

ボアホールテレビ映像による岩種推定の適用例

(An Application Example to Distinguish Kinds of Rocks with Borehole T. V. Image)

榎 戸 源 則ⁱ⁾ (Motonori Enokido)
坂 田 文 男ⁱⁱ⁾ (Fumio Sakata)

キーワード：岩／技術開発／原位置試験／現地調査／試掘／事例／ボーリング (IGC：C4/C7)

1. はじめに

著者は、さきに、ボアホールテレビ映像からの孔壁不連続面の一抽出法について報告した¹⁾。本報においては、この方法を実際に標本岩石に適用し比較検討して、岩種を推定した適用例について報告する²⁾。

全周撮影型ボアホールテレビカメラを使用すると、孔壁全周の状況が連続展開カラー映像により深度方向に連続的に観察可能となる。さらに、機器の改良により映像の解像度と色合いの忠実度（孔壁の色あいとカラー映像の色合いとの差の少なさ）が向上した結果、孔壁映像により得られていた割れ目と地盤境界に関する情報の他、岩種の判定や岩盤の風化度情報を抽出できるようになった。コアサンプルは調査後の保管を含め採取に手間がかかるため、これを採取せずにボアホールテレビ映像から地盤情報を得ることにより、ボーリング調査の経済性も向上させることができる。

連続展開映像で得られる岩石の紋様は、映像情報として得られる3原色赤 (R)、緑 (G)、青 (B) 成分の信号の強弱となって画面上に2次元的に分布している。成分信号の分布状態は周期的に配置されたものの集合と考え、位置の関数を時間の関数と対応させると、成分信号の分布状態は、空間領域における周波数成分すなわち空間周波数スペクトルとして扱う。

空間周波数スペクトルについて2次元周波数解析を行い、その形状と紋様の特徴を比較し、岩種の推定をおこなう。岩種の推定の順序は図-1のフローチャートに示したとおりである。岩種推定法の重点は次のとおりである。

- (1) 4種類の標本岩石をテレビカメラで撮影し、その画像について周波数解析を行い、空間周波数スペクトルを求める。
- (2) 空間周波数スペクトルの特徴として、その分布曲線が最大値となる最大値周波数で代表させうることを、4種類の標本岩石の解析結果より明らかにする。
- (3) この手法を計測現場で得られた連続展開映像に適用し、岩石と空間周波数スペクトルが持つ特徴との関係を求めると、その特徴が岩種の変化と破碎帯や地質境界の存在とよく一致して変化していることが認められる。

ⁱ⁾ 国士館大学 教授 (元群馬大学教授)
ⁱⁱ⁾ 坂田電機㈱ 専務 (1995. 4. 25 原稿受付・討議期限 1997. 1. 1 要請があれば1か月の期限延長可能)

