

富山湾の水塊・潮流の季節変動調査報告 —2008年度若潮丸によるCTD・ADCP調査—

古山彰一^{*}、千葉元^{**}、横井幸治^{***}、橋本心太郎^{****}

Seasonal Variation of Sea Water and Tidal Flow in Toyama Bay
- Wakashio-maru CTD & ADCP Observations from April 2008 to March 2009 -

FURUYAMA Sho-ichi, CHIBA Hajime, YOKOI Koji, HASHIMOTO Shintaro

Abstract

The seasonal variations of the water quality and the tidal flow in Toyama Bay were observed by using Conductivity Temperature Depth (CTD) and Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Tsushima warm current (TWC) intrudes about 100m in depth in Toyama Bay. The Japanese sea proper water is observed under 400m in depth; the salinity is from 34.1 to 34.2 and the potential temperature is around 0°C. The flow field in Toyama Bay is observed by ADCP system in the summer and the winter time.

Keywords: Toyama Bay, CTD, ADCP, T-S diagram, Japan Sea Proper Water

1 はじめに

本研究では、富山湾における季節的な水塊構造の変動を明らかにする事を目的として定期的なCTD、ADCP調査を行ない、表層から700[m]深程度までの富山湾内での水塊構造を明らかにする。

富山湾は沿岸域から急峻な海底地形を持つ日本でも有数の深層湾である。また、半閉鎖的な湾である事から、日本海から対馬暖流水の流入がありこれが湾内の環境に大きな影響を及ぼしていると考えられている[今村他(1993)など]。さらに、立山連峰をはじめとする3,000[m]級の山岳が海岸まで迫っているため、特に春先には大量の冷たい雪解け水が富山湾に注ぎ込み、湾内の水塊・水質構造や流動に対して多大な影響を及ぼしていると考えられている。

これまで富山湾内での水塊構造を観測によって明らかにした研究は、Hatta et al. (2005)が挙げられる。彼らは、富山湾内に流入する対馬暖流水の収支をボックスモデルで定量化し観測との結果を比較する事で、対馬暖流水が湾西部から反時計周りに侵入してくる仮説を検証している。また、陸水の効果についても検討を行ない富山湾内に存在しうる水塊について多方面からの検証を行なった。また、数値モデルを利用した湾内の水塊特性についても検討が行なわれており、

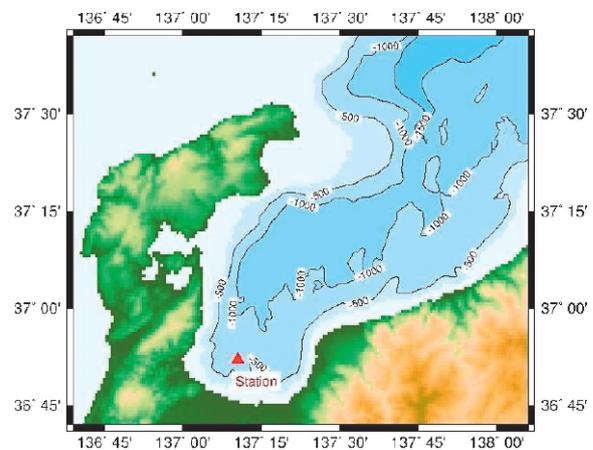


Fig.1: The Station shows the observation point of CTD (Ishimori Point). The latitude is 36.53N and longitude is 137.10E. The depth of the point is about 800[m].

