

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24年 5月22日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656081

研究課題名（和文）CNTを用いた未来超音波通信システム用超音波源の研究

研究課題名（英文）Study of ultrasonic generator using CNT for future ultrasonic communication system

研究代表者

三村 秀典（MIMURA HIDENORI）

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：90144055

研究成果の概要（和文）：カーボンナノチューブ（CNT）のウェブ（web）を用いた熱音響型スピーカー（CNTスピーカー）に関する研究を行った。音響特性測定の結果CNTスピーカーは、可聴域から超音波領域（100-100kHz）まで超広帯域の周波数レスポンスを示した。これは従来のダイナミックスピーカーでは実現できない特性である。また、スピーカーの抵抗および個々のCNTの長さの音響特性依存性、およびヒートダイナミクスから、その音波発生メカニズムについて考察した。

研究成果の概要（英文）：We have proposed and studied the properties of thermo-acoustic CNT speakers fabricated by CNT web. The measurements reveal that the CNT speaker shows super-broad frequency response from 100 to 100 kHz, which is not realized in the conventional dynamic speakers. We also discuss that the generation mechanism of the acoustic wave from the heat dynamics and the dependence of both the resistivity of the CNT speaker and the length of the individual CNT on the acoustic properties.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	0	1,700,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	420,000	3,520,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：波動利用工学・超音波発生

1. 研究開始当初の背景

超音波に様々な情報を載せて、室内で人間と機器、または機器間で通信を行い、電波や光を使わずに情報のやりとりができるユビキタスな未来超音波通信システムが検討されつつある。このためには、小型・軽量・波形歪の少ない超音波発生源の開発が必要である。通常、超音波発生源として、圧電素子などの振動素子が用いられている。しかしな

がら、振動素子から発生する超音波は素子の共振という動作原理のため、歪特性が良好でなく、広帯域での安定した発信が困難である。そのため、振動素子を用いない小型・軽量の超音波発生源の開発が必要である。

超音波通信システムでは、a)音を人に直接情報を伝達せず、単純に情報伝達の媒体として利用する（人に聴こえない、あるいは人にとって意味の無い音による伝達）、あるいは

は、b)人に直接情報を伝達する音（アナウンス、音楽等）を超音波で変調して、空間に放射させ、聴覚に直接働きかけると同時に、音を関連情報を持ち関連情報に繋がるハイパーリンク機能を持つハイパーメディアとして利用するという2つが考えられる。このように、従来の視覚に加えて聴覚を用いた端末を用いることでユビキタスな情報化社会の大きな市場と価値に結びつくと考えられる。

音を情報伝達媒体として利用する場合の特徴として、次の点が挙げられる。

i) 情報媒体が音であるため、音の特性でシステムの特性を決めることができる。

ii) 超音波の場合は、到達範囲が狭くない。そのため、その場でなければ得られない情報通信に向き、秘匿性が必要な場所での情報伝達媒体として優れている。

iii) 赤外・可視光のような影がないため、ある範囲内であればどこでも受信が可能である。

iv) 電波のような法的制約がないため、どこでも使える。

すなわち、情報伝達媒体としての「音」はRF・赤外などに比べると情報量、速度などの点で劣るが、上記特性を活かし、RF、赤外と使い分けることができる。

実現するユビキタス性のイメージとして、例えば、狭小空間内で受信者が空間に手を伸ばせば、その空間から情報を入手できる環境を提供したり、情報を必要とする特定の人だけに情報を届けたりすることが可能となる。また、携帯情報端末(PDA)や携帯電話などへ超音波発信装置を搭載することにより位置測定などの音波センサーとして機能させることができる。

