



Title	遠赤外における各種フィルターの研究
Author(s)	阪井, 清美
Citation	大阪大学, 1968, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/382">https://hdl.handle.net/11094/382</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

遠赤外における各種フィルターの研究

1968年 8月

阪井清美

# 目次

緒言	1
第1章 イオソ生結晶を使ったフィルター	7
§1 はじめに	7
§2 Reststrahlen フィルター及Ca フィルターモノクロメーター	10
2-1 Reststrahlen フィルター	10
2-2 Reststrahlen フィルターを使ったモノクロメーター	12
[1] 光学系	13
[2] 短波長光の除去と偏光度の低下	14
[3] モノクロメーターの性能	16
§3 Reststrahlen パウダーフィルターの低温における性質	19
3-1 低温における測定系	19
3-2 Reststrahlen パウダーフィルターの低温における透過率	21
3-3 考察	24
§4 結論	31

第2章	金属メッシュを使ったフィルター	34
§ 1	はじめに	34
§ 2	金属メッシュの光学的性質の研究と、その透過特性を使ったバンドパスフィルター	38
2-1	金属メッシュの光学的性質の研究	38
	[1] メッシュの反射と透過	38
	[2] 位相	42
	[3] 吸収	44
2-2	金属メッシュの透過特性をバンドパスフィルターに用いる研究	47
§ 3	ファブリー・ペロ型干渉計	51
3-1	ファブリー・ペロ・エタロン及び <i>tunable</i> -ファブリー・ペロ・干渉計	51
3-2	金属メッシュを使ったファブリー・ペロ型干渉計の性質	53
3-3	次数の分離	55
3-4	<i>tunable</i> ファブリー・ペロ干渉計を使った簡単な分光器	56
3-5	3枚以上のメッシュを平行に並べた場合	60
3-6	考察 (ファブリー・ペロ型干渉計に附随する二、三の問題点)	63

[1] 反射板表面の欠陥	63
[2] 光源及び検知器の面積が有限な場合 の装置函数	67
[3] 反射板の反射率の差による影響	70
[4] 回折格子分光器とファブリー・ペロー 分光器の明るさの比較(光源の面積, 検知器の受光面積が限られている場合)	71
§4 結 論	79
謝 辞	83
文 献	84

## 緒 言

遠赤外領域の研究の最初から、その研究が盛んになり遠赤外レーザーなどが開発された今日でもなお問題になっていることは、遠赤外領域で強い連続スペクトルを出す光源が得られないということである。従ってグローバーのような熱輻射光源か高圧水銀灯が常用されているが、これらはいずれも、遠赤外の輻射に比べ近赤外の輻射が非常に強く、例えばグローバーを $1500^{\circ}\text{K}$ の黒体で置き換えると、 $2\mu$ と $50\mu$ の輻射強度の比は $1:5 \times 10^{-5}$ 、 $50\mu$ と $500\mu$ のそれは $1:10^{-6}$ 程度になる。近赤外輻射と遠赤外輻射の強度比が低いといわれる水銀灯においても、例えば $5\mu$ と $50\mu$ での強度比を比較すると約30倍ぐらいある。従って、1次光を使っている遠赤外回折格子分光器では高次光を嚴重に除去しなければならぬので、フィルターリングが特に重要である。中でも *long-wave pass filter* (LWPF), *wide-band pass filter* (WBPF), が重要である。*narrow-band pass filter* (NBPF) はそれだけで低分解能の分光に使える他、回折格子やファブリー・ペローの高次光を取り出すのに役立つ。

波長  $1\mu \sim 1mm$  の間のフィルターということになると、色々な動作原理のフィルターを使わなければならないが、現在までに開発されているものを列举すると、

LWPF に属するものとしては、物質の選択的透過や反射を利用したフィルター<sup>1,2)</sup>、誘電体薄膜干渉フィルター<sup>3~5)</sup>、ポウダーフィルター<sup>6,7)</sup>、*wire* メッシュフィルター<sup>8)</sup>、回折格子フィルター<sup>9,10)</sup>、*frustrated total reflection* を使ったフィルター<sup>11)</sup>、粗面フィルター<sup>12)</sup>、チヨッポーフィルター、*facal isolation* フィルターなどがあげられる。

物質の選択的透過や反射を利用したフィルターの中、*Si*、*Ge*、*InAs*、*InSb* 等の半導体の吸収端を利用したものは半導体フィルターと呼ばれ、 $1 \sim 10\mu$  の間で透過型フィルターとして使われている。立ち上りは急で、吸収端から短波長側の抑制効果は實際上完全であるが、屈折率が大きく反射損失があるため反射防止膜を蒸着して使っている。

他に水晶や、*IRTRAN 1~5* (*MgF<sub>2</sub>*、*ZnS*、*CaF<sub>2</sub>*、*ZnSe*、*MgO*) のような物質の透過特性は  $40\mu \sim 100\mu$

\* *wire* メッシュフィルターとは燐青銅の *wire* をメッシュ状に編んだもので、第二章に出てくる金属メッシュと異なる言葉と区別している。

の間は、 $TlCl$ ,  $KRS-6$ ,  $TlBr$ ,  $KRS-5$  などの結晶の反射特性は  $50\mu \sim 90\mu$  の間にカットオフ波長があり、各々透過型フィルター、反射型フィルターとして使われている。

誘電体薄膜干渉フィルターも透過型フィルターで、 $Ge$  や  $Te$  のような高屈折率と、*cryolite* や  $NaCl$  等のような低屈折率の物質の  $\lambda/4$  や  $\lambda/2$  厚さの層を蒸着で交互に積み重ねたもので、多層膜による干渉の原理を利用している。層数を増せば増すほど立ち上りが良くなり、現在  $20\mu$  程度までのものが得られている。パウダーフィルター<sup>\*</sup>は遠赤外域で透明なポリエチレンシートに、イオン結晶等の粉末を数種類混入して作ったもので、透過型フィルターである。粉末の種類、組み合わせ方を変えて、 $25\mu \sim 150\mu$  にカットオフ波長を持つものが得られている。

回折格子フィルターは、エシレット格子が格子定数  $d$  より短波長側の光は回折してブレース角の方向に集中するが、長波長側の光は零次光として鏡面反射することを利用したもので、カットオフ波長はおよそ  $d/2$  であ

<sup>\*</sup> パウダーフィルターの中、イオン結晶だけを混入して作ったものは特に *reststrahlen* パウダーフィルターと呼ぶ。

る。反射型の他に、ポリエチレンでレプリカをとった透過型もある。

*frustrated total reflection* を利用したフィルターは、全反射をおこしている境界に1波長以内に第2の物質を近づけると、全反射していた光の一部が通るようになる性質を利用したもので、ポリエチレンのプリズムを2個使って100 $\mu$ 以上でLWPFを作った報告がある。透過型のフィルターである。

粗面フィルターは、粗面が短波長光を散乱し長波長光を鏡面反射する性質を利用したもので、面の粗さを変えてカットオフ波長が変えられる。

チョツパーフィルターは、ある波長 $\lambda$ から長い方は通さない物質でチョツパーを作ると、 $\lambda$ 以上の光に対しては金属チョツパーと同様にチョツプされるが、 $\lambda$ 以下の光はチョツプされないことと、交流増幅を組み合わせるとLWPFの作用をさせたものである。

*focal isolation* フィルターは、波長により屈折率の違う物質でレンズを作り、長波長光に対する結像点にピンホールのあいた遮光板を置き、長波長のみをとり出し、短波長光は遮光板でさえぎるものである。

BPFに属するものとしては、誘電体薄膜干渉フ

ルター<sup>3, 5, 13~17)</sup>, Reststrahlen フィルター<sup>18~22)</sup>, periodic - interference modulator<sup>23~26)</sup> がある。

誘電体薄膜干渉フィルターは、やはり高屈折率と低屈折率の物質の $\lambda/4$ 層を交互に作り反射率を高くしたもの二組を、 $N \cdot \lambda/2$ の空隙、又は蒸着層を介して保持したものである。TeとNaClで $15\mu$ 程度までのBPFを作った報告がある。

Reststrahlen フィルターは、NaClやKClのようなイオン結合をした結晶が、遠赤外領域で格子振動による高い反射バンドを持つ性質を利用したもので、 $8\mu \sim 150\mu$ の間の反射型のBPFを用意できる。一回の反射では幅が広いが、二回又は三回反射させるとバンド幅は狭くなる。

periodic interference modulatorは、ラメラ格子を周波数 $f_0$ で周期的に動かすと、 $n\lambda_n = 2\Delta_{max}$  ( $\Delta_{max}$ : 最大光路差)の関係を満たす波長の光は、 $nf_0$ の周波数で変調されるので、 $nf_0$ に同調された同調増幅器と組み合わせて $\lambda_n$ の光をとり出すという原理を使っている。 $100\mu \sim 4mm$ の間で使っている報告がある。

SWPFは実際上あまり問題になることはないか。

NaCl や KBr, CsI などの透過特性<sup>27)</sup> は  $50\mu$  までの SWPF としての性質を持っている。

以上、近赤外から遠赤外までの各種フィルターを羅列してきたが、著者は  $20\mu \sim 1mm$  の間の BPF と LWPF 及びフィルターモノクロメーターの研究を行った。すなわち第1章では、reststrahlen フィルター及びフィルターモノクロメーターの研究と、reststrahlen パウダーフィルターの低温における研究で  $20\mu \sim 150\mu$  までの BPF 及び LWPF について、第2章では、金属メッシュを使った  $100\mu \sim 1mm$  までの BPF について報告する。

# 第1章 イオン性結晶を使ったフィルター

## §1 はじめに

NaCl や KCl のようにイオン結合している結晶は、遠赤外域の各結晶に固有の周波数(波長)で、*reststrahlen* バンドと呼ばれる強い吸収バンドを持っている。これは +イオンと -イオンが調和振動して振動双極子能率が生じ、光を吸収(単音子過程)することによる。このような強い吸収バンドの所では、結晶は高い反射率を示す。すなわち、*reststrahlen* バンドと呼ばれる反射バンドがそれで、完全なイオン結晶のみならず、II-VI 族、III-V 族等でもイオン性を持っているものならば現れる。現在約60種類<sup>22)</sup>が知られており、WBPF として回折格子分光器でその1次光をとり出すのに使われているが、回折格子分光器が発達するまでは、数回反射させてバンド幅を狭くし遠赤外の低分解能の分光をおこなうのに使われてきた。例えば、J. Strong<sup>12,28)</sup> は1931年に、NaCl, TlI などの結晶を使って150 $\mu$ までのフィルター分光をおこなっている。その他、1953年の J. K. O'Loane<sup>29)</sup> の有機物の吸収バンドの測定や、1957年の J. Bohdansky<sup>30)</sup> の高圧水銀灯の輻射の

研究の例などがある。しかし、この *Reststrahlen* フィルターを用いて分光する方法は、高性能の回折格子分光器<sup>31, 32)</sup>が開発された後の1961年にも、E. D. Palik<sup>33, 34)</sup>等が簡易型の分光法として *InSb* のサイクロtron共鳴吸収の測定に使っており、干渉分光器も開発され遠赤外の分光測光が比較的容易になった現在でもなお有用性がある。この点に着目して *Reststrahlen* フィルター・モノクロメーターを試作し、その性能、利点、欠点などを調べた。

この *Reststrahlen* バンドの短波長側及び長波長側には、これほど大きくはないが2音子過程による吸収がある。これは同じ伝播定数で違った周波数  $\omega_1$  と  $\omega_2$  の波が双極子能率の高次項あるいはポテンシャルの高次項により相互作用し、周波数  $\omega_1 + \omega_2$  又は  $\omega_1 - \omega_2$  に生じた吸収で、 $\omega_1 + \omega_2$  の方は *summation* バンドと呼ばれ、*Reststrahlen* バンドよりも短波長側の、 $\omega_1 - \omega_2$  の方は *difference* バンドと呼ばれ *Reststrahlen* バンドよりも長波長側の吸収である。結晶の透過率は従って、*Reststrahlen* バンドのところで不透明、それより長波長側及び短波長側で透過するようになる形になっている。

*summation* バンド、*difference* バンドは温度依存

性があり、後者は特に強く、絶対零度近くではほとんど吸収がなくなる。低温技術、特に液体ヘリウム温度での測定技術が発達してきた今日、イオン結晶の低温における透過率の測定がおこなわれ出している。

例えば、A. Hadni 等による NaCl, KBr<sup>35)</sup>, TlCl, CsBr<sup>36)</sup> などの測定例がある。

このような Reststrahlen 結晶を粉末にして、遠赤外域で透明なポリエチレンシートに混入したものを、やはり Reststrahlen バンド付近で不透明で、それより長波長側及び短波長側で透明になる。この透明な短波長側に Reststrahlen バンドを持つ Reststrahlen 結晶をさらに混入してゆくと、短波長側が不透明で長波長側が透明な LWPF になる。これは Reststrahlen パウダーフィルターと呼ばれるもので、違った種類の結晶を使って、カットオフ波長が  $25\mu \sim 150\mu$  までのものが得られ現在まで常温で使われて来たが、著者の研究から低温にすると、フィルターとしての性能が著しく改善されること分った。

## §2 Reststrahlen フィルター及びフィルターモクロメーター

### 2-1 Reststrahlen フィルター

多くの Reststrahlen 結晶中、アルカリハライドだけを使っても、 $30\mu \sim 150\mu$ の間のフィルター分光ができる。一回の反射ではバンド幅は広いが、2回ないし3回反射させると、例えば NaCl について Fig 1-1 に示すごとく、最大反射率をあまり下げることなくバンド幅を狭くすることができる。

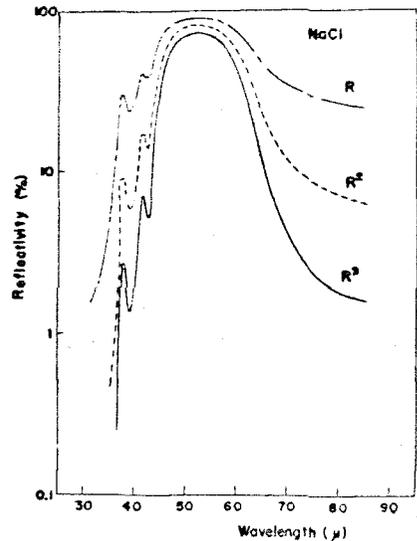


Fig 1-1 Reststrahlen フィルター、1回、2回、3回反射の反射率 (NaClの場合)

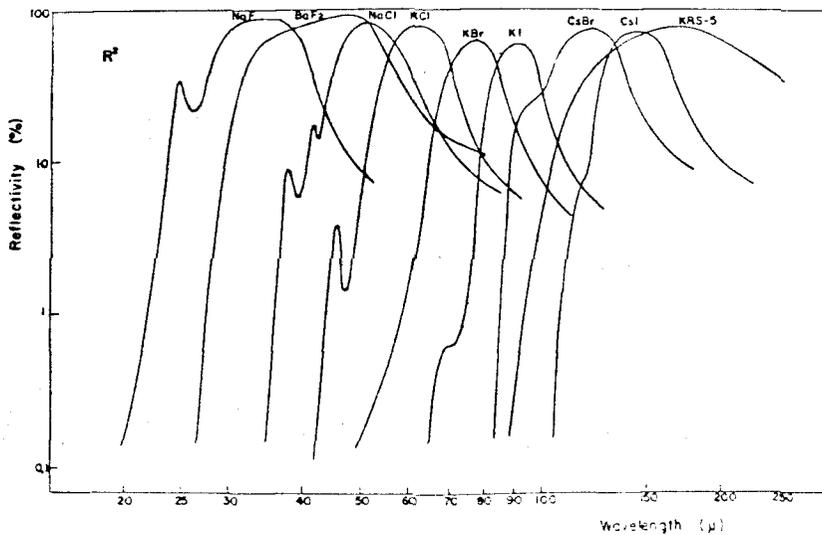


Fig 1-2 Reststrahlen フィルター 2回反射の反射率

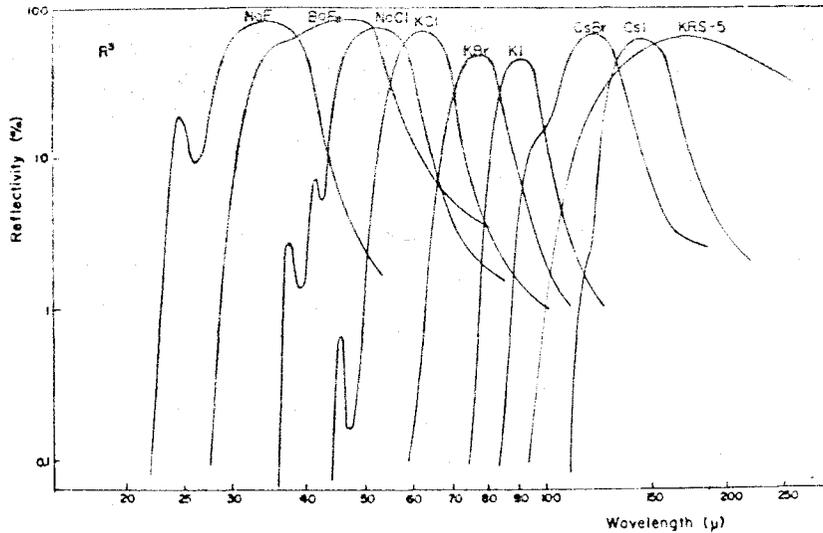


Fig 1-3 reststrahlen フィルター - 3回反射の反射率.

Table 1-1 reststrahlen フィルター - の特性

reststrahlen フィルター -	最大値 波長 ( $\mu$ )	中心 波長 ( $\mu$ )	最大反射率 (%)		半幅幅 ( $\mu$ )		補助フィルター -
			$R^2$	$R^3$	$\Delta\lambda(R^2)$	$\Delta\lambda(R^3)$	
NaF	34	33.5	79	82.5	13.5	11.7	P.F. (BeO+ZnO) + S.P. **
BaF <sub>2</sub>	45	44.5	90	85.5	23	19.5	P.F. (LiF) + S.P.
NaCl	53	53	81	73	17.5	15.2	P.F. (LiF) + IO <sup>+</sup> + S.P. + (G.F.) <sup>††</sup>
KCl	63	62.5	79	70	17	14.2	P.F. (SrF <sub>2</sub> +LiF) + IO + S.P. + (G.F.)
KBr	79	78	63	50	18	14	P.F. (CaF <sub>2</sub> +LiF) + IO + S.P. + (G.F.)
KI	92	90.5	59	45	16	14	P.F. (CaF <sub>2</sub> +LiF) + 2Q + S.P. + (G.F.)
CsBr	122	120	76	66	34	27.5	P.F. (BeO+ZnO+NaF+KCl) + 4Q + S.P. + (G.F.)
CsI	145	145	73	62.5	42	34.5	P.F. (LiF+SrF <sub>2</sub> +KCl) + 4Q + S.P. + (G.F.)
KRS-5	170	150	76.5	67	80	68	P.F. (KBr+BaF <sub>2</sub> +LiF) + 5Q + S.P. + (G.F.)

