

親潮水域における春季ブルーミングと水塊

石川誠志¹⁾, 河野時廣²⁾

¹⁾ 株式会社ライトスタッフ

²⁾ 東海大学生物学部

Factors of spring bloom and water masses in the Oyashio Region

Seiji ISHIKAWA¹⁾ and Tokihiro KONO²⁾

¹⁾ RIGHT STAFF

²⁾ School of Biological Sciences Tokai University

要 旨

北太平洋西部亜寒帯域では毎年、植物プランクトンの大增殖が発生しこの海域の生物生産を特徴づけている。この海域には低温低塩分な沿岸親潮水 (COW), 低温でやや高塩分な親潮水 (OYW), 高温高塩分な黒潮変質水 (MKW) が流入し、起源が異なるこれらの海水 (以降“水型”と呼ぶ) の分布や混合はこの大增殖に影響を与えているはずである。本研究では、北海道区水産研究所が北海道南東岸から南南東に伸びる観測線上で得られた 1994 年から 2001 年までの 3 月と 4 月の海面から 30m 深で観測されたデータを用いて三つの水型の混合比とクロロフィル (以降 Chl. とよぶ) および栄養塩 (硝酸塩, リン酸塩, ケイ酸塩) の各濃度の関係を統計的に解析した。各水型の混合比で重みづけ平均した Chl. 濃度は 3 月, 4 月ともにそれぞれ COW で最大となる年が多いものの卓越は 3 年間のみで、栄養塩濃度は 2000 年のリン酸塩, ケイ酸塩を除いて COW で最小となっていたものの各年で大きな差はない。しかし、水型の混合比とこれら Chl.・栄養塩濃度を比べると 3 月, 4 月ともにほぼすべての年で COW にのみ有意な正および負の相関がそれぞれみられた。すなわち、COW に含まれる何らかの栄養塩以外の特性 (例えば鉄など) が春季ブルーミングの制限要因となっていることが示唆された。

1. はじめに

北太平洋西部亜寒帯域では、冬季に表層が冷やされることで鉛直混合が活発になり、躍層が破壊され栄養塩が表層に供給される。春季に低塩分な海水が表層を覆い、光が強くなって躍層が発達するようになると植物プランクトンが急激に増殖するブルーミングが発生する¹⁾。その後栄養塩の枯渇や動物プランクトンによる捕食、表層の高い生物量による光制限によって終焉を迎えると考えられている²⁾。このブルーミング現象はこの海域の生物生産を特徴づける重要なイベントで

あるため、動態の解明が必要である。この海域には起源の異なる 3 つの水塊が流入し、それぞれ、オホーツク海を起源とする低温低塩分な沿岸親潮水 (COW), カムチャッカ半島〜千島列島沿いを南下してくる低温でやや高塩分な親潮水 (OYW), 黒潮を起源とする黒潮変質水 (MKW) に分けられている。Kono and Sato (2010) は OECOS-WEST プロジェクトで得た毎日の定点観測データを用いて、水型の混合比とクロロフィル濃度・栄養塩濃度の直線関係から物理過程の影響を取り除き、ブルーミングの動態を解析する手法

を開発した³⁾。その結果, 春季ブルーミングはCOWに含まれる栄養塩以外の要素(例えば鉄など)によって制限されていることを示唆した。そこで本研究では北海道区水産研究所が毎年行っているA-lineの定点観測で得られたデータの混合比解析を行い, 各水型の混合比とクロロフィル濃度, 栄養塩濃度の関係を明らかにし春季ブルーミングの制限要因について議論した。また, Kono and Sato (2010) の手法を本研究のデータに適用し, 物理過程の影響を取り除くことが可能かどうかについて検討した。

2. 資料及び方法

北海道区水産研究所によって行われている北海道南東岸から南南東に伸びるA-lineの定点観測(図1)の結果が公開されている(<http://hnf.fra.affrc.go.jp/a-line/>)。このうち1994年から2001年の3月と4月の水温, 塩分, クロロフィル(以下Chl.と呼ぶ)濃度, NO₃, PO₄, SiO₂の水深5m, 10m, 20m, 30m, 50m, 75m, 100mのデータを取り出し, 100m深水温5℃以

下の測点のものを親潮域として計算に用いた。まず各年のT-Sプロットから, COW, OYW, MKWの基準となる水温塩分を年ごとに決定し(図2), 以下の式のとおり混合比を計算した。

$$r_1T_1 + r_2T_2 + r_3T_3 = T \quad (1)$$

$$r_1S_1 + r_2S_2 + r_3S_3 = S \quad (2)$$

$$r_1 + r_2 + r_3 = 1 \quad (3)$$

ここで T, S は観測された水温, 塩分, T_i, S_i はそれぞれ基準とした水型COW, OYW, MKWの水温と塩分を示し, r_i はこれら水型の混合比を示す。

