

目次

自然	プランクトンが語る海の環境と生態系《6》	谷口 旭	2
歴史	中国の地図を作ったひとびと《7》	今村 遼平	8
研究	平成29年度 水路技術奨励賞(第32回)		16
	西之島火山周辺における海底地震観測による自然地震活動と 浅部地殻構造の特徴に関する研究		17
	沖合観測情報に基づくアンサンブル津波予測手法の開発		24
	低天端有脚式離岸堤「バリアウインT」の開発		32
	北極海 海氷下観測用小型AUVの開発		37
	拡張現実を用いた水中可視化システムの開発		41
コラム	健康百話(63)	加行 尚	46
	海洋情報部コーナー	海洋情報部	49

お知らせ

第22回理事会及び第9回評議員会・第23回理事会開催報告	56
平成29年度 水路業務功績者表彰	//
平成30年度 水路測量技術研修実施報告(2級・1級)	57
平成30年度 沿岸海象研修実施報告	59
平成29年度 水路測量技術検定試験問題 港湾1級1次	60
平成30年度 水路測量講習会案内	65
協会だより	66
編集後記	67
海底地形デジタルデータ更新情報のおしらせ	68

表紙:「練習船 日本丸」・・・稲葉 幹雄

伏木富山「海王丸パーク」に寄港中の練習船「日本丸」をペン画にしました。

作者ブログ <http://blog.goo.ne.jp/mikijii>

イラスト:淵之上 倫子

掲載広告

オーシャンエンジニアリング 株式会社	表2
株式会社 離合社	69
株式会社 武揚堂	71
海洋先端技術研究所	73
一般財団法人 日本水路協会	74・75・76・表3
古野電気 株式会社	70
株式会社 鶴見精機	72
株式会社 東陽テクニカ	表4

プランクトンが語る海の環境と生態系《5》

三洋テクノマリン株式会社生物生態研究所長 谷口 旭

- 181号 プランクトンが語る海の環境と生態系《1》植物プランクトン篇 その1
182号 プランクトンが語る海の環境と生態系《2》植物プランクトン篇 その2
183号 プランクトンが語る海の環境と生態系《3》植物プランクトン篇 その3
184号 プランクトンが語る海の環境と生態系《4》植物プランクトン篇 その4

1 海洋生態系における

動物プランクトンの役割

前回までは、海洋が水に満たされた世界であるために、光合成が可能な表層は光と栄養塩に関して二律背反的な環境であること、それゆえ海洋の基礎生産者は植物プランクトンでなければならないこと、そのサイズは微細であるうえに現存量も少なく、海には植物がないかのようにみえることなどを述べてきました。そして、そのような海洋生態系の特徴を理解するには、栄養塩の動態を知ることが重要だと指摘しました。栄養塩は乏しいにもかかわらず生態系が安定的に持続しているということは、その背景では栄養塩が速い速度で再生循環していることを意味しています。目には見えませんが、海洋生態系は、その再生循環の恩恵を受け続けるために、再生循環の機序が最大限に働くよう自らの仕組みを進化させてきたに違いありません。その仕組みの中で最も重要な役割を担っているのが動物プランクトンだということ、それが今回からの主題です。

動物プランクトンは、表層における栄養塩の再生循環を速めているということだけで重要なわけではありません。海は深いので、海洋の生物圏は巨大な3次元構造をしています。地面に沿って2次的に広がる陸上の生物圏と比較すると、文字通り桁違いに巨大な生物圏です。この点で、海洋生態系は陸上生態系

とは全くといって良いほど異なった生態系になっているのです。陸上の生態系に関する知識で海洋生態系を理解しようとする、まじがう可能性が高いのです。

世界の海洋の平均水深は 3,800 m、太平洋だけの平均水深は 4,000 m です。世界一深い海は、本誌の読者がよくご存じのように、西部太平洋のチャレンジャー海淵で、10,920 m もあります。その超深海底にも生物がおり、その上の水柱中(超深海層)には深海性の動物プランクトンやネクトンがいます。魚類はそれほど深いところには生息できないといわれていますが、それでも 2017 年 8 月に海洋研究開発機構と NHK の共同調査で、マリアナ海溝の水深 8,178 m で魚類の生息が確認されました。これらの深海生物の生命活動を支えるエネルギーの起源は、海の表面からせいぜい 100 m 深までの表層にいる植物プランクトンの光合成生産です。光が届かない海底には、地下から湧出する熱水などに溶存している無機化合物を使って有機物生産をする化学合成系もありますが、海洋の全体から見ればその生産は限定的です。ですから、表層わずか 100 m の生産層の下に巨大な 3 次元生物圏が維持されているという表現は、まじがいではないのです。そしてその背景でも、動物プランクトンが重要な役割を果たしています。

また、海には 1 μm の植物プランクトンから

20 mの巨大なクジラまでが生息しています。海洋の植物は陸上の小型植物よりもさらに小さく、クジラは陸上の大型動物よりもさらに大きいのです。重要なことは、その植物プランクトンだけが基礎生産者であり、巨大なクジラも、間接的ではありますが、植物プランクトンの有機物に依存しているという事実です。1個体あたりの有機物量（ほぼ体積に比例）で比較すれば、実に 10^{21} 倍の差があります。クジラは1兆分の一のさらに10億分の一の植物プランクトン有機物に依存しているわけですから。このとてつもないサイズ差を通して有機物エネルギーを伝送している仕組みは食物連鎖ですが、その食物連鎖はどのようにして成り立っているのでしょうか。微細な植物プランクトンから巨大なクジラまでの食物連鎖が成立する鍵、実はその鍵をにぎっているのも動物プランクトンなのです。

北極海から熱帯海域、そして南大洋まで、どこの海にも魚、エビ・カニ、貝などの動物がいます。彼らの食物の起源は、やはり植物プランクトンです。ところが、植物プランクトンの光合成は、昼がない極域の冬には停止します。遊泳力が強く、暖かい海でも生きていける動物は、冬には極域から温帯域の海域へと季節移動することもあります。冬の間も極域に留まり、しかも冬眠もしない魚類は海中にたくさんいます。そういう魚類が冬の間にも餓死しないのは、なぜでしょうか。ここでも、動物プランクトンが鍵になっています。

以上のような、海洋生態系の成立と安定持続のかげで動物プランクトンが果たしている機能的役割を整理すると、次の4項目になります。

- ・表層における栄養塩再生を加速する機能
- ・下層へ有機物を急速輸送する機能
- ・食物連鎖を構築する機能
- ・植物プランクトン生産の季節変動を平準化する機能

今回以降の動物プランクトン篇では、これらの機能について説明します。その目的は、動物プランクトンの機能が海洋生態系の安定性や持続性に貢献していることを示すにとどまりません。その機能というものは、海洋という環境で進化してきた動物プランクトンが獲得した合理的な適応生態であるということ、さらに大切なことは、海洋生態系はそのような適応生態を獲得した動物プランクトンを選択し温存してきたということを示したいのです。一部の生物の生態を知るにとどまらず、生態系が「全体として」地球環境に適応し進化してきたということを理解していただきたいと思います。このねらいは、前回植物プランクトン篇を「次の動物プランクトン篇で、プランクトンが語る海の環境と生態系の特徴をより明らかに示せるだろう」と結んだ意図に呼応するものです。皆様が周りのお子さんたちに海の生物の話がされるときには、そうした全体論的ないし包括的な視点を育てるように話していただきたいと思います。さまざまな生物現象を、環境との関係で包括的に理解しようとするところに、生態学の生態学たる意義があるからです。

2 植物プランクトンを摂食する 食植性動物プランクトン

今後の説明を分かりやすくするために「食物連鎖を構築する機能」からはじめますが、動物プランクトンの4つの機能はたがいに関連しており、切り離して説明することはできません。そのため、説明はたびたび行き交うであろうことを予めお断りしておきます。

海洋生態系の基礎生産者である植物プランクトンは、恒常的に成層している貧栄養な亜熱帯海域では特に小型であり、上昇流や鉛直混合が卓越する富栄養な湧昇流域や亜寒帯海域ではより大型であることは、すでに述べた通りです。その大きさは $1\ \mu\text{m}$ 弱から、多数の細胞が連なる群体では1 cmを超えるものまで

さまざまですが、いずれも微小です。小麦粉（粒度 5-130 μm 程度）を水に懸濁させたようなものです。この微粒子を水と区別して食べるにはどうしたら良いでしょうか。お茶やコーヒーをいれるときの要領で濾過するという以外に良い方法は思いつきません。この場合は、お茶をいれるのとは反対に、水のほうを捨てて植物プランクトンを捕捉するわけです。このような摂餌法を濾過摂食といい、水中では最も基本的な摂食法です。カキ、フジツボ、ホヤなど多くの底生動物をはじめとして、オキアミを食べる巨大なヒゲクジラも濾過摂食者です。濾過摂食とはいうものの、湯と茶葉を濾し別けるような完全な濾過をするとは限りません。多くの濾過摂食者は、海水を引き寄せながら、水とともに近づいた餌粒子を捕えたり粘液で絡めとったりするのですが、海水中に散在している餌粒子を濃縮して食べるので、濾過摂食というのです。茶こしのような典型的な濾過は、むしろヒゲクジラやジンベイザメなどの大型動物にみられます。猛獣のように餌を狙って捕食しているかのように見えるカツオやマグロも、餌を水ごと捕え、鰓蓋（さいがい：えらぶたのこと）の後ろの開口部（外鰓孔といいます）から水を吐き出して餌だけを丸呑みするので、やはり濾過摂食しているといえます。巣にかかった飛翔動物を捕獲するクモの生態はこれに少し似ていますが、実際に濾過摂食をする動物は陸上にはいません。フラミンゴは濾過摂食をしますが、水中のプランクトンなどを食べるので、陸上動物というよりは水鳥というほうが適当です。

海の動物は濾過摂食が得意だとはいえ、カツオやマグロやヒゲクジラなどは植物プランクトンを直接食べることはできません。彼らから見ると、植物プランクトンは小さすぎて水と区別することができません。植物プランクトンを食べる動物は繊細な目合いの濾過摂食器官を備えていなければなりません。一般

に、体が小さい動物ほど体のつくりは繊細なので、植物プランクトンを濾過摂食する動物は一般に小型です。前出のカキ、フジツボ、ホヤなどがその例です。水柱中で植物プランクトンを濾過摂食するのは食植性の動物プランクトンであり、やはり小型です。多くの食植性動物プランクトンは、体長が数 10 μm から数 cm の範囲にあり、餌である植物プランクトンとともに水中に浮遊しながら、絶えず濾過摂食をしています。こうして、植物プランクトンの有機物は十倍の大きさの動物プランクトンの体という有機物塊に転換（サイズアップ）されます。

3 食植性動物プランクトンの摂食器官と摂食行動

小さな植物プランクトンを摂食する動物プランクトンの濾過摂食器官のつくりは、精緻です。

図 1 は、海洋の動物プランクトンとして繁殖しているカイアシ類の中の典型的な食植性種の摂食器官を示しています。カイアシ類はエビと同じ甲殻類で、体の基本構造もエビと同じです(図 1 右上)。この図は体長が 5 mm 程度の種を示していますが、上が頭、下が尾です。頭の方に口がありますが、そのまわりに 5 対の付属肢があり、それぞれが無数の刺毛を備えています(図 1 左上)。その中の第二顎脚といわれる付属肢を例に、構造をさらに詳しく示したのが図 1 左下です。100 μm のスケールも示してありますので、大きさを想像してみてください。刺毛にはさらに鳥の羽根状の細毛が密生しています。これが濾過器として働くのですが、図ではその目合いと植物プランクトンが比較されています。この目合いより大きなものは捕捉されやすく、小さなものは水とともに流れ去ることが分かります。カイアシ類は、これらの口部付属肢やその下の方にある遊泳肢を連動させて、頭上から尾の方に向かう水流を起こし、その中に入って

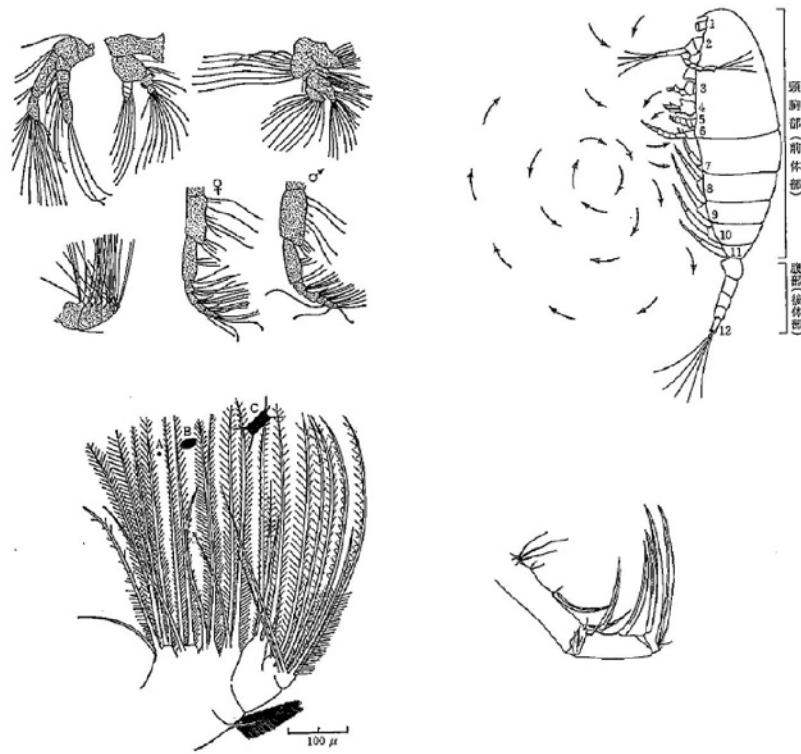


図1 食植性カイアシ類の摂食器官(口部付属肢)

左上：濾過摂食器官として機能する口部付属肢(右図の2-6)、6だけ雌雄別に描かれている(Marshall & Orr⁶⁾より)。右上：個体の側面観で、体前縁の番号は付属肢の位置を示す。1は触角、2-6は口部付属肢、7-11は遊泳肢、12は尾節。体前方の矢印は濾過水流が上方から下方に流れることを示している(Gauld¹⁾より)。顕微鏡下の水滴内では流れは渦になるが自然海では上から下への一方行流になる(田中¹³⁾)。左下：細毛が密生した刺毛を備えた第二顎脚(右上図の5)と植物プランクトン細胞の比較(Marshall⁵⁾より)。右下：肉食性種の第二顎脚の刺毛は鋭く強靱で細毛を欠く(Giesbrecht²⁾を大塚・上田¹⁰⁾から引用)

くる植物プランクトンを濾過捕捉して食べます。

オキアミ類はさらにエビに似ていて、頭胸部に6-8対の発達した胸脚があります(図2)。食植性の種類では、胸脚には多数の刺毛があり、図には示しません、カイアシ類の顎脚と同様に、刺毛にはさらに細毛が密生しています。胸脚はいずれも長くて刺毛を備えているので、左右全体の胸脚で籠のような空間を作り、その中に前方から後方への水流を起し、流れてくる植物プランクトンを濾し取って食べます。詳しいことは、中川ら⁸⁾を見て下さい。カイアシ類もオキアミ類も、濾過摂食のための水流から酸素を得て呼吸するので、この運動は間断なく続けられます。そ

の結果、一日間で数10 mlから数リットルの海水を濾過することになります。なお、肉食性のカイアシ類やオキアミ類の口部付属肢の形態は、これとは異なっています。餌動物を捕獲するために、刺毛は鋭く強靱で、細毛はありません(図1右下)。このように、食性によ

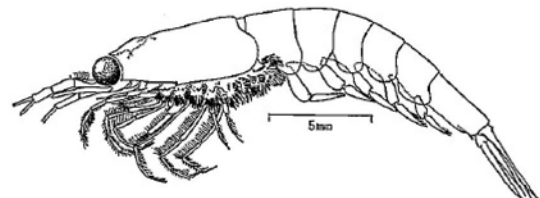


図2 日本近海に多産するツノナシオキアミ(Komaki⁴⁾より)

刺毛が密生した6対の胸脚が発達し、全体が胸の下でかごのような空間を作り、前方から水流に乗って入ってきた植物プランクトンを濾過摂食する。

って付属肢の形態が異なっているので、付属肢の形態をみれば食性が分かります。カイアシ類は海洋で最も繁栄した動物プランクトンであり、古くから研究の対象になってきました。食性に関する知見も数多く蓄積されています¹¹⁾。

微細な植物プランクトンを濾過摂食するために適応した形態の極致ともいべき姿が、オタマボヤ類にみられます。オタマボヤはホヤの仲間で、脊椎動物の一步手前まで進化した原索動物です。おなじみのホヤは海底の岩などに固着していますが、その幼生はオタマジャクシ型で水中で浮遊生活をします。その幼生の形態のまま成体になったかのような動物プランクトンがオタマボヤ類です。扁平だけれども大きくて目立つ尾があるので尾虫類ともいわれますが、この尾の中軸に脊索があるので、原索動物だと分かるのです。かなり進化した動物です。彼らは植物プランクトンの中でもより小さいものを選択して摂食するのですが、そのために驚くほど巧妙精緻な濾過摂食器官を具有するようになりました(図3)。オタマボヤの濾過摂食器官は体にあるのではなく、タンパク質とセルロースからなる薄い粘膜でできたハウスと呼ばれる袋(包巣)に仕込まれています。オタマボヤの体は1 cm足らずですが、ハウスはそれよりずっと大きく、オタマボヤ本体を包みこんでいます。その前後に開口部があり、中にあるオタマボヤは尾を動かして、前の入水口から後ろの出水口へと、常に新しい海水が流れるようにします。それで呼吸をすると同時に餌も採るのです。オタマボヤは微細な植物プランクトンしか食べないので、入水口には網戸のような構造があり、小さな粒子以外は中に入らないようにできています。ハウスの中には、水流から小さな餌粒子を濾集してオタマボヤの口へと運ぶための精巧な器官があります。このように複雑かつ精巧なハウスはオタマボヤ自身が作るのですが、驚いたことに、完成

させるのに数分しかかからず、しかも毎日何回も作りかえるのです。何度も作りかえる理由は入水口の網が目詰まりするからですが、捕食動物がハウスに近づいたときにもオタマボヤはいち早く感知して、ハウスから脱出します。

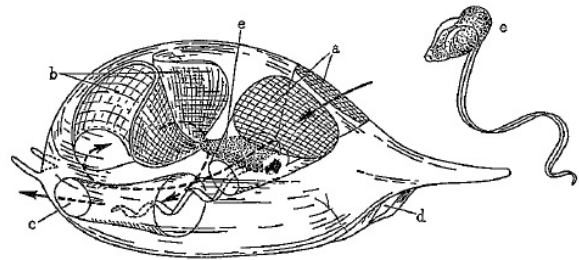


図3 オタマボヤの摂食生態(Hardy³⁾より)

右上 e はオタマボヤの虫体。左は精緻な構造のハウス(包巣)で、a は網を備えた入水口、b は内部の餌粒子濾集器官、c は出水口、d は脱出口、e は虫体の頭部(軀幹部)。矢印は、ハウス内のオタマボヤが尾で起こす水流が、入水口から入って濾集器官を通り、出水口から外へ出る流路を示す。

流水の天使として親しまれているクリオネ(和名ハダカカメガイ)は、サザエやアワビなどの巻貝(腹足類)の仲間ですが、腹足が浮遊生活に適した翼状に変化しているので翼足類とよべれます。クリオネは他の翼足類を捕食する肉食者ですが、翼足類には小さな植物プランクトンを食べる種もいます。そういう種は、まわりに粘液質の薄膜をベールのように拡げて、これに付着する植物プランクトンや細菌を食べます。この薄膜は粘液網(mucous net)とか摂食ベール(feeding veil)といわれますが、水中に散在している微小な粒子を捕集する一種の濾過摂食器官で、これも海洋動物にはよくみられるものです。オタマボヤのハウスや翼足類の摂食ベールなどは脆弱な粘液質の薄膜なので、完全な形のまま採集して念入りに顕微鏡で観察することが難しいものです。工夫を重ねて飼育実験に成功した例⁹⁾もあり、潜水して水中カメラで自然の姿の撮影に成功した例⁷⁾もあります。いずれも貴重な画像が公開されています。

以上いくつか挙げた例から、海洋生態系における微小な基礎生産者を効率よく摂食するのは、それ自体が小型な動物プランクトンであることが分かったと思います。これが海洋の食物連鎖の第一段階です。このあとに何段もの食う一食われるの関係が続き、最終的にはマグロやクジラまでに至るわけです。

参考文献

- 1) Gauld, D.T. (1966): The swimming and feeding of copepods, pp. 313-144. In H. Barnes (ed.) "Some Contemporary Studies in Marine Science," Allen & Unwin, London.
- 2) Giesbrecht, W. (1892): Systematik und Faunistik der Pelagischen Copepoden des Golfes von Neapel. Fauna Flora Golf. Neapel, 19: 831 pp. + 54 Pls.
- 3) Hardy, A.C. (1956): The Open Sea, Its Natural History. The World of Plankton, 335 pp., Collins, London.
- 4) Komaki, Y. (1960): On the euphausiids collected on the second cruise of the Japanese Expedition of Deep Sea (JEDS-2). J. Oceanogr. Soc. Japan, 16: 185-197.
- 5) Marshall, S.M. (1973): Respiration and feeding in copepods. Adv. Mar. Biol., 11: 57-120.
- 6) Marshall, S.M. & A.P. Orr (1955): The Biology of a Marine Copepod, *Calanus finmarchicus* (Gunnerus), 195 pp., Oliver & Boyd, Edinburgh.
- 7) Monterey Bay Aquarium, HP
<<https://www.youtube.com/watch?v=qSeu4KyeaYc>>
- 8) 中川至純・西野康人・遠藤宜成(2008): オキアミ類の摂食生態と脱皮, pp. 179-263. 佐々木洋ほか(編)「海洋プランクトン生態学」成山堂書店, 東京.
- 9) 大阪大学大学院理学研究科生物科学専攻西田研究室, HP「オタマボヤについて」
<http://www.bio.sci.osaka-u.ac.jp/bio_web/lab_page/nishida/otamaboya/1.html>
- 10) 大塚攻・上田拓史 (1997): カイアシ亜綱—総説・検索, pp. 649-658. 千原光雄・村野正昭(編)「日本海洋プランクトン検索図説」東海大学出版会, 東京.
- 11) 大塚 攻・西田周平(1997): 海産浮遊性カイアシ類(甲殻類)の食性再考. 海の研究, 6: 299-320.
- 12) Owre, H.B. & M. Foyo (1967): Copepods of the Florida Current, Fauna Caribaea 1, Crustacea, Pt. 1: Copepoda. 137pp., Univ. Miami, Miami.
- 13) 田中祐志(2018): 魚卵仔稚魚・動物プランクトンの個体の行動と空間分布に関する研究. 2018年度日仏海洋学会学賞受賞記念講演(東京, 6月2日).