- \* P.F. : *reststrahlen* パウダーフィルター
- \*\* S.P. : 煤フィルター
- + 例えば 10 は 1mm の水晶フィルター
- ++ G.F. : 20 $\mu$  がカットオフ波長になるような回折格子フィルター (LWPF)

Fig 1-2, Fig 1-3 は, 測定結果<sup>18)</sup>をもとに, 2 回及び 3 回反射させた場合の反射曲線を, Table 1-1 はそれぞれの場合の最大反射率 ( $R^2, R^3$ ), 半価幅 ( $\Delta\lambda(R^2), \Delta\lambda(R^3)$ ), 最大値波長, 中心波長, 補助フィルターをまとめたものである。

2-2 *reststrahlen* フィルターを使ったモノクロメーター<sup>37)</sup>  
*reststrahlen* フィルターを使った簡単なモノクロメーターを組み立てた。回折格子分光器や, 干渉分光器のような高分解の測定はできないが, 簡易型の分光器として, フィルターの波長間隔よりもゆるやかな変化をする現象の測定に使うことができる。フィルターによる分光は非分散型の分光であるから, 大きな *étendue* (面積  $\times$  立体角) をとることができる。従って明るい光学系にできる。

# [1] 光学系

試作したモノクロメーターの光学系はFig 1-4のようになっている。

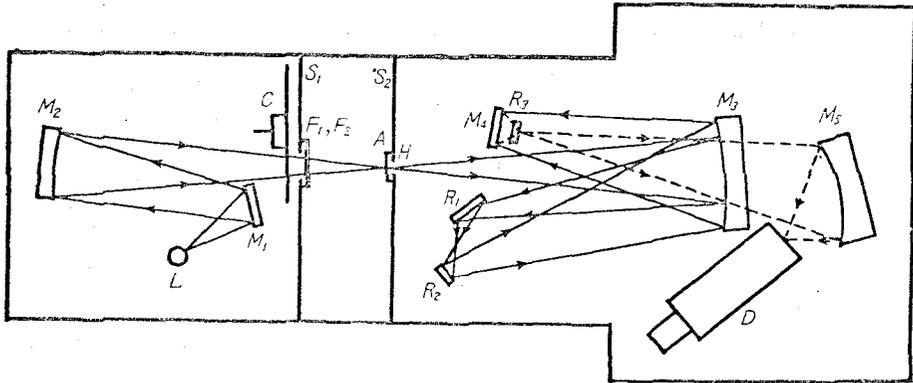


Fig 1-4 フィルターモノクロメーターの光学系

$M_2, M_3$  : 球面鏡,  $M_1, M_4$  : 平面鏡,  $D$  : 検知器  
 $R_1, R_2, R_3$  : Neststrahlen フィルター,  $C$  : チョッパー  
 $M_5$  : 軸外し楕円面鏡,  $F_1, F_2$  : 透過型 フィルター,  
 $S_1, S_2$  : 遮光板,  $L$  : 光源.

光源  $L$  から出た光は  $M_1, M_2$  を経て一度  $H$  の位置に結像し, さらに  $M_3, R_1, R_2, M_3, M_4, R_3$  と経て最後に軸外し楕円面鏡  $M_5$  により  $1/5$  に絞られて検知器へ入る。結像点は  $H$  の位置の他に,  $R_1$  と  $R_2$  の間及び  $R_3$  の上である。  $F$  の位置には透過型 フィルターを置く。透過試料 (直径  $10\text{ mm}$ ) は  $H$  の位置に, 反射試料は

M4の位置(59mm x 37mm)に置く。Cは10 C.P.Sの  
チョッパーである。

この光学系は、短波長光をカットするフィルターの役目を持た  
せるため、及び、モノクロメーターの偏光特性を良くするため  
に、reststrahlen フィルター  $R_1$  と  $R_3$  の入射面を直交させ  
てある。又、このモノクロメーターで使ったフィルターは、NaCl,  
KCl, KBr, KI, KRS-5 の5種類である。

以上の光学系は、22cm x 79cmのベースプレートにマウ  
ントされ、全長83cm、直径45cm(一部45cm)の真空  
タンクの中に設置される。そして、水蒸気による吸収を避ける  
ため、 $10^{-2}$  mm Hg 程度まで排気される。検知器から  
の出力は、交流増幅後、  
同期整流され、記録さ  
れる。

Fig 1-5は装置の写真  
である。



Fig 1-5 フィルターモノクロ  
メーターの写真

[2] 短波長光の除去  
と偏光度の低下  
reststrahlen フィルター  
は、遠赤外域で高い反射

率を持っているが、近赤外域でも数パーセントの反射率を持っている。一方、光源のエネルギー分布は、近赤外域の方がはるかに高く（ $5\mu$ と $50\mu$ では約30倍）、その上検知器のコレクタの感度が波長に無関係で、同じように検知されるため、フィルターの近赤外領域の反射率が数パーセントといっても、検知器に入るエネルギーとしては無視できなくなる。そのため、水晶とKClフィルター及びパウダーフィルターを使って短波長側をカットしているが、 $1\mu\sim 5\mu$  附近のフィルターリングが十分でないので、*reststrahlen* フィルター  $R_1, R_3$  の入射面を直交させ、しかもこの領域の光に対しては Brewster 角になるように入射角を決め、フィルター作用を持たせている。

このモノクロメーターで使った5種類の結晶の  $0.8\mu\sim 10\mu$  での Brewster 角は、NaCl:  $56^\circ$ , KCl:  $55^\circ$ , KBr:  $57^\circ$ , KI:  $58^\circ$ , KRS-5:  $67^\circ$  附近で  $1^\circ$  以内の変化をする程度である。モノクロメーターとして使う場合、フィルターの交換に際して、Brewster 角の違いにより光学系をその都度調整することは測定を繁雑にするので、平均値  $57^\circ$  を採用した。KRS-5のみ約  $10^\circ$  差違があり、P偏光のエネルギーは約3% 反射されるので、補助フィルターで補っている。

又、neststrahlen フィルター  $R_1$  と  $R_3$  の入射面が直交し、各  $R$  への入射角が等しいことは、これら2面での反射の際の偏光<sup>3b)</sup>を相殺することになり、モノクロメーターとしては望ましい。 $R_2$  によるものは残るが、 $R_2$  への入射角は  $28^\circ$  で、偏光度は、たとえば  $\text{NaCl}$  については  $50\mu$  で約3%、 $70\mu$  で約20%、 $100\mu$  で約30%である。

### [3] モノクロメーターの性能

このモノクロメーターを使ってする測定は、どの程度信頼がおけるかということを検討するために、分光透過率が正確に分っている試料を測定し、Fig 1-6 ~ Fig 1-8 に示すような結果を得た。ただし試料は、 $300\mu$  の厚さのポリエチレンシートの中に、図に示したような粉末状の結晶を、附記した量だけ一様に混ぜてかためたものである。

測定点の表示は、Table 1-1 の中心波長を使った。

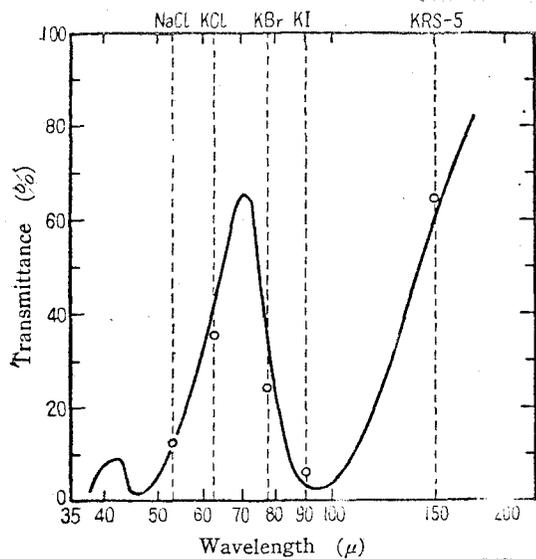


Fig 1-6  $\text{CaCO}_3$  パウダー ( $3\text{mg}/\text{cm}^2$ , ポリエチレンで保持) の透過率

— 回折格子分光器による測定

○ フィルターモノクロメーターによる測定

これらの測定の S/N 比は 50~60 (時定数 4.5 秒または 9.2 秒), 各測定値の再現性は約 ±1% である。波長精度としては, 最大値波長と中心波長の差程度を見込むのが適当と思われる。

回折格子分光器と *reststrahlen* フィルターモノクロメーターの測定結果を比較する場合, フィルターモノクロ

メーターのもつ再現性,

波長精度に加えて, 回折格子分光器による測定自体, ±1% ~ 2% 程度のばらつきがあるので, その差が ±2% ~ 3% 程度はやむをえないとして, Fig 1-8 の KRS-5 による,  $\text{CaCO}_3 + \text{KCl} + \text{MgO}$  や,  $\text{TlCl} + \text{TlI} + \text{NaF}$  の測定の差は, 明らかに系統的な誤差に属するものである。すなわち, KRS-5

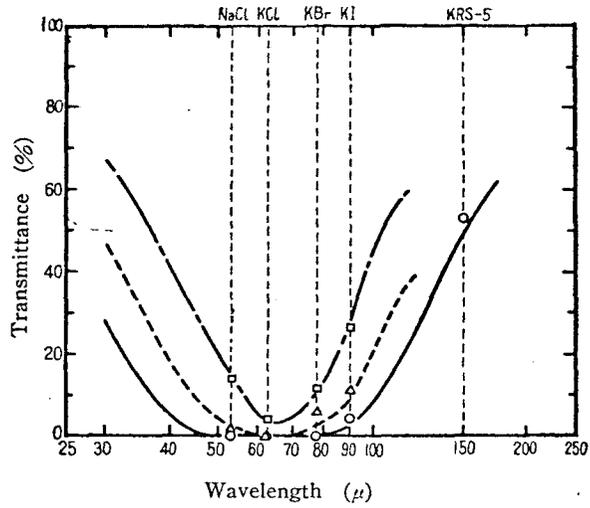


Fig 1-7 KCl パウダー (ポリエチレンで保持) の透過率。

— — — — — } 2.5 mg/cm<sup>2</sup>

- - - - - } 5 mg/cm<sup>2</sup>

————— } 10 mg/cm<sup>2</sup>

————— } は, 回折格子分光器による測定結果。

□ } は, フィルターモノクロメーターによる測定結果。

△

○

のバンド幅が広い上に、  
試料の透過率がバンド  
内でかなり変化している  
からである。このような  
ことは十分注意しなけ  
ればならない。

CsIを使う場合は、  
これを使うことが望ま  
し。

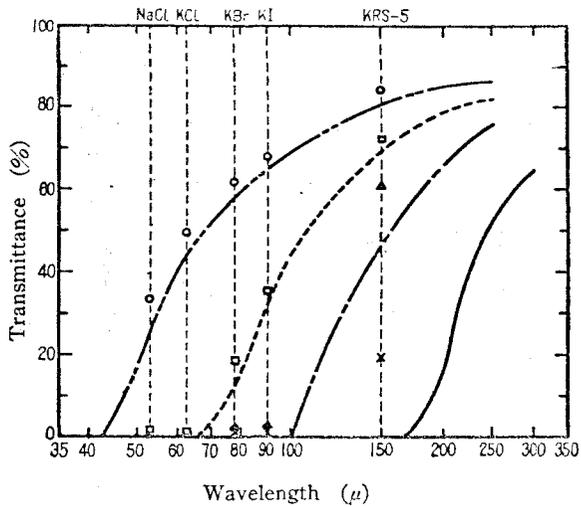


Fig 1-8 reststrahlen パウダー  
フィルターの透過率。

- }  $\text{CaF}_2 + \text{LiF}$
- }  $\text{BeO} + \text{ZnO} + \text{NaF} + \text{KCl}$
- △ }  $\text{CaCO}_3 + \text{MgO} + \text{KCl}$
- x }  $\text{TlCl} + \text{TlI} + \text{NaF}$
- } 1回析格子分光器に  
よる測定結果
- } は、フィルターモクロメーター  
による測定結果

§3 reststrahlen パウダー フィルターの低温における性質.

3-1 低温における測定系

reststrahlen パウダー フィルターの透過測定は、大阪大学遠赤外回折格子分光器<sup>32)</sup>を用いておこなった。常温及び液体窒素温度での測定は、フィルターを液体窒素用のクライオスタットの中に入れ、先ず常温で測り、次に液体窒素温度に冷やして測定した。クライオスタットの位置は入射スリットの前である。検知器はコレーセルを用いた。測定精度は $100\mu$ 以下では $\pm 1\%$ 以下、 $100\mu$ 以上では

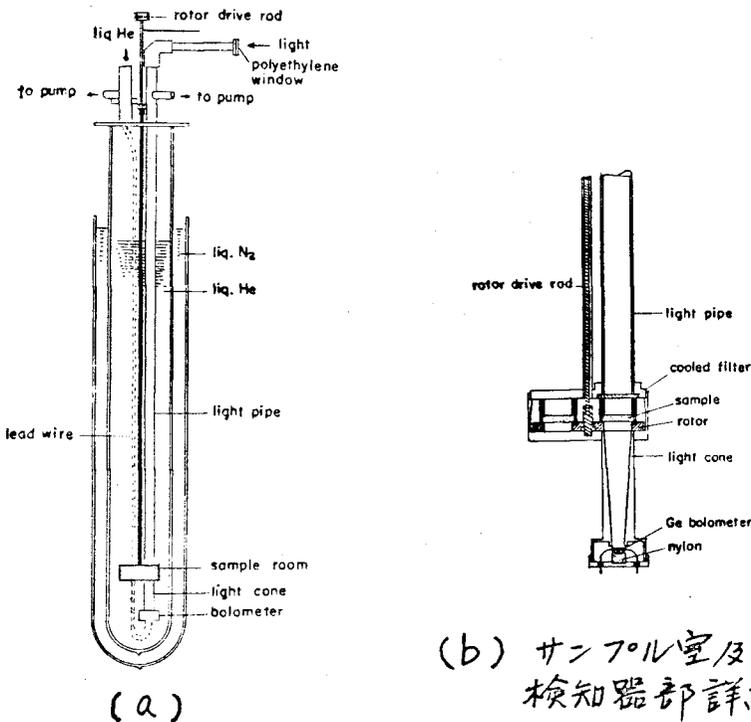


Fig 1-9 試料室付きケルマニウムボロメーターのクライオスタット

±2%以下であった。液体ヘリウム温度での測定は、グレーの代わりにケルマニウム (インジウム・ドーパ) ホロメーターを用い、ホロメーターへ光を導いてくるライトパイプの途中に試料室を作つて、試料もホロメーターも同時に液体ヘリウム温度に冷やす Fig 1-9 のようなクライオスタットを用いた。

入射した光は、内径 11 mm のキプロロニツケル製のライトパイプに導かれて、試料室に入り、試料を透過してシンチユウ製のライトコーンで絞られ、6 mm 平方のホロメーターで検知される。ホロメーターからの出力はハーメックを通じ外部へ取り出される。(b) は試料室詳細で、この内部には円板があり、円板の上に試料を3個乗せることができる。他の1個は空白のまま *reference* として用いる。試料は、すべて銅でできた試料室の伝導により液体ヘリウム温度まで冷やされる。光路に入れる試料の交換は、円板に固定されたシャフトにより外部からまわすことができるようになっている。試料室の入口には *cooled* フィルターがあり、ライトパイプ壁からの輻射で、試料温度やホロメーター温度が高くなるのを防いでいる。*cooled* フィルターは測定領域に依りて違つたものを用いた。

すなわち、 $\text{BeO} + \text{ZnO}$ 、 $\text{LiF}$ 、パウダーフィルターに対しては、 $\text{BeO}$  パウダーフィルターとブラックポリエチレン、

$\text{SrF}_2 + \text{LiF}$ ,  $\text{CaF}_2 + \text{LiF}$  パウダーフィルターに対しては,  
 $\text{BeO} + \text{ZnO}$  パウダーフィルター と ブラックホリエチレン,  
 $\text{BeO} + \text{ZnO} + \text{NaF} + \text{KCl}$ ,  $\text{LiF} + \text{SrF}_2 + \text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$   
 $+ \text{BaF}_2 + \text{LiF}$  パウダーフィルターに対しては,  $\text{SrF}_2 + \text{LiF}$   
 パウダーフィルター と ブラックホリエチレン,  $\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$   
 $+ \text{KCl}$ ,  $\text{TlCl} + \text{TlI} + \text{NaF}$  パウダーフィルターに対しては,  
 水晶 (2mm) と ブラックホリエチレン を用いた。

このような クライオスタットでは, ホンビキングによる雑音が入  
 る可能性があるが, 取り除かなければ 測定結果に大きな  
 誤差が生じる。これを取り去った後に残るのは, 試料の  
 位置決めから生ずる誤差で, これは ±3% であった。

### 3-2 reststrahlen パウダーフィルターの低温に おける透過率<sup>39)</sup>

測定は, 先に発表された<sup>6)</sup>  
 総てのパウダーフィルターについ  
 て, 常温, 液体ネオン及び液  
 体ヘリウム温度でおこなった。  
 結果は Fig 1-11, Fig 1-12  
 に示す如くである。

測定結果から, 常温, 液体

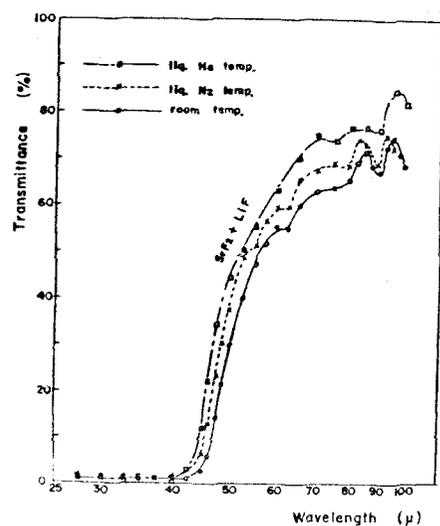


Fig 1-10 reststrahlen  
パウダーフィルターの干渉

テッソ温度，液体ヘリウム温度と，温度が低くなるに従って，

i) 透過領域の透過率が，3%~5% づつ高くなる。

ii) 立ち上りが急になる。すなわち，この領域での透過率は，約10% づつ高くなっている。

iii) カットオフ波長が短波長側へずれる。フィルターの種類により異なるが，常温と液体ヘリウム温度での差が，一番大きくて7.5 $\mu$ である。

iv) 不透明領域の透過率は，常温

での透過率より悪くならない。すなわち1%程度である。

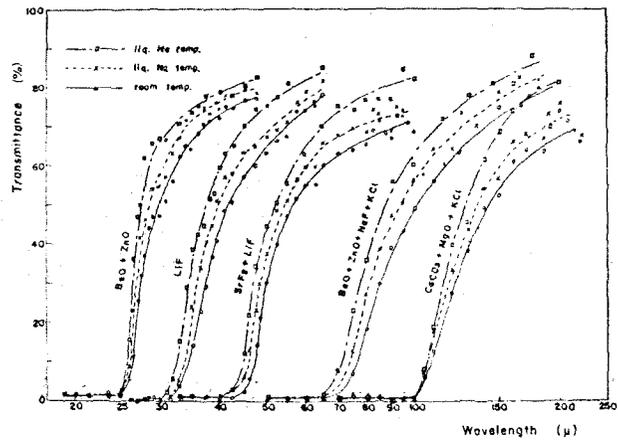


Fig 1-11 各種 reststrahlen  
パウダーフィルターの，常温，液体  
テッソ温度，液体ヘリウム温度にお  
ける透過率。

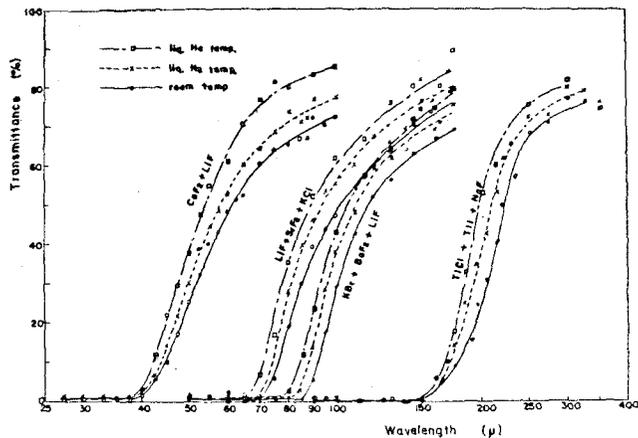


Fig 1-12 各種 reststrahlen  
パウダーフィルターの，常温，液体  
テッソ温度，液体ヘリウム温度にお  
ける透過率。

又、透明領域では Fig 1-10 に示すように干渉が現れるため、透過曲線はなめらかになっていない。常温と液体ネッソ温度では同一試料であり、光路中の同じ位置で測定しているため同じ干渉パターンを示すが、液体ヘリウム温度の場合は、同じハウジーフィルターの違った場所から切りとった試料を使っていること（厚さは場所により少し異なる）と、試料をライトパイプ中に入れているため、試料中の光路が異なり、従って違った干渉パターンになっている。

