研　究　速　報
UDC 681.7.013.8

光ヘテロダイン顕微鏡の奥行方向分解能

Longitudinal Resolution of Optical Heterodyne Microscope

尾　﨑　政　男*・藤　井　陽　一*
Masao OZAKI and Yoichi FUJII

1. はじめに

光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡は，光ヘテロダイン検波すなわち，信号光と参照光との差の周波数成分を取り出す検波方式の有する結像作用を利用したものである．その原理・特徴などについて，最初の提案[1]以来多くの研究がなされてきた．しかし，奥行方向分解能については，今まで適切な実験がなされずにきたが，今回測定に適当な試料を工夫し実験結果を得た．

さらに，信号光・参照光共にガウス波の場合の分解能の理論値を得たので，あわせて報告する．

2. 分　解　能

光ヘテロダイン検波では，試料各点からの信号光のうちで，参照光との位相波面が光検出器の受光面上で一致しているものの差周波数成分が卓越して検出され，一致していないときには受光面全体としては打ち消され検出されない[2),3)]．つまり図1のように角周波数ωの光を光学顕微鏡の対物レンズで絞り球面波の参照光とし，角周波数$\omega+\Delta\omega$の光を照明光とする．照明された試料の各点から出る球面波の中で，参照光球面波の中心とビーム・スプリッタを介して対称の位置にある点からの光と参照光とのビート成分のみが際だって検出される．

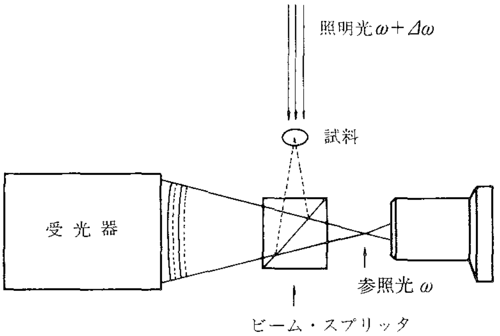

図1　光ヘテロダイン検波による結像

*東京大学生産技術研究所　第3部

図2のように光検出器の受光面を半径aの円形として，その中心を通り受光面に垂直にz軸をとる（なお，以下の考察では，信号光源の位置というのは，これと等価なビーム・スプリッタによる虚像の位置のことであり，また，ビーム・スプリッタの屈折率は考慮しない）．光検出器のヘテロダイン成分の出力電力P_Hは

$$P_H=\alpha\left|\int_{受光面} A_S{}^*(\boldsymbol{r})A_R(\boldsymbol{r})h(\boldsymbol{r})d^2\boldsymbol{r}\right|^2 \quad (1)$$

ここで$A_S(\boldsymbol{r})$，$A_R(\boldsymbol{r})$：受光面に入射する信号光および参照光の振幅，$h(\boldsymbol{r})$：受光面の振幅感度分布関数，α：光検出器の量子効率・増倍率・負荷抵抗等により与えられる定数，積分は受光面の全領域にわたって行う．以下において添字Rは参照光，添字Sは信号光に関するものであることを示す．また，両光源の波長については$\lambda_R\simeq\lambda_S=\lambda$と近似する．

入射光の振幅はHuygens-Fresnelの原理により

$$A(\boldsymbol{r})=\frac{jk}{2\pi}\int_{光源面} G(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{r}')f(\boldsymbol{r}')d^2\boldsymbol{r}' \quad (2)$$

$f(\boldsymbol{r}')$：光源の振幅分布関数，$G(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{r}')$：Green関数今の場合，近軸近似を用いると，波数をkとして，

$$G(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{r}')=e^{jk|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|}/|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|$$
$$\simeq\exp\{jkz'+j(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}')^2{}_\perp/2z'\}/z' \quad (3)$$

