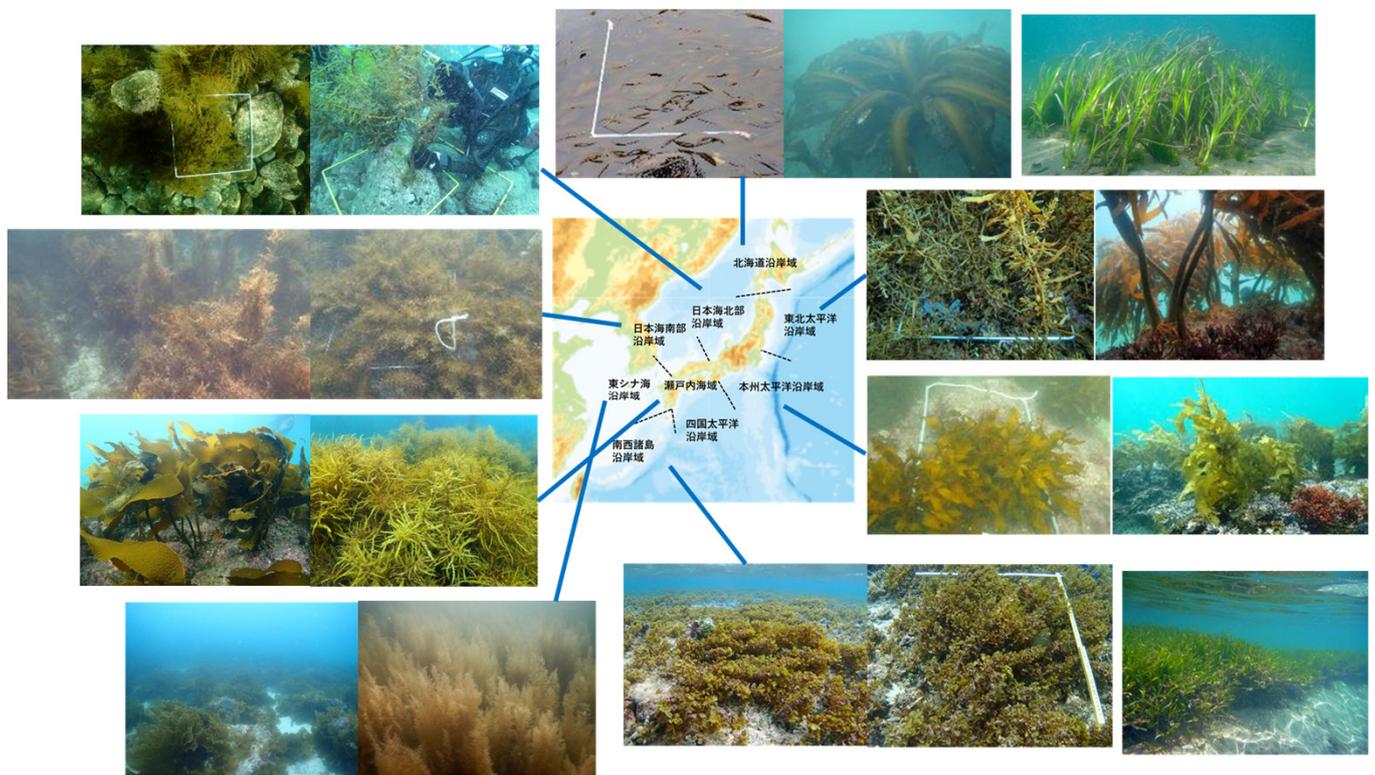


海草・海藻藻場のCO₂貯留量 算定ガイドブック



国立研究開発法人
水産研究・教育機構

令和5年11月

はじめに

- ・このガイドブックは、農林水産省 みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業のうち農林水産研究の推進（委託プロジェクト研究）「ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発（JPJ008722）」で得られた研究成果に基づいて、海草・海藻類によるCO₂貯留量算定手法とその考え方を紹介したものです。
- ・本ガイドブックでは、藻場タイプ・海域区分別CO₂貯留量を算定する具体的方法をフローチャートで示しています。

【本ガイドブックの内容に関する問合せ先】

bcguidebook@fra.go.jp

【本ガイドブック引用時の記載方法】

水産研究・教育機構（2023）海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック，水産研究・教育機構，pp. 13.