Nakada et al. (2002) では、二層モデルを用いる事で富山湾内に流入する外部流れについて検討が行なわれた。この研究では、富山湾内での流れは能登半島以西で議論されてきた沿岸分枝流では説明できない特異な流れ場の存在が推測されており、非常に複雑な流れ場が湾内に存在しうる事が示唆されている。

日本海から富山湾内へ流入する流れ場の特性につい

ては、Chiba et al. (2007) が2004年8月と2005年8月に能登半島先端部でADCP観測を行ない、対馬暖流系水の夏季の富山湾入口での流動場特性を考察した。また、Aiki et al. (2007) は富山湾周辺の表層流を解析し、富山湾内に流入する流れの季節特性について検討を行なった。

以上のように、富山湾内の水塊については、対馬暖流系水を起源とする外部からの比較的高温高塩分水の侵入、低温の淡水の流入、陸棚が未発達な急峻な地形や能登半島の存在などにより複雑な流動場とそこに存在する独特の水塊構造が研究の対象になる。そこで本研究では富山湾内の水塊構造やその季節変動を詳細に観測し、これらの解明に結びつく観測データの提示を行ない、富山湾内の水塊構造の特性を議論する。

DATE	CTD	ADCP	NOTE
Apr 14	○	○	0900 出航.
May 15	○	○	1030 出航.
May 22	○	○	1100 出航.
Jun 19	△	○	1015 出航.
Jul 24	○	○	1400 出航.
Aug 28, 29	○	○	1000 出航.
Oct 23	○	○	1130 出航.
Nov 26	○	○	1130 出航.
Dec 17	○	○	1315 出航.
Jan 14	○	○	1305 出航.
Feb 04	○	○	1300 出航.
Mar 04	○	○	1315 出航.

Table 1 : Observation Date from April 2008 to March 2009. The CTD data of June 24 is eliminated in the study, because of the data has the large error for the salinity.

2 手法

本校、若潮丸に搭載されている Conductivity Temperature Depth (CTD) と Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) を用いて計測を行なった。本研究で使用されたCTDセンサは米国 Falmouth Scientific, INC.(FSI) 社製高速応答水温センサー付き Integrated CTD (ICTD) で、水圧測定範囲 0 ~ 3000[dB]、水温 (高速応答) - 2 ~ 35°C ± 0.01 の性能を有する。ADCP は RDI 社製の 150[kHz] のシステムが若潮丸船底に装備されている。本システムでは 1 層当たりの層幅を 8 [m] とし、最大水深 300[m] 程度まで、各層での流向流速が観測可能である。

CTD 観測ポイントは、(36.53N, 137.10E) とし (以下、「石森ポイント」と記述)、水深 700[m] まで CTD 調査を行なった (図 1)。また、ADCP 調査は、石森ポイントまでの航行 (往復) について取得している。観測は気象状況等で特に問題がなければ毎月観測を行なっているが、今回は 2004 年 6 月から 2009 年 3 月までの期間について CTD 観測報告と、今年度分のデータを対象として水質評価、および ADCP 観測結果を示す。2008 年度 (2008 年 4 月から 2009 年 3 月まで) の観測実績は表 1 の通りである。なお、センサーエラーの理由から、6 月 19 日の CTD 観測に関するデータは本研究の中では利用していない (表中△)。

3 結果および考察

3.1 水温の季節変動について

図 2 に石森ポイントにおける海水温の季節変動を示す。縦軸は水深を表し単位は [m] である。つまり、0 [m] は海水表面を意味する。横軸は観測月を表し、2004 年 6 月 (図左端の J) から 2009 年 3 月 (図右端の M) までを記述している。なお、アルファベットは月を英語で表記した際の頭文字である。色は摂氏温度を表し 0 ~ 25°C の間で色付をしている。

海水表面での水温の極大は夏季の 8 月にあり、この季節には水深 200[m] までの間で鉛直方向で水深が深くなるにつれて水温が下がり成層している。また、2 月および 3 月には、水深 150[m] 程度まで水温変化がほとんど見られない混合層が確認される。

水深 150[m] 以深、約 400[m] 程度までは、季節的に多少変動はあるものの、ほぼ定常的にこの範囲で水温が 10°C 程度から 2°C 程度まで低下している。これは季節に関係なくほぼ定常的に存在する層で永久躍層と呼ばれる部分である。さらにそこより下部に向かうと、400[m] 以深で水温はほぼ 1°C 未満となる。ここより下部の水は、海表面の気象や淡水には影響されない、富山湾固有の水塊であると考えられる。

