

# 第六章

## ワイドバンドスペクトル光源を用いた 多層構造の吸収スペクトルと厚さ計測

ワイドバンドスペクトルを光源とした干渉計測においては干渉縞は光路差ゼロの位置付近に局在する。ここでは、ワイドバンドスペクトル光源を用いて反射光によって形成された干渉縞から、試料の三次元構造と吸収スペクトルの情報を同時に測定する方法を提案する。本方法を用いると厚さの絶対値を波長の整数倍の不確定性なく測定でき、複数の吸収スペクトル分布をもつ多層構造物に対し、フーリエ変換によって各層の吸収スペクトル特性を測定することができる。

### 6.1 緒論

高度情報社会に向かって、効率のいい測定、コンパクトな測定機器が求められてきた。従来、多層構造物の厚さと吸収スペクトルの測定ではそれぞれに対応するデバイスが必要であり、それぞれの測定に対し、別々に行ってきた。吸収スペクトルの測定では、透過型、反射型などがある。従来、測定物の透過光を利用してスペクトルアナライザーによって行ってきた。それに対し、ワイドバンドスペクトル光源から形成した干渉縞を利用すると、絶対的な厚さを計測することができる。またその干渉縞がスペクトルの情報を含んでいるので、厚さと吸収スペクトルを同時に測定することができ、干渉計だけのデバイスと少ない手順で済む。ワイドバンドスペクトル光源を用いた干渉計測はスペクトルが広いため可干渉性が低く、干渉縞が光路差ゼロの位置にしか局在しない。この特徴を生かして、ワイドバンドスペクトル光源の可干渉距離より長い距離の測定では、ワイドバンドスペクトル光源だけで長さを測定することができる

1,2)。

しかし、図 6.1.1(a) のように、吸収スペクトルを持つ多層物体を測定するとき、単一スペクトルの情報しか得られない。各層の吸収スペクトル特性を知る場合、透過光を利用した測定では困難がある。それに対し、図 6.1.1(b) のような反射型は反射光から各層にインターフェログラムが形成され、そのインターフェログラムがスペクトルの情報が含んでいるので、解析することによって吸収スペクトルを再現することができる。また、インターフェログラムのピークから、厚さの絶対的な計測ができる。

本研究ではワイドバンドスペクトル光源を用いて、反射光によるインターフェログラムを形成し、そのインターフェログラムをフーリエ変換して、吸収スペクトルを再現し、インターフェログラムの頂点付近の3点を通る二次曲線によるインターフェログラムのピークの検出で、厚さ計測を行い、多層構造の吸収スペクトルと厚さを同時に測定することができる方法を提案する。

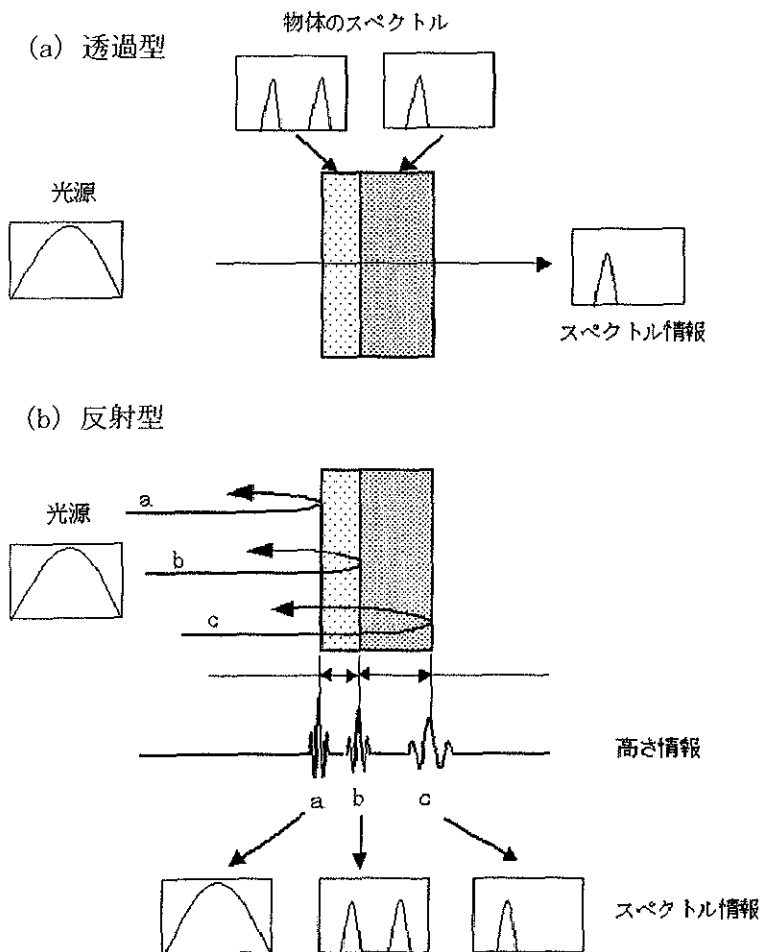


図 6.1.1 透過型と反射型の測定

## 6.2 測定原理

ワイドバンドスペクトル光源の場合、参照鏡が光軸 Z に沿って移動する時、その干渉縞の強度分布は式(2-2-3)

$$I(x, y, \theta, \delta) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} b(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma(n(\sigma)\Phi(x, y, \theta, \sigma) + \delta))] d\sigma$$

