

夏季鹿島灘浅海域における内部ケルビン波 による南下流の強化について

浅木 雄登¹・内山 雄介²・渡辺 萌斗¹・佐野 朝昭³・橋本 孝治⁴・
伴野 雅之⁵・増永 英治⁶・山崎 秀勝⁷

¹学生会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ (株) アルファ水工コンサルタンツ 北海道本社 (〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目)

⁴正会員 (株) アルファ水工コンサルタンツ 東京本社 (〒104-0045 東京都中央区築地3-9-9)

⁵正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究
グループ グループ長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 茨城大学講師 地球・地域環境共創機構 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

⁷ 東京海洋大学名誉教授 大学院海洋科学技術研究科 (〒108-0075 東京都港区港南4-5-7)

開放性沿岸域の流動は、波浪・風・潮汐・内部波・外洋からの海流や中規模渦の波及など様々な外力の影響を受ける。本研究では、典型的な開放性海岸である鹿島灘に位置する波崎海洋研究施設観測栈橋において2023年夏季に約2週間の現地観測を行った。観測期間中、寒冷前線を伴う低気圧通過後に風向が変わり、その後数日間岸に沿う南下流が強まる現象が確認された。この南下流は日周変動しており、その周波数特性、JCOPE2M再解析データから見積もられる位相速度とロスビーの内部変形半径などから、陸棚斜面上で励起された日周期内部潮汐が沿岸に捕捉され、岸を右手に見て沿岸方向に進行する近慣性内部ケルビン波に発達したものと考察された。この内部ケルビン波は、静穏期の砕波帯周辺の流動や環境に対して強い影響を与えていることが示唆された。

Key Words : diurnal internal Kelvin wave, open coast, Kashima-nada Sea, field measurement

1. はじめに

鹿島灘に代表される開放性沿岸域の流動は、波浪・風・潮汐・内部波、さらには外洋からの海流や中規模渦の波及など様々な外力の影響を受けて形成される。これらの外力の正確な把握は、港湾・海岸整備、沿岸災害対策、漁業資源管理、生態・環境保全などの観点から工学的に極めて重要な課題である。また、鹿島灘から銚子沖にかけての海域では大規模洋上風力発電事業が計画されており¹⁾、エネルギー政策上の重要性も増している。

本研究では、鹿島灘に面した典型的な開放性海岸である茨城県神栖市須田浜地先に位置する波崎海洋研究施設(HORS)観測栈橋で行った短期集中観測の結果を紹介する(図-1)。夏季の鹿島灘浅海域では、日スケールの水温変動・流速変動に関して日周期の内部波の影響が大きく²⁾、岸沖方向だけでなく内部ケルビン波として沿岸方向にも伝播する可能性が報告されている³⁾。また、半

日周期の内部潮汐波の岸沖方向伝播がボア状のフロントとして観測される⁴⁾など、本海域の環境は内部波の影響を強く受けていることが示唆されている。

北極海⁵⁾やクリル海峡⁶⁾などの高緯度域では、沿岸捕捉波である近慣性内部ケルビン波がしばしば発達することが知られている。より低緯度の駿河湾や遠州灘では、慣性周期よりも長い周期の内部ケルビン波が観測され、その起源は陸棚が比較的広い鹿島灘から房総半島東岸にかけての海域で励起された陸棚波⁷⁾であると考えられている。本海域での慣性周期は約20.5時間で日周期24時間より短いため、日周期の内部波は沿岸に捕捉されてケルビン波となることが予想されるが、八木ら³⁾の観測を除くと近慣性内部ケルビン波を直接的に捉えた事例はない。

一方、本研究での現地観測期間中、寒冷前線を伴う低気圧通過後に風向が変わり、その後数日間岸に沿う南下流が強化される現象が確認された。そこで本研究では、この強い南下流が内部ケルビン波である可能性が高いこ

