フェリーによる台風通過前後の海洋環境の変化の観測

大田啓一[1)]，増澤敏行[1)]，濱 健夫[2)]，寺井久慈[1)]，古谷 研[3)]，佐久川弘[4)]，
関根義彦[5)]，木村龍治[6)]，中塚 武[7)]，神田穣太[8)]，高橋正征[9)]，原島 省[10)]

1) 名古屋大学大気水圏科学研究所
2) 筑波大学生物科学系
3) 東京大学大学院農学生命科学研究科
4) 広島大学総合科学部
5) 三重大学生物資源学部
6) 東京大学海洋研究所
7) 北海道大学低温科学研究所
8) 静岡大学理学部
9) 東京大学大学院総合文化研究科
10) 国立環境研究所

要旨：台風9426と9429号通過にともなう海洋環境の変化を，フェリーボート「くろしお」によって観測した。台風前後における海水温，栄養塩，クロロフィル，植物プランクトン種と量の変化から，台風が大阪湾，四国沿岸および九州西岸において海洋鉛直混合を引き起こし，これに陸水の流出の影響が加わったことがわかった。さらに，栄養塩の増加と生物量の増加の間には数日以上の時間差があったこと，海洋混合と生物活動の変化が水中の気体成分に影響を与えたこと，台風の影響は 9429 号進路の東側にあたった九州西岸において強く現われたことなどが示された。

1. はじめに

本研究は大気擾乱に対する海洋環境の様々な応答のなかから、特に海洋生物活動に注目して、その量的・質的応答とこれに駆動され，気体形成・発散に至る海洋物質循環の応答を評価することを目的としたものである。

海洋上を通過する台風や発達した低気圧によって海洋に加えられる物理的なインパクトに関しては、理論と人工衛星およびロボットブイによる観測（Cornillon *et al.*, 1987[1)]，大塚、1990[2)]，Taira *et al.*, 1993[3)]）の両面から研究が進みつつある。海洋内部に発生した鉛直循環に伴う栄養塩の表層への回帰や，沿岸海洋における大気擾乱に伴う混合と湧昇がプランクトンやバクテリアの活動を上昇させ、また海洋の生態系に少なからぬ影響を与えていることは、断片的にではあるがこれまでに得られている知見から示唆される（Checkley *et al.*, 1988[4)]，大塚、1990[2)]，Chrost and Riemann, 1994[5)]）。

一方、海洋の生物活動が海水中の種々の気体成分の生成と消滅を支配していることはよく知られた事実である。多くの気体成分（メタン、N_2O、DMS、ハロゲン化アルキルなど）は大気に移行して、直接的にあるいは反応を介して大気の赤外放射に影響を及ぼしうる活性分子である。このためにこれら気体の大気へのフラックスに関する観測も世界的に行われてきた。しか

し、これに関する観測データはほとんどすべてが静穏な海況下に得られたものであって，本研究が目指すような，大気擾乱によって引き起こされる化学・生物過程に関する観測データは限られている。

本研究は名古屋大学大気水圏科学研究所が 1994～1997 年に実施した特別事業「メソスケールの水・物質循環と大気水圏環境変動との関わりの研究」のうちの「課題２．海洋生物活動の大気擾乱への応答に関する研究」として行った。この課題の研究においては，通過する台風に応答する海洋内部のプロセスを明らかにするために，人工衛星，航空機，研究船ならびにフェリーボートによる観測を行った。このうち，国立環境研究所のプロジェクト「東アジア定期行路船舶による海洋汚染モニタリング」との共同研究として実施した，大阪～沖縄定期航路「フェリーくろしお」での観測結果をここに報告する。

2. 方法

「フェリーくろしお」による観測は，1994 年 9 月 22～24 日（大阪～那覇間，Leg 1），9 月 30 日～10 月 2 日（大阪～那覇間，Leg 2），10 月 2～4 日（那覇～大阪間，Leg 3），および 10 月 17～19 日（那覇～長崎経由大阪間，Leg 4）の 4 回実施した（Fig.1a,1b）.

「くろしお」においては，経時的に海水試料をサンプリングし，ろ過した。ろ紙は凍結し，ろ液は冷蔵して持ち帰り，クロロフィルと栄養塩の分析にそれぞれ供した。生物計測用試料については，グルタールアルデヒド処理してピコ・ナノプランクトンの計数をし，フォルマリン固定後珪藻と渦鞭毛藻の同定・計数を行った。pCO_2 の測定は，船上において流水を平衡器に導き，平衡後の気体を非分散赤外線吸収測定装置（NDIR）によって，連続的に測定した。N_2O は流水をガラスバイアルにオーバーフローさせて採取後，フォルマリンを添加し，密栓して持ち帰り，非放射線源 ECD ガスクロによって測定した。

3. 結果と考察

3.1 台風進路と観測ライン

観測期間中に台風 9426 および 9429 号が観測海域近くを通過した（Fig.1a,1b）.1994 年 9 月 20 日，北緯 20 度にあった台風 9426 号は，9 月 26 日 21 時に沖縄の東南東に進み（Fig.2A），925hP，最大風速は 40kt であった。28 日 6 時には 935hP となり，29 日 19 時 30 分頃和歌山県田辺付近に上陸し，北上して日本海に抜けた。台風 9429 号は，10 月 7 日，フィリピンの東方海上にあって 955hP であったが，10 月 8 日には 910hP と強くなった。9 日には台湾付近で 940hP となり（Fig.2B），東シナ海に入り，980hP となった後に韓国から大陸に入って熱帯低気圧になった。

フェリーボート「くろしお」による本研究の Leg 1 は台風 9426 号の直前の観測であり，Leg 2 と Leg 3 は台風通過後の観測であった。観測線は台風 9426 号進路の西側に位置した。 Leg 4 は台風 9429 号通過後の観測であり，観測線は台風進路の東側に当たる。

