

表 18 作業手引き内容一覧

対象	作業手引きの内容
金網ロール式着生材	竹の切り出し作業
	竹の運搬作業
	竹の加工作業
	金網の加工作業
	着生材の組み立て作業
	着生材の設置作業

■計画・準備

- 1)設置時期
カキの浮遊幼生が着底する春季(4~6月頃)が望ましいです。
- 2)設置場所
底質が安定しており、着生材の流出や埋没リスクが少ないところが望ましいです。
カキ礁を造成したい場所(カキ礁の切れ目など)を選定しましょう。
- 3)設置数量
設置する着生材の数を決めて、必要な部材を準備しましょう。

■金網ロール式着生材の制作

準備物(1基あたりに必要なもの)

品名	備考
金網(線径 1.4 mm、目開き 40 mm)	1m×1m×8枚=8㎡
青竹	2.2m×8本+1.5m×4本=約24m
ロープ(6mm KPロープ)	1.5m×16本=24m
その他雑材	仮止め用のビニールテープ、結束バンド等



(左)金網、(右)竹



(左)固定用ロープ、(右)仮止め用のビニールテープ、結束バンド

◆①竹の切り出し作業◆

- 1)着生材に使用する青竹を切り出します(着生材1基あたり:2.2m×8本・1.5m×4本)。
- 2)なるべく真つすくな竹が望ましいです。直径5cm以上の丈夫な竹を選びましょう。
- 3)竹を切る人が1名、横で竹を支える人が1名、切断した竹を竹林から運び出す人が2名の計4名1人で作業すると効率的に行えます。

※急斜面な竹林での作業は危険が伴います。帽子やゴム手袋等の保護具を着用しましょう。
※人間が行き来する道を伐採しておくこと、竹を運び出す作業が安全で効率的に行えます。



(写真)竹の切り出し、竹林からの運び出し

◆②竹の運搬作業◆

- 1)竹林から運び出した竹は、車両等で作業場まで運搬します。
- 2)この時点で竹の枝を切り落としておくこと運搬しやすくなります。
- 3)着生材に使用する竹の本数に不足がないか確認しておきましょう。
- 4)公道を走行する際には、道路交通法に基づいて安全に走行しましょう。

※軽トラック等を使用する際には、車両の最大積載寸法や運搬時の竹の落下に注意しましょう。



(写真)竹の枝落とし、竹の運搬

図 44 作業手引きの抜粋

表 19 金網ロール式着生材の材料コスト

品目	単位	単価	数量	計	備考
金網	㎡	467	96	44,832	1基あたり:1m×1m×8枚=8㎡
青竹	m	450	288	129,600	1基あたり:2.2m×8本+1.5m×4本=24m
ロープ	m	25	288	7,200	1基あたり:1.5m×16本=24m
その他雑材費	式			10,000	仮止め用の結束バンド、ビニールテープ等
合計			12基	191,632	12基分の製作実績(2m×2m×12基=48㎡)
			1基あたり	15,969	1基分に換算(2m×2m×1基=4㎡)

※着生材に使用する青竹を購入した場合の材料コスト

3.1.3 考察

(1) 着生材のカキ着生量の把握

1) 金網ロール式着生材における金網の耐久性向上

本小課題では、カキ礁の造成に向けて令和2年度の春季から棚式着生材を導入し、カキ着生量を経年的にモニタリングしてきた。その中で、令和3年度の夏季以降、棚式着生材の金網部分の腐食が確認され始め、その後、着生したカキの成長による重量増加に伴い、着生したカキとともに金網が落下する事象が確認された。そこで、令和4年度の春季には、使用する金網の線径を太くして耐久性を向上させるとともに、より効率的にカキを着生させるため、金網をロール状の立体構造に改良した金網ロール式着生材を導入した。

令和4年度に金網ロール式着生材を導入するにあたり、令和3年度の秋季に試験的に1基設置し、金網線径の違いによる耐久性を確認した。令和3年度に試験的に設置した金網ロール式着生材は、図45に示すとおりである。令和3年10月に、線径0.9mm、1.4mm、1.8mmの3種類の金網をロール状に加工し、浜川河口のカキ礁周辺に設置した。その後、令和4年6月時点において、線径0.9mmの金網では、表面の腐食に加えて局所的な断裂が確認された。一方、線径1.4mmと1.8mmの金網では、表面の腐食は確認されたものの、断裂等は確認されなかった。これらの要因の一つとして、金網線径による腐食速度の違いが考えられる。金属ワイヤの腐食速度と線径の関係についての既往試験では、大気解放した5%NaCl水溶液において、鋼ワイヤ(0.1~1.0mmφ)の腐食速度は線径への依存性がみられ、線径が小さくなるほどに腐食速度が増大することを報告している⁹⁾。これらの報告は、実海域に設置した金網ロール式着生材の金網も同様であると考え、令和3年10月に設置した最も線径の細い0.9mmの腐食速度は大きく、設置9か月が経過した時点で局所的に断裂が生じたものと考えられた。