中国の地図を作ったひとびと《7》

アジア航測 株式会社 名誉フェロー 今村 遼平

180号 中国の地図を作ったひとびと《1》禹

182号 中国の地図を作ったひとびと《3》劉徽

184号 中国の地図を作ったひとびと《5》酈道元

181号 中国の地図を作ったひとびと《2》張衡

183号 中国の地図を作ったひとびと《4》裴秀

185号 中国の地図を作ったひとびと《6》祖冲之

7. 僧一行

(1) 僧一行の経歴

僧一行(673-727)は、仏教上の名前であり、本名は張遂という。中国唐代の天文学者であり積学家で、邢州巨鹿(今の河北省巨鹿)の人とも、一説には魏州昌楽(河南省昌楽)の人ともいい、唐の高宗弘道元年(673)に生まれ、玄宗の開元15年(727)に亡くなっている(図1)。

張遂の曾祖父は太宗・李世民的功臣で、襄州都督、郟国公・張公謹であった。父・張瑄は県令として武功があったらしい。だが、張氏の家族は武則天(則天武后)時代(690-705ころ)にはすでに衰微していた。そんな状況のなか、張遂は幼いころから曆象と陰陽五行の学を学んだ。青年時代に学識が高まり長安に出るとその名は世間に聞こえた。武則天の政争に巻き込まれるのを避けるために剃髪して僧になり、一行と称した。嵩山や天台山・当陽山などで、經典の解釈と天文学を学んだ。かつてインド仏教には多種の翻訳があったが、彼は修行のちに仏教の一派である密宗の領袖となった。

中宗が神龍元年(705)、武則天の退位した後、李唐王朝は多次にわたって彼を京に招聘したが、彼は断った。開元5年(717)までに唐の玄宗・李隆基は、専門家・基叔を従えて一行と接するために邢州に行った。彼は商において古道唐朝山南漕運、丹水線を経て商州



図1 僧一行の像(筆者図)

(商州の銅仏)を経て長安に帰ってきた。

開元9年(721)、道士であり天文学者である李淳風の《麟徳歴》によると、その頃の曆では日食が何回も合わなかったため、玄宗は一行に新しい曆を編成するように命じた。一行の一生でもっとも主要な仕事は、《大衍曆》の編成である。そのために彼は重要な天文儀器を発明・製造して、天象の観測と天文測地や測算方面で極めて多くの貢献をしている。

(2) 僧一行の業績

(2.1) 復矩の発明

一行は、極めて簡便に直接北極星の地平高度（つまり測定地点の近似的な緯度）を測定する観測儀器—復矩—を創造・発明した（図2）。この図で、ABは望遠筒（窺管）¹、CDは支架杵（儀器を支える架台）、Eは錘球、Fは象限分度（当時中国では円周は365.25度—つまり大地（地球）は1日1度ずつ動いて、1年365.25日で太陽を1周するから、円周を365.25度にしたもの。だから、1象限は90度ではなく91.31度であった）である。復矩を使って望遠筒（窺管）で北極星を観測すると、錘球の示す垂線の目盛の象限分度（図2の θ ）が北極星の地平高度を示す。つまり、任意の観測点の象限分度が近似的に北極高度つまり天文緯度を示すことになるわけである。復矩は北極星に限らず、任意の星の地平高度を簡単に測定できる便利な観測儀器なのである。

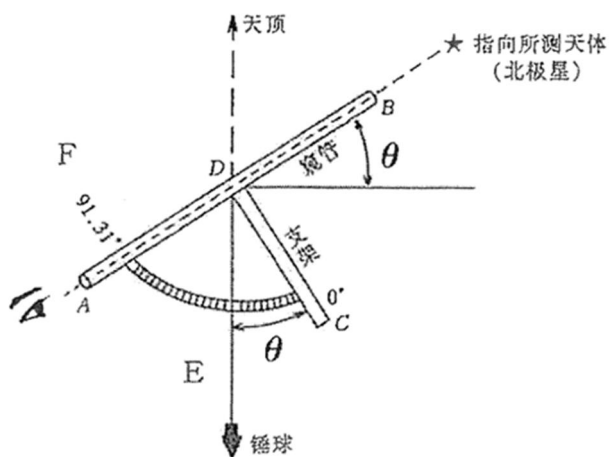


図2 僧一行が作った復矩の構造

(2.2) 黄道遊儀の製造

一行は、暦法は過去の実測結果を基礎に確立すべきだ、という主張であった。このため、彼はまず、天体の位置を測量する儀器を作っ

¹このころにはまだガラスのレンズは発明されてはいないので、目標の星に向けた望遠筒だけであった。

た。前述した復矩もその一つで、これはおもに緯度の計測のために用いた。そのほか開元9年（721）、府の兵曹参軍・梁令瓚が黄道遊儀を設計し、さらに木型を作ったのを踏まえて一行は、銅と鉄でこれ鑄造することを決め、開元11年（723）に完成した。この儀器では黄道は固定的ではなかったもので、赤道上に移動させて、歳差現象（当時歳差は黄道に沿って西に退いていると認識されていたが、これは実測とは相反していた）と合わせる事ができた。

(2.3) 水運渾天儀の製造

その後、一行と梁令瓚は水運渾天儀を設計・製造した。これは水力によって渾儀（渾天儀）を地球の動きと同期させて回転させるものである。これには報時装置が付いていて、自動的に時刻を報じることができるため、“水運渾天儀”あるいは“開元水運渾天俯視図”と呼ばれた。

水運渾天儀は水力を使って運転するもので、天体の運行に連動して儀器をゆっくりと回転することができるため、天体観測が正確にできた。この水運渾天儀の原理は後漢の科学者・張衡の設計になるもので、水力によって自転し、1昼夜で1周して星宿の運動以外の表現を取り除くことができた。このため、日が昇り月が落ちるのが表現され、当然、一行の作ったものは張衡が作った水運渾天儀より精巧・複雑にできていた。だから、この水運渾天儀を武成殿の前に設置して文武百官に観せると、その製作は精妙で、朔望の測定や時刻の報告は正確なために称賛を博した。

特に、水運渾天儀上には2個の木人（商州の銅の仏像文物遺跡にあるものと同じ形であった）が設置されており、これが歯車で動き、一つの木人は毎刻（古代では1昼夜は100刻に分けられていたから、1刻は14.4分）自動的に太鼓を鳴らし、もう一つの木人は毎辰（現在の2時間に当たる）自動的に鐘を鳴らした。これら2個の木人は機械的な原理によって、

古代のロボットの働きをしている。これは、極めて精巧な時計機械で、世界で最も早い時報装置であり、現代の機械類の祖先をなすもので、1370年に西欧でできたものよりも、6世紀も早い。

この水運渾天儀が使用されるようになり、さらに次に銅鉄で作った渾天儀の便利さが世間に広く認識されるようになった。イギリスの著名な科学史家・**李約瑟**（ジョセフ・ニーダム）博士は《中国科学技術史》第4巻の中で、**僧一行**と**梁令瓚**が発明した平行連動装置は、実質上最も早い機械式の時鐘であり、一切をとらえる什器の祖先であり、欧州で14世紀に発明された機械式時計のプロトタイプである、と言っている（鐘表示装置は14世紀早期に欧州の発明になるという説もあるが、これは完全な間違いである）。

一行等は新しい仕組みの黄道遊儀で日・月・五惑星などの運動を観測して、一つの恒星の赤道座標と黄道に対する相対位置は、漢代における測量結果と大きく変化していることを示した。

（2・4）天文測量

一行は皇帝から新しい暦を改編する命を受けて、一次の大地測量作業組織を編成した。**一行**のこのときの大規模な天文測量には二つの目的があった。（1）その一つは中国に古代からあった：“日影長1寸の差は、地表での南北の位置差1000里に当たる”という伝統理論に、劉宋時代の天文学者・**何承天**（544-608）が交州（今の越南河内一帯）の測量に基づいて疑問を呈していたのだが、まだそれを実証できずにいたので、その真偽の検証することであった。隋朝の天文学者・**劉焯**が、それまで提唱されていた間違っただけの実測結果を修正するための具体的な検証計画を立てていたので、**一行**はその方法にもとづいて実施した。（2）その二は、当時観測地点が違っていると日食の実際の発生時間と日食の予報と食い違いが生じ、各節気の日影の長さや漏刻による昼夜の区分

が同じでないことが分かった。これらの現象が生じたのは暦法の持つ過去の考察が正しくなかったことによる。こういったことから、改暦のためには各地で実測する必要が生じたのである。

このときの測量は、太史監（長官）・**南宮説**と太史官・**大相元太**等の人を分けて各地に派遣して、“日影と日晷”を観測した。そして、**一行**は、南北の日影長の違いを勾股法（ピタゴラスの定理）を用いて計算した。**一行**はこの測量作業の責任者としてばかりでなく、測量数値の分析計算作業も自分で担当し、実施した。

当時、測量の範囲は極めて広く、北は北緯51度前後の鉄勒回紇部（今の蒙古のウランバートル西南）から、南は北緯18度の林邑（今のベトナムの中部）まで13ヶ所で（図3）、現在の中国南北の国土境界内よりも広い。このような規模の測量は、世界科学史上空前のことであった。

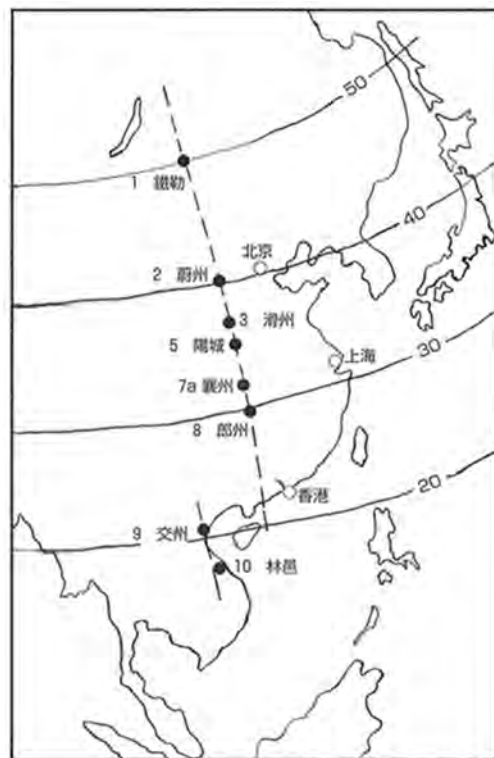


図3 僧一行と南宮説が723年に実施した子午線計測の実測ルート（筆者作成）

そのうち最も注目すべきは、南宮説が自分で率いた測量隊が、隋の劉焯が計画した黄河兩岸平原地域測量の4点で実施した正確な緯度測量である。その4点というのは北から南に向かって滑州白馬（今の河南滑県）、汴州浚儀太岳台（今の開封西北）、許州扶溝（今の河南扶溝）、豫州上蔡武津館（今の河南上蔡）である（図4）。その中の白馬は黄河の北にあり、そのほかの3点は黄河の南にある。これらは平東経114.2度-114.5度間にあり、ほぼ同一経度上にある（つまり劉焯が計画したとおり、これら4点はまさに南北経線上にある）。この4点間すなわち白馬～上蔡間の距離は総計526里270歩、この間の北極高度の差（緯度差）1.5度に相当するから、子午線1度の弧長が351里80歩（約123.7km）という値を得た。

唐時代の尺は大小があり、一行のこのときの子午線測量の精度は制限を受けるというこ

とから、人々のその時の見方は一致しない。初歩的な見積計算の結果は、一行の測量値と現代の値と比較すると相対誤差はほぼ11.8%と見積もられている。

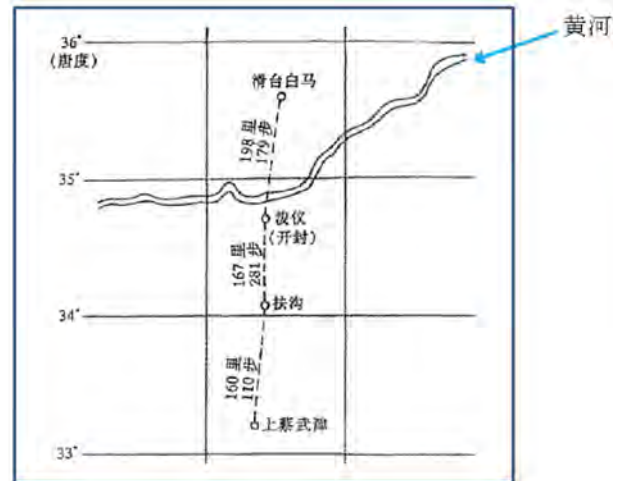


図4 僧一行・南宮説らが河南平原で実施した緯度測定位置（部分）

表1 河南平原での各観測地点間の距離と北極高度の日影長

観測点	距離 (唐里、歩)	北極高 (唐度)	中 午 日 影 長 (唐 尺)		
			冬 至	夏 至	春分・秋分
滑台、白馬	198里 179歩	35.3	13.0	1.57	5.56
浚儀	167里 281歩	34.8	12.85	1.53	5.50
扶溝		34.3	12.55	1.44	5.37
上蔡武津	160里 110歩	33.8	12.38	1.36	5.28

表2 僧一行らが実施した2500km間の測点と北極高・日影長

測点	距離 (唐里、歩)	北極高 (唐度)	中 午 日 影 長 (唐 尺)		
			冬 至	夏 至	二分
白馬	198里 179歩	35.3	13.0	1.57	5.56
浚儀		34.8	12.85	1.53	5.50
扶溝	167里 281歩	34.3	12.55	1.44	5.37
上蔡	160里 110歩	33.8	12.38	1.36	5.28
鉄勒地	距洛陽 9815里	52	29.26	4.13	9.87(旧唐書注) 5.87(新唐書)
武陵	1826里 76歩	29.5	10.53	0.77	4.375(図測 4.47)
陽城		34.4 ^①	12.715	1.478	5.43
蔚州横野	1861里 214歩	40	15.89	2.29	6.445(図測 6.625)
安南	距陽城 5023里	20.4	7.94	表南 0.33	2.93
林邑	距陽城 6112里	17.4	6.90	表南 0.57	2.85

中国以外の最も早い時期の日影計算に基づく地球周長の測定は古代ギリシア時代、アレクサンドリアの科学者 エラトステネスが紀元前240年に実施したもので、彼はアレクサンドリア港とエジプトの都市・シエネ（現在のアスワン）との間の正午の太陽の高度と三角法の計算から、スタジア (stadia) という単位で地球の直径を計算している。古代ギリシアの長さの単位は各地で異なるが、エラトステネスの測定結果はアッチカ・スタディオンの単位 (185m) による計算だと地球周長は46,620km、で16.3%多く、エジプト・スタディオンの単位による計算だと39,690kmとなり2%小さい。その後、イスラム世界で行われた最も早い子午線の実測は一行が実施した90年後の814年のことで、このときアッバース朝の天文学者・アル・フワーリズミー (約783-850) が組織した測量隊が、シンジャール平原で実施した1次大地測量で得た子午線一度の長さは111.815km (現代の理論値は110.6km) と、一行らよりもかなり正確な値が得られている。

(2・5) 《大衍曆》の制定

一行は開元13年(725)から新曆の編纂を始めた。2年間の時間をかけて草稿ができ、《大衍曆》と名前が定められた。《大衍曆》は張説と歴官・陳玄景などの整理を経て書物になり、開元17年(729)からこの新曆にもとづいて毎年の曆が全国に頒布された。《大衍曆》は中国では729年から761年まで使用された。開元21年(733)に日本に入り、爾来100年近く利用されてきた。

(2・6) 《大衍曆》の“九腹晷影”算法とその正接 (tangent) 函数表の作成

中国の古代曆法は、後漢の《四分曆》(65-220に使用)から始まる。各節気の最初の日きせいちようの晷影長 (正午の影の長さ) と太陽去極度きよきよくど (天の北極からの角距離一角度にしてどれだけ離れているか) の観察記録や時刻・晷影長が、古代曆法の重要な計算項目であった。隋の

劉焯りゆうしやく (544-608) が2次等間距離内挿法 (挿値法) を発明したあと、唐の李淳風が2次内挿法 (放物線補間) をまず時刻の計算の中にとり入れ、毎節気の初日の時刻と晷影長から、それぞれの節気の各日の時刻と晷影長を求めた。しかし、各曆法の中での記載や計算による時刻と晷影長の大部分は、陽城 (今の河南省登封東南の告成鎮にあった天文台) での測定数値であった。

一行らは《大衍曆》の編纂のさい、延長2,500kmに及ぶ大規模な天文測量をおこない、その観測を通して、太陽去極度の緯度変化に伴う晷影長や地方の位置の違いによる太陽の天頂距離には一定の対応関係があることを見出した。一行は《大衍曆》の編纂中に、地方ごとの日影長と去極度の計算法を見出して、これを“九腹晷影”と称した。

曆法の中で、陽城の中での各節気初日の太陽去極度は出ている。したがって測定をすれば、任意の地域の各節気の太陽去極度の陽城との差がわかる。同様に、各節気の陽城との太陽天頂距離差も測定すればわかるから、このような差数を求めるやり方は、任意の地点すべて同様に適用できる。このようにして、任意の一地方に対して、ただ一つの節気 (夏至など) の太陽天頂距離を測って知れば、その他の節気の太陽天頂距離は、すべてこの差数のプラス・マイナスによって求めることができる。

それでも、解決を要する以下の二つの問題が残る。その一つは、ある地点の夏至 (あるいは冬至) の天頂距離をどう求めるかであり、その二つは、自分のところの天頂距離から、晷影長をどう換算するかである。この二つの問題は、いずれも一つの影長と太陽の天頂距離の対応数値表があれば解決される。

もし、天頂距離を求め、1度おきに影の長さの数値表を作れば上述の二つの問題は解決できる。まず、測る地点の夏至 (あるいは冬至) の晷影長を測り (一行率いる2,500kmの

大地測量では、各地でこうした測量をおこなった)、その影の長さから太陽の天頂距離を出し、前述のような陽城との差分をプラス・マイナスすれば、当該地の各節気の天頂距離が求まり、逆に表から影の長さが求まる。

一行は《大衍曆》の中で、このような0度から80度までの、度ごとの影長と太陽天頂距離に対応する数値表を作成した。これは世界の数学史上で最も早い正接 (tangent) 三角函数表である。

中国以外では、920年ころ、アラビアの学者アル・バタニ (al Battani:858- 929) が、影の長さ と 太陽仰角の関係を、0度 - 90度の度ごとに太陽の影長表を作って編纂した。これも実際上は三角函数表である。これとは別にアラビアの学者アブル・ワファ (Abul-Wafa:940-998) は、980年ころに正接 (tangent) 函数表を作った。一行とアル・バタニとは経過は違うが正接と余接の函数表を作っている。彼ら二人の発明の内容は、ほとんど同じである。一行の正接函数表はアル・バタニの余接函数表より200年ほど早く、アブル・ワファより250年ほど早い。一行の正接函数表は0度 - 80度だが、実用上の利便さはアル・バタニのものと大きな違いはない。

(2・7) 《大衍曆》における挿値算法 (内挿法：補間法) の発明

今日、内挿法 (ある既知の数値データ列をもとにして、そのデータ列の各区間の範囲内を埋める数値を求めること) には、通常ニュートンの内挿公式が用いられる。その不等間隔形式は、等間隔形式に比べて複雑である。

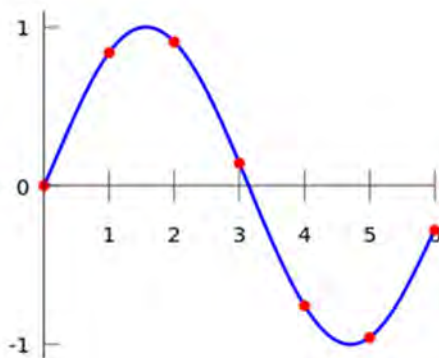


図5 2次元の内挿モデルの例

天文学上の計算史では、唐朝の天文学者・一行は《大衍曆》編纂の中で、次に示す不等間隔二次内挿法を発明した。6世紀に張子信が太陽の見かけの運動と惑星の公転の不均等性現象を発見した後、中国の天文学者たちは、不均等二次内挿法の運用を始めた。それが最も早くあらわれるのは隋の劉焯の《皇極曆》(600)である。その後唐代の僧一行が編纂した《大衍曆》(724)では、太陽の見かけの運動の中心差を計算するために、次に示す不等間隔二次内挿法を発明した

$$f(x) = \frac{x}{n_1} \times \Delta I_1 + \left(1 - \frac{x}{n_1}\right) \times \frac{x}{2n_2} \times \Delta^2$$

ここに、 $0 \leq x < n_1$ 日とする。これは1回帰年を24節気に分けたとき、 n_1 と n_2 はそれぞれ隣り合った運動の中心差を表している。 ΔI_1 ΔI_2 は常数である。この関係(1)が一行の有名な「不等間隔二次内挿公式」である。

この式中、 $n_1 = n_2 = n$ とすると、公式の二次差分は $\Delta^2 = \Delta I_1 - \Delta I_2$ となり、得られたx函数は、劉焯が《皇極曆》で用いた「等差二次内挿公式」と同値となる。ということは、明らかに、劉焯の公式は一行の公式の特別ケースなのである。いうまでもなく、二人とも(1)に示したような形で数式を示したわけではなく、縦書きの文章で示したものである。

藪内清 (1944) は彼の博士論文で劉焯・一行の計算法をそれぞれに「等間隔二次内挿法」と「不等間隔二次内挿法」とし、劉焯・一行の函数(1)がガウスの内挿公式に変換することを通じて、この公式はガウスの等間隔内挿法と不等間隔内挿法と等価であるとしている¹⁾。藪内清のこの発見の10年余り後、中国の李儼²⁾は劉焯・一行の函数(1)を変換すると、ニュートンの内挿公式になることを示した。つまり、劉焯・一行の計算法は、それぞれニュートンの等間隔内挿法と不等間隔内挿法と等価であるとした。しかし、一行

の内挿法上の貢献は、中国以外の天文計算関係では、あまり注目されてはいない。

このように中国古代の非線形内挿法は、隋の劉焯が《皇極曆》²の編纂の際に考案し、太陽運行の不均衡性を念頭に置いて、太陽行度を求めるために最初に考えだしたものである。それを踏まえた一行の内挿法は、その時点ではまだ、いかに広範な意義を持つかは想像できるようなものではなかった。内挿法自体は、前述のように一行の算法と劉焯の算法とは実質的には同じであり、一行の特別ケースが劉焯の算法であったのだ。

《皇極曆》では、平節気は等間隔をもって日躔表（太陽の通る道筋）の基礎の上に内挿値をなす“定節気”である。《大衍曆》以降、一行はすべて1回帰年365.25日を24等分した節気に分け（つまり毎節気は15.22度）、24節気³を“常気”または“平気”と呼んだ。

6世紀半ばに活躍した北朝の北魏—北斉の学者・張子信（？—？）は、中国天文学に一時期を画した学者で、30年にわたる天文観測の結果、太陽が円軌道よりずれて動く事実を発見した。そして“太陽は春分以降には遅くなり秋分以降は速くなる”ことを指摘している。これは地球の軌道が円ではなく楕円であることから、太陽の黄道上での運動速度が一定にならないことによるものだ。月の運動についての同様の事実はすでに後漢末には知られていたが、＜日行盈縮＞と呼ばれる太陽運

動のずれは、張子信によって初めて知られた。この知識が隋・唐の天文台に受け継がれ、曆法は一層確実なものとなっていったのである。

劉焯は《皇極曆》を作るときに、24節気はみな“定日”で対応することにした。しかし、劉焯はさらに太陽の速度の加減と節気の間隔をはっきり示しており、彼の太陽の日躔表では、秋分の定日後から次の年の春分定日までを12区分し、この間の毎気は14.54日であり、春分の定日から秋分の定日前までも平均12区分し、この間の毎気は15.45日であるとした。つまり劉焯の節気は“定気”ではないことがはっきりしている。劉焯はこうした太陽の見かけの運動変化モデルを図6のように考えていたのである。

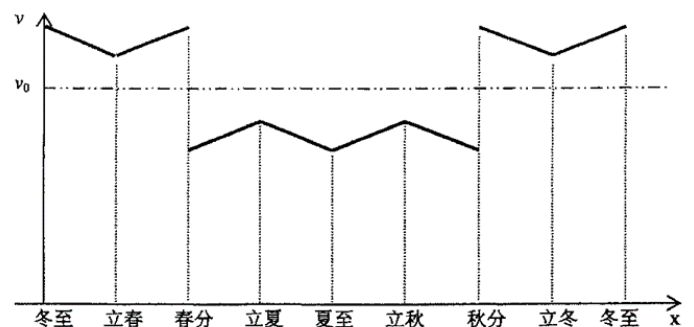


図6 《皇極曆》(604)の太陽の見かけの運動モデル⁷⁾

劉焯の日躔表に示されている規定では、太陽の視運行（見かけの運動）は、1年のうちでは規則的に変化しており、冬至には最も早く、冬至後にはしだいに遅くなり、立春になると速さを加えはじめ、春分時にはまた最も早くなる。冬至から春分までの間の平均速度は速く、春分後太陽の視運動の速度は突然最も遅くなり、その後だんだん速度を増し、立夏からはゆっくり減じはじめ、夏至で最もゆっくりとなる。春分から夏至までの間の平均速度はゆっくりである。夏至以降の変化は今述べた夏至までの状況の鏡面对称である(図6)。この劉焯のモデルでは、太陽の見かけの運動速度の変化はかなり奇妙な不連続状態を示し

² 《皇極曆》：明の劉焯が編纂した太陰太陽曆で、六朝時代の天文学の成果のすべてを採り入れた画期的な曆法で、煬帝は採用を求めたものの、当時の太史令・張胄玄らの反対にあい、そのうちに作者の劉焯がなくなったこともあって、施行されなかった。1太陽年を365.2445日歳、歳差には76年に1度という値を取っている。日月の運航には、内挿法が用いられている。

³ 24節気：太陽の黄経を24等分して、その一つひとつに季節の細分を割り当てたものである。季節は太陽の赤緯に支配されているが、それを再区分するために用いる。

ていることが分かる。

これに対し一行はこの劉焯モデルの不合理性を認め、太陽は1回帰年365.2444日の中で、365.2444度動き、年間を通して毎節気15.2185度動くとした。つまり、一行の《大衍曆》での太陽盈縮の1年間の変化は、冬至付近で最大となり、以降はだんだん小さくなって夏至で最も遅くなり、以降はまた次第に速さを増すとしている(図7)。冬至は太陽の視運動の近日点に当り、夏至は遠日点に当たるのである。この認識は今日から見ても正確である。これに対し《皇極曆》のモデルはあまりに奇妙で実際には合っていなかったことがわかる。

