

海洋情報部研究報告

第 43 号

2007 年

平 成 19 年 3 月

海 上 保 安 庁

Inquiries about this publication may be addressed to :
Ocean Research Laboratory,
Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard,
5-3-1 Tsukiji, Chuo-ku, Tokyo, 104-0045 Japan
E-mail : [kenkyu @ jodc.go.jp](mailto:kenkyu@jodc.go.jp)
Older issues : [http : //www 1.kaiho.mlit.go.jp/](http://www1.kaiho.mlit.go.jp/)

研究ノート

幕末から明治初年にかけての日本近海英国海図
—日本水路部創設前の海図史—

菊池眞一*

Admiralty Charts for Adjacent Seas of Japan in the last Days of Tokugawa Regime and early in Meiji Era

Sinito Kikuti

キーワード：海図， Admiralty Chart， 伊能図， 開国， 19 世紀

Abstract

Japanese Government made ‘An Peace and Amity Treaty between Japan and the U. S.’ in 1854 after long national isolation, to permit foreign ships’ calling at harbors for water, supply and coal. Japanese Islands are located at one of the end of the ocean route between the U. S. A. and China traversing North Pacific Ocean. Surveys along the routes were carried out to publish charts of ‘Strait of Tsugar’ and only a few harbor plans and to maintain small-scale charts particularly rectifying coastlines of offshore islands in Sea of Japan. Since amity and commercial treaties are concluded in 1858, surveys in Japanese coastal waters are carried out in earnest and large-scale charts are increasing rapidly. At that time British Admiralty Chart had confidence of mariners in Western countries, because of its quality and the publishing policy to cover all navigational waters for trading ships. This note shows outline of navigational charts in Japanese waters, published in the last days of Tokugawa Regime and early Meiji era before the establishment of Japan Hydrographic Department in 1871 and the brief history of the Admiralty Chart during contemporary period.

Although all of hydrographic surveys in this period were operated by foreign survey vessels, Japanese maps made by Japanese land surveyors contributed toward the preparing navigational charts, required by trading ships, in due course. This note also describes the adoption of data from the Japanese maps into the navigational charts during the above-mentioned period.

1 はじめに

日本近海及び沿岸の海図は 1854 年の開国を契機に整備が開始された。当時，国際航海を行う深喫水の船舶の航行に必要な海図を作成する技術が我が国に無く，外国水路部によって近代的海図が

作成された。その中でも，1855 年に刊行された英国海図（Admiralty Chart）2347‘Japan’及び 2405 ‘The Kuril Islands’は幕末期の最も早い時期に作成されたもので，これらの海図は外国水路部の測量成果だけでなく，伊能図を編集資料に採用して改

†Received 01 March 2007 ; Accepted 12 March 2007.

* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

版したことが知られている。

本研究ノートは、1871年（明治4）に水路局（兵部省海軍部所管）が創設される以前の「日本海図史」の主要なできごとである、1855年（安政2）から1870年代にかけての英国海図刊行の変遷を海図記載記事に基づいて報告するものである。

本ノートでは月日を西暦により表記し、和暦により表記する場合、和暦と明示することとする。また、英国水路部が刊行するAdmiralty Chart（「海軍省海図」）に「英国海図」を略称として用いることとする。

2 海図が作成された時代

2.1 開国と国際情勢

1854年（安政1）3月31日に日米和親条約が調印され、続いて1854～56年に英国、ロシア及びオランダが相次いで日本と条約を調印した（Table 1 参照）。これらの条約は外国船に対して石炭、水及び食糧の補給のための寄港を認めたものであった。米国は、同条約によって北西太平洋を航行する商船や捕鯨船の補給と安全のために日本寄港を確保することができた。北太平洋横断航路は、米国東海岸から大圏コースをとり、アリューシャン列島付近まで北上し、津軽海峡から日本海に入り、済州島付近から上海に至る航路、及び日本海に入らずに本州南方沖を通り、琉球諸島付近から上海に到達する航路が想定された（米国下院海軍委員会キング委員の1848年の報告）。冬季は海況が厳しい日本海を避け、冬季以外は、気象情報が不十分な当時、台風を避けるために日本海

Table 1 Peace and Amity Treaties and Open Ports
和親条約と開港場

条約（調印期日）	箱館	下田	長崎
日米和親条約（1854.3.31）	○	○	
日英協約（1854.10.14）	○		○
日露和親条約（1855.2.7）	○	○	○
日蘭和親条約（1856.1.30）	○	○	○
日米協約（1857.6）			○

○：和親条約で認められた補給のための寄港地。

Table 2 Open Ports upon Amity and Commercial Treaties concluded in 1858

1858年に締結された修好通商条約に基づく開港場

開港場	開港予定*1	実際の開港
神奈川	1859.7.4	横浜 1859.7.1*2
長崎	1859.7.4	長崎 1859.7.1*2
箱館	1859.7.4	箱館 1859.7.1*2
新潟	1860.1.1	新潟 1869.1.1
兵庫	1863.1.1	神戸 1868.1.1

下田は神奈川開港後6か月で閉鎖

*1 日米修好通商条約による開港予定

*2 日露・日英の修好通商条約による開港（安政6年6月2日（和暦））。なお、幕府は和暦の「6月から」（1859年6月30日から）自由貿易を許可した。

コースをとることが有効であった。一方、英国はロシアに対抗する軍事行動のために寄港地を日本に求めたもので、1854年3月に英仏両国がロシアに対して宣戦布告を行い、1856年3月までクリミア戦争が継続し、その最中に日英協約が調印された。当時、欧米諸国が交易相手として求めたのは中国であり、日本との交易を期待する貿易業者は少なかった。

1858年7月（安政5）に日米修好通商条約が締結され、続いてオランダ・ロシア・イギリス・フランスとの修好通商条約が締結され、5港の開港が定められた。Table 2に条約に規定された開港予定期日と実際の開港日を掲げた。中国及び日本の開国によって、西欧から東アジアへの定期航路は着実に整備され、英国P&O社による定期航路が上海-長崎間（1859）、横浜-上海-香港（1867）に開設された。

2.2 外国測量艦による日本沿岸水路測量

幕末期～明治初年における外国水路部による日本沿岸の水路測量は、開国前（～1853年）、和親条約調印直後（1854・55年）、修好通商条約締結直後（1858～61年）及び1862年以降に分類される。オランダ、米国、ドイツ、ロシア、英国、フランスの水路部が水路測量を実施した。英国水路部に保管されている各国の測量成果について、

Table 3 Results of Hydrographic Surveys in the last days of the Tokugawa Regime and early Meiji Era
幕末から明治初年にかけての水路測量成果

	before 54	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
英国	2		13			1	14		32	1	5	2	1	12	13	20	15	5	9	10
オランダ	4						1									1	1			
米国		8	1				2								1		1			
ドイツ									1											
ロシア		1	1				1			2	1		1				1		1	
フランス																2	2	7	1	
日本																			3	3
条約・開港		▲ 日米和親条約				▲ 日米修好通商条約 △ 長崎・横浜・箱館開港					△ 神戸開港 △ 新潟開港									

英国水路部所蔵の測量資料。フランスの資料は刊行海図。

Pascoe (1972) により作成

Pascoe (1972) が紹介している。Figure 1 に 1852～1857 年に実施された測量を示した。同図の比較的狭い測量区域については地名を付記した。

①開国前

1854 年より前に実施された外国水路部による沿岸部測量は少ない。英国水路部に 1845 年のエドワード・ベルチャー (Edward Belcher) による 'Nagasaki, sketch of outer road' 及び 1849 年の Haloran による 'Simoda H., sketch survey' が保管されている。測量艦船長ベルチャーによる長崎港測量は本国水路部の指示に基づくものでなかった。そのため、ポーフォート水路部長からベルチャーへの手紙で「現在の南方での任務が完了しないうちから日本という地名をあなたの手紙に見ることは遺憾である」として南シナ海の測量を優先するよう強く指示している (Day, 1967)。1849 年の浦賀及び下田への英国軍艦 Marina の来航時は、嘉永雑記 (史籍研究会編, 1983) に掲載された日本側で作成した航跡の地図を見ると相模湾沿岸を沖合から測量したようである。このとき、通訳として尾張回船出身の漂流民、音吉が乗船していたので (春名, 1988)、英国測量艦は沿岸情報を把握のうえ測量したものと推定される。1854 年以前のオランダの測量は長崎周辺のものである。朝鮮半島東岸北部をフランスが 1852 年に測量している (この測量はラベルズによる日本海沿岸の探検測量を補うもので海図 2347, 2405 に採用され

ている。Figure 1 に記載)。

②和親条約調印直後

英国水路部は 1855 年に日本海のうち日本沿岸及び沿海州沿岸の測量を実施し、航洋図 2 図 (海図 2347, 2405) を刊行した。そのうち、日本沿岸の測量は、英国測量艦 Saracen 船長 John Richards により長崎から函館に至る航路に面した島嶼や半島 (隠岐諸島, 能登半島, 佐渡ほか) 沖合

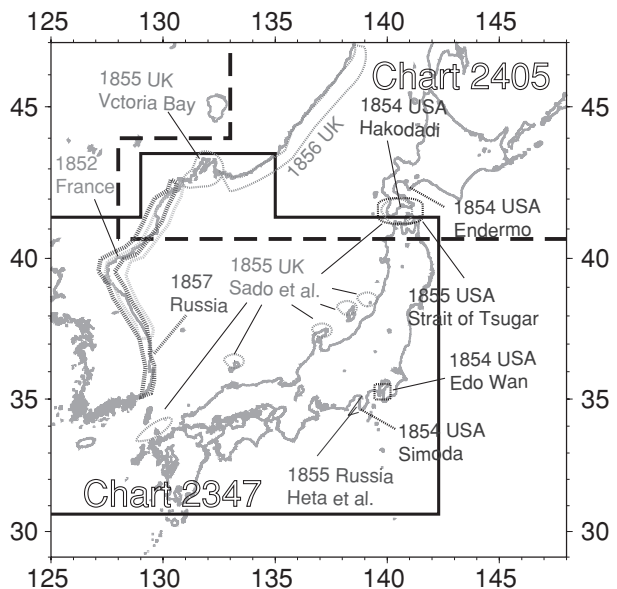


Figure 1 Surveys for treaty ports and approaches between 1852 and 1857

1852～1857 年に実施された外国測量艦による開港場と航路の測量
青：英国 緑：米国 橙：フランス 茶色：ロシア



Figure 2 Admiralty Chart No. 2405 'The Kuril Islands', 1855 corrected to 1862 (Strait of Tsugaru)
Possession of Yamaguchi Prefectural Archives
海図 2405 Kuril Islands (62年改正, 部分) 津軽海峡付近 山口県文書館毛利家文庫所蔵

側及び津軽海峡の水路測量が実施されている (Figure 1 参照).

特に、「サラセン号は 1855 年の夏を箱館湾と、津軽海峡を含む箱館湾への通路の調査に費やした」(ビーズリー, 2000)。同測量の成果により、海図 2441 Strait of Tsugar (津軽海峡) (縮尺 1 海里 : 1 インチ (縮尺 7 万 3 千分の 1), 1856 年 4 月刊行) が刊行された。シーボルト (1840) によると、津軽海峡は日本国内で「クキドメの瀬戸」と呼ばれ、1620 年に Angelas 神父がエゾに渡って以来、津軽の地名から、Isugaru, Tzugaru, Tsugaar, Sangar といった海峡名称を文献に見ることができるとしている。海図 2441 を直接確認できなかったため、海図 2405 Kuril Island (1862 年改正) の津軽海峡付近を Figure 2 に示す。

海図 2347 に示された航路沿いの島嶼や半島先端部の位置は、飛鳥 (山形県) を除いて正確に海図に表示されている。飛鳥は 1859 年に英国測量艦により再測量されているが、1862 年の改正ではその測量成果が採用されずに誤った位置に記載されたままである。

日本に派遣された英国測量艦は、測量を休止する冬季に測量原図を完成させてロンドンに送付した。本国水路部では若干の修正を加えて測量と同

縮尺で海図を編集し、測量の翌年に刊行することが多かった。(Pascoe, 1972)

米国による測量はペリー艦隊によるものとロジャース太平洋探検測量隊 (1853~56 年) によるものがある。ペリー艦隊の測量成果は、ペリー提督の日本遠征記 (Perry, 1856) として、米政府によって公式に刊行されている。ペリー艦隊は、下田湾、江戸湾、相模湾、箱館湾及び室蘭 (Endermo Hr) の測量や航路選択に必要な黒潮の観測を実施している。ロジャース測量隊の記録は Cole (1947) によって報告されている。米国測量艦 Fenimore Cooper, Hancock 及び Vincennes による測量は 1855 年に実施され、北太平洋横断航路のアジア側の端点となる北海道南岸 (襟裳岬付近) から日本海を通過する航路沿いの測量が実施された。Cooper 及び Hancock による日本海沿岸の測量 (Hayes, 2001) は英国の測量と区域がほぼ一致する。また、箱館と下田を結ぶ航路 (津軽海峡から東北地方太平洋岸) は、霧による海難を避けるために Vincennes の搭載艇 Vincennes Junior (15 人乗船) によって 5 月 29 日から 6 月 17 日にかけて岸沿いに南下して 720 km を測量した。Hayes (2001) に掲載された Vincennes Junior の航跡図では、房総半島南部の内浦湾、館山湾に寄って下田に到着している。

1855 年にロシアのブチャーチンによって停泊地 6 カ所、館山、下田及び伊豆半島西岸 (田子、安良里、戸田、江ノ浦)、の測量が実施されている。これについては北澤 (2004, 2005) がロシア資料等に基づき報告している (Figure 1 参照)。このほかにロシアは箱館湾を測量している (Pascoe, 1972)。

③修好通商条約調印直後

1859 年 (安政 6) に通商のために箱館、横浜、長崎が開港されてから、外国測量艦に対する国内情勢が非常に厳しいものとなった。1859・61 年に集中的な測量が実施され、開港予定の 5 港の測量が一応、完了した。1860 年は天津付近測量のため日本国内の測量実績はない。Ward が指揮する Actaeon 号による測量については保柳 (1974)

が詳細に紹介している。Wardによる1859年のTsushima sound (浅茅湾；あそうわん) 測量について、Oliphant (1863) が、浅茅湾の水深が深いため錨泊が難しく、樹木に索をかけて係留したことを報告している。対馬の測量は軍事的意図から重視されたと推定される。1861年には対馬でロシアによる対馬占領事件が発生し、対馬藩、幕府、更には英国軍艦によるロシア軍艦の対馬退去要求の事態が発生した。また、1860年当時、瀬戸内海の外国船航行は軍艦以外、禁止されていたので、長崎から横浜への航路となる九州西岸～大隅海峡の測量が1859年にオランダによって実施された。

④1862年以降

1862年以降、1868年の神戸開港までは、新潟の開港が懸案事項となった。新潟は冬季使用が困難と思われたことから、信濃川河口の測量を行ったほか、敦賀及び七尾が代替として検討され、1867年に英・仏・米の軍艦が現地を調査し、英国公使パークスは新潟のほか、代替候補地を視察した。パークスは七尾を適地として本国外相に報告している。英国による七尾、敦賀湾等の測量図(大屋愷故 [合文、非標準漢字] (よしあつ) 訳、慶応3年) が石川県立図書館に所蔵されている。このほかに、パークス公使と西国諸侯との交流に合わせて、鹿児島、宇和島、関門海峡 (Simoseki Strait) の港が測量された。

1868年に水路部長リチャーズから測量艦シルビア号を指揮するEdwaed W. Brookerに宛てた手紙では日本周辺海域の測量、開港場の測量は一応の成果をあげたので瀬戸内海の測量に重点を置くことを指示している (Day, 1967)。しかし、日本沿岸の他の海域でも多くの海難が発生したため貿易関係者の強い要望により、瀬戸内海以外の海域についても開港場のアクセス航路に沿った避泊地の測量に重点を置いた、英国測量艦による測量が1883年 (明治16) まで継続した。

日本の水路測量技術は、1853年10月に長崎海軍伝習所開設し、オランダ人の教官により教授された (第1次伝習1855～57年、第2次伝習1857

～59年)。1871年 (明治4) には水路局が創設され、翌年には第1号海図釜石港を刊行することができた。英国測量艦とともに行動して技術習得に努めたが、技術の確立は長期間を要した (主要な航路や港湾の海図である、海図101号神戸港及び海図80号東京湾口至御前崎は1893年 (明治26) に日本の測量資料だけで作成し、刊行した.)。

3 英国水路部における海図作成

幕末から明治初年にかけての英国水路部における海図作成についてDay (1967) 及びRitchie (1967) により紹介する。

フランス・ボーフォート (Francis Beaufort; 部長在任期間1829-55) は「ビューフォート」風力階級にその名を残した科学者である。部長就任時には55才、35年間の水路業務を経験していた。ボーフォートは水路学及び関連する科学分野で多くの実績を残し、海図作成については彼によって英国海図のパターンが完成されたとされている。彼の下で海図表現の基本となる海図図式 (初版) が1835年頃までに作成された。ボーフォートの時代に確立し、その多くが最近まで継承されていた海図に関する基準として、略最低低潮面を基準とする水深表示、真方位コンパス図 (地磁気偏差を付記) 表示、底質記号の標準化、干出の点刻 (stipple land-tint) や等深線記号の表示、分図挿入、装飾性の少ない陸部表現等が含まれる。ボーフォートは部長自ら厳密に海図原稿を審査して全ての新刊される海図を完璧なものにした。ボーフォートが求める基準の高さは'safe as an Admiralty Chart' という表現で示されるものであった (Wilford, 1981)。その審査は、「ほとんど欠点といってよいほど極端なものであった」が、彼の徹底した指導によって統一された海図編集方針が組織の隅々まで定着し、それが継承されていった (George H. Richards 英国水路部長回想録)。ボーフォートの時代に、測量マニュアルに従って作成された測量成果を編集して海図を作成する「仕事の仕方」が確立した。測量成果の縮尺

はあらかじめ測量艦に伝えられた。離任時期となる1854-55年の海軍予算(定員)に海図課(Chart Branch)が初めて登場して組織的にも海図作成業務が確立した。

英国海図は1823年以來ずっと全世界の商船に対して販売されている。商船への海図販売は当初、水路部職員の給与を増加させる目的で提案されたものであったが、その5年後には「航行の自由と安全」を確保するという英国の目的の一部となった。英国が全世界に自国産業のために原材料を求め、市場を確保しようとする施策と合致するものであった。また、英国水路部はこの頃から一貫して海事国間での海図情報の共有化を提唱し、米国及びフランスがこれに賛同し、ロシア等の海図作成国も同調せざるをえなかった。ポーフォート在任中の海図刊行数の伸びは著しく、1830年の852版から1855年に1981版を刊行するようになった(週に0.8版の増加)。この時点で、欧米諸国の船が航行する全世界の海をカバーしていた。

続くジョン・ワシントン(John Washington)水路部長の時代(1855-63)も英国海図の版数増加が顕著であった。編集製図者が増強され、1855年から1864年の間に刊行海図が約1980版から約2500版に増加した(現在の英国海図刊行数は約3,500版である)。小サイズのもの統合を進めたので実質的な版の増加はもっと多い。その結果、各国船舶が英国海図を使用するようになった。各国水路部間の海図、測量成果の交換が英国主導で促進され、全世界の海図を英国水路部が整備して商船の航海に役立てるという戦略が達成された。1862年には、14万枚の英国海図が印刷され、そのうち7万5千枚が外国に販売された。また、ジョージH. リチャーズ(George H. Richards)水路部長の時代(1864-74)は英国植民地や日本の海図整備が重点的に遂行された。そのため、リチャーズは日本派遣の測量艦船長に現地での測量成果交換の権限を与え、日本周辺海域の海図整備を促進した(当時の各国の測量成果や海図が英国水路部に保管されている(Pas-

coe, 1972).).

ポーフォートが水路部長になったとき、販売された海図に最新情報を追加する仕組みがなかったが、1832年に海軍省とMerchant Marine Fund(商船海事基金)が共同で海図最新維持情報を提供するためにNautical Magazineを発行した。これを引き継ぎ、1834年11月に海軍省単独で水路通報(Notices to Mariners)第1号を発行した。しかし、年間3,000件となる通報件数は当時の航海者の中で好評でなかった。海図補正は赤インクで表記され、1841年の記録に補正図の記載がある。なお、この時期は大改正と小改正の区分は無く、改正(correction)に一括して海図に表記していた。

リチャーズ部長の時代(1864-74)は特に海図に関する公共サービスを充実したとされる。海図の専売代理会社Potterに関する1868~73年の覚え書きによると、1871年の調停裁判所の決定により独占販売合意書は1873年9月に終了させられた。1870年代前半に最新維持の責任分担が再調整され、水路部が特に指示しない場合、販売店(subagent)が改正のために海図を元売り会社(sold agent)に戻すことがなくなった。新刊、改版、再版、大改正及び小改正の区分が確立したのはこのころである。

印刷については、19世紀中頃に石版印刷の採用が幾度か議論されたが、水路部内では線と文字の描画が鮮明な銅版彫刻による原板維持が継続された。銅版は強い圧力をかけて印刷するので、多大な労力を要し、銅版が損耗しやすいので大量印刷に適していなかった(1875年(明治8)に日本水路部が導入した英国製銅版印刷器械の印刷能力は1日100枚を超えなかった(海上保安庁水路部, 1971).)。銅版は、つぶれて印刷に適しなくなるまでは改正をくり返し、使用不可能となると版を交替(改版)したと推測される。海図2347 Japanが1863年5月及び同年11月に改版された理由は、内容がほとんど変化してないことから、損耗による版の交替であったものと推定される。1855年11月に海図印刷を英国水路部から外

部に移すことが決定された。銅版は水路部地下に保管され、最新情報は銅版に彫刻された。銅版彫刻による海図原版作成は1930年代になっても継続され、その間、鉄メッキやクロムメッキによる原版保護技術が開発された。

海図用紙は、従来、麻布 (linen) で裏打ちされた特殊な用紙を使用してきた。海図用紙の大きさはDE (ダブリュー・エレファント*) が標準的であった。銅版印刷は用紙に湿り気を与えないとインクが載りにくく、乾燥時の収縮が問題点であった。そのため、この厚みを持った用紙は銅版印刷に適したものであり、伸縮が小さいことから日本水路部では部内保管する原備海図の印刷に使用されてきた。1858年に普通の用紙が採用された (新旧用紙が併用された期間が長く続いた.)。今回調査した海図では、英国水路部所蔵海図 (1855年～1890年に改版、大改正) が旧用紙を使用し、銅版彫刻の特徴である鮮明さを有する印刷物であった。印刷の外部化及び新用紙採用は、国内外の需要に対応するために石版印刷による大量生産と関係するものと推定される。日本国内所蔵の英国海図はいずれも新用紙を使用している。日本国内所蔵の1876年改版 (1892年まで改正) の海図は文字のつぶれ、汚れがあり、当時、海図印刷が芳しくない状況もあったように推定される。

*エレファント判：画用紙の大きさ。71×58 cm

4 幕末～明治初年の日本付近の英国海図

4.1 幕末に刊行された英国

海図幕末期に刊行された日本近海の縮尺英国海図は Table 4 に掲げる海図 5 図である (Figure 3 参照)。国内でこれらの海図所在を調査したが、19世紀の地図は古地図収集の対象とされおらず、その数は極めて乏しい。国内所蔵海図では山口県文書館所蔵のものが最も早い刊行時期のものとする。それ以外に確認できたのは、海図 2347 (1876年改版、92年まで改正；東京大学総合図書館所蔵) だけであった。そのため、本研究では英国水路部から送られた精密な複写を貴重な資料として使用した。実際に確認できた海図及び

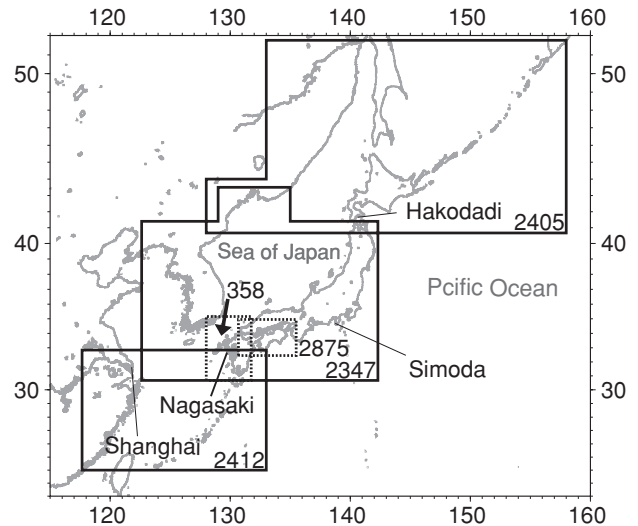


Figure 3 Small-scale Admiralty Charts published in the last days of the Tokugawa Regime and Treaty Ports

幕末に刊行された小縮尺英国海図と1855年時点での日本と中国の主要な開港場破線の区域は1862年以降の刊行海図

記載記事による、小縮尺海図の変遷を Figure 4 に示した。海図 2347 及び 2475 は保柳 (1974) が紹介している。

日本沿岸の大縮尺英国海図を Table 5 に示した。これより古い大縮尺英国海図は、1825年版英国海図目録に掲載された Capt. Hume R.N. 1762年作成とされる長崎 (横山, 2001), その後を継いで、シーボルトが1828年に作成した長崎港の海図 (オランダが発行) を英国水路部が複製したものだけである (海上保安庁水路部, 1971)。1856年刊行の津軽海峡の海図が我が国の海岸図で最も早い時期のものである。つまり1855年に3港への寄港を認めたころ、外国船は小縮尺海図を使用して日本沿岸を航海していたことになる。沿岸航行に使用するために測量の手当を行ったカ所を Figure 1 に示した。勝海舟による1867年 (慶応3) の「大日本国沿海略図」 (京大付属図書館蔵) は日本船の使用の便を図るために海図 2347 を翻訳したものである。同図は水深分布から見て、1863年11月改版以降の海図 2347 を元としている。1859年以降、開港場の開港に合わせて海岸図及び港泊図が刊行された (神戸は当初の開港予

Table 4 Admiralty Charts in small scales for adjacent seas of Japan in the last days of the Tokugawa Regime
幕末に刊行された日本付近の小縮尺英国海図

種類	海図番号・図名 (縮尺)	刊行年・改正	備考
縮尺 150 万分の 1~200 万分の 1 (航洋図)	2405 The Kuril Islands (1 : 2,000,000)	1855 年 12 月 30 日刊行 59 年・62 年 1 月改正	山口県文書館所蔵* ¹
	2347 Japan - Nipon, Kiusiu and Sikok and A part of the Coast of Korea 1 : 1,800,000 (北緯 35 度付近での計 測値)	1855 年 10 月 12 日改版	英国水路部所蔵* ² (複写)
		1861 年 8 月改正	英国水路部所蔵* ³
		1862 年 3 月改正	山口県文書館所蔵
		1863 年 5 月 15 日改版	英国水路部所蔵* ² * ⁴ (複写)
1863 年 11 月 10 日改版 64 年 6 月・65 年 6 月改正	山口県文書館所蔵* ¹		
2412 Islands Between Formosa and Japan (1 : 1,540,000)		1871 年版英国海図目録に記載* ⁵	
縮尺 50 万分の 1 前後 (航海図)	2875 Seto Uchi or Inland Sea 1 : 447,000	1862 年 12 月 10 日新刊 63 年 8 月・63 年 12 月改正	山口県文書館所蔵* ¹
		64 年 12 月・65 年 1 月改正	英国水路部所蔵* ⁴ (複写)
	358 The Western Coast of Kiusiu and Nipon including Tsusima(1 : 536,000)	1863 年 11 月 10 日刊行 (Pascoe (1972) に記載)	1871 年版英国海図目録に 1861 年 刊行 1866 までの改正の記載* ⁵