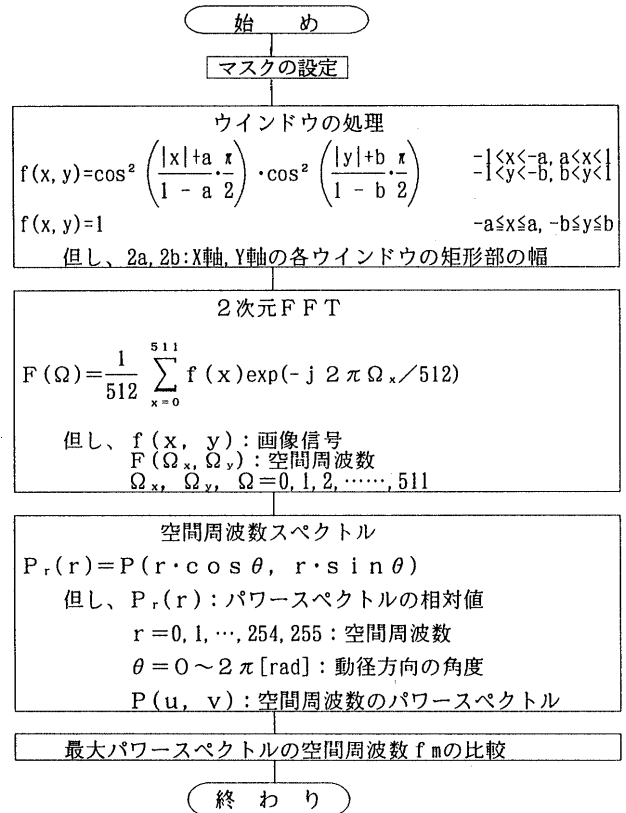


図-1 岩種の推定フローチャート

2. 空間周波数

孔壁映像が持つ情報のうち、岩石名の判定に利用される映像情報の一つに、孔壁面上に現われる岩石特有の紋様がある。この紋様は、岩石の構成粒子が持つ成分や粒径、その生成過程の差により岩石特有の形状を示し、映像では3原色赤 (R)、緑 (G)、青 (B) に分離された成分信号の分布として現れている。画面上の画素もつ各成分信号は、X方向、Y方向共に強弱を繰り返し2次元的に分布する。画面上に分布する成分信号について、位置の関数を時間の関数に対応させると、位置的に変化する空間領域上の変化は、空間周波数に置換しうる。このように、成分信号の分布として得られる紋様は、時間的に繰り返し周期をもつ種々の波の合成されたものと考えられ、周波数解析の対象となる。

空間周波数は、2次元的に分布する信号の周期を画面上の単位長さあたりの波の数で表し、その単位はサイクル/mmである³⁾。しかし、デジタル画像では、画素 (Pixel) を基準にとると都合が

よいので、本文ではサイクル/画素 (Cycle/Pixel, c/p と呼ぶ) を使用する。即ち、画面上で変化の粗い映像では、空間周波数の低い成分が多くなり、変化が微細な映像では、空間周波数の高い成分が多くなる。例えば、縦横方向に一画素おきに明暗を繰り返す紋様の時、最大周波数にのみ成分が存在し、 512×512 画素をもつ画面上の空間周波数では、 $256/512$ (c/p)の時である。また、変化のない様な画面では、空間周波数スペクトルは 0 (c/p)にピークが現われる。

岩石の紋様を映像上の空間周波数に置換すると、3原色の各々に対し、計算機上で一般的に使用されている周波数解析 (2次元高速フーリエ変換) が可能になる利点がある。この2次元高速フーリエ変換は、画像解析に使用する場合、取扱うデータ容量が多いため計算に時間がかかり、従来、使用されることが少なかったが、最近、計算機自体の処理速度の向上と専用演算回路 DSP (Digital Signal Processor) の普及により、演算処理速度が向上し、画像処理分野でも使用される場合が多くなりつつある。ここに、DSPとは、画像処理、演算処理を高速で行うことを目的とした IC (Integrated Circuit) の一種類で、具体的には積和演算処理が高速で行えるプログラムが送られるバス回路 (プログラム・データバス) とデータが送られるバス回路 (データ・データバス) を別々に設け、大量のデータを高速で処理することが可能である等の特徴をもつ。最近では、画像処理専用の GSP (Graphic SP) も市販されている。

周波数解析では、横軸を空間周波数、縦軸をスペクトル強度とする空間周波数成分の分布曲線 (空間周波数スペクトル) を求めることができる。空間周波数スペクトルとは、2次元空間における周期的紋様の特徴検出であり、紋様をもつ形状の特徴は、空間周波数成分の分布曲線をもつ形状の特徴に置換可能で、紋様という概念の計算機上での取り扱いが可能である。この分布曲線の形状は、岩石の持つ紋様により異なるため、岩石の種類と空間周波数スペクトル分布曲線の形状との関係から岩石を推定しうる。