さらに各年の水型のChl. および栄養塩の特性をみるために, 以下のように各要素で平均を定義して比較した。

$$\bar{A}_j = \sum_{i=1}^N (r_{ij}A_i) / \sum_{i=1}^N r_{ij} \quad (4)$$

ここで A はChl. 濃度, 栄養塩濃度, および水深の各要素, r は混合比, N はデータ個数を示す。また各年各月の混合比と各要素の間の相関を年ごとに調べた。

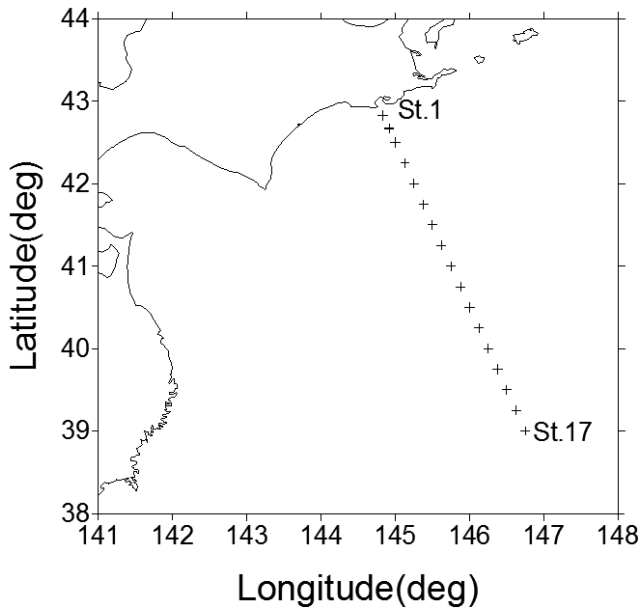


Fig. 1 Locations of the observational stations named A-line.

