

速報

鋭敏色法による固体中を伝搬する超音波伝搬の可視化

保坂 儒人*, 今野 和彦*

(2015.7.14 受理)

Visualization of Ultrasonic Wave Propagation in Solids by the Sensitive Tint Method

Yoshito HOSAKA* and Kazuhiko IMANO*

Visualization of 1 MHz burst sine and pulsed ultrasonic wave propagation in the glass by using strobe photoelastic system introducing the sensitive tint method is carried out to improve the understanding of the sound field. Acoustic field data obtained by the system was captured by the CMOS camera and they were processed with integration, subtraction and normalization to enhance the S/N and contrast of the images. As the result, ultrasonic propagation of wavefront is clearly visualized in the low level excitation. Moreover, sign of positive and negative of ultrasonic sound pressure can be successfully identified in red and green, respectively.

Keywords: Strobe photoelastic method, Sensitive tint method, Visualization, Ultrasonic sound field, Subtraction image

固体中に超音波を送波した場合の音場を観測し、非破壊検査へ役立てることを目的に、ガラス中に1 MHz程度のバースト正弦波の超音波を送波し、ストロボ光弾性法および鋭敏色法により音場の可視化を行った。CMOSカメラにより撮影した画像には積分、差分および正規化処理を施し、超音波波面の高コントラスト化を行った。この結果、ガラス中における超音波波面の伝搬の時間推移および複屈折による光路差の変化がストロボ光の色の変化として現れ、音圧の極性に対応していることが明らかになった。すなわち、ストロボ光弾性法に鋭敏色法を導入することにより音圧の正負がそれぞれ赤色と緑色で表示され、これらが伝搬の様子が観測された。また、本法によれば低電圧駆動時でも音場を高感度に可視化できることを示した。

キーワード：ストロボ光弾性法、鋭敏色法、可視化、超音波音場、差分画像

1. はじめに

現在、超音波を用いた構造物の非破壊検査にはパルスエコー法が多く使用されている。これは対象とする構造物に超音波を送波し、その反射波を受波し、この受波波形の到達時間や周波数成分を観測することにより健全性を評価する方法である。しかし、き裂やボイドなどが存在する欠陥部分では反射、回折および弾性的な非線形性などが発生し、音場が複雑になると予想される。しかしながらこのような場合の音場は明らかにならず、正確な非破壊検査には超音波の音場の可視化が重要であると考えられる。

音場を可視化する方法として、光学的な方法がある。この中で、静的な応力ひずみ解析に一般的に用いられている光弾性法¹⁾は、ガラスや透明な高分子材料などの光を透過する固体に応力が発生したとき、この応力による複屈折を観測する方法で

あり、ストロボ光を用いれば音場の動的な特性を可視化できる。Fig. 1は光弾性法の原理を示したもので、2枚の直線偏光板を直交ニコル状態にし、その間に被検体を配置する。偏光子を通過した光は被検体に入射し、応力が存在する部分で複屈折する。直交ニコル状態では偏光子を通過した光の偏光軸と検光子を通過する光の偏光軸が直交するように偏光板を配置しているため、複屈折による光のみが検光子を通過する。検光子を通過した光をカメラなどで撮影することで、物体の内部応力に対応した光の輝度分布の観測が可能である。前述のように光源にストロボを使用し、ストロボが発光するタイミングと圧電振動子に電圧を印加するタイミングを合わせれば、超音波伝搬の様子を観測できる。鋭敏色法は複屈折光において2つの直交する

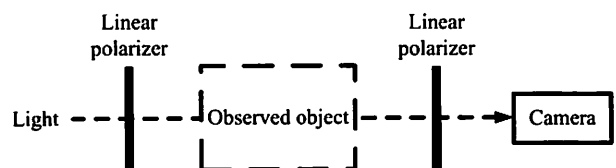


Fig. 1 Principle of photoelastic method.