3. 岩種と空間周波数スペクトルとの関係²⁾

岩石が持つ紋様の特徴と、岩石の映像から得た空間周波数スペクトルの分布曲線が持つ特徴との関係を求めるため、映像として特徴のある4種類の標本岩石を各々4箇所づつ計16箇所について解析を行った。空間周波数スペクトルを求める方法は、岩石の映像信号を3原色 R, G, B の成分信号に分離した後、各色毎の信号を計算機にとりこむ。次に2次元高速フーリエ変換を行う。

標本岩石を実験用のテレビカメラで撮影し、得られた映像の画面上に 200×200 画素の処理範囲 (ウインドウという) を設定し、この処理範囲内の信号に対してだけ処理する。2次元周波数解析にあたり、処理範囲の境界部分は、境界外の信号ゼロの状態から境界内の信号レベルへステップ状に変化するため、周波数解析を行うと、このエッジ部分により高周波成分が大きくなる解析誤差が生じる。この誤差を除去するため、境界部分の信号を徐々に変化させる「Cos² ウインドウ」処理を施す。この処理は、処理範囲を設定した周波数解析に用いられる一般的な方法である。

解析に使用した4種類の標本岩石の映像を写真-1に示す。4種類の使用の岩石名、採取地は以下のとおりである。

- (1) 黒雲母花崗岩：火成岩、花崗岩石英閃緑岩類
茨城県笠間市稲田町
- (2) 角閃安山岩：火成岩、酸性火山岩類
新潟県長岡町釜沢町
- (3) 砂岩：堆積岩、水成岩類、静岡県藤枝市鬼岩寺
- (4) 礫岩：堆積岩、水成岩類、山梨県南巨摩郡

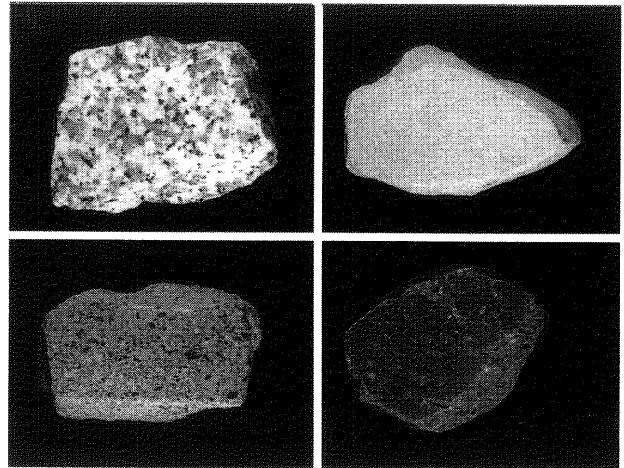


写真-1 標本岩石の映像

写真-1 標本岩石の映像

岩石の映像上の特徴を整理すると次のようになる。

- (1) 黒雲母花崗岩
白色を基調とし薄い茶色が混じるベースに、黒の小さな点状の黒雲母と薄い灰色状のやや大きい黒雲母が点在している。
- (2) 角閃安山岩
薄い紫色を基調とするベースに、黒色の小さな点とやや大きい点と白色の小さな点が点在する。
- (3) 砂岩
薄い茶色をベースに、細かい紫色の点と白色に近い茶色の点が均等に分布する。
- (4) 礫岩
濃い緑色をベースに、緑色が大きめなブロックで濃淡となり、薄い茶色又は白色の小さな点がある。

4種類の岩石に対する3原色の R, G, B 別に周波数解析を行う。2次元周波数解析では、画面の縦方向 y (深度方向) に解析した結果を Ω_y 、横方向 x (方位方向) に解析した結果を Ω_x とし、方向性を持たない周波数解析とするため、 $\Omega_r^2 = \sqrt{\Omega_y^2 + \Omega_x^2}$ の計算を行い解析結果 Ω_r (c/p) を得ている。横軸を空間周波数とし縦軸を周波数毎の相対強度 (パワースペクトル) とする空間周波数スペクトルについて、4種類の岩石を一つの図にまとめた結果、3原色の R (赤) を図-2、G (緑) を図-3、B (青) を図-4 に示す。これらの図から、以下の知見が得られる。

