

# セルフモニタリングによるベンダーエレメントの振動特性の評価

Evaluation of vibration properties of bender element by self-monitoring system

北海道大学大学院 ○学生員 西田 浩太(Kohta Nishida)  
 秋田大学 正員 荻野 俊寛(Toshihiro Ogino)  
 北海道大学大学院 フェロー 三田地利之(Toshiyuki Mitachi)

## 1. はじめに

ベンダーエレメント (以下 BE) 試験は Shirley & Hampton<sup>1)</sup>が開発して以来、試験装置が簡単であり各種室内試験に取り付けることが可能であるというメリットから、地盤材料のせん断弾性係数  $G$  を求める試験として急速に普及している。

BE 試験で得られる情報はすべて受信波形に集約されているため、受信波形が重要な意味を持っている。ところが受信波形は詰まるところ BE の振動であるので、受信波形に関する問題は結局 BE の振動特性の問題に帰着する。しかしながら、既往の研究<sup>2)</sup>においてはせん断波到達時間の特定方法などは報告されているものの、BE の振動特性そのものに関する報告例は数少ない。

本文は研究の端緒として、セルフモニタリング (送信部と受信部が一体となっている) BE (図-1) を製作し BE の厚さ、自由長が振動特性に及ぼす影響を検証したものである。

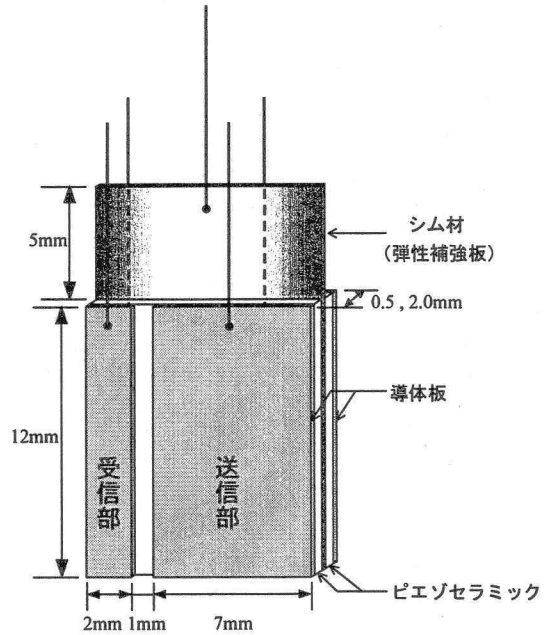


図-1 セルフモニタリング BE の構造

## 2. 試験概要

### 2.1 セルフモニタリング BE

通常の BE 試験において記録される送信波は BE に与えた入力信号そのものであり、送信側 BE の振動によって発生した電圧変化時刻歴ではない。そこで、振動特性を把握するために図-1 のようなセルフモニタリング BE を製作した。サイズは全長 ( $l_0$ ) 17mm、幅 ( $w$ ) 10mm、厚さ ( $t$ ) 0.5 および 2.0mm である。送信側を並列にすると同じ電圧でも直列の 2 倍の振動が生じる<sup>3)</sup>ため、製作した BE はパラレル (並列) 型とした。表面の電極は裏表ともに 2 分割されており、幅 7mm の電極部に電圧波形が送信され、BE が変形することによって発生した電圧を幅 2mm の電極部でモニタリングする仕組みになっている。素材はシム材がリン青銅、表面の電極 (導体板) は銀である。

### 2.2 BE 計測システム

図-2 に計測システムの概略図を示す。パソコンからの命令によって電圧波形が DA ボードから BE の送信用電極部とオシロスコープに対して同時に送信され、オシロスコープが受信した BE の送・受信両方の電圧変化時刻歴データが GP-IB インターフェイスを介してパソコンに取り込まれ、モニタに表示される仕組みとなっている。このシステムではコマンドを入力することにより、送信電圧波形ならびに振動数、トリガや掃

