

「超高感度深海ハイビジョンTVカメラ」の開発

内田 徹夫*¹ 棚田 詢*¹ 谷岡 健吉*²

ハイビジョンSuper-HARP撮像管と特殊光学系を用いた深海無人探査機用の超高感度ハイビジョンカメラを開発した。このカメラは、3000m級無人探査機「HYPER-DOLPHIN」に装備され、母船船上の制御室(control van)で極めて鮮明な映像を表示した。映像表示装置には、42インチの大型ハイビジョンプラズマディスプレイを採用し、高精細大画面表示としたため、従来の無人探査機システムでは不可能だった深海の臨場感を表現することに成功した。また、これまでにない深海生物類の繊細な形状を記録した。

キーワード：ハイビジョンカメラ, スーパーハープ, 「ハイバードルフィン」, 無人探査機

Development of the Deep sea Ultra High Sensitivity HDTV Camera System

Tetsuo UCHIDA*³ Jun TANADA*³ Kenkichi TANIOKA*⁴

The high-definition television camera for the Deep sea Remotely Operated Vehicle that used an ultra high sensitivity Super-HARP imaging device and special optic system was developed. This camera is equipped on 3000m class Remotely Operated Vehicle "HYPER-DOLPHIN" and displayed an extremely clear picture in the control room (control van) on the mother ship. The display with a High Definition Plasma Display of 42 inches large screen. In this way, The realism of the deep sea world was succeed fully in reproduced which was impossible with a conventional ROV. Also, we recorded the sensitive form of the deep sea animals and the like that picture recording was impossible in the past.

Keywords : High-Definition Television, Super-HARP, 「HYPER-DOLPHIN」, Remotely Operated Vehicle

*1 研究業務部 船舶工務課

*2 NHK放送技術研究所 撮像デバイス

*3 Research Support Department

*4 NHK Science and technical Research Laboratories Advanced Imaging Devices Research Division

1. はじめに

海洋科学技術センターは、超高感度深海ハイビジョンカメラを開発し最新鋭の無人探査機「ハイパードルフィン」に搭載した。

深海調査の現場では、さまざまな無人探査ROV's: Remotely Operated Vehiclesが活躍している。ROV'sは支援母船と数Kmに及ぶケーブルで結ばれた探査機を遠隔操縦するシステムで、深海で活動するこの探査機に装備する水中カメラは、システム全体の眼として機能する重要な機器である。この映像の高画質化は、必然的な要求であるが従来のテレビカメラの方式は現行方式、すなわち走査線数525本のNTSC: National Television System Committee (走査線数525本)であり画質の向上にはおのずと限界があった。このため、ハイビジョン方式HDTV: High Definition Television (走査線数1125本)の超高感度な水中テレビカメラを開発することで、抜本的な高画質化を達成した。このカメラの開発により、これまでになかった緻密な観察・調査が実現し、深海生物等を鮮明な映像として捉えることに成功した。本稿では、システムを構成する要素技術について紹介する。開発したカメラの要目を(表1)に示す。

2. 深海用ハイビジョンテレビカメラの選択

現行方式の水中テレビカメラは、陸上用の一般的なカメラ同様、光を電気信号に変換する撮像素子にCCD: Charge Coupled Device素子を使用したCCDカメラが主流である。しかし、海洋科学技術センターでは、NHK放送技術研究所と共同開発した、水中スーパーハープ(Super-HARP)カメラも超高感度テレビカメラとしてすでに実用化している。

ハープ, HARP: High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor 方式撮像管では、光を電気信号に変換する光導電膜で、入力した光子1個が電子のなだれ増現象を生じ、多数の電荷を発生する。このため他の超高感度素子と異なりノイズの増加を伴うことなく超高感度で鮮明な映像を生み出すことができる¹⁾。また、ハープ撮像管の分光感度特性は、海水中における光の減衰特性の弱い中短波長領域に感度ピークがあり中長波長領域に感度ピークを持つCCD素子に比べて有利な水中特性を有している²⁾。

