

港湾技研資料

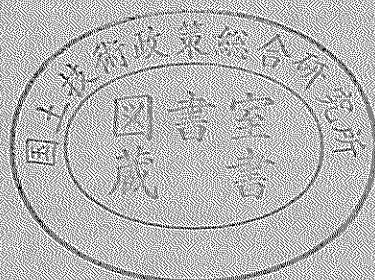
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 683 Sept. 1990

水中ビデオ画像の特性と利用
——実海域での撮影方法と流速計測——

細 川 恭 史
古 川 恵 太
三 好 英 一

運輸省港湾技術研究所



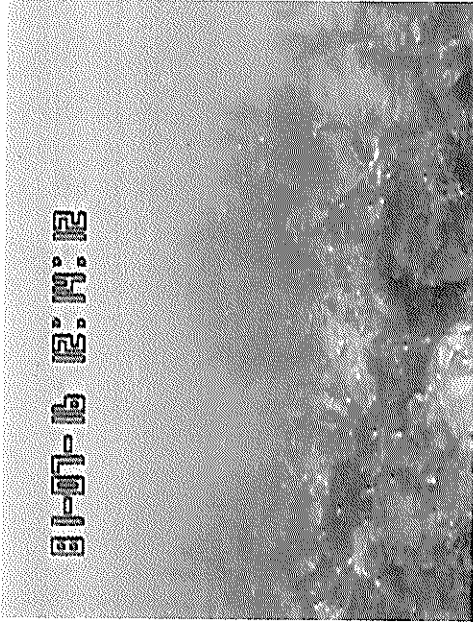


写真-1 明るい海中の画像 (PSFD)

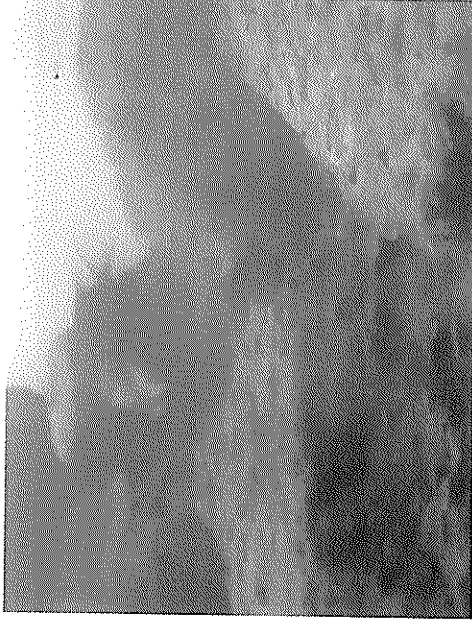


写真-2 影のある捨石周りの画像 (BLFD)

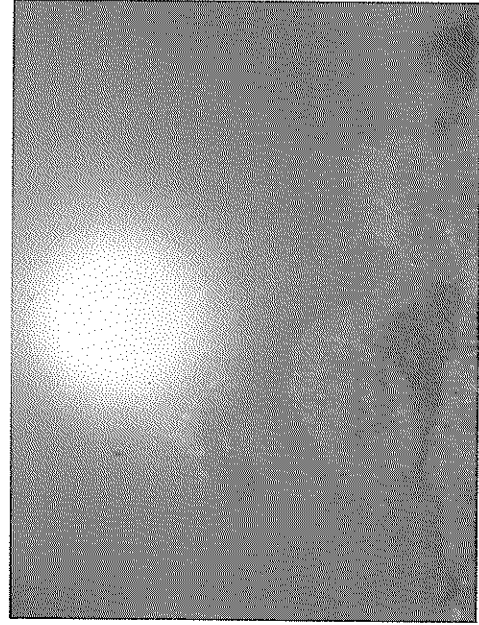


写真-3 フラッシュで増光された砂場の画像 (SDFD)

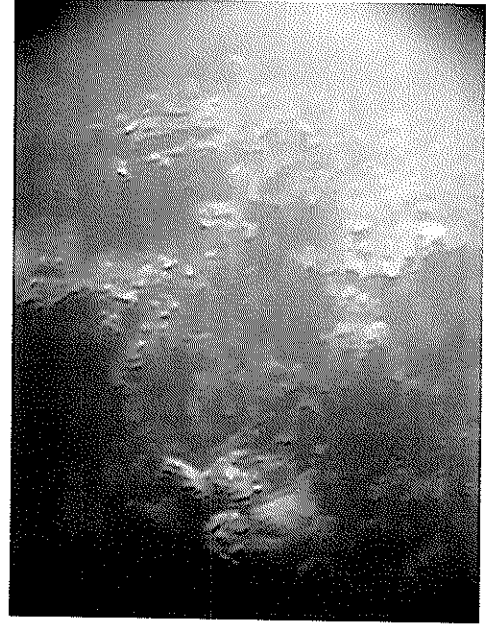


写真-4 岩と付着生物（ライトの関係で黄色に写っている）
(SWFD)

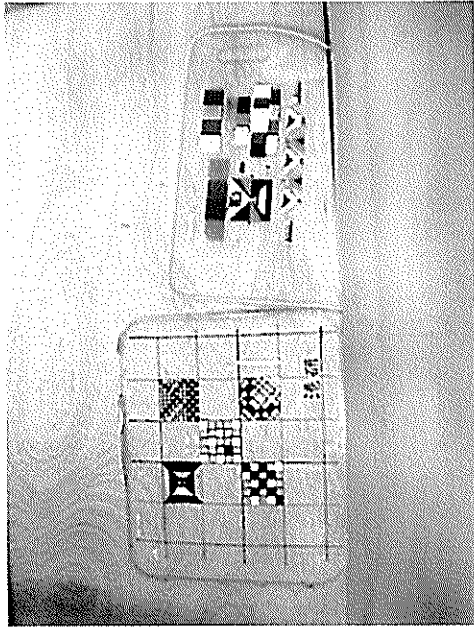


写真-5 実海域で用いたパターンボード

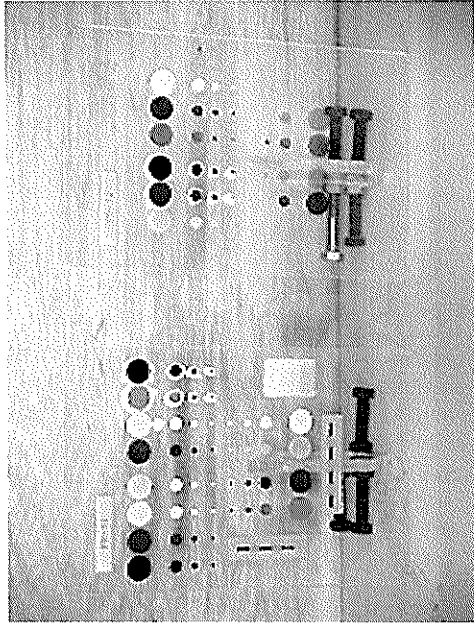


写真-6 水槽実験で用いたパターンボード



写真-7 パターンボードの写し込み

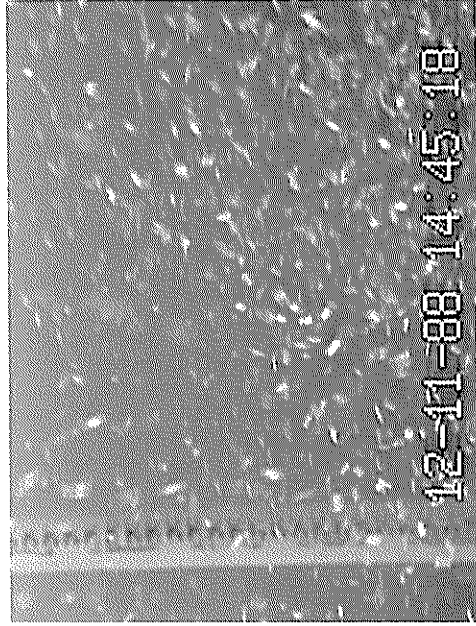


写真-8 トレーサの写し込み (黄色紙片)

目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 水中ビデオ画像特性	4
2.1 水中ビデオ画像の収録システム	4
2.2 光伝達モデル	4
2.3 RGB表色系とカラーモデル	6
2.4 画像のフィルタリング	7
3. 光伝達モデルの検証	8
3.1 水槽実験	8
3.2 大きさによる減衰	10
3.3 距離による減衰	10
4. 水中ビデオ画像の情報	13
4.1 実海域実験	13
4.2 カラー画像の情報量	14
4.3 色情報の付加と欠落	15
4.4 画像のパターンボードによるクラス分け	17
4.5 トレーサ画像の特性	18
5. 流れ場の計測への利用	23
5.1 流速推定法	23
5.2 トレーサの撮影条件と計測精度	24
5.3 海底面における水平流速の推定例	25
6. おわりに	27
参 考 文 献	28
記 号 表	28
Appendix	29

**Features of VTR-Pictures taken by Submerged Camera and their Applications
—Techniques for Taking High Quality VTR-Pictures and Measuring Flow Field
in Real-sea—**

Yasushi HOSOKAWA*
Keita FURUKAWA**
Eiichi MIYOSHI**

Synopsis

VTR-Pictures taken under water are usually used for aquatic ecological study in situ. The VTR-Pictures contain valuable and various information. For evaluating quality of VTR-Pictures, and studying about a model of light-transmission under water, we use data from experiments and data from real-sea observations. We present a new method how we can estimate quality of VTR-Pictures by a pattern-board. Without any troublesome considerations about light-transmission parameters, we can handle a VTR camera in the sea easily by this method.

Motion-analysis of suspended tracers are attempted for its application. Our motion-analysis method is based on travel distance between a pair of serial scenes. We also show limits and errors of this method. We apply this method for the estimation of local flow field VTR-Pictures taken in Tokyo Bay. It shows good ability of advanced application of under water VTR-Pictures.

Key Words : VTR-Pictures, Image-processing, Motion-analysis

* Chief of purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Member of purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

水中ビデオ画像の特性と利用

——実海域での撮影方法と流速計測——

細川 恭史*
古川 恵太**
三好 英一**

要 旨

水中ビデオ撮影による各種調査の実施の際に、撮影画像の品質を管理する方法として、キャリブレーションボードによる検定、評価法の提案をする。そのために、水中における簡略化された光伝達モデルを構築して、モデルの検証を行っている。また、画像は多くの情報量を持つポテンシャルの高い情報であるので、その高次利用が考えられる。その一例として流速推定法を示し、高次利用の可能性を検討している。

光伝達モデルの検証には、水槽を用いて、水質、光源をパラメータとした実験を行い、その結果を利用する。実海域の画像情報についての考察は、各種調査のVTR画像と共に、当所において撮影された画像を利用する。

その結果、光伝達モデルの妥当性が確かめられ、キャリブレーションボードによる評価法の裏付けを得る。また、黄色紙片をトレーサとして投入した画像を用いて、流速の推定を行い、期待される精度を持って流速が測定できることを示す。

キーワード：ビデオ画像、画像処理、移動計測

1. はじめに

目に見える形に変換された情報は、現象を理解、説明するためには欠かせない物である。特に、生態系にかかわる調査では、生物の同定、生息状況の把握、生息環境の観察等数値化しにくい情報が多く存在するので、従来からの生化学的指標の測定に平行して、水中ビデオカメラによる撮影が頻繁に行われるようになってきた^{1)~6)}。また、港湾構造物の劣化調査等にも水中ビデオ撮影の画像が利用されている。

可視化された情報は、例えばカラー画像であれば1画像あたり800kBYTE近くの情報量を持ち、潜在的な利用価値が高い。もちろん撮影条件、利用方法の違いにより全ての情報が有効に働いているわけではない。かえって情報の冗長度が人間の感覚的な理解を助けているとも言える。しかし、客観的な情報の利用の面から考えると、画像そのものに対する最低限のキャリブレーションや評

価法の確立が必要であると考えられる。そうすることによって、各所で収集されている画像情報を資料として、互いに比較することも可能になる。

また、画像から二次的に引き出される情報についても、画像の情報量のポテンシャルを考えると、様々な利用が考えられる。なかでも、流速計測への利用は、空間、時間的に広がる画像情報の特性を考えると魅力ある課題のひとつと言える。

本論文では、水中ビデオ画像の持つ特性を整理し、その利用法の一例を示すことにより、水中ビデオ画像のポテンシャルを検討した。構成は以下の通りである。2章において画像を評価し、利用するための理論的準備として、光伝達モデルや処理系に関する知識の整理をする。3章において、水槽実験による光伝達モデルの検証を行う。4章では、実海域画像の評価を前提とした画像処理の結果を示すと同時に、パターンボードを利用した画像の評価法を提案する。5章では、流速計測への画像情報

* 海洋水理部 海水浄化研究室長

** 海洋水理部 海水浄化研究室

の利用を検討し、実海域画像からの流速推定結果を示す。

2. 水中ビデオ画像特性

水中ビデオカメラを用いて水中の映像を収録し、その情報を利用するために画像処理装置に取り込む過程は、図-1に示されるような、アナログ入力をデジタル出力に変換するシステムとして表すことができる。アナログ入力Pは撮影の対象物であり、変換部に入る前に擾乱Kをうけ、さらに変換部でシステム固有の量子化過程を経てデジタル出力pに変換される。

本章では、本論文で用いたシステムの中における情報の伝達に着目して概要を紹介する。

2.1 水中ビデオ画像の収録システム

今回用いたシステムは、図-2に示すように画像の収録部および処理部に分けられ、収録部では水中ビデオカメラからVTRでビデオテープに画像を収録し、処理部では、VTRを用いてビデオテープより読みだした画像情報を画像処理装置を用いて量子化し、各種処理を行うと共に、さらに解析・計算を行うためにCPUに情報がファイル化され送り込まれる。各装置の主要な諸元を表-1に示す。

情報の伝達経路に沿って、情報の受ける作用および変換を追跡する。まず撮影対象があり、連続的な3次元の情報を持っている。この表面情報が光の刺激を受け反射光の情報として放出される。反射光は、水中で減衰・拡散の影響を受けビデオカメラに到達する。ビデオカメラでは、レンズが光の情報を2次元化し、受光素子が量子化する。受光素子にはCCDと呼ばれる個体素子が用いられており、画素(Pixel)を単位とした情報の空間上の離散化が行われている。情報をVTRに送る際、伝達経路の制約により輝度信号に色信号を周波数多重したNTSC信号が用いられ、1画面(フレーム)を2分割(フィールド)したインターレースサンプリングと呼ばれ

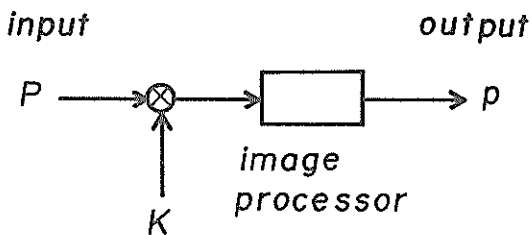


図-1 システム図

(P:入力, p:出力, K:擾乱)

る時間的な離散化が行われ、空間情報のアナログ化が行われる。VTRでは、情報の記録のためにビデオテープを用いている。ビデオテープに録音する際にも信号の変換が行われているが、再生の際に再変換が行われるので、情報の劣化がおこるほかには、見かけ上情報の変換を意識しなくてよい。画像処理装置では、VTRからの信号をRGB信号に分解し、その強度をフレームメモリに離散量として取り込む。信号強度の離散化は、メモリの持つ容量に対応して1~8bit(2~256階調)で行われ、輝度と呼ばれる無次元量に変換される。このフレームメモリ上のデータが画像処理の対象となる。モニター画面には、フレームメモリ上のデータを再変換して得られる画像とVTRから直接得られる画像が再生される。このような複雑な情報の変換が行われているが、これを①カメラ前面までに行われる画像劣化と②画像を再構成するまでの量子化、③量子化された画像の処理の3つの部分に分けて2.2節以下に説明する。なおここで使用する諸量の対応表を表-2に示す。