* 秋田大学 大学院工学資源学研究所
〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1番1号
* Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University
1-1, Tegata Gakuen-machi, Akita 010-8502, Japan

鋭敏色法による固体中を伝搬する超音波伝搬の可視化

保坂 儒人*, 今野 和彦*

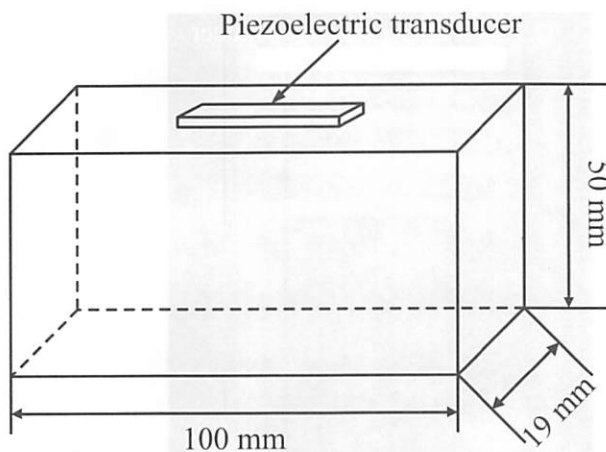


Fig. 2 Geometrical dimensions of glass sample.

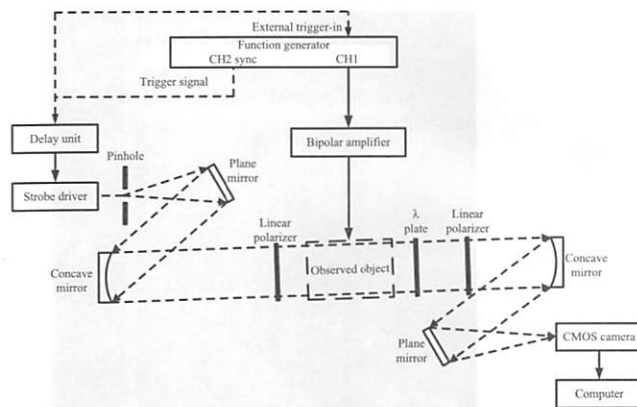


Fig. 3 Ultrasonic visualization system using sensitive tint method.

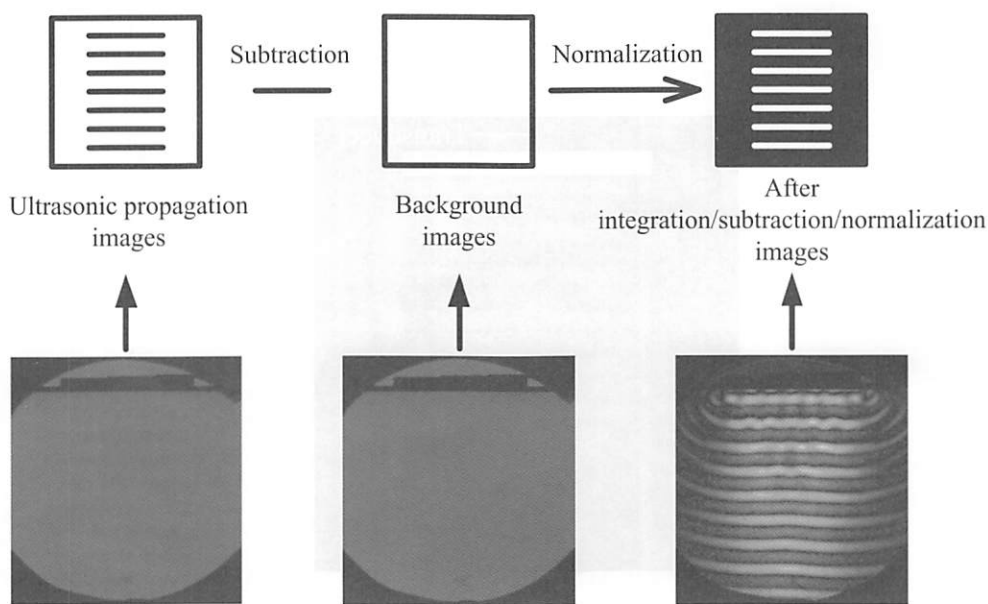


Fig. 4 Image processing method to enhance the ultrasonic propagation image.

