

砂質性海浜における地下水の栄養塩供給機構

A mechanism of nutrients supply by groundwater
discharge in a sandy beach

加茂 崇

2014

要旨

陸域と海域の相互作用を受ける沿岸域の生物生産にとって、「森、川、海」の連環の重要性が指摘されている。沿岸域における多様な栄養塩供給機構の中で、まず挙げられるのが河川である。河川に加えて、近年では陸域からの栄養塩供給機構として、海底地下水湧水 (SGD : Submarine Groundwater Discharge) が注目されている。地下水は領域によっては、河川の数倍の栄養塩を海域に供給しているという報告もある。また、内湾域の環境悪化が解決されない要因の一つに、地下水からの栄養塩負荷が考慮されていないという指摘もある。現段階では、地下水による供給栄養塩の沿岸域生態系に与える影響評価は、同じ陸域からの淡水流入である河川による供給栄養塩の評価と比較して非常に少ない。

本研究は、沿岸域のうち、生態系および水産学的観点に立つ知見が少ない砂浜海岸を対象に、陸域からの栄養塩供給機構として注目されつつある地下水に着目して、沿岸域において陸域からの栄養塩供給機構として、地下水流入の意義について検討を行った。

本研究によって得られた主な結果を以下に示す。

(1)鹿児島県吹上浜海岸の砂浜背後地において地下水位の連続観測を行い、ダルシーの法則(Darcy's law)に基づき、砂浜滲出面から流入する砂浜地下水量を推定した。その結果、滲出面 1m^2 当たり $0.65\sim 0.86\text{m}^3/\text{day}$ の流出量が推定された。また、栄養塩供給量は、滲出面 1m^2 当たり $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN , $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々、 $4.4\sim 5.3\text{g}/\text{day}$, $0.64\sim 0.76\text{g}/\text{day}$, $0.031\sim 0.037\text{g}/\text{day}$ と推定された。

(2)広域的な視点から、吹上浜一帯に流入する淡水量を水収支式によって推定した。その結果、流域毎に違いはあるが、流域の平均値としてみると、流出量に対して河川流量が44%、地下水流量が55.3~56.0%であった。吹上浜の全流域から、約 $4.0\times 10^8\text{m}^3/\text{yr}$ ($12.6\text{ m}^3/\text{s}$)の地下水流入量が推定され、これは吹上浜流域の最大河川である万之瀬川の平均流量に匹敵する流量であることがわかった。地下水による DIN , $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給量は $376.1\text{t-N}/\text{yr}$, $18.3\text{t-P}/\text{yr}$ と推定され、原単位法を用いて算定した陸域からの流入負荷量に対して、 DIN が20.7%、そして、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が12.4%を占めていることが推定された。

(3)衛星画像の表層Chl.a濃度のデータを使用して、吹上浜沿岸域のChl.aの水平分布を調べると、流入河川の河口付近では春から秋にかけて $10\mu\text{g}/\text{l}$ 以上の値を示すこともあり、沖合よりも陸域に近い海域が高濃度になる傾向にあった。

(4)河川流入のない鹿児島県松ヶ浦海岸の潮間帯において、口径 12.5cm (断面積 : 122.7cm^2) の塩ビパイプ管内から、 $12.6\text{ m}^3/\text{day}$ の海岸湧出地下水量が確認された。栄養塩供給量として、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々 $45.7\text{ g-N}/\text{day}$, $0.5\text{ g-P}/\text{day}$ と推定された。

(5)潟湖である、福島県松川浦における淡水流入量を水収支式によって推定した。その結果、陸域からの流出量に対する地下水流出の割合は6.5%で、流量として $7.7\times 10^6\text{m}^3/\text{yr}$ ($0.24\text{m}^3/\text{s}$)の流出量が推定された。地下水流入量は、松川浦流域の小河川である梅川の推定流量 $0.19\text{m}^3/\text{s}$ と同レベルであった。

これらの結果から、沿岸域への栄養塩供給機構として、地下水流入が重要な役割を持つことがわかった。

Abstract

It is recognized that links among forests, rivers and seas is important, because biological and fisheries production in coastal zone is influenced by land-sea interaction. There are several nutrients supply systems in coastal zone. River runoff, probably the most major nutrients supply system, has been evaluated by many previous studies. In addition, Submarine Groundwater Discharge (SGD) is considered as an important source of dissolved material into coastal zone, recently. For example, Johannes (1980) shows that SGD supplies several times as much as nitrate volume as river runoff. However, the knowledge on nutrients supply mechanism in sandy beach ecosystem has not been fully understood, yet. Thus, it is necessary to quantitatively evaluate freshwater discharge and nutrients supply in a sandy beach. The current research clarifies a significance of groundwater discharge as nutrients supply mechanism in a sandy beach. The major conclusions are as follows;

(1) Continuous observation of groundwater level had been conducted to estimate the groundwater flow from the seepage face at Fukiagehama beach, Kagoshima Prefecture, Japan. As a result, groundwater flow from the seepage face was estimated as much as 0.65 to 0.86m³/m/day. Nutrients supply of SiO₂-Si, DIN and PO₄-P are estimated as 4.4 to 5.3g/m/day, 0.64 to 0.76g/m/day and 0.031 to 0.037g/m/day, respectively.

(2) A water budget method is applied to estimate the freshwater discharge rate and volume in the Fukiagehama basin. It is estimated that the river flow was 44% and the groundwater flow was 55.3 to 56.0% of the total amount of runoff. The estimated quantity of groundwater flow can be as much as $4.0 \times 10^8 \text{m}^3/\text{yr}$ (= 12.6 m³/s). This estimated volume is nearly the same volume of river flow in Manose River. Nutrients supply from the groundwater of DIN and PO₄-P are estimated as 376.1t-N/yr and 18.3t-P/yr, respectively. Even though a macroscopic estimation (the first order approach), the groundwater flow is significantly important as a nutrient supply mechanism in the Fukiagehama basin.

(3) A field observation on the concentration of chlorophyll-a in the coastal area in Fukiagehama had been conducted by using MODIS images. The estuaries sometimes exhibited high chlorophyll-a concentration (10μg/ℓ) between spring and autumn, therefore, this suggests that nutrients supply from the land is important to the primary production in the nearshore zone of Fukiagehama.

(4) Field measurements of flow rate and monitoring of water quality had been conducted to reveal characteristics of coastal groundwater at intertidal zone in Matsugaura Beach, Kagoshima Prefecture, Japan. The coastal groundwater flow rate is estimated as much as 12.6m³/day. Nutrients supply by the groundwater is estimated as much as 45.7 g-N/day and 0.5 g-P/day. The results show that the coastal groundwater is a key mechanism to supply nutrients into a coastal zone and maintain a local ecosystem.

(5) The volume of groundwater flow is estimated in the Matsukawaura lagoon, Fukushima Prefecture, Japan, by using the water budget method. The groundwater flow is estimated as much as $7.7 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$ (= 0.24m³/s).

目次

第1章 序論	1
1.1 背景—沿岸域における栄養塩供給機構として地下水に着目する意義—	1
1.2 背景—沿岸域生態系において砂浜海岸に着目する意義—	2
1.3 本論文の目的と構成	3
参考文献	5
第2章 吹上浜海岸における砂浜地下水の現地調査	8
2.1 まえがき	8
2.2 調査地点	8
2.2.1 ラネルの環境調査	8
2.2.2 地下水位の変動観測	10
2.3 観測結果	12
2.3.1 ラネル内の水温・塩分分布	12
2.3.2 地下水位観測結果	15
2.4 考察	16
2.4.1 滲出面からの地下水流出量	16
2.4.2 砂浜地下水からサーフゾーンへ供給される栄養塩類	16
2.5 まとめ	18
参考文献	19
第3章 吹上浜流域における淡水流入量の推定	20
3.1 まえがき	20
3.2 吹上浜流域の特性	20
3.2.1 吹上浜流域の流域面積	20
3.2.2 流域の表層地質	20
3.3 水収支式による淡水量の推定	23
3.4 水収支結果及び考察	26
3.5 まとめ	30
参考文献	30
第4章 吹上浜流域における流入負荷量の推定	32
4.1 まえがき	32
4.2 原単位法による流入負荷量の算定方法	32
4.2.1 排出負荷量の算定	33
4.3 排出負荷量の算定結果	38
4.3.1 鹿児島湾の排出負荷量との比較	40
4.4 流入負荷量の算定	42

4.4.1	実測値による T-N, T-P 負荷量の算定	42
4.4.2	流達率の算定	44
4.5	地下水からの DIN, PO ₄ -P 負荷量	44
4.6	降雨からの窒素負荷量	45
4.7	シラス漁による窒素・リンの水揚量	46
4.8	まとめ	47
	参考文献	48
第 5 章	吹上浜沿岸域の表層クロロフィル a の分布	51
5.1	まえがき	51
5.2	衛星画像による植物プランクトン現存量の把握	51
5.2.1	吹上浜沿岸域の Chl. a の水平分布	51
5.3	万之瀬川河口域における栄養塩供給量と Chl. a	56
5.4	ガウス分布による鉛直方向 Chl. a の推定	59
5.5	鉛直方向 Chl. a の推定結果	61
5.6	まとめ	61
	参考文献	65
第 6 章	鹿児島県松ヶ浦海岸潮間帯における湧出地下水の現地調査	66
6.1	まえがき	66
6.2	現地調査	67
6.3	水質観測結果	67
6.4	湧出地下水量	69
6.5	栄養塩供給量	71
6.6	考察	71
6.7	まとめ	73
	参考文献	73
第 7 章	福島県松川浦における淡水流入量の推定	75
7.1	まえがき	75
7.2	松川浦流域の特性	75
7.2.1	松川浦の流域面積	75
7.2.2	松川浦流域の気象概況	76
7.2.3	松川浦流域の表層地質及び土地利用状況	77
7.3	水収支式による淡水量の推定	79
7.4	淡水流入量の推定結果及び考察	79
7.5	松川浦における Chl. a 連続観測	80
7.6	Chl. a 連続観測結果	82
7.7	まとめ	82

参考文献	83
第 8 章 総合考察	85
第 9 章 結論	88
謝辞	91
付録 A	92
付録 B	101

第 1 章 序論

1.1 背景—沿岸域における栄養塩供給機構として地下水に着目する意義—

我が国は四方を海に囲まれた島嶼国であり，それゆえ海洋生物資源に恵まれた環境にあるといえる．例えば，Fujikura *et al.* (2010)¹⁾ は，日本海域で確認されている海洋生物は，世界中で確認されている海洋生物の種数 23 万種に対して，14.6%を占める約 3 万種（未記載の種を含めると約 15 万種）の海洋生物が生息していると報告している．このように種数から見ても日本海域は海洋生物の多様性に富んでいることがわかる．

海洋の中でも，とりわけ基礎生産の高い場所が沿岸域である (Nixson *et al.*, 1986)²⁾．植物プランクトンによる基礎生産は，食物連鎖を介して高次消費者に利用されるため，沿岸域は生物生産，ひいては水産資源の供給場としての観点からも重要な役割を担っている．もちろん，必ずしも基礎生産量の増加が，漁業生産量の増加につながるとは限らないが，漁業生産量は基本的には基礎生産量の多寡に規定されているという指摘もある (長田・小川, 1997)³⁾．

沿岸域で植物プランクトンの成長に必要な栄養塩類は，主として河川や地下水等の陸域から供給されるもの，そして湧昇流等によって外洋から供給されるものが考えられる．加えて，降雨によって直接海域に栄養塩類が供給されることもある (多田, 1998)⁴⁾．栄養塩の供給機構は多様であるが，基本的には陸域からの栄養塩供給が沿岸域の基礎生産を支えている一因と考えられる．特に，流入河川からの供給栄養塩が沿岸域の基礎生産に及ぼす影響については，既往の多くの研究 (例えば，長田, 1994, 今井ら, 2000, 和ら, 2008)⁵⁻⁷⁾によって評価されている．さらに，地球に現存する淡水量は氷河 (1.79%)，地下水 (浅層地下水が 0.33%，深層地下水が 0.41%)，河川水が 0.0001% (樞根, 1973)⁸⁾と河川水より地下水 (浅層地下水) の量が多いので，陸域から沿岸域への淡水流入機構として，河川流入に加えて地下水流入も考慮すべきである．

Johannes (1980)⁹⁾は，領域によっては地下水が河川の数倍の栄養塩を海域に供給していると報告している．このように海域に供給される地下水は海底地下水湧水 (SGD : Submarine Groundwater Discharge) とよばれ，近年，物質輸送や生態系への影響の観点から注目されている (谷口, 2001)¹⁰⁾．例えば，我が国の海域では富山湾の伏流水が知られており，中口ら (2005)¹¹⁾は，海底湧水が河川の約 1.4 倍の硝酸態窒素を供給していると報告している．

安元ら (2011)¹²⁾は，有明海における生態環境の悪化が解決されない要因の一つに，地下水による栄養塩負荷が考慮されていないことを挙げている．この指摘にもあるよ

うに、地下水による供給栄養塩が沿岸域生態系に与える影響評価は、同じ陸域からの淡水流入である河川による供給栄養塩の評価と比較して非常に少なかった。しかし、塩川ら(2013)¹³⁾は、河川の影響が少ない有明海西岸域を対象に、高濃度栄養塩の地下水が緑藻類の繁茂を促している可能性を示すなど、徐々に沿岸域生態系における地下水の供給栄養塩が評価されるようになってきている。科学的根拠はないものの、地下水の湧くところに魚が集まるといことは昔からよく言われており、沿岸域への地下水流入は生態系への影響だけでなく、漁業生物等、水産業の視点からも評価をしていく必要があるのではないだろうか。近年、沿岸域の生物生産にとって、「森、川、海」の連環の重要性が提言されており¹⁴⁾、陸域と海域の相互作用の重要性が指摘されているのは周知のことである。今後、陸域からの物質輸送機構として「川」と同様に、「地下水」を取り上げ、時空間上で栄養塩の供給量を定量的に評価することが重要な研究課題の一つと考えられる。

1.2 背景—沿岸域生態系において砂浜海岸に着目する意義—

沿岸域という言葉に明確な定義はないが、日本沿岸域学会(2000)¹⁵⁾によると、「沿岸域は、水深の浅い海とそれに接続する陸を含んだ、海岸線に沿って延びる細長い帯状の空間である。そこは陸と海という性質の異なる環境や生態系を含み、陸は海の、また海も陸からの影響を受ける環境特性を持っている」と定義している。

海岸線総延長約 35,000km の我が国の沿岸域は、砂浜海岸や岩礁海岸、藻場、干潟、サンゴ礁、マングローブ帯、汽水湖および流水性海域などを含む多様な沿岸域で構成されている。そのうち海岸線総延長の 14%におよぶ約 4,900km が砂浜である¹⁶⁾。グローバルスケールで見ると、砂浜は世界の氷に覆われていない海岸線の約 3 分の 2 を占めている¹⁷⁾。

砂浜海岸（特に、外海に面した開放的な砂浜海岸）は、コアジサシの営巣場やウミガメの産卵場としてクローズアップされることはあっても、藻場や干潟、サンゴ礁など他の沿岸域と比較すると、生物生産の場所としての認識は低いと思われる。須田・早川(2002)¹⁸⁾は「砂浜海岸の生態学」（砂浜海岸における生態学に関する数少ない専門書の一つである「Ecology of Sandy Shores」の訳書）のあとがきの中で、「生物研究者の間にさえ、砂浜海岸は単調で生物の営みに乏しいという先入観がある」と述べている。さらに、目黒ら(2005)¹⁹⁾は、海岸事業が生態系に与える影響を評価するうえで、砂浜の生物に関する情報が断片的で、実証データが不足していると指摘している。

これまでの我が国における砂浜生態系に関する研究は、主として魚類相に関する研究（例えば、木下, 1984, Senta and Kinoshita, 1985, 須田・五明, 1995, 中根ら, 2005)²⁰⁻²³⁾や、魚類の餌生物として重要な位置を占める、アミ類の研究（例えば、広田ら, 1989, 高橋, 1993, Nonomura *et al.*, 2007)²⁴⁻²⁶⁾が行われてきた。これらの研究により、砂浜海岸のサーフゾーンは水産重要種をはじめとする多様な魚類仔稚魚の生息場として利用されているだけでなく、餌生物であるアミ類も多く存在することが明らかにされている。砂浜海岸での生物多様性や水産学的重要性が認識されつつあるので、国土交通省宮崎河川国道事務所により砂質性の宮崎海岸（宮崎港北側から

一ツ瀬川河口域まで)を対象に、詳細な生態系・水質調査などが実施されている²⁷⁻³⁰⁾。今後、砂浜海岸は水産資源の補給場としての観点から、より詳細な実証的調査データに基づいて定量的に評価される必要がある。

1999年の海岸法改正によって、海岸の**防護**に重点を置いてきた(旧)海岸法に、「海岸**環境**の整備と保全」及び「公衆の海岸の適正な**利用**」が追加された。そのため、(新)海岸法では海岸の**防護・環境・利用**のバランスのとれた海岸事業が求められている。

海岸環境の保全を行う上で、生態系の観点から見た保全が必要であるが、すでに述べたように砂浜生態系に関する知見が不足している。現在の砂浜海岸の深刻な問題として、海岸侵食が挙げられるが、すでに砂浜総延長の43.3%が侵食傾向にある³¹⁾。さらに、河川や海食崖からの土砂供給(沿岸漂砂)を考慮していないために過大評価と言えるが、三村ら(1993)³²⁾は、1mの海面上昇によって90%の砂浜が消失すると試算しているように、地球温暖化に伴う海面上昇の影響も懸念される。砂浜の消失は、生物の生息場の消失、すなわち水産資源の損失に他ならない。生態系を考慮した砂浜の保全のためにも、多面的な視点から砂浜生態系の基礎的知見を蓄積していくことが喫緊の課題である。

1.3 本論文の目的と構成

前節で述べた背景を踏まえて、本研究では沿岸域のうち、生態系および水産学的観点に立つ知見が少ない開放的な砂浜海岸を対象に、陸域からの栄養塩供給機構として注目されつつある地下水に着目して、沿岸域における陸域からの栄養塩供給機構として、地下水流入の意義について考察することを目的とした。本目的を達成するために、本論文は本章を含めて、9章から構成されている。

第2章では、典型的な開放性の砂浜海岸である、鹿児島県吹上浜の京田海岸で実施した現地調査の結果に基づき、砂浜滲出面から供給される砂浜地下水量及び栄養塩供給量を推定した。

第3章では、広域的視点から、吹上浜流域における淡水流入量として、河川流量および地下水量を水収支式によってマクロ的(巨視的)に推定し、吹上浜流域における栄養塩供給機構として、河川流入に加え地下水流入の重要性を示した。

第4章では、吹上浜流域における流入負荷量(N,P)を原単位法によって推定した。

第5章では、衛星画像データによって、吹上浜沿岸域の表層クロロフィルa濃度の水平分布をモニタリングした。

第6章では、河川流入の存在しない小規模なポケットビーチである、鹿児島県松ヶ浦海岸における湧出地下水の地下水量および栄養塩供給量を、現地調査の観測結果から算定した。

第7章では、第3章で用いた水収支式によって、潟湖である福島県松川浦に流入する淡水量の推定を試みた。

第8章では、7章までの結果を踏まえ、砂浜海岸における栄養塩供給機構として地下水の重要性について総合的に考察した。

第9章では、本研究で得られた主要な結論及び今後の課題と展望について述べた。



写真-1.1 鹿児島県吹上浜海岸から滲出している砂浜地下水
満潮時に滞留した海水と背後地の地下水が混合しながら滲出している



写真-1.2 鹿児島県松ヶ浦海岸から滲出する地下水および湧出地下水
松ヶ浦海岸潮間帯からは海底からの湧出地下水が目視で確認できる（写真右）

参考文献

- 1) Fujikura, K., Lindsay, D., Kitazono, H., Nishida, S., Shirahama, Y. : Marine Biodiversity in Japanese Water, *PLoS ONE*, **5(8)**, e11836, 2010. doi:10.1371/journal.pone.0011836.
- 2) Nixon, S.W., C.A.Oviatt, J. Frithsen, AND B.Sullivan. : Nutrients and the productivity of estuarine and coastal marine ecosystems, *J.Limnol. Soc. S. Afr.*, **12**, pp.43-71, 1986.
- 3) 長田 宏, 小川嘉彦 : 日本周辺海域における漁業生産量の指標としての透明度との関係, *日水研報*, **47**, pp.23-32, 1997.
- 4) 多田邦尚 : 降水中の窒素・リン濃度と内湾への栄養塩負荷, *海と空*, **73(4)**, pp.125-130, 1998.
- 5) 長田 宏 : 新潟県沿岸域における河川水起源の栄養塩分布の季節変動, *水産海洋研究*, **58(1)**, pp.1-9, 1994.
- 6) 今井 直, 谷村 篤, 太原英生, 河村章人 : 河川水の流入が的矢湾の植物プランクトン現存量に及ぼす影響, *水産海洋研究*, **64(4)**, pp.215-223, 2000.
- 7) 和 吾郎, 木下 泉, 深見公雄 : 四万十川から供給される栄養塩が土佐湾西部沿岸海域の栄養塩分布と基礎生産の季節変化に及ぼす影響, *海の研究*, **17(5)**, pp.357-369, 2008.
- 8) 榎根 勇 : 水の循環, 共立出版, 230p, 1973.
- 9) Johannes RE : The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, *Mar. Eco. Prog. Ser.*, **3**, 365-373, 1980.
- 10) 谷口真人 : 「地下水と地表水・海水との相互作用」 4.海水と地下水の相互作用, *地下水学会誌*, **43(3)**, pp.189-199, 2001.
- 11) 中口 譲, 山口善敬, 山田浩章, 張 勁, 鈴木麻衣, 小山裕樹, 林 清志 : 富山湾海底湧出の化学成分の特徴と起源—栄養塩と溶存有機物—, *地球化学*, **39**, pp.119-130, 2005.
- 12) 安元 純, 広城吉成, 末益大嗣, 高岡秀朋, 神野健二 : 有明海沿岸火山岩地域における海底湧水の湧出機構と栄養塩の輸送特性, *土木学会論文集 B1(水工学)*, **67(4)**, pp.584-594, 2011.
- 13) 塩川麻保, 山口 聖, 梅澤 有 : 有明海西岸域への地下水由来の栄養塩供給量の評価, *沿岸海洋研究*, **50(2)**, pp.157-167, 2013.

- 14) 山下 洋, 田中 克 編: 森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産, 恒星社厚生閣, 147p., 2008.
- 15) 日本沿岸域学会 2000 年アピール委員会: 日本沿岸域学会 2000 年アピール—沿岸域の持続的な利用と環境保全のための提言一, 17p, 2000.
- 16) 国土交通省河川局 編: 海岸統計 平成 24 年度版.
- 17) MCLACHLAN, A. and BROWN, A.C. : The ecology of sandy shores, 2nd ed. Academic Press, Burlington, 373p, 2006.
- 18) 須田有輔, 早川康博: 砂浜海岸の生態学, 東海大学出版会, 427p., 2002. (A. C. Brown and A. Mclachlankoma, 1990 の訳書)
- 19) 目黒嗣樹, 加藤史訓, 福濱方哉: 生態系の概念にもとづくインパクト・レスポンスフローを活用した海岸環境調査の提案, 海洋開発論文集, **21**, pp.235-240, 2005.
- 20) 木下 泉: 土佐湾の砕波帯における稚仔魚の出現, 海洋と生物, **35**, pp.409-415, 1984.
- 21) Senta, T. and Kinoshita, I. : Larval and Juvenile Fishes Occurring in Surf Zones of Western Japan, *Amer.Fish.Soc.*, **114**, pp.609-618, 1985.
- 22) 須田有輔, 五明美智男: 砂浜海岸砕波帯における魚類仔稚魚分布と物理環境, 水産工学研究収録, **1**, pp.39-52, 1995.
- 23) 中根幸則, 須田有輔, 大富 潤, 早川康博, 村井武四: 中間型砂浜である鹿児島県吹上浜の近岸帯における魚類相, 水産大学校研究報告, **53(2)**, pp.57-70, 2005.
- 24) 広田祐一, 富永 修, 上原子次男, 児玉公成, 貞方 勉, 田中 克, 古田晋平, 小嶋喜久雄, 輿石裕一: 日本浅海域におけるアミ類の地理的分布, 日本海ブロック試験研究集録, **15**, pp.43-47, 1989.
- 25) 高橋一生: 砕波帯におけるアミ類の幼体と親の分布, 月刊海洋, **25(5)**, pp.251-256, 1993.
- 26) Nonomura, T., Hayakawa, Y., Suda, Y., Ohtomi, J. : Habitat zonation of the sand-burrowing mysids (*Archaeomysis japonica* and *liella ohshimai*), and diel and tidal distribution of dominant *Archaeomysis vulgaris*, in an intermediate sandy beach at Fukiagehama, Kagoshima Prefecture, southern Japan. *Plankton Benthos Res.*, **2**, pp.38-48, 2007.

- 27) 国土交通省宮崎河川国道事務所, パシフィックコンサルタンツ株式会社: 宮崎海岸環境調査業務報告書, 平成 20 年.
- 28) 国土交通省宮崎河川国道事務所, パシフィックコンサルタンツ株式会社: 宮崎海岸魚介類等調査業務報告書, 平成 20 年.
- 29) 国土交通省宮崎河川国道事務所, 西日本技術開発株式会社: 宮崎海岸生物環境追跡調査業務報告書, 平成 21 年.
- 30) 国土交通省宮崎河川国道事務所, パシフィックコンサルタンツ株式会社: 宮崎海岸環境モニタリング計画検討業務報告書, 平成 21 年.
- 31) 榎木 亨, 出口一郎: 新編海岸工学, 共立出版株式会社, 225p.,1996.
- 32) 三村信男, 幾世橋慎, 井上馨子: 砂浜に対する海面上昇の影響評, 海岸工学論文集, **40**, pp.1046-1050, 1993.

第2章 吹上浜海岸における砂浜地下水の現地調査

2.1 まえがき

早川ら(2009)¹⁾によって吹上浜海岸における砂浜地下水に関する現地調査が行われ、砂浜背後地の高濃度栄養塩が確認された。そして、砂浜地下水流入が海域のサーフゾーンの基礎生産に寄与していることも示唆された。しかし、早川ら(2009)¹⁾の研究では栄養塩濃度の分布が明らかにされただけで、砂浜背後地からサーフゾーンに供給される地下水量及びそれに伴う栄養塩量は定量化されていない。そこで、本研究では、加茂(2011)²⁾で行った水質調査を継続し、地下水位の変動についても調査を実施した。そして、調査結果に基づき、砂浜背後地からサーフゾーンへ供給される地下水流量の検討を行うことにした。

2.2 調査地点

現地調査は、鹿児島県吹上浜海岸における伊作川と万之瀬川の間位置する京田海岸で行った(図-2.1)。一般に、砂浜海岸のタイプは反射型砂浜、逸散型砂浜、中間型砂浜の3タイプに大別され³⁾、さらに、中間型砂浜は沿岸州一トラフ型砂浜、波状沿岸州型砂浜、横列沿岸州型砂浜、干潮台/リッジラネル型砂浜の4タイプに分類される。そして、本研究の対象とした京田海岸は中間型砂浜のうち、干潮台/リッジラネル型砂浜にあたる。

2.2.1 ラネルの環境調査

本研究の対象とする中間型砂浜では、下げ潮時から上げ潮時にかけてラネル(Runnel)と呼ばれる浅い水域が形成される(写真-2.1)。ラネルの陸側には滲出面(Seepage face)が形成され、背後地の地下水と満潮時に滞留した海水の混合水である砂浜地下水が流入している。このラネルの物理的環境の特徴をつかむために、GPSロガー(Transystem社, 747Pro)を持ってラネルの淵を歩き、取得した軌跡からラネルの形状をGIS上で可視化し、ラネルの形状データを取得すると同時に、多項目水質計(東亜ディーケーケー社, WQC-24型)を携帯して踏査し、ラネル内の水質項目として、水温、塩分を測定した。

調査日時は、2013年5月23日のラネルが出現する下げ潮時から上げ潮時にかけて行った。

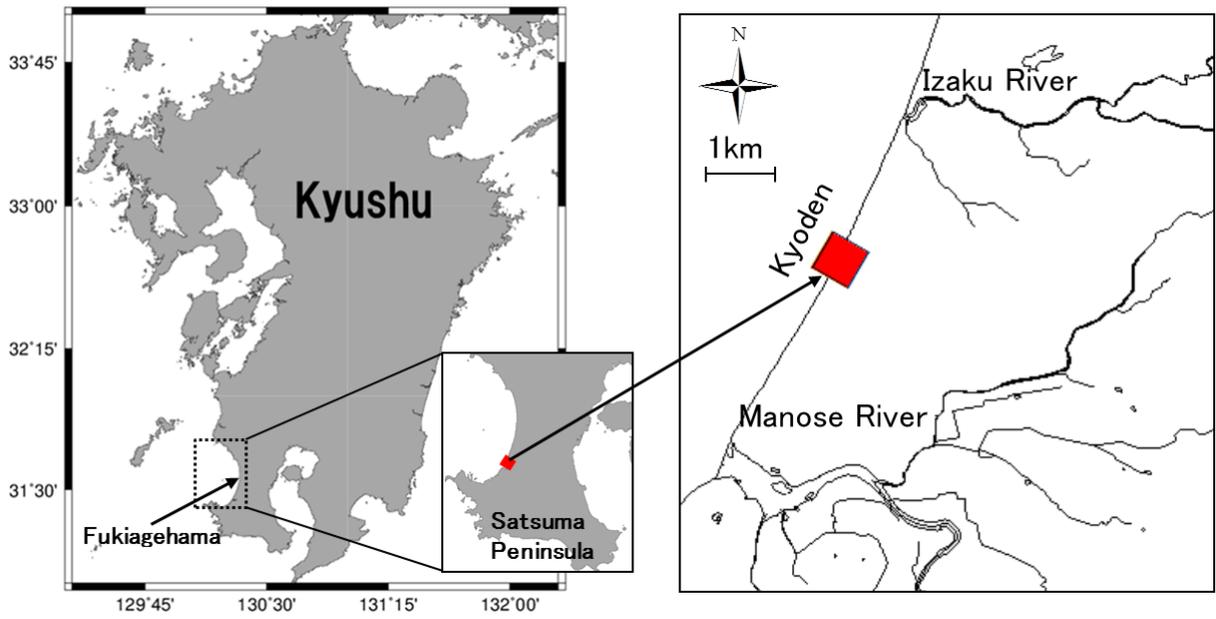


図-2.1 調査地点



写真-2.1 下げ潮時から上げ潮時に出現するラネル

2.2.2 地下水位の変動観測

地下水位の観測は2013年5月14日から27日まで行った。地下水位の観測用井戸は、最大満潮時汀線より陸側の砂丘基部に設置した(図-2.2)。観測用井戸は地下水面が露出するところ(砂浜地下約2m)まで掘削し(写真-2.2)、そこから塩ビパイプを打ち込んで設置した(写真-2.3)。その塩ビパイプ内にメモリー波高計(JFEアドバンテック社、Compact-WH、写真-2.4参照)を固定して15分間隔で地下水位の観測を行った。塩ビパイプには約1cmの通水孔をあけ、管内への砂の流入を防ぐために網目の細かいネットを巻いた(図-2.3)。

さらに、地下水観測用井戸の掘削時に底質のサンプリングも行い、砂の粒度組成及び透水係数、間隙率について求めた。

粒度組成(中央粒径値)はふるい分けによって算出し、透水係数及び間隙率については、中央粒径値から推定することができる経験式によって算出した。

透水係数(k)はマリオら(2008)⁴⁾が透水係数と中央粒径値の相関から導き出した次式によって算出した。

$$k_{20}=0.0303\ln(D_{50})+0.054 \quad (2.1)$$

間隙率(n)は次式によって算定した(坂本, 1994)⁵⁾。

$$n=(Md\phi+9.8)/27 \quad (2.2)$$

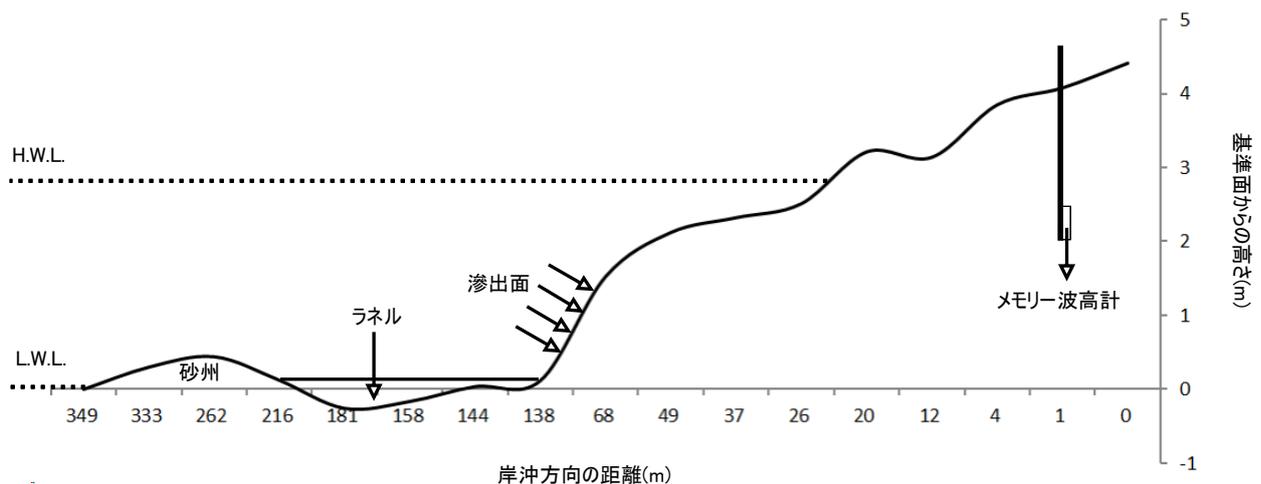


図-2.2 砂浜断面図 (2013年5月24日測量)



写真-2.2 砂浜地下水面



写真-2.3 観測管設置状況



写真-2.4 メモリー波高計

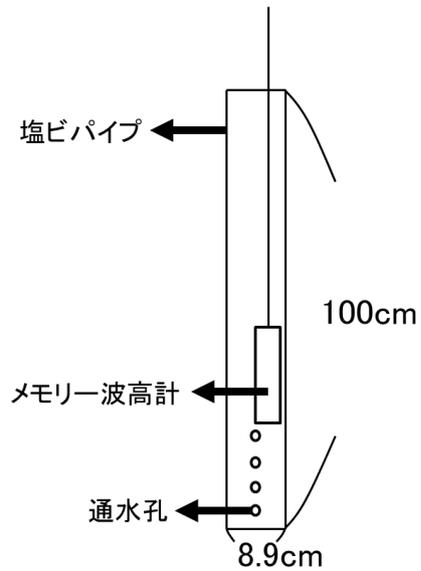


図-2.3 観測管

2.3 観測結果

2.3.1 ラネル内の水温・塩分分布

図-2.4 に GPS ロガーで取得した軌跡を示す。このデータを元に、ArcGIS10.0(ESRI 社)を使用してラネルの形状を可視化した(図-2.5)。水質観測ポイントは図-2.6 に示す通りである。

ラネル内の水温は 23.4℃から 27.3℃の範囲で、海水の表面水温と滲出面からの砂浜地下水温は最大で 4℃近くの差が見られた(図-2.7)。塩分は 20.5‰から 31.3‰の範囲で、滲出面付近においておよそ 20‰と淡水の影響を受けていることがわかる(図-2.8)。



