

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

内田 徹夫^{*1} 大塚 清^{*2}
青木 太郎^{*3} 谷岡 健吉^{*4}

水中TVカメラは、ROV (Remotely Operated Vehicle) システムの内で“目”として機能する重要な機器であり、この撮像性能の向上はシステム全体の能力の拡大に貢献する。海洋科学技術センターは、NHK放送技術研究所の技術協力を得てSuper-HARP撮像管技術を応用した超高感度・高解像度水中カラーTVカメラ (DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA) を開発した。1991年11月、これをROV「ドルフィン-3K」に装備し、実海域試験を実施した。その撮像性能は、従来型TVカメラの60倍以上の高感度と水平解像度600本以上という高性能を達成した。CCD-TVカメラとの性能比較では格段に良好な性能が認められた。また、海中環境でも極めて効果的で、従来にない鮮明な映像や遠方の映像を得られることを確認した。

キーワード：ディープシー、スーパーハープ、テレビカメラ

Development of the DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA

Tetsuo UCHIDA^{*5} Kiyoshi OTSUKA^{*6}
Taro AOKI^{*7} Kenkichi TANIOKA^{*8}

Under water TV cameras are one of the most pieces of important equipment used in ROV system as eyes. Improving the efficiency of TV cameras influences to ROV total system potential. The DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA,

*1 運航部

*2 電子計算機室 (深海研究部)

*3 深海開発技術部

*4 NHK放送技術研究所

*5 Ship Operations Department

*6 Data Processing Office (Deep Sea Research Department)

*7 Deep Sea Technology Department

*8 NHK Science and Technical Research Laboratories

which uses Super-HARP tube, has been developed at JAMSTEC with technical support from NHK Science and Technical Research Laboratories. The ROV DOLPHIN-3 K is equipped with this TV camera and the first sea-trial was successfully conducted last November in Sagami Bay. This TV camera appeared to be about 60 times more high sensitive than normal TV cameras and attained a highly efficient horizontal resolution of more than 600 lines. Compared with the CCD-TV camera on the sea floor, its very high efficiency was confirmed. The DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA is highly effective, and is capable of taking very pure images with a more distant view under the sea than in the past.

Key words : Deep sea, Super-HARP, TV camera

1 はじめに

ROV誕生の歴史は、人間が実際に海中に潜ること無く海底の情報を得ようとするところから始まった。このため、当初から水中TVカメラはROVシステムの中で中核を占める重要な機器で、これがもたらす映像情報はROV自体の運用に不可欠であるばかりでなく、調査観察用としても利用されるようになった。近年TVカメラの周辺機器、特にVTRの進歩により、この映像情報はますます貴重な調査資料となりその画質の向上が望まれるに至った¹⁾。従って、水中TVカメラの撮像性能の向上は、ROVの安全運航や調査効率にまで影響する大きな意義を持つようになった。

一般に、水中TVカメラは、市販のTVカメラにカメラ本体やレンズの制御を遠隔操作する細工を施して耐水圧ハウジングに収納されている。近年、CCD (Charge Coupled Device) 素子の開発によりTVカメラのほとんどが、撮像管カメラから急速にCCD-TVカメラに転換し、小型化に成功した。必然的に、水中TVカメラも小型・軽量化し、CCD素子の解像度の進歩により画質も向上した。しかし、海中における撮像性能に言及すれば、小型化に匹敵するほどの大きな進歩があったとはいえない。海底撮影では水中照明が不可欠であるが、光量は海水の影響による激しい減衰を受けるため、限られた狭い範囲しか照明されない。このため、暗い環境下でも映像を得るTVカメラとして、SIT (Silicon Intensifier Target) 管カメラが水中高感度モノクロTVカメラとして一般化した。また、

I. I (Image Intensifier) を撮像管やCCD素子と結合させ水中TVカメラに応用した例もある。しかし、これらの高感度撮像デバイスは、いずれも光電面からの光電子を高い電圧で加速してこれにエネルギーを与え、そのエネルギーを利用して感度の増大を図るものであるが、光電面の量子効率が低いために²⁾、原理的にノイズが増えてS/N特性が良くなく、また残像特性や解像度特性が十分でないため画質が極めて悪い。このため高感度とはいえ、その画像がモノクロであるということもあり、最近の海洋調査の現場で求められているような正確な調査や、緻密な観察の用途には不十分で、限られた海中作業などに利用されているに過ぎない。

従って、ROVの運用現場等では高感度と高解像度を両立した水中カラーTVカメラの開発が潜在的に求められていた。このためには、海中環境における撮像性能に主眼をおいたTVカメラの選定が極めて重要で、この点からわれわれはNHK放送技術研究所と日立製作所が共同で4年前に開発したSuper-HARP TVカメラに着目した³⁾。

2 Super-HARP TVカメラ

このカメラは超高感度と高解像度を世界ではじめて両立したTVカメラである。

このカメラの心臓部には、Super-HARP (High-gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor) 撮像管が使われている。この撮像管は、a-Se (非結晶セレン) を主成分とする光導電