() 内の縮尺は英国海軍省海図目録 1938 年版による。

*1 河村 (2001), *2 清水 (2002), *3 Admiralty Collection (市販複製海図), *4 保柳 (1974), *5 横山 (2001)
海図 2347 (1863 年 5 月・11 月): “Japan - Nipon, Kisiu and Sikok and A Part of the Korea に変更。

定 1863 年 1 月 1 日に合わせて海図 2875 に分図として挿入。長崎は古くから海図があり、開港後に刊行.)。

4.2 日本付近の英国海図の変遷

①英国海図 2347 の変遷

1828 年刊行の海図 2347 Nipon, Kiusiu and Sikok は Krusenstern Atlas (1827) をそのまま採用したものとされる (海上保安庁水路部, 1971)。海図編集に使用されたクルーゼンシュテルンの海図は作成年代から見て、近畿大学中央図書館所蔵の「クルーゼンシュテルン日本図パリ 1827-35 年 (905×691 mm)」とほぼ同じ内容のものと思われる。同図は横幅が短く、三陸地方及び五島列島が内輪郭線のごく近くに位置する。1855 年刊行の英国海図 2347 JAPAN は、表題記事に、Krusenstern (1827) (以下、この章で「旧地図資料」という。) を元に作成したもので、‘Positions of Coast doubtful’ と記載している。同海図は、縮尺 1 : 1,830,000 (北緯 35 度付近) 横長の図で東は三陸地方が内輪郭線に近くに位置し、

西は山東半島の先端を包含する外国船の寄港が許された箱館、下田及び長崎を含み、北側に Victoria Bay (Peter the Great Bay) を切出しにより包含している (河村 (2001) に写真掲載)。

1855 年刊行の海図 2347 は、津軽海峡、佐渡、能登岬、隠岐及び五島列島を Mr. Richards (1855) により、Quelpart (チェジュ島) 及びその北東側諸島を Sir E. Belcher (1845) により編集したとしている。旧地図資料に Richards (1855) の測量成果を追加した結果、2つの佐渡島及び飛島が描画され、隠岐諸島の北西にも存在しない島が記載されている (Figure 5 参照)。ただし、Richards (1855) による飛島の位置は不正確である。長崎付近から九州北部沿岸は、Richards (1855) の測量成果を優先したため、海岸線が切れ切れになり、海図として使用できない状態となっている (Figure 6 A 参照)。三浦半島~知多半島はシーボルトの地図を採用しているため比較的正確に描画されている。

1861 年 8 月まで改正の海図 2347 は、朝鮮半島東岸にロシアによる 1857 年の測量成果が採用さ

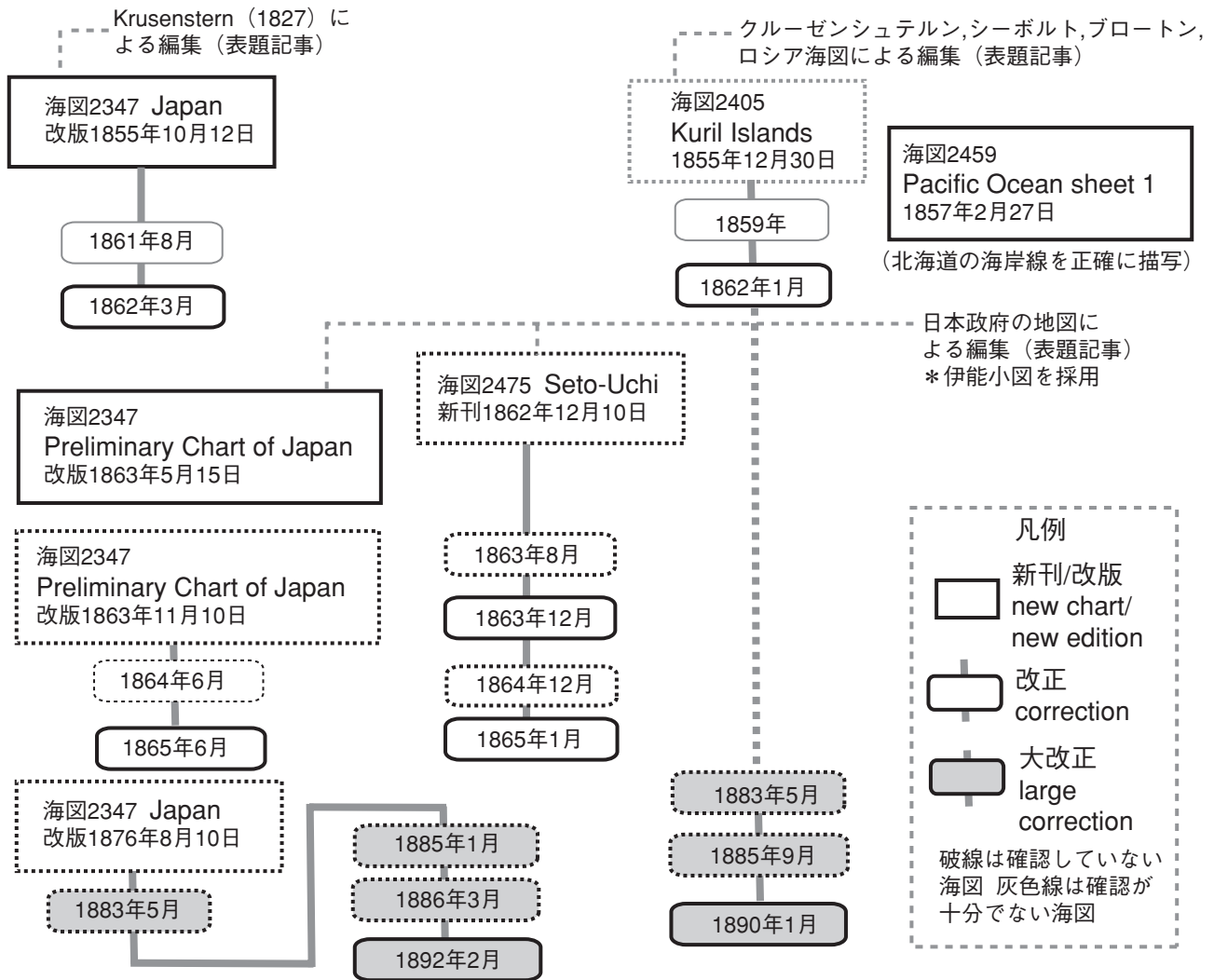


Figure 4 Small Scale Admiralty Charts in the last days of the Tokugawa Regime and Meiji Era
幕末から明治にかけての小縮尺海図の変遷

れ、九州西部（関門海峡～大隅海峡）にオランダ Lieut. J.H.O. Wichers による 1859 年の測量成果が採用されて大幅に改善された（Figure 6 B 参照；1861 年 8 月改正の海図で改善されていることを確認した.）。1861 年 8 月改正の海図には、図右下に伊豆半島沿岸停泊地の分図 6 図（館山、伊豆半島の江ノ浦、戸田、安良里、田子及び下田）が挿入された。これらの分図は 1855 年のロシアによる測量成果である。佐渡島、隠岐の描画はそのままである。なお、この海図に先行する海図 2459 Pacific Ocean（1857 年刊行）において、旧地図資料による佐渡島等が削除されている。

1862 年 3 月改正海図は 1861 年 8 月改正海図と比較すると、江戸湾西部の水深が記載され、房総

半島東岸、伊豆七島が改善されているが、測量に関する記載がない。同海図では、旧地図資料による飛鳥、佐渡島及び隠岐北西の島が削除されている。飛鳥は、本州から視認できるので、Ward による 1859 年の測量（飛鳥・佐渡周辺）によって正確な位置が確認できたはずであるが、1862 年改正の海図に採用されていない。また、1862 年改正の海図は保柳（1974）に掲載されている広瀬博司氏所蔵図と山口県文書館所蔵図の 2 図が存在する。後者は上辺に切出しがあるが、前者には切り出しがなく、上辺にあるコンパス図上端が切断されている。このことから、山口文書館所蔵のものがオリジナルの体裁であると推測される。

1863 年 5 月改版の海図は、表題記事に「日本

Table 5 Admiral Charts in large scales for Japanese coastal waters from 1856 to 1871
1856~71年に刊行された日本沿岸海域の大縮尺海図

番号	図名(縮尺)	刊行日	備考
Chart Scale 0.98 ≤ m ≤ 2.0 Coastal Chart 海岸図			
2441	Strait of Tsugaru m=1.0	1854/4/23	津軽海峡
2657	Yedo Bay and Harbour (U.S. Survey) m=1.0	1859/4/1	横浜* (1859.7.1)
127	W. Entrance to Seto Uchi or Inland Sea m=0.98	1863/5/27	関門海峡西方
527	Iki Island m=1.5	1863/12/19	壱岐
16	Hiogo and Osaka m=1.0	1867/9/30	神戸* (1868.1.1)
536	Sado Island Niigata Harbour m=1.0	1868/7/1	新潟* (1869.1.1)
140	Hirodo Island Spex Strait m=1.0	1869/06/03	平戸, 平戸海峡
93	Akashiono Seto m=2.0	1870/11/18	明石海峡
Chart Scale m > 2.0 Harbor Plan 港泊図			
2655	Shimoda Harbour m=4.0	1859/4/1	下田港
2672	Hakodati Harbour (U.S. Survey) m=3.0	1859/6/18	箱館* (1859.7.1)
2674	Endermo Harbour (U.S. Survey) m=5.3	1859/6/20	室蘭港
2710	Tsusima Sound m=3.0	1860/8/20	浅茅湾(対馬)
2875	plan, Hiogo and Kobe Bay m=2.5	1862/12/10	神戸* (1868.1.1)
2415	Nagasaki Harbour m=3.0	1863/5/1	長崎* (1859.7.1)
356	Owasi Bay, Oosima and Urakami Harbour m=2.0, 3.0, 3.0	1863/6/19	尾鷲湾, 大島, 浦神
357	Harbours in Kii Channel	1863/11/18	紀伊水道の港
372	Kagosima Harbour	1863/11/20	鹿児島湾
359	Harbours on the W. Coast of Kiusiu and adjacent islands	1863/12/19	九州西岸の港
270	Simidsu Bay m=3.0	1864/1/1	清水湾
532	Simonoseki Strait m=3.0	1864/1/18	関門海峡
141	Yobuko Harbour m=4.4	1869/9/20	呼子港
135	Sagitsu No Ura m=2.8	1869/10/25	(該当港不明)
107	The Naruto Passage m=3.0	1871/6/1	鳴門海峡
131	Kurussima No Seto m=6.0	1871/5/15	来島海峡
107	Matoya Harbour m=3.6	1871/10/1	的矢湾

縮尺: m=1.0 は1海里を1インチとして描画 (1:72,900)
*開港場(括弧内: 開港年月日) Pascoe(1972)により作成

は, Mr. Richards (1855) に位置を合わせるようにして日本政府の地図から編集した」と明記している。同海図に採用された伊能小図については, 1861年(文久1)に英国測量艦に幕府役人が乗船した際に, 和暦7月12日に伊能図(小図)を見る機会があり, その後, 許可を得て和暦7月19日に内容確認。1861年8月24日付け日本駐在英国全権公使オールコックを通じて資料提供を要請。和暦7月22日にオールコックへ渡した旨伝



Figure 5 Admiral Chart 2347, May 1855
Possession of UK Hydrographic Office
英国海図 2347 1855年5月刊行 英国水路部所蔵
注) 本所蔵海図は‘Royal Geographical Society London’の蔵書印があり, 新潟付近の赤い丸は後からの記載

えた。日本政府から入手した地図は1864年4月11日に軍艦アクテオン (Actaeon) 号とドーヴ (Dove) 号から英国水路部に納められた(金窪, 1998)。

1863年5月改版の海図は, 保柳(1974)及び清水(2002)に伊能図による英国海図として掲載されている。前者には開港に関する記事が図の中央にあり, 後者にはない。開港に関する記事はTable 6のとおりである。同記事は筆記体でしるされ, 製図を専門職とする者によるものと思えない粗雑な書き方である。

海図 2347 は, 1863年5月に改版された海図が同年11月に再び改版されている。山口文書館所蔵の1863年11月改版の海図は開港に関する記事が掲載されておらず, 下関, 御手洗等に灯台が記載され, 水深がかなり増加している。

海図 2347 (1855年刊行) は, 朝鮮半島東岸をフランス測量(1852年)及び英国プロートンの測量によっていたが, 1861年改正でロシア測量(1857年)に入れ替わった。海図 2347 切り出し部の沿海州沿岸 (Victoria 湾) は英国の1855年

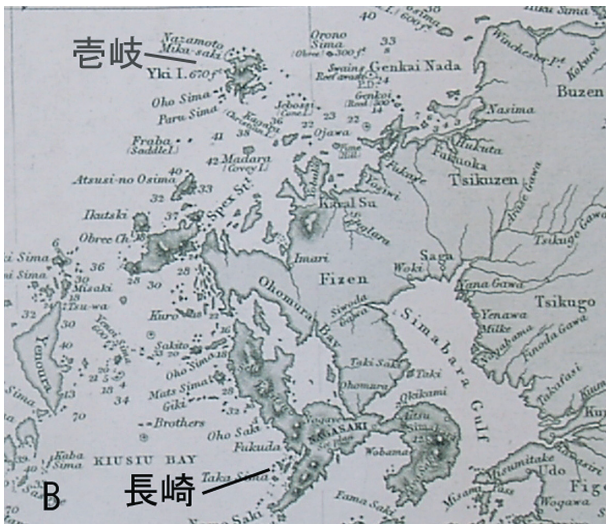
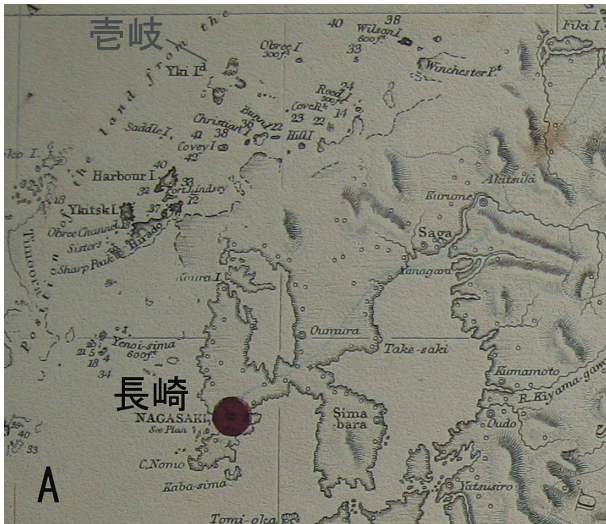


Figure 6 Corrections on Admiral Chart 2347
 A: Published in May 1855.
 Possession of UK Hydrographic Office
 B: Corrections to March 1862; using survey results of Lieut. J.H.O. Wichers
 Possession of Yamaguchi Prefectural Archives
 オランダ水路部ウィチャーズの測量成果による海図 2347 の改正
 A: 1855 年 5 月刊行 英国水路部所蔵
 B: 1861 年 8 月改正 山口県文書館毛利家文庫所蔵

の測量成果で編集されたが、1863 年 5 月刊行海図で切り出し部そのものが削除された。

②海図 2405 の変遷

海図 2405 'The Kuril Islands' は北海道、サハリン南部、千島列島、カムチャッカ半島南端及び沿海州を包含する海図である。切り出し部を除いた

Table 6 The List of Treaty Ports noticed on the Chart No. 2347 (May, 1863) and Limits for Europeans
 海図 2347 に掲載された開港場と西洋人の遊歩範囲

TREATY PORTS	
	LIMITS FOR EUROPEANS
HAKODADI	10 Ri (24 miles) in any direction
NAGASAKI	Any part in its vicinity
KANAGAWA	To the R. LOGO and 10 Ri in any other direction.
NEE-E-GATA	To be settled after the Treaty. If this port not found suitable, another to be substituted.
HIOGO	10 Ri in any direction, but not to go within 10 Ri of Miaco, and crews of vessels to cross R. Finagawa.
OSACO	To be arranged after the Treaty
JEDO	D° D°

英国海図 2347 (1863 年 5 月改版, 保柳 (1974) 掲載) の表題記事の下に掲載された表。下線部: 不鮮明な箇所。

図郭は、左下北緯 40 度 40 分、東経 133 度 00 分
 右上北緯 51 度 46 分東経 158 度 00 分、縮尺は 1 : 2,000,000 (北緯 50 度) である。図の左下に東経 128 度までの切り出し部がある。沿海州ではカストリーズ湾、ビクトリア湾、日本列島では箱館が区域内にあり、カムチャッカ半島のハバロフスキーカムチャッキーの直ぐ南までである。ビクトリア湾の部分は切り出し部となっている。1862 年改正の海図には、カストリーズ湾口の灯台が表示され、黄色の円と中心の赤点の彩色がされている。

表題記事によると、海図 2405 (1855 年刊行, 1862 年改正) はクルーゼンシュテルン、シーボルト、プロトン及びロシア海図により作成された (Figure 7 参照)。北海道の海岸線は、寿都以北の日本海沿岸及びオホーツク海沿岸がクルーゼンシュテルンの地図によるもので現実の海岸線と大きく異なっている。一方、寿都以南の日本海及び釧路以西の太平洋岸は海岸線が現代の地図とよく一致し、水深を記載しているカ所もある。海岸線が正確な区間は水系も内陸部まで正確に描画されていることから、シーボルトの地図を使用しているものと推定される。(Figure 8 参照)

また、表題記事 (Figure 7) の末尾に T.S. Takahasi Sakusaimon 1826. Astronomr Yedo. の記載が

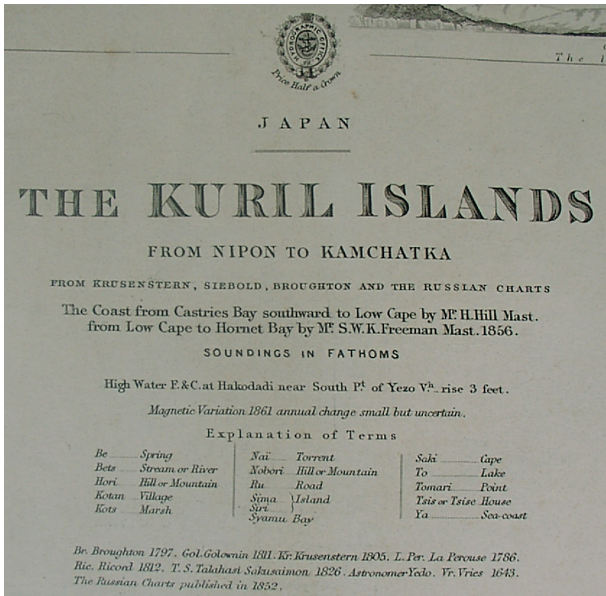


Figure 7 Title Articles of Admiralty Chart 2405 'The Kuril Islands', 1855 corrected to 1862. Possession of Yamaguchi Prefectural Archives
英国海図 2405 The Kuril Islands (1855 年刊行 1862 年まで改正) 表題記事. 山口県文書館毛利家文庫所蔵.



Figure 8 Admiralty Chart No. 2405 'The Kuril Islands' 1855. corrected to 1862 (Western Part of Hokkaido)
Possession of Yamaguchi Prefectural Archives
英国海図 2405 The Kuril Islands (1862 年改正) 北海道西部
山口県文書館毛利家文庫所蔵

Table 7 Corrections of the Charts during 1876 and 85
1876~85 年の海図の大改正と小改正

	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
2347 1876 年改版 Japan			3 ① ④ ⑥	2 ① ⑪	4 ③ ⑦ ⑧ ⑨	4 ① ④ ⑨ ⑪	5 ④ ⑦ ⑩ ⑫	4 ⑦ ⑧ ⑨ ⑩	3 ① ⑦ ⑩	1 ⑨
2405 1855 年刊行 Kuril Islands	4 ④ ⑩ ⑪ ⑫	2 ① ⑫	2 ⑩ ⑫	1 ⑪	4 ① ③ ⑦ ⑩	2 ① ⑨	1 ⑧	1 ⑨	0	2 ④ ⑩

◇ : Large correction ① : issued month

ある。これらのコードは記載事項の出典を示すためと考えるが、1862 年改正の海図上では使用箇所をほとんど確認できていない。不鮮明だが、カラフト西岸の湾に、'Chart Siebold from T.S.'の記載がある。

1859 年改正の海図 2405 は、桂忠彦氏が撮影した英国水路部所蔵海図の写真では、表題記事に地磁気記事がない点以外は 1862 年改正の海図と違いがなく、北海道の海岸線も同じ描画である。

③海図 2347 と 2405 のその後の変遷

19 世紀の英国海図の資料は日本国内にあまりなく、前述のもの以外では、海図 2347 (1876 年改版, 92 年まで改正; 東京大学総合図書館所蔵) 及び海図 2405 (1855 刊行, 94 年まで改正; 英国水路部所蔵海図複写) を調査した。また、英国海軍省海図目録 1938 年版によると、海図 2347 は 1876 年 8 月刊行の図を初版としている。1865 年 6 月改正の後は 1876 年 8 月改版の間の改正や改版の存否は不明である。海図最新維持の表記方法は現行のものと同じになっている。年平均 2~3 回の小改正があり、大改正がある年は小改正が少ない傾向がある。Correction の記事は掲載されていないので、海図 2347 は 1865~76 年の改版及び改正、海図 2405 は 1862~76 年の改正が不明である。海図 2347 (1876 年改版) は西側に天津及

び上海のエントランス部を包含するように区域を拡張し（北緯 35 度での縮尺，1：2,000,000），中国と日本の開港地を航海する海図として使いやすくなったものとなっている。調査した海図 2347 は 1876・77 年の小改正がないので，1878 年 1 月より前に再版（Revised Reprint）として刊行されたものと推定される。再版は版がすり切れて不明瞭になったときに水路通報の情報を追加して新たに版を作成するもので，海図需要が急増したことを反映している。一方，海図 2405 は 1855 年刊行のもので，1875 年までの小改正を取り入れて再版したものと推定される。

④その他の海図の変遷

海図 2875 SETO-UCHI は山口文書館所蔵のもと同じ刊行日の海図が保柳（1974）に掲載されている。前者は「1862 年刊行，1863 年 8 月・1863 年 12 月改正」の記事があり，後者はそれに加えて，「1864 年 12 月・1865 年 1 月改正」の記載がある。海図 2876 は水深が関門海峡から神戸への航路沿いに記載されている。1865 年改正の図は周防灘南西部の水深が追加されている。

5 日本人により作成された地図資料の採用

保柳（1974）は，1840 年に公表されたシーボルトの地図が局部的にしか参考に資せられず，正確さで劣るクルーゼンシュテルンの地図が海図 2347（1855 年 5 月刊行）に採用されたことに疑問が投げかけ，水路学者クルーゼンシュテルンの名声をその理由にあげている。確かに，クルーゼンシュテルンは英国海軍留学の経験を持つロシア海軍士官であり，優秀な水路測量技術者であった。

シーボルトの地図を採用した三浦半島から知多半島にかけての海域は先に述べた 1849 年に英国軍艦 *Mariner* が出沒した海域である。ペリー艦隊による測量が実施された海域でもある。従って，シーボルトの地図と欧米諸国の海軍による測量資料との比較が採否の基準となったという説明が考えられる。

1861 年 8 月まで改正された海図 2347 はオラン

ダ海軍の測量資料により九州西部の海岸線を大幅に改善している。シーボルトの地図には同海域を含む地図があり，海域が広大で海岸線も複雑に屈曲していることからシーボルトの地図を参考にした可能性が高い。この事例も，海軍による測量による確認というプロセスを経て採用したことが推定される。海図 2405 の北海道東岸及び南岸の正確な海岸線が描画されている部分は，ブロートンや米国海軍が測量した海域である。ブロートンの測量成果はスケッチ測量のレベルであり，米国海軍による測量期間から見て，海図の海岸線をシーボルトの地図を参考にしたものと考えられる。海図 2405 の記事はシーボルトの地図を採用した区域を特定していないが，北海道のこの海域がそれに含まれる可能性が高い。

江戸湾周辺，北海道西岸・南岸及び九州西部は開港場出入港あるいは北太平洋横断航海で最も海図情報を必要とする海域である。日本政府の精度の高い地図を入手できるまでは，欧米諸国海軍の水路測量による検証を条件としてシーボルトの地図を海図に採用したものと考えられる。ボーフォートによって測量資料により海図を編集するやり方が確立していたので，シーボルトが収集した地図を直ちに採用することができなかったと考える。

海図 2347（1876 年改版）には「日本政府の地図から編集した」とする記事が無く，東北地方南部の太平洋沿岸に‘No confidence is to be placed in the position of the coastline between Katsura and Sendai Bay, which has been taken from a Japanese Map’の記事が記載されている。この海域は 1888 年（明治 21）5 月刊行の海図 216 号「東京海湾至金華山」においても，「まるで未開の地，例えば南極大陸の一部を覗くような景観」となっている（中西，1977）。この海図は，海岸線のほとんどを伊能図から採用したもので，この体裁で 1902 年（明治 35）ころまで使用された。現在の海図編集においても資料作成者の種別が，情報の信頼性を示すものとして，資料採用の基準とされており，技術的な問題ではなく，提供を受けた地図に対する責任を持つ政府すなわち江戸幕府が無くなった

ことにより、このような注意記事が記載されたものとする。このことはシーボルトの地図を採用するに当たってオランダ海軍測量による確認があったことと同様の資料の扱い方である。

6 まとめ

6.1 幕末～明治初年の近代的海図の作成

北太平洋横断航路の航海及び日本近海での捕鯨漁業における寄港地として、和親条約に基づいて箱館、下田及び長崎が開港され、開港場3カ所の海図と小縮尺海図が整備された。水路測量は米国、英国、オランダ及びロシアが測量を実施した。英国水路部はボーフォート水路部長の時代に英国海図のパターンを確立し、全世界の海図を刊行する方針をとっていた。そのために、英国海図に各国の測量成果を積極的に採用した。

1858年に欧米諸国5カ国が締結した修好通商条約に基づいて開港場5カ所が約束された。そのための海図整備は開港予定に合わせて着実に実施された。測量は5カ国が実施し、開港場だけでなく、沿岸航路及び避泊地の測量が実施された。

6.2 日本人測量家の作成した地図の採用

海図 2347 Japan (1863年5月改版)は伊能図を採用した海図として広く知られている。一方、海図 2405 The Kuril Islandsがシーボルトの地図、すなわち、日本人測量家が作成した地図を採用した海図であることは従来の研究において重視されていなかった。しかし、本研究によって、1863年の海図 2347 改版に先立ち、英国海図 2347 及び 2405 において外国測量艦の測量成果と比較して正確さを確認できた海域に限って日本人測量家の作成した地図が採用されていたことを示すことができた。

6.3 今後の研究課題

本研究では日本水路部創設前の日本近海英国海図の歴史を整理できた。これは英国以外のオランダ、フランス、ロシア、米国による水路測量と海図刊行についての効率的な調査研究に役立つと考

える。

要 旨

本研究ノートは我が国の水路業務夜明け前の幕末～明治初年における日本周辺の世界の歴史を、海図の記載内容に基づいて、水路学的視点から整理したものである。海図は、当初、1854年に調印された和親条約に基づく開港場への寄港のために作成され、続いて1858年に修好通商条約が締結されると、通商のために来航する船舶のために作成された。海図作成は商船の需要に応じて外国水路部、特に英国水路部によって体系的に進められた。この当時には、英国海図 (Admiralty Chart) はボーフォート水路部長の指導により各国船舶に最も信頼される海図となっていた。そのため、本研究では特に英国海図に焦点を当てて、幕末～明治初年の日本水路部創設前の「日本海図史」を記述した。