のように与えられる。ここで、 $x, y$ は平面座標、 $\sigma$ は波数、 $\sigma_1$ は光源の最小波数、 $\sigma_2$ は最大波数、 $b(\sigma)$ は光源の発光スペクトル分布、 $n(\sigma)$ は屈折率、 $\Phi(x, y)$ は形状分布、 $\delta$ は参照面の移動量を表す。

全章で述べたように、測定対象が多層構造物の場合、物体上のある一点 $(x_0, y_0)$ について  $j$  層目の形状  $\Phi_j(x_0, y_0)$ 、群屈折率が  $n_{gj}$ 、厚さが  $d_j = \Phi_j(x_0, y_0) - \Phi_{j-1}(x_0, y_0)$ 、実効吸収スペクトルを  $b_j(\sigma)$  とすると、干渉縞強度分布式(5-2-6)より、干渉縞強度分布次のようになり、

$$I_j(x_0, y_0, \delta) = \int_{\sigma_{j1}}^{\sigma_{j2}} b_j(\sigma) \left( 1 + \cos \left\{ 2\pi\sigma \times \left( \left( \sum_{i=1}^j (n_{gi} - 1) (\Phi_i(x_0, y_0) - \Phi_{i-1}(x_0, y_0)) \right) + \delta \right) \right\} \right) d\sigma \quad (6-2-1)$$

そこで、 $\sigma_{j1}$ 、 $\sigma_{j2}$ は  $j$  層目に入射した光のスペクトル範囲を表す。 $j$  層目の時、参照面の移動量を  $\delta_j$  とし、 $j-1$  層目から  $j$  層目までの参照面の移動量差は

$$|\delta_j - \delta_{j-1}| = (n_{gj} - 1) (\Phi_j(x_0, y_0) - \Phi_{j-1}(x_0, y_0)) \quad (6-2-2)$$

となる。式(6-2-2)より  $j-1$  層目と  $j$  層目との間の厚さ

$$d_j = \frac{|\delta_j - \delta_{j-1}|}{n_{gj} - 1} \quad (6-2-3)$$

を求めることができる。

干渉縞の強度分布をスペクトルに変換する方法はフーリエ変換がある<sup>3)</sup>。式(6-2-1)  $I_j(x_0, y_0, \delta)$  のうち、参照鏡が光軸 Z に沿って移動する時のインター

フェログラムを  $j$  層目だけ取り出した場合、その干渉縞強度分布は

$$I_j(\delta) = \int_{\sigma_{j1}}^{\sigma_{j2}} b_j(\sigma) \times (1 + \cos\{2\pi\sigma\delta\}) d\sigma \quad (6-2-4)$$

のように書くことができる。また、 $I_j(x, y, \delta)$  のうち、 $\delta$  についての変動分だけを取りだし、 $j$  層目に入射した光は  $\sigma_{j1} \sim \sigma_{j2}$  のスペクトル範囲しか含まない場合、次のように

$$I_j(\delta) = \int_{\sigma_{j1}}^{\sigma_{j2}} b_j(\sigma) \cos(2\pi\sigma\delta) d\sigma \quad (6-2-5)$$

拡張することができる。式(6-2-5)を複素形式で表示すると、

$$I_j(\delta) = \int_{\sigma_{j1}}^{\sigma_{j2}} b_j(\sigma) \exp(2\pi i \sigma \delta) d\sigma \quad (6-2-6)$$

となり、(6-2-6)式の両辺をフーリエ変換すると、

$$b_j(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I_j(\delta) \exp(-i2\pi\sigma\delta) d\delta \quad (6-2-7)$$

となる、すなわち参照鏡を光軸  $Z$  に沿って移動するを変化させて得られたインターフェログラム  $I_j(\delta)$  をフーリエ変換すれば、実効吸収スペクトル分布  $b_j(\sigma)$  を求めることができる。本研究では、各層に対する干渉縞をそれぞれフーリエ変換で解析することによって、各層のスペクトルの性質を求める。

## 6.3 測定

実験装置は図 6.3.1 のように Twyman-Green 干渉計を用いた光学系を配置した。ワイドスペクトル光源としてキセノンランプを使い、一旦コリメータによって平行光にしてから、ビームスプリッターを経て参照面と測定面に集光する。それぞれの反射光から干渉縞を形成する。使用した波長は 500 nm ~ 1000nm であった。測定対象はステージにのせられ、Stepping motor を通じてコンピュータによって制御される。干渉縞が CCD カメラによって検出され、その干渉縞の画像信号が画像処理ボードを経てコンピュータに送られ、解析データとして使う。

