

海中画像処理システムの開発

宮原則行 田口久哉

Development of Underwater Image Processing System

Noriyuki Miyahara and Kyuya Taguchi

要 旨

主に前浜で使用する増養殖施設の保守管理や飼育対象魚介類の観測に適用可能な海中画像処理システムを、水中TVカメラ等の画像入力装置も含め総合的に開発した。海中映像の画像処理には多くの課題が残されているが、リアルタイムの画質改善方法等現時点でも有効な手法は幾つかあり、システムを構成する際にはこれらに配慮する必要がある。

1. ま え が き

「栽培漁業」を支える増養殖施設の管理・維持のための周辺技術の開発が求められてきたが、特に水中の人工いけす・魚礁等の様子を陸上から任意に観察可能な水中TVカメラシステムの開発はその筆頭にあげられる。さらにここから得られた水中映像を通じて、これら増養殖施設の保守・管理を行うことのみならず、飼育対象魚介類の生育状態の継続的定量観測の実施等、将来の海洋牧場構想を支える上で不可欠な要素技術の確立も希求されている。

本研究開発の目的は上記事情に鑑み、主に前浜で使用する増養殖施設の保守管理や飼育対象魚介類の観測に適用可能な海中画像処理システムを開発することにある。

今日一般に画像処理と言えばデジタル画像処理を指し、さらに画像処理を狭義に捉えれば、入力画像をA/D変換し得られたデジタルデータを変換・加工し、画像として再出力する、あるいは定量的なデータを得る手法であるということになるが、この種の狭義の画像処理に関しては少なくとも産業界で利用可能なものについては現在ではほとんどの手法が確

立しており、高速なハードウェアの開発を待って徐々に実用化されつつあるというのが現状である。したがって、現在の画像処理システム開発のポイントは、新たな画像処理手法の創造にあるのではなく、画像入力、画像処理、画像認識、マンマシーンインターフェース等広汎な画像工学全体にわたる技術が必要とするシステムを如何に構築するかということにある。

本研究開発が対象とした海中・水中画像処理も例外ではなく、画像入力方法や入力条件が極めて特殊なことから、むしろ最も端的な例と言える。したがって、本研究開発では、画像入力手段の研究開発から着手し、最終的に現時点で最も効率的と考えられる海中画像処理システムの構築を図った。

2. 水中画像処理システムの現状

海中・水中画像処理システムの従来例はあまり多くないが、上下水システムにおける画像処理技術等として数例報告があるので以下に概略を示す。

2. 1 フロック監視システム¹⁾

湖沼からの原水を上水に使用するには懸濁粒子を粒径0.2~2.0mm前後のフロックに凝集させ沈澱させる必要があり、浄水場ではフロックの形成状態を1日数回目視観察し、凝集剤の注入を制御している。この監視を以下の特徴を持った画像処理システムで行っている。フロック群撮像用の水中TVカメラに、観察窓とバック・スクリーン両面を同時に清掃可能なダブル・ワイハ機構を設置し、照明領域は太陽光の影響を受けないように配慮している。また、処理フローの概略は、①濃淡画像の取込み②フロックの認識(画像の強調、2値化)③ラベリング~粒径分布計算で、粒径分布の計測時間は4~15分程度としている。

2. 2 魚類行動監視システム²⁾

浄水場での原水水質の安全性確認のための、魚類の生死や異常行動の監視に適用されている画像処理システムである。急性毒性物質が混入した水質異常の初期の魚の「鼻上げ行動」や「狂奔行動」等の行動パターンを定量的に検出することを目的としている。システム構成上の特徴は、魚が飼育される水槽の後方から光散乱板を通して照明する方法を採用したことで、画像の濃度ヒストグラムから魚類を常に暗い物体として撮像可能としている点である。画像処理フローの概略は、①ウインドウ設定②魚体の認識(ヒストグラム2値化法)③重心計算④速度計算⑤位置分布の計測⑥速度分布の計測となっている。

2. 3 魚介類判別システム

水中映像の画像処理ではないが、魚介類を対象にした画像処理システムとしては、以下のようなものが知られている。

(1) 魚種・魚体自動選別³⁾

下方向からの透過照明で得た2値画像から魚体の輪郭座標を求め、体高/体長比、背/腹大きさ比、尾の形等の形状パラメータを抽出して魚種を判定する。実験による正判定率はアジ、サバ、サンマ、イワシの4種分類の場合、約95%とされている。

(2) 魚体処理用位置認識⁴⁾

レーザー光で魚体を走査して得られる光透過率が、

雌雄で10倍近く差があることを利用し、ニシンの雌雄選別装置が開発されている。

3. 水中映像撮影機器の現状

画像処理を効果的に行うためには、可能な限り高品質の画像を処理目的に合った形で得る必要がある。水中画像処理が気中における画像処理と決定的に異なるのは、画像入力手段を水中映像撮影機器に頼るほかないことである。現在、水中映像撮影用機器(以下水中TVカメラ)として一般に使用されているものには、大きく分けて次の4種類の型が存在する。

- (1) 携帯式水中TVカメラ
- (2) 吊下げ式水中TVカメラ
- (3) 自航式水中TVカメラ
- (4) 固定式水中TVカメラ

3. 1 携帯式水中TVカメラ

携帯式水中TVカメラは、撮影者が自ら水中TVカメラを持って潜水し、撮影する型のもので、テレビや映画などに使用されている水中映像は、ほとんどこの型の水中TVカメラによって撮影されたものである。したがって、撮影条件もコントロールしやすく、良好な画質の映像を記録することが可能である。反面、人間が潜水できる整った海況条件が必要なことから、非常に限定された好条件の海中映像のみしか、捉えることができない欠点がある。

この型の水中TVカメラは、防水ケースに民生用小型ビデオカメラを内蔵しただけのものから、有線式で水深100m近くまで使用可能なものまで、幅広いタイプが存在し、価格的にも比較的安価なものが多い。

海洋科学技術センターの「しんかい6500」に代表される有人潜行艇による水中映像の撮影も、広い意味ではこの型の延長線上に位置づけられる。

3. 2 吊下げ式水中TVカメラ

吊下げ式水中TVカメラは、主に船上等から水中にカメラのみをケーブルで吊下げ降下させるもので、撮影者が潜水する必要のない水中TVカメラとしては、最も簡便なものであるが、この型の延長線上に

は数百から数千メートルの深海底で撮影可能な水中TVカメラも存在し、価格、仕様とも非常に幅広いのが特徴の水中TVカメラである。

吊下げ式水中TVカメラは、安価なものでもほとんどがTVカメラのパン・ティルト機構を装備し、撮影者の便宜を図ろうと努力しているが、実際には降下深度が深くなるにつれ流れやケーブルのねじれにより、撮影者の意に反した方向にレンズが向くことが多く、これが最大の欠点となっている。

表1に安価なものでは代表的と思われる日立造船(株)製の「アイボール」の主仕様と図1にその概念図を示す。このクラスのもの、単焦点の広角レンズを採用し、焦点調節を不要にした固定焦点型ものが主流で、絞りはリモートコントロール可能か、オートアイリスのものが一般的である。

