

備讃瀬戸航路における深浅測量と潮流観測に基づいた サンドウェーブの解析

中田正人*・伊福 誠**・三野真治***

備讃瀬戸におけるイノサキノツガイの航路保全区域では、1981～1983年に維持浚渫が実施されたが、サンドウェーブの形成・発達により航路埋没が生じ、計画水深の維持が困難になり2001年より維持浚渫工事を行っている。本研究では、前報(2002)以降、備讃瀬戸航路で拡大した深浅測量結果に基づいて地形変化に関する詳細な解析を行うとともに、維持浚渫工事の期間中に観測した土砂移動の外力となる潮流の観測結果についても解析し、土砂移動とサンドウェーブの形成・移動状況を把握し、航路の維持管理に関する基礎資料を得ようとしたものである。

1. はじめに

国土交通省四国地方整備局高松港湾・空港整備事務所では、イノサキノツガイ(図-1中の定期深浅測量の領域)において1981～1983年に維持浚渫を実施したが、サンドウェーブの形成・発達により航路埋没が生じ、計画水深の維持が困難になり、2001年より図-2に示す工区分割で浚渫工事が行われている。1984年からの年1回の定期深浅測量とともに2000年からは三ツ子島から牛島間の拡大範囲の定期深浅測量を実施している。また、2000年と2001年の2年間は、上述した領域を含む広域深浅測量が実施されている。本研究で用いた深浅測量結果は、2000年から2004年までの5年間分である。この深浅測量結果を用いて、イノサキノツガイおよびその周辺の地形変化を詳細に調べ、サンドウェーブの動きについて検討した。また、2001年からの浚渫工事において毎年工事用浮標のアンカーにドップラー式多層流速計 ADCP (Sontek 社製; 1 MHz 3台, 500 KHz 1台) を固定し多層潮流観測を実施している。4年間の潮流観測結果に

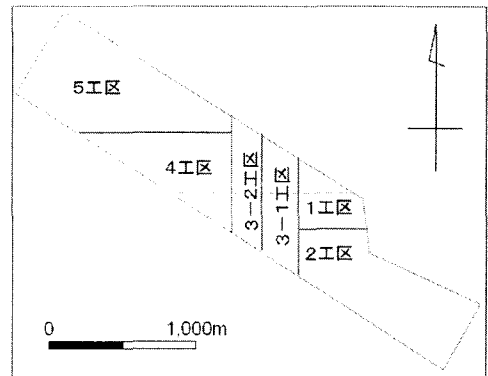


図-2 浚渫工区

対して調和解析を実施し、土砂移動の外力となる潮流についても詳細に検討した。

2. 深浅測量結果

(1) 地形変化

図-3は、保全区域を含む三ツ子島から牛島間の東西3,500 m 南北2,500 m のエリアを10 m メッシュで深浅データを差分し、 ± 2.0 m 間の高さを堆積、浸食部分をグラデーション表示したものである。なお、中央左部分の侵食が顕著な部分は2004年の4工区浚渫工事による掘

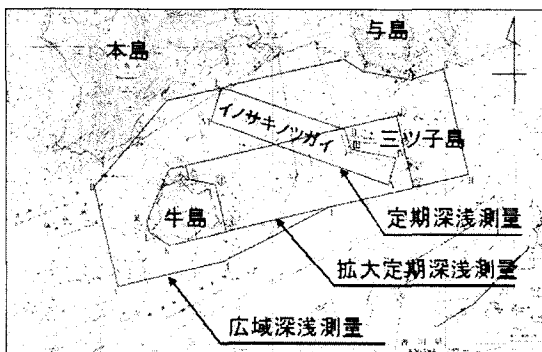


図-1 備讃瀬戸航路の深浅測量範囲

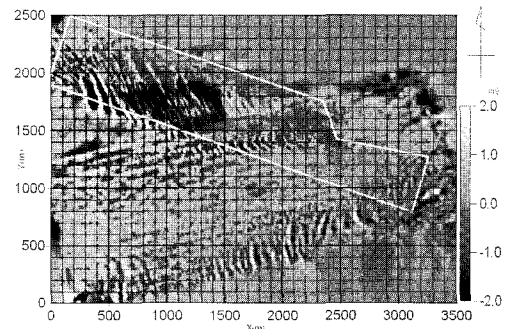


図-3 地形変化 (2004-2003年)

