

A bstract

電磁波のスペクトルのうちミリ波の主要な応用は大容量通信の分野にあると思われるが、一方計測の分野にもユニークな応用を有している。最近、安全・安心（セキュリティ）の分野で、ミリ波を用いたイメージング計測が注目されている。ミリ波イメージングは、光に比べると分解能は落ちるが、衣服、炎などを透過して観測できるなどの利点を持っている。特に、物体自身が放射しているミリ波を観測するパッシブイメージングは完全無侵襲であり、これは計測技術として大きな特長である。更に、ミリ波帯ではこれまで通信用として多くの優れた技術が開発されており、それらを利用して常温で動作する高感度のシステムを組み上げることができる点もミリ波イメージング技術の大きな特長である。

キーワード：ミリ波、イメージング、セキュリティ、パッシブイメージング

1. ま え が き

最近、安全・安心（セキュリティ）用の科学技術としてミリ波の透過性に着目したイメージング（カメラ）技術が注目されている。本稿ではミリ波イメージングの特徴、基礎技術等について述べたいと思う。

一般に電磁波の応用は、通信、計測、エネルギーの3分野に大別できる。テレビ、携帯電話などに用いられている電磁波は普通電波と呼ばれているが、その電波と可視光との間に波長がミリメートルのオーダーのミリ波^(用語)がある。その主な応用は通信と考えられるが、計測の分野にもユニークな応用が存在する。ミリ波を用いた計測について、特にイメージングに関して他の電磁波スペクトルと比較すると、光^(用語)、赤外^(用語)、テラヘルツ波^(用語)に比べて物質の透過率が高いこと、またマイクロ波^(用語)に比べると空間分解能が高いことなどが挙げられる⁽¹⁾。ミリ波は炎、ちり、霧、雲、雨、ある種の建材、衣服等を透過するので、この性質をイメージング技術と組み合わせることにより、火炎・煙で覆われた環境でのイメージング、噴煙・雲で覆われた火山の観測、雨・霧等悪環境下での交通監視用イメージング、ベニヤ板などを透過しての監視、衣服等を透過しての武器・爆発物の検知等セ

キュリティへの応用などが考えられている。交通監視への応用としてはほかにトンネル内での事故時に、煙あるいは炎を透過しての監視等が、また衣服を透過するミリ波の性質を利用すると危険物検知以外に、情報機密の持ち出しを防止するために必要なCD-ROMの検知等にも利用できる。更に、高密度プラズマ計測、あるいはダンボール箱内食品の温度計測などの応用も考えられる。

図1は、炎を透過して観測した人物像であるが、光、赤外（この場合10 μ m帯）では観測できない炎の向こうがミリ波（35GHz帯）では観測可能であることが示されている。なお、波長が長いミリ波では、光・赤外に比べて分解能が悪いこともお分かり頂けると思う。

ミリ波領域では、これまで主に通信への応用を目指して開発されてきた常温動作可能な低雑音増幅器（LNA）、あるいは検波器など各種の高性能デバイスが使用でき、これはイメージング技術開発にとって大きな利点である。

以下、2.では、まずミリ波イメージングの各種の方式について紹介する。3.以下では、各種の方式のうち、現在安全・安心科学技術分野で注目されているフォーカルプレーン（カメラ）型のパッシブイメージング方式⁽²⁾を選び、その基礎技術、応用例などを紹介する。

2. ミリ波イメージングの方式

各種のミリ波イメージングの方式を大別すると、まず

水野皓司 正員：フェロー 東北大学電気通信研究所
E-mail Koji@riec.tohoku.ac.jp
Koji MIZUNO, Fellow (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai-shi, 980-8577 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.91 No.12 pp.1047-1053 2008年12月

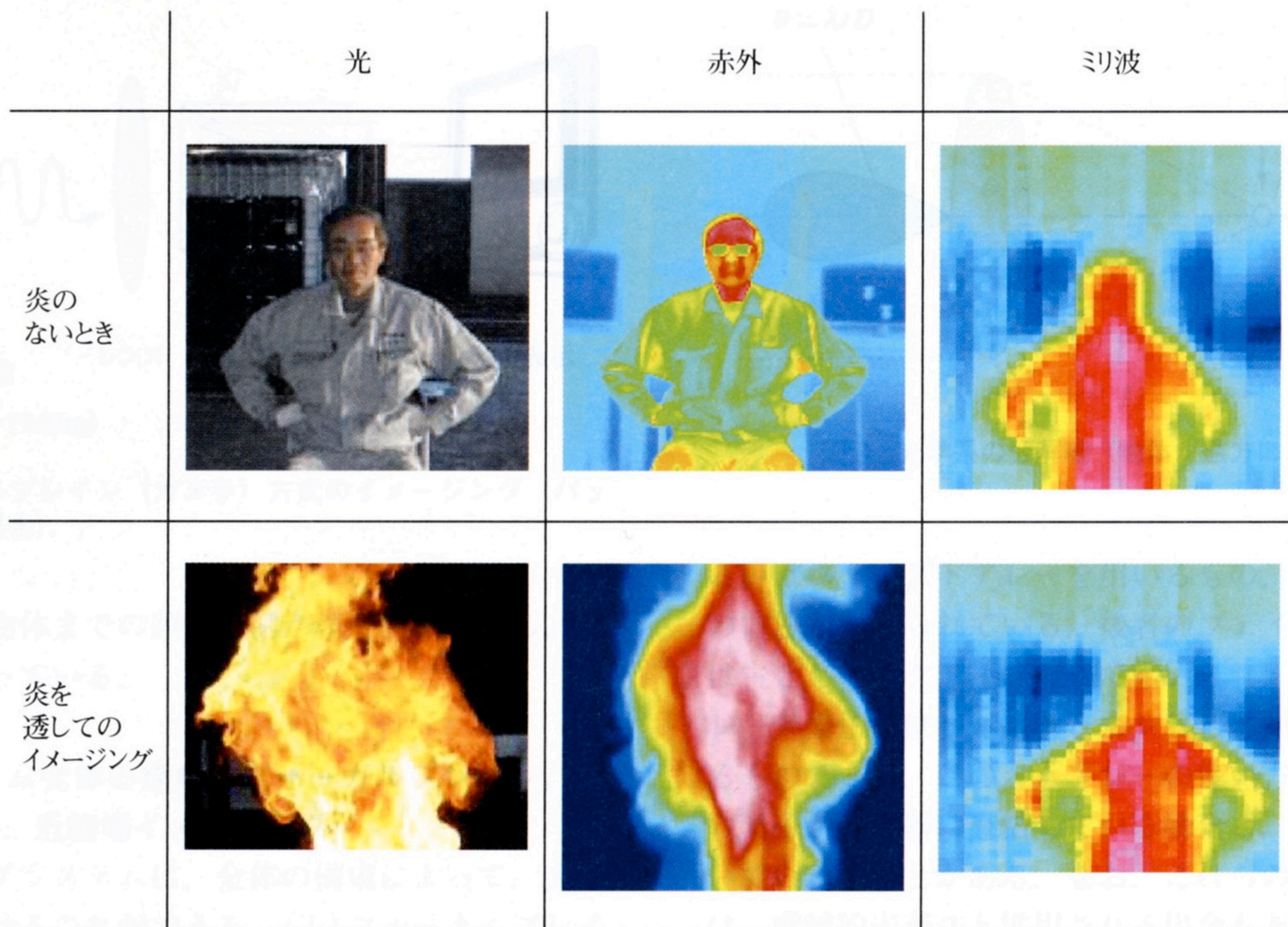


図1 炎を透してのイメージング 左より，光，赤外 (10 μ m 帯)，ミリ波 (35GHz 帯，パッシブ) 像の比較. 上段は，炎のないとき. ((株) モリタテクノスとの共同研究)