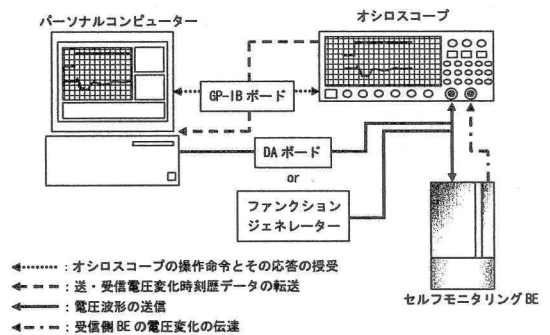


図-2 BE 計測システムの概略図

表-1 試験条件

$t$ (mm)	$l$ (mm)	結線方法 (送信側・受信側)
0.5 2.0 (2種類)	6	直列・直列
	8	並列・並列
	10	並列・直列
	(3種類)	(3種類)

引時間なども設定でき、試験に関わるオシロスコープの操作はいっさい必要としない。さらに、得られた送・受信時刻歴は自動的にオシロスコープからパソコンに取り込まれ、ハードディスクに保存される。

ただし、電圧波形の送信を DA ボードで行った場合、

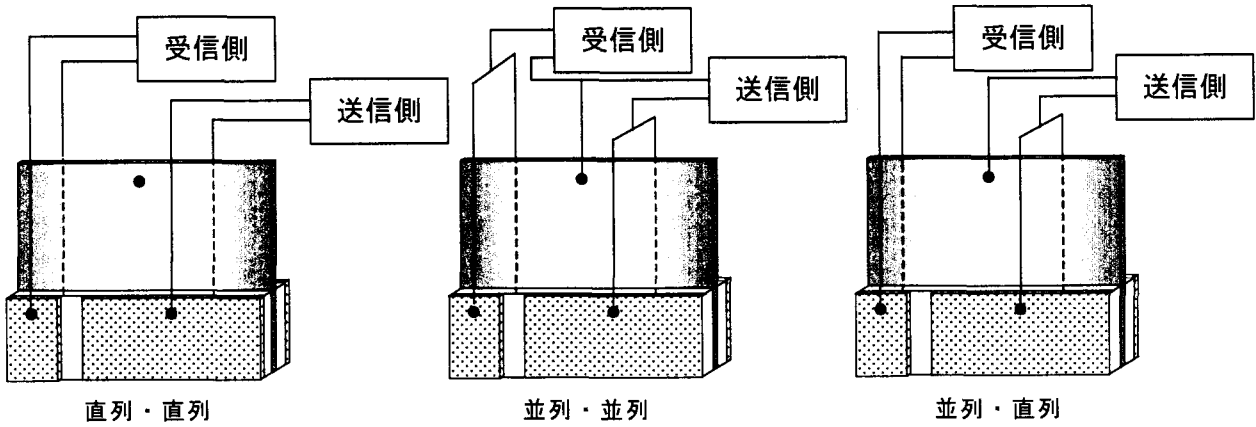


図-3 セルフモニタリング BE の結線方法

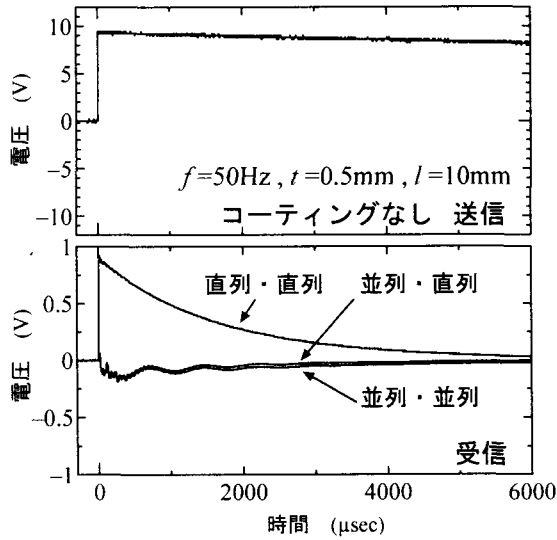


図-4 減衰振動試験における送・受信波の時刻歴 ( $t=0.5\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$ )

