

## 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 5月27日現在

機関番号：32717

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22658079

研究課題名（和文）音波による土壌水分分布計測に関する研究

研究課題名（英文）Study on soil water distribution measurement using sound wave

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（和文）：**音波振動と高い感度のレーザードップラ振動計を用いた音響探査法により極浅層土壌中の水分分布計測が行えるかどうかについて検討を行った。砂および培養土を用いた実験結果より、伝搬音速と体積含水率の間に関連性があることが明らかになった。また、屋上緑地化を想定した底が浅い容器を用いた場合には、含水率が異なる箇所がごく浅い領域にある場合には非接触音響探査法により映像化が可能であることが判明した。

**研究成果の概要（英文）：**Examination about the ability of the water distribution measurement in very shallow soil to be performed by the acoustic imaging method using a sound wave and the laser Doppler vibrometer of high sensitivity was performed. From the experimental result using sand and culture soil, the relevance of propagation acoustic velocity and volume water content was confirmed. Moreover, from the experimental result using the container for roof planting, when the part where moisture content differs was very shallow, we confirmed that the visualization using the non-contact acoustic imaging method was possible.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1500000	0	1500000
2011年度	800000	240000	1040000
2012年度	700000	210000	910000
年度			
年度			
総計	3000000	450000	3450000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：水分分布計測、超磁歪振動子、非破壊計測、精密農業、スキャニング振動計

## 1. 研究開始当初の背景

音波振動による極浅層地中（15cm 以内）の映像化はこれまで困難とされてきたが、近年になって地表面でも振動計測可能なスキャニング振動計（SLDV：Scanning Laser Doppler Vibrometer）の登場や、空中放射音波による極浅層地中のみ選択励起可能な

第2種縦波の存在により可能となってきた。従来は埋設物の探査が主目的であり、実際に埋設物の周波数応答による識別まで行なえるほどになっている。しかしながら、同時にその事実は非接触音響探査法を応用すれば、土壌に含まれる水分含有量の計測に使用できる可能性が高いことが考えられた。

## 2. 研究の目的

音波振動を極浅層地中内に伝搬させ、スキャニング振動計(SLDV: Scanning Laser Doppler Vibrometer)を用いてその地表面における伝搬速度を非接触的に計測することにより、極浅層地中の含水量を推定可視化し、広域の水分分布計測が行なえるようにすることを目的とする。また、近年の水不足による食糧危機に対応するために本手法を応用して屋上緑化のような極めて浅い土壌でも適用可能かどうかを検討することも目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験器具

音源としては超磁歪振動子と平面スピーカの2種類を用いた。Fig.1(a)に超磁歪振動子(Moritex Corp., AA140J013-MS1)を示す。形状は半径1.5 cm、高さ20 cmの円柱である。また、Fig.1(b)に平面スピーカ(FPS Corp., FPS2030M3P1R)を示す。形状は幅26.5 cm、高さ36.5 cmの方形板状のものである。

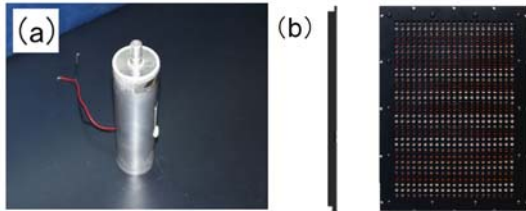


Fig.1 Sound source.

- (a) Giant magnetostriction vibrator,
- (b) Flat speaker.

### (2) 測定原理

SLDVと超磁歪振動子を用いた場合の音波による水分分布計測の基本概念図をFig.2に示す。SLDVは音源によって発生した音波振動により引き起こされた土壌表面の振動速度を測定する。送振波形と計測された振動速度波形を用いて、地中の伝搬音速を推定することができる。

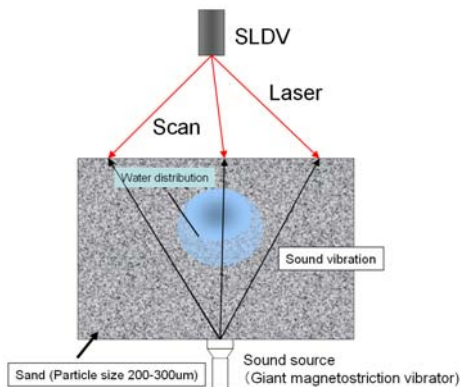


Fig.2 Schematic figure of water distribution measurement using sound vibration.