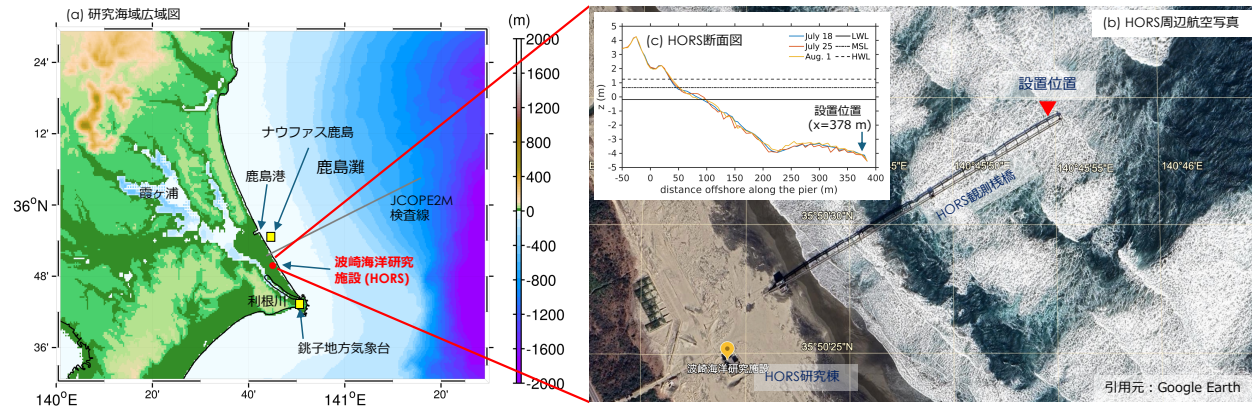


図-1 現地観測実施海域。(a) 研究海域広域図, ●: 波崎海洋研究施設 (HORS), 黄色□: 鹿島港ナウファス沖波海象計設置位置 (水深 23.4m) および銚子地方気象台の位置, グレー実線: 図-6 で用いる JCOPE2M 岸沖断面検査線。(b) HORS 周辺の拡大図 (航空写真), ▼: 観測機器類設置位置 ($x=378$ m)。(c) HORS 断面地形。ただし, 2023 年 7 月 18 日, 7 月 25 日, 8 月 1 日の実測地形。 z 座標は波崎港工事基準面 DL から鉛直上向きを正にとった。黒線: 朔望平均干潮位 ($LLW=DL-0.192$ m, 実線), 平均水面 ($MSL=DL+0.651$ m, 破線), 朔望平均満潮位 ($HWL=DL+1.252$ m, 点線) である。

表-1 HORS 先端における観測機器の型番と観測モード

観測項目	流速・流向	Chl-a・濁度	水温・塩分
計測機器	AEM-USB	ACLW2-USB	DEFI2-CT
シリアル番号 (表層・底層)	0990・1014	0702・0716	OBE7029・ OBE7030
計測間隔	1 s	1 s	60 s
回数	60 回	30 回	1 回
バースト間隔	600 s	600 s	連続

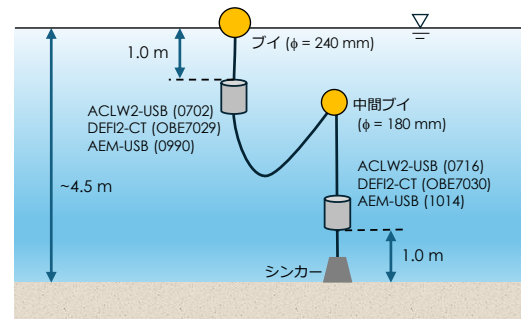


図-2 HORS 棧橋先端における観測機器の設置概要

とを示すとともに, 内部波を含めた鹿島灘浅海域の流動特性に影響する要因を特定し, 内部ケルビン波の発生メカニズムを考察したので, その結果を報告する。

2. 現地観測および解析データの概要

現地観測は2023年7月18日11時40分から2023年8月3日10時00分までの15昼夜連続で実施した。小型メモリー電磁流速計 (AEM-USB, JFEアドバンテック製, 以下同じ), ワイパー式メモリークロロフィル濁度計 (ACLW2-USB), 小型メモリー水温塩分計 (DEFI2-CT) の3種の自記式計測機器を各2機ずつ用いた。これらの機器をHORS棧橋先端付近から海中に垂下し, 表層 (水面下1 m) および底層 (海底上1 m) における水温・塩分・濁度・Chl-a濃度・流速の連続データを取得した (図-2)。計測機器情報やサンプリング間隔などは表-1に示すとおりである。また, 同期間のナウファス鹿島における波浪 (有義波高・有義波周期) および潮位データ, 銚子地方気象台における気圧, 気温, 風向風速などの気象データ, 気象庁GPV-MSMによる風向風速と海面更正気圧の解析値, 海洋研究開発機構JCOPE2Mによる3次元海洋再解析データ (温位, 密度) を併せて取得し, 以下の解析に供した。

