

論文

[1132] アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究

正会員 ○ 山田 和夫 (愛知工業大学工学部)

正会員 小阪 義夫 (関西大学工学部)

1. はじめに

最近、アルカリ骨材反応や塩害などによるコンクリート構造物の早期劣化が社会的な問題となっており、関連する各省庁や学・協会においても、それらの原因の解明並びに実構造物に対する劣化度診断方法の確立に関する調査・研究が精力的に行われている。筆者らも、従来からこのような社会的背景を踏まえて、コンクリート中を伝播し検出された超音波の周波数特性に注目したコンクリートの劣化度診断方法、いわゆる超音波スペクトロスコピー法[1] による劣化度診断方法の確立を目的として、一連の理論的並びに実験的検討を行ってきた[2-9]。本報は、その延長上のもので、アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性とモルタルの劣化度との関連について実験的に調査・検討を行ったものである。

2. 実験方法

2・1 実験の概要

アルカリ骨材反応を生じたモルタル試験体中を伝播した超音波の諸特性を測定し、それらの特性値とモルタルの劣化度との関係を調べた。実験要因は、細骨材中に占める反応性モデル細骨材(パイレックスガラス)の容積置換率4種類(Vg/Va=0、0.2、0.4および0.6)、NaOH水溶液の濃度5種類(0、2、4、5および6%)、ならびにアルカリ骨材反応促進のための養生方法2種類(田村ら[10]の提案によるGBRC促進法(NaOH水溶液の濃度=5%の場合のみ)および大岸ら[11]の提案した60℃の温水養生(NaOH水溶液の濃度=0、2、4および6%の場合))である。なお、モルタルの水セメント比(W/C)は50%とし、超音波の計測終了後、曲げおよび圧縮強度をJIS R 5201の規定に準じて求めた。

2・2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、NaOH水溶液、天竜川産の川砂(表乾比重=2.60)およびパイレックスガラス骨材(比重=2.23)を用いた。細骨材はJASS 5NT-201の規定に準じて表-1に示すような粒度調整を行った。標準調合表を表-2に示す。試験体は、いずれも4x4x16cmの横打ち角柱体とし、モルタル打設後約6時間目にストレートエッジを用いて表面を平滑に仕上げ、24時間目に脱型した。

表-1 使用細骨材の粒度分布

ふるい目	残留率(%)
2.5-5 mm	10
1.2-2.5mm	20
0.6-1.2mm	25
0.3-0.6mm	23
0.15-0.3mm	16
0.15mm以下	6

表-2 調合表

GBRC促進法用の試験体は、温度20±1℃の水中で24時間養生を行った後、アルカリ反応促進養生を行い、続いて温度20±1℃、湿度95±5%の湿空中に24時間放置した後、各種の測定を行った。

Vg/Va (%)	容積調合(ℓ/m³)				重量調合(kg/m³)			
	水溶液	セメント	川砂	ガラス	水溶液	セメント	川砂	ガラス
0	300	190	519	0	300	600	1350	0
20	300	190	415	104	300	600	1079	241
40	300	190	311	208	300	600	809	482
60	300	190	207	312	300	600	538	724

[註] Va: 細骨材(川砂+パイレックスガラス)の容積、  
Vg: パイレックスガラスの容積。

60℃温水養生用の試験体は、材令3週まで温水養生を行った後、温度:20±1℃、湿度80±5%の養生室内で1週間空中養生を行い、各種の測定を行った。試験体個数は、各要因毎に3個とした。

### 2.3 計測・処理方法

使用した計測システムのブロック・ダイアグラムを図-1に示す。なお、入出力用変換子(AE-905S、共振周波数:約1MHz)は、試験体長手方向の両端に熱可塑性樹脂で直接接着した。また、既報[4]と同様に、計測システムの特性に依存し

ない媒体固有の周波数応答特性を表わす指標として周波数伝達関数を用いた。さらに、検出された波形の各種特性を調べるために、前報[8]と同様に、山口・小柳津[12]がアコースティック・エミッション(AE)のリアルタイム処理に際して用いた各種波形特性パラメータ(伝播速度(Vp)、平均周波数(Frav.)、最大振幅(AMPmax)、エネルギー(Et)、エネルギー・モーメント(Tem)、エネルギー分散(Ed)、など)を用いた。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 強度特性

