

紀伊水道東部海域における栄養塩の季節変化

諏訪 剛

和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場

The Seasonal Changes of Nutrient around the Eastern Kii Channel

Tsuyoshi Suwa

Marine Fisheries Experimental Station

Wakayama Research Center of Agriculture, Forestry and Fisheries

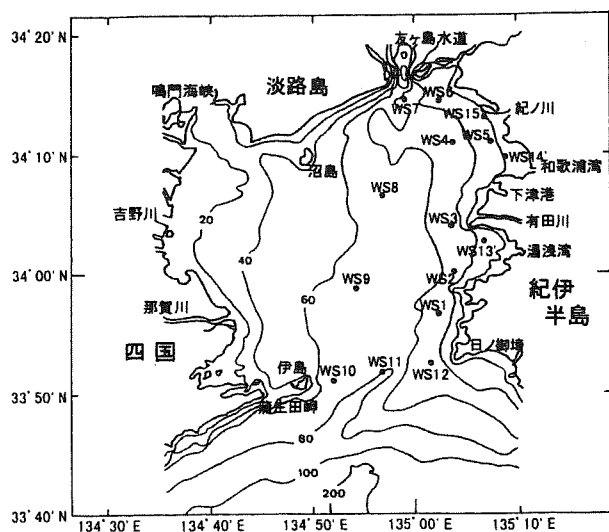
緒 言

紀伊水道は南は太平洋に大きく開き、北は友ヶ島水道と鳴門海峡を通じてそれぞれ大阪湾と播磨灘に繋がっている半閉鎖的な海域である。海底地形は水深 60～80 m の溝状の窪みが水道の中央よりもやや東寄りを南北に伸びており、そこから東側では比較的急に、西側では比較的なだらかに、いずれも浅くなっている。日ノ御崎と蒲生田岬を結ぶ線から南は紀伊水道外域と呼ばれ、海底は急激に深くなり、陸棚斜面へと続いている。

夏季には紀伊水道の底層を、紀伊水道外域の陸棚斜面から低温、高塩分で富栄養な亜表層水が北上侵入することが知られている(藤原ら, 1996 藤原ら, 1997 竹内ら, 1997 金田・上田, 1998)。このようにして紀伊水道へ入ってきた栄養塩は植物プランクトンの増殖や藻場の繁茂などに影響を与え、これらの一次生産を経て紀伊水道全体の漁業に大きな影響を及ぼすと考えられている(竹内, 2001 竹内, 2002 Ozaki *et al.*, 2004)。また、藤原ら(1996, 1997)高志ら(2002)は、人間活動により富栄養化した大阪湾の海水交換機構を解明するために、紀伊水道における底層からの栄養塩流入や流出などについて研究を行っている。このように近年、紀伊水道における栄養塩は水産学および海洋物理学の方面から盛んに研究されており、非常に興味深い分野である。

水産試験場の漁業調査船「きのくに」では紀伊水道東部海域に 15 点の調査定点を設け、水温や塩分をはじめとした項目について定期的な海洋観測を継続的に行っている(第 1 図)。このうち冬季、春季、夏季、秋季の年 4 回(基本的には 2, 5, 8, 11 月)には、水温や塩分などに加えて水深 0 m と底上 1 m の栄養塩調査を実施している。

本研究では、紀伊水道東部海域における近年の平均的な水温、塩分、栄養塩を解析することにより、本海域における栄養塩類の季節変化と変化の機構について整理と考察をおこなう。



第1図 紀伊水道東部海域における調査定点図 (WS1～WS15')

材料および方法

紀伊水道東部海域に設定された調査定点 WS1 ~ 15'において四季毎に観測された水深 0 m と底上 1 m の水温と塩分, および溶存態の硝酸態窒素と磷酸態磷 (以後, それぞれ NO₃-N および PO₄-P と表記する) を, 各季毎に 1994 ~ 2003 年の 10 年間で平均した (第 1 表). 各季における観測月は, 基本的に

第1表 四季における各定点毎の, 表面と底上1mの水温, 塩分, NO₃-N, PO₄-P
1997~2003年の10年間の平均値である.

冬季 定点名	表面					底上 1 m			
	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)	観測水深(m)	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)
WS1	14.4	34.07	3.77	0.35	50	14.5	34.27	3.82	0.36
WS2	14.0	33.99	4.34	0.35	50	13.8	34.11	4.33	0.35
WS3	13.4	33.80	4.94	0.36	43	13.8	34.11	4.59	0.39
WS4	10.9	32.97	5.25	0.43	49	12.3	33.50	5.43	0.48
WS5	11.1	33.04	6.08	0.45	29	12.2	33.62	5.31	0.46
WS6	10.6	32.94	5.15	0.43	32	11.8	33.44	5.48	0.45
WS7	10.5	32.90	5.23	0.43	57	11.4	33.30	5.02	0.43
WS8	12.4	33.52	4.95	0.40	67	13.8	34.12	4.85	0.41
WS9	13.6	33.99	3.98	0.32	66	13.3	34.01	4.42	0.35
WS10	12.6	33.67	3.70	0.32	67	13.1	33.93	4.52	0.36
WS11	14.6	34.17	3.35	0.29	81	14.0	34.18	4.74	0.38
WS12	14.6	34.18	3.86	0.32	47	15.0	34.40	3.64	0.29
WS13'	13.9	33.99	4.36	0.34	33	13.6	34.09	4.14	0.51
WS14'	11.2	33.09	6.02	0.44	21	11.7	33.43	5.44	0.44
WS15'	11.1	32.88	6.32	0.42	21	11.9	33.39	5.29	0.43
平均	12.6	33.55	4.75	0.38	—	13.1	33.86	4.73	0.41

春季 定点名	表面					底上 1 m			
	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)	観測水深(m)	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)
WS1	20.2	33.88	0.21	0.22	50	17.7	34.24	2.72	0.31
WS2	20.1	33.78	0.27	0.22	50	18.4	34.17	1.79	0.26
WS3	19.8	33.72	0.61	0.21	43	18.8	33.27	1.43	0.24
WS4	18.8	33.35	1.14	0.19	49	17.5	33.62	2.10	0.32
WS5	19.5	33.46	0.62	0.17	29	18.3	33.95	1.17	0.23
WS6	18.1	33.31	1.24	0.16	32	17.6	33.81	1.83	0.26
WS7	17.0	33.16	1.66	0.21	57	17.0	33.89	3.16	0.35
WS8	18.9	33.52	0.45	0.14	67	16.4	33.81	4.59	0.50
WS9	19.2	33.58	0.25	0.10	66	16.5	34.10	4.19	0.45
WS10	18.9	33.36	0.25	0.08	67	16.7	34.31	4.13	0.44
WS11	20.0	33.84	0.20	0.11	81	16.8	34.38	4.29	0.40
WS12	20.3	33.91	0.28	0.15	47	18.8	34.39	1.95	0.24
WS13'	20.0	33.75	0.25	0.14	33	19.3	34.29	0.90	0.18
WS14'	19.7	33.51	0.45	0.21	21	18.6	33.85	1.02	0.35
WS15'	19.8	33.00	1.87	0.17	21	18.5	33.77	1.14	0.17
平均	19.4	33.54	0.65	0.17	—	17.8	33.99	2.43	0.31

夏季 定点名	表面					底上 1 m			
	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)	観測水深(m)	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)
WS1	27.5	32.56	0.31	0.10	50	23.2	34.15	2.48	0.30
WS2	27.6	32.53	0.28	0.08	50	22.9	34.10	2.74	0.32
WS3	27.2	32.57	0.34	0.08	43	23.3	33.98	2.57	0.33
WS4	27.1	32.33	0.58	0.15	49	23.0	33.47	3.98	0.44
WS5	27.5	32.30	0.51	0.12	29	24.2	33.35	2.65	0.41
WS6	26.3	32.49	0.93	0.13	32	23.7	33.59	3.14	0.37
WS7	25.7	32.62	1.13	0.23	57	22.4	34.01	3.94	0.40
WS8	26.7	32.39	0.28	0.11	67	20.6	34.14	6.04	0.53
WS9	27.1	32.15	0.13	0.07	66	20.2	34.31	6.32	0.55
WS10	27.2	32.49	0.20	0.08	67	20.2	34.48	5.66	0.48
WS11	27.6	32.76	0.22	0.06	81	19.8	34.54	5.40	0.45
WS12	27.4	32.66	0.32	0.09	47	23.0	34.33	2.66	0.25
WS13'	27.5	32.59	0.34	0.09	33	23.8	33.82	2.38	0.29
WS14'	27.7	32.29	0.46	0.13	21	25.0	33.17	1.90	0.34
WS15'	27.5	32.24	1.35	0.18	21	25.2	33.01	1.53	0.29
平均	27.2	32.46	0.49	0.11	—	22.7	33.90	3.56	0.38

