

実海域における水中ビデオ画像の特性について

古川 恵太*・細川 恭史*

1. はじめに

近年、可視化された情報が注目され、研究のアウトプットとして利用されてきている。海域での各種調査においても、水中ビデオカメラによる水中撮影が従来の分析的調査と平行して行われるようになってきた。しかし、撮影法に関しては統一された方法がなく、得られた画像の評価法も確立されていない。そのために、異なる条件で撮影された画像の比較は難しく、多くの情報が活用されないままに残されている。

本論文では、水中ビデオ画像の特性を抽出し、活用できる情報として画像を収録する方法を検討するために、①海域における光の伝達モデルを構築し、水槽実験によってモデルの検証を行う。②この光の伝達モデルに基づいた簡易な画像のキャリブレーション法を提案する。③実海域における画像を用いて、その撮影状況と得られる画像の特性を色・空間周波数の観点から整理する。

2. 水中における光の伝達モデル

2.1 光伝達モデルの構成

本論文で用いた光の伝達モデルは、図-1 に示される概念図をもとに

$$Q_{in} = Q_{01} + k_1 \cdot Q_{11} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{ot} = Q_{02} + k_3 \cdot Q_{12} \dots \dots \dots (2)$$

とした。ただし

$$Q_{01} = Q_{01}' + Q_{01}'' \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_{02} = Q_{02}' + Q_{02}'' \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_{12} = k_2 \cdot Q_{in} \dots \dots \dots (5)$$

である(細川ら, 1990)。

Q_{in} は、撮影対象前面における光強度であり、 Q_{ot} はカメラ前面における光強度である。直接的な光としては、水中ライトによる直射光がある。ライトの光は Q_{11} の強度を持ち、対象物前面に到達するまでに k_1 の減衰を受ける。その光が対象物の表面で k_2 の割合で反射し、カメラ前面に到達するまでに k_3 の減衰を受ける。この他に水中では光の散乱による間接的な光があり、水

塊全体が明るさをもっている。これを環境光と名付け、対象物の前面とカメラ前面での環境光の強さをそれぞれ Q_{01} 、 Q_{02} で示す。環境光の起源としては、自然光とライトによるものが考えられ、それぞれ Q_{01}' 、 Q_{01}'' (Q_{02}' 、 Q_{02}'') で表している。実海域で透明度が高い場合一般には、 $Q_{01}' > Q_{01}''$ ($Q_{02}' > Q_{02}''$) である。この伝達モデルは、光の伝達特性を支配している吸収、散乱といった個々の要因の結果として現れるその場の光強度を元にして組み立てられているのが特徴である。したがって、従来海洋光学で検討されている光伝達パラメータとの厳密な比較はできないが、ここで用いている光強度がほぼ光束に対応し、 k_1 、 k_3 が光束透過率に対応していると考えられる。また、光路を①環境光を経由するものと、②直接対象とカメラに到達するものに分け、さらに光源を①自然光と②ライトによるものに分けることによって、光束透過率の構成要因である吸収係数、消散係数の場所的な分布や、光源による波長分布の違いを考慮していることになる。

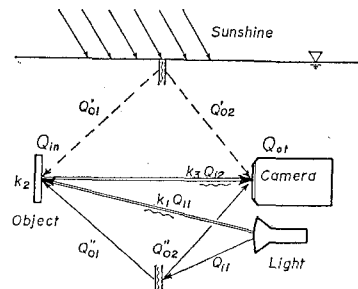


図-1 光伝達モデルの概念図

まず、このモデルを用いた思考実験として、完全な光の吸収体を対象としたときの画面上の輝度について考える。式(2)は、 $k_2=0$ であることより、 $Q_{ot}=Q_{02}$ となる。つまり画面上の輝度はカメラ前面における環境光の強度に比例する。カメラの直前に対象を置いたときには、画面上の輝度値は0である。対象をカメラから遠ざけるにしたがって、環境光は増加する。これは、カメラと対象物の間の距離がけん濁物質の量に対応しており、

環境光が海水中のけん濁物質により散乱させられた光であることを考えれば明らかである。さらに、対象をカメラから遠ざけて行くと Q_{02} が距離によって変化しなくなる。この距離を L_0 と定義する(図-2 参照)。一般に海水の光に対する拡散効果が高いほど距離 L_0 は短くなり、光源の強度が大きいほど長くなる。