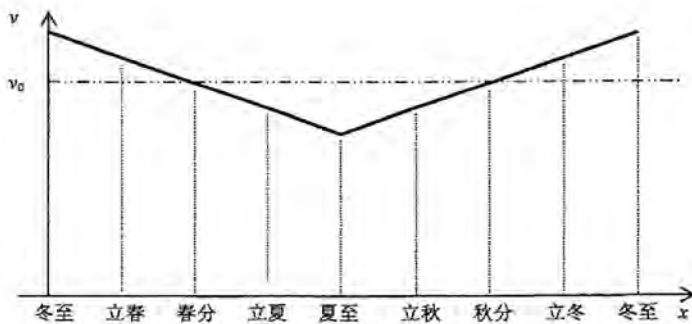


図7 《大衍曆》(724)の太陽の見かけの運動モデル⁷⁾

図7のように、冬至付近での太陽運行速度は最も速い。このため、2節気間の太陽運行時間は最も短く、夏至付近での太陽運行速度は最も遅い。だから、2節気間の時間も最も長い。實際上《大衍曆》では、まず平分の黄道を24等分するように提唱し、太陽が実際等分された区間を動く時間長が、各節気の長さであり、これが通常“定気”と称される概念である。一行が正確な“定気”概念を提唱して以来、太陽運行改正時の計算は、自然と内挿法間隔となった。内挿法自体については、前述したように劉焯の方法(一行の算法の特例が劉焯の算法であるが)に沿った方法である。

そのほかにも一行の天文学上の業績や本業である仏教上の業績も多いが、本文との直接関係が薄いため省略したい。

参考文献

- 1) 蔦内清：隋唐曆法史の研究(博士論文)三省堂 P.P.71-74
- 2) 李儼：中算家的内挿法研究 科学出版社 1957 (中国語)
- 3) 《中国測繪史》編集委員会編：中国測繪史、測繪出版社 2002 (中国語)
- 4) 金応春・丘富科編著：中国地図史話 科学出版社 1984(中国語)
- 5) ジョセフ・ニーダム(東畑精一ほか日本語監修)：中国の科学と文明 第一巻 思索社 1980
- 6) 蔦内清責任編集：世界の名著 続I 中国科学 中央公論社 1975
- 7) 曲安京：中国の数学技術研究：回顧と展望 数理解析研究所講究録 1317巻 p. p.91-107 (台湾)
- 8) 中国のインターネット百度 (中国語)
- 9) 中国のインターネット百度 (中国語)

平成 29 年度 水路技術奨励賞（第 32 回）

－業績紹介－

去る平成 30 年 2 月 27 日に同賞の表彰式があり、5 件 7 名の方々が授与されました（「水路」第 185 号で紹介）。本号では業績内容をご紹介します。ただし共同研究課題の場合、全容をご紹介しますことができません。

1. 「西之島火山周辺における海底地震観測による自然地震活動と浅部地殻構造の特徴に関する研究」

受賞者：海上保安庁海洋情報部 技術・国際課海洋研究室 岡田 千明

2. 「沖合観測情報に基づくアンサンブル津波予測手法の開発」

受賞者：(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 高川 智博

3. 「低天端有脚式離岸堤「バリアウインド」の開発」

受賞者：東洋建設（株）土木事業本部 総合技術研究所鳴尾研究所 山野 貴司

4. 「北極海 海氷下観測用小型 AUV の開発」

受賞者：(国研) 海洋研究開発機構 海洋工学センター海洋戦略技術研究開発部
海洋観測技術研究開発グループ 渡 健介
基盤技術研究開発グループ 杉本 文孝
株式会社インターリンク 開発部第四開発課 坪根 聡

5. 「拡張現実を用いた水中可視化システムの開発」

受賞者：東亜建設工業株式会社 土木事業本部機電部 田中 孝行

1. 西之島火山周辺における海底地震観測による自然地震活動と浅部地殻構造の特徴に関する研究

海上保安庁海洋情報部 技術・国際課海洋研究室 岡田 千明

1. 西之島について

西之島は、東京から南方へ約 1000 km 離れたところにある火山島で、伊豆・小笠原島弧-海溝系の火山フロント上に存在する(図 1)。2013 年(平成 25 年)11 月に約 40 年ぶりに噴火が確認されてから、大量の溶岩流出を伴う活発な火山活動が約 2 年間継続した。

2015 年 11 月の噴火を最後に噴火活動は休止していたが、2017 年 4 月に再噴火し、8 月までは噴火が確認されていた。海上保安庁では、海上交通安全の確保を目的として、航空機等を使用した海域の活火山や海底火山の定期的な監視・観測を行っている〔例えば、小野・他, 2015, 2018〕。また、活火山周辺の海底地形調査、地殻構造調査等の測量船を使用した海洋調査も実施している〔例えば、西澤・他, 2000〕。西之島においても、火山活動が継続していた 2015 年 6 月から 7 月にかけて、測量船「昭洋」による噴火後初めてとなる総合的な海洋調査を実施した。その際、海底地震計(Ocean Bottom Seismograph; OBS)を使用した西之島火山周辺の自然地震観測、及び小規模な地震波速度構造探査を実施し、西之島火山周辺の単純な地震波速度構造モデルを推定した。本稿では、西之島火山周辺で OBS を使用して行った地震学的調査・観測から判明した結果について説明する。

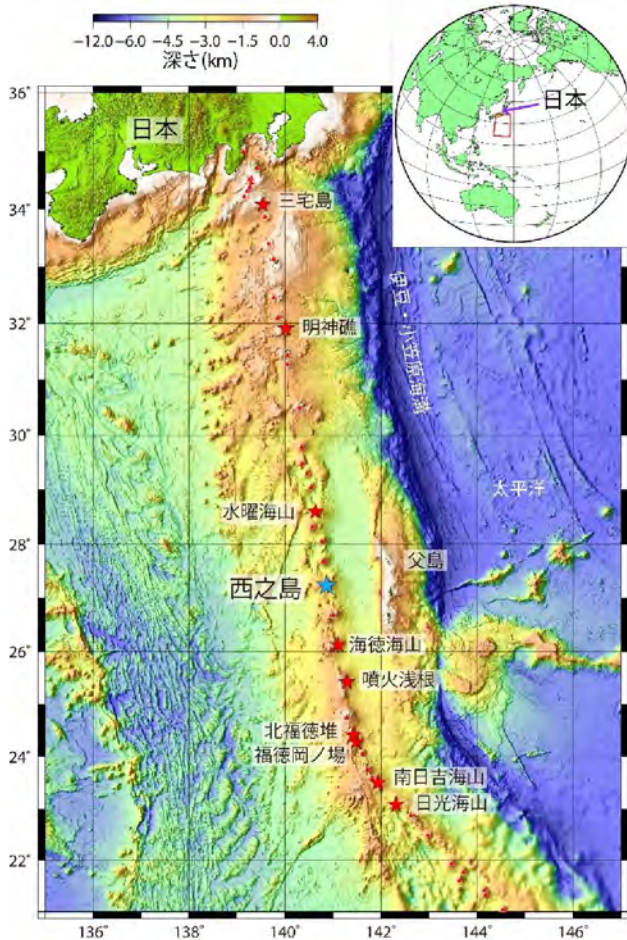


図 1 伊豆・小笠原島弧-海溝系における活動的な火山の分布(赤三角)。星印の火山においては、以前海上保安庁による海底地震観測を実施した。青星印で西之島の位置を示す。

2. 調査概要

調査当時、西之島を中心とする半径 4 km 以内の範囲は、噴火警戒範囲として測量船の航海が禁止されていた。そのため、当庁では噴火警戒範囲外で西之島を囲むように 4 点、および南側の西之島南海丘上に 1 点の OBS を設置した。当庁が設置した OBS の位置を図 2 に示す。OBS は、3 成分の速度型地震計とハイドロフォンを装備しており、船上からの音響信号による切離装置付きの自己浮上式である。

地震波速度構造探査においては、人工震源

としてエアガン、受振器としてOBSを使用した。地震波速度構造探査の模式図を図3で示す。測量船で曳航したエアガンから、空気を圧縮して人工的に作られた地震波が放出される。その地震波は海水中を通り海底面まで到着すると、岩石の種類や密度の違いから海底面やその下にある地層の境界面で反射したり屈折したりする。屈折した波はその後も速度構造の変化に応じて進行方向を変えながら海底下を伝播し、海底に設置したOBSまで到達する。OBSで記録された地震波の走時(到着時刻と発震時刻の差)や振幅から、観測記録を最も適切に説明できる地下構造のモデルを推定した。調査当時、海上保安庁の他に東京大学地震研究所と気象研究所も西之島周辺にOBSを設置していたため、測線設定の際には全てのOBSの直上をできるだけ通るように配慮した。構造探査を行った全ての測線位置を図2の赤線で示す。当庁のOBSの直上を通る測線は図2の黒線と黒点線で示す5本である。全ての測線が一筆書きになるように設定したため、探査開始から全測線終了まで連続でエアガンを発振している。

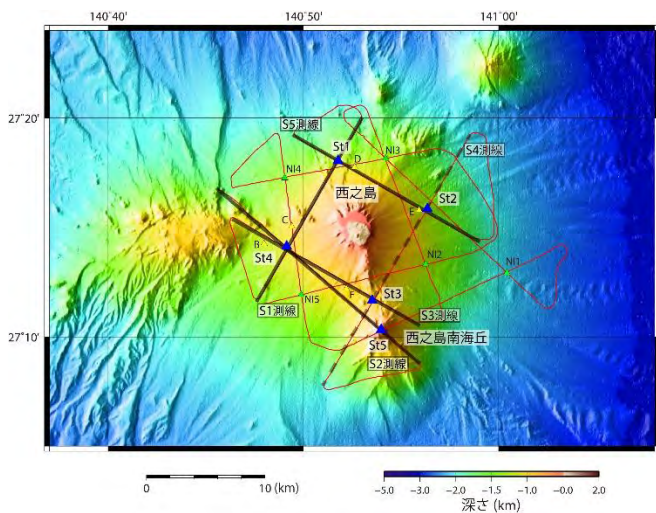


図2 西之島周辺に設置した海底地震計(三角)および地震波速度構造探査測線(赤線)の位置。各地震計の所属は以下のとおり;青:海上保安庁、黄:気象研究所、緑:東京大学地震研究所。黒太線と黒点線で示した測線についてP波速度構造解析を実施した。

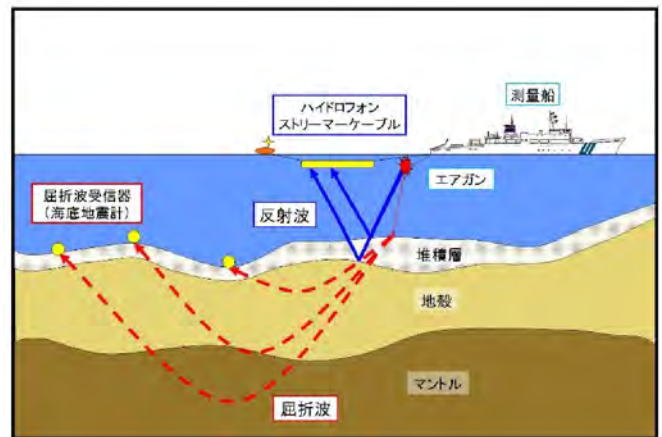


図3 地震波速度構造調査の模式図。本解析では、主に赤点線で示した屈折波のデータを使用した。

3. 西之島周辺の自然地震活動の特徴

OBSの連続波形記録から、西之島周辺の自然地震活動について以下の2つの特徴が確認された。

- ① 断層のズレによって発生する地震は、遠地地震を除いて検出されなかった。断層運動によって起きる通常の「地震」の震動波形では、地震波の振動方向の違いからP波・S波などの複数の波の到着を区別することができる。しかしながら、西之島周辺での観測期間中、P波・S波が明確に区別できる震動波形はほとんど確認できなかった。西之島火山周辺では、断層運動により発生する地震があまり起きていなかった、もしくはOBSで記録できないほど規模が小さい地震が起きていたと推測される。
- ② 1分程度の間隔で発生している特徴的なイベントが複数のOBSで同時に確認された。OBS記録におけるイベントの震動発生時刻と、船上からの噴火活動の目視観察を比較すると両者は非常によく対応しており、震動開始から数秒遅れて火口からの噴火が発生していることが判明した[森下・他, 2015]。図4では、OBS St1の観測記録との対比を示す。オレンジ色の範囲が火口からの噴煙が視認された時

間帯であり、ほぼ同時刻にこの特徴的な震動がすべてのOBSで観測されているので、これを噴火に伴う震動であると解釈した。

噴火に伴う震動と解釈される波形の周波数特性を調べるために、それぞれのOBSで記録された震動波形のスペクトログラム (Gabor Spectrogram) を計算

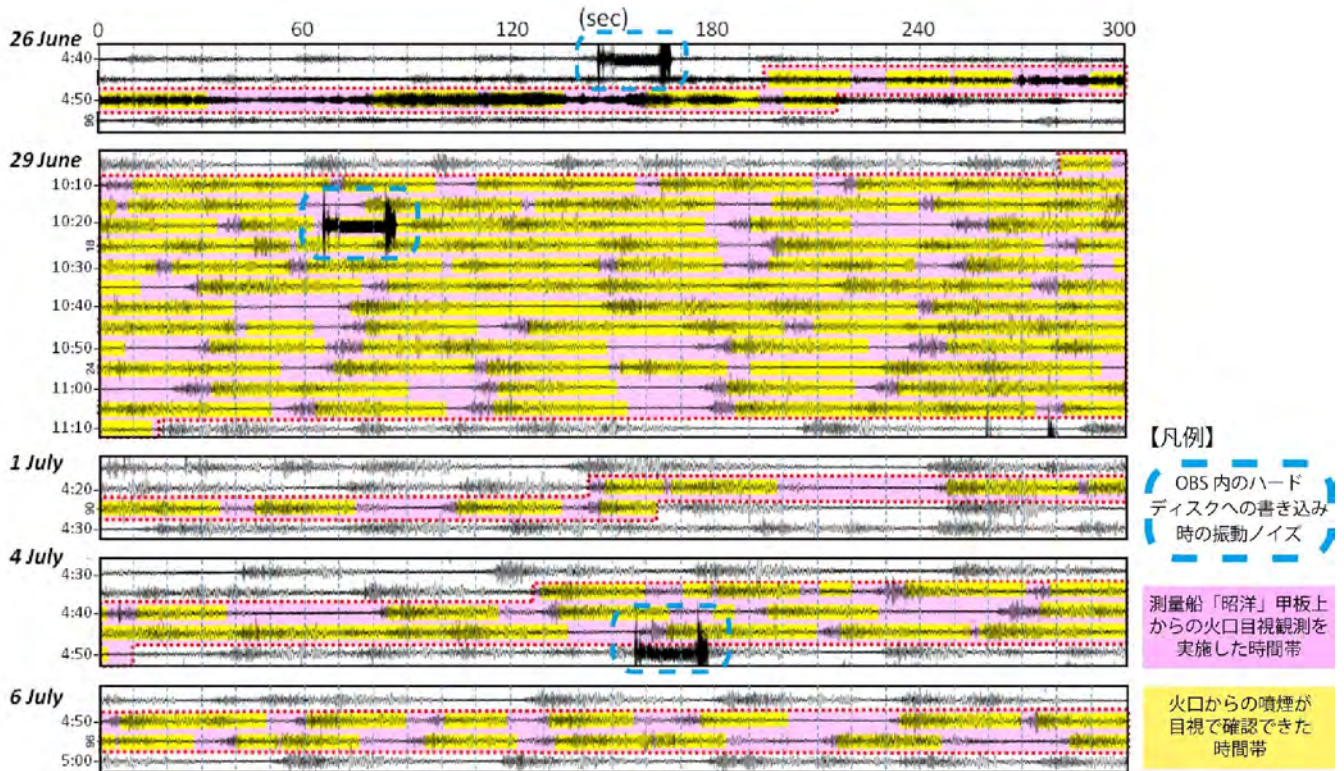


図4 測量船上から目視で確認した火口からの噴煙放出時間とOBS St1で記録された震動波形(上下動記録)との対比。1本のトレースは、5分間に相当する。

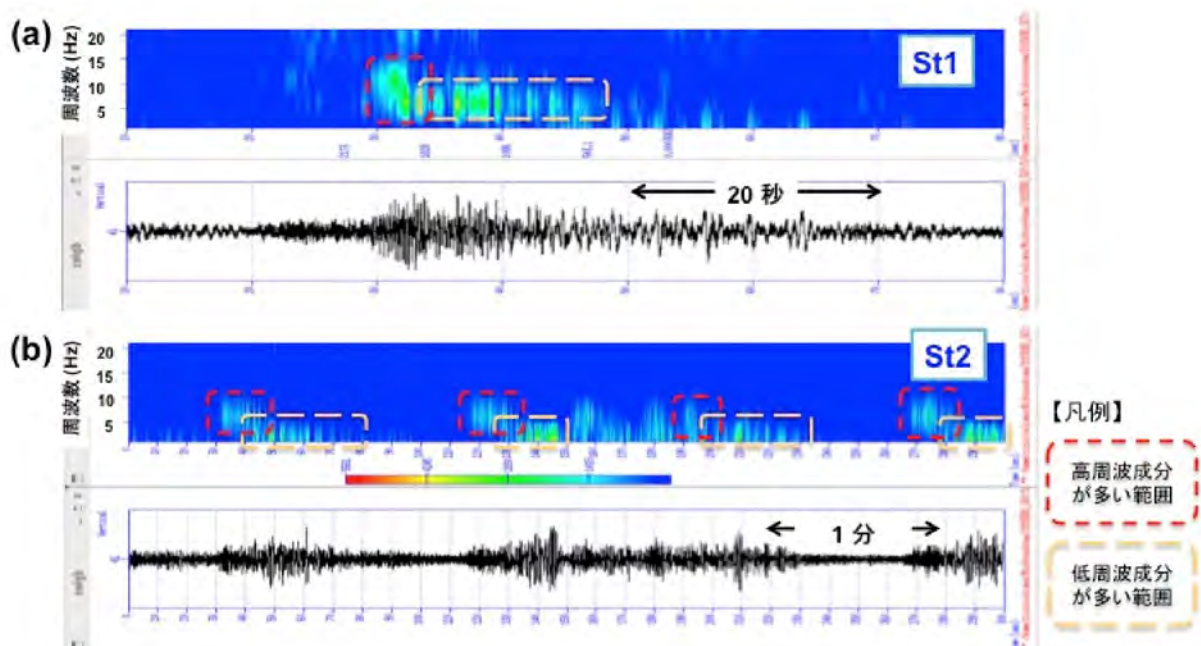


図5 噴火活動に伴うと推定される震動波形記録から作成したスペクトログラム。(a)St1における震動波形記録(下図)とそのスペクトログラム(上図)。(b)St2における震動波形記録(下図)とそのスペクトログラム(上図)。

した。図5 (a) の St1 の記録を見ると、イベントの初期部分(赤枠の範囲)では10Hz を超えた高周波域に信号が確認される。その後の15秒間程度(オレンジ色枠の範囲)では信号の帯域は10Hz 以下となり、さらにそれ以降では5Hz 以下になる。図5 (b) の St2 の記録では、前半部分で見られる高周波成分は約10Hz 以下であったが、イベントの後半に向かうにつれてさらに低周波域が卓越していく変化が確認された。このような周波数特性から1回のイベントにおいては、火山体内で噴火の発端となる現象が起こっている時に高周波成分が卓越し、低周波成分が卓越する時間帯に火口から噴煙が放出されていると推定した。

4. 西之島火山周辺の地震波速度構造モデル

西之島周辺の地殻構造を推定するにあたり、2種類の解析を実施した。

(1) ファンシューティング

P波速度構造解析を実施する前の予備的な解析として、エアガン発震位置から西之島山体下を伝播した波線が各OBSに達するまでにどのように減衰するかを調べてみた。

図6にOBSSt1で得られたレコードセクションを示す。この解析では、エアガンショットの時間に合わせてOBSの連続波形を切り出し、1ショットごとの記録波形をショット順に左から並べている。大半の時間帯ではエアガンからの震動が記録されているが、突然震動が記録されなくなったり振幅が大きく減衰したりする区間があることが判明した。St1において減衰が確認された区間において、エアガンからの地震波が伝播したと推定される領域を図7の緑色と青色の網掛けで示した。震動の減衰が確認された区間は、波線が西之島火山の直下付近を通る傾向にあることが判明した。他の4台のOBS記録でも同様の傾向が確認されている。速度構造が不明であるの

で、青と緑の影の部分の深度やその水平方向の広がりをも正確に決めることはできないが、西之島火山体の直下に地震波を減衰させる領域が存在することが示唆された。

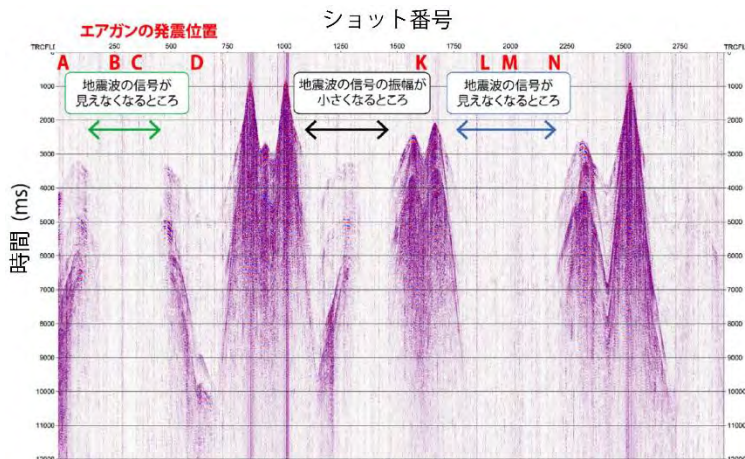


図6 OBS St1で記録されたエアガン発震のレコードセクション(上下動記録)。エアガン発震時刻に合わせてOBSの記録波形を切り出し、5-30Hzのバンドパスフィルターをかけている。

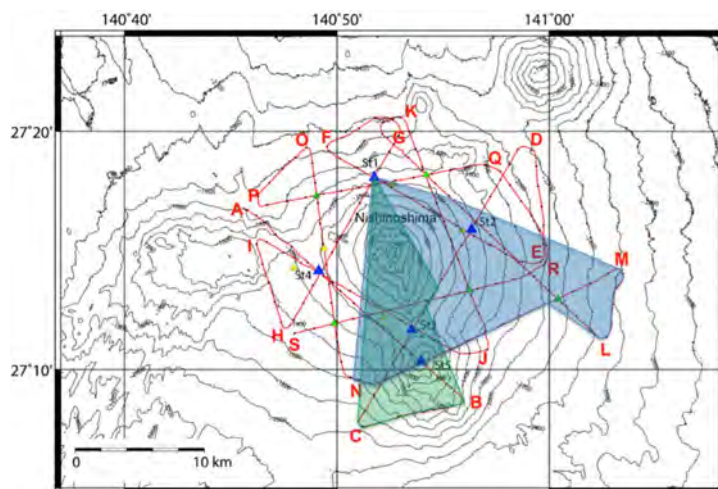


図7 OBSSt1のレコードセクションから推定された、地震波を減衰させると推定される物質の存在域の重ね合わせ。OBSのレコードセクションで地震波が記録されなかった範囲の波線が通ると推定される領域を緑色と青色の網掛けで示した。網掛けの色は図6の両矢印の色とそれぞれ対応している。西之島火山体の直下に地震波の減衰域の存在が確認できた。

(2) P波速度構造解析

P波速度構造解析は、各測線の各OBSについて観測記録(レコードセクション)の作成、OBSに最も早く到着する屈折波初動とその後

に到着する反射波走時の読取、初期モデルの作成、2次元波線追跡法を使用したフォワードモデリングによるモデルの改良[Fujie et al., 2000; Kubota et al., 2009]の順で実施した。P波速度構造モデルの推定は、当庁設置のOBSの直上を通る5測線で解析を行ったが、そのうち図2の黒点線で示す1測線はOBSの記録に雑微動が多く、エアガンからの地震波信号の走時を読み取ることができなかったため、残りの4測線の速度構造モデルを推定した。例として、西之島の南西側を通るS1測線の速度構造モデルを図8に示す。4測線に共通して確認されたP波速度構造モデルの特徴は以下の通りである。

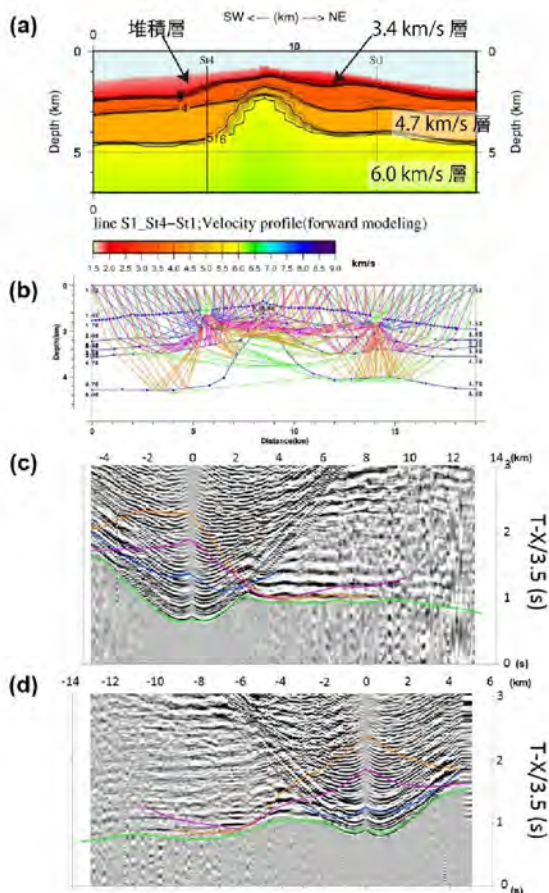


図8 (a) S1測線 (OBS St1 と St4上を通る西之島北西側の測線) のP波速度構造モデル。コンターは、0.25 km/s ごとの等速度線を示す (2-6 km/s の範囲)。 (b) 2つの OBSにおける地震波の波線図。青線は、各層の境界線を示す。 (c) St4のレコードセクション上に計算走時をプロットしたもの。 (d) St1のレコードセクション上に計算走時をプロットしたもの。