測定データの取り方は図 6.3.1 の Stepping motor ステージを  $Z$  方向に移動す

ることによって行った。Z 方向に沿って連続的に画像を記録する。その中の一点について解析を行った。図 6.3.2(a)のような測定対象に対し、Z 方向に移動するたびに一枚の画像をとり、走査距離の全体に対し、図 6.3.2(b)のような連続的に画像をとる。得られた画像から、その中の一点について、図 6.3.2(c)のように境面がある所に干渉縞のピークが現れる。これらのピークとピークの距離から測定対象の厚さを推定することができる。

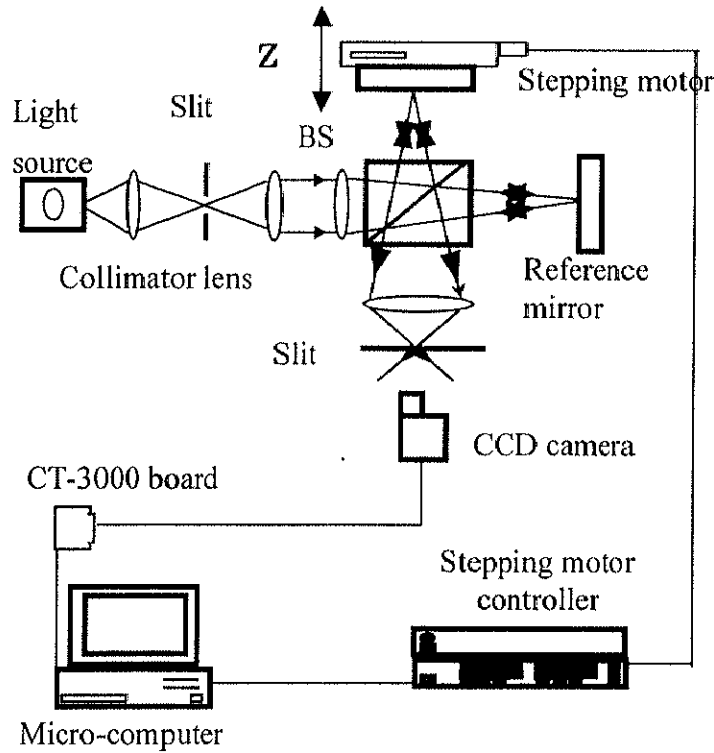


図 6.3.1 実験装置

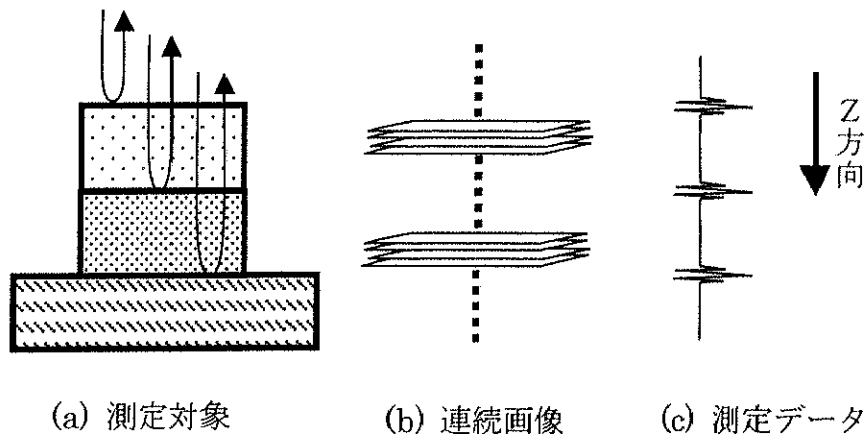


図 6.3.2 測定データの取り方

## 6.4 測定結果

まず、シミュレーションを行い、波長 500nm~1000nm の間に、波長 500nm の干渉縞を任意の幅にし、それを基準に倍率を広げ、50nm ごとに単波長の干渉縞を作り、その干渉縞をフーリエ変換した結果を図 6.4.1 の a 線に示す。

