

JIER-049

# 赤外線センシング技術研究調査委員会

## 報告書

平成 9 年 3 月

社団法人 照明学会

## 目 次

	ページ
1. まえがき	1-1
1. 1 委員会構成	1-1
1. 2 委員会開催経過	1-3
2. アクティブセンシング技術	2-1
2. 1 レーザ測距の現状と応用	2-1
2. 2 レーザレーダ（気象用）	2-2
2. 3 赤外線レーザを用いた地球大気環境の計測	2-4
2. 4 レーザ励起蛍光による植物プランクトン観測	2-6
2. 5 近赤外線による生体計測	2-10
2. 6 レーザドップラ効果の振動計測への応用	2-12
参考文献	2-15
図・表	2-17
3. パッシブセンシング技術	3-1
3. 1 暗視技術	3-1
3. 2 赤外線技術の都市・建築環境への応用	3-4
3. 3 ビル壁の非破壊検査	3-7
3. 4 レーザ光検知	3-10
3. 5 赤外線の資源探査への応用	3-16
参考文献	3-20
図・表	3-21
4. 構成要素技術 —光源および光学系—	4-1
4. 1 赤外線放射光源およびその応用	4-1
4. 2 最近のガスレーザと短波長化	4-4
4. 3 LD励起固体レーザ	4-6
4. 4 波長変換技術を用いた赤外レーザ光の発生	4-9
4. 5 回折光学素子の光学系への応用	4-12
4. 6 補償光学系の原理とその応用	4-14
参考文献	4-17
図・表	4-20

5. 構成要素技術 ー検知器ー	5-1
5. 1 赤外線暗視技術及びその周辺技術	5-1
5. 2 赤外線検知器 (MCT)	5-4
5. 3 赤外線検知器 (PtSi)	5-7
5. 4 赤外線検知器 (非冷却)	5-9
5. 5 室温動作超高速赤外線検出素子	5-11
5. 6 自己積分型赤外線検出素子	5-14
5. 7 InSb赤外検知器	5-16
参考文献	5-19
図・表	5-23
6. その他の周辺技術	6-1
6. 1 赤外線動画発生技術の動向	6-1
6. 2 赤外線撮像技術	6-3
6. 3 赤外線大気伝播特性について	6-6
6. 4 まとめ	6-9
参考文献	6-9
図・表	6-12
7. あとがき	7-1

## 1. まえがき

照明と放射は光源及び材料の開発、光計測・制御の分野において不可欠である。そこで、過去3年間に亘り、照明学会において「光センサ研究調査委員会」を設立し、光センサ全般について研究調査が行われた。光センサの進展は日進月歩であり、あらゆる分野に及んでいる。そこで、今回は調査対象を赤外線放射を利用したセンシング技術に絞り、研究調査を行うこととした。本委員会は、赤外線センシングについて、照明分野で要望される機能及び応用技術の現状と今後の動向を把握するとともに、併せて、各種応用分野での利用形態を含めた調査を進める主旨で設置された。

赤外線センシング技術研究調査委員会は、最近約5年間における内外の赤外線センシングの進展状況を中心として、その技術動向を調査してまとめた。調査は、アクティブセンシング技術、パッシブセンシング技術、構成要素技術（光源及び光学系）、構成要素技術（検知器）、その他の周辺技術の5分野に分類し、各分類毎にテーマを設けて研究会を実施した。この間、照明学会光関連材料・デバイス専門部会、赤外線センシング技術研究調査委員会、電気化学協会導電性セラミック研究会、次世代センサ協議会、日本赤外線学会の共催の下、公開シンポジウムを早稲田大学材料研究所にて開催した。

この報告書は、赤外線センシング技術研究調査委員会が平成6年7月～平成9年3月まで約3年間研究調査した内容をまとめたものである。なお、報告書の作成に当たっては、調査の分類項目を各章として構成し、各章はそれぞれの専門分野単独で研究開発状況が把握できるよう配慮した。

(増谷光正)

### 1. 1 委員会構成

委員長 増谷 光正 防衛庁技術研究本部 (第2研究所・所長)

幹 事 増田 千尋 芝浦工業大学 (システム工学部電子情報システム学科・教授)

幹 事 菅野 俊雄 防衛庁技術研究本部 (第2研究所3部光波システム研究室・室長)

幹事補佐 和田 英男 防衛庁技術研究本部 (第2研究所3部光波第4研究室・室長)

幹事補佐 長嶋 満宏 防衛庁技術研究本部 (第2研究所3部光波第4研究室)

- 委員 磯貝 浩一 (財)資源・環境観測解析センター (調査研究部・研究員)  
(平成7年4月～)
- 委員 江田 英雄 (株)島津製作所 (中央研究所)
- 委員 小原 實 慶応大学(理工学部電気工学科・教授)
- 委員 木股 雅章 三菱電機(株)(先端技術総合研究所 薄膜応用技術部・次長)
- 委員 河野 愛 (財)原子力環境整備センター (三井金属(株)から出向)  
(平成6年7月～7年3月)
- 委員 佐藤 俊雄 (株)東芝 (生産技術研究所 レーザ研究部・部長)
- 委員 鈴木 等 (株)トプコン (光学技術部)
- 委員 中辻 俊一 (株)富士通システム統合研究所 (主席部長)
- 委員 二橋 得明 浜松ホトニクス(株)電子管事業本部 (技術部・応用基礎グループ長)
- 委員 初田洋司雄 日本電気(株)無線事業本部 (誘導光電事業部・主席技師長)
- 委員 梅千野 晃 東京工業大学 (総合理工学研究科 環境物理工学専攻・教授)
- 委員 松田 光 三菱電機(株) (鎌倉製作所 E O事業開発センター・主管技師長)
- 委員 黒川 賢 日本電気三栄(株) (技術本部・統括部長)
- 委員 妹尾 誠 (株)日立製作所 (エネルギー研究所第2部 計測システム研究グループ・グループリーダー)
- 委員 宮本 義博 (株)富士通研究所 (赤外デバイス研究部長)
- 委員 安田 升 日本電気(株)無線事業本部(誘導光電事業部・主管技師長)
- 委員 安岡 義純 防衛大学校 (電子工学科・教授)
- 委員 山中 正宣 大阪大学 (レーザー核融合研究センター・助教授)

(50音順・敬称略)

## 1. 2 委員会開催経過

### 第1回委員会(H.6.10.12)

設置趣意書を基に委員構成、活動方針、スケジュールを決定

調査対象範囲、分類方法、研究会講演項目及び講演者、報告書内容等の検討

講演者(敬称略)

### 第2回委員会(H.6.11.28)

(1) レーザ測距の現状と応用

細川 哲夫(日本電気)

(2) 赤外線のアストロノミへの応用

奥田 治之(宇宙科学研究所)

(3) 赤外線検知器1(MCT)

宮本 義博(富士通研究所)

### 第3回委員会(H.7.1.24)

(1) LD励起固体レーザー

山中 正宣(大阪大学)

(2) 暗視技術

村松 俊夫(日本電気)

(3) アイセーフレーザー

斉藤 英明(防衛庁)

### 第4回委員会(H.7.3.14)

(1) 赤外線の資源探査への応用

河野 愛(資源・環境観測センター)

(2) 赤外線検知器2(PtSi)

木股 雅章(三菱電機)

(3) 回折を利用した光学系

鈴木 等(トプコン)

会期延長についての討議および承認

### 第5回委員会(H.7.5.23)

(1) レーザレーダ(気象用)

内野 修(気象庁観測部オゾン層情報センター)

(2) 補償光学系の開発

一ノ瀬 祐治(日立製作所)

公開シンポジウムの開催内容および発表項目、予稿集についての検討

### 公開シンポジウム(H.7.9.19)

(於: 早稲田大学材料研究所)

(1) 最近のガスレーザーと短波長化

住吉 哲実・小原 実(慶応義塾大学)

(2) 波長変換技術を用いた赤外レーザー光の発生

秋山 靖裕・佐藤 俊雄(東芝)

(3) 赤外放射光源およびその応用

吉川 和彦・木原 邦彦(東芝ライテック)

(4) 赤外動画像の発生技術

松田 光(三菱電機)

(5) 赤外線撮像技術

中里 英明・中辻 俊一(富士通システム統合研究所)

(6) 室温動作超高速赤外線検出素子 安岡 義純 (防衛大学校)

(7) 赤外線レーザーを用いた地球大気環境の計測

杉本 伸夫 (国立環境研究所)

(8) 近赤外光による生体計測

江田 英雄・田村 知己・常石 召一

岩本 慎一・小田 一郎・綱澤 義夫

高田 通之助 (島津製作所)

#### 第6回委員会(H.7.11.27)

(1) 赤外線検知器3 (非冷却)

小田 直樹 (日本電気)

(2) ビル壁の非破壊検査

黒川 賢 (日本電気三栄)

#### 第7回委員会(H.8.2.7)

(1) 赤外域暗視管及びその周辺技術の動向

二橋 得明 (浜松ホトニクス)

(2) 赤外線技術の都市・建築環境への応

梅干野 晃 (東京工業大学)

平成6～7年度活動報告および平成8年度活動予定についての検討

報告書作成のためのスケジュールおよび各分野毎の目次についての討議

執筆要綱および講演者への執筆依頼要領についての説明

#### 第8回委員会(H.8.4.16)

(1) レーザ励起蛍光による植物プランクトン観測

浅沼 市夫 (海洋科学技術センター)

(2) レーザドップラ効果の振動計測への応用

小林 卓之 (グラフテック)

報告書編集のためのグループ構成についての検討

最終目次案と執筆担当者の決定

#### 第9回委員会(H.8.6.19)

(1) 赤外線大気伝播特性について

松浦 義雄 (富士通システム統合研究所)

(2) 自己積分型赤外線検出素子

宮本 恵司 (日本電気)

#### 第10回委員会(H.8.8.22)

(1) InSb赤外線検知器の現状と将来動向

黒田 正廣 (東芝)

(2) レーザ光検知

平塚 隆仁 (日本電気)

#### 第11回委員会(H.9.1.30)

成果報告書の初版についての検討並びに変更箇所の確認

#### 第12回委員会(H.9.3.13)

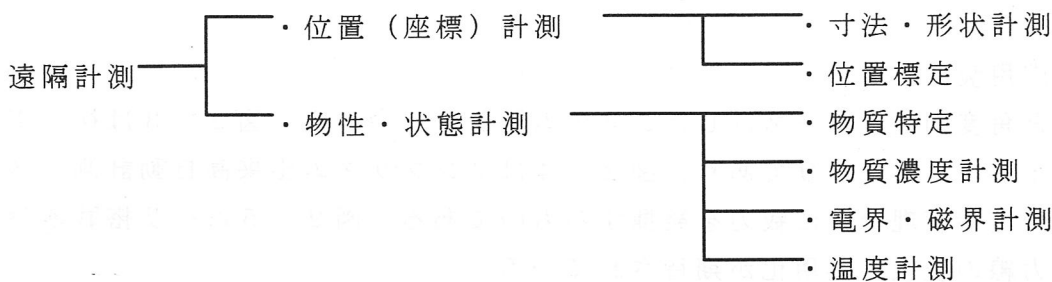
成果報告書の最終確認と配布先の検討

## 2. アクティブセンシング技術

### 2. 1 レーザ測距の現状と応用

#### 2. 1. 1 レーザ測距技術の位置付け

レーザ測距技術は、以下の遠隔計測における位置（座標）計測の技術として応用される。



#### 2. 1. 2 遠隔計測手段の比較

遠隔計測の手段としては、光波、電波、音波等が主なものでその比較を表 2-1 にしめす。

#### 2. 1. 3 レーザ測距におけるアイセーフレーザ技術

一般にレーザ光線は目に対して極めて危険と言われている。誤って強いレーザ光を目に入れると、極端な場合は網膜を損傷し、失明してしまう。したがって、レーザ光を用いた遠隔計測においては、一般に、厳格な安全管理が必要である。この問題に対処するため、国内外において目に安全なレーザ、すなわちアイセーフレーザの開発が活発に推進されている。

アイセーフレーザとは、レーザエネルギー密度が、JISあるいは米国のANSI基準等による目に対する最大許容露光量：MPE (Maximum Permissible Exposure) 以下のレーザを指す。一般には、波長  $1.4 \mu\text{m}$  以上のレーザを指し、目の水晶体での吸収が大きく、網膜までレーザ光が達しないという特長がある。とりわけ、波長  $1.5 \mu\text{m}$  のレーザ光は、よく使われるYAGレーザ光に対して、目に対する安全性が20万倍と高く、遠隔計測における重要なレーザ光である。レーザ安全基準の一例として、代表的なレーザとその最大許容露光量：MPE、及び目の網膜までの透過率の波長依存性を、表 2-2 および、図 2-1 に示す。

国内外で開発しているアイセーフレーザの種類と応用とを表 2-3 に示す。

#### 2. 1. 4 レーザ測距応用製品の紹介

##### (1) アイセーフレーザ距離計

現在、商品化されているアイセーフレーザ距離計の例としては、

① EYESAFE SUPER : LX3200

(5000mまでの遠距離測距用)

## ② EYESAFE KID : LX1000

(200mまでの近距離、高精度、高繰り返し測距用)

の2種類がある。特徴としては、目に優しいアイセーフレーザの採用、反射板(プリズム)なしでの距離測定が可能等である。これら装置の性能を表2-4に示す。

測距距離は、気象条件、測定対象物等の条件により異なる。これら装置の応用例を図2-2に示す。

### (2) 距離測定応用装置

以下に、距離と角度測定をベースにしたシステム製品を紹介する。図2-3は梯子車誘導支援システム：LGS8450であり、図2-4はノンプリズム出来高自動計測システムで、土木工事の進捗管理などに威力を発揮するものである。図2-5はヘリ搭載離隔測定システムで電力線の監視に実用化が期待されている。

#### 2.1.5 レーザ測距技術の動向

レーザ測距技術の方向としては、より遠く、より正確に、より早く、より手軽にを目標として開発が進展していくと考えられる。この為の重点開発事項としては、以下の技術がある。

- ・ 小型、短パルス、高繰り返し発振レーザ技術
- ・ 高速、高感度、低雑音光検出器技術
- ・ 高精度時間計測技術、および高速デジタル信号処理技術
- ・ 小型、軽量、低価格化技術

これら、技術の発展にともない、3次元計測応用分野がますます拡大することを期待している。

(細川 哲夫)

#### 2.2 レーザレーダ(気象用)

##### 2.2.1 レーザレーダの原理

レーザレーダ(ライダ)は、レーザ光の短いパルスを、大気中に発射し、大気中の分子、原子、エアロゾル、雲、地表面等からの散乱光を望遠鏡を用いて受信することにより、遠方にある物質の濃度、組成、速度、気温などの情報を高い距離(空間)分解能で遠隔的に測定する装置である<sup>1)</sup>。連続観測が可能なることから、地球物理学、気象学、環境研究などの計測手段として、広く用いられている。

多くは地上設置のレーザレーダであるが、航空機搭載の場合広域の立体観測が可能である。また人工衛星搭載の場合短時間に地球規模の観測が可能である。1994年9月にはスペースシャトルによるレーザレーダ実験が世界で初めて行われ成功を収めた<sup>2)</sup>。

ここでは、レーザレーダの分類、測定対象、測定例などについて述べる。

## 2. 2. 2 レーザレーダの分類と測定対象

レーザレーダは、レーザ光と物質の相互作用の仕方によって表 2-5、表 2-6、表 2-7 のように大きく三通りに分けられる。表では各測定原理に対して、それぞれ測定対象、測定高度範囲および測定の距離分解能を載せた。

表 2-5 は、入射したレーザの波長と散乱光の波長が同じものをまとめたものである。最もシンプルなレーザレーダとしては、レーザを発射してから散乱体までの往復時間を計測する測距用のレーザレーダがある。例として地上と衛星間の距離を多地点で測定して地殻変動などの検出や、地球温暖化に伴うグリーンランドなどの氷床高度の変化を衛星から測定しようとしている米国航空宇宙局 (NASA) の GLAS 計画などがある。

送信するレーザの波長と同程度かそれより大きな粒子、すなわちエアロゾルや雲からのミー散乱を用いたレーザレーダは、気象や環境の分野で広く用いられている。例えば、1991 年 6 月のピナトゥボ火山噴火後の成層圏エアロゾルの観測は世界中で行われ、成層圏でエアロゾルの変動や輸送過程の解明に役立っている<sup>3)</sup>。また巻雲や、オゾン層破壊に大きな役割を果たす極成層圏雲などの観測では、散乱体が球形であるか非球形であるかを区別する偏光解消度などの観測が行われる。また多波長を利用したレーザレーダではエアロゾルの粒径分布に関する情報を求めることが可能である。

レーザの波長よりも非常に小さな大気 (空気) 分子からのいわゆるレーリ散乱 (散乱断面積は波長の 4 乗に反比例) は、エアロゾルからの散乱が通常無視できる、高度 30km から 90km の大気密度や気温変動の観測に利用されている。特に気温の観測では、気象観測用のゾンデによる観測は高度 30km 程度までであることから、レーザレーダによる連続観測は、30km 以上の重力波や大気潮汐などの気変動の解明に大きな役割を果たしている<sup>4)</sup>。

ここまで述べてきたレーザレーダの観測には、レーザとしては YAG レーザなどの固体レーザがよく用いられている。また望遠鏡の口径としては、20cm から 1m 程度のものがよく用いられている。検出部には光電子増倍管や、最近ではアバランシェフォトダイオードも用いられつつある。信号処理としては低層用にはアナログ方式が、高層観測用にはホトンカウンティング方式が採用される。

高度 90km 付近には、流星が地球大気に突入したとき融解してできたナトリウム (Na) などの金属原子層が存在する。金属原子のエネルギー順位間に丁度合ったレーザ波長 (Na の場合は 589.95nm) を当てると、通常のレーリ散乱に比べて桁違い (14 桁程度) の大きな共鳴散乱が起こる。この共鳴散乱を利用して中間圏 (高度 60km~100km) の大気力学や化学過程の研究が行われている<sup>5)</sup>。また最近では大口径の天体望遠鏡の調整に、この Na のレーザの共鳴散乱を利用した人工星 (Laser Guide Star) が注目されている。レーザとしては可変波長の色素レーザやアレキサンドライトレーザが利用されている。

表 2-6 は、入射光と散乱光の波長が異なる散乱過程を利用したレーザレーダをまとめたものである。水分子と窒素分子のラマン散乱を利用した水蒸気の観測は夜間観測に限られているが、ほぼ実用段階に入りつつある<sup>6)</sup>。ラマン散乱断面積は、レーリ散乱断面積に比べてさらに 3 桁程度小さいことから、高エネルギー高繰り返しレーザと、口径の大きな受信望遠鏡が必要である。このラマン散乱レーザレーダを用いてエアロゾルの光学的厚さを直接求める新しいアルゴリズムが最近開発されたことは、今後のエアロゾルの観測に新

しいページを開くものと期待される<sup>7)</sup>。

大気の運動（風）に乗って動いているエアロゾルからはドップラーシフトを受けた散乱光が帰ってくることから、このドップラーシフトをコヒーレント検出することにより風向・風速を測定することができる。レーダに用いられる電波に比べて、ドップラーライダーのレーザ光は指向性に優れていることから、複雑地形例えば山谷風の観測も可能である。また将来衛星からのグローバルな風観測である LAWS (Laser Atmospheric Wind Sounder)<sup>8)</sup>などの計画は、数値天気予報や気候変動の解明のためにも有用であり、将来の実現が期待されている。

一方、エアロゾルの散乱が通常無視できる高度 25 km 以上ではレーリ散乱スペクトルの中心がわずかにドップラーシフトしているので受光部に高分解能のファブリーペローエタロン等を用いて風向・風速の測定も試みられるようになった<sup>9)</sup>。

表 2-7 は、差分吸収法ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) で測定できる分子や気温、気圧などをまとめたものである。DIAL は、分子の吸収を受けるものと吸収を受けない二波長のレーザを利用して、二波長の伝播光路中の吸収の差から濃度分布を遠隔測定する方法である。オゾン ( $O_3$ ) の観測は現在出力の大きなエキシマーレーザを用いて世界各地観測が行われている<sup>10)</sup>。水蒸気に関しては Ti: サファイアレーザなどの波長可変レーザを利用した開発が進められている。最近では成層圏を飛ぶ ER-2 搭載用の自動観測可能な水蒸気 DIAL が NASA で開発され、実験観測に成功している<sup>11)</sup>。日本でも、航空機や宇宙基地さらには衛星搭載に向けた基礎開発が現在進められている。

(内野 修)

## 2. 3 赤外線レーザを用いた地球大気環境の計測

### 2. 3. 1 はじめに

オゾン層破壊や地球温暖化などの地球環境問題の解明や監視において、オゾンや炭酸ガス、メタン、フロンガスといった大気微量分子の濃度分布を地球的な規模において観測することが重要である。また、酸性雨などの現象では、バックランドに近い大気中の  $NO_x$  などの極めて微量な分子を測定する必要がある。このような観測では人工衛星を利用した遠隔計測が有効であると考えられる。実際、オゾン層破壊関連の成層圏の大気微量分子の測定では、太陽光を光源とする太陽掩蔽法による大気の吸収分光測定や、太陽光の大気による散乱光を利用した吸収測定、大気の赤外放射やミリ波放射を利用した測定などが顕著な成果を挙げている。また、対流圏の大気微量分子については、干渉分光計を応用した衛星センサーなどが期待されている。しかしながら、特に対流圏の大気微量分子の測定については、これらの受動型のセンサーには原理的な限界があり、さらに感度の高い計測手法の開発が望まれている。赤外線レーザを用いた能動的な計測手法は、これに応える、感度の高い測定手法として期待されている。ここでは、赤外線レーザ長光路吸収法による大気微量分子の計測を中心に最近の研究を紹介する。

### 2. 3. 2 レーザ長光路吸収法と差分吸収ライダー<sup>12)</sup>

大気微量分子を実大気中で遠隔的に計測する手法として、レーザ光を長い光路を透過させ

で吸収測定するレーザー長光路吸収法は最も感度の高いものである。測定の概念は太陽光などの白色光源を用いた分光測定と同様であるが、レーザー光の単色性が極めて高いことを考えると、レーザーを用いる手法が優れている。また、レーザー波長を変調するなどの様々な手法を用いることができる。赤外領域には多くの分子の振動回転遷移による吸収があるため大気微量分子の測定において注目される波長領域である。

レーザー長光路吸収法は、差分吸収ライダー（レーザーライダー）のひとつの測定形態と考えることもできる。実際、1970年代には可視の色素レーザーや赤外の化学レーザー、炭酸ガスレーザーなどパルスレーザーを用いた差分吸収ライダーの研究が数多く行われ、それらの研究のなかで建物の壁面などのハードターゲットの散乱を利用した長光路吸収による分子の測定が報告された。

また、中赤外の連続波（CW）の半導体レーザーを光源とする長光路吸収システムの研究もさかんに行われた。半導体レーザーを周波数変調し、微分信号を取ることによって感度の高い測定を用いる研究が行われた。しかし、中赤外の半導体レーザーは出力が低く、また、大気圧の実大気中の分子の測定では分子の吸収線幅が圧力拡がりのために高い感度を得ることがむづかしいため、現在では低圧の多重反射セルを利用する方法がむしろ主流となっているようである。一方、屋外の大気中の長光路吸収測定では、CWレーザーを用いる手法よりも、ピークパワーの高いパルスレーザーを用いる手法が有利である。最近の光パラメトリック発振器や波長変換の技術の進歩により、赤外波長可変パルスレーザーを用いたレーザー長光路吸収システム、あるいは長光路差分吸収ライダーは再び注目されている。測定対象は以前は大気汚染分子や揮発性の有機分子など局所的なものが中心であったが、最近ではメタンやCOなどバックグラウンドの地球大気中の微量分子の測定が注目されている。図2-6に筆者らが試作した、色素レーザーと誘導ラマン散乱による波長変換とを用いた赤外領域のレーザー長光路吸収システムのブロック図を示す。また、このシステムと約500m離れて設置したレトロリフレクターを用いて測定したCO<sub>2</sub>の吸収スペクトルを図2-7に示す。図2-7中の点がレーザーにより測定された透過率、実線は理論的な吸収スペクトルを最小自乗法によりフィッティングしたものである。下のプロットはフィッティングの残差である。この例から、1回の波長掃引により約0.8パーセントの精度でCO<sub>2</sub>濃度が測定できることがわかった<sup>13)</sup>。筆者らは現在、半導体レーザー励起固体レーザーで励起した光パラメトリック発振器（OPO）を光源とする、メタン計測用の小型の長光路差分吸収システムの開発研究を行っている<sup>14)</sup>。

### 2.3.3 地上衛星間レーザー長光路吸収測定

オゾンや高層大気中の微量分子の観測では、太陽光の吸収や大気の放射を利用した受動的な方式の衛星センサーが有効で、これまでに数多くの成果が得られている。しかし、対流圏の大気化学に関連する多くの微量分子については、受動的な方式は必ずしも有効ではない。このような対流圏の測定の限界を突き破る新しいアプローチとして筆者らは、レーザー長光路吸収法を地上と人工衛星の間の光路の測定に応用する研究を進めている。

地上衛星間レーザー長光路吸収法には、人工衛星に搭載したレトロリフレクターを用いる方法と、光検出システムを人工衛星に搭載する方法が考えられる。図2-8に概念を示す。

前者の方法について、筆者らは1996年8月17日に打ち上げられた、ADEOS衛星（みどり）にリフレクター（RIS）を搭載し、観測実験を行う計画である。一方、光検出システムを人工衛星に搭載する方法では、レーザ光を衛星上で受信する。この方法は、地上システムに大口径の追尾望遠鏡が不要であり、地上システムは著しく小型化される利点がある。また、静止衛星を用いて、多数の地上局から常時、大気微量分子濃度の監視を行うシステムを構築することができる。

衛星搭載リフレクターRISは有効口径約50cmのコーナリフレクタで、日本の地球観測技術衛星ADEOSに搭載されている。RISを用いる測定では図2-9に示すように、地上から送信するレーザ光を衛星までの光路で往復させ、その間で受ける大気の吸収を測定する。RIS計画では連続波長可変レーザではなく炭酸ガスレーザを光源として測定を行うが、衛星が対地速度約7km/sで進行するこにより伴うドップラーシフトを利用することで、レーザ波長の近傍の高分解能の吸収スペクトルを測定することができる。同位体（ $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ 、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ）炭酸ガスを用いた単一縦モードTEAレーザとその第三高調波を用いて、 $\text{O}_3$ 、 $\text{HNO}_3$ 、フロン12、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ などの測定を行う計画である<sup>15)16)</sup>。現在、可視のレーザを用いて、RISによる反射光を受信し、リフレクターとしてのRISの機能の確認を終えたところで、近く赤外レーザによる観測実験に入る。静止衛星に光検出システムを搭載する方法についても検討を進めている。理論的検討結果によると、連続波長可変の赤外レーザを用いる場合、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{OCS}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{CO}$ 、 $\text{HOC1}$ 、フロンガス等の測定が可能である。このうち、 $\text{CO}_2$ から $\text{CO}$ までの分子については吸収線の形状を利用して高度分布を求めることが可能である。その他の分子については気柱全量が求められる<sup>17)</sup>。この場合、RISの場合のようにドップラーシフトを利用した分光ができないため、波長可変のパルスレーザ光源が必要となる。レーザ出力は平均パワーで数mWで測定は可能であるが、波長幅が狭く、波長再現性の高いレーザ光源の開発が必要である。

#### 2. 3. 4 おわりに

本文では、レーザ長光路吸収法について筆者らの研究を中心に報告したが、世界的には、例えば、英国のNPL（National Physical Laboratory）ではYAGレーザ励起の赤外OPOを用いた長光路吸収の研究が行われている。また、米国のSRI（Stanford Research Institute International）でも、赤外OPOを用いて航空機から地表面反射を利用する長光路吸収測定システムが開発されている。赤外レーザを人工衛星に搭載して、人工衛星から大気微量分子の観測を行うことも、将来高出力、高効率の赤外波長可変レーザが実現されれば、現実的なものとなる可能性がある。

（杉本 伸夫）

#### 2. 4 レーザ励起蛍光による植物プランクトン観測

本節では、レーザを光源とし、海水中の植物プランクトン含有のクロロフィル-a色素を観測するための海洋レーザ観測装置について述べる。

を観測するための海洋レーザ観測装置について述べる。

#### 2. 4. 1 植物プランクトンとレーザ光

植物プランクトンからの蛍光励起を効率よく行うためには、各植物プランクトンに共通に含まれるクロロフィル a の吸光分光波長特性に合わせ、レーザの波長を選択する必要がある。あるいは、観測対象となる植物プランクトンの種に含有されるクロロフィル a 以外の密度の高い色素の吸光分光波長特性に合わせ、レーザの波長を選択する必要がある。

これまでの植物プランクトン中のクロロフィル a 色素濃度を測定するための測器は、ハロゲンランプ、キセノンランプなどを光源とし、430 nm から 440 nm の光を透過するフィルターを組み合わせ、クロロフィル a の吸光分光波長の最大となる波長の光を照射し、蛍光を励起する。

これに対して、レーザを光源として選択したとき、従来からの光源に比べて、次のような特長があげられる。

イ 単一波長の光を照射できる。

ロ 光が拡散せず、離れた所の物体に対して強度を維持したまま照射できる。

ハ 強い強度の光を照射できる。

現在利用可能あるいは開発中のレーザ装置として、Nd・YAGレーザ、窒素色素レーザ、半導体レーザ、半導体励起Nd・YAGレーザなどがある。Nd・YAGレーザは基本波として1064 nmの光を発振し、KDP結晶を通し532 nmの第2高調波を発振する。このNd・YAGレーザの第2高調波である532 nmの波長は、クロロフィル a の吸光分光波長のピークから外れ、直接励起に適した波長ではない。しかし、フィコシアニン、フィコエリスリン等の補助色素の吸光波長を刺激するものであり、間接的ながら蛍光励起の可能性を持つ。さらに、Nd・YAGレーザに関して、レーザパルス先の鋭化と、ジャイアントパルスと称されるようにパルスへのエネルギーの集約が可能となっており、リモートセンサーの光源としての可能性を持つ。Hogeら(1980)は、Nd・YAGレーザを光源とし、航空機搭載型の植物プランクトン観測および散乱光観測の海洋レーザ観測装置を開発した<sup>18)</sup>。

色素レーザは、窒素ガスレーザの紫外線やキセノンランプを光源とし、各種の色素に照射し色素の蛍光を励起させ、任意の波長のレーザ光を発振させる装置である。従って、クロロフィル a の吸光分光波長のピークである430 nmのレーザ光により直接蛍光を励起することが可能である。このレーザ装置の問題点として、発振エネルギー量が小さく、また、色素の媒体として有機溶剤を用いるためリモートセンサーの光源としては運用がむずかしい点があげられる。Bristow(1980)らは、フラッシュランプ励起の色素レーザをヘリコプタに搭載し、河川における植物プランクトン観測のための装置を開発した<sup>19)</sup>。また、Browellは、レーザ光と植物プランクトン色素からのレーザ励起の蛍光について検討を加え、レーザ方程式を提案し、光学モデルからレーザによる植物プランクトン観測の可能性を論じた<sup>20)</sup>。

半導体レーザに関しては、緑色から青色の短波長側のレーザ光の発振が可能となってきた。また、半導体励起のNd・YAGレーザの開発が進められており、装置の小型化、出

力強度の増加、長寿命化などの点で期待がかかり、キセノンランプ励起のこれまでのNd・YAGレーザにとって変わる可能性を持つ。今後価格が低下すれば容易に利用されうる。

我々は、HogeらがNd・YAGレーザを光源として使用していること、Nd・YAGレーザの高出力、安定性、操作性、可搬性などに着目し、実際に海洋において植物プランクトン色素濃度検出の可能性を検証し、船舶搭載型の海洋レーザ観測装置に光源として採用した。

#### 2. 4. 2 海洋レーザ観測装置

90年から91年にかけて船舶搭載型の海洋レーザ観測装置を製作した。90年の製作後、実海域における性能試験を行い、その結果を踏まえ、91年に光学系の追加および信号処理系の改良を行った。

図2-10に海洋レーザ観測装置の光学系のブロック図を示す。光源にNd・YAGレーザを配置し、本体、第2高調波発生装置、プリズム高調波分離装置を組合せ、1064nmの基本波と532nmの第2高調波を独立に送信光学系へ送る配置とした。

1064nmのレーザ光は、海面からの反射光を計測し海面形状を評価することを目的とした。1064nmのレーザ光は、ビームエキスパンダを通してビーム径が拡大され、受光のための望遠鏡の光軸と平行に海面へ向け照射される。受光検出系は、海面からの反射光を集光するための150mm径の望遠鏡、波長を選択するための金属干渉フィルター、入射強度を調整するためのNDフィルター、光を検出し電気信号へ変換するための光電子増倍管から構成される。

532nmのレーザ光は、海面からの反射光を計測し海面形状を評価するため、海中からの散乱光を計測し海水中の懸濁物濃度を推定するため、また、海中からの蛍光を計測し海水中のクロロフィル-a濃度を推定することを目的とした。レーザ光は、ビームエキスパンダを通してビーム径が拡大され、受光のための望遠鏡の光軸と同じ軸上を海面へ向け照射される。受信光学系は、海面からの光を集光するための250mm径の望遠鏡、集光された光を平行にするためのコリメータ、各検出系に分光するためのダイクロイックミラ、ビームスプリッタから構成される。検出系は、海面反射光、散乱光、蛍光に分かれ、計測対象の波長選択のための干渉フィルター、入射強度調整のためのNDフィルター、集光のためのレンズ、光を検出し電気信号へ変換するためのゲート付きマイクロチャネルプレート内蔵光電子増倍管(MCP)から構成される。ゲート付きMCPはマイクロチャネルと称される距離の短い光電子の増幅のための素子を有し、従来の光電子増倍管に比べて高速の応答性を示す光電子増倍管である。

これらの装置の構成要素については、基礎実験を通し、それぞれの有効性を確認の上、本装置の構成要素として採用した。

信号検出は、レーザ発振装置から出力されるアドバンスト・トリガーを信号検出系の基準信号とし、海面からの反射光が検出可能なように、アドバンスト・トリガーのタイミングを調整した。「かいよう」の甲板上に設置したレーザ観測装置搭載コンテナから海面までの距離は、バラスト水の容量により変化するが、大きな変化はなく、アドバンスト・

トリガーのタイミングをその都度変化させることなく計測が可能である。このアドバンスド・トリガーの信号を基準とし、1064nm および 532nm の海面反射光、散乱光、蛍光のそれぞれの光電子増倍管のゲートの開閉を行った。

本装置では、深度方向の散乱光および蛍光を計測するため、また深度方向での散乱光および蛍光の指数関数的減少に対応し光電子増倍管の感度を上げるため、深度方向に対応する時間軸における光電子増倍管のゲート開放のタイミングを変化させ、光電子増倍管の感度を変化させ光を検出するゲート手法を開発した。これにより、散乱光については深度 50m まで、また蛍光については 15m から 20m 深度までの計測が可能となった。

#### 2. 4. 3 検証実験

92年11月から船舶搭載型海洋レーザ観測装置を用いて、西部太平洋赤道域、東シナ海からフィリピン東方沖の海域において、本装置の検証実験を開始した。図2-11に94年1月に行った検証実験の航路と表層20mの流れのスティックダイアグラムを示す。パプアニューギニア北方において沿岸から北東方向の流れ、東経150度から東経170度にかけては北西向きの流れ、日付変更線以東では北東向きの流れが存在した。海水温度及び栄養塩濃度から判断して、日付変更線以東の海水は赤道湧昇に伴うものと推定される。この赤道湧昇の海域の植物プランクトンの種の同定結果によると、各測点において、珪藻類の *Nitzschia* spp. が5割以上を占める特異性のある種の分布であった。図2-12のレーザ励起の蛍光強度と、採水海水から求めたクロロフィル a 濃度の分布を示す。データを観測日の順に並べ、同図の左側が北緯5度の東進する測線から始まり、14日が赤道上、西経165度の測点、22日にかけて赤道上の測線、25日以降が赤道上のパプアニューギニアにかけての測線に対応する。このレーザ励起の蛍光強度に関しても、昼間に強度が低くなり、夜間に強度が強くなる昼夜変動を示した。

#### 2. 4. 4 クロロフィル a 濃度の昼夜変動

このレーザ励起の蛍光強度の昼夜変動は、ある濃度以上のクロロフィル a が観測されるときに見られる現象である。この現象は、従来から利用されてきた蛍光励起型の測器によっても観測された現象である。レーザ励起の場合、植物プランクトンにとっては非常に強い励起光であり、可能な限りの光を受光し、光合成を行い、余分なエネルギーを蛍光として出していると考えられ、これまでの測器に比べ、蛍光強度の昼夜変動が大きい。また、観測から、植物プランクトンの昼夜活性度の差により蛍光励起効率が変動することと、植物プランクトンの色素濃度の分析結果から海水の混合等にもなる現存量の昼夜変動も含まれることがわかった。

この蛍光強度の昼夜変動は、現場海水中の植物プランクトンの蛍光効率の変動であるから、植物プランクトンの現存量の変動を含む現場海水の基礎生産力を表す可能性がある。今後、基礎生産力の計測データを蓄積し、蛍光強度の振幅との関連性を見いだす。

(浅沼 市夫)

## 2.5 近赤外線による生体計測

### 2.5.1 はじめに

農業、食品工業、医療などで、近赤外 (NearInfraRed) 分光法 (Spectroscopy) が近年のトピックになっている。生体を対象とした光 CT の研究は世界中で盛んであり、インターネットにホームページが設けられ活発な議論が続いている<sup>21)</sup>。

近赤外と呼ばれる光の波長域は専門分野によってまちまちに定義されているが、ここでは波長 800nm 付近の光をそのように呼ぶことにする。この波長域では、水、蛋白質、脂質、デンプンなどがほとんど吸収を持たないため、近赤外線は被検体をよく透過する。そもそも分光測定の基本は光を吸収する物質が存在することであるから、光吸収の少ない近赤外域を使うことは従来敬遠されてきた。しかし「非破壊計測」をキーワードに、その透過しやすさのほうがかえって着目されるようになったのである。農業、食品工業などでは果実の甘さや米のうまみなどを測定するシステムが研究されている。丸ごと、そのままでも測るものなのでオンラインでの測定が可能になる。

生体計測では「無侵襲 - noninvasive -」が非破壊に相当する言葉である。非侵襲とも書かれる。光を使って生体、もしくはその一部を測ることは特に新しいことではなく、採血してヘモグロビン濃度を測る検体検査では古い歴史があり、また動脈血の酸素飽和度を測定するパルスオキシメータも既に病院に普及している。しかし、光で無侵襲に生体を測定する試みはこの近赤外線を用いてはじめて可能になったと言える。

ここでは最初に生体内の酸素運搬とその代謝について述べ、近赤外の生体計測が必要とされる医学的背景を概観する。次に物理学的に生体内の光伝播がどのように表わされるかを簡単に述べる。最後に、近赤外生体計測装置である酸素モニタ及び光 CT について述べる。

### 2.5.2 生体内での酸素運搬とその代謝

生命活動におけるエネルギー代謝の基本はグルコースを酸化して ATP (アデノシン三リン酸) を産出することであり、このためヘモグロビン (以下 Hb) による酸素の運搬は極めて重要な意味を持つ。肺で酸素化された Hb は血管により組織に送られ、各組織の細胞ではその酸素を使って ATP を産出する。前者の呼吸と循環の過程は生理学が、後者の代謝の過程は生化学の研究が明らかにしているのだが、簡単に考えると酸素がどのくらい組織へ送られているか、酸素がどのくらい組織に渡されたか、酸素がどのくらい組織で使われているか、の 3 つの視点が重要である。

第一の視点である組織に酸素を送るためのパラメータは呼吸と循環に関係する。1. 心臓から毎分何回血液が送り出されるか、2. 一回に送り出される血液の量はどのくらいか、3. その血液中に Hb はどのくらい含まれているか、4. その Hb のうち何%が酸素化しているか、の 4 つが大きく考えられ、それぞれ、1. 心拍数、2. 心拍出量、3. Hb 濃度 (もしくはヘマトクリット)、4. 酸素飽和度に該当している。救急の場で、息をしているか、心臓が動いているかをまず確認するのは、これらが基本的にヒトの生命の証しであるからである。現存の医療装置の多くは、この呼吸と循環をさまざまな手法によって測定しているものである。

第二の視点は実際に酸素がどのくらい組織に渡されたかである。これを調べる最も簡単

な方法は動脈血と静脈血の酸素飽和度を測ることである。Hbは肺で受けとった酸素を組織で離すのだから、離す前（動脈）と離した後（静脈）の酸素の量を知ればどのくらい組織に渡されたかがわかるはずである。しかしこの方法の欠点として、部分部分の情報が得られない点、血管内に針を挿入せねばならない点があげられる。余談になるが、通常、動脈の酸素飽和度は約98%、静脈のそれは大体70%くらいであり、静脈とはいえ酸素はかなり残っている。ヒトはずいぶんと余裕をみて「設計」されていると言えるだろう。

第三の視点は組織に渡された酸素がきちんと使われたかどうかであり、代謝に関係する。これは分子レベルできちんとATPが産出されたかどうかで決まる。この情報を得るためには、呼吸や循環の計測に比べると大がかりな装置が必要となり、通常はMRS（磁気共鳴スペクトロスコピー）を使ってクレアチンリン酸を測ることで推定している。クレアチンリン酸はATP産出を示すバロメータである。細胞が酸素を受け取ってからATPを産出する過程で、チトクロームオキシダーゼという呼吸酵素が関与している。

後述するように近赤外分光法の第一の目的は、酸素化Hb、脱酸素化Hbの増減を測定することにより、組織レベルで送られた酸素と使われた酸素を測定することである。第二の目的はチトクロームオキシダーゼを測定することによって、分子レベルで使われた酸素を推定することである。第三にそれらを光CTとして画像化まで進めるものである。

### 2.5.3 生体内光伝播の物理的記述

生体組織は光の吸収は小さいのだが散乱が非常に大きく、透過性の良い800nmの光でも1cm離れると、目安として、光量は十分の一程度に減衰する。生体に入射された光は多重散乱を繰り返すうちに結局散乱の方向性が無くなって行って、マクロにみれば拡散現象で近似できるようになる。熱の伝導や、半導体内のキャリアの移動を示す式と同じ形になり、一次の時間微分を含んだ拡散方程式である。この非定常拡散方程式は、無限平面、厚みのある平面、円筒、球などの形状に関してはGreen関数が求められているが、複雑な形状は解けないので、有限要素法などにより数値的に解くしかない。典型的な値として吸収係数 $=0.02/\text{mm}$ 、等価的散乱係数 $=1.0/\text{mm}$ がよく使われる。この等価的散乱係数とは、非等方性パラメータを用いて前方散乱あるいは後方散乱を等方散乱で置き換えたものである。

### 2.5.4 酸素モニタ<sup>22)</sup>

生体組織で波長800nm付近の近赤外域に吸収を示す主なものは、Hbとチトクロームオキシダーゼである。Hbは、酸素化、脱酸素化で光吸収スペクトルが変化する。動脈の血（酸素化Hb）が鮮やかな赤色に、静脈の血（脱酸素化Hb）がどす黒い赤色に見えることはそれを示している。この色の違いを生体外部から検出し、その測定部位での酸素化Hbと脱酸素化Hbを測定する装置が酸素モニタである。測定部位を選ばないため、心臓手術中の脳のモニタ、運動中の筋肉のモニタなどに応用されている。酸素モニタはHbレベルで、送られている酸素と使われている酸素を同時に測定することになる。動脈、静脈ばかりでなく末梢血管をも含んだ血液の量と酸素化度を測定するため、酸素モニタの測定データは非常に示唆に富んだものとなる。チトクロームオキシダーゼの酸素状態を測定することが次の目的であるが、そのデータは他の測定手段からは得られないものであるため、Hb以上に、生理

理学的、医学的に議論が続いている。一方、前述の拡散近似をうまく使えば吸収係数、等価的散乱係数は求めることができる。そのためには時間分解測定システムなどが必要であり、求められたパラメータの単位を医学的な数値に翻訳するには、別の議論がさらに必要になる。

#### 2.5.5 光 CT<sup>23)</sup>

医用画像診断装置は最近のコンピュータの発達にもなつて発展し、X線 CT、MRI、PET、SPECTなどが製品化されている。これらは生体の形態情報を得るもの(X線 CTやMRI)と代謝のような機能情報を得るもの(PETやSPECT、及び光 CT)に大別できる。PETやSPECTは放射性同位元素を体内に注入することで代謝の情報を得るが安全性の問題から連続測定は無理であり、これらと比べると光 CTははるかに安価で、安全に機能情報がとれることが期待されている。

その光 CT実現のための問題点は測定方法と画像再構成法である。前に述べたように1cm離れると光量は十分の一程度に減衰するから、たとえば直径10cmの生体の光 CT画像を得ようとするれば同時に10桁の測定レンジが必要になる。フォトンカウントのような微弱光計測システムは、普通、微弱光だけを専用に測るシステムであるから10桁の測定レンジを実現することは難しい。人体に照射できる光パワーには限度があるので、もっぱら測定系を工夫せねばならない。

また、X線と異なり光は散乱されてくるから、そのままでは伝統的な画像再構成法は使えない。そこで「散乱光の中から直進光を選び出す」ことでX線 CTの方法(FBP:フィルタードバックプロジェクション)を応用することが考えられ、空間的に差分を取る方法、時間的に差分を取る方法、ヘテロダイン法により入射光とコヒーレントな成分を抜き出す方法、の三通りの方法が試みられた。これらによって光 CTがともかく実現可能であることは示せたが、残念ながら未だ革命的な結果にはなっていない<sup>24)25)26)27)</sup>。一般には逆問題を解くことが必要となる。そのための新しい発表も目立つようになり、今なお世界中で開発に鏘を削っている現状である。

(江田 英雄)

### 2.6 レーザドップラ効果の振動計測への応用

振動計測用のセンサは数多くあるが、レーザドップラ振動計は、非接触計測、空間分解能(ビーム径による測定領域の分解能)が高い、測定ダイナミックレンジが広い、高温振動物体または、液中振動物体の計測が可能など、多くの特長があり、多くの分野で使用されている。ここでは、レーザドップラ振動計の測定原理と計測用途について述べる。

#### 2.6.1 レーザドップラ振動計の測定原理

レーザドップラ振動計は、「ドップラ効果」と「光ヘテロダイン法」を利用して、振動速度の大きさ、振動周波数を非接触で検出する速度センサである。

測定原理を述べる。図2-13に於いて、He-Neレーザビーム( $f_0$ )は、ビームスプリッタB.S1で参照光と測定光とに分光され、参照光はAOM(音響光学変調器)で-

80 MHz 周波数をシフト、ビームスプリッタ B.S 3 を経由して O/E (光/電気) 変換器に照射する。一方、ビームスプリッタ B.S 1 で分光された測定光は、ビームスプリッタ B.S 2、 $\lambda/4$  波長板を經由して測定物 A に照射されると、その反射光  $f_r$  は、測定物 A の速度  $v$  に比例したドップラシフトを起こす。反射光は  $\lambda/4$  波長板、ビームスプリッタ B.S 2、ミラー M 1 を經由し、ビームスプリッタ B.S 3 の参照光と同一空間上で重ね合わせ、干渉ビート周波数  $80 \text{ MHz} \pm f_D$  が O/E 変換器により電気信号に変換される。そして振動速度  $v$  に比例した FM (周波数変調) 信号は、速度復調器の F/V (周波数/電気) 変換器により FM 復調され、速度信号を検出する。

## 2. 6. 2 ドップラ効果による周波数シフト

振動物体にレーザビームを照射すると、その反射光の周波数はドップラ効果により周波数が増える。図 2-14 のように、ある方向に速度  $v_1$  で等速度運動している物体に発振周波数  $f_0$  のレーザビームを角度  $\theta_1$  で照射すると、照射方向に散乱する反射光の周波数  $f_r$  は、ドップラ効果の公式より、

$$f_r = \frac{\lambda_0 \times f_0 + v_1 \cos \theta_1}{\lambda_0 \times f_0 - v_1 \cos \theta_1} \times f_0 \quad \dots (2.6.1)$$

となる。よって照射光と反射光との周波数差であるドップラシフト周波数  $f_D$  は、

$$\begin{aligned} f_D &= |f_0 - f_r| \\ &= \left| f_0 - \left( \frac{\lambda_0 \times f_0 + v_1 \cos \theta_1}{\lambda_0 \times f_0 - v_1 \cos \theta_1} \right) \times f_0 \right| \\ &= \frac{2 v_1 \cos \theta_1 \times f_0}{\lambda_0 \times f_0 - v_1 \cos \theta_1} \quad \dots (2.6.2) \end{aligned}$$

ところで、 $\lambda_0 \times f_0$  (光速)  $\gg v_1 \cos \theta_1$  であるから、ドップラシフト周波数  $f_D$  は、

$$f_D = \frac{2 v_1 \cos \theta_1}{\lambda_0} \quad \dots (2.6.3)$$

となり、ドップラ効果による周波数シフト量は、振動速度に比例する<sup>28)</sup>。

## 2. 6. 3 光ヘテロダイン法

ラジオのヘテロダイン受信機と同じ原理で、情報 (周波数変化、振幅変化、位相変化)

を持ったある周波数の信号光（測定光）と、それとわずかに異なる参照光とを重ね合わせると、その差周波数がO/E変換器で検出することができる。この差周波数には、信号光の情報がそのまま含まれ、電氣的処理により情報内容が検出可能になる。このような方法を光ヘテロダイン法という。

今、情報を持った信号光の周波数、振幅、位相を  $f_s(x)$ 、 $u_s(x)$ 、 $\phi_s(x)$ 、参照光の周波数、振幅、位相を  $f_r(x)$ 、 $u_r(x)$ 、 $\phi_r(x)$  とすると、O/E変換器の受光面Xにおける時刻  $t$  での光の電場は、

$$E_s(x, t) = u_s(x) \exp \{ i [ 2 \pi f_s(x) t + \phi_s(x) ] \} \quad \cdots (2.6.4)$$

$$E_r(x, t) = u_r(x) \exp \{ i [ 2 \pi f_r(x) t + \phi_r(x) ] \} \quad \cdots (2.6.5)$$

となり、この2つの光を重ね合わせると、O/E変換器で検出される光強度は、

$$\begin{aligned} I(x, t) &= | E_s(x, t) + E_r(x, t) |^2 \\ &= u_s^2(x) + u_r^2(x) + 2 u_s(x) u_r(x) \cos \{ \\ &\quad 2 \pi [ f_s(x) - f_r(x) ] t + [ \phi_s(x) - \phi_r(x) ] \} \quad \cdots (2.6.6) \end{aligned}$$

となる<sup>29)</sup>。式(2.6.6)に於いて、1項と2項は、直流成分となり、3項が差周波数、及び位相差に対応し、この3項を電氣的処理により、信号光の持っている情報を検出する。

#### 2.6.4 振動計の復調方式と復調周波数特性

振動計の復調回路ブロックを図2-15に示す。振動物体をセンシングしたO/E変換器の出力信号は、 $80 \text{ MHz} \pm (f_D + f_m)$  のFM信号を出力する。O/E出力信号は発信周波数  $f_L = 70 \text{ MHz}$  のローカル信号とミキシングされ、 $10 \text{ MHz}$  帯の差周波数信号成分のみB.P.F（バンドパスフィルター）により選択し、中間周波数帯に周波数変換する。IF-AMP（中間周波増幅器）で増幅した後、F/V変換器により周波数の偏移量とその繰り替えし周期に対応した、振動の速度量と、振動周波数情報を含んだ信号を復調する。F/V出力信号成分には、キャリア信号成分が含まれているためL.P.F（ローパスフィルター）で除去し、振動信号成分のみ検出、規定の速度レベルに利得を校正されたAF-AMP（低周波増幅器）にて速度信号を出力する。

よって、振動計の復調可能な最大速度と最高振動周波数は、B.P.FとL.P.Fの帯域特性、それにAF-AMPの周波数特性に依存する。現在、市販されている汎用の振動計の性能は、最大速度  $5 \text{ m/s} \sim 10 \text{ m/s}$ 、最高振動周波数  $1 \text{ MHz} \sim 1.7 \text{ MHz}$  が一般的である。特殊用途に、最高振動周波数が  $10 \text{ MHz}$  の高周波まで測定可能な振動計も実用化されている。

レーザドップラ振動計の計測用途は、あらゆる分野で様々な使われ方をしている。測定方法は、大きく分類して2つの方法に分けられる。1つは、測定物自身に駆動源（又は、振動源）があり、その測定データから測定物の性能を評価をする方法。もう1つは、測定物を外部のアクチュエータまたは、測定物内蔵のアクチュエータ機能を加振して、測定物の振動モードを測定評価する方法である。

前者の例は、エンジン、モーター、リレーなどに代表される、動作時の振動量や、異常動作（異音）検査測定例が挙げられる。ハードディスクや光ディスクの面ぶれ計測もこの範疇にはいる。

後者の例は、ハードディスクヘッドなどの小型構造体の構造解析に用いられる測定方法で、モーダル解析法として一般的に知られている。周波数応答関数を測定し構造体の振動モードを解析評価する方法である。CDやDVD用光ピックアップの周波数応答関数測定例も同様である。

また、最近ではレーザドップラ振動計と顕微鏡をシステムアップし、数 $\mu\text{m}$ ～数百 $\mu\text{m}$ 程度の超小型構造体（マイクロマシンなど）の振動現象を、数 $\mu\text{m}$ の空間分解能で測定する用途が拡大している。

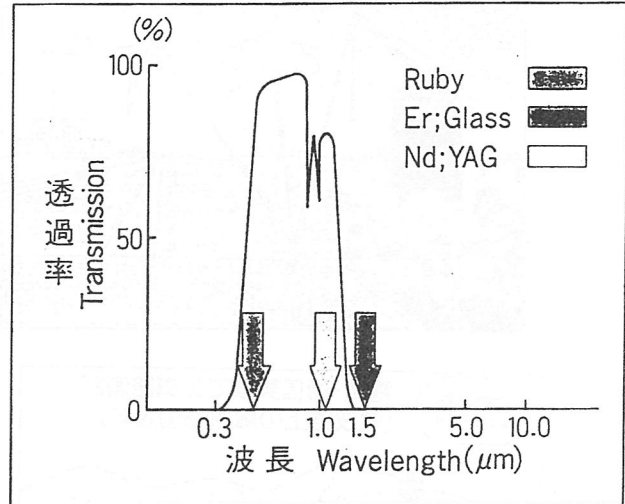
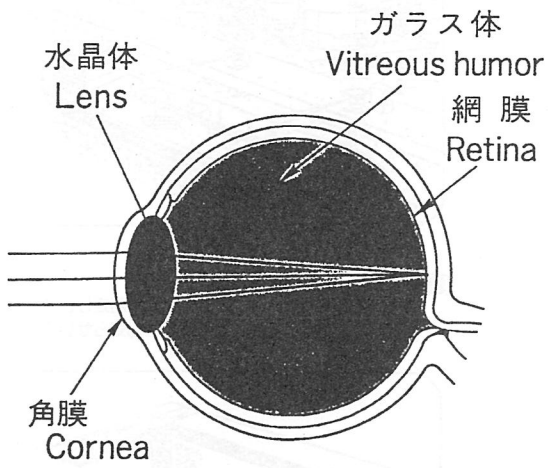
今後は、面計測や多次元の振動計測用途が注目されると思われる。

（小林 卓之）

#### 参考文献

- 1) Hinkley, E. D. ed.: Laser Monitoring of the Atmosphere, Topics in Applied Physics, 14, Springer Verlag, PP.380, 1976.
- 2) McCormick, M. P.: Rev. Laser Eng. 23, p175(1995).
- 3) Uchino, O.: Rev. Laser Eng. 23, p161(1995)
- 4) Hauchecorne, A., Chanin M. L. and Keckhut, P.: J. Geophys. Res. 96, p15297(1994)
- 5) She, C. Y. and Yu, J. R.: Geophys. Res. Lett. 21, p1771(1994)
- 6) Melfi, S. H., Whiteman, D., Ferrare, R. and Evans K.: Rev. Laser Eng. 23, p108(1995)
- 7) Ansmann, A., Riebesell, M. and Weitkamp, C.: Opt. Lett. 15, p746(1990)
- 8) 内野：衛星搭載レーザレーダによる地球環境計測，オプトロニクス社，次世代テクノロジー集成，p306(1992)
- 9) Garnier and Chanin: Appl. Phy. B-55, p35～40(1992)
- 10) McDermid, I. S.: Rev. Laser Eng. 23, p97(1995)、
- 11) Browell E. V.: Rev. Laser Eng. 23, p135(1995)
- 12) R.M. Measures, "Laser Remote Sensing", (John Wiley & Sons, New York, 1984).
- 13) N. Sugimoto and A. Minato, "Long-Path Absorption Measurement of CO<sub>2</sub> with a Raman-Shifted Tunable Dye Laser", Appl. Opt., Vol.32, No.33, 6827-6833 (1993).
- 14) N. Sugimoto, A. Minato, and T. Kobayashi, "All-Solid-State Long-Path Absorption Lidar Using Correlation Spectroscopy for Methane Measurement", CLEO/Pacific Rim '95, p.35 (1995).

