

液晶による波面補正素子とその応用

橋本 信幸

Liquid-Crystal Active Optics and Their Applications

Nobuyuki HASHIMOTO

Liquid crystal devices are suitable for spatial light modulators, since their half-wave voltage is only a few volts and can be driven directly by CMOS ICs. In this paper, we describe liquid crystal active optics with segmented ITO patterns. ITO segments are connected with smaller, highly resistive ITO links that produce voltage drops between the larger ITO segments. The voltage distribution causes a phase distribution across the modulator that can be generated by a simple 3-terminal input. We also describe application of the device to optical pickups in order to dynamically compensate optical aberrations. These devices are now being sold commercially in the market place.

Key words: liquid crystal, active optics, compensator, aberration, optical pickup

液晶素子は時計や電卓からスタートし、今やフラットディスプレイとして大きなマーケットを築いている。他方で、液晶の半波長電圧がわずか数Vであるということは光波の変調素子としてすぐれた素子であることを示唆している。この性質に着目し、筆者らは1980年代からマトリクス駆動液晶でのダイナミックなホログラフィー¹⁾や、分割画素構造をもつ液晶素子の光ピックアップへの応用²⁾を研究してきた。そして、2000年には光ピックアップ用液晶収差補正素子を量産化した。

マトリクス電極構造をもつ液晶素子は、原理的に任意の位相分布を発生することが可能である。しかし、光学系の波面補正を考えた場合、コマ収差等の特定パターンを考慮すればよい。また、瞳サイズも固定のため、数画素から数十画素の分割電極で対応可能である。本稿では、液晶による波面制御の基礎および分割電極を用いた波面補正素子と、その応用に関して解説する。

1. 液晶素子による光波面制御の基礎³⁾

本章では、波面補正用として代表的な液晶分子が平行

(ホモジェニアス)配向された素子の基本構造と、その光学特性に関して概説する。

1.1 平行配向型液晶位相変調素子

図1に、平行配向型液晶素子の基本構造を示す。両面に透明電極(ITO)が塗布されたガラス基板に配向膜が塗布され、液晶分子が平行に配向される。液晶分子の重心はZ軸方向にそろえて描いたが、ネマチック相ではどの方向にもそろっていない。ここでITOが上下二分割されているとし、上半分のITOに電圧を加えれば液晶分子がZ方向に傾く。このとき、配向方向と同じY方向の直線偏光に対する実効屈折率は上側では n_o (短手方向)に近く、また、下側は n_e (液晶分子長手方向)のままなので、液晶層厚を d とし($n_e - n_o$)を Δn とすると、最大で Δnd の位相変調を行える。中間電圧では液晶は中間状態に傾き、連続的な位相変調が可能である。

ITOを適当に分割し電圧分布をつくれば、原理的に任意の位相変調パターンをつくることができる。このとき、入射直線偏光は保存されて出射する。また、配向方向と直交する直線偏光に対しては位相変調作用がない。そのた