謝 辞

本報告は主に山口県文書館及び英国水路部が所蔵する英国海図を使用して研究を進めた。その整然とした資料保管に敬意を表す。また、長期間かけて収集した、海図史に関する貴重な資料を譲渡していただいた元水路部航法測地課長中嶋逞氏に深く感謝する。

参考文献

- 史籍研究会編 (1983), *弘化嘉永雑記*, 内閣文庫所蔵史籍叢刊, 35, 774 pp, 汲古書院, 東京
- Day, Archibald (1967), *The Admiralty Hydrographic Service 1795-1919*, 378 pp, Her Majesty Stationary Office, London
- Ritchie, G.S. (1967), *Admiralty Chart*, 379 pp, Hollis & Carter, London
- Wilford, John Noble (1981), *The Mapmakers*, 414 pp, Alfred A. Knopf, New York [和訳] ジョン・ノーブル・ウィルフォード著, 鈴木主税訳 (1988), *地図を作ったひとびと: 古代から現代にいたる地図製作の偉大な物語*, 561

- pp, 河出書房新社, 東京
- Pascoe, L. N. (1972), The British Contribution to the Hydrographic Survey and Charting of Japan 1854 to 1883, *Researches in Hydrography and Oceanography*, 355-386 pp, Japan Hydrographic Association, Tokyo
- 河村克典 (2001), 館蔵の海図について, *山口県文書館研究紀要*, 28, 83-96
- 清水靖夫 (2002), 伊能図を活かす, *伊能図*, 日本国際地図学会・伊能忠敬研究会編, 228-239, 武揚堂, 東京
- 保柳睦美 (1974), 伊能図に基づいたイギリス製日本沿岸図, *伊能忠敬の科学的業績*, 保柳睦美編著, 20-222, 東京地学協会, 東京
- 横山伊徳 (2001), 19世紀日本近海測量について, *地図と絵図の政治文化史*, 黒田日出男, M.E. ベリ, 杉本史子編, 269-344, 東京大学出版会, 東京
- 海上保安庁水路部 (1971), *日本水路史 1871~1971*, 680 pp, 日本水路協会, 東京
- 春名徹 (1988), *にっぽん音吉漂流記*, 中公文庫, 368 pp, 中央公論社, 東京
- ビーズリー, W.G. (2000), 衝突から協調へ/日本領海における英国海軍の測量活動 (1845-1882年)後藤晴美訳, 日英交流史 1600-20001 (細谷千博, イアン・ニッシュ監修) 政治外交 I (木畑洋一ほか編), 99-121, 東京大学出版会, 東京
- フィリップ・フランツ・フォン・シーボルト著, 中井晶夫, 八城圀衛訳 (1978), 日本. 図録第1巻, 76 pp, 雄松堂書店, 東京
- Perry, Matthew Calbraith (1856), Narrative of the expedition of American squadron to the China sea and Japan 1856, Vol. II, Washington.
- Cole, Allen B. ed. (1947), Yankee Surveyors in the Shogun's Seas-Records of the United States Surveying Expedition to the North Pacific Ocean, 1853-1856, 161 pp, Princeton University Press, Princeton
- Hayes, Derek (2001), Historical Atlas of the North Pacific Ocean, 224 pp, Sasquatch Books, Seattle
- 北澤法隆 (2004・2005), 幕末来航プチャーチン艦隊の日本沿岸水路調査, *季刊水路*, 131-133
- Oliphant, Laurence (1863), A visit to Island of Tsusima, *Journal of Royal Geographical Society*, 33, 178-181
- 金窪敏知 (1998), 世界測量史における伊能図, *伊能図に学ぶ*, 東京地学協会編, 135-159, 朝倉書店, 東京
- 中西良夫 (1977), 明治版海図を省みる, *地図*, 15-4, 14-17

研究ノート

海底地殻変動観測における音響 トランスデューサ位置のバイアス誤差の推定

松本良浩*¹, 石川直史*², 藤田雅之*³

Bias estimation of acoustic transducer position for seafloor geodetic observation

Yoshihiro Matsumoto*¹, Tadashi Ishikawa*² and Masayuki Fujita*³

Abstract

Among results of JCG's intensive observation off Miyagi Prefecture, some epochs gave erroneous solutions presumably caused by the bias of acoustic transducer position. We tried simultaneous estimation of the bias of acoustic transducer installation and positions of the seafloor reference points. As a result, we detected significant biases dependent upon difference of used devices i.e. acoustic transducers, observation poles, etc. Correction for these biases gave less scattered time-series of determined positions and reduced residuals of traveltime. This method took effect to improve the accuracy of position estimation of seafloor reference points.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部は、東大生産技術研究所と技術協力を行いつつ、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発（浅田・矢吹，2001；矢吹，2002）及び海底基準点の展開を行っている。我々の海底基準点は、これまで主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に設置しており、測量船による繰り返し観測を行っている（例えば Fujita et. al., 2006 a）。

現在海上保安庁の測量船「明洋」および「海洋」では、海底地殻変動観測の実施の際には船尾ブルワークに全長約 8 m の堅牢な支柱を設置して、上部に GPS アンテナと動揺計測装置、下部に音響トランスデューサを配置している（Fig.1）。GPS アンテナ-音響トランスデューサ間の相対位置関係の定量には、動揺計測の 3 つの計

測軸に一致した直交座標系（前後，左右，上下）に沿って計測した変位量を用いている。動揺計測装置によって計測されるロール・ピッチ・ヘディングの値を用いてこの値を東西・南北・上下の地理座標系に変換し，GPS アンテナの位置座標に加算する（これをポール補正と呼ぶ）ことにより音響トランスデューサの地理座標系による位置が決定される。ここで，相対位置関係の計測誤差や，動揺計測装置の上下の計測軸と実際の観測支柱の軸との不一致は音響トランスデューサの位置決定の誤差要因となり，ひいては海底基準局の位置決定の誤差に波及すると考えられる。

実際，我々が 2005 年に実施した宮城県沖における集中観測の結果を検討したところ，音響トランスデューサ位置のバイアス誤差により局位置解が誤差を持って決定されていると推測される事例

†Received 06 December 2006 ; Accepted 08 February 2007.

*1 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

*2 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

*3 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

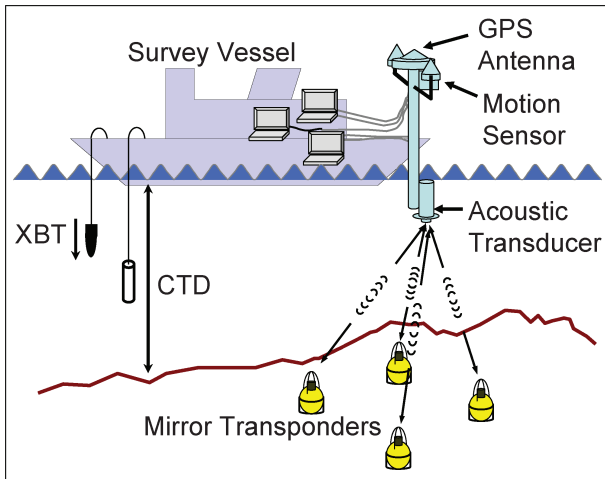


Fig. 1 Schematic picture of the GPS/Acoustic seafloor geodetic observation system.

がいくつかあったことから、局位置解析におけるバイアス誤差の検出とその補正が重要課題となった。

本稿では、海底地殻変動観測において音響測距に用いられる測量船上の音響トランスデューサの据付位置に含まれるバイアス誤差を推定し、これを補正して海底基準局の位置決定の精度向上を図る手法について考察する。

2 宮城沖における集中観測の結果に見る局位置の偏り

2005年4月から10月にかけて、海洋情報部ではFig. 2に示す宮城沖1海底基準点(MYGI)において6エポック(4月, 6月, 7月, 8月, 9月, 10月)の観測を行った。海底地殻変動観測において、同一の観測点に対してこれほど高頻度の観測を行った例はこれまでにはなく、我々の観測手法を検証する上で貴重な検討材料を得ることとなった。Fig. 3に2002年10月から2005年10月までの11エポックの局位置の水平成分の時系列変化を示す。図のプロットは、海底局4局の座標値の平均について、2002年10月の値を基準とした差を表示している。高さ成分は2005年8月の決定値を用いて全エポックについて固定し、水平成分の精度向上を図っている(石川・藤田, 2005)。また、位置の基準は海上保安庁のSLR基準点で

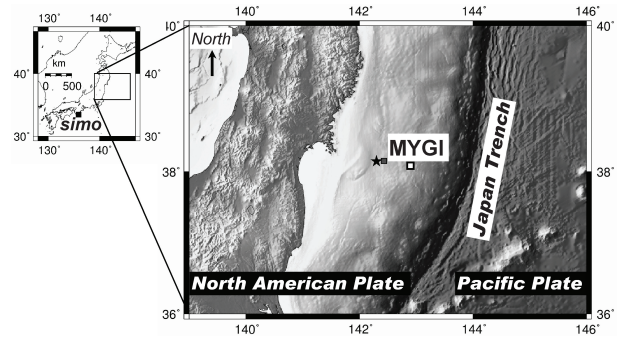


Fig. 2 Location of the seafloor reference point (open square) used in this study shown on the topographic map around northeastern Japan. Also shown is the Shimosato site (a solid square labeled as simo).

ある和歌山県下里(simo)である。この図によると、2005年6月の局位置はそれまでの傾向から10cm程度北寄りに、また2005年8月の局位置は10cm弱南寄りに決定されるといった、極端な偏りが起きていた。この偏りはそれまでの解の再現性から大きく外れていたことから、原因追究のため観測データを様々な角度から検討した。その結果、漂流観測における測量船の船首方位に着目するに至った。

我々は観測時には通常、測量船が走行する際のノイズが音響測距の障害となるため、クラッチを切り離した状態で波と風まかせの漂流観測を行う(畝見, 2004)。概ね海底局アレイの中心から水深の1~1.2倍程度の円内で観測を行い、潮流によらず移動が必要な際には音響測距を中断して航行する。こうした漂流観測の測線計画と実際の航跡の典型例をFig. 4に示す。Fig. 5に2005年4月, 6月, 7月, 8月の観測エポックにおいて測量船の船首が向いていた方位を測線単位でプロットしたものを示す。実際には船首方位は測線観測中にも潮流や風の影響で時々刻々変化するが、観測開始から約500秒経過後の方位を各測線における代表値として表示している。この海域では通例我々は一つの測線上で10秒間隔・100ショットの音響測距を行っており、例外はあるものの観測開始500秒後はちょうど測線の間中点にあたる。これによると、船首方位は4月, 7月の2エポッ

クでは比較的バランスよく分布していたが、6月には南向きに偏りが、2005年8月には北向きに偏りがあることが見てとれる。これは Fig.5 の中央に示す局位置の時系列に見られる偏りとは正反対に符合している。このことから、音響トランスデューサ位置に船首方向前方へのバイアス誤差を仮定すれば、局位置解の偏りが説明できると推測された。

決定局位置と上記バイアスの関連については定性的には次のように説明されよう。我々が通常の局位置解析に用いているソフトウェア「SGOBS」(藤田・他, 2004)では、Fig.6(a)のような幾何学的原理により、時々刻々 KGPS によって決定された音響トランスデューサの位置を中心として音響測距で得られた距離に相当する円

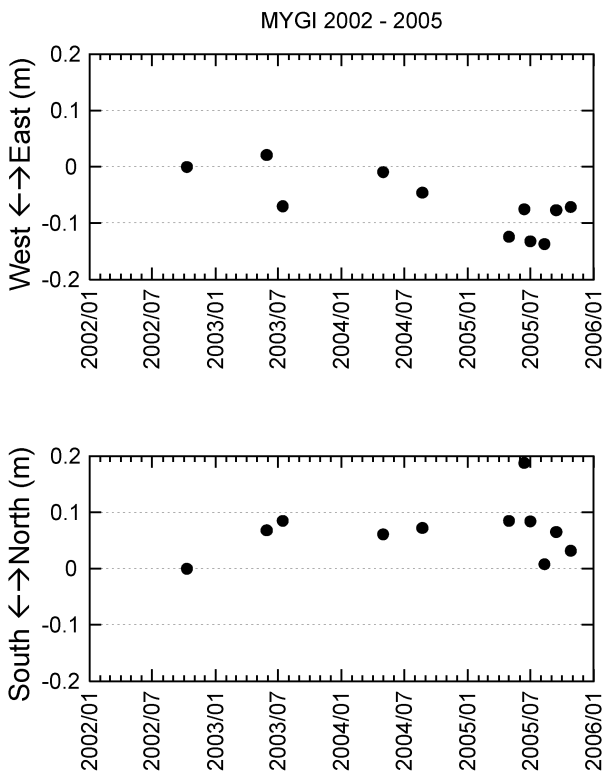


Fig. 3 Time series in the horizontal components obtained at the seafloor reference point MYGI from eleven campaign observations during the period from October, 2002 to October, 2005. The top and bottom panels correspond to the EW and NS components, respectively. The position reference is the Shimosato site, in central Japan. The vertical component is constrained to the height at AUG 2005.

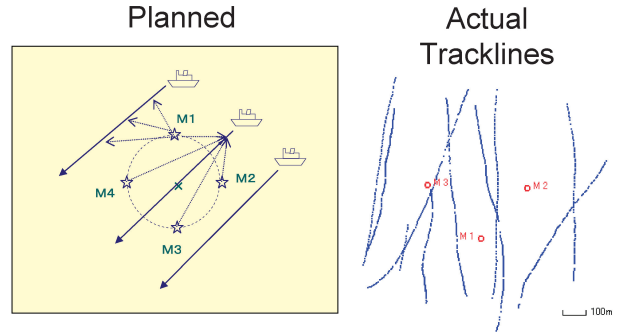


Fig. 4 Typical planned lines and actual tracklines of the drifting observation.

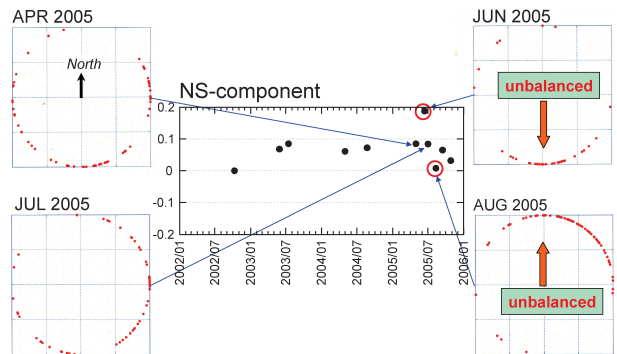


Fig. 5 Relationship between positional error and distribution of heading of the survey vessel. The time series in the center is the NS component of the seafloor reference point MYGI, that is same as Fig. 3. Four scatter charts represent distribution of heading angles of the survey vessel in four observation epochs: each red spot represents the heading angle at each survey line.

弧が多数描かれ、その交点として海底局の位置が最小二乗的に求められる。ここに音響トランスデューサ位置にバイアス誤差があったとしても、観測時の船首の方位が分散していれば Fig. 6(b)のように最小二乗的に誤差は相殺され、本来の局位置と大きく変わらない位置に「虚像」が決定される。一方、観測時の船首の方位が偏っていた場合には相殺効果が働かず、Fig. 6(c)のようにバイアス誤差を反映した「虚像」が決定されることになる。

以上のような考察を基に、次節に述べる手法を用いて、上記バイアスを定量的に求めることを試みた。

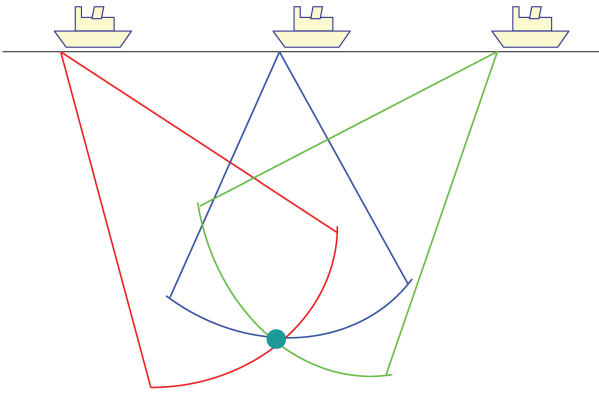


Fig. 6(a) Geometrical principle for positioning of a transponder.

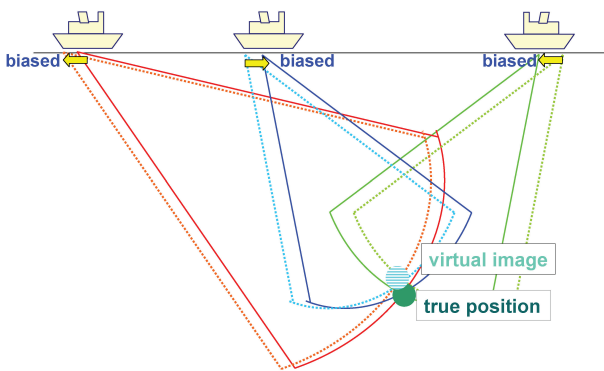


Fig. 6(b) Influence of the bias of the acoustic transducer position upon positioning of a transponder when heading of the survey vessel is well-distributed.

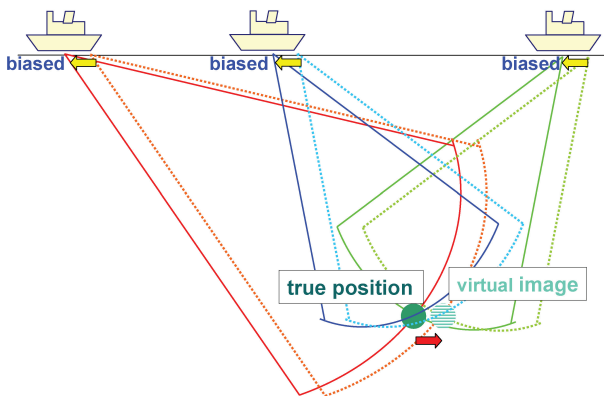


Fig. 6(c) Same as (b) when heading of the survey vessel is unevenly distributed.

3 海底基準局位置と音響トランスデューサ位置のバイアス誤差との同時推定

3.1 局位置解析ソフトウェア「SGOBS」の概要

我々が通常の局位置解析に用いているソフトウェア「SGOBS」(藤田・他, 2004)は, KGPS

解析による GPS アンテナの位置, 音響解析による音波走時, 動揺計測パラメータ (ヘディング, ロール, ピッチ) および海中の音速度構造プロファイルを入力してこれらの結果を結合し, ベイジアン最小自乗法に基づくインバージョン法 (松浦, 1994) を用いて海底局位置を決定するソフトウェアである.

我々が展開している海底基準点では, 1 点につき原則 4 局の海底局を東西南北に配置している. まずこれら複数局についてそれぞれ同一の音速度構造で局位置解を求めた後, その残差データを用いて, 一定の時間ウィンドウ毎に音速度の時間変化係数を求める. このサイクルを局位置が収束するまで繰り返し, 最終的な局位置解を求める.

なお, 最終成果としては複数の海底局の中心位置 (「仮想基準点」と呼ばれる) を算出する. これは, 「観測データを 3 局又は 4 局の海底局の中心点に対してバランスよく取得することにより, その中心点における海中の音速誤差の水平位置への影響を数 cm 程度に小さくすることができる」(佐藤・藤田, 2004) ことによる.

3.2 ベイジアンインバージョン法について

この手法は, 正規分布を持つ誤差 e を含む観測データ y^0 とモデルパラメータ x の間に, A を偏微分行列とした線形の観測方程式

$$y^0 = Ax + e \quad (1)$$

が成り立つと仮定し, モデルパラメータの初期値からの誤差分布がアприオリに与えられる場合に, モデルパラメータ解 \hat{x} が次式によって計算されるというものである (松浦, 1994).

$$\hat{x} = x^0 + DA^t (E + ADA^t)^{-1} (y^0 - Ax^0) \quad (2)$$

ここで, x^0 はモデルパラメータ初期値, D はモデルパラメータ海の初期値からのずれを特徴づける共分散行列, E は e の誤差分布を特徴づける共分散行列である.

一般には, 観測データとモデルパラメータの関係は非線形であることがほとんどであるが, その場合でも真値近傍における微小な変化に対しては線形関係が成り立つと仮定し, 与えた初期値

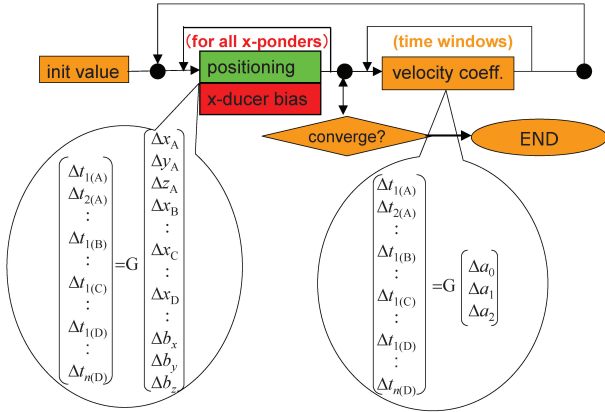


Fig. 7 Algorithm of parameter estimation applied to get the seafloor station position using the round-trip travel time of acoustic waves

と真値との差を解として求める。これは式 (1) および (2) において、 $x^0 = 0$ として y^0 と x をそれぞれ初期値に対する Δ 値と考えることに相当する。そして、実際の実線形の影響については、繰り返し計算により真値に収束させる。

ベイジアン手法、すなわちモデルパラメータの共分散行列 D を導入する意味は、初期値の信頼性に依って拘束をかけられることである。その最も簡単な適用例として、パラメータの固定、推定の選択を D の対角成分により自由に設定できることがある。

3.3 モデルパラメータと観測方程式

観測方程式は局位置解を求める部分と音速度構造を求める部分との2つに分かれている (Fig. 7)。本研究に際し、局位置を求める部分で同時に音響トランスデューサ位置のバイアス誤差を推定するよう、モデルパラメータを変更した。

(a) 海底局位置の推定

式 (1) のモデルパラメータを設定する上で、藤田・他 (2004) とはアルゴリズムを変更した。藤田・他 (2004) では、複数ある海底局の局位置解をそれぞれ同一の音速度構造を用いて個別のインバージョンで局位置解を求めた。今回推定しようとする音響トランスデューサ位置のバイアスは、海底局の区別なく一つの観測エポックに対し

で一組決定されるべきパラメータである。このため、複数局の局位置と音響トランスデューサ位置のバイアスをモデルパラメータとし、一括してインバージョンを行うこととした。

これに従って、式 (1) の観測データ y^0 は、海底局を A~D の4局とすると、以下のように記述される。

$$y^0 = \begin{pmatrix} \Delta t_{1(A)} \\ \Delta t_{1(B)} \\ \Delta t_{1(C)} \\ \Delta t_{1(D)} \\ \vdots \\ \Delta t_{n(D)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

右辺は、KGPS 解析と動揺補正により求められたトランスデューサの位置と各海底局の初期位置座標から音速度構造を用いて計算された往復走時と、観測された往復走時の差の時系列を表している。

また式 (1) のモデルパラメータには、海底局 A~D の位置座標 (ローカル座標系の3成分) と、動揺計測の3つの計測軸に一致した直交座標系 (前後, 左右, 上下) に沿って与えられる3成分のトランスデューサ位置のバイアス (b_x, b_y, b_z) を設定する。実際にはモデルパラメータ x は、それぞれの初期値からの補正量として次のように表現される。

$$x = \begin{pmatrix} \Delta x_A \\ \Delta y_A \\ \Delta z_A \\ \vdots \\ \Delta x_D \\ \vdots \\ \Delta b_x \\ \Delta b_y \\ \Delta b_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

(b) 音速度構造の推定

従来 SGOBS では、音速度構造を推定パラメータとすることにより、誤差の補正を試みている (藤田・他, 2004)。本研究においても、音速度構造の推定を行うプロセスには違いがないため、概

略を述べるにとどめる。

音速度構造を求める部分の観測データ y^0 は海底局を4局 (A~D) とすると、例えばタイムウインドウ

$$[t_k (A), t_k (B), t_k (C), t_k (D), \dots, t_l (D)]$$

について、以下のように記述される。

$$y^0 = \begin{pmatrix} \Delta t_k (A) \\ \Delta t_k (B) \\ \Delta t_k (C) \\ \Delta t_k (D) \\ \vdots \\ \Delta t_l (D) \end{pmatrix} \quad (5)$$

音速度構造推定におけるモデルパラメータは、音速度の時間変化を三次式で表したときの係数としている。推定を行う各タイムウインドウにおいて、平均音速度の時間関数 $V(t)$ を

$$V(t) = V(t_0) + a_0 + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 + a_3(t-t_0)^3 \quad (6)$$

と表すと、モデルパラメータ x はその係数の補正值として次式のように表現される。

$$x = \begin{pmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \Delta a_2 \\ \Delta a_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式 (6) において、 t^0 は各タイムウインドウにおける基準時刻、 $V(t^0)$ は音速度初期値の t^0 における値である。

4 解析の対象

現在の海上保安庁の海底地殻変動観測では、海底局位置の決定精度を維持するため、1 エポックについて4日以上 の観測データを確保することを原則としている。以下の解析においては、現行の観測支柱を用いて4日以上 の観測データが取得されているキャンペーン観測を対象として、各回の全データによる局位置と音響トランスデューサ位置バイアスの同時推定を行うこととした。2002年8月から2006年5月までのキャンペーン観測が解析の対象となった。このうち、①測量船「海洋」と「明洋」では別々の支柱を用いて観測を

行っている、②2003年9月よりルビジウム発振器による基準信号を用いたGPS時刻同期型リアルタイムクロックを導入し、収録データの時刻同期の精度が向上した、③2004年10月より新型音響トランスデューサを導入し、各海域で段階的に使用を開始した、というような観測ハードウェアの差異(成田・他, 2005)に伴い、データの品質に違いがあるため、結果を考察するにはこれらを区別する必要がある。これを考慮し、測量船別(明洋・海洋)および期間別に6グループに分類した。期間の区別は次のとおりである。

第I期: ルビジウム発振器なし・旧型音響トランスデューサ使用

第II期: ルビジウム発振器あり・旧型音響トランスデューサ使用

第III期: ルビジウム発振器あり・新型音響トランスデューサ使用

解析の対象となったキャンペーン観測の概要をTable 1に示す。なお、2節で船首方位の偏りを指摘した2005年6月のエポックは観測日数が3日しかなかったため、解析対象には含まれていない。

なお、音響トランスデューサ位置のバイアスは前後と左右の2成分のみを推定し、上下成分は0として拘束した。これは、バイアスの上下成分、局位置解の鉛直成分および音速度構造の3者の間で推定パラメータの分離が悪く、解が安定しなかったことによる。

なお、音響信号波形から往復走時を決定する音響解析には相関解析を用いたソフトウェア sas ver. 1.2.0 (富山, 2003) を、KGPS 解析には IT ver 3.4 (Colombo 1998) を用いた。

5 結果と考察

5.1 バイアス同時推定の結果

Table 2に観測エポック毎に推定(初期値は0)した音響トランスデューサ位置のバイアス値を示す。前述のような観測ハードウェアの差異を考慮し、測量船別(明洋・海洋)および期間別に6グループに分けてバイアス値の平均と標準偏差

Table 1 List of observed data used for estimation of the bias of acoustic transducer, classified according to used survey vessels and acoustic transducers.

