

駿河湾奥部への急潮の流入にともなう内部波の発達と水質および 低次生産への影響

The Development of Internal Wave and Its Influence on Water Quality and Primary Production Induced by the Intrusion of "Kyucho" in the Inner Part of Suruga Bay

仁木将人¹・萩原直樹²・杉本隆成³・勝間田高明⁴・古島靖夫⁵

Masato NIKI, Naoki HAGIWARA, Takashige SUGIMOTO
Takaaki KATSUMATA and Yasuo FURUSHIMA

Continuous observation of current, temperature and water quality in the inner part of Suruga Bay were carried out since August 2007. In middle April 2008, sudden temperature rise about 4 degree was observed. The temperature rise was influenced by the intrusion of the Kuroshio warm water, so-called "Kyucho", which persisted for a few days. Kyucho occurred tree times and generated stratification in the upper layer of the inner part of the bay. After intrusion of Kuroshio warm water, internal waves with the period of half a day, caused by stratification were observed. Internal wavers generated strong currents, having the maximum velocity of about 30cm/s, which induced nutrients uptake from the lower layer.

1. はじめに

突発的な強い流れである急潮現象は、定置網の流失や破損といった沿岸漁業への直接的な影響ばかりでなく、水温の上昇や海水交換の促進、閉鎖性湾での栄養塩の供給機構への影響等、湾内の環境へ様々な形で影響することが知られている（例えば、武岡・永田，1992）。急潮の主要因は黒潮系の暖水の流入や気象擾乱にともなって発生することが知られており、発生機構や沿岸での振る舞いに関する研究が数多く進められている（例えば日向ら，2003）。

開放性の高い駿河湾では湾南方を東流する黒潮に伴う暖水の波及が知られている。勝間田（2004）は湾口東部海域の300m以浅における長期観測結果から、暖水の波及には、黒潮前線波動に由来する半月～1ヶ月周期の流入，東西風の変動に伴う数日～10日周期の流入，2・3日スケールの強い流入が存在することを示した。急潮はこのうち2・3日スケールの強い流れであり，その物理過程に関する研究が散見される（稲葉・勝間田，2003；長谷川，2005）ものの，化学・生物学的な視点を含む総合的な環境影響は不明である。駿河湾奥では現在，著者らによって海況変動監視のためのモニタリング観測を実施しているが，その過程で春季の急潮現象を観測した。本研究では，湾奥での係留観測および湾奥定点での化

学・生物観測を通して大水深で開放性の高い内湾への急潮現象の影響を議論する。

2. 観測の概要

湾奥部の係留観測として，由比漁港所有の駿河湾奥倉沢沖の定置網（水深約70m）に水温塩分計（アレック電子社製，MDS-CT：水深5・10・15mの水温・塩分），流速計（アレック電子社製，COMPACT-EM：水深約20・60m），水位計（アレック電子社製，COMPACT-TD：水深約9m）およびクロロフィル・濁度計（アレック電子社製，COMPACT-CLW：水深5m）を2008年2月末～5月初旬に設置した（図-1参照）。また，併せて2007年4月中旬～2008年4月末の間，湾口部の東寄りの波勝沖（東経138度40分：北緯34度40分）において水深約600mの海底から立ち上げたADCP（RD社製ワークホース150kHz）により連続観測を実施した（図-2参照）。さらに，湾奥に3定点を設け，半月に1回程度の頻度でCTD観測と採水を9層（水深0・2・5・10・15・20・50・100・

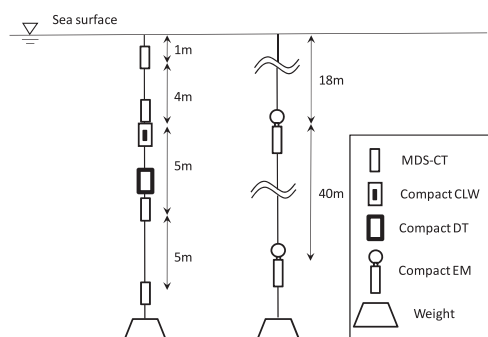


図-1 湾奥係留系の概要

1 正会員 博(工) 東海大学海洋学部准教授
2 理修 東海大学海洋学部講師
3 理博 東海大学海洋学部特任教授
4 博(理) 東海大学海洋学部非常勤講師
5 博(農) JAMASTECC