シチズン時計(株)MHT 開発本部 (〒359-8511 所沢市下富 840) E-mail: hashimoto@citizen.co.jp

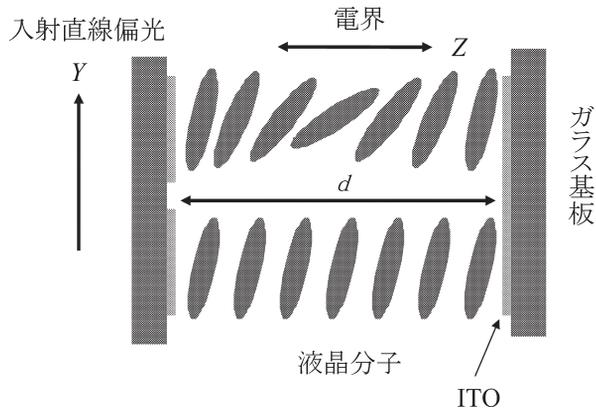


図1 平行配向型液晶素子による位相変調の原理。

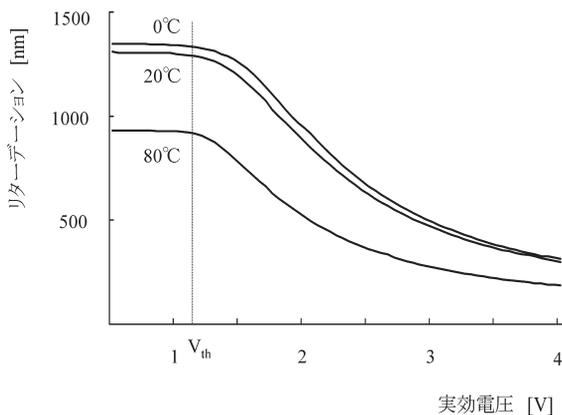


図2 液晶素子の電圧対位相変調特性。Δn:0.2, セルギャップ d:6.5 μm。

め、任意の偏光に対する変調では、配向軸が直交する2素子を重ね合わせる等の工夫が必要である。

1.2 位相変調特性

図2に、液晶素子の電圧対位相変調特性を温度特性と合わせて示す。縦軸はp偏光(変調される方向)とs偏光に対する光路長差(リターデーション)で、液晶層厚6.5 μm, Δnが0.2の場合である。図2より閾値電圧 V_{th} を超えると、リターデーションが低下するがゼロにはならない。これは図1に示すように、配向界面近傍の分子は強いアンカリング力により動かないからである。また、液晶の種類にもよるが、40°C近辺からリターデーションは低下をはじめめる。

液晶の電場応答性はセル厚 d の2乗に反比例する。一例として、単純駆動の場合、6.5 μmの液晶では25°Cで30 ms, 0°Cで100 ms程度である。これはフル変調の場合で、中間状態の変調では逆に遅くなる。また、電圧緩和による立ち下がりが立ち上がりより遅い。

液晶はアクティブな干渉フィルター特性をもつ。しか

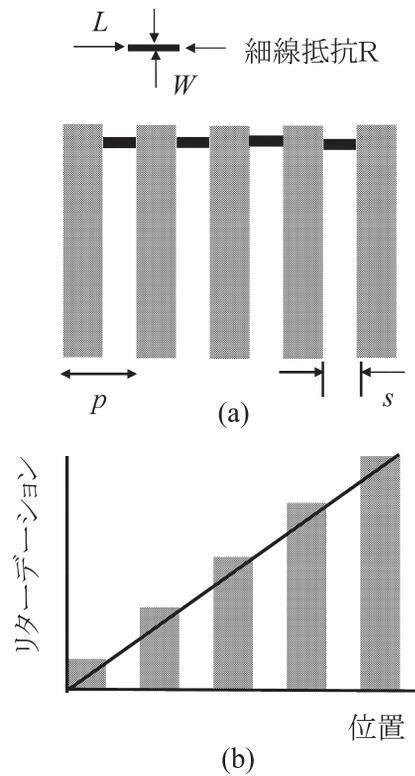


図3 液晶アクティブプリズム。(a) 分割ITOパターン、(b) 位相分布。

し、膜設計を最適にすることで、駆動による透過率変動を±1%程度以下に抑えられる³⁾。

2. 高抵抗接続された画素電極を用いた液晶位相変調素子とその特性⁴⁾

本章では、高抵抗接続された画素電極をもつ液晶素子の動作特性を、理解しやすい液晶アクティブプリズム⁵⁾について解説する。アクティブプリズムは、入射光を光軸と垂直方向に偏向できるためティルト収差の補正素子とも考えられる。

図3(a)に、液晶アクティブプリズムを実現するITOパターンを示す。ピッチ p 、スペース s の格子形状をしたITOが抵抗値 R をもつ細線化されたITOで接続されている。抵抗値 R は線幅を W 、線長を L とすれば L/W に比例する。対向基板のITOには基準電位が与えられる。したがって、電極間に V_1 と V_2 の電位を加えれば、液晶層に階段状の電位分布を与えることができる。このとき図2に示す位相変調の線形範囲で使えば、液晶層には図3(b)で示される階段状の位相分布が発生する。これは、斜線で示したプリズム成分と残りの鋸歯状格子成分に分解される。

一例として、電極ピッチ p が23.4 μm、電極スペース s

が $3\ \mu\text{m}$ 、電極本数は 64 本で液晶層の Δnd が $3000\ \text{nm}$ の場合、液晶線形応答範囲で約 $\pm 1\ \text{mrad}$ の偏向が可能である。本素子は AR コートをした場合に光利用率は 95% 以上が得られ、駆動による透過率変動も $\pm 1\%$ 程度である。また、回折格子の成分による一次回折光割合も 1% 以下である。