次に、完全な光の反射体 ($k_2=1$) を対象としたときの画面上の輝度値について考える。環境光に対して、 $Q_{01}=0$, $Q_{02}=Q_{02}'$ という仮定をする。これは、光源をライトに限り、しかも対象物が十分にライトからはなれており、ライトによる環境光の影響を受けないという事である。ここで、海水中の減衰が生じないと仮定したときのカメラ前面での光強度を Q_{01}' とすると、

$$Q_{01}' = Q_{02}' + Q_{11} \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。実際には、減衰係数 k_1 , k_3 が存在するので

$$Q_{01} = Q_{02}' + k_1 \cdot k_3 \cdot Q_{11} \quad \dots\dots\dots (7)$$

であり、 $Q_{01} < Q_{01}'$ となる。

さらに、完全な光の反射体を対象とし、光源を自然光のみに限ると $Q_{11}=0$ となり、

$$Q_{01} = Q_{02}' + k_3 \cdot Q_{01}' \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。式(7)、(8)のいずれの場合にしろ Q_{01} は減衰を受け、十分に長い光路長をとると Q_{02} に等しくなる。この距離を $L_{\max}$ と定義する(図-2 参照)。光源の強度が高いほど $L_{\max}$ は長くなり、海水の濁度が高いほど短くなる。

Q_{01} と Q_{02} は、図-2 に示すような変化を示すと考えられる。 Q は、画面上で得られる輝度値であり、 L は、カメラ前面から対象物までの距離である。 Q_{01} は、黒色の対象物から得られる輝度値に対応し、 Q_{02} は、白色の対象物から得られる輝度値であることを考えると、図中 Q_{01} と Q_{02} で囲まれた領域が、カメラで得られる対象物に関する色の情報量を示している。なお Q_{01}' は $k_1=k_3=1$ つまり水中での光の減衰が無いとした場合の白色の対象物から得られる輝度値を表している。

色の分解能は、環境光が一定となる L_0 から情報量が0となる $L_{\max}$ にかけて減少していくことが予想される。

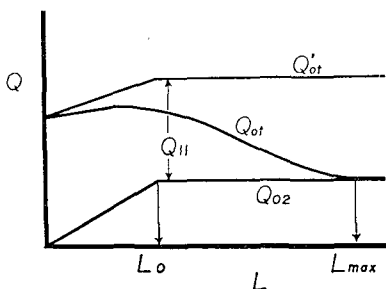


図-2 パラメータの変化

2.2 水槽実験によるモデルの検証

様々な条件の下での、光伝達モデルの挙動を知るために、水槽内での実験を行った。実験は光源の種類、及び環境光量や減衰係数を支配していると考えられる海水中の懸濁物濃度をパラメータとして、表-1 に示す10ケースについて行った。ケース22~25の4ケースは光源をライトとし、海水中の懸濁物濃度が比較的低い範囲の実験である。これは、直射光が多く、環境光が小さい場合の

表-1 水槽実験ケース一覧

ケース No.	自然光量 (lux)	投光出力 (w)	SS (mg/l)	$L_{\max}$ (cm)
22	0	1000	0.0	-----
23	0	1000	0.9	130
24	0	1000	1.4	110
25	0	1000	2.4	105
31	50000	0	3.6	98
32	50000	0	4.3	89
33	50000	0	5.0	72
34	50000	0	5.7	63
35	50000	0	6.4	50
36	50000	1000	6.4	60

条件に対応する。ケース31~35の5ケースは光源を自然光に限り、海水中の懸濁物濃度が比較的高い範囲の実験であり、環境光が多い場合の条件に対応する。ケース41は光源として、ライトと自然光を併用した場合の実験である。なお、海水中の懸濁物濃度は、カオリンを添加することにより調整し、SS (mg/l) で測定した。

代表的なケースにおける白、黒、赤、黄のパターンの画像上の輝度値の変化をパターンボードまでの距離をパラメータとして測定した結果を図-3 に示す。ライトのみによる撮影のケースでは、 Q_{01} の減衰が明らかに現れており、撮影距離が長くなると画面が暗くなり、色の情報量が少なくなることが判る。自然光のみによる撮影では、全体に輝度値が高くなり、距離による減衰も小さいが、 Q_{02} も大きくなるので、色の情報量の増加の効果は余り見られない。

白と黒のパターンの輝度値より、代表的な長さ L_0 と $L_{\max}$ を読み取ることができる。 $L_{\max}$ を SS に対してプロットしたものが図-4 である。SS が高くなるにつれて $L_{\max}$ が短くなっていることが判る。同様に L_0 を SS に対してプロットしたものが図-5 である。自然光のみで撮影したケースでは、 L_0 が $L_{\max}$ に近くて分離できなかったため、ライトのみのケースの結果を示している。