他方、ハイビジョン方式では、走査線が現行方式の525本から1125本と約2倍、画素の大きさは現行方式の約1/4となるため解像度は格段に良くなるが、反対に被写界深度は浅くなってしま³⁾。しかも、この現象はレンズの光学的な原理から、被写体をズームアップし、レンズ絞りを開けるほど極端となる。結果として撮影時にフォーカス操作(ピント合わせ)が難しくなり、ピンボケ映像の原因となる。一般的に、ハイビジョンカメラで現行方式と同等な被写界深度を得るには、レンズを2絞り絞って使用する必要があると言われていた。しかしこの場合、映像の明るさは1/4に低下してしまうため、光が急激に減衰する水中では現実的ではない。このように、深海中でのハイビジョン撮影、特に無人探査機をホバリングさせて中深層に漂う深海生物等の撮影を想定すると浅い被写界深度は大きな問題である。

一方、現行方式のスーパーハープカメラの鮮明な映像は、画像の明るさをそのままにして(映像信号レベルを一定にし

て)、感度を上げながらレンズの絞りを一定か、絞り込んで被写界深度を深くするため、同じ照明条件でも奥行き感(質感)のある画質を得ている。この原理は、ハイビジョン方式においても同様となるため、深い被写界深度を得るためには、現行方式以上の超高感度化が絶対の条件であった。視感的にも、高画質でしかも奥行き感のある映像を、大画面で表示すれば臨場感を生みだすことができる。このような考察をふまえてスーパーハープ管を用いた超高感度深海ハイビジョンカメラを開発することにした。

3. ハイビジョンカメラシステム概要

カメラは、無人探査機「ハイパードルフィン」(最大潜航深度3000m)(写真1)のシステムに組み込まれ映像信号の伝送には予備のSM型光ファイバー1本を使用している。しかし、ハイビジョンカメラの系統は「ハイパードルフィン」の機能に干渉せず独立している。

カメラのシステム系統図を(図1)に示す。探査機に装備するカメラヘッド部は最大使用水深3000m、アルミ合金製で、空中重量 36Kg 長さ639mm 外径216mmの大きさである。

通信方式は、波長分割多重WDM: Wavelength Division Multiplex方式の双方向光通信とした。カメラヘッド部からはハイビジョン映像信号HD-SDI信号(1.5Gbps)をUP-LINK系(1310nm)の光信号に変換し送信する。映像信号は、アンビリアルケーブル(3300m)、ウィンチシステムを通じて支援母船上のコントロールバン(制御室)に設けられたCCU: Camera Control Unitに接続される。反対方向のCCUからカメラ、レンズへの制御信号(RS422)は、DOWN-LINK系(1550nm)として送信される。カメラヘッドのレーザードライバ(光通信装置)の出力は最大26dbで、「ハイパードルフィン」システムの総合的な光ロス、-7db程度であった。船上コントロールバンのCCU部にはカメラの基本的な設定操作を行うセットアップユニット(Setup Unit)、リモートでカメラの操作を行うためのオペレーションユニット(Operation Panel)が接続するほか。映像は42インチハイビジョンプラズマディスプレイ(HD-PDP: High Definition Plasma Display)



写真1 超高感度深海ハイビジョンカメラを装備した無人探査機「ハイパードルフィン」

Photo1 The HDTV Camera Mounted on ROV「Hyper-Dolphin」

表1 超高感度深海ハイビジョンTVカメラ定格
Table 1 Specification of Super-HARP HDTV Camera System

	カメラヘッド
最大使用深度	3000m
重量	36Kg (空中) 14Kg (水中)
外形寸法	カメラヘッド・レンズ 450mm (L) × 190mm (φ) 耐圧容器 639mm (L) × 216mm (φ) (AL7075-T6) タフラム処理
撮像管	2/3 インチHD Super HARP撮像管 電磁集束 電磁偏向型 RGB3管式
感 度	F5.6 2000Lux (高画質モード) F1.8 2Lux (最高感度モード) 無段階変更
S/N	43dB 以上
変調度	800 TVL, 10% 以上 (画面中心部)
レジストレーション	第1ゾーン (画面高さの80%) 0. 1%以内
レンズ・光学系	
最大口径比	1 : 1.8
焦点距離	5.5~27.5mm (5倍ズーム)
フォーカス範囲	∞~0.3m (水中、窓の前面から被写体まで)
水中画角	Wide 66.6° × 41.66° 73.4° Tele 15.2° × 8.9° 17.4°
分解光学系	F1.8 M型折り返しプリズム
信号伝送方式	カメラヘッド映像出力信号 (UPLINK) HD-SDI信号 シングルモード光ファイバ伝送 カメラ制御信号CCUから (DOWNLINK) 光分波多重 (WDM) による双方向通信
カメラコントロール ユニット 信号出力	HD SDI 3系統 Y.Pb.Pr/RGB 2系統 NTSC SDI 3系統 VBS 3系統 Y. R-Y. B-Y/R.G.B 1系統
電 源	カメラヘッド DC12V 60W CCU AC100V 300W
表示装置	42 inch HD-PDP × 3 17 inch カラーモニター ×1 9 inch モノクロ調整 ×1
映像記録装置	HD-DVTR HDCAM (Sony HDW-500) ×1 DIZITAL BETACAM ×1 W-VHS ×1