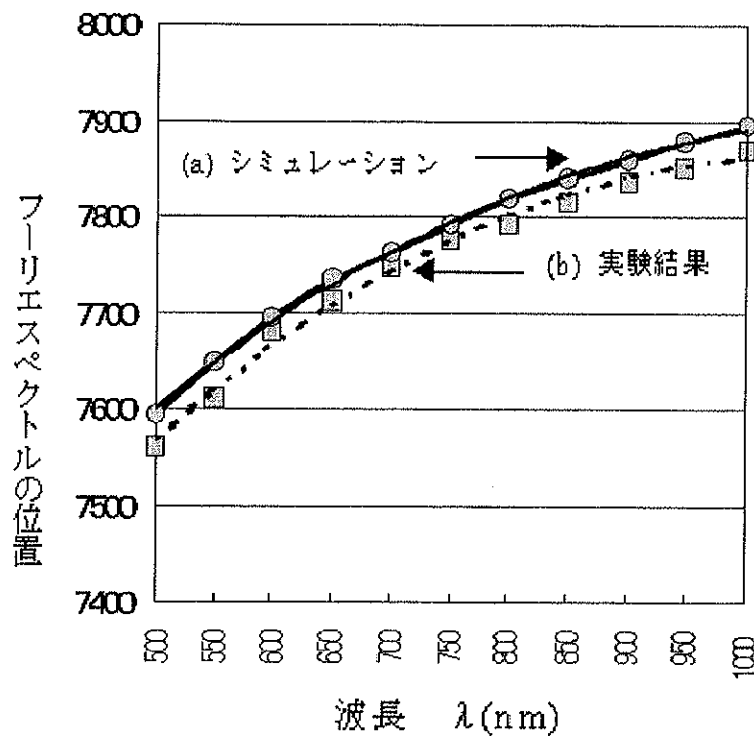


図 6.4.1 各波長による形成された干渉縞のフーリエ変換した結果とフーリエスペクトルの位置との関係

次に、波長フィルターを用いて離散的なスペクトルの測定を行った。実験では、キセノン光源を用い、500nm~1000nm の間に 50nm ごとの波長フィルター(スペクトル幅が 20nm~40nm) を図 6.4.2 のように測定ごとに一枚ずつ測定台の鏡面に置き、鏡面からの反射光と参照鏡からの反射光で干渉縞を形成し、得られた干渉縞を図 6.4.3 に示す。その干渉縞をフーリエ変換した結果を図 6.4.1 の b 線に示す。シミュレーションでは、波長 500nm の干渉縞を任意の幅にし、それを基準に倍率を広げたため、得られた二次項近似線の結果が実験結果と平行

することになる。シミュレーションと実験結果から、フーリエスペクトルの位置が各波長により形成された干渉縞のフーリエ変換した結果と1対1の関係を持っているのを確認することができ、二次項近似線がほぼ平行していることから、干渉縞により、波長を認識することができた。

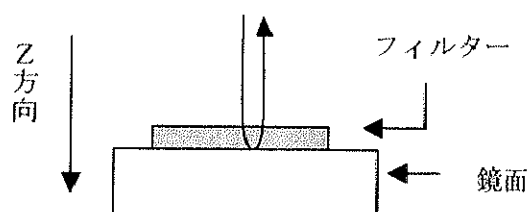


図 6.4.2 測定対象

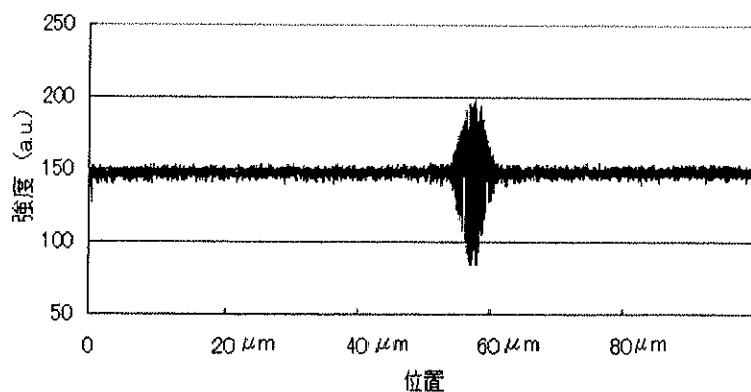


図 6.4.3 得られた干渉縞の分布

ワイドバンドスペクトルの測定ではカラーフィルターを測定対象とし、その特性をスペクトルアナライザーにより測定した結果は、一枚目と二枚を透過した光源の特性をそれぞれ図 6.4.4 と図 6.4.5 に示す。実験では、図 6.4.6 のように二枚のカラーフィルターを重ねて置き、測定ステージを深さの方向に 10 nm ごと走査し、得られた干渉縞を図 6.4.7 に示す。図 6.4.7 より各層の干渉縞の最大変調を検出することによってその厚さを推定することができる。実験結果は一枚目の厚さが 1.72mm、二枚目の厚さが 1.78mm であった。図 6.4.8 は

図 6.4.7 に示している b 部分の干渉縞、図 6.4.9 は図 6.4.7 に示している c 部分の干渉縞の部分拡大図を示す。図 6.4.7～図 6.4.9 に示すように吸収スペクトルの分布によって干渉縞の間隔とコヒーレンス長が異なっている。図 6.4.10 は図 6.4.7 の b 部分の干渉縞、図 6.4.11 は図 6.4.7 の c 部分の干渉縞をフーリエ変換にして得られたフーリエスペクトルの分布を示す。

