

## Professional Report

## 超高度HARPカメラの開発とその応用

Development of Ultra High Sensitivity Camera Using HARP Image Pickup Tubes and Application Examples

吉田 哲男 Tetsuo Yoshida 浮ヶ谷 文雄 Fumio Ukigaya 谷岡 健吉 Kenkichi Tanioka

株式会社日立国際電気はNHK放送技術研究所らと共同で、HARP(High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor)と呼ばれる特殊な撮像管を用いた超高度ハイビジョンカメラを新たに開発した。

この超高度カメラは、夜間の緊急報道番組やオーロラなどを撮影するサイエンス番組などの放送での活用だけでなく、今日ではX線医療診断やバイオの研究、さらには深海探査や夜間の港湾監視など、さまざまな分野に応用が広がり、社会に貢献する先進技術として注目を集めている。

ここでは、日本発のオリジナル技術として注目されているHARP撮像管の動作原理、超高度ハイビジョンHARP撮像管カメラの開発、その応用例、最後に今後の展望について述べる。

吉田 哲男

1969年芝電気株式会社入社、  
現在、株式会社日立国際電気 研究開発本部 情報通信システム研究所 所属  
現在、主に放送用カメラ / 超高度カメラの開発に従事



浮ヶ谷 文雄

1975年日立電子株式会社入社、  
現在、株式会社日立国際電気 研究開発本部 情報通信システム研究所 所属  
主に放送用カメラの製品開発放送 / 映像事業を推進し、現在、放送 / 映像分野の新技術開発に従事  
映像情報メディア学会会員  
工学博士



谷岡 健吉

1966年NHK高知放送局入局、  
1976年NHK放送技術研究所に転じ、撮像デバイス用のアモルファスセレン系光導電膜の開発研究に従事  
現在、同研究所所長  
全国発明表彰恩賜発明賞受賞  
工学博士



## 1 はじめに

テレビカメラの性能は内蔵する撮像デバイスの特性に大きく左右される。撮像デバイスの感度が高ければ高いほど、暗い被写体でも鮮明な映像として捉えることができる。このため、デバイスの高感度化は、内外での約80年にわたる研究史をひもといてもわかるように、常に最も重要な課題として扱われてきた。

日本放送協会放送技術研究所(以下、NHK技研と言う。)でもこの課題に取り組み、1985年、光導電型撮像管ターゲットのアモルファスセレン(a-Se)光電変換膜に約 $10^8$  V/mの強い電界を印加して動作させたとき、連続して安定なアバランシェ増倍現象が生じ、画質劣化が抑制された状態で高い感度が得られることが発見された。これを基に、HARPと呼ばれる超高度撮像管がNHK技研と日立製作所との共同研究によって開発され、「ハーピコン」として実用化された<sup>1,2,3)</sup>。また、その後、今日まで、NHK技研と浜松ホトニクス株式会社との共同研究により、HARP撮像管のいっそうの高性能化が進められてきた(製品名: APイメージャ<sup>4,5)</sup>。

一方、株式会社日立国際電気(以下、当社と言う。)では、NHK技研と共同でこの撮像管を用いた超高度で高画質なHARP撮像管カメラ(以下、HARPカメラと言う。)の開発に取り組み、放送用、研究用、工業用カメラの製品化を図ってきた。特に長年のHARPカメラ開発の経験を生かして製品化した「SK-H5000」と呼ばれる超高度ハイビジョンHARPカメラは、今日、NHKの本部や大阪、名古屋などの拠点局に導入され、夜間緊急報道や種々の番組制作に活用されている。

ここでは、HARP撮像管のターゲット構造、動作原理、主要特性などを解説するとともに、これを用いて開発した超高度ハイビジョンHARPカメラの主要技術、ならびに特徴と性能について述べる。また、深海探査、医療診断やバイオなどさまざまな分野の先端研究に活用されている事例について述べる。

