

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 8月26日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360305

研究課題名（和文）

積層圧電素子による空中超音波計測システム開発と宇宙ロケット機器への適用

研究課題名（英文）

New Ultrasonic Measurement System Using Developed Laminated Transducer for Space Rocket Structures

研究代表者

三原 毅 (TSUYOSHI MIHARA)

富山大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：20174112

研究成果の概要（和文）：

500kHz の PZT16 枚素子で 8 チャンネル積層探触子を試作し、8 チャンネルバーストパルサーと組み合わせた大変位超音波計測システムを開発し、大型固体ロケット燃料充填時のボイド探傷に利用できることを確認した。またロケットモーターケースの非接触超音波計測法として、コンポジット型探触子を改良し、中心周波数 100 kHz の探触子を試作し表面整合層を組み合わせた結果、20mm 離れた計測で、通常の素子に比べ約 7 倍の効率で空中超音波計測が可能だった。

研究成果の概要（英文）：

We obtained nearly 7 times larger amplitude by combining the developed laminated transducer and an eight-channel burst pulser compared with a conventional transducer system. We also developed special air coupled transducer adding a silicone rubber as the acoustic impedance matching layer leaded to nearly 7 times larger amplitude than that in a conventional measurement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
23年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
24年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：ものづくり技術（共通基礎研究）

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工 処理

キーワード：ロケット、大変位超音波送信システム、空中超音波

1. 研究開始当初の背景

我が国の航空宇宙産業は、実質的に国内の需要に限定されながら発展してきたが、特に今後の宇宙ロケット技術の存続は、世界的な衛星打ち上げビジネスの中で、打ち上げの信頼性とコストを両立できるか否かに掛かっている。信頼性向上の観点からは、ロケットの製造、組立工程における非破壊検査技術の確立が不可欠であり、卓越した非破壊検査技術の確立することは、航空宇宙産業の浮沈に関わる。特に、複合材料や複雑構造が多用される宇宙ロケット構造部材では、他の構造部材で非破壊検査の中核である超音波探傷が大きな減衰のために困難である。例えば固体ロケットの燃料充填の評価は、NASAでも巨大な建屋の中で専用のX線透過装置で検査されており、我が国でも種子島射場横に検査建屋が設置されている。これらの検査は、膨大なコストと手順が必要で、ロケットのコストを引き上げるとともに、検査も発射前のタイミングに限定されるため、信頼性向上の効果は限定的である。新しい超音波計測技術で、この工程を置き換えることができれば、安いコストで、部品製造・組立・燃料充填・射場設置のすべての段階で検査が可能で、信頼性の向上とコストの削減に大きく寄与し、国際競争力の大幅な向上が見込める。宇宙ロケットの非破壊検査技術の開発は、我が国のロケット産業存続の鍵を握る技術の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、固体ロケットの燃料充填状況を超音波法で計測するための新しい計測法について、積層探触子を中心とする大振幅超音波送信技術を用いた新しい計測法を開発し大型模擬試験体を用いて有効性を検証する。さらに、複合材料ロケットモーターケースを非接触で水等に浸すことなく計測できる、空中超音波計測システムについて、アルミニウム板試験体をモデルに、既存の計測システムと比較して有効性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

富山大三原研究室では、非線形超音波計測システムの開発のために、大変位超音波送信技術の開発に取り組んできた。その技術の中核は、大振幅アクチュエータ等で用いられる積層探触子だが、単純な積層探触子では、積層による電気インピーダンスの低下と共振周波数の低下で、超音波計測に大変位超音波を利用することは困難である。我々は、図1に示す

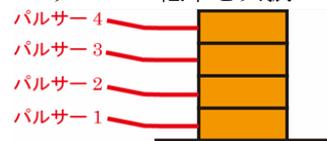


図1 積層探触子システム

積層探触子とマルチチャンネルパルサーを組み合わせることで、周波数やインピーダンスの低下なく大振幅を得られる基本技術を確立した。本研究ではこの技術を、減衰が大きくこれまで超音波計測が困難だった、宇宙ロケットの超音波計測に適用し、新しい検査手法の実用を図る。これまでの計測目的から、既存の装置は超音波バーストパルサーを使ったが、探傷用途では空間分解能が不足する。このため本研究では、やはりこれまでに減衰の大きい材料で有効性を確認してきた超広帯域ステップパルサーに着目し、新たに接地