Table 1-2 neststrahlen ハウジーフィルター  
の、液体ヘリウム温度におけるカットオフ波長と、  
回折格子の1次光をとり出すのに使用できる領域

Neststrahlen ハウジーフィルター	カットオフ波長( $\mu$ )	1次光をとり出す場合に使用できる領域( $\mu$ )
BeO + ZnO	24 (25)	27 ~ 48 (31 ~ 50)
LiF	30 (31.5)	37 ~ 60 (42 ~ 63)
SrF <sub>2</sub> + LiF	40 (42.5)	52.5 ~ 80 (57 ~ 85)
CaF <sub>2</sub> + LiF	39 (40)	54 ~ 78 (61 ~ 80)
BeO + ZnO + NaF + KCl	65 (70)	86 ~ 130 (100 ~ 140)
LiF + SrF <sub>2</sub> + KCl	65 (70)	90 ~ 130 (105 ~ 140)
KBr + BaF <sub>2</sub> + LiF	77.5 (85)	105 ~ 155 (120 ~ 170)
CaCO <sub>3</sub> + MgO + KCl	97.5 (100)	130 ~ 195 (140 ~ 200)
TlCl + TlI + NaF	150 (150)	200 ~ 300 (225 ~ 300)

Table 1-2に、液体ヘリウム温度でのカットオフ波長と、回折格子の1次光をとり出す場合に使用できる領域をまとめておく。但し( )内の値は、常温におけるものである。

### 3-3 考察

現在まで、*reststrahlen* パウダーフィルターの特性を決める原因について種々の議論がなされてきたが、低温での測定を終った段階で検討してみる。

#### 吸収について。

吸収は、フィルターの特性を決める要因中、一番大きく作用していると考えられる。低温における実験とカットオフ波長に対する検討が、その根拠を与えてくれる。*reststrahlen* パウダーフィルターを低温にした時の透過率の変化は、フィルター内に含まれるイオン結晶の低温での透過率の変化とよく対応がたつ。Hadni や Plendle によると、イオン結晶を低温(液体ヘリウム温度、液体ネオン温度)にすると、

- i) *reststrahlen* バンドより長波長側の透過率は著しく良くなる。
- ii) *reststrahlen* バンドはシャープになり、ヒークは短波長側へずれる。

iii) reststrahlen バンドよりも短波長側の透過率は少し良くなるが、長波長側ほどではない。

すなわち、"reststrahlen パウダーフィルターを低温にした時、透過領域の透過率が良くなる"ことは、reststrahlen 結晶の i) の性質と対応する。reststrahlen 結晶のこの領域での吸収は、difference バンドによるもので、その吸収係数は Lax 及び Burstein<sup>22)</sup> によると、

$$\alpha(\omega) \propto \sum_{k t t'} \frac{|H(k t t')|^2}{\omega_t(k) \omega_{t'}(k)} \times (n_{k t} - n_{k t'}) \times \delta[\omega + \omega_t(k) - \omega_{t'}(k)]$$

----- (1-1)

で与えられる。

$\omega_t(k)$  は波数ベクトル  $k$  における  $t$  分枝の角周波数、 $H(k t t')$  は、 $t$ -分枝と  $t'$ -分枝を結ぶためのマトリックス要素で、 $k t t'$  が決まれば定数となる。 $n_{k t}$  は  $(k, t)$  状態にあるフォノンの数で、

$$n_{k t} = \left\{ \exp(\hbar\omega/RT) - 1 \right\}^{-1} \quad \text{----- (1-2)}$$

で与えられる。低温 ( $T \rightarrow 0^\circ K$ ) になると、すなわち  $RT \ll \hbar\omega$  になると、 $n_{k t} \rightarrow 0$  になるので、 $\alpha(\omega) \rightarrow 0$  になる。低温にすると長波長側で透過率が上がるのはこの理由による。

次に、“reststrahlen パウダーフィルターを低温にした時立ち上りが急になり、カットオフ波長が短波長側へずれる”

ことは、reststrahlen 結晶の ii) の性質と対応する。

reststrahlen バンドが低温で sharp になるのは、光による励起された単音子の、二音子への遷移が減るためである。

これは、Drude の分散式について言えば“減衰項が減ったこと”による。

又、バンド (中心角周波数  $\omega_0 = [2f(\frac{1}{M} + \frac{1}{m})]^{\frac{1}{2}}$

$f$ : カの定数,  $M$ : +イオン質量,  $m$ : -イオン質量) が短

波長側へずれることは、低温にすると格子間隔が狭く

なってカの定数が大きくなり、振動数が大きくなることによる。

“reststrahlen パウダーフィルターの不透明領域の不透明さが、低温でも常温とあまり変わらない” という性質は、短波長側にある第2, 第3の結晶の reststrahlen バンドが温度依存性を持たないこと、及び、reststrahlen 結晶の iii) の性質による。主として前者が影響を及ぼしていると考えられるが、この第2, 第3の結晶の reststrahlen バンドは低温にすると sharp になるので、バンドとバンドの間隔ができてカットオフ特性が悪くなる可能性がある。実際、濃度が薄く、常温でカットオフ特性の悪いものについては低温にした時さらに悪くなったが、常温で満足するものは、

低温にしてもこのようなことはなかった。

iii) は reststrahlen 結晶の summation バンドによる吸収のため、吸収係数は、

$$\alpha(\omega) \propto \sum_{k, k'} \frac{|H(k, k')|^2}{\omega_k(k)\omega_{k'}(k')} \times (1 + n_{k, k'}) \times \delta[\omega - \omega_k(k) - \omega_{k'}(k')] \quad \text{--- (1-3)}$$

と表される。  $T \rightarrow 0^\circ\text{K}$  とすると、

$$\alpha(\omega) \rightarrow \sum_{k, k'} \frac{|H(k, k')|^2}{\omega_k(k)\omega_{k'}(k')} \times \delta[\omega - \omega_k(k) - \omega_{k'}(k')] \quad \text{--- (1-4)}$$

となり、吸収は残る。

以上は、低温における実験から来る根拠であるが、次にパワーフィルターのカットオフ波長を検討してみると、これは、フィルターに混入されたイオン結晶の粒度ではなく、その種類によって決まっている。すなわち、カットオフ波長を決めるのは主として吸収であるという根拠になる。

### 散乱について

吸収係数ではないが散乱もまたフィルターの透過特性に影響を及ぼしていると思われる。散乱には、粒子の屈折率と媒質の屈折率の差による項と、波長に対する粒子の大きさの項とが含まれる。前者はいわゆるクリステンセン効果

によるもので、パウダーフィルターではホリエテレン( $n \approx 1.5$ )と其中に含まれる *neststrahlen* 結晶(粉末状)の屈折率の差が大きいほどよく散乱される。普通の結晶では *neststrahlen* バンド付近のみ屈折率の差が大きいのでこの付近のみ顕著であるが、TL系統の結晶は全域にわたって屈折率が大きく( $n \approx 5.5$ )、従って *neststrahlen* バンド以外の所でもこのような影響があると思われる。すなわち、 $TL\alpha + TL\Gamma + NaF$  フィルターの場合、カットオフ波長から短波長側へ全域にわたっての不透明さか他のフィルターにくらべてすぐれているのは、この効果によるのであろう。

後者に対しては、粒子が細くなるほどカットオフ点は短波長側へ移るとともに、立ち上り、カットオフ特性は良くなる。<sup>6)</sup>

この場合の粒子の大きさは、平均  $10\mu$  程度であるから、これと同程度の波長からカットオフ波長あたりの光に対しては *Mie scattering*、長波長側の透過領域の光に対しては、*Rayleigh scattering* として取り扱うこととなる。先ず、粒子の大きさを  $10\mu$  として長波長側では、散乱のためにはどの程度透過率が下るか調べてみる。但し、*neststrahlen* パウダーは球状になっていると仮定して求める。散乱係数  $\beta$  は次式で与えられる。

$$\beta = \frac{8\pi^3 N v^2}{3 \lambda^4} \left( \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0} \right)^2 \text{----- (1-5)}$$

但し  $N$  は単位体積中の粒子数,  $v$  は粒子体積,  $\epsilon, \epsilon_0$  は, 粒子及び媒質の誘電率である。例えは  $10 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 300 \mu$  のポリエチレンシートに  $\text{NaCl } 200 \text{ mgr}$  が含まれている  
 以下の簡単な場合を考えると,  $v = \frac{1}{2} \times 10^3 [\mu]^3$ ,  $\epsilon = 5.62$ ,  $\epsilon_0 = 2.25$ ,  $N = 2 \times 10^{-4} [\mu]^{-3}$  で, これを (1-5) に代入すると。

$$\beta \approx \frac{10^4}{\lambda^4} [\mu]^3 \text{----- (1-6)}$$

となる。フィルターの厚さ  $300 \mu$  として, 波長  $500 \mu$  での散乱による入射光の減衰を考えると,

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\beta d} = e^{-0.5 \times 10^{-4}} \approx 1 \text{----- (1-7)}$$

すなわち, 長波長側での散乱による透過率の減少は無視できる。但し,  $I_0, I$  は各々, 入射光, 透過光の強度である。立ち上りの領域での散乱は Mie の理論を使わなければならぬが, 計算で求めることはできない。ただ実験的に, 粒子を  $10 \mu$  程度よりも大きくすると, *Reststrahlen* バンドの両側で透過するようになり, 立ち上りも悪くなる。すなわち粒子としての性質よりも結晶としての性質が支配的になってくるが, これは, *non selective scattering* (粒

子の大きさが波長にくらべて十分大きな場合に使う散乱理論で、粒子表面での反射、透過、屈折、粒子による回折も考えている) よりも、Mie scattering でとりあつかう程度に粒子が細くなった方が、良い結果を与えることを物語っている。

### その他

ポリエチレンシートの厚さや、パウダーの濃度も、フィルターに影響を及ぼすか、これらについては、現在まで定量的に調べられている。<sup>40)</sup> すなわち、厚さについては薄い方が良いが、製作上一種類のもので240 $\mu$ 、数種類の粉末を混入する場合で260 $\mu$ 以下は薄くできない。

濃度は、ポリエチレン2grに対し粉末0.2gr $\sim$ 0.25grが適当である。その他、表面の汚れや傷(チャネルスパウトルを取り除くために表面を粗くすること)は、フィルターの特性を悪くする。

## §4. 結論

本章で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) *reststrahlen* フィルターは、3回の反射で、 $\lambda/\Delta\lambda$  が3~6, 最大反射率が50%~80%になる。
- 2) NaF, BaF<sub>2</sub>, NaCl, KCl, KBr, KI, CsBr, CsI, KRS-5で、波長30 $\mu$ ~150 $\mu$ の間をおよそ10 $\mu$ おきの各波長で測定ができる。(但し, KI~CsBrは30 $\mu$ , CsBr~CsIは25 $\mu$ の開きがある)
- 3) *reststrahlen* フィルター各々3枚使って、3回反射するような光学系を持ったフィルターモノクロメータを試作したが、これは非分散型の分光器であるから大きな *étendue* (面積 $\times$ 立体角)をとることができるという利点と、簡単に作れるという利点がある。しかし高分解の測定は期待できない。
- 4) 試作したモノクロメータでは、フィルター3枚の中2枚の入射面を直交させ、短波長光の除去と、偏光を少くすることに役立たせた。
- 5) このモノクロメータによる測定の S/N比は50~60 (時定数4.5~9.2秒), 再現性は約 $\pm 1\%$ である。
- 6) *reststrahlen* フィルターモノクロメータによる測定結果は、回折格子分光器による測定結果と測定誤差

±2% (両方の誤差を含む)以内で一致した。但し KRS-5 の場合バンド幅が広いので、その限りではない。

7) *reststrahlen* ハウターフィルターは、常温、液体ネオソ温度、液体ヘリウム温度、と温度が低くなるに従って、

i) 透過領域の透過率が 3~5% ずつ高くなる。

ii) 立ち上りが急になる。すなわち、この領域で透過率は約 10% ずつ高くなっている。

iii) カットオフ波長が少し短波長側へずれる。

iv) 不透明領域の透過率は、常温での透過率より悪くならない。すなわち 1% 程度である。

8) *reststrahlen* ハウターフィルターの以上の性質は、フィルター内に含まれる *reststrahlen* 結晶の吸収が主に原因していると思われる。すなわち、立ち上り領域の所は単音子の吸収で、低温になるとその吸収バンドが *sharp* になり、短波長側へずれることから、ii) iii) がおこると考えられる。これより長波長側は *difference* バンドによる吸収で、これは温度依存性が強く、絶対零度近くでは吸収係数はほとんど 0 になる。i) は、この理由による。又、短波長側は、*summation* バンドによる吸収 (温度依存性は、*difference*

バンドにくらべたい)と、第2, 第3...の *reststrahlen* バンドによる吸収(温度依存性はない)のため透過率は常温とほとんど変わらなかった。

- 9) *Reststrahlen* パウダーフィルターの特性を決めているのは、吸収の他に散乱がある。散乱には、波長に対する粒子の大きさの項と、粒子及び媒質の屈折率の差による項がある。粒子度は細い方がフィルターとしての特性は良い。後者はクリスタンゼン効果と呼ばれるもので、TR系統のような広い波長領域にわたって高屈折率( $n \approx 5.5$ )のものは、その広い波長領域で散乱効果が著しい。たとえば、TRCl + TRI + NaF フィルターの場合、カットオフ波長から短波長側の不透明さが他のフィルターにくらべて優れているのは、この効果によると思われる。

## 第2章 金属メッシュを使ったフィルター

### §1 はじめに

reststrahlen 結晶を使ったフィルターは、BPFの場合には $150\mu$ 、LWPFの場合には $300\mu$ が限界で、これより長波長側では金属メッシュがこれに代る。1962年以來、電解メッシュをファブリー・ペロー型干渉計の反射板として<sup>41,42)</sup>、あるいはマイケルソン型干渉計のビームスプリッター<sup>43)</sup>として、wireメッシュをLWPF<sup>4)</sup>として使う研究がなされて来たが、著者も1964年から金属メッシュを使ったフィルター、主としてファブリー・ペロー型干渉計の研究を始めた。その第一段階として、メッシュの光学的性質をくわしく調べることから始めた。メッシュは、インダクティブメッシュと、これに相補的な形をしたキャパシティブメッシュに分かれる。前者の透過率は $\lambda/g \approx 1$  ( $g$ : 格子定数,  $\lambda$ : 波長)で90%以上の最大値を持ち、両側へ減少していくような性質を持っているが、それ自体、透過型のWBPFの特性を持っている。又、数回透過させて、バンド幅を狭くすることもできる。例えは4回透過で最大透過率約80%、 $\lambda/g \approx 3$ になる。これはしかし、現在得られるメッシュの格子定数が

25 $\mu$  ~ 250 $\mu$ であるから、波長範囲もこの間に限られ、その上選択できる波長は離散的な値になる。しかるに反射率は  $\lambda/g$  で 80% 以上、吸収は 100 $\mu$  から長波長側で 1% を越えないという性質を持っているため、ファブリー・ペロー型として用いると、得られる格子定数の最大値が 250 $\mu$  でも、1mm 以上まで範囲を広げることができる上、選択できる波長は連続的でバンド幅も狭くなる。又、キャパシティブムツシは等価回路的には容量 C で表され、これを数枚平行に並べたものは LWPF になる。

ファブリー・ペロー型干渉計の一般的性質は、古くから研究されよく知られているように、反射板間での多重反射による干渉の原理を利用したもので、透過光の相対強度  $T(\nu)$  は、

$$T(\nu) = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \times \left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \Phi\right)^{-1} \quad \dots (2-1)$$

で与えられる。Airy の式と呼ばれるものである。但し、R はエネルギー反射率、A はエネルギー吸収率である。又、

\* この章では、波長  $\lambda$ 、波数  $\nu$ 、格子定数  $g$  に対して正規化された、波長  $\lambda/g$ 、波数  $g/\lambda$  を、場合に応じて使いわけ。

$$\Phi = 2\pi n d \nu \cos \theta - \varphi_r \quad \text{--- (2-2)}$$

で、 $d$ は反射板間の距離、 $n$ は中間層の屈折率、 $\theta$ は屈折角、 $\nu$ は波数、 $\varphi_r$ は反射板表面で反射する際の位相のずれである。

$T(\nu)$ は、 $\Phi = k\pi$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ )で最大透過率、

$$T_0 = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \quad \text{--- (2-3)}$$

を持ち、吸収 $A$ が小さいほど、 $T_0$ が大きい。また、

$$F = \frac{\pi \nu R}{1-R} \quad \text{--- (2-4)}$$

は、フィネス (finesse) と呼ばれ、分解能 $\mathcal{R}$ と

$$\mathcal{R} = \frac{\nu k}{\Delta \nu} = \frac{\lambda k}{\Delta \lambda} = kF \quad \text{--- (2-5)}$$

の関係を持っている。すなわち、フィネスは、1次の分解能を与えるものである。

ブリー・ロー型干渉計をモノクロメーターとして使う場合、回折格子分光器と同様、波長の重なりが問題になるが、1つのピークだけをとり出すのに、プリズムが使える領域ではプリズムと組み合わせているが、遠赤外域のようにこれが使えない場合は、LWPFや回折格子を用いる

は、低分解のフアリー・ハローと組み合わせて使うことを考えなければならぬ。著者は LWPF を使って 1 次をとり出す方法を用いた。

又、波数(波長)走査は、 $\nu_k = k / 2nd \cos \theta$  から屈折率  $n$ , 薄膜間隔  $d$ , 屈折角  $\theta$ , 次数  $k$  のいずれかを変化しておこなう, 各々特徴を持っている。著者は広い波数(波長)領域を走査する必要と, 他の方法にくらべ簡単なことから, 間隔  $d$  を変化させる方法を用いた。

メッシュを 3 枚以上平行に並べると, 反射率一定のメッシュ(仮想的なものであるか)では矩形に近い WBPF になり, キャパシティブメッシュの場合に立ち上りの良い, LWPF になることが計算から分った。

## §2 金属メッシュの光学的性質の研究と、その透過特性を使ったバンドパスフィルター (BPF).

### 2-1 金属メッシュの光学的性質の研究

金属メッシュは、Fig 2-1のような形をしたものと、これと相補的な Fig 2-5のような形をしたものに分れる。各々の透過、反射、を格子定数よりも長波長側で角周波数  $\omega = g/\lambda$  として等価回路的に考えると、前者は、インダクタンスの性質を持つのでインダクティブメッシュ、後者はキャパシタンスの性質を持つのでキャパシティブメッシュと呼ばれる。

