

論文 AE 原波形解析によるコンクリートの微細ひび割れ領域の評価

森谷寛*1・白井伸明*2・森泉和人*3

要旨: AE 法を併用した実験において計測される膨大な数の AE データに対し、位置標定およびモーメント・テンソル解析を迅速に行うことを目的とした P 波初動の自動確定を試みた。位置標定手法としては、標定精度の観点から解析の手法より数値的手法が有利であることを示した。また、Daubechies (N=2) のウェーブレットを用いた白色ノイズの除去が P 波初動の自動確定作業を容易にすることを示した。また、3 次元位置標定およびモーメント・テンソル解析を実施し、くさび挿入試験でのコンクリートの微細ひび割れ領域について検討した。

キーワード: コンクリート, AE, 位置標定, モーメント・テンソル解析, ウェーブレット

1. はじめに

近年、環境問題などの見地から建築・土木構造物の維持管理に関する研究が盛んである。維持管理に際しては対象となる既存構造物の劣化・損傷を評価、つまり「どこでどのような破壊が存在しているのか」を評価する必要がある。コンクリート構造物に対して、それは表面的および潜在的なひび割れを評価することに相当する。筆者らの研究室では、コンクリートの「破壊の力学」に基づき、前述の微細ひび割れ現象の解明およびその成果の応用について研究を進めている。既往の研究¹⁾では、介在物による微細ひび割れ領域の進展性状の違いを明らかにすることを目的とした、最大骨材径の異なる 2 種類のくさび挿入型試験体シリーズについての実験結果および粒子モデルによる解析結果を報告している。しかし、微細ひび割れ領域を表すと考えられる AE 源位置標定結果とひび割れ性状に関する検討に際し、主としてデータ処理作業に多大な時間を要することが障害となり十分な検討はできていない。

本研究では、実験¹⁾での位置標定精度について検討し、ウェーブレット縮退によるノイズ除去²⁾を併用した AE 波形からの P 波初動の自動確定手法を提案して、その手法を用いた位置標定およびモーメント・テンソル解析³⁾結果を報告する。

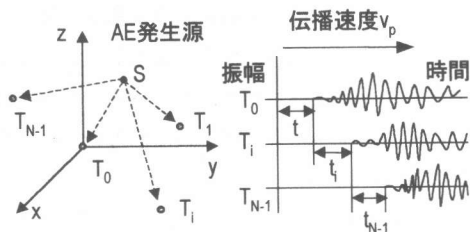
2. AE 源位置標定および P 波初動の自動確定

2.1 位置標定手法および精度⁴⁾

位置標定 (図-1) は、未知量の AE 源の位置である適当な固定値として変化させ、式(1)の量 ε が最小になるように標定位置 (x, y, z) を定める、繰返し演算による数値解法により行なった⁴⁾。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N-1} (t + t_i - l_i / v_p)^2 \quad \dots (1)$$

ここで、センサ数は N 、 v_p は P 波速度、 t は AE 源から第 1 到達センサまでの伝播時間、 t_i は第 1 到達センサから第 i 到達センサまでの到達時間差、



AE 源座標 $S : (x, y, z)$ 、センサ座標 $T_i : (x_i, y_i, z_i)$
 AE 源 - センサ座標距離 l_i :

$$l_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$$

信号伝播方程式 :

$$l_i = v_p (t + t_i) \quad (i = 1, \dots, N - 1)$$

図-1 AE 源の 3 次元位置標定

*1 前日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)
 *2 日本大学教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)
 *3 日本大学助手 理工学部建築学科 工修 (正会員)

l_i は AE 源 (x, y, z) から第 i 到達センサ (x_i, y_i, z_i) までの伝播距離である。なお、 v_p は実験¹⁾において測定された速度（コンクリート試験体：5290m/s、モルタル試験体：4590m/s）を用いる。位置標定の計算法としては、数値解法の他に、図-1の伝播方程式中の2次の項を消去し連立1次方程式として標定解を求める解析解法⁴⁾がある。解析解法では繰返し計算がない分、早く標定解を求めることができるが、標定不能域が存在することが知られており、本研究のようにモーメント・テンソル解析を前提とした精度の高い位置標定を行なう目的では採用できない。図-2に実験¹⁾で使用された試験体の形状およびセンサ配置を示す。図-3に、実験¹⁾のモルタル試験体内に10mm間隔の格子状のAE源を仮定し、そこから一定の音速 v_p で各センサにAE波が伝播すると仮定し作成した、AE初動の到達時刻データを用い、数値解法および解析解法により位置標定を行なった結果を示す。標定結果を見ると、双方とも標定された格子点に乱れはなく良好な標定が行なわれていることが分かる。しかし、解析解法ではX型に標定不能領域が存在している。

