

成層期における燧灘の海洋構造に関する研究

二村 彰*・杉本紘一**

Observation of the oceanic structure of stratified region in Hiuchi-Nada

Akira Futamura* and Kouichi Sugimoto**

Abstract

We carried out hydrographic observations in Hiuchi-Nada, the Kurushima Strait and the Western Bisan Strait from July 30 to August 1 in 2003. The bottom cold was existed in the eastern part of Hiuchi-Nada. It was lower temperature, higher salinity and higher density than the surrounding water. It also was characterized by the hypoxia. The cyclonic circulation above the bottom cold water was estimated by the geostrophic calculation.

1. はじめに

燧灘は瀬戸内海の中心に位置する海域であり、同海域西部は来島海峡、同東部は備讃瀬戸を通じて他の海域とつながり海水が交換されている。燧灘の大きさは南北方向に約30km、東西方向に約50kmであり、平均水深は約20mと比較的浅い海域である(図1)。

燧灘の潮汐と潮流の特徴を瀬戸内海の他の海域と比較すると、干満の差が大きく、潮流が弱いことを

挙げることができる(柳・樋口, 1981⁽¹⁾)。図2は瀬戸内海で卓越する潮汐成分であるM2分潮の潮汐の振幅(満潮と干潮の差)を表したものであるが、潮汐の振幅は、紀伊水道や豊後水道は100cm以下と小さいが、燧灘はそれの2倍以上の200cm以上であり、瀬戸内海の中でも最も振幅の大きい海域の一つであると言える。

一方、図3はM2分潮の潮流の振幅(流れの強さ)を表したものであるが、来島海峡や備讃瀬戸などの海峡部では50cm/s以上で大きく、灘などの広い海域では30cm/s以下で小さい傾向であることが分かる。その中でも燧灘東部では10cm/s以下で瀬戸内海でも最も弱い潮流の海域の一つとなっている。

海水の密度は、沿岸域では主に水温と塩分によって決定される。燧灘などの比較的潮流が弱い海域では、夏季になると強い太陽放射により海面が温めら

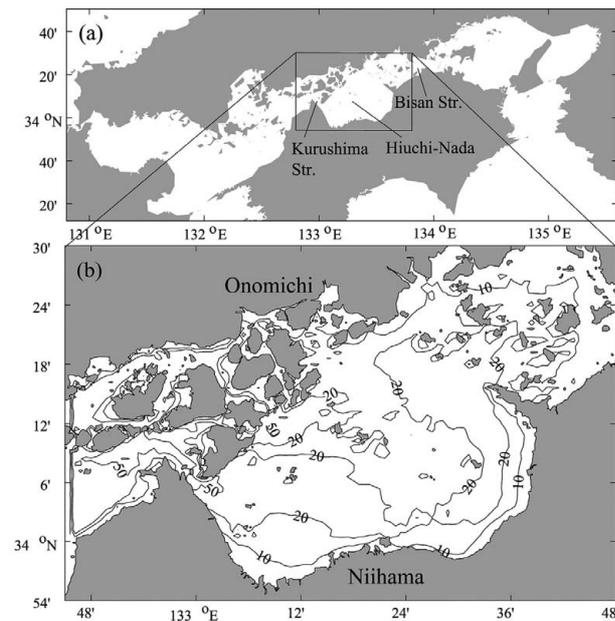


図1 瀬戸内海全景 (a) と燧灘周辺図 (b)

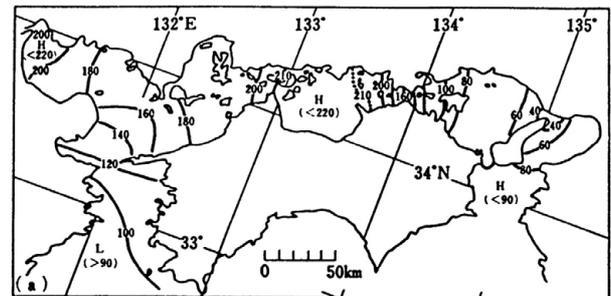


図2 瀬戸内海におけるM2分潮の全振幅 (cm) (柳・樋口, 1981⁽¹⁾)

