

第 6 回 海域再生対策検討作業小委員会
－海域区分ごとの環境特性と関連図について－

目 次

1	再生方策の考え方	1
1.1	順応的管理の視点からの再生技術体系	1
1.2	再生方策の検討方針	5
1.3	再生方策検討の視点	6
2	環境特性の把握	7
2.1	考え方	7
2.2	使用したデータ	8
2.2.1	底質	8
2.2.2	底生生物	11
2.2.3	水質	14
2.3	解析方法	17
2.3.1	概要	17
2.3.2	階層的クラスタ分析の手順	18
2.4	解析結果	21
2.4.1	底質からみた環境特性	21
2.4.2	底生生物からみた環境特性	31
2.4.3	水質環境からみた環境特性	35
3	有明海・八代海の海域区分の検討	39
3.1	各観点からみた海域区分の重ね合せ	39
3.2	有明海・八代海の海域区分	40
3.2.1	有明海の海域区分	40
3.2.2	八代海の海域区分	41
4	海域区分ごとの環境特性	42
4.1	有明海	43
4.2	八代海	46
5	海域区分ごとの連関図と課題(案)	49
5.1	問題点とその原因・要因の考察(平成18年委員会報告記載内容)	49
5.2	有明海の各海域の連関図と課題	51
5.2.1	A1 海域	51
5.2.2	A2 海域	54
5.2.3	A3 海域	57

5.2.4 A4 海域	60
5.2.5 A5 海域	63
5.2.6 A6 海域	66
5.2.7 A7 海域	69
5.2.8 A8 海域	72
5.3 八代海の各海域の連関図と課題	75
5.3.1 Y1 海域	75
5.3.2 Y2 海域	78
5.3.3 Y3 海域	81
5.3.4 Y4 海域	84
5.3.5 Y5 海域	87

1 再生方策の考え方

閉鎖性海域の環境は「地圏・水圏・気圏」の3つの環境基盤と、これに人を含めた「生態圏」の4圏により構成され、互いが相互に関連し合っており、海域環境の変化の要因・原因については物理・化学的環境および生物生産過程を視野に入れた総合的な解析が必要であり、環境変動のメカニズムの解明が大きな課題とされている。また、海域環境の改善・再生に当たっては、このような海域環境変動のメカニズム解明を基本としながらも、海域再生策の基本は、人が制御可能な事項として、①底質環境の改善技術、②水質環境（負荷を含む）の改善技術、③人為的負荷の削減技術であるとされている。さらに、これら3つの技術目標に対して、物理・化学・生物学的技術の開発・適用、それらの組合せ技術が効果的であるとしている。

1.1 順応的管理の視点からの再生技術体系

再生方策に必要な再生技術について、順応的管理の視点から技術体系として整理した(図 1.1)。これは、滝川ら(2010)が示した順応的管理の視点からの技術体系を引用した。

ここでは、全体目標は、熊本県「委員会報告」(有明海・八代海干潟等沿岸海域再生検討委員会、平成18年3月)の有明海・八代海干潟等沿岸海域の再生のあり方における基本理念に基づき設定されている。これによると、干潟等を含む海域は、水質浄化機能、生物生息・生育の場として重要な役割を有しており、有明海・八代海を「豊かな海」として再生するためには、漁業対象の生き物を含む多様で豊かな生態系を回復・維持させるという考え方が必要であると謳われている。

有明海・八代海等の再生のための全体目標の検討は、次年度以降に行われるものの、検討を進めて行くためには目標像をイメージする必要がある。そこで、本小委員会では、現時点での全体目標を「**有明海・八代海における環境特性に応じた生物多様性のある海域環境**」として再生方策の検討を進めたいと考えている。この全体目標を実現するためには、環境全体のプラン、その中に海域全体と海域別のプラン、地域ゾーニングプランを考える必要がある。

*本章は、「滝川清・増田龍哉・五明美智男・五十嵐学、順応的管理の視点からの閉鎖性水域における環境改善の技術体系 ―有明海を例に―、海洋開発論文集 第26巻、2010年6月」を基に記載している。

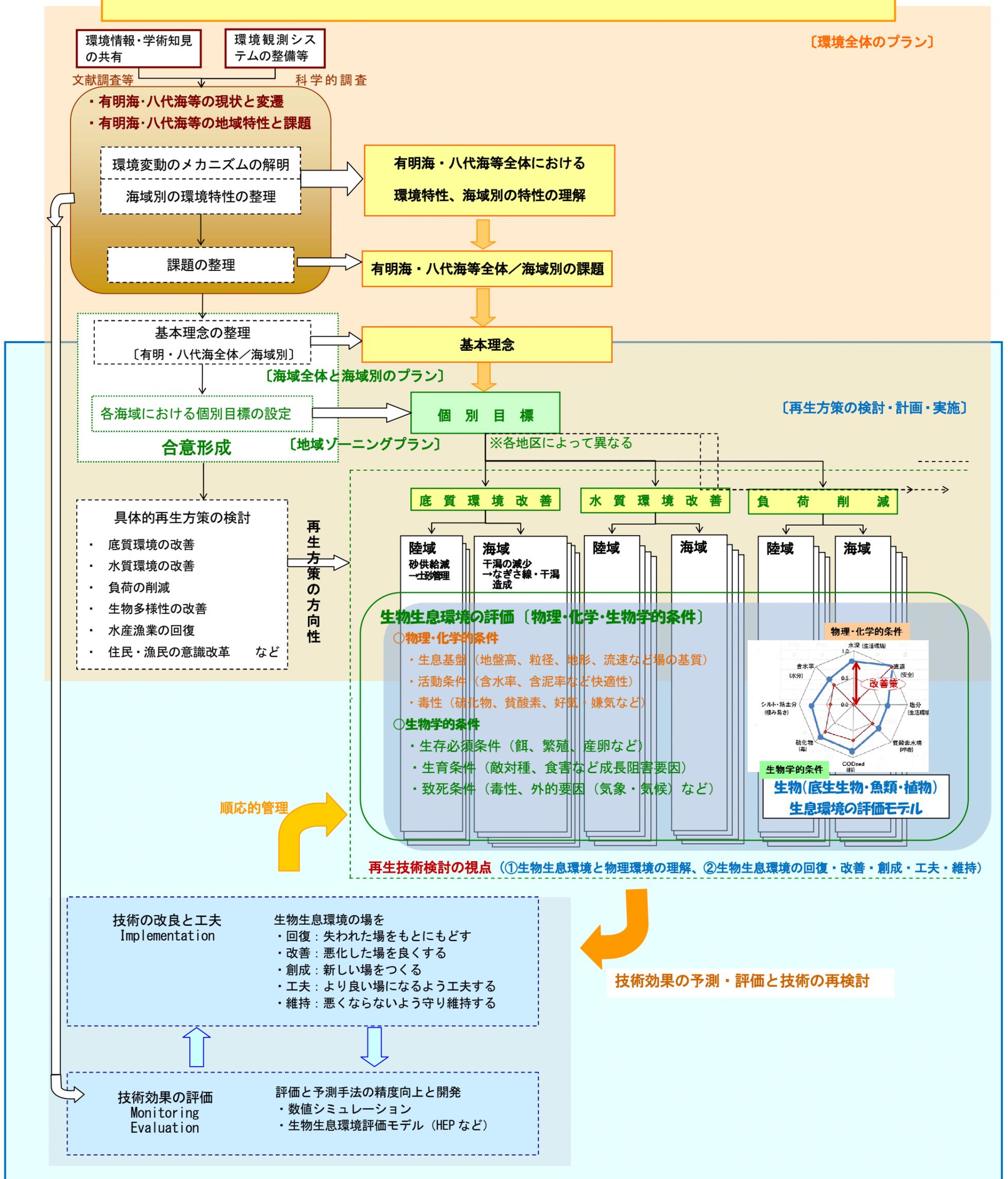
海域全体と海域別のプランでは、海域全体と海域別の基本理念を設定し、地域ゾーニングプランでは個別目標が各地区別に設定される。これらのプランを達成するためには、