【掲載場所URL】

https://www.fra.go.jp/gijutsu/project/fisheries_ecosystems/files/bluecarbon_guidebook2023.pdf

ブルーカーボン生態系による大気中CO₂のとりこみ

- ・光が海底まで届く浅い沿岸域において、マングローブ林、塩性湿地、藻場など大型の植物が繁茂し、有機炭素を長期間貯留する機能を持つ生態系をブルーカーボン生態系と呼びます。
- ・国連がブルーカーボン生態系の重要性を2009年に発表した時点では藻場のうち海草藻場のみが対象となっていました。近年は科学的根拠の蓄積が進んでおり、天然の海藻藻場や養殖海藻も効果的なCO₂吸収源とみなす事例が増えています。国連では現在、海洋で有効な5つのCO₂吸収源としてブルーカーボン生態系に加えて海藻養殖も含めています（表1）。
- ・国連気候変動枠組条約を批准している各国は、自国の温室効果ガスの排出量・吸収量の算定結果を条約事務局に報告します。その算定は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）が作成したガイドラインに準拠する必要があります。ここでCO₂吸収源として認定されるためには、大気中のCO₂を減らすことが必須となります。海草や海藻は、海中のCO₂や炭酸イオンを光合成により吸収して自分の体の構成成分にする（有機炭素にする）ことで海中のCO₂を減らし、その減らした分のCO₂が大気から海中に取り込まれるため、ブルーカーボン生態系がCO₂吸収源とみなされています。

表1 国連で議論されている海洋での5つのCO₂吸収技術（※）

CO ₂ 吸収技術	技術の概要
ブルーカーボン生態系	吸収源として有効なブルーカーボン生態系を拡大し、海中に貯留される大気中のCO ₂ 量を増加させる
大型海藻養殖	大型海藻養殖を促進してCO ₂ 貯留量を増加させ、大気からのCO ₂ 取り込み量を増加させる
海洋アルカリ化	海洋のアルカリ化を人工的に促進し、海洋が吸収できる大気中CO ₂ 量を増加させる
海洋肥沃化	鉄や栄養塩の散布により植物プランクトンの生産を増加させ、海洋に取り込まれる大気中のCO ₂ 量を増加させる
DAC/CCS*	大気から回収したCO ₂ を海中や海底に送り込み、人工的に海中に貯留されるCO ₂ 量を増加させる

※ UNESCO-IOC (2021) Integrated Ocean Carbon Research – A summary of Ocean Carbon research, and Vision of Coordinated Ocean Carbon Research and Observations for the Next Decadeの内容を集約した。

* DAC：Direct Air Capture, CCS：Carbon dioxide Capture and Storageの略

CO₂貯留プロセスの概要

- ・海草・海藻藻場においてCO₂貯留量として算定できるプロセスには以下の4つがあげられます。

- ①**堆積貯留**：枯れた海草・海藻が藻場内の海底に堆積し，長期間貯留されるプロセス
- ②**難分解貯留**：枯れた海草・海藻，その細分化された破片が流出し，長期間CO₂に戻らない難分解性の細片（粒子状）となり，藻場外の沿岸域に堆積して長期間貯留されるプロセス
- ③**深海貯留**：波浪などでちぎれた海草・海藻が流れ藻となって沖合に流出し，浮力を失って深海へ沈降し長期間貯留されるプロセス
- ④ **RDOC貯留**：海草・海藻が放出する難分解性の溶存態有機炭素が長期間にわたり海水中に貯留されるプロセス．難分解性溶存態有機炭素（Refractory Dissolved Organic Carbon）の頭文字からRDOCと呼ぶ

