

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500196

研究課題名(和文) 柔軟なデュアル構造を有する超広帯域エレクトレットコンデンサセンサの開発

研究課題名(英文) Development of super-wideband electret condensor sensor with flexible dual structure

研究代表者

蔭山 健介 (KAGEYAMA, Kensuke)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30272280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロギャップを有するフレキシブルエレクトレットコンデンサセンサ(フレキシブルECS)の製作を行った。その結果、折りたたみ可能な柔軟性を有するECSを製作できた。製作したECSは、心音の測定、植物のキャピテーションに伴う超音波AEを検出が可能で、広帯域の加速度も測定できた。さらに、素子を2枚積層したデュアルセンサを製作した。このデュアルセンサから得られる送受信波形の振幅と重心周波数を用いて、軟質材料の硬さを測定することができた。これらの結果から、目的に応じて素子の形状や構造を調節することで、1 Hzから100 kHzまでの超広帯域の振動に対応したフレキシブルECSを開発できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Flexible electret condensor sensor (Flexible ECS) was fabricated. As a result, the flexible ECS was obtained and it could be folded. The fabricated ECS could measure a heart sound and detect a ultrasonic AE due to cavitation in living plants. Furthermore, dual sensor with lamination of two elements was fabricated. The dual sensor could measure the hardness of soft materials using transmitting and receiving waveform and center frequency. These results can conclude that a flexible ECS with super-wideband of 1 Hz to 100 kHz could be developed optimizing the shape and structure of the element.

研究分野：非破壊評価

キーワード：非破壊評価 フレキシブルセンサー 振動 超音波 加速度 アコースティック・エミッション エレクトレット 硬さ

### 1. 研究開始当初の背景

エレクトレットコンデンサマイクロフォン(以下 ECM)は小型で安価なマイクロフォンとして広く使用されているが、応募者はこの原理を応用して、広帯域 ECM の開発を行ってきた。これは、ECM のギャップ部に微細なパターンニングを施す事により、ギャップ厚さを数  $\mu\text{m}$  以下にしたマイクロギャップ(微細パターンニングギャップ)を有するセンサであり、超音波領域までをカバーし、送信も可能な広帯域のエレクトレットコンデンサ音響センサ(以下 ECS)を作製することができた。この広帯域 ECS はギャップ部が微細化したことで、形状の自由度も飛躍的に増し、振動(音響)の送信も可能となった。そこで、応募者は、図1と以下に示すような ECS を開発できるのではないかと考えるに至った。

- (1) フレキシブル ECS (薄く柔軟に変形可能で折り畳む事も可能)
- (2) 超広帯域デュアル ECS (送信用と受信用の ECS を張り合わせる事で、可聴域~超音波領域だけでなく、直流成分(DC)~超低周波の圧力や振動も測定可能)

### 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3つである。

- (1) フレキシブル ECS の開発  
厚さ 0.5mm 以下で折り畳め、生体(人体と植物)に容易に取り付け可能で、生体信号(心音、植物茎部の発泡音)を従来のセンサより高感度で検出可能な ECS の開発
- (2) 超広帯域デュアル ECS の開発  
送信用 ECS と受信用 ECS を張り合わせたデュアル構造とすることで、DC~超音波領域の圧力や振動が測定可能な超広帯域 ECS の開発
- (3) 超広帯域フレキシブル ECS の開発  
柔軟性により機器の表面に容易に取り付け可能な一方で、従来の広帯域センサと同程度の感度を維持しながら周波数帯域が向上した超広帯域フレキシブル ECS の開発

### 3. 研究の方法

- (1) フレキシブル ECS の開発  
極薄フッ素樹脂(PFA)フィルムに Al 電極を蒸着又は溶着により取付け、コロナ放電によりエレクトレット化したフィルムとインクジェットプリンティングにより  $\text{SiO}_2$  凝集体の微細パターンニングギャップを形成したフィルムを積層して、フレキシブル ECS 素子を作製した。作製したフレキシブル ECS について、シリコーン樹脂ブロックの振動測定により性能の評価を行った。  
次に、フレキシブル ECS を用いて、人体の生体信号(心音)、植物の発泡音(茎部のキャピテーション)を測定した。従来型センサと性能比較を行い、エレクトレットの表面電