3.2 塩分の季節変動について

図 3 に石森ポイントにおける塩分の季節変動を示す。縦軸は水深を表し単位は [m] である。つまり、0 [m] は海水表面を意味する。横軸は観測月を表し、2004 年 6 月 (図左端の J) から 2009 年 3 月 (図右端の M) までを記述している。なお、アルファベットは月を英語で表記した際の頭文字である。色は塩分を表し 33 ~ 35PSU の間で色付をしている。

河川や降水による淡水の流入により、水深 25[m] 程度までは塩分の低い水が広く海表面を覆っている事が

Temperature (June2004-March2009)

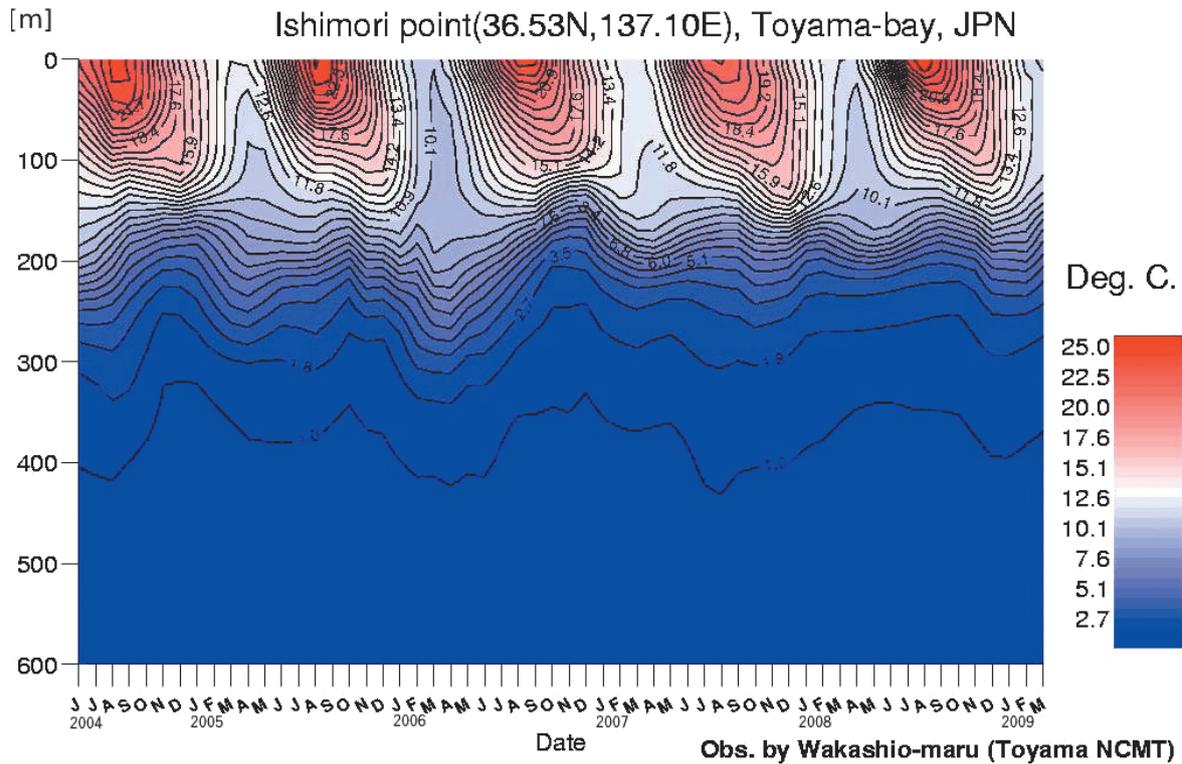


Fig.2: The seasonal variety of the temperature in Toyama Bay from June 2004 to March 2009.

