

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：平成 18 年度～平成 20 年度  
 課題番号：18300307  
 研究課題名（和文） 超磁歪振動子を用いた浅層地中探査映像の分解能改善  
 研究課題名（英文） Resolution improvement of shallow underground imaging  
 using super magnetostriction vibrator  
 研究代表者  
 杉本 恒美（SUGIMOTO TSUNEYOSHI）  
 桐蔭横浜大学・工学部・教授  
 研究者番号：80257427

## 研究成果の概要：

超磁歪振動子を用いて浅層地中内に時間的に周波数を変化させたチャープ波を発生させ、受振波形にパルス圧縮法を適用することで分解能の飛躍的改善を図った。最初にシミュレーションにより期待される分解能の検討を行なった後、実際に屋外で確認実験を行なってシミュレーションと同等の分解能が得られることを確認した。従来のハンマー法による分解能約 50cm と比較すると約半分以下の約 20cm の分解能を実現することが出来た。

## 交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2006年度 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |
| 2007年度 | 1,200,000 | 360,000   | 1,560,000 |
| 2008年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 5,300,000 | 1,590,000 | 6,890,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：計測工学、可視化、リモートセンシング、地中探査、超磁歪振動子、パルス圧縮

## 1. 研究開始当初の背景

従来の地中探査では主に地中レーダ（GPR）が用いられているが、電磁波の速度が速すぎるために埋設物の形状を把握できるほどの分解能はないというのが実情である。一方、音波や振動を用いる映像化手法では音速は非常に遅くなるため有利であるが、従来はハンマー打撃法を用いていたために比較的低周波（概ね 200Hz 程度）しか使用することできず、分解能的には GPR と同程度でしかなかった。

しかしながら、近年開発された超磁歪振動子は非共振周波数にもかかわらず、低周波で大振幅を発生できるという特徴を持っている。

ることが明らかになった（200Hz で約 80  $\mu$  m 程度）。これはいままでの音波による地中探査で用いられてきたハンマー打撃法や電磁誘導型振源に比べると送振波形を変化させられるという利点を持っていると考えることができる。また、磁歪振動子は基本的に電流駆動であるために高電圧発生装置も必要としないため、室外での運用に向いていると思われる。さらに人力で行うハンマー打撃法や基本的にインパルス波形しか発生できない電磁誘導型振源に比べると、同期調整がしやすいため、超磁歪振動子複数個の駆動により指向性を制御することにより従来手法よりも分解能が改善できる可能性が期待された。

## 2. 研究の目的

超磁歪振動子は通常の磁歪振動子や圧電材料を用いた電歪振動子よりも得られる振幅変位（弾性変形）がはるかに大きく、かつ低周波数であれば非共振周波数でも使用してもそれなりの振動振幅を得ることができるという特徴をもっている。非共振周波数でも使えるということは周波数を時間的に変化させた波形（チャープ波）の送信も可能であるということであり、レーダの場合と同様に送振源として用いた場合に飛躍的に分解能を改善できる可能性がある。また、この超磁歪振動子の駆動電圧は 10V 程度で十分であるため（電流駆動）、市販バッテリーを電源として用いることも可能であり、高電圧を必要とする電歪振動子と比べると室外での運用適応性が高い。そのため、超磁歪振動子は地中探査用の振源としては大変適していると思われるが、まだ超磁歪振動子を地中探査用の振源として利用した例は大深度地下用を除くと皆無である。

そこで本研究では 1 個もしくは複数の超磁歪振動子を地中探査用振源として用いて、周波数や波形を変化させることにより、浅層地中映像においてレーダ探査（GPR）を含めた従来手法よりも格段に分解能を改善できることを明らかにすることが目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験器具