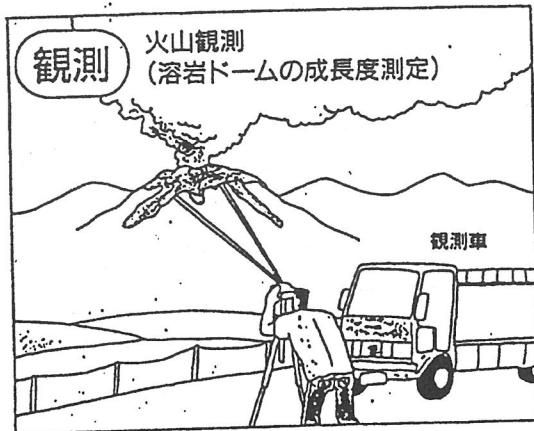
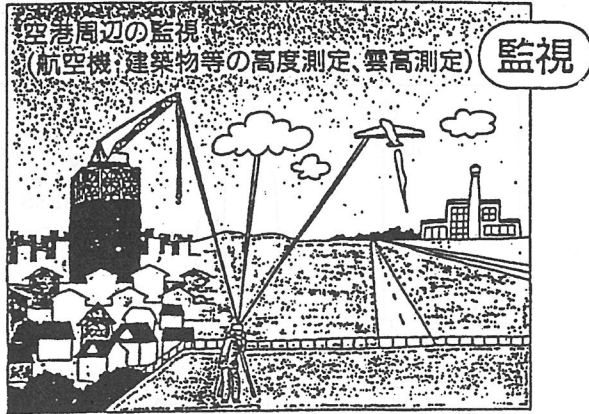
- '95, p.35 (1995).
- 15) 杉本伸夫, "地上衛星間レーザー長光路吸収用リトロリフレクター(RIS)", 日本リモートセンシング学会誌, Vol.13, No.4, 78-82 (1994).
  - 16) N. Sugimoto and A. Minato, "Data Reduction Method for the Laser Long-Path Absorption Measurement of Atmospheric Trace Species Using the Retroreflector in Space" IEICE Trans. Commun., E78-B, 1585-1590 (1995)
  - 17) N. Sugimoto, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, and A. Nomura, "Theoretical Evaluation of Earth-to-Satellite Laser Long-Path Absorption Measurement of Atmospheric Trace Species in the Infrared Region", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.34, pp2329-2334 (1995)
  - 18) Hoge, F.E., and R.N. Swift: Application of the NASA Airborne Oceanographic LIDAR to the Mapping of Chlorophyll and Other Organic Pigments, Chesapeake Bay Plume Study, ed. by J.W. Campbell and J.P. Thomas, p349-374, (1980).
  - 19) Bristow, M., D. Nielsen, D. Bundy, R. Furtek, and J. Baker: Airborne Laser-Fluoresensing of Surface-Water Chlorophyll-a, Ocean Remote Sensing Using Lasers, Howard R. Gordon, Editor, NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-18, p97-174, (1980).
  - 20) Browell, E.V.: Analysis of Laser Fluorosensor Systems for Remote Algae Detection and Quantification, NASA Technical Report, TN D-8447, 39pp, (1977).
  - 21) <http://www.lrsm.upenn.edu/pmi/optimag.html>
  - 22) 江田英雄、他、看護技術, vol. 42, No. 2, pp66 - 69, 1996
  - 23) 江田英雄、他、日本放射線技師会雑誌, vol. 43, No. 3, pp297 - 305, 1996
  - 24) I. Oda et al. SPIE, vol. 1431, pp, 284 - 293, 1991
  - 25) Y. Yamada et al. Applied Optics, vol. 32, No. 25, pp - 4808 - 4842, 1993
  - 26) Y. Tsunazawa et al. SPIE, vol. 2389, pp75 - 86, 1995
  - 27) H. Eda et al. SPIE, vol. 2389, pp477 - 485, 1995
  - 28) 小林卓之: レーザドップラ振動計による速度計測, レーザ協会誌 7月号, pp42-46, (1996)
  - 29) 中島俊典: 干渉計測法, 光工学ハンドブック, pp 387-389, 朝倉書店



眼の透過率  
Spectral Transmission to Retina

図 2-1 眼球とレーザーの透過性

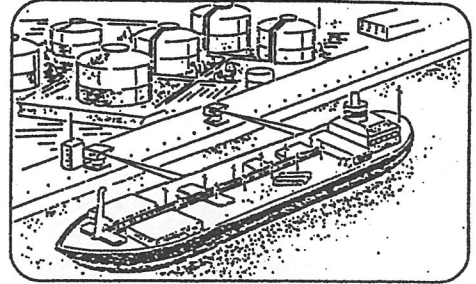
LX3200の応用例



LX1000の応用例

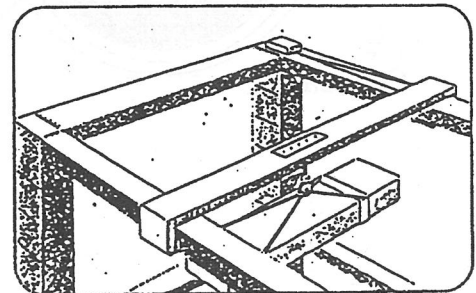
■船舶の接岸誘導

燃料備蓄基地からタンカーまでの距離・速度を測定し、指定位置に誘導します。



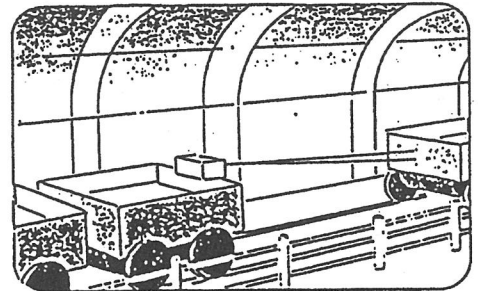
■クレーンの自動制御

近づいてくるクレーンの距離を連続で測定し、クレーンが鋼材を取り付ける位置になると、お知らせします。



■無人搬送車の衝突防止

前の無人搬送車との距離を連続で測定し、距離が一定値を下回ると、アラームを出して衝突を防ぎます。



■指定エリアの障害物監視

レーザー光を1方向に走査して光バリアをつくり、障害物を検知すると、警報を発します。

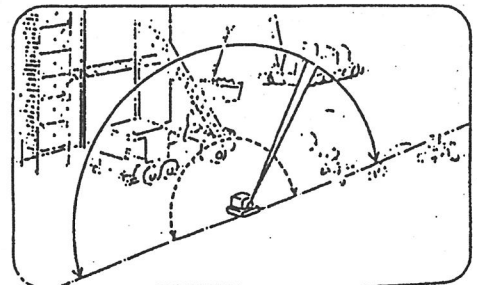
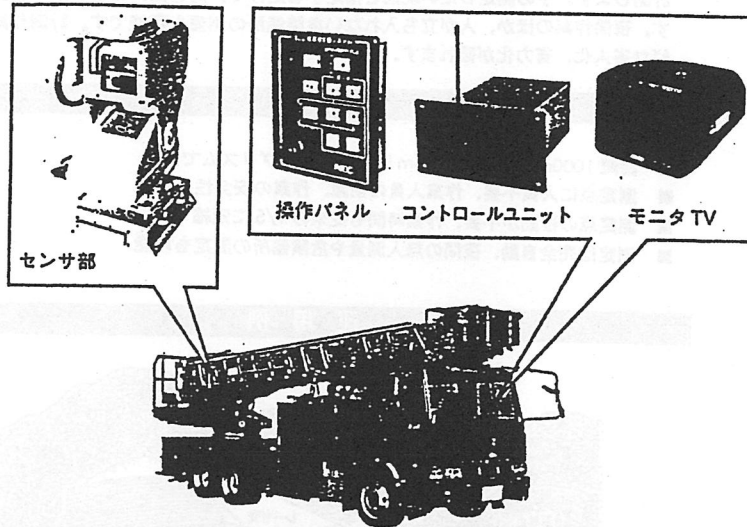


図 2-2 レーザ測距装置の応用例

## 停車位置を一発決定

- 現場に急行、即停車位置を決定
- はしごの使用限界範囲と運動



### 概要

火災現場において、はしごを伸ばすことなく、はしご車の停車位置範囲を瞬時に決定し、迅速な消火・救助活動を支援します。

### 特徴

- はしご車と消火・救助地点との距離・角度を測定し、モニタTVに表示します。
- はしごの使用限界範囲と比較して停車位置範囲を判定し、モニタTVに表示します。
- 運転席から簡単に遠隔操作し、停車位置を決定できます。
- アイセーフレーザを利用した高精度・高遠の、はしご車誘導支援システムです。

### 仕様

性能	
距離測定範囲	1～80m (目標の拡散反射率 20% 以上)
角度旋回範囲	方位角 $-175^{\circ} \sim +175^{\circ}$ 以上 起伏角 $-18^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 以上
距離測定誤差	±30cm 以下
角度測定誤差	±1° 以下
はしご車停車判定誤差	±50cm 以内 (はしご使用範囲内におけるノミナル値)
測定時間	約5秒 (測定、演算、表示時間を含む)
旋回速度	方位 約10°/s 起伏 約5°/s
ハウジング	ワイパー、ヒータ、デフロスタ、ファン機能付
照準用カメラ	オートアイリス 固定レンズ 画角 約14° × 10°
レーザクラス	CLASS 1(アイセーフ)
モニタTV	カラー6インチ
供給電源	DC +24V
消費電力	約180W MAX

図 2-3 梯子車誘導支援システム:LGS8450

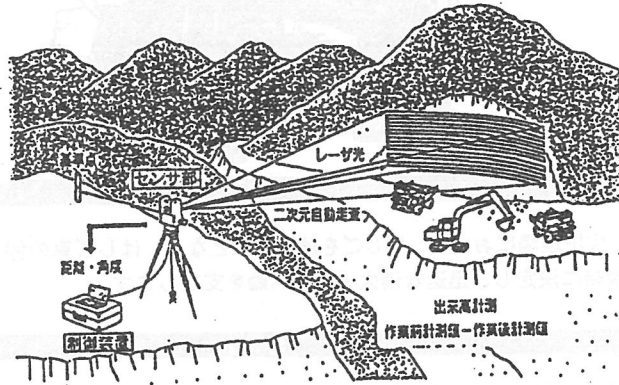
距離 1000m で、精度 50mm 以下を実現した、  
ノンプリズムトータルステーション

ノンプリズムの測距測角装置をコンピュータ制御し、対象物表面の三次元形状を計測します。予め測定したい範囲を指定するだけで、あとは、完全自動で測量します。夜間作業のほか、人が立ち入れない危険個所の測量も可能です。計測作業の大幅な省人化、省力化が図れます。

特長

- 距離 1000m で精度 ± 50mm 以内を、ノンプリズムで実現
- 測定点に人員不要、作業人員の削減、作業の安全性を確保
- 測定点の移動が不要、作業時間も従来の 1/5 に短縮
- 測定は完全自動、夜間の無人測量や危険個所の測定も可能

運用例



仕様

距離測定範囲	20～1000m
距離測定精度	± 50mm 以下
距離測定分解能	1mm
ビーム広がり角	0.3mrad 以下
走査角度測定範囲	鉛直 45°～270° (天頂 0° 時)
	水平 無制限回転可能
角度測定精度	± 15"
回転角速度	最大 8° /s
測定点自動設定精度	10' 以下 (鉛直、水平)
照準望遠鏡倍率×視野	30倍×1'、20'
電源	DC 12V
寸法 (センサ部)	約 260(W)×240(D)×470(H)mm
重量 (センサ部)	約 10kg

出来高計測結果の出力例



地形	切土量	盛土量	土量差
A	7,500	3,800	3,700
B	3,870	5,500	1,630
C	5,200	2,700	2,500
D	1,200	3,400	2,200

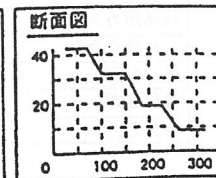


図 2-4 ノンプリズム出来高自動計測システム

## 概要

本装置は、送電線と周囲樹木との離隔を測定する装置です。距離計測にレーザ方式を採用し高精度な離隔測定を実現しました。また、ヘリ搭載型のため、どんな山奥でも運用できる機動性と効率性を備えています。

(九州電力(株)殿と共同開発)

## 特長

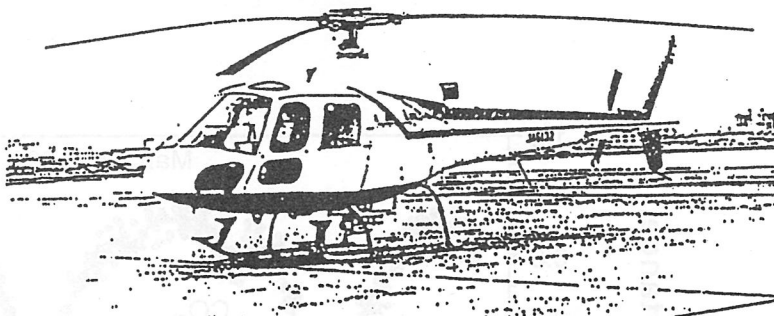
- 短時間で広範囲に連続した三次元データを取得。  
(ヘリ速度：50Km/hまで対応)
- レーザ方式の採用により離隔測定精度40cmを実現。  
(距離：50mにて)
- 三次元距離画像データ処理により各径間の縦断面図、平面図、および任意位置の断面図を画面表示。
- 温度による送電線の弛度変化、送電線下の樹木の成長をシミュレーション。
- 映像データにより送電線下の状況把握も容易。

## 運用概念図



## 主な性能

最大測距距離	100m (φ10mm電線)
離隔測定精度	0.4m (距離50mにて)
データ取得時間	2時間



(協力：西日本空輸(株)殿)

## 装置構成

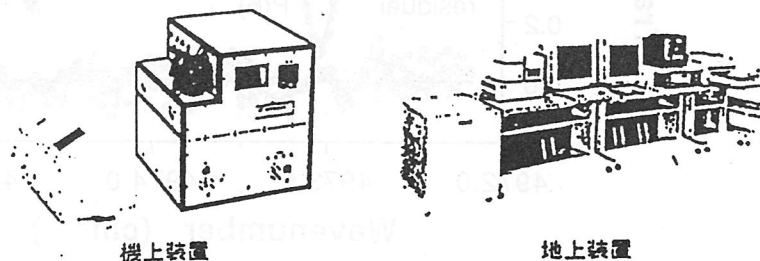


図 2-5 ヘリ搭載離隔測定装置

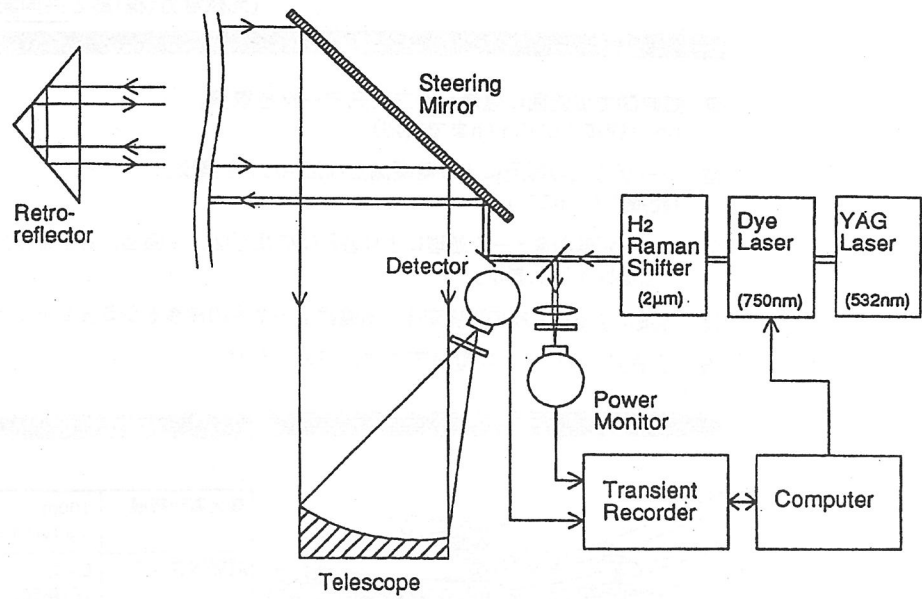


図 2-6 色素レーザーとラマンシフタを用いたレーザー長光路吸収システムのブロック図

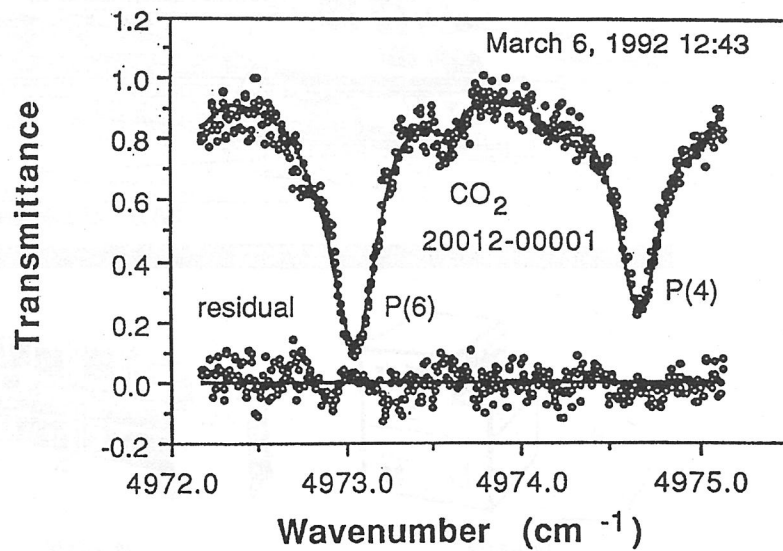


図 2-7 往復 1 km の光路で測定した大気中の CO<sub>2</sub> の吸収スペクトル

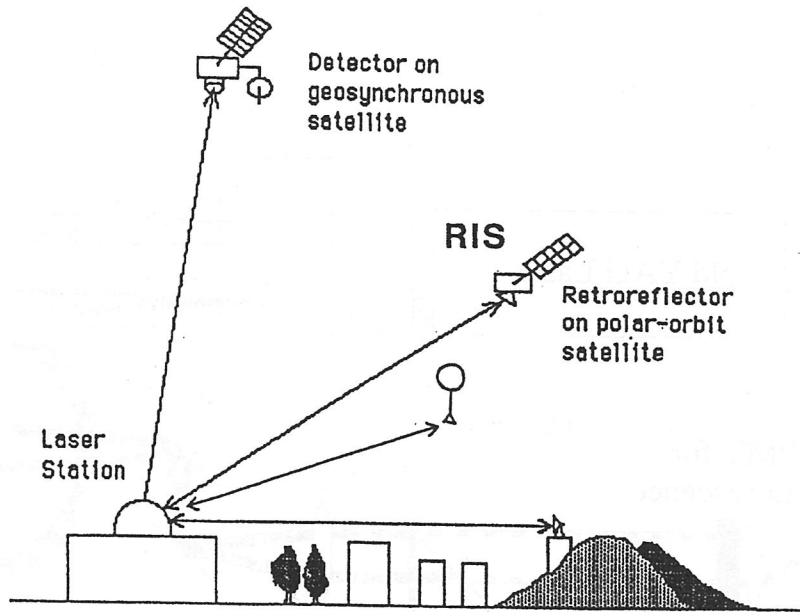


図 2-8 地上衛星間 長光路吸収法  
による大気測定 の概念

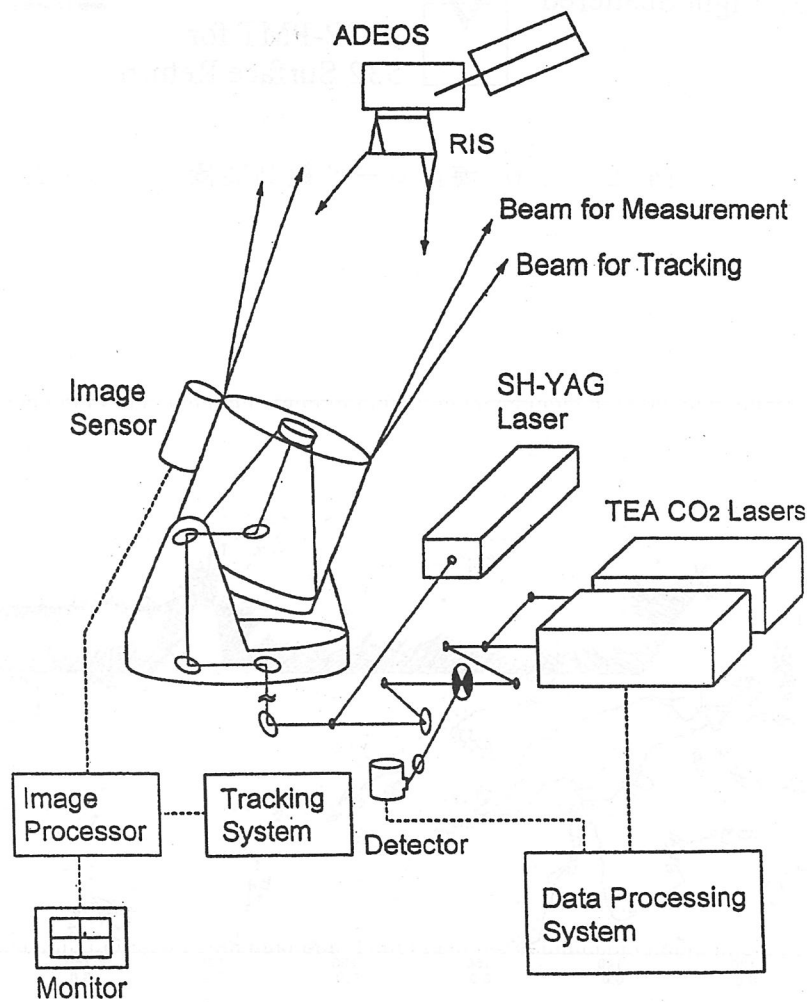


図 2-9 ADEOS搭載RISによる  
大気測定システム の概念

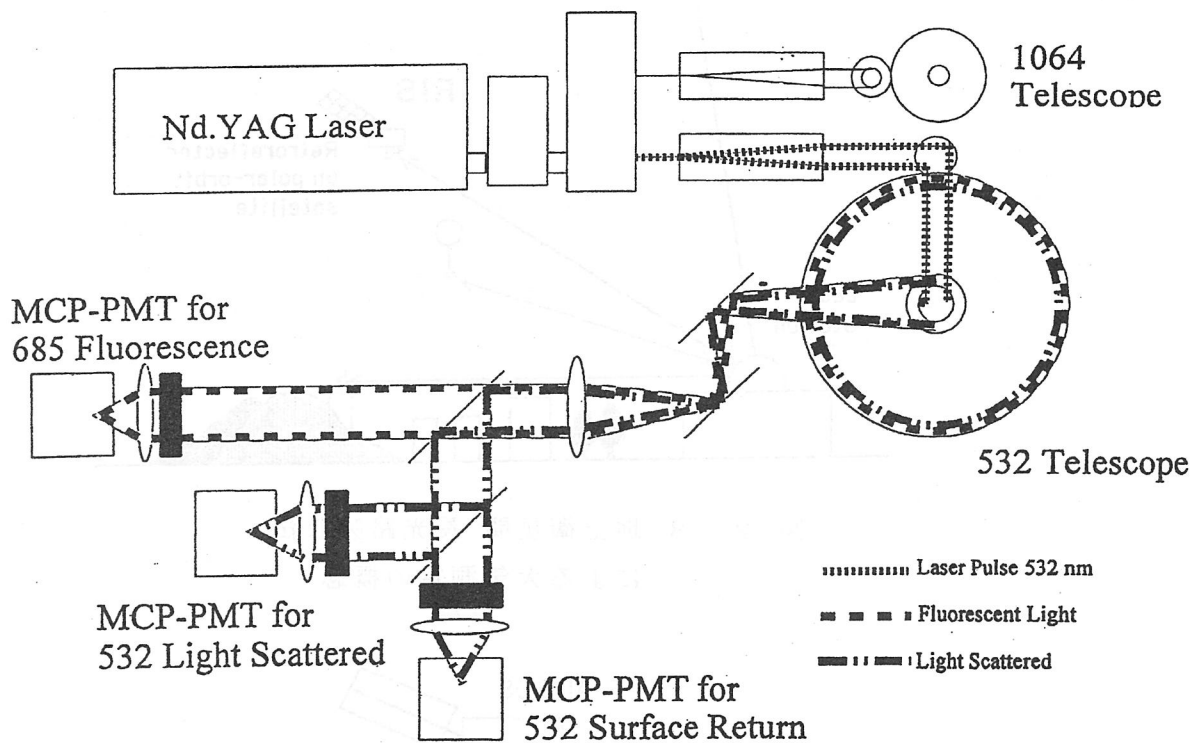


図 2-10 海洋レーザ観測装置ブロック図

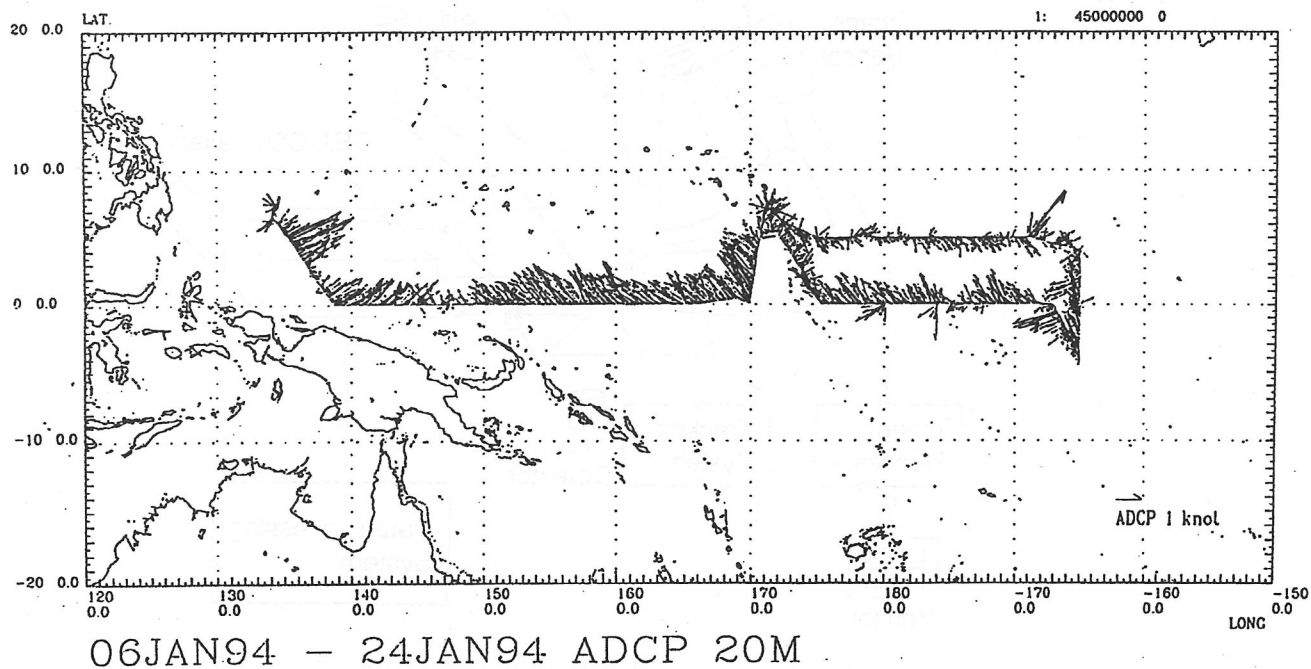


図 2-11 94年1月の観測航路とADCPによる流向流速

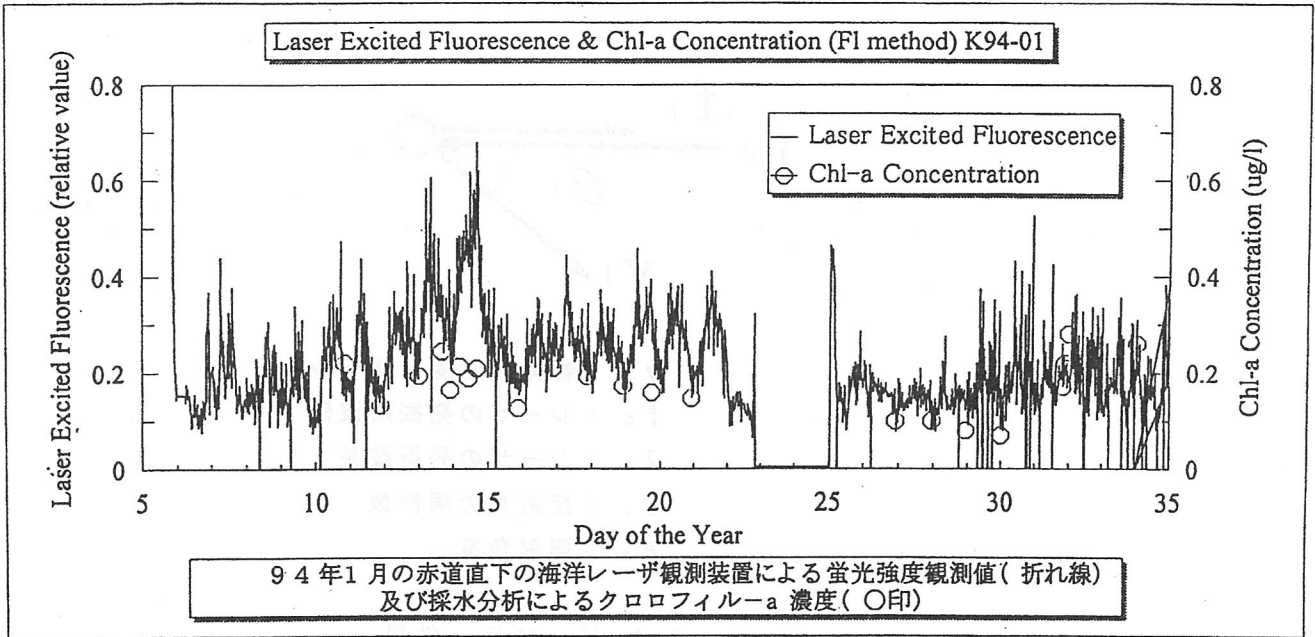


図 2-12 赤道直下の海洋レーザ観測装置による蛍光強度観測値

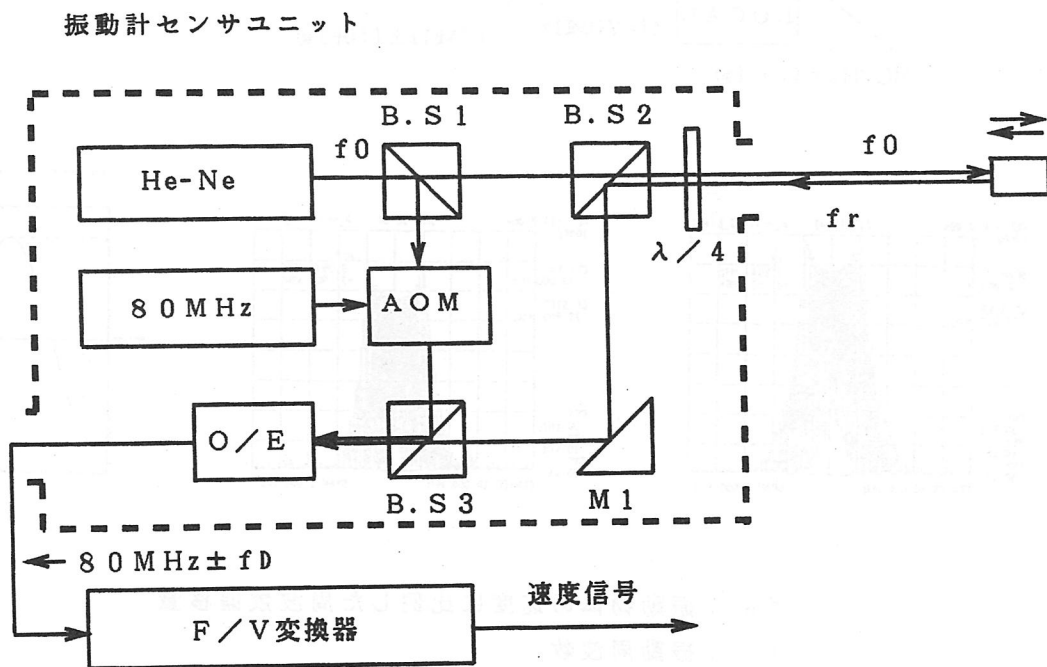
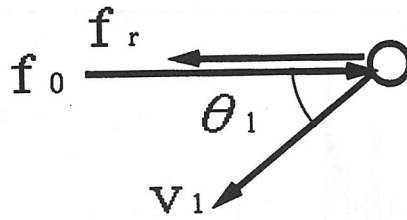
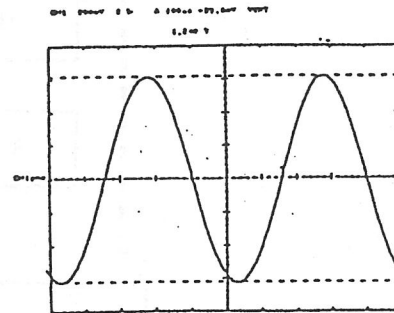
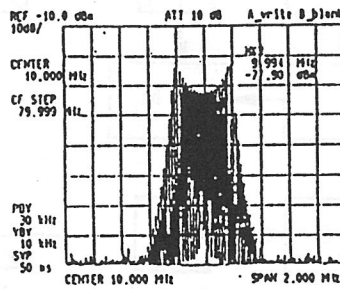
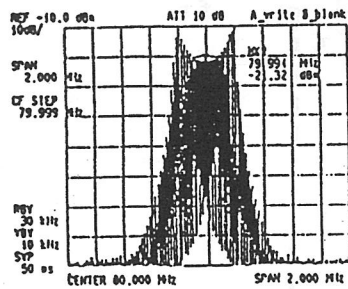
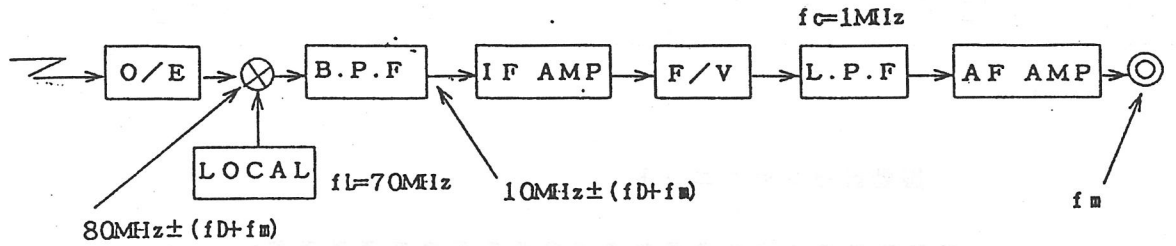


図 2-13 測定原理



- $V_1$  : 物体の速度ベクトル
- $f_0$  : レーザの発振周波数
- $\lambda_0$  : レーザの発振波長
- $f_r$  : 反射光の周波数
- $\theta_1$  : 照射角度

図 2-14 ドップラー効果



- $f_D$  : 振動物体の速度に比例した周波数偏移量
- $f_m$  : 振動周波数

図 2-15 振動計復調回路ブロックダイアグラム

表 2-1 遠隔計測手段の比較

特性 手段		位置計測性		空間搬 伝性	昼夜 間性	物性・状態計測性 (可能な計測)	規制等
		距離分解 能	角度分解 能				
光波	アクティブ	◎	◎	○	◎	反射・散乱解析及びその波長特性より、物体（浮遊微粒子含む）の物性及び濃度計測	J I S による 安全規格
	パッシブ	△				可視画像（色、表面状態）による物性の特定 赤外画像による温度分布計測	
電波	アクティブ	○	○	◎	◎	表面形状観測 反射率計測による物性特定	電波法 による 使用規制
	パッシブ	△				自然放射スペクトル等による物性特定	
音波	アクティブ	○	△	△	◎	反射波、透過波解析による物体内部構造（欠陥、不連続面等）の観測	可聴音 の場合 騒音規制
	パッシブ	△				音源解析による物質状態、音源位置計測	

表 2-2 単発パルスレーザにおける目と皮膚とへの許容しうる入射エネルギー密度 (MPE)

番号	レーザの種類	発振波長	露光時間 (秒)	目に対するMPE値	皮膚に対するMPE値
1	Ruby	0.694 $\mu\text{m}$	$10^{-9} \sim 1.8 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$	$2 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$
2	Nd : YAG	1.06 $\mu\text{m}$	$10^{-9} \sim 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$	$10^{-1} \text{ J/cm}^2$
3	Er : ガラス	1.54 $\mu\text{m}$	$10^{-9} \sim 10^{-7}$	$1 \text{ J/cm}^2$	$10^{-2} \text{ J/cm}^2$
4	CO <sub>2</sub>	10.6 $\mu\text{m}$	$10^{-9} \sim 10^{-7}$	$10^{-2} \text{ J/cm}^2$	$10^{-2} \text{ J/cm}^2$

\* ANSI (American National Standard Institute, Inc)  
のレーザ光に対する安全基準による。

表 2-3 アイセーフレーザの種類と応用

アイセーフレーザの種類	波長	応用製品等	備考
Er ; G l a s s レーザ	1.5 $\mu$ m	国内で最初に実用化したアイセーフレーザ距離計に使用： L X 3 2 0 0 など	
光パラメトリック発振	1.5 $\mu$ m	ヘリ搭載離隔測定装置（3次元画像取得レーザレーダ）に使用 レーザ出力 2.5 k w、発振繰り返し周波数 1 0 0 k H z 以上のレーザで、各種応用が可能	
1.5 $\mu$ m 帯半導体レーザ	1.5 $\mu$ m	アイセーフ半導体レーザを用いた短距離測距用 L X 1 0 0 0 など	

表 2-4 アイセーフレーザ装置の性能

主要性能項目	L X 3 2 0 0	L X 1 0 0 0
使用レーザ	Er ; G l a s s レーザ (1.5 $\mu$ m)	1.5 $\mu$ m 半導体レーザ (1.5 $\mu$ m)
測距距離	3 0 m ~ 5 0 0 0 m	1 m ~ 2 0 0 m
測距精度	$\pm 1$ m	$\pm 1 0$ c m ~ $\pm 2 0$ c m
測距速度	1 2 回 / 分	最大 2 8 6 0 回 / 分
測距分解能	2 0 c m	1 c m
電源	専用 N i C d 電池 D C 1 2 V 3 A	専用 N i C d 電池 A C 1 0 0 V ( A C アダプタ)
寸法	2 0 4 $\times$ 2 3 8 $\times$ 8 6 m m	1 2 7 $\times$ 1 9 0 $\times$ 6 8 m m
重量	2.1 K g	2 K g

表 2-5 入射レーザ光と散乱光の波長が同じレーザレーダ

測定原理	測定対象	測定高度範囲	距離分解能
時間差	氷床高度	地表	10 c m ~ 20 c m
ミー散乱	エアロゾル	500 m ~ 35 k m	15 m ~ 500 m
	雲	1 k m ~ 17 k m	15 m ~ 500 m
レイリー散乱	大気密度	25 k m ~ 90 k m	150 m ~ 3 k m
	気温	25 k m ~ 80 k m	150 m ~ 3 k m
共鳴散乱	Na K Fe Li	80 k m ~ 110 k m	37.5 m ~ 1 k m

表 2-6 入射レーザー光と散乱光の波長が異なるレーザーレーダ

測定原理	測定対象	測定高度範囲	距離分解能
差分吸収法	O <sub>3</sub>	1 km ~ 45 km	300 m ~ 5 km
	H <sub>2</sub> O	1 km ~ 6.5 km	30 m ~ 300 m
	SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> NO	100 m ~ 1.5 km	30 m ~ 100 m
	気圧 (O <sub>2</sub> )	100 m ~ 1.7 km	30 m
	気温 (O <sub>2</sub> )		
	CH <sub>4</sub> CO N <sub>2</sub> O		

表 2-7 差分吸収法レーザーレーダ

測定原理	測定対象	測定高度範囲	距離分解能
ラマン散乱	H <sub>2</sub> O	100 m ~ 7 km	150 m
	気温		
ドップラー	風 (coherent)	100 m ~ 5 km	150 m ~ 300 m
	風 (incoherent)	15 km ~ 40 km	2 km

### 3. パッシブセンシング技術

#### 3. 1 暗視技術

パッシブセンシング技術は、目標・背景自身の放射光または、自然界にある太陽、星等を光源とする反射、散乱光を利用して目標の探知、識別を行う技術である。パッシブセンシング技術としては、技術的に2つの基本方式があり、微光暗視技術、赤外線撮像技術に分類される。

##### (1) 微光暗視技術

微光暗視技術は、波長帯として可視領域とそれを僅かに超える近赤外線領域の微弱な光を検出し増幅するものである。この技術は、像増倍管(イメージインテンシファイア管)により、微弱な光を電子に変換し、電子の状態を増幅を行い、最終的には蛍光スクリーンに電子を衝突させて、光の像を再発光させるものである。この像増倍管を使用した微光暗視装置では、星や月明かりなどの自然界の微弱な光で照明された目標及び背景を、対物光学系と像増倍管及び接眼光学系によって、明るい画像として観測者に認識させる。その微光暗視装置の原理を図3-1に示す。

図3-1に示すように、星や月明かりなどで照明された目標からの光は、対物レンズで集光され、像増倍管の光電面上に結像される。光電面では、像の明暗に応じた量の電子が放出され、マイクロチャンネルプレート(MCP)によって2次電子増幅が行われる。増幅された電子は蛍光面に衝突し、再度光に変換され、人間の目に見える明るい像となる。像増倍管では、数万倍の輝度増幅を行っている。蛍光面の像は、像を正立させるための180°ツイストファイバーによって反転され、接眼レンズで正立した明るい画像として拡大して見ることができる。

像増倍管を動作させるためには、数kVの高電圧を必要とするが、通常は電池(DC2~3V)から高電圧発振回路で、DC-AC変換、昇圧後、これを多段倍電圧整流回路で更に昇圧、整流を行い、高電圧を得ている。この高電圧発振回路と多段倍電圧整流回路を含む高電圧発生回路は、高電圧のリークを避けるためにモールドされ、像増倍管として一体化構造となっている。

微光暗視装置に使用される、対物光学系及び接眼光学系は一般的な可視領域の光学技術であるが、微光暗視装置用として特に近赤外線領域までのコーティングとか歪み補正等に注意が払われた設計となっている。

微光暗視装置の前身として、第2次世界大戦の間、ドイツと英米で赤外線投光型暗視装置が開発され、実用化された。この装置は赤外線投光器で、人間の眼に見えない近赤外線を投光し、その反射光を捉え、その近赤外線像を暗視管(イメージコバータ型)で可視化する。アクティブタイプの暗視装置であった。しかし、アクティブタイプである為、相手が同一の装置をもっていた場合格好の目標となることから、自然界に存在する微弱な光を利用するパッシブタイプの微光暗視技術が望まれ、発達してきたものである。

最初の像増倍管は、暗視管の光増幅率が30~35倍であった為、オプティカルファイ

パープレートにより多段に接続し、3万～4万倍の光増幅を行った。これが一般に「第1世代」と呼ばれている。しかし、これは多段に接続する為、装置として大型になると同時に、像歪み、ブルーミング等の性能的な問題もあった。

次に1975年頃、厚さ1mm程度の2次電子増倍板であるマイクロチャンネルプレート(MCP)が開発され、それを組み込んだ像増倍管が出現した。これは電子増幅機構の変革であり、「第2世代」と呼ばれ、インバータ型と近接型が製作された。

「第2世代」の出現により、装置として小型、軽量化された為、飛躍的に普及した。特に近接型は小型、薄型である特徴を生かして、暗視眼鏡(ゴーグル)として広く実用化されている。

次の段階として、光を電子に変換する部分(光電面)に改良が加えられ、変換効率が高いガリウム砒素(GaAs)光電面を使用した「第3世代」の製品が開発された。「第3世代」は、「第2世代」の光電面が変更されただけで、電子増幅機構は同一であるが、感度が約3倍向上し、しかも感度波長が0.58～0.92ミクロンと近赤外域に片寄っており、近赤外域の光が多いという夜間の自然界に適合している。このガリウム砒素光電面の「第3世代」は、ヘリコプタの夜間操縦用暗視ゴーグル(Night Vision Goggle…NVG)として使用され始めている。像増倍管の性能比較を表3-1に、分光感度特性を図3-2示す。

微光暗視装置の運用が盛んになるにつれ、その周辺技術の研究も重要となってきた。ヘリコプタの夜間操縦用への応用では、従来のコックピット内の計器照明がNVGに悪影響をもたらす為、これを解決する方法として、LED等の照明灯や邪魔となる光をカットする光学フィルタ等の採用等の工夫を行ってきている。また、パイロットへの表示装置として、微光暗視装置の映像に赤外線撮像装置の映像や計器情報を重ねて表示するヘッドアップディスプレイ、ヘルメットバイザディスプレイの研究開発も盛んになってきている。

このように周辺技術も含め、微光暗視技術は確立した技術となっている。初期の段階では過度の期待がかけられ、遠距離の目標探知という目的から、大型の光学系を用いた暗視装置も製作されたが、可視及び近赤外線を利用するという点で目標探知性及び天候性に問題があり、現在では小型、軽量で肉眼に近い映像が得られるという特徴を生かし、暗視ゴーグルのような夜間作業及び行動用に使用されている。今後も中距離、遠距離の搜索、照準には、赤外線撮像装置、レーダ等の他の装置が使用され、微光暗視装置は個人携帯用として普及していくものと思われる。

我が国においては、80年代後半に赤外線投光型暗視装置から第2世代像増倍管を使用した微光暗視装置に置き換わった。また、90年代初頭には、ヘリコプタ操縦用等の特殊分野に第3世代像増倍管を使用した微光暗視装置が導入された。

第2世代像増倍管については、製造技術も確立され国産化されている。第3世代像増倍管については、技術的には確立されたものであるが、生産設備、製造技術的な問題を含んでおり、現状では製造面での研究開発段階である。

米国においては、大きな需要のもとに、第3世代像増倍管の製造技術も確立され、歩留りも向上してきている。また、MCPのチャンネル極小化技術の向上により、高解像度化(36lp/mm→64lp/mm)も進んでいる。しかし、次世代のものとしては、各種の研究開発が試みられているが、まだ方向性が明確になっていない。

欧州においては、第3世代像増倍管製造技術の確立しているメーカは数社あるが、生産量が少ない為、生産設備の維持に苦勞しているメーカもある。次世代の研究開発の内容については、まだ伝わってきていない。

微光暗視装置の応用は、軍事面の利用だけではない。暗い所で物を見るという作業は広く要求されている。赤外線投光器を使用したゴーグル型の暗視装置は、写真現像所とか感光紙製造メーカにおいて、暗所作業用として古くから使用されている。

パッシブ型の微光暗視装置は、夜間の動物の生態観察、撮影や天体観測、微弱光の検出等、ある特定の研究分野において一部使われてきたが、高価である為、民間では普及してこなかった。しかし最近では、実質的に価格が低下してきたことにより、監視等に使用されるようになってきた。1つは、ゴーグル型として、夜間の船舶航行用として使われている。もう1つは、L<sup>s</sup>(Low Light Level)TVカメラとして工場、発電所、変電所の警備及び河川の監視に使われている。

## (2) 赤外線撮像技術

赤外線撮像技術は、目標及び背景から放射される中赤外線または遠赤外線を検出し、その量をコントラストの差としてモニタに表示するものである。その赤外線の量の差は、目標及び背景の温度差及び放射率の差である。赤外線撮像装置技術については、他の章で説明されているため、ここでは省略する。

(村松 俊夫)

### 3. 2 赤外線技術の都市・建築環境への応用

#### 3. 2. 1 はじめに

都市・建築環境の熱環境を議論する上で、表面温度は気温・湿度・風速などとともに重要な熱環境要素である。特に表面温度は、都市・建築の設計・計画の対象となる空間の形態や材料の熱的特性によって直接的に規定される。このため、建築や都市空間における表面温度、特に、その面的に詳細な分布を知ることは、建物や地表面における熱収支を解析したり、快適な熱環境を形成するための設計・計画を進める上でも必須といえる。

しかし、建物の壁面や屋根、そして、舗装面、裸地などの表面温度は、多種・多様な材料が使われていること、空間形態も複雑であることに加え、時々刻々と変化する日射や風速などの影響も受けるため、非常に複雑な様相を示す。これを全体的かつ詳細に把握する方法として表面温度の面的な情報が得られる赤外線イメージングは非常に有効な方法と考える。本稿では筆者らが試みてきた、都市・建築を対象とした赤外線イメージングの例として、次の2テーマを紹介しながら、その特徴や有効性、今後の研究課題について述べる。

#### 3. 2. 2 熱画像を用いた建物全表面からの対流による顕熱流量の解析

##### 1) 建物全表面の温度分布をとらえる意義

一般に建物からの放熱と都市気候の関連性を評価・予測する研究では、建物の材料構成については考慮しても、形状は直方体のように簡略化して考えられることが多い。しかし、建物表面からの顕熱流量は構成材料の影響だけでなく、屋根面・壁面・ベランダ天井面のような建物各部位の表面形状にも、天空率や直達日射のあたり方を左右する要因として大きく依存することが考えられる。よって、建物各部位の形状が建物全表面からの顕熱流量に与える影響を定量的に把握していく必要がある。

##### 2) 夏季晴天日の建築外表面の温度計測概要

図3-3に実測対象建物の外観を示す。この建物は壁面材料がALCの比較的熱容量が小さい低層鉄骨建築である。熱画像の収録にあたっては2台の放射カメラを固定して2方位ずつ捕らえ、死角となる部位はポータブルタイプの放射カメラを用いて建物の周囲を移動して計測した。

##### 3) 熱画像上で建物構成部位の輪郭抽出

建物からの顕熱流量は表面温度の気温との差に比例するため、各部位毎の放熱状況を把握するには、各部位の放射温度を平均して抽出する必要がある。そのためには、放射温度抽出範囲の指標として、収録した熱画像に各部位のポリゴンを重ねなければならない。そこで今回は熱画像における各部位の抽出を以下の手順で行った（詳細は文献1を参照）。

- (1) システム補正（X・Y方向の走査による歪みの補正）をした熱画像より、背景とのコントラストが最大の画像を選択し、各立面ごとに放射カメラの外部標定要素（焦点座標など）を求める。
- (2) (1) で求めた外部標定要素より放射カメラから観測した場合と同じ透視図を求める。
- (3) (2) で求めた透視図をラスタ変換し、アフィン変換により画像サイズ・画像位置を調整した上で部位抽出レイヤーとする。

#### 4) 各建物構成部位の放射温度日変化

図3-4は収録した熱画像と透視図を重ね合わせたものである。図3-5には熱画像から抽出した各部位の放射温度変化を示す。明け方の各部位の放射温度は、気温に対し $\pm 1\sim 2^{\circ}\text{C}$ の範囲に留まっており、その後はそれぞれ直達日射による受熱に対応して急激に上昇している。しかし、全ての部位が一様に上昇するわけではなく、最大で $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ もの分布を示している。どの部位の放射温度とも、日没直後から急激に温度が低下するが、その後数時間は気温より $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ も程度高い位置におちついており、建物の蓄熱状況がわかる。

#### 5) 対流による顕熱流量の日変化

得られた各部位の面積及び放射温度をもとに顕熱流量を算出した。風速は先述の実測値を全表面に一様に適用させ、局所熱伝達率は考慮していない。図3-6は部位別日変化を示す。全表面からの顕熱流量の日変化を見ると、最大となるのは夕方であり、最小となるのは日の出直後であった。これは午前中に比べ午後から夜間にかけての風速が大ききという、夏季・晴天日の東京近郊における典型的な気象現象の影響といえる。部位別に見ると屋外階段・付設部位・開口部で午前中は全体の $1/3$ 近くを占めているが、午後の占有率は小さい。これは屋外階段が建物の東にあるためである。

### 3. 2. 3 サイドルッキング航空機MSSデータによる丘陵開発地域のヒートアイランドポテンシャルの計量

建物壁面等の鉛直面の放射温度分布は、地域の熱環境を解析する上で重要であるが、これは航空機MSS等により広域の放射温度分布を捕らえる場合においても同様である。以下では、従来の直下観測による航空機MSSに加え、新たにサイドルッキング航空機MSSを用いることにより、丘陵開発地域における全地表面の放射温度分布の計測を試みた例を紹介する。また得られた熱画像とGISデータを用いた画像処理により、土地被覆の状況による地区の熱的特性をとらえることを試みる。

#### 1) サイドルッキング航空機MSS観測の概要

冬季の晴天日において、航空機MSSにより、川崎市の丘陵開発地域を対象に観測を行った。観測コースは東西方向とし、建物壁面を含む全地表面を観測できるように、同一地区を観測角度の異なる3つのコース、すなわち直下及び北、南サイドルッキングにより観測した。航空機MSSの仕様及び観測概要等は文献2, 3を参照。サイドルッキング画像の一例を図3-7に示す。

#### 2) 顕熱によるヒートアイランドポテンシャル(HIP)の定義と意義

サイドルッキング航空機MSSにより収録した熱画像を用いて、地区からの単位時間、単位面積当たりの顕熱流量を文献2, 3のように求めた。

要約すると、顕熱流量を求めるためには、対流熱伝達率、および地区の表面温度と気温との温度差を求める必要がある。このとき、次の仮定をおく。1) 都市キャノピー内の気温の空間分布は一般に $^{\circ}\text{C}$ の幅であるが、表面温度分布は数十度にも及ぶことから気温の空間分布はないものとする。2)  $1\sim 2\text{m/s}$ 程度の弱風条件の場合、結果的に地表面における対流熱伝達率の空間分布は小さいことから、その空間分布はないと仮定する。

そこで次式を「都市の全地表面からの対流熱伝達による、顕熱によるヒートアイランドポテンシャル」と定義する。(以下、H I Pと略記)

$$H I P = \frac{\int_{\text{全地表面}} (T_s - T_a) dS}{A}$$

H I P : 顕熱によるヒートアイランドポテンシャル  
T a : 気温

T s : 表面温度  
A : 地区の水平面投影面積

### 3) サイドルッキング航空機M S Sデータを用いたH I Pの算出方法

目視判読によって個々の建物の壁面の放射温度を抽出することは困難である。このため、直下観測によるM S S熱画像と、G I Sによる建物の階数データを用いた立体表示画像との幾何補正を行い、サイドルッキング観測時に建物によって死角となる部分を同定し壁面の放射温度の平均値を求めた。面積が小さく位置の同定の難しいものについては、画像の死角判読によって補った。以上から、H I Pは地表面及び屋根面の成分(水平面成分)と建物壁面の成分(鉛直面成分)に分けて求めた。

### 4) 冬季晴天日におけるH I Pの日変化の検討

まず、朝、正午、日没時の3時刻のM S S熱画像に共通に含まれる地区のH I Pを算出し、その日変化を考察する(図3-8)。森林地区のH I Pは、一日を通じて-3~1℃の範囲にあるが、R C造建築地区および木造建物地区のH I Pの分布は非常に大きい。

地区のH I Pは、朝は-7~2℃に分布するが、朝から正午にかけてはいずれの地区のH I Pも増加し、H I Pが24℃以上となる地区も存在する。正午から日没時にかけては、いずれの地区のH I Pも小さくなるが、地区内の建物の構造別では、木造建物地区のH I Pが0℃以下であるのに対し、R C造建物地区のH I Pは4℃以上を示している。正午のH I Pはほとんど変わらないH I Pを示す地区もある。日中の日射による蓄熱、および暖房による建物壁面やガラス面の表面温度の上昇が原因である。

### 5) H I Pと土地被覆との関係

さらに、土地被覆の状況ごとのH I Pの日変化の特徴を考察する。地区の土地被覆の状況を表す指標として「緑被率」、および地区内の建物の構造(木造とR C造)別「容積率」を用いる。

観測時刻の中で地区の熱的特性が最も顕著に表れている正午における、地区ごとのH I Pと緑被率、および容積率との関係を示す(図3-9)。緑被率が小さいほど、地区のH I Pは大きい傾向にあり、木造建築地区の方がR C造建物地区よりH I Pが大きい。また容積率が大きいほど、木造建物地区、R C造建物地区ともに直線的に大きいが、容積率が約300%を越えると、建物による日影の影響が大きくなり、H I Pは減少する傾向がみられる。

### 3. 2. 4 おわりに

以上、都市・建物を対象とした赤外線イメージングについて、赤外線放射カメラによるパノラマ熱画像や航空機M S Sによるサイドルッキング画像を用いた解析例を紹介した。はじめにも述べたように、複雑な空間形態と多種多様な材料から構成されている都市・建物の熱環境を解析する上で、赤外線イメージングの有効性は高い。しかし、工業計測への

応用以上に、放射率補正や大気補正など解決すべき問題は多い。特に放射率補正については、対象ごとに放射率が異なると言っても過言ではないことや、同時に対向面の表面温度の情報を必要とすることなど、現状ではこれを実行しようとする、リモートセンシングの良さを否定することにもなりかねない。最近のハード面における赤外線イメージングの進歩は目覚ましいものがあるが、環境計測への応用には、計測手法のハード、ソフト両面からさらなる研究開発が望まれる。

(梅干野 晃)

### 3. 3 ビル壁の非破壊検査

#### 3. 3. 1. 外壁剥離診断の必要性

近年、外壁の仕上げ材として使用されているタイルなどの剥落による事故が多発し、中には人命を奪う事故もあり、大きな社会問題になっている。

建築材料、施工技術にもよるが、特に15～20年以上経過した建築物については、剥離現象が顕著になりつつあるといわれており、これら一連の事実からも現在の外壁剥離診断の必要性は生じてくる。

剥落は基本的には剥離の延長上にあるものであるから、剥離を早期に発見し補修することが重要である。剥離には種々の要因が考えられるが、温度応力による剥離は他の要因と比較して、直接壁面に現象が現れにくいいため、目視以外のなんらかの検知技術が必要になってくる。

#### 3. 2. 2. 外壁剥離診断法の評価

当時の日本電信電話公社による外壁剥離診断法の評価では、実際の建物で各種診断法の実験をし、それを比較検討した結果、赤外線映像装置を用いて建物外壁の表面温度を測定し、剥離検知をする方法(以下、「赤外線法」という)が最も良いという評価がされている<sup>9)</sup>。また、その後の建設省による評価においても、これに近い評価となっている<sup>10)</sup>。ただ、これらの診断法は、壁面の異常の概況を定量的に予備的に把握することのできる機器であって、その結果が直ちに剥落につながるような結果を示すものでなく、入念な総合診断調査が必須であるとしている。

#### 3. 3. 3. 赤外線法(表面温度測定法)

赤外線法は

- ① リモートセンシングによる剥離診断が可能である(非接触診断法)。
- ② 作業は安全かつ簡便である。
- ③ 検知結果が面情報として得られる。
- ④ 結果を視覚に訴えることが容易である。

など多くの利点がある反面、

- ① 赤外線映像装置で測定しているのは、測定対象方向からの‘放射温度’であって、測定対象物の温度ではないため、条件によっては実際の温度と大きな差異を生じる可能性がある。
- ② 現在、測定・解析方法は熟練や経験に頼られている部分が少なくないため、結果

に差異が生じる場合がある。すなわち、今後しっかりした理論的に裏付けされた外壁剥離診断方法の確立が望まれる。

などの課題もある。

### 3-1) 実験に使用した赤外線映像装置の性能

今回実験に使用した赤外線映像装置の基本性能を表3-2に示す。また、装置の相対分光感度特性とガラスの分光透過率および分光反射率を図3-10に示す。

### 3-2) 測定上の問題点

赤外線法においては、

- ①外壁表面の放射率、反射率、よごれやひび
- ②日射の影響
- ③天空の反射の影響
- ④大気吸収の影響

など、留意しなければならない点が存在する。

#### 3-2-1) ガラスの透過と反射

図3-10からガラスの表面温度を測定する場合、バンド(A)では環境からの反射の影響が、バンド(C)では背景からの透過の影響があることが予想できる。ガラスと2つの熱源(やかんの表面に黒体塗料を塗布しお湯をいれたもの)と赤外カメラを図3-11のように配置して測定したガラス表面の熱画像を見てみると、バンド(A)では熱源の反射像が、バンド(C)では2つの熱源の反射と透過像がそれぞれ写っているが、バンド(B)では、透過の影響はなく反射の影響がわずか見られるが、温度に換算すると $0.4^{\circ}\text{C}$ に過ぎないことがわかる。

#### 3-2-2) 主な建築材料の分光反射率

主な建築材料の絶対分光反射率を図3-12に示す。これから、バンド(A)では約10~20%の反射があることがわかる。また、バンド(C)では、コンクリートの反射は低いもののタイルやレンガなどでは、50%以上の反射率となっている。このため、これらの波長帯域は日射や天空の反射の反射を受けることが容易に予測できる。一方、バンド(B)においては、いずれも反射率は10%以下で、環境の反射の影響を受けにくいことがわかる。

#### 3-2-3) 日射の反射の影響

一般的には晴れた日の昼間の屋外測定では、日射の影響は避けられない。図3-13に太陽を5900Kの黒体と考えた時の地表での放射照度と、300Kの黒体の分光放射発散度を重ねて示す。バンド(C)の波長帯域では、300Kの黒体の分光放射発散度を考えると、太陽の放射照度と地表での測定対象物の放射発散度がほぼ同程度の強度で、日射の影響を受けやすいことがわかる。また、バンド(A)においては、太陽の放射照度は対象物の放射発散度の $1/50\sim 1/100$ となり、日射の影響は少ないことがわかる。一方、バンド(B)の波長帯域においては、大気層の水蒸気の吸収により地表では日射の影響を受けない。

### 3-2-4) 天空放射の反射の影響

大気の透過率の大きい波長領域では、天空の放射は地表の対象物の放射に比べて著しく小さいため、天空は無視することのできない反射の原因となりうる。図3-14に夏の快晴時における天空の放射温度の角度分布をそれぞれのバンドについて試算した結果を示す。バンド(A)では、地表面付近の気温が36°Cでも、天空の放射温度は天頂角が45°以下の範囲で、-25°C以下にもなることがわかる。一方、バンド(B)では天空放射の受ける影響は少ない。

以上の結果より、赤外線法にはバンド(B)の中間波長が適していることが分かる。ただ、この帯域は大気の水蒸気の吸収帯に相当するため、気温と湿度および測定距離の補正が必要になる<sup>9)</sup>。

### 3-3) 建物外壁診断用赤外線映像装置

赤外線法で使用する赤外線映像装置は、表3-3の要求される性能を満足することが望ましいとされている<sup>10)</sup>。一方、以上の実験の結果を踏まえて、建物外壁診断用の赤外線映像装置が新しく開発されており、その装置の仕様を表3-3に並べて示す<sup>11)</sup>。ここで、新しく開発された装置の中間波長の相対分光感度特性を従来の装置の長波長および短波長の特性と合わせて図3-15に示す。また、これらの各波長で計測されたデータを図3-16に示す。

図3-16から中間波長で撮られた熱画像は周囲からの影響が少ないことが分かる。

### 3-4) 外壁剥離検知のアルゴリズム

外壁剥離検知の手法としては、これらの問題点を考慮して、図3-17に示す画像処理アルゴリズムが提案されている<sup>12)</sup>。

### 3.3.4. おわりに

赤外線映像装置を利用した外壁診断技術は、社会的要請を背景に今後とも重要なひとつの分野を形成していくものと思われる。そして、現在は前述の諸問題に着目し、実用化に向けての研究開発が進められている段階にあるといえる。

これらの問題が解決された時、赤外線法は非常に有効な外壁剥離診断法になると思われる。

尚、本資料の3.3.3項以降に紹介したデータは、東京工業大学 大学院総合理工学研究科環境物理工学専攻 梅干野 晃 教授との共同研究によるものである。また、図3-16は北海道立寒地住宅都市研究所 生産技術部 西川忠氏のご協力により計測されたものである。

(黒川 賢)