- (1) 分布曲線の形状は3色とも同様の形状であり、色の相違による顕著な特徴は認められない。
- (2) 写真-1に示した岩石は異なった色にもかかわらず、これら岩石の紋様は色によって変化していないことを示しており、空間周波数スペクトルの R, G, B、成分信号の相違から岩種を特徴づける方法は難しいことが理解される。
- (3) 周波数が 0.01 (c/p)以下の低周波数領域に存在する周波数成分は、岩種による明確な特徴が発見されないため、低周波数領域は判別に使用できない。
- (4) 高周波部に強いスペクトルはなく、「Cos² ウインドウ」処理は有効である。
- (5) 各岩石の周波数スペクトル曲線は山形をしており、その形状は各々異なる。

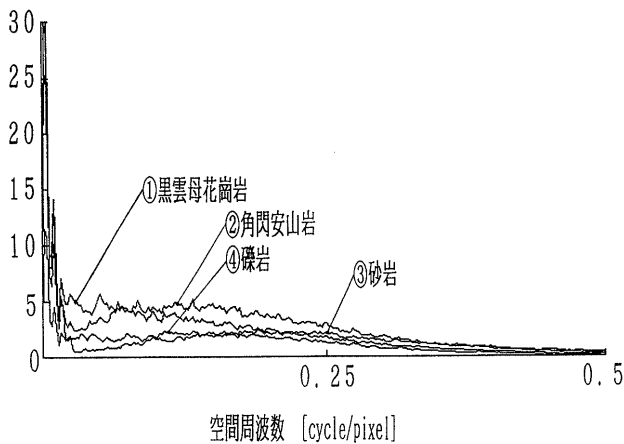


図-2 標本岩石の空間周波数スペクトル (赤)

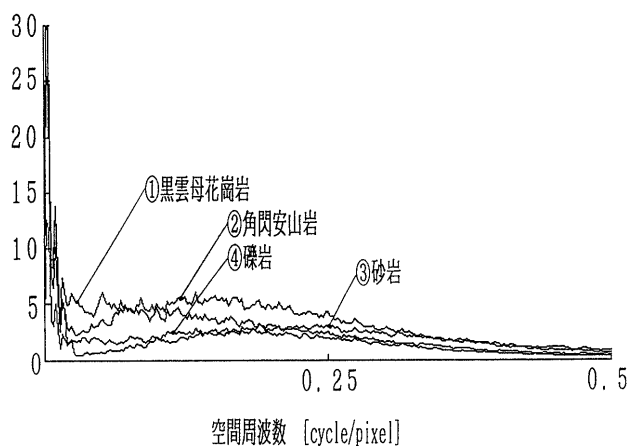


図-3 標本岩石の空間周波数スペクトル (緑)

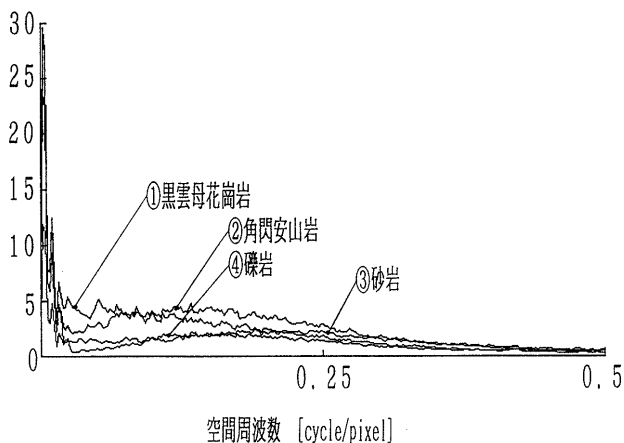


図-4 標本岩石の空間周波数スペクトル (青)