* 正会員 (株)エイトコンサルタント 技術本部
** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科
*** 国土交通省四国地方整備局 高松港湾・空港整備事務所課長

削を示し、浸食堆積が帯状の部分は、サンドウェーブが発達し移動していることを示している。

図-4のLine-Aは、北航路のサンドウェーブに対しほぼ直角に測線を設定し、Line-Bは、三ツ子砂嘴西側

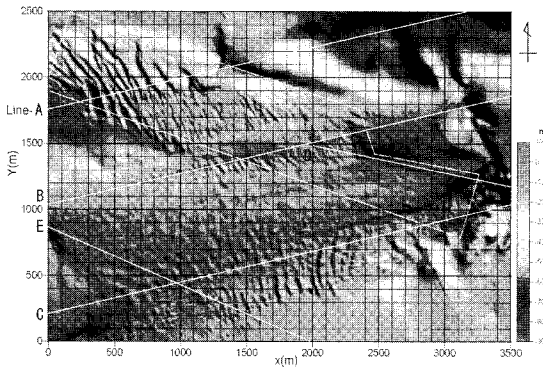


図-4 断面測線

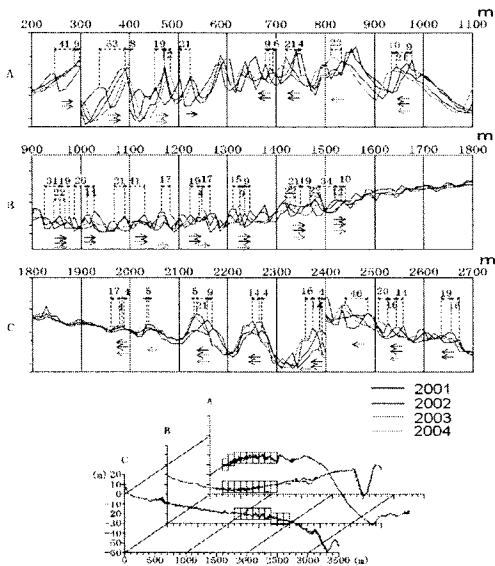


図-5 断面図

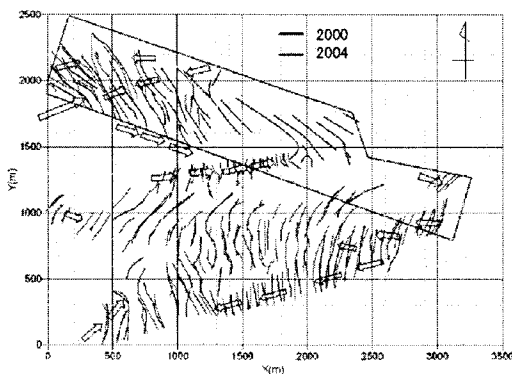


図-6 サンドウェーブ分布図

部を中心に土砂流入がみられる西側部分と三ツ子砂嘴を詳細に示している。また、南航路から牛島東背後の浅海部までをLine-Cとする。

図-6は、サンドウェーブ発生位置について峰の位置および移動ベクトルを表示している。

北航路西の $X=300\sim 500$ m, $Y=1,700\sim 2,000$ m 付近と、土砂流入部の $X=1,000\sim 2,000$ m, $Y=800\sim 900$ m 付近のサンドウェーブ移動が顕著となっている。

イノサキノツガイの北航路部分は、三ツ子砂嘴西側部から西北西に向かってサンドウェーブが放射状に広がり、 $X=600$ m 付近のサンドウェーブの峰を中心に東西方向から取れんし年々波高が大きくなっている。このことは伊福ら(2002)でも確認されている。

三ツ子砂嘴西側部から西側では、 $Y=1,200\sim 1,500$ m の範囲で $X=600$ m から南北100 m の幅で三ツ子砂嘴西側部へ向かうサンドウェーブの移動が確認され、西に10~20 m/年の速度でイノサキノツガイ方向に移動しているのが確認される。