冬季 定点名	表面					底上 1 m			
	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)	観測水深(m)	水温 (°C)	塩分 (PSU)	NO ₃ -N(ug at/l)	PO ₄ -P(ug at/l)
WS1	21.3	33.88	2.17	0.28	50	21.2	34.08	2.29	0.26
WS2	21.0	33.68	2.68	0.34	50	20.9	33.93	2.82	0.33
WS3	20.7	33.51	3.31	0.38	43	21.1	33.88	2.84	0.33
WS4	20.4	33.13	4.68	0.48	49	21.1	33.83	3.44	0.41
WS5	20.2	33.02	5.73	0.52	29	20.7	33.46	3.95	0.46
WS6	20.4	32.99	5.29	0.52	32	20.8	33.40	4.14	0.47
WS7	20.4	33.05	4.95	0.55	57	20.8	33.46	4.14	0.47
WS8	20.7	33.51	2.90	0.35	67	21.1	34.01	2.93	0.34
WS9	21.2	33.75	2.03	0.28	66	20.7	34.15	3.46	0.36
WS10	21.0	33.56	2.22	0.32	67	21.1	34.28	2.72	0.27
WS11	21.8	34.08	1.46	0.19	81	20.7	34.40	3.60	0.32
WS12	21.9	34.11	1.22	0.16	47	21.6	34.22	1.66	0.16
WS13'	20.8	33.63	2.99	0.32	33	20.7	33.79	3.08	0.34
WS14'	20.4	33.21	3.78	0.43	21	20.4	33.43	3.78	0.43
WS15'	20.0	33.20	6.60	0.57	21	20.9	33.50	5.36	0.47
平均	20.8	33.49	3.47	0.38	—	20.9	33.86	3.35	0.36

冬季が2月，春季が5月，夏季が8月，秋季が11月である。ただし，1998年の冬季は3月，1996年の春季は6月，2000年の夏季は9月，1996年と1997年の秋季は12月にそれぞれ観測を行っている。

第1表をもとに以下の作業を行った。まず，表層における $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変化を示すために，水深0 mにおける $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の，15定点の各季毎の平均値を棒グラフに表した（第2図）。次に，水深0 mの水温，塩分， $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ について，水平分布図を作成した（第3-1～3-4図）。さらに，水深0 mについては水温，塩分と $\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{PO}_4\text{-P}$ との，また底上1 mについては水温，塩分，観測水深と $\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{PO}_4\text{-P}$ との，それぞれの散布図を四季毎に作成した（第4-1～4-4図）。散布図には回帰直線と，その決定係数 R^2 ，およびピアソンの積率相関係数 R を記入した。また，各調査地点における水温や栄養塩などの，水深0 mと底上1 mでの違いが季節毎にどのように変化するかを知るために，水温，塩分， $\text{NO}_3\text{-N}$ ，および $\text{PO}_4\text{-P}$ について，各調査地点における水深0 mの値から底上1 mの値を差し引いた値を地図に記入した図を作成した（第5-1～5-4図）。

なお，水深0 mの水温と塩分は，それぞれ棒状水銀温度計とサリノメーターで，底上1 mの水温と塩分はCTDで， $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ はそれぞれカドミウムカラム還元法とストリックランド・パーソンズ法で測定した。

結 果

・水深0 mにおける栄養塩の季節変化（第2図）

$\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに，春～夏季に比べて秋～冬季は顕著に高濃度であった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は秋季よりも冬季の方が高濃度であった。

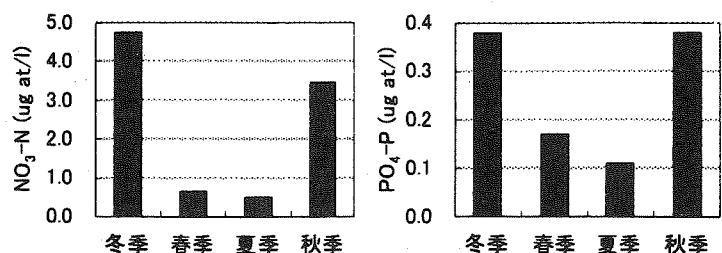
・水深0 mにおける水平分布図

冬季（第3-1図）：高温で高塩分の水が日ノ御崎の沖から紀伊水道南東部を広く覆っており，和歌浦湾沖で高温高塩分水と低温低塩分水とがほぼ南北に分かれていた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は概ね北で高く南で低い分布になっていた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は紀ノ川河口から和歌浦湾にかけての海域で $6 \mu\text{g at/l}$ 以上と最も高濃度になっていた。

春季（第3-2図）：水温と塩分は紀伊水道南東部を中心に和歌浦湾付近までの東部全体で高くなっていた。栄養塩については全体的に低濃度で，水平的な濃度変化は小さく，はっきりした分布パターンは認め難かった。友ヶ島水道の南側西寄りに位置するWS7では低温で低塩分，高栄養塩の傾向がみられた。

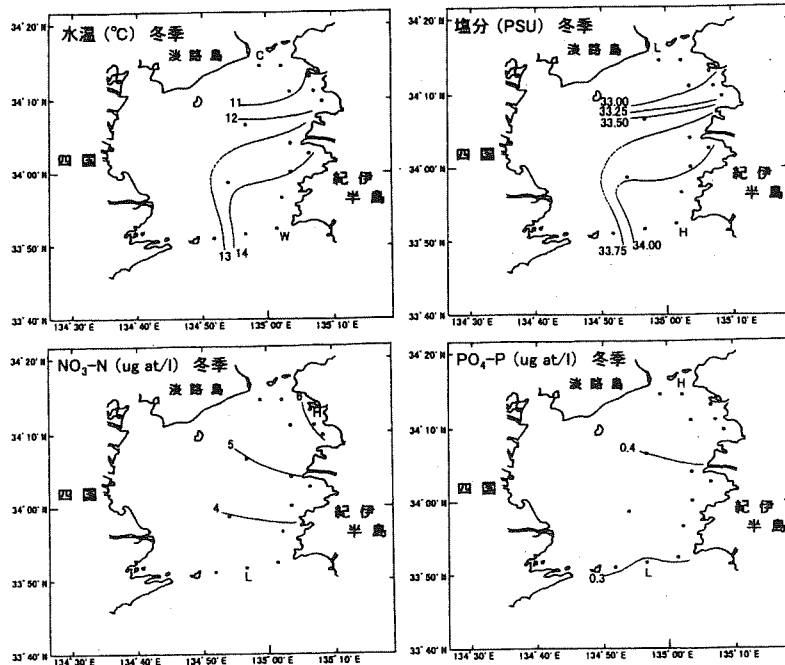
夏季（第3-3図）：水温は，友ヶ島水道南側西寄りのWS7を除いては，全域的に $26 \sim 27^\circ\text{C}$ 台で，水平的な変化は少なかった。塩分は，南の紀伊水道外域から北上する高塩分水や，西の紀伊水道西部海域から東へと張り出す低塩分水などにより，やや複雑な分布を呈していた。栄養塩は，春季と同様に全体的に値が低く，水平的な濃度変化は小さかった。友ヶ島水道の南側はWS7を中心として低温，高塩分，高栄養塩の傾向がみられた。

秋季（第3-4図）：冬季と同様に高温で高塩分の水が紀伊水道南東部を広く覆っていた。有田川の沖合よりも北の海域では，水温，塩分ともに北へ向かうほど低くなっていた。栄養塩は水平的な濃度変化がはっきりしており，分布パターンが水温，塩分の分布パターンと良く対応してい

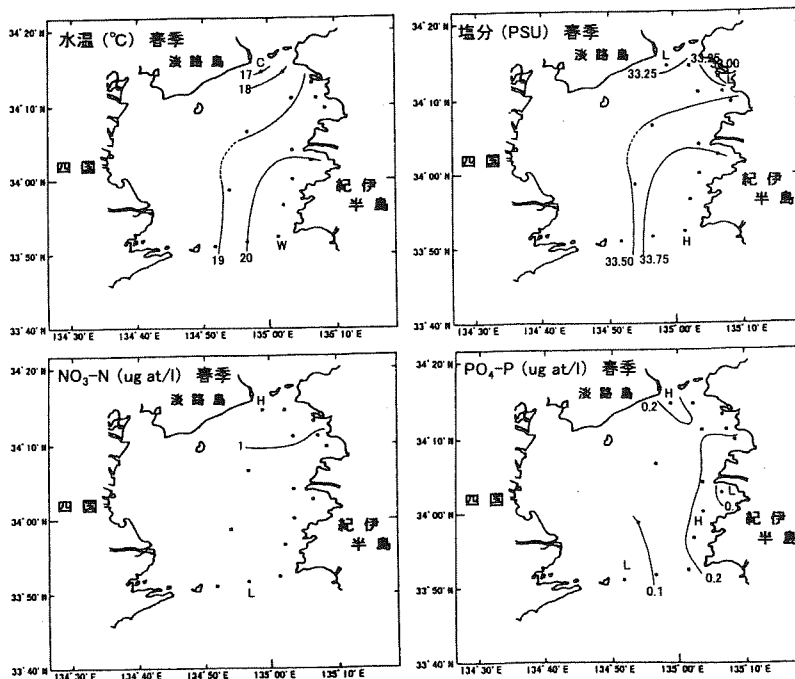


第2図 水深0 mにおける $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変化
紀伊水道東部海域における15定点の平均値である。

