

平成30年6月21日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14509

研究課題名(和文) 光交流式ヘテロダイン干渉法の提案と宇宙用超低熱歪材のナノスケール熱的寸法安定評価

研究課題名(英文) Proposal of periodic-heating heterodyne interferometry and evaluation of nano-scale thermal dimensional stability of low thermal expansion material for spacecraft

研究代表者

小川 博之(OGAWA, HIROYUKI)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：60311172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：高度な熱歪設計を達成するため、線膨張係数と熱拡散率を同時に計測する手法を新たに提案し、その実現性を検証した。光ヘテロダイン干渉法と周期加熱法を融合した新しい装置を新たに構築し、物性が既知の単結晶シリコンにより高精度線膨張係数測定の有効性を確認した。CFRPの線膨張係数の温度依存性を明らかにするとともに、アルミニウムの線膨張係数、熱拡散率の同時測定を行い、高い精度での測定を実証した。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve a high precise thermal strain design of spacecraft, a simultaneous measurement for a coefficient of thermal expansion (CTE) and a thermal diffusivity has been proposed, and its feasibility was experimentally examined. A new measurement method which consists of a heterodyne interferometry which has a good advantage in high wavelength resolution for the CTE, and periodic heating method for the thermal diffusivity has been developed. First, a measurement accuracy was evaluated with a single crystal silicon. Second, the temperature dependence of the CTE for carbon fiber reinforced plastic was measured, finally, a simultaneous measurement of the CTE and the thermal diffusivity for Al alloy was conducted and its high-accurate measurement was demonstrated.

研究分野：航空宇宙工学、熱工学、熱設計、二相流

キーワード：線膨張係数 熱伝導率 天文衛星 熱ひずみ

1. 研究開始当初の背景

近年宇宙機の構造物の大型化、光学的観測精度の向上に伴い、熱歪設計が極めて重要となる。特に極低温域での温度依存性を考慮した熱歪設計は重要であり、例えば赤外天文衛星「あかり」では6Kでの材料相変態に起因する線膨張係数変化を考慮していなかったため、地上試験時に主鏡から支持パットが外れ、計画が大幅に遅れるなどのトラブルにも発展した。このように、高度な熱歪設計を達成するためには、広い温度範囲における熱的寸法安定性、すなわち材料自身の「線膨張係数」と、外部環境変化に伴う三次元温度分布を正確に把握するための「熱伝導率」の情報が不可欠となるが、これまで不足データの挿入や、実際にミラーを製作した上での熱歪結像評価を行うなど、非常に非効率かつ精度の低い設計が行われてきた。このように線膨張係数と熱伝導率を広い温度範囲で、同一温度環境で測定できる手法の創出ならびに信頼できるデータベースの構築は今後の宇宙開発の高度化にとって喫緊の課題である。

2. 研究の目的

高度な熱歪設計を達成するためには、高精度な「線膨張係数」と「熱伝導率」とその温度依存性情報に基づくナノメートルオーダーの熱的寸法安定性評価が不可欠となる。しかし、これまで材料自身の熱的寸法安定性を広い温度範囲で総合的に評価する手法は無く、線膨張係数と熱伝導率は個別に求められてきた。そこで本研究は、光ヘテロダイン干渉法と周期加熱法を融合した全く新しい手法により、ナノメートルオーダーの熱的寸法安定性を総合的に評価できる技術を確立し、宇宙観測機器や精密光学素子などの熱歪解析・設計・制御の高度化、技術革新をもたらすことを研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究で新たに構築したヘテロダイン干渉計と周期加熱システムを組み合わせた線膨張係数・熱拡散率同時測定装置の概念図を図1に示す。

ヘテロダイン干渉計は、安定化 He-Ne レーザ、音響光学変調器(Acoustic optic Modulator, AOM)、光検出器、ロックインアンプから構成される。レーザ光はビームスプリッタにより2光束に分けられ、それぞれのAOMによってわずかに周波数が変化する。本装置ではAOMに入力するRF周波数を、それぞれ40MHz及び40.003MHzとした。これにより周波数差3kHzの2つのレーザ光が得られる。2つのレーザ光は偏光ビームスプリッタにより、さらにそれぞれ2つの光路に分けられる。1組のレーザ光は直接光検出器1(以後PD1)に入射し、もう1組は試料および背面ミラーにそれぞれ2度反射し光検出器2(以後PD2)に入射する。試料に2度レーザ光を照射することで、測定感度を2倍に増加させている。

ここで、2つの光検出器からのレーザ光の干渉により得られる周期信号をビート信号と呼び、本研究ではビート信号の周波数はそれぞれ3kHzとなる。

また周期加熱用のレーザには波長385μm, 出力150mWのダイオードレーザを用い、試料の表面を周期加熱し、その温度応答の位相遅れの周波数依存性を試料裏面の熱電対で計測する。