### 3.4 レーザ光検知

#### 3.4.1 レーザ光の種類

レーザ光を検知することを考える上で、対象となるレーザ光源の種類は、下記のようなものとなる。

- ・固体 ルビー、YAG等
- ・気体 Ar、He-Ne、CO<sub>2</sub>等
- ・半導体 GaAlAs、InGaAsP等
- ・色素 RHODAMINE、CARBAZINE等
- ・高調波 波長変換（ラマンシフト、非線形光学結晶等）

これらのレーザ光源の波長域は、0.2  $\mu$ m程度（紫外域）から10  $\mu$ m帯（遠赤外域）・1mm程度までと広範囲なものである。

#### 3.4.2 検知素子の種類

レーザ光を電気信号に変換する検知素子には、量子型と熱型とがあり、下記のように分類される。

##### a) 量子型

- ・光起電力効果ホトダイオード  
CCD
- ・光導電効果（抵抗値の変化）  
CdSセル、撮像管
- ・光電面の利用（光電子放出）  
光電子倍增管

##### b) 熱型

- ・導電率の変化  
サーミスタ／ボロメータ
- ・焦電効果  
パイロ
- ・熱起電力効果  
熱電対／サーモパイル

#### 3.4.3 レーザ光検知の要求

レーザ光を検知する理由にはいろいろなものがある。多くの場合、レーザ光のみを検出するのではなく、レーザ光に付随した情報を検出することが要求されており、下記のような場面に分類される。

- a) レーザ光そのものの脅威の検出  
目や皮膚に対する障害の予防のため  
火災の発生の予防のため
- b) レーザ光に付加された情報の検出  
データ通信
- c) レーザ光による情報の検出  
リモートセンシング（レーザレーダ等）  
干渉を利用した計測（ホログラフ等）  
レーザ・ジャイロ  
ドップラ現象を利用した計測
- d) レーザ光に続く脅威の検出  
レーザ光誘導兵器等

#### 3. 4. 4 軍用でのレーザ光検知

レーザ光を検知する場面の中から軍用の場面でのレーザ光、いわゆるレーザ光兵器から照射されるレーザ光の検知について述べる。

レーザ光兵器には、下記のように3種類に分類することができる。（レーザ照射器の例を表3-4に示す。）

- a)破壊用  
ソフトキル、ハードキル
- b)誘導用  
レーザ照射器（セミアクティブ・レーザ誘導用）
- c)測量用  
レーザ測遠機

これらのレーザ光を検知することにより、レーザ光そのものの脅威やレーザ光に伴う脅威をいち早く検知する。

検知後、脅威に対する対抗手段によって兵員や装備品を保護し、生存性を高めていくための装置としてレーザ検知器が必要となっている。

#### 3. 4. 5 レーザ検知器に要求される条件

レーザ光を検知するレーザ検知器に要求される条件は、脅威に対する対抗手段を講じるために下記のようなものとなる。

- a) 広い視野（照射されたレーザ光はいかなる方向からのものでも検知できること。）
- b) 広帯域（各種の波長のレーザ光を検知できること）
- c) 高検知確率
- d) 低誤報率

### 3. 4. 6 レーザ検知器に要求される機能

レーザ検知器に要求される機能は、下記のようなものがある。

- a) 警報の発令
- b) レーザ光源の方向の判別・表示
- c) レーザ光の特性の判別・表示  
パルス繰り返し周波数、パルス幅、波長等
- d) 生存性向上のための装置への起動指令出力

### 3. 4. 7 屋外でのレーザ光検知における注意点

軍用におけるレーザ光検知は、屋外で運用されるため下記のような注意事項がある。

- 1. 太陽光の影響
- 2. 大気の減衰とゆらぎ
- 3. 照射されるレーザ光のビームプロファイルとレーザ光中心から検知素子までの距離の影響
- 4. レーザ光源の正確な方向の検出

以下、これらの注意点について述べる。

#### 3. 4. 7. 1 太陽光の影響

屋外での運用においては、太陽光の影響が最大のものとなる。すなわち、太陽光によって検知素子が飽和してしまい、CWレーザ光だけでなくパルスレーザ光の出力も取り出せなくなる。この太陽光の影響を少なくするため、波長域を狭く設定することも一つの方法として考えられるが、波長域を狭く設定すると検知できるレーザ光の種類が限定されてしまう欠点もある。さらに、干渉フィルタなどの波長選択性の光学素子は、入射角度に対する波長依存性があり、光学素子の選定上注意が必要となる。

太陽光による検知素子出力の飽和問題を解決した後は、レーザ検知器として高検知率・低誤報率を達成するために、太陽光を含む自然光とレーザ光との判別方法が重要となる。

CWレーザ光の検知においては単一スペクトル性の利用やコヒーレント性の利用による判別方法がとられ、パルスレーザ光の検知においては時間による判別方法がとられる。

軍用に使用されるレーザー光はパルスレーザー光であることが多く、時間による判別方法がとられる。この場合、太陽光のゆらぎや、フラッシュ・雷光との区別がレーザー検知器の誤報率を低くする上で重要な問題となる。太陽光のゆらぎや、フラッシュ・雷光の周波数成分はパルスレーザー光に比べて十分低いものといえる。このため、単一検知素子の出力からレーザー光のみを容易に判別することができる。しかし、CCDのような蓄積型の検知素子の場合、信号取り出しの周期（フレームレート等）が太陽光のゆらぎや、フラッシュ・雷光の周波数成分と同等か低いため、レーザー光を容易には判別できず、何らかの対策が必要となる。

### 3. 4. 7. 2 大気の減衰とゆらぎ

レーザー光を検知する上で大気によるレーザー光の減衰とゆらぎも問題である。

可視域での大気の減衰は、視程によって減衰量を計算されることが多いが、同じ視程でも湿度や地域によって減衰量が異なることを考慮しておかなければならない。

大気の減衰には、吸収と散乱によるものとに区別される。散乱は、大気中の粒子によって発生し、粒子の大きさが波長よりも小さい場合の散乱をレーリー散乱、粒子の大きさが波長よりも大きい場合の散乱をミー散乱という。吸収は大気中の水蒸気や炭酸ガス等によって発生し、主に赤外域のレーザー光に影響する。

ゆらぎは、大気中の屈折率の分布変化によって発生し、下記のように分類される。

#### a) ビーム・ベンディング（曲がり）

光に直角な温度勾配による屈折率変化によるもので、日周期でほぼ垂直方向に変動する。（海面の温度差 $1^{\circ}\text{C}$ で $1\text{ m r a d}$ 程度曲がる。）

#### b) スポット・ダンシング（ビーム位置のゆらぎ）

温度の異なる（屈折率が違う）空気の塊の動きによるもので、 $3\sim 4\text{ H z}$ や数 $10\text{ H z}$ で変動する。

#### c) シンチレーション（強度のゆらぎ）

レーザービーム内の屈折率の変化によるもの。

### 3. 4. 7. 3 照射されるレーザー光のビームプロファイルとレーザー光中心から 検知素子までの距離の影響

レーザー光のビームプロファイルの違いにより、検知素子に照射されるレーザー光の強度が変化する。軍用におけるレーザー光は最小の入力パワーから最大の出力パワーを取り出すため、レーザー光の出力モード選択などを行わない。よって、出力されるレーザー光の強度分布は複雑なマルチモードと呼ばれるビームプロファイルとなる。このようなビームプロファイルの場合、レーザー検知器にレーザー光が直接照射されても検知素子自体に照射されるレーザー光の強度が大きく変化する。この強度変化は、レーザー光の到来方向の判別やレーザー光に付随する情報を検出する場合に影響する。

さらに、検知素子自体は有限の数であるため、レーザー光が検知素子に直接照射される場合よりも離れた場所に照射されたレーザー光を検知する機会が多くなる。レーザー光が検知素

子に直接照射されない場合は、レーザ光が大気中で前方散乱した成分を検知することになる。このときの大気の状態やレーザ光中心と検知素子との相対的な位置関係が、検知素子に照射される強度に大きく影響する。レーザ照射器やレーザ測遠機の場合、検知素子に直接照射されるレーザ光のパワー密度は数MW程度になることもあり、直接照射されない場合は数W～数100 $\mu$ W程度となり、ダイナミックレンジにして10°以上になる。

#### 3. 4. 7. 4 レーザ光源の正確な方向の検出

レーザ光に付随する脅威に対して対抗手段をとるためには、照射されたレーザ光の到来方向、すなわち、レーザ光源の方向を正確に把握しなければならない。このレーザ光の到来方向を判別するときの影響を受けるのが、光学系内部での散乱や検知素子の周囲からの反射レーザ光である。光学系内部での散乱は、検知素子に入射されたレーザ光が検知素子の表面で反射することによって発生するもので、照射されるレーザ光の強度のダイナミックレンジが10°以上あるため、光学系の最適化によってもその影響をなくすことはできない。

周囲からの反射レーザ光を判別する方法としては、受光強度の比較や時間軸上の比較による方法が取られる。ただし、受光強度の比較では周囲からの反射レーザ光の強度が直接照射されたレーザ光の強度よりも弱いとは限らない。たとえば、レーザ光を反射する物体が鏡面のようなもので、直接照射されるレーザ光が大気中の前方散乱による成分だけのような場合、直接照射されるレーザ光の受光強度は反射レーザ光よりも弱くなる。このため、受光強度の比較だけでは実用的といえない。

時間軸上の比較の場合は、直接照射されるレーザ光よりも周囲から反射してから照射されるレーザ光の方が検知素子に到達するまでの距離が長くなることから、時間的に遅れて出力される。この時間差によって直接照射されたレーザ光と反射してきたレーザ光とを判別する。

実際には、図3-18(a)のように反射レーザ光と直接照射されたレーザ光のそれぞれの検知素子からの信号出力を単純なコンパレータ回路によって一定電圧レベルを超えた時点の時間同士を比較する。しかし、この方法では照射されるレーザ光の強度パターンによってレーザ光の到来方向を正しく判断できないことがある。(図3-18(b)参照)

#### 3. 4. 8 レーザ光検知器の例

実際のレーザ検知器の場合、レーザ光の検知方式によって分類することができ、各方式の特徴を下記に示す。(表3-5に各国のレーザ検知器の例を示す。)

##### a) 単検知素子方式

- ・ 広視野
- ・ 複数個で高角度分解能に対応
- ・ 安価

##### b) アレイ検知素子方式

- ・ 高角度分解能
- ・ 高繰り返しパルス光の検出には工夫が必要(単検知素子との併用等)

c) 干渉計検知方式

- ・波長も判別可能
- ・複雑

(平塚 隆仁)

### 3. 5 赤外線の資源探査への応用

#### 3. 5. 1 はじめに

近年における発展途上国・フロンティア地域での資源探査では、地形図をはじめとする探鉱のための基本データがない、あるいはあっても古くて使用できない場合が多い。そのような場合、広域を高分解能でカバーでき、入手が簡単な衛星リモートセンシングデータを利用することは非常に有効である。

衛星データによるリモートセンシングが普及する以前は、資源探査の基礎となる地質解析は航空写真等を用いたいわゆる写真地質学的判読によるものであった。これは、岩石固有の浸食に対する強度の違いに起因して形成される地形特徴を利用したもので、メサ、ケスタ、ベディングトレスなどは地質判読の指標として既に一般用語となっている。これを伝統的な技術とすれば、近年の衛星データによるリモートセンシングは、岩石・鉱物の可視・赤外線領域における分光反射スペクトル特性を介し資源賦存有望地域を抽出するといった「質の識別」という新しい技術をもたらした。

1992年2月に打ち上げられた地球資源衛星1号（JERS-1 : Japanese Earth Resources Satellite - 1）は資源探査を目的とし、光学センサ（OPS:Optical Sensors）として可視近赤外放射計（VNIR:Visible and Near-Infrared Radiometer）および短波長赤外放射計（SWIR:Short Wavelength Infrared Radiometer）と、合成開口レーダ（SAR:Synthetic Aperture Radar）の2つのセンサが搭載されているが、特にこのJERS-1 OPSは過去に打ち上げられた衛星搭載型光学センサに比べ、短波長赤外線領域を4バンドにするなどの改良が施され、さらに詳細な「岩質の識別」をねらいとしている。

ここでは、JERS-1データを例として、赤外線領域の特性をどのように資源探査へ応用するかを概説する。

#### 3. 5. 2 資源探査への応用

##### 3. 5. 2. 1 鉱物の分光反射スペクトル特性

鉱物には特定の波長域に特徴的なスペクトル吸収を示すものがある。金属鉱床の鉱化作用に伴う鉱物の変質で形成される粘土鉱物の多くは、図3-19に示されるように短波長赤外線領域における波長1.4~1.5 $\mu\text{m}$ 付近に非常に強い吸収を示す。これらは大気の窓からはずれるため、宇宙からのリモートセンシングに利用することができない。しかしながら、葉蠟石、モンモリロナイト、セリサイト、カオリナイト、明礬石などの粘土鉱物は2.2 $\mu\text{m}$ 付近にもう一つの強いスペクトル吸収を示す。また、同図から石灰岩やドロマイトなどの炭酸塩鉱物は、2.30~2.35 $\mu\text{m}$ 付近に強い吸収帯を持つことが理解される。これら短波長赤外線領域における粘土鉱物等の、各々のスペクトル吸収特性を識別する目的でJERS-1 OPSのバンド領域は設定されている。

JERS-1 OPSおよびLANDSAT TMのバンド構成は、図3-19の上部枠外に示されるので参照されたい。

### 3. 5. 2. 2 鉱物の分布と資源

ここでは、リモートセンシングにおけるスペクトル指標となる鉱物と資源がどのように関連するかを述べる。

金属探鉱の主要目的である金・銀・銅などの鉱床が、直接スペクトル情報として画像に現れることは一般には考えられない。しかしながら、このような金属鉱床形成に関連して各種の変質鉱物とその周辺に形成されることが知られている。リモートセンシングを用いた資源探査では、これらの関連変質鉱物の分布を一つの重要な手がかりとして、地質学あるいは鉱床学的解釈を加えることにより探鉱地域の評価をしてゆく。

一例として、火山活動に伴う熱水型金鉱床は、火成岩の分布と火山活動に伴うカルデラなどの構造に加えて粘土鉱物等変質鉱物の分布を伴う。図3-20は火山活動に伴い形成される熱水型金鉱床のモデルである。<sup>21)</sup>ここでは環状の断裂群とその周辺の変質帯および断裂に沿う鉱化帯の分布形態が示される。

また、斑岩銅鉱床でも、地表部に熱水変質帯、溶脱帯、酸化帯などの変質帯を伴うことがよく知られている<sup>17)</sup>。ここに含まれる褐鉄鉱などは可視領域の $0.35\sim 0.50\mu\text{m}$ に特徴的な吸収を示し、粘土鉱物であるカオリナイトやモンモリロナイトは $2.2\mu\text{m}$ 帯にそれぞれ特徴的な吸収特性を持つ。JERS-1 OPSのバンド7は、この $2.2\mu\text{m}$ 帯に対応していることが図3-19から理解できよう。このバンドを用いて変質鉱物を検出し、その分布を知ることができる。

一方、石油・ガスの探鉱では根源岩として泥岩、石灰岩、ドロマイトの分布、貯留岩として石灰岩類や砂岩などの分布を知ることが重要である。ここでも、スペクトル特性を利用することが可能である。特に、石灰岩やドロマイトなど炭酸塩岩類は短波長赤外領域の $2.3\mu\text{m}$ 付近に吸収特性を示すため、JERS-1のバンド8の利用効果が期待できる。

当然のことながら、これらは植生や土壌被覆の少ない乾燥地域において、その効果を有効に利用できる。また石油・ガスのように、地中深部に胚胎する鉱床に対して地表情報がそのまま適用できないことも多々ある。そのような状況であっても、これまでの探鉱技術に加え、リモートセンシングは新しい視点からの情報として、正確で経済性の高い探鉱を実現する技術として利用され、さらに新しい利用技術の開発も試みられている。

### 3. 5. 2. 3 地質構造と資源

断層、褶曲（背斜・向斜）、不整合などの地質構造は各種資源の胚胎場を決定する要因として重要である。元来、大断層の発達する地域は、地球規模のエネルギーの集中があったことを意味しており、熱水や圧力による変成作用とともに資源形成の可能性の高い地域でもある。

熱水型の金属鉱床の場合、熱水やガスが地表近くまで上昇する場には必ず何らかの割れ目が存在する。これは上昇する物体が、周辺に比べて容易に通過しやすい場として断裂系を選択するためと考えられる。また、火山地域では環状構造などの特徴的な断裂系が形成され、資源胚胎場と関連づけて解析される。

石油・ガスは、地質時代における堆積盆地内に形成される。これは、石油の根源物質となる有機物がこの盆地底に堆積したためである。堆積盆地は面積的規模が大きなことから、リモートセンシング以外の手法で全容を観察することはおそらく不可能であろう。盆地内

において、石油・ガスは背斜、断層、不整合などとこれらが複合し形成する地質構造にトラップされる。リモートセンシング画像は、広域に広がるこれらの構造をとらえる点で非常に有効である。しかしながら、画像から解析される構造に石油がトラップされるためには、石油の生成・移動とトラップ構造形成の時間的対応がうまく一致していなければならない。これらは、リモートセンシング画像の解析だけでは当然のこととして解らないため、その他の物理探査結果など多くの資料を利用し、地質学的知見を背景とした総合解釈がおこなわれる<sup>18)</sup>。

### 3. 5. 3 スペクトル解析と資源探査への利用

これまでの解説のように、資源探査には鉱物の種類と地質構造の分布を知ることが重要な初期情報となる事が理解されよう。ここでは、JERS-1データを用いた資源解析の利用例を示す。

#### 3. 5. 3. 1 鉱物を強調する画像解析

##### 1) 鉱物の強調

JERS-1 OPSは短波長赤外線領域に4つのバンドを持ち、鉱物の種類や分布の情報をより多く収集している。しかしながら、JERS-1データのバンド6、7、8のデータ間には高い相関関係が認められることが多く、単純なバンド組み合わせによるフォールスカラー合成ではその効果はあまり期待できない。これらの情報を強調する手法として、一般にリモートセンシングで使われる比演算処理、主成分分析、ログレジデュアル法、無相関ストレッチ法などが資源解析分野でも利用される。また、炭酸塩岩類の抽出のためカルサイトインデックス (CLI) なども開発されている。

図3-21はボリビア南部Cerro Chinchiluma地域における解析例である<sup>21)</sup>。図3-21 (A) は、JERS-1データのバンド3、5、8を組み合わせせたフォールスカラー画像である。この画像中、シアン系に発色しているのはバンド8の吸収の強い地域であり、変質帯の存在が推定される。同様のデータを比演算処理をして作成したものが図3-21 (B) である。ここでピンクに発色する変質帯は、フォールスカラー画像と概ね同じ地域であるが、その境界はより明瞭になる。また、図3-21 (C) に示すSPI処理<sup>20)</sup> 画像では変質帯が黄色に現れ、その周辺がシアンとなる特徴を示す。SPI処理とはログレジデュアル法を改良した指標で、この結果を現地において確認した結果、変質帯を構成する粘土鉱物の主体はカオリナイトであり、その周辺にセリサイトがとりまくように分布していることが判明した。

##### 2) 構造の強調

地質構造の解析は地形特徴を指標として行われることが多く、スペクトル特性が直接的に利用される例は岩質解析に比べ少ない。しかしながら、類似の岩相・岩種で構成される地域では地形的特性が現れずらく、写真地質学的手法では構造解析の精度が上がらない。この様な場合、構造解析のためにスペクトル特性を強調した画像が要求される。図3-22は中国北西部のタリム盆地北縁<sup>19)</sup> の画像である。この地域は大半が赤色～黄色砂岩類で構成され一部に石膏の薄層を狭在する状況であるため、一般に作成される可視・近赤外領域のフォールスカラー画像では層理が不明瞭で構造解析には不適であった (図3-22A)。こ

れに対し、比演算と主成分分析を組み合わせ石膏層の強調処理をした結果、その連続性を画像上でとらえることができ（図3-22B）、正しい褶曲形態および褶曲を切る断層の存在の把握が可能となった。この石膏層は10m程度の薄層であるが、スペクトル強調をすることで構造解析の鍵層として利用することができた。

### 3. 5. 3. 2 総合解析

主として短波長赤外線領域は、変質鉱物の分布情報を与え鉱床分布評価には有効な情報となるが、これまでの写真地質学的手法から得られる情報も同時に有効である。JERS-1のPSの立体視機能をは写真地質学的解析に利用され、構造解析などで効果を上げている。実際の解析では両者を合わせ、地質学的ノウハウをバックグラウンドとした総合解析を行う。

多くの場合、この工程では既に得られている地表調査や物理探査など全ての情報を合わせて行われる。金属探鉱や石油・ガス探鉱ではそれぞれの深い知識を必要とすることは言うまでもない。

また、資源探査は広域概査から試掘に至るまで種々の工程で構成される。リモートセンシングが貢献できる領域はその初期工程である広域概査にとどまるとは言うものの、これを適切に行うことにより、全体工程の期間短縮、探査精度の向上など経済的な場面での貢献もその役割である。

### 3. 5. 4 まとめ

リモートセンシングデータは、広域・同時性をその特徴とする地表面からの情報である。これに対し多くの資源は地中深部に胚胎する。リモートセンシング技術は直接的に資源の存在を突き止める情報としてあるのではなく、広域から評価を始め可能性の高い地域を徐々に絞り込むことにある。

前述したようにJERS-1の赤外線領域におけるデータは資源賦存有望地域の絞り込みに大いに役立っているが、1998年に打ち上げ予定のASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) は、短波長赤外線領域を6バンドに細分しさらに熱赤外領域にも5バンドを有するセンサである。JERS-1の技術的経験はこのASTERに継承され、これからの資源探査に貢献することであろう。

(磯貝 浩一)

## 参考文献

- 1) 梅干野, 浅野ほか: 第18回日本リモートセンシング学会学術講演梗概集, PP167-170 (1995)
- 2) 梅干野ほか: 日本建築学会計画系論本報告集, 第462号, PP49-58(1994)
- 3) 梅干野, 飯野ほか: 日本建築学会計画系論文報告集, 第471号, PP29-37(1995)
- 4) 梅干野ほか: 日本建築学会計画系論文報告集, 第459号, PP17-25(1994)
- 5) 梅干野: 光応用・視覚研究会資料(LAV-87-8), PP21-32(1987)
- 6) 梅干野ほか: 日本建築学会計画系論文報告集, 第450号, PP29-37(1993)
- 7) 佐藤ほか: 外壁タイルの剥離診断方法、日本建築学会大会学術講演梗概集、(1981)
- 8) 今泉勝吉: タイル仕上げ等のはく離検知器の開発(建設技術評価)、p11(1984)
- 9) 内山ほか: 熱画像における大気自動補正アルゴリズムの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp1511~1512(1991)
- 10) 野田良平: 赤外線診断法の実務・最新技術、BELCA新素材・新技術セミナー資料、(1995)
- 11) NEC三栄(株)「サーモレーサ(TH3105)」仕様書(1995)
- 12) 梅干野ほか: 新たに試作した波長域に感度を有する熱画像と熱収支計算による外壁剥離検知手法に関する基礎的研究、日本建築学会計画系論文報告集、第450号(1993)
- 13) 'Handbook of Optics', Optical Society of America, McGraw-Hill, (1987)
- 14) JANE'S年鑑: RADAR AND EW SYSTEM、LAND-BASED AIR DEFENSE、BATTLEFIELD SURVEILLANCE SYSTEM
- 15) LASERGAGE社カタログ
- 16) MBB(Messerschmitt-Bolkow-Blohm)社カタログ
- 17) (財)資源・観測観測解析センター、資源探査への応用(2)、資源探査へのリモートセンシング実用シリーズ
- 18) (財)資源・観測観測解析センター、資源探査への応用(1)、資源探査へのリモートセンシング実用シリーズ6
- 19) (財)資源・環境観測解析センター、平成7年度石油資源遠隔探知技術の研究開発報告書1/4および2/4
- 20) 土田聡、田中壮一郎、小田島高之、Logarithmic Residual法およびその類似法のためのスペクトルパターン指標、写真測量とリモートセンシング、Vol.32, No.1, 1993
- 21) 丸山裕一、久保田善裕、金鉦床探査地域の選定を目的とした衛星リニアメント解析手法の検討、日本写真測量学会年次学術講演会P179-182, 1992年5月

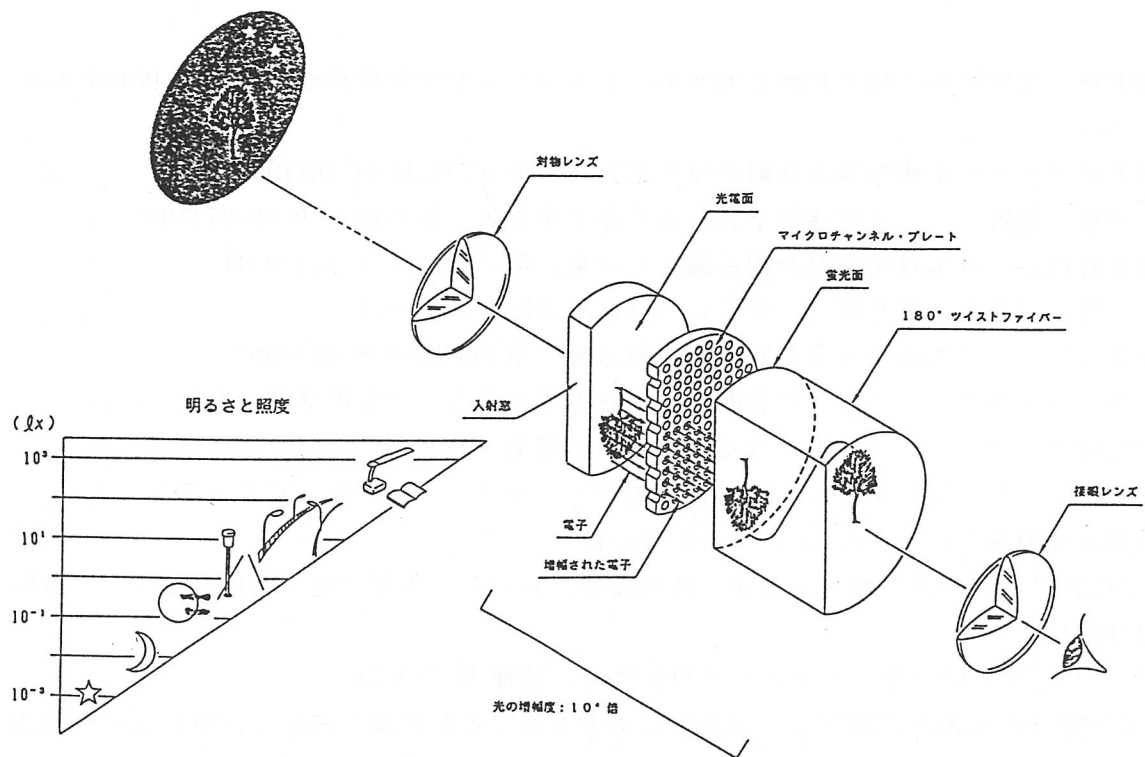


図 3 - 1 微光暗視装置の原理

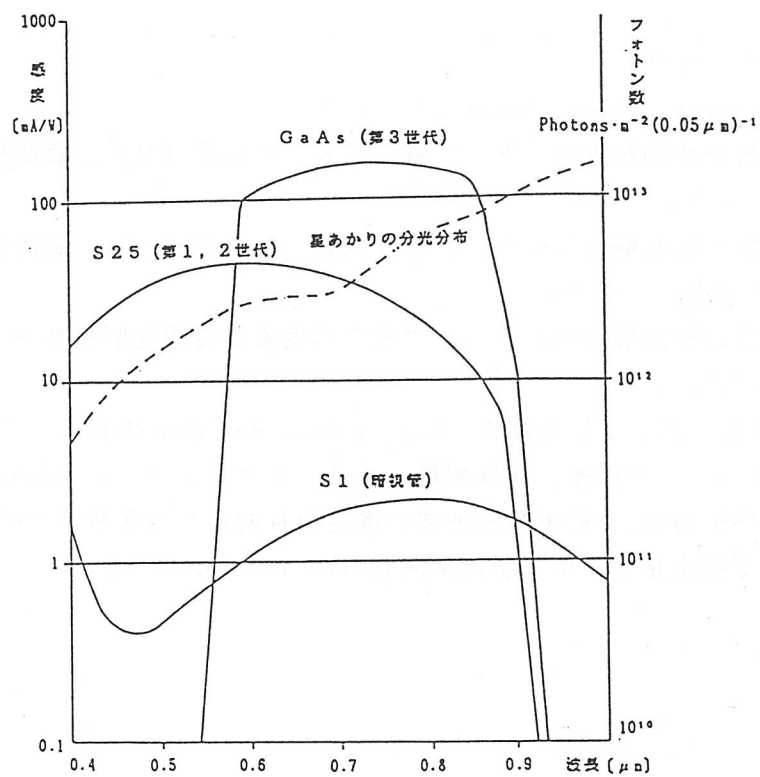


図 3 - 2 暗視管、像増倍管の分光感度特性

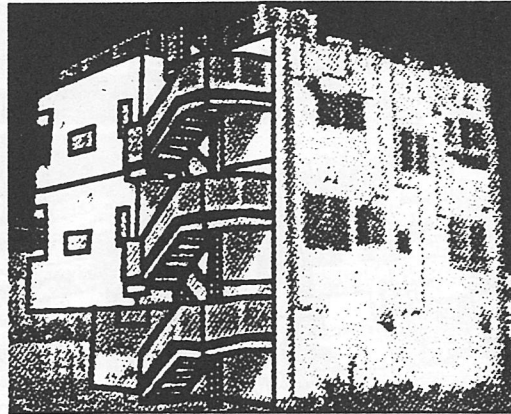
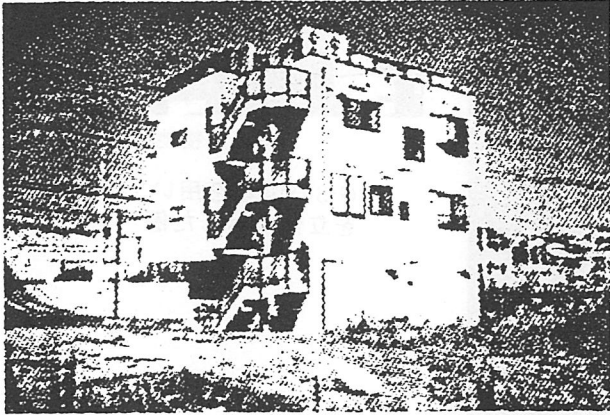


図3-3 実側対象建物の外観（東側より臨む）  
\*壁面の日射吸収率の実測値は0.8であった

図3-4 熱画像と透視図の重ね合わせ例  
\*透視図は微調整前の段階のもの

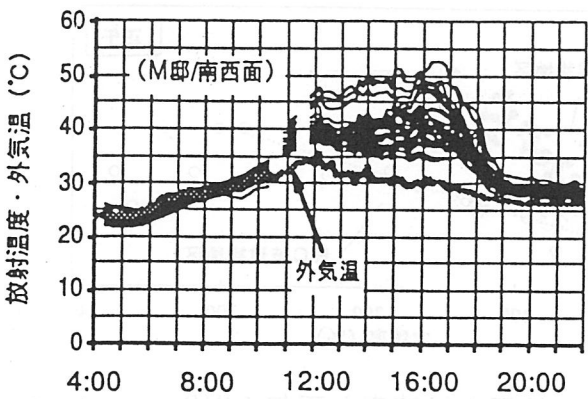
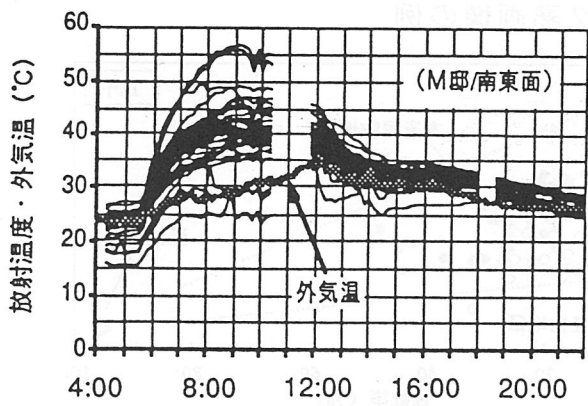


図3-5 熱画像により抽出した建物各部位の放射温度の日変化

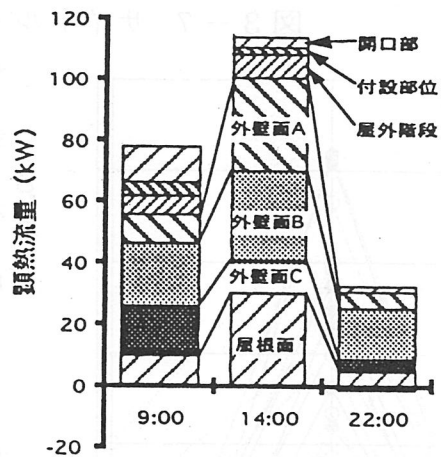
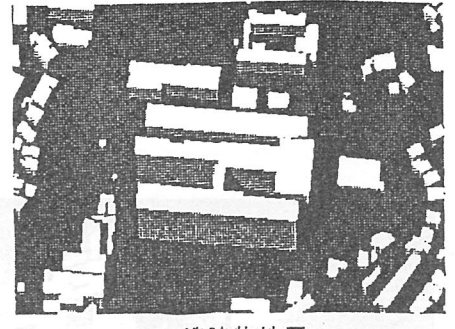
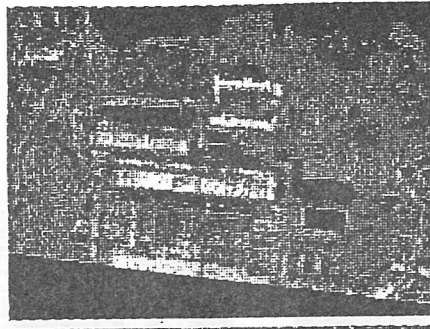
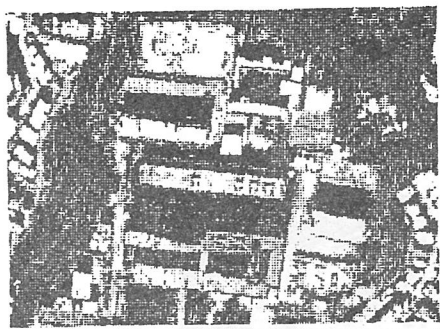
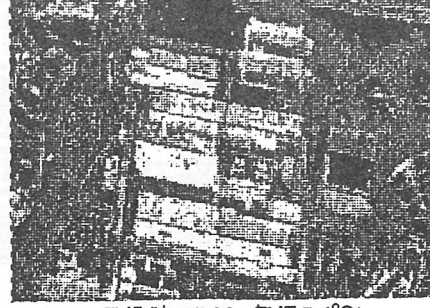


図3-6 建物全表面からの湿熱流量の部位別日変化



RC造建物地区

GISの情報を用いて建物を立体表示した例



正午(12:30, 気温9.0°C)

日没時(17:30, 気温7.6°C)

(上段:北サイドルッキング,下段:南サイドルッキング)

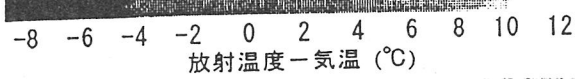


図3-7 サイドルッキング熱画像の例

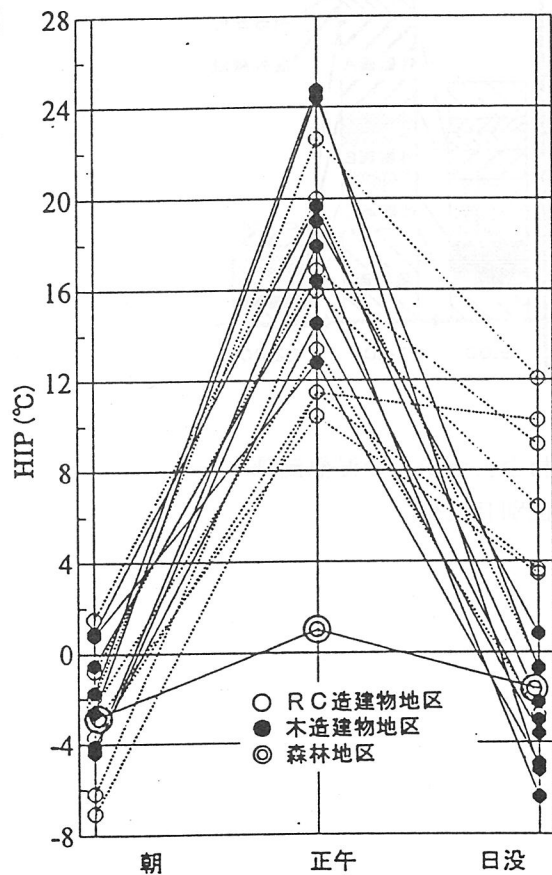


図3-8 地区ごとのHIPの日変化

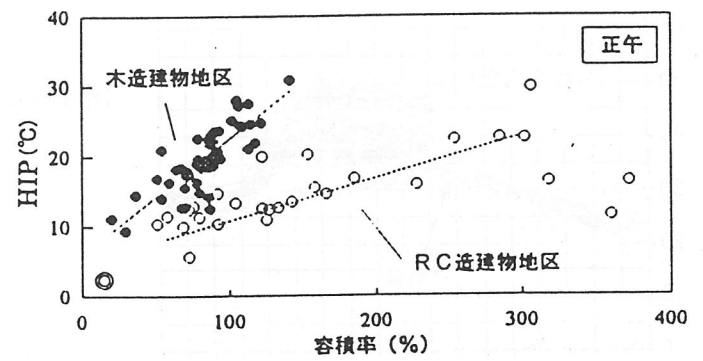
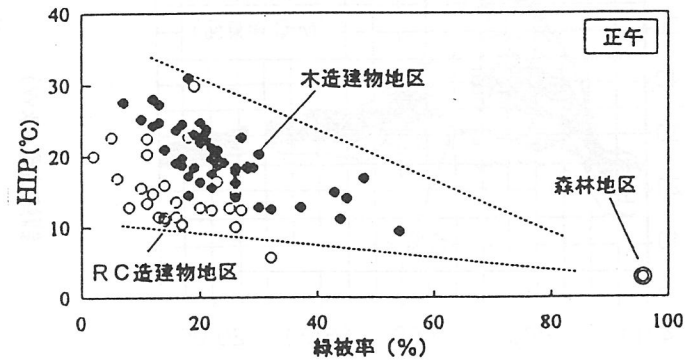


図3-9 地区の緑被率と正午のHIPとの関係

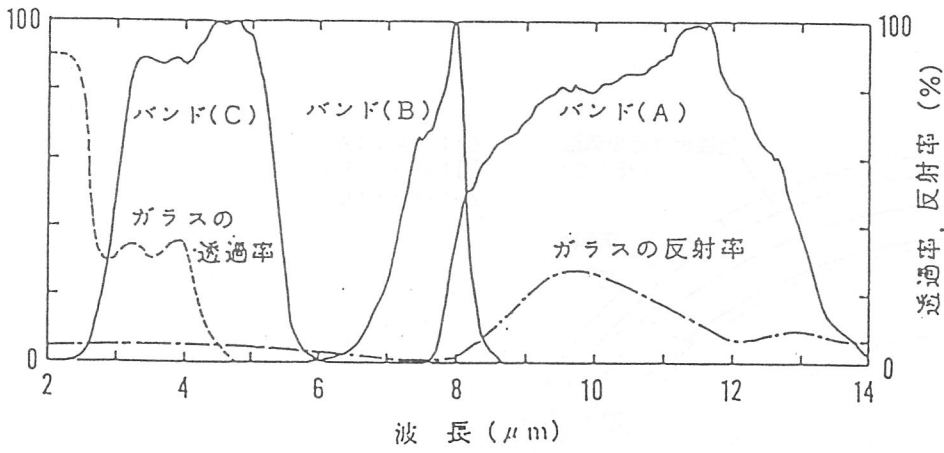


図 3-10 分光感度及びガラスの透過率と反射率

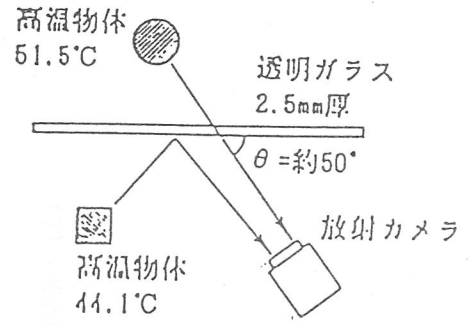


図 3-11 実験の概要

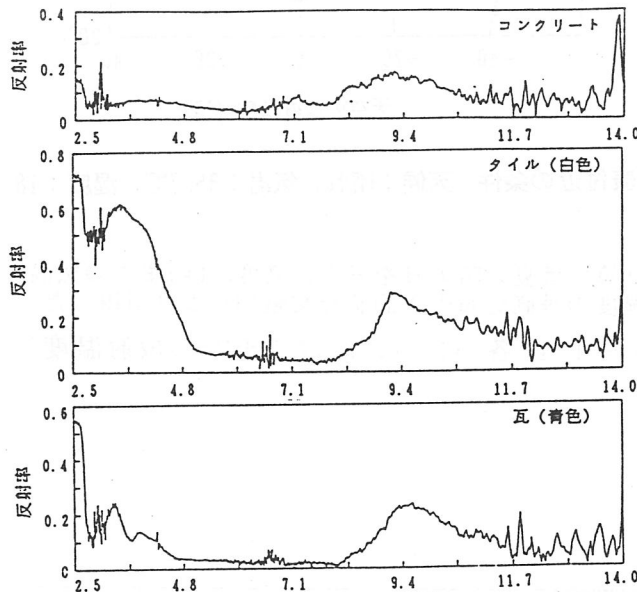


図 3-12 主な建築材料の絶対分光反射率

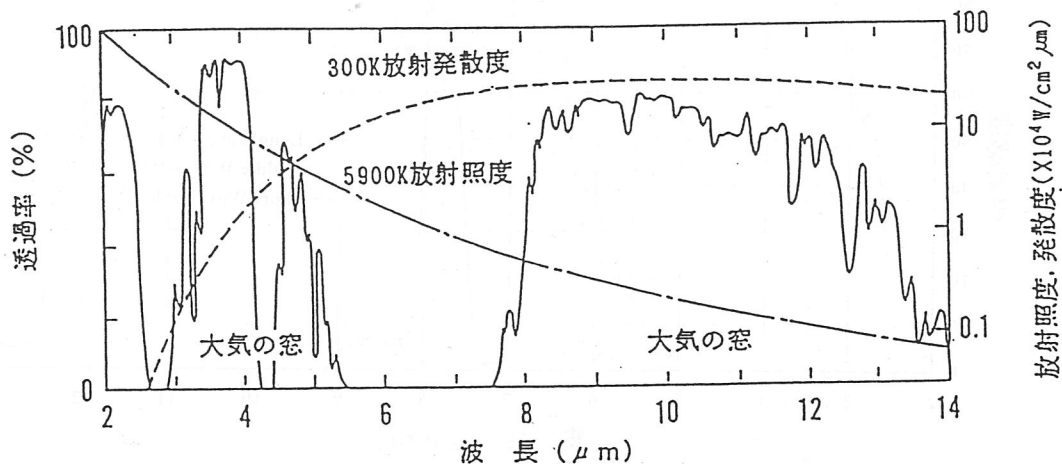
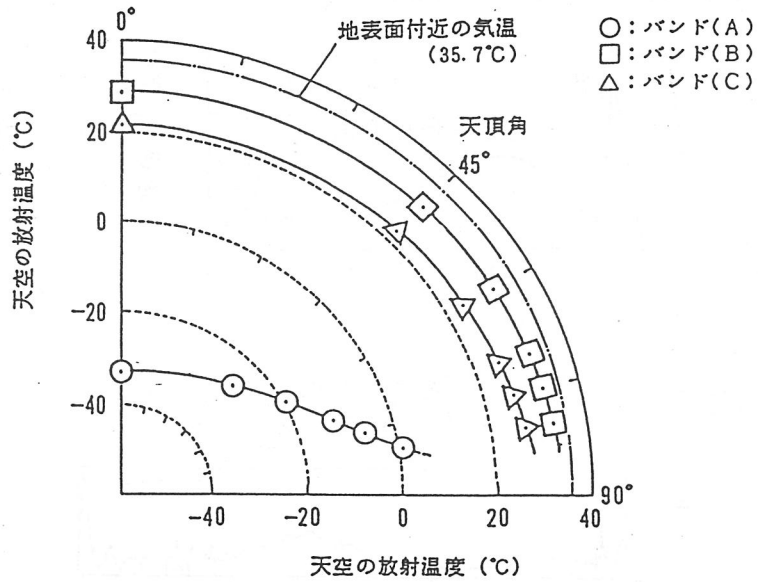


図 3-13 大気の透過率及び太陽の放射照度  
土地表面での放射発散度



地表面付近の条件 天候：晴れ，気温：35.7°C，湿度：18.2g/m<sup>3</sup>

計算には夏の晴天日を考え、高度2.0kmまでの気温、湿度の垂直分布の実測値を文献(13)より引用した。

図 3 - 1 4 各バンドにおける天空の放射温度

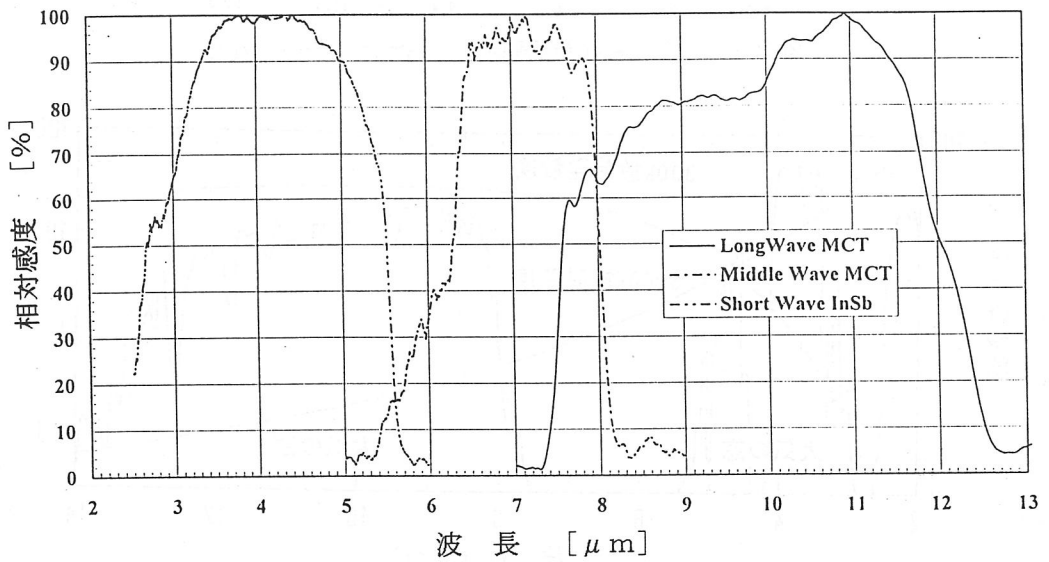


図 3 - 1 5 相対波長感度特性

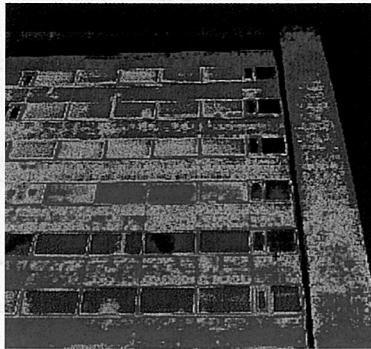
## 赤外線法による建物外壁診断 — — — 測定波長域の違いと熱画像

測定対象物：灰色タイル、やや光沢あり、12階建て南面

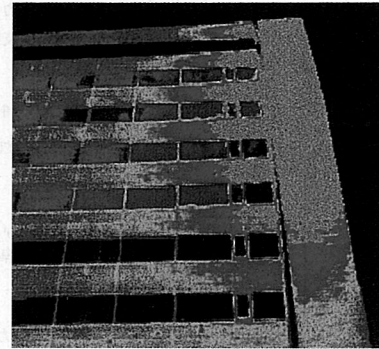
LW（長波長）機  
(8~12 $\mu$ m)



MW（中間波長）機  
(5.5~8 $\mu$ m)

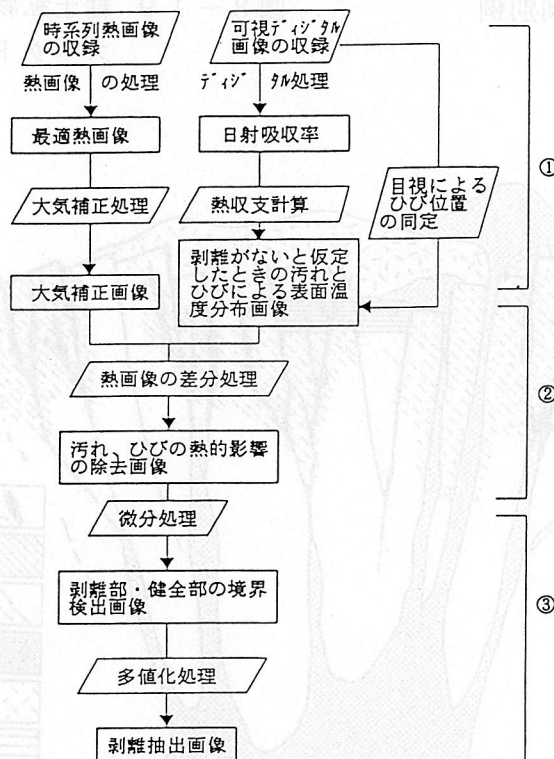


SW（短波長）機  
(3~5.3 $\mu$ m)



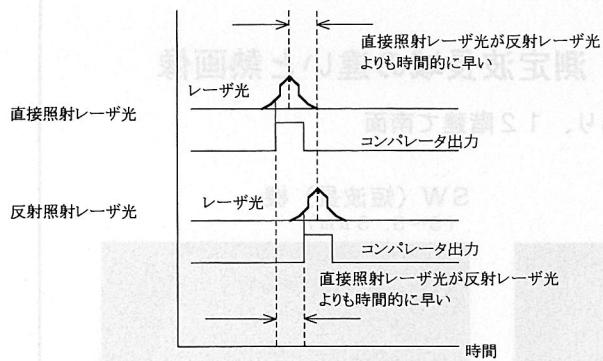
- 壁面の右上に太陽が反射している。SW機ではその影響が大きく、LW機でも多少映っている。MW機では、全く影響されない。
- LW機では天空反射による、壁面高さ方向の温度勾配が大きい。MW機でも温度勾配はあるが、LW機ほどではない。
- 縦横の伸縮目地に沿って、MW機とLW機で共通して高温になっている箇所が多くあり、これについては剥離の可能性が高い。

図3-16 赤外線法による建物外壁診断

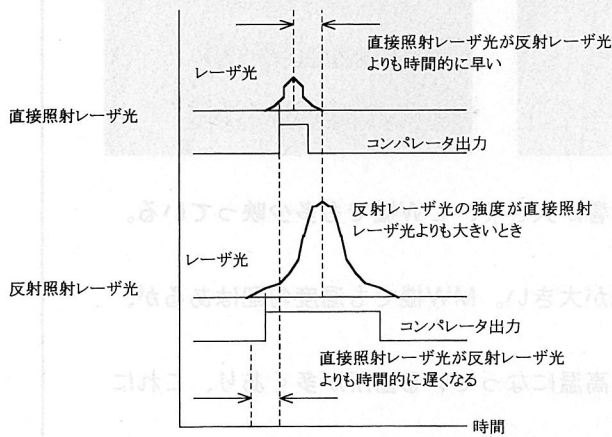


① 前処理 ② 汚れ、ひびの影響の除去 ③ 剥離抽出画像の作成

図3-17 剥離抽出のための画像処理の流れ



(a) 直接照射レーザー光と反射レーザー光を正確に判別できる場合



(b) 直接照射レーザー光と反射レーザー光を正確に判別できない場合

図 3-18 直接照射レーザー光と反射レーザー光の判別例

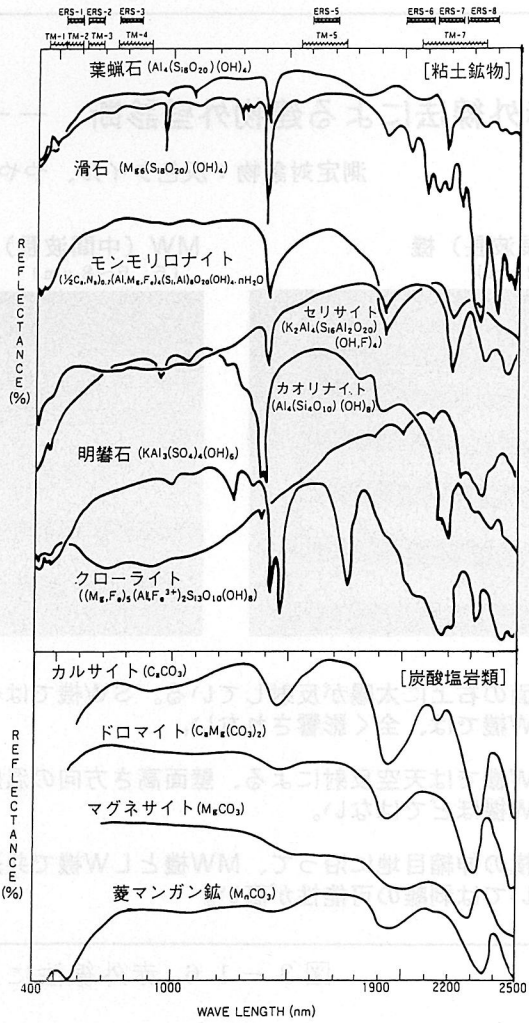


図 3-19 粘土鉱物と炭酸塩岩類のスペクトル特性

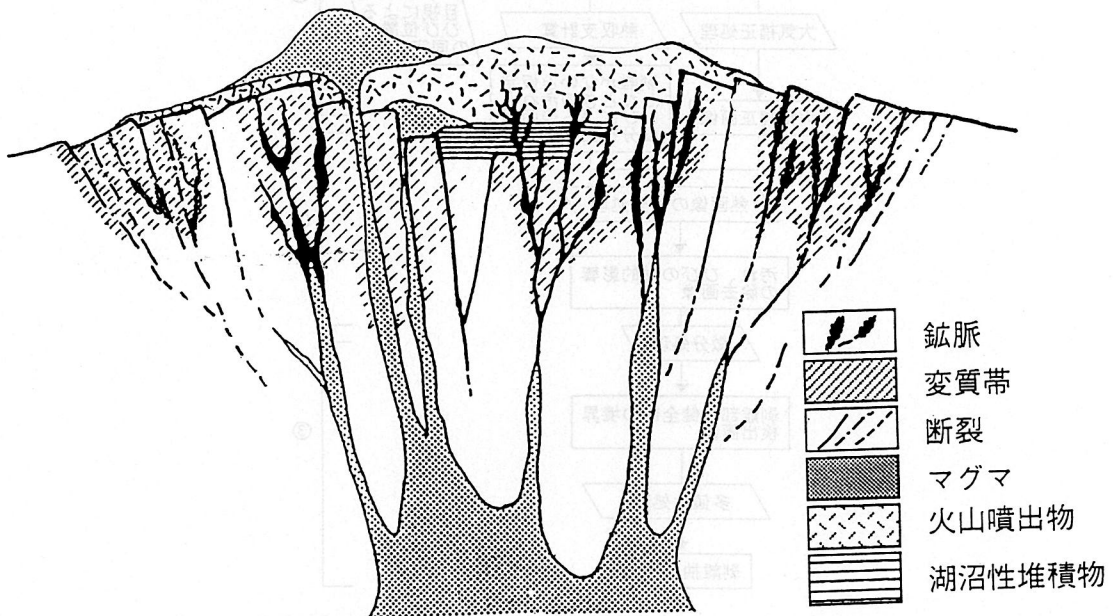
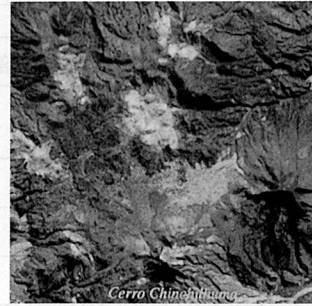


図 3-20 金鉱床胚胎場として火山性陥没構造モデル(久保田原図)



(A)



(B)



(C)

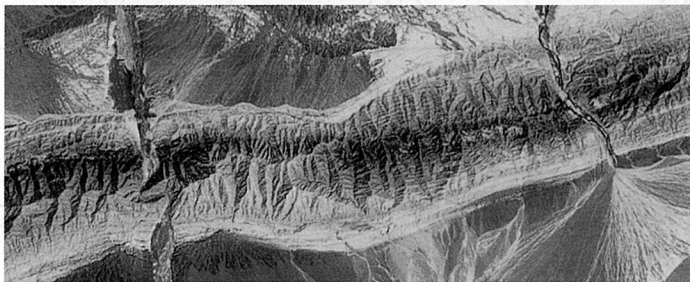
(A) フォールスカラー画像

(B) 比演算画像

Band2/1,3/2,5/8= B,G,R

(C) SPI 画像

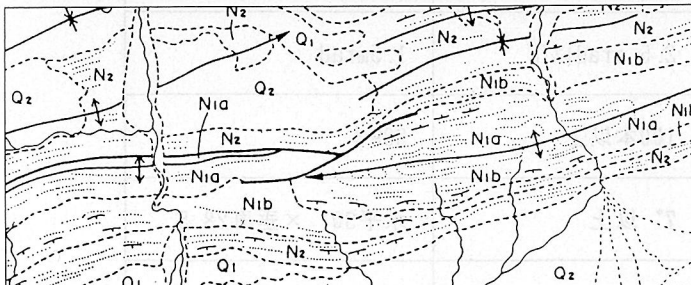
図 3 - 2 1 JERS-10PS画像による鉱物の強調処理  
(ボリビア、Cerro Chinchihuma)



(A) JERS-10PS バンド1:2:3= BGR



(B) JERS-10PS PC1:PC2:1/2= BGR



(C) 地質構造解析図

図 3 - 2 2 石こう層の強調処理による地質構造の抽出  
(中国タリム盆地)

表 3 - 1 像増倍管の性能

性能	像増倍管 (イメージインテンシファイア管)			
	第1世代 (カスケード型)	第2世代 (インハート型)	第2世代 (近接型)	第3世代 (近接型)
製品例	LD6011	LD6029	LD6033	MX-10160
光電面	マルチアルカリ	マルチアルカリ	マルチアルカリ	GaAs
有効径(mmφ)	25	25	18	18
感度(μA/lm)	175	240	240	1000
MCP	無し	有り	有り	有り
蛍光面 (材料)	P-20 (Zn, Cd)S:Ag	P-20 (Zn, Cd)S:Ag	P-20 (Zn, Cd)S:Ag	P-20 (Zn, Cd)S:Ag
光出射窓	ファイバー	ファイバー	ツイストファイバー	ツイストファイバー
ゲイン	35,000	50,000	12,000	20,000
解像度 (lp/mm)	25	25	25	36
寿命(H)	10,000	10,000	2,000	7,500

表 3 - 2 実験に使用した赤外線映像装置の基本性能

バンド	(A)	(B)	(C)
分光感度	7.8~13.9 μm	6.5~8.6 μm	2.7~5.7 μm
検出器	HgCdTe	HgCdTe	InSb
瞬時視野角	1.5 mrad	1.5 mrad	2.0 mrad
視野角	水平30° × 垂直25°	水平30° × 垂直25°	水平30° × 垂直25°
解像度	319 × 232	319 × 232	255 × 214
最小検知温度差	0.1°C	0.2°C	0.2°C
測定温度範囲	-50~2000°C	-50~2000°C	-20~2000°C

表 3 - 3 外壁診断に要求される赤外線映像装置の性能

	要求される性能 <sup>10)</sup>	建物外壁診断用装置 <sup>11)</sup>
最小検知温度差	0.1°C以下	0.1°C以下
瞬時視野	2.5 mrad以下	1.5mrad
走査線数	100本以上	239本
視野(標準)	7°以上	水平30° × 垂直28.5
温度幅	20°C以下	0.8~80°C(可変)
階調または色相	10以上	16~256(可変)

表 3 - 4 レーザ照射器の例

国名	型名	主要諸元(性能)	備考
アメリカ	G/VLLD	波長 1.06 $\mu$ m ビーム広がり角 0.15mrad RPF 20PPS	
イギリス	TYPE 306	波長 1.06 $\mu$ m ビーム広がり角 0.25mrad RPF 20PPS	
イスラエル	MOSP	波長 1.06 $\mu$ m ビーム広がり角 0.45mrad RPF 20PPS	
日本	87 式 (中 MAT)	波長 1.06 $\mu$ m パルス幅 <20nsec RPF 20PPS	