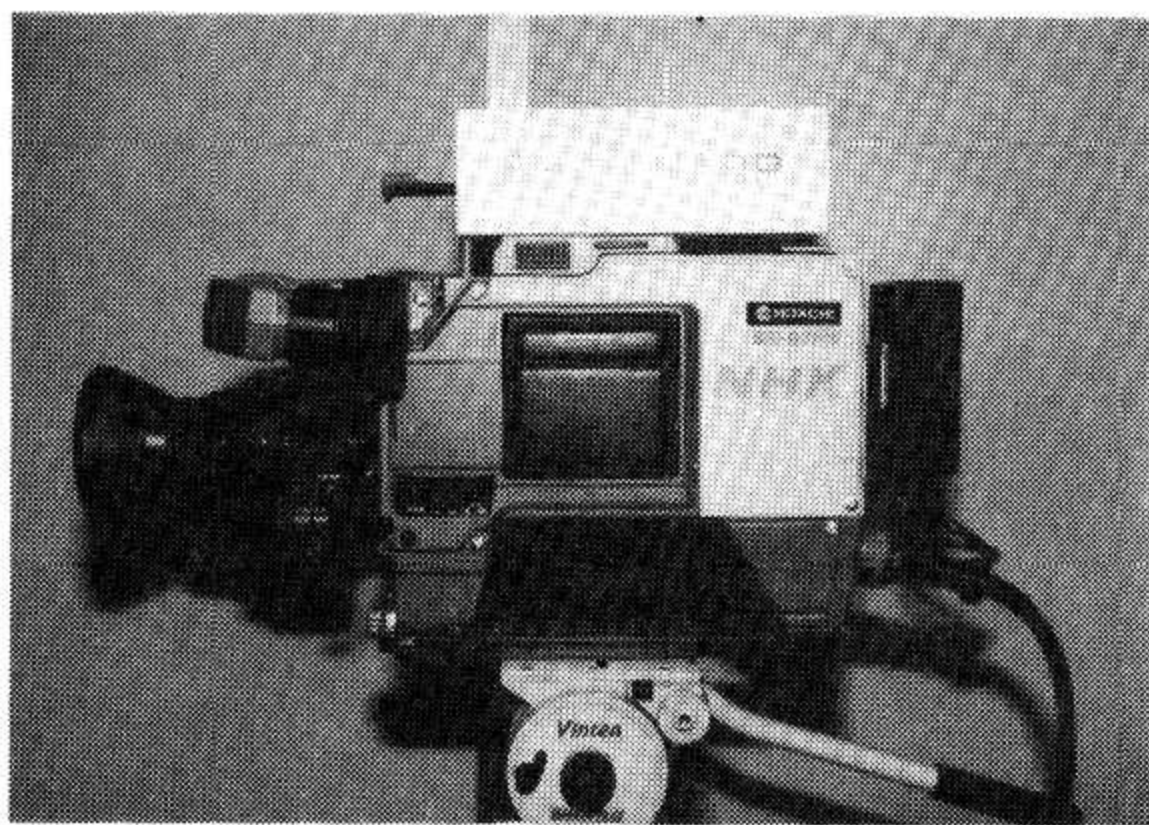


写真1 Super-HARP TVカメラ
Photo 1 Super-HARP TV camera

膜 (Target) に強電界をかけると発生する電荷のなだれ増殖現象 (Avalanche効果) を利用したもので, SATICON撮像管の80倍以上もの超高感度を実現することが可能である。また, Avalanche効果による増感時でも原理的に解像度劣化は発生しないため, もともと分解能の高いa-Seの特質により水平解像度800本以上という高解像度をも同時に得ることができる。また, 低残像, 低雑音, ダイナミックレンジが広く, S/Nが良い等の極めて良好な特性を兼ね備えている²⁾。Super-HARP TVカメラの登場により, 従来のカラーTVカメラでは撮影が不可能であった暗い被写体を鮮明に映像化することが可能となり, 同方式のTVカメラが, 放送局用, 業務用ともすでに販売が開始されたこともあって, CCD-TVカメラが全盛の今日においても, 特殊撮像管を使用した超高感度高画質TVカメラとしてその用途を拡大している。図1にHARP方式撮像管の構造及びその動作原理を示す。

3 超高感度・高解像度水中カラーTVカメラの製作

3.1 光学系

水中TVカメラに改造するにあたって生じた最大の問題点は小型化であった。最近のTVカメラは, その光学的な効率の良さからプリズム光学系が使用されている。写真2は, プリズム光学系を使用しているTVカメラの例であるが, レンズから入ってきた光は, 3方向に開いた5角形のプリ

ズムによりR (赤)・G (緑)・B (青) の3色に分光される。この端部に撮像素子が結合するが, Super-HARP TVカメラの場合2/3インチ撮像管であるため, 3方向に開いた両端の撮像管の末端間の寸法が大きい。このような形状でも, 市販されているHARP方式TVカメラでは, 撮像管の端部を, 把手の基部や肩当て部にうまく収めているため外観状は目立たない。しかし, 円筒形の耐水圧ハウジング内に収める検討をすると, 撮像管の端部間の寸法はその内径寸法に大きく影響し, 実用的な大きさにはならないことがわかった。

TVカメラの光学系としてはプリズム光学系以外に, 光の透過効率が劣るため現在のTVカメラでは採用されていないが, 撮像管を平行に3本配置できる平行光学系 (写真3) があった。そこで, この平行光学系を有するカメラの撮像管をSuper-HARP撮像管に変換し, その超高感度・高解像度の性能を移植することにした。この方法により, 実用的な大きさの耐水圧ハウジングの設計が可能となった。

このTVカメラは, Victor KY-1900という業務用クラスのカメラで, 6年ほど前にすでに生産が終了し, 現在では製造設備すら無いものであった。試作機には, 海洋科学技術センターで以前使用していたものを流用した⁴⁾。

3.2 SM型Super-HARP撮像管

この改造にあたり, 市販されているHARP方式のTVカメラやNHK技研のSuper-HARP TVカメラの撮像管電子ビームの収束偏向方式とは異なっていたため, 新たにNHK技研において静電収束, 電磁偏向型 (SM型) 2/3インチ撮像管に, 膜厚6 μ mのHARP Targetを組み合わせた前例のないSuper-HARP撮像管 (写真4) を製作した。このSuper-HARP撮像管はSATICON撮像管の約100倍⁵⁾の感度と水平解像度600本以上の性能を示した。

このSuper-HARP撮像管は, カラーとして3本が1式となり, G (緑)・B (青) チャンネル用Targetは図1とほぼ同一の構造だが, a-Seは620nm以上の長波長の光に対してほとんど感度がないためR (赤) チャンネルは, Te (テルル) の添加により赤色感度を増加させたTargetを使用している⁶⁾。図2に製作したG (緑) チャンネルのTargetの電界と電流特性を示す。