3. 液晶波面制御素子を用いたアクティブ収差補正³⁾

光ディスクやデジタルカメラ等の高性能化に伴い、その収差補正はより困難を増している。また、静的状態で収差をバランスさせても動的な状態では対応できない場合もある。そのためアクティブな収差補正が望まれ、一部の光ディスクでは液晶を用いた収差補正が実用化されている。本章では、ツェルニケ収差をベースとした液晶収差補正に関して紹介する。

3.1 ツェルニケ収差^{6,7)}

任意の波面（たとえば波面収差）を考えた場合、その形状は一般に複雑である。しかし、直交展開を用い基本要素（基本波面）の和で表せば、各項（波面）は独立して取り扱うことが可能である。このような手法は、複雑な物理現象を単純化するためにしばしば用いられる。ツェルニケ収差を表すツェルニケの多項式も直交多項式で、次数で分類整理された項は基本波面式となりコマ収差、球面収差等と対応する。ここで、ツェルニケの多項式の導出として、瞳位置 (μ, ν) で波面 $W(\mu, \nu)$ の正規直交展開を考える。回転対称光学系として極座標表示を用いれば、 ρ, θ の独立性から $W(\rho, \theta)$ は $r(\rho)$ と $f(\theta)$ の積となる。ここで、 $f(\theta)$ は 2π を周期とするから、 $\exp(\pm im\theta)$ (i は虚数単位) で直交展開される。また、ラジアル方向の正規直交展開は、ヤコビ (Jacobi) の多項式 $R_{m,n}(\rho)$ が用いられる (m, n はともに自然数)。したがって、 $W(\rho, \theta)$ は $\exp(\pm im\theta) * R_{m,n}(\rho)$ と正規直交展開され、ツェルニケの多項式が導出される。

図 4 に、代表的な三次ツェルニケ収差の単位波面と極座標 (ρ, θ) 表示された式を示す。各波面は互いに直交系をなし、平均値がゼロとなるように低次の項も含む。たとえば、三次球面収差式にはパワーである ρ^2 と DC 成分 1 が含まれている。これは、物理的に三次球面収差がある場合はデフォーカス (ρ^2) することで収差を最小にできることを示す。ツェルニケ収差は、像座標も含み定義されるザイデル収差とは異なり、瞳座標のみで定義されている。

