

# 周波数変調信号と最適窓関数を利用した 非接触 1 探触子空中超音波検査技術の開発

Development of air-coupled ultrasonic one-probe reflection inspection  
using frequency modulated signal with optimum window function

研究代表者 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 講師 石川真志\*

Masashi Ishikawa

Although air-coupled ultrasonic non-destructive inspection is conventionally performed with a transmission method or a pitch-catch method, a pulse-echo method that uses one ultrasonic probe has not been achieved. The present study aims to achieve the air-coupled ultrasonic pulse-echo method. In order to achieve the aim, this study examined the use of ultrasound with linear frequency modulation (chirp signal) and the pulse compression technique. It was found through theoretical calculations and experiments that ultrasonic signals received after propagating in the test objects could be detected by applying the pulse compression technique, and that chirp signals with larger bandwidth and appropriate window function were required for detecting defects in thinner objects or objects with higher wave velocity.

## 要旨

本研究では従来困難とされている空中超音波を用いた 1 探触子反射探傷法による非破壊検査の実現を目指し、周波数変調信号（チャーブ波）の励起とパルス圧縮による信号処理の適用による時間分解能の向上効果に注目し、励起するチャーブ波の周波数条件等と時間分解能の向上効果との関係、およびチャーブ波に付加する窓関数の変化に伴うパルス圧縮処理後波形への影響について理論計算および実験的な調査を行った。その結果、より高い時間分解能を得るためにより大きな周波数帯域を有するチャーブ波の励起が必要であること、また窓関数の変化によりパルス圧縮後の時間分解能が変化することを確認した。これらの結果は、超音波励起条件のさらなる改善により 1 探触子での空中超音波反射法を実現し得ることを示唆する。

## 1. 諸言

材料や構造物の健全性評価のために、非破壊検査は不可欠な技術である。非破壊検査技術の中でも超音波を用いた技術は一般的かつ信頼性の高い検査技術であり、医療分野や工業分野の様々な場面で使用されている。一般的に超音波検査では、検査対象物への超音波の透過率を向上させるため、超音波を送受信するプローブと検査対象物との間に水やグリスなどの接触媒体を設置して検査を行う。一方で、近年で

は接触媒体を用いず、空气中へ励起した超音波を直接検査対象へ入射させる空中超音波検査技術も開発されており、既にいくつかのメーカーより検査装置として製品化も成されている<sup>(1), (2)</sup>。空中超音波による検査は対象物に対して非接触での検査が可能であることから、接触を嫌う、あるいは接触が困難な対象物への検査も可能となる。しかし、空中超音波により対象物の内部検査を行う場合、既存の技術では超音波探触子 2 つを対象物の両サイドに設置しての透過法<sup>(3)~(7)</sup>、もしくは 2 つの探触子を同面に斜角設置してのピッチキャッチ法<sup>(8)~(10)</sup>が用いられ、従来の接触媒体を用いた超音波検査において広く実施される 1 探触子反射法（パレス・エコー法）は実施不可能であるとされている。これは、空中超音波検査において接触媒体となる空気と対象物との間の大きな音響インピーダンスマッチングの存在により入射音波エネルギーの大半が対象物表面で反射され、これにより生じる大振幅の表面反射波が内部透過後に反射・検出されるごく小さな内部（欠陥）反射波を覆い隠してしまう為である。

本研究では空中超音波検査における上記の問題の克服と 1 探触子反射法検査の実現を目的とし、送信波形に周波数変調を有するチャーブ波を利用したパルス圧縮技術の利用とその高度化について検討を行った。パルス圧縮技術は得られた受信波形に対して送信波形による相関処理を行うことで時間分解能の

\* 徳島大学 大学院理工学研究部 助教

大幅な向上と信号対雑音 (Signal to Noise: S/N) 比の向上が得られる手法であり<sup>(11)~(13)</sup>、これにより従来法で検出の困難な微小内部反射波の分離・検出が可能となると期待される。本報告では提案手法による空中超音波 1 探触子検査の実現可能性について、数学的な理論計算および実験を通じた検討を行った。