- 第一に「有明海・八代海等全体における環境特性、海域別の特性を理解」し、これらが抱える「課題を整理」することが必要である。
- 第二に、整理した課題から有明海・八代海等全体、海域別の全体目標を達成するための「基本理念」を設定し、これらを基に、海域全体や各海域における「個別目標」を決める。

次に、個別目標を達成するための具体的な再生方策を検討する。再生方策の方向性として底質環境改善、水質環境改善、負荷削減等が挙げられる。これらの方策を検討する際は、海域の環境特性、地域特性を踏まえることが重要である。また、再生方策に適用する技術を検討する際は、従来の実施されている技術のみならず、複数の技術の組み合わせた新規の技術を含め最も効果のある再生技術を適用することが重要である。

さらに、個々の技術に対しては「技術の改良と工夫」、「技術効果の評価」が必要である。「技術の改良と工夫」では、生物生息環境の回復、改善、創成、工夫、維持の観点からの技術改良・工夫が重要である。一方、「技術効果の評価」では、再生技術実施後のモニタリング結果を通じての数値シミュレーションや HEP などの評価手法により一層の精度向上と開発が必要である。このような、技術検討を重ね、効果的な技術の進展を図ることが重要である。

全体目標：有明海・八代海の環境特性に応じた生物多様性のある海域環境



※滝川清・増田龍哉・五明美智男・五十嵐学、順応的管理の視点からの閉鎖性水域における環境改善の技術体系 —有明海を例に一、海洋開発論文集 第26巻、2010年6月を基に作成

図 1.1 海域環境改善・再生の技術体系と順応的管理(素案)

1.2 再生方策の検討方針

有明海・八代海の環境変化については、「有明海・八代海総合調査評価委員会」において議論され、平成18年に以下のことが報告されている、

環境悪化の原因は様々な要因が複雑に関係し合っており十分な調査・研究が必要であるとしつつ、海域における物質収支のバランスが崩れた直接的な要因の1つとして、

- ・ 底質の悪化や干潟消失等によって底生生物の生息環境が悪化し、底生生物が減少している。
- ・ 底生生物が減少したため、物質循環における有機物分解過程の機能が低下（例えば、二枚貝類の減少に伴うろ過機能の低下等）している。
- ・ また、海水中の有機物の増加（赤潮抑制機能の低下）や底質中の有機物の蓄積（底層水の酸素消費促進、沈降中の有機物分解による酸素消費促進）によって貧酸素化が起きている。

などが指摘されている。

また、有明海・八代海のような閉鎖性海域における環境改善・再生に当たっては、以下のような留意点が述べられている。

- ・ 海域特性を十分に把握の必要性(海域ごとの環境特性に応じた環境改善・再生を考える必要がある)および海域全体への影響考慮とマスタープランの必要性。
- ・ 大気、水、底質およびこれら間の物質収支を把握する必要がある(赤潮や貧酸素水塊は物質循環が良好でないために頻発するようになっており、特に水、底質およびこれら間の物理的・化学的・生物的物質循環を把握することが必要である)。

上記を踏まえ、再生方策の検討方針を以下の通りとする。

【再生方策の検討方針】

- ① 有明海・八代海等全体における環境特性、海域別の特性を理解する。
⇒環境特性の把握と課題の整理
- ② 各海域の特性に応じた基本理念と個別目標を掲げる
⇒各海域の個別目標を設定する
- ③ 個別目標を達成するための具体的再生方策を検討する。
⇒各海域における再生方策の方向性、再生技術の検討

1.3 再生方策検討の視点

本検討では、先に示したとおり、環境特性に応じた生物多様性のある海域環境を創出することを目的として再生方策を考えることとした。具体的な再生方策(技術)については、生物の生息環境の観点から再生技術を検討する。再生技術の検討に当たっては、生物の生息環境を構成する要素である底質環境、水質環境、流動環境、地形環境等の各条件を評価した上で、適切な技術を検討する必要がある。そこで、まず底質環境、水質環境、流動環境、地形環境及び生物生息環境の特性把握とこれらの評価手法を検討することとした。

2 環境特性の把握

2.1 考え方

生物の生息環境の構成要素の物理的・化学的環境は、上記のように底質・水質・流動・地形環境が考えられる。これらは互いに関係し、長期的・短期的な相互作用の結果が現状と考えられる。即ち、底質は基本的には地形と流動で規定され、場合によっては水質からの影響を受ける(ex.懸濁物(赤潮)の局所的な沈降・堆積等)。また、地形は基本的には流動で規定されると考えられる。言い換えると、底質は、流動(地形)の長期的・短期的な影響の積分された結果である(その期間内では水質の影響も含む)。