2.2 光伝達モデル

水中での画像の劣化は、媒体である水による強力な光の減衰・拡散といった伝達の性質におもに起因する⁷⁾。この水中における光の伝達特性を対象物前面やカメラ前面での光強度でモデル化することによって、様々な影響を分類・整理することを試みる。

用いた光の伝達モデルは、

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

$$Q_{01} = Q_{02} + k_3 \cdot Q_{12} \quad \dots\dots(2)$$

であり、ただし

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

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

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

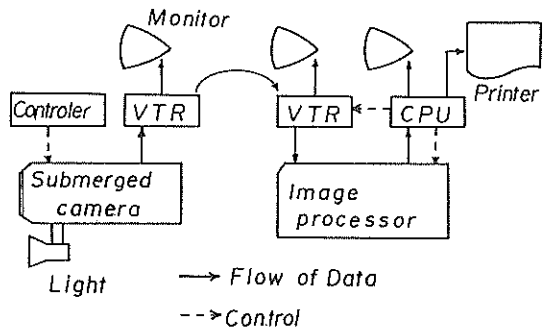


図-2 画像収録・処理システム概要

(—:情報の流れ, ---:制御)

表-1 用いた装置の諸元

装 置	項 目	仕 様
水中カメラ (カラー)	撮像素子	2/3"CCD
	最低照度	30Lx
	走査方式	46dB以上, 2:1 インターレス
	信号出力	NTSC 1Vp-p
	制 御	ライト, 焦点, 絞り
	投光器	ハロゲン 300W×2灯
水中カメラ (白黒)	撮像素子	2/3"CCD
	最低照度	10Lx
	走査方式	2:1 インターレス
	信号出力	NTSC 1Vp-p
	制 御	ライト, 焦点, 絞り, シャッタースピード
	投光器	ハロゲン 500W×2灯
V T R	録画方式	2ヘッド, VHS規格
	映 像	NTSC方式
画像処理装置	画 素 数	512×512Pixel, 256階調
	画 面 数	16画面(カラー5画面)
	画 像 変 換	2値化, 擬似カラー
	フ ィ ル タ ー	平滑化, 強調, メディアン, 凡用
	2値画像処理	拡大, 縮小, 細線化, 特性量計算
C P U	演 算 能 力	16bit, 10MHz

表-2 諸量の変換

入 力	出 力
長 さ L (cm)	画 素 数 l (Pixel)
時 間 T (sec)	画像収録間隔 $\Delta \tau$ (Step)
速 度 U (cm/s)	速 度 u (P/S)
光強度 Q (lx)	輝 度 q (無次元数)

である。図-3にこのモデルの概念図を示す。 Q_{in} は、撮影対象前面における光強度であり、 Q_{01} 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})で表される。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。

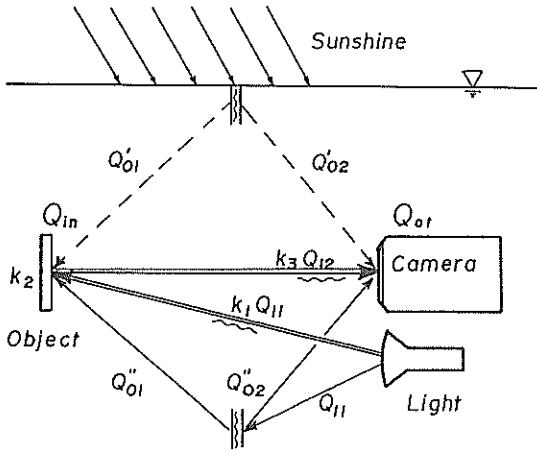


図-3 光の伝達モデル
 (== : 直接的な経路,
 —— : 間接的な経路 (ライト光源とする),
 ---- : 間接的な経路 (環境光を光源とする))

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、 $Q_{01} = Q_{02}$ 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、散乱された光がカメラに届く前に減衰してしまうため、画面上の輝度値が一定値に収束する領域が現れる。この距離を L_0 と定義する。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くほど長くなるのが予想される。

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、

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

である。実際には、減衰係数 k_1 、 k_3 が存在するので

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

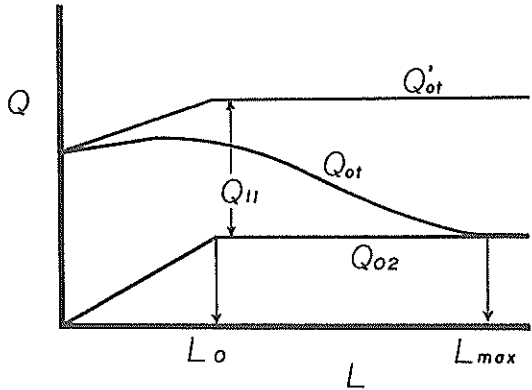


図-4 カメラの受ける光量と対象までの距離
 (Qはカメラ前面での光強度,
 Lは対象とカメラ前面までの距離)

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、

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

となる。式(7)、(8)のいずれの場合にしろ Q_{01} は減衰を受けどこかで Q_{02} に等しくなる。この距離を L_{max} と定義する。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のが予想される。

以上の考察をまとめるとカメラと対象物までの距離 L をパラメータとして Q_{01} は、図-4に示すような変化を示すと考えられる。図中 Q_{01} と Q_{02} で囲まれた領域は、カメラ前面で得られる対象物に関する到達情報量を示している。画面上の輝度値 q は Q_{01} に比例すると考えられるので、システムのアウトプット中での対象物に関する情報もこの領域に対応する強さで得られると考えてよい。

2.3 RGB表色系とカラーモデル

カメラに到達した光は、量子化され最終的に画像処理装置のフレームメモリにRGB信号の輝度値として記録される。画像の量子化において、空間、時間的なものは収録・処理システムに依存する。ここでは、これまで無定義で使用してきた光強度について、カメラに到達した光の強度が、RGB表色系に変換される過程で受ける量子化について説明を試みる。現在ほとんどのコンピュータやTVシステムにおけるカラー表色方法がRGB指定である。RGB表色系は、R(赤)G(緑)B(青)の3刺激値の強度(輝度)をもちいて加法混色を行い、色を再現する。RGBの色空間はRGBの輝度値をそれぞれ軸とする立方体で表される。光強度すなわち明るさを

表すためには、座標軸の変換が必要である。この変換は、H S I 変換と呼ばれており、リモートセンシングの分野においては、一般的な表色系の変換である。H（色相）S（彩度）I（明度）の内Iが表示画面上の輝度を表しており、光強度はこの輝度により近似することとする。ただし、ここで用いているRGB, H S I はカラーモニター上の輝度値を説明するためのものである。例えば、I は感覚的な明るさや、色彩学上の明度（Lightness）とは異なり、白黒モニター上の輝度値に対応する。このRGB-H S I 間の変換は、カラーモデルを用いて簡単に行うことができる。代表的なカラーモデル（三角錐、六角錐、双六角錐）と変換式を図-5に示す⁹⁾。ここでは、混乱を避けるためにそれぞれのモデルに対して、明度Iに対応する値をI, V, Lで表し、明度に垂直な面に現れる彩度S, 色相Hは省略している。

2.4 画像のフィルタリング

画像処理装置のフレームメモリに入力された、量子化済みの画像の処理法を考える。水中ビデオ撮影において、撮影時に良好な画像を得ることはもちろん重要であるが、状況の制限により適当な画像が得られない場合がある。

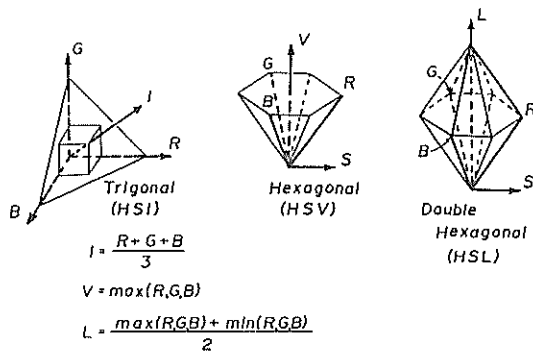


図-5 カラーモデルと変換式
 (H S I : 三角錐モデル, I はIntensity
 H S V : 六角錐モデル, V はValue
 H S L : 双六角錐モデル, L はLightness)

そういった画像に対する後処理として、画像に数値的なフィルター（デジタルフィルター）を作用させる方法を整理する⁹⁾。

画像にフィルターを作用させることをフィルタリングと呼ぶが、ここでは画像の復元と強調にかかわる操作に対して、広い意味でフィルタリングと言う言葉を用いることとする。画像の復元とは、できるだけ元画像に近い画像を得るための操作で、画像の強調とは、目的の情報を抽出するための操作である。したがって、画像の強調では、必ずしも元画像に忠実な画像が得られなくてもよい。同様に、フィルターについても復元と強調に関して特に区別しないことにする。

フィルターを作用させる際のフィルタリングの概念図を図-6に示す。ここで、入力画像そのものにコンボリューションマスクと呼ばれる行列を、原画像に畳み込み積分する操作を空間領域コンボリューションと呼び、空間周波数に変換されたスペクトル画像に行う操作を周波数フィルタリングと呼ぶ。その得失を表-3に示すが、両者は原理的には同等の効果を与える。その選択基準は原画像の情報量や、ノイズの性質による。代表的なフィル

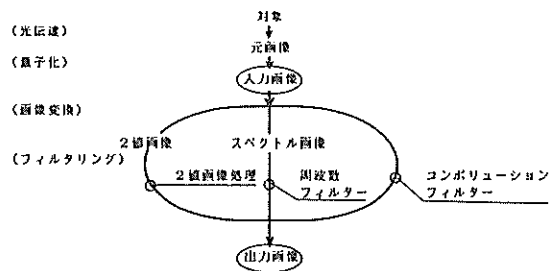


図-6 フィルタリングの概念図
 (対象を写し込んだ元画像から量子化され画像処理装置に取り込まれた入力画像に対するフィルタリング。
 出力画像は再度入力画像として多重のフィルタリングも行える。)

表-3 周波数フィルタリングと空間領域コンボリューション

周波数フィルタリング	空間領域コンボリューション
<ul style="list-style-type: none"> データ数が多いとき有利 低周波数領域にも有効 線形的なフィルター 一様な画像が得られていることが前提 	<ul style="list-style-type: none"> データ数が少ないとき有利 非線形的なフィルターも可能 画像に対応して独特なフィルターが作れる

ターの対応を図-7に示す。空間領域コンボリューションの拡張として、メディアンフィルターやエッジ検出フィルターなどがあり、ピークノイズの除去や対象の抽出に利用される(図-8)。量子化の際、1画素あたりの情報を2値(明・暗)とした2値化画像に対するフィルタリングは、2値化の操作そのものにフィルタリングの効果があり、さらに、計算量が少なく済むので、対象の

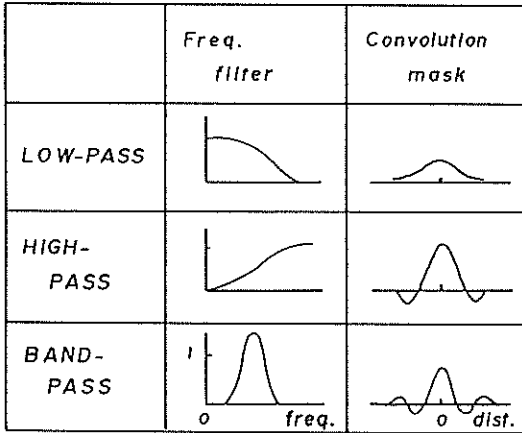


図-7 周波数フィルターとコンボリューションマスク
(縦軸はフィルターの重みを表す。)

Name	Operator									
Median filter	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>a</td><td>b</td><td>c</td></tr> <tr><td>d</td><td>e</td><td>f</td></tr> <tr><td>g</td><td>h</td><td>i</td></tr> </table> Sort(a,i) ↓ Value = e	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	b	c								
d	e	f								
g	h	i								
Edge extractor	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> </table>	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1
1	1	1								
0	0	0								
-1	-1	-1								
Laplacian filter	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>-4</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	0	1	0	1	-4	1	0	1	0
0	1	0								
1	-4	1								
0	1	0								

図-8 そのほかのフィルター
(メディアンフィルターは、ピークカット用
エッジ検出マスクは、一方向輪郭強調用
ラプラシアンフィルターは、画像強調用)

画面上での拡大・縮小、形状の当てはめ、物体の抽出等といった多彩な処理が行える。

フィルタリングは元画像の特性と目的により選択的に使用されるべき物であり、一般的な方法を論ずることは難しい。また、個々の画像処理装置の処理能力に制限されるので、処理時間と得られる画像の改善効果を比較して、目的に合わせた利用法の検討が必要である。

3. 光伝達モデルの検証

光強度を測定する手段として、白黒水中ビデオカメラを用いて、環境設定が容易な水槽内でパターンボードの写し込みを行い、光伝達モデルの検証を行った。

3.1 水槽実験

図-9に示すような水槽を用いて、光伝達モデルの検証を行った。撮影対象としては、色・材質による反射率の違いを考慮して、アクリル板の上に油性のペイント、反射テープ、マジックインクで円形に彩色したものを用了。図-10に示すように、パターンは直径2.5mm~20mmの4通りを用意し、反射面の大きさによる影響を確かめた(写真6参照)。撮影条件として、媒体を空気、水道水、海水とし、光の拡散率を上げるために海水には、中央粒径0.8 μ mのカオリナイトを添加した。また、光源の条件としては、自然光、ハロゲンライトを単独または、併用した。自然光は、晴れた日の日陰を選び、水面と平行に照度を測定し、水槽上均一に間接光が到達していることを確認して、実験場所を選定した。

実験条件とケース名の一覧を表-4に示す。海水による光の拡散率の指標として、SSを測定したものを併記してある。SSはガラスフィルターGF/Cのふるい目1 μ mのフィルターを用いて測定している。本来、濁度や透明度・透視度といった指標を用いるべきであるが、混入させた粒子の性質が比較的均一であるので、SSでも十分に指標になると考えられる。

実験の手順は、まず水槽内に海水(水道水)を満たし、カメラをセットして光源の条件を設定する。次にカメラ前面40cmのところパターンボードを置き、測定対象のパターンが良好に写るように絞りを調整する。従って、各ケース間で絞りの設定が異なるため基準の輝度値は変化している。測定は、各ケース毎にパターンボードをカメラ前面から10cm~90cmの範囲で、10cm間隔に写し込みを行い、得られたVTR画像の対象物内の輝度を画像処理装置で測定した。計測データについては、Appendixに掲載する。

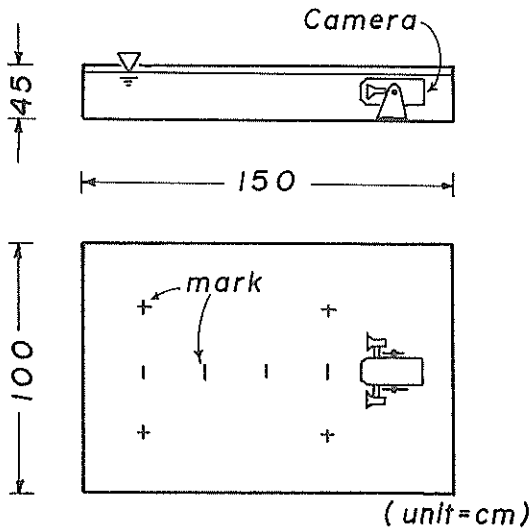


図-9 実験水槽

(パターンボード写し込み用の実験水槽。自然光の実験では、屋外日陰に設置し、ライト光源のみの実験では、屋内に設置し、覆いを付けて撮影した。

+ : 照度測定点,

! : パターンボード設置点)

