GPSセンサネットワークを用いた表層流観測システムの開発と海水浴場への適用

Development of Surface Current Observation System using GPS Sensor Network and its Application to a Bathing Beach

芝田 浩¹・岡辺拓巳²・石川仁憲³・堀口敬洋⁴・青木伸一⁵・小峯 力⁶

Hiroshi SHIBATA, Takumi OKABE, Toshinori ISHIKAWA, Takahiro HORIGUCHI
Shin-ichi AOKI and Tsutomu KOMINE

The authors developed a new observation system to visualize the present status of the surface current in a bathing beach area, which utilizes GPS sensor floats and a network system that connects multiple sensors. This system can detect a real time trajectory and flow velocity of the GPS sensor floats to a computer, and can display the data on the screen. In this paper, the specification of the system and the results of its application to a bathing beach are described. In the observation, the GPS sensor floats and a person having a GPS sensor were floated together and compared.

1. はじめに

日本の夏季には、海水浴、サーフィン、釣り等、多くのマリネレジャーが親しまれており、特に沿岸域は海域利用者の憩いの場となり多くの利用者がいる。それ故に、沿岸海域での海浜事故が多発しており、時には尊い命が失われることも少なくない状況である。海上保安庁の海難事故統計によると、平成23年には1766名が海浜事故等に遭遇しており、事故内容の内訳としては遊泳中が266名、さらにその内死者・行方不明者数は91名であった（海上保安庁、2012a；海上保安庁、2012b）。これに対して、海浜事故を未然に防ぐための活動も盛んに行われており、全国各地の海水浴場やプール等では、事故防止のための監視や指導、救助等のライフセービング活動が盛んに行われている。ライフセーバーが活躍する約200海岸における統計情報によると、毎年約2000件もの救助が行われている（小峯 他、2009）。今後、沿岸海域のマリネレジャーによる観光産業、レジャー産業の拡大を推進するためには、海浜を利用する上での安全性の確保が必要となる。特に、遊泳中の事故の多くは、遊泳禁止海域や離岸流などの海浜流が存在する場所で多く発生していること、また、事故者の約4割がこれからの社会を支える18歳以下の若年齢層であることから、早急の事故防止対策をとる

必要がある。海水浴場で発生する海浜事故では様々な要因が考えられるが、その中でも人間が流される過程に対して表層近くを流れる海浜流が影響していると考えられている。しかし、沿岸海域における代表的な表層流として挙げられる離岸流、沿岸流などに対して既往の研究では、染料やハンディGPSを乗せたフロートのトレーサーによる調査（西 他、2004）や、計測機器による流況観測（出口 他、2006）等の方法によって研究されているが、いまだ未知な点が多い現象である。そのため、沿岸海域における海浜流の発生やその動態を明確に検知することは重要であり、海浜を安全で快適に利用するためには必要不可欠である（青木 他、2008；石川 他、2011）。

一方、近年無線通信技術やセンシング技術の発展に伴い、情報を効率よく収集するための手段として、無線センサネットワークが注目されている（Akyildiz 他、2002）。一般的に無線センサネットワークでは、センサを搭載する無線の端末（以下、センサノード）を空間に散在させ、互いに協調しデータを採取することで、その領域の状況や環境を把握する（図-1）。1つのセンサノードあたりの能力は非常に限られたものであるものの、ネットワーク全体で環境観測に対して機能を発揮するシステムを構築することができる。本研究では、複雑な条件が関連している沿岸海域の表層流の観測に対して、GPSセンサを搭載したセンサノードで形成される無線センサネットワークを用いた観測システムの適用について検討した。ここでは海水浴場での実際の利用を念頭に入れており、本システムを使用することで観測から結果を確認するまでをリアルタイムに処理できる。表層流の観測に対する無線センサネットワークの適用方法、実際に開発したシステムの構成及び、実現した機能について述べる。さらに、

1	修(工)	広島商船高等専門学校講師 電子制御工学科
2	正会員	博(工) 豊橋技術科学大学研究員 工学部建築・都市システム学系
3	正会員	工修 (一般財団)土木研究センター なぎさ総合研究室
4	正会員	(株)クレアリア 海岸部
5	正会員	工博 大阪大学大学院教授地球総合工学専攻
6	正会員	修(体) 流通経済大学教授スポーツ健康科学部