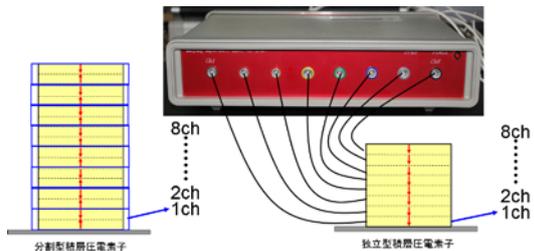


図2 8チャンネルステップパルサーを独立とした、図2に示す8チャンネルステップパルサーを開発した。また本計測用途に最適化した、積層探触子を新たに製造条件を改良することで試作し、固体ロケット燃料大

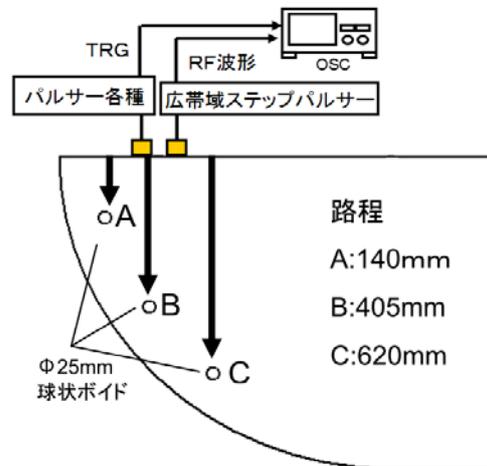


図3 固体ロケット燃料模擬材の探傷型模擬試験体を例に、図3に示す計測により有効性を検証した。

一方、空中超音波計測システムでは物理的に、圧電セラミックスと空気の音響インピーダンスの不整合により、圧電素子から空中に超音波が入射できないことが最大の問題である。



ここでは、市販の 図4 新空中超音波素子コンポジット型探触子の構造をヒントに、図4に示す新しく空中超音波計測に特化した

小さな柱状素子から成る音響インピーダンスを減じた探触子を試作し、さらに空気とのインピーダンスマッチング材としてシリコンゴムを選別し、非接触で20mm離れた位置に置いたアルミニウム板を透過する超音波変位波形を正確にレーザー振動計で計測する、図5に示す空中超音波計測システムを構築して、有効性を検証する。

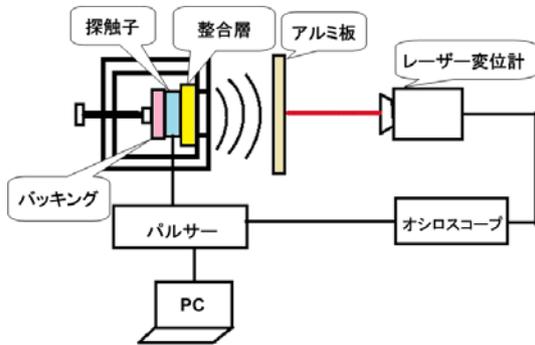


図5 空中超音波計測システム

4. 研究成果

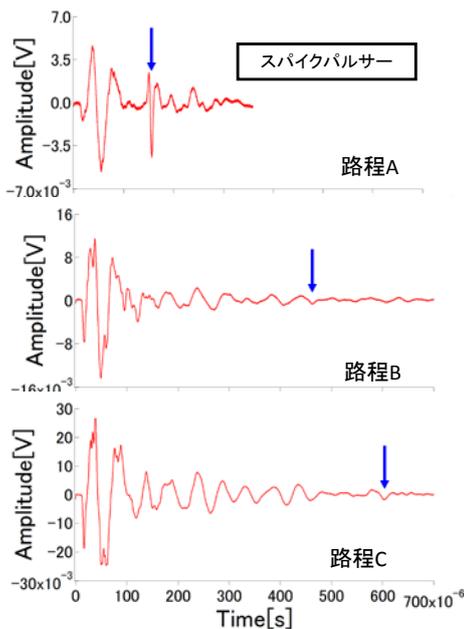


図6 スパイクパルサーによる計測

まず宇宙用固体ロケット燃料を模擬した大型試験体に、深さの異なる3種のΦ30mmのボイドを入れ、従来型スパイクパルサーと開発した8チャンネル積層ステップパルサーで探傷した結果を図6、図7に示す。試験体表面からの2探触子法による反射法で、受信には帯域の広い高性能のステップパルサー用の受信探触子とアンプを用いた。またスパイクパルサーの励振電圧は1000V、ステップパルサーは300Vである。いずれも音速から予測される欠陥エコー位置を矢印で示す。スパイクパルサーでは路程の短いAで、ボイドが検出できるものの、路程405mmのBや620mmのCでは、SN比が悪化して計測ができなかつ