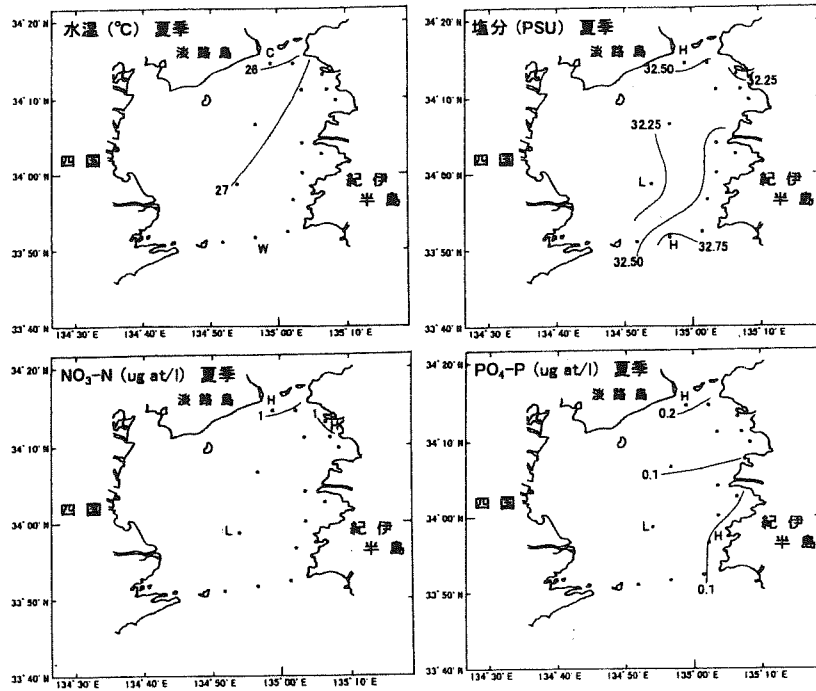
た。すなわち、水道南東部の高温高塩分の水域は栄養塩濃度は低く、有田川の沖合付近から北側では栄養塩濃度は北ほど高くなっていった。NO₃-Nは紀ノ川河口付近で6 ug at/l 以上と最も高かった。



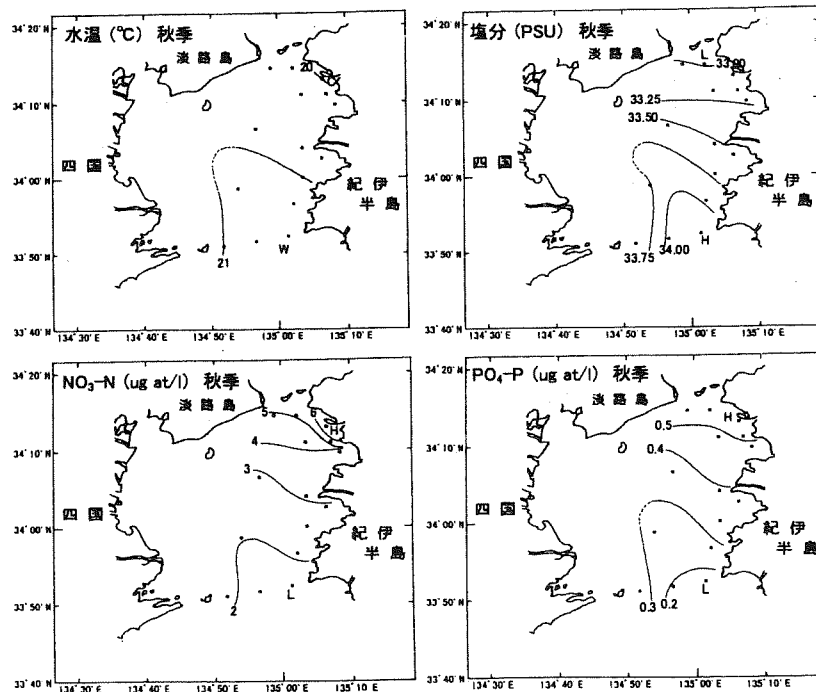
第3-1図 水深 0 m における水温，塩分，NO₃-N，PO₄-Pの水平分布図 冬季
ドットは調査定点を示す。



