

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560086  
 研究課題名(和文) レーザ熱衝撃を受ける電子薄膜材料の熱衝撃破壊機構の解明と熱強度評価  
 研究課題名(英文) Solutions and Evaluations of Thermal, Electrical and Mechanical Waves in Piezoelectric Thin Plates under Impulsive Laser-Pulse Heating  
 研究代表者  
 須見 尚文 (SUMI NAOBUMI)  
 静岡大学・教育学部・教授  
 研究者番号：20022189

研究成果の概要(和文)：①レーザ熱衝撃を受ける薄膜材料の温度波と熱衝撃波の特性曲線法を用いた数値解析法を確立した。②黒色塗装が施され透明材料の表面に YAG レーザを用いて熱衝撃を加え、発生する熱波動現象を他面に取り付けた超小型 AE センサーで計測し、コンピューターにより解析する実験方法を確立した。③レーザ熱衝撃を受ける電子薄膜材料の減衰を考慮した熱・電気・弾性波を、特性曲線法を用いて解析し、材料の熱衝撃強度特性を評価した。

研究成果の概要(英文)：①This research developed the numerical method for the solutions of thermo-electro-mechanical responses of piezoceramic thin films subjected to impulsive loadings. The basic equations are based on the generalized theory of thermoelasticity, and the basic equations are numerically analyzed by using the method of characteristics. ②We established the experimental system for the measurement of dynamic thermal stresses of transparent materials subjected to the Laser-Pulse heating. The induced thermal stresses are measured by using the AE sensors. ③Numerical results are obtained for thin films and tow-layer composite films subjected to impulsive surface heating. The influences of the damping coefficient, relaxation times and thermo piezoelectric constants on the thermo-electro-mechanical waves are found.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：材料力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：熱応力・波動・圧電材料・レーザ加熱・材料設計・物性・評価

## 1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器材料の多様化・高密度化・高集積化・複合化が進み、高効率・高出力のために材料はミクロンオーダーまで薄膜化されて使用されるようになってきた。これらの材料は、レーザー照射による熱衝撃をはじめ、一層厳しい熱的使用環境に晒される。このため、材料内部には熱衝撃による熱衝撃応力が発生し、時として材料の破壊にいたる。このため、この熱衝撃破壊機構の解明と熱衝撃強度評価が重要視されている。これらの対策として、従来の熱衝撃実験に基づいた強度評価に加え、数値シミュレーションを事前の設計段階で用い、レーザー熱衝撃応力を定量的に評価する方法が試みられている。しかしながら、一般の熱衝撃現象の場合、温度は瞬間的に到達し、これに付随して熱応力が生じるとして解析されてきた。しかし、レーザー衝撃加熱のように大量の熱が衝撃的に付加されると、温度波が有限の速度で伝播し、それに付随して熱衝撃波が生ずるため、従来の解析で予測することが困難となり、設計位置と異なる箇所破壊現象が生じるため、このレーザー衝撃破壊機構の解明が喫緊のテーマとなっている。本研究での数値シミュレーション法が確立されれば、材料の熱衝撃破壊機構と熱強度評価が正確かつ簡便に行えることが期待できる。更に、本研究ではレーザー照射による熱衝撃実験を行い、上記の解析方法の有用性を検証する。

## 2. 研究の目的

本研究は、レーザー熱衝撃を受ける電子薄膜材料に生じる熱衝撃応力波の「特性曲線法を

用いた数値シミュレーション法」を確立し、レーザー熱衝撃実験による測定結果と比較・検討することにより、熱衝撃破壊強度を解明し評価しようとするものである。この独創的な方法を用いると、単層薄膜材料の熱衝撃問題ばかりでなく、多層薄膜材料や、傾斜機能薄膜材料の問題も解析できる。この様な解析方法は、世界的に行われておらず、本研究が世界の先駆けとなる。また、透明なガラス体表面の一部を黒色に塗装し、YAG レーザーを照射し固体中の熱衝撃波を超小型AEセンサーにより計測する方法は、独創的で、数値解析との比較で熱衝撃破壊強度を評価する方法は、国際的に高く評価されることが期待される。