表 3 - 5 レーザ光検知器の例

国名	型名	主要諸元(性能)	備考
アメリカ	AN/AVR-2 <sup>(14)</sup>	視野:AZ:360°(センサ2個) 角度分解能:4象現表示	干渉計検知
アメリカ	LAHAWS <sup>(14)</sup>	波長:0.66~1.1 $\mu$ m 視野:AZ:360°	アレイ検知素子と 単検知素子併用
イギリス ノルウェー	RL1 <sup>(15)</sup>	波長:0.66~1.1 $\mu$ m 視野:AZ:360°,EL:-45°~90° 角度分解能:45°	単検知素子
ドイツ	COLDS <sup>(16)</sup>	波長:0.4~2 $\mu$ m 視野:AZ:360°,EL:±45° 角度分解能:AZ:±3°	単検知素子
スペイン	SEIDAL <sup>(14)</sup>	波長:1.06 $\mu$ m 視野:AZ:360°,EL:-25°~55° 角度分解能:±15°	単検知素子
南アフリカ	LWS-200 <sup>(14)</sup>	波長:0.6~1.9 $\mu$ m 視野:AZ:360°(センサ2個),EL:-40°~20° 角度分解能:±6°(rms)	単検知素子
日本	FV/90TK レーザ検知器	波長:1.06 $\mu$ m 視野:AZ:180°,EL:-7°~15° 角度分解能:30°	単検知素子
日本	TKBレーザ検知器 MBRSレーザ検知器	波長:1.06 $\mu$ m 視野:AZ:180°,EL:-7°~15° 角度分解能:30°	単検知素子

## 4. 構成要素技術 — 光源および光学系 —

### 4. 1 赤外線放射光源およびその応用

現在照明用の光源として蛍光灯、白熱電球、H I Dランプなどが使用されている。これらはいずれも電気エネルギーを電磁放射である光に変換し、そのうちの可視光を利用している。前記3光源の内、白熱電球、H I Dランプはそのプロセスにおいて電気エネルギーの多くを熱としてロスしている。そのロスを減少させるため、白熱電球の一種であるハロゲン電球では既に赤外反射膜が実用化され電気エネルギーの可視光への変換効率を向上させている。また、同様にH I Dランプでも同様の効果の有無が研究されている。

このような研究を行うためにはランプからの赤外域放射を測定できなくてはならない。以下に赤外域放射の測定法とその応用について報告する。

#### (1) 測定法

測定法の概略について記す。本方式は2つの測定を組み合わせた測定法である。

1) 積分球で380～850nm間を測定し値付けを行う<sup>1)</sup>。

測光した全光束と可視域の分光分布より380～760nm間の放射束(W)を求める。次に760～850nm間の放射束を可視域との分光分布より求める。

2) 赤外分光器で700～4000nm間を測定し値付けを行う。

赤外分光器(日本分光(株)SS-50)を用いて700～4000nm間を測定し、積分球と重複する部分(700～850nm)から700～4000nm間の放射束を求める。

次に赤外域の測定法について記す。赤外分光器SS-50の概略を図4-1に示す。

赤外域の分光測定は次のように行った。

1) 分光器に入力した光をチョッパで交流にする。

2) 高次カットフィルタで2次・3次光をカットする。

3) グレーティングで分光する。

4) 熱電対を用いて光出力を電圧に変える。

5) プリアンプで増幅する。

6) ロックインアンプで同期増幅する。ロックインアンプにはチョッパより同期信号を入力する。

7) パソコンに電圧を送信し、パソコン内で放射束を演算する。

#### (2) 供試ランプ

供試ランプの一覧を表4-1に示す。ランプ入力は全て400W一定である。

#### (3) 測定結果

図4-2～4に3種類のランプの400～2400nm間の放射束分布を示す。併せて表4-2にそれぞれのランプの放射効率百分率(放射量(W)/入力(W)×100)を示す。

表4-2において赤外域の波長域を2つに分けたのは、赤外反射膜の反射効率が高い

領域の760～1300nmと他の部分を区別するためである。図4-2～4と表4-2よりDy, Scランプは全入力25%程度が可視域に放射しており、赤外反射膜の放射効率の高い領域の760～1300nmでは10%以下の放射効率になっていることが分かる。

Snランプは近赤外域に26%放射しており可視域の放射量より多いことが分かる。また、760～1300nmに15%放射しており赤外反射膜の応用に期待が持てることを示唆している。

#### (4) 白熱電球の赤外放射

次に白熱電球での応用を紹介する。白熱電球は発熱体（フィラメント）を高温にすることによって放射する熱放射の内、可視光を利用した光源である。熱放射による分光エネルギー分布は紫外域から可視光域、赤外域まで連続的に分布しており、照明の用途に必要な可視光域のエネルギーは、一般電球の100Wクラスで入力エネルギーに対して約10%である。紫外域のエネルギーは無視できるほど微量であるが赤外域のエネルギーは入力エネルギーに対して70%以上であり、この赤外放射を直接利用する用途として、被照射物の加熱を目的とした各種ヒーター類があるが、照明用には不要なものであるため、発熱体に戻し再利用する赤外反射膜応用ランプの研究がなされてきた。

#### (5) 白熱電球における赤外線の利用

1) 被照射物の加熱 : 塗料の乾燥、焼き付け、暖房用、照明、暖房兼用  
医療用、保温用、複写機等のトナー着着用

2) 赤外エネルギーの再利用 : 赤外反射膜付きランプ

これらの赤外線利用の内、赤外反射膜付きランプについて概要を紹介する。

#### (6) 赤外反射膜応用ランプ

赤外反射膜応用ランプは赤外線の帰還によるエネルギーを再利用するという原理上、帰還率をよくするために小形化が必要であり、さらに小形化によるガラス球（バルブ）は温度上昇に耐える必要があるため、通常は石英ガラスまたは硬質ガラスを使用したハロゲン電球に適用されている。以下に赤外反射膜応用ハロゲン電球について説明する。

##### 1) 赤外反射膜の構造と形成方法

赤外反射膜の構造として、金属誘電体複合膜、導電性膜、誘電体多層膜が知られている。光学特性、耐熱性から現在は誘電体多層膜が採用されている。また形成方法では有機金属浸漬法、CVD法、スパッタリング法等が実用化されている。

##### 2) 赤外反射膜応用ハロゲン電球の構造

ハロゲン電球に赤外反射膜を応用した構造例を図4-5に示す。バルブ外面に形成した赤外反射膜により、フィラメントから放射された可視光は透過、赤外線は反射し、フィラメントに戻して効率を向上させる。

##### 3) ハロゲン電球への応用の現状

フィラメントから放射した赤外線は、赤外反射膜で反射されフィラメントに戻り、

一部が吸収され、フィラメント加熱に寄付する。フィラメントに戻り吸収され、再利用されるエネルギーは、

$$P_r = \int \frac{R_f R(\lambda) P_o(\lambda)}{1 - (1 - \epsilon) R(\lambda) R_f} d\lambda$$

$P_r$  : フィラメントに戻り吸収されるエネルギー  
 $P_o(\lambda)$  : フィラメントからの放射エネルギー  
 $R(\lambda)$  : 赤外反射膜の反射率  
 $\epsilon$  : フィラメントの放射率  
 $R_f$  : 形状係数

となる。フィラメントの加熱に再利用される  $P_r$  が決まれば、赤外反射膜応用ハロゲン電球の効率向上率は

$$E_u = \frac{\int_{vis} V(\lambda) T(\lambda) P_o(\lambda) d\lambda}{\int_{ir} (P_o(\lambda) - P_r(\lambda)) d\lambda + P_L} \times \frac{\int_{ir} P_o(\lambda) d\lambda + P_L}{\int_{vis} V(\lambda) P_o(\lambda) d\lambda}$$

$E_u$  : 効率向上率                       $P_L$  : 対流及び熱伝導などによる損失  
 $T(\lambda)$  : 赤外反射膜の透過率       $V(\lambda)$  : 比視感度

となる<sup>2)</sup>。

以上により効率向上率  $E_u$  は赤外反射膜の反射率  $R(\lambda)$ 、形状係数  $R_f$ 、赤外反射膜の透過率  $T(\lambda)$  に依存しており、形状係数はバルブ形状を円筒形から楕円形等の曲面形状へ、反射率・透過率は耐熱性を具備した多層化のための材質、形成方法の研究がなされ、効率向上率約50%を達成することが可能になってきている。

#### (7) まとめ

- 1) 積分球と赤外分光器の組合せでHIDランプの赤外域を測定し、絶対値で示した。
- 2) HIDランプにおいて赤外反射膜の応用はSnI<sub>2</sub>封入ランプに効果が期待できる。
- 3) 赤外反射膜の応用はハロゲン電球で進んであり、効率向上率約50%を達成することが可能になってきている。

(吉川和彦・木原邦彦)

## 4. 2 最近のガスレーザーと短波長化

### 4. 2. 1 はじめに

近赤外から中赤外波長域における高出力ガスレーザーの短波長化に関する研究を報告する。非線形光学結晶による短波長化のみではなく、レーザー媒質の励起および発振方法を最適化することで新しい応用を期待できる高効率・高出力短波長レーザーが得られている。

### 4. 2. 2 Ar/Xe原子レーザー

キセノン(Xe)原子レーザーはレーザーガスの希釈ガスを選択することでXe原子の電子励起状態が変化し、従って取り出せるレーザー波長も変化する。レーザー発振は上準位の5dから下準位の6pへの遷移で生じ複数のレーザー波長で発振する。図4-6にXe原子レーザーの準位図を示す。He/Xeの混合ガスでは2.03  $\mu\text{m}$ が高出力であるのに対してAr/Xeでは1.73  $\mu\text{m}$ の出力が増加する動作モードが存在する。1.73  $\mu\text{m}$ 遷移の下準位である6p[5/2]<sub>2</sub>の緩和速度定数においてArがHeよりも10倍大きいことがAr/Xeガスで1.73  $\mu\text{m}$ が高出力になる要因の一つである。

近年、ライダ(LIDAR: Light Detection And Ranging)に応用される高ピークパワーを有するパルスレーザーの波長特性としてヒトの目の網膜に達しないアイセーフ波長であることが必要とされている。このアイセーフ領域に大気中を低損失伝搬可能でもある1.4~2.6  $\mu\text{m}$ があり、その中でも1.5~1.8  $\mu\text{m}$ では特に許容されるレーザーフルエンスが高いので発振波長1.73  $\mu\text{m}$ の高輝度Ar/Xeレーザー開発の意義は大きい。

レーザー発振特性として、主放電回路にPFN(Pulse Forming Network)を用いて420 mJ/パルス、効率1.2%が得られている<sup>3)</sup>。1.73  $\mu\text{m}$ における発振には高密度励起が必要なのでパルスモードでのみ実現しているが100 kW/cm<sup>3</sup>を超す高密度励起では電子衝突励起による下準位数密度の増加によって1.73  $\mu\text{m}$ の小信号利得は低下する<sup>4)</sup>。

連続発振モードではRF(Radio Frequency)放電励起スラブ型レーザーの高出力化がHeriott-Watt大学のHallによって1995年に報告されている<sup>5)</sup>。このレーザー装置の特長は利得媒質をスラブ状にすることで冷却効果が高められ、ガス循環器による強制冷却装置を必要とせず小型化が可能であることにある。2.03, 2.65, 3.51  $\mu\text{m}$ の多波長発振で電気効率0.4%、最大連続出力5.5Wが得られている<sup>5)</sup>。図4-7にこのスラブ型Ar/Xeレーザーの出力特性を示した。

### 4. 2. 3 非線形光学結晶によるTEA CO<sub>2</sub>レーザーの第2高調波発生

TEA CO<sub>2</sub>レーザーは中赤外波長において高い尖頭値パワーのパルスが得られる高出力レーザーで、半導体スイッチを使用した全固体励起回路による高繰り返し動作で、平均出力キロワット動作が実現しており産業応用が期待される。特に9  $\mu\text{m}$ 帯レーザーの第2高調波は大気の窓である波長領域3~5  $\mu\text{m}$ に一致するのでLIDAR用光源として有望と言える。また、水素化アモルファスシリコンの加工に使用可能であることが実証されている<sup>6)</sup>。これまでに報告されているTEA CO<sub>2</sub>レーザーの第2高調波の変換効率の中で比較的大きな値を表4-3に示す。表4-3に示されている結晶の他に高効率な第2高調波発生が可能な非線形光学結晶としてCdGeAs<sub>2</sub>、Tl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub>が知られている。CdGeAs<sub>2</sub>では最大パワー変換効率21~26%、平均出力約1Wが報告されているものの低温動作(77K)が必要という点で他の光学結晶と比較して実用性に難がある<sup>7)</sup>。Tl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub>は最近の高品質化によって再び注目されてきた結晶

で、結晶成長の制御を行い格子欠陥が全くない結晶で 57%の変換効率が達成されているが詳しい実験条件は明らかではない<sup>8)</sup>。表 4-3 から ZnGeP<sub>2</sub> で高効率変換が可能であることが判るが基本波に対する吸収係数が比較的大きく、高エネルギー変換時に熱的問題が生じることが予想される。従って、AgGaSe<sub>2</sub> は基本波、2 倍波に吸収がなく、結晶端面の損傷閾値が大きく、位相整合許容角も大きいので、TEA CO<sub>2</sub> レーザの第 2 高調波発生に適している。表 4-3 に示したように、そのエネルギー変換効率は 56%まで達成されており<sup>10)</sup>、今後の結晶成長技術の進歩と入射強度の制限要因となっている無反射コーティングの強度の向上が望まれる。その他 TEA CO<sub>2</sub> レーザの第 2 高調波発生用として薄平板状半導体を積み重ね量子井戸を形成する非線形光学素子が注目される。現状ではその変換効率は極めて低い(3x10<sup>-4</sup>)<sup>13)</sup>、今後の発展が期待される。

#### 4. 2. 4 第一振動倍音遷移による HF 化学レーザの短波長化

フッ化水素 (HF) 化学レーザはフッ素ドナーと水素ドナーからなる混合ガスを点火し、発熱反応で生成した HF 励起分子から誘導放出光を得るレーザである。HF 分子の高い振動準位から低準位へカスケード発振するので多波長発振し、エネルギーの取り出し効率が極めて高い特長を持つ。図 4-8 は HF 分子の光学的遷移を示す模式図である。HF レーザの基本遷移波長は 2.5~3.3 μm であるから、その第 2 高調波は 1.3~1.6 μm となり、基本波では不可能なシリカ系光ファイバによる低損失パワー伝送が可能になりレーザ加工応用に期待できる。

非線形光学結晶を用いる短波長化では、基本波のレーザを高強度で結晶に入射させるので高エネルギー波長変換においては、結晶の光に対する耐光性が大きな問題となる。それとは対照的にレーザ利得媒質から直接短波長レーザを取り出すのが第一振動倍音遷移によるレーザ発振であり、大きな電気双極子モーメントを有する 2 原子分子の HF 化学レーザにおいて可能となる。このスキームでレーザ発振を実現するには極めて大きな利得を有する基本遷移の発振を抑制し、第一振動倍音遷移波長に対して Q 値の高い波長選択共振器を構成する必要がある。遷移確率を決定する励起 HF 分子の双極子モーメントの行列要素を比較すると、第一振動倍音遷移は基本遷移の 100 分の 1 と極めて小さい。1970 年代に原理実証が行われたものの、当時は高品質の光学製品が開発されていなかったため倍音発振スペクトルの確認にとどまっていた。

しかし、現在では米国において倍音遷移発振波長域の反射率を高く保持したまま基本遷移発振波長域の反射率を 0.3% まで抑えた波長選択性の高いミラーの製作が可能になった。その結果、CW 動作で高出力 HF 倍音レーザが実現されている。これまでの高出力化の研究結果を図 4-9 に示す。図 4-9 から、全出力パワー 14 kW のうち約 60% が倍音遷移の出力パワーとして得られることが判る<sup>14)</sup>。

一方、高繰り返し動作が可能な放電点火方式のパルスモード第一振動倍音遷移 HF レーザの研究では回転エネルギーの非平衡を取り入れたシミュレーションコードにおける最適動作条件下で F<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> 反応系で最大特性出力エネルギー 2.73 J/1 が期待できる計算結果が得られている<sup>15)</sup>。

HF 化学レーザ以外にこの第一振動倍音遷移のスキームによる短波長化がなされたレーザとして CO レーザがある。電子ビーム制御放電のパルスモードでパルス時間幅 1.5 ms、パルスエネルギー 4.4 J が電気効率 1% で実現しており、基本波の発振は完全に抑えられて

いる<sup>16)</sup>。

#### 4. 2. 5 おわりに

実用化が期待できるような赤外ガスレーザの短波長化の研究を報告した。赤外ガスレーザはコヒーレンスが高く、高効率発振の特長を有しており、短波長化技術の発展によって赤外レーザダイオード、固体レーザを中心とした波長変換技術では未だ達成困難な波長の高輝度・高出力コヒーレント光源が得られることが期待される。

(住吉哲実・小原 実)

#### 4. 3 LD 励起固体レーザ

##### 4. 3. 1 はじめに

良く知られる様にレーザは、1) レーザ媒質、2) 励起源と、3) 共振器より構成されている。2) の励起源に半導体レーザ(レーザダイオード(LD))光を、1) のレーザ媒質に固体を用いるのがLD励起固体レーザである。室温動作する高出力・高効率・長寿命のLDが1980年後半により急速に開発され、低価格化も進み、LD励起固体レーザが最近非常に注目される様になった<sup>17,18)</sup>。

固体レーザ材料の励起に用いられてる主要なLD(波長領域)はInGaAsP(1,300~1,500nm)、InGaAs(900~1,000nm)、AlGaAs(780~810nm)、AlGaInP(615~690nm)である。これらLDの動作波長域に強い吸収線を有する固体レーザ材料を用いて、アイセイフレーザ<sup>19)</sup>、波長可変レーザ、色中心レーザを含む波長1~3 $\mu$ m LD励起固体レーザが実現された<sup>17,18)</sup>。

LD励起固体レーザの大出力化も進み、パルス当たり10~20J、平均出力1~2kW、CW出力300Wが達成され、レーザ加工、ステッパー、ライダ<sup>20)</sup>等各分野への応用が本格化してきた。さらに、レーザ核融合用のLD励起固体レーザドライバ<sup>21)</sup>が提案されている<sup>17,18)</sup>。

ここでは、LD励起大出力固体レーザのa)原理、b)現状と問題点、c)開発の目標と手段、について述べることにする。

##### 4. 3. 2 半導体レーザ励起固体レーザの原理

図4-10には、エネルギー準位図によるLD励起固体レーザの動作原理が示されている。この図に従ってこのレーザの原理をながめてみる<sup>17,18)</sup>。従来、固体レーザの励起光源としてランプ光源が用いられてきたが、図4-10に示されている様に、固体レーザ媒質の吸収線との整合性は悪く、ランプ光エネルギーのほとんどが熱に変換される。従って、熱歪みのためにレーザ出力ビーム質が悪く、レンズを用いても良く絞りにくい欠点があった。しかしAlGaAs LDは例えば1054nm Nd:ガラスレーザの強い吸収線に一致した波長802nmで発振させることが出来るので、熱に変換される割合は小さく、従って、熱歪みも小さいので高繰り返し動作が可能である。この場合、量子ディフェクトは $802\text{nm}/1054\text{nm}=76\%$ であるから、残りの24%が熱に変換されるのみである。この利点のために、周波数超高安定度のLD励起固体レーザが開発されている。しかし、ここで注意すべきことは、この24%による熱によって固体レーザ媒質にやはり熱歪みが生じることである。このために、熱レンズや熱複屈折を補償することが必須となる。

もし、LD 励起されたレーザ上準位の蛍光寿命が長ければ（例えば、Nd:ガラス（LHG8）では 0.32 ms）、その蛍光寿命程度の間上準位にエネルギーが蓄積され、Q-スイッチにより大きなパルス出力を取り出すことが可能となる。このために長蛍光寿命のレーザ材料が望ましいことになる。

LD の波長をレーザ媒質の吸収線に合致させなければ、光励起が行われず、レーザ発振しないので、LD の選択によりおおまかな中心波長を選び、次に必要とする LD の精密な波長を指定するのが一般的である。使用に際しては、ペルティエ素子や水によって冷却したヒートシンクの温度調整によりレーザ媒質の吸収線に LD 波長を合致させる必要がある。パルス動作の AlGaAs LD では、例えば 200  $\mu$ s のパルス動作中に加熱のために波長チャープングが起り、波長が 2nm 程度長波側にシフトする。これに対する対策として、予め波長チャープング量に応じて短波長側に中心波長をシフトさせたりして、励起効率を上げることが行われている。

もし、レーザ媒質の吸収帯が広ければ、波長チャープングの影響が少なく、LD 製造の歩留りも向上することになる。例えば広い吸収帯を有する材料を励起波長と共に列挙すると、Nd:YVO<sub>4</sub> (807 $\pm$ 4 nm)、Nd:ガラス (802 $\pm$ 6.5 nm)、Nd:CNGG (808 $\pm$ 4.5 nm)、Yb:YAG (941 $\pm$ 9nm)、Fe、Ho:YGG (950 $\pm$ 50nm)、Ti:サファイア (500 $\pm$ 100 nm) 等がある。例えば、2.1  $\mu$ m Fe、Ho:YGG レーザの場合、吸収帯が広いために InGaAs LD (900-1,000nm) の温度調整は不要である。

なお、LD の発光領域が狭いため出力光は回折により 40 度も広がり、これをプリズムにより整形しレンズ系でレーザ媒質に絞り込むことが不可欠となる。近接して LD 励起する場合は問題は少ないが、特に 2 次元 LD アレイ光を絞り込むことは容易ではない。このために、レンズ系、ファイバー、バイナリーオプティックス、導波路、レンズダクト等が用いられている。今後は、集光効率の向上を図ることが課題となっている。側面励起の場合、LD 光はレーザ材料の表面近くで吸収されるので、冷却に対しては好都合となる場合が多い<sup>21)</sup>。表面励起の場合には、LD 光で励起されている領域に対するレーザ光の通過領域の割合（カップリング効率）を向上させることが必要となる<sup>21)</sup>。

#### 4. 3. 3 半導体レーザ励起固体レーザの現状と問題点

LD 励起大出力固体レーザの励起方式は図 4-11 にまとめた様に、(a) の端面励起と (b) ~ (e) の側面励起の 2 つに大別される<sup>21)</sup>。(a) の方式では、横モード体積に一致する様に端面より LD 励起するものであり、小型・高効率の小出力レーザに適している。吸収係数の大きな例えば Nd:YVO<sub>4</sub> を用いてマイクロチップレーザが実現されている。(b) のロッドを側面より対称性良く LD 励起する方式では比較的高出力 (CW で 300W 程度) まで達成されているが、熱歪み（熱レンズと熱複屈折）の問題が生じやすい。(c) のジグザグスラブを両面より励起する方式では、熱歪みがある程度補償されており、LD 励起 Nd:YAG レーザで平均出力 1~2kW まで達成されている。(d) は大口径ビームを増幅するのに適しているアクティブミラー方式である。最近、LD 表面励起 Yb:YAG レーザで CW 出力の高出力化が進んでいる<sup>23)</sup>。背面より 2 次元 LD アレイで励起すると、背面が LD 光で熱せられ伸びるために凹面鏡となる欠点が明らかにされている。この凹面鏡のそりを防ぐために両面より LD アレイで遠隔励起する方式 (e) が試みられており、大出力のレーザ核融合炉ドライバーとして開発研究が進められている<sup>21, 22, 24)</sup>。

LD 励起はランプ励起に替わるものとして注目されているが、既に述べた様に、熱歪みの問題より完全に開放されるものではない。従って、熱歪みに対する補償法の開発研究が不可欠である。例えば、図 4-12 はロッドを側面より対称性良く励起した Nd:YAG レーザ増幅器の配置を示している<sup>25)</sup>。90° 偏光面を旋回させる水晶旋光子により、熱複屈折を補償することができる<sup>26)</sup>。さらに、反射鏡部に位相共役鏡を併用する場合もある<sup>25)</sup>。熱レンズ効果の補償のために望遠鏡を共振器内の 90° 旋光子近くに挿入したり<sup>25)</sup>、折り返し凹面鏡の焦点距離を短く選り熱レンズに対して補償したり<sup>22)</sup>することも行われている。

LD 励起大出力固体レーザドライバー開発のための要素実験により、a) LD 励起 Nd:YAG 再生増幅器のエネルギー抽出効率<sup>21)</sup>は増幅器内損失を 8% と低くすると 50% にも達することが示され、しかも Lowdermilk-Murray の理論モデルが抽出効率の実験値と良く一致することが示されている<sup>21)</sup>。さらに b) 表面 LD 励起の Nd:YAG 主増幅のエネルギー抽出効率 (65%) は熱複屈折損失を考慮した Frantz-Nodvik の理論値に良く一致することが示めされた<sup>22)</sup>。従って、今後 LD 励起大出力固体レーザの開発に際して、上述の 2 つの理論は設計指針を与えるものである。なお、熱複屈折損失の評価のためにポラリメーターが新たに開発された<sup>22)</sup>が、今後高速画像処理化が必要である。

#### 4. 3. 4 半導体レーザ励起固体レーザの開発目標と開発手法

LD 励起大出力固体レーザドライバーの要素開発を目的として研究した LD 励起の Nd:YAG レーザシステム (図 4-13) の諸効率を例にとり<sup>22)</sup>、開発目標と手法について概略を記すことにする。

LD 励起固体レーザシステムの目標総合効率は表 4-4 に示す様に前置増幅器の再生増幅器で 2.5%、ディスク型主増幅器で 3.3% である。この中で特に重要なのは増幅器の性能を表すエネルギー抽出効率の実証である。再生増幅器においてはレーザ下準位の利得回復がない状態での最大のエネルギー抽出効率 50% を、またダブルパスのディスク型主増幅器においては飽和強度領域での高エネルギー抽出効果 80% (熱複屈折損失が無いとして) を実現した。なお、ディスク増幅器の LD アレイ光の励起集光系で 80% の伝達効率を確保することが高出力化に向けての重要なポイントである。

表中には比較のために将来の炉用ドライバーに必要な効率を示している。また、表 4-4 中の白抜き文字で示す効率は炉用ドライバーに対する目標値との格差が大きいものである。この表における効率の低下分について、a) 励起効率は LD の発光効率を 65% まで上げることで目標を達成でき、b) 励起システム効率は励起構成や増幅器構成を最適化して 76% まで上げることが可能である。以上の様に、何れも主な原因が分かっており、今後の技術的な改善を行って目標を達成できると期待される。

LD 励起大出力固体レーザの開発の際に、熱除去が次第に問題となってくる。このため、LD 励起による熱歪みを最小化するための構造設計、熱歪みの補償技術開発が重要な課題である。これらの問題に関してはシミュレーションコードを駆使して効率よく問題を解決することが望まれる。

吸収線幅の広いレーザ材料の開発も進められているが、限られた吸収線幅内に励起パルス中の波長チャープが納まる LD アレイの開発が不可欠である。例えば、Yb:S-FAP の励起には 1ms パルスが使われているが 1ms の間に 6nm も長波長側に波長がチャープし、励起効率は 76% に低下している<sup>24)</sup>。従って、より高効率の LD 水冷却法の開発が望まれる。

#### 4. 3. 5 まとめ

LD励起大出力固体レーザーを開発する際の問題点と今後の課題について慣性核融合用ドライバー開発を例にとり概略を述べた。大出力化を達成するためには熱効果の制御が不可欠であることを示した。この熱効果による損失を考慮すれば、理論的に出力値を予想できるようになった。今後は安価な高出力アレイの国産化<sup>27)</sup>に支えられて、段階的に、LD励起大出力固体レーザーの開発研究が推進されると考えられる。

(山中正宣)

### 4. 4 波長変換技術を用いた赤外レーザー光の発生

#### 4. 4. 1 はじめに

加工・医用・リモートセンシングなどの分野では、2～12 μmの赤外域で、強力なレーザー光源が求められており、特に光反応などの分光研究・レーザー同位体分離などの分野では波長同調性が要求されている。赤外域で直接発振する高出力レーザーとしては、CO<sub>2</sub>レーザーや化学レーザー、Tm, Ho, Erなどをドープした固体レーザーがあるが、いずれも限られた波長域でのみ発振するレーザーである。また、カラーセンターレーザー、半導体レーザーなど広い波長域で発振するレーザーは、出力が小さい・取扱いが難しいといった欠点を有している。このように中赤外から遠赤外においては、実用的な波長同調光源がないのが実状である。このようなレーザーの発振線のギャップをうめる方法として有力なのが非線形光学結晶を利用した波長変換である。

非線形波長変換とは、媒質に外部から光電界が入射した際に、媒質中に様々な周波数成分を持った分極が生じ、それが源となって入射光とは周波数の異なる光電界が放射される現象である。分極 $P$ は、光電界 $E$ 、比誘電率 $\epsilon_0$ および、物質に依存する感受率 $\chi^{(n)}$ により、

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} EE + \epsilon_0 \chi^{(3)} EEE + K \quad (1)$$

と表すことができる。右辺の第1項は線形項であり、第2項以降が非線形項を表している。2次の非線形性を用いた波長変換としては高調波発生、光パラメトリック発振器(OPO)、和/差周波発生などが、3次の非線形性を用いたものとしては、四波混合やラマン散乱などがあげられる。非線形光学媒質はレーザーの出現とともに研究・開発が進められ、多数の材料が見出されてきた。ここでは、主に非線形光学結晶を用いたOPOおよび高調波発生に焦点をあて、結晶の種類・報告例などに関して紹介する。

#### 4. 4. 2 高出力レーザー用非線形光学材料

波長変換素子として非線形光学結晶に要求される条件としては、大きな非線形光学定数・広い波長域・耐ダメージ性・位相整合性などが挙げられる。位相整合条件に関しては、角度や温度変動に対して出力が変動しにくい、すなわち角度許容角・温度許容角の大きい材料であることが望まれる。また、優れた特性を有していても、結晶成長や研磨・コーティングなどが難しい結晶では安価に良質の結晶を得ることはできない。

表4-5に様々な励起光波長に対して、一般に用いられている非線形光学結晶とそれにより発生される波長域を示した。また、図4-14にそれぞれの励起光源から得られる波長域を

示した。1  $\mu\text{m}$  の励起光を用いた場合、OPOおよび差周波発生が用いられる。非線形光学結晶としては、耐ダメージ性が良いという観点からBBO, KTPが一般的に用いられる。しかし、これらの結晶の透過波長域はBBOで2  $\mu\text{m}$ 、KTPで3  $\mu\text{m}$ 程度であり、3  $\mu\text{m}$ より長い波長域においては、LiNbO<sub>3</sub>やKTA, RTAなどの結晶が用いられる。2~3  $\mu\text{m}$ 光源を用いた波長変換法では、OPO、差周波発生が主流であり、非線形光学結晶としては、BBO, KTPなどの酸化物結晶に代わり、AgGaSe<sub>2</sub>, ZnGeP<sub>2</sub>などのカルコパイライト結晶が主に用いられる。これらの結晶により得られる波長域は高出力光を得る場合には10  $\mu\text{m}$ 程度、低出力なものでは20  $\mu\text{m}$ を超える波長光を発生させることができる。最後に、10  $\mu\text{m}$ 光源としてCO<sub>2</sub>レーザが挙げられる。波長変換法としては第2・3高調波発生が用いられる。結晶としてはAgGaSe<sub>2</sub>, ZnGeP<sub>2</sub>, TASなどのカルコパイライト結晶が主流である。

#### 4. 4. 3 光パラメトリック発振器 (OPO)

図4-15にOPO共振器の代表的な例を示す。共振器のミラー構成にはシグナル光とアイドラ光の2波長とも共振させるDRO (Doubly Resonant Oscillator)とシグナル光のみ共振させるSRO (Singly Resonant Oscillator)がある。DROは発振しきい値が低いという利点があるが、2波長共振させるため発振条件が安定しないという欠点がある。このため、DROは発振しきい値を下げる必要のあるcw-OPOに利用される。OPOの一般的な構成は2枚のミラーの間に非線形結晶を配置したものである。OPOの入射側には発振に必要な励起光強度を得るための集光光学系と励起レーザへのレーザ光の戻りを抑制するための光アイソレータが配置されるのが普通である。また、狭帯域発振が必要な場合は共振器内にエタロンなどの波長選択素子が挿入される。

OPOは、励起光の波長を2つの波長に分割するため、広い波長域で連続同調が可能である。シグナル光・アイドラ光の波長を変化させるためには、位相整合条件を媒質の屈折率を変えることで変化させればよい。その方法としては結晶の複屈折を利用した角度同調法や温度同調法がある。角度同調させる際には異常光の伝搬方向とポインティングベクトルの向きが一致せず、ウォークオフ効果が発生する。このため使用できる相互作用長に限界が生じる。高出力レーザ光を得るためにはウォークオフ効果が起こらないノンクリティカルな位相整合条件で用いる必要がある。

最初のOPOによる波長変換は1965年GiordmaineとMillerによりBa<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>を用い行われた<sup>28)</sup>。以来、可視域から赤外域の広い波長域で研究が行われていた。しかしながら、耐ダメージ性能の高い高品質の非線形光学結晶や共振器ミラーがなかったため、十分な性能が得られなかった。しかしながら、近年KTPやBBOが開発され、耐ダメージ性能の高い新しい結晶を用いたOPOの研究が世界的に始まり、Nd:YAGやそのSHG, THGで励起して変換効率が50%を超えるものが次々と発表され市販されるようになった。以下では、励起光源をNd:YAGレーザとしたものと波長2~3  $\mu\text{m}$ の固体レーザとしたものに関してトピックスを紹介する。

表4-6に紫外域から5  $\mu\text{m}$ 帯にかけて透明な波長域をもつ非線形光学結晶を示す。近赤外光の発生用としてはKTP, BBOやLBOが優れている。しかし、BBO, LBOは波長2  $\mu\text{m}$ 程度までしか対応できない。それに対して、KTPは角度許容幅、温度許容幅ともにBBO, LBOより優れ、また、波長4  $\mu\text{m}$ 程度までの赤外光の発生が可能であり、マンリーリミットとなる68%の高い変換効率で1.57  $\mu\text{m}$ 光が得られた報告もある<sup>29)</sup>。しかしながら、KTPは波長3  $\mu\text{m}$ を超えると吸収があり、高出力光発生には限界がある。そこで、近年研究が進んでいるのがKTPの同類体であるKTA, RTA, CTAなどの結晶<sup>30)</sup>である。これらの赤外域での吸収特

性を図 4-16 に示す。KTP が  $3 \mu\text{m}$  から吸収が始まっているのに対し、その他の結晶は  $3.6 \mu\text{m}$  付近まで吸収がなく、透過波長域が  $5 \mu\text{m}$  付近まで延びているのがわかる。一方、 $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{KNbO}_3$ ,  $\text{LiIO}_3$  といった結晶は  $4 \mu\text{m}$  付近まで吸収がないが、ダメージしきい値が低く高出力用としては問題があった。しかし、最近の報告では、励起光である Nd : YAG レーザ光のビームパターンをトップハット型にしたり、時間波形の立ち上がりを早くするなどの工夫により、 $\text{LiNbO}_3$  を用いても  $8 \text{W}$  の  $3.5 \mu\text{m}$  光出力が得られている<sup>31)</sup>。

表 4-7 に波長  $20 \mu\text{m}$  までの領域で透過波長域をもつ非線形光学結晶をまとめて示した。ほとんどの結晶は、1970 年代に発見されているが、吸収率が小さく、高品質のものはできなかった。しかし、近年の赤外光によるリモートセンシングなどの応用が期待されるようになると再び研究が盛んになり、 $\text{ZnGeP}_2$ ,  $\text{AgGaSe}_2$  の 2 種の結晶が吸収率も低く、比較的ダメージしきい値の高いものができるようになった。特に  $\text{ZnGeP}_2$  は大きな非線形性と高い熱伝導性のために、高繰り返しで平均出力の高い応用に適している。 $\text{ZnGeP}_2$  結晶は当初は  $2 \mu\text{m}$  付近においてバンドギャップ中のアクセプタの吸収が存在するため、 $2 \mu\text{m}$  レーザ励起には不向きとされていた。しかし、近年アニーリングや電子ビーム照射などにより、 $2 \mu\text{m}$  での吸収を  $0.26 \text{cm}^{-1}$  におさえることに成功し、 $4 \mu\text{m}$  出力として  $3 \text{W}$  が得られている<sup>30), 32)</sup>。一方  $\text{AgGaSe}_2$  や  $\text{AgGaS}_2$  は  $\text{ZnGeP}_2$  にくらべ吸収係数は低いものの熱伝導率が悪く結晶中での熱レンズ効果が問題となり、高繰り返し動作には不向きである。しかし、 $\text{ZnGeP}_2$  が  $8 \mu\text{m}$  を越えると吸収領域となるのに対し、 $\text{AgGaSe}_2$ ,  $\text{AgGaS}_2$  は  $10 \mu\text{m}$  以上に渡り吸収がない領域が存在するため、分光研究などを目的とした広波長域同調光源としては適している<sup>33)</sup>。

#### 4. 4. 4 高調波発生

高調波発生は Nd : YAG をベースとした可視・紫外光への変換が主流となって研究が進められており、KDP, KTP, BBO, LBO などの無機材料のみならず、有機材料を使用したものも盛んに研究が行われている。一方、高調波発生による中赤外光の発生は  $\text{CO}_2$  レーザを励起光としているものがほとんどである。 $\text{CO}_2$  レーザは、 $9 \sim 11 \mu\text{m}$  帯で連続出力、パルス出力ともに可能な高出力レーザであり、高調波発生による  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  帯の中赤外光発生の励起光源として適している。その第 2 高調波発生については、1965 年の Patel<sup>34)</sup> による報告以来、連続、パルスとも様々な報告がされている。非線形光学結晶としては、初期では、Te, Se, HgS,  $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ ,  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$  等が用いられたが、比較的小出力に止まっていた。1970 年代以降は、主に  $\text{AgGaS}_2$ ,  $\text{AgGaSe}_2$ ,  $\text{ZnGeP}_2$ ,  $\text{CdGeAs}_2$  等のカルコパイライト型の結晶が用いられるようになった。パルス光の第 2 高調波発生の場合、1991 年には  $\text{Tl}_3\text{AsSe}_3$  を用いて変換効率  $53\%$ <sup>35)</sup>、1993 年には  $\text{AgGaSe}_2$  によって同  $56\%$  という報告<sup>36)</sup> がされている。平均出力としては、1976 年に報告された  $77\text{K}$  に冷却された  $\text{CdGeAs}_2$  を用いた  $0.79\text{W}$  が最大であった<sup>37)</sup> が、1995 年に  $\text{AgGaSe}_2$  (室温動作) を用いて  $1\text{W}$  を越える出力が報告されている<sup>38)</sup>。cw 動作では、 $\text{CdGeAs}_2$  を用いての  $73\text{mW}$  が最大である<sup>39)</sup>。第 3 次以上の高次高調波発生については、高次の非線形光学効果を用いた場合、極めて変換効率が低いので、基本波や SH 光等の和周波混合によるカスケード構成が高出力化に適している。この方式で  $\text{Tl}_3\text{AsSe}_3$  による第 5 次高調波発生も報告されているが<sup>39)</sup>、効率が低く、中赤外域の光源として実用的なのは、第 3 高調波までと考えられる。 $\text{AgGaSe}_2$  を用いた第 3 高調波発生では、基本波からの変換効率  $30\%$  の報告もされている<sup>40)</sup>。変換光の出力は、主に非線形光学結晶の品質、および損傷しきい値の低さに制限されている。現状では、供給できる結晶メーカーも非常に限られているが、今後の高出力化には、より均一で吸収の少ない大型結晶の

育成と処理技術、および高い損傷閾値を得るための表面研磨およびコーティング技術の向上が必要である。また、波長変換を目的として、結晶へのダメージ、熱影響を与えにくい光特性（フラットトップビーム、短パルス波形）を有する高品質の励起レーザの開発も求められる。

#### 4. 4. 5 まとめ

赤外光発生用の非線形光学結晶に関して、主に固体レーザ励起のOPOおよびCO<sub>2</sub>レーザの高調波発生による中赤外光発生用の現状について紹介した。近年、より高性能な波長変換用の非線形光学結晶の開発が続いており、新たな波長域での小型高出力光源の実用化が進められるものと期待される。

(秋山靖裕・佐藤俊雄)

#### 4. 5 回折光学素子の光学系への応用<sup>41,42)</sup>

光の回折現象を利用した光学素子には、古くから分光器に用いられる回折格子(Diffraction Grating)や集光作用をもつフレネルゾーンプレート(FZP:Fresnel Zone Plate)などがよく知られている。また、近年のホログラフィック光学素子(HOE:Horographic Optical Element)やフォトリソグラフィ技術で作られるバイナリー光学素子(BOE:Binary Optical Element)も光の回折現象を利用した素子である。最近は、回折を利用した光学の分野を回折光学(Diffractive Optics)、また、回折光学素子を総称してDOEs(Diffractive Optical Elements)と呼ぶことが多くなってきた(図4-17)。

DOEが、最近、特に注目されるようになったのは、リソグラフィ技術・超精密加工技術の進展で、DOEの高性能化・小型化・機能の複合化・コスト削減のための量産化ができるようになってきたことによる。DOEは、主に米国で防衛・宇宙での赤外光学系への応用を目的に、日本では光ディスクヘッド光学系などの民需製品への応用を目的に開発が進められ、実用化されている。

##### (1) レンズ作用をもつ回折光学素子

レンズと同じように集光作用をもつ回折光学素子にフレネルゾーンプレート(FZP)がある(図4-18)。振幅型のゾーンプレートでは、焦点位置が複数存在し、+1次の焦点位置での入射光量に対する効率約10%( $1/\pi^2$ )である。ゾーンを図4-19のような位相型にすると回折効率が上がり、+1次の焦点位置での効率は約40%( $4/\pi^2$ )になる。

さらに効率を上げるには、i番目のゾーンの回折光が1番目のゾーンの回折光に対し位相が波長のi倍遅れて進行するようにゾーンを設定し、焦点に向かって球面波の一部として進行するように曲面形状を最適化する(図4-20)。この素子の入射光に対する集光効率は100%になる。このような曲面形状をした回折光学素子はキノフォーム(Kinoform)と呼ばれ、可視域の素子はガラスモールドやプラスチックの射出成形で作られ、赤外域の素子はダイヤモンドターニングによる切削加工により作られることが多い。ただし、集光効率が100%になるのは、1波長・1画角に対してだけであり、他の波長・画角に対しては、FZPと同様に多くの回折光を生じる。したがって、波長幅のある光を用いる光学系にDOEを適用する場合は、最適化されない波長から生じる多くの回折次数の光の影響を考慮しなければならない。

## (2) バイナリー光学素子

キノフォームのような自由曲面に近い形状を形成するのに、LSI（大規模集積回路）のリソグラフィ技術を転用しながら作製していく方法がある（図4-21）。原理的には、屈折レンズの波長の整数倍の光路長差に相当する部分を取り除いた形状にする（図4-22）。このようなリソグラフィ技術と、計算機によるパターン設計を用いて作製された回折光学素子をバイナリー光学素子（BOE）という。

BOEの形状はキノフォームのように曲面でなく、階段状になるため光の集光効率（回折効率）が低下する。マスクを転写する回数Mが多いほど形状は曲面に近づき、効率は高くなるが、マスクのゾーンの間隔が狭くなり、製造上の困難さは増加する。図4-23に量子化数（ $L=M^2$ ）と回折効率の関係を示す。

BOEのように平面基板上に作られた回折光学素子は、像面のある一点（例えば光軸上）に光を集光する目的には使えるが、画角（視野角）のある撮像光学系への適用は、基板が平面のままだと用途は限定される。

## (3) 光学系への応用例

### (a) 撮像光学系への応用例

DOEを撮像光学系に適用する場合、主に色収差の補正を目的として用いられることが多い。それは、DOEの用途を色収差の補正に限定すると、輪帯数の少ない製造し易い形状の設計ができるからである。DOEの波長に対する変化率は、通常のレンズより1桁以上もあり、符号も逆なので、通常のレンズと組み合わせると色収差の補正が容易にできる。

DOEを複雑な光学系の設計に自由に使えるようにするには、平面基板上の素子だけではなく、レンズの曲面上に回折機能をもたせる必要がある。図4-24cは使用波長帯域が $10\mu\text{m}$ 帯の赤外線用単レンズ（ $f=200\text{mm}$ ,  $F/1.6$ ）のキノフォームの例である。波長が長いのでゾーンの数は3つですみ、各ゾーンは異なった非球面形状をもち、材質はゲルマニウムで、ダイヤモンドターニングによるNC切削加工が可能である。図4-25に通常のレンズ（図4-24a, b）との軸上色収差の比較を示す。図4-26の例は $10\mu\text{m}$ 帯の赤外線望遠鏡の結像光学系の例で、DOEを用いることにより、通常の6枚構成の光学系を4枚で構成している。

この様に、DOEは光学系の構成要素数の削減を可能にするが、欠点として、波長幅のある光に対しては、多くの回折光が生じる。そのため、像面で結像光の周辺にバックグラウンド光が分布し、低周波のMTFが低下する。また、輪帯の境界での光の散乱も考えられるので、DOE光学系は、通常の光学系が達成できる結像性能を越えることはできない。しかし、DOEは今まで紹介してきた様に、要素数の削減・コストの低減・小型化を可能にし、また、設計によっては、ナルシサスの低減にも効果があるので、赤外線装置としての総合的観点から適用を検討すべきである。

### (b) マイクロオプティクスへの応用例

マイクロオプティクスとしてのDOEの応用は、ホログラムスキャナーをはじめ、CDプレーヤー用の光ヘッドなど多くの実用化がなされている。赤外での応用は、図4-27に示すようなBOEのマイクロレンズアレイが、Si、CdTeなどの基板上に作られ、アレイ検知器の集光効率を向上する目的に用いられている。

DOEの複合的な応用例として全回折形の焦電型赤外線センサーがある（図4-28）。このセンサーの回折形マイクロチョッパは、反射型のグレーティングで、印加電圧のオン・オフにより、グレーティングの厚さ方向の間隔が変化する。オン・オフで間隔が変化すると、反射光の位相が変化する。0次光と1次光が交互に発生する。1次の反射回折光は、マイクロレンズの有効径に入らず、0次の反射光のみが焦電センサーに集光し、印加電圧に

同期したチョッピング光となる。

(鈴木 等)

#### 4.6 補償光学系の原理とその応用

ここでは補償光学系の主要技術である形状可変鏡と波面検出法について述べると共に、様々な光学装置への応用例について概説する。

補償光学系の基本構成を図 4-29 に示す。入射光の波面歪みを波面検出器で検出し、形状可変鏡でミラー面の凹凸を制御し波面歪みを補正するものである。波面歪みの補正性能はストレール比(補正後の焦点強度と無歪時の焦点強度の比)で評価され、その上限は形状可変鏡の空間分解能で決まる。

##### 1) 形状可変鏡

形状可変鏡の構造は図 4-30 に示すように分割鏡と一体鏡に大別できる。分割鏡は駆動素子毎にミラーを設けたものを 2 次元的に配列したものであり、一体鏡は一枚の薄いミラーを複数の駆動素子で駆動するものである。分割鏡は制御制及びメンテナンス性には優れるが、補正効率及び駆動素子の高密度化の点で有利な一体鏡が現在では主流となっている。一体鏡の開発例としては、低膨張率のガラスを母材としミラー厚 1.5mm で 241 個の圧電素子を取付けた構造で、面精度  $0.04 \mu\text{m}$ 、応答周波数 1kHz の性能が得られている<sup>43)</sup>。また高出力レーザの波面補正を目的に、中空構造のミラーに冷却材を循環させ冷却する機能を持つ一体鏡も開発されている<sup>44)</sup>。

形状可変鏡の他の構造として、ミラー面の曲率分布を制御できるバイモルフミラーがある。バイモルフミラーは、互いに逆方向に分極した圧電素子を 2 枚貼り合わせたバイモルフ圧電素子をミラー裏面に複数個取り付けたものである。バイモルフ圧電素子に電圧を印可すると一方は伸び、他方は縮むため、全体として屈曲変位を起こす<sup>45)</sup>。有効径 30mm、素子数 13 のバイモルフミラーが開発されており<sup>46)</sup>、構造が単純で、比較的大きな曲率を得ることができる。

##### 2) 波面検出法

補償光学系の波面検出には様々な方式が提案されており、表 4-8 に代表的なものを示す。シャックハルトマン、シェアリング干渉、カーバチャーの各方式は波面検出器で光学的に検出し、マルチディザイア方式は光学的な波面検出器を設けず間接的に波面を検出するものである。

図 4-31 にシャックハルトマン方式<sup>47)</sup>の原理図を示す。レンズを 2 次元的に配列したマイクロレンズアレイに入射光を入力し、各レンズ焦点像を CCD で検出し、計算機処理にてその重心位置変位からレンズに入射された波面の傾きを算出する。通常、焦点像を検出する画素数  $16(4 \times 4)$  程度であり、像の光強度にもよるが画素巾の  $1/10$  程度の重心位置分解能が得られる。マイクロレンズの密度から波面の空間分解能が決まるが、 $300 \mu\text{m}$  の方形レンズ( $f=10\text{mm}$ )を  $30 \times 30$  配列したものが開発されている<sup>48)</sup>。

波面を干渉計測するには参照波面及び縞走査が不要なシェアリング干渉計が適しており、観測光を 2 つに分け  $x$ 、 $y$  方向のシェアリング干渉計を構成して波面傾きを検出する<sup>49)</sup>。このほか、光軸方向にずらし干渉させる方式や<sup>50)</sup>、回折格子を回転させ干渉像を変調することで検出速度を向上させた方式等<sup>51)</sup>が開発されている。

カーバチャー方式は波面の曲率分布を検出するものであり、観測光をレンズで結像すると焦点前後の強度分布の差が曲率分布に比例することを利用する<sup>52)</sup>。曲率を検出できることからバイモフルミラーと1対で使用されることが多い<sup>53)</sup>。

マルチディザイ方式は波面検出器を用いずに波面を間接的に検出するものであり<sup>54, 55)</sup>、その原理を図4-32に示す。レーザビームを形状可変鏡の駆動素子毎に異なる周波数で位相変調したとき、その領域のレーザ振幅は次式で与えられる。

$$U_m = A_m \cdot \exp[j\omega t + j(\phi_m + \phi \cdot \sin \omega_m t)] \quad (1)$$

ただし、 $A_m$  : レーザ強度

$\phi_m$  : レーザ位相

$\phi$  : 位相変調時の振幅

$\omega_m$  : 位相変調角周波数

レーザビームのレンズ焦点強度  $I_p$  には、次式に示すように位相変調信号  $I(m)$  が含まれる。

$$I_p = I_{DC} + \sum_{m=1}^N I(m) \cdot \sin \omega_m t + I_H \quad (2)$$

$$I(m) = k \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^N \sin(\phi_m - \phi_k) \quad (3)$$

ただし、 $I_{DC}$  : 直流成分

$I_H$  : 高周波成分

$k$  : 定数

$N$  : 駆動素子数

(2)式に示す  $I(m)$  は、位相変調した領域のレーザ位相  $\phi_m$  と他の領域のレーザ位相  $\phi_k$  との差の正弦関数に比例するため、全ての  $I(m)$  を検出すれば波面を間接的に検出できる。波面が平坦であれば全ての  $I(m)$  は零となるため、各駆動素子毎に  $I(m)$  を同期検波器で分離検出し、 $I(m)$  を独立に最小化する制御系を構成することで波面制御が可能となる。マルチディザイ方式では、形状可変鏡に高い応答性が求められる反面、波面検出用の光学系が不要で単純な制御系で構成できる点が特徴である。なお、マルチディザイ方式では  $2n\pi$  の位相差を検出できないため、波面の連続性から隣接する駆動素子間のレーザ位相差  $\pi$  以内と仮定し、 $\pi$  以上の場合には一方に  $2\pi$  を加算する制御法が開発されている<sup>56)</sup>。

### 3) ミラー面制御法

補償光学系の波面検出器は波面の傾きあるいは曲率分布を検出するため、形状可変鏡を制御するには波面の再構成演算が必要となる。検出値が波面の傾き、曲率のいずれの場合でも、以下に示す演算法から形状可変鏡の駆動量は決定できる。いま、波面を  $(\phi)$ 、検出値を  $(s)$  とすれば、次式の関係が成立する。

$$(s) = [B] \times (\phi) \quad (4)$$

ただし、 $[B]$  : 感度行列

一方、形状可変鏡のミラー面  $(\phi_M)$  と駆動電圧  $(a)$  には、次式の関係が成立する。

$$(\phi_M) = [D] \times (a) \quad (5)$$

ただし、 $[D]$  : 応答行列

(4)、(5)式より  $(\phi)$  と  $(\phi_M)$  が等しいとし、 $(a)$  について解けば次式が得られる<sup>57)</sup>。

$$(a) = ([B] \times [D])^{-1} \times (s) \quad (6)$$

いま  $(a)$  の要素数を  $M^2$  とすれば、波面傾きを検出する場合、 $(s)$  の要素数は  $2M(M-1)$  となり、(6)式は  $2M^3(M-1)$  回の積和演算となる。駆動素子数が増えると演算量も増大するため、処理の高速化が課題であり、アレイプロセッサを用いた回路構成が開発されている<sup>58)</sup>。

### 4) 天体望遠鏡への応用例

天体望遠鏡の分解能は、次式に示す光学開口Dと観測波長 $\lambda$ から決まる回折限界が上限となる。

$$\theta = 1.22 \cdot \lambda / D \quad (7)$$

ところが実際の分解能は、光学系の歪みの他大気ゆらぎによる波面歪みのために低下し、大気ゆらぎのコヒーレンス長 $r_0$ が見かけ上の開口Dとなる。 $r_0$ は観測波長及び気象条件により異なるが可視光で数十cm程度であり、開口数mの大型天体望遠鏡ではその影響は大きい。

そこで図4-33に示すように、天体望遠鏡で集光した光を補償光学系で波面補正した後、天体像を観測するシステムが開発されている。ヨーロッパ南天天文台のCOME-ON(チリ、開口3.6m)は<sup>59)</sup>、19素子の形状可変鏡と5×5配列のシャックハルトマン波面検出器の構成で、波長1.7 $\mu$ mで回折限界にほぼ近い0.12秒角の分解能が得られている。現在では、さらに素子数を向上させたシステムで近赤外域での波面補正が達成されている<sup>60)</sup>。この他ハワイ大学<sup>53)</sup>、日本の国立天文台においても開発が進められている<sup>65)</sup>。天体用のシステムでの課題は、可視光での補正を可能にするための高空間分解能化と観測天体の限界等級を上げるための光検出器の高感度化にある。また、より暗い天体を観測する目的で、観測天体と同視野の上空(90km)のナトリウム層にレーザービームを照射して人工的な星(レーザーガイドスター)を作り、その反射光から波面を推定し波面補正する技術も開発されている<sup>61)</sup>。

#### 5) レーザ共振器への応用

気体レーザーのビーム品質(空間コヒーレンス)は、共振器内部の気体密度の不均一性及び不純物などの混入により低下する。さらに高出力レーザーの場合には、気体中や出力窓での熱レンズ効果により低下する。図4-34にレーザー共振器に補償光学系を適用した例を示す。レーザー共振器の一方のミラーを形状可変鏡にし、共振器から出力されるレーザーの波面を検出し波面補正する。波面検出にはマルチディザイア方式を採用しており、28素子の形状可変鏡で波面補正した結果、ストレーラ比を50%程度向上できている<sup>62)</sup>。

レーザー慣性核融合に使用するような高出力ガラスレーザーでは、発振時に生じる熱によりガラスに屈折率分布が生じビームが歪む。このため、レーザーの発振間隔を短くすることが難しい。これを解決するため補償光学系の適用が検討されている<sup>48)</sup>。このように、高出力レーザー発振器も大きな応用分野のひとつである。

#### 6) レーザ同位体分離装置への応用

レーザー同位体分離装置とは、原子番号が同じで質量数が異なる同位体の特定のものをレーザーエネルギーを利用して分離抽出するものである。その代表的なものがレーザーウラン濃縮装置であり、天然ウランを加熱蒸発し、4波長のレーザービームを照射することにより、<sup>235</sup>Uのみを選択的にイオン化し抽出するものである<sup>63)</sup>。ウラン蒸気中を伝播させるレーザービームの伝播距離は100m以上と予想されており、蒸気による波面歪みが発生し伝播できなくなる恐れがある。米国ではこの対策として、5×5素子の形状可変鏡と4×8配列のシャックハルトマン波面検出器の補償光学系が開発されている<sup>64)</sup>。

(一ノ瀬祐治)

## 参考文献

- 1) 照明学会、照明工学、オーム社(1973).
- 2) J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 69 No. 10 (1985).
- 3) J. E. Tucker and B. L. Wexler, IEEE J. Quantum Electron. 26, 1647 (1990).
- 4) K. Komatsu, F. Kannari, and M. Obara, J. Appl. Phys. 71, 5347 (1992).
- 5) P. P. Vitruk, R. J. Morley, H. J. Baker, and D. R. Hall, Postdeadline papers on CLEO Pacific Rim '95, Makuhari Chiba, Japan, July 10-14, 1995 and Appl. Phys. Lett. 67, 1366 (1995).
- 6) T. Sumiyoshi, Y. Ninomiya, A. Shiratori, and M. Obara, Appl. Phys. Lett. 65, 2127 (1994).
- 7) N. Menyuk, G. W. Iseler, and A. Mooradin, Appl. Phys. Lett. 29, 422 (1976).
- 8) K. C. Yoo, R. P. Storrick, T. Henningsen, J. A. Spitznagel, and R. H. Hopkins, J. Crystal Growth 125, 208 (1992).
- 9) R. C. Eckardt, Y. X. Fan, and R. L. Byer, Appl. Phys. Lett. 47, 786 (1985).
- 10) D. A. Russell and R. Ebert, Appl. Opt. 32, 6638 (1993).
- 11) V. V. Badikov, V. B. Laptev, V. L. Panyutin, E. A. Ryabov, G. S. Shevyrdyaeva, and O. B. Shcherbina, Sov. J. Quantum Electron. 22, 722 (1992).
- 12) Yu. M. Andreev, V. Yu. Baranov, V. G. Voevodin, P. P. Geiko, A. I. Gribenyukov, S. V. Izyumov, S. M. Kozochkin, V. D. Pis'mennyi, Yu. A. Satov, and A. P. Strel'tsov, Sov. J. Quantum Electron. 17, 1435 (1987).
- 13) Z. Chen, D. Cui, M. Li, C. Jiang, J. Zhou, and G. Yang, Appl. Phys. Lett. 61, 2401 (1992).
- 14) W. A. Duncan, S. P. Patterson, B. R. Graves, J. L. Sollee, G. N. Yonehara, and J. P. Dering, Proc. SPIE 1871, 123 (1993).
- 15) S. Ashidate, T. Takashima, F. Kannari, and M. Obara, J. Appl. Phys. 70, 548 (1991).
- 16) A. P. Napartovich, A. D. Belykh, V. A. Gurashvily, I. V. Kochetov, A. K. Kurnosov, V. M. Putilin, and N. G. Turkin, Proc. SPIE 2117, 136 (1994).
- 17) 山中(正): レーザ研究 21, 850(1993).
- 18) 山中(正): 関大工技研・資源エネルギー講演集 XIII 15(1995).
- 19) M. Doshida, K. Teraguchi and M. Obara: IEEE J. Quantum Electron. 31(1995) 910.
- 20) H. Kubomura, H. Imoto, Y. Hatsuda and N. Moribe: LEOS'92 Conf. Proc. (1992) EOS/SSLT2.2.
- 21) 内藤: 大阪大学博士(工学)論文(1993).
- 22) 近江: 大阪大学博士(工学)論文(1995).
- 23) U. Brauch, A. Giesen, M. Karszewski, Chr. Stewen and A. Voss: Opt. Lett. 20, 713 (1995).
- 24) C. D. Marshall, S. A. Payne, C. D. Orth, H. T. Powell and W. F. Krupke: 12th Int. Conf. LIRPP, Osaka (1995) No. Tu I-3.
- 25) W. Koechner: Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag, 4th Ed. (1996).
- 26) H. Kiriya, M. Ohmi, M. Yamanaka, Y. Izawa, T. Yamanaka, S. Nakai and C.