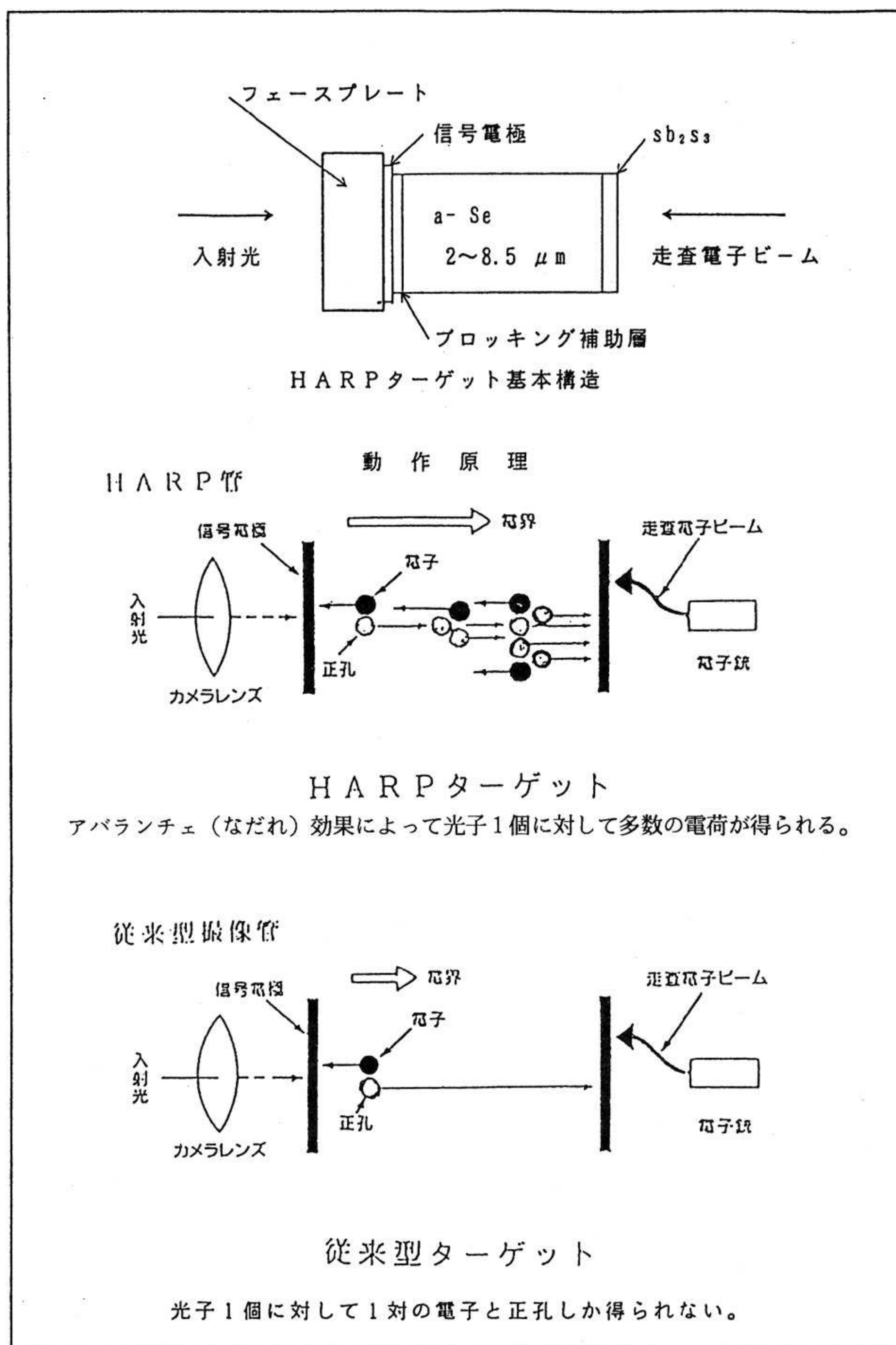


図1 Super-HARP targetの構造と動作原理

Fig. 1 Schematic diagram and operational representation of the super-HARP tube target

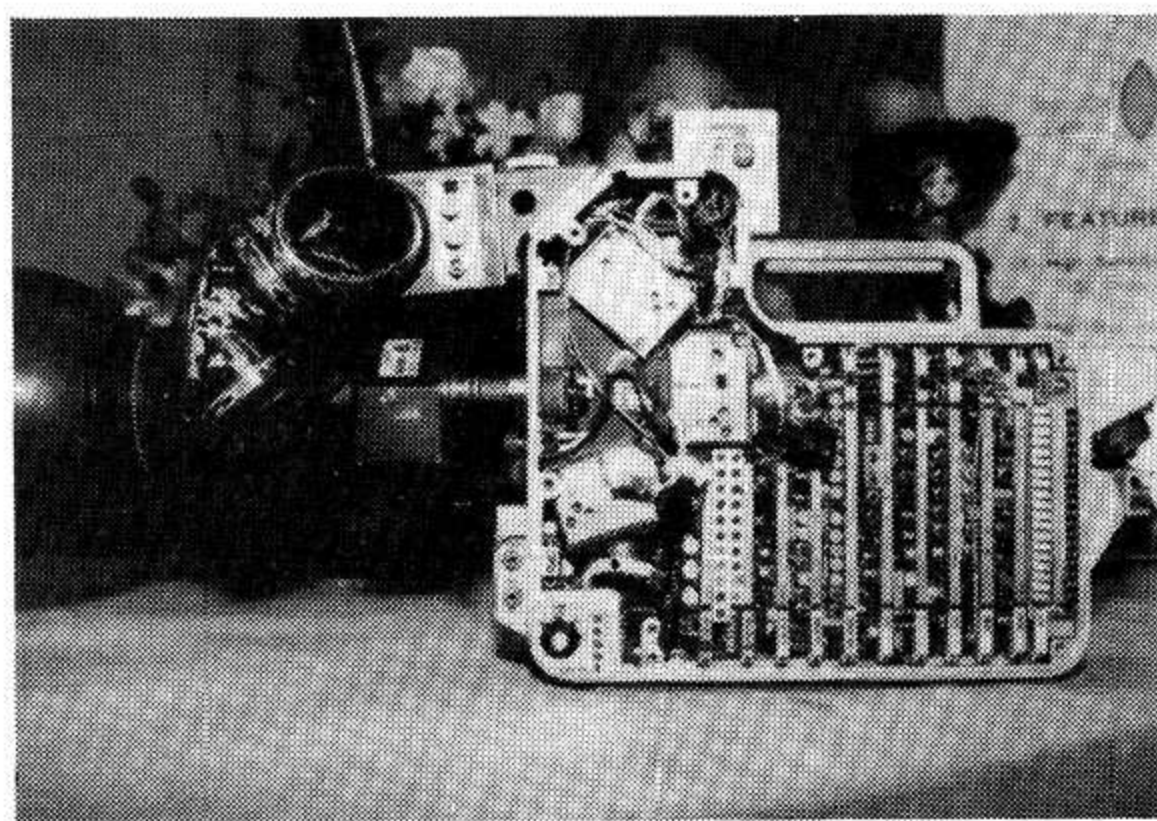


写真2 プリズム光学系TVカメラ
Photo 2 Cross section of the prism optical system TV camera

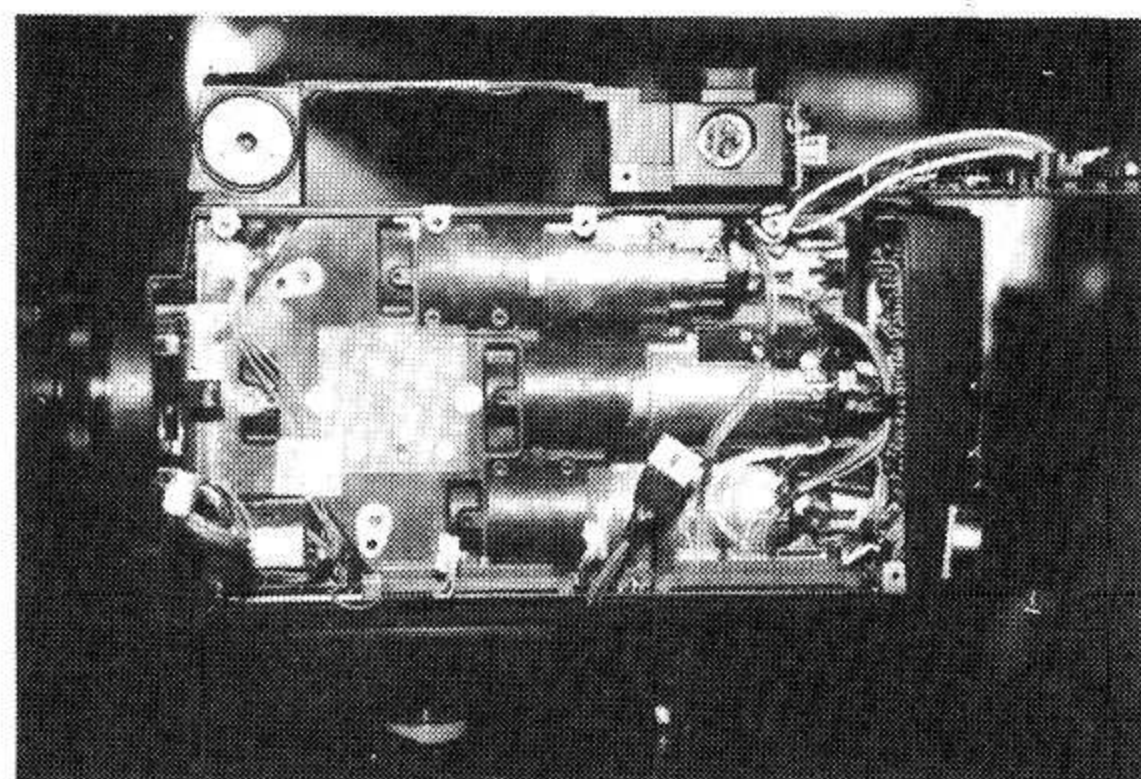


写真3 平行光学系TVカメラ
(ビクター KY-1900)
Photo 3 Cross section of the parallel optical system TV camera (KY-1900)

