

様式3

愛媛大学沿岸環境科学研究センター  
共同利用・共同研究拠点「化学汚染・沿岸環境研究拠点」  
共同研究報告書

平成 29 年 2 月 15 日

化学汚染・沿岸環境研究拠点 拠点長 殿

申請者（研究代表者）

所属機関 \_\_九州大学応用力学研究所\_\_

職 \_\_教授\_\_

氏名 \_\_磯辺篤彦\_\_

下記の共同研究について、別紙の通り報告します。

1 研究課題

沿岸海洋前線・河川前線の微細渦構造に関する研究

2 研究組織

氏名	所属	職	分担研究課題
代表者 磯辺篤彦	九州大学・応用力学 研究所	教授	沿岸海洋前線・河川前線の微細渦 構造に関する研究(統括)
分担者 木田新一郎	同上	准教授	同上(解析)
岩中祐一	九州大学総合理工 学府	博士課程 3年	同上(観測と解析)
拠点対応教員	森本昭彦	教授	

3 研究内容 (別紙)

沿岸海洋前線・河川前線の微細渦構造に関する研究

磯辺篤彦・木田新一郎(九大応力研)・岩中祐一(九大総理工)

研究協力者：山本悠真(九大総理工)・宮尾泰幸(九大総理工)

## 1. 研究目的

近年、性能の向上や価格の低下と共に、研究だけでなく一般にも広く使われるようになった自律式無人航空機(ドローン)は、小型化され持ち運びが容易となって、撮影域の設定にも自由度が高い。また、性能の向上を目指した開発も活発であるため、メーカーのサポートも手厚い。その結果、測量や建造物の点検など、広範囲の利用が進んでいる。しかし、持続飛行時間が一般的には20 - 30分程度と短いこと、海上で使う際には、落下した場合の回収が容易でないこと、装置の防水化が必要との理由から、海洋学分野での利用は進んでいないのが現状である。

本研究では、バルーン空撮を用いた低高度リモートセンシングを実施する。バルーンに熱赤外カメラを搭載し、これを観測船で曳航しつつ目的となる海洋前線域を観測する。低高度(< 150 m)からの撮影となるため、人工衛星のように雲の影響を受けることなく海表面温度を高い分解能(~10 cm)で観測できる。また、ヘリウムガスを詰めたバルーンは動力を必要とせず、長時間の観測が可能である。そして他のリモートセンシングより比較的安価に観測を行うことができる。

## 2. 研究内容

本研究で用いたバルーン(SKY CATCHER, MHI Ship & Ocean Engineering Co.,Ltd : 図1左)の内部にはヘリウムガスが充填されている。バルーン下部に可視画像と赤外画像を同時に取得できる重量300gの小型熱赤外カメラ(Thermo Shot F30s : 日本アビオニクス)と、カメラを内包する通信機器を備えた箱(以降：カメラユニット)を取り付けている。観測船から曳航しつつ、高度を最大で200m程度まで揚げて海表面を撮影する。カメラユニットには二つのサーボモータが搭載されており、船上ユニット(図1右)から撮影角度を変えつつシャッター操作が可能である。カメラのアングルやシャッターは、船上からアンテナを介して送信される可視映像をモニターを見ながら操作する。バルーンは船上に備え付けた電動リールと釣り糸を介して繋がっており、釣り糸の長さを変えることにより、自由に高さを調節することができる。緒言で述べた通り、これまでは取得した画像の射影変換のために空撮と同時に海上

に20個以上のGPSブイを撒いて観測を行っていた。これは画像上に四つ以上のGPSブイが含まれる状態で撮影することで、そのブイのGPS座標を使った最小2乗法による射影変換を行うためである(Kako et al.,2012<sup>[1]</sup>)。本研究ではGPSブイを撒くことなく、バルーンのみでスタンドアロンに観測が行えるよう、新たに傾斜センサを導入した。バルーンが支えることのできる重量の関係上、小型で軽い必要がある。本研究ではカメラユニットにマイコン(以降:GPS傾斜センサ)を装着させた。これは、Raspberry Pi Model B+(ラズベリーパイ財団製)に方位・傾斜センサ(三軸デジタル・コンパスモジュールHMC6343:ストロベリー・リナックス社製)とGPSセンサ(Adafruit Ultimate GPS HAT:スイッチサイエンス社製)を搭載したもので、1秒ごとの時刻とGPS位置座標、そして高度と、ロール角や、ピッチ角、さらに方位角をメモリに記録する。また、Raspberry Piを動作させるための小型バッテリーも搭載した。