- Yamanaka: CLEO/Pacific Rim'95, Makuhari (1995) No.Th P2 ; 桐山、山中(正) : レーザ研究 24、343(1996).
- 27) 菅、神崎、宮島、伊藤、晝馬、山中(正)、近江、桐山、中井 : レーザ研究 23、541(1995).
  - 28) J. A. Giordmaine and R. C. Miller, Phys. Rev. Lett. 14, 973 (1965).
  - 29) Stults et al., OSA Advanced Solid State Lasers Meeting, 1994 Paper #PD11.
  - 30) F.K.Hopkins, Laser Focus World 1995, p.87.
  - 31) Englander et al., OSA Advanced Solid State Lasers Meeting, 1994 Paper #PD2.
  - 32) M.G.Knights et al., OSA Advanced Solid State Lasers Meeting, 1994 Paper #AWD4.
  - 33) Simon et al., Laser Focus World 1994, p.99.
  - 34) C.K.N.Patel, Phys.Rev.Lett. 15, 1027(1965).
  - 35) D.R.Shgre, Appl.Phys. B52, 367(1991).
  - 36) D.A.Russll et al., Appl.Opt. 32, 6638(1993).
  - 37) N.Menyuk et al., Appl.Phys.Lett. 29, 422(1976).
  - 38) H.Harasaki et al., CLEO'95, Ctu03.
  - 39) R.C.Y.Auyeung et al., Appl.Phys.B 48, 293(1989).
  - 40) 加藤冽、防衛技術ジャーナル, 13, 26(1993).
  - 41) C.W.Chen and J.S.Anderson : Diffraction and Miniaturized Optics, ed. S.H.Lee, SPIE Vol.CR49 (1993).
  - 42) 塩野照弘, 上田路人, 伊藤達男, 横山和夫 : “赤外用回折光学系”, 光設計研究会機関誌, No.9 (1996)p30-36.
  - 43) E.H.Anderson, D.M.Moore and J.L.Fanson : “Continuous facesheet low voltage deformable mirrors”, Opt. Eng., 29 (1990) 1191-1198.
  - 44) D.Kittell and C.L.Fiandra : “Cooled Deformable Mirror”, Proc. SPIE, 1543, (1991) 101-106.
  - 45) 内野研二 : 圧電/電歪アクチュエータ、第1版 (森北出版、1986) pp.82-84
  - 46) P.Jagourel and J.P.Gaffard : “Adaptive Optics Components in laserdot”, Proc. SPIE, 1543, (1991) 76-86.
  - 47) R.V.Shack and B.C.Platt : “Production and Use of a Lenticular Hartmann Screen”, J.Opt.Soc.Am., 61 (1971) 656-661.
  - 48) 実野孝久、伊根栄、中塚正大、加藤義章、中井定雄 : “シャック・ハルトマン計測と核融合レーザーにおけるアダプティブ光学系”、電気学会光・量子デバイス研究会資料、(1994) 14-19.
  - 49) J.W.Hardy, J.E.Lefebvre and C.L.Koliopoulos : “Real-time atmospheric compensation”, J.Opt.Soc.Am., 67 (1977) 360-369.
  - 50) C.L.koliopoulos : “Radial grating lateral shear heterodyne interferometer”, Appl.Opt. 19 (1980) 1523-1528.
  - 51) B.A.Horwitz : “Multiplex techniques for real-time shearing interferometry”, Opt.Engr., 29 (1990) 1223-1232.
  - 52) F.Roddier, C.Roddier and N.Roddier : “Curvature Sensing; A new Wave-front Sensing Methods”, Proc. SPIE, 976 (1988) 203-209.
  - 53) J.E.Graves and D.L.Mckenna : “The University of Hawaii adaptive optics system: III The Wavefront Curvature Sensor”, Proc. 1542 (1991) 262-272.

- 54) T. R. O'Meara: "The multidither principle in adaptive optics", J. Opt. Soc. Am., 67 (1977) 306-315.
- 55) 一ノ瀬祐治、川端正弘、道口由博: "マルチデザイナー方式補償光学系における波面制御性の解析及びシミュレーション結果"、光学、21 (1992) 714-719.
- 56) 一ノ瀬祐治: "補償光学系用一体型形状可変鏡の開発"、攪乱媒質中の波動伝播と補償光学研究会、(国立天文台、1993) 225-230.
- 57) R. K. Tyson: "Principle of Adaptive Optics", (ACADEMIC PRESS, 1991) pp. 240-255.
- 58) L. Cuellar, P. Johnson and D. G. Sander: "Performance tests of a 1500 degree-freedom adaptive optics system for atmospheric compensation", Proc. SPIE, 1542, (1991) 468-476.
- 59) F. Merkle, G. Gehring, F. Rigaut, P. Lena, G. Rousset, J. C. Fontanella and J. P. Gaffard: "Adaptive optics system tests at the ESO 3.6m telescope", Proc. SPIE, 1542, (1991) 308-318.
- 60) 高見英樹: "アダプティブ光学による光ビーム制御の現状(天文学への応用)"、精密工学会誌、60、(1994) 1091-1096.
- 61) G. P. Graham: "Making Star to See Stars; DOD Adaptive Optics Work is Declassified", Phys. Today, 45, 4, (1992) 18-22.
- 62) K. E. Oughstun, J. M. Spinhirne and D. Anafi: "Intracavity adaptive optics. 4; Compensation of theory and experiment", Appl. Opt. 23 (1984) 1529-1541.
- 63) 中井洋太、藤田尚徳、濱田博義、島崎善広、矢戸弓雄、岸本洋一郎、笹尾信之: "レーザー法ウラン濃縮の現状"、日本原子力学会誌、35 (1993) 280-285.
- 64) J. T. Salmon, E. S. Bliss, W. Long, E. L. Orham, R. W. Presta, C. D. Swift and R. S. Ward: "Real-time wavefront correction system using a zonal deformable mirror and a Hartmann sensor", Proc. SPIE, 1542, (1991) 459-467.
- 65) 高見英樹、高遠徳尚、大坪政司、神沢富雄、鎌田有紀子、中島浩二、家正則: "すばる望遠鏡用補償光学系の閉ループ実験による性能評価"、光学連合シンポ、日本光学会、7pF02 (1996).

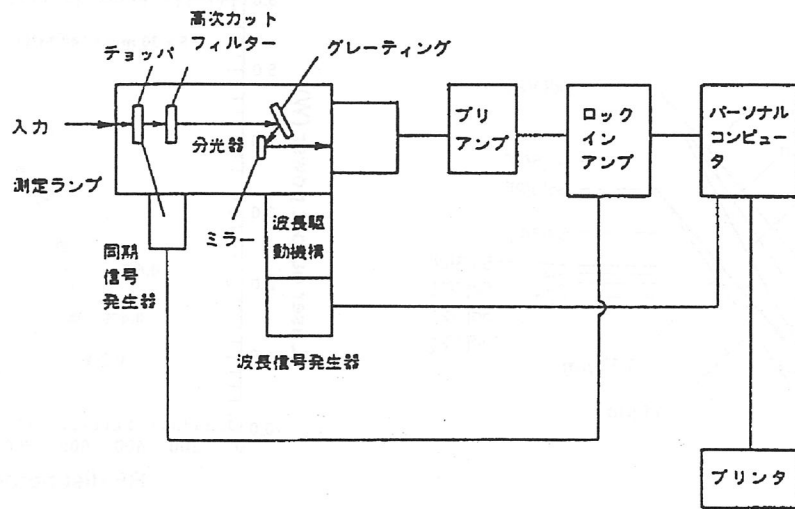


図 4-1 SS-50 の概略図

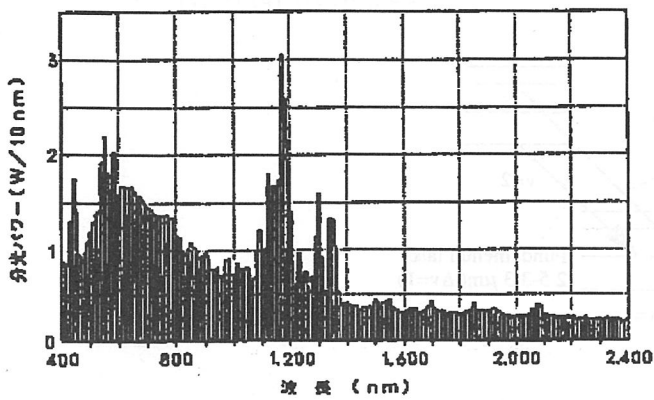


図 4-2 Sn ランプの分光分布

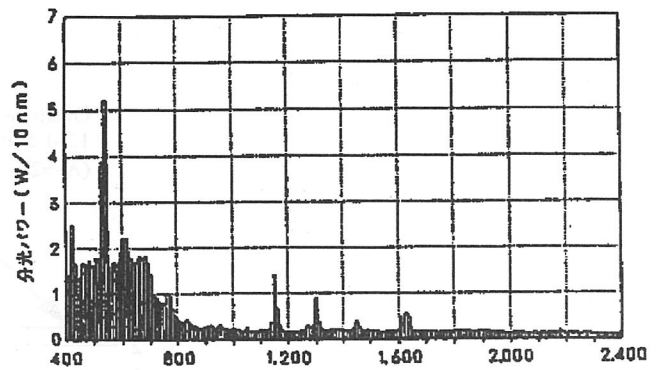


図 4-3 Dy ランプの分光分布

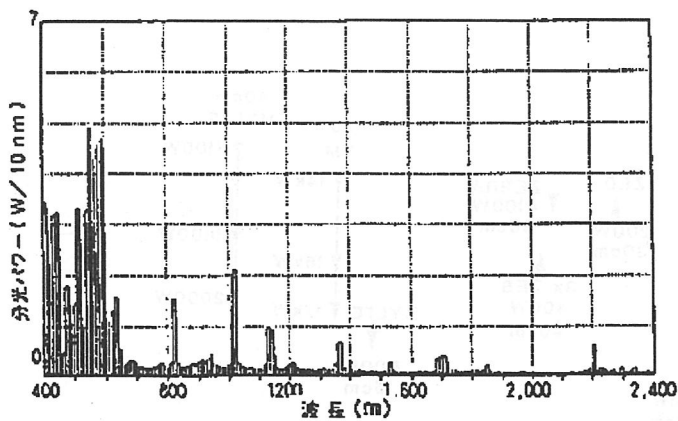


図 4-4 Sc ランプの分光分布

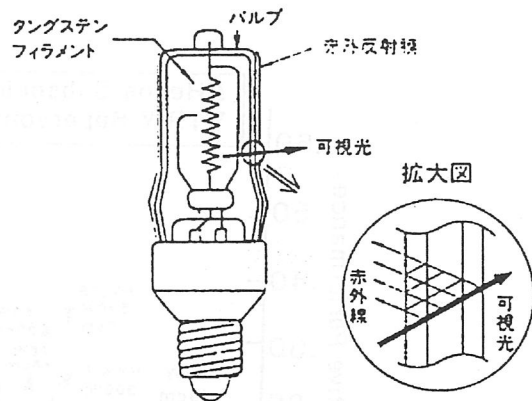


図 4-5 赤外線反射膜つきハロゲン電球の原理と構造

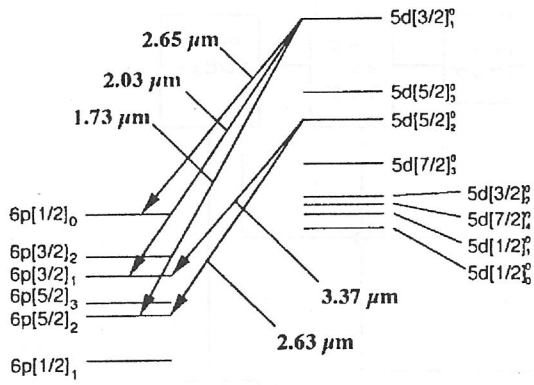


図 4-6 キセノン原子レーザーのエネルギー準位図<sup>4)</sup>

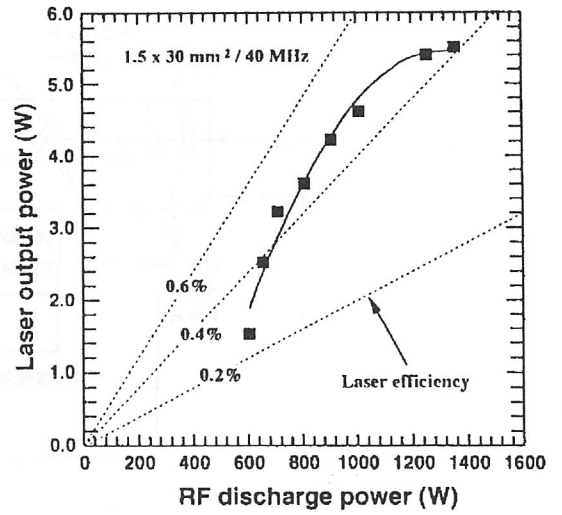


図 4-7 複合不安定共振器からのレーザー出力の取り出し<sup>5)</sup>

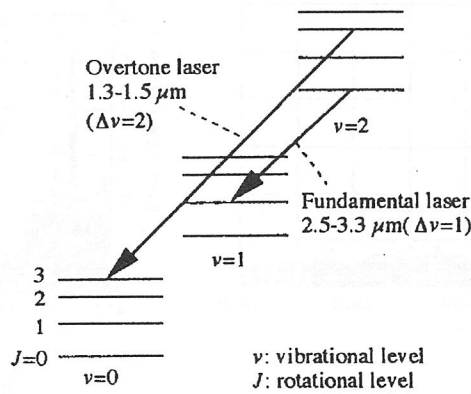


図 4-8 基本および第 1 倍音遷移の概略図

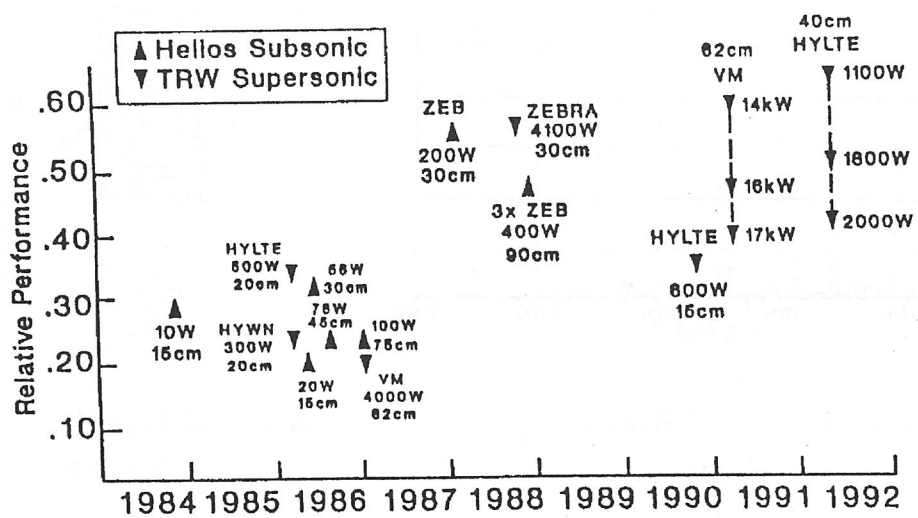


図 4-9 倍音 HF レーザ特性の発展に関する年譜<sup>14)</sup>

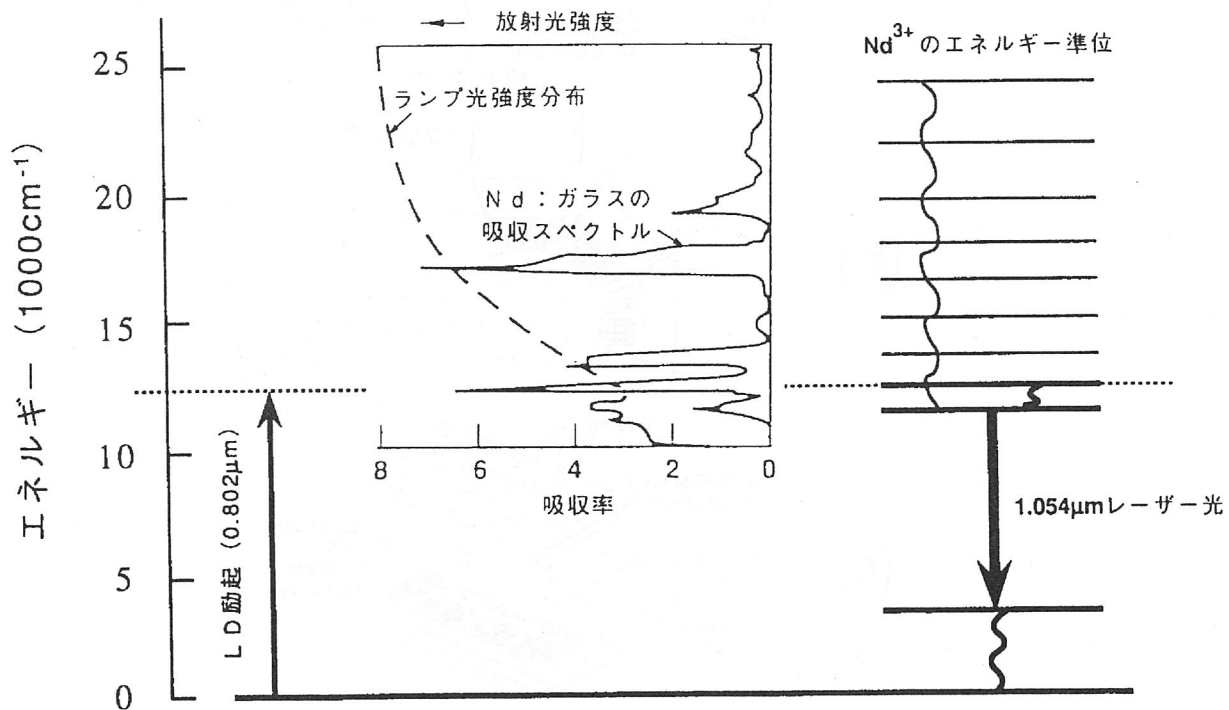


図 4-10 Nd:ガラスの吸収スペクトルとランプスペクトル及びLDアレイ光との整合性.

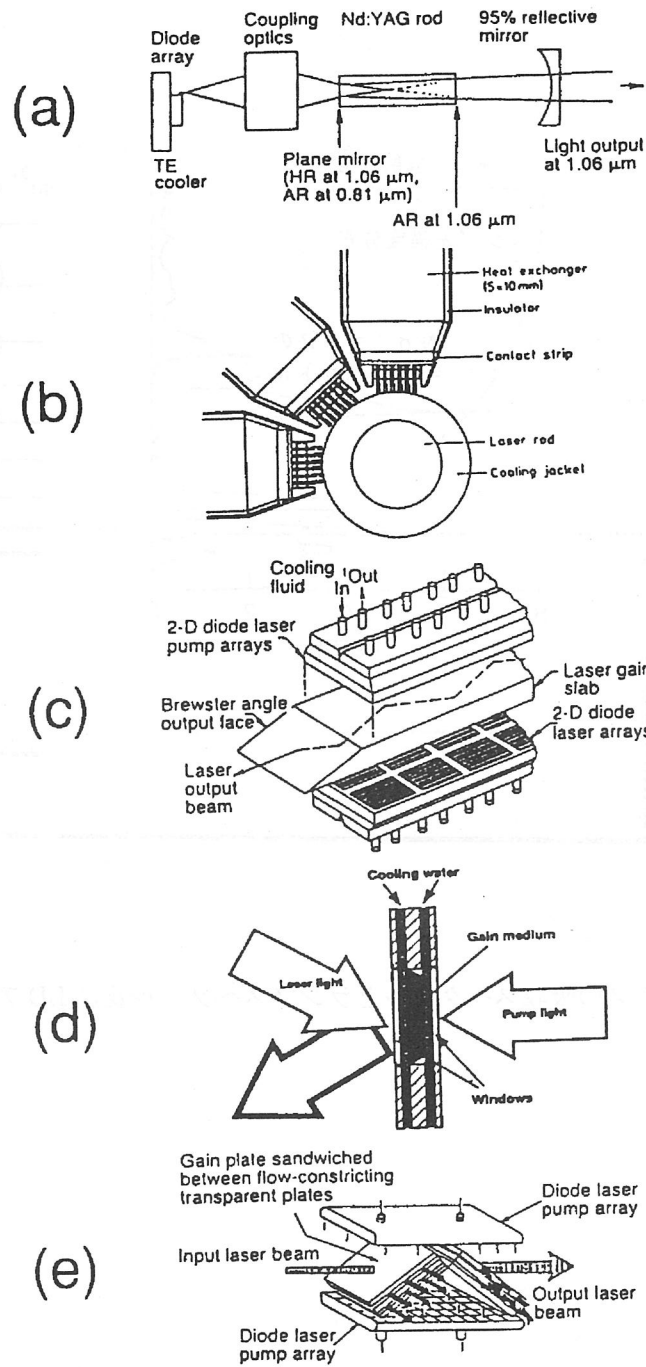


図 4-11 LD 励起大出力固体レーザーの励起方式.

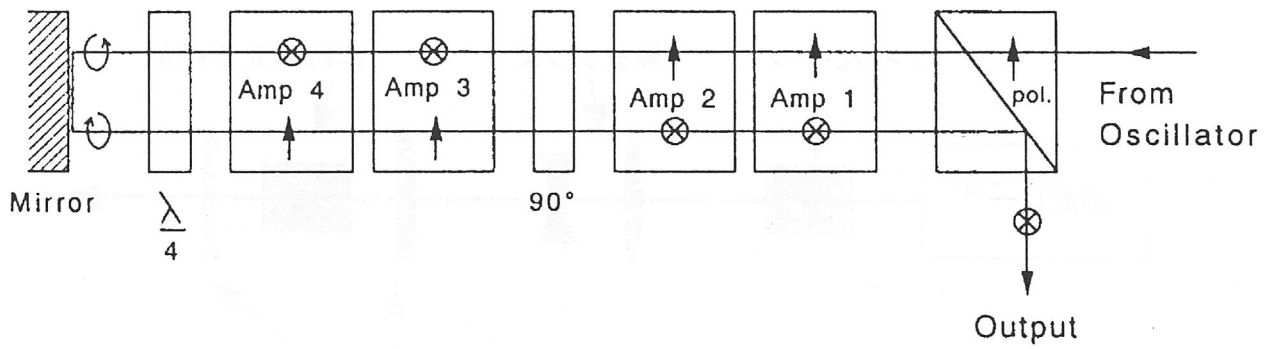


図 4-12 側面对称 LD 励起の固体レーザー増幅器における 90° 旋光子を用いた熱複屈折補償法.<sup>25)</sup>

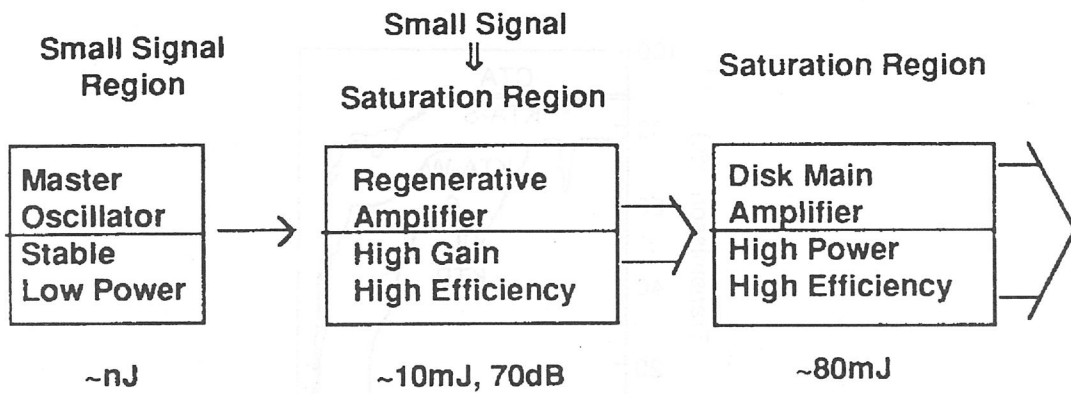


図 4-13 LD 励起 Nd:YAG レーザーシステムの構成.<sup>22)</sup>

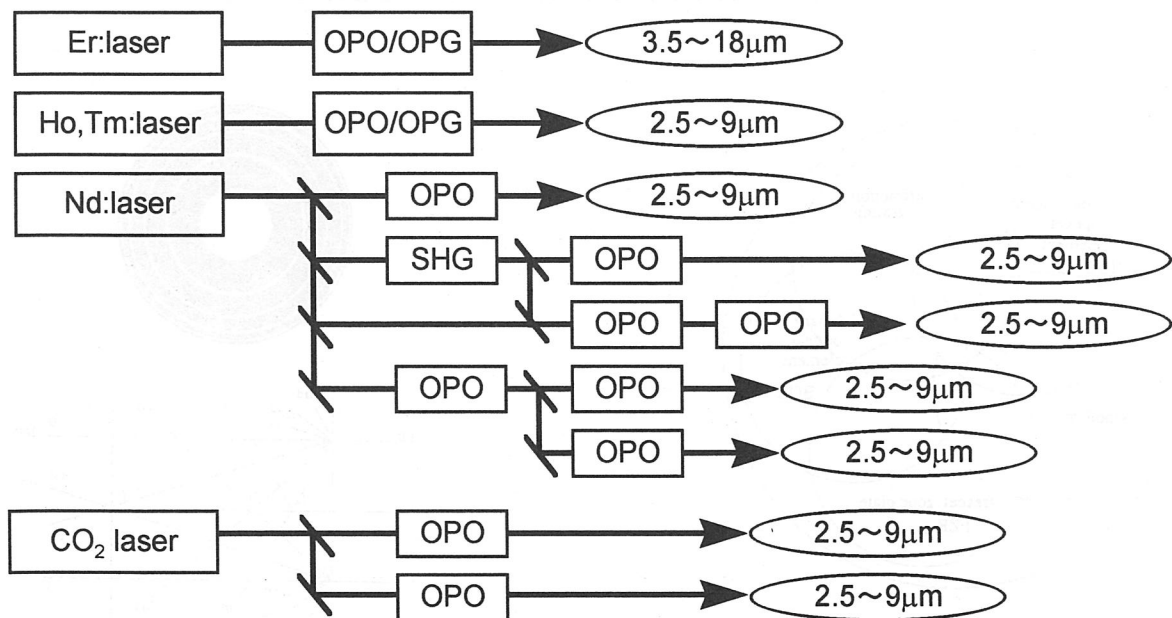


図 4-14 波長変換の種類

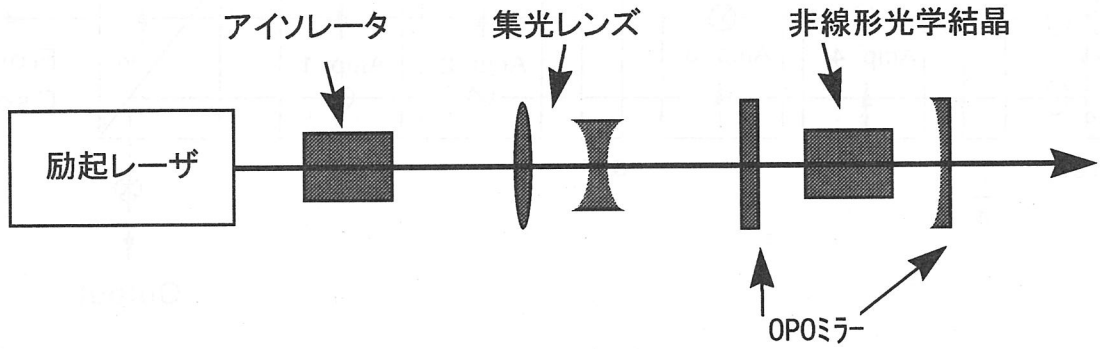


図 4-15 OPO構成例

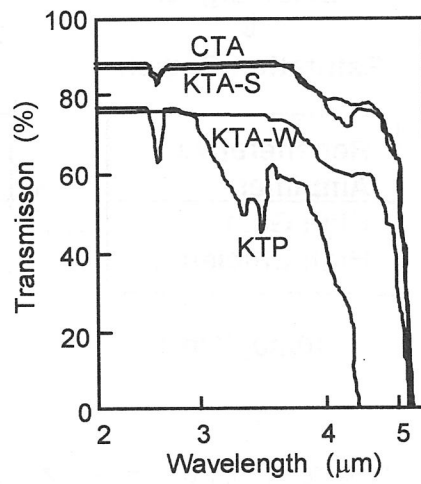


図 4-16 KTP, CTA, KTAの透過特性比較

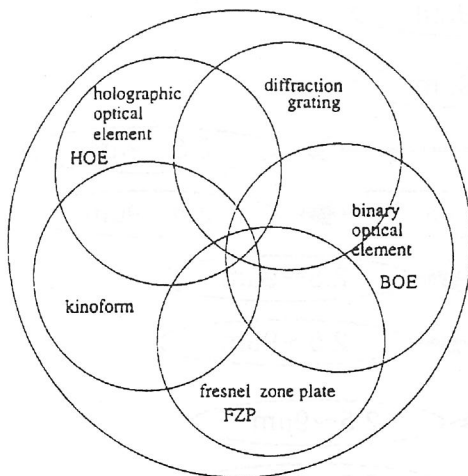


図 4-17 Diffractive Optics

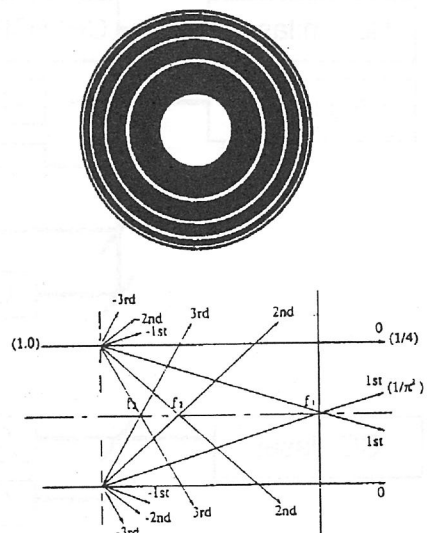


図 4-18 振幅型FZP

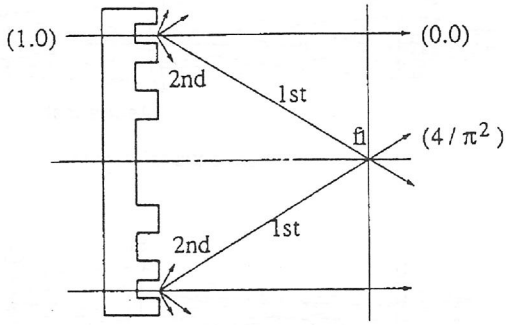


図 4-19 位相型 F Z P

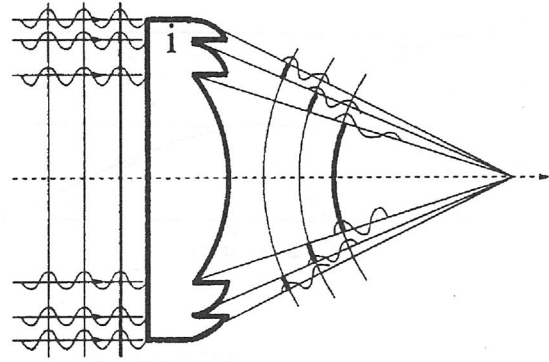


図 4-20 キノフォーム

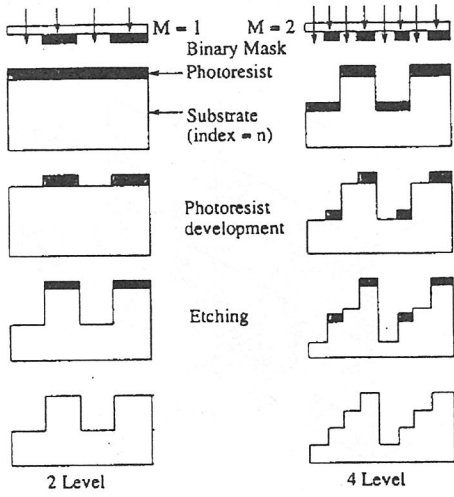


図 4-21 BOEの製作法

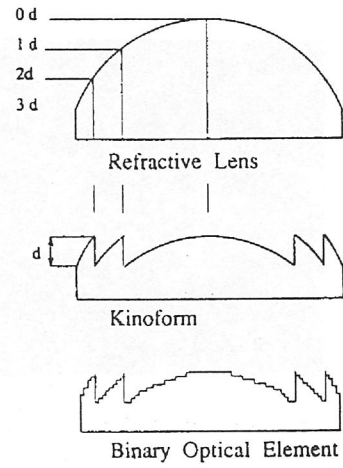


図 4-22 BOEの形状

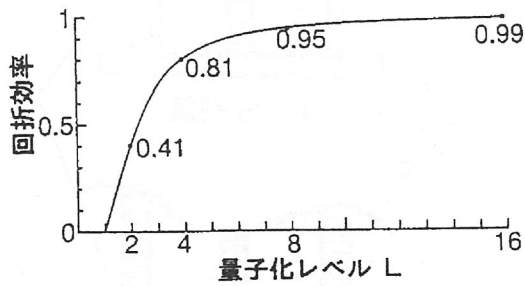


図 4-23 バイナリーレンズの回折効率

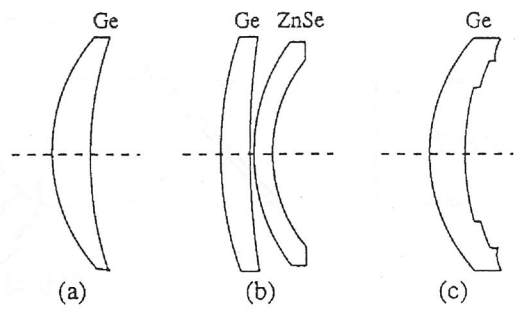


図 4-24 単レンズのDOE

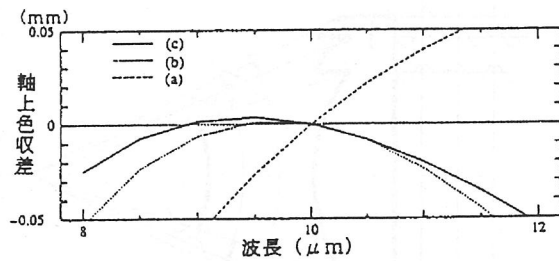
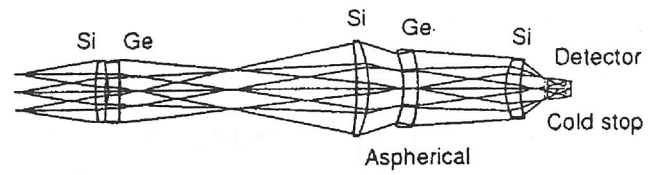
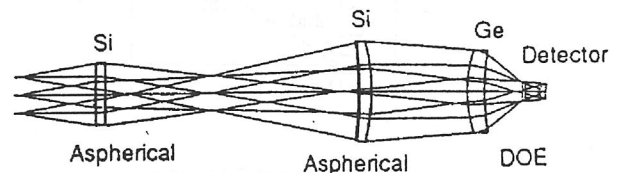


図 4-25 DOEの色収差



a. Conventional design



b. DOE design

図 4-26 DOE光学系の設計例

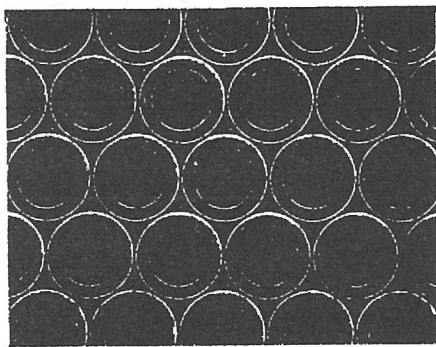


図 4-27 マイクロレンズアレイ

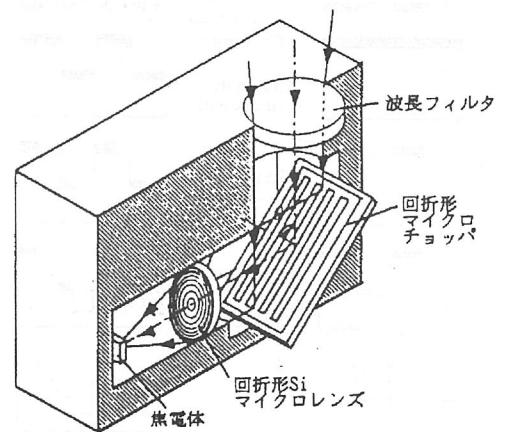


図 4-28 焦電型赤外線センサー

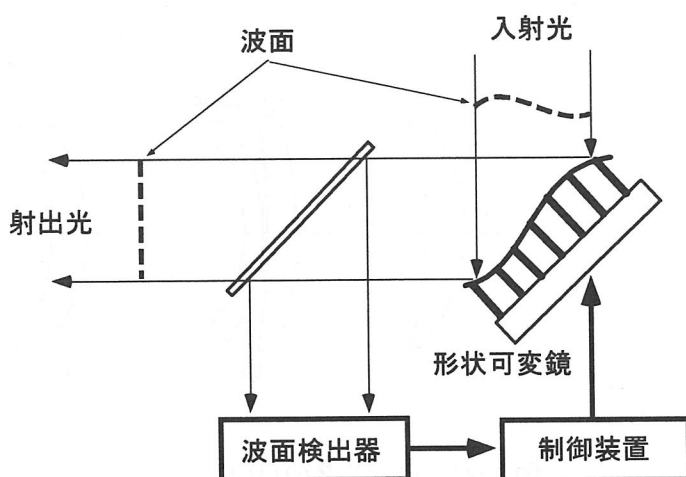


図 4-29 補償光学系の構成

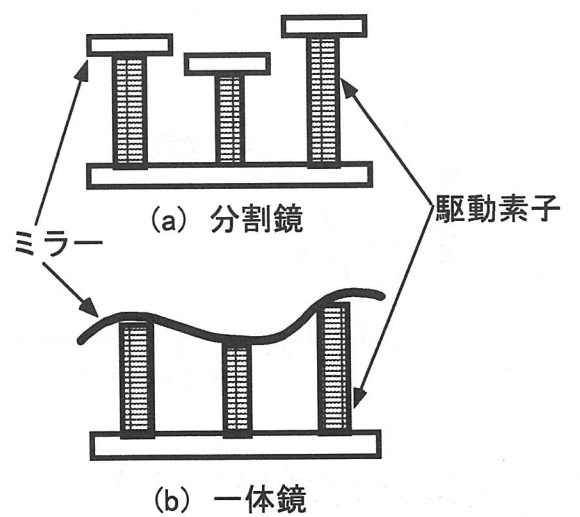


図 4-30 形状可変鏡の構造

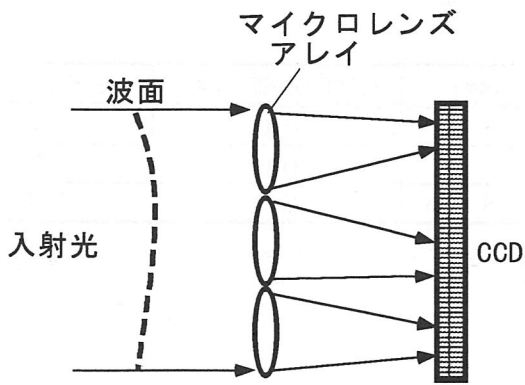


図 4-31 シャックハルトマン方式の原理

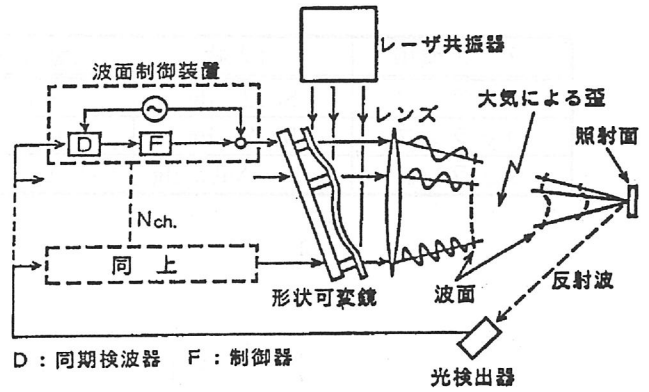


図 4-32 マルチデザイナー方式の原理

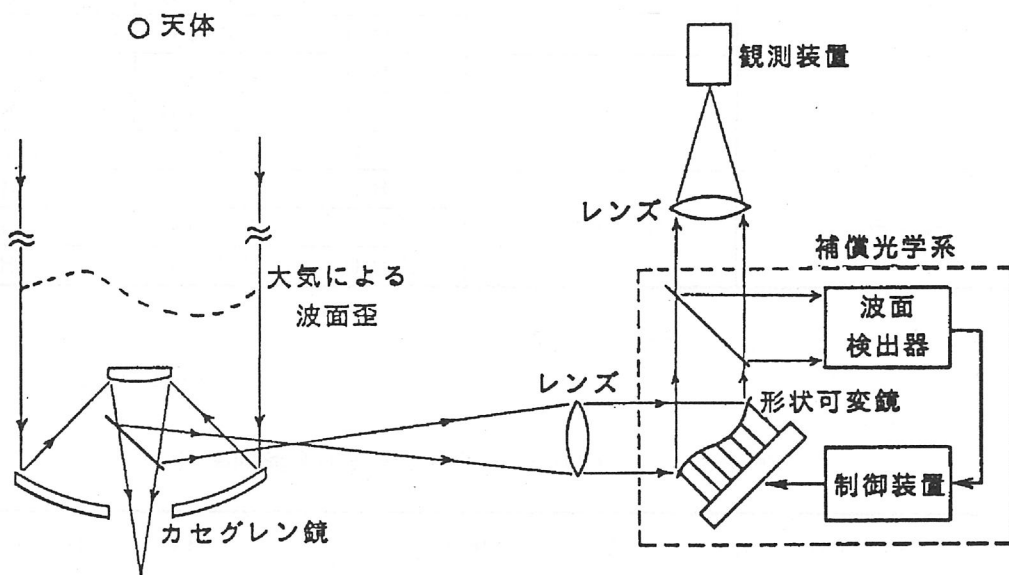


図 4-33 天体望遠鏡への補償光学系の適用例

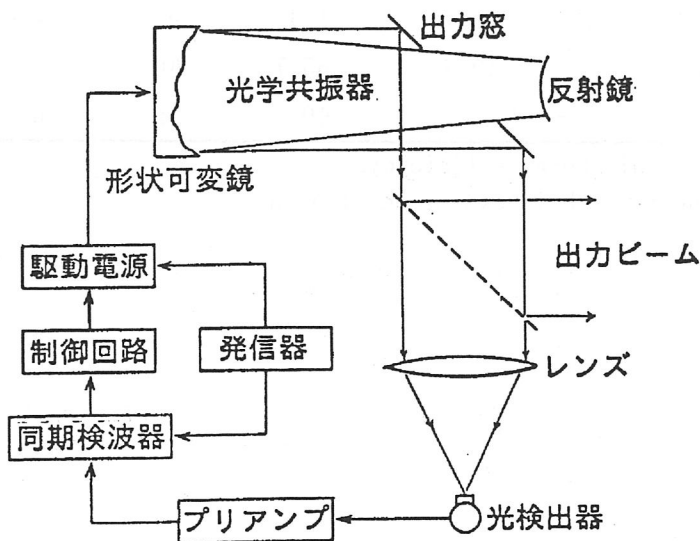


図 4-34 レーザ共振器への補償光学系の適用例

表 4-1 供試ランプ一覧

ランプ種類	封入物	始動ガス	内径 (mm)	電極間距離 (mm)	発光管材料
S n ランプ	Sn12, Hg	A r	1 8	6 0	石英
D y ランプ	Dy13, Hg	A r	1 8	6 0	石英
S c ランプ	Sc13, NaL, Hg	A r	1 8	6 0	石英

表 4-2 メタルハライドランプの放射効率一覧

ランプ種類	主発光物質	波長域 (nm)	放射効率 (%)
S n ランプ	S n	3 8 0 ~ 7 6 0	1 5
		7 6 0 ~ 1 3 0 0	1 5
		1 3 0 0 ~ 2 4 0 0	1 1
D y ランプ	D y	3 8 0 ~ 7 6 0	2 7
		7 6 0 ~ 1 3 0 0	8
		1 3 0 0 ~ 2 4 0 0	1 1
S c ランプ	S c - N a	3 8 0 ~ 7 6 0	2 4
		7 6 0 ~ 1 3 0 0	9
		1 3 0 0 ~ 2 4 0 0	8

表 4-3 パルス CO<sub>2</sub> レーザの 2 倍波の変換効率 (η)

Nonlinear crystal	Crystal length (mm)	η Power (%)	η Energy (%)	Energy SH radiation (mJ)	Pulse duration (ns)	AR coating	References
AgGaSe <sub>2</sub>	20	35	14a	4b	75	yes	9)
AgGaSe <sub>2</sub>	20.8	----	56	1.4	30	yes	10)
AgGaSe <sub>2</sub>	20	----	19.8	55.7	80	no	11)
ZnGeP <sub>2</sub>	3	----	49	10	2	no	12)

a Calculated internal energy efficiency.

b Estimated value from their experimental data.

表 4-4 LD 励起 Nd : YAG レーザーシステムの目標効率と

核融合用 LD 励起固体レーザードライバーの目標効率<sup>22)</sup>

Items		Regenerative Amplifier	Main Disk Amplifier	LD Pumped ICF Driver
(1) Excitation Efficiency	Radiation effi.	30%	30%	65%
	Absorption effi.	95%	95%	95%
	Quantum effi.	95%	95%	95%
	Quantum defect	75%	75%	75%
	Storage effi.	65%	65%	75%
Total effi. (1)		13%	13%	33%
(2) Pumping System Efficiency	Transfer effi.	95%	80%	95%
	Coupling effi.	40%	40%	80%
	Total effi. (2)	38%	32%	76%
(3) Extraction Efficiency		50%	80%	65%
Total Efficiency (1)(2)(3)		2.5%	3.3%	16%

表 4-5 各励起波長で適する非線形光学結晶

励起波長	光源	方式	結晶	主な発生波長
<1 μm	Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Nd:YAG/SHG, THG	OPO DFG	KTP BBO LBO LiNbO <sub>3</sub> KTA, etc	0.8~4 μm
1 μm	Nd:YAG(YLF)			
1.6 μm	Nd:YAG/OPO	OPO	AgGaSe <sub>2</sub> AgGaS <sub>2</sub> ZnGeP <sub>2</sub> etc	3~9 μm
2 μm	Tm, Ho:YAG(YLF)			
3 μm	Er:YAG			
9-11 μm	CO <sub>2</sub> レーザー	SHG THG	AgGaSe <sub>2</sub> CdGeAs <sub>2</sub> TAS, etc	3.1~5.4 μm

表 4-6 波長 0.2~5  $\mu\text{m}$  帯の非線形光学結晶

結 晶	透過波長域 (nm)	位相整合波長域 (Type)	ダメージしきい値 (GW/cm <sup>2</sup> )	相対性能指数
KDP	200-1500	517-1500 (I)	0.20	1.0
KDP	200-1500	732-1500 (II)	0.20	1.8
BBO	198-3300	400-3300 (I)	5.00	26.0
BBO	198-3300	526-3300 (II)	5.00	15.0
LiIO <sub>3</sub>	300-5500	570-5500 (I)	0.50	50.0
MgO:LiNbO <sub>3</sub>	400-5000	800-5000 (I)	0.05	105.0
KTP	350-4500	1000-2500 (II)	1.00	215.0
KNbO <sub>3</sub>	414-2000	840-1065 (II)	0.35	1755
疑似位相整合 LiNbO <sub>3</sub>	400-5000	800-5000	0.05	2460N2 (III)

(1) Nは、周期構造の数  
ref) J.T.Lin and C.Chen, Lasers & Optonics November 1987 pp59-63.

表 4-7 CO<sub>2</sub>レーザーSHG用非線形光学結晶例

結 晶	透過波長域 ( $\mu\text{m}$ )	吸 収 (cm <sup>-1</sup> at 10.6 $\mu\text{m}$ )	ダメージ閾値 (MW/cm <sup>2</sup> )	相対性能指数
AgGaS <sub>2</sub>	0.5-13	0.090	15	1.0
CdSe	0.75-20	0.016	50	1.6
AgGaSe <sub>2</sub>	0.71-18	0.050	12	6.3
TAS	1.26-17	0.040	16	6.5
CdGeAs <sub>2</sub>	2.4-18	0.230	40	9.2
ZnGeP <sub>2</sub>	0.74-12	0.900	3	14.0
Te	3.8-32	0.960	45	270.0

ref) J.T.Lin and C.Chen, Lasers & Optonics November 1987 pp-60

表 4-8 補償光学系の波面検出法式

方式名	検出原理及び検出量
シャックハルトマン方式	レンズ焦点像の位置変化による波面傾き分布
シェアリング干渉方式	自己干渉による干渉強度変化による波面傾き分布
カーバチャー方式	レンズ焦点前後の強度さによる波面曲率分布
マルチディザー方式	位相変調した送信光の変調信号強度による光の位相差

## 5. 構成要素技術 -検知器-

### 5. 1 赤外線暗視技術及びその周辺技術

外部光電効果を用いた光検出器（以下、電子管型センサと称す。）は、光電変換部（以下、光電面と称す。）、増倍部及び読み出し部からなる。近赤外域において実用化されている光電面の特性を中心に述べると共に、それらを用いた代表なデバイスの特性とそのデバイスを特徴づけている機能材料及び最近の開発動向についても述べる。

#### 5. 1. 1 光電面

外部光電効果は、次の3過程で説明される。①光吸収励起過程：入射光のエネルギーを吸収し、伝導帯に光電子を発生する。②拡散過程：光電子が結晶中を移動し、散乱を受ける。③脱出過程：表面に到達した光電子は、表面障壁を越えて真空中に脱出する。

光電面には、光の入射方向と光電子の放出方向の関係から反射型と透過型の2種類ある。光電感度は、単位時間の入射光エネルギーに対する出力電流比（放射感度；mA/W）あるいは、入射光子数に対する放出光電子数（量子効率；%）で表示される。

分光感度特性は、光電面材料に依存し、長波長側閾値は光電面材料の物性値で決まる。その閾値限界は、(Cs, 0)吸着層で決定される $1.1\mu\text{m}$ である。短波長側は一般には入射ガラスにより決定されるが、半導体型では光電面材料中の窓層の材質により決定される。

近赤外域に限定した場合、実用化されている光電面の種類には、従来型光電面として、Ag-0-Cs、マルチアルカリ(S-20)、Extended マルチアルカリ(S-25)、半導体型光電面として、GaAs(Cs)、InGaAs(Cs)、GaAsP(Cs)と、最近開発された Bias-Assisted型光電面として、InP/InGaAs(Cs)、InP/InGaAsP(Cs)<sup>1)</sup>がある。

以下、3種類について説明する。

各種光電面の分光感度特性を図5-1に、また感度、暗電流、E B I等を表5-1に示す<sup>2)</sup>。

(1) 従来型光電面：例えばガラス面板上に真空中でAgやアンチモンとアルカリとの反応により形成される。膜厚は、光の吸収と光電子の脱出拡散長を考慮して決められる。

分光感度特性としては、Ag-0-Cs光電面は他の光電面にない近赤外まで感度を持つ特長があり、現在は近赤外域に限られている。マルチアルカリ光電面は、紫外域～近赤外まで広波長域に感度を持つ。Extended マルチアルカリ光電面は、マルチアルカリ光電面より膜厚を厚くし光の吸収量を増加する事により長波長側での効率の向上を図っている。

(2) 半導体型光電面：光電面材料に半導体結晶を用い、層構造、バンドギャップ、ドーピング濃度、膜厚に関して設計された光電面である。半導体結晶にはⅢ-V族化合物半導体が多く用いられ、GaAs(Cs)、InGaAs(Cs)、GaAsP(Cs)が製品化されている。

GaAs(Cs)光電面等は、MOCVD結晶成長法で形成された多層構造の半導体結晶をガラスと熱圧着した後、エッチングにより薄膜化され良好な大面積の光電面材料になる。それを真空中で(Cs,0)層にて活性化処理が行われる。

分光感度特性は、半導体結晶のバンドギャップで長波長側閾値、窓層の材質で短波長側閾値が決まる。その波長域においてアルカリ・アンチモナイド系と比較して、高くかつ平坦な量子効率特性を示す。さらにはデバイス構造上、光電面と次段(例えばMCP-pin)を平行平板的に近づけた近接型構造において電界効果を利用して、GaAs(Cs)で30%at650nm、InGaAs(Cs)で5.4%at900nm、GaAsP(Cs)で55%at530nmと従来にない高い量子効率を示す<sup>2、3)</sup>。これは、光電面を固体センサと比較した場合の一つの弱点である光電変換効率での最も重要な改善の一つである。

(3) Bias Assisted 型(あるいは Transferred Electron型)光電面：従来の光電面の長波長側閾値限界である $1.1\mu\text{m}$ を越える光電面として開発された<sup>4)</sup>。光電面材料には、光吸収層、電子移送層からの層構造を持つ半導体結晶を用いる。電子移送層上にショットキー電極を設け、これに+電位を加えることで電子移送層内部に傾斜電界を形成し、光吸収層での光電子に対して内部障壁を低下させると同時に表面障壁を越させて真空中に脱出させる。長波長側閾値は、光吸収層のバンドギャップで決まり、その材料にはInGaAsP、InGaAsがそれぞれ用いられている。その結果、長波長側閾値は大幅に赤外域に拡大した<sup>5、6)</sup>。

現在製品化されている光電面の分光感度特性は、 $0.3\sim 1.4\mu\text{m}$ 、 $0.3\sim 1.7\mu\text{m}$ の2種類があり、全領域にわたってほぼ平坦である<sup>7)</sup>。

### 5. 1. 2 増倍部

光電面から放出された光電子は、真空中で加速され、ダイノードに高速入射する事により二次電子増倍をおこす。この二次電子増倍機能は低雑音性を有しており、電子管型センサを固体センサと比べ特徴づけている要因の一つである。

増倍部として、従来型ダイノード、マイクロチャネルプレート<sup>8)</sup>(以下MCPと略す)、電子打ち込み型Siターゲット<sup>9、10)</sup>が有る。

### 5. 1. 3 読み出し部

信号の読み出し方法は、光電子増倍管においては、従来から用いられている単一陽極から取り出す方法のほか、用途に合わせたマルチアノード、リニアアノード、クロスワイア等が用いられている<sup>11)</sup>。イメージ管においては、蛍光体にて可視出力像に変換した後、肉眼で観測する方法の他、FOPで光学的に次段の例えばCCD等と結合させ、ビデオ信号として読み出す方式もある<sup>12)</sup>。また、電子打ち込み型においては、Siターゲットでの増倍を行い、陽極から取り出す方式と、同じく増倍をCCD裏面部にて行い、増倍信号の伝達をCCDにてビデオ信号として読み出す方式も研究されている<sup>13)</sup>。

#### 5. 1. 4 デバイス

各種の光電面、増倍部、読み出し部は、用途に応じて組み合わせられ、多種類のデバイスが作られている。ここでは代表として高機能性を発揮しているイメージインテンシファイア（以下、I. Iと略する。）とその機能部品としてのMCP及びファイバーオプティックプレート（以下、FOPと略す。）について述べる。

(1) イメージインテンシファイア：構造は、光電面、電子レンズ、MCP及び蛍光面から構成されている。動作原理は、像を結ばせた光電面から光電変換された光電子が、MCP入力面上に電子レンズで結像され、MCPにて数千倍に増倍されて蛍光面に入射し光学像に変換される。その結果、入射光は数万倍に増強される。

最近では、構成部品を各々真空装置内に導入し真空中にて処理、搬送、組立するトランスファー技術により、光電面とMCP-inを平行平板的に近づけた近接型I. Iが作成され、そのサイズは、従来のインバータ型I. Iと比べて、1/3～1/4位と薄く小型になっている。

第三世代I. Iは、光電面にGaAs(Cs)が用いられ、高い量子効率である上に、その分光感度特性は夜間天空放射と良く一致し、非常に高い視認性の装置が作られている。第4世代I. IにはInGaAs(Cs)が用いられ、1.06 $\mu$ m光検出用に有効である。解像度は、NEA光電面の特徴である狭い光電子放出角度と揃ったエネルギー分布特性が生かされ、第二世代と比べて著しく向上している。最近では45lp/mm以上とさらに改善が図られている<sup>14)</sup>。これはMCP、蛍光面及びFOPの性能、及びトランスファー技術の向上に寄与するところが大きい。

(2) MCP：MCPは2次元の電子増倍器で像検出デバイスに広く利用されている。

直径10 $\mu$ m程度のガラス管を600万本程度束ねて、直径25mm、厚さ0.5mm程度の板状にしたものである。細いガラス管の内壁は、抵抗体かつ2次電子放出体であり、管壁に衝突する電子が次々に増倍されて出力される。

MCPは高空間分解能、小型高利得（厚さ0.5mm/1kV印加時で、利得 $\approx 10^4$ ）、高速（立上がり時間 $\approx 100\sim 300$ pS）などの特長がある。各種光電面と併用される他、それ自体でも紫外線、X線、 $\gamma$ 線、中性子、荷電粒子等にも感度を持つ。MCPを多段に接続して、より高利得を稼ぐと同時にパルス波高分布特性の改善を図り、高S/Nを達成する手段もある<sup>8)</sup>。

最近では、低抵抗化による高ダイナミックレンジ化<sup>15)</sup>、ピッチ径の微細化（最近の最小チャンネル径は6 $\mu$ m）等による高解像度化、高OAR化が図られている。

(3) FOP：数 $\mu$ mのシングルファイバを束ねたマルチファイバ構造をしている。1本のシングルファイバは光を伝達するコアガラス、それを被覆するクラッドガラス及びクラッドガラスから洩れた光を吸収する吸収体ガラスの3種類から構成されている。コアガラスとクラッドガラスの屈折率の差によりその境界で全反射が起こり、光はシングルファイバ内を伝達する。

ファイバ径が3 $\mu$ mの高解像度タイプや、最大3:1までの像の拡大、縮小が可能なテーパー

ファイバも作成されている。最近は新しい製法によって歪みが無くチキンワイアの無いFOPも開発されている<sup>16)</sup>。

I. Iの光電面側と像出射側に使用されることが多い。とくに出射側は、同じくFOPを入力面板に用いたCCD素子と直接カップリング(Fiber Optical Coupling)がなされ、小型軽量、光の最大伝達等の利点が生まれている。

#### 5. 1. 4 電子管型センサの開発動向

電子管型センサは、半導体技術、微細加工技術等を導入しながらさらに新しい方向に開発されている。以下、構成要素別に開発動向を示す。

(1) 光電変換部：光電面材料の高品質化や層構造などの最適化、近接型構造による電界効果などによる光電感度の向上、あるいは外部バイアスによる真空準位の低下という新しい動作方法等の導入による長波長領域での光電面感度の向上<sup>17)</sup>、さらに量子井戸を利用した $10\mu\text{m}$ までの超格子型光電面が提案されている<sup>18)</sup>。

(2) 増倍部：二次電子増倍部にダイオードやアバランシェダイオードを用いて従来性能をはるかに凌ぐ高エネルギー分解能の実現が図られている<sup>9,10)</sup>。

(3) 読み出し部：MCPのファイバー細密化、蛍光体の改良あるいは電子軌道による拡大等により空間解像度の向上、ストリーク管及びMCP-PMT等による高速応答性の向上<sup>19,20)</sup>が図られている。また光電面とMCP-in間のシャッター駆動によるゲート機能付イメージインテンシファイアは、最速200psまでゲート動作が可能であり、イメージ像の高速観測を可能としている<sup>21)</sup>。

(4) 機能その他：材料の高純度化によるダークノイズの低減<sup>22)</sup>、メタルチャネルダイノードを用いた半導体素子並の小型化、あるいは使い易さを求めたモジュール化やインテリジェント化への努力が行われている<sup>11,23)</sup>。

(二橋 得明)

### 5. 2 赤外線検知器 (MCT)

本節では、赤外線に高い感度を有するMCT (HgCdTe) 赤外線検知器について、開発の現状を紹介する。

#### 5. 2. 1 MCT材料

MCTは半金属HgTeと半導体CdTeの三元化合物半導体であり、その混晶比によって $-0.3\text{eV}$ から $1.6\text{eV}$ のバンドギャップをもつ。図5-2に混晶比(x値)とバンドギャップの関係を示す<sup>24)</sup>。バンド間吸収を利用する量子型検知器では、分光感度のカットオフ波長 $\lambda_c$ とバンドギャップ $E_g$ には次の関係がなりたつ。

$$\lambda_c (\mu m) = 1.24 / E_g (eV) \quad (1)$$

MCTでは、3-5  $\mu m$ 帯には  $x = 0.3$  ( $E_g = 0.25 eV$ ) の8-10  $\mu m$ 帯には  $x = 0.2$  ( $E_g = 0.12 eV$ ) の混晶が用いられる。