我々グループは、極めて簡単に数十m以上の糸にすることができるカーボンナノチューブ(CNT)の製作技術を世界で唯一保有している。このCNTは、 FeCl_2 触媒とアセチレンガスを用いて減圧化学気相成長法(LPCVD)を用いて製作する。本方法の特長は、ガスを流して温度を上昇させるだけで、従来のCNT成長法で必要とした基板上への触媒の堆積が必要ない極めて簡単なプロセスにある。また20分で2mm以上の垂直配向CNTを得ることができる。さらに、ピンセットで端部をつまんで引っ張るだけで、極めて簡単に数十m以上の糸にすることができる。また、簡単にシート状にすることも可能である。このCNT糸から直径0.1mmのCNTファイバーを作り、その電気抵抗を測定したところ、抵抗率は $8 \times 10^{-4} \Omega \text{Wcm}$ と高導電性を示した。電気抵抗測定の実験を通して、本研究のCNTに数十Vの電圧を印加すると、短時間にCNTが発熱し、また印加電圧をOFFすると短時間にCNTが室温に戻ることを見出した。この特性により、CNT

に20kHz以上の超音波帯のパルス電圧を印加すると、そのパルス電圧に追従して、CNTが発熱冷却を繰り返し、それによりCNTの周辺の空気は膨張と収縮を繰り返す。この圧力振動により極めて簡単な原理(熱音響効果)で超音波を発生させることができる。このように、本研究が提案するCNTの超音波発生源への応用は、我々グループのCNT糸が高速で発熱冷却する現象を見出したことにより着想に至ったものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我々グループが世界で唯一保有する極めて簡単に数十m以上の糸にすることができるカーボンナノチューブ(CNT)を用いて、振動素子を用いない小型・軽量で且つ歪の少ない超音波発生源の開発を行うことである。性能目標は、未来超音波通信システムに利用可能である、周波数帯域20kHz~100kHz、音圧100dBである。

3. 研究の方法

まず、最適なCNT超音波発生装置を製作するため、すなわちCNT糸やシートで優れた音響特性を得るため、CNTのナノレベルな基礎物性とCNTシート(糸)によるマクロな音響効果(マクロな場合、CNTとCNTの結合の状態や結合の数、平行なCNTとCNTの間隔、トータル長、そのインピーダンス、電極とのコンタクト抵抗などの影響を受ける)との関係の解明を行う。その後、目標値である周波数帯域20kHz~100kHz、音圧100dBを達成する音波発生装置を製造する。最終的には、実際にCNT超音波発生装置および周辺機器を試作し、未来超音波通信インフラを狭小空間で仮想的に構築し、実用化に向けた実験・検討を行う。

4. 研究成果

図1にCNTスピーカーの製作方法とスピーカーの写真を示す。CNTリボンを低回転モータで周辺に銅テープが貼られている枠に巻き取ったものである。枠を2枚重ねておけば、1度巻き取れば、裏表で2つのスピーカーが製作できる。AgペーストはCNTと銅テープの導通を取るために用いられている。申請者らのCNTのみ、このような簡単なプロセスでCNTスピーカーの作製が可能である。

まず、将来能率が良いD級アンプでの駆動を想定して、音響入力信号としてサイン波をパルス幅変調であるPWM(Pulse Width Modulation)変換した信号を用いた。Duty比は50%とした。PWM信号の場合、無音時はDutyが50%に保たれたキャリア周波数の矩形波が連続して出力される。ここに信号が加わると、加わった信号に応じて、パルス幅が変調する。周波数特性測定はオーディオアナライザ

(Audio Precision SYS-2712)を用いた。マイクはブリュエル・ケアー社製 (Brüel & Kjaer) の B&K 4138 を用いた。CNT ウェブスピーカーとマイク間の距離は 1[m]とした。入力信号はオシロスコープを見ながら調整した。この音響装置系は音響測定業界において標準的に使用されているものである。なお、音響測定は無響室で行った。図 2 に測定系統図を示す。

CNT ウェブスピーカーに AC 信号周波数 f を入力すると、CNT スピーカーは周波数 $2f$ の音圧が発生する。図 3 に示すように、AC 1 周期の入力振幅により表面温度振幅が 2 周期 (ゼロ⇒ピーク⇒ゼロ⇒ピーク⇒ゼロ) となり出力信号は全波整流される。この現象を避けるため、増幅器 (amplifier) に直流 (direct current, DC) バイアス電圧を加えている、DC バイアスにより、出力周波数は f となる。本実験では $V_{dc}=36[V]$ とし、パワー段 (Power stage) から入力している。なお、信号投入電圧は $V_i=V_{o-p}=30[V]$ とした。 ($V_{p-p}=60[V]$)

