

三宅島沿岸域表層海水中の栄養塩濃度(溶存態無機窒素濃度・リン酸態リン濃度・ケイ酸態ケイ素濃度)に影響する要因

飯島純一^{*1}・駒澤一郎^{*2}・高瀬智洋^{*1}・木本 巧^{*3}

The factors which effect the nutrient concentrations (DIN, PO₄-P, SiO₂-Si) in the surface seawater on the coasts of Miyake-jima Island, central Japan

Junichi IIJIMA^{*1}, Ichiro KOMAZAWA^{*2}, Tomohiro TAKASE^{*1}, and Takumi KIMOTO^{*3}

三宅島は伊豆諸島に属する島であり、東京から約180 km 南に位置している(図1)。三宅島では水産業が盛んであり、特に寒天原藻として知られるテングサ科海藻の内、マクサ *Gelidium elegans* およびオオブサ *Gelidium pacificum* は、1960年代後半には三宅島の

総水揚げ量の7割以上を占める重要な水産物であった(東京都水産試験場 1970)。現在では最盛期に比べ水揚げ量は減少しているものの、三宅島の特産品として重要な水産物となっている。

同じ伊豆諸島に属し、三宅島より約120 km 南に

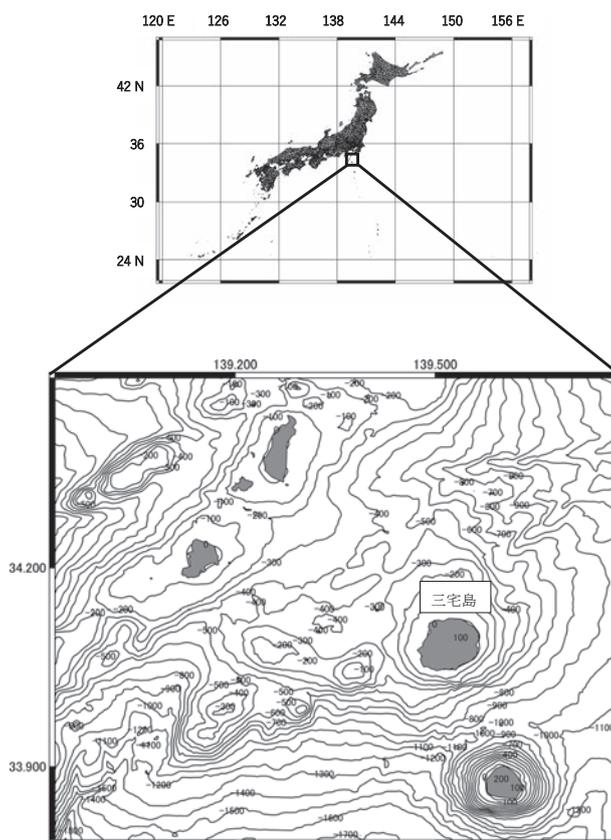


図1 三宅島の位置

-
- 1 東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所 〒100-0212 東京都大島町波浮港17
 - 2 東京都島しょ農林水産総合センター八丈事業所 〒100-1511 東京都八丈町三根4222-1
 - 3 東京都島しょ農林水産総合センター振興企画室 〒105-0022 東京都港区海岸2-7-104

位置する八丈島では、主要水産物であったマクサが2000年代に入ると衰退し、近年ほとんど漁獲がなくなったことが報告されている（高瀬ら 2008）。この一因として、駒澤ら（2012）は黒潮流路変動に伴う海中の栄養塩濃度変化の影響を指摘している。八丈島における海中の栄養塩濃度には黒潮流路が影響し、同島が黒潮の外側域に位置すると高水温・低栄養、内側域に位置すると低水温・高栄養の海況となる。

三宅島についても、黒潮流軸が接近すると沿岸水温が高くなる等、黒潮の影響を大きく受ける場所に位置しており（図2）、八丈島と同様に海中の栄養塩環境が黒潮流路に影響を受けて変動し、マクサやオオブサの盛衰に影響を与えている可能性がある。これまで三宅島の沿岸域における栄養塩濃度について、中島（2002）は表層水温の観測データを基に、東向きの流れが卓越するときに局地性湧昇流が発生し、低水温・高栄養塩の海洋深層水が表層付近まで湧昇することで、マクサやオオブサの収穫量が多くなるとしている。しかし、三宅島において実測した栄養塩濃度と海藻の豊凶について解析した事例はなく、さらに栄養塩濃度に影響する黒潮流路や季節等の環境要因についても解析されていない。三宅島における環境要因と栄養塩濃度との関係を明らかにすることができれば、それらの要因が同島の重要水産物であるマクサやオオブサの盛衰に与える影響も把握できる可能性がある。