写真2 船上装置
Photo 2 Surface Unit

に出力表示している。また、映像記録装置はHDデジタルVTR (HDW-500)を採用した。(写真2)

4. 要素技術

4.1. カメラヘッド部の要素技術

4.1.1. ハイビジョンスーパーハープ撮像管

撮像素子としては、今まで実績のあるハープ管を基礎とした。高感度でハイビジョン方式に対応できる電磁偏向・電磁集束型のハイビジョンスーパーハープ撮像管を開発した。(写真3)この撮像管は、大きさが太さ $\phi 18\text{mm}$ 長さ約108mm, 光導電膜厚15ミクロンで電荷読み取り用の電子銃はハイビジョン用に開発した。この撮像管は一般的なハイビジョンCCD素子の約50倍の感度を有している。

4.1.2. F1.8M型折り返しプリズム分解光学系

水中カメラの耐圧ハウジングは円筒形が基本であるため効率良く収納するためにはカメラ内機を円筒形にまとめる必要がある。現場での取り扱いや汎用面を考慮してカメラは可能な限り容積圧縮をおこない小型化,特に長さ方向を短くすることに重点を置いた。カメラ内機の大きさを決める大きな要因は、レンズと分解光学系そして撮像管の配置である。通常のプリズム分解光学系では図2aのように撮像管が3方向に開く配置となるため、外形を円筒形にまとめ小型化するのは困難である。そこで、レンズから来た光をR. G. B 3原色に分解しつつレンズ方向(カメラ前方)に折り返して撮像管が取り付けられる特殊な形状のM型折り返しプリズム分解光学系(写真4)を新規に開発した。これにより図2bのようにズームレンズ、撮像管3本が1方向に平行に配置可能なためカメラ内機が円筒形に短くまとまる。この配置により、撮像管に及ぼす地磁気の影響(色ズレ現象)も小さくなった。さらにこの光学系と組み合わせるレンズはリレーレンズの一部を撮像面側に分割して備えて、レンズの長さ方向を圧縮し、内機寸法で $\phi 186\text{mm}$ 長さ461mmという大きさにまとめることができた。(図3) (写真5a, 5b)レンズはF1.8, 画角は水中広角端で対角 73.4° ズーム比5.5mm~27.5mmの5倍である。