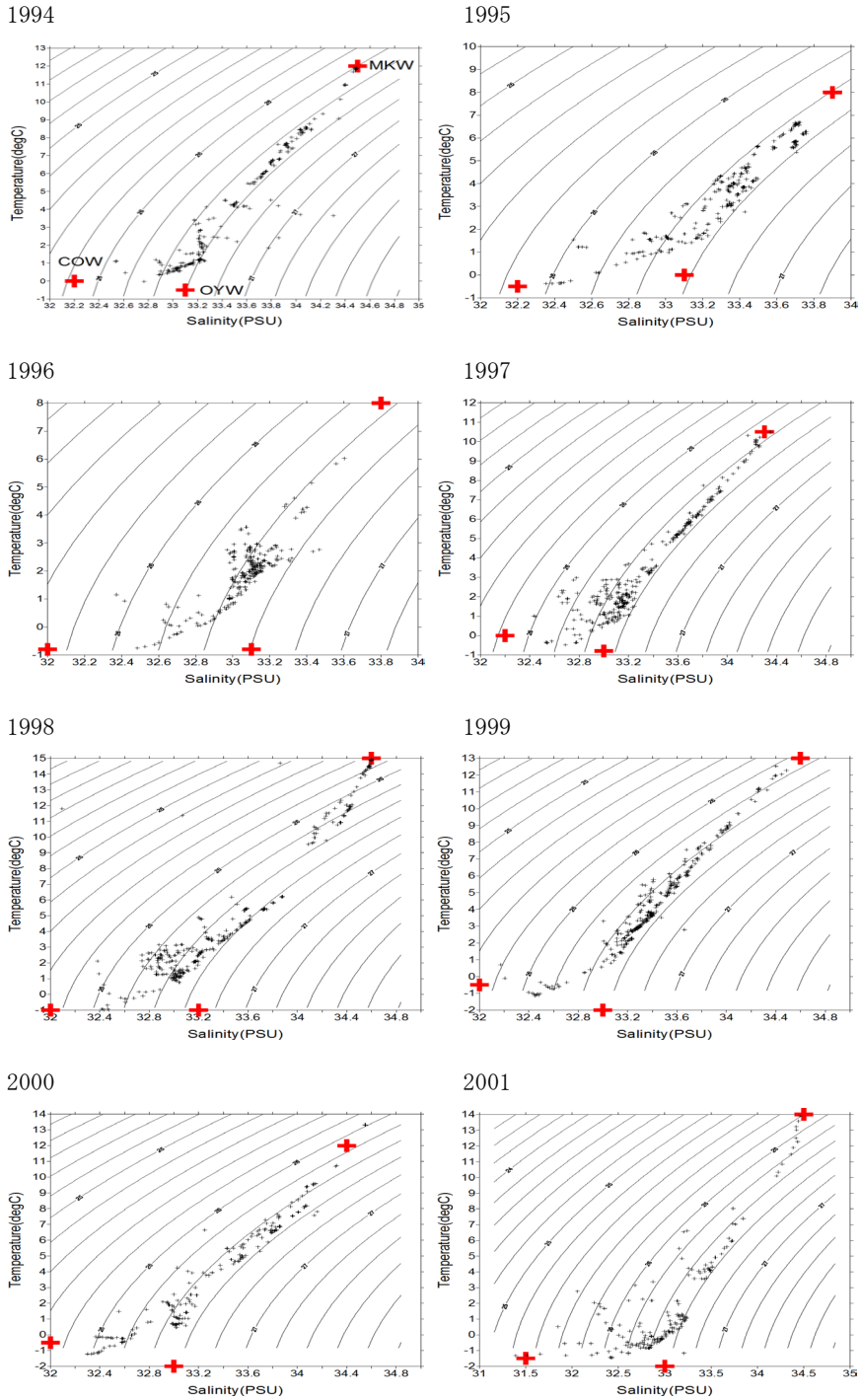


Fig. 2 T-S relationships using the data observed at the depths of 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m in each year of 1994-2001 (black dots). Water types of COW, OYW, MKW used for the calculation of mixing ratio were denoted by red crosses. For each year the water types were selected from the observed data as the cold and less saline water (COW), the warm and saline water (MKW), and the cold water but more saline than COW (OYW), which surrounded the other data in the diagram.

3. 結果

水温塩分が観測された水深を混合比に応じて3つの水型に分配し、3つの水型が存在する平均水深として計算した。水深100mまでのデータを用いて計算すると、3月はCOWが水深33m前後に位置したのに対して、OYWとMKWは40m近くであった。4月に入るとその差はさらに広がりCOWが3月よりも浅い28m前後に存在するのに対して、OYWでは水深48mまで深くなり、MKWも水深40m付近に存在し

ていた。このことは3月から4月にかけてCOWが海面に厚く分布していたことを示す。用いる水深を浅くし、50mまでにしたところ3月は水深20m前後でほとんど差が無かったものの、4月になるとCOWでは水深20mより浅く、OYWでは水深26m前後に存在し、まだCOWがOYWの上層に分布する傾向が見られた。そこでさらに用いる水深を浅くし、水深30mまでのデータで計算したところ、各水型とも3月は水深15m前後、4月はCOWとMKWで水深15m前後、OYWで水深18m前後となり、水型間の水深の差は小さくなった(図3)。水深30mまでのデータを用いた水型分布は水深にほとんど依存しないと考えられるため、以降この層でのデータを用いて解析を行った。

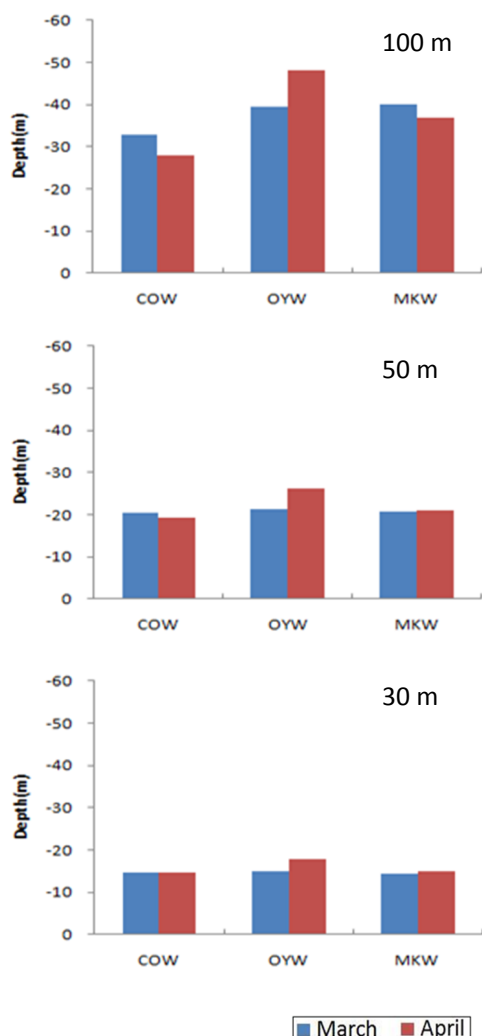


Fig. 3 Water depths of each water type distributed according to the mixing ratio, using the data from the sea surface to the 100 m depth (upper), from the surface to the 50 m depth (middle), and from the surface to the 30 m depth (lower), observed in March (blue) and April (red).

