解 説

これからの強力超音波デバイス研究について —圧電材料の非線形モデル化と実デバイス設計への応用展開に向けて—

Nonlinear Evaluation for High-power Ultrasonic Devices

森 田 剛* *東京大学

Takeshi Morita* *The University of Tokyo

1. 研究の背景

強力超音波デバイスとして超音波モータや超音波溶接、集束超音波治療デバイス（HIFU）等が知られているが、最近では空中超音波を利用した非接触ハンドリング[1]や非接触での構造物ヘルスマニタリング[2]などの新しいデバイスが提案されてきている。このような強力超音波応用デバイスにおいては、その振動源となる圧電材料の研究開発が小型化や出力パワー限界の向上に直結するが、従来の圧電評価技術は主に直流駆動するデバイスを対象としたもので、強力超音波応用デバイス用の評価方法ではなかった。つまり、従来の性能評価定数として用いられてきた圧電 d 定数や電気機械結合係数 k^2 ではなく、限界振動速度、温度上昇、出力パワー密度などの評価手法が強力超音波応用においては本質的である。環境負荷の小さい非鉛圧電セラミックスが精力的に研究開発されている中で、この非線形定数に注目して強力超音波応用デバイス用へと開発を進めるには、非線形振動現象を表す性能評価が不可欠である。

2. 圧電材料の非線形振動モデル

圧電横効果（31 効果）における振動特性を評価するための図 1 に示す振動子（ハード系 PZT（C203））において、10 V_{pp} の振幅で電気特性評価（アドミッタンス測定）を行った測定例を図 2 に示す。このように、低電圧駆動では駆動周波数に対して対称形状をもつ共振特性が、一般的には低周波側にゆがみ、周波数を up-sweep したときと down-sweep したときで共振特性に跳躍現象がみられ、ヒステリシスを持つことが分かる [3] [4]。

圧電共振振動を考える場合には、図 3 に示す集中定数系の LCR 等価回路を用いることが一般的である [5] が、非線形振動が生じる場合には、この等価回路に非線形項を加えてはならない。我々は、バーストモード測定法 [6] と

図 1 圧電横振動（31 効果）振動子

図 2 共振特性に非線形現象が見られるアドミッタンス測定結果と計算結果

図 3 集中定数系 LCR 等価回路

原稿受付 2018 年 1 月 9 日

キーワード: Piezoelectric Effect, High-power Ultrasonic Device, Nonlinear Vibration, Equivalent Circuit, Transfer Matrix Method, Langevin Transducer

*〒 277-8565 柏市柏の葉 5-1-5

*Kashiwa-shi, Chiba

表 1 非鉛セラミック (CuO-KNN) と PZT セラミックの非線形パラメータの比較

Sample	A (N/V)	β_0 (s ⁻¹)	η (ΩA^{-2})	p (s/m)	ω_0 ($10^3 \times \text{rad/s}$)	ζ (ΩA^{-2})	q (s/m)	C_d (pF)
Hard PZT	0.153	54	5.07×10^3	2.58×10^1	227	-9.57×10^4	-4.86×10^2	2060
CuO-KNN	0.0189	861	2.08×10^5	2.44×10^0	2862	-2.39×10^6	-2.79×10^1	96.9

図 4 PZT と CuO-KNN の機械的品質係数 Q と中心応力の関係 (計算結果)

高電圧でのアドミタンス特性を組み合わせることによって、圧電等価回路に含まれるパラメータのうち、機械的等価コンプライアンスと機械的等価振動損失の二つのパラメータのみに非線形項を与えれば十分であることを明らかにした [3] [4]. つまり集中定数系の LCR 等価回路における動アドミタンス部分に流れる電流と電圧の関係を

$$L \frac{di}{dt} + R_0 i + \eta i^3 + \frac{1}{C_0} \int i dt + \xi \omega^3 \left(\int i dt \right)^3 = V$$

と ξ , η で表される非線形係数を導入すればよい. これはハイパワー駆動による大振幅領域において、高次の振動が励振されることによる機械的な非線形性を表すパラメータであり、均一温度の状態で測定することができる. ほかのパラメータ, すなわち, 制動容量, 力係数, 機械的等価質量については, 定数項として扱ってよい. これは, 共振駆動の場合, 特にハード系の圧電材料での共振駆動の場合に限定され, ソフト系の圧電材料の場合には, 高い電界による誘電率の変化などに注意しなければならない.