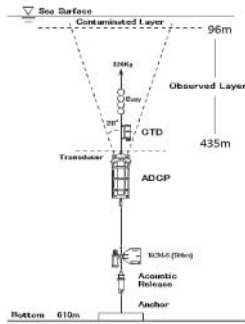


図-2 湾口係留系の概要

150m)で行った。採水した海水は研究室に持ち帰り栄養塩、pH、植物プランクトンおよびクロロフィルの計測を行った。湾奥観測地点の概要を図-3に示す。

3. 観測結果とその考察

(1) 急潮の概要

本観測期間中に確認された急潮は、2008年4月中旬に発生したものである。この時期黒潮流軸は非大蛇行離岸流路をとっていたが、遠州灘沖合に発達した黒潮前線波動が北上し御前崎に衝突した後東進し4月17日に石廊崎へと接岸する。駿河湾へは17日に湾口東部より進入し18日の午後によ比沖へと波及している。

(2) 由比沖係留系の観測結果

図-4に由比沖係留系での水温（10m, 20m, 60m）の観測結果を示す。由比沖では4月18日の午後以降、それまで16℃以下であった水温が次第に上昇し、19日未明には全層で18℃以上を示すに至る。10m層と20m層はそれ以降も上昇し21日には20℃を越え計測機器を回収した5月8日まで19℃程度を観測した。60m層では多少の変動を示しつつゆっくりと昇温し、4月24日以降に20℃を越え

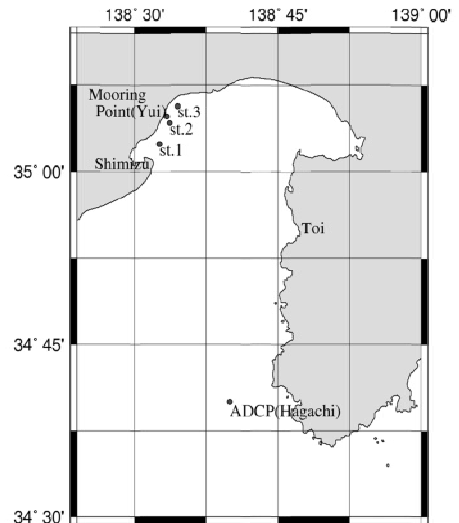


図-3 湾奥観測地点の概要

る値を示す。しかし、26日以降しだいに水温は低下し、4月29日に暖水前線通過以前の水温である16℃以下へと回復している。

このときの20m層および60m層での南北方向流速を図-5に示す。北方流速が正であり、観測地点は湾奥西部に位置することから急潮の進入に伴う流れは南流として現れている。4月18日の午後に非常に強い流れが20m層で観測され、そのときの南北方向流速で約40cm/s、合成流速の最強値は50cm/sを越えていた。60m層ではそれほど強い流れではないものの南方向の流れが続いている。19日の午後から24日までは20m層と60m層での流れが同期し、その大きさも同程度である。21日、23日および24日には再び連続した南方向流れが観測され60m水深の水温を押し上げている。26日以降は特に表層で半日から1