## 2. チャーブ波とパルス圧縮に関する理論計算

### 2.1 信号処理方法

パルス圧縮は受信された超音波信号を励起波形などの参照信号で相関処理を行うものであり、出力される信号  $P_c(t)$  は以下の式で表される。

$$P_c(t) = \int_0^{\infty} C_R(t') C_{\text{ref}}(t+t') dt' \quad (1)$$

ここで  $C_R$  は受信信号、 $C_{\text{ref}}$  は参照信号であり、 $t$  は時間を示す。本研究では、パルス圧縮を行う励起超音波信号として、以下のチャーブ波を利用した。

$$C(t) = W(t) \sin\left(2\pi F_i t + \frac{\pi B_w}{T} t^2\right) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

$F_i$ 、 $B_w$ 、 $T$  はそれぞれチャーブ波の初期周波数、周波数帯域、および励起時間幅を示し、 $W(t)$  は窓関数を示す。チャーブ波を利用してパルス圧縮処理による時間分解能の向上がより顕著となる。

### 2.2 チャーブ波パラメータ変化の影響

図 1 はハニング窓 (2.3 参照) を適用した  $T = 200 \mu\text{s}$  のチャーブ波について、 $B_w = 100 \text{ kHz}$  として  $F_i$  を変化させた場合、および  $F_i = 100 \text{ kHz}$  として  $B_w$  を変化させた場合について、自己相関によるパルス圧縮処理後の時間幅 (半値幅)  $W_{pc}$  とそれぞれの変化パラメータとの関係を計算した結果である。本図より、 $W_{pc}$  は  $F_i$  には依存せず、 $B_w$  の増加に伴い減少することが確認できる。また、 $W_{pc}$  はチャーブ波の励起時間幅  $T$  にもほとんど依存しないことが確認された。これらの結果より、パルス圧縮後の波形における時間分解能は  $B_w$  にのみ依存すると考えられる。

### 2.3 内部反射波の検出に必要な周波数帯域 $B_w$ の推定

1 探触子反射法の実現のためには検査対象物の表面で反射した後に検出される波 (表面反射波:  $S_s$ ) と、内部へ入射後、欠陥等で反射した後に受信される波

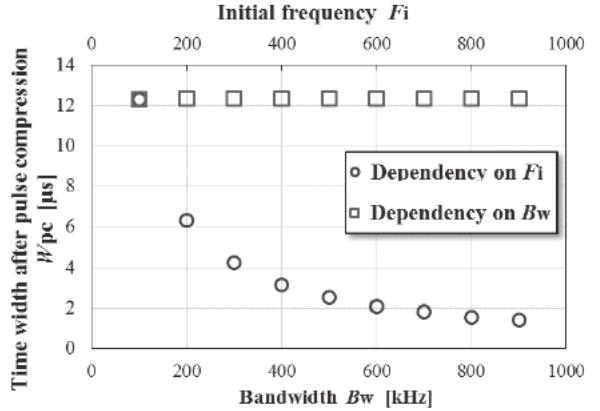


図 1 パルス圧縮後時間幅  $W_{pc}$  とチャーブ波初期周波数  $F_i$

および周波数帯域  $B_w$  との関係

(内部反射波:  $S_t$ ) の時間的な分離が必要となる。既述の通り、パルス圧縮後の時間分解能に影響を与えるチャーブ波パラメータは周波数帯域  $B_w$  であることから、 $S_s$  と  $S_t$  の分離を実現するために必要となる  $B_w$  の値を計算により推定した。図 2 はパルス圧縮後の波形において、 $S_t$  が  $S_s$  に対して時間的に分離可能となるときの  $S_s$  と  $S_t$  の受信時間差 ( $S_s$  の受信時間に対する  $S_t$  の受信時間遅れ:  $t_d$ ) と  $B_w$  との関係を示す。ここで、 $S_t$  の振幅は  $S_s$  の振幅の  $1.1 \times 10^{-5}$  倍の大きさ (空気-水面間の音響インピーダンス差から推定される透過減衰を想定) として計算を行った。また、チャーブ波に付加する窓関数の変化による影響も調査するため、以下の 3 種類の窓関数を適用した場合についてそれぞれ計算を行った。

$$\text{サイン窓 } W_S(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right), \quad (3)$$

$$\text{ハニング窓 } W_H(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right], \quad (4)$$

