

八代海の潮流観測を目的とした漂流ブイの開発

DEVELOPMENT OF DRIFTING BUOY FOR THE PURPOSE OF OBSERVING A TIDAL CURRENT OF YATSUSHIRO SEA

上久保祐志¹・入江博樹²・藤野和徳³・斉藤郁雄⁴
 Yuji KAMIKUBO, Hiroki IRIE, Kazunori FUJINO and Ikuo SAITO

¹正会員 博(工) 八代工業高専准教授 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

²博(工) 八代工業高専准教授 機械電気工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

³正会員 工博 八代工業高専教授 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

⁴工博 八代工業高専教授 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

Yatsushiro Sea is an enclosed water area, where the wave height is low and the tidal current is also quiet. Therefore, the seawater exchange with the open sea is not good. Furthermore, the driftage is running from Kumagawa River, and it drifts with the current of Yatsushiro Sea. In this study, a drifting small buoy system equipped with a GPS receiver is used for the purpose of observing a tide of Yatsushiro Sea. The effect of current on the buoy was investigated experimentally and numerically, and it was developed the optimum shape of buoy.

Key Words : YATSUSHIRO SEA, tidal current, driftage, drifting buoy, GPS, ODEM

1. 序論

(1) 研究の背景

熊本県南西部に位置する八代海(図-1 参照)は、多くの半島、島々を始め、干潟、干拓、リアス式海岸など多様な地形に恵まれた豊かな海岸資源・観光資源を持つ一方で、魚介類やそれを餌とする鳥類なども多種多様に生息している。しかし、近年、閉鎖水域における赤潮が多く発生しており、漁獲高の減少や、水質環境の悪化が大きな問題となっている。閉鎖性水域においては、波高が低く、潮流が穏やかであるため、外海との海水交換が円滑に行われず停滞性水域ができる場合があり、これによって水質悪化が引き起こされる傾向にある。また、降雨の影響や河川水質によって、海域における水質は容易に悪化する。八代海における海域環境変化の要因については、沿岸域の開発、海水域の環境、排水等による富栄養化の進行、河川形態の変化、洪水時の河川等からの土砂等の流入、台風や海流の変動等による海水温の変化や潮流の変化など様々な原因が挙げられる。特に、八代市の中心を流れる一級河川である球磨川から大量に流れ込む河川流入の影響は大きく、季節や天候の変化により八代海の水域環境などに大きな影響を与えている一方、降雨時などには水とともに流木やごみなどの漂流物が多く八代海に注がれている。このような漂流物は、そのほとんどは最終的に図-2 に示すように八代海沿岸に漂着し、廃棄物として地域住民の頭を悩ませている。

(2) 研究の目的

本研究においては、八代海における潮流特性を把握するために、3次元流動モデルを用いて八代海での潮流解析を行うとともに、GPSを搭載した漂流ブイによる現地観測を行い、特に球磨川から流出される漂流物の漂流特性について検討することを目的としている。また、漂流ブイ形状特性についての改善事項を検討し、八代海の潮流を調査する際に最適となる漂流ブイ形状について検討を行う。

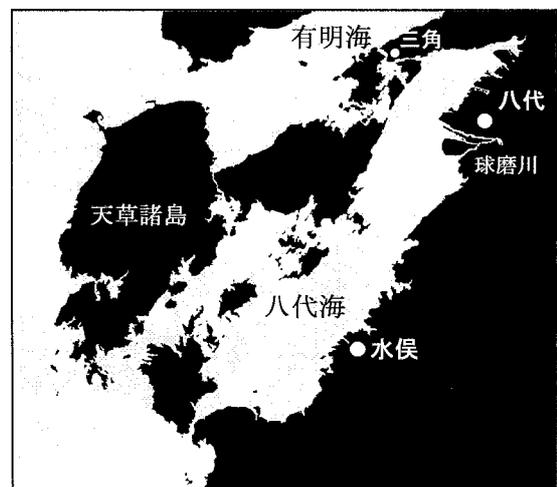


図-1 八代海

2. 数値計算による八代海の潮流解析

本研究では、八代海における潮流特性を把握するために、3次元流動モデル ODEM (Osaka Daigaku Estuary Model) を用いて八代海での潮流計算を行う。ODEM は、大阪大学の中辻¹⁾により開発された数値シミュレーション手法であり、これまでに大阪湾をはじめ東京湾、伊勢湾、陸奥湾²⁾などの日本の代表的な閉鎖性内湾を中心に利用されており、再現性も高く評価されている。