わかる。特徴的な点は、夏期に水深100[m]付近で高塩分水塊が確認できる事である。この水塊は、富山湾外側の日本海から流入してくる対馬暖流水と言われており、塩分が34.5 (PSU) 程度となる。この水塊は冬季の混合層形成に伴い消滅することが本研究の結果から示す事ができる。このことは対馬暖流水の富山湾内への侵入の強弱が季節により変動している事が示唆される。

水深200[m]以深は、センサーのノイズと考えられる誤差が若干含まれているが、概ね34.1[PSU]付近で安定した水塊が存在している事がわかる。

3. 3 T-S ダイアグラム

図4に石森ポイントにおける2008年度(2008年4月~2009年3月)までのT-Sダイアグラムを示す。縦軸はポテンシャル温度を示し、横軸は塩分を表す。観測日時毎に点の色を変えてあり、季節的なT-Sダイアグラムの変化も同時に見えるようにした。

図4を見ると、オレンジ色の四角で囲んだ富山湾浅水塊と呼ばれる領域と、日本海固有水に分類されるエリアにわかれる事がわかる。特に富山湾浅水塊は河川水や降水、または湧水などによって塩分が薄められたものと、対馬暖流水を起源とする高塩分領域に分け

られる。低温部を拡大してみると、ポテンシャル水温5℃未満ではCTDにより観測された塩分は34.1付近に収束している。

3. 4 ADCP 観測結果

図5、6はADCPによる観測結果であり、それぞれ夏季と冬季の海潮流の様子を表している。それぞれの季節について図が2つずつ示されているが、左側の図は水深16.24[m] (以下、「表層」と記述)で、右側の図が水深104.24[m] (以下「100m深」と記述)での様子を表している。図中で赤い線は船がそこを航行した際の海潮流の流向流速を示している。流速のリファレンスはそれぞれの図左上に示した長さが1.0[m/s]を示す。

図5(夏季)は、2008年8月29日の朝8:30に七尾湾を出航し、その日の12:30頃に本学臨海実習場までの航行についてADCPデータを取得した際の結果である。表層での流向流速を見ると、伏木、氷見沖に沿って20[cm/s]程度の時計周りの循環流の存在が推測される。一方、100m深では全体的に流速は遅くなっており、中でも特筆すべき部分は、伏木沖での流向が表層とは反対方向でかつ20[cm/s]程度の比較的速い流れが存在していることである。