- ① 浅部より、最上部堆積層 (約 2.0 km/s 層)、3.4 km/s 層、4.7 km/s 層、6.0 km/s 層の4層に分けることができる。
- ② 最上部の堆積層は、P波速度が概ね 1.9-2.1 km/s となっている。厚さは約 1 km であるが、測線を通して様な厚さを示している測線と、厚さに変化がある測線に分かれている。
- ③ 堆積層の下にある層は、速度 3.4-3.5 km/s と推定された。厚さは 1-2 km で測線ごとにばらつきが見られる。
- ④ 3.4 km/s 層の下位に、速度 4.7 km/s の層の存在が認められた。厚さは 1-2 km であるが、堆積層や 3.4 km/s 層よりも 4.7 km/s 層が厚い測線が多い。
- ⑤ OBS のレコードセクションから、4.7 km/s 層下にさらに速度の速い層が存在していると推定された。この層は、速度 6.0 km/s とすることで説明することが可能である。しかし、測線上の2台のOBSに対する波線図を見ると (図8 (b))、6.0 km/s 層を通過した屈折波の波線が2台のOBSで重なる範囲が狭く、測線の中央部のみに限定されていることから、中央部以外の範囲においては推定精度が低い。また、オレンジ色の計算走時曲線で示している信号よりも後に到達した反射波の信号が確認できなかったため、この層の下端の深さと速度は決定できなかった。
- ⑥ 堆積層 (海底面) から 4.7 km/s 層までの厚さは、概ね 3-4 km である。また、海底地形と速度構造モデルの比較から、西之島の北西に存在する地形の高まりと西之島南海丘の直下において、周囲よりも高速度層の上昇が認められた。図9で示したS2測線が通った西之島南海丘の近くでは、3.4 km/s 層と 4.7 km/s 層が周辺よりも浅部に存在していることが確認された。

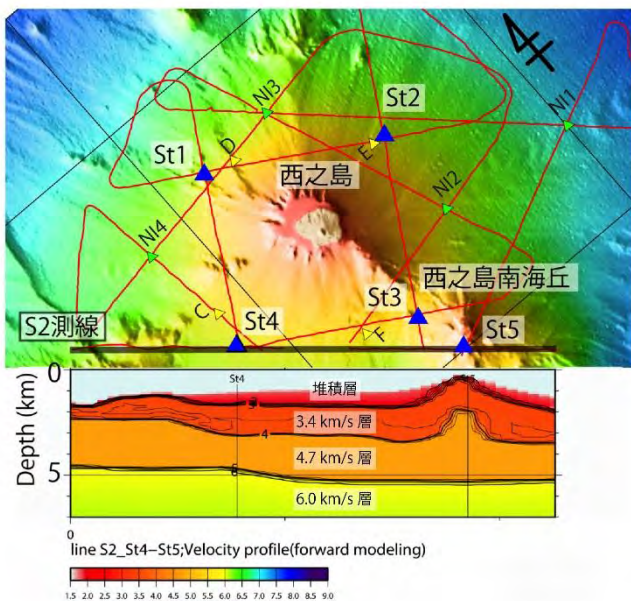


図9 S2測線 (OBSSt4とSt5上を通る西之島南西側の測線) のP波速度構造モデルと海底地形の対比。上図はS2測線の位置と海底地形、下図はP波速度構造モデルを示す。測線南東側の西之島南海丘の直下で3.4km/s層と4.7km/s層が上昇している。6.0km/s層の上昇は測線長の問題もあり、今回は確認できなかった。

5. おわりに

本調査結果は、西之島火山の噴火活動様式の把握や今後の震源決定精度向上のための観測点補正の推定等に貢献できると考えられる。なお、今回のP波速度構造解析では解析に使用できるデータが少なく、1つの層内の速度を一定と仮定した極めて単純なモデルの推定を実施した。火山体の構造は3次的に不均質であるため、不均質性を反映させたより詳細な構造を推定するには、OBSを密に設置しさらに多くのデータを取得することが必要と考えられる。加えて、2017年4月の再噴火以降の火山活動によって、さらに島が拡大したことが確認されており、今回推定した地殻構造も変化している可能性がある。火山活動が収束した後、再度海底下の構造に関する調査を実施することが期待される。

謝辞

本調査にあたり、測量船「昭洋」の船長を始めとした乗組員の方々、また現地調査班の皆様には、調査機器の運用を安全に遂行していただいたことに感謝いたします。海底地震観測計画策定に際しては、東京大学地震研究所の篠原雅尚氏、気象研究所の高木朗充氏には大変お世話になりました。海底地形図や航跡図の作成にはGMT (Generic Mapping Tools; Wessel and Smith, 1998) を使用しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 小野智三・濱崎翔五・矢島広樹・伊藤弘志・野上健治 (2015) 西之島火山の2013-2014年噴火活動, 海洋情報部研究報告, 52, 56-78.
- 2) 小野智三・佐藤泉・森下泰成・濱崎翔五・野上健治 (2018) 2013年-2015年の西之島火山の火山活動, 海洋情報部研究報告 55, 20-54.
- 3) 西澤あずさ・小野智三・大谷康夫・古川博康 (2000) 明神礁における海底地震観測, 水路部研究報告, 36, 37-56.
- 4) 高木朗充・西澤あずさ・篠原雅尚・長岡優・木村一洋・森下泰成・小野智三 (2015) 西之島火山周辺の海底地震合同観測, 日本火山学会 2015年秋季大会講演予稿集.
- 5) 森下泰成・小野智三・濱崎翔五・高橋日登美・野上健治 (2015) 西之島火山の調査航海結果 (速報), 日本火山学会 2015年秋季大会講演予稿集.
- 6) Fujie, G., J. Kasahara, T. Sato, and K. Mochizuki (2000) Traveltime and raypath computation: a new method in a heterogeneous medium, J. Soc. Explor. Geophys. Jpn., 53, 1-11.

- 7) Kubota, R., E. Nishiyama, K. Murase,
and J. Kasahara (2009) Traveltime
estimation of first arrivals and
later phases using the modified
graph method for a crustal structure
analysis, *Explor. Geophys.*, 40, 105-
113.
- 8) Wessel. P., and W. H. F. Smith (1998)
New, improved version of the Generic
Mapping Tools released, *EOS Trans.*
AGU, 79, 579.

2. 沖合観測情報に基づくアンサンブル津波予測手法の開発

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 高川 智博

1. はじめに

津波は水路や港湾、その背後地に甚大に被害を及ぼす。その多くが海域の地震によって励起され、津波発生源近傍ではわずか数分で破壊的な津波が沿岸を襲うことがある。一方、東京湾、伊勢湾、大阪湾などの社会資本が集積する湾奥では、地震発生から津波の浸水までは1時間程度の時間的猶予がある(図1)。そのため、沖合で捉えた津波の観測情報に基づく確度の高い予測情報は、緊急対応の重要な判断要素となりうる。

地震や津波の発生後に観測情報に基づいて津波浸水を予測する手法には、さまざまな手法(Tsushima and Ohta, 2014)が提案されている。これらは事前計算を主体とする方法と事後の計算を主体とする方法の2つに分けて考えることができる。事前計算を主体とする方法(例:Abe and Imamura, 2010)では、複数の地震や津波の発生シナリオを想定し、予め津波の伝播浸水シミュレーションを行って、その結果をデータベースとして記録しておく。実際に地震や津波が発生した際には、観測データとデータベースを比較し、適合度の高いシナリオから予測値を生成する。事前にシミュレーションを実施することから、速報性に優れている。一方、事前に想定するシナリオの多様性には限界があり、実際に発生した津波がこれらシナリオでうまく近似できないものであった場合には、大きく精度が低下する可能性がある(Hossen, et al., 2015)。事後計算を主体とする方法(例:Titov et al. 2005)では、地震発生後に津波伝播浸水シミュレーションを実施し、予測を行う。こちらは、事後計算であるため、速

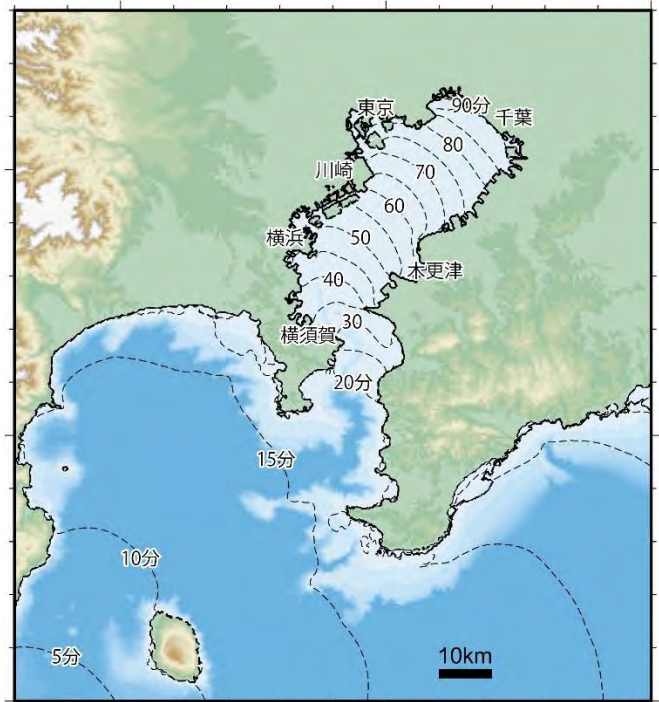


図1 東京湾における南海トラフ地震津波(内閣府(2012)ケース①)の第一波到達時間

報性という点ではデータベース方式にはかなわない。しかし、事前に設定する津波発生シナリオに依存しない方法(例:辰巳・富田, 2008, Tsushima et al., 2009)を用いることで、自然界で発生する複雑で多様な津波(図2)に対応可能な予測手法を構築することが可能である。また、非線形性の強い浸水現象のシミュレーションを事後的に行うため、浸水に大きな影響を及ぼす地形や防護構造物の変化にも、大幅なデータベースの更新をすることなく、柔軟に対応することが可能である。とくに、浸水現象は地殻変動による地盤高の変化の影響を強く受けるが、津波と同時生起し、予測結果に重大な影響を与えるような変化も予測に取り込むことができるのも、

事後計算方式が精度を向上させる上で有利な点である（高川・富田，2012，2014）。ここでは高精度な予測が期待される事後計算方式による津波浸水予測手法、なかでも予測の不確実性の定量化機能を備えた新しい津波浸水予測手法について、その概略を紹介する。

ここで紹介する沖合観測情報に基づくアン

サンプル津波予測のスキーム（高川・富田，2015）を図3に示す。スキームは大きく、（1）沖合観測波形データの逆解析による津波波源推定と、（2）浸水を伴う非線形現象に適用可能なアンサンプル予測という2つの部分に分けることができる。

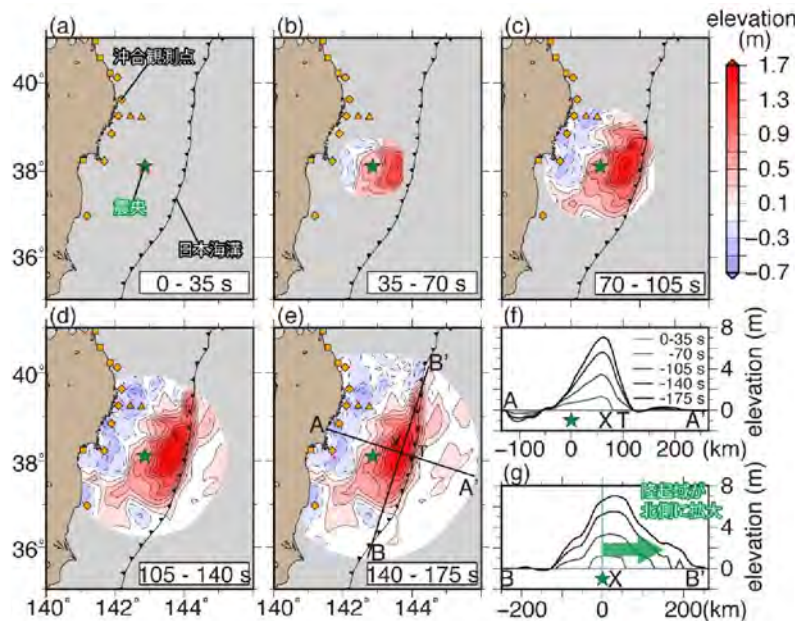


図2 津波観測波形データによる2011年東北地方太平洋沖地震による津波の初期水位分布の時間発展の解析例（Takagawa and Tomita (2012)を修正）。日本海溝に沿った隆起帯が北方に伸張する顕著な異方性があり、複雑な時空間分布を示すことが大きな特徴。

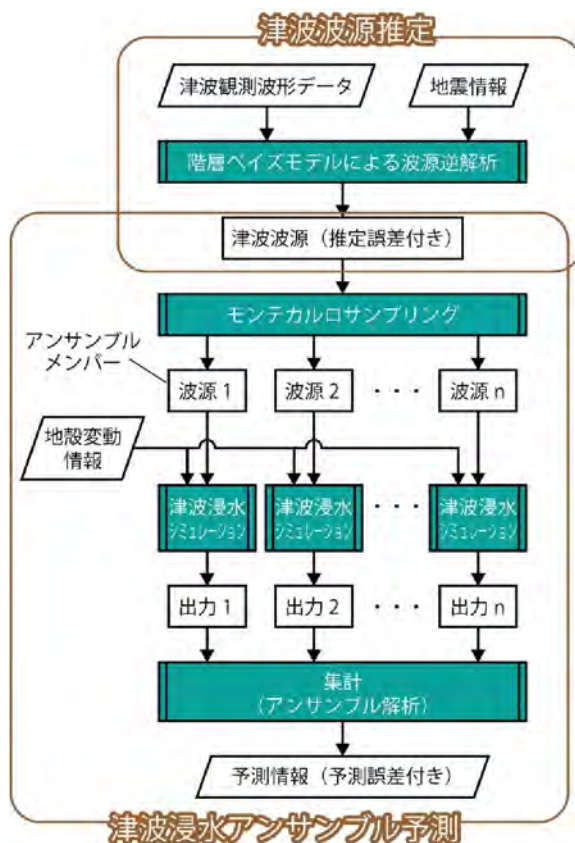


図3 沖合観測情報に基づくアンサンプル津波予測のスキーム（高川・富田（2015）に加筆）

2. 観測データに基づく津波波源推定と不確実性の定量化

波源推定は階層ベイズモデルを用いた観測津波波形の逆解析により行い、津波の初期水位の時空間変動を推定する(図2)。解析方法の詳細については高川・富田(2012, 2014)を参照いただきたいが、重要なのはこの手法により、初期水位の最尤推定量が求められるだけでなく、その不確実性の幅も同時に推定できることである(図4)。これにより観測点の増設や観測時間の増加が波源の推定精度の向上に与える影響を定量的に示すことが可能となる。この解析では、沖合の津波伝播現象がほぼ線形な現象であることを利用し、線形近似のもとで逆解析を行っており、波源の推定結果は水位の時空間変動を表す多変量正規分布で表される。

3. 非線形現象に適用可能なアンサンブル予測

多変量正規分布でモデル化された津波の初期水位分布の不確実性が津波伝播により陸域にどのように伝わるのかを推定するのが、次の課題である。ここで、単純な例をもとに、津波浸水による非線形性によって、確率密度分布が大きく変化すること、そしてそのような非線形変換に適用可能なアンサンブル予測について述べる。

図5は津波来襲時の堤防の前面の水域の水位と堤防に守られた背後地域の水位の関係を簡単な非線形変換としてモデル化したものである。左下の図の青実線は、堤防の高さを越えるまでは背後地域は一切浸水しないが、津波の水位が堤防の高さを越えると、前面と背面の水位が一致するまで浸水が進行することを表している。比較のために線形変換の例も

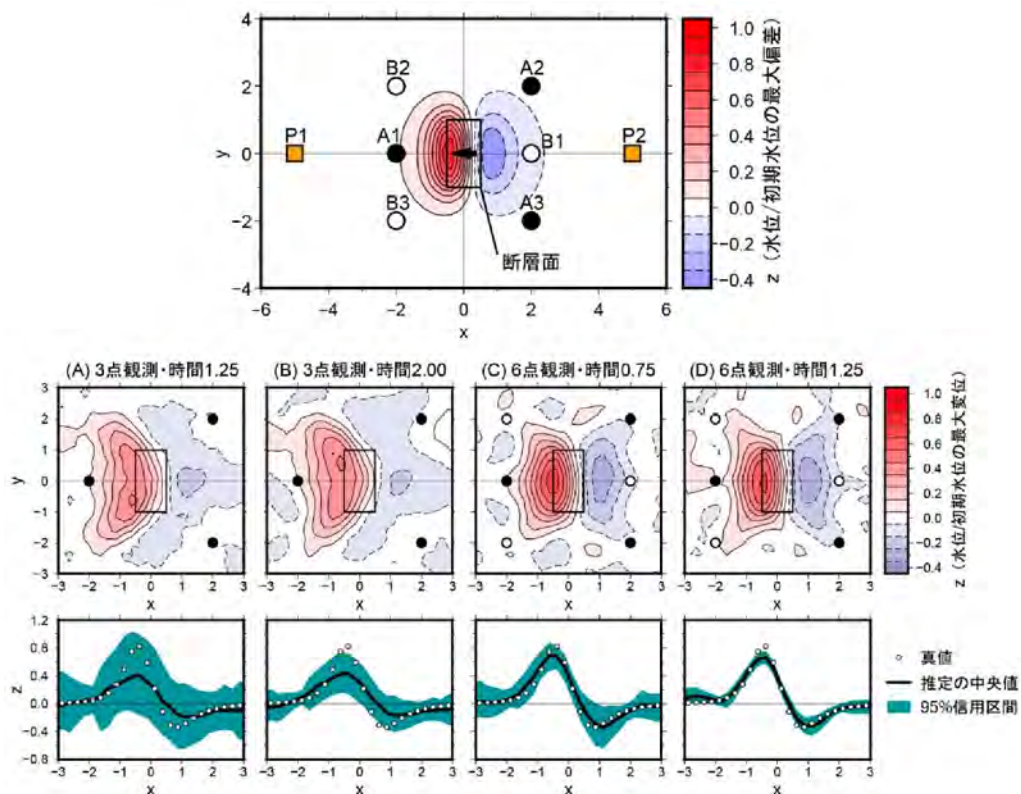


図4 階層ベイズモデルによる津波波源推定と不確実性の定量化の例。観測点の数と観測時間を変えた場合の推定結果の比較。上段が津波波源の真値、中段が波源推定値の平面分布、下段が推定値の鉛直断面である。観測点が多く、観測時間が長くなるほど推定の中央値が真値に適合し、信用区間が狭まる(高川・富田(2014)に加筆)。

黒破線で合わせて示した。3 mの高さの堤防に、高さ 2.5 ± 1.5 mの津波が作用する場合を考える（確率密度分布を平均 2.5 m、標準偏差 0.75 mの正規分布でモデル化）。このとき線形の場合は堤防背後の水位の確率密度分布は、堤防前面と同じく一つの頂点の周りになめらかに裾野が広がる正規分布となる（図5右下の黒破線）。しかし、非線形変換の場合は分離した2つ頂点をもつ分布となる（図5右下の青実線）。防護レベルを越えるか越えないかで、背後域の被害が大きく異なるというのは、津波浸水現象に本質的な部分であり、こうした非線形性に伴う確率密度分布の変形は予測の不確実性を評価する上で適切に扱う必要がある。しかしながら、ここで見たように強い非線形性を持つ津波浸水現象においては、仮に前面水位の確率密度分布が正規分布のように解析的に扱いやすい分布で与えられたとしても、背後地の確率密度分布は複雑な形状となり、解析的な扱いが困難である。このように非線形性が強い現象に対し、確率密度分布の

変形を推定するのに用いられる方法がアンサンブルによる推定である。この方法では確率密度分布を多数のアンサンブルメンバーの集合でモデル化する。アンサンブルメンバーは確率密度分布からのモンテカルロサンプリングによって得られる（高川・富田 2015）。図5の左上図の緑色の円が個々のアンサンブルメンバーを表し、これらの集合、すなわちアンサンブルによって確率密度分布を表現する。非線形変換の場合、広がりをもった分布がどのように変換されるかを簡単に計算することができない場合も多いが、広がりを持たないある特定の状態（アンサンブルメンバー）が変換によってどう変化するかは、単純に個々のメンバーの値に変換を施すだけで計算できる。図5の緑の矢印がアンサンブルメンバーの変換を表している。このように、アンサンブルを用いることで、非線形現象であっても初期値に含まれる不確実性の分布が、どのように時間的・空間的に伝播していくのかを追跡することができるようになる。

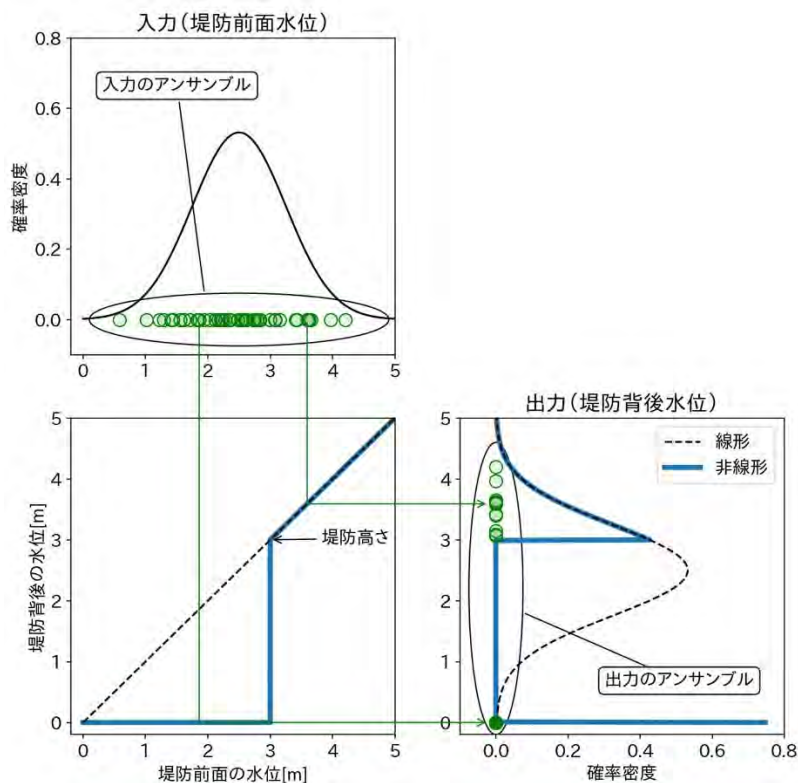


図5 堤防の前面水位と堤防の背後の水位の非線形な応答関係、および、非線形変換に伴う確率密度関数の変形とアンサンブルによる予測の模式図。

4. 想定南海トラフ地震津波の模擬観測波形を用いた手法の検証

ここで紹介したアンサンブル津波予測手法を想定南海トラフ地震津波の模擬観測データに適用した事例（高川・富田，2015）を紹介する。この事例では、名古屋港周辺地域を浸水予測の対象地域とし、想定南海トラフ地震津波（内閣府（2012）ケース①）が発生した場合について調べた。検証ではまず模擬観測波形を作成する。これは、想定される津波発生のシナリオから津波の伝播浸水シミュレーションを実施し、その結果からGPS波浪計など実際の沖合の津波観測地点での水位の時系列データを抽出し、その波形データに人工的な観測ノイズを加えることで作成した。この模擬観測データと地震の震央位置の情報を入力として津波波源の推定を行った（図3上段）。さらに、対象とした地震はマグニチュード9.1の巨大地震であり、対象地域で0.5m程度の地盤の沈降が想定されている。こうした

地盤変動の影響も考慮するため、地殻変動量をデータとして与えた場合と与えない場合についてそれぞれ検証した。なお対象地域の地殻変動量については国土地理院の電子基準点のデータを用いることにより、地震発生後数分程度で推定することができるため、ここでは既知の情報として予測スキームに入力した（図3中段）。