図 4 に周波数と音圧の実験結果を示す。CNT シートのマクロな抵抗が $3.2\ \Omega$ と $8.2\ \Omega$ の場合である。20kHz~40kHz において、音圧 70dB 以上が得られている。ここで特徴的なのは、抵抗が低いほど、音圧が高いことである。

次に、より現実的な音声信号を扱うため、正弦波アナログ信号を用いた評価系を構築し、音響特性 (広帯域の周波数特性、様々なドライブモードによる出力・歪特性など) を詳細に測定した。また、前節では周波数 40[kHz] が上限となっていたが、ここでは 100[kHz] まで測定するため、Audio analyzer として Audio precision SYS-2712 を使い、サンプリング周波数を 192[kHz] とした。マイクは 200[kHz] まで測定可能な B&K Type 4138 とした。CNT ウェブスピーカーは異なる成長長さの 3 種類のを製造した。本実験では、CNT の長さを 3 水準 (0.8、1.2、1.6[mm]) とした。また、それぞれの電極間の抵抗値を巻き層数で調整し、全て $19[\Omega]$ 一定になるようにした。さらに、ウェブの熱的な挙動をモフォロジー的視点から調査するため、アトマイザー (噴霧機) を用いて、ウェブにエタノールを噴霧し、ウェブを凝集させたワークを用意した。以降、本節ではウェブのみからなるスピーカーを Web speaker、エタノールで凝集させたスピーカーを Film speaker と記述する。エタノールで凝集させることで厚さ 200~500[μm] のウェブが、主に厚さ方向に 1~5[μm] に収縮する。また収縮により抵抗値が $19[\Omega]$ から $17[\Omega]$ に低下する。これは独立 CNT 間の距離が近くなり、独立 CNT-CNT の接触抵抗が低下したためであると推測される。

図 5 に測定系統図を示す。スピーカーとマイク間の距離は 0.5[m] とした。図 6 に Web

speaker、Film speaker の周波数特性を示す。図 6 で示したように、CNT の長さは 3 水準 (0.8、1.2、1.6[mm]) としているため、合計 6 種類の結果である。ここで、入力信号の電圧は $V_{p-p}=10[V]$ 一定とし、バイアス電圧 $V_{dc}=10[V]$ とした。

図 7 に様々なドライブモード (AC モード、AC/DC モード) による入力電圧と出力音圧の関係を示す。入力電圧 V_{p-p} を 0.8~19[V]、DC バイアス電圧 V_{dc} を 0~13.5[V] まで変化させた時の出力音圧と入力電圧 V_{p-p} の関係である。入力信号の周波数は 25[kHz] のため $V_{dc}=0$ の時 (AC モード) は、出力音圧の周波数は 2 倍の 50[kHz] を計測した。AC/DC モードでは 25[kHz] を計測した。

さらに高調波歪特性の評価、突発的な信号が入出力した時の立ち上がりと立下がりを表した過渡応答性能、音波発生メカニズムについて検討した。

未来超音波通信システム用超音波源として、カーボンナノチューブ (CNT) ウェブを用いた熱音響型スピーカーを製作し、以下の成果を得た。①周波数特性の結果、可聴域から超音波領域 (100[Hz]~100[kHz]) まで広帯域な音波発振を確認した。②可聴域の周波数特性は 6[dB/oct.] の傾きを持つ。③超音波領域の周波数特性は広帯域且つフラットである。④電極間の抵抗値が同一であれば、単独 CNT の長さ と出力音圧に優位差は認められなかった。⑤様々なドライブモード (AC モード、AC/DC モード) による出力特性を詳細に測定した結果、入力電力と出力音圧は比例の関係にあり、出力音圧は熱起因、つまり熱音響効果で発生していることを確認した。⑥高調波歪率は、可聴域では周波数依存係数によりドライブモードにより、出力音圧の周波数依存性指標によって整理・説明することができた。また高調波歪率は 20[kHz] 以上の超音波領域において急激に低下することがわかった。⑦優れた超音波過渡応答性から、CNT 本体から空気への温度振幅による圧力変換が入力信号に高速で追従し、熱→音波変換されていることがわかった。⑧音波発生メカニズムについてモフォロジー的な観点およびヒートダイナミクスから検討し、CNT ウェブスピーカーはウェブ中に存在する独立 CNT 同士の分子間力によるコンタクトポイント、すなわちナノ音源の集合体であるというモデルで説明できることがわかった。