一般的に浅層土壌の音速は水と比較すると極めて遅いことが知られている(砂:約130m/s, 水:1500m/s)。そのため、音波が含水率の高い土壌中領域を通過すると伝搬音速が影響を受けることが予測される。伝搬音速値は伝搬距離を伝播時間で除することにより算出する。伝搬距離は振源から、SLDVの測定点までの距離とする。伝播時間の算出方法は以下のとおりである。まず、送振波形と受振波形にヒルベルト変換を用いて包絡線を求める。Fig.3(a)に波形をヒルベルト変換したものを示す。その後、求めた包絡線の最大値の半値(Fig.3: 赤線)のライン、その上下のライン(Fig.3: 緑線(半値+(最大値-半値)/5)、青線(半値-(最大値-半値)/5))に包絡線がかかる時間をそれぞれ算出し、平均する。Fig.3(b)に概念図を示す。最後に送振波形・受振波形の時間差から伝搬時間を算出することができる。

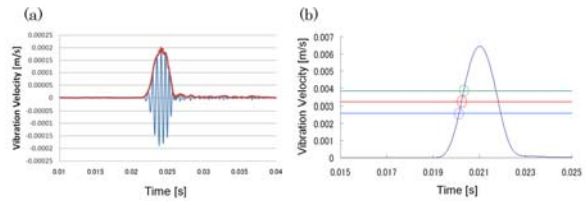


Fig.3 Example of the envelope waveform and the threshold value. (a) Example of the envelope of the received waveform calculated using Hilbert transform, (b) Position relations of the envelope waveform and the threshold value.

## 4. 研究成果

### (1) 砂中の含水比と伝搬音速の関係

最初に砂中の含水比と伝搬音速の関係について調べた。加速度センサと超磁歪振動子を用いた実験セットアップをFig.4に示す。

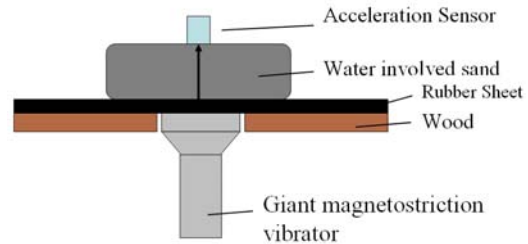


Fig.4 Experimental setup for the relation between water ratio and propagation velocity of sound (Sand size: 15×10×7 cm, Particle size: 300μm).

様々な種類の含水比の砂を作成して、伝搬音速を計測した。実験結果例をFig.5に示す。グラフより砂のように全く含水率がゼロという状態に水を加えた場合には、伝搬音速は含水比にほぼ比例することがわかる。一方、市販の培養土の場合には、最初から水を含んでおり、伝搬音速は含水比に逆比例することも判明した。この理由は市販の培養土は砂よりも土粒子間の間隙が大きく、その粒子間に

水が入った場合には水の表面張力による粘性が強く働いて土粒子の動きを制限するためと思われる。

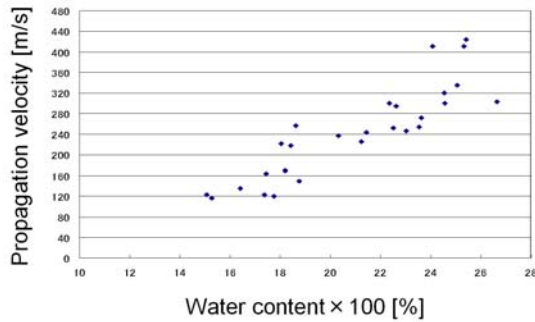


Fig.5 Propagation vs. water content.