MCT結晶材料としては、再結晶法やブリッジマン法によるバルク結晶、ティッピング法やスライディングボート法による液相エピタキシャル結晶、MOVPE法やMBE法による気相エピタキシャル結晶などが用いられている<sup>25)</sup>。

### 5.2.2 PV型赤外検知器 (フォトダイオード)

ここでは最近のIRFPA (InfraRed Focal Plane Array) に応用されているMCTフォトダイオードの構造について紹介する。図5-3に各種フォトダイオードの構造を示す。

最も単純な構造は、Hg空格子によるp型MCTにイオン注入によってn型領域を形成したプレーナ型である。ループホール型はp型MCTにイオンミリングでスルーホールを形成し、同時にn型領域を形成する方法である。最近の気相成長技術やドーピング技術の進歩にとともに、n型MCTにワイドギャップのp型MCTを成長したメサ型のヘテロ接合構造も用いられている。

図5-4にダイオードの特性を示すゼロバイアス抵抗 $R_0$ と逆バイアス抵抗 $R_d$ のバンドギャップ依存性の一例を示す<sup>26)</sup>。 $R_0$ は拡散暗電流で支配されており、光電流入射下では $R_d$ はアバランシェ電流で支配されている。暗時の $R_d$ は拡散暗電流のアバランシェでほとんど決定されている。

### 5.2.3 IRFPA (InfraRed Focal Plane Array)

IRFPAはMCTフォトダイオードアレイとSi読出回路(ROIC)を接続した構成である。その接続方法によって図5-5に示す3種の構造に分類される。

- ①直接ハイブリッド構造：MCTとROICをインジウムバンプを用いて直接接続する構成である。最も一般的な構成であり、高密度の二次元IRFPAに用いられている。
- ②間接ハイブリッド構造：MCTとROICを配線基板を中継してインジウムバンプで接続する構成である。構成に柔軟性があり、一部の一次元IRFPAに用いられている。
- ③モノリシック構造：ROIC上に直接MCTを形成する構成であり、ループホールなどはこの構造の一種と考えられる<sup>27)</sup>。

ROICの構成は大別して、CCD型とCMOS型に分類できる。MCTフォトダイオードからの電流をMOSキャパシタで積分する入力部分は共通であるが、CCD型は電荷を転送して多重化を行う。CMOS型は多くの場合、電荷-電圧変換を行ったあとスイッチの切り換えによって多重化を行う。フィルファクタを大きくできる点、周辺回路を集積化しやすい点などから、ROICとして最近CMOS型が多用される傾向にある。

#### 5. 2. 4 一次元 I R F P A

480×2画素一次元 I R F P Aについて紹介する<sup>26)</sup>。I R F P Aの裏面からの写真を図5-6に示す。2チップのMCTダイオードアレイと4チップのSi-CCDがサファイア配線基板にインジウムバンプで接続されている。接続率は100%、2500回の常温-80Kの熱サイクルに対して故障は認められなかった。

積分時間22μs、F1.2の場合の比検出能( $D^*_{\lambda_p}$ : S/Nを入射パワーで規格化した性能指標)のヒストグラムを図5-7に示す。標準偏差は平均値の14%。平均 $D^*_{\lambda_p}$ は $6.4 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{0.5}/\text{W}$ であり、量子効率100%の理想状態でのBLIP(背景光量制限性能)の70%を実現している。平均の1/2以下の4素子は欠陥画素と判定され、欠陥率は0.4%である。

#### 5. 2. 5 二次元 I R F P A

256×256画素二次元 I R F P Aについて紹介する<sup>28)</sup>。MCTダイオードアレイとCMOS-ROICをインジウムバンプで張り合わせた直接ハイブリッド構造である。熱膨張係数の差による熱歪みを緩和するため、Si-ROICは薄層化してサファイア基板に接着されている。接続率は100%、1000回の熱サイクルに対して故障は認められなかった。

チップ写真を図5-8に、撮像例を図5-9に示す。F2.5の光学系で温度分解能NETD=0.06K、感度ばらつき $\sigma/m=4.5\%$ 、欠陥画素0.5%を実現している。

#### 5. 2. 6 I R F P Aの開発動向

MCTを用いた I R F P Aの最近の報告例を表5-2に示す。第二世代の I R F P Aは、米国、英国、フランスで開発が進んでおり、日本でも開発されている。

一次元では、TDI構造で高感度化を狙ったデバイスが報告されている。画素数は標準TVフォーマットに相当する240~480画素であり、素子規模は1000~2000素子である。

二次元では、256×256画素から、標準TVフォーマットの480×640画素のものまで報告されている。ただし、詳細な性能についてはほとんど報告されていない。

#### 5. 2. 7 まとめ

MCTを用いた第二世代の I R F P Aは、標準TVフォーマットの規模の素子数の集積化が進み、実用化に向けたシステムの開発も進展している。I R F P Aは従来の赤外検知器に比べ、①直流再生、②TDI、③デジタル信号処理などに適した高機能・高性能な赤外検知器であり、赤外撮像システムの大幅な性能向上に寄与するものと考えられる。

(宮本 義博)

### 5. 3 赤外線検知器 (PtSi)

本節ではPtSiショットキバリア検知器中心に内部光電子放出という光検出メカニズムで動作する赤外線検知器の技術について述べる。

ショットキバリアの内部光電子放出を赤外線検知に使用しようという積極的な試みは1960年代後半から見られるようになり、1973年には米国のShepherdとYangによりショットキバリア検知器を用いた赤外線固体撮像素子が提案されている<sup>29)</sup>。提案された当初は量子効率が低いため実用化は困難という意見が大勢を占めていたが、現在ではショットキバリア赤外線検出は高解像度で感度均一性の高い赤外線FPA (Focal Plane Array) を提供する重要な技術として認められるようになってきた。

最初のショットキバリア赤外線FPAに用いられたのはPd<sub>2</sub>Siとp型シリコンのショットキバリア検知器<sup>30)</sup>であるが、現在主流となっているのは3-5 μm帯の検知器として用いることのできるPtSiとp型シリコンのショットキバリア検知器<sup>31)</sup>である。初期のPtSi検知器は厚い金属電極を用いていたため感度が非常に低かった。PtSi検知器の量子効率<sup>32)</sup>は1980年代に入り、薄い金属電極を用いることで実用的なレベルまで改善された<sup>32)</sup>。金属電極の薄膜化による量子効率の改善は金属電極の2つの界面でのキャリアの多重反射によるものである。現在実用化されているPtSiショットキバリア赤外線FPAで用いられている高感度化手法は、この金属電極の薄膜化以外に裏面入射の検知器の上に反射膜を設ける光学的共振構造がある<sup>46)</sup>。その他のショットキバリア検知器としては、8-13 μmの検知器として期待できるIrSiショットキバリア<sup>33)</sup>や短波長用を狙ったCoSi<sub>2</sub>とNiSiショットキバリア検知器がある<sup>34)</sup>。図5-10, 11に代表的なショットキバリア検知器の分光感度特性と暗電流の温度依存性を示す<sup>34)</sup>。

図5-12はショットキバリア赤外線FPAの画素の構造と動作を示す図である。ショットキバリア赤外線FPAはシリコンVLSI技術を用いて製造できるため、図のようなモノリシック構造が容易に実現でき、高解像度化ではハイブリッド構造の必要な化合物半導体よりも有利である。信号電荷はショットキバリア検出器の浮遊容量に蓄積されており、トランスファークロッキングのオン/オフにしたがって図に示すよう読み出し/蓄積動作を行う。この検出器構造でのユニークな特徴にブルーミング抑制機能がある。ショットキバリアダイオードのバリア高は低く、検出器が飽和しても電子が基板中に注入されるような状態にならないため、ブルーミングは完全に抑制される。

1975年に発表された最初のショットキバリア赤外線FPAは64画素のリニアアレイであった<sup>30)</sup>。その後すぐに256画素のリニアFPAと25x50画素の2次元FPAが報告されているが<sup>35)</sup>、この時点までは厚い金属電極が使用されおり、感度は蓄積動作を考慮しても不十分といわざるをえなかった。上述のように薄い金属電極を用いて感度が飛躍的に改善されると、ショットキバリア赤外線FPAに対する期待は高解像度化に向けられるようになり、1983年にはシ256x256画素のFPAが開発されている<sup>36)</sup>。

1987年にはCSD (Charge Sweep Device) 方式という信号読み出し方式の512x512画素のPtSiショットキバリアFPAが開発され<sup>37)</sup>、その翌年この素子を用いた赤外線カメラが初めて

製品化された。これに続き、PtSiショットキバリア検知器を用いた標準テレビ解像度をもった赤外線FPAが次々と報告されている<sup>34)</sup>。最近、さらに解像度を向上させた1040x1040画素のCSD方式PtSiショットキバリア赤外線FPAも報告されている<sup>38)</sup>。

図5-13はPtSiショットキバリア2次元FPAの集積度の推移を示したグラフである。平均的に見ると、集積度増加の速さは、VLSIの代表的な製品であるダイナミックメモリと同じ18カ月で2倍ペースであることが分かる。図5-14は画素サイズの縮小トレンドを示す図である。最初に報告された25x50画素の素子から最近開発された1040x1040画素の素子までに、画素サイズは約1/50に縮小されている。

こうした画素サイズの縮小に対応して、開口率の増大はショットキバリア赤外線FPAの開発の中で最も重要な課題の一つと考えられてきており、読み出し方式、FPA構造、検知器構造等に関し多くの開口率増大策が提案されている<sup>34)</sup>。開口率改善策として提案されたCSD方式という信号読出方式を用いて26x20  $\mu\text{m}^2$ の画素で71%の開口率を実現したという報告もある<sup>39)</sup>。その他の読出方式の工夫としては、フレーム蓄積動作で2画素にCCDの1段分を割り当てる方式<sup>47)</sup>や、水平方向にインターレースする方法<sup>48)</sup>等が報告されている。また、素子構造を工夫し実効的に100%の開口率が得られるDSI (Direct Schottky Injection) 方式<sup>40)</sup>やマイクロレンズを用いた光学的手法<sup>41)</sup>も開口率改善のアイデアとして注目される。

最初の25x50画素の次元FPAの雑音等価温度差NETDは0.8 Kであったが、最近報告された開口率71%の512x512画素のFPAは $f/1.2$ で0.033 KのNETDを達成している<sup>39)</sup>。ショットキバリア赤外線FPAは高い感度均一性により1点補正だけでほとんどの応用に問題ない性能が得られているが、2点補正(感度とオフセット補正)を行なうことでより広い入射光量の範囲で固定パターン雑音が無視できる性能が実現できる<sup>49)</sup>。また、補正時に問題となる低周波の雑音も実用上無視できることが報告されており<sup>50)</sup>、長時間安定した動作が期待できる。一般にショットキバリア2次元FPAは読出雑音の小さなCCDを用いているので、高背景下での性能は背景ショット雑音で決まっている。背景雑音限界で動作するFPAではNETDは背景信号電荷数の平方根に反比例する(低いNETDを実現するためには大きな背景信号を蓄積・転送する必要がある)ので、高感度化には飽和電荷量の増大が不可欠である。従来から用いられているインターライン転送CCD方式では既にFPAの性能が信号読み出しに用いるCCDの飽和電荷量で決まるようになってきたことが指摘されている<sup>42)</sup>。高開口率化に有効であったCSD方式は飽和電荷量の増大でも有利であるという報告がある<sup>43)</sup>。表1にTV解像度をもったショットキバリア赤外線FPAの性能比較を示した。

ショットキバリアと同じ光検知メカニズムで動作するGeSiとSiのヘテロ接合検知器<sup>44)</sup>が最近注目を集めている。この検知器のバリア高はGeの組成比とGeSi中のボロン濃度を変化させることで調整することができ、8-13  $\mu\text{m}$ 帯にも感度を持つように設計することができる。図5-15, 16にGeSiヘテロ接合検知器の構造と分感度特性の例を示す<sup>45)</sup>。単体のGeSiヘテロ検知器としては25  $\mu\text{m}$ のカットオフ波長を達成したという報告もあり、GeSiヘテロ検知器FPAとしては400x400画素のものまで開発が進んでいる<sup>45)</sup>。

(木俣 雅章)

## 5. 4 赤外線検知器（非冷却）

高感度の2次元赤外線センサとして従来冷却型のものが多かったが、1992年Honeywell社とTexas Instruments(TI)社から高感度の8万画素熱型非冷却赤外線イメージセンサがデビューした<sup>51,52)</sup>。両センサの温度分解能はF/1の光学系に対して約0.1Kである。Honeywell社のものはボロメータ型で、Si読出回路上にマイクロマシーニングにより宙に浮いた熱分離構造を作り、その上にボロメータ薄膜を形成したモノリシック型である。TI社のものは強誘電体に溜まる電荷量が室温付近で温度に敏感に変化するのを利用したもので、セラミクスを研磨・熱分離しSi読出回路とハイブリッド化した構造である。両センサは室温で動作するため冷却器の保守が不要であり、低価格監視カメラとして赤外市場を拡大する可能性が高い。

### 5. 4. 1 非冷却型赤外線センサの動作原理と実例

熱型の非冷却センサは、ボロメータ型、強誘電体型、サーモパイル型に大別される。それらの動作原理、レスポンス及びノイズを表1にまとめておく。3種類のセンサの共通点として、レスポンスを向上させるには熱分離構造を如何にうまく作るかに強く依存する。ノイズに関しては、フォトンノイズと温度揺らぎノイズが共通している。冷却が必要な量子型センサの場合、フォトンノイズ支配で動作するが、熱分離構造を有する非冷却の熱型センサの場合、温度揺らぎノイズの方が遥かに大きい。またセンサの抵抗(R)に起因するジョンソンノイズは各センサとも存在し、強誘電体型の場合、誘電損失( $\tan \delta$ )を用いて表5-4中の式のように表される。

### 5. 4. 2 ボロメータ型赤外線センサ

ボロメータは、温度変化に対応した抵抗変化を電圧又は電流の変化として検出する。そのレスポンスは、表1に示したようにボロメータ材料の抵抗温度係数( $\alpha$ )に比例する。同材料として、NiやMn等の金属の酸化物を混合したNTC(Negative Temperature Coefficient)材料が知られており、サーミスタという名称で親しまれている。また酸化バナジウム $\text{VO}_2$ は68°C付近で大きい抵抗変化を示し、二木によりCTR(Critical Temperature Resistor)と名付けられ<sup>53)</sup>、温度検知素子として実用化されている。

さて図5-17にHoneywell社が開発した240×336画素のモノリシック型マイクロボロメータアレイの画素構造を示す<sup>54)</sup>。画素サイズは50×50 $\mu\text{m}$ で、各画素は下部に設けられた信号読出用オンチップトランジスタ及びその上に1対の梁で支持されたダイアフラムからなる2階建て構造になっている。同ダイアフラム構造はマイクロマシーニング技術を用いて形成され、熱コンダクタンスが0.1 $\mu\text{W/K}$ の優れた熱分離が実現され、センサの高感度化に大きな寄与をしている。尚、このアレイセンサは、対流による熱の逃げを防止するため、真空パッケージ(約75mTorr)に封入される。ダイアフラムは厚さ約0.5 $\mu\text{m}$ で、ボロメータ材料である多結晶酸化バナジウム薄膜約0.1 $\mu\text{m}$ とSiN膜(支持膜と保護膜)で構成されている。酸化バナジウム薄膜の抵抗は10~20k $\Omega$ 、抵抗温度係数は約-2%/Kである。

センサに入射する赤外線は、一部ダイアフラムを透過し下層の反射膜で折り返し、ダイ

アフラム上面で打ち消し合う干渉を起し、ダイアフラムに熱として吸収され温度を上昇させる。この干渉条件を実現するには、上層と下層の間隔を検出したい波長の1/4にする必要がある。このようなダイアフラムの温度上昇によりボロメータの抵抗が変化し、これを電気信号に変換する。

Honeywell社は、各画素にパルス状のバイアス電流(250 $\mu$ A-5 $\mu$ sec)を流す信号読出方法を開発し<sup>51)</sup>、F/1のカメラに対して30Hzのframe rateで温度分解能40mKを達成している。

#### 5. 4. 3 強誘電体型赤外線センサ

強誘電体型には2種類あり、1つは焦電型(パイロ)と呼ばれ強誘電体材料の自発分極の温度依存性が強い(例、PbZrTiO<sub>3</sub><sup>5)</sup>, Curie温度 $\sim$ 200 $^{\circ}$ C)。他は誘電体ボロメータと呼ばれ誘電率の温度依存性が大きい(例、BaSrTiO<sub>3</sub><sup>2)</sup>, Curie温度 $\sim$ 22 $^{\circ}$ C)。表1では簡単のため、まとめて焦電効果としておく。同表に載せたようにレスポンスビティは実効焦電係数( $\gamma_{eff}$ )に比例する。

$$\gamma_{eff} = \int_0^E \frac{d\varepsilon}{dT} dE + \frac{dP}{dT} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ は誘電率、Eは電場、Tは温度及びPは自発分極である。上式で第2項が、よく知られた焦電係数である。

パイロセンサ材料であるチタン酸鉛は、(1)式のうち第2項が支配的である。同結晶のユニットセルでは正電荷と負電荷の重心がずれており強い電場をかけることにより分極させることができる。このようにして表面に現れる電荷は、空気中のイオンの付着により電氣的に中和されている。この状態で赤外線を吸収して温度が変わると結晶格子が歪み分極の大きさが変化する。分極の早さは熱時定数で決まる。さて分極の変化により電極に出現した表面電荷は新たな平衡状態に達するまで漸減し、最後に中和されてしまう。従って、一定強度の直流的な赤外線に対して焦電型センサは感度がなく、チョッパー等により入射赤外線を交流化する必要がある。パイロセンサアレイとしては、半田バンプ接続技術を用いたハイブリッド型の384 $\times$ 288のものが開発されている<sup>56)</sup>。その構造は、材料を除けば、次に述べるハイブリッド型誘電体ボロメータと同じである。

図5-18は、TI社が開発した245 $\times$ 328画素のハイブリッド型誘電体ボロメータアレイの画素構造である<sup>57)</sup>。画素サイズは48.5 $\times$ 48.5 $\mu$ mで、強誘電体材料として(1)式のうち第1項が支配的な(Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>セラミクス(厚さ25 $\mu$ m)を用い、画素毎に溝を切ることにより熱分離して感度を上げている。同材料は波長10 $\mu$ m帯の赤外線を殆ど吸収しないため、各画素には半透明の金属膜/有機膜/金属反射膜から成る赤外線吸収層が形成されており、金属反射膜は各画素の共通電極も兼ねている。赤外線の吸収メカニズムは「ボロメータ型赤外線センサ」の節で説明したのと同じであり、有機膜の厚さは、屈折率をnとすると、検出したい波長の1/(4n)である。さて各画素からの信号は、熱伝導率の小さいポリイミドで作ったメサ上の金属薄膜を介して、Si基板上の読出回路に入力される。このような構造の採用により熱コンダクタンス5 $\mu$ W/Kが得られている。

TI社のデバイスの動作温度は、強誘電体セラミクスの相転移温度付近に設定されており、電子冷凍器により約22 $^{\circ}$ Cに制御されている。同社は、このデバイスをF/1のカメラに組み込み

30Hzのチョッピング周波数で温度分解能70mKを達成している。

#### 5. 4. 4 サーマパイル型赤外線センサ

サーモパイル型はゼーベック効果を利用し、温接点と冷接点間の温度差を検出している。これは熱電対内の電子の運動による熱起電力に基づくものである。通常、熱電対を複数個直列に接続して信号を大きくしたサーモパイルとして用いることが多い。

図5-19は、128×128画素のモノリシック型サーモパイルアレイの画素構造である<sup>58)</sup>。画素サイズは100×100 $\mu\text{m}$ で、下部構造としてCCD及びその上に形成したサーモパイルを有するダイアフラムから成る2階建て構造である。酸化膜から成るダイアフラムの熱分離構造は、マイクロマシーニング技術を用いて形成されている。熱電対材料は、ボロンドープのp型多結晶シリコンとリンドープのn型多結晶シリコンであり、これを32対直列接続してサーモパイルとした。多結晶シリコンのゼーベック係数はp型とn型で絶対値はほぼ等しく、不純物濃度 $10^{19-20}\text{cm}^{-3}$ に対して300~400 $\mu\text{V/K}$ である。同デバイスの温度分解能はF/1のカメラに対して0.5Kと報告されている。

#### 5. 4. 5 まとめ

今までの熱型非冷却赤外線イメージセンサの開発では、マイクロマシーニング技術等の進展により熱コンダクタンスが低減され、センサの感度が向上してきた。今後、熱型非冷却センサの感度を温度揺らぎノイズで決まる極限感度に到達させるには、熱コンダクタンスの低減も重要であるが、材料自身の特性改善が不可欠である。ボロメータ材料に関しては抵抗温度係数を現状の2倍以上かつ1/fノイズが小さいもの、強誘電体型では現状のセラミクスの実効焦電係数を保ち且つ誘電損失が小さい薄膜の開発、熱電対材料に関してはゼーベック係数を1桁以上上げるか又は比抵抗を2桁以上小さくする必要がある。

(小田 直樹)

#### 5. 5 室温動作超高速赤外線検出素子

赤外線検出素子はその動作原理によって、通常、熱型と量子型に分類されている。ここで熱型とは、赤外線が照射されることによって生じる素子の温度変化を利用した検出素子で、5.4節で述べた熱電対、ボロメータおよび焦電型検出器等の非冷却検出器はこの熱型検出素子に属する。一方、量子型は、光量子エネルギー $hf$ （ここで $h$ はプランク定数、 $f$ は周波数）をもった赤外線が半導体に照射されることによって半導体の抵抗が変化したり（光導電効果）起電力を生じる（光起電力効果）現象を利用した検出素子で、5.2および5.3節で述べた冷却型検出器はこの量子型検出素子に分類される。

本節で述べる検出素子は、上記の熱型や量子型検出素子とその検出原理を異にし、RF波やマイクロ波を受信する場合と同様、赤外線をアンテナで受信し、アンテナで受信された超高周波信号を検波して取り出す検出素子で、アンテナ結合型検出素子もしくは検波型検出素子と呼ばれている。この検出素子は、

(1) 赤外線をアンテナで受信するため、周波数や位相、偏波面のそろった赤外線（例えばレーザー光）とランダムな周波数や位相、偏波面をもった赤外線を区別して受信できる（検出すべき赤外線の周波数や偏波面によって指向性や利得等の受信特性が大きく変化する）、

(2) アンテナで受信した赤外線の周波数に直接応答する検波素子である、

(3) 量子型検出素子と異なり遠赤外領域でも室温動作が可能な素子である、

等の特徴を有する。しかし、上記の特徴(2)を裏返せば、アンテナ結合素子には、アンテナで受信した信号の周波数に直接応答する検波能力が要求されるため、量子型検出素子の検出能力が長波長領域で大きく低下するのとは逆に、アンテナ結合素子の検出能力は高周波（短波長）領域で大きく低下する。このことは、アンテナ結合型検出素子が有効に動作する波長範囲は $10\mu\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ の遠赤外からサブミリ波領域であることを示唆している。

アンテナ結合型検出素子は、その基本的な構造を図5-20に示しているように、先端の鋭く尖った金属細線（通常直径約 $10\mu\text{m}$ のタングステン細線が使用されている）を金属もしくは半導体上に立てた構造をしており、この金属細線が赤外線に対してアンテナとして動作し、アンテナによって受信された信号が素子構造によって生じる電流-電圧特性の非線形性によって検波されて出力として取り出されるもので、その非線形性の発生原理によって、MOM(Metal-Oxide-Metal)トンネルダイオード<sup>59,60)</sup>、ショットキダイオード<sup>61,62)</sup>およびウオームキャリア素子<sup>63)</sup>がある。この中で、MOMダイオードは金属細線(W細線)を極薄の酸化膜を介して他の金属（通常Niが使用される）と点接触させた構造をしており、W-金属側とNi-金属側からみた電位障壁の高さが異なることにより電流-電圧特性に非線形を生じる素子であり、ショットキダイオードは金属細線と半導体間のショットキー障壁によって非線形の電流-電圧特性を生じる素子、ウオームキャリア素子は金属細線と半導体はオーム性接合しているものの、極端に面積の異なる点対面の電極構造により電流-電圧特性に非線形性を生じる素子である。

これらのアンテナ結合素子の中で最も応答速度が速いのはMOMダイオードで、約200THz( $1.5\mu\text{m}$ )までの応答が確認されている<sup>64)</sup>。ウオームキャリア素子では28THz( $10.6\mu\text{m}$ )までの応答が<sup>65)</sup>、ショットキダイオードでは2.5THz( $118\mu\text{m}$ )までの応答<sup>62)</sup>が確認されている。

上記の素子が赤外線をアンテナを介して検出していることを示す例として、図5-21に、ウオームキャリア素子によって検出された $118\mu\text{m}\text{-CH}_3\text{OH}$ レーザーおよび $10.6\mu\text{m}\text{-CO}_2$ レーザー光に対する検出電圧-入射角度依存性を示している<sup>63)</sup>。図5-21(a)は $\text{CH}_3\text{OH}$ レーザーを長さ(アンテナ長)の異なる金属細線を有する素子で測定した結果で、理論から予測される通り、アンテナ長によって指向性が変化している。図5-21(b)は同一素子で $\text{CO}_2$ レーザーと $\text{H}_3\text{OH}$ レーザー光を検出したときの指向特性で、波長によって理論から予想される通り指向特性が変化しているのが分かる。

図5-22に、28THz( $10.6\mu\text{m}$ )帯で行ったハーモニックミクシングの結果の一例を示している。図は、発振線の異なる2本の $\text{CO}_2$ レーザー光(P(18)、P(20))と8.69GHzマイクロ波をMOMダイオードに同時に照射したときのビート信号である。P(18)とP(20)発振線間のビート信号周波数は約53.548GHzとなり、8.93GHzマイクロ波の第6高調波とのミクシングによっ

て32MHzのビート信号 ( $|53.548\text{GHz} - 6 \times 8.93\text{GHz}| = 32\text{MHz}$ ) を得ている。同様な結果はウオームキャリア素子によっても得られている<sup>65)</sup>。

アンテナ結合型赤外線検出素子は、その速い応答速度を利用して、遠赤外レーザー光の発振周波数の精密測定 (図5-23参照)<sup>64)</sup> や、レーザー発振周波数の安定化、プラズマ診断等に 응용されている。しかし、同素子は、図5-20に示しているように、直径 $10\mu\text{m}$ と言う非常に細い金属細線を半導体もしくは金属に立てた構造をしていて、機械的振動に非常に弱く、寿命が短く、特性が不安定であるため、非常に優れた特性を有しながら上記のような特殊な用途にのみに応用範囲が制限されているのが現状である。この構造による欠点をなくして応用範囲を拡大するため、最近発達の著しい微細加工技術を用いた薄膜素子の製作が試みられている。薄膜化するためには、素子の微細化、特にアンテナと半導体もしくは金属の接触面積の微小化が重要となるが、点接触構造の場合には、その接触面積は、 $10^{-12}\text{cm}^2$ 以下であり、この接触面積を薄膜構造で実現するには、 $0.1\mu\text{m}$ 程度もしくはそれ以下の微細加工が必要となる。そのため、種々の製作方法および構造の検討が進められている。

J. Changらは、GaAs基板上に微小形状のショットキダイオードを形成してその電極上にアンテナを立てた構造の素子 (図5-24参照) を製作し<sup>66)</sup>、Y. Yasuokaらは、GaAsのエッジ部を利用してショットキダイオードを形成してその電極部にアンテナ細線を立てた構造の素子 (図5-25参照) の製作することによって<sup>67)</sup>、素子特性の均一化を計っている。

上記の構造の他に、アンテナの薄膜化も含めた素子製作も古くから試みられている。M. HeiblumらはNi薄膜のエッジを利用した $10^{-10}\text{cm}^2$ の接触面積をもつMOMダイオードを製作し<sup>68)</sup>、 $118\mu\text{m}$ - $\text{CH}_3\text{OH}$ レーザーに対するアンテナパターンの測定に成功している<sup>69)</sup>。しかし、検出感度は非常に小さい。原川らは、薄膜アンテナが集束イオンビームであけた半径 $0.05\mu\text{m}$ の微細孔を通してp形ゲルマニウム (Ge) と接触する構造のウオームキャリア素子を製作し (図5-26参照)、 $\text{CO}_2$ レーザー光の受信には成功しているが、アンテナの受信効率が悪く検出感度は決して高くない<sup>70)</sup>。この素子構造の欠点はアンテナが薄い絶縁膜で覆われた抵抗の低い半導体上にあることであり、この欠点をなくすため、最近、アンテナと半導体部を切り離す構造の素子 (図5-27参照) が製作され、 $700\text{GHz}$ - $\text{HCOOH}$ レーザーに対して $100\text{V/W}$ の受信感度を得ている<sup>71)</sup>。一方、C. Fumeauxらは、 $0.012\mu\text{m}^2$ の接触面積をもつボータイアンテナ接合薄膜MOMダイオードを製作し (図5-28参照)、その素子に同一発振線で発振している2本の $\text{CO}_2$ レーザー光を照射することによって、基本波ミクシング信号検出に成功している<sup>7)</sup>。

今後は、さらに接触面積の微細化と接触状態の改善およびアンテナの特性向上によって、感度の高い素子の製作が進められるものと期待している。

(安岡 義純)

## 5. 6 自己積分型赤外線検出素子

本節では、前述の赤外線検知器のうち、キャリアの積分効果を利用した自己積分型赤外線検出素子について述べる。

赤外線入射による抵抗の変化を検出する光伝導型赤外線検出素子の感度を向上させる方法として、T D I (Time Delay and Integration) 動作という方法がある。この方法は画像の走査方向に複数の素子を配列し、走査による各素子間の時間のずれを遅延回路で補正し、各素子の出力信号を積分することによってS/Nの改善を図るものである。しかしながら、この方法では外部回路が複雑になり、外部への配線の増加により素子の冷却が難しくなるという問題がある。

そこで、素子数を増やさずに1素子内でT D I動作をさせる方法がElliott等により考案され、そのような動作をするデバイスはS P R I T E (Signal Processing in the Element) と呼ばれている。

このデバイスは図5-29に示すように画像の走査方向の素子長が素子幅に比べて大きい、細長い形状をしている。S P R I T E素子では、素子の一部に集光した赤外線によって生成されたキャリアがバイアス電界により素子内を移動するが、このとき素子上での画像の走査速度とキャリアの移動速度を一致させるとキャリアの積分を行うことができる。このようにS P R I T E素子は素子内部でキャリアの積分を行い感度の向上を図るものであるが、キャリアの積分効果を十分に発揮させるためには生成したキャリアの再結合を抑制することが重要である。キャリアの再結合は素子内部と素子表面で行われ、素子内部の再結合の抑制には結晶特性の向上が、素子表面の再結合の抑制にはダメージを与えない加工技術と良質なパッシベーション皮膜の形成が必要となる。これらの要素技術の向上により高感度化を達成した自己積分型赤外線検出素子 (Self Integration device, S I D) について以下に述べる。

### 5. 6. 1 結晶特性

光伝導型の赤外線検出素子に使用するH g C d T e結晶は一般にブリッジマン法又は固相再結晶 (Solid State Recrystallization, S S R)法で製作するが、ブリッジマン法は純化作用で高品位な結晶が得られる一方組成勾配ができる欠点があり、特に液相温度と固相温度の差が大きいH g C d T e結晶では組成勾配が著しくなる。そこで、組成均一性に優れるS S R法について述べる。

S S R法では、石英アンブルに真空封入した材料を高温で熔融・攪拌・急冷して微細構造の多結晶体を製作した後、固相状態で単結晶化を行うため、材料、アンブルに含まれる不純物が結晶内に取り込まれる。従って、S S R法で高品位な結晶を育成するにはまず材料の純度を高めることが必要である。材料としてはH g T eとC d T eの組み合わせが化学量論的には簡便であるが、これらの材料は酸化されやすく6N以上に純度を上げることは困難である。そこで、H g (9N), C d (7N), T e (7N)の単体を材料とし、更に最も多く使用するT eをゾーリファイニングで純化して純度を8Nまで高め、これらの材料を融点より

20℃高い温度で熔融・攪拌・急冷した後、図5-30に示すように固相の上限温度より10℃低い温度で温度勾配を設けて長時間保持すると、微細多結晶体が回転・成長して良質の単結晶を育成することができる。このas-grownのp型単結晶をスライスした後Hg蒸気中でアニールすると、Hgが結晶内部に拡散し空孔を埋めてn型に変換される。この条件で育成した結晶 ( $x \sim 0.21$ ) はデバイス化に十分な特性 (キャリア濃度  $\sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、電子移動度  $\sim 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) を示している。

## 5.6.2 デバイスプロセス

前述したように自己積分型赤外線検出素子では、高い感度を得るためにはいっそうのキャリアの長寿命化を図る必要がある。結晶内部でのキャリアの再結合は高品位な結晶育成によって抑制されるが、結晶表面での再結合防止には陽極酸化膜の形成が必須である。この陽極酸化膜には膜中の正の固定電荷によりn型半導体の少数キャリアであるホールを結晶表面から遠ざける効果があり、通常はプロセスの容易性から素子裏面と表面にのみ形成される。しかし、デバイスの寸法が小さくなるとキャリアの拡散による素子側壁での再結合の影響が大きくなるため、感度を向上させるためには素子側壁にも陽極酸化膜を形成する必要がある。そこで、自己積分型赤外線検出素子は次の工程により製作している。

- ・ 結晶特性の良好な領域まで研磨し、所定の大きさに切断する。
- ・ 結晶裏面に陽極酸化膜を形成し、接着剤で基板に接着する。
- ・ 結晶の外形を整形した後、素子側壁を露出させて結晶表面及び側壁に陽極酸化膜を形成する。
- ・ 電極となる材料 (Au (5000 Å) / Cr (500 Å)) を蒸着し、素子を分離する。
- ・ 保護膜及び反射防止膜の役割をするZnS膜を成膜する。

このような手順により素子の全面に陽極酸化膜が形成されるが、素子表裏面と素子側壁とでは陽極酸化膜形成前の結晶表面状態が異なるため、その膜質は大きく異なる。すなわち、素子表裏面では研磨のダメージ層を取り除くためにBr-MeOH溶液でエッチングを行うため結晶の表面状態は良好であるのに対し、イオンミリング等のドライプロセスで加工した素子側壁は突起が多数形成され、更にイオンによって叩き出された結晶・接着剤等が側壁に再付着されているために表面状態は非常に悪い。このような面では良質な陽極酸化膜を形成することができないため、イオンの衝突によるダメージが残る結晶表面層の影響を受け、キャリアの再結合が促進される。従って、ドライプロセス時の素子側壁への再付着を抑制し、いかに良質な陽極酸化膜を形成するかが感度向上の鍵となる。イオンミリングによる再付着は、イオンの入射角、加速電圧、レジストパターンの形状等のパラメータに依存しており、これらの条件によって素子側壁への再付着の量をコントロールすることができる。自己積分型赤外線検出素子ではこれらの条件を最適化することによって素子側壁でのキャリアの再結合を抑制し、素子側壁に陽極酸化膜を形成しないSPRITEに比べて感度を2～3倍向上させている。

### 5. 6. 3 デバイス特性

デバイスの性能を表す指標としては、感度を表すResponsivity、 $D^*$ と空間分解能を表すMTFがある。

Responsivity及び $D^*$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{Responsivity} &= \Delta V_s / \Delta W \\ &= V \eta \zeta S \tau / n_0 l w d h \nu \\ D^* &= \text{Responsivity} \times (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / V_n \end{aligned}$$

$\eta$  = 量子効率,  $\zeta$  = スウィープアウトファクター,  $S$  = 表面再結合係数

本式より感度を向上させるためには、多数キャリア濃度を小さくしてバルクのキャリア寿命を大きくすること及び表面再結合を小さくすることが重要であることが分かる。前述のTeの純化による結晶の高品位化、研磨及びイオンミリングの加工条件の最適化により、 $1.5 \times 10^{16} \text{ ph/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の背景輻射条件において図5-31に示すデバイス特性を達成している。ここで、図中の実線は計算値を、マーカーは15本の素子の実測値に対応しているが、両者はよく一致しており素子間のばらつきも十分小さいことが分かる。

次にもう一つのデバイス特性の指標である空間分解能は、通常の光伝導型素子ではデバイスの外形寸法によって決定される。しかし、自己積分型素子ではキャリアを素子内で走査して読み出し領域で検出するため、キャリアの走査距離の差による空間分解能の劣化を招きやすい。これを防ぐには読み出し領域の形状を最適化してキャリアが電極に到達するまでの時間を均一にする必要がある。読み出し領域の形状として、直線、 $\exp(-\alpha X)$ 、 $1/(1 + \exp(\beta X))$ の3種類の代表的な関数を用いキャリアの到達時間をシミュレーションした結果、 $1/(1 + \exp(\beta X))$ の形状が最も空間分解能が良いことが分かった。そこでその形状のデバイスを試作してMTFの測定を行ったところ、従来の直線型のデバイスと比較して、空間周波数80 cycle/cm時にMTFの値が約25%向上することが確認された。

このように自己積分型赤外線検出素子では、結晶材料の高純度化による結晶特性の高品位化、加工条件の最適化によるダメージ・再付着の抑制、デバイス形状の最適化により、空間分解能の劣化を抑え、感度を通常のデバイスの1桁以上、SPRITEと比較しても2~3倍向上させることができている。

(宮本 恵司)

## 5. 7 InSb赤外検知器

### 5. 7. 1 PDA (Photo Diode Array)

#### (1) N層理論量子効率

\* 低温InSbのキャリアライフタイムは電子に比べ正孔の方が大きく<sup>87)</sup>、推定拡散長を表5-5に示す。

\* 拡散長と量子効率理論式<sup>88)</sup>からの理論バルク量子効率特性を図5-32に示す。

\* これより、25  $\mu\text{m}$  N層(ドリフト領域)での理論バルク量子効率は92%。

## (2) P<sup>+</sup>層の影響

\* 表面入射の表面P<sup>+</sup>層信号低下は大で(10dBV/ $\mu$ m)、N層側からの背面入射が効率的。

## (3) サファイア/InSb 2重構造

\* サファイアはPDA薄層化支持と2層構造多重反射狙い(透過率は80%; 図5-33)。<sup>89)</sup>

\* 2重構造PDAの推定実質量子効率 $0.92 \times 0.8 = 0.74\%$ で、波長特性は図5-34。

## (4) 暗電流

\* M I S 特性の良好な(陽極酸化+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>スパッタ)2層Passivation膜(表5-6)。<sup>89)</sup>

\* Cd封管拡散で高R<sub>0</sub>A値(10<sup>6</sup>Ωcm<sup>2</sup>)を実現(図5-35、表5-7)。<sup>89)</sup>

## (5) R<sub>0</sub>A値の温度特性(図5-36)

\* 高抵抗ゲイート<sup>ト</sup>では、120K以上の高温域は拡散電流領域、120K以下はR-G電流領域

## 5. 7. 2 IRFPA (Infrared Focal Plane Array)

### (1) Si CCDによる信号転送

\* キャリアは正孔のため、低温動作Si CCD転送部は表面pチャネル構造(図5-37)。<sup>89)</sup>

\* 4相駆動、各転送電極長(L)15 $\mu$ m、転送周波数10KHz、77K、100画素条件で、pチャネル転送効率は、埋め込みチャネル67%に対して、表面チャネル99%以上と良好。

### (2) 転送周波数<sup>90)</sup>

\* L=15 $\mu$ mの表面チャネルCCDの転送効率(99.99%/画素)が得られる転送周波数(f)は3MHz(図5-38の熱拡散モデル試算と実測が一致)。

\* 転送周波数向上のためにはDのupと転送電極長の短縮が効果的。

### (3) フレーム周波数と画素数、水平駆動周波数

\* 一般に、最大フレーム周波数(F<sub>max</sub>)は水平・垂直の画素数(h)、水平ブランキング時間(Th)、水平駆動周波数(f)、及び垂直ブランキング時間(Tv)から、全画素同時感光・1出力の場合

$$F_{\max} = [(h/f + Th) \cdot h + Tv]^{-1}$$

\* Th=5 $\mu$ s、Tv=1.2msの例を図5-39。多画素化に対応してF<sub>max</sub>は極端に低下する。

### (4) CCDの雑音

\* 転送雑音のチャネル構造依存性は図5-40。300Kでは埋め込みチャネルの方が低雑音だが、77Kでは埋め込みと表面で差なし。オンチップ出力アンプ雑音例は図5-41。

\* リセットゲートon/off時の浮遊拡散層内電荷残留分がリセット雑音で、浮遊拡散層容量(C)から(kTC)<sup>0.5</sup>/q。容量からの雑音値(50ele.rms)と、実測雑音値(52ele.rms)は一致。

\* CCD雑音を表5-8に纏め。通常、放射ショット雑音に比べてCCD雑音は十分小。

### (5) CCD出力信号処理<sup>89)</sup>

\* CCDオンチップアンプ直後の出力には、信号分以外のDC成分やIRFPA各画素の感度ばらつき(図5-42)が含まれる。より正確に画像化するため、A/D変換、信号補正を実施。

## 5. 7. 3 赤外検知器特性

\* J-T冷却例は図5-43、Stirling冷却例は図5-44。J-T型の方が小型、急速冷却。

### (1) 基本特性

\* 赤外検知器の雑音 ( $N_T$ ) はレンズ通過の放射ショット雑音 ( $N_B$ )、レンズ鏡筒の放射ショット雑音 ( $N_K$ )、ダイオード熱雑音 ( $N_{TH}$ )、ダイオード暗電流ショット雑音 ( $N_{DD}$ )、及びCCD雑音 ( $N_C$ ) で、

$$N_T^2 = N_B^2 + N_K^2 + N_{TH}^2 + N_{DD}^2 + N_C^2$$

\* 感度主要素の等価雑音温度差 (NETD) は、放射量コントラスト ( $C$ ) と、 $\tau$  比例の信号 ( $S$ ) から  $NETD = N_T / S / C$  で、 $N_C$  が無視出来る場合、NETD は  $\tau$  の平方根に反比例する。

### (2) NETDの各パラメータ依存性

- \* Pixel = 30  $\mu$  m,  $R_0A = 10^5 \Omega \text{ cm}^2$ , 背景温度 = 300K, レンズ明るさ = 2, レンズ見込み角 = 28度で、蓄積量 =  $3 \times 10^6$  ele. に固定時のコールドシールド角に対するNETDと蓄積時間(試算と試作)を図5-45。開口整合によるレンズ鏡筒ショット雑音 ( $N_K$ ) 低減でNETD = 0.02Kが予測出来る。
- \* コールドシールド角36度時の  $R_0A$  依存性(図5-46)。  $R_0A > 3 \times 10^4 [\Omega \text{ cm}^2]$  でNETDへの影響小。

## 5. 7. 4 将来動向

### (1) 赤外検知器全体では、小型化、急冷。

- \* 小型化は図5-43に示す通り J-T冷却型で12mm $\Phi$  (100\*100画素収納)可能。
- \* 急冷は図5-47に示す通り J-T冷却型・12mm $\Phi$  でCooldown Time < 3秒実現。

### (2) IRFPAでは、多画素化、高速駆動、低雑音化。

- \* 多画素化の各社動向は表5-9。最大画素数は現在1024\*1024<sup>92, 93, 94, 95)</sup>。
- \* 高速駆動の基本として図5-39にCCDの非分割時のフレーム周波数特性推定を示す。さらなる高速化は分割駆動。他方、MOS Switch Arrayではテークレート20MHzの例あり<sup>91)</sup>。
- \* 低雑音化狙いのPDA部の高  $R_0A$  化は、 $10^7 \sim 10^8 \Omega \text{ cm}^2$  相当 (0.55Vバイアス、50K時暗電流 = 400 ele./s、35K時 0.1 ele./s) の発表例がある<sup>92)</sup>。
- \* 同じく信号転送部は10 ele.rms以下の発表例がある<sup>95)</sup>。

### (3) PDAでは、量子効率up、反射率低減、均一化、低抵抗領域0化。

これらの課題はInSbプロセス技術の向上に応じて改善が進行中<sup>92)</sup>。

### (4) InSb結晶では、ウエーハ大口径化、ヘテロ構造化、モノリシック化。

ウエーハは3インチが購入可。当分Siとのハイブリッド構造での高性能化が主流。

## 5. 7. 5 まとめ

(1) InSb赤外検知器の特長は高量子効率、多画素化、低雑音が比較的容易である事。

(2) 量子効率 > 70%、PDA  $R_0A > 10^6 \Omega \text{ cm}^2$  (at 77K)、信号転送部雑音 = 70 ele.rms。

蓄積電荷量 =  $3 \times 10^6$  ele.、背景300K、レンズ明るさ = 2で、NETD = 0.02K見込める。

(3) 多画素化は、各社で256\*256画素以上を実用(最大は1024\*1024画素)。

(4) 低雑音化は、信号転送部で10ele.の予測や、PDA部で低暗電流化と低温駆動による35K時 0.1 ele./s等着実な改善が進展中。

(5) J-T冷却・100\*100画素収納型では、12mm $\Phi$ 小型化、Cooldown Time < 3秒を実現。

(6) 今後も具体的需要(要求)を見込みつつ、高性能、新製品化がさらに進むと考える。

(黒田 正廣)

参考文献

- 1) 新垣実、広畑徹、鈴木智子、山田正美、信学技報 ED94-104(1994-12)
- 2) C. B. JOHNSON , 2/SPIE VOL. 1655 ELECTRON TUBES AND INTENSIFIERS('92)
- 3) J. P. EDGECEMBE, V. W. AEBI, AND G. A. DAVIS , 204/SPIE VOL. 1655 ELECTRON TUBES AND IMAGE INTENSIFIERS('92)
- 4) J. S. ESCHER AND R. SANKARAN , APPLIED PHYSICS LETTERS , VOL. 29, NO. 2, 87, ('76)
- 5) J. S. ESCHER , P. E. GREGORY, S. B. HYPER, AND R. SANKARAN, J. APPL. PHY. 49(4), 259, ('78)
- 6) P. E. GREGORY, et. al, APPL. PHYS. LETT, 36(8), 639('80)
- 7) 浜松ホトニクス(株) TECHNICAL DATA SHEET :R5509-41, R5509-71
- 8) 浜松ホトニクス(株) : MCPアッセンブリ技術試料
- 9) M. SUYAMA , et. al , IEEE TRANS. ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 41(4) ('94)
- 10) DEP技術資料 : HYBRID PHOTOMULTIPLIER TUBES (HPMT'S) 154-08184A/FEB 1994
- 11) H. MATSUURA, Y. HASEGAWA, M. ITO, AND H. KYUSHIMA, SPIE'S 1995 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OPTICAL SCIENCE, ENGINEERING AND INSTRUMENTATION
- 12) M. LEMONIER, J. C. RICHARD, D. RIOU, M. FOUASSIER, R. POLAERT, 出典不明
- 13) W. ENLOE, R. SHELDON, L. REED, AND A. AMITH , 41/SPIE VOL. 1655 ELECTRON TUBES AND IMAGE INTENSIFIERS('92)
- 14) ITT TECHNICAL DATA SHEET
- 15) 井口昌彦他、第43回応用物理学会 28a-ZT-2
- 16) 中山智幸他、テレビジョン学会技報 VOL. 16(82)7-12('92)
- 17) K. COSTELLO, ET. AL, 177/SPIE VOL. 2550 INT. SOC. OPT. ENG.
- 18) E. L. NOLLE, 74/SPIE VOL. 2513 HIGH SPEED PHOTOGRAPHY AND PHOTONICS
- 19) K. KINOSHITA, ET. AL, 180/ SPIE VOL. 1982 PHOTOELECTR. DETECTION AND IMAGING '93
- 20) H. KUME, et. al., SPIE INT. SYMP. IN LASER SPECTROSCOPY, 19-24 JA('92)440
- 21) H. SUZUKI, K. KATOH, Y. HIKIDA, AND A. ONODA, PROC. INT. SYMP. ON SURF. AND THIN FILMS OF ELECTRONIC MATERIALS 30(3)195('95)
- 22) K. NAKAMURA , THE 6TH INT. CONF. PEACE THROUGH MIND/BRAIN SCI., FEB 28-MAR 1('96)
- 23) 浜松ホトニクス(株) TECHNICAL DATA SHEET : H5773/H5783/H5784シリーズ、H657
- 24) "Semiconductor and Semimetals, vol.18 Mercury Cadmium Telluride", (1988) Academic Press
- 25) P. Capper編, "Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds", (1994) Inspec, IEE
- 26) Y. Miyamoto et. al., "480x2 Hybrid HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays", Proc. SPIE vol. 2269 pp397, (1994)
- 27) I. Kasai, "Second-generation Infrared Focal Plane Arrays", 日本赤外線学会誌, vol. 3, No. 2, pp68, (1993)
- 28) 菅野俊雄, 他, "ハイブリッド型256×256画素10μm帯HgCdTe赤外センサ", テレビジョン学会技術報告 vol. 18, No. 17, pp39, (Mar. 1994)

- 29) F. D. Shepherd and A. C. Yang, Tech. Digest of IEDM, pp. 310 - 313 (1973).
- 30) E. S. Kohn et al., Proc. Int. Application of CCD's, pp. 59 - 69 (1975).
- 31) B. Capone et al., Proc. SPIE, Vol. 156, pp. 120 - 131 (1978).
- 32) R. Taylor et al., Proc. SPIE, Vol. 217, pp. 103 - 110 (1980).
- 33) P. W. Pellegrini et al., Tech. Digest IEDM, 157-160 (1982).
- 34) M. Kimata and N. Tsubouchi, "Schottky-barrier Photoemissive Detectors" in Infrared Photon Detectors edited by A. Rogalski, SPIE Press (1995).
- 35) W. F. Kosonocky et al., Tech. Digest of Int. Conf. on Application of CCD's, pp. 27 - 38 (1978).
- 36) M. Kimata et al., Tech. Digest of ISSCC, pp. 254 - 255 (1983).
- 37) M. Kimata et al., IEEE JSSC, Vol. SC-22, pp. 1124 - 1129 (1987).
- 38) N. Yutani et al., Tech. Digest of IEDM, pp. 175 - 178 (1991).
- 39) H. Yagi et al., Proc. SPIE, Vol. 1685, pp. 37 - 47 (1992).
- 40) W. F. Kosonocky et al., Proc. SPIE, Vol. 1308, pp. 70 - 80 (1990).
- 41) H. G. Erhardt et al., Proc. SPIE, Vol. 501, pp. 165 - 172 (1984).
- 42) J. M. Mooney, Proc. SPIE, Vol. 1107, pp. 2 - 8 (1989).
- 43) M. Kimata et al., Proc. SPIE, Vol. 1656, pp. 151 - 162 (1992).
- 44) T. L. Lin et al., Tech. Digest of IEDM, p. 641 - 644 (1990).
- 45) B-Y. Tsaur et al., Proc. SPIE, Vol. 1540, pp. 580 - 595 (1990).
- 46) R. J. Archer et al., Final Report, AFCRL-68-01222, Air Force Cambridge Research Lab., Boston (1968).
- 47) W. F. Kosonocky and G. Hughes, Proc. SPIE, Vol. 782, pp. 114 - 120 (1987).
- 48) M. J. McNutt et al., IEEE JSSC, Vol. 25, pp. 602 - 608 (1990).
- 49) J. E. Murguia and E. W. Ewing, Proc. SPIE, Vol. 782, pp. 121 - 128 (1987).
- 50) J. M. Mooney, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 38, pp. 160 - 166 (1991)
- 51) Wood, R. A., Han, C. J. and Kruse, P. W. : Technical Digest of Solid State Sensors and Actuators, p132, 1992 June
- 52) Kulwicki, B. M., Amin, A., Beratan, H. R. and Hanson, C. M. : Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, p1, 1992 Aug.
- 53) Futaki, H. : Jpn. J. Appl. Phys. 4, p28(1965)
- 54) Wood, R. A. : Technical Digest of International Electron Devices Meeting, p8.1.1, 1993 Dec.
- 55) Porter, S. G., Watton, R. and McEwen, R. K. : SPIE 2552, p573(1995)
- 56) Watton, R., Manning, P. A., Perkins, M. C. J., Gillham, J. P. and Todd, M. A. : SPIE 2744, p486(1996)
- 57) Hanson, C., Beratan, H. and Owen, R. : SPIE 1735, p17(1992)
- 58) Kanno, T., Saga, M., Matsumoto, S., Uchida, M., Tsukamoto, N., Tanaka, A., Itoh, S.,

- Nakazato, A., Endoh, T., Tohyama, S., Yamamoto, Y., Murashima, S., Fujimoto, N. and Teranishi, N. : SPIE 2269, p450(1994)
- 59) H.H.Kligenberg and C.O.Weiss: Appl. Phys. Lett. **43** (1983) 361.
  - 60) Y.Yasuoka, T.Sakurada, D.P.Siu and T.K.Gustafson: J. Appl. Phys. **50** (1979) 5860.
  - 61) H.Daniel, B.Maurer M.Sleiner and H.Walther: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 313.
  - 62) N.Inoue, K.Harakawa, and Y.Yasuoka: Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 268.
  - 63) Y.Yasuoka, T.Okuda and N.Inoue: Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) L886.
  - 64) K.M.Baird: Phys. Today **36** (1983) 52.
  - 65) Y.Yasuoka and T.Okuda: Rev. Laser Eng. **20** (1992) 963.
  - 66) J.J.Chang, T.Suzuki, T.Nozoekido, C.M.Mann, Y.Kuwano and K.Mizuno: Digest of 19<sup>th</sup> Int. Conf. on IR & mm Waves (Oct. 1994) 35.
  - 67) Y.Yasuoka, H.Takao and N.Inoue: Microelectronic Engineering 11 (1990) 101.
  - 68) M.Heiblum, S.Y.Wang, J.R.Whinnery and T.K.Gustafson: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 159.
  - 69) Y.Yasuoka, M.Heiblum and T.K.Gustafson: Appl. Phys. Lett. **34** (1979) 823.
  - 70) T.Shimizu, Y.Yasuoka, K.Gamo and S.Namba: Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) 3359.
  - 71) Y.Yasuoka, T.Shimizu, A.Kirihata and T.Uchida: Conf. Proceedings 21<sup>st</sup> Int. Conf. on IR & mm Waves (July 1996) Bth2.
  - 72) C.Fumeaux, W.Herrmann, H.Rothuzen, P.De Natale and F.K.Kneubuhl: Appl. Phys. B **63** (1996) 135.
  - 73) C.T.Elliott, D.J.Wilson: IR Physics 22, 31(1982)
  - 74) D.L.Smith: J. Appl. Phys. 54(9), 5441-5448(1983)
  - 75) J.C.Brice : Prog. Crystal Growth and Charact. 13, 39(1986)
  - 76) R.Triboulet : J. Vac. Sci. Technol. A3, 95(1985)
  - 77) A.W.Vere, B.W.Straughan, D.J.Williams, N.Shaw, A.Royle, J.S.Gough and J.B.Mullin : J. Crystal Growth 59, 121(1982)
  - 78) W.M.Higgins, G.N.Pultz, R.G.Roy and R.A.Lancaster : J. Vac. Sci. Technol. A7, 271 (1989)
  - 79) J.J.Dubowski, T.Dietl, W.Szymanska and R.R.Galazka and J. Phys. Chem. Solids 42, 351(1981)
  - 80) J.S.Chen : United States Patent No. 4 897 152 (Jan. 30 1990)
  - 81) S.H.Shin, J.M.Arias, D.D.Edwall, M.Zandian, J.G.Pasko and R.E.DeWames : J. Vac. Sci. Technol. B10, 1492(1992)
  - 82) N.Oda, T.Yamagata : Int'l. J. IR. and Mmw. 8, 133(1987)
  - 83) N.Oda, K.Miyamoto and T.Yamagata: Proc. of. the 31st SPIE Conference, Infrared Technology 819, 172(1987)

- 84) 小田, 山形 : 赤外線技術11, 18-24(1986)
- 85) 宮本, 山形, 小田, 藤野 : 赤外線技術 15, 19(1989)
- 86) T. Ashley, C. T. Elliott, A. M. White, J. T. M. Wotherspoon and M. D. Johns :  
Infrared Phys. 24, 25(1984)
- 87) R. A. Laff, et. al., "Carrier Lifetime in Indium Antimonide", Phys. Rev. 121, 1  
(1961) 53-62.
- 88) T. Uemoto, et. al., "IR Characteristics of InSb Photodiode with Backside  
Illumination", Proc. of the 5TH Sensor Symposium (1985) 43-46.
- 89) 角田他, "64\*64画素2層構造InSb-IRCCD", テレビジョン学会誌、Vol. 42, No. 5 (1988)  
484-492.
- 90) J. E. Carnes, et. al., "Noise Source in Charge-Coupled Devices", RCA Review  
33 (1972) 327-343.
- 91) L. J. Kozlowski, et. al., "640\*480MWIR HgCdTe FPA", SPIE Vol. 2020 (1993) 432-439
- 92) A. M. Fowler, et. al., "Evaluation of the SBRC 256\*256 InSb Focal Plane Array and  
Preliminary Specifications for the 1024\*1024 InSb Focal Plane Array", SPIE  
Vol. 1946 (1993) 25-32.
- 93) M. A. Goodnough, et. al., "FPA Design Methodologies at Santa arbara  
Focalplane", SPIE Vol. 2745-03, April 1996.
- 94) I. Kasai, "Second-Generation Infrared Focal Plane Arrays", 日本赤外線学会誌 第3  
巻 第2号 (1993. 12) 68-90.
- 95) A. Hoffman, "Current and Future InSb Infrared Arrays for Astronomy", SPIE  
Vol. 1946 (1993) 14-17.