3. 観測結果

(1) 波崎海岸の流動と各環境因子の変動特性

図-3は, HORSでの連続観測結果と, ナウファス鹿島の波浪データおよび銚子気象台気象データの2023年7月19日から2023年8月2日までのデータを整理した結果を示している。上から順に, 水温, 塩分, Chl-a濃度, 濁度, 表層流速ベクトル, 底層流速ベクトル, 気温, 海面気圧, 風速ベクトル, 潮位, 有義波高, 有義波周期である。HORSデータについては表層 (赤) と底層 (青) の結果を色別で示している。塩分に関しては計測器の回収時に生物付着が見られたため, データの信頼性が低いと考え, ここでは直接取り扱わず, 参考値として示した。

まず水温に着目すると, 7月19日から7月21日と7月24日から8月2日にかけて明確な水温成層が見られる。この期間のChl-a濃度と濁度にも成層化していた状況が現れている。一方で, 7月21日から7月24日までの期間は水温, Chl-a濃度, 濁度がいずれも鉛直方向に一様化していたことがわかる。また, 水温は観測期前半が後半に比べて高いのに対して, 気温は水温と比較して長期的には概ね

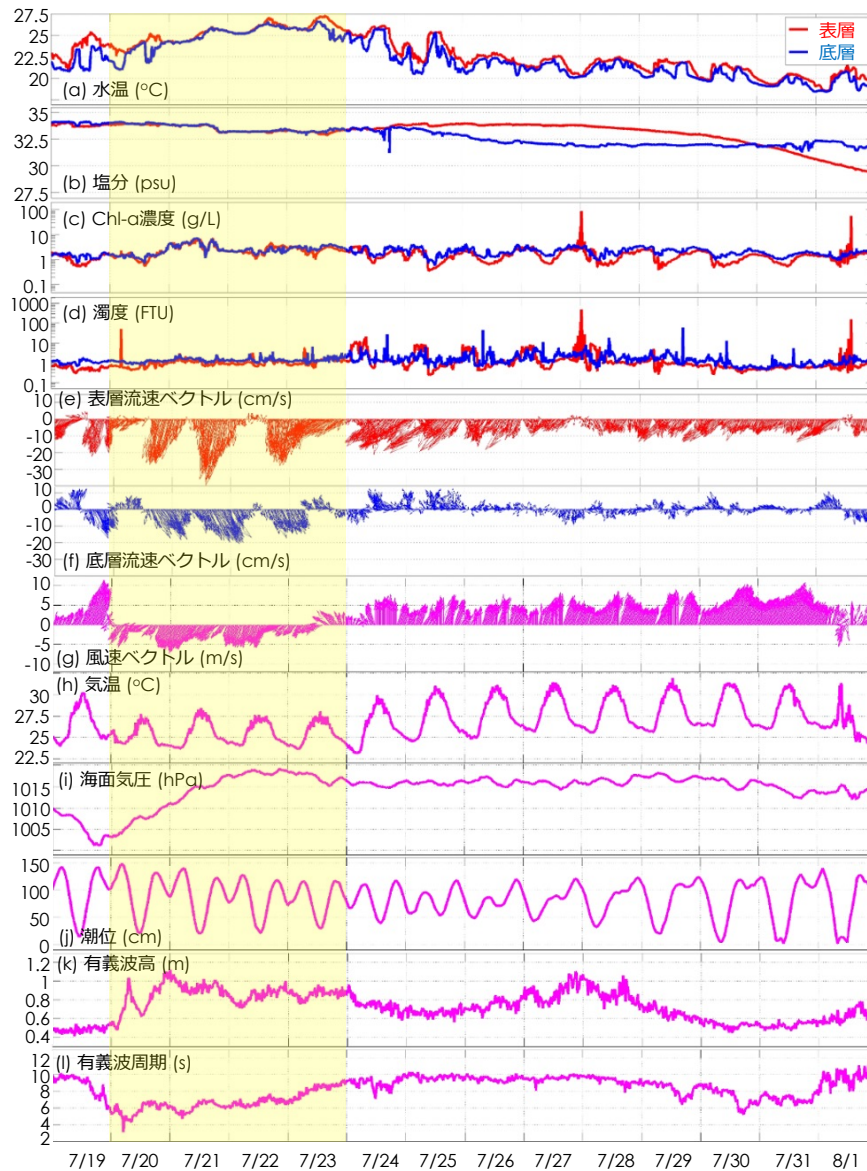


図-3 HORS観測栈橋先端・鹿島港・銚子地方気象台における観測データ時系列図（2023年7月19日～8月2日）。赤：HORS表層観測値，青：同じく底層（図-2，表-1 参照），ピンク：ナウファス鹿島および銚子地方気象台における観測値。南下流強化イベント期間（7月20日～23日）を黄色ハッチで示した。