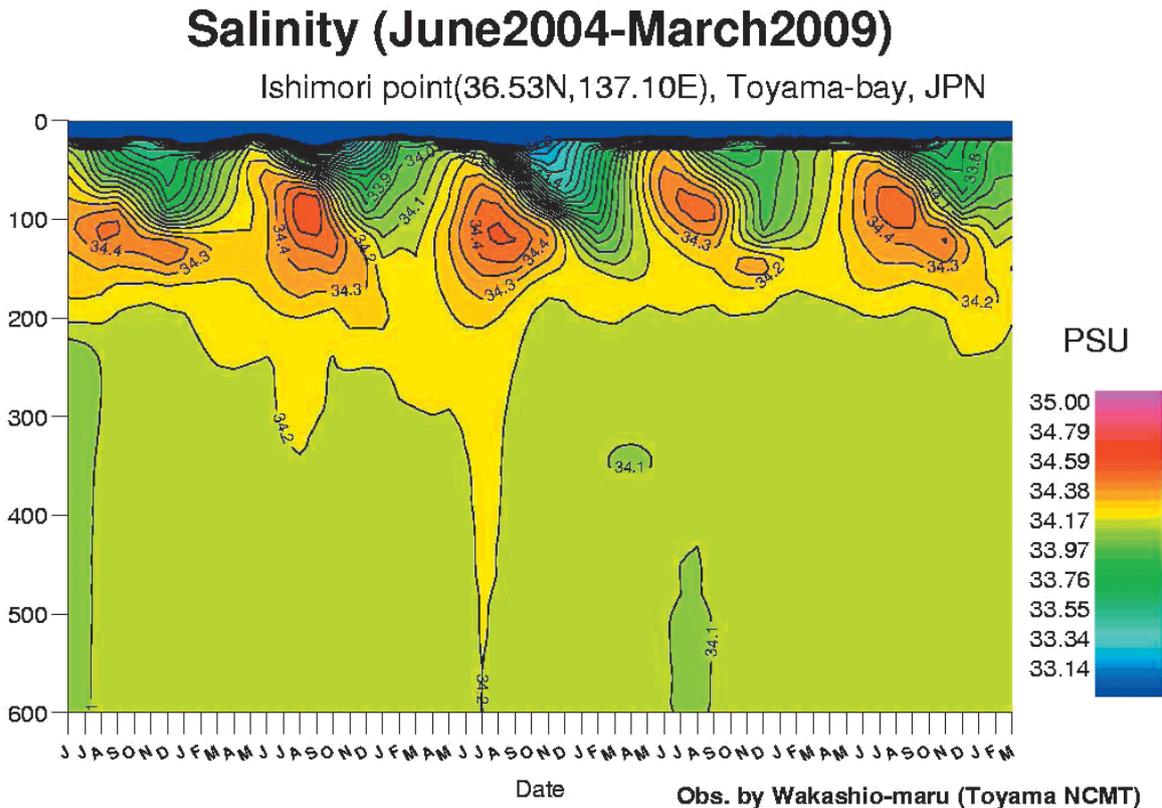


Fig.3: The seasonal variety of the salinity in Toyama Bay from June 2004 to March 2009.

図6 (冬季)は、2008年12月17日の本学臨海実習場から石森ポイント迄への往復路について ADCP データを取得した際の結果である。表層では沿岸地形に沿うような形で20~30[cm/s]程度の南東流が確認されている。また100[m]深では沿岸にかなり近いエリアでも20[cm/s]程度の南東流が確認でき、場所によっては表層よりも流速が速いエリアがある事も確認できる。

3. 5 考察

まずはじめに、富山湾の深層部に存在する水塊について考察を行なう。図2、3の結果から明らかなように、富山湾では水深400[m]以深は季節的な変動はあまり受けておらず、非常に安定した水塊が存在していることがわかる。図2によると水深400[m]以深では水温が1℃未満となっており、この領域では定常的に低い温度の水塊が存在している事がわかる。このことを考慮した上で T-S ダイアグラム (図4) を見ると、ポテンシャル水温が1℃未満のエリアで、塩分がほぼ34.1~34.2[PSU]に収まっている事がわかる。これはこの海域での深層水の特徴を表す指標であると考えられる。Hatta et al. (2005) の富山湾内での計測によると、この数値が 34.068 ± 0.008 [PSU]と示されており、本観測のデータと比較して0.1[PSU]程度低めに出ている事

が伺える。ほぼ一致した結果ではあるが、このずれは、センサーの精度や電気伝導度から塩分への変換の際に利用しているパラメータの違いなどが推察される。また、ここで得られたデータを柳 (2001) らの T-S ダイアグラムと照らしあわせると、日本海固有水の領域とほぼ一致した結果が得られている。このことより、富山湾の深層水は日本海固有水を起源としている事が推測できる。

次に、比較的上層部の水塊について検討を行なう。図2、3を見てわかるように、水深200[m]までのエリアは、水温や塩分が定常的ではなく、大きく変動している事がわかる。またこの変動は季節的な要因が原因になっている事が推察される。水温に関しては、気温の影響が大きい事が容易に想像できるが、塩分に関しては34.5[PSU]程度の高塩分水が夏季の100[m]深付近に存在しており、これは外部からの高塩分水の流入が無いと存在し得ない水塊である。Hatta et al. (2005) は、高温高塩分の対馬暖流水が夏季に強度をまして富山湾内に侵入してくる事を示しており、本結果はこの理論を裏付けるデータとなる。

