

# 100 MHz までの帯域におけるアコースティック エミッションの検出

正員 金井 浩 (東北大)  
正員 中鉢 憲賢 (東北大)  
非会員 竹田 重利 (東北大)

## Detection of Acoustic Emission Signals in the Frequency Range up to 100 MHz

Hiroshi Kanai, Member Noriyoshi Chubachi, Member Toshishige Takeda, Non-member  
(Tohoku University)

In the literature there have appeared a lot of works with regard to acoustic emission (AE) signals observed in a frequency range below a few MHz. In this paper we describe a new system for measuring AE signals in the frequency range up to 100 MHz. By using piezoelectric thin-film transducers fabricated on the end surfaces of rectangular bars of glass samples which have been notched, the AE signals radiated from the crack can be detected during conventional three point bending test. The output signal of each transducer is amplified and A/D converted at a sampling rate of 200 MHz. The power spectrum of each AE signal and the coherence function between the two signals are obtained by using a computer. The new AE measurement system in VHF range developed here can be applied in a new research field to be called micro-AE spectroscopy.

キーワード：アコースティックエミッション (AE)，ピエゾ形トランスジューサ

### 1. まえがき

アコースティックエミッション (AE) 信号は、固体内部の塑性変形、変態、き裂の発生・成長に伴って、材料内部のひずみエネルギーが解放され、弾性波となって放出されたものである。従って、固体に存在するひずみ・き裂などの欠陥状況を監視し危険度を評価するために、非常に重要な手がかりとなり、従来、様々な分野で AE に関する多くの研究が行われてきた。しかし、このような固体の破壊などの過程で検出された AE 信号は、従来の報告においてはすべて数 MHz 以下の周波数帯域に限られており<sup>(1)(2)</sup>、それ以上の帯域での AE 検出例はまだ見あたらなかった。

そこで本論文では、フィルム状の超音波トランスジューサを用いて 100 MHz までの帯域における AE 信号の計測実験を行った。棒状のガラス試料に静的な三

点曲げ試験を施し、その際に発生する AE 信号を、超音波トランスジューサを用いて検出する。更に、その出力信号を高速な標準化周波数で A/D 変換し、得られたデジタル信号を分析し、負荷をかけないときと比較することによって、100 MHz までの帯域において AE 信号が発生していることを実験的に確かめた。本論文で示されるこのような VHF 帯域における AE 信号の計測システムは、今後マイクロ AE スペクトルスコピーという新しい学問領域へ発展する可能性が期待できる。

### 2. 実験試料および測定系

図 1 および図 2 は、ガラス試料と AE 計測システムを示す。試料は、長さ 130 mm、高さ 25 mm、奥行き 13 mm の棒状のパイレックスガラスで、長辺の中心に幅 1 mm、長さ 12 mm の切込みが入れてある。

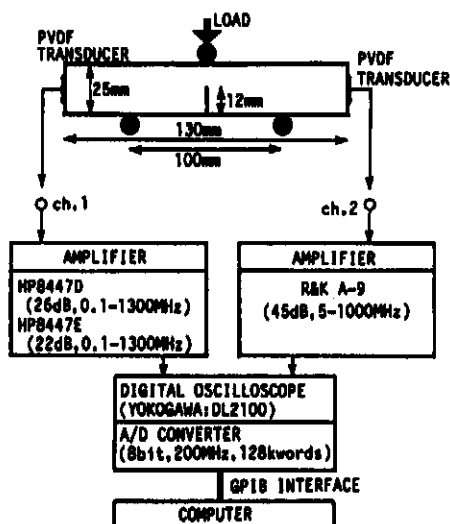


図1 試料とAE信号測定系

Fig. 1. A measurement system for detection of AE signals and bar-shaped Pyrex glass specimen used in a static three-point bending test.

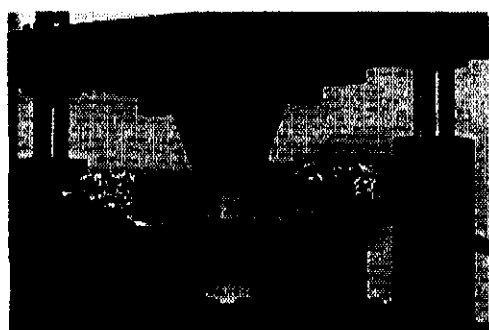


図2 試料とAE信号測定系の一部

Fig. 2. A measurement system for detection of AE signals and bar-shaped Pyrex glass specimen.