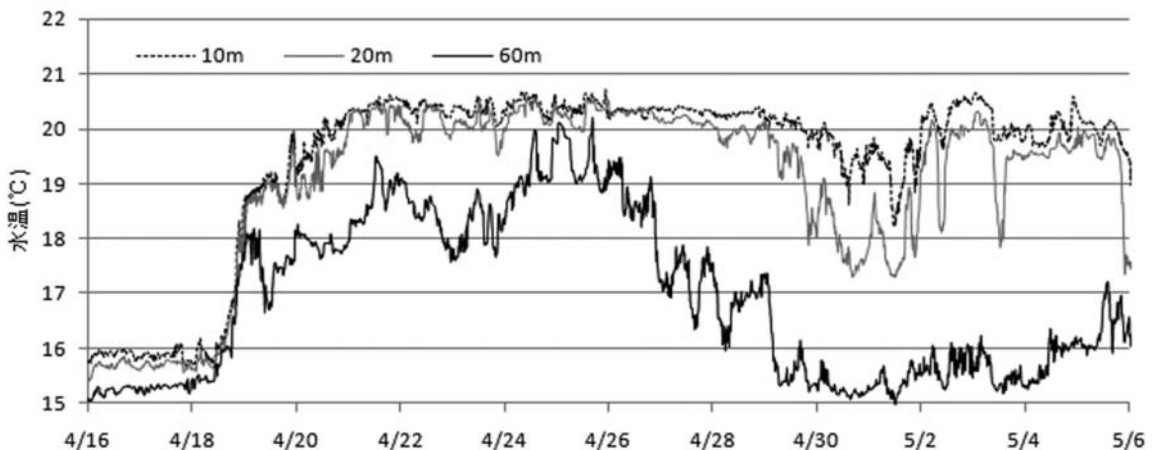


図-4 湾奥係留系での水温観測結果

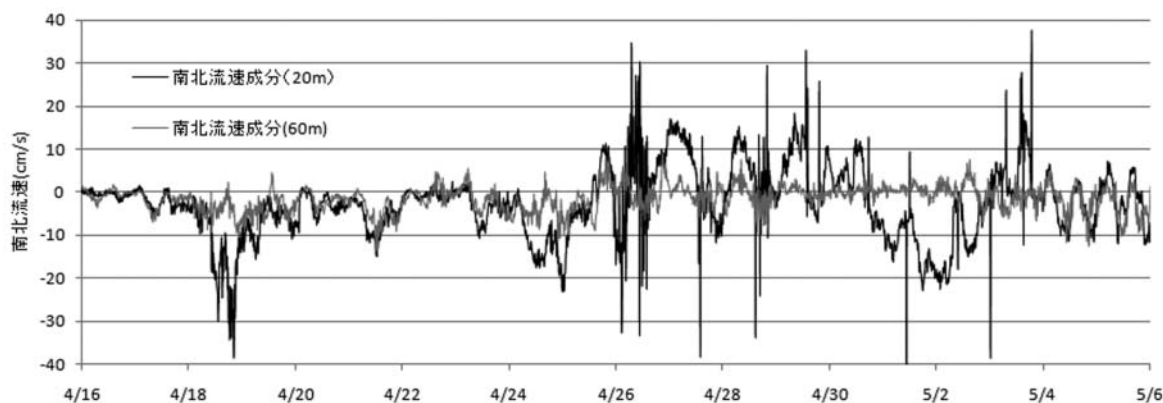


図-5 湾奥係留系での南北方向流速（北方流速が正）

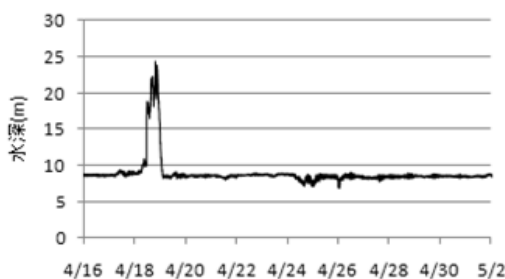


図-6 湾奥係留系での水位計の観測結果

日程度の周期で南北方向流速が交代する強い流れが見られ、上下層での位相のずれが確認される。同時に60m水温は60m流速の北向きの流れが生じている期間に低下し、南向きの流れに対応して上昇している。

図-6に水位計の観測結果を示す。水位計は約9m付近に設置してあるが、急潮に伴い暖水が到達した18日午後15m程度引き込まれている。これは設置してある定置網が強い急潮により吹き流され沈下してしまったためと考えられる。石戸谷ら（2008）は回流水槽を用いて大型二段箱式落網に急潮規模の流れが作用した場合の張力に関する模型実験を実施しているが、0.4m/sの流れに対して台浮子が12m沈下したと報告しており実験結果と沈下の程度がよく一致している。

(3) 湾口波勝でのADCP観測結果

ADCPは予定していた水深よりも深くに設置されたため表層付近の流れを押さえることができていない。観測されたのは最浅部96m、最深部435mである。図-7にADCPより得られた96m層および150m層での南北方向流速を示す。観測地点は駿河湾口東部のため急潮発生時に