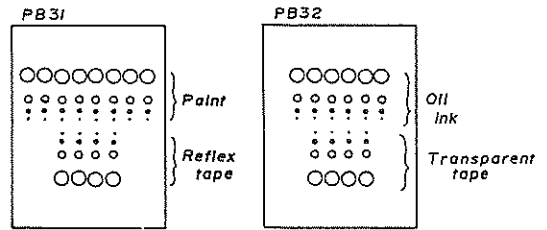


図-10 パターンボード

(P B31 : 上段左から、赤、オレンジ、黄、水色、青、白、灰、黒

下段左から、青、赤、黄、白

P B32 : 上段左から、黄、赤、黒、緑、

紫、白

下段左から、赤、黄、オレンジ、

青)

表-4 実験条件

ケース名	光源	媒質	SS (mg/l)
Case 11	自然光 5000lx	空中	—
Case 12		水道水	—
Case 13		海水	1.4
Case 22	ハロゲン光 500W × 2灯	水道水	—
Case 23		海水 (450l)	0.9
Case 24		海水+にごり* 0.5g	1.4
Case 25		海水+にごり 1.0g	2.4
Case 31	自然光 50000lx	海水 (430l)	3.6
Case 32		海水+にごり 0.5g	4.3
Case 33		海水+にごり 1.0g	5.0
Case 34		海水+にごり 1.5g	5.7
Case 35		海水+にごり 2.0g	6.4
Case 36	自然光 ハロゲン光 50000lx + 500W × 2灯	海水+にごり 2.0g	6.4

*) にごりは、カオリナイト粘土使用

3. 2 大きさによる減衰

対象物の明るさを測定する方法として、その物体の平均的な明るさを測定するために、画面上で測線を設定し、測線上の輝度値を画像処理装置より読み取り、平均する方法を用いた。対象物が小さく、この測線が短いときには、輝度値が見かけ上小さくなっていることが測定された。これは、画像中に含まれるノイズや画素の分解能の制限があると考えられ、対象物を写し込む時の幾何学的制約条件となる。例えば、図-11は、図左に示したアクリル板に描かれた大きさの異なる白色円盤を対象として、直径方向に設定された測線上の輝度値 q の分布を図右に示したものである。

この図では、一番小さい円に対応する輝度値が他の輝度値に比べて小さくなっており、減衰を受けていることが判る。そこで、減衰を受けていないと考えられる輝度値（この場合大きい方から2番目までの円に対応する輝度値）を平均し、これを基準として、それぞれの大きさに対応する輝度値を無次元化した。この無次元輝度値を画面上の大きさ（画素数）について整理したものが、図-12である。

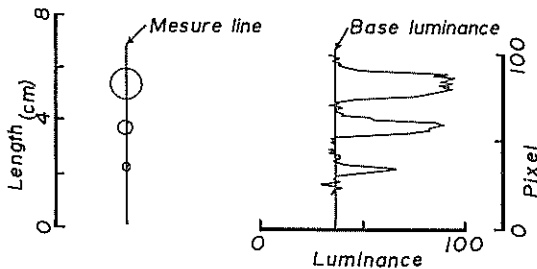


図-11 大きさの異なる対象の輝度分布
(左図：対象の画像、
右図：測線上の輝度値分布)

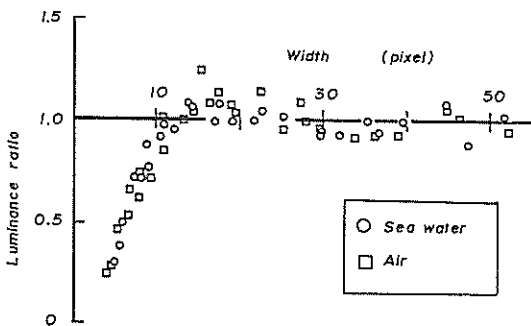


図-12 画面上の画素数と無次元輝度値
(横軸：対象の幅（画素数）
縦軸：無次元輝度)

図中に示されたプロットは、それぞれカメラから対象までの距離が20cm~90cmで、○印は海水中、□印は空気中の画像から得たデータを用いている。傾向はよく一致し、画面上の画素数が11~12Pixelになるところから、大きさによる減衰が生じていることが判る。また、対象物そのものの大きさには関係していないことより、この減衰は、システムに依存していることが予想され、以下の測定・解析においては、最低画素数を20として、大きさの影響を受けないように考慮した。

3. 3 距離による減衰

図-4にない表-4のそれぞれのケースにおける白、黒、赤、黄色のペイント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図-13に示す。これらの図より、代表的な長さ L_0 と L_{max} を読み取る。 L_0 は環境光が一定値となる長さで、環境光の強さが支配的であり、 L_{max} は画像情報の得られる最大距離を表し、媒体（海水）の状態（SS、環境光）が支配的であると考えられる。光源として、ハロゲンライトのみを用いたとき（Case 23~25）には、 L_{max} が測定範囲を越えているために実測はできないが、SSの高いほど L_{max} が短くなっていることが判る。自然光のみの条件で撮影されたケース（Case 31~35）における L_{max} をSSに対してプロットしたものが図-14である。一方、 L_0 は自然光のみで測定したケースにおいては、明確な一定値は測定範囲内に現れておらず、ハロゲンライトのみで測定したケースの結果を、図-15に○プロットで示す。どちらもSSと相関の高いことが示され、2.2節で考察した傾向と一致している。

次に、減衰係数 k_1 、 k_3 について考察する。減衰係数 k_1 、 k_3 は、SSや対象までの距離 L に影響を受けると考えられる。いま仮に L に対する減少関数として

$$k_1 = k_3 = a \cdot L^{-n} \quad \dots\dots(9)$$

を仮定する。 a はSS、光源、絞りの関数で定義される定数で、 n は距離 L の指数である。 n について考察するために、白と黒のパターンの輝度値の変化について整理する。ここで近似的に白は反射率 $k_2 = 1$ 、黒は反射率 $k_2 = 0$ とおく。すると、自然光のみの条件では黒の輝度値は Q'_{02} となる。ここで、白の輝度値を Q_{01} とすると式(8)より、

$$Q_{01} - Q'_{02} = k_3 \cdot Q'_{01} \quad \dots\dots(10)$$

であり、白と黒のパターンの輝度値の差の対数を距離 L の対数に対してプロットすることにより n が得られる。このようにして、自然光のみの条件で測定したケースを

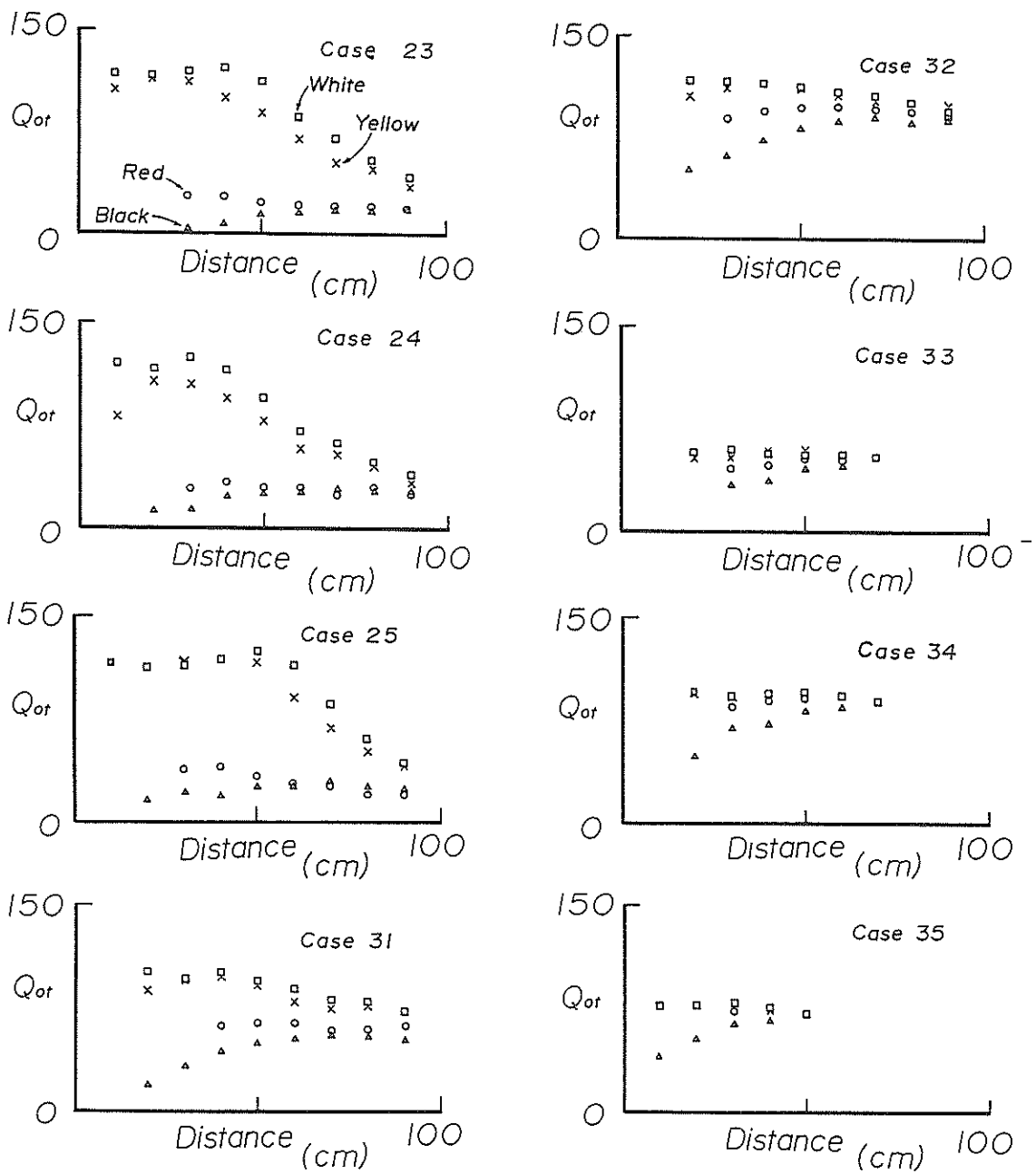


図-13 各色の輝度値の距離による変化

- | | |
|-----------------------|-----------|
| (Case23: 海水 (450 l)) | } ライト光源のみ |
| Case24: 海水+にごり (0.5g) | |
| Case25: 海水+にごり (1.0g) | |
| Case31: 海水 (430 l) | } 自然光源のみ |
| Case32: 海水+にごり (0.5g) | |
| Case33: 海水+にごり (1.0g) | |
| Case34: 海水+にごり (1.5g) | |
| Case35: 海水+にごり (2.0g) | |

横軸: カメラと対象の距離

縦軸: 画像処理装置で測定した各色の輝度値

整理すると、図-16の様になる。図中の傾きが n を示しており、およそ1~2の範囲にあることが判る。

ハロゲンライトのみの光源を用いた場合は、黒のパターンの輝度値が Q''_{02} となり、

$$Q_{01} - Q''_{02} = k_1 \cdot k_3 \cdot Q'_{01} \quad \dots\dots(11)$$

と表せる。同様に図-17に白と黒のパターンの輝度値の差をプロットする。ただし、 L が約50cm以下のところでは Q'_{01} の影響が見られ、輝度値の差の変化が小さい領域が現れている。この部分を無視して傾きを求めると n^2 が判る。ここで求めた n の値をSSで整理すると表-5に示すようにSSと密接な関係があることが判る。ただし、定数 a については、絞りの絶対値が判らないために、その変化についての議論はできない。

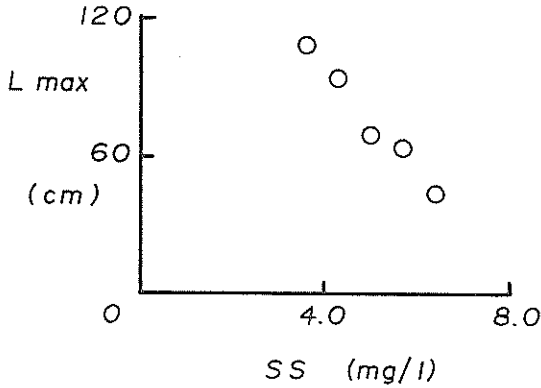


図-14 L_{max} の分布
(自然光源のみの条件による L_{max} の変化)

ここで、 n と光束消散係数 K との対応を考察する。 $Bear$ の法則は、光束 Q に対して、

$$\Delta Q = -K \cdot Q \Delta L \quad \dots\dots(12)$$

と表され、式(9)より

$$K = n \cdot L^{-1} \quad \dots\dots(13)$$

であることが判る。 $Bear$ の法則は、単一光源に対して光路中の一様な減衰を仮定しているものである。しかし、測定光路長の変化により光束消散係数の測定誤差が現れるので、一般には、式(12)を積分した形で、光束消散係数を計算する。本方法で、提案した減少関数(式(9))は $L=1$ の時、 $K=n$ とおき、近似計算したものになっていることが式(13)から判る。

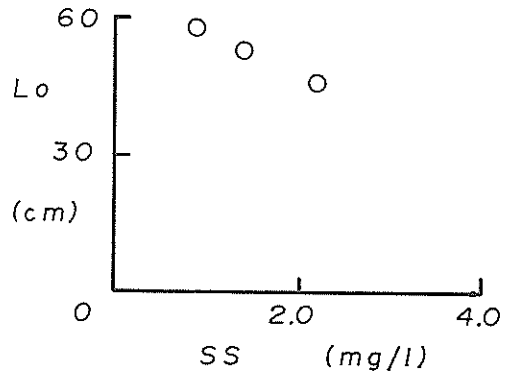


図-15 L_0 の分布
(ライト光源のみの条件による L_0 の変化)

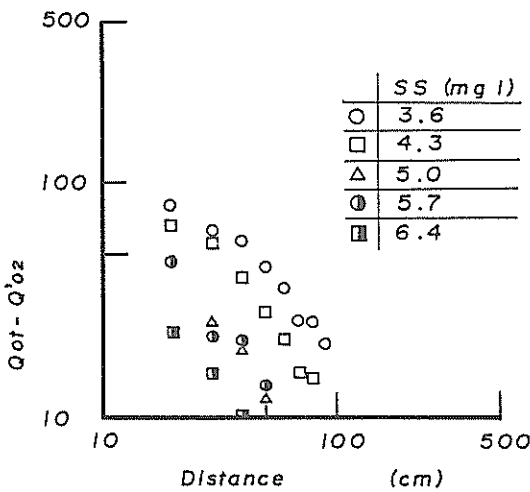


図-16 白と黒の輝度差(自然光)
(輝度値の差 $Q_{01} - Q'_{02}$ と、パターンまでの距離 L)

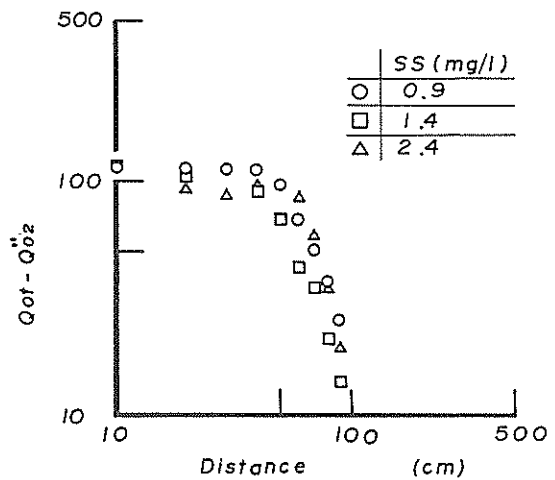


図-17 白と黒の輝度差(ハロゲンライト)
(SSの条件に示した、白と黒のパターンの輝度値の差 $Q_{01} - Q''_{02}$ と、パターンまでの距離 L)

表-5 SSとhの関係

SS (mg/l)	n	備考
0.9	1.1	} ハロゲン光
1.4	1.3	
2.4	1.4	
3.6	1.2	} 自然光
4.3	1.4	
5.0	2.2	
5.7	2.2	
6.4	1.7*	

*) データ数少ない

4. 水中ビデオ画像の情報

前章において、水中での光の伝達に関する基本的な性質を整理したが、実際の水中ビデオ撮影においては、画像がカラーであること、水中の条件が複雑であること、撮影対象が様々であることより厳密なモデルの構築、適用は難しい。そこで、画像情報の利用のため、より実際の画像の評価、最適化を目指した方法を提示する。