図-2.4 GPS ロガーの軌跡

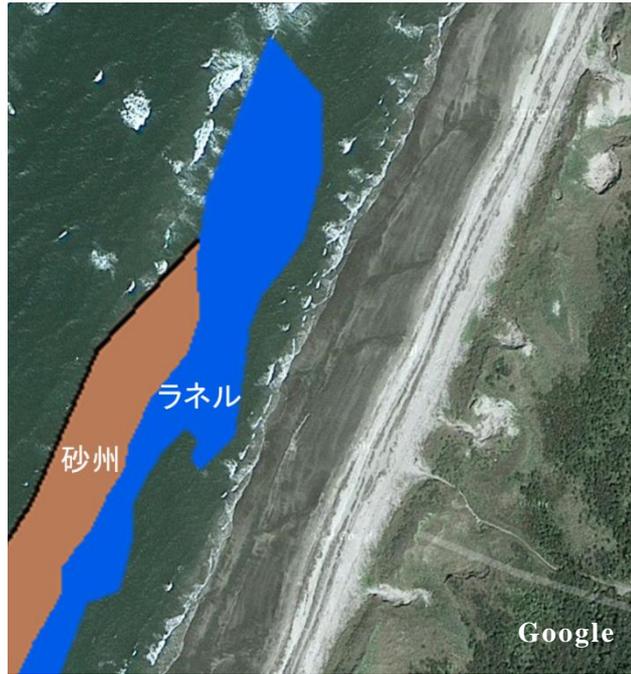


図-2.5 ラネルの形状（2013年5月23日，潮汐：中潮の干潮時）

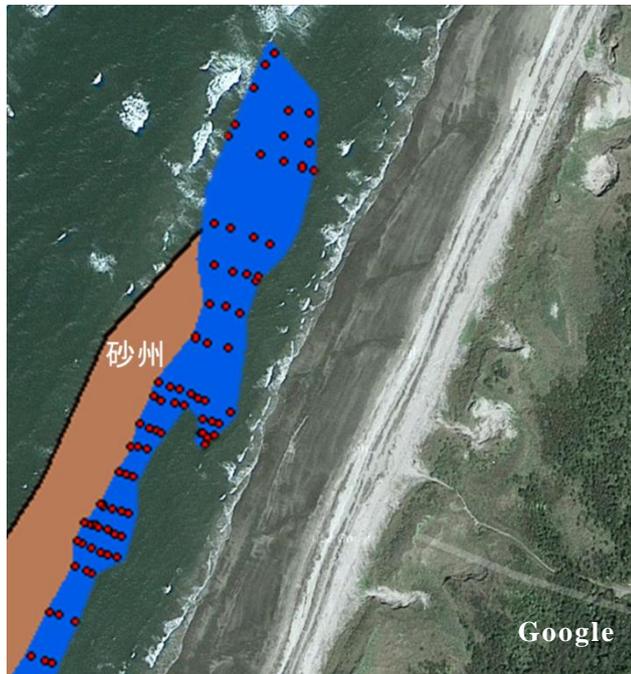


図-2.6 ラネルの水質観測ポイント

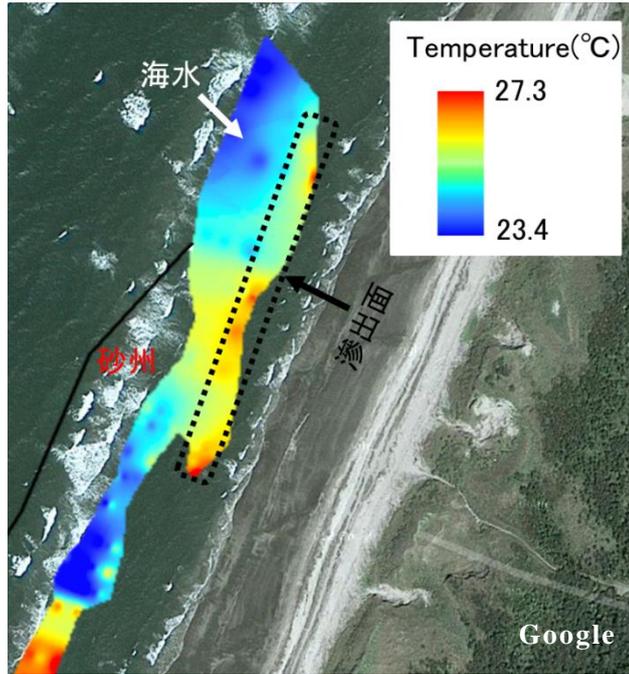


図-2.7 ラネルの水温分布

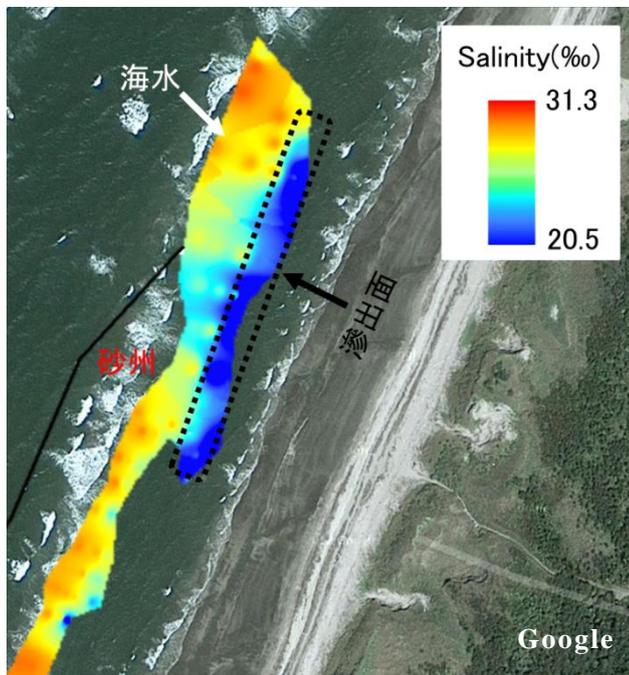


図-2.8 ラネルの塩分分布

2.3.2 地下水位観測結果

地下水位の観測結果を図-2.9に示す。図中には、調査地点近傍の串木野の天文潮位（推算値）及び、調査期間中の降水量（加世田のアメダス降水量）についても示した。5月19日に12.5mmの降水があったが、この日以外に降水は認められなかったため、調査期間中の地下水位の変動は主として潮汐変動に応答していると考えられる。地下水位は237.7~292.7cmの間で変動しており、振幅の最小は小潮時の1.5cm、最大は大潮時の17cmであった。地下水の位相は潮位の位相より遅れる傾向にあり、上げ潮時に約50分、下げ潮時に約140分の遅れが見られた。地下水位と潮位の水位差は大潮時の満潮時を除いてプラスになり（図-2.10）、この時を除いて基本的に岸沖方向への定常的な地下水流入が存在すると考えられる。

観測井戸内の砂質の特徴として、中央粒径値は0.24mm（ $\phi=2.1$ ）と細砂であり、透水係数は0.01cm/s、間隙率0.44であった（表-2.1）。

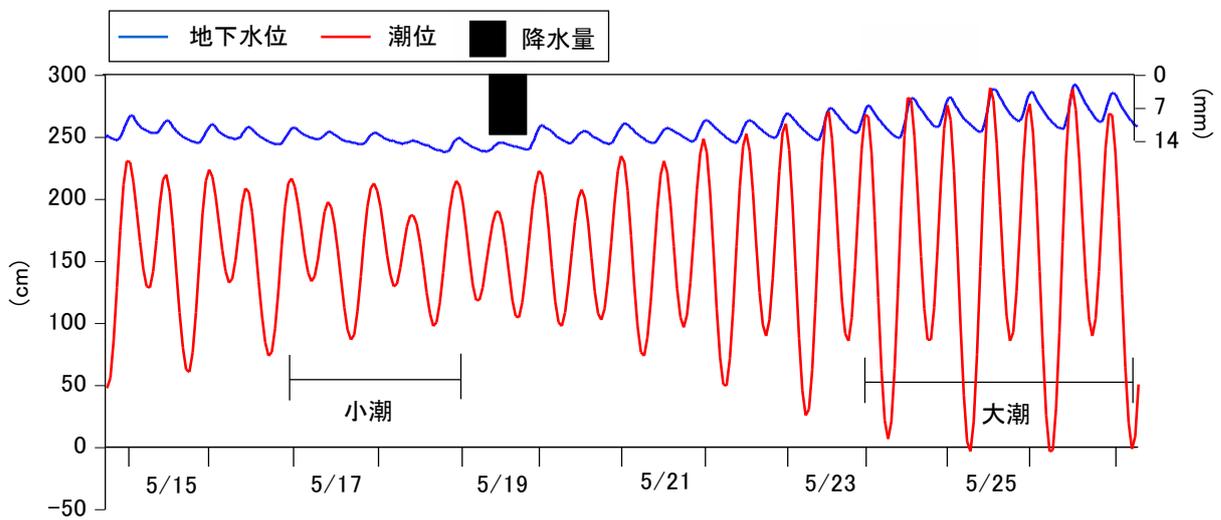


図-2.9 地下水位および潮位変動

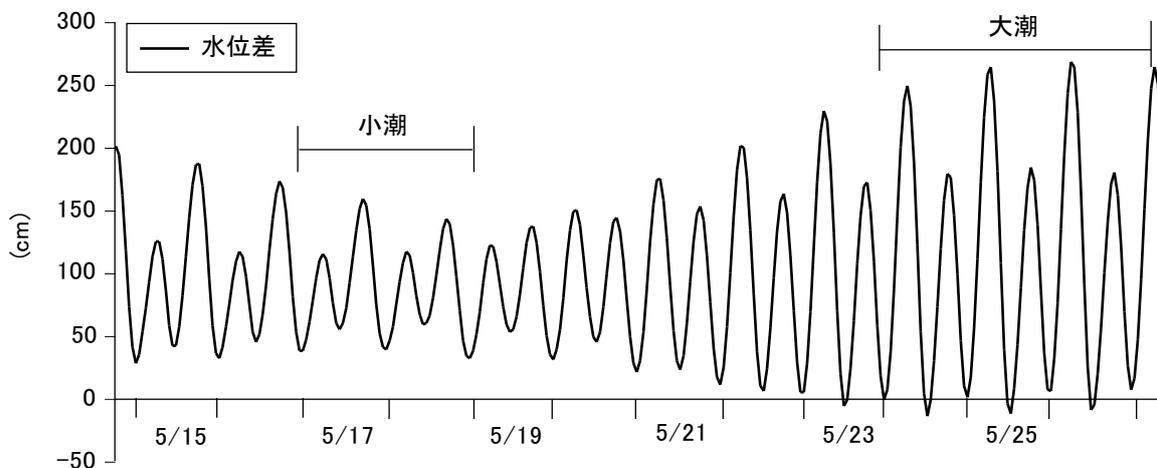


図-2.10 水位差の変動

表-2.1 観測井戸内の砂質特性

中央粒径値 (mm)	透水係数 (cm/s)	間隙率
0.24($\phi = 2.1$)	0.01	0.44

2.4 考察

2.4.1 滲出面からの地下水流出量

浸透流の流速は動水勾配に比例するというダルシーの法則に従い、次式によって砂浜地下水の流速を算出した。

$$v=ki \quad (2.3)$$

$$i=\Delta h/l$$

ここで、 k は透水係数、 i は動水勾配である。

観測井戸から滲出面までの動水勾配は概ね0.015であり、透水係数に動水勾配を乗じてダルシー流速を算出すると、 1.5×10^{-4} cm/sとなる。実際には地下水は間隙中を流れるため、ダルシー流速を間隙率0.44で除したダルシー実流速を算出すると、 3.5×10^{-4} cm/sとなる。

流速に断面積を乗じれば流量を算定できるので、ここで地下水の帯水層を5mと仮定して、滲出面からの砂浜地下水量の推定を試みた。その結果、1日に滲出面1m当たり、小潮時では 0.68m^3 (5月17日)、 0.65m^3 (5月18日)、大潮時では 0.76m^3 (5月24日)、 0.78m^3 (5月25日)、 0.86m^3 (5月26日)の流出量が推定された。

2.4.2 砂浜地下水からサーフゾーンへ供給される栄養塩類

加茂(2011)²⁾によって観測された、京田海岸における砂丘基部の砂浜地下水の栄養塩濃度(表-2.2)から、サーフゾーンへの栄養塩供給量の推定を行った。砂浜地下水の栄養塩濃度の特徴として、反応性ケイ酸態ケイ素($\text{SiO}_2\text{-Si}$)及び硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)が高濃度を示す傾向にある。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニウム態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)の合計濃度を溶存無機窒素(DIN)として溶存態栄養塩のモル比を見ると、DIN:リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$): $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は45:1:156となる。Del Amo *et al.*,(1997)⁶⁾、今井ら(2000)⁷⁾、和ら(2008)⁸⁾を参考にN:P比とSi:N比の散布図を用いて、Redfield比をN/P/Si=16:1:15として、植物プランクトンの成長の制限因子となりうる栄養塩を検討した(図-2.11)。図-2.11には、加茂(2011)²⁾によって得られた砂浜地下水の全栄養塩濃度の値をプロットした。Redfield比から考察すると、砂浜地下水からの栄養塩供給は $\text{SiO}_2\text{-Si}$ とDINは豊富に供給されており、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が制限因子となっていることが考えられる。

栄養塩濃度に地下水流出量を乗じることで、砂浜地下水が滲出面を通じてサーフゾ

ーンへ供給される栄養塩量を推定することができる。そこで、表-2.2の栄養塩濃度の平均値に前節で算出した地下水流出量を乗じて栄養塩供給量を推定した。その結果、小潮時には滲出面1m当たり、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々、4.4g、0.64g、0.031g、大潮時には $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々、5.3g、0.76g、0.037gと推定された。砂浜（汀線方向長さ）1km当たりでは、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々4.4～5.3kg/day、0.64～0.76kg/day、0.031～0.037kg/dayが供給されていることになる。

表-2.2 砂浜地下水の栄養塩濃度
(2008年～2010年のmean±standard deviation)

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ ($\mu\text{mol}/\ell$)	$\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{mol}/\ell$)	$\text{NO}_3\text{-N}$ ($\mu\text{mol}/\ell$)	$\text{NO}_2\text{-N}$ ($\mu\text{mol}/\ell$)	$\text{NH}_4\text{-N}$ ($\mu\text{mol}/\ell$)
n=36	n=36	n=31	n=33	n=36
234.5±90.8	1.5±0.6	66.3±20.8	0.1±0.1	1.1±0.8

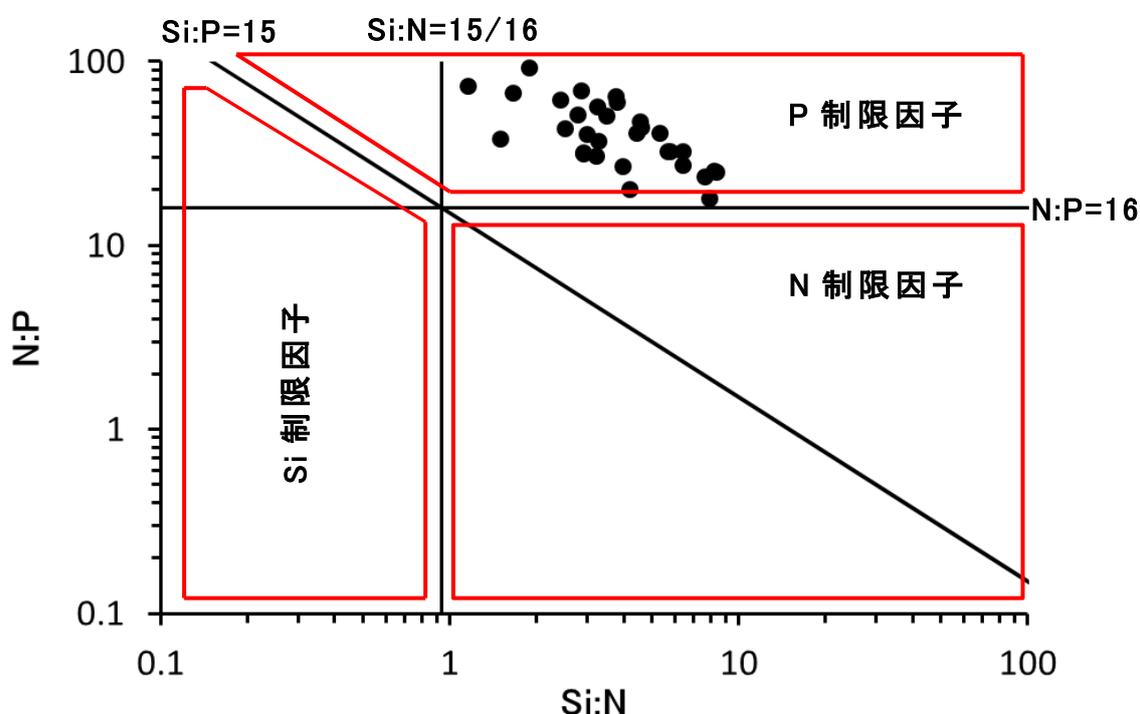


図-2.11 砂浜地下水の栄養塩の構成比
加茂 (2011) ²⁾で観測された砂浜地下水の栄養塩濃度を元に作成

吹上浜におけるサーフゾーン海水のクロロフィル a 濃度は、5 月において約 $6.0 \mu\text{g/l}$ (加茂, 2011)²⁾ と植物プランクトンによる一次生産力は決して低くないと推定される。開放的な砂浜域に関しては、鹿島灘においても、汀線付近のクロロフィル a が年間平均 $9.5 \mu\text{g/l}$ と高濃度であることが観測されている (足立ら, 1994)⁹⁾。さらに、砂浜地下水が直接流入する、滲出面一帯の表面には底生微細藻類が確認できる (写真-2.5)。干潟における底生微細藻類は、干潟生態系の主要な一次生産者であり、 $25\sim 30^\circ\text{C}$ を超える高水温期には極めて高い増殖速度を有していることが報告されている (一見ら, 2008)¹⁰⁾。そのため、砂浜生態系においても、底生微細藻類による一次生産について評価していく必要がある。早川ら(2009)¹⁾はサーフゾーン海域での一次生産を支える栄養塩供給源は、河川に加え、砂浜地下水も重要であるとしているが、植物プランクトンに加え、底生微細藻類の一次生産においても砂浜地下水からの栄養塩供給が寄与している可能性がある。砂浜 1km 当たりの $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給量は各々、 $1,606.0\sim 1,934.5\text{kg/yr}$, $233.6\sim 277.4\text{kg/yr}$, $11.3\sim 13.5\text{kg/yr}$ と推定される。砂浜 1km 当たりから供給される窒素を、植物プランクトンがすべて取り込んだと仮定して、Redfield 比から C/N 比 (重量比) を 5.7 として炭素量に換算すると、 $1,331.5\sim 1581.2\text{kg-C/yr}$ の炭素固定量となる。

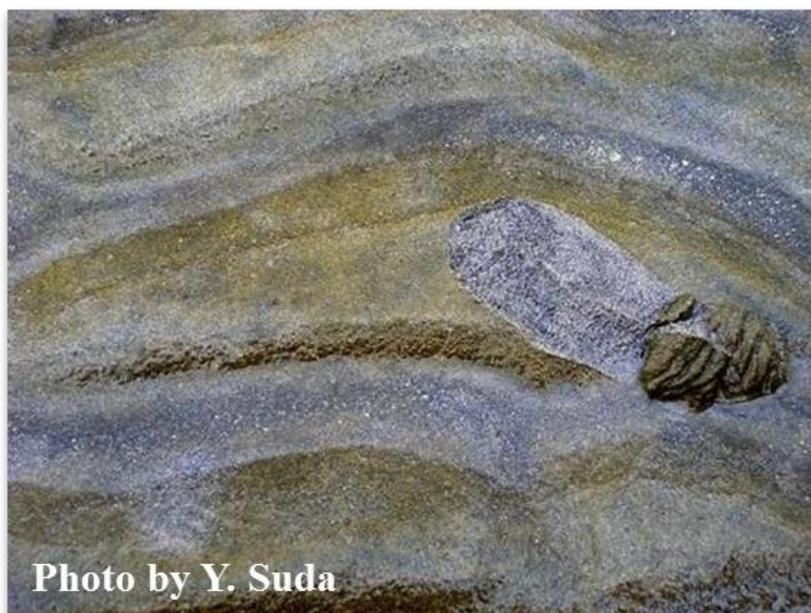


写真-2.5 滲出面周辺の付着藻類

2.5 まとめ

鹿児島県吹上浜の京田海岸において、地下水位変動の観測を実施し、砂浜の滲出面からサーフゾーンへ供給される砂浜地下水量及び栄養塩供給量の推定を行った。滲出面からの流出量は、砂浜 1m 当たり $0.65\sim 0.86\text{m}^3/\text{day}$ 、栄養塩供給量は、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々、 $4.4\sim 5.3\text{g/day}$, $0.64\sim 0.76\text{g/day}$, $0.031\sim 0.037\text{g/day}$ と推定された。年間の砂浜 1km 当たりでは、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給量は各々、 $1,606.0\sim 1,934.5\text{kg/yr}$, $233.6\sim 277.4\text{kg/yr}$, $11.3\sim 13.5\text{kg/yr}$ と推定された。

参考文献

- 1) 早川康博, 松本和剛, 須田有輔: 砂浜生態系における栄養塩供給と物質循環, 月刊海洋, **41(4)**, pp.193-199, 2009.
- 2) 加茂 崇: 吹上浜海岸の砂浜生態系における水質環境とアミ類餌料環境, 水産大学校修士論文, 94p., 2011.
- 3) Short,A.D. and Wright,L.D : Physical variability of sandy beaches, In Sandy beaches as ecosystems(eds.A.McLachlan and T.Erasmus),W.Junk, The Hague, pp.133-144, 1983.
- 4) マリオ デ レオン, 西 隆一郎, 北村良介: 海浜底質の粒度特性と透水係数について, 海洋開発論文集, **24**, pp.1201-1206,2008.
- 5) 坂本市太郎: 砂浜の潮汐に伴う呼吸 (有機物の好気分解代謝) 機能, 用水と排水, **36(1)**, pp.44-52,1994.
- 6) Del Amo, Y., Le Pape, O., P. Treguer, B. Queguiner, A. Menesguen and A. Aminot : Impacts of high-nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. I. Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom – dominated phytoplankton of the Bay of Brest(France), *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **161**, pp.213-224, 1997.
- 7) 今井 直, 谷村 篤, 太原英生, 河村章人: 河川水の流入が的矢湾の植物プランクトン現存量に及ぼす影響, 水産海洋研究, **64(4)**, pp.215-223, 2000.
- 8) 和 吾郎, 木下 泉, 深見公雄: 四万十川から供給される栄養塩が土佐湾西部沿岸海域の栄養塩分布と基礎生産の季節変化に及ぼす影響, 海の研究, **17(5)**, pp.357-369, 2008.
- 9) 足立久美子, 日向野純也, 木元克則: 鹿島灘砂浜海岸における一次生産(1992年), 水産工学研究所技報 (水産土木), **16**, pp.13-24, 1994.
- 10) 一見和彦, 山下裕明, 澤山稔, 多田邦尚, 門谷 茂: 新川・春日川河口干潟域 (瀬戸内海播磨灘) に生息する底生微細藻類の増殖ポテンシャル, 日本プランクトン学会報, **55(1)**, pp.1-8, 2008.

第3章 吹上浜流域における淡水流入量の推定

3.1 まえがき

鹿児島県薩摩半島南西部に位置する吹上浜は総延長約 40 km におよぶ日本を代表する開放的な砂質性海岸である。この吹上浜はアカウミガメの重要な産卵場であり、また同海岸のサーフゾーンは水産重要種をはじめ多様な魚類稚仔魚の主要な生息場であることが明らかにされている（中根ら，2005，Nakane *et al.*, 2011）^{1,2)}。さらに，魚類の餌生物として重要なアミ類の時空間的分布や多毛類の出現に関する研究等（Nonomura *et al.*, 2005，Nonomura *et al.*, 2007，富岡ら，2012）³⁻⁵⁾により，吹上浜の潮間帯は，一見砂漠のように見えながら生物生産性の高い海域であり，沿岸域生態系を構成する様々な生物の生息場としての役割を持つことがわかる。そのため，多様性のある沿岸域生態系の保全という観点から，砂浜の機能を再評価する必要がある。

陸域からの栄養塩供給量は，沿岸域の一次生産を支える重要な因子である。しかし，我が国の代表的な砂質性海岸である吹上浜一帯に流入する河川水や地下水起源の淡水流入量や栄養塩負荷量を定量的に示した研究例はまだない。そこで，本研究では水収支式を用いて吹上浜一帯の各流域を対象に河川流量と地下水量を推定し，吹上浜における淡水量供給機構をマクロ的に把握することにした。

3.2 吹上浜流域の特性

3.2.1 吹上浜流域の流域面積

本研究の対象とする吹上浜流域を図-3.1に示す。対象域は北側から南側にかけての江口川流域から万之瀬川流域までとした。吹上浜に流入する河川は7河川あり，そのうち万之瀬川(流域面積372.3 km²) が最大河川である。それに神之川(98.8 km²)，永吉川(50.4 km²)が続く。吹上浜に流入する川は小河川が多いのが特徴である。

3.2.2 流域の表層地質

図-3.2に各流域の表層地質図を示す。この図は，国土交通省国土情報課が公開しているGISデータ，1/200,000土地分類基本調査，鹿児島県の表層地質図を元に作成した。さらに，図-3.3に各流域の表層地質を占める上位三項目の割合を示す。表層地質の特徴として，全流域においてシラスが20 %以上占めており，特に江口川流域で40 %以上，神之川流域においては70 %がシラスである。



河川名	流域面積 (km ²)
江口川	22.9
神之川	98.8
大川	19.3
永吉川	50.4
小野川	13.6
伊作川	38.9
万之瀬川	372.3

図-3.1 吹上浜に流入する河川と流域面積

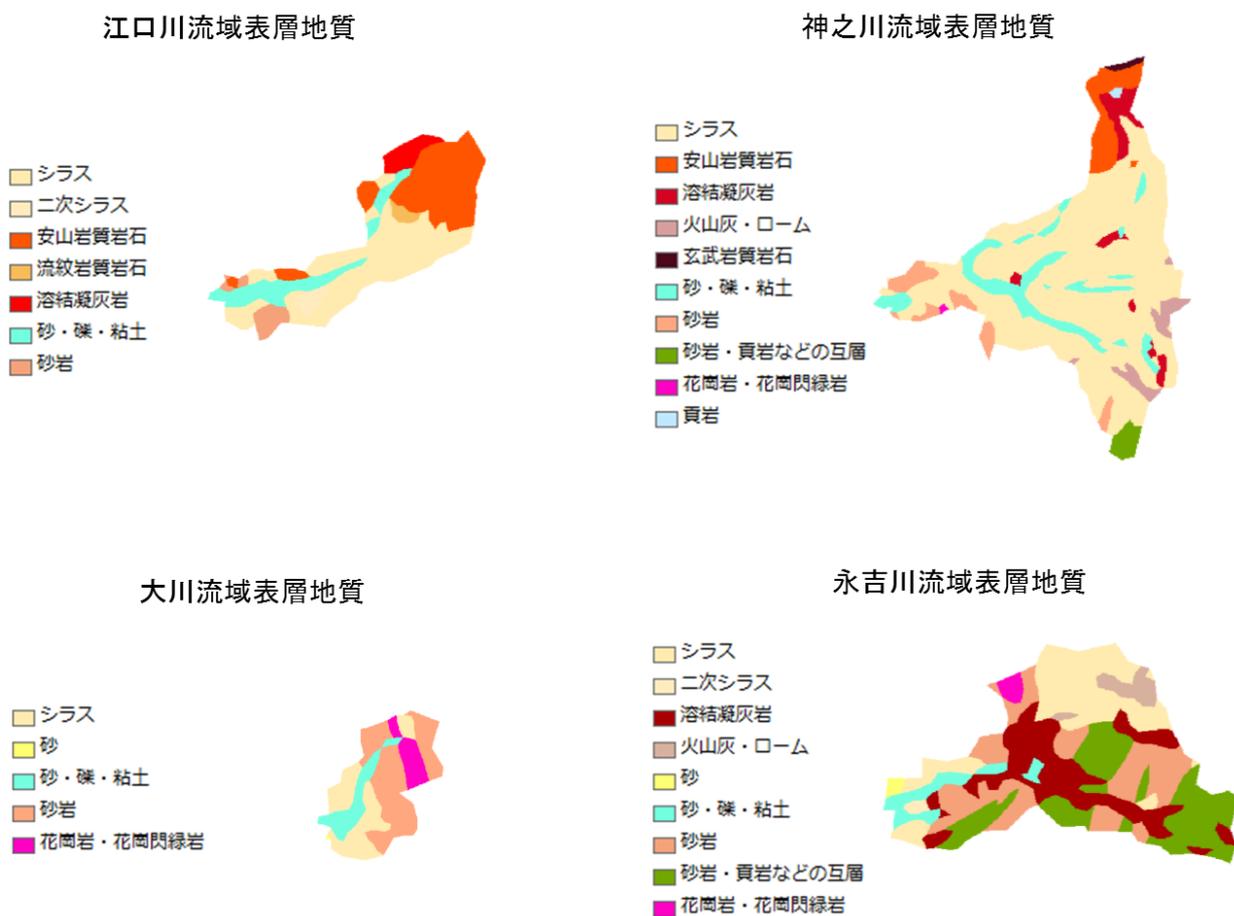
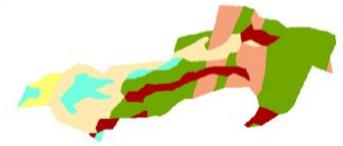


図-3.2 吹上浜流域の表層地質図(次ページに継続)

小野川流域表層地質



伊作川流域表層地質



万之瀬川流域表層地質

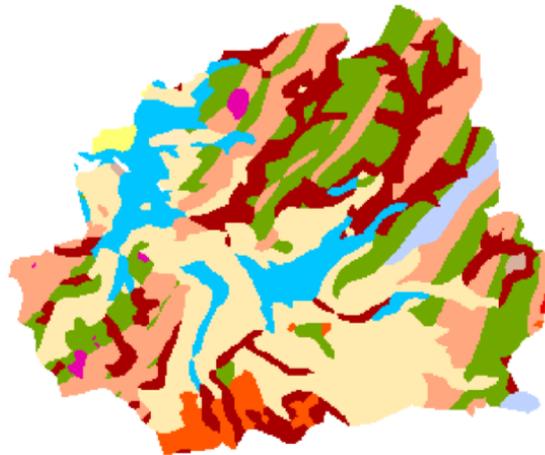


図-3.2 吹上浜流域の表層地質図

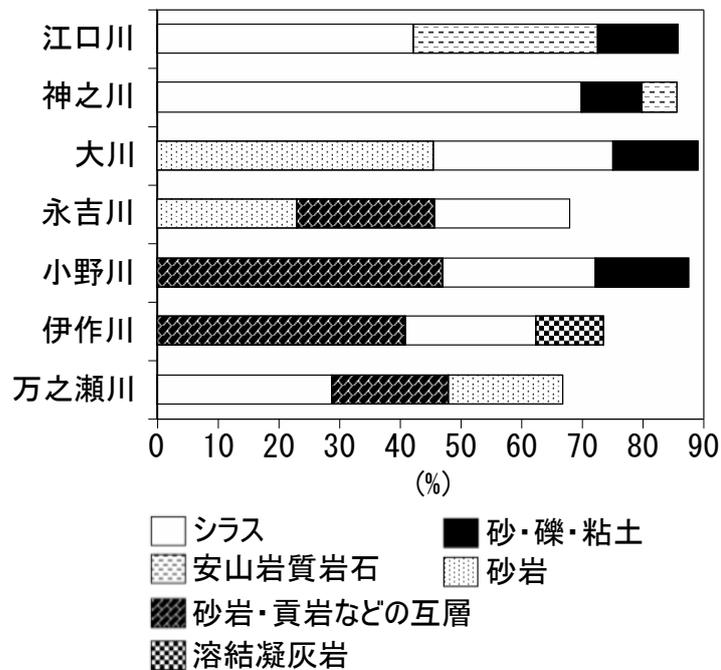


図-3.3 吹上浜流域の表層地質の割合(上位三項目)

3.3 水収支式による淡水量の推定

淡水量は、(3.1)式で表される水収支式を用いて算定した。

$$P=R+G+E+\Delta S \quad (3.1)$$

ここで降水量 P 、河川流量 R 、地下水量 G 、蒸発散量 E 、貯水量変化 ΔS である。ただし、貯水量変化は長期水収支を考える場合は無視できるので、年間水収支を把握する目的の本研究では考慮しなかった。

(1) 降水量

降水量は、図-3.4に示す各気象観測所の1992年から2011年までの20年間のアメダス降水量の平均値を用いた。各流域の降水量は、ティーセン法によって各々の流域平均雨量を算出し、それに流域面積を乗じて年降水量を算出した。

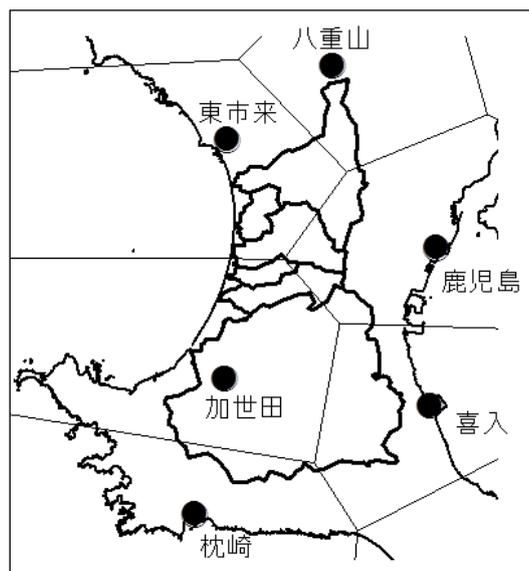


図-3.4 吹上浜流域のティーセン分割状況

(2) 河川流量

河川流量は万之瀬川(1991～2011年)、伊作川(1994～2011年)、神之川(1991～2011年)については、鹿児島県調べ⁶⁾の年平均水流量を年河川流量として用いた。データのない他の小河川については、データのある河川の比流量を元に推定値を算出した(表-3.2)。

表-3.2 河川流量

河川名	流量 (m ³ /s)
江口川	0.32*
神之川	1.36
大川	0.27*
永吉川	0.70*
小野川	0.38*
伊作川	1.13
万之瀬川	13.25

*は推定値

(3) 蒸発散量

蒸発散量は可能蒸発散量を算出し、これに係数を乗ずることによって蒸発散量とした。

a) 可能蒸発散量

可能蒸発散量とは「植物で完全に覆われた地表面に十分な水を供給した場合に失われる蒸発散量」(樫根, 1980)⁷⁾である。本研究では、月平均気温から簡易的に可能蒸発散量を推定できる、ソーンズウェイト法とハモン法を用いて算出した。

ソーンズウェイト法は(3.2)式で表される。

$$E_T = 16 D_0 (10T/I)^a \quad (3.2)$$

ここで、 $I = \Sigma(T/5)^{1.514}$, $a = (492,390 + 17,920I - 77.1I^2 + 0.675I^3) \times 10^{-6}$, E_T は可能蒸発散量(mm/month) , D_0 は月平均可照時間(12hour/dayを1とする) , T は月平均気温(°C)である。

ハモン法は(3.3)式で表される。

$$E_H = 0.14D_0^2 Pt \quad (3.3)$$

ここで、 E_H は可能蒸発散量(mm/month) , D_0 は月平均可照時間(12hour/dayを1とする) , Pt は月平均気温に対する飽和絶対湿度(g/m³) , T は月平均気温(°C)である。

月平均気温は、降水量と同様に1992年から2011年までの20年間の各気象観測所のデータを用いて、ティーセン法によって流域平均気温を算出した。ただし、八重山観測所の気温データがないため、八重山を除いてティーセン分割を行った。

吹上浜流域における年平均気温は30年間でおよそ1~1.2°C上昇している(図-3.5)。そのため、気温上昇に伴い可能蒸発散量も増加傾向にあると考えられるが、ここでは単純に1992年から2011年までの20年間の平均値を用いることにした。

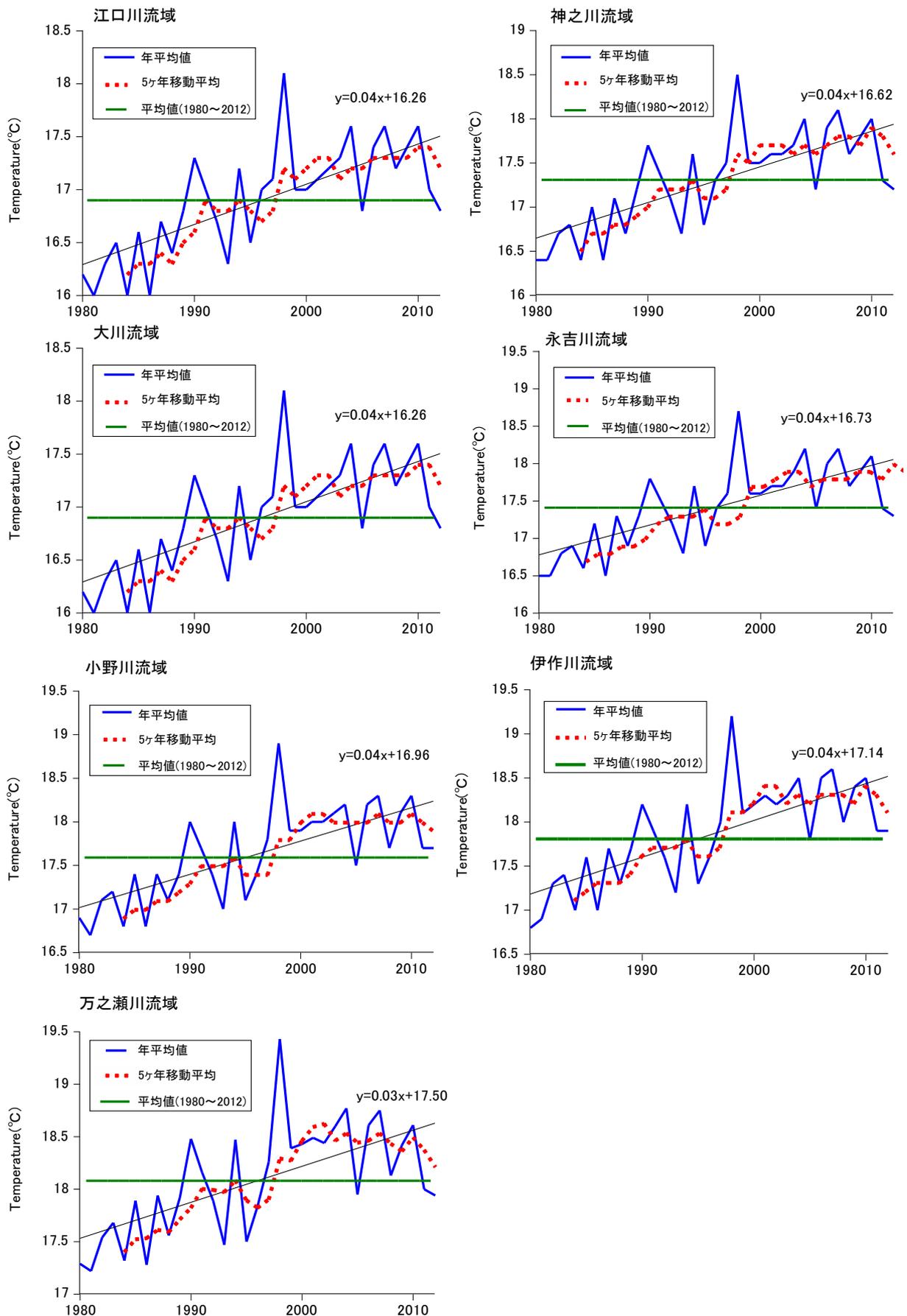


図-3.5 吹上浜流域における年平均気温の推移

b) 蒸発散比と土地利用分類

(3.2), (3.3)式で算出した可能蒸発散量に, 係数として蒸発散比を乗じて蒸発散量の推定を行った. 蒸発散比は可能蒸発散量と蒸発計蒸発量の比であるが, 実際に蒸発散量の測定は行っていないので, 文献値(金子, 1973, 大槻, 1989)^{8,9)}の蒸発散比を使用した. 使用した蒸発散比は表-3.3に示す通りである.