保全区域の南東端の $X=3,000$ m 付近では、南航路への落ち込みが見られ、そこから西南西に向けて牛島背後までサンドウェーブの移動がみられる。 $X=1,000\sim 1,500$ m 付近では、牛島背後方向への偏向が見られ、 $X=600$ m 付近では、牛島南側から東向きの回り込みと合流し堆積が顕著な場所がみられる。

(2) 土砂変動量

保全区域内は、1985年より深浅データがあることより図-2に示す工区別および図-7に示す100 m×100 m 区域別にそれぞれ1985年を基準とした土砂変動量、その領域

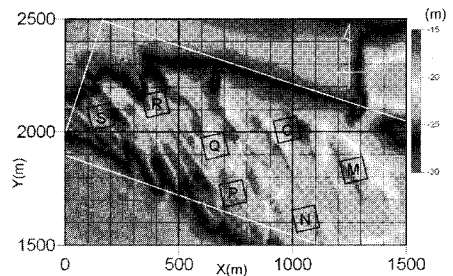


図-7 領域図

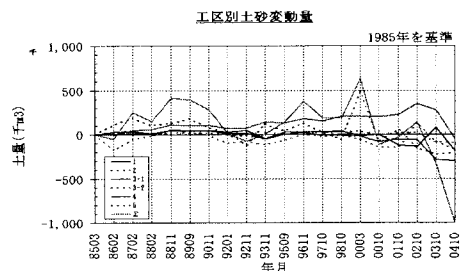


図-8 工区別土砂変動

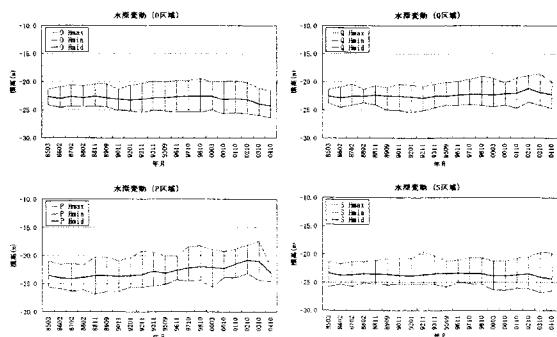


図-9 区域別地形変動

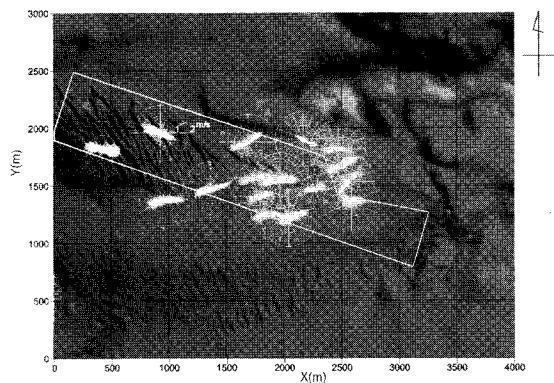


図-10 底層部潮流

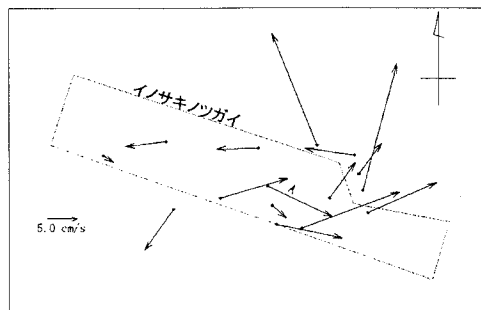


図-11 底層部潮流残差流

内の最浅水深、最深水深、平均水深を時系列で取りまとめ解析を行った。なお、2001年は1工区、2002年は2工区、2003年は3工区、2004年は4工区の浚渫工事が行われそれぞれ浚渫直後のデータである。

図-8に示す1985年を基準とした工区別土砂変動量から、年々増加傾向を示す工区は4工区のみで他の工区は増減を繰り返しほぼ横ばいとなっている。全工区でも、増減を繰り返し1992年に大きく減少したが、さらに増大しほぼ7年の周期を持って土砂が増加している傾向がみられる。

1, 2工区浚渫後の2002年は、4および5工区で土砂増加がみられ平均水深で約0.5 mの増加がみられる。これは、浚渫による海底土砂攪乱に伴い一時的に土砂流入したものではないかと思われる。3工区浚渫後の2003年では、4および5工区でともに減少している。2004年の4工区浚渫後では、5工区において引き続き減少傾向がみられる。