また、図4の T-S ダイアグラムを見ると、低温部の水を除き、塩分が広範囲で分布している事がわかる。これは外部から侵入する高温高塩分の対馬暖流水と、

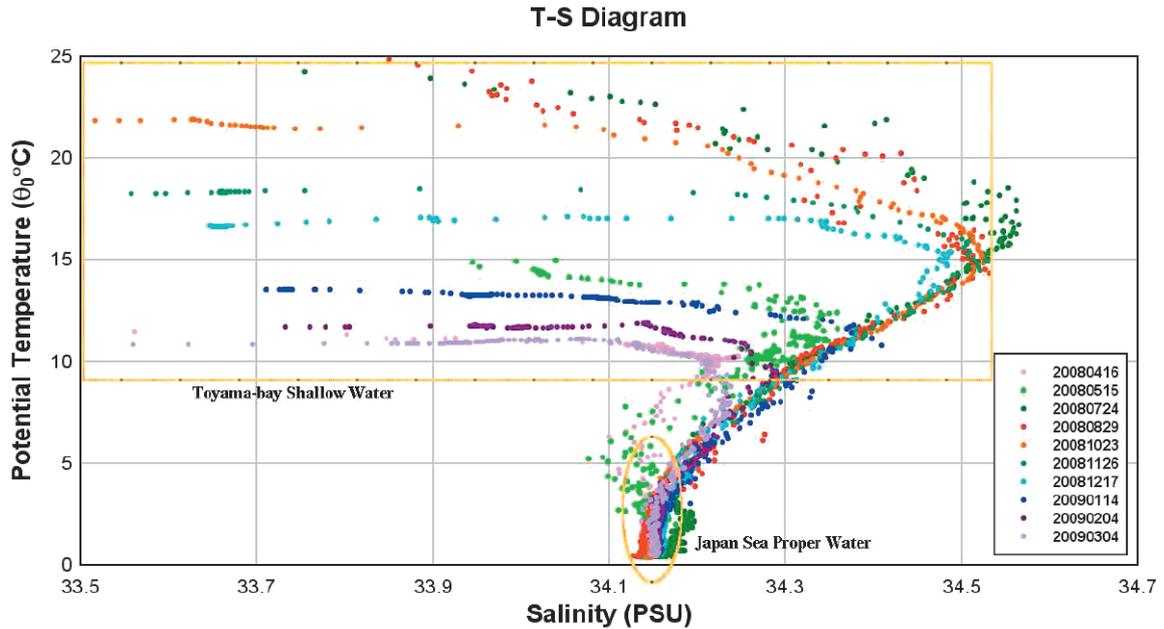


Fig.4: T-S Diagram for Ishimori point.

河川や降水、また富山湾に特有の湧水（たとえば Zhang and Satake (2003) の混合が行なわれている事を示唆し、複雑な水塊環境を形成している事がわかる。また、この図で低塩分での温度分布を見ると（グラフ中、塩分33.5~33.9(PSU)、ポテンシャル温度10~25°Cの範囲）、最も低温になるのが3月または4月である事がわかる。気象庁での富山県における平均気温分布を見ると1、2月が最も気温の低い月になるが、それから1、2ヶ月ずれて海水温に反映されている事がわかる。これは、気温が直接海表面温度を下げるわけではなく、河川からの雪代（雪解け水）が3、4月頃に大量に富山湾に流入し、その影響で海表面の水温が冷やされている事が考えられる。

以上の事から、富山湾の水塊は、表層での季節的な変動を全く受けない400[m]以深部の水塊、対馬暖流水の高温高塩分の外部流入水の影響を受けるおよそ100[m]深の特に夏季に高塩分になる水塊、さらに、陸水の影響を大きく受ける表層の低塩分水の領域の3つに大きく特徴づけられる事がわかる。

富山湾内の海水流動パターンについてはADCP観測により、夏季は図5のようになり、冬季は図6になるような結果が得られた。夏季については表層と100[m]深では流動のパターンが若干異なりなり、場所によっては逆流を示しているところも存在した。また、冬季に関しては、表層と100[m]深でほぼ同じ傾向の流向・流速が観測された。これらの結果は、CTD観測結果で得られた夏季と冬季での成層構造の違いから推測