## 2 HARP撮像管

### 2.1 HARP撮像管のターゲット構造と動作原理

HARP撮像管ターゲットの概略構成を図1に示す。光電変換部は $\text{CeO}_2$ （酸化セリウム）薄層とa-Seを主成分とする光導電膜（以下、a-Se膜と言う。）と $\text{Sb}_2\text{S}_3$ （三硫化アンチモン）層で構成されている。このターゲットでは、透明信号電極（ITO：Indium Tin Oxide）および $\text{CeO}_2$ とa-Se膜との接合により、信号電極側から膜内への正孔の注入が阻止され、また、 $\text{Sb}_2\text{S}_3$ 層によって電子ビーム走査側からの電子の注入が阻止されている。すなわちHARP撮像管のターゲットは、電極に電圧を印加しても膜内に電荷がほとんど流れ込むことのない阻止型に属する。a-Se膜に添加されているAs（ヒ素）は、膜の結晶化を抑えて欠陥（画面キズ）の発生などを防止している。またLiF（フッ化リチウム）は、a-Se膜内の電界制御の役割を担い、a-Se膜の $\text{CeO}_2$ 層側界面付近の電界を緩和させて欠陥の発生を防いでいる。Te（テルル）は、赤チャネル用の赤色増感剤としてa-Se膜に添加される。なお、LiFやTeを添加している部分の厚さは、a-Se膜全体の厚さの数十分の一以下と非常に薄くなっている。また上述の $\text{Sb}_2\text{S}_3$ 層は多孔質膜状に形成されており、ターゲット電極に非常に高い電圧が印加された場合でも二次電子の放出が抑制され、ビーム走査が安定に行われるように工夫されている。なお、これらの成膜には基本的にサチコン<sup>1)</sup>用開発された蒸着技術が活用されている。

HARP撮像管の動作原理を図2に示す。入射光で生成された電子と正孔は、約 $10^8$  V/mの強い電界が掛けられたa-Se膜内で加速されてイオン化衝突を起こし、新たな電子と正孔対を発生させる。それらが繰り返し加速されて次々と新たな電荷を作り出す。この作用により、入射光子1個に対して増倍された多数の電子が透明信号電極から取り出される。HARP撮像管で高い感度が得られるのは、a-Se膜でこのような電荷のアバランシェ増倍が生じ、か

<sup>1)</sup> SATICON/サチコンは、日本放送協会の登録商標である。

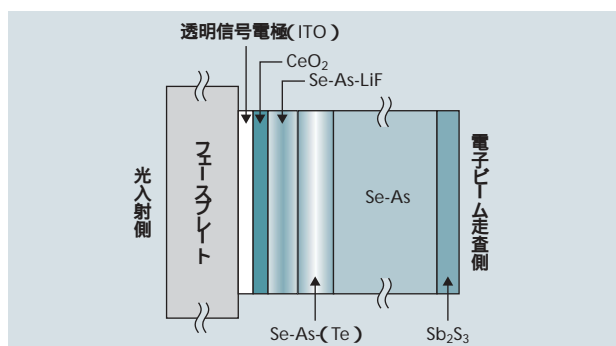


図1 ターゲットの基本構造

HARP撮像管ターゲットは酸化セリウム、アモルファスセレン、三硫化アンチモンなどの積層構造となっている。

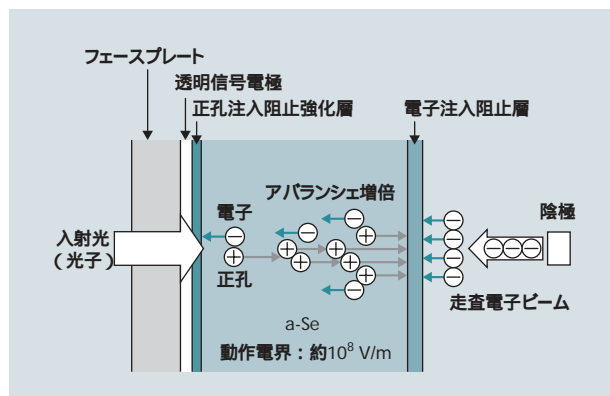


図2 HARP撮像管の動作原理

電子と正孔は強い電界で加速されて衝突を繰り返し、なだれ状に新たな電子と正孔対を発生させるアバランシェ増倍作用を示す。

つ、増倍で付加されるノイズがほとんどないことによるものである。

### 2.2 HARP撮像管の主要特性

図2の動作原理からわかるように、HARP撮像管ではa-Se膜が厚いほどアバランシェ現象の増倍率が大きくなり、高い感度が得られる。また、残像も膜厚増加に伴って低減される。これは残像特性を支配するターゲットの蓄積容量が減少することによるものである。