色の分離傾向を黒と赤の組合せと、白と黄の組合せに注目して整理すると、以下のような特徴のあることが判る。ライトのみで撮影されたケースでは、白と黄が良好

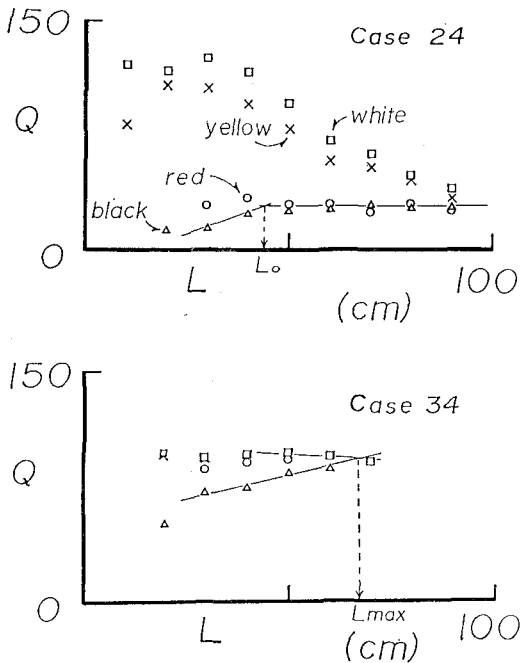
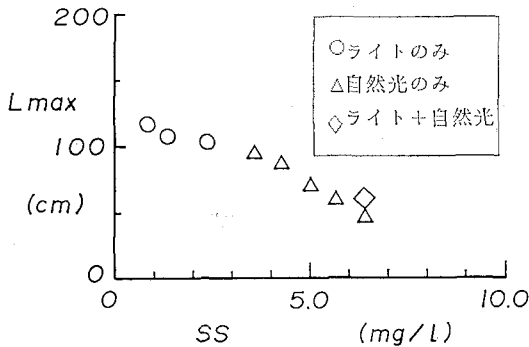
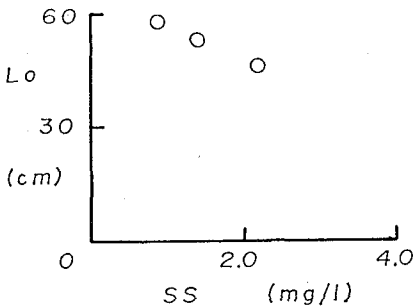


図-3 輝度値測定結果

図-4 L_{max} の変化図-5 L_0 の変化

に分離されているが、黒と赤の分離が悪い。反対に、自然光のみで撮影されたケースでは、白と黄の分離が悪いが、黒と赤の分離が良い。したがって、自然光とライトの光の強さのバランスが良いことが、色の情報を保存している良好な画像を収録するための条件となる。

2.3 パターンボードによる画像の評価

前節の結果を、画像のキャリブレーションに応用する方法を検討する。使用するパターンボードは、図-6に示すように、白・黒・赤・黄色のカラーブロックパターンと、大きさを変えたスケールパターンおよびスケールが描かれているものとする。パターンボードの大きさは、ダイバーが片手で持ち運べる範囲に制限される。また、パターンボード自体がハレーションを起こさぬように、素材、着色に気を配る必要がある。

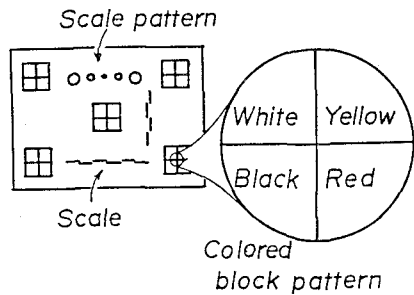


図-6 パターンボード例

使用法の概要は、あらかじめカメラ前面から対象物距離までの間で、数回の写し込みを行い、カラーブロックパターンを用いて、絞り、シャッタースピード、光源の強さ・向き等を調整する。また、スケールパターンは、対象物に対する焦点合わせ、フレーミングの決定の手がかりとする。スケールは、画角、距離の確認用である。

カラーブロックパターンでは、白と黒のパターンの輝度差が、色の情報量を示している。撮影したい範囲の近距離と遠距離の代表点において、白と黒が良好に分離できるようであれば、撮影範囲が L_0 と L_{max} の間にあることが確認できる。また、自然光とライトの光の強さのバランスを白と黄のパターン及び、黒と赤のパターンを用いて、調整する。もし、自然光が足りないようであれば、絞りを開け、ライトの光量を落として撮影する。自然光が多い場合には、絞りを閉じてライトの光量を上げて撮影する。絞りの調整後、再び L_0 、 L_{max} の確認を行い、必要であれば撮影距離や撮影場所の変更を行う。図-7 にパターンの見え方の分類を示し、表-2 に画像評価の一覧を示す。