そこで、本報告では三宅島沿岸域の栄養塩環境に影響を与える要因を把握するため、周年採水した海水サンプルの栄養塩濃度と、採水を実施した季節・採水場所・黒潮流路・採水日から過去3日間の合計降水量との関係について、一般化線形モデル(以下GLMと記す)を用いて解析を行った。

材料と方法

表層海水の採取

栄養塩分析に用いた海水は2012年4月から2015年3月までの3年間、概ね毎月1回、三宅島の4地点の漁港（図3）で表層海水を採水した。採水はポリエチレン製のバケツを用いて行い500 mL 黒色ボトルに収容した。収容した表層海水は、その日の内に市販の冷凍庫で凍結した後、事業所に持ち帰り、-20℃の冷暗所にて保存した。なお、2012年は阿古漁港、湯の浜漁港の5月、7月、9月、11月、伊ヶ谷漁港、坪田漁港の9月が欠測であった。2013年は阿古漁港、坪田漁港の5月から9月までの各月と11月、伊ヶ谷漁港、坪田漁港の6月、8月が欠測であった。2014年は阿古漁港、湯の浜漁港の3月、7月、8月、9月、11月、伊ヶ谷漁港、坪田漁港の3月、7月、8月、11月が欠測であった。2015年は阿古漁港、湯の浜漁港、伊ヶ谷漁港、坪田漁港の3月が欠測であった。