表5-1 各種光電面の特性比較

	Window material	感度波長域 (nm)	感度 (%)	波長 (nm)	暗電流 at23°C (fA/cm <sup>2</sup> )	EBI (fW/cm <sup>2</sup> )
Ag-O-Cs	Lime-glass	400~ 1200	0.3 (°K)	800	900	20000 (0°C 1 μm)
マルチアルカリ (S-20)	Lime-glass	300~ 850	17 (°K)	430	0.3	3
Extendedマルチアルカリ (S-25)	Lime-glass	500~ 900	4.0 (°K)	650	1	23
GaAs (Cs)	7056	550~ 900	30 (°K) 8.5	550 880	25	417
InGaAs (Cs)	7056	550~ 1060	5.4 0.0023	900 1060	47	1200 24E <sup>6</sup>
GaAsP (Cs)	7056	300~ 700	55	530	5	19
InP/InGaAsP (Cs)	Lime-glass	300~ 1400	0.1	1300		
InP/InGaAs (Cs)	Lime-glass	300~ 1700	0.04	1500		

表5-2 MCT-IRFPA (主に90年代に報告されたもの)

画素数	波長帯	構造	メーカー	年代など
64 × 64	3-5 μm	ハイブリッド型	富士通	(1986年 SPIE)
	8-10 μm	ハイブリッド型	富士通	(1993年 SPIE)
	8-10 μm	ハイブリッド型	日本電気	(1993年 SPIE)
128 × 128	8-10 μm	ループホール型	GECマルコニー (英)	(1990年 IEE)
128 × 128	3-5 μm	ハイブリッド型	LETI (仏)	(1990年 IEE)
128 × 128	λc 13 μm 40 K 動作	ハイブリッド型	SBRC (米)	(1993年 日本赤外線学会)
256 × 256	3-5 μm 帯	ハイブリッド型	ロックウエル (米)	サファイア代替基板使用 (PACE-1)
256 × 256	8-10 μm	ハイブリッド型	SBRC (米)	(1993年 日本赤外線学会)
256 × 256	8-10 μm	ハイブリッド型	富士通	(1994年 TV学会)
480 × 640	λc 9.5 μm	ハイブリッド型 20 μm ピッチ画素 MCT / CZT / GaAs / Si 構造のウエハ	SBRC (米)	(1993年 日本赤外線学会)
512 × 2	8-10 μm	ループホール型	GECマルコニー (英)	(1990)
288 × 4	λc 10.3 μm	直接ハイブリッド型	SOFRADIR (仏)	
480 × 2	λc 10.5 μm	間接ハイブリッド型	富士通	(1994年 SPIE)
480 × 4	λc 10.3 μm	直接ハイブリッド型	SOFRADIR	(1994年 SPIE)

表5-3 代表的な2次元PtSiショットキバリア赤外線FPAの性能

TYPE OF FPA	PIXEL SIZE	FILL FACTOR	DESIGN RULE	Qmax	NETD
512x512CSD	26x20 $\mu\text{m}^2$	39%	2.0 $\mu\text{m}$	1.3Me	0.07K (f/1.2)
512x488IL-CCD	31.5x25 $\mu\text{m}^2$	36%	1.8 $\mu\text{m}$	0.55Me	0.07K (f/1.8)
512x512LACA	30x30 $\mu\text{m}^2$	54%	2.5 $\mu\text{m}$	0.4Me	0.1K (f/1.8)
640x486IL-CCD	25x25 $\mu\text{m}^2$	54%	1.2 $\mu\text{m}$	0.55Me	0.1K (f/2.8)
640x480MOS	24x24 $\mu\text{m}^2$	38%	1.5 $\mu\text{m}$	1.5Me	0.06K (f/1.0)
640x488IL-CCD	21x21 $\mu\text{m}^2$	40%	1.3 $\mu\text{m}$	0.5Me	0.1K (f/1.0)
640x480HB/MOS	20x20 $\mu\text{m}^2$	80%	2.0 $\mu\text{m}$	0.75Me	0.1K (f/2.0)
1040x1040CSD	17x17 $\mu\text{m}^2$	53%	1.5 $\mu\text{m}$	1.6Me	0.1K (f/1.2)
512x512CSD	26x20 $\mu\text{m}^2$	71%	1.2 $\mu\text{m}$	2.9Me	0.033K (f/1.2)

表 5-4 熱型非冷却センサの動作原理、レスポンスビリティ及びノイズ

		ボロメータ	強誘電体	サーモパイル
動作原理		抵抗変化	焦電効果	ゼーベック効果
レスポンスビリティ (定常状態) (単位: V/W)		$R_V = \frac{\alpha\eta V_B}{G}$	$R_V = \frac{\gamma_{eff}\eta d}{\epsilon_0\epsilon_r G}$	$R_V = \frac{S_C\eta}{G}$
ノイズ (単位: V)	ジョンソンノイズ	$\sqrt{2kT_d R / \tau_i}$	$\sqrt{2kT_d d \tan \delta / (\pi\epsilon_0\epsilon_r A)}$	$\sqrt{2kT_d R / \tau_i}$
	1/fノイズ	$V_B \sqrt{K \ln(f_2/f_1)}$	...	...
	マイクロフォニックノイズ	...	電歪効果に起因 (定式化困難)	...
	温度揺らぎノイズ	$V_{TF} = (R_V / \eta) \sqrt{kT_d^2 G / \tau_T}$		
	フォトンノイズ	$V_{PN} = R_V \sqrt{2A\sigma k (T_d^5 + T_a^5) / (\eta\tau_T)}$		

$\alpha$ : 抵抗温度係数  
 $\eta$ : 赤外吸収率  
 $V_B$ : バイアス電圧  
 $G$ : 熱コンダクタンス  
 $\gamma_{eff}$ : 実効焦電係数  
 $S_C$ : ゼーベック係数

$d$ : 厚さ  
 $\epsilon_0$ : 真空の誘電率  
 $\epsilon_r$ : 比誘電率  
 $R$ : センサの抵抗  
 $T_d$ : センサの温度  
 $T_a$ : 背景輻射温度

$\tan \delta$ : 誘電損失  
 $\tau_T$ : 熱時定数  
 $\tau_i$ : 積分時間又は読出時間  
 $K$ : 定数  
 $f_2$ : 周波数帯域の上限  
 $f_1$ : 周波数帯域の下限

$A$ : 受光面積  
 $\sigma$ : Stefan - Boltzmann定数  
 $k$ : Boltzmann定数

表5-5 77K InSb中のキャリアの拡散長

キャリア	移動度[ $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	ライフタイム[s]	拡散長[ $\mu\text{m}$ ]
正孔	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^{-7}$	60
電子	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-10}$	8

表5-6 Passivation膜MIS特性の膜構造比較

膜構造	膜中電荷密度 $Q_f$ [ $\text{cm}^{-2}$ ]
SiO <sub>2</sub> CVD 膜	$2 \cdot 10^{11}$
陽極酸化膜+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> スパッタ膜	$8 \cdot 10^9$

表5-7 暗電流のPN接合形成条件比較

形成条件	逆バイアス時の暗電流 [A] (0.1V, 面積= $4.3 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2$ )	R <sub>0A</sub> [ $\Omega \text{cm}^2$ ]
Mgイオン(400°C)	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^4$
Beイオン(400°C)	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^5$
Cd 封管拡散(400°C)	$4 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^6$

表5-8 表面チャネルCCDの77K時の雑音レベル

雑音源	実測雑音等価電子数 [ele.rms]
転送雑音	43 (埋め込みチャネル=45)
出力アンプ雑音	16
リセット雑音	52
全雑音	70

条件;100\*100 画素 CCD、蓄積電荷数= $1 \cdot 10^6 \text{ele.}$ 、  
駆動周波数=1MHz、測定帯域=10~2.5MHz

表5-9 多画素化の各社動向

画素数	ピッチ ( $\mu \text{m}$ )	メーカー	発表時期、文献等
1024*1024	30	Hughes	1993 Preliminary Data Sheet、SPIE 1993 <sup>(21)</sup>
640*512	24	Lockheed	SPIE 1996 <sup>(22)</sup>
640*480	20	Hughes	First Product 1991、日本赤外線学会誌 1993 <sup>(23)</sup>
512*512	—	Raytheon	1994 Product Data Sheet
256*256	30	Hughes	First Product 1990、日本赤外線学会誌 1993 <sup>(23)</sup>
	31	Lockheed	SPIE 1992 <sup>(24)</sup>
	40	Raytheon	1991 Product Data Sheet
	30	東芝	開発中

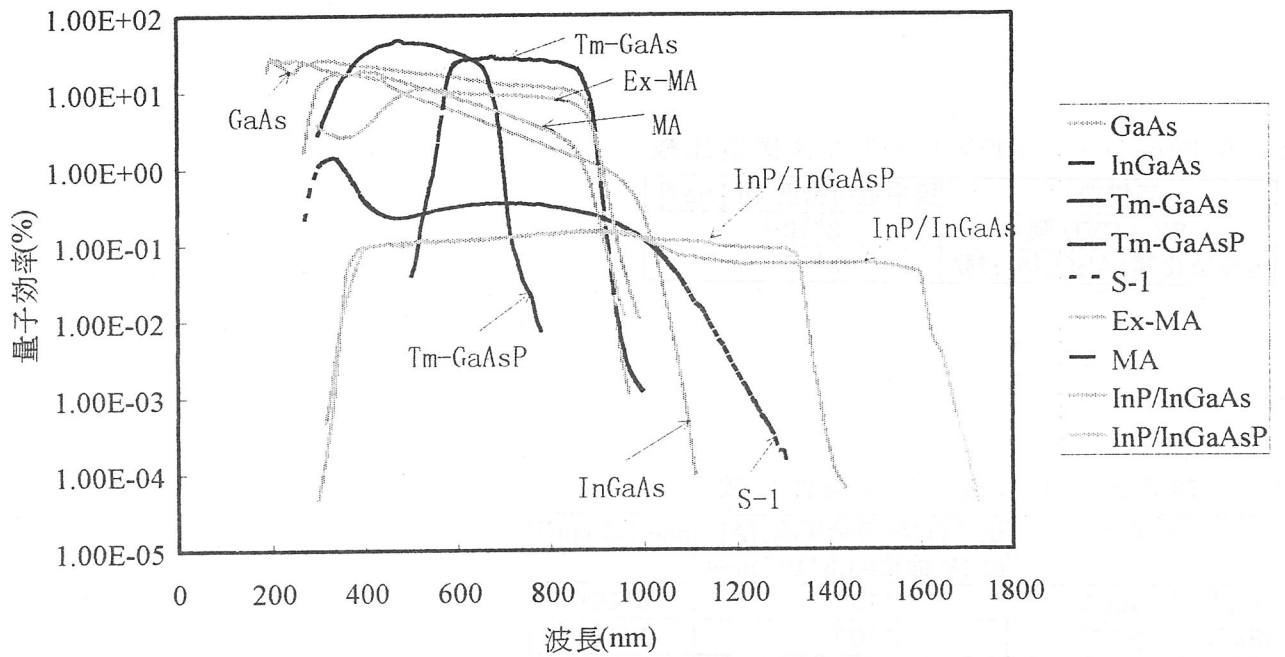


図5-1 各種光電面の分光感度特性

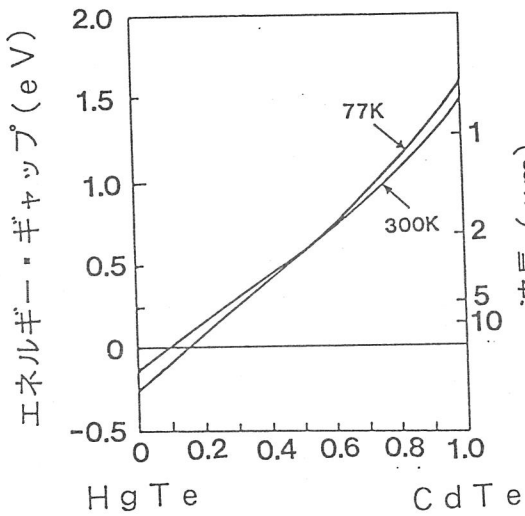


図5-2 MCTのバンドギャップ

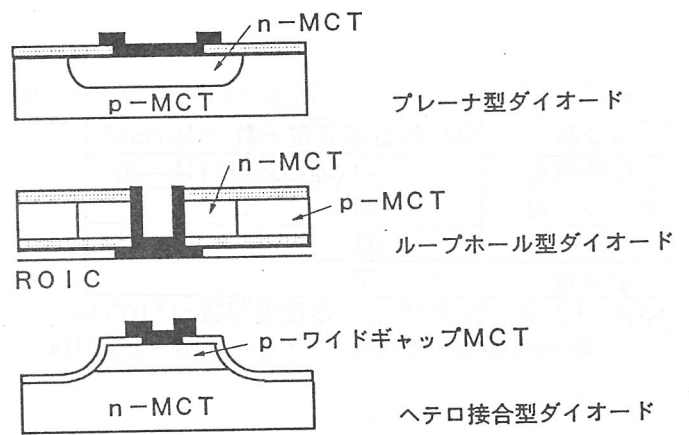


図5-3 MCTダイオードの構造

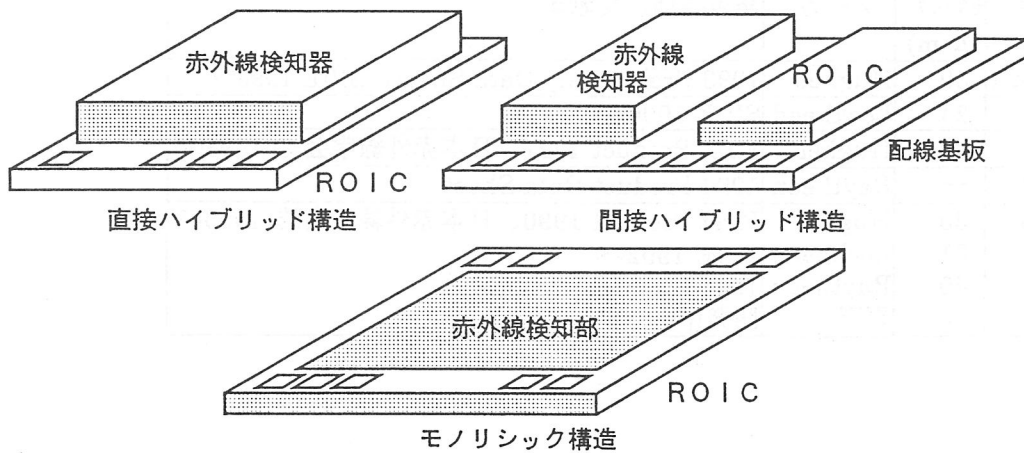


図5-5 IRFPAの構造

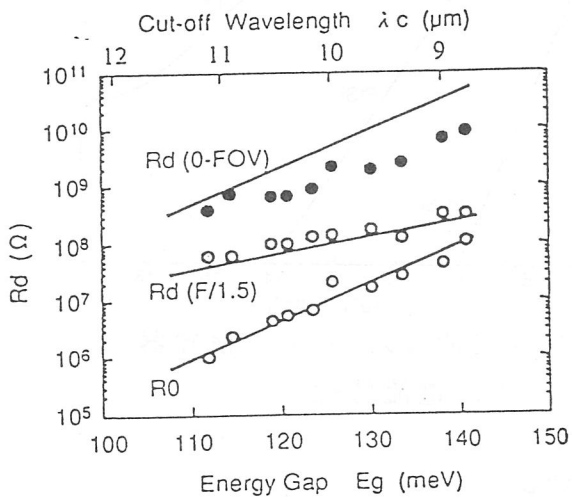


図5-4 ダイオード特性のバンドギャップ依存性

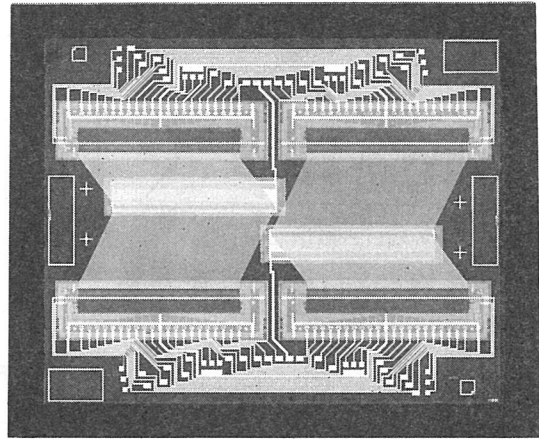


図5-6 480×2画素 IIRFPA

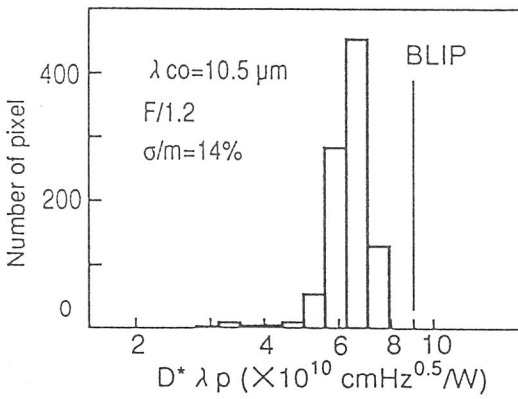
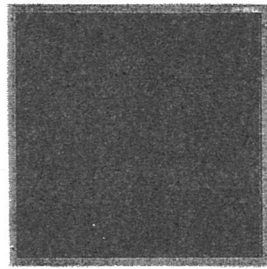
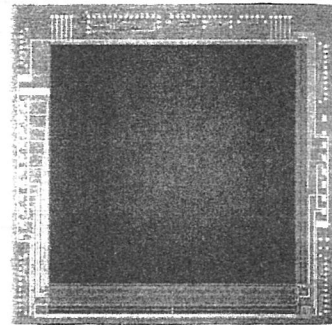


図5-7 比検出能 ( $D^* \lambda_p$ )



HgCdTeダイオードアレイ  
(10.2 mm □)



Si信号読み出し回路  
(12.2 mm □)

図5-8 256×256画素 IIRFPAのチップ写真

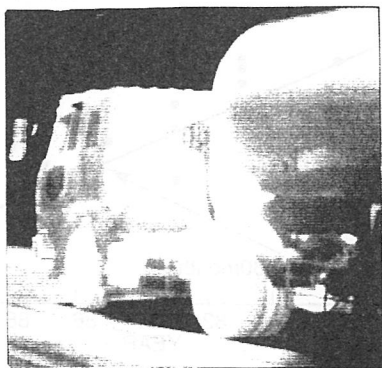


図5-9 256×256画素 IIRFPAの撮像例

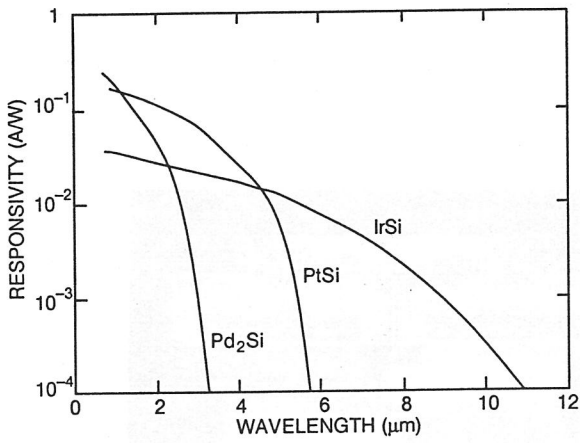


図5-10 代表的なショットキバリア検知器の分光感度特性

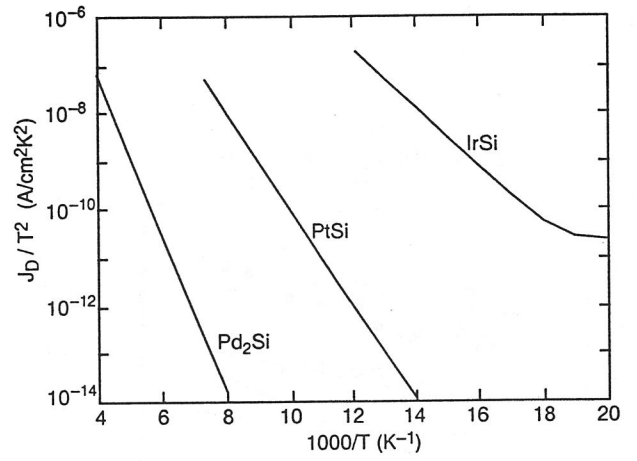


図5-11 代表的なショットキバリア検知器の暗電流特性

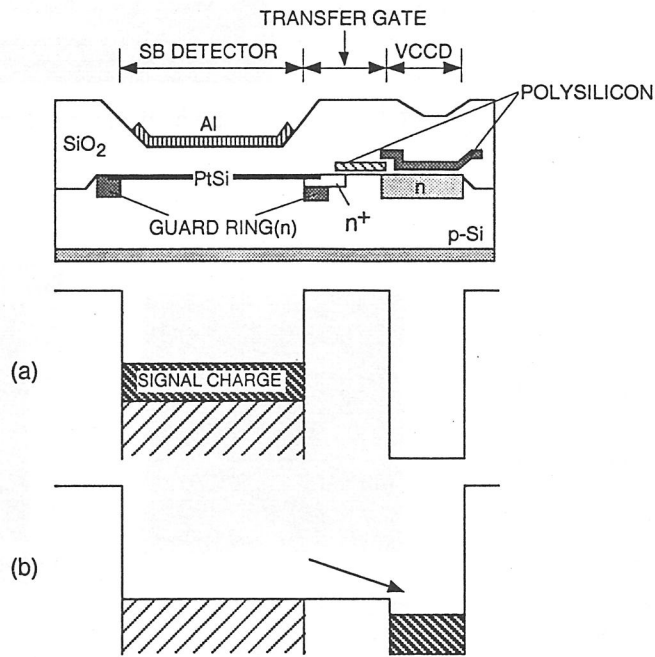


図5-12 PtSiショットキバリア赤外線FPAの画素の構造と動作

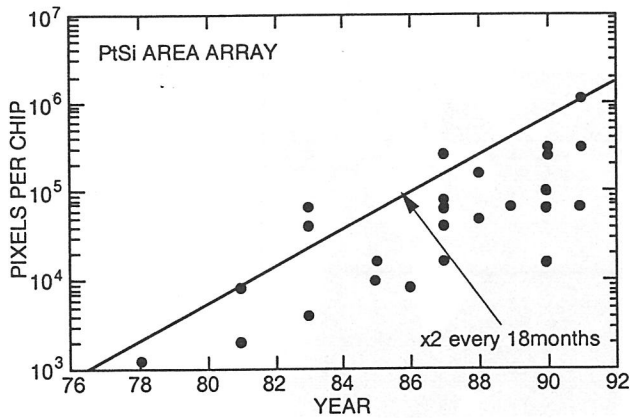


図5-13 PtSiショットキバリアFPAの集積度の推移

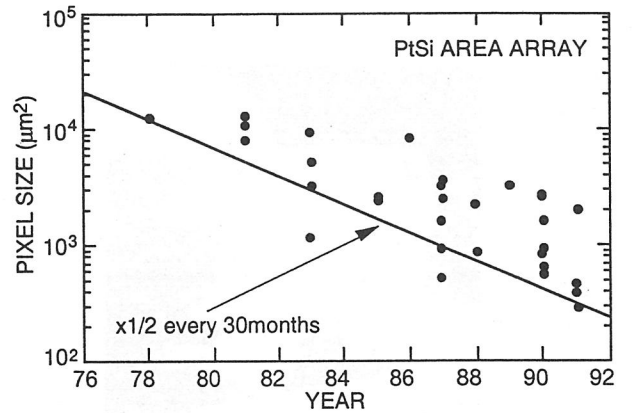


図5-14 PtSiショットキバリアFPAの画素サイズの推移

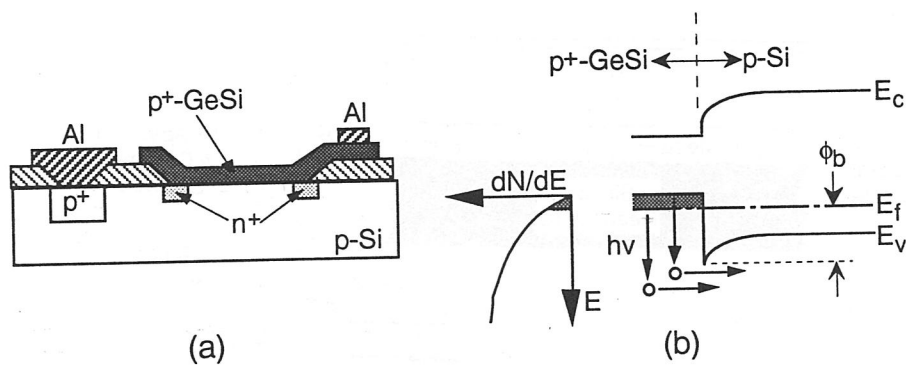


図5-15 GeSiへテロ接合検知器の構造と動作原理

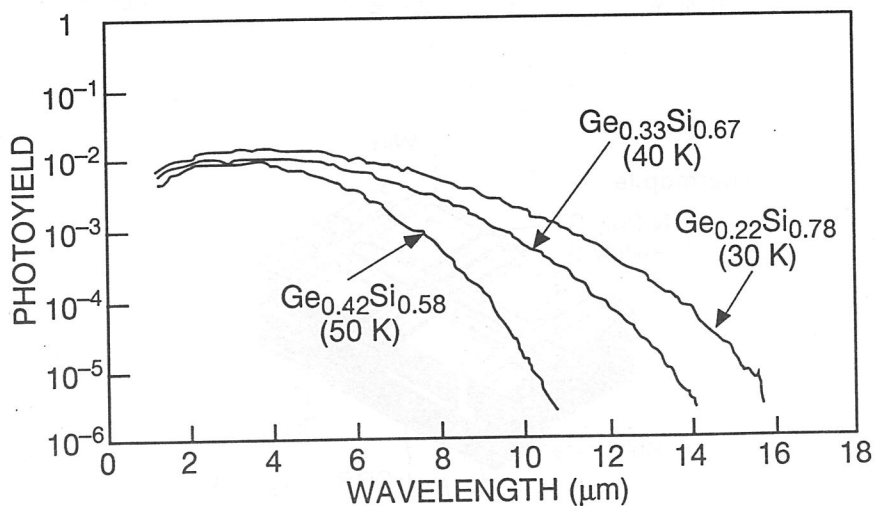


図5-16 GeSiへテロ接合検知器の分光感度特性

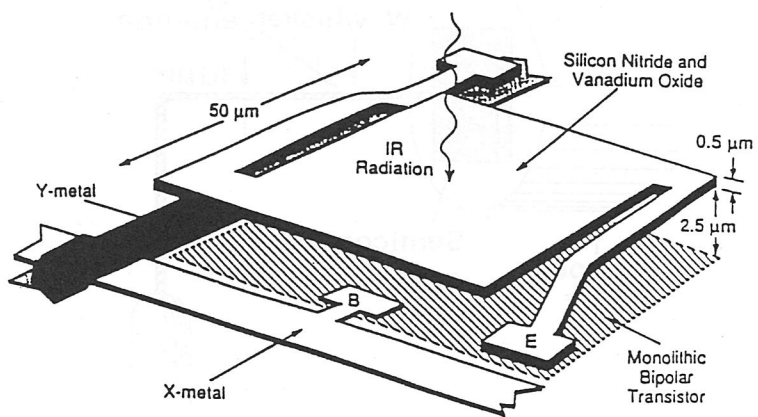


図5-17 240×336画素のモノリシック型マイクロボロメータレイの画素構造<sup>54)</sup>

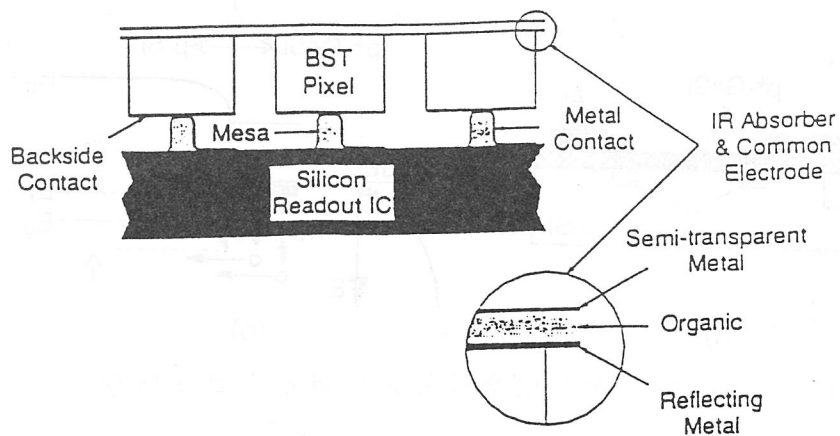


図5-18 245×328画素のハイブリッド型誘電体ホモータレイの画素構造<sup>57)</sup>

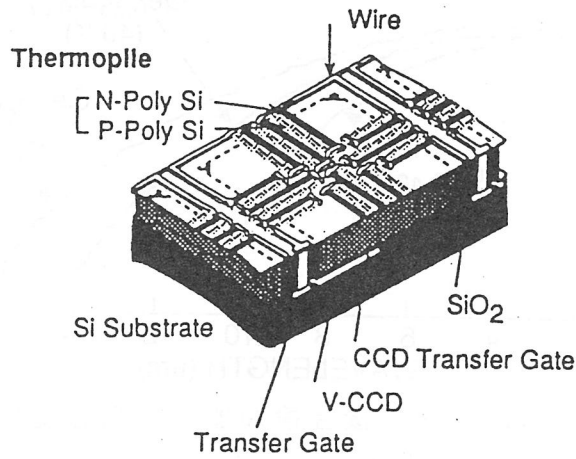


図5-19 128×128画素のモノリシック型サーモパイルアレイの画素構造<sup>58)</sup>

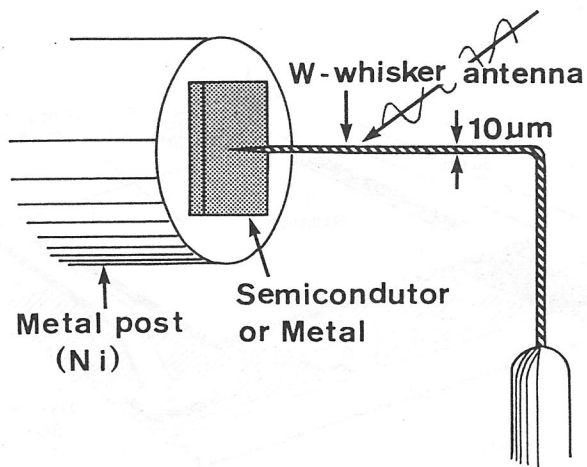
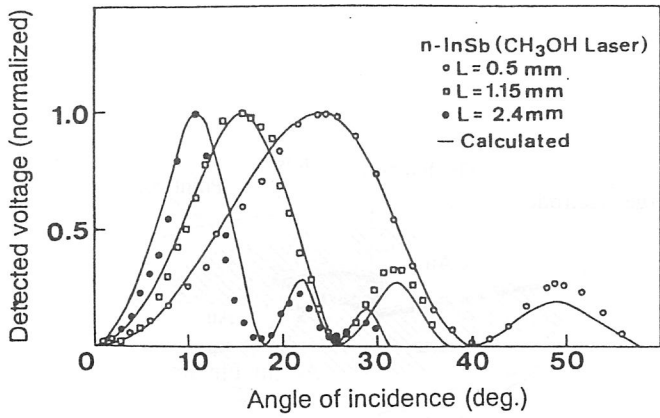
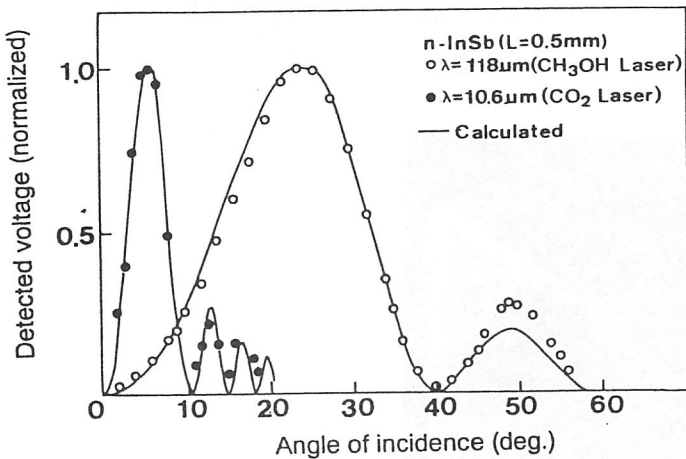


図5-20 点接触アンテナ結合型赤外線検出素子の構造



(a) アンテナパターンへのアンテナ長依存性



(b) アンテナパターンへのレーザー光波長依存性

図5-21 検出電圧-入射角度依存性 (レーザー光に対するアンテナ指向性)

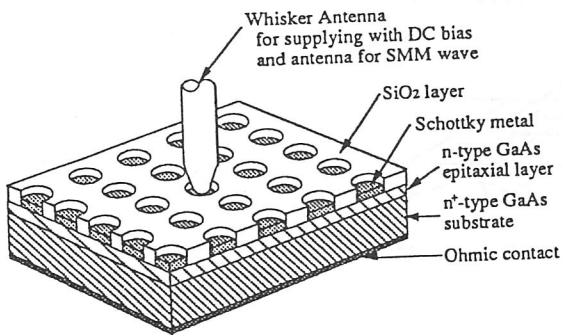


図5-24 ショットキバリアダイオードの構造

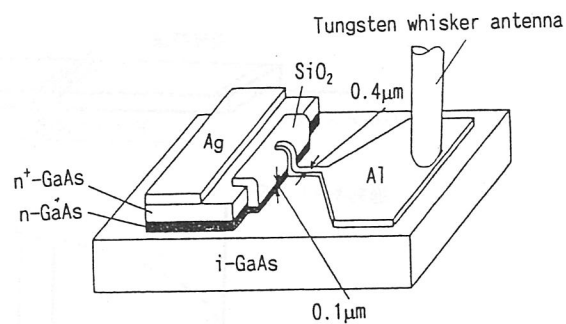


図5-25 エッジ型ショットキダイオードの構造

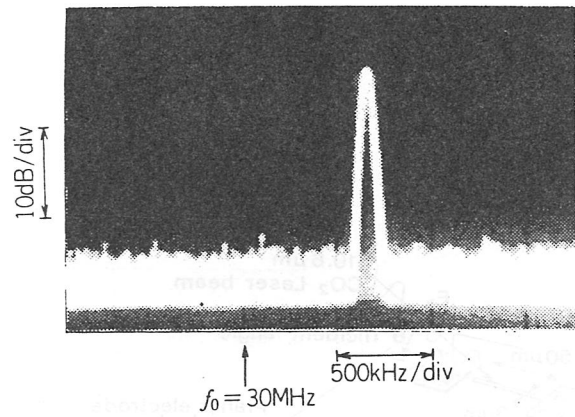


図5-22 発振線の異なった2本のCO<sub>2</sub>レーザーとマイクロ波を同時に照射して得られたビート信号

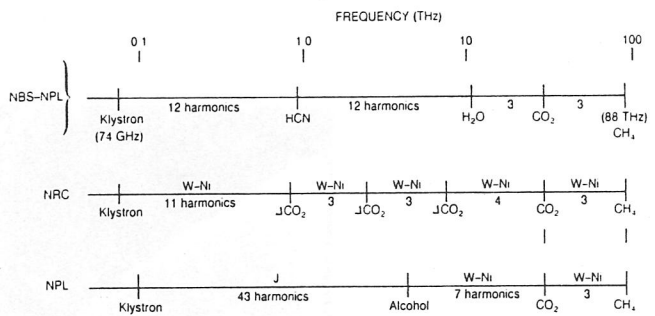


図5-23 MOM(W-Ni)点接触ダイオードを用いて行われるレーザー発振周波数の精密測定

NBS(National Bureau of Standard)  
 NPL(National Physical Laboratory)  
 NRC(Canadian National Research Council)

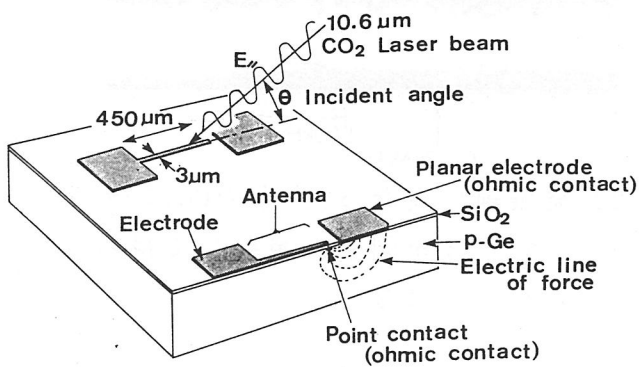


図5-26 ピンホール型ウオームキャリア素子の構造

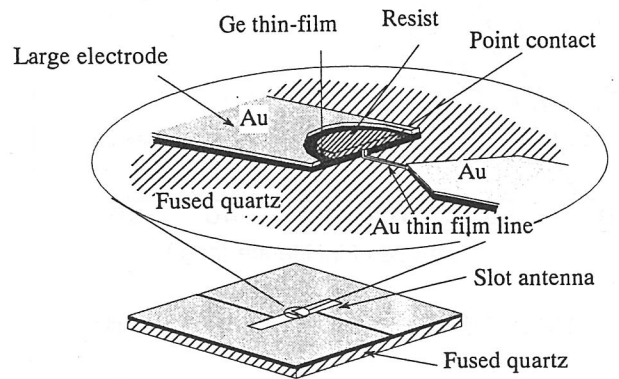


図5-27 スロットアンテナ結合エッジ型ウオームキャリア素子の構造

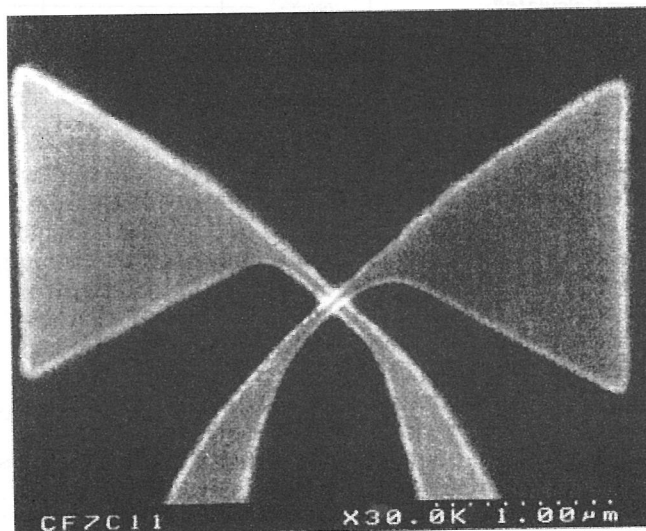


図5-28 ホウタイアンテナ結合MOMダイオードの構造

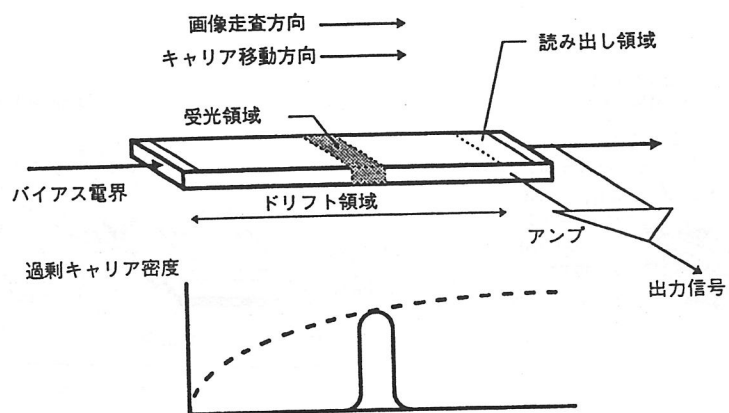


図5-29 SPRITE素子の構造

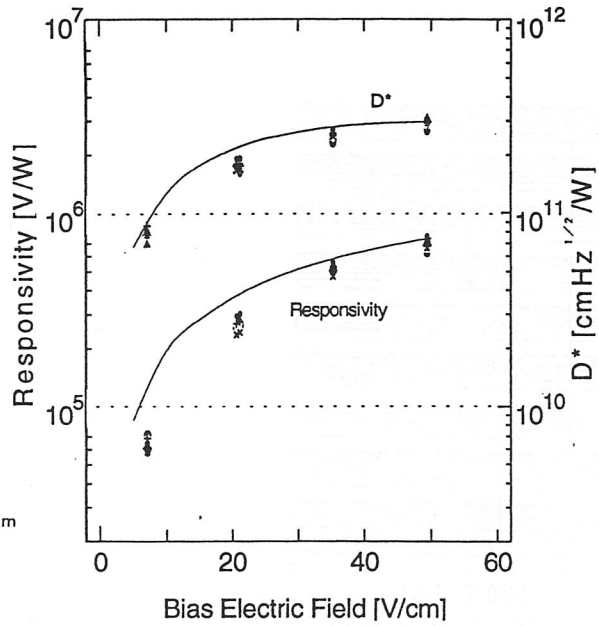
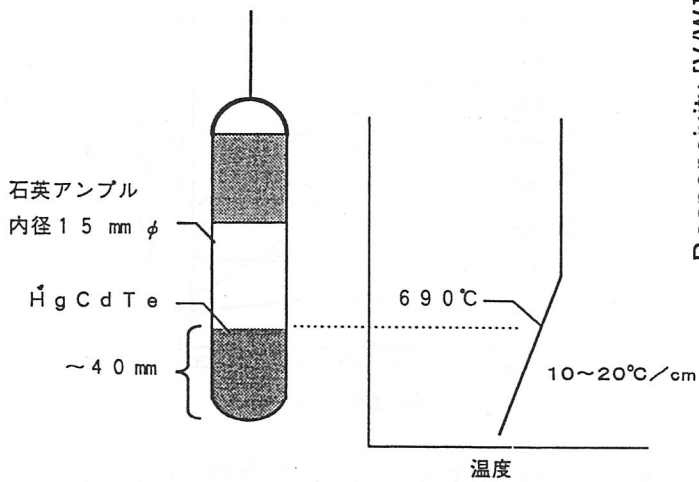
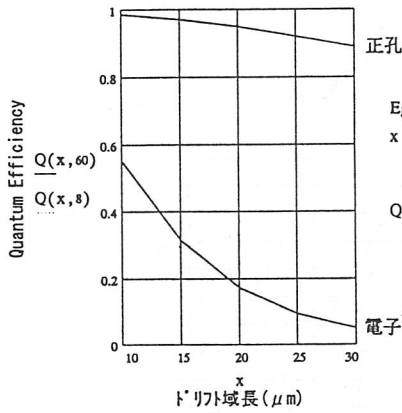


図5-30 SSR法

図5-31 デバイス特性



$$E_g = 0.228 \quad l = 8.60 \dots 60$$

$$x = 10, 15 \dots 30 \quad a = 8 \cdot 10^{-2} + 1.9 \cdot \left( \frac{1.24}{4} - E_g \right)^{0.5}$$

$$Q(x, l) = \frac{a \cdot l}{(a \cdot l)^2 - 1} \left[ \frac{a \cdot l \cdot e^{-a \cdot x} \cdot \sinh\left(\frac{x}{l}\right)}{\cosh\left(\frac{x}{l}\right)} - a \cdot l \cdot e^{-a \cdot x} \right]$$

$\text{InSb}$  屈折率  $n_s=1.7$      $\text{InSb}$  屈折率  $n_i=3.9$

空気/ $\text{InSb}$  反射率  $r_s=(n_s-1)^2/(n_s+1)^2=0.067$

$\text{InSb}$ / $\text{InSb}$  反射率  $r_i=(n_i-n_s)^2/(n_i+n_s)^2=0.154$

$$R_1=r_s \quad R_T=R_1+R_2+\sum R_{j+1} \quad (j>2)$$

$$R_2=(1-r_s)^2 \cdot r_i \quad =0.67+0.134+0.134 \cdot 0.01+$$

$$R_{j+1}=R_j \cdot r_i \cdot r_s \quad (j>2) \quad =0.203$$

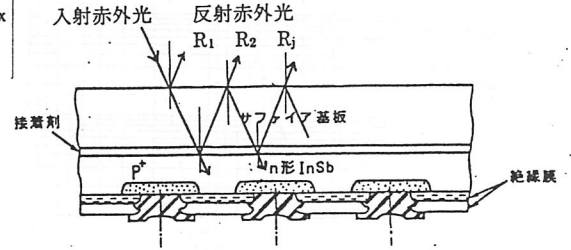


図5-32 InSb理論バルク量子効率

図5-33 サファイア/InSb 2重構造模式図

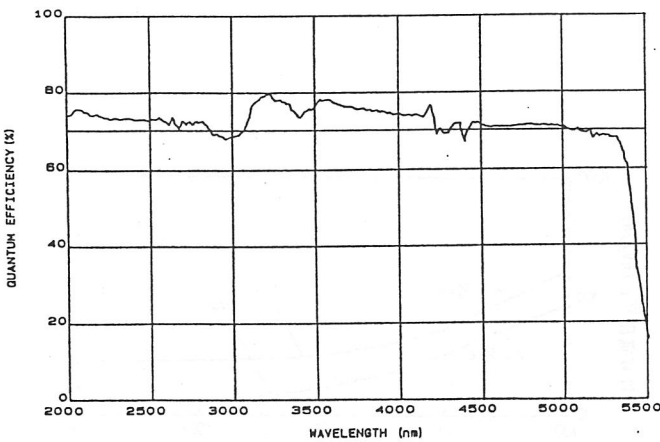


図5-34 InSb PDAの量子効率の波長特性

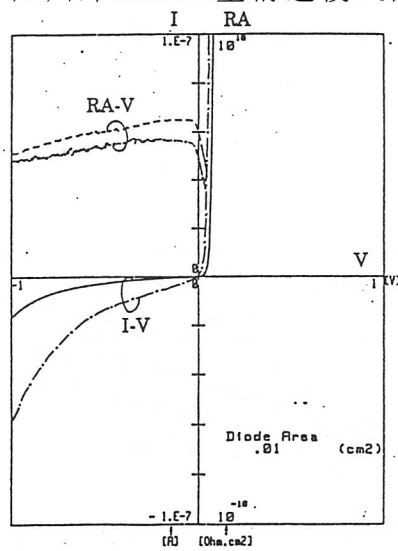


図5-35 Beインプラ及びCd封管拡散によるPN接合I-V&RA-V特性 (一点鎖線; Be、実線/点線; Cd)

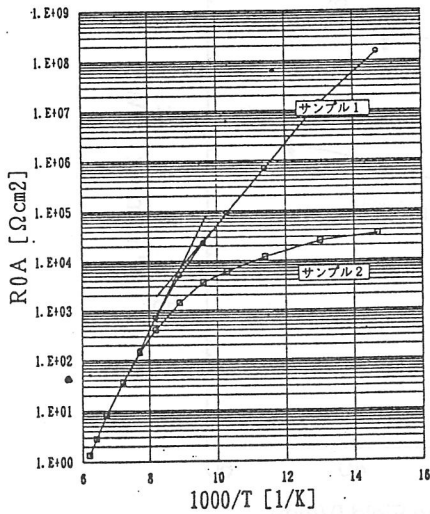


図5-36 ROAの温度特性

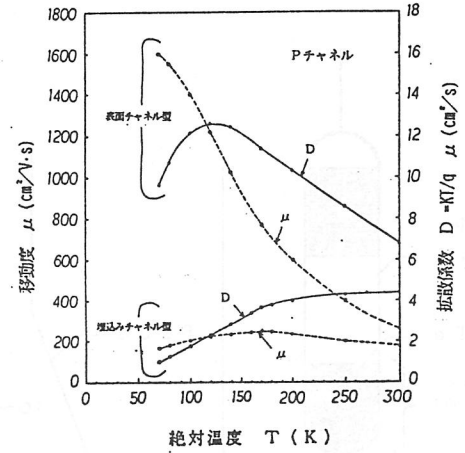


図5-37 移動度等の温度依存性のCCD構造比較

CCD非転送効率  
熱拡散モデル  
 $x = 1, 2, \dots, 6$

$$f(x) = 10^{6-2x}$$

$$G(1, x) = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{2\pi^2 \cdot D}{f(x) \cdot 4 \cdot 10^{-8}}} \cdot \left[ \mu; L=15\mu\text{mの定数} \right]$$

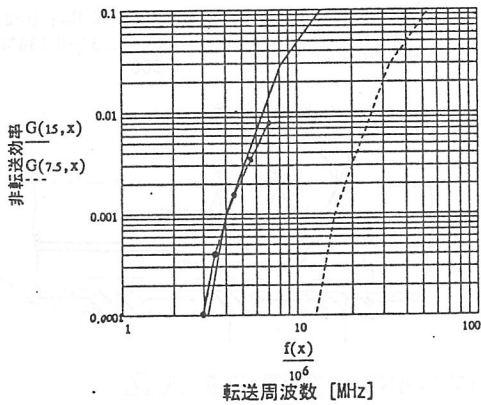


図5-38 転送効率と転送周波数

フレーム周波数試算

水平、垂直の画素数  $h = 128, 256 \dots 1024$

水平CCD駆動周波数  $f = 5 \cdot 10^6, 10 \cdot 10^6 \dots 20 \cdot 10^6$

水平「ラシク」時間  $Th = 5 \cdot 10^{-6}$

垂直「ラシク」時間  $Tv = 10^{-3} \cdot 1.2$

$$\text{最大フレーム周波数 } F_{\text{max}}(f, h) = \left[ \left( \frac{h}{f} \cdot Th \right) \cdot h \cdot Tv \right]^{-1}$$

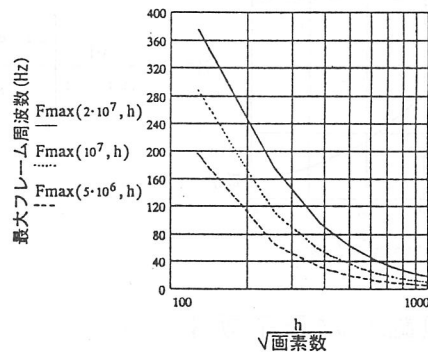


図5-39 フレーム周波数

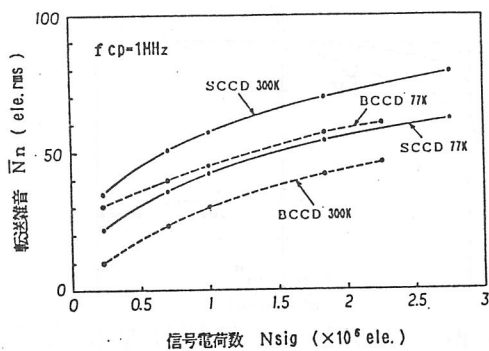


図5-40 転送雑音のチャネル構造、信号電荷数依存性 (100×100画素、30 μmピッチ)

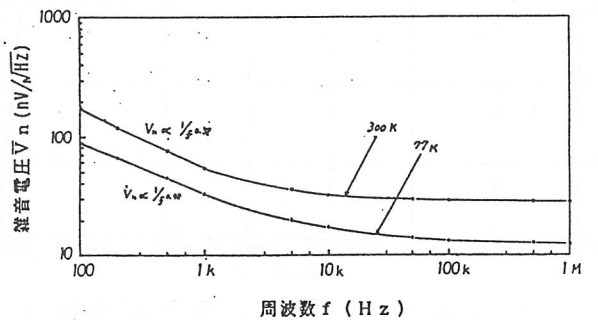


図5-41 オンチップ出力アンプの雑音特性 (PチャネルエンハンスメントMOSFET2段ソースフォロ)

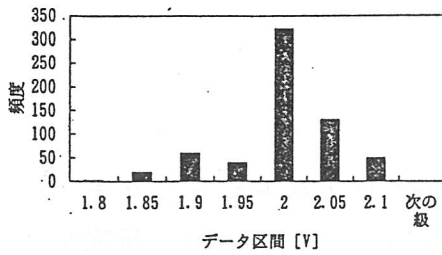


図5-42 100×100画素IRCCDのOS出力の  
頻度分布例

信号電荷数 2E6 ele.、出力有効画素率 99.96%(欠陥画素数=4p)

頻度総数は4pおきの625p、平均OS出力=1.99V、標準偏差(1σ)=2.8%

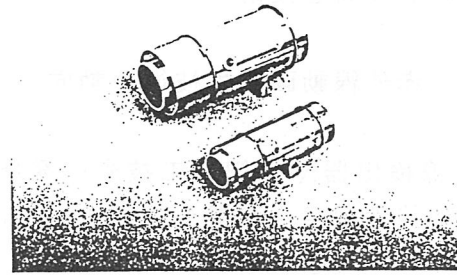
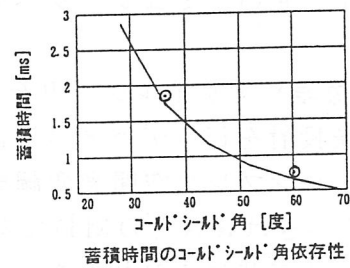


図5-43 J-T冷却赤外検知器例  
(直径18mmφと12mmφ)



蓄積時間のコールドシールド角依存性

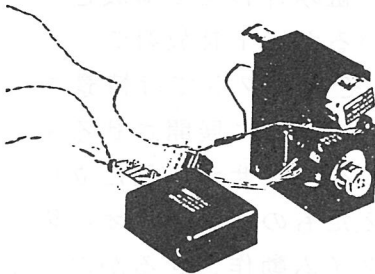


図5-44 Stirling冷却赤外検知器例  
(冷却能力;0.5W、Slip-In型)

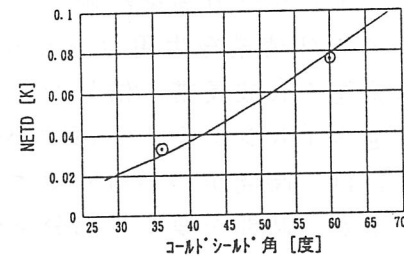
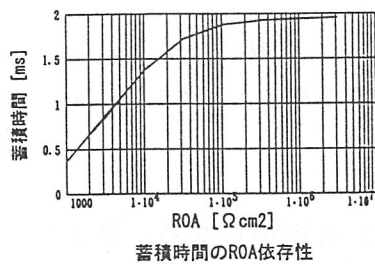


図5-45 NETDのコールドシールド角依存性



蓄積時間のROA依存性

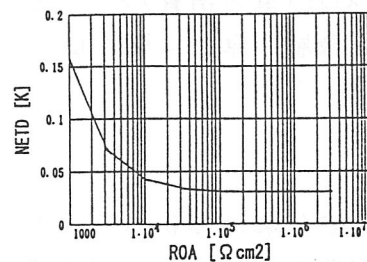


図5-46 NETDのROA依存性  
(狭波長帯域例)

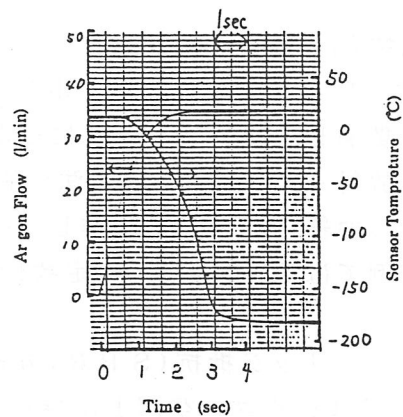


図5-47 J-T冷却、12mmφ、100×100画素赤外  
検知器のCooldown特性(Argガス:400気圧)

## 6. その他の周辺技術

### 6. 1 赤外線動画発生技術の動向

赤外線検出器や微細加工技術の発展をベースに米国を中心に赤外センサシステム評価用の赤外線動画発生装置(D I R S P, Dynamic Infra-Red Scene Projector)の研究や試作が盛んになってきている。ここではD I R S Pの構成要素である想定情景熱像を発生するデバイスを中心に現状を概観する。

#### 6. 1. 1 E Oシミュレータへの応用例

I R撮像器やミサイルシーカを実際のI Rの情景で試験する関心が高まっている。動的なI R情景投射を行うデバイスには抵抗アレイ(R A)、ディフォーダブルミラーデバイス(DMD)、メンブレン空間光変調器、液晶ライトバルブ、I R-C R T等(表6-1)があるが、注目すべきはR AとDMDである。R Aによる赤外の情景投射装置の概念を図6-1に例示する。2次元状にI R放射を行うアレイデバイスに光学系を組み合わせて構成され、ミサイルのI Rシーカ等を評価できる。また図には省略されているが、I R放射デバイスを駆動する赤外情景発生用コンピュータとソフトが存在する。そのソフトでは情景中の目標・背景をI R波長帯の信号となるように記述し、シナリオ中で動的に展開させる事ができる。通常I Rシグナチャ(目標や背景の赤外の放射パターン)をセンサから見た立場で計算するには、時間がかかるのでオフラインで計算し、一旦蓄えたものをシナリオに従って再生するか、時間を要する部分を簡略化して実行し、リアルタイム動作させるかの方法が選択される。

##### (1) 抵抗アレイ(R A)

I R情景投射に使うR Aには3種の基本構造がある。薄膜抵抗(T F R)、シリコンブリッジ抵抗(S B R)、及びサスペンデッドメンブレン抵抗(S M R)である。(図6-2参照)。

##### a. 薄膜抵抗(T F R)方式

T F R方式は、薄膜抵抗の層、ポリイミド絶縁層、及びシリコン基板からなる。発生熱は絶縁層を貫通しシリコンとそれにつながるヒートシンク(冷却フィン)に流れる。薄膜の性能特性は放射・伝導面の等価寸法に制限を受ける。どんな構造であれ(電力消費)×(時定数) = 一定の曲線の近傍点で動作し、所要電力と時定数の両方が絶縁層の厚みに強く依存する。代表例では温度200°C、時定数100~200  $\mu$ sである。

##### b. シリコンブリッジ抵抗(S B R)方式

S B R方式はシリコン空洞上に棒状の薄い抵抗素子を形成する。熱伝導は棒状素子の端へいくほど低くなる。この技術の難点は高熱伝導率である。電力消費を増加させれば速度向上できるが、各画素が加熱に1mWを要すると仮定すると512×512画素アレイ全体では250

Wにもなる。SBR方式は消費電力と時定数の積の点で魅力が少ない。Electro-Optek社の代表的製品は温度約1,000°C、時定数数msである。

#### c. サスペンデッドメンブレン抵抗(SMR)方式

SMR方式はもっとも望ましい構造をもっている。中央の膜はそれよりも小さな支持アームで単独または空洞の上部に吊られており、温度と応答速度を別々に分離して設計できる。Honeywell社とOptical ETC社のメンブレンSMRデバイスはもっとも成功している。Honeywell社が製作している128×128素子のエミッタアレイ(1/4×1/4インチ)で投影されたパターンを図6-3に示す。このアレイで8-12 $\mu$ mの400K黒体温度に要する全電力は僅か1.5W、フレームレート30Hz以上である。

#### (2) ディフォーダブルミラーデバイス(DMD)

DMDでは入力光の変調に個々のミラーのアレイを傾けるのに対し、メンブレン空間光変調器の膜は一枚のシート状反射フィルムである。DMD使用のIR情景投射装置の構成方法には各種ある。図6-4に一構成を示すが、この場合では画素が傾斜していない際は黒体1(BB1)からの光はDMDで反射されてIR撮像器に入射するが、画素が傾くと黒体2(BB2)又は室温背景からの光がDMDで反射されIR撮像器に入る。DMDはIR撮像器の像面に対応した物体面にある。階調とダイナミックレンジは黒体1と黒体2のスイッチングとパルス幅変調によって決まる。図6-4の右端の投影図形はT.I.社のロゴである。

現在、赤外線情景投射を行うのに静電方式と圧電方式の2種のDMDミラー傾斜方式がある。T.I.社は蝶番的に留められたミラーが、下に配置した電極で静電的に引きつけられる仕組みのミラーアレイを開発した。(図6-5(a))画素の寸法と蝶番を付ける事で各画素に対してねじれ、片持ち梁の効果がおきる。静電方式のDMDを図6-5に示す。

圧電式デバイスでは片側を固定した結晶、あるいは2個の逆極性の結晶にミラーを付け、電圧を加えるとミラーが傾く。DMDの利点は、反射を利用するので精密な黒体模擬が可能なこと、民需で大規模なHDTVアレイが製作され可視で成功を収めている事実がある。

デバイスは抵抗アレイに比し更にリスクが高いが、より汎用のIR情景投射システムを提供できる可能性をもつ。光学系には開発リスクはない。研究者の関心は十分な処理速度と長波長光学系の開発にある。また、パルス幅変調ミラー構成では、走査型FLIRへの同期化した情景の投影が問題であり、DMD方式は他方式に比し大型になる。T.I.社は768×576素子(17 $\mu$ m画素)のDMDをHDTV用に開発し、現在IR用途に256×256素子(37 $\mu$ m画素)のDMDを開発中である。Aura社は64×64素子(1mm画素)、フレームレート400Hzのデバイスを開発済みで、200×400素子(200 $\mu$ m画素)のアレイを開発中である。

## 6. 1. 2 米国で開発中のシミュレータの例

米国では1993年より4年間の計画でW I S P (Wideband Infrared Scene Projector)の開発が行なわれている(図6-7参照)。W I S Pは弾道ミサイル防衛局(BMDO, Ballistic Missile Defense Organization)の国家試験設備として位置付けられているKH I L S (Kinetic Kill Vehicle Hardware-in-the-Loop Simulator)の一部である。W I S Pの目的はブースト段階から大気圏再突入までの目標と背景を模擬(phenomenology effects)することにある。模擬には時間と共に変化するハードボディ、空間的・時間的に変動するブルーム及び航跡の流れを伴う大気圏再突入ビークル等がある。背景には様々の空間的・スペクトル的分解能をもった地球、雲、及び水平線がある。

W I S Pは、エミッタアレイ、コリメータ光学系、不均一性補正(NUC, Non-Uniformity Correction)のキャリブレーション、及びコントローラの4つの技術要素からなる。φIIではエミッタアレイは128×128素子の高ダイナミックレンジ(HDR, High Dynamic Range)のものと、512×512素子の基本性能のアレイを使用した。φIIIではシングルチップ化して512×512素子アレイの中央部に128×128素子を統合化することになっている(図6-6参照)。W I S Pの全体の仕様については表6-2に示す。

(松田 光)

## 6. 2 赤外線撮像技術

### 6. 2. 1 はじめに

近年、赤外線撮像技術は、赤外線検知器のI R F P A (Infra-Red Focal Plane Array)技術に急速な進展があり<sup>12)</sup>、活発な動きが見られる。ここでは、赤外線撮像技術の概要を記し、検知器を中心とした最近の技術動向を紹介する。

### 6. 2. 2 赤外線撮像の特長と応用分野

総ての物体はその表面温度と表面状態に応じて自発的に電磁波を放射している。常温付近の物体では赤外線領域に放射のピークがある。この赤外線放射の2次元分布を検出、画像化する技術が赤外線撮像技術である。赤外線の波長は可視光と電波の中間に位置し、赤外線画像で得られる情報には肉眼、TVカメラ、レーダ、等で得られる情報には無い特徴がある。例えば、

- (1) 目標の非接触放射強度(温度)計測が可能
- (2) 放射源が必須でなく(パッシブ動作が可能)、夜間運用可能、送信機不要
- (3) 可視光に比べて霧・霞等の大気現象の影響を受け難い
- (4) 電波に比べて高分解能で形状情報の取得が可能

等である。そのため、赤外線撮像技術は各種の産業分野に利用されている(図6-8参照)。

### 6. 2. 3 赤外線撮像の原理

赤外線撮像システムには大別して3つの要素が関与している。放射源、伝播路、および画像化である。各要素の特徴をよく考慮して使い方や適用技術を選定することが、コスト・パフォーマンスの高い撮像装置の実現につながる。