される結果で、特に夏季に関しては季節的な成層や、対馬暖流水の流入による表層と下層での水塊構造の違いがこのような流向流速の違いを生じさせていると考えられる。また、夏季の逆流の結果より、地形の影響や、海水の密度差などによる湧昇や沈降などの鉛直流れの存在が示唆されるが、これらを証明するためには潮汐流の影響の除去や、比較的測定誤差が少ないと思われる定点での流向流速観測データとの比較を行ないながら観測を続けていく事が必要であると考えられる。

4 おわりに

富山湾におけるCTD、ADCP調査を行ない、湾内の水塊構造の季節変動について検討を行なった。CTDの季節変動からは、高温高塩分の対馬暖流水が夏季に強く富山湾内に侵入し、湾内の水塊構造に大きな影響を及ぼしている事が確認できた。また、T-Sダイアグラムにより、富山湾の深層部に存在する水は日本海固有水である事が確認された。ADCPによる流動場の観測では、表層と100[m]深での流向流速が異なる事が観測され、湾内での鉛直方向における流動場の複雑さについても観測データより確認する事ができた。今後はこのような外部からの流れや陸水の影響を強く受け、さらに地形も急峻で能登半島の遮蔽効果など、独特な地形をもつ富山湾に対して継続的な観測を行ないながら、海洋モデルなどの数値シミュレーションの検討を行なう事で、より詳細に富山湾内の流れや水塊構造について検討をしていく予定である。

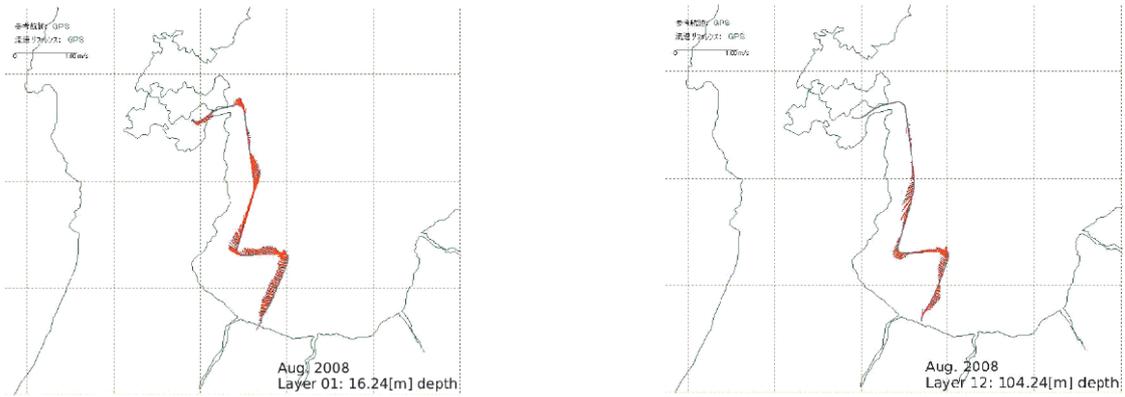


Fig.5: ADCP results : The 2 figures show the summer flow field observed by ADCP (Aug. 2008). The left figure shows the 1st layer from the sea surface (16.24[m] in depth) and the right figure shows the 12th layer from the sea surface (104.24[m] in depth).