表-3.3 蒸発散比

	1月	2月	3月	4月	5月	6月
水田	0.45	0.45	0.55	0.60	1.00	1.05
水田以外	0.45	0.45	0.55	0.60	0.65	0.70
山地	0.90	0.90	0.70	0.50	0.60	0.80
造成農地	0.85	0.75	0.80	1.65	0.70	0.75
	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水田	1.25	1.30	1.30	1.20	0.70	0.55
水田以外	0.80	0.85	0.85	0.80	0.65	0.55
山地	0.80	0.80	0.80	0.90	1.00	0.90
造成農地	0.70	0.75	0.90	1.00	1.00	1.00

土地利用分類は, 国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ(平成21年度)を元に, ArcGIS10.0(ESRI社)を使用して, 各流域の土地利用面積の割合を算出した. 土地利用の分類は, 便宜的に「田」, 「その他農用地」, 「建物用地・道路・鉄道」, 「森林・荒地」, に再分類した(図-3.6). ここに, 表-3.3の蒸発散比を対応させた. 「田」に水田の蒸発散比, 「その他農用地」に造成農地の蒸発散比, 「森林・荒地」に山地の蒸発散比, 「建物用地・道路・鉄道」は水田以外の蒸発散比を乗じて蒸発散量を推定した. 最終的に蒸発散量の推定は, 可能蒸発散量に各々の蒸発散比および流域面積を乗じたものを各流域の蒸発散量とした.

3.4 水収支結果及び考察

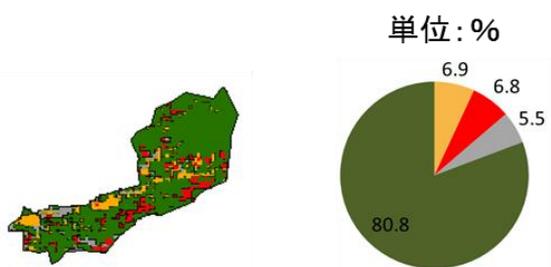
水収支の結果を表-3.4に示す. 表中の E_T はゾーンスウェイト法, E_H はハモン法によって推定された項目である.

流域平均雨量は全流域において大差はなく, 概ね年間2,200 mmである. 吹上浜流域における降水量は全国平年値1,683.3 mm(全国80地点の气象台・測候所の1981年から2010年の平均値¹⁰⁾より算出)と比較して500mm以上多いことがわかった.

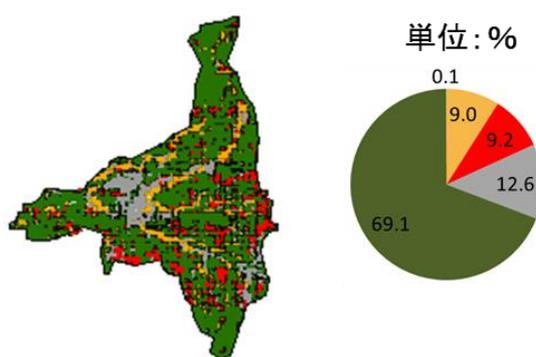
年可能蒸発散量は E_T が E_H よりも20 mm程度多く推定される傾向にあるが, 概ね900 mm前後であった. 年蒸発散量(E_H)は概ね年蒸発散量(E_T)の97%である.

図-3.7に降水量に対する蒸発散量, 河川流量, 地下水量の割合を示す. E_T と E_H から推定された蒸発散量は年間の水収支をオーダーレベルで見ると, 年蒸発散量の推定値は E_T と E_H のどちらを用いても大差がないことがわかった.

江口川流域土地分類状況



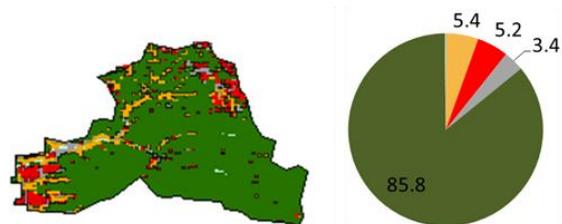
神之川流域土地分類状況



大川流域土地分類状況



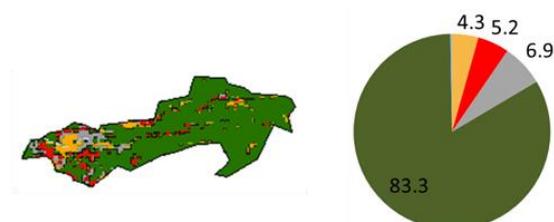
永吉川流域土地分類状況



小野川流域土地分類状況



伊作川流域土地分類状況



万之瀬川流域土地分類状況

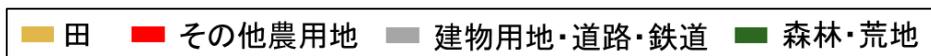
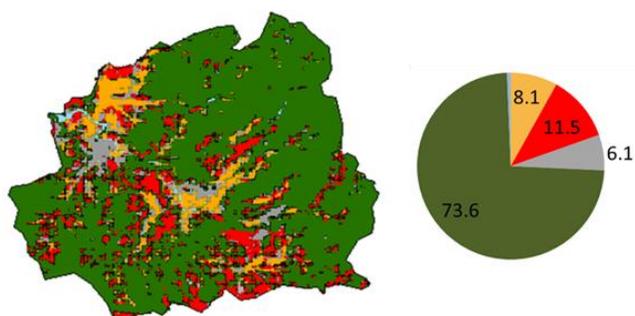


図-3.6 吹上浜流域における土地利用状況

降水量に対する河川流量の割合は、最大河川の万之瀬川が48 %、伊作川、小野川が約40 %、江口川、神之川、大川、永吉川が約20 %であり、地下水量の割合は、万之瀬川流域が約19 %、伊作川、小野川流域は約27 %、江口川、神之川、大川、永吉川の各流域が約47 %であった。

流出量に対する河川流量の割合は、万之瀬川が約70 %、伊作川、小野川が約60 %、江口川、神之川、大川、永吉川が約30 %であり、地下水量の割合は、万之瀬川が約30 %、伊作川、小野川が約40 %、江口川、神之川、大川、永吉川が約70 %であった。

河川流量と地下水量の割合は、傾向として流域の北側の江口川、神之川、大川、永吉川流域と南側の小野川、伊作川、万之瀬川流域において各々類似性がある。そこで、流域を北側と南側で大別すると、流出量は全流域平均値13,380.1～13,627.4万m³/yrに対して、北側の平均値は6,980.7～7,094.2万m³/yr、南側の平均値は21,912.7～22,338.2万m³/yrと算出された。河川流量の北側の平均値は2,089.3万m³/yr、南側の平均値は15,513.1万m³/yrであり、地下水量は北側の平均値が4,891.5～5,004.9万m³/yr、南側の平均値が6,399.6～6,825.1万m³/yrと算出された。流出量に対する河川流量と地下水量の割合は、概ね北側で3:7、南側で6:4であった。

吹上浜の各流域において降水量や蒸発散量の大きな違いはないため、地下水量は、流域の流域面積や地質条件等の影響によって変化すると考えられる。特に吹上浜流域の位置する南薩は、シラスで代表される火砕流台地であるため、地下水量は地質によって大きく左右され、多孔質で浸透性の高いシラスが表層地質を占める割合が高いと、地下水量が多いと考えられる。このことは、図-3.3の表層地質の割合からも神之川流域や江口川流域において顕著に表れているものと考えられる。同様に、多孔質である砂岩の割合が高い大川流域および永吉川流域においても地下水量が多く存在することが考えられる。砂岩・頁岩の互層が高い割合を占める、小野川・伊作川流域においては、透水層の砂岩に加えて難透水層の頁岩が層を成しているため、浸透する地下水量は相対的に少なくなっていると考えられる。

表-3.4 吹上浜流域の水収支結果

流域名	降水量 (mm/year)	E_T (mm/year)	E_H (mm/year)	流域面積×降水量 (万m ³ /year)	流域面積×蒸発散量(E_T) (万m ³ /year)	流域面積×蒸発散量(E_H) (万m ³ /year)
江口川	2,155.2	893.0	875.9	4,935.3	1,646.5	1,601.1
神之川	2,194.2	918.4	898.3	21,678.6	7,350.6	7,107.1
大川	2,176.7	893.0	875.7	4,200.9	1,454.4	1,403.2
永吉川	2,239.4	925.6	904.4	11,286.4	3,726.9	3,613.1
小野川	2,221.4	936.0	913.4	3,021.1	1,029.5	996.3
伊作川	2,283.3	952.7	926.9	8,881.9	2,939.7	2,837.6
万之瀬川	2,339.7	967.9	938.9	87,108.8	29,304.5	28,163.2
平均値	2,230.0	926.7	904.8	20,159.0	6,778.9	6,531.7

流域名	流出量(E_T) (万m ³ /year)	流出量(E_H) (万m ³ /year)	河川流量 (万m ³ /year)	地下水流量(E_T) (万m ³ /year)	地下水流量(E_H) (万m ³ /year)	蒸発散量/降水量(E_T) (%)	蒸発散量/降水量(E_H) (%)
江口川	3,288.8	3,334.3	1,009.2	2,279.7	2,325.1	33.4	32.4
神之川	14,328.1	14,571.6	4,288.9	10,039.2	10,282.7	33.9	32.8
大川	2,746.6	2,797.7	851.5	1,895.1	1,946.3	34.6	33.4
永吉川	7,559.5	7,673.3	2,207.5	5,352.0	5,465.7	33.0	32.0
小野川	1,991.6	2,024.8	1,198.4	793.2	826.4	34.1	33.0
伊作川	5,942.1	6,044.3	3,563.6	2,378.5	2,480.7	33.1	31.9
万之瀬川	57,804.3	58,945.7	41,777.3	16,027.0	17,168.4	33.6	32.3
平均値	13,380.1	13,627.4	7,842.3	5,537.8	5,785.0	33.7	32.6

流域名	地下水量/降水量(E_T) (%)	地下水量/降水量(E_H) (%)	河川流量/降水量 (%)	地下水量/流出量(E_T) (%)	地下水量/流出量(E_H) (%)	河川流量/流出量 (%)
江口川	46.2	47.1	20.4	69.3	69.7	30.3
神之川	46.3	47.4	19.8	70.1	70.6	29.4
大川	45.1	46.3	20.3	69.0	69.6	30.4
永吉川	47.4	48.4	19.6	70.8	71.2	28.8
小野川	26.3	27.4	39.7	39.8	40.8	59.2
伊作川	26.8	27.9	40.1	40.0	41.0	59.0
万之瀬川	18.4	19.7	48.0	27.7	29.1	70.9
平均値	36.6	37.8	29.7	55.3	56.0	44.0

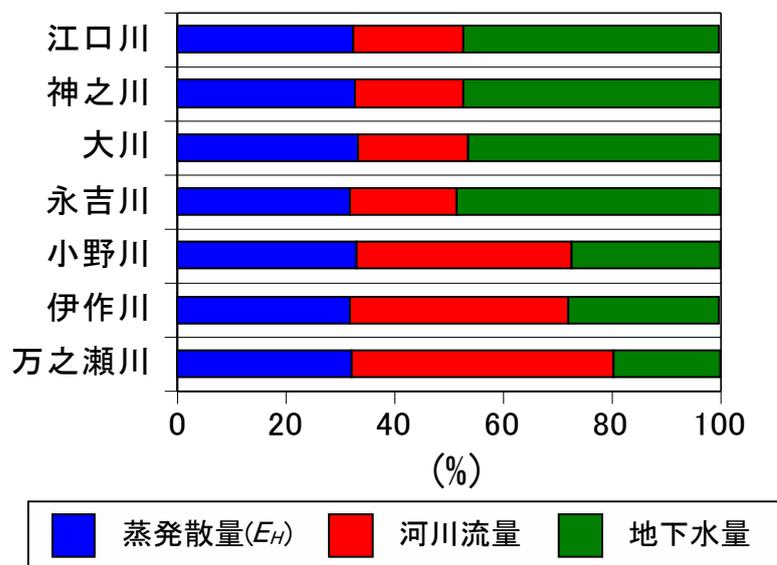
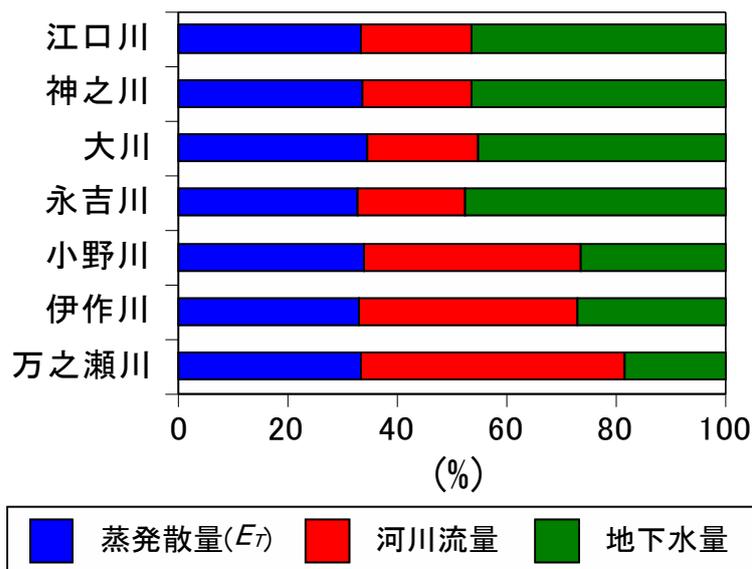


図-3.7 蒸発散量と河川流量，地下水量の割合
(上図が E_T ，下図が E_H による推定値)

3.5 まとめ

水収支式を用いて吹上浜流域における淡水量をマクロ的に推定した。流域毎に違いはあるが、流域の平均値としてみると、降水量に対して河川流量が 29.7%，地下水量が 36.6～37.8%，流出量に対して河川流量が 44%，地下水量が 55.3～56%であった。吹上浜の全流域から、約 $4.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{yr}$ (= $12.6 \text{ m}^3/\text{s}$)の地下水流入量が推定され、これは吹上浜流域における最大河川である万之瀬川の年間平均流量に匹敵する流量である。降水量の多さと地質的条件等によって、沿岸域に流入する地下水量が多く存在することが推定される。すなわち、吹上浜流域一帯では栄養塩供給機構として地下水流入量が、河川流入に加えて重要であることが示された。

参考文献

- 1) 中根幸則, 須田有輔, 大富 潤, 早川康博, 村井武四: 中間型砂浜である鹿児島県吹上浜の近岸帯における魚類相, 水産大学校研究報告, **53(2)**, pp.57-70, 2005.
- 2) Nakane, Y., Suda, Y., Sano, M. : Food habits of fishes on an exposed sandy beach at Fukiagehama, South-West Kyushu Island, Japan., *Helgol.Mar.Res.*, **65**, pp.123-131, 2011.
- 3) Nonomura, T., Hayakawa, Y., Suda, Y., Ohtomi, J. : Practical identification of the sand-burrowing mysid, *Archaeomysis vulgaris* (Crustacea: Mysidacea) and its biological characteristics. *Plankton Biol.Ecol.*, **52**, pp.48-57, 2005.
- 4) Nonomura, T., Hayakawa, Y., Suda, Y., Ohtomi, J. : Habitat zonation of the sand-burrowing mysids (*Archaeomysis japonica* and *liella ohshimai*), and diel and tidal distribution of dominant *Archaeomysis vulgaris*, in an intermediate sandy beach at Fukiagehama, Kagoshima Prefecture, southern Japan. *Plankton Benthos Res.*, **2**, pp.38-48, 2007.
- 5) 富岡森理, 須田有輔, 加茂 崇, 大富 潤, 西 隆一郎, 田中龍児, 早川康博: 鹿児島県吹上浜の砂浜海岸の潮間帯に出現した多毛類, 水産大学校研究報告, **61(2)**, pp.65-74, 2012.
- 6) 鹿児島県: 河川台帳.
- 7) 榎根 勇: 水文学, 大明堂, 272p., 1980.
- 8) 金子 良: 農業水文学, 共立出版, 286p., 1973.
- 9) 大槻恭一: 蒸発散(その8) —蒸発散の推定方法—, 農業土木学会誌, **57(11)**, pp.65-71, 1989.

10) 国立天文台 編：理科年表 平成 24 年, 丸善, 1108 p., 2011.

第4章 吹上浜流域における流入負荷量の推定

4.1 まえがき

前章では、吹上浜流域における淡水量をマクロ的に推定することができた。そこで、本章では一次生産量を検討するための次の段階として、吹上浜流域の流入負荷量として、窒素(N)、リン(P)負荷量を推定することにする。著者の知る限りでは、吹上浜流域における栄養塩負荷量が定量的に示された事例はない。栄養塩負荷量を算定するには、流入河川の流量データと栄養塩濃度のデータが必要となる。吹上浜流域における流入河川の流量データは鹿児島県によって、万之瀬川、神之川、伊作川(平成18年以降は観測されていない)の流量が測定されている¹⁾。栄養塩濃度は鹿児島県の「公共用水域水質測定結果」によって、万之瀬川と神之川の硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素のデータを得ることができる。しかし、これらのデータは断続的に得られた調査結果である。加えて、流域内の他の小河川については、流量と栄養塩濃度のデータが皆無に等しく、詳細な栄養塩負荷量を算定するのが困難である。そこで本研究では、巨視的に推定することが可能な原単位法によって、吹上浜流域における流入負荷量を推定した。

4.2 原単位法による流入負荷量の算定方法

流入負荷量の計算過程は、図-4.1に示すフローに基本的に従って算定した。本研究では、流入負荷の発生源を生活系、面源系(田、畑、市街地、森林)、工業系、畜産系(牛、豚、鶏)に区分して、各々の発生負荷量から排出負荷量を算出し、最終的に流達率を乗じたものを流入負荷量とした。

ここで、排出率、流達率は浮田、中西(1985)³⁾に従うと、以下の通りである。

$$\text{排出率} = \text{排出負荷量} / \text{発生負荷量} \quad (4.1)$$

$$\text{流達率} = \text{流入(達)負荷量} / \text{排出負荷量} \quad (4.2)$$

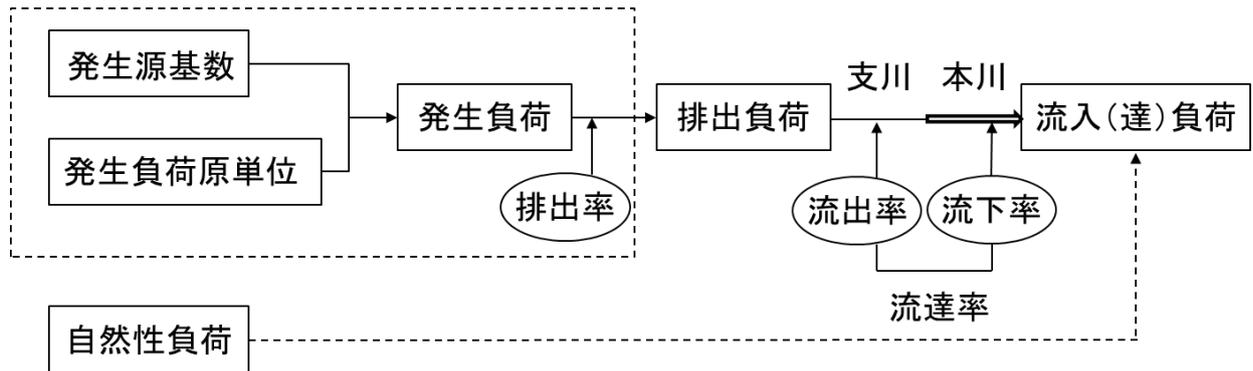


図-4.1 原単位法による流入負荷の計算過程（引用：国松，村岡，1989）²⁾

4.2.1 排出負荷量の算定

(1) 生活系排出負荷量

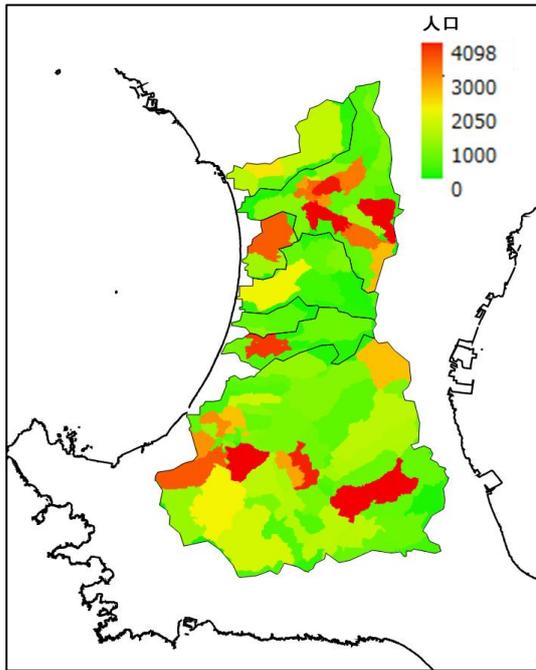
生活系の発生負荷量は，発生負荷原単位(g/人/日)に流域人口を乗じて算定した．排出負荷量は，污水处理形態を下水道，農業集落排水，浄化槽，漁業集落排水に分類し，各々の排出率を，污水处理人口に乘じて算定した．使用した発生負荷原単位および処理別形態排出率^{2,4)}は表-4.1に示す通りである．ただし，漁業集落排水の排出率については不明のため，ここでは便宜的に農業集落排水と同じ排出率とした．

流域人口は，平成17年度の国勢調査のデータをもとに，ArcGIS10.0(ESRI社)を使用して算定した（図-4.2）．污水处理人口は，平成22年度の鹿児島県における市町村別污水处理人口普及率⁵⁾から流域の污水处理人口を算定した（表-4.2）．

表-4.1 生活系の発生負荷量原単位と排出率

原単位	人			
	(g/人/日)			
T-N	11			
T-P	1.3			

処理形態別排出率	下水道	業集落排	浄化槽	漁業集落排水
	(%)	(%)	(%)	(%)
T-N	61	55.5	58	55.5
T-P	39	48.5	62	48.5



流域名	流域人口 (人)
江口川	4644
神之川	35174
大川	3560
永吉川	4027
小野川	1399
伊作川	4344
万之瀬川	53498

図-4.2 吹上浜流域人口

表-4.2 市町村別汚水処理人口及び普及率

平成22年度 市	人口 (人)	汚水処理人口		下水道		農業集落排水		漁業集落排水		浄化槽	
		普及人口 (人)	普及率 (%)								
日置市	51300	34100	66.4	16100	31.4	500	1.1			17400	34
南さつま市	38900	19700	50.7			600	1.4	14000	3.6	17800	45.7
南九州市	39800	17800	44.7	3900	9.9	1200	3.1			12600	31.7
鹿児島市	6041000	544000	90.2	473500	78.4					70200	11.6
枕崎市	23800	16200	68	13400	56.3					28000	11.7

(2) 畜産系排出負荷量

畜産系の排出負荷量は、発生源を「牛」、「豚」、「鶏」に分類し、流域ごとの畜産頭羽数に、各々の発生負荷原単位(g/頭・羽/日)および排出率を乗じて排出負荷量を算定した。使用した発生負荷量原単位と排出率⁴⁾は表-4.3に示す通りである。

畜産の頭羽数は、農林水産省のホームページにおける統計情報の畜産統計調査、平成17年度市町村別データ⁶⁾を用いて流域ごとの頭羽数を算定した(表-4.4)。

表-4.3 畜産系の発生負荷量原単位と排出率

発生負荷量原単位	牛	豚	鶏
	(g/頭/日)	(g/頭/日)	(g/羽/日)
T-N	290	40	1
T-P	50	25	0.15
排出率	牛	豚	鶏
	(%)	(%)	(%)
T-N	10.5	13.6	10
T-P	3.1	10	1.3

表-4.4 市町村別畜産頭羽数

平成17年度 市町村	牛 (頭)	豚 (頭)	鶏 (羽)
南さつま市	9240	12800	315000
日置市	8010	9600	626000
枕崎市	3850	36000	132000
鹿児島市	9380	2200	691000
知覧町	7020	31300	1561000
川辺町	7220	32400	394000

(3) 面源系排出負荷量

面源系の排出負荷量は、発生源を「田」、「畑」、「市街地」、「森林」に分類し、流域ごとに各々の土地利用面積を算定し、それに排出負荷量原単位(kg/ha/年)を乗じて算定した。使用した排出負荷量原単位⁴⁾は表-4.5に示す通りである。流域の土地利用面積割合は第3章で算定した、「田」、「その他農用地」、「建物用地・道路・鉄道」、「森林・荒地」の割合を各々、「田」、「畑」、「市街地」、「森林」として割り当てた(表-4.6)。

表-4.5 面源系の排出負荷量原単位

排出負荷量原単位	田	畑	市街地	森林
	(kg/ha/年)	(kg/ha/年)	(kg/ha/年)	(kg/ha/年)
T-N	13.4	100.4	16.2	4.9
T-P	4.14	1.28	1.9	0.3

表-4.6 流域の土地利用割合

流域名	田 (%)	畑 (%)	市街地 (%)	森林 (%)
江口川	6.9	6.8	5.5	80.8
神之川	9.0	9.2	12.6	69.1
大川	19.4	9.8	9.0	61.8
永吉川	5.4	5.2	3.4	85.8
小野川	8.6	13.4	4.3	72.9
伊作川	4.3	5.2	6.9	83.3
万之瀬川	8.1	11.5	6.1	73.6

(4) 工業系排出負荷量

工業系の排出負荷量は、排出量原単位(g/万円/日)に製造出荷額(万円)を乗じて、それに流域の事業所数割合を乗じて算定した。

排出量原単位は、流域別下水道整備総合計画調査指針と解説(2008)⁴⁾の細分類の排出量原単位を用いて、表-4.7に示すように中分類の排出量原単位を算出した。各市町村の製品出荷額は、経済産業省のホームページの工業統計調査における、平成22年度市区町村編のデータ⁷⁾を用いた(表-4.8)。同様に、工業統計調査の平成22年工業統計メッシュデータ⁸⁾を用いて、各流域に属する事業所数から流域の事業所割合を算出した(表-4.9)。

表-4.7 工業系の排出量原単位

排出負荷量原単位	T-N (g/万円/日)	T-P (g/万円/日)
食料品・製造品	0.074	0.024
飲料煙草飼料・製造品	0.052	0.012
繊維工業	0.132	0.019
木材・木製品	0.001	—
家具・装備品	0.031	0.108
パルプ・紙・紙加工品	1.023	0.0961
印刷・同関連業	0.001	0.0002
化学工業	0.598	0.099
プラスチック製品	0.002	0.0026
窯土石・製造品	0.037	0.021
鉄鋼業	2.047	0.0038
金属製品	0.041	0.031
石油・石炭製品	0.053	0.0025
一般機械	0.008	0.005
生産用機械・製造品	0.007	0.008
電気機械・製造品	0.020	0.003
電子部品・製造品	0.069	0.021
輸送用機械	0.01	0.0091
その他製品	0.015	0.013

表-4.8 市町村別製造出荷額

市町村 2010	事業所数 (従業者4人以上)	製造業項目	製造業出荷額 (万円)
南さつま市	60	食料品製造業	2088499
		飲料・たばこ・飼料製造業	421570
		窯業・土石製品製造業	127495
		生産用機械器具製造業	190686
		電子部品・デバイス・電子回路製造業	254885
		電気機械器具製造業	166863
		製造業計	3338453
南九州市	136	食料品製造業	927016
		飲料・たばこ・飼料製造業	1620209
		木材・木製品製造業（家具を除く）	101701
		家具・装備品製造業	14125
		窯業・土石製品製造業	234178
		金属製品製造業	26163
		生産用機械器具製造業	355291
		その他の製造業	122873
製造業計	3762556		
日置市	100	食料品製造業	1053799
		飲料・たばこ・飼料製造業	1192386
		繊維工業	10081
		家具・装備品製造業	23895
		窯業・土石製品製造業	52469
		金属製品製造業	174924
		生産用機械器具製造業	225915
		電子部品・デバイス・電子回路製造業	2509620
		電気機械器具製造業	127804
その他の製造業	295375		
製造業計	6445243		
鹿児島市	541	食料品製造業	15423821
		飲料・たばこ・飼料製造業	10140852
		繊維工業	340473
		木材・木製品製造業（家具を除く）	269670
		家具・装備品製造業	231508
		パルプ・紙・紙加工品製造業	405272
		印刷・同関連業	1966867
		化学工業	710393
		石油製品・石炭製品製造業	98459
		プラスチック製品製造業（別掲を除く）	209669
		窯業・土石製品製造業	837387
		鉄鋼業	137676
		金属製品製造業	1347140
		はん用機械器具製造業	81160
		生産用機械器具製造業	851780
電子部品・デバイス・電子回路製造業	120917		
電気機械器具製造業	181050		
輸送用機械器具製造業	293042		
その他の製造業	311019		
製造業計	34102601		

表-4.9 流域の事業所数と各市町村に属する事業所数の割合

流域名	事業所数 (従業者4人以上)	鹿児島市 (%)	日置市 (%)	南さつま市 (%)	南九州市 (%)
江口川	6		6.0		
神之川	68	5.7	37.0		
大川	11		11.0		
永吉川	5	0.6	2.0		
小野川	3		3.0		
伊作川	12		12.0		
万之瀬川	126	0.2		70.0	61.0

4.3 排出負荷量の算定結果

排出負荷量の算定結果を表-4.10に示す。吹上浜流域における T-N 負荷量は 55.3～1,451.0t-N/yr（流域平均 307.2 t-N/yr），全流域の合計で 2,150.3 t-N/yr，T-P 負荷量は 6.0～124.4t-P/yr(流域平均 29.9 t-P/yr)，全流域の合計で 209.0 t-P/yr であった。排出負荷量を流域面積で除した比負荷量は，T-N が 1.8～3.9t-N/yr/km² で，万之瀬川流域が最大で，永吉川流域が最小であった。T-P は 0.16～0.49t-P/yr/km² で，神之川流域が最大で，小野川流域が最小であった。T-N/T-P(モル比)は，江口川，永吉川，小野川，万之瀬川流域において，T-P に対して T-N の負荷量が多い傾向にある。

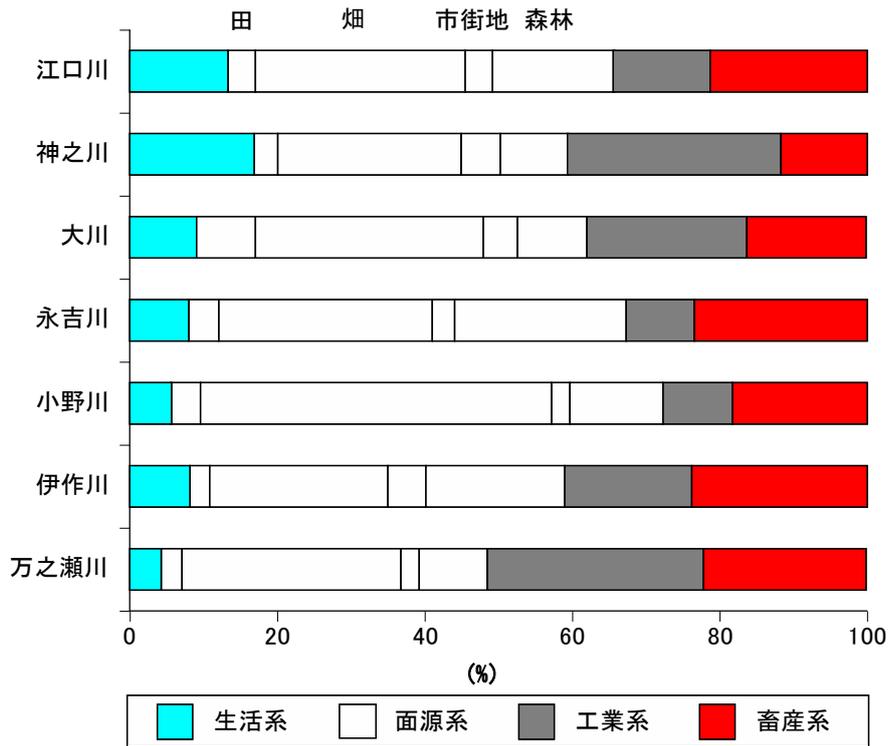
排出負荷量を発生源別に見ると(図-4.3)，T-N 負荷量は，畑からの負荷量が流域平均 30.6%と最大で，次いで畜産系 19.5%，工業系 18.5%である。T-P 負荷量は，流域平均で工業系が 40.7%，畜産系が 22.6%と全流域で工業系と畜産系の負荷量の合計が 50%以上を占めている。

表-4.10 排出負荷量の結果

T-N 流域名	生活系 (tonN/year)	面源系(田) (tonN/year)	面源系(畑) (tonN/year)	面源系(市街地) (tonN/year)	面源系(森林) (tonN/year)	面源系(合計) (tonN/year)	工業系 (tonN/year)	畜産系 (tonN/year)	合計 (tonN/year)	比負荷量 (tonN/year/km ²)	T-N/T-P (mole ratio)
江口川	7.4	2.1	15.6	2.1	9.1	28.8	7.3	11.7	55.3	2.4	20.4
神之川	62.3	11.9	91.0	20.2	33.5	156.6	106.9	42.8	368.6	3.7	16.7
大川	5.6	5.0	19.1	2.8	5.8	32.7	13.4	10.0	61.7	3.2	16.2
永吉川	7.2	3.7	26.4	2.8	21.2	54.0	8.4	21.2	90.9	1.8	24.7
小野川	2.2	1.57	18.27	0.96	4.86	25.7	3.6	7.0	38.6	2.8	26.0
伊作川	6.9	2.3	20.3	4.4	15.9	42.8	14.6	20.0	84.2	2.2	18.7
万之瀬川	63.0	40.4	429.5	37.0	134.3	641.3	427.0	319.8	1451.0	3.9	25.8
流域合計	154.7	66.9	620.2	70.2	224.6	981.9	581.2	432.5	2150.4		

T-P 流域名	生活系 (tonP/year)	面源系(田) (tonP/year)	面源系(畑) (tonP/year)	面源系(市街地) (tonP/year)	面源系(森林) (tonP/year)	面源系(合計) (tonP/year)	工業系 (tonP/year)	畜産系 (tonP/year)	合計 (tonP/year)	比負荷量 (tonP/year/km ²)
江口川	0.7	0.7	0.2	0.2	0.6	1.6	2.4	1.2	6.0	0.26
神之川	5.9	3.7	1.2	2.4	2.0	9.3	29.4	4.3	48.8	0.49
大川	0.6	1.5	0.2	0.3	0.4	2.5	4.3	1.1	8.4	0.44
永吉川	0.7	1.1	0.3	0.3	1.3	3.1	2.2	2.1	8.1	0.16
小野川	0.2	0.49	0.23	0.11	0.30	1.1	1.2	0.7	3.3	0.24
伊作川	0.7	0.7	0.3	0.5	1.0	2.4	4.7	2.1	10.0	0.26
万之瀬川	7.2	12.5	5.5	4.3	8.2	30.5	29.0	57.6	124.4	0.33
流域合計	16.0	20.7	7.9	8.2	13.8	50.6	73.2	69.2	209.0	

T-N排出負荷量の割合



T-P排出負荷量の割合

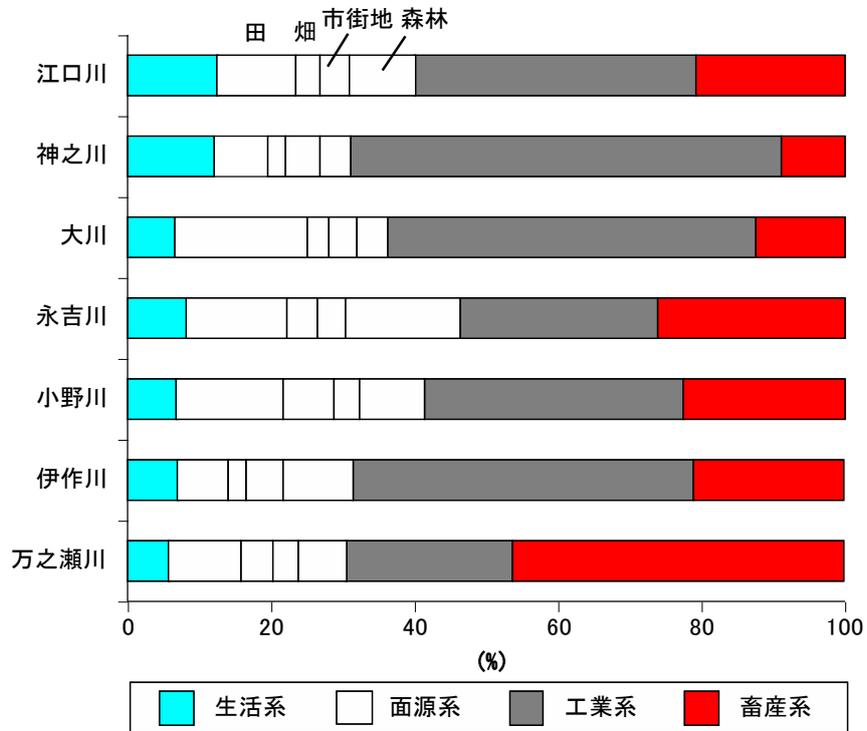


図-4.3 排出負荷量割合

4.3.1 鹿児島湾の排出負荷量との比較

開放的な砂浜海岸である吹上浜とは対照的に閉鎖的な内湾である鹿児島湾の窒素・リンの排出負荷量を表-4.11に示す(第4期鹿児島湾ブルー計画)⁹⁾。鹿児島湾の流域面積は1,850km²で吹上浜流域(616.3km²)の3倍の面積を持ち、流域人口は約88万人で吹上浜流域人口(約11万人)の約8倍の人口を有している。