図6の上段に沖合観測点の波形予測結果を示す。図より、観測時間が7分→10分→15分と変化する中で、波源推定に使用した時間以降のデータにおける信用区間の幅が減少し、予測誤差が低減していること、信用区間の幅が減少しているにも関わらず、真値をほぼ内包しており、信用区間の推定がほぼ正しく機能していることがわかる。また、地震発生後10分の時点では、伊勢湾口沖、高知西部沖などにはまだ第一波のピークが到達していないが、この時点で第一波のピークが信用区間で捉えられている。これは、波源から比較的離れた沖合観測点では津波到達前に、到来する

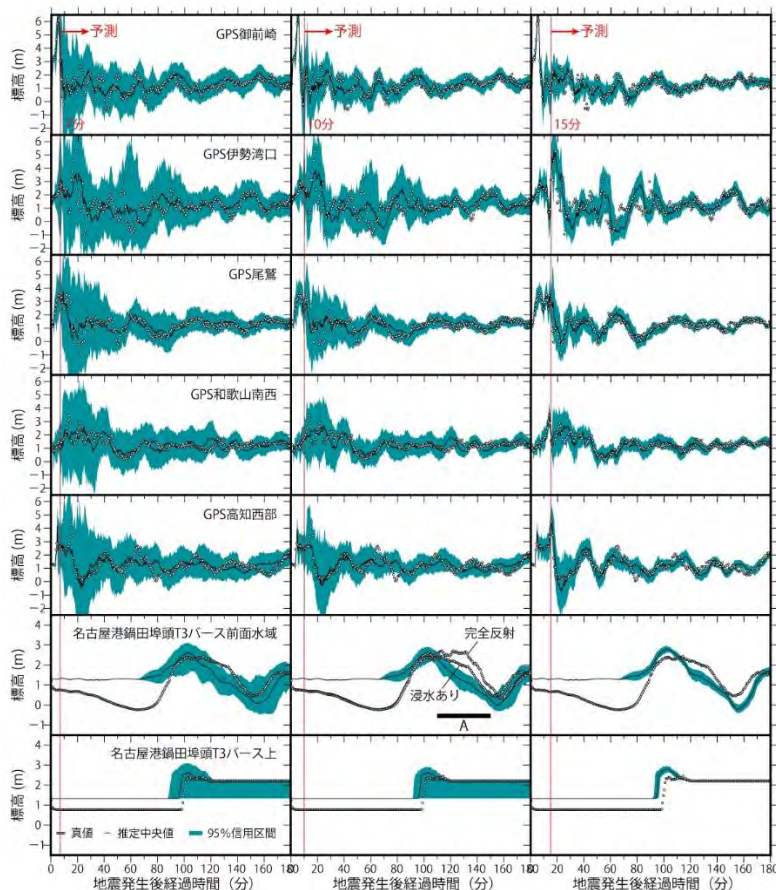


図6 津波の時系列波形の真値と推定値の比較。左列は7分間の観測データに基づく予測を表し、中列、右列はそれぞれ10分間、15分間のものである。赤線よりも左側の区間が推定に用いたデータであり、右側が予測区間である。推定値の不確実性を緑色の帯の幅で表現している（高川・富田，2015）。

津波のピーク波形に関するリスクを正しく認識できることを示している。

図6の下段には名古屋港の入り口付近に位置する鍋田埠頭 T3 バースの前面水域の水位変化とバース上の陸上地点の水位変化を示した。バース全面の波形に関しては、沖合観測点の場合と異なり、地震発生後 90 分頃までの引き波を全く予測できていない。この引き波はGPS波浪計等の沖合観測点では捉えられない伊勢湾内の波源によるものである。この引き波成分を予測するには、伊勢湾内の領域も波源域に加えるとともに伊勢湾内の津波波形観測データも取得する必要があると考えられる。一方、太平洋側の津波波源に対応する第一波の押し波が到来する地震発生から 90 分後以降は、沖合観測点と同様に、観測データの蓄積により信用区間が徐々に縮小すること、全体的な波形の概略を再現することに成功している。一部に信頼区間から真値が外れている部分があるが、これには水路端での浸水・反射に関係する非常に非線形性の強い現象が関係しており(高川・富田, 2015)、アンサンブル予測でも捉えにくい部分である。予

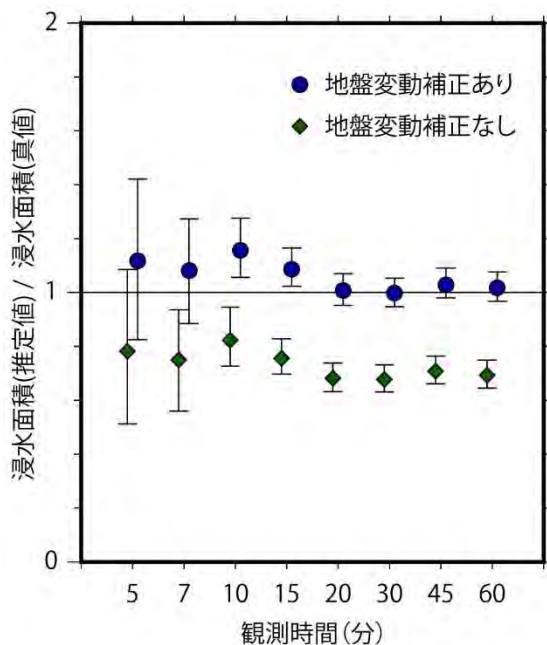


図7 名古屋港周辺の津波浸水面積の真値に対する推定値の比の観測時間による変化(高川・富田, 2015)。

測情報の活用にあたってはこうした誤差があることも認識しておく必要がある。

名古屋港周辺地域の浸水深面積の予測結果を図7に示す。時間経過に伴う観測データの蓄積により信用区間の幅が徐々に減少し、真値に収束していることがわかる。一方、図には地盤沈下を考慮しない場合の推定結果も合わせて示した。名古屋周辺地域では南海トラフ巨大地震時に 50 cm程度の地盤の沈降が想定されている。地盤の沈降を考慮しない場合には、30%程度浸水面積を過小評価することになる。ここで示した結果は、精度の高い浸水状況の推定を行うには、地盤変動量を取り入れた推定を行うことが不可欠であることを示している。

地盤変動を考慮することで開発手法により浸水面積が適切に推定できることが示されたが、浸水域の空間分布はどうであろうか。図8には最大浸水深分布の真値と7分間と15分間の観測データに基づく 50 パーセンタイル推定値を示した。左側の列に示した図からは、推定値が全体的な浸水分布の傾向をよく再現していることが見て取れる。より詳細に真値と推定値の違いを比較するために両者の差分をとったものが真ん中の列の図である。庄内川より東側では過小評価、西側では過大評価となっていることがわかる。両者の面積差が全体の浸水面積に比して小さいため、浸水面積という評価基準では真値とほぼ一致するものの、予測誤差の分布には空間的な偏りがあることがわかる。ただし、その予測誤差はほぼ全域で 75 cm未満となっており、この区域の最大浸水深が 3 m 以上であることを考えると、誤差は 25%未満である。また、上下の図を見比べることにより観測時間の増加とともに、真値との差が減少し、推定精度が向上していることが確認できる。次に、図8の右列には 97.5 パーセンタイル推定値と真値との差を示した。図には 25 cm以上の過小評価を示す青い色の領域がほとんど無い。したがっ

て、過小予測が甚大な損害に発展しかねない問題に対して予測情報を活用する場合には、このような区間推定による推定値を活用することが有効であると考えられる。

5. まとめ

沖合観測波形データに基づく津波浸水アンサンブル予測スキームの概要を紹介した。このスキームは階層ベイズモデルに基づく津波波源逆解析手法、推定波源の確率密度分布に基づくモンテカルロサンプリング、多数の津波波源に基づく津波浸水推定結果のアンサンブル解析から成り立っている。スキームの有効性を検証するため、南海トラフ巨大地震津波を想定し、南海トラフ沿いに設置されたGPS波浪計の観測波形データを用いて名古屋港に來襲する津波波形や浸水状況の予測を行った。その結果、時系列波形予測、浸水面積予測、最大浸水深の空間分布予測いずれにおいても、観測データの蓄積に応じて信用区間が縮小あるいは予測精度が向上し、真値に収束することが示された。ただし、浸水予測が真値に収束するためには、地盤変動の影響を考慮することが不可欠であった。また、区間推定の97.5パーセンタイル値のような端部の値を用いることによって、過小評価のリスクを適切にコントロールした予測情報が提供可能であることも合わせて示した。

参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告），44p.，2012.
- 2) Tsushima, H. and Y. Ohta: Review on Near-Field Tsunami Forecasting from Offshore Tsunami Data and Onshore GNSS Data for Tsunami Early Warning, J. Disaster Res., 9, 339-357, 2014.
- 3) 阿部 郁男, 今村 文彦：津波浸水予測データベースによるリアルタイム津波浸水予測の精度と評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 66, 261-265, 2010.
- 4) Hossen, M. J., P. R. Cummins, J. Dettmer and T. Baba: Time reverse imaging for far-field tsunami forecasting: 2011 Tohoku earthquake case study, Geophys.

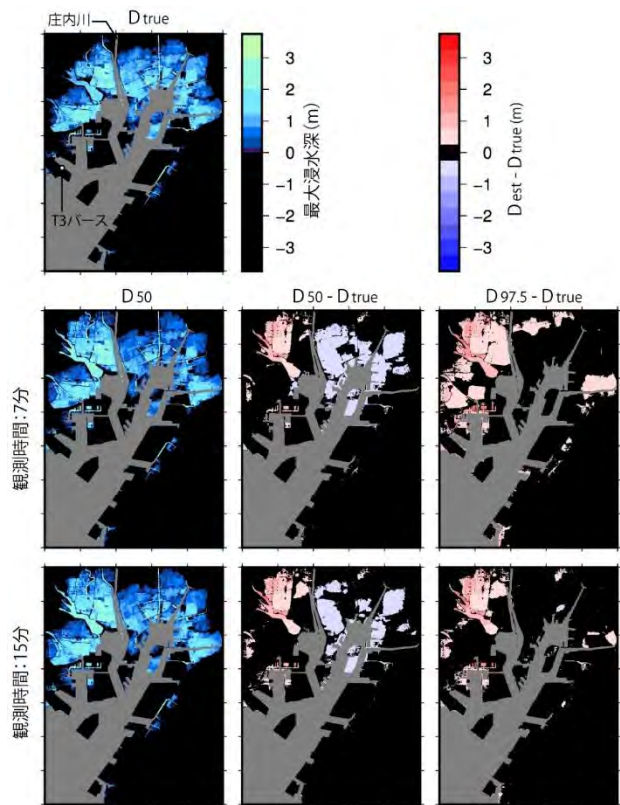


図8 津波の最大浸水深の平面分布図。上段は真の分布、中段と下段はそれぞれ観測時間7分間と15分間の津波波源データに基づく推定値である。 D_{true} は最大浸水深の真値、 D_{est} はその推定値であり、推定値のうち50、97.5パーセンタイル値をそれぞれ D_{50} 、 $D_{97.5}$ で示した（高川・富田，2015）。

- Res. Lett., 42, 9906 - 9915, doi:
10.1002/2015GL065868, 2015.
- 5) Titov, V.V., F.I. González, E.N. Bernard, M.C. Eble, H.O. Mofjeld, J.C. Newman, and A.J. Venturato: Real-time tsunami forecasting: Challenges and solutions, *Nat. Hazards*, 35, 35-41, doi:10.1007/s11069-004-2403-3, 2005.
 - 6) 辰巳大介, 富田孝史: 震央位置を利用したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測, *港湾空港技術研究所報告書*, 47 (3), 55-73, 2008.
 - 7) Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka and F. Imamura: Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, *J. Geophys. Res.*, 114, B06309, doi:10.1029/2008JB 005988, 2009.
 - 8) Takagawa, T. and T. Tomita: Effects of Rupture Processes in an Inverse Analysis of the Tsunami Source of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 24. 14-19, 2012.
 - 9) 高川智博, 富田孝史: 時間発展を考慮した津波波源逆解析と観測点地盤変動量のリアルタイム推定, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 68, I_311-I_315, 2012.
 - 10) 高川智博, 富田孝史: ベイズ情報量基準を用いた確率論的津波浸水予測手法の開発と検証, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 71, I_379-I_384, 2015.
 - 11) 高川智博, 富田孝史: 階層ベイズモデルによる津波波源逆解析解の信用区間と観測誤差の同時定量推定, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, 70, I_196-I_200, 2014.

3. 低天端有脚式離岸堤「バリアウイント」の開発

東洋建設株式会社 土木事業本部総合技術研究所鳴尾研究所 山野 貴司

1. はじめに

わが国では第二次世界大戦後、ダム建設や海岸・港湾構造物の建設などが進み、その結果として川から海への流出土砂量が減少し、港湾施設によって沿岸方向の土砂移動が分断されることによって、全国的に海岸侵食が加速された。さらには、将来気候において予想される海面上昇等による沿岸外力の変化や、既存構造物の老朽化、また、外洋に面した未整備の侵食性海岸も少なくないことから、海岸侵食に対する保全対策は継続的に取り組むべき国家的課題である。

海岸侵食対策工法の一つである離岸堤は、消波機能により波エネルギーを減衰させ、その背後に砂を堆積させて汀線を前進させる機能を有するものであり、積極的に海浜の拡大を図るものである。離岸堤のなかでも、杭によって構造物を支持する有脚式離岸堤は、海底勾配が急峻な場合や、地盤条件が良好でない等、従来の離岸堤では設置条件が厳しい場所や、外洋に面した海象条件が厳しい場所においても築造・設置が可能な構造物として開発された。現在、全国各地で採用されている離岸堤の多くは重力式（構造物の自重によって安定性を維持する型式）であるが、重力式離岸堤では設置が困難な現地条件も少なくない。そのような現地条件に対しては、有脚式離岸堤が優位となる。

一方で、砂地盤上に設置された海岸・港湾構造物の周辺で、波浪の作用によって渦流が発生し、構造物周辺の底質砂が移動する洗掘と言う現象が生じ得る。有脚式離岸堤の場合には、洗掘によって上部工を支持するための杭が露出して引き抜き抵抗に対する杭支持力

が低下し、杭そのものに流体力が作用するために杭の破断や屈曲を引き起こすなどの重大な影響を及ぼすことが懸念される。したがって、洗掘の発生機構を把握したうえで適切な対策を講じることは重要である。

そこで、実海域に適用するために求められる消波機能を満足したうえで、可能な限り小断面の構造型式としてコストの削減を図るとともに、沿岸景観にも配慮した低天端有脚式離岸堤「バリアウイント」（図1参照）を開発した。

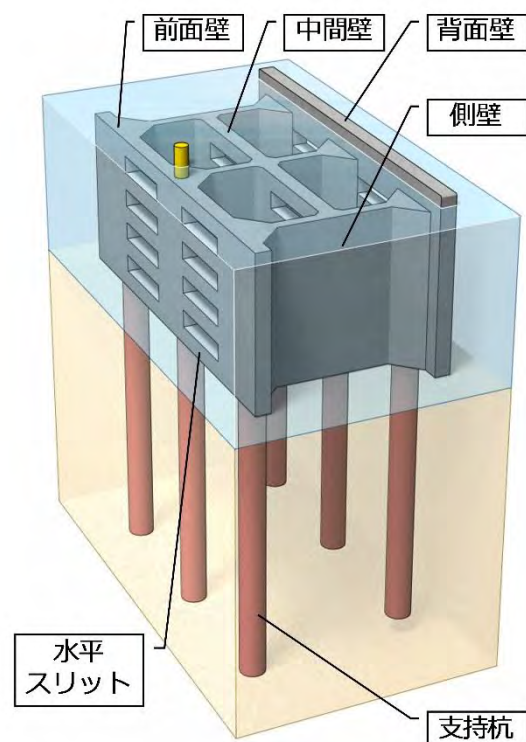


図1 低天端有脚式離岸堤「バリアウイント」

2. バリアウイントの特徴

バリアウイントの主な特徴を以下に示す。

(1) 水平スリットを有する消波・耐波構造

前面壁・中間壁・背面壁の3枚の水平スリットを有する壁と、側壁で構成される構造である。この多重スリット壁構造により、水塊がスリットを通過することで波エネルギーを減衰させることによる消波効果を発揮する。また、スリット壁間に遊水室を有しているため、内部で渦や乱れ、多重反射が発生することによる波エネルギーの減衰も促す構造である(図2参照)。図3に、相対堤体幅(波長 L に対する堤体幅 B の割合)と透過率 K_t および反射率 K_r の関係について水理模型実験の結果を示す。図より、本構造物の消波性能は、実海域に適用可能な低透過、低反射性能を達成し、従来の重力式離岸堤と同等以上の消波性

能を有していることから、離岸堤工法としての侵食対策効果が期待される。

床版だけでなく、水面付近の上床版がないことにより、鉛直波力を受ける面積が小さくなり、その結果、堤体に作用する鉛直波力が極めて小さい構造である。また、低天端構造であること、スリットを有する透過構造であることから、水平波力に対しても一定の低減効果を有する構造である。図4に、アーセル数 HL^2/h^3 (H :波高、 L :波長、 h :水深)と波力低減率 λ_r (本構造物に作用する水平波力と、同じ堤体高さの不透過直立壁に作用する水平波力との比)の関係を示す。図より、構造物全体に作用する水平波力は、不透過構造物の場合の約0.6倍の波力低減効果を得られることを模型実験において確認した。

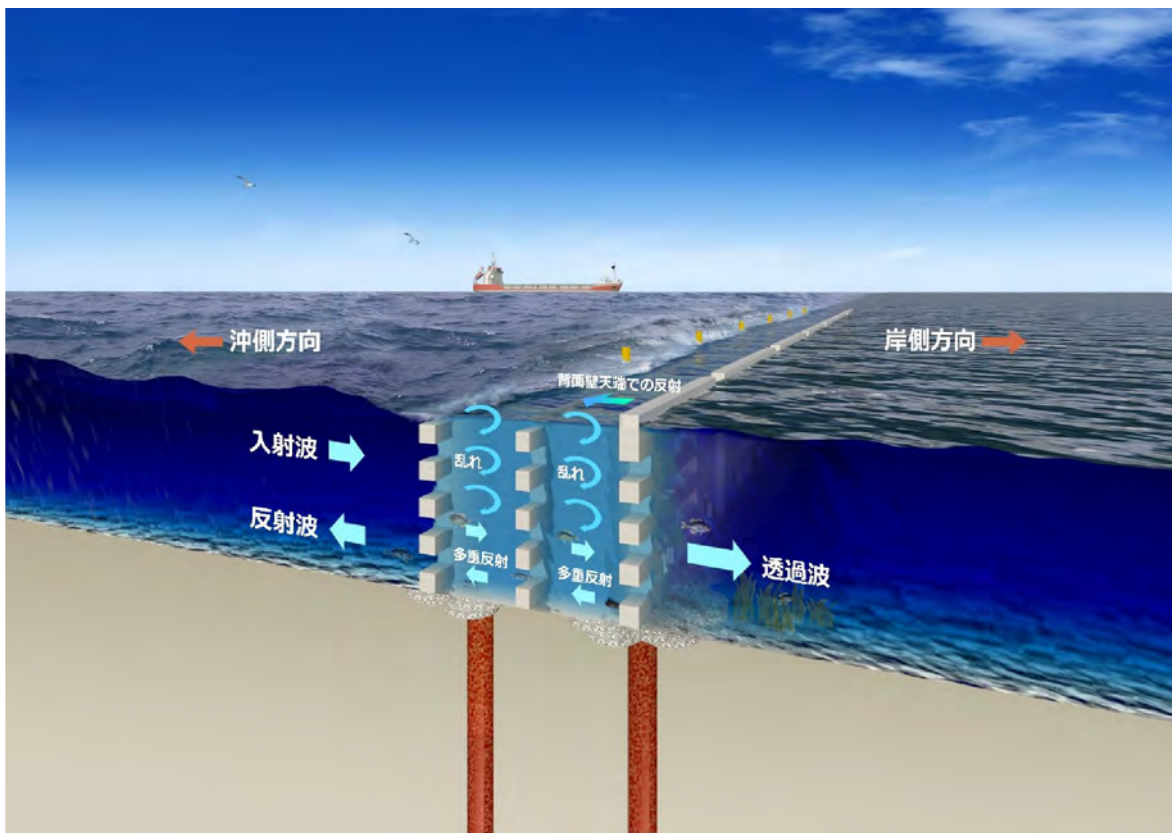


図2 バリアウイントの消波機構

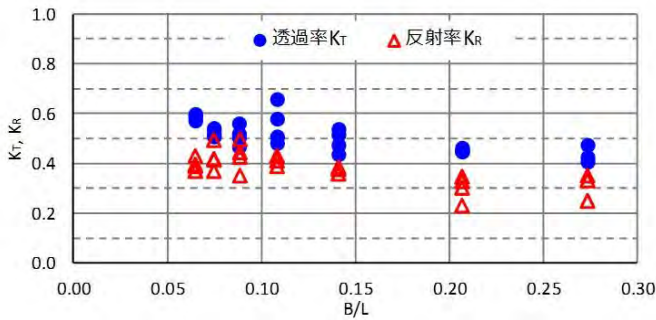


図3 相対堤体幅 B/L と透過率 K_T ・反射率 K_R の関係

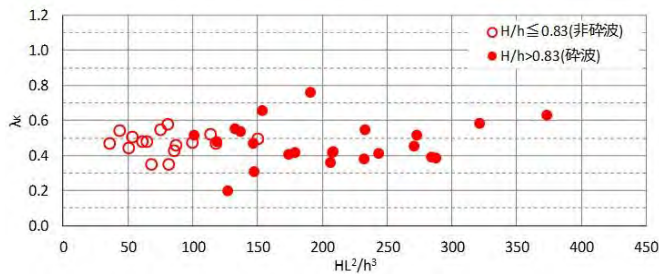


図4 アーセル数 HL^2/h^3 と波力低減率 λ_k の関係

(2) 環境に配慮した低コスト構造

3枚の水平スリット壁を有する透過性の構造であるため、海水交換を良好に保つことで水質環境を保全する。また、岸側の背面壁のみが水面から突出し（水面より0.5m）、それ以外の部分は常時没水状態であるため、海岸からの視界を妨げない景観に配慮した構造である。また、構造物全体の高さを小さくすることで、波力を受ける構造物の面積が小さくなることによる波力の低減効果を発揮する構造である（写真1参照）。

床版および上床版を有しない構造とすることで断面を小型化し、その結果、構造物の製作費を縮減（従来有脚式離岸堤に対して約20%のコスト削減）した構造物である。さらに、構造物体積の軽減に伴う質量の軽減によって、施工費の縮減を可能とする。



写真1 静岡県での実施工

(3) 局所洗掘対策

バリアウインドの周辺で発生する局所洗掘を抑制するための対策として、可撓性のある袋体に石材を詰めた構造体を上部工の下部に設置する（図5(a)参照）。そうすることで、その部分で発生する局所洗掘の発生を抑える。また、対策工として可撓性のある構造体を採用することで、中詰材（石材）の移動に追随するため、袋体の破損による中詰材の流出を防止する。局所洗掘対策工の検討において、移動床水理模型実験によりその設置範囲を検討した結果、上部工下部の杭周辺を防護するように設置する（図5(b)参照）ことで、ある程度の局所洗掘の発生を抑制する効果があることを確認した。また、局所洗掘対策工の設置範囲を杭周辺のみとし、使用する袋詰め石材は、従来橋脚等の洗掘防止工で用いられてきた袋詰め玉石工を採用することで、実際の施工において経済的な工法とした。この対策工法を講じることで、杭直近での局所洗掘の発生を抑える効果が発揮される。

局所洗掘対策工の検討を行うにあたっては、本有脚式離岸堤の局所洗掘特性を把握する必要がある。その特性を把握するために、光ファイバを用いた地形変化計測手法を開発した。光ファイバは、時々刻々変化する地形の変化を高精度に計測することが可能であり、この手法を用いて移動床水理模型実験を行い、バ

リアウィンTにおける最大洗掘深は杭の直近で発生することを明らかにした。本計測手法の原理を図6に示す。図7に、局所洗掘対策工を設置した場合としない場合の最大洗掘深の経時変化を示す。横軸に時刻 t を周期 T で

除した実質的な波数を示し、縦軸に無次元最大洗掘深 Z_s/D (洗掘深: Z_s 、杭径: D) を示す。局所洗掘対策工を設置することにより、設置しない場合に比べて洗掘深を約1/2に抑制することを確認した。