振源として用いた超磁歪振動子（Moritex Corp, AA140J013-MS1）を Fig.1(a) に示す。形は半径 1.5 cm、高さ 20 cm の円柱である。横波を発生させるために、ハンマー法で用いていた振源の上に超磁歪振動子を設置した（Fig.1(b) 参照）。振源は 44 cm×8 cm×3 cm の長方形のアルミブロックに 2.5 cm×6 cm のスパイクがついたものである。また、受振器としては速度センサであるジオフォン（Geophone）を使用し、記録装置には、McSEIS\_SX（Oyo Corp, McSEIS-SX, MODEL-1125R）を用いた。

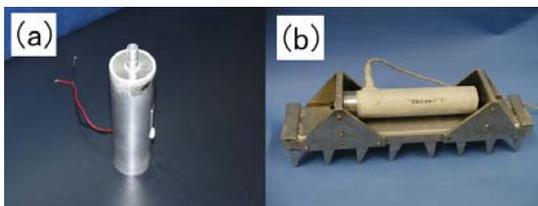


Fig.1 Sound source

- (a) Super-magnetostriction vibrator,
- (b) Sound source for shear wave

### (2) 実験概要

実験セットアップは Fig.2 のように 50cm 間

隔で受振器を 12 個一直線に並べ、5.5m のラインを 1 つの探査ラインとした。振源は受振器間を移動させて走査する。パルス圧縮は相関処理を行うため、送振波形と実際に駆動される波形が似ている必要がある。ここでは振動子をスムーズに駆動するために、Fig.3 に示すように、通常のバースト波形に窓関数をかけて使用した。

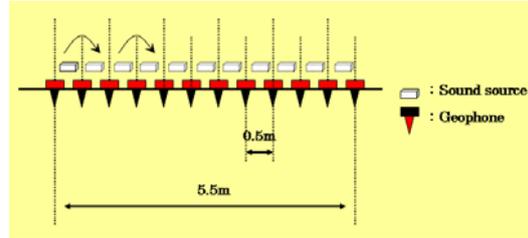


Fig.2 Experimental set-up

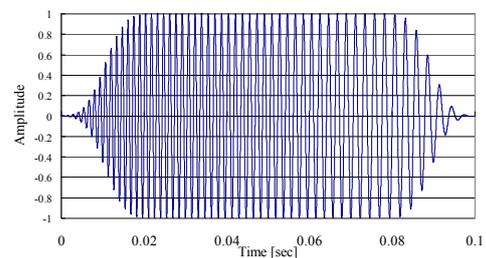


Fig.3 Output waveform

## 4. 研究成果

### (1) チャープ波の高周波成分増幅の検討

#### ① チャープ波の周波数依存減衰

送振波に用いるチャープ波は時間とともに周波数が増加していくため、周波数依存減衰を考慮する必要がある。そこで、屋外実験にて持続時間 200ms のバースト波を 300Hz から 800Hz まで 100Hz ずつ送振して各周波数の周波数依存減衰値を計測した。

計測結果例を Fig.4 に示す。グラフから、Start 周波数と Stop 周波数では減衰値で約 10 (dB/m) の差が生じていることがわかる。パルス圧縮の効果を高めるために、受信時のチャープ波の高周波成分を増幅する検討が必要であることがわかる。この結果より最小二乗法を用いて近似した直線の式を (1) 式に示す。この式を用いて (2) 式に示すように周波数領域で減衰を適用させた。

$$DF(\omega) = (-0.02 \frac{\omega}{2\pi} - 7.3) \times P \quad \dots (1)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \times DF(\omega) \quad \dots (2)$$

ここで  $\omega$  は角周波数、 $t$  は時間、 $P$  は伝播距離を示す。

減衰値より算出した 1m 伝播時の受振波形を Fig.5 に示す。低周波数帯に比べ高周波数帯の減衰が大きいことが確認できる。

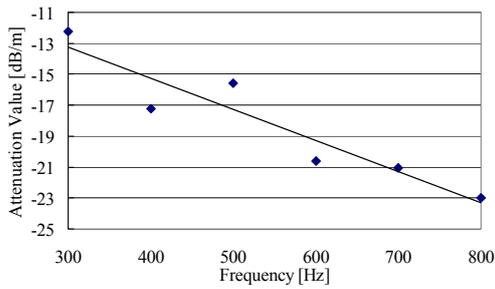


Fig.4 A measurement result example of frequency dependent attenuation using burst wave. Vibrated every 100Hz from 300 to 800Hz.

