構造強度解析におけるレーザの応用*

角 誠 之 助**

1. ま え が き

レーザが実現してから 10 数年を経過したが、その間に新しいレーザの開発など基礎的な面はもとより、レーザ光の優れた性質と応用面における豊富な可能性から、応用化の研究も活発に行なわれ、多くの分野でレーザ応用の新しい技術が開発されてきている。

レーザ光には、(1)単色性、可干渉性 (coherency) で、(2)指向性、集束性がよく、(3)エネルギーの空間的、時間的な集中、短いパルス光の発生が可能であるなどの特長がある。レーザ応用はこれらの特長を利用するもので、主な応用分野としては、計測、情報処理、通信、材料加工、医療、分光などがあるが、特に計測は進歩が著しく、非常に広い範囲を含んでいる。

その中で、構造や材料の種々の力学的挙動の解析にはホログラフィ干渉法やスペックル・パターン法などが広範囲に適用されており、粗面物体の変形や振動などのパターン計測が可能であるなど、従来の方法にない大きな利点がある。本稿ではこれらについて解説を行なうが、すでに本誌でも光力学全般に関する展望¹⁾があり、ホログラフィ光弾性法などの詳細については参照されたい。また、関連する文献はきわめて多く、ここでそれらを網羅することはとうてい困難である。代表的なもの、あるいは最近の報告などを主に紹介する。

2. ホログラフィ干渉法

2.1 ホログラフィ 1948 年、英国の GABOR によって創始されたホログラフィ (holography) は、1962 年、米国の LEITH, UPATNIEKS による改良と、レーザの出現によって応用できる技術に発展したが、例えば文献 2), 3) にみられるように NASA などでは、いち早く広範な利用が展開されるにいたった。

ホログラフィの原理については、すでに多くの解説や専門書⁴⁻⁷⁾があるので、ここでは基本的事項のみを

第 1 図 ホログラムの撮影

簡単に述べる。第 1 図は拡散反射物体の場合の原理図で、レーザからの coherent monochromatic light を二つに分け、一方を物体面で反射する物体光 (object beam)、他方を平面鏡で反射する参照光 (reference beam) とし、これらを合わせて写真乾板に露光する。

これを現像処理したものを GABOR はホログラム (hologram) と名付けたが、物体光の振幅と位相の情報が参照光との干渉しまのコントラストとその生ずる位置によって記録されている。この場合、露光量を適当にとれば、ホログラムの振幅透過率は記録された合成光の強度に比例する。このホログラムを元の位置におき、参照光で照射すればホログラム上の干渉しまは参照光を回折し、元の位置に虚像として物体像が再生 (wavefront reconstruction) される。これがホログラフィの原理で、次のように表わされる。

$$\text{物体光: } U_O = A_O e^{i\phi_O}, \text{ 参照光: } U_R = A_R e^{i\phi_R} \quad (1)$$

合成光の強度:

$$I = (U_O + U_R)(U_O^* + U_R^*) \\ = |U_O|^2 + |U_R|^2 + U_O U_R^* + U_O^* U_R \quad (2)$$

再生光:

$$U_R I = A_R (A_O^2 + A_R^2) e^{i\phi_R} + A_O e^{i\phi_O} A_R^2 \\ + A_O e^{-i\phi_O} A_R^2 e^{i2\phi_R} \quad (3)$$

第 2 項が再生される物体光 (虚像) で直接像と呼ばれ、第 3 項はその共役像 (実像)、第 1 項は参照光の方向に直進する透過光である。

このようにして、一つの物体光波面の記録、再生ができるのみでなく、多くの波面の多重記録、再生が可能であり、また物体上の一点がホログラムの全面にわたって記録される redundancy に富む記録法でもある。これらが次に述べるホログラフィ干渉法の基礎となっている。

次に実験技術について簡単にふれておこう。まず、

* 昭和 52 年 4 月 28 日原稿受理 Application of Laser to Structures, Structural Dynamics and Materials Research

** 九州大学工学部航空工学科 Seinosuke Sumi

光源に用いられるレーザの中で最も代表的なのは He-Ne レーザ (波長 $\lambda=6,328 \text{ \AA}$) で、出力 10~50 mW 程度の単一横モード (TEM₀₀) 発振のものが使用される。さらに、高出力の Ar レーザ (5,145 $\text{\AA}$) もある。これらは、いずれも continuous wave (CW) レーザであるが、高速度現象などの測定にはパルス発振のできるルビー・レーザ (6,943 $\text{\AA}$) などが使用される。

感光材としては、高解像力のものが必要であり、代表的なのは Kodak の 649 F 乾板、Agfa-Gevaert の Scientia 乾板で、解像力とともに 2,000 本/mm 以上であるが、感度は後者が高い。また、乾式で、回折効率がよく、多数回の使用が可能なサーモプラスチックも使用されている。

さらに、留意事項としては CW レーザの場合は露光時間が長いので、外部の振動、空気の揺動など外部のじょう乱の防止が必要である。パルス・レーザの場合は問題とならない。また、物体光と参照光の光路差を可干渉距離 (coherence length) 以下 (He-Ne レーザでは 20 cm 程度) にし、それらの強度比を 1: (3~5) 程度にとることなどがあげられる。

2.2 ホログラフィ干渉法の特長 ホログラムによる波面の再生に際して位相関係が完全に再現されるので、再生された波面を用いる干渉測定が実現された。これがホログラフィ干渉法 (holographic interferometry, interferometric holography) で、従来の方法では困難であった 3 次元の粗面物体について、時間的に異なる波面間の干渉 (時間分割干渉) や多くの波面間の干渉 (多重干渉) 測定が可能である。また、基準波面を用いずに物体光波面間の干渉であるため、光学系の収差などが影響しないという大きな利点もあり、ホログラフィ応用の大きな分野を占めている。この中で CW レーザを用いる方法として次の三つがある⁹⁾。

(1) 二重露光法 (double-exposure method) この方法は物体の二つの状態、例えば静的変形の前後での物体光波面を 1 枚の乾板に二重露光する方法で、ホログラムによって二つの物体光波面が同時に再生され、変形分に応じた干渉しまが形成される。

二つの物体光を U_{01}, U_{02} , 参照光を U_R とすれば、(2)式との類似によりホログラムに記録される合成光の強度は

$$I = |U_{01}|^2 + |U_{02}|^2 + |U_R|^2 + (U_{01} + U_{02})U_R^* + (U_{01}^* + U_{02}^*)U_R \quad (4)$$