このようにして得られた分布曲線は、山形の形状をした曲線状に細かい凹凸(雑音)が存在するため、空間周波数が0.01(c/p)以上に対し、移動平均を行い平滑化し除去する。この分布曲線の特徴を表現する方法には、種々の岩石に対し、分布曲線の形状をそのまま比較する方法や平均値と分散で比較する方法であるが、いずれも計算処理に時間がかかる。そこで、特徴の一つである分布曲線が最大値となる周波数(最大値周波数 f_m と呼ぶ)に着目する。512個のパワースペクトル値の最大値を求める計算時間は、前記2つの方法に必要な計算時間より非常に短い。最大値周波数 f_m を図-3の3原色のG(緑)より求めると、次のような概略値がえられた。

- (1) 黒雲母花崗岩 : 0.031(c/p)
- (2) 角閃安山岩 : 0.125(c/p)
- (3) 砂岩 : 0.215(c/p)
- (4) 礫岩 : 0.147(c/p)

この値は同一岩種4個の結果を考慮して決定したため、図-3とは若干異なる。なお、G(緑)のデータを使用した理由は、3原色のうち緑が人間の視感度曲線の中央に位置するため、人間の感覚と一致するからである。この値より、紋様の細かさは砂岩、礫岩、角閃安山岩、黒雲母花崗岩の順であり、礫岩と角閃安山岩の値が接近しているが、砂岩と黒雲母花崗岩は明らかに異なった値を示す。

この結果、砂岩と黒雲母花崗岩、礫岩又は角閃安山岩に対する3種類の判別は、最大値周波数 f_m より明確に行なえるが、礫岩と角閃安山岩の判別は難しい。しかし、BHTVシステムで得られる連続展開映像を考えると、火成岩と堆積岩の異なる種類の岩石が境界を接して積層する確率は少ないため、同じ岩石と判別される可能性は少ないと推定されるので、最大値周波数 f_m の値によって岩種を判定する手法を適用することにした。

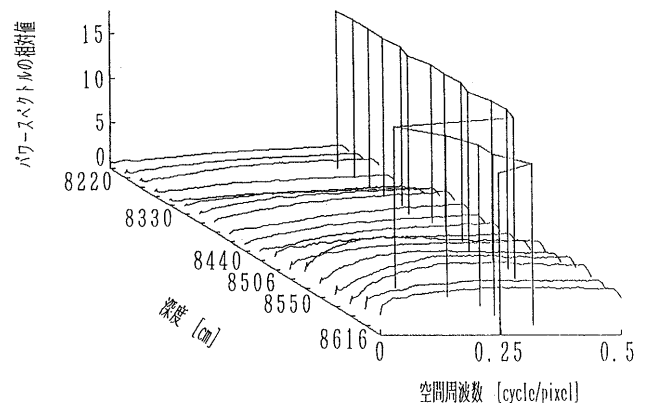
4. TV 映像の解析結果

BHTVシステムで得られた孔壁の照明むらの補正がすんだ連続展開映像を使用し、空間周波数の2次元周波数解析を行った。解析は、深度10~100 mの映像を一画面ずつ(約20 cm)区切り、20 cm単位で実施した。なお、この解析法は、色による影響のない3原色のG(緑)について行った。

深度82.20~86.16 mにわたる周波数解析の結果を図-5に示す。深度をY軸に空間周波数をX軸に、パワースペクトルの絶対値をZ軸にとる3次元直角座標により表示し、さらに各深度における最大値周波数 f_m の軌跡を重ねて表示した。この図より次の知見が得られた。

- (1) 85 m付近を境に、周波数スペクトルの分布曲線の形状が異なる。
- (2) 最大値周波数 f_m の軌跡は深度82.2~85.0 mまで安定した高い空間周波数であり、深度85.06 m付近で低い周波数に落ち込み、さらに深くなると0.25(c/p)付近に安定している。
- (3) 85.06 mでは最大値周波数 f_m の空間周波数が低周波数領域へ落ち込んでいる。