(2) 砂槽における水分分布可視化実験

①砂槽表面に水分分布を作成した場合

砂槽表面に水分分布を作成した場合の実験セットアップ図を Fig.6 に示す。アクリル製の砂槽 (40×50×30cm) に粒径の整った砂(300 $\mu$ m)を敷き詰め、砂表面部に水分分布 (15×10×7cm, 砂:1000g, 水:250ml)を設置し計測を行った。

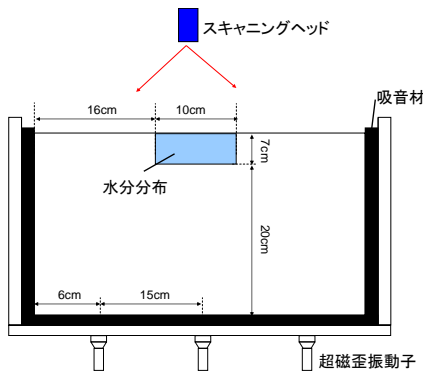


Fig.6 Experimental setup for water distribution measurement using sound vibration.

実験容器の底面にはゴム板でカバーされた振源用の穴が9個あり、砂槽底面から振源として超磁歪振動子で振動を送ることが可能である。上方から SLDV を用いて砂表面の振動波形を 2 次元的に取得する。送振波形としては正弦波 2kHz, 300mVpp, 3cycles のバースト波を用いる。SLDV のスキャンエリアは 17×23points, point 間隔は縦:約 1.75cm, 横:約 1.8cm である。Fig.6 に映像化結果を示す。映像化した速度範囲は 107 m/s から 196 m/s である。図より水分分布が地表面に近い場合は非常に明瞭に映像化できることがわかる。設置深さをより深くしていくと伝搬音速が影響を受けるエリアが広がり、映像としてはぼやけた感じになることも明らかになった。このほか、複数の水分分布を作成した場合も検討し、設置深さが浅い場合には非常に明瞭に映像化できることを明らかにした。

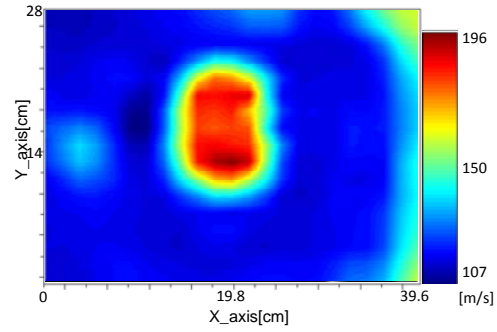


Fig.7 Distribution image of the propagation velocity of sound. Propagation velocity range :107-196m.

②砂槽内部から水分を供給した場合 (水平)。

次に多孔質管を用いた負圧差灌水方式により砂槽内部から水分を供給した場合について検討した。実験セットアップを Fig.8 に示す。この方式では水位調整タンクと多孔質管との高低差により水分供給速度を制御することが可能である。

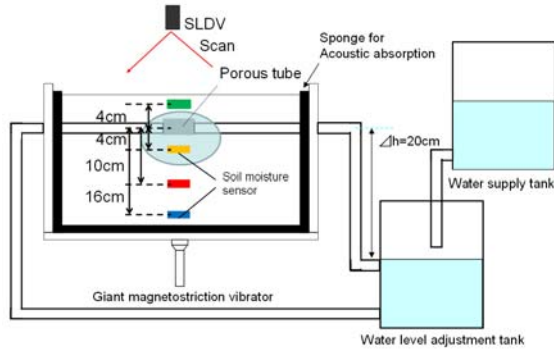


Fig.8 Experimental setup using negative pressure difference irrigation system.

Fig.9 に伝搬音速の可視化結果を示す。時間経過毎に伝搬音速の速い領域が広がっていくことが確認できる。

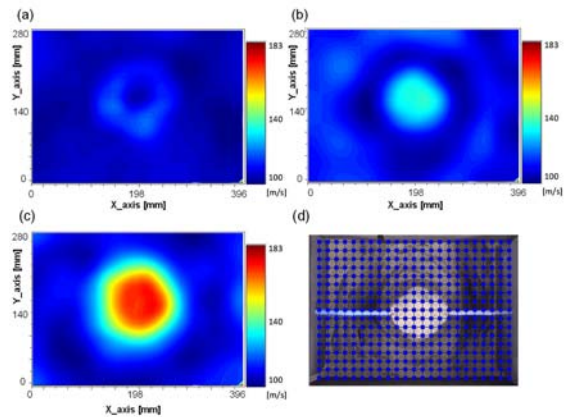


Fig.9 Results of imaging of sound velocity distribution for each time: (a) 20, (b) 50, (c) 80 min. (d) Upper view of scanned area obtained by CCD camera of SLDV (after experiment).



