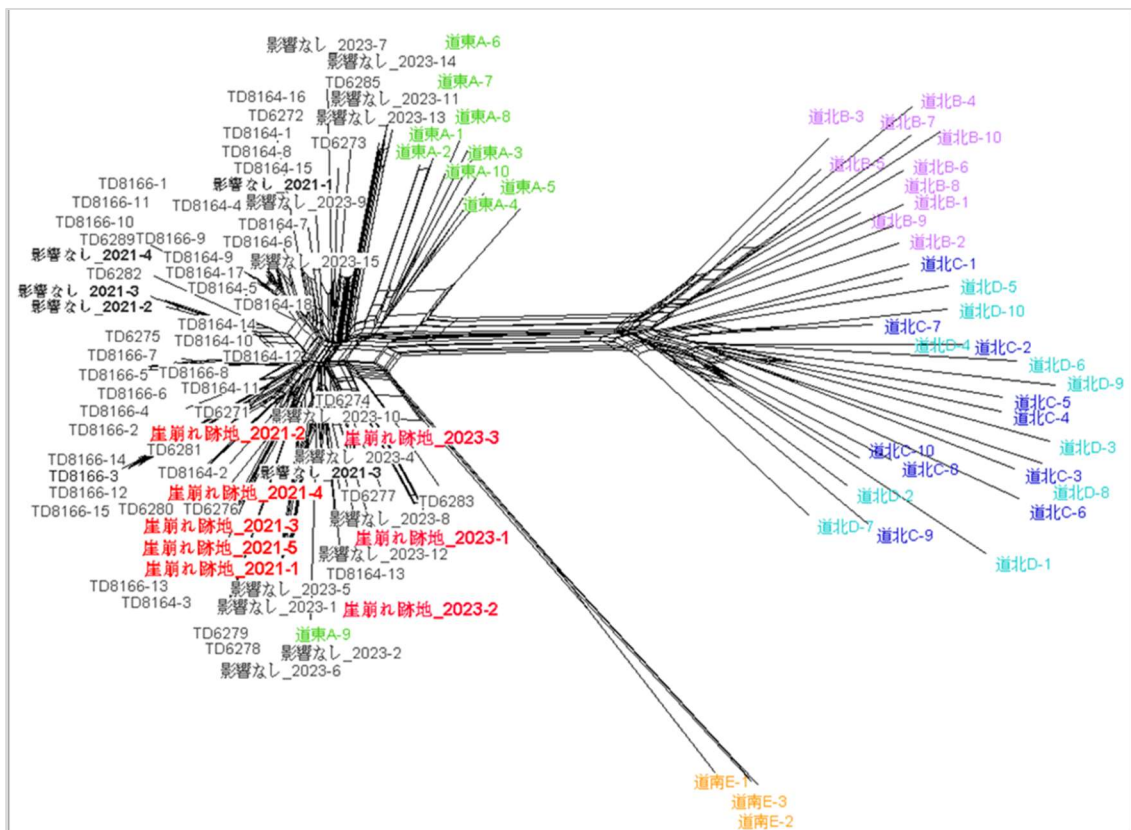


図7：北海道内オオアマモの遺伝的解析の結果。試料名の色の違いが採集地点の違いを示しており、アイニニックップにおいては崖崩れ影響あり（赤色）と影響なし（黒色）の2色で示されている。図内左側に道東2地点の集団、右側に道北3地点の集団、中央下部に道南1地点の集団がまとまっている。赤色で示した崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落は、アイニニックップの集団（黒色）とまとまる。