位置標定計算は、主に、P波初動到達時刻の読取り誤差、P波速度の設定誤差、計測機の時間分解能により生じる時間データの切捨て誤差などの影響を受ける⁵⁾。P波初動の読取り誤差に対しては、微弱な波でも初動が検出できるようノイズを除去することが重要であり、この方法については次節にて報告する。音速設定誤差に対しては、音速が変動し得る範囲を予測しておき、それが結果に与える影響について整理する必要がある。実験¹⁾より10%程度の音速設定誤差が混入する可能性があることが分かっている。図-4に位置標定にて設定

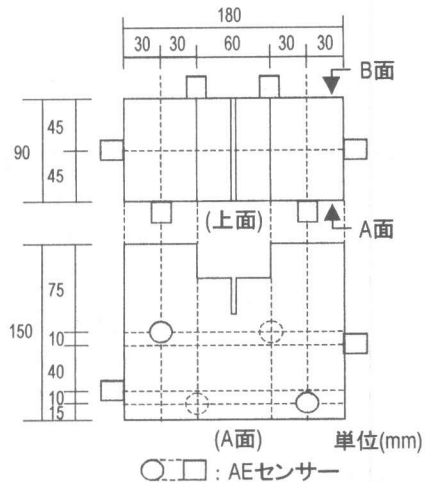


図-2 AEセンサー設置位置

する音速に10%の誤差が混入した場合の位置標定結果を示す。音速測定誤差は、真の音速 V_0 (4520m/s) および誤差率 $\Delta V (=0.10)$ から次式により求め、その誤差を含んだ音速 V を用い位置標定計算することで検討した。

$$V = V_0(1 \pm \Delta V) \quad \dots\dots(2)$$

図より、解析解法では、図-3と同様に上面方向から見たときX型の標定不能領域が存在しており、また、全体として標定点が試験体中央部に片寄る傾向がある。さらに、リガメント部の中央では標定点が乱れており標定精度は低い。一方、数値解法では、リガメント部から離れた点での標定点は乱れてはいるが、主な標定対象であるリガメント部では特別な乱れは見られず精度良い標定

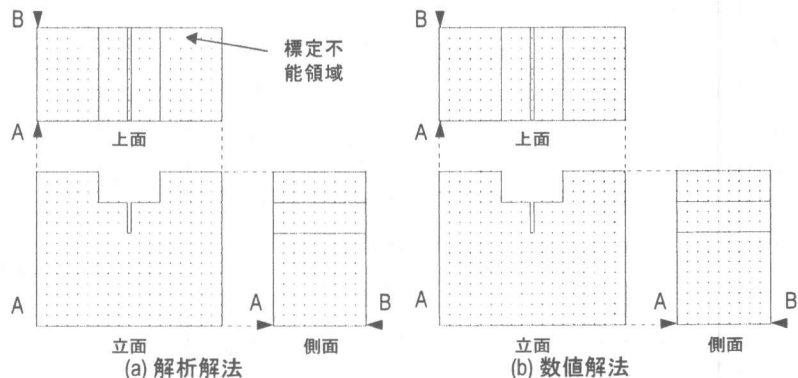


図-3 3次元位置標定結果

が行われている。

実験¹⁾においての時間分解能は $0.5\mu s$ であり、標定はその時間分解能以下を切捨てた時間データを用い行われる。図-5に時間分解能による時間データの切捨て誤差を考慮した位置標定結果を示す。標定結果を見ると、解析解法にはこれまでと同様な標定不能領域が見られるが、リガメント部に限って見ると解析解法、数値解法とも標定点の著しい乱れは観察出来ず、比較的高い精度で標定が行なわれている。また、数値解法ではリガメント部以外でも比較的良好に標定が行われている。