図-9は、図-7中のO, P, QおよびS区域における平均地盤と最浅・最深地盤を示したものである。全区域の中で、P区域は経年的に平均地盤高が増加しており、北航路のサンドウェーブ取れん地点に位置していることから土砂が堆積しているものと思われる。一方、OおよびS区域では最浅水深と最大水深の差が経年的に大きくなっており、土砂移動に伴うサンドウェーブの波高が発達していることがわかる。

3. 潮流観測結果

潮流観測による調和解析結果から、土砂移動に密接に関係する底層部潮流の流向流速分布を図-10、残差流の分布を図-11に示す。

三ツ子島背後に位置する南北連絡航路部は、三ツ子砂嘴の遮蔽による影響から上げ潮時の西向き流れが回り込み弱められることから、東向きに比べ西向きの流速が小さくなっており、三ツ子砂嘴の裾野部に位置するX=4,300 m, Y=2,000 m付近が最も小さく、西に向う

ほど大きくなっている。また、三ツ子砂嘴の稜線から南北に分流し斜面に沿った流向を示している。残差流方向をみてもとくに東向きに卓越していることがわかる。

これらのことより、当領域では東向きの土砂移動が卓越し堆積環境を形成している。また、領域を通過した土砂は、三ツ子砂嘴の稜線から南北に分流し斜面に沿った移動経路を形成していることがわかる。

三ツ子砂嘴北側の潮釜上縁部では、縁に沿った流向を示しており領域Aへの土砂移動経路を形成しているものと考えられる。また、V字形中央付近では縁に沿った方向から45°程度保全区域向きの流向を示しており、領域Aからの土砂流入の要因と考えられる。

一方、三ツ子島背後取れん域への土砂供給経路とみられる北航路の南側は、上げ潮時は西南西、下げ潮時は東北東に方向集中度の高い流れを示し、強い東向きの残差流となっており、土砂供給経路を裏付けるものとなっている。

北航路取れん部では、北北西から南南東のサンドウェーブの尾根方向に対し45°程度反時計回りの西北西から東南東方向の往復流となっている。残差流をみると、西向き残差流が卓越しているが、サンドウェーブ取れん部を境に、西側では東向きに流向が逆転している。

したがって、土砂は東西方向に往復移動しながらサン

ドウェーブを伴ない北航路取れん部に東西両側から取れんしていることが裏付けられた。

4. 土砂循環

小笹 (1975) は、イノサキノツガイの主な土砂供給源は三ツ子砂嘴であると結論付けている。しかしながら、2000年からの拡大深浅測量結果をみると、これまで土砂供給源とされた三ツ子砂嘴の地形変化は軽微であり保全区域への土砂流出はほとんどみられず、三ツ子砂嘴が主な土砂供給源ではないことが確認された。それと同時に、保全区域外を含めた三ツ子砂嘴西側 (南北連絡航路部) を分岐点とした北側の反時計回りの土砂循環と南側の時計回りの広範囲での土砂循環が新たに確認された。

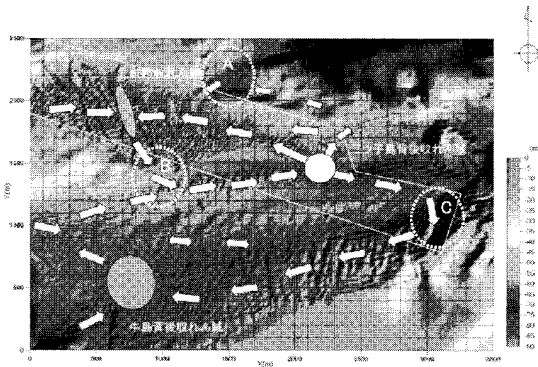


図-12 土砂循環経路図

図-12 に示す三ツ子砂嘴背後取れん域では、三ツ子砂嘴からの土砂流入ではなく保全区域外からの東向き土砂移動により三ツ子砂嘴西側のすその部分 (南北連絡航路部) へ土砂が取れんし、サンドウェーブの比高が増大することがわかった。進入土砂の一部は三ツ子砂嘴から南北に分岐し、北に分岐した土砂は潮釜部に向かいその斜面沿いに領域 A に移動し堆積していると考えられる。一方、南に分岐した土砂は、三ツ子砂嘴南斜面の裾部を東に向かい領域 C で南航路に落ち込んでいる。堆積が進行すると、多くの土砂が北航路に落ち込み、その後サンドウェーブを伴い西へ移動している。サンドウェーブは、北航路取れん部に示す 1 本の稜線を中心に東西から集合し堆積している。