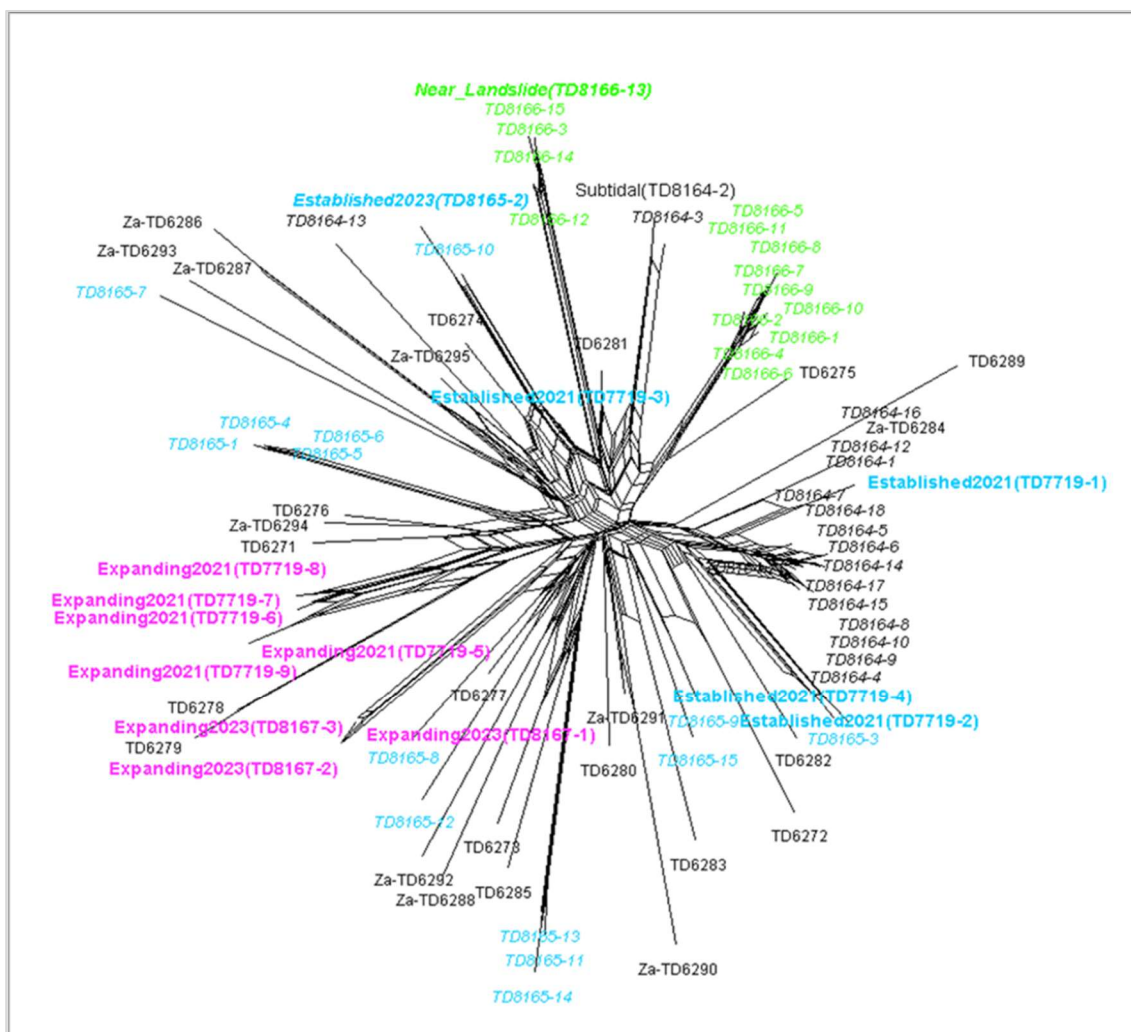


図 8：アイニカップのオオアマモ集団の遺伝解析の結果。各試料名の色は、黒色が2019年の試料（崖崩れ前）、ピンク色が「2021年影響あり」群落から得られた試料、緑色が「2023年影響あり」群落から得られた試料、水色が2021年と2023年の「影響なし」群落から得られた試料をそれぞれ示している。図内左側ピンク色の「2021年影響あり」では、2021年に得られた試料が1つのまとまりを形成し（上側のまとまり）、2023年に得られたサンプルは別のまとまり（下側）を形成している。また図内上部緑色で示した「2023年影響あり」群落では、試料が2つの遺伝的まとまりを形成している。水色の「影響なし」群落は遺伝的なまとまりを示していない。

## まとめ

本研究より、潮間帯のオオアマモ群落は崖崩れの影響により形成、消失を繰り返す可能性があることが判明した。このことからアイニカップのような崖崩れが頻繁に起きる地域

では一時的なアマモ場の拡大は生じるものの、その程度や頻度によってはアマモ場の安定的な形成は難しいことが示唆された。また崖崩れによるオオアマモ形質への影響は、短期的には繁殖に関わる形質で強くみられる一方、より長期的には株密度の低下や成熟度合の遅れなどの変化をもたらすなど、時間的に変化しながら数年単位持続することがうかがえた。本研究の時点ではまだ崖崩れ発生から2年程度と限定的であるが、今後より長期的な調査を行うことで崖崩れ影響の全貌を把握することが可能となるであろう。集団遺伝解析の結果、崖崩れ跡地に生じたオオアマモ群落は他地域から侵入した可能性は低いものの、遺伝的に近縁な少数の個体に由来している可能性が示された。また崖崩れの影響を受けていない群落と比べて遺伝的多様性が低い傾向も示されており、群落の形成過程あるいは安定性によって遺伝的多様性が影響を受ける可能性を示唆している。このように崖崩れのような適度な自然攪乱を実験的に用い、詳細な遺伝解析を組み合わせることで、海草群落の形成過程の理解を深めるといった新たなアプローチの可能性も示された。

気候変動の進行に伴い、今後崖崩れの頻度や規模は増加することが見込まれている。本研究の成果は、今後も厚岸周辺で断続的に起きる崖崩れによって希少なオオアマモ群落がどのような影響を受けるかを予測し、必要な保全策を検討する際の重要な基礎資料となるだけでなく、他の地域での崖崩れの影響評価の際にも参照可能な重要な知見となることが期待される。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター厚岸臨海実験所の皆様には、調査船舶および宿泊施設の利用だけでなく、採集調査や実験室でのサンプル処理の補助など数々の便宜を図っていただきました。特に野外調査やサンプル処理にご助力いただいた北海道大学理学部の津金響子氏、工藤乃菜氏、萩原ひかり氏、北海道大学環境科学院の伊藤慶造氏、ハンブルグ大学のLilli Lenzmann氏に感謝の意を示すとともに、小型調査船「うみあいさ」を用いた潜水調査にご協力いただいた濱野章一氏、桂川英徳氏に御礼申し上げます。また本研究の遂行にあたり様々な場面でご助言をいただいた、厚岸臨海実験所 所長 仲岡雅裕教授に心より感謝いたします。本研究は、令和5年度厚岸湖・別寒辺牛湿原学術研究奨励補助金制度の助成を受けて行われました。