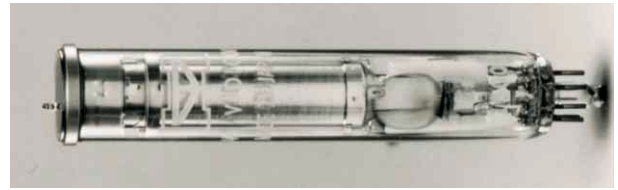


写真3 HD Super-HARP 撮像管
Photo 3 HD Super-HARP Tube

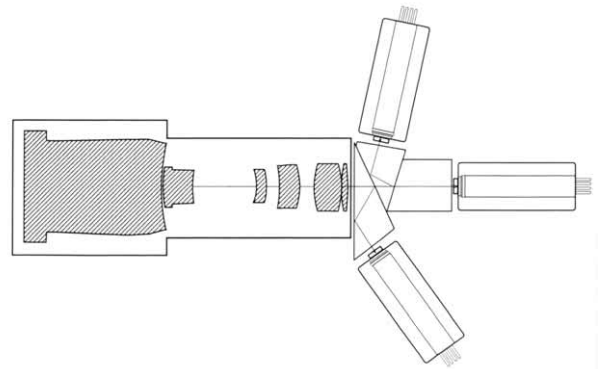


図2a プリズム分解光学系の撮像管の配置

Fig. 2a Arrangement allocation of normal Optical Prism System

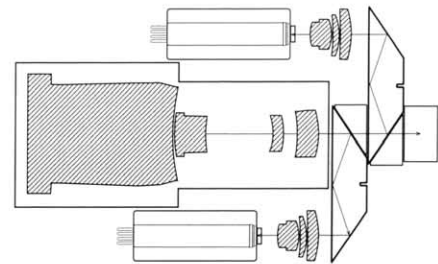


図2b M型折り返しプリズム分解光学系の撮像管配置

Fig. 2b Arrangement allocation of M type Special Optical Prism System

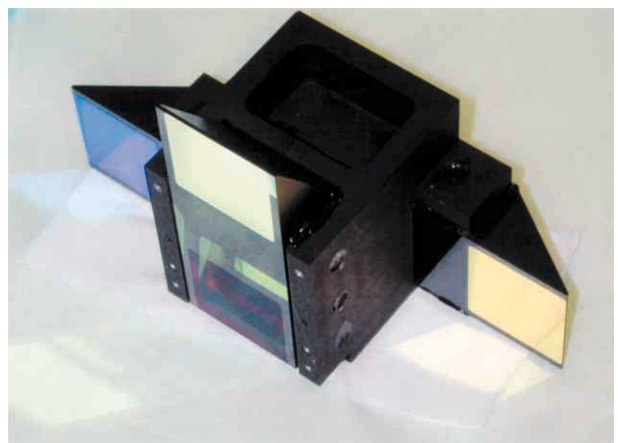


写真4 M型折り返しプリズム分解光学系
Photo 4 M Type Special Optic Prism System

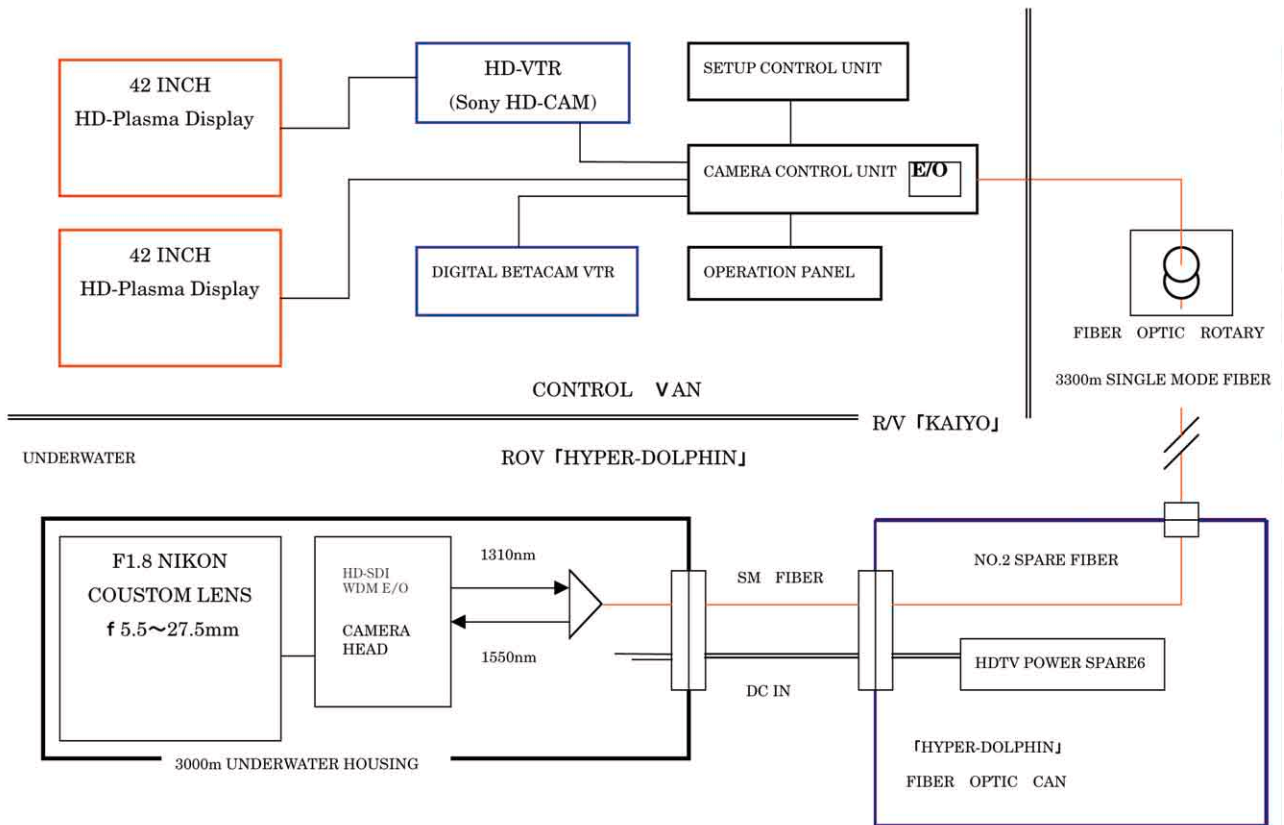


図1 ハイビジョンカメラ系統図

Fig. 1 Block Diagram of HDTV Camera System