ブラックマン窓

$$W_B(t) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right). \quad (5)$$

図 2 より、より小さな  $t_d$  の条件にて内部反射波を検出するためには、より大きな  $B_w$  が必要であることがわかる。また、3 種類の窓関数の比較では、ブラックマン窓を使用した際に、より小さな  $t_d$  の条件での内部反射波を検出可能となることが予想される。

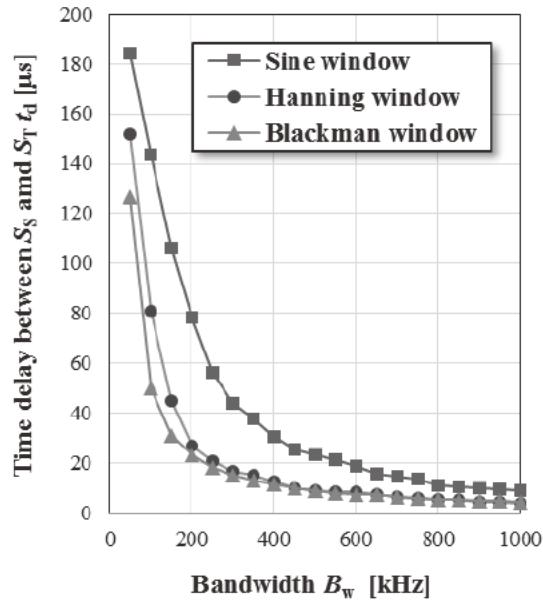


図2 表面反射波  $S_S$  の受信時間に対する内部反射波  $S_T$  受信時間の時間遅れ  $t_d$  と周波数帯域  $B_w$  との関係

### 3. 実験

1 探触子反射法の実現可否の検討と図2に示す計算結果の妥当性評価のため、実験的な検討を行った。

#### 3.1 実験方法

図3に実験装置の概要を示す。本実験では1探触子反射法の実現に向けた検討の第一段階として、検査対象物に水を用い、水中からの内部反射波の1探触子での検出を試みた。水は内部での伝搬減衰が小

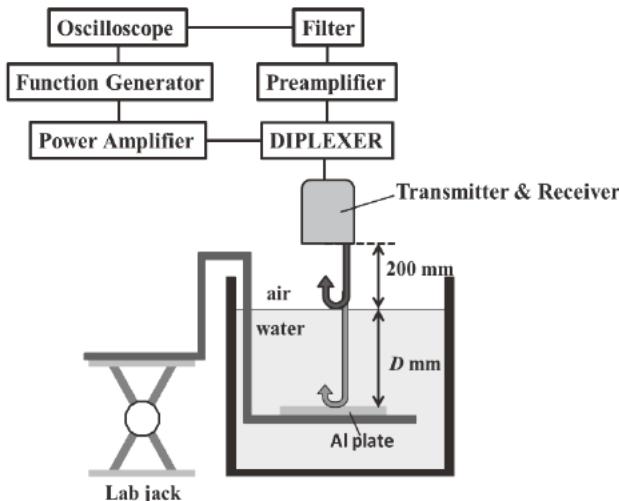


図3 水を検査対象物とした空中超音波1探触子反射法の実験概略図

さく、また空気との音響インピーダンス差が比較的小ないことから、固体対象物と比較して内部反射波の検出が容易であると考えられる。実験では水中にアルミ板を設置し、アルミ板からの反射波が水面での表面反射波から分離され検出可能であるか調査を行った。水面からアルミ板までの距離  $D$  は0mm(表面反射波のみ)～200mmまで変化させた。使用したチャーブ波は  $F_i = 100\text{ kHz}$ ,  $T = 200\text{ }\mu\text{s}$ ,  $B_w = 50, 100, 150\text{ kHz}$  の各条件とし、超音波探触子(0.4k14×20N-TX, ジヤパンプロープ株式会社)より励起、水中へ入射させた。励起チャーブ波にはサイン窓、ハニング窓、ブラックマン窓の3種類の窓関数を適用し、それについて実験を行った。