#### [1] メッシュの反射と透過

メッシュに光が当たると、反射 (R)、透過 (T)、吸収 (A)、回折 (D) が起こり、各々の間に、

$$R + T + A + D = 1 \text{ ---- (2-6)}$$

という関係がある。

$$\text{回折は } (\lambda/g) / (1 + \sin\theta) > 1$$

ではおこらないし、吸収もこのような領域では後で述べるごとく 1% 以下になるからこれを無視すると

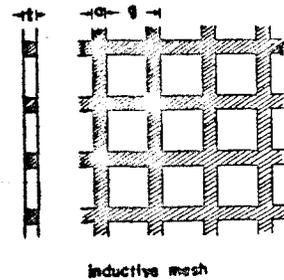


Fig 2-1 インダクティブメッシュの構造

$(\lambda/g) / (1 + \sin\theta) > 1$  では、

$$R + T = 1 \quad \text{--- (2-7)}$$

となる。インタクティブメッシュの反射率、透過率は実験的に Fig 2-2, Fig 2-3 のようになる。各々メッシュの線幅をパラメータにとってあるが、線幅を広くするほど（附随的に線の厚さも厚くなるが）反射率は高く透過率は低くなり、一次元の場合\*と同様な性質を示す。さらにメッシュの厚さは数ミクロンで、これを無視して考えると、振幅反射率と、振幅透過率との間に、

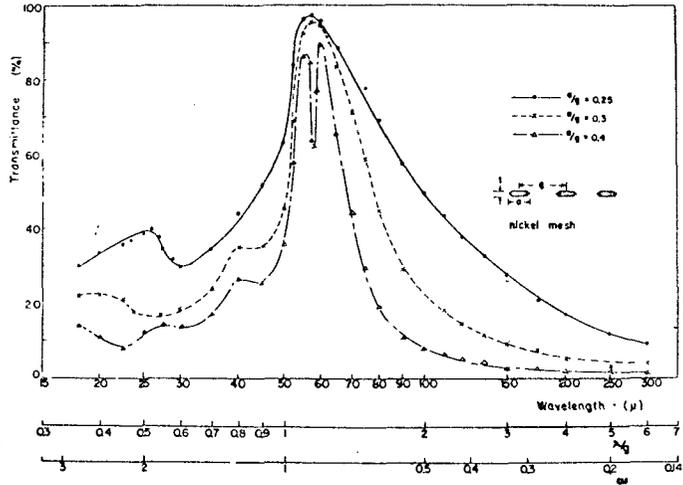


Fig 2-2 インタクティブメッシュの透過率

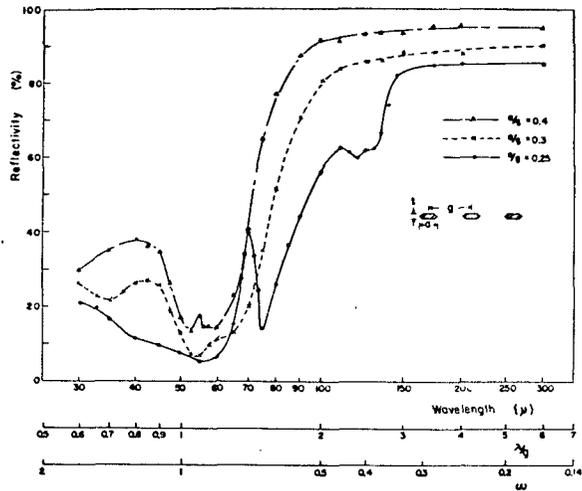


Fig 2-3 インタクティブメッシュの反射率

$$1 + r = t \quad \text{-----} \quad (2-8)$$

の関係も成立する。又、  
Fig 2-4は、 $1-R-T$ を  
プロットしたもので(2-6)式  
から  $D+A$  に等しいが、吸  
収  $A$  はほとんど無視でき  
るので、回折の大きさ  $D$  を  
表していると考えられる。

キャパシティブメッシュ<sup>45,46)</sup>は  
構造上吸収の少ない薄い  
基板(例えば  $6\mu$  程度の  
マラーフィルム)の上において

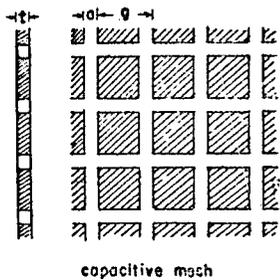


Fig 2-5 キャパシティブ  
メッシュの構造

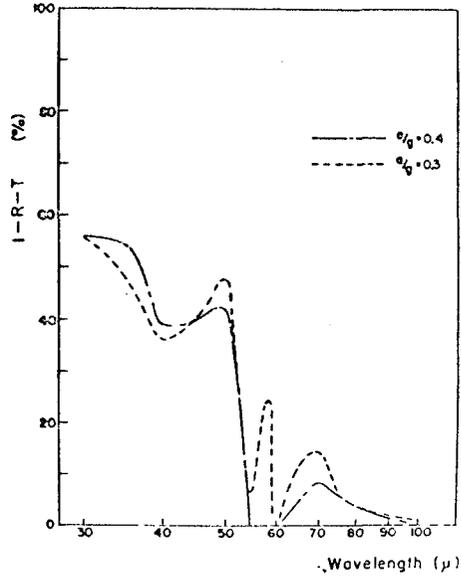


Fig 2-4 インダクティブメッシュ  
の回折

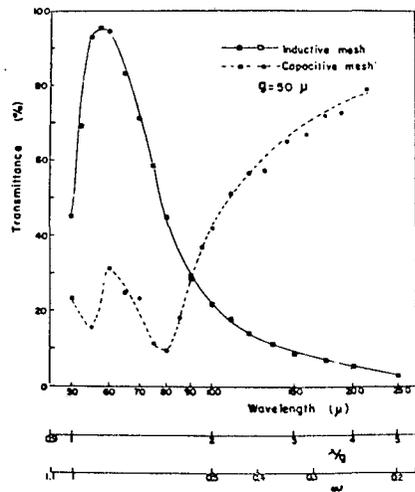


Fig 2-6 キャパシティブ  
メッシュの透過率

いるが、これを無視して考えるとインダクティブメッシュと全く相補的である。すなわちインダクティブメッシュの透過率は、キャパシティブメッシュの反射率と、キャパシティブメッシュの透過率はインダクティブメッシュの反射率と同じで、(2-7)、(2-8)の関係も持っている。実際にアルミニウムをマラーの上へ蒸着し、フォトリソグラフィの技術を用いて作ったキャパシティブメッシュの透過率を、マスクにしたインダクティブメッシュの透過率と共に Fig 2-6 に示す。但し基板の影響は除いてある。 $T_i + T_c = 1$  ( $T_i, T_c$  は各々インダクティブメッシュとキャパシティブメッシュの透過率)となるべきであるが、必ずしもそうになっていないのは、フォトリソグラフィを処理する場合に、マスターの影の像かくすれ、線幅が太くなったり角がとれたり、あるいは場所的に正方形の形が歪んだりしたためである。

---

\* Fig 2-7 のような一次元格子について、Marcubitz<sup>44)</sup> の式を使って、例えばインダクティブグリッドについて、反射率、透過率を計算したものは、Fig 2-8 (a) 及び (b) である。これによると、反射率、透過率は線幅、線の厚さ、断面の形状によって決り、線幅が広いほど、線の厚さが厚い程、又断面の形状が楕円、長方形、円となるほど反射率高くなり、透過率は低くなる。著者が使用したメッシュ

の断面の形状は, Fig 2-2  
あるいは Fig 2-3 に書いたよ  
うなもので, 長方形と楕円の中  
のような形状をしている。

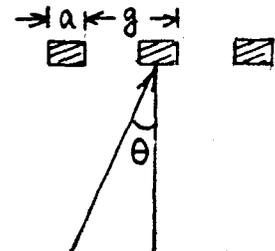
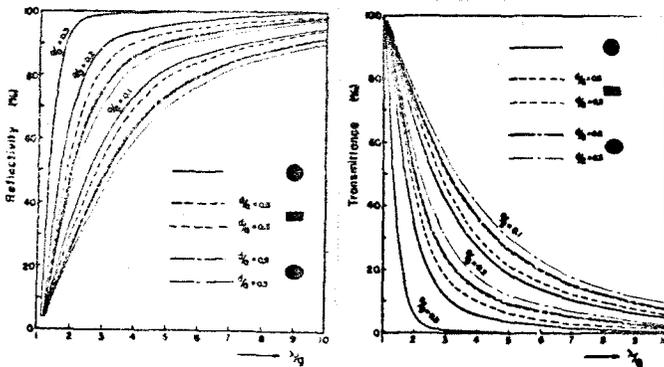
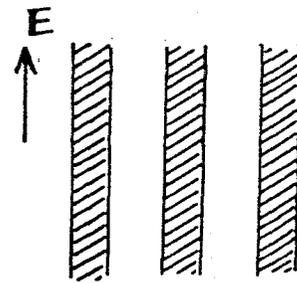


Fig 2-7 一次元格子  
(インタラクティブ・グリッド)

(a) 反射率

(b) 透過率

Fig 2-8 インタラクティブ・グリッドの反射率  
及透過率 ( $\theta=0$ )

## [2] 位相

光がメッシュ表面で反射する場合, 位相のずれが  
おこる。位相のずれを測定する方法として, i) 透過率  
から求める方法, ii) メッシュをファブリー・ペロー型にして,  
Airy ピークの差から求める方法, iii) マイケルソン型干  
渉計の片方の光路へメッシュを入れて測る方法などか  
あるが, 一番簡単な i) の方法を用いた。この方法は,  
メッシュの吸収と厚さが無視できるという仮定のもとに

なりたつ(2-10)式, (2-11)式を用いる。すなわち,

$$r = |r| e^{i\varphi_r} = |r| (\cos \varphi_r + i \sin \varphi_r) \quad \text{---(2-9)}$$

$$|r|^2 + |t|^2 = 1 \quad \text{---(2-10)}$$

$$1 + r = t \quad \text{---(2-11)}$$

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2 \quad \text{---(2-12)}$$

から,

$$\cos \varphi_r = -|r| = -\sqrt{1-T} \quad \text{---(2-13)}$$

のような形で, 透過率  $T$  と反射の際の位相のずれ  $\varphi_r$  が結びつけられる。Fig 2-2, 及び Fig 2-6 の 透過率 を使って求めた位相のずれを Fig 2-9 に示した。

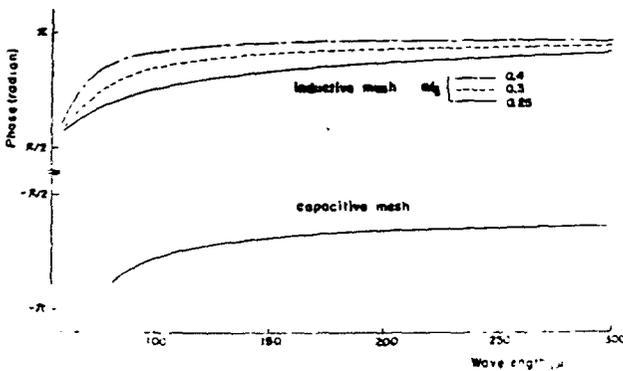


Fig 2-9 ネットの位相

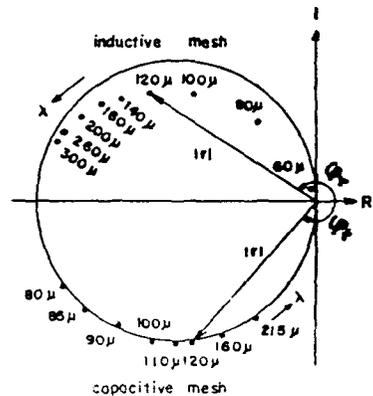


Fig 2-10 ネットの  
振幅反射率

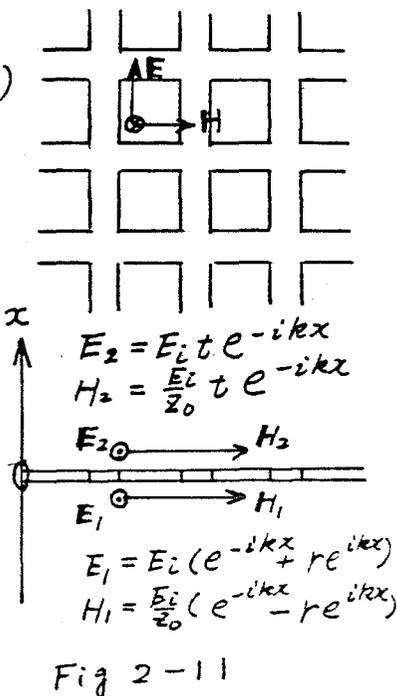
この図でメッシュが完全反射に近づくほど、位相のずれは $\pi$ に近くなっていることが分る。Fig 2-10は振幅反射率を複素平面上に示したもので、 $r$ が円周上に乗らないことは、厚さや、吸収の影響が出ていたものと思われる。

### [3] 吸収

メッシュによる吸収は、光(電磁波)によって誘起される高周波電流による抵抗損と考えて求める。但しメッシュの厚さは $5\mu\sim 6\mu$ で、表皮厚さ $\delta$ (ニッケルで $\lambda=100\mu$ で $\delta=0.08\mu$ )よりも厚い。以下のとりあつかいではMKS単位系を使う。

Fig 2-11のようにメッシュの一方の線に平行なEベクトルを持つ光(電磁波)がメッシュに垂直に入射する最も簡単な場合を考える。 $x=0$ で境界条件を求めると、先ずHの方はこれにおいて誘起される電流Jがメッシュの裏表あるので、

$$\begin{aligned} H_1 - H_2 &= \frac{E_i}{Z_0} (1 - r - t) \\ &= -2J_p \quad \text{--- (2-14)} \end{aligned}$$



Eの方は

$$E_i(1+r) = E_i t \quad \text{---- (2-15)}$$

従って,

$$H_1 - H_2 = \frac{E_i}{Z_0} (-2r) = -2J_p \quad \text{--- (2-16)}$$

すなわち,

$$J_p = r \frac{E_i}{Z_0} \quad \text{---- (2-17)}$$

$r$ は空間的に平均化された値であるから、 $J_p$ も空間的に平均化された値である。又、 $E_i$ を時間的に正弦的に変ると考えると、 $J_p$ もそのように変る。時間平均をとって、

$$\frac{1}{2} J_p^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{E_i}{Z_0} \right)^2 r^2 \quad \text{---- (2-18)}$$

次に、単位面積当り消費されるエネルギー  $P_d = 2 \frac{1}{\sigma} \cdot \left( \frac{J_p^2}{2} \right)$  の入射エネルギー  $P_0 = \left( \frac{1}{2Z_0} \right) \cdot E_i^2$  に対する割合  $P_d/P_0$  が吸収  $A$  になる。

$$\begin{aligned} A = \frac{P_d}{P_0} &= \frac{2 \times \eta \times \frac{1}{\sigma} \times \frac{1}{2} \times \left( \frac{E_i}{Z_0} \right)^2 \times r^2}{\frac{1}{2Z_0} (E_i)^2} \\ &= 2 \times \eta \times \frac{1}{\sigma} \times R \times \frac{1}{Z_0} \quad \text{--- (2-19)} \end{aligned}$$

但し  $\sigma$  は空間的に平均化された導電率で、 $1/\eta$  を単位面積当りの金属部分の面積とすると、 $\sigma = \frac{1}{\eta} \sigma$

( $\sigma$ : 導体部分の導電率)である。又、 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  は空間のインピーダンスである。 $\eta$  は、インダクティブメツェに対しては  $1/\eta \approx 2a/g$ 、キャパシティブメツェに対しては、 $1/\eta \approx 1/(1 - \frac{2a}{g})$  で、従って、吸収  $A$  は各々に対して、

$$A = \frac{g}{2a} \times \frac{1}{\sigma \delta} \times R \times \frac{2}{Z_0}$$

$$= \frac{g}{2a} \times R \times \left( \frac{10^7 \mu^*}{c \sigma \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (インダクティブメツェ)} \quad (2-20)$$

$$A = \left( 1 - \frac{2a}{g} \right) \times R \times \left( \frac{10^7 \mu^*}{c \sigma \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (キャパシティブメツェ)} \quad (2-21)$$

但し  $10^7$  は  $[LT^{-1}R^{-1}]$  のディメンジョンを持っている。

相対透磁率  $\mu^*$  は、たとえニッケルのような強磁性体であつても、問題にしてゐる周波数が高く、磁化が追いつけないので  $\mu^* = 1$  と考へてゐる。又、キャパシティブメツェの場合、基板の物質の吸収を無視して考へてゐる。

(2-20)式、(2-21)式中、 $\left( \frac{10^7 \mu^*}{c \sigma \lambda} \right)^{\frac{1}{2}}$  を、メツェを作る金属について求めると、

$$\text{銅の場合、} \left( \frac{10^7 \mu^*}{c \sigma \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.239 \times 10^{-1} \left[ \frac{1}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-22)$$

$$\text{ニッケルの場合、} \left( \frac{10^7 \mu^*}{c \sigma \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.491 \times 10^{-1} \left[ \frac{1}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-23)$$

$$\text{アルミの場合} \left( \frac{10^7 \mu^*}{c \sigma \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.303 \times 10^{-1} \left[ \frac{1}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-24)$$

従って吸収は,  $\lambda = 100\mu$ ,  $a/g = 0.3$ ,  $R = 1$  のような条件で, 1% を越えることはない。通常は  $100\mu$  以上の波長領域で使うので, 吸収はさらに低くなる。

## 2-2 金属メッシュの透過特性をバンドパスフィルタ(BPF)に用いる研究

インダクティブメッシュの透過特性は,  $\lambda/g \approx 1$  にピークを持つバンドパスの性質を持っている。この性質は、メッシュを二次元の回折格子と考慮して、透過した零次光の入射光に対する割合であると考えられる。1~2枚では WBPF になり, 枚数をさらに増してゆくとバンド幅を狭くできる。しかし幾何学的形状がバンドパス特性に影響を及ぼすので、組み合わせ方に対しては配慮しなければならない。

9枚使って一枚のメッシュの透過率の9乗の形にするには, ゆるい不平行に(光路中に十分距離をはなしておいても同じである)

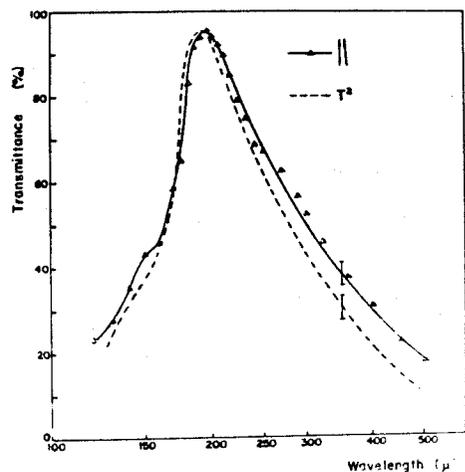


Fig 2-12 メッシュ2枚, 不平行に重ねた時の透過率

保つことが考えられる。それを実験的に(2枚で)確かめたのが Fig 2-12 で、測定誤差を考慮に入れるとほぼ一致する。現在市販されているメツジの格子定数は  $g = 25\mu, 50\mu, 100\mu, 170\mu, 250\mu$  で、各々の透過