令和3年10月 (設置後の状況)	令和4年6月 (9か月後の状況)	
金網線径0.9mm、1.4mm、1.8mm	金網線径0.9mm	金網線径1.4mm
		
備考： 線径の異なる金網（線径0.9mm、1.4mm、1.8mm）をロール状に加工して設置	備考： 金網表面の腐食を確認 局所的な断裂を確認 フジツボ類の着生を確認（少）	備考： 金網表面の腐食を確認 断裂箇所は無し フジツボ類の着生を確認（多）

図45 試験的に設置した金網ロール式着生材（令和3年10月設置）

2) 金網ロール式着生材のカキ着生量

設置1年目のカキ着生量は、令和4年度の金網ロール式着生材で 0.81 kg/m^2 、令和2年度と3年度の棚式着生材でそれぞれ 0.57 kg/m^2 、 0.12 kg/m^2 となり、金網ロール式着生材のカキ着生量が最も多い結果となった。これらの要因の一つとして、年度によるカキ浮遊幼生の発生量や着生量の違いが推測されるが、図46に示すとおり、金網部分を面的な棚式構造から、立体的なロール式構造に変更したことで、金網部分の水当たりが向上し、カキの着生効果と成長効果が向上したことも要因の一つとして考えられる。また、令和4年度に設置した金網ロール式着生材のカキ着生量は、令和4年12月の追加調査において 8.24 kg/m^2 まで増加しており、今後も時間の経過とともに新たなカキの着生と、着生したカキの成長によってバイオマスは増大するものと考えられる。さらに、前述の「(1)金網ロール式着生材における金網の耐久性向上」で示した金網の耐久性の向上により、設置2年目以降の金網の耐久が期待でき、既存カキ礁と同等の 20 kg/m^2 のバイオマス達成の見込みも十分にあるものと考えられた。