図-2はGBRC法、図-3は60℃温水による促進養生を行ったモルタルの曲げ強度(Fb)および圧縮強度(Fc)と反応性骨材の容積置換率(Vg/Va)との関係を示したものである。GBRC法による場合には、NaOHによってモルタル中のアルカリ度を高

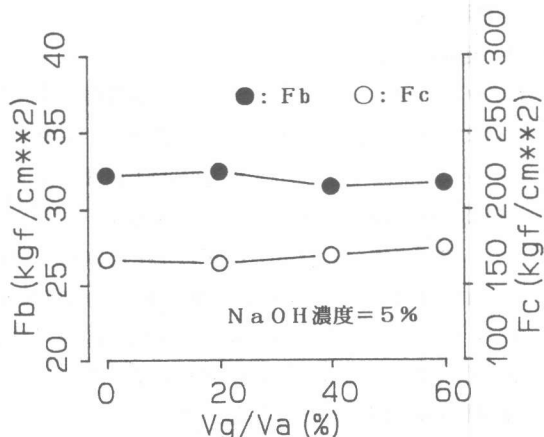
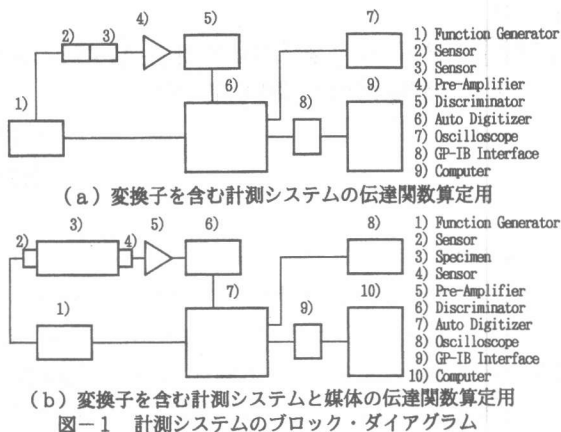


図-2 モルタル強度 (GBRC促進法)

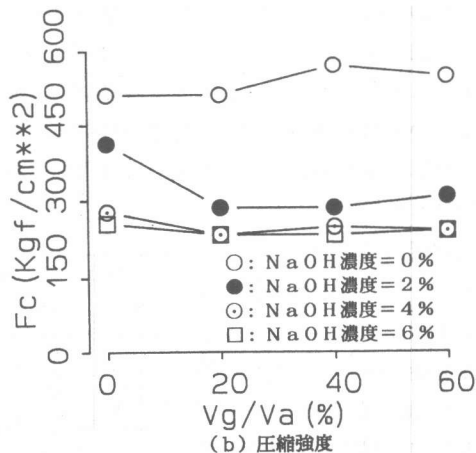
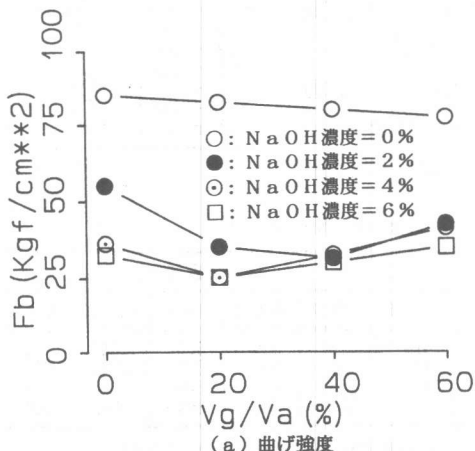


図-3 モルタル強度 (60℃温水促進法)

めても、モルタル強度は反応性骨材量の影響を殆ど受けないが、60℃温水法による場合には、NaOHによってモルタル中のアルカリ度を高めると、モルタル強度は $V_g/V_a$ が20～40%の範囲で最小値を示し、かつNaOH水溶液の濃度が大きくなるほど低下する傾向を示す。なお、本実験の範囲では、GBRC法による場合には、肉眼で確認できるひび割れは全く観察されなかった。