有明海・八代海等では潮汐差が大きく、両海域ともに河川からの出水の影響も大きいと考えられ、そのために底質の変動は短期的には大きい。しかしながら、有明海湾奥西部では底質が長期的に一方向へ変化していることはなく、他の海域も同様と考えている。そこで、本検討では生物生息環境の構成要素のうち、底質環境をベースとして環境特性の把握、評価を考えることとした。その上で、水質、流動等の環境特性を整理して行くこととした。

生物生息環境については、有明海・八代海等の環境特性把握のベースを底質環境と考えること、移動力が比較的小さい底生生物はその場の環境変遷が積分された結果と考えられることから、まず、底生生物について検討を行う。その後、重要な水産資源である二枚貝類、魚類についても検討を進めて行くこととした。

また、有明海・八代海等では、現在、赤潮、貧酸素が社会的な問題となっていることから、前節までの整理が終了したところで各海域における赤潮、貧酸素水塊の影響を整理した。

なお、上記の二枚貝類、赤潮及び貧酸素水塊の影響については、生物・水産資源・水環境問題検討作業小委員会において整理がなされているところであり、それらの結果を参考とした。

2.2 使用したデータ

2.2.1 底質

(1) 調査地点

今回の作業に用いたデータの調査地点を図 2.1 に示す。

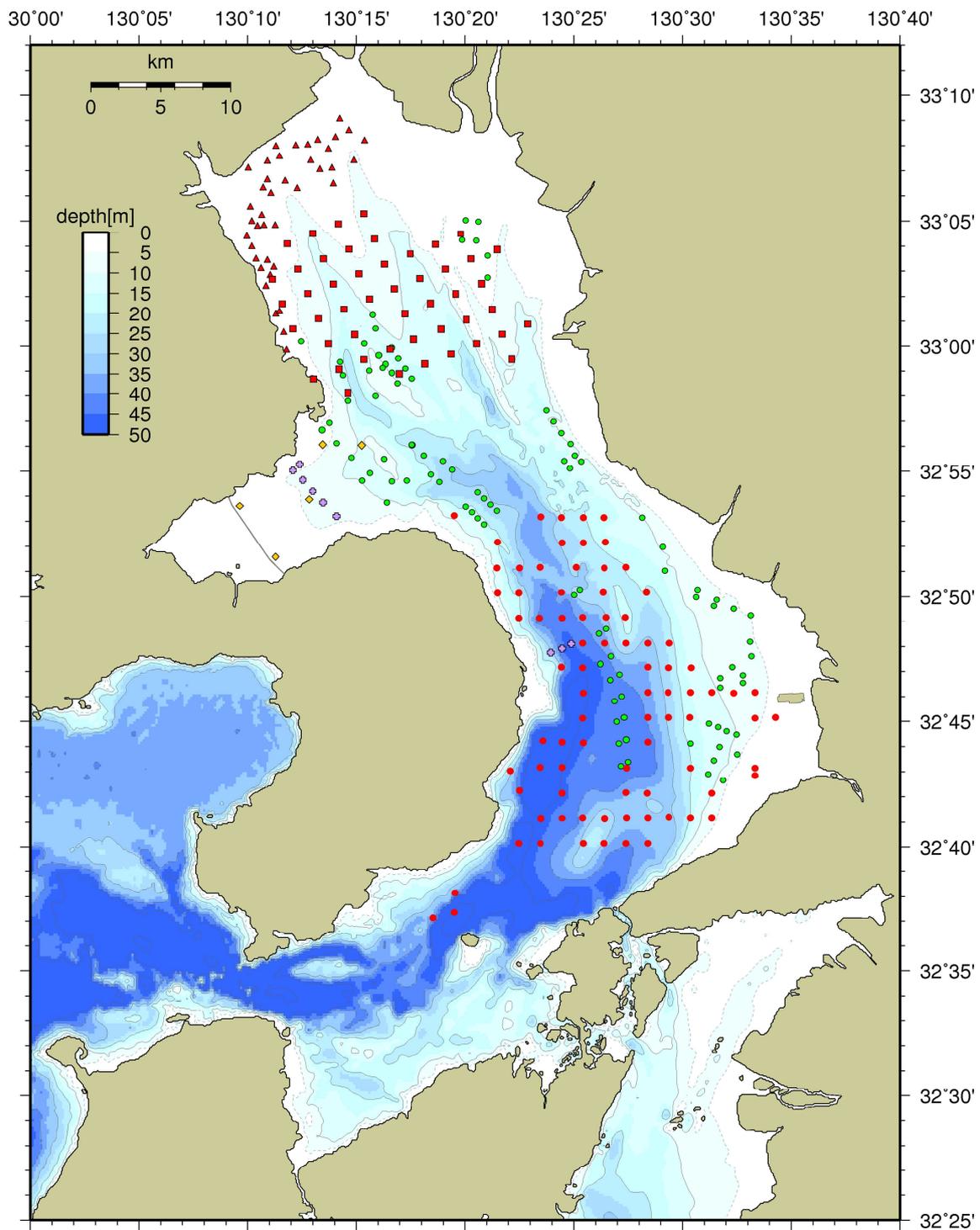


図 2.1 (1) 底質データ調査地点(有明海①)

