

電子式スペックル・パターン干渉法を用いた地殻歪の 3次元リアルタイム計測システムの開発

竹本修三*・近藤淳也*・向井厚志**

* 京都大学大学院理学研究科

** 奈良産業大学法学部

要 旨

ホログラフィ干渉法を用いた地殻歪の3次元計測システムを発展させて、湿式の写真処理部分をビデオ・カメラと画像処理装置に置き換えた電子式スペックル・パターン干渉法(ESPI)を地殻歪の3次元計測に応用する際の基本的な問題点が述べられている。

キーワード：地殻変動，伸縮計，レーザー伸縮計，ホログラフィ，ESPI

1. はじめに

京都大学では、傾斜計や伸縮計を用いた地殻変動の連続観測を約半世紀以上にわたって続けている。この間、1943年鳥取地震(M=7.2)の際の生野鉱山における異常傾斜変動の観測(佐々・西村, 1951)をはじめとする地震前後の地殻変動の研究や地球潮汐の研究が数多くなされてきた。

Takemoto (1979), Takemoto et. al (1994, 1998b) は、きわめて微小な地殻歪シグナルの定量的な議論を可能とするために、本質的に計器の感度検定が不要で、レーザー光の1/2波長を単位として微小歪みの計測が可能なマイケルソン型レーザー干渉計を用いたレーザー伸縮計を天ヶ瀬観測室(京都府宇治市)や六甲高雄観測室(神戸市)などに設置し、長期間の良質なデータを得てきた。

ところで、これまで地殻変動の連続観測のために用いられてきた傾斜計や伸縮計は、6成分の独立な地殻歪テンソル(ε_{ij})のうちの1成分を検出できるに過

ぎない。レーザー伸縮計も例外ではない。また、体積歪計で得られる観測データも、同様に1成分のみの情報である。これらの計器によって得られる1次元的なデータでは、地震の前後に、1つの計器に異常が見いだされたとしても、それが機械的原因や環境ノイズによるものか、真の地殻歪変化を反映したものかを判断することがむずかしい。また、地殻歪の主軸の方向や大きさ、さらには、それらの時間的変化を求めるためには、複数の計器で得られた観測量を組み合わせなければならないために、個々の成分に固有なノイズも重ね合わされることになり、得られた結果の信頼性に問題があることがかねてから指摘されていた。そこで、2次元ないしは3次元の地殻歪変化を同時に、しかも、定量的に測定できる新しい地殻変動観測システムが開発されれば、地震前後の地殻変動の研究に大きな貢献をなすと考えられる。

この観点から、Takemoto (1990, 1993) は、3次元の物体のわずかな形状変化をレーザー光の半波長を基本単位として定量的に検出できるホログラフィ干渉法を

地殻変動連続観測に応用する試みを行ない、天ヶ瀬観測室の地下観測坑道に設置された大型ホログラフィ装置を用いて、潮汐力によってひきおこされる観測坑道の変形の空間的なパターンをホログラム乾板上に現れる干渉縞の移動から精度よく求めることに成功した。

この方法を長期間のルーチン観測に使用する場合の最大の弱点は、手間のかかる湿式の写真処理（乾板の現像・定着・水洗）の技術を必要とすることである。また、長期間の連続観測に使用するためには乾板の吸湿によるホログラム像の劣化も問題であることが明らかになった。これらの問題点を解決するためには、自動車や航空機用機材などの微細な瑕疵検査等に応用されている電子式スペックル・パターン干渉法（ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometry）の導入が最も有効であると考えられる（Takemoto, 1996）。ESPI法は、ビデオ・カメラと計算機を用いたデジタル画像処理、すなわち、ビデオ・カメラを通じて計算機のメモリーにいったん取り込んだ過去の画像データと、現在見えている被写体からの反射波による実時間画像データと

の重ね合わせによって、干渉縞を作ることができるもので、面倒な湿式の写真処理を必要とせず、しかも、ホログラフィ干渉計測法と同様の原理に基づき、2次元あるいは3次元的な物体の微小な形状変化を、レーザー光の1/2波長を単位として、定量的に検出することができる。