表1. 吊下げ式水中TVカメラの仕様例

製品名：アイボールIII型（日立造船(株)製）		
カ メ ラ	撮像素子	半導体（カラー）
	水平解像度	320本以上
	最低被写体照度	25 lx
ラ	レンズ	f4.8mm F1.8 F値はリモートコントロール可能
	ホワイトバランス	オート、マニュアル選択可
	焦点調節	固定焦点
そ の 他	パンニング可能角度	360度
	ティルティング可能角度	230度
の 防 水 ケ ー ス	照明	150Wハロゲンライト2灯
	使用可能水深	100m
	防水ケース	φ220mm球形アクリル製
	電源	AC100V, DC12V
	重量	5kg（大気中）

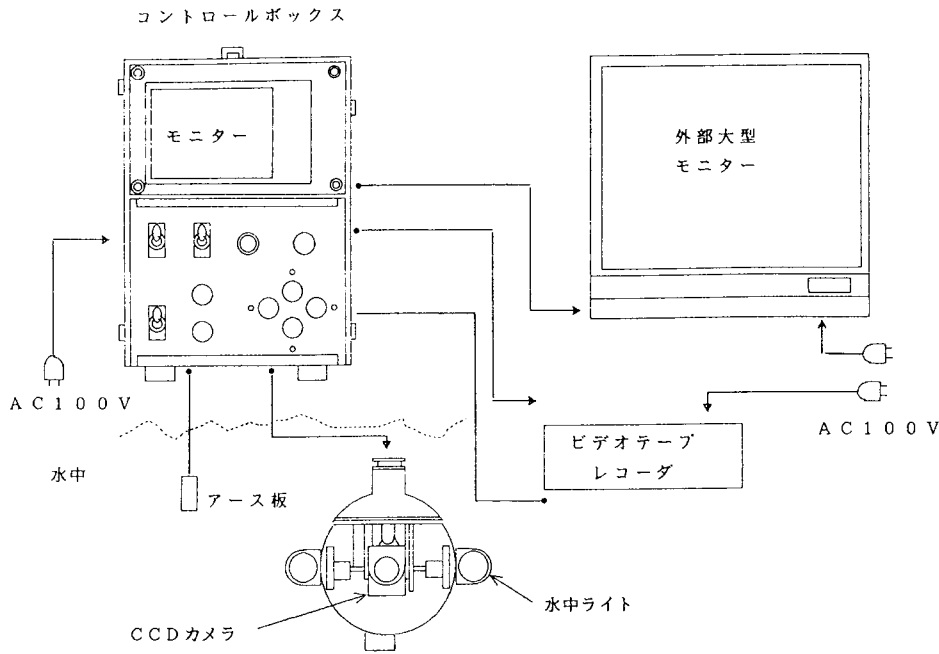


図1. 吊下げ式水中TVカメラ概念図

3.3 自航式水中TVカメラ

自航式水中TVカメラは、吊下げ式水中TVカメラに推力を持たせることで、吊下げ方式の欠点だった姿勢制御上の難点を解決し、合わせて撮影可能範

囲の拡大を図ろうとしたものと位置づけられる。しかしながら、静水中は別として、潮流がある程度以上ある場合や潜行深度が深い場合などには、熟練した操縦者以外では操作が極めて難しいといった問題

点が残されている。

この型のもが現在最も開発に力が入れられており、海洋科学技術センターの「ドルフィン-3K」^{5),6)}や現在計画中の10000m潜航型「10K」等がその好例である。こうした「有索自航式」の他に、「無索自航式」のものも開発されてきているが⁷⁾、現在世界に約1500機あるとされる自航式水中TVカメラの大半は前者によって占められる。

一般的仕様と思われる(株)キュー・アイ製の超小型自航式水中探査カラーテレビカメラ装置「DELTA-100S」の主仕様を表2に概念図を図2に示す。

3.4 固定式水中TVカメラ

固定式水中TVカメラは、水中に常時設置され、特定の観測対象を長期間撮影する型のものであるが、現在までのところあまり例としては多くない。

撮影者が水上または水中へ赴く必要がないので、どのような条件下でも撮影が可能である反面、機動

表2. 自航式水中TVカメラの仕様例

製品名：DELTA-100S (株)キュー・アイ製)		
カ メ ラ	撮像素子	2/3" カラー固体撮像素子
	水平解像度	340本以上
	S/N比	46dB以上
	最低被写体照度	5lx(F1.4)
	レンズ	f4.5mm F1.4 (オートアイリス)
ラ	焦点調節	5cm~∞(リモートコントロール)
	視野角	水平95度 垂直74度(空中)
そ の 他	ティルト可能角度	±45度
	照明	200Wハロゲンライト2灯
	使用可能水深	100m
	耐水圧	15kg/cm ²
の 他	速力	前進2.5ノット(静水)
	電源	AC100V 2kVA
	外形	L640 W600 H295 (mm)
	空中重量	24kg
	水中重量	0kg

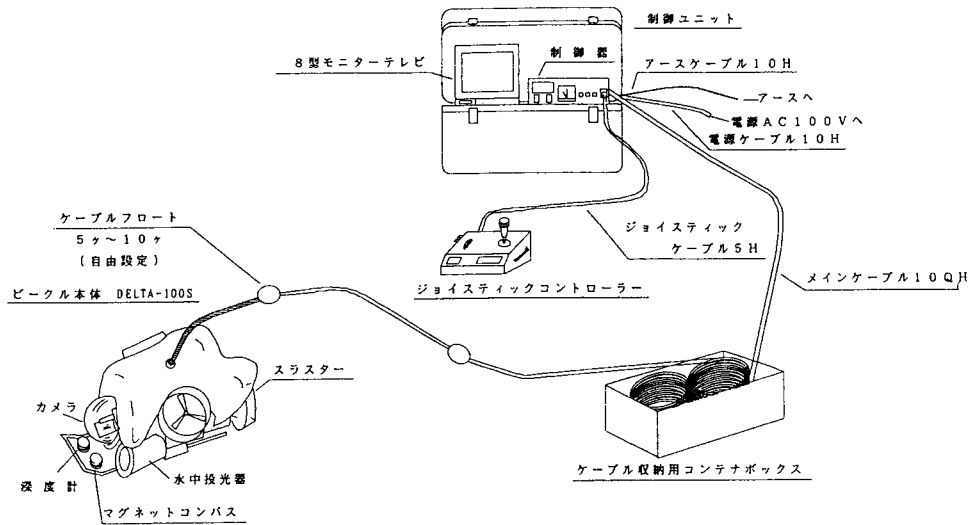


図2. 自航式水中TVカメラ概念図

性がないので広い撮影範囲を求める用途には向かない。また、条件によっては設置費用が数千万円を越えることもあるため、国内では発電所の取排水口監視や観光用など、限定された用途にしか使用されていない。

この型の水の中TVカメラの大きな問題点の一つは、

カメラ光学系外部への水中生物の付着により視野の確保が困難になる点である。特にこの種の水の中TVカメラが設置されていることの多い穏やかな内湾などでは、ひどい時には一週間余りで撮影が不可能な状態になることもあり、ダイバー等による清掃作業や、ワイパ装置の使用による定期的な付着生物の除

去作業が必須のものとなっている。

もう一つの問題点は、水中カメラの耐久性である。上述のようにこの型の中水TVカメラは、穏やかな内湾等に設置されているため、一般的には波浪による破損等は、あまり考えられない。しかしながら、ワイバ装置やカメラのパン・ティルト機構部等の経時劣化や損耗は避け難く、ダイバーによる定期的保守点検や、一定期間毎の陸上での整備点検が必要となる。