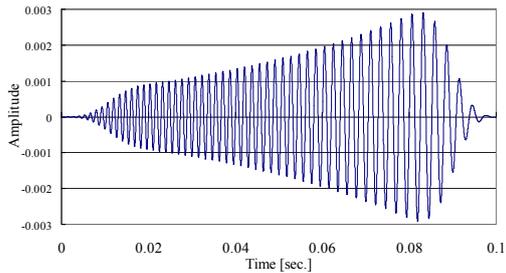


Fig.5 An example of calculated received waveform which applied frequency dependant attenuation. (When transmitted distance is 1m.)

## ②半値幅の計測

シミュレーションにおいて、仮想反射点の位置を探査ラインの中央(2.75m)深さ1mの位置に設置した。地中映像において、反射信号の距離方向における反応の大きさを確認するため、Fig. 6 に示すように映像振幅の半値幅を計測した。送振波には 800-300Hz、持続時間 100ms のチャープ波と、以前用いていたハンマー法に見立てて 200Hz 5 波のバースト波を用いた。

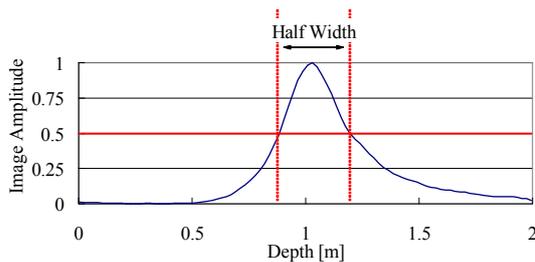


Fig.6 Measurement for half width

計測した半値幅を Fig. 7 に示す。(a)は音速を 150m/s に設定した際の  $\Delta f$  と半値幅の関係である。 $\Delta f$  はチャープ波における Start 周波数と Stop 周波数の差である。(b)は  $\Delta f$  が 500Hz の際の音速を軸にしたグラフである。

(a)の結果より、 $\Delta f$  を 500Hz 以上にするにより、半値幅は 30cm 以下になることがわかる。また、(b)の結果より、パルス圧縮を用いた方法は、200Hz のバースト波を用い

た映像よりも半値幅が小さいことが確認できた。

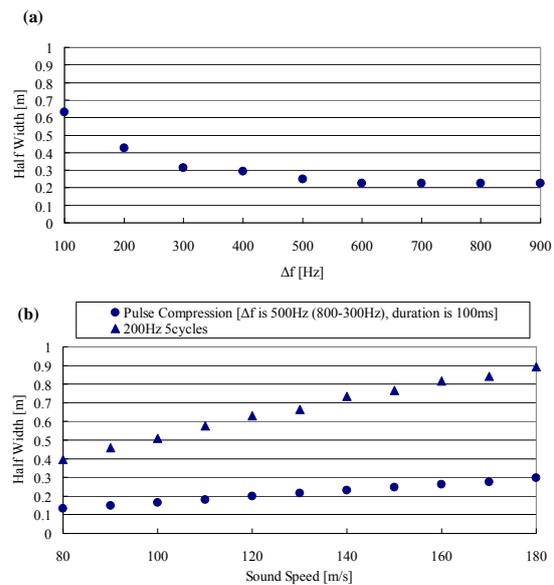


Fig.7 Simulation results, (a) Horizontal axis is  $\Delta f$ . (b) Horizontal axis is Sound speed. Black Triangle is 200Hz 5cycle. Black circle is pulse compression.