本研究の目的は、これまで京都大学で行われてきたホログラフィ干渉法に基づく地殻変動観測システムの開発研究に基礎をおき、それを発展させたものとして、ESPI法を応用した新しい地殻変動観測システムを構築することにある。

そのために、1997年4月に、京都市北区にある上賀茂地学観測所の地殻変動観測用横坑に大型のESPI装置を設置して、基礎実験を開始した。2方向の壁面にレーザー光を照射して、坑道壁面の相対変位によって生じるスペックル・パターン干渉縞の移動を測定することにより、微小な坑道変形を直接検出しようという新しい試みである。

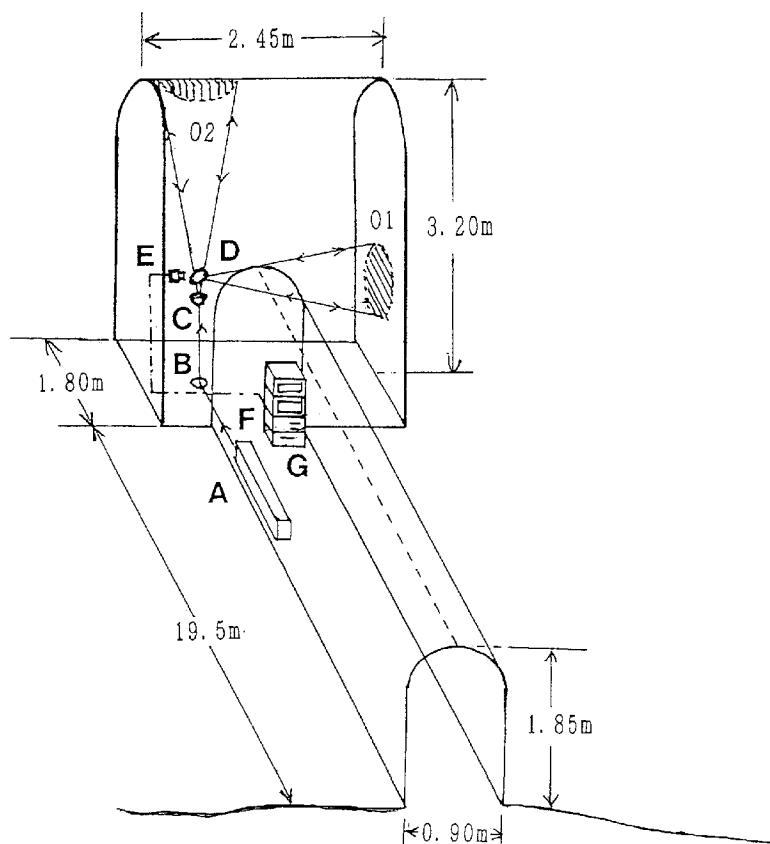


Fig.1 Observation tunnel of Kamigamo Geophysical Observatory and the ESPI recording system installed in the tunnel. A: Laser source, B: Mirror(Beam-bender), C: Beam-expander, D:Beam-splitter, E:CCD video camera, F: Image processor, G: Personal computer, O₁, O₂: Object walls.