### 3・2 検出超音波の減衰特性

60℃温水による促進養生を行ったモルタルの透過超音波の各種波形特性パラメータのうち、透過超音波の伝播速度( $V_p$ )、平均周波数( $F_{rav.}$ )、最大振幅( $AMP_{max}$ )、エネルギー( $E_t$ )およびエネルギー分散( $E_d$ )と反応性骨材の容積置換率( $V_g/V_a$ )との関係を、それぞれ図-4～図-8に示す。これらの図によれば、NaOHを添加していないモルタルの場合には、各波形特性パラメータは、反応性骨材量とは殆ど関係しないが、NaOHによってモルタル中のアルカリ度を高めると、これらのパラメータ値は、NaOH水溶液の濃度および反応性骨材量によって著しく影響されることがわかる。これらの事象のうち、特に同一NaOH濃度試験体における反応性骨材量の影響は、明らかにアルカリ骨材反応による結果であるものと考えられる。一般的に、伝播速度( $V_p$ )、平均周波数( $F_{rav.}$ )、最大振幅( $AMP_{max}$ )およびエネルギー( $E_t$ )は、試験体が劣化して強度が低下する

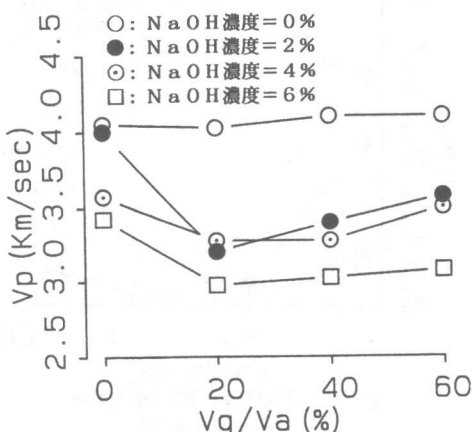


図-4 透過超音波の伝播速度 (60℃温水促進法)

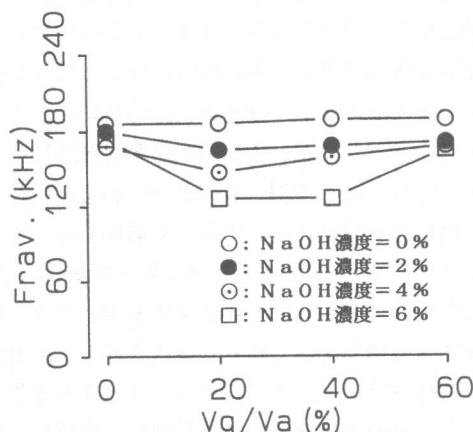


図-5 透過超音波の平均周波数 (60℃温水促進法)

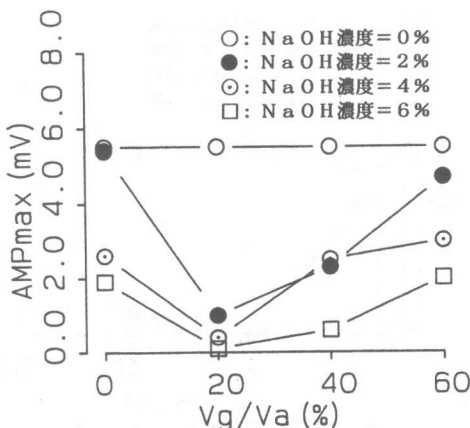


図-6 透過超音波の最大振幅 (60℃温水促進法)

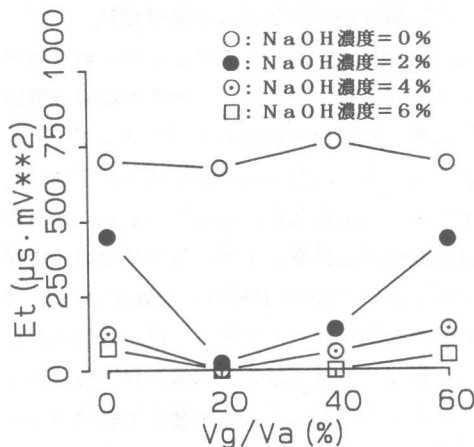


図-7 透過超音波のエネルギー (60℃温水促進法)

