

氏 名 石川 真志

学位（専攻分野） 博士（工学）

学 位 記 番 号 総研大甲第 1486 号

学位授与の日付 平成 2 4 年 3 月 2 3 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学 位 論 文 題 目 赤外線パルス・フェイズ・サーモグラフィ法による非接触  
非破壊検査法

論文審査委員	主 査	教授	佐藤 英一	宇宙科学研究所
		教授	八田 博志	
		准教授	稲富 祐光	
		准教授	後藤 健	
		教授	小松 敬治	宇宙科学研究所
		教授	向後 保雄	東京理科大学
		教授	笠野 英秋	拓殖大学

## 論文内容の要旨

### 赤外線パルス・フェーズ・サーモグラフィー法による非接触非破壊検査法

Infrared thermographic non-destructive testing (IR-NDT) is a non-contact method featuring shorter inspection times covering a wider area than other NDT methods, such as ultrasonic techniques. Consequently, this method is expected to be applicable to aerospace and automotive structures.

Among IR-NDT methods, pulsed thermography (PT) is the most widely used. In PT inspections, the tested object surface is heated instantaneously by flash lamps. Then the surface temperature distribution after heating is monitored by an infrared camera. Defects inside the object are identified as a local temperature rise on the surface immediately above the defect, attributable to the disturbance of heat flow around the defect. The PT method has been applied to various materials such as metal and ceramic materials, and carbon fiber reinforced polymers (CFRP). In these applications, PT was found to detect defects located at depths of only few millimeters from the surface. In CFRP laminates, the detectable defect depth is especially small: up to 1 or 2 mm. This small value is the result of CFRP's extremely low thermal diffusivity in the out-of-plane direction relative to in-plane directions.

Several ideas have been proposed to improve the shallow detectable defect depth by PT. Among the techniques, pulse phase thermography (PPT) is a convenient testing method similar to PT, and can detect deeper defects than PT. In PPT, the temperature-time data obtained by an infrared camera is transferred to phase-frequency data by application of the Fourier transform. Using phase images constructed from the phase data, detectable depth of defects is improved. Some previous papers reports that deeper defects can be detected in phase images constructed at lower frequencies. However, detectable defect depth for CFRPs presented in the papers using PPT is 2 or 3 mm, and it is still not enough for practical use (up to about 10 mm is required for CFRPs used in aerospace and automotive structures).

Based on the background presented above, this study was undertaken to enhance the detectable defect depth using PPT, and aims to detect defects depth of more than 10 mm in CFRPs. For attaining these aims, the following topics were discussed in each section in this dissertation,

Section 2: Analytical studies for phase data obtained by PPT,

Section 3: Application of square pulse heating to improve the detectable defect depth,

Section 4: Studies for reduction of phase noise,

Section 5: PPT inspection for CFRPs.

In section 2, phase data for various defect depth and defect diameter were analytically calculated using one-dimensional calculations and numerical simulations based on finite element method (FEM). As reported in previous papers, detectable depth of defects is varied with frequency of phase images. Therefore, optimum frequencies for various defect conditions were estimated from analyses. Obtained analytical results were verified by PPT experiments for a polymethylmethacrylate (PMMA) specimen. The experimental results represented that deeper defect could be detected in phase images at the optimum frequencies for each depth than those presented in previous papers.

In section 3, square pulse heating (heating for several tens of seconds) was applied instead of pulse heating

conventionally used in PT and PPT, and its effectiveness was studied by analyses and experiments. From the analytical results, it was found that square pulse heating is especially useful to detect deep defects. In the experimental results for PMMA specimen, though detectable defect depth in phase images obtained by conventional pulse heating was up to about 5-6 mm, it was improved up to 9-10 mm by square pulse heating.

In experimentally obtained phase data, phase noise appears due to existence of temperature noise before Fourier transform, and the detectable defect depth depends on the amplitude of the phase noise. Therefore, noise reduction techniques were studied in section 4 to enhance S/N (Signal to Noise) ratio. In this study, two different methods (Thermographic signal reconstruction; TSR and data averaging) were discussed, and data averaging was found to be useful to improve S/N ratio.

