

硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析

IMAGE ANALYSIS OF AN AIR-VOID SYSTEM IN HARDENED CONCRETE

鮎田 耕一*・桜井 宏**・田辺寛一郎***

By Koichi AYUTA, Hiroshi SAKURAI and Kan-ichiro TANABE

The standard microscopic technique for the characterization of air-voids in hardened concrete is a method according to ASTM C 457, but it is a time and effort consuming process. Recently, a technique using an image analyzing system has been developed for reducing the time and effort to measure. However, the specimens for the analyzing system have to be given surface treatment to distinguish the air-voids in cement paste matrix.

This paper describes a technique of the new automatic quantitative image analyzing system using a difference of intensity of illumination for the non-treatment surface specimens. The surface of the specimen has light coming from three directions for the stereo analysis. The time required is about one hour to measure the air-void system of a 10 cm square specimen.

Keywords : air-void system, image analysis, intensity of illumination

1. ま え が き

コンクリート構造物の耐凍害性確保のためには、適切なエントレインドエアがコンクリートに連行されていることが必要である。そのため、一般にはフレッシュコンクリートの空気量を測定することにより品質管理を行っている。しかし、耐凍害性を評価するためには、空気量より気泡の間隔が重要であることから、硬化コンクリート中の気泡組織を求めることが必要になる。

硬化コンクリート中の気泡組織を調べるために、一般に行われている方法はASTM C 457のポイントカウント法あるいはリニアトラバース法である。これらの方法は、コンクリート断面を実体顕微鏡を用いて観察・測定するものであるため、測定に長時間を要するとともに測定者に相当な根気が要求される。

この方法の欠点を解消する目的で、画像解析による方法が近年試みられている^{1)~5)}。これはテレビカメラから入力した画像をコンピュータによって解析する方法であ

り、ASTMの方法に比べて測定者の負担は大幅に減少される。しかし、テレビカメラで得た画像から硬化コンクリート中の気泡を直接識別するのは困難であるので、気泡とそれ以外の箇所を区別するために試料にあらかじめ二値化処理を施す必要がある。処理の方法としては、硬化コンクリート表面の気泡の中に白色の溶剤を詰め、気泡以外の部分には黒色のペイントを塗るとか、蛍光染料を添加した材料を気泡に充填し紫外線を照射するとかが試みられている。このため、この画像解析による方法は、ASTM法に比べて測定時間が短縮されたとしても二値化のための前処理に時間を要し、実質的な試験時間の短縮にならない欠点をもっている。

そこで、著者らは二値化のための前処理を施していないコンクリート試料を用いて画像解析を行うことを試み、きわめて短時間に硬化コンクリート中の気泡組織を測定する方法を開発したので報告する。

2. 画像解析システムの概要

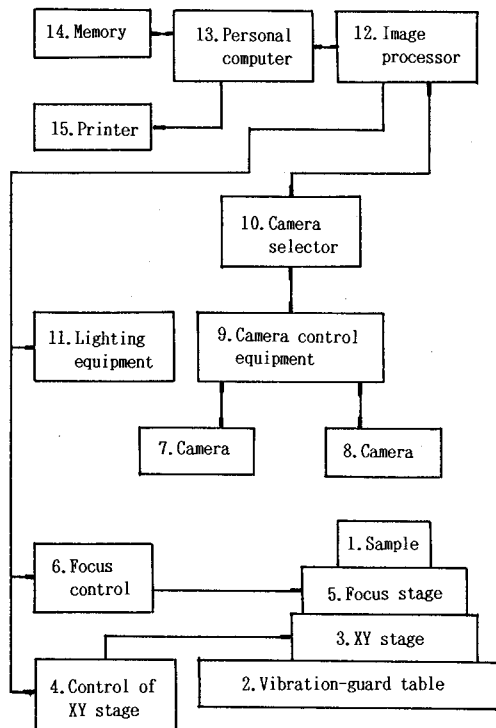
本画像解析システムは、画像処理装置本体のほか、骨材とセメントペースト領域を識別する画像を取り込むマクロ測定のための入力装置、実体顕微鏡下で気泡を識別する画像を取り込むミクロ測定のための入力装置、得られたデータを印刷するプリンタからなっている。

* 正会員 工博 北見工業大学教授 工学部土木工学科
(〒090 北見市公園町165番地)