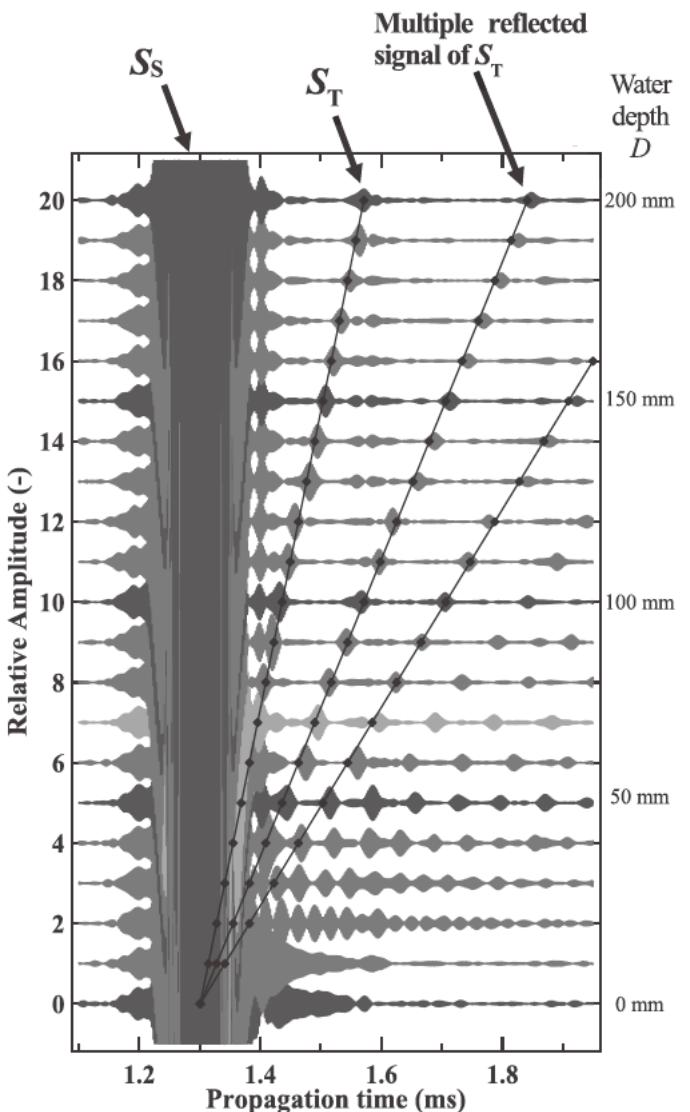


図4 実験より得られた各水深さ  $D$  の条件におけるパルス圧縮処理後

受信波形(励起チャーブ波  $B_w = 150\text{ kHz}$ , ハニング窓適用)

### 3.2 実験結果

図4にハニング窓を適用した  $B_w = 150$  kHz のチャーブ波による実験より得られたパルス圧縮後波形を示す。1.3 ms 付近にみられる波束が表面反射波 ( $S_s$ ) であり、その後方にみられる波束が水中のアルミ板において反射した内部反射波 ( $S_t$ ) およびその多重反射波である。本図より、 $S_t$  が  $S_s$  と分離されて検出可能である最小の  $D$  は 70 mm であることがわかる。従って、水中での縦波音速を 1480 m/s とすると、本励起条件において内部反射波を検出可能な最小の  $t_d$  は約 95  $\mu$ s となる。同様の実験を各励起条件のチャーブ波にて行い、得られた  $t_d$  と  $B_w$  の関係を図5中に示す。同図には、図2に示した各窓関数を使用した際の計算結果も示している。これらより、実験で得られた  $t_d$  は計算結果と比較していずれも大きな値となっていることがわかる。しかしながら、窓関数の変化に伴う  $t_d$  の変化の傾向は一致している（つまり、 $t_d$  はサイン窓、ハニング窓、ブラックマン窓の順で小さくなる）。これらの結果より、計算にて予想された窓関数の変化に伴う時間分解能の変化の傾向は実験においても確認された。計算結果と実験結果における値の違いは、以下の理由であると考えられる：つまり、実験では使用する超音波探触子の周波数特性等の影響により正確な（入力設定通りの）周波数変調を持つチャーブ波の励起が困難であることから、パルス圧縮後の波形において、計算では現れない余分なサイドローブが発生しており、これにより時間分解能の低下が生じたためであると考えられる。