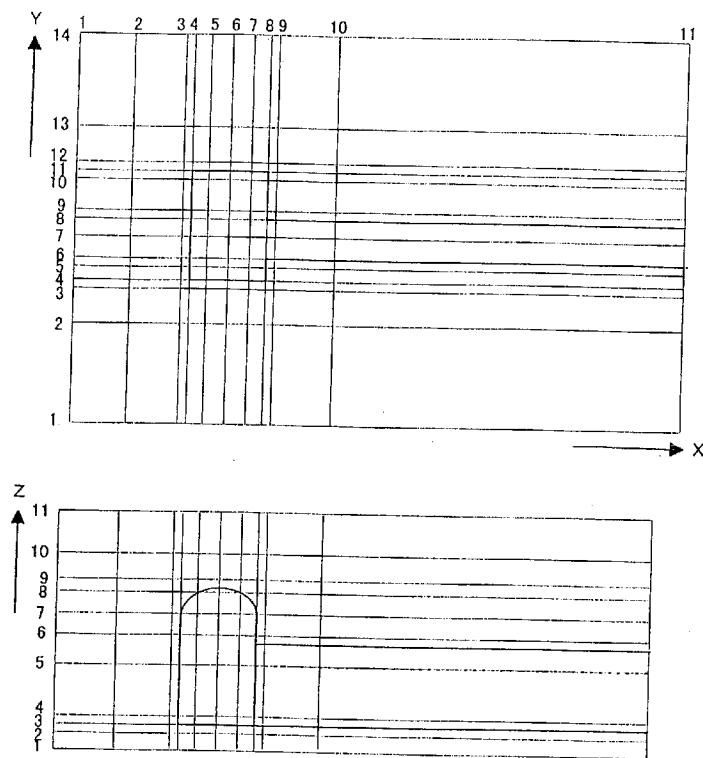


Fig.2 Three dimensional finite element grids around the Kamigamo tunnel. (upper) horizontal section(X-Y plane), (lower) vertical section (X-Z plane).

2. 上賀茂地学観測所における観測システム

上賀茂地学観測所は、1909年(明治42年)に日本震災予防調査会より京都大学に寄附された施設であり、京都市北区上賀茂本山町にある。国有林に囲まれた33,782m²の敷地内には、地階付石造建物(102 m²)があり、その地階の断面が1.5m×1.5 m、深さ9 mの縦坑観測室には、地震計が設置されている。また、この石造建物から北北東に約50 m離れて、断面が1.5m×2.0 m、奥行き約20 mの横坑観測室がある。観測室周辺の岩質は、砂岩・頁岩をまじえた秩父古生層のチャートである。

1997年6月にESPI法を用いた干渉計測システムが上賀茂地学観測所の横坑観測室に設置された。システムの構成は、Fig.1に示されている。出力15mWのHe-Neレーザー光源(A)から水平方向に発射されたレーザー光は、全反射ミラー(B)で向きを変えられ、垂直方向に進み、

ビーム・エクスパンダー(C)でその光束が拡大される。そののち、光は、ビーム・スプリッター(ハーフ・ミラー)(D)で2方向に分割され、観測坑の天井と側壁に向けて照射される。

天井と側壁上の光が当たる部分(Fig.1のO₁とO₂)には、反射率をよくするために、あらかじめ1 m四方の範囲に白ペンキが吹き付けられている。この粗面にレーザー光が照射されるとスペckルパターンが現れる。2つの壁面からの反射光を重ね合わせ、高感度CCDビデオ・カメラ(E)で受けて、画像処理装置(F)に取り込む。画像処理装置はパーソナル・コンピュータ(G)で制御される。画像処理装置に保存された基準画面と次々に入ってくるリアル・タイムの画像データを逐次比較することにより、坑道変形に伴うスペckル・パターン干渉縞の動きがモニター・テレビで観測される。

3.有限要素法によるトンネル変形の見積り

実際に観測を行う前に、有限要素法により、潮汐力による上賀茂地学観測所の坑道変形を計算し、ESPI システムで得られる干涉縞の動きを予測した Takemoto(1998a)。Fig. 2 に示すように、X-Y の水平面内に 11×14 の節点、垂直方向(Z)に 11 の節点で分割した弾性媒質内に中空の観測坑道が存在するとき、X 及び Y 軸方向の境界面に潮汐力の水平成分が働いたときの坑道変形を計算した。

弾性媒質内に中空の観測坑道が存在するとき、坑道周辺では Cavity Effect により、歪が増幅される。Fig. 3 に示される潮汐力の水平成分が働いたとき、Fig. 1 の O_1 と O_2 との間の相対変位は、最大で約 $0.4 \mu\text{m}$ に達することが明らかになった。今回、われわれが使用した He-Ne レーザ光源の出力波長は、 $0.6328 \mu\text{m}$ であり、 O_1 と O_2 との間の相対変位が半波長分、すなわち、 $0.32 \mu\text{m}$ 変わると縞が 1 本分動くことになる。従って、光学系の調整により、Fig. 4 に示すようなスペckル・パターン干涉縞をあらかじめ作っておけば、潮汐力の時間的変化に伴い、1 日 1 本分以上の縞の移動が見られると期待される。