** 正会員 工修 北見工業大学講師 工学部開発工学科
(同上)

*** (株)ニレコ (〒104 中央区京橋2-8-7)

Fig. 1 に本画像解析システムのブロック図を示す。1 は測定の対象となるコンクリート試料である。2 は試料 1 の振動を防止する除振台、3 は試料 1 を搭載した状態で二次元移動を行う XY ステージ、4 は XY ステージ制御装置、5 は試料 1 の上下方向の位置を制御して最適の焦点距離にする自動焦点機構、6 は自動焦点機構 5 を制御する自動焦点制御装置、7 は試料 1 の気泡を識別するマイクロ測定用カメラ、8 は試料 1 の骨材領域とセメントペースト領域を識別するマクロ測定用カメラ、9 はマイクロ測定用カメラ 7、マクロ測定用カメラ 8 のカメラコントロール部、10 はマイクロ測定用カメラ 7 とマクロ測定用カメラ 8 とを切り替えるビデオ切替部、11 は試料 1 に対する照明装置で、試料 1 の表面に真上からの光と左右からの斜光を当てるため 3 個のライトを装備している。12 はカメラ 7, 8 から入力された画像を処理するとともに XY ステージ制御装置 4、自動焦点制御装置 6、ビデオ切替部 10 を制御する画像処理装置、13 は画像処理装置 12 を制御するパーソナルコンピュータ、14 はパーソナルコンピュータ 13 のプログラムや画像処理装置 12 の測定データを記録するマイクロディスクやフロッピーからなる二次記憶装置、15 は画像処理装置 12



Note: 7: Air-void system camera
8: Camera to distinguish between hardened cement paste and aggregate

Fig. 1 Block diagram of the image analyzing system.

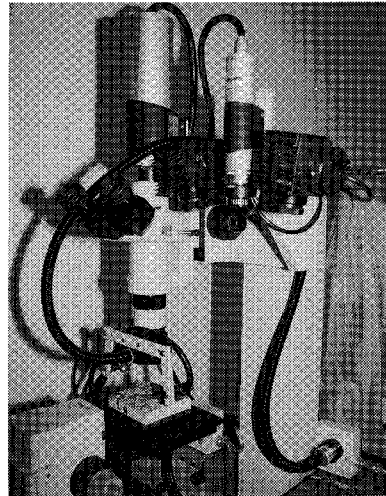


Photo 1 An input unit.

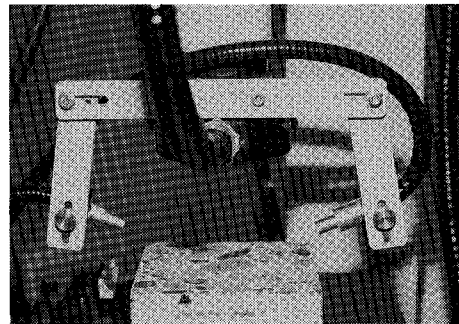


Photo 2 Lighting equipment.

の測定データ等を入力するプリンタである。

入力装置を Photo 1 に、マイクロ測定装置の照明装置を Photo 2 に示す。

3. 気泡認識処理

画像解析では、テレビカメラから入力された濃淡画像を 1 画素（画像の構成要素）ごとにテレビ信号に変換、その濃さをデジタル化（たとえば、黒を 0、白を 255 とし 256 分割する）して取り込む。この 0 から 255 の間で任意の値を設定し、設定値以上を 1、以下を 0 とすることにより二値化を行う。

本研究では、コンクリート試料表面に真上、左および右の三方向から一方向ずつ同じ強さの光を照射して、各照射方向ごとの画像を取り込み、各画像の同一位置における明るさの差（照度差）を検出し気泡組織を求めた。すなわち、試料の表面に気泡がある場合、複数の方向から一方向ずつ光を照射すると、その反射光の明るさは、気泡が試料の表面から陥没しているため互いに異なったものとなることを利用している。