た。図中特にCの矢印位置にエコーが見られるものの、探触子位置を変えても変化しないこと、路程の短いBで既に計測が困難なことから探触子内部の反射等のノイズと判断した。これに対し、ステップパルサーによる計測ではA~Cまで、路程の増加により受信振幅の低下と、超広帯域ステップパルサーの計測における特徴である、中心周波数の低下が見られるもののボイドからの反射エコーが判別できることが確認できた。本計測では、

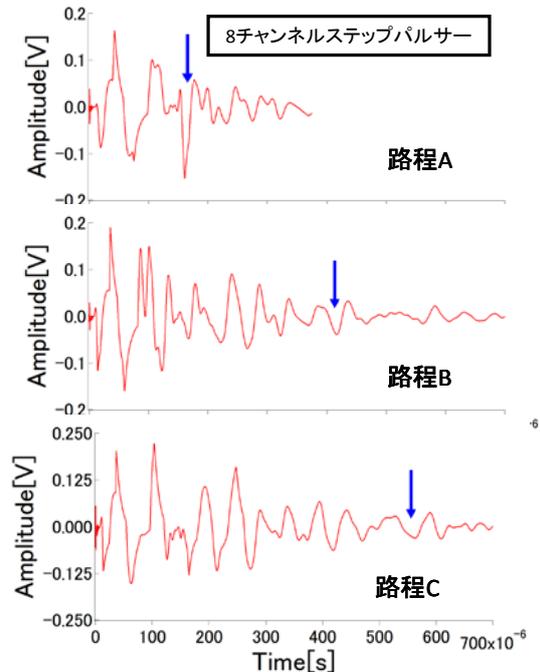


図7 8CHステップパルサーによる計測
スパイクパルサーに1000Vの大電圧パルサーを用いたことと、また2探触子測定の実験探触子とアンプに超広帯域アンプを用いたため、通常の市販スパイクパルサーでの計測よりかなり有利な計測でありながら、本研究で開発した8チャンネル積層ステップパルサー計測システムの優位性は明確だった。

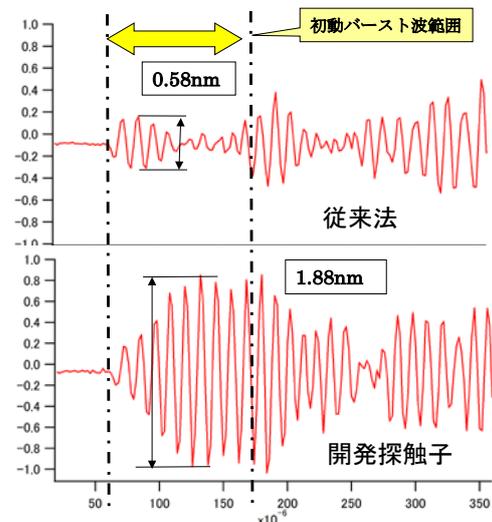


図8 開発した空中超音波探触子の効果

また、空中超音波計測システムとして、既存の1枚素子による探触子と、コンポジット型探触子構造とインピーダンス整合層システムによる空中超音波計測結果を比較して、図8に示す。両者を比較すると、アルミニウム裏面変位の比較で、約7倍の振幅向上が見られた。これはコンポジット型探触子構造の1枚素子による探触子の結果であり、前述した積層技術とマルチチャンネルパルサー技術を組み合わせれば、さらに高効率で空中超音波計測が可能になると考えられる。今後は、柱状素子構造素子を複数積層する場合、接着時に柱状素子や電極に損傷を与えない作製手順の検討が必要になると考えられる。

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2件)

- T. Mihara, M. Maruta, T. Hamajima, Y. Udagawa, and H. Tashiro, Basic study and Application for Ultrasonic Dispersion in Concrete Structures, Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 30B, AIP (2011) 1299-1306
- T. Mihara, T. Hamajima, H. Tashiro and A. Sato, Ultrasonic Inspection of Rocket Fuel Model Using Laminated Transducer and Multi-Channel Step Pulser, Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 32B, AIP (2013) 1617-1622