実海域で、パターンボードを使用した例を以下に示す。カメラは水平方向に架台にセットされ、ダイバーに

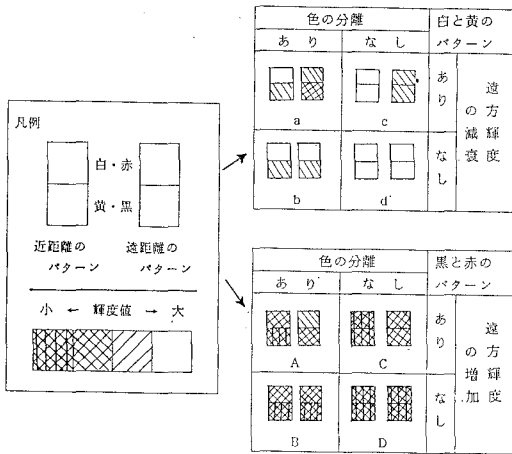


図-7 パターンの見え方の分類

表-2 画像評価の一覧

色分離		白と黄のパターン	
している	していない		
ライト光量大	ライト光量小 ss大 絞り閉めすぎ	減衰する	距離による 輝度値の変化
環境光量大	ライト光量小 ss小 絞り開けすぎ	減衰	しない
色分離		黒と赤のパターン	
している	していない		
環境光量大	ss大 絞り開けすぎ	増加する	距離による 輝度値の変化
ライト光量大	ss小 環境光量小 絞り閉めすぎ	増加	しない

よってカメラ前面 20~140 cm にパターンボードをセットし、写し込んだ画像を解析に使用した。撮影条件は表-3 の通りである。

それぞれの画像を図-7 にしたがって分類した結果と、SS の測定結果を表-3 に示す。前出の表-2 と比較すると撮影当日が、快晴であったので、環境光が十分にあり、黒と赤のパターンの分離が良い。しかし、白と黄のパターンの分離状況が悪い。これは、環境光に対してライトの光量不足か、絞りの開けすぎが原因と考えられる。また、ある程度 SS の高い場合の方が、良好な画像が得られていることが判る。

3. 実海域でのカラー画像の特性

カラーカメラにより得られる画像の特性を議論するのであれば、RGB 三原色それぞれに関して、議論する必

表-3 実海域での撮影条件と画像評価の一覧

ケース No.	自然光量 (lux)	投光出力 (w)	ss (mg/l)	白と黄の パターン	黒と赤の パターン
1	47500	600	1.6	d	A
2	38750	600	3.6	a	A
3	33500	600	2.2	—	A
4	16000	600	1.6	c	A
5	90000	600	3.6	a	A
6	97500	600	1.2	d	A
7	35000	1000	3.6	d	C
8	35500	1000	1.9	c	A
9	24500	1000	1.7	—	A
10	65000	1000	2.0	c	D
11	75000	1000	3.7	c	A

—: 判別不能

表-4 代表画像の主成分分析の結果

ファイル名	平均	分散	第1主成分 ^{a)}	寄与率
明るい海中	R 106	12	a 11	69
	G 185	10	b 9	
	B 213	10	c 6	
岩と海草	R 185	28	a 27	82
	G 146	22	b 20	
	B 17	15	c 8	
砂場	R 0	1	a 0	56
	G 146	8	b 6	
	B 224	8	c 6	
口向の岩場	R 10	8	a 1	76
	G 75	6	b 4	
	B 146	16	c 16	