偏光の位相差が 570 nm 程度となる一波長板を被検体と検光子の間に追加すると、被検体において発生する複屈折の位相差の変化により干渉色が変わる原理を利用し、この色の変化により応力を観測する方法である²⁾。本法において鋭敏色法を導入すれば、複屈折による位相差の変化が色の変化として現れ、また光の進み位相と遅れ位相で色の変化が異なるので超音波の正負の極性判別が可能である。先行研究³⁾では、鋭敏色法により媒質内部における超音波の共振などの可視化が行われているが、超音波伝搬における時間的推移の詳細な可視化や、高コントラスト化に関する検討は行われていない。従来の光弾性法では観測時の光のコントラストを高くするために圧電振動子に高電圧を印加していることが多い。しかし、高電圧の印加により圧電振動子や伝搬媒質の非線形性が現れる可能性が考えられる。

本報告では、数 10 から 100 V 程度の低い電圧で圧電振動子を駆動して超音波を伝搬させ、この画像（以下、超音波画像）を取得する。次に、超音波が伝搬していない画像（以下、背景

画像）を取得し、両者を用いて差分処理を行う^{4,5)}。これらの処理により、ガラス中に超音波を送波し、さらに鋭敏色法を導入したストロボ光弾性実験系を構築し音場観測を行えば、画像処理による波面の高コントラスト化及び音圧の極性が色の違いにより可視化可能であることを述べる。

2. 観測対象と観測実験系について

観測対象のガラスと超音波を送波するための圧電振動子の寸法を Fig. 2 に示す。ガラスは長さ 100 mm、幅 19 mm、厚さ 50 mm で縦波音速 5800 m/s、横波音速 3500 m/s のソーダ石灰ガラスである。Fig. 2 中の矩形圧電振動子は長さ 30 mm、幅 7 mm、厚さ 2.2 mm の 1 MHz 付近に共振周波数をもつものである。圧電振動子は図のようにガラスの上面に音響結合剤を用いて接着した。

Fig. 3 に観測実験系を示す。ストロボ光源（菅原研究所 NP-1A）の光はピンホールを通過し、この光は平面鏡で反射され、凹面鏡で平行光となり偏光板を通過する。直線偏光された光は