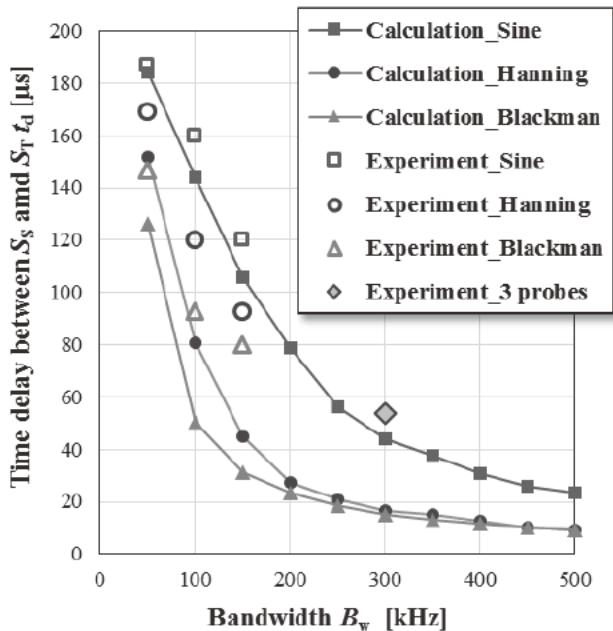


図5 各窓関数を適用したチャーブ波励起条件における計算と実験結果の比較、およびマルチプローブ（Experiment\_3 probes）による実験結果

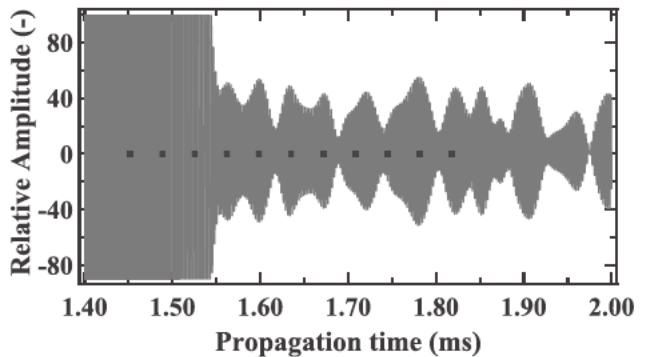


図6 アクリル板への実験により得られたパルス圧縮後の受信波形

（励起チャーブ波  $B_w = 100$  kHz、ブラックマン窓適用）

図中のプロットは内部反射波およびその多重反射波の検出時間を示す

チャーブ波の励起が困難であることから、パルス圧縮後の波形において、計算では現れない余分なサイドローブが発生しており、これにより時間分解能の低下が生じたためであると考えられる。

### 4. アクリル板中の内部反射波の検出

提案手法による固体材料への検査の可能性を検討するため、アクリル板への1探触子検査を試みた。実験は厚さ 50 mm のアクリル板へ  $B_w = 100$  kHz のチャーブ波を空中より入射させ、板底からの内部反射波の検出可否について検討を行った。チャーブ波の窓関数にはブラックマン窓を使用した。

図6に実験より得られたパルス圧縮後の波形を示す（グラフ中のプロットは内部反射波およびその多重反射波の検出が予想される時間位置を示す）。本図より、本実験条件では  $S_t$  は  $S_s$  に埋もれており、その検出は困難であることがわかる。これはアクリル中の縦波音速（約 3000 m/s）が水中の音速と比較して大きいためである。従って、音速の大きな固体材料の検査に際しては、より高い時間分解能の実現が必要となる。これはより大きな  $B_w$  を有するチャーブ波の励起が必要となることを意味する。