開発当初のHARP撮像管では、ターゲット膜厚が $2\ \mu\text{m}$ で増倍率は約10であったが、今日では、 $15\ \mu\text{m}$ で増倍率200の2/3型MM HARP撮像管が浜松ホトニクスから「APIメージャ」という名称で製品化されている。前述のNHKに納入されたハイビジョンカラーカメラ「SK-H5000」にはこの撮像管が使用されている。研究的には、これよりさらに厚い数種類のHARPターゲットも試作されており、NHK技研らと当社でそれらの試作管がカメラに実装され、撮像実験が進められてきた。以下に、膜厚 $25\ \mu\text{m}$ で印加電圧2,500 V時に増倍率約600が得られる2/3型HARP撮像管の主要特性について述べる。HARP撮像管の外観を図3に示す。



図3 2/3型HARP撮像管

HARP 撮像管は円筒形をした真空管である。光電変換部は撮像管の先端部（左側）に位置し、入ってきた光で生じた電荷をアバランシェ増倍する。

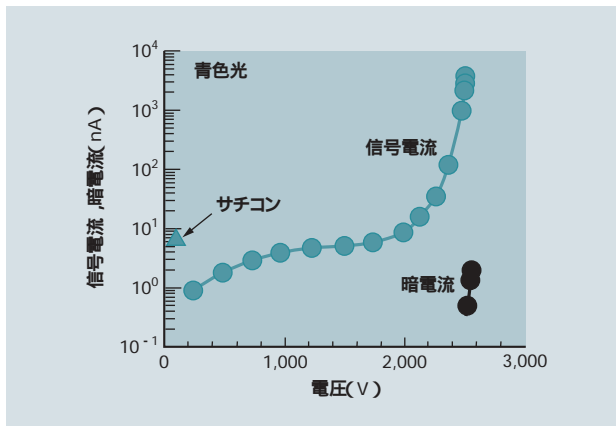


図4 電流 電圧特性  
印加電圧が2,000 Vから急激に信号電流が増える。すなわちアバランシェ増倍作用が始まり2,500 Vで最高感度となる。

### 2.3 感度特性(電流 電圧特性)

感度を表す信号電流と暗電流の印加電圧による変化を図4に示す。同図には比較のため、通常の阻止型撮像管サチコンを同じ入射光量で測定した場合に得られる信号電流も示した。HARP撮像管で約2,500 Vの電圧印加時に、サチコンの600倍を超える感度が得られることがわかる。この場合、暗電流は約2 nAであるが、カメラ実装時の撮像管の基準信号電流200 nAに比べて十分小さいことから、画質への影響は無視できる。

なお、HARP撮像管は印加電圧の制御によって感度を大幅に変えることが可能であることから、日中の屋外などの非常に明るい場所での撮影にも適用できる。

### 2.4 解像度特性

限界解像度は800 TV本以上と良好で、アバランシェ増倍動作による解像度劣化は認められない。解像度特性は撮像管の電子ビーム径に支配されることから、ビーム径のより小さな電子銃と組み合わせるとさらに高い解像度が得られる。

### 2.5 雑音

アバランシェ増倍で付加される雑音の大きさは過剰雑音係数で表される。HARP撮像管ではその値は約1であり、ほぼ無雑音の増幅が実現されていることになる。このような結果が得られるのは、a-Se膜における正孔と電子のイオン化係数比が大きいことに加え、ビーム走査側がフローティング状態になっている(電位が固定されていない)ことに起因して、雑音を抑制する一種の負帰還作用が生じるためと考えている。

### 2.6 光電変換特性 とダイナミックレンジ

光電変換特性(値)は信号電流に依存する。信号電

流が小さい領域では0.9~0.85であるが、電流が増すにつれて減少し、200~600 nA(映像信号で100~600%)の領域では0.6~0.5となる。このような値の圧縮作用は、HARP膜の信号電流 電圧特性の急峻(しゅん)な立ち上がり起因して生ずるものであるが、撮像管のダイナミックレンジを大きくする効果があることから、好ましい特性と言える。信号電荷読取りの電子ビーム電流を標準的な600 nAに設定した場合、HARP撮像管のダイナミックレンジは、従来型撮像管サチコンのそれに比べて数倍以上大きい。なお、ターゲットに蓄積される最大電荷量で決まるダイナミックレンジは、HARP撮像管ではサチコンの約10倍大きい。