で与えられる。このホログラムを参照光で照射するとき直接像に対応するのは第 4 項で、 $U_{01} + U_{02}$ に比例する波面が再生される。

いま、静的変形を考え、変形前後での物体光を

$$U_{01} = A_0 e^{ik\phi_{01}}, U_{02} = A_0 e^{ik\phi_{02}}, k = 2\pi/\lambda \quad (5)$$

と表わせば、再生像の強度は次式で示される。

$$I \propto |U_{01} + U_{02}|^2 = 2|A_0|^2 \{1 + \cos k(\phi_{02} - \phi_{01})\} \quad (6)$$

ここで、 $\phi_{02} - \phi_{01} \equiv \Delta$ は変形による物体光の光路長変化であり、変位ベクトルとともに記録時の照明方向および再生像の観測方向に関係する。変位方向が既知の場合は、それと θ_1, θ_2 をなす方向で照明、観測を行えば、 $\Delta = d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$ となるから、変位量 d は N 次の明るいしまより

$$d = N\lambda/\gamma, \gamma = \cos \theta_1 + \cos \theta_2 \quad (7)$$

として求められる。一般の変形状態では、3.1 で述べるような方法で変位成分が求められる。

また、二重露光法を振動測定に拡張したストロボ二重露光法がある。振動周期に同期してパルス状に変調させたストロボ光を用い、正負の二つの振幅最大の状態のみで露光すると、振幅について (6) 式と同形の干渉しまが得られる。

二重露光法ではコントラストのよい干渉しまが得られ、また記録時の参照光によっていつでも再生できる利点があるが、変化の状態はホログラム作成後でないとわからない。

(2) 時間平均法 (time-average method) この方法は正弦振動している物体を振動周期より十分長い時間露光してホログラムを作る方法であって、振動中のすべての状態の波面が記録され、これらの時間平均に対応した波面が再生される。

いま、物体上の任意点の振幅を a , 角振動数を ω とし、振動方向と θ_1, θ_2 をなす方向で照明、観測を行えば、時刻 t での物体光は (7) 式の γ を用いて

$$U_0 = A_0 \exp(ik\gamma a \cos \omega t) \quad (8)$$

と表わされる。再生される波面は露光時間 T の時間平均をとることにより

$$U \propto \frac{1}{T} \int_0^T U_0 dt = \frac{A_0}{T} \int_0^T \exp(ik\gamma a \cos \omega t) dt = A_0 J_0(k\gamma a) \quad (9)$$

ここで、 J_0 は第 1 種 0 次の Bessel 関数である。したがって、干渉しまの強度は

$$I \propto |A_0|^2 J_0^2(k\gamma a) \quad (10)$$

で与えられ、振動数、位相には無関係に J_0 の極値と零点のところで明暗のしまとなり、これから振幅が求められる。しかし、この場合は (6) 式と異なり、振幅について等間隔のしまとならず、また高次のしまのコントラストが急速に低下するが、ノーダル・ラインの部分ではきわめて明るく、モード検出は容易である。

また、物体上の任意点の振動に同期して参照光を位相変調させ、時間平均法を行えば等振幅線とともに位相の情報も得られ、これは参照光位相変調法と呼ば

れている。

さらに、時間平均法の別の応用として、一定速度の運動測定がある。速度を V とすれば物体光は $A_0 \exp i k V t$ と表わされるから、露光時間を T として

$$I \propto |A_0|^2 (2 - 2 \cos k V T) / (k V T)^2 \quad (11)$$

の干渉しまが得られことになる。

(3) 実時間法 (real-time method, stored-beam method) 二重露光法も時間平均法も干渉しまが固定 (dead fringe) されており、変化の状態を実時間的に観測できない欠点もある。これに対して、変形前、あるいは静止時の状態をホログラムに記録し (stored beam), この再生像と変形後あるいは振動状態での物体光波面を直接干渉させる方法は実時間法と呼ばれ、名の示すように実時間で干渉しまの変化 (live fringe) を求められる利点がある。

静変位 d と振幅 a の振動があれば、この場合の干渉しまの強度は次式で与えられる。

$$I \propto 2 |A_0|^2 \{1 + \cos(k y d) J_0(k y a)\} \quad (12)$$

したがって、静変位のみであれば (6) 式の二重露光法と全く同一のしماとなる。一方、振動のみの場合は (10) 式の時間平均法の場合に比較して、しまのコントラストが低下し、しま数は $1/2$ になるが、ノーダル・ラインは同様に明るくなり、共振点探索には有効な方法として利用される。

この実時間法を行なうには、ホログラムを完全に元の位置におかねばならないが、それとともに乾板では現像処理による乳剤の変形の問題もある。このため、乾板を水を満たした透明槽の中に設置して露光し、そのまま自動現像が行なえる専用の装置やサーモプラスチック装置を使用して行なわれている。

3. ホログラフィ干渉法の応用

3.1 変形測定 変形測定は代表的な応用の一つで、3次元物体の全面にわたる変形情報が、非接触で光波長単位の高感度で得られる利点がある。しかし、観測される干渉しまは照明、観測、変位の各方向が関係するので、変位への換算は一般にかなり煩雑である。また、干渉しまが最もコントラストよく生ずるのは必ずしも物体面ではないという干渉しまの局在性 (fringe localization) の問題もあり、しまの解釈について十分な知識を必要とする。

変位が物体面に垂直な場合はしまの解釈にあいまいさがなく、(7)式により等変位線が求められる。特に $\theta_1 = \theta_2 = 0$ であれば、しまの間隔は $\lambda/2$ の変位差に対応する。このように高感度であることが大きな特長であるが、変形が大きくなると干渉しまが密になり、その分離は困難である。このため感度を低減する試みも

第2図 内圧を加えた円板で、二つの観測方向で得られた二重露光法の再生像

なされている⁹⁾。また、二つの同じ二重露光による干渉しまをごく僅か横ずらして重ねると等勾配線を示すモアレしまが得られる¹⁰⁾。

面内変位を伴う場合の測定は、ひずみ解析上重要であるが、これには1方向から照明し、2方向のホログラムで得られる干渉しまから面内変位を計算する方法¹¹⁾、2方向から照明し、1方向でホログラムを作り、二つの干渉しまのモアレしまとして面内変位^{12,13)}、あるいは面内、面外の変位¹⁴⁾を直接求める方法などがある。

一般の3次元変形では、三つの情報が必要であり、これには三つの観測方向のホログラムから変位成分を求める方法¹⁵⁾、あるいは一つのホログラムで観測方向をずらすときのしまの変化から求める方法^{16,18)}などがある。

適用例としては曲げ問題をはじめ多くの報告があるが、例えば円筒かくの曲げ¹⁷⁾、座屈¹⁸⁾、あるいは anti-clastic bending を利用したポアソン比の測定¹⁹⁾なども行なわれている。第2図は内圧を加えた円板の例であるが、観測方向によって干渉しまが異なることを示すものである。

3.2 振動測定 ホログラフィ干渉法の最も大きな成果は振動解析への応用であろう。3次元物体について振幅、位相およびノーダル・ラインが非接触でパターン計測でき、特に高次振動にはきわめて有効であるなど従来の方法でこれに匹敵するものはない。

定常振動に対しては、CW レーザによる前述の時間平均法、ストロボ法、参照光位相変調法などが適用され、また非定常振動あるいは大振幅の振動に対しては3.4で述べるパルス・レーザ・ホログラフィが有力な手段となる。

これらの方法が例えば、はり²⁰⁾、平板やかく²¹⁾などの構造要素をはじめ、各種の構造物、機器の振動解析に広く実用されているが、現在では振動解析に加えて応力解析さらには後述するように品質管理、検査の手段としても利用されている。例えば、Rolls-Royce 社では各種ブレードやディスクを対象に早くからルーチ

第3図 時間平均法による円筒かくの振動モード²¹⁾第4図 時間平均法によるタービン・ブレードの振動モード²¹⁾

ン業務に取り入れられ^{22,23)}、国内でも実用化が行なわれており²⁴⁾、その他内、外とも多くの報告がある。なお、各種解析法の詳細については最近の解説²⁵⁾などがあるので参照されたい。第3図は円筒かく²¹⁾、第4図はタービン・ブレード²¹⁾での時間平均法による干渉しまの例である。

3.3 光弾性法への応用 ホログラフィ干渉法は透過物体にも適用され、その一つに光弾性法への応用がある。FOURNEY^{26,27)} および HOVANESIAN²⁸⁾の報告以来多くの研究がなされているが、大きな利点は2次元光弾性模型で負荷前後の二重露光を行えば主応力差の等色線と主応力差の等高線からなる干渉しまが得られ、主応力を分離して求められることである。

同じ目的に用いられた従来の光干渉光弾性法では、模型の表面はきわめて高精度の平行平面に仕上げる必要があったのに対し、ホログラフィ干渉法では共通光路干渉で、変化分のみが干渉しまとなるのでその必要がなく、実験がきわめて容易になる。また、負荷後のみの単一露光では通常の光弾性法と同じ等色線が得られる。これらの詳細については解説²⁹⁾や本誌の展望³⁾なども参考にされたい。また、HOVANESIAN³⁰⁾、筆者³¹⁾らの熱応力問題への適用もある。

3.4 高速度現象の測定 パルス発振のできるレーザを用いてホログラムに現象を瞬間的に記録し、後で再生する方法はパルス・レーザ・ホログラフィと呼ばれ、高速度現象の3次元凍結記録が可能となった。高速度現象の干渉測定には、CWレーザと高速度カメラを用いて実時間法を適用する方法³²⁾もあるが、ある時間間隔で2度パルス発振するレーザを用いれば、二重露光法でその間の変化を求めることができる (pulsed differential interferometry)。これにはパルス幅が数十 n sec、パルス間隔が数 μ sec～数百 μ sec 程度の Q スイッチのルビー・レーザが用いられており、また再

生には普通 He-Ne レーザが使用される。

この方法は、例えばはり³³⁾、板³⁴⁾の衝撃、高速度光弾性³⁵⁾などに適用されているのみでなく、後述するように流体問題さらには小振幅に限定される時間平均法に代わって大振幅の振動³⁶⁾、パネル・フラッタ³⁷⁾、あるいは回転中のプロペラ・ブレードの振動³⁸⁾などへも適用されている。さらに、外部のじょう乱に影響されず、また高出力のため大型供試体に適用できるなどの利点を生かして、ハンガー内での大型ヘリコプタの機体³⁹⁾、高温でのパネル⁴⁰⁾などの振動測定にも適用されている。

3.5 非破壊検査 早くから実用化されたものの一つに非破壊検査への応用 (holographic nondestructive testing, HNNT) があるが、特に航空機などで多用されている複合構造の内部欠陥検出にはきわめて有効で、米国では専用の装置が商品化されている⁴¹⁾。ラミネート板やハニカム板をなんらかの方法で微小変形させると、内部に欠陥 (ボイド、はがれ、コアの破損など) がある部分では、正常部とは異なる表面変形を生ずるので、これをホログラフィ干渉法で測定すれば干渉しまの局所的な乱れとして内部欠陥が検出される。変形方法 (stressing technique) としては、衝撃荷重を加える方法⁴²⁾もあるが、一般に用いられているのは、加熱、加振、加(減)圧である⁴³⁾。

この方法は板のみでなく、例えばタービン・ブレードやロケット・モータ⁴³⁾などの複雑な構造にも適用され、さらには疲れき裂の検出⁴⁴⁾、タイヤの検査⁴⁵⁾など広範囲な利用が行なわれており、多くの報告がある。これらについては、例えば文献 8)、46) が詳しく、また国内でも解説^{47,48)}がある。第5図はアルミ・ハニカム板での減圧変形、実時間法によるもので⁴¹⁾、コアと

第5図 減圧変形、実時間法によるアルミ・ハニカム板の内部欠陥検出⁴¹⁾

スキンの間の二つの欠陥が明瞭に検出できることを示している。

なお、ホログラフィの理論はコヒーレントな波動である超音波にも応用され、非破壊検査装置が実用化されている^{5,49)}。この超音波ホログラフィではレーザのように直接記録する方法がないので、間接的手段でホログラムを作り、レーザで可視化する方法がとられるが、米国では航空機、原子炉など大型構造物への適用がなされている。

3.6 その他の応用 物体の形状測定にも利用されており、その一つに標準品の再生像と測定物の物体光波面を干渉させ、標準品からの寸法ずれを測定する方法がある⁵⁰⁾。また物体の等高線を求めることもでき、それにはホログラムに二つの波長 λ_1, λ_2 による物体光を記録し、一つの波長で再生する multiple-frequency holographic contouring⁵¹⁾、物体を屈折率 n_1, n_2 の二つの液体中で二重露光する multiple-index holographic contouring⁵²⁾ がある。前者では $\lambda_1 \lambda_2 / 2 |\lambda_1 - \lambda_2|$ 、後者では $\lambda / 2 |n_1 - n_2|$ の等高線を生ずる。

また、干渉法とは異なるが、ホログラムを optical matched filter として利用するパターン認識があり、計測の分野でも利用されている。その一つに疲労損傷検出への応用がある^{53,54)}。疲労前での供試体表面のホログラムをフィルタとして、任意疲労状態での物体光でこれを照射すると、表面状態の相関に対応した参照光の直接像が再生され、これを光電測定して表面疲労損傷の進行が検出できる。同様の方法がひずみ測定にも応用されている⁵⁵⁾。

なお、レーザ流速計が最近普及してきたが、ホログラフィ干渉法は伝熱や流体力学などの分野でも早くから応用されている^{56,57)}。この場合、common path 干渉の利点が生かされ、例えば風洞の測定窓などは良質でなくてよく⁵⁸⁾、また記録時の焦点合わせの必要もなく、再生像を焦点、方向を変えて観測することにより、流れの3次元的測定が可能という大きな利点が存在する⁵⁹⁾。パルス・レーザ・ホログラフィを主体に、衝撃波⁶⁰⁾その他多くの問題に適用されているが、1枚のホログラムで 180° 観測可能な専用のホロカメラも製作されている⁶⁰⁾。

4. スペckル・パターンとその応用

4.1 スペckル・パターン レーザ光を拡散反射面に照射し、前方にスクリーンをおけば、スペckル・パターン ('objective' speckle pattern) と呼ばれる明暗の小さな粒状斑点からなる反射パターンが観測される。第6図に均一な粗面の場合のこのパターンを示した。これはランダムな位相変化を伴った、各散乱

第6図 均一な粗面でのスペckル・パターン

中心からの種々の方向への反射光が、観測面上の各点で重なり合い、相互に干渉するために生ずるものである。このとき、スペckルの平均の大きさ σ は、照射領域の直径を D 、観測面と物体面との間の距離を L とすれば、 $\sigma \approx 1.2 \lambda L / D$ で与えられ、照射領域を小さくすればスペckルは大きくなる。また、スペckル・パターンの構造は物体面上の光の複素振幅分布のフーリエ変換と考えると、微細な表面構造の変化によって異なったものになる。

また、レーザで照射された物体面をレンズで結像するときにもスペckル現象を生ずる。このパターン ('subjective' speckle pattern) は照射面上のある点での種々の方向への反射光が集光され、結像面で相互に干渉するために生ずるものであり、この場合のスペckルの平均の大きさはレンズ系の f/number を F として、 $\sigma \approx 1.2 \lambda F$ で与えられる。

このように、スペckル現象はレーザ光の coherence によって生ずるもので、ホログラフィでは background noise となり、軽減しようとする試みもなされてきた。しかし、一方ではその性質をうまく利用した種々の計測も行なわれている。例えば、面内の変形や振動の測定が容易であり、記録には低解像力の感光材や VTR などでも使用でき、また装置の安定性も厳しく要求されないなど、ホログラフィ干渉法とは異なる利点がある。以下、これらの応用について述べる。

4.2 変形測定 ホログラフィ干渉法で面内変位を求めるには一般に煩雑であるが、スペckル・パターンによれば比較的容易であり、その一つにスペckル干渉法 (speckle interferometry) があるが、LEENDERTZ⁶⁰⁾ は第7図に示すように二つの平行光で物体面を対称に照明し、垂直方向で観測する方法を提案した。この配置で観測する x 方向および紙面に垂直な方向の変位に対しては二つの照明光間で光路長変化が打消され、スペckルの明暗は変化しない。しかし y 方向の面内変位 d に対しては、二つの照明光間で $\Delta = 2d \sin \theta$ の光路長変化を生じ、スペckルの明暗は周期的に変化するが、 $\Delta = n\lambda$ の変位に対応する部分では再び元の明るさになる。したがって変形前でのス

第7図 スペックル干渉法による面内変位測定
の光学系⁶⁰⁾

第8図 スペックル干渉法による面内変位の干渉しま⁶⁰⁾

ベックル・パターンのネガを通して変形状態を観測すれば、 $\lambda/2 \sin \theta$ の変位に対応する間隔をもったしまが観測される。第8図はその一例である⁶⁰⁾。

ホログラフィ干渉法は二つの波面間の干渉によるものであるが、この方法は二つのパターンの強度差を用いるものであるから、変形前後で別々に記録し、一方のネガを反転してポジとし、他方のネガを重ねてもよい。また二重露光によってもよいが、最近VTRやVDを用いて電気信号で処理することが試みられており、例えば複合材料での測定⁶¹⁾などに応用されている。

また、DUFFY⁶²⁾は二照明光の代わりにレンズの前に二つの開口をおき、一照明光を用いて同様な原理で面内変位を測定する方法を提案した。この方法は $\sin \theta$ の値が上述の方法より小さくなるので感度が低く、また開口を用いるので強い照明光を必要とするが、二重露光したネガをフィルタリングすることによってコントラストの強い干渉しまが得られる。

さらに、HUNGら⁶³⁾は単一照明、四つの開口を用いて、4方向の spatial derivative を同時に求める speckle-shearing 干渉法を報告し、面内、面外の変位測定とともに、また振動モードの検出にも応用している。

これらのスペックル干渉法で測定できる変位の大きさは、スペックルの相関が保たれる程度、すなわちス

ペックルの平均の大きさ程度までである。これに対して大きな面内変位の場合には、一方向のみで物体を照明したときのスペックル・パターンを用いる speckle photography 法が適用できる⁶⁴⁾。この方法では、変形前後で二重露光されるが、この乾板はランダムな構造をもつ回折格子と考えてよく、そのフーリエ変換から変位が求められる。前述の方法ほど装置の安定性、光のコヒーレンシが要求されず、また1枚の乾板から各点の変位の大きさと方向を求めることができ、感度はモアレ法より高いなどの利点がある。

4.3 振動測定 レーザで直接照明されている振動面の前方に焦点を合わせて観測すると、振幅が大きい場合はある部分でスペックルがすじとなったパターンが見られる^{65, 66)}。これは、Chladni パターンと類似してはいるが、ノードル・ラインを示すものではなく、面の傾きが大きくなる部分を示している。したがって、interference mapping 法とも呼ばれるこの方法によって振動モードを完全に決定することはできないが、共振周波数の探索には有効である。

これに対し、拡散板を通して振動面を照射し、ノードル・ラインのみを明瞭に計測する方法がある⁶⁷⁾。この方法では拡散板の大きさと物体からのその位置を変えることにより、測定感度を 1λ から 100λ 程度の範囲で選ぶことが可能である。

明るさがスペックル・パターンの平均明るさ程度で、照明光との光路差が coherence length 以下の参照光を加えて観測すると、両者の位相差により観測方向の振幅に応じてスペックルの明るさが変化する⁶⁸⁾。このスペックル干渉法はホログラフィ干渉法の時間平均法と同程度の感度であり、ストロボ法で行なうこともできる⁶⁹⁾。また、変形測定の場合と同様に vidicon

第9図 TVカメラを用いたスペックル干渉法による円板の振動モード⁷⁰⁾

で撮影することも行なわれているが、第9図はその一例である⁷⁰⁾。

面外振動に対する時間平均法と同様にして、面内振動の測定に speckle photography が適用される⁷¹⁾。ある時間露光すれば、振動方向にばけたスペックル・パターンが得られる。これをフーリエ変換すれば平行な干渉しまが生ずるが、しまの方向は振動方向に直交する方向で、強度は振幅について0次の第1種 Bessel 関数の2乗で変化したものになる。この方法は振動方向が求められるので、2次元振動にも適用されている⁷²⁾。

4.4 その他の応用 粗面物体からの反射光によって生ずるスペックル・パターンは、各点からの散乱反射光の相互干渉によるものであり、その中には、(1) 照射光、観測面に対する物体面の位置関係、および、(2) 物体面の状態に関する情報が含まれており、いずれが変化してもパターンの構造は異なったものになる。したがって、スペックル・パターンはこれらの情報を与える carrier と考えることができ、これを用いた種々の計測が行なわれている。

その一つに、ある状態でのパターンを記録した乾板(ネガ)を shadow filter として元の位置におき、他の状態でのパターン(ポジ)をこれに照射して透過光量を光電測定する方法がある。変位や振動により物体面の位置が変化すれば、(1)により filter 上でのポジのパターンはそれに伴って変化し、透過光量が増加するのでこれらの測定が可能である⁷³⁾。次に、(2)を利用して面の状態の相関測定が可能であり⁷³⁾、物体面が変化すれば同様に透過光量が増加する。これを表面疲労損傷の測定に応用し、き裂の発生に先だって大きな光電出力の変化を生ずることが示されている^{74, 75)}。

また、形状⁷⁶⁾、表面粗さ⁷⁷⁾などの測定、さらに最近では多くの分野で表面欠陥の検出に利用され、自動化も行なわれている⁷⁸⁾。欠陥がある部分では欠陥特有のパターンを生ずるので、このパターン認識を行なうことにより欠陥検出が可能となる。

5. ディフラクトグラフィ法

PRYOR ら⁷⁹⁾は供試体と reference edge とにより構成されたスリットをレーザ光が通過するとき、スリット後方の離れた面に生ずる第10図のような Fraunhofer diffraction pattern を計測に利用する方法を報告し、diffractographic method と呼んだ。

これは、スリット幅 w としまとの関係が

第10図 スリットによるフラウンホーファー回折パターン⁷⁹⁾

$$w = N \lambda / \sin \theta \quad (13)$$

で与えられることに基いている。ここで、 θ は位置角で、 N 次の暗いしまを生ずる位置とスリットを結ぶ線が中心線となす角である。したがって、例えば物体が変位すればスリット幅が変化し、それに伴って観測点のしま次数が変化することにより変位が測定できる。

この方法は、ひずみ⁷⁹⁾、変位^{80, 81)}のみでなく、振動⁸²⁾その他種々の測定⁸³⁾に利用され、実用化されている。

6. む す び

構造強度の解析あるいはそれに関連する分野へのレーザ応用について概説し、応用例を紹介した。ここに挙げた種々の方法の中で、実用化にはなお feasibility study を必要とするものもあり、また測定対象によって使い分けることが肝要であるが、今後これらのレーザ応用計測法が研究室での利用のみでなく、例えば文献 84) にみられるように大型の実物での測定などにもますます利用されていくことと思われる。しかし、この応用面での進展にはレーザや周辺機器など hardware の面における進歩、普及も不可欠なことである。これらの国内の現状は、便利なホロカメラなどが商品化されているものの、米国などに比較すればまだかなりのおくれが感ぜられ、それらの進歩、発展も大いに期待したい。

なお、ここで触れなかったその他の応用例が、例えば文献 8) には数多く引用されており、また解説⁸⁵⁾、展望⁸⁶⁾などもあるので参照されたい。本稿を草するに当たってもこれらの文献を特に参照させていただいた。ここに厚く感謝の意を表する。また、文献 39) には最近の報告が多数収録されており、応用面における現状を伺い知ることができるので興味ある方には一覽をおすすめする。

文 献

- 1) 西田正孝: 光力学の現状と将来性, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 21, No. 239 (1973), pp. 19-32.
- 2) NASA SP-248, Holographic Instrumentation Applications (1970).
- 3) NASA SP-299, Holography and Optical Filtering (1973).
- 4) DEVELIS, J.B., et al.: Theory and Applications of Holography, Addison-Wesley (1967).
- 5) CAMATINI, E. (ed.): Optical and Acoustical Holography, Plenum Press (1972).
- 6) SMITH, H.M.: Principles of Holography, 2nd ed. John Wiley and Sons (1975).
- 7) 辻内順平: 光学技術ハンドブック, 久保田広ほか編, 朝倉書店 (1968), pp. 200-232.
- 8) ERF, R.K. (ed.): Holographic Nondestructive Testing, Academic Press (1974), pp. 87-103.

- 9) DER, V.K., HOLLOWAY, D.C. and FOURNEY, W.L.: A Technique for Reducing the Fringe Frequency in Large-Displacement Holography, *Exptl. Mech.*, Vol. 14, No. 7 (1974), pp. 286-289.
- 10) BOONE, P. and VERBIEST, R.: Application of Hologram Interferometry to Plate Deformation and Translation Measurements, *Optica Acta*, Vol. 16, No. 15 (1969), pp. 555-567.
- 11) ENNOS, A.E.: Measurement of In-Plane Surface Strain by Hologram Interferometry, *J. Phys. E; Sci. Instrum.*, Vol. 1, Ser. 2 (1968), pp. 731-734.
- 12) HUNG, Y.Y. and TAYLOR, C.E.: Measurement of Surface-Displacements Normal to Line of Sight by Holo-Moiré Interferometry, *J. Appl. Mech.*, Vol. 42, No. 1 (1975), pp. 1-4.
- 13) SCIAMMARELLA, C.A. and GILBERT, J.A.: A Holographic-Moiré Technique to Obtain Separate Patterns for Components of Displacement, *Exptl. Mech.*, Vol. 16, No. 6 (1976), pp. 215-220.
- 14) 加藤和典ほか: レーザによる三次元塑性変形の測定法に関する二, 三の検討, 日本機械学会誌, 第75巻, 第639号 (1972), pp. 98-109.
- 15) SOLID, J.E.: Holographic Interferometry Applied to Measurements of Small Static Displacements of Diffusely Reflecting Surfaces, *Appl. Opt.*, Vol. 8, No. 8 (1969), pp. 1587-1595.
- 16) DHIR, S.K. and SIKORA, J.P.: An Improved Method for Obtaining the General-Displacement Field from a Holographic Interferogram, *Exptl. Mech.*, Vol. 12, No. 7 (1972), pp. 323-327.
- 17) SCIAMMARELLA, C.A. and CHANG, T.Y.: Holographic Interferometry Applied to the Solution of a Shell Problem, *Exptl. Mech.*, Vol. 14, No. 6 (1974), pp. 217-224.
- 18) LEADBETTER, I.K. and ALLAN, T.: The Engineering Uses of Holography, ed. by Robertson, E.R. and Harvey, J.M., Cambridge Univ. Press (1970), pp. 185-200.
- 19) YAMAGUCHI, I. and SAITO, H.: Application of Holographic Interferometry to the Measurement of Poisson's Ratio Japanese *J. Appl. Phys.*, Vol. 8, No. 6 (1969), pp. 768-771.
- 20) APRAHAMIAN, R. and EVENSEN, D.A.: Applications of Holography to Dynamics: High-Frequency Vibrations of Beams, *J. Appl. Mech.*, Vol. 37, No. 2 (1970), pp. 287-291.
- 21) APRAHAMIAN, R. and EVENSEN, D.A.: Applications of Holography to Dynamics: High-Frequency Vibrations of Plates, *J. Appl. Mech.*, Vol. 37, No. 4 (1970), pp. 1083-1090.
- 22) HOCKLEY, B.S. and HILL, R.J.: Vibration and Strain Analysis by Means of Holography, *Aircraft Engineering*, Vol. 41, No. 8 (1969), pp. 6-11, 16.
- 23) HOCKLEY, B.S. and BUTTERS, J.N.: Holography as a Routine Method of Vibration Analysis, *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 12, No. 1 (1970), pp. 37-47.
- 24) 山本鷹司, 村田正義: ホログラフィ振動解析法の製品開発への応用, 三菱重工技報, Vol. 12, No. 6 (1975), pp. 16-25.
- 25) 村田正義: ホログラフィによる振動解析法, 機械の研究, 第28巻, 第10号 (1976), pp. 6-10, 第28巻, 第11号 (1976), pp. 27-30.
- 26) FOURNEY, M.E.: Application of Holography to Photoelasticity, *Exptl. Mech.*, Vol. 8, No. 1 (1968), pp. 33-38.
- 27) FOURNEY, M.E.: Further Applications of Holography to Photoelasticity, *Exptl. Mech.*, Vol. 10, No. 5 (1970), pp. 177-186.
- 28) HOVANESIAN, J.D., BRIC, V. and POWELL, R.L.: A New Experimental Stress-Optic Method: Stress-Holo-Interferometry, *Exptl. Mech.*, Vol. 8, No. 8 (1968) pp. 362-368.
- 29) 永田良: 光弾性ホログラフィ, 画像技術, 10-11月号, (1975), pp. 15-26.
- 30) HOVANESIAN, J.D.: New Applications of Holography to Thermoelastic Studies, *Proc. 4th International Conf. on Exptl. Stress Analysis* (1971), pp. 428-435.
- 31) 角誠之助: ホログラフィによる熱弾性問題解析について, 第16回構造強度に関する講演会講演集 (1974), pp. 17-20.
- 32) APRAHAMIAN, R., EVENSEN, D.A. and MIXSON, J.S.: Transient-response Measurements Using Holographic Techniques, *Exptl. Mech.*, Vol. 10, No. 10 (1970), pp. 421-426.
- 33) APRAHAMIAN, R., EVENSEN, D.A., MIXSON, J.S. and WRIGHT, J.E.: Application of Pulsed Holographic Interferometry to the Measurement of Propagating Transverse Waves in Beams, *Exptl. Mech.*, Vol. 11, No. 7 (1971), pp. 309-314.
- 34) APRAHAMIAN, R., EVENSEN, D.A., MIXSON, J.S. and JACOBY, J.L.: Holographic Study of Propagating Transverse Waves in Plates, *Exptl. Mech.*, Vol. 11, No. 8 (1971), pp. 357-362.
- 35) CLARK, J.A. and DURELLI, A.J.: A Simple Holographic Interferometer for Static and Dynamic Photomechanics, *Exptl. Mech.*, Vol. 10, No. 12 (1970), pp. 497-505.
- 36) APRAHAMIAN, R. and EVENSEN, D.A.: Vibration Analysis by Differential Holographic Interferometry, *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 1 (1971), pp. 186-188.
- 37) EVENSEN, D.A.: Application of Holography to Panel Flutter, *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 12 (1976), pp. 1671-1674.
- 38) SIKORA, J.P. and MENDENHALL, F.T.: Holographic Vibration Study of a Rotating Propeller Blade, *Exptl. Mech.*, Vol. 14, No. 6 (1974), pp. 230-232.
- 39) ERF, R.K., GAGOSZ, R.M. and WATTERS, J.P.: The Engineering Uses of Coherent Optics, ed. by ROBERTSON, E.R., Cambridge Univ. Press (1976), pp. 23-46.
- 40) EVENSEN, D.A., APRAHAMIAN, R. and OVEROYE, K.R.: Pulsed Differential Holographic Measurements of Vibration Modes of High-Temperature Panels, *NASA CR-2028*, June (1972).
- 41) WELLS, D.R.: NDT of Sandwich Structures by Holographic Interferometry, *Materials Evaluation*, Vol. 27, No. 11 (1969), pp. 225-231.
- 42) CHU, W.P., ROBINSON, D.M. and GOAD, J.H.: Holographic-Nondestructive Testing with Impact Excitation, *Appl. Opt.*, Vol. 11, No. 7 (1972), pp. 1644-1645.
- 43) OAKS, A.E.: Nondestructive Testing of Scout Rocket Motors, *NASA CR-2013*, April (1972).
- 44) RUMMEL, W.D., et al.: The Detection of Fatigue Cracks by Nondestructive Testing Method, *NASA CR-2369*, February (1974).
- 45) VOGEL, P.E.J.: Nondestructive Testing, Rubber

- Age, Vol. 106, No. 11 (1974), pp. 33-39.
- 46) ERF, R.K., et al.: Nondestructive Holographic Techniques for Structures Inspection, Tech. Rep., AFML-TR-72-204, October (1972).
 - 47) 溝口勝彦: ホログラフィによる非破壊検査法, プラスチックマテリアル, Vol. 14 (1973), pp. 69-75.
 - 48) 角誠之助: レーザの応用, 日本機械学会第 444 回講習会教材 (非破壊検査の最近の動向) (1977), pp. 11-20.
 - 49) 宮本公男, 奥野卓夫, 小木曾光利: 超音波ホログラフィと非破壊検査, 非破壊検査, Vol. 24, No. 4 (1975), pp. 232-237, No. 5 (1975), pp. 283-289, No. 6 (1975), pp. 341-349.
 - 50) ARCHBOLD, E., BURCH, J.M. and ENNOS, A.E.: Application of Holography to the Comparison of Cylinder Bores, J. Sci. Instrum., Vol. 44, No. 7 (1967), pp. 489-494.
 - 51) HILDEBRAND, B.P. and HAINES, K.A.: Multiple-Wavelength and Multiple-Source Holography Applied to Contour Generation, J. Opt. Soc. Amer., Vol. 57, No. 2 (1967), pp. 155-162.
 - 52) TSURUTA, T., et al.: Holographic Generation of Contour Map of Diffusely Reflecting Surface by Using Immersion Method, Japanese J. Appl. Phys., Vol. 6, No. 5 (1967), pp. 661-662.
 - 53) CHUANG, K.C.: Application of the Optical Correlation Measurement to Detection of Fatigue Damage, Materials Evaluation, Vol. 26, No. 6 (1968), pp. 116-119.
 - 54) MAROM, E.: Coherent Optical Processing for Non-destructive Testing, Bendix Technical Journal, Summer (1969), pp. 39-47.
 - 55) MAROM, E.: Real-Time Strain Measurement by Optical Correlation, Appl. Opt., Vol. 9, No. 6, (1970), pp. 1385-1391.
 - 56) HEFLINGER, L.O., WUERKER, R.F. and BROOKS, R.E.: Holographic Interferometry, J. Appl. Phys., Vol. 37, No. 2, (1966), pp. 642-649.
 - 57) TANNER, L.H.: Some Applications Holography in Fluid Mechanics, J. Sci. Instrum., Vol. 43, (1966), pp. 81-83.
 - 58) BENSER, W.A., BAILEY, E.E. and GELDER, T.F.: Holographic Studies of Shock Waves Within Transonic Fan Rotors, J. Eng. Power, Vol. 97, No. 1, (1975), pp. 75-84.
 - 59) WITTE, A.B.: Flow Visualization and Data Reduction, Proc. Symp. of Eng. Appl. of Holography, Soc. Photo-optical Instrum. Eng. (1972), pp. 219-235.
 - 60) LEENDERTZ, J.A.: Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 3, No. 3, (1970), pp. 214-218.
 - 61) DENBY, D. and LEENDERTZ, J.A.: Plane-Surface Strain Examination by Speckle-Pattern Interferometry Using Electronic Processing, J. Strain Analysis, Vol. 9, No. 1, (1974), pp. 17-25.
 - 62) DUFFY, D.E.: Moiré Gaging of In-Plane Displacement Using Double Aperture Imaging, Appl. Opt., Vol. 11, No. 8, (1972), pp. 1778-1781.
 - 63) HUNG, Y.Y., ROWLANDS, R.E. and DANIEL, I.M.: Speckle-Shearing Interferometric Technique: A Full-Field Strain Gauge, Appl. Opt. Vol. 14, No. 3, (1975), pp. 618-622.
 - 64) ARCHBOLD, E. and ENNOS, A.E.: Displacement Measurement from Double-Exposure Laser Photographs, Opt. Acta, Vol. 19, No. 4, (1972), pp. 253-271.
 - 65) MASSEY, G.A.: Study of Vibration Measurement by Laser Methods, NASA CR-985, (1968).
 - 66) FERNELIUS, N. and TOME, C.: Vibration-Analysis Studies Using Changes of Laser Speckle, J. Opt. Soc. Am., Vol. 61, No. 5, (1971), pp. 566-572.
 - 67) ELIASSON, B. and MOTTIER, F.M.: Determination of the Granular Radiance Distribution of a Diffuser and its Use for Vibration Analysis, J. Opt. Soc. Am., Vol. 61, No. 5, (1971), pp. 559-565.
 - 68) ARCHBOLD, E., et al.: Visual Observation of Surface Vibration Nodal Patterns, Nature, Vol. 222, (1969), pp. 263-265.
 - 69) NAKAJIMA, T.: Stroboscopic Method of Vibration Analysis Using Laser-Produced Speckles, Japan. J. Appl. Phys., Vol. 10, No. 3, (1971), pp. 394-395.
 - 70) BUTTERS, J.N. and LEENDERTZ, J.A.: Application of Video Techniques and Speckle Pattern Interferometry to Engineering Measurement, Proc. Symp. of Eng. Appl. of Holography, Society of Photo-optical Instrum. Eng., (1972), pp. 361-375.
 - 71) TIZIANI, H.J.: Application of Speckling for In-Plane Vibration Analysis, Opt. Acta, Vol. 18, No. 12, (1971), pp. 891-902.
 - 72) ARCHBOLD, E. and ENNOS, A.E.: Two-Dimensional Vibrations Analyzed by Speckle Photography, Opt. and Laser Technol. Vol. 7, No. 1, (1975), pp. 17-21.
 - 73) GROH, G.: Engineering Uses of Laser-Produced Speckle Patterns, The Engineering Uses of Holography, ed. by Robertson E.R. and Harvey, J.M., Cambridge Univ. Press, (1970), pp. 483-494.
 - 74) 角誠之助: 光学的相関法の疲労問題への応用, レーザスペckルによる場合, 第 17 回構造強度に関する講演会, (1975), pp. 73-76.
 - 75) SUMI, S.: Speckle Correlation Method for Measurement of Surface Structural Changes Caused by Fatigue, Proc. 19th Japan Congr. Materials Research, (1976), pp. 17-21.
 - 76) Inspection Systems Using Electric Speckle-Pattern Interferometry, Machinery and Production Engineering, Vol. 22, May, (1974), pp. 614-615.
 - 77) OHTSUBO, J., et al.: Surface Roughness Measurement by Using Speckle Pattern, Japan. J. Appl. Phys., Vol. 14, (1975), Suppl. 14-1, pp. 293-298.
 - 78) NORDQVIST, K.G. and MILLGARD, L.: Automatic Surface Inspection and Classification, Iron and Steel Engineer, June, (1974), pp. 67-70.
 - 79) PRYOR, T.R. and NORTH, W.P.T.: The Diffractographic Strain Gage: Exptl. Mech., Vol. 11, No. 12, (1971), pp. 565-568.
 - 80) PRYOR, T.R., et al.: Diffractographic Dimensional Measurement, Part 1: Displacement Measurement, Appl. Opt., Vol. 11, No. 2, (1972), pp. 308-313.
 - 81) 中川憲治ほか: レーザの回折によるクラック開口変位の測定: 精機学会昭和 50 年度関西地方定期学術講演会前刷 (1975), pp. 75-76.
 - 82) PASTORIUM, W.J. and PRYOR, T.R.: Diffractographic Techniques for Vibration Measurement, ASME Paper No. 73-DET-116.
 - 83) PRYOR, T.R.: Laser Systems for Industrial Meas-