3.2 台風による海洋鉛直混合と栄養塩の回帰

「くろしお」Leg 1 と 2 において観測された海水温度と栄養塩濃度の比較を Fig.3 に示した。Leg 2 の水温は Leg 1 に比べて全体として低下しているが，紀伊水道から大阪湾にかけての水温低下が著しく，また栄養塩濃度もここにおいて上昇している。これらのことから，大阪湾においては活発な鉛直混合があって，これにともなって低層の栄養塩が表層に回帰したものと考えられる。この状況は台風通過 5 日後になっても認められた（Fig.4）。

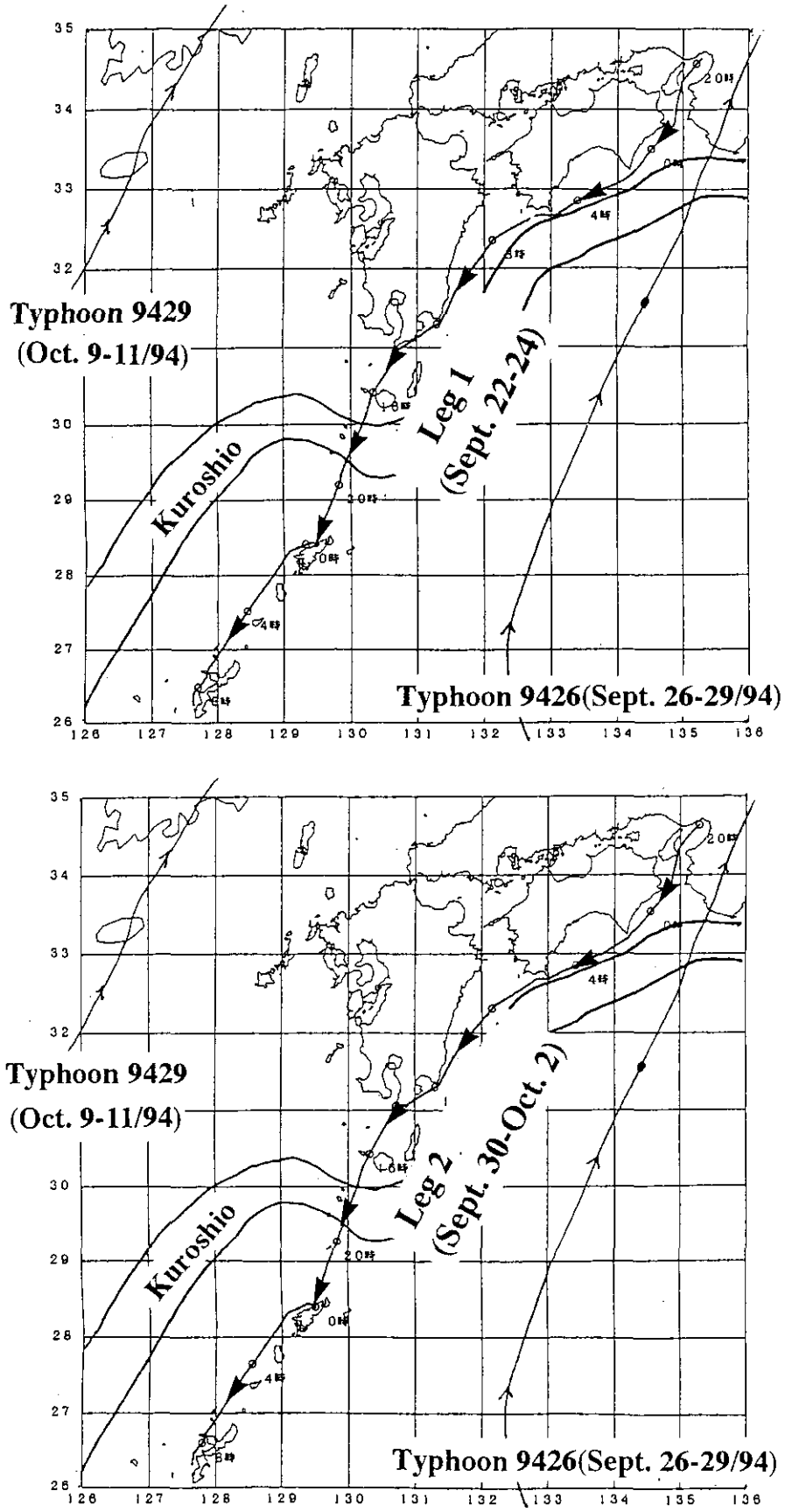


Fig. 1a. Tracks of Legs 1 (upper) and 2 (lower) of "Ferry Kuroshio" cruises, and those of Typhoons 9426 and 9429 in 1994.