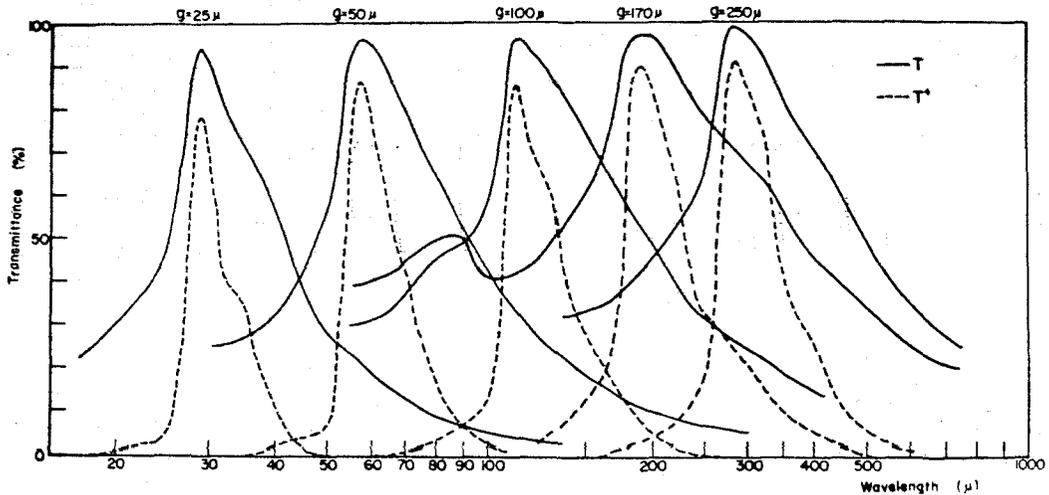


Fig 2-13 インタクティブメツジ 1回 及び 4回  
透過の透過率 (格子定数  $25\mu, 50\mu, 100\mu, 170\mu, 250\mu$ )

Table 2-1 金属メツジの透過特性を使った BPF

格子定数( $g$ )	最大値波長	$T_{max}$	$\Delta\lambda(T)$	$T_{max}^4$	$\Delta\lambda(T^4)$
$25\mu$	$29\mu$	94%	$17.5\mu$	78%	$6\mu$
50	57.5	96	47	85	17
100	112.5	96	112.5	85	30
170	190	97	250	88	55
250	285	97	290	88	80

率の測定値と、それを4乗したものが Fig 2-13 である。  
 又、Table 2-1 にはその時の最大透過率と半価幅をま  
 とめておいた。Nextstrahlen フィルター 3 回反射と同程度  
 の半価幅で、最大透過率はそれよりも高い。  
 さらにメッシュを 2 枚、接触させて重ねる実験をおこなった  
 が、その結果が Fig 2-14, Fig 2-15 である。

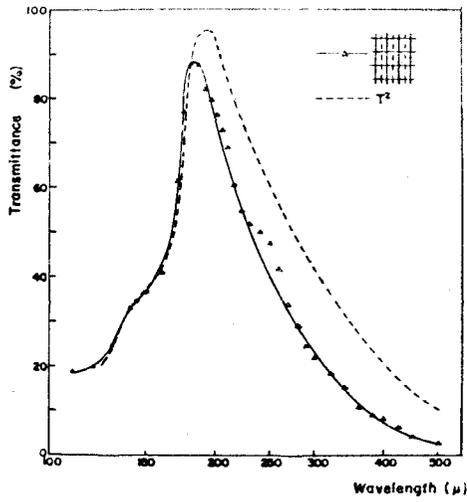


Fig 2-14 格子定数の半分だけ  
 一方へずらせて重ねた場合

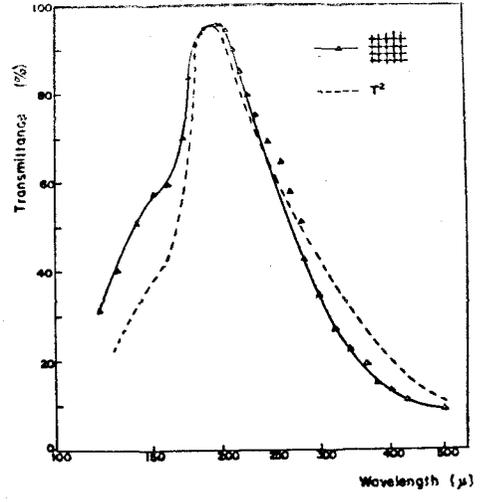


Fig 2-15 メッシュ同士を一致させ  
 て重ねた場合。

Fig 2-14 は、一方向にもう 1 つのメッシュを  $g/2$  だけずらして  
 重ねたもので、開孔 (aperture) の形 (或はインピーダンス) が  
 正方形から矩形に変わったことにより、ピーク値は短波長側へ  
 ずりすれ、半価幅も 2 枚、不平行に重ねた場合より狭く  
 、フィルターとして望ましい。このような重ね方をしたものを 2 組使  
 うと、先の 4 乗の形よりも狭くなる。Fig 2-15 は 2 枚のメッシュ

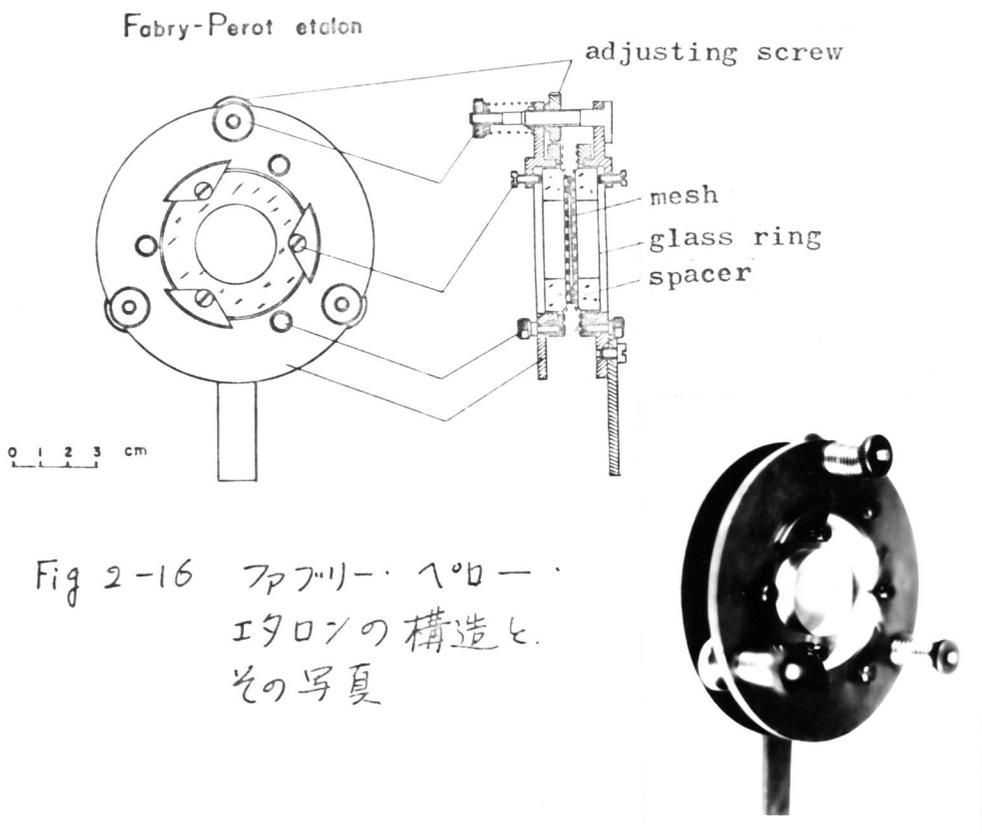
同志一致させて重ねた場合で、 $\lambda/g > 1$  の領域では同じインピーダンスを2つ並列にしたとの取り扱いから、 $T^2$ よりも高い透過率を持つはずであるが、重ね方の上で誤差があるためか必ずしもそうなっていない。 $\lambda/g < 1$  の回折領域でもしそそうになっている。いずれにしても Fig 2-15 の場合、 $T^2$ よりも優れた特性は持っていない。又、その他の重ね方に対しては優れた特性は見つからなかった。

このようなメッシュの透過特性を用いた BPF の利点は、あくまで簡単に作ることもできるという点である。製作が少し複雑であるが、フアフリー・アロー型にしたものは、バンド幅もかなり狭く、波長も連続的に選ぶことができ、BPF としては、はるかに優れている。

### §3 ファブリー・ペロ-型干渉計

#### 3-1 ファブリー・ペロ-エタロン 及び tunable - ファブリー・ペロ 干渉計

Fig 2-16 は ファブリー・ペロ-エタロンの構造及びその写真, Fig 2-17 は tunable ファブリー・ペロ-干渉計の構造及びその写真である。両方ともメッシュを張るためガラスリング (0.25 $\mu$ 以下の平面度) を使っているが、その内面にアルミニウムを蒸着して半透膜を作り、可視光 (NaのD線) で平行度調整ができるようにしている。平行度は 1 $\mu$ 以内におさえている。エタロンの場合、スペーサーは



紙, 又は雲母板が適当である。(低次で使っているので、水晶などの板は厚すまで使えない) 又, tunable Fabry-Perot の平行調整は, ピッチ  $0.1\text{mm}$  の差動ネジでおこなう。間隔の変化は, 焼青銅の平行板バネと, マイクロメーター(最小目盛  $2\mu$ ) でおこない,  $400\mu$  の移動に対する平行度のくずれは  $1\mu$  以内であった。又, メッシュは別のフレームに固定し, それを,

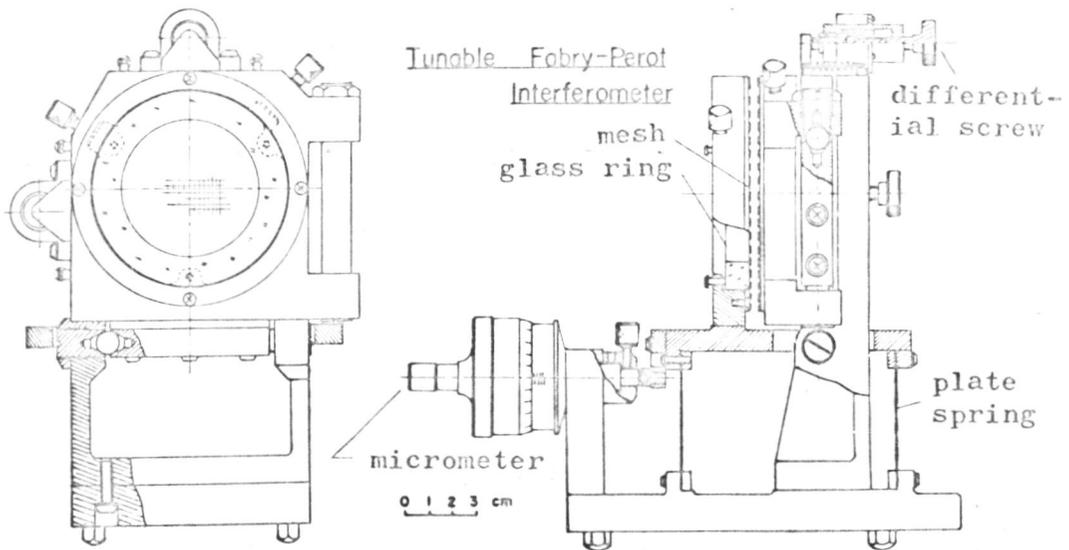
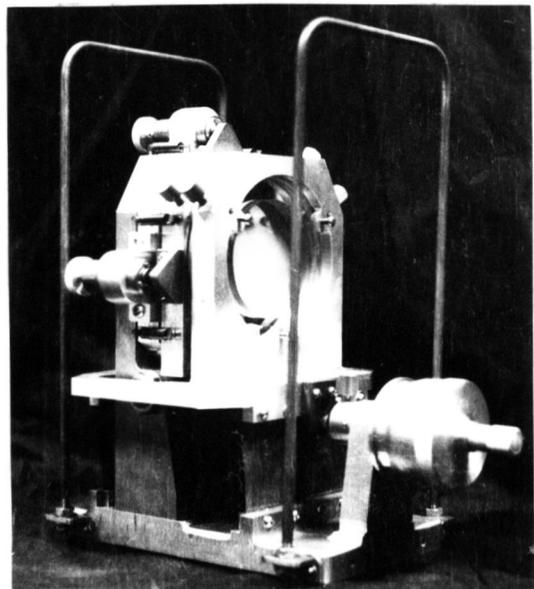


Fig 2-17  
tunable Fabry-Perot  
の構造と写真



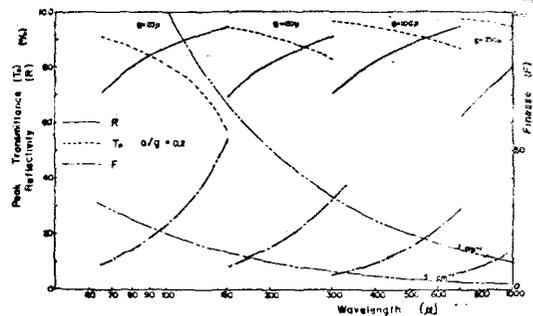
本体にネジ止めする様な構造になっている。

### 3-2 金属メッシュを使ったファブリー-ペロー型干渉計の性質

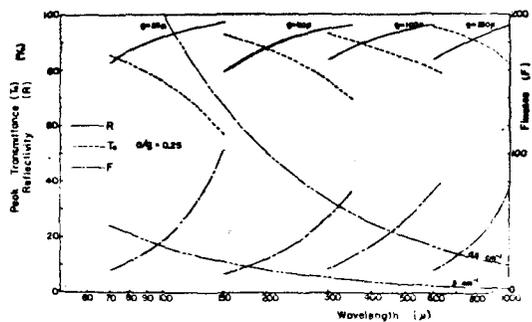
メッシュを反射板に使った場合、Airy曲線の(従って理想的な場合の)ピーク値、フネスはどのようになるかという事を調べた。これらは実際のメッシュの透過率測定から、 $R=1-T$ ,  $\tau_0=(1-A)^2$

$F=\pi\sqrt{\tau_0}/(1-R)$ , 又、 $\tau_0$ の中  
の吸収Aは(2-23)式を  
用いて計算した。結果は

Fig 2-18にまとめたお  
なっている。すべてにわた  
って透過率を用い、反射  
率の測定結果を使わな  
かった理由は、前者の方  
が後者よりも信頼度か  
高いことによる。又、同図  
で、メッシュの格子定数を  
変えると使用できる領域  
が変わり(1つのメッシュ



(a)  $a/g = 0.2$



(b)  $a/g = 0.25$

Fig 2-18 インダクティブメッシュ  
をファブリー-ペローの反射板  
に使った場合のピーク値、及  
びフネス

では  $\lambda/g$  が 3~6 程度が適用領域) 数種で  $80\mu \sim 1mm$  を走査できることがわかる。

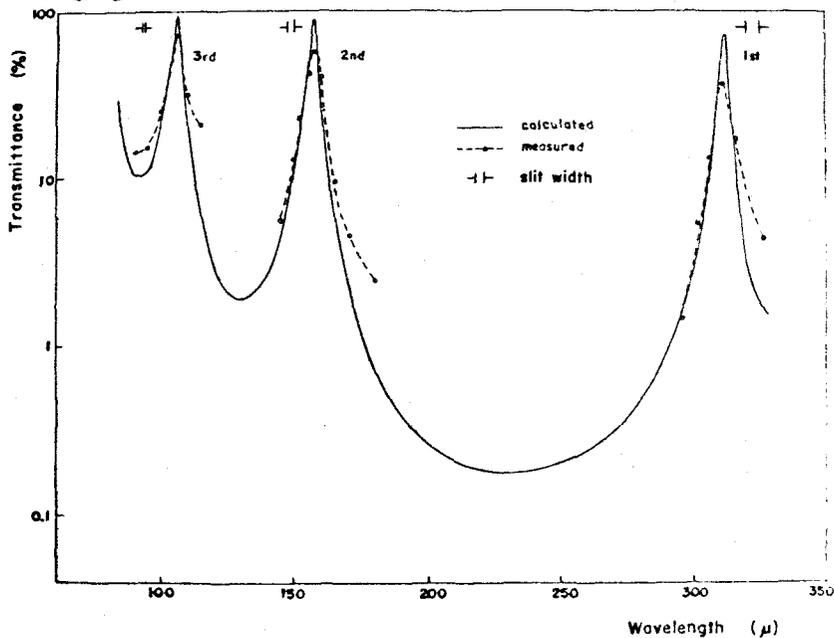


Fig 2-19 Ainy 曲線, 測定値と計算値

Fig 2-19 は,  $g=50\mu$  のニッケルメッシュを用いたイタロンの透過特性と, 理想的な Ainy 曲線との比較で, 理想的なものからのずれは, 平行度の悪さ, 収束光による制限が累々起している。ファブリー-

ペローを double pass で使用すると,  $\tau_0$  は  $\tau_0^2$  に, 分解能は 1.6 倍すすおち  $1.6F$  になる。Fig 2-18(b) と同じメッシュを用いて double pass とした場合を Fig 2-20 に

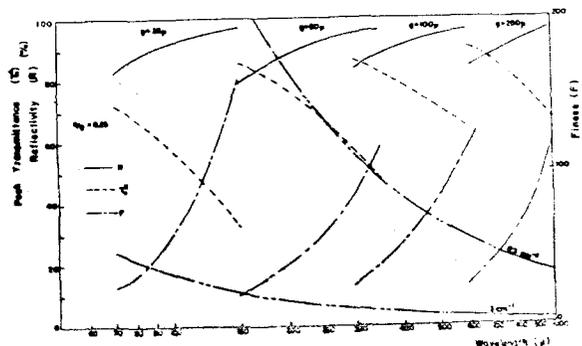


Fig 2-20 ファブリー-ペローを double pass で使用した場合のピーク値及  $F$  ファネス

示した。

### 3-3 次数の分離

ファブリー・ペローは  $2nd \cos \theta = k\lambda$  ( $k=1, 2, \dots$ ) を満足する波長にピークを持つが、モノクロメーターとして使うためには、この中から一つの次数だけを取り出さなければならない。色々な方法があるが、著者はLWPFを使って1次を取り出す方法を採用した。長波長側でのLWPFとして、reststrahlen パウダーフィルター<sup>6)</sup> と、wire mesh フィルター<sup>8)</sup> を使った。Fig 2-21は、そのカットオフ特性と使用領域である。

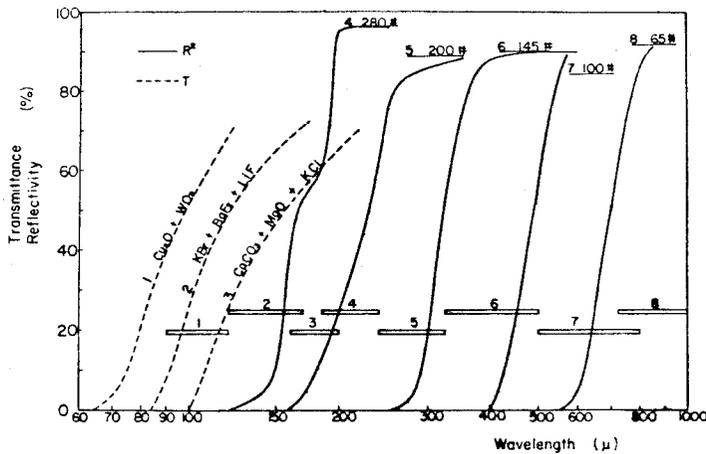


Fig 2-21 ファブリー・ペローの1次光を取り出すためのLWPF

LWPFを使うだけでは1次光しか使えないが、もっと分解能をおきたい、従って高次を使う場合には、BPFを入れて使えばよい。その様なプリ-モノクロメーターとして、

もし1つのファブリー・ペローを使った場合、例えば2次をとり出す場合に対しては、Fig 2-22 のようになる。但し吸収は無視している。フ列モクロメーターに使うメツジは、透過率の高いものが良い。

