

超音波スペクトロスコピー法を適用した
コンクリートの劣化度評価に関する研究
(その2: アルカリ骨材反応を受けたモルタルの場合)

山田和夫

**Damage Evaluation
of Concrete by Ultrasonic Spectroscopy
(Part-2: Mortar damaged by Alkali Aggregate Reaction)**

Kazuo YAMADA

Ultrasonic spectroscopy technique was applied to evaluating the quality of concrete damaged by the alkali aggregate reaction, as one of the non-destructive testing technique for concrete.

The energy and the maximum amplitude of measured wave propagating through the mortar specimens decreased, and the energy moment and the energy dispersion increased with the progressive damage of specimen by the alkali aggregate reaction. The energy of propagated wave was more sensitively affected by the damage of the internal structure of specimen than the maximum amplitude and pulse velocity.

The maximum amplitude, the average frequency and the energy of measured waveform, and further the particular energy of the frequency transfer function in the specific frequency range were closely related the change of internal structure of mortar, due to the damage by the alkali aggregate reaction.

The results obtained by the present study suggested that the assessment of damage in mortar by the alkali aggregate reaction was possibly accomplished by the ultrasonic spectroscopy technique.

1. まえがき

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・研究が勢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

建築学科

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受け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受け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、

表-1 使用細骨材の粒度分布

ふるい目	残留率 (%)
2.5 -5 mm	1.0
1.2 -2.5mm	2.0
0.6 -1.2mm	2.5
0.3 -0.6mm	2.3
0.15-0.3mm	1.6
0.15mm以下	6

表-2 調合表

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
2.0	300	190	415	104	300	600	1079	241
4.0	300	190	311	208	300	600	809	482
6.0	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。

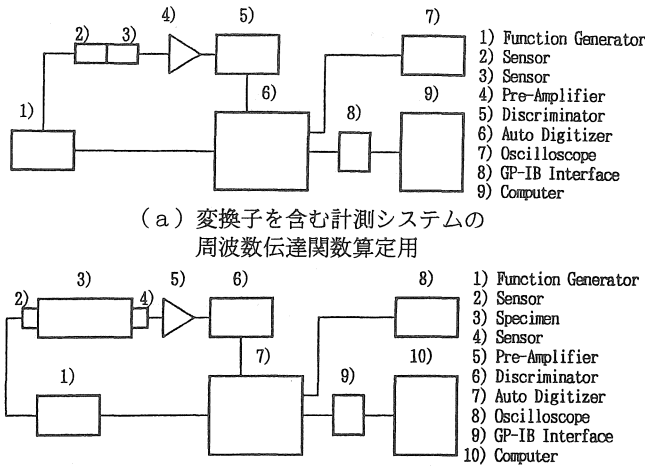


図-1 計測システムのブロック・ダイアグラム

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 $60^\circ C$ 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、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 $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ 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。

GBRC促進法用の試験体は、温度 $20 \pm 1^\circ C$ 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 $20 \pm 1^\circ C$ 、湿度 $95 \pm 5\%$ の湿空气中に24時間放置した後、各種の測定を行った。

$60^\circ C$ 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： $20 \pm 1^\circ C$ 、湿度 $80 \pm 5\%$ 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 1 MHz)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

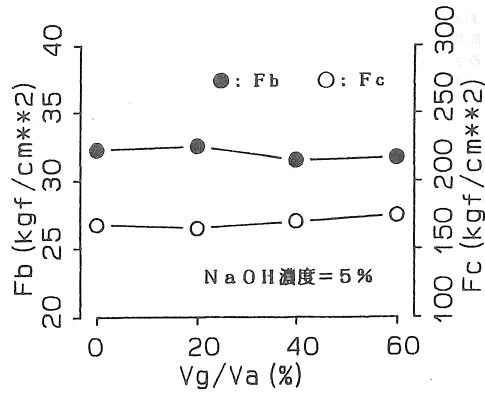


図-2 モルタル強度 (GBRC促進法)