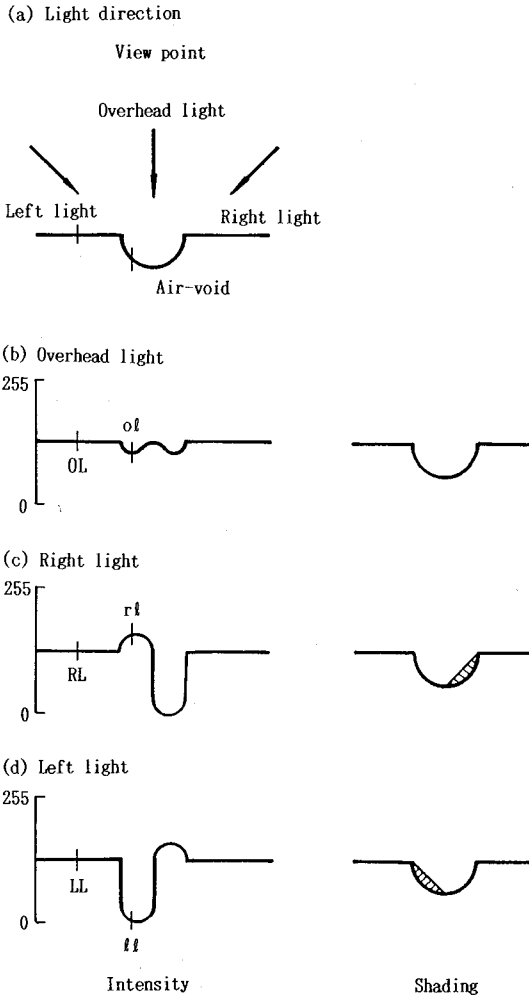


Fig. 2 Shading from three directions.

Fig. 2は、コンクリート試料表面に真上、右斜め、左斜めから同じ強さの光を照射した場合をモデル的に示したものである。(a)図に気泡の断面形状と光の方向を示した。(b)図に真上から光を照射した場合の輝度分布と影のでき方を示した。輝度を0から255までのレベルで示している。ol, OLは、それぞれ気泡部分、気泡部分以外の位置における輝度である。(c)図に光を右斜めから照射した場合、(d)図に光を左斜めから照射した場合の輝度分布と影のでき方を示した。rl, RL, ll, LLは(b)図のそれぞれ該当する位置と同じ位置における輝度である。(b),(c),(d)図を比較した場合、気泡部分以外の位置の輝度、OL, RL, LLは同じレベルであるが、気泡部分では同一位置でも光の照射方向により輝度のレベルが異なっている。この違いによって気泡を識別することができる。

気泡の認識処理は次のようにして行った。

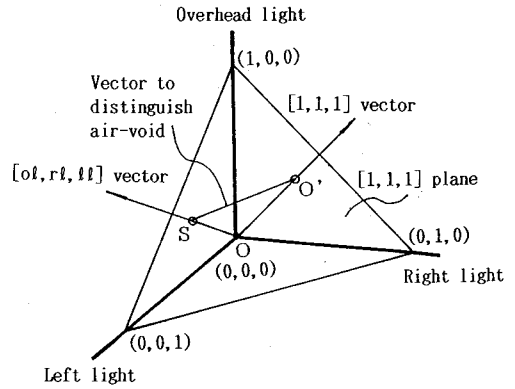


Fig. 3 Vector to distinguish air-void.

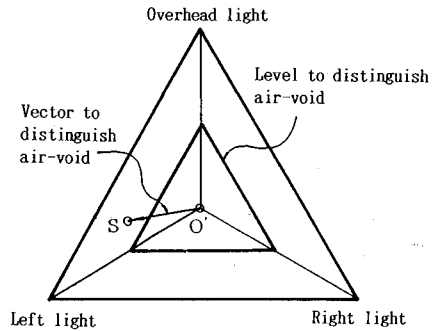


Fig. 4 Plane to distinguish air-void.

三方向から光を当てた場合の輝度 ol, rl, ll を Fig. 3 に示す三次元座標にとり、座標原点 $O(0, 0, 0)$ からのベクトルを求めると、このベクトル $[ol, rl, ll]$ が、三次元座標の $(1, 0, 0)$ 、 $(0, 1, 0)$ 、 $(0, 0, 1)$ を頂点とする平面 $[1, 1, 1]$ と交わる点 S を得る。

また、座標原点 O を起点として3つの座標の値がすべて同じである点を通るベクトルを求めると、このベクトル $[1, 1, 1]$ が平面 $[1, 1, 1]$ と交わる点、すなわち、照度座標系 (Fig. 4) の原点 O' を得る。