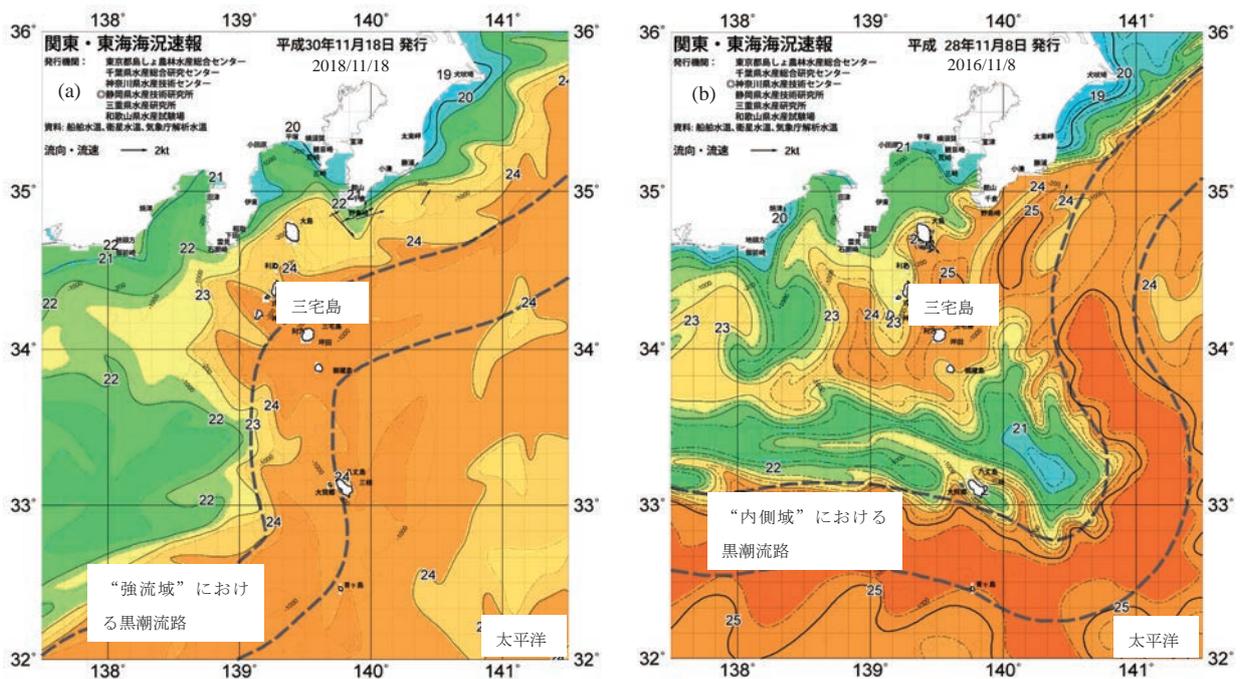


図2 三宅島の位置と黒潮流路 (a) “強流域” 2018年11月18日, (b) “内側域” 2016年11月8日。

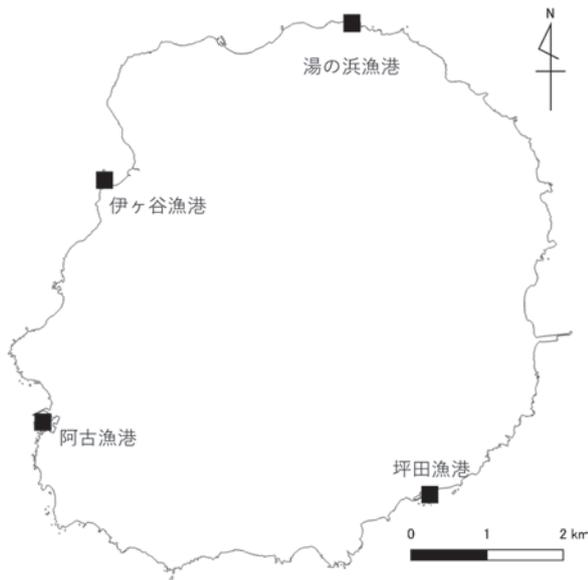


図3 採水地点

栄養塩濃度の分析

採集した表層海水は株式会社日本海洋生物研究所に分析委託し、海洋観測指針（日本気象協会 1990）に基づき、NO₃-N 濃度は銅-カドミウム還元反応、NO₂-N 濃度はジアゾ化反応、PO₄-P 濃度はリンモリブデン酸錯体生成反応、SiO₂-Si 濃度はケイモリブデン酸錯体生成反応、NH₄-N 濃度はインドフェノール生成反応を利用し、分光光度計を用いた吸光度法により測定した（単位は全てμg/L）。また GLM による解析時には NO₃-N 濃度、NO₂-N 濃度、NH₄-N 濃度を合計し溶存態無機窒素濃度（DIN 濃度）として取り扱った。

黒潮流路と降水量

黒潮流路については、東京都、千葉県、神奈川県、静岡県、三重県、和歌山県が共同で発行する関東・東海海況速報（<https://www.ifarc.metro.tokyo.lg.jp/archive/20,0,48.html>）を基に、黒潮流軸が三宅島の南側に位置する場合を内側域型（Coastal）、黒潮流軸が三宅島にかかる場合を強流域型（Onshore）として1日毎に判別し、1ヶ月ごとに集計して内側域型と強流域型（内側域型の占める日数が50%以上と未満）に分類した（図2）。

降水量については、気象庁東京管区气象台が設置する三宅島特別地域気象観測所の統計データを気象庁ホームページ（<http://www.data.jma.go.jp/jma/menureport.html>）からダウンロードして用いた。2012年から2015年の各年それぞれについて、日毎の降水量データから採水日を含めない過去3日間のデータを

合計して GLM の解析に用いた。また、日毎の降水量データを合計して各月毎の合計降水量を求め、さらに各月の合計降水量を整理し季節（春（3月～5月）、夏（6月～8月）、秋（9月～11月）、冬（12月～2月））毎の合計降水量を求めた。

GLM による解析

三宅島沿岸域の表層海水中の DIN 濃度、PO₄-P 濃度、SiO₂-Si 濃度に影響する要因を明らかにするため、応答変数をそれぞれ DIN 濃度、PO₄-P 濃度、SiO₂-Si 濃度とし、説明変数は、採水した季節（春（3月～5月）、夏（6月～8月）、秋（9月～11月）、冬（12月～2月））・採水場所（阿古漁港、伊ヶ谷漁港、湯の浜漁港、坪田漁港）・採水日の黒潮流路（内側域型、強流域型）・過去3日間の合計降水量、採水場所と黒潮流路の交互作用項とした GLM を構築した。また、説明変数の内、季節・採水場所・黒潮流路はカテゴリカル変数として扱った。応答変数の確率分布は対数正規分布、ガンマ分布をそれぞれ仮定して GLM を構築した。それぞれのモデルについて、総当たり法（馬場 2015）で AIC が最小のモデルを選択した。すべての統計解析は、フリーソフト R（<http://cran.r-project.org/>） Ver.3.6.1 を用いて行った。