従来型の PZT 振動子 (富士セラミックス PZT C-203 $44 \times 7 \times 2 \text{ mm}^3$) に対して, 非鉛圧電材料としてハード系ニオブ酸カリウム系セラミック (CuO-(K_{0.48}Na_{0.52})NbO₃ (CuO-KNN) $6.33 \times 2.54 \times 0.99 \text{ mm}^3$) [7] [8] を比較対象とした. これは, 水熱合成法で合成した原料粉末に酸化銅をドーピングして, さらに Ar 還元雰囲気中でポストアニールしたものである [7] [8]. これらの非線形特性評価例を表 1 に示す. 非線形定数, の形状依存度をなくした材料固有の非線形定数 p と q を比較してみると, 非鉛材料の値が PZT よりも小さいことが分かり, 優れた振動特性を有することが示唆される. これらの得られた物性値から, 高負荷条件での Q 値の変化を計算した図 4 の結果から, PZT 振動子では応力が大きくなるにつれてすぐに Q 値が小さくなって

しまうのに対して, 非鉛材料は高く安定した Q 値を維持できることが分かる.

3. 温度上昇と温度分布を考慮した圧電材料の非線形特性評価

今まで述べてきた非線形特性評価では, 振動子の各パラメータが温度によって変化しないように, 振動子の温度上昇や温度分布が生じないように測定を行う必要があった. しかし, 実際の強力超音波応用デバイスでは, 応力が集中するところ, すなわち電気機械変換を有効に行うことのできる場所に圧電素子が配置されて高い応力条件下で駆動されるために, 温度上昇と温度分布が生じることになる. そこで, このような高負荷状態での温度分布の影響をモデル化するために分布定数系モデルを導入した [9]. 線形の伝達マトリックスは以下のように表現される [5].

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \\ V_0 \\ I_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & -\frac{SZ}{j}b & (1-a)A & 0 \\ -\frac{b}{jSZ} & a & \frac{b}{jSZ}A & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{b}{jSZ}A & (1-a)A & j\omega C_d - \frac{b}{jSZ}A^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_2 \\ v_2 \\ V_0 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

ただし, $a = \cos(k\Delta x)$, $b = \sin(k\Delta x)$ であり, 音速 $c = \sqrt{E/\rho}$, 波数 $k = \omega/c$, 力係数 A , 音響インピーダンス $Z = E/c'$, 断面積 $S = wh$, w , h , ρ , E はそれぞれ振動子の幅, 厚さ, 密度, 電界一定条件でのヤング率とした. 圧電振動子を長手方向について微小部分 Δx に分割し, それぞれの微小部分にこの伝達マトリックスを対応させる. この方法により, 分割面の速度や力を次々に計算することによって, 応力や歪みの分布を求めることができる. ここで, 非線形成分を含めたヤング率 $E'(x)$ は, 次のように導出することができる.

$$E'(x) = E_1 + \frac{3}{4}E_3 \left(\frac{\partial u_x(x)}{\partial x} \right)^2$$

ただし, u_x は変位 u に含まれる駆動周波数成分である. 上記の伝達マトリックスの計算において, 線形のヤング率 E の代わり $E'(x)$ にを用いることで, 非線形振動の計算を行うことが可能となる [5]. 本研究では, 板状振動子の温度分布を次のような一次元定常熱伝導方程式を用いて計算した.

$$0 = \lambda wh \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q} - 2\alpha wh(T - T_\infty)$$

ここで、 T は温度、 λ は熱伝導率、 α は対流熱伝達率、 T_∞ は環境温度、 $\dot{q}$ は単位時間当たりの発熱量である。ここでは $\lambda = 1.5 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$ とし、対流熱伝達率 α は実験的に測定を行った温度分布に対してカーブフィッティングを行い得られた値 $17 \text{ [W/m}^2\text{ }^\circ\text{C]}$ を用いた。発熱量 $\dot{q}$ は振動に伴うエネルギー損失として、以下のように計算を行った。

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \frac{whE_{1i}}{\omega} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \frac{3}{8} \frac{whE_{3i}}{\omega^3} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^4$$

ここで E_{1i} は E_1 の虚数部分、 v_x は振動速度である。また、圧電体全体を均一な温度にしたときの各種材料計測をあらかじめ行っており、温度分布が生じた状態でも各部分での特性値が求まるようにした。

印加電圧に対する振動速度の実測と計算を図5に、駆動電圧を 30 V_{pp} としたとき温度分布を図6に示す。温度上

図5 温度上昇を含めた振動速度飽和の様子（実験結果と計算結果）

図6 振動励振時の温度分布（左：計算結果，右：実験結果）

図7 ランジュバン振動子の断面図と製作したランジュバン振動子

昇を考慮した振動速度の計算結果とその際の中心温度、均一温度の振動速度の計算結果が示してある。印加電圧の上昇にしたがって、中心温度が上昇し、均一温度の場合に比べて振動速度が比較的低電圧でも飽和してしまうということが明らかになった。振動速度が飽和してしまった状態では、印加電圧を増加させても、発熱量が増加するのみで振動速度の増加につながっていない。すなわち、今回用いたPZT振動子の場合では、非線形効果によって著しく振動効率が低下しているということが分かる。