実験時の多孔質管付近の伝搬音速値の時間変化と砂槽内部に設置された水分センサの平均値の比較図を Fig.10 に示す。図より、伝搬音速値と体積含水率の変化は良い一致を示していることがわかる。

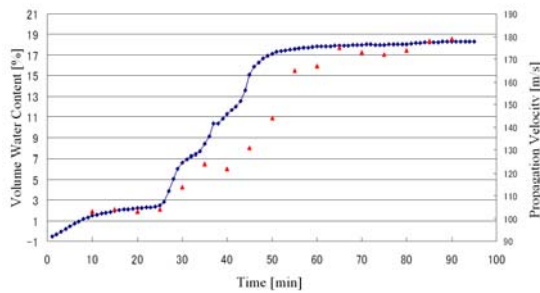


Fig.10 Experimental results of the volume water content and the propagation velocity. Blue diamond, average propagation velocity near the porous tube [m/s]; red triangle, average volume water content of four sensors [%].

③砂槽内部から水分を供給した場合（鉛直）。次に同様な手法で、鉛直方向の水分分布が可視化できるかどうかを検討した。実験セットアップ図を Fig.11 に示す。土壌中の水分が時間経過とともに鉛直方向に浸透していく過程を計測するため、円形音響窓を多数設けた測定板を製作した。測定板と土壌の間には土壌の流出を防ぐため、厚さ約 60 $\mu$ m の薄い膜（ポリプロピレンシート）が装着されている。計測の際はこの膜を介して土壌の振動を計測する。

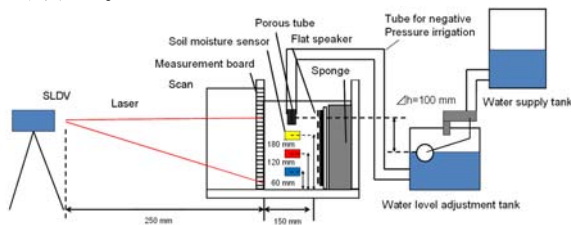


Fig.11 Experimental setup of vertical water distribution imaging when using negative pressure irrigation system.

音源としては平面スピーカを用い、送振波形は正弦波 4 kHz, 5 cycles のパースト波を使用した。SLDV のスキャンエリアは 8 $\times$ 10 points, ポイント間隔は縦横 2.5 cm 間隔である。土壌への灌水方法は砂槽底面から 22cm の高さに設置した多孔質管から給水を行った。このときの水分調整タンクと多孔質管との高低差は 10cm とした。土壌中には深さ毎の体積含水率を測定するために誘電率により測定を行う土壌水分センサ(Decagon devices Inc, ECH2O probe EC-5)が埋設されている。埋設深度はそれぞれ 6,12,18cm である。SLDV と土壌水分センサの測定時間はそれぞれ 2 分、1

分である。Fig.12 に伝搬音速分布の時間変化を示す。図より、多孔質管付近から音速が変化し、徐々に砂槽下部に音速の速い領域が移動していく様子が見て取れる。

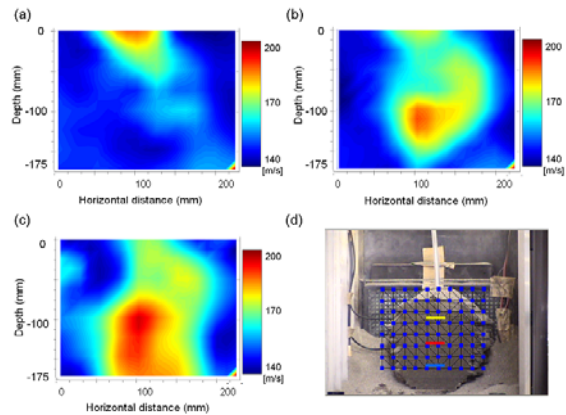


Fig.12 Results of imaging of propagation velocity distribution for each time: (a) 14, (b) 32, and (c) 54 min. (d) Photograph of the wet sand in the sand tank after the experiment.