カメラや人間の眼のように、中心投影によって得られる画像は平面に直交して撮影しない限り、幾何学的に元の平面から歪んでいる。そのため、海面に直交するよう、幾何補正の必要がある(射影変換処理)。写真上の位置と海面の関係は図2に示される。小文字の $w, u, v$ はカメラ座標、大文字の $W, U, V$ は海面上を基準とした座標である。例えば本研究の成果でもあるMiyao and Isobe(2017)<sup>[2]</sup>は、GPSブイの位置座標を用いて最小二乗法によって射影変換を行った。今回の研究では、カメラに搭載したGPS傾斜センサが記録したロール角( $\omega$ )と、ピッチ角( $\phi$ )、そして方位角( $\kappa$ )と、高度( $w$ )、加えて位置情報を用いて以下の式に従って射影変換を行った。

$$\begin{bmatrix} U_p \\ V_p \\ W_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \end{bmatrix}$$

ここで下付き添え字の $p$ は任意の位置座標、 $0$ はカメラの位置座標を表している。

以上のようなシステムによって、2016年8月1日と2日に図3左に示す海域で「いさな」によるバルーン空撮を行なった。



図1 バルーン空撮システム。左図において、船上から空に掲げるバルーンと高度を上げ下げする電動リール。そして赤外カメラを搭載したカメラユニット。右図はバルーンに搭載されたカメラからの映像を見ながら操作する。モニタ、コントローラ、アンテナを示す。

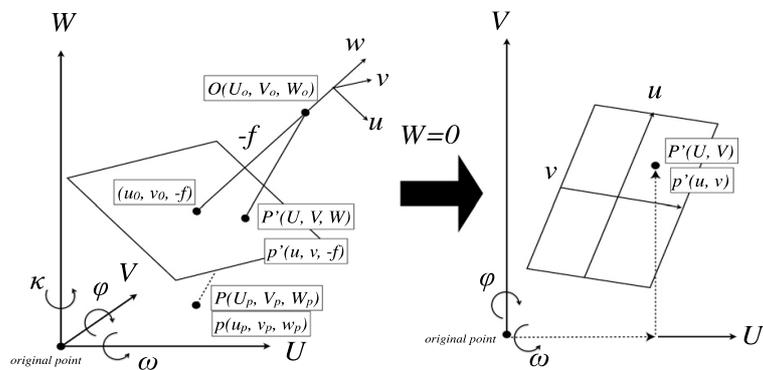


図2 海面とカメラの位置関係。小文字の  $w, u, v$  はカメラ座標、 $W, U, V$  は海面上を基準とした座標

### 3. 研究成果

図3は、「いさな」による観測海域と、観測初日に見つけた漂流物の集積域(前線域：緯度 33.805；経度 132.467 周辺)を上空 150m からバルーンを使って撮影した赤外画像(射影変換済)である。メディアン・フィルタとラプラシアン・フィルタを1回ずつかけて平滑化したのち、 $0.2^{\circ}\text{C}$ ごとに等値線を描いた。観測船はバルーンを曳航しつつ収束域とともに南進している。二本の「紐状暖水帯」を観測することができた。平行に伸びる二本の暖水帯は、ある波長を持った何らかの波動構造の峰であることをうかがわせるが、波峰に海面紐状暖水帯を伴う沿岸の波動現象に既存観測報告は見当たらず、これは既存観測にはなかった低高度のバルーン空撮を導入した本研究による新たな沿岸過程の発見かもしれない。二本の暖水帯とは別に水平規模が 5 - 10 m 程度の「微小暖水塊」が散見され、周囲との温度差が  $1^{\circ}\text{C}$  を超えるものも確認できた。これは本研究で用いた熱赤外カメラの分解能の 10 倍であって、温度の絶対値を断定することはできないものの、何らかの物理構造を示す空間偏差であ