実験に用いた超音波トランスジューサは、PVDF (polivinyllidene fluoride) の薄膜<sup>(3)(4)</sup>(呉羽化学 KF Piezoelectric Film) であり、エポキシ樹脂系の接着剤 (Araldite) によって、光学研磨した試料の両端面の中心に二つのトランスジューサを接着した。PVDF 膜は、厚さ  $9\mu\text{m}$  で  $5\text{mm}$  角の大きさである。

この試料に図1のように静荷重を負荷し、三点曲げ試験<sup>(5)</sup>を施し、発生したAE信号を両トランスジューサによって検出した。三点曲げ試験の支点部分は、テフロンシートによって包み、試料と支点間の摩擦の影響を抑えた。静荷重負荷時の二つのトランスジューサ出力を各々  $48\text{dB}$ 、 $45\text{dB}$  利得の増幅器で増幅後、デジタルオシロスコープにより標本化周波数  $200\text{MHz}$  (標本化周期  $5\text{ns}$ ) で2チャンネル成分を同時にA/D変換した。A/D変換器の量子化レベルは、8bit

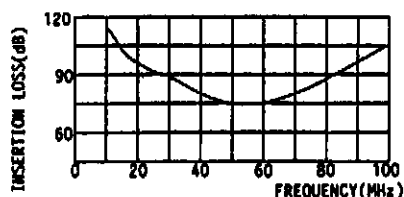


図3 試料の挿入損失の周波数特性

Fig. 3. The characteristics of the insertion loss in transmission measured by using the PVDF transducers on the specimen.

である。更に、GPIB インタフェース経由でこれらのデータを計算機へ転送し解析した。デジタルオシロスコープのトリガレベルは、上記増幅器の出力信号に関して  $14\text{mV}$  に設定し、トリガレベル以上の振幅のAE信号が入力した時刻を時間原点とし、その前後の波形を最大  $128,000$  点 ( $640\mu\text{s}$ ) にわたってA/D変換し、その波形データを分析の対象とした。

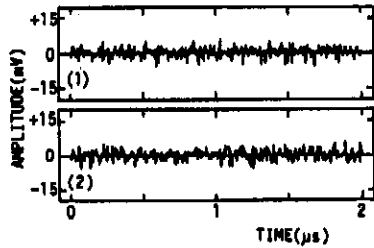
図3は試料両端の二つのトランスジューサ間の挿入損失を示す。一方のトランスジューサから入力したRFバーストのパワーに対して、その波が他端のトランスジューサへ伝搬して得られた出力信号のパワーの減衰量を、周波数を掃引してスペクトルアナライザを用いて求めたものである。このように広帯域の特性を有し、中心周波数  $55\text{MHz}$  において、挿入損失は約  $73\text{dB}$  であった。

本計測のA/D変換時には、アンチエイリアスフィルタを用いていないが、超音波トランスジューサの周波数特性から、 $70\text{MHz}$  以上では、 $-26\text{dB/Oct.}$  の低域フィルタの特性がある。一方、超音波トランスジューサの出力を増幅する際に加わる背景雑音に対しては、エイリアシングの影響が無視できない。従って、得られた背景雑音レベルを基準として、これよりも大きな成分に対してのみ本計測結果は有効であり、そのため静的負荷を加えないときと加えたときのパワースペクトルの相対的な比較を行う。なお、超音波トランスジューサの出力のうち、 $50\text{MHz}$  付近の成分の量子化レベルを8bitとすると、 $100\text{MHz}$  の成分は約  $5.5\text{bit}$  に相当し、この帯域の成分も分析可能である。

### 3. 検出されたAE信号とその分析結果

無荷重時の左右両端のトランスジューサの出力波形(背景雑音)の一部を各々図4(1)、(2)に示す。このように、ほぼ振幅  $6\text{mV}$  以下のランダムな雑音系列を示している。

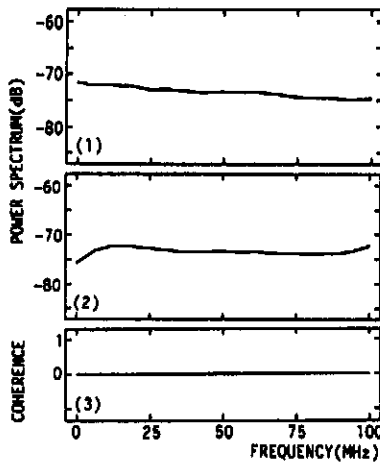
A/D変換した波形全体の長さは、 $32,000$  点 ( $160\mu\text{s}$ ) である。これら各チャンネルの信号の平均スペクト



(1) 1チャンネル (2) 2チャンネル

図 4 無負荷時に検出された信号

Fig. 4. The typical output signals obtained by the PVDF transducers without load.