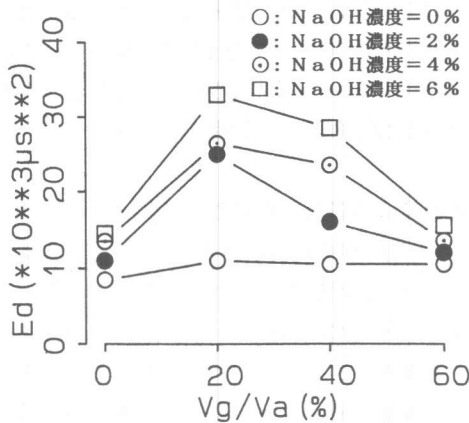


図-8 透過超音波のエネルギー分散 (60℃温水促進法)

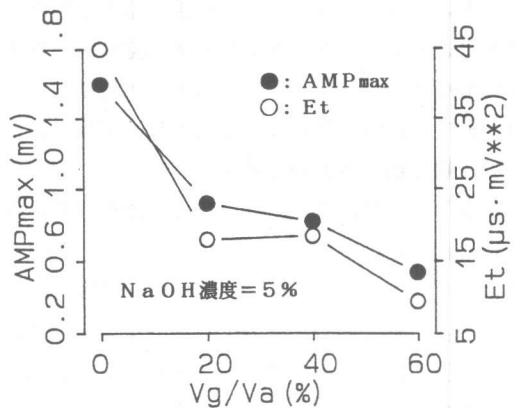


図-9 透過超音波の最大振幅およびエネルギー (GBRC促進法)

につれて減少するが、波形の集中度を表すエネルギー分散 ( $E_d$ ) は逆に増加する傾向を示し、検出波形は減衰して波形の立下りも鈍くかつ波形の集中度も分散化する。一方、GBRC法による場合には、前述のようにモルタル強度は反応性骨材の量に殆ど影響を受けないが、検出波形の各波形特性パラメータ値は、例えば図-9 にその一例を示すように、反応性骨材量によって著しく影響を受ける。一般的に、 $V_p$ 、 $F_{rav}$ 、 $AMP_{max}$ および $E_t$ は、反応性骨材量の増加とともに減少するが、 $E_d$ は逆に増加する傾向を示した。このように、上記の各波形特性パラメータ値は、モルタル強度の変化がみられない範囲においても、試験体の内部構造の変化に対して敏感に反応することがわかる。

### 3.3 試験体の周波数応答の減衰特性

図-10 および図-11 は、それぞれ60℃温水による促進養生を行ったモルタルの周波数伝達関数の最大振幅 ( $AMP_{max}$ ) およびエネルギー ( $E_t$ 、本研究では  $\int |G_m(j\omega)|^2 df$  を周波数伝達関数のエネルギーと定義した。ただし、 $G_m(j\omega)$  は試験体の周波数伝達関数を、 $\int df$  は周波数領域での積分を意味する) と反応性骨材の容積置換率 ( $V_g/V_a$ ) との関係を示したものである。図から明らかなように、周波数伝達関数の最大振幅 ( $AMP_{max}$ ) およびエネルギー ( $E_t$ ) も、上記の各種波形特性パラメータと同様に、NaOHによってモルタル中のアルカリ度を高めた場合には、反応性骨材量によって著し

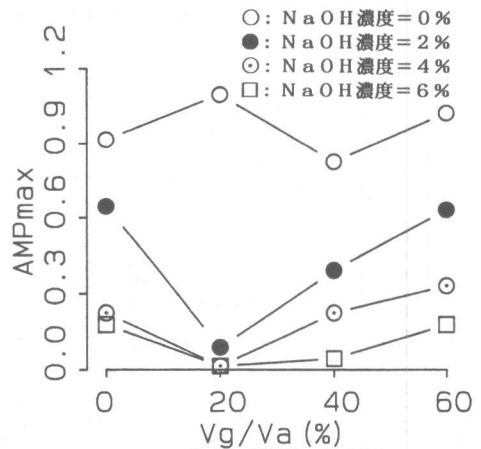


図-10 周波数伝達関数の最大振幅 (60℃温水促進法)