#### (1) 放射源

物体からの放射過程はプランクの法則(図6-9参照)が基本である。即ち、物体の分光放射特性は温度が高いほど放射量が極大となる波長が短くなる。表面温度約6000Kの太陽の放射は $0.5\mu\text{m}$ 付近に、300K程度の常温物体では $10\mu\text{m}$ 付近に、航空機の排気孔等、高温(数百~1000K)目標では $3\sim 5\mu\text{m}$ 付近にピークがくる。プランクの法則で表現される放射を出す物体をという。物体の自発放射はその温度だけでなく表面状態にも左右され、一般的に黒体より小さい(放射率 $<1$ )。固体や液体は普通、放射率の波長依存性が小さく灰色体という(図6-10参照)。一方、気体は構成分子の状態遷移に固有の波長で選択的な放射を行うことが多く、選択放射体と呼ばれる(図6-10参照)。エンジンやロケット・モータの排気ブルームの放射は、水蒸気と炭酸ガス以外に燃焼特性改善用の各種薬剤からの放射が複合されており、複雑な様相を呈する。

#### (2) 伝播路

大気伝播における減衰メカニズムは大別して2種類ある。即ち大気を構成する気体分子による選択吸収と大気中の微粒子による散乱である。赤外線の吸収に寄与する主な気体分子は $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、および $\text{O}_3$ である。 $\text{H}_2\text{O}$ による吸収は絶対湿度に関係し、場所による変化や季節変動がある。例として課降水量17mm、長さ6000ft、海面高度の大気路の分光透過率を示す(図6-11参照)。ある程度の透過特性が得られる波長域は $0.7\sim 2.6$ 、 $3\sim 5$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ ( $10\mu\text{m}$ 帯)等に限られていることが判る(大気の窓という)。

一方、散乱は伝播電磁波の波長と散乱粒子径の関係がそのメカニズムを左右する。粒子径が波長より小さい場合、散乱係数は波長の4乗に反比例し、波長に対する強い依存性がある。これをRayleigh散乱という。粒子径が更に大きくなっていくと散乱係数は複雑な波長依存性を示した後一定値に向かう。これをMie散乱という(図6-12参照)。散乱に係る気象現象としては靄、霧、雨がある。靄は大気中に浮遊、散在している塩の小結晶、非常に細かい塵、燃焼生成物等から成る。半径は $0.5\mu\text{m}$ 未満で、特に長波長の赤外線に対する影響は小さい。ただし湿度が高いと水分が付着して粒子径が著しく増大して大きな散乱を来すことがある。霧は更に水分が付着して半径が $0.5\sim 80\mu\text{m}$ となったもので、赤外線に強い散乱をもたらす。雨は重力によって落下する水滴で、その半径は $0.25\text{mm}$ を越えている。もはや波長依存性は無く可視光と同様の伝播状況となる。その他、シンチレーションによる輝度揺らぎや光路の曲がりの変調信号処理や目標方位検出精度に影響を与える場合があるとの報告<sup>14)</sup>がある。

### (3) 画像化

放射源から発して伝播路を通過して到達した赤外線を検出、画像化する。検出波長域を左右する赤外線検知素子材料の応答波長域と動作温度を図6-13に示す。材料によって適用可能な技術が変わってくるので、放射源と伝播路の特性以外に使用上の要件(視野角, 分解能等)も考慮して選定を行う。技術的手法は次項に記す。

## 6. 2. 4 赤外線撮像装置の技術動向

### (1) 赤外線撮像装置の構成

赤外線撮像装置の構成技術要素を図6-14に示す。

### (2) 撮像方式

2次元画像を形成するには機械走査もしくは電子走査が必要であるが、多画素化の進展に応じて機械走査の負担を下げる方向に進んできた。主な赤外線検知器の素子配列と走査形態を図6-15に、多素子リニア・アレイ(10 $\mu$ m帯)+並列走査方式の画像を図6-16に示す。

### (3) 検知器技術

多素子量子型検知器の登場により高感度リアルタイム撮像が可能となり、以来量子型検知器の進展即ち撮像装置の進歩という傾向にあった。現在のところ、主要な検知素子材料はHgCdTe, InSb, PtSiで、この中ではHgCdTeが10 $\mu$ m帯にも応答波長域を持たせることができる。各々素子数の増大努力が続けられており、凝視型の素子数の変遷は図6-17に示す通りである。近年凝視型FPA技術の発達に伴って、量子井戸型検知器、不純物ドーピングSi, SiGe等HgCdTe以外の長波長赤外線検知器の研究開発も進められている<sup>17)</sup>。また、熱型検知器の撮像装置適用が進んでおり(図6-18参照)、冷却が不要で広い波長範囲に渡って平坦な分光特性を有する特長を活かして応用範囲を拡げている。

### (4) 装置性能の評価手法

赤外線撮像装置の装置特性と運用性能の関係は、米軍を中心に精力的に研究が進められ、MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference、最小分解可能温度差)もしくはMDTD (Minimum Detectable Temperature Difference、最小検出可能温度差)を用いた認識、探知距離性能の見積もり手法が広く用いられている<sup>20)</sup>。装置適用技術の進展等に対応したブラッシュ・アップも継続されている<sup>21)、22)、23)</sup>。それ以外に赤外線撮像装置固有の特性として把握しておくべきものが幾つかあり、我が国では防衛庁規格として整備されてい

る。これには装置全体の試験方法の他に光学系，検知器系，表示系，および走査系の各要素の試験方法が規定されている。赤外線撮像装置試験方法(NDS C 0212)で採り上げられている試験項目について表6-3に示す

(中里英明・中辻俊一)

### 6. 3 赤外線大気伝播特性について

#### 6. 3. 1 はじめに

大気での赤外線伝播特性は、赤外線システムの屋外性能にとって重要なファクタである。特に10 kmを越える遠距離での運用が想定されるシステムでは大気透過特性がシステムの性能を決めている場合もあり、システム性能計算における大気透過率の評価は必須のものと言える。しかし赤外線の場合可視域での「視程 (VISUAL RANGE)」のような大気透過の直接的なメジャーが無い場合、赤外線領域での大気伝播による透過率劣化の程度を見積もるには、気象条件等を含めた大気路の物理的モデルに基づいた計算が必要となる。

赤外線大気伝播での減衰の物理過程としては、大別して、大気の構成分子による吸収過程と大気中の浮遊微粒子(エアロゾル)による散乱過程の2つに分けられる。

本章では米国の地球物理学研究所が開発した大気透過率の計算モデルLOWTRANを中心にその物理的内容について説明し、あわせて赤外線領域における大気伝播特性の一端について記す<sup>25)-30)</sup>。

#### 6. 3. 2 LOWTRANの概要とその変遷内容

通称、LOWTRANの正式名称は、“ATMOSPHERIC TRANSMITTANCE/RADIANCE: COMPUTER CODE LOWTRAN”であり、開発発行元は米国のGEOPHYSICS DIRECTORATE (HANSCOM AIR FORCE BASE, MASSACHUSETTS)、以前のAIR FORCE GEOPHYSICS LABORATORYである。LOWTRAN 2 が 1972年に発行された後 順次バージョンがアップされ、最新版は1988年発行のLOWTRAN 7 である。

LOWTRANの基本的な仕様は、波長域が 0  $\text{cm}^{-1}$ から 50,000  $\text{cm}^{-1}$ (波長で0.2  $\mu\text{m}$ )、分光分解能は 20  $\text{cm}^{-1}$ , 分光サンプル間隔は5  $\text{cm}^{-1}$ である。高度は地表から 100 km までをカバーし、米国標準大気、中緯度夏、中緯度冬等の地球規模で代表的な6種の条件下における大気モデルを有している。エアロゾルモデルは地表でのモデルの他、対流圏、成層圏、中間圏のモデル、雲、霧、雨 等のモデルを含んでいる。

LOWTRANにおける大気透過率算出手法は、図6-19に示す通りである。透過率は、分子吸収(バンド構造帯)、分子吸収(連続帯)、分子散乱(RAYLEIGH散乱) 及びエアロゾルによる減衰の各項目の積の形で算出される。吸収に与かる気体分子として、水蒸気、オゾンその他、空気の構成ガスである $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ (これらをMIXED GAS とよぶ)が含まれる。なお、窒素分子 $\text{N}_2$ は、アルゴンガスAr同様、紫外線以上の波長帯では透明であるが、3.8  $\mu\text{m}$ から4.7  $\mu\text{m}$ に衝突誘起の連続吸収帯が存在する。またLOWTRANでは水蒸気の連続吸収帯がバンド構造の吸収帯とは別に設けているが、これは、水蒸気吸収ラインのFAR WING成分の集合と

考えられているものであり、上記の $N_2$ 分子の吸収帯同様、分子間の衝突頻度に比例する成分である。

LOWTRANの計算フローでは、基本的な入力パラメータとして気象条件や大気経路が設定されると、LOWTRAN自体が持っている大気モデルに従って各分子の吸収体密度や吸収係数が算出される。またエアロゾルモデルの選択と可視での視程距離情報の入力に応じて、計算波長域でのエアロゾル減衰が算出される。バンド構造帯の分子吸収の透過率算出に当たっては近似的手法としてLOWTRAN独自の透過率関数が使われている(詳細は6.3.3節)。

表6-4には、LOWTRANモデルの主要な変遷内容を示す。

### 6. 3. 3 LOWTRAN バンドモデル

分子のバンド構造の吸収に対して、LOWTRAN 6まではLOWTRAN 透過率関数として2種類のテーブル指定の関数曲線しか無かったが、LOWTRAN 7では、分子毎及び波長帯毎に、2種類のパラメータを持ったDOUBLE EXPONENTIAL形の解析的関数で近似されるようになった。

吸収体量に対し透過率がEXPONENTIALに減衰する、「ランバート・ベール則」に従った減衰関数に比べるとLOWTRAN 透過率関数は、吸収体量が大きなところでは「ランバート・ベール則」より減衰量が小さくなる効果が表現出来る。LOWTRAN 関数はバンド構造の吸収に対して低分解能の分光モデルで計算する際の近似であり、バンド構造を持たない水蒸気や窒素分子の連続帯、エアロゾル散乱については当然「ランバート・ベール則」が成り立ち、その振る舞いはEXPONENTIAL減衰で表される。

### 6. 3. 4 スラントパスでの透過率の計算

LOWTRANでは高高度での大気透過率の計算が可能である。高度により気圧は減少していくので、高度毎での大気構成分子の密度も地表の状態とは大きく異なってくる。気温も地表とは異なった値をもち、当然分子吸収の減衰量も変わってくる。従って高度10 kmから地表の目標を観測するような、傾斜した光路のパスでの透過率計算には、各高度における大気状態を入れてパス全体の積分計算をすることが必要である。LOWTRANでは6種の大気モデルがあり各高度毎の大気条件、すなわち、気温、気圧、水蒸気量、各大気構成分子の密度、エアロゾル量が与えられている。これらのデータを基に任意のスラントパスでの透過率計算が行われる。

スラントパス光路もかなり遠距離になると、地球自体半径が約6400 kmの球体であるため、各パスポイントでの高度は単純な地平面仮定での比例計算で割り出したものとは微妙にずれてくる。例えば周回軌道の人工衛星からかなり横方向から地表をみた場合などは地球の曲率を計算に入れて各光路での高度を計算する必要がある。LOWTRANではこの効果を含めて計算する。

またセンサと目標までの距離が100 kmを超えるようになると、屈折率の高度変化に伴う光線の曲がりが無視出来なくなる。これらの効果についてもLOWTRANでは考慮されている。大気屈折率変化による影響としての行路の曲がりの程度は、地表付近で水平路の場合、

約4万キロの曲率半径のものであり、曲がりの向きは地表に近づく方向である。

### 6. 3. 5 エアロゾルモデルについて

LOWTRANのバージョンが上がる度にエアロゾルモデルも種類が増え多様化してきた。表6-5にLOWTRANにおけるエアロゾルモデルの分類を示す。

### 6. 3. 6 精度及び他のモデルとの比較

ここでは、LOWTRANの各バージョンでの透過率計算値の比較例と、さらにLOWTRAN以外のモデルとの比較の結果について示す。

先ず、LOWTRANバージョン間の比較として、LOWTRAN 5、6、7について赤外線領域、ここでは「大気の窓」である $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯と $8\sim 12\mu\text{m}$ 帯の2波長帯について試算した。距離は30 kmとやや長めに設定し、モデル間の差異を強調している。図6-20にその結果を示す。 $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯では、 $3.4\mu\text{m}$ から $4.1\mu\text{m}$ までの領域では細かな構造部分で僅かな差があるものの総体的にはよく一致している。 $4.5\mu\text{m}\sim 4.9\mu\text{m}$ 帯や、 $8\sim 12\mu\text{m}$ 帯では各モデルによる系統的な差異が生じている。この違いはLOWTRANのバージョンアップに伴って行ってきた水蒸気連続吸収帯の見直しの結果によるものと思われる。 $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯についてはLOWTRAN 5以前では水蒸気連続吸収帯の $4.5\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 付近での値が設定されていなかったため、 $4.5\mu\text{m}\sim 4.9\mu\text{m}$ 帯透過率がLOWTRAN 5では大きく出たものと思われる。 $8\sim 12\mu\text{m}$ 帯については、LOWTRAN 7で行った、 $10\mu\text{m}$ 付近での水蒸気連続吸収帯の吸収係数見直しにより幾分吸収係数の値が下げられたことが反映しているものと思われる。

図には各モデルでの波長帯平均の透過率が記載されているが、これらに対数に変換し疑似的な減衰係数の形で比較すると、LOWTRAN 5とLOWTRAN 7では、 $8\sim 12\mu\text{m}$ 帯で約15%、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯で約6%の差が出ている。言換えれば、同じ透過率になる距離がLOWTRAN 5とLOWTRAN 7では15% ( $8\sim 12\mu\text{m}$ 帯)、6% ( $3\sim 5\mu\text{m}$ 帯)の違いが出てくるということである。

LOWTRAN以外の大気伝播予測モデルには、MODTRAN及びFASCODEがある。MODTRANは、分光分解能がLOWTRANの10分の1の $2\text{cm}^{-1}$ である。またFASCODEは、各吸収ラインの物理諸元(共鳴波数、線強度、線広がり等)のデータベース(HITRANデータベース)を基に直接的に各波長での吸収による減衰を算出するものであり、バンドモデルに基づく不確かさは無いはずである。これらとLOWTRAN 7との比較サンプルを図6-20に示す。大気条件は先のLOWTRAN間での比較のものと同じである。比較の結果は3者間での一致は極めて良いものと言える。但しこれら3つのモデルはすべてGEOPHYSICS DIRECTORATEが開発したものであり当然地表付近の大気条件では一致し易いものと考えられる。FASCODEによる透過率プロファイルは、細かな構造が見て取れるが、LOWTRANではこれらの構造が洗い流されている。LOWTRANモデルの限界を感じさせる。

屋外測定データとの比較の研究論文は幾つか見られるが、いずれも定量的な比較とは言いがたい。これは主に実験上の問題のためである。例えば、長い光路のスペンにわたって気象条件が一定していない、あるいは特定ができないなどの定量測定の阻害要因がある。またこれに加えて、シンチレーション等により受信強度が揺らぐなどの問題や、受信感度

の校正の問題等が挙げられている。

以上で述べてきたように、LOWTRANそのものの妥当性ないしは精度については定量的に論じられない状況であるが、上記のモデル間での比較等から、大気の窓程度の比較的広い帯域での平均値でみた場合に限定すれば、地表での通常の距離の条件では減衰係数換算で約10%の精度とみるのが妥当かと思われる。LOWTRANはその名の示すように低分光分解能のモデルであり、経験的なバンドモデルやLOWTRAN透過率関数などを導入しているので、限定された条件下でしか合わせ込まれていない面があると思われる。従って、40 km 以上の高高度では計算精度は落ちるとも言われている。

#### 6. 4 まとめ

5章までに含まれなかった技術の内、目標放射を模擬する赤外線画像発生技術、画像としてセンシングするシステムに係る撮像技術、および目標とセンサの間を媒介する大気の伝播特性について概要を示した。赤外線画像発生技術としては抵抗アレイとディフォーダブル・ミラー・デバイスが、解像度、フレーム・レート、等の面から注目度が高い。撮像技術の内、赤外線撮像装置の技術動向としては、凝視型FPA技術の発達に伴う新しいタイプの量子型検知器と非冷却センサの技術進展が目を見届げる。大気の伝播特性に関しては分光分解能を下げ取扱性を良くした大気特性計算モデルLOWTRANを中心に概観したが、データベースとモデルの追加・更新が続けられており、発展途上にあるということができよう。各アイテム共、赤外線検知システムを構成する主要素に関する技術であり、常に先端状況を抑えておくことが、今後ともシステム検討上、重要である。

(松浦 義雄)

#### 参考文献

- 1) Thomas Old and Steven Gutsche(MRC), :Optics, Electronics, Test Calibration, and Characterization for Tactical Scene Generator, プレゼンテーション資料(1994)
- 2) Ronald Drigges, et. al., :Review of Infrared Scene Projector Technology -1993 Optical Engineering Vol. 33, No. 7, (1994)
- 3) Honeywell, Honeywell Infrared Projector Technology, パンフレット(1993)
- 4) Anne Carstens, Robert Stockbridge(Wright Lab., Eglin AFB), and James Dillon (Contraves), :Wideband Infrared Scene Projector(WISP), SPIE Vol. 2474 Smart Focal Plane Arrays and Focal Plane Array Testing, (1995)
- 5) Istvan Gorog, :Displays for HDTV: Direct-View CRT's and Projection Systems, Proc. of IEEE, Vol. 82, No. 4, (1994)
- 6) IBM, TI announce better ways to manipulate light signals, It's all done with mirrors and GaAs, IEEE, the Institute, Vol. 13, No. 11, (1989)
- 7) Charles Malone(Contraves) and David Flynn(Nichols Research Lab), Optimization of measurement process variables used in radiance uniformity calibration of

- the emitter source for the Wideband Infrared Scene Projector (WISP), SPIE Vol. 2469 Targets and Backgrounds: Characterization and Representation, (1995)
- 8) Owen M. Williams (DSTO), :Dynamic Infrared Scene Projection, Short Course Note. SPIE's AeroSense' 95, (1995)
  - 9) Georgia Tech Research Institute, Proceedings of the Tri-service Dynamic Infrared Scene Projection Orlando, Florida, (1995)
  - 10) Owen M. Williams (DSTO), :Dynamic Infrared Scene Projection Technologies Under the Microscope, SPIE Vol. 2469 Targets and Backgrounds: Characterization and Representation, (1995)
  - 11) Owen M. Williams (DSTO), :Dynamic Infrared Projection Analysis, SPIE Vol. 2223 Characterization and Propagation of Sources and Backgrounds, (1994)
  - 12) M. Hewish, :Focal-plane arrays revolutionize thermal imaging, IDR 4/1993
  - 13) 赤外線技術研究会編:赤外線工学－基礎と応用－オーム社(1991)
  - 14) R. D. Hudson, Jr., :Infrared System Engineering, John Wiley & Sons(1969)
  - 15) I. Kasai, :2nd-Generation IR Focal Plane Arrays, 日本赤外線学会誌V. 3#2(1993)
  - 16) 増谷光正:赤外線イメージングシステム 日本赤外線学会誌V. 5#1(1995)
  - 17) 財)防衛技術協会編:国内外の防衛技術関連科学技術の調査研究(OE技術)報告書(1994)
  - 18) P. R. Norton, :Infrared Image Sensor Status, SPIE Vol. 2274(1995)
  - 19) S. Horn & R. Buser, :Uncooled Sensor Technology, SPIE Vol. 2020(1993)
  - 20) J. A. Ratches et al., :NVL Static Performance Model for Thermal Imager(1975)
  - 21) L. Scott et al., :NVEOD FLIR92 Thermal Imaging System Performance Model, SPIE Vol. 1689
  - 22) L. Scott, :Modeling Stating Thermal System with FLIR92, SPIE Vol. 1969
  - 23) J. R. Moulton et al., :E0-VISION for FLIR92 and ACQUIRE modeling, SPIE Vol. 1969
  - 24) 防衛庁規格:赤外線撮像装置試験方法 NDS C 0212~0216
  - 25) F. X. Kneizys, E. P. Shettle, W. O. Galley, J. H. Chetwynd, L. W. Abreu, J. E. A. Selby, R. W. Fenn, and R. A. McClatchey, :Atmospheric Transmittance/radiance: computer code LOWTRAN 5, AFGL-TR-80-0067, Air Force Geophysics Laboratory(1980)
  - 26) F. X. Kneizys, E. P. Shettle, W. O. Galley, J. H. Chetwynd, L. W. Abreu, J. E. A. Selby, S. A. Clough, and R. W. Fenn, :Atmospheric Transmittance/radiance: computer code LOWTRAN 6, AFGL-TR-83-0187, Air Force Geophysics Laboratory(1983)
  - 27) F. X. Kneizys, E. P. Shettle, W. O. Galley, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Galley, J. E. A. Selby, S. A. Clough, :Users Guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophysics Laboratory(1988)
  - 28) B. Herman, A. J. LaRocca, and R. E. Turner, :Atmospheric scattering, Chap. 4 in *The Infrared Handbook*, 2nd ed., W. L. Wolfe and G. J. Zissis, Eds., Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI(1985)
  - 29) A. J. LaRocca, :Atmospheric absorption, Chap. 5 in *The Infrared Handbook*, 2nd ed., W. L. Wolfe and G. J. Zissis, Eds., Environmental Research Institute of Michigan,

Ann Arbor, MI (1985)

- 30) F.G. Smith ed., :Vol. 2 Atmospheric Propagation of Radiation, in *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, J. S. Accetta, and D. L. Shumaker, Eds., Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press (1993)

表6-1 DMDとCRT, LCDの比較<sup>2)</sup>

	直視型CRT	投射型CRT	投射型液晶	投射型DMD
サイズ(対角)	最大1m	制限少ない	制限少ない	制限少ない
輝度(>300cd/m <sup>2</sup> )	満たす	満たす	満たす	満たす
ハイライトピーク耐性	あり	あり	なし	なし
効率(ave. lm/W)	最高	良好	最低	中位
視認角度範囲	優れている	劣る	劣る	劣る
分解能(@低輝度)	良好	良好	良好	良好
分解能(@高輝度)	劣化する	劣化する	劣化なし	劣化なし
推定価格	最も安価	中位	中位	最も高価

表6-2 WISPの仕様<sup>4)</sup>

アレイサイズ(分解能)		
ベースライン/HDRアレイ		512×512 / 128×128
動作波長帯		1.5μm~12μm
ピクセルデータ分解能		12bits
ピクセルデータレート		30×106pixels/sec
ピクセルレスポンス		
ベースライン/HDRアレイ		10msec / 2msec (10% to 90%)
最大フレームレート		
ベースライン/HDRアレイ		100frames/sec / 500frames/sec
フリッカ制御		1%(10msecの期間にわたって)
ダイナミックレンジ(@射出瞳)		
ベースライン/HDRアレイ		300(1.5~5μm帯), 10(5~12μm帯)
HDRアレイ		103(1.5~5μm帯)
不均一性の補正		1%(@射出瞳, リアルタイム)

表6-3 赤外線撮像装置試験方法(NDS C 0212)試験項目

No.	試験項目	評価対象
1	雑音等価温度差(NETD)	充分低い空間周波数でS/N=1が得られる温度差
2	最小分解可能温度差(MRTD)	4バー・パターンが解像できる最小温度差。空間周波数の関数
3	最小検出可能温度差(MDTD)	矩形パターンが検知できる最小温度差。見張り角の関数
4	変調伝達関数(MTF)	装置の空間周波数特性
5	信号伝達関数(STF)	赤外線入力とディスプレイ輝度の関係を表す入出力特性
6	ダイナミックレンジ	ディスプレイの輝度変化として観測可能な目標温度範囲
7	クロストーク	1素子への入力の他素子(またはチャンネル)出力への影響
8	瞬時視野(IFOV)	1素子がある瞬間に観測している物体空間の範囲
9	波長特性	入射波長に対する相対感度特性
10	フレームレート・フィールドレート・ラインレート	フレーム, フィールド, ラインの同期周波数
11	視野角(FOV)	装置が観測している物体空間の範囲
12	ひずみ	画像の幾何学的歪み
13	均一性	チャンネル(または画素)間の輝度ばらつき
14	ナルシナス	光学系の反射による冷却された検知器自身の像強度
15	シェーディング	鏡筒内放射や口径食起因の視野内位置による輝度ばらつき
16	ゴースト	入射赤外光のレンズ面や検知素子面の反射による偽信号
17	低周波応答	装置の1走査期間相当方形波入射に対する応答特性
18	直流再生	映像信号の直流成分の赤外線入射に対する忠実度
19	焦点調節範囲	焦点が合う近距離限界
20	クールダウンタイム	冷却開始から冷却完了表示までの時間
21	画像安定性	表示位置および表示輝度の安定性

表6-4 LOWTRANモデルの変遷内容

LOWTRAN	年	主な変更点	プログラム規模 サブルーチン数 / ソースコード行数 / ソースコードバイト数
2	1972		
3	1975		
3B	1976	<ul style="list-style-type: none"> <li>4つの新たなエアロゾル・モデルの設定。 平均的大陸性エアロゾル→MARITIME, URBAN, RURAL, TROPOSPHERICの4種モデル</li> <li>水蒸気連続帯の吸収係数(自己線拡幅)に温度依存性の改良。また外来線拡幅吸収係数の変更。</li> </ul>	
4	1978		
5	1980	<ul style="list-style-type: none"> <li>高度及び相対湿度に依存するエアロゾル・モデルの組み込み。</li> <li>大気屈折と地球の曲率を考慮したスラント・パス計算の組み込み。</li> <li>2種類の霧モデルの追加。</li> </ul>	20個/3200行/260K
6	1983	<ul style="list-style-type: none"> <li>大気屈折を考慮したスラント・パス計算の改良。</li> <li>太陽/月散乱放射の追加。</li> <li>水蒸気連続スペクトル・モデルの改良</li> <li>風に依存する海洋性エアロゾル・モデル(NAVY MARITIME)の追加。</li> <li>垂直構造エアロゾル・モデル(境界層)の追加。</li> <li>巻雲モデル、降雨モデルの追加。</li> <li>グラフ出力機能の追加。</li> </ul>	64個/8400行/ 1180K
7	1988	<ul style="list-style-type: none"> <li>モデル大気データの追加・更新。 新しいモデル大気は13種類(4種類追加)の気体で構成。U.S. 標準大気(1976)更新。</li> <li>新たな分子のバンド・モデルと、バンド・モデルの吸収係数の追加。</li> <li>バンド・モデルの透過率関数の変更。 数値テーブル → 解析的透過率関数(double-exponential)</li> <li>10μm帯の水蒸気連続吸収の自己密度による係数の変更。</li> <li>オゾンの紫外線吸収係数の追加。</li> <li>多重散乱の計算追加。</li> <li>全てのエアロゾル・モデルと降雨モデルについてはmm波長域まで拡張。</li> <li>NAVY MARITIMEモデルの改良(Large Particle Componentによる風速の影響)。</li> <li>2つの巻雲モデルと、新しい5つの雲モデル、砂漠(風に依存)モデルの追加。</li> <li>高高度のエアロゾル・モデルの追加。</li> </ul>	116個/18800行/ 1530K

表6-5 エアロゾル・モデルの多様化

高度	対応大気層	エアロゾル・モデル	バージョン
0~2km	境界層	・RURAL (郊外型)	3B
		・URBAN (都市型)	3B
		・MARITIME (海洋型)	3B
		・NAVY MARITIME (風と相対湿度の影響有)	6
		・RAIN (雨)	6
		・FOG (霧)	5
		・DESERT (砂漠、風の影響有)	7
2~10km	対流圏	・TROPOSPHERIC (春夏モデル/秋冬モデル)	3B
10~30km	成層圏	・火山性サイズ分布モデル(分光吸収係数)	6
		・火山性初期モデル	
		・火山性後期モデル	
		・エアロゾル垂直分布モデル(垂直プロファイル)	6
		・成層圏背景モデル	
		・穏やかな火山性	
		・活発な火山性	
		・激しい火山性	
30~100km	中間圏	・エアロゾル垂直分布モデル(垂直プロファイル)	7
		・METEORIC DUST EXTINCTION	6
雲モデル		Cumulus(積雲), Stratus(層雲), Stratus/Strato-cumulus, Alto-stratus, Nimbo-stratus(乱層雲), Cirrus(巻雲)	7

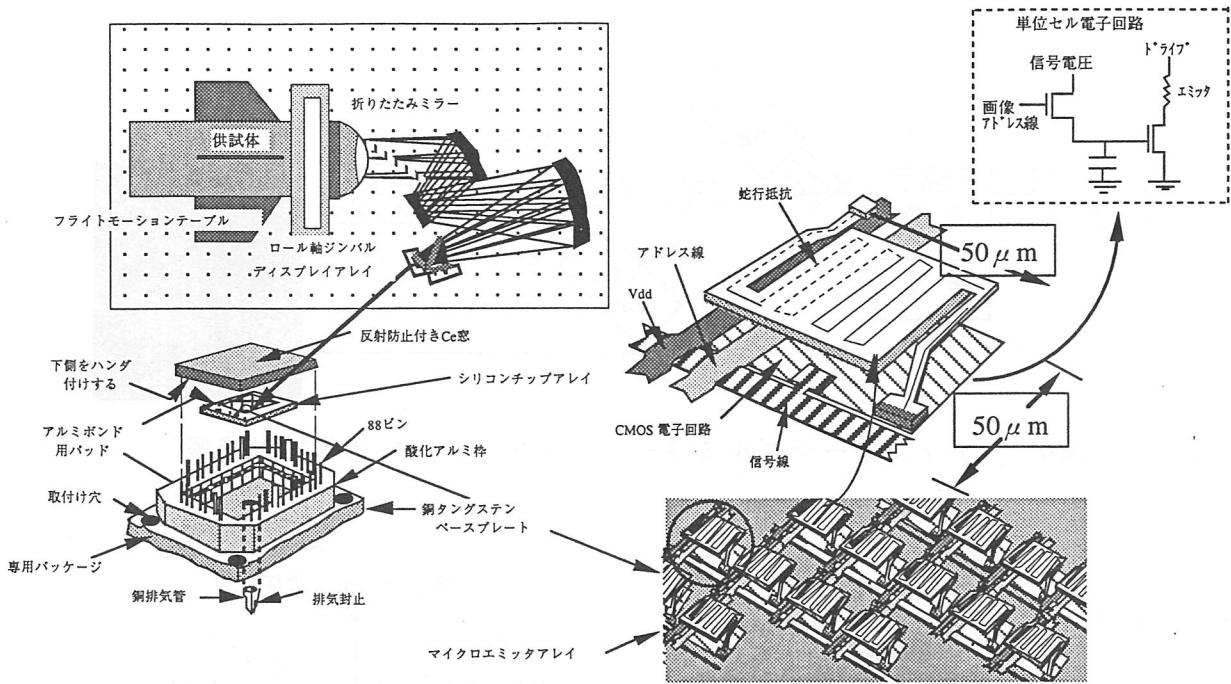


図6-1 戦術的情景ジェネレータに適用可能な情景ディスプレイ<sup>1)</sup>

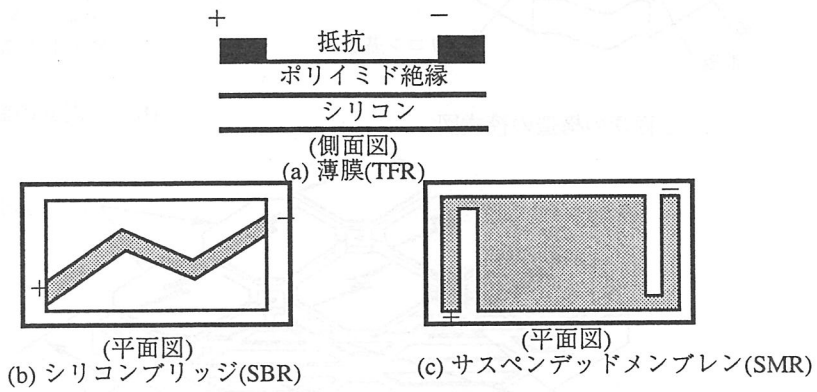


図6-2 抵抗アレイ(RA)の各方式の構造比較<sup>2)</sup>

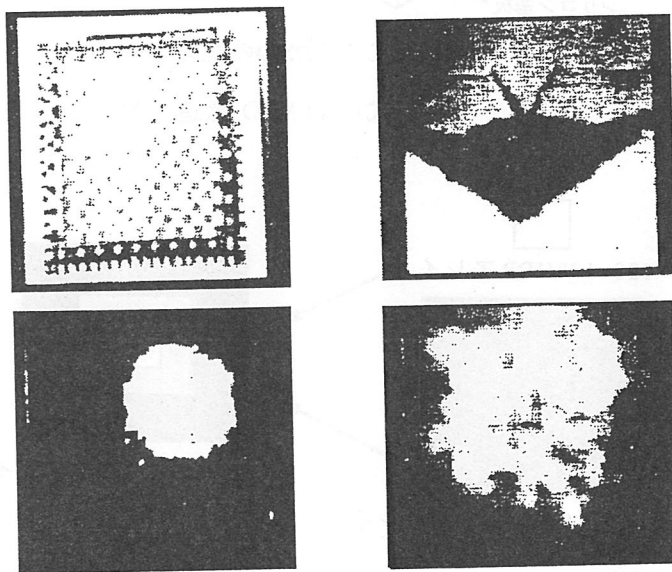


図6-3 128×128アレイの放射パターン

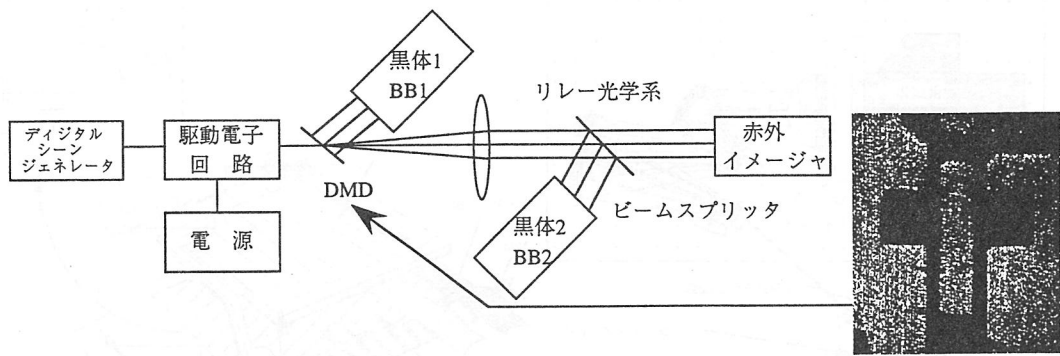
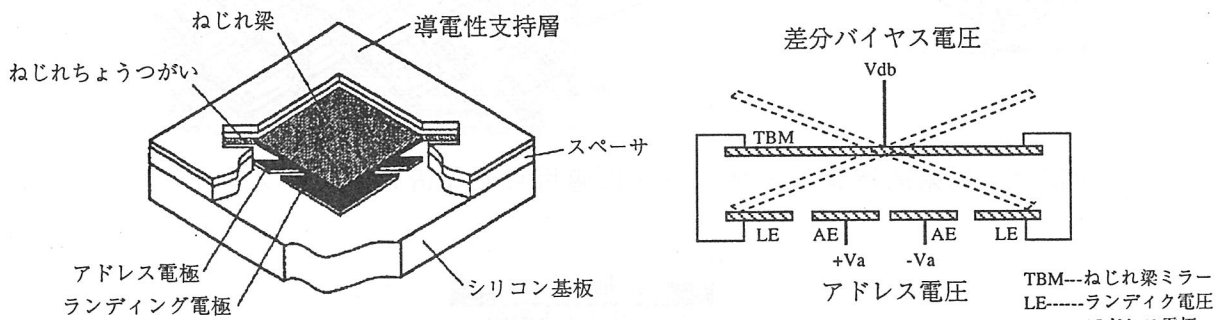
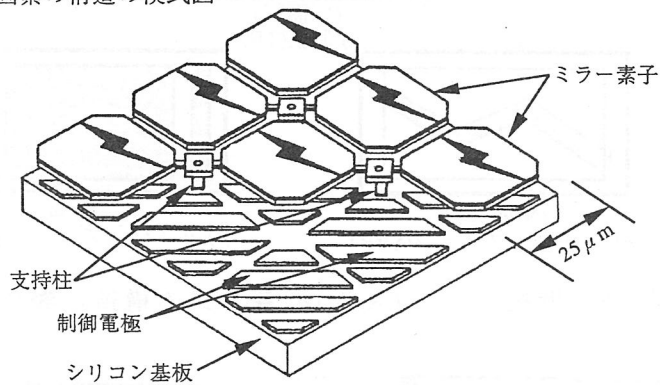


図6-4 デイフォーダブルミラーデバイス(DMD)情景投射装置<sup>2)</sup>



(a) 1画素の構造の模式図

(b) 1画素の断面の模式図



(c) 3×3画素からなるDMDの模式図

図6-5 静電式のDMD構造<sup>5), 6)</sup>

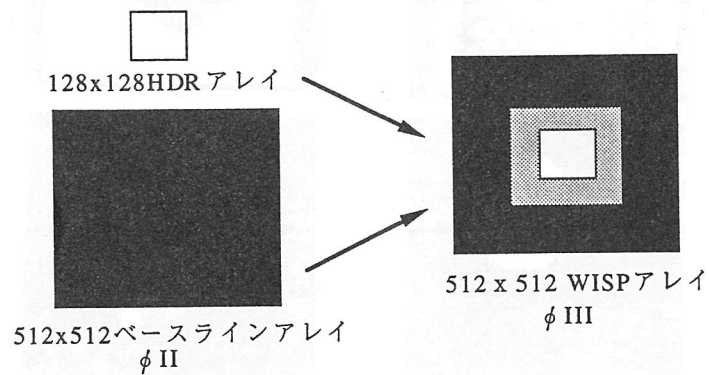


図6-6 WISP用アレイの計画<sup>4)</sup>

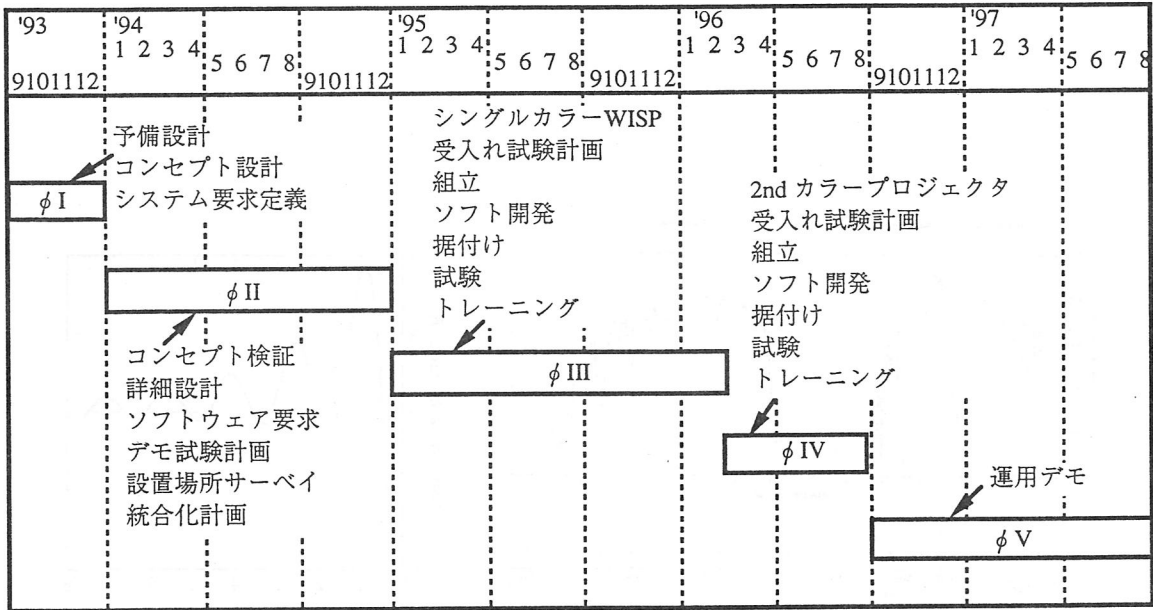


図6-7 WISPの計画<sup>4)</sup>

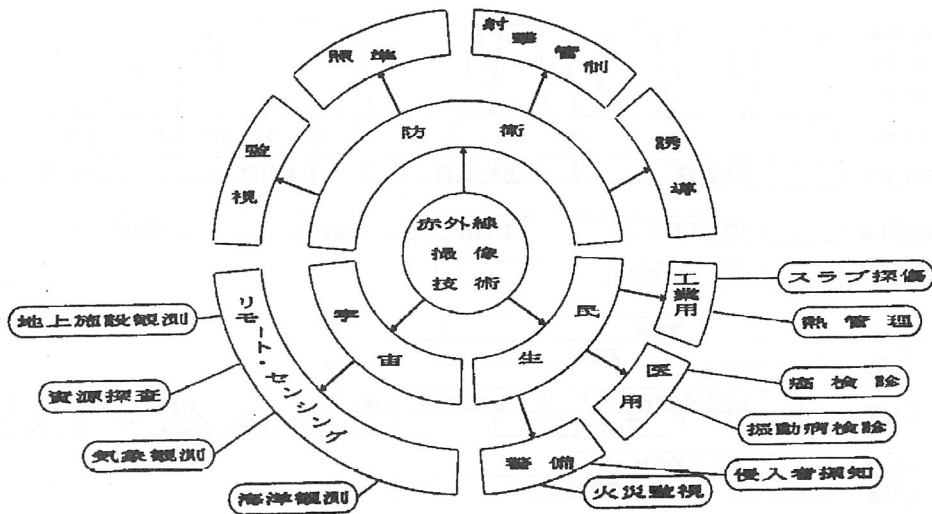


図6-8 赤外線撮像装置の応用分野

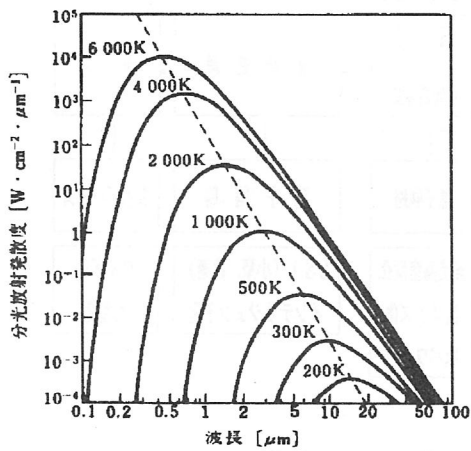


図6-9 黒体の放射発散度<sup>13)</sup>

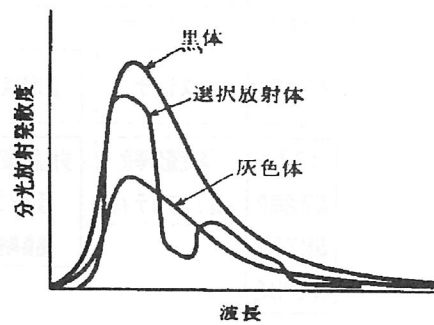


図6-10 黒体，灰色体，選択放射体<sup>13)</sup>

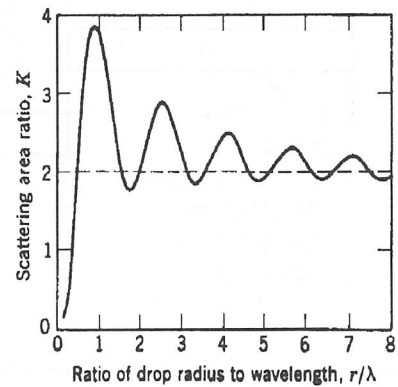
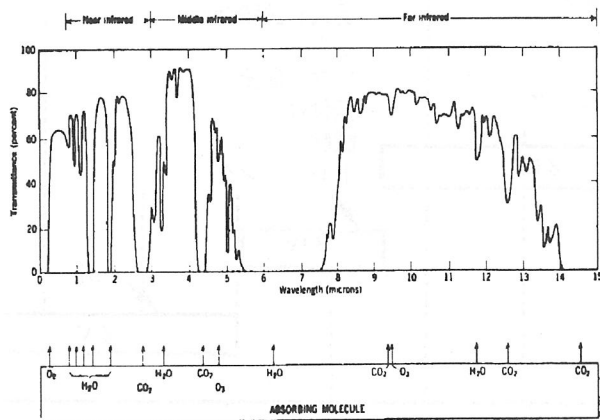


図6-11 大気路分光透過率の例<sup>14)</sup> 図6-12 散乱効率と(粒子径/波長)<sup>14)</sup>

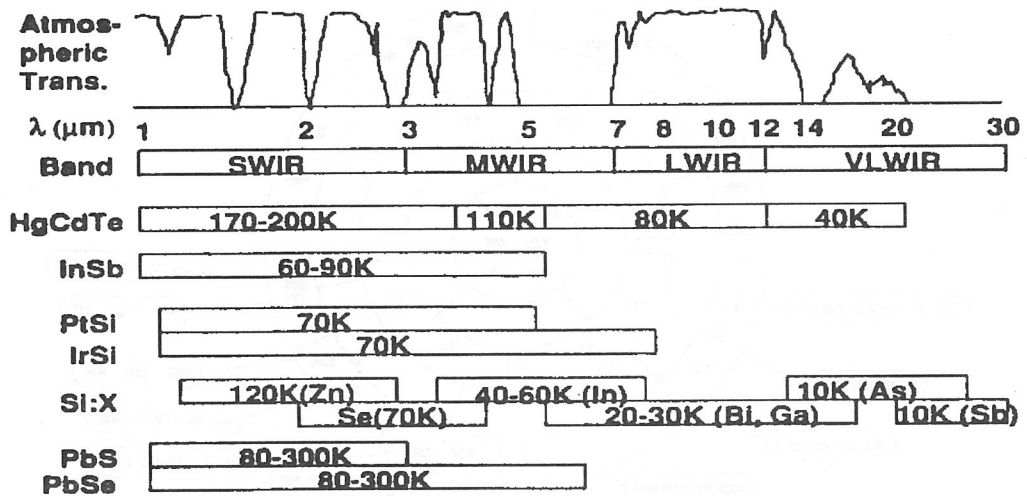


図6-13 赤外線検知素子材料の応答波長帯域と動作温度<sup>15)</sup>

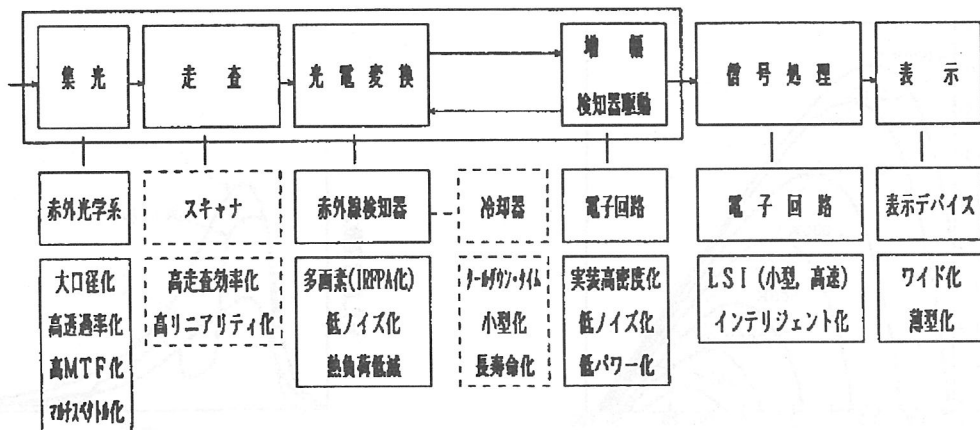


図6-14 赤外線撮像装置の構成技術要素

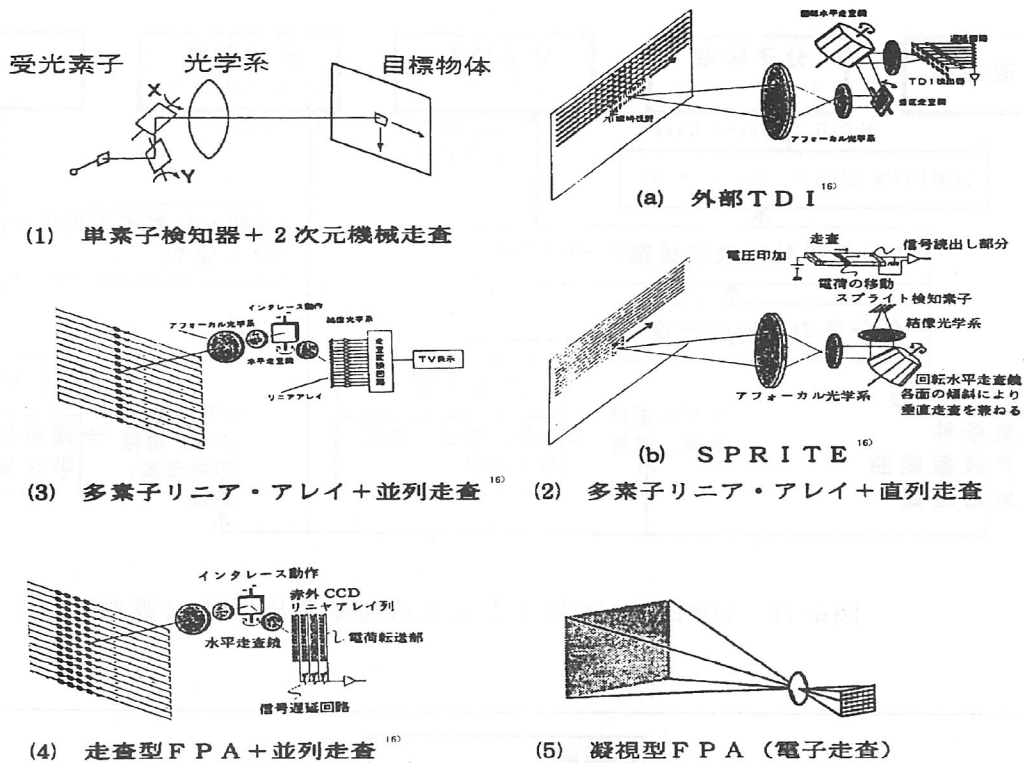


図6-15 主な赤外線検知器の素子配列と走査形態

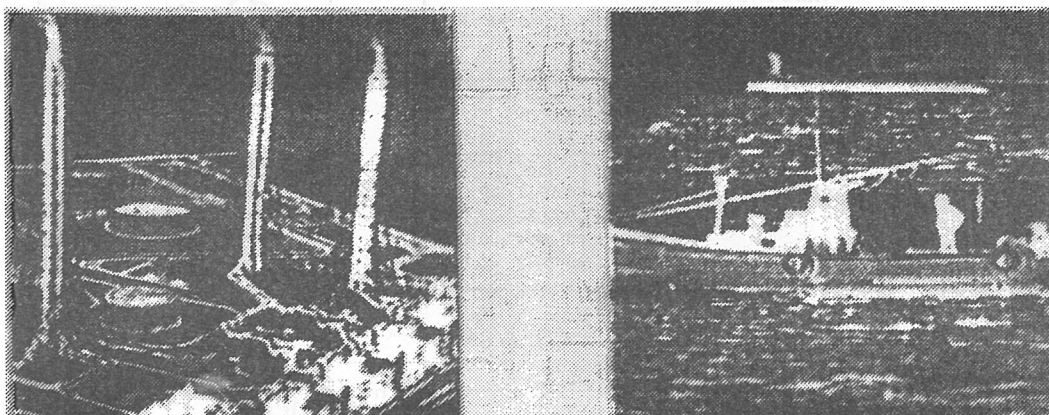


図6-16 赤外線画像の例(10 $\mu$ m帯多素子リニア・アレイ + 並列走査)

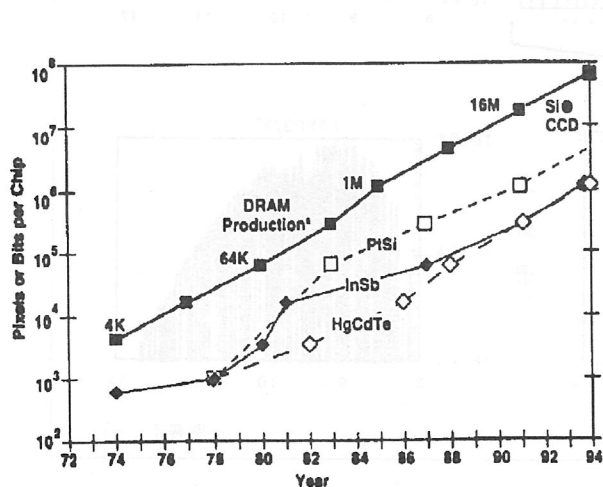


図6-17 凝視型IRFPA素子数の変遷<sup>18)</sup>

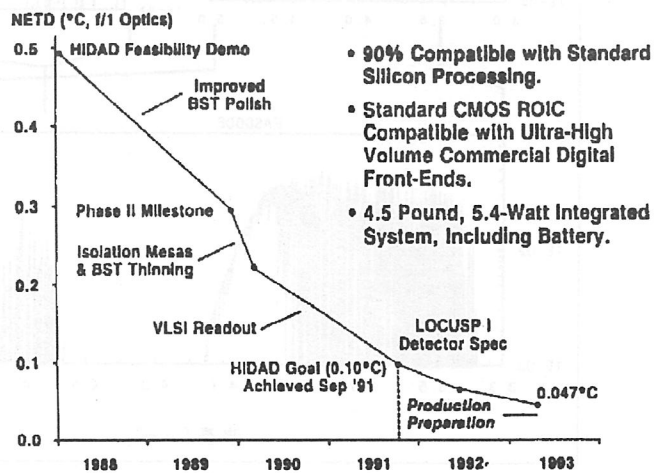


図6-18 熱型検知器(強誘電体)の開発経緯<sup>19)</sup>

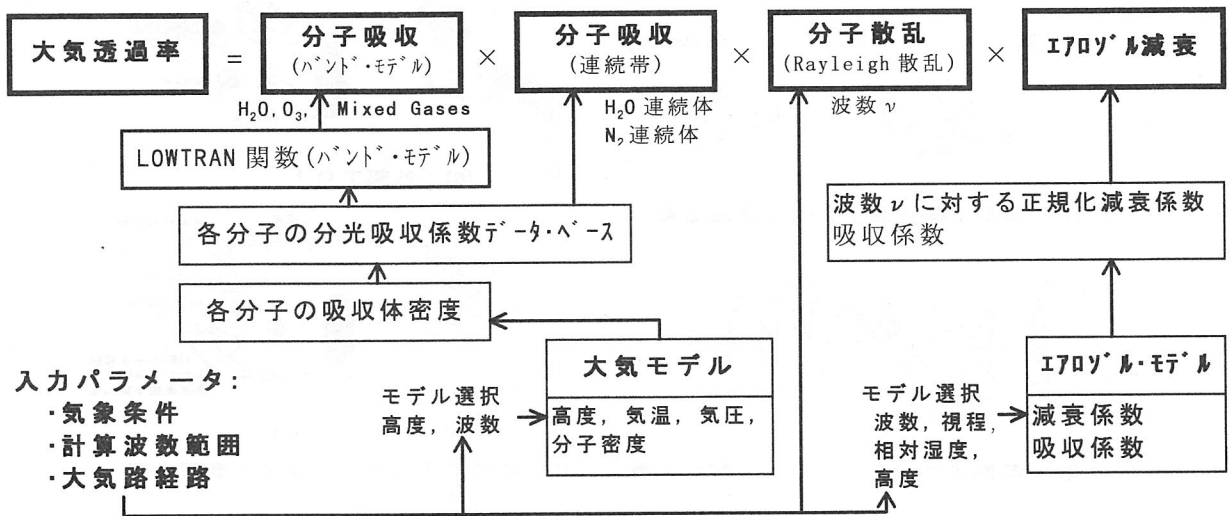


図6-19 LOWTRAN における大気透過率算出手法の概要

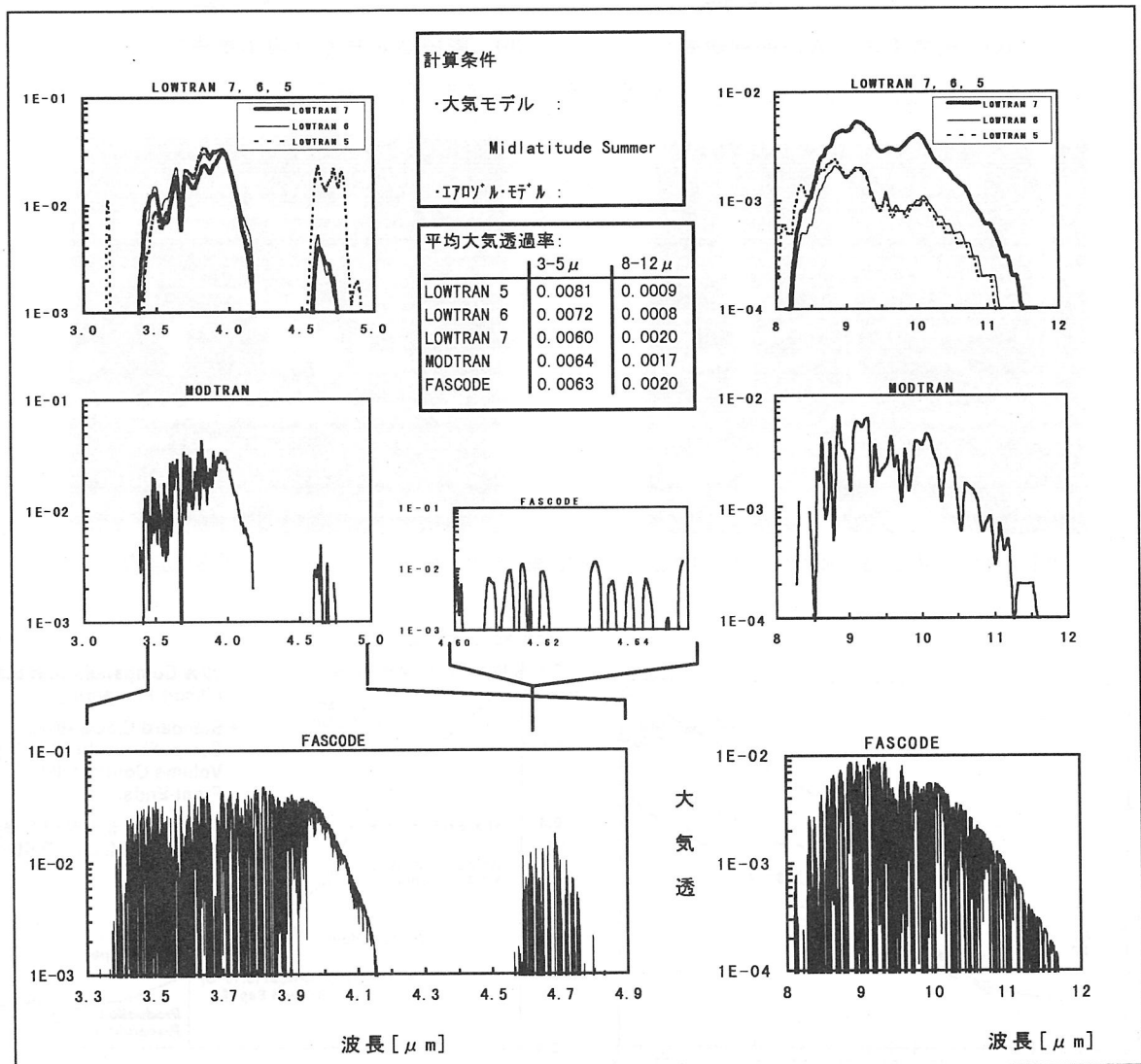


図6-20 他の大気伝播予測モデルとの比較

## 7. あとがき

以上、最近約5年間に渡る内外の赤外線センシングの進展状況を中心として、その技術動向を調査してまとめた。本報告書が有効に活用されることを切望する。

しかし、本文中でも述べているように、この分野の進展は日進月歩であり、社会の要求に答えて今後益々発展を続けることは確実である。その発展の中から、学会と密接に係わる関連分野への応用・研究も充分期待される。

したがって、これらの技術動向並びにその応用の可能性を引き続き調査しまとめていくことが学会にとって重要と思われる。本学会がこのような活動を通して活性化され、さらに一層の躍進を遂げることを切望する。

(菅野俊雄・増田千尋)