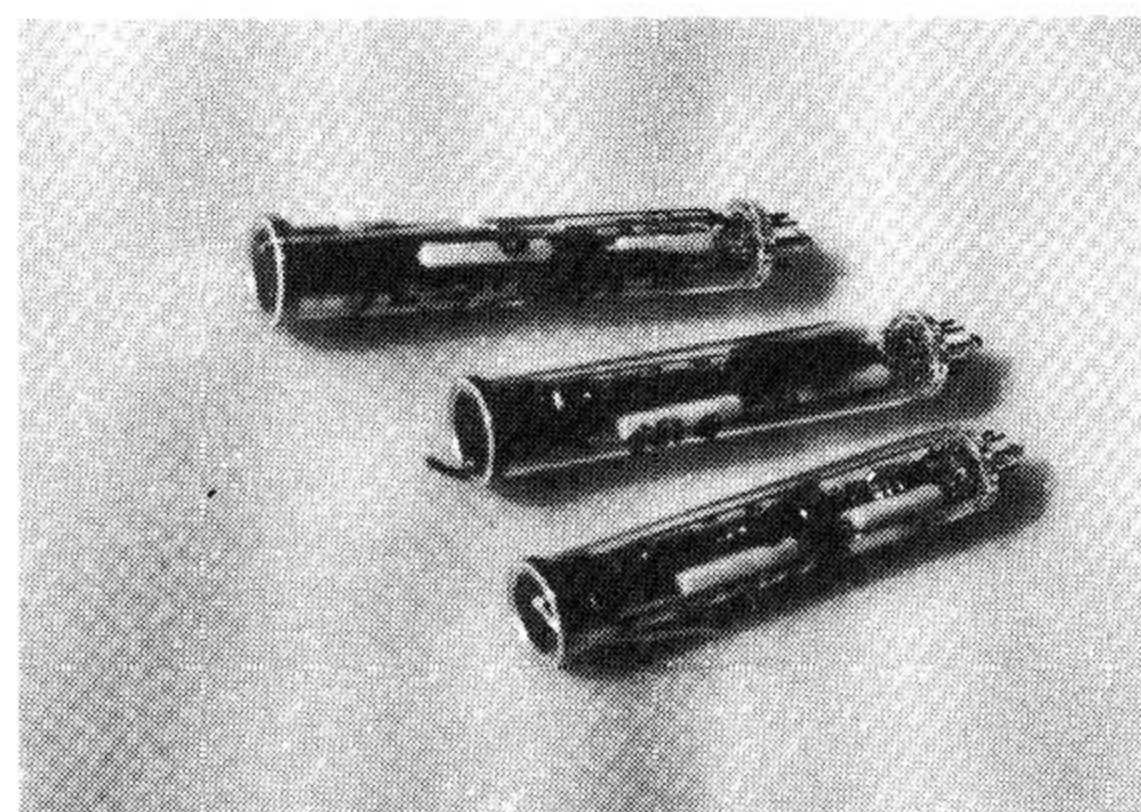


写真4 SM型Super-HARP撮像管
Photo 4 SM type super-HARP target tube

NHK技研から、この撮像管と高感度化に必要なノウハウの提供を得てKY-1900本体の高感度化の改造を行った。

3.3 感度設定

Super-HARP撮像管は、図2に示すとおりTargetにかける電圧で感度を調節できる。このため、月明りから真昼の明るさまでの広い照度範囲で良好な画像を得ることができるという通常のTVカメラに比べて、非常に広いダイナミックレンジを誇っている。この特性を利用して、感度を以下のように3段階に設定し選定できるようにした。さらに、このカメラが本来持っていた電氣的な増感機能 (Gain up 9dB) を各段階に付加できるようにした。

電源OFF				サチコン撮像管比
感度1	2000	LUX	F 7.2	2倍相当
感度2	250	LUX	F 7.2	32倍相当
感度3	60	LUX	F 7.2	64倍相当

Super-HARP撮像管は、強い入射光がある場合はその部分のみ瞬時に増感度が低下する。これはAvalanche効果そのものが原理的に感度調整機能を持つため、感度を固定して使用することも可能である。しかし、解像度の劣化がなく、幅広いダイナミックレンジを有するというSuper-HARP撮像管の最大の特徴を有効に利用するためには、感度を可変にしたほうがより効果的である。

3.4 水中TVカメラ内機の構成

把手など不必要な部品を取り外したKY-1900 TVカメラは、平行光学系部分が最大寸法となりその内径は $\phi 164\text{mm}$ の容器に収まる。これをひとつの基準として、TVカメラ内機の設計を行った。レンズは、30cmくらいの被写体にも焦点が合うように、M・O・D (最小撮影距離) が最小のものを設定した。この結果、FUJINON A3.5 $\times$ 6.5ズームワイドレンズと、これに適合するドーム型レンズポートを採用した。しかし、KY-1900 TVカメラとのマウント形式が異なったため、中間にCマウントからバイヨネットマウントに変換するアダプタFUJINON ACM-4を設けた。これらを耐水圧ハウジングの内径にフィットするアルミ製のプレートとサイドフレームで固定し、水中TVカメラとしての内機を構築した。