受信するミリ波の性質によってアクティブ方式とパッシブ方式とに分けることができ (2.1)，またシステム全体

用語解説

ミリ波，光，赤外，テラヘルツ波，マイクロ波 人間が電波を使い始めたのは今から約 110 年前のことであるが，現代社会は電波なしでは成り立たないくらいになっている。テレビ放送，携帯電話などで使われているいわゆる電波と，光通信で使われている光とは同じ電磁波の一種であるが，周波数 (あるいは波長) が異なっている。図は，電磁波を周波数によって示したもので，図で右にいくほど周波数が高い，つまり波長が短い電磁波である。本稿で扱うミリ波は波長がミリメートルのオーダの電磁波で，電波と光との中間に位置する。ミリ波より波長の短い領域はサブミリ波 (テラヘルツ THz 波)，更に波長が短い数マイクロメートル (μ m) あたりは赤外線と呼ばれている。また，ミリ波より波長の長い領域 (10cm くらいまで) にマイクロ波がある。

なお，電波法では現在周波数で 3THz 以下の電磁波を電波と定義している。また，電磁波は，波と粒子との両方の性質を持っているが，一般的にテラヘルツ以下の電磁波は波の性質の方が大きく現われる。

周波数	30MHz	300	3GHz	30	300	3THz	30	300
波長	10m	1	100mm	10	1	100 μ m	10	1
慣用的名称	電波 (テレビ放送)		マイクロ波	ミリ波	サブミリ波 (テラヘルツ波)		赤外線	光 (光通信)

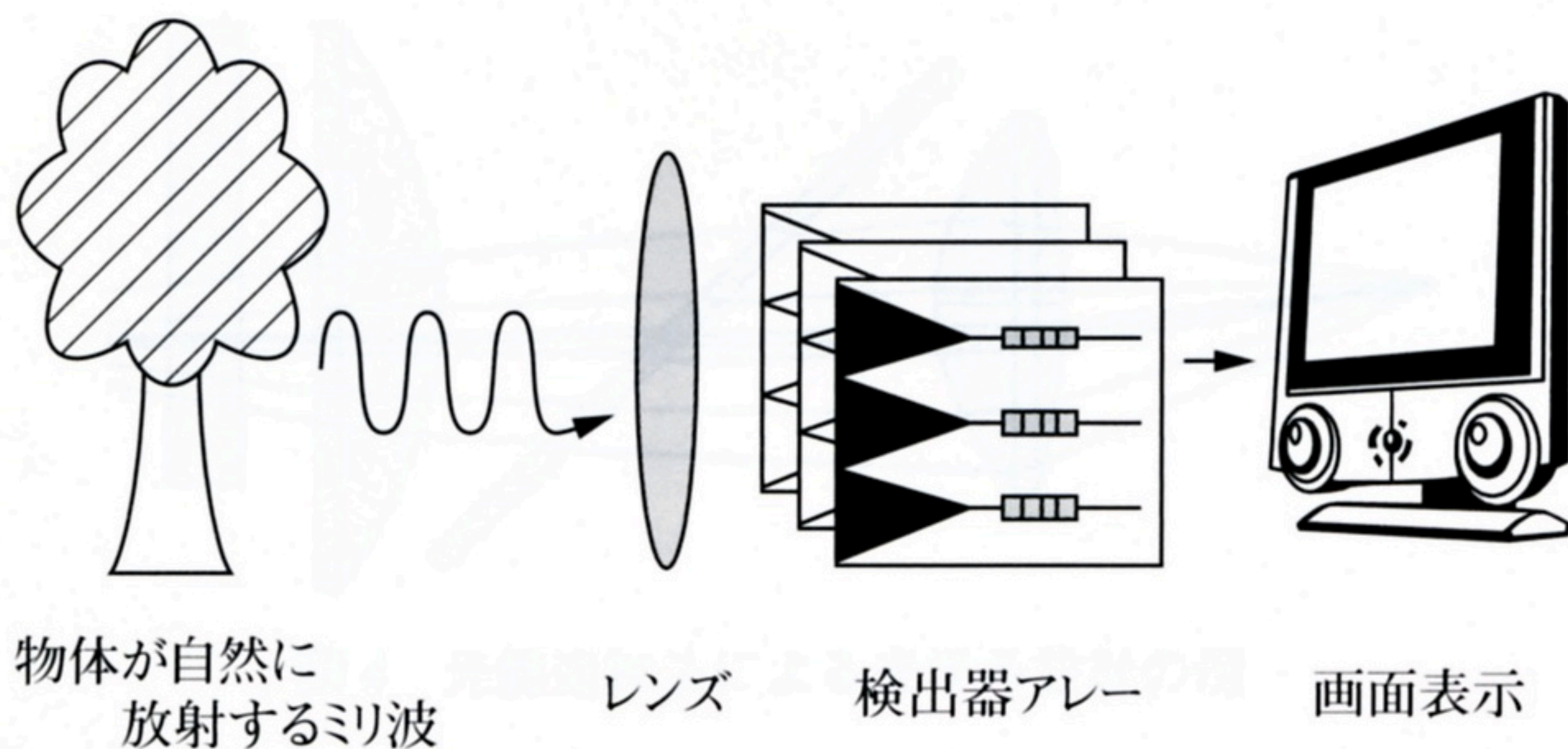
の構成によって，フォーカルプレーン (カメラ)，フレネル，近接場方式の 3 種類に分かれる (2.2)。更にフォーカルプレーン (カメラ) 方式に対しては，ミリ波の場合幾つかの画像構成方法がある (2.3)。本章では，これらについての大略を述べる。

2.1 アクティブ方式とパッシブ方式

アクティブ方式は，ミリ波を被写体に照射して散乱，あるいは透過波を受信して画像を構築するものであるが，一方被写体が熱的に放射するミリ波を受信するものはパッシブ方式と呼ばれている^{(1)~(3)}。アクティブ方式の光源は，通常ミリ波発振器からのコヒーレントな波で，コヒーレント波に特有の干渉 (スペックル)，あるいは形状に特有な散乱断面積の差 (グリント) などの現象により，画像に大きな乱れが生じることがある⁽⁴⁾。アクティブ方式は，イメージングレーダと呼ばれることもあり，スペックル，グリントなどの現象は従来主にレーダの分野で研究されているものである。

パッシブ方式は，被写体自身からの熱放射を受信するもので，完全に無侵襲な計測であることと，熱雑音信号というインコヒーレントな波を受信するために干渉による画像の不明りょう化等を生じない，などの特長がある。電波法などの制約を受けないことも実用の上で大きなメリットである。しかし，信号強度は微弱で，低雑音，広帯域，高感度な受信系が要求される。

最近はこれらアクティブとパッシブの中間に位置する UWB レーダの開発も盛んである⁽⁵⁾。比較的近距離のイ



物体が自然に放射するミリ波

レンズ

検出器アレー

画面表示

$P_D \sim 2 \times 10^{-11} \text{ W} (-77 \text{ dBm})$

図2 フォーカルプレーン（カメラ）方式のイメージング（パッシブ型の場合）。

イメージングで物体までの距離計測が精度良くできる、などの特徴を持っている。

2.2 システム全体の構成（フォーカルプレーン、フレネル、近接場イメージング）

イメージングシステムは、全体の構成によって、大きく3種類に分けることができる。(i)フォーカルプレーンイメージング方式は、いわゆるカメラの構成でレンズ（あるいは凹面鏡）を用いて像を作り、像面に構成された画像情報をセンサアレーにて受信するものである。空間分解能は像面ではほぼ波長程度が得られる。(ii)走査近接場イメージング方式⁽⁶⁾は、近年可視、あるいは赤外領域で盛んに研究が行われているもので、物体のごく近傍にセンサを置き、それを機械的に走査して画像を得るものである。波長よりも小さい空間分解能が得られるのが本方式の大きな特徴である。(iii)フレネルイメージング⁽³⁾は物体近傍の数波長（フレネル距離）のところにセンサを置き、機械的な走査で像を得るもので、約波長程度の分解能が得られ、装置が簡単なことが特徴である。なお、これら各々についてアクティブ、パッシブ両方の方式が可能である。

2.3 フォーカルプレーン（カメラ）方式の画像取得方法

カメラ方式の概念図を図2に示す。この場合、二次元の画像（イメージ）を構成する最も単純な方法は、レンズなどの光学結像系で像を形成し、その像面にセンサを二次元に配列するものであるが、この方式は、必要なセンサの数が多くなることが欠点である。そのため、通常機械的な走査あるいは電子走査を併用することが行われる。機械的な走査の場合、センサ数をできるだけ減らして動画を得るためには、偏心した回転凹面鏡、あるいは振動（flapping）平面鏡を用いて走査するなどの方法が実用化されている。画像取得の時間は早いもので、数十フレーム/秒である。