^{a)} 第1主成分 = $a \cdot R + b \cdot G + c \cdot B$

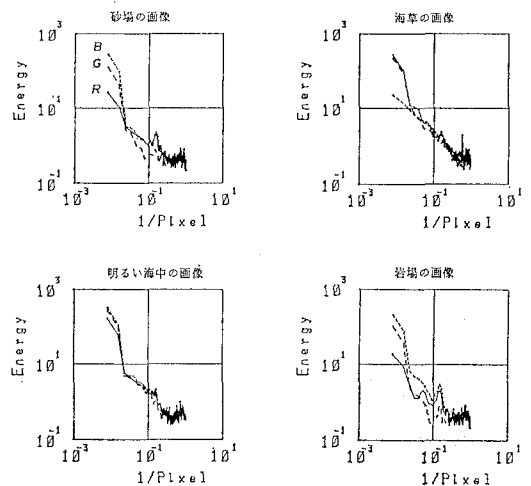


図-8 代表画像の空間周波数への変換

要がある。しかし、実海域での収録画像では、そこに現れている RGB 信号の強度が互いに従属関係にあることが指摘されている (石谷ら, 1988)。

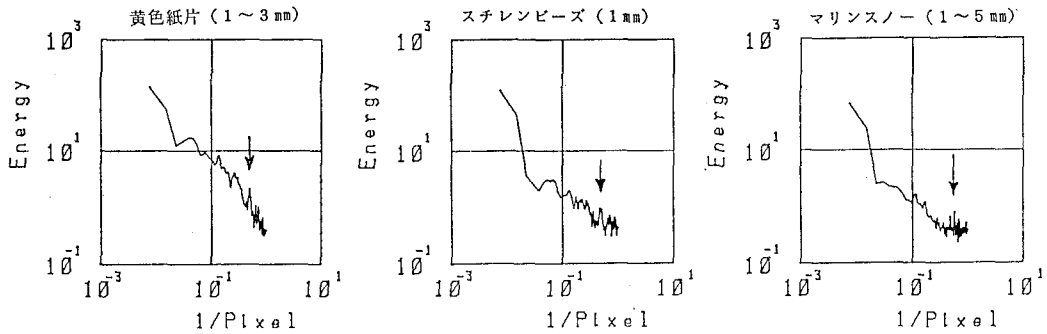


図-9 トレーサ懸濁画像の空間周波数への変換結果

ここでは代表的と思われる画像に対して、RGB 信号のそれぞれの輝度値をパラメータとして主成分分析を行い、各主成分の寄与率を比較した。

主成分分析には、それぞれの画像の特徴を抽出する測線を設定し、そこに現れおる RGB 信号の強度をデータとして用いている。例えば、捨石の画像であれば、凹凸の情報が測線上で現れるように、個々の捨石にまたがった測線を設定した。また、画像に現れる情報の S/N 比の定性的な傾向を検討するために、測線上のデータを FFT により空間周波数上のエネルギー強度に変換した。

主成分分析の結果を表-4 に示す。主成分分析の結果より、ほとんどの画像で第一主成分が卓越しており、RGB 表色系の 3 成分が互いに従属関係にあり、有効に分離されていないことを示している。また、第一主成分の構造を見ると、HSI 表色系の I 成分（明度）に対応しており、ほとんどのカラー画像の情報量は白黒画像の情報量と等価である。したがって、水中での光伝達モデルは、光の強度（輝度値）に関して検討すれば良い。

FFT による空間周波数への変換結果を図-8 に示す。図中のエネルギー強度は RGB 信号それぞれの強度に基づき算出した物である。代表的な特徴量のスケールは 10 ~ 20 Pixel である。データ量が少ないので、低周波数側については、明確なことは言えないが、いずれの場合も特徴量スケールのエネルギーは低周波側に比べて大きくないことを示している。問題となるのは、ノイズと考えられる高周波数側のエネルギーである。海中や、海草の画像では、RGB いずれの信号でも特徴量のエネルギーが卓越しており、良好な分離を示しているが、捨石や、砂場の画像では、特に特徴量の G 信号のエネルギーがノ

イズと同レベルまで下がっているために、 S/N 比が悪くなっていることが判る。このことは、画像中の G 信号が選択的に減衰していることを示している。つまり、赤色が分離されていない状況であるので、自然光が不足していることを表している。

高周波のノイズの大きさを比較するために、各種トレーサを浮遊させた画像の FFT 結果を図-9 に示す。それぞれ、図中の矢印の位置が、トレーサの代表長さに対応している。この図から、画像上のノイズが数画素~十数画素のスケールの対象に影響を及ぼすことが判る。

4. おわりに

本論文で得られた結論を列挙する。1) 光の伝達モデルを構築し、水槽実験によってその妥当性を確かめた。2) 光伝達モデルをもとにしたパターンボードによる画像のキャリブレーション・評価法を提案した。利用方法は簡便であり、実海域で撮影した画像を評価すると、ある程度 SS の高い方が環境光量が多いため良好な画像の得られることが判った。3) 海域における色情報は、ほとんどの場合白黒画像と等価であることが RGB 成分の主成分分析により示された。このことは、各色強度の空間周波数上でのエネルギースペクトルからも確認された。

参考文献

- 石谷 久・馬場康子 (1988): 視界情報による潜水艇の制御情報取得に関する考察, 日本造船学会論文集, Vol. 164, pp. 221-230.
- 細川恭史・古川恵太・三好英一 (1990): 水中ビデオ画像の特性と利用, 港湾技研資料, No. 683, 33 p.