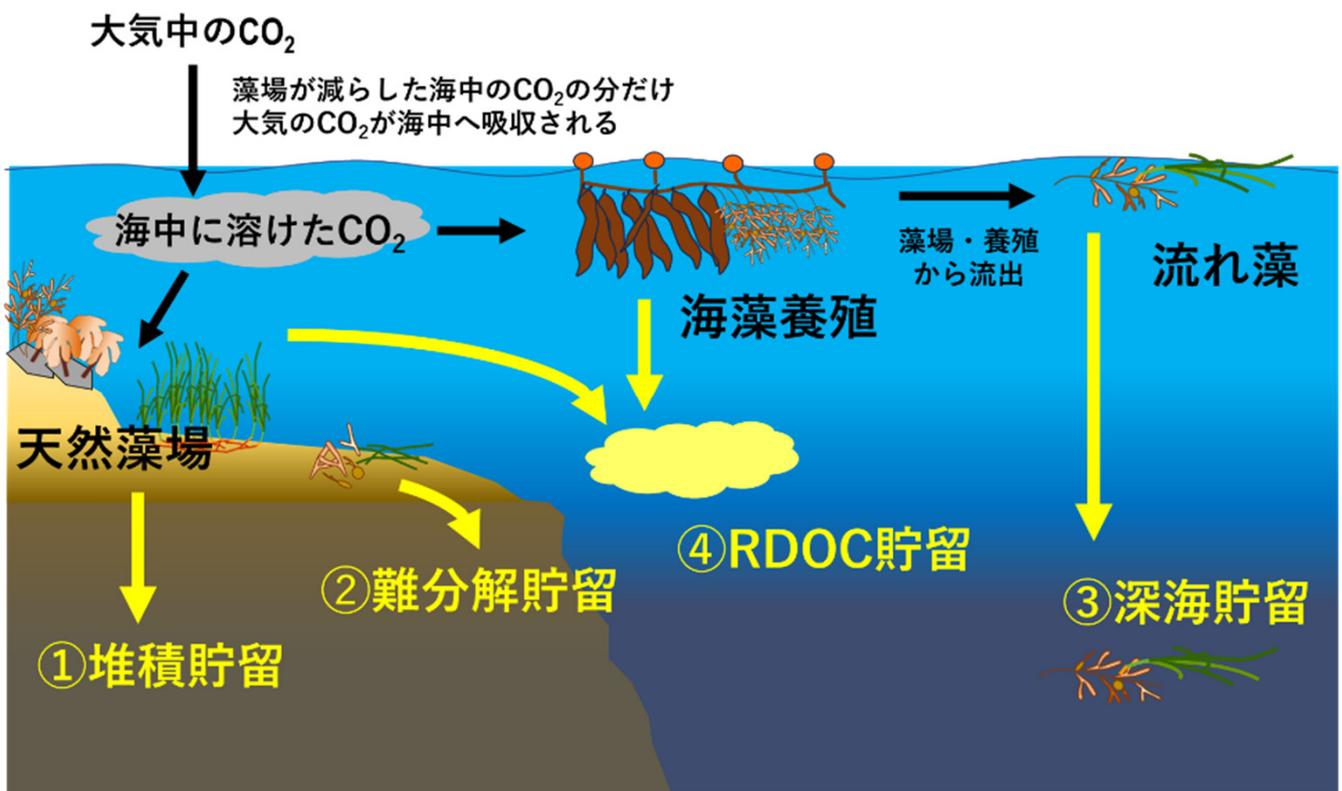


図1 ブルーカーボン生態系における大気中CO₂に由来する有機炭素の海中での流れと4つの貯留プロセス

算定式の概要

- ・藻場のCO₂貯留量は、単位面積当たりの藻場が貯留するCO₂量（吸収係数）を求め、さらに人為活動によって増減させた藻場の面積（活動量）を乗じることで算定します。
- ・吸収係数は、大気から海中の海草・海藻に取り込まれたCO₂量（隔離量）のうち、4つの貯留プロセスを経て海底・海中に長期間貯留されるCO₂量を表します。したがって、吸収係数は海草・海藻によるCO₂隔離量に貯留プロセスによって残存する割合を乗じることで算定されます（式1）。
- ・吸収係数の算定には、後述する吸収ポテンシャルと最大現存量（ B_{max} ）および生態系変換係数（ E ）が必要になります。

式1：藻場のCO₂貯留量の算定式

$$\text{CO}_2\text{貯留量 (トンCO}_2\text{/年)} = \text{面積 (活動量)} \times \text{吸収係数 (トンCO}_2\text{/面積/年)}$$

$$\text{吸収係数} = \text{CO}_2\text{隔離量 (トンCO}_2\text{/面積/年)} \times \text{残存率}$$

海草・海藻が有機炭素化した大気中CO₂量（年間純一次生産量をCO₂として算定した値）

海草・海藻によって隔離された大気中CO₂のうち、分解されずに海中に長期間貯留される割合

藻場タイプ・海域区分

- ・日本国内には海草類が約15～20種，海藻類が約1,000種分布しています。
- ・本研究では，各種のCO₂吸収プロセスの類似性から藻場を海藻養殖も含めて21のタイプに分類しました（表2）。
- ・さらに，同じ藻場タイプであっても，藻場を構成する種は海域によって異なるため，図2のように9つの海域に区分しました。
- ・これにより，各藻場タイプ・海域区別に吸収係数を算定しました（p.9，表4）。



図2 吸収係数を算定した海域区分

表2 吸収係数を算定した藻場タイプ

藻場タイプ	各藻場タイプに含まれる主要な海草・海藻種
海草類	1. アマモ型 アマモ，スゲアマモ，コアマモなど
	2. タチアマモ型 タチアマモ
	3. スガモ型 スガモ，エピアマモなど
	4. 亜熱帯性海草小型 ウミヒルモ類，マツバウミジグサ，コアマモ（亜熱帯型）など
	5. 亜熱帯性海草中型 リュウキュウスガモ，ベニアマモリュウキュウアマモなど
	6. 亜熱帯性海草大型 ウミショウブ
海藻類	7. マコンブ型 マコンブ，ホソメコンブ，ガゴメコンブなど
	8. ナガコンブ型 ナガコンブ，スジメ，アイヌワカメなど
	9. アラメ型 アラメ，サガラメなど
	10. カジメ型 カジメ，クロメなど
	11. ワカメ型 ワカメ，ヒロメなど
	12. 温帯性ホンダワラ型 アカモク，ホンダワラ，ノコギリモクなど
	13. 亜熱帯性ホンダワラ型 ヒイラギモク，ヒメハモク，ヤバネモクなど
	14. 小型緑藻型 ヒトエグサ，アナアオサ，ミルなど
	15. 小型紅藻型 マクサ，ツノマタ，スサビノリなど
	16. 小型褐藻型 アミジグサ，ヒバマタ，ヤハズグサなど
	17. 石灰藻類 無節石灰藻類，有節石灰藻類など石灰化する藻類
養殖	18. コンブ類養殖型 マコンブはえ縄方式など
	19. ワカメ型 ワカメはえ縄方式など
	20. ノリ類養殖型 ノリ網浮き流し式，支柱式など
	21. ホンダワラ類養殖型 アカモクはえ縄式など