（ただし$\boldsymbol{r}$のz座標は受光面なので0としている．）

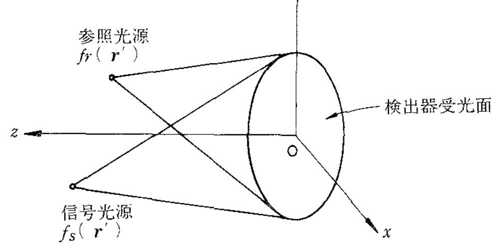

図2　信号光・参照光および受光器の座標関係

分解能を P_H の最大値Qの半値全幅で定義すると，i）信号光・参照光共に点光源の場合，ii）信号光：点光源，参照光：ガウス波の場合についてはすでに求められている[4]．

i）信号光・参照光：共に点光源の場合

$$f_S(\boldsymbol{r}')=\delta(\boldsymbol{r}'-\boldsymbol{r}_S),\quad f_R(\boldsymbol{r}')=\delta(\boldsymbol{r}'-\boldsymbol{r}_R) \tag{4}$$

$$h(\boldsymbol{r})=\exp(-\boldsymbol{r}^2/a_g^2) \tag{5}$$

ここで振幅感度分布関数をガウス型で近似したのは解析解を容易に得るためであり，a_g は実効的な開口径である．横方向分解能 B_T は $z_S=z_R$ のときを考えればよく，

$$P_{HT}=\exp\{-2(ka_g\Delta/2z_R)^2\}Q \tag{6}$$

ただしΔ：両点光源間の距離

より，波長をλとすれば，

$$B_T=\sqrt{2\ln 2}\lambda z_R/\pi a_g \tag{7}$$

奥行方向分解能 B_L は両点光源が z 軸上にあるときを考えて，

$$P_{HL}=[1+\{ka_g^2(1/z_R-1/z_S)/2\}^2]^{-1}Q \tag{8}$$

より，$|z_R-z_S|\ll z_R,\ z_S$ とすれば

$$B_L=2\lambda z_R^2/\pi a_g^2 \tag{9}$$

両者共点光源の場合には，実は振幅感度分布関数をガウス型にせず rect 関数

$$h(\boldsymbol{r})=\begin{cases}1 & |\boldsymbol{r}|\leqq a\\ 0 & |\boldsymbol{r}|>1\end{cases} \tag{10}$$

としても解析的に求まり，$v=2\pi a\Delta/\lambda z_R$ として，

$$P_{HT}=[2J_1(v)/v]^2Q \tag{11}$$

$$B_T=1.616\lambda z_R/\pi a \tag{12}$$

$$P_{HL}=[\mathrm{sinc}\{\pi a^2(1/z_S-1/z_R)/\lambda\}]^2Q \tag{13}$$

$$(\mathrm{sinc}(x)=\sin x/x)$$

$$B_L=5.566\lambda z_R^2/\pi a^2 \tag{14}$$

$h(\boldsymbol{r})$ をガウス型で近似したときの分解能をこの場合と一致させるための a_g 値に対する補正係数は，それぞれ，

$$\gamma_T=a_{gT}/a=0.7286,\quad \gamma_L=a_{gL}/a=0.5994 \tag{15}$$

ii）参照光源をガウス波とした場合

$$f_S(\boldsymbol{r}')=\delta(\boldsymbol{r}'-\boldsymbol{r}_S)$$

$$f_R(\boldsymbol{r}')=A_R\sqrt{1/\pi\omega_{R0}^2}\exp(-\boldsymbol{r}'^2/\omega_{R0}^2)$$

$$h(\boldsymbol{r})=\exp(-\boldsymbol{r}^2/a_g^2)$$

として，

$$B_T=(\sqrt{2\ln 2}\lambda z_R/\pi a_g)\sqrt{1+(\pi a_g\omega_{R0}/\lambda z_R)^2} \tag{16}$$

$$B_L=(2\lambda z_R^2/\pi a_g^2)\{1+(\pi a_g\omega_{R0}/z\lambda)^2\} \tag{17}$$

iii）信号光・参照光共にガウス波の場合

a）奥行方向分解能

光源の中心が共に z 軸にある状況を考えればよいので，

$$f_S(\boldsymbol{r}')=A_S\sqrt{1/\pi\omega_{S0}^2}\exp(-\boldsymbol{r}'^2/\omega_{S0}^2)$$

$$f_R(\boldsymbol{r}')=A_R\sqrt{1/\pi\omega_{R0}^2}\exp(-\boldsymbol{r}'^2/\omega_{R0}^2)$$

$$h(\boldsymbol{r})=\exp(-\boldsymbol{r}^2/a_g^2)$$

したがって（2），（3）より参照光について

$$A_R(\boldsymbol{r})=\{jk\omega_{R0}A_R/2\sqrt{\pi}z_R(1-j/\mu_R)\}\times\exp(jkz_R-\boldsymbol{r}^2/u_R^2) \tag{18}$$