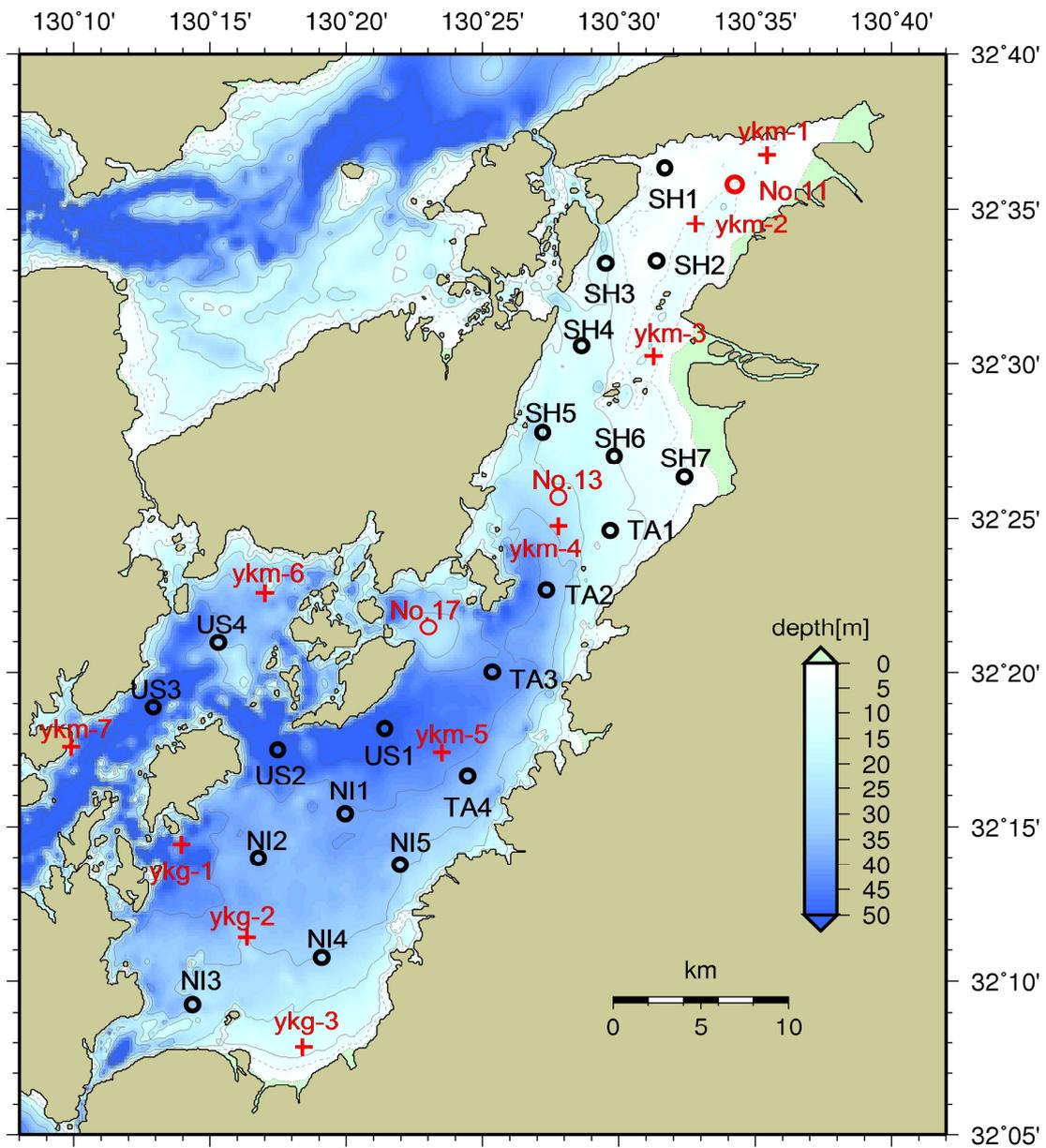


図 2.1 (2) 底質データ調査地点(八代海)

(2) 調査項目

作業に用いた底質の項目は表 2.1 に示すとおりである。

表 2.1 (1) 作業に用いた底質データ一覧(有明海)

調査機関	調査年	調査月	含泥率 (%)	全硫化物 (mg/g)	強熱減量 (%)	COD (mg/g)	全窒素 (mg/g)	全リン (mg/g)	AVS (mg/g)	地点
九州農政局 (底質環境調査)	2004~2007	7~9月上旬	○	○	○	○	○	○		図-2.1(1): ●
	2008~2013	7~9月上旬	○	○	○					図-2.1(1): ●
九州農政局 (環境モニタリング調査)	2007	8月	○	○	○	○	○	○		図-2.1(1): ◆
長崎県	2008	8月	○	○		○				図-2.1(1): ⊕
佐賀県	2009	7月	○		○	○		○		図-2.1(1): ▲
	2005	10月	○		○			○		図-2.1(1): ■
熊本県	2009	8月	○	○	○	○				図-2.1(1): ▼
	2011	7月	○	○	○	○				図-2.1(1): ▼
九州大学	2006	7~9月上旬	○		○					図-2.1(1): ●

表 2.1 (2) 作業に用いた底質データ一覧(八代海)

調査機関	調査年	調査月	含泥率 (%)	全硫化物 (mg/g)	強熱減量 (%)	COD (mg/g)	全窒素 (mg/g)	全リン (mg/g)	TOC (mg/g)	地点
環境省	2012	2月	○	○	○	○	○	○		図-2.1(2): ⊕
国土交通省	2012	5月	○	○	○	○	○	○	○	図-2.1(2): ⊙
熊本大学	2011	11月	○	○			○	○	○	図-2.1(2): ⊙