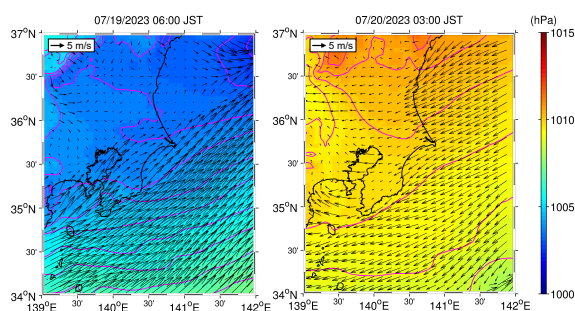


図-4 気象庁 GPV-MSM 解析値による7月19日午前6時，7月20日午前3時の海面気圧（カラー，ピンクコンター：0.5hPa 間隔）および海上風速分布（ベクトル）

一定であるが，7月20日に急激に低下し，その後7月24日までは他の期間に比べて平均的に約2.5度低く，また期

間には強い日周期変動が現れていることが分かる。一方，風速ベクトルに着目すると，7月20日から7月23日の期間では北風が吹いているが，その他の期間では弱い南風が卓越している。同じ期間の流向・流速に着目すると，他の期間よりも南向き流速が強化されている。この南下流速は最大で0.41 m/s（表層流速バースト平均値：10分おきに1秒間隔で取得した60個のデータの平均値）に達していたが，これは内部ケルビン波を観測した八木ら⁴⁾の測定値である0.17 m/sと比較して2.4倍以上の値であり，かなり強い流速値であったといえる。

7月20日～23日に見られる気象海象の大きな変化に関連して，海面気圧の時系列（図-3 (i)），MSM海面更正気圧・海上風速分布（図-4）などから，7月19日に前線に伴う低気圧が観測地点を通過し，風向が反転したこと

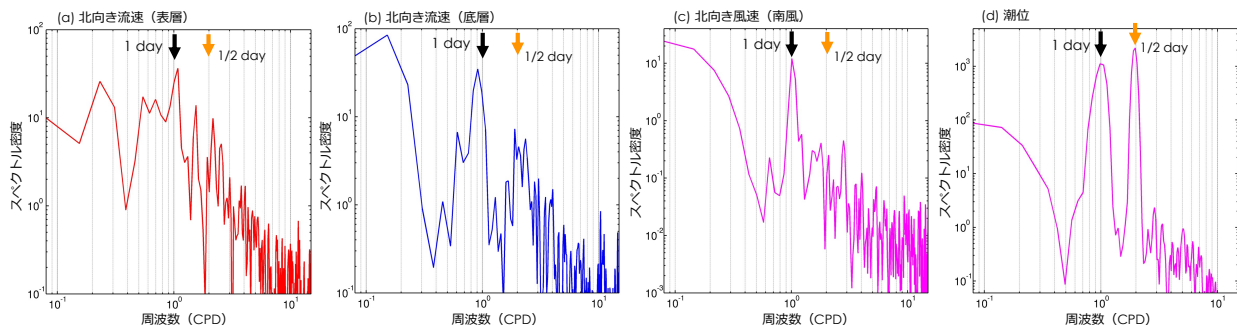


図-5 パワースペクトル密度. (a)表層・(b)底層における北向き流速, (c)北向き風速, (d)潮位. 横軸はCPD (cycles per day)

が確認された. ここでは図示しないが, 各物理量の時間変化や天気図などから, 7月24日以降は太平洋側に高気圧が張り出し, 典型的な夏型の気圧配置であったことを確認している. また, 観測期間中の天候は連日の晴天であった. さらに, 塩分データ (図-3 (b)) にも目立った塩分低下は現れておらず, 利根川からの河川出水の影響はほとんどなかったと推定される. したがって, 7月20日～23日の期間では, 7月19日の前線通過の影響により南風から北風が変わり, 同時に気温が低下したと考えられる. その一方で, 有義波高と周期 (図-3 (k), (l)) にはこの低気圧通過の影響はそれほど強くは現れておらず, 観測期間全体を通して波高は0.6～1.1 m, 周期は8秒以下と比較的穏やかであったことがわかる. したがって, 7月20日～23日の前線通過期に見られる南向き流速の急激な強化が生じた原因としては, 海浜流の影響というよりは, 風, 内部潮汐・内部波などの影響が強かったものと考えられる. 次節以降では, スペクトル解析結果を交えながらさらに詳細に検討する.