以上のように、HARP撮像管は感度のみならず、高画質な映像を得るのに必要な諸特性も兼ね備えている。

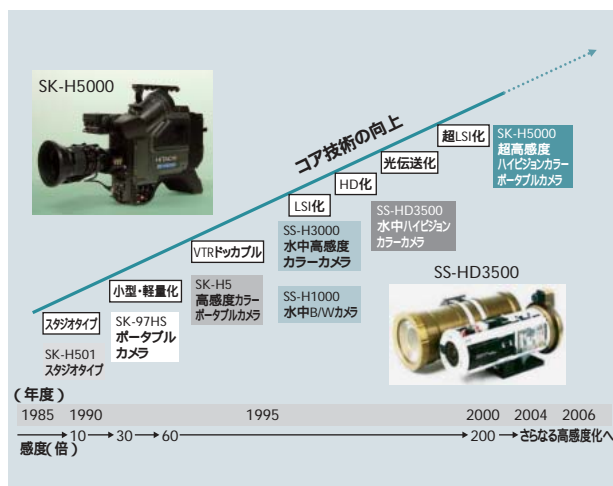
## 3 超高感度HARPカメラの開発

「もっと暗い被写体を鮮明に見たい」という要求からテレビカメラの研究開発においては、時代や分野を超え、「高感度化」、「高精細化」、「高S/N(Signal to Noise Ratio)化」が技術課題として常に取り上げられている。

HARP撮像管を用いたカメラの研究開発は、現在、当社が世界唯一であり、約20年にわたり、多種多様な用途での活用に応えた研究開発の実績を図5に示す。

超高感度HARP撮像管(増倍率200倍)を用いて、小型、軽量、低消費電力化したポータブル型の放送用超高感度ハイビジョンHARPカメラSK-H5000を開発した。その外観を図6に示す。

SK-H5000に組み入れた主要開発技術の高感度化、高画質化、撮像管の温度制御技術の3点について次に述べる。



注: 略語説明 VTR (Video Tape Recorder)  
HD (High Definition), B/W (Black and White)

図5 HARP方式カメラの開発実績

HARPカメラの開発機種を年代別に掲げ、感度向上と当時のコア技術を取り入れて製品化したカメラの歴史を示す。



図6 HARPカメラ「SK-H5000」

製品化された超高感度ハイビジョンHARPカメラは、放送分野以外にも新しい応用分野を広げている。

### 3.1 高感度(高S/N)化

HARP撮像管でアバランシェ増倍により高感度性を実現するには、ターゲット電極に数千V以上の直流電圧を供給することが必須となる。加えて増倍率がターゲット電極電圧に鋭敏に依存するため、直流電源にはきわめて高精度の安定性が要求される。また、撮像管カメラではnAオーダーの微弱な信号電流を扱うため、S/N劣化を極力少なくすることが重要となる。SK-H5000ではこれらの要請に応えるべく、新たに、低雑音FET (Field Effect Transistor) を採用した前置増幅器ときわめて安定な高電圧回路の開発を行った。

前置増幅器の模式図を図7に示す。撮像管出力から前置増幅器回路までのパターンには浮遊容量が発生する。

この浮遊容量がS/N比に大きく影響を及ぼす。前置増

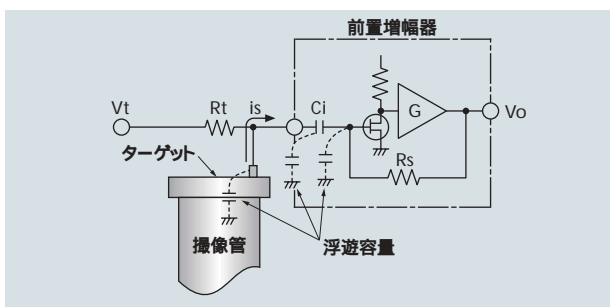


図7 前置増幅器の模式図

撮像管カメラにおける前置増幅器に使用する部品他擬似的な浮遊容量も加えS/N (Signal to Noise Ratio) 検討用の模式図を示す。

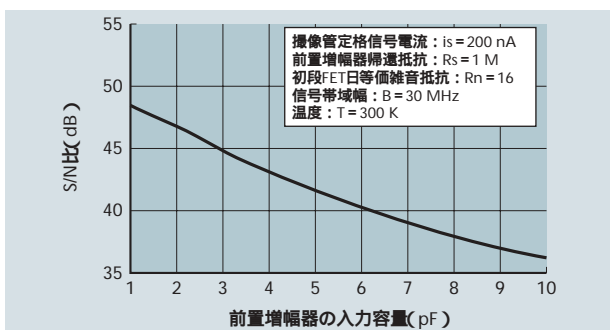


図8 入力容量とSN比の関係

ハイビジョン撮像管カメラにおけるS/Nは入力容量に反比例する。入力容量の増加に伴いS/Nの劣化を招く。

幅器の入力容量とS/Nの関係を図8に示す。浮遊容量の増加に伴い、S/Nが劣化することがわかる。したがって、高いS/Nのカメラを実現するためには、回路設計だけでなく、部品選定、部品実装に十分気を配り、浮遊容量の増加を防ぐ必要がある。