4.1 実海域実験

より一般化した、水中ビデオ画像の特性を調べるために、実海域における水中ビデオ画像の収録を行った。収録は、昭和62年から平成2年にかけて3回、それぞれ、久里浜湾内護岸、久里浜地先、夏島地先において行った^{10)~12)}。撮影場所の概要を図-18、19に示す。久里浜地先および夏島地先においては、パターンボード(写真5、7参照)とトレーサの写し込み(写真8参照)を行っており、久里浜湾内護岸および久里浜地先の撮影においては、カラー水中ビデオカメラと白黒水中ビデオカメラを併用し水平方向にカメラをセットし、鉛直流の観測を行い、夏島地先では白黒水中ビデオカメラのみを海底面に

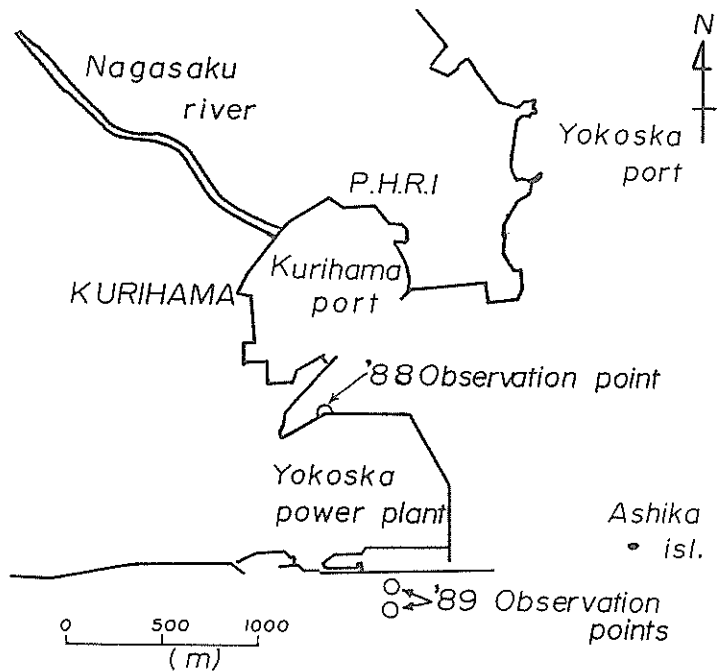


図-18 実海域実験場所(久里浜湾)

(昭和63年度, 平成元年度の実験海域および測定点)

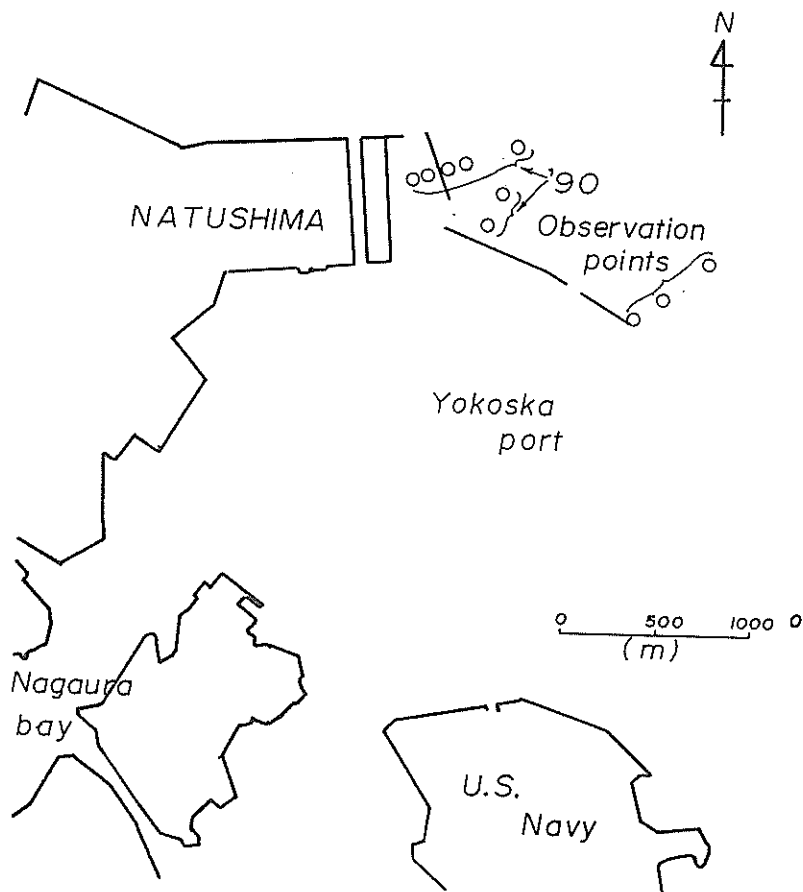


図-19 実海域実験場所（夏島地先）
（平成2年度実験海域および測定点）

垂直にセットし、海底面に沿う流れの観測を行っている。いずれの場合も、1ケースあたり10分程度の連続撮影を行うために、水中カメラのセットには固定用架台を使用している。船を用いた観測では、架台のセットのしやすさと安定性に気を使い、十分な剛性を持ったものを用いる必要がある。

実海域画像としては、この他に各港湾局の実施している各種調査用の水中ビデオ画像を収集し、解析に用いている。今回使用した画像の一覧を表-6に示す（写真1～4参照）。それぞれ使用している記録媒体が異なるために、VHSビデオテープに媒体変換して画像解析装置に入力した。

4.2 カラー画像の情報量

一般に水中のビデオ画像は青みがかっている。そのことが、かえて水中であることの雰囲気強調し、鑑賞用の画像としては、好ましいと感じられることもある。しかし、画像の情報を利用する立場からは、カラーであることによる情報の豊富さが活かされておらず、情報量の欠落が生じていると考えられる。どのくらいの情報量の欠落が生じているかの指標として、ここでは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、それぞれの画像で特徴的と思われる画像から、特徴を抽出する測線を設定し、そこに現れて

いる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-7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。これは、対象物自体が単色に近いことも原因の一つであるが、3.3節で検討したように Q_{01} と Q_{02} の差が小さいために十分な情報量を収録できなかったことが原因と考えられる。このことは、それぞれのデータの分散が小さいことから裏付けられる。また、第一主成分の構造を見ると、2.3節で検討したHSI表色系のI成分(明度)に対応していることが判り、ほとんどのカラー画像の情報量が白黒画像の情報量と等価であることが判る¹⁹⁾。

FFTによる空間周波数への変換結果を図-20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もとづき算出した物である。代表的な特徴量のスケールは10~20Pixel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が、海中(PSFD)や、海草(SWFD)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(BLFD)や、砂場(SDFD)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、画像情報の欠落がG信号でのみ選択的に生じていることを示している。

4.3 色情報の付加と欠落

カラー水中ビデオ画像における情報量が、I(明度)で代表できることと、RGB信号における情報の選択的な欠落が生じることは、一見矛盾しているように見える。確かにSDFDなどの砂場における画像では、G信号の選択的な欠落が生じており、かつ第一主成分の寄与も小さくなっているため両者が合いいれない条件であることを示している。言い替えると、この場合には情報の選択的な欠落ではなく、R、B信号に対し選択的な付加が生じていると言える。しかし、BLFDなどの捨石付近での画像は、第一主成分の寄与が大きいにもかかわらず、G信号の選択的な欠落が生じている。こうした状況がどう

表-6 各種調査水中ビデオ画像

ファイル名	対 象	観 測 点
PSFD20	明るい海中	KN港沖
SWFD20	岩と海草	NA港
S L F D 20 21	砂場 砂場(フラッシュ有)	JG浚渫箇所 JG浚渫箇所
B L F D 20 21 22	日向の岩場 日陰の岩場 岩と付着生物	NZ港防波堤 NZ港防波堤 WJ港

表-7 各種画像の主成分寄与率

ファイル名	平 均	分 散	第1主成分*	寄与率
PSFD20	R 106	12	a 11	69
	G 185	10	b 9	
	B 213	10	c 6	
SWFD20	R 185	28	a 27	82
	G 146	22	b 20	
	B 17	15	c -8	
S D F D 20	R 17	8	a -5	55
	G 84	6	b 4	
	B 185	8	c 8	
S D F D 21	R 0	1	a 0	56
	G 146	8	b 6	
	B 224	8	c 6	
B L F D 20	R 42	12	a 10	73
	G 152	12	b 10	
	B 255	0	c 0	
B L F D 21	R 10	8	a -1	76
	G 75	6	b 4	
	B 146	16	c 16	
B L F D 22	R 76	17	a 16	87
	G 151	20	b 19	
	B 165	17	c 15	

*) 第1主成分 = a · R + b · G + c · B

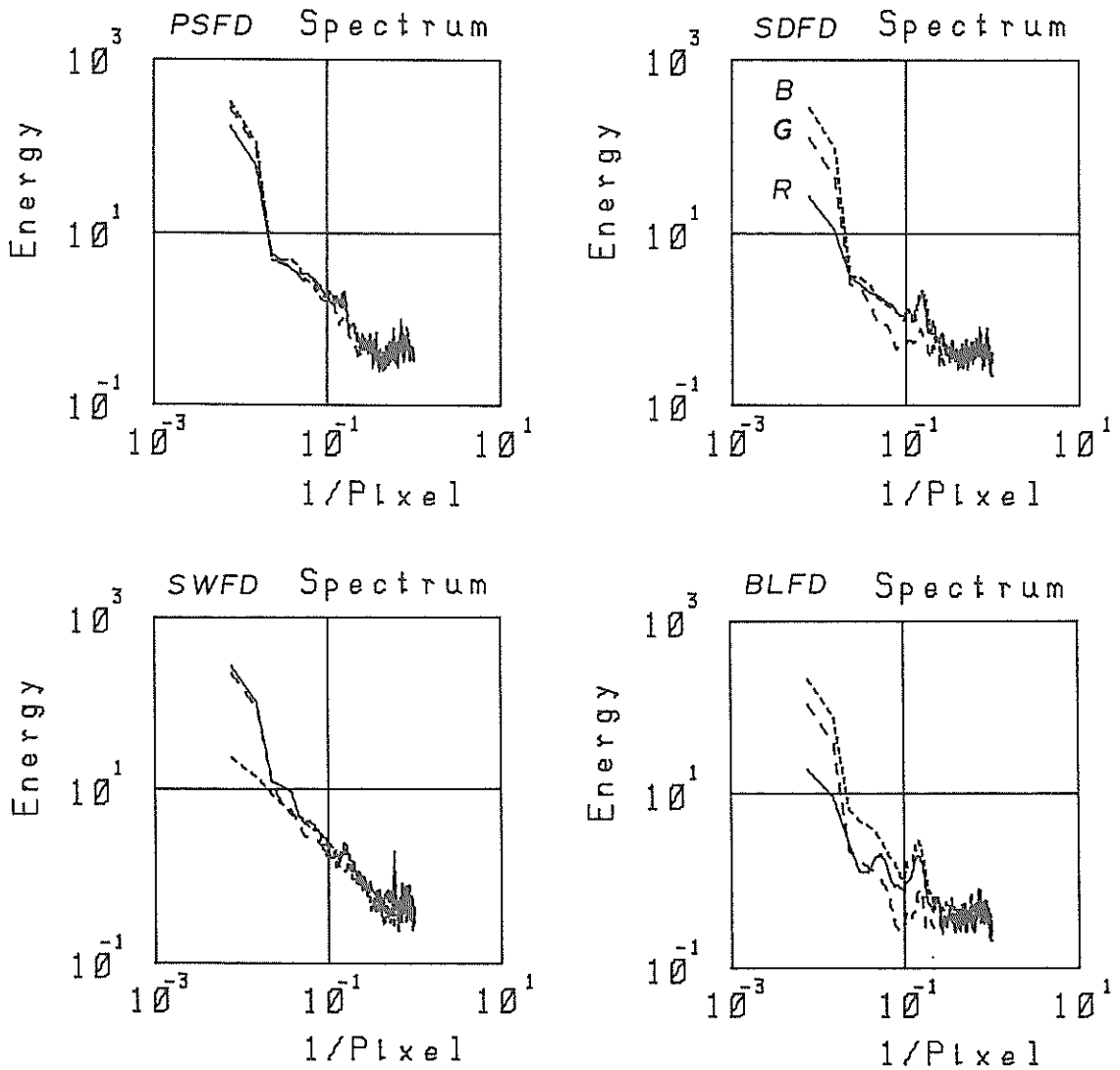


図-20 各種画像の空間周波数上のエネルギー強度
 (左上: 明るい海中の画面 (PSFD20) 右上: ストロボ光のある砂場 (SDFD21)
 左下: 黄色光に照らされた岩 (SWFD20) 右下: 日陰の岩場 (BLFD20))

横軸: 空間周波数
 縦軸: RGB各信号成分別エネルギー強度

して生じるのか光の伝達モデルを基に説明を試みる。
 図-21は海域における白の 패턴の写し込み画像から得た輝度値をRGB信号別に表示する。すると、R信号は Q_{02} のパターンに、B信号は $Q_{01} - Q_{02}$ のパターンに相当することが、図-4との対比で判る。つまり、R信号は環境光に大きく依存しており、B信号は対象からの反射光に大きく依存していることが判る。そして、G信号はその中間の強度を持ち、環境光と反射光のつりあ

いを示していると考えられる。したがって、環境光と反射光に強い相関がある場合には、R信号とB信号とは相関関係を持ち、G信号も追隨して変化する。一方、環境光と対象からの反射光が独立している場合には、RGB信号間の相関が低くなり、選択的な信号強度の変化が生じるものと考えられる。海中における環境光はおもに自然光により構成され、対象からの反射光はライトと自然光の合成であるので、両者のバランスが崩れたときに情

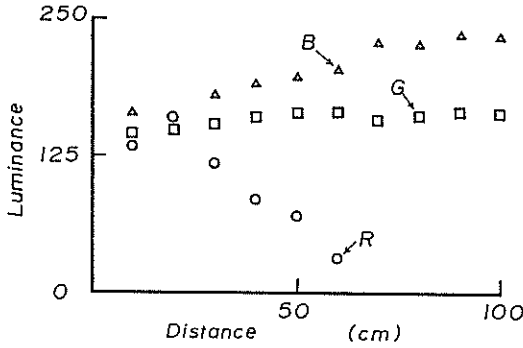


図-21 白色のパターンの輝度値の距離による変化
 (横軸：カメラから対象までの距離
 縦軸：画像処理装置で測定した輝度値)

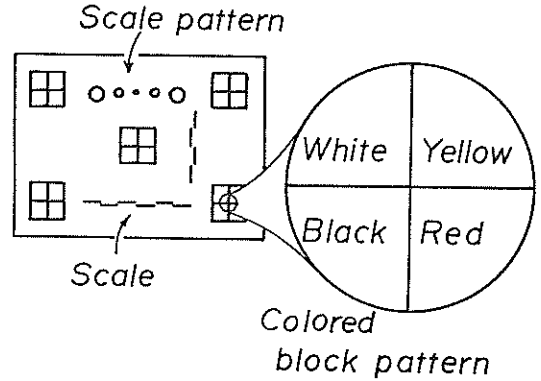


図-22 パターンボード例
 (カラーブロックパターン、スケールパターン、
 スケールを持つパターンボード)

報の選択的な欠落または付加が生ずると考えられる。

捨石の画像では、捨石の間に自然光の陰ができるので、この部分では、環境光をライトが上回り、そのほかの部分では、環境光が支配的であるので、両者のバランスが崩れているために情報の選択的な欠落が生じていると考えられる。常にライトの光量が十分であると、砂場の画像のように、情報の付加が起こる。

情報の付加が生じているのか、欠落が生じているのかは、情報の選択性が局所的に生じているのか、大域的に生じているのかで分かれている。従って、色情報の付加を起こすためには、環境光として、自然光が十分あり、かつライトによる投光が画面全体において行き届いている必要がある。