次節に示す光ディスクの収差補正では、対物レンズの瞳面でほぼ光軸上の波面収差を補正する。このとき、ツェルニケ収差に基づくコマ収差や球面収差の波面補正を行う。

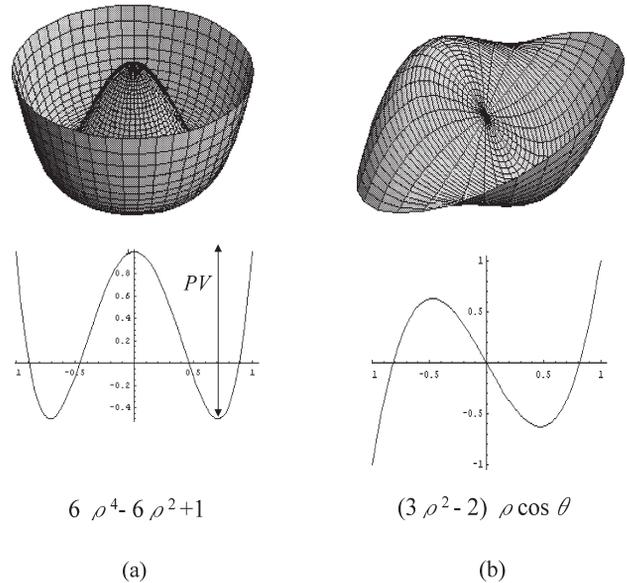


図 4 ツェルニケの収差波面図とその式。(a) 三次球面収差、(b) 三次コマ収差。

3.2 光ディスクにおけるアクティブ収差補正⁸⁾

光ディスクがより短波長の光源そして高 NA の対物レンズに向かうにつれ、その収差補正は困難を増している。光ディスクはディスク基板背面にあるピットを読み書きする。そのため、対物レンズは基板厚みも考慮しほぼ無収差で設計される。したがって、基板が傾くとコマ収差が発生する。その収差をレンズの入射瞳面近傍に換算したツェルニケの三次コマ収差は基板厚みとディスク傾きに比例し、さらに対物レンズ NA の 3 乗に比例する。例として、NA が 0.65 でディスク厚 $0.6\ \text{mm}$ の DVD の場合、ディスクが 1 度傾くと約 $100\ \text{m}\lambda_{\text{rms}}$ の三次コマ収差が発生する。このとき、レンズの入射瞳位置に液晶素子を配置し、コマ収差量に応じた逆の位相分布を与えれば相殺することができる。

図 5 に、液晶素子を用いたコマ収差補正の原理を示す。(a) はコマ収差パターンを近似した ITO パターンで三分割されていて、同じ番号は同電位となる。(b) はツェルニケの三次コマ収差波面と、それをデジタル的に近似補正する波面位相分布を X 断面で示している。(c) はその近似補正後の残収差波面を示したもので、40% 程度に圧縮される。実際は (a) のような ITO パターンをもった液晶素子を対物レンズの入射瞳位置に設置し、発生コマ収差と逆の位相分布を与えて入射波面を調整する。各画素を細線化 ITO による電気抵抗で内部接続し、入力電圧を内部で抵抗分割することで画素数にかかわらず引き出し線を 3 本にできる。

図 6 に、収差補正前後の DVD ディスクの RF 信号波形

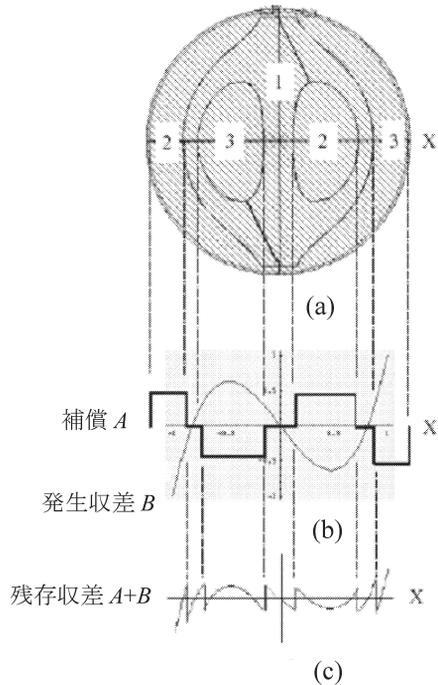


図5 三次コマ収差補正原理. (a) 分割ITOパターン, (b) 発生収差 B とその補償波面 A, (c) 残存波面収差.

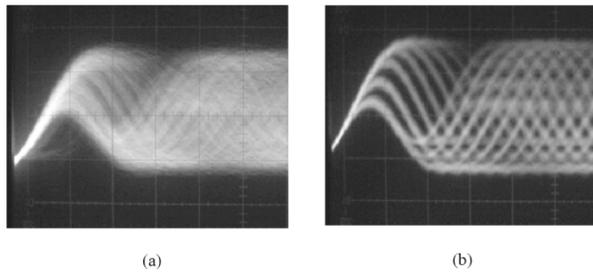


図6 DVDのRF信号波形(アイパターン). (a) 液晶収差補正オフ, (b) 液晶収差補正オン.

(アイパターン)を示す. 液晶収差補正をオンにすることで信号波形が回復しているのがわかる.

また, ディスクの基板厚みが変化した場合に球面収差が発生する. 光ピックアップはオートフォーカスが機能しているが, 焦点位置補正後もさらに三次球面収差が残る. この量は対物レンズNAの4乗に比例し, NA 0.85のBDの場合は, 基板厚みが $1\mu\text{m}$ 変化すると $10\text{m}\lambda_{\text{rms}}$ もの三次球面収差が発生する. 三次球面収差は, 収差パターンを近似した同心円状の分割ITOをもつ液晶収差補正素子で補正可能である. また, 液晶素子が光軸からずれると新たなコマ収差が発生する. したがって, ディスクトラッキングにより対物レンズが動くとき問題になる場合がある. これは, ITO形状を工夫することである程度の対応が可能である⁹⁾.