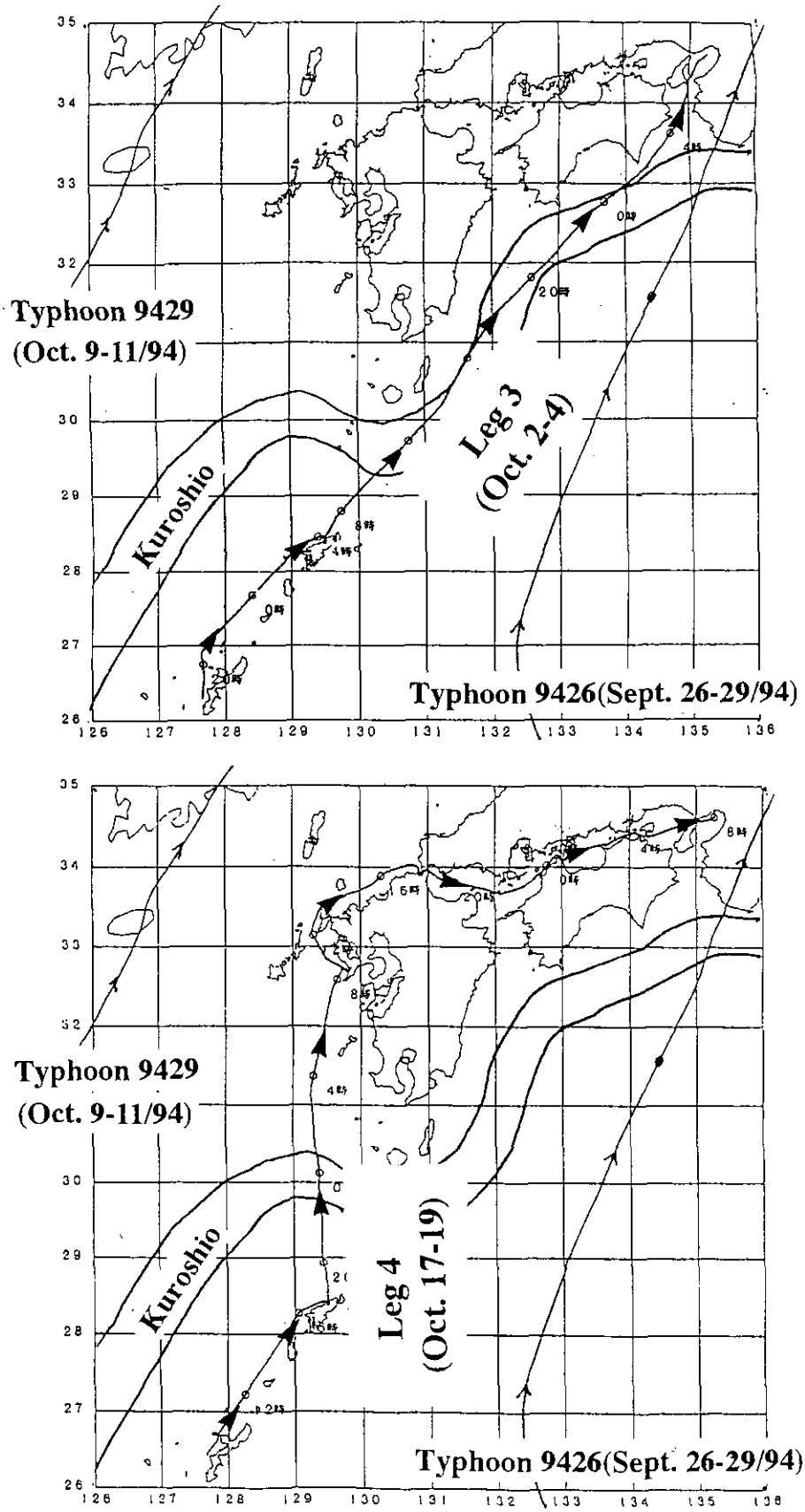


Fig. 1b. Track charts of Legs 3 (upper) and 4 (lower) of "Ferry Kuroshio" cruises and storm tracks of Typhoons 9426 and 9429 in 1994.

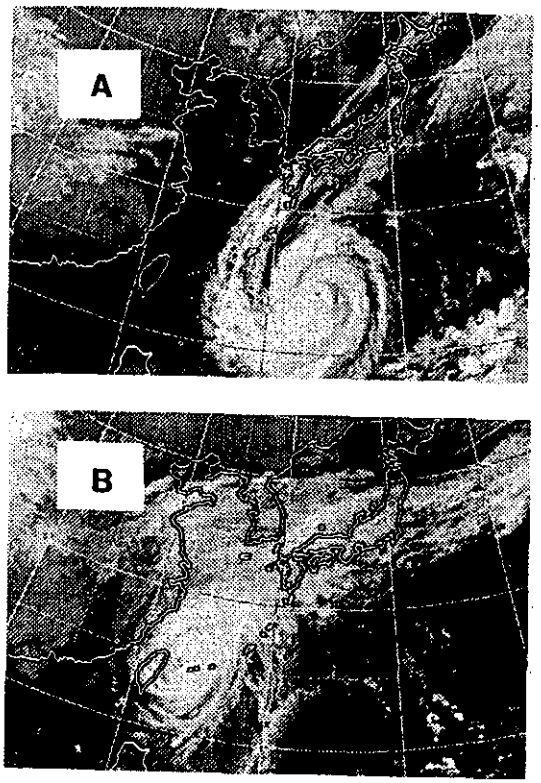


Fig. 2. Satellite images of Typhoons 9426 (A) and 9429 (B).

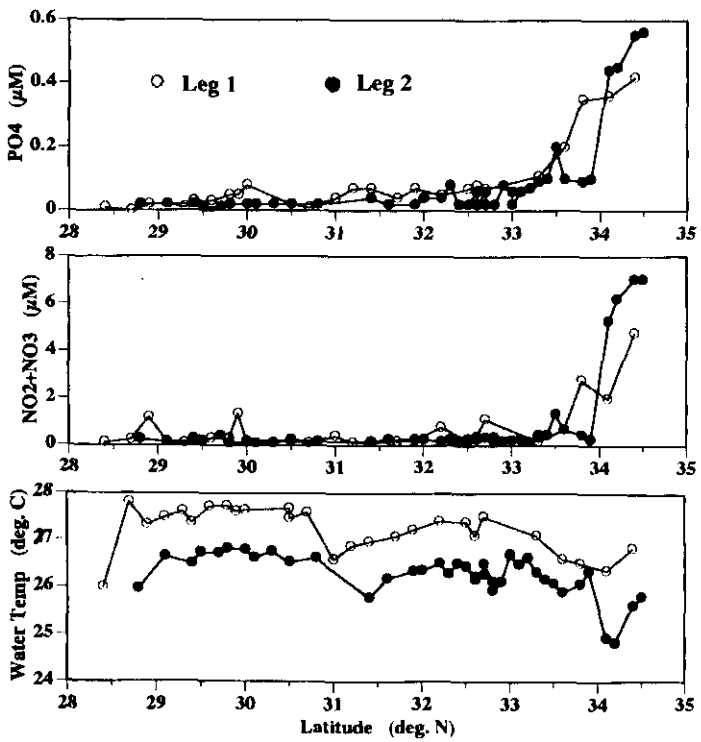


Fig. 3. Distributions of nutrient concentrations (PO_4 and NO_2+NO_3) and water temperature along the tracks of Legs 1 and 2.