写真-2は、深度84.95~85.15 mの孔壁映像である。この映像は、図-5の深度範囲内であり、写真中央部の85.06 m付近に亀裂が存在することがわかる。この事実から亀裂の存在は最大値周波数 f_m を大きく変動させる要因であることがわかる。コアサンプルからの判定では、この付近はひん岩より花崗岩に岩種が変化する地

図-5 空間周波数スペクトルと最大値周波数 f_m の軌跡

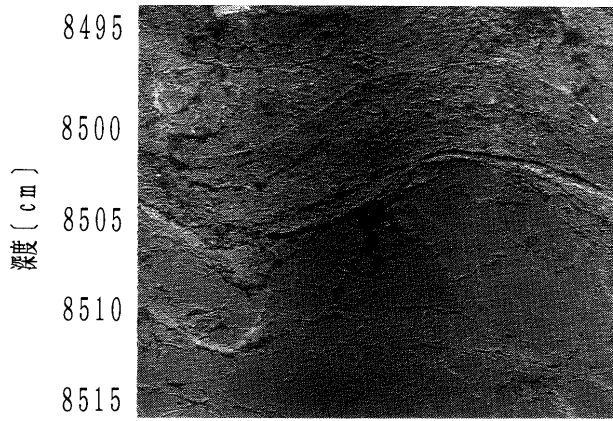


写真-2 深度8506 cm 付近の孔壁映像

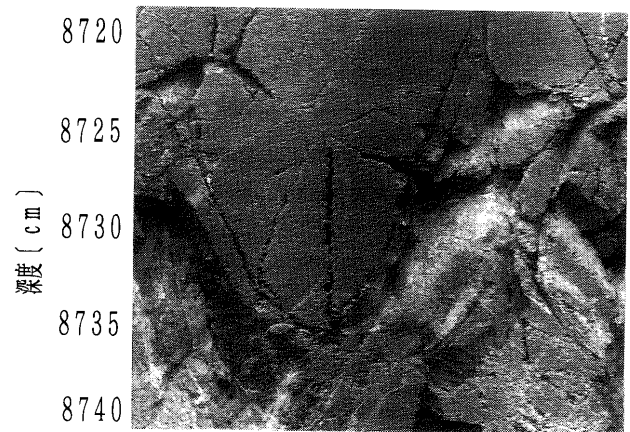


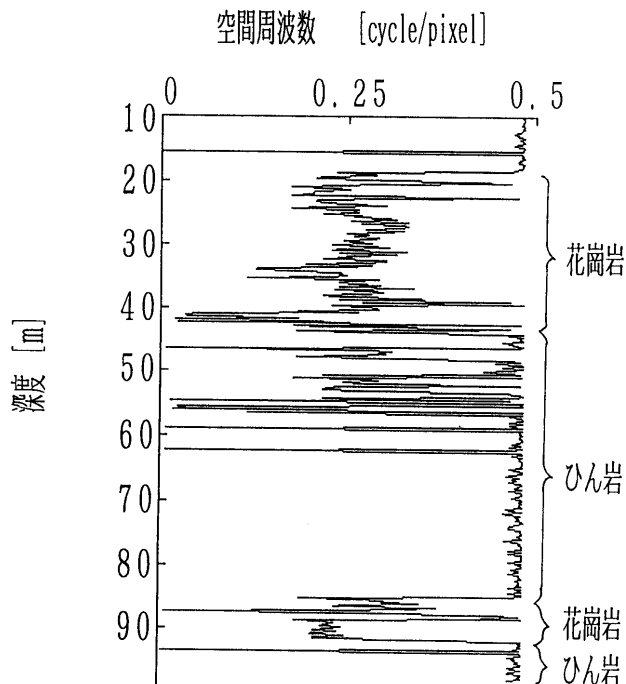
写真-3 深度8726 cm 付近の孔壁映像

層である。

(4) 亀裂の存在が最大値周波数 f_m に影響する反面、大きな変動は亀裂の存在を示すことも理解される。

図-6 は、深度10~100 m における深度と最大値周波数 f_m の軌跡を示す図であり、縦軸に深度、横軸に空間周波数、右側にコアサンプルより判定した岩石名を示した。この図において、花崗岩の f_m は、 0.25 ± 0.1 (c/p) の範囲であり、ひん岩は約0.48(c/p) が得られた。写真-3 は深度87.2~87.4 m の孔壁映像であり、87.3 m 付近に破碎帯があることを示しており、図においても同じ深度で最大値周波数 f_m は大きく変動している。このように、最大値周波数 f_m が大きく変動している部分は、地中に存在する亀裂や地盤の境界によるものと推定される。

以上の結果、連続展開映像を2次元高速フーリエ変換により空間周波数解析を行い、得られた結果よりスペクトルの分布曲線が最大値を示す空間周波数を求めると、最大値周波数 f_m の深度方向に対する軌跡より、地盤を構成する岩種名、地盤境界、破碎帯の存在を推定しうることが明らかになった。最大値周波数 f_m と岩種名の

図-6 深度に対する最大値周波数 f_m の軌跡

関係は、蓄積されたデータが不十分なので、現時点では明確な相関関係は示し得ないが、有力な現地地盤調査の手法であると考えられる。BHTV システムにより得られる映像データは膨大になるので、本手法により概略の解析調査を実施し、この結果をもとに、熟練した技術者による調査を行ない、総合的な判断が可能となると思われる。