天然藻場における算定式

- ・天然藻場の場合、CO₂貯留量は吸収係数に対象とする藻場の面積を乗じて算定します。
- ・吸収ポテンシャルは、最大現存量 B_{max} 1gが貯留するCO₂量を表し、以下の図3で示した算定式のうち、最大現存量と生態系変換係数を除いた残りの部分になります。
- ・吸収係数は、現場で計測した最大現存量 B_{max} に、生態系変換係数 E と吸収ポテンシャルの2つを乗じることで求めることができます。
- ・炭素含有率 $Ccont$ は、乾燥重量を有機炭素量に換算するためのパラメータで、平均すると約30%となります。これにCO₂とCの重量比 (44/12) を乗じることでCO₂量とします。
- ・生態系変換係数 E とは、葉上の付着珪藻や混生する他の海藻の現存量が無視できない場合などに、追加的な補正を行うための係数です。なお、補正がない場合は $E=1$ とします。
- ・CO₂隔離量は年間純生産量 (P) に等しく、藻場タイプ j の P/B_{max} 比に対象藻場の B_{max} を乗じるにより求めることができます。
- ・残存率 (r_1, r_2, r_3, r_4) は、草藻体が隔離したCO₂のうち4つの貯留プロセスで貯留される割合です。

$$\begin{aligned}
 \text{藻場タイプ}j\text{の吸収係数 (gCO}_2\text{/m}^2\text{/year)} &= \frac{\text{CO}_2\text{隔離量} \times \text{残存率の総和}}{\text{最大現存量 (乾燥重量)}} \times \text{Ccont}_j \times (44/12) \times E_j \\
 &= \frac{
 \begin{aligned}
 &(P/B_{max})_j \times B_{max} \times r_{2j} && \text{: 堆積貯留} \\
 + &(P/B_{max})_j \times B_{max} \times r_{3j} && \text{: 深海貯留} \\
 + &(P/B_{max})_j \times B_{max} \times r_{1j} \times (1-r_{2j}-r_{3j}) && \text{: 難分解貯留} \\
 + &B_{max} \times r_{4j} && \text{: RDOC貯留}
 \end{aligned}
 }{
 \begin{aligned}
 &B_{max} \times [(P/B_{max})_j \times \{ r_{1j} + (r_{2j} + r_{3j})(1 - r_{1j}) \} + r_{4j}] \\
 &\text{CO}_2\text{隔離量} \times \text{残存率の総和のうち、現存量以外の項}
 \end{aligned}
 } \times \text{Ccont}_j \times (44/12) \times E_j \\
 \text{吸収係数} &= \text{吸収ポテンシャル} \times B_{max} \times E_j
 \end{aligned}$$

図3 天然藻場を対象とした吸収係数の算定式。 r_1, r_2, r_3, r_4 は、それぞれ難分解貯留、堆積貯留、深海貯留、RDOC貯留の残存率。ただし、 r_4 はRDOC残存量を計算するための係数が含まれている。

海藻養殖における算定式

- 海藻養殖の場合，現存量として水揚げ量（ Y ）と取り残し量（ C ）の二つを考える必要があります。前者は人間が直接利用する部分です。後者は波浪や枯死などにより養殖施設から脱落・流出した藻体，成育途中に間引かれた藻体などになります。
- 水揚げ量は，最終的に大気中へ CO_2 として戻り，堆積貯留，深海貯留および難分解貯留には貢献しないため，これらの算定式では水揚げ量 Y を差し引いています。RDOC貯留については，天然藻場と同様に成長しながら難分解性の溶存態有機炭素を放出するので，水揚げ量と取り残し量から算定します（ $Y+C$ ）。

