気球搭載用簡易分光カメラを利用した アマモ分布図作成のための基礎実験

A BASIC EXPERIMENT FOR MAPPING OF EELGRASS DISTRIBUTION USING THE BALLOON WITH THE SIMPLE SPECTRAL CAMERA SYSTEM

大前和広¹・作野裕司²・田中義和³・國貞栄二⁴・田中力⁵・ルイ ソチエー¹ Kazuhiro OMAE, Yuji SAKUNO, Yoshikazu TANAKA, Eiji KUNISADA Tsutomu TANAKA and LUY Sochea

1学生会員		広島大学	大学院工学研究科(〒73	39-8527	東広島市鏡山1-4-1)
2正会員	博(工)	広島大学助教	大学院工学研究科(〒73	39-8527	東広島市鏡山1-4-1)
3	博 (情)	広島大学助教	大学院工学研究科(〒73	39-8527	東広島市鏡山1-4-1)
4		広島大学	大学院工学研究科(〒73	39-8527	東広島市鏡山1-4-1)
5		広島県	環境部環境対策局 (〒73	30-8511	広島市中区基町10-52)

A basic experiment for mapping of eelgrass distribution using the balloon with the simple spectral camera in this research was conducted. The field survey station was selected to the Yoshina Tidal Flat in Takehara, Hiroshima Prefecture. As a result, the following matters were clarified. 1) The characteristic for the spectral reflectance of the eelgrass appears in the wavelength at 450nm, 500nm, 650nm, and 700nm<. 2) A strong correlation was observed the relationship between the reflectance ratio (533nm and 440nm; 533nm and 620nm; 620nm and 720nm) and the area ratio (index of the density). 3) The width of the observation and the spatial resolution of the balloon were provisionally calculated as 17m and 13mm. 4) Strength of the balloon rope used was measured with about 1000N. 5) The infrared composite color image of the eelgrass taken with the simple spectrum camera was clearer than the natural color composite image.

Key Words: remote sensing, eelgrass, balloon, spectral reflectance

1. はじめに

近年,地球温暖化や都市化に伴い急速に多くの藻場が 消滅しつつあり,藻場の実態調査が急務となっている. しかし,ダイビング等を伴う現地調査には多大な労力と 費用がかかるため,調査の多くはごく一部の地域に留 まっており,更新作業も容易ではなかった.このような 調査の労力を軽減するために広域の調査を素早く行える リモートセンシング(RS)手法が期待されている.

このような状況下で、古くから利用されている航空写 真の目視判読から最近では超高解像度の衛星画像や音響 探査による藻場の広域分布把握研究が増加してきている ^{1),2),3)}.本研究の対象地域付近でもLandsatやラジコンヘリ による藻場分布把握が試みられている^{4),5)}.このうち、 航空写真による藻場分布の正確な判読は非常に高解像度 で藻場の分布を把握することができるという利点はある が、その判読は一部の専門家の技術や経験によるところ が非常に大きい.また通常の航空写真では可視光のRGB 画像であることが多く、分光特性を考慮したデジタル解 析的な処理による研究も非常に少ない.一方,人工衛星 に搭載されたセンサでは雲や大気の影響除去が困難であ ることや解像度の低さ等が大きな問題となっている.さ らに航空写真や衛星画像による藻場分布推定に共通する 問題点として,「研究者が欲しい時期のデータが必ずし も繰り返し得られるとは限らない」点にある.そのため, 航空写真や衛星画像では藻の季節変化や経年変化を十分 捉えることができなかった.また,音響探査機による調 査は水中の3次元的な情報を得られるため,非常に有効 な調査法であるが,比較的高価な調査用の機材と調査船 が必要であり,広い範囲の藻場分布図を作成するには, 多くの測線を調査しなければならない等の欠点がある.

以上のような背景から,筆者らは航空機や衛星, ラジ コンヘリ,音響探査と共に有力な藻場分布調査法の一つ として,比較的安価で繰り返し観測が可能な気球をプ ラットフォームとした藻場分布図作成システム開発の基 礎実験を行った.具体的には,従来比較的研究例が少な い(特に我が国では)藻の分光反射率特性を把握すると ともに,藻の観測を行うために必要な気球搭載型の簡易 分光カメラシステムを開発し,実際の藻を撮影した場合 に得られる結果と問題点について議論する. 今回は多く の藻場のうち,近年特に研究が盛んなアマモ場を対象と する.