* 商船学科

** 専攻科 海上輸送システム工学専攻

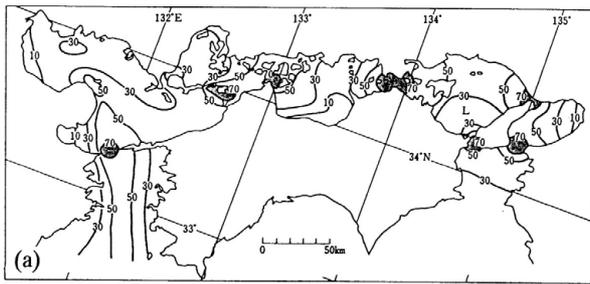


図3 瀬戸内海におけるM2分潮流の振幅 (cm/s) (柳・樋口, 1981⁽¹⁾)

れたり河川水が流入したりすると上層の海水は軽くなり、下層の重い海水の上に乗った状態となる。この鉛直的に異なった二層以上の海洋構造を持つ状態を成層構造と言う。燧灘は夏季に成層が起こりやすく、瀬戸内海では大阪湾に次いで成層が強い海域である(武岡, 1984⁽²⁾)。一方、燧灘に隣接する来島海峡や備讃瀬戸では強い潮流による鉛直混合が生じ、常に上層と下層が混ざり合う混合域となっている。

瀬戸内海は、我が国の高度経済成長期に伴う沿岸域への重化学工業の集中や都市化により、環境問題が多発した海域である。例えば、瀬戸内海を中心に位置する燧灘では1960年代後半から70年代前半において工業排水や生活排水が富栄養化を促し貧酸素水塊が発生し、魚介類の大量死などが頻発した経験を持っている。これまでにこの状況はかなり改善されたものの現在でも同海域では夏季になると貧酸素水塊が形成されている(Ochi and Takeoka, 1986⁽³⁾)。そこで本研究では2003年7月29日から8月1日にかけて行ったCTD(水温・塩分・密度)・DO(溶存酸素濃度)観測により得られたデータを用いて最近の燧灘の詳細な海洋構造の状況を詳しく述べる。

2. 観測

ここでは、本研究で実施した観測について概要を説明する。燧灘、来島海峡および備讃瀬戸において、2003年7月29日から8月1日にかけてCTD観測とDO観測を行った。観測方法は、予定測点において計測器を水中に落とし、海底に着底した後、ロープで引き上げるといった測定を行った。CTD・DO観測には弓削商船高等専門学校実習船「はまかぜ」を使用して行った。CTD観測に使用した装置はアレック電子(株)のAST1000S(以下CTD)で、鉛直的な測定間隔は0.25mである。DO(溶存酸素計)観測に用いた機器は、アレック電子(株)のクロロテックAAQ1183という水中センサ部、水中ケーブル、インターフェイスからなるパソコン直結式の総合水質計である。観測範囲の中には、燧灘東部、西部海域と同時期に観測された例がほとんど無い燧灘北部の

備後灘周辺海域も含んでいる。なお、今回のCTD・DO観測は、観測範囲が広いため、観測に3日間を費やしている。図中の英数字はCTD・DO観測の測点番号を示しているが、来島海峡西側の安芸灘周辺の測点19~26はCTD観測のみの観測である。