結果

栄養塩濃度

DIN 濃度、PO₄-P 濃度、SiO₂-Si 濃度の採水地点別の季節変化をそれぞれ図4、5、6に示した。

DIN 濃度は、坪田漁港を除き夏に減少した後に秋から冬にかけて増加した。最小値は夏の伊ヶ谷漁港で 17.2 μg/L、最大値は冬の湯の浜漁港で 66.8 μg/L であった。

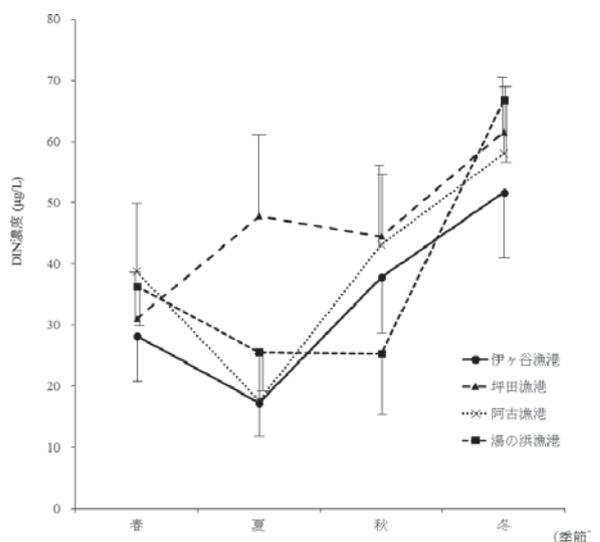


図4 DINの季節変化

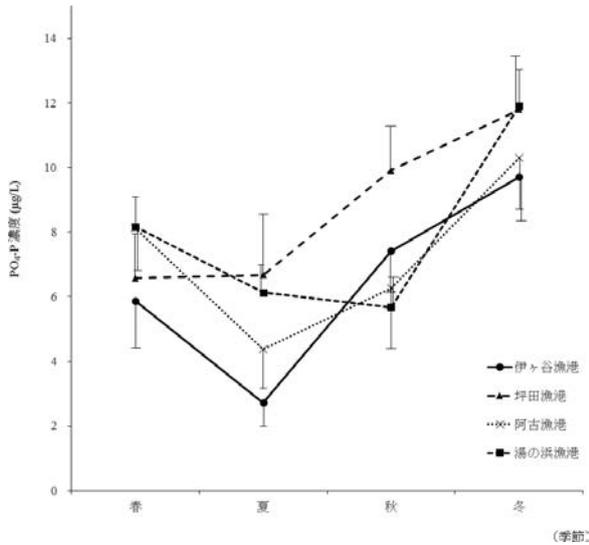


図5 PO₄-P濃度の季節変化

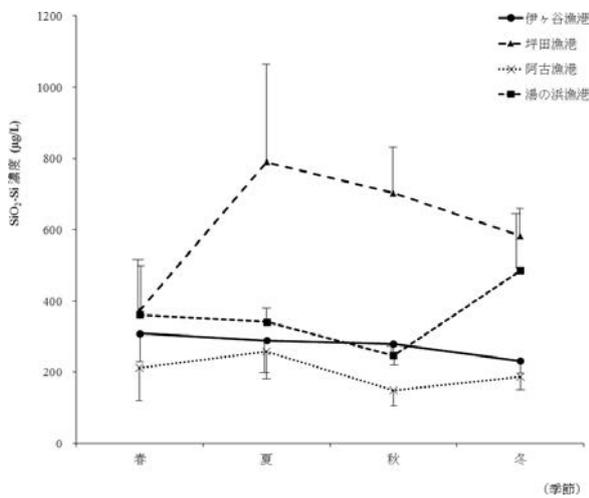


図6 SiO₂-Si濃度の季節変化

PO₄-P濃度は、伊ヶ谷漁港および阿古漁港では夏に減少した後に秋から冬にかけて増加するというDIN濃度と同様の季節変化を示した。また、坪田漁港では春以降、冬にかけて増加し、湯の浜漁港では春から秋にかけて減少した後、冬に大きく増加した。最小値は夏の伊ヶ谷漁港で2.7 μg/L、最大値は冬の湯の浜漁港で11.9 μg/Lであった。

SiO₂-Si濃度は、明瞭な季節変化は見られなかった。全季節を通じて坪田漁港が高く、阿古漁港が低かった。最小値は秋の阿古漁港で149.8 μg/L、最大値は夏の坪田漁港で790.0 μg/Lであった。