2. 研究地域について

本研究の対象地域は図-1に位置する,広島県竹原市に ある吉名干潟(北緯34度18分,東経132度51分)である. 同地区周辺は瀬戸内海に面した温暖な気候であり,潮汐 差は最大で3.5m程度である.アマモ場調査地域に近い竹 原港おける天文潮位の例を図-2に示す.このうち分光反 射率測定等のための現地調査は,海岸部の潮位が約 50cm未満となる干潮時に行った.また吉名沿岸の藻場 は少なくともアマモ場,ガラモ場,アラメ場等が存在し ⁹,アマモは春〜秋にかけて同地区の海岸部で比較的容 易に観察,採取することができる.また本地域における 藻場の存在する水深は概ね10mより浅い場所である (図-1参照).







3. アマモの分光反射率特性

(1) 方法

今回の分光反射率測定で使用した分光計はEKO社, MS720(波長間隔3.3nm,波長分解能10nm,出力単位W/ m²/µm)である.照明は太陽光で,反射率は白色板(標 準板)と試料の放射輝度比とした.ただし白色板は完全 拡散面と仮定する.また実験方法としては,干潮時を想 定した水槽中(水槽は野外に置いた)の藻場試料の真上 に分光計を設置し,各5回ずつ放射輝度を測定し,平均 化処理を行った.分光測定条件としては,分光計の開口 角10°,測定距離10cmと固定した.アマモの密度の指 標となる面積比は試料上等距離から撮影したカメラ画像 を二値化(白黒画像化)処理することにより算出した. その結果,図-3に示すアマモの面積比は7,34,53,58, 60%となった.



(2) アマモの分光反射率特性

今回実験水槽で測定した白色板とアマモの分光放射輝 度を図-4に示す.実際には図-4の両者の値を割ることで 反射率を算定している.また、図-5はアマモの典型的な 分光反射率測定結果である. アマモの分光特性は概略的 には、短波長側から長波長側に向かって、400-500nm (青) で低く, 500-600nm (緑) でやや高く, 600-700nm(赤)で再び低くなり,700nm以上(近赤外)で 非常に高くなるという陸上植物の分光反射率⁷とほぼ同 様の特性を示した.また青と赤(特に680nm付近)の低 反射率は葉に含まれるクロロフィル色素の吸収の影響で ある. これより, 450nm, 500nm, 650nm, 700nm以上付 近の写真を取得すれば少なくとも干潮時のアマモの分光 特性を再現することができると考えた、しかし、後述す るように、今回気球に搭載する分光カメラのフィルター は市販されているバンドパスフィルターの波長が限られ ているため、実際には440nm、553nm、620nm、700nm (以上) 付近のフィルターを使って、アマモの分光特性 をカメラで捉えることになる.

図-6はそれぞれアマモの面積比別の分光特性を示して いる.図-6より,面積比7%の分光特性は他の試料と比 べてやや乱れているが全体として概ね図-5と同様の特性 を示している.次に,図-7,図-8に今回用いるバンドパ スフィルターの中心波長の反射率(単波長)および反射率 比(様々な組み合わせで特に相関が良かったものだけ掲 載)の関係をそれぞれ示す.これらの図から反射率ある いは反射率と面積比の相関は極めて高いことがわかった (相関係数0.8~1.0).反射率と比べて反射率比の方が面 積比の相関係数が高い理由は,面積比が高いほど植物の 特有の反射・吸収特性が現われ,かつ比をとることで入 射光量の角度依存性等のノイズ影響を取り除くことがで きるからだと考えられる.これより,気球搭載分光カメ ラからアマモの面積比(密度に相当)を推定することが 可能であると考えられた. 一方,アマモの計測だけでは特徴的な分光特性が把握 したとは言えないため,現地においてアマモ以外の藻の 分光特性も調べ,比較した(図-9).その結果,絶対値は 若干異なるものの,3種とも分光形状はほぼ同じである ことがわかった.したがって,今回搭載する気球の4波 長を撮影するカメラからはアマモと他の藻を区別するこ とは難しいと判断された.







4. 藻場観測のための気球観測システム

(1) 気球観測システムの光学系

本研究で使用される観測システムの光学系を図-10に 示す.また写真の縮尺M(通常は逆数の1/mとして称さ れる)は以下のような式で表される.

$$M = \frac{1}{m} = \frac{L'}{L} = \frac{f}{H} \tag{1}$$

ここで, L' はカメラの画枠, Lは撮影距離, f はカメラ の焦点距離, Hは撮影高度である. 現在,筆者らが想定している気球による藻場観測の観 測幅は,数十m(沖方向)×数百m(海岸線方向)の範 囲である.今,筆者らが所有するカメラおよび気球高度 の条件は式(1)のパラメータに従うと,「L'=6mm, H=200m, f=70mm」である.これより撮影距離Lの算出 過程を示すと,以下のような式となる.

$$L = \frac{L'H}{f} = \frac{6 \times 10^{-3} \times 200}{70 \times 10^{-3}} = \frac{120}{7} = 17.1$$
(2)

これより1回の測定につき約17m四方が撮影されること がわかる.また今回使用したカメラの解像度は1280ピク セル(横方向)であるから,地上解像度は17/1280で約 13mmと計算され,超高解像度衛星の解像度1mよりかな りすぐれた解像度で,藻場の観測が可能となる.実際に はこのような観測幅,解像度で観測船等を牽引してス ポット撮影を繰り返し,数百mの海岸線の藻場を撮影す る計画である.