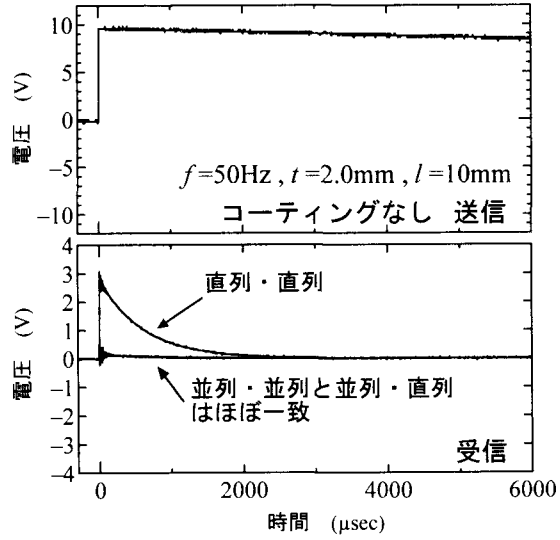


図-6 減衰振動試験における送・受信波の時刻歴 ( $t=2.0\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$ )

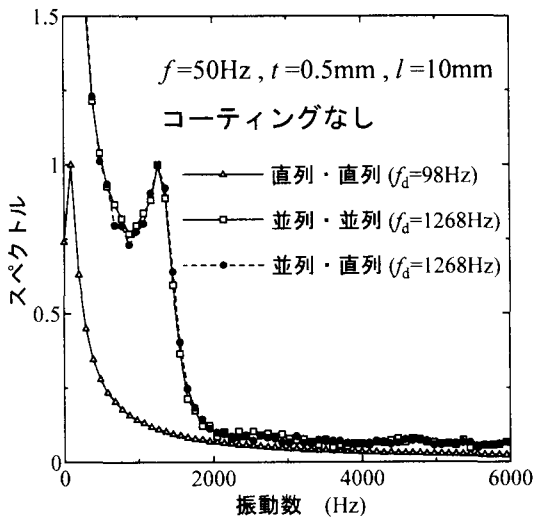


図-5 図-4 の受信波のパワースペクトル

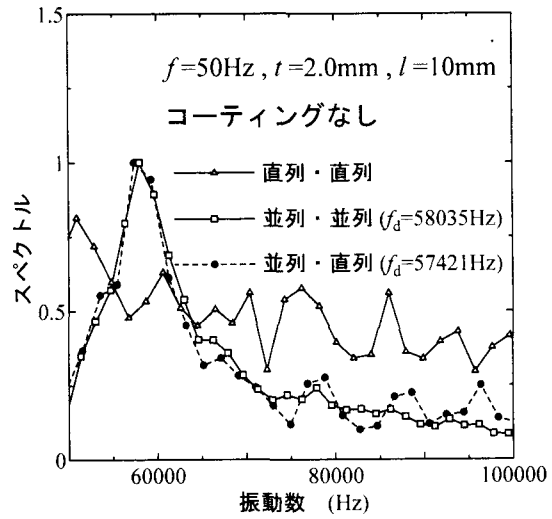


図-7 図-6 の受信波のパワースペクトル

設定可能な振動数の上限は 10kHz までであるため、それ以上の振動数の電圧波形を送信する場合にはファンクションジェネレーターを用いた。

### 2.3 試験条件

試験条件を表-1 に示す。厚さ( $t$ ) 2 種類、自由長( $l$ )3

種類、送信側・受信側の結線方法の組み合わせ 3 種類 (図-3 参照) の計 18 種類の条件下で次に示す試験を実施した。なお、BE はシム材側をバイスによって固定して片持梁とし、その梁長を自由長とした。また、エポキシ樹脂によるコーティングは施していない。

(a) 減衰振動試験：送信波に 50Hz の矩形波を用いた

試験で、受信波から減衰振動の固有振動数( $f_d$ )を求める。

- (b) 連続 sin 波による共振試験：送信波に連続 sin 波を用い、振動数を漸次増加させて BE の一次共振振動数( $f_r$ )を探る試験。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 減衰振動試験