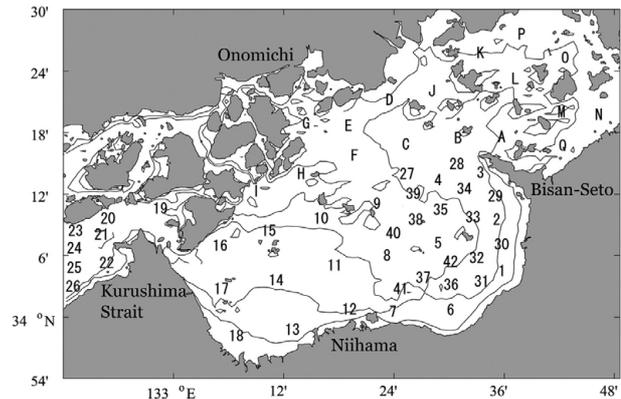


図4 測点配置

3. 観測結果

図5は、上層(0m)と下層(20m)の水温、塩分、密度、溶存酸素の水平分布を示す。上層水温は燧灘南東部が最も高く、備讃瀬戸がこれに次いでおり、来島海峡が最も低い。特に燧灘西部と来島海峡間に水温差が最も大きくなっている。下層では燧灘北東で最も低くなっており、次いで来島海峡、備讃瀬戸と高く、燧灘北西が最も高かった。塩分分布は、上層では来島海峡が最も高く、燧灘と備讃瀬戸で低くなっており、特に燧灘南岸と備讃瀬戸北西沿岸では低くなっていた。これは河川による淡水流入の影響と思われる。下層では水温場とよく似た分布を示しており、燧灘北東と来島海峡が同程度で最も高く、燧灘北部から備讃瀬戸にかけて最も低かった。密度場は、上層では来島海峡が最も重く燧灘と備讃瀬戸で軽く、この構造は水温分布に対応している。しかし、燧灘南西と備讃瀬戸北西沿岸で最も軽くなっており、これは塩分の影響によるものと思われる。下層についても水温分布に非常によく一致していて、燧灘北東と来島海峡で同程度に重く、燧灘北部から備讃瀬戸にかけて最も軽くなっていた。溶存酸素(DO)は、上層では備讃瀬戸でやや低いが全体的に大きな変化はない。一方、下層では燧灘北東を中心に低く、その値は3.0mg/l以下で貧酸素化していた。しかしながら、この場所から西方向の燧灘中央、または北東方向の備讃瀬戸へいくとともに急激にDO値は増加する。このため、貧酸素化している場所は燧灘北東に限定されていることが分かった。

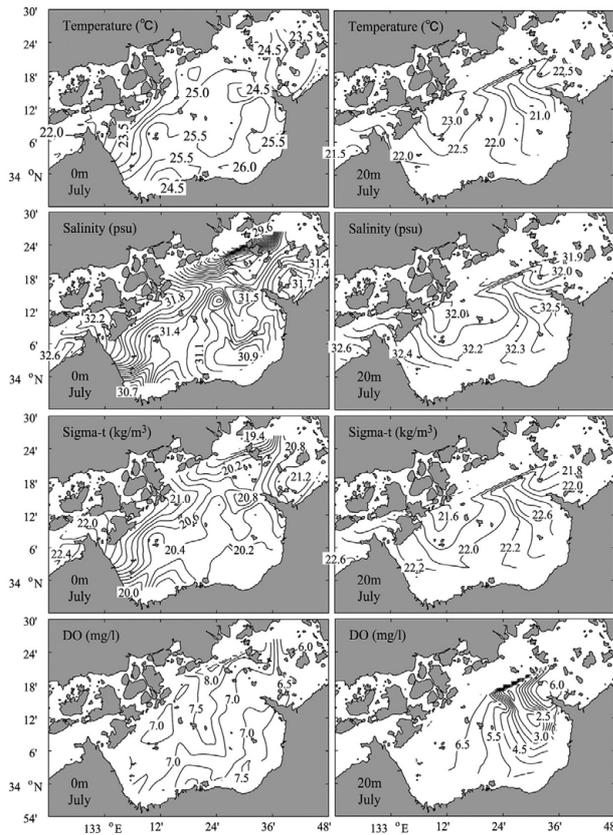


図5 水深0mと水深20mの水温、塩分、密度および溶存酸素の水平分布

次に各海域を代表する測点の水温、塩分、密度および酸素濃度の鉛直分布を見ていく。代表測点は来島海峡については測点19を、備讃瀬戸を測点Aそして燧灘東部を測点34とした。図6に来島海峡の水温、塩分および密度鉛直分布を示す。なお、来島海峡では溶存酸素観測は行っていない。水温は水深13m付近においてわずかな変化があるが、海面から海底まで23℃付近ではほぼ一定となっており、強い潮流により鉛直混合しているのが分かる。塩分や密度でも同じように強い鉛直混合の特徴が見られた。

図7は備讃瀬戸西部の測点Aにおける水温、塩分、密度および酸素濃度の鉛直分布を示したものであるが、来島海峡ほどではないが潮流による鉛直混合の特徴の方が強く見られる。しかし、水深1~5mと12~17mに弱い水温躍層（水温が急激に変化してい