位、フィルムの厚さ、電極の厚さと材質、微細パターンニングの形状、パッケージの方法をパラメータとして性能の最適化を行った。

### (2) 超広帯域デュアル ECS の開発

超広帯域 ECS の開発  
フレキシブル ECS 素子を2枚積層する事によってデュアル構造 ECS を作製した。そして、金属や樹脂のブロックに取り付け、振動の送受信を行い、得られた送受信波形と測定対象ブロックの硬さ(デュロメーター硬さ A)との相関を調べた。そして、従来型センサと性能比較を行い、エレクトレットの表面電位、フィルムの厚さ、電極の厚さと材質、微細パターンニングの形状、パッケージの方法をパラメータとして性能の最適化を行った。

### (3) フレキシブル超広帯域 ECS の開発

ECS を折り畳める程度に柔軟性を持たせた超広帯域フレキシブル ECS を作製した。そして、これを加振器に取り付け、加速度測定を行った。さらに、鉄鋼材料の微視割れに伴う AE 測定も行った。そして、従来型センサとの比較を行い、エレクトレットの表面電位、フィルムの厚さ、電極の厚さと材質、微細パターンニングの形状、パッケージの方法をパラメータとして性能の最適化を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) フレキシブル ECS の開発

図1に示すように厚さ  $12.5\mu\text{m}$  のフッ素樹脂フィルムと Al 電極を積層してエレクトレットコンデンサセンサー(ECS)を作製したところ、折りたたみ可能な柔軟性を得ることができた。

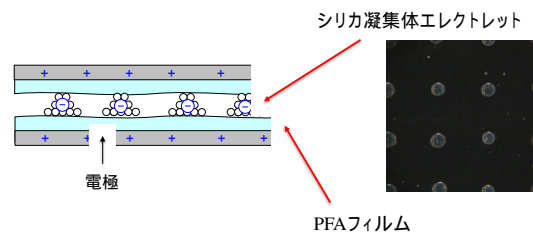


図1. フレキシブル ECS の構造

そして、実際に4層に折りたたんで、PPテープで保護することで厚さ 0.4 mm の ECS を製作できた。この ECS を用いて、心音の測定を行ったところ、ECM 用の安価なアンプを用いることで図2に示すように明瞭な心音信号を測定することができた。また、折りたたまずに  $10 \times 10 \text{mm}$  の受感部を有する素子をアクリルプレートに接着して FET を介して 55dB 増幅できる測定回路を製作した。そしてこれを、ミニトマト茎部に取り付けたところ、茎内部のキャピテーションに伴う超音波 AE を検出することができ、市販の AE センサを用いた場合と同等の検出感度が得られた。市販の AE センサーは 10 万円程度の価格であるのに対して、今回製作した ECS および測定回路は通常マイクロフォンに使用される安価

な装置であることから、この ECS を用いて植物の AE 測定を大幅にコスト削減できる可能性が示された。

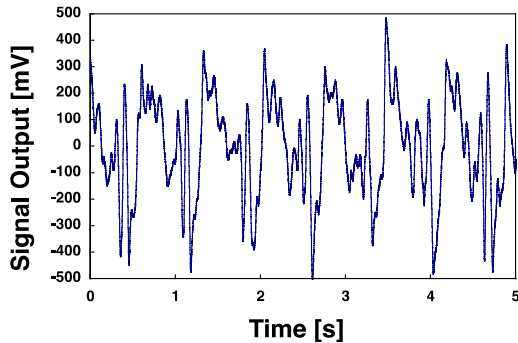


図 2 . ECS による心音測定波形

(2) 超広帯域デュアル ECS の開発

素子を 2 層に折りたたんだフレキシブル ECS を製作し (受感部 10x10 mm), これを 2 枚積層することでデュアルセンサを製作した (図 3)。



図 3 . デュアルセンサの構造と外観

そして, AI, アクリル, 天然ゴム, シリコン, エラストマーのブロックにデュアルセンサを取り付けて振動の送受信を行った。その結果, 図 4 および図 5 に示すように, 送受信波形の振幅と重心周波数を用いて, センサの押付力と, 測定対象の硬さとの相関を見出すことができた。また, デュアルセンサの取り付け方とセンサ全体の構造を最適化し, デュロメーター硬さ計と比較したところ, デュロメーター硬さ(A)30-100 の範囲で, デュアルセンサを用いて硬さを推定することができた。