(2) スペクトル解析

得られた時系列データに対して, 高速フーリエ変換 (FFT) およびハミング窓関数を用いたウェルチ法に基づくスペクトル推定を行った. 図-5(a), (b)はそれぞれ表層および底層に設置した流速計で計測された北向き流速のパワースペクトル密度を示している. 横軸は周波数 (cycles per day) である. 対応する外力として, 図-5(c), (d)に北向き風速 (南風) および潮位のパワースペクトル密度を示す. 北向き流速には表層・底層ともにおおよそ日周期にピークが現れている. ただし, 卓越する日周期変動に対してデータ長が15日程度とやや短いため, FFTによるスペクトル推定値ではピーク位置が24時間からわずかにずれている点に注意されたい. また, 日周期のピークは底層の方がよりシャープに現れている. 北向き風には流速と同様に日周期にピークが現れており, 潮位には日周期と半日周期の2つのピークが出現している. この海域では, 流速の周期変動を引き起こす要因とし

て, 日周期の内部潮汐の影響が強いことが報告されている^{3,4)}. 潮位のスペクトルでは半日周期のほうが日周期よりもピークが高く, 外力としては半日周期が卓越していることが確認される. しかしながら流速スペクトルには半日周期のピークは明確には現れておらず, 半日周期の潮汐および内部潮汐の直接影響は強くない. したがって, HORS先端における流速変動に対しては, 日周期変動する風や日周期内部潮汐の影響が強い可能性が高い.

なお, 紙面の都合上ここでは示さないが, 水温のスペクトルでも日射の影響による日周期変動が卓越し, Chl-a濃度と濁度のスペクトルにも日周期に強いピークが現れ, しかもその傾向は底層よりも表層で顕著であった. Chl-a濃度は植物プランクトン量に比例するため, 表層で日射の影響を受けたChl-aの局所的な増減によって日周期変動が強く現れたものと考えられた. また, 底層濁度には日周期のピークがほとんど見られず, しかも表層でのパワースペクトル密度が底層のおおよそ100倍になっていたことから, 表層での濁度の周期変動はChl-aの周期変動の影響を強く受けていると考えられた. 一方で, 底層濁度は明らかな周期変動はしておらず (図-3 (d)), かつ観測期間中のHORS断面地形変化も極めて小さかった (図-1 (c)) ことから, 海底からの土砂の再懸濁や浮遊砂輸送の影響はほとんどなかったものと推察された.

4. 考察: 南下流の発生機構

(1) 海浜流の影響

7月20日～23日に生じた南下流の発生機構について検討する. まず, 鹿島灘海岸は開放性海岸であるため, 外洋からの波浪の影響を強く受けるが, 観測期間中の有義波高は0.6 m～1.1 m程度と小さかった (図-3 (k)). ナウファス鹿島の海象計設置水深は24.6 m であるので, 微小振幅長波を仮定し, 浅水変形のみを考慮して波浪変形計算を行うと, HORS先端 (水深約5 m) での波高は0.89 m～1.64 m 程度と見積もられる. 砕波基準に波高水深比＝

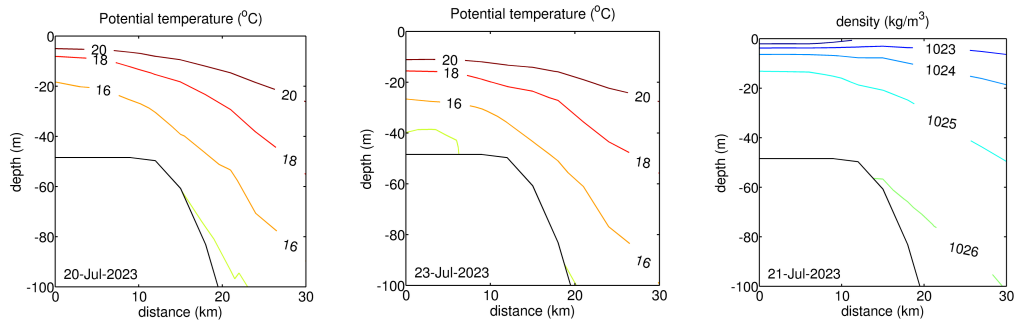


図-6 海洋研究開発機構 JCOPE2M 再解析データによる (左) 7/20 の水温, (中) 7/23 の水温, (右) 7/21 の密度. HORS 延長線 30 km 沖合までの鉛直断面内日平均値の空間分布を示している. 黒線は JCOPE2M の海底面.

0.78 を用いれば, 砕波点は水深 1.1 m ~ 2.1 m 地点であったと推定される. これは図-1 (b) の沖向き座標 $x = 130 \sim 170$ m 地点に対応し, 観測位置 ($x = 378$ m) からは 200 m 以上も岸側であり, 流速観測地点は砕波帯よりもかなり沖側に位置する状況であったと考えられる. 有義波高と有義波周期の時系列図からは日周変動も弱いことが示されており, 南下流に対する波による海浜流 (沿岸流) の影響は極めて限定的であったと考えられる. 以上の考察から, 鹿島灘の流動特性, 特に観測期間前半に南下流が強くなった主な要因は風と内部波であると予測される.