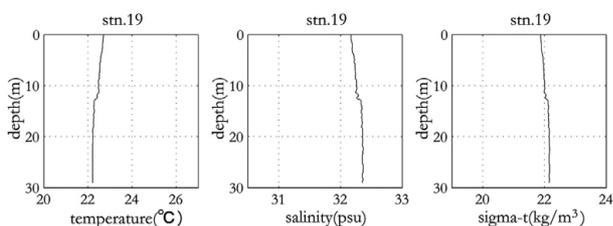


図6 測点19の水温、塩分および密度の鉛直分布

る層)が存在しており非常に弱い成層構造も見られる。塩分を見ても、水深が深くなるにつれて高くなっているのがわかる。密度も同様、水深が深くなるにつれて高くなっているのがわかる。酸素濃度は下層に近づくにつれて次第に酸素濃度が低くなっている。

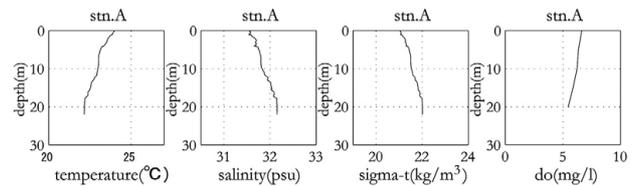


図7 測点Aの水温、塩分、密度および酸素濃度の鉛直分布

次は燧灘東部の測点について見ていく。図8は燧灘東部の測点34の水温、塩分、密度および酸素濃度の鉛直分布を示したものである。水温を見ると、来島海峡と比べ上下層で水温が大きく変化しているのがわかる。海面付近では約26℃あった水温が海底付近になると20.5℃近くまで下がっており水温差は約5.5℃もあった。水深0~7mにおいて強い躍層を確認できた。これらのことは来島海峡や備讃瀬戸のように鉛直混合しているのではなく強い成層が発達していることを示すものである。塩分や密度をみても水深0~7mにおいて急激に変化しており成層が確認できた。溶存酸素は水温等のような急激な変化はなく、水深0~7mの成層の影響を受けずに酸素濃度が高く一定であった。しかし、水深16m付近から急激に減少し水深20m以降で3 mg/l以下となっており貧酸素化が見られる。この付近の水温を見ると、水深18mにも躍層があり、これ以深で観測された水は、今回の観測において来島海峡や備讃瀬戸よりも低い水温、高い塩分、高い密度であることが分かった。

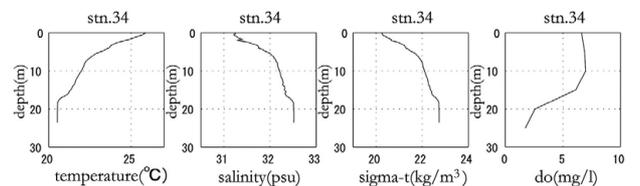


図8 測点34の水温、塩分、密度および溶存酸素の鉛直分布

この燧灘東部の下層に存在する低温、高塩、高密度、貧酸素な水は過去の研究からも指摘されている底部冷水 (Ochi and Takeoka, 1986⁽³⁾) である。この底部冷水を中心に鉛直的に詳しくみることにする。

図9は、燧灘における東西方向の測点16・15・10・9・39・4・34・3での水温、塩分、密度、溶存

酸素の断面分布を示す。測点16は混合しており、測点15から東方向へ行くに従い成層が強まっている。水温、塩分および密度分布はともによく似た構造をしている。密度Sigma-t=22.0より重い水を底部冷水とすると、測点39から少なくとも測点3まで底部冷水が海底地形上の窪地の上に存在している。底部冷水の大きさは東西方向に15km以上、鉛直方向では水深8m付近から海底に及ぶ。底部冷水上部の形状は上に凸になっていて、その下は低温、高密度となっている。この水塊の内側は貧酸素化(2.5mg/l以下)されており、また周囲よりも比較的高塩分であることから、これは周囲の水と海水交換があまりなされず長期間保存されていることを示唆している。