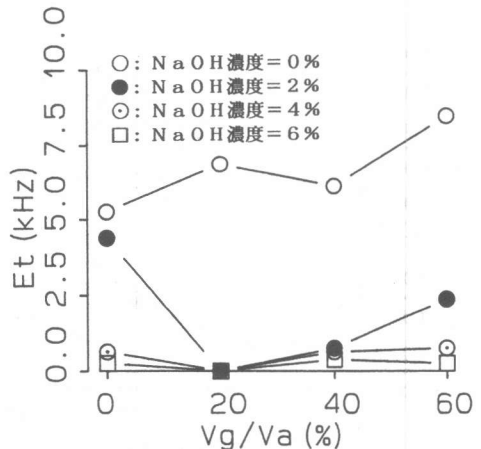


図-11 周波数伝達関数のエネルギー (60℃温水促進法)

く変化し、一般的にモルタル強度の低下とともに減少することがわかる。

表-3および表-4は、それぞれGBRC法による促進養生を行ったモルタルの周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギーを、50kHzの周波数帯域毎に分類して示したもので、表に示した値は、いずれも10~300kHzの全周波数領域における最大振幅およびエネルギーで除して無次元化してある。これらの表によれば、周波数伝達関数の最大振幅は、反応性骨材量にかかわらず200~250kHzの周波数帯にみられ、

かつ図には示していないが、この周波数帯の局所最大振幅は、反応性骨材量の増加とともに顕著に減少することがわかった。また、反応性骨材量の増加とともに、10~50kHz、50~100kHzおよび150~200kHzの周波数帯における相対局所最大振幅は徐々に増大することがわかる。なお、100~150kHzおよび250~300kHzの周波数帯の相対局所最大振幅は、反応性骨材量に殆ど影響を受けず、200~250kHzの周波数帯の局所最大振幅と類似した変化状況を示す。このことから、試験体の内部構造の変化に対して、100~150kHz、200~250kHzおよび250~300kHzの周波数帯における局所最大振幅は比較的敏感に反応するが、10~50kHz、50~100kHzおよび150~200kHzの周波数帯における局所最大振幅は比較的鈍感であるといえる。

周波数伝達関数のエネルギー成分は、反応性骨材を混入していない場合( $V_g/V_a=0$ )には、200~250kHzの周波数成分が全エネルギーの約70%を占め、100~150kHzの周波数成分が約15%、50~100kHzおよび250~300kHzの周波数成分がともに約7%、10~50kHzおよび150~200kHzの周波数成分がともに約0.5%となっており、全体として200~250kHzの周波数成分が著しく卓越した周波数特性となっているが、反応性骨材量の増加とともに、100~150kHzおよび200~250kHzの周波数成分が著しく減衰し、逆に10~50kHz、50~100kHzおよび150~200kHzの周波数成分が増大する傾向を示し、特に50~100kHzの周波数成分の増大が著しい。また、250~300kHzの周波数成分は、試験体の内部構造の変化には比較的鈍感で、最終的には50~100kHzおよび200~250kHzの周波数成分が、それぞれ全エネルギーの約35%を占め、残りの約30%を10~100kHz、150~200kHzおよび250~300kHzの周波数成分が、それぞれ約15%、約5%、約9%および約1%占めている。

以上のことから、強度低下がみられない範囲においても、アルカリ骨材反応によると思われる試験体の劣化によって、周波数伝達関数は敏感に反応し、劣化とともに50~100kHzの低周波数成分が卓越した周波数特性を示すようになることがわかる。

#### 4. 結論

本研究では、超音波スペクトロスコーピーを適用したコンクリートの品質劣化度の診断手法の確立を目的とした基礎的研究の一つとして、アルカリ骨材反応を生じたモルタルを取り上げて検討

表-3 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数の相対最大振幅

$V_g/V_a$	各周波数帯(kHz単位)における相対最大振幅						
	(%)	10~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300
0		0.068	0.122	0.188	0.061	1.000	0.175
20		0.212	0.215	0.082	0.112	1.000	0.093
40		0.231	0.349	0.165	0.385	1.000	0.150
60		0.478	0.542	0.177	0.365	1.000	0.123