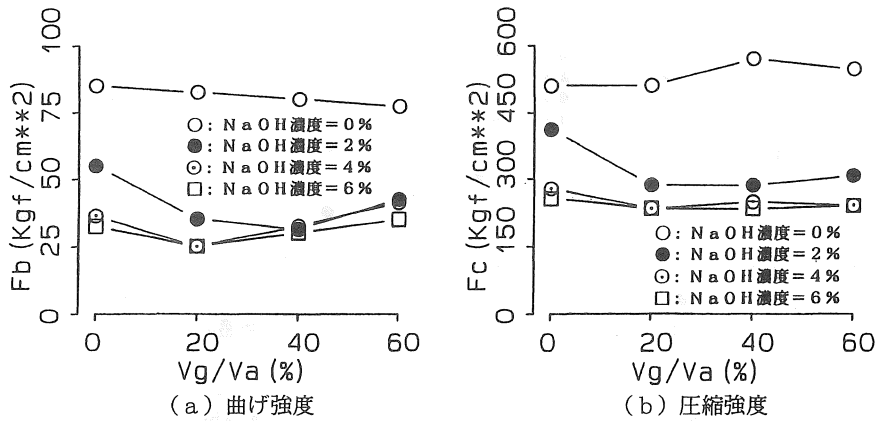


図-3 モルタル強度 (60°C温水促進法)

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、既報[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°C温水による促進養生を行ったモルタルの強度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°C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Vg/Va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した。なお、本実験の範囲では、GBRC法による場合には、肉眼で認められるような巨視的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°C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(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)およびエネルギー分散(Ed)と反応性骨材の容積置換率(Vg/Va)との関係を、それぞれ図-4~図-9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、反応性骨材量とはあまり関係しないが、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、反応性骨材量によって著

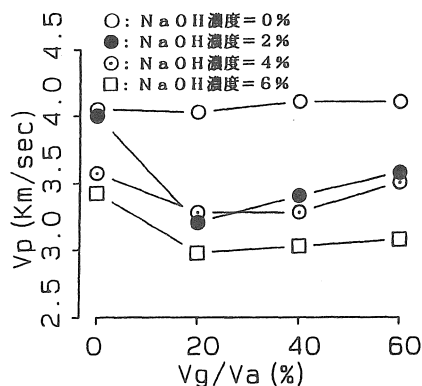


図-4 透過超音波の伝播速度
(60℃温水促進法)

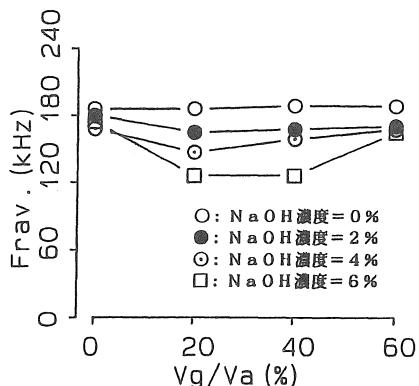


図-5 透過超音波の平均周波数
(60℃温水促進法)

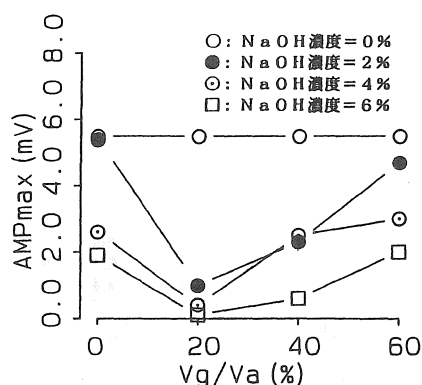


図-6 透過超音波の最大振幅
(60℃温水促進法)

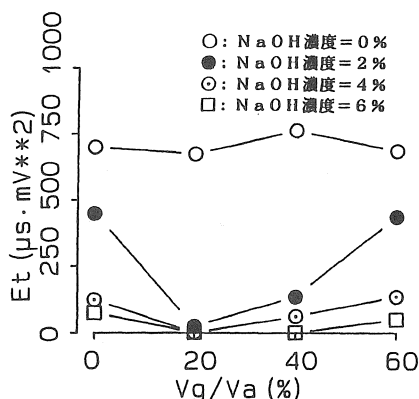


図-7 透過超音波のエネルギー
(60℃温水促進法)