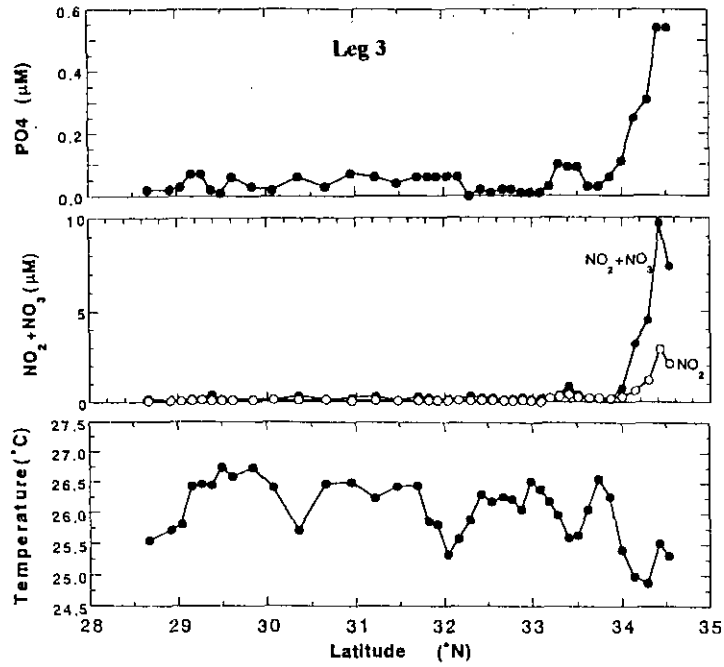


Fig. 4. Distributions of nutrient concentrations (PO_4 and NO_2+NO_3) and water temperature along the Leg 3 track.

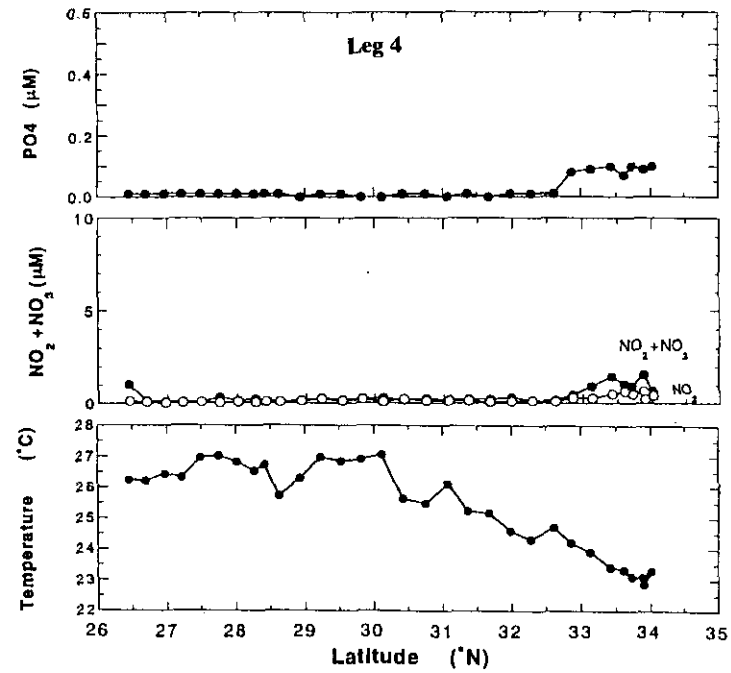


Fig. 5. Distributions of nutrient concentrations (PO_4 and NO_2+NO_3) and water temperature along the Leg 4 track.

Leg 2 においては，室戸海盆（33.5° N 付近）に低塩分，低温で栄養塩濃度の高い水塊が認められた。この水塊の特徴は，大阪湾海水と外洋水との混合では説明できないところから，台風 9426 号の通過にともなう降水によってもたらされた陸水の影響を受けてるものと考えられる。台風通過 5 日後の Leg 3 においてはこの水塊ははっきりしなくなっている。すなわち比較的短期間ではあるが，台風通過後にローカルな陸水の影響が沿岸海洋に及ぶことが示されたといえる。

内湾や沿岸域は浅いために台風の影響をより大きく受ける。その影響は地形や潮汐あるいは出水量によって複雑化されるが，Leg 2 の大阪湾から室戸海盆において見られた上述の現象は，台風の効果としてこれまでの観測からも認められているところである（関根ら、1992[6]）。

Leg 1 と Leg 2 の比較（Fig.3）から，土佐湾沖の外洋（32° N 付近）で，低水温で高い PO_4 のピークが数カ所出現したことがわかる。Leg 3 ではこれらのピークは消失していたが,これらのピークは亜表層水の湧昇があったことを示唆している。一方, 31° N 以南の外洋では台風 9426 号の通過前後における大きな海洋環境の変化は認められなかった。