図-4 は  $t=0.5\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$  の減衰振動試験結果について送・受信波の電圧時刻歴を示している。時刻歴において、並列・並列（以下、並・並）と並列・直列（以下、並・直）ではほぼ同じ波形が現れているものの、直列・直列（以下、直・直）のみ急激に立ち上がった後、緩やかに減少している。図-5 は受信波のワースペクトルを示したものである。なお、縦軸のスペクトルは最大値で除して正規化している。並・並および並・直では 1268Hz に卓越振動数が認められ、この値は図-4 の受信波に見られる減衰振動の固有振動数( $f_d$ )と一致している。直・直の場合 98Hz に卓越振動数が認められるが、受信波形が減衰振動しておらず、結線方法として直・直を用いることは適切ではないといえる。しかし、本研究で用いた BE は平行型であるため今後はシリーズ型の BE を用いて同様の試験を行い、直・直の適用性を検証する必要があると思われる。

図-6、図-7 は同様の試験結果を  $t=2.0\text{mm}$  の場合について示したもので、それぞれ図-4、図-5 に対応している。図-6 においても図-4 の場合と同様、直・直の場合のみ受信波の減衰振動が認められず、図-7 のワースペクトルで卓越振動数が見られなかった。並・並および並・直の場合では、 $f_d$  は約 58000Hz であった。

実際に供試体を用いて BE 試験を行う場合、BE はエポキシ樹脂でコーティングをして用いる。BE の振動特性は被覆されることによって変化することが考えられ、同様の試験を行ってコーティングの影響を検証する必要がある。被覆厚さが増加することにより、変位振幅が減少するばかりでなく卓越振動数が増加するという報告もある<sup>4)</sup>。

また、本報告における  $f_d$  はセルフモニタリング BE による受信波から求めたものであるため、直接 BE の変位を計測し、実際の固有振動との対応関係を検証する必要があると考えられる。

#### 3.2 連続 sin 波による共振試験

共振試験は振動数を徐々に増加させていき、受信波の振幅が最大になる点から一次の共振振動数( $f_r$ )を探った。図-8 は並・直、 $t=0.5\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$  のときの共振に至るまでの代表的な受信波時刻歴を示したものである。送信波には連続 sin 波を用い、送信電圧は  $20\text{V}_{\text{p-p}}$  とした。図に示すように  $f_r$  は 1260Hz であり、 $f_d$  (1268Hz, 図-5 参照) とほぼ等しい値が得られた。図-9 は  $f_r$  周辺の振動数帯において振動数と受信波の両振幅の関係を表した、いわゆる共振曲線である。並・並と並・直の共振曲線はほぼ同じ形であるのに対して、直・直のみ  $f_r$  が現れなかった。

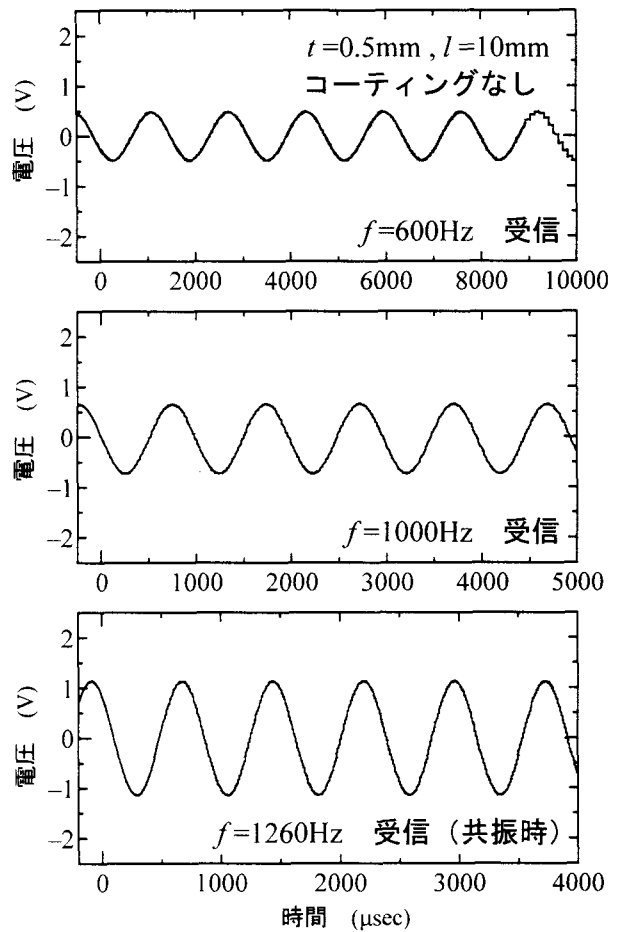


図-8 共振に至るまでの受信波時刻歴 (並・直,  $t=0.5\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$ )