この開発では、HARP方式撮像管の高感度化に伴い、数千ボルトの直流電圧が必要となるため、高圧リーク、放電が発生し、初段アンプの破壊やノイズ混入の原因となった。また結合コンデンサの耐圧、形状の大型化に伴い浮遊容量が1.4 pFから3.1 pFに増加し、S/Nの低下を招いた。これらを解決するために、結合コンデンサとコイルアセンブリの距離を取り、基板上にスリットを設け、結合コンデンサを基板上で三次元的な中空実装することによって高圧リーク、放電対策を行った。また、結合コンデンサを2個直列接続し、中空実装することにより、高耐圧化の実現と同時に部品の小型化、実装面積(表面積、接触面積)の削減ができ、浮遊容量を1.6 pFまで低減できた。その比較を表1に示す。

この結果、放電による機器の破損を防ぐとともに入力容量の増加を抑えることができ、S/Nがほぼ不変となることを確認し、高感度、高S/N化が実現できた。

これらの問題を解決し、製品化するために度重なる回路、実装設計の変更を余儀なくされ、地道で根気のいる開発となった。

試作した前置増幅器の概略を図9に示す。

表1 浮遊容量の変化

使用する部品の表面積、周辺までの距離、実装方法の違いによる浮遊容量の違いを示す。

結合コンデンサ	浮遊容量の実測値(pF)	表面積(mm <sup>2</sup> )	設置面積(mm <sup>2</sup> )	コイル間距離(mm)
従来: 2 kV	1.4	220	90	2
4 kV用基板搭載	3.1	1,540	500	1
• 今回の方式 2 kVを2個 三次元空中実装	1.6	440	80	5

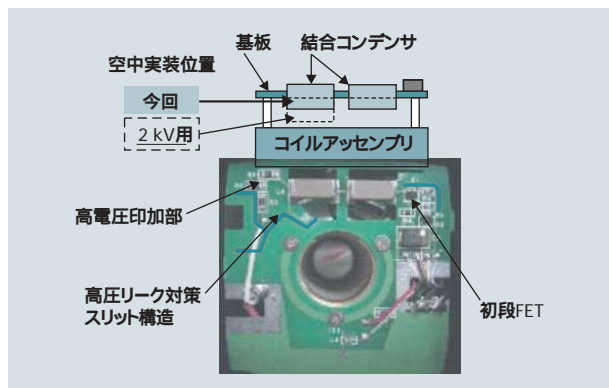


図9 前置増幅器

カメラの心臓部であり高感度化、高S/N化、またアバランシェ増倍の安定化などが考慮されている。

### 3.2 高画質化

カラーカメラにおけるレジストレーション(R/G/Bチャネルの重ね合わせ)の良し悪しは画質を大きく左右する。高精細画像を実現する手段として、ラスタ面全域にわたる走査電子ビームの形状均一化(4コーナー独立レジストレーション補正)、偏向の直線性改善、水平偏向回路の広帯域化などに取り組み、カラーカメラでの各チャネルを高精度に重ね合わせる技術を開発した。これらにより、各チャネルのレジストレーションの精度が向上し、特に画面4コーナーの高精度化が可能になった。

### 3.3 撮像管の温度制御機能

HARP撮像管の安定性、信頼性向上を図るために、ペルチェ素子を用いた電子恒温化構造により撮像管ターゲット(光電変換膜)の温度コントロールを行っている。これにより、周囲の温度環境にかかわらず、電源投入後、撮像管の光電変換膜を30秒以内に32℃に設定でき、HARP撮像管を安定動作させるとともに、被写体に高輝度のスポット光が入射しても安定に動作する超高感度カメラを実現している。