In section 5, PPT inspection for CFRP laminates were studied. CFRPs have intensive thermal anisotropy, and detectable depth of defect in CFRP is expected to be varied depending on its strength. Hence, relation between detectable defect depth and strength of thermal anisotropy was analytically studied using FEM simulations. In addition, the square pulse heating (discussed in section 3) and the noise reduction method (discussed in section 4) were applied for CFRP inspections. Experimental results demonstrated that, though detectable defect depth by pulse heating was about 5 mm, that by square pulse heating (heating duration was 30 s) was improved to 7-8 mm. Moreover, detectable depth was estimated to be improved to about 10 mm when the noise reduction technique (data averaging) was applied in addition to square pulse heating. These results mean that PPT with square pulse heating and noise reduction method is an efficient non-destructive testing method for CFRPs used in aerospace and automotive structures.

赤外線パルスサーモグラフィ法は、非接触で短時間に広い範囲の領域をカバーできる非破壊検査法として知られているが、宇宙機や航空機構造を迅速に非破壊検査できる技術として期待が大きい。しかしながら、現在この手法で検出できる欠陥は表面近傍のものに限られ適用対象も限定されている。石川真志君の出願論文は、この手法を宇宙機や航空機の複合材料構造に適用できるように、検出可能深さを大幅に改善しようとするものである。同君は、特に得られた温度情報をフーリエ変換した位相情報を用いるパルス・フェイズ・サーモグラフィ (PPT) 法に着目して改良を目指した。

第1章では、赤外線サーモグラフィによる非破壊検査手法に関するこれまでの研究を reviewするとともに、赤外線サーモグラフィ法の欠点が浅い欠陥しか検出できないことにあることを示した。また、本出願論文では、目的をこの点に絞ったことを述べている。

第2章では、PPT法による検出深さは低周波数の位相画像に着目することにより向上できることを示し、低周波数における向上機構を解明した。さらに、検出欠陥深さを向上するための最適周波数を解析的に求め、実験による検証を行った。この最適周波数を用いることにより欠陥の検出可能深さは従来技術に比べて約1.5倍に改善した。

第3章では、検出深さの更なる向上を実現するため、従来のパルス加熱に代わり長時間加熱を行う方法を提案した。長時間加熱のメリットは入射エネルギーをあげられることにあるが、15～30秒の加熱を行うことにより、表面温度を大きく上げずに入射エネルギーをあげられることにもあることを示した。本章では最適加熱パターンを明らかにし、これにより、従来法に比べて1.5～2倍の検出深さの向上が得られることを実験的にも確認した。

第4章では、ノイズの低減方法について検討した。本章ではノイズ低減方法として、既提案のThermographic Signal Reconstruction (TSR)法と新規に提案した温度データの平均化法を比較し、TSR法は不適格であり平均化法は有効であることを示した。平均化法ではノイズを従来法に比べて1/3以下に低減できることを示し、これにより検出深さも2倍以上向上することを示した。

第5章では、航空・宇宙分野で使用されるCFRP等の複合材料に上記の手法を適用した結果を示した。複合材料は異方性を有しており、異方性が位相データへ与える影響についても検討を行った。この結果、等方性材料と比較して、異方性の強い複合材料では内部欠陥の検出が困難になるが、本研究の第2章から第4章の方法を組み合わせることで適用することにより、従来CFRPに対しては3mm以下の深さの欠陥(10mm直径)しか検出できなかったが、本研究の成果を取り入れることにより赤外線サーモグラフィ法で深さ10mm以上の欠陥が検出できる可能性が示された。

以上の結果は、宇宙機や航空機の複合材料構造への赤外線サーモグラフィ法の適用を大幅に拡張するもので、非破壊検査技術に大きな貢献をするものといえ、石川真志君の出願論文は工学博士に十分値するものと判断した。