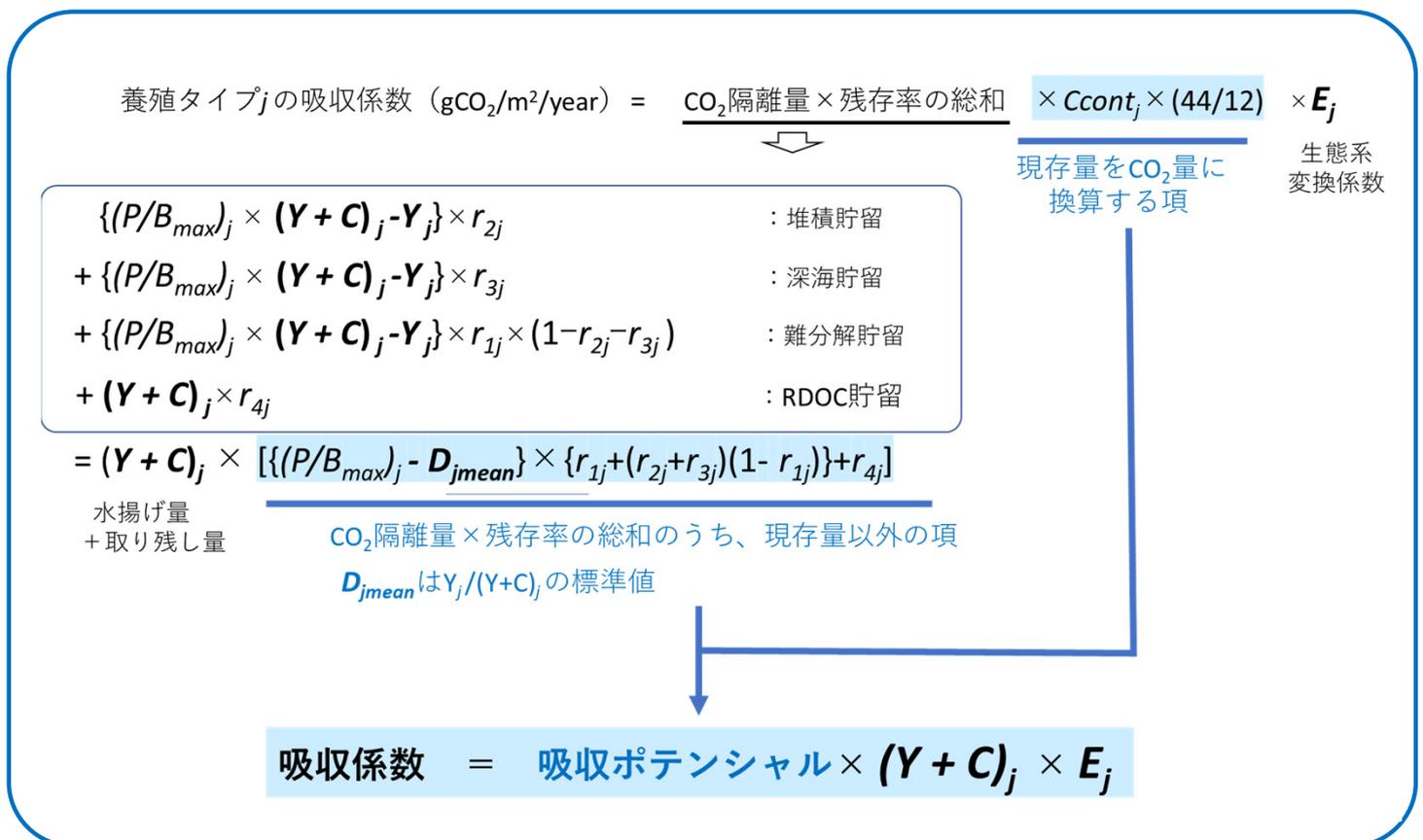


図4 海藻養殖を対象とした吸収係数の算定式

吸収ポテンシャル

- ・吸収ポテンシャルは，乾燥重量で求めた海草・海藻の現存量（天然藻場の B_{max} または海藻養殖の $Y+C$ ）1g当たりのCO₂貯留量を表します．
- ・吸収ポテンシャルの算定には，専門的な観測や分析機器，実験，解析が必要となります．
- ・本研究では，藻場タイプ・海域区別の吸収ポテンシャルを算定しました（表3）．

表3 藻場タイプ・海域区別の吸収ポテンシャル

藻場タイプ	北海道	東北太平洋	日本海北部	日本海南部	中部太平洋	瀬戸内海	四国太平洋	九州東シナ	南西諸島
アマモ	0.663	0.715	0.656	0.675	0.656	0.712	0.675	0.695	
タチアマモ	0.591	0.610	0.591	0.591	0.591				
スガモ	0.613	0.613	0.613	0.613	0.613				
亜熱帯小型									1.164
亜熱帯中型									0.758
亜熱帯大型									0.545
マコンブ	0.068	0.068	0.068						
ナガコンブ	0.078								
アラメ		0.098		0.098	0.129		0.129	0.098	
カジメ		0.124	0.124	0.124	0.100	0.124	0.100	0.112	
ワカメ	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062	
温帯性ホンダワラ	0.098	0.101	0.109	0.099	0.125	0.101	0.131	0.103	
亜熱帯性ホンダワラ							0.093	0.093	0.093
小型緑藻	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126	0.126
小型褐藻	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063
小型紅藻	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069
サンゴ藻	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
コンブ養殖	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049			
ワカメ養殖	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	
ノリ養殖	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	
ガラモ養殖	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059