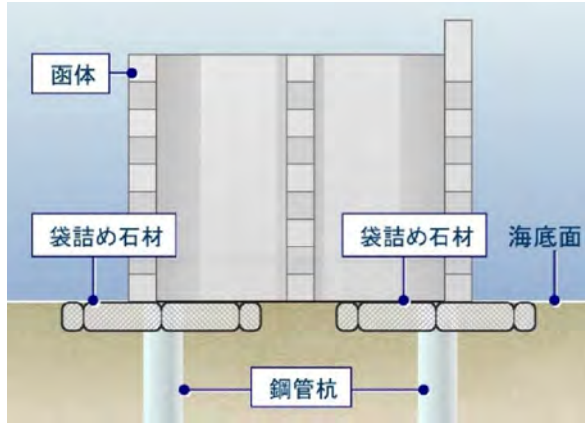


図5 局所洗掘対策工法設置イメージ
(a) 上部工下部の状況

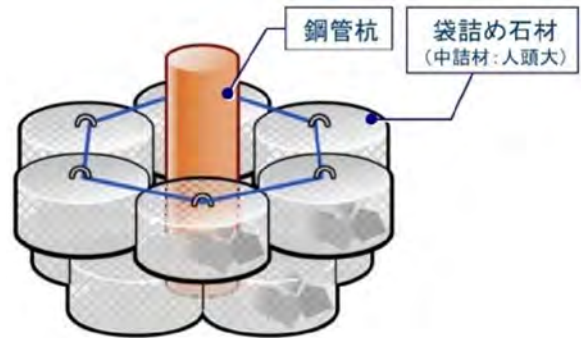


図5 局所洗掘対策工法設置イメージ
(b) 杭周辺の状況

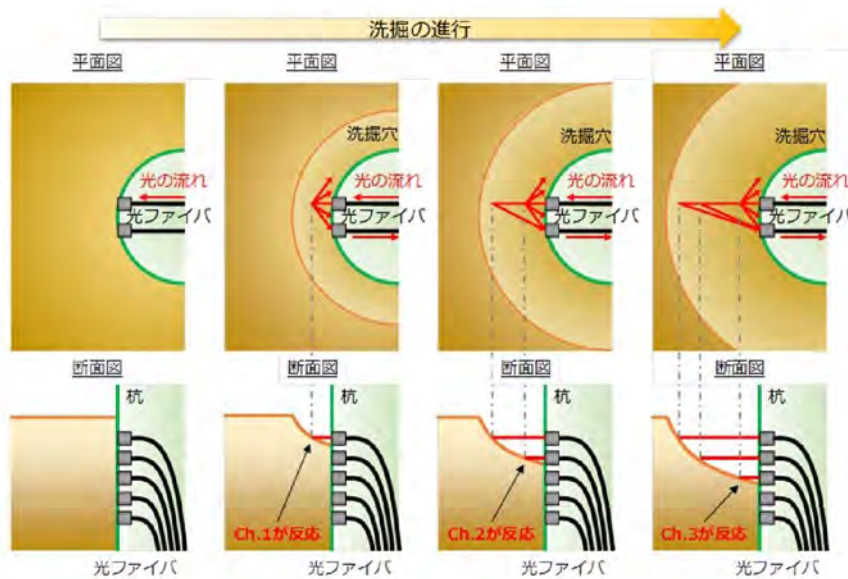


図6 光ファイバの計測原理

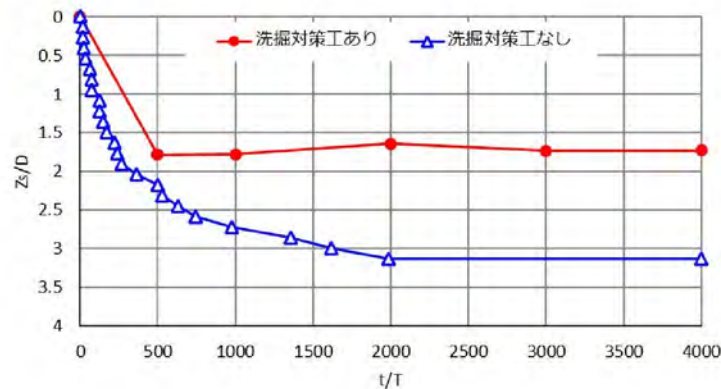


図7 最大洗掘深の経時変化

3. おわりに

海岸侵食対策工法の一つとして、低天端有脚式離岸堤「バリアウインT」を開発した。本構造物は、従来に比べて小断面とすることによりコストの縮減を図り、低天端構造とすることにより景観に配慮した。また、模型実験により、消波性能、耐波性能が実海域に適用可能な性能を有していることを確認した。さらに、洗掘現象に対し、杭の周囲を防護するように設置する局所洗掘対策工法を開発した。その洗掘抑制効果について移動床水理模型実験を行い、洗掘の経時変化を、光ファイバを用いてリアルタイムに把握するとともに、対策工の効果を確認した。

山野貴司，藤原隆一，野村浩二，白木孝一：
杭周辺の局所洗掘に関する現地観測およびその再現実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 69, No. 2, pp. I_874-I_879, 2013.

山野貴司，藤原隆一，野村浩二，白木孝一：
有脚式離岸堤の脚部局所洗掘に対する平面的特性とその対策工の効果，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 69, No. 2, pp. I_591-I_595, 2013.

山野貴司，藤原隆一：スリット形状の違いによる透過式構造物の消波特性に関する3次元数値計算，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 71, No. 2, pp. I_805-I_810, 2015.

山野貴司，中原悠輔，重松孝昌，藤原隆一：
鉛直スリットを有する透過性構造物の消波性能と底部流況特性に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 72, No. 2, pp. I_901-I_906, 2016.

関係論文

藤原隆一，山野貴司，野村浩二，長山英樹：
低天端有脚式離岸堤に関する実験的研究，海洋開発論文集，第 25 巻，pp. 611-616, 2009.

山野貴司，藤原隆一，野村浩二：低天端有脚式離岸堤の消波性能と波力特性について，海洋開発論文集，第 26 巻，pp. 969-974, 2010.

藤原隆一，山野貴司，野村浩二：低天端有脚式離岸堤の局所洗掘に関する水理模型実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 67, No. 2, pp. I_208-I_213, 2011.

藤原隆一，山野貴司：杭により支持されるスリット式離岸堤の局所洗掘に対する CASMAS-SURF/3D の適用性，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 67, No. 2, pp. I_741-I_745, 2011.

山野貴司，藤原隆一，野村浩二：海底勾配の違いによる低天端有脚式離岸堤の洗掘特性と対策工に関する実験的研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 68, No. 2, pp. I_738-I_743, 2012.

4. 北極海 海水下観測用小型AUVの開発

(国研) 海洋研究開発機構 海洋工学センター海洋戦略技術研究開発部
海洋観測技術研究開発グループ 渡 健介
基盤技術研究開発グループ 杉本 文孝
株式会社インターリンク 開発部第四開発課 坪根 聡

1. RAIV 概要

RAIV は、将来的な北極海観測のための本格的なAUVの開発に向けた知見を蓄積するため、平成27年度に開発に着手した小型軽量なAUVの試作機で、潮流の弱い環境でのシナリオ航行のみに特化したものです。全長約1.9m、重量27kg程度と非常にコンパクトな形状で、わずか二人で投入と揚収ができるのが大きな特長です。

RAIVには、通常の海洋観測において標準の計測項目である水温、塩分、深度を測る各種センサを搭載するとともに、映像取得のためのカメラが装備されており、往復航行シナリオの自律航走観測を通して、海氷域の水温、塩分計測や映像による海氷下の様子や海洋生物の活動の様子などを捉えることができます。また、オプションセンサ搭載のためのスペースも持たせており、水中音響機器を用いての航走位置の計測や、溶存酸素計測、照度の計測など用途に応じて計測項目を追加することが可能です。ただし音響機器での測位については近距離に限られるため、今回の北極海での試験観測では搭載しませんでした。最大潜航深度は200m、観測および航走可能時間は最大で9日間です。

RAIVの開発は、メカ、エレキ、ソフトウェアの開発担当者

が、極めて迅速な開発を行った結果、開発開始からわずか10ヶ月で北極海氷下への投入を実現しました。以下にそれぞれの分野の特徴や工夫、苦心した点を記載しました。

2. メカ設計開発

- ・流体抵抗の低減と高密度実装の両立

低推力で長期間の航行を想定しているRAIVは、流体抵抗の軽減が重要となる。フルマンの回転楕円体に近似させたボディ内部に高密度で機器を搭載し、かつ、重量が浮力を上回らないよう、重量の調整が必要です。CFDと抵抗値の計測実験から、翼のサイズを最適化し、強度を確保しつつ設計を進めました。(図1)

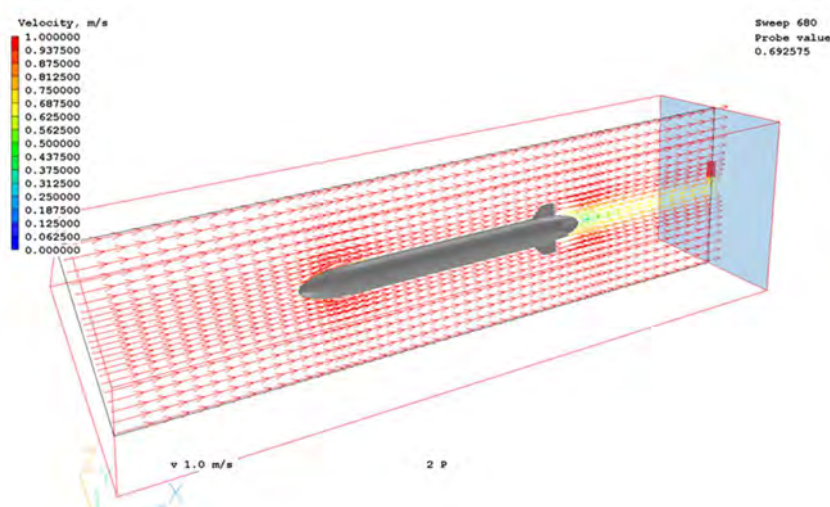


図1：外形のCFD解析

- ・組立て性の向上

RAIV は高い組立て性を求められました。北極航海でも5機のRAIVを運用したが、短い期間で複数台の機体を製造、整備する必要があるため、治具設計から作業性向上のための組立て順の変更など、製造時間の短縮や品質向上のための施策を多く採用しました。

- ・小型軽量化とコストダウン

開発に当たり、海洋地球研究船「みらい」での運用を前提とされたため、運用のための特殊設備などは使用せずに運用できることが求められました。そのため、大人2人で持ち運び出来る重量30kgを機体重量とし、小型化、軽量化を進めました。また開発費の圧縮のため、製作台数に合わせた製造方法を選択しています。成形、切削、プレス、注型など、様々な加工方法を選択しながら、最適な機体の設計を行いました。(図2)

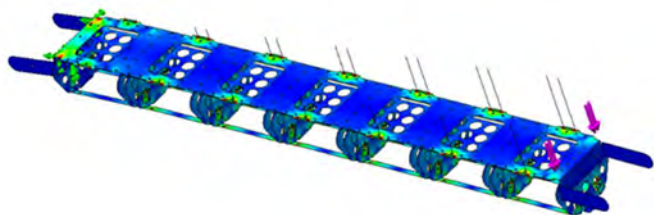


図2：プレス部品の強度解析

3. エレキ設計開発

- ・低温環境下で安定動作する電気回路設計

今回、北極海で運用される観測機に搭載される制御基板を設計するにあたり、考慮した内容について記載します。

- ・電子部品の温度特性

夏の北極海が対象となるため、気温は-10℃以上、水温も海面近くで-5℃以上はあり、通常の電子部品においては仕様範囲内であり、特性上問題となることは少ないが、コンデンサや発振器等の大きな温度特性を持つものを中心に影響を検討し、電解コンデンサは使用しない、発振器は温度補償をもつ部品か発振を受ける側の回路で余裕を持った設計とする等の対策を行っています。

- ・基板設計

低温環境下において電気回路で問題となることの1つに結露があります。船内の暖かい環境から低温の室外、さらに海中に入れる際には温度変化が大きく、結露によって短絡が起きる可能性があります。観測機の内機には窒素置換等を行うことが難しい部分もあり、基板設計においては、できる限り大きめの端子ピッチの部品を使用し、配線を接続するために設けるビアの間隔も大きくする等の対策を行い、結露が発生しても短絡しにくくしています。

- ・地磁気センサ

今回の観測では主として地磁気による誘導制御を行っています。北極に近く地磁気の誤差が大きい環境であるため、近くに設置される電気回路からの影響は極力小さくなる設計とし、磁気の変動を伴うメカニカルリレーではなく半導体リレーを使用し、電源回路においても大きなコイルを使用しない構成としています。

- ・スラスター

長時間、低温環境下で安定動作するスラスターの開発において、電気回路としては効率が良く安定した電源設計を目指し、安定した出力となる回転数を維持する制御を行っています。このスラスターについては、短期間での開発となったが、念入りの評価を行い実運用においても安定した動作をさせることが出来ました。



スラスター 低温動作試験

4. ソフトウェア設計開発

普段は係留ブイに搭載するデータ収集装置やフロートの制御装置のソフトウェアを手掛けているのですが、今回「フロートの制御を応用してAUVの制御をしてくれ」という依頼があった時には正直途方にくれました。当然、鉛直方向のみ考えればよいフロートとAUVでは自由度があまりにも違うため、そのままスラスタを回せばどんな姿勢になるのか誰も答えられない状態からの手探りでのスタートでした。

・姿勢制御

今回は、深度に関しては油袋(ブラダ)の油量で制御を行い、方位制御は2台搭載された推進用スラスタの左右出力バランスを変化させることで行っています。

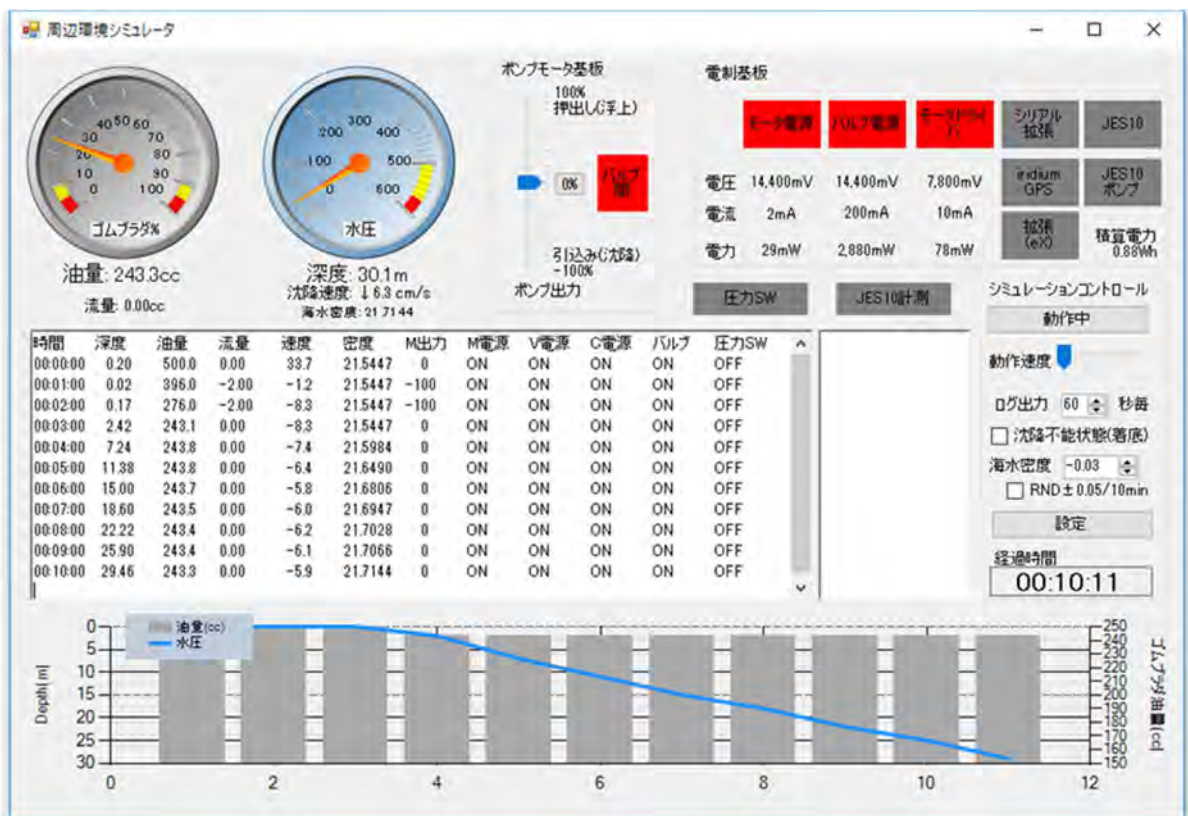
姿勢に関しては機構で静的なバランスを取るため、ソフトウェアでは機体の制御を深度と

方位の2次元的に捉えています。ブラダは機首に位置しており、深度制御のため油量を調節すると機首の上げ/下げのピッチが変化します。このピッチの制御とスラスタ推進力を合わせて深度制御を行う試みをしましたが、浮力関係も含めて変化するため調整に難航し、今回は深度制御とスラスタの制御については切り離しました。

・深度制御

深度制御についてはフロートでの経験もあり、水中での挙動をシミュレーションするソフトを動作検証用に開発しました。ポンプ・バルブ・センサ類などの周辺機器の疑似応答、電源制御などで消費される電力量、油量と浮力の関係などをリアルタイムで把握することができ、海域での実験を前に検証を重ねました。

困ったのは、浮上状態から沈降開始で徐々



▲作成した周辺環境シミュレータ

実際の海域での試験が始まると、シミュレータとはやはり異なる挙動が出てきます。

に油を引くと、沈降を開始するはずの油量なのになかなか沈まない、やっと沈み始めたと思ったら機首を真下にして真逆さまに沈み始める。といった挙動でした。フェアリング内に溜まってしまう気泡であったり表面張力であったりが余計な浮力を生み、沈降開始とともにその浮力が失われて行き過ぎた沈降力で一気に沈んでしまっているようでした。制御のパラメータを調整しようにもスタートがこのような状態では試験の度ごとに条件が変わってしまい安定しません。そこで、今回は水中に潜り始めるまでは一気に油を抜き、沈降開始と同時にブレーキ代わりに油を足し、中性浮力となる油量を探索するというスタート用のシーケンスを用意しました。中性浮力となった状態から目的の挙動制御を開始することで、初期状態が安定し実験で得られたパラメータを活用しやすい状態となりました。

・方位制御

スラスターの制御に関しては、2台のスラスターの出力比を舵として利用し、方位を安定させるために行っています。目的の方位と逆向きを向いていた場合、左右で推進と逆進のようにプロペラ回転方向を変えることでその場で回頭することも可能となりました。目的の方位を与え、自身が持つコンパスの方位との差から出力比を決定する比較的単純な制御となります。スラスターが本体に与える変化量が小さいため制御周期は比較的長めとなりました。

開発を通し、予想し用意したものがまったく想像外の挙動を示し、データを見直すことで理解を深め(た気分になり)、さらに実験するとまた違う見地が見つかった(気になる)ということをひたすら繰り返していました。少しずつ進んだり戻ったりを繰り返しながらの開発でした。「思いついたことを実際にやってみる」というのは、言うのは簡単ですが実際には様々な制約があって実現は難しい事が多いのです。が、今回は限られた時間内で素

早く繰り返し「思いついたので実際にやってみた」が実現でき、最終的には目的を達成させるまで作り込むことができました。自前で機械・基板・ソフトウェアなどすべてを1から自分たちで作っていたため、アイデアが具体的な形になるまでの速度が非常に速く、部品の調達までの待ち時間以外は常に改良が続けられる環境に加わったのは幸運でした。

また、現在も別の形で実験を重ねていますが、未だに毎回海域実験で得られる経験の重要性は代えがたい物があり、海洋での実験機会が得られる環境に感謝しています。

5. まとめ

北極での観測後、RAIVの基礎設計は、JAMSTECで運用している多目的小型観測フロートおよび多目的観測グライダーに引き継がれ、今日現在も日々機能向上が進んでいます。

開発に協力頂いたJAMSTECの各位に改めて感謝申し上げます。

5. 拡張現実を用いた水中可視化技術「Beluga-AR」

東亜建設工業株式会社 土木事業本部 機電部 電気グループ 田中 孝行

1. はじめに

(1) 近年の建設業界の動向

建設業界では、1990年代初頭に起こったバブル崩壊後から現在に至るまで、建設投資額の減少が建設業就業者数の減少の割合を上回っており、東日本大震災直後の東北地方の様に局部的に労働力の不足している場面はあったものの、一貫して労働力が過剰である状態が続いていた。そのため、建設業界では、省力化につながる建設現場の生産性の向上は見送られてきた。建設業就業者数と建設投資額の増減を図1に示す。

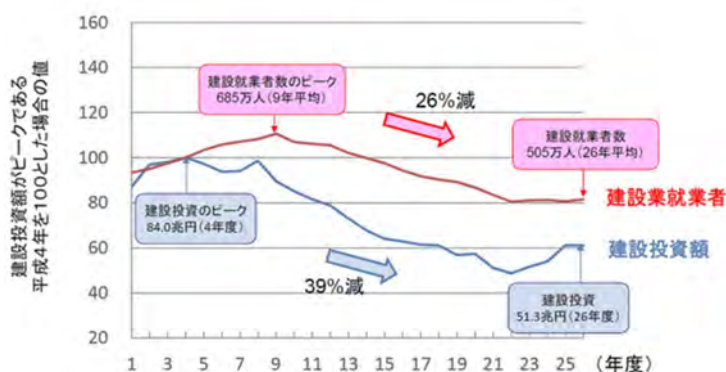


図1 建設投資額および建設業就業者の増減⁽¹⁾

昨今、団塊世代が定年を迎えることによる生産年齢人口の減少が問題になっており、建設業界の技能労働者においてもこの問題は顕著である。一般社団法人日本建設業連合会では、2014年度に343万人いた技能労働者が2025年度には、100万人以上の高齢者が離職し、技能労働人口が216万人まで減少するといった予測を発表した⁽²⁾。

以上のことから、建設業界では、来るべき労働者不足に対応することが急務であった。そこで、国土交通省は、2016年度から労働者

一人一人の生産性を向上させ、企業の経営環境を改善し、建設現場に携わる労働者の賃金水準の向上を図るとともに安全性の確保を目指す取り組みである i-Construction を建設業界全体で推進していくことを発表した。i-Constructionでは、「①ICT技術の全面的な活用」、「②規格の標準化」、「③施工時期の平準化」の三つの取り組みを重点的に行う。従来は、これらの取り組みを施工段階の一部で実施していたが、今後は、測量・設計・施工・検査・維持・管理の全てのプロセスにおいて最適化を図り、労働環境の改善及び生産性の向上を行う。そのため、現在、建設業界では、上記の3つの取り組みを施工現場に活用することが奨励されている状況である⁽³⁾。

(2) 開発の背景

今日、海洋工事における水中部の出来形管理や構造物の形状把握には、短時間で広範囲かつ高密度の測深データを収集可能なナローマルチビーム (NMB) 測量が採用されている。この技術は、海洋工事の施工管理に必要な不可欠なツールとして一般的となっているが、広範囲の海底地形を面的に捉えるためには、NMB 測深機を搭載した測量船で対象範囲を航行する必要がある。また、NMB 測量で取得したデータは、ノイズ除去や計測データの重ね合わせ等の解析作業が必要になるため、リアルタイム性に欠けるといった課題があった。このような背景から、水中部の状況をリアルタイムに把握可能なシステムが求められていた。この課題を解決するため、当社では拡張現実の技術を応用し、3Dソナーの計測データと3次元モデルを重ね合わせることによって、水

中の様子がリアルタイムに3次元で表現可能なシステム「Beluga-AR」を開発した。本稿では、「Beluga-AR」の概要と計測精度の検証及び現場への導入事例について紹介する。

2. 水中可視化システム「Beluga-AR」の概要

水中可視化システム「Beluga-AR」は、拡張現実 (Augmented Reality:AR) の技術を応用し、3Dソナーの計測データと3次元モデルを組み合わせ、水中部のリアルタイムな可視化を可能とするシステムである。水中部の施工状況や潜水士の作業状況をリアルタイムに確認でき、ブロック据付・撤去工をはじめ、さまざまな工種に適用可能である。「Beluga-AR」のイメージを図2に示す。

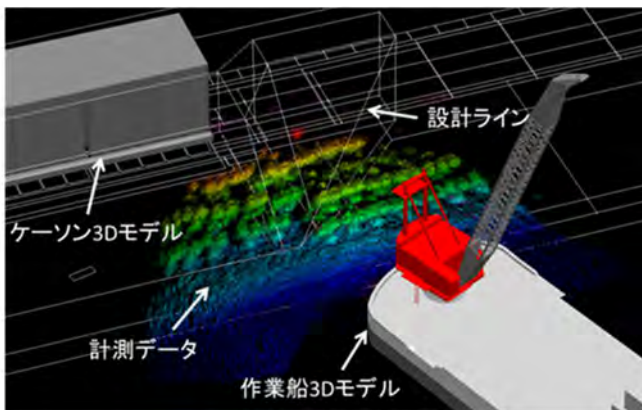


図2 Beluga-AR イメージ図

(1) 機材構成

「Beluga-AR」は、3Dソナー、パンチルト装置、GNSS受信機、動揺補正装置などから構成されている。3DソナーにはCoda Octopus社製の「Echoscope」を使用し、 $50^{\circ} \times 50^{\circ}$ の範囲に128×128本のビームを照射し、最大距離150mまでの計測が可能である。ビーム幅は $24^{\circ} \times 24^{\circ}$ に切り替えることも可能で、より詳細な計測および表現をすることができる。更に、375kHzと610kHzの2つの周波数を切り替えることで、広範囲と高密度の計測を行うことができる。また、ソナーの照射方向を変更するパンチルト装置を併用することで、より広域の可視化が可能である。