Fig.13 に水分センサの示す体積含水率の変化とセンサと同じ位置での伝搬音速値の変化

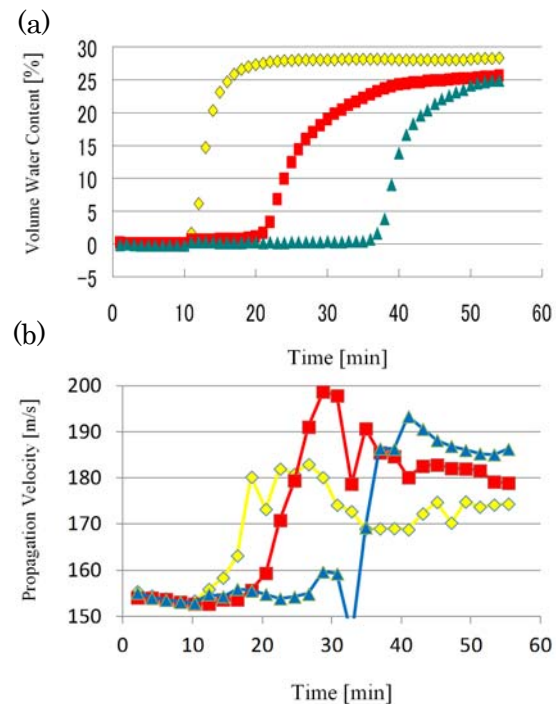


Fig.13 Measurement results of the volume water content and propagation velocity. (a) Temporal changes of the volume water content measured by three soil moisture sensors. Sensor position from the bottom of the sand tank: yellow diamond, 180 mm; red square, 120 mm; and green triangle, 60 mm, (b) Temporal changes of the estimated propagation velocity near the sensor position.

を示す。計測結果を比較するとほぼ同様の時間帯に値が変化し始めていることが確認できる。また、伝搬音速値が一旦ピークを迎えた後、減少するように見えるのは測定エリアが約 11cm と狭いため、測定容器壁面に到達した水分がそのまま流れ落ちている可能性を示唆している。すなわち、伝搬音速は音源から測定ポイントまでの間の推定値であるため、たとえ多孔質管中心付近の体積含水率が高くても、音波が通過する周辺部の体積含水率が低下すると、結果的に伝搬音速の推定値自体も影響を受けて低下することを意味していると思われる。

④空中放射音波により励振させた場合。

屋上緑地化に使われるような非常に浅い容器における水分分布を非接触で計測可能かどうかを検討するために、空中放射音波を用いた非接触音響探査法を適用した場合について検討した。Fig.14 に示すように底浅容器（47.5x47.5 x 6cm）を大型砂槽（79 x103x40cm）の上において実験を行った。音源としては平面スピーカを用いた。

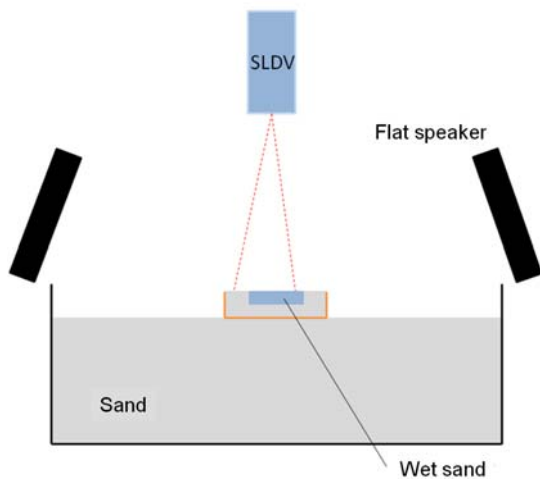


Fig.14 Experimental setup using non contact acoustic imaging method when a shallow bottom container is on sand.