[註]  $V_a$ : 細骨材(川砂+パイレックスガラス)の容積、  
 $V_g$ : パイレックスガラスの容積。

表-4 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエネルギー成分比

$V_g/V_a$	各周波数帯(kHz単位)におけるエネルギー成分比						
	(%)	10~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300
0		0.008	0.070	0.151	0.005	0.701	0.065
20		0.052	0.178	0.031	0.022	0.689	0.028
40		0.040	0.224	0.048	0.136	0.528	0.024
60		0.143	0.349	0.048	0.095	0.349	0.016

[註]  $V_a$ : 細骨材(川砂+パイレックスガラス)の容積、  
 $V_g$ : パイレックスガラスの容積。

を行った。本研究によって得られた結果は、およそ次のように総括できる。

- 1) 本実験で採用した促進アルカリ骨材反応試験法のうち、GBRC法ではモルタル強度に影響を及ぼすほどの反応はみられなかったが、60℃温水促進法の場合には、強度低下がみられた。この場合、パイレックスガラスのペシマム量は、細骨材の容積置換率で評価すると、約20～40%であった。
- 2) 強度変化がみられない場合も、アルカリ骨材反応によるものと思われる透過超音波の伝播速度、平均周波数、最大振幅およびエネルギーの減少、ならびにエネルギー分散の増加がみられ、検出波の出力は減衰して波形の立下りも鈍くかつ波形の集中度も分散化する。
- 3) アルカリ骨材反応による強度低下がみられない場合でも、周波数伝達関数は敏感に反応し、次第に低周波数成分が卓越した周波数特性を示すようになる。

以上の結果、超音波スペクトロスコピー法は、アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの劣化度評価に対しても有用であることが明らかとなった。

#### [謝 辞]

実験およびデータ整理に際して御助力を得た上田直樹君、服部光助君、水野久樹君および山本正岳君(愛知工業大学学生)に対して謝意を表するとともに、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金(一般研究(B))、ならびに内藤科学技術振興財団および石田財団の研究助成金によったことを付記する。

#### [引用文献]

- [1]Brown, A.F.: Ultrasonic Spectroscopy, Ultrasonic Testing, 1982, pp.167-215.
- [2]山田和夫、小阪義夫: コンクリート内部で発生したアコースティック・エミッションの伝播特性、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、第1号、1987, pp.499-504.
- [3]山田和夫、小阪義夫: コンクリート中を伝ばするアコースティック・エミッションの減衰特性、材料、第36巻、第406号、1987, pp.716-722.
- [4]山田和夫、小阪義夫: 火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、1988, pp.361-366.
- [5]山田和夫、土屋宏明、小阪義夫: コンクリートの伝達関数に及ぼす各種要因の影響、セメント技術年報、第42巻、1988, pp.259-262.
- [6]山田和夫、土屋宏明、小阪義夫: 超音波スペクトロスコピーによる火災を受けたコンクリートの劣化度評価、日本建築学会東海支部研究報告集、第27号、1989, pp.37-40.
- [7]山田和夫、土屋宏明、小阪義夫: コンクリートの超音波波動伝播特性に関する解析的検討、第43回セメント技術大会講演集、第43巻、1989, pp.320-325.
- [8]山田和夫、小阪義夫: 極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、1989, pp.331-336.
- [9]山田和夫、土屋宏明、小阪義夫: 超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究—高温加熱を受けたコンクリートの場合—、材料、第8巻、第431号、1989, pp.959-965.
- [10]田村 博、星野善孝、高橋利一、斉藤広志: 骨材のアルカリ反応性の早期判定試験方法の一提案、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、第7巻、1985, pp.177-180.
- [11]大岸佐吉、小野博宣、山下隆司: アルカリ骨材反応の促進試験および含浸無機ポリマーによるAAR抑制効果、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、1989, pp.129-134.
- [12]山口楠雄、小柳津宏忠: AE情報分散処理による適応型多目的監視システム、第6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、1987, pp.94-99.