4.4 画像のパターンボードによるクラス分け

実海域での水中ビデオ撮影においては、色情報は、I (明度) 成分に集約される。その大きさは、光伝達モデルを用いて決定論的に推定することが可能であるが、3章で検討したように、各パラメータの定性的変化を整理することはできても、水中の様々な状況の変化に対応できるような資料の作成は困難である。そこで、現場で撮影を行う際に、パターンボードを用いて、画像のキャリブレーションを行い、I成分を用いた光伝達モデルにもとづく画像評価を行う方法を提案する。

使用するパターンボードは、図-22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必要である。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。

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、①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、②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。③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の具体的な使用法は、おもに白と黄色を用いて、近距離の撮影時のハレーションや絞りの開けすぎを調整し、黒と赤を用いて、遠距離の撮影時の絞りの閉めすぎや環境光の強度とのバランスを調整する。4.3節で示したようにR信号(赤色)は環境光に大きく依存しているからである。各色はモニター上で分別し易いように隣接して描かれ、境界の画像より判断をする。特に、対象物の色や大きさがあらかじめ限定される時には、それに近い色をカラーブロックパターンに加えて、さらに細かい調整をすることが望ましい。

図-23にパターンの見え方の分類を示す。パターンの見え方の内、大文字ABCで区分されているのは、黒と赤のパターンの見え方で、主に環境光の輝度の変化を確認している。黒のみに注目すると、近くと遠くで変化が無い場合(A, Bのケース)は、 L_0 が短い場合に対応している。Cのケースの様に L_0 が長いと言うことは、環境光が十分であることを示している。さらに、黒と赤の対比は、対象からの反射光の強度が十分であるかの指標になる。小文字abcで区分されているのは、白と黄色のパターンの見え方である。こちらは、主に対象からの反射光の強度を確認することに使用できる。白のバ

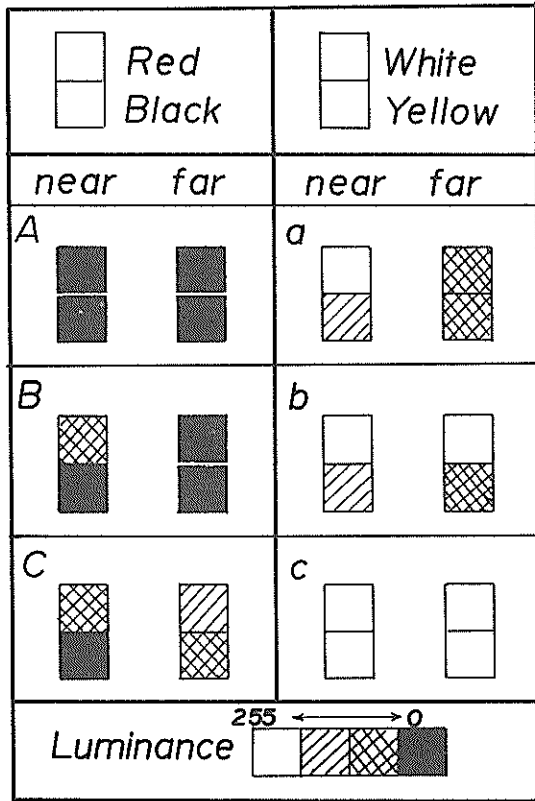


図-23 カラーブロックパターンの見え方

ターンに注目すると、近くと遠くで変化のある場合（aのケース）には、海水による反射光の減衰が生じていることを示し、 L_{max} が短くなっていることに対応する。また、自然光には、黄色を白と区別する成分であるR成分が少ないことが多いので、白と黄色のパターンの対比により、ライトによる対象物の反射光が十分であるかどうか判定できる。すなわち、黄色のパターンに距離による減衰が生じている場合には、対象物の反射光の中にライトによるものが多く含まれていることを示している。以上の説明は、相対的な反射光、環境光の傾向に対するものである。画像の情報量は白と黒の輝度差（ $Q_{01} - Q_{02}$ ）によりあらわされている。まず、白と黒のパターンを見て露出を決定し、白と黒が分離されていることを確認してから、上記のような検討を行う必要がある。

これをまとめた物として、表-8に画像評価の一覧を示す。最も望ましいと考えられるのは、Bとbの組合せである。Aとaの組合せでは、環境光が不足しているために、画面全体が露出不足になりやすく、Cとcの組合

表-8 画像の評価

白黄 黒赤	a	b	c
	A	露出不足 ← 環境光 < ライト	適正
B			
C			

表-9 実海域画像の評価

白黄 黒赤	a	b	c
	A	(1.6) (1.2)	(3.7)
B		(3.6)	(3.6)
C	(2.0) (3.6)	(1.9)	(1.6)

() 内はmg/l単位のSS

せでは、露出過多で、対象物がハレーションを起こしている可能性が高い。aからcでは、cに近いほどライトの光量が大きく、AからCでは、Cに近いほど、環境光の光量が大きい。

この表の使用例として、久里浜地先で行った撮影時の画像を評価したときの結果を表-9に示す。SSの低いときには、環境光が十分でないために、ライトのバランスが難しく、露出の調整がうまく行っていないことが判る。SSが高くなると環境光が安定し、良好な画像が撮れていることが判る。

4.5 トレーサ画像の特性

撮影の対象となるのは、海中の構造物や、生息する生物であることが多い。しかし、それを取り巻く環境のひとつとして、流れ場の観察も重要な情報である。その定量化については、5章で検討を加えるが、流れ場の可視化方として、トレーサをけん濁させる方法について、画像の面から検討を加える。

トレーサは、測定する対象や投入条件、検出方法等を

考慮して選択される。例えば、拡散の方向、大きさを調べるために蛍光染料を用いたり、水表面での流況を調べるためにフロートを投入したりするのは、測定したい対象の違いによるトレーサの使い分けである。水中ビデオ撮影においては、作業が水中で行われるために、トレーサの選択、投入法に関して制限を受ける。基本的に、水中ビデオ撮影は、2人のダイバーがカメラの操作と状況の記録、補助作業を分担している。作業量にあまり余裕が無いので、トレーサ投入は、補助者がひとりで簡単に行える必要がある。そのためには、トレーサが携帯可能な大きさ、量を持ち、水中で変質せず、特別な投入装置を必要としないと云った条件を備えていなければならない。また、水中に投入されたトレーサが海域を汚染することがあってはならないの言うまでもない。

今回の撮影の目的が流況の観測であり、比較的近距离で行われたので、中立浮遊粒子として、一昼夜水に付け込んで比重調整した1mm×3mmの黄色紙片と直径1mm～2mmのステレンビーズ（半透明）をトレーサとした。黄色紙片は、エッジの鋭い画像、ステレンビーズはエッジの鈍い画像を得ることを目的として選択された。また、久里浜地先の撮影においてマリンスノーを写し込み、その画像を用いて、トレーサとしての画像特性を比較した。

評価は、実画像の輝度分布による直接的な比較と、画像を空間周波数領域におけるS/N比の比較を行った。

ケース名と特徴を表-10に列挙する。

トレーサによる結果の違いを図-24に示す。黄色紙片（TRFD30）は、紙片の向きにより大きさが変化するために明確なピークこそ示さないものの、トレーサスケールのエネルギーは大きく、ステレンビーズ（TRFD31）やマリンスノー（MSFD01）に比べて分離特性がよいことが判る。次に、黄色紙片を用いて、写し込みの状況を変えた場合の画像の変化を図-25に示す。ピントがあるかどうか、トレーサが近くにあるか遠くにあるかで場合分けしたが、ピントは見かけ上の大きさの変化に影響するだけで、いずれの場合も十分な画像が得られている。

ステレンビーズやマリンスノーといったトレーサでは、S/N比が悪く、ノイズに埋もれてトレーサの抽出が難しいことが判った。そこで、2.4節で検討したようなフィルターを作用させることによって画像の強調を行い、その後抽出をする必要がある。その一例として、マリンスノーの写し込み画面に5×5Pixelのメディアンフィルターを作用させた場合の画像の変化を図-26に示す。原画像（MSFD11）よりフィルターによってピークノイズをカットした画像（MSFD12）の方がS/N比が大きく改善されていることが判る。特に、マリンスノーは場所、時間、時期等により組成、光反射・吸収特性が変化するので一般的なことは言えないが、適当なフィルターを作用させることにより、画像を強調してトレーサとして分離することが可能であることを示している。

表-10 トレーサ画像

ファイル名	トレーサ	備 考
TRFD 24 25 26 27	黄色紙片	(トレーサ位置：ピント) 近 : 合っていない 近 : 合っている 遠 : 合っていない 遠 : 合っている
TRFD 30 31	黄色紙片 ステレンビーズ	
MSFD 01 02 11 12	マリンスノー	小 大 メディアンフィルター（5×5Pixel）

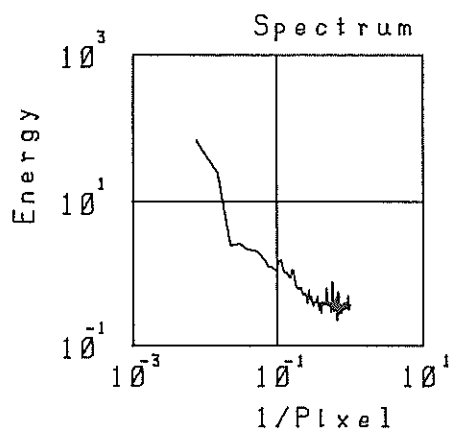
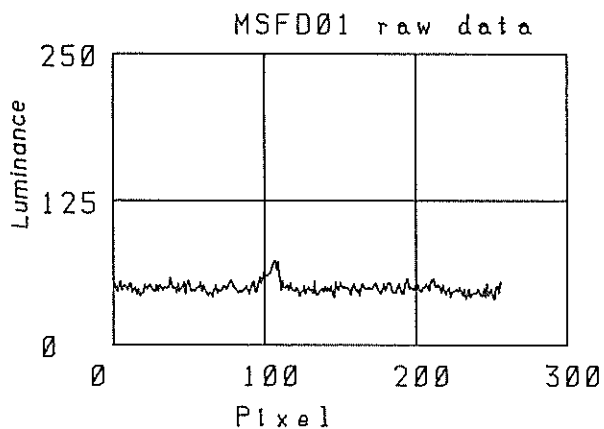
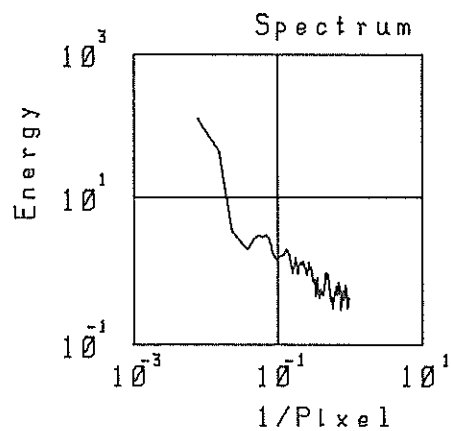
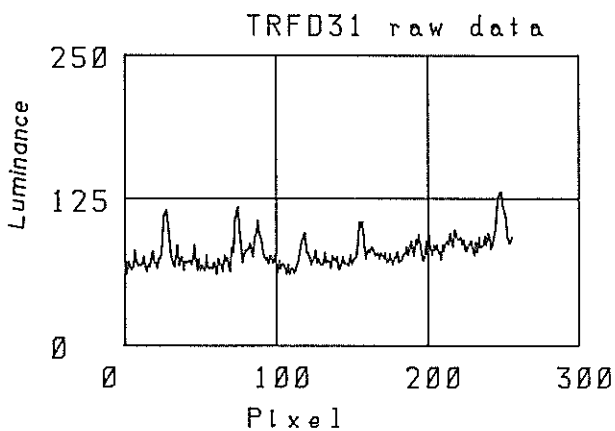
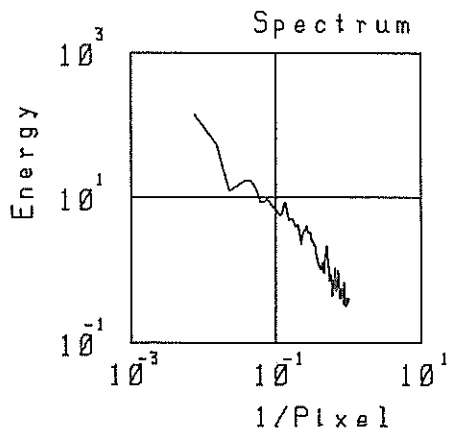
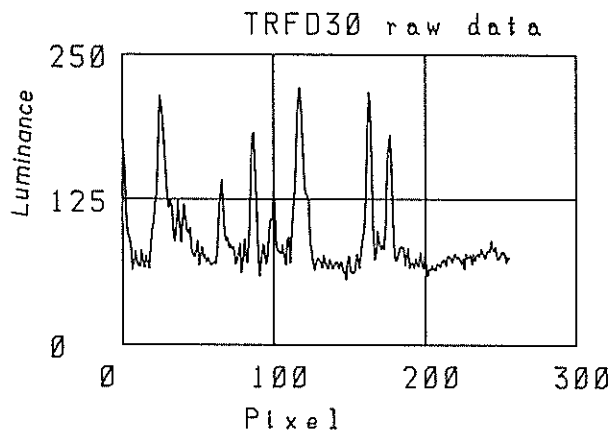


図-24 トレーサ画像の評価 (白黒画像)

(TRFD30: 黄色紙片

TRFD31: スチレンビーズ

MSFD01: マリンスノー)

左図: 測線上の信号強度

右図: 空間周波数上のエネルギー分布

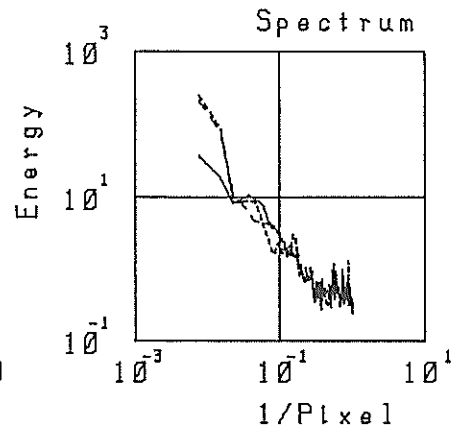
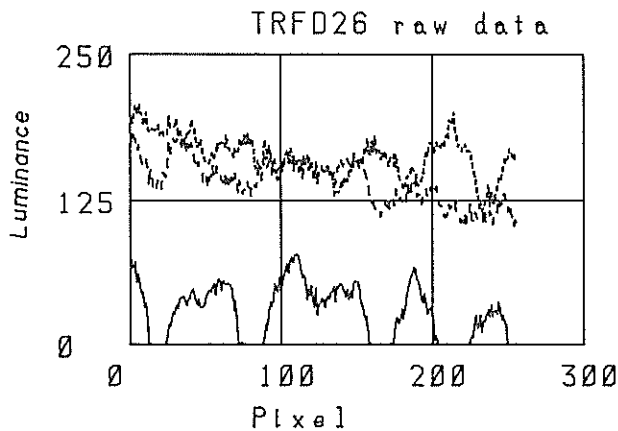
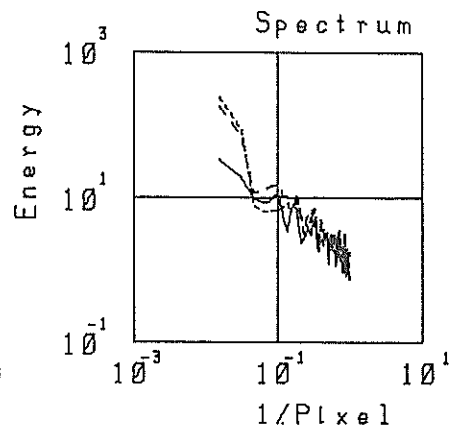
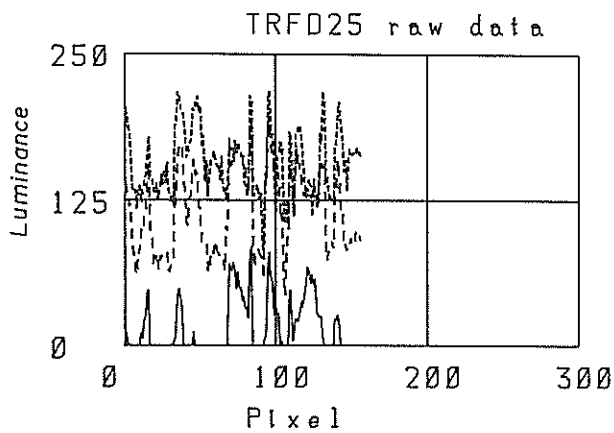
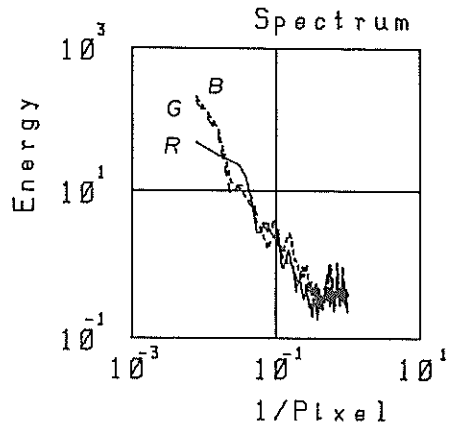
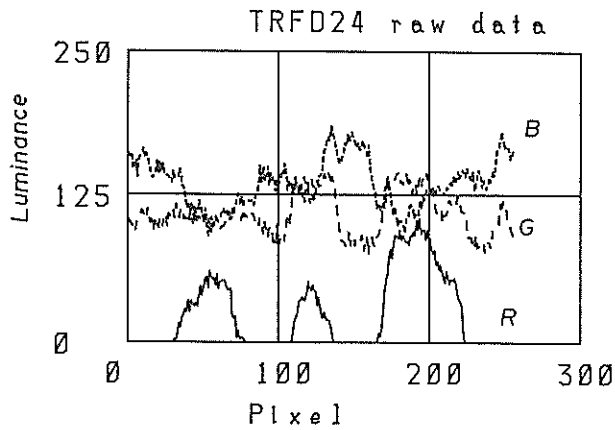