この型の中水TVカメラは基本的には特注品であるため特に代表的なものはないが、参考に(株)キュー・アイ製の水中カラーテレビジョン装置の主仕様を表3に概念図を図3に示す。

4. 海中連続観測システム

上記のような水中映像機器の現状を踏まえて、前浜での増養殖施設監視用の固定式水中TVカメラシステムを「海中連続観測システム」⁸⁾として新たに設計・製作した。システム構成の概略を図4に示す。水中TVカメラは、松前町字赤神静浦漁港の沖合い200m、水深15mのヤリイカ産卵魚礁の近傍に設置し

表3. 固定式水中TVカメラの仕様例

カ メ ラ	撮像素子	2/3" サチコン管
	撮像方式	RGB3管
	水平解像度	650本以上(中央部)
	S/N比	57dB
	最低被写体照度	40lx(F1.6 +18dB)
	レンズ	f9.0mm~108mm
	焦点調整	F1.6(オートアイリス可) リモートコントロール
そ の 他	ティルティング可能角度	±30度
	パンニング可能角度	±120度
	照明	250Wタリウムランプ2灯
	耐水圧	10kg/cm ²
	材質	SUS316
	電源	AC100V 2kVA
	外形	L800 W720 H1350(mm)
	空中重量	185kg
	その他	ワイバ装置装備

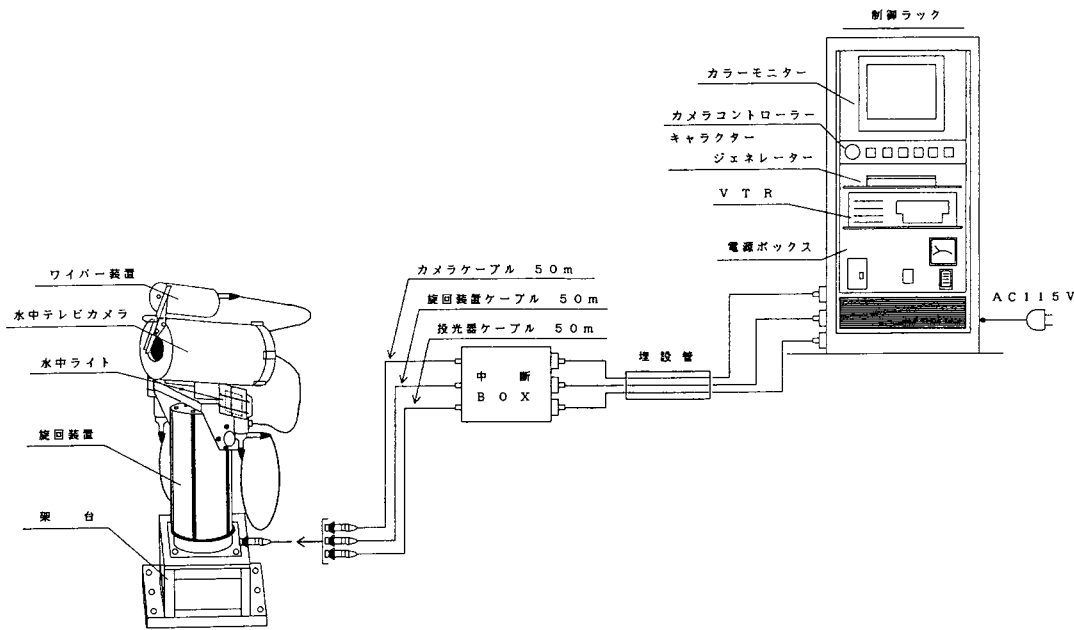


図3. 固定式水中TVカメラ概念図

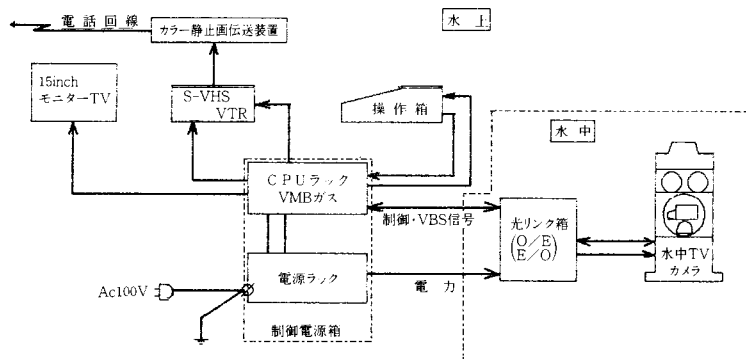


図4. 海中連続観測システム概要

た。当地区は冬季間の波浪が激しく、また観察対象がヤリイカの他、ホッケ、アワビ、ウニなど比較的多様なため設置場所として選定した。

4.1 水中TVカメラ

半球形透明ドームで一端を封止したステンレス性耐圧容器内に、パン・ティルト機構付カラーCCDカメラを収納した水中TVカメラユニットである。アクリル製のドームは水圧に対しては十分な耐性を期待できるが、衝撃強度が小さいため、流木・小石等の衝突による損傷を防止する目的でポリカーボネート保護筒で外部を覆う二重シールド構造とした。保護筒と内部のドームの間の空間には、空気とプラスチックの屈折率差を補正する目的で純水を注入した。また保護筒表面への海洋生物の付着を防止するため清掃機構(ワイパ装置)を設けた。さらに、カメラの旋回と連動する水中ライト二灯を保護筒内に備え、低照度下でも撮影可能に構成した。

表4に主仕様を図5に概念図を示す。

4.2 信号伝送系

水中TVカメラのVBS信号の周波数帯域は約4.2MHzであり、信号伝送系としては同軸ケーブルと光ファイバが考えられる。同軸ケーブルの場合は10C-2V仕様を用いれば、1500m程度までならケーブル補償器を用いてVBS信号の伝送は可能である。しかしながら電力線心及び計装信号線心との複合化を図った場合には、電磁誘導による雑音対策を施す必要があり、ケーブル外径・重量の増大をも伴う。光ファイバの特徴である無誘導性・軽量性・将来性

表4. 水中TVカメラの仕様

		カラービデオカメラモジュール:XC-117 (株ソニー製)	
カ メ ラ	撮像素子	2/3インチCCD固体撮像素子	
	有効画素数	510(H)×429(V)	
	方式	インターライン転送	
	レンズ	f11~110mm, F1.6	
	包括角度	f11mm:43.6°×33.4° f110mm:4.6°×3.4°	
	至近距離	1.1m (前玉面より)	
	水平解像度	320 (TV本)	
	感 度	2000lx F4 (3200°K)	
	最低被写体照度	30lx F1.4	
	S/N 比	48dB	
そ の 他	ズーム	リモートコントロール	
	焦 点	リモートコントロール	
	絞 り	自動(±1絞り手動調整可)	
	ホワイトバランス	自動	
保 護 筒	パンニング角度	±180度	
	ティルティング角度	+20度~-25度	
	可潜水深	40m	
	寸 法	φ380mm(アクリル)	
	空中重量	37.2kg	
	動作温度	-10~+40° C	
	保存温度	-20~+70° C	
保 護 筒	照 明	250Wハロゲンランプ2灯	
	材 料	ポリカーボネート	
	寸 法	φ470mm×610H	
	厚 さ	5mm	
保 護 筒	空中重量	68kg	
	ワイパ装置	テフロンブラシによるワイピング	