これらの結果より、パルス圧縮を用いた際の高分解能が期待できることがわかる。しかし、ハンマー法に比べチャープ波は高い周波数が発生しているため、減衰が大きく、距離方向に埋設物を分解するのは非常に困難であるうえ、埋設深度が深いほど半値幅が大きくなると考えられる。

## ③高周波成分増幅によるパルス圧縮の検討

Fig. 8 にチャープ波受振波形、および送振波形のフーリエ変換結果を示す。受振波形の 600-800Hz の高周波成分は送振波形に比べて減衰していることが分かる。

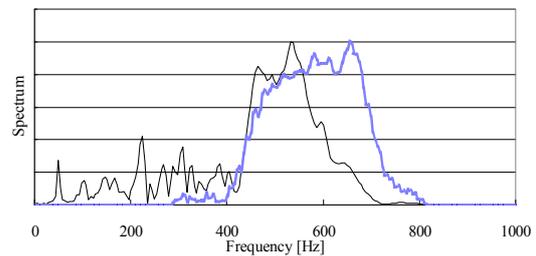


Fig.8 Examples of Fourier transform results. Solid line (black) is Received waveform. Bold line (blue) is Driving waveform.

そこで、パルス圧縮の効果を向上させるため、周波数上で受振波と駆動波の比を取り、これを補正関数として式(3)に示すように高周波成分を増幅した。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{-j\omega t} dt \times \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} D(t)e^{-j\omega t} dt} \dots (3)$$

Rは受振波(Received waveform)、Dは駆動波形(Driving waveform)を示す。

Fig. 9 に駆動波形、受振波形、フィルタ処理後波形、パルス圧縮後波形を示す。受振波形の高周波成分は送振波に比べ減衰しているが、フィルタ処理後は増幅され、送振波に近い形になっている。また、パルス圧縮結果を見ると、パルスが非常に短く圧縮されている。

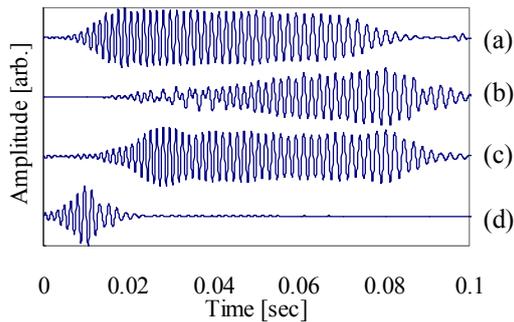


Fig.9 Examples of waveforms.

(a) Driving waveform, (b) Received wave, (c) Filtered wave, (d) Correlation result

## (2)減衰補正効果の屋外確認実験

### ①実験概要

実験を行った場所は茨城にある休耕地を用いた(Photo. 1 参照)。探査実験では振源に超磁歪振動子とハンマーを用い、埋設物は大きさ 13 × 12 × 5cm の空のタッパを深さ 0.5m に埋設した。

探査ラインは Fig. 10 にあるように①は探査ラインの中央(2.75m)に1つ、②は探査ラインの端から 2m の位置に 20cm 間隔で 2つ、③は探査ラインの端から 2m の位置に 10cm 間隔で 2つタッパを埋設した。

超磁歪振動子からは 800-300Hz、持続時間 100ms のダウンチャープを発生させた。また、パルス圧縮を用いた方法比較するため、ハンマー法も使用した。



Photo. 1 休耕地上の探査ライン例

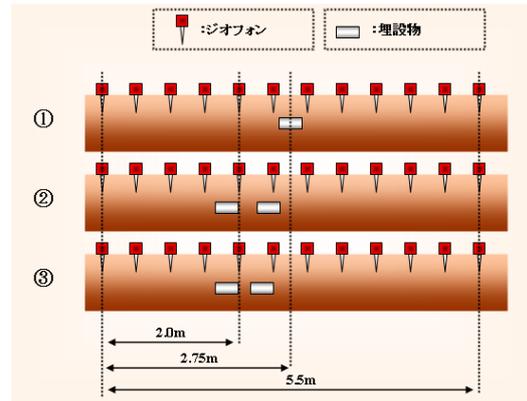


Fig.10 The setup of the exploration lines.