第3-2図 続き 春季



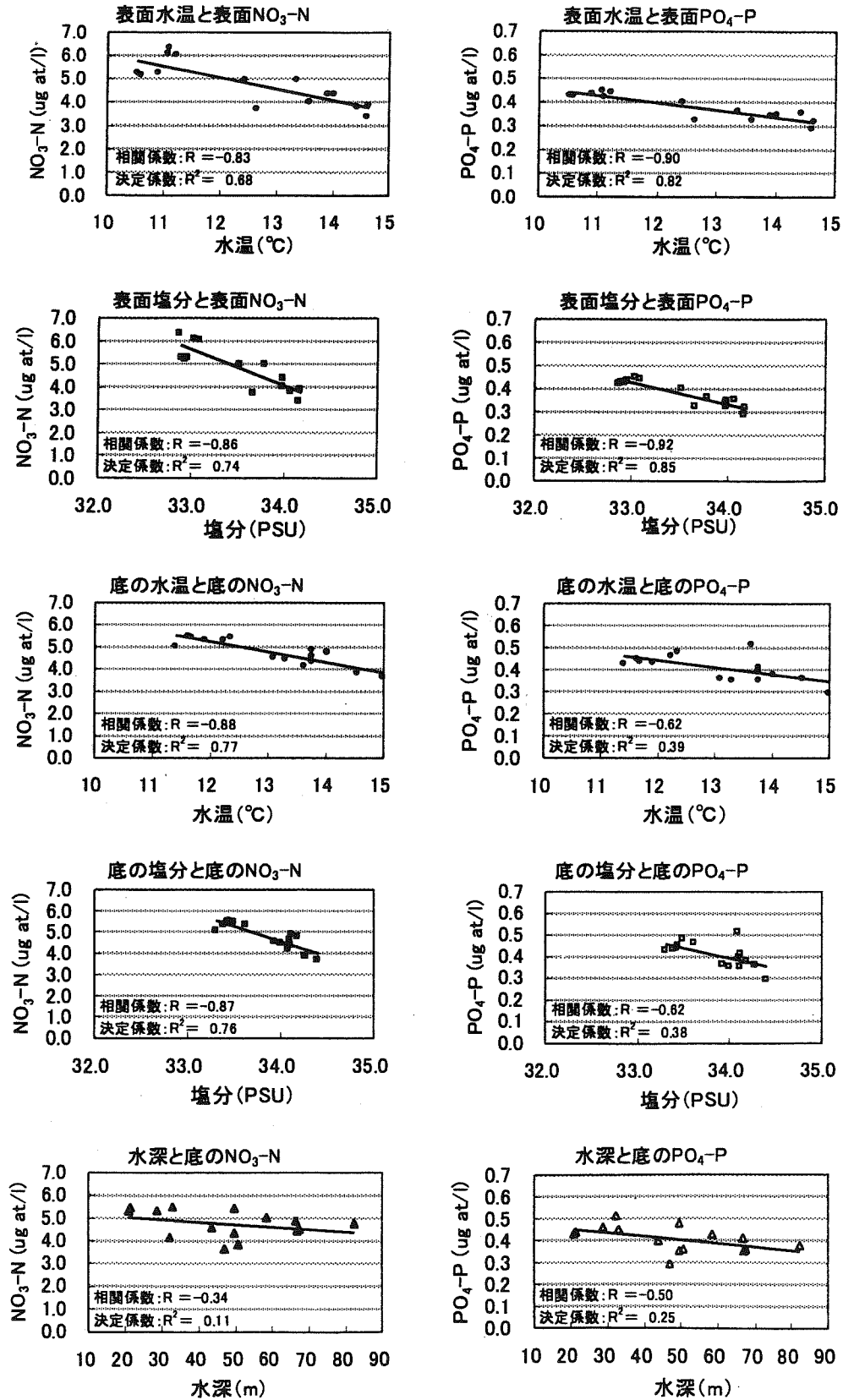
第3-3図 続き 夏季



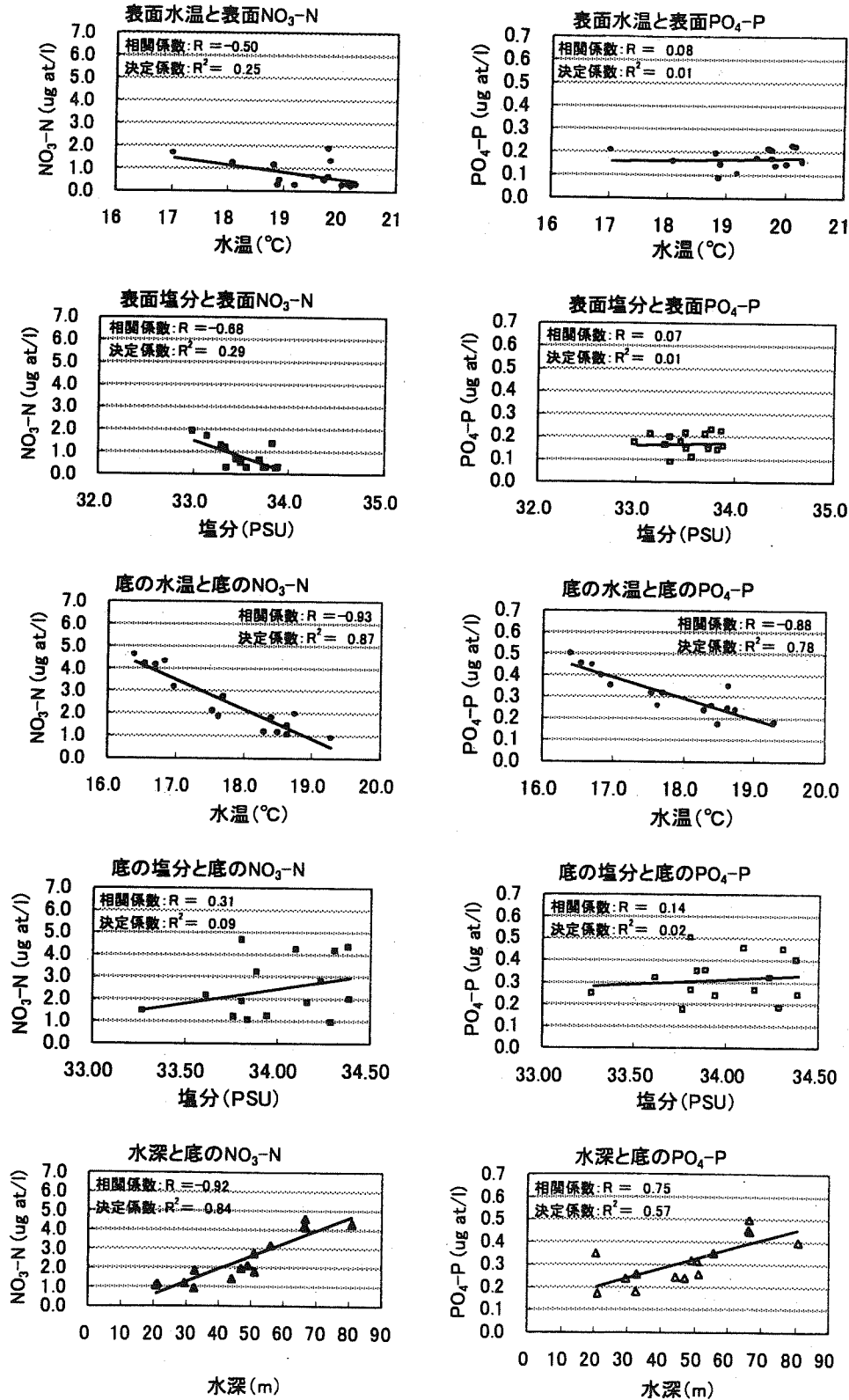
第3-4図 続き 秋季

・各観測項目間における相関関係

冬季 (第 4-1 図) : 水深 0 m の $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$, および底上 1 m の $\text{NO}_3\text{-N}$ で, 水温と塩分が高くなるほど栄養塩濃度が低くなる関係が, 高い相関係数と決定係数 (相関係数は絶対値で 0.83 以上, 決定係数は 0.68 以上) で認められた。また, 底上 1 m では水温と塩分が高くなるほど $\text{PO}_4\text{-P}$ が低くなる傾向が比較的高い相関係数 (-0.62) で認められた。

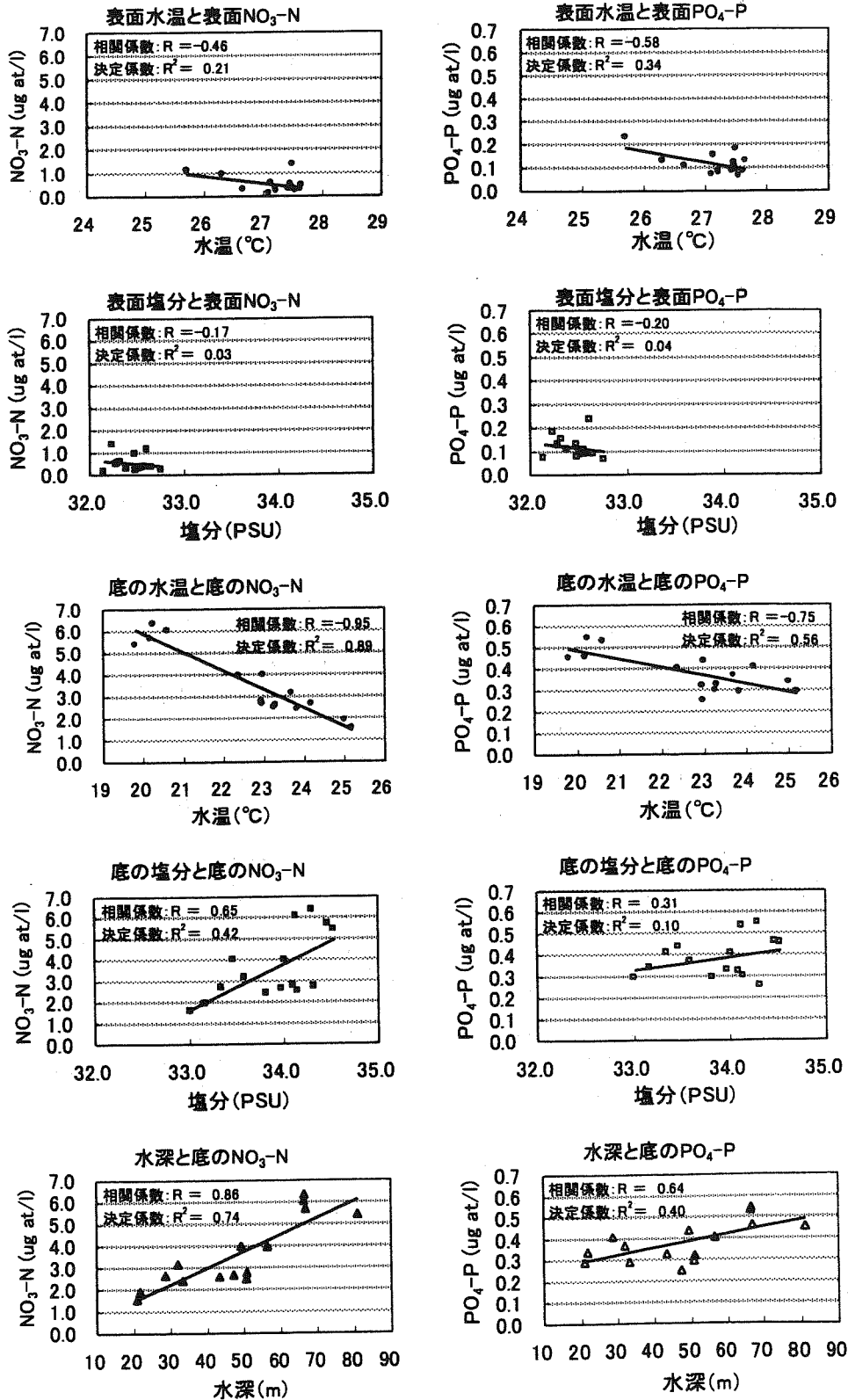


第4-1図 水深0mおよび底上1mにおける水温、塩分、観測水深と $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の散布図 冬季
各散布図には相関係数 R と回帰直線、および決定係数 R^2 が記入されている。