2つのビート信号の位相差は試料長によって変化する。PD1及びPD2で検出されたビート周波数の位相をそれぞれ ϕ_{PD1} ・ ϕ_{PD2} とすると、その位相差の変化 $\Delta(\phi_{PD2} - \phi_{PD1})$ は試料長の変化 ΔL と以下のEq.(1)の関係で表記できる。

$$\Delta L = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda_m \Delta(\phi_{PD2} - \phi_{PD1})}{2\pi} \quad (1)$$

ここで、 λ_m は周波数の異なるレーザ光の平均波長であり、本装置では $\lambda_m = 632.8 \text{ nm}$ となる。線膨張率 α は以下のEq.(2)により得られる。

$$\alpha(T_m) = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (2)$$

ただし、 T_m は温度変化前後の試料平均温度、 ΔT はその温度差、 L_0 は温度変化前の試料長である。

$\Delta(\phi_{PD2} - \phi_{PD1})$ はロックインアンプ、試料温度はT型熱電対によってそれぞれ測定される。計測機器は全てGPIBケーブルでPCに接続し、LabVIEWにより制御される。真空環境における測定では、大気の影響を避けるため試料は真空チャンバ内に設置し、レーザ光は真空チャンバ下面のビューポートから入射した。測定時真空度は $3.5 \sim 6.0 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 、液体窒素とシートヒータにより $-160^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ で温度変化させた。一方、大気圧下での測定ではシートヒータにより $30^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ で温度変化させた。

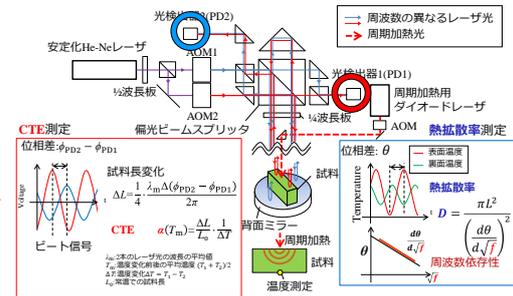


図1 線膨張係数・熱拡散率同時測定概念図

4. 研究成果

新たに構築した線膨張係数・熱拡散率同時測定装置を図2に示す。表1に測定した試料の室温での試料長 L_0 と試料の外観写真を示す。装置の健全性を評価するため、標準物質である単結晶Si試料を測定し、推奨値と比較した。また低熱ひずみ材料として、比剛性に

優れ、ゼロ膨張を実現可能な炭素繊維強化複合材 CFRP を測定する。上面でレーザー光を反射させるため、単結晶 Si 試料は両面を鏡面研磨し、反射率を上げた。試料は背面ミラーと共にベリリウム銅製平行バネホルダで固定した。一方、CFRP は鏡面研磨が困難なため、試料上面に反射用ミラーを挟み固定した。しかしながら、この構成だと測定結果には CFRP の膨張量に加え反射用ミラーの膨張量も加わるため、今回は反射用ミラーの CTE を予め測定し測定結果から差し引くことで CFRP の CTE を導出した。

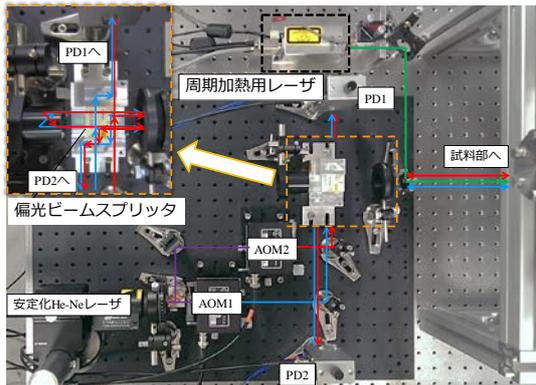


図2 線膨張係数・熱拡散率同時測定装置

表1 測定試料

Material	L_0 , mm	Picture
Single crystal Si	9.88	
CFRP (Pitch-type, Uni-direction, 30layers)	15.06	

図3に単結晶 Si の大気圧下における 30°C から 100°C での試料長変化の温度依存性の結果を測定例として示す。ヒーターによる温度変化に伴い、単結晶 Si の試料長が変化しているのが分かる。