黒潮流路と降水量

調査期間中の黒潮流路の推移を図7に示した。強流域型に位置していたのは2012年5月、9月から11月、2013年3月、5月、2014年5月、12月であった。それ以外の期間は内側域型に位置した。栄養塩濃度分析のデータ数は、強流域型で20、内側域型で72となった。

三宅島における調査期間中の合計降水量の季節変化を図8に示した。季節ごとの合計降水量は、386.5 mm (2013年冬) から1137.0 mm (2014年秋)の間で推移し、年や季節により変動が大きいものの、年間では秋に多い傾向があった。

GLMの解析結果

DIN濃度、PO₄-P濃度、SiO₂-Si濃度それぞれについて、総当たり法により各48モデルが作成された。作成されたモデルのうち、それぞれ上位10モデルを表1に示した。AICによるモデル選択の結果、DIN濃度およびPO₄-P濃度については応答変数の従う確率分布が対数正規分布で、DIN濃度の説明変数が黒潮流路(KC)と季節(SE)、PO₄-P濃度のそれは黒潮流路(KC)、季節(SE)、降水量(RF)のモデルがそれぞれ選択された。SiO₂-Si濃度については応答変数の従う確率分布がガンマ分布で、説明変数が採水場所(SP)のみのモデルが選択された。

選択されたモデルの係数をそれぞれ表2、3、4に示した。

上述のようにDIN濃度については、説明変数が季節と黒潮流路のモデルが選択された。季節の係数は、春を基準(0)にした場合、夏に低い値を取り、冬に高くなる傾向があった。また、黒潮流路の係数は、内側域型を基準(0)にした場合、強流域型に移行する

強流域型
 内側域型
 調査期間外

年	冬		春			夏			秋			冬
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2012												
2013												
2014												
2015												

図7 黒潮流路の変化

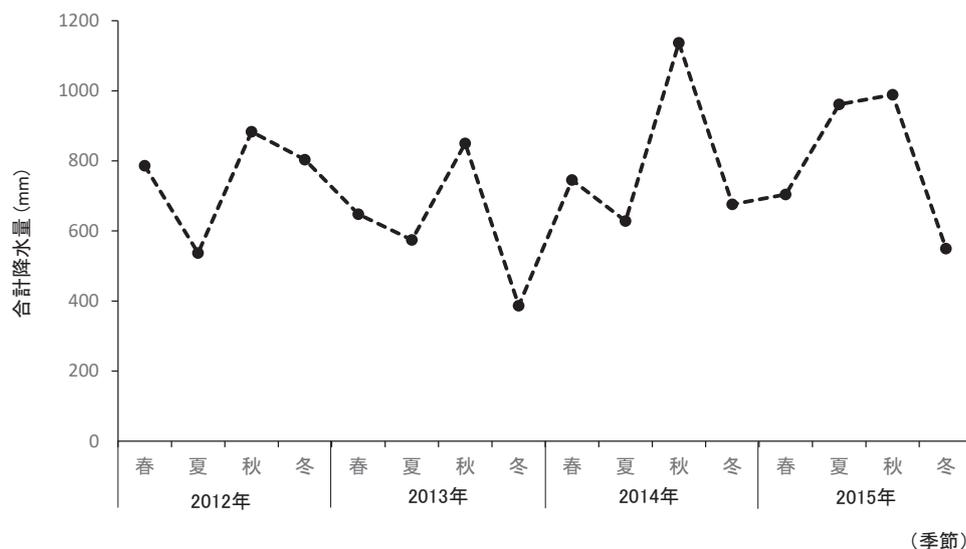


図8 三宅島の降水量

表1 モデル毎のAIC

DIN 濃度モデル毎の AIC

No.	有意な説明変数	応答変数の確率分布	AIC	△ AIC
1	KC+SE	対数正規分布	863.5	0.0
2	KC+SE+RF	対数正規分布	864.7	1.2
3	KC+SE+SP	対数正規分布	864.9	1.4
4	KC:SP+RF+SE	ガンマ分布	865.4	1.9
5	KC+KC:SP+RF+SE	ガンマ分布	865.4	1.9
6	SP+KC:SP+RF+SE	ガンマ分布	865.4	1.9
7	KC+SP+KC:SP+RF+SE	ガンマ分布	865.4	1.9
8	KC+KC:SP+SE	ガンマ分布	865.7	2.2
9	KC:SP+SE	ガンマ分布	865.7	2.2
10	SP+KC:SP+SE	ガンマ分布	865.7	2.2