図-10 観測システムの光学系

(2) 気球の選定と位置決定装置

研究目的にあった藻場観測の気球を選定するに当たり モジュールの重量を概算した.モジュールの構成部品は, GPS(0.6kg),フィルター(0.25kg),カメラ(0.6kg),ドライ バー類(3.7kg),パソコン(1.4kg),モータ(1.7kg),ケーブ ル(3kg),計11.25kgである.このような重量とモジュー ルの部材などを考慮するとおよそ総重量は15kgとなる. そこで,今回は直径3600mm,高さ1250mm,体積37.2m³, 浮力20.5kgの気球を選択した.また気球位置決定として のGPSシステムは市販のGPS補正付姿勢方位基準装置 (NAV420CA)を用いた.このGPSを載せた別の気球

(テスト用のコンパクト気球)を使ってテストフライト した際のGPSデータによる気球高度の時系列データ例を 図-11に示す.

テストフライト時のロープの長さは150mであり,ほ ぼ完全に伸びた状態で試験を行っており、このGPSが上 空でも機能している様子が確認された(ただし上空の風がありロープがやや斜めであるために、実際の高度は 130-140mとなった).



(3) 気球ロープの強度

気球の係留用ロープの強度(破断荷重)を調べるため 引張試験機(島津製作所のAG5000D)を使用して引っ 張り試験を行った.ロープを金具に設置し,金具を試験 機のチャックに取り付けた.ロープは金剛打ちφ6mmで ある.試験開始の初期は5mm間隔で変位を増加させ、あ る程度荷重が上がった後は2mmもしくは1mm間隔で変 位を増加させていった.変位を増加させた直後は、荷重 がおちる現象が生じるため、変位を増加させるたび、荷 重を落ち着かせるために15分程待ち時間を設け、破断す るまで計測をおこなった.

計測結果を図-12に示す. 試験体数は3本であり, 図中の伸び率とは変形後の長さを元の長さでわった値である. 試験体の全長はそれぞれ1回目が10cm, 2回目が9cm, 3 回目が8.5cmである. 引張強さはそれぞれ1回目が1365N, 2回目が1090N, 3回目が1370Nであった. 各実験で900N あたりから内部のロープが部分的に破断し, 完全に破断 するまでにロープの全長が1.7倍ほど伸びているのが確 認された. 以上のことよりロープは1000Nほどの荷重に 耐えられるため, 前述した浮力20.5kg (約200N) には十 分耐えられることが確認された.



(4) 気球搭載カメラの概要

今回研究で開発した回転式フィルター部分の装置はス テッピングモーターを使って、ガラスフィルタを取り付 けたアルミ板を回転させる簡単な構造になっている (図-13).使用したデジタルカメラは「The imaging

Source Europe Gmb社製」の「モノクロFire wireカメラ (HDMK41BF02)」で、レンズはNikon社製「AF Nikkor 50mm F1.4D」である.一方、使用したガラス フィルタはTOKIA社のバンドパスフィルターである.使 用したガラスフィルタの詳細を表-1に示す.今回はこれ ら5枚のガラスフィルタを組み合わせることにより、4種 類のバンド(中心波長440nm,553nm,620nm,700nm の4チャンネル)の画像を取得できる設計となっている.



図-13 回転式カメラフィルターの構造

表-1 使用したバンドパスフィルターの諸元

	フィル ター径	厚さ	透過率	透過波長
B-440	50mm	2.5mm	0.40	440nm
G-533	50mm	2.5mm	0.55	533nm
R-62	50mm	2.5mm	0.50	620nm<
HA-50	50mm	2.5mm	0.50	NIR cut
R-70	50mm	2.5mm	0.40	700nm<

5. 簡易分光カメラによるアマモ場擬似観測試験

(1) 簡易分光カメラによる画像シミュレーション

気球に搭載されるカメラシステムのテストとして,広 島大学実験室での予備撮影実験を行った.実験は実験室 内のクレーンでモジュールを吊るし,約4mの高さから 実施した(図-14).今回の被写体は,吉名干潟で実際 に採取したコアマモを用いた.