鹿児島湾ではブリやカンパチ等の養殖業が活発に行われており、水産系の排出負荷量だけでも窒素、リン各々、3,358.0t-N/yr, 730.0t-P/yrである。これらの排出負荷量は、吹上浜流域における全排出負荷量推定値の、窒素、リンに対して各々、約1.6倍、約3.5倍に相当する負荷量である。そこで、水産系の排出負荷量を除外した鹿児島湾における全排出負荷量は、窒素が4,197.5 t-N/yr, リンが740.9t-P/yrである。吹上浜流域における全排出負荷量は、鹿児島湾の全排出負荷量(水産系は除外)に対して窒素が51.2%, リンが28.2%である。

排出負荷量別に見ると、吹上浜流域の生活系排出負荷量は鹿児島湾流域の生活系排出負荷量に対して窒素が8.5%, リンが7.7%である。人口の比率(吹上浜流域:鹿児島湾流域=1:8)や污水处理人口の普及率(表-4.2)からして、吹上浜流域の生活系排出負荷量の推定値は若干の過小評価の可能性はある。

工業系(事業系)の排出負荷量は、吹上浜流域が鹿児島湾流域に対して窒素が122.5%, リンが91.1%である。吹上浜流域の事業所数は、鹿児島湾流域の事業所数(鹿児島市内)よりも少ないにも関わらず(表-4.8, 表-4.9)窒素の排出負荷量推定値は鹿児島湾流域よりも多く推定されている。そのため、鹿児島湾流域と比較して吹上浜流域の工場・事業所に対する排水処理の普及が遅れていることなどが考えられるが、吹上浜流域への負荷量が過大評価となっている可能性があり、再考の余地がある。

畜産系の排出負荷量は吹上浜流域が鹿児島湾流域に対して窒素が49%, リンが17.2%である。農林系(吹上浜流域では面源系の田と畑の合計とした)の排出負荷量は吹上浜流域が鹿児島湾流域に対して窒素が67.2%, リンが56.0%である。吹上浜流域は農畜産業が盛んであり、畜産系に加えて、特に畑からの窒素負荷量が多い。畑からの排出負荷量は一律の原単位によって推定しているが、西尾(2001)¹⁰⁾に従い作物別原単位(表-4.12)を与えてより詳細に畑の窒素排出負荷量を算出してみると、733.7t-N/yrとなり、一律の原単位で算出した窒素排出負荷量620.2t-N/yrよりも約100t-N/yr多く算定されることがわかった。

鹿児島湾流域における窒素排出負荷量は水産系を除いた場合、生活系が43.5%と最も高い負荷量を占めているが、吹上浜流域における窒素負荷量は生活系が7.2%と少なく、畑からの負荷量が28.8%と最も高い。一方で、リンの負荷量は鹿児島湾流域では畜産系の負荷量が最も高く(54.1%), 吹上浜流域では工業系の負荷量が最も高い(35.0%)。次いで、鹿児島湾流域では、生活系の負荷量が高く(28.8%), 吹上浜流域では畜産系の負荷量が高い(33.0%)。

表-4.11 鹿児島湾の排出負荷量(2002年)

排出負荷量	窒素 (ton/day)	リン (ton/day)
生活系	5.0	0.57
事業系	1.3	0.22
畜産系	2.4	1.10
水産系	9.2	2.00
農林系	2.8	0.14
合計	20.7	4.03

表-4.12 作物種類別施肥 N 負荷原単位
西尾(2001)¹⁰⁾を参考に作成

作物	原単位 (kgN/ha)
大根	39
人参	146
馬鈴薯	84
里芋	174
白菜	182
キャベツ	121
ハウレン草	157
レタス	173
葱	179
玉葱	155
露地キュウリ	482
施設キュウリ	311
露地ナス	483
施設ナス	314
露地トマト	220
施設トマト	231
露地ピーマン	182
施設ピーマン	9
温州ミカン	50
リンゴ	85
ブドウ	106
ナシ	317
モモ	162
甘藷	0
茶	350
煙草	104

4.4 流入負荷量の算定

前節で排出負荷量を算定することができた。そこで、本節では流入負荷量を算定することにする。

4.4.1 実測値による T-N, T-P 負荷量の算定

(1) 現地調査場所及び分析方法

2011年5月21日, 11月1日, 2012年6月1日に万之瀬川及び伊作川で表層水を採水し(図-4.4), 栄養塩分析を行った。栄養塩類の測定項目は, 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$), アンモニウム態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$), リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)とし, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ の合計を溶存態無機窒素(DIN)とした。分析はサンプル水をグラスファイバーフィルター(Whatman GF/F, 47 mm)で濾過後, 常法によって分析した^{11,12)}。

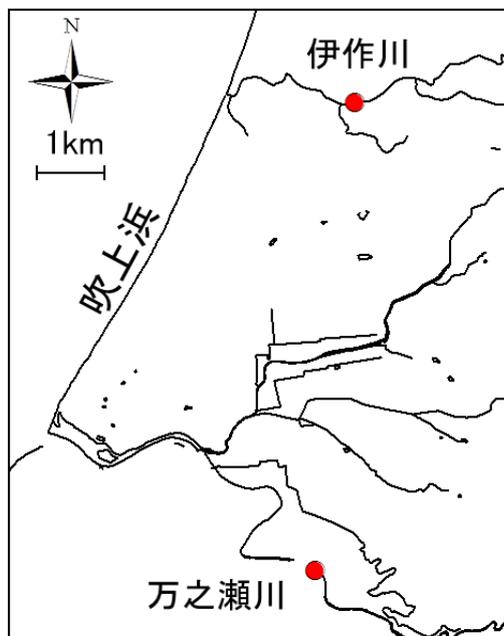


図-4.4 河川の採水地点

(2) 溶存態無機窒素(Dissolved Inorganic Nitrogen; DIN)およびリン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)の負荷量

分析結果を表-4.13に示す。神之川の $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ は2011年の鹿児島県の公共用水域水質測定結果¹³⁾の値である。万之瀬川と伊作川のDINに対する $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ はともに95.3, 93.9%と90%以上を占めている。そこで, ここでは神之川の $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ のDINに占める割合を90%と仮定してDINの推定値を算定すると $192.7\mu\text{mol/l}$ となる。DIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ (モル比)は, 万之瀬川, 伊作川それぞれ33.5, 40.9であり両河川ともに $\text{PO}_4\text{-P}$ に対

表-4.13 DIN および PO₄-P 濃度

Station		PO ₄ -P (μ mol/ℓ)	NO ₃ -N (μ mol/ℓ)	NO ₂ -N (μ mol/ℓ)	NH ₄ -N (μ mol/ℓ)	DIN (μ mol/ℓ)	DIN/PO ₄ -P (mole ratio)
万之瀬川	N	3	3	3	3		
	M	3.98	125.1	1.81	6.26	133.2	33.5
	SD	1.11	18.8	0.52	4.16		
伊作川	N	3	3	3	3		
	M	1.57	59.5	0.79	3.92	64.2	40.9
	SD	0.10	21.7	0.36	2.38		
※神之川	N		1	1			
	M		171.3	2.14		(192.7)	
	SD						

※神之川は鹿児島県公共用水域水質測定結果の値
神之川のDINは推定値

表-4.14 DIN および PO₄-P 負荷量

河川	流量 (m ³ /s)	DIN (tonN/year)	PO ₄ -P (tonP/year)
万之瀬川	13.25	779.8	51.5
伊作川	1.13	32.1	1.7
神之川	1.36	115.8	

して DIN が供給過多であることが考えられる。Redfield 比として見ると、吹上浜海域における植物プランクトンの成長にとって、PO₄-P が制限因子となっていることが考えられる。PO₄-P が制限因子となっている可能性は、吹上浜の砂浜地下水でも同様のことが言える(第 2 章参照)。栄養塩濃度、河川流量は季別の変動を考慮するべきだが、ここでは単純に、得られた栄養塩濃度に第 3 章で使用した河川の平年値流量を乗じて DIN 負荷量及び PO₄-P 負荷量を算定した(表-4.14)。その結果、万之瀬川、伊作川、神之川の DIN 負荷量は 779.8, 32.1, 115.8t-N/yr, PO₄-P 負荷量は万之瀬川, 伊作川が 51.5t-P/yr, 1.7t-P/yr と算定された。

(3) DIN/T-N, PO₄-P/T-P 負荷量比から T-N, T-P 負荷量の推定

山本ら(1996)¹⁴⁾は、DIN/T-N 負荷量比が、大阪湾の流入河川が平均 76%、播磨灘が平均 72%、備讃瀬戸が平均 58%、備後灘が平均 60%、安芸灘が平均 67%、広島湾が平均 70%と報告している。さらに、浮田、中西(1985)³⁾によると、瀬戸内海への流入河川である揖保川、加古川、厚東川の DIN/T-N が平均 70%、PO₄-P/T-P が平均 53%としている。そこで、本研究ではこれらの値を参考にして、DIN/T-N を 70%、PO₄-P/T-P を 50%として T-N 負荷量を推定した。その結果、T-N 負荷量は万之瀬川が 1,114.0t-N/yr、伊作川が 45.9t-N/yr、神之川が 165.4t-N/yr、T-P 負荷量は、万之瀬川が 103.0t-P/yr、伊作川が 3.4t-P/yr と算定された。

4.4.2 流達率の算定

流達率は流入（達）負荷量/排出負荷量であるから，原単位法によって推定した排出負荷量と，実測値によって推定した流入負荷量から流達率を算定した．その結果，T-N 負荷量の流達率は万之瀬川が 76.8%，伊作川が 54.5%，神之川が 44.9%，T-P 負荷量の流達率は，万之瀬川が 82.8%，伊作川が 34.1%であった．

神之川の T-P 負荷量の流達率と江口川，大川，永吉川，小野川の T-N 負荷量及び T-P 負荷量の流達率についても算定しなければならないが，これらの流達率は第 3 章で算定した流出量/河川流量の割合から推定した．流出量/河川流量の割合は，神之川，江口川，大川，永吉川は約 30%，小野川，伊作川は約 60%，万之瀬川は 70%である．河川流量の割合が多い万之瀬川は流達率が大きく，地下水流量の割合が多い神之川は流達率が小さくなっていることが考えられる．そのため，流出量/河川流量の割合が同レベルの，江口川，大川，永吉川は神之川の流達率を，小野川は伊作川の流達率を使用することにした．なお，神之川の T-P 負荷量の流達率は 30%とした．

表-4.15 に流入負荷量の算定結果を示す．吹上浜への流入負荷量として，T-N 流入負荷量，T-P 流入負荷量各々，1,439.3t-N/yr，129.2t-P/yr と推定された．

表-4.15 吹上浜流域における流入負荷量

河川	T-N流入負荷量 (tonN/year)	T-P流入負荷量 (tonP/year)
江口川	24.8	2.0
神之川	165.4	14.6
大川	27.7	2.5
永吉川	40.4	2.4
小野川	21.0	1.1
伊作川	45.9	3.4
万之瀬川	1114.0	103.0
流域合計	1439.3	129.2

4.5 地下水からの DIN, PO₄-P 負荷量

第 3 章で算出した地下水流量に，加茂(2011)¹⁵⁾によって得られた砂浜地下水の栄養塩濃度の平均値(DIN;67.5 μ mol/l, PO₄-P;1.5 μ mol/l)を乗じて，栄養塩供給量を算出した．その結果，DIN は約 376.1t-N/yr, PO₄-P は約 18.3t-P/yr の栄養塩負荷量が推定された．吹上浜の全流域における T-N 排出負荷量 2,150.3 t-N/yr に対して DIN は 17.5%，T-P 排出負荷量 209.0 t-P/yr に対しては PO₄-P は 8.8%である．T-N 流入負荷量 1,439.3 t-N/yr に対して DIN は 26.1%，T-P 流入負荷量 129.2 t-P/yr に対しては PO₄-P は 14.1%である．

4.6 降雨からの窒素負荷量

多田(1998)¹⁶⁾が播磨灘において降雨からの直接の窒素・リン負荷量は、原単位法で推定した負荷量に対して窒素が約13%，リンが1.5%と報告しているように、降雨からの窒素供給量も無視できない量である可能性がある。そこで、吹上浜沿岸域に直接供給される降雨からの窒素供給量を推定した。

使用した栄養塩データは、上村ら(2009)¹⁷⁾の鹿児島市内での調査結果を使用した(表-4.16)。吹上浜沿岸域の範囲を図-4.5に示す範囲(466km²)として、表層に直接供給されるNO₃⁻+NH₄⁺は平均値として年間391.4tonと算出された。降雨からの直接供給量(NO₃⁻+NH₄⁺)は、吹上浜の全流域におけるT-N排出負荷量2,150.3 t-N/yrに対して18.2%，T-N流入負荷量1,439.3 t-N/yrに対して、27.2%である。

表-4.16 鹿児島市の降雨成分 (NO₃⁻と NH₄⁺)

鹿児島	年度	降水量 (mm)	NO ₃ ⁻ (μ mol/l)	NH ₄ ⁺ (μ mol/l)	NO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ (μ mol/l)	NO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺ (kg/ha/year)
	2003	1691	12.7	19	31.7	7.5
	2004	2161	9.5	22	31.5	9.5
	2005	1489	12.7	15.1	27.8	5.8
	2006	2186	13	21.5	34.5	10.6
	2007	2181	11.2	16.4	27.6	8.4
	平均	1942	11.8	18.8	30.6	8.4

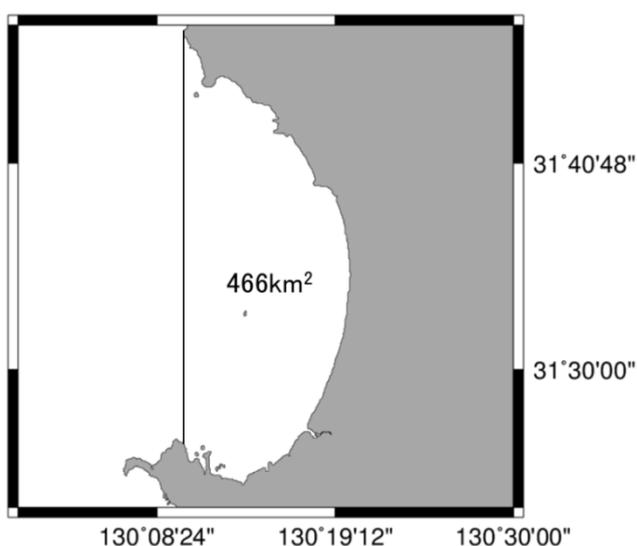


図-4.5 吹上浜沿岸域の範囲

4.7 シラス漁による窒素・リンの水揚量

鹿児島県は全国有数のシラスの産地で、北薩海域、西薩海域、志布志湾海域の3海域（図-4.6）が主な漁場となっている^{18),19)}。中でも、吹上浜沖合の西薩海域の漁獲量が最も多く、鹿児島県のシラスの総水揚量に対して西薩海域が30～80%、志布志湾海域が10～60%、北薩海域が数%となっている¹⁸⁾。表-4.17に2005年から2011年の西薩海域でのシラス漁獲量を示す。ここで、西薩海域の漁獲量は、農林水産省の海面漁業生産統計調査の平成17年～23年の市町村別データ²⁰⁻²⁶⁾における薩摩川内市、いちき串木野市、日置市、南さつま市の漁獲量を用いた。さらに浮田(1983)²⁷⁾に従い、漁獲量から可食たんぱく量、N水揚量及びP水揚量を算出した。

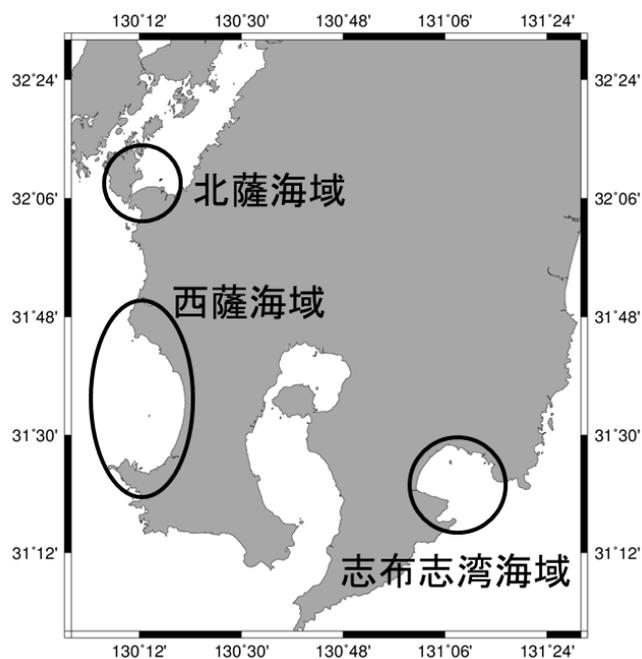


図-4.6 鹿児島県の主なシラス漁場(加治屋(2006)¹⁸⁾)

表-4.17 西薩海域でのシラス漁獲量

	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年
	(t)						
薩摩川内市	860	566	928	612	290	381	506
いちき串木野市	312	401	378	386	297	359	320
日置市	1,769	1,634	1,429	909	996	866	867
南さつま市	1,007	734	589	645	492	850	411
Total	3,948	3,335	3,324	2,552	2,075	2,456	2,104

ここで,

$$\text{可食たんぱく質} = \text{水揚量} \times (1 - \text{廃棄率}) \times \text{たんぱく含量} \quad (4.3)$$

$$\text{N水揚量} = \text{水揚量} \times \text{たんぱく含量} \times 0.88 / 6.25 \quad (4.4)$$

$$\text{P水揚量} = \text{N水揚量} \times (\text{P/N}) \quad (4.5)$$

ただし, $\text{P/N} = (\text{可食 P 含量} \times 1.21) / (\text{可食たんぱく含量} \times 0.88 / 6.25)$

である。廃棄率, たんぱく含量, P 含量は食品成分表²⁸⁾のしらす干しの微乾燥品の値を使用した。

表-4.18 に 2005 年から 2011 年の西薩海域における可食たんぱく量, N 水揚量及び P 水揚量の算定結果を示す。漁獲量は 2005 年以降減少傾向にあり, それに伴い可食たんぱく量, N 水揚量及び P 水揚量も減少している。ここで, 単純に 2005 年から 2011 年の平均値を見ると, 可食たんぱく量, N 水揚量及び P 水揚量は各々, 653.2ton, 92.0ton, 16.1ton である。N 水揚量平均値は, 吹上浜全流域における T-N 排出負荷量 2,150.3 t-N/yr に対して 4.3%, P 水揚量平均値は T-P 排出負荷量 209.0 t-P/yr に対して 7.7%を占めている。T-N 流入負荷量 1,439.3 t-N/yr に対しては 6.4%, T-P 流入負荷量 129.2 t-P/yr に対しては 12.5%である。

表-4.18 西薩海域での可食たんぱく量, N 水揚量及び P 水揚量

年	可食たんぱく (t)	N水揚量 (t)	P水揚量 (t)
2005	912.0	128.4	22.5
2006	770.4	108.5	19.0
2007	767.8	108.1	18.9
2008	589.5	83.0	14.5
2009	479.3	67.5	11.8
2010	567.3	79.9	14.0
2011	486.0	68.4	12.0
平均	653.2	92.0	16.1

4.8 まとめ

原単位法によって, 吹上浜流域における T-N, T-P 排出負荷量及び T-N, T-P 流入負荷量を算定した。その結果, T-N, T-P 排出負荷量は吹上浜全流域の合計値として, 2,150.3t-N/yr, 209.0 t-P/yr と推定された。吹上浜への T-N, T-P 流入負荷量としては, 1,439.3 t-N/yr, 129.2 t-P/yr と推定された。地下水からの DIN, PO₄-P 負荷量は各々, 376.1t-N/yr, 18.3t-P/yr と推定され, 吹上浜に流入する陸域からの流入負荷量を計算す

ると，1,815.1 t-N/yr，147.5t-P/yrとなる．地下水のDIN， PO_4 -P負荷量は陸域からの流入負荷量に対して，各々20.7%，12.4%を占めていることが推定された．図-4.7に吹上浜沿岸域（図-4.5に示す範囲）における窒素循環を示した．吹上浜沿岸域には，河川，地下水及び降雨によって2,206.5t-N/yrの窒素が供給され，吹上浜沿岸域で代表的な漁獲物であるシラスの漁獲量として，92.0t-N/yrが回収されることになる．沖合からの窒素供給については，本研究では考慮しておらず，今後検討する必要がある．

陸域から供給される窒素(DIN)を，海域の植物プランクトンがすべて取り込んだと仮定して，C/N比（重量比）を5.7として炭素量に換算すると，7,886.5t-C/yrの炭素固定量となり，地下水からのDIN供給量は2,143.8 t-C/yrの炭素固定量に寄与していることになる．

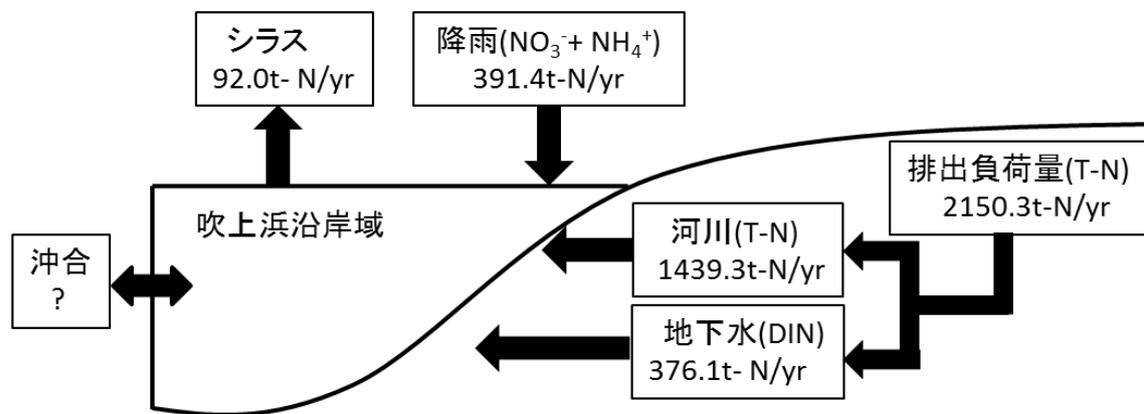


図-4.7 吹上浜沿岸域における窒素循環

参考文献

- 1) 鹿児島県：河川台帳.
- 2) 国松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技法堂出版，266p., 1989.
- 3) 浮田正夫，中西 弘：河川の汚濁負荷流達率に関する研究，土木学会論文集，**357**，pp.225-234,1985.
- 4) 流域別下水道整備総合計画制度設計会議 編：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，日本下水道協会，285p，2008.
- 5) 鹿児島県：鹿児島県ホームページ，汚水処理人口普及率，平成 22 年度，<http://www.pref.kagoshima.jp/infra/toshi/haisui/hukyuritu/index.html>

- 6) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，畜産統計調査，市町村別データ，平成 17 年，
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/>
- 7) 経済産業省：経済産業省ホームページ，工業統計調査，平成 22 年市区町村編，
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2.html>
- 8) 経済産業省：経済産業省ホームページ，工業統計調査，平成 22 年工業統計メッシュデータ，
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/index.html>
- 9) 鹿児島県：鹿児島県ホームページ，第 4 期鹿児島湾ブルー計画，
<http://www.pref.kagoshima.jp/ad05/kurashi-kankyo/kankyo/suishitu/keikaku/blue.html>
- 10) 西尾道徳：作物種類別の施肥窒素負荷量に基づく地下水の硝酸性窒素汚染リスクの評価方法，日本
土壌肥料学雑誌，**72(4)**，pp.522-528，2001.
- 11) 奥 修：吸光光度法ノウハウ ケイ酸・リン酸・硝酸塩の定量分析，技法堂出版，137 p.,2002.
- 12) 荒川 清，大久保勝男，佐々木克之，澤田保夫，田端健二，長倉克男，深井麟之助，
藤井 実，本城凡男，町田喜弘：水質分析法，新編水質汚濁調査指針（日本水産資源
保護協会 編），恒星社厚生閣，東京，p.133-235,1980.
- 13) 鹿児島県：平成 23 年度 公共用水域水質測定結果.
- 14) 山本民次，北村智顕，松田 治：瀬戸内海に対する河川流入における淡水，全窒素および全リン
の負荷，*J.Fac.Appl.Biol.Sci.*，**35**,pp.81-104,1996.
- 15) 加茂 崇：吹上浜海岸の砂浜生態系における水質環境とアミ類餌料環境，水産大学校修士論文，
94p.，2011.
- 16) 多田邦尚：降水中の窒素・リン濃度と内湾への栄養塩負荷，海と空，**73(4)**，pp.125-130，1998.
- 17) 上村忠司，上大藪智徳，茶屋典仁，遠矢倫子，平原裕久：鹿児島県における酸性降下物—2003
年度から 2007 年度の調査結果について，鹿児島県環境保健センター所報，**10**，pp.82-89，2009.
- 18) 加治屋 大：鹿児島県におけるシラス漁況予測に向けた取り組み，黒潮の資源海洋研究，**7**，
pp.13-16，2006.
- 19) 鹿児島県水産技術センター：うしお，**329**，pp1-2. 2011.

- 20) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 17 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001073352>.
- 21) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 18 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001073376>.
- 22) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 19 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001073377>.
- 23) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 20 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001073378>.
- 24) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 21 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001075096>.
- 25) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 22 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001089356>.
- 26) 農林水産省：農林水産省ホームページ，統計情報，海面漁業生産統計調査，市町村別データ，平成 23 年，<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001106530>.
- 27) 浮田正夫：わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究，京都大学博士論文，p.242，1983.
- 28) 香川芳子：食品成分表 2013 本表編，女子栄養大学出版部，p.308，2013.

第5章 吹上浜沿岸域の表層クロロフィル a の分布

5.1 まえがき

第3章及び第4章において、吹上浜流域における淡水流入量と流入負荷量をマクロ的に推定した。本章では次の段階として、吹上浜沿岸域におけるクロロフィルa(Chl.a)の分布について把握することにする。

沿岸域の高次栄養段階の生物生産を把握するためには、基盤となる一次生産量を明らかにすることが重要である。Ryther(1969)¹⁾は、沿岸域の平均的な一次生産量は100g/C/m²/yearと推定しているが、吹上浜沿岸域における一次生産量はいまだ正確に把握されていない。海洋における一次生産量の測定は、溶存酸素法と放射性同位元素を用いた¹⁴C法、さらには非放射性元素の¹³Cを用いて行われる²⁾。これらの現場法によって、一次生産量を推定することが望ましいことは言うまでもないが、今のところ吹上浜沿岸域において実測値に基づいたデータはないと思われる。そこで本研究では、初期段階として、現場の実測値データがなくても推定可能な、人工衛星によって観測されたクロロフィルa濃度データを使用し、吹上浜沿岸域の表層クロロフィルaの水平分布について把握することを目的とした。

5.2 衛星画像による植物プランクトン現存量の把握

本研究では、環日本海海洋環境ウォッチ³⁾によって公開されている衛星画像のうち、MODIS画像のChl.aデータを使用した。取得したChl.aデータは、雲の影響に依るものを除き、2011年の、1/2, 1/14, 2/3, 2/15, 3/5, 3/13, 3/31, 4/5, 4/12, 4/25, 5/13, 5/31, 6/28, 7/16, 7/30, 8/3, 8/13, 8/31, 9/13, 10/16, 10/26, 11/1, 11/16, 12/5, 12/20とした。取得したデータは、ArcGIS10.0(ESRI社)を使用して、**図-5.1**に示す範囲内のSt.1~47の観測定点におけるChl.aの水平分布を内挿補間して表示した。なお、内挿補間はIDW(Inverse Distance Weighted)法を用いた。

5.2.1 吹上浜沿岸域のChl.aの水平分布

吹上浜沿岸域のChl.aの水平分布を**図-5.2**に示す。水平分布を見る限りでは、沖合よりも陸域に近いほうが高濃度になる傾向にある。そこで、吹上浜沿岸域を陸域のほうからA(158km²), B(308km²), C(358km²)に区分し(**図-5.3**)、単位面積当たりの表層Chl.aの月平均値を比較

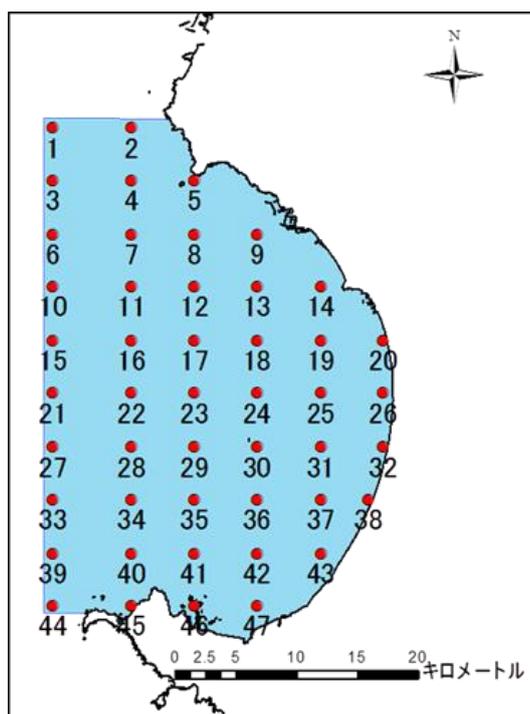


図-5.1 吹上浜沿岸域における衛星画像データの観測定点

してみた(図-5.4)。その結果、陸域に面したA海域が最も高いChl.aを示す傾向にあり、B海域、C海域において大差はないが、B海域が若干高い値を示す傾向にある。そのため、吹上浜沿岸域の一次生産において陸域からの栄養塩供給量の重要性が示唆される。ただし3/31、5/13、7/16、8/3、8/13、の沖合（C海域）の北部において、Chl.aが相対的に高濃度になる時がある。これは、鹿児島県の北西部には川内川（流域面積；1600km²、年平均流量；55m³/s）⁴⁾の流入があり、吹上浜沿岸域の表層水は夏季に南への流れが卓越する⁵⁾ことを考えれば、川内川からの栄養塩供給も考慮する必要がある。沖合からの影響も考慮しなければならないが、今回取得したデータからは、特に高濃度を示す傾向にあるのはA海域の海岸線付近においてである。10μg/l以上の値が観測されたのは、5/31、6/28、7/30、8/31、10/16、7/30、8/31、11/1の流入河川の河口付近である。その中でも、吹上浜流域における最大河川である万之瀬川河口付近においてChl.aが高濃度を示している。そこで、次節で万之瀬川河口付近における栄養塩供給量とChl.aの関係について検討してみる。

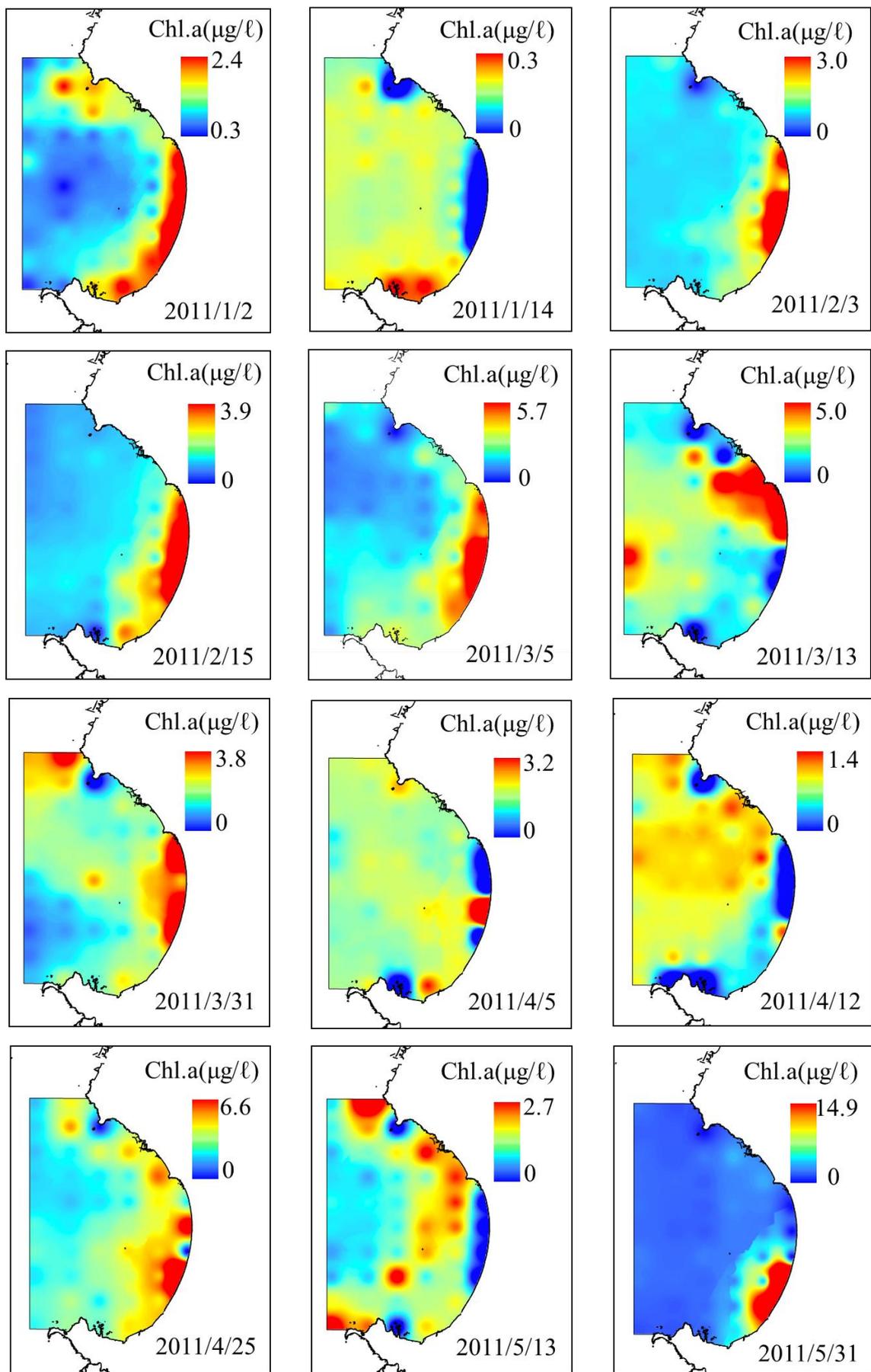


図-5.2 吹上浜沿岸域におけるChl. aの水平分布 (次ページに継続)