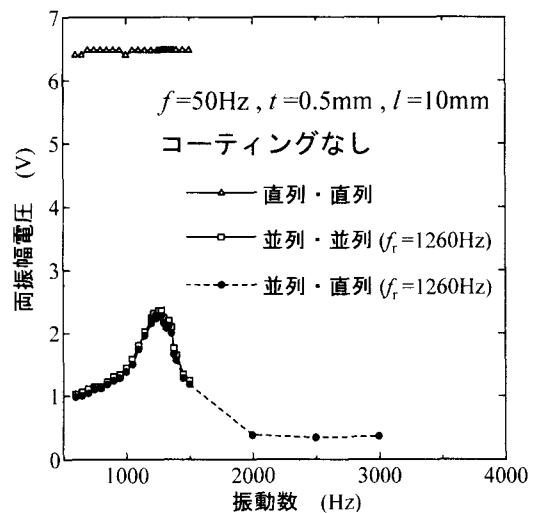


図-9 共振曲線 ( $t=0.5\text{mm}$ ,  $l=10\text{mm}$ )

#### 3.3 計算結果との比較

図-10、図-11 はそれぞれ  $t=0.5, 2.0\text{mm}$  での  $f_d$ ,  $f_r$  と自由長との関係を示したものである。図に示すように、 $f_d$ ,  $f_r$  と自由長との関係は BE の厚さ毎にほぼ等しい値が得られている。つまり試験結果からはセルフモニタリング BE は送信側を並列にすれば、受信側の結線方法によらず同じ振動特性が得られるといえる。ところ

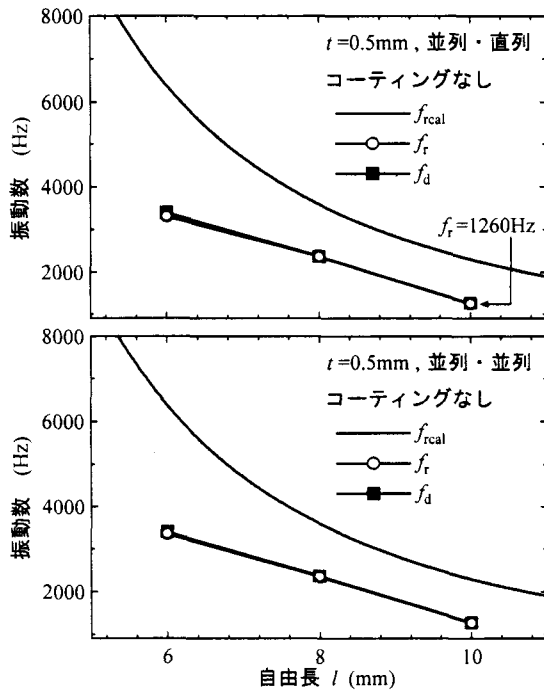


図-10 各振動数～自由長関係( $t=0.5\text{mm}$ )

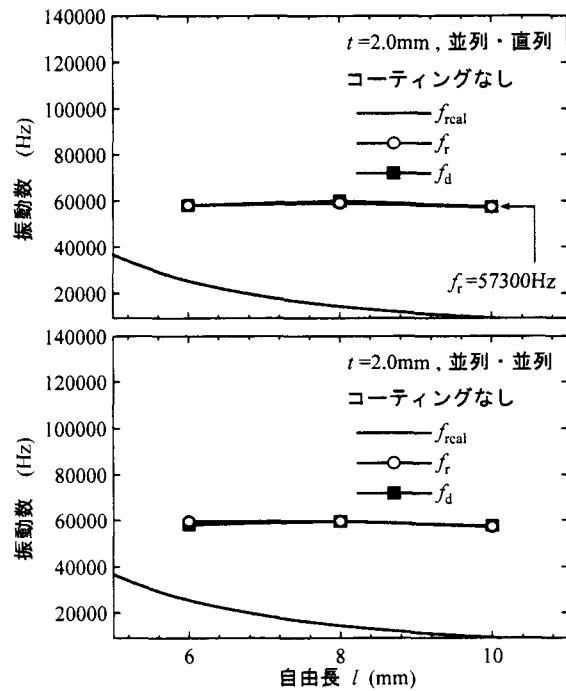


図-11 各振動数～自由長関係( $t=2.0\text{mm}$ )