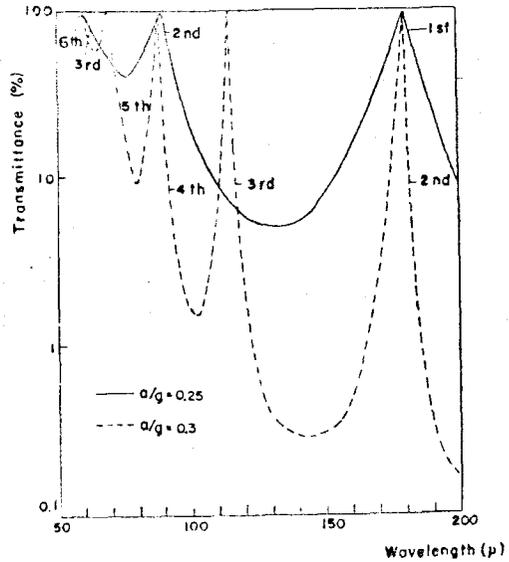


Fig 2-22 フ列モクロメーター (ファブリー・ペロー)で、ファブリー・ペローの2次をとり出す様子

### 3-4 tunable ファブリー・ペローを使った簡単な分光器

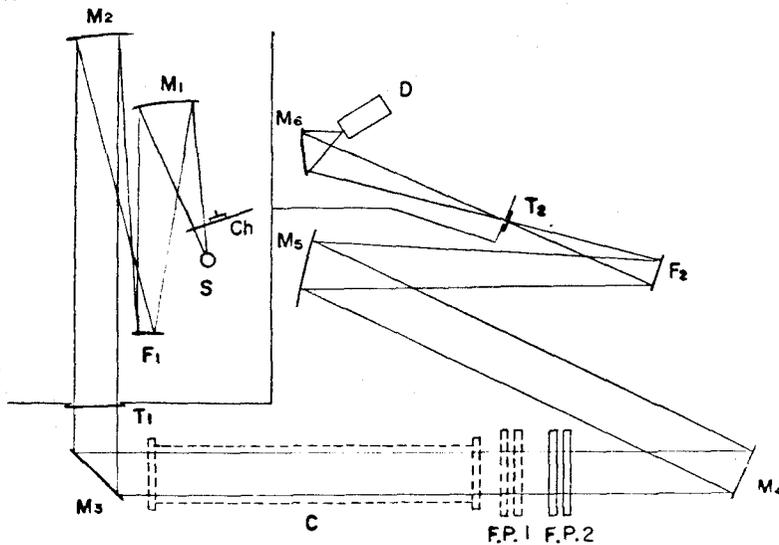


Fig 2-23 tunable ファブリー・ペローを使った分光器の光学系。

Fig 2-23 は tunable ファブリ・ペロー・干渉計を使った簡単な分光器の光学系である。光源 S から出た光は、球面鏡  $M_1$  により、球面鏡  $M_2$  の焦点に像を結び、平行光束となって平面鏡  $M_3$ , ガスセル C, F.P.1, F.P.2, 平面鏡  $M_4$  と通り、球面鏡  $M_5$ , 楕円面鏡  $M_6$  を通って検知器 D に入る。光はフォトパ-Ch により 10 C.P.S でフォトされる。

$F_1, F_2$  は 1 次光のみを取り出す wire ネット フィルター,  $T_1$  は煤 フィルター,  $T_2$  は neststrahlen パウダー フィルター。その他の透過型 フィルターである。C と F.P.1 は場合に応じて光路中に入れたり、光路からはずしたりする。

100 $\mu$  ~ 400 $\mu$  の水蒸気の吸収スペクトル

Fig 2-24

水蒸気の吸収  
スペクトル (1 atm).

F.P.2 :  $g = 50 \mu$   
 $a = 15 \mu$   
ニッケルネット

$F_1, F_2$  : 280 #  
(100 $\mu$  ~ 270 $\mu$ )  
200 #  
(270 $\mu$  ~ 400 $\mu$ )

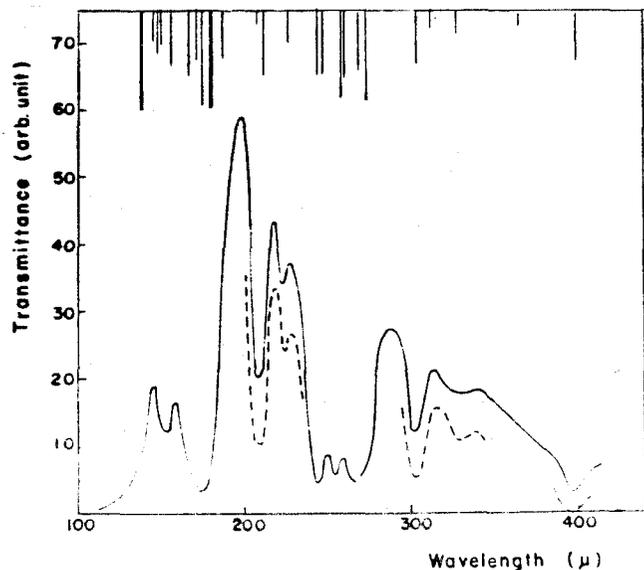


Fig 2-24は光路中からC, F.P.1をとりのぞき, F.P.2  
 でのった大気中の水蒸気の吸収スペクトルで, 光路は約  
 2.5m, 使用した金属メッシュ(インタグレイブメッシュ)及Cu-wire  
 メッシュは図に説明した通りである。40 cm<sup>-1</sup>で約2cm<sup>-1</sup>  
 の分解を示している。破線は再現性で, 故意に下へずらせた。

Fig 2-25は, ファブリー-ペロー F.P.1  
 及Cu-F.P.2を直列にし, 両方とも1次を  
 使ってとった水蒸気の吸収スペクトルで  
 ある。F.P.2のメッシュは, Fig 2-24と同  
 じものである。F.P.1はF.P.2より分解  
 能は落ちるものであった。直列にした  
 場合の総合的な分解能は,  $R_1$  と  
 $R_2$  が異なる場合近似的に,  $\sqrt{R_1^2 + R_2^2}$   
 に等しい。

スペクトルをとった条件は, 図の下に書い  
 た通りである。Fig 2-24よりも吸収バ  
 ンドが鋭くなっていることや, 分解され  
 かけている吸収線があり, 分解能は  
 上がっている。

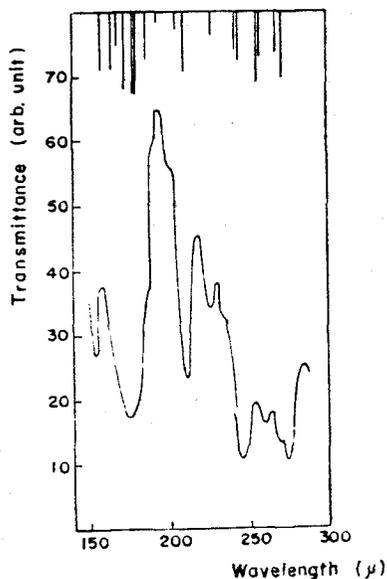


Fig 2-25 F.P.1, F.P.2を  
 直列にしてとった水蒸気  
 の吸収スペクトル

F.P.1:  $g=50\mu$   $a=8\mu$   
 $\Rightarrow$  71 $\mu$ メッシュ

F.P.2:  $g=50\mu$   $a=15\mu$   
 $\Rightarrow$  71 $\mu$ メッシュ

$F_1, F_2$ : 280#  
 (150 $\mu$  ~ 240 $\mu$ )  
 200#  
 (240 $\mu$  ~ 290 $\mu$ )

360 $\mu$ ~620 $\mu$ の間の水蒸気及び一酸化炭素ガスの  
吸収スペクトル

この領域では、強い水蒸気の吸収線が少いので、COガスを光路に入れて、水蒸気とCOガスの吸収スペクトルをとった。COガスは、長さ60cmのカセル中に1気圧、水蒸気も1気圧である。使用したメッシュは、格子定数100 $\mu$ 、線幅30 $\mu$ のニッケルメッシュである。25 $\text{cm}^{-1}$ 近傍の水蒸気とCOガスの吸収線が分離しており、これは、2 $\text{cm}^{-1}$ の分解である。

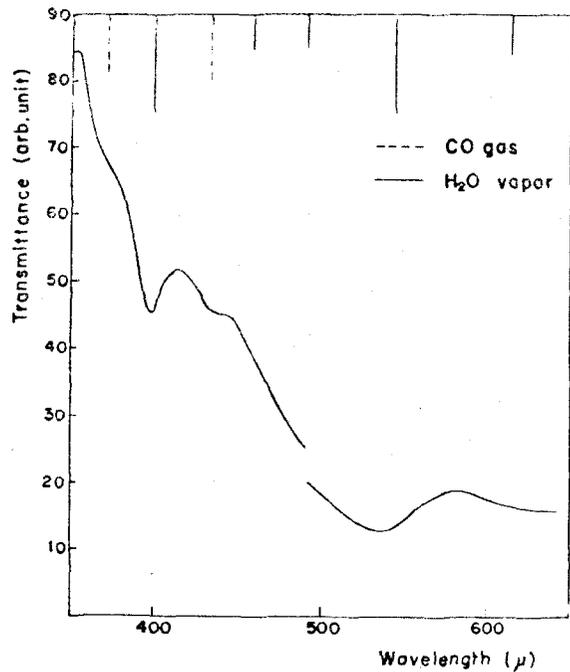


Fig 2-26 360 $\mu$ ~620 $\mu$ の間の水蒸気及びCOガスの吸収スペクトル。  
(図の上書き入れた線の中、実線は水蒸気、破線はCOガスを示す)

F.P.2 :  $g=100\mu$   $a=30\mu$   
ニッケルメッシュ

F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> : 145# (350 $\mu$ ~490 $\mu$ )  
100# (490 $\mu$ ~650 $\mu$ )

Fig 2-27は 300 $\mu$ ~450 $\mu$ の間で、格子定数100 $\mu$ のメッシュより反射率の高い、格子定数50 $\mu$ のメッシュを使ってとったCOガス及び水蒸気の吸収スペクトルである。装置函数の幅が狭くなるので分解能は上がるが、S/N比は落ちる。

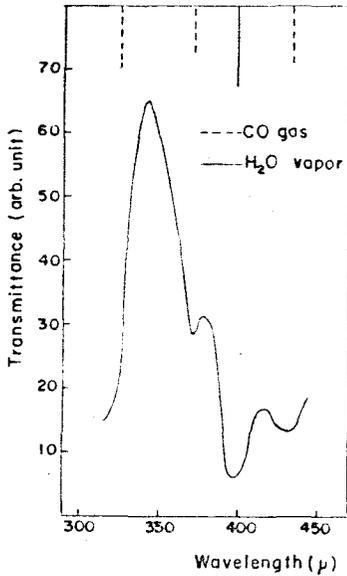


Fig 2-27 300 $\mu$ ~450 $\mu$ の

間の水蒸気及びCOガスの吸

収スペクトル

(図の上部に入れた線の中, 実線は水蒸気, 破線はCOガスを表す)

F.P. 1 :  $g=50\mu$   $a=8\mu$   
ニッケルメッシュ

$F_1, F_2$  : 145#

### 3-5 3枚以上のメッシュを平行に並べた場合

3枚以上のメッシュが一定の距離はなれて平行に並んでいる場合については, メッシュをインピーダンス表示して等価回路に直し, 回路理論<sup>(27-49)</sup>を使って簡単に解くことができる。この場合, メッシュのインピーダンスを $Z$ とすると, メッシュの部分の4端子マトリックスは,

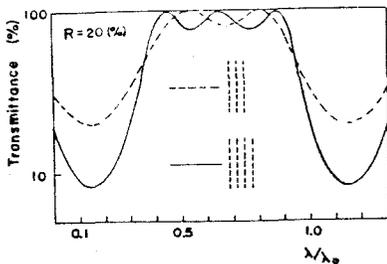
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{----- (2-25)}$$

となる。又, メッシュとメッシュの間の媒質を空気とし, そのインピーダンス $Z_0$ , 伝播定数 $\beta$ , 間隔 $d$ で表すと, この部分の4端子マトリックスは (2-26)式のようになる。

$$\begin{pmatrix} \cos \beta d & j Z_0 \sin \beta d \\ (j/Z_0) \sin \beta d & \cos \beta d \end{pmatrix} \text{--- (2-26)}$$

先ず、反射率一定の仮想的なメッシュが、3枚ないし4枚等間隔 ( $d = \lambda_0/2$ ) に並んでいる場合を考える。この場合、メッシュの反射率  $R$  とそのインピーダンス  $Z$  の間には

$$R = \left( \frac{-1}{1 + 2Z/Z_0} \right) \left( \frac{-1}{1 + 2Z/Z_0} \right)^* \text{--- (2-27)}$$



の関係があり、3枚あるないし4枚通ったあとの総合的な透過率は Fig 2-28 ~ Fig 2-30

Fig 2-28  $\lambda/2$  3枚、 $\lambda/4$  4枚平行に並べた場合。  $R=20\%$

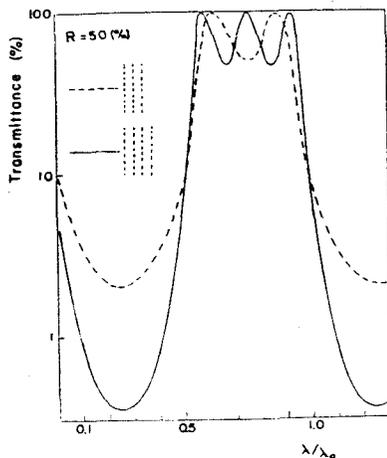


Fig 2-29  $\lambda/2$  3枚、 $\lambda/4$  4枚を等間隔に平行に並べた場合。  $R=50\%$

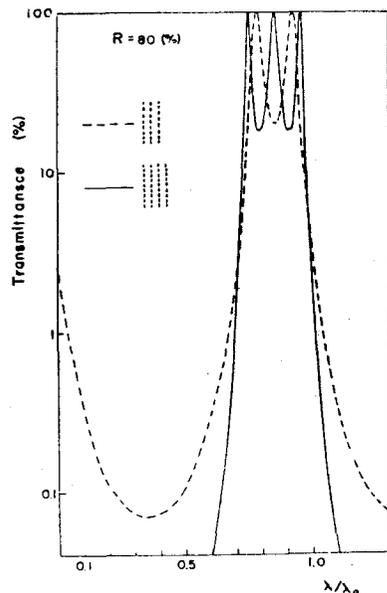


Fig 2-30  $\lambda/2$  3枚、 $\lambda/4$  4枚を等間隔に平行に並べた場合。  $R=80\%$

\* 複素共軛を表す

のようになる。但し Fig 2-28 はメッシュの反射率が、20%、Fig 2-29 は 50%、Fig 2-30 は 80% である。メッシュ3枚の場合は透過領域で各が1つ、4枚の場合は2つでき、反射率が高くなるほどこの谷は深くなる。反射率が高い場合は谷が深いことから、又、反射率が低い場合は抑制領域 (stop band) の抑制効果が悪いことから、BPFとしては不適当で、反射率50%前後が適当と思われる。又、メッシュの枚数は増えるほど立ち上りは急になる。

一方、Fig 2-5 のようなキャパシティブメッシュは、等価回路的に容量  $C$  で表されるが、電気的な low (frequency) pass フィルタの対応から、2枚なりし3枚等間隔 ( $g/2$ ) に並べた場合を考える。この場合のメッシュのインピーダンスは  $Z = 1/j\omega C$  ( $\omega = g/\lambda$ ) で、結果は Fig 2-31 のように立ち上りの急な透過型の LWPF になる性質を示す。

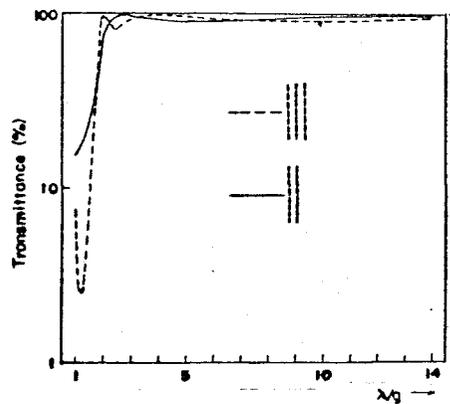


Fig 2-31 キャパシティブメッシュを使った LWPF (計算値)

### 3-6 考察 (フアフリー・ヘローに附随する二、三の問題点)

#### [1] 反射板表面の欠陥<sup>50)</sup>

著者が使用したフアフリー・ヘローではガラスリングでメッシュを張っているので、メッシュが歪曲していたり、メッシュの表面が粗かったり、あるいは、張られたメッシュ同士互に平行になっていないような場合は、いずれもフアフリー・ヘロー干渉計に悪い影響を及ぼす。すなわち、装置函数のピーク値は下り、幅は広くなり、従って分解能は下る。これらがどの程度影響するかを検討した。

張られたメッシュが Fig 2-32 のように歪曲している場合、その歪曲を (2-28) 式のように抛物面近似して欠陥を考慮した装置函数  $\overline{A(\nu)}$  を考える。但し式中の文字は図中に示したようにした。又、欠陥を片方のメッシュに寄せて考えても一般性は失われない。

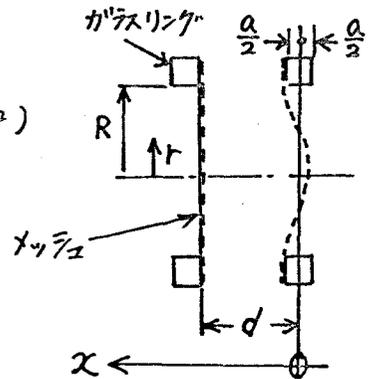


Fig 2-32 張られたメッシュの歪曲

$$x = \frac{a}{R^2} r^2 - \frac{a}{2} \quad \text{----- (2-28)}$$

$$\overline{A(\nu)} = \frac{1}{S} \int_S \frac{dS}{1 + m \sin^2(2\pi\nu)x} \quad \text{----- (2-29)}$$

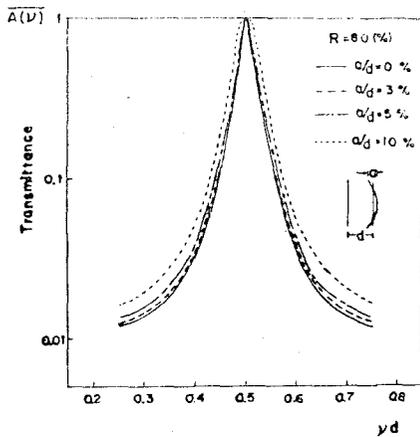
但し  $m = 4R / (1-R)^2$  とおき、簡単のため垂直入射 ( $\theta=0$ )

で屈折率  $n=1$  の場合を考えた。(x ~ x+dx)間の面積の全体の面積に対する割合は,  $ds/s = dx/a$ であるから,

$$\overline{A(\nu)} = \frac{1}{a} \int_{d-\frac{a}{2}}^{d+\frac{a}{2}} \frac{dx}{1 + m R \sin^2(2\pi\nu)x}$$

$$= \frac{\tan^{-1} \sqrt{m+1} \tan 2\pi\nu d (1 + \frac{1}{2} \frac{a}{d}) - \tan^{-1} \sqrt{m+1} \tan 2\pi\nu d (1 - \frac{1}{2} \frac{a}{d})}{2\pi\nu d \cdot \frac{a}{d} \cdot \sqrt{m+1}}$$

--- (2-30)



の形に対する。Fig 2-33 はこの式を使い, 反射率  $R$  及び曲曲の大きさを  $a/d$  をパラメーターにして計算した  $\overline{A(\nu)}$  で, ピーク値に対して正規化してある。又, Fig 2-34 はその場合の最大透過率の低下の様