第4-2図 続き 春季

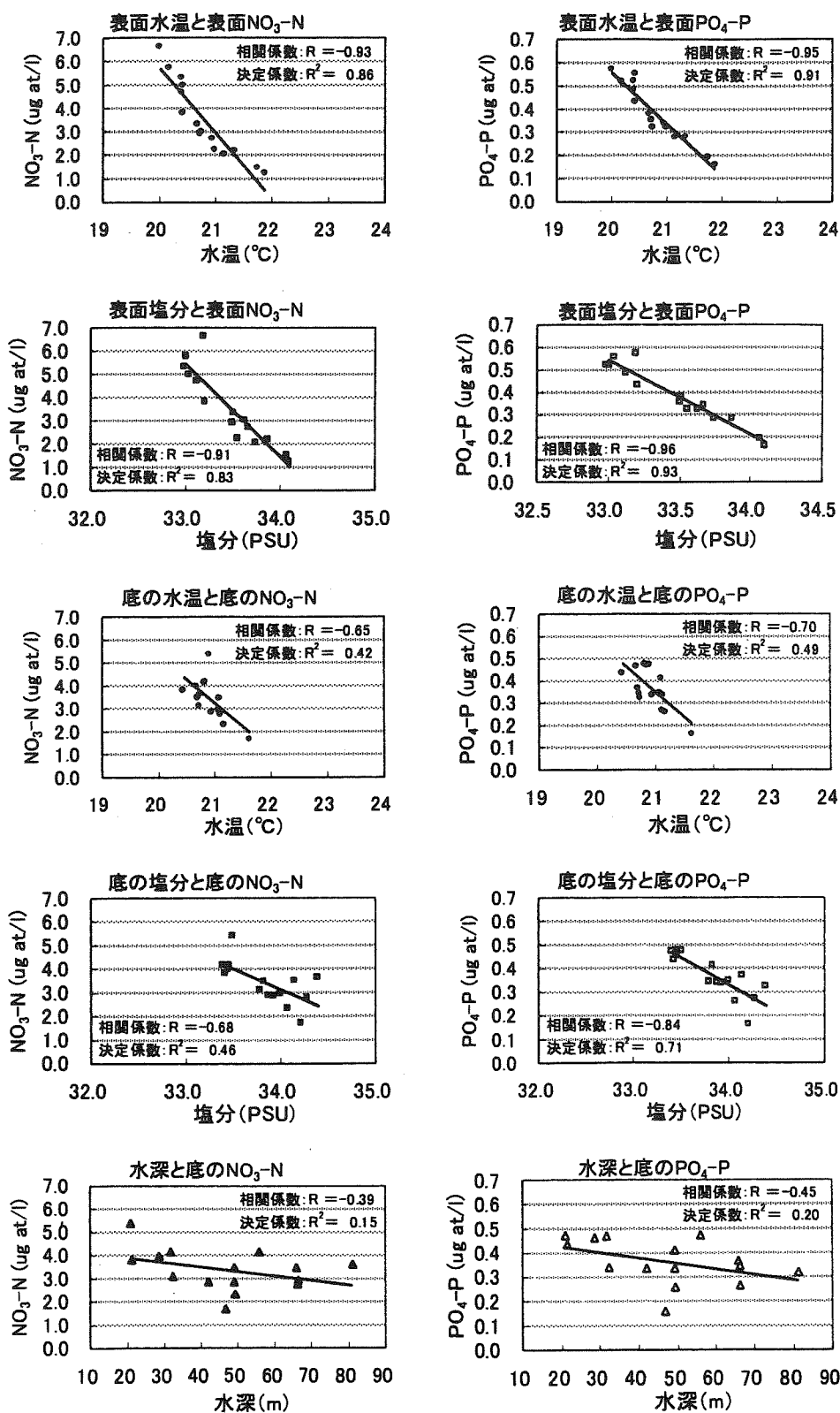
春季 (第4-2図) : 底上 1 m の NO₃-N と PO₄-P で、水温が高くなるほど栄養塩濃度が低くなり、水深が深くなるほど栄養塩濃度が高くなる関係が、高い相関係数と決定係数 (相関係数は絶対値で 0.75 以上, 決定係数は 0.57 以上) で認められた。



第4-3図 続き 夏季

夏季 (第4-3図): 底上1mのNO₃-NとPO₄-Pで、水温が高くなるほど栄養塩濃度が低くなり、水深が深くなるほど栄養塩濃度が高くなる関係が、高い相関係数と決定係数(相関係数は絶対値で0.75以上、決定係数は0.56以上)で認められた。また底上1mでは、塩分が高くなるほどNO₃-Nが高くなり、

水深が深くなるほど $PO_4\text{-P}$ が高くなる傾向が、いずれも比較的高い相関係数（絶対値で 0.64 以上）で認められた。



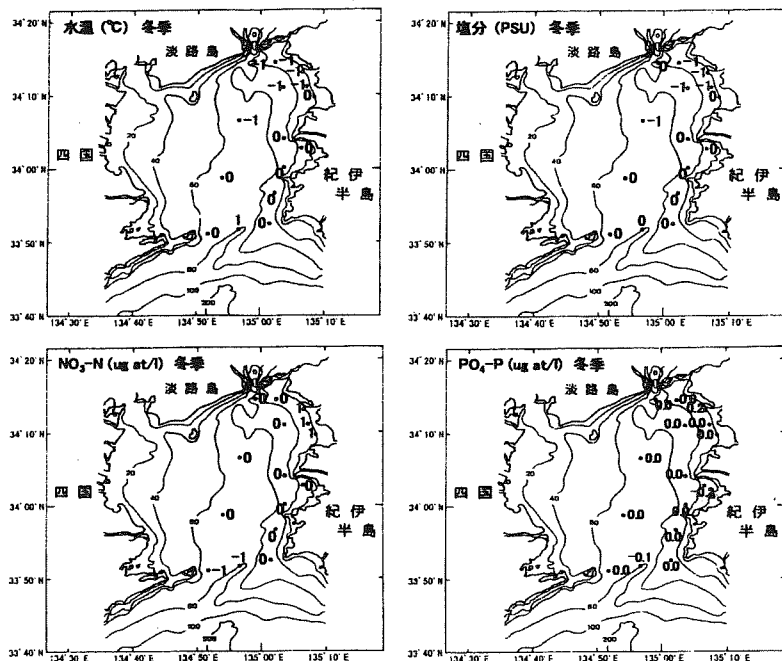
第4-4図 続き 秋季

秋季 (第 4-4 図) : 水深 0 m の $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ で、水温と塩分が高くなるほど栄養塩濃度が低くなる関係が、高い相関係数と決定係数 (相関係数は絶対値で 0.91 以上, 決定係数は 0.83 以上) で認められた。また、底上 1 m では塩分が高くなるほど $\text{PO}_4\text{-P}$ が低くなる関係が高い相関係数 (-0.84) と決定係数 (0.71) で認められた。さらに、底上 1 m では水温が高くなるほど $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ が、塩分が高くなるほど $\text{NO}_3\text{-N}$ が、いずれも低くなる傾向が比較的高い相関係数 (絶対値で 0.65 以上) で認められた。

・各測定項目における水深 0 m と底上 1 m の違い

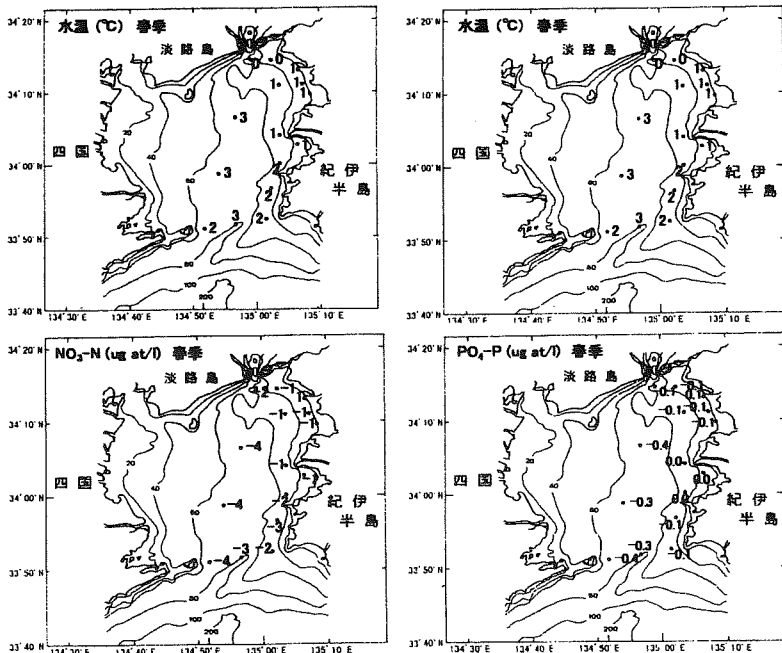
冬季 (第 5-1 図) : 水温, 塩分, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ のいずれも、水深 0 m と底上 1 m の差は春～夏季に比べると顕著に小さかった。ただし、観測海域の北部では、水温では約 1℃, 塩分では約 1 PSU, いずれも底上 1 m の方が高かった。また、紀ノ川河口周辺では水深 0 m の $\text{NO}_3\text{-N}$ が底上 1 m よりも約 1 $\mu\text{g at/l}$ 高かった。