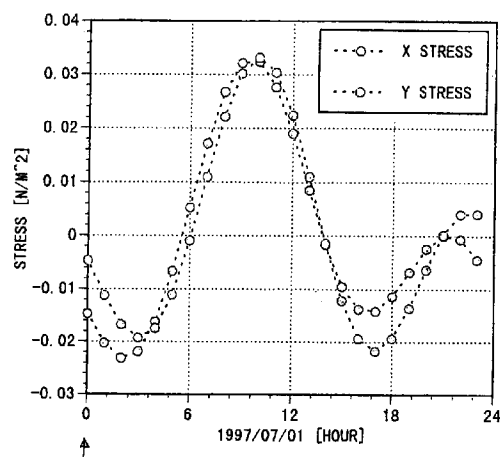


Fig. 3 Tidal stress calculated for the Kamigamo tunnel on July 01, 1997.

4. 予備観測の結果と問題点

上賀茂地学観測所における ESPI 法を用いた干涉計測の実験は、1997年6月から同年8月まで続けられた。しかし、実際に現場で実験を始めてみると、Fig. 4 のスペckル・パターン干涉縞をあらかじめ作ることが、極めて難しいことがわかった。

事前に大学構内の実験室で行った実験では、ハーフ・ミラーから 2 つのオブジェクト (2 面の壁) までの距離をそれぞれ約 50 cm とし、2 つの粗面から戻ってきた反射光の重ね合わせを高感度 CCD ビデオ・カメラで取り込み、画像処理装置を経て、画像データをパーソナル・コンピュータに記録する。次に、ハーフ・ミラーを指で軽くたたいたのち、再度、画像データを取り込み、2 つの画像の輝度の差の絶対値をとることにより、スペckル・パターン干涉縞を比較的簡単に生成することができた。

上賀茂地学観測所の横坑内の現場では、ハーフ・ミラーからオブジェクトまでの距離が約 180 cm あり、実験室と同様な方法では、干涉縞を得ることができなかった。そこで、われわれは、2 つの画像データを取り込む間に、壁面の 1 部を押したり、ドライヤーで暖めたりすることによって、瞬間的に干涉縞を作り出すことはできたが、安定した縞模様は得られなかった。そのため、再度、実験室に立ち戻り、基準となる干涉縞を作り出すための基礎実験からやり直すことになった。

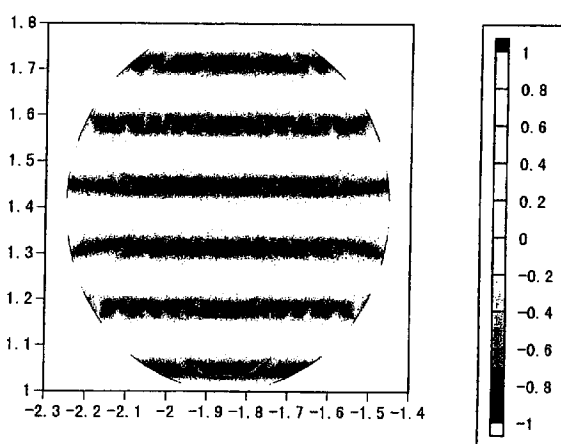


Fig. 4 Expected ESPI fringe pattern.

The fringe will move up and down accordingly tunnel deformation caused by the tidal force.

5. 観測システムの改良

Fig. 5(a) は、ESPI 干涉縞を生成するための基本的な光学系の配置を示す。このシステムを用いて、ハーフ・ミラーと対象物 (O_1 と O_2) との間の距離が 50 cm より短い場合は、対象物をマイクロメーターで少し動かすか、ハーフ・ミラーを少し回転させることで比較的容易に干

渉縞を得ることができる。しかし、その距離を超えると、この光学配置で干渉縞を作るのが難しい。上賀茂地学観測所の光学配置からもわかるように、ESPI 法を用いて地殻を計測するためには、ハーフ・ミラーと対象物 (O_1 と O_2) との間の距離を 2 m 程度にする必要がある。そこで、別の工夫が必要となる。