吸収係数

- ・吸収係数は、単位面積当たりの藻場のCO₂貯留量を表し、吸収ポテンシャルに最大現存量 (B_{max}) と生態系変換係数 (E) を乗じることにより求められます。
- ・本研究では、藻場タイプ・海域区分別に吸収係数を求めました (表4)。
- ・この吸収係数に藻場面積を乗じることによって、簡易的にCO₂貯留量を求めることができます。
- ・より正確な貯留量を求めるためには、p.8のように現存量 (天然藻場の B_{max} または海藻養殖の $Y+C$) を計測して吸収ポテンシャルを求めたうえで算定する必要があります。
- ・海藻養殖の場合、取り残し量 C が不明な場合には、標準値を使って算定することが可能です (表5)。

表4 藻場タイプ・海域区分別の吸収係数

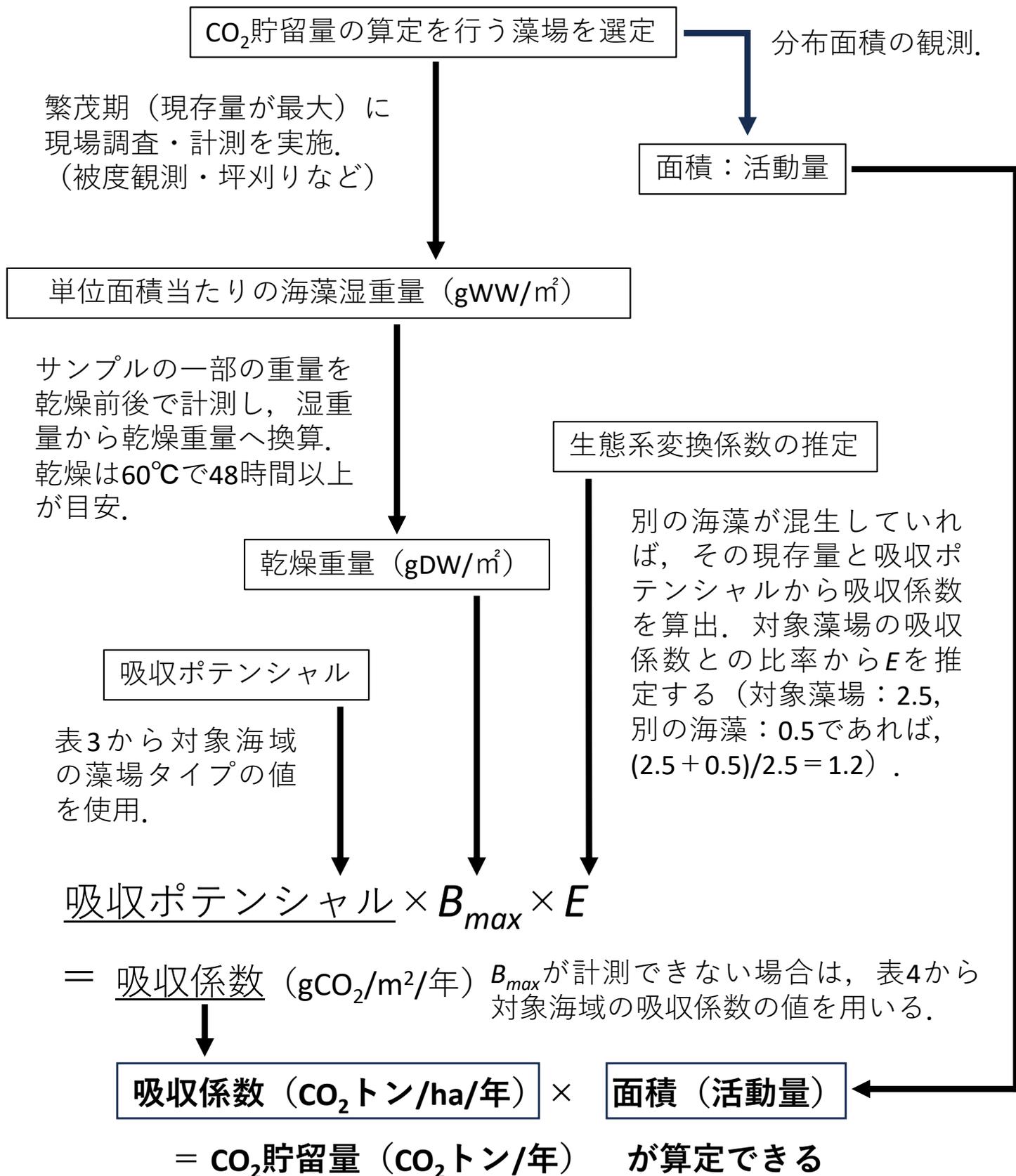
藻場タイプ	北海道	東北太平洋	日本海北部	日本海南部	中部太平洋	瀬戸内海	四国太平洋	九州東シナ	南西諸島
アマモ	490.39	224.11	593.20	381.56	593.20	232.10	381.56	280.52	
タチアマモ	847.77	212.74	847.77	847.77	847.77				
スガモ	2039.74	1780.41	713.21	713.21	535.52				
亜熱帯小型									108.79
亜熱帯中型									305.91
亜熱帯大型									336.35
マコンブ	164.18	468.66	468.66						
ナガコンブ	110.70								
アラメ		274.72		127.16	423.02		162.69	127.16	
カジメ		61.55	15.54	151.57	49.39	126.08	25.24	20.28	
ワカメ	58.48	116.28	58.48	25.70	23.71	47.49	12.23	15.83	
温帯性ホンダワラ	312.03	158.86	60.50	219.24	31.56	155.21	27.33	105.50	
亜熱帯性ホンダワラ							128.51	21.31	41.97
小型緑藻	4.16	9.95	5.54	7.05	6.05	9.70	1.89	4.16	17.76
小型褐藻	112.69	7.91	11.68	63.91	1.19	19.90	30.51	14.88	9.35
小型紅藻	52.38	22.90	56.94	17.57	1.52	30.24	22.76	15.98	4.36
サンゴ藻	15.14	6.76	0.57	6.76	6.76	9.71	2.02	4.58	0.10
コンブ養殖									
ワカメ養殖	養殖は海域・手法・経営体によって収穫量の差が大きいため、標準値を示していない								
ノリ養殖									
ガラモ養殖									