レンズなどの結像光学系を用いないものでは、周波数の違いによるアンテナ指向性の違いを利用するもの、あ

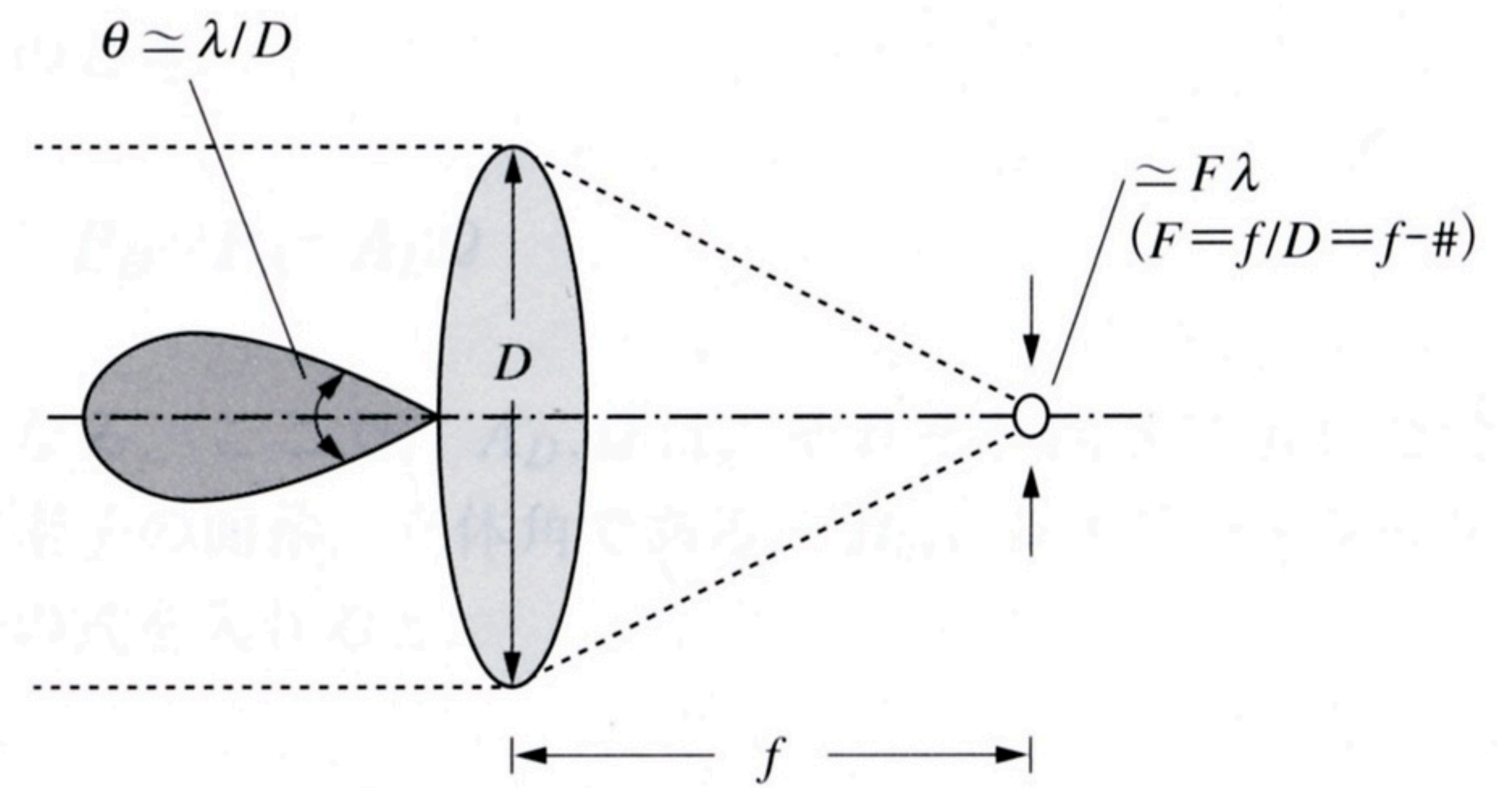


図3 光学系の分解能（物体が遠方にある場合）

るいはフェイズドアレーを用いるもの、などの電子走査の方法が用いられている。後者のフェイズドアレー方式は主としてアクティブ方式で用いられ、原理は平面状アレー各素子の位相を制御してレンズと同じ作用を持たせるものである。このときアレーの使い方としては、個々の素子が発振器に直結している場合と、反射器として働いている場合とがある。なお、これらの電子走査の方法は、機械的走査法と併用される場合もある。

3. パッシブイメージングの基礎技術

ミリ波帯イメージングの研究開発は、主として無侵襲などの理由により現在パッシブ方式が主流である。3.では、パッシブフォーカルプレーン方式を取り上げその光学系、信号強度、などの基礎技術について述べる。アクティブ方式に関しては、光学系に関する考察はパッシブ方式と共通、また信号処理に関しては従来のレーダ技術と共通の部分が多い。

3.1 ミリ波イメージング用光学系

ミリ波帯イメージング用光学系の設計法は、基本的に可視域カメラのそれと同じで、検討すべきファクタは分解能、収差、明るさなどである。分解能は主としてレンズ口径と波長によって決まる（図3）。ミリ波波長を λ 、レンズの口径を D とすると、回折限界の分解能 Δx （像面にて、円形像、インコヒーレント光のとき）は次式で与えられる。

$$\Delta x = 1.2 \frac{b}{D} \lambda \quad (1)$$

ここで b はレンズと像面との距離である。画像信号取得の際この分解能を得るためには、サンプリング定理が教えるように、イメージングアレー素子は $\Delta x/2$ の間隔で並べる必要がある。通常アンテナ開口は1/2波長程度になるので、この間隔を実現するためにレンズの $f\#$ （焦点距離と口径との比）は1近辺に選ばれることになる。