HARP撮像管は直径18mm、長さ105mmの円筒形をした真空管である。光電変換膜は撮像管の先端部に位置し、この膜を32℃に保つ必要がある。

ペルチェ素子を用いた電子恒温化構造を図10に示す。円筒形の周りに120度間隔に3個のペルチェ素子を配置

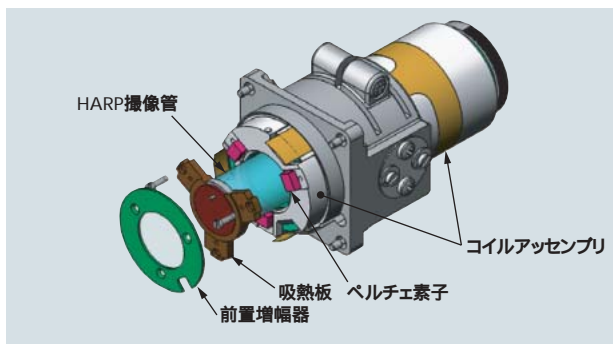


図10 電子恒温化構造  
HARP撮像管を中心に、ペルチェ素子、吸熱、放熱構造を示す。

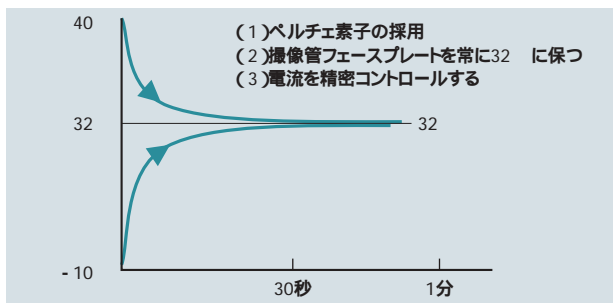


図11 温度制御コントロール

電源を入れると同時に外温が高いときは冷却して温度を下げ、低いときは暖めて温度を上げ、光電変換膜を常に32℃に保つ。

し、素子の放熱側は体積の大きいコイルアセンブリ、プリズム筐(きょう)体、カメラ筐体の順に放熱される。

一方、撮像管側は特殊形状をした吸熱板を介し、インジウムリングと呼ばれる円筒形の先端部に高精度に接触させるとともに撮像管前面からも冷却、加熱させる二重構造とし、その効率を高めている。

この結果、外気温度40℃から-10℃の間光電変換膜を32℃に保っている(図11参照)。

また、光電変換部は信号取り出し口であるとともに高感度(高S/N)化の最重要個所でもあり、実装方法、制御電流雑音、温度コントロール方法を含めた多くのノウハウの蓄積が重要であった。

### 3.4 開発したHARPカメラ「SK-H5000」の主な仕様

SK-H5000の主な仕様は以下のとおりである。

- (1) 撮像方式：R, G, B3管方式
- (2) 撮像管 (APイメージャ)：増倍率200 (2/3型MM HARP撮像管)
- (3) 感度：20 Lux, F 5.6
- (4) 最低被写体照度：0.08 Lux
- (5) S/N：40 dB, Ych30 MHz
- (6) 増倍率：2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 200切換
- (7) 蓄積時間：OFF, 1/30, 1/15, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4秒切換
- (8) 解像度：水平限界解像度 = 800 TV本
- (9) 出力信号：1,080 i, フィールド周波数59.94 Hz

### 3.5 撮像比較実験

SK-H5000カメラに膜厚15μmのHARP撮像管を実装したときの暗所における撮像比較実験の結果を図12(a)(b)に示す。これらの実験では、比較用としてハイビジョン用CCD(Charge Coupled Device)カメラを用いた。

被写体照度0.8 Lux、レンズ絞りF2で撮影した結果である。CCDカメラでは撮影困難な暗い被写体を、HARPカメラは鮮明な映像として捉えていることがわかる。



注：略語説明 (Charge Coupled Device)

図12 比較撮像例(0.8 Lux F2)

HARPカメラSK-H5000とCCDカメラの比較撮像例を示す。HARPカメラは鮮明な映像を捉え、その違いがよくわかる。



図13 SK-H5000の放送での活用例

夜間緊急報道での自動車運搬船の火災事故やスペシャル番組でのオーロラを示す。

## 4 超高感度カメラの応用

### 4.1 放送での活用

HARP撮像管を実装した高感度ハイビジョンカラーカメラSK-H5000は、超高感度でありながら通常のカメラと同じ感覚で安心して使用できるという大きな特徴がある。そのためこのカメラは、夜間緊急報道や自然科学番組など種々の番組制作に活用されている。

放送で使用された例を図13(a)(b)に示す。同図(a)は、自動車運搬船の火災発生事故の夜間緊急報道、(b)はNHKスペシャル番組でのオーロラの撮影である。これらの撮影例からもHARPカメラの高感度、高ダイナミックレンジである特徴がよく生かされていることがわかる。