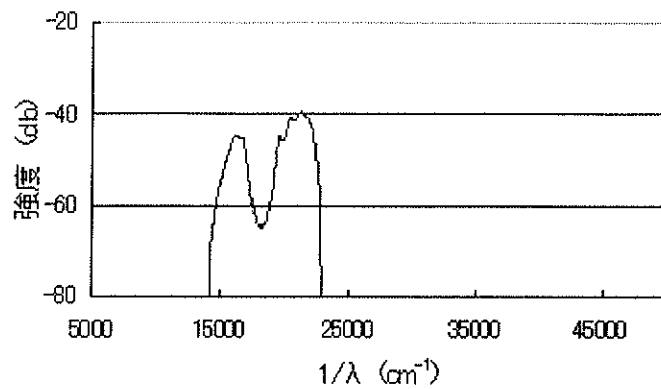


図 6.4.4 スペクトルアナライザにより測定した一枚目の特性

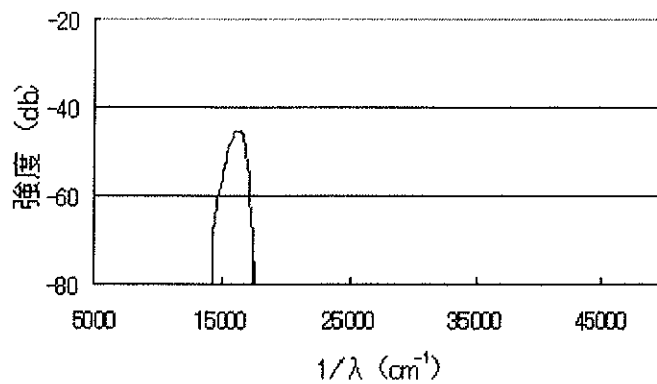


図 6.4.5 スペクトルアナライザにより測定した二枚を重ねたものの特性



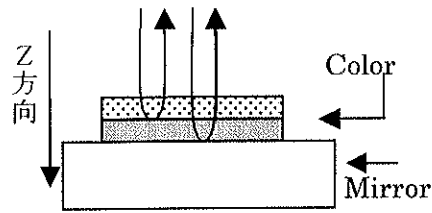


図 6.4.6 測定対象

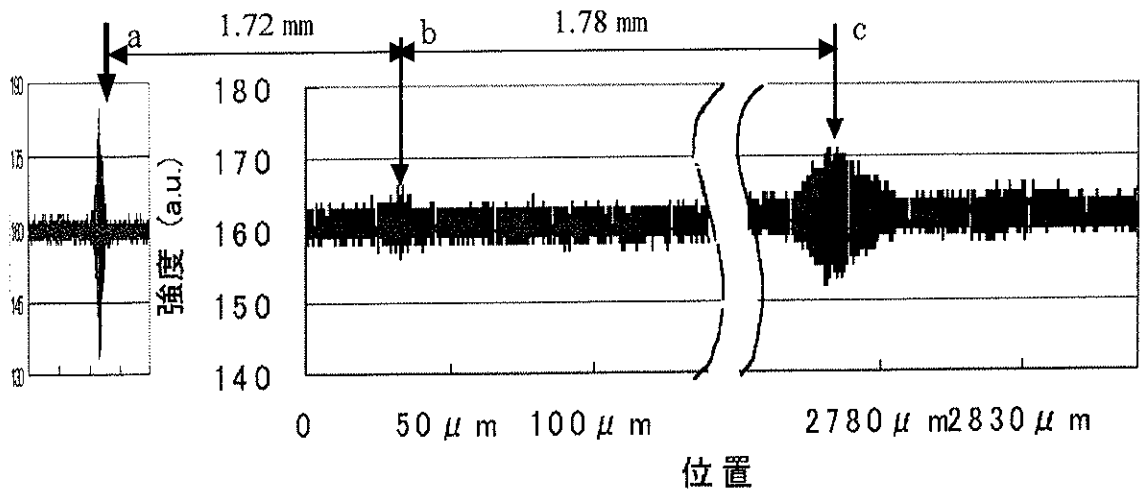


図 6.4.7 得られた干渉縞の分布

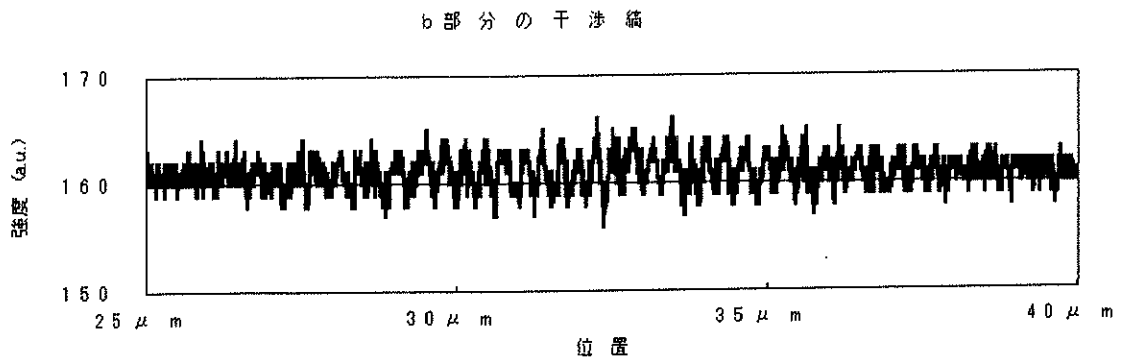


図 6.4.8 図 6.4.7 に示している b 部分の干渉縞の部分拡大図

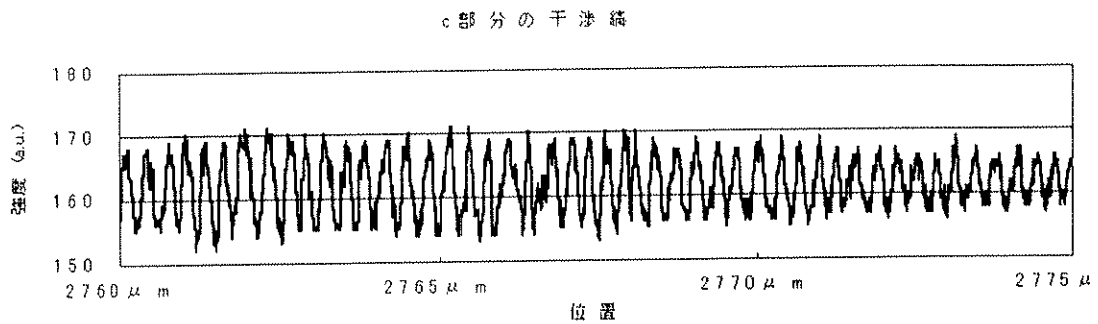


図 6.4.9 図 6.4.7 に示している部分の干渉縞の部分拡大図

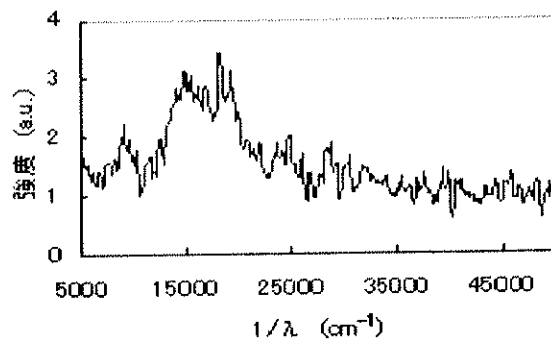


図 6.4.10 図 6.4.7 の b 部分の干渉縞をフーリエ変換によって得られたスペクトルの分布

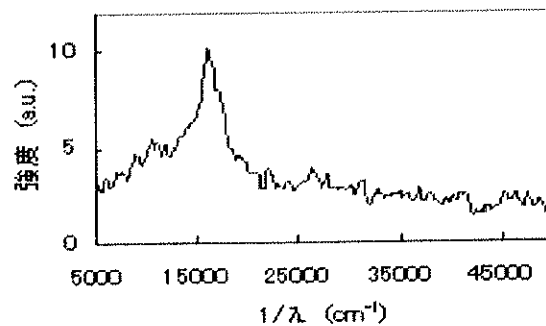


