

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03845

研究課題名（和文）グローバル画像相関法と逆問題解析による粘弾性材料特性評価法の確立

研究課題名（英文）Identifying Viscoelastic Characteristic Functions Using Global Digital Image Correlation and Inverse Analysis

研究代表者

米山 聡 (Yoneyama, Satoru)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：90306499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、バーチャルフィールド法を用いて緩和体積弾性係数及び緩和せん断弾性係数を同時に決定する方法を提案する。測定された面内ひずみが逆解析の入力となり、板厚方向ひずみは線形粘弾性体の対応則に基づいた数値ラプラス変換によって、面内ひずみ成分から算出する。未知材料特性値は仮想仕事の原理に粘弾性構成方程式を代入することで得られる非線形方程式を数値解法によって解くことで同定する。提案する方法を有限要素解析により得られた変位分布および画像相関法により得られた変位分布に対して適用し、その有効性を示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この方法では、独立した2種類の粘弾性材料特性を同一の試験片を用いて同時に決定することが可能であり、従来から指摘されてきた材料特性評価の精度に関する問題が解消できる。そのため、高分子材料など粘弾性挙動を示す材料で構成される機器・構造物の応力解析の精度が向上しそれらの信頼性向上が期待できる。また、この方法を実現するために本研究で開発した数値ラプラス変換を用いた応力算出法や非線形バーチャルフィールド法は、粘弾性力学および逆問題解析それぞれにおいて今後の発展に資する技術である。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a method for determining the relaxation bulk and shear moduli simultaneously based on the virtual fields method. In-plane displacements and strains are measured and the through-thickness strain is computed from the in-plane strains using the numerical Laplace transform based on the correspondence principle. The unknown material property functions are determined by solving nonlinear simultaneous equations obtained from the principle of virtual work and the constitutive equations of viscoelasticity. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by applying it to the displacement fields obtained by finite element analysis and the measured fields measured by digital image correlation.

研究分野：材料力学，実験力学

キーワード：逆問題解析 粘弾性 ひずみ測定 画像相関法

1. 研究開始当初の背景

粘弾性体の応力解析を行うためには、緩和体積弾性係数(バルクリラクゼーションモジュラス)および緩和せん断弾性係数(バルクシェアーモジュラス)を得る必要がある。しかし、これらの係数を直接的及び同時に測定することは困難である。等方粘弾性体を対象とした場合、独立した材料特性は2つであり、それらを求めるためには、2種類の試験を行う必要がある。緩和弾性係数とポアソン比を測定し、弾性係数の内部変換によって緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を算出することが可能である。しかし、2つの独立した係数の測定は複雑であるため、ポアソン比はしばしば定数として扱われ、正確な緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を算出することができない。星野ら<sup>(1)</sup>は緩和弾性係数とポアソン比を同時に測定したが、これらの値から緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を得る際には、関数近似を何度か行う必要がある。Emri ら<sup>(2)</sup>は緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を直接測定する手法を提案した。しかし、2つの係数は異なる試験で測定している。独立した2つの粘弾性材料特性の評価は、同一条件下にある同一試験片に対して同時に行われることが理想である<sup>(3),(4)</sup>。

一方、材料特性を同定する方法として逆解析手法がある。この方法では、逆解析の入力値となる変位分布を光学的測定法などにより求め、仮想仕事の原理を用いて未知材料特性を決定する。これらの未知材料特性は、応力ひずみ関係式を用いて構成方程式に代入された仮想仕事の非線形方程式を解くことによって直接かつ同時に決定することができる。ところで、応力ひずみ関係式を得るために、測定した物体のひずみから応力を算出する時、物体の表面は平面応力状態であると考えられる。その際、板厚方向の応力が0であっても、板厚方向ひずみが生じる。粘弾性体の場合は弾性体や弾塑性体と異なりポアソン比が時間と温度に依存するため、面内ひずみから板厚方向ひずみを求めることができず、応力を算出することが困難である。したがって、面内のひずみ測定値から板厚方向の垂直ひずみを決定する方法の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、ポアソン比の時間・温度依存性を考慮し、緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を同時に同定する方法を提案する。そのためには面内ひずみの測定値から板厚ひずみを算出する必要があるが、粘弾性体の対応則に着目し、ラプラス変換面での板厚方向ひずみを数値ラプラス変換<sup>(5)</sup>による数値解法によって算出する。これにより、ポアソン比を時間に依存する変数として取り扱うことができるため、粘弾性体の材料特性を同定することが可能となる。