(1) 計算条件

計算領域は、図-3 に示す八代海および有明海を含む領域を対象とする。計算領域を 200m 間隔で東

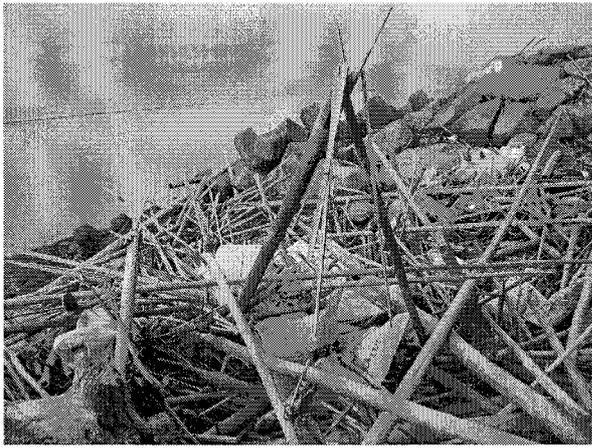


図-2 八代海沿岸に漂着した漂流物

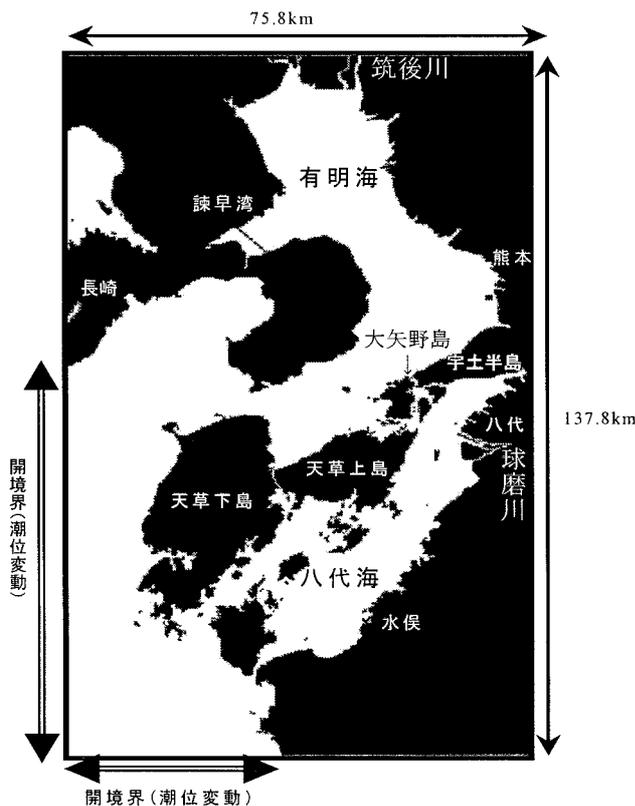


図-3 数値計算範囲

西方向に 379 分割、南北方向に 689 分割した。鉛直方向には湾内の流動・密度の鉛直方向の分布を考慮して不規則厚とし、最上層から底面にかけて 10.0m × 2 層、20.0m、40.0m、80.0m の順で合計 5 層とした。また、計算領域の西側及び南側の境界には、潮位予測システム Nao.99³⁾ に基づいた潮位変動を境界条件として与えている。Nao.99 は潮汐を予測する箇所の東経と北緯、そして予測時刻(年・月・日・時・分)を与えることで、時間的空間的な潮位変動を与える事が可能である。また、河川からの流入としては、八代海東部に位置する球磨川および有明海北部に位置する筑後川からの流入を、河川の平均流量を用いてそれぞれ初期条件として与えている。計算は 2006 年 2 月 6 日午前 10 時 20 分から 12 日間分について、時間ステップ間隔 6 秒で解析を行った。球磨川から流出される漂流物の漂流特性を確認するために、本計算では、球磨川河口付近に質量を有しない仮想マーカーを 2 月 11 日 10 時 20 分に投入し、その後 7 日間のマーカーの分散状況を見ることとした。この仮想マーカーについては表層の流速を対象として MAC 法⁴⁾ に基づいた動きをとっており、計算時間は実際に現地調査において漂流ブイを投入する時刻および回収するまでの時間と一致させている。

(2) 計算結果

図-4 は投入から 7 日後のマーカーの位置を示す。本計算においては、マーカーは 30 分ごとに 16 個ずつ、合計 1280 個を球磨川河口付近に投入している。図より、球磨川から流入したマーカーについては、西方向もしくは北西方向へと流れており、南方向に向かっての流れは見られない。球磨川の西部および北部に固まっているマーカーが多く、八代海の閉鎖性を顕著に表している。一方で、大矢野島と天草上島の間を流れているマーカーも見られ、その多くは

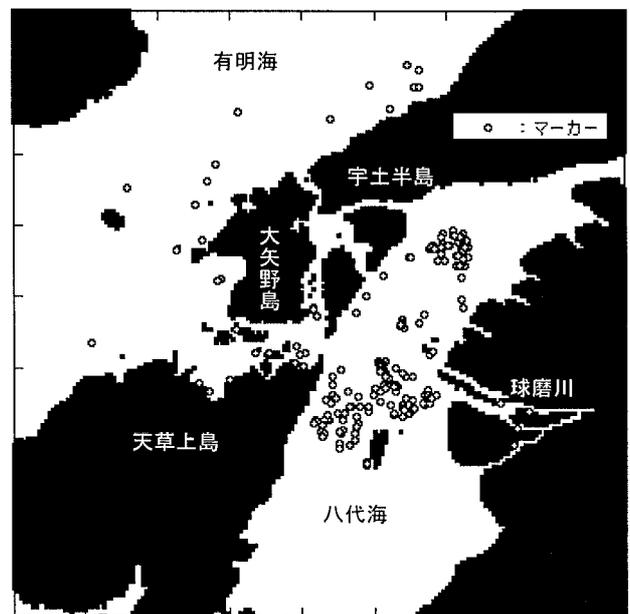


図-4 計算結果 (マーカーの分散状況)

宇土半島の北部海岸を沿う様にして有明海を流れている。

図-5 は、投入地点より一番遠方に移動したマーカーに着目し、その軌跡を示したものである。それぞれのプロットは、球磨川河口付近に2月11日10時20分にマーカーを投入してからの7日間について、7時間ごとのマーカーの位置を示している。図より、球磨川河口にて投入されたマーカーは、八代海を北西方向にゆっくり蛇行しながら横断した後、大矢野島と天草上島との間の瀬戸を抜け、有明海へと流れている。有明海では一旦は西方向に移動するが、その後は宇土半島に沿って北東方向に移動している。

以上より、数値計算によると、球磨川から八代海へ流入する漂流物については、八代海南方へは移動せず、八代海にて停滞するものや、大矢野島と天草上島の間を抜けて有明海へと流入しているものがほとんどであるとの解析結果を得た。

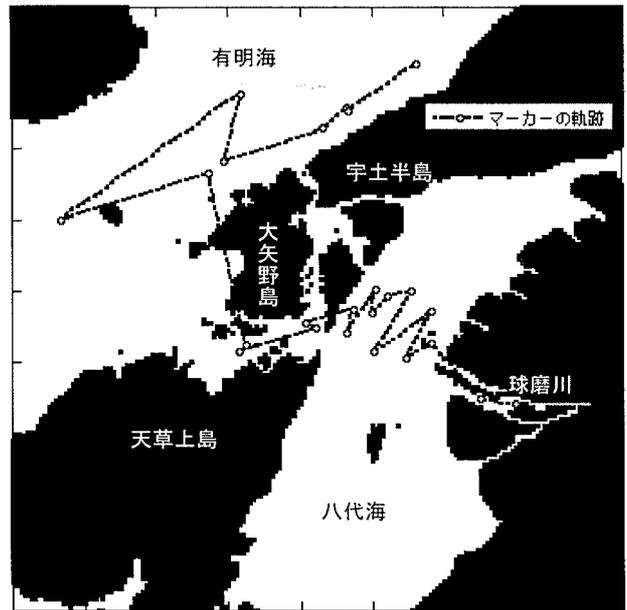


図-5 計算結果（マーカーの軌跡）

3. 漂流ブイを用いた八代海の潮流計測

近年、潮流などの流動解析を行う場合には、流速計を固定する事でその空間内における時間的な変化を計測するオイラー手法による定点観測手法が多く用いられている。著者らは、オイラー手法とは異なるラグランジュ的手法を用いたデータ取得を目標とし、図-6 に示す漂流ブイの開発を行っている⁵⁾⁶⁾。この漂流ブイは、内部にGPSを搭載しており、その現在位置および時刻を計測することが可能となっている。具体的には、携帯電話の電波を使ってその位置情報を送信し、携帯電話の基地局で受信した情報は携帯電話会社のパケット通信網を使って伝送され、データは携帯電話会社からインターネットを経由して観測サーバに送られ、リアルタイムで漂流状況を観察できることに大きな特徴がある。その他の特徴として、大容量のバッテリーを搭載しているために2週間から1ヶ月の調査が可能であること、位置情報を常に確認できるため回収を容易に行うことができること、独自に製作しているため改造が容易であり、費用も非常に安く抑えることができることなどが挙げられる。逆に、携帯電話の電波が届く範囲でないで使用できないといった欠点もある。

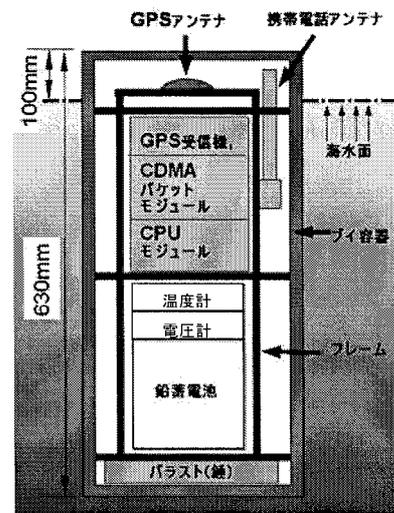


図-6 漂流ブイの内部構造

(1) 漂流ブイによる計測結果

2006年2月11日午前10時20分に漂流ブイを北緯32°27'07"、東経130°30'18"に放流した。これは、球磨川河口から西に位置し、八代海中央に浮かぶ大築島より南へ約1kmの地点となっており、前述の数値計算により水塊が停滞している場所と推定した地点である。図-7 は、漂流ブイによる計測軌跡と、数値計算によるマーカーの軌跡を示したものである。このとき、マーカーは、漂流ブイと同じ地点に投入している。図より、漂流ブイは、八代海を南方向へと移動し、御所浦島付近でしばらく同じ

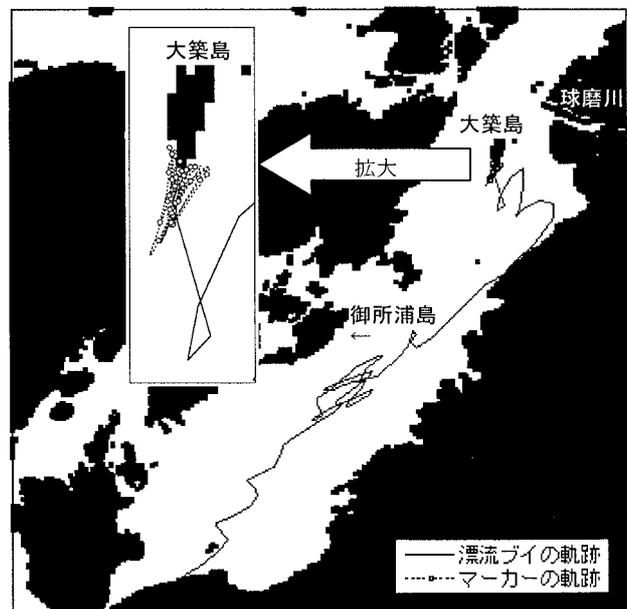


図-7 漂流ブイの軌跡

海域を漂流した後、八代海南部に漂着している様子が分かる。漂着した時刻は、2006年2月18日午前10時頃であった。一方、数値計算によるマーカーの軌跡を確認すると、ほぼ同じ海域に停滞している様子が伺える。現地観測と数値計算における再現性が得られなかったが、漂流ブイが漂着した場所には、多くの流木やゴミが漂着しており、八代海における漂流物の終着駅の一つとなっていた。

(2) 現地観測と数値計算の再現性の検討

前項にて、漂流ブイは南下したものの、数値計算では漂流物が停滞するという相違点がでてきた。この点について検討するために、図-8に示すように両者の緯度の時間的変化に着目し、比較することとした。横軸は2006年2月11日午前0時を0としたときの時間経過、縦軸は漂流ブイおよび仮想マーカーのその時間における緯度を示している。また、図-9は、八代海北部の宇土半島の西端に位置する三角（図-1参照）における潮位変動の実測値⁷⁾を示しており、横軸は同様の時間経過を表している。図-8より、図-9に示す潮位変動に連動して、両者は上げ潮時には北方向へ、下げ潮時には南方向へ移動方向が変化していることがわかる。仮想マーカーではその連動が顕著であるが、漂流ブイについては、潮位変動に連動しつつも徐々に南方向へ漂流しており、風の影響を受けていると考えられる。図-10は、気象庁アメダスの八代における風向風速⁷⁾について、その南北方向の風速成分を抽出し図示したものである。縦軸の0点より上が北風の速度成分、下が南風の速度成分を示している。図より、ブイが南方向へと流されている36時間から48時間、120時間から180時間においては、北風が強く吹いている様子がわかる。逆に、南風が強く吹いている84時間付近と108時間付近には、北方向にブイが流されている。このように、漂流ブイは風によって大きくその漂流特性を変えられたと考えられる。

4. 漂流ブイの改良

以上のように、漂流ブイは風によって大きくその漂流特性が変化し、八代海の潮流特性を検討する際には、そのブイの動きが何を示したことになるのか、大きな疑問が残る結果となった。対象とする漂流物が、流木であるのか、生活ゴミであるのか、赤潮のようなプランクトンであるのか、それらによって流動特性が異なるので、対象によって異なる漂流ブイを用いる必要があると考えられる。

そこで今回は、漂流物として観測する対象を正味の潮流水塊に設定し、風の影響が少なくなるように考慮した、流体の流動となるべく近い動きをする漂流ブイに改良することとする。これまで、積載装置やその性能の問題から、図-11(a)に示す円筒型モデルを中心として研究を行ってきた。一方で、潮流

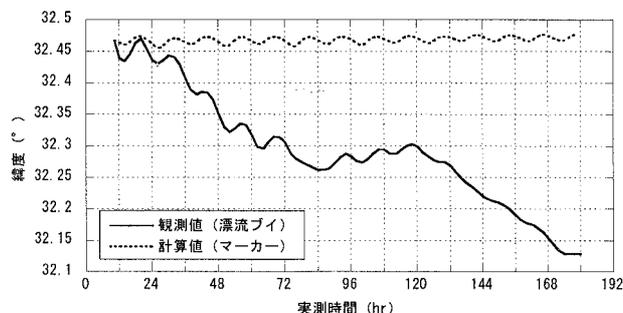


図-8 漂流ブイの南北方向の時間的変位

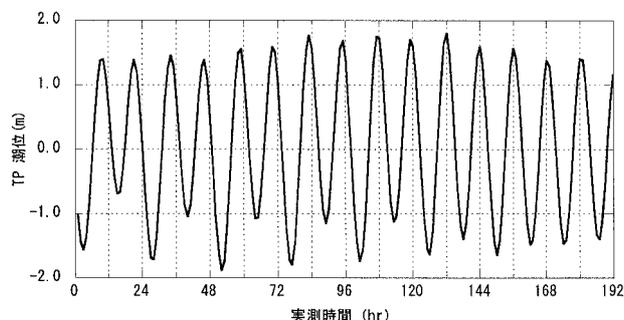


図-9 三角における潮位変動

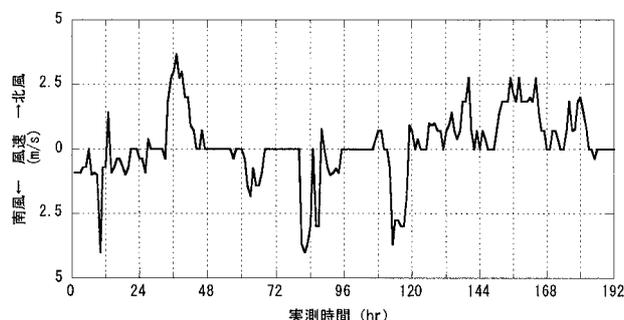


図-10 風速の南北成分の時間的変動

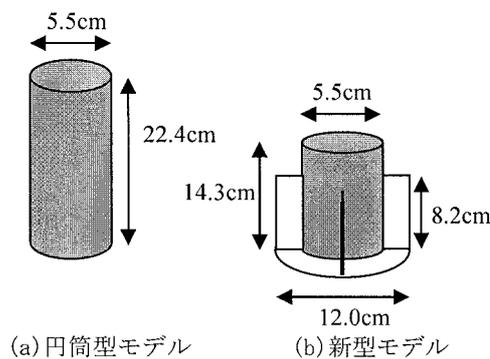


図-11 ブイの模型

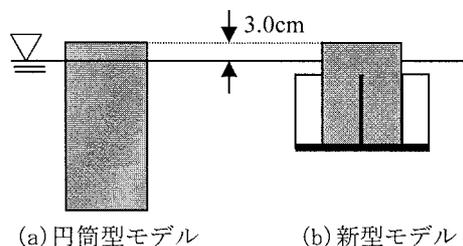


図-12 ブイ模型の静水時の状態

に対して従順な運動を行うブイ形状を開発する際には、ブイ水上部における表面積の増加により風の影響が増大する事、また、ブイ水中部における表面積の増加により水中の流体移動の影響が増大する事を考慮する必要がある⁸⁾。以上を考慮した上で、短い円筒型に、側面に4枚の翼と底面に1枚の円盤を装着した図-11(b)に示すブイ形状を提案する。このブイ形状について、水理模型実験を用いてその流動特性を確認する。

(1) 実験条件

実験に際しては、実験室で行うために漂流ブイの模型縮尺を小さくし、図-11に示す寸法を用いた。ただし、それぞれの水面からの突出長さは、図-12に示すように3cmと統一した。実験には、図-13に示す風洞装置を装備した2次元造波水槽を用い、風洞装置により風を発生させると同時に造波装置により不規則波を発生させ、その移動速度を計測することで、風と波がブイに与える影響を調べた。風速は追い風として断面平均風速 3.0m/s とし、入射波高は有義波高 0.073m、有義波周期 0.92s の不規則波を Bretschneider-光易型スペクトルをもとに作成した。また、流れ特性についても、図-14に示す2次元開水路装置を使用し、水槽内に水を断面平均流速 0.22m/s となるように流入させ、図-11に示すそれぞれの模型についての移動速度を測定した。さらに、水の流れに加えて風が吹いている状況による違いを検討するために、ファンを用いて水槽内に 4.8m/s の向かい風を吹かせた場合についても実験を行った。ただし、2次元開水路には風洞設備がないため、この風は水面から 0.5m の高さに水平に吹かせたものであり、風速についてはファンから 1.0m 離れた場所での計測結果である。

(2) 実験結果

表-1に実験結果を示す。それぞれの結果は、同一条件で5回測定した値の平均速度である。まず、風洞造波実験においては、波を起こさずに風だけをブイに作用させた場合、両モデルともほぼ同一の結果を得た。これは、水面上部の突出高さおよび形状が同じであるためであると考えられる。ただし、波を発生させた状態では、両モデルとも速度が速くなるが、(b)新型モデルの方が(a)円筒型モデルに比べて速度が遅く、波と風の影響が少ないことがわかる。これは、波による上下運動によって、(a)円筒型モデルは鉛直方向の振幅幅が大きくなり、水上部に突出する表面積が大きくなるために風の影響を受けて流されやすくなってしまいが、(b)新型モデルでは下部に取り付けた円盤の効果により上下の振動はそれほど大きくなり、水面上に突出する表面積は初期値に近いままであるので、風の影響を受けにくくなっているためである。さらに、この(b)新型モデルについては、波による水平方向への動揺もほとんど見られず、非常に高い安定性を有している事が確

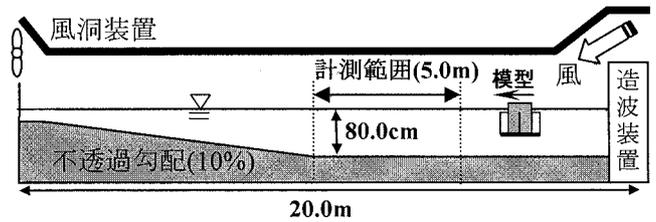


図-13 風洞造波実験装置図

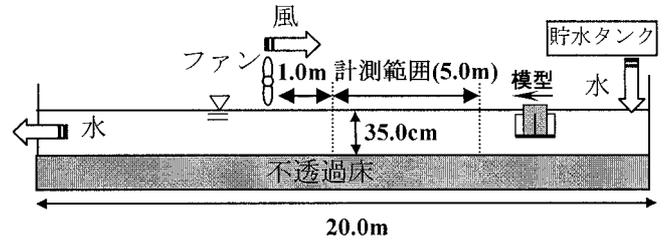


図-14 開水路実験装置図

表-1 水理模型実験結果

	風洞造波実験 (風あり)		開水路実験 (流れあり)	
	波無し	波あり	風無し	風あり
(a)円筒型 モデル	0.020 (m/s)	0.040 (m/s)	0.230 (m/s)	0.164 (m/s)
(b)新型 モデル	0.019 (m/s)	0.033 (m/s)	0.218 (m/s)	0.205 (m/s)

認できた。ブイ自体の動揺が小さいことで、ブイ内部の精密機器の損傷を防ぐことができるだけでなく、GPS アンテナが人工衛星を捉えやすくなることができ、機械的にも大きなメリットとなる。

次に、漂流ブイに対する流れおよび風の影響を開水路実験の結果をもとに検討する。まず、流れのみの条件で各形状を比較すると、どちらのモデルにおいても水塊の流速である 0.22m/s に近い速度を示しており、流れに対して純粋な動きをしている事が伺える。次に、ファンを用いて向かい風を発生させた場合には、両モデルとも向かい風の影響で速度が低下してしまうものの、(a)円筒型モデルは大きくその速度を落としているが、(b)新型モデルはほとんど速度低下が見られず、流れを的確に捉えている事が分かる。これは、模型側面に設置した翼が水中における表面積を増加させた事で、ブイが水中で受ける抵抗の増大に繋がり、水塊の流速に近い値を維持する事が可能となったためと考えられる。

以上のことより、風の影響に大きく左右されずに、純粋に潮流の流動特性を捉えることができ、その運動性も安定しているブイ形状としては、従来の円筒型ブイよりも、今回提案した図-11(b)に示すブイの方が、より最適な形状であると考えられる。

5. 結論

本研究では、八代海の潮流特性を調査するに際し、

数値計算と漂流ブイを用いた現地観測を行い、その漂流ブイの基礎的特性の検討とブイ自体の形状改良を行った。

以下に、主要な結論を示す。

(1)ODEM を用いた数値計算では、球磨川から八代海へ流入する漂流物については、八代海南方へは移動せず、八代海にて停滞するものや、大矢野島と天草上島の間を抜けて有明海へと流入しているものがほとんどであった。

(2) 漂流ブイによる現地観測では、漂流ブイは八代海を南方向へと移動したが、数値計算によるマーカーの軌跡を確認すると、ほぼ同じ海域に停滞しており、現地観測と数値計算における再現性が得られなかった。これは、漂流ブイは風によって大きくその漂流特性を変えられたためである。

(3) 漂流ブイが漂着した場所には、多くの流木やゴミが漂着しており、多くの種類がある漂流物の一つとしては、その動きを再現できていると考えられる。

(4) 漂流ブイが何の漂流物の動きを表現できているか具体性が無いため、計測する対象を正味の潮流水塊に設定し、風の影響が少なくなるように漂流ブイを改良した結果、従来の円筒型ブイよりも風や波に左右されにくく、その運動性も安定しているブイ形状を開発した。

謝辞：本研究は、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究(B)18310023 の交付を受けている研究であることを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 中辻啓二：大阪湾における残差流系と物質輸送，水工学シリーズ 94-A-9，土木学会水理委員会，pp. A9. 1-28, 1994.
- 2) 石塚正秀，中辻啓二：海峡部における人工的地形変化が内湾の流動解析に及ぼす影響の数値実験，海岸工学論文集，第 48 卷，pp. 1291 - 1295, 2001.
- 3) Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe : Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model, *A Global Model and a Regional Model Around Japan*, *Journal of Oceanography*, 56, pp.567-581, 2000.
- 4) J.E. Welch, F.H. Harlow, J.P. Shannon, B.J. Daly : The MAC method, A Computing Technique for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid Flow Problems involving Free Surface, *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Report LA-3425*, pp.145~, 1966.
- 5) 入江博樹，上久保祐志，三田長久：GPS 搭載漂流ブイを用いた八代海の潮流観測システムの開発，日本航海学会 Navigation 第 167 号，pp. 58 - 66, 2006.
- 6) 入江博樹，三田長久，上久保祐志，斉藤郁雄：GPS 搭載漂流ブイを用いた八代海の潮流観測システムと数値解析，電子情報通信学会信学技報，SANE2006-131，pp. 69-74, 2006.
- 7) 気象庁 WEB ページ，URL：http://www.jma.go.jp/
- 8) 福島繁樹：漂流予測の高度化のための基礎調査～風圧流と偏角について～，海洋情報部技報，Vol. 24，pp. 107-115, 2006.
- 9) 上久保祐志，上原功，山口洋，村上啓介，村上真章：八代海における潮流特性に関する研究，沿岸域学会研究討論会講演概要集，No. 18，pp. 68-71, 2005.
- 10) 村上啓介，上久保祐志，古松琢美，上原功：3次元流動モデルによる八代海の潮流特性の解析，海洋開発論文集，第 20 卷，pp. 1031-1036, 2004.
- 11) 上久保祐志，上原功，山口洋，村上啓介，村上真章：八代海における潮流の3次元流動解析，八代高専紀要，第 27 号，pp. 49-55, 2004.