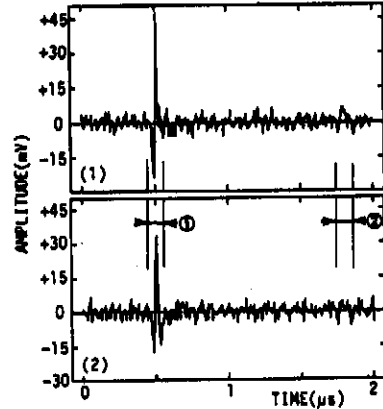


(1) 1チャンネル, (2) 2チャンネルの平均スペクトル,  
(3) コヒーレンス関数

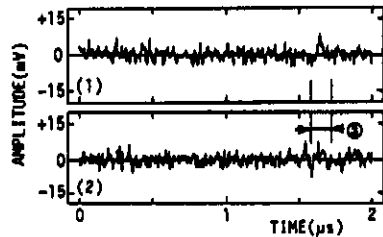
図 5 無負荷時に検出された信号の平均スペクトル  
およびチャンネル間のコヒーレンス関数

Fig. 5. The average power spectra of the signals detected without load and their coherence function.

ると、両信号間のコヒーレンス関数<sup>(7)</sup>を図 5 (1) ~ (3) に示す。全体で 32,000 点の長さの信号を、隣り合った長さ 32 点の区間が互いに 3/4 ずつ重なるように、4,000 個の区間を設定する。その各々の区間内の波形に 32 点のハミング窓<sup>(7)</sup>を掛けた後、離散的な高速フーリエ変換 (FFT) を行って、各区間ごとに両チャンネルのスペクトルとクロススペクトルを得る。こうして得られた 4,000 個のスペクトルから平均パワースペクトルとコヒーレンス関数を計算している。図 5 (1), (2) の平均パワースペクトルはほぼ平坦な特性を示している。これらの平均パワースペクトルの形状のわずかな差異は、主に使用した増幅器の特性の違いに起因している。また、図 5 (3) のコヒーレンス関数は、100 MHz までの全周波数帯域で零であり、これら両チャンネルの信号は互いに無相関であることがわかる。



(a)



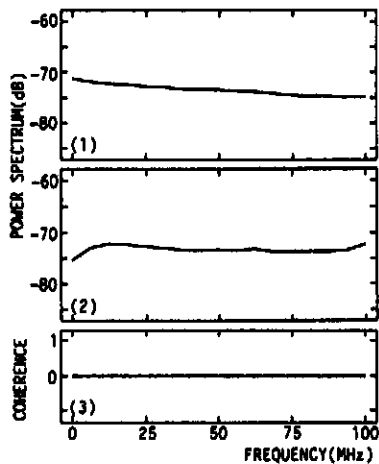
(b)

(1) 1チャンネル (2) 2チャンネル (連続した信号を (a), (b) の区間に分けて表示している)。

図 6 負荷時 (16.55 kg) に検出された信号  
Fig. 6. The typical output signals obtained by the PVDF transducers with load (16.55 kg).

図 6 は、試料に三点曲げ試験により 16.55 kg の静荷重を負荷した際に得られた各トランスジューサの出力波形の一部を示す。A/D 変換した波形全体の長さは上記雑音系列の場合の 4 倍で 128,000 点 (640 μs) である。図 4 と同様な雑音系列に加えて、図 6 (a) で 2箇所 (図中①②)、図 6 (b) で 1箇所 (図中③) にパルス状の信号が存在する。特に図 6 (a) の①で発生したパルスは振幅が約 46 mV と非常に大きいことがわかる。また、図 6 の他の二つのパルス (②と③) は、振幅は雑音系列と比較して大きくないものの、低周波成分が大きいことがわかる。なお、図 6 (a-2) の中のパルス状の波形が、図 6 (a-1) の同時刻のパルス状の波形の微分操作後の波形に近い形状であるのは、図 5 (1), (2) の平均パワースペクトルからわかるように、2チャンネル目の信号の増幅に用いた増幅器の特性が直流付近の周波数成分を増幅していないためである。