### 4.2 先端研究への応用

HARP撮像管が青色光に高い光電変換効率を持つことから、これを水中用カメラに適用した場合、特に優れた撮像能力(超高感度・高画質)を発揮すると考え、長年、独立行政法人海洋研究開発機構(旧海洋科学技術センター)と共同で水中撮影の基礎実験を行ってきた。その結果実現したのが、世界初の深海探査用超高感度ハイビジョンHARPカメラ「SS-HD3500」である。同研究機構と共同開発したこのカメラは、深海生物や海底の様子をこれまでにない鮮明な映像として捉えることに成功している(図14参照)。

このカメラの開発などが基となり、2002年11月には、

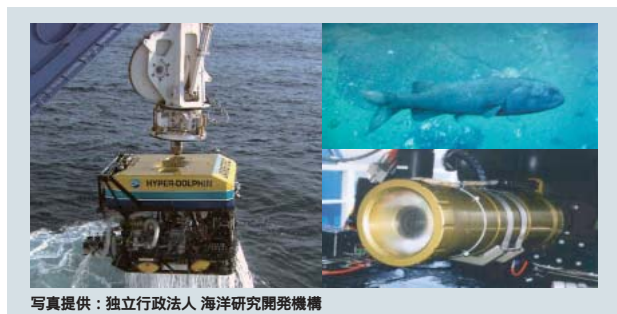


図14 水中カメラに応用

海洋研究開発機構との共同実験で深海無人探査機ハイバードルフィンに搭載したハイビジョンHARPカメラと撮影された深海魚を示す。

相模湾初島沖、水深1,200 mの海底からの初めてのハイビジョン生中継が行われ、「深海の神秘の世界」が茶の間にクリアな映像で紹介された。また、スマトラ沖大地震直後の震源域の調査においては、地震によってできた海底の大きな亀裂や崩落を確認し、地震発生のメカニズムの分析に貢献した。

### 4.3 医療、バイオ

HARP撮像管カメラは、がんの早期発見や心筋梗塞(こうそく)の高度診断を目的とした微小血管X線診断の研究<sup>7)</sup>、白内障手術、網膜診断などの眼科医療研究に活用されている(図15参照)。

さらに最近、予防医療の実現や画期的な新薬の開発などをめざした国のバイオプロジェクトの研究にもHARP撮像管とそのカメラがかかわっている。「細胞内ネットワークのダイナミズム解析技術開発」と名付けられたこのプロジェクトの研究では、生きた細胞の中のタンパク質分子の動きを観察し、その挙動を明らかにすることが重要である。観察はテレビカメラを特殊な顕微鏡に装着して行われるが、強い光を当てると細胞が損傷を受けるため、カメラには高い感度が求められる。また詳細な観察を可能とするためには高い解像度やノイズが少ないことも必要とされる。そのために、増倍率1,000のHARP撮像管<sup>8)</sup>とそれをういた極超高感度カメラの開発が進められた。これをういた研究成果の一つとして、独立行政法人理化学研究所の時田公美基礎科学特別研究員、中野明彦主任研究員らは、生きた細胞内の「ゴルジ体」と呼ばれる小器官が時間とともに変化していく様子をカラーの立体画像(3D)で50 nmの解像度で捉え、細胞内でできたタンパク質を運ぶ新しいメカニズムを世界で初めて解明して、英国科学誌「ネイチャー」(電子版2006年5月14日付)に発表した(図16参照)。