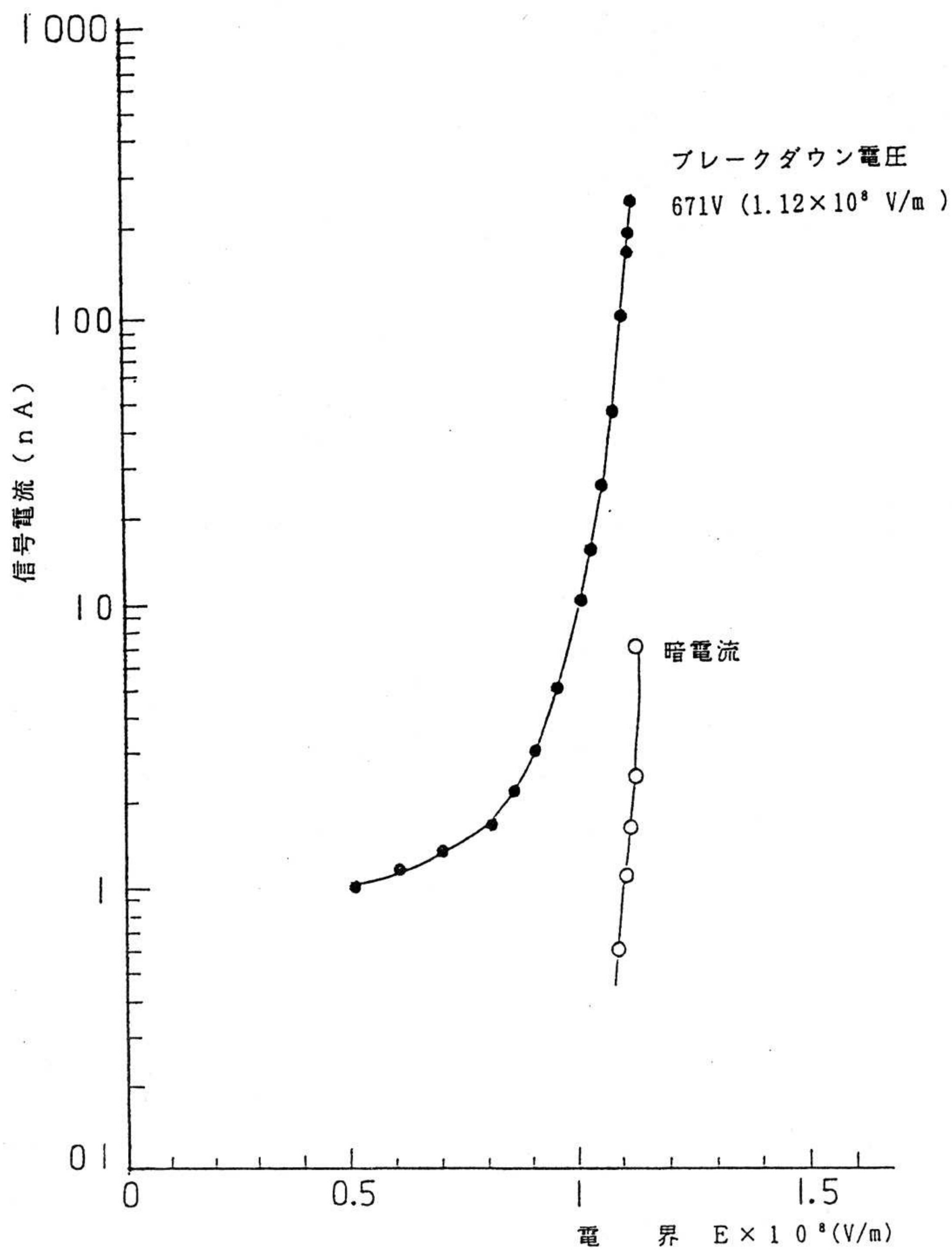


図2 Super-HARP撮像管 電界—電流特性 (緑色光)

Fig. 2 Electric field and signal current of Super-HARP tube target (Green light)

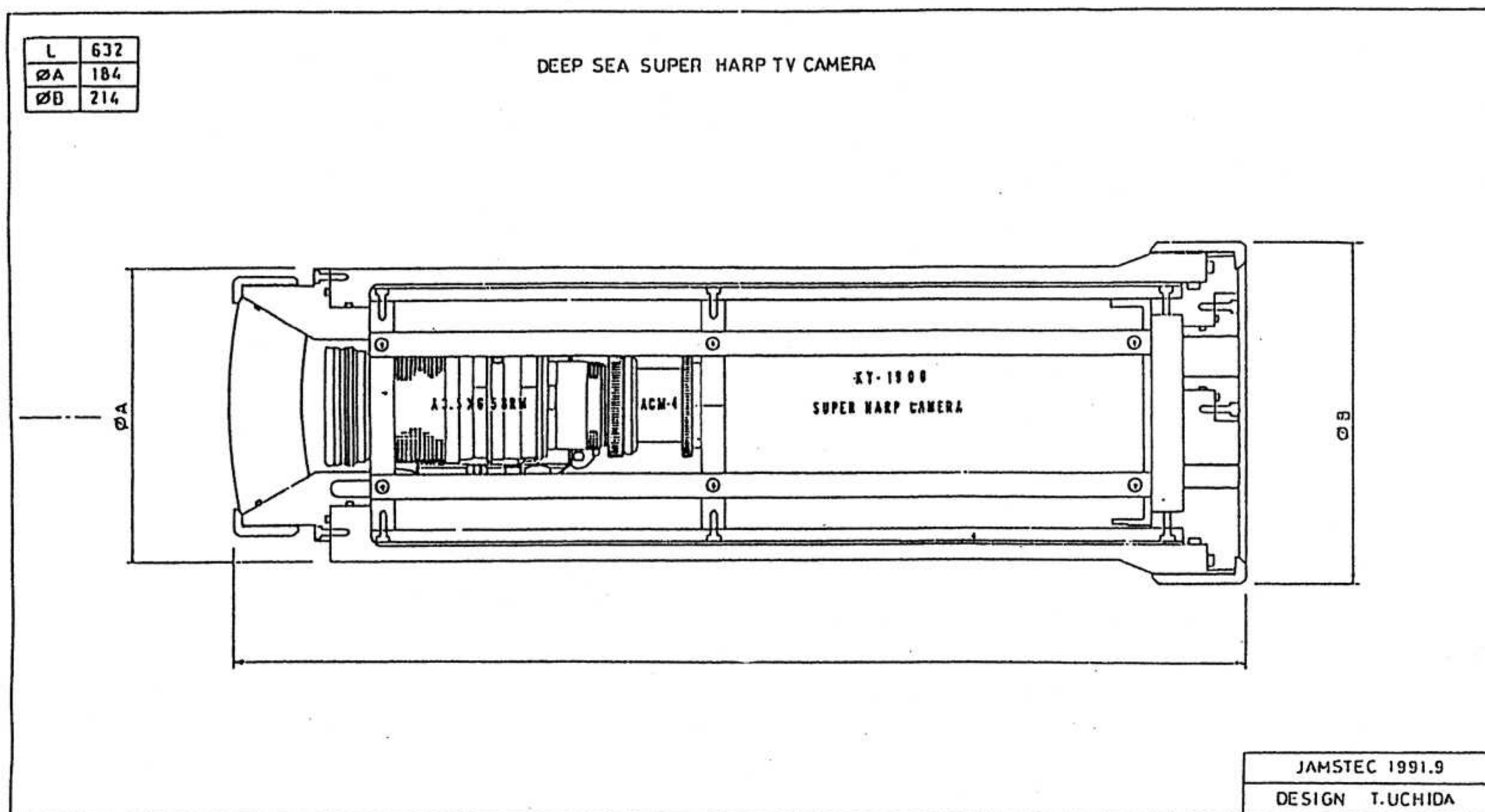


図3 超高感度・高解像度水中TVカメラ断面図

Fig. 3 Cross section of the DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA

3.5 耐水圧ハウジング

平行光学系を持つKY-1900 TVカメラを改造したSuper-HARP TVカメラの外径寸法を耐水圧ハウジングの内径寸法とし、レンズ系を含めた内機の全長と「ドルフィン-3K」に装備した時の全長の限界を考慮して、耐水圧ハウジングの設計を行った(図3)。