4. ボルト締めランジュバン振動子の非線形振動モデル

強力超音波振動源としてボルト締めランジュバン振動子は、水中ソナーや医療用超音波メス、加工機などハイパワー用途に広く用いられている。このボルト締めランジュバン振動子は静的予圧を与えた状態で駆動することになるために、圧電特性における予圧付与の影響などを考慮する必要がある。そこで、伝達マトリクス法に非線形弾性係数を導入し、ボルト締めランジュバン振動子の非線形性についての解析モデルを検討した。多くの圧電デバイスと同様に、ボルト締めランジュバン振動子では圧電縦効果を利用する。この圧電縦効果では反電界によって電界もまた歪みの関数として分布するため、一つの圧電体を複数の伝達マトリクスに分割するのが困難となる。そこで、一般にランジュバン振動子に励振される振動モードの波長に対して圧電体は十分短いことに注目し、圧電体内部の歪み分布は一樣と見なせて分割する必要はないものとした。

シミュレーションに用いたモデルと同様の形状を持つ、ボルト締めランジュバン振動子を製作した。断面図と写真を

図 8 実測したアドミタンス特性

図 9 計算したアドミタンス特性

図 7 に示す。締めトルクはトルクレンチを用いて $10\text{ [N}\cdot\text{m]}$ とした。駆動電圧振幅を変化させながら測定したアドミッタンス測定結果を図 8 に示す。非線形効果の現れない 0.5 V_{pp} で駆動したときのアドミッタンス測定結果をもとにして、非線形弾性係数 E_{3r} , E_{3i} のみをフィッティングパラメータとして、各電圧で独立にカーブフィッティングを行った。得られたパラメータを用いて計算したアドミタンス特性を図 9 に示す。跳躍現象が生じる周波数など細かい部分には差異があるものの、解析モデルの妥当性が確認できた。

5. まとめと今後の展望

圧電材料の非線形振動特性評価において、機械的コンプライアンスと機械的振動損失の二つの係数のみに高次項を加えれば十分であることを見いだした。この概念により、容易に非線形振動解析ができるようになり、非鉛圧電材料が高負荷条件で高い Q 値を安定に保持することができ、PZT よりも優れた特性を持つことを明らかにした。

また、実駆動時に問題となる温度上昇や温度分布に対応するために、伝達マトリクス法に非線形弾性係数を導入し、

熱伝導計算を組み合わせることで計算することにより、温度上昇が振動特性に与える影響を検討することが可能になった。最後に、ランジュバン振動子の非線形効果についての解析モデルを構築し、実測したアドミタンス特性から非線形弾性係数を導出可能であることを確認した。

今後は、ランジュバン振動子の実測値から非線形係数を求める手法について検討を重ねていく予定である。圧縮圧等の設計パラメータと非線形性との関係を明らかにしていくことで、新しい強力超音波デバイスの創成に貢献していきたいと考えている。

参 考 文 献

- [1] D. Koyama and K. Nakamura: "Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector," IEEE UFFC, vol.57, pp.1152–1159, 2010.
- [2] A. Osumi, K. Doi and Y. Ito: "Fundamental study of detecting internal defect in building materials using high-intensity aerial ultrasonic waves with finite amplitude," Jpn. J. Appl. Phys., vol.50, 07HE30, 2011.
- [3] Y. Liu, R. Ozaki and T. Morita: "Investigation of nonlinearity in piezoelectric transducers," Sensors and Actuators A, vol.227, pp.31–38, 2015.
- [4] R. Ozaki, Y. Liu, H. Hosaka and T. Morita: "Piezoelectric nonlinear vibration focusing on the second-harmonic vibration mode," Ultrasonics, vol.82, pp.233–238, 2018.
- [5] 森田剛: 圧電現象, 森北出版, 2017.
- [6] M. Umeda, K. Nakamura and S. Ueha: "The measurement of high-power characteristics for a piezoelectric transducer based on the electrical transient response," Jpn. J. Appl. Phys., vol.37, pp.5322–5325 1998.
- [7] Y. Liu and T. Morita: "Nonlinear coefficients in lead-free CuO-(K,Na)NbO_3 transducers," Jpn. J. Appl. Phys., vol.54, 07HC01, 2015.
- [8] Y. Liu, T. Maeda, Y. Yokouchi and T. Mo: "The hardening of CuO-(K,Na)NbO_3 via post annealing with argon," Jpn. J. Appl. Phys., vol.53, 015503, 2014.
- [9] S. Miyake and T. Morita: "Modelling of high power piezoelectric vibration with interaction between temperature rise and nonlinear vibration," IWPMA&ECMD 2016, pp.191–192, 2016.

森田 剛 (Takeshi Morita)

1999 年東京大学大学院博士課程修了, 博士 (工学)。理化学研究所, スイス連邦工科大学で博士研究員を経た後, 2002 年から東北大学電気通信研究所助手, 2005 年より東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授, 現在に至る。強誘電体デバイス応用, 圧電評価などの研究に従事。精密工学会, 応用物理学会, 電気通信情報学会, 日本音響学会, IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)