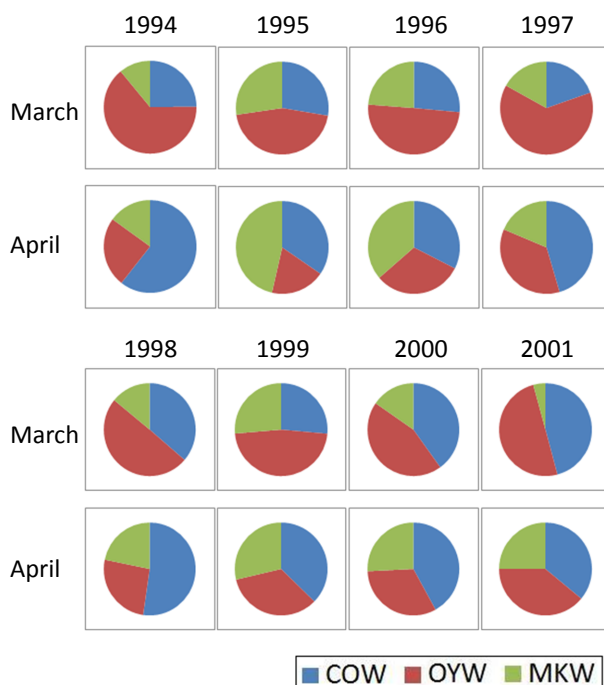


Fig. 4 Pie charts of the three mixing ratios for March (upper) and April (lower) of each year from 1994-2001. The water types of COW, OYW, and MKW were denoted by blue, red, and green, respectively.

観測されたデータについて各水型の混合比を平均すると、3月は全ての年で OYW の比が三つのうちで最大であり、最も大きな割合を示した 1994 年で 64%, 小さな年でも 2000 年で 40% を占めていた。一方で 3 月の COW が最も多かった 2001 年では 45% を占めるものの OYW は 50% を占め MKW が数 % になり、MKW は最も多かった 1995 年でも 27% 程度でしかなかった。4 月に入ると全ての年で 3 月に比べ OYW の割合が 10 ~ 40% 程度減少し、MKW が数 % ~ 20% 上昇するのに対し、COW も 3 月の時点で 45% を占めていた 2001 年を除いて最大で 35% 程度上昇していた (図 4)。このことは、4 月に入ってオホーツク海を起源とするより低温低塩分な水塊がこの流域に流入してきたということを意味する。

水型ごとに各年の Chl. 濃度の平均を式 (4) のとおり計算したところ、いずれの水型も 3 月よりも 4 月の方が高い値を示していた (図 5)。4 月には 1995 年から 1997 年と 1999 年で COW は他の二水型よりも高い値を示す

ものの、1994 年では OYW、2000 年は MKW の方が高く、残りの年はあまり差が無かった。同様に各栄養塩濃度の平均を計算したところ、3 月から 4 月にかけて 1997 年と 2000 年の PO_4 濃度を除いて、すべての水型において栄養塩濃度が低くなっており (図 6)、前述の Chl. 濃度の増加とともにこの時期のブルーミングがうかがわれる。各栄養塩ともわずかな経年変化はあるものの、ほとんどの年月の栄養塩で COW が最も低い値となり、3 月は MKW、4 月は OYW が最大値を示すことが多かった。

各水型の混合比と Chl. 濃度の相関関係を調べたところ、1% の危険率で有意な正の相関が得られたのは

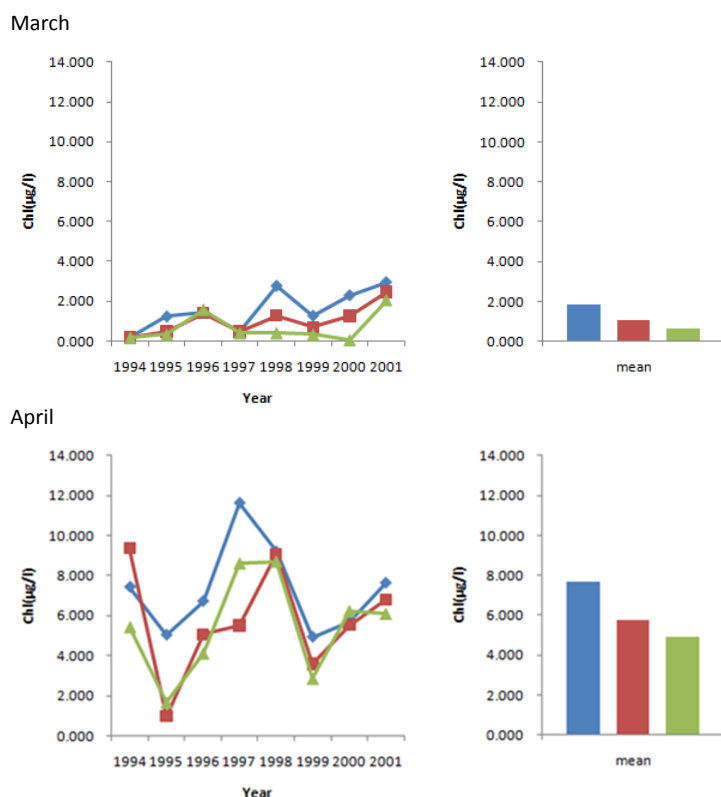


Fig. 5 Yearly changes in chlorophyll concentration ($\mu\text{g/l}$) of the water types of COW (blue), OYW (red), and MKW (green), which were distributed according to the mixing ratio, using data from the sea surface to the 30 m depth observed in March (upper) and April (lower) from 1994 to 2001 in left panels. The means of three water types over the observed years were shown as in the right panels in the same colors as the left panels.