(2) 海上風・エクマン輸送

連続観測とスペクトル解析の結果から, 鹿島灘における日周変動する流速成分は, 同じく日周変動する風の影響を色濃く受けていると考えられた. 一般に, 海上風によって引き起こされる吹送流については, エクマンの吹送流理論により説明される. まず, 南下流が発達する観測期間前半の北風 (北東から南西向き) の時期は, 風向の右側 90 度方向に発達するエクマン輸送は概ね岸に沿って北西へ向かう流れを駆動することになる. 反対にそれ以外の南風 (南南西から北北東方向) の期間では南下流が卓越するはずである. しかしながら, 観測された流速の方向はこれらの予測の正反対となっており, 風によるエクマン輸送では波崎の流速変動は十分に説明できない. この理由を考えるために, エクマン理論による海面の風応力の影響が及ぶ範囲 (摩擦深度: D_E) を以下の式により求める (例えば, 宇野木⁸⁾).

$$D_E = \sqrt{\frac{2K_v}{|f|}} \quad (1)$$

K_v : 渦動粘性係数 ($0.01 \sim 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$), $f = 2\Omega \sin \phi$: コリオリパラメータである. 地球の自転角速度を $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} [\text{rad/s}]$, 波崎海岸の緯度を $\phi = 35.7$ 度とすれば, $f = 8.48 \times 10^{-5}$ となり, 慣性周期 (f^{-1}) は約 20.5 時間である. 以上の値から, $D_E = 50 \sim 150 \text{ m}$ と見積

もられ, 連続観測地点の水深である約 5 m のほうが圧倒的に浅い. したがって, 観測地点の水深が浅いため, エクマン螺旋は十分に発達することができず, 風下方向の右 90 度方向にエクマン輸送が発達できなかったものと考えられる.

以上の考察から, 風による吹送流はコリオリ力の影響を直接的には受けて, 風の吹送方向に沿って形成されたことになる. 図-3 の風速時系列図から, 南下流強化イベント期間 (7/20 ~ 7/23) には沖から岸に向かう風が吹いていて, それ以外の期間では岸を左手に見て進む北向きの風が吹いていることがわかる. したがって, 南下流強化イベント期間においては岸に向かう風によって表層水が岸へ押しつけられて沿岸沈降が発生している可能性が考えられる. 沿岸沈降に伴い, 岸近傍では表層水が底層へ供給され, 沿岸の水温が上昇するとともに表層と底層の水温差が小さくなる (図-3 (a)). このとき, 表層流速では西向き (岸向き) 成分が強く, 底層では東向き (沖向き) 成分が強いことから (図-3 (e), (f)), 沿岸沈降に伴う表層と底層での反対向きの流れが発達していたことが裏付けられる. 図-6 左・中は HORS 延長線断面における日平均水温分布を示しているが, 北風による沿岸沈降が強化される 7/20 から 7/23 にかけて, 表層水の集積に伴って高温層が下層へと拡大し, 沿岸水温が上昇していることが確認できる.

なお, 砕波帯内では砕波に伴う運動量輸送により表層で岸向き, 底層で沖向き戻り流れという沿岸沈降モードと同じ鉛直循環流⁹⁾が形成されるが, 4. (1) で検討したように, 観測地点は砕波帯外縁よりもかなり沖側になるため, 3次元海浜流の効果は無視できると考えられる.

(3) 内部ケルビン波

南下流強化イベント期間 (7/20 ~ 7/23) での流速変動は海上風の影響を強く受けたものと推察されたが, エクマン理論では南下流の発達をうまく説明することができなかった. 図-3 (e), (f), 図-5 (a), (b) から明らかなように, この期間の流速には極めて明確な日周変動が見られるが,

一方で風の日周変動はそれほど強くはない。内部潮汐と風の複合効果でこの周期的な南下流が発達したとするならば、この南下流の正体は内部波であった可能性が強く推察される。いま、流速は慣性周期（20.5時間）より少し長い日周期で変動しているため、外洋や閉鎖性水域で発達する回転・散逸波モードの内部ポアンカレ波（慣性周期より短い）や、地形性 β 効果による陸棚波（慣性周期よりかなり長い）ではなく、進行波モードの近慣性内部ケルビン波（慣性周期よりわずかに長い）を捉えたものと推察される。内部ケルビン波は沿岸に捕捉され、岸を右手に見て伝播する進行波であり、7/20～7/23の南下流の方向と一致する。また、半日周潮による内部波は、周期が慣性周期よりかなり短いため、その大部分はポアンカレ波として沖合へ散逸してしまったと考えられる。