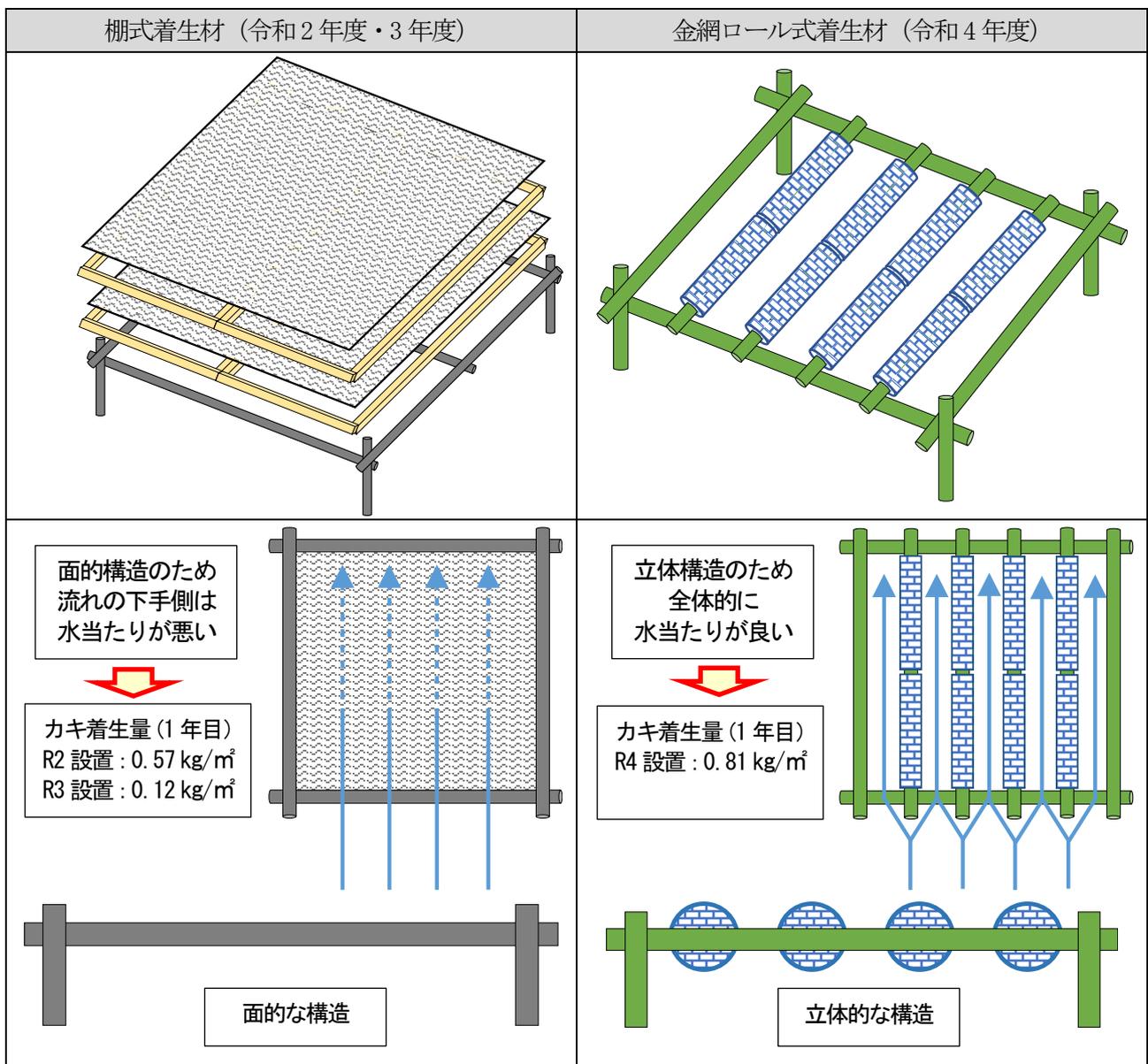


図46 棚式着生材と金網ロール式着生材の構造

3) カキ礁造成に向けての課題

今年度までの検証により、カキ礁造成に向けた着生材の開発として、既存カキ礁の平均カキバイオマスとほぼ同程度のカキが着生する棚式着生材を開発し、さらに、金網の耐久性向上に向けた金網線径の見直しと着生量増加に向けた金網ロール式着生材を開発した。その結果、金網ロール式着生材は、使用する金網の線径を太くすることで耐久性が向上し、金網を面的な棚式構造から立体的なロール式構造に変更することで、設置1年目のカキ着生量が増加することを把握した。一方で、カキ礁を造成するためには、着生材に着生したカキが地盤に落下し、それらが複数世代で付着し合う多重立体の構造となる必要がある。しかし、時間的な制約から、今年度までの技術開発ではそこまでの検証に至っておらず、残存率、作業性やコストの実用面、カキ着生量の多い効率的な着生材の開発にとどまった。したがって、今後は、着生材に着生したカキのその後の活用策の検討として、設置から一定の時間が経過した後に、金網に着生したカキの自然落下あるいは人的に落下させる等の具体策を検証し、カキ礁の造成に向けた一連の技術開発が必要であると考えられる。

令和3年度の検証では、令和2年度に設置した棚式着生材の金網の一部が腐食して落下し、図47に示すとおり、金網に着生したカキが底質の泥に埋没している状況が確認されている¹⁰⁾。これらからも、着生したカキを落下させる際には、着生材下部の底質改善が必要であると考えられる。

当該地先では、古くからのカキ礁造成手法として、竹や葦の築建てによって稚貝を採苗し、殻高70～80mmに成長したカキを筭から掻き落とし干潟に撒きつける地撒き式養殖が主流であった¹¹⁾。地元漁業者によると、泥場でのカキ礁造成の際には、カキを掻き落とす前にカキ殻を散布する方法も行われていたようであり、これらは金網ロール式着生材によるカキ礁造成にも流用可能であると考えられる。一方で、造成場所の底質環境によってカキ殻の散布の有無や散布量が異なり、さらには、散布時期や散布後のカキ殻の流出対策の検討も必要であると考えられることから、今後は、造成場所の環境に応じた着生材の設置からカキ礁造成までの一連の方法の検討が必要であると考えられた。