Period	S/V	X-ducer	Rb Oscillator	observation site and epoch	observed date	observed days	# of acoustic ranging	
I	Kaiyo		not used	MYGI 0307	2003. 7. 12-17	6	7084	
				SIOE 0309	2003. 3. 9-12	4	3104	
				SIOW 0308	2003. 8. 24-27	4	3797	
	Meiyo			MYGI 0305	2003. 5. 26-6. 4	6	6430	
				FUKU 0306	2003. 6. 7-10	4	4857	
				TOKW 0208	2002. 8. 8-11	4	4647	
II	Kaiyo	old		MYGI 0404	2004. 4. 24-5. 7	8	9278	
				MYKA 0402	2004. 2. 13-19	4	2959	
				SIOE 0409	2004. 9. 20-25	6	7452	
				SIOW 0406	2004. 6. 6-9	4	5260	
				TOKW 0408	2004. 8. 3-6	4	4869	
	Meiyo			MYGI 0408	2004. 8. 19-27	4	4912	
				SAGA 0401	2004. 1. 10-15	6	7101	
				SIOE 0407	2004. 07. 06-12	4	5477	
				SIOE 0411	2004. 11. 12-15	4	4698	
				TOKW 0407	2004. 7. 1-5	4	5261	
III	Kaiyo	new		MYGI 0504	2005. 4. 22-5. 9	6	7923	
				MYGI 0507	2005. 7. 1-4	4	5321	
				MYGI 0508	2005. 8. 9-14	6	7408	
				MYGI 0509	2005. 9. 9-18	5	5921	
				MYGI 0510	2005. 10. 22-30	6	6314	
				MYGW 0504	2005. 4. 29-5. 3	4	4486	
				MYGW 0506	2005. 6. 3-7	5	5817	
				MYGW 0508	2005. 7. 31-8. 5	6	9091	
				MYGW 0509	2005. 8. 29-9. 2	5	7015	
				MYGW 0510	2005. 10. 10-21	6	7011	
				SAGA 0501	2005. 1. 30-2. 3	4	5224	
				SAGA 0601	2006. 1. 10-16	6	6603	
				Meiyo	MYGW 0602	2006. 2. 19-3. 5	6	5415
					SIOE 0605	2006. 5. 29-6. 3	4	4841

を求めた。

上述した 2005 年 6 月および 8 月の観測エポックはいずれも第 III 期に属し、測量船「海洋」によって行われた。このエポックに対応するバイアス値は概ね船首方向に 9 cm と求められており、2 節におけるバイアスの存在予想と良い一致を示している。

5.2 ルビジウム発振器の有無について

第 II・III 期におけるバイアス値各成分の標準偏差は概ね 2 cm 以内に収まっているのに対して、第 I 期では 3 cm 以上、特に明洋における y

成分のバイアスは標準偏差が 10 cm にも及ぶなど、ルビジウム発振器を導入していなかった第 I 期においては、ルビジウム発振器導入後と比較してバイアス推定の再現性が劣っていると見られる。ルビジウム発振器が無かった時期には、観測データ収録 PC の内蔵時計の発振精度や LAN 接続によるデータ通信の遅延等の要因により、音響測距・動揺計測・GPS 観測の 3 者間の時刻同期精度が低かったため（成田・他，2005）、刻時誤差がバイアス推定値に混入していると考えられる。このことはルビジウム発振器の導入が我々の観測システムの計測精度向上に寄与したことを示

Table 2 Statistics of estimated biases for each epoch according to used survey vessels and acoustic transducers.

period	S/V	X-ducer	Rb Oscillator	observation site and epoch	observed days	biases (m)		mean bx SD bx	mean by SD by		
						bx	by				
I	Kaiyo	old	not used	MYGI 0307	6	0.0284	0.0694	-0.0117	0.0491		
				SIOE 0309	4	-0.0455	0.0577			0.0374	0.0258
				SIOW 0308	4	-0.0180	0.0201				
	Meiyo			MYGI 0305	6	0.0497	0.0528	0.0079	-0.0272		
				FUKU 0306	4	-0.0103	0.0091			0.0363	0.1031
				TOKW 0208	4	-0.0158	-0.1435				
II	Kaiyo	old	used	MYGI 0404	8	0.0442	0.0358	0.0278	0.0380		
				MYKA 0402	5	0.0414	0.0181				
				SIOE 0409	6	0.0087	0.0379				
				SIOW 0406	4	0.0040	0.0521				
				TOKW 0408	4	0.0408	0.0463			0.0197	0.0129
	Meiyo			MYGI 0408	4	-0.0217	-0.0325	-0.0350	-0.0539		
				SAGA 0401	6	-0.0277	-0.0813				
				SIOE 0407	4	-0.0265	-0.0526				
				SIOE 0411	4	-0.0309	-0.0478				
				TOKW 0407	4	-0.0683	-0.0555			0.0189	0.0177
III	Kaiyo	new	used	MYGI 0504	6	-0.0077	0.0983	0.0035	0.0868		
				MYGI 0507	4	-0.0019	0.1434				
				MYGI 0508	6	0.0022	0.1142				
				MYGI 0509	5	-0.0329	0.0515				
				MYGI 0510	6	0.0233	0.0899				
				MYGW 0504	4	0.0137	0.0573				
				MYGW 0506	5	-0.0046	0.0577				
				MYGW 0508	6	0.0276	0.0524				
				MYGW 0509	5	-0.0192	0.0894				
				MYGW 0510	6	0.0262	0.1203				
				SAGA 0501	4	0.0049	0.0899				
				SAGA 0601	6	0.0106	0.0771			0.0184	0.0293
				Meiyo	MYGW 0602	6	-0.0551			-0.0470	-0.0562
	SIOE 0605				4	-0.0573	-0.0367	0.0016	0.0073		

していよう。

5.3 観測支柱と音響トランスデューサの型式の違いについて

第II期と第III期の解析結果からは、バイアス値が有意に存在するとともに、支柱毎にバイアス値が異なるのはもとより、同一の測量船・支柱を用いても音響トランスデューサの形式によってバイアス値が異なっているということが示されている。

そもそも我々は継続的に観測の品質を維持できるように、音響トランスデューサの先端が新旧とも全く同じ位置になるように支柱への取り付け方法を工夫してきた。にもかかわらず今回の解析結果

からは、実際には異なったバイアスを持っていることを示唆している。この要因はいくつか考えられる。

- ①音響トランスデューサの実際の音響中心の正確な位置が異なる。
- ②動揺計測の3軸と支柱の上下・左右・前後の方向にずれがある。
- ③ポール補正には支柱の設計上の値を用いているが、実際には支柱が変形している。
- ④さらに観測時に支柱及び音響トランスデューサが水流から抵抗を受けてしまっている。

①については望月・他(2007)により検討が進められているが、今回のように音響中心が水平方向に偏りを持っているかどうかは現在のところ明

らかになっていない。

②③④については、実際の観測に使用している環境において支柱の形状を精密に実測することが不可能であるため、現状ではこれを検証することが困難である。

特に④については、音響トランスデューサの形状の違いからしなりの大きさ・方向に違いが生じ、推定バイアス値の差につながったとも考えられる。今回の手法によって推定されるバイアス値は観測エポックに対して一組であることから、④の影響に対しては短周期の振動が相殺されたエポック中の平均的なバイアス値を推定していると考えられる。

現段階では残念ながら、解析的に推定されたバイアス値が持つハードウェア上の意味を検証するには至っていない。だが、バイアス値が有意に存在するという事は、我々がこれまでに持たなかった知見であり、これを何らかの方法で補正することが海底局の位置決定精度の向上につながると期待される。

6 バイアス補正とその効果

推定されたバイアスを補正して局位置解の時系列変化が改善されるかどうかを、Fig. 3と同様の宮城沖1海底基準点における2002年10月から2005年10月までの11観測エポックのデータを再解析して検証する。具体的にはTable 2で得られた各期間別、各支柱・測量船別に求められた平均的なバイアス値をポール補正量に加算することでバイアス補正とする。

この際、第I期と第II期では音響トランスデューサ・動揺計測装置・GPSアンテナの据付条件は同じであることから、バイアス補正を第I期の観測データに行う際には、第II期の平均的なバイアス値を遡って適用することが精度面では有利であると考えた。この結果、バイアス補正值の内訳はTable 3のようになった。なお、第III期の「明洋」に対しては、観測エポックが2つしかなく、しかも宮城沖1においては実施されていないことから、Table 3に示すバイアス値は暫定

的なものであると同時に、以下の解析では使用していない。

Fig. 8に2002年10月から2005年10月までの11エポックの再解析で得られた局位置の水平成分の時系列変化を示す。高さ固定を行ったことおよび位置の基準についてはTable 2と同様である。この結果をFig. 3と比較すると、2005年6月および8月の極端な位置の偏りは大きく取り除かれ、その他のエポックについても全般にばらつきが軽減されていることがわかる。

かつてFujita et al. (2006 a)は、この海底基準点における2005年4月までの観測結果から、ユーラシアプレートに対するこの地点の速度ベクトルを西北西(方位角295度)に8.5 cm/年と求めたが、Fujita et al. (2006 b)は、2005年8月までのエポックに対してバイアス補正を適用した上記の再解析結果を用いて速度ベクトルを再計算した。この結果、西北西(方位角300度)に7.3 cm/年という値が得られ、直線回帰の標準誤差は東西成分で0.7 cm/年から0.5 cm/年に、南北成分で0.9 cm/年から0.5 cm/年に改善された。

ところでTable 2で得られたバイアス値は、観測を実施した数年間の平均的なバイアス値を観測機材の組み合わせごとに求めたものといえる。だが、実際には観測機材は取り外しが行われるため、観測エポック毎に観測機材の据付状態が異なるということが考えられる。また、支柱等の形状の経年変化も当然起こり得る。これらの事情を考慮しようとするれば、むしろ上記の平均的なバイアス値による補正をグループ内で一律に適用するのは必ずしも適切とはいえないことになる。

Table 3 Values of bias correction adopted to reanalysis. Corrections for Meiyō in period III are temporary values.

period	S/V	bias correction	
		bx (m)	by (m)
I and II	Kaiyo	0.03	0.04
	Meiyo	-0.04	-0.05
III	Kaiyo	0.00	0.09
	Meiyo	(-0.06)	(-0.04)

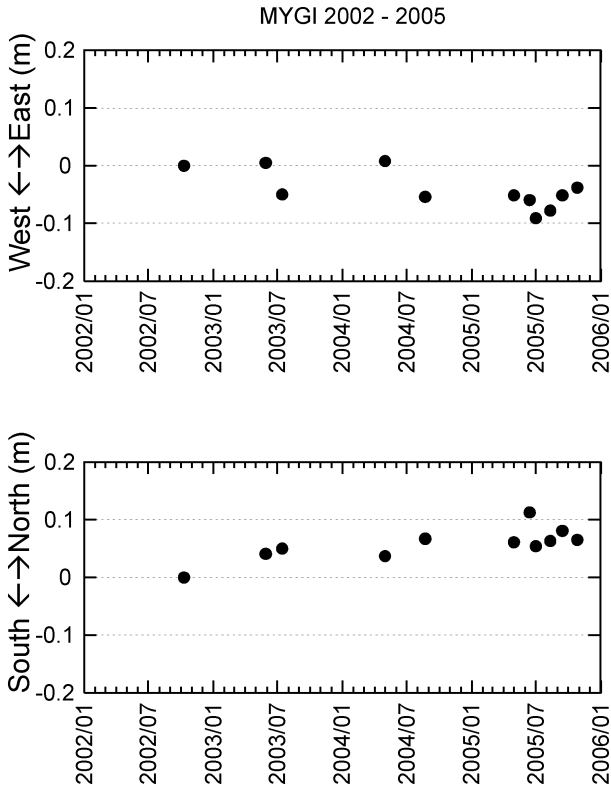


Fig. 8 Same figure as Fig. 3 for the result of reanalysis corrected with mean bias of acoustic transducer position.

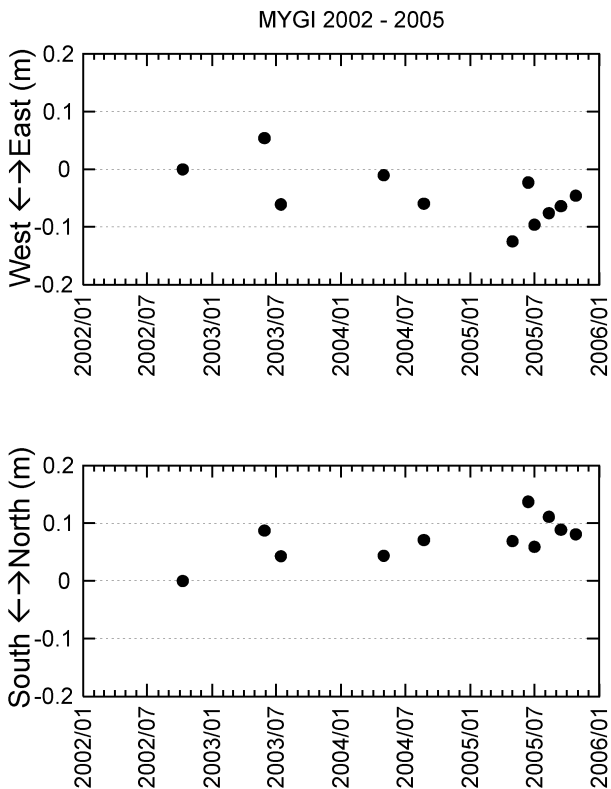


Fig. 9 Same figure as Fig. 3 for the result of simultaneous estimation of station positions and the bias of acoustic transducer position.

そこで比較のために、エポック毎のバイアスとともに同時決定された局位置の水平成分の時系列変化を Fig. 9 に示す。この時系列プロットにおいては、観測日数が4日に満たないエポックに対してもバイアス同時推定を行っている。高さ固定を行ったことおよび位置の基準については Fig. 3 および Fig. 8 と同様である。この結果を見ると、2005年6月および8月の極端な位置の偏りが取り除かれている点は同様であるが、全体のばらつきはバイアス無補正の Fig. 3 と比較してもむしろ大きくなっているように見える。同時推定されたバイアス2成分は、各エポックにおいて必ずしも十分に実態のバイアスを補正しきれてない場合があり、さらには、観測データに含まれる何らかの別の要因をバイアスに押しつけている可能性もある。これらの比較は、むしろ一定の平均的なバイアス値を適用したほうが、実用上は良い補正となっていることを示している。

上記の①バイアス無補正 (Fig. 3), ②平均的なバイアス値による補正 (Fig. 8), ③バイアス同時推定 (Fig. 9) による解析の結果、残差がどのように変化しているかを Table 4 で比較した。③においては全てのエポックで残差が減少した一方で、②においても第I期の2つのエポックを除いて同等に残差が減少している。一般に推定パラメータを増やせば残差を小さくすることは可能であるが、一定とみなしても確からしいパラメータであれば推定しないほうがむしろ解は安定すると考えられ、この意味で平均的なバイアス値による補正を適用する効果は十分にあったと考えられる。

以上のような検討から、現在の我々の局位置解析では、Table 3 に示されたバイアス補正值を使用することとしている。だが、既に考察したとおり、エポック毎の観測機材の据付状態の変化や支柱の形状の経年変化が否定されるものでは決してなく、これに対しては引き続き注意を払っていく必要がある。今後もデータの蓄積に伴って推定されるバイアス値をチェックし、有意な変化があれば補正值の再検討を行う必要があるだろう。また、第

Table 4

period	S/V	X-ducer	Rb Oscillator	observation epoch	observed date	Observed days	residual RMS (msec)				
							①w/o bias correction	②corrected w/ mean bias rate of change	③simultaneous estimation rate of change		
I	Kaiyo	old	not used	MYGI 0210	2002.10.09-10	2	0.0639	0.0694	8.6%	0.0631	-1.3%
	Meiyo			MYGI 0305	2003.5.26-6.4	6	0.0940	0.0953	1.4%	0.0928	-1.3%
	Kaiyo			MYGI 0307	2003.7.12-17	6	0.0766	0.0746	-2.6%	0.0738	-3.7%
II	Kaiyo	new	used	MYGI 0404	2004.4.24-5.7	8	0.0639	0.0620	-3.0%	0.0612	-4.2%
	Meiyo			MYGI 0408	2004.8.19-27	4	0.0642	0.0614	-4.4%	0.0621	-3.3%
III	Kaiyo			MYGI 0504	2005.4.22-5.9	6	0.0770	0.0686	-10.9%	0.0717	-6.9%
				MYGI 0506	2005.6.13-15	3	0.0504	0.0479	-5.0%	0.0474	-6.0%
				MYGI 0507	2005.7.1-4	4	0.0737	0.0690	-6.4%	0.0684	-7.2%
				MYGI 0508	2005.8.9-14	6	0.0476	0.0453	-4.8%	0.0460	-3.4%
				MYGI 0509	2005.9.9-18	5	0.0747	0.0699	-6.4%	0.0733	-1.9%
MYGI 0510	2005.10.22-30	6	0.0863	0.0835	-3.2%	0.0839	-2.8%				

III期の測量船「明洋」に対する暫定バイアス値については、今後データを蓄積して適切な補正值を決定し、再解析する必要がある。

7 まとめ

海上保安庁が2005年に実施した宮城県沖における集中観測の結果を検討したところ、音響トランスデューサ位置のバイアス誤差により局位置解が誤差を持って決定されていると推測される事例がいくつかあったことから、これまでに蓄積された観測データを対象として、局位置と音響トランスデューサ位置バイアスの同時推定を行った。観測ハードウェアの差異を考慮し、測量船別（明洋・海洋）および期間別に6グループに分類してバイアス値を集計した結果、グループ毎に有意なバイアス値が決定された。このグループ毎のバイアス値を補正して「宮城沖1」の観測データの再解析を行った結果、時系列変化のばらつきが改善された。但し、エポック毎の観測機材の据付状態の変化や支柱の形状の経年変化に対しては今後も注意を払い、補正值の再検討を行っていく必要がある。

今回のバイアス推定の結果は、特にルビジウム発振器導入後の我々の観測システムにおいて得ら

れるデータがこのようなバイアスを検出し、分離できるだけの精密な情報を含んでいるということを示しており、システムの信頼性を傍証しているといえよう。

また、今回2節のような考察を基に、漂流観測時には船首の方位を分散させるように注意を払えば、決定局位置に対するバイアスの影響を最小二乗的に低減させることができ、またバイアスを検知する上でも有利であるということが、我々の観測上の指針として新たに付け加えられたことは特記する必要がある。

謝 辞

NASA/GSFCのColombo博士にはKGPS解析のソフトウェア「IT」を提供していただいた。KGPS陸上基準点の一部は、国土地理院より電子基準点1秒データを提供いただいている。海底地殻変動観測は、航法測地室衛星測地担当職員、測量船「明洋」および「海洋」乗組員並びに東京大学生産技術研究所浅田研究室の各氏ほか多くの方々の協力の下に実施されている。記して感謝いたします。

要 旨

海上保安庁が2005年に実施した宮城県沖における集中観測の結果を検討したところ、音響トランスデューサ位置のバイアス誤差により局位置解が誤差を持って決定されていると推測される事例が見つかった。そこで音響トランスデューサ位置のバイアス誤差と海底基準局の位置の同時推定を試みた結果、観測支柱や音響トランスデューサ等の使用機器の違いによってそれぞれ異なるバイアス値が有意に求められた。これらのバイアスを補正することによって海底局位置の時系列のばらつきが改善され、残差も減少した。この手法は局位置決定の精度向上に効果を上げていると考えられる。

参考文献

- 浅田昭・矢吹哲一郎 (2001), 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, *地学雑誌*, **110** (4), 529-543.
- Colombo, O.L. (1998), Long-Distance Kinematic GPS, in *GPS for Geodesy 2nd edition*, edited by Teunissen, P. J. G. and Kleusberg, A, pp. 537-568, Springer, Berlin.
- 藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一郎 (2004), 海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発, *海洋情報部技報*, **22**, 50-56.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo (2006 a), GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, **58**, 265-275.
- Fujita, M., Y. Matsumoto, T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, K. Kawai, T. Yabuki, A. Asada and O. L. Colombo (2006 b), Combined GPS/Acoustic seafloor geodetic observation system for monitoring off-shore active seismic regions near Japan, *Proc. ION GNSS - 2006*, Fort Worth, Texas, 592-603.
- 石川直史・藤田雅之 (2005), 海底地殻変動観測における局位置解析手法と精度の向上について, *海洋情報部研究報告*, **41**, 27-34.
- 松浦充宏, インバージョン解析法, *現代測地学*, 「現代測地学」編集委員会編, 477-482, 日本測地学会, 東京.
- 望月将志・成田誉孝・石川直史・吉田善吾・河合晃司・松下 優・川井仁一・松本良浩・藤田雅之・浅田 昭 (2007), 海底地殻変動観測用トランスデューサの音響中心, *海洋情報部研究報告*, **43**, 29-36.
- 成田誉孝・畝見潤一郎・望月将志 (2005), 海底地殻変動観測における機器の現状とその運用について, *海洋情報部技報*, **23**, 53-60.
- 佐藤まりこ・藤田雅之 (2004), 海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置への影響について, *海洋情報部技報*, **22**, 42-49.
- 富山新一 (2003), 海底地殻変動観測における音響解析, *海洋情報部技報*, **21**, 67-72.
- 畝見潤一郎 (2004), 海底地殻変動観測の現状と諸問題について, *海洋情報部技報*, **22**, 33-41.
- 矢吹哲一郎 (2002), 海底地殻変動観測を目指した音響技術開発, *水路部研究報告*, **38**, 47-58.

研究ノート

海底地殻変動観測用音響トランスデューサの 音響位相特性と音響位相中心

望月将志^{*1}, 成田誉孝^{*2}, 石川直史^{*3}, 吉田善吾^{*1}, 河合晃司^{*3}, 松下優^{*4},
川井仁一^{*3}, 淵之上紘和^{*5}, 松本良浩^{*6}, 藤田雅之^{*7}, 浅田昭^{*1}

Acoustic phase characteristics and phase centers of the acoustic transducers for seafloor geodetic observation

Masashi MOCHIZUKI^{*1}, Yoshitaka NARITA^{*2}, Tadashi ISHIKAWA^{*3}, Zengo YOSHIDA^{*1},
Koji KAWAI^{*3}, Hiroshi MATSUSHITA^{*4}, Jin'ichi KAWAI^{*3}, Hirokazu FUCHINOUE^{*5},
Yoshihiro MATSUMOTO^{*6}, Masayuki FUJITA^{*7} and Akira ASADA^{*1}

Abstract

Institute of Industrial Science, University of Tokyo and Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard have been conducting seafloor geodetic observations since 2000. Sufficient observational results to discuss the system and the observational method have been established as we accumulated the experiences of the observations. Issues and knowledge that we have through the observations should be fed back to the system and further observation for improvement. One of such issues is one inherent in acoustic transducers for acoustic ranging. Ranging errors were caused by the operational principles of the transducers and the reference point set on the point at the top center of the transducers. In order to take measure to this issue, tank tests were conducted to evaluate the ranging characteristic curves of the acoustic transducers. And then the acoustic phase centers of the transducers were deduced from these curves. The comparison of the acoustic phase centers of two types of the acoustic transducers, that is, the cylindrical and the spherical curved disk transducers should be needed to retain the continuity of the long-term seafloor geodetic observation.

1 はじめに

東京大学生産技術研究所と海上保安庁海洋情報部は、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測システムの開発を行い、このシステムを利用した海底地殻変動観測網の展開を行ってきた（浅

田・矢吹, 2000, 2001; Fujita, 2003; Mochizuki et al., 2003)。2000年に最初の観測点を熊野灘に設置したのを皮切りに、現在までに、18の観測点を日本島弧太平洋側の前弧域を中心に設置し、釜石沖から室戸沖までを覆う長大な海底地殻変動

†Received 04 January 2007; Accepted 05 February 2007.

- *1 東京大学生産技術研究所 Institute of Industrial Science, University of Tokyo
- *2 第七管区海上保安本部 7th R.C.G. Hqs.
- *3 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office
- *4 第三管区海上保安本部 3th R.C.G. Hqs.
- *5 測量船拓洋 R/V TAKUYO
- *6 海洋研究室 Ocean Research Laboratory
- *7 技術・国際課 Technology Planning & International Affairs Division

観測網が構築されている。この観測網により、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートの沈み込みに伴った、島弧海底地殻の変形を、海底で直接、計測しようとする試みを続けている。

この観測を開始してから7年の歳月がたち、観測回数の多い観測点では、プレート内変動の速度ベクトルを検出することや (Fujita et al., 2006), 地震に伴う変動を検出することに成功しており (Matsumoto et al., 2006), 現行の観測システムが実用になったシステムとなっていることを示す結果が得られている。

しかしその一方で、観測の回を重ねる中で、机上ではわからなかったこの観測システムの問題点が明らかになってきている。我々が検出を目指す海底地殻の変形は、年間数 cm から 10 cm といった速さで収束する海洋プレートの運動に伴ったものが主であり、これに応じた変位量をもつ。これを数年間の繰返し測位観測によって検出することを考えれば、少なくとも cm オーダーの測位精度が必要であり、そうした高い精度を目標とする本観測システムでは、計測誤差を生じさせる可能性のある問題点を継続的な観測を通して発見し、一つずつ対処して、観測システムの高精度化、安定化を図っていく必要がある。我々が現在着目し、観測・解析手法の上で改善を施そうとしている、そうした問題点の1つが、音響トランスデューサの形状および振動子の発振原理に起因する計測誤差である。

本稿では、音響トランスデューサに起因する音響測距の問題点を提示するとともに、解決に向けた我々の取り組みについて述べる。

2 音響トランスデューサ

現行では2種類の音響トランスデューサを音響測距に使用している。1つは米国 ITC 社製の円筒型トランスデューサ (ITC-3148) である (Fig. 1)。このトランスデューサは、様々な用途で利用されている汎用的なもので、海底地殻変動観測システムの開発当初より使用している。船上局のトランスデューサとしては、2005年度より

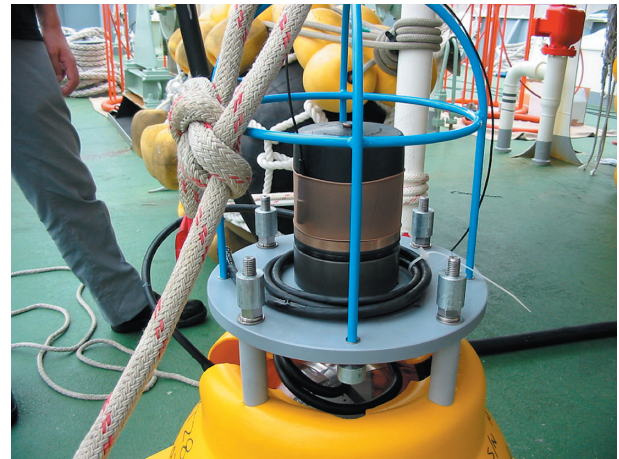


Fig.1 Cylindrical acoustic transducer on the seafloor mirror transponder.