表5 水揚げ量 Y に対する取り残し量 C の比率 (標準値)

海藻養殖タイプ	コンブ養殖	ワカメ養殖	ノリ養殖	ガラモ養殖
C の標準値	0.8	1.33	0	0.25

CO₂貯留量算定フローチャート

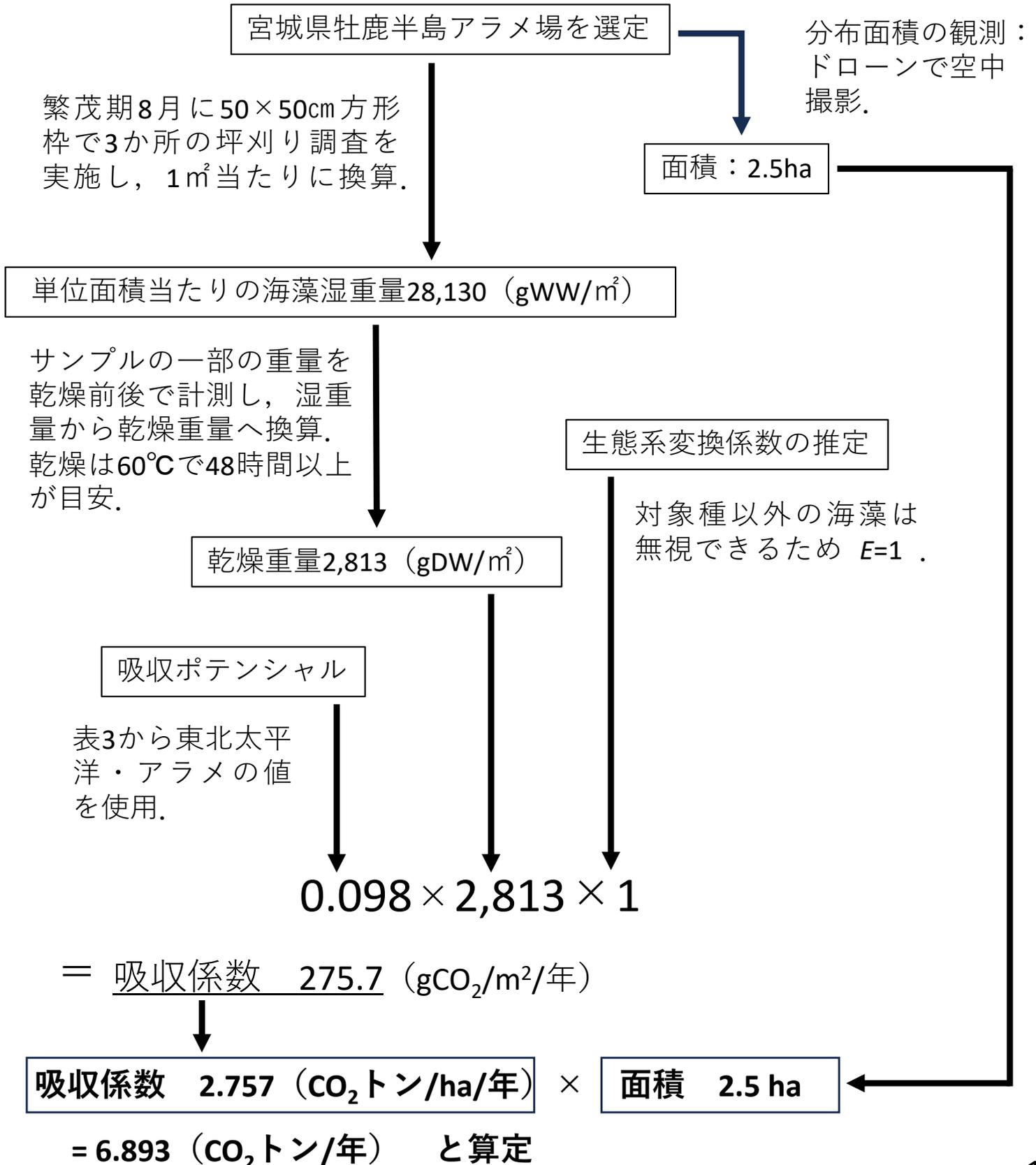
・藻場のCO₂貯留量は以下のフローにしたがって算定することができます。



CO₂貯留量算定フローチャート: 海藻藻場の算定事例