図-25 写し込みによるトレーサ画像の変化 (カラー画像)

(TRFD24: 近くのトレーサ, ピンボケ)

TRFD25: 近くのトレーサ

TRFD26: 遠くのトレーサ, ピンボケ)

左図: 測線上の信号強度

右図: 空間周波数上のエネルギー分布

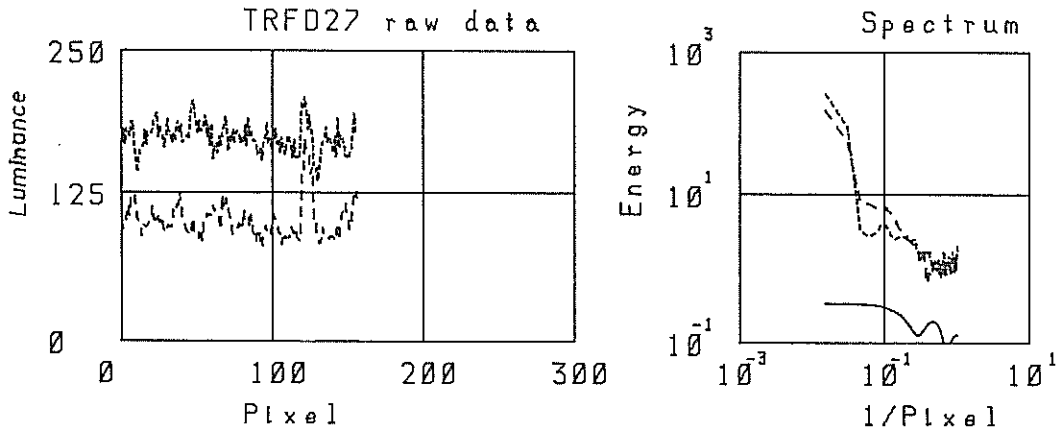


図-25 写し込みによるトレーサ画像の変化(カラー画像)つづき
(TRFD27: 遠くのトレーサ)

左図: 測線上の信号強度
右図: 空間周波数上のエネルギー分布

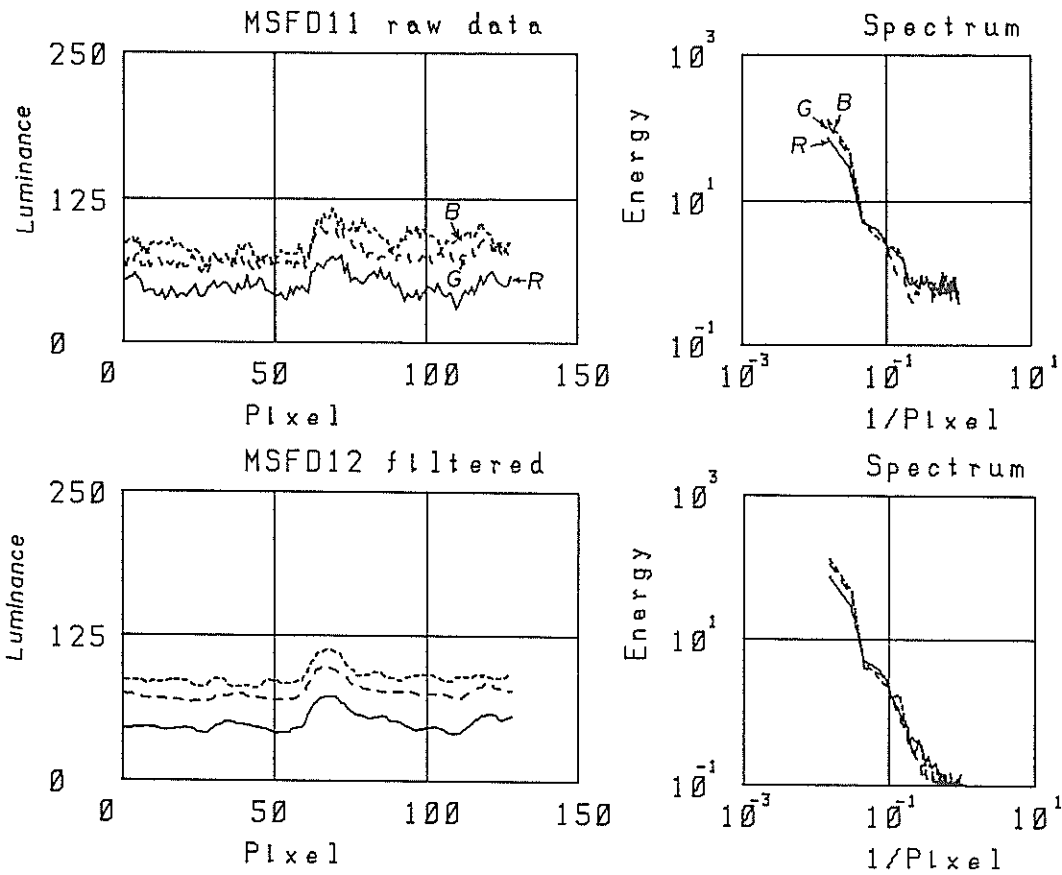


図-26 メディアンフィルターによる画像の変化(カラー画像)
(MSFD11: 元画像
MSFD12: フィルター作用後の画像)

左図: 測線上の信号強度
右図: 空間周波数上のエネルギー分布

5. 流れ場の計測への利用

本章では、収録された水中ビデオ画像情報の高次利用法の一例として、トレーサを流れに懸濁させ、可視化された流れ場の情報をもとに流速を測定する方法について検討し、適用例を示す。

5.1 流速推定法

画像を利用して、流れ場を解析することには従来型の流速計による測定に比べて3つの利点がある。第1に非接触で計測できることであり、微細な流速場を測定する際には重要なことである。第2に空間的に広がりを持った場を同時に取り扱えることで、多点計測ができることその他に、測定している流速のチェックが容易になるという精度保証上の利点もある。第3に測定している場の原画像が残ることで、感覚的な現象の理解のためには、それだけで強力な手段となる。

しかし、以上に述べた利点があるとしても、計測に使用する機材、人材の準備は大きな障害となる。したがって、他の水中ビデオ撮影を伴う調査との同時実施が有利であり、そのデータを高次利用する形で望ましい。そのためにも、前章で述べた画像評価をして良好な画像を得

る必要がある。

得られたトレーサの写し込み画像から流速を推定する方法は、すでに多くの研究者により、各種のアルゴリズムが開発されている^{14)~16)}。流速の推定は、対象物の抽出とその移動距離、移動時間の計測に集約され、それぞれの方法を分類するために表-11の様な分類項目が挙げられる。これらの項目は互いに関係が深く、従来の方法ではある程度決まった組合せでアルゴリズムが構築されている。ここでは、説明の都合上、流跡法・相関法・追跡法の3つの方法に分類する。流跡法とは、対象の流跡線を1画面上に取り込み、その起点と終点の距離を判別して移動距離を出し、流跡線の記録された時間をシャッター速度または、ストロボ発光の時間より算定する方法である。これは、従来の35mm写真解析による流速測定法の延長上にあり、解析の段階の自動化を目指してビデオによる画像の収録が行われている。相関法は、分散性の粒子を流れ場全体に懸濁させ、その分布形状が小領域内では保存されることを利用して、2画面間で小領域の比較を行い、その指標に小領域間の相関係数を用いる方法である。追跡法は、比較的大きめの中立粒子をトレーサとして、その単体の位置を2~4画面間で追跡し、移動

表-11 流速推定法

	分類項目	細目
対象物の抽出	対象	トレーサの軌跡 トレーサの分布形状 トレーサ単体
	トレーサ	タフト 分散粒子 おが屑 アルミ粉 中立粒子 スチレンビーズ ナイロン12 コロイド 模擬データ
移動距離	対象の対応	流跡線判別 参照画面間の相関係数 移動推定
	参照画面数	1画面 2画面 それ以上
移動時間	撮影機材	写真 CCDカメラ
	撮影方法	シャッター ストロボ

距離を推定する方法である。追跡の方法は、2画面間の移動距離を指標とした単純なものから4画面間の移動距離・方向・対象の大きさを指標としたものまで数多くのアルゴリズムが存在する。以上3つの方法の得失を列挙すると、表-12の様になる。

5.2 トレーサの撮影条件と計測精度

今回の水中ビデオ撮影で得られたトレーサ画像は、分布に偏りがあるものの、背景との分療は良好である。また、解析に用いるのがパソコンであることを考えると、計算量の制限から、追跡法による流速推定が有利であろう。そこで、時刻の異なる画像間での特定粒子の対応条件として、画像間で元の座標に最も近い粒子を新しい画像での移動先とする追跡法（最近法）を適用する場合を想定した。まず、この際のトレーサの投入条件（投入濃度 p ）と計測の精度について検討する¹⁷⁾。今回用いた追跡法は最近法を基本とし、対応条件を付加したものであり、詳細は次節で説明する。

以下の議論は、すべて画面上での療散量を基本としている。これらの量は実海域での長さ S (cm)と時間 T (sec)は、画像収録間隔 ΔT (sec)、焦点距離 f 及びカメラと対象までの距離 L (cm)を用いて近似的に、

$$s = f \cdot S / L \quad [\text{Pixel}] \quad \dots\dots(14)$$

$$\tau = T / \Delta T \quad [\text{Step}] \quad \dots\dots(15)$$

と表される。参考までに今回の撮影においては、 $f = 815\text{Pixel}$, $\Delta T = 1/15\text{sec}$ であった。

正しくトレーサが対応付けられるための投入濃度の条件を検討する。平均流速 u (Pixel/Step)の流速場において、移動距離最短条件によるトレーサの対応を取る場合、一次元で考えると、図-27の様に $\Delta \tau$ の時間差でトレーサ a は、 a' の位置に移動する。従って移動距離

l は、

$$l = (u + u') \cdot \Delta \tau \quad \dots\dots(16)$$

となる。ただし、 u' は流速 u の変動成分である。つまり、他のトレーサ b と注目しているトレーサ a を最近法で分離するためには、 $\tau + \Delta \tau$ における位置 b' が a' を中心とし l より外側にある必要がある。したがって、距離 l_{ab} は、

$$l_{ab} > 2 \cdot l \quad \dots\dots(17)$$

である必要があり、トレーサの投入濃度 p (1/Pixel)の条件は、式(16)、(17)より、次のようになる。

$$p < 0.5 / ((u + u') \cdot \Delta \tau) \quad \dots\dots(18)$$

同様に、二次元に拡張して考えると、 p の条件は、

$$p < \frac{1}{\pi \cdot (u + u')^2 \cdot \Delta \tau^2}$$

である。 u' について、その標準偏差が u の1/10, 1/5, 1/3, 1倍である正規分布を仮定すると、9割以上の粒子が正しく対応付けができる条件は、図-28に示された線の左下の領域になる。測定対象の u が決まれば図-28より、対応付けが正しくできるようにトレーサの投入濃度条件 p および $\Delta \tau$ が設定できる。ただし、トレーサは水中で一様にちらばっていると仮定しているの、実際は見かけ上濃度 p が高くなることも考慮しなければならない。

図-28中、左下の領域が、推定確率 E の高い領域となっており、 p または u が大きくなるほど E が小さくなる。流速の分布測定のためには p を高くする必要があり、必要な p と推定確率 E との関係から、 $\Delta \tau$ が制限される。

つぎに、正しく対応付けられたトレーサの流跡線から計算される流速の精度を検討する。それぞれ、 l , p に

表-12 流速推定法の得失

推定法	必要な画像の情報	精度	拡張性	計算効率	誤対応の修正	他の方法との併用
流跡法	対象の流跡線 (起点と終点が判別できること)	撮影方法により時間の分解能を上げる事ができる	自動化は難しい	入力に時間がかかる 計算量は少ない	修正は難しい	難しい
相関法	対象の分布位置、形状、輝度差 空間的に一律な画像	対象の対応率は高い 空間分解能は低い	自動化に向く 機能の拡張が計算量にひびく	計算量が多い メモリが多く必要	誤対応が少ない	可能
追跡法	対象の位置、大きさ	対象の対応率は低い 空間分解能は高い	自動化に向く 機能の付加が容易	計算量は少ない	誤対応を抑える アルゴリズムが必要	可能

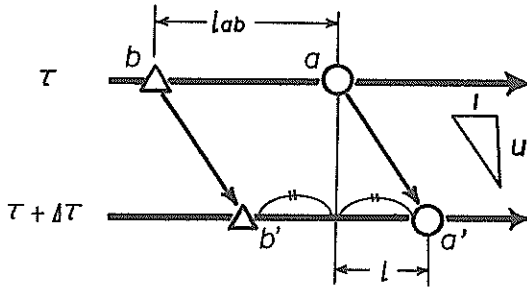


図-27 一次元に限したトレーサの存在範囲
(a: 注目しているトレーサ
b: aと判別したいトレーサ)

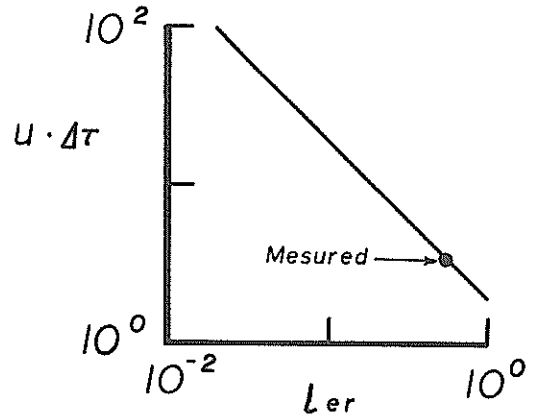


図-29 トレーサ移動の相対誤差 l_{er} の分布
(横軸: l_{er}
縦軸: 移動距離 (画素))