は強い北方流が現れる。最表層の96mでの流速は、湾口付近に急潮が到達したと思われる4月17日に強い流れは現れていない。しかし、18日から25日まで北方流が卓越し、22日未明には80cm/sの強い流れが確認できる。150m層に関しても18日から24日まで弱いながらも全体として北方流が卓越しているが、96m層ほどの強流は見られない。過去の同地点での観測結果からは黒潮由来の半月から1ヶ月周期の流動は200m以上の厚みを持って進入してくることが確認されている。一方、急潮の層厚は100m以浅である。したがって、22日に96m層のみに現れた強流は黒潮由来の半月から1ヶ月周期の流入に短周期の急潮が重なって発生したと考えられる。急潮の層厚は100m以浅であるため150m層には強流が現れなかったと考えられる。

(4) 湾奥定点における水質観測結果

湾奥において半月に1度程度の頻度で水質観測を実施している。図-8に急潮が進入した前後における係留観測地点に近いSt.2での水温と密度の鉛直分布を示す。急潮進入前の4月9日には表層付近の水温が16℃弱であり100mまでの水温の変差が2℃を超えない。それに対して急潮進入後の4月23日には表層から20m付近までの水温が20℃を超え全層で3～4℃の昇温が見られる。140m水深で9日の表層と同程度の水温であり、急潮の進入により140m付近まで4月上旬の表層が押し下げられた水塊構造となっている。

図-9にSt.2の20m、50m、100m、150mの各層における栄養塩の観測結果を時系列で示す。駿河湾奥では過去の観測から沿岸河川系水の影響はせいぜい20m以浅であることがわかっている（萩原ら、2009）。20m以深の栄養塩は水深方向に高くなる傾向が見られ、20m以深では下層から栄養塩が供給されていることがわかる。急潮進入後

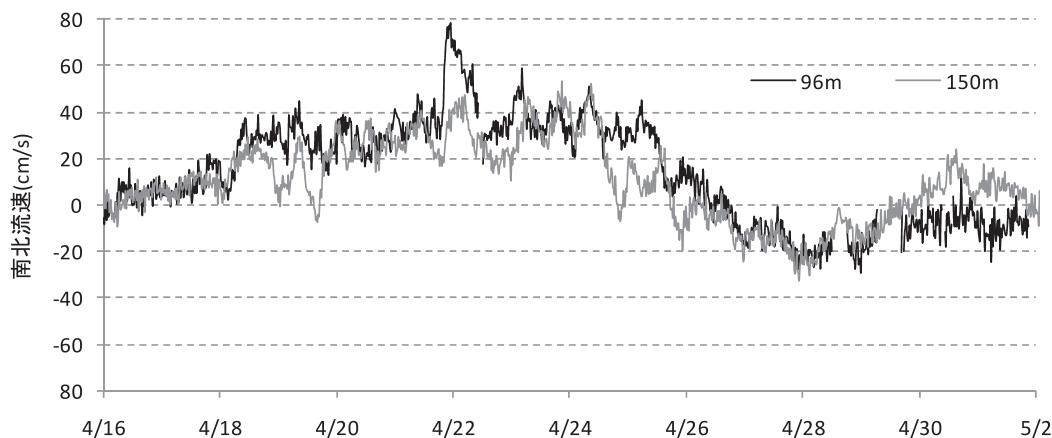


図-7 湾口係留系での南北方向流速（北方流速为正）

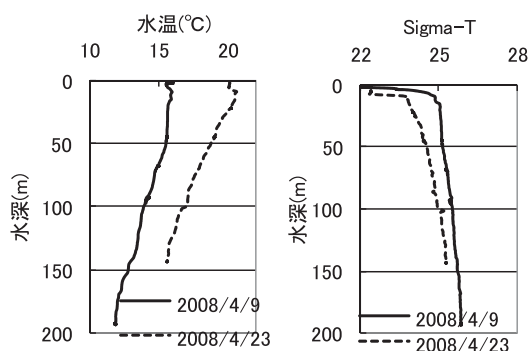


図-8 湾奥でのCTD観測結果の鉛直分布

の4月23日の観測では各指標とも濃度が低下し100mおよび150m層で年間の最低値となった。黒潮系暖水は低栄養塩で知られており、150mまでの水塊が影響を受けていたことがわかる。しかし、その直後の5月7日の観測では、すぐに回復し、特に100および150m層では過去の平均値と比べても高濃度となっている。