カメラシステムによる撮影画像を図-15に示す.図-15(e)の自然画像 と図-15(f)の赤外線画像は,それぞれ 図-15(a)~(c)および,図-15(b)~(d)の画像を合成して作 成された画像である.画像は図-5で示すような分光特性 どおり,440nmで特に暗く写り,700nmでは特に明るく 映っており,(e)の自然色カラー画像と比べて(f)の赤外カ ラー画像がより明瞭なアマモの葉を捉えることができる ことがわかった.ただし,これは現場において潮位が低 い状態におけるアマモ撮影に対して有効であるというこ とに注意する必要がある.



図-14 カメラシステム

(b) 553nm

(a) 440nm



図-15 バンドフィルター付カメラによる撮影画像

(2) 吉名地区における現地気球実験

図-16(a) に、吉名干潟における藻(アマモ)の分光画 像の撮影実験風景を示す.ただし当日は、気球安定性の 問題およびカメラシステム操作の問題で上空からの撮影 において解析可能な情報が得られなかった.そのため、 今回は図-16(b)に示すような方法で1mの高さからアマモ を撮影した分光画像のみを図-17(a)~(d)に示す.図-17 より、若干画像間の明暗が不明瞭であるが、現地藻場に おいても図-15と同様の画像強度の分光画像が得られる ことが確かめられた.しかし、実際の気球での観測にお いては飛行安定性やカメラシステムの操作性などに問題 がある.そのため、現在、風に強い新型気球を新たに購 入し、カメラシステムも改良する等して、分光画像取得 実験を継続中である.



図-16 空撮風景(a)および高さ1mからのアマモ撮影風景(b)



図-17 現地におけるカメラ画像

6. まとめ

本研究では比較的安価で繰り返し観測が可能な気球を プラットフォームとした藻場分布図作成システム開発の ための基礎実験を行った.その結果,まずアマモの基本 的な分光特性や面積比の変化による分光特性の違いを把 握した.また藻場観測のために必要な気球システムの光 学系や気球の選定,位置決定,気球係留ロープの強度に 関わる各種パラメータの試算あるいは実験を行った.さ らに実際気球に搭載する簡易分光カメラシステムを開発 し,藻場観測に必要な室内実験ではアマモの明瞭な画像 を取得することを確かめた.しかし,現地における気球 搭載カメラによる藻場観測は天候の影響等で今回は高さ 1mからの撮影画像の掲載のみとなった.

今後は、カイツーン型気球等,悪天候(特に風)に強い気球を用いて、現地で空撮を行うこと、また観測日の 状況(日射量や透明度など)に応じた手法など、より精度 の高いアマモ分布図作成システムの開発を推進していく つもりである.

謝辞:本研究は、「平成18年度環境技術開発等推進費」および「平成18年度科学研究費補助金(若手研究
(B))」の助成を受けて行われた.また本研究を遂行するにあたり、国立環境研究所の山野博哉博士、松永恒雄博士、広島県環境保健協会の杉本憲司氏には多くのご助言をいただいた.また、藻場の現地実験に関して関西気球の若松芳樹氏、(株)中国工業開発の岡田隆政氏、広島大学大学院工学研究科物質化学システム専攻グリーンプロセス工学講座の関係各位に大変お世話になった.記して謝意を表す.

参考文献

- 楠山哲弘,高木哲夫,林誉命,黄金崎清人,神野宏樹, 鳴海日出人:藻場(リシリコンブ)のリモートセンシン グによる分布域の推定-網走港周辺海域-,海洋開発論 文集,23, pp.555-560,2007.
- 松田斉久,吉田勝則,丹波幸一,山田文人,吉田徹,鳴 海日出人:衛星画像と音響測深機を利用したアマモ場分 布域の把握-霧多布港周辺海域,海洋開発論文集,23, pp.561-566,2007.
- Paringit, E. C., 灘岡和夫, M. D. Fortes, 波利井佐 紀・J. J. Strachan, 田村仁, 三井順, 中山哲嚴:藻場 キャノピー光学モデルと高解像度衛星画像による海藻藻 場のマッピングと現地検証,海岸工学論文集, 50, pp. 1386-1390, 2003.
- 4) 宮野忠文,佐野誠,長谷川浩治,馬場祥宏,小黒剛成, 相田聡,千葉良三:リモートセンシング画像による藻場 分布把握技術の開発(第1報),広島県立西部工業技術 センター研究報告, No. 48, pp. 13-16, 2005.
- 5) 宮野忠文, 佐野誠, 長谷川浩治, 馬場祥宏, 小黒剛成, 相田聡, 千葉良三: リモートセンシング画像による藻場 分布把握技術の開発(第2報), 広島県立西部工業技術 センター研究報告, No. 49, pp. 12-15, 2006.
- 広島県,平成4年度沿岸海域藻場・干潟分布調査報告書, 2003.
- 7) 吉村晴佳,葉齢による樹葉の近赤外域分光特性と重なりの効果、日本リモートセンシング学会誌,18(1),pp.42-56,1998.

(2007.9.30受付)