春季 (第 5-2 図) : 水温は水深 0 m の方が高い傾向を示し、その傾向は調査域北部では弱くて上下層の差 ((水深 0 m の値) - (底上 1 m の値)) は 0 ~ 1℃, 調査域南部の水深が比較的浅いところではやや強くて上下層の差は約 2℃, 水深の深いところでは最も顕著で上下層の差は約 3℃であった。塩分は、調査域の北部と、南部の水深が比較的深いところで、底上 1 m の方が約 1 PSU 高い他は、上下層の差はほとんど認められなかった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は底上 1 m の方が高い傾向を示し、その傾向は調査域北部と南部の比較的浅所 (水深 20 ~ 60 m) では比較的弱くて上下層の差は $\text{NO}_3\text{-N}$ が -1 ~ -3 $\mu\text{g at/l}$ で $\text{PO}_4\text{-P}$ が -0.1 $\mu\text{g at/l}$ で、調査



第5-1図 水深0mの値から底上1mの値を差し引いた値 冬季

水温, 塩分, $\text{PO}_3\text{-P}$ は小数点第1位を, $\text{PO}_4\text{-P}$ は小数点第2位をそれぞれ四捨五入した値を記入している。ドットは調査定点を示す。



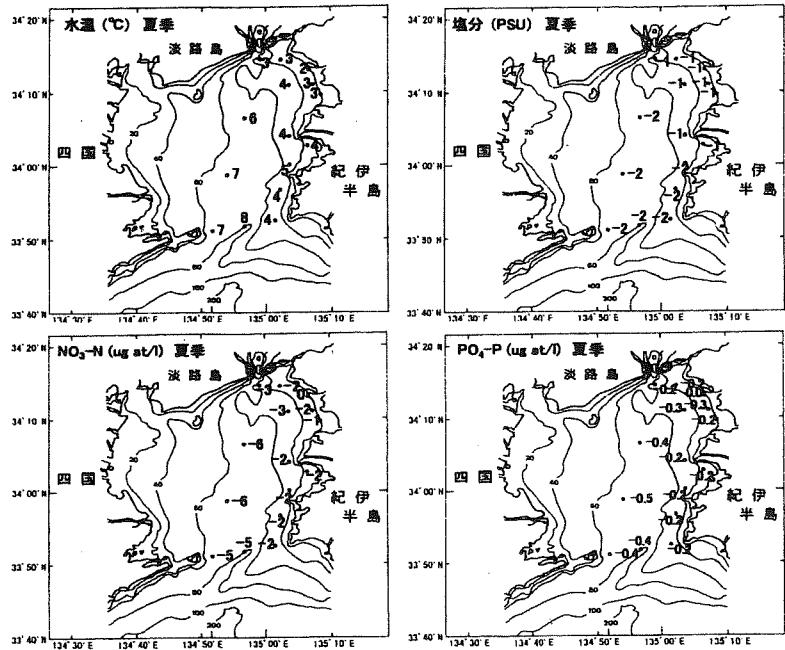
第5-2図 続き 春季

域の深所では比較的強くて上下層の差は $\text{NO}_3\text{-N}$ が $-3 \sim -4 \text{ ug at/l}$ で $\text{PO}_4\text{-P}$ が $-0.3 \sim -0.4 \text{ ug at/l}$ であった。

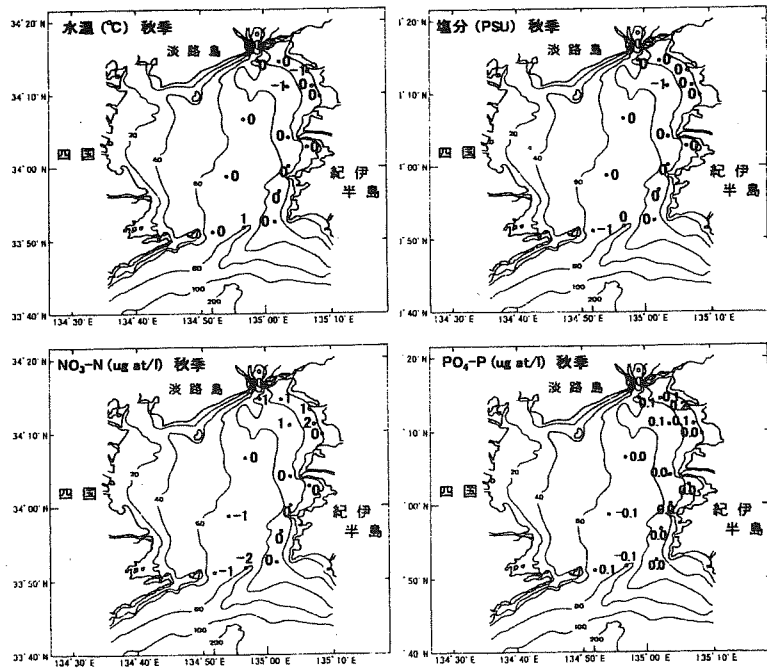
夏季 (第 5-3 図) : 水温は水深 0 m の方が底上 1 m よりも高く、栄養塩は水深 0 m よりも底上 1 m の方が高かった。この傾向は春季と同様であるけれども、夏季にはさらに顕著となっていた。水温の上下層の差 ((水深 0 m の値) -

(底上 1 m の値)) は、調査域北部では $2 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$ で小さく、調査域中～南部の比較的浅所 (水深 $20 \sim 60 \text{ m}$) では $4 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、調査域の比較的深所 (水深 $60 \sim 80 \text{ m}$) では $6 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ で大きかった。栄養塩の上下層の差は $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに調査域東寄りの比較的浅所 (水深 $20 \sim 60 \text{ m}$) では比較的小さく ($\text{NO}_3\text{-N}$: $0 \sim -2 \text{ ug at/l}$, $\text{PO}_4\text{-P}$: $0.0 \sim -0.3 \text{ ug at/l}$)、調査域西寄りの比較的深所 ($40 \sim 80 \text{ m}$) では比較的大きい ($\text{NO}_3\text{-N}$: $-3 \sim -6 \text{ ug at/l}$, $\text{PO}_4\text{-P}$: $-0.2 \sim -0.5 \text{ ug at/l}$) 傾向が認められた。塩分は水深 0 m よりも底上 1 m の方が高く、その上下層の差は調査域北部では -1 PSU と小さく、調査域中～南部では $-1 \sim -2 \text{ PSU}$ と大きかった。

秋季 (第 5-4 図) : 冬季と同様に、水温、塩分、栄養塩のいずれも水深 0 m と底上 1 m の差は春～夏季に比べると顕著に小さかった。ただし、栄養塩については調査域北部では水深 0 m の方が高く、上下層の差 ((水深 0 m の値) - (底上 1 m の値)) は $\text{NO}_3\text{-N}$ が $1 \sim 2 \text{ ug at/l}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が $0.1 \sim 0.2 \text{ ug at/l}$ であった。これに対して調査域南部の深所では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ では $1 \sim 2 \text{ ug at/l}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では約 0.1 ug at/l 、いずれも底上 1 m の方が高い傾向が認められた。