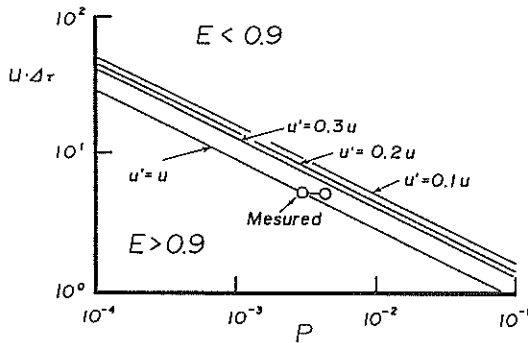


図-28 トレーサの投入濃度 p と推定確率 E
(横軸: 対象画面中のトレーサ濃度 (個/画素)
縦軸: 移動距離 (画素))

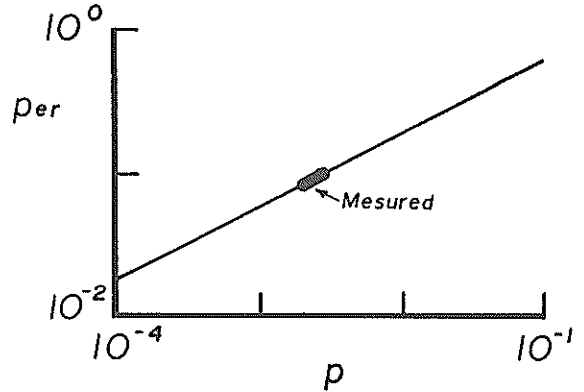


図-30 トレーサ間距離の相対誤差 p_{er} の分布
(横軸: トレーサ濃度 (個/画素)
縦軸: p_{er})

は量子化による誤差が含まれている。量子化限界が1 Pixelであることを考慮すると、移動距離の相対誤差 l_{er} とトレーサ間の距離を投入濃度で代表させた相対誤差 p_{er} とは、

$$l_{er} = 2 / (u \cdot \Delta \tau) \quad \dots\dots(20)$$

$$p_{er} = 2 \cdot p^{1/2} \quad \dots\dots(21)$$

となる。 l_{er} と p_{er} の分布を図-29, 30に示す。図-28に示された流速の分離条件の範囲においては、かならず $l_{er} > p_{er}$ であることは明らかである。したがって、流速の精度は、式(20)で示される l_{er} で規定される。

ここで示した図表は、流れ場を一様流、一方向流に限り、しかもトレーサの対応条件として、移動距離のみを考慮したものである。流速の計測精度に対して定性的な評価を与えることができた。また、トレーサの撮影条件として、投入濃度 p や撮影間隔 $\Delta \tau$ 、流速 u を用いて流速の分離条件を示し、測定の限界を示す指標の検討を行った。

5.3 海底面における水平流速の推定例

実海域における計測例として、平成2年1月19日に夏島地先で海底面に対して鉛直下向きにセットされた水中ビデオカメラで測定された海底面直下の画像から、流速を測定した例を示す。海底面とカメラの距離は約70cmであり、トレーサは海底付近でダイバーにより流れの上手から静かに投入され、海底より約10cmの高さを水平に流下していることを目視で確認している。トレーサとしては、背景との色の分離が良好であった3mm×1mmの黄色紙片を一昼夜水に付け込んだものを用いた。

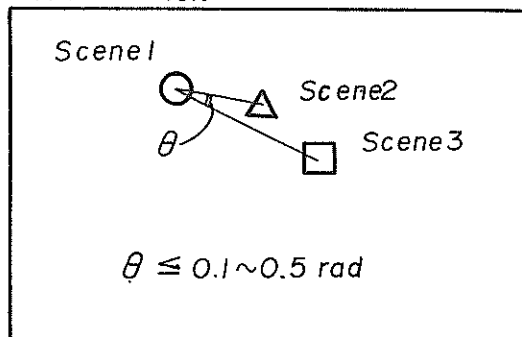
画像は、1/15secごとに512×512Pixelの領域に256階調で取り込まれている。解析範囲として全領域の内から128×128Pixelを指定し、トレーサが40~50個写り込む画面を得た。

推定手順は、①得られた画像から、トレーサを二値化する。②各トレーサ毎に重心座標と大きさを計測する。③各時刻毎にファイル化し記憶させる。④ファイルを順次読みだし、3画面間で対応付けを行い流跡線を得る。⑤得られた流跡線の長さ、方向と画像の測定時間間隔より流速を計算し、⑥目的の場所での流速に補間し、その位置での流速の時間変化を出力する。

解析用の再生画面から読み取ったトレーサの濃度 p とプロベラ式流速計により得られた平均流速 u から、測定時の条件を図-28, 29, 30上に示す。図-28より十分な計測を行うためには、トレーサ濃度 p を小さくするか、測定間隔 $\Delta\tau$ を小さくする必要のあることが判る。そこで、トレーサの対応付けに、図-31に示すような、3画面間で移動方向(θ)が設定したしきい値以下であること、対応粒子の大きさ(a)が設定したしきい値以下で、かつ大きさの変化が一割を越えないといった条件を付加した。移動方向の制限は、移動距離 l に選択性をもたせ見かけ上 $l' (=u \cdot \Delta\tau)$ を小さくし、大きさの制限は、対応粒子をふるい分けて見かけの投入濃度 p を小さくしている。式(19), (20)から判るようにどちらも推定確立を上げる方向に作用する。表-13には、移動方向のしきい値を $0.5 \sim 0.1 \text{ rad}$ 、大きさのしきい値を $500 \sim 10 \text{ Pixel}$ に変化させたときの誤対応の発生した件数を示す。図-32には、移動方向のしきい値を $\pm 0.1 \text{ rad}$ 、大きさのしきい値を 100 Pixel とした場合の計測例を示す。この位置での推定流速は平均値 6.8 cm/sec であり、変動の標準偏差は 0.7 cm/sec で、変動係数 σ / u_{mean} は 0.1 であった。5.2節の検討により、トレーサの対応に制限を加えない場合における誤差は $P_{\text{er}} = 0.1, l_{\text{er}} = 0.4$ である。トレーサ対応付け時のふるいわけによる精度の改善効果

のおかげで平均値に関しては、十分な精度をもって計測できている。しかし、変動の大きさが量子化限界の1 Pixelに近いため、この位置での流速変動に関する情報には不確かさが残っているといえる。

Restriction of direction



Restriction of size

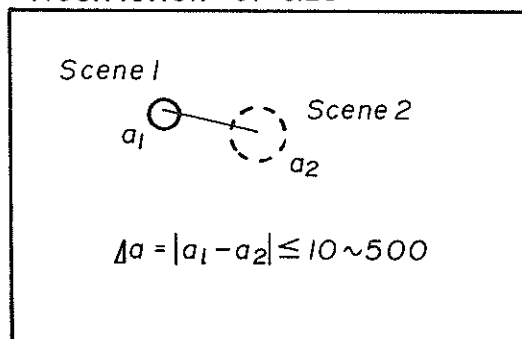


図-31 粒子の対応付け

(上図：移動方向変化 θ による制限

下図：トレーサの大きさ a による制限)

表-13 移動方向のしきい値と誤対応件数

大きさ (Pixel)	移動方向 (rad)				
	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
500	4 / 21	4 / 20	3 / 18	3 / 18	2 / 12
200	2 / 18	2 / 17	1 / 15	1 / 15	1 / 11
100	1 / 16	1 / 15	1 / 14	1 / 14	1 / 10
50	1 / 9	1 / 8	1 / 8	1 / 8	0 / 0
10	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0

存在粒子数 44 (誤対応粒子数 / 対応粒子数)

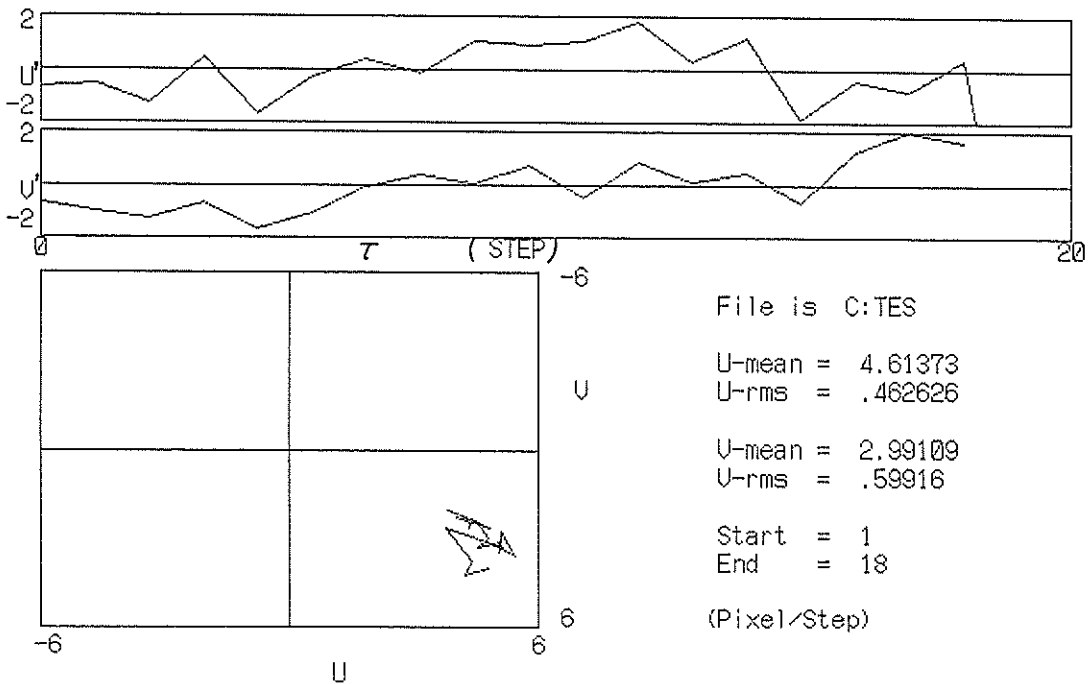


図-32 流速推定例

(上2図：水平および垂直流速成分の変動

下左図：流速成分の時間変化

下右：測定結果諸量)

6. おわりに

本論文で得られた結論を章別に列挙する。

3章では、2章において提案した光の伝達モデルを検証し、定性的な性質が再現されていることを確認した。光の減衰率を距離の関数として表すと、減衰係数の値はSSと相関を持ち、距離の1~2乗に反比例することが判った。また、測定上の注意点として、10~15Pixel以下の大きさを持つ対象物に関しては、輝度値の減衰が生ずることも確認した。これは、画像収録・処理システムに依存すると考えられるので、事前にそれぞれ使用する撮影・処理系で確かめる必要がある。

4章では、カラー水中ビデオ画像の持つ情報量が、一般的には白黒画像の情報量と同等であり、さらに色情報を付加するためには、光源や撮影方法について検討する必要があることを示した。また、3章で検証した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、利用方法を解説した。さらに、画像情報の高次利用のために、トレーサ画像の特性を比較し、黄色紙片を用いたトレーサが有効であることを示すと共に、判別の難しいトレーサの画像にフィルターを作用させることによって、利用可能な画像強調

が行えることを例示した。

5章では、画像情報の高次利用として、トレーサ写し込み画面より流速測定を行なった例を計測精度の考察と共に示した。簡易な操作で平均流速を測定することができた。これによって、画像情報の高次利用の可能性を示すことができた。

なお、今後の課題として、画像のフィルタリングに関する手法の整理や、流速測定法の信頼性の向上のための、トレーサの選択、投入法に関する検討、計測精度の定量的な評価法の確立がある。また、水中ビデオ画像情報による群生生物の生息量の計測や、同定の自動化、水質・環境評価の総合的指標の抽出等といった問題に対しても、多くの情報を持つ水中ビデオ画像情報の高次利用の可能性を検討したい。

本報告は、特別研究「港湾施設による海水流動と海洋環境の制御技術に関する研究」の一部として実施した研究の成果であり、本研究に用いた画像処理装置、水中ビデオ撮影装置等は特別研究の中で整備したものである。東京湾現地水中撮影の一部は社団法人海洋調査協会に委託して実施した。特別研究の実施にあたって、海洋水理部長堀江毅博士の御指導を受けた。記して深く感謝します。(平成2年6月30日受付)

参考文献

- 1) 運輸省第四港湾建設局：岩砕漁礁，1976
- 2) 運輸省第五港湾建設局：四季の海生生物—防波堤漁礁効果調査—，1984
- 3) 宮城県石巻港湾事務所：石巻港港湾計画に伴う石巻湾の環境調査，1982
- 4) 運輸省第二港湾建設局：釜石港防波堤'80，1979
- 5) 東京都港湾局：よみがえれ東京の海，1976
- 6) 宮本・増田：港湾域の水産生物環境条件調査について，北海道開発局技術研究発表会講演概要集(4)，pp.247~252，1988
- 7) 杉森・坂本編：海洋環境光学，東海大学出版会，pp.145~158，1985
- 8) 福江・下田・坂田：HSI-RGB変換に関する諸方式の比較，第1回色彩光学コンファレンス，pp.91~94，1984
- 9) 高木・鳥脇・田村編：画像処理アルゴリズムの最新動向，新技術コミュニケーションズ，pp.188~204，1988
- 10) 運輸省港湾技術研究所：港湾構造物工事における濁り等の水中ビデオ撮影技術の開発業務報告書，54p，1988
- 11) 運輸省港湾技術研究所：水中浮遊物の挙動ビデオ撮影業務報告書，131p，1989
- 12) 運輸省港湾技術研究所：水中ビデオ撮影業務報告書，39p，1990
- 13) 石谷・馬場：視界情報による潜水艇の制御情報取得に関する考察(第1報)，日本造船学会論文集，vol.164，pp.221~230，1988
- 14) 小林・佐賀・瀬川：二次元流れ場の実時間画像計測の一例，流れの可視化，vol.7，pp.289~292，1987
- 15) 西村・武若：VTR画像の相関解析による砕波時内部流速分布の推定，第35回海岸工学講演会論文集，pp.45~48，1988
- 16) 加賀ら：可視化画像による流度計測のためのトレーサ追跡方法の検討，流れの可視化，vol.8，pp.297~300，1988

記号表

a	: k_1, k_3 にかかると定数項
B	: RGB成分の内の青
E	: 流速推定確率
f	: 焦点距離
G	: RGB成分の内の緑
I	: HSI成分の内の明度
K	: 光束消散係数
k_1	: ライトから対象物までの光の減衰率
k_2	: 対象面での反射率
k_3	: 対象物からカメラ前面までの光の減衰率
L	: カメラと対象物の距離
L_0	: 画面上の輝度値が一定値に収束する領域の長さ
L_{max}	: $Q_{01} = Q_{02}$ となる長さ
l	: トレーサ移動距離
l_{ab}	: トレーサ間の距離
l_{er}	: 移動距離による距離推定の相対誤差
n	: k_1, k_3 の距離による減衰項の指数
p	: トレーサ投入濃度
p_{er}	: トレーサ濃度による距離推定の相対誤差
Q	: 光強度
Q_{in}	: 撮影対象前面における光強度
Q_{01}	: カメラ前面における光強度
Q_{01}	: 対象物の位置における環境光
Q'_{01}	: Q_{01} の内，自然光によるもの
Q''_{01}	: Q_{01} の内，ライトによるもの
Q_{02}	: 対象物の位置における環境光
Q'_{02}	: Q_{02} の内，自然光によるもの
Q''_{02}	: Q_{02} の内，ライトによるもの
Q_{11}	: ライトの光強度
Q_{12}	: 対象物から放射される光強度
R	: RGB成分の内の赤
S	: 実海域での長さ
s	: 画面上の長さ
T	: 実時間
ΔT	: 実時間画像収録間隔
u	: トレーサ移動速度
u'	: uの変動値
τ	: 画像の並び
$\Delta \tau$: 画像収録間隔

Appendix : 各色各距離における輝度値測定結果 (水槽実験)