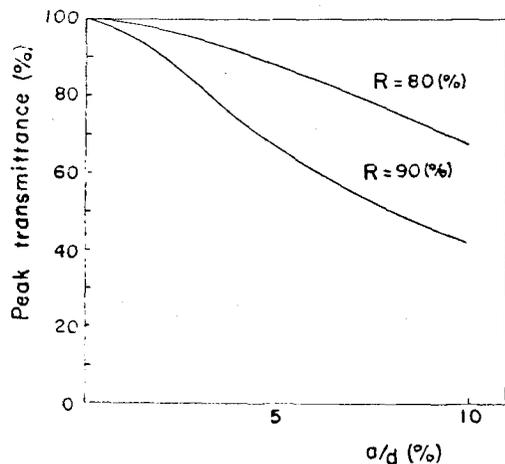
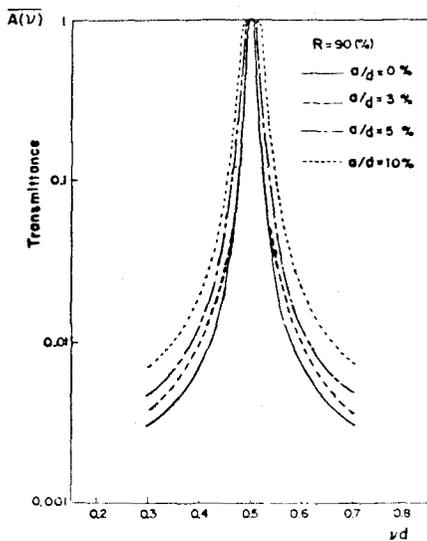


Fig 2-33 メツジの曲曲を考慮に入れた装置函数

Fig 2-34 メツジの曲曲による最大透過率の低下

子を表している。反射率が高いほど、すなわちフネスが大きくなるほど表面の欠陥の影響は大きくなる。

× $1/2$ 表面が粗い場合、間隔が  $(x \sim x+dx)$  の間にある面積の全体の面積に対する割合  $dS/S$  が  $x=d$  を中心に Gauss 分布すると仮定すると、

$$\frac{dS}{S} = f(x) dx = \frac{2}{\delta x} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp[-4 \ln 2 \left(\frac{x}{\delta x}\right)^2] dx$$

従って、

$$\begin{aligned} \overline{A(\nu)} &= \frac{1}{S} \int_S \frac{dS}{1 + m \sin^2(2\pi\nu)x} \\ &= \frac{2}{\delta x} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \int_{d-\delta x}^{d+\delta x} \frac{\exp[-4 \ln 2 \cdot \frac{(x-d)^2}{\delta x^2}]}{1 + m \sin^2(2\pi\nu)x} dx \end{aligned}$$

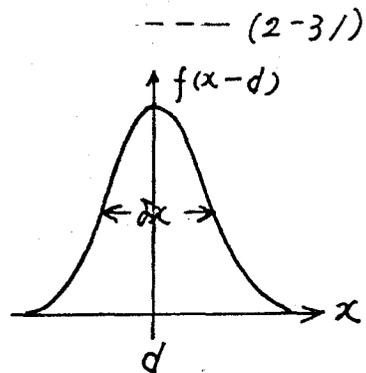


Fig 2-35 × $1/2$ 表面が粗い場合 (Gauss 分布)

----- (2-32)

これは、

$$\frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{x}{2}} = \frac{1-R}{1+R} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R^k \cos kx \right]$$

$$\text{及 } \int_{-\infty}^{\infty} \cos bx e^{-ax^2} dx = e^{-\frac{b^2}{4a}} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

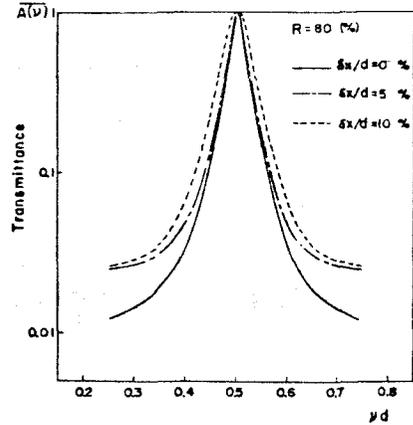
を用いて、

$$\overline{A(\nu)} = \frac{1-R}{1+R} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R^k \cos(4\pi\nu dk) \exp\left\{-\left(\frac{\delta x}{\delta}\right)^2 (\nu d)^2 \frac{\pi^2 k^2}{\ln 2}\right\} \right]$$

----- (2-33)

という形になる。

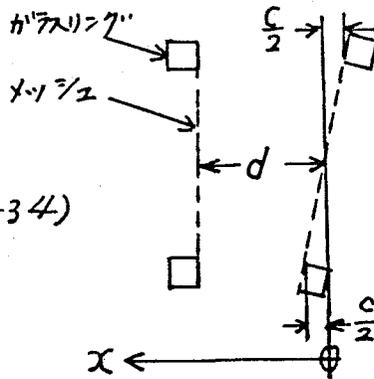
反射率  $R=80\%$  とし、(2-33)式  
で10頃までとって近似計算した  
結果をFig 2-36に示す。



張られたメッシュの平行調整  
が要くて、Fig 2-37のような  
傾きがある場合、

Fig 2-36 メッシュ表面の粗さを考慮に入れた装置函数

$$\frac{ds}{s} = \frac{4}{\pi C} \sqrt{1 - \frac{4(x-d)^2}{C^2}} dx \quad \text{---- (2-34)}$$



従って、

Fig 2-37 張られたメッシュの傾き。

$$\begin{aligned} \overline{A(v)} &= \frac{1}{s} \int_s \frac{ds}{1 + m \sin^2(2\pi v) x} \\ &= \frac{4}{\pi C} \int_{d-\frac{C}{2}}^{d+\frac{C}{2}} \frac{\sqrt{1 - \frac{4(x-d)^2}{C^2}}}{1 + m \sin^2(2\pi v) x} dx \quad \text{---- (2-35)} \end{aligned}$$

という形になる。この計算は複雑で、積分型のままにしておく  
が、ファブリー・ペローが矩形であると仮定すると(2-30)式  
と同じになる。

実際にファブリー・ペローに使っているメッシュの表面粗さを知る

ことは困難であるが、厚さが数 $\mu$ であることから $1\mu$ 以内であると見当っている。 $d=50\mu$ 以上( $100\mu$ 以上の波長をF.P.の1次を使って走査する場合)に対しては $a/d$ は2%以下になるから、Fig 2-36におよと無視できる。又、表面の歪曲と傾きは、両者とも $1\mu$ 程度であると考えられる。従って $100\mu$ 以上の波長域の走査に対して、 $a/d$ 及び $c/d$ は、やはり $1/50$ 程度になるので、Fig 2-33, Fig 2-34から、反射率 $R=90\%$ の場合でも、最大透過率の低下は10%程度、半価幅の増大は無視できる。

## [2] 光源及び検知器の面積が有限な場合の装置函数

$A_{\text{img}}$ の式が装置函数として使えるのは、フアリー・ペロー表面が完全で、しかも点光源の場合である。しかし実際はフアリー・ペロー表面は欠陥を持っているし、光源及び検知器(あるいは円孔)は有限の大きさを持っている。前者による影響は[1]で述べたので、ここでは後者による影響を調べる。但し、フアリー・ペロー表面は完全なものとして取り扱う。円孔の大きさを角度で表して $\Delta X$ とすると、その影響を考慮した装置函数 $\overline{A(\nu_p)}$ は

$$\overline{A(\nu_p)} = \frac{2}{\Delta X} \int_{x_0}^{x_0 + \frac{\Delta X}{2}} \frac{dx}{1 + m \sin^2 2\pi d \nu_p (x - x_p)} \quad \text{--- (2-36)}$$

で表される。但し、 $X = \cos \psi$ ,  $X_p = \cos \psi_p$   
 $X_0 = 1$ ,  $2\pi d \psi_p X_p = k\pi$ , で、円孔の  
 大きさは光源の強度の角度による  
 分布が無視できる\*ほどであると  
 している。(2-36)式を計算すると、

(2-37)式のおよびなる。この式を使い、  
 $R$ と $\Delta X$ をパラメータにして計算した  
 ものが Fig 2-39 である。

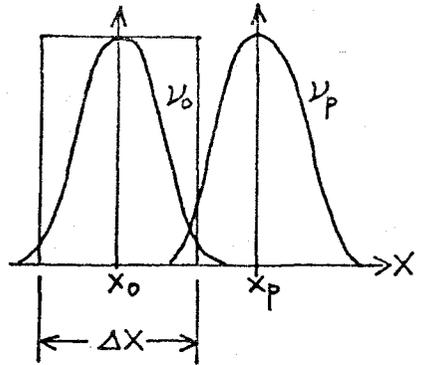


Fig 2-38. 単色光( $\lambda_0, \lambda_p$ )  
 の角度による強度分布と  
 円孔。

$$\overline{A(\psi_p)} = \frac{\tan^{-1}[\sqrt{1+m} \tan 2\pi d \psi_p (1 + \frac{\Delta X}{2})] - \tan^{-1}[\sqrt{1+m} \tan 2\pi d \psi_p]}{\frac{\Delta X}{2} \cdot 2\pi d \psi_p \cdot \sqrt{1+m}}$$

--- (2-37)

$\Delta X$ が大きくなると最大透過率は落ち、波数の大きい方へ移動してゆく。移動量は約  $\Delta X/4$  である。[4]における考察から、速報

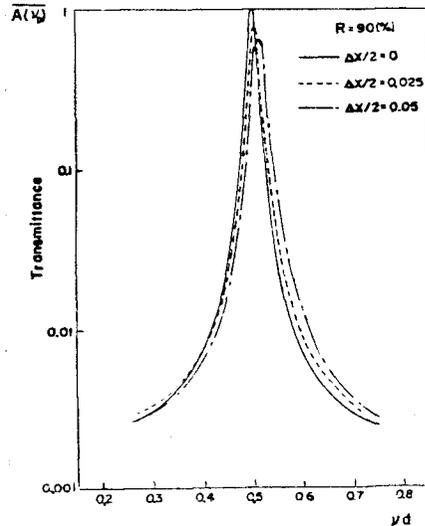
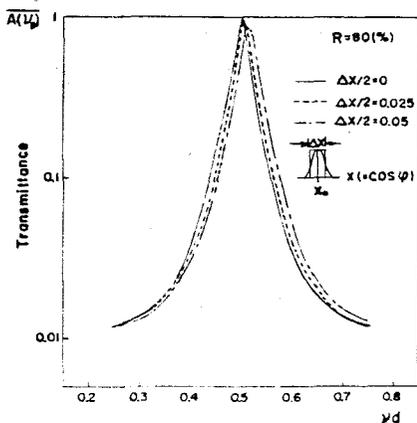


Fig 2-39 円孔の大きさを考慮に入れた装置函数。

外における光学系では、 $\Delta X \approx 1/100$ 程度で、反射率90%の場合でも装置函数の変化は無視できる。

\*

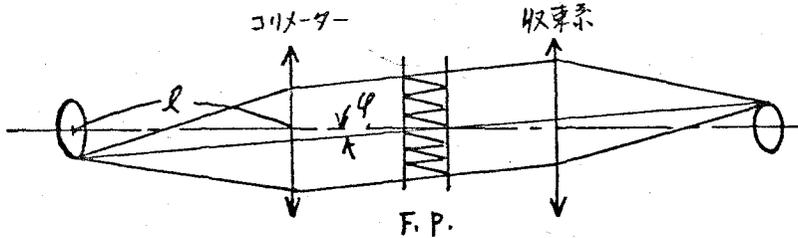


Fig 2-40 ファブリ・ペローを有限面積の光源で照らした場合.

Fig 2-40 で、角度  $\varphi$  方向から来る光の強度  $di(\varphi)$  は、

$$di(\varphi) = B \cdot 2\pi l^2 \frac{\tan \varphi}{\cos^2 \varphi} = -C \frac{dX}{X^3} \quad \text{--- (2-38)}$$

但し  $B$  は光源の単位面積あたりの輝度で、ここでは場所的に一様と考えている。  $C$  は上式を計算して出て来る定数、 $X = \cos \varphi$  である。従って、くわしくは、(2-36)式の代わりに、

$$\overline{A(\nu_p)} = \frac{-2C}{2 \int_{X_0}^{X_0 + \frac{\Delta X}{2}} -C \frac{dX}{X^3}} \int_{X_0}^{X_0 + \frac{\Delta X}{2}} \frac{dX/X^3}{1 + m \sin^2 2\pi d\nu_p (X - X_p)} \quad \text{--- (2-39)}$$

(2-39)式を使わなければならぬが、容易に解けないので  $X = \cos \varphi \approx 1$  として (2-36)式を使っている。実際、光源の面積も検知器の面積も小さく (2-36)式で十分である。

[3] 反射板の反射率の差による影響。

フブリー・ペローの反射板を構成する2枚のメッシュの反射率に差がある場合の  $A_{\text{avg}}$  の式に相当するものは、吸収を無視すると、

$$T(\nu) = \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2} \left[ 1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2} \sin^2 \Phi \right] \quad \text{---- (2-40)}$$

$$\Phi = 2\pi r d \nu \cos \theta - \phi_{r1} - \phi_{r2} \quad \text{---- (2-41)}$$

但し  $R_1, R_2$  は、各反射板のエネルギー反射率。  $\phi_{r1}, \phi_{r2}$  は、各反射板で反射する時の位相のずれである。

(2-40) から最大透過率: (2-42) 式 及、フネス: (2-43) 式を

$$T_0 = \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2} = \frac{R(1-R)(\frac{1}{2} - 1 - \frac{\Delta R}{R})}{(1 - R\sqrt{1 + \frac{\Delta R}{R}})^2} \quad \text{---- (2-42)}$$

$$F = \frac{\pi\sqrt{R_1 R_2}}{1-\sqrt{R_1 R_2}} = \frac{\pi\sqrt{R} \sqrt{1 + \frac{\Delta R}{R}}}{1 - R\sqrt{1 + \frac{\Delta R}{R}}} \quad \text{---- (2-43)}$$

(但し  $R_1 = R, R_2 = R + \Delta R$ )

とり出してその影響を調べたのが、Fig 2-41, Fig 2-42 (反射率が等しい時のフネス  $F_0 = \pi\sqrt{R}/(1-R)$  に対して正規化してある) で、反射率に差があると、フネスは高くなるが、最大透過率は下るので望ましくない。

メッシュは製作上、大きさが限られているが、1枚のメッシュから、

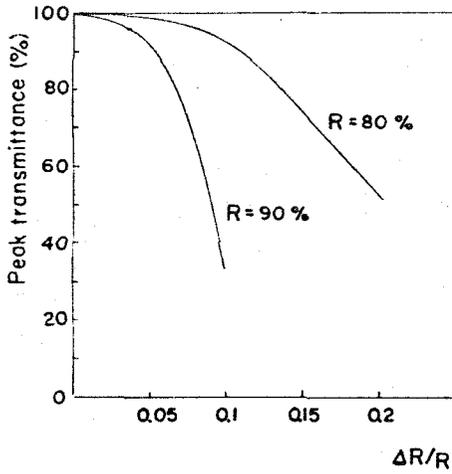


Fig 2-41 ファブリー・ペロー  
反射板の、反射率が異なる場  
合の、最大透過率の低下。

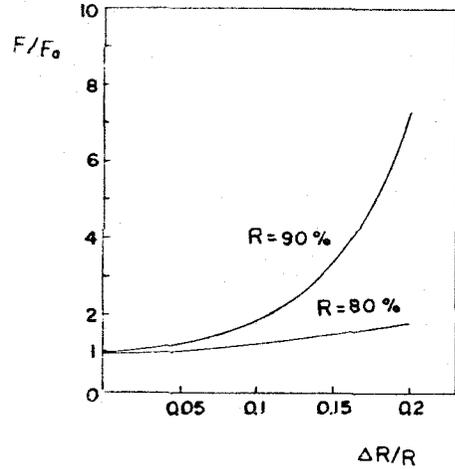


Fig 2-42 ファブリー・ペロー  
反射板の、反射率が異なる場  
合の、F/F<sub>0</sub>の変化。

ファブリー・ペローの反射板が2枚切りとることができる場合は、この1枚のメッシュの場所的反射率の差が $\Delta R$ になるが、これはほとんど無視できると考えられる。しかし、2枚の反射板を別々のメッシュから切りとらなければならぬ場合、同一反射率の要請に対し、製作上5%程度の差がある。この程度の差はどれくらい影響するか求めてみると、例えば $R=85\%$ で $\Delta R=5\%$ なら、 $T_0$ は97%に、F/F<sub>0</sub>は約1.2倍になる程度である。

[4] 回折格子分光器とファブリー・ペロー分光器の明るさの比較 (光源の面積, 検知器の受光面積が限られている場合)

フアブリー・ヘロー分光器は、回折格子分光器にくらべ、大きな *étendue* (面積  $\times$  立体角) をとることができるといわれているが (P. Jacquinet<sup>51)</sup>, 遠赤外域のように光源、検知器ともその面積が限られている場合は事情が異なる。すなわち、光源のアーチの径は高さ  $10\text{ mm}$ , 検知器の窓は、グレーの場合は直径  $7\text{ mm}$  程度、極低温ボロメータの場合ライトパイプの径の  $10\text{ mm}$  程度である。(極低温ボロメータの場合、ライトパイプとライトコーンで  $6\text{ mm}$  平方程度の受光片で光を導いているので、検知器の入口の径は、ライトパイプの径の  $10\text{ mm}$  程度とするが、入射角は考慮に入れなければならない。) 又、フアブリー・ヘローは製作上直径  $60\text{ mm} \sim 80\text{ mm}$  程度の面積であるのに対し、回折格子の場合はもっと大きなものを作ることができる。このように点を考慮に入れ、各々できるだけ大きな *étendue* を得ることができるよう光学系を考え、明るさを比較した。但し分解能は  $20 \sim 70$  程度、すなわちフアブリー・ヘローの分解能に合わせて検討した。これは、 $100\mu$  以上の波長域の分光をする場合、フアブリー・ヘローの方が有利か、それとも回折格子分光器を、分解能を下げた方が有利かということ調べるためである。

### 回折格子分光器の場合

回折格子分光器の分解能を $R$ とすると,

$$\frac{1}{R} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{s}{f} \cdot \frac{g \cos\theta}{\lambda} \quad \text{--- (2-44)}$$

の関係がある。但し $g$ は回折格子の格子定数,  $\theta$ は回折角,  $s$ はスリット幅,  $f$ はコリメーターの焦点距離である。1つの回折格子の使用範囲では,  $1.2 < g \cos\theta / \lambda < 2.8$ 程度であるから, 例えは $100\mu$

から長波長側で,  $R=20$

( $R=50$ )で使うとすれば,

$$0.018 < s/f < 0.04$$

( $0.007 < s/f < 0.017$ )で,

入射スリットの幅 $s$ は最大 $0.04f$

( $0.017f$ )である。これは光源

位置では $0.04f/\gamma$  ( $0.017f/\gamma$ )となる。この大きさが, 光源の

アークの幅より小さいかどうか検討しなければならない。但し

$\gamma \equiv b/a$  (Fig 2-44 参照)で, 最初の収束系の倍率である。

Fig 2-44 (a)の回折格子より前の光学系で,  $\gamma \equiv b/a = (b/f) - 1$

と,  $d/b = D/f$  から,

$$\gamma = \frac{f}{D} \cdot \frac{d}{f'} - 1 \quad \text{--- (2-45)}$$

と表せるので, スリット幅の光源位置での大きさを $W_s$ とすると,

$$W_s = \frac{0.04f}{\frac{f}{D} \cdot \frac{d}{f'} - 1} \dots (R=20), \quad W_s = \frac{0.017f}{\frac{f}{D} \cdot \frac{d}{f'} - 1} \dots (R=50)$$