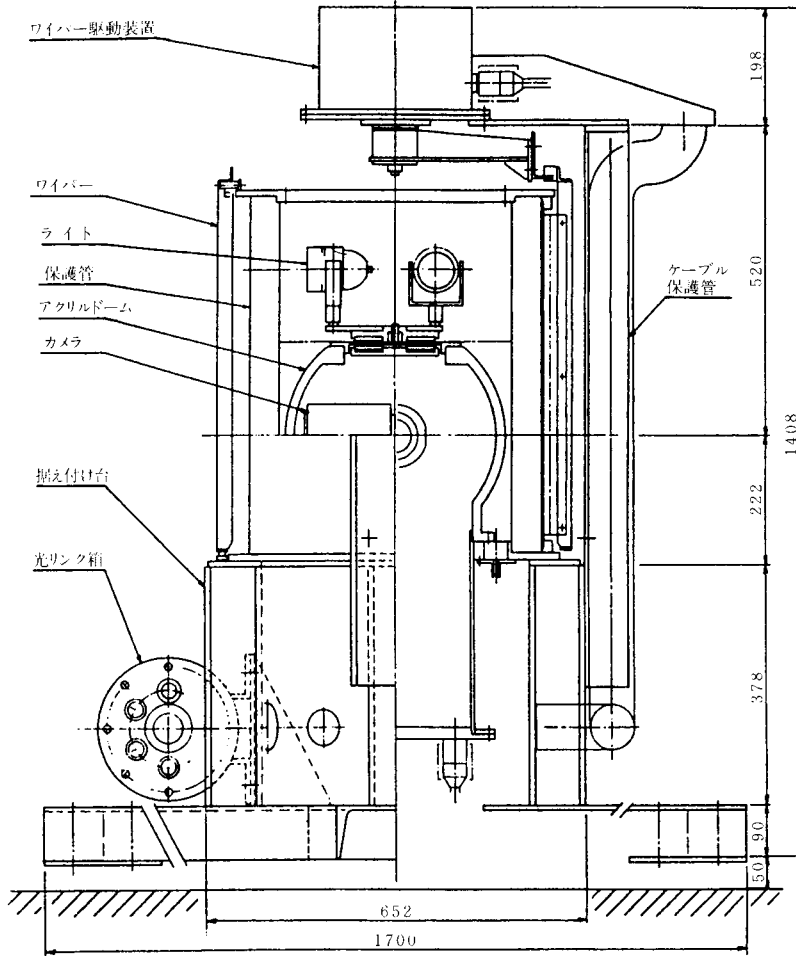


図5. 水中TVカメラ概念図

を考慮し、光通信による信号伝送方式を採用した。

VBS信号の光変調はIM変調可能だが、変調時の入出力特性や分波・合波時の伝達特性は、最終的に得られる画像に大きな影響を与え得るため、選定には注意を要する。採用した映像信号用光リンクモジュール及び光分波・合波器の主仕様を各々表5、表6に示す。

VBS信号とともに海底の水中TVカメラから伝送する計装信号は、中心周波数を8MHzの周波数偏移変調(FSK)を行いVBS信号に重畳することで、海→陸で使用する通信波長を880nmの単一波長とした。陸上から出力する制御信号は、730nmの可視光をパルス符号変調(PCM)して伝送した。

表5：映像信号用光リンクモジュールの特性

項目	仕様	条件・備考
伝送方式	IM変調	ベースバンド伝送
伝送帯域	60Hz~4.5MHz	-3dB
入力信号電圧	1.0±0.1Vp-p	75Ω終端
出力信号電圧	1.0±0.2Vp-p	75Ω終端
S/N	50dB MIN.	-20dBm入力時
	40dB MIN.	-30dBm入力時
直線性	DG 8% MAX.	
	DP 5° MAX.	
Vサグ	8% MAX.	
Hサグ	3% MAX.	

表6. 光分波・合波器の特性

項目	仕様	備考
適用光ファイバの屈折率分布	グレーデッド インデックス	コア径 50 μ m クラッド径 125 μ m
挿入:波長730nm	2.5dB MAX.	分波
損失:波長880nm	3.0dB MAX.	分波
クロストーク	40dB MIN.	多重伝送の場合
近端漏洩	50dB MIN.	双方向伝送の場合

水中TVカメラからの映像は上記のように記録用VTRなどに伝送される他に、電話回線を利用したカラー静止画伝送装置にも伝送される。カラー静止画伝送装置は512×480画素のカラー静止画像をDPCM符号化方式により約62秒で伝送可能なERIS(株)エー・ディー・エス製を採用し、遠隔地からの画像データの入手も可能とした。

4.3 制御系

水中TVカメラはマイクロコンピュータにより制御され、水中部はZ80A(4MHz)、陸上部は8086-2(8MHz)を使用した。水中部のシステムは小型化・信頼性に配慮しSTDバスを採用し、ASTD100シリーズ(株)アドテックシステムサイエンス製のCPU、

S10、A/D、D/A及びリレー用ユニバーサルボードで構成し、サーボアンプボードを付加した。陸上部のシステムは拡張性と信頼性に配慮しVMEバスを採用し、HIMVマイクロコンピュータシステム(日立造船(株)製)のCPU、SRAM、PSI/Oで構成し、O/E用及びVTRコントロール用ユニバーサルボードをバス上に付加した。さらにVBS信号にデータ表示用信号を重畳し画面にスーパーインポーズ表示するSIUを併設した。また水中・陸上両システム間のデータ通信はRS-232C規格に準じたシリアル通信方式を採用した。システムのブロックダイアグラムを図6に示す。

水中TVカメラの制御は、陸上部のシステムのPSI/Oに接続された操作箱のキーボードスイッチを押圧して行う。制御可能な水中TVカメラの機能は以下の8機能とした。

- (1) パン・ティルト動作
- (2) 焦点調節
- (3) ズーム
- (4) 照明用水中ライトのON/OFF
- (5) ワイパ装置の駆動
- (6) データの画面へのスーパーインポーズのON/OFF
- (7) 絞り値の±1E.V.補正