COW のみで、3 月では 1995 年と 1998 年から 2000 年、4 月では 1995 年から 1997 年と 1999 年で見られた (表 1)。他の二水型との関係は、OYW で 3、4 月ともに 8 年のうち 3 年で有意な負の相関が見られ、MKW では 3 月で 8 年のうち 6 年、4 月でも 5 年のデータが負の相関を示した。各水型の混合比と各栄養塩濃度の相関関係を見ると (表 2, 3, 4)、10% の危険率で有意な負の相関が得られたのは COW で、 NO_3 の 3 月で 1994 年から 2000 年、4 月で、1995 年から 1999 年と 2001 年、 PO_4 の 3 月で 1994 年から 1999 年、4 月で 1994 年から 1999 年と 2001 年、 SiO_2 の 3 月で 1994 年から 2000 年、4 月で 1994 年から 1997 年と 1999 年、

2001 年と多くの年で得られたほかは、唯一 MKW の 2001 年 4 月の PO_4 濃度でも有意な負の相関が得られただけだった。一方で OYW や他の MKW では混合

比が高くなるほど栄養塩濃度が高くなる有意な正の相関が多く見られた。

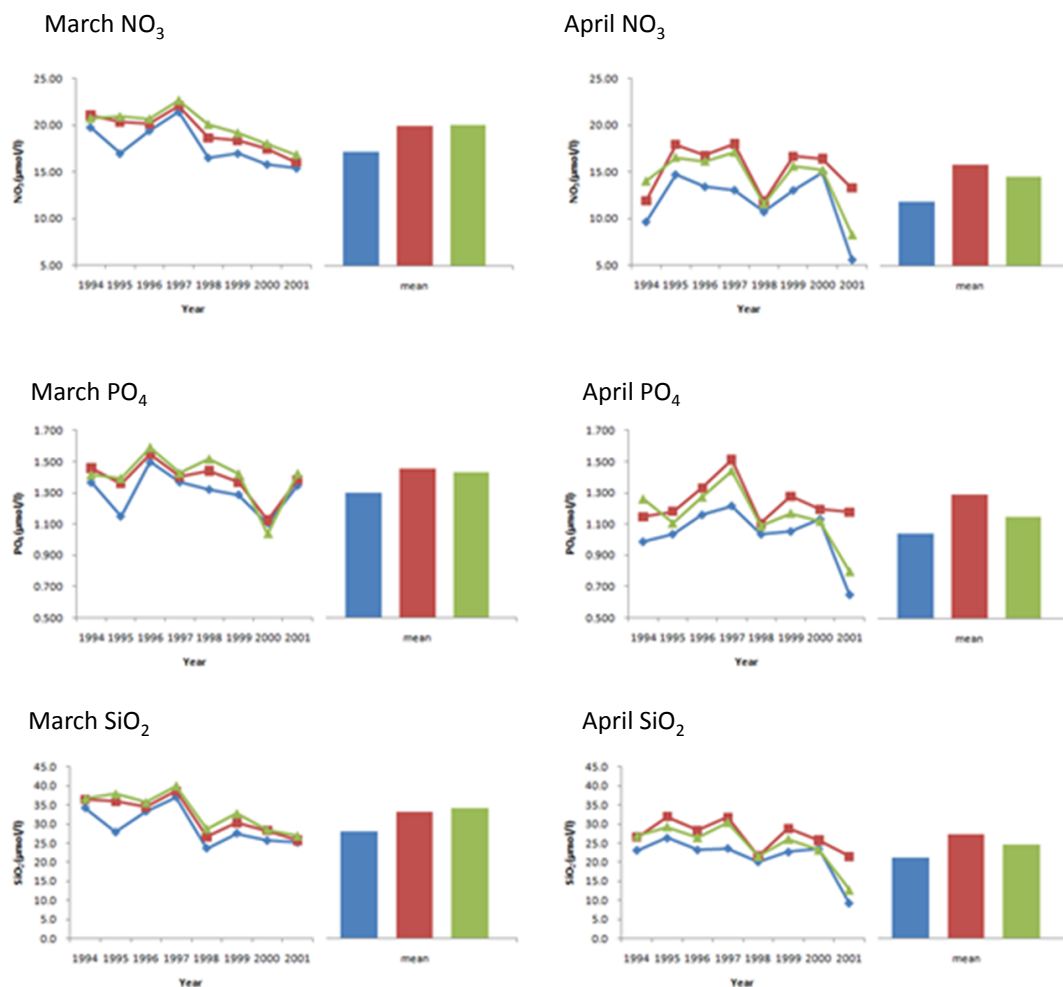


Fig. 6 Yearly changes and means of nutrient concentration of NO_3 (upper), PO_4 (middle) and SiO_2 (lower) in March (left) and April (right), which were calculated and colored similarly to Fig.5.