### ②映像化結果例

探査ライン①において、(a)にハンマー法を用いた地中映像を、(b)にパルス圧縮を用いた地中映像を Fig. 11 に示す。白い四角が埋設位置となっている。映像上部に記してある STC とは減衰補正值である。どちらの映像も埋設位置に強い反応が現れた。また、距離方向における埋設物反応の大きさはハンマー法の映像では約 50cm、パルス圧縮を用いた映像では約 25cm であった。

この結果はシミュレーションの値と大体同じ大きさであることが確認できた。このことより、パルス圧縮を用いた方法では、分解能改善の可能性があると考えられる。

次に(a)にライン②と(b)にライン③のパルス圧縮を用いた地中映像を Fig. 12 に示す。これらの映像は埋設位置以外にも強い反応が現れたが、埋設物反応が現れている。(b)では2つの埋設物反応が重なってしまっていることから、パルス圧縮を用いた際の方位方向分解能は約 20cm であることがわかった。

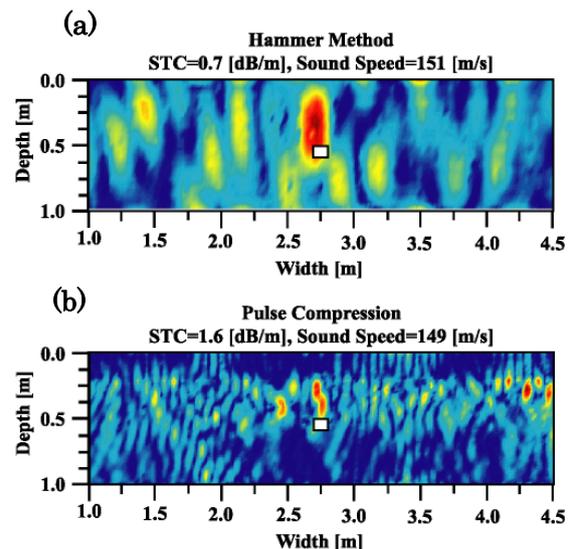


Fig.11 Examples of underground image at Line①.  
(a) Hammer, (b) Pulse Compression

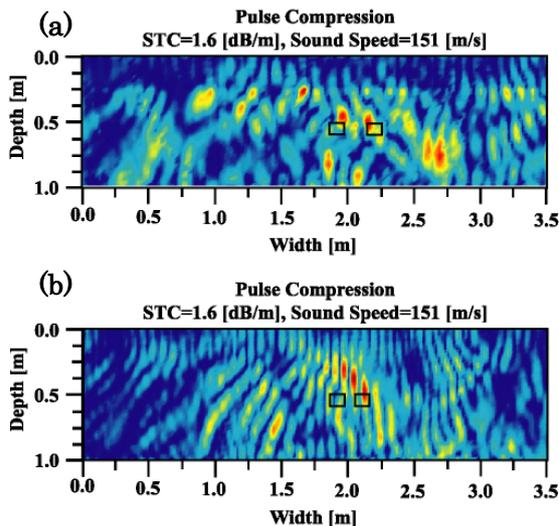


Fig.12 Examples of underground images.

(a) LINE ②, (b) Line ③

### (3)まとめと今後

パルス圧縮に用いるチャープ波の瞬時周波数の減衰を考慮した検討を行い、受振波の高周波成分を増幅することによりパルス圧縮を用いた映像化に成功し、距離方向における埋設物の反応の大きさがシミュレーションとおおそ同じであることを確認した。

今回の研究成果から、深さ 1m 程度の地中において軸方向および方位方向ともに 20cm 程度の分解能が得られることが判明した。また、世界的に見ると英国 Southampton 大学の ISVR 研究所にても同様な研究を行なわれているが、まだ映像が出始めたばかりの段階であり分解能的には本研究による手法が圧倒的に優れているという状況にある。

浅層地中映像の分解能をさらにあげるためにはチャープ波の持続時間を長くすることが必要であるが、現状ではデータ収録装置のデータ長と超磁歪振動子の発熱の問題のため実現出来ていない。そのため、今後は、チャープ波の持続時間を増やした検討、伝播距離に応じたパルス圧縮法の検討および超磁歪振動子の放熱制御の検討を行う必要がある。