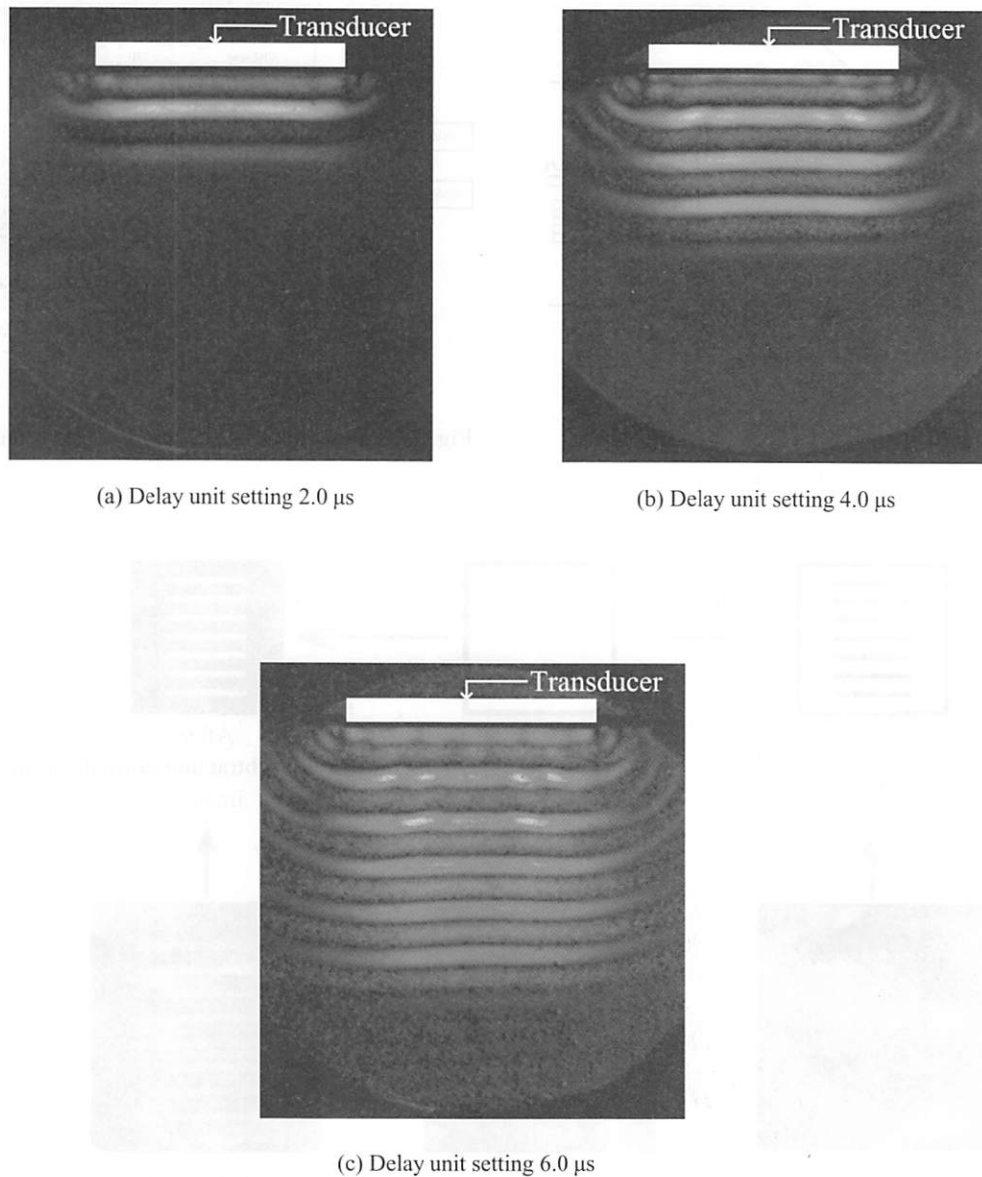


Fig. 5 Sensitive tint images of glass sample (30-cycle burst sine wave).

- (a) Delay unit setting $2.0 \mu\text{s}$
- (b) Delay unit setting $4.0 \mu\text{s}$
- (c) Delay unit setting $6.0 \mu\text{s}$

観測対象であるガラスに入射する。偏光子と検光子を直交ニコル状態にしておく、ガラスに入射した光は応力が存在する場合、複屈折する。この複屈折による異常光と通常光が一波長板(570 nm)を通過すると、それぞれ異なる色の変化として見える。透過した光をコンピュータに接続したCMOSカメラ(Artray ARTCAM-200CMV-USB3)で画像として取得した。

発振器(KEYSIGHT 33600A)のCH1端子から周波数1.080 MHzのバースト正弦波の電圧信号を出力し、バイポーラ増幅器(NF HSA4101)で $100 V_{pp}$ 程度に増幅し、これを圧電振動子に印加した。この程度の駆動電圧であれば2次高調波などの非線形効果は現れないことを確認している。一方、同一の発振器から100 Hzのトリガ信号を出力し、これを発振器の外部トリガ入力端子と遅延装置(菅原研究所 FG-310)に接続し、発

振器からバースト信号を出力するタイミングとストロボ装置が発光するタイミングを同期した。このとき繰り返し周期は10 msと設定した。遅延装置の設定時間 ΔT を変化させて、バースト波を送波してからストロボ装置が発光するまでの遅延時間を制御すれば、超音波伝搬の時間推移が観測可能となる。

コンピュータで取得される超音波画像は、Fig. 4の左下の画像のように超音波の波面のコントラストが小さい。これを大きくするために、本報告では取得した画像に対して差分処理を行った。まず、超音波画像と背景画像(Fig. 4中央下)を複数枚取得してそれぞれを加算し、ストロボ光源の揺らぎによる輝度の変化を抑制した。次にこの処理を行った超音波画像と背景画像の減算を行い、正規化した。これにより、Fig. 4の右下の画像のように伝搬する超音波の波面が明確になる。多くの光弾性