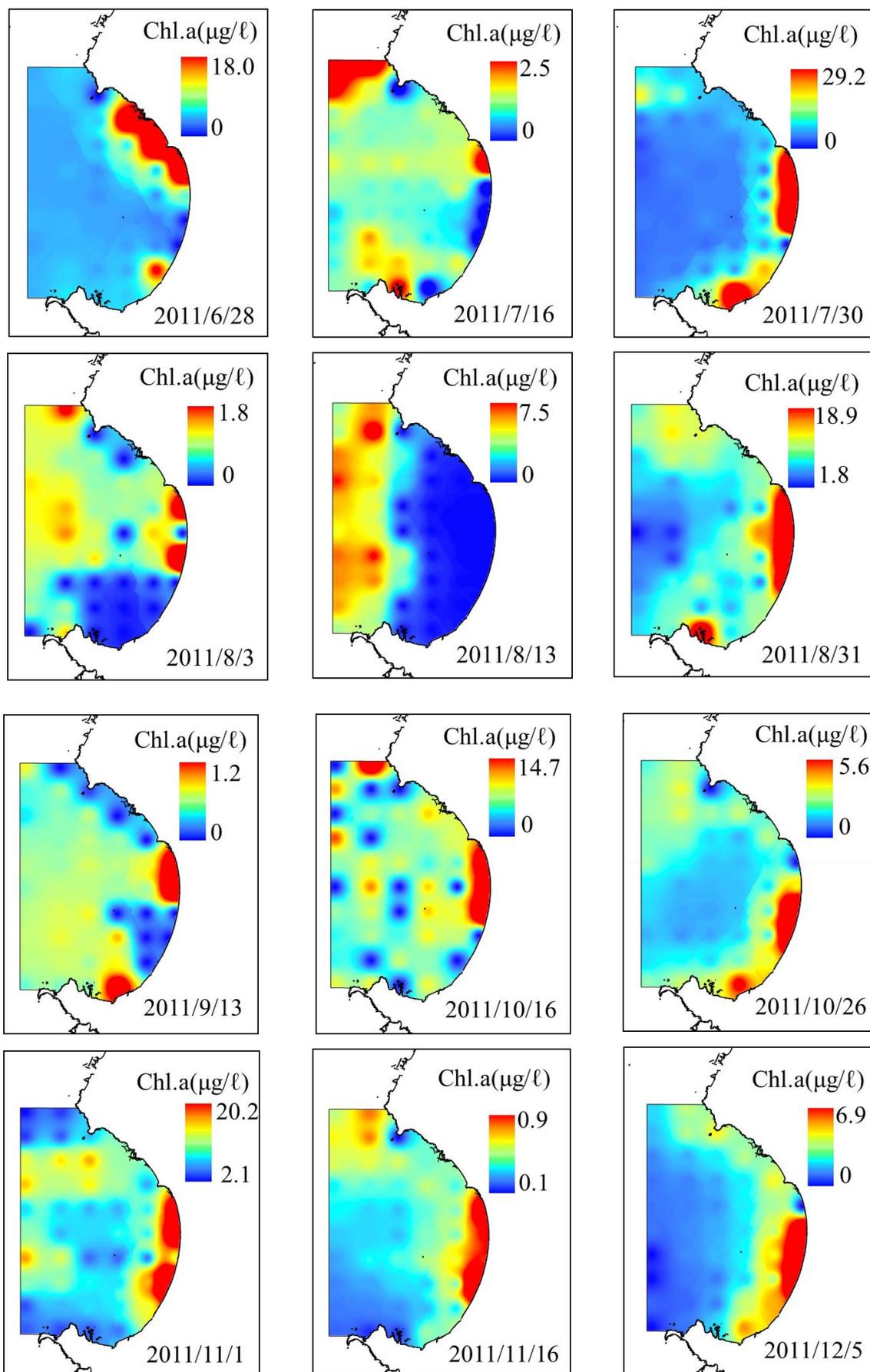


図-5.2 吹上浜沿岸域におけるChl. aの水平分布（次ページに継続）

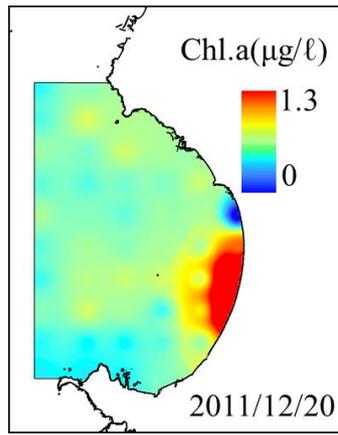


図-5.2 吹上浜沿岸域におけるChl. aの水平分布

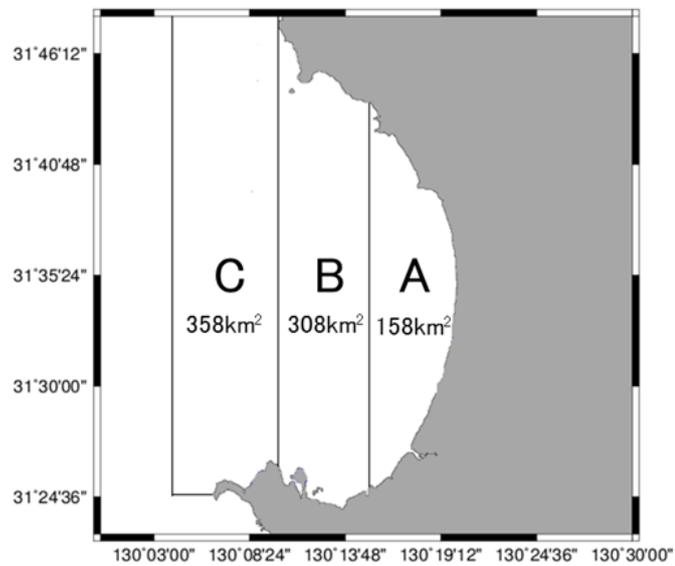


図-5.3 吹上浜沿岸域の海域区分及び表面積

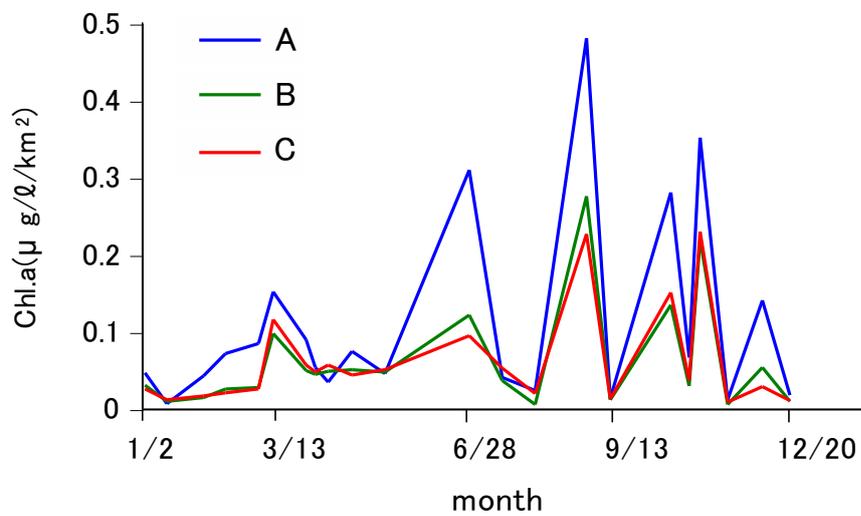


図-5.4 海域別表層 Chl. a の比較

5.3 万之瀬川河口域における栄養塩供給量とChl. a

衛星データによる Chl.a 濃度から、吹上浜の海岸線付近、特に万之瀬川河口域が特に高濃度になることがわかった。そこで、万之瀬川河口域(図-5.1 の St.43)を対象とし、第4章で算定した NO₃-N 供給量と Chl.a の関係について検討した。

(1) 水温変動

万之瀬川河口域の表層水温の実測値は鹿児島県の公共用水域水質測定結果によって得ることができるが、2~3か月毎に一度しか測定されておらず、連続的な観測データがない。そこで、まず2008年から2011年の万之瀬川河口域近傍の加世田のアメダス気温と、公共用水域水質測定結果(表-5.1)の関係を調べた結果、有意な正の相関($r=0.95, p<0.01$)が認められ(図-5.6)、水温は次式によって推定できることがわかった。

$$\text{表層水温} = 0.58 \times \text{気温} + 10.04 \quad (5.1)$$

ここで、気温は2011年のデータから算出した次式の近似式によって計算し、得られた計算値を(5.1)式に代入し水温を算定した。

$$\text{気温} = 17.76 + 12.0 \times \cos \times 2\pi / 365 \times (\text{day} - 216) \quad (5.2)$$

表-5.1 公共用水域の水温と加世田のアメダス気温

年度	月日	時間	水温(公共用水域) (°C)	加世田(気温) (°C)
2008	4月21日	9:29	19.8	20.5
	6月23日	10:01	24.2	23.9
	9月8日	8:21	27.5	27
	10月21日	9:53	25.5	25.1
	12月24日	8:57	14.5	6.2
2009	2月2日	9:45	15.2	11.7
	4月30日	9:11	19.5	18.5
	6月1日	9:06	22	23
	8月3日	10:09	28.6	32
	10月13日	9:03	22.9	21.5
2010	12月9日	9:24	19.5	13.4
	2月17日	9:29	15.7	8.4
	5月6日	9:24	21.1	22.2
	6月29日	9:35	24.5	26.8
	8月16日	9:39	29.8	30.1
2011	10月20日	9:40	23.4	21.2
	12月6日	9:23	19.1	13.9
	2月7日	9:12	14	7.1
	4月8日	9:14	17.6	16.7
	7月10日	16:23	26.8	32.1
2011	8月22日	9:22	28	25.8
	10月12日	9:31	25	24.6
	12月5日	9:21	17.7	12.1

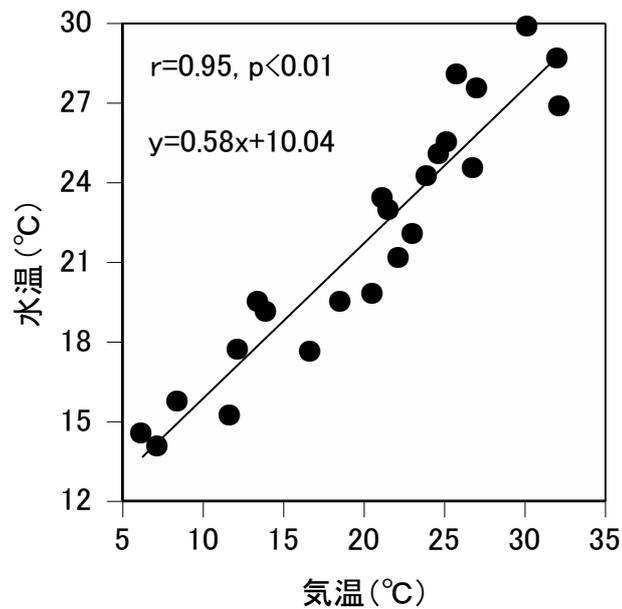


図-5.6 公共用水域の水温と加世田のアメダス気温の関係

図-5.7 に、2011 年のアメダス気温と計算値の気温の時系列変化を示す。また、図-5.8 に水温の計算値と公共用水域の水温の時系列変化を示す。加えて、参考値として、衛星画像データ（環日本海海洋環境ウォッチが提供している、NOAA による日中 10 日間の平均表層水温）³⁾の表層水温の時系列変化についても示した。

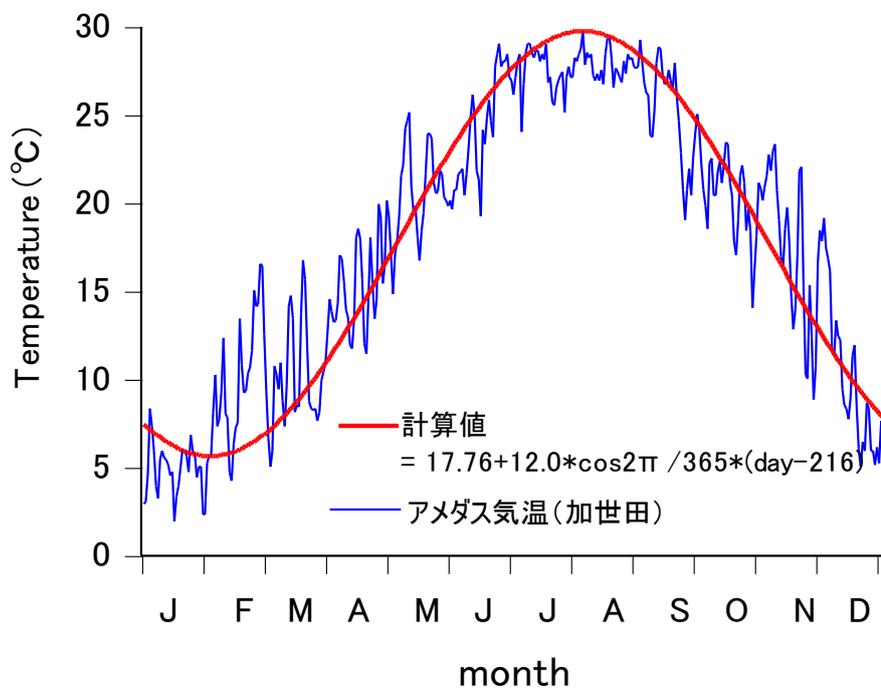


図-5.7 加世田のアメダス気温と計算値による気温

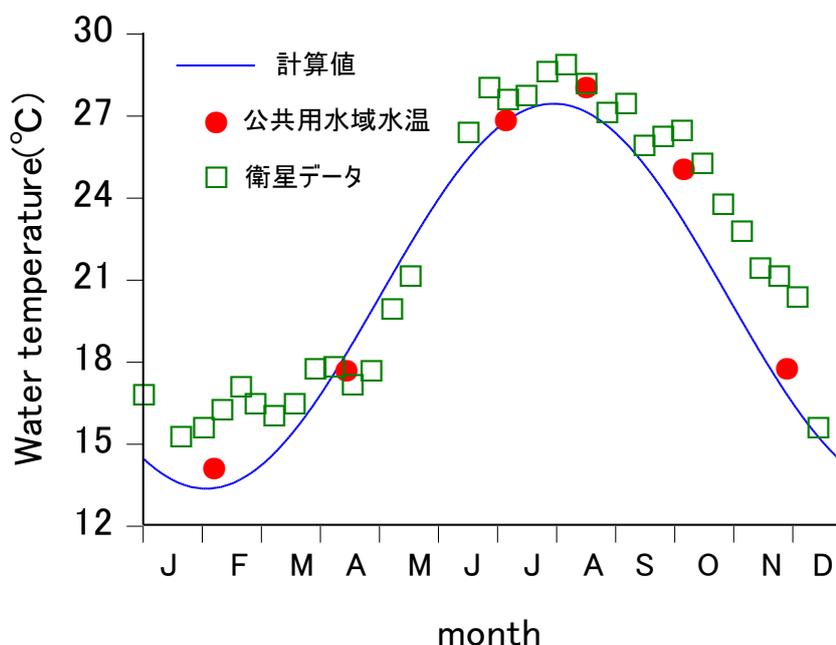


図-5.8 計算値による水温と公共用水域及び衛星画像による水温

(2) NO₃-N供給量とChl. a

第4章で算定した，年間NO₃-N供給量から月別NO₃-N供給量を次式によって算定した。

$$\text{月別 NO}_3\text{-N 供給量} = \text{年間 NO}_3\text{-N 供給量} \times \frac{\text{月別降水量}}{\text{年間降水量}} \quad (5.3)$$

ここで，降水量は2011年の加世田のアメダス降水量である。

Chl. a は，St.43で取得できたデータから月平均値を算定し，月別NO₃-N供給量とともに，時系列変化を図-5.9に示した。図中には，加世田の降水量，水温（計算値），日射量も示した。ただし，日射量は鹿児島気象官署における全天日射量の日積算量の月別平年値(1981年から2010年の平均)⁴⁾である。

図-5.9に示した結果によると，降水量の増加に伴い，栄養塩供給量が増加する梅雨時期の6月にChl. aが短期的に増加していることが考えられる。7月にはChl. aの低下が見られるが，これは河川からの栄養塩供給量が低下したこと，6月のChl. aが短期的に増加したことにより栄養塩が一時的に枯渇していたことなどが考えられる。水温，日射量が最大となる8月になると再びChl. aの増加が見られ，表層付近で植物プランクトンの増殖が活発になったことが考えられる。全体の傾向として，栄養塩供給量が増加し始める5月から，9月までの間において変動が激しいことがわかる。

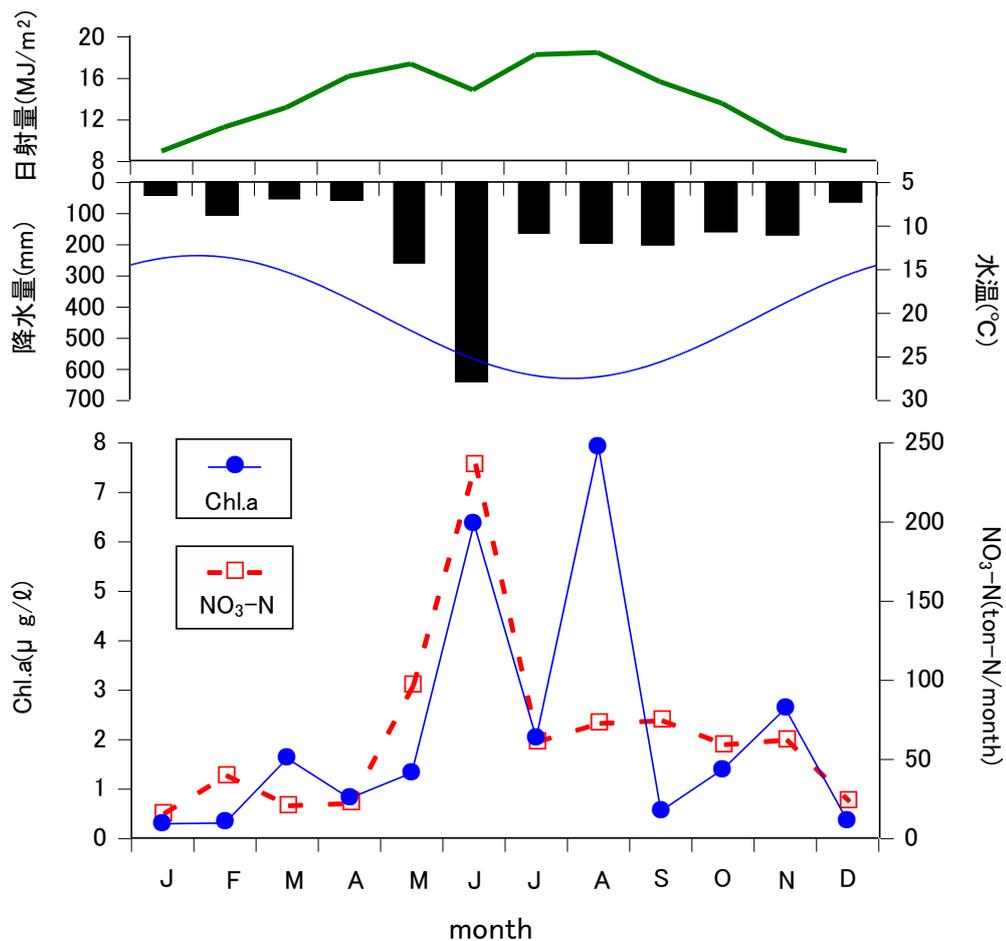


図-5.9 万之瀬川河口域の NO₃-N 供給量と Chl. a

5.4 ガウス分布による鉛直方向のChl. aの推定

衛星画像からは、表層における Chl.a の水平分布は把握できるが、鉛直方向の分布はわからない。一般的に、海洋における Chl.a の鉛直分布は、ずらしを入れたガウス分布で表現できると言われている(Platt and Sathyendranath,2009)⁶⁾。このずらしを入れたガウス分布は次式で表される。

$$B(z) = B_0 + \frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-z_{max})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5.4)$$

ここで、 B_0 はバックグラウンド生物量、 z は水深、 z_{max} は Chl.a 極大値の深さ、 σ は Chl.a の最大値が現れる分布の幅、 h はガウス曲線に囲まれた積分値である。また、 σ は次式で表される。

$$\sigma = \frac{h}{\sqrt{2\pi(C_{max} - B_0)}} \quad (5.5)$$

ここで、 C_{max} は鉛直 Chl.a の最大値である。

作野ら(2008)⁷⁾は、このガウス分布を適用し、広島湾において衛星データの表層 Chl.a から、鉛直 Chl.a 分布を 50% の推定誤差以内で推定可能であるとしている。そこで、本研究でも作野ら(2008)⁷⁾に従い、吹上浜沿岸域の鉛直 Chl.a 分布の推定を試みた。

鉛直 Chl.a 分布の推定は、海域 A, B, C(図-5.3)において行った。ここで、図-5.10 の吹上浜沖合の海底地形図(岩淵・向山, 2006)⁸⁾を参考に海域 A, B, C の平均水深を各々 20m, 50m, 70m として解析を行った。

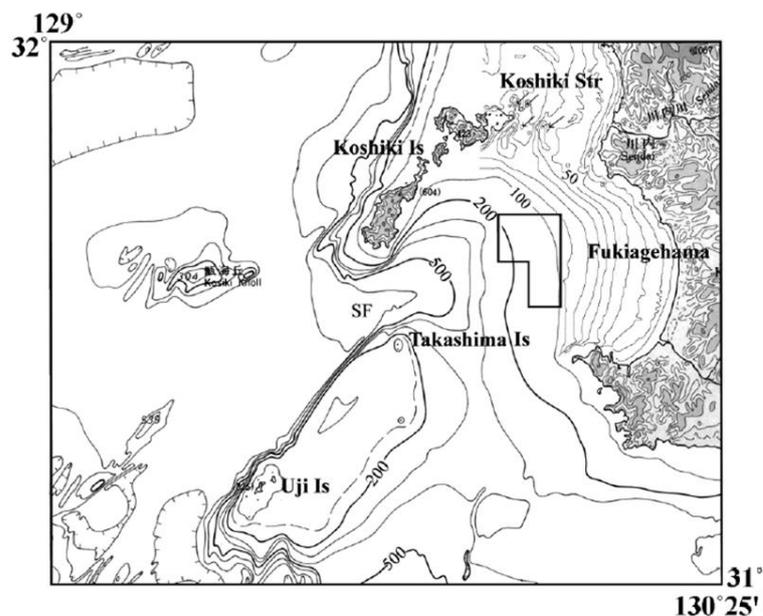


図-5.10 吹上浜沖合の海底地形図(岩淵・向山 2006⁸⁾から引用)

作野ら(2008)⁷⁾に従い、ガウス分布式(5.4)式のパラメータの C_{max} , z_{max} , h は各々以下の式によって推定した。

$$C_{max} = 1.45 + C_0 + 1.73 \quad (5.6)$$

$$z_{max} = -3.50C_0 + 16.37 \quad (5.7)$$

$$h = 6.74 C_{max} + 2.14 \quad (5.8)$$

ここで、 C_0 は表層の Chl.a 濃度である。ただし、作野ら(2008)⁷⁾は表層水温が 22°C 以上の時は、水温と z_{max} は高い正の相関があるとして、(5.7)の代わりに以下の式を示している。

$$z_{max} = 4.03T_0 - 90.01 \quad (5.9)$$

ここで、 T_0 は表層水温である。

よって、表層水温が 22°C 以上 (NOAA による日中 10 日間の平均表層水温)³⁾であ

った, 6月から11月までは, (5.6), (5.8), (5.9)式を使用し, それ以外の月は, (5.6), (5.7), (5.8)式を使用し鉛直 Chl.a 分布の推定を行った. また, B_0 のバックグラウンド生物量は, 作野ら(2008)⁷⁾が広島湾で使用した値を参考に, 春(3~5月), 夏(6~8月), 秋(9~11月), 冬(12~2月)各々, 0.7, 1.0, 1.2, 0.5とした. ただし, 作野ら(2008)⁷⁾は冬における B_0 は示していないので, ここでは夏の半分の値とした.

5.5 鉛直方向 Chl. a の推定結果

鉛直 Chl.a 分布の推定結果を図-5.11(海域A:水深20m), 図-5.12(海域B:水深50m), 図-5.13(海域C:水深70m)に示す. Chl.a の極大水深は海域ごとに大きな違いは見られず, 春から夏にかけて徐々に下層へ移動して, 8月に最大水深となり, 秋から冬にかけて再び表層へと移動している(図-5.14).

表層から水深10mまでの積算 Chl.a を算出すると, 海域Aで平均 $12.3\text{mg}/\text{m}^2$, 海域Bで平均 $11.8\text{mg}/\text{m}^2$, 海域Cで平均 $11.6\text{mg}/\text{m}^2$, となる. 有機炭素と Chl.a の比 C/Chl.a 比を 50(Kawamiya *et al.*,1995)⁹⁾として, 表層から水深10mまでの Chl.a 現存量を炭素量に換算すると, 各々 $615\text{g-C}/\text{m}^2$, $590\text{mg-C}/\text{m}^2$, $580\text{mg-C}/\text{m}^2$ となる.

5.6 まとめ

MODIS 画像の表層 Chl.a 濃度のデータを使用して, 吹上浜沿岸域の表層 Chl.a の水平分布をモニタリングした. その結果, 流入河川の河口付近では春から秋にかけて $10\mu\text{g}/\text{l}$ 以上の値を示すこともあり, 沖合よりも陸域に近い海域が高濃度になる傾向にあった. そのため, 吹上浜沿岸域の一次生産において陸域からの栄養塩供給量の重要性が考えられる. 一方で, 吹上浜沖合の北部において, 相対的に Chl.a が高濃度を示すときもあり, 鹿児島県北西部から流入する一級河川である川内川の影響についても示唆された.

衛星画像によって, 吹上浜沿岸域の表層 Chl.a の季節変化や陸側からの流入負荷量の影響等について, ある程度は検討できるものと考えられる. 今後は, 吹上浜沿岸域における表層 Chl.a 濃度を実際に観測し, 衛星 Chl.a 濃度との比較をする必要がある. また, 鉛直方向の Chl.a 分布についても, 今回推定したような分布構造を示すのか検証し, 吹上浜沿岸域での一次生産量について把握する必要がある.

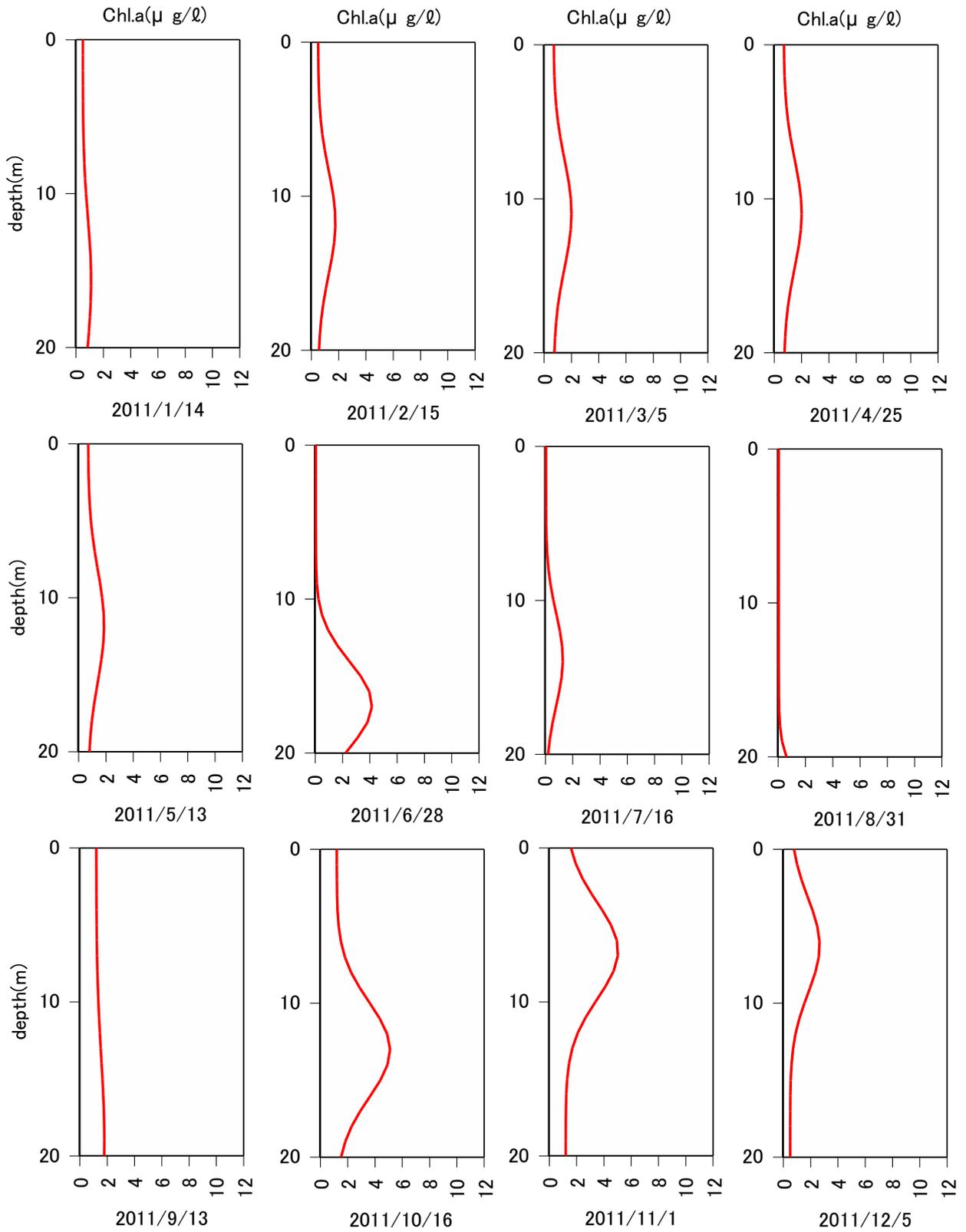


圖-5.11 Chl. a 鉛直分布(海域 A:水深 20m)

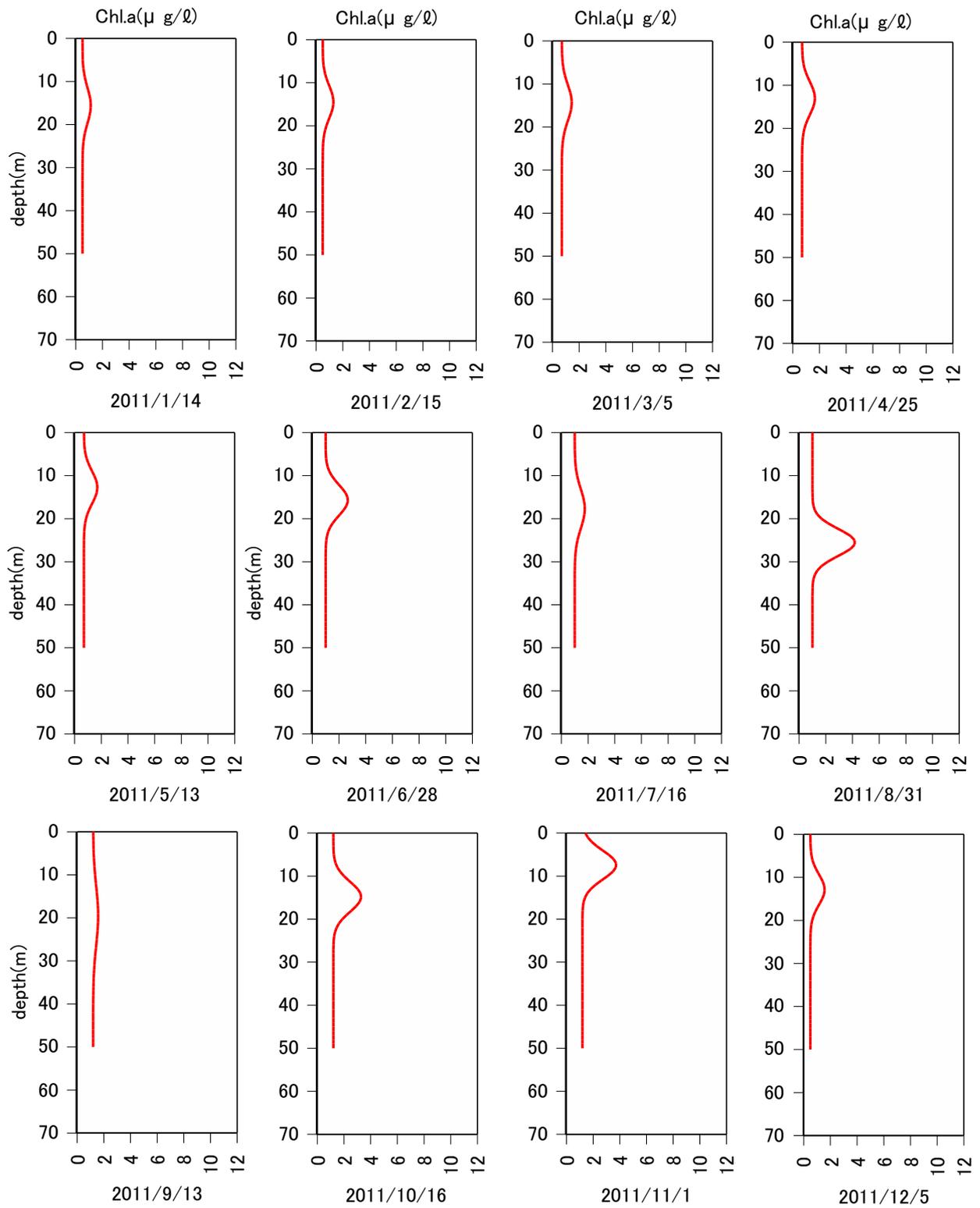


圖-5.12 Chl. a 鉛直分布 (海域 B: 水深 50m)

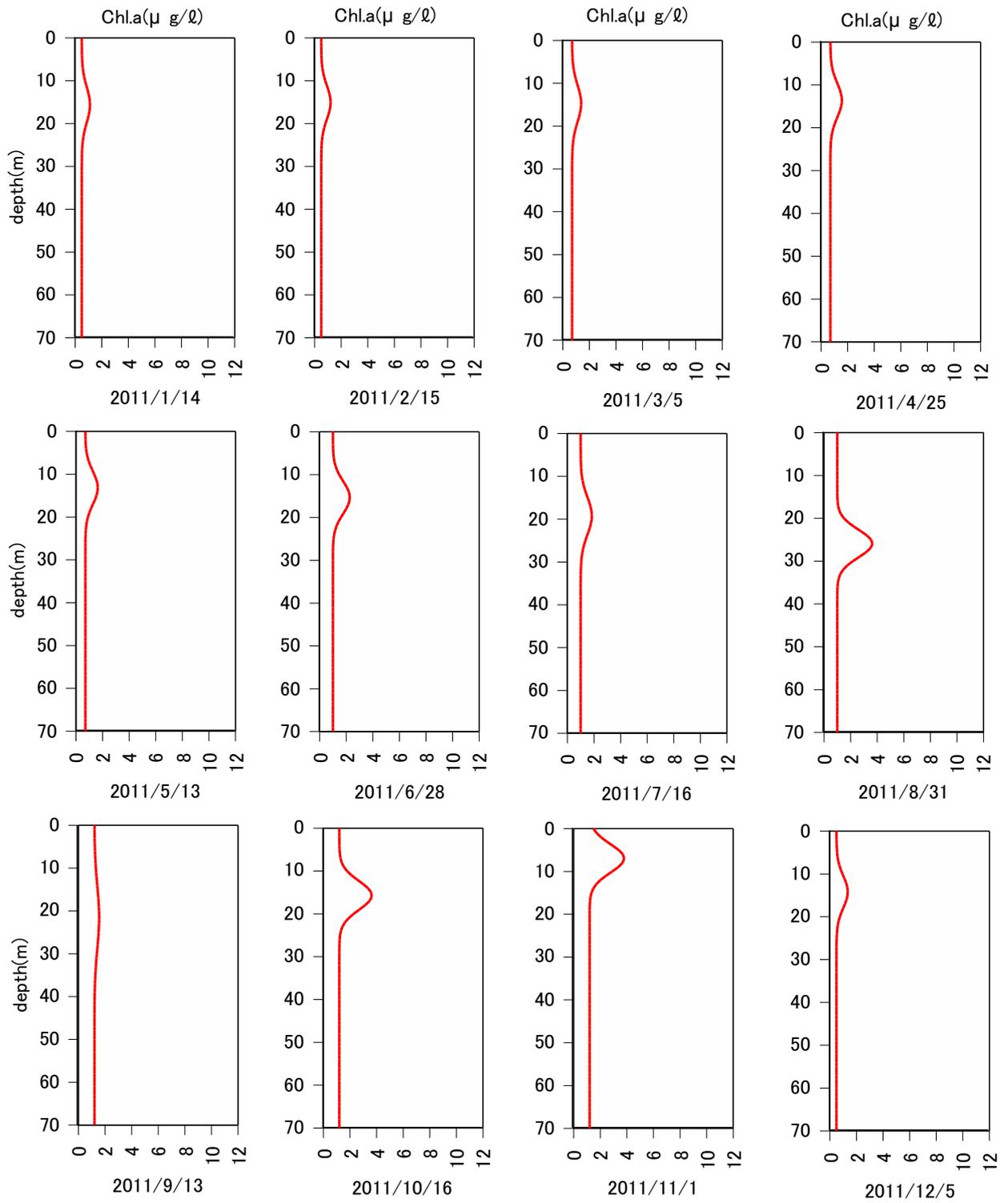


圖-5.13 Chl. a 鉛直分布(海域 C:水深 70m)

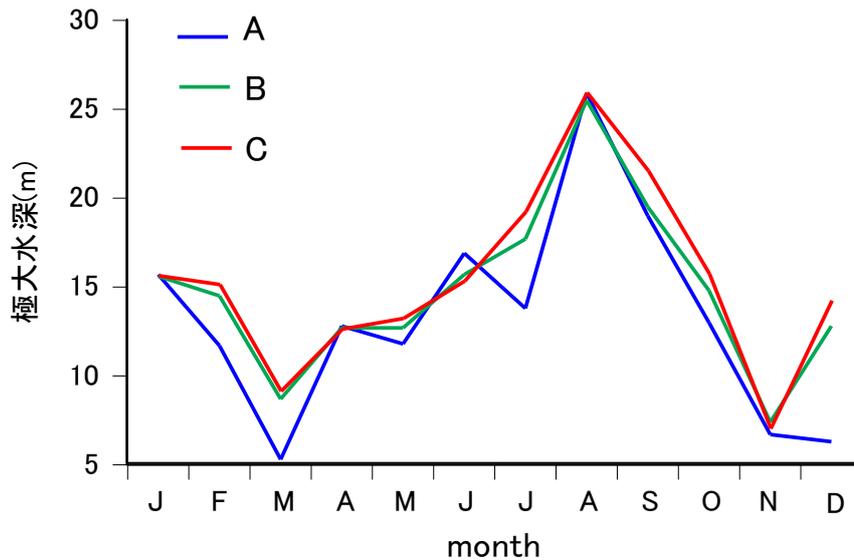


図-5.14 極大水深の変動

参考文献

- 1) Ryther, J. H. : Photosynthesis and fish production in the sea , Science, **166**, PP. 72-76, 1969.
- 2) 岡市友利, 小森星児, 中西 弘 編: 瀬戸内海の生物資源と環境, 恒星社厚生閣, 272p., 1996.
- 3) 環日本海海洋環境ウォッチ : <http://ocean.nowpap3.go.jp/>
- 4) 国立天文台 編: 理科年表 平成 24 年, 丸善, 1108 p., 2011.
- 5) 東 隆文, 日高正康, 幅野明正, 福田隆二, 東川勢二: 薩摩半島, 吹上浜西方沖の底質, 鹿児島大学水産学部紀要, **47**, pp.19-23, 1998.
- 6) Platt, T. and Sathyendranath, S : 光と海洋の一次生産 (中田喜三郎 訳), 生物研究社, 174p., 2009.
- 7) 作野裕司, 津島邦之: 衛星データを使った内湾の鉛直クロロフィル推定のためのガウスモデルの適用可能性評価, 日本船舶海洋工学会論文集, **7**, pp.39-46, 2008.
- 8) 岩淵 洋, 向山健二郎: 薩摩半島吹上浜沖陸棚斜面の特異地形, 地質学雑誌, **112(8)**, pp.531-534, 2006.
- 9) Kawamiya, M., Kishi, M. and Suginoara, N. : An ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, Journal of Oceanography, **51**, PP.635-664, 1995.