2.2.2 底生生物

(1) 調査地点

今回の作業に用いたデータの調査地点をまとめて図 2.2 に示す。

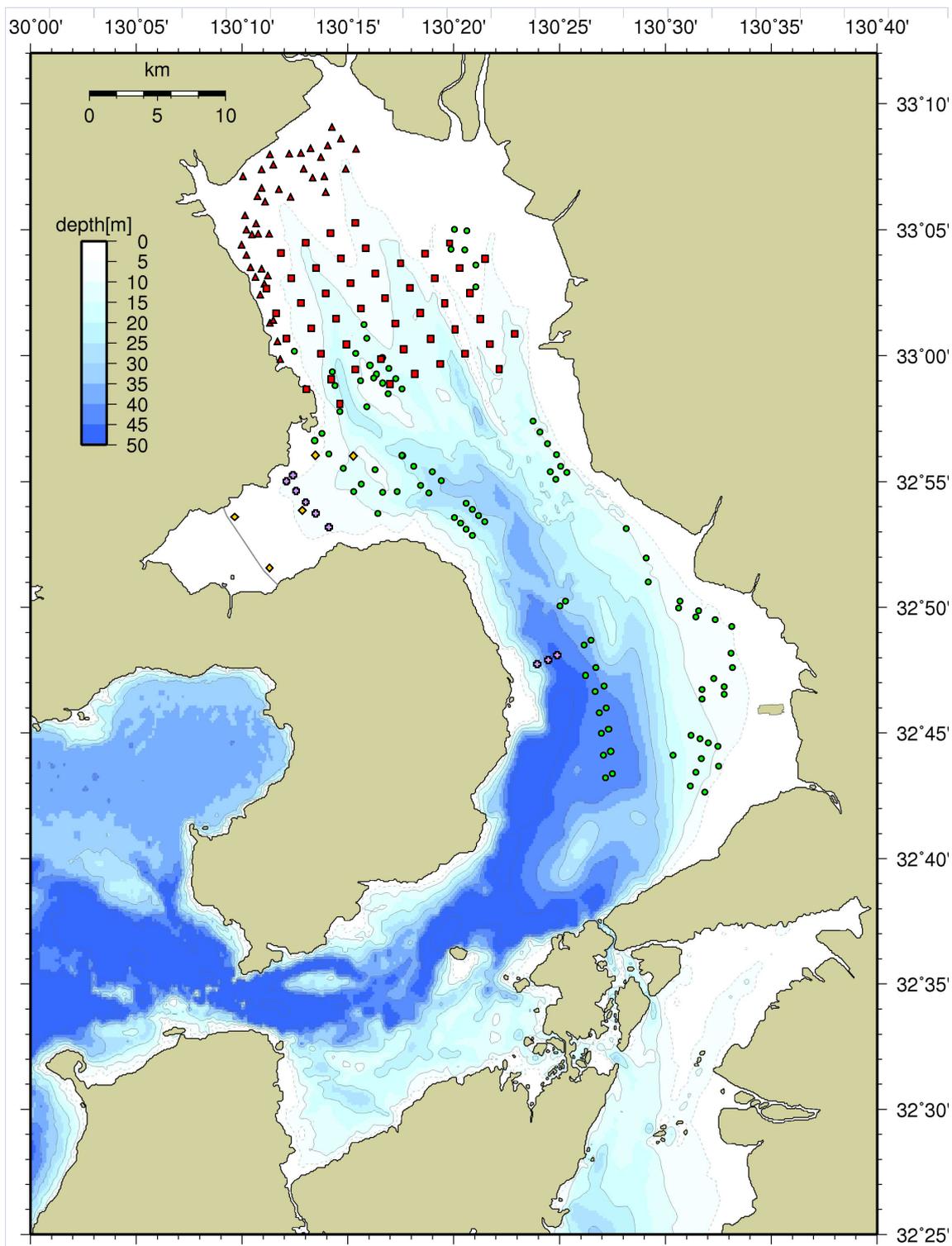


図 2.2 (1) 底生生物データ調査地点(有明海)

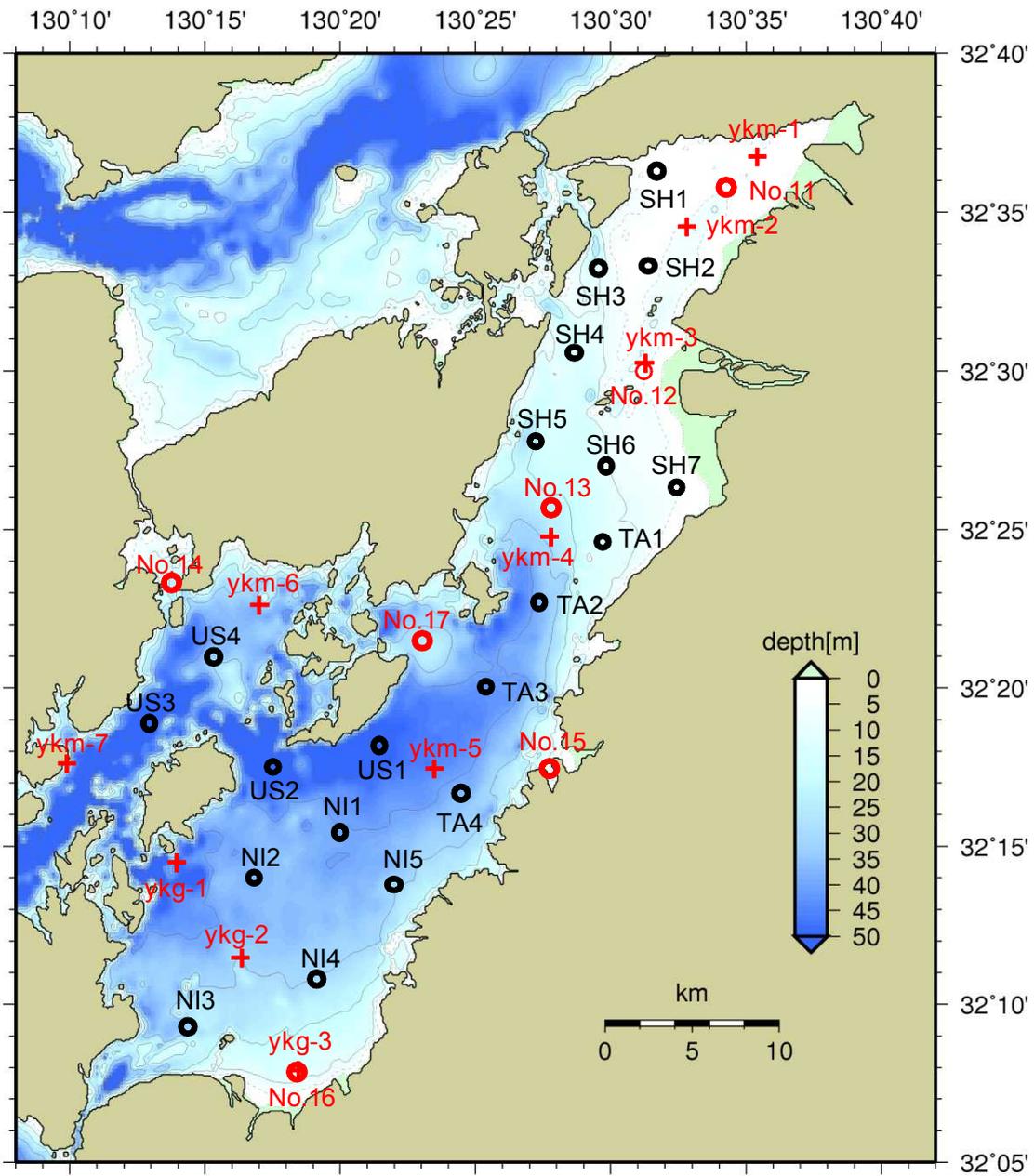


図 2.2 (2) 底生生物データ調査地点(八代海)