原点 O' から点 S までのベクトルを求めると、このベクトルの大きさを気泡を認識することができ、このベクトルが大きいかほど気泡である可能性が高いことになる。

気泡認識のためのこのベクトルの大きさ V は、三方向から光を当てた場合の各位置におけるそれぞれの輝度、 ol, rl, ll から以下の式によって求められる⁶⁾。

$$V = C\sqrt{X^2 + Y^2}$$

ここで、 $X = \frac{ol - 0.5(rl + ll)}{ol + rl + ll}$, $Y = \frac{\sqrt{3}(rl - ll)}{2(ol + rl + ll)}$

C : 定数

なお、ここでは画像からの光の反射率は一定であるとしている。照度座標系で気泡を識別するために設定した二値化レベルより、ここで求めたベクトル V が大きければ気泡と認識される。

4. 測定時間短縮のための処置

本画像解析システムによる測定は、3. で述べたコンクリート供試体の切断面の一部分を拡大した画像で気泡部分を識別するミクロ測定と、切断面全体からの画像でセメントペースト領域と骨材領域を識別するマクロ測定とに分かれている。

硬化コンクリート中のきわめて小さい気泡を画像から識別するためには、ミクロ測定の視野の幅を数 mm 程度にしなければならない。そのため、硬化コンクリートの切断面の気泡組織を正確に求めるためには、数百の画像を取り込む必要があり、これに測定時間の大半が費やされる。測定時間を短縮するためには、骨材だけで占められている画像を取り込まないのが望ましい。そこで、マクロ測定によってすべて骨材領域であると認識されたミクロ測定の視野は、測定を行わずに自動的に次の視野に移動させることにした。このため、オートステージの制御によりマクロ測定とミクロ測定の原点を同じにした。さらに、マクロ測定からミクロ測定への試料の移動およびミクロ測定での試料の移動は、すべてオートステージで自動的にを行い測定時間の短縮と測定者の負担の軽減を図った。

試料面をセメントペースト領域と骨材領域に識別するマクロ測定は、取り込んだ濃淡画像の濃さの分布の中から骨材と判断される部分（骨材領域）とそうでない部分（セメントペースト領域）が適切に識別されるような二値化レベルを設定して行った。試料を横切るある任意の直線上の濃淡を Fig. 5 のように想定すると、設定した二値化レベルより上の部分が骨材領域で、下の部分がセ

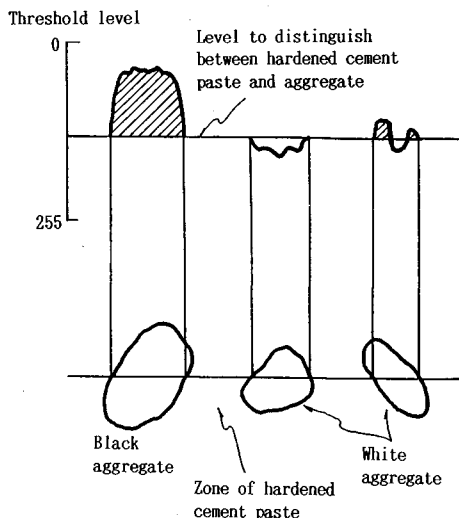


Fig. 5 Distinction between hardened cement paste and aggregate.

メントペースト領域となる。ただし、この判断は色の濃淡によって行うため、白色系の骨材は骨材として認識されにくい。このため、正確に識別するには、ディスプレイ上で試料面を観察し、白色系の骨材の領域を座標入力装置（マウス）を用いて手動修正する必要がある。

5. 測定例

測定に用いたコンクリート試料は 10 cm 角の大きさで、マクロ測定の範囲は 9×9 cm、ミクロ測定の 1 視野の範囲は 6×6 mm でミクロ測定の視野数は 225 である。本測定例では 1 視野の画素数を 400×400 に設定した。したがって、1 画素は 6 mm/400 画素 = 15 μm となる。エンブレインドエアの標準の寸法は 50~500 μm であるから、直径が約 50 μm 以上となる気泡を取り込んだ。

Photo 3 にマクロ測定用カメラから取り込んだコンクリート断面を骨材領域とセメントペースト領域に二値化した画像を示す。

Photo 4~6 に真上、左、右からの照明の下でミクロ測定用カメラから取り込んだそれぞれ 1 視野の画像を示す。

Photo 7 に Photo 4~Photo 6 の結果から気泡組織を二値化した画像を示す。

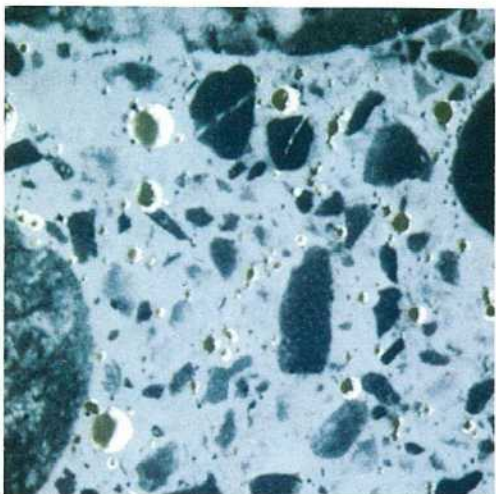
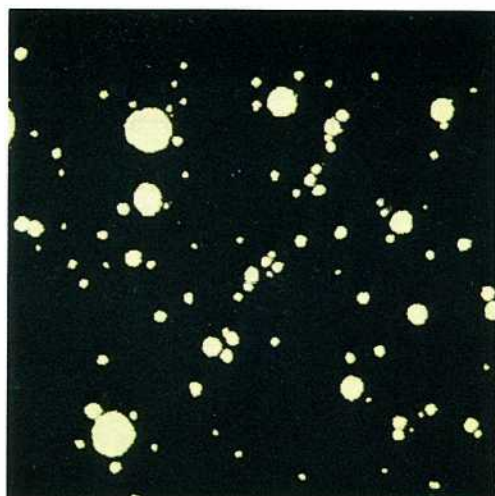
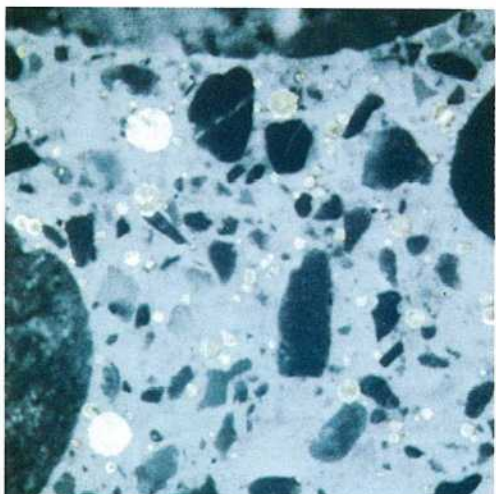
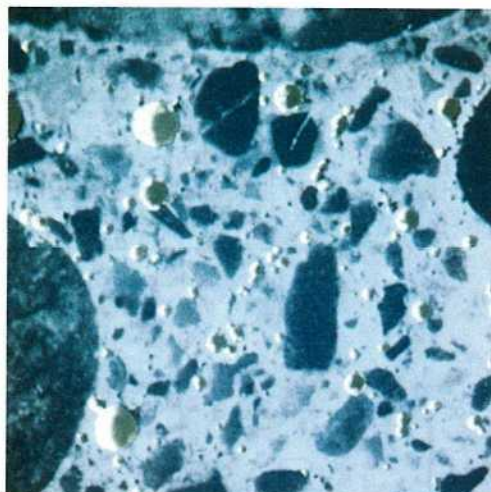
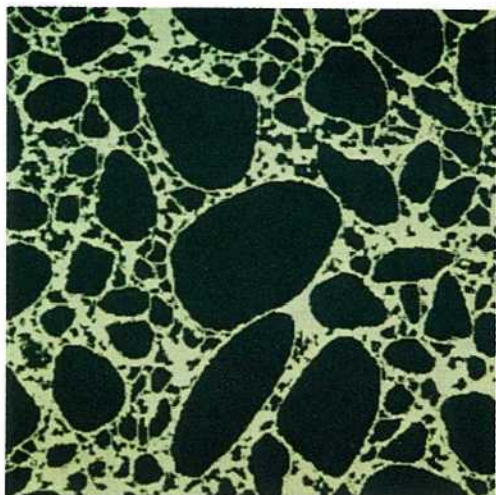
Table 1 に気泡組織の測定結果を示す。表中の (1) は二値化画像から ASTM のリニアトラバース法、(2) は修正ポイントカウント法に準じて気泡組織を求めた結果であり、いずれもセメントペースト容積は、二値化画像から求めている。(3) は比較のために画像解析を行わないで ASTM の修正ポイントカウント法によって求めた結果であり、この場合直径がおおよそ 50 μm 以上となる気泡を対象にし、セメントペースト容積は配合から求めた。

用いたコンクリートのフレッシュ時の空気量は 4.6 % である。

Fig. 6 に画像解析による測定例 (1), (2) の二値化画像から求めた気泡の大きさの分布を示した。

Table 1 および Fig. 6 の結果から、本画像解析システムによって得られた硬化コンクリートの気泡組織は、相当信頼度の高いものであることがうかがえる。

画像解析に要した時間は、(1), (2) のいずれによっても 1 時間程度であり、かつ、最も時間を要するミクロ測定の間は自動的に処理が行われるので、測定者が拘束される時間は一測定につきわずか 20 分間程度であった。ASTM C 457 の方法では、同程度の断面積の硬化コンクリート中の気泡組織を観察・測定するのに少なくとも数時間はかかるので、それと比較すると本報告による方法はきわめて有用であろう。また、この方法の特徴は平面上の凹凸部を検出することにあるので、コンクリート



(左上から)

Photo 3 Image of concrete section,

Photo 4 Image with overhead light source,

Photo 5 Image with left light source,

(右上から)

Photo 6 Image with right light source,

Photo 7 Image of air-void system,

Table 1 Results of analysis.

	(1)	(2)	(3)
Paste Content (%)	26.6	26.6	26.8
Air-Void Content (%)	3.9	4.0	4.7
Specific Surface (cm^2/cm^3)	256	255	237
Spacing Factor (μm)	209	208	207

(1) Image Analysis based on the Linear Traverse Method of ASTM

(2) Image Analysis based on the Modified Point-Count Method of ASTM

(3) Modified Point-Count Method of ASTM

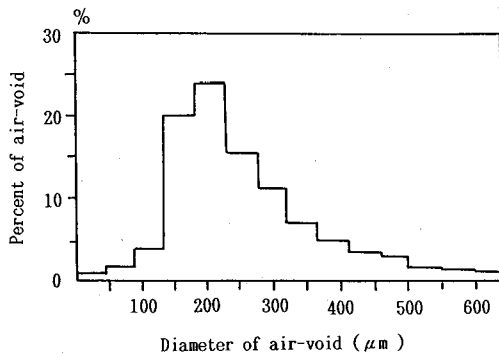


Fig. 6 Distribution of air-void.

のひびわれ測定にも応用し得る。

6. あとがき

従来の画像解析による硬化コンクリート中の気泡組織測定では、気泡とそれ以外の箇所を区別するために、試料面にあらかじめ二値化のための処理を施す必要があった。これを解消するため、試料面に三方向から一方向ずつ同じ強さの光を照射し、そこに生じる照度差から気泡を識別する方法を開発した。この結果、特別な前処理を施さずに硬化コンクリート中の気泡組織を短時間で測定することを可能にした。すなわち、10 cm 角の硬化コンクリートの気泡組織を測定するのに要する時間は、わずか1時間であり、かつ、測定の自動化により測定者の拘

束時間を20分間程度にすることを可能にした。

謝 辞：本システムの構築にあたり、ご尽力いただいた猪狩平三郎氏（北見工業大学）ならびに高橋洋一氏（現・北海道庁、当時北見工業大学学生）に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Chatterji, S. and Gudmundsson, H.: Characterization of Entrained Air Bubble System in Concrete by Means of an Image Analysing Microscope, *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 423~428, 1977.
- 2) 原田克己・地頭蘭博・仁木孟伯：画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法，セメント・コンクリート，No. 471, pp. 22~28, 1986.
- 3) 太田利隆・大橋 猛・小長井宣生・根本任宏：自動画像解析システムを用いた硬化コンクリートの気泡パラメータの測定方法について，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 389~392, 1986.
- 4) 鮎田耕一・林 正道：海水の作用を受けるコンクリートの耐凍害性確保のための適正空気量，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 93~96, 1986.
- 5) 西山 孝・前川慎喜・日下部吉彦・中野錦一：シアノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察，セメント技術年報 42, pp. 212~214, 1988.
- 6) Horn, B. and Brooks, M. J.: *Shape from Shading*, MIT Press, pp. 29~52, 1989.

(1989. 8. 31・受付)