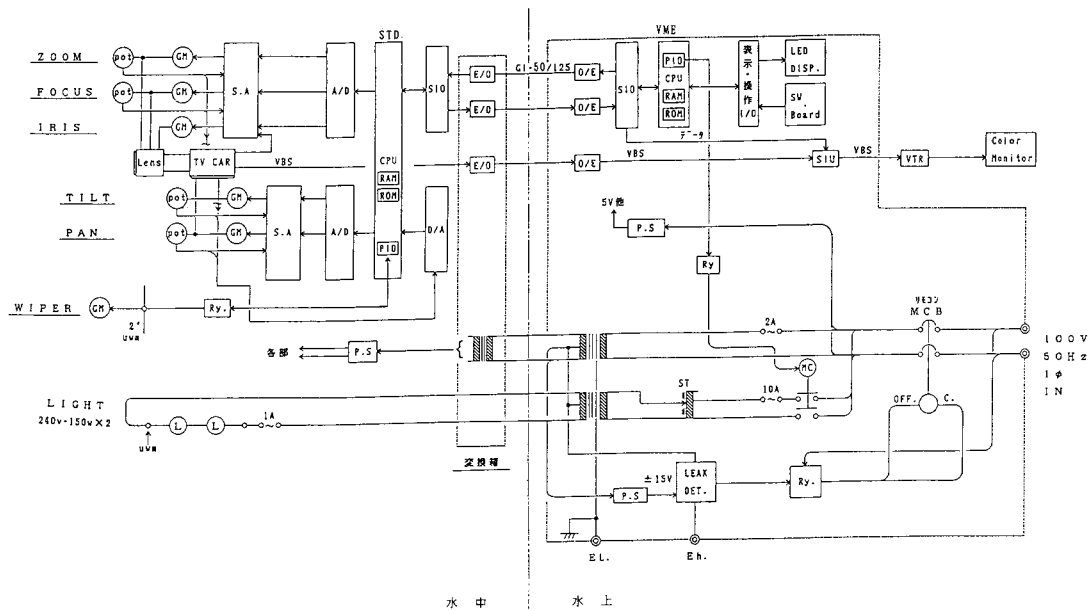


図6. システムブロック図

(8) 水中ライトの光量調節
 (7)(8)の機能を除く上記6機能の他に記録用VTRのON/OFFを加えた7機能はプログラム可能で、自動連続定点観測が可能となるように構成した。表7に制御電源箱の主仕様を示す。

表7. 制御電源箱の主仕様

寸法	570W×750H×530D(制御部) 250W×119H×235D(操作箱)		
重量	75kg(制御・電源部) 1.5kg(操作箱)		
入力電源	AC100V 50Hz 1φ 1500VA以下		
出力電源	水中TVカメラ	AC120V	2A
	水中ライト	AC0~276V	6.1A
	VTR	AC100V	2A
	モニタ	AC100V	2A
動作温度	-10~+40℃		
保存温度	-20~+70℃		
その他	水中部漏電検出遮断回路装備		

4.4 システムの運用結果

昭和62年10月からほぼ1年間本システムを実海域において運用し、その効果・問題点などを探った。

本システムの開発目的の一つは、波浪の激しい前浜で長期間観測可能な耐久性を持つ水中TVカメラを開発することであったが、運用期間中かなり激しい時化も幾度か経験したが当初懸念されたポリカーボネート保護筒の損傷等はなく、耐久性に関してはおおむね良好な結果を得たといえる。ただし、初期の段階でワイバ装置の摺動部に砂が詰まり一時的に動作不能になり、機構部分が水中に露出する構造の場合の問題点がより明らかになった等の経緯はある。

開発の第二目的であった生物付着の防止は、上記のようにワイバ装置が故障したこともあり、下記のように幾つかの問題点を残す結果となった。

本システムのようなワイバ方式ではワイバの動作回数を状況に応じて一時間に数回程度と多くしないと、保護筒表面への生物付着を完全には除去できないことが明らかになった。また、一旦付着した生物はワイバのブラシによる払拭ではほとんど除去不能なため、ワイバ駆動機構には高い信頼性が要求され

る。しかしながら、実際には本システムでも経験したが、ワイバと保護筒の間にアワビを噛みこんで動作不能になるなど不測の事態も起こり得るため、これを実現するのはかなり困難であると考えられる。

保護筒表面への生物付着の他に、ワイバ装置自身等の水中TVカメラの水中露出部への生物付着も無視できない問題である。本システムでも水中TVカメラ上方のワイバ駆動装置部にコンブ等が繁茂し、視界を遮るほど下方に垂下したため、ダイバーによる切除作業を余儀なくされた。こうした事態を防ぐために生物付着防止塗料を塗布することも考えられるが、増養殖施設の近傍であることを考慮するとあまり好ましいこととは言えず有効な対策を開発することが今後の課題となった。

この他の問題点としては、保護筒等による像の光学的歪みの発生、照明光量不足などがある。前者はポリカーボネート保護筒がシリンダカルレンズのように作用して、像の縦横で結像状態が変わるために発生するもので、ズームアップした時に顕著に現われ解像力を著しく低下させる。後者は250W2灯の照明では不足だということだが、観測対象生物へ及ぼす影響を考えると照明光量を単純に増やすにも限界があり、別の解決策を考慮する必要が生じた。

5. 移動式海中連続観測システム

上記の「海中連続観測システム」の成果・問題点を踏まえ、新たに「移動式海中連続観測システム」⁹⁾を昭和63年度に開発した。システム全体の概念図を図7に示す。システムの設置場所は既設のケーブル等がそのまま転用可能なため、「海中連続観測システム」と同じ松前町宇赤神静浦漁港沖とした。

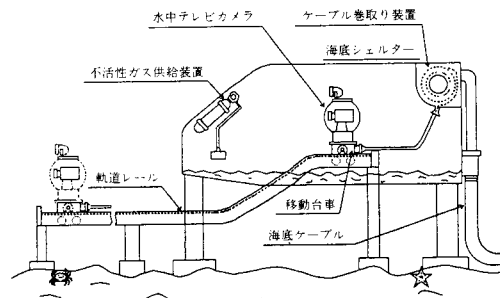


図7. 移動式海中連続観測システム概念図

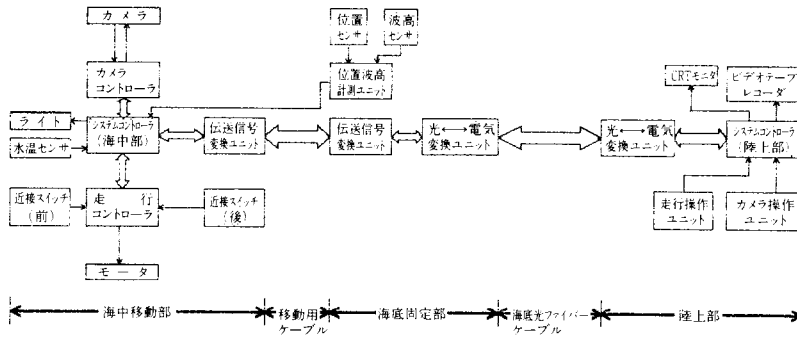


図8. 移動式海中連続観測システムブロック図

5. 1 システム構成

本システムの特徴は水中TVカメラを移動可能に構成したこと及びガス式シェルタを採用したこととの二点である。ガス式シェルタは通常の観測休止時及び海況悪化時に水中TVカメラの待避舎として使用するもので、内部には不活性ガス（ここでは窒素ガスを使用）を充てんし生物付着防止を図るとともに、駆動機構部の保護をも目的とし、長期間無保守で連続観測が可能なシステムの構成を目指した。

水中TVカメラを搭載した移動台車は400WのDCモータによる四輪駆動で、約3m/minの速度でラックを配設した軌道レール上を任意に走行可能とし、波高センサによる観測波高値が閾値以上になると、機器保護のためシェルタ内に自動収納されるように構成した。また移動台車の位置計測を移動用ケーブルの繰出し量をモニタすることで行い、自動運転モードでは設定位置まで自動走行し、観測・記録し、再びシェルタへ戻るプログラム運転を可能とした。

搭載した水中TVカメラの仕様は照明等も含め「海中連続観測システム」による像歪みの問題解決のためポリカーボネートの保護筒を廃し、球形のアクリルドームだけの一重シールド構造とした。また、ガス式シェルタの生物付着防止効果がワイバ装置の機能を代替すると考え、信頼性の点で問題のあったワイバ装置は装備しなかった。