以上より、数値解法を用いることで、音速設定誤差および時間分解能誤差を考慮したとしても、高い精度で位置標定が行われることが分かった。

2.2 AE 波形からのノイズ除去

AE を計測する実験では、一般に数千以上の膨大な数の AE 事象が計測される。実験¹⁾においても計測終了までに 4000 余りの AE 事象を計測した。高精度が要求される AE 源位置標定では、計測された AE 波形より P 波初動部を確定し標定計算を行うことが望ましいが、ノイズの混入によりその初動部の確定作業は困難な場合が多い。本研究では、白色ノイズを対象にウェーブレット縮退を用いたノイズの除去²⁾を行った。

離散ウェーブレットを用いると関数 $x(t)$ のウ

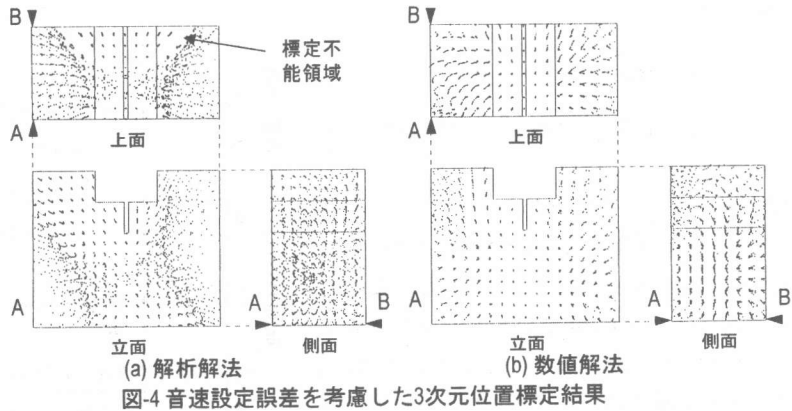


図-4 音速設定誤差を考慮した3次元位置標定結果

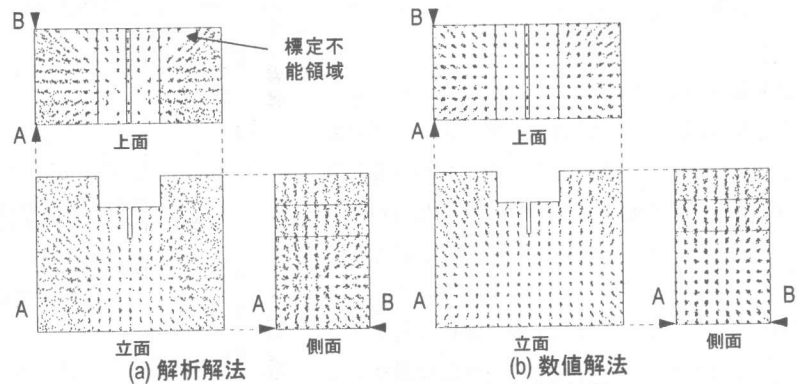


図-5 時間分解能を考慮した3次元位置標定結果

ェーブレット展開は次のように与えられる²⁾。

$$x(t) = \sum_j \sum_k w_k^{(j)} \psi_{j,k}(t) \quad \dots\dots (3)$$

$$w_k^{(j)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad \dots\dots (4)$$

ここで $w_k^{(j)}$ はウェーブレット展開係数、 $\psi_{j,k}(t)$ は基底となるマザーウェーブレットである。また、 $\overline{\psi_{j,k}(t)}$ は $\psi_{j,k}(t)$ と共役な関数である。

ウェーブレット縮退は、離散ウェーブレット変換を用い信号のウェーブレット展開係数を求め、その絶対値がある値 T より小さいものを 0 に置き換え信号の再構成を行なう手法である。本手法による利点は、存在するノイズの周波数領域を意識することなく、その振幅を推定するだけで実施出来るところである。ここでは、計測された AE 波形の初動以前と判断できる、波形記録開始点から $250\mu s$ の区間を対象として次式により T を設定し、展開係数が T 以下のものを 0 に置き換え信号

の再構成を行なった。

$$T = \sigma \sqrt{2 \ln n} \quad \dots (5)$$

ここで、 σ はノイズの標準偏差、 n はサンプル数を示す。

離散ウェーブレット変換では、マザーウェーブレット $\phi_{j,k}(t)$ の選択が重要になるが、ここでは Daubechies のウェーブレットを用いた。また、Daubechies はその展開項数の 1/2 にあたる数 N により特徴づけがなされるが、ここでは、 $N=2, 8, 40$ の中で、初動近傍の平滑さより、最もノイズ除去に効果があると判断された $N=2$ のウェーブレットを用いた。