ここで、成層した海域の内部ケルビン波の波速 c は次式で求められる⁸⁾。

$$c = \sqrt{g' \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \quad (2); \quad g' = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g \quad (3)$$

ただし単純な2層海域を仮定しており、 h_1, h_2 は上層および下層の深さ、 ρ_1, ρ_2 は上層および下層の密度、 g' は有効重力加速度である。HORS延長線断面の水温・密度分布（図-6）を見ると、7/20・21における躍層は表層5～20 m程度に形成されているため、上層： $h_1 = 10$ m、 $\rho_1 = 1023$ kg/m³、下層： $h_2 = 50$ m、 $\rho_2 = 1025$ kg/m³とおくと、波速 c は約0.40 m/sと見積もられ、南下流強化イベント期間の流速の最大値（0.41 m/s）に極めて近い値となる。このとき、ロスビーの内部変形半径 λ_i は、

$$\lambda_i = \frac{c}{f} \quad (4)$$

より、約4.7 kmと見積もられる。図-6からもわかるように、夏季の鹿島灘の沖合海域では密度成層が形成されており、岸から15～20 kmの陸棚斜面と密度界面との相互作用によって観測海域の北側で励起された内部潮汐波が岸に捕捉され、このうち日周期成分が海域の慣性周期と共振することで内部ケルビン波として発達し、岸に沿って低緯度方向へと伝播して南下流を引き起こしたと考えられる。また、流速変動には半日周期成分がほとんど見られない（図-5(a), (b)）ことから、この内部波は日周変動する風応力と日周潮の影響を複合的に受けて振動したものと考えられる。この近慣性内部ケルビン波はコリオリ力によって強く沿岸に捕捉され、岸から約4.7 km（内部変形半径）の範囲において強化されたと考察される。

南下流発生時の流速を見ると（図-3 (e), (f)）、表層と底層での流速は同位相で変動し、概ね順圧的な流れとなっていることが確認される。図-3 (e), (f)に見られる上下

の流向差は、順圧的な南下流に4. (2) で考察した沿岸沈降による岸沖断面内での鉛直循環流が重畳したものである。一般に内部ケルビン波は上下層で逆位相となる傾圧モードになるが、今回のような近慣性波の場合、特に低次モードの内部波では岸付近で順圧流成分が卓越することが知られており¹⁰⁾、力学的な矛盾はない。

以上の解析結果および考察から、2023年7月～8月の鹿島灘は、好天のため波浪による海浜流の影響は強くなく、むしろ日周変動する風、沖合での密度成層とそれに伴う日周期内部潮汐、コリオリ力の複合影響を受けて発達する沿岸捕捉波である近慣性内部ケルビン波が流動構造に強く寄与していた可能性が高いものと結論付けられる。

5. おわりに

本研究では、典型的な開放性海岸である鹿島灘に位置する波崎海洋研究施設観測栈橋において2023年夏季に15昼夜の連続現地観測を行い、成層期である夏季の静穏期における浅海域の流動構造を解析した。観測期間中、寒冷前線を伴う低気圧通過後に風向が変わり、その後の数日間にわたって岸に沿う南下流が強化される現象が確認された。この南下流は日周変動しており、その周波数特性、JCOPE2M再解析データから見積もられる位相速度とロスビーの内部変形半径などから、陸棚斜面上で励起された日周期内部潮汐が沿岸に捕捉され、日周変動する風応力の影響を受けて海域の慣性周期と共振しながら、岸を右手に見て沿岸方向に進行する近慣性内部ケルビン波に発達し、観測海域のさらに北側から伝播してきたものと推察された。

観測地点の水深は高々5 m程度と極めて浅いながらも、静穏時には温度・Chl-a（およびその影響を強く受けた濁度）に成層構造が形成されており、南下流などの擾乱によって成層が容易に崩壊する様子も確認された。期間中の波浪は小さく、そのため観測地点は碎波帯外に位置しており、また好天のため降雨に伴う河川出水もなく、海浜流、河川密度流などの影響は極めて限定的であった。その一方で、内部ケルビン波の波速は、流速の実測値と一致する約0.40 m/sと見積もられ、これは過去の観測事例⁹⁾と比較してもかなり大きな値であった。したがって、静穏期の碎波帯周辺の流動構造、ひいてはその周辺環境に対して、近慣性内部ケルビン波は強い影響を与えていることが示唆された。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究A（24H00337）の助成を受けた。