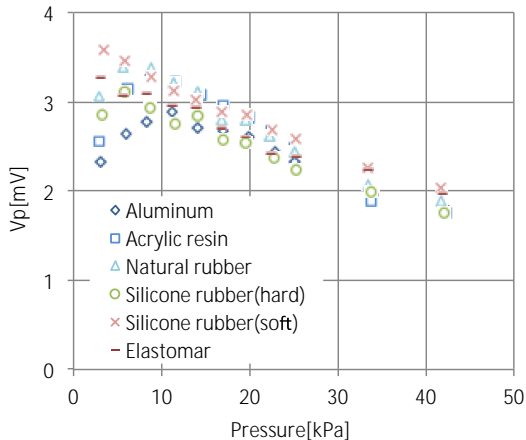


図 4 . デュアルセンサの送受信波形振幅と押付圧力の関係

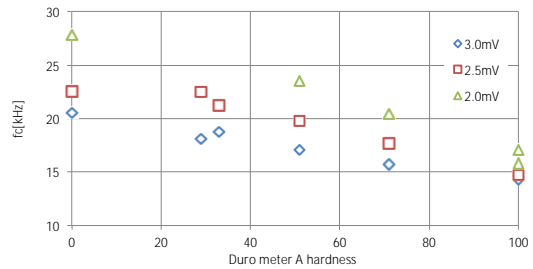


図 5 . デュアルセンサの送受信波形の重心周波数と硬さの関係

デュアルセンサを用いれば, 従来のデュロメーター硬さ計より大幅に小型 (10x10x3mm) でかつ応答速度が極めて速い (10ms 程度) の硬さ測定が可能である。また, 今回製作した ECS および測定回路は通常のマイクロフォンに使用される安価な装置であることから, 果実の熟度判定, 人体の筋肉の凝りの測定などさまざまな実用化への可能性が示された。

(3) 超広帯域 ECS の開発

図 6 に示す手順で, 素子を 2 層に折りたたんだフレキシブル ECS を製作し (受感部 20x20 mm), 加振器を用いて加速度測定を行った。その結果, 図 7 に示すように市販の広帯域加速度センサと比較して 1 kHz 以下では 20 dB 以上感度が向上した。また, 10 kHz まで同等の感度を示し, 1 Hz~10 kHz までの広帯域の加速度を測定可能であることがわかった。

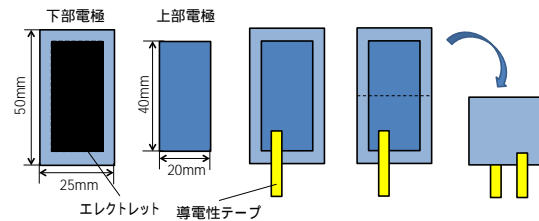


図 6 . ECS の製作手順

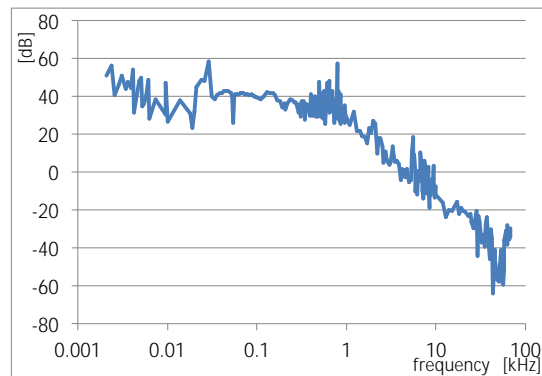


図 7 . ECS の市販の加速度センサに対する感度の比較 (0 dB が市販の加速度と同じ感度) さらに, 素子を折りたたまずに 0x10mm の受感部を有する素子をアクリルプレートに接着して FET を介して 55dB 増幅できる測定回路を製作した。これを用いて鉄鋼の微視割れに伴う AE の検出を行った。その結果, 市販の AE センサより感度は劣るものの 100 kHz