新しいタイプのものへと移行し、実質的に使用されていないが、現在も海底局のすべてでこのトランスデューサを使用している。

円筒型トランスデューサは、リング形状の振動子とその内部に持ち、その振動子が半径方向に振動することによって音響信号の送受信を行う (Fig. 2)。この動作原理に起因して、例えば、振動子の振動方向とそれに直交する方向、つまりトランスデューサの軸方向とでは、同時に送受信された音響信号であってもその位相が 180° ずれたものになってしまうといった、角度に依存した位相ズレが送受信信号に生じることが考えられる。

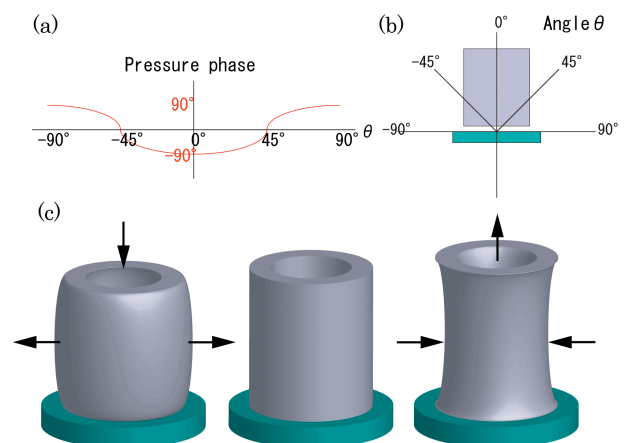


Fig.2 (a) Acoustic pressure phase of the cylindrical acoustic transducer versus angle θ . (b) θ is measured from the axis of the acoustic transducer. (c) Schematic images of the oscillation mode of the cylindrical oscillator.



Fig. 3 Current acoustic transducer employed on the on-board unit.

測距に利用する信号の搬送波周波数が 10 kHz であることから、その波長はおおむね 15 cm となり、 180° の位相ズレが生じれば 7.5 cm 相当の測距誤差が生じ得ることになる。汎用品であり、利用しやすい反面、こうした特性を十二分に把握した上で利用しなくては、cm オーダーの水中測距は達成し得なくなる。

もう 1 つは、米国 LinkQuest 社の Xiaolong Yu 博士が設計をし、ITC 社が製作を行った、球面型振動板をもつ球面型トランスデューサである (Fig. 3)。これは、2005 年度の観測より、船上局のトランスデューサとして使用し現在に至っている。

曲率を持つ振動板を振動させることで音響信号の送受信を行う動作原理になっている (Fig. 4)。送受波ビームがトランスデューサの軸方向にあり、トランスデューサの軸に対して $\pm 50^\circ$ の範囲が 6 dB 減衰点で、このビーム内での位相反転が生じないように設計がなされている。船上局-海底局間の測距の多くは、双方のトランスデューサの成す角度が $0 \sim 50^\circ$ の範囲で実施されるので、これに対応した設計である。船上局側のトランスデューサを、前述の円筒型トランスデューサからこのトランスデューサへ変更することで、位相特性による水中測距への影響を減じることを目指している。

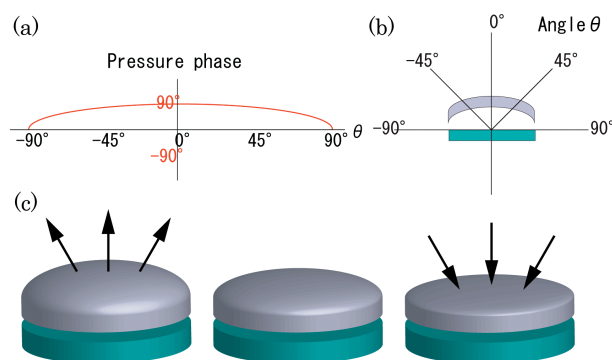


Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the spherical curved disk acoustic transducer.

3 水槽試験

音響トランスデューサの性能情報として、メーカー側が振幅特性を提示することはあっても、位相特性を提示することは少ない。我々の海底地殻変動観測で使用している 2 種類の音響トランスデューサについても例外ではない。cm オーダーの測距、測位を目指す我々にとって音響トランスデューサの位相特性を把握した上で観測を実施することは必須である。

2 種類の音響トランスデューサの位相特性を計測する試験を、東京大学生産技術研究所海中工学研究センターの試験水槽にて実施した。この試験水槽は AUV の開発用に設計、設置されたもので、700 cm (W) \times 700 cm (D) \times 900 cm (H) の大きさを有するものである。水槽中央部付近に、工事現場等で利用されている汎用の足場パイプとユニバーサルジョイントを組み合わせた試験治具を設置して計測を行った (Fig. 5)。

計測の概要を Fig. 6 に示す。足場パイプによって水槽中に固定されたハイドロフォンに対し、音響トランスデューサは常に一定距離 (Fig. 6 において $L=150$ cm と固定する。) を維持したまま、ユニバーサルジョイントによって角度 (θ) を変えられるような仕組みにしてある。音響トランスデューサを送波器に、ハイドロフォンを受波器として、 $L=150$ cm を維持しつつ θ を変えながら音響測距を行い、 θ の変化によって、 $L=150$ cm という実距離の音響測距値がどのように変化するかの把握を行う。本論文では θ を 0° から 10° 刻

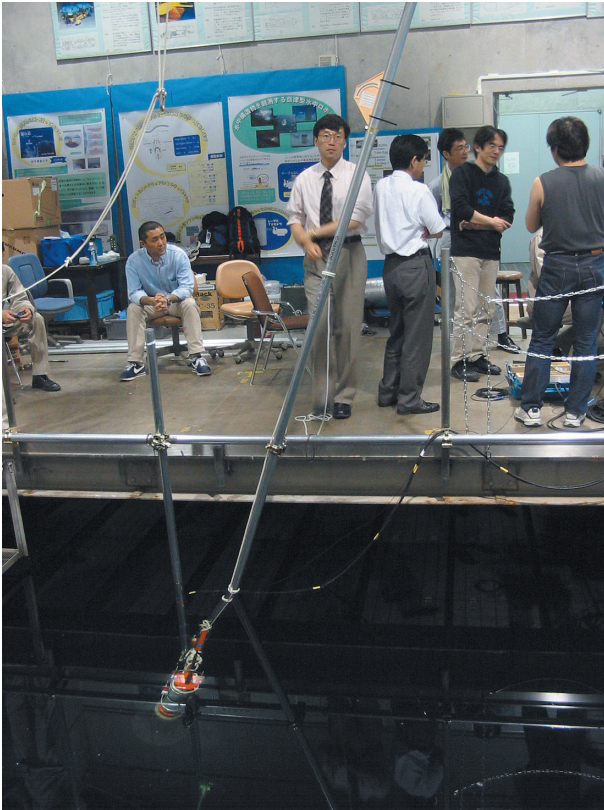


Fig. 5 A snapshot from the water tank test.

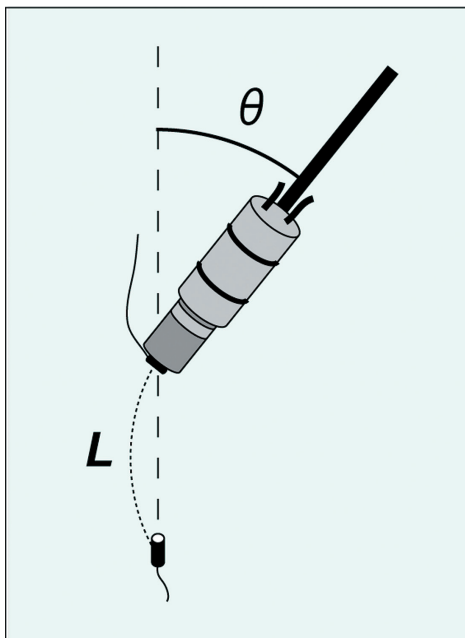


Fig. 6 Schematic image of the ranging procedure in the water tank.

みで 60° まで、更にこの水槽においての限界値となる 64° の 8 つの角度に設定し計測した値を扱う。設定した角度において、それぞれ 15 回程度の測距を実施している。更にトランスデューサの軸を回転軸として 90° 回した位置においても同様の計測を実施している。

送信する信号は、海底地殻変動観測で利用されているものと同じ、10 kHz の正弦波を搬送波とし、4 波を 1 ビットとしてコーディングした 9 次の M 系列信号 (204 ms 長) である (浅田・矢吹, 2001 ; Mochizuki et al., 2003, 2005)。受波器として使用するハイドロフォン (RESON TC 4013) は、感应部が 1 cm 程度の小型のもので、使用する音響信号の波長 (~ 15 cm) に比して小さく、ほぼ等方的なレスポンスを持つことから、点として見なすことができる。

音響トランスデューサの送信信号とハイドロフォンの受信信号を 2 つのチャンネルで同時に収録し、それぞれの収録タイミングを測距信号のレプリカとの相互相関によって求める。このタイミングの差が計測信号の伝搬走時となり、測距結果に対応する値となる。収録システムは現行の海底地殻変動観測システムをそのまま代用しており、200 kHz のサンプリング間隔で収録を実施した。

音響トランスデューサとハイドロフォン間距離は、ハイドロフォン感应部から音響トランスデューサ頭頂部中央までの距離としている。これは、通常海底地殻変動観測の解析において、頭頂部中央をもって、送受信時のトランスデューサの位置としていることに依っている。

4 計測特性曲線

Fig. 7 に計測結果を示す。150 cm の距離を音響測距した際に、トランスデューサに対する受信点の位置 (角度) が変わること、測距結果の違いがどのように現れるかということを示している。横軸に角度 θ をとり、縦軸には伝搬走時に対応するサンプル数をとっている。200 kHz で収録をしているのでこのサンプル数にサンプル間隔の 5 μ s をかけたものが実際の伝搬走時となる。10 kHz

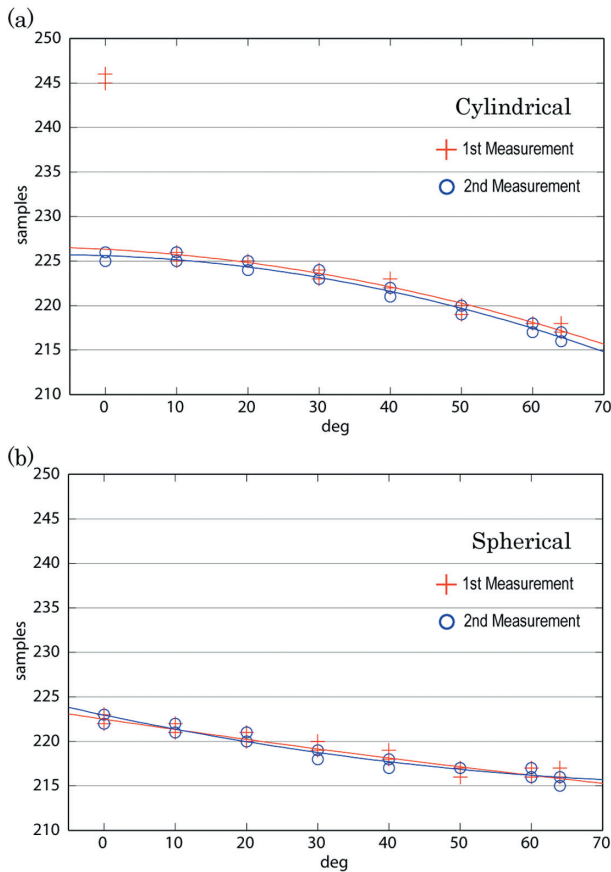


Fig. 7 Ranging results of the cylindrical (a) and the spherical curved disk (b) transducers in the tank test. Ordinate axis indicates ADC samples. Red crosses and blue open circles correspond to 1st and 2nd measurements, respectively, carried out in two directions which intersect orthogonally. Lines are quadratic polynomial functions deduced by the least square method.

の正弦波を搬送波として用いていることから、20サンプルが1波長、即ち約15cmに対応する。

Fig. 7 (a) は円筒型トランスデューサに対する計測結果を示している。一見すると取得データ数が少ないように見えるが、測距の再現性が高く、同じ位置に重なってプロットされている。

トランスデューサの軸の延長方向である $\theta = 0^\circ$ での計測値の中に、トレンドから大きくズレたものが確認できる。これは、この方向が、振動子の振動方向と直交方向にあることを一因としていのではないかと考えている。振動子の振動方向に正対する $\theta = 90^\circ$ の位置であれば、第一に、振動子の近接する部分から生じる音圧変化を直接

受信することになる。これに比して $\theta = 0^\circ$ の位置では、振動子各部より生成された音圧変化が伝播ののち形成する音場をとらえることとなり、自ずと受信する音圧の変化にも微妙な差が生じてくる。実際の受信波形を、その先頭部のエンベロープの形に着目して見比べてみても、 $\theta = 0^\circ$ のときにはなまっていたものが、 θ 値が大きくなるにつれて立ち上りの明瞭なものになっていた。こうした受信波形の微妙な差異が、信号到達時刻の読み取りに影響を及ぼし、およそ1波長分ずれたところを読み取ってしまったものと考えている。音源となるトランスデューサ近傍では音場の揺らぎが大きく、特に水槽のように狭く閉じられた空間では、より一層、円筒型トランスデューサ頭頂部方向での計測を困難なものにしてしまっていることも考えられる。このことは、汎用性の高い円筒型トランスデューサを利用する際に把握しておかねばならない事項であるといえよう。

これらの計測値はアウトライヤーとしてとらえ以後の解析では除外し、トレンドに乗った部分のみに目を向けていくと、 0° から 64° まで、受信点の位置を変えることで、計測値にほぼ半波長分、7.5 cm 程度の差が生じていることがわかる。

Fig. 7 (b) は球面型トランスデューサに対する計測結果である。 $0^\circ \sim 64^\circ$ の範囲での計測値の開きが4.5 cm 程度に抑制されており、円筒型トランスデューサに比して、音響トランスデューサの特性によって生じる計測誤差が軽減されていることが見て取れる。

水槽試験では音響トランスデューサを送波器としてのみ利用し、いわば音響トランスデューサが持つ、電気信号から音響信号への変換特性の実測を行ったものといえる。実際の観測においては音響トランスデューサを、送波器としてだけでなく受波器としても使用し、測距信号の往復走時を計測することになる。このとき、送波と受波をそれぞれ2度ずつ行うため、計4度にわたって音響トランスデューサの持つ特性の影響を受けることになる。よって、Fig. 7 が示す以上の測距結果への

角度依存性が存在しうることになる。cm オーダーの測位を目指す海底地殻変動観測においては無視できるものではなく、何らかの対応が必要となる。

5 音響トランスデューサの位相中心

水槽試験で示された同一距離に対する音響測距値の開きは、音響トランスデューサの発振原理によるものだけでなく、それ以外に、音響トランスデューサ上の計測基準点の取り方にも影響を受けているものと考えられる。

水槽試験では音響トランスデューサ頭頂部中央を計測の基準点とし、ここから 150 cm 離れた位置に小型のハイドロフォンを配置し測距を実施した。実際の海底地殻変動観測においても、同一の支柱に取り付けられた GPS 装置と動揺センサーによって、音響トランスデューサ頭頂部中央の位置が、送受信時の音響トランスデューサの位置として求められて、解析に利用されている。これは、トランスデューサの詳細な内部構造や動作原理、制御原理といったことをメーカー側が公開せず、音響的中心を知るすべがないため、便宜的に計測の基準点を頭頂部中央に置いたに過ぎない。ここでいう音響的中心とは、遠方で観測した際に、音響トランスデューサ内、あるいは近傍のその一点より、等方的に音響エネルギーが放出されるように見える点をイメージしている。GPS アンテナに記載されている位相中心の位置に相当する音響トランスデューサ上の点といった方がより具体的かもしれない。

前章で示した水槽試験の結果を用いて、音響トランスデューサ上の音響的位相中心を推定する試みを実施した。その概念図を Fig.8 (a) に示す。

音響トランスデューサの音響的位相中心が軸上に存在し、軸対象な位相特性を示すものと仮定をする。水槽試験では頭頂部にその点を仮定していたが、実際にはそこから内側に d だけ入った位置に音響的位相中心があるものとし、角度 θ とハイドロフォンまでの実距離 L を計算し直す。新

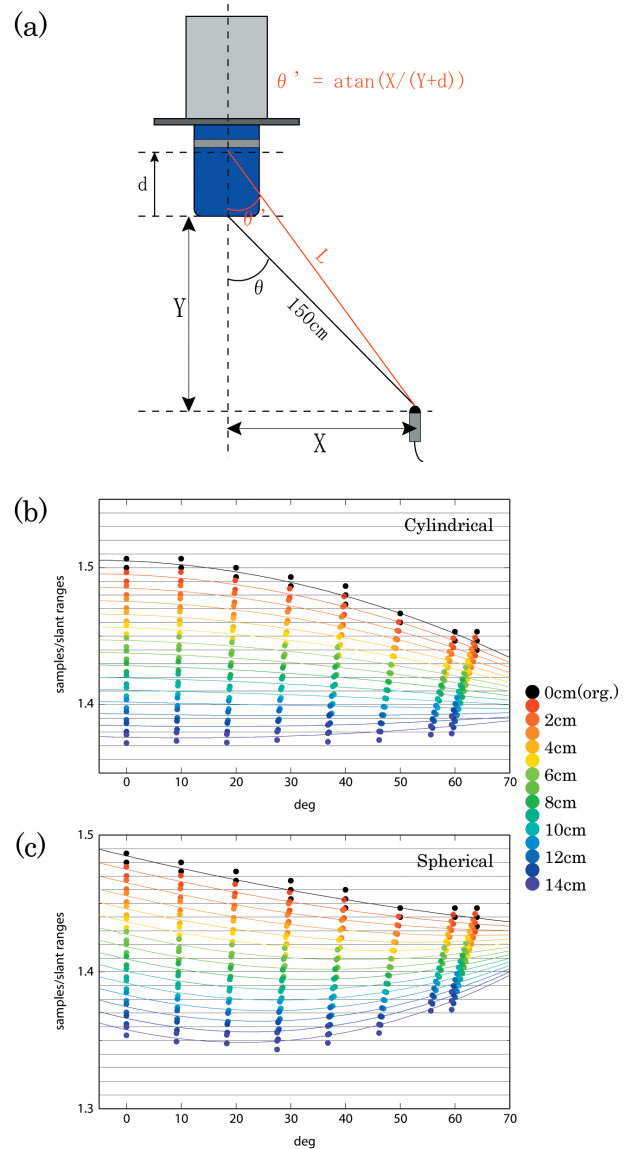


Fig.8(a) Schematic image of the estimation of the acoustic phase center. The acoustic phase center is assumed to be at d cm inside from the top and on the axis of the acoustic transducer. L and θ' are calculated as d ranges between 1 and 14 cm at interval of 1 cm. The response curves, which were obtained from the tank test, are redrawn based on the L and θ' . (b) : Redrawn response curves for the cylindrical acoustic transducer. (c) : Redrawn response curves for the spherical curved disk acoustic transducer.

たに求めた角度 θ' に対して、測距結果を書き直すという作業を、 d を 1 cm ~ 14 cm まで 1 cm ずつ変えて行っていった。

Fig.8 (b,c) がその結果を示している。計測距離 L は角度によって変わってくるため、伝搬走

時に対応するサンプル数を計測距離 L で除算し、単位長あたりのサンプル数を縦軸に、 θ を横軸にプロットしている。最上部に黒色でプロットされているのが、Fig.7 に示されているものに対応している。

Fig.9 (a) は円筒型トランスデューサに対応した結果。仮定する音響位相中心を、音響トランスデューサのより内部に持つて行くに従い、角度に対して平坦な特性を持つようになっていく。 $d = 12$ cm としたときに最も平坦な特性を示している。平坦な特性、即ち、どの角度に対して測距結果が変わらない点であり、この点が円筒型トランスデューサの音響位相中心と考えることができる。

Fig.9 (b) は球面型トランスデューサに対する結果である。円筒型トランスデューサの場合と比べて少し下向きに凸な特性を示しているが、 $d = 9$ cm のときに最も平坦に近い特性を示すことになり、この付近に音響位相中心があるものと推定することができる。内部については全くもって詳細が分からないのであるが、振動板の曲率や独自の制御機構をして、 $0 \sim 50^\circ$ の範囲で送受波の位相特性が平坦に保たれるように調整されており、こうした機構が分からないまま、幾何的に位相特性を推定したことで、平坦な特性からのズレが生じたのではないかと考えている。Fig.7 (b) において、 $0 \sim 50^\circ$ の範囲で、数 cm の計測地の開きが残っているのも、これと同じ理由によるものと考えられる。

ここでの解析結果をもとに考えれば、円筒型、球面型ともに音響トランスデューサの計測基準点は、それぞれ 12 cm, 9 cm とかなり内部にあるといえる。この点を音響測距時の送受波点と考えることで、音響トランスデューサの位相特性による測距結果への影響を大きく減ずることが可能となる。

6 まとめ

海底地殻変動観測における水中音響測距精度の向上を目指し、現行で使用している 2 種類の音響

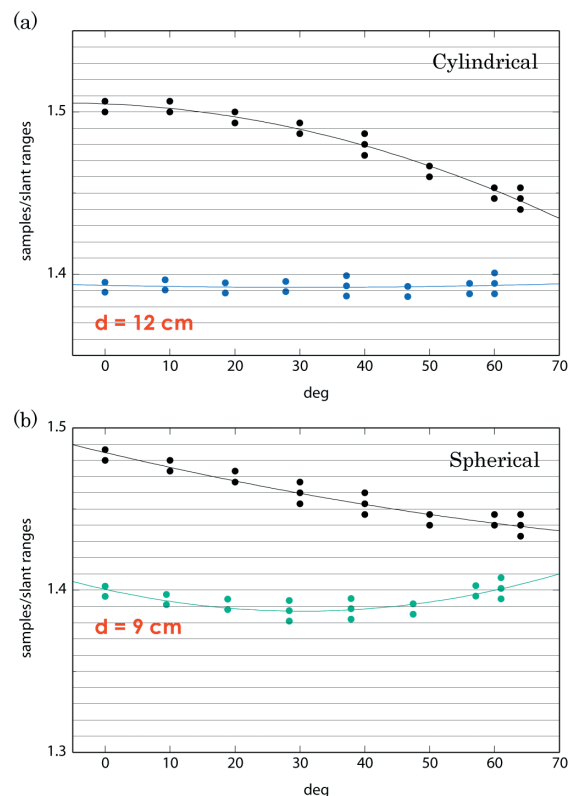


Fig. 9 Phase response curves for the cylindrical (a) and the spherical curved disk (b) acoustic transducers. Ordinate axis indicates ADC samples per unit range. Black dots indicate ranging results in the tank test. Black lines are quadratic polynomial functions deduced by the least square method. Color dots and lines correspond to ones with ranges and angles recalculated based on the assumed phase centers.

トランスデューサの計測特性把握のための水槽試験を実施した。

円筒型トランスデューサは、150 cm の測距距離に対し、軸方向、即ち $\theta = 0^\circ$ 方向と、 $\theta = 64^\circ$ 方向とでは、測距信号波長の半波長、約 7.5 cm の測距結果の差を持つことが明らかとなった。後から船上局トランスデューサとして導入された、球面型トランスデューサは、円筒型トランスデューサのそれに比して約 3 cm 減じ、計測結果の差が 4.5 cm 程度に収められている。こうした計測結果に見られる差は、音響トランスデューサの発振原理に起因する音響位相特性によるものと、計測の基準点を音響トランスデューサの頭頂部中央に置いていることに起因する 2 つを原因と

して考えることができる。

更に水槽試験で把握した計測特性をもとにして、両音響トランスデューサの音響位相中心の推定を行った。円筒型トランスデューサは頭頂部から 12 cm 内部に入った位置に、球面型トランスデューサの場合には、9 cm 内側に入った場所に音響位相中心があると仮定すると、 θ に対して平坦な計測特性を得られることが分かった。

謝 辞

水槽試験の実施に当たっては海洋情報部諸氏に参加いただいた。また、計画段階より、(株)三ツ矢農水の岡部圭二氏に多大なるご尽力をいただいた。本文中の図の作成にソフトウェアパッケージ GMT (Wessel and Smith, 1991) を使用した。記して感謝する。

要 旨

GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測において、今後、考慮されるべき問題点の 1 つとして、音響測距に見込まれる測距誤差があげられる。音響トランスデューサの動作原理に起因して角度による送受波信号の位相差が生じること、計測の基準点をトランスデューサ頭頂部中央としていることがその要因となっている。1 度の送信あるいは受信によって生じ得る測距誤差は数 cm に達すると見込まれ、cm オーダーの測位を必要とする海底地殻変動観測において、無視することのできない問題点であるといえる。

我々は現行で使用している 2 種類の音響トランスデューサに対して水槽試験を実施し、角度による測距応答曲線を取得、見込まれる計測誤差の把握を行った。更に、水槽試験で取得した測距応答曲線をもとに、トランスデューサの音響位相中心の推定を実施し、円筒型トランスデューサは、現在測距の基準点としている頭頂部より 12 cm 内側に、球面型トランスデューサは 9 cm 内側に音響位相中心があるとの結果を得た。この位置を測距の基準点とし、2 種類の音響トランスデューサの音響位相中心の差を認識した上で観測を実施す

ることにより、長期にわたる観測の連続性、安定性が維持されるものと考えられる。

参考文献

- 浅田昭, 矢吹哲一郎 (2000), 海底音響基準ネット, *生産研究*, 52, 293-296.
- 浅田昭, 矢吹哲一郎 (2001), 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, *地学雑誌*, 110 (4), 529-543.
- Fujita, M. (2003), Seafloor geodetic observation —GPS/acoustic combination technique—, *Hydro International*, 7, 41-43.
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo (2006), GPS/Acoustic seafloor geodetic observation : method of data analysis and its application, *Earth Planets Space*, 58, 265-275.
- Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochizuki, T. Yabuki, and A. Asada (2006), Under-sea co-seismic crustal movements associated with the 2005 Off Miyagi Prefecture Earthquake detected by GPS/Acoustic seafloor geodetic observation, *Earth Planets Space* (in press).
- Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida, and A. Asada (2003), Construction of seafloor geodetic observation network around Japan, *Recent advances in marine science and technology 2002*, 591-600.
- Mochizuki, M., M. Fujita, M. Sato, Z. Yoshida, M. Katayama, T. Yabuki, and A. Asada (2005), Repeated trials of seafloor geodetic observation network around Japan, *Recent advances in marine science and technology 2004*, 11-18.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1991), Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, 72, 441, 445-446.

研究ノート

下里 SLR 観測の新手法

黒川隆司^{*1}, 福良博子^{*1}, 久間裕一^{*1}, 井城秀一^{*1}, 田中郁男^{*1}, 鈴木充広^{*1}, 長岡 継^{*2}, 江河有聡^{*3}

Newly developed methods for SLR observation at Simosato Hydrographic Observatory

Takashi KUROKAWA^{*1}, Hiroko FUKURA^{*1}, Yuichi KYUMA^{*1}, Hidekazu INOSHIRO^{*1},
Ikuro TANAKA^{*1}, Michihiro SUZUKI^{*1}, Mitugu NAGAOKA^{*2}, Asato EGAWA^{*3}

Abstract

In satellite laser ranging (SLR) observation the distance to an artificial satellite is measured from round-trip travel time of a laser pulse which is transmitted from the station, reflected at the corner cube reflectors on the surface of the satellite and then received back at the station. The ranging accuracy depends on how accurately the specific point of returned pulse is identified. A simple method to identify such a point by detecting the leading edge of a transmitted and a received pulse has been degrading the ranging accuracy because of 'time walk' caused by variation of signal intensity. In order to reduce the time walk, two new techniques were introduced at Simosato Hydrographic Observatory in 2006 : namely, the methods named Triple Threshold Screening (TTS) and Constant Mid-signal Detection (CMD). The authors intend to verify both of them are effective in improvement of ranging accuracy in this paper. The principle of these techniques and some examples of their effectiveness are given.