親潮水域における春季ブルーミングと水塊

表1 各水型の混合比とクロロフィル濃度の回帰分析

Chl.		March(Aline)			April(Aline)		
		COW	OYW	MKW	COW	OYW	MKW
1994	correl	-0.53	0.40	0.17	-0.09	0.47	-0.72
	slope	-0.23	0.19	0.08	-2.43	15.02	-46.08
	intercept	0.23	0.05	0.16	9.08	3.95	14.54
	t-value	0.10					0.05
1995	correl	0.80	-0.85	-0.63	0.76	-0.60	-0.63
	slope	2.46	-5.92	-2.87	17.37	-26.32	-19.66
	intercept	-0.04	3.31	1.43	-3.30	7.70	11.83
	t-value	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
1996	correl	0.00	-0.26	0.15	0.61	-0.10	-0.57
	slope	0.05	-6.79	2.33	24.71	-5.22	-25.59
	intercept	1.45	4.84	0.91	-2.78	6.88	14.58
	t-value				0.01		0.01
1997	correl	0.33	0.43	-0.59	0.68	-0.72	-0.05
	slope	1.25	2.02	-1.91	44.40	-50.59	-7.22
	intercept	0.23	-0.81	0.80	-11.32	27.03	10.22
	t-value			0.05	0.01	0.01	
1998	correl	0.87	-0.93	-0.71	0.11	0.01	-0.23
	slope	15.99	-33.88	-22.60	5.29	0.59	-23.23
	intercept	-4.12	18.51	4.86	6.30	8.91	14.11
	t-value	0.01	0.01	0.01			
1999	correl	0.68	-0.25	-0.67	0.60	-0.19	-0.60
	slope	5.97	-4.41	-7.04	15.28	-5.75	-20.21
	intercept	-0.82	2.84	2.61	-1.82	5.83	9.67
	t-value	0.01		0.01	0.01		
2000	correl	0.76	-0.58	-0.59	-0.07	-0.41	0.27
	slope	8.81	-15.80	-7.78	-1.54	-19.98	6.43
	intercept	-2.05	8.53	2.68	6.43	12.21	4.13
	t-value	0.01	0.01	0.01		0.10	
2001	correl	0.25	-0.21	-0.74	0.24	-0.04	-0.31
	slope	1.42	-1.21	-58.48	7.18	-1.24	-14.42
	intercept	2.01	3.27	5.16	4.34	7.41	10.53
	t-value			0.01			0.10

1%, 5% (薄い灰色), 10% (濃い灰色) の危険率で有意な相関が得られた月のみ t 値を示した。有意な相関が得られた回帰式のうち、正の傾きのセルを赤、負の傾きを青とし表示した。

表2 各水型の混合比と NO₃ 濃度の回帰分析

NO ₃		March(Aline)			April(Aline)		
		COW	OYW	MKW	COW	OYW	MKW
1994	correl	-0.60	0.64	0.01	-0.62	0.26	0.96
	slope	-31.08	35.48	0.58	-17.56	9.02	66.70
	intercept	28.43	-2.06	20.65	21.51	8.66	0.82
	t-value	0.05	0.05				0.01
1995	correl	-0.76	0.85	0.57	-0.54	0.69	0.26
	slope	-11.11	28.20	12.30	-10.95	26.73	7.15
	intercept	22.65	6.89	16.22	19.95	11.09	12.85
	t-value	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
1996	correl	-0.58	0.19	0.45	-0.66	0.52	0.27
	slope	-16.59	8.64	12.34	-34.16	34.29	15.46
	intercept	24.47	15.78	17.15	26.55	4.79	9.80
	t-value	0.01		0.01	0.01	0.01	0.10
1997	correl	-0.77	0.14	0.57	-0.85	0.70	0.43
	slope	-29.06	6.71	18.61	-40.44	36.12	41.86
	intercept	27.75	17.80	18.91	33.95	2.60	7.77
	t-value	0.01		0.05	0.01	0.01	0.05
1998	correl	-0.85	0.85	0.74	-0.31	0.25	0.20
	slope	-23.60	47.16	35.53	-18.27	17.26	24.02
	intercept	26.65	-5.34	13.10	20.74	6.71	5.97
	t-value	0.01	0.01	0.01	0.10		
1999	correl	-0.79	0.34	0.74	-0.68	0.63	0.21
	slope	-14.46	12.59	16.34	-28.58	32.10	12.06
	intercept	22.02	12.25	13.89	25.86	4.08	11.54
	t-value	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	
2000	correl	-0.63	0.90	0.28	-0.24	0.72	-0.09
	slope	-12.06	40.59	6.19	-10.61	70.09	-4.19
	intercept	21.72	-1.21	15.93	19.93	-7.08	16.55
	t-value	0.01	0.01			0.01	
2001	correl	-0.18	0.14	0.64	-0.77	0.87	-0.23
	slope	-2.07	1.66	101.59	-36.70	39.65	-17.62
	intercept	16.71	14.93	11.44	22.45	-6.23	13.64
	t-value			0.01	0.01	0.01	