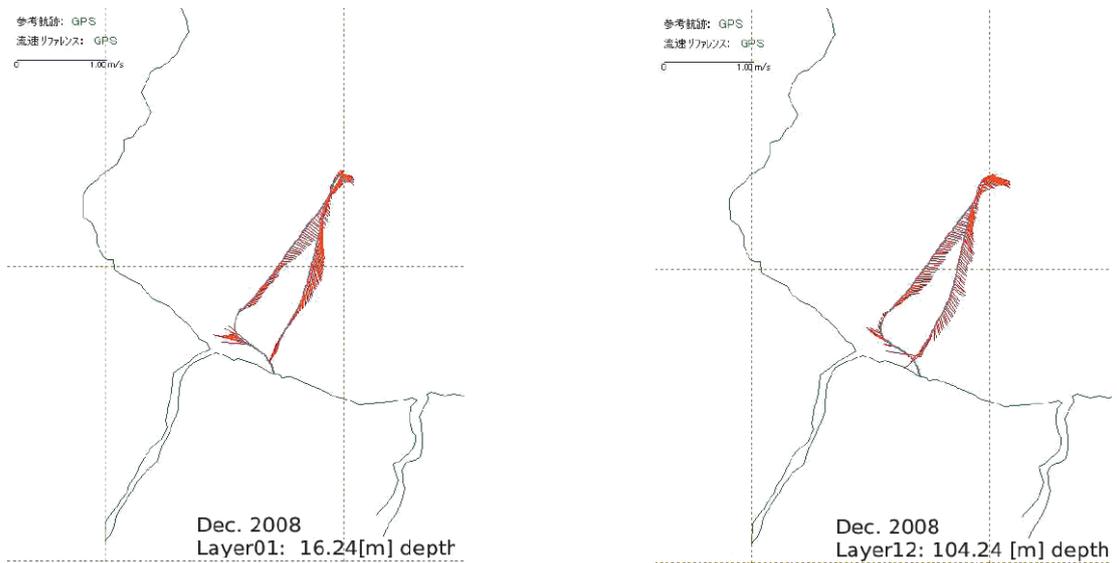


Fig.6: ADCP results : The 2 figures show the winter flow field (Winter, Dec. 2008). The left figure shows the 1st layer from the sea surface (16.24[m] in depth) and the right figure shows the 12th layer from the sea surface (104.24[m] in depth).

謝辞

本論文を執筆するにあたり、富山大学理学部松浦知徳教授には多くの御助言、コメントを頂きました。深く感謝いたします。

CTD、ADCP観測を行なうにあたり、若潮丸の船員の方々、臨海実習場の皆様にはセンサーの上げ下ろしや準備等で多くのサポートを頂きました。感謝申し上げます。また本学商船学科千葉研究室の学生の皆様に

も観測のサポートで多大な御協力を頂きました。大変感謝しております。さらに情報工学科古山研究室の学生の皆様にはADCPセッティングや観測への同行、データ整理などで御協力頂きました。深謝致します。

なお本研究の一部は、(財)環日本海環境協力センターの「富山湾プロジェクト」によって行なわれた事を記して、謝意を表します。

参考文献及び注

Aiki, T., Y. Isoda, I. Yabe, and H. Kuroda (2007) "Seasonal Variations of Surface Flow around Toyama Bay," Oceanography in Japan, Vol. 16, No.4, pp. 291-304. in Japanese.
 Chiba, H., S. FURUYAMA, and K. Yokoi (2007) "Observation of

Direction and Speed at Tsushima Current by Shipboard ADCP," IEEEJ Trans. EIS, Vol.127, No. 5, pp. 699-704. in Japanese.
 Hatta, M., J. Zhang, H. Satake, J. Ishizaka, and Y. Nakaguchi (2005) "Water Mass Structure and Fresh Water Fluxes (Riverine and

SGD's into Toyama Bay," Chikyukagaku (Geochemistry), Vol.39, pp. 157-164. (in Japanese).

Nakada, S., Y. Isoda, and K. Kusahara (2002) "Response of the Coastal Branch Flow to Alongshore Variation in Shelf Topography off Toyama Bay,"

Oceanography in Japan, Vol. 11, No. 2, pp. 243-258. in Japanese.

Zhang, J. and H. Satake (2003) "The Chemical Characteristics of

Submarine Groundwater Seepage in Toyama Bay, Central Japan." In: Land and Marine Hydrogeology (eds. M. Taniguchi, K. Wang and T.Gamo), pp. 45-60.

今村明・石森繁樹・川崎賢一（1993）『富山湾Ⅱ物理』、日本海洋学会沿岸研究部会編、日本全国沿岸海洋誌、東京大学出版会
柳哲雄（2001）『海の科学』、恒星社厚生閣