Case11

Distance	Color#*)											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10			108.0	87.6	54.0	105.5			10.5	24.9	50.0	79.3
20	33.0	63.5	110.9	107.1	34.1	104.4	47.6	12.9	13.1	31.5	59.1	89.7
30	31.1	66.9	110.6	107.5	43.5	106.6	59.0	14.6	18.6	36.3	72.4	104.4
40	33.6	39.3	116.0	112.7	41.8	115.9	61.4	15.9	21.1	39.7	76.4	107.7
50	48.4	82.3	113.9	111.4	40.7	111.8	68.4	18.1	22.9	44.7	83.2	114.1
60	45.6	84.5	113.9	117.6	37.0	116.0	66.6	20.2	26.3	46.5	85.8	117.3
70	42.2	81.6	117.9	118.6	37.8	119.2	67.7	17.3	23.5	45.5	85.5	116.0
80	38.6	77.8	116.7	117.4	36.4	120.4	64.0	14.9	24.9	45.1	80.9	118.9
90(cm)	35.2	77.9	121.8	116.2	39.3	118.8	70.1	17.3	28.2	45.3	80.9	120.9

Distance	Color#*)									
	31	32	33	34	35	36	41	42	43	44
10	47.8	20.6								
20	77.5	47.6	19.8	75.2	63.3	115.5	48.8	52.7	56.4	59.6
30	80.9	49.9	16.3	61.4	74.5	117.7	54.6	66.9	57.3	58.0
40	78.8	52.8	19.8	54.7	62.2	121.6	49.0	60.3	58.0	48.3
50	80.9	55.4	23.5	56.7	61.8	125.9	49.9	64.7	64.0	58.0
60	72.9	54.9	22.7	47.9	55.6	126.5	54.5	64.3	68.9	59.7
70	66.6	51.8	23.9	47.5	50.5	123.6				
80	65.3	54.0	26.6	46.1	51.6	129.7				
90(cm)	59.7	55.4	25.8	44.5	45.0	127.0				

Case13

Distance	Color#											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10									34.3	51.3	91.2	124.3
20		74.5	126.5	136.7	50.0	131.0	91.7		36.4	55.1	96.3	125.3
30	47.4	71.6	117.8	117.8	53.0	118.7	88.3	39.4	38.5	58.3	96.5	120.8
40	41.7	62.7	124.0	121.5	47.7	131.7	82.8	49.6	41.9	59.4	92.3	121.2
50	48.3	70.6	122.4	118.0	57.8	120.9	89.2	45.0	46.8	60.3	94.1	118.9
60	44.7	66.2	108.2	106.9	56.6	121.8	80.6	49.0	48.7	60.6	91.0	111.0
70	43.7	63.8	105.0	99.8	53.5	125.2	81.3	54.4	49.8	62.0	83.1	108.9
80	42.8	61.3	87.3	87.0	49.2	114.0	74.8	52.2	48.8	61.2	80.4	101.4
90(cm)	41.5	58.1	88.5	89.5	53.2	110.7	76.7	47.9				

Distance	Color#									
	31	32	33	34	35	36	41	42	43	44
10		99.0	45.8	46.7	41.0		39.1	59.0	57.1	45.0
20	119.5	86.8	39.4	53.1	49.1	122.9	54.8	73.5	73.9	61.5
30	120.0	80.9	46.0	65.3	62.5	125.4	60.3	71.3	77.5	69.0
40	118.1	80.2	41.6	65.0	62.7	122.1	69.6	90.1	75.8	75.8
50	100.4	77.1	45.6	67.6	71.1	122.9				
60	93.0	74.1	50.3			125.0				
70	90.0	75.9	49.8			121.4				
80	80.6	74.1	49.0			117.5				
90(cm)	70.6	65.6	49.6			105.8				

Case21

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10			107.5	21.8		63.0			18.1	6.1	8.0	66.3
20		101.5	123.3	123.4	17.4	121.3	74.4	7.2	21.6	69.3	116.1	123.3
30	43.2	104.9	123.9	123.2	20.6	122.9	81.4	9.2	22.8	64.4	102.0	120.0
40	41.5	98.8	126.0	125.4	22.6	126.3	77.5	12.8	26.1	70.8	113.8	124.5
50	38.2	88.9	124.1	120.9	23.8	130.6	76.1	16.8	27.4	74.2	110.1	125.7
60	33.5	65.7	109.4	103.8	24.6	129.9	64.5	19.8	29.3	69.8	107.2	129.3
70	28.5	58.3	94.0	90.2	21.7	126.7	59.5	20.3	30.7	61.4	99.9	127.7
80	26.7	44.2	73.8	65.9	18.9	96.1	45.8	19.3	31.4	56.0	91.0	123.6
90(cm)	24.0	41.1	64.1	61.8	19.9	93.2	46.9	18.9	27.3	55.1	84.2	114.6

Distance	Color #									
	31	32	33	34	35	36	41	42	43	44
10		83.1	12.9	19.2	17.0					
20	73.8	83.8	16.9	25.5	19.8	130.7	32.6	28.3	33.6	38.4
30	73.0	79.1	14.9	17.8	19.8	133.0	30.6	26.4	30.8	29.4
40	69.1	73.3	16.0	23.3	23.6	132.6	39.6	40.8	44.8	36.4
50	62.9	69.5	18.6	25.1	27.9	130.3	41.4	36.7	42.7	43.5
60	52.1	54.9	20.8	26.5	24.5	114.0	34.8	33.8	40.5	40.6
70	45.5	51.3	20.5	24.9	27.5	101.6	37.0	39.7	43.2	45.4
80	40.2	44.3	22.8	26.0	27.6	81.8	38.3	43.1	41.0	49.6
90(cm)	36.8	41.2	24.6	29.1	29.7	80.2	37.6	41.8	43.3	58.9

Case23

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10			106.0	11.8		119.1			19.1	15.9	20.7	120.0
20		63.2	113.6	102.0	9.7	117.2	52.4		14.9	53.7	85.3	101.0
30	28.0	77.1	112.2	108.8	11.4	119.5	57.1	3.6	16.6	49.1	78.1	108.3
40	27.7	65.3	100.0	94.7	16.9	123.1	57.6	8.4	16.8	47.6	78.7	97.9
50	23.0	54.5	88.7	79.3	16.5	111.3	48.9	14.5	17.0	44.8	71.6	95.8
60	20.8	43.7	69.4	61.6	16.7	86.5	40.1	16.2	20.5	44.4	64.5	86.5
70	20.3	35.4	51.6	48.5	18.3	70.6	38.4	16.8	18.5	37.8	58.9	79.8
80	19.7	31.7	47.2	41.9	18.0	54.8	33.4	16.7	19.8	35.3	49.9	73.9
90(cm)	16.4	26.1	34.6	34.4	15.3	42.2	29.3	17.8	18.5	31.4	47.3	62.8

Distance	Color #									
	31	32	33	34	35	36	41	42	43	44
10		61.2	13.6	13.3	15.8					
20	53.4	58.8	17.9	12.0	14.3	118.7	30.2	31.0	36.3	42.2
30	51.4	56.3	18.9	21.9	24.8	118.9	40.1	38.0	39.8	44.7
40	50.2	52.8	19.2	29.2	37.0	100.4	37.7	41.2	42.8	50.8
50	43.3	47.4	19.2	34.7	39.6	83.3	37.3	40.7	44.9	40.0
60	36.6	39.9	21.2	35.8	40.3	65.1	36.4	42.1	44.2	40.6
70	31.5	34.5	23.4	37.1	42.6	53.9	39.5	38.7	45.6	44.8
80	30.0	32.3	22.9	37.4	36.8	48.0	42.3	43.0	44.0	44.3
90(cm)	24.7	27.7	21.8	39.6	38.0	38.7	42.0	43.3	46.4	48.5

Case24

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10			81.7	18.9		121.4				16.2	25.2	124.8
20		62.5	107.1	99.4	11.1	117.2	52.8	12.4	17.6	54.1	82.6	103.2
30	29.4	67.4	104.8	100.3	14.9	124.9	55.5	12.8	20.3	46.1	70.3	90.0
40	33.5	65.5	94.9	82.2	23.5	115.6	55.0	22.5	27.9	53.1	77.3	94.8
50	30.2	51.6	78.9	70.3	26.2	96.3	54.6	24.9	28.6	50.9	70.4	86.4
60	30.4	41.5	58.2	35.1	27.1	72.1	43.8	25.9	31.2	45.1	61.8	79.5
70	25.0	37.9	54.2	47.5	24.6	63.2	44.1	29.2	25.7	39.4	55.4	68.5
80	30.3	34.0	44.8	40.5	26.7	49.4	37.1	27.2	28.7	37.9	50.9	60.9
90(cm)	25.9	33.1	38.6	37.0	27.0	40.4	36.4	27.1	28.8	34.1	44.1	53.3

Distance	Color #									
	31	32	33	34	35	36	41	42	43	44
10		119.1	32.6							
20	101.3	109.1	35.9			144.1				
30	98.5	109.1	36.2			144.3				
40	86.2	94.8	42.8			146.3				
50	75.6	86.7	45.1			133.3				
60	63.4	71.7	44.7			105.7				
70	55.2	62.1	43.4			86.3				
80	51.4	51.8	42.2			69.5				
90(cm)	44.6	47.0	38.3			60.3				

Case25

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10			115.4	26.7	4.5	116.2			25.8	22.4	39.2	118.1
20		108.5	110.6	111.0	12.8	112.9	100.4	16.4	18.8	91.9	110.7	110.2
30	38.8	108.9	116.9	113.3	21.9	114.4	106.4	22.4	23.1	81.8	113.4	112.8
40	40.5	102.9	118.9	117.3	26.9	118.2	93.1	18.5	22.7	74.9	111.0	115.0
50	33.7	79.2	116.1	108.5	27.1	123.9	76.4	25.8	27.4	71.8	104.0	119.6
60	27.9	63.0	90.8	83.6	27.0	115.3	61.3	26.7	25.3	60.5	91.4	115.8
70	26.8	47.7	69.2	64.1	28.1	86.7	50.0	29.5	28.1	52.2	79.2	99.8
80	20.4	37.0	51.5	46.3	25.7	61.9	41.1	25.7	25.7	47.4	66.7	88.8
90(cm)	20.0	32.0	41.8	40.7	27.4	45.2	38.1	24.9	27.3	41.2	55.4	68.7

Distance	Color #									
	31	32	33	34	35	36	41	42	43	44
10		94.0	12.8	24.0	27.8					
20	81.1	92.1	21.0	29.3	31.4	130.9	31.6	37.9	38.3	42.2
30	72.0	87.7	27.6	39.2	45.3	134.5	36.0	40.6	37.8	32.8
40	68.6	76.0	28.1	50.9	55.8	129.9	42.2	44.6	47.0	44.0
50	54.6	61.6	28.3	55.9	55.8	105.2	45.9	47.8	48.3	46.5
60	42.6	52.0	29.4	58.6	59.9	78.7	46.3	50.7	51.7	46.8
70	37.2	42.5	29.3			61.2	51.3	50.1	51.5	46.5
80	33.4	36.3	27.7			47.5	51.0	51.7	52.9	53.2
90(cm)	29.1	31.9	28.4			39.1	50.8	55.3	55.9	54.3

Case31

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10												
20			87.5	73.3	49.6	101.5	47.5	18.8	11.2	18.5	32.8	44.4
30		63.9	94.7	76.1	53.5	97.1	55.1	30.8	26.2	32.8	48.0	57.6
40	63.3	68.7	98.2	82.8	62.8	102.4	64.6	42.7	37.5	43.5	60.9	67.8
50	65.0	69.8	91.6	81.6	60.4	95.2	68.7	49.0	42.1	50.0	63.1	67.9
60	65.4	68.4	79.9	85.4	62.5	90.0	73.8	55.0	48.3	53.1	65.0	66.1
70	59.4	66.1	74.8	75.6	60.9	81.8	71.3	54.4	51.4	55.7	59.8	65.8
80	60.6	68.0	77.3	73.1	62.3	81.2	69.9	61.3	49.3	54.7	62.4	63.8
90(cm)	62.8	61.6	74.0	69.6	63.0	73.0	67.2	58.9	50.7	53.0	57.5	56.0

Case32

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10												
20		85.1	103.9	93.7	76.1	116.7	69.9	50.2	37.0	43.9	53.2	65.2
30	89.4	93.4	110.9	101.6	81.3	116.0	85.2	59.6	53.4	60.5	67.9	76.8
40	93.7	97.0	114.5	104.0	87.4	112.7	93.5	73.0	65.6	69.1	81.4	87.4
50	97.1	98.6	110.7	104.8	91.8	112.1	96.7	82.0	71.9	73.9	89.1	89.7
60	97.7	98.6	105.9	105.0	93.6	108.5	94.9	86.8	73.5	75.9	86.5	88.0
70	95.9	95.2	102.4	101.1	92.6	105.6	97.6	90.1	75.9	81.7	87.3	84.2
80	94.3	97.8	100.6	99.9	93.5	100.7	95.5	86.1	77.1	83.6	81.1	86.4
90(cm)	90.2	92.2	98.6	95.2	91.3	94.7	92.6	88.3	78.6	82.1	80.1	81.7

Case33

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10												
20		42.8	52.5	47.2	35.2	58.2	33.1		10.2	15.0	20.2	28.7
30	46.1	47.9	54.0	51.5	45.0	59.6	44.6	34.2	23.6	26.8	34.0	38.2
40	48.1	50.7	59.2	54.2	46.1	56.9	48.3	36.9	31.7	33.5	38.1	42.2
50	53.7	51.2	59.6	55.8	50.5	57.1	51.1	45.2	36.9	39.6	42.0	44.9
60(cm)	53.3	50.0	55.3	55.3	51.1	57.1	52.8	48.2	39.2	44.8	43.9	42.3

Case34

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10												
20		81.9	94.6	84.2	74.0	96.5	68.9	49.9	36.3	38.8	49.8	56.5
30	85.6	85.4	93.9	89.0	81.6	92.9	80.0	70.9	54.0	56.0	61.6	66.5
40	90.7	91.4	96.3	92.9	86.1	96.4	85.9	74.1	64.2	65.1	68.7	73.7
50	92.9	93.3	95.6	96.6	87.9	96.8	88.2	83.4	66.5	70.5	75.9	76.2
60(cm)						93.8		84.7				

Case35

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10					55.9	76.7	57.7	40.1			56.0	60.6
20			78.0	71.4	65.4	76.8	61.8	53.4	46.0	47.9	50.6	56.2
30	73.0	73.5	78.7	75.9	71.1	80.2	69.8	64.4	56.0	58.3	59.7	62.8
40(cm)	76.7	74.0	74.3	75.6	70.2	75.9	70.6	65.7	63.0	61.2	63.3	63.6

Case36

Distance	Color #											
	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24
10												
20		95.8	97.3	94.7	44.0	94.4	95.3		27.2	74.1	93.2	93.7
30	77.2	102.2	102.9	101.7	56.5	101.2	100.0	49.4	38.0	70.2	97.1	101.1
40	62.9	91.9	103.0	98.1	57.1	103.2	83.6	53.9	43.8	64.8	87.8	95.7
50	55.8	71.3	82.1	77.2	57.4	84.7	70.1	53.6	46.3	61.3	77.9	86.6
60	48.7	56.7	65.0	60.6	49.2	64.0	59.1	49.1	44.0	52.6	59.4	64.8
70(cm)	48.8	55.3	55.6	54.7	50.1	58.2	50.9	48.9	44.0	48.7	53.0	53.7

*) 色番号

Color #	対象物	色	Color #	対象物	色
11	油性ペイント	赤	31	油性インク	黄
12		オレンジ	32		赤
13		黄	33		黒
14		うす青	34		緑
15		青	35		紫
16		白	36		白
17		灰			
18		黒			
21	反射テープ	青	41	半透明テープ	赤
22		赤	42		黄
23		黄	43		オレンジ
24		白	44		青

港湾技術資料 No.683

1990・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 新宿総合印刷センター協業組合

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.