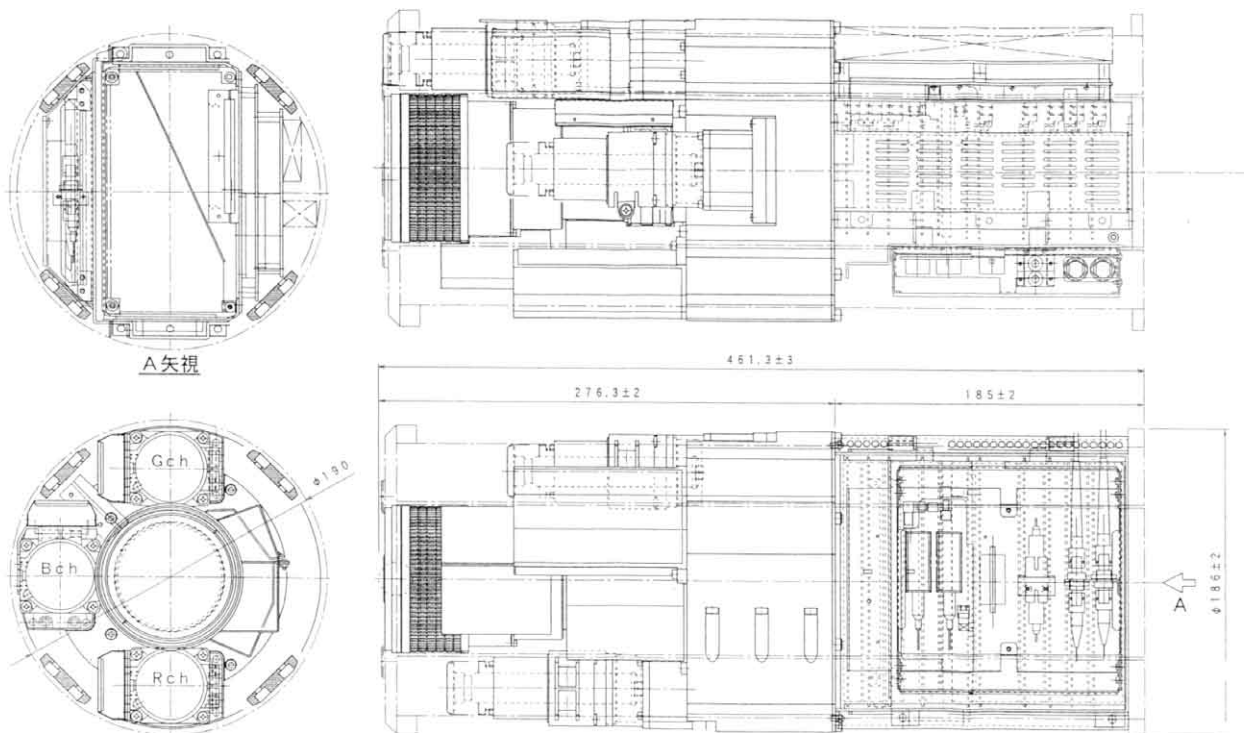


図3 カメラ内機寸法図

Fig. 3 Arrangement of Inner Camera Head



写真5a カメラ内機
Photo 5a Inner Camera Head

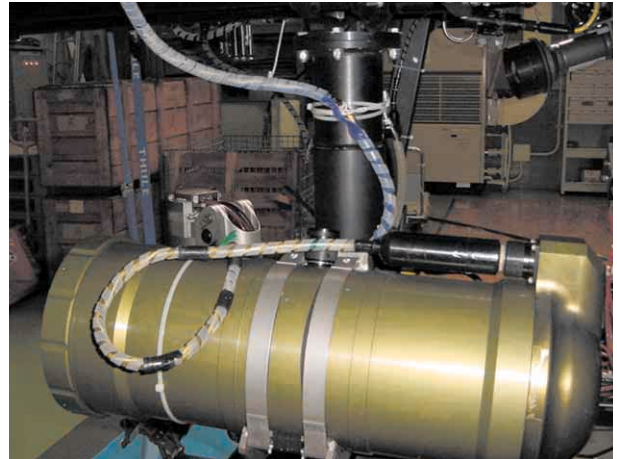


写真6a 水中コネクタの取付け形態
Photo 6a Installation of a Underwater Connector

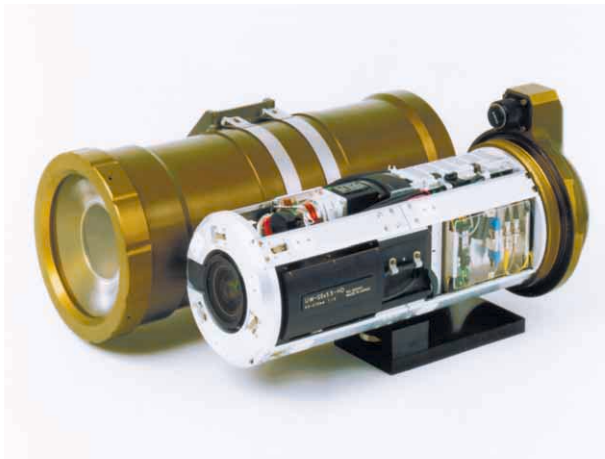


写真5b カメラ内機
Photo 5b Inner Camera Head

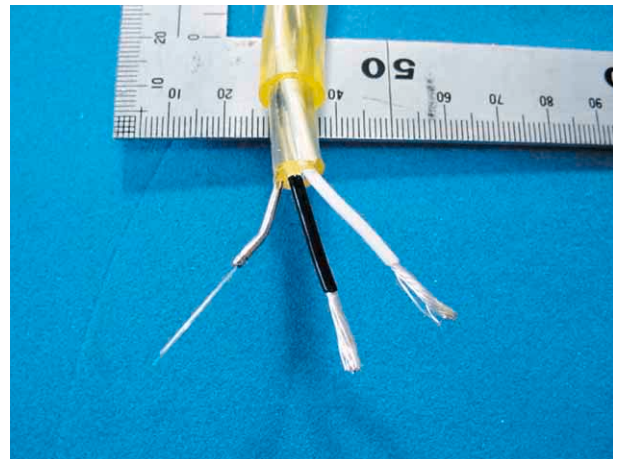


写真6b 水中ケーブル
Photo 6b Underwater Cable

4.1.3. 耐圧窓

テレビカメラの耐圧窓の選択としては、材質としてアクリル樹脂かガラス、形状としてドーム型、平行面型の選択があり、おのおの長所短所がある。しかしながら、最大使用深度が3000m、ハイビジョンでは平面が0.5mm程度歪んでも画質に影響することもあり、加えて主に次の理由から一般的なアクリル円錐台形窓を選択した。(寸法：外径201mm 内径98mm 厚さ56mm)

耐衝撃性が良いため浸水事故に強い。

アクリル円錐台形窓ではドーム窓のようにドーム中心とズームレンズ光軸中心とのズレによる画質劣化の心配がない。

レンズ効果を防止する為の補正レンズの必要がない。(半球ドームの場合など)

4.1.4. 水中コネクタ

カメラに接続するケーブルおよびコネクタは高水圧下でパン・チルト装置により繰り返し動作するため高い信頼性が求められる。特に本カメラでは、映像信号伝送用にSM型光ファイバーを使用するため、断線トラブル等の懸念があった。また、無人探査機への取付け容積を小さくするため、カメラに接続するコネクタ部分も出来る限り小型の物が必要であった。選択したケーブル・コネクタはSEACON社製MINO-2SMFO-2/#14-CCPLでこのケーブルは、2本の光ファイバーを直径2mmほどのステンレスのパイプに通して保護し、その周りをシリコンゴムで二重に防水している。接続方法としては、カメラのエンドプレートから前方へケーブルを導く形態とした。このコネクタの接続時の大きさは長さ180mm、外径40mmで平均の光接続ロスは-0.50dbであった。(写真6a, 6b)