で、一様断面の梁において片端固定の場合の一次共振振動数( $f_{real}$ )は、次に示す式(1)から求まる<sup>5)</sup>。

$$f_{real} = \frac{1.875^2}{4\sqrt{3}\pi} \cdot \frac{t}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

ここに、

$t$ : 厚さ(m),  $l$ : 自由長(m),  $E$ : ヤング率 (本研究で用いた BE は  $6.2 \times 10^{10} \text{ kN/m}^2$ )<sup>6)</sup>,  $\rho$ : 密度 (本研究で用いた BE は  $7.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )<sup>6)</sup>

図-10, 図-11 には式(1)による計算結果も示しているが、 $f_d$ ,  $f_r$  と比べて大きく異なっている。

また、式(1)では共振振動数は  $t$  に比例しており、 $t=2.0\text{mm}$  の BE の共振振動数は  $t=0.5\text{mm}$  のその 4 倍になるはずである。しかしながら並・直、 $l=10\text{mm}$  の場合の  $f_r$  を見てみると (図-10, 図-11 参照),  $57300\text{Hz}/1260\text{Hz} \approx 45.5$  となり著しく計算上の値とは異なる。さらに  $t=0.5\text{mm}$  の場合は  $l$  が大きくなるにつれて  $f_d$ ,  $f_r$  は減少しており、傾向としては計算値と一致しているが、 $t=2.0\text{mm}$  ではほぼ一定となっている。これらの原因としては  $t=2.0\text{mm}$  の場合、 $l$  に比較して相対的に BE が厚すぎるために振動が妨げられていることが考えられる。

しかし、式(1)は均一材料の片持梁に対する理論式であり、BE はヤング率の異なるシム材とピエゾセラミックが結合されてできている。さらに、片端固定条件が満足されていない可能性もあり、式(1)が必ずしも本試験に適用できるとは限らないため、この点についても今後検討の余地があると考えられる。

#### 4. まとめ

1) BE の振動特性を把握するため、2 種類の厚さの平行型セルフモニタリング BE を製作した。このことにより BE に与えた入力信号のみならず BE の振

動によって発生した応答信号の測定も可能となった。

- 2) 平行型セルフモニタリング BE を用いる場合、送信側の結線を並列にすれば、受信側は並列、直列のいずれを用いても BE の厚さ毎にほぼ同じ振動特性が得られた。送信側、受信側の両方を直列にした場合、減衰振動・共振現象ともに確認することはできなかった。
- 3) 並列・並列および並列・直列結線の場合、減衰振動試験から得られた  $f_d$  と共振試験から得られた  $f_r$  はほぼ等しくなることが確認された。

#### 参考文献

- 1) Shirley, D.J and Hampton, L.D.: Shear-wave measurements in laboratory sediments, Journal of the Acoustical Society of America, 63, No.2, pp.607-613, 1977.
- 2) たとえば、川口貴之、三田地利之、澁谷啓、佐野侖房: 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数  $G$  の評価, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.195-207, 2001.
- 3) Dyvic, R. and Madshus, C.: Laboratory measurement of  $G_{max}$  using bender elements, Proceeding of American Society of Civil Engineering Annual Convention, pp.186-196, 1985.
- 4) 西尾伸也、馬場幸吉、安部透、岩井俊之: ベンダーエレメント試験におけるせん断波発信子の変位計測, 物理探査学会第 100 回学術講演会論文集, pp.127-131, 1999.
- 5) たとえば、土木学会: 土木技術者のための振動便覧, 1966.
- 6) 富士セラミックス: 圧電セラミックス・素子とその応用製品