GNSS受信機、動揺補正装置を用いることで、3Dソナーから得られる点群に座標を持たせることが可能になるだけでなく、作業船3Dモデルの位置やクレーンの旋回、起伏の描画を実際の作業船の位置や動きに合わせた表現が可能になる。また、3DCADと同じように、表示画面は自由に拡大縮小、回転が可能である。計測データは「Beluga-AR」を動作しているPC内に保存されるため、計測後にデータを「再生」して閲覧することが可能である。

(2) 特徴

通常、パンチルト装置でソナーを起伏・旋回させた場合、視認可能な範囲はビームが照射された箇所に限定され、画角から外れた範囲の状況は把握することができない。

「Beluga-AR」では、パンチルト装置から取得される角度情報を利用して、視準している部分をリアルタイムに更新し、それ以外の部分を過去に視準した際の残像として表示させることによって、広範囲の可視化を実現している。この機能は、潜水士や吊荷などの移動体の状況を把握する際に有効であり、リアルタイムに更新される狭い視界内だけでなく、広範囲の状況を加味した表現によって、吊荷との接触事故等の潜水災害の防止に寄与する。また、自動ノイズ除去機能を使用することによって、水中のリアルタイムな作業状況を鮮明な3次元の映像で把握することが可能となる。さらに、3次元設計図面との重ね合わせた表現によって、作業効率や施工精度、潜水作業の安全性の向上に寄与する。

3. 精度検証試験

「Beluga-AR」の計測精度を検証するため、弊社ヤード内の乾ドックを使用し、トータルステーション (以下、TS) と3Dソナーで同一対象物の位置を計測した。計測対象物には、船舶の整備時に船体を支える盤木を使用し、四隅にミラーを立ててTSにて測位を行った。その後、乾ドックに水を張り、3Dソナーで盤

木を3次元計測した。なお、注水後に盤木の位置がずれないように、コンクリートブロック上に盤木を乗せ、番線で全体を緊結して固定

した。各種計測機器の設置状況と盤木との位置関係を図3～図6に示す。

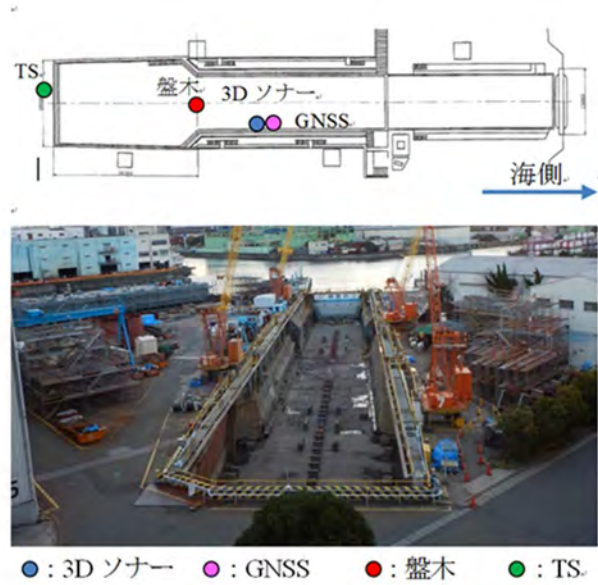


図3 機器設置状況



図4 3D ソナー設置状況



図5 GNSS 設置状況



図6 盤木設置状況

3Dソナーの設置位置は、GNSS (RTK) で求めた。また、3Dソナーの視準方向は、GNSS方位計とパンチルト装置のデータを使用して求めた。

3Dソナーの計測画面とTSとの比較結果をそれぞれ図7、表1に示す。

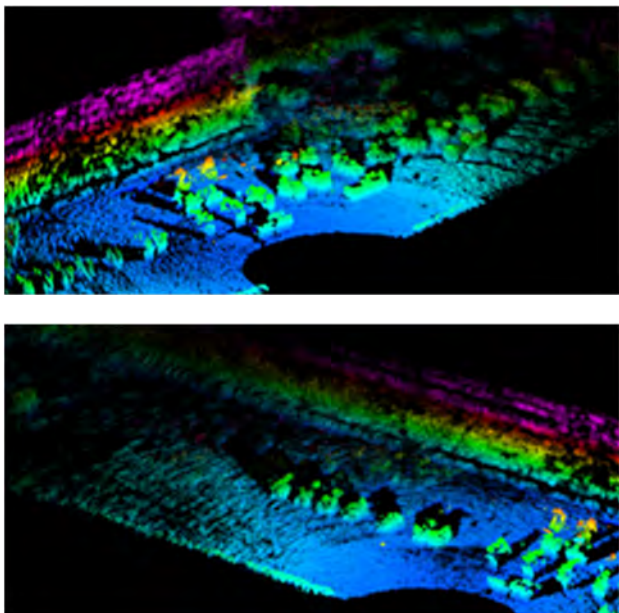


図7 3Dソナー計測状況

表1 比較結果 (TS値-3Dソナー計測値)

座標名	X座標 [m]	Y座標 [m]	Z座標 [m]
盤木_1	-0.083	-0.033	-0.059
盤木_2	-0.081	-0.065	-0.051
盤木_3	-0.081	-0.051	-0.054
盤木_4	-0.082	-0.041	-0.054
平均	-0.082	-0.048	-0.055

TSの計測値を真値として3Dソナーの計測値を比較した結果、最大8cm程度の偏差で計測可能であることを確認した。GNSSや3Dソナーの精度、GNSSと3Dソナーの3次元相対位置の計測誤差を考慮しても、3Dソナーが十分な計測精度を有していると言える。

4. 現場への導入事例

現場への導入事例として鹿児島県で「Beluga-AR」の導入を行い、根固めブロック及び被覆ブロックの据付状況をリアルタイムに計測すると共に、3DCADの設計ラインと3Dソナーで取得したデータを重ね合わせ、その位置関係の整合性及び表現方法について確認を行った。ブロック据付工に従事した非自航式旋回起重機船の船首部に3Dソナー、パンチルト装置、GNSS受信機、動揺補正装置を設置し、さらに、旋回するクレーンの動きを「Beluga-AR」上で表現するため、ブームの先端に小型のGNSS受信機を設置した。

(1) 導入結果

図8に、3Dソナーの計測データと設計図面を重ね合わせた画面を示す。図の中央付近に据付中の根固めブロックがあり、白いラインが設計ラインである。また、図9に根固めブロック据付前後の比較画面を示す。根固めブロックの形状が明瞭に描画され、向き、傾斜が確認できた。



図8 根固めブロック据付状況

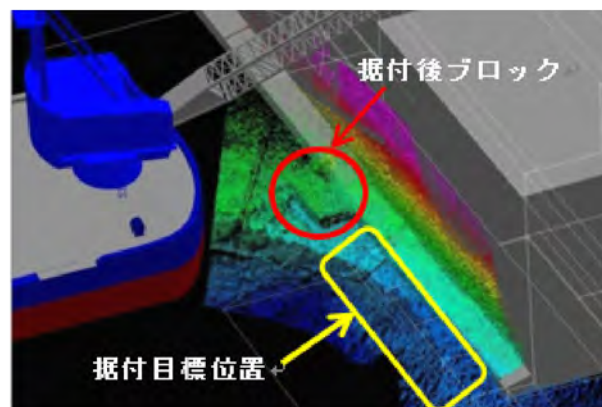


図9 根固めブロック据付前後の比較

5. おわりに

本稿では、「Beluga-AR」の概要と現場への導入事例について紹介した。3Dソナーを使用した水中部の可視化だけでなく、拡張現実の機能を付加することによって、設計に対する水中構造物の配置状況がリアルタイムに確認でき、作業効率や施工精度の向上が期待できる。また、パンチルト装置を併用することによって、広範囲の可視化が実現できた。特に、潜水作業を伴う場合は、吊荷と潜水士の位置関係だけでなく、その周囲の情報も重要な視覚情報となることから、安全かつ確実な施工のために必要なツールとして大きな役割を果たすことが期待できる。

国土交通省が推進する i-Construction では、港湾工事のプロセス全体で ICT 技術を使用することによって、建設現場の生産性向上と安全性の確保が期待されている。マルチビームによる三次元データと組み合わせることで、全プロセスにおける 3 次元データ活用が可能となり、生産性向上と安全性向上が期待できる。

最後に、「Beluga-AR」の開発及び現場導入にあたり、ご支援いただいた関係者各位に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) “建設現場の生産性に関する現状”、第 1 回 i-Construction 委員会 配布資料 資料 1、
<http://www.mlit.go.jp/common/001113550.pdf>、2015.
- 2) “再生と進化に向けて ―建設業の長期ビジョン―”、
大成出版社、pp34-pp45、2015.
- 3) “技術調査 i-Construction”、国土交通省 HP 内、
http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_00028.html

☆ 健康百話（63） ☆

—症状から病気へ②1 失神—

若葉台診療所 加行 尚

1 はじめに

2018年の立夏は5月5日でした。“夏が立つ”と書くことから夏の気配が感じられる時期をさしており、春分と夏至の中間ごろに位置し、暦の上では立夏から立秋の前日までを夏ということだそうです。

長期天気予報では、今年の夏は早期から大変厳しい暑さの到来のようです。熱中症に気を付けなければいけません。

今回は熱中症に多い“失神”について考えてみようと思います。

2 失神の病態生理

1) 失神の特徴

失神とは「突然の意識消失発作により、姿勢の保持が困難となる状態」で、一過性で速やかに、かつ完全に回復することを特徴とします。何らかの原因によって生じた急速な血圧の低下による一過性の全脳虚血によるものです。ではその原因について考えてみます。

2) 神経調節性失神

長時間立ちっぱなしの状態が続いたとき、強い痛みの刺激があった時、高温多湿の環境に長時間居るようなとき、気持ちの悪い場面が続いた時などが誘因となり、自律神経の調節が巧くいかなくなって失神を来します。このような人間にとって不都合な状態が続くと、心臓の交感神経活動の亢進と迷走神経活動の低下が生じ、その状態が持続することにより、心臓の機械受容器が刺激されて元の状態に戻そうとして迷走神経活動が急激に亢進し、その結果、心拍数が減少し、血管が拡張して血

圧の低下が生じ、失神を来します。これが血管迷走神経反射です。

3) 起立性低血圧

人間が寝た状態から急に立ち上がると、大量の血液が胸腔内から下肢や腹部内臓系へ移動し、心臓への還流血液量が大きく減少します。これにより心拍出量が減少し、血圧が低下します。この循環動態の変化に対し、人間の生態は圧受容器反射系の亢進により対処し、これにより心拍数が増加し、心収縮力も増加して来ます。健常者では、この圧受容器反射系が適切に機能して急激な血圧低下を防いでいますが、この反射が適切に作用しない場合には高度の血圧低下を来します。

4) 心原性失神

心血管由来の失神で、これには①不整脈性失神と②器質的心疾患によるものに分けられます。また不整脈性は徐脈性と頻脈性とに分けられます。

① 不整脈性失神

・徐脈性は、洞不全症候群または房室ブロックに起因して起こります。

洞不全症候群は、洞結節の自動能低下もしくは洞房伝道の途絶で徐脈が起こります。房室ブロックは、房室接合部(房室結節とHis束)伝道の遅延もしくは途絶で徐脈が起こります。

徐脈性は、加齢に伴う組織の変性や繊維化などで生じることも多く、虚血性心疾患や心筋症に合併して二次性に起こることもあります。これらのことが原因で高度な徐脈

が起こり、その結果心収縮が行われないことが原因です。

・頻脈性は、心室性不整脈(心室細動、心室頻拍)に起因して起こることが多いです。これらの不整脈は、単独で発症することは稀で、多くは器質的心疾患(心筋梗塞や心筋症など)に合併して起こります。高度な頻脈で心拍出量が低下ないしは消失することが原因です。

稀なことですが、上室性不整脈でも失神を来すことが有り、それは心房細動を伴うWPW症候群や心房粗動の場合です。

② 器質的心疾患による失神

器質的心疾患によるものには、急激に血流が阻害されて起こる病態で、重症の大動脈弁狭窄や閉塞性肥大型心筋症、心臓腫瘍、肺塞栓などが有り、また心拍出量が低下する病態で、広範囲の心筋梗塞や心タンポナーデなどが有ります。

3 失神を起こさないために

神経調節性失神は若年者に多く、何らかの環境・状況因子が直接の引き金になります。長時間の立位保持、急な起立、精神的緊張・恐怖、炎天下や高温多湿の環境、疲労・不眠、脱水・空腹、疼痛などを避けるようにして下さい。その他排尿後や嘔吐などの場合にも失神を起こすことが有ります。要注意です。

最近では“ヒートアイランド”という言葉をよく耳にします。高齢者も熱中症による失神も多くみられます。高齢者の体内の水分の量は50%しかありません。屋内に居ても、高温の時には脱水になり易いのです。御注意下さい。

今回は失神について考えて参りました。早い高温の夏の到来で、熱中症のことが頭にあったからです。またグランドゴルフをプレイ中に失神を起こした方を診ましたら、洞不全症候群でした。現在ペースメーカーを入れて元気にゴルフをプレイしております。

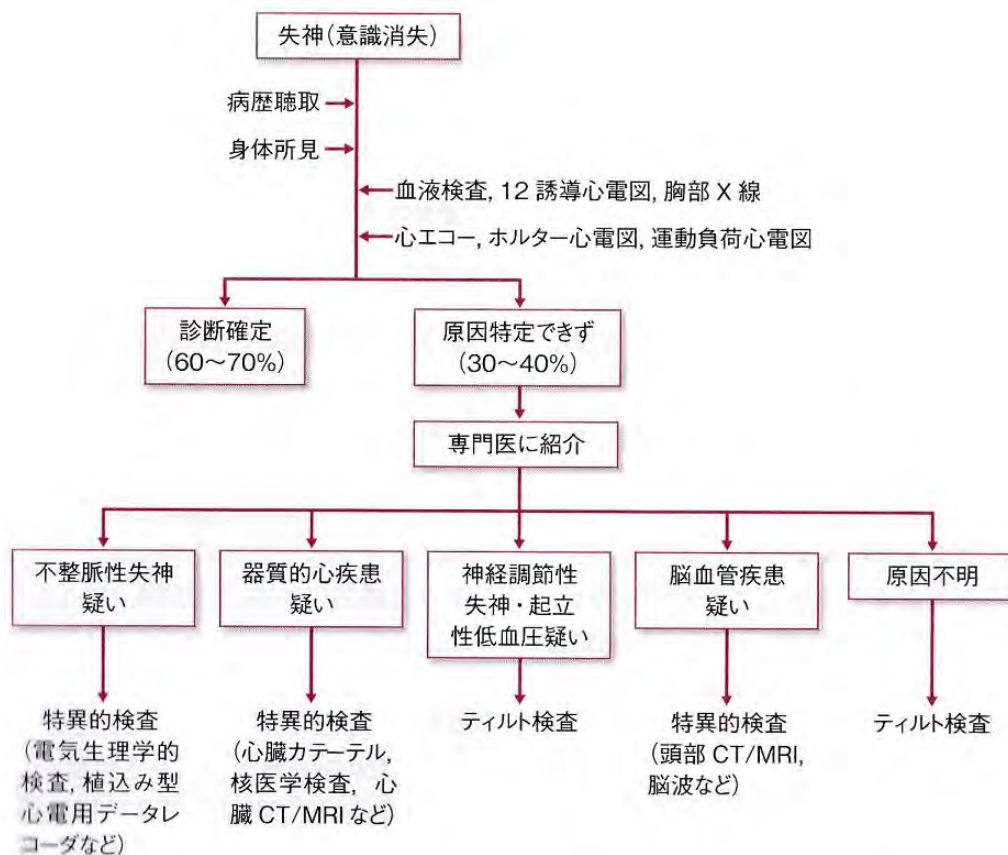


図1 失神患者の診断の進め方

今回は少し専門的過ぎて理解しにくかった
かも知れません。お許し下さい。

失神発作が有りましたら、必ず医療機関を
受診して下さい。

参考文献

- 1). 跡見裕、磯部光章他(監)：症状からアブロー
チするプライマリケガ：日本医師会雑誌第 140 卷・特
別号(2)、2011
- 2) 広辞苑 第 5 版 岩波書店

(図 1) は参考文献 1). 55 頁より引用



海洋情報部コーナー

1. トピックスコーナー

(1) 測量船「海洋」一般公開（第70回東京みなと祭）

(本庁 海洋情報部)

海上保安庁海洋情報部は、東京都中央区の晴海ふ頭で開催された『第70回東京みなと祭』に参画し、5月26日（土）、測量船「海洋」（総トン数550トン、全長60m）を一般の方に公開しました。

測量船「海洋」は、様々な観測機器を装備し、海図作製のための測量、防災のための海底地殻変動観測、環境保全のための海洋汚染調査等を行っている測量船です。

測量船「海洋」の船内では、海上保安制度創設70周年に相応しいパネル展示や観測室・

操舵室などを公開し、当日は天候にも恵まれ、家族連れの方等約1900名の方に乗船していただきました。

岸壁テントでは、海洋情報業務への理解を深めていただくため、海洋情報部パンフレット、70周年記念海底地形図、平成29年度東京湾環境マップ等を配布し、多数の方にお持ち帰りいただきました。

また、平成32年度より新たに加わる、海洋調査に従事する大型測量船(約4000トン型)の船名の応募箱を岸壁テントに設置し、約70名の方から船名の応募をいただいたほか、後日の応募方法について聞かれるなど反響の大きさを感じました。

海洋情報部では、海上保安庁はもとより海洋情報部の仕事を国民の皆様によくご理解いただくことを目的として、今後も様々な機会を活用して測量船の一般公開を実施しますので、機会があれば足をお運びいただけたら幸いです。



パネル展示の様子



観測室の様子



うーみんの応援

(2) ECDIS 教育勉強会において電子海図の講演

(本庁 海洋情報部)

3月16日(金)、東京海洋大学越中島キャンパスにおいて、「2017年度ECDIS教育勉強会」が開催され、海洋情報部航海情報課から「電子海図の現状と今後の動向」のタイトルで講演を行いました。

本勉強会は、船舶職員養成機関(大学、大学校、高等専門学校等)の電子海図表示システム(ECDIS)講習担当者およびECDISメーカーの担当者などが出席し、ECDISに関する教育の内容や方法等について情報交換を行う会合です。

講演では、初めに航海情報としての海図の位置付けや測量から海図反映までの作業の流

れ等について紹介した後、電子海図の作製方法や電子海図と紙海図との違いについて説明しました。また、電子海図の今後の動向として、新たな水路データの製品仕様(S-100シリーズ)として国際水路機関(IHO)において開発が進められている、電子海図や水路誌の新たな製品仕様について、その特徴や開発スケジュール等の紹介を行いました。

約50名の参加者からは、電子海図の使用方法や新規格電子海図の今後の見通しなどについて活発な質疑が行われ、電子海図に対する関心の高さが窺えました。



講演の様子

(3) HS 21 測量船はましお解役、そしてHS 31 測量船はましお就役

(第三管区海上保安本部 海洋情報部)

1991年3月に海上保安庁初の20m型測量船として就役した第三管区海上保安本部の測量船はましおが、27年間にわたる水路測量や海象観測等を終え、解役の日を迎えました。総航海距離は約30万キロ、地球7.5周分に達しました。

3月12日に行われた解役式では、森下泰成・第三管区海上保安本部海洋情報部長が、後継船が就役することに触れ、「はましおは、時代のニーズに合わせてながら、様々な業務にあたってきた。東日本大震災では、被災地の復旧・復興のため、津波の被害を受けた茨城県から千葉県東岸にある10港の測量を行い、関係する海図の迅速な改訂に貢献。解役年度となっ

た29年度においても、2020年オリンピック・パラリンピック東京大会に向けた水路測量を遅滞なく実施し、貴重なデータを収集した。はましおの活躍を記憶に刻みつつ、新しい測量船とともに、地域の海洋活動の安全を支える海洋情報の収集と提供のため頑張ろう」と訓示。乗組員や関係者が別れを告げました。

後を継ぐ測量船は、広島県尾道市の株式会社木曾造船で建造され、3月30日に就役。海上保安庁初の27m型測量船であり、高機能化した観測機器を搭載しています。

はましおの名が付けられた3代目の測量船となりました。



HS 21 「はましお」

全長：21m

幅：4.5m

総トン数：27トン



HS 31 「はましお」

全長：27.5m

幅：5.6m

総トン数：62トン

2. 国際水路コーナー

(1) 東アジア水路委員会（EAHC）第5回運営委員会及び第8回東アジア研修センター理事会

中国（アモイ）

平成30年3月5日～3月8日

平成30年3月6日から8日まで、「東アジア水路委員会（EAHC）第5回運営委員会」が中国のアモイにおいて開催されました。

我が国からは、仙石海洋情報部長（当時）、加藤技術・国際課長（当時）、富山技術・国際課国際業務室長（当時）、齋藤技術・国際課調査技術運用調整官、松本航海情報課海図編集官、日本水路協会から伊藤アドバイザーが出席しました。

我が国は副議長国として参加し、EAHC加盟国である中国、韓国、シンガポール、タイ、インドネシア、フィリピン、ブルネイ、オバザーバー国としてカンボジア、さらに国際水路機関（IHO）事務局のアプリ・カンファーマンが参加しました。

会議においては、IHO事務局カンファーマン部長からのIHO全体の活動報告のほか、EAHCにおける人材育成や技術訪問等の活動報告、EAHCの今後の活動方針を定める戦略計画の作成等が議題となりました。

次回の運営委員会は、平成31年にインドネシアにおいて開催される予定です。

なお、前日の3月5日には第8回東アジア研修センター理事会が開催され、我が国からは富山国際業務室長（当時）が参加し、本年1月末に我が国がホストとして実施したSDB-LIDAR研修の結果について報告しました。



EAHC 第5回運営委員会出席者
集合写真

(2) 国際水路機関(IHO)第10回水路業務・基準委員会(HSSC10)

ドイツ(ロストック)

平成30年5月15日~5月17日

平成30年5月15日から17日まで、ドイツのロストックにおいて国際水路機関(IHO)の第10回水路業務・基準委員会(HSSC)が開催され、26のIHO加盟国及びNGO等から約60名が参加しました。海上保安庁からは海洋情報部海洋情報課の佐藤 情報提供技術総合分析官が出席しました。

HSSCの下には電子海図など様々な海洋情報を統一的に取り扱うための新たな国際基準であるS-100やそれに基づく個別の製品仕様等の技術的な検討を行う作業部会が設置されています。会議ではそれら作業部会の活動報告のほか、作業部会等からの提案事項について審議が行われました。

今回の会議では、S-100製品仕様について現在の開発状況が報告されたほか、S-100製品仕様第1版の承認手続きを迅速化するための提案が審議され、承認されました。また、S-100製品仕様の利用にあたっての電子署名等、サイバーセキュリティに係る課題について、多くの国から関心が示されました。

次回のHSSCは平成31年5月に南アフリカ共和国(ケープタウン)で開催され、以降、平成32年5月に英国、平成33年5月にインドネシアで開催されることが決定しました。



HSSC10 出席者 集合写真

(3) 第3回潮汐潮位海潮流作業部会 (TWCWG3)

チリ (ビーニャ・デル・マール)

平成30年4月16日～4月20日

去る4月16日から20日まで、国際水路機関 (IHO) 第3回潮汐潮位海潮流作業部会 (TWCWG) がビーニャ・デル・マール (チリ) にて開催されました。17か国から37名の参加者があり、海上保安庁海洋情報部から土屋主税環境調査官が、一般財団法人日本水路協会から西田英男技術アドバイザーと隆はるみ情報事業部長が出席しました。

TWCWG は、IHO の水路技術・標準委員会 (HSSC) 傘下の作業部会のうちの一つです。その目的は、潮汐や潮位、海潮流、基準面について、

- ・技術的な助言を加盟国に対して行うこと
- ・IHO 標準の開発、維持を助けること
- ・IHO 文書の策定、最新維持を行うこと

です。TWCWG は、国際水路機関水路データ共通モデル (S-100 シリーズ) のうち、S-104 (潮汐・潮位) 及び S-111 (海潮流) の製品仕様の策定も担っています。

今回の作業部会では、S-104 及び S-111 の仕様策定状況の共有、電子潮汐表に関する IHO 標準案の策定、平均水面と鉛直基準面の楕円体高の算出に関する各国の取り組み、各国の水路情報表示プロジェクト等について議論が行われました。

次回は、平成31年4月に釜山 (韓国) で開催される予定です。



第3回潮汐潮位海潮流作業部会出席者の集合写真

3. 水路図誌コーナー

平成30年4月から6月までの水路図誌等の新刊、改版、廃版等は次のとおりです。
詳しくは海上保安庁海洋情報部のHP (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOKAI/ZUSHI3/default.htm>) をご覧ください。