(2) 調査項目

作業に用いた底生生物の項目は表 2.2 に示すとおりである。

表 2.2 (1) 作業に用いた底生生物データ一覧(有明海)

調査機関	調査年	調査月	種類数	個体数	湿重量	地点
九州農政局 (底質環境調査)	2004~2007	7~9月上旬	○	○	○	図-2.2(1): ●
	2008~2013	7~9月上旬	○	○	○	図-2.2(1): ●
九州農政局 (環境モニタリング調査)	2007	8月	○	○	○	図-2.2(1): ◆
長崎県	2008	8月	○	○		図-2.2(1): ⊕
佐賀県	2009	7月	○		○	図-2.2(1): ▲
	2005	10月	○		○	図-2.2(1): ■
熊本県	2009	8月	○	○	○	図-2.2(1): ▼
	2011	7月	○	○	○	図-2.2(1): ▼

表 2.2 (2) 作業に用いた底生生物データ一覧(有明海)

調査機関	調査年	調査月	種類数	個体数	湿重量	地点
環境省	2012	2月	○	○	○	図-2.2(2): +
国土交通省	2012	5月	○	○	○	図-2.2(2): ○
熊本大学	2011	11月	○	○		図-2.2(2): ⊙

2.2.3 水質

(1) 調査地点

今回の作業では、福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県が実施している浅海定線調査結果及び内湾調査結果を用いた。有明海・八代海の各調査地点を図 2.3 に示す。

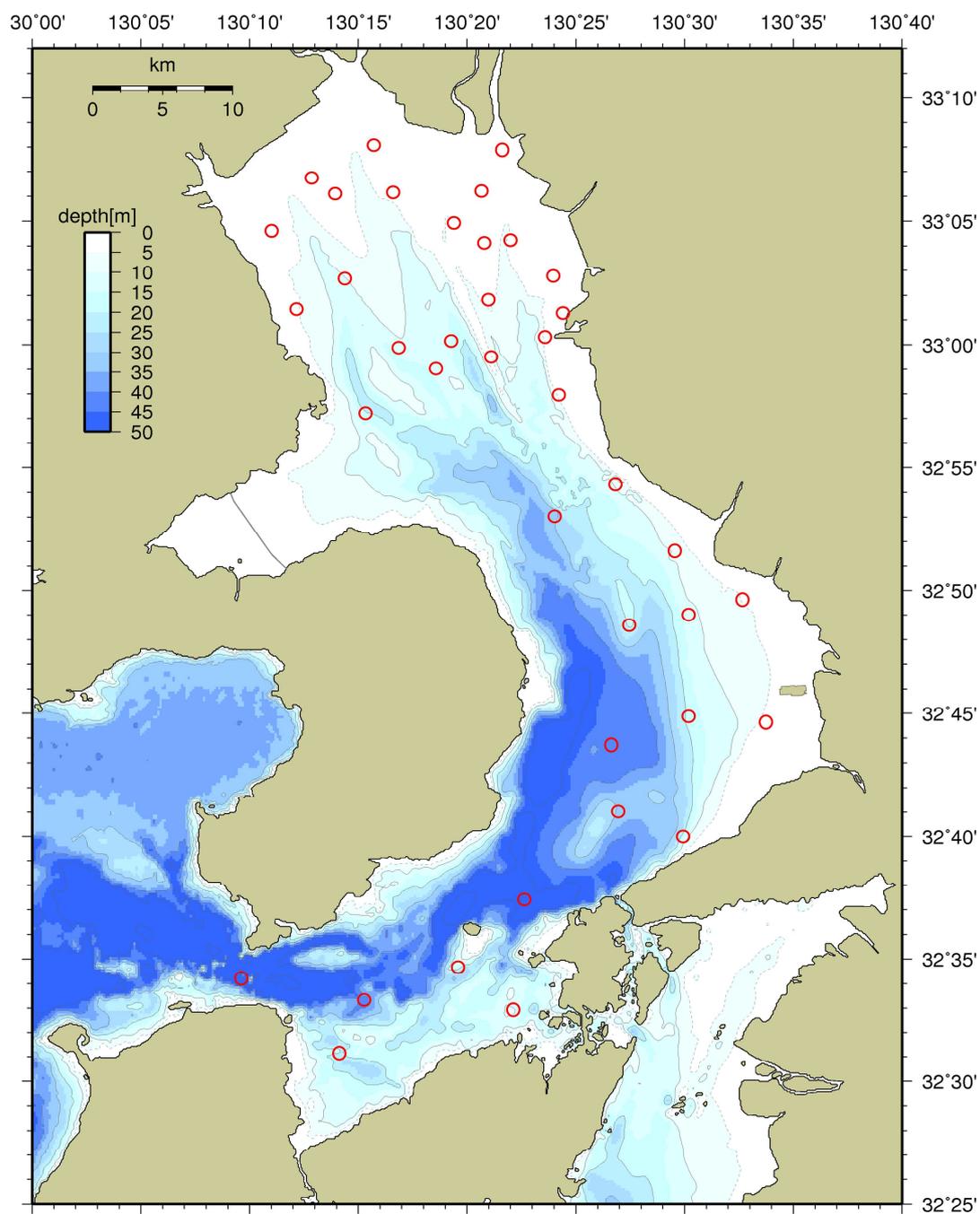


図 2.3 (1) 水質データ調査地点(有明海)