システムの制御・データ伝送方式も、「海中連続観測システム」とほぼ同一としたが、移動台車の走行に伴い繰出し・巻き取りを繰返される約20mの移動用ケーブル部に関しては水中で挿抜可能な水中光

コネクタの入手が困難なため電気信号による伝送とした。図8にシステムのブロック図を示す。

5. 2 システムの運用結果

昭和63年10月末からほぼ1年間連続的に運用した結果、水中TVカメラ、移動台車の駆動機構、移動用ケーブル巻き取り機構等に波浪の影響による損耗等はなく、シェルタの持つ待避舎としての機能は確認できた。しかしながら、電食が予想以上に進行し、設計上十分な防食亜鉛板を取付けたにもかかわらずアルミ合金（A5052）部分が著しく腐食した。設計上は絶縁されているはずの移動台車と鉄鋼材（S S 41）製の軌道レールやシェルタとの電気的接触が原因と考えられ、確実な両者の絶縁方法の確立が必要であることが明らかになった。

生物付着防止効果については、ガスが封入されていた時点では予想通りの効果を発揮し、また時化によりシェルタ内のガスがほとんど流出してしまったにもかかわらず、春・夏の生物活動期経過後も生物付着・汚れ等は少なく、ワイバ装置を上回る付着防止効果を発揮することを確認した。ガスが流出したにもかかわらず生物付着が少なかった理由は、機器に付着する生物の多くは光合成により活動していると考えられるため、ほとんど太陽直達光や天空光が到達し得ないシェルタ内部では発生不能だったためであると考えられる。しかしこのシステムは本来ガス封入が前提であり、機器保全の意味からもシェルタ内に規定量のガス確保は必要である。本システムでは予算上割愛したが、シェルタ内ガス定量確保機能の装備、またはその他の方法で、待機時は常に移動台

車が水上に出ている形をとることが望ましい¹⁰⁾。

なお、上記の幾つかの問題点を対策した移動式海中連続観測システムは、平成元年度に「環境モニタリングシステムの開発研究」事業として新たに函館市から受託し、函館市根崎沖700m、水深13mの海底に海洋牧場の監視用に設置され、事業終了後も順調に動作し続け、平成3年5月現在も観測を続けている。

6. 海中画像の特質

海中画像の取込みでは、光学的にも気中と異なる様々な制約があり、これらが海中画像の取込みを困難にしている。

6.1 海中の照明条件

海中の照明条件は水深、天候、時刻、波浪状況等の諸因子で大きく変動し、この影響を軽減するため基本的には日中でも適宜照明が必要である。図9に諸条件の相関を模式図として示す。

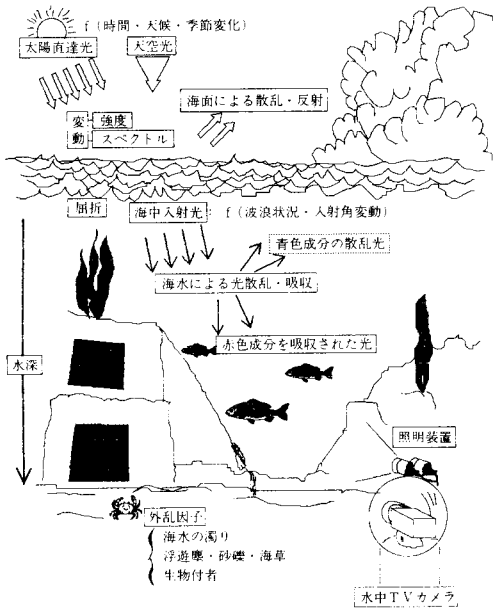


図9. 照明条件の相関図

6.2 海中の照度

海面に入射する光は主に太陽直達光と天空光及び

月光、夜天光等である。前二者が一日の全入射光量の大半を占めるが、このうち太陽直達光による照度変動は著しく、海面で $0\text{lx} \sim 120,000\text{lx}$ の変動幅がある。天空光は曇天時等に天球面全体からほぼ均等に地上面に達する光で、照度としては $0\text{lx} \sim 50,000\text{lx}$ 程度と考えられる。これらによる照度が日中は支配的になるが、夜間は月があれば月による照度が海中の照度を決定する。月による照度は満月で 0.1lx 、半月で 0.01lx 、三日月だと 0.001lx 程度であり、月がないときには星夜光や黄道光などの夜天光による照度が $1 \times 10^{-5}\text{lx}$ 程度地上で観測される。

これらの入射光は海面の状況や入射角度に応じた比率で海面で反射され、海水中に透過するのは入射光の一部となる。太陽直達光や天空光の反射率に関しては多くの報告がなされているが^{11), 12), 13)}、夜間の月光や夜天光に関しては報告がない。

月光の場合には太陽直達光と同じ条件であることを考えれば、その反射率は月光入射角に依存したものとなり、海面が平坦な場合には表8のようになると考えられる。また、荒れた海面の場合にも太陽直達光と同様に、月高度が高いときには海面が平坦な場合に比べて反射率がわずかに増え、低いときにはかなり減少することになる¹⁴⁾と考えられる。実際には黄道と白道は約6度傾斜して交差しているため、北緯45度における月の南中高度は最大で75度程度、最低で15度程度になり、月の南中時の反射率もこれにともなって $2\% \sim 21.2\%$ の範囲で変化することとなるが、ほとんどの場合月の出入前後の数時間を除いて数パーセントの反射率になると考えて問題はない。

表8. 平坦な海面に対する反射率¹³⁾

入射角	反射率(%)	入射角	反射率(%)
0°	2.0	5°	2.0
10°	2.0	15°	2.0
20°	2.1	25°	2.1
30°	2.1	35°	2.3
40°	2.4	45°	2.8
50°	3.4	55°	4.4
60°	5.9	65°	8.7
70°	13.3	75°	21.2
80°	34.9	85°	58.3

夜天光の場合は天空光と同様な条件と考えられるので、反射率は天空光で得られている6.5%程度という結果¹¹⁾を採用して良いと思われる。

海中に入射した光は懸濁粒子や水分子等による吸収、散乱を受けて図10に示すように水深にもなって減衰する。これらに関してはJerlov¹⁵⁾、杉森¹³⁾らにより詳しい報告がなされているが、水域による差が大きく標準大気モデルのようなものは今のところまだ無い。海中連続観測システム設置現場で採取した海水の透過率測定例を図11に示したが、溶存物質が変化すればこの結果も変化することになる。しかしながら、比較的清澄な貧栄養海であるため、長波長側ほど吸収を受け易いという傾向は変わらないと考えられる。参考に、類似した水型と思われる日本海大和堆での水中分光放射照度の測定例¹⁶⁾を図12に示す。これらの結果から前浜でも水深20mでは赤色域100分の1以下に、青色域でも10分の1程度まで入射光が減衰していることが推定できる。

以上の結果を総合すると水深20m程度の前浜の海底照度は正確には分光放射照度として扱う必要があるが、簡単には晴天時の最高時で10,000lx程度、曇天時で数千lx程度、夜間の満月時で10mlx、月の細い時で0.1mlx程度が最大であると推定される。