収差を小さくするためには光線追跡法が有用である。

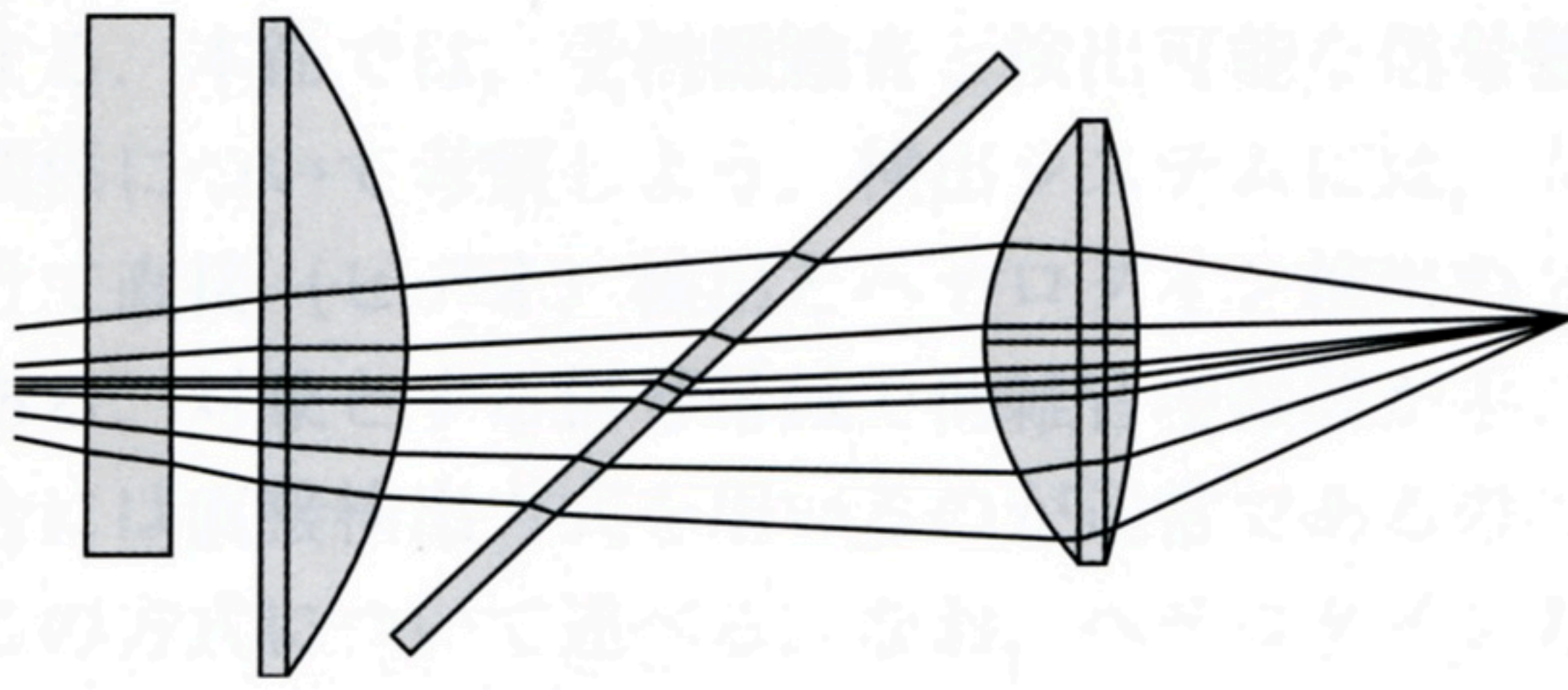


図4 光線追跡法による光学系設計の例

図4に示すように、物体の1点から出た光線が像面で1点に収束するように、レンズ曲面の形状を決定する。収差は、像面の周辺（光軸から外れる）ほど大きくなり、その程度によって視野角が決まってくる。また、光学系の明るさに関しては、次節3.2にて考察する。

なお、ミリ波帯のレンズ材としては、テフロン、ポリエチレン、石英、アルミナなどが使用可能である。

3.2 パッシブイメージングの信号

パッシブイメージングの場合、信号は被写体が熱的に放射している、いわゆるプランクの熱放射（のミリ波成分）である。このときの信号強度について考えてみよう。

図5の構成で物体からの熱放射を受信するとき、まず、レンズに入る受信電力は、

$$P_A = B_{br} A_r \Omega_t \quad (2)$$

となる。ここで、 B_{br} : 物体の輝度 ($\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ 、後述)、 A_r : レンズの面積 (m^2)、 Ω_t : レンズより物体を見た立体角 (sr) であり、回折の効果より次の条件が成り立つ。

$$A_r \cdot \Omega_t \sim \lambda^2 \quad (3)$$

つまり、この P_A は回折限界の分解能に対応する物体の面積部分よりの電力である。

さてミリ波イメージングの次の条件のもと、受信素子に入る電力 P_D を計算する。

- ① 物体、レンズ、受信素子の位置関係は結像条件（レンズの公式）を満たす、
- ② 回折限界の単位像は1個の受信素子に対応する（式(2)の P_A を1個の素子で受信する）。

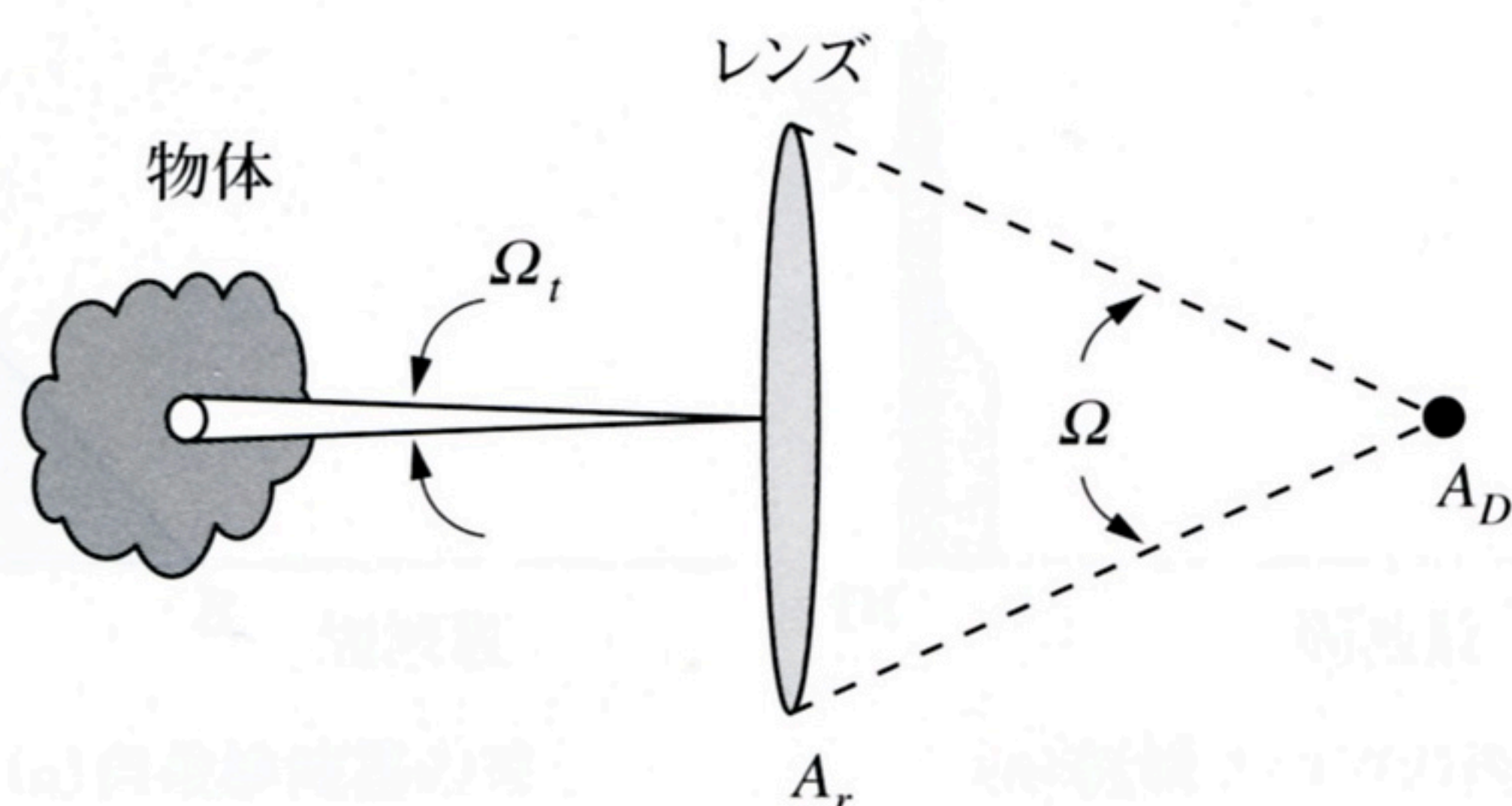


図5 黒体放射の受信

このとき、

$$P_D = P_A = A_D \Omega \quad (4)$$

となる。ここで、 A_D, Ω は、それぞれ図5に示した受信素子の面積、立体角である。 B_{br} にレイリー・ジーンズの式を入れると、

$$P_D = 2kT\Delta f \quad (5)$$

が得られる。ここで、 k はボルツマン定数、 T は物体の輝度温度（物理温度と放射率との積）、 Δf は受信帯域である。通常、単一偏波成分のみ受信するので、この値の1/2が実際の受信電力となる。なお、これは、電子回路の雑音を計算するときの $kT\Delta f$ と全く同じものである。また、この場合1個の受信素子に入る信号電力（明るさ）は、原理的にレンズの口径によらないことになる。今帯域 Δf を 6GHz として常温物体の場合、受信信号強度 P_D は約 $2 \times 10^{-11}\text{W}$ (-77dBm) となる。