PO₄-P 濃度モデル毎の AIC

No.	有意な説明変数	応答変数の確率分布	AIC	△ AIC
1	KC+RF+SE	対数正規分布	494.7	0.0
2	KC+SP+RF+SE	対数正規分布	495.1	0.4
3	KC+SE	対数正規分布	495.5	0.8
4	KC+SP+SE	対数正規分布	496.1	1.4
5	KC:SP+RF+SE	対数正規分布	499.7	5.0[
6	KC+KC:SP+RF+SE	対数正規分布	499.7	5.0
7	SP+KC:SP+RF+SE	対数正規分布	499.7	5.0
8	KC+SP+KC:SP+RF+SE	対数正規分布	499.7	5.0
9	KC+SP+RF+SE	ガンマ分布	499.7	5.0
10	KC:SP+SE	対数正規分布	501.3	6.6

SiO₂-Si 濃度モデル毎の AIC

No.	有意な説明変数	応答変数の確率分布	AIC	△ AIC
1	SP	ガンマ分布	1233.6	0.0
2	SP+RF	ガンマ分布	1235.0	1.4
3	KC+SP	ガンマ分布	1235.1	1.5
4	KC+SP+RF	ガンマ分布	1236.2	2.6
5	KC:SP	ガンマ分布	1236.5	2.9
6	KC+KC:SP	ガンマ分布	1236.5	2.9
7	SP+KC:SP	ガンマ分布	1236.5	2.9
8	KC+SP+KC:SP	ガンマ分布	1236.5	2.9
9	KC:SP+RF+SE	ガンマ分布	1237.3	3.7
10	KC+KC:SP+RF+SE	ガンマ分布	1237.3	3.7

* KC：黒潮流路，SE：季節，SP：採水場所，RF：降水量を意味する

表2 DIN濃度モデルの係数

説明変数	係数	標準誤差
切片	3.643	0.136
季節		
夏	-0.248	0.255
秋	0.022	0.185
冬	0.528	0.149
黒潮流路		
強流域型	-0.836	0.278

表3 PO₄-P濃度モデルの係数

説明変数	係数	標準誤差
切片	2.029	0.121
季節		
夏	-0.334	0.224
秋	-0.040	0.143
冬	0.407	0.123
黒潮流路		
強流域型	-0.678	0.190
降水量	0.004	0.002

表4 SiO₂-Si濃度モデルの係数

説明変数	係数	標準誤差
切片	5.299	0.165
採水場所		
伊ヶ谷漁港	0.312	0.212
坪田漁港	1.105	0.212
湯の浜漁港	0.662	0.234

と低くなった。

PO₄-P濃度については、季節、黒潮流路および降水量のモデルが選択された。季節の係数は夏に低く冬に高くなり、黒潮流路の係数は強流域型に移行すると低くなるというDIN濃度と同様の傾向が認められた。また、降水量の係数は0.004と他の説明変数と比べて小さい値であった。

SiO₂-Si濃度については、採水場所のみのモデルが選択された。その係数は阿古漁港を基準(0)とした場合、坪田漁港で最も大きく、次いで湯の浜漁港、伊ヶ谷漁港と続いた。

採水場所と黒潮流路の交互作用項はDIN濃度、PO₄-P濃度、SiO₂-Si濃度のいずれにおいても選択されなかった。

考察

三宅島における栄養塩濃度の解析の結果、黒潮流路がDIN濃度、PO₄-P濃度に影響していることが明らかとなった。内側域型を基準(0)とした場合の強流域型の係数はDIN濃度、PO₄-P濃度のいずれもマイナスとなった(表2, 3)。このことから三宅島において強流域型になるとDIN濃度、PO₄-P濃度が低くなることが示された。今回の解析により、三宅島表層海水のDIN濃度、PO₄-P濃度に黒潮流路が影響していること



図9 三宅島におけるテングサ水揚げ量の経年変化

・東京都産業労働局農林水産部水産課のデータを用いて整理した、三宅島におけるマクサ*Gelidium elegans*・オオバサ*Gelidium pacificum*を主とするテングサ水揚げ量の経年変化を示す。