1 はじめに

第五管区海上保安本部下里水路観測所では 1982 年より人工衛星レーザー測距 (Satellite laser ranging : SLR) 観測を行っている。観測開始から現在までの 24 年間に世界の SLR 観測とその関連技術は長足の進歩を遂げており、ことに測距精度の向上は著しく、精度の一つの指標である測距データの single shot RMS の残差 (以下, RMS と呼ぶ) は当初の十数 cm から 1 cm を切る段階へと進んできており、下里水路観測所もその流れの中にあって、常に精度向上の取り組みを行ってきている。

本稿は下里水路観測所において 2006 年途中から採用した SLR の精度向上のための二つの新手法について紹介するものである。

2 従来の測距手法 (リーディングエッジ方式) について

SLR はレーザー光を発射し、次に人工衛星に取り付けられた逆反射プリズムによって反射されたこの光を捉え、発射から反射光受信までの往復時間を測定することにより、人工衛星までの距離を測定する観測である。発射したレーザー光とその反射光はそれぞれ電気信号 (スタート信号, ス

†Received 13 December 2006 ; Accepted 01 February 2007.

*1 第五管区海上保安本部下里水路観測所 Shimosato Hydrographic Observatory 5th R.C.G. Hqs

*2 第七管区海上保安本部 7th R.C.G. Hqs

*3 第三管区海上保安本部 3th R.C.G. Hqs

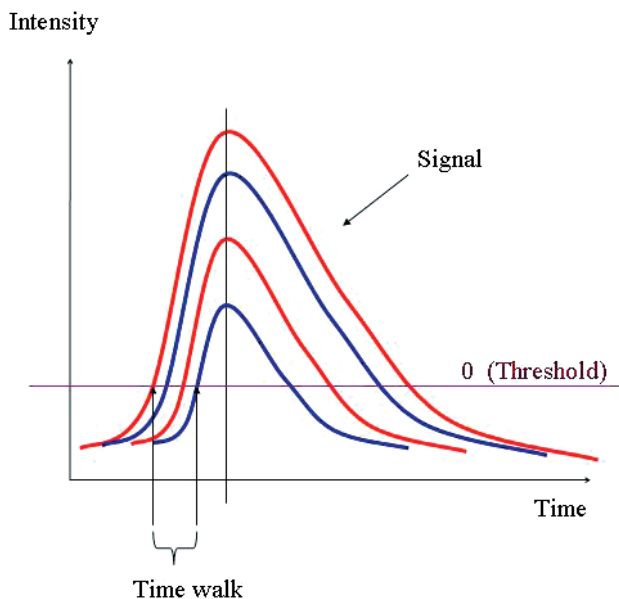


Fig. 1 Concept of leading edge detection technique.

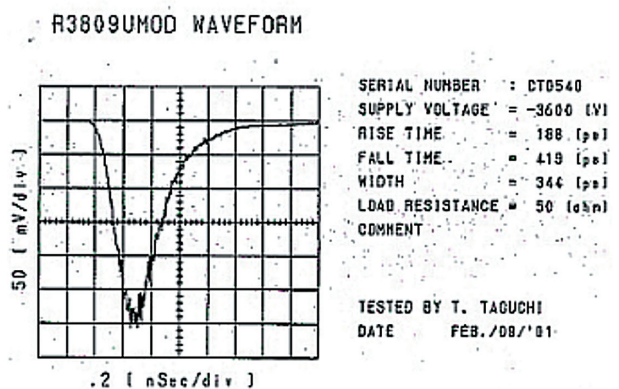


Fig. 2 Actual waveform of a stop signal. (Photomultiplier tube (PMT), manufactured by Hamamatsu Photonics K.K.)

トップ信号)に変換される。

従来の観測では信号の「立ち上がり（実際には信号の電圧極性がマイナスなので立ち下がり）」の電圧がある一定の閾値に達した瞬間をスタート及びストップとし、両者の時間間隔から衛星までの距離を測定している。

この手法では信号の強弱により、閾値に達するまでの時間にバラつき（Time walk）が生じ、それが精度の劣化を引き起こす大きな要因となる（福良・藤田，1999）（Fig. 1）。下里水路観測所において実際に受信光検出に使用している検出器（Microchannel Plate Photomultiplier Tube : MCP-PMT）に短いパルス状の光（継続時間 50 ps）

を照射した際の出力信号波形（浜松ホトニクス株式会社，2001）を Fig. 2 に示す。

3 三段階閾値評価法（TTS法）について

3.1 概要

TTS法は衛星からのリターン信号が十分に強く、多数の光電子が検出できることを前提としている。この法はシングル光子又は少数の光電子の信号である可能性がたかいクラス A の信号の除去や、人工衛星からの受信信号から信号強度の均質なデータのみを抽出することにより Time walk を小さく抑える手法である。（Fig. 3）

3.2 詳細

通常レーザー測距装置は、受信信号のレベルが一定の閾値以上となる全てのデータを測距データとして採用している。ここで Fig. 3 の①～④の信号であるが、大気の影響、トラッキングエラーなどにより反射波の受信強度が個々に変動（州崎・橘，1980）し、大きな Time walk が生じることが精度悪化の原因となっている。

ここで3階の閾値を設けて信号強度を A~D の4のクラスに分け、特定のクラスのデータのみを採用することで信号強度の均質なデータを得て、Time walk を小さくし、精度向上を図るのが TTS (Triple Threshold Screening) 法である。

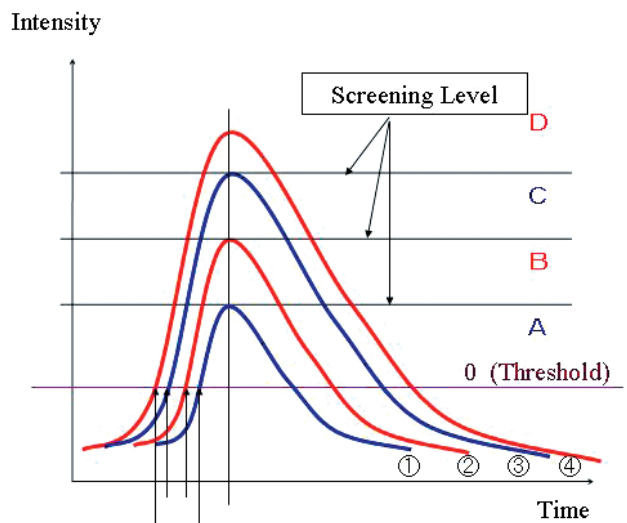


Fig. 3 Concept of Triple Threshold Screening (TTS) technique.

仮に Fig. 3 で C 区間のみの採用とした場合、立ち上がりの瞬間の変動は②と閾値との交点、③と閾値との交点の時間差分だけとなり測距精度は向上する。

なお TTS 法による特定クラスのデータ選択はデータ取得後のオフライン処理によって行われる。この際比較に用いるキャリブレーションデータについても TTS 法による選択を行い、衛星測距と同一クラスのデータによって比較している。

TTS 法の着想と人工衛星レーザ測距システムの実装方式については [附録] 参照

3.3 利点及び欠点

TTS 法を用いる利点としては、信号強度の強い信号のクラスと弱い信号のクラスとを分離処理することによって、どのクラスの精度が良いかを調べることができる。

またそれぞれのクラスに分類されたデータの数を調べることによって実際の観測において受信する衛星からの反射光の強度分布の情報を得ることが出来る。反射光の強度分布のパターンは衛星までの距離や衛星毎の逆反射プリズムの配置パターン等の影響を受けるものと予想されるが、実際にそれが現れるのか否かは興味深い問題である。この問題の検証は今後の課題である。

一方 TTS 法を用いる欠点は受信したデータを更に取捨選択するので最終的に採用されるデータ数は減少する点である。

3.4 結果

次の図は従来手法 (Fig. 4 (a)) と、TTS 法 (Fig. 4 (b)) で同じ観測データ (測地衛星あじさい) を処理した結果の残差グラフ (最小二乗法により測距値に多項式近似をおこない、残差の標準偏差の 3 倍以上の残差を持つデータの削除) である。

従来手法の処理後の RMS が 19 mm であるのに対して TTS 法で選択したデータの処理後の RMS は 11 mm で、約 40% の改善が見られた。この傾向はノーマルポイントデータについても同

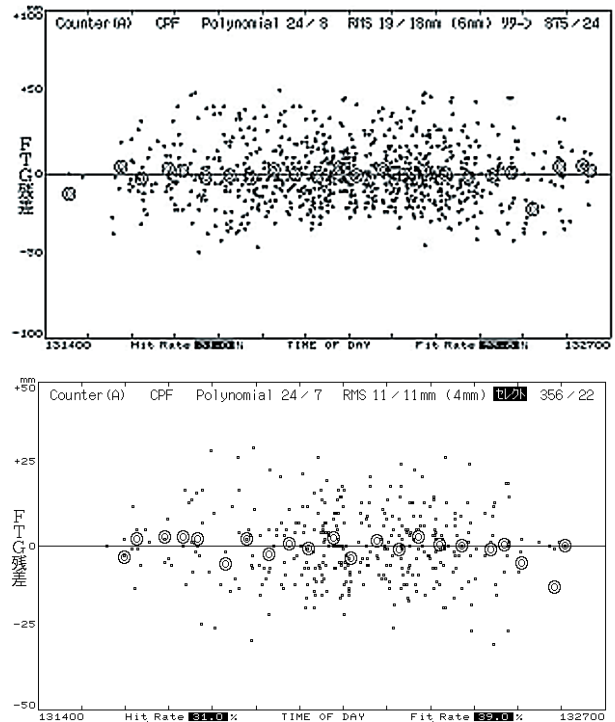


Fig. 4 (a) Residual plot of AJISAI observation under conventional technique, (b) same plot under TTS technique.

様で、TTS 処理前後で RMS は 18 mm から 11 mm に向上している。

一方処理後のデータ数は従来手法 875 に対して、TTS 法は 356 と 60% 減少しており、TTS 法の欠点もはっきりと現れている。

TTS 法により分類されるデータのクラスと測距値の関係については、測地衛星 LAGEOS-1, 2 のデータから測得データ数の多かった 5 観測について、分類された A~D のクラス全てのデータで処理した結果の残差から、A~D クラスそれぞれのデータを抽出し、残差の傾向を調べる方法で検討した。結果は信号の弱いクラスほど残差がプラス側に偏り、その量は隣り合ったクラス間で 1~2 cm の差 (ただし数値自体は TTS の設定値によって変化する。) となった。

この結果は TTS 法の原理から予想される結果であり、TTS 法の有効性を示している。

4 信号不動中点検出法 (CMD 法) について

4.1 概要

CMD (Constant Mid-signal Detection) 法は信

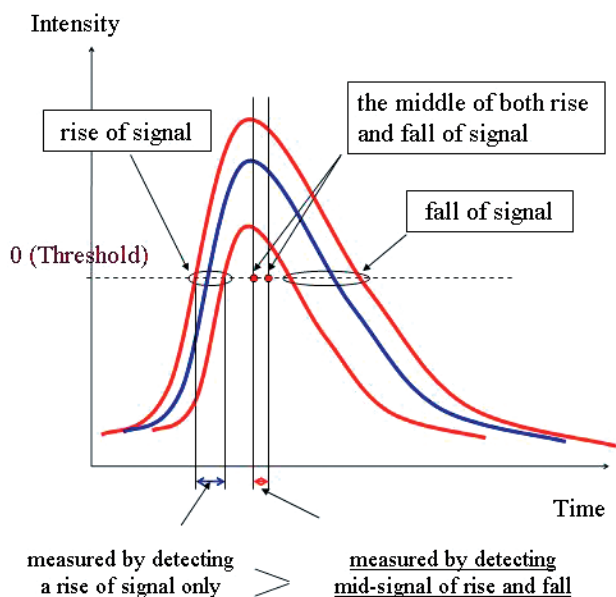


Fig.5 Concept of Constant Mid-signal Detection (CMD) technique.

号強度の変動による Time walk の影響を僅少化するための手法である。スタート信号、ストップ信号の立ち上がり立ち下がりが信号波形のピークの左右で対称形であると仮定すれば、立ち上がり立ち下がりの位置を測定してこれを平均した位置は、信号波形の波高値に無関係に常に波形のピーク的位置を表す。完全に左右対称でないとしても、近似的に左右対称と見なせる波形 (Fig. 2) であれば、従来手法より信号の強度変化の影響を小さく出来ることが期待できる。CMD 法はこの仮定に基づいて考案された手法である。(Fig. 5)

4.2 詳細

光を電気信号に変換する PMT からの出力信号は、Fig. 5 のような立ち上がりより立ち下がり側がやや広がる形状をしており立ち上がり信号と立ち下がり信号の双方のタイミングを検出することにより、その中央を見つけ出しこの信号中央を受信信号として扱い測距値を算出することによって、ランダムな受信強度変化に伴う受信信号の立ち上がりに生じる Time walk による誤差を僅少化することが期待出来る。

具体的には、PMT からの出力信号の立ち上が

りと立ち下がりを検出し各々の信号に基づく測距値を得た後に二つの値の平均値として測距値を求める。

但し、この手法が効果を発揮するためには、受信信号波形が近似的に左右対称と見なせるものであること及び受信強度 (の違い) によって不規則に乱れないこと、すなわち受信強度が変動しても受信波形は相似的に変化するという二点が前提となる。下里水路観測所の SLR システムにおいて CMD 法導入に先立つ予備的観測を行ったところ、衛星測距の結果も地上標的を用いた実験の結果も、その多くが CMD 法の前提条件を満たす波形を示した。

CMD 法では衛星測距と地上標的の測距では波形が異なる場合、正しい測距データが得られない問題が予想されるが、この点に関しては立ち上がり立ち下がりの中点位置を、立ち上がり立ち下がり距離の差の 1/2 を補正して得られる擬似的な leading edge 位置に置き換える操作を、衛星測距データと地上標的の測距データ双方に施すことによって解決した。

4.3 利点及び欠点

CMD 法を用いる利点は記録された一つ一つのデータの信号強度の変動を僅少化するため、この手法の処理によって観測されたデータ数が減少することは無いことから、記録されたデータ数が少ない観測においても有効に利用できること及び、観測中にレーザー出力が変動してしまったような場合でも観測結果に及ぼす悪影響を小さく押さえる効果があるという利点がある。また原理的に、必ず従来の leading edge による測距データも記録していることから、従来の方式によるデータの比較によるチェックが容易だという利点もある。

一方、CMD 法の欠点は観測する人工衛星によって RMS の改善効果に大小の差があり、かえって RMS を悪化させる場合がある点である。この欠点はことに「あじさい」に関して顕著である。

4.4 結果

次の図は従来手法 (Fig.6 (a)) と, CMD 法 (Fig.6 (b)) で同じ観測データ (測地衛星ラジオス2) を処理した結果の残差グラフである。

従来手法の処理後の RMS が 13 mm であるのに対して CMD 法で選択したデータの処理後の RMS は 9 mm で, 約 30% の改善が見られた。

一方処理後のデータ数は従来方式 1808 に対して, CMD 法は 1683 と 10% も減少しておらず, CMD 法の利点もはっきりと現れている。

測距値に関しては, CMD 法と従来方式での測距値を直接比較した結果, 懸念されていた衛星の違いによる値の違いは認められなかった。ノーマルポイントデータについても比較してみると, 観測データ同様 RMS が 13 mm から 9 mm に向上しており良好な結果といえる。

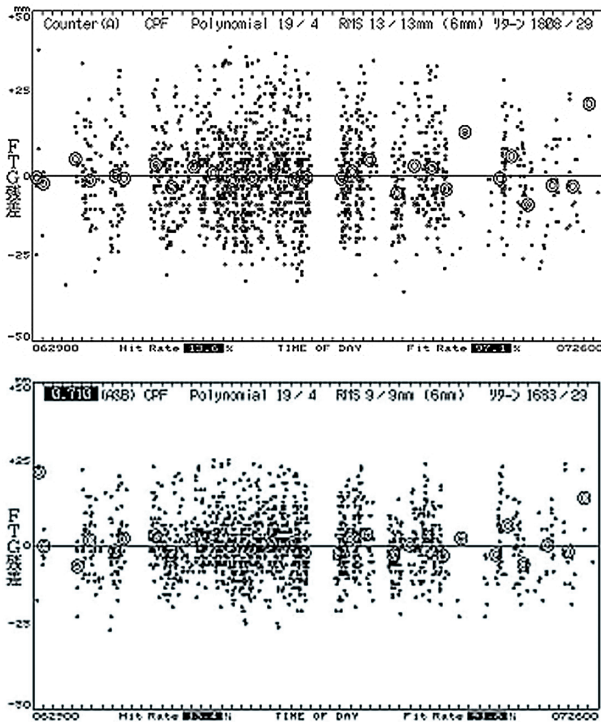


Fig.6(a) Residual plot of Lageos-II observation under conventional technique, (b) same plot under CMD technique

5 まとめと考察

CMD 法は, 「あじさい」においては有効な場合とそうでない場合がある。この点に関しては, 「あじさい」が大型の球形の衛星であること, プ

Table.1 Residual RMS and data number of AJISAI and Lageos-II observations

AJISAI 2006.10.12	Residual RMS(mm)	data number
LEADING EDGE	19(18)	875(24)
TTS	11(11)	356(22)
CMD	14(14)	892(24)
TTS•CMD	8(9)	356(22)

LAGEOS-II 2006.10.24	Residual RMS(mm)	data number
LEADING EDGE	13(13)	1808(29)
TTS	8(8)	543(26)
CMD	9(9)	1683(29)
TTS•CMD	6(7)	503(25)

リズムの配置が均一でないこと (佐々木, 1986) などの影響によって, 信号強度の変動と波形の相似性の変化の関係が崩れているためではないかと考えているが, まだ結論に至るだけの資料が得られておらず, 今後一層の研究が必要である。

また, 今回はストップ信号に対してのみ適用しているが CMD 法はスタート信号に適用しても改善が見込まれる技術であるから, スタート信号にも利用すればよりよい結果が生まれるかもしれない。この点に関しても今後の研究課題である。

TTS法に関しては, 全ての衛星に関して一定の効果が得られるが, 良い結果を得るためには有効なデータとして抽出するクラスの範囲を狭める必要があり, 元々の観測データ数自体が少ないものについては, 適用することが難しい方式である。また, 3つの閾値の設定は状況に合わせて変更することが難しく, 観測途中での大気状態の変化や, レーザー出力の変動といった要因での信号強度変化に対してはこれを除去することが出来ないという問題があり, 改良が望まれる。

TTS法, CMD法は初期の試験の段階から, 本年の半ばには実運用による効果の検証の段階へと進んでいる。まだまだ改善の余地は有るものの, 現時点でも Table. 1 に示したように両方式の併用によって従来手法に比べて RMS を 1/2 にまで改善出来ており, いずれも非常に有効な手法であ

ると評価できる。

謝 辞

本手法の実現にはユニバース株式会社、電応システム株式会社の努力によるところが大きい。佐々木稔氏（前第十管区海上保安本部次長）には要所において的確な助言を頂きました。独立行政法人情報通信研究機構大坪俊通氏は試験データの予備的評価を快く引き受けてくださいました。たゆまぬ努力により、貴重なデータの蓄積を続けてこられた歴代職員の方々にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

要 旨

レーザー光を発射（送信）し、これが人工衛星表面の逆反射プリズムで反射されて再び観測点に戻る（受信）までのレーザー光の往復時間を測定することによって人工衛星までの距離を測定する人工衛星レーザー測距（SLR）観測では送受信信号のそれぞれの時刻をいかに正確に決定できるかによって観測精度の良否が決定される。SLRにおいて広く使われる送受信信号の Leading Edge を検出して信号の時間位置を決定する方式では、信号強度の強弱によって Time walk を生じて測距精度の悪化をまねいていた。下里水路観測所では測距精度の悪化の原因となる Time walk を低減し、測距精度を高めるために三段階閾値評価法（TTS）と信号不動中点検出法（CMD）と呼ぶ二つの新手法を 2006 年より取り入れて、その有用性を検証してきた。その結果、両手法とも測距精度向上に有効であることが示されたので、両手法の原理とその効果の実例を示した。

参考文献

- 佐々木稔（1986）、国産測地衛星 GS-1 の完成、**水路部技報**，4，1-3。
州崎保司，橋篤志（1980）、人工衛星における光パルスの検知時刻と誤差，**電気通信学会論文誌 Vol. 63-C NO. 8** 501-506
福良博子，藤田雅之（1999）、下里水路観測所 SLR

データの測距バイアスについて解析，**水路部技報**，17，51-54

浜松ホトニクス株式会社（2001）、試験成績表（MCP-PMT R 3809 UMOUD），11 pp

附 録

TTS（Triple Threshold Screening）

SLR の受信信号は微弱で光電子ゆらぎがあること、拡がり角度の狭小なビームを使用するためわずかな追尾エラーで反射光は大きく変動すること、衛星の複数反射器の反射光どうしが干渉し強弱が生ずること、大気ゆらぎの影響を受けることなどにより波形と波高値は大きく変動する。このため一定閾値を有する受信部で Time walk が生じ、測距誤差の要因となっている（1）。

信号波高値の変動による Time walk を消去するのに CFD（Constant Fraction Discriminator）（2）という手法があるが、これは受信信号（パルス）を二分岐し、一方を反転（極性を変え）して遅延をかけ、その後 2 つの信号波形を足し合わせるときに Time walk が最小となるゼロクロスポイントで検知をなすものであり CFD は先進的な SLR の多くに採用されている。

しかしこの手法が完全に機能するのは、波高は変動するが波形には変化がないということが前提になるため、波形変動を来たす単一光電子レベルまたはそれに近い信号が混在するような場合には効果は減じられる。

これらの問題を改善する方法として我々は TTS（Triple Threshold Screening）という方式を開発した。改善の前提として、SLR では受信信号強度の変動は避けられないこと、測距は必ずしも全てのデータを取得する必要はない、という認識をベースにしている。その方法は、変動する信号をレベル分けして、一定レベル間の信号を選択、抽出する機能を付加して測距をなすものである。具体的には通常 1 つの閾ユニットの受信系に代り、レベルの異なる 3 つの閾ユニットの系を構成し、選択すべきレベルに設定した二つのレベル間の信号のみを抽出する機能を付加する。第一の

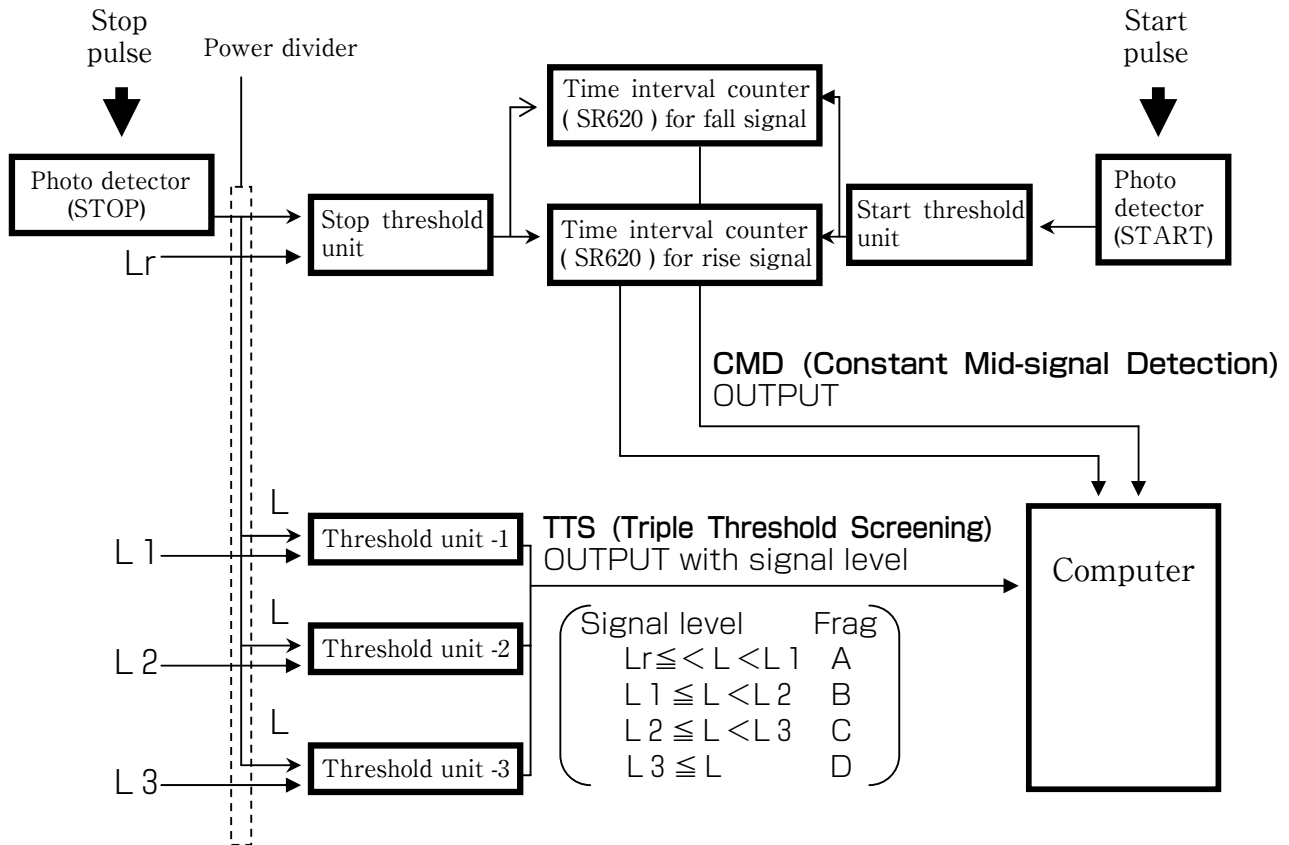


Fig. A New configuration of TTS and CMD for Simosato SLR

閾値ユニットの閾値を L_1 、第二のそれを L_2 、第三のそれを L_3 とするとき $L_1 < L_2 < L_3$ となる設定をなし、信号のレベルが L_2 と L_3 の間にある信号のみを抽出し、その信号をレベル L_1 の閾値ユニットで検出して測距をなす。この方式で試作した TTS による予備テストにおいて、LAGEOS の通常測距で RMS: ~ 30 mm の条件下で TTS を適用して、上下の極端に外れる信号を排除することで、それが 10 mm レベルに改善されることが分かった。

実際の SLR への適用にあたっては、新たに採用された新コンパレータとの整合性、従来方式との比較評価のため、選定した信号を測距信号とする代わりに、TTS を従来の閾回路に併設して 1 ショットごとの信号波高値の識別に適用し、それぞれの信号にフラグを付けて記録し、オフライン処理する方式をとった。

Fig.A にこの形での TTS の回路構成を示す。図において検知器 (MCP PMT) からの信号はパ

ワーデバイダにより 4 等分岐され、その一つはストップ閾値ユニットを経て、測距カウンターに入力する。残りの 3 分岐出力は TTS の 3 つの閾値ユニット -1, 2, 3 に入力し、比較レベル L_1 , L_2 , L_3 で検知される。測距のスタート信号はスタート検知器とスタート閾値ユニットを経て、測距カウンターに入力される。測距カウンターからの出力測距データはショットごとに計算機に送り込まれる。同時に 3 つの閾値ユニット -1, 2, 3 のレベルの判定出力も計算機に送り込まれる。計算機は以上の入力を処理して、レベル判定結果をフラグ化 (A, B, C, D) して測距データに添付する。この結果測距データは 4 つのレベルに分けて抽出することが可能になる。

研究ノート

2 軸電磁ログを使用する海流観測における バイアス誤差の補正方法

田中友規*

Development of Bias error Correcting Method for Ocean Current Velocity Measured
by Using Electromagnetic Log with Dual-axis Sensors

Tomonori TANAKA

Abstract

The trajectory prediction of drifting matter is always important for rescue operations on the sea. The ocean current for the prediction is usually observed by ADCP equipped on vessels of Japan Coast Guard. Recently a newly built high-speed vessel is equipped with an electromagnetic log with dual-axis sensors (EM 2 log) taking the place of ADCP, not to spoil its navigational capability. So we were required the evaluation of the ocean current observed by using EM 2 log and the development of processing methods for it. As the results of sea trials, we found a conspicuous bias error included in measured ocean current velocity. The bias error includes misalignment error and scale error, which are also contained in the ocean current observed by ship board ADCP. Although the method to reduce bias error is basically the same with that for ADCP data, dataset for correction of bias error should be prepared for each vessel in various vessel-speeds. This paper shows a solution method to determine the dataset, named 'Random Cruising Method'.