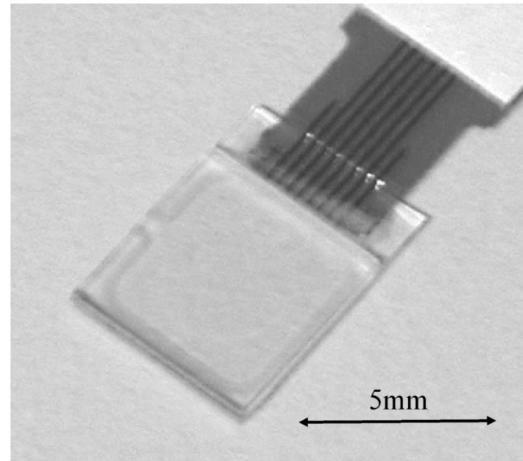


図7 液晶収差補正素子(三次球面収差+三次コマ収差補正).

図7に, 光ピックアップ用液晶収差補正素子の写真を示す. ガラス基板の片側ITOにコマ収差補正パターン, その対面側のITOに球面収差補正パターンが形成され, コマ収差, および球面収差のハイブリッド補正が可能である. 外形は5mm角, 有効径は $3.5\text{mm}\phi$ で -20°C 以下から 80°C を超える温度範囲で動作し, 車載用DVDにも使用された.

4. 液晶アクティブレンズ

焦点距離を変化させることはパワーの収差補正とも考えられ, 光学機器の小型化にともない液体レンズ¹⁰⁾などが提案されている. 液晶を用いた可変焦点レンズも古くから提案され, 基板にフレネル形状¹¹⁾やレンズ形状¹²⁾をもたせたもの, 透明電極をホール形状¹³⁾にしたり高抵抗化¹⁴⁾したものが代表的である. ここでは, 既存の量産プロセスが使用できる分布屈折率レンズを近似した分割ITOをもつ液晶レンズを紹介する.

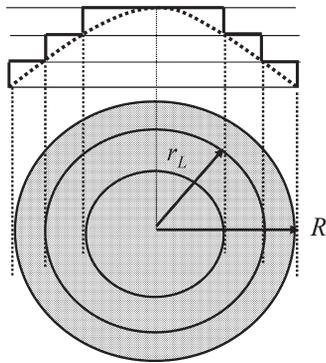
4.1 分布屈折率型レンズ

分布屈折率型レンズはGRINレンズとして知られる導波路型レンズで, 光軸から半径 r 方向に $n(r) = n_s - ar^2$ で表される二乗屈折率分布 $n(r)$ をもつ. ここで n_s は基準(光軸)屈折率, a は定数である. 一次近似で, 係数 a は $1/2fd$ (f は焦点距離, d は導波路長)となる. 例として d を $20\mu\text{m}$, n_s を1.7, 外周部の屈折率を1.5, r を 1.25mm とすると, f は 195mm で凸レンズとなる. この状態で中心と外周の屈折率を逆転させれば, f は -195mm で凹レンズになる.

4.2 液晶量子化分布屈折率型レンズ¹⁵⁾

図8に, 液晶量子化分布屈折率型レンズのITO形状を示す. ゾーンプレート状に分割パターンニングされた各ゾー

屈折率分布： $n - ar^2$



分割ITOパターン

図8 液晶量子化分布屈折率型レンズの分割ITOパターン。

は、同値の高抵抗ITOで接続される。中心と外周の2端子間に電位差を与えれば、量子化された電圧分布を与えることができる。液晶が電圧に線形応答する範囲とし L 番目のゾーン半径 r_L を $R \cdot \sqrt{(L/M)}$ (R は有効径, M はゾーン数) とすれば、屈折率分布を量子化近似した GRIN レンズを実現できる。また、位相変調量を制御することで可変焦点レンズとなる。例として、直径 3 mm, d が 22 μm , Δn が 0.2, 分割数 20 の液晶 GRIN レンズでは、液晶線形応答範囲で約 $\pm 450 \text{ mm} \sim \infty$ までの連続可変焦点が得られる。また、焦点距離が 600 mm になるように電圧設定し、波長 650 nm, ビーム直径 2.7 mm の平行光を入射したとき、スポット直径は 155 μm (半値幅), ストレール比は 80% 以上でマーシャル条件を満たす結像性能が得られた。