算定事例 1 : 東北アラメの場合

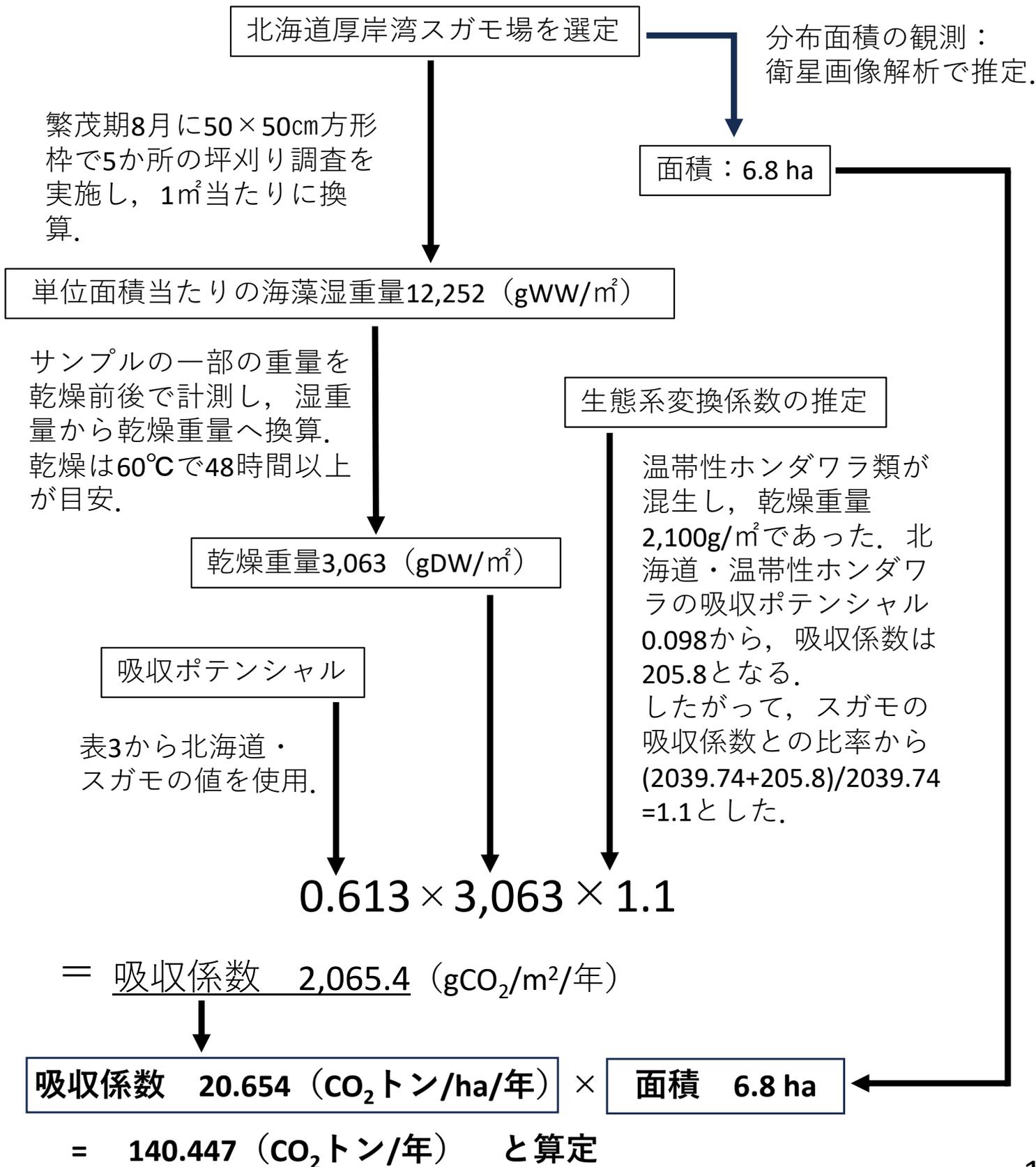
※以下の数値は参考値です



CO₂貯留量算定フローチャート：海草藻場の事例

算定事例2：北海道スガモ場の場合

※以下の数値は参考値です



CO₂貯留量算定フローチャート: 海藻養殖の事例

算定事例3：徳島県ワカメ養殖の場合

※以下の数値は参考値です