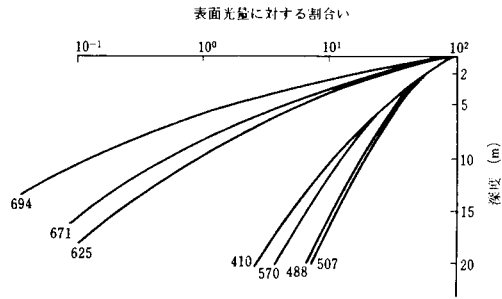


図10. 下方向放射照度の波長別透過率曲線 (駿河湾-富士川沖)¹³⁾

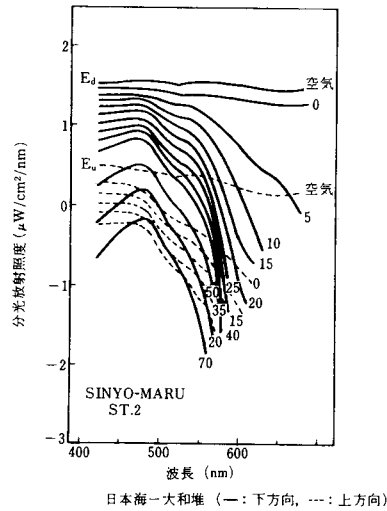


図12. 水中分光放射照度の例¹⁶⁾

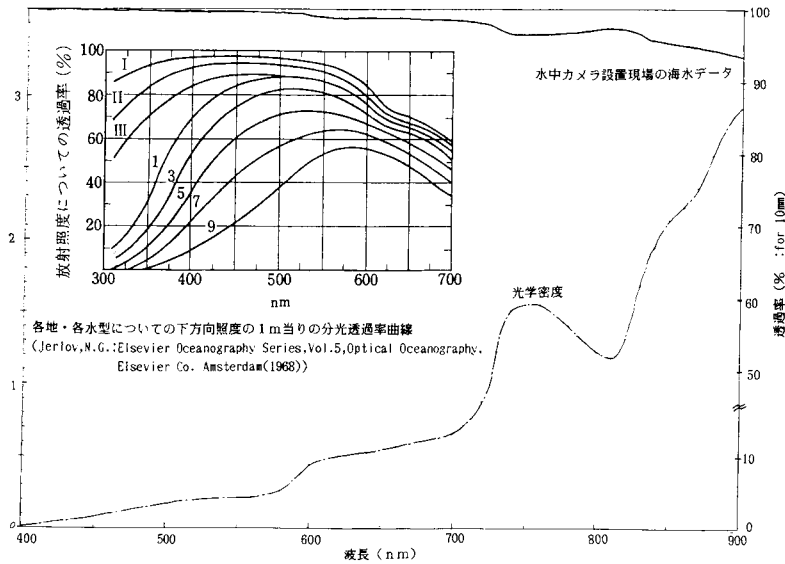


図11. 海水による光の吸収

6.3 海中の色温度

上記のように海水中で発生する入射光の減衰には波長依存性がある。短波長域では主に懸濁粒子や溶存物質による吸収・散乱が、長波長域では水分子による吸収がこの主要原因とされているが¹³⁾、海中画像入力時の言わば照明光におけるこの波長依存性の存在は、カラー画像の取り込み時には極めて重要な要素である色温度に大きな影響を与える。

陸上の場合の自然光の色温度変化は表9に示すようにほぼ1900°K~25000°Kの間となる。

このときの分光放射強度は図13のようになり、黒体放射の分光放射率をPlanckの放射則に基づいて計算した結果とほぼ一致する。図13に黒体放射の分光放射強度の計算結果を、横軸に波長を縦軸に560nmの放射強度で100に規格化した放射相対強度をとって示す。図中に付してある数字は黒体の絶対温度で、温度を上げて行くと無限大の曲線に漸近し収束する。

表9. 自然光の色温度変化^{17), 18)}

自然光の種類		色温度(°K)
太陽光	日の出	1,900
	日の出1時間後	3,500
	日の出2時間後	4,400
	正午	4,800
昼光	太陽光と青空の光	5,400
	北窓からの光	6,500
空の光	曇天	7,000
	青空	11,000
	澄んだ青空	25,000
月光		4,100

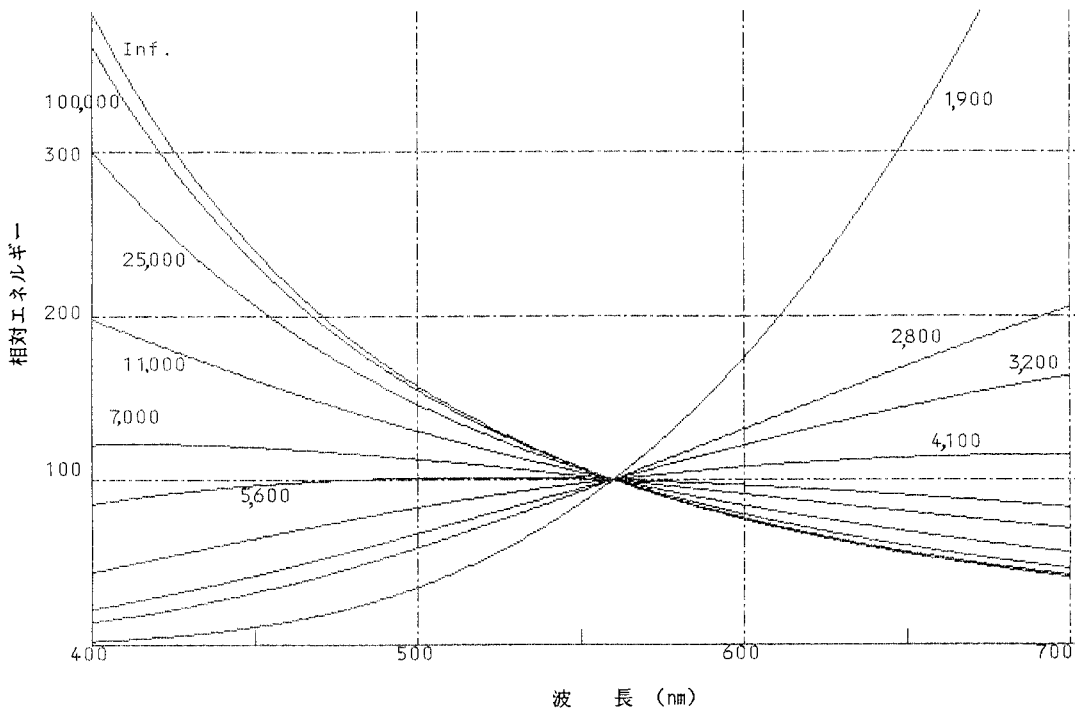


図13. 黒体放射の分光放射強度

海中への入射光も海面では黒体放射に近似できる自然光であるが、海面直下の水中分光放射照度分布観測結果(図12)と図13を較べると、水深が5 m程度までは辛うじて両者に類似性がみられるが、それ以上の水深では水中の観測結果の長波長域の吸収が大きくなり対応がつかなくなる。水深5 mの場合でも100,000°K近くの黒体放射に類似するのであるから色温度としてはきわめて高く、色温度変換フィルタ等で昼光色に変換できる範囲を逸脱している。したがって、水中では単に色温度の異なる照明光が得られるというのではなく、青色の色光による照明条件下で画像取り込みをすることになると結論づけられる。

6. 4 海中の画像外乱因子

水中画像と気中画像の大きな違いの一つに、カメラと対象物間の媒体に画像外乱因子が存在することがあげられる。海中画像取込み時には、常に対象物・カメラ間に微小な懸濁物質の他に大きなゴミ、海草、砂礫等の様々な画像外乱因子が存在し、これらの雑音因子の効果的排除の可否が海中画像を扱う上での大きなポイントになる。