以上のほか、HARPカメラの新しい応用として、夜間

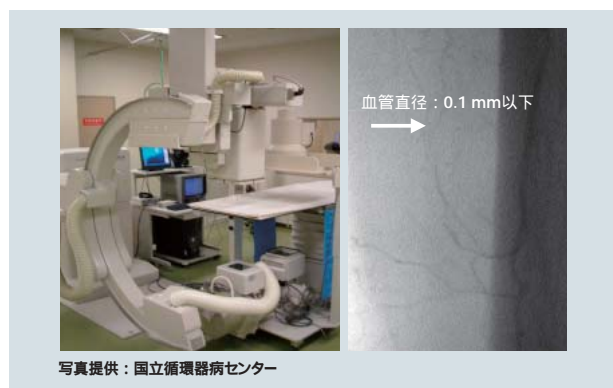


図15 HARP撮像管カメラの医療での活用例

細い血管が可視化できるX線HARPカメラが実装された微小血管X線撮影装置と微小血管画像を示す。

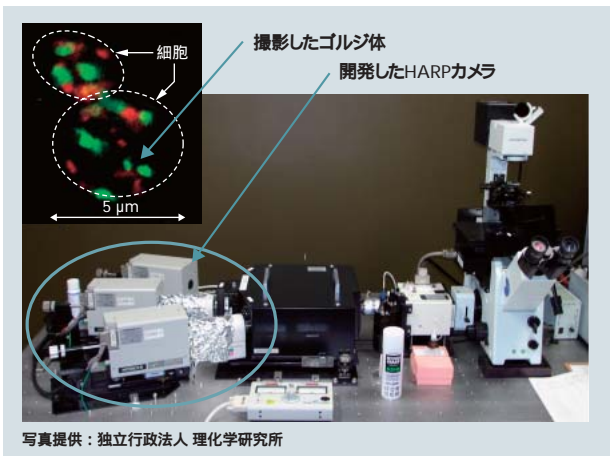


図16 超高感度可視化システムと顕微鏡で撮影したゴルジ体の様子  
超高感度HARPカメラ、分光光学系、共焦点顕微鏡、多波長レーザなどを組み  
合わせ、生きた細胞の中のタンパク質分子の動きを観察したシステムを示す。

の海や火山の監視，テレビドラマや映画の夜間撮影などへの適用が話題となっており，それぞれ精力的に実験が進められている。

## 5 今後の展望

ここでは，HARP撮像管の動作原理，主要特性などとともに，これを用いて開発された超高感度ハイビジョンHARPカメラの特性とその応用について述べた。

超高感度撮像デバイスは，これまで特殊デバイスとして扱われ，CCDなどの高画質撮像デバイスとは別物と考えられてきた。しかし，究極の超高感度撮像デバイスとは何かを考えると，それは付加雑音なしにきわめて大きな利得が得られる内部増幅機能を有し，また，開口率と光電変換効率の双方が100%のデバイスということになる。これは，取りも直さず超高画質（理論限界の高S/N）撮像デバイスそのものである。このような撮像デバイスとその特徴を100%引き出すカメラが実現すれば，暗闇から明るいところまで，既存のどのようなデバイスを用いたカメラよりもノイズの少ない鮮明な映像が得られることになる。

CCDカメラが主流の今日，SK-H5000ハイビジョンHARPカメラがテレビドラマや映画制作の夜間撮影用として急速に関心を集めるようになったのは，HARP撮像管が前述の超高画質を実現しうる撮像デバイスの状態にかなり近づいているためである。今後，HARPターゲットの光電変換効率がさらに向上し，薄板形状の冷陰極HARP撮像板<sup>9)</sup>が究極の超高感度撮像デバイスとして実用化されると，HARPカメラの応用は一段と大きく広がると考えられる。

最後に，SK-H5000カメラの実用化開発に際してご指導

いただいた日本放送協会技術局の関係各位に深謝する次第です。

### 参考文献

- 1) K. Tanioka, et al.: An Avalanche-Mode Amorphous Selenium Photoconductive Layer for Use as a Camera Tube Target, IEEE Electron Device Letters, EDL-8, 9, pp.392-394 (1987)
- 2) 谷岡, 外: アバランシェ増倍a-Se光導電膜を用いた高感度HARP撮像管, テレビ誌, 44, 8, pp.1074~1083 (1990)
- 3) 久保田: 超高感度新Super-HARPカメラの開発, NHK技研R&D, Vol.41, 8, p. 45 (1996.8)
- 4) 大川, 外: 実用型新Super-HARP膜, 映像情報メディア学会年次大会, 23-7, pp. 345~346 (2001)
- 5) 宮川, 外: 超高感度ハイビジョンハンディカメラ, 映像情報メディア学会年次大会, 23-9, p. 348 (2001)
- 6) Robert G. Neuhauser: Photoconductors Utilized in TV Camera Tubes, SMPTE J., 96, 5, pp.473-484 (1987.5)
- 7) 久保田, 外: ハイビジョン新Super-HARP撮像管とその放射線医療診断への応用, テレビ学技報, Vol.20, 71, p.13 (1996)
- 8) 松原, 外: 極超高感度新Super-HARP膜の試作, 映像情報メディア学会年次大会, 12-3 (2003)
- 9) N. Egami, et al.: FEA Image Sensor with Electron-beam Focusing System, IVNC 04, 4.1, pp. 228-229 (2004)