岩種は鉱物粒子の組成等を含めて判定される。映像上で鉱物粒子の組成は判別不可能であるが、スペクトラムにより直径66 mm のボーリング孔壁上で0.4 mm 以上の粒径を持つ粒子の粒径分布を求めため、鉱物粒子の外観に関する情報も含まれている。また、風化作用による岩石の変色は、空間周波数解析に影響されない特徴がある⁴⁾。

5. 結 論

4種類の岩種について各々4個の試料を用いて、BHTV 手法を用いた映像解析により、岩種推定法を実施した結果次のような結論が得られた。

(1) 映像化された岩石の紋様を空間周波数に置換し、2次元周波数解析を実施して得られる空間周波数スペクトルは、4種類の標本岩石についていずれも異なった形状を示すが、0.01(c/p) 以下の周波数では差が認められない。

(2) 岩石の空間周波数スペクトルは4種類とも、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の3色については形状がよく似ており、色について空間周波数領域での特徴はみられなかった。

(3) 空間周波数スペクトルの分布曲線の特徴は、その曲線の最大値を示す空間周波数 (最大値周波数 f_m) で表しうる。

(4) 現地で得られた連続展開映像の最大値周波数 f_m の深度に対する軌跡は、岩石の種類と f_m との間に強い相関が認められ、破碎帯や地盤境界では、最大値周波数 f_m の値は大きく変動する。

(5) 以上の結果、最大値周波数の軌跡から地盤を構成している岩種、破碎帯、地盤境界を推定しうる。

参 考 文 献

- 1) 榎戸源則・坂田文男・杉山一・石井弘充 (1994): ポアホールテレビ映像からの孔壁不連続面の一抽出法, 「土質工学会論文報告集」, Vol 34, No. 4, pp. 135~140.
- 2) 坂田文男・榎戸源則・杉山一・石井弘充 (1994): ポアホールテレビ映像の画像解析による岩種推定法, 「土木学会第49回年次学術講演会概要集」第6部 pp. 22~23.
- 3) 吹抜敏彦 (1981): 画像のデジタル信号処理, 「日刊工業新聞社」 pp. 7~11.
- 4) 竹内他 (1994): 岩石の色彩の数値化と地質工学への利用, 「第9回岩の力学国内シンポジウム」, pp. 527~532.