## 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 10 件)

- (1) 川崎拓, 杉本恒美, “遺跡・遺構のための音波探査のための地中ソナーの研究, -パルス圧縮を用いた映像分解能の改善-”, 文化財と探査 Vol.11, No.1 PPxx-xx, (2009.6) (掲載予定) 査読有

- (2) H.Kawasaki and T.Sugimoto, “Resolution Improvement of Underground Images Using Pulse Compression”, JJAP Vol.48, PPxx-xx (2009.6) (to be published.) 査読有
- (3) 川崎拓, 杉本恒美, “遺跡・遺構のための音波探査のための地中ソナーの研究, -超磁歪振動子を用いた映像分解能の改善-”, 桐蔭論叢, 第 20 号, pp89-100 (2009.6) 査読無
- (4) 川崎拓, 杉本恒美, “遺跡・遺構のための SH波を用いた地中映像化の研究, -パルス圧縮における瞬時周波数の減衰を考慮した検討-”, アコースティック・イメージング研究会, 信学技報 Vol.108, No436, PP7-12, (2009.2) 査読無
- (5) 川崎拓, 杉本恒美, “遺跡・遺構のための音波探査のための地中ソナーの研究, -超磁歪振動子を用いた映像分解能の改善-”, 文化財と探査 Vol.10, No.1 PP33-39, (2009.1) 査読有
- (6) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, “Resolution improvement of underground image using pulse compression”, Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics Vol.29, 2P2b-15 PP231-232, (2008.11) 査読無
- (7) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, “Underground Imaging Using Shear Waves, Resolution improvement using pulse-compression processing”, Acoustical Imaging Vol.29 PP339-345, (2008.10) 査読有
- (8) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, “Underground imaging using shear waves, -Resolution improvement using pulse compression and dynamic focus-”, Proc. of Acoustics’08, PP2115-2119, (2008.7) 査読無
- (9) 川崎拓, 杉本恒美, “遺跡・遺構における横波音波を用いた浅層地中映像化の研究, -ダイナミックフォーカスとパルス圧縮を用いた映像分解能の改善-”, アコースティック・イメージング研究会, 信学技報 Vol.107, No494, PP19-23, (2008.2) 査読無
- (10) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, “Underground SONAR using Shear Waves, -Resolution improvement using pulse compression and dynamic focusing-”, Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.28, 3-03-02, PP.335-336, (2007.11) 査読無

### 〔学会発表〕 (計 17 件)

- (1) Tsuneyoshi Sugimoto, Hiraku Kawasaki, “Study on the shallow underground imaging by the pulse compression method that considered frequency dependent attenuation”, Proc. of 2009 IEEE International Ultrasonic Symposium, P2L 115-03, (2009.09.22 :Ergife Palace Hotel, Roma, Italy) 発表予定
- (2) 杉本恒美, 川崎拓, “遺跡・遺構のための横波音波を用いた地中映像化の検討, -チャ