ここで計算した信号強度は、物体とレンズ（受信機）の間にある大気の影響を考慮していない。実際には、受信機までの間に存在する大気による吸収（減衰）を考慮して、受信信号強度が得られる。一方、熱平衡にある大気はミリ波を吸収すると同時に放射もしており、その放射が被写体信号強度よりも大きい場合には、検出（イメージング）が不可能になる。つまり、被写体信号強度と大気の放射強度との比較が必要で、これが動作周波数を決める一要因になる。ミリ波帯で減衰の少ない、いわゆる大気の窓としては $35, 90\text{GHz}$ （時に 94GHz といわれている）が知られており、他方 60GHz は減衰の大きいことで知られている。 60GHz の吸収は酸素によるもので、地上では平均 20dB/km の減衰がある。

パッシブイメージングに対する大気の影響をこの 60GHz を例にとって考えてみよう。熱放射を扱うとき、ミリ波強度を表すためには、等価な黒体の絶対温度 (K) でいうことが多く、輝度温度と呼ばれている。今輝度温度 300K の物体が受信機より 1km 離れたところにあるとすると、受信機直前の信号強度は大気の吸収によって輝度温度約 30K に下がる。一方、 1km 厚さの大気による放射は前記の減衰より計算すると約 270K という大きさになり、この場合は、大気の放射の方が大きく物体は観測できないことになる。これは、 60GHz という大気吸収が特に大きい周波数を選んだためであるが、それ以外の周波数帯では、通常の大気条件のとき、数百mの距離を観測するとき大気の減衰は支障ないと考えてよい。

3.3 パッシブ・イメージングの信号検出系

前節の考察で信号強度が大気放射より大きい場合、次にその信号が検出可能か否かは受信機の雑音強度により

決まる。本節では、受信機雑音と検出可能な信号強度との関係について考察しよう。検出システムには、大きく分けて直接（ビデオ）検出とヘテロダイン検出の2方式がある。対象とする信号帯域で低雑音増幅器が手に入る場合には直接検出方式を用いるのが通常であるので、以下この方式について述べる。なお、ヘテロダイン方式を採用した場合でもミキサの後は全く同じ議論が通用する。

図6に、信号検出系のブロックダイアグラムを示す。輝度温度 ΔT の被写体の信号が、アンテナで受信されミリ波増幅器（LNA、帯域： B_{HF} ）により増幅されて、自乗検波器に入力される。このとき、検出系への入力としては、被写体からの信号以外に、受信機内部雑音がある。受信機の雑音は、通常雑音指数NFにより表されるが、入力等価雑音温度 T_{RN} の表示（後述）もよく使われる。自乗検波された出力は、信号 ΔT に対応した直流成分と T_{RN} に起因する交流の揺らぎ成分より成り、図7(a)に示したようにLNAの帯域に対応した三角形のスペクトルになる。このうち交流成分は次段の低域フィルタを通して大部分がカットされ、最後に受信信号強度に応じた直流出力と低域フィルタを通過した交流成分（雑音）が出力される（図7(b)）。この直流出力が、ディスプレイデバイスに入力されイメージング画像を表示することになるので、直流出力と雑音との大小関係がイメージングの可否を決める。

パッシブイメージングの場合、受信機で識別できる被写体輝度温度の最小値 ΔT が、受信機性能を決める重要な指標となる。図6の回路ブロック図をもとに、LNAのNFと ΔT との関係性を求めよう⁽⁷⁾。直流の信号出力 P_{DCS} は低域フィルタの後で、