付近の AE 信号を検出することができた。これらの結果から、目的に応じて素子の形状や構造を調節することで、1 Hz~100 kHz までの超広帯域の加速度および AE を検出可能な ECS を製作することができた。

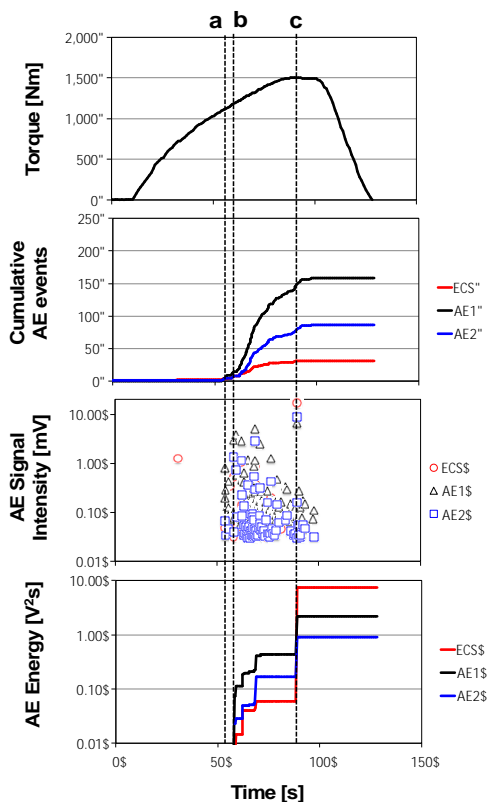


図8 .鉄鋼材料のねじり試験時のトルクとAE発生挙動；AE1, AE2 が市販のAE センサ

### 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)

- 1) 小野寺 将, 蔭山 健介: フィルム積層エレクトレットセンサを用いたデュアルセンサの製作と特性評価, 日本実験力学会誌, Vol. 15, pp64-68 (2015).
- 2) Wu, Chenye, Kageyama, K. and Sakai, T.: Improvement of heat resistance of silica-agglomerate electret using electrostatic spraying, Mechanical Engineering Journal, vol. 2, p. 15-00064 (2015).

〔学会発表〕(計5件)

- 1) 小野寺 将, 蔭山 健介: フィルム積層エレクトレットセンサを用いたデュアルセンサの製作と特性評価, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, くにびきメッセ(島根県・松江市), 2014/10/13
- 2) 櫻田 健, 蔭山 健介: シリカ凝集体エレ

クトットを用いた薄型加速度センサの製作と特性評価, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, くにびきメッセ(島根県・松江市), 2014/10/13

- 3) 吳 シンク, 蔭山 健介: 静電噴霧を用いたシリカ凝集体エレクトレットにおける帯電量の向上, 第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, くにびきメッセ(島根県・松江市), 2014/10/13
- 4) 蔭山 健介, 金子慎太郎: フィルム積層ECMを用いたフレキシブル加速度センサの製作と特性評価, 第21回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2013), 首都大学東京(東京都・八王子市), 2013/11/10
- 5) 吳 シンク, 蔭山 健介: シリカ凝集体の静電噴霧によるエレクトレットフィルムの耐熱性改善, 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 仙台国際センター(宮城県・仙台市), 2013/11/7

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計1件)

名称: デュアルエレクトレットセンサ、硬度測定方法及びデュアルエレクトレットセンサの製造方法

発明者: 蔭山健介

権利者: 埼玉大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-213028

出願年月日: H26/10/17

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mehp.mech.saitama-u.ac.jp/activities/kageyama-2.html>

### 6 . 研究組織

(1)研究代表者

蔭山健介 (KAGEYAMA, Kensuke)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 30272280

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し