耐圧強度は「ドルフィン-3K」の最大潜航深度に安全率をかけて $375\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上とし、材質はA17075合金のT6処理材で、成型が完了した後、陽極酸化被膜処理を行い、さらにタフラム加工を施した。完成した超高感度・高解像度水中TVカメラ(DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA)を写真5に、またその主要性能を表1に示す。

4 実海域試験

1992年11月、ROV「ドルフィン-3K」に完成したTVカメラを装備して(写真6)、初島沖1,200mのシロウリガイ群集のある海底で実海域試験を行った。

試験は、海底に被写体として誘導ピンガーを設置して、推定で距離約6mの離れた場所から「ド

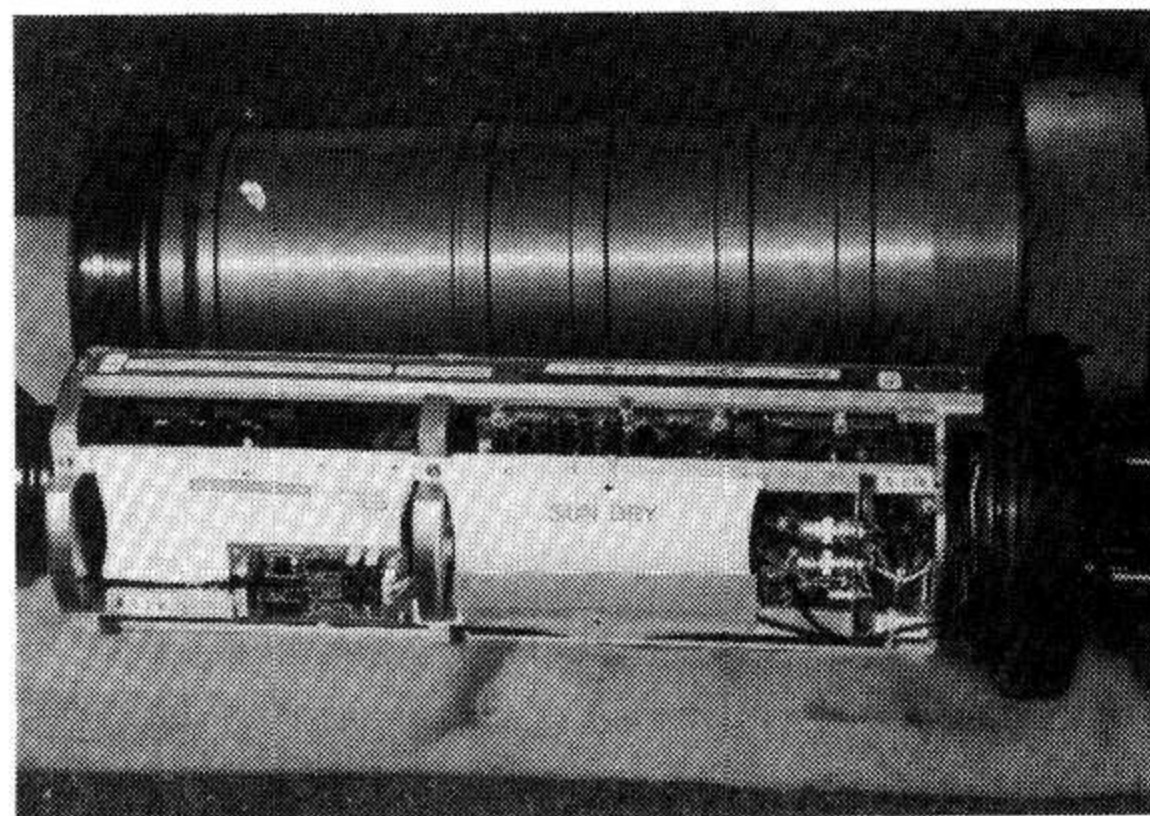


写真5 超高感度・高解像度水中TVカメラ

Photo 5 DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA

ルフィン-3K」前面に装備する4台、各500Wのハロゲンライトの点滅と、TVカメラの感度設定の変化により、撮影条件の違いによる映像の変化を確認した。同時に、照明条件を同一として「ドルフィン-3K」に同時装備する1/2インチ3板(TOSHIBA IK-T30C)水中CCDカラーTVカメラとの映像比較を実施した。撮影した映像は、画質の良さを考慮してベーターカム方式に

表1 DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA定格 (KY-1900 改造)

Table 1 Specification of DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA

最大使用深度	3300 m		
重 量	29.6Kg（空中） 9.5Kg（水中）		
寸 法	最大外径Φ214 mm 内径φ164mm 長さ632 mm		
光学系	ダイクロイックミラーによるR・G・B三色分解 平行配置光学系		
撮像方式	3管方式		
撮像管	2/3インチ, 静電収束, 電磁偏向型 Super HARP 管		
カラー方式	NTSC（IQエンコード）		
走査方式	走査線数525 本 60フィールド 2：1インターレース		
同期方式	内部同期 （内蔵 SSG） 外部同期 （CVBS・B.B）		
感 度	感度—1 2000LUX F7.2 感度—2 250LUX F7.2（+18dB相当） 感度—3 60LUX F7.2（+30dB相当）		
最低被写体照度	1 LUX（F1.7 +9dB 感度—3）		
水平解像度	600 本		
S／N	52 dB 以上		
増感回路	9 dB		
電 源	12V 1.2 A		
レ ン ズ			
最大口径比	f 1.7		
ズーム倍率	3.5		
焦点距離	空中 6.5 ～23 mm 水中 6.3 ～21.9 mm		
絞 り	オートアイリス, 1.7～16 , クローズ		
M・O・D	空中 0.3 m ・ 水中 0.54 m		
水中画角	水 平	WIDE 53°	TELE 16°
	垂 直	42°	12°

記録した。写真7は、500W 2灯点灯時の両水中TVカメラの比較映像写真である。

これを見ると、圧倒的な感度差があることを容易に判別でき、水中においてもSuper-HARP TVカメラが効果的であることを実証した。また、照明条件が良好な範囲での撮影では、感度が高い