懸濁物質は数 μm から数mm程度が一般的で、対象物からカメラに至る画像形成光の吸収・散乱を大きく支配する。懸濁物質や溶存物質と光の相互作用に関しては前出のJerlov¹⁵⁾、杉森¹⁶⁾らにより詳しく報告されており、理想的な海水モデルに関してはレーリ-散乱とミー散乱でほぼ説明できることが分っているが、実際には海域による水質差が激しく簡単にその結果を利用できる場合は少ない。したがって、ここでは一般的な結果のみを示す。純水に近い清浄な海水ではレーリ-散乱により λ^{-4} に比例する散乱が支配的になるが、この影響よりは吸収による効果の方が遙かに大きく、したがって、長波長側が減衰する。懸濁粒子が多い場合にはミー散乱による効果で λ^{-1} に比例する散乱が支配的になり、粒子の存在量に応じて短波長側でも減衰が大きくなる。

懸濁物質より大きなゴミ、海草、砂礫等は時化等によって一時的に外乱物質となるものだが、長期連続観測型的水中TVカメラを考える場合には単に運不運で済ませ得る問題ではなく、なんらかの対策が

必要になる。

これらの外乱因子のほかに、カメラレンズ系に徐々に付着してくる海中生物、海草類の影響も考慮しなければならない。実際にはこれが一番の問題点であり、本研究開発においては、生物付着防止機構を設けることで、カメラレンズ系への付着物防止に対処している。

7. 画像処理 (前処理技法)

どのような画像処理を行う場合でも前処理はある程度必要となるが、海中画像の場合には前述のような特質があるため、きわめて重要な作業と位置づけられる。さらに、一般的には有効とされている前処理技術でも、強調処理技術以外の基本前処理技術は、低コントラスト・低彩度を特徴とする海中画像に対しては、そのままの形ではほとんど効果を発揮しないことが判明した。以下に海中画像の場合でも有効と考えられる幾つかの手法を示す。

7. 1 雑音除去

海中映像の画像処理が、一般の空気中の画像処理と大きく異なる点の一つに、カメラ・対象物間に介在する多数の外乱因子の存在があげられる。こうした映像信号上は、ノイズに相当する成分を除去する手法としては、様々な平滑化の手法が考えられているが、外乱因子各々の特徴を考慮し最適なフィルタリングのアルゴリズムを選択する必要がある。

比較的短時間内に発生するゴミなどへの対処の方法として、具体的には次の三つが考えられる。

- (1) 平滑化フィルタの採用
- (2) 連続画像入力による時間平均
- (3) 画像間演算による強制除去

(1)の平滑化フィルタとしては、単純平滑化フィルタ、メディアンフィルタ、E-フィルタ等多数あるが、いずれも予想した程の効果は認められなかった。これらの処理の特性上、画像の辺縁部の情報が消失し、複数回作用させた場合にはノイズ成分の減少効果以上に画像のボケがめだち、結果として原画像に比べ処理画像の方が劣化したと評価される。

(2)の連続画像入力による時間平均を施した実例を

写真1, 写真2に示す。時化時の魚礁周辺の画像で、写真1が原画像、写真2が1/15秒毎の画像を20枚加算平均処理した処理画像である。海底の砂礫、ゴミ、貝殻等が底流で巻き上がり、原画像を動画で観察しても魚礁の影さえ定かではないが、写真2の処理画像では魚礁周辺の詳細な状況が判別できる。この手法は、観測対象の動きが少なく外乱物の動きが大きい場合に極めて有効である。具体的には、ウニ、アワビ等の観察、水中構造物の監視等への応用が考えられるが、外乱物の移動速度やその分布の程度に応じて、画像取り込み回数や頻度を適宜調整する必要がある。

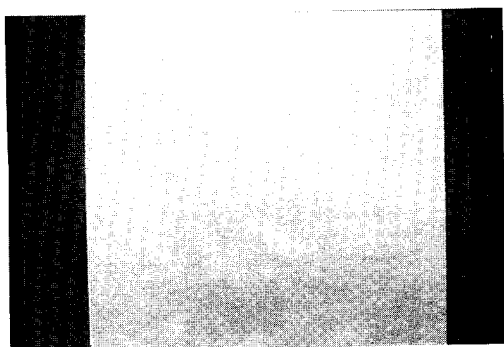


写真1. 原画像

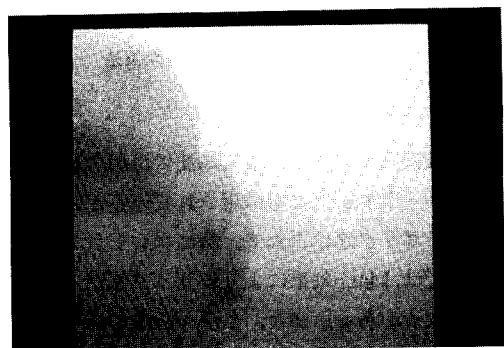


写真2. 処理画像

(3)の画像間演算による強制除去は、ゴミに対してより動きの速い対象物を背景から分離し、対象物の観測を容易にすることに効果があると評価される。この手法は、魚類等の一般に移動速度の十分速いものに対してある程度有効である。

7.2 明度補正

海中映像を画像処理する際に大きな問題となるの

は、色彩情報の青色偏重化のみならず、6.2で述べたようにその照度が大きく変動する点にある。水中TVカメラに内蔵させたオート・アイリス機構による光量調整やオートゲインのみでは補正しきれなくなる。

この場合には一般的な強調処理の手法が有効で、濃度ヒストグラムを参考にしてルックアップテーブルを強調型に変換すれば、明度補正のみならずコントラスト改善にも大きな効果が期待できる。ヒストグラムの参照領域を小さく限定し、画面内数カ所に配置することでほとんどリアルタイム処理も可能だが、SN比が実際に向上するわけではないので平滑処理等との併用が必要になる場合も多い。濃度ヒストグラムデータはカラー画像の場合RGBの3種類得られるが、海中画像の特質としてB成分のヒストグラムの輝度値が通常最大で、R成分の輝度値が最小になるので、ルックアップテーブルの変換はこの範囲で行うと輝度飽和もなく効率よく変換可能である。

7.3 色補正

6.3に示したように水中画像は、青色照明光下でのものであるため、以下のような実験を行い画像の色彩情報の補正を行った。①水中TVカメラによる空气中、標準照明条件下での白色標準サンプルの映像情報の記録。②混濁物のない淡水中での白色標準サンプル及びRGB各色サンプル映像の記録。③実海域海中に実験用基準標色球を距離2m, 5m, 10mに仮設し、映像データを水中TVカメラにより記録。④上記の分光学的画像分析結果をもとに、色彩情報に対する補正関数を以下のように2種類決定した⁸⁾。

(1) ルックアップ・テーブルを利用し、RGBの各成分に以下のような γ 補正を施す。

$$R : \gamma^{1.05} \quad G : \gamma^{1.7} \quad B : \gamma^{1.85}$$

(2) 上記の方法に加え、RGB各成分の特徴を踏まえて補正関数を設定し補正を行う。

上記の結果が良好であることから、水深に応じたRGB各成分の補正は観察対象となる海中において、基準となる白色の画像を記録し補正関数を設定すれ