図-6 に $N=2$ の Daubechies によるウェーブレット縮退を用いたノイズ除去例を示す。ノイズ除去により大部分のノイズは除去でき、初動近傍も滑らかになるため初動の読取りは容易になるのが分かる。なお、P 波初動時刻は、AE 波形が設定したしきい値を越えた点とした。設定するしきい値は、初動振幅がゆっくりと立ち上がる波形でも精度良く初動時刻を確定できるように、可能な限り小さい値を設定すべきであるが、余りに小さく設定した場合（例えば 1.0mV 程度）には、図-7 に示すように、初動以前の除去しきれなかった、振幅の大きなノイズを P 波初動として誤って読取る可能性があるため、適度な大きさは持たせなければならない。一方、計測された AE 波形を観察すると、微弱な P 波初動ではその振幅が 4.0mV を下回ることも良くみられるため、しきい値は大きくとも 3.0mV 程度以下に設定する必要がある。また、初動以前で除去しきれなかった、振幅の大きなノイズを読取らないように、取得した振幅値としきい値と比較する際、該当の振幅データから $10 \mu s$ 先のデータまでの標準偏差を計算・参照し、初動以前のノイズと判断できる場合には、そのデータをスキップするよう調整している。

3. 位置標定およびモーメントテンソル解析結果

図-8 に実験¹⁾で AE 計測した、コンクリートおよびモルタル試験体の実験終了時のひび割れ状況

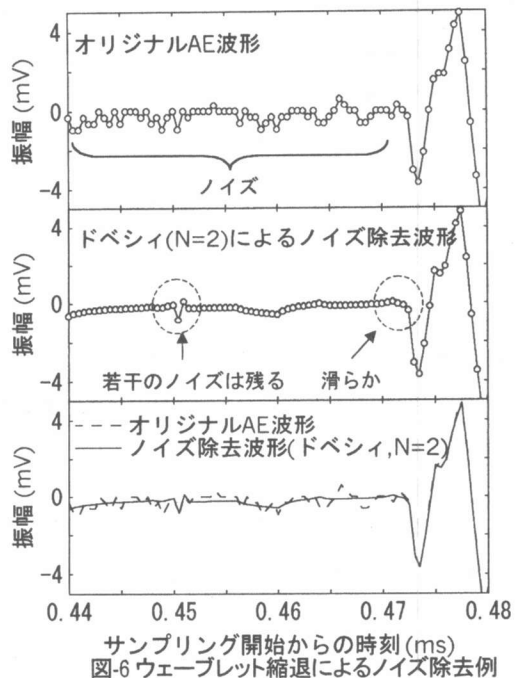


図-6 ウェーブレット縮退によるノイズ除去例

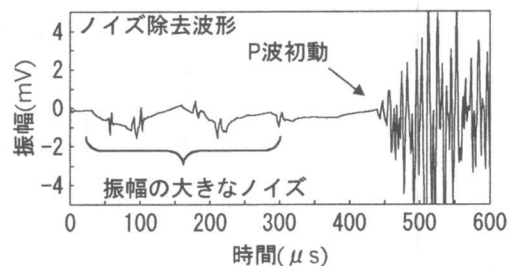


図-7 振幅の大きなノイズの例

を示す。図-9(a)および(b)にコンクリート試験体で、P 波初動確定のしきい値を 2.0 および 3.0mV とした場合の位置標定結果およびモーメント・テンソル解析結果を示し、図-10(a)および(b)にモルタル試験体での結果を示す。解析には SIGMA 手法³⁾を用い、AE 源をせん断寄与率 X の値に応じて、せん断型 ($0.6 \leq X$)、混合型 ($0.4 < X < 0.6$)、引張型 ($X \leq 0.4$) に分類した。なお、先の標定手法により収束解を得たものでかつその結果が試験体内に標定されているもののみを有意な標定結果と判断し、その他のものは除外した。各標定結果ともに実験終了時のひび割れ形状を良く模擬している。また、各標定結果とも収束解を得たものはほぼ全てがリガメント部に標定されており、標定精度の高さが伺われる。各試験体で、しきい値の