図 6.4.11 図 6.4.7 の c 部分の干渉縞をフーリエ変換によって得られたスペクトルの分布

## 6.5 考察

図 6. 4. 10 の b 部分の干渉縞による得られたフーリエスペクトルの分布が図 6. 4. 4 のスペクトルアナライザの測定結果に、図 6. 4. 11 の c 部分の干渉縞による得られたフーリエスペクトルの分布は図 6. 4. 5 のスペクトルアナライザの測定結果に、それぞれ形が似ているが、位置がずれている。このずれについて以下のように検討した。

インターフェログラムの解析範囲の影響：

今回の場合、適当な窓関数を掛けてインターフェログラムを取り出した。図 6. 5. 1 のように、取ったデータがずれた場合、フーリエ変換のシフト則より、位相の変化があるが、スペクトルの形、位置に影響しない。

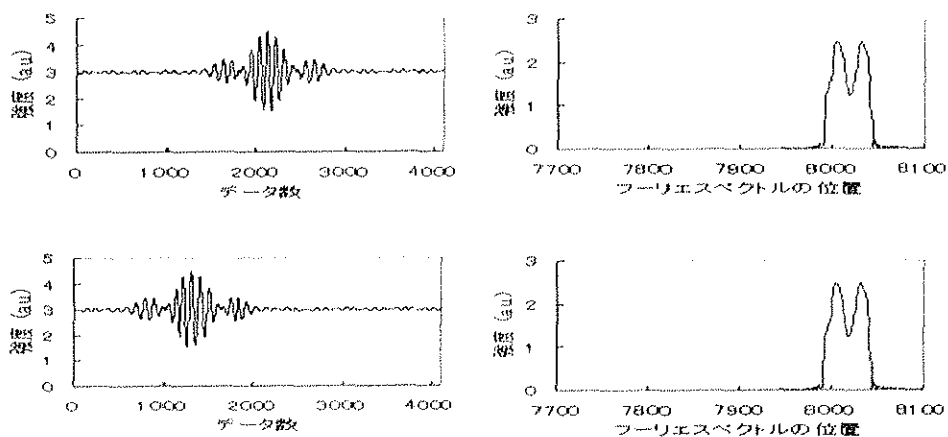


図 6. 5. 1 インターフェログラムの解析範囲の影響

強度のムラによる影響：

光源の不安定性などによるインターフェログラムが傾いてしまった場合、図 6. 5. 2 のように傾きが小さい場合、多少形が崩れるが、まだ識別できる。しかし、傾きが大きくなるにつれて、だんだん識別しにくくなってしまふ。フーリエ変換の線形性から、スペクトルの幅は変わらないが、縦方向の強度（すなわち形）に影響する。