第6章 鹿児島県松ヶ浦海岸潮間帯における湧出地下水の現地調査

6.1 まえがき

鹿児島県薩摩半島南部の海岸には、溶結凝灰岩からなる岩礁地帯に、小さな入江状の砂浜（ポケットビーチ）が点在している。本研究で取り上げる松ヶ浦海岸もその一つである（図-6.1）。

松ヶ浦海岸はアカウミガメの上陸・産卵が確認され、平成8年に当時の建設省によりエコ・コースト事業の指定を受け、養浜工と潜堤の設置が行われ、自然環境に十分な配慮が必要とされる海岸となっている。

松ヶ浦海岸の潮間帯一帯からは地下水が滲出しており、定点（図-6.1, St.1）からは潮汐に関わらず明らかに多量の湧出地下水が目視で確認できる。この湧出状況は衛星画像でも確認できる（図-6.2のA地点）。さらに、事前調査によりこの湧出水の硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)が $300 \mu\text{mol/l}$ と高濃度を示した。松ヶ浦海岸には河川流入が存在しないため、地下水流入が重要な栄養塩供給機構として考えられる。そこで、本研究では松ヶ浦海岸の潮間帯から湧出する地下水の特徴を明らかにする目的で現地調査を行い、水質観測および流量測定を行った。なお、本海岸において、図-6.2のB地点からも地下水の滲出が目視で確認できるが、St.1からの湧出地下水量と比較すると非常に少量である。また、2012年度の梅雨時期には砂浜背後地である図-6.2のC地点から多量の地下水湧出によって砂の流出が地元住民によって確認されている。しかし、このような特別な状況を除いて、本海岸においてはSt.1からの湧出地下水が有意であると考えられる。

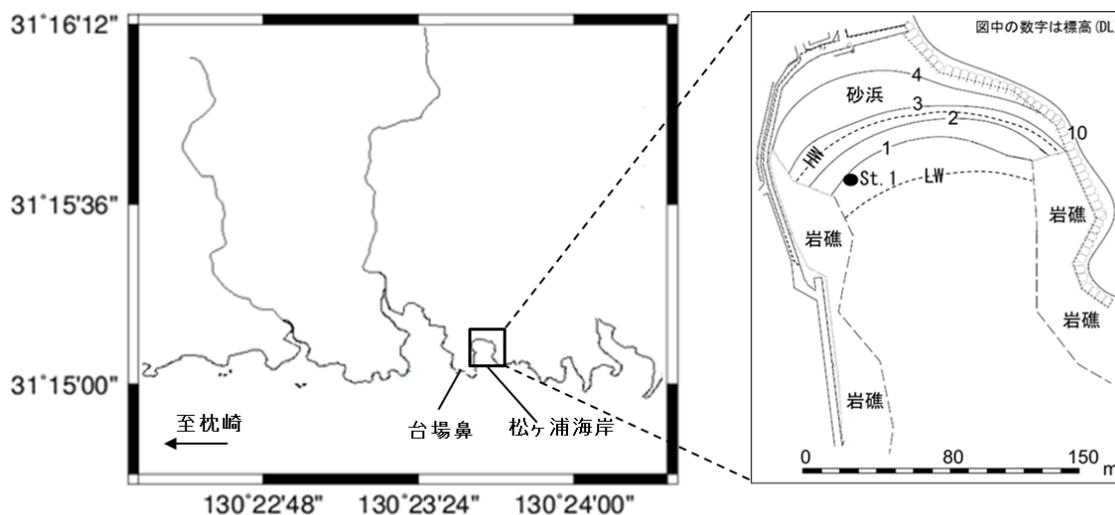


図-6.1 調査対象地域

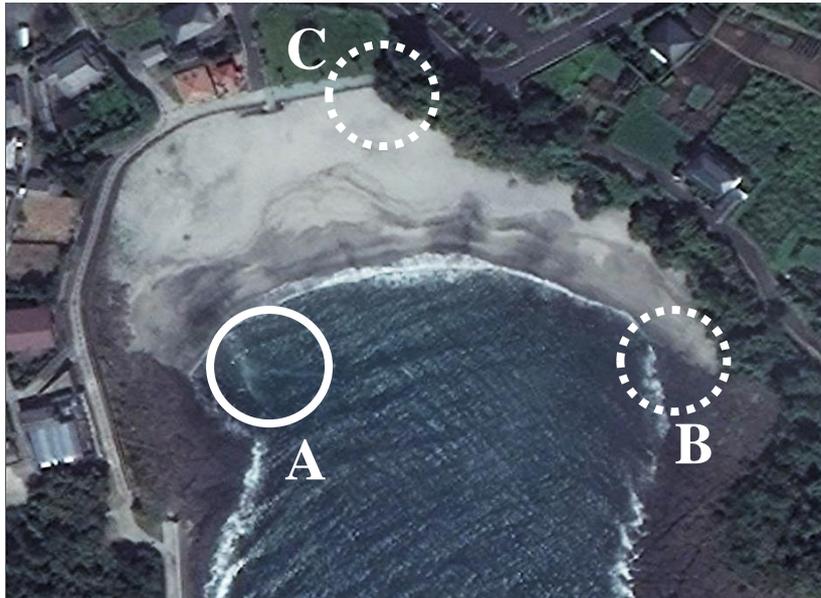


図-6.2 衛星画像から見る湧出地下水状況 (C) 2010 Microsoft Corporation its data suppliers

6.2 現地調査

現地調査は、図-6.1に示す松ヶ浦海岸潮間帯における地下水湧出ポイント (St.1) で行った。調査は、2013年1月11日午後10時22分から12日午前3時30分にかけての夜間に行った。調査時の潮汐は、大潮時の下げ潮時から上げ潮時である。St.1に取水口を取り付けた塩ビパイプ (口径：12.5 cm, 高さ：52 cm) を埋め込み (写真-6.1), 30分毎に取水口から流出する地下水量を測定した。流量は、一定時間内に1,000 mlメスシリンダーに溜まった水量を計測した。この操作を3回繰り返して、平均値を単位時間当たりの流量として算出した。さらに、塩ビパイプ管内に多項目水質計 (東亜ディーケーケー, WQC-24型) を固定して1分毎に水質観測を行った。水質観測項目は、水温、塩分、溶存酸素 (DO), pHである。ただし、下げ潮時から最干潮時にかけて潮位の低下に伴って、塩ビパイプ管内の水位が低下し、取水口からの流出がいったん途切れたので、一度塩ビパイプを設置し直した。その影響による水質への変動を考慮して、再設置し直してから約30分間の水質データは除外した。流量測定においても、再設置作業前後の影響を考慮するために、後述の方法によって補正を行い地下水流量の推定を行った。

6.3 水質観測結果

水質観測結果を図-6.3に示す。図中、水質観測結果に加え、調査地点近傍の枕崎の潮位 (海上保安庁のリアルタイム験潮データ) も示す。

観測中の水温は 19.0~19.1℃と一定の値を示した。塩分は下げ潮から最干潮にかけて 2.9 ‰から 0.5 ‰まで減少し、その後は 0.1 ‰で安定した。なお、用いた水質計の塩分測定値の下限は 0.1 ‰である。DOは 7.32~7.57 mg/l の範囲で、平均 7.43 mg/l であった。pHは 6.26~6.36 の範囲で、平均 6.29 であった。観測時の水質の傾向として、水温は常に一定の値を示し、他の水質項目は、最干潮時以降に変動が小さくなり安定する傾向にあった。特に pH の低さが特徴的である。



写真-6.1 湧出地下水観測状況

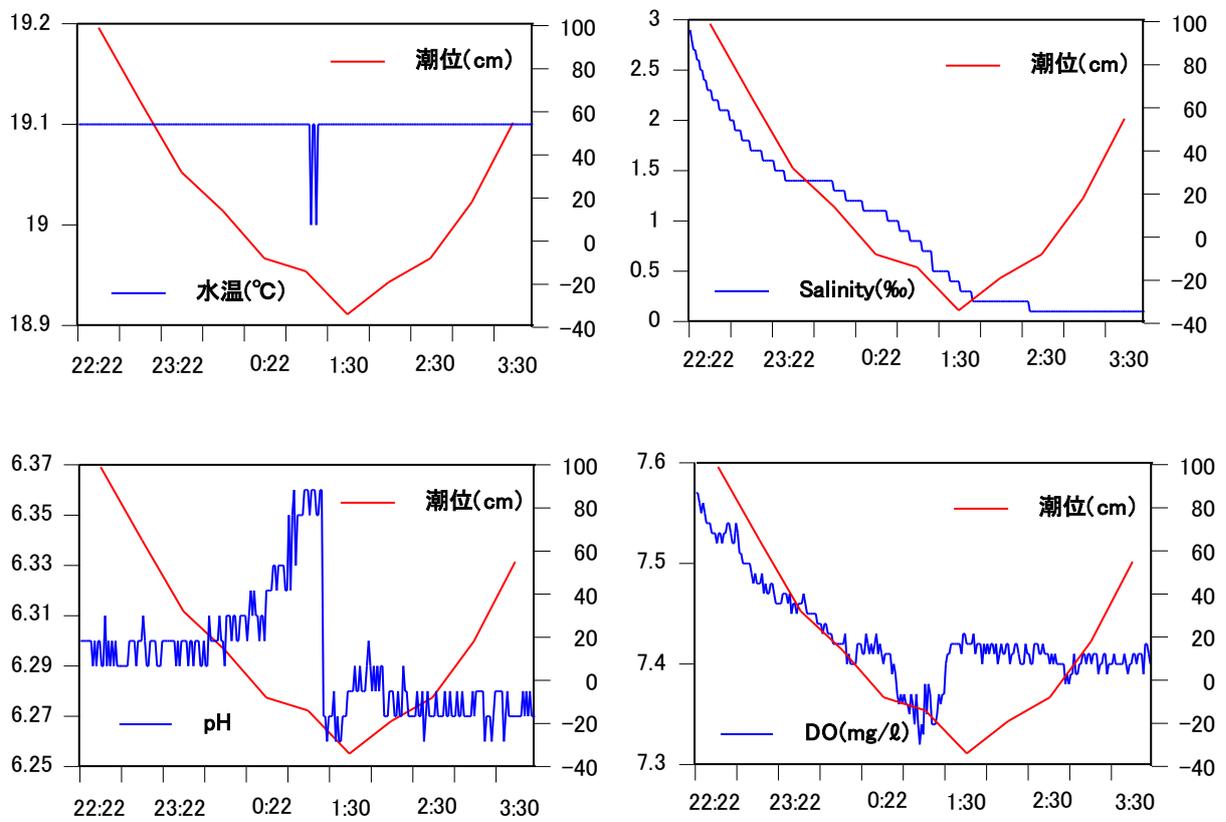


図-6.3 水質観測結果

6.4 湧出地下水量

図-6.4に流量の経時変化を示す。前述したとおり、潮位の低下に伴い、観測管内の水位が低下し流出がいったん途切れた。そのため、流出が途切れた前後の流量測定の結果を補正する必要がある。図-6.4の(a)が補正前、(b)が補正後の流量の経時変化を示している。補正方法は、まず30分毎の流量減少量を図-6.5に示すようにプロットし、多項式近似曲線をあてはめた。そして、図-6.5の赤い点線の時間帯が流量観測できなかったため、多項式近似式から流量減少量の推定値を算出した。その値を、流出が途切れた直後に観測した流量値に加算して、補正した結果が図-6.4の(b)である。その結果、調査時間308分間に対して湧出地下水量は 2.7m^3 となり、日流量は $12.6\text{m}^3/\text{day}$ と推定された。

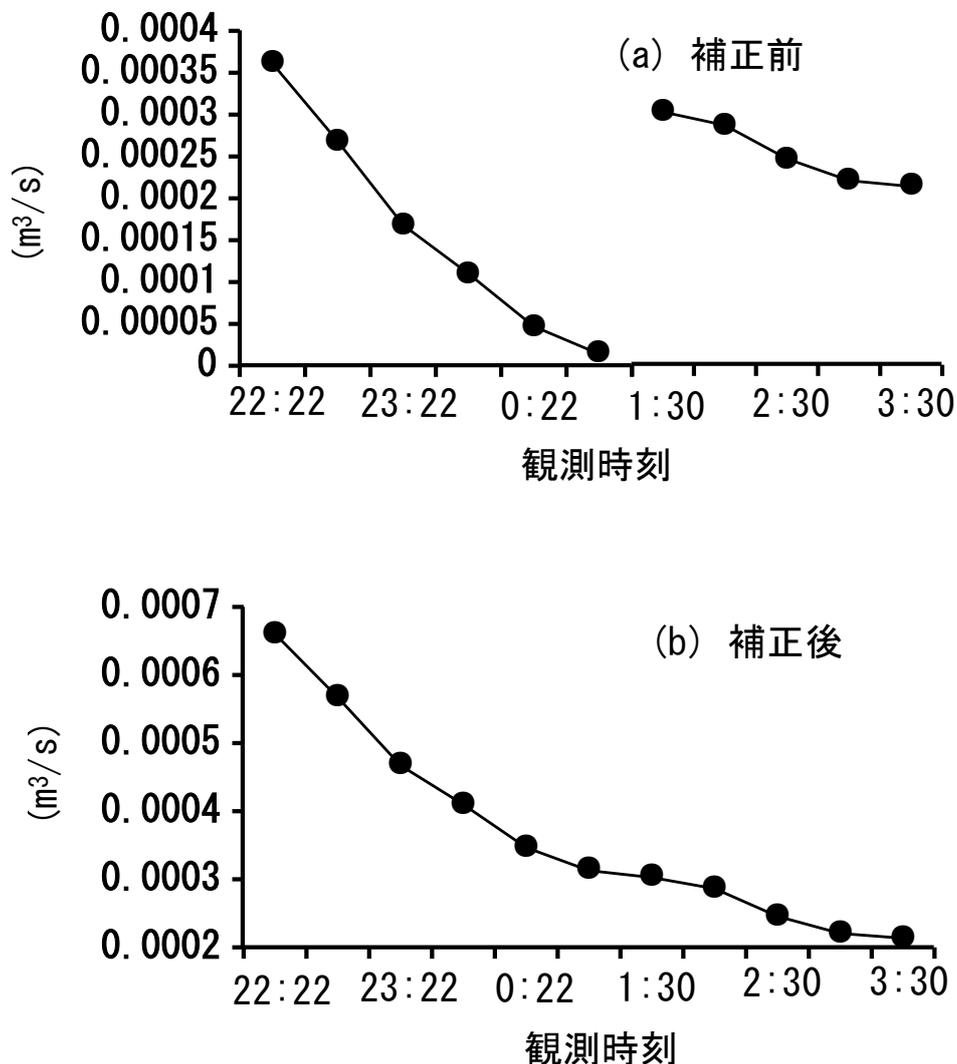


図-6.4 流量の経時変化

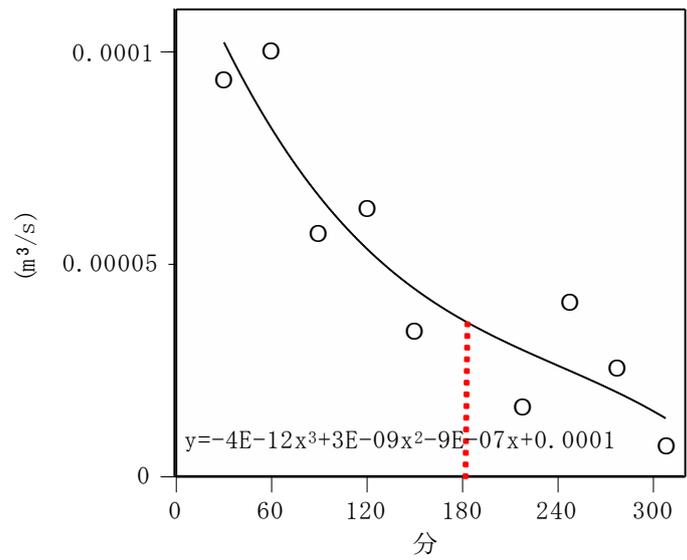


図-6.5 流量減少量

図-6.6に湧出地下水量に対する海水流量と淡水地下水量を示す。ここで、湧出地下水量，淡水地下水量，海水量を各々， V ， V_1 ， V_2 ，湧出地下水，淡水地下水，海水の塩分を各々， S ， S_1 ， S_2 ，とすると，海水量および淡水地下水量は各々(6.1)，(6.2)式で算定できる。海水塩分は現場で測定された値，30.6%，淡水地下水の塩分は0.1%とした。

$$V_2 = V(S - S_1) / (S_2 - S_1) \tag{6.1}$$

$$V_1 = V - V_2 \tag{6.2}$$

計算の結果，湧出地下水量に対して淡水地下水量は90%以上を占めていた。海水量の割合は下げ潮時の9%から徐々に低下していき，最干潮時以降はほぼ淡水地下水流量のみになることが示された。

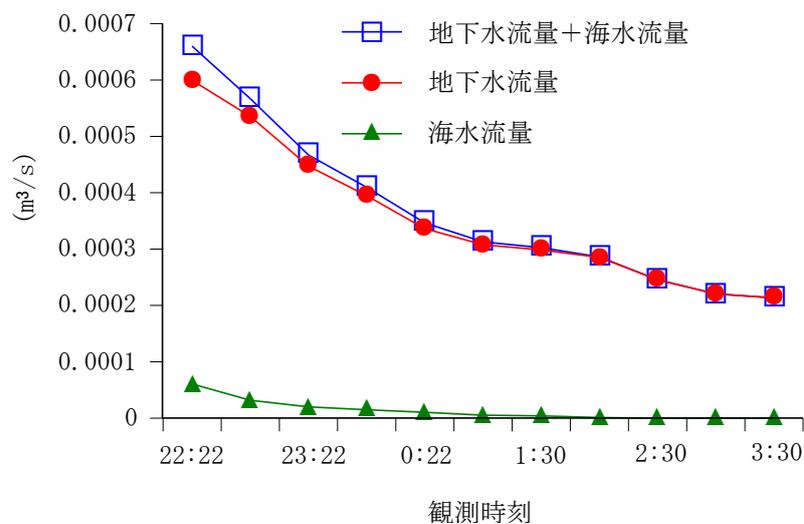


図-6.6 湧出地下水量に対する海水量と地下水量

6.5 栄養塩供給量

栄養塩供給量は流量に栄養塩濃度を乗じることによって算定した。栄養塩濃度は事前調査（採水日時：2012年10月2日午前11時30分、水温：18.9℃）によって得られた、湧出地下水の硝酸態窒素（NO₃-N）およびリン酸態リン（PO₄-P）の値を用いた。栄養塩は、サンプル水をグラスファイバーフィルター（Whatman GF/F, 47 mm）で濾過後、常法によって分析した（奥，2002）¹⁾。

その結果、NO₃-N および PO₄-P は各々300 μmol/l, 1.5 μmol/l であり、NO₃-N:PO₄-P（モル比）で見ると200となり、NO₃-Nが過剰であることが示された。NO₃-N, PO₄-P濃度に流出量に乗じて、栄養塩供給量を見積もると、各々45.7 g-N/day, 0.5 g-P/dayと推定された（表-6.1）。

表-6.1 栄養塩供給量の推定

流出量 (m ³ /day)	NO ₃ -N (μmol/l)	PO ₄ -P (μmol/l)	NO ₃ -N供給量 (g-N/day)	PO ₄ -P供給量 (g-P/day)
12.6	300	1.5	45.7	0.5

6.6 考察

口径12.5cm（断面積：122.7cm²）の塩ビパイプ管内から、12.6 m³/dayの湧出地下水流出が生じていると推定された。また、栄養塩供給量としてはNO₃-N, PO₄-P, 各々45.7 g-N/day, 0.5 g-P/dayが発生していると推定された。図-6.7の棒グラフは、松ヶ浦海岸近傍の枕崎における月平均降水量（枕崎特別地域気象観測所の1980～2012年の平均値）を示したものであるが、現地調査を行った2013年1月は年間降水量が最も少ない時期であり、梅雨時期になるとさらに流出量が増加し、それに伴い栄養塩供給量も増加すると思われる。また、地下水量の観測結果から1月の月総量推定値を算出し、降水量との比から算定した各月の月総量地下水量の推定値を図-6.7に示す。その結果、ファーストオーダーの推算値ではあるが、年間約9,000 m³の流出量が推定された。

松ヶ浦海岸の位置する南薩の表層地質は溶結凝灰岩に覆われており（図-6.8）、砂浜背後地の地質は写真-2に見られるように、空隙が目立つ多孔質媒体である。すなわち、湧水が発生しやすい地質構造であるため、陸域起源地下水が海岸に流出しやすい環境にあると考えられる。加えて、松ヶ浦海岸の背後地である南九州市知覧町は茶の生産地であり、背後地一帯は1,337 haにわたる茶園が広がっている（南九州市，2012）²⁾。茶葉の栽培には施肥が欠かせず、茶の栽培地域は相対的に地下水中の硝酸態窒素濃度が高くなる傾向にあり、酸性物質である硝酸態窒素濃度が高い茶畑の湧水は、pHの低下が見られる等の報告がある（藪崎，2010，井伊ら，1997）^{3,4)}。

今後、背後地の茶畑周辺の地下水や湧水の水質を測定する必要があるが、海岸湧出地下水のNO₃-N濃度および低pHからして、茶畑への施肥の影響を受けた地下水が流出している可能性がある。

参考値として、平成21年度の鹿児島県公共用水域及び地下水の水質測定結果⁵⁾によると、調査対象地域周辺の生活用水や一般飲用の硝酸性窒素および亜硝酸性窒素は10 mg/lを超えており、陸水の窒素濃度が高いことがわかる（表-6.2）。このように、松ヶ浦海岸背後地の、地下水流出が発生しやすい地質条件と、窒素負荷量が高い茶畑という土地利用条件によって、高濃度のNO₃-Nを含んだ地下水

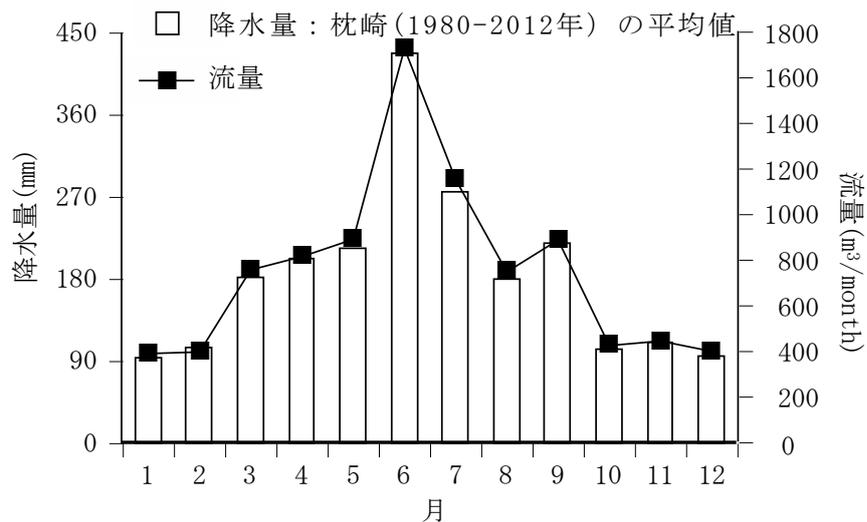


図-6.7 調査対象地域付近の降水量

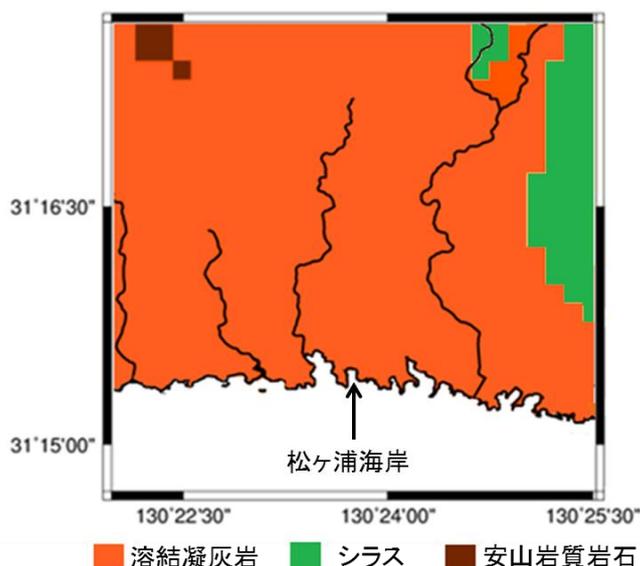


図-6.8 松ヶ浦海岸周辺の表層地質（国土交通省のGISデータ，20万分の1土地分類基本調査，鹿児島県の表層地質図を元に作成）

が海岸に湧出していると考えられる。海岸湧出地下水は湧出量に対して淡水地下水量が90%以上を占めており，干潮時にはほぼ淡水地下水が流出している。NO₃-N濃度や低pH等の水質および流量の傾向から，湧出水に対する海水の影響は小さいと考えられ，満潮時に砂浜に滞留した海水ではなく，陸域起源の地下水が観測地点で常時湧出していると考えられる。

水産用水基準⁹⁾によると，海域の水生生物に適したpHは7.8-8.4としている。海岸湧出水のpHは約6.3と基準値と比べるとかなり低い値であるが，現場の海水pHは概ね8.1である。高濃度のNO₃-Nと低pHの海岸湧出水が海域に与える影響については今後調査をしていく必要があるが，松ヶ浦海岸の位置する南薩海域は貧栄養の黒潮の影響を受ける場所であるため，本海岸での海岸湧出地下水は沿岸域生態系にとって重要な栄養塩供給機構である可能性が高い。そのため，今後経年的な調査を行い，供給

栄養塩量を定量的に求める必要があることがわかった。

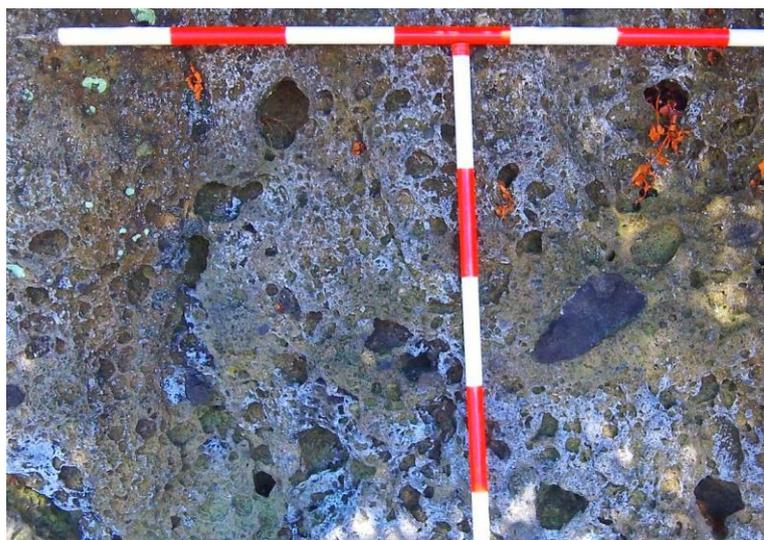


写真-6.2 松ヶ浦海岸背後地の地質状況

表-6.2 調査対象地域周辺の公共用水の硝酸性窒素および亜硝酸性窒素

地区名	用途	調査日	硝酸性窒素および 亜硝酸性窒素 (mg/l)
南九州市知覧町塩屋	生活用水	2010/2/8	12
南九州市知覧町南別府	一般飲用	2010/2/17	11

6.7 まとめ

松ヶ浦海岸の潮間帯から $12.6 \text{ m}^3/\text{day}$ の海岸湧出地下水量が確認され、栄養塩供給量として、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、各々 45.7 g-N/day 、 0.5 g-P/day と推定された。また、海岸湧出地下水の水質は高濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($300 \mu\text{mol/l}$)と低pH(6.3)で特徴づけられ、さらに塩分は0.1~2.9 %で、淡水地下水量が90 %以上を占めており、海水の影響が小さいことが示された。

以上のことから、河川流入のない本海岸において、海岸湧出地下水が沿岸域生態系にとっての重要な栄養塩供給機構である可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 奥 修：吸光光度法ノウハウ ケイ酸・リン酸・硝酸塩の定量分析，技法堂出版，137 p.，2002.
- 2) 南九州市：平成 24 年度 統計南九州.

- 3) 藪崎志穂：日本の地下水・湧水等の硝酸態窒素濃度とその特徴，地球環境，**15(2)**，pp.121-131，2010.
- 4) 井伊博行，平田健正，松尾宏，田瀬則雄，西川雅高：茶畑施肥に由来する硝酸性窒素と周辺表流水に及ぼす影響，水工学論文集，**41**，pp.575-580，1997.
- 5) 鹿児島県：平成 21 年度 鹿児島県公共用水域及び地下水の水質測定結果.
- 6) 水産用水基準（2005 年版）：日本水産資源保護協会，2006.

第7章 福島県松川浦における淡水流入量の推定

7.1 まえがき

本章では、第3章で用いた水収支法によって、開放的な砂浜海岸とは対照的に閉鎖的環境の潟湖である福島県松川浦への淡水流入量の推定を行った。

松川浦は、福島県と宮城県の県境付近に位置する、水域面積 7.38km^2 、最大水深 5.5m 、平均水深約 1m の潟湖である。松川浦は、アサリ漁業やヒトエグサの養殖など漁業が盛んな場所であり、加えて幼稚魚の生育場としての機能も果たしており(佐藤ら, 2007, 根本ら, 2007)^{1,2)}、漁業・水産業の観点からも重要な場所である。

松川浦は閉鎖的な環境のため、陸域からの流入河川による栄養塩負荷量が、浦内の水質や漁業生物に与える影響が大きいと考えられる。例えば、和田ら(2004)³⁾は、松川浦において、流入河川や農業排水からの流入負荷量を調査し、浦内の水環境と漁業の関係性について考察している。しかし、浦内への淡水流入量は、河川流入に加えて、おそらく地下水流入も考えられるため、地下水からの栄養塩供給についても考慮する必要がある。そこで、本研究では水収支法によって、松川浦に流入する地下水流入量の推定を行った。

2011年3月11日に東日本大震災が発生し、それに伴う津波および東京電力福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の放出によって、松川浦を含む福島県の水産業は甚大な被害を受けた。松川浦では、原発事故によって放出された放射性物質の影響で、漁業の自粛が余儀なくされている。神山・島村(2013)⁴⁾は、震災後、松川浦の海底土の放射性セシウム濃度を測定し、陸域からの流入の影響についても考えられると指摘している。そのため、放射性物質の流入という観点からも、松川浦へ流入する淡水流入量として河川流量や地下水流量を把握する必要がある。

7.2 松川浦流域の特性

7.2.1 松川浦の流域面積

松川浦(水域面積 7.38km^2)には、宇多川(流域面積 106.3km^2)、日下石川(39.6km^2)、小泉川(18.5km^2)、梅川(8.1km^2)の4河川が流入し、全流域面積は 172.5km^2 (松川浦の面積を含めると、 179.9km^2) である(図-7.1)。流入河川に加えて、松川浦の西部には、農業用水を汲み上げて浦に流す排水機場があり、そこからの流入負荷量も無視できない大きさ($106\text{kg}/\text{日}$)であると報告されている(木幡, 2002)⁵⁾。

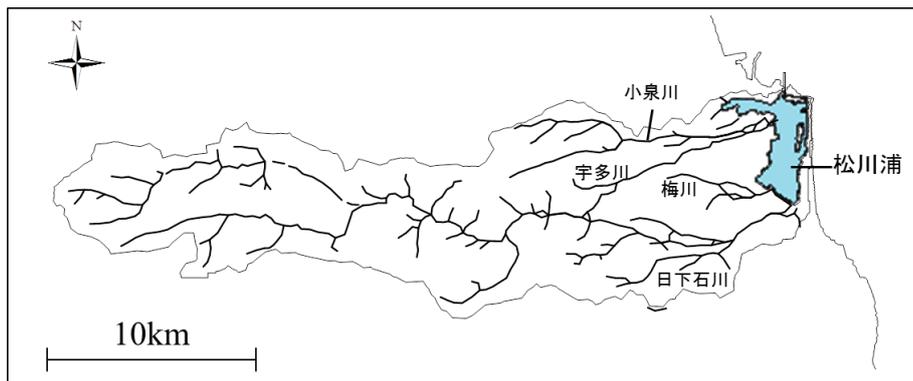


図-7.1 松川浦に流入する河川及び松川浦流域

7.2.2 松川浦流域の気象概況

松川浦流域をティーセン分割して（図-7.2），流域平均気温及び流域平均雨量を算出すると，流域平均気温は 10.9℃，流域平均雨量は 1,382.2mm であった．ここで，流域平均気温及び流域平均雨量は相馬と飯館の 1983 年から 2012 年（ただし，降水量データは資料不足値の年があるため，1980 年から 2012 年まで）の 30 年間のアメダスデータを使用した．松川浦の流域平均気温は，鹿児島県の吹上浜流域と同様に，30 年間で約 1.2℃の上昇が見られる（図-7.3）．流域平均雨量は，全国平年値 1,683.3 mm（全国 80 地点の気象台・測候所の 1981 年から 2010 年の平均値⁶⁾より算出）と比較して 300mm 程度少ない地域である．

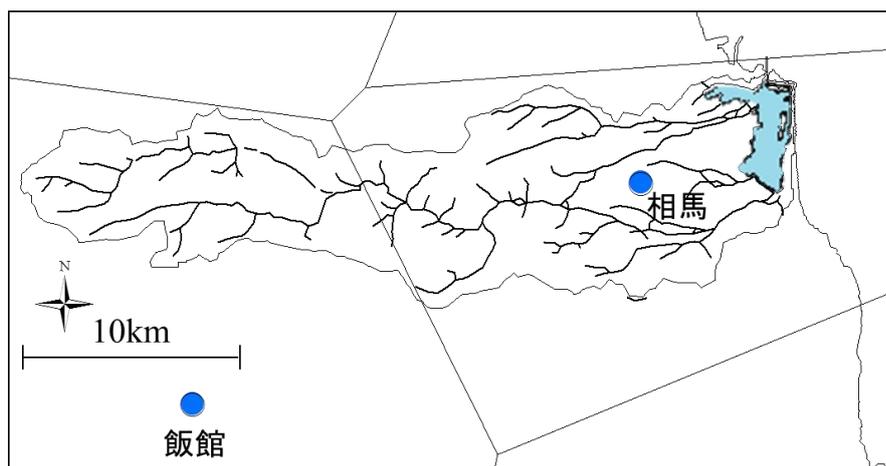


図-7.2 松川浦流域のティーセン分割状況及び気象観測所

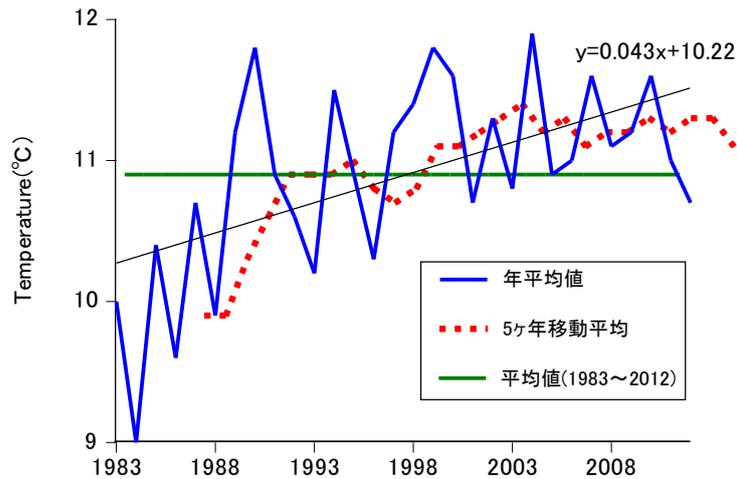


図-7.3 松川浦流域の年平均気温の推移

7.2.3 松川浦流域の表層地質及び土地利用状況

松川浦から約5kmの内陸部までは標高10m未満の低地であり(図-7.4)、表層地質は砂または礫である(図-7.5)。流域の中流域の表層地質は、深成岩の花崗閃緑岩や火山性堆積岩の緑色凝灰岩、中流域から上流域にかけての表層地質は、火山性堆積岩の緑色凝灰岩、集塊岩凝灰角礫岩、安山岩質岩石等によって構成されている(図-7.5)。