海図

刊種	番 号	図 名	縮尺 1 :	図積	発行日等
改版	W 1 0 5 0	鹿島灘南部	50,000	全	2018/4/27
改版	W 1 2 6 1	竹原港	10,000	1/2	
改版	W 1 0	津軽海峡	250,000	全	2018/5/18
改版	J P 1 0	TSUGARU KAIKYO	250,000	全	
改版	W 1 0 2	土生港付近	13,000	1/2	2018/5/25
改版	W 1 2 5 6	伊万里港	10,000	全	
改版	W 7 0	御前埼至伊勢湾	200,000	全	2018/6/15
改版	J P 7 0	OMAE SAKI TO ISE WAN	200,000	全	
改版	W 1 0 8 9	相馬港	10,000	全	2018/6/29

上記海図改版に伴い、これまで刊行していた同じ番号の海図は廃版となりました。
廃版海図は航海に使用できません。

電子海図

刊種	航海目的	セル番号	対 象 海 図 等	セル サイズ	発行日等
新刊	4 アプローチ	JP44H8U4	W218 「南西諸島諸分図第2 : 前籠漁港付近」	30分	2018/6/29
		JP44IG06	W218 「南西諸島諸分図第2 : 西之浜漁港付近」		
		JP44HSF6			
	5 入港	JP54VTNL	W1152 「下北半島諸分図 : 白糠漁港白糠」	15分	
		JP54HIMM	W219 「吐喝喇群島諸分図 : やすら浜港」		
		JP54I67N	W219 「吐喝喇群島諸分図 : 中之島港、西之浜漁港」		
		JP54H8U4	W219 「吐喝喇群島諸分図 : 前籠漁港」		
	データ 追加	5 入港	JP54HSF6	W219 「吐喝喇群島諸分図 : 南之浜港」	



一般財団法人 日本水路協会 第22回理事会開催

平成30年5月21日（月）、東海大学校友会館において、第22回理事会が開催されました。

○理事会（11時～12時）

- 1) 平成29年度事業報告及び決算報告について
- 2) 平成29年度公益目的支出計画実施報告書について
- 3) 報告事項（代表理事及び業務執行理事の職務執行状況について）

一般財団法人 日本水路協会 第9回評議員会及び第23回理事会開催

平成30年6月5日（火）、東海大学校友会館において、第9回評議員会及び第23回理事会が開催されました。

○評議員会（16時40分～17時50分）

- 1) 平成29年度事業報告及び決算報告について
- 2) 評議員の選任について
- 3) 理事及び監事の改選について
- 4) 報告事項（平成30年度事業計画及び収支予算について）
- 5) "（平成29年度公益目的支出計画実施報告書について）

○理事会（18時00分～18時10分）

水路業務功績者表彰

平成30年6月5日（火）、東海大学校友会館において、平成29年度水路業務功績者の表彰を行いました。

○極浅海域での水上バイク測深による水路測量など海洋調査の推進に貢献

川崎地質株式会社

松本 一男 氏

○環境アセスメントなどの調査、解析に貢献

いであ株式会社

五十嵐 弘昭 氏

○津波対策業務などによる沿岸域の防災対策に貢献

国際航業株式会社

長谷川 亮 氏



平成 30 年度 2 級水路測量技術研修実施報告

上記研修を一般社団法人海洋調査協会と共催で、前期（平成 30 年 4 月 2 日～14 日）・後期（4 月 16 日～21 日）に分け、一般財団法人日本水路協会・研修室（東京都大田区羽田空港 1-6-6）において実施しました。

1. 講義科目と講師

◆ 前期（港湾級・沿岸級共通）

- ・水路測量と海図（海図概論）[八島 邦夫]
- ・基準点測量（測地、測定方法、位置測定）[佐々木 稔]
- ・基準点測量（高さの測定、海岸線測量、資料の作成）[田中 日出男]
- ・水深測量（測位・測深：マルチビーム音響測深機の儀装、機器の取扱い
海上実習〈東京晴見埠頭前海域〉、データの解析）[日本海洋㈱]
- ・水深測量（測深：多素子音響測深機の原理・構造・取扱い、記録の整理、資料作成）
[田中 日出男]
- ・水深測量（測深：サイドスキャンソナーの原理・構造・取扱い）[松原 修三]
- ・水深測量（測深：測深と基準面）[戸澤 実]
- ・潮汐観測（潮汐の概要、験潮所実地研修（横浜港）、潮汐記録の整理、資料作成）
[山田 秋彦]
- ・水深測量（デジタル測量成果）[岩本 暢之]
- ・水深測量（資料の作成）[岩本 暢之]

◆ 後期（沿岸級）

- ・地図投影（地図の投影、測地計算）[八島 邦夫、佐々木 稔]
- ・水深測量（測量成果の作成、海底地形図（素図）の作成）[西川 公]
- ・海底地質調査（地学一般、海底地質概論、音波探査機及び採泥器、音波探査記録及び採集底質の整理、海底地質構造図・底質分布図の作成）[桂 忠彦]

2. 研修受講修了者

港湾級 7 名及び沿岸級 13 名の方々が研修を修了されました。

3. 実習紹介



平成 30 年度 1 級水路測量技術研修実施報告

上記研修を一般社団法人海洋調査協会と共催で、前期（平成 30 年 5 月 7 日～19 日）・後期（5 月 21 日～26 日）に分け、一般財団法人日本水路協会・研修室（東京都大田区羽田空港 1-6-6）において実施しました。

1. 講義科目と講師

◆ 前期（港湾級・沿岸級共通）

- ・法規（国内法、国際法（安全管理と技術倫理を含む））[佐々木 稔]
- ・水路測量と海図（海図概論）[八島 邦夫]
- ・基準点測量（測地、GPS/GNSS による位置測定）[佐々木 稔]
- ・基準点測量（計画、測定方法、計算及び調整、海岸線測量、資料の作成）
[田中 日出男]
- ・水深測量（測位・測深：マルチビーム音響測深機の儀装、機器の取扱い、
海上実習〈東京晴見埠頭前海域〉、データの解析）[榎東陽テクニカ]
- ・水深測量（測深：計画、測位用基準点の測定、測定値の評価・調整、測量船の誘導、
音響測深、記録の整理、資料の作成）[田中 日出男]
- ・水深測量（測深：サイドスキャンソナーの原理・構造）[松原 修三]
- ・水深測量（測深：測深と基準面）[戸澤 実]
- ・潮汐観測（理論、計画、観測、資料の作成）[山田 秋彦]
- ・水深測量（デジタル測量成果）[岩本 暢之]
- ・水深測量（資料の作成）[岩本 暢之]

◆ 後期（沿岸級）

- ・地図投影（地図の投影、測地計算）[八島 邦夫、佐々木 稔]
- ・水深測量（測量成果の作成、海底地形図（素図）の作成）[西川 公]
- ・海底地質調査（地学一般、海底地形地質概論、音波探査機及び採泥器の原理・構造・
取扱い、音波探査記録及び採集底質の解析、海底地質構造図・底質分
布図の作成）[桂 忠彦]

2. 研修受講修了者

港湾級 11 名（うち聴講 1 名）及び沿岸級 7 名の方々が研修を修了されました。

3. 実習紹介



平成 30 年度 沿岸海象調査研修実施報告

当協会と一般社団法人 海洋調査協会は、上記研修水質環境コース（平成 30 年 6 月 11 日～15 日）及び海洋物理コース（同 18 日～22 日）を当協会・研修室において開催しました。

受講者は、海洋物理コース 5 名、水質環境コース 7 名でした。

◆水質環境コース（科目・講師）

海洋調査概論（小田巻 実）。**海洋環境調査の現状**（寄高 博行 高知大学教育研究部総合科学系 黒潮圏科学部門教授）。**水質・底質の調査**（峯岸 宣遠 いであ(株)国土環境研究所 環境調査部長）。**沿岸環境アセスメント**（宗像 義之 国際航業(株)技術本部環境保全部 水環境研究室長）。**水産生物と海洋環境**（田中 祐志 東京海洋大学 学術研究院 海洋環境科学部門教授）。**流況観測と資料の解析**（潮流解析）、**最近の流況観測機器と取扱い**（重森 輝政 (株)東京久栄 環境部長）。**気象概論**（大島 広美(一財)気象業務支援センター 専任主任技師）。**関連法規 1（港湾関係規定・法令）・港湾の知識、設計の基礎**（安立 重昭（一社）海洋調査協会第一技術部長）。**関連法規 2（海上保安庁所管法令）・安全管理**（西沢 邦和 (株)武揚堂 経営企画室顧問）。

◆海洋物理コース（科目・講師）

海洋調査の現状と課題（小田巻 実）。**沿岸流動の特性**（吉田 次郎）。**潮汐の概説と潮汐観測・潮汐資料の解析と推算**（小田巻 実）。**波浪理論と資料解析**（平山 克也 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所 海洋研究領域波浪研究グループ長）。**漂砂調査法**（中村 聡志 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域上席研究官）。**気象概論**（大島 広美(一財)気象業務支援センター 専任主任技師）。**関連法規 1（港湾関係規定・法令）・港湾の知識、設計の基礎**（安立 重昭（一社）海洋調査協会）。**関連法規 2（海上保安庁所管法令）・安全管理**（西沢 邦和 (株)武揚堂 経営企画室顧問）。



講義の様子

平成29年度 水路測量技術検定試験問題

港湾1級1次試験（平成29年7月1日）

－試験時間 85分－

法規

問 次の文は水路業務法、同施行令及び海上交通安全法の条文の一部である。
（ ）の中に当てはまる語句を下から選びその記号を記入しなさい。

1 水路業務法第9条（抜粋）

海上保安庁又は第六条の許可を受けた者が行う水路測量は、経緯度については世界測地系に、標高及び（ ① ）その他の国際水路機関の決定その他の水路測量に関する国際的な決定に基づき政令で定める事項については政令で定める測量の基準に、それぞれ従って行わなければならない。（以下略）

2 水路業務法施行令第1条（抜粋）

水路業務法第九条第一項の政令で定める事項は、次の表の上欄（左欄）に掲げるとおりとし、同項の政令で定める測量の基準は、当該事項ごとにそれぞれ同表の下欄（右欄）に掲げるとおりとする。（以下略）

事項	測量の基準
可航水域の上空にある橋梁その他の障害物の高さ	（ ② ）からの高さ
水深	（ ③ ）からの深さ

3 海上交通安全法第30条（抜粋）

次の各号のいずれかに該当する者は、当該各号に掲げる行為について（ ④ ）の許可を受けなければならない。ただし、通常管理行為、軽易な行為その他の行為で国土交通省令で定めるものについては、この限りでない。

一 （ ⑤ ）又はその周辺の政令で定める海域において工事又は作業をしようとする者（以下略）

- イ. 最高水面 ロ. 国土交通大臣 ハ. 底質 ニ. 特定港内
ホ. 海上保安庁長官 ヘ. 最低水面 ト. 満潮位 チ. 航路
リ. 海岸線 ス. ふくそう海域 ル. 平均水面 ツ. 低潮線
ワ. 港湾区域 カ. 干潮位 ヨ. 港長 タ. 水深

基準点測量

問1 次の文は、基準点測量について述べたものである。

正しいものには○を、間違っているものには×を付けなさい。

- 1 新設基準点とは、等級告示に定める一級及び二級の精度を持つものである。
- 2 海岸線は、水面が最低水面に達した時の陸地と水域の境界である。
- 3 原点の位置は、図解法によるものを除き、平面直角座標値により表示するものとする。
- 4 距離の測定は、図解交会点を除き、2回以上行うものとする。
- 5 平面直角座標において座標原点を通るX軸の北は、真北と一致しない。

問2 次の文は、GNSS測量について述べたものである。

() の中に適当な語句を入れ文章を完成しなさい。

- 1 GNSS（全地球衛星測位システム）とは、GPS、(イ)、(ロ) 等の衛星測位システムの総称であり、衛星からの電波を専用アンテナで受信し、そのアンテナ位置を決定するシステムをいう。
- 2 干渉測位法とは、既知点と未知点にGNSSアンテナを設置し、衛星電波到達のズレを用いて両点の(ハ) を測定し、未知点の(ニ) を求める方式である。
- 3 干渉測位法における(ホ) 法とは、GNSS受信機の1台を既知点に据付け、他の1台を用いて他の観測点を移動しながら、既知点と観測点の相対位置を求める方法である。

問3 水準測量において、往復観測の出合差の制限が2キロメートルにつき1.4センチメートルとした場合、3キロメートルの往復観測の出合差はいくらまで許容されるか、センチメートル以下第1位まで算出しなさい。

水深測量

問1 次の文は測深作業について述べたものです。正しいものには○を間違っているものには×を付けなさい。

- 1 測深は、海上模様ができる限り平穏なときに実施するものとし、特に掘下げ区域及び岩礁区域では、波浪のある場合を避けるものとする。
- 2 測深線の方向は、測深作業が能率的であるとともに、海岸地形を把握できるように設定するものとする。
- 3 現行海図に記載されている浅所等については、その位置及び水深を確認するものとする。
- 4 常時波浪のある海岸の至近で、測量船が接近し難い水域の測深は、可能な範囲にとどめることができる。
- 5 多素子音響測深機を使用して測深する場合は、原則として斜測深を併用することとし、斜測深用の送受波器の指向角（半減半角）は3度以内のものを使用し、斜角は指向角の中心までとし20度を超えてはならない。

問2 次の文は海水中における音波の伝搬について記述したものです。
()の中に入る適切な語句を下記から選び記号を記入しなさい。
なお、同じ語句が入る箇所があります。

一般的に音波は（ 1 ）が高いほど減衰が大きくなり、伝搬距離が（ 2 ）なる。ただし、分解能は高くなることから、詳細な海底地形が取得できる。そのため、比較的浅い海域の測深作業には（ 3 ）の高い音響測深機が使用されている。

また、海水中における音波の伝搬速度は、温度、（ 4 ）、（ 5 ）により変化するため、1日1回、測深着手前に水中音速度の測定を行う。

ア. 長く イ. 潮流 ウ. 圧力 エ. 風力 オ. 潮位
カ. 塩分濃度 キ. 短く ク. 周波数 ケ. 気圧

問3 スワス音響測深機を使用して測深を行う場合、測深前に調査水域において水中音速度を測定しパッチテストを行います。その項目と測定方法を二つ記述しなさい。

問4 次の文は、スワス音響測深機について述べたものである。（ ）の中に適切な語句を記入しなさい。なお、同じ語句が入る箇所があります。

スワス音響測深機には、クロスファンビーム方式とインターフェロメトリ方式がある。クロスファンビーム方式は測量船の左右方向に（ ① ）、前後方向に（ ② ）扇形のビームを送信し海底から反射してくる音波を測量船の左右方向に（ ③ ）、前後方向に（ ④ ）感度分布を持った多数の受波器で受信することで広い範囲を一度に測深する。

クロスファンビーム方式は、送受波器の直下付近の測深精度が（ ⑤ ）反面周辺部の精度は（ ⑥ ）。

インターフェロメトリ方式は、上下2列に備えられたトランスデューサーにより音波の（ ⑦ ）を計測する。（ ⑧ ）から計算した音波の（ ⑨ ）と（ ⑩ ）から反射点の座標を把握する方式である。

インターフェロメトリ方式は直下付近の測深精度が（ ⑪ ）が周辺部の精度は（ ⑫ ）。

潮汐観測

問1 次の文は、潮汐及び関連事項について述べたものである。正しいものには○を、間違っているものには×を付けなさい。

- 1 潮型は通常、1日2回潮型、1日1回潮型および混合潮型の3つに分類される。
日本近海においては、1日2回潮型がほとんどである。
- 2 日本沿岸における月平均水面の変動は、大潮差にほぼ比例するので、日本海沿岸で小さく、太平洋沿岸では大きい。
- 3 潮汐表の潮高は最低水面からの高さであることから、マイナス値になることはない。
- 4 潮時は、毎日50分程度早くなる。
- 5 約半年後の月齢の等しい日の潮汐変動はほぼ等しいが、午前と午後とを逆にした変動になる。

問2 次の文は、月齢の変化に伴う潮差の変化について述べたものである。()
の中に適当な語句を記入して、文を完成させなさい。ただし、括弧内の同じ数字
は同じ語句を表す。

半日周期型の潮汐では、潮差は月齢の変化にともなって変化し、一般には、
(①)、(②)、(③) がほぼ一直線になる (④) または (⑤) 後
1～2日に最大となり、地球に対する月と太陽の相対位置が90度または270
度離れる (⑥) または (⑦) 後1～2日に最小となる。

これが一般に大潮及び小潮と言われている現象である。(④) または (⑤)
から大潮となるまでの時間は場所によって異なり、その地点の潮汐の特徴を表す
一つの指標となるもので、特に (⑧) と呼ばれている。

問3 某港において某日某時刻に音響測深機により水深を測ったところ、15.4メ
ートル(潮高以外は補正済み)であった。某港には常設験潮所がなく、その時刻
の臨時験潮器の観測基準面上の潮位は3.15メートルであった。

下に示す資料の条件から

観測基準面上の

- ①最低水面の算出式を記載しなさい。
- ②海図の水深基準面(最低水面)を算出しなさい。
- ③海図記載水深をメートル以下第1位まで算出しなさい。

ただし、某港の Z_0 は、0.95メートルである。

資料	1) 常設験潮所(基準験潮所)の最近5か年の永年平均水面(A_0)	2.47 m
	2) 常設験潮所(基準験潮所)の短期平均水面	
	平成29年5月1日～5月31日の平均水面(A_1)	2.60 m
	3) 測量地験潮所(臨時験潮器)の短期平均水面	
	平成29年5月1日～5月31日の平均水面(A'_1)	1.95 m

水路測量講習会案内

水路測量に従事する技術者の技術の標準化、向上を図るため水路測量技術検定試験を実施しておりますが、1級水路測量技術合格者の更なる水路測量に関する知識・技術並びに深淺測量及び水路測量業務の管理及び統括を行う能力の維持向上のための水路測量講習会（以下「講習会」という）を実施します。この講習会を受講することにより、「公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者資格登録規程（平成26年国土交通省告示第1107号）」に基づいて、技術者登録簿に登録された資格（以下「国土交通省登録技術者資格」という）の保有者となります。なお、この「国土交通省登録技術者資格」は5年毎の更新制となります。

1 受講資格

当協会実施の1級水路測量技術(沿岸)又は1級水路測量技術(港湾)合格者のみです。

2 講習日時

平成30年11月13日(火) 13時30分～17時00分

3 講習日・会場

TKP 東京駅前カンファレンスセンター 5F ホール5A
(東京都中央区八重洲1-5-20 石塚八重洲ビル)

4 受講料

13,000円(税込み)

5 申込み期間

平成30年9月10日～10月12日

6 講習内容

- ・水路測量に関する最新の知識・技術
- ・港湾関係法令、港湾の知識、設計の基礎
- ・安全管理

7 技術者資格の保有

- (1) 受講後は1級水路測量技術(沿岸)又は1級水路測量技術(港湾)として、「国土交通省登録技術者資格」の保有者となります。
- (2) 受講者には『国土交通省登録技術者資格認定証』を交付します。
- (3) 資格保有の有効は5年間であり、水路測量講習会を受講することにより更新されます。

8 問合せ先

一般財団法人 日本水路協会 技術指導部
電話: 03-5708-7076
E-mail: gijutsu@jha.jp

協会だより

日本水路協会活動日誌
「平成30年4月～6月」

4月

日	曜	事 項
2	月	◇ newpec (航海用電子参考図) 4月更新版提供
2	月	◇ 2級水路測量技術研修 (前期～14日まで)
16	月	◇ 2級水路測量技術研修 (後期～21日まで)
25	水	◇ 機関誌「水路」第185号発行

5月

日	曜	事 項
7	月	◇ 1級水路測量技術研修 (前期～19日まで)
9	水	◇ 機関誌「水路」編集委員会
16	水	◇ 第1回水路測量技術検定試験小委員会 (第1総合ビル中2階会議室)
21	月	◇ 第22回理事会 (東海大学校友会館)
21	月	◇ 1級水路測量技術研修 (後期～26日まで)
22	火	◇ 第1回水路測量技術検定試験委員会 (東京八重洲ホール会議室)

6月

日	曜	事 項
1	金	◇ ナブトール社(ノルウェー法人)へデジタルトレーシング提供開始
2	土	◇ 2級水路測量技術検定試験 (第1総合ビル中2階会議室など)
5	火	◇ 第9回評議員会・第23回理事会 (東海大学校友会館)
〃	〃	◇ 平成29年度 水路業務功績者表彰式 (東海大学校友会館)
6	水	◇ 第2回水路測量技術検定試験委員会 (東京八重洲ホール会議室)
11	月	◇ 沿岸海象調査研修 (水質環境コース～15日まで)
13	水	◇ 第2回水路測量技術検定試験小委員会 (第1総合ビル中2階会議室)
18	月	◇ 沿岸海象調査研修 (海洋物理コース～22日まで)
20	水	◇ 第3回水路測量技術検定試験委員会 (東京八重洲ホール会議室)
29	金	◇ Yチャート(ヨット・モーター用参考図) H-138 (大阪湾北部) 発行

編集後記

★ 谷口 昭さんの「プランクトンが語る海の環境と生態系〈5〉」は、海洋生態系は再生循環の恩恵を受け続けるために、再生循環の機序が最大限に働くよう自らの仕組みを進化させてきたと考える筆者。その仕組みの中でも最も重要な役割を担っているのが動物プランクトンだということ、それが今回からのテーマとなっています。

★ 今村 遼平さんの「中国の地図を作ったひとびと〈7〉」は、中国唐代の天文学者であり積学家でもある僧一行（本名は張遂）について、幼少期から曆象と陰陽五行の学を学んだことや彼の一生で最も主要な仕事であった《大衍曆(だいえんれき)》の編成ため、重要な天文儀器を発明・製造して、天象の観測と天文測地や測算方面で極めて多くの貢献をしたことが紹介されています。

★ 加行 尚さんの「健康百話 (63)」は、「失神」についてのお話です。失神とは「突然の意識消失発作により、姿勢の保持が困難になる状態」のことで、一過性で速やかに、かつ、完全に回復することが特徴とのことです。失神を起こさないためには、長時間の立居保持、急な起立、精神的緊張・恐怖、炎天下や高温多湿の環境、疲労・不眠、脱水・空腹、疼痛などを避けることが大事だそうです。もう直ぐ梅雨明け、夏の暑さに負けぬよう熱中症対策をしっかりして乗り越えましょう。失神発作がありましたら、必ず医療機関を受診するようにしてください。

(伊藤 正巳)

編集委員

- 藤田 雅之 海上保安庁海洋情報部
技術・国際課長
- 西崎 ちひろ 東京海洋大学学術研究院
海事システム工学部門助教
- 今村 遼平 アジア航測株式会社
名誉フェロー
- 勝山 一朗 日本エヌ・ユー・エス株式会社
新ビジネス開発本部
営業担当部長
- 森岡 丈知 日本郵船株式会社
海務グループ 航海チーム
- 伊藤 正巳 一般財団法人日本水路協会
専務理事

水路 第186号

発行：平成30年7月25日

発行先：一般財団法人 日本水路協会
〒144-0041 東京都大田区羽田空港1-6-6
第一綜合ビル 6階
TEL 03-5708-7074 (代表)
FAX 03-5708-7075

印刷：株式会社 ハップ
TEL 03-5661-3621

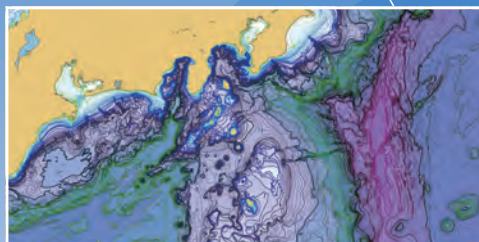
税抜価格：400円 (送料別)

*本誌掲載記事は執筆者の個人的見解であり、
いかなる組織の見解を示すものではありません。

海底地形デジタルデータ あなたのM7000は 最新ですか？

シリーズ

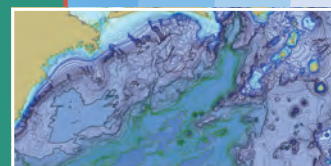
海底地形デジタルデータ M7000 シリーズは、日本沿岸全域をカバー。
全国を 27 エリアに分けて、海岸線、等深線、低潮線の情報を収録。
データ形式は、アスキーファイルとシェープファイルの 2 種類。
目的によってデータも自在に加工可。
海洋調査、漁業、工事など、さまざまなシーンで活躍。
データの内容は随時更新。
最新のデータがさまざまな場面であなたをサポート。
更新情報は、海図ネットショップにて御確認いただけます。



M7000シリーズの 更新情報

- 2018年 更新
- 2017年 更新
- 2016年 更新
- 2015年 更新
- 2014年 更新
- 2013年 更新

(2018年7月現在)



海図ネットショップ

JHA (一財)日本水路協会
<http://www.jha.or.jp/shop/>