以上のことより、CNT) ウェブを用いた熱音響型スピーカーは未来超音波通信システム用超音波源として利用できることがわかった。

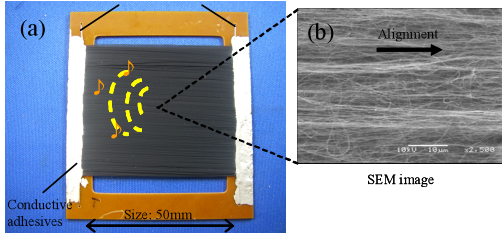


Fig.1 CNT スピーカーの製作方法とスピーカーの写真

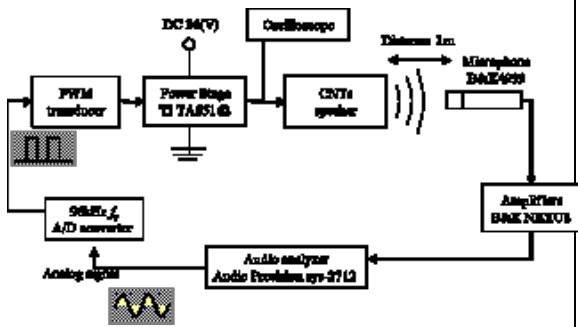


Fig. 2 音響入力信号としてPWMを用いた場合の出力音圧の測定系統図

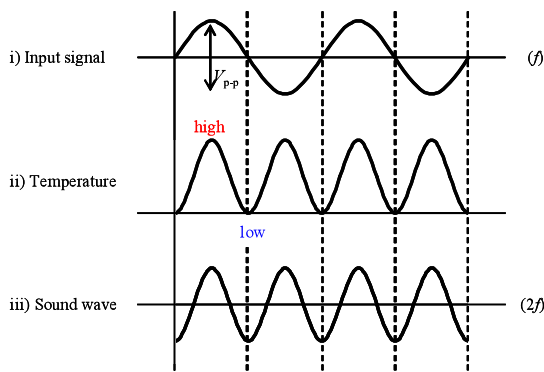


Fig. 3 信号波形の変化 (i)入力信号 (ii) 温度振幅 (iii)音波信号

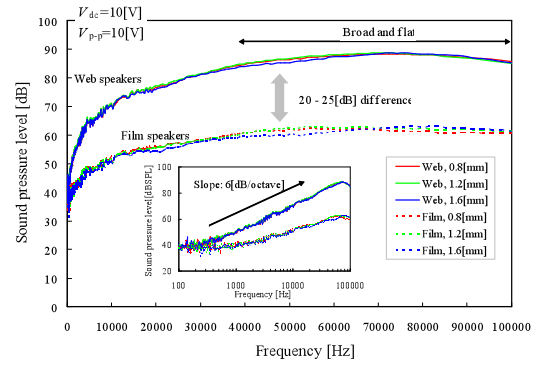


Fig. 4 音圧 (SPL) と周波数の関係

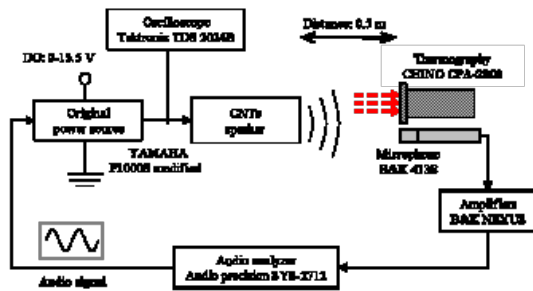


Fig. 5 音響入力信号として正弦波アナログ信号を用いた場合の出力音圧の測定系統図

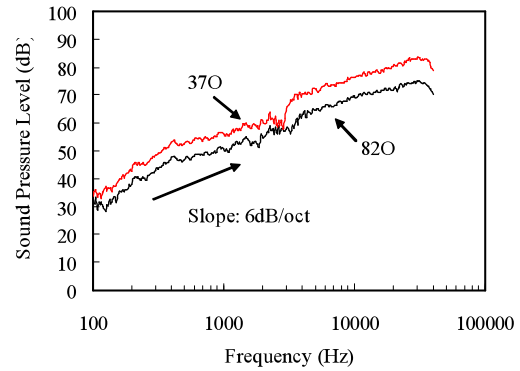


Fig. 6 Web speaker、Film speaker の周波数特性

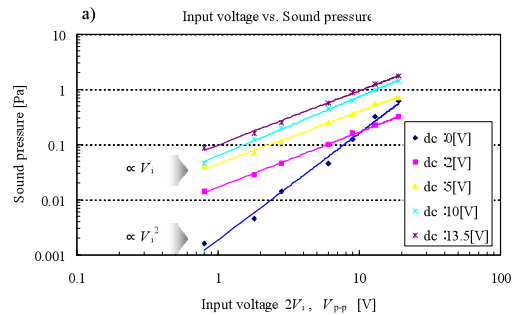


Fig. 7 様々なドライブモード (AC モード、AC/DC モード) による入力電圧と出力音圧の関係

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 K. Suzuki, S. Sakakibara, M. Okada, Y. Neo, H. Mimura, Y. Inoue, and T. Murata, Study of Carbon-nanotube Web Thermo-acoustic Loud Speakers、査読有、Jpn. J. Appl. Phys. Vol.50、2011、pp.01BJ10.1-01BJ10.4.

② Y. Inoue, Y. Suzuki, Y. Minami, J. Muramatsu, Y. Shimamura, K. Suzuki, A. Ghemes, M. Okada, S. Sakakibara, H. Mimura and K. Naito, Anisotropic carbon nanotube papers fabricated from multiwalled carbon nanotube webs、査読有、CARBON Vol.49、2011、pp.2437-2443.

[学会発表] (計5件)