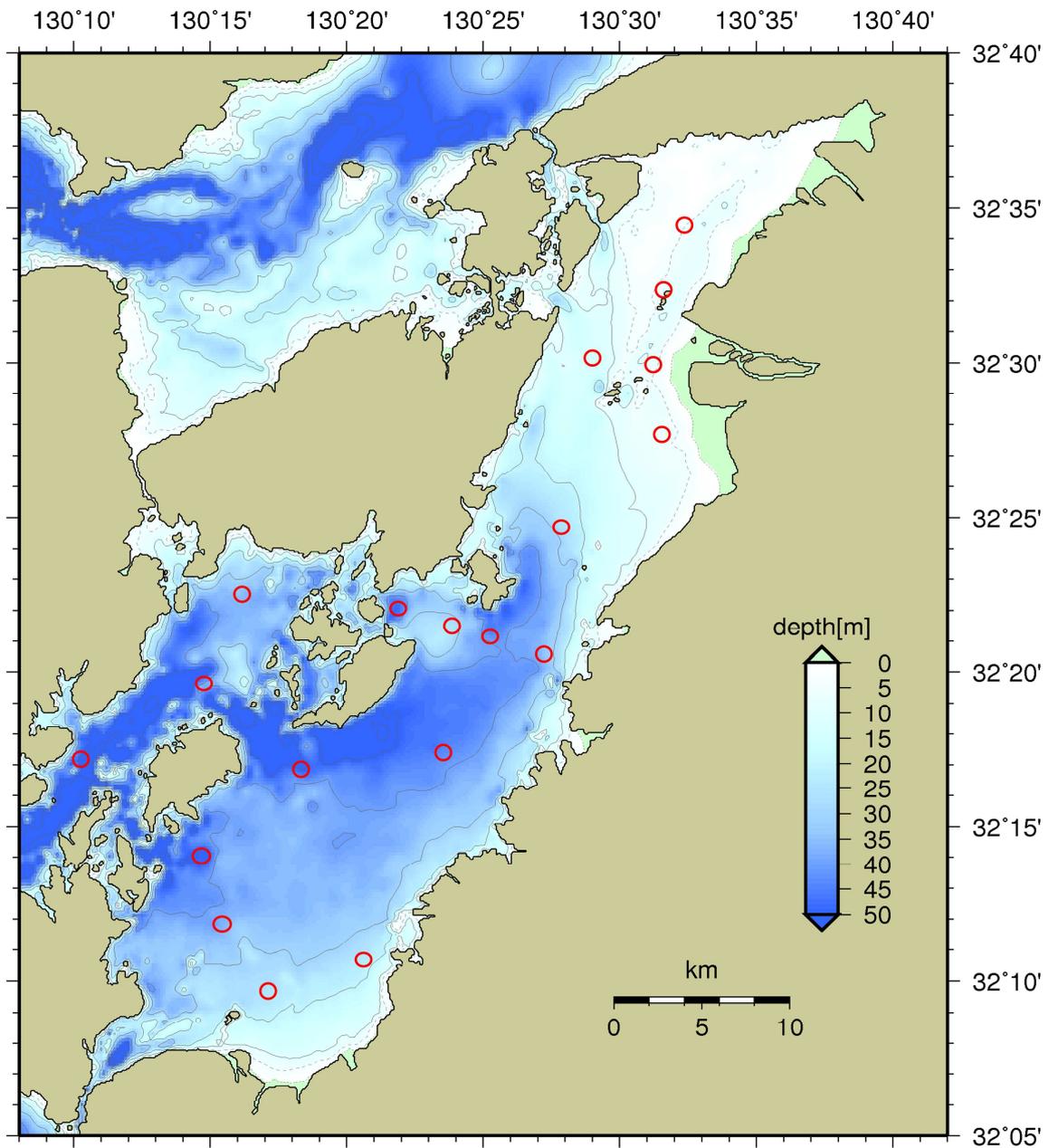


図 2.3 (2) 水質データ調査地点(八代海)

(2) 調査項目

作業に用いた水質の項目は表 2.3 に示すとおりである。

表 2.3 作業に用いた水質データ一覧

海域	調査機関	項目	期間
有明海	福岡・佐賀・長崎・熊本県	○海面下 5m の水温・塩分・DO・DIN・PO4-P ○透明度	1988/1～2006/12
八代海	熊本県	○海面下 5m の水温・塩分・pH・DSi・DO・DIN・PO4-P ○透明度	2004/12～2012/3

2.3 解析方法

2.3.1 概要

クラスター分析は、サンプル(あるいは変数)間の類似度あるいは非類似度に基づき、サンプル(あるいは変数)の分類を行う手法である。類似度あるいは非類似度とは、サンプル(あるいは変数)がどれだけ類似しているか、あるいはどれだけ類似していないのかを数値として表したものである。

分類してできたサンプル(あるいは変数)の集団はクラスターと呼ばれ、大きく階層的方法と非階層的方法に分けられる。クラスター分析には表 2.4 に示すとおり、数多くの方法があるが、ウォード法は連鎖(クラスター分析の過程において、近い対象を含むクラスターが次々と統合して長い帯状のクラスターができる)が起きにくいことが経験的に知られており、実用性が高い手法であることから、ここでは、クラスター化法(分類をおこなう手法)としてウォード法、非類似類似係数(対象をまとめていくための基準)として平方ユークリッド距離を用いた。平方ユークリッド距離は、 n 個の個体において p 個の変量について観測値が与えられた場合、個体 a と b との非類似度 d_{ab} を次のように定義する。いま、 a, b の観測値ベクトル x_a, x_b を $x_a = (x_{1a}, x_{2a}, \dots, x_{pa})$, $x_b = (x_{1b}, x_{2b}, \dots, x_{pb})$ とすると、次式で表される。

$$d_{ab} = \sum_{i=1}^p (x_{ia} - x_{ib})^2$$

表 2.4 各クラスター化法の特徴

名称	特徴	短所
群平均法	<ul style="list-style-type: none"> 最も代表的な手法である。 クラスター間の類似度はそれらに属する対象の対の類似度の平均的な値で定義される。 最短距離法と最長距離法の中間的性質を持つ。 	
ウォード法	<ul style="list-style-type: none"> クラスターを統合することによる平方和の増分が最も小さいものを統合する。 ある 1 つのクラスターに対象が順に 1 つずつ吸収されてクラスターが形成されていく現象(連鎖)が起りにくい。 	サイズ移動に敏感な非類似度係数しか使えない
可変法	<ul style="list-style-type: none"> 各方法を統一的に扱う方法。 パラメータの変更でどの方法にもなる。 	
最短距離法	<ul style="list-style-type: none"> 最も類似性の高い(距離が近い)対の類似度により決まる。 間隔尺度、順序尺度どちらにも使える。 一つの大きなクラスターを作る傾向がある。 	連鎖が起りやすい。逆に連鎖を確認するために使うといった場合は便利
最長距離法	<ul style="list-style-type: none"> 最も類似性の低い(距離が遠い)対の類似度により決まる。 間隔尺度、順序尺度どちらにも使える。 	