Fig. 5(b)は、ピエゾ素子を使って片方の光路のみを任意に変化させることができるようにしたものである。対象物は動かさず、手前のミラーを動かすことで干渉縞を得て、その後ピエゾの電流を変化させることで片側の位相が 90 度ずつ変化するように段階的に画像を取り込み、位相シフト法を用いて位相図を作った。この方法の難点は、大型のミラーが必要となることであり、そのため、現場での応用は困難と考えられる。さらにピエゾを使う場合、再現性に不安があるため、初期縞模様を与えたあとはその縞の動きを見る方法が適していると思われる。そのため、位相シフト法は却下することにした。代わりに考えたのが次の配置である。

Fig. 5(c)は、対象物に向かう“往き”用のハーフ・ミラーと反射光を CCD に取り込むための“帰る”用のハーフ・ミラーと分離した光学配置である。Fig. 5(a)のように同じハーフ・ミラーを用いると、光学配置が簡潔になってシステムを組みやすいが、対象との距離が長くなると、撮影系のミラーが動くのは問題があることがわかった。つまり、同じスペックルの像が同じ CCD に届かなくなるためである。この問題点は、照射系と撮影系のハーフ・ミラーを分けることで解決した。現在、1 m ほどの距離まではハーフ・ミラーのマイクロメーターを調整することで縞模様が得られている。しかし距離が長くなるにつれて縞の出方が不安定になる傾向があり、また、時間経過と共に縞が不鮮明になることも確認された。これらの点に関して、さらに室内実験室を行う必要がある。そのなかで、ピエゾ素子の応用なども考えている。

6. まとめ

ホログラフィ干渉法を用いた地殻歪の 3 次元計測システムを発展させて、湿式の写真処理部分をビデオ・カメラと画像処理装置に置き換えた電子式スペックル・パターン干渉法 (ESPI) を地殻歪の 3 次元計測に応用することを目的として、上賀茂地学観測所において実験観測を行った。ESPI 式地殻変動観測システムは、多元的な地殻歪変化をレーザー光の $1/2$ 波長を基本単位とする干渉縞の移動から定量的に検出することができるため、地殻変

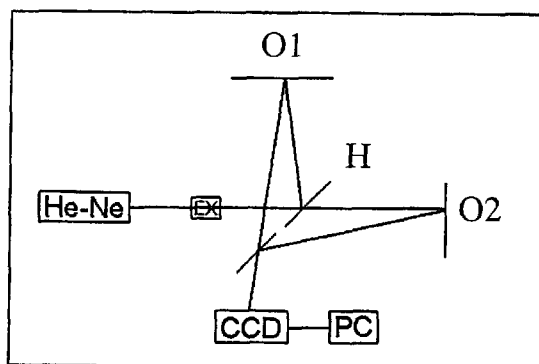
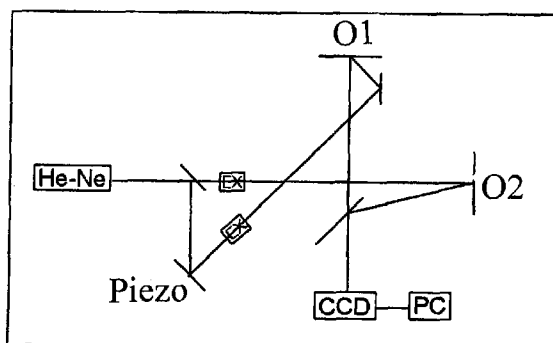
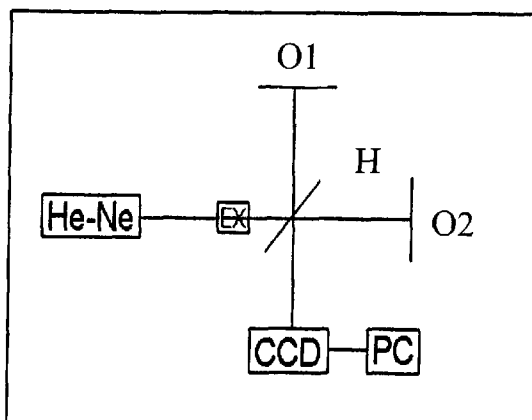


Fig.5 (a) Standard arrangement of the optical pass for ESPI recording. (b): Arrangement for phase shift. (c): Arrangement for measurement of tunnel deformation.

動や地球潮汐の研究に、従来とは質的に異なる観測データを提供することができる。観測に先だって、有限要素法により、潮汐力による上賀茂地学観測所の坑道変形を計算した結果、坑道変形量は、最大で約 $0.4\mu\text{m}$ に達することがわかった。このため、スペックル・パターン干渉縞をあらかじめ作っておけば、潮汐力の時間的变化に伴い、1日1本分以上の干渉縞の移動が観測できると期待された。しかし、実際に上賀茂地学観測所で実験を始めると、現場で ESPI 干渉縞をあらかじめ与えることが難しいということがわかった。そこで、再び学内の室内実験に戻り、検討した結果、距離の離れた物体に対して ESPI 法を用いるためには、撮影系の光学配置を変えてはいけないことがわかった。そこで、Fig. 5(c)に示したハーフ・ミラーを2つ用いる方法が、現在のところ、最も有力な方法と考えられる。今後、時間経過とともに干渉縞が不鮮明になることなどへの対策をさらに検討したうえで、再度、実際の地殻変動用観測坑道内の試験観測を実施する予定である。

謝 辞

本研究の一部は、京都大学防災研究所地震予知研究センターの平成9・10年度プロジェクト研究費を用いて行われたものである。

参考文献

- 佐々憲三・西村英一：地震の前駆現象Ⅰ，‘科学’
第1巻，第2号，86-88
- Takemoto, S.(1979): Laser Interferometer Systems for Precise Measurements of Ground-Strains, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 29, Part 2, No.262, pp.65-81
- Takemoto, S. (1990):Holographic Measurements of Tidal Deformation of a Tunnel, Geophys. J. Int. Vol. 100, pp.99-106
- Takemoto, S. (1993): Applications of Holography and ESPI in Geophysical Sciences, in "Optical Inspection and Testing" edited by J. D. Trolinger, A Publication of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, pp.175-196.
- Takemoto, S. K. Fujimori, Y. Tanaka, T. Yamamoto, Higashinaka, S. Otsuka and M. Omura (1994): Continuous Monitoring of Crustal Strains with a Laser Strain-meter in Kobe, "Proc. The Eighth International Symposium on Recent Crustal Movements", December 6-11, 1993, Kobe, Japan, pp.253-257

- Takemoto, S. (1996): Holography and ESPI in Geophysics, Optics and Lasers in Engineering, Vol.24, pp. 145-160
- Takemoto, S., A. Mukai, U. Magari and J. Kondo(1998a): A New Measurement System of Tidal Strains by Employing Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) Proc. The 14th Inter. Sympo. on Earth Tides, Brussels, pp.69-73
- Takemoto, S., T. Yamamoto, S. Otsuka, K. Fujimori and A. Mukai (1998b): Tidal Strain Observation at Rokko-Takao Station, Kobe, Japan: Proc. The 14th Inter. Sympo. on Earth Tides, Brussels, pp.193-199.

Development of a 3-D Real Time Measurement System of Crustal Strains by Means of Electronic Speckle Pattern Interferometry

Shuzo TAKEMOTO*, Junya KONDO* and Atsushi MUKAI*

*Graduate School of Science, Kyoto University

**Faculty of Law, Nara Sangyo University

Synopsis

An ESPI recording system designed for monitoring crustal deformations was installed in the tunnel of Kamigamo Geophysical Observatory, Kyoto, Japan, in June 1997. Before the field experiment, tunnel deformations caused by tidal forces were estimated by using a finite element method. As a result, relative displacement of $0.4 \mu\text{m}$ could be expected due to tidal stress acting around the tunnel. This amount corresponds to be more than one fringe displacement in the ESPI pattern. This paper reports the preliminary result of experiment at the Kamigamo Observatory.

Keywords: Crustal deformation, Extensometer, Laser extensometer, Holography, ESPI