この北航路への落ち込みによる土砂移動は、取れん部が水深の深い北航路に隣接していることから重力勾配により移動量が多くなっている。

領域 A では、その北東に堆積領域が位置し保全区域への土砂流入が確認される。この土砂は、潮釜の上縁に沿った堆積をしており、とくに V 字地形の中央部で卓越している。

北航路取れん部では、三ツ子砂嘴背後取れん域および

領域 A から供給された土砂はサンドウェーブの移動に伴い東西方向から北航路取れん部の尾根に向って取れんしている。

領域 B では、北航路取れん部で発達したサンドウェーブから谷部に落ち込んでいる状態が確認される。この土砂が谷に沿って東の三ツ子砂嘴背後取れん域に移動している。

領域 C では、三ツ子砂嘴背後取れん域から南に分岐した土砂が北航路に落ち込み、北航路の北側斜面に沿ってサンドウェーブを伴い西南西に移動し牛島背後取れん域に達している。

これらのことから、保全区域への流入土砂は三ツ子砂嘴等特定場所からの土砂供給ではなく、おもに三ツ子砂嘴西側を分岐点とした北側の反時計回りの循環土砂によるものと考えられる。

5. サンドウェーブの特性

図-9 中の O, P, Q および S 区域における波高 (最浅水深と最深水深の差) と平均水深をみてみると、サンドウェーブの土砂供給源と考えられている 1 および 2 工区の浚渫後から波高、平均水深ともに減少していることが確認された。このことから、サンドウェーブの波高発達には、土砂供給が密接に関与していると考えられる。

北航路でのサンドウェーブは、潮流の流向に対し稜線方向が直角ではなく反時計回りに傾斜して形成されている。サンドウェーブ取れん部の南側では、本島、牛島間の海峡からの V 字谷地形より潮流が取れんし周辺に比べ流速が最も強く、そのためサンドウェーブの移動速度が大きいものと思われる。また、サンドウェーブの稜線に対し斜め方向からの流速で南向きの成分流速が卓越し、サンドウェーブの斜面沿いに土砂が南向きに移動し、保全区域から流出しているものと思われる。

当海域の土砂の中央粒径は、過去の調査 (運輸省第三港湾建設局, 1997) より北航路で 1.3 mm, 南北連絡航路で 0.5 mm である。この粒径の限界摩擦速度を岩垣公