*本節は、Yoshihiro SONODA, Kiyoshi TAKIKAWA, et al (2011) DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF WATERQUALITY, SEDIMENTS, AND BENTHOS IN THE ARIAKE SEA AREA. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.G (Environmental Research), Vol. 67, No. 4, 150-169.から引用した。

2.3.2 階層的クラスター分析の手順

階層的分類法は凝集型と分岐型があるが、ここでは凝集型（分類対象となるデータをボトムアップ的に階層化する）を用いた。凝集型の解析手順は以下のとおりである。

- ・データ行列を作る。
- ・非類似度行列を計算する。
- ・クラスター化する。
- ・デンドログラム（樹形図）などで視覚化する。

上記の各手順・アルゴリズムには数多くの方法があるが、Lance と Williams によって提案され、現在では広く用いられている「組み合わせ的手法」をベースとした。

クラスター分析において、含泥率や全硫化物などの単位の異なるデータを使って分類をする場合、特定の変数にのみ大きな影響を受けてしまうため、データの標準化を行った。標準化の計算方法は最も一般的な平均 0、標準偏差 1 とする計算とした。

図 2.4 に、クラスター化法としてウォード法、非類似類似係数として平方ユークリッド距離を用いたデンドログラムを示した。デンドログラムから分かるように、どの結合レベルで切断するかによって、いくつのクラスターに分類されるのかが変わってくる。クラスター分析は探索的な手法であり最適なクラスター数を決定する数値的な基準はない。そこで「良い解釈が得られそうな水準」でクラスター数を決定した。



図 2.4 デンドログラム

クラスター数の判断の目安としては、①結合距離が長くなるところで切る、②各クラスターで各変数の平均値をとり、クラスター間で有意な差があるかを分散分析などで検討する、③判別分析でうまく予測できるクラスター数を採用する、④各種統計量基準(R^2 近似値、部分的 R^2 、疑似 F 値、疑似 t^2 値、CCC 基準)を勘案することなどが考えられた。ここでは、判断の目安の一つとしていくつかの統計量基準を用いた。これらは、クラスター集団を形成していく上での凝集経過によって変化する。この変化の過程の例を図 2.5 に示した。

一様性の推移(クラスター分析の凝集経過における統計指標の推移を表したもの)における統計指標の意味づけは、以下に示すとおりである。図 2.5 において、クラスター数が 4 個から 3 個に減少すると、これらの統計指標のうち RSQ(平方重相関)と SPRSQ(平方セミパーシャル相関係数)の変化傾向から、各グループの類似度が悪くなること分かる。

- ・ RMSSTD : 2 つのクラスターが結合して 1 つになった時の、平均平方根標準偏差を示す。
- ・ SPRSQ(平方セミパーシャル相関係数) : 結合した 2 つのクラスターがどの程度似通っていたか (分散比率の減少比) を示す指標。値は 0.0~1.0 の範囲内で値が小さい程良い。値が急速に小さくなる前のクラスター数に注意する。
- ・ RSQ(平方重相関) : クラスター間分散と全分散の比率。値は 0.0~1.0 の範囲内で値が大きい程良い。値が急速に大きくなる前のクラスター数に注意する。回帰分析の寄与率に相当する。
- ・ PSF(疑似 F 統計量) : 各ステップでの全クラスター間の分離度合いを示す統計量。値の系列変化を見たときに、頂点となる位置のクラスター数に注意する。
- ・ PS_t^2 (疑似 t^2 統計量) : 各ステップで結合した 2 つのクラスター間の分離度合いを示す統計量値の系列変化を見たときに、値が大きく上がる直前のクラスター数に注意する。

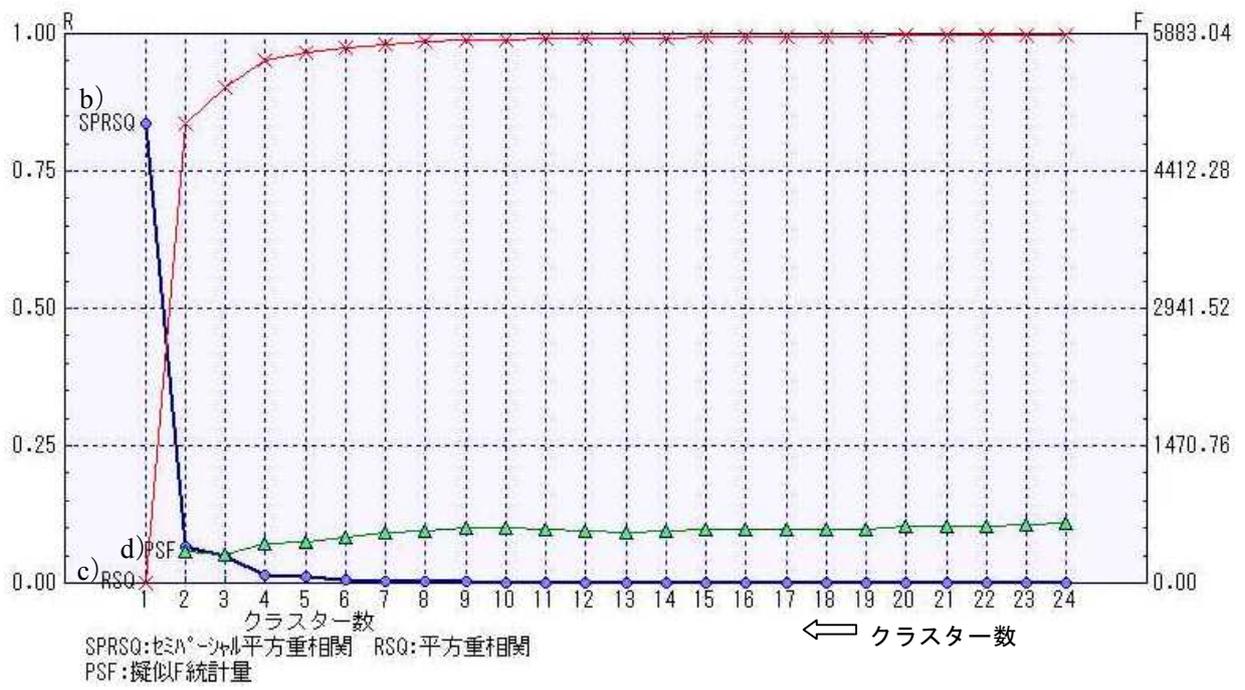


図 2.5 一様性の推移