1 はじめに

1.1 ADCP に代わる海流観測機器の必要性

海上保安庁では、海難に伴い人や環境汚染物質が漂流した際に、効果的かつ効率的に人命救助及び海洋環境保護を行うための漂流予測を実施している。漂流予測計算は、漂流開始地点、海の流れ（以下、「海流」）、風、漂流物の特性を基になされるが、海流の代表的な観測手段として ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, 以下「ADCP」) を搭載した巡視船があり、搜索時の海流をリアルタイムに観測している。今日、巡視船の高速化対応のために ADCP に代わる新たな海

流観測機器が求められており、海上保安庁海洋情報部では「2 軸電磁ログ」を使用する海流観測を検討している。

電磁ログは、人工的に作られる磁界の中に 1 対の電極を配置し、ファラデーの電磁誘導法則を利用して船首-船尾方向の対水船速（いわゆる「船速」と呼ばれる）を計測する機器であり、船速距離計の 1 つとして使用されている。2 軸電磁ログは、2 対の電極を配置して船首-船尾方向とこれに直交する左右方向の対水船速を計測する機器であり、通常の電磁ログと比較して離着岸の際などに左右方向の対水船速を知る利点を有する。2 軸

†Received December 25, 2006 ; Accepted March 20, 2007.

* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

電磁ログのセンサー部は直径約 5 cm で、船底から 1 cm 程度突出させている。2 軸電磁ログの製造・販売会社によると、2 軸電磁ログは国内外を通じて 1 社のみが製造している。

以後、海流を ADCP と 2 軸電磁ログのいずれで観測したかを区別する場合、それぞれを「ADCP 海流」、「EM 2 海流」と呼ぶ。

1.2 ADCP 海流の算出過程に見る EM 2 海流に必要な補正

2 軸電磁ログを使用する海流観測は、ADCP を使用する海流観測^{注1)}と同様に、2 軸電磁ログ (ADCP 使用のときは、ADCP) が計測する対水船速、測位装置 (一般には GPS) の情報から計算される対地船速、船舶搭載のジャイロコンパスの指示方位を得て、これらから海流を算出する。ADCP は 1970 年代に実用化が図られ、その出現以前に用いられていた GEK (電磁流速計: Geomagnetic Electro-Kinotograph) と比較して、容易かつ迅速に海面下の複数層の対水船速が計測できる利点から、今日では船舶搭載型の海流観測機器として確たる地位を築いている。このため ADCP 海流のクオリティ向上のための提案が多くあり、2 軸電磁ログを使用する海流観測においてもこれらの提案が参考になる。

ADCP 海流のクオリティ向上の方法は、気象庁の海洋観測指針 (1999) (以下、「海洋観測指針」) や石井 (2006) などにまとめられている。海洋観測指針では、ADCP 海流の誤差は、平均化やフィルターリングで取り除くことができないバイアス誤差として生じることが多いと指摘したうえで、大きなバイアス誤差の原因として「アライメント誤差」、「スケール誤差」、「ジャイロコンパスの誤差」を挙げている。アライメント誤差は「ADCP の送受信機ビームとジャイロコンパスの回転が流速値に与える誤差」であり、スケール誤差は「真の対水船速と ADCP が計測する対水船速とのスケール差が対水船速に与える誤差」であり、ジャイロコンパスの誤差は、「ジャイロコンパスで一般に言われている速度誤差と緯度誤差」

を指す。石井 (2006) はこれらの他に「ジャイロコンパスの応答の遅延に伴う誤差」、「うねり・波浪に伴う誤差」を挙げている。

2 軸電磁ログを使用する海流観測においてもジャイロコンパスを使用する。うねり・波浪の中での海流観測もある。計測する対水船速のスケール差が生じないという保証はない。ADCP 海流で生じる上記のバイアス誤差が、EM 2 海流でも生じることは十分に考えられる。

本稿では、ADCP 海流に生じるとりわけ大きなバイアス誤差である「アライメント誤差」と「スケール誤差」に着目し、これらのバイアス誤差の補正方法を記した海洋観測指針や石井 (2006) を参考に、EM 2 海流に生じると考えられるこれらの補正を行い、補正後の EM 2 海流の評価を行う。さらに、2 軸電磁ログを使用する海流観測の実用上の問題とその解決法を記す。

なお、本稿で対象とした 2 軸電磁ログ搭載船が使用するジャイロコンパスは、速度誤差と緯度誤差を自動的に補正する機能を有しているため、本稿では「ジャイロコンパスの誤差」は生じないと仮定する。さらに、「ジャイロコンパスの応答の遅延に伴う誤差」は、船舶の変針後の一定時間に観測する海流のフィルターリングで除去できる。「うねり・波浪に伴う誤差」は、有効な補正方法が存在しないことから本稿では無視する。

注 1) 本稿では、ADCP を使用する海流観測は対水モードでの使用を想定している。

2 EM 2 海流のアライメント誤差とスケール誤差の補正式

ADCP を使用する海流観測において、測位装置は一般に GPS が使用され精度も高い。海流の誤差を生むのは対水船速の誤差と考えてよい (石井 (2006)) にもあるとおり、アライメント誤差とスケール誤差は ADCP が計測する対水船速に生じ、これが ADCP 海流にバイアス誤差として引き継がれる。アライメント誤差とスケール誤差を補正するための係数をそれぞれ「アライメント係数」、「スケール係数」とすると、これらの係数の

算出方法は海洋観測指針^{注2)}や石井 (2006) が示している。両者ともに ADCP 搭載船で往復またはこれに近い航走で観測を行い (以下, 「往復観測」), その間は海流が一定かつ対地船速は正しいという前提のもとで定式化を行っている。前者は真の海流を対地船速と真の対水船速から求めるのに対して, 後者は真の海流は観測した海流に ADCP が計測する対水船速と真の対水船速の差分が加わったとして求めることで異なる。2 軸電磁ログを使用する海流観測においても, 両者の方法を使用することでアライメント係数とスケール係数を算出することができる。ここでは簡単に触れる。詳細は海洋観測指針や石井 (2006) を参照されたい。

アライメント係数を θ (単位は度: 時計回りが正), スケール係数を k とする。 θ は角度であるが, 便宜上本稿では「係数」と呼ぶ。対地船速を G , 真の対水船速を S , 2 軸電磁ログが計測する対水船速を S' とし, G と S から得られる真の海流を U , G と S' から得られる海流を U' とする。地球座標系をとったときの南北成分と東西成分を添字 ϕ, λ で表す (ϕ は北方位が正, λ は東方位が正)。船首-船尾方向とこれに直交する座標系を用いた場合, 船首-船尾方向成分と直交する左右方向成分を添字 x, y で表す (x は船首方向が正, y は右方向が正)。 ϕ, λ と x, y の変換は, 測位装置から算出する方位やジャイロコンパスの指示方位を使用する。

往復観測の往路と復路を添字 1, 2 で表し, 往復観測の間に真の海流に変化がないとする。

海洋観測指針は, U を G と S から求める ($U = G - S$) ことから出発している。

$$\begin{aligned} G_{\phi 1} - S_{\phi 1} &= G_{\phi 2} - S_{\phi 2} = U_{\phi} \\ G_{\lambda 1} - S_{\lambda 1} &= G_{\lambda 2} - S_{\lambda 2} = U_{\lambda} \end{aligned} \quad (1)$$

石井は, U を U' に S' と S との差分が加わったものとして出発している。

$$\begin{aligned} U_{\phi 1}' + (S_{\phi 1}' - S_{\phi 1}) &= U_{\phi 2}' + (S_{\phi 2}' - S_{\phi 2}) = U_{\phi} \\ U_{\lambda 1}' + (S_{\lambda 1}' - S_{\lambda 1}) &= U_{\lambda 2}' + (S_{\lambda 2}' - S_{\lambda 2}) = U_{\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

(1) 式は次式となり, これを展開して k と θ を得る。

$$\begin{pmatrix} \Delta G_{\phi} \\ \Delta G_{\lambda} \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{\phi}' \\ \Delta S_{\lambda}' \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{\Delta G_{\phi}^2 + \Delta G_{\lambda}^2}{\Delta S_{\phi}'^2 + \Delta S_{\lambda}'^2}} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta G_{\lambda} \Delta S_{\phi}' - \Delta G_{\phi} \Delta S_{\lambda}'}{k (\Delta G_{\phi} \Delta S_{\phi}' + \Delta G_{\lambda} \Delta S_{\lambda}')} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{\phi} &= G_{\phi 1} - G_{\phi 2} & \Delta S_{\phi}' &= S_{\phi 1}' - S_{\phi 2}' \\ \Delta G_{\lambda} &= G_{\lambda 1} - G_{\lambda 2} & \Delta S_{\lambda}' &= S_{\lambda 1}' - S_{\lambda 2}' \end{aligned}$$

(2) 式は次式となり, これを展開して k と θ を得る。

$$\begin{pmatrix} \Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}' \\ \Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}' \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{\phi}' \\ \Delta S_{\lambda}' \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{(\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}')^2 + (\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}')^2}{\Delta S_{\phi}'^2 + \Delta S_{\lambda}'^2}} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta S_{\phi}' (\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}') - \Delta S_{\lambda}' (\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}')}{k (\Delta S_{\lambda}' (\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}') + \Delta S_{\phi}' (\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}'))} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{\phi}' &= U_{\phi 1}' - U_{\phi 2}' & \Delta S_{\phi}' &= S_{\phi 1}' - S_{\phi 2}' \\ \Delta U_{\lambda}' &= U_{\lambda 1}' - U_{\lambda 2}' & \Delta S_{\lambda}' &= S_{\lambda 1}' - S_{\lambda 2}' \end{aligned}$$

(7), (8) 式は, (4), (5) 式の ΔG_{ϕ} を $\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}'$, ΔG_{λ} を $\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}'$ に置き換えたものに他ならない。何れから k と θ を計算しても結果は同じになる。

ジャイロコンパスの指示方位の誤差 (緯度誤差と速度誤差を除く。以下同じ) は観測航海ごとに変わり得るため, k や θ も変化する。ADCP を使用した海流観測では 1 年の間に θ の大きさが 3 度以上変化したことも報告されている (工藤, 寄高 (2001))。 k と θ を管理することが必要である。

注2) Pollard and Read (1989) と Joyce (1989) が基になっている。

3 EM 2 海流の算出とその評価

3.1 評価方法の検討

3.1.1 評価基準と評価項目

EM 2 海流の確からしさの評価にあたり, 理想的には真の海流との比較が望ましい。しかし, 真

の海流は不明なことから、何らかの方法により観測される確からしい海流を真の海流に見立てる必要がある。当庁における、2軸電磁ログを使用する海流観測の主たる目的は漂流予測である。今日の漂流予測は海流に風の影響を加味する方法で行われており、ADCP搭載船が観測する海面下約10m層の風の影響が小さい海流の使用を想定している。このため、海面下約10m層のADCP海流を評価基準としてEM2海流の確からしさを評価する。

海流は速さと向きをもったベクトルである。速さと向きを同時に評価するために、EM2海流とADCP海流の速度をそれぞれ南北成分（北が正）と東西成分（東が正）に分ける。なお、2軸電磁ログが計測する対水船速は船首-船尾方向と左右方向であり、ジャイロコンパスの指示方位をもとに、それぞれ南北成分と東西成分に分離・合成される。このため、EM2海流の確からしさを評価について、EM2海流の南北成分と東西成分を別々に評価することは意味をなさない。本稿では、EM2海流の南北成分と東西成分を1つのデータセットを構成する個々の海流成分として取り扱い、同様に取り扱うADCP海流の個々の海流成分との比較からEM2海流の評価を行う。以下、それぞれのデータセットの個々の成分をEM2海流成分、ADCP海流成分と呼ぶ。

3.1.2 評価方法

当庁所属船が観測するADCP海流は、船速が速くなると不確かになることが経験的に指摘されている。このため、ADCP搭載船の船速とADCP海流の誤差との関係を考察し、確からしいADCP海流が得られる船速で航走したときに観測されたADCP海流とEM2海流との比較を行う。このとき、EM2海流の確からしさの目安として、漂流予測担当課からの聞き取りに基づきEM2海流成分とADCP海流成分との差の平均（バイアス誤差）を±0.1knot以内とする。

EM2海流は、ADCP海流と比較して海面に近い船底付近で観測されるために風の影響（吹送

流）を含むと考えられる。ADCP海流(y)はEM2海流(x₁)から風(x₂)の影響を除いたと考えることができ、以下のモデル(A)を仮定する。最小二乗法を使用して、有意性の検定(H₀: β_i = 0, α = 0.05)からx₂を選択か非選択か判断する。モデルの評価は残差分析で行う。x₂が選択された場合は、EM2海流に含まれる風の影響を取り除く。

$$y = \beta_0 + x_1 + \beta_1 x_2 + \varepsilon \dots\dots\dots (A)$$

y: ADCP海流成分 (knot)

x₁: EM2海流成分 (knot)

x₂: 風速成分 (knot) 風の吹き去る方向が正

β_i: 偏回帰係数 (i = 0, 1)

ε: 誤差

3.2 EM2海流の評価

3.2.1 ADCP海流の誤差と船速との関係

2005年12月9日、当庁所属の2隻のADCP搭載船が奄美大島沖の同一海域を時間の隔たりが小さい中で海流を観測した。それぞれをA₁船、A₂船とする。A₁船は9knot、A₂船は9、15、19knotで航走している。海域を緯度・経度1'メッシュに分け、A₁海流、A₂海流のメッシュごとの平均海流をそれぞれ求める。この平均海流をもとに3.1.1と同様の海流成分を算出し、同一海域において時間の隔たりが小さい中での海流は一定という前提のもと、メッシュごとに両者の差を求める。Fig.1はA₂船の船速別の差の分布であり、差の平均を丸印、差の標準偏差を矢印、差を求めたペア数を括弧内の数字で表している。差の平均に注目すると、船速9、15knotでは±0.1knot

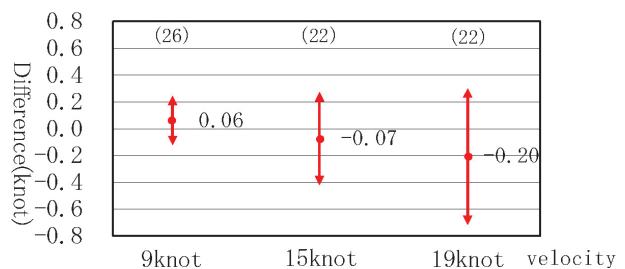


Fig.1 Difference between Ocean current components observed by shipboard ADCPs in several vessel's velocity.

以内であるのに対し、船速 19 knot では -0.2 knot と許容する値よりも大きい。以下、ADCP 搭載船が観測する ADCP 海流のクオリティは同じという仮定をおき、船速 15 knot 以下で航走した際の ADCP 海流を評価基準とする。

3.2.2 EM2 海流の算出

(1) 対象とする EM2 海流

当庁所属の 2 隻の 2 軸電磁ログ搭載船の観測データ（対水船速、対地船速、ジャイロコンパスの指示方位の総称を言う。以下同じ）から 1 分間隔ごとの EM2 海流を算出する。それぞれの船舶を E_1 船、 E_2 船とし、これらが観測する海流を E_1 海流、 E_2 海流とする。3.1.1 と同様に南北成分と東西成分を 1 つのデータセットの個々の成分したときの名称を E_1 海流成分、 E_2 海流成分とする。喫水は E_1 船約 1.3 m、 E_2 船約 3 m である。

E_1 海流・ E_2 海流と、同一海域を時間の隔たりの小さい中で 15 knot 以下の速力で観測した ADCP 海流とを比較する。観測日とそのときの船速 [knot]、風速 [knot] の範囲を、観測日（船速範囲、風速範囲）として表現すると、 E_1 海流については 2005 年 12 月 1 日（5.6~10.8, 5.1~10.4）、2005 年 12 月 9 日（9.3~10.7, 0.1~1.8）、2006 年 6 月 22 日（9.0~40.9, 5.3~12.2）、2006 年 6 月 27 日（5.1~38.6, 14.9~19.1）の 4 日、 E_2 海流については 2006 年 11 月 6 日（3.4~30.0, 7.3~25.8）となる。

(2) スケール係数とアライメント係数の算出

EM2 海流の算出にあたり、バイアス誤差を補正するためのスケール係数とアライメント係数を知る必要がある。これらの係数は航海の度に求めることが理想であるが、当庁所属船の多くは警備や救難などを目的としており、係数を算出するための往復観測を航海の度に行うことは望めない。このため、 E_1 船、 E_2 船が前述の観測日の前後の航海において、必要に応じ又はたまたま実施した往復観測時の観測データから各係数を求める。

各係数の算出に際し、海域を緯度・経度 $0.5'$

メッシュに分け、メッシュごとに往復観測の往路と復路別に観測データの平均値を求める。これらの平均値と式（4）、（5）を使用してメッシュごとに各係数を求める。これらを集合として取り扱い、各係数の平均と標準偏差（以下、「分布」）を算出する。

Table 1~4 は、（1）で評価対象とした EM2 海流の観測日前後の E_1 船、 E_2 船のスケール係数とアライメント係数の分布である。括弧内の数字は各係数の分布の算出に使用したメッシュの往路と復路のペア数を表す。両船ともに、各係数が船速別に異なる傾向があり、船速に応じて使い分けの必要がある。各係数が船速に応じて変化する原因の考察は 4 章で行う。

(3) バイアス誤差を補正した EM2 海流の算出

Fig.2 は（1）で評価対象とした E_2 海流のバイアス誤差の補正前と補正後の一例を表したものである。補正前は往路の海流（赤）と復路の海流（青）が大きく異なっているのに対して、補正後はほぼ等しくなっている。省略するが E_1 海流も同じことが言える。

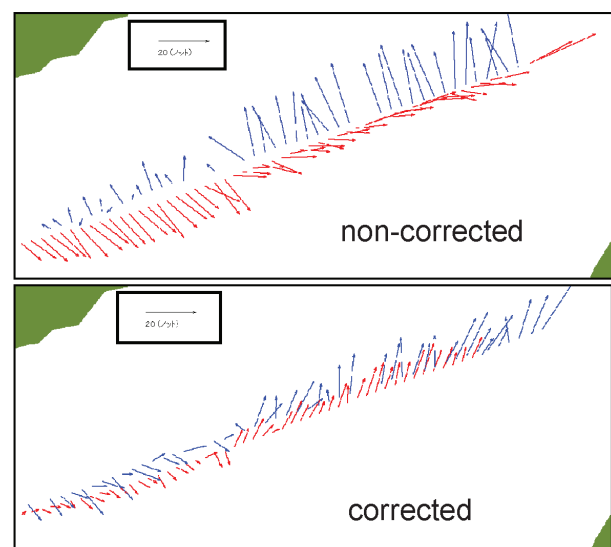


Fig. 2 An example of correction for ocean current velocity measured by using EM2 Log. (Upper) non-corrected, (lower) corrected.

Table 1 Scale factor in several E_1 vessel's velocity.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot	30~40knot
05.12.01	0.999 ± 0.011 (34)	1.012 ± 0.007 (13)	—	—
05.12.09	—	0.999 ± 0.006 (14)	—	—
06.05.30	—	—	1.023 ± 0.036 (8)	—
06.06.29	—	—	—	1.008 ± 0.005 (74)
06.09.24	—	—	1.032 ± 0.004 (6)	—

Table 2 Same as Table 1, but for E_2 's vessel.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot
06.07.15	—	0.975 ± 0.014 (55)	—
06.07.16	—	0.987 ± 0.012 (30)	0.994 ± 0.009 (13)
06.07.17	—	0.987 ± 0.009 (42)	—
06.11.06	—	—	0.984 ± 0.014 (26)
06.11.08	0.915 ± 0.016 (9)	—	—
06.11.10	—	0.985 ± 0.006 (30)	0.980 ± 0.008 (20)

Table 3 Misalignment factor (degree) in several E_1 vessel's velocity.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot	30~40knot
05.12.01	2.55 ± 0.89 (34)	2.99 ± 0.38 (13)	—	—
05.12.09	—	2.14 ± 0.43 (14)	—	—
06.05.30	—	—	0.74 ± 0.36 (8)	—
06.06.29	—	—	—	0.82 ± 0.52 (74)
06.09.24	—	—	1.16 ± 0.22 (6)	—

Table 4 Same as Table 3, but for E_2 's vessel.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot
06.07.15	—	-3.72 ± 0.88 (55)	—
06.07.16	—	-3.37 ± 0.61 (30)	-2.96 ± 0.83 (13)
06.07.17	—	-3.64 ± 1.02 (42)	—
06.11.06	—	—	-3.16 ± 0.77 (26)
06.11.08	-5.20 ± 0.73 (9)	—	—
06.11.10	—	-2.98 ± 0.73 (30)	-2.98 ± 0.45 (20)

3.2.3 E_1 海流と ADCP 海流との比較

E_1 海流, E_2 海流と同一海域を時間の隔たりの小さい中で航走観測した ADCP 海流とを比較する. 3.2.2 (1) で記したとおり E_1 海流は 2005 年 12 月から 2006 年 6 月までの 4 日間, E_2 海流は 2006 年 11 月 6 日に観測している.

ADCP 海流成分と E_1 海流成分, E_2 海流成分との関係のモデル (A) は, それぞれ $y = -0.02 + x_1 - 0.01 x_2$, $y = -0.05 + x_1 - 0.01 x_2$ となった.

x_2 の係数を用いて風の影響を取り除いた E_1 海流成分, E_2 海流成分と ADCP 海流成分との差の平均と差の標準偏差を Table 5, 6 に, 対応関係を Fig. 3, 4 に示す. Fig. 3, 4 の縦軸は ADCP 海流成分, 横軸は E_1 海流成分又は E_2 海流成分を表

しており, 正負の符号は 3.1.1 に基づく. Table 5, 6 の括弧内の数字は差を求めたペア数を表している. 但し, 船速 20~30 knot 航走時の E_1 海流は観測されていない.

Table 5 の E_1 海流の場合, ADCP 海流成分との差を求めたペア数が少ないときには差の平均の絶対値が大きいが, ペア数が 9 以上確保されている場合には船速や流速にかかわらず小さい. 一方, Table 6 の E_2 海流の場合, ADCP 海流成分との差を求めたペア数が多いにもかかわらず, 差の平均の絶対値が大きい.

Fig. 3, 4 から, ADCP 海流との対応関係を表す相関係数は, E_1 海流の場合は船速に関わらず 0.84 以上と大きいのに対して, E_2 海流は船速 10

Table 5 Differences between ADCP's and E_1 's ocean current components in several vessel's velocity (knot).

velocity ocean current	~10knot	10~20knot	30~40knot	(total)
0~0.5knot	0.08 ±0.17 (27)	0.02 ±0.21 (105)	0.37 ±0.15 (2)	0.04 ±0.20 (134)
0.5~1knot	-0.04 ±0.13 (27)	-0.02 ±0.23 (18)	0.15 - (1)	-0.03 ±0.18 (46)
1~1.5knot	0.17 ±0.11 (5)	0.19 - (1)	0.02 ±0.32 (9)	0.08 ±0.26 (15)
1.5~2knot	-0.02 ±0.05 (3)	- - (0)	- - (0)	-0.02 ±0.05 (3)
(total)	0.03 ±0.16 (62)	0.01 ±0.21 (124)	0.09 ±0.31 (12)	0.02 ±0.20 (198)

Table 6 Same as Table 5, but for E_2 's ocean current component.

velocity ocean current	0~10knot	10~20knot	20~30knot	(total)
0~0.5knot	0.26 ±0.16 (18)	0.12 ±0.37 (10)	0.06 ±0.42 (2)	0.11 ±0.38 (30)
0.5~1knot	0.20 ±0.20 (24)	0.25 ±0.29 (12)	0.06 ±0.41 (2)	0.11 ±0.38 (38)
1~1.5knot	0.30 ±0.16 (50)	0.32 ±0.04 (56)	-0.21 ±0.27 (18)	-0.12 ±0.32 (124)
(total)	0.24 ±0.18 (92)	0.16 ±0.34 (78)	0.02 ±0.41 (22)	0.03 ±0.29 (192)

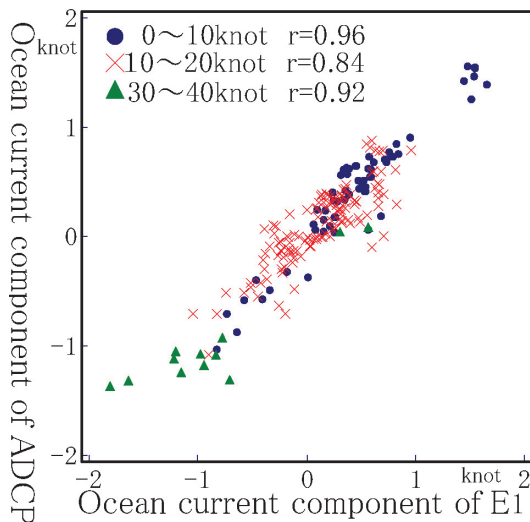


Fig. 3 Correlation between ADCP's and E_1 's ocean current component.

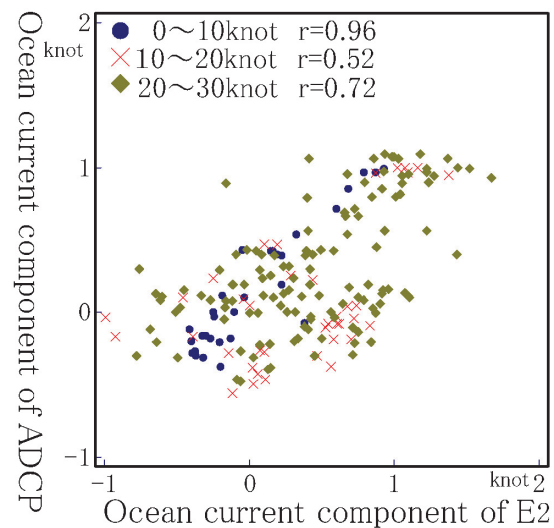


Fig. 4 Same as Fig. 3, but for E_2 's ocean current component.

~20 knot では 0.52 と小さい.