松川浦の土地利用状況を見てみると、森林・荒地(66.1%)に次いで、田んぼが18.5%を占め、松川浦背後地に広がっている(図-7.6)。

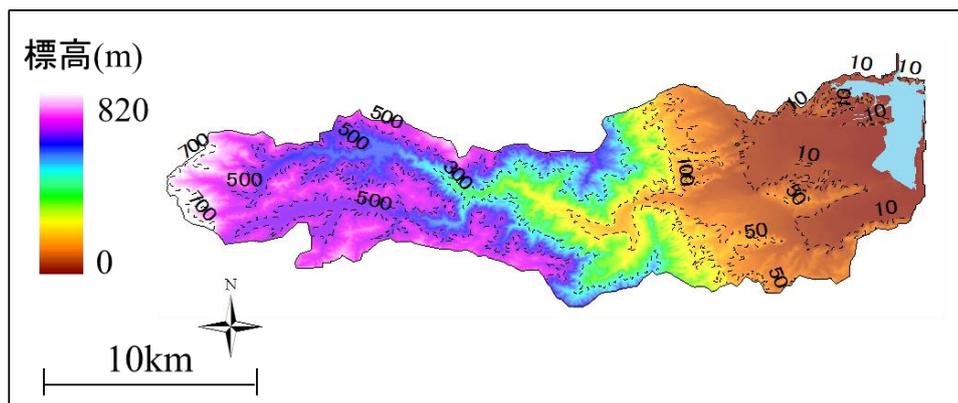


図-7.4 松川浦流域の標高
基盤地図情報の数値標高モデル(10mメッシュ)を元に作成

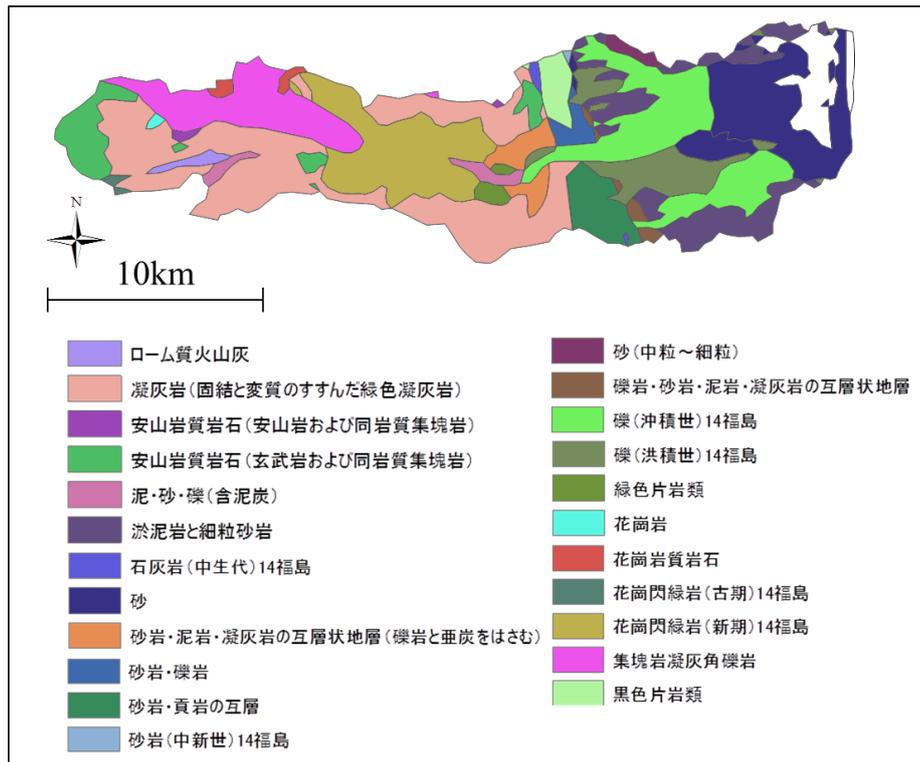


図-7.5 松川浦流域の表層地質図

国土交通省国土情報課が公開しているGISデータ、1/200,000土地分類基本調査、福島県の表層地質図を元に作成

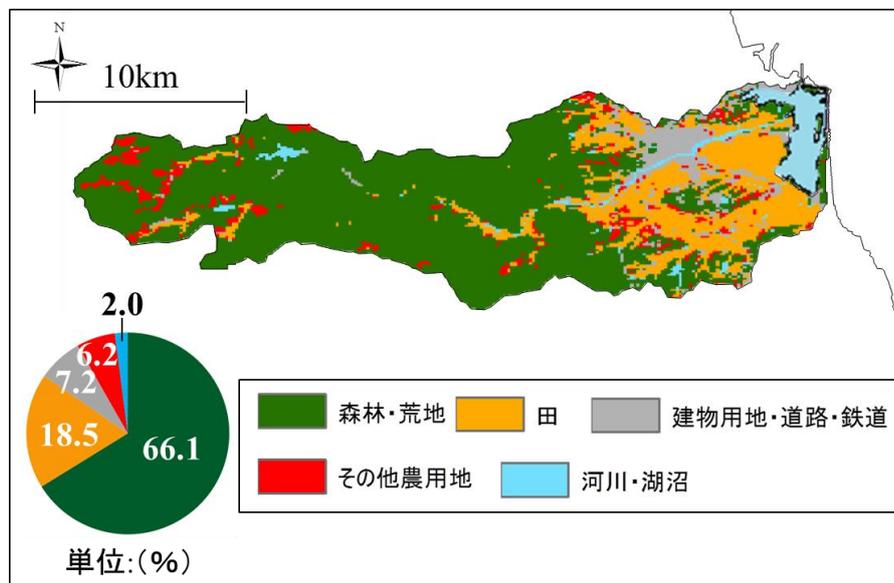


図-7.6 松川浦流域における土地利用状況

国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ(平成21年度)を元に作成

7.3 水収支式による淡水量の推定

松川浦に流入する淡水量の推定は、第3章で吹上浜流域における淡水流入量の推定法と同じ方法を用いたため、ここで詳細な記述は割愛する。

河川流量データは宇多川（観測地点：百間橋）と小泉川（観測地点：百間橋）は2000年から2005年までの年平均値（福島県「水質年報」）を用いた。梅川と日下石川は比流量から推定した（表-7.1）。

流域平均雨量及び、可能蒸発散量を算定するうえで、使用した降水量データ及び気温データは、図-7.2に示す気象観測所の2000年から2005年までのデータを使用した。

ただし、蒸発散量を算出する過程で用いた可能蒸発散量の推定方法は、ソーンズウェイト法とハモン法の両者に大差は見られなかったため、ここではソーンズウェイト法のみを用いて解析を行った。

表-7.1 河川流量（梅川，日下石川は推定値）

河川	流量 (m^3/s)
宇多川	1.81
小泉川	0.57
梅川	0.19
日下石川	0.94

7.4 淡水流入量の推定結果及び考察

松川浦流域における水収支結果を表-7.2に示す。2000年から2005年までの平均値として見ると、松川浦流域における流域平均雨量は年間1,285.6mm、可能蒸発散量は687.2mmと算定された。第3章で算定した吹上浜流域の値と比較して降水量は約1,000mm、可能蒸発散量は約200mm少ない。松川浦流域における年間降水量21,224.4万 m^3 に対して、蒸発散量は44.2%、河川流量は52.2%、地下水流量は3.6%であった（図-7.7）。年間流出量は11,839.1万 m^3/yr であり、これに対して河川流量が11,069.1万 m^3/yr 、地下水流量は769.9万 m^3/yr であり、割合で見ると河川流量が93.5%を占めており、地下水流量は6.5%であった（図-7.8）。地下水流量は流出量の割合で見ると6.5%であるが、流量で見ると769.9万 m^3/yr (0.24 m^3/S)の流出量があり、これは梅川の推定流量0.19 m^3/S と同レベルの値である。地下水流出の割合が非常に少ないが、これは松川浦流域の中流域から上流域にかけての表層地質が、不透水層の岩盤となっており、中流域から上流域においては、降水量の地下浸透はほとんどなく、直接流出として河川に流出していることが考えられる。一方で、下流域の表層地質は砂や礫といった透水性が高い地質のため、松川浦流域の下流域においては地下水流量がある程度期待できる。しかし、降水量のすべてが地下に涵養されることはないので、全流域の地下水量としてみると少なくなっていることが考えられる。

陸域からの流出量に対する地下水流量の割合は少ないものの、松川浦流域の小河川一本分の流量があるので、浦内への物質輸送機構として地下水流入量も評価する必要が考えられる。

表-7.2 水収支結果 (2000年から2005年の平均値)

降水量 (mm/year)	可能蒸発散量 (mm/year)	流域面積×降水量 (万m ³ /year)	流域面積×蒸発散量 (万m ³ /year)	流出量 (万m ³ /year)	河川流量 (万m ³ /year)	地下水流量 (万m ³ /year)
1,285.6	687.2	21,224.4	9,385.4	11,839.1	11,069.1	769.9

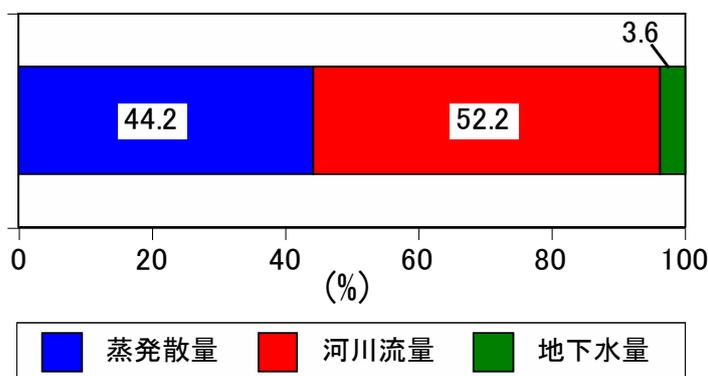


図-7.7 降水量に対する蒸発散量と河川流量，地下水量の割合

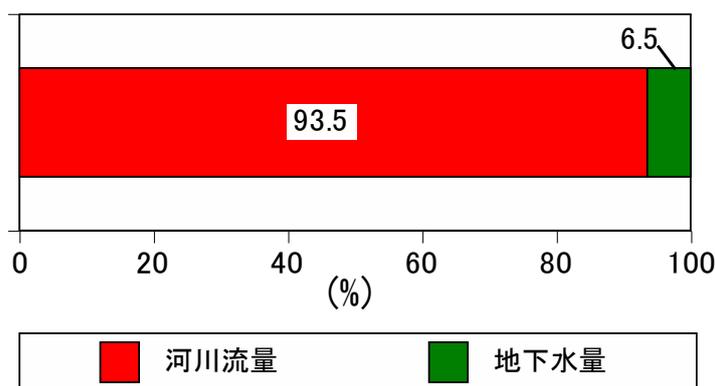


図-7.8 流出量に対する河川流量と地下水量の割合

7.5 松川浦におけるChl. a連続観測

松川浦は福島県内唯一のアサリの養殖場である。アサリは植物プランクトンやデトリタスを摂取する濾過摂食者であるため、植物プランクトン現存量の指標となるChl.aの動態を把握することはアサリの資源量を考えるうえで重要である。そこで、2013年9月6日から11月7日にかけて松川浦でChl.aの連続観測を行ったので、速報値として結果をここに示す。

(1) 観測場所

図-7.9に示す松川浦の浦口付近においてChl.aの連続観測を行った。

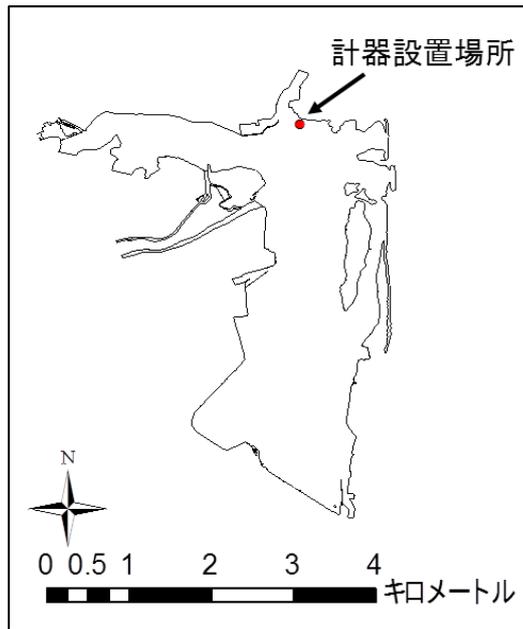


図-7.9 クロロフィル濁度計設置場所

(2) 観測方法

2013年9月6日から11月7日にかけて、クロロフィル濁度計(JFEアドバンテック社, Compact-CLW)を海底から約40cmの高さに設置して観測を行った。なお、観測場所の水位は潮汐に伴い約50cmから150cmの間で変動する。測定は、30分毎に1秒間隔で10サンプルのデータを取得し、取得したデータの平均値をその時間帯(30分間)の観測値とした。さらに、夜間のデータを省き、午前7時から午後7時までのデータの平均値を日平均値とした。なお、クロロフィル濁度計は水温も同時に測定できるため、水温のデータについても同様に取得した。

(3) クロロフィル濁度計の補正

植物プランクトン培養液(キートセロス・グラシリス, ヤンマー社製)を濾過海水で希釈し、数点の希釈培養液を作製した。その希釈培養液をクロロフィル濁度計と90%アセトン抽出法(日本海洋学会, 1979)⁷⁾によって各々Chl.aを測定し、相関式を求めた(図-7.10)。そして得られた相関式によって、クロロフィル濁度計の観測値を、90%アセトン抽出法のChl.aの値として補正した。

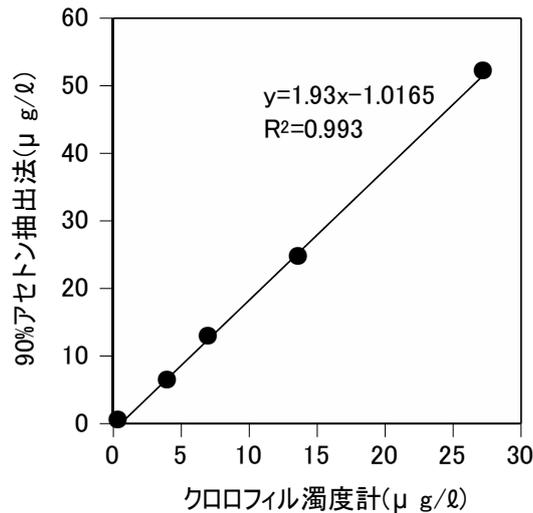


図-7.10 クロロフィル濁度計と90%アセトン抽出法によるChl. a

7.6 Chl. a連続観測結果

Chl.a及び水温の日平均値の変動を図-7.11に示す。図中には、観測場所近傍の気象観測所である相馬における日ごとのアメダス降水量についても示した。日射量については、相馬では観測されていないので、福島気象台の日ごとの全天日射量について示した。

2013年9月6日から11月7日にかけての松川浦浦口のChl.a日平均値は1.5~9.0 μ g/ℓの範囲で、平均値は4.7 μ g/ℓであった。木幡(2002)⁵⁾によると、松川浦の浦口のChl.aは、海水が流入する満潮時に高濃度になると報告している。そのため、浦口のChl.aは、水温や日射量との間で明瞭な相関関係は認められず(図-7.12)、潮汐に応じた変動を示す可能性がある。ここでは、潮汐変動について考慮していないので今後、潮汐について検討する必要がある。

7.7 まとめ

水収支式によって、潟湖である福島県松川浦における淡水流入量を推定した結果、陸域からの流出量に対して、河川流量が93.5%、地下水流量が6.5%と推定された。地下水流量は769.9万m³/yr(0.24m³/s)であり、これは松川浦流域の小河川である梅川の推定流量0.19m³/sと同レベルの値であった。流出量に対する地下水流量の割合は少ないものの、松川浦流域の小河川一本分の流量はあるので、浦内への物質輸送機構として地下水流入量も評価する必要が考えられる。また、今後、宇多川、日下石川、小泉川の河口付近で栄養塩量をそれぞれ計測できれば、松川浦内に陸域から流入する総栄養塩量が大きめに推定できることもわかった。

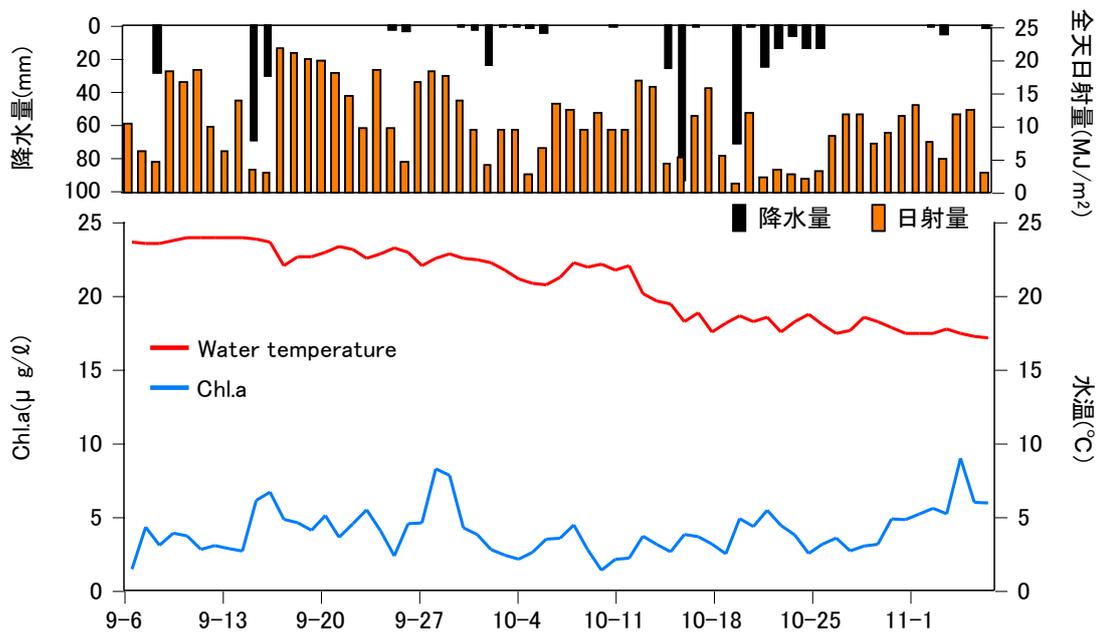


図-7.11 Chl.a と水温の日平均値の変動

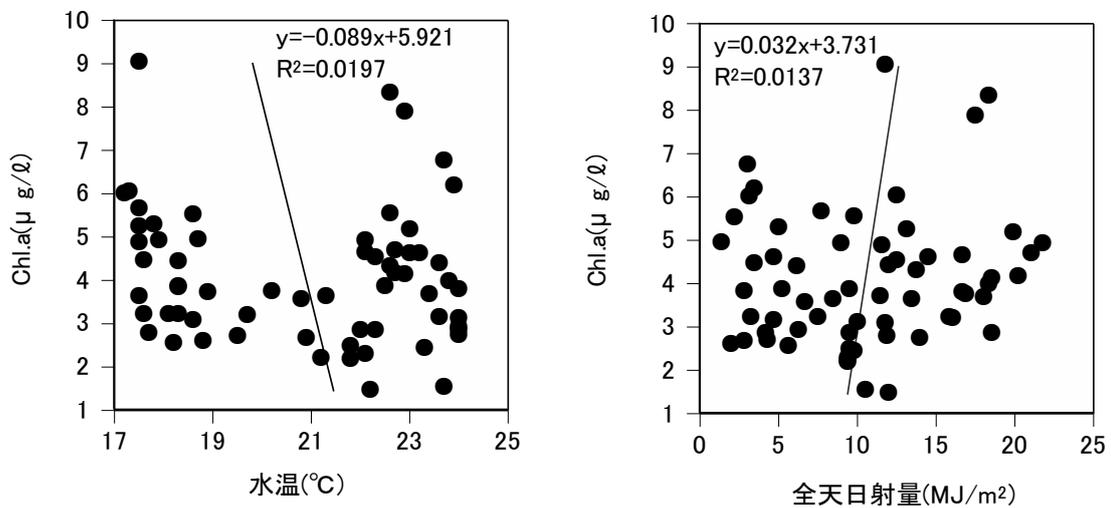


図-7.12 Chl.a と水温及び全天日射量の相関関係

参考文献

- 1) 佐藤利幸, 尾形康夫, 根本芳春, 島村信也: 福島県松川浦におけるアサリ漁業の変遷と現状にお

- ける問題，福島県水産試験場研究報告，**14**，pp.57-67，2007.
- 2) 根本芳春，平川英人，佐藤利幸，島村信也：福島県松川浦における魚類について出現する種類と分布特性，福島県水産試験場研究報告，**14**，pp.41-56，2007.
 - 3) 和田沙知代，加藤 将，柚洞一央，山本真輔：松川浦の漁業と水環境，2004，
<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/~tyam/lab/exc2003souma/>
 - 4) 神山享一，島村信也：松川浦の海底土における放射性セシウムの分布，福島県水産試験場研究報告，**16**，pp.73-78，2013.
 - 5) 木幡邦男：浅海域での生物による水質浄化—福島県松川浦の干潟の調査から—，国立環境研究所ニュース，**21(4)**，pp.3-5，2002，<http://www.nies.go.jp/kanko/news/21/21-4/21-4-02.html>
 - 6) 国立天文台 編：理科年表 平成 24 年，丸善，1108 p.，2011.
 - 7) 日本海洋学会：植物色素の定量法，日本海洋学会 編，海洋環境調査法，恒星社厚生閣，東京，pp. 373-381，1979.

第 8 章 総合考察

近年, 沿岸域への物質輸送機構として海底地下水湧水 (SGD: Submarine Groundwater Discharge) が注目されている (谷口, 2001)¹⁾. しかし, 陸域から沿岸域への栄養塩供給機構として地下水による供給栄養塩が沿岸域生態系に与える影響評価は, 河川による供給栄養塩の評価と比較して非常に少ない. そのため, 本研究は, 沿岸域生態系における栄養塩供給機構として地下水流入の重要性を検討することを目的として行った.

鹿児島県吹上浜海岸における砂浜生態系に関する研究は, これまで, 魚類相 (中根ら, 2005, Nakane *et al.*, 2011)^{2,3)} やアミ類の分布等 (Nonomura *et al.*, 2005, Nonomura *et al.*, 2007)^{4,5)} に関する研究が行われ, 本海岸のサーフゾーンが多様な魚類仔稚魚の生息場や餌場として機能していることが明らかにされている. そのため, 高次栄養段階の基盤となる植物プランクトンや底生微細藻類による一次生産力は決して低くないことが考えられる. MODIS 画像によって, 吹上浜沿岸域の表層 Chl.a 濃度の水平分布をモニタリングすると, 流入河川の河口付近では春から秋にかけて $10 \mu\text{g/l}$ 以上の値を示すこともあり, 沖合よりも陸域に近い海域が高濃度になる傾向にあり, 一次生産において陸域からの栄養塩供給量の重要性が考えられる. 植物プランクトンの成長には栄養塩類が必要となるわけであるが, 吹上浜における栄養塩供給機構としての河川流量と地下水流量およびそれに付随する栄養塩供給量は明らかにされていなかった. そこで, 水収支法を用いて, 吹上浜一帯から流入する淡水流入量をマクロ的に推定してみると, 全河川流量の合計値として, $約5.5 \times 10^8 \text{m}^3/\text{yr} (= 17.4 \text{m}^3/\text{s})$, 地下水流入量として $約4.0 \times 10^8 \text{m}^3/\text{yr} (12.6 \text{m}^3/\text{s})$ であり, 陸域からの淡水流入量に対して, 地下水流入量が 41% を占めていることが推定された. 地下水流入量は, 吹上浜流域における最大河川である万之瀬川の年間平均流量に匹敵する量である. 石飛ら (2005)⁶⁾ は, 水収支法によって, 駿河湾沿岸の安倍川流域における, 陸域からの流出量に対する地下水流出の割合を 39% と推定しており, 吹上浜流域はこの値と同レベルである. Taniguchi *et al.* (2002)⁷⁾ は, 水収支法よって推定された, 陸域からの流出量に対する地下水流出の割合は 10~31% としており, 吹上浜流域はこの推定値よりも大きい. 吹上浜流域の降水量の多さと, シラスで代表される火砕流台地という透水性の良い地質的条件等によって, 沿岸域に流入する地下水量が多く存在することが考えられる.

吹上浜沿岸域における地下水からの栄養塩供給量として, DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給量の推定値は各々 376.1t-N/yr, 18.3t-P/yr と算出され, 陸域からの流入負荷量に対して, 各々 20.7%, 12.4% を占めていることが推定された. 地下水からの窒素 (DIN) を海域の植物プランクトンがすべて取り込んだと仮定して, C/N 比 (重量比) を 5.7 として炭素量に換算すると, 2143.8 t-C/yr の炭素固定量となる. 早川ら (2009)⁸⁾ はサーフゾーン海域での一次生産を支える栄養塩供給源は, 河川に加え, 砂浜地下水も重要であるとしている. 加えて, 砂浜地下水の滲

出面周辺には底生微細藻類が確認され(第2章, 写真-2.5参照), 植物プランクトンとともに, 底生微細藻類の一次生産においても砂浜地下水からの栄養塩供給が寄与している可能性がある. そのため, 仮に背後地の構造物等によって地下水流入が阻害された場合, 海域における一次生産力が低下する可能性もある. いずれにせよ, 地下水流量および栄養塩供給量から, 沿岸域生態系における栄養塩供給機構として地下水は, 河川と同様に評価する必要があると考えられる.

鹿児島県松ヶ浦海岸の潮間帯からは, 明らかに地下水が湧出しているのが目視で確認できる(序論, 写真-1.2参照). この湧出地下水は, 高濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($300 \mu\text{mol/l}$)と低 pH (6.3)で特徴づけられ, 湧出地下水量は, 渇水期の推定値として $12.6 \text{ m}^3/\text{day}$, 栄養塩供給量として, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, 各々 45.7 g-N/day , 0.5 g-P/day と推定された. 高濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ は, 背後地一帯の茶畑への施肥の影響を受けた地下水が流出していることが考えられ, 海岸湧出地下水への背後地における人為的影響の大きさが示唆された. 湧出地下水量 $12.6 \text{ m}^3/\text{day}$ は, 口径 12.5cm (断面積: 122.7cm^2) の塩ビパイプ管内からの湧出量であり, 実際には海岸線一帯から地下水が滲出しており, 本海岸への地下水流入量は $12.6 \text{ m}^3/\text{day}$ より多いことが推測される. 河川流入がない松ヶ浦海岸の生態系において, 高濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ の湧出地下水が重要な役割を果たしていることが考えられる.

開放的な砂浜海岸とは対照的に閉鎖的環境の潟湖である福島県松川浦への淡水量流入の推定を行った結果, 陸域からの流出量に対する地下水流出の割合は6.5%で, 流量として $7.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ ($0.24 \text{ m}^3/\text{s}$)の流出量が推定された. 地下水流出の割合は, 吹上浜流域の41%と比較して非常に少ない. これは, 吹上浜の表層地質は流域全域にわたり, 透水性の良いシラスが表層地質を占めているのに対して, 松川浦流域の表層地質は, 下流域は砂や礫といった透水性の高い地質であるが, 中流域から上流域にかけて深成岩の花崗閃緑岩や, 火山性堆積物の緑色凝灰岩, 集塊岩凝灰角礫岩など不透水層の岩盤が占めているため, 降水量は, 地下に浸透する割合よりも, 直接流出として河川に流出する割合が高いことが考えられる. 流出量に対する地下水流量の割合は少ないが, 松川浦流域の小河川である梅川の流量($0.19 \text{ m}^3/\text{s}$)と同レベルであるため, 浦内への物質輸送機構として評価する必要があると考えられる.

参考文献

- 1) 谷口真人: 「地下水と地表水・海水との相互作用」4.海水と地下水の相互作用, 地下水学会誌, **43(3)**, pp.189-199, 2001.
- 2) 中根幸則, 須田有輔, 大富 潤, 早川康博, 村井武四: 中間型砂浜である鹿児島県吹上浜の近岸帯における魚類相, 水産大学校研究報告, **53(2)**, pp.57-70, 2005.
- 3) Nakane, Y., Suda, Y., Sano, M.: Food habits of fishes on an exposed sandy beach at Fukiagehama, South-West Kyushu Island, Japan., *Helgol.Mar.Res.*, **65**, pp.123-131, 2011.
- 4) Nonomura, T., Hayakawa, Y., Suda, Y., Ohtomi, J.: Practical identification of the sand-burrowing

mysid, *Archaeomysis vulgaris*(Crustacea: Mysidacea) and its biological characteristics. *Plankton Biol.Ecol.*,**52**, pp.48-57 ,2005.

- 5) Nonomura, T., Hayakawa, Y., Suda, Y., Ohtomi, J. : Habitat zonation of the sand-burrowing mysids (*Archaeomysis japonica* and *liella ohshimai*), and diel and tidal distribution of dominant *Archaeomysis vulgaris*, in an intermediate sandy beach at Fukiagehama, Kagoshima Prefecture, southern Japan. *Plankton Benthos Res.*, **2**, pp.38-48 , 2007.
- 6) 石飛智稔, 谷口真人, 佐伯憲一, 小野恵子 : 駿河湾における海底地下水湧出量の定量的評価, 地球化学, **39**, pp.97-106, 2005.
- 7) Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E. and Turner, J. V. : Investigation of submarine groundwater discharge, *Hydrol. Process*, **16**, pp.2115-2129, 2002.
- 8) 早川康博, 松本和剛, 須田有輔 : 砂浜生態系における栄養塩供給と物質循環, 月刊海洋, **41(4)**, pp.193-199, 2009.

第9章 結論

本論文では、生態系および水産学的観点に立つ知見が少ない、砂浜海岸を対象に、近年沿岸域への物質輸送機構として注目されつつある、海底地下水湧水（SGD：Submarine Groundwater Discharge）に着目し、沿岸域における陸域からの栄養塩供給機構として、地下水流入の意義について検討を行った。

以下に本論文で得られた主要な結論について述べる。

第2章において、鹿児島県吹上浜海岸の砂浜背後地において地下水位の連続観測を行い、ダルシーの法則に基づき、砂浜の滲出面から流入する砂浜地下水量を推定した。その結果、滲出面 1m 当たり $0.65\sim 0.86\text{m}^3/\text{day}$ の流出量が推定された。また、栄養塩供給量は、滲出面 1m 当たり $\text{SiO}_2\text{-Si}$, DIN , $\text{PO}_4\text{-P}$ は各々、 $4.4\sim 5.3\text{g}/\text{day}$ ($1,606.0\sim 1,934.5\text{g}/\text{yr}$), $0.64\sim 0.76\text{g}/\text{day}$ ($233.6\sim 277.4\text{g}/\text{yr}$), $0.031\sim 0.037\text{g}/\text{day}$ ($11.3\sim 13.5\text{g}/\text{yr}$) と推定された。滲出面 1km 当たりから供給される窒素を、植物プランクトンがすべて取り込んだと仮定して、C/N 比（重量比）を 5.7 として炭素量に換算すると、 $1,331.5\sim 1,581.2\text{kg-C}/\text{yr}$ の炭素固定量となる。滲出面周辺には底生微細藻類が確認でき、砂浜生態系における栄養塩供給機構として砂浜地下水の重要性が示唆された。

第3章において、マクロな視点から、吹上浜一帯に流入する淡水量を水収支式によって推定した。その結果、流域毎に違いはあるが、流域の平均値としてみると、降水量に対して河川流量が 29.7%，地下水量が 36.6～37.8%，流出量に対して河川流量が 44%，地下水量が 55.3～56% であった。吹上浜の全流域から、約 $4.0\times 10^8\text{m}^3/\text{yr}$ ($12.6\text{m}^3/\text{s}$) の地下水流入量が推定され、これは吹上浜流域における最大河川である万之瀬川の年間平均流量に匹敵する量であり、栄養塩供給機構として河川流入に加えて地下水流入の重要性が示された。

第4章において、原単位法を用いて、吹上浜流域の T-N, T-P 負荷量について推定した。その結果、T-N, T-P 排出負荷量は吹上浜全流域の合計値として、 $2,150.3\text{t-N}/\text{yr}$, $209.0\text{t-P}/\text{yr}$ と推定された。吹上浜への T-N, T-P 流入負荷量としては、 $1,439.3\text{t-N}/\text{yr}$, $129.2\text{t-P}/\text{yr}$ と推定された。地下水からの DIN , $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷量は各々、 $376.1\text{t-N}/\text{yr}$, $18.3\text{t-P}/\text{yr}$ と推定され、吹上浜に流入する陸域からの流入負荷量を計算すると、 $1,815.1\text{t-N}/\text{yr}$, $147.5\text{t-P}/\text{yr}$ となる。地下水の DIN , $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷量は陸域からの流入負荷量に対して、各々 20.7%, 12.4% を占めていることが推定された。

第5章において、MODIS画像の表層 Chl.a 濃度のデータを使用して、吹上浜沿岸域の Chl.a の水平分布をモニタリングした。その結果、流入河川の河口付近では春から秋にかけて $10\mu\text{g}/\text{l}$ 以上の値を示すこともあり、沖合よりも陸域に近い海域が高濃度になる傾向にあった。そのため、吹上浜沿岸域の一次生産において陸域からの栄養塩供給量の重要性が考えられる。一方で、

吹上浜沖合の北部において、相対的にChl.aが高濃度を示すこともあり、鹿児島県北西部から流入する一級河川である川内川の影響についても示唆された。

第6章において、鹿児島県松ヶ浦海岸の潮間帯における、口径12.5cm（断面積：122.7cm²）の塩ビパイプ管内から、12.6 m³/dayの海岸湧出地下水量が確認され、栄養塩供給量として、NO₃-N、PO₄-P、各々45.7 g-N/day、0.5 g-P/dayと推定された。また、海岸湧出地下水の水質は高濃度NO₃-N(300 μmol/l)と低pH(6.3)で特徴づけられ、さらに塩分は0.1~2.9 %で、淡水地下水量が90 %以上を占めており、海水の影響が小さいことが示された。河川流入のない本海岸において、海岸湧出地下水が沿岸域生態系にとっての重要な栄養塩供給機構である可能性が示唆された。

第7章において、福島県松川浦における淡水流入量の推定をおこなった。その結果、降水量に対して河川流量が52.2 %、地下水量が3.6%、流出量に対して河川流量が93.5 %、地下水量が6.5%であった。地下水流量は769.9万m³/yr(0.24m³/s)であり、これは松川浦流域の小河川である梅川の推定流量0.19m³/sと同レベルの値であった。流出量に対する地下水流量の割合は少ないものの、松川浦流域の小河川一本分の流量はあるので、浦内への物質輸送機構として地下水流入量も評価する必要が考えられる。

最後に今後の課題及び展望について述べる。

(1) 吹上浜海岸を対象とした現地調査

(i) 砂浜地下水の長期連続観測

吹上浜の砂浜背後地において、地下水位観測を2週間行ったが、今後は長期的な連続観測を行い、季節変動等、詳細な砂浜地下水動態を明らかにしていく必要がある。また、吹上浜流域の北部地域と南部地域において地下流量の類似性が見られた。そのため、北部と南部の砂浜背後地において、同時に砂浜地下水の連続観測を行い、背後地の地形や地質の相違、砂浜背後地の構造物の有無等が沿岸域への地下水流入に及ぼす影響について明らかにする必要がある。加えて、砂浜地下水の栄養塩濃度についても測定し、より詳細な栄養塩供給量を算出する必要がある。

(ii) 流入河川の流量及び水質観測

現在の吹上浜における流入河川の流量及び栄養塩濃度のデータは非常に少ない。特に小河川については皆無に等しい。そのため、河川の流量及び栄養塩濃度を測定し、河川からの栄養塩供給量の詳細を明らかにする必要がある。

(iii) 低次生物生産における砂浜地下水の重要性

地下水からの栄養塩供給が、吹上浜海岸の低次生物生産にどの程度寄与しているのかまだ明らかにされていない。そのため、例えば、窒素安定同位体比分析を用いて、地下水起源栄養塩と、滲出面周辺の底生微細藻類やサーフゾーン内における植物プランクトンとの関連性について調査し、砂浜生態系の窒素循環に対する影響を明らかにする必要がある。

(iii) 吹上浜沿岸域におけるChl.aの水平分布及び鉛直分布

吹上浜沿岸域における漁業生産量の管理を行う上で、基盤となる一次生産量を把握する必要がある。そのため、沿岸域周辺において、Chl.aの水平分布及び鉛直分布を明らかにしなければならない。衛星データによって、表層Chl.aの水平分布はある程度把握することが

できるが、今後は実際に現地観測を行い、衛星Chl.aとの比較や鉛直分布について調査し、一次生産構造を明らかにする必要がある。

(2) 松ヶ浦海岸を対象とした調査

松ヶ浦海岸は、幅100mほどのポケットビーチで流入河川がない。そのため、陸域からの栄養塩供給機構として地下水の影響評価を行いやすい場所である。本研究では、塩ビパイプ管内から湧出する地下水量を測定し日湧出流量を推定したが、より正確に測定するには、例えば、シーページメータによって測定する必要がある。地下水や海岸周辺の海水を含め、水質データについては今後も調査を行い、データを蓄積していかなければならない。