表-1に急潮前後の植物プランクトン観測結果を示す。この海域では植物プランクトンの出現はほぼ50m以浅に限られる。4月9日には6種程の出現が確認され、表層付近にピークが見られる。それに対し4月23日の観測では出現種数が2種と少なくなり、表層付近に集中して見られる。しかし、5月7日には種数は3種であるが50m層まで出現層が回復している。

(5) 急潮発生時の流れの特徴

湾奥係留系および湾口のADCP観測結果より、17日に駿河湾に進入した急潮は表層付近に流速のピークを持ち流入暖水の厚さは60m程度であったと判断できる。それ以降も2、3日の周期で繰り返し暖水塊は進入し、表層水温の上昇に伴い、急潮が進入深度を深めていったため、

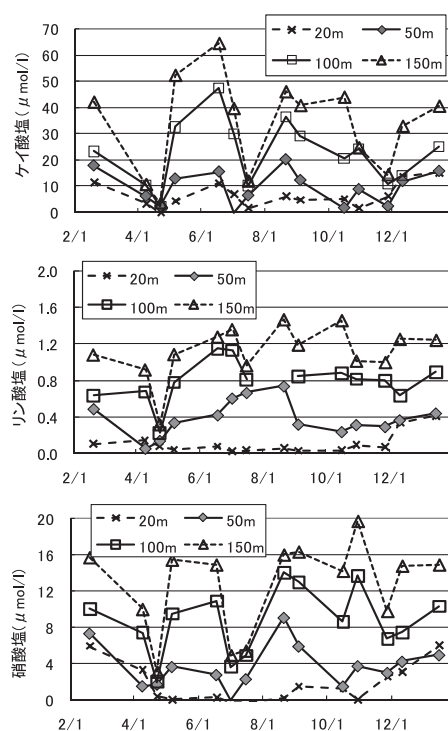


図-9 湾奥での栄養塩観測結果

22日に湾口96m層で強い流れが観測されたのではないかと考えられる。また、湾内表層水温が上昇し成層化が進むと、次第に内部波が発達し26日以降日周もしくは半日周期の流れを強化し南北流速成分が強まったものと見られる。係留系の観測地点である定置網は大陸棚縁辺の少し張り出した部分に設置しており、湧昇流の影響を受けやすく、夏季に内部波が発生すると半日周期の水温変動が底層付近で確認される。60m水温も26日以降半日程度

表-1 湾奥での植物プランクトン観測結果 (cell/ml)

St.1 2008/4/9

	0m	10m	20m	30m	50m
<i>Skeletonema costatum</i>	99	18	0	11	0
<i>Chaetoceros affine</i>	0	0	0	12	0
<i>Chaetoceros curvisetum</i>	176	84	32	35	8
<i>Rezosolenia setigera</i>	2	2			
<i>Eucampia zoodiacus</i>	35	8	0	8	0
<i>Nitzschia pungens</i>	8				

St.1 2008/4/23

	0m	10m	20m	30m	50m
<i>Chaetoceros curvisetum</i>	252	35	0	0	0
<i>Nitzschia pungens</i>	4	0	0	0	0

St.1 2008/5/7

	0m	10m	20m	30m	50m
<i>Leptocylindras danicus</i>	53	6	12	15	0
<i>Chaetoceros curvisetum</i>	63	24	13	54	16
<i>Nitzschia pungens</i>	0	0	9	12	0

の周期で水温変化が生じつつ次第に急潮進入以前の水温まで低下しており、内部波の存在が支持される。底層でのこの水温の振動は急潮進入以前の水温が回復した30日まで続くが、それ以降はしだいに中層水温が振動しはじめる。以上より、内部波は界面水深を変えながら1週間程度継続したことが分かる。