さらに底部冷水を詳しく見るため、底部冷水を中心とした各水深の密度の水平分布を見てみる(図10)。

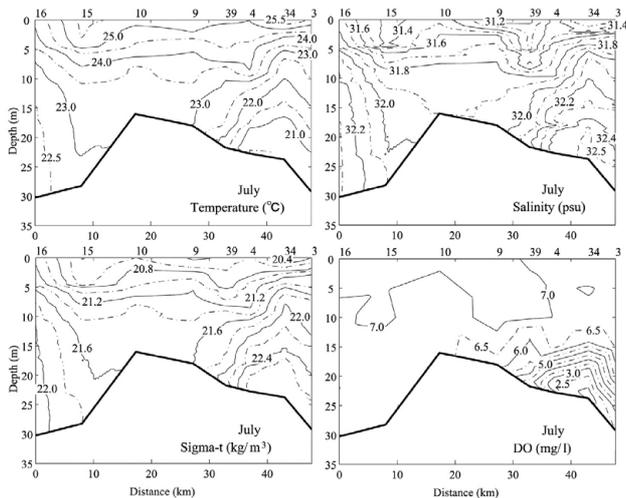


図9 測点16.15.10.9.39.4.34.3における水温、塩分、密度および溶存酸素の断面分布図

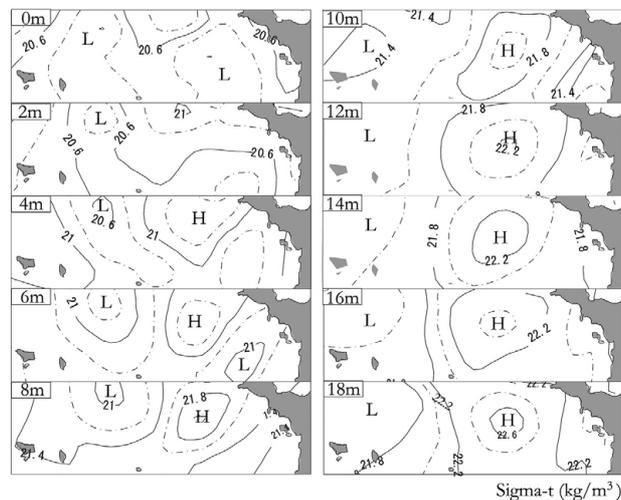


図10 燧灘東部海域における水深0~18mの水深毎の水平密度分布

図10内のH記号をつけた高密度分が底部冷水の位置に対応している。図9において底部冷水は水深8mから海底に位置していたが、図10を見ると水深12~18mにかけて高密度の水塊が円形となっており、水深10mより浅くなると円形が崩れていることが分かった。このことから、底部冷水は海底を中心として下層で円筒形状に発達していることが分かった。

4. 考察

底部冷水のような水塊は世界中で報告され、底部冷水、cold pool, bourrelet, dense bottom waterなどと呼ばれている(例えば、Houghton et al., 1982⁽⁴⁾; Le Fevre, 1986⁽⁵⁾; Hill et al., 1997⁽⁷⁾)。最近では、この底部冷水と水平循環の關係に着目した研究がなされている。Hill et al. (1994)⁽⁶⁾は、夏期の西アイリッシュ海の底部冷水の真上に反時計回りの渦が存在することをADCP観測と自由追跡ブイ調査から示した。さらに、Hill et al. (1997)⁽⁷⁾は、診断モデルを用いて底部冷水の上に反時計回りの渦が発達することを表した。

今回、燧灘においても底部冷水を東西方向に横切る測点9・39・35・34・29の密度分布から地衡流計算により南北方向の流れを見積もった(図11)。地衡流速は次のように表される。

$$v = \frac{g}{f} \frac{\Delta D}{\Delta x}$$

ここで、 v : 地衡流速 (m/s)、 ΔD : 海面の傾きの鉛直距離 (m)、 Δx : 海面の傾きの水平距離 (m)、 f : コリオリパラメーター、そして g : 重力加速度 (m/s²) である。

地衡流の南北成分と密度断面分布を比較してみると(図11)、燧灘東部に存在した底部冷水のほぼ中心となる測点34よりも西側に南流、東側に北流の流れが発達しているのが分かった。この流れの傾向は表層を中心に強く、深度が増すにつれて弱くなっている。このことは、底部冷水は円筒形状に発達していることを考慮すると、底部冷水の真上の表層中心に地衡流による密度流が反時計回りに循環している可