平面スピーカは砂槽の左右に 50 cm 離れた状態で設置した。また SLDV のヘッドは測定対象物の中心から 1m 離れた位置に固定した。送振波形としては 500-5000Hz のチャープ波（持続時間 1.8s）を使用した。底浅容器内部に埋設した含水砂の重さは砂 600g、水 127.4g であった。SLDV による振動速度分布の計測結果例を Fig.15 に示す。図より底浅容器の含水部（青四角）に振動速度の大きな部分があることがわかる。しかし、底浅容器の側面も同時に振動していることも見て取れる。そこで、次に底浅容器を大型砂槽の表面に埋設した場合の検討を行った。実験セットアップ図および実験結果例を Fig.16, Fig.17 に示す。

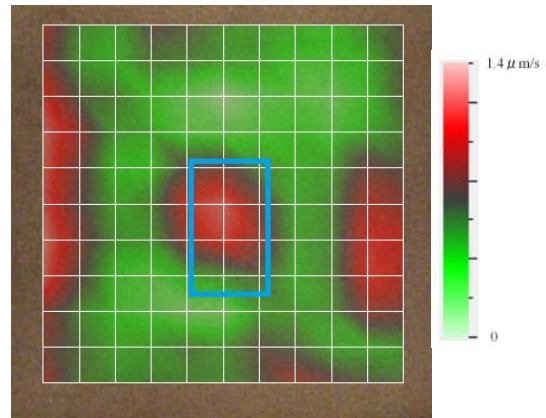


Fig.15 Distribution image of vibration velocity when a shallow bottom container is on sand. A blue frame shows a buried position.

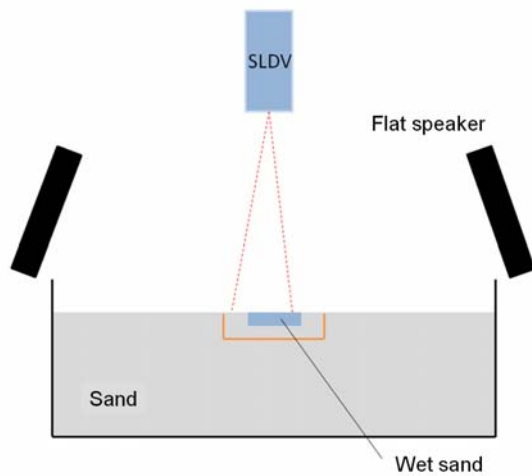


Fig.16 Experimental setup using non contact acoustic imaging method when a shallow bottom container is in sand.

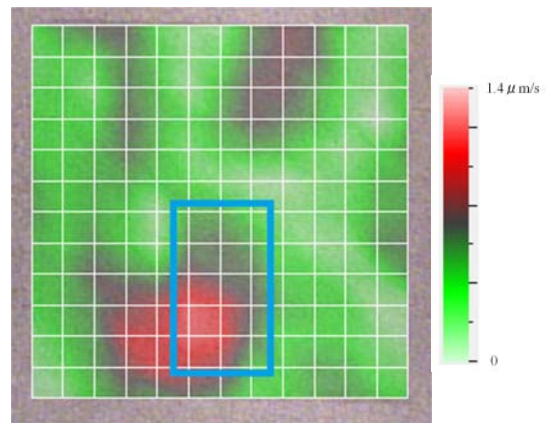


Fig.17 Distribution image of vibration velocity when a shallow bottom container is on sand (A blue frame shows a buried position).