図47 令和2年度設置の棚式着生材下部のカキ落下状況（令和3年10月）¹¹⁾

(2) 既存カキ礁のカキバイオマスの把握

1) 既存カキ礁のカキバイオマスの年変動

平成 29 年から令和 4 年までの浜川河口と七浦地先の既存カキ礁のカキバイオマスの推移は、図 48 に示すとおりである。

畝状で離散型のカキ礁が形成される浜川河口域では、平成 29 年～令和元年までのカキバイオマスの平均は 20.3 kg/m²であった。令和 2 年には、令和 2 年 7 月豪雨による低塩分化の影響¹²⁾を受けて、カキバイオマスは 11.7 kg/m²まで低下したものの、令和 2 年 10 月から令和 3 年 8 月にカキバイオマスは 14.0 kg/m²程度にまで回復した。その後、令和 3 年の夏季から秋季にかけて確認されたナルトビエイの食害により、令和 3 年 10 月のカキバイオマスは 1.7 kg/m²まで大幅に低下したが、令和 4 年 8 月には 16.8 kg/m²、令和 4 年 10 月には 20.2 kg/m²まで回復した。令和 3 年に確認されたナルトビエイによる食害は、浜川河口域を含む広範囲で大きな影響を受けたが、浜川河口域の当該実験範囲では当年生まれの稚貝の多くが生残していたことから、令和 4 年 8 月までの期間においてカキバイオマスは大幅に回復したものと考えられた。

七浦地先では、平成 29 年～令和元年までのカキバイオマスの平均は 14.6 kg/m²であり、令和 2 年 8 月には 7.5 kg/m²まで減少した。これらの減少は、上述の令和 2 年 7 月豪雨による低塩分化の影響によるものと推察され、浜川河口域と同様に、平成 29 年～令和元年の平均値から 5 割近いバイオマスが減少した。その後のバイオマスについては、浜川河口とは異なり、季節的あるいは経年的なバイオマスの増加はほとんど見られず、令和 2 年 10 月から令和 4 年 8 月までは 0.2～2.9 kg/m²で推移し、令和 4 年 10 月には 0.01 kg/m²未満まで減少した。

これらの要因については、地先ごとのカキ浮遊幼生の発生量や着生量の差が考えられるが、着生後のカキの生残成長も関係していると考えられる。令和 3 年 8 月以降で確認されたカキのうち、殻高 50 mm 以上のカキ総個体数は、浜川河口で 811 個体/m²であるのに対し、七浦地先では 56 個体/m²であり、殻高 70 mm 以上のカキ総個体数は、浜川河口で 322 個体/m²であるのに対し、七浦地先では 0 個体/m²であった。このように、浜川河口と比較すると七浦地先は生息しているカキのサイズが小さく、令和 2 年以降で確認された大規模な低塩分化や食害以外の要因として、流れや底質等の生息環境の悪化による生残成長への影響の可能性はある。

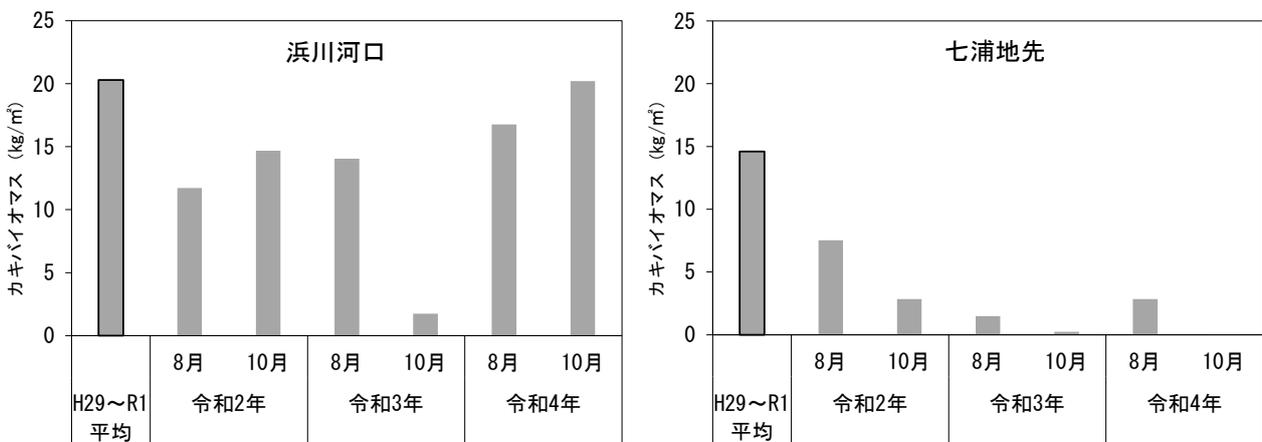


図 48 浜川河口と七浦地先における既存カキ礁のカキバイオマスの推移

4. カキ礁造成による貧酸素水塊の軽減効果の検証（小課題4-1-3）

4.1 カキ礁造成による貧酸素水塊の軽減効果の検証

カキ礁による貧酸素水塊の影響軽減効果を評価するために、令和2年度までに構築した物質循環モデルを用いて、カキ礁の分布条件を変更した解析を実施し、得られた解析結果より、カキ礁条件による貧酸素水塊の軽減効果を検討した。

以下に、設定モデルによる解析結果より、貧酸素水塊の軽減効果を評価した。

4.1.1 方法

(1) 物質循環モデルの概要

貧酸素水塊軽減効果の検討に利用している物質循環モデルは、流動モデルとカキやアサリ等の二枚貝による有機物の摂餌や排泄などを考慮した水質モデルにより構成している。

流動モデルはPOM (Blumberg and Mellor)¹²⁾を基本に設定し、水質モデルはCerco and Cole¹³⁾により開発された富栄養化モデルに、カキやアサリ等の二枚貝による有機物の摂餌や排泄などを考慮した。計算格子は、図49に示すとおり、有明海を200 m×200 mに区分して、外海に向かって格子サイズが大きくなる不等間隔格子を設定した。下図は、南端が計算領域の境界部である鹿児島県阿久根市、西端は長崎県樺島までを示したが、計算領域の西端境界部は、図の表示範囲より約90 km西方の福江島まで設定しており、最大格子幅は10,000 mである。

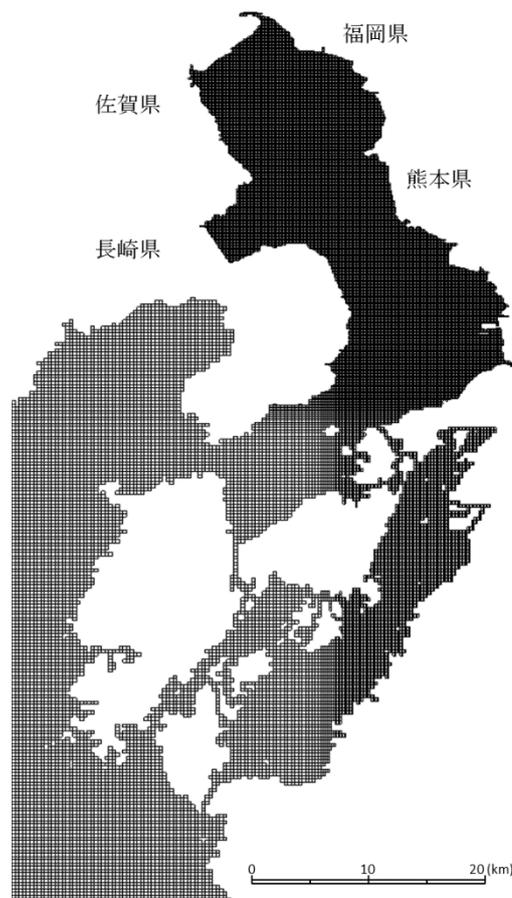


図49 計算格子図（抜粋）

1) 物質循環の構造

平成31年度までに構築した物質循環モデル（図50）では、カキ礁のカキによる有機物の除去効果だけでなく、図51に示す漁場図のように佐賀県沿岸にアサリ漁場のほか、サルボウガイ漁場も広く分布することから、これら二枚貝による有機物除去効果も考慮できるように構築した。

カキ礁による貧酸素水塊の軽減には、カキ礁が摂餌、排糞および排泄を通じてモデルの最下層の物質とやり取りを行うことで関わっている。モデルに設定する各種パラメータは、本課題で得られた現地調査結果や、独立行政法人水産総合研究センター・国立大学法人佐賀大学¹⁴⁾および山口ほか³⁾を参考に設定した。

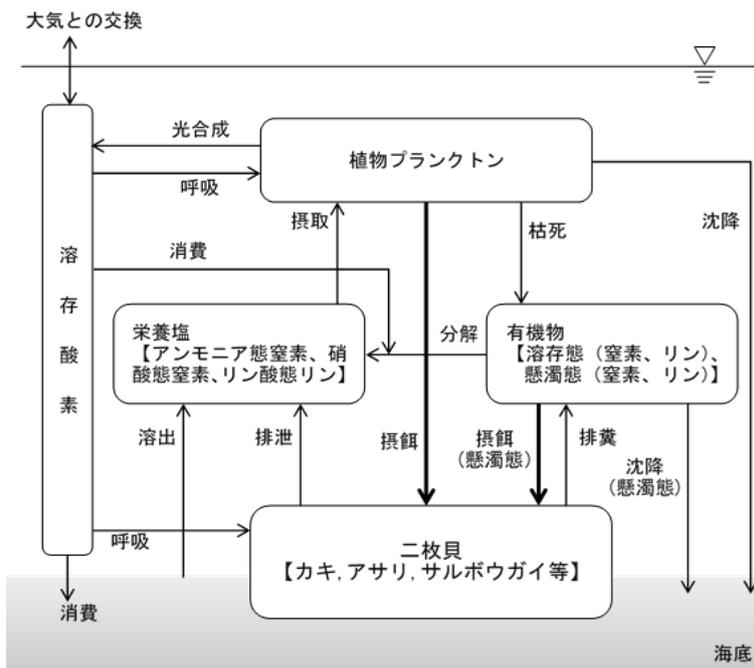


図50 物質循環モデルのイメージ図

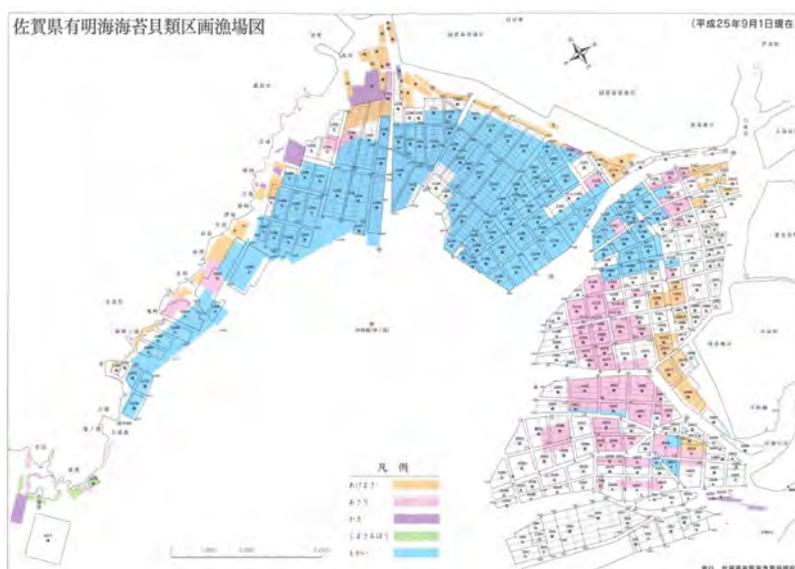


図51 佐賀県沿岸の貝類の漁場図（発行:佐賀県有明海漁業協同組合）

2) 物質循環モデルにおけるカキの主な基礎式

カキによる呼吸や摂餌等の反応式は、既往知見^{3),14)}を参考に設定した。
以下に主な反応式を示した。

a. 呼吸

カキの呼吸による酸素消費は、カキ礁を構成するスミノエガキ、マガキ、シカメガキの3種について、それぞれ次式で表される。

・スミノエガキ

$$\log_{10} D_9 = (0.022 \times T + 0.197) \cdot \log_{10} DW + 0.035 \cdot T - 0.866$$

・マガキ

$$\log_{10} D_9 = 0.663 \cdot \log_{10} DW + 0.032 \cdot T - 0.755$$

・シカメガキ

$$\log_{10} D_9 = 0.689 \cdot \log_{10} DW + 0.047 \cdot T - 1.105$$

D_9 : カキによる酸素消費量、 T : 最下層水温、 DW : カキの軟体部乾燥重量である。

3種類のカキの生物量比は、現地調査結果に基づいて設定されている既往知見より、スミノエガキ:マガキ:シカメガキ = 4:3:3とした。

b. 摂餌

カキによる摂餌は、カキ礁の分布場所での底層水中での植物プランクトン量(炭素、窒素、リン)と懸濁態有機物量(炭素、窒素、リン)に濾水速度を積算して算定した。濾水速度には、水温、塩分その他、懸濁物濃度や、カキの生息密度の影響を考慮している。

$$BS_1 = (Pc + Pn + Pp + POC + PON + POP) \times FR$$

$$FR = f(T, S) \times f(SS) \times f(BSF) \times Xm^{FRc}$$

BS_1 : カキによる摂餌量、 Pc, Pn, Pp : 植物プランクトン体炭素、窒素、リン、 POC, PON, POP : 懸濁態有機炭素、懸濁態有機窒素、懸濁態有機リン、 FR : カキの濾水速度、 Xm : カキの平均個体乾燥重量、 FRc : カキの濾水速度に関する定数、 $f(T, S)$: カキの濾水速度に対する水温・塩分の依存関数であり、次式で表される。

$$f(T, S) = T_{coef} \times T + S_{coef} \times S + cst$$

T_{coef}, S_{coef} : 水温、塩分に関する係数、 cst : 定数である。 $f(SS)$: 懸濁物濃度(SS)による摂餌制限関数であり、次式で表される。

$$f(SS) = A_{SS} \times \exp(B_{SS} \times SS)$$

A_{SS} , B_{SS} : SS による摂餌制限に関する係数である。 $f(BSF)$: 濾水速度に対するカキ密度依存関数であり、ミカエリスメンテン型の次式で表される。

$$f(BSF) = \frac{K_{BSF}}{BSF + K_{BSF}} A_{SS}$$

K_{BSF} : カキ密度の半飽和定数である。

c. 排糞

カキによる排糞は、摂餌量 (BS_1) のうち同化しない分が、糞生産速度に従い懸濁態有機物量 (炭素、窒素、リン) として底層に排出するとして、次式で表される。

$$BS_2 = \alpha_{bsf} \times (1 - ASSI_{bsf}) \times BS_1$$

BS_2 : カキによる排糞量、 α_{bsf} : 糞生産速度定数、 $ASSI_{bsf}$: 同化係数、 BS_1 : カキによる摂餌量である。

d. 排泄

カキによる排泄は、個体サイズおよび水温が影響するように、次式で表される。

$$BS_3 = \beta_{bsf} \times 10^{Q_{10}BS_3 \times T} \times X_m^{\beta_{BS_3} X_m + \alpha_{BS_3} X_m \times T}$$

BS_3 : カキによる排泄量、 β_{bsf} : アンモニア排出速度定数、 $Q_{10}BS_3$: アンモニア排出の温度係数、 $\alpha_{BS_3} X_m$: アンモニア排出と個体サイズの関係についての温度係数、 $\beta_{BS_3} X_m$: アンモニア排出と個体サイズの関係についての定数である。

(2) 物質循環モデルによる解析

1) 貧酸素水塊の軽減に効果的な場所の検討 (ケース 1)

令和 3 年度には、図 52 の左図に示す様にそれまでに検討されたカキ礁造成可能域を 3 エリアに区分して、個々のエリアにカキ礁を同じバイオマスで造成した解析を実施し、貧酸素水塊軽減効果の高い造成エリアを検討した。しかし、この検討では、その後新たに設定された図 52 の右図に示すカキ礁造成可能域 (ケース 1 のエリア) が含まれていないため、このエリアに令和 3 年度の検討と同じバイオマスのカキ礁を設定し解析を実施した。

設定したバイオマスは、R3 造成可能域 1 に 20 wet-kg/m² で造成したカキ礁の量であり、造成可能域の面積が広い他のエリアでは、R3 造成可能域 1 のエリアに比べて広く薄くカキ礁を造成することになる。

カキ礁分布条件の基本となる 2007 年のカキ礁分布範囲 (分布面積: 約 165 ha) は図 53 に示すとおりであり、国立研究開発法人水産研究・教育機構 西海区水産研究所 (現 長崎庁舎) より調査結果の提供を受け設定した。

設定するカキ礁の空間スケールは、計算格子サイズ (200 m×200 m) に比べて小さく、各格子によってカキ礁の密度が異なる。そこで、山口ほか³⁾を参考に、カキ礁が占める面積割合を被覆度 (0 から 1.0) で表し、各格子のカキ生物量を次式で表した。

$$\text{各格子のカキ生物量} = \text{各格子の面積 (m}^2\text{)} \times \text{被覆度} \times \text{カキ礁の平均密度 (gC/m}^2\text{)}$$