$$P_{DCS} = C(k\Delta T B_{HF})^2 \quad (6)$$

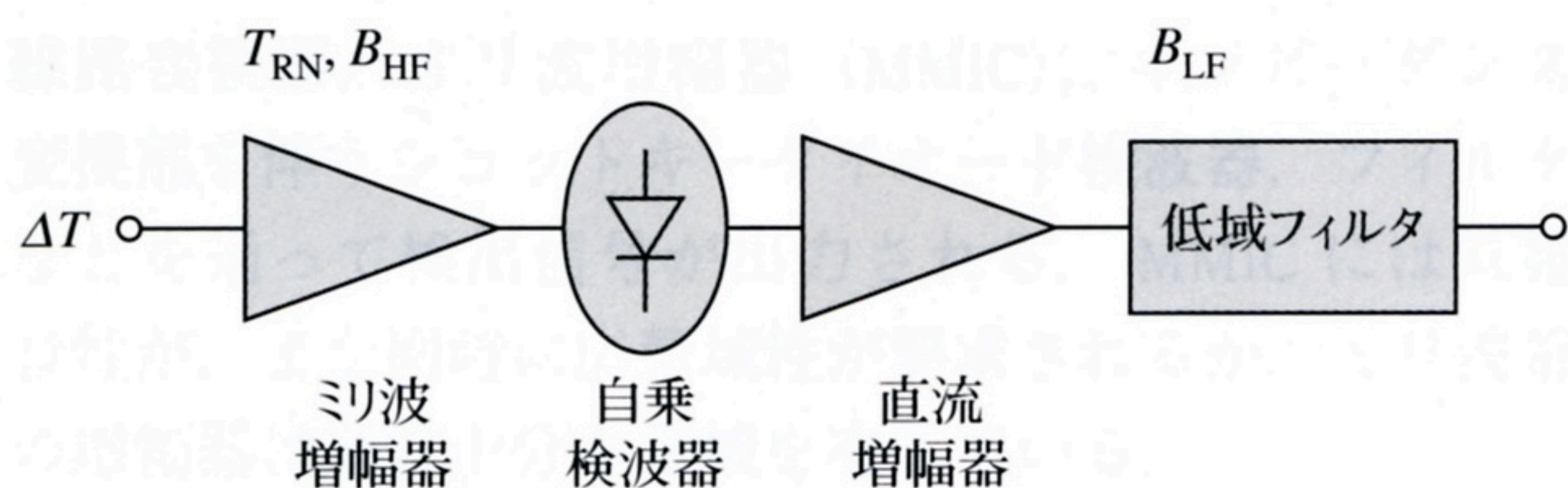


図6 広帯域信号の検出系

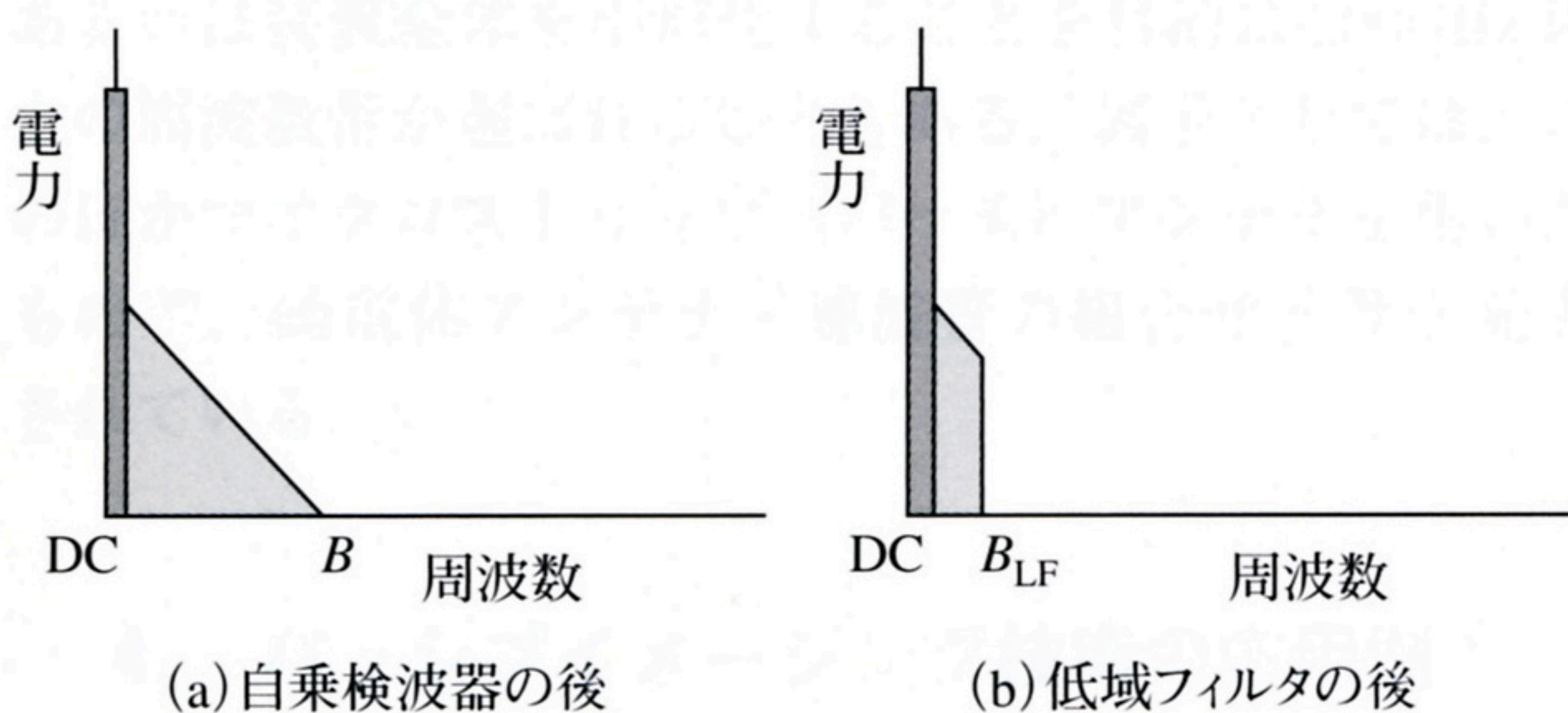


図7 自乗検波器の後、低域フィルタの後の信号スペクトル。

となる。ここで、 C は定数、 k はボルツマン定数である。また、受信機内部雑音に起因する雑音出力 P_{NLF} は、同じく低域フィルタの後で、

$$P_{NLF} \approx 2C(kT_{RN})^2 B_{HF} B_{LF} \quad (7)$$

となる。ここで、 B_{LF} は、低域フィルタの帯域である。低域フィルタの後でのSN比を a （電圧比）とすると、

$$S/N = P_{DCS}/P_{NLF} = a^2 \quad (8)$$

となる。一方、受信機の雑音指数NFを F とすると、定義より、

$$T_{RN} = (F-1)T_0 \quad (9)$$

となる。ここで、 T_0 は室温である。したがって、 ΔT の温度分解能（最低検出温度）を得たいとき必要な増幅器の F は、

$$F = \frac{\Delta T}{aT_0} \sqrt{\frac{B_{HF}}{2B_{LF}}} + 1 \quad (10)$$

となる。熱放射を受信する今のような場合は、コヒーレントな信号を受信する場合と違い、 B_{HF} が大きいほど取り込める信号強度が強くなり、したがって F は大きくても（悪くても）よいことになる。ミリ波帯域では、マイクロ波帯に比して受信機の帯域が広く取れることが、ミリ波を用いる有利な点の一つである。 B_{LF} に関しては逆の関係になっているが、これは B_{LF} が雑音を制限する役目であることから理解できる。なお、物体の識別は、各々の物体の輝度温度の差、つまり熱放射が物体によって異なることによって行われ、温度分解能 ΔT より小さい輝度温度差の物体は識別できないことになる。

数値を当たってみよう。検出可能な最小温度、つまり温度分解能 ΔT として 1° を得たいときを考える。ミリ波受信機の帯域 (B_{HF}) として 6GHz 、低域フィルタの帯域 (B_{LF}) として 10kHz の受信機を構成すると、SN比 = 1 のとき、ミリ波増幅器に対して必要なNFは 5.5dB となる。

なお、この計算はミリ波増幅器の内部雑音のみを考えたものであるが、回路中の伝送線路などに損失があると、信号の損失と同時に雑音の増加も招く。例えば、線路（常温）の損失が 1dB のとき、信号の損失と同時に 75K の等価入力雑音加わることになる。