ADCP 海流と E_1 海流は同等と見なすことができるものの、 E_2 海流を同等と見なすことができない。この原因として E_2 海流は 1 日分の限られた観測データであることや、スケール係数やアライメント係数のバラツキの影響が考えられる。観測データを増やすことや、より確かなスケール係数やアライメント係数を算出することで確からしい海流を観測できると考えられる。

4 2 軸電磁ログを使用する海流観測における実用上の問題とその解決法

4.1 実用上の問題

これまでの検討から、2 軸電磁ログが計測する対水船速に含まれるバイアス誤差を適切に補正することで、確からしい海流を算出できると考えられる。バイアス誤差を補正するための係数として「アライメント係数」と「スケール係数」があるが、各係数は船速に応じて変化する。船速に応じて各係数が変化することは、各係数を算出するために、船舶の就役後やジャイロコンパスの調整後

に船速を変えた往復観測を数多く行う必要がある。しかし、当庁の所属船に限らず、時間の制約から往復観測を数多く実施することは困難という実用上の問題が生じる。

また、ここまでは船速 10 knot 間隔で算出したスケール係数とアライメント係数を使用した。この間隔が適当であるかの疑問が残る。船速ごとに各係数が変化することとその解決策を以下で検討する。

4.2 実用上の問題が生じる原因の考察

同一船舶において、スケール係数やアライメント係数が変化すること大きな原因としてジャイロコンパスの指示方位の誤差が考えられる。しかし、Table 1~4 では、船速に応じてこれらの係数に増加又は減少の傾向が見られることから、この原因がジャイロコンパスの指示方位の誤差に因るものとは考えにくい。その他の原因として、GPS が計測する対地船速の誤差と 2 軸電磁ログが計測する対水船速の誤差が考えられるが、前者に因るものとは考えにくい。このため、後者に注目して、各係数が船速に応じて変化することの原因を考察する。

まず、船速に応じて顕著に変化するアライメント係数について考える。船舶が航走する際、理想的には船首-船尾方向とその左右方向の対水船速は独立であり、両者を平面上にプロットすると傾きをもたない直線関係になるはずである。しかし、実際にプロットすると傾きをもった直線関係が見られる (Fig. 5)。船首-船尾方向と左右方向の対水船速は、そのときどきの海流や風の影

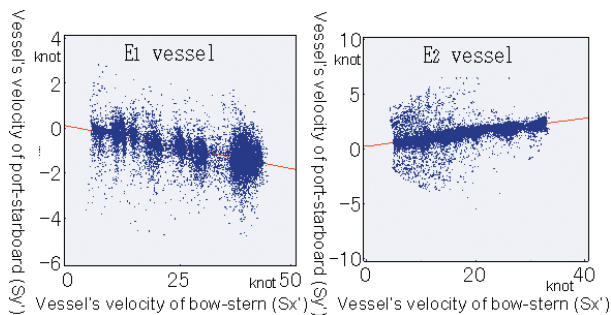


Fig. 5 Relation between vessel's velocities of bow-stern (S_x') and port-starboard (S_y') measured by using EM 2 Log.

響、2 軸電磁ログに備わっている計測誤差、船舶の運動が対水船速に与える誤差を含む。しかし、船舶がさまざまな針路をとったときの対水船速を多く計測することができれば、海流や風などの影響はランダムと見なすことができ、両者の関係に回帰直線を当てはめることができる。

回帰直線の傾き (対水船速の船首-船尾方向に対する左右方向) を β とし、真の対水船速を S (S_x, S_y), 2 軸電磁ログが計測する対水船速を S' (S_x', S_y'), アライメント係数を θ , スケール係数を k とする。但し、ここでの θ と k は 2 章で説明したジャイロコンパスの指示方位誤差の影響を受けない。区別のためにそれぞれを θ_t, k_t とする。

θ_t と β の関係は以下から求められる。

S と S' の関係は (9) 式で、 β を算出するための式は (10) 式で表される。

$$k_t \begin{pmatrix} S_x' \\ S_y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_t & \sin \theta_t \\ -\sin \theta_t & \cos \theta_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \end{pmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

$$\beta = \frac{\Sigma (S_x' - \bar{S}_x') (S_y' - \bar{S}_y')}{\Sigma (S_x' - \bar{S}_x')^2} \dots \dots \dots (10)$$

(9) 式を (10) 式に代入すると次式になる。

$$\beta = \frac{(-SS_x + SS_y) \sin \theta_t \cos \theta_t + SS_{xy} (\cos^2 \theta_t - \sin^2 \theta_t)}{SS_x \cos^2 \theta_t + 2SS_{xy} \sin \theta_t \cos \theta_t + SS_y \sin^2 \theta_t} \dots \dots \dots (11)$$

但し、

$$SS_x = \Sigma (S_x - \bar{S}_x)^2$$

$$SS_y = \Sigma (S_y - \bar{S}_y)^2$$

$$SS_{xy} = \Sigma (S_x - \bar{S}_x) (S_y - \bar{S}_y)$$

ここで、 SS_{xy} は S_x と S_y の偏差積和であり、 S_x と S_y が互いに独立のときには 0 となる。また、 S_x の範囲が S_y の絶対値の範囲に比べて十分に大きいときには SS_y を無視することができ、 β は以下に近似できる。

$$\beta \doteq -\frac{SS_x \sin \theta_t \cos \theta_t}{SS_x \cos^2 \theta_t} = -\tan \theta_t \dots \dots \dots (12)$$

(12) 式から、 β は θ_t に依存する。船速に応じて θ_t が変化することは、 β も船速に応じて変化することを意味する。

2 軸電磁ログの製造・販売会社によると、工場

出荷時における船首-船尾方向と左右方向の対水船速の計測誤差はともに真の対水船速の 1% 未満である。しかし、船舶への取り付け後には 2 軸電磁ログの取り付けのズレや 2 軸電磁ログ取り付け付近の船底の形状に伴い発生する偏流の影響を受けて船首-船尾方向、左右方向ともに測定誤差、特にバイアス誤差が大きくなる。このためマイルポストの使用から求める真の対水船速と 2 軸電磁ログが計測する対水船速との関係を船速 5 knot ごとに一次式で表し、この式を使用して対水船速を真の対水船速に調整することが行われる。しかし、船舶は左右方向に航走することができないために調整は船首-船尾方向に限られる。

ジャイロコンパスの指示方位誤差の影響を受けないとした場合、(9) 式から、 $Sy' \doteq (Sy - Sx \sin \theta_t) / k_t$ と近似でき、 Sx' は調整されるため Sx となる。 Sx' に対する Sy' は、 $Sy' / Sx' = (Sy - Sx \sin \theta_t) / k_t Sx$ となり、 k_t が一定だとしても船速に対応して変化する。船速に応じてアライメント係数が変化する原因のひとつとして、2 軸電磁ログの船舶取り付け後に行われている対水船速の調整が船首-船尾方向に限られていることがある。 $k_t = 1$ のとき Sy' は $Sy - Sx \sin \theta_t$ となり、船速に応じて Sy との比率が変化する。アライメント係数と同様に、調整が船首-船尾方向に限られることが、スケール係数が船速に応じて変化する原因になる。

対水船速の船首-船尾方向のみの調整は、2 軸電磁ログの本来の目的である船速距離計としての使用を考えると妥当かもしれない。しかし、海流観測での使用を考えると、各係数が船速に応じて変化する原因になることから、左右方向の調整も行われることが望ましい。

4.3 実用上の問題に対する解決法の提案

4.3.1 対水船速の左右方向の補正

スケール係数とアライメント係数が船速に関わらず一定となれば、4.1 に示した実用上の問題は解決される。各係数が一定にならない原因として、対水船速の左右方向の調整ができていないこ

とが考えられるため、これを補正計算で対応することを検討する。

海洋観測指針や石井 (2006) による各係数の算出では、ADCP が計測する各方向の対水船速のスケール係数は一定という前提がある。しかし、2 軸電磁ログの使用では対水船速の船首-船尾方向のみの調整が行われるためにこの前提が成り立たない。このため、以下の方法でスケール係数 (k)^{注3)} とアライメント係数 (θ) を算出する。

(3) 式は (13) 式となり、これを展開して (14), (15) 式を得る。但し、 Sx' は調整されているため Sx としている。

$$\begin{pmatrix} \Delta G_x \\ \Delta G_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_x \\ k \Delta S_y' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

$$k = \sqrt{\frac{\Delta G_x^2 + \Delta G_y^2 - \Delta S_x^2}{\Delta S_y'^2}} \dots\dots\dots (14)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta G_y \Delta S_x - k \Delta G_x \Delta S_y'}{\Delta G_x \Delta S_x + k \Delta G_y \Delta S_y'} \dots\dots\dots (15)$$

3.2.2 (2) と同じ E_1 船の観測データを使用し、(14), (15) 式から算出した k と θ の一部を Table 7 に示す。 k と θ が不自然な値であったり、(14) 式の分子が負となり k が求まらないこともある。これは E_2 船の場合でも同様である。

この原因として、

- ・ Sy' が Sx に比べて小さいにもかかわらず Sx より Sy' の誤差がはるかに大きい
 - ・ マイルポストなどの利用による Sx' から Sx への調整が十分でない
- ことが考えられる。

Table 7 Computed k and θ , which made a point of correction of port-starboard (Sy').

Date	Obs. No	k	θ
12月1日	1	-	-
12月1日	2	5.205	77.8
12月1日	3	-	-
12月1日	4	-	-
12月1日	5	1.818	22.4
12月1日	6	1.888	31.5

「-」は値が求まらないことを表す

4.3.2 ランダム航走法による対水船速の バイアス誤差補正

2軸電磁ログを船舶に取り付けた後の対水船速の調整において、船首-船尾方向と左右方向の対水船速のバイアス誤差が取り除かれ、ジャイロコンパスの指示方位が正しければ、スケール係数とアライメント係数はそれぞれ1と0になると考えられる。この考えから、船首-船尾方向と左右方向の対水船速が含むバイアス誤差の補正を試みる。

これまでと同様に、GPSが計測する対地船速を G (G_x, G_y)、2軸電磁ログが計測する対水船速を S' (S'_x, S'_y)、真の対水船速を S (S_x, S_y)、とする。

真の対水船速を計測できる船舶がさまざまな針路で航走したときの観測点を無作為に抽出し、 G_x と S_x 、 G_y と S_y との差を求める。これらの差は、真の海流の南北方向成分、東西方向成分であるが、抽出する観測点の数が多い場合には、確率変数と見なすことができ、これらの分布は左右対称の尖った形となり、期待値は0になる ($E[G_x - S_x] = 0$, $E[G_y - S_y] = 0$)。しかし、 S' (S'_x, S'_y) は S (S_x, S_y) に加えてスケール誤差、アライメント誤差などのバイアス誤差を含むために $E[G_x - S'_x] = \delta_x \neq 0$, $E[G_y - S'_y] = \delta_y \neq 0$ となる。2軸電磁ログが計測する船首-船尾方向と左右方向の対水船速に含まれるバイアス誤差がそれぞれ δ_x と δ_y になる。これらには、ジャイロコンパスの指示方位の誤差が与えるバイアス誤差も含まれる。

以下、 E_1 船、 E_2 船について、船速5knotごとに δ (δ_x, δ_y)を算出し、 S' (S'_x, S'_y)に含まれるバイアス誤差を補正してEM2海流の算出を行う。整理のため、この方法を「ランダム航走法」、2章で説明した方法を「往復観測法」と呼ぶ。

Fig. 6, 7に、3ヶ月の間に得た観測データから求めた E_1 船、 E_2 船の船速別の δ_x, δ_y を示す。

E_1 船、 E_2 船ともに δ_x の絶対値が船速に関わらずおおよそ0.5knot以内であるのに対して、 δ_y

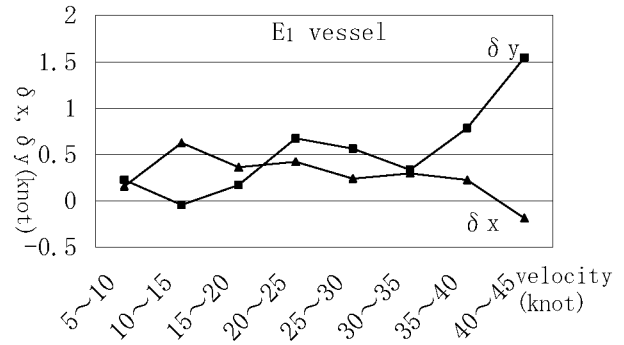


Fig. 6 Bias error on bow-stern (δ_x) and port-starboard (δ_y) ocean current velocity of measured by using E_1 's EM 2 Log.

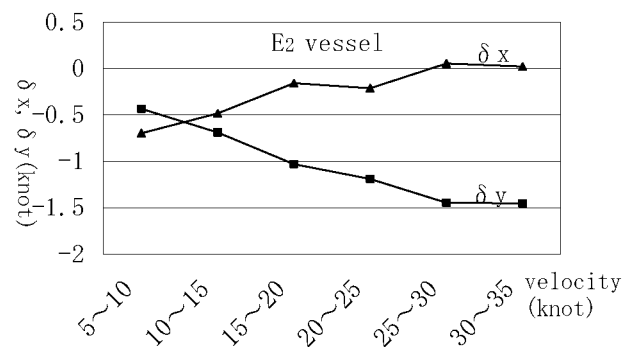


Fig. 7 Same as Fig. 6, but for E_2 vessel.

の絶対値は船速が速くなるにつれて1.5knot程度まで大きくなる。ここで再度、アライメント係数とスケール係数が船速に応じて変化する原因を考察する。

E_1 船について、Table 3からアライメント係数は正である。これはFig. 5(左)からも明らかのように対水船速の船首-船尾方向(S'_x)に対する左右方向(S'_y)の傾き(β)が負の値をもつことを意味する。船速が高速になるにつれてアライメント係数が小さくなることは、 β が小さくなることであり、これは高速になるにつれて S'_x の増加分に比べて S'_y の減少分が小さくなることを意味する。 δ (δ_x, δ_y)に着目すると、高速になるにつれて δ_x の減少分に比べて δ_y の増加分が大きくなることであるが、Fig. 6からこれは明らかである。スケール係数はTable 1から船速が高速になるにつれて大きくなっている。これは高速になるにつれて対水船速を過小評価することであり、高速になるにつれて δ_x と δ_y が大きくなるか、また

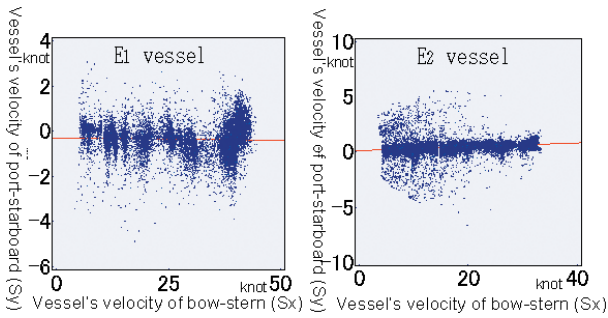


Fig. 8 Same as Fig. 5, but for corrected vessel's velocity.

は、いずれか一方の減少分に比べて他方の増加分が大きくなるかを意味する。これも Fig. 6 から明らかである。E₂ 船においても同様の考え方により船速に応じたアライメント係数とスケール係数の変化を説明できる。

バイアス誤差補正後の E₁ 船、E₂ 船の対水船速の船首-船尾方向と左右方向の関係は Fig. 8 となる。Fig. 5 では回帰直線は傾きをもったが、Fig. 8 での傾きは極めて小さくなっている。2 軸電磁ログを船舶に取り付けた後に行う対水船速の調整が十分でないことが、スケール係数とアライメント係数が船速に応じて変化する原因と判断できる。

3. 2. 2 (1) と同じ観測データ使用して、ADCP 海流とランダム航走法を適用してバイアス

誤差の補正を行った E₁ 海流、E₂ 海流の比較を行う。ADCP 海流成分と E₁ 海流成分、E₂ 海流成分との関係のモデル (A) は、それぞれ $y = 0.03 + x_1 - 0.01x_2$, $y = -0.02 + x_1 - 0.01x_2$ となる。

風の影響を取り除いた E₁ 海流成分、E₂ 海流成分と ADCP 海流成分との差の分布を Table 8, 9 に、対応関係を Fig. 9, 10 に示す。往復観測法を適用した Fig. 4 では船速 10~20 knot において ADCP 海流成分と E₂ 海流成分との相関係数が 0.52 と小さかったが、Fig. 10 では 0.80 と大きくなっている。Table 9 では、往復観測法を適用した Table 6 の結果と比較して全体的に値が小さくなっている。Table 8, 9 を通して、差の平均の大きい箇所があるが、これは、差を求めたペア数が少ないためと考えられる。この結果から、本稿で提案するランダム航走法は、ADCP の分野でかねてから行われている往復観測法と同等の結果が得られると判断できる。

ランダム航走法を適用することで、2 軸電磁ログ搭載船は 5 knot ごとに船速を変えた往復観測をせずとも、EM 2 海流のバイアス誤差を補正するための係数を知ることができ、2 軸電磁ログを使用する海流観測の実用上の問題が解決できる。

但し、3. 2. 2 (2) で「EM 2 海流のバイアス誤差を補正するための係数は航海の度に求める

Table 8 Same as Table 5, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

velocity ocean current \	~10knot	10~20knot	30~40knot	(total)
0~0.5knot	0.04 ±0.15 (27)	-0.04 ±0.18 (105)	0.16 ±0.30 (2)	-0.02 ±0.18 (134)
0.5~1knot	-0.16 ±0.21 (27)	-0.04 ±0.31 (18)	0.31 - (1)	-0.10 ±0.26 (46)
1~1.5knot	0.28 ±0.09 (5)	0.45 - (1)	0.02 ±0.44 (9)	0.14 ±0.37 (15)
1.5~2knot	-0.09 ±0.19 (3)	- - (0)	- - (0)	-0.09 ±0.19 (3)
(total)	-0.03 ±0.22 (62)	-0.04 ±0.21 (124)	0.07 ±0.39 (12)	-0.03 ±0.23 (198)

Table 9 Same as Table 6, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

velocity ocean current \	~10knot	10~20knot	20~30knot	(total)
0~0.5knot	0.13 ±0.15 (18)	0.05 ±0.29 (54)	0.03 ±0.37 (20)	0.06 ±0.29 (92)
0.5~1knot	0.05 ±0.14 (10)	0.09 ±0.30 (56)	-0.22 ±0.25 (12)	0.04 ±0.29 (78)
1~1.5knot	0.13 ±0.11 (2)	0.02 ±0.25 (10)	-0.29 ±0.16 (10)	-0.11 ±0.26 (22)
(total)	0.10 ±0.15 (30)	0.06 ±0.29 (120)	-0.12 ±0.32 (42)	0.03 ±0.29 (192)

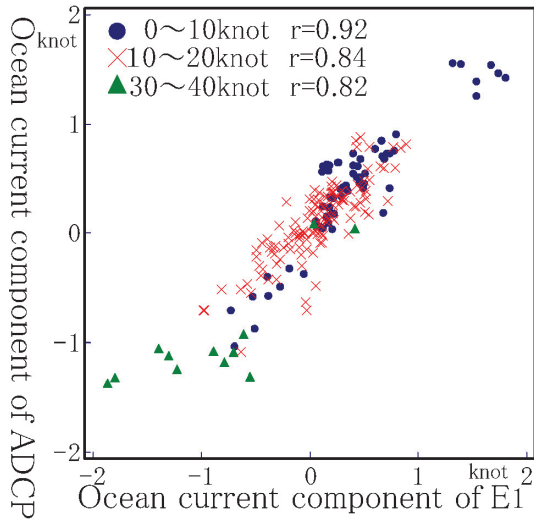


Fig. 9 Same as Fig. 3, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

ことが理想」と記したが、「ランダム航走法」では船舶がさまざまな針路で航走した際に得られる観測データが一定量必要となり、この記載と矛盾する。しかし、当庁所属船のように、航海の度に往復観測法からバイアス誤差を補正するための係数を求めることが見込めない場合には「ランダム航走法」は有効と考える。

ランダム航走法で算出する δ (δ_x , δ_y) は、ドックなどでジャイロコンパスが調整された場合には大きく変化すると考えられる。このため δ の質を評価することが望ましい。 δ の算出のためには、船舶の航路から無作為かつ多くの観測データを抽出することが求められ、その場合 δ_x と δ_y のそれぞれの分布は理想的には左右対称の尖った形状になる。従って、 δ の質を、「観測データの数又は観測時間」、「 δ_x , δ_y の分布の左右対称性(歪度)」、「 δ_x , δ_y の分布の尖り具合(尖度)」から評価することができる。本稿ではスペースの都合上、 δ の質の評価法は割愛する。

注3) スケール係数はこれまでと同じ記号(k)を使用しているが、厳密にはスケール係数の意味は異なる。

5 まとめと今後の課題

2軸電磁ログを使用する海流観測について検討を行った。結果、船底直下の確からしい海流を観測できることが分かった。

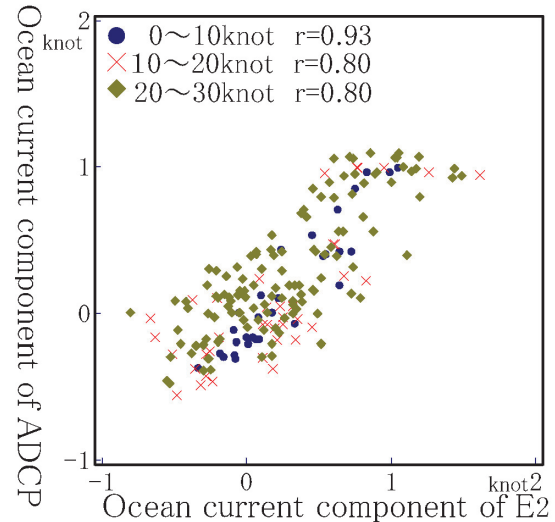


Fig. 10 Same as Fig. 4, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

2軸電磁ログを使用して観測される海流は無視できないバイアス誤差を含む。バイアス誤差を生む大きな原因として、計測する対水船速のバイアス誤差がある。

対水船速のバイアス誤差補正のための係数は、かねてからADCPを使用する海流観測で提案されている往復観測による方法で算出することができる。しかし、ADCPの使用ではこの係数が船速に関わらず一定なのに対して、2軸電磁ログの使用ではこの係数が船速に応じて変化する。これは2軸電磁ログを船舶に取り付けた後に実施している、対水船速の調整の限界によるものである。

この係数を算出するためには、船速を変えた往復観測を定期的に多く実施する必要があるが、当庁所属の船舶に限らず時間の制約からこれは難しい。このため、往復観測に頼らない係数の算出方法をランダム航走法として提案した。これにより2軸電磁ログを使用する海流観測の実用化が可能となる。

海難における捜索時の船速は一般に低速であるが、当庁の船舶が現場に到着するまでの間の漂流予測計算には海流の統計値が使用される。統計値には巡視船が日常に航走しているときに観測される海流が多く含まれる。船速が低速時だけでなく高速時にも確からしい海流が観測できる意義は大きい。

今後の取り組みとして、2軸電磁ログを使用し
て観測する海流のさらなる誤差低減があり、GPS
コンパスの導入や船速に応じて変化するバイアス
誤差補正のための係数を一定にする取り組みがあ
る。

最後に、匿名の査読者から適切にご指摘を数多
く頂きました。

本稿執筆のために使用した観測データは、当庁
所属の2軸電磁ログ搭載船、ADCP搭載船の観測
によるものです。

海洋情報部の工藤宏之氏、末広孝吉氏、林王弘
道氏、横河電子機器株式会社の家城竜也氏には助
言や資料の提供を頂きました。

各位に感謝します。

要 旨

海上保安庁では海難において人や物が漂流した
時に漂流予測を実施している。漂流予測に不可欠
な海流の多くはADCPを搭載した船舶で観測さ
れているが、巡視船の高速化対応のためにADCP
に代わる海流観測機器が必要となり、2軸電磁ロ
グによる海流観測を検討した。結果、2軸電磁ロ
グの使用により船底直下の確からしい海流が観測
できることが分かった。さらに、高速時でも低速
時とほぼ同等の質の海流を観測できることが分
かった。

2軸電磁ログによる海流観測は、ADCPによる
海流観測と同様にバイアス誤差の補正が重要であ
る。しかし、2軸電磁ログの使用ではバイアス誤
差を補正するための係数は船速に応じて変化する
。係数算出のための往復観測を数多く実施する
必要があるが、これは簡単でない。

このため、バイアス誤差を補正するための新た
な方法としてランダム航走法を提案した。

参考文献

石井春雄 (2006), 船舶搭載型3ビーム式ADCP
の測定流速誤差と補正, *海洋情報部研究報
告*, 42, 61-87.

Joyce, T.M. (1989), On in situ "calibration" of ship-
board ADCPs, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 6, 169
- 172.

気象庁 (1999), 海洋観測指針.

工藤宏之, 寄高博行 (2001), 船舶搭載ADCP測
流データの偏り誤差補正について, *水路部技
報*, 19, 77 - 80.

Pollard, R. and J. Read (1989), A method for cali-
brating shipmounted acoustic Doppler profil-
ers and the limitations of gyro compasses, *J.
Atmos. Oceanic Tech.*, 6, 859-865.

— 転載等に関する問い合わせ先 —

〒104-0045

東京都中央区築地5丁目3番1号

海上保安庁海洋情報部技術・国際課海洋研究室

海洋情報部研究報告担当

電話 03-3541-4387, FAX 03-3541-3870

平成19年3月28日発行

発行者	海上保安庁海洋情報部 東京都中央区築地5丁目3番1号 (郵便番号 104-0045) 電話 03-3541-3811(代)
編集者	海洋情報部研究報告編集委員会 東京都中央区築地5丁目3番1号 (郵便番号 104-0045) 電話 03-3541-4387
印刷所	新高速印刷株式会社 東京都港区新橋 5-8-4 柴田ビル6 F 郵便番号 105-0004 電話 03-3437-6365

本号掲載の著作物の無断転載・複製を禁ず

REPORT OF HYDROGRAPHIC AND OCEANOGRAPHIC RESEARCHES

No. 43
March 2007

CONTENTS

1. 幕末から明治初年にかけての日本近海英国海図 1
—日本水路部創設前の海図史—……………菊池眞一
Admiralty Charts for Adjacent Seas of Japan in the last Days of Tokugawa Regime
and early in Meiji Era ……………Siniti Kikuti
2. 海底地殻変動観測における音響トランスデューサ位置のバイアス誤差の推定 17
……………松本良浩・石川直史・藤田雅之
Bias estimation of acoustic transducer position for seafloor geodetic observation
……………Yoshihiro Matsumoto, Tadashi Ishikawa and Masayuki Fujita
3. 海底地殻変動観測用音響トランスデューサの音響位相特性と音響位相中心 29
……………望月将志・成田誉孝・石川直史・吉田善吾・河合晃司・松下優・川井仁一・
淵之上紘和・松本良浩・藤田雅之・浅田昭
Acoustic phase characteristics and phase centers of the acoustic transducers
for seafloor geodetic observation
……………Masashi MOCHIZUKI, Yoshitaka NARITA, Tadashi ISHIKAWA, Zengo YOSHIDA,
Koji KAWAI, Hiroshi MATSUSHITA, Jinichi KAWAI, Hirokazu FUCHINOUE,
Yoshihiro MATSUMOTO, Masayuki FUJITA and Akira ASADA
4. 下里 SLR 観測の新手法 37
……………黒川隆司・福良博子・久間裕一・井城秀一・田中郁男・鈴木充広・長岡 継・江河有聡
Newly developed methods for SLR observation at Simosato Hydrographic Observatory
……………Takashi KUROKAWA, Hiroko FUKURA, Yuichi KYUMA, Hidekazu INOSHIRO,
Ikuro TANAKA, Michihiro SUZUKI, Mitugu NAGAOKA and Asato EGAWA
5. 2 軸電磁ログを使用する海流観測におけるバイアス誤差の補正方法 ……………田中 友規 45
Development of Bias error Correcting Method for Ocean Current Velocity Measured
by Using Electromagnetic Log with Dual-axis Sensors ……………Tomonori TANAKA

JAPAN COAST GUARD
TOKYO, JAPAN

Older issues : <http://www.1.kaiho.mlit.go.jp/>