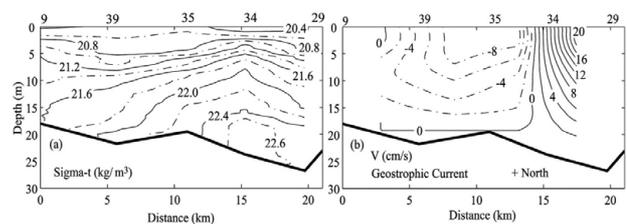


図11 測点9・39・35・34・29における (a) 密度断面分布、(b) 地衡流速の南北成分

能性を示している。図12は第六管区海上保安部(1973)⁽⁸⁾による流れの観測結果であるが、この結果からも燧灘東部において反時計回りの還流の存在が確認できる。しかしながら、これが底部冷水に起因するものであるかどうかは明らかにされていない。

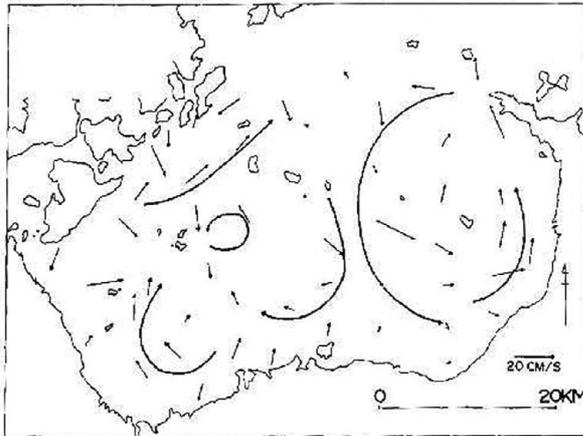


図12 燧灘の5 m層における恒流 (第六管区海上保安部, 1973⁽⁸⁾)

5. まとめ

燧灘、来島海峡および備讃瀬戸において、2003年7月29日から8月1日にかけて水温、塩分、密度および溶存酸素濃度観測を行った。その結果、水温場について上層では燧灘南東部が最も高く、来島海峡が最も低かった。下層水温は燧灘北東で最も低く、燧灘北西が最も高かった。塩分分布は、上層では来島海峡が最も高く、燧灘南岸で低くなっていた。下層では水温場とよく似た分布を示していた。密度場は、上下層とも水温分布と非常によく一致した分布となっていた。酸素濃度は、上層では大きな変化は見られなかったが、下層では燧灘東部海域において貧酸素化していた。

来島海峡では上層から下層まで強く鉛直混合し、備讃瀬戸では、来島海峡ほどではないが潮流による鉛直混合の特徴が強く見られた。一方、燧灘東部海域においては強く成層化し、下層では高塩分、高密度、貧酸素化した底部冷水が確認された。

この底部冷水の大きさは、東西方向に15km以上、鉛直方向では水深8m付近から海底に及び、底部冷水上部の形状は上に凸になっていることが分かった。さらにこの底部冷水は、水深12~18mにかけて円筒形状に発達していることが分かった。

底部冷水周辺の流れを確認するため、密度分布から地衡流計算により南北方向の流れを見積もった。その結果、底部冷水周辺において密度流が発達していることがわかった。この密度流は底部冷水の上部

を中心として、反時計回りに循環している可能性があることが分かった。

参考文献

- (1) 柳 哲雄、樋口明生 (1981) : 瀬戸内海の潮汐・潮流。第28回海岸工学講演会論文集、555-558
- (2) 武岡 英隆 (1984) : 瀬戸内海全体から見た燧灘の流動と成層の特性。環境科学研究報告集 B210、9-16
- (3) Ochi, T. and H. Takeoka (1986) : The Anoxic Water Mass in Hiuchi-Nada Part 1, Distribution of the Anoxic Water Mass. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 1-11.
- (4) Houghton, R. W., R. Schlitz, R. C. Beardsley, B. Butman (1982) : The Middle Atlantic Bight Cold pool : Evolution of the Temperature Structure During Summer 1997. J. Phys. Oceanogr., 12, 1019-1029.
- (5) Le Fevre, J. (1986) : Aspects of the Biology of Frontal System. Advances in Marine Biology, 23, 163-299.
- (6) Hill, A. E., J. Brown and L. Fernand (1997) : The summer gyre in the western Irish Sea: shelf sea paradigms and management implications. Estuar. Coas. Shel. Sci., 44, 83-95
- (7) Hill, A. E., R. Durazo, D. A. Smeed (1994) : Observation of a cyclonic gyre in the western Irish Sea. Cont. Shelf Res., 14, 479-490.
- (8) 第6管区海上保安本部 (1973) : 燧灘の潮流, 第6管区海上保安部報告書