ここで

$$1/u_R^2=(1+j/\mu_R)/(1+\mu_R^2)\omega_{R0}^2-jk/2z_R \tag{19}$$

$$\mu_R=2z_R/k\omega_{R0}^2 \tag{20}$$

信号光についても添字をすべてRからSに置き換えることで得られる．

$$\int_{受光面} A_S^*(\boldsymbol{r})A_R(\boldsymbol{r})h(\boldsymbol{r})d^2\boldsymbol{r}\ \propto\ \omega^2 \tag{20}$$

$$ここで\ 1/\omega^2=1/u_R^2+(1/u_S^2)^*+1/a_g^2 \tag{21}$$

なお以上の計算において，z_R ~数 cm，ω_{R0} ~数 μm なので，$k/2z\ll 1/\omega_{R0}^2$ を使い微小項を落とした．

したがってヘテロダイン出力電力 P_{HL} は，

$$P_{HL}=\left[1+\left\{\frac{k}{2}\left(\frac{1}{z_S}-\frac{1}{z_P}\right)\Big/\left(\frac{1}{\omega_{R0}^2\mu_R^2}+\frac{1}{\omega_{S0}^2\mu_S^2}+\frac{1}{a_g^2}\right)\right\}^2\right]^{-1}\times Q \tag{22}$$

奥行方向分解能は $|z_S-z_R|\ll z_S,\ z_R$ として

$$B_L=(2\lambda z_R^2/\pi a_g^2)\{1+(\omega_{R0}^2/z_R^2+\omega_{S0}^2/z_S^2)\pi^2a_g^2/\lambda^2\} \tag{23}$$

括弧の中の第2項以降が光源が拡がっていることによる点光源からのずれを表す．

b）横方向分解能

光源面の両Z座標は同じにとり，参照光源の中心は z 軸にとり，信号光源の中心は x 軸方向にΔだけずれている場合を考える．

$$f_R(\boldsymbol{r}')=A_R(1/\sqrt{\pi\omega_{R0}^2})\exp(-\boldsymbol{r}'^2/\omega_{R0}^2)$$

$$f_S(\boldsymbol{r}')=A_S(1/\sqrt{\pi\omega_{S0}^2})\exp[-\{(x'-\Delta)^2+y'^2)/\omega_{S0}^2]$$

（2），（3）式よりそれぞれ

$$A_R(\boldsymbol{r})=\{jk\omega_{R0}A_R/2\sqrt{\pi}z_R(1-j/\mu_R)\}\ \exp(jkz_R-\boldsymbol{r}^2/u_R^2) \tag{24}$$

$$1/u^2=(1/\omega_{R0}^2)(1+j/\mu_R)/(1+\mu_R^2)-jk/2z_R \tag{25}$$

$$\mu_R=2z_R/k\omega_{R0}^2 \tag{26}$$

$$A_S(\boldsymbol{r})=\frac{1}{\sqrt{\pi\omega_{S0}^2}}\,\frac{jkA_S}{2z}\,\frac{e^{jkz+j\frac{kr^2}{2Z}-\frac{\Delta^2}{\omega_{S0}^2}}}{1/\omega_{S0}^2-jk/2z}\times\exp\left[\frac{1}{4\{1/\omega_{S0}^2-jk/2z\}}\left\{-\frac{k^2(x^2+y^2)}{z^2}-4\frac{jk\Delta x}{z\omega_{S0}^2}+4\Delta^2/\omega_{R0}^4\right\}\right] \tag{27}$$

(24), (27)より

$$\int A_S{}^*(\boldsymbol{r})A_R(\boldsymbol{r})h(\boldsymbol{r})d^2\boldsymbol{r}$$

$$\propto \exp\left[-\frac{\Delta^2}{{\omega_{S0}}^2}+\frac{\Delta^2}{\left(\frac{1}{{\omega_{S0}}^2}-\frac{jk}{2z}\right){\omega_{S0}}^4}-\frac{k^2\Delta^2}{4\left\{\frac{1}{u^{2*}}-\frac{jk}{2z}-\frac{k^2}{4\left(\frac{1}{{\omega_{S0}}^2}-\frac{jk}{2z}\right)z^2}+\frac{1}{{a_g}^2}\right\}\left\{z-j\frac{k{\omega_{S0}}^2}{2}\right)^2}\right] \quad (28)$$

(28)から

$$P_{HT}=\exp\left[-\frac{k^2\Delta^2}{2z^2}\cdot\frac{1/(\omega_{R0}\mu_R)^2+1/{a_g}^2}{1/(\omega_{R0}\mu_R)^4+2/(a_g\omega_{R0}\mu_R)^2+1/{a_g}^4}\right]Q \quad (29)$$

となるので

$$B_T=\sqrt{2ln2}\,\frac{\lambda z}{\pi a_g}\sqrt{\frac{(a_g k^2{\omega_{R0}}^2/4z^2)^2+(k\omega_{R0}/a_g z)^2/2+1/{a_g}^4}{(k\omega_{R0}/2z)^2+1/{a_g}^2}} \quad (30)$$

3.　実験および測定結果

測定系を図3に示す．光源はHe-Neレーザ（波長0.6328μm)を用い，照明光の周波数シフトは，電歪振動子に鏡を取り付け，ドップラー効果により行っている．

i)理想的な分解能実験

信号光・参照光共に光学顕微鏡の100倍の対物レンズを用いて集束した．そして，ヘテロダイン出力が最大の位置から参照光集束用の対物レンズを微動装置により，横方向および奥行方向に移動させて半値全幅を求めた．結果は，

$B_T=1.8\mu$m

$B_L=41.5\mu$m

このとき使用した対物レンズによる最小ビーム径は1.3μm, $z=3.3$cm, $a=2.62$cm, a_g値に対する補正係数として点光源のときと同じと近似して(15)を採用すれば，理論値は，(30), (23)より $B_T=1.5\mu$m, $B_L=35.3\mu$m となりよく一致することがわかる．

ii)試料に基づく分解能実験

試料は，異なる図形が現像されている2枚のフィルムをカバーグラス（厚さ約150μm）をはさんで貼り合わせて作成した．検鏡に用いた集束用の対物レンズは共に40倍である．図4の右の2枚の写真は，試料の光ヘテロダイン顕微鏡によるストレージスコープ上の像をインスタントカメラで撮ったものである．上と下の写真では，撮影時の試料台の高さが150μm離れている．上の写真では，上のフィルム上の図形（点線による円で，左上の図のようなもの)が見えているが，下の写真では，下のフィルム上の図形（点線による十字形で，左下の図のような