図9に、本液晶をデジタルカメラの接写時におけるフォーカス調整に用いた写真を示す。全画角で比較的良好な結像が得られている。

収差補正以外にも、アクティブ波長板や偏光変調素子としての応用も可能である¹⁶⁾。今後は、微細光学構造等を組み合わせることでさらに機能性を高めた素子開発¹⁷⁾を行い、液晶のもつ光制御の可能性を探究していきたい。

文 献

- 1) N. Hashimoto and S. Morokawa: "Real-time electro holographic system using liquid crystal television spatial light modulators," *J. Electron. Imaging*, **2** (1993) 93-99.
- 2) 橋本信幸：特開昭 63-249125 号。

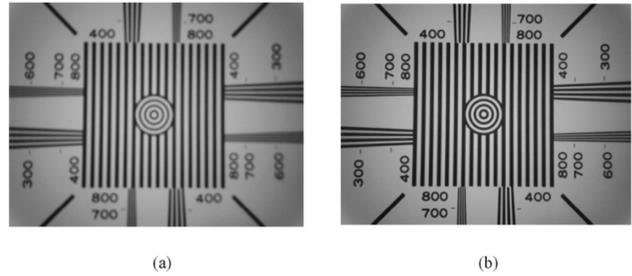


図9 液晶レンズを用いたフォーカス補正。(a) 液晶レンズオフ, (b) 液晶レンズオン。

- 3) N. Hashimoto: *Optical Applications of Liquid Crystals*, ed. L. Vicari (IOP Publishing, 2003) pp. 150-200.
- 4) W. Klaus, M. Ide, Y. Hayano and Y. Arimoto: "Efficient liquid crystal wave front modulator," *Proc. SPIE*, **3015** (1997) 84-92.
- 5) 佐藤慎也, 菊池正美, 庄子隆徳, 橋本信幸: "液晶可変光偏向素子の試作と評価", 第27回光学シンポジウム講演予稿集 (2002) pp. 43-44.
- 6) C.-J. Kim and R. Shannon: "Applied optics and optical engineering," eds. R. Shannon and J. Wyant, *Applied Optics and Optical Engineering, Vol. X* (Academic Press, 1987) pp. 193-221.
- 7) 橋本信幸: "第9章収差編", 光学実務資料集 (情報機構, 2006) pp. 159-171.
- 8) S. Ohtaki, N. Murao, M. Ogasawara and M. Iwasaki: "The applications of a liquid crystal panel for the 15 Gbyte optical disk systems," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1744-1749.
- 9) 橋本信幸: "光ピックアップ用液晶収差補正素子とその軸ずれ対策", 第30回光学シンポジウム講演予稿集 (2005) pp. 67-68.
- 10) B. Berge: "Liquid lens technology for adaptive optics: Principle, physical limitations and applications," 第31回光学シンポジウム講演予稿集 (2006) pp. 67-68.
- 11) S. Sato, A. Sugiyama and R. Sato: "Variable focus liquid-crystal Fresnel lens," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24** (1985) L626-628.
- 12) S. Kowel, P. Kornreich and A. Nouhi: "Adaptive spherical lens," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2774.
- 13) T. Nose and S. Sato: "A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field," *Liq. Cryst.*, **5** (1989) 1425-1433.
- 14) 土屋昌弘, 上原伸一, 神谷武志, 高見英樹, 大坪政司, 井出昌史, 諸川 繁: "液晶を用いた焦点反転素子とその波面補償システムへの適用", *O plus E*, **10** (1998) 1125-1130.
- 15) 橋本信幸, 栗原 誠: "液晶分布屈折率型量子化レンズの特性と可変焦点光学素子への応用", 第31回光学シンポジウム講演予稿集 (2006) pp. 53-54.
- 16) N. Baba, N. Murakami, T. Ishigaki and N. Hashimoto: "Polarization interferometric stellar coronagraph," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1373-1375.
- 17) 仲 秀治, 保坂 康, 佐藤慎也, 橋本信幸, 西原英一郎, 高木康博: "モスアイ構造を用いた液晶光学素子とその特性", 第29回光学シンポジウム講演予稿集 (2004) pp. 41-42.

(2006年10月12日受理)