となる。収束系のF数は製作上1以下にすることはむづかしく、従って  $d/f'$  の最大値は1となる。この値を使うと、

$$W_s = \frac{0.04f}{\frac{f}{D} - 1} \dots (R=20), \quad W_s = \frac{0.017f}{\frac{f}{D} - 1} \dots (R=50) \dots (2-46)$$

あるいは、コリメータのF数 ( $F = f/D$ ) を使って、

$$W_s = \frac{0.04DF}{F-1} \dots (R=20), \quad W_s = \frac{0.017DF}{F-1} \dots (R=50) \dots (2-47)$$

コリメータの径  $D = 200 \text{ mm}$  とすると  $F \geq 5$  ( $F \geq 1.5$ ) なら、 $F$  の径  $10 \text{ mm}$  内に入る。通常の光学系では、 $F$  は5程度である。一方スリットの高さの方は、光源側よりも、検知器側で限定

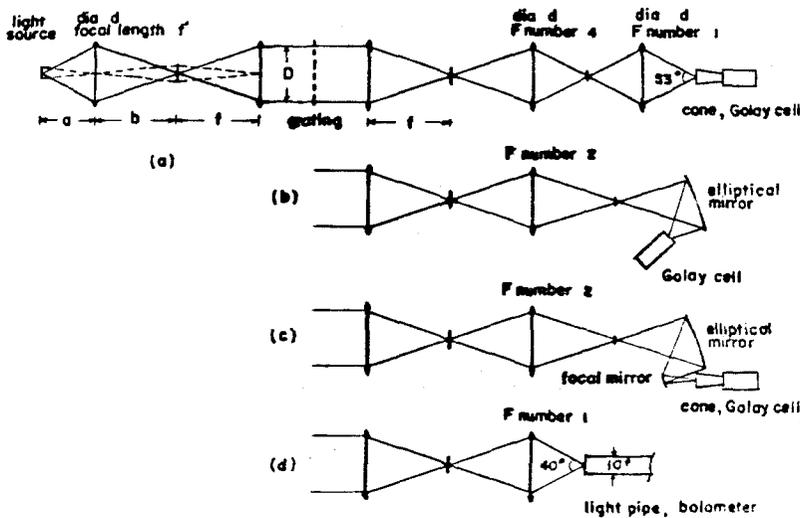


Fig2-44 像の縮小率が大い特徴的系4つの光学系

される。コリメーターの下数を5として特徴的な4つの光学系を考え、一番よく絞れるように設計したものを、Fig 2-44 にまとめた。縮小率が最も大きい(C)の場合で約1/2である。従って、出口スリットの位置でのコリメータ(直径7mm)の像は84mmの直径の円になる。 $f=5D$ ,  $D=200\text{mm}$ , スリット高さ  $h=84\text{mm}$  とすると,  $h/f=0.084$ , その他の場合に対しては  $h/f=0.06$  程度である。検知器に入る光束は,

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos i \cdot \frac{S}{f} \cdot \frac{h}{f} \cdot \eta \quad \text{--- (2-48)}$$

$B$ は光源の輝度,  $A$ ,  $i$ ,  $\eta$  は,それぞれ回折格子の面積, 回転角, 効率である。 $S/f=0.04$  ( $S/f=0.017$ ),  $h/f=0.084$ ,  $\cos i \approx 1$  を採用して

$$\left. \begin{aligned} \phi &= B \cdot A \cdot 0.0034 \cdot \eta \quad (R=20) \\ \phi &= B \cdot A \cdot 0.0014 \cdot \eta \quad (R=50) \end{aligned} \right\} \text{--- (2-49)}$$

である。

### ファブリー・ペローの場合

ファブリー・ペローの場合には, スリットの代わりに円孔(位置は, スリットと同じくコリメーターの焦点面)を使い, 通常この円孔は, ファブリー・ペローの中心に対し2π/θ。(θはファブリー・ペローの持つ分解能)の立体角をなすようにとる。但しこの場

合, ファブリー・ペロー-分光器の  
分解能は0.7%に下る。

このことから,  $R=20$  ( $R=50$ )  
の場合,  $d=0.53$  ( $d=0.33$ )

で, 円孔の直径は  $0.53f$  ( $0.33f$ )

となる。光源位置での円孔の大きさを  $P$  とすると,  $P=0.53f/\delta$   
( $0.33f/\delta$ ) となる。 $\delta$  は, (2-45) 式と同じもので, 回折格子の  
場合と同様に,  $d/f'=1$  とすると,

$$P = \frac{0.53f}{\frac{f}{D} - 1} = \frac{0.53DF}{F-1} \dots (R=20), \quad P = \frac{0.33f}{\frac{f}{D} - 1} = \frac{0.33DF}{F-1} \dots (R=50)$$

--- (2-50)

となる。Dは通常60mm程度である。F=5とすると,  $P=40\text{mm}$   
( $R=20$ ),  $P=25\text{mm}$  ( $R=50$ ) で,

Fig 2-46 のような開きになる。すな  
わち, 縦方向は  $40\text{mm}$  ( $25\text{mm}$ )  
まで使えるが, 横方向はアーク  
幅の  $10\text{mm}$  が上限になる。

これは円孔の位置では  $0.13f$   
に相当する。又, 検知器の方から縦方向に対する束縛があ  
り, 回折格子の項で検討したように,  $h/f = 0.28$  (Fig 2-44  
Cの場合)  $h/f = 0.2$  (a, b, d, の場合) でいずれも  $d=0.53$

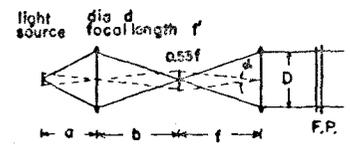


Fig 2-45. ファブリー・ペロー-  
分光器の光源側の光学系

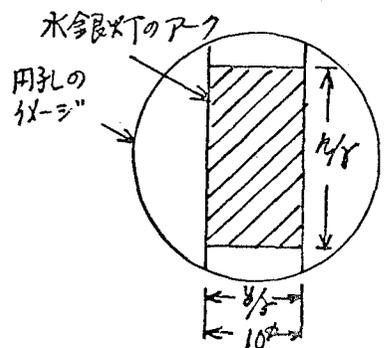


Fig 2-46 光源(水銀灯のアーク)  
と光源位置での円孔の像

(0.33) よりも小さい。すなわち、横方向は光源側から、 $g/f = 0.13$  に、縦方向は検知器のため、 $h/f = 0.28$  ないし  $0.2$  に限られる。直径  $60\text{ mm}$  のフアリー・ヘロー分光器で利用できる光束は、

$$\phi = B \cdot A \cdot \frac{h}{f} \cdot \frac{g}{f} \cdot \bar{\omega} \quad (\omega_0 = 20, 50)$$

$$\approx B \cdot A \cdot 0.0364 \cdot \bar{\omega} \quad \text{--- (2-51)}$$

となる。但し、 $\bar{\omega}$  を  $\omega_0$  でおきかえた理由は、上に述べてきたように、光源の面積あるいは、検知器の受光面積が限られているので、理論的に許される立体角  $\Omega = \Omega_0 = 2\pi/\omega_0$  まで利用することができます。  $\Omega/\Omega_0 = 0.2$  程度であるので、フアリー・ヘローを通る光はほとんど垂直入射であるとみることができる。又、同じ理由で分解能の低下はほとんどなく、 $\omega \approx \omega_0$  と考えられる。

以上 2つの場合に対する考察から、光源の面積、検知器の受光面積に制限があり、しかも、回折格子 ( $200\text{ mm}$  幅)、フアリー・ヘロー (直径  $60\text{ mm}$ ) とともに現実的の大きさの面積のものを採用した場合の *étendue* (面積  $\times$  立体角) を比較すると (2-52) 式 及び (2-53) 式のようになる。但し  $\omega \approx \omega_0$  としてある。

$$\frac{\Phi_G}{\Phi_{F.P.}} = \frac{B \times 200^2 \times 0.0034 \times \eta}{B \times \pi \times 30^2 \times 0.0364 \times \tau_0} = \frac{136\eta}{102\tau_0} \approx 1.3 \quad (R=20)$$

--- (2-52)

$$\frac{\Phi_G}{\Phi_{F.P.}} = \frac{B \times 200^2 \times 0.0014 \times \eta}{B \times \pi \times 30^2 \times 0.0364 \times \tau_0} = \frac{56\eta}{102\tau_0} \approx 0.55 \quad (R=50)$$

--- (2-53)

すなわち、分解能が20~70程度の分光をしようとする場合、低分解能の場合には回折格子の方が、分解能が高くなると、ファブリー・ペローの方が少し有利である。

これに加えて、ファブリー・ペローは簡単でしかも透過型という大きな利点を持っている。

## §4 結論

第2章で得られた結論は以下のようになる。

- 1) メッシュには、インダクティブメッシュとキャパシティブメッシュがあり、形状は相補的で、 $\lambda/g(1 + \sin\theta) > 1$  の回折のない領域については、インダクティブメッシュの透過率(反射率)とキャパシティブメッシュの反射率(透過率)は等しく、メッシュの透過特性及び反射特性は、線幅、線の厚さ、断面の形状により変化する。すなわち、インダクティブメッシュでは、線幅が広い程、厚さが厚い程、透過率は下り反射率は上る。キャパシティブメッシュの場合はこの逆である。
- 2) メッシュ表面で光が反射した際におこる位相のずれは、完全反射に近づくほど $\pi$ に近くなる。又、 $3g \sim 6g$  ( $g$ : 格子定数)間での位相の変化は $\pi/20$ 程度である。
- 3) メッシュの吸収は、光によってメッシュ表面に誘起される高周波電流による抵抗損と考えて求めた。この結果によれば、吸収は $100\mu$ 以上の波長域で1%以下である。
- 4) インダクティブメッシュの透過率は、格子定数附近でピークを持つBPFの性質を持っている。4回の透過で最大透過率80%以上、 $\lambda/\lambda \approx 3$ になる。原理的には、格

格子定数を変えて色々な波長のBPFが得られるが、現在市販されているメッシュの格子定数は、 $25\mu$ ,  $50\mu$ ,  $100\mu$ ,  $170\mu$ ,  $250\mu$ の5種類であるから、BPFとしてはこの5種類の波長近傍に限られる。

5) インダクティブメッシュを2枚重ね合わせる時に、格子の一方向へ格子定数の半分ずらせて重ねると(重ね方は困難であるが)、2回の透過よりもバンド幅の狭いものが得られる。従ってこのようなものを2組使えば、4)の4回透過の場合よりもバンド幅の狭いものが得られる。

6) インダクティブメッシュの  $3g$  ( $g$ : 格子定数) 以上の反射率の高い所を、ファブリー・ペロー型干渉計の反射体として使えば、メッシュの格子定数を変えて  $80\mu \sim 1.5\text{mm}$  の任意の波長のB.P.F.ができて、理想の場合、フネス(1次の分解能)  $20 \sim 70$ , 最大透過率  $90\% \sim 60\%$  のものが得られる。

7) 6)で述べたB.P.F.を実現するため、tunable ファブリー・ペロー干渉計及びファブリー・ペロー・エタロンを試作した。両者とも、平行度及びメッシュ表面の歪曲は調整して各々  $1\mu$  程度にすることができた。又、前者の可動機構に対しては、間隔  $400\mu$  の移動で平行度のくずれが  $1\mu$  以内であった。

8) Tunable ファブリー・ペロー干渉計を使った簡単な分光器を組み立てて、 $100\mu \sim 600\mu$  の水蒸気の吸収及び  $\text{CO}$  酸化炭素の吸収をとった。 $40\text{cm}^2$  で  $20\text{cm}^2$  の分解を得た。

又、ファブリー・ペロー型干渉計の持つ高次光を除去するために、rectstrahlen パウダーフィルター及び wire-mesh フィルターを使った。

9) 3枚以上のメッシュを平行に、且、等間隔に並べた場合については、メッシュをインピーダンス表示して等価回路を考え、回路網理論を使って解くと便利である。(この理論は、勿論、2枚の場合あるいは1枚の場合にも適用できる) 反射率一定のメッシュ(仮想的であるが)を  $\lambda_0/2$  の間隔をおいて平行に並べた場合、 $\lambda = (0.7 \sim 0.8)\lambda_0$  を中心とする(反射率により中心位置は異なる)BPFの形になる。反射率が低い場合(例えば20%の場合)は抑制領域の抑制効果が悪いことから、又、反射率が高い場合(例えば80%の場合)は、透過領域で透過率の悪い箇所(透過率の谷)ができることから望ましくなく、中間の50%近傍が適当である。

10) キャパシティブメッシュを2枚ないし3枚等間隔( $d = \frac{\lambda}{2}$ )

$g$ : 格子定数) に並べると, 電氣的な low (frequency) pass フィルターと同等な LWPF ができることを計算から求めた。

11) ファブリー・ペロー型干渉計の装置函数は Airy の式で表されるものであるが, 反射極表面の粗さ, 平行度の悪さ, 反射率の差異, 光源が点光源でないこと, により影響を受けるが, 試作した ファブリー・ペロー型干渉計を  $100\mu$  以上の波長域で使う場合に対しては, 問題になる程度ではなかった。

12) ファブリー・ペロー型干渉計は, 回折格子分光器にくらべ大きな *étendue* (面積  $\times$  立体角) を取りこむか, 出来ると言われているが, これは, 光源も検知器も十分大きいと仮定しての話である。その両方の面積が限られている場合について, 具体的な光学系を考えに入れて考察したが, 分解能  $20 \sim 70$  程度の分光では, ファブリー・ペローの方が少し ( $1 \sim 2.5$  倍) 有利であるという結論がでた。

## 謝 辞

本研究に対し、全方針を与えて下さった吉永教授、研究上色々と御指導いただいた藤田教授、三石教授、南助教授に深く感謝致します。又、回路網理論のことで色々と御教授下さった、通信工学教室の熊谷助教授、ファブリー・ヘロー型干渉計の製作上多大の御協力をいただいた、ミルタカメラ株式会社の西野氏、池田氏、長谷川氏、村岡氏、及び、ファブリー・ヘロー型干渉計の実験、rectstrahlen ハウターフィルターの液体ヘリウム温度での測定で協力していただいた、同じ研究室の福井君、中川君、岡脇君にも心から感謝いたします。

## 文 献

- 1) J. T. Cox, G. Hass and G. F. Jacobus :  
J. Opt. Soc. Am. 51 (1961) 714.
- 2) G. M. Ressler and K. D. Möller :  
Appl. Opt. 5 (1966) 877.
- 3) V. N. Smiley and F. E. Stuart :  
J. Opt. Soc. Am. 53 (1963) 1078.
- 4) 下高原積 塚田清司 岩崎敏勝 :  
応用物理学会春季講演会 (1968).
- 5) O. S. Heavens, J. Ring and S. D. Smith :  
Spectrochim. Acta, 10 (1957) 179.
- 6) Y. Yamada, A. Mitsuishi and H. Yoshinaga :  
J. Opt. Soc. Am. 52 (1962) 17.
- 7) T. R. Manley and D. A. Williams :

*Spectrochim. Acta* 21 (1965) 737.

- 8) A. Mitsuishi, Y. Otsuka, S. Fujita and H. Yoshinaga : *Jap. J. Appl. Phys.* 2 (1963) 574.
- 9) J. U. White : *J. Opt. Soc. Am.* 37 (1947) 713.
- 10) K. D. Möller and R. V. McKnight :  
*J. Opt. Soc. Am.* 53 (1963) 760.
- 11) W. Wetzling and L. Genzel :  
*Infrared Phys.* 4 (1964) 253.
- 12) J. Strong : *Phys. Rev.* 38 (1931) 1818.
- 13) S. D. Smith and O. S. Heavens :  
*J. Sci. Instr.* 34 (1957) 492.
- 14) R. G. Greenler : *J. Opt. Soc. Am.* 45 (1955) 788.
- 15) R. G. Greenler : *J. Opt. Soc. Am.* 47 (1957) 130.

- 16) R. G. Greenler : *J. Phys.* L9 (1958) 375.
- 17) R. Beer and J. Ring : *Infrared Phys.* 1 (1961)  
94.
- 18) A. Mitenishi, Y. Yamada and H. Yoshinaga :  
*J. Opt. Soc. Am.* 52 (1962) 14.
- 19) P. J. Gielisse et al. : *Phys. Rev.* 155 (1967)  
1039.
- 20) J. N. Plendl et al. : *Appl. Opt.* 5 (1966) 397.
- 21) P. J. Gielisse et al. : *J. Opt. Soc. Am.* 36  
(1965) 2446.
- 22) J. T. Houghton and S. D. Smith :  
"Infrared Physics", (Oxford University Press,  
London, 1966).
- 23) L. Genzel und R. Weber : *Z. Angew. Phys.*

10 (1958) 127.

24) L. Genzel und R. Weber : Z. Angew. Phys.

10 (1958) 195.

25) L. Genzel : J. Mol. Spectry. 4 (1960) 241.

26) P. Vogel and L. Genzel : Appl. Opt. 3 (1964) 367.

27) D.E. McCarthy : Appl. Opt. 2 (1963) 591.

28) J. Strong : Phys. Rev. 37 (1931) 1565.

29) J. K. O'Loane : J. Chem. Phys. 21 (1953) 669.

30) J. Bohdanovsky : Z. Physik 149 (1957) 383.

31) R.A. Oetjen et al. : J. Opt. Soc. Am. 42 (1952)  
559.

32) H. Yoshinaga et al. : J. Opt. Soc. Am. 48 (1958)

- 33) E. D. Palik et al. : *Phys. Rev.* 122 (1961) 475.
- 34) E. D. Palik : *Appl. Opt.* 2 (1963) 527.
- 35) A. Hadni et al. : *Compt. Rend.* 260 (1965)  
4973.
- 36) A. Hadni et al. : *Appl. Opt.* 4 (1965) 487.
- 37) 阪井清美, 三石明善, 南茂夫, 吉永弘 : 応用物理,  
第34巻 第3号 (1965) 176.
- 38) A. Mitsuishi, Y. Yamada, S. Fujita and  
H. Yoshinaga : *J. Opt. Soc. Am.* 50 (1960) 433.
- 39) K. Sakai, Y. Nakagawa and H. Yoshinaga :  
*Jap. J. Appl. Phys.* 7 (1968) 792.
- 40) 遠山隆 : "結晶粉末フィルターの研究" (大阪大学修士論文1967).

- 41) K.F. Renk and L. Genzel :  
Appl. Opt. 1 (1962) 643.
- 42) R. Ulrich, K.F. Renk and L. Genzel :  
IEEE Trans. MTT-11 (1963) 363.
- 43) E. Bell : Symposium on Molecular Structure  
and Spectroscopy (1962).
- 44) N. Marcubitz : "Waveguide Handbook", M. I. T.  
Rad. Lab. Ser., (McGraw-Hill, New York, 1954).
- 45) R. Ulrich : Infrared Phys. 1 (1967) 37.
- 46) G. M. Ressler and K. D. Möller :  
Appl. Opt. 6 (1967) 893.
- 47) K. Kumagai, M. Matsubara and H. Mori :  
IEEE J. Quantum Electronics 1 (1965) 85.
- 48) W. Culshaw : IRE Trans. MTT-7 (1959) 221.

49) J. S. Seeley : Proc. phys. Soc. 78 (1961) 998.

50) R. Chabbal : J. Phys. Radium L9 (1958) 295.

51) P. Jacquinet : J. Opt. Soc. Am. 44 (1954) 761.