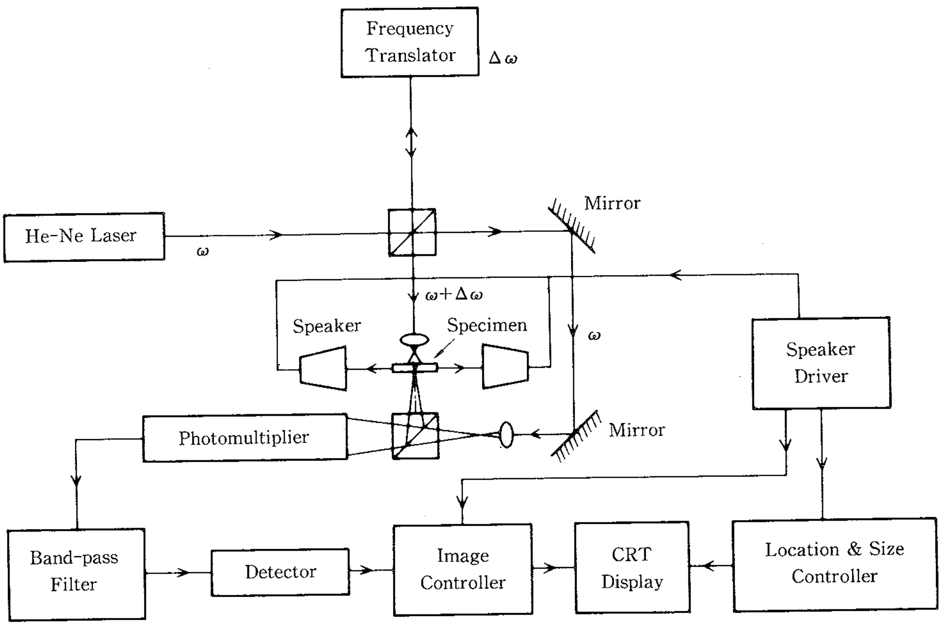

図3　光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡装置

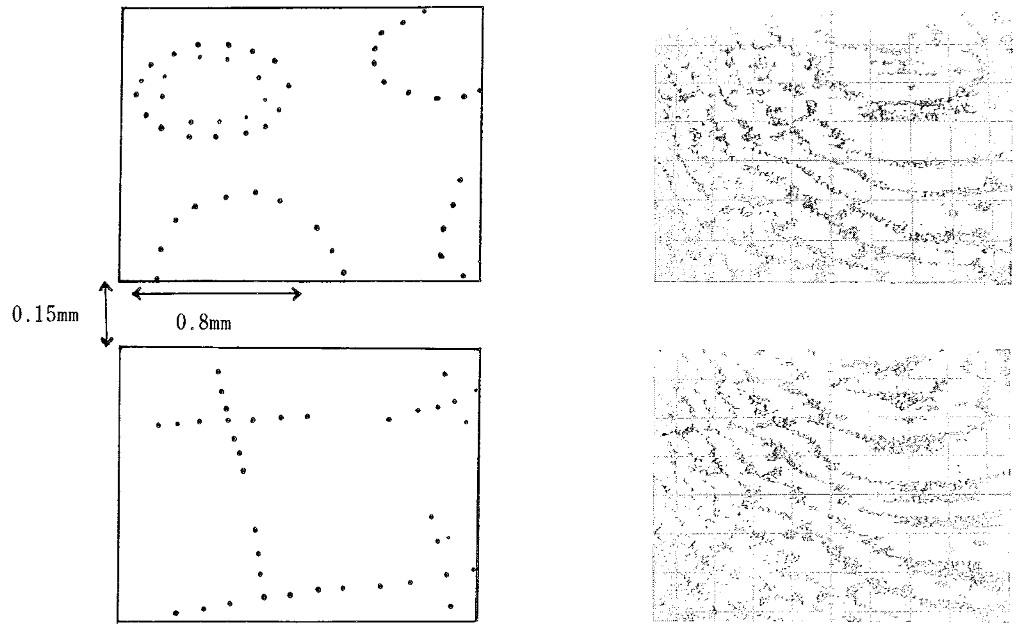

図4　光ヘテロダインレーザ顕微鏡の奥行方向分解能

もの）が見えている．つまり，奥行方向に分解能があることが，実際に確認できる．

4．結　　　論

参照光・信号光が共にガウス波の場合の分解能の表式が得られ，実験と割合によく一致した．これは，対物レンズの最小ビーム径のより正確な値が得られれば，もっと一致すると思われる．そして，実際の試料を用いた実験で奥行方向分解能が確かめられた．奥行方向分解能は，おおよそビームの最小径の2乗で効くので，ピンホールなどの援用により，大幅に改善できる可能性がある．そのときには，層状構造をもつ試料の各層の状態が把握でき，たとえば，カラーフィルムの各層の乳剤の分布状況などの観察に役立つと期待される．

本研究にあたり，助言を下さった富士写真フィルム株式会社の織田昌平博士，岡上豊氏，ならびに，試料を作成して下さった大学院生神山博幸・岩島徹両氏に感謝致します．　　　　　（1986年9月24日受理）

参　考　文　献

1）藤井：電子通信学会全国大会（昭和47年度）943
2）滝本・藤井：電子通信学会量子エレクトロニクス研究会資料ＱＥ 72―48（1972）
3）Fujii, Y., H.Takimoto and T.Igarashi：Opt. Comm. **38**（1981）85
4）滝本・藤井：電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料ＯＱＥ 74―84（1975）