なお、図6では大きな  $S_s$  の波束の後方に  $S_t$  の多重反射とみられるいくつかの波束も見られる。このため、本結果は多重反射に注目することによる検査の可能性も示唆している。しかしながら、固体材料は水と異なり内部での伝搬減衰が大きいため、多重反射に伴う内部反射信号の大きな振幅値減衰が生じ、ノ

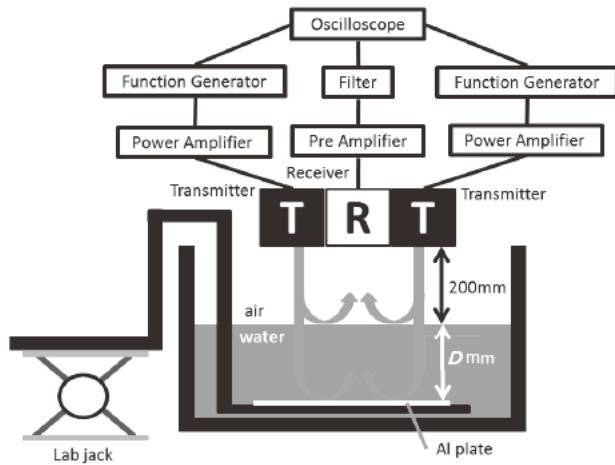


図7 マルチプローブによる高周波数帯域化した条件による実験の概略図

イズ信号との識別が困難となることが予想される。このため、検査に際しては S/N 比への配慮が必要となる。

## 5. チャープ波周波数帯域向上方法の検討（マルチプローブの利用）

図2より、より高い時間分解能を得るためにには、より大きな  $B_w$  が必要であることがわかる。しかし、既存の空中超音波探触子にて励起可能な超音波の周波数帯域には限界がある。そこで、本研究では簡易的により広帯域のチャープ波を励起するため、複数の超音波探触子より周波数の異なる波を励起し、空中で合成することで  $B_w$  を増加させる方法について実験的な検討を行った。

図7に本実験の概略図を示す。実験では3つの超

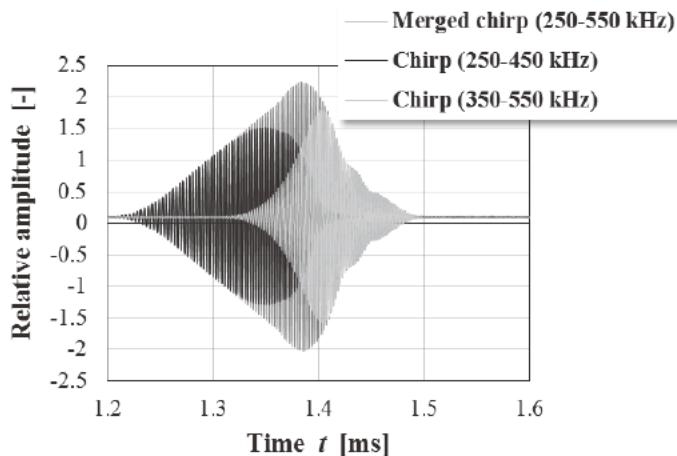


図8 マルチプローブによる実験にて使用した各送信用探触子より励起されるチャープ波および合成後チャープ波波形

音波探触子を使用し、2つを送信用、1つを受信用として使用した。2つの送信用探触子からはそれぞれ 250~450 kHz, 350~550 kHz の周波数帯域を持つチャープ波を励起し、これらを空中で合成することで 250~550 kHz ( $B_w = 300$  kHz) のチャープ波の送信を試みた（図8に各探触子からの励起波形、および合成後波形を示す）。実験は3.の実験と同様に水中への超音波の送信を試み、水中からの内部反射波が検出可能な最小の  $D$  の値より  $t_d$  を求めた。本実験より得られた結果は図5中を示す（Experiment\_3 probes）。3.で得られた実験結果と比較して、 $B_w$  の増加に伴う  $t_d$  の減少が確認できる。従って、本結果はより広帯域のチャープ波の励起を実現することで、より高い時間分解能を得ることが可能であることを示唆するものである。