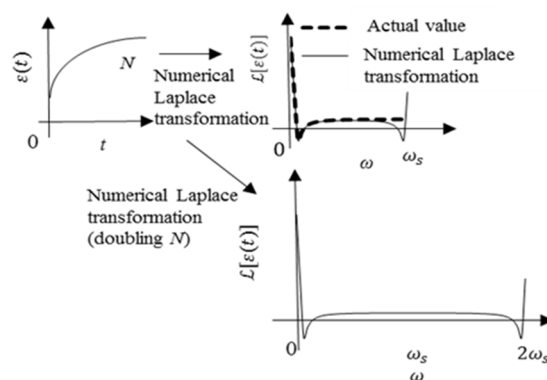
3. 研究の方法

(1) バーチャルフィールド法を用いた粘弾性材料特性の同定方法

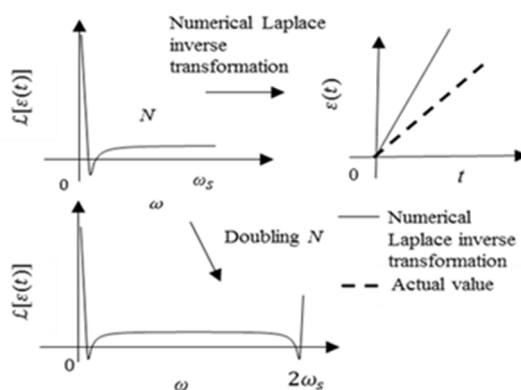
線形粘弾性体の構成方程式を仮想仕事の原理に代入することによって得られた非線形方程式を解くことで、未知パラメータである緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を同定する。この時、入力に用いる板厚方向ひずみは、次に示すように面内のひずみ測定値から数値ラプラス変換を用いて算出する。

(2) 数値ラプラス変換を用いた板厚方向ひずみの算出

本研究では、時間温度依存性を考慮し板厚方向垂直ひずみを算出するため対応則を利用する。対応則によれば、ラプラス変換面での板厚方向垂直ひずみは弾性体と同じ形式で表すことができる。この特性を利用し、数値ラプラス変換および逆変換を用いた数値解法によって板厚方向ひずみを算出することを提案する。この方法の



(a) 数値ラプラス変換



(b)

数値ラプラス逆変換

図1 数値ラプラス変換の概要

概要を図 1 に示す。

### (3) 有効性の検証

既知の粘弾性材料特性を使用し、有限要素法によって得られた変位分布を用いて提案手法の妥当性を検証する。その後、画像相関法により得られた変位分布にこの方法を適用する。

### 4. 研究成果

有限要素法によって得られた変位分布と荷重履歴、また自作した仮想変位場を用いて複数の温度において逆解析を行った。種々の温度条件下で解析を行い、基準温度 303 K とした時間温度換算測を適用することで、1 本の曲線すなわち、マスターカーブを作成した。図 2 は得られ材料特性のマスターカーブである。低温になるにつれて、弾性係数の値が大きくなっていることがわかる。提案する方法によりゴム状態からガラス状態へ遷移していく様子を表現する材料特性を同定できていることがわかる。また、有限要素法に入力した値と逆解析結果を比較しており、ポアソン比を 0.477 一定として逆解析を行った結果を点線プロットで示している。両パラメータともに入力した材料特性に近い結果を同定することができており、ポアソン比を一定とした場合に比べてより正確に同定することができている。つぎに、得られた値から内部変換によってポアソン比を算出した結果を図 3 に示す。逆解析結果が入力値と概ね一致していることから、ポアソン比の時間温度依存性を考慮して材料特性を同定することができている。

次に、画像相関法<sup>(6)</sup>を用いて測定したデータに対して提案する方法を適用した。図 4 は試験片と測定装置である。試験片にはスプレー塗料によるランダムパターンを塗布し、図 5 に示すような画像を撮影した。図 6 は画像相関法により得られた変位分布の時間変動である。測定データは測定誤差を含むため、材料特性を正確に求めるためには仮想変位を適切に設定する必要がある。現時点ではその方法は確立していないため、図 7 に示すように数種類の仮想変位場を用意した。得られた緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を図 8 に示す。これらの図において実線は動的粘弾性試験により得られた値である。これらの図に示すように、緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数の同定結果は使用する仮想変位に依存していることがわかる。得られた結果は動的粘弾性試験の結果とおおむね一致しており、提案する方法は有効である。