① Y. Suzuki, M. Okada, H. Mimura and Y. Inoue, Growth of spinnable carbon nanotube arrays by chloride mediated CVD method, MRS Fall Meeting, 2011年11月28日、Boston

② M. Okada, Y. Inoue, A. Ishida and H. Mimura, Light and strong CNT fiber spun with CNT web、61st International Astronautical Congress、2010年10月1日、プラハ

③ K. Suzuki, S. Sakakibara, M. Okada, Y. Neo, H. Mimura, Y. Suzuki, Y. Miami, J. Muramatsu, and Y. Inoue、Study of carbon-nanotube web thermo-acoustic loud speakers、3rd international symposium on organic and inorganic electronic materials and related nanotechnologies、2010年6月23日、富山

④ 三村秀典, 井上翼、カーボンナノチューブの高速成長とその繊維化、情報・知能・精密機器部門講演会、2010年3月16日、東京

⑤ K. Suzuki, S. Sakakibara, S. Shimizu, M. Okada, Y. Neo, H. Mimura, Y. Suzuki, Y. Minami, A. Murakami, J. Muramatsu and Y. Inoue、High thermo-acoustic property of carbon-nanotube speaker、International Conference on Solid State Devices and Materials、2009年10月7日、仙台

[その他]

ホームページ等

<http://www.nvrc.rie.shizuoka.ac.jp/vision-i/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三村 秀典 (MIMURA HIDENORI)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：90144055

(2) 研究分担者

研究者番号：

(3) 連携研究者

井上 翼 (Inoue Yoku)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90324334