本研究の一環として，台風 9426 号通過後の 10 月 3 日には，台風進路の東に当たる遠州灘と熊野灘において AXBT 観測を行ったが，得られた水温の鉛直分布には、混合層が台風通過線に向かってより発達していることと、同じ方向への水温低下がみられた。また南方海上の 136° E, 32° N における表面水温（船舶通報データ）も台風通過後に顕著に低下した。これらのデータとシミュレーションの結果からは、黒潮を越えた外洋においては、台風進路に沿って混合層を 40mから 60mへと発達させ、またおよそ 2℃の表面水温の低下をもたらす程の鉛直混合があったことが示唆された。また航空機による MSS 観測（海洋表面温度とクロロフィル濃度のリモートセンシング）からは，伊豆諸島の浅瀬では，台風によって湧昇が強化されたことが見い出されている。台風進路の東側で見かけられたこれらの現象にに比べると，台風進路西側の「くろしお」航路の外洋域への台風の影響は比較的小さかったことが分かる。

台風 9429 号の通過後の Leg 4 においては 31° N 以北の水温の低下が顕著である。表面水温の低下は夏季にはやがて回復する。しかし広域的な水温分布（漁業情報サービスセンター）を見ると，台風 29 号通過後の東シナ海においては、25℃等温線が大幅に南進し、再び昇温することなく徐々に冷却していった。台風に伴う東シナ海の鉛直混合が、秋から冬にかけての水温降下期にあっては、水温降下を加速する効果を持つことを示すものである。この状況はロボットブイによる観測結果（大塚、1990[2]）とよく一致する。Leg 4 の 33° N以北の，玄界灘から関門海峡，周防灘にかけての栄養塩の濃度上昇が台風の効果によるものか，あるいは鉛直混合の効果が解消されて，海域の定常的な状態に戻っていたのかについては判断できかねる。

3.3 台風の生物活動へのインパクト

海洋有光層への栄養塩の供給と植物プランクトンの増殖の間には，ふつう数日の時間差が認められることが多い。Leg 2 と Leg 3 について，クロロフィル a と NO_2+NO_3 濃度の関係を Fig.6 に示した。高い NO_2+NO_3 濃度は大阪湾内で認められたものであるが，台風 9426 号通過直後の Leg 2 では，NO_2+NO_3 濃度に対してクロロフィル濃度は低く，グラフは左に片寄っている。Leg 3 ではプロットは右にシフトしていて，台風の通過後 5 日目で，生物量が NO_2+NO_3 濃度に応答しつつある様子がうかがえる。台風 9429 号通過の Leg 4 においては，30° N以北においてクロロフィル濃度が高く，台風通過の一週間後には生物量の増加が海洋鉛直混合に応答した可能性を示した。

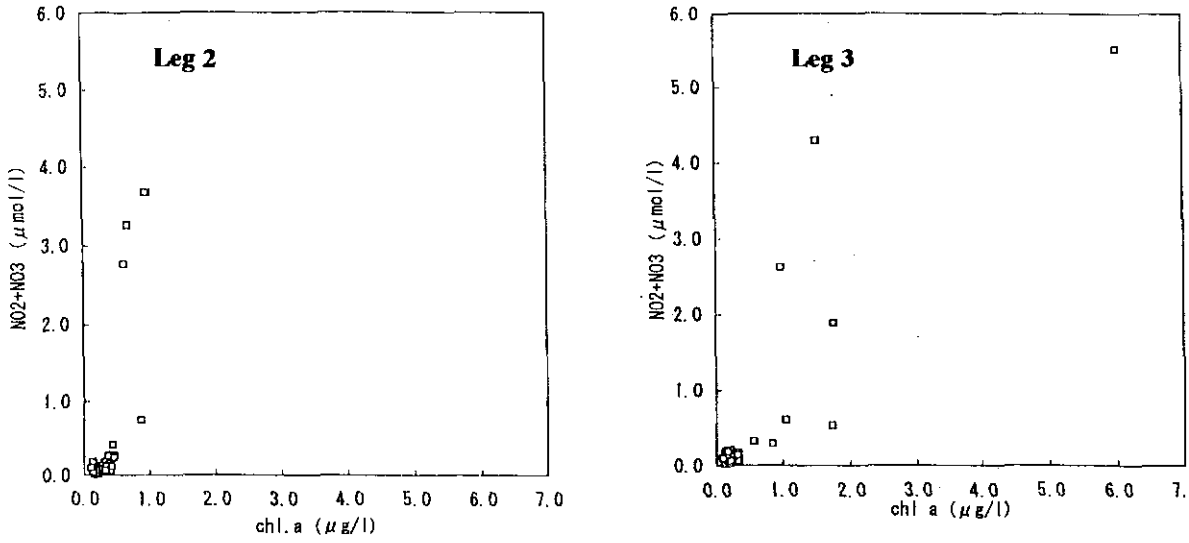


Fig. 6. Plots of nutrient (NO_2+NO_3) *vs.* chlorophyll-a concentrations measured during Legs 2 and 3 cruises.