図4に単結晶 Si の真空下での -160°C ~ 100°C における測定と、大気圧下における 30°C ~ 100°C における CTE 測定結果を示す。真空下での測定に関しては、測定した CTE はいずれの温度域に対しても推奨値と $\pm 0.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 以内で一致している。一方、大気圧下での測定に関しては特に室温付近での CTE が推奨値に対して最大 $-0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ の差異が生じた。この測定値と推奨値の差異の原因は、試料付近の大気の屈折率が試料温度変化に伴い変化し、それにより試料長測定の基準となっているレーザー光の波長が変化したためであると考えられる。そのため今後の大気における測定では、大気の屈折率を算出しレーザー光の波長変化量を補正する

必要がある。

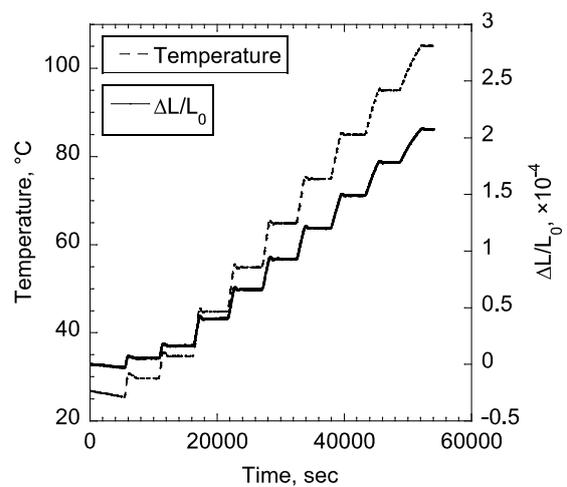


図3 単結晶シリコンの試料長変化の温度依存性

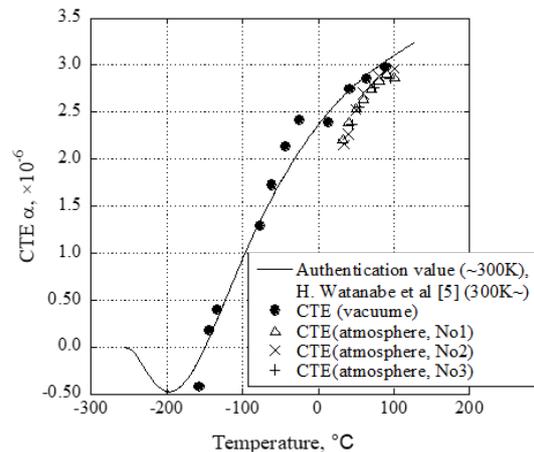


図4 CFRP の線膨張係数温度依存性測定結果

次に、CTE と熱拡散率の同時測定について検証した。CTE の測定における各定常温度ステップの状態ですべて試料に周期加熱光を入射し、熱拡散率の測定を行った。測定試料は 10mm の Al を用いた。図5に同時測定を行った際の試料長温度変化と温度変化、図6に測定された線膨張係数と熱拡散率の測定結果を示す。CTE の計算を行うと $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ であり、また熱拡散率は温度約 69°C に於いて $8.9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、 117°C に於いて $1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ であった。いずれも推奨値と 11% 以内の差であった。

以上のことから本提案手法により CTE と熱拡散率の同時測定が可能であることが確認された。今後は様々な試料に対し本測定法を適用し、幅広い温度範囲で線膨張係数と熱拡散率を明らかにする。

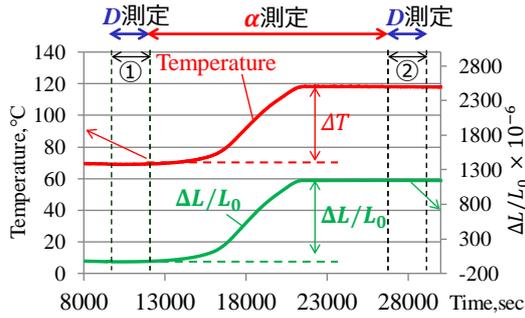


図5 温度変化と試料長変化

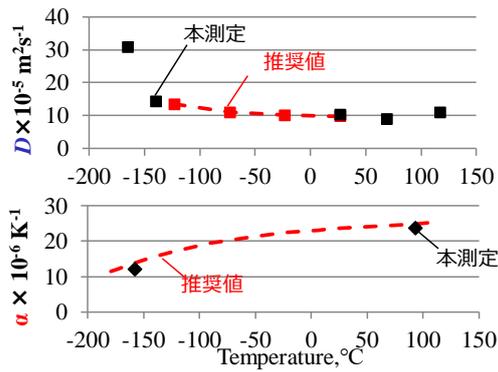


図6 熱拡散・線膨張係数同時測定結果

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 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 博之 (OGAWA, Hiroyuki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機

構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：60311172

(2) 研究分担者

長野 方星 (NAGANO, Hosei)

国立大学法人名古屋大学・大学院工学研究

科・教授

研究者番号：10435810