図-1 センサネットワークの概要図

システムの動作と実際の利用に対する確認のために実施した、2011年夏期の相良海岸（さがらサンビーチ）における実海域での観測とその結果から、実際の利用に対して考察した。

2. 表層流の観測とセンサネットワークの利用

海浜事故につながる表層流について、既往の研究において様々な方法で観測が試みられている。しかし、海の状態（海水温、流向流速など）、風向風速、気象条件（気温、気圧）、地形など複雑な条件が関連して発生するため、期待する現象を観測するのが難しい。さらに、一般的な流向流速などの計測機器を使用した観測では、解析が完了するまでをリアルタイムに処理することが難しいことから、海水浴の安全利用への適用に対しては、さらなる研究開発を必要としている。本研究では、センサネットワークを利用し、対象海域に放ったセンサノードが互いに協調しデータを採取することで、流況を把握する。

本観測システムでは、GPSを組み込んだセンサノードを搭載したフロート（以後、GPSフロートと呼ぶ）を観測域の波打ち際に多数放ち、表層流や風の影響により自由に移動できるように状態にする。GPSフロート上のセンサノードは、センサネットワークを形成することにより相互接続し協調してデータを観測することができる。センサノードは、GPSセンサで取得した信号から現時点での位置情報を一定間隔で求め、センサネットワークを経由してコンピュータへ送信する。ユーザは、コンピュータの画面上で、その位置データをリアルタイムに一括で取得することで、GPSフロートが移動する軌跡を確認することができる。さらに、得られたデータから移動速度を求めることで、海域の表層流を把握する（図-2）。

3. システム構成

海水浴場における表層流の観測システムの概要を図-3に示す。フロートGPSフロートには、GPSセンサを搭載したセンサノードを乗せている。センサノードは、GPSセンサ、マイコンボード、センサネットワークを形成するための通信デバイスから成る。GPSセンサで取得した人工衛星からの信号により現時点での位置情報を求める。さらにセンサノードは、搭載した通信デバイス

図-2 表層流観測システムの概要図

図-3 システム構成

(xbee)により無線センサネットワークを形成しており、求めた位置情報をネットワーク内に位置する唯一のコンピュータへ一定間隔で送信し続ける（Digi International, 2011）。以上のGPSセンサによる位置情報の取得、及び通信デバイスによる情報の送信などの処理をマイコンボードで制御する。

一方コンピュータ内部では、各GPSフロートからの位置情報をリアルタイムに受信し、その情報を用いて接続されたコンピュータでデータ表示のための処理を行う。コンピュータ内部では、通信ソフトウェアにより観測データを受信し内蔵のデータベース（以下、DB）へ格納する。得られたデータは、すべてDBで管理する。ユーザは、DBに格納されたデータを確認するために、コンピュータ上のデータ表示ソフトウェアを使用する。データ表示ソフトウェアでは、DBから検索条件に合致したデータを検索し表示するとともに、簡易的な地図上にプロットする（図-4）。地図情報は、国土交通省国土地理院（1998）のデータを使用した。このようにして受信した各時刻における位置情報から表層流の軌跡をリアルタイムに得ることができる。

図-4 システムのデータ表示画面

図-5 GPSフロートの形状

図-6 観測方法

図-7 観測方法

図-8 計測機器設置の概要

GPSフロートの形状を図-5に示す。GPSセンサは、人工衛星からの信号を受信しやすいことと、海の表層を人間が流される場合に近い移動の仕方をするように考慮し設計した。センサ端末の容器を取り囲むように発泡素材の浮きを配置し、GPSセンサが海面より上に出るようにした。さらに、表層の流れに追従するように、アクリルの抵抗体を十字に設置し、波による動揺に対して安定するようにボルトのおもりを設置した。ボルトの設置場所としては、人間の重心に近くなるように、GPSフロートの中心近くに配置した。

4. 観測の概要

(1) 対象海岸

静岡県相良海岸において、海水浴場として遊泳区域が指定されているさがらサンビーチ（図-6）を調査対象海岸とした。相良海岸は御前崎から約10km北方に位置して駿河湾に面しており、卓越風向は西～南西、卓越波向は東～南東である。同海水浴場は相良港～離岸堤背後を遊泳エリアとしており、相良港防波堤沿いや離岸堤間において離岸流の発生が報告されている。また、7～8月の2ヶ月間、ライフセーバー（相良ライフセービングクラブ）が常駐して利用者の安全を確保している。

(2) 観測方法

本システムを使用した現地観測は、下記のa) からd)までの手順にて実施した（図-7）。

- GPSフロートを持った人員（25個のGPSフロートを使用し13名の人員で実施）が、波打ち際に整列する。

- 腰の高さまで入水後、監視所からの合図によりGPSフロートを海上に放つ。
- 海上を浮遊しているGPSフロートからの位置データを、監視所にあるコンピュータでセンサネットワーク経由により一括で受信する。
- 一定海域に到達したところで、ボートを使用して人手によりGPSフロートを回収する。

また、上記の手順b)以降において、GPSフロートと共にGPSノードを持った人間も同時刻に漂流した。人間は、浮き輪の内側につかり、足を海底に向けて下けている状態で漂流した。GPSフロートの観測値と実際の人間の漂流との相関について観測した。

さらに、GPSフロートによる観測を実施した同じ時間帯に、計測機器を設置した（図-8、表-1）。1基目離岸堤の背後付近の碎波点の沖側に設置した（北緯34度40分55.1秒、東経138度12分21.0秒）。計測機器の流速計は水面下0.6m、波高計は海底から0.05mの高さにセンサが位置するように設置した。

5. 観測結果

(1) 風向風速と潮位

観測は、2011年8月16日17:04から17:57にかけて行なった。天候は晴れ、4～6mの西寄りの風が常に吹き、太

表-1 計測機器

観測項目	型名（メーカー）
流速	Infinity-EM（JFEアドバンテック）
波高	Compact-WH（アレック電子）

図-9 気象と潮位

平洋高気圧が張り出した気温の高い（日中の最高気温は30度以上）真夏日であった。御前崎（気象庁発表）における風向風速および潮位の平時変化を図-9に示す。観測を実施した時間帯には、5m/sを越える南西からの風が発生していた。

(2) 計測機器による波浪・流況の観測結果

計測機器における観測時の有義波高および有義波周期を表-2に示す。観測時は静穏であった。また、計測機器を使用した流速のデータについては、波浪の影響を除去するため有義波周期とほぼ同じ $t=8s$ で移動平均するとともに、南北成分と東西成分を位相面にプロットした。その結果を図-10に示す。このように流速のデータから流向は、北東方向へ向かう成分が卓越していた。

(3) GPSフロートによる観測結果

今回の観測では、GPSフロートが波や風によりその機能の実行を妨げられることもなく、位置情報を取得することができた。その結果、各GPSフロートが移動する際の軌跡をデータとして観測することができた。各GPSフロートから得られた位置情報を地図上へ時系列にプロットした結果を図-11に示す。遊泳区域付近の初期位置から、遊泳区域外の防波堤付近へGPSフロートが移動する軌跡を確認することができる。

また、GPSフロートの位置情報から平均の移動速度を求め、地図上に表示した結果を図-12に示す。四角でマークしたのが計測機器の設置場所である。本図より、GPSフロートの位置によって平均移動速度が異なっていることがわかり、海岸の南寄りに位置していたGPSフロートほど速度が速くなっていた。さらに、人間の漂流とGPSフロートの平均移動速度を比較すると、概ねGPSフロートの方が0.1から0.2m/s程度速い結果となった。

今回の観測では、その期間中の気象および海流の流れは穏やかであり、定常的な表層の流れの観測にとどまり、急激な沖向きの流れを伴うような危険な流れを観測することはなかった。

表-2 有義波高および有義波周期

項目	値
有義波高	0.29 m
有義波周期	$t=8.66$ s

図-10 計測機器による流況の観測結果

図-11 GPSセンサが移動した軌跡

図-12 GPSセンサの平均移動速度

6. システムを使用した観測と実利用へ向けた考察

(1) GPSフロートによる観測と人間の漂流について

今回の観測では、GPSフロートの位置情報から移動する際の軌跡をデータとして観測することができ、海水浴場の流況を観測することができた。GPSフロートの移動とシステムでの軌跡のデータは、一致していた。さらに、本システムを利用した観測結果と、同時刻に設置した計測機器のデータを比較すると、GPSフロートの移動方向と、計測機器のデータから得られた流速の卓越している方向は、一致している。ただし、流速の最大値は、GPSフロートの方が概ね0.1から0.2m/s程度速い結果となっている。これは、風の影響を受けているためと考えられ、観測時に卓越していた風向とGPSフロートの移動方向が、一致していることからわかる。これらのことから、本システムでは、表層の流況を観測することができたと言える。