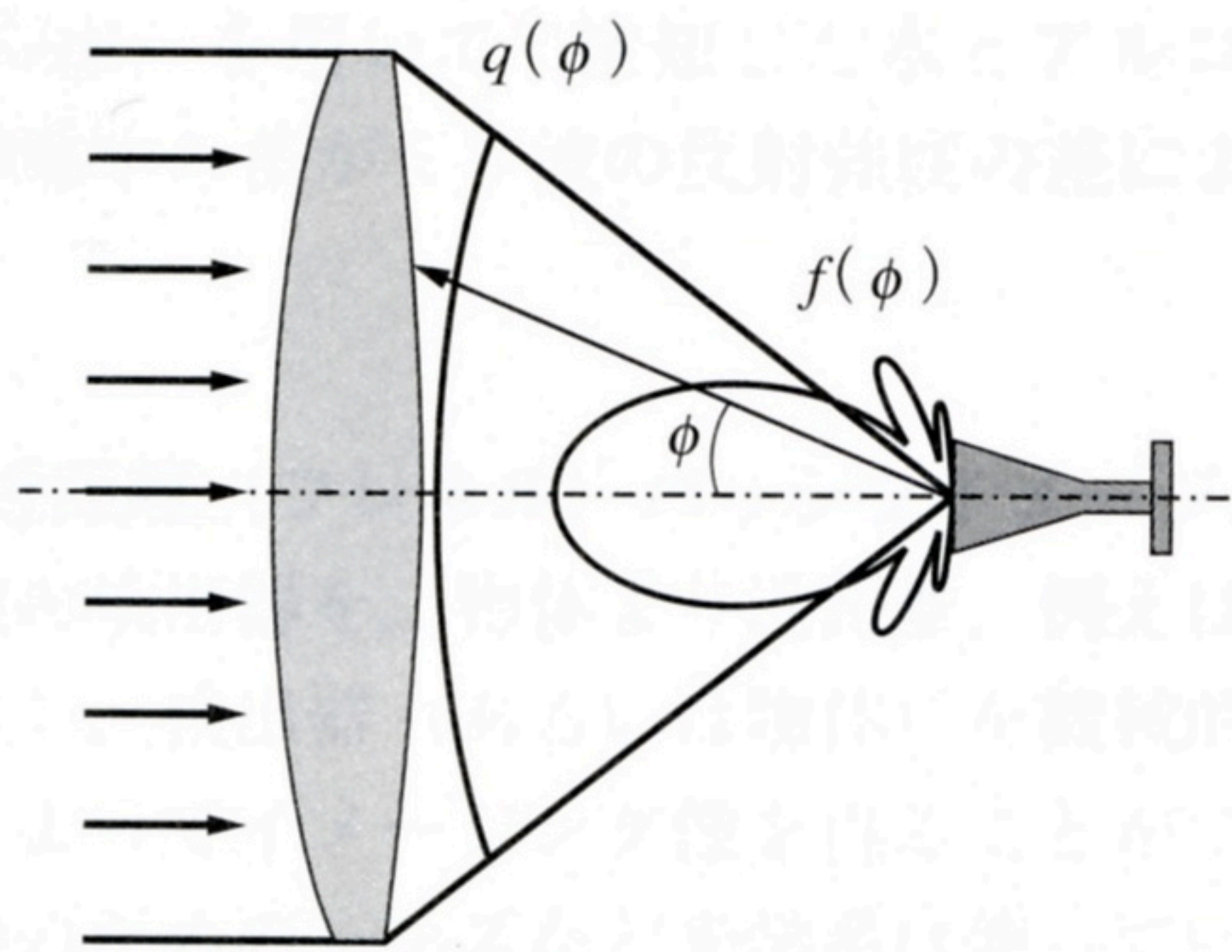


図8 レンズと検出素子アンテナとの光学的マッチング

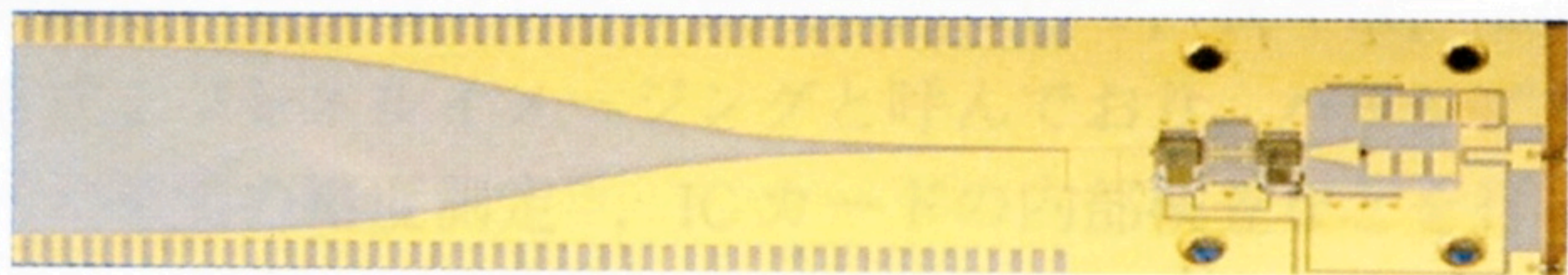


図9 35GHz帯イメージングアレー素子の一例 縦10mm, 横48mm, 厚さ0.1mmのアルミナ基板上に構成されている。

3.4 イメージングアレー用素子

イメージング用のミリ波検出素子は、アレーを構成することになるので小形にまとめられる構造のものが望ましい。構成は、広帯域アンテナ、ミリ波低雑音増幅器、検波器、低域増幅器、フィルタよりなるが、その大きさに関しては、3.1で述べた $\Delta x/2$ がイメージング素子に要求されるサイズである。またそのアンテナの指向性は、レンズを含めた全体のアンテナ効率を高め、更に漏話を防ぐために、レンズと光学的にマッチングしている必要がある。図8で、レンズから収束されてきた入力ミリ波に対し、アンテナの指向性が合っているとき（強度、更に位相が）に効率が高くなる。

図9には35GHz帯パッシブイメージングアレー用素子の一例を示す⁽³⁾。これは、1枚の誘電体基板上にアンテナから検波器までが構成されているもので、図の左のフェルミアンテナ^{(8),(9)}と呼ばれる誘電体アンテナで受信されたミリ波は、スロット線路、スロット線路—CPW線路変換器、ミリ波増幅器(MMIC)、インピーダンス変換部を伴うショットキーダイオード検波器、フィルタなどを通して検出信号が出力される。MMICには低雑音性が、また同時に広帯域性が要求されるが、ミリ波帯の増幅器は通常十分な帯域を有している。

なお、35GHzは、前述したように大気窓の一つであるが、その他イメージング用には前述した90GHz、あるいは装置全体を小形化することを目的に200GHz以上の周波数帯が選ばれることもある。素子としては、このほかマイクロストリップ(パッチ)アンテナを用いたもの⁽¹⁰⁾、誘電体アンテナ・導波管の組合せ⁽¹¹⁾等が発表されている。

4. パッシブイメージング技術の応用例⁽³⁾

本章ではミリ波帯イメージングの応用例を述べる。現

在はweb site検索で、“millimeter wave imaging”あるいは“passive millimeter wave imaging”のキーワードにより多くのサイトが見つかるので、ここでは我々が行った実際例を幾つか紹介するにとどめたい。

4.1 フォーカル・プレーン・タイプによるイメージング(ミリ波カメラ)

図1で示した火炎を透したイメージングは、ミリ波応用の一つの典型と思われる。なぜ、ミリ波だと炎の向こうが見えるのだろうか？ 炎の主体はプラズマであるが、その密度は通常 $10^8 \sim 10^{12} \text{cm}^{-3}$ のオーダーである。この密度に対応するプラズマ周波数は0.1~10GHzになり、マイクロ波は炎を透過できないが、ミリ波は透過できることになる。また、同図に示されているように光、赤外線は炎自体(内の炭素微粒子)から強く放射されているが、ミリ波は放射されていない。これがミリ波で炎の向こうが観測できる理由と考えられる。

図10は、35GHz帯パッシブイメージング法で検知した衣服の下のCD-ROMである。現在空港などのセキュリティチェックで重要な対象物は液体あるいはセラミックナイフなどの誘電体であるが、図は、ミリ波イメージングで誘電体を検知できることを示している。

図11は、ミリ波光源として家庭用蛍光灯(輝度温度

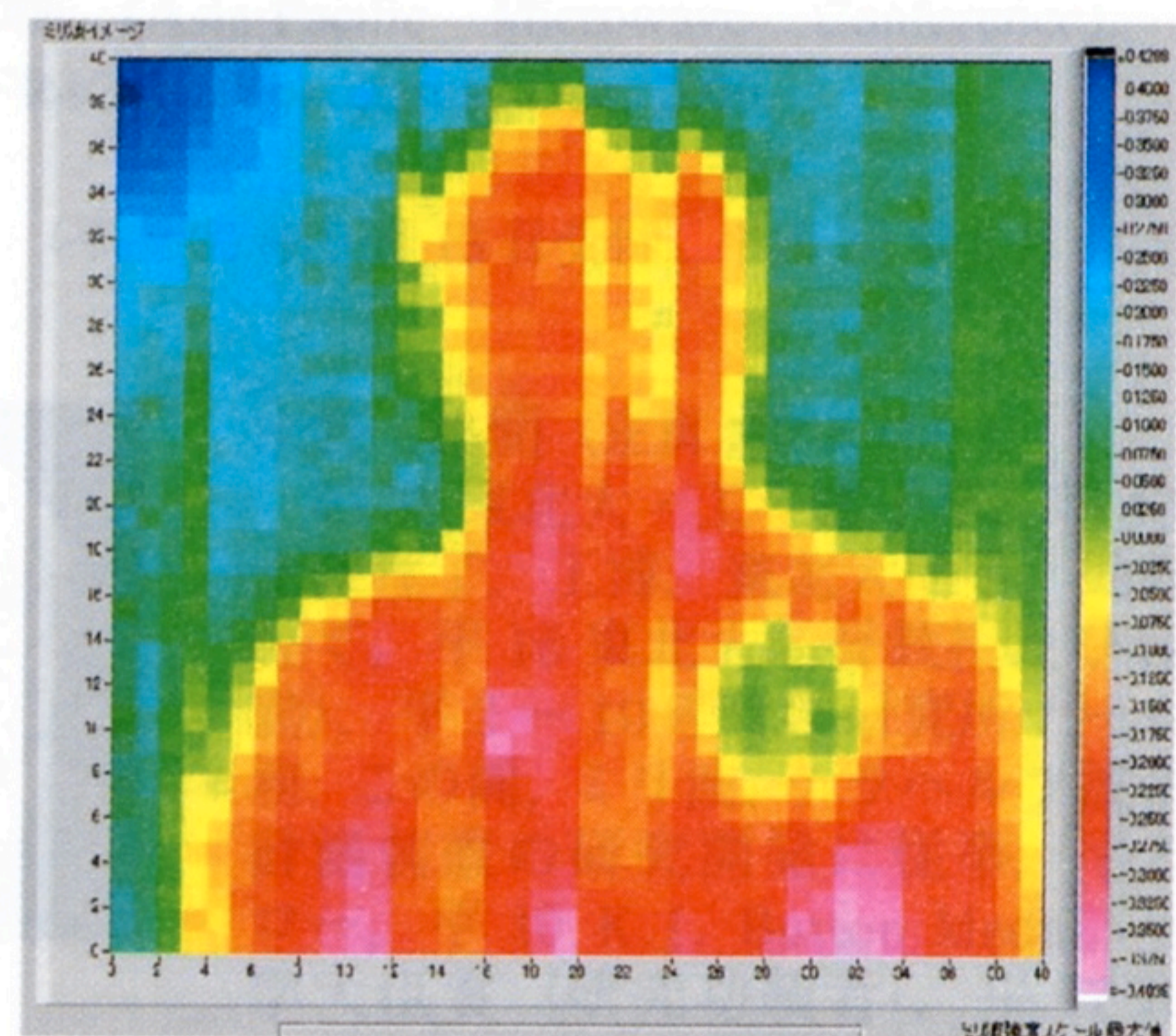
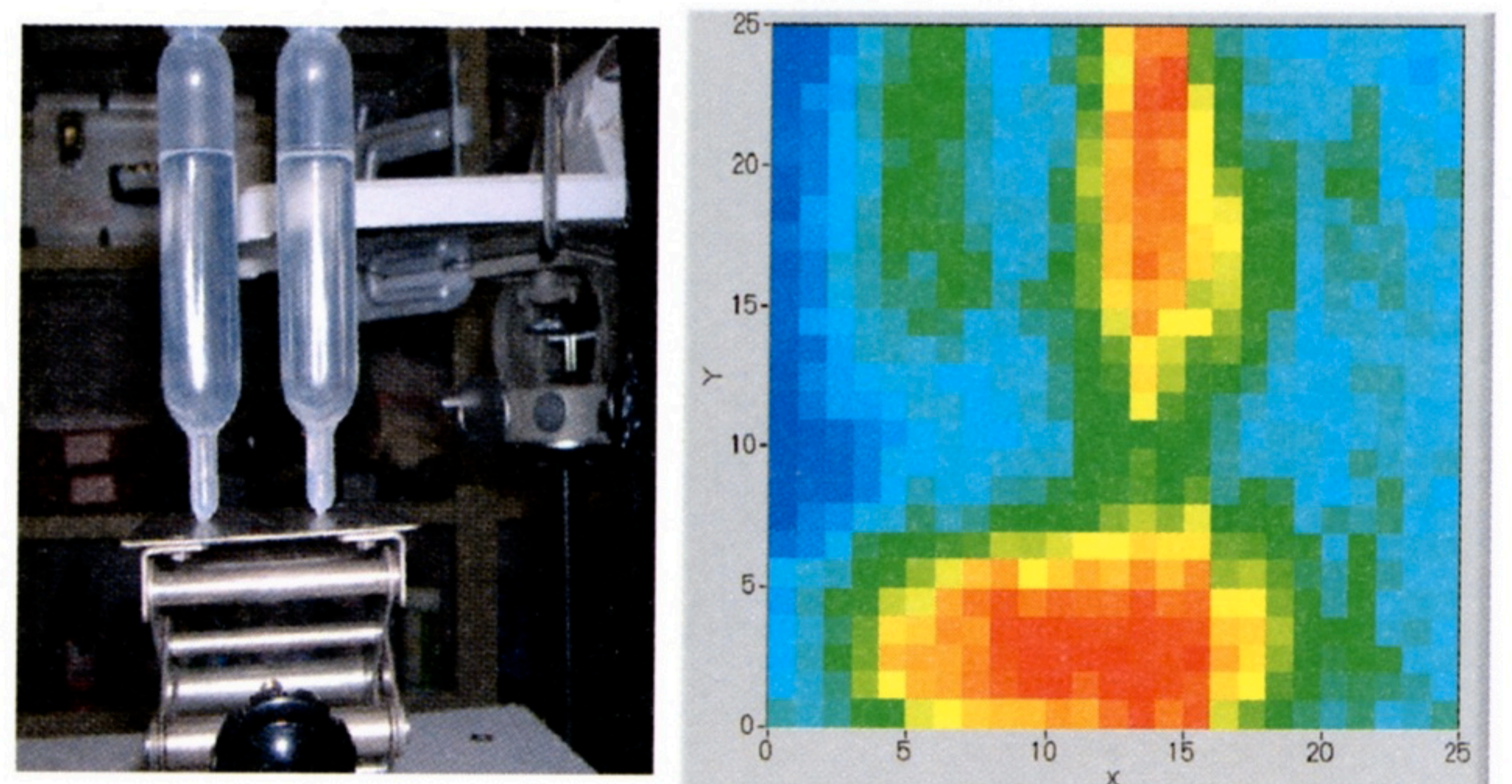