第 5-3 図 続き 夏季



第 5-4 図 続き 秋季

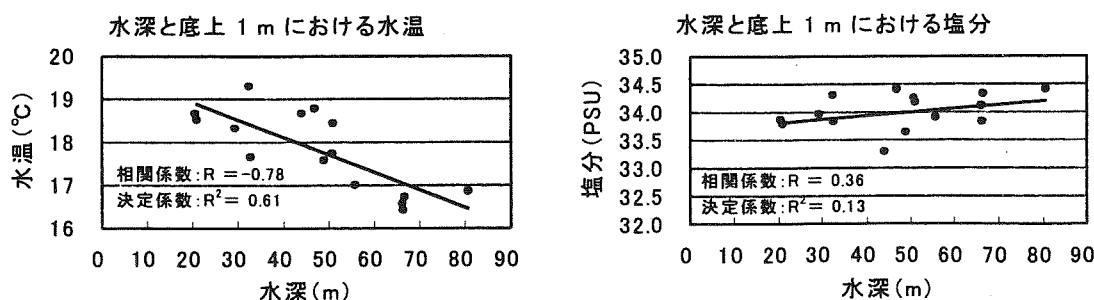
考 察

・各季における栄養塩の分布状況などの海況

冬季：水深 0 m における水平分布図（第 3-1 図）は、南部海域では高温、高塩分、貧栄養で、北部海域では低温、低塩分、富栄養であることを示していた。水深 0 m における水温、塩分と栄養塩の散布図（第 4-1 図）によると、高温高塩分ほど貧栄養で低温低塩分ほど富栄養という関係が認められ、この関係は水平分布図でみられた南部海域の高温、高塩分、貧栄養、北部海域の低温、低塩分、富栄養を反映したものと考えられる。底上 1 m における水温、塩分と栄養塩の散布図（第 4-1 図）でも、水深 0 m で認められたのと同じように、高温高塩分ほど貧栄養で低温低塩分ほど富栄養な関係が示された。第 5-1 図より、水温、塩分、栄養塩での水深 0 m と底上 1 m の差はあまりみられなかったことから、冬季には鉛直混合のために上層と下層の水はほとんど同じとなり、このために底上 1 m でも水深 0 m と同様の関係が示されたのだと考えられる。このことはまた、底上 1 m でも南部海域では高温、高塩分、貧栄養、北部海域では低温、低塩分、富栄養であることを示唆している。

調査域北部では表層よりも底層の方が水温では約 1℃、塩分では約 1 PSU、いずれも高かった（第 5-1 図）。これは、河川水流入量の多い比較的浅海域では冬季にしばしば観察される水温逆転現象が起きているのだと考えられる。第 5-1 図より、水温逆転現象の起きている海域では、栄養塩に上層と下層の違いは特に認められないことから、水温逆転現象は栄養塩分布には特に関与していないと考えられる。

春季：水深 0 m では高温高塩分水が日ノ御崎沖から和歌浦湾沖周辺まで広く分布していた（第 3-2 図）。水温は水深 0 m の方が底上 1 m よりも高く、この傾向は水深が深い海域ほど顕著であった（第 5-2 図）。このことから、春季には水温の成層構造が形成されていたと考えられる。水深 0 m の栄養塩は $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに低濃度で、水平的にはっきりした濃度勾配や濃度分布は認められなかった。水深 0 m と底上 1 m における栄養塩の差は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに底層の方が高い傾向が認められた。この栄養塩に認められた傾向は、水温と同様に、水深の深い海域ほど顕著であった。第 4-2 図によると、底上 1 m では水温が低いほど、また水深が深いほど、栄養塩が高いという関係が示された。ここで底上 1 m の水温と水深の散布図を描いてみると（第 6 図）、水深が深くなるほど水温が低くなる関係が示された（相関係数 -0.78 、決定係数 0.61 ）。したがって、底層では水深が深いほど水温が低く、富栄養であるといえる。



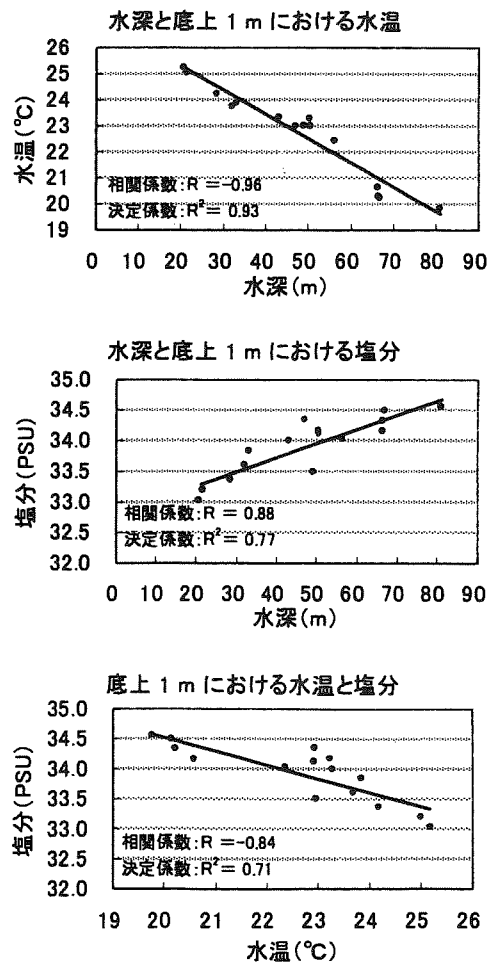
第6図 底上1mにおける水温、塩分と水深の散布図

各散布図には相関係数Rと回帰直線、および決定係数 R^2 が記入されている。

塩分は、調査域の北部と、南部の水深が比較的深い海域で、底上 1 m の方が約 1 PSU 高かった。このような現象が起きたのは、調査域北部では大阪湾の水や紀ノ川の河川水により上層の水が低塩分になったため、南部の水深が深い海域では紀伊水道外域の亜表層水が紀伊水道の底層を這い上がってきたためと考えられる。亜表層水の這い上がり（竹内ら、1997 金田・上田、1998）は夏季にさらに顕著となるので、夏季のところで詳しく述べる。

夏季：水深 0 m では、塩分にやや複雑な分布パターンが認められる他は、水温、栄養塩のいずれも水平的な濃度変化は僅かで、はっきりした分布パターンは認め難かった。水温と塩分における水深 0 m と底上 1 m の差は春季よりも顕著で、水深 0 m の方が高温、低塩分であった（第 5-3 図）ことから、春季よりも成層構造が発達したと考えられる。友ヶ島水道付近では、西寄りの WS7 を中心にして低温、高塩分、富栄養の傾向が認められた。同様の傾向は春季にも認められた。これらの現象は、友ヶ島水道に生じた激しい潮流が成層構造を攪乱し、表層の水と表層下の水が混じり合ったことにより生じたと推測される。潮流による水の混合は WS7 周辺で特に激しいために、こちらの方が低温、高塩分、富栄養の傾向が強く表れるのだと考えられる。底上 1 m では春季と同様に水温が低いほど、水深が深いほど、栄養塩は高いという関係が示された（第 4-3 図）。また、塩分が高いほど、NO₃-N は高いという関係も示された。PO₄-P についても、塩分が高いほど高濃度である傾向が示された。ここで底上 1 m の水温、塩分、および水深の、それぞれ同士の散布図を描いてみると（第 7 図）、水深が深くなるほど水温は低くなり、塩分は高くなり、また水温が低いほど塩分は高いという関係が示された（相関係数は絶対値で 0.84 以上、決定係数は 0.71 以上）。したがって、底層では水深が深いほど水温は低く、塩分は高く、富栄養であるといえる。これは竹内ら（1997）や金田・上田（1998）が報告しているように、夏季には紀伊水道外域の陸棚斜面から低温、高塩分、富栄養な亜表層水が紀伊水道の底を北上してくるためと考えられる。第 5-3 図は表層よりも底層の方が低温、高塩分、富栄養で、この傾向は紀伊水道東部海域の北部よりも南部で、また浅所よりも深所で、より顕著であることを示していた。これは陸棚斜面から這い上がってきた亜表層水が、水深の深いところから北上してきていることを示していると考えられる。春季のところで述べたように、このような亜表層水の北上は、春季には既に始まっている。

秋季：水深 0 m では水温が全域的に 20 ~ 21 °C 台で変化が比較的小さい他は、塩分、栄養塩はいずれも水平的な濃度変化が大きく、分布パターンがはっきりと認められた。すなわち、紀伊水道南東部は紀伊水道外域から日ノ御崎沖を北北西に向けて入り込んできた高温、高塩分、貧栄養の外海系水に広く覆われており、この外海系水の北側では、北へ向かうほど塩分は徐々に低くなり、栄養塩は徐々に高くなっていった。水深 0 m における水温、塩分と栄養塩の散布図は、低温で低塩分ほど富栄養であることを示しており、水温、塩分、栄養塩の水平分布にみられた関係を裏付けている。底上 1 m でも、低温、低塩分ほど富栄養の傾向が認められた。上層と下層の水温、塩分、栄養塩の差を示した第 5-4 図によると、水温と塩分は上下層の差はあまり認められないので、鉛直混合が起きて両層の水はほとんど混じり合っていると考えられる。したがって、上層で認められた低温で低塩分ほど富栄養であるという関係が、底層でも認められたのだと考えられる。ただし、第 5-4 図の NO₃-N と PO₄-P によると、紀伊水道南部の中央寄りでは下層の方が上層よりも富栄養で、調査



第7図 底上1mにおける水温、塩分、観測水深の、それぞれ同士の散布図
各散布図には相関係数Rと回帰直線、および決定係数R²が記入されている。

域の北部では上層の方が下層よりも富栄養である傾向が認められる。このために、底上 1 m では水温、塩分と栄養塩の相関の強さが水深 0 m よりも鈍いのだと考えられる。紀伊水道南部の中央寄りでは下層の方が上層よりも富栄養である理由は、この海域の水深が比較的深く鉛直混合が底層まで十分に達しないことと、上層に黒潮系の貧栄養な水が分布していることによると推測される。調査域の北部で上層の方が下層よりも富栄養であることについては、後に考察する。