を初めて明らかにすることができた。

三宅島においても黒潮流路が沿岸域の DIN 濃度、 $PO_4\text{-P}$ 濃度に影響していることが明らかとなった。東京都産業労働局農林水産部水産課（1976-2019）によると、三宅島では 1970 年代後半には年間 500 t から 1200 t のテングサ類が水揚げされていたが、近年は 15 t 前後で推移しており、減少傾向にある（図 9）。その要因には 2000 年の雄山の噴火による火山灰の堆積や引続き発生した火山灰を含む泥流の影響もある（東京都水産試験場 2002）。しかし、近年は噴火直後に認められた火山噴出物を由来とする海底に厚く堆積した泥層が確認できない等、火山灰や泥の堆積の影響も減少していると考えられ（東京都島しょ農林水産総合センター 2013）、これら以外の要因が影響している可能性がある。八丈島では、水温平年差と DIN 濃度、 $PO_4\text{-P}$ 濃度の間にそれぞれ負の相関があり、マクサ生長期の水温上昇による栄養塩濃度の低下が資源の減少に影響したと考えられている（駒澤ら 2012）。今後、三宅島においても黒潮流路、水温および DIN 濃度、 $PO_4\text{-P}$ 濃度の関係を明らかにし、窒素、リンを中心とした栄養塩環境の変遷とマクサ・オオブサ資源との関係を解析することができれば、同島におけるこれら海藻の豊凶に栄養塩環境が影響しているのか否かを明らかにできる可能性がある。

今回の解析において、黒潮流路以外では季節が DIN 濃度および $PO_4\text{-P}$ 濃度に影響していることが示された（表 2, 3）。鎌谷ら（2000）は相模湾における硝酸塩、リン酸塩をそれぞれ調べ、10 月以降に上下層の水塊の鉛直混合が活発となり、それに伴い栄養塩に富んだ下層の水塊が表層へ栄養塩を供給する様子を観察している。今回の結果も、この報告と一致しており三宅島の秋期から冬期における DIN 濃度および $PO_4\text{-P}$ 濃度の増加傾向は、表層水温の低下に伴い下層海水との鉛直混合が促進されることに起因すると考えられた。

過去 3 日間の合計降水量については、 $PO_4\text{-P}$ 濃度に影響していることが示された（表 3）。降水量に関連した表層海水における $PO_4\text{-P}$ の供給は河川水（辻本 2009, 梅澤ら 2015）、降水からの直接供給（田淵 1985）、土壌からの流出（石原ら 1995, 竹内 1997）の他、沿岸湧水による地下水系からの海への供給（新井ら 1977）が考えられる。しかし、三宅島に定常的な河川は無く、雨水は沢、地下水等から一時的に沿岸域に流入するのみである（新井ら 1977）。そのため今回、過去 3 日間の合計降水量が有意になった理由は $PO_4\text{-P}$ が降水から直接供給、沿岸湧水量の増加、もしくは土

壌からの流出と考えられるが今回の解析からは明らかにできなかった。今後、降水や沢水、沿岸湧水についても $PO_4\text{-P}$ の分析を行い、起源を推定する取り組みが必要であろう。

採水場所については $SiO_2\text{-Si}$ 濃度に影響していることが明らかとなった（表 4）。富山湾において、 $SiO_2\text{-Si}$ 濃度は陸水の影響を受けることが明らかとなっている（辻本 2009）。また、新井ら（1977）は三宅島の陸水について調査し、湧水や池の水は火山の影響を受け、 $SiO_2\text{-Si}$ 濃度が高くなっていることを示している。さらに、三宅島には溶岩層を不透水層とした貯留機構を持つ地下水溜りが存在しており（新井ら 1977）、今回の解析で $SiO_2\text{-Si}$ 濃度が高かった坪田地区では、南西側に淡水が湧出する場所があることも明らかとなっている（高山 1973）。これらのことから、各採水場所によって湧水の流出の有無や流出量が異なり、それらが $SiO_2\text{-Si}$ 濃度に影響していると考えられた。

採水場所と黒潮流路の交互作用項については、DIN 濃度、 $PO_4\text{-P}$ 濃度、 $SiO_2\text{-Si}$ 濃度いずれでも選択されなかった（表 2, 3, 4）。中島（2002）は、強流域型のような三宅島に東向きの流れが卓越する時、島の東側で湧昇が起き栄養塩に富んだ底層海水が流入するとしているが、今回の解析ではこの現象を検出することができなかった。本解析に用いた強流域型のデータ数は 20 と少なく、季節も 5 月、6 月、8 月、12 月のみでありこの現象を検討するには不十分であったと考えられる。そのため今後、強流域型時における栄養塩濃度データを蓄積し、検討していく必要がある。