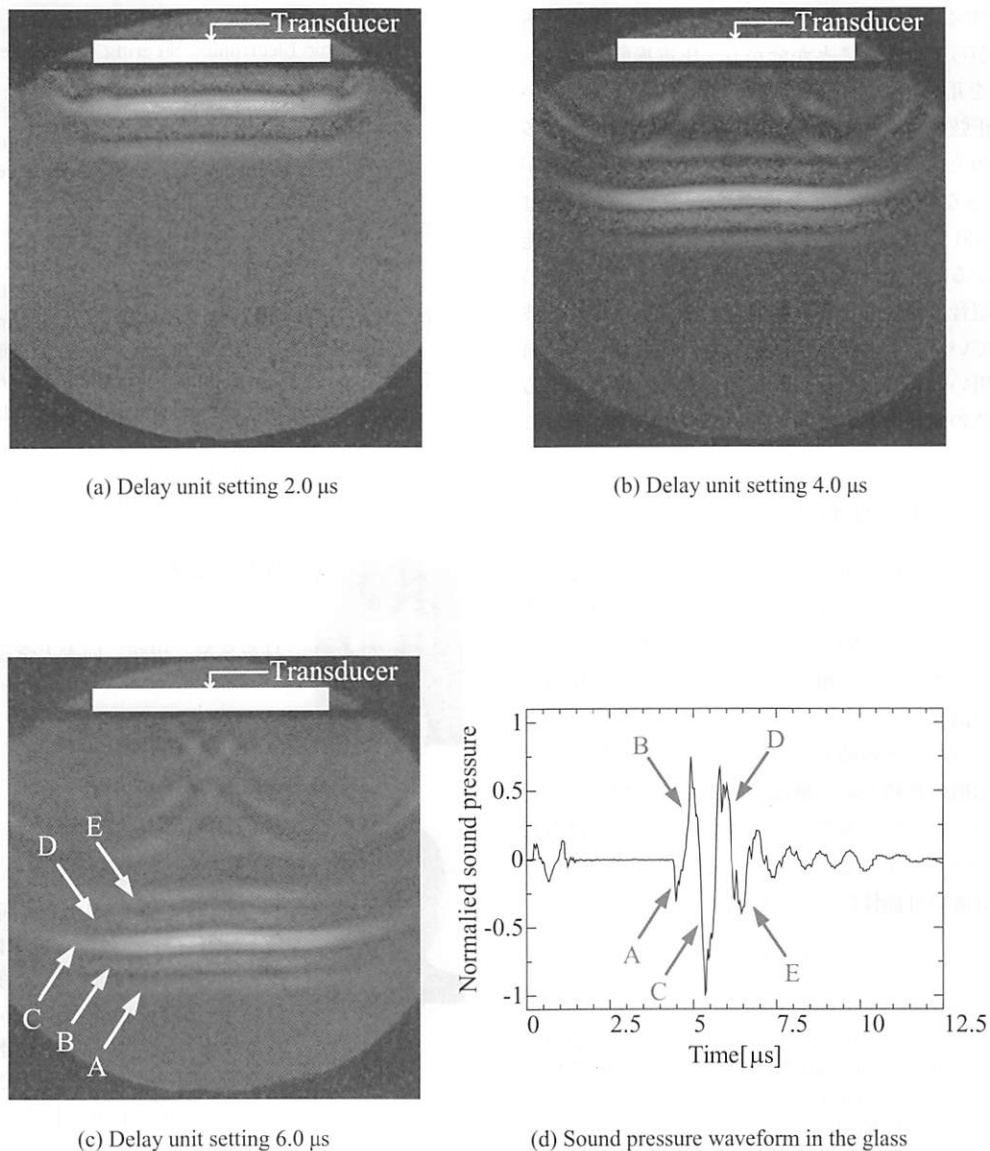


Fig. 6 Sensitive tint images of glass sample (1-cycle burst sine wave).

- (a) Delay unit setting $2.0 \mu\text{s}$
- (b) Delay unit setting $4.0 \mu\text{s}$
- (c) Delay unit setting $6.0 \mu\text{s}$
- (d) Sound pressure waveform in the glass

法の実験では画像の鮮明化のために圧電振動子を数 100~2000 V 程度で駆動しているが、本報告では前述のように低電圧駆動で音場観測ができ、非線形性などの問題がない。

3. 観測結果

バースト正弦波の波数を 30 波と設定し、遅延装置の設定時間を $2.0 \mu\text{s}$ 、 $4.0 \mu\text{s}$ 、 $6.0 \mu\text{s}$ と変化させた場合の画像を Fig. 5 に示す。ガラスの上面に接着した圧電振動子からガラスの下部に向かって超音波が伝搬していることが分かる。上述のように、遅延装置の設定時間を変化させていくとこれに対応した超音波伝搬の時間推移が観測できることが分かる。超音波の音圧による音場媒質の複屈折による位相差が生じ、これらは鋭敏色法の原理から赤色の部分は圧縮応力、緑色の部分は引張応力に対応