4.2. 無人探査機システムの工夫

4.2.1. 探査機の水中共照明

水中で鮮明な映像を得るためには、照明の当て方は重要である。懸濁物の有る海中で、被写体に対してカメラと同じ方向から、強い光を当てると被写体との間の懸濁物が乱反射して被写体が見えにくくなる現象がおこる。この現象を避けるためにはカメラの光軸と照明の光軸をなるべく大角度に配置したほうが良い。しかしながら、実際には探査機に取り付ける物理的な制約があるので被写体から眺めてカメラとライトの位置をなるべく離す取り付け方をする。「ハイパードルフィン」ではピークル前方上部に左右に(180°)観音開きに展開駆動するライトブーム(長さ800mm)を無人探査機としては初めて装備した。このライトブームにはHMI:Hydragryum Medium Arc Length Iodideライト2灯とパン・チルト付きCCDカメラ、ライト1灯を取付け、カメラ位置に対して任意な角度から照明が可能である。中深層のクラゲ等、ピークル前方の3m付近までの被写体に対して斜め上方から照明できるため、懸濁物のある状況でも効果的であり左右の光量を調整することにより立体感のある映像が可能となった。ピークル前方の水中共照明は光量調節機能付き400W HMIライト5灯である。(写真1)

4.2.2. 電動パン・チルトと前後スライド機構

カメラを搭載するパン・チルト装置は遊びの少ない電動駆動(Remote Ocean System 社)PT25型とした。パン・チルト装置は上下左右各170°の旋回角度を持ち、広範囲を観察できる。さらにパン・チルト装置自体を油圧シリンダで前後に600mmスライドする機構を持たせた。これにより、オペレータ、サンプルバスケットとのカメラ位置を調整できるほか、最前部位置ではピークル直下の海底も観察可能である。(写真7)

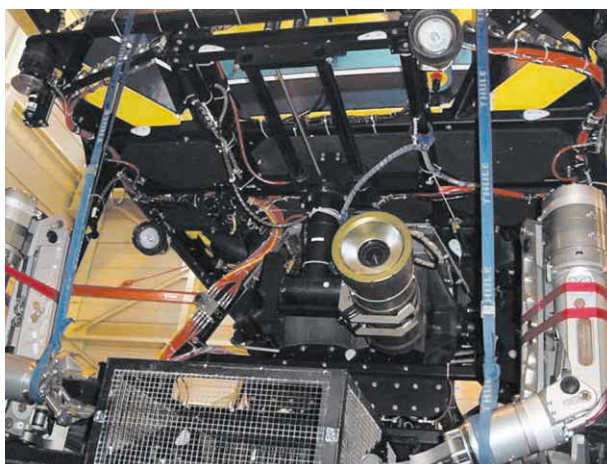


写真7 パン・チルト装置とスライド機構
Photo 7 Pan tilt device and slide system

4.2.3. ハイビジョンプラズマディスプレイ

(High Definition Plasma Display)

支援母船上のコントロールバンにおいてカメラからの映像を表示するため、42インチのハイビジョンプラズマディスプレイ(HD-PDP)を採用した。ハイビジョン映像の表示にはCRTのモニターも考えられるが、大画面で、しかも壁面への取付けを考えてPDPの薄い特徴を利用し上下2段合計6台のPDPを装備した。上段50.42.50インチ3台はオペレーション用のNTSC映像の表示とし、大画面PDPとマルチSWにより4分割して各カメラ、データ画面等を自由に任意の位置に表示可能となった。下段42インチ3台がハイビジョン映像を表示する。通常、ハイビジョンの最適視認距離は画面縦方向の長さの3倍と言われているが、42インチ画面の縦の長さは約520mmであるため視認距離は1600mm程度となる。そこで視認者の座席位置をオペレータ前列3席、研究者用の後列5席の2列配列として20cmの段差を設けたうえ視認距離も確保した。(写真8a, 8b)



写真8a コントロールバン内のPDP
Photo 8a Plasma Display in the Control van



写真8b コントロールバン内のプラズマディスプレイ
Photo 8b Plasma Display in the Control van

5. 実海域試験

このハイビジョンカメラは、平成12年5月14日から5月22日及び6月29日から7月5日の間、無人探査機「ハイパードルフィン」の行動時に、主に深海生物を撮影して性能確認試験をおこなった。撮影海域は相模湾、初島沖、相模トラフ及び駿河湾の500mから3000mの中深層及び海底である。いずれの試験海域でも懸濁物が比較的多く透明度は良くなかった。このため、海底地形の起伏を遠景から観察するような映像の収録はできなかった。中深層におけるクラゲの撮影では探査機(vehicle)をホバリングさせ、被写体の微妙な動きに合わせる必要がある。最適なフレーミングには、繊細な操縦が求められ、ビークルパイロットの技量に頼るところが大きかった。照明についてはライトプームを左右130°程度に展開した位置で、手前のライトを消した方法が0.5~3m程度の被写体に対して効果的であった。いずれにしろ、海域による透明度の変化や、撮影する被写体により照明条件は細かく調整する必要がある。また、真っ白で小さな生物の撮影では照明によるハレーションを起こしたため、ベダスタ