これら静荷重負荷時の信号の平均パワースペクトルと両信号間のコヒーレンス関数を図 7 (1) ~ (3) に示す。平均パワースペクトルとコヒーレンス関数の求め方は、図 5 の場合と同じであるが、扱った信号が



(1) 1チャンネル (2) 2チャンネルの平均スペクトル、  
(3) コヒーレンス関数

図7 負荷時に検出された信号の平均スペクトル  
およびチャンネル間のコヒーレンス関数

Fig. 7. The average power spectra of the signals detected with load and their coherence function.

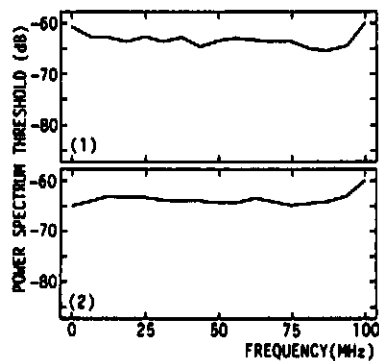
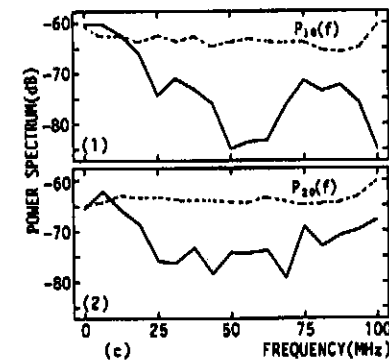
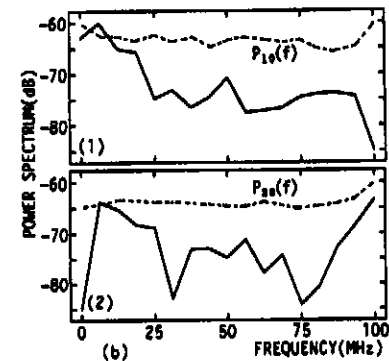
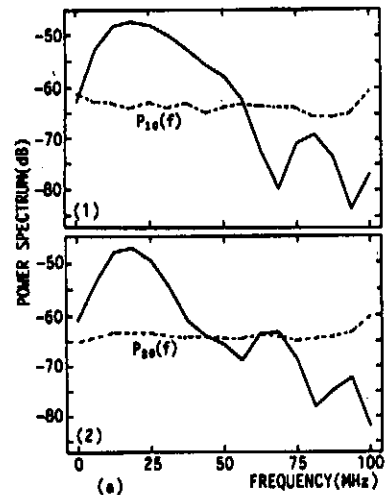


図8 設定したしきい値スペクトル  
 $P_{10}(f)$ ,  $P_{20}(f)$

Fig. 8. The power spectrum thresholds  $P_{10}(f)$  and  $P_{20}(f)$  obtained from the maximum value of power spectra of signals detected without load.

128,000点 (640  $\mu$ s) であるため、この信号を32点長の16,000個の区間に分け、16,000個の区間のスペクトルから、平均スペクトルやコヒーレンス関数を得ている。得られた各チャンネルの平均パワースペクトルは、図5(1)、(2)に示した無負荷時の雑音系列とほぼ同じである。また、二つのチャンネルの信号間のコヒーレンスも全くない。このように負荷時・無負荷時の平均パワースペクトルが同じである理由は、図6(a)、(b)からわかるように、負荷時に特有の①~③のようなパルス状の波形が、間欠的にしか現れないため、多数の区間の平均スペクトルにはこれらの成



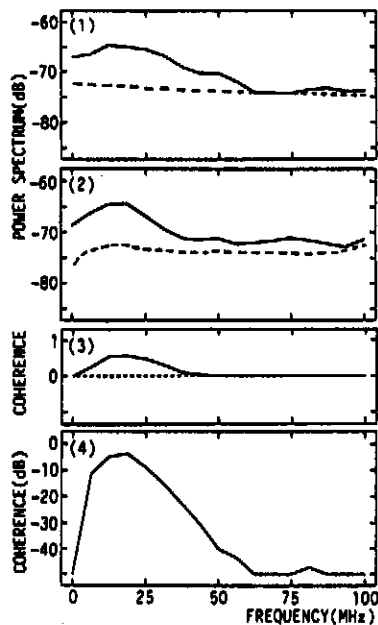
(a)~(c)は図6①②③の各区間に対応

図9 負荷時に検出された信号の短区間ごとのパワースペクトル

Fig. 9. The power spectra of the signals detected with load.