測定されるインターフェログラムの幅変化による影響：

各層の面の平滑度、平行度、傾きによりインターフェログラムの幅が変化した場合、同じ走査間隔でデータを取っても得られたインターフェログラムの幅が変わってしまう。図 6. 5. 3 のように、幅が  $1/2$  になった場合と  $1/4$  になった場合、スペクトルの形と位置が変わる。この辺について、フーリエ変換の相似則から、

スペクトルの縦横の両方向に（すなわち、スペクトルの強度と位置）影響を与える。

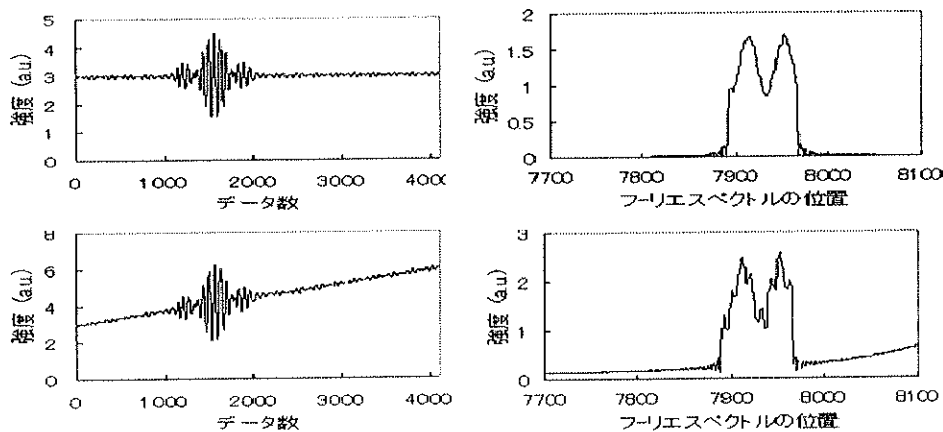


図 6.5.2 強度のムラによる影響

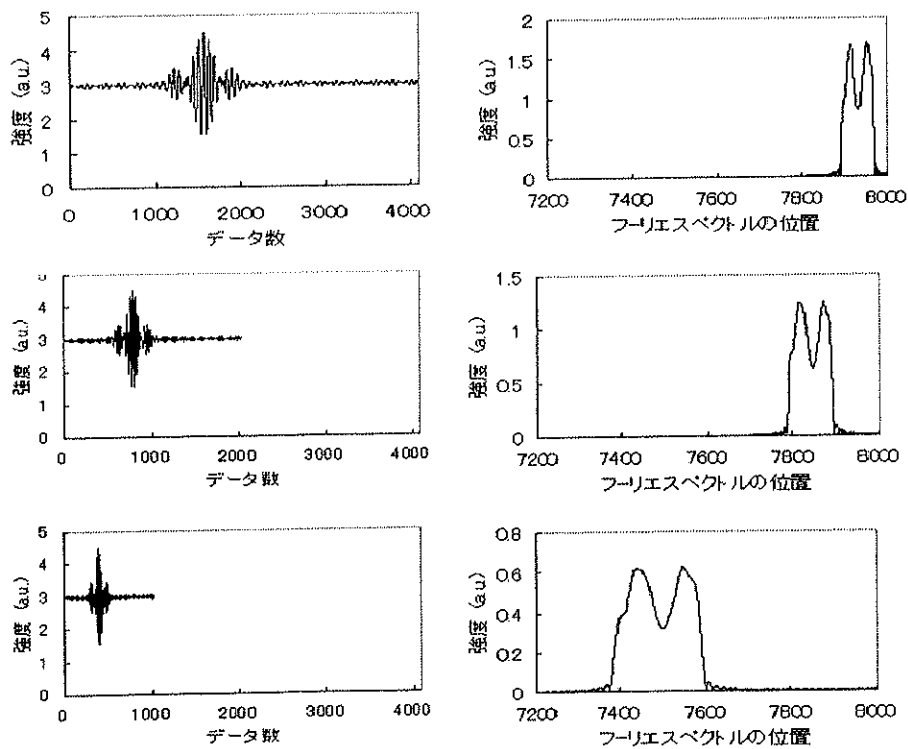


図 6.5.3 インターフェログラムの幅変化による影響

測定されるインターフェログラムの幅変化とスペクトル位置の関係：

測定されるインターフェログラムの幅変化がスペクトル位置にどのぐらいの影響を与えるか調べた。図6.5.4のように波長650nmについて、干渉縞の幅比率が上がった場合、スペクトルの位置への影響は小さいが、干渉縞の幅比率が下がった場合、影響を大きく受ける。