図10 衣服の下のCD-ROMの検知



(a)資料の配置

(b)ミリ波像

図11 家庭用蛍光灯をミリ波(35GHz)源として観測した液体の像 (a)は、資料(直径23mmポリエチレン容器)の配置。資料のうち左はエタノール、右は水、下部は金属製資料台。(b)は、(a)に対応するミリ波像。

は約1,000K)を用いて⁽³⁾検知した水とアルコールであるが、誘電率の差がミリ波の反射強度の差によって現れている。

4.2 近距離(フレネル)パッシブイメージング

ミリ波の検出器を、物体より近距離、例えば6波長程度に配置し、検出器(あるいは物体)を機械的に走査することによってイメージング像を得ることができ、このとき結像のためのレンズなど光学系は使っていないが、波長程度の空間分解能を得ることができる。物体までの距離がいわゆるフレネル領域にあるので、我々は、この方式をフレネルイメージングと呼んでおり、パッシブ方式で果実の糖度測定⁽³⁾、ICカードの内部検査などを行っている。また、家庭用の蛍光灯を光源に利用して、木材の節、あるいはシロアリ被害の検査⁽³⁾などを試みている。

5. ま と め

ミリ波帯は通信分野への応用を目指して種々のデバイスが開発されている。これらは、小形、広帯域、常温動作が可能、動作が安定、など多くの実用的な特性を有している。これら高性能なデバイスが手に入ることで、またミリ波特有の高い物質透過性などを生かすと新しい応用分野⁽¹²⁾を開拓することができる。本稿では、特にイメージング計測の分野に絞ってその技術を紹介した。電磁波の計測への応用は、果実糖度の測定のように、時として技術者の思いも付かない分野が現れることがあり、今後の展開に注目したい。

文 献

- (1) 水野皓司, “ミリ波帯イメージングアレー—ミリ波帯のカメラ—,” 信学誌, vol.79, no.2, pp.176-181, Feb. 1996.
- (2) 水野皓司, “ミリ波パッシブ・イメージング技術,” 電学電子デバイス研資, no.EDD-05-40, pp.19-24, March 2005.
- (3) K. Mizuno, H. Matono, Y. Wagatsuma, H. Warashina, H. Sato, S. Miyanaga, and Y. Yamanaka, “New applications of

millimeter-wave incoherent imaging (Invited),” 2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, no.WE2C-3, Long Beach, CA, June 2005.

- (4) K. Watabe, K. Shimizu, M. Yoneyama, and K. Mizuno, “Millimeter-wave active imaging using neural networks for signal processing,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.51, no.5, pp.1512-1516, May 2003.
- (5) 例えば最近の学会で次のようなセッションが組まれている。Session TH2C (Imaging and Ultra-Wideband Radars), 2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu, June 2007.
- (6) 荻戸立夫, 藪 鐘石, 水野皓司, “マイクロ波・ミリ波帯走査型近接場顕微鏡技術,” 信学誌, vol.85, no.4, pp.272-274, April 2002.
- (7) M. E. Tiuri, “Radio astronomy receivers,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-12, no.12, pp.930-938, Dec. 1964.
- (8) S. Sugawara, Y. Maita, K. Adachi, and K. Mizuno, “A MM-wave tapered slot antenna with improved radiation pattern,” 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp.959-962, Denver, June 1997.
- (9) 佐藤弘康, 澤谷邦男, 我妻壽彦, 水野皓司, “コルゲート構造付フェルミアンテナの広帯域FDTD解析,” 信学論(B), vol.J88-B, no.9, pp.1682-1692, Sept. 2005.
- (10) K. Uehara, K. Miyashita, K. Hatakeyama, and K. Mizuno, “Lens-coupled imaging arrays for the millimeter-and submillimeter-wave regions,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.40, no.5, pp.806-811, May 1992.
- (11) J. Richter, D. Noetel, F. Kloeppel, J. Huck, H. Essen, and L. Schmidt, “A multi-channel radiometer with focal plane array antenna for w-band passive millimeterwave imaging,” 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, no.TH2E-5, San Francisco, June 2006.
- (12) K. Mizuno, “Comparison of the capabilities of the millimeter wave region and the THz region (Invited),” Proc. APMC 2006 (Asia-Pacific Microwave Conference), pp.1827-1832 (FR4C-1), Yokohama, Dec. 2006.

(平成20年5月13日受付 平成20年6月11日最終受付)



水野 皓司 (正員:フェロー)

昭38 東北大・工・電子卒。昭43 同大学院博士課程了。工博。東北大助手、助教授、教授を経て、平16 東北大名誉教授及び客員教授(常勤)。平2~10 理化学研究所チームリーダーを兼務。この間、ミリ波、テラヘルツ波帯デバイス・計測装置の研究開発に従事。平5 IEEE フェロー、平10 K.J. Button Medal、平15 文部科学大臣賞(研究功績者)、平17 IEEE MTT-S Distinguished Educator Award 受賞。