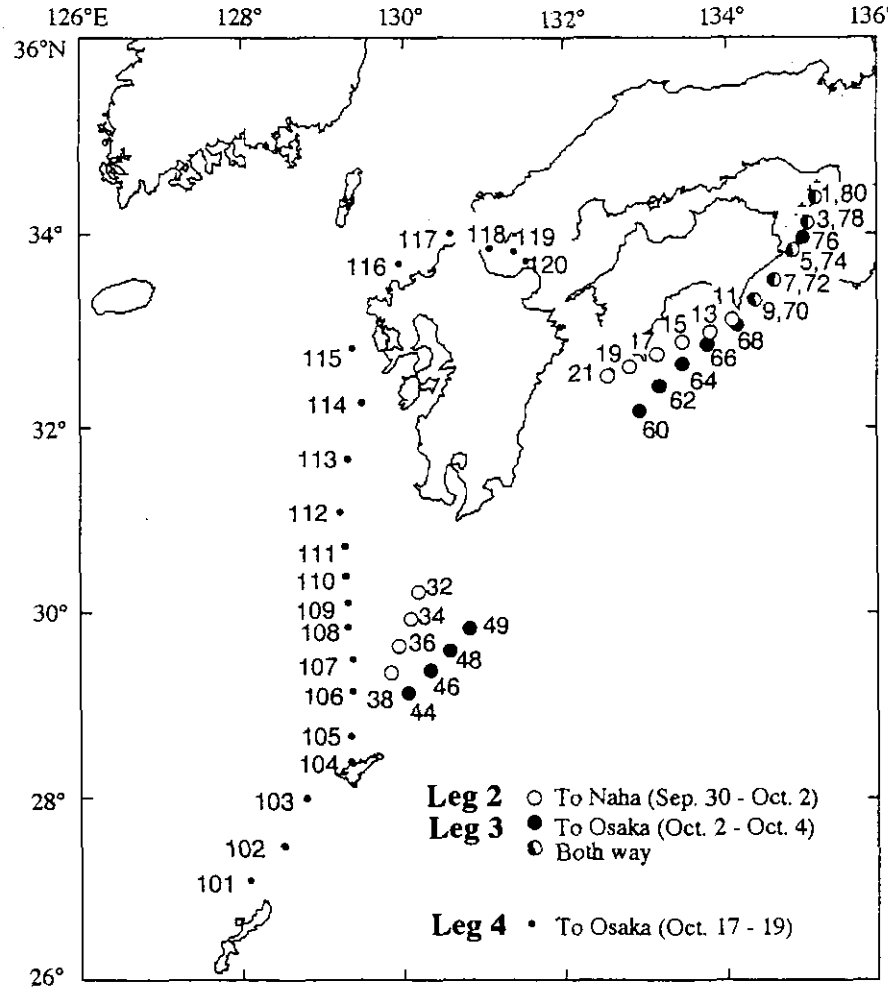


Fig. 7. Stations of water sampling for the analysis of phytoplankton assemblage.

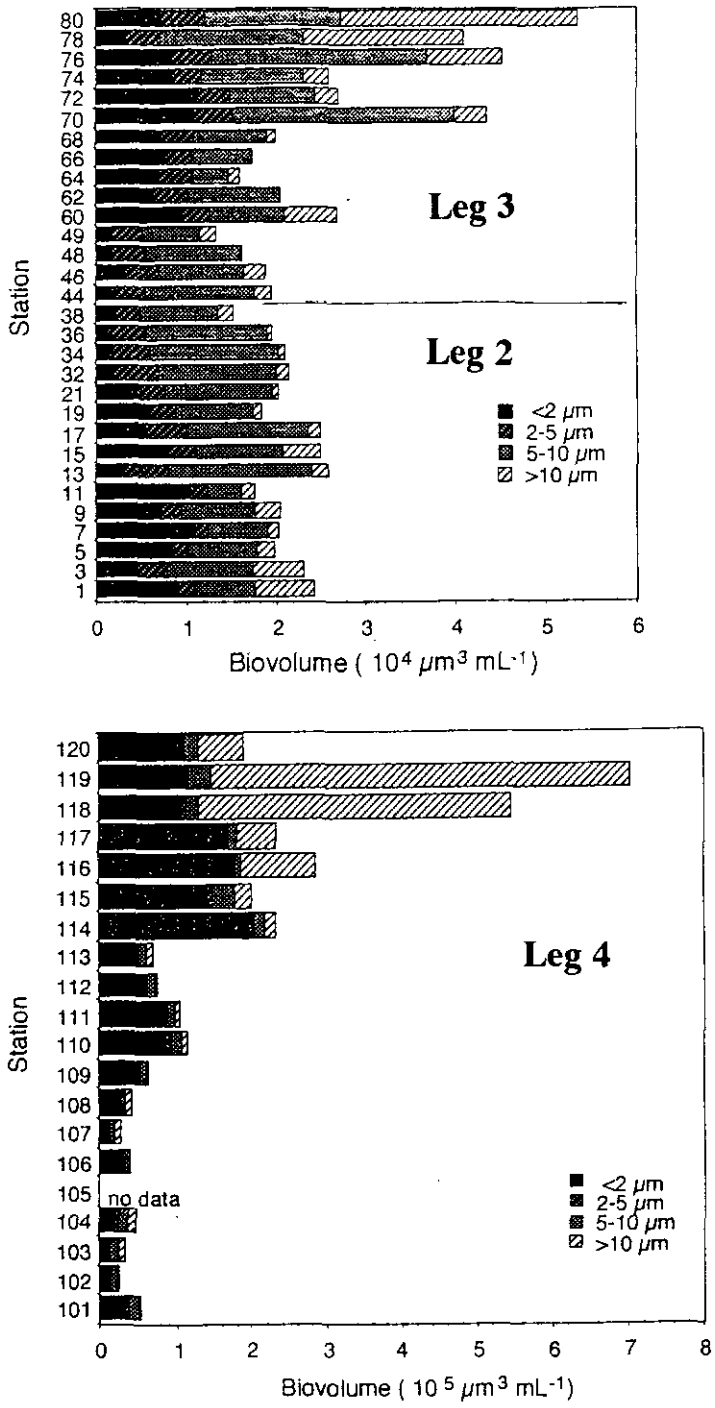


Fig. 8. Phytoplanktonic cell volumes and size fractions at individual sampling stationsof Legs 2 through 4.