図より、容器側面の影響が消えて含水部のみが明瞭に映像化できていることがわかる。

### (3) まとめと今後

粒径約 300 $\mu$ mの海岸砂中の含水比と伝搬音速値がほぼ比例する関係にあることおよび市販の培養土の場合は、逆比例することを明らかにした。次に砂槽に人為的に水分分布を作成した場合には、設置深さにも依存するが音波振動によりその分布を可視化することも明らかにした。また、負圧差灌水による水分分布の時間的な変化を音波振動により計測した。振動計測の結果を用いて作成した伝搬音速平均分布図より砂槽における水分分布の時間的な変化を捉えることができた。その結果は市販されている土壤水分センサの結果と比較することにより有効性が確認された。さらに非接触音響探査法により屋上緑地化に用いられる底浅容器でも水分分布の可視化が可能であることを示した。今回は再現性を重視して主に砂を使用した。今後は植物を栽培するのに使用する培養土を用いた場合について検討する予定である。

## 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 3 件)

- (1) 中川裕、杉本恒美，“波振動を用いた土壤水分分布計測に関する検討，—土壤水分分布の音響映像化法に関する検討—”，桐蔭論叢，Vol.28，PPxx-xx，(2013.7) 掲載予定，査読無
- (2) 中川裕、杉本恒美，“土壤中の水分分布計測に関する基礎研究，—音波振動と土壤水分センサを用いた計測に関する検討—”，桐蔭論叢，Vol.26，PP51-56，(2012.7) 査読無
- (3) 中川裕、杉本恒美，“音波振動を用いた土壤中の水分分布計測に関する基礎研究”，桐蔭論叢，Vol.24，PP235-238，(2011.7) 査読

### [学会発表] (計 8 件)

- (1) Yutaka Nakagawa and Tsuneyoshi Sugimoto，“Basic study of water distribution measurement in soil, -Acoustic imaging of water distribution in the sand-”，7th Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2012(TUBME), Abstract Book, IM7, p99-100, (2012.11.10), Toin Memorial Academium
- (2) Yutaka Nakagawa and Tsuneyoshi Sugimoto，“Basic Study of Water Distribution Measurement in Soil Using SLDV, -Real Time Imaging of the Vertical Water Distribution-”，IEEE International Ultrasonic Symposium 2012, Abstract Book, P2E-4, pp183-184, (2012.10.08), Dresden, Germany

- (3) Tsuneyoshi Sugimoto, Yutaka Nakagawa, Takashi Shirakawa, Motoaki Sano, Motoyoshi Ohaba, and Sakae Shibusawa, “Study on water distribution measurement in sand using sound vibration”, 11<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture, (2012.07.17), Indianapolis Hyatt Regency hotel, Concept room, USA
- (4) Yutaka Nakagawa and Tsuneyoshi Sugimoto，“Basic study of water distribution measurement in soil, -Study on the measurement using Sound Vibration and Electric Detection-”，6th Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2011, (TUBME), Abstract Book, IM9, pp116-117, (2011.11.5), Toin Memorial Academium
- (5) Yutaka Nakagawa and Tsuneyoshi Sugimoto，“Basic study of water distribution measurement in soil using SLDV”，IEEE International Ultrasonic Symposium 2011, (2011.10.19), Caribe Royale, Orland, Florida, USA.
- (6) 中川裕、杉本恒美，“音波振動による土壤中水分分布計測に関する基礎研究(II)”，日本音響学会春季研究発表会講演論文集，3-8-5,p134,pp1565-1566，(2011.03.11)，早稲田大学
- (7) 中川裕、杉本恒美，“音波振動による土壤中の水分分布計測に関する検討，—伝搬音速値と含水比についての検討—”，アコースティック・イメージング研究会，信学技報 Vol.110, No419, PP23 - 26, (2011.02.21) 産業総合技術研究所
- (8) Yutaka Nakagawa and Tsuneyoshi Sugimoto，“Basic study of water distribution measurement in soil using a sound vibration”，5<sup>th</sup> Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2010, (TUBME), Abstract Book, IM7, pp113-114, (2010.11.6), Toin Memorial Academium

### [その他]

ホームページ

<http://www.cc.toin.ac.jp/sc/sugimoto>

## 6. 研究組織

- (1)研究代表者  
杉本 恒美 (TSUNEYOSHI SUGIMOTO)  
桐蔭横浜大学・工学部・教授  
研究者番号：80257427
- (2)研究分担者  
研究者番号：
- (3)連携研究者  
白川 貴志 (SHIRAKAWA TAKASHI)  
桐蔭横浜大学・工学部・非常勤講師  
研究者番号：30424857