本研究では弾性材料特性である緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数を同時に同定する方法の提案を行った。ポアソン比の時間温度依存性を考慮するため、数値ラプラス変換を利用して面内のひずみ測定値から板厚ひずみを算出した。有限要素法により得られたシミュレーションデータに対して提案する方法を適用し、その有効性を示した。独立した 2 種類の粘弾性材料特性係数関数の計測は従来からの課題の一つとして長く議論されている。特に緩和体積弾性係数を直接評価するためには体積変化を測定する必要があり困難である。そのため試行錯誤が行われている状況である。一方、ひずみ分布測定結果を利用した材料特性の同定については、主に

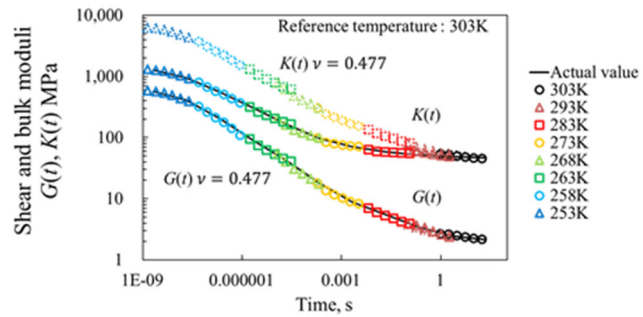


図 2 VFM により得られた緩和体積弾性係数および緩和せん断弾性係数のマスターカーブ

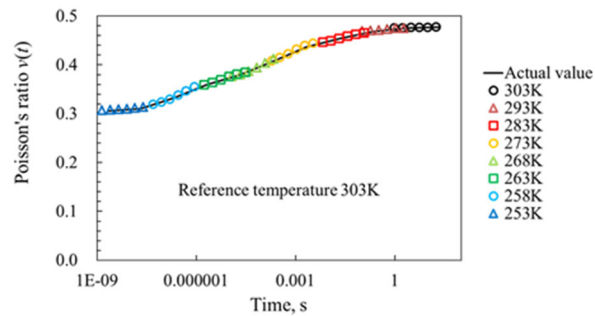


図 3 逆解析結果から内部変換によって得られたポアソン比のマスターカーブ

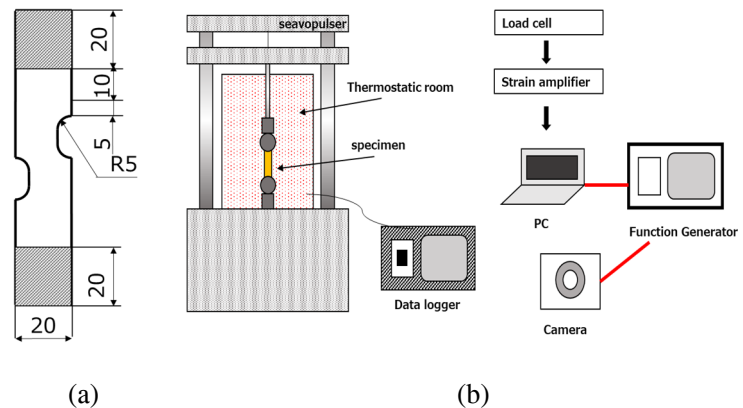


図 4 (a) 試験片 (b) 測定装置

ヨーロッパの研究者により盛んに行われている。ひずみ測定方法として画像相関法が用いられることが多く、バーチャルフィールド法を基に種々の材料特性の同定が行われている。本研究は以上の2つの研究内容を結びつけるものである。これは粘弾性力学およびバーチャルフィールド法のどちらにおいても意義のある内容である。今後は測定誤差の影響を低減する適切な仮想変位を設定する技術の確立が必要である。