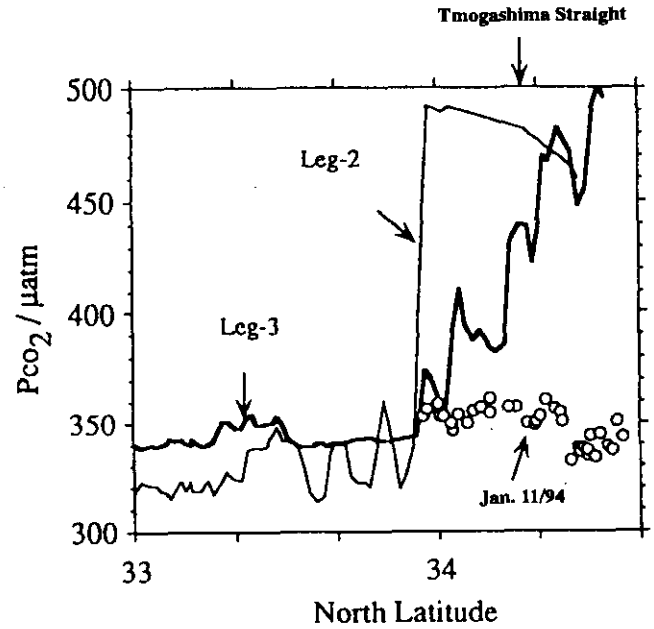


Fig. 9. Distribution of pCO_2 in water in coastal areas and the Osaka Bay.

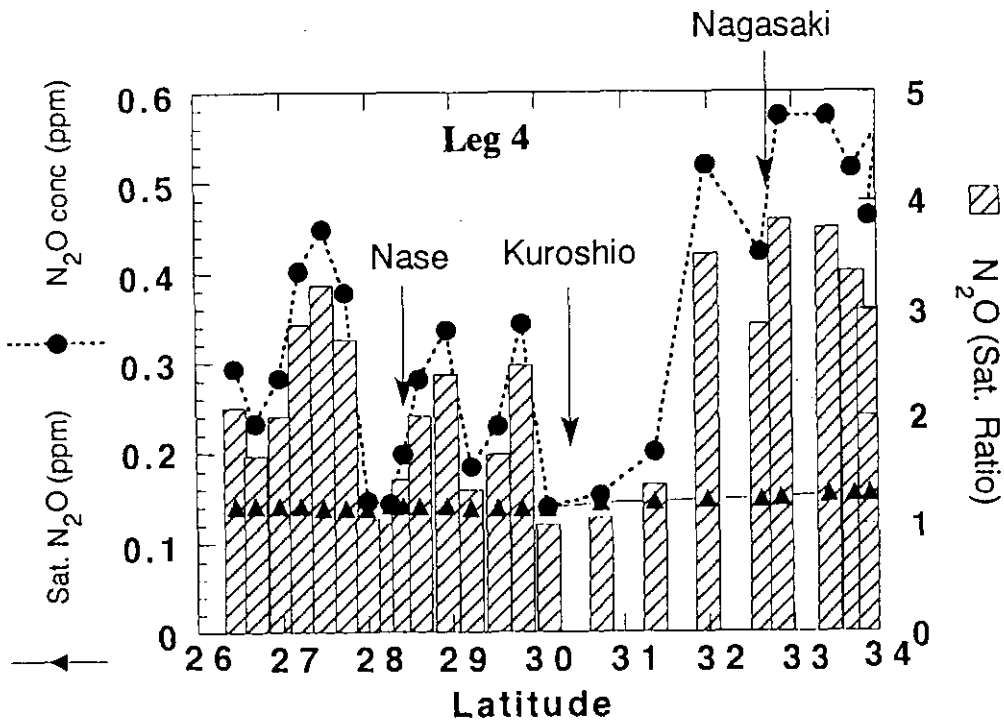


Fig. 10. N_2O concentrations measured during Leg 4 and expected levels of saturation and saturation ratio of N_2O.

海洋植物プランクトン群集の解析には Fig. 7 に示した測点で採取した試料を用い，解析結果は Fig. 8 に示した。Leg 2 の大阪湾から紀伊水道にかかる測点 1～7 では，浮泥や細胞質のない珪藻殻などが多量に懸濁し，鉛直混合が海底にまでおよんだことを示した。紀伊水道から室戸に至る海域では，淡水産の藻類が見られ，これは Leg 3 では消失していた。この事実は上述の Leg 2 における栄養塩のピーク群の出現と調和的であり，短期間の陸水の影響があったことが確認された。Leg 3 の大阪湾内の測点 78 と 80 では，10μm 以上の大形珪藻が優先していた。しかしその中には湧昇域で優先するプランクトン種として *Nitzschia pungens*（Furuya *et al.*, 1986[7]）が検出されたが，それ以外はほとんど見かけられなかったことから，大形珪藻の出現を台風による鉛直混合の結果のみに帰するわけにはいかなかった。

Leg 4 においては，黒潮域で 2μm 以下のラン藻を種とする生物量が多く，特に 32° N以北でこれが顕著であった。10μm 以上のサイズ画分にあっては，珪藻の *Thalassiosira diprocyclus* が優占した。本種は好適な栄養塩濃度の下でしばしば強く優占し，r—選択性があることが知られている（Margalef, 1967[8], Kiham and Kiham, 1980[9]）。本種が沿岸域のみならず黒潮域でも優占していたことは，台風 9429 号の通過にともなって,台風進路の東側の九州西岸から瀬戸内海西部にかけて活発な鉛直混合が引き起こされ，回帰した栄養塩が一週間後には生物の増加につながっていたことを示すものであった。