分の影響が現れないためである。

そこで、図6の中の①~③のように明らかに雑音系列とは異なる信号を含む区間を抽出するために、次のような実験を行った。まず、図5におけるスペクトルの計算と同様にして、図4に示した無負荷時に得られた長さ32,000点の両チャンネルの信号から、各区間ごとの4,000個のパワースペクトルを計算し、両チャンネルごと、各周波数ごとに、その最大値  $P_{10}(f)$  と  $P_{20}(f)$  を求める。これらの値を図8(1)、(2)に示



(1) 1チャンネル (2) 2チャンネルの平均スペクトル、  
(3) コヒーレンス関数

図10 負荷時に検出された信号の中で図8のしきい値スペクトル以上のパワーをもつ区間の平均スペクトルとコヒーレンス関数

Fig. 10. The average power spectra and the coherence function of the periods which have the power spectra larger than the power spectrum threshold shown in Fig. 8.

す。従って、雑音系列はいかなる区間においても、必ず  $P_{10}(f)$  と  $P_{20}(f)$  以下のパワースペクトルしかもたないことになる。

次に、この  $P_{10}(f)$  と  $P_{20}(f)$  をしきい値とし、このしきい値スペクトルと、図6の負荷時に得られた長さ128,000点の両チャンネルの信号の16,000個の区間の各パワースペクトルとの比較を行う。図9(a)~(c)は、しきい値スペクトル以上のパワースペクトルをもつ区間のうち三つの区間の波形(長さ32点=160ns)のパワースペクトルを示す。これら(a)~(c)図の区間は、ちょうど図6(a),(b)の①~③のパルス状の波形と各々対応している。これらのパワースペクトルには、図8のしきい値スペクトル  $P_{10}(f)$  と  $P_{20}(f)$  よりも2~15dB程度大きい値をもつ周波数帯域がある。

このように図8のしきい値スペクトルより大きなパワーをもつ区間数を調べたところ、128,000点を分割して得られた16,000個の区間全体では、合計132個あった。それらの区間のスペクトルのみから、平均パワースペクトルとコヒーレンス関数を求めた結果を、図10(1)~(4)に示す。(1),(2)図中の破線は、

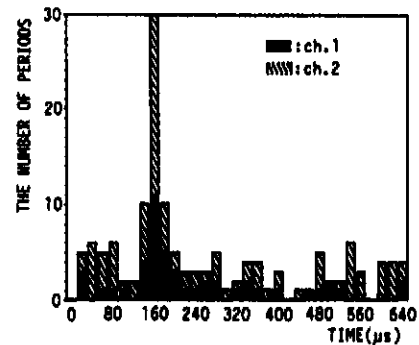


図11 20  $\mu$ s長ごとの信号内でのしきい値スペクトル以上のパワーの発生回数

Fig. 11. The number of the periods which have the power spectra larger than the power spectrum threshold. (The unit of the time axis is 20  $\mu$ s length.)

図5の雑音のみの平均スペクトルを示す。これらと比較すれば、図10(1),(2)の平均スペクトルが、特に50MHz以下の帯域で大きなパワーをもっていることがわかる。

また、図10(3),(4)のコヒーレンス関数は特に20MHzで大きな値をもっており、二つのトランスジューサで得られたAE信号間に相関があること、すなわち同じ発生源に起因した波形を観測していることが裏付けられる。コヒーレンス関数が大きな値をもっていることは、更に発生源から両トランスジューサまでの距離の差が、これら132個の発生区間において、20MHzでの波長以下の小さい範囲でしか変化していなかったことを示している。以上のように静荷重負荷時に得られた信号の中で、雑音系列のしきい値パワースペクトルより大きなパワースペクトルをもつ区間では、静荷重によってAE信号が確かに発生していることがわかる。