REFERENCES

- 1) 小松崎 衛：日本発大規模洋上風力発電プロジェクト〈メガサイト鹿島〉始動，日本風力エネルギー学会誌，Vol.40, No.1, pp.41–44, 2016. [Komatsuzaki, M.: Japan Launches Major Offshore Wind Power Project: “Mega Site Kashima”, *Wind Energy*, Vol.40, No.1, pp.41–44, 2016.]
- 2) 八木 宏，日向博文，足立久美子，日向野純也，灘岡和夫：鹿島灘海岸域における日スケールの水温変動と物質輸送特性，土木学会論文集，第 642 巻，pp. 87–98, 2000. [Yagi, H., Hinata, H., Adachi, K., Higano, J. and Nadaoka, K.: Diurnal variation of nearshore water temperature and cross-shore transport process at the Kashima Coast, *J. JSCE*, Vol. 642, pp. 87–98, 2000.]
- 3) 八木 宏，日向博文，内山雄介，灘岡和夫：熱変動特性から見た夏季鹿島灘沿岸域における海水流動特性の解明，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 396–400, 1998. [Yagi, H., Hinata, H., Uchiyama, Y. and Nadaoka, K.: Investigation of coastal hydrodynamics off Kashima-nada in summer based on thermal variability, *Proc. Coastal Eng., JSCE*, Vol. 46, pp. 396–400, 1998.]
- 4) 行川 修平，武若 聡：夏季の鹿島灘浅海域で観測された水温変動とフロントの伝播に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 70, No. 2, pp. I_441–I_445, 2014. [Yukikawa, S. and Takewaka, S.: Observation of coastal fronts in shallow waters of Kashima coast in summer season, *J. JSCE Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 70, No. 2, pp. I_441–I_445, 2014.]
- 5) Weber, J.E.H. and Isachsen, P.E.: Energy transfer from sub-inertial Kelvin waves to continental shelf waves at a transverse bottom escarpment, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 258, 104985, 9 pp., 2023.
- 6) Tanaka, Y., Hibiya, T., Niwa, Y. and Iwamae, N.: Numerical study of K_1 internal tides in the Kuril straits, *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, C09016, 13 pp., 2010.
- 7) Kitade, Y. and Matsuyama, M.: Coastal-trapped waves with several-day period caused by wind along the southeast coast of Honshu, Japan, *J. Oceanogr.*, Vol. 56, pp. 727–744, 2000.
- 8) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，672 pp., 1993. [Unoki, S.: *Coastal physical oceanography*, Tokai University Press, 672 pp., 1993.]
- 9) Uchiyama, Y., McWilliams, J.C. and Shchepetkin, A.F.: Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex force formalism: Application to the surf zone, *Ocean Modell.*, Vol. 34:1-2, pp.16-35, 2010..
- 10) Brink, K.H.: Island-trapped waves, with application to observations off Bermuda, *Dyn. Atmos. Oceans*, Vol. 29, pp. 93–118, 1999.

(Received March 17, 2025)

(Accepted July 22, 2025)

ENHANCEMENT OF SOUTHWARD CURRENTS BY INTERNAL KELVIN WAVES IN THE SHALLOW-WATER REGION OF THE KASHIMA-NADA SEA IN SUMMER

Yuto ASAKI, Yusuke UCHIYAMA, Moeto WATANABE, Tomoaki SANO, Koji HASHIMOTO, Masayuki BANNO, Eiji MASUNAGA and Hidekatsu YAMAZAKI

Hydrodynamics in highly open coastal areas is influenced by various forcing factors, including waves, wind, tides, internal waves, offshore currents, among others. This study aims to assess the hydrodynamic processes and underlying mechanisms through a 15-day field observation conducted in the summer of 2023 at the tip of the Hazaki Oceanographical Research Station (HORS) at Kashima-nada Coast, Japan. During the observation period, a shift in wind direction occurred following the passage of a low-pressure system accompanied by a cold front, leading to a southward coastal current that persisted for several days with pronounced diurnal variability. Based on its spectral characteristics, phase velocity and the internal Rossby deformation radius estimated from the JCOPE2M reanalysis data, we speculated that diurnally forced internal tides generated along the continental shelf slope were amplified near the coast and evolved into near-inertial internal Kelvin waves propagating alongshore with the coastline to their right. These internal Kelvin waves are likely to exert a significant influence on nearshore circulation and resultant marine environment, even within the surf zone during calm periods.