図5 試料表面の画像

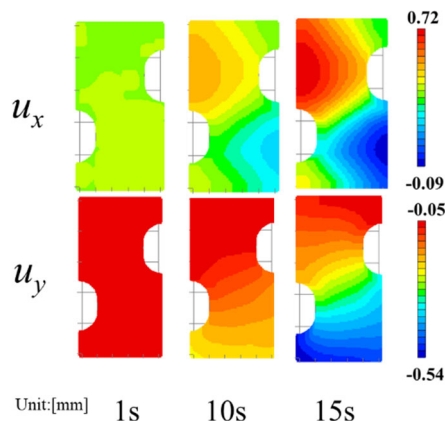


図6 画像相関法により得られた変位分布

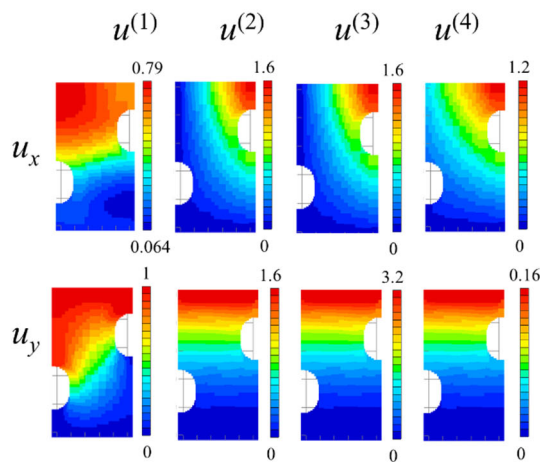


図7 仮想変位分布図

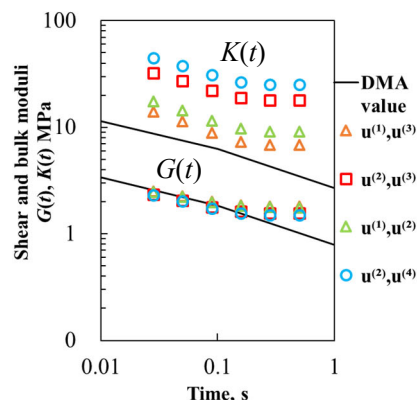


図8 VFMにより得られた緩和体弾性係数および緩和せん断弾性係数

<引用文献>

- (1) Hoshino, Y., Tamai, K., Zhang, Y. and Yoneyama, S., Direct measurement and master curve construction of viscoelastic Poisson's ratio with digital image correlation, *Strain*, Vol.54 (2018), e12294.
- (2) Emri, I. and Prodan, T., A measuring system for bulk and shear characterization of polymers, *Exp. Mech.*, Vol.46 (2003), pp. 429-439.
- (3) Tschogel, N.W., Knauss, W.G., and Emri, I., Poisson's ratio in linear viscoelasticity: a critical view, *Mech. Time-depend. Mater.*, Vol.6 (2002), pp. 3-51.
- (4) Qvale, D. and Ravi-Chandar, K., Viscoelastic characterization of polymers under multiaxial compression, *Mech. Time-depend. Mater.*, Vol. 8 (2004), 193-214.
- (5) 井上裕嗣, 上林 稔, 岸本喜久雄, 渋谷寿一, 小泉 堯, 高速フーリエ変換を利用した数値ラプラス変換・逆変換, 日本機械学会論文集(A編), Vol.91 (1991), pp. 245-250.
- (6) Yoneyama, S., Basic principle of digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement, *Adv. Compos. Mater.*, Vo. 25 (2016), pp. 105-123.
- (7) Yoneyama, S., Koyanagi, J. and Arikawa, S., Measurement of discontinuous displacement/strain using mesh-based digital image correlation, *Adv. Compos. Mater.*, Vol. 25 (2016), pp. 329-343.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 星野優輔, 張 月琳, 竹尾恭平, 米山 聡	4. 巻 20
2. 論文標題 バーチャルフィールド法を用いた粘弾性材料特性の同定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 17-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.20.17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taguchi, S., Takeo, K. and Yoneyama, S.	4. 巻 5
2. 論文標題 Computing Stresses from Measured In-plane Strains in Viscoelastic Body under Plane Stress Condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 135-140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/aem.5.0_135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Taguchi, S., Takeo, K. and Yoneyama, S.
2. 発表標題 Computing Stresses from Measured In-plane Strains in Viscoelastic Body under Plane Stress Condition
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口祥太郎, 竹尾恭平, 米山 聡
2. 発表標題 数値ラプラス変換を用いた平面応力状態における粘弾性体の応力算出手法の確立
3. 学会等名 第51回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木壮一朗, 田口祥太郎, 竹尾恭平, 米山 聡
2. 発表標題 ポアソン比の時間依存性を考慮した逆問題解析による粘弾性材料特性の同定
3. 学会等名 第51回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hoshino, Y., Zhang, Y. and Yoneyama, S.
2. 発表標題 Simultaneous Identification of Two-independent Viscoelastic Characteristics with the Virtual Fields Method
3. 学会等名 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taguchi, S., Takeo, K. and Yoneyama, S.
2. 発表標題 Evaluating Stresses from Measured Strains in Viscoelastic Body Using Numerical Laplace Transformation
3. 学会等名 SEM XIV International Congress on Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taguchi, S. and Yoneyama, S.
2. 発表標題 Inverse Analysis of Viscoelastic Material Properties Considering Time- and Temperature-Dependence of Poisson's Ratio
3. 学会等名 International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

青山学院大学理工学部機械創造工学科材料力学研究室  
<http://www.me.aoyama.ac.jp/~yoneyama/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------