違いにより標定点数の違いは見うけられるが、標定結果はほぼ等しいものとなっている。表-1 に各試験体について、ノイズ除去を行なった波形とそうでない波形での位置標定数、標定率の一覧を示す。ここで、標定率とはP波初動自動読取りの対象となった全てのAE事象に対する有意な標定結果の割合を示す。それによると、両試験体ともにノイズ除去を行なったか否かに関係なく、しきい値を3.0mVとした標定の方が若干ながら標定率が上がっている。これは、しきい値が2.0mVでは初動以前のノイズを誤ってP波初動と判定していることを示している。なお、本実験では計測対象となる試験体寸法が比較的小さいものであったため、境界面からの反射波などがノイズとして影響を与えたことが予想される。しかしながら、モー

メント・テンソル解析にてコンクリートの破壊現象を詳細に評価する場合には、解析可能なAE事象の絶対数を増やすよりも計測条件の整ったAE事象を選別することを優先すべきであるので、位置標定がなされたほぼ全てのAE事象が、実験終了時のひび割れ状況とほぼ完全に一致している点は評価できる。

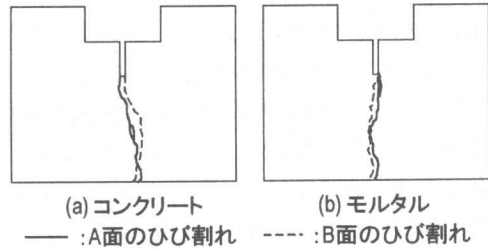


図-8 実験終了時のひび割れ状況

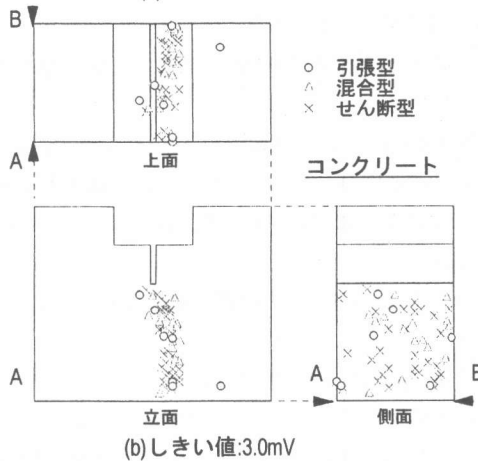
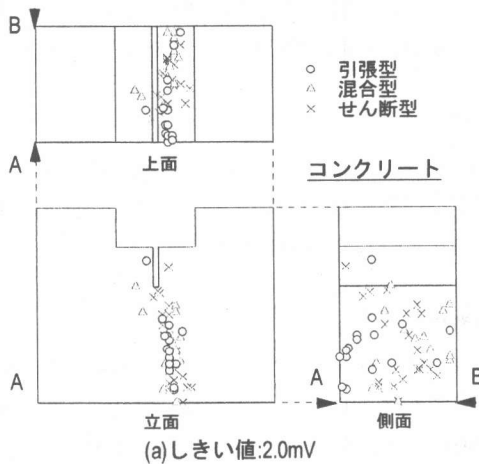


図-9 コンクリート試験体の位置標定結果

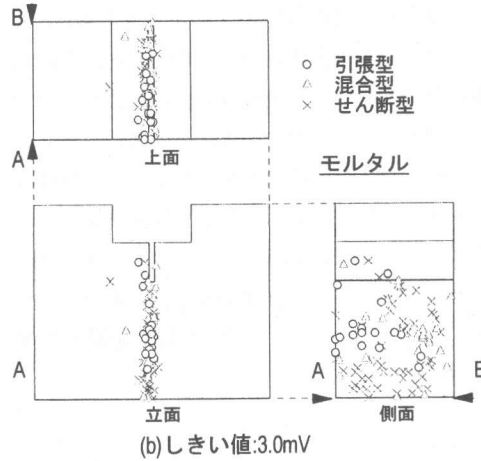
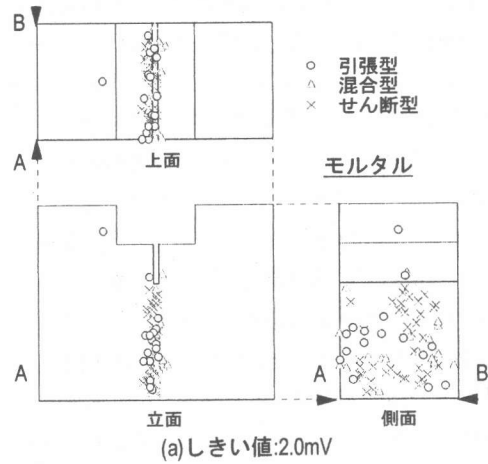