- ー波の周波数依存減衰を考慮した検討-, 日本文化財探査学会第 12 回大会発表要旨集, (2009.06.14 立命館大学) 発表予定
- (3) 川崎拓, 杉本恒美, "遺跡・遺構のための横波を用いた超浅層地中映像化の研究, -チャープ波における瞬時周波数の減衰を考慮した検討-", 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1-1-8, p2, pp1363-1366 (2009.03.17 東京工業大学(大岡山))
- (4) Tsuneyoshi Sugimoto, Hiraku Kawasaki, "Resolution Improvement of Shallow Underground Imaging using Super-Magnetostription Vibrator and Pulse Compression Method-", Proc. of 2008 IEEE International Ultrasonic Symposium, P2L 115-03, (2008.11.04 Beijing International Conference Center)
- (5) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, "Underground sonar using shear waves -Resolution improvement using pulse compression", Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2008, Abstract Book, IM3, PP113-114, (2008.10.31 桐蔭横浜大学・交流会館)
- (6) Tsuneyoshi Sugimoto, "Shallow Underground Imaging Using Shear Waves", DARPA Underground Technologies Workshop, (2008.09.09 Washington DC, ANSER.Inc.)
- (7) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, "Underground imaging using shear waves, -Resolution improvement using pulse compression and dynamic focus-", Proc. of Acoustics'08, PP2115-2119, (2008.07.01 Palais des Congres in Paris)
- (8) 川崎拓, 杉本恒美, "遺跡・遺構の音波探査のための地中ソーナの研究, -パルス圧縮を用いた映像分解能の改善-", 日本文化財探査学会第 11 回大会発表要旨集, PP1-2, (2008.6.22, 兵庫県立考古博物館)
- (9) 杉本恒美, "音波による超浅層地中映像化技術, -遺跡探査と地雷探査への応用-", 超音波医学, Vol.35, Suppl., S110, (2008.05.23, 神戸国際展示場)
- (10) 杉本恒美, "音波による超浅層地中探査, -カンボジアにおける地雷探査の可能性-", 第 54 回 精研シンポジウム「スマートアコースティックス」, Proc. INV-2, PP9-16, (2008.03.06, 東京工大 すずかけホール)
- (11) 川崎拓, 杉本恒美, "遺跡・遺構のための横波を用いた超浅層地中映像化の研究, -パルス圧縮とダイナミックフォーカスを用いた分解能改善の検討-", 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 3-9-2, p134, PP1409-1412, (2008.03.19 千葉工業大学)
- (12) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, "Underground sonar using shear waves -Resolution improvement using pulse compression", Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2007, Abstract Book, IM4, PP113-114, (2007.11.02 桐蔭横浜大学・交流会館)
- (13) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, "Underground imaging using shear waves, -Resolution improvement using pulse compression-", Proc. of The 19th International Congress on Acoustics (ICA 2007), ULT-02-007, Board 23, 6pages, (2007.09.06 PMC, Madrid, Spain)
- (14) 杉本恒美, 川崎拓, "遺跡・遺構の音波探査のための地中ソーナの研究, -超磁歪振動子を用いた映像分解能の改善-", 日本文化財探査学会第 10 回大会 研究発表要旨集 PP6-7, (2007.06.16 秋田大学)
- (15) Hiraku Kawasaki, Tsuneyoshi Sugimoto, "Underground imaging using shear waves", 29th International Symposium on Acoustical Imaging(AI29), p-19, (2007.04.17 Shonan Village)
- (16) 川崎拓, 阿部冬真, 杉本恒美, "遺跡・遺構の音波探査のための地中映像化の研究, -超磁歪振動子を用いた高分解能化-", 日本音響学会春季研究発表会講演論文集 1-10-12, PP1217-1218, (2007.03.13, 芝浦工業大学(豊洲))
- (17) Tsuneyoshi Sugimoto, "Very Shallow Underground Imaging using sound waves", Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2006(TUBME), Abstract Book p57, (2006.11.02 桐蔭横浜大学・交流会館)
- 【その他】
- (1) ホームページ  
<http://www.cc.toin.ac.jp/sc/sugimoto>
- (2) フィールドワーク
- ① 奈良平城京址における音波による地中探査実験, 2006 年 9 月 11 日-14 日
- ② カンボジア王国・バクサンバンにおける音波による浅層地中探査に関する調査, 2006 年 12 月 20 日-2007 年 1 月 9 日
- ③ 茨城県日立市神田町における休耕畑を利用した地中探査実験  
2007 年 9 月 2 日-9 日
- ④ 茨城県日立市神田町における休耕畑を利用した地中探査実験  
2008 年 8 月 1 日-9 日
- (3) Southampton 大学 ISVR 研究所訪問  
Mike Brennan 研究室  
2008 年 7 月 7 日-8 日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
杉本恒美 (SUGIMOTO TSUNEYOSHI)  
桐蔭横浜大学・工学部・教授  
研究者番号: 80257427