またGPSフロートと人間が漂流する際の平均移動速度を比較すると、人間の方が0.1から0.2m/s程度遅い結果となっているものの、同様の軌跡を描いている。その原因としては、水中にある体積及び形状による流れに対する抵抗の違いに関連しているものと考えられる。そのため、人間の形状と同じような流体力学的特性を持つGPSフロートの形状にする必要がある。

(2) GPSフロートのネットワーク接続について

本システムを使用することで、観測データを取得できたが、観測結果(図-11, 図-12)を再度確認すると、データが密に得られている箇所と疎になっている箇所がある。これは、GPSフロートからの通信が輻輳状態になりコンピュータまで届かない状態になっていたことが考えられる。改善方法としては、通信デバイス内のファームウェアを変更し、センサネットワークのネットワークトポロジーをメッシュ状にすることで、ネットワーク内でのデータの消失を少なくすることが挙げられる。観測精度をより高めるためには、このような情報の欠損を無くすためのシステム改善が必要である。

(3) システムの操作性改善と実利用について

本システムの操作性を改善、表示プログラムの画面上で、各データ表示、地図上へのプロットとともに、各地点での平均移動速度を表示する機能、GPSフロート自体の操作性(スイッチ、電池交換方法等)を改善すること、モバイル環境(携帯電話、スマートフォン等)での確認機能が必要であると考えている。これにより、海水浴場での観測を、ライフセーバーや一般の方が容易に操作することができ、日々の業務やアクティビティとして流況の確認方法として活用できる。さらに、そこで観測されたデータにより、沿岸流の解析への貢献も期待される。

7. 結論

本研究では、複雑な条件が関連している沿岸海域の表層流の観測に対して、GPSセンサを活用した無線センサネットワークを用いた観測システムを開発することができた。本システムでは、海水浴場での実際の利用を考え、観測から結果を確認するまでをリアルタイムに処理し、視覚的に流れを表示できる機能を実装することができた。さらに、2011年夏期の相良海岸(さがらサンビーチ)における現地観測では、本システムの多数のGPSフロートを使用することで海水浴場の平面的な流れをリアルタイムに観測できることを確認した。これにより、海岸の波動場の状況把握による安全な海岸利用の直接的な評価ができるとともに、海浜での溺水事故の防止における実際の海水浴場で利用できるシステム実現の可能性を確認することができた。

今後は、GPSフロートの形状や操作性の改善により、観測精度の向上や、ライフセーバーにおける海水浴場の流況の確認に対する本システムの利用を検討する。これにより、本システムが海水浴場の安全利用に対して貢献することが期待される。

謝辞: 本研究では、現地観測にあたって相良サーフライフセービングクラブのご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 青木伸一・上野成三・西 隆一郎・小峯 力・石川仁憲・堀口敬洋 (2008): 海岸の安全利用からみた静穏時離岸流の現地調査-研究者、実務者と海岸利用者との連携の試み-, 海洋開発論文集, Vol. 24, pp. 255-260.
- 石川仁憲・岡辺拓巳・堀口敬洋・青木伸一 (2011): 静岡県相良海岸における静穏時の離岸流発生特, 土木学会論文集B3 (海洋開発) Vol. 67, No. 2, pp. 679-684.
- 海上保安庁 (2012a): 海上保安統計年報, 第62巻, pp. 39-41.
- 海上保安庁 (2012b): 海難の現況と対策について (平成23年版), p. 28.
- 国土交通省国土地理院 (1998): 数値地図2500 (空間データ基盤) 静岡-1, CD-ROM.
- 小峯 力・石川仁憲・風間隆宏・堀口敬洋 (2009): 海浜における水難事故の発生要因と予防策, 海洋開発論文集, Vol. 25, pp. 1335-1340.
- 西 隆一郎・山口 博・岩淵 洋・木村信介・村井弥亮・徳永企志・古賀幸夫 (2004): 宮崎県青島海岸での離岸流観測-水難事故予防のために-, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 151-155.
- 出口一郎・吉井 匠・野村尚生・荒木進歩 (2006): 離岸流の時間変動特性について, 海岸工学論文集, Vol. 53, pp. 101-105.
- Akyildiz, I. F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci. (2002): A survey on sensor network, IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, pp. 102-114.
- Digi International (2011): XBee/XBee-PRO ZB RF Modules, 138 p.