## 6. 結言

空中超音波による1探触子反射法による検査の実現を目指し、周波数変調を持つチャープ波の送信とパルス圧縮処理の利用を検討し、その特性と効果について検討を行った。計算および実験的な検討の結果、パルス圧縮後の時間分解能は送信チャープ波の周波数帯域に依存し、より高い時間分解能を得るためににはより大きな周波数帯域を有するチャープ波の励起が必要であることが確認された。これは、より音速の大きな対象物、あるいはより薄い対象物の検査を行うためには、より広帯域のチャープ波が必要であることを意味する。また、チャープ波へ付加する窓関数を変更することでパルス圧縮後の時間分解能が変化することが確認された。これらの結果は、超音波探触子の改良によるさらなる励起超音波の広帯域化、あるいは付加する窓関数の最適化により、固体材料を含む様々な対象物に対する1探触子反射法による検査の実現可能性を示すものである。

## 発表論文

- [1] 遠藤 光哉, 石川 真志, 西野 秀郎, 杉本 直, 空中超音波反射法による CFRP の内部検査に向けた基礎研究, 第8回日本複合材料会議(JCCM-8), 2017年3月.
- [2] Endo Mitsuya, Masashi Ishikawa, Hideo Nishino and Sugimoto Sunao, Development of the air-coupled ultrasonic vertical reflection method, 15th Asia

## 参考文献

- (1) 大平克己, 非接触・空中伝搬超音波検査, 非破壊検査, 第62卷7号, 2013年, 320–321.
- (2) 非接触空中伝播超音波の測定事例, 株式会社 ケン・オートメーション ホームページ,  
[http://www.kenautomation.com/tec\\_secondwave01](http://www.kenautomation.com/tec_secondwave01)
- (3) R. Stoessel, N. Krohn, K. Pfleiderer, and G. Busse, Air-coupled ultrasound inspection of various materials, Ultrasonics, vol. 40(1–8), pp. 159–163, 2002.
- (4) E. Blomme, D. Bulcaen, and F. Declercq, “Air-coupled ultrasonic NDE: experiments in the frequency range 750 kHz–2 MHz”, NDT&E International, vol. 35(7), pp. 417–426, 2002.
- (5) K. Imielinska, M. Castaings, R. Wojtyra, J. Haras, E. Le Clezio, and B. Hosten, Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: glass, carbon and Kevlar/epoxy composites, Journal of Materials Processing Technology, vol. 157, pp. 513–522, 2004.
- (6) 川嶋紘一郎, 空中伝搬超音波による非破壊材料評価と検査, 非破壊検査, 第58卷7号, 2009年, 250–255.
- (7) 高橋雅和, 野地正明, 桐生啓二, 高橋修, 小倉幸夫, 松嶋正道, 西野秀郎, 中畑和之, 川嶋紘一郎, 非接触・空中伝搬超音波透過探傷法の開発と応用例, 非破壊検査, 第60卷9号, 2011年, 518–521.
- (8) D. W. Schindel, D. S. Forsyth, D. A. Hutchins, and A. Fahr, Air-coupled ultrasonic NDE of bonded aluminum lap joints, Ultrasonics, vol. 35(1), pp. 1–6, 1997.
- (9) M. Castaings, P. Cawley, R. Farlow, and G. Hayward, Single sided inspection of composite materials using air coupled ultrasound, Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 17(1), pp. 37–45, 1998.
- (10) S. Delrue, K. Van Den Abeel, E. Blomme, J. Deveugele, P. Lust, and O. B. Matar, Two-dimensional simulation of the single-sided air-coupled ultrasonic pitch-catch technique for non-destructive testing, Ultrasonics, vol. 50(2), pp. 188–196, 2010.
- (11) T. H. Gan, D. A. Hutchins, D. R. Billson, and D. W. Schindel, The use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging, Ultrasonics, vol. 39(3), pp. 181–194, 2001.
- (12) T. H. Gan, D. A. Hutchins, and D. R. Billson, Preliminary studies of a novel air-coupled ultrasonic inspection system for food containers, Journal of Food Engineering, vol. 53(4), pp. 315–323, 2002.
- (13) J. Berriman, P. Purnell, D. A. Hutchins, and A. Neild, Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete,