

論文 インパクトエコー法によるコンクリート内部空隙の評価に与える弾性波の入力周波数の影響

中根 基之^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・内田 慎哉^{*3}・古本 吉倫^{*4}

要旨：インパクトエコー法では、コンクリート内部空隙を評価する際、深さに応じて異なる鋼球直径を適切に選定する必要があると言われている。しかしながら、鋼球直径、すなわち弾性波の入力周波数の違いが空隙検出性能に与える影響についての詳細な検討は行われていない。そこで本研究では、複素応答法による FEM 解析と供試体での計測において、入力周波数をいくつか変化させ、空隙の評価に与える影響をパターン認識を用いて検討した。その結果、ユークリッド距離を用いることにより、空隙深さの異なるケースについて、入力周波数が空隙評価に与える影響を定量的に把握することができた。

キーワード：インパクトエコー法、空隙、入力周波数、複素応答法、周波数スペクトル

1. はじめに

コンクリート内部空隙を評価する手法の一つとして、インパクトエコー法¹⁾がある。この手法は、コンクリート表面から打撃により弾性波を入力し、空隙表面で反射される波の成分をコンクリート表面で計測するものである。評価にあたっては、コンクリートと内部空隙との間で励起される縦波共振現象によるピーク周波数の有無と周波数の値を活用する。そのため、如何にして空隙に起因するピーク周波数を抽出するかが問題となる。この問題に対して、Sansalone^ら¹⁾は、鋼球直径が大きくなるにしたがって、入力される弾性波の上限周波数が小さくなることから、縦波共振周波数を抽出する際は、空隙までの深さに応じた鋼球直径を選定する必要があると述べている。しかしながら、ここでいう上限周波数とは、Sansalone^ら¹⁾が周波数応答の低下する領域を便宜上定義しているに過ぎない。このような背景から、入力する弾性波の上限周波数を考慮した評価手法に関する研究が行われており、そのひとつに SIBIE²⁾がある。

これを受けて、本研究では、複素応答法による FEM 解析および供試体計測において、入力する弾性波をいくつか変化させ、これが内部空隙評価に与える影響についての検討を行った。また、パターン認識を活用して、コンクリート内部空隙の評価における弾性波の入力周波数の影響について、解析および計測結果でのそれぞれの周波数スペクトルにより、定量的に把握した。

2. インパクトエコー法による空隙の評価原理

インパクトエコー法によるコンクリート内部空隙の評価原理を図-1に示す。この手法は、コンクリート内部空隙を、打撃により得られた受信波の周波数スペクトルから評価するものである。その評価にあたっては、周波数スペクトルにおける縦波共振によるピークを活用する。なお、図中における内部空隙によるピーク周波数は、以下の式により算出される。

$$f_v = C_p / 2d \quad (1)$$

ここで、 f_v ：空隙によるピーク周波数、 C_p ：縦波の伝播速度、 d ：空隙までの深さである。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助手 工博

一方、打撃によって生じる弾性波の周波数は、使用する鋼球の直径に影響を受けることが知られている。Sansalone らが定義した関係式¹⁾を以下に示す。

$$f_{max} = 29I/D \quad (2)$$

ここで、 f_{max} ：入力される弾性波の上限周波数、 D ：鋼球直径である。

さらに、式(1)および式(2)の関係より、内部空隙の最小検知深さ(d_{min})を算出することができるとも報告されている。これは、空隙に起因するピーク周波数に対して、入力される弾性波の上限周波数が同じ値かそれ以上でなければならないことを意味している。以下に Sansalone らによって提案されている関係式¹⁾を示す。

$$d_{min} = 7D \quad (3)$$

なお、上記式(2)¹⁾および式(3)¹⁾を用いて、代表的な鋼球直径に対する上限周波数および最小深さの計算結果を、表-1にまとめて示す。表より、鋼球直径が大きくなるに従って、最小深さは大きくなるのに対して、上限周波数は小さくなることを確認できる。

3. 解析概要

3.1 複素応答法による FEM 解析

グラウト充填評価における既往の研究成果を参照に、複素応答法による FEM 解析を用いることとした³⁾。この解析手法では、フーリエ変換を前提として、解析モデルにおける伝達関数を周波数ごとに独立して求める。この伝達関数に弾性波の入力のフーリエ変換を掛け合わせることで、周波数スペクトルが算出される。

3.2 解析モデル

解析モデルは、断面方向のみの弾性波の伝播挙動に着目するため、平面ひずみ要素による 2 次元モデルとした。モデルの断面寸法は、図-2 に示すように、500mm×2000mm とした。空隙の大きさは 45mm に固定した上で、空隙までの深さを 60 および 140mm と変化させた。また、モデルパターンは、コンクリート内部に空隙が配置されているもの（空隙モデル）と空隙が存在

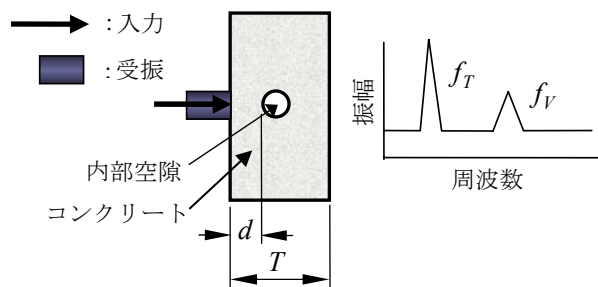


図-1 インパクトエコー法の概念

表-1 鋼球直径に対する計算結果

鋼球直径 D (mm)	上限周波数 f_{max} (kHz)	最小深さ d_{min} (mm)
3.2	90.8	21.5
4.0	72.7	26.8
6.4	45.4	42.9
9.6	30.3	64.4
11.0	26.4	73.8
12.8	22.7	85.9
15.7	18.5	105.3
19.1	15.2	128.0

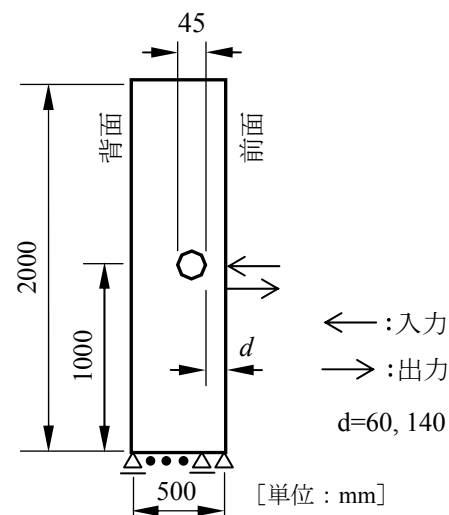


図-2 解析モデルの例

表-2 材料物性値

物性値	コンクリート	グラウト
密度(g/cm ³)	2.3	1.9
ポアソン比	0.2	0.17
伝播速度(m/s)	3900	3000
減衰定数	0.02	0.02

しない健全なもの（健全モデル）とした。空隙モデルでは、断面内に空隙に相当する 8 角形の空間を設けた。健全モデルにおいては、この 8 角形を要素のひとつとみなし、ここにグラウトの物性値を設定したものをモデルに組み込んだ。グラウトおよびコンクリートの物性値を表-2に示す。モデルにおける境界面は、底面のみ高さ方向の移動を拘束した（図-2 参照）。なお、要素の代表長さは 20mm である。

3.3 解析条件

入力位置は、図-2 に示すとおり、底面から高さ 1000mm、空隙右側の側面上の接点にて行った。出力位置は、入力位置より下側へ 50mm 移動した接点である。入力する弾性波の周波数帯域を変化させるため、既往の研究¹⁾を参考に、入力におけるフーリエスペクトルを算出した。その一例を図-3 に示す。なお、出力時における基本周波数は 0.49kHz である。

4. 実験概要

4.1 供試体概要

側面からの反射波の影響を極力避けるため、図-4 に示すように、長さと幅を十分大きくし、板厚を 500mm としたコンクリート供試体を作製した。供試体内部には、空隙を模擬するために、直径 45mm のスパイラルシースを埋設した。また、コンクリート表面から空隙までの深さを変化させることを目的に、シースの埋設深さが 60 ～250mm へとなるように、供試体長手方向における中央部にて、5°の角度で斜めに曲げ上げた。なお、供試体作製後、空隙までの深さを電磁波レーダ法により確認した。

4.2 インパクトエコー法の計測

弾性波の入力および受信位置は、図-4 における◎の位置（空隙深さ：60 および 140mm）であ

る。図に示す計測位置において、鋼球打撃による弾性波の入力と変位波形の受信を、シース中央部の直上のコンクリート表面にて行った。弾性波の入力には、入力する弾性波の上限周波数を変化させることを目的に、写真-1 に示す鋼球の直径が異なるインパクトを用いた。一方、弾性波の受信には、0～1MHz の間でフラットな応答感度を有するコニカル型高感度変位センサを用いた。受信された変位波形に対して、高速フーリエ変換（FFT）を施して周波数スペクトルを算出した。基本周波数は、解析でのそれと同じにするため、0.49kHz である。波形収集時のサンプリング時間は 1 μ s、サンプリング数は 2048 個である。なお、コンクリート部分の弾性波伝播速度の計測は、シースおよび鉄筋の直上を避け、図-4 における×印で実施した。伝播速度は、縦波共振周波数と供試体厚さ（500mm）から算出した。複数箇所での算出を平均して、伝播速度を 3900m/s とした。インパクトエコー法の計測状況を写真-2 に示す。

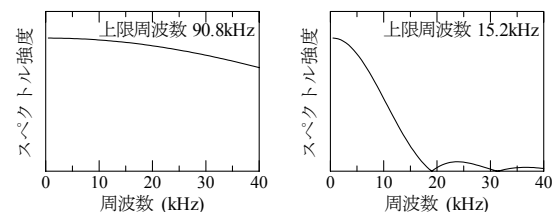


図-3 入力におけるフーリエスペクトル

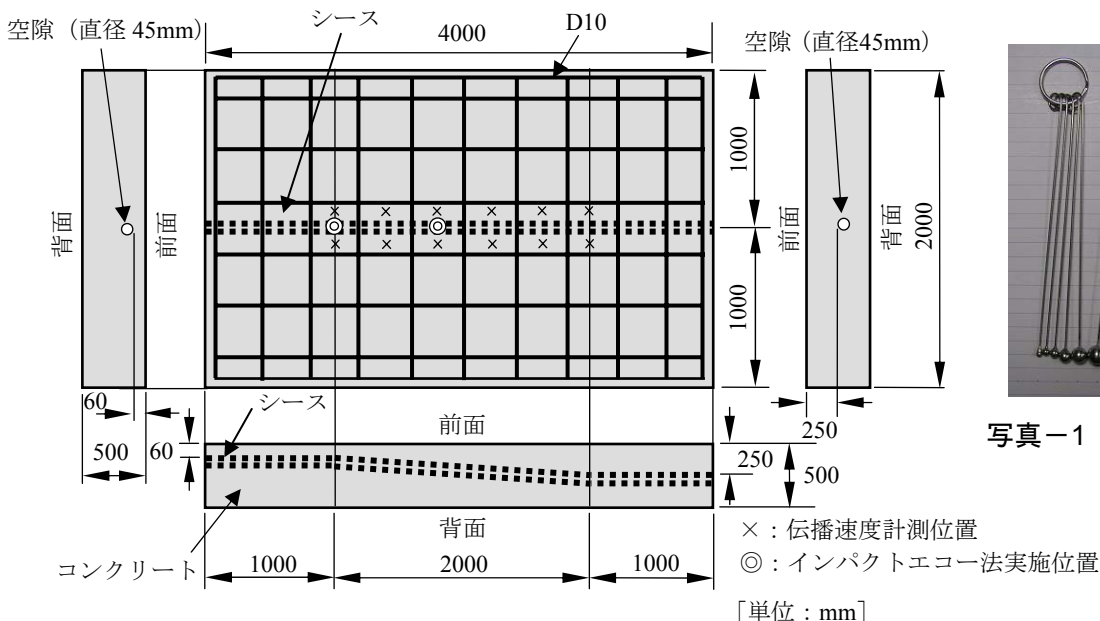


図-4 供試体概要



写真-1 インパクト

5. パターン認識

本研究では、コンクリート内部空隙の評価に与える弾性波の入力周波数の影響を把握するため、周波数スペクトルを用いたパターン認識⁴⁾を利用した。まず、解析において、設定した入力時のフーリエスペクトルごとに、空隙モデルの周波数スペクトルの特徴と健全モデルの周波数スペクトルの特徴との比較を行った。

続いて、実験および解析での周波数スペクトルの比較を行い、実験で得られた周波数スペクトルが、空隙あるいは健全モデルのどちらの周波数スペクトルに最も近いかを判別した。なお、本研究におけるパターン認識では、ユークリッド距離を活用した。ユークリッド距離とは、2つの周波数スペクトルの類似性を数値として表現するための、2次元ユークリッド空間上での2点間距離である。その値が小さくなるに従い、周波数スペクトルどうしの類似性が高くなる。以下の式(4)により、ユークリッド距離を算出した。

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - b_i)^2} \quad (4)$$

ここで、 D ：ユークリッド距離、 a_i および b_i ： i 番目の周波数におけるスペクトル強度($i=1,2,3\cdots N$)である。

6. 結果と考察

6.1 解析におけるユークリッド距離

空隙モデルおよび健全モデルにおけるユークリッド距離比と上限周波数との関係を図-5に示す。この図に示すユークリッド距離比とは、上限周波数 90.8kHz における空隙と健全モデルでのユークリッド距離を1として、それに対する各上限周波数でのモデル間のユークリッド距離との比率として定義したものである。この図によれば、いずれの空隙深さにおいても、上限周波数が小さくなるに従って、ユークリッド距離比も小さくなる傾向を示している。距離が小さくなることは、空隙モデルと健全モデルとの類似性が高いことを意味している。これより、上限周波数が小さくなるに従って、空隙と健全



写真-2 実験供試体の計測状況

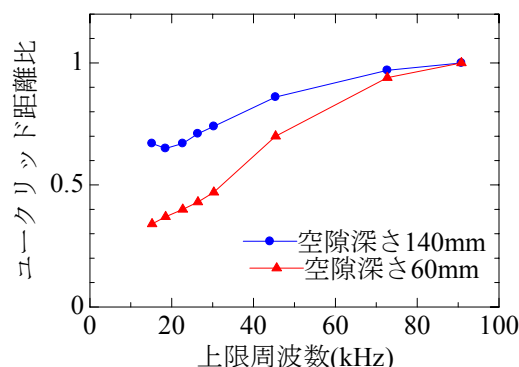


図-5 ユークリッド距離比

モデルとを判別しにくくなるのがわかる。また、空隙深さ 60mm と 140mm とを比較すると、上限周波数の低下に対するユークリッド距離の低下率は、明らかに深さ 140mm の場合の方が小さい。これより、空隙までの深さが大きい場合は、上限周波数の違いがモデル間の識別に与える影響は小さいものと考えられる。

以上のことから、空隙深さによって異なるものの、入力する弾性波の上限周波数は、空隙の検出性能に影響を与える因子であることがわかる。

6.2 解析で算出された周波数スペクトルの特徴

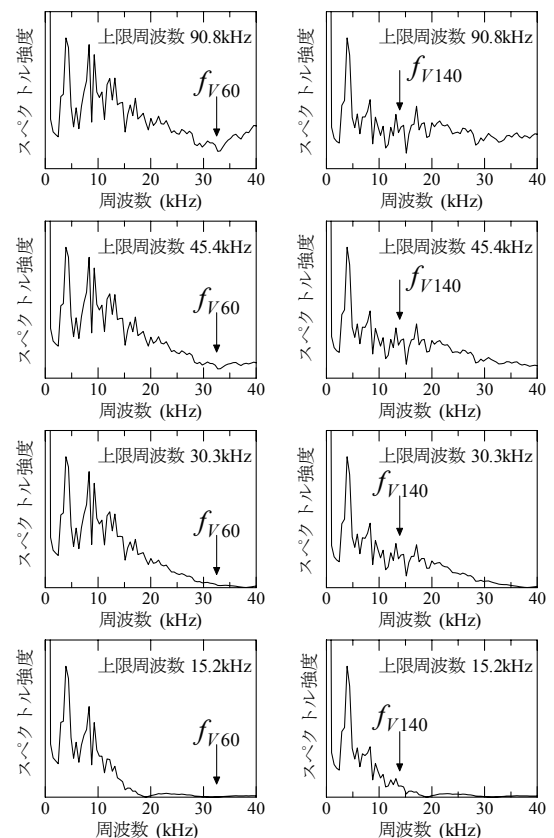
図-6に空隙の深さ 60mm および 140mm における空隙モデルの解析結果の一例を、上限周波数と併せて示す。図中の矢印は、コンクリート空隙深さに相当する縦波共振周波数(f_{v60} , f_{v140})を示している。伝播速度を 3900m/s とすると、深さ 60mm と 140mm の縦波共振周波数の理論値は、式(2)よりそれぞれ 32.5kHz および 13.9kHz となる。この図によれば、いずれの埋設深さにおいても、4kHz 付近にモデル厚さ 500mm に応じたピーク周波数が確認できる。空隙深さ 60mm

(図-6 a)に着目すると、上限周波数が 15.2kHz および 30.3kHz の場合、空隙からのピーク周波数である 32.5kHz を満足するに至っていない。これによって図では、縦波共振現象を捉えることができなかったものと考察できる。これは Sansalone らの研究成果¹⁾と一致する。しかしながら、上限周波数が 45.4kHz および 90.8kHz においては、空隙によるピーク周波数近傍のスペクトル強度が大きくなる傾向を示した。これは、空隙による縦波共振のピーク周波数が、入力された弾性波の上限周波数を上回ったためであり、式(3)¹⁾からも明らかである。一方、図-6 b)では、いずれの上限周波数においても、空隙深さ 140mm に起因する縦波共振周波数 13.9kHz を満たしているため、ピーク周波数の生成を確認できる。しかしながら、上限周波数の増加に伴って、縦波共振によるピーク周波数に加えて、その他の周波数成分における振幅も大きくなり、ピーク周波数の判別が難しくなることがわかる。

以上の解析結果より、コンクリート内部空隙を評価するにあたり、入力される弾性波の上限周波数は空隙に起因するピーク周波数を最低限満足する必要があることを、周波数スペクトルから確認した。ただし、上限周波数が大きくなると、縦波共振のピーク周波数とそれ以外の周波数成分の振幅とが同程度になり、空隙評価を困難にする場合があることも同時に明らかとなった。

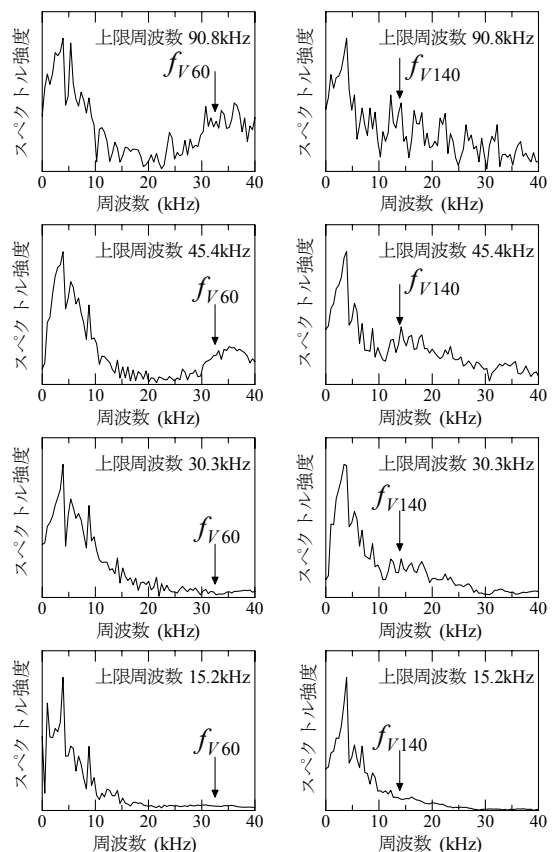
6.3 計測された周波数スペクトルの特徴

供試体で計測された空隙深さ 60mm および 140mm の場合における周波数スペクトルを図-7に示す。ここでの周波数スペクトルは、著者らの研究成果³⁾を踏まえて、表面波を除去した受信波形に対して FFT を実施したものである。また、本図では、解析結果との比較のため、図-5に示す上限周波数から算出される鋼球直径を用いて計測した場合の結果のみを示している。いずれの場合も、供試体厚さに起因したピーク周波数が生成されている。また、空隙深さに関わらず、空隙による縦波共振のピーク周波数を把



a) 空隙深さ 60mm b) 空隙深さ 140mm

図-6 空隙モデルでの周波数スペクトル



a) 空隙深さ 60mm b) 空隙深さ 140mm

図-7 計測された周波数スペクトル

表－3 計測結果のパターン認識結果

a) 空隙深さ 60mm

鋼球直径 (mm)	上限周波数 (kHz)	最小深さ (mm)	解析結果*	
			健全	空隙
3.2	90.8	21.5	2.037	1.867
4.0	72.7	26.8	2.543	2.032
6.4	45.4	42.9	2.045	2.024
9.6	30.3	64.4	1.577	1.548
11.0	26.4	73.8	1.495	1.499
12.8	22.7	85.9	1.384	1.447
15.7	18.5	105.3	1.490	1.538
19.1	15.2	128.0	1.307	1.437

*単位：無次元

握するためには、このピーク周波数が入力された弾性波の上限周波数の範囲内に最低限属している必要があることを、計測結果からも確認できる。さらに、入力する弾性波の上限周波数が大きくなることにより、空隙に起因するピーク周波数を判別しにくくなる傾向についても解析結果と同様であった。

6.4 解析と実験とのパターン認識

コンクリート内部空隙の評価における入力する弾性波の周波数の影響について、より定量的に把握するため、パターン認識を行った。ここでは、供試体での周波数スペクトルが、空隙モデルと健全モデルのどちらの周波数スペクトルに類似しているかを比較した。表－3 にパターン認識結果を示す。この表における数値は、計測結果と空隙モデル、あるいは計測結果と健全モデルとのユークリッド距離をそれぞれ示している。空隙深さ 60mm における計測結果は、弾性波の入力周波数の上限が 30.3～90.8kHz までは、空隙モデルに類似しており、上限周波数がこれよりも小さくなると健全モデルとして認識することがわかる。しかも、空隙モデルと認識した上限周波数の最小値 (30.3kHz) と、空隙深さ 60mm における縦波共振周波数 (32.5kHz) とは、かなり近い周波数の値を示している。一方、内部空隙深さが 140mm の場合は、いずれの上限周波数においても、計測された周波数スペクトルは、いずれの上限周波数に対しても、未充填モデルでの周波数スペクトルに類似する結果を示した。これは、各鋼球直径から算出されるおのこの上限周波数に、140mm から算出される縦

b) 空隙深さ 140mm

鋼球直径 (mm)	上限周波数 (kHz)	最小深さ (mm)	解析結果*	
			健全	空隙
3.2	90.8	21.5	1.833	1.754
4.0	72.7	26.8	1.835	1.760
6.4	45.4	42.9	1.367	1.249
9.6	30.3	64.4	1.240	1.064
11.0	26.4	73.8	1.338	1.179
12.8	22.7	85.9	1.480	1.324
15.7	18.5	105.3	1.185	1.039
19.1	15.2	128.0	1.014	0.857

*単位：無次元

波共振によるピーク周波数 (13.9kHz) が属したためと考察できる。

以上のことから、入力する弾性波の周波数によっては、コンクリート内部空隙の評価結果が異なる傾向となることを、パターン認識により把握した。

7. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 本研究では、解析で得られた結果に基づいて、上限周波数の違いが空隙判定に及ぼす影響の程度を、ユークリッド距離を用いて定量的に示す方法を提案した。
- 2) 提案する方法を用いて、空隙深さの異なるケースについて、入力周波数が空隙評価に与える影響を把握することができた。

参考文献

- 1) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-254, 1997
- 2) 渡辺健, 渡海雅信, 小阪浩二, 大津政康 : インパクトエコー法の画像処理に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000
- 3) 川嶋雅道, 鎌田敏郎, 古本吉倫, 六郷恵哲 : FEM 解析を援用したインパクトエコー法による PC グラウト充填状況の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1829-1834, 2006
- 4) たとえば, 安居院猛, 長尾智晴 : 画像の処理と認識, 昭晃堂, pp.99-114, 2000