図11はこのように、しきい値スペクトルよりも大きいパワーをもつ区間の時間的にどのように分布しているかを、時間軸を20  $\mu$ sごとに区切って示したものである。図9(1)~(3)の区間はいずれもこの図中の160  $\mu$ s時の頻度の中に入っている。同図から、静荷重負荷によるAE信号の発生は、間欠的ではあるが、分析信号全体にわたってほぼ平均的に発生していることがわかる。

#### 4. 結 言

本論文では、今まで報告されていなかった100MHzまでの帯域でのAE信号検出について、パイレックスガラスにPVDFトランスジューサを接着し、三点曲げ試験によって静荷重を負荷したときに得られ

た信号を分析し、負荷をかけないときのデータと比較することによって、この周波数帯域での AE 信号の存在を示した。

今後、本トランスジューサの内部の減衰特性・感度、指向性などに関する基礎的データを調べると共に、これらの高周波帯域での AE 発生のメカニズムを解明する予定である。また本論文では、100 MHz までの実験を行ったが、AE には更に高い周波数領域の信号成分も有している可能性がある。これらも併せて今後検討を行う予定である。

実験に御協力いただいた本学科 三野宮利男氏、大学院 斎藤和正氏、石橋正和氏および本学部材料加工学科 三原 毅博士に感謝します。また、測定機器の便宜を図っていただいた横河電機 SBU 統括本部長 田村 久常務に感謝いたします。

(平成 2 年 12 月 26 日受付, 同 3 年 8 月 22 日再受付)

## 文 献

- (1) K. Yamaguchi, K. Aoki & T. Kishi (Ed.): "Progress in Acoustic Emission III", Proc. 8th International Acoustic Emission Symposium, (1986)
- (2) K. Yamaguchi, I. Kimpara & Y. Higo (Ed.): "Progress in Acoustic Emission IV", Proceedings of the 9th International Acoustic Emission Symposium, (1988)
- (3) 中鉢・三野宮: 「ポリフッ化ビニリデン圧電膜による超高周波超音波トランスジューサ」, 音響学会講演論文集, p. 395 (昭 52)
- (4) N. Chubachi & T. Sannomiya: "Composite resonator using PVF<sub>2</sub> film and its application to concave transducer for focusing radiation of VHF ultrasonic wave", 1977 Ultrasonic Symp. Proc., Phoenix, IEEE cat. # 77 CH1264-1SU, p. 119 (1977)
- (5) H. Niitama, M. Kikuchi, H. Takahashi, M. Suzuki & R. Sato: "AE classification and micro pop-in cracking in fracture toughness test", Proc. 5th International Acoustic Emission Symposium, Tokyo, p. 411 (1980)
- (6) J. Karpovich: "Resonance Reverberation Method for Sound Absorption Measurements", J. A. S. A., 26, 819 (1954)
- (7) 城戸: デジタル信号処理入門 (昭 60) 丸善

### 金 井 浩 (正員)



昭和 33 年生。56 年 3 月東北大学工学部通信工学科卒業。61 年東北大学大学院工学研究科電通専攻博士課程修了。61 年東北大学情報処理教育センター助手, 平成 2 年同大学工学部電気工学科講師, 現在に至る。工学博士。音響振動・超音波のデジタル信号処理工学の研究に従事。63 年石川賞, 平成 2 年栗屋賞, 3 年篠原賞, 電気学会 B 賞受賞。電子情報通信学会, 日本音響学会, IEEE, 超音波医学会, 日本 ME 学会, 日本機械学会会員。

### 中 鉢 憲 賢 (正員)



昭和 8 年生。31 年 3 月東北大学工学部電気工学科卒業。40 年東北大学大学院工学研究科電通専攻博士課程修了。40 年東北大学電気通信研究所助手, 41 年同助教授, 54 年同大学工学部電気工学科教授, 現在に至る。工学博士。超音波工学の研究に従事し, 超音波顕微鏡などを開発。電子情報通信学会超音波研究会専門委員長, 日本音響学会東北支部長などを歴任, 現在, 応用物理学会東北支部長。40 年稲田賞, 平成 2 年電気学会学術振興賞進歩賞受賞。IEEE, 超音波医学会, 非破壊検査協会, 日本 ME 学会, 日本機械学会会員。

### 竹 田 重 利 (非会員)



昭和 44 年 1 月 2 日生。平成 3 年 3 月東北大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月(株)富士通入社。在学時, 超音波トランスジューサとその応用に関する研究に従事。