3.4 台風通過と気体成分

海水中の pCO_2 の測定はすべての Leg で実施した。その結果から，pCO_2 は観測ラインが西にあるほど低く，東高西低の傾向を示した。Leg 1 と 2 の比較からは，紀伊水道から大阪湾にかけての pCO_2 が台風通過後に急上昇していた。またこれは Leg 3 までの間に低下したことが示された（Fig.9）。Leg 2 と 3 における pCO_2 の値は，94 年 1 月に観測したそれに比較するとはるかに高く（Fig.9），夏季と冬期における pCO_2 の違いを考慮したとしても，この大きな差は夏季成層が鉛直混合によって破壊されたことによるものと考えざるを得ない。

N_2O の測定は Leg 4 において実施した。結果を Fig.10 に示した。N_2O 濃度は，黒潮域では低かったが，32° N以北の九州沿岸から周防灘にかけての海域では極めて高く，大気平衡濃度の数倍に及んだ。九州沿岸以北での高い N_2O 濃度は台風 9429 号による鉛直混合によりもたらされ，さらに増加した生物量の影響も加わったものと考えられる。大気平衡濃度を超える N_2O 濃度は，黒潮域以南の海域においても観測され，海水温度の分布（Fig.5）と相関するが，この原因については不明である。「フェリーくろしお」での N_2O 測定は今回はじめて実施されたが，測定に供する試料水が N_2O 測定に妥当なものであるか否かについての検討を一度行う必要がある。

4. 結論

台風 9426 号進路の西側海域における「フェリーくろしお」による観測から，この台風が大阪湾内の海水を混合し，これに流入水の効果も加わることによって，低温で高栄養塩の海水を出現させたことがわかった。この栄養塩が数日後に生物量の増加をもたらし始めたが，顕著な増加量には至っていなかった。台風 9426 号は陸水の流出を四国沿岸海域にもたらし，栄養塩の小ピークを出現させたが，生物活動への効果は小さく，短期間内のイベントとして終了した。外洋への台風の影響は台風進路の西側に当たる「くろしお」観測域では，台風進路東側の熊野灘・遠州灘に比べると，その影響は小さかったことが窺われる。

一方，台風 9429 号進路の東側海域は，陸棚や浅海域となっていて水深が浅いために，この海域への影響は大きかったことが明らかになった。九州西岸では，鉛直混合は海底にまで達したことが示され，これによって海洋表層に回帰した栄養塩は，一週間後には生物量の増加を出現させ，生物活動関連気体の上昇を促したことが認められた。

謝辞

「フェリーくろしお」上での観測に際しては，船長，機関長，事務長はじめスタッフの方々の協力をいただいた。また日本気象協会関西本部の若林孝氏，ならびに海洋化学研究所の紀本岳志氏に援助・協力をいただいた。深謝いたします。

参考文献

1)Conillon,P., Stramma,L. and Price,J.F. (1987): Satellite measurements of sea surface cooling during hurricane Gloria, Nature, 326, 373-375.

2)大塚一志 (1990): 暴風に伴う表層水温の変化，月刊海洋, No.3, 100-105.

3)Taira,K., Kitagawa,S., Otobe,H. and Asai,T. (1993): Observation of temperature and velocity from a surface buoy moored in the Shikoku Basin (OMLET-88)-An oceanic response to a typhoon, J. Oceanogr., 49, 397-406.

4)Checkley,D.M., Jr., Raman,S., Maillet,G.L. and Mason,K.M. (1988): Winter storm effects on the spawning and larval drift of apelagic fish, Nature, 335, 346-348.

5)Chrost,R.J. and Riemann,B. (1994): Storm-stimulated enzymatic decomposition of organic matter in benthic/pelagic coastal mesocosms, Mar. Ecol. Prog. Ser., 108, 185-192.

6)関根義彦，川股信一，佐藤裕一 (1992): 初冬期における伊勢湾の沿岸フロントの観測，沿岸海洋ノート，29，190-196.

7)Furuya,K., Takahashi,M. and Nemoto,T. (1986): Summer pytoplankton community structure and growth in a regional area off Hachijo Island, Japan, J.exp.mar.Biol. Ecol, 96, 43-55.

8)Margalef, R. (1967): The food-web in the pelagic environment, Helgolander wiss. Meeresunters., 15, 548-559.

9)Kiham,P. and Kiham,S.S.(1980): The evolutionary ecology of phytoplankton, In Morris,I.(ed.). The Physiological Ecology of Phytoplankton, Blackwell, Oxford, 571-597.

Observation of the marine environmental change before and after the passage of a typhoon

Keiichi OHTA[1],Toshiyuki MASUZAWA[1], Takeo HAMA[2], Hisayoshi TERAI[1], Ken FURUYA[3], Hiroshi SAKUGAWA[4], Yoshihiko SEKINE[5], Ryuji KIMURA[6], Takeshi NAKATSUKA[7], Jota KANDA[8], Masayuki TAKAHASHI[9] and Akira HARASHIMA[10]

1) Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University,
2) Institute of Biological Sciences , Universit y of Tsukuba
3) Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo
4) Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University
5) Faculty of Bioresources, Mie University
6) Ocean Research Institute, University of Tokyo
7) Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
8) School of Science, Shizuoka University
9) Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo
10) National Institute for Environmental Studies

Abstract: Field observations for oceanic environmental changes caused by Typhoons 9426 and 9429 were conducted by use of "Ferry Kuroshio" in 1994. Water temperature, nutrients, chlorophyll and biomass and species of phytoplankton showed considerable differences in their distributions between before and after the typhoons, indicating that the vertical mixing of water took place in the Osaka Bay and coastal areas of Shikoku and Kyushu and that the land-water outflow modified partly the oceanic environments. Elevated nutrients levels resulted in increase in phytoplankton biomass as well as gaseous components in water several days later. A strong impact was given by Typhoon 9429 to the western coast of Kyushu being located at the east of its course.

Keywords: typhoon, vertical mixing, biogeochemical parameters, ferry, gaseous components