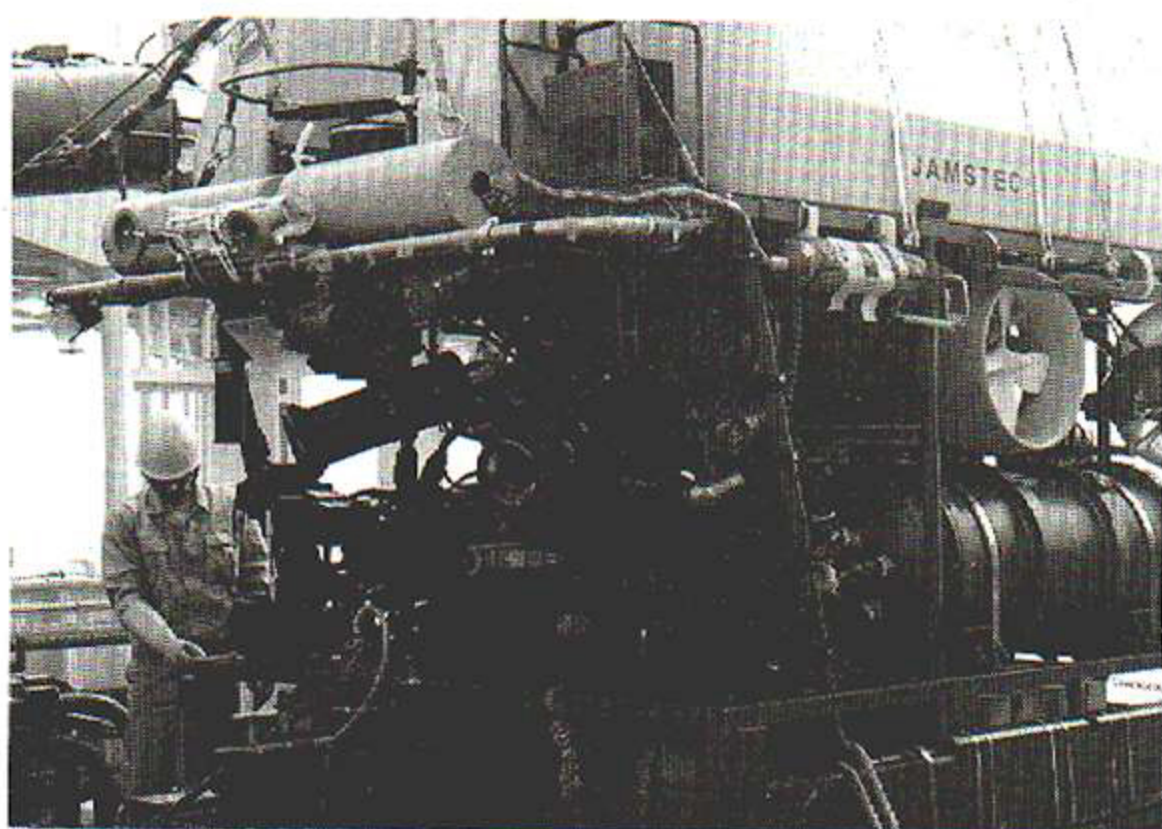


写真6 「ドルフィン-3K」に装備した超高感度・高解像度水中カラーTVカメラ

Photo 6 The DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA attached to ROV DOLPHIN-3K

分アイリスの絞り込みが可能のため、従来にない被写界深度の深い質感ある良質の映像を得た。さらに、「ドルフィン-3K」の離底時を利用して監視した結果、高度10mまでシロウリガイ群集を確認できた。この時のTVカメラのチルト角度から撮影時の斜距離は約14mとなるが、水中カラーCCDカラーTVカメラでは高度4mで視認不能になった。シロウリガイ群集は照明の反射率が高いため、通常の高底とのコントラストが強く、いちがいに視程距離差を論ずることはできない。しかし、同時装備のCCD方式TVカメラとの比較という点でいえば、明らかに3倍以上の視認可能な距離の差があると判断される。また、このカメラの映像を観察すると、感度不足による暗さよりは、水中照明と懸濁物の乱反射に起因する視程阻害の影響が大きい。なお、海中の長い距離を往復した光の特徴として、長波長成分が喪失し短波長域の光に支配されるため、画面全体がやや青っぽく写っている。このことから、照明条件や特に海域の透明度が良好ならば、さらに大きな効果が期待できるものと思われる。



写真7 超高感度・高改造度水中TVカメラとCCD TVカメラの比較映像写真

Photo 7 The CCD TV CAMERA image (left) and the DEEP SEA SUPER HARP TV CAMERA image (right)

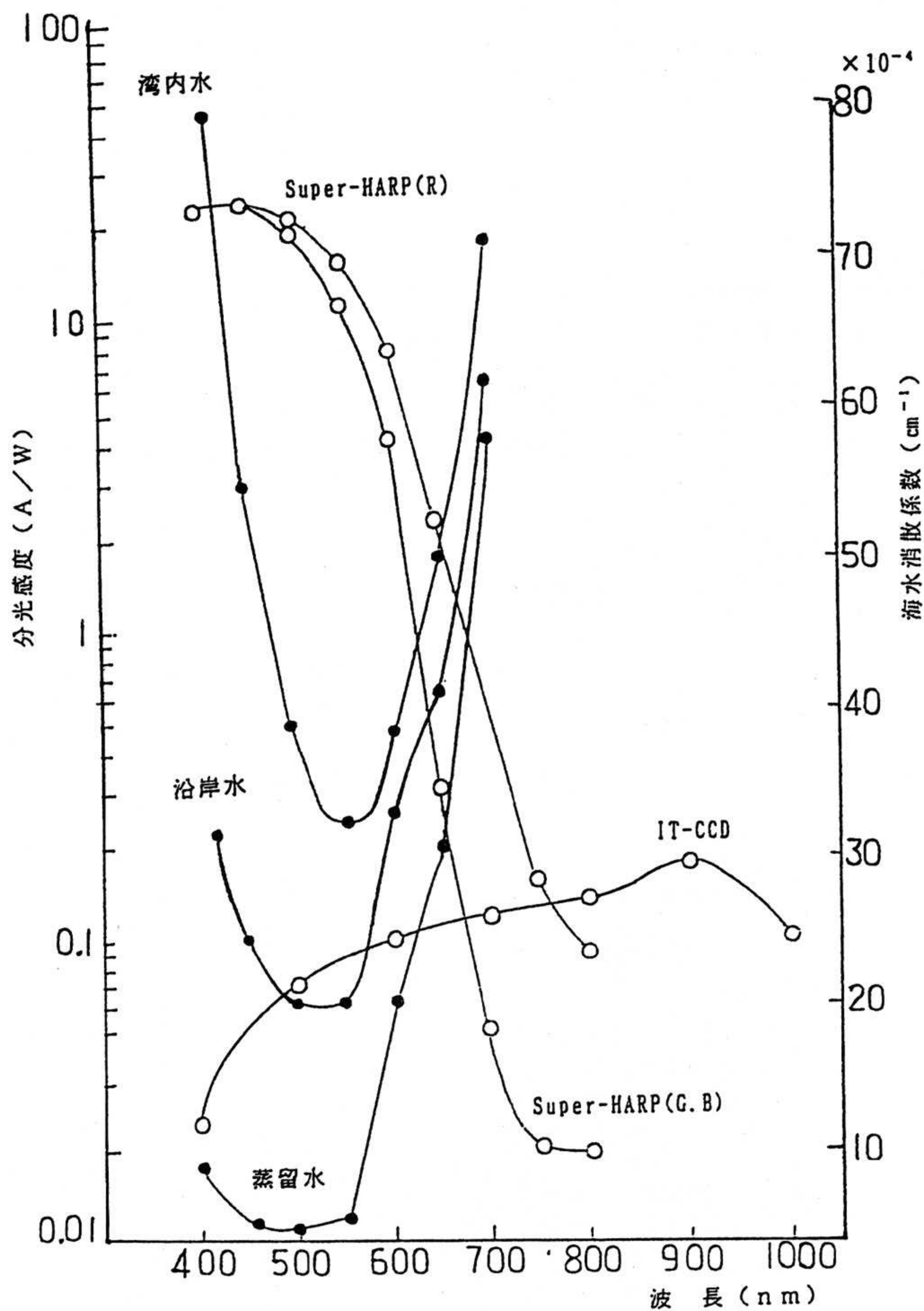


図4 撮像素子の分光感度特性と海水の消散係数の測定例

Fig. 4 Spectral respnse of photoconductor and attenuation coefficient of sea water