[学会発表] (計19件)

査読付き国際会議

- T. Mihara, T. Kamimura, Y. Miura, T. Katsuhara and H. Tashiro, Development of high amplitude ultrasonic laminated transducer system for ultrasonic inspection, Proceeding of IWPM 2012, (2012)61
- T. Mihara, T. Hamajima and H. Tashiro, Ultrasonic inspection of rocket fuel model using laminated transducer and

multi-channel step pulser, Proceeding of the Conference for Review of Progress in Quantitative NDE, (2012)27

- K. Sakamoto, T. Mihara, T. Furukawa, I. Komura and Y. Kamiyama, Visualization of Ultrasonic Wave in Cast Austenitic Stainless Steel Piping, 9th International Conference on NDE in Relation to Structure Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2012)
- T. Mihara, Y. Kamiyama, and Y. Udagawa, Large Amplitude Ultrasonic Measurement System Using Laminated Transducer and Multi-channel Pulser, Proceeding of the Conference for Review of Progress in Quantitative NDE, (2011)56
- T. Mihara, Y. Ikegami, T. Furukawa, Subharmonic Wave Analysis in Crack Using Developed FEM, Proceeding of the Conference for Review of Progress in Quantitative NDE, (2011)94
- T. Hamajima, T. Mihara, A. Sato and H. Tashiro, Ultrasonic Behaviour of Rocket Fuel Model Using Multi-channel Pulser and Laminated Transducer, Proceeding of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 32 (2011)193-194

国内学会発表

- 勝原孝仁、三原毅、島谷孝志、田代発造、連成解析有限要素法を用いた積層探触子の音場解析、日本機械学会 2012 年度年次大会 (2012) J042032
- 上村匠、三原毅、朝倉鉄弘、田代発造、き裂識別性向上のための高周波積層探触子による大変位超音波送信技術、日本機械学会 2012 年度年次大会 (2012) J042043

- ・ 井上将輝、三原毅、三浦祐輔、田代発造、き裂計測を想定した微小隙間における超音波の透過・反射特性、日本機械学会 2012 年度年次大会 (2012) J042045
- ・ 朝倉鉄弘、三原毅、上村匠、田代発造、大変位超音波送信のための積層素子の高周波数化、日本機械学会 M&M2012 (2012) OS0708
- ・ 小西剛毅、三原毅、田代発造、石田仁志、応力腐食割れ検出における SPACE の有効性、日本機械学会 M&M2012 (2012) OS0707
- ・ 山本泰寛、三原毅、三浦祐輔、田代発造、圧電素子のインピーダンスマッチングと積層圧電素子の高性能化、日本機械学会 M&M2012 (2012) OS0709
- ・ 三浦祐輔、三原毅、田代発造、トランスを用いた昇圧回路によるパルサーの大電圧化とその応用、日本非破壊検査協会秋季講演大会 (2012) 121-124
- ・ 上村匠、三原毅、田代発造、積層探触子を用いた大変位超音波計測と連成解析 FEM コードによる評価、日本非破壊検査協会秋季講演大会 (2012) 117-120
- ・ K. Shimaya, T. Mihara and H. Tashiro, Ultrasonic inspection of highly attenuated material using step pulser, USE2012 (2012) 433
- ・ 濱島拓巳、三原毅、上山芳教、田代発造、積層探触子と多チャンネルパルサーによる大変位超音波の送受信、第 18 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 (2011) 23-24
- ・ 勝原孝仁、三原毅、上山芳教、田代発造、多チャンネルパルサーを用いた積層探触子の超音波伝搬解析、第 18 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 (2011) 67-68

- ・ 上村匠、三原毅、田代発造、上山芳教、積層圧電素子と 8 チャンネルパルサーによる大振幅超音波送信システム、平成 23 年度日本非破壊検査協会春季大会講演論文集、(2011) 117-120
- ・ 三浦祐輔、三原毅、田代発造、上山芳教、大振幅超音波送信のためのインピーダンス整合回路と耐圧探触子の試作、平成 23 年度日本非破壊検査協会春季大会講演論文集、(2011) 121-124

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三原 毅 (Tsuyoshi Mihara)
富山大学・大学院理工学研究部・教授
研究者番号：201174112

(2) 研究分担者

田代 発造 (Hatsuzo Tashiro)
富山大学・大学院理工学研究部・准教授
研究者番号：80179689