図6.4.11のc部分の干渉縞による得られた測定結果は図6.4.5のスペクトルアナライザの測定結果と比べて、全体的に波長の短い方にずれたので、元の干渉縞の幅より小さく取ってしまい、結果に影響を与えと考えられる。それは各層の面の平滑度、平行度、傾きによるインターフェログラムの幅が変化し、同じ走査間隔でデータを取っても得られたインターフェログラムの幅が変わってしまい、求めたスペクトルの位置に影響を及ぼす。

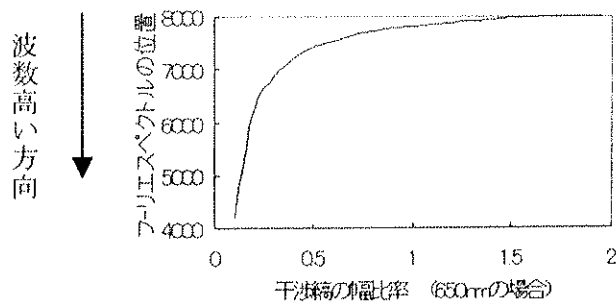


図 6.5.4 幅変化とスペクトル位置の関係

そのため、やむを得ない場合、インターフェログラムの幅を参照鏡で調整して、元の幅より大きく取った方が結果に影響を与えにくい。しかし、元の幅より大きくとると、スペクトルが波長の長い方にずれ、フーリエスペクトル分解能が低くなって再現できない場合がある。図6.5.5に示す波長とフーリエスペクトル分解能との関係から、横軸の各100nmの波長差に対し、フーリエスペクトル空間で対応されるデータ数は波長が長くなると、対応されるスペクトルが少なくなり、スペクトルの幅が狭くなる。そして、対応できないスペクトルが出てきて、形を再現することができなくなる。解析データ数を増やして、対応するスペクトルを求めることができるが、求められたスペクトルの全体的な形が変形してしまう。

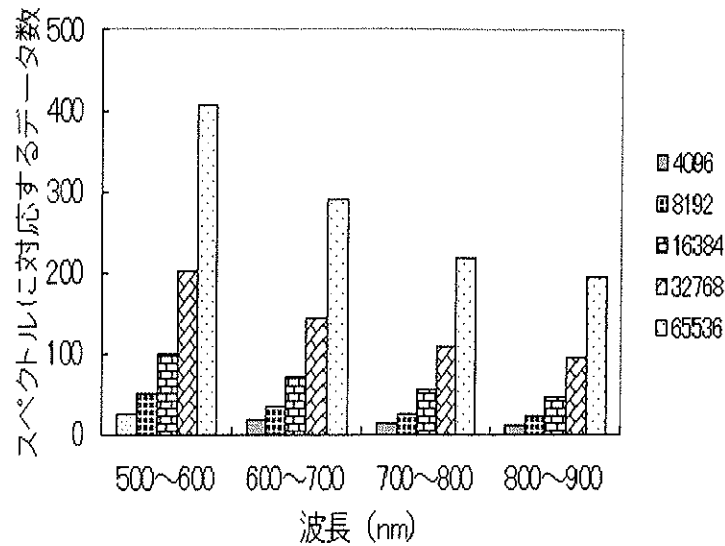


図 6.5.5 波長に対するフーリエスペクトルの分解能

## 6.6 結論

スペクトルの狭い波長フィルターを用い、各波長より得られた干渉縞をフーリエ変換し、得られた結果は各波長にフーリエ空間では対応する位置に出力されることを示した。本測定において、ワイドバンドスペクトルを持つカラーフィルターについても同様のことが言え、この方法を用いることで、多層構造物の厚さと吸収スペクトルを同時に測定することができた。効率のいい測定、機器のコンパクト化、デバイス製作費用の削減に役立つと思われる。

### 参考文献

1. M. Itoh, R. Yamada, R. Tian, M. Tsai and T. Yatagai: Opt. Rev., 2 (1995) 135.
2. G. Häusler and M. W. Lindner: Journal of Biomedical Optics, 3 (1998) 21.

3. 谷田貝豊彦：“光とフーリエ変換”、朝倉書店、1992.
4. B. S. Lee and T. C. Strand: Appl. Opt. 29 (1990) 3784.
5. G. S. Kino and S. S. C. Chim: Appl. Opt. 29 (1990) 3775.
6. T. Dresel, G. Häusler and H. Venzke: Appl. Opt. 31 (1992) 919.
7. K. Takada, I. Yokohama, K. Chida and J. Noda: Appl. Opt. 26 (1987) 160.
8. B. L. Danielson and C. D. Whittenberg: Appl. Opt. 26 (1987) 2836.
9. R. C. Youngquist, S. Carr and D. E. N. Davies: Appl. Lett. 12 (1987) 158.
10. W. Watanabe, Y. Masuda and K. Itoh: Proc. SPIE 3261 (1998) 278.
11. K. Itoh, W. Watanabe and Y. Masuda: Proc. SPIE 3261 (1998) 305.