(3) GISによる沿岸域への地下水流量の評価

水収支式を用いた本研究の手法は、流域における河川流量の実測値データがあれば、後は気象庁のアメダス降水量や気温データ、基盤地図情報や国土数値情報によって公開されている数値標高データ、土地利用データ等を使って、GIS上で容易に解析できる。しかし、水収支式による推定は、季節変動や短期的な変動を考慮しておらず、ファーストオーダーの概算値ということにもなる。ただし、近年、沿岸域への栄養塩輸送機構としてSGDが注目されつつある中で、吹上浜沿岸域のように陸域からの淡水流入量が明らかにされていない沿岸域においては、地下水流量の初期情報を得る手段として有効な方法であると考えられる。今後、沿岸域への地下水流量の評価手法として発展していくことを期待する。

(4) 陸域内地下水経路での栄養塩の内部消費・生産

地下水が陸域の土壤中を移動する間にも、その経路途中の間隙生物や微生物などにより栄養塩が消費されたり、逆に、内部生産されることも考えられる。本博士論文では、海域に供給される直前（吹上浜）・直後（松ヶ浦）で栄養塩濃度を測定し、この濃度に流量を乗じて海域への栄養塩供給量を求めたが、場合によっては、陸域の複数地点で地下水の栄養塩濃度を求めて、海域への栄養塩供給量を推定する必要が生じる可能性もあるので、地下水経路内での栄養塩の内部消費・生産に関しても定量的な推定手法を開発する必要がある。

謝辞

月日が経つのは早く、2011年4月に鹿児島大学大学院連合農学研究科博士課程の学生として研究に取り組み始め、早3年が経過しました。研究室に配属された当初、他大学から来たということもあり、新たな環境でのスタートに期待と不安な気持ちを抱えていたことを覚えています。元来のんびりとした性格であるため、なかなか研究が進まず、周りの方々にご迷惑をかけたことを反省している次第です。

本研究を遂行するにあたり、鹿児島大学水産学部水産生物・海洋学分野の西隆一郎教授には終始、熱心な御指導・御鞭撻を賜りました。心より深くお礼申し上げます。西教授は多忙を極めていたにもかかわらず、研究が遅々として進まないに著者に対し、我慢強くそして紳士的な態度で接していただきました。3年間の研究生生活で学んだことを、これからの社会人生活に少しでも活かせるよう努力していく所存です。

副指導をしていただいた、鹿児島大学水産学部水産生物・海洋学分野の大富潤教授及び鹿児島大学水産学部漁業工学分野の重廣律男教授には本論文に対して有益な御意見をいただきました。厚くお礼申し上げます。

独立行政法人水産大学校水産学研究科の須田有輔教授には、卒論研究から現在に至るまで、非常に多くの御指導・御助言をしていただきました。心よりお礼申し上げます。

(元)独立行政法人水産大学校生物生産学科の早川康博教授は、大学を退職された後も、著者の研究や論文に対して多くの適切な御助言を下されました。心より感謝申し上げます。

鹿児島建設専門学校の教諭で、研究室の社会人学生でもある鶴成悦久氏には、測量やGIS解析の基礎など多くの実務的な御指導をいただきました。これらの御指導がなければ、本論文の完成はなかったと思います。さらに、研究だけにとどまらず日頃から良き相談相手になっていただきました。心よりお礼を申し上げるとともに、今後ともよろしく願います。

現地調査を行うにあたり、鹿児島大学水産学部海洋環境グループの平中陸氏、渡辺卓也氏及び水産大学校生物生産学科の沿岸生態系保全研究室の学生諸氏にご協力いただきました。ここに謝意を表します。

吹上浜の現地調査を行うにあたり、調査基地として京田農村振興研修センターの利用を快く許可してくださった、南さつま市金峰町京田地区の住民の方々の御協力に感謝いたします。

最後に、博士課程への進学を承諾し、経済的支援をしてくれた両親に心よりお礼を申し上げます。

皆様、本当にありがとうございました。

付録 A

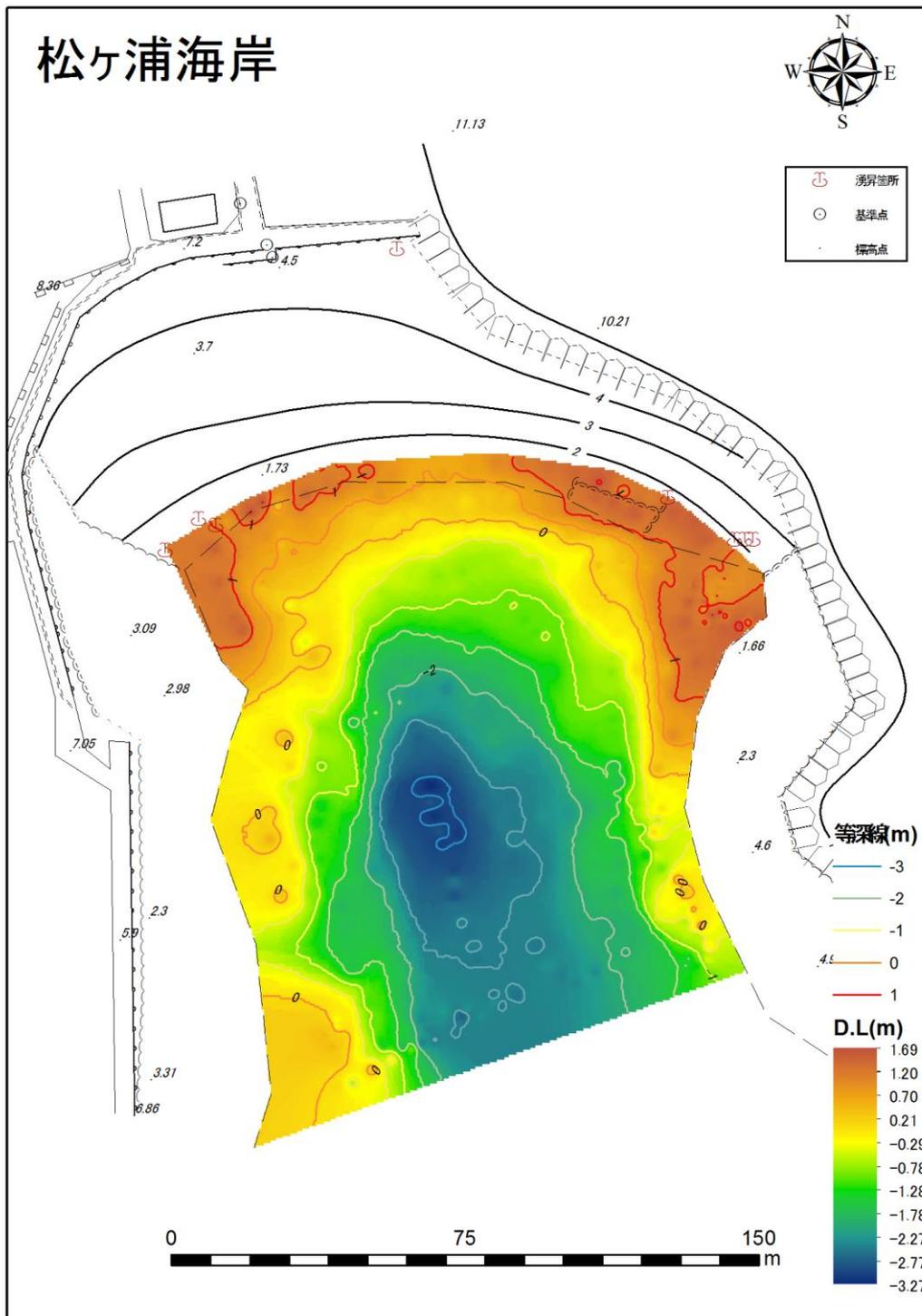
追加調査として、2013年4月29日に鹿児島県松ヶ浦海岸の海域調査を実施した。調査内容は、GPS魚群探知機による測深観測及び水質観測である。水質観測は、多項目水質計(東亜ディーケーケー, WQC-24型)によって、水温、塩分、電気伝導度、濁度を1秒間隔で測定し、クロロフィル濁度計(JFE アドバンテック社, Compact-CLW)によってクロロフィル a を1秒間隔で測定を行った。GPS魚群探知機及び水質計等の調査機器はインフレーターブルボートへ搭載し観測を実施した(詳細は、鶴成ら(2013)¹⁾を参照)。

海底地形図及び海域表層の水質観測結果の図を次ページ以降に示した。これらの図は鹿児島建設専門学校の鶴成悦久教諭に作成していただいた。今後、これらの海底地形図を元に継続的に現地調査を実施し、流入地下水による物質輸送が海域の生物生産に及ぼす影響について評価していく必要がある。

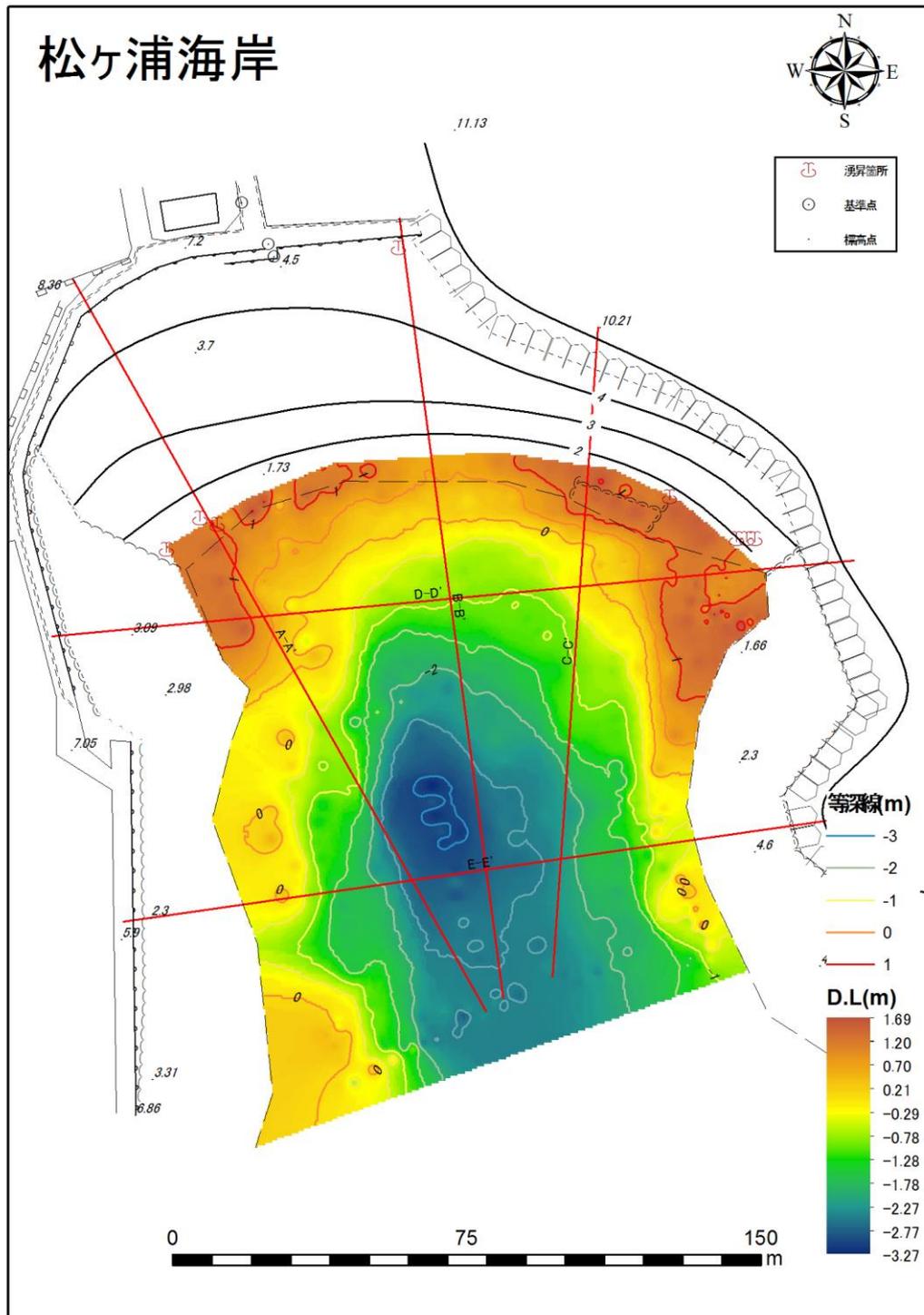
付録 A-1	海底地形図	93
付録 A-2	海底地形断面図を見るために引いたライン	94
付録 A-3	海底地形断面図	95
付録 A-4	表層水温	96
付録 A-5	表層塩分	97
付録 A-6	表層電気伝導度	98
付録 A-7	表層濁度	99
付録 A-8	表層クロロフィル a	100

参考文献

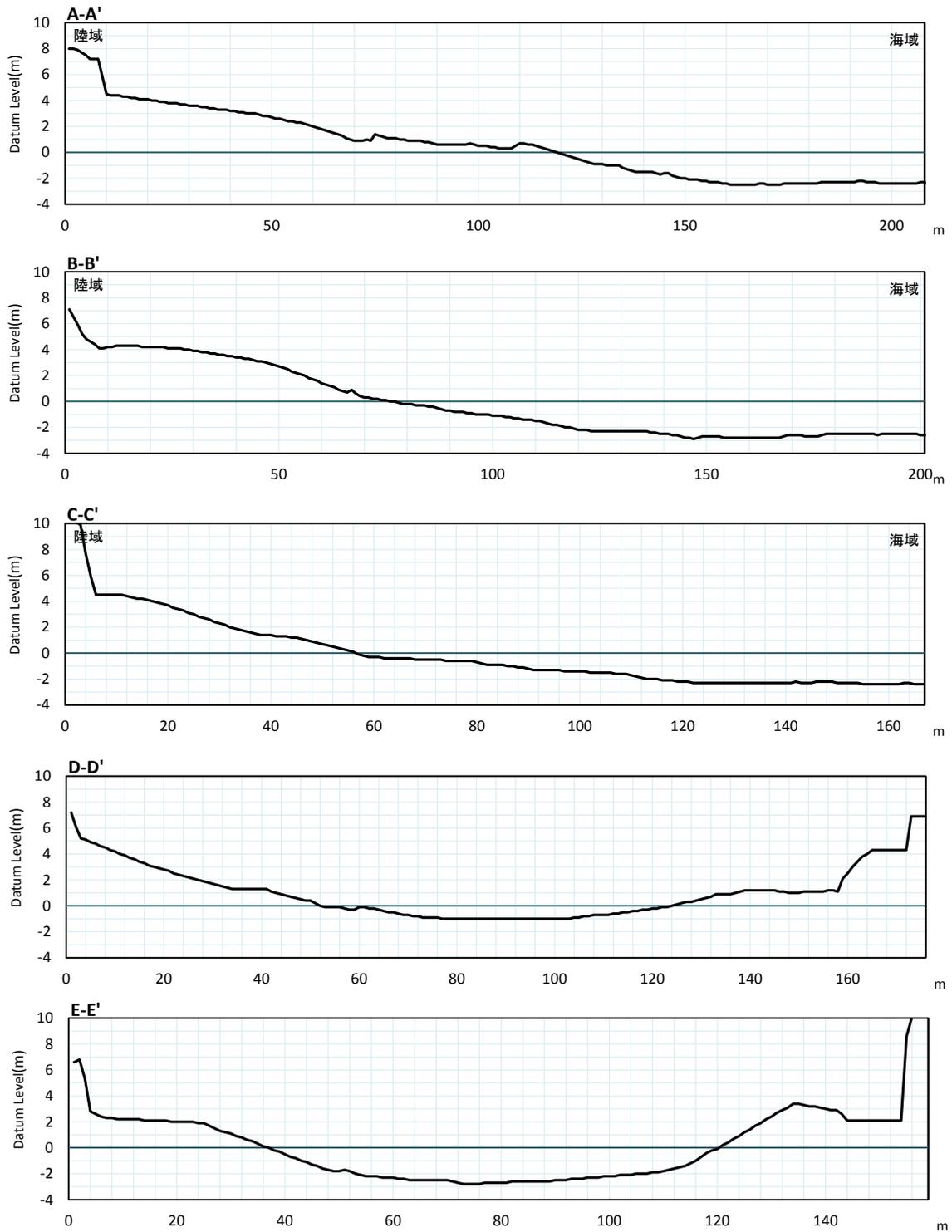
- 1) 鶴成悦久, 西 隆一郎, 加茂 崇, 立山芳輝, 浜本 麦, 林 健太郎: GPS魚群探知機による極浅海域を対象とした調査手法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, I_1132-I_1137, 2013.



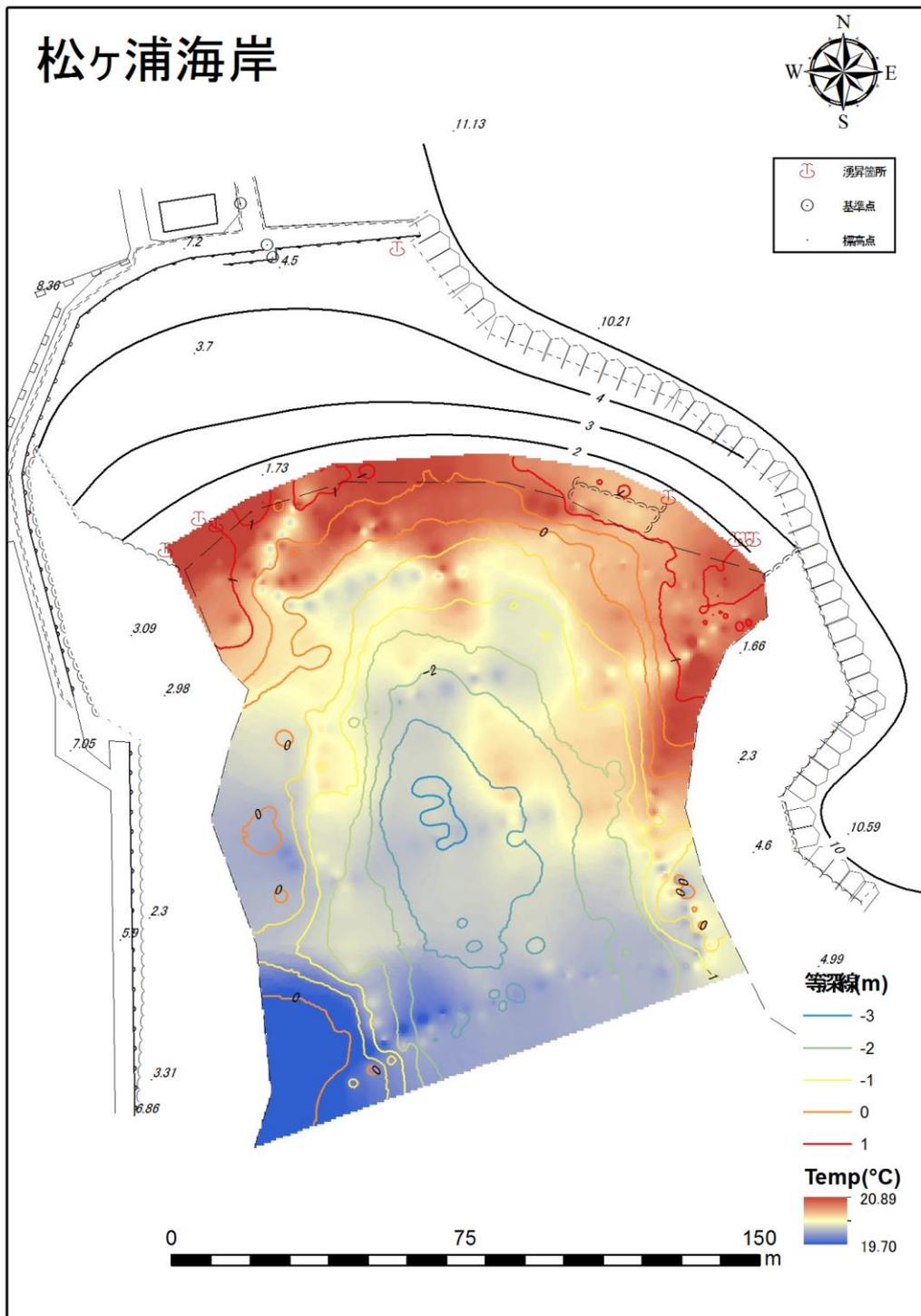
付録 A-1 海底地形図



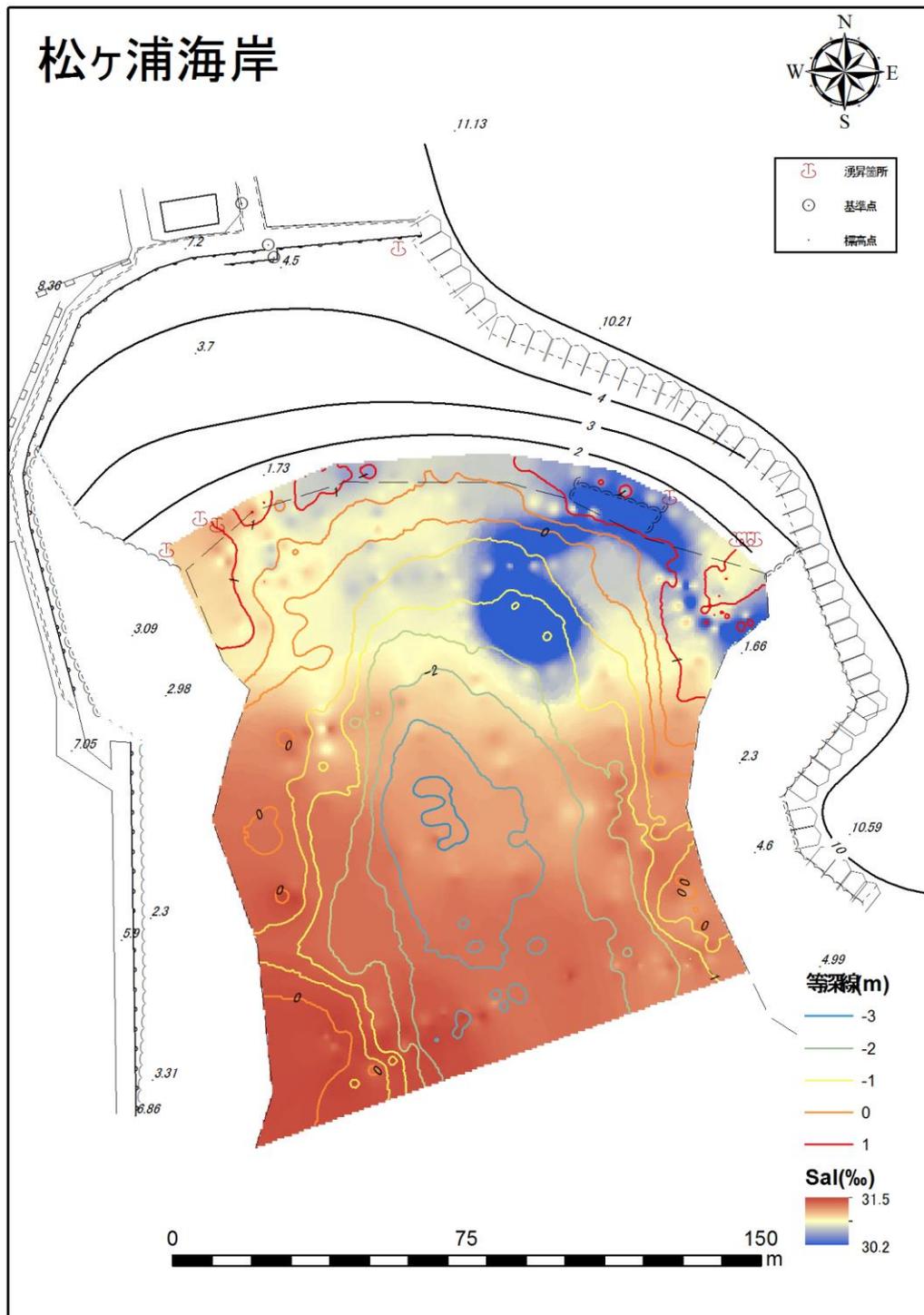
付録 A-2 海底地形断面図を見るために引いたライン



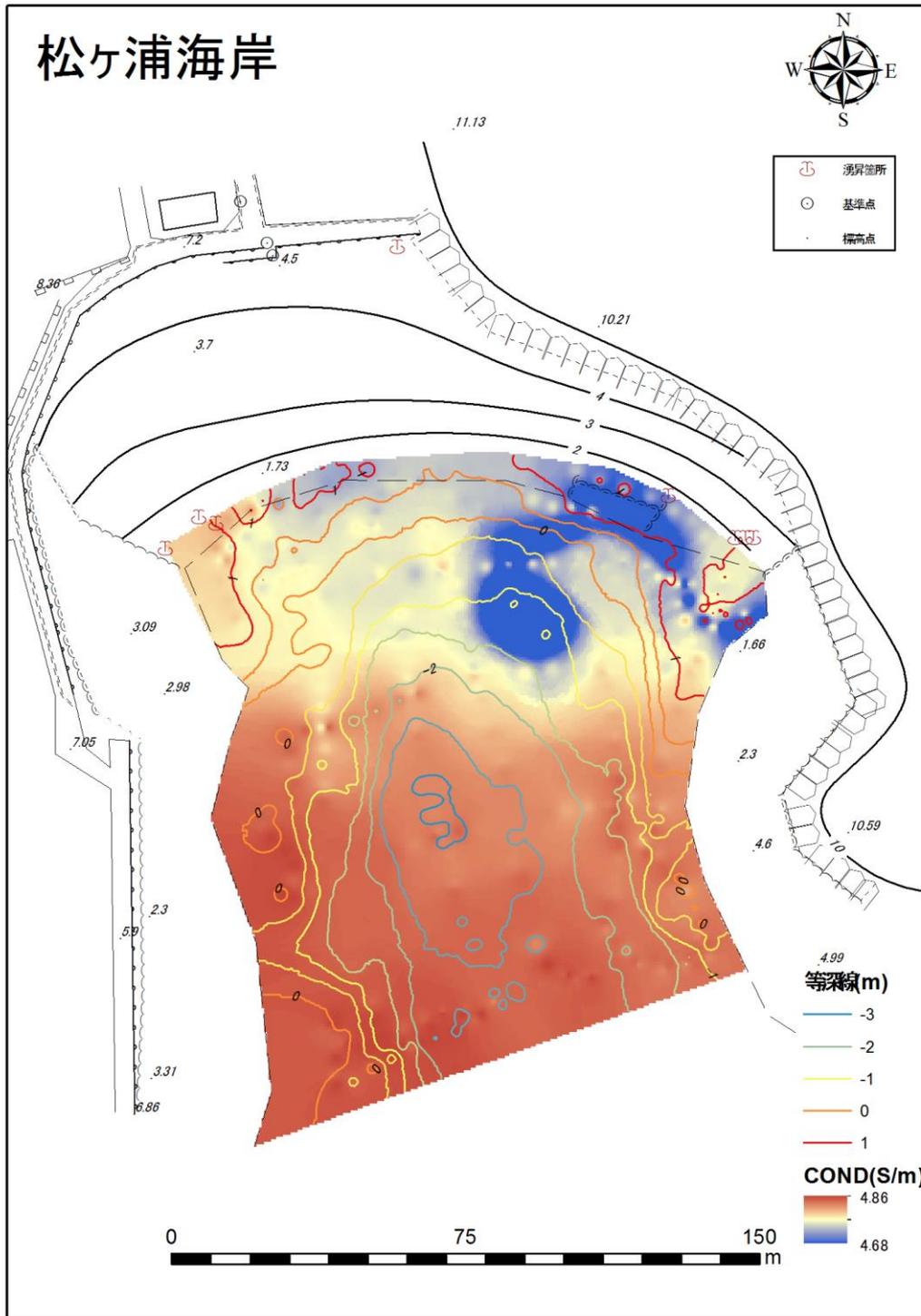
付録 A-3 松ヶ浦海岸海域の海底地形断面図



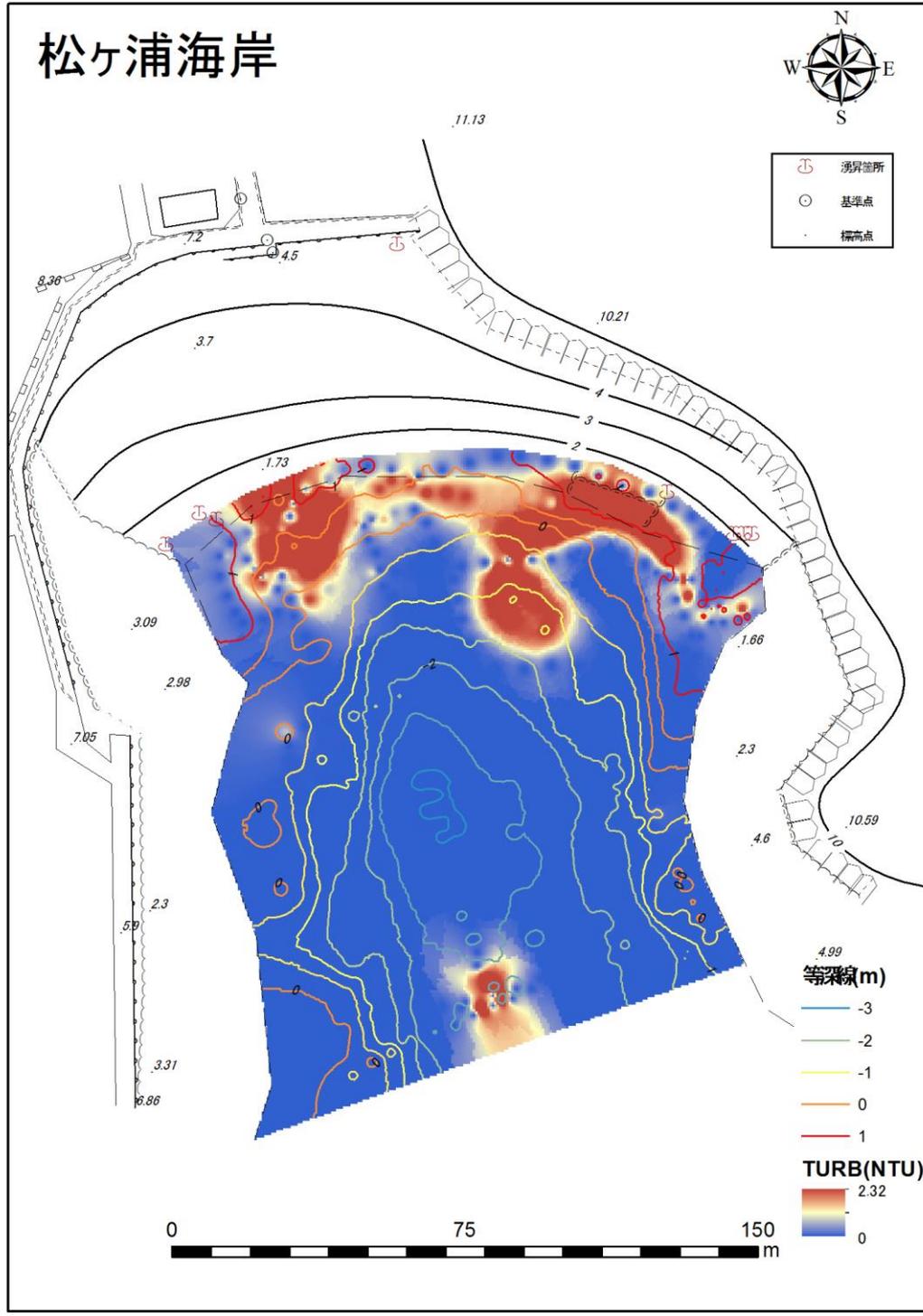
付録 A-4 松ヶ浦海岸海域の表層水温



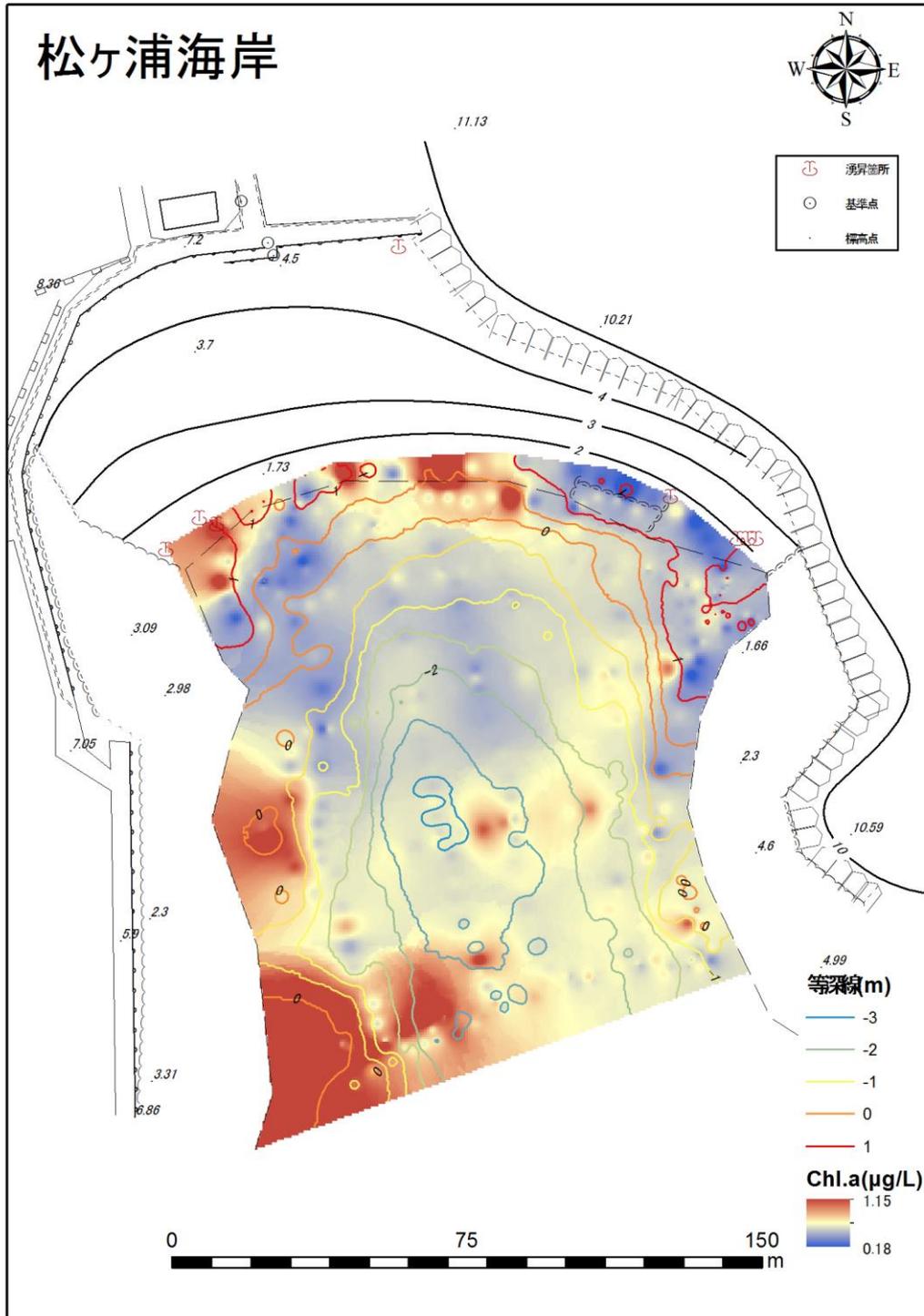
付録 A-5 松ヶ浦海岸海域の表層塩分



付録 A-6 松ヶ浦海岸海域の表層電気伝導度



付録 A-7 松ヶ浦海岸海域の表層濁度



付録 A-8 松ヶ浦海岸海域の表層クロロフィル a

付録 B 論文リスト

査読付き論文

- 1) 加茂 崇, 西 隆一郎, 鶴成悦久, 黒瀬公美子: 海岸湧出地下水の研究—鹿児島県松ヶ浦海岸潮間帯から湧出する地下水—, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, I_539-I_544, 2013.
- 2) 加茂 崇, 西 隆一郎, 鶴成悦久, 須田有輔, 早川康博, 大富 潤: 砂質性海浜に流入する淡水量の推定—鹿児島県吹上浜を例に一—, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, I_545-I_550, 2013.
- 3) 鶴成悦久, 西 隆一郎, 加茂 崇, 立山芳輝, 浜本 麦, 林 健太郎: GPS 魚群探知機による極浅海域を対象とした調査手法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, I_1132-I_1137, 2013.

査読無し論文

- 1) 加茂 崇, 山下 善, 涌井邦浩, 鷹崎和義, 神山享一, 西 隆一郎, 林 健太郎: 福島県松川浦の東日本大震災津波前後での水質変化, 季刊「水路」, 第 163 号, pp.6-12, 2012.
- 2) 鶴成悦久, 西 隆一郎, 加茂 崇: 水圏環境 GIS を用いた重富干潟における環境特性の解析, 地理情報システム学会講演論文集(CD-ROM), 巻 21, 2012.
- 3) 早川康博, 伴 佳一郎, 加茂 崇, 江崎恭志: 博多湾における養殖マガキの餌料指標としてのクロロフィル a の変動, 水産大学校研究報告, 第 61 巻, 第 1 号, pp.1-10, 2012.
- 4) 富岡森理, 須田有輔, 加茂 崇, 大富 潤, 西 隆一郎, 田中龍児, 早川康博: 鹿児島県吹上浜の砂浜海岸の潮間帯に出現した多毛類, 水産大学校研究報告, 第 61 巻, 第 2 号, pp.65-74, 2012.