ることは明白である。

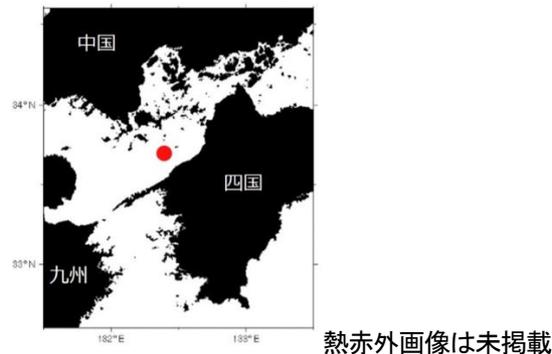


図3 前線域の観測域(左)と熱赤外面像(右:ウェブ版報告書では未掲載)。空間スケールを右下に記載している。

観測二日目に収束域並走観測を行った(緯度 33.726 ; 経度 132.4365 周辺)。長く伸びた収束域に沿ってバルーンを曳航することで、射影変換を行った複数の熱赤外面像を重ね合わせ、広範囲の SST マップとして収束域形状の全体像を把握する。速度 3 ノット程度を維持したまま、漂流物の集積が目視で判別できなくなるまで 30 分ほど収束域に沿って曳航し、約 20 秒に一回のバルーン空撮を行った。射影変換後の画像を並べたものを図 4 に示す。暖水域と冷水域が収束域に沿って続いており、また、ここでも空間規模が 5 - 10 m 程度の微小な渦構造も確認することができた。さらに冷水域と暖水域の境界は明確な海洋前線構造を呈しており、これが数 100 m 程度の曲率半径で湾曲している様子が見て取れる。

未掲載

図4 前線域の熱赤外面像(ウェブ版の報告書では未掲載)。

#### 4. 今後の課題

本研究では GPS 傾斜センサを使うことにより、GPS ブイを使うことのないバルーン空撮のスタンドアローン化に取り組んだ。その結果、海面収束域周辺における広範囲で、水平解像度が 20 cm の SST マップを作成することができた。そして、紐状暖水帯や空間規模が数 m 程度の微小渦構造や、前線の湾曲、これに伴う渦構造を可視化した。

ただ、熱赤外カメラの視野角が狭いことや高度に限界があるため、広範囲の SST

分布を現場で把握できない欠点があった。そこで、改善策としてバルーン観測と共に熱赤外カメラを搭載したドローンを導入し、強い収束域を示すような特定の領域を中心に、広範囲を高い機動力で全体を捉える観測システムの構築を提案する。また CTD 観測を同時に行うことで、海洋の内部構造も把握できると期待される。この際、継続性のあるバルーン空撮は、本研究で実施した追従観測のような、時間変化の観測に用いればよい。空間分布を観測するドローン観測と併用することで、多くの新たな沿岸海洋過程の発見につながる期待がある。

### 参考文献

- [1] Shin'ichiro Kako, Atsuhiko Isobe, Sinya Magome, Low altitude remote-sensing method to monitor marine and beach litter of various colors using a balloon equipped with a digital camera, *Marine Pollution Bulletin*, 64, 1156-1162, 2012
- [2] Miyao, Y., and Isobe, A., A combined balloon photography and buoy-tracking experiment for mapping surface currents in coastal waters, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 1237-1250, 2016

### 5. 成果発表

#### 論文

- [1] Miyao, Y., and Isobe, A., “A combined balloon photography and buoy-tracking experiment for mapping surface currents in coastal waters” , *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 1237-1250, 2016.06
- [2] Miyao, Y., and A. Isobe “An attempt to visualize coastal oceanic features using an infrared camera suspended by a balloon” *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, in press.

#### 学会発表

- [1] 山本悠真, 磯辺 篤彦, バルーン空撮による沿岸海洋過程の熱赤外リモートセンシング - スタンドアローン化の試み, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016.09.14.
- [2] 岩中祐一, 磯辺 篤彦, 河川プルームの厚さを決める非静水圧応答について, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016.09.14.