urements, Canadian Controls and Instrumentation, October, (1973), pp. 22-25.

- 84) 宇田川哲夫, 鈴木正根ほか: パルスレーザホログラフイによる工作機械の変形測定: 昭和 51 年度精機学会秋季大会学術講演前刷, (1976), pp. 397-398.

- 85) 斎藤弘義, 中島俊典: レーザ干渉応用計測, 計測と制御, Vol. 13, No. 1, (1974), pp. 57-66.

- 86) STETSON, K. A.: A Review of Speckle Photography and Interferometry, Optical Engineering, Vol. 14, No. 5, (1975), pp. 482-489.

最近のバルーンについて*

西 村 純**

はじめに

プラスチック気球は戦後発展したプラスチック工業を背景に登場した気球である。比較的大重量の観測器を搭載し高度 30 km~40 km まで上昇することができること, また長時間高々度に滞空できることから宇宙科学観測用の手段としてロケットや人工衛星にさきがけて登場し発展しつづけてきた。現在アメリカにおいては容積 100 万 m^3 を越す大型気球が実用化されて年間約 300 機の観測用大型気球が打上げられている。

我が国でも昭和 41 年東京大学宇宙航空研究所で大気球の特別事業を取扱うようになってから大型気球の開発整備, 科学観測等が本格化し現在に至っている¹⁾。

以下にプラスチック気球の概要と現状について紹介することとしたい。

1. プラスチック気球の概要

1.1 ゼロ・プレッシャ気球とスーパー・プレッシャ気球 プラスチック気球には大別してゼロ・プレッシャ気球とスーパー・プレッシャ気球がある。

ゼロ・プレッシャ気球は気球の下端に排気口をもつ気球である。気球が上空に昇ると, ガスが膨張し気球本来の容積に達するとガスはこの排気口を通して外に逃げる。この結果自由浮力分が減少し気球総重量と浮力がバランスして, 気球はその高度に滞空することとなる。気球内のガス圧は排気口があるので外の大気圧とあまり差がなく, したがってゼロ・プレッシャ気球と呼ばれている。

気球の皮膜にもあまり力がかからず, 比較的軽量に気球を作ることができる。現在観測用大気球として用いられているものは大部分この型のものである。ゼロ・プレッシャ気球の最大の欠点は気球内ガス温度によって浮力の変動をうけることである。日中満膨張で

第1図 ゼロ・プレッシャ気球とスーパー・プレッシャ気球

水平浮遊している気球は日没とともに気球内ガス温度が低下*してガスは収縮する。ガス温度の低下量は気球材料やその日の気象条件にもよるが, 一般に使用されているポリエチレン気球では 10°C から 20°C の低下があり, 数%の浮力損失となって気球は下降する。もとの高度を保つためには総重量の数%にあたるバラストを投下する必要がある, このためゼロ・プレッシャ気球は何日間にもわたる長時間観測には不向きである。

スーパープレッシャ気球は排気口のない気球である。気球が上昇して気球内ガスが膨張し気球本来の容積に達してもガスは気球に閉じ込められたままで上昇を続ける。気球の容積は一定で, 大気密度は減少するので総浮力は減り, 全体の重量と浮力がバランスする所で気球は水平浮遊に入る。

気球内のガス圧が大気圧より高くなるのでスーパー・プレッシャ気球と呼ばれている。日没などで気球内のガス温度が低下してもガス圧が低下するだけで容積は変化しないので, 浮力は一定であり気球が下降するようなことはない。

気球内のガス圧に耐えるよう気球皮膜の強度が要求され, またわずかなガスの洩れも問題となる。このようなわけでスーパー・プレッシャ気球はゼロ・プレッシャ気球にくらべて製作上もむずかしく, 特殊な目的にだけ使用されている。例えば南半球での大気の流れを調べるため, 数か月にわたって浮遊させる GHOST プロジェクトなどで使われている。

1.2 気球の形 気球を設計するにあたってまず問

* 昭和 52 年 4 月 8 日原稿受理 On the Recent Development of Plastic Balloons

** 東京大学宇宙航空研究所 Jun NISHIMURA

* これに反して高々度では大気温度は日中と夜間でほとんど変わらない。