1%, 5% (薄い灰色), 10% (濃い灰色) の危険率で有意な相関が得られた月のみ t 値を示した。有意な相関が得られた回帰式のうち、正の傾きのセルを赤、負の傾きを青とし表示した。

表3 各水型の混合比と PO₄ 濃度の回帰分析

PO ₄		March(Aline)			April(Aline)		
		COW	OYW	MKW	COW	OYW	MKW
1994	correl	-0.74	0.89	-0.08	-0.67	0.32	0.98
	slope	-2.08	2.67	-0.25	-1.17	0.68	4.11
	intercept	1.95	-0.29	1.46	1.77	0.90	0.45
	t-value	0.01	0.01		0.10		0.01
1995	correl	-0.70	0.79	0.52	-0.43	0.65	0.14
	slope	-0.68	1.74	0.76	-0.45	1.29	0.19
	intercept	1.50	0.53	1.10	1.25	0.85	1.00
	t-value	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	
1996	correl	-0.69	0.10	0.60	-0.59	0.58	0.14
	slope	-1.16	0.28	0.98	-1.61	2.02	0.43
	intercept	1.85	1.41	1.31	1.78	0.63	1.10
	t-value	0.01		0.01	0.01	0.01	
1997	correl	-0.63	0.19	0.41	-0.84	0.72	0.37
	slope	-1.39	0.54	0.79	-2.38	2.22	2.12
	intercept	1.67	1.06	1.27	2.45	0.57	0.97
	t-value	0.05			0.01	0.01	0.05
1998	correl	-0.71	0.72	0.61	-0.30	0.24	0.19
	slope	-1.30	2.63	1.93	-1.14	1.08	1.47
	intercept	1.88	0.10	1.14	1.66	0.78	0.75
	t-value	0.01	0.01	0.01	0.10		
1999	correl	-0.72	0.21	0.74	-0.64	0.74	0.04
	slope	-0.84	0.49	1.03	-1.59	2.22	0.13
	intercept	1.58	1.13	1.09	1.75	0.41	1.12
	t-value	0.01		0.01	0.01	0.01	
2000	correl	0.00	0.69	-0.34	-0.14	0.63	-0.15
	slope	0.00	1.48	-0.35	-0.36	3.50	-0.41
	intercept	1.10	0.44	1.16	1.30	0.02	1.25
	t-value		0.01			0.01	
2001	correl	-0.19	0.15	0.64	-0.74	0.90	-0.32
	slope	-0.11	0.08	5.23	-2.45	2.81	-1.64
	intercept	1.42	1.32	1.15	1.77	-0.21	1.30
	t-value			0.01	0.01	0.01	0.10

1%, 5% (薄い灰色), 10% (濃い灰色) の危険率で有意な相関が得られた月のみ t 値を示した。有意な相関が得られた回帰式のうち、正の傾きのセルを赤、負の傾きを青とし表示した。

表4 各水型の混合比と SiO₂ 濃度の回帰分析

SiO ₂		March(Aline)			April(Aline)		
		COW	OYW	MKW	COW	OYW	MKW
1994	correl	-0.83	0.73	0.16	-0.88	0.62	0.88
	slope	-57.32	54.15	11.93	-20.29	17.37	49.15
	intercept	50.12	1.13	34.59	36.81	20.29	17.11
	t-value	0.01	0.01		0.01		0.01
1995	correl	-0.91	0.91	0.76	-0.55	0.76	0.21
	slope	-27.01	60.98	33.17	-18.09	48.33	9.67
	intercept	41.69	6.77	25.16	35.02	19.58	24.27
	t-value	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
1996	correl	-0.63	0.08	0.56	-0.58	0.59	0.12
	slope	-29.56	6.16	25.20	-46.60	60.86	10.73
	intercept	42.25	31.37	28.44	41.13	7.07	22.06
	t-value	0.01		0.01	0.01	0.01	
1997	correl	-0.86	0.20	0.61	-0.86	0.70	0.45
	slope	-71.68	20.74	43.90	-67.10	59.25	71.92
	intercept	52.58	25.37	31.10	58.31	6.53	14.40
	t-value	0.01		0.05	0.01	0.01	0.05
1998	correl	-0.76	0.74	0.68	-0.26	0.18	0.23
	slope	-33.03	63.60	51.57	-26.40	21.05	46.04
	intercept	37.83	-5.75	18.61	34.58	15.31	10.77
	t-value	0.01	0.01	0.01			
1999	correl	-0.83	0.14	0.92	-0.61	0.69	0.06
	slope	-31.47	10.79	41.65	-44.07	60.23	5.65
	intercept	38.54	25.13	19.26	42.15	5.23	24.09
	t-value	0.01		0.01	0.01	0.01	
2000	correl	-0.55	0.90	0.19	-0.16	0.72	-0.17
	slope	-17.64	67.96	7.03	-12.06	118.59	-13.84
	intercept	34.30	-3.07	26.14	29.20	-14.03	27.70
	t-value	0.05	0.01			0.01	
2001	correl	-0.13	0.09	0.61	-0.66	0.79	-0.28
	slope	-1.94	1.40	125.63	-57.09	65.58	-38.08
	intercept	26.40	24.81	20.16	35.39	-10.75	24.35
	t-value			0.01	0.01	0.01	