## 参考文献

Alexandre A, Santos R, Serrão E (2005) Effects of clam harvesting on sexual reproduction of the seagrass *Zostera noltii*. *Mar Ecol Prog Ser* 298: 115–122.

- Bainbridge Z, Lewis S, Bartley R, Fabricius K, et al (2018) Fine sediment and particulate organic matter: A review and case study on ridge-to-reef transport, transformations, fates, and impacts on marine ecosystems. *Mar Poll Bull* 135: 1205-1220.
- Carr JA, D'Odorico P, McGlathery KJ, Wiberg PL (2012) Modeling the effects of climate change on eelgrass stability and resilience: Future scenarios and leading indicators of collapse. *Mar Ecol Prog Ser* 448: 289–301.
- Deb S, Mandal B (2021) Soils and sediments of coastal ecology: A global carbon sink. *Ocean Coastal Management* 214: 105937.
- Dunic JC, Brown CJ, Connolly RM, et al (2021) Long-term declines and recovery of meadow area across the world's seagrass bioregions. *Glob Chang Biol* 27: 4096–4109.
- Gariano SL, Guzzetti F (2016) Landslides in a changing climate. *Earth-Science Rev* 162: 227–252.
- 北海道地質百選検討グループ (2009) 月刊地球 31(10): 557-562.
- 堀正和・桑江朝比呂 (2018) 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. 地人書館: 276p.
- IPCC (2021) *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press.
- IUCN Red List of Threatened Species (2023) *Seagrasses.* International Union for Conservation of Nature, Cambridge
- 環境省 (2017) 環境省レッドリスト2020.
- 国土交通省 (2022) 令和4年度版国土交通白書.
- Mori N, Takemi T, Tachikawa Y, et al (2021) Recent nationwide climate change impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia. *Weather Clim Extrem* 32: 100309.
- Nakaoka M, Aioi K (2001) Ecology of seagrasses *Zostera* spp. in Japanese water, a review. *Otsuchi Mar Sci* 26: 7–22
- Nordlund LM, Koch EW, Barbier EB, Creed JC (2016) Seagrass ecosystem services and their variability across genera and geographical regions. *PLoS One* 11: e0163091.
- 大場達之, 宮田昌彦 (2020) 日本海草図譜[改訂版]. 北海道大学出版: 156p.
- Orth RJ, Carruthers TJB, Dennison WC, et al (2006) A global crisis for seagrass ecosystems. *Bioscience* 56: 987–996.
- Serrano O, Lavery PS, Duarte CM, et al (2016) Can mud (silt and clay) concentration be used to predict soil organic carbon content within seagrass ecosystems? *Biogeosciences* 13: 4915–4926.



- Shaffer JA, Parks DS (1994) Seasonal Variations in and Observations of Landslide Impacts on the Algal Composition of a Puget Sound Nearshore Kelp Forest. *Bot Mar* 37: 315–324.
- Sudo K, Quiros TEAL, Prathep A, et al (2021) Distribution, temporal change, and conservation status of tropical seagrass beds in Southeast Asia: 2000–2020. *Front Mar Sci* 8: 637722.
- Suyama Y, Matsuki Y (2015) MIG-seq: An effective PCR-based method for genome-wide single-nucleotide polymorphism genotyping using the next-generation sequencing platform. *Sci Rep* 5: 1–12.
- 田近淳, 岡村俊邦, 坪山厚美, 山岸宏光 (1994) 海岸斜面の地すべりの地質規制とその形態的特徴-釧路—厚岸地域の地すべり. *地下資源調査所調査研究報告* 22: 45p.
- United Nations Environment Programme (2020) OUT OF THE BLUE THE VALUE OF SEAGRASSES. UNEP, Nairobi.
- Watanabe M, Nakaoka M, Mukai H (2005) Seasonal variation in vegetative growth and production of the endemic Japanese seagrass *Zostera asiatica*: a comparison with sympatric *Zostera marina*. *Bot Mar* 48: 266–273.
- 渡辺雅子 (2003) 浜中湾における絶滅危惧種オオアマモの現存量と生育環境との関係. *霧多布湿原学術研究支援成果報告* 54: 10p.
- Waycott M, Duarte CM, Carruthers TJB, et al (2009) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proc Natl Acad Sci* 106: 12377–12381.
- Yasuhara K, Komine H, Murakami S, et al (2010) Effects of Climate Change on Geo-Disasters in Coastal Zones. *J Glob Environ Eng* 15: 15–23.