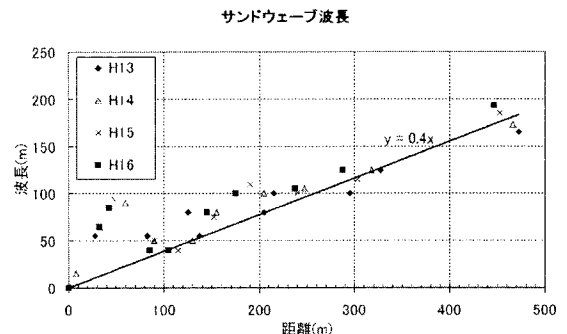


図-13 サンドウェーブ波長

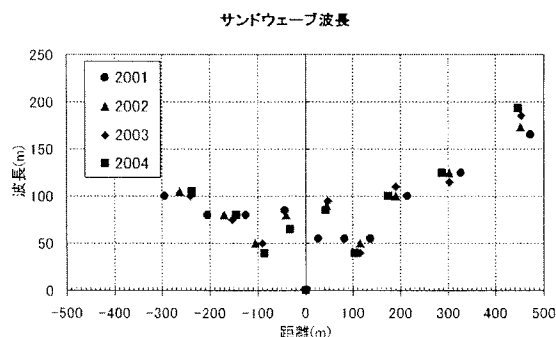


図-14 サンドウェーブの波長と距離の相関

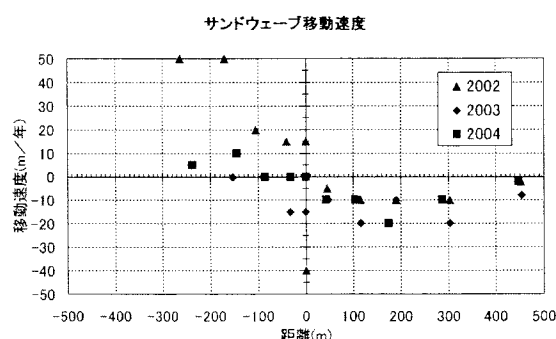


図-15 サンドウェーブの移動速度

式より求めると、北航路で2.76 cm/s、南北連絡航路で1.73 cm/s となる。

掃流力は、海底流速である半日周潮流をみると南北連絡航路の一番遅い箇所でも40 cm/s あることを考慮すると、半日周潮流により常に大量の土砂が移動しているものと考えることができる。

堆積が進行し北航路へ落ち込んだ土砂は、西向きの残差流によりサンドウェーブ収れん部に向う。北航路での残差流は、サンドウェーブ収れん部を中心に東西から流れ込み、近づくほど小さくなっている。

図-13 は、サンドウェーブ収れん部からの距離と波長を示したもので図-14 にその相関を示す。また、図-15 には、サンドウェーブ収れん部からの距離と移動速度を示している。

これらのデータから、北航路でのサンドウェーブは東西から押されるように発達し、波長は距離の約0.4倍で形成されている。収れん部東側では、サンドウェーブ移動速度は、200 m 付近が最も速く20 m/年で、その東西は減速し、収れん部の東側450 m に位置するサンドウェーブが東側の発生境界となっている。収れん部の西側で

は、サンドウェーブ移動速度が領域内で最も大きい場所である50 m/年である。

6. 結 論

- (1) 潮流の調和解析結果から、土砂移動の外力である底層流（海底から3 m 地点）は、三ツ子島砂嘴の西側では半日周潮流は東西方向であり、残差流は東向きで砂嘴に向かい、地形に沿って南北に分岐していることがわかった。
- (2) 北航路においては、半日周潮流の卓越方向は東西方向でやや南北に偏向し、サンドウェーブの収れん位置の東西でそれぞれ収れん位置方向に向かっていていることを確認した。伊福ら（2002）では、イノサキノツガイにおける1984年から2000年までの深浅測量結果の解析からは、土砂供給源は三ツ子砂嘴であると推定していた。しかしながら、2000年以降の拡大・広域深浅測量の解析から、イノサキノツガイへの土砂供給源と推定していた三ツ子砂嘴の地形変化はほとんど無いことを確認した。
- (3) 北航路におけるサンドウェーブの形成状況は、 $X=750$ m, $Y=1,900$ m 付近に収れんし、サンドウェーブの波長は収れん部からの距離が増大するにつれて長くなり収れん部からの距離の0.4倍程度であることがわかった。
- (4) サンドウェーブは、収れん部の東側では450 m 程度東を発生地点とし、100～300 m 間を20 m/年の速度で移動している。一方、収れん部の西側では、200 m 地点が50 m/年の速度で移動し、収れんした土砂は南東方向へ移動している。
- (5) イノサキノツガイ以外での三ツ子島砂嘴、牛島間の東北東向き、南航路の西南西向きのサンドウェーブの発達・移動を確認した。これらのことから、保全区域での土砂移動は、三ツ子砂嘴の西側背後を分岐点とした北側の反時計回りと南側の時計回りの土砂循環によるものであることがわかった。

参 考 文 献

- 伊福 誠・小林泰之・坂田健治・西本光宏・中田正人(2002)：深浅測量結果に基づく備讃瀬戸航路の地形変化，海岸工学論文集，第49巻，pp. 556-560。
- 運輸省第三港湾建設局(1997)：備讃瀬戸航路埋没予測調査報告書，pp. 1-89。
- 小笠博昭(1975)：備讃瀬戸航路における海底砂州，サンドウェーブの調査，港湾技術研究所報告，Vol. 1, No. 2。