1%, 5% (薄い灰色), 10% (濃い灰色) の危険率で有意な相関が得られた月のみ t 値を示した。有意な相関が得られた回帰式のうち、正の傾きのセルを赤、負の傾きを青とし表示した。

表5 COW 混合比 40%の水塊におけるクロロフィルと栄養塩濃度の1日の変化量とクロロフィルと栄養塩, 栄養塩同士の比. 4月のクロロフィル濃度, 3, 4月の各栄養塩濃度の全てで有意な相関が得られた年のみで計算を行った.

Year	Estimated at COW ratio 40%										
	Chl INcrease Rate (μ g/l/day) (1/day)		d/dt(μ mol/l/day)			Ratio of d/dt(mol:mol)			Ratio of d/dt(g:mol)		
			N	P	Si	N:P	Si:P	Si:N	Chl:N	Chl:P	Chl:Si
1995	0.08	0.04	-0.08	-0.005	-0.10	17.10	20.14	0.51	-0.49	-8.30	-0.41
1996	0.16	0.04	-0.14	-0.007	-0.23	19.45	31.24	1.34	-0.28	-5.51	-0.18
1997	0.18	0.05	0.05	0.012	0.24	4.37	20.02	-13.61	0.94	4.10	0.20
1999	0.08	0.03	-0.06	-0.004	-0.04	15.83	11.31	0.82	-0.52	-8.29	-0.73

4. 考 察

水型の鉛直分布が水深に依存しない, 海面から30mまでの層で解析をおこなった. 各水型の平均をみれば, すべての水型でChl. 濃度は3月から4月にかけて増加し, 栄養塩濃度は減少してブルーミングのうかがわれた. Chl. 濃度はCOWで高い傾向にあるものの, 必ずしもすべての年で卓越しない. しかし, 4月にはCOWの混合比でのみChl. 濃度と有意な正の相関 ($p<0.01$), 栄養塩濃度と有意な負の相関 ($p<0.1$) をそれぞれ示した. 加えて3月には各水型とも栄養塩濃度が高いことと, 4月にCOW混合比が増加するものの, 50%前後にとどまることから, COWに含まれる何らかの海水特性 (例えば鉄など) がブルーミングの制限要因になって, 栄養塩が消費されずに残っている可能性があり, Kono and Sato (2010) と矛盾しない.

1995年, 1996年, 1997年, 1999年は4月のChl. 濃度と3, 4月のすべての栄養塩濃度で有意な ($p<0.05$) 回帰直線が得られた. これらの年のデータから, Kono and Sato に倣ってCOW混合比が40%の水塊を想定し, Chl. と各栄養塩の濃度を用いて3月から4月にかけての濃度時間変化の比を計算した (表5). これまでの観測や実験の結果から, 植物プランクトンの増殖による栄養塩の消費の比は, N:P比で9.0~19.2, Si:P比で8~38, Si:N比で0.13~3.1と見積もられている (Kono and Sato, 2010). 3月から4月にかけてChl. だけでなく全ての栄養塩も増えていた1997年を除き, 有意な相関関係が得られた年に

ついて, 栄養塩の比をこれまでの結果と比較した. その結果, N:Pで1996年が上限とほぼ同程度であったことを除き, すべての比が過去の見積もりの範囲内にあった. 4年間のみ有意な結果が得られ, そのうち3年間に適当なChl. の増加と栄養塩の減少が見積もられた. より短い時間間隔で観測されたデータを用いれば, 栄養塩の枯渇や捕食による影響などが無い段階での物理過程の影響を取り除く彼らの方法が適用可能になり, 定点観測データからブルーミング動態が解析できると期待できる.

参考文献

- 1) Hiromi Kasai, Hiroaki Saito, Akira Yoshimori and Satoru Taguchi. Variability in timing and magnitude of spring bloom in the Oyashio region, the western subarctic Pacific off Hokkaido, Japan. *Fisheries Oceanography* 6: 2, 118-129 (1997).
- 2) Hiroaki Saito and Atsushi Tsuda. Influence of light intensity on diatom physiology and nutrient dynamics in the Oyashio region. *Progress in Oceanography* 57, 251-263 (2003).
- 3) Tokihiro Kono and Masatoshi Sato. A mixing analysis of surface water in the Oyashio region: Its implications and application to variations of the spring bloom. *Deep-Sea Research II* 57, 1595-1607 (2010).