今回、解析に用いた栄養塩濃度のデータは 3 年間と比較的短い期間であり、その中で欠測となっているデータも多い。このため、今後より多くのデータを蓄積していく必要がある。また、既に述べたように、八丈島においては黒潮流路変動による栄養塩濃度の減少がマクサ資源の減少に影響していると考えられている。三宅島においてもより長期的な栄養塩濃度、水温およびマクサ・オオブサ資源量のデータを蓄積することが重要であり、それらの相互関係を明らかにできれば、資源の将来予測や維持・増産対策を講じることができる可能性がある。

要 約

2012 年 4 月から 2015 年 3 月まで、三宅島沿岸 4 か所において概ね月 1 回表層海水を採水し、DIN 濃度、 $PO_4\text{-P}$ 濃度、 $SiO_2\text{-Si}$ 濃度を分析した。DIN 濃度、 $PO_4\text{-P}$ 濃度、 $SiO_2\text{-Si}$ 濃度をそれぞれ応答変数とし、説

明変数を季節・採水場所・黒潮流路・過去3日間の合計降水量、採水場所と黒潮流路の交互作用項として一般化線形モデル（GLM）により解析を行った。結果、DIN濃度は季節・黒潮流路が、PO₄-P濃度は季節・黒潮流路・過去3日間の合計降水量が、SiO₂-Si濃度は採水場所が有意となった。

キーワード：一般化線形モデル・栄養塩濃度・黒潮流路

謝 辞

栄養塩濃度の分析試料採集にあたり、三宅支庁産業課水産担当の伊藤誠課長代理（現産業労働局農林水産部水産課）に、多大なご協力をいただいた。また、島しょ農林水産総合センター八丈事業所の堀井善弘事業所長には本稿を校閲していただいた。ここに記して感謝申し上げる。

文 献

新井 正・森 和紀・高山茂美．1977. 三宅島の陸水について．陸水学雑誌，38: 1-8.

馬場真哉．2015. 平均・分散から始める一般化線形モデル入門．プレアデス出版，長野，pp. 316-319.

石原 肇・加藤哲郎．1995. 三宅島農耕地土壌の一般化学性について．東京都農業試験場研究報告，26: 1-12.

鎌谷明善・奥 修・辻 久恵・前田 勝・山田佳昭．2000. 相模湾における栄養塩類の分布と消長．日水誌，66(1): 70-79.

駒澤一期・高瀬智洋・田中優平・早川浩一．2012. 八丈島におけるマクサの生長と成熟におよぼす黒潮流路変動の影響．水産増殖，60(2): 169-177.

中島敏光．2002. - 21世紀の循環型資源 - 海洋深層水

の利用．緑書房，東京，pp. 61-64.

日本気象協会．1990. 海洋観測指針．気象庁，東京，pp. 177-194.

田淵俊雄．1985. 降水中の窒素とリン．水質汚濁研究，8(8): 486-490.

高瀬智洋・田中優平・黒川 信・野原精一．2008. 伊豆諸島八丈島におけるテングサの磯焼け．日水誌，74(5): 889-891.

高山茂美．1973. 三宅島の観光開発と水資源問題．立正大学人文科学研究年報，11: 56-62.

竹内 誠．1997. 農耕地からの窒素・リンの流出．日本土壤肥料学雑誌，68(6): 708-715.

東京都産業労働局農林水産部水産課．1976-2019. 魚種・海区別生産量．東京都の水産．昭和51年度版～令和元年度版．

東京都水産試験場．1970. 漁場改良造成事業効果認定調査報告 浅海増殖開発事業効果認定調査（その8）．東京都水産試験場調査研究要報，84: 1-4.

東京都水産試験場．2002. 三宅島噴火による沿岸漁場の被害．平成13年度東京都水産試験場主要成果集，: 13-14.

東京都島しょ農林水産総合センター．2013. 三宅島のテングサ資源の回復状況（マクサの着生量と取り巻く環境）．平成25年度東京都島しょ農林水産総合センター主要成果集，: 5-6.

辻本 良．2009. 富山湾沿岸域の表層水における塩分と栄養塩濃度の分布．富山県農林水産総合技術センター研究報告，1: 7-22.

梅澤 有・鈴木昌弘・塚崎あゆみ・尾崎健史・牟田直樹・山口 聖．2015. 沿岸域生態系のリン循環．地球環境，20(1): 63-76.