(6) 急潮発生前後の水質・生物の応答

急潮に伴い暖水が波及すると沿岸上層の海水交換が促進され、黒潮由来の清澄な海水が大量に供給される。本観測結果においても直後の観測では各栄養塩濃度の低下が確認され、150m層までその影響が及んでいた。しかし、その2週間後の観測では既に回復し、高濃度となっている。20m以深の栄養塩の供給源が下層からで有ること、また、流れの観測結果から急潮進入後内部波が発生していることから併せて考えて、内部波に伴う上下水の混合により栄養塩が下層より供給された可能性が指摘される。内部波発生後60m水温は急潮進入以前の水温へと5日で回復している。栄養塩に関してもおそらく数日で回復したものと推察される。また、植物プランクトンに関しても急潮直後は表層にわずかの種が出現するのみとなるが、栄養塩と同様に回復しており、急潮の侵入の効果が長期には継続していない。急潮の進入により水質・生物の構造が大きく変化するものの、成層化により励起される内部波により短期間しか継続しない事が伺われる。

小泉 (2004) は宇和海の下波湾における急潮前後の観測結果から、急潮直後は栄養塩濃度やクロロフィル濃度

が低下するもののその後に起きる湾外起源の冷水の進入 (底入り潮) により栄養塩類が供給され植物プランクトンが再び増殖する事を示している。本研究でも湾の規模や栄養塩供給の機構が異なるものの、同様の結果が導かれた。

4. おわりに

- (1) 急潮後に成層構造が変化し、長周期の内部波が励起され1週間にわたって継続することが確認された。
- (2) 急潮直後には栄養塩濃度が低下するものの、その後発生した内部波に伴う上下水の混合により、栄養塩が下層より供給され高濃度となっている可能性が指摘された。
- (3) 駿河湾に進入する暖水波及の周期は20日程度が一般的であるが、今回の観測では周期3日程度とより短周期の進入を確認した。
- (4) 急潮が短周期で連続発生した場合、成層構造の変化により進入深度が大きくなり、また、すでに上昇している表面水温には現れにくくなるため、春季といえども表面水温のみにより急潮を判断することはできない。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究 (B) (代表者: 杉本隆成, 課題番号: 18380119) の補助を受けて行った。本研究を行うにあたり西倉沢漁協の皆様から多大なる協力をいただいた。また、三井共同建設コンサルタンツ(株)の鶴谷広一博士より観測機器を提供および貴重なアドバイスをいただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 石戸谷博範・辻 俊宏・丸山克彦・井野慎吾・瀬戸久武・上野陽一郎 (2008) : 大型二段箱式落網の側張りに作用する張力について, 平成20年度日本水産工学会学術講演会, pp. 124-125.
- 稲葉栄生・勝間田高明 (2003) : 水温急上昇で捉えた駿河湾の急潮, 「海-自然と文化」東海大学紀要海洋学部, 第1巻第1号, pp. 71-77.
- 勝間田高明 (2004) : 駿河湾への外洋水の流入過程, 東海大学大学院博士論文, p. 110.
- 小泉喜嗣 (2004) : 急潮の発生と植物プランクトンの増殖, 海流と生物資源 (杉本隆成編), 成山堂書店, pp. 35-46.
- 武岡英隆・永田豊 (1992) : シンポジウム「急潮-沿岸と外用の相互作用-」のまとめ, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 30, pp. 1-3.
- 萩原直樹・澤本彰三・仁木将人・勝間田高明・杉本隆成 (2009) : 駿河湾奥部の栄養塩類・プランクトンの動態と流況変動との関わり, 月刊海洋, Vol. 41, No. 3, pp. 130-138.
- 日向博文・宮野 仁・柳 哲雄・石丸 隆・粕谷智之・川村 宏 (2003) : 大島西水道からの黒潮系暖水流入時における相模湾表層循環系の短周期変動特性, 海の研究, 第12巻, pp. 167-183.
- 長谷川雅俊 (2005) : 2002年11月下旬に駿河湾で発生した急潮現象, 静岡県水産試験場研究報告, 第40号, pp. 1-10.