## 3. 研究の方法

研究の手法は以下の3段階で行われる。

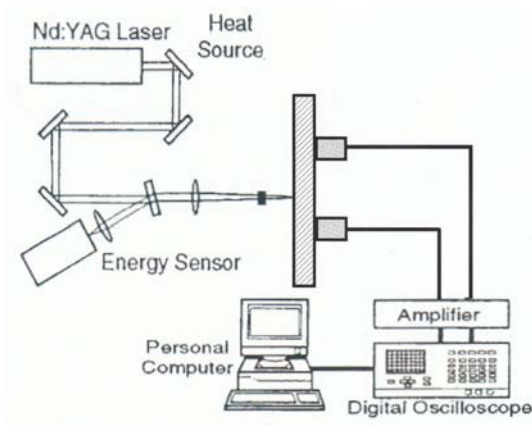
### (1) 「特性曲線法を用いた数値シミュレーション法」の確立と熱衝撃破壊解析

ここでは、温度場と電気場と弾性場が連成した多次元の動的熱電気弾性問題を対象とした「特性曲線法を用いた数値シミュレーション法」を確立する。本解法によれば、多層薄膜の界面や境界での波の反射・干渉を自動的に考慮して解析するので、材料の不均質特性を問わず解析でき、温度波や電気弾性波や熱応力波の多次元的な応力波の伝ば挙動が正確に把握できる。

### (2) レーザー熱衝撃実験による熱衝撃応力の測定

ここでは、透明なガラス体中の熱弾性波動を測定する。ガラス固体の一部を黒色に塗装し、YAG レーザーを照射し熱衝撃を加える。ここで生じた熱衝撃波を数個の超小型AEセンサーにより熱波動現象を計測し、

コンピューターにより解析し、理論計算値との比較・検討を行うが、このような実験は独創的である。



レーザー熱衝撃実験装置

### (3) 電子薄膜材料の熱衝撃破壊機構の解明と破壊強度の同定

ここでは、(1)で開発した「特性曲線法を用いた数値シミュレーション法」により、単層および複合材料としての電子薄膜の熱衝撃現象を解析し、(2)の方法で測定実験を行い、この解析結果から熱衝撃破壊強度を同定する。

## 4. 研究成果

### (1) 「特性曲線法を用いた数値シミュレーション法」の確立

熱衝撃負荷を受ける単層材料、二層複合材料および傾斜機能材料の温度波、電気波および熱衝撃波の特性曲線法を用いた数値解析法を確立した。基礎式には Lord-Shulman および Green-Lindsay による一般化された熱弾性基礎式を用い、熱の緩和時間に加え、粒子速度の減衰項を考慮した。この解法を用いて、表面を局部加熱される種々の電子薄膜材料の温度波、電気波および熱衝撃波を求め、熱衝撃波の伝播挙動を解明した。

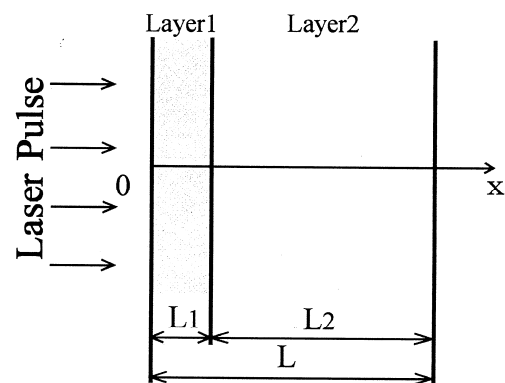
### (2) レーザ熱衝撃実験による熱衝撃応力の測定

黒色塗装が施され透明材料の表面に、YAG

レーザーを用いて熱衝撃を加え、発生する熱波動現象を他面に取り付けた超小型AEセンサーで計測し、コンピューターにより解析する実験方法を確立した。透明ロッドレンズに対する実験を行い、特性曲線法による解析結果と比較して、粒子速度の第一波に良好な一致が見受けられた。本実験方法の可能性を検討できた。