図-10 モルタル試験体の位置標定結果

表-1 試験体およびしきい値の違いと位置標定数

	コンクリート試験体		モルタル試験体	
	2.0mV	3.0mV	2.0mV	3.0mV
しきい値	2.0mV	3.0mV	2.0mV	3.0mV
オリジナル AE波標定数	1 (0.0%)	83 (2.6%)	0 (0.0%)	207 (9.5%)
ノイズ除去 AE波標定数	51 (1.6%)	56 (1.8%)	78 (3.6%)	99 (4.5%)

(注) ()内は標定対象となった全てのAE事象に対する標定率
筆者らは既往の研究¹⁾において、コンクリート試験体ではモルタル試験体に比べ、可視的なひび割れに沿って広い幅でAE源位置が標定される結果を示した。本研究においても、コンクリート試験体でのAE源位置は、モルタル試験体でのAE源位置に比べ、若干ながら幅広く標定されていることが確認できる。これは、AE源と微細ひび割れ領域とを対応させれば、粗骨材の介在が微細ひび割れ領域の形成に与えた影響を示していると判断できる。しかし、表-1に示す通り、コンクリート試験体ではAE源位置の標定率が低いことから、前述の位置標定精度の検討結果と合せ判断すると、確定したAEパラメータに多くの誤差が混入したことによる標定結果の乱れとも考えられ、今後、この点に関しての検討が必要と思われる。

図-9および10について、モーメント・テンソル解析結果に注目すると、切欠き先端部ではせん断型のクラックが多く、リガメント中央部では引張型と混合型のクラックが混在し、そして試験体底部部では、再びせん断型クラックが多く発生している。引張応力下と言えど、ひび割れ形成時には多種のひび割れモードが混在していることが分かる。ひび割れモードの分布性状に傾向らしきものが見られるが、現在計測対象としている試験体は寸法が小さく、計測したAE波形は試験体表面の影響を強く受けていると予想できる。今後、ひび割れ挙動に対してより詳細に検討をすすめるためには、試験体表面がAE波形へ及ぼす影響を考慮する必要がある。

4. まとめ

以上、ウェーブレット変換を用いたノイズ除去

を併用しP波初動の自動確定を試みた。そして、自動確定された到達時刻データを元にAE源位置標定を実施した結果について報告した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 数値解法によれば、音速設定誤差や時間分解能誤差が存在しても、リガメント部においては高い精度でAE源位置標定がなされる。
- 2) ウェーブレット変換を用いるノイズ除去を併用したP波初動の自動確定が、AE源位置標定に有効であることの可能性を示した。
- 3) AE源位置標定結果は実験終了時のひび割れ状況とは良く対応したが、微細ひび割れ領域との対応関係は見出せなかった。モーメント・テンソル解析により、引張応力下と言えどひび割れの形成時には多種のひび割れモードが混在することを示した。今後の検討では試験体境界面の検出AE波への影響を正確に把握する必要があると思われる。

謝辞

本研究は、学術フロンティア「環境・防災都市に関する研究」および日本大学学術助成金(一般研究)の一部として実施したものである。

参考文献

- 1) 森谷寛ほか: コンクリートの引張軟化特性と微視破壊挙動(その1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(広島), C-2, pp.567-570, 1999.9
- 2) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版株式会社, 1999.8
- 3) M.Ohtsu: Generation of Acoustic Emission Waves and Moment Tensor Analysis, 熊本大学工学部紀要, 第43巻, 第1号, pp.1-18, 平成10年3月
- 4) 仲佐博裕: 3次元AE位置標定法, 第12回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp243-248, 1999.11
- 5) 仲佐博裕: アコースティックエミッションの理論と実際 -非破壊検査におけるフラクタル評価法-, 地人書店, pp.61-108, 1994.10