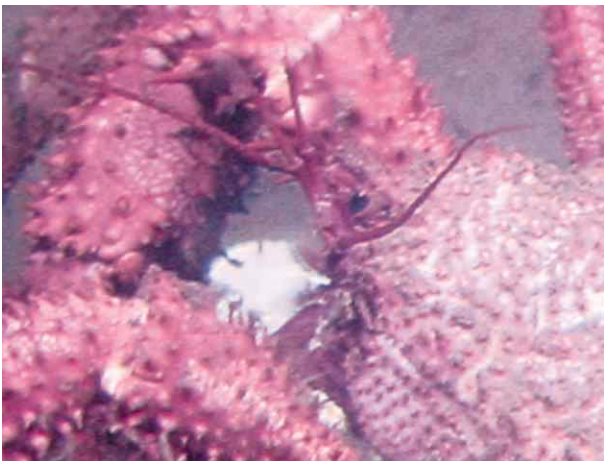


写真9a ハイビジョンカメラ画像
Photo 9a Image of HDTV



写真9b NTSC ダウンコンバート画像
Photo 9b Image of NTSC (downconvert)

ル(黒レベル)を操作した特撮をおこない効果があった。画質の確認のため収録した画面をデジタルカメラで撮影し拡大して比較した。ハイビジョン映像を(写真9a)に、またNTSCにダウンコンバートした画像を(写真9b)に示す。(写真9b)では走査線が見え画質が劣化しているのが確認できる。画質について定量的な検証は難しいが、これまで確認できなかった生物の繊細な形状を観察できている。

6. まとめ

無人探査機に現行方式に比べて約5倍の情報量を持つ超高感度ハイビジョン方式のカメラを無人探査機に搭載した。コントロールパンには、42インチ大画面のハイビジョンプラズマディスプレイを装備し情報量の多い高画質映像がリアルタイムで表示される。このシステムでは、従来、映像だけでは識別や確認が困難であった深海生物の繊細な形態が、判別できるようになり、より自然な状態での生態観察が可能となった。このため新たな研究手法の確立も期待できる。また、監視カメラとしては、細かい状況が確認できるため、的確な現場判断が容易となり、海底作業の場面でもこれまでより敏速で効率的な作業ができるようになった。このように、このカメラの開発は、無人探査機の性能や利用価値の拡大にも、大きく貢献している。

7. さいごに

ハイビジョン方式の映像は、原則として専用の記録、表示装置が必要で収録した映像のポスト処理には、ハイビジョン方式の機材の整備が不可欠である。また、収録された映像ソフトをどの様に活用し管理するべきか、スチル画像への加工、さらに他の深海システムへの展開などが今後の大きな課題となっている。

このカメラの開発を皮切りに、深海の表情をさらに臨場感よく再現する広視野角、大画面、立体映像技術等への展開を期待したい。

今回のテレビカメラの開発にあたりご協力を戴いたNHKエンジニアリングサービス、NHK放送技術研究所、NHK放送技術局、(株)日立国際電気、(株)ニコン、浜松フォトリクス(株)、(株)湘南 実海域試験に協力いただいた日本海洋事業(株)、運航チーム、「かいう」乗組員の各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷岡 健吉, 山崎 順一, 設楽 圭一, 河村 達郎, 平井 忠明, 高崎 幸男, 雲内 高明: “アバランシェ倍増 a-Se 光導電膜を用いた高感度HARP撮像管”, テレビジョン学会誌, Vol.44.No.8
- 2) 内田 徹夫, 大塚 清, 青木 太郎, 谷岡 健吉: 超高感度・高解像度水中カラーTVカメラ (DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA) の開発 JAMSTECR 29, (March 1993).113-124
- 3) F.okano, J.kumada, and K.tanioka, “The HARP High-Sensitibity Handheld HDTV camera”, SMPTE Journal, Vol.99, 612-619, August 1990.

(原稿受理: 2001年1月15日)