5 海中環境における撮像能力の検討

このような結果に基づいて、Super-HARP撮像管とCCD素子の海中環境での撮像能力を考察した。図4は横軸の光波長を同一軸として、左縦軸(対数A/W)にSuper-HARP撮像管とCCD素子の分光感度特性を、また右縦軸には海水の消散係数をとって、水質の異なる海水(湾内水、沿岸水、蒸留水)の消散係数の測定例を重ねて描いたものである。

IT-CCD (INTER-LINE CCD) 素子の感度ピークは、Photodiode (フォトダイオード) の素材である結晶Si (シリコン) の特性から、0.13A/W程度で波長900nm付近にある⁷⁾。これはほぼ赤外領域にその感度ピークを持っているということで、肉眼の視感度の380~780nmの範囲外である⁸⁾。それに比べてSuper-HARP撮像管は23A/Wもあり、そのトップピークは450nm付近にあって青色領域で非常に高い感度を誇り、人間の視感度の範囲に入っている。

このことから、両デバイス間には150倍以上の感度差があり、また感度のトップピークの領域が短波長域の視感度範囲外と長波長域の赤外領域に区別できるほか、700~800nm付近で感度が逆転するという特徴が伺える。

一方、海水中を光が透過していく場合、懸濁物質や水自身によって散乱や吸収が起こり消散していく。ただし、この場合にも波長依存性がある。下向きのカーブで重ねて描いたのは、湾内水、沿岸水、蒸留水の消散係数の測定例であるが、水質によりその傾向はかなり異なることがわかる。湾内水のそれは短波長域でも大きく、次第に減少し、530nm付近で最小となり、長波長域で再び増大する。しかし、沿岸水や蒸留水では、短波長域ではさほど小さくなく、700nm付近から増大していく。このことは、一般に、短波長域の消散係数の増大は懸濁物、とくに有機懸濁物と溶存物質による吸収に由来し、長波長域700nm付近からの係数の増大は水自身による吸収の影響が大きい⁹⁾とされている。このことから、懸濁物が少なく透明度の良い海水では短波長側の減衰は少ないが、650~700nm以上の長波長域では減衰が激しく、ほとんど光の成分としての効果を期待できないことが推察される。

しかし、Super-HARP撮像管は短波長域、言い換えれば海水の減衰特性の弱い領域に圧倒的に大きな感度ピークを有しているため、海中環境においても極めて有利な条件となり、その撮像能力はさほど損なわれないであろうことが推察される。それに比べて、IT-CCD素子の場合、この減衰の激しい領域に感度のピークがあり、海水による減衰の影響をまともに受けている。このことは、陸上では赤外域まで感度があって良好な性能を示すCCD-TVカメラでも、海中環境ではその性能を十分発揮できないことを意味している。また同時に海中環境における水中TVカメラの撮像能力は、水質的な条件や水中照明の条件により、その効果が大きく変化するであろうことを示唆している。

6 おわりに

Super-HARP TVカメラを耐水圧ハウジングに収めた超高感度・高解像度水中TVカメラは、小型の水中CCD-TVカメラが大多数を占める中で、水中環境における撮像性能に主眼をおいて開発したものである。

実海域試験の結果、その性能は、CCD-TVカメラや従来型撮像管を使用した水中TVカメラに比べて圧倒的な撮像能力の向上が認められた。しかし、次のようないくつかの問題点も明らかになった¹⁰⁾。

- ①Super-HARP Targetの主材質であるa-Saは比較的結晶化温度が低い²⁾。特に、Teを添加している赤色管のTargetは、作動時35℃保管時45℃以下に保持する必要がある。
- ②ビームが下降スラスタを使用する際など、カメラに激しい振動が伝わると映像にマイクロフォニックノイズを発生することがある。
- ③撮像管カメラのため、CCD-TVカメラに比べて寸法が大きくなる。

しかし、これら②③は、撮像管カメラであるがゆえの問題であり、①も含めて取扱い不可能というような深刻な問題とはいえない。海洋科学技術センターでは、すでにこのTVカメラをROV「ドルフィン-3K」に実装するとともに、同様な方法で製作したTVカメラを曳航体「DEEP TOW」へも装備した。現在、両システムの実海域での運

用を通じ、数多くの成果を挙げている。また、今回の成果を評価していただいた関係者の努力によって、この水中TVカメラは本格的な製品化が決定した。これにより今後、潜水調査や水中作業の分野において大きく活躍することが期待される。

7 謝 辞

今回の水中TVカメラの開発に際し、プールにおける試験及び実海域試験に協力していただいたNHK放送技術研究所、映像デバイス研究部諸氏、特に映像の記録や編集をしていただいた丸山氏、撮像管の製作に協力していただいた日立製作所、電子デバイス事業部の江幡氏、カメラの改造に尽力された(株)湘南 長井氏、実験に必要な作業の支援をしていただいた運航部「しんかい2000」、 「しんかい6500」チーム、「無人探査機操縦班」の各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内田徹夫：水中TVカメラの現状。なつしま, No. 1198, 2-3. (1992)
- 2) 山崎順一・谷岡健吉・昼間栄久・設楽圭一・平井忠明・高崎幸男：超高感度2/3インチHARP撮像管, 1989年テレビジョン学会全国大会, 17-18. (1989)
- 3) NHK K取材班：“はるかなる光を追って”, 140-154/銀河宇宙オデッセイ, 日本放送協会, 日本放送出版協会. (1990)
- 4) 内田徹夫：超高感度水中TVカメラ開発速報. JAMSTEC, 通巻13, 61-65, (1992)
- 5) 丸山裕孝・鈴木四郎・谷岡健吉・大塚 清・内田徹夫：深海探査用超高感度水中Super-HARPカラーカメラの開発, 1992テレビジョン学会年次大会22-6. (1992)
- 6) 谷岡健吉・山崎順一・鈴木四郎・昼間栄久・設楽圭一・高崎幸男・辻 和隆・平井忠明：赤色光増感型HARP撮像感, 1988テレビジョン学会技術報告, 37-42. (1988)
- 7) 原田 望：個体撮像デバイスの現状と将来, 1988年テレビジョン学会全国大会2-部門講演②, 25-28. (1988)
- 8) 中村好郎：“テレビジョンのあらまし”, 14/テレビ技術教科書〔上〕, 日本放送協会, 日本放送出版協会. (1989)
- 9) 津田良平：“海洋光学計測法”, p149-152./海洋環境光学, 杉森康宏・坂本 亘 編, 東海大学出版会. (1985)
- 10) Otsuka, K., T.Uchida and K.Tanioka : Development and Sea-Trial of Ultra-High Sensitive Underwater Color Video Camera, Intervention/ROV '92 Proceedings, 389-393. (1992)

(原稿受理：1992年10月30日)