して観測される⁶⁾。すなわち、直線偏光板のみの場合は複屈折による輝度の変化のみが観測されるため、バイアス光を用いても超音波の負のサイクル部分を完全に観測することはできないが、一波長板を追加すると、超音波の波面が音圧極性の符号付きで観測される。観測される同じ色の波面の間隔がガラス内部での超音波の波長を表している。次に、駆動の際のバースト正弦波の波数を 1 波と設定し、遅延装置の設定時間を $2.0 \mu\text{s}$ 、 $4.0 \mu\text{s}$ 、 $6.0 \mu\text{s}$ と変化させた場合の画像を Fig. 6 に示す。この場合も Fig. 5 と同様に超音波伝搬の推移が観測できている。音圧の極性は Fig. 6 (c) と、ガラス中を伝搬する超音波波形を光偏向法⁷⁾で観測した Fig. 6 (d) の波形に対応する波面を A~E で示しているように、赤が正 (B, D)、緑が負 (A, C, E) であると考えられる。Fig. 6 (d) において、波数 1 波の電圧で圧

電振動子を駆動すると音圧波形の立ち上がりが2波程度であり、十分立ち上がっていないことが分かる。圧電振動子にバックリングや整合層を用いておらず機械的なQが高く帯域が狭いため、パースト正弦波電圧入力時に圧電振動子内部で音波が多重反射し、波形の立ち上がりが遅くなり⁸⁾、この場合は波面がほとんど観測できない。しかし、本報告の画像処理を行えばFig. 6のように100 V_{pp}程度の電圧駆動で高感度な観測が可能であることが分かる。また、電圧信号の印加後も圧電振動子の残留振動による超音波が立ち上がりと同様に1波ではなく2波程度に長くなっていることも明瞭に観測できる。これらの結果から鋭敏色法を用いて超音波の伝搬を観測すれば、応力による複屈折の変化を色の変化として非常に高い感度で観測できることが分かる。

4. おわりに

光弾性実験系に一波長板を追加して鋭敏色法として、圧電振動子を低電圧で駆動してガラス中にMHz領域の超音波を送波し、CMOSカメラでガラス内部の超音波伝搬を観測した。撮影した超音波画像と背景画像を用いて加算・差分・正規化処理を行い、超音波の波面のコントラストが高い画像を生成し、この画像の評価を行った。その結果、遅延装置の設定時間の変化に応じて超音波伝搬の推移が高い感度で観測され、超音波の音圧極性を色の変化として捉えることができた。今後は、得られた音場画像におけるRGB成分の変化から複屈折量を推定し、音圧の定量的な計測の可能性について検討する。

参考文献

- 1) E. Umezaki, "Stress Distribution Measurement Techniques Using Photoelasticity: Current Status and Future Prospects," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, **79**, pp. 607-611, (2013) [in Japanese].
- 2) A. Miyashiro and I. Kushi, "Ganseigaku I," *Kyoritsu Shuppan*, pp. 51-57 (1972) [in Japanese].
- 3) K. Izuno and K. Yamamoto, "Sensitive tint visualization of

resonance patterns in glass," *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Steering committee of symposium on ultrasonic electronics* (2010), pp. 449-450.

- 4) N. Kudo, H. Ouchi, K. Yamamoto, and H. Sekimitsu, "A simple Schlieren system for visualizing a sound field of pulsed ultrasound," *Journal of Physics: Conference Series* **1**, pp. 146-149, (2004).
- 5) K. Imano, "Optical observation method for ultrasonic field using the shadowgraph introducing pulse inversion averaging," *IEICE Electronics Express*, **11**, pp. 1-6, (2014).
- 6) T. Kishi, "Utilization Technology of Strain Detector," *NEW GLASS TECHNOLOGY*, **5**, pp. 47-62, (1986) [in Japanese].
- 7) K. Imano, "A detecting system for the crack in the solid material using light deflection method," *Int. J. Mater. Eng. Resour.*, **26**, (2015), impress.
- 8) Y. Udagawa, "Chouonpa Gijutsu Nyumon," *Nikkan Kogyo Shinbunsha*, pp. 189-191 (2010) [in Japanese].



保坂 隼人

2014年秋田大学工学資源学部電気電子工学科を卒業。現在、同大学院に在学。



今野 和彦

1979年秋田大学鉱山学部電子工学科を卒業。1979年同大助手。1997年同大工学資源学部電気電子工学科教授。現在に至る。この間、主として超音波計測、超音波デバイスの研究に従事。博士(工学)。1986年日本音響学会粟屋潔学術奨励賞受賞。日本音響学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、日本ME学会、IEEE、ASA、日本画像学会などに所属。