### (3) 電子薄膜材料の熱衝撃機構の解明と破壊強度の同定

レーザー熱衝撃を受ける単層および二層薄膜材料の減衰を考慮した温度波と熱衝撃波を特性曲線法を用いて数値解析した。解析には Lord-Shulman および Green-Lindsay による一般化された熱弾性基礎式を用い、減衰項および緩和時間が界面の温度波および熱応力波に及ぼす影響を明らかにした。種々のパラメータに対する数値計算を実行し、電子薄膜材料の熱衝撃強度特性を評価した。



レーザー加熱を受ける二層複合板

### (4) 傾斜機能薄膜材料の熱衝撃強度評価

傾斜機能材料は、材料の設計段階で使用条件に合わせて構成因子を分布させることにより、機能を積極的に制御できる材料である。ここでは、基板材料層に電子薄膜層が完全に接着された薄膜に、レーザー熱衝撃が作用したときの一般化された熱弾性問題を、粒子速度の減衰を考慮して特性曲線法を用いて解析

した。温度変化、熱応力及び電界の強さを長時間にわたって数値的に求め、さらに粒子速度の減衰係数や層の厚さ比が、温度変化、熱応力および電界の強さの時間経過に及ぼす影響を明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① N. Sumi and Y. Matsunaga, Thermal, Electrical and Mechanical Response of a Piezoceramic Thin Film with Damping, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress on Thermal stresses, TS2009, Illinois, 2009, pp.179-182、審査有
- ② N. Sumi, Generalized Thermo Mechanical Wave Problem in a Thin Composite Plate with Damping, Proceedings of the Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, Matue, 2008, pp.37-40、審査有
- ③ 芦田文博、須見尚文、坂田誠一郎、前田真由子、減衰を考慮した二層複合薄膜の一般化された一次元熱弾性解析、日本機械学会論文集(A編)、74巻738号、2008、pp.208-215、査読有
- ④ T. Hata and N. Sumi, Thermal stress focusing effect in a spherical zirconia inclusion with dynamically transforming strains, Journal of Engineering Mathematics, Vol. 61, No.2-4, 2008, pp.133-141、査読有
- ⑤ T. Hata and N. Sumi, Thermal stress focusing effect in a cylinder with phase transformation, Acta Mechanica, Vol.195, 2008, pp.69-80、査読有
- ⑥ N. Sumi, Two-Dimensional Thermo-Mechanical Wave Propagations in Generalized Coupled Theory of Thermoelasticity, Journal of Thermal Stresses, Vol.30, No.9, 2007, pp.897-909、査読有
- ⑦ N. Sumi, Two Dimensional Thermo-Mechanical Wave Propagations in Generalized Coupled Theory of Thermoelasticity, Proceedings of The Seventh International Congress on Thermal Stresses, Thermal Stresses 2007, Taipei, 2007, pp.61-64、審査有

[学会発表] (計3件)

- ① 須見尚文、減衰を考慮した圧電セラミッ

クス薄板の熱・電気・弾性波動の数値解析、日本機械学会 第22回計算力学講演会、CMD2009、2009年10月10日、金沢大学

- ② K. Watanabe, Elastodynamic Doppler Effect by a Moving Interface, 1<sup>st</sup> Japan-Austria Joint Workshop on Mechanics and Model Based Control of Smart Materials and Structures, 2008年9月22日、Johannes Kepler University Linz, Austria
- ③ 小野幹生、レーザ照射を受ける円柱内を伝播する熱応力波の測定と解析、日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス、2007年10月26日、東京大学生産技術研究所

[図書] (計1件)

- ① H. Irshik, M. Krommer, K. Watanabe, T. Furukawa (Eds.), SpringerWienNewYork, Mechanics and Model - Based Control of Smart materials and Structures, 2009, 222, (K. Watanabe and N. Sumi, Elastodynamic Doppler Effects by a Moving Interface, pp.193-204)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

須見 尚文 (SUMI NAOBUMI)  
静岡大学・教育学部・教授  
研究者番号：20022189

##### (2) 研究分担者

畑 俊明 (HATA TOSHIAKI)  
静岡大学名誉教授  
研究者番号：40005351

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：