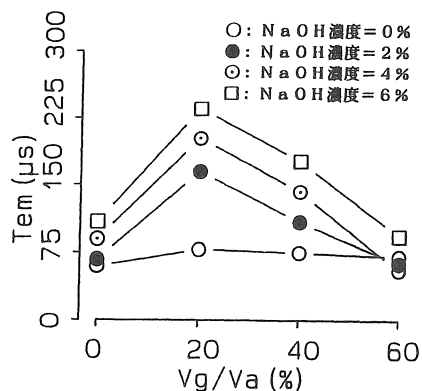


図-8 透過超音波のエネルギー・モーメント
(60℃温水促進法)

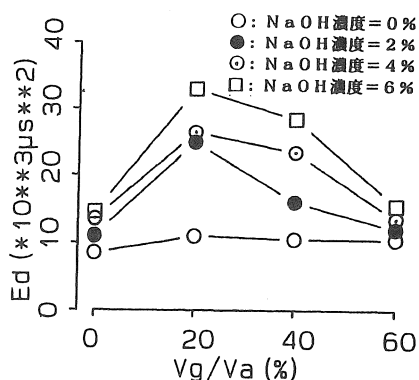


図-9 透過超音波のエネルギー分散
(60℃温水促進法)

しく影響され、前述の強度特性と密接な関係にあることがわかる。すなわち、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、アルカリ骨材反応による劣化によって強度が低下するにつれて減少し、検出波形の立下りの鋭さ

を表すエネルギー・モーメント(T_{em})および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た。また、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の傾向を示した。なお、紙数の都合で図には示していない

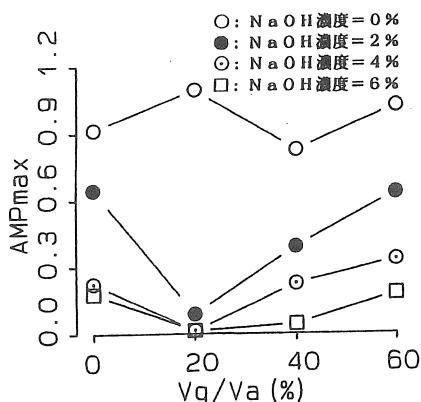


図-10 周波数伝達関数の最大振幅 (60℃温水促進法)

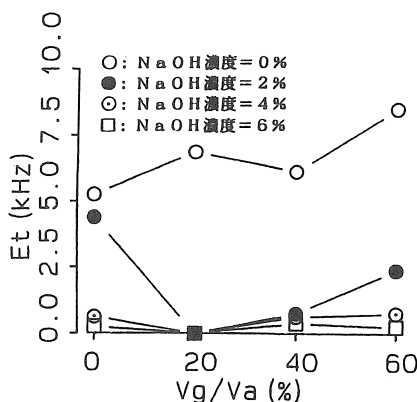


図-11 周波数伝達関数のエネルギー (60℃温水促進法)

が、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、反応性骨材量によって著しく影響を受け、Vp、F_{rav}、AMPmaxおよびEtは、反応性骨材量の増加とともに減少し、TemおよびEd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見られない範囲においても、内部構造の変化に対して敏感に反応することがわかった。

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 (AMPmax) およびエネルギー (Et、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 (Vg/Va) 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 (AMPmax) およびエネルギー (

Et) 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く変化し、一般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、反応性骨材によるモルタル内部の劣化とともに、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、200~25

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

Vg/Va (%)	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] 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。

表一 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

Vg/Va (%)	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] 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。

0kHzの周波数帯の局所最大振幅と類似した変化状況を示した。このことから、試験体内部の劣化に対して、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($Vg/Va = 0$)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、試験体の劣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、アルカリ骨材反応によって試験体の劣化が進行すると、それが強度には影響を及ぼさない程度のものであっても、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、アルカリ骨材反応によって劣化したモルタルを取り上げて検討を行った。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ベンナム量は、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・モーメントおよび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、アルカリ骨材反応による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]

本研究の実施に際して有益なるご助言を賜りました名古屋大学小阪義夫教授、ならびに実験およびデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学学生の上田直樹君、服部光助君、水野久樹君および山本正岳君に対して謝意を表します。なお、本研究費の

一部は、平成元年度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し、謝意を表す。

[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ー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ー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：A E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.

(受理 平成2年3月20日)