・紀伊水道東部海域における栄養塩の季節的変動

紀伊水道東部海域における栄養塩の季節的な分布様式は、大きく 2 つに分けることができる。すなわち、冬季と秋季、および春季と夏季である。冬季と秋季には、鉛直混合により上層と下層の水が混じり合うため、表層と底層の水温、塩分、栄養塩はいずれもほぼ同じとなる（第 5-1, 5-4 図）。表層の栄養塩は春～夏季に比べると顕著に高く（第 2 図）、その濃度分布は低温で低塩分の北部海域ほど高く、高温で高塩分の南部海域ほど低い（第 3-1, 3-4, 4-1, 4-4 図）。春季と夏季には成層構造が形成される。表層の栄養塩濃度は秋～冬季に比べると顕著に低く（第 2 図）、底層には陸棚斜面から低温で富栄養の亜表層水が這い上がってくるために、水深の深いところほど低温で、富栄養である（第 4-2, 4-3, 5-2, 5-3 図）。冬季と秋季、および春季と夏季の栄養塩の分布様式には、鉛直混合と成層構造が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

以上より、紀伊水道東部海域における栄養塩の季節的変動を次のようにまとめることができる。冬季には、栄養塩は表層でも底層でも比較的高濃度である。表層の栄養塩は、冬季が四季のうちで最も高濃度であり、低温低塩分の北部海域ほど高く、高温高塩分の南部海域ほど低い。春季になると成層構造が形成され、表層の栄養塩は低くなる。底層では紀伊水道外域の陸棚斜面から亜表層水が紀伊水道に這い上がってくるために、水深の深いところほど低温で富栄養になる。夏季には成層構造はより発達し、亜表層水の這い上がりは更に顕著になる。秋季には成層構造が崩壊し、鉛直混合が起きて上層と下層の水はほぼ同じになる。表層の栄養塩は高くなり、その濃度分布は冬季と同様に低温低塩分の北部海域ほど高く、高温高塩分の南部海域ほど低い。

・秋～冬季における栄養塩の供給源について

秋季と冬季における水深 0 m の $\text{NO}_3\text{-N}$ の分布図を見比べると（第 3-1, 3-4 図）、秋季には北緯 34 度 10 ～ 15 分付近をほぼ東西に延びていた 4 ug at/l と 5 ug at/l の等値線は、冬季には前者が北緯 33 度 57 ～ 59 分付近まで、後者が北緯 34 度 04 ～ 08 分付近までそれぞれ南下しており、秋から冬へと季節が変わるにつれて $\text{NO}_3\text{-N}$ の豊富な水が北から南へと広がっているようにみえる。また、秋～冬季には低温低塩分ほど $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高かったことから、秋季には低温低塩分で $\text{NO}_3\text{-N}$ を豊富に含む水が調査域の北から南へと流れ込み、この水の南下がさらに進んで冬季には $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度がより高くなるのだと考えられる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、秋～冬季にかけての南下拡散の様子は水平分布図から $\text{NO}_3\text{-N}$ ほどはっきりと読みとることはできないものの、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と同じく秋～冬季には低温低塩分ほど高濃度であったことから、おそらく $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様の振り舞いをしていると推察される。高志ら（2003）は 11 ～ 3 月には大阪湾から紀伊水道へ富栄養の水が流れ込むことを報告している。したがって紀伊水道東部海域では、秋季における栄養塩上昇は大阪湾の低温、低塩分で富栄養な水の南下によりもたらされるのであり、この大阪湾水の南下がさらに進んで冬季には栄養塩がより高くなるのだと考えられる。

ところで、秋～冬季にかけての $\text{NO}_3\text{-N}$ の水平分布図（第 3-1, 3-4 図）によると、いずれも紀ノ川河口付近は 6 ug at/l 以上の高濃度になっていた。このことは、大阪湾からの水に加え、紀ノ川河川水からもかなりの栄養塩が供給されていることを示唆している。第 5-4 図によると、秋季には調査域北部では表層の方が底層よりも栄養塩濃度が高かったことから、紀ノ川河川水によって供給された栄養塩は調査域北部の表層を拡散したことが考えられる。このように表層の方が栄養塩濃度の高い海域は冬季には紀ノ川河口域に限られていた。これは冬季には鉛直混合が卓越するためであると考えられる。

なお、水深 0 m における水平分布図（第 2-1 ～ 2-4 図）によると、秋～冬季には紀ノ川から高濃度の栄養塩が流出しているようにみえるけれども、春～夏季には高濃度の栄養塩の流出は認められない。春～夏季の貧栄養には植物プランクトンによる栄養塩吸収などが関与していると考えられ、これについては今後の課題である。

摘 要

1994 年～ 2003 年の 10 年間に四季毎に調査された水温、塩分、溶存態窒素、溶存態リンのデータを解析し、紀伊水道東部海域における栄養塩の季節毎における分布の変化を海洋学的な見地をもとに整理した。表層の溶存態窒素濃度は春～夏季には低く、秋季には上昇し、冬季には最も高くなった。春～夏季には底層では水深が深くなるほど水温は下がり、栄養塩は高くなった。これは陸棚斜面から這い上がってきた低温、富栄養の亜表層水によると考えられる。秋季には大阪湾からの低温、低塩分、富栄養の水が南下してきて栄養塩は北部から高くなり、大阪湾水の南下がさらに進んで、冬季にはさらに栄養塩は高くなると考えられた。秋～冬季には紀ノ川からも多くの栄養塩が添加されていることが示唆された。

謝 辞

海洋に関するアドバイスをいつも惜しみなく頂いている和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場の竹内淳一副場長に感謝の意を表します。また、これまで海洋観測と栄養塩分析を担当されてきた歴代研究員の方々に敬意を表します。さらに、海洋観測に多大な御協力を頂いております漁業調査船「きのくに」の乗組員の皆様に深く御礼申し上げます。

引用文献

- 藤原建紀・宇野奈津子・笠井亮秀・須佐美智嗣・多田光男・地本直弘・中辻啓二. 1996. 外海から瀬戸内海に流入する窒素・リン. 1996 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集. 355 - 356.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二. 笠井亮秀・坂本 亘. 1997. 紀伊水道の流れと栄養塩輸送. 海と空. 73 : 63 - 72.
- 竹内淳一・中地良樹・小久保友義. 1997. 紀伊水道に侵入する表層暖水と底層冷水. 海と空. 73 : 81 - 92.
- 金田佳久・上田幸男. 1998. 紀伊水道の平均的海洋構造と陸棚斜面水這い上がり現象. 第 4 回瀬戸内海資源海洋研究会報告. 15 - 26.
- 竹内淳一. 2001. 紀伊水道における底層冷水とプランクトン量の経年変動特性. 海と空. 77 : 91 - 98.
- 竹内淳一. 2002. 紀伊水道におけるプランクトン量の経年変動とその影響. 月刊海洋. 号外 No.31 : 209 - 216.
- Ozaki, K., Uye, S., Kusumoto, T. and Hagino, T. 2004. Interannual variability of the ecosystem of the Kii Channel, the Inland Sea of Japan, as influenced by bottom intrusion of cold and nutrient-rich water from the Pacific Ocean, and a recent trend of warming and oligotrophication. Fish. Oceanogr. 13:65-79.
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・竹内淳一. 2002. 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. 海岸工学論文集. 49 : 1076 - 1080.
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・堀 豊. 2003. 紀伊水道における栄養塩の分布および濃度の季節変動. 2003 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集. 211.

Summary

The seasonal distributional passage of the nutrient of Eastern Kii Channel was oceanologically examined. The nutrient concentration of surface water is low at spring and summer, moderately high at autumn, and highest at winter. At spring and summer, the bottom water becomes cooler and higher nutrient concentration, as the depth is deeper. That oceanological phenomenon certainly attribute to the intrusion of the subsurface water, which is cool and high nutrient, along the bottom of the Kii Channel from outer ocean. At autumn and winter, as the temperature is cooler and the salinity is lower, the nutrient concentration becomes higher. The cool, low salinity, and nutrient-rich water of Osaka Bay influents the Kii Channel at autumn. Then, the water of Eastern Kii Channel becomes higher nutrient. The inflow of the water from Osaka Bay progresses, and the nutrient concentration of Eastern Kii Channel becomes highest at winter. At autumn and winter, besides inflow from Osaka Bay, the outflow from Kinokawa River will supply the nutrition to the Eastern Kii Channel.