

まさ土地盤の表層の分光反射特性

Spectral Reflectance Characteristics of
Top Soil of Decomposed Granite Soil Ground

網千寿夫* (Hisao Aboshi)

小堀慈久** (Shigehisa Kobori)

キーワードズ：まさ土／リモートセンシング／分光反射率／地盤層厚／地温／含水比／密度
(IGC:C2/D8)

1. まえがき

瀬戸内海沿岸の一带に広がる風化花崗岩、いわゆる、まさ土は降雨によって地盤表層部の強度が低下し、毎年のように各地で斜面崩壊を引き起こしている。この斜面災害のメカニズムの解明と発生予測を行うため、多方面で斜面災害多発地帯の地質や代表的災害斜面の土質調査、地形調査、サンプリングによる室内土質試験、現場計測等が詳細に行われてかなり成果を上げて来た。他方マクロ的検討として地域の空中写真を判読し、地形、地質、植生等の分類を行い、総合的判断により得られる地盤の特性から崩壊予知のための研究が行われている。

一方、ここ数年、人工衛星、航空機を利用した、リモートセンシング (Remote Sensing 以下R/Sと略記する。) 技術は農学、土地利用計画、海洋工学、気象学等多くの分野で成果を上げている。R/Sは物体の電磁波の反射または放射特性の固有性に着目して、電磁波に関する情報を収集し、物体の識別やそれが置かれている環境条件を判読しようとする手法である¹⁾。これにより得られるマルチスペクトルスキャナ (Multi Spectral Scanner 以下MSSと略記する) データと対比するための地上の現位置における電磁波測定は通常、分光光度計による分光反射率測定及び赤外放射温度計による地物表面温度測定がある。

本研究はこのような電磁波特性を利用し、地盤の分光反射率及び地表面温度によるまさ土地盤の特性調査のための基礎的研究である。具体的には自然及び人工のまさ土地盤の地表面状態、まさ土層厚、地中温度変化等、地中の状態が及ぼす分光特性への影響を検討した。

2. 現地計測地域

分光反射率の現地計測地域は広島県呉市の休山周辺である。この地域は従来からまさ土の斜面災害の多発地で特に昭和42年7月、昭和47年7月においてかつてない集中豪雨に襲われ各所で土石流や斜面崩壊が発生し、尊い人命と多くの構築物を失った。その後も斜面災害の報告は多い。図-1に示す測定地域の呉市休山の太入地区は、地形的には休山山頂 (標高501m)、日佐護山 (418m)、三津峰山 (380m) 等の山々に囲まれている又中央部の尾峰はこの地区を二分し斜面勾配、植生、土地利用等の分布に相違を見せている。地質的には中世代白亜紀に貫入したと思われる花崗岩体が広く分布している。この岩体は広島花崗岩複合体と呼ばれ、一部に閃緑岩を除けば全体としては黒雲母花崗岩を主体とする低盤を形成している。この太入地区の特徴は急峻な斜面勾配と、もろい風化花崗岩地帯で代表される²⁾。

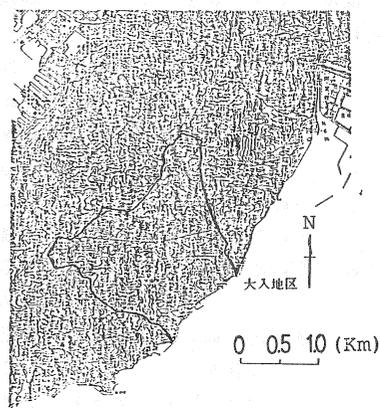


図-1 呉市休山周辺 (広島県)

* 広島大学工学部第四類 (建設系) 教授 , ** 呉工業高等専門学校 土木工学科 助教授

まさ土自然地盤の実測地点は呉高専の学内1ヶ所、呉市休山周辺で3ヶ所で行った。学内地盤厚さは3 cm、5 cm、10 cm、の比較的、浅い層厚で行った。山腹での地盤厚さは休山（Ⅰ）地点で6 cm、23 cm、休山（Ⅱ）で5 cm、10 cm、休山（Ⅲ）で51 cm、57 cmの3ヶ所の各層厚である。尚、休山現地での表層厚さ調査は簡易貫入試験機（コーンペネトロメーター）により斜面あるいは斜面上部における貫入深さとその抵抗値を計った。鉛直方向に測定した貫入深さは斜面勾配により補正し、斜面に沿った実際の厚さを求めた。調査は標高200～420 m付近まで90余ヶ所で行い、表層部の厚さはこの平均コーン貫入抵抗値 $q_c = 5.39 \text{ Kg/cm}^2$ をもって基準として測定した。

3. 分光反射及び放射量の測定

地上観測の分光反射量及び放射量は分光光度計及び赤外放射温度計により測定した分光反射量は白色基準板の分光反射量 $V_{0\lambda}$ と測定物体の分光反射量 V_λ から分光反射量 R_λ （%）を式（1）より求める。

$$R_\lambda = 10 \frac{V_{0\lambda} - V_\lambda}{V_{0\lambda}} \quad (1)$$

分光反射量の測定値に影響を与える要因としては、1）太陽の高度、日照時刻 2）季節の変化、気象状況における気温、風力、雲の分布、大気汚濁 3）被測定物の色相、色調、乾湿、熱伝導率 4）測定機器の性能、測定高さ等が考えられる³⁾。次に赤外放射温度計は原理的には基準黒体の温度（室温）を T_a （℃）とすると、検出器出力として $T - T_a$ （℃）に相当する電圧が得られる。このため T_a を白金センサーにより測定し温度と赤外エネルギー相当に変換した T_a を検出力に加算し式（2）

$$T = (T - T_a) + T_a \quad (2)$$

より被測定物体の温度 T （℃）が得られる⁴⁾。測定は呉高専グラウンドの試験地盤及び休山周辺の斜面で行った。測定時刻は午前7：00～午後7：00頃迄、期間は4ヶ年（'83.9～'84.2、'84.7～'85.1、'85.9～'86.2、及び'86.9～'87.2）である。測定は1.5 mの三脚より太陽を背にし約45°下向きで行った。使用波長は0.40 μm 、0.45 μm 、0.50 μm 、0.55 μm 、0.60 μm 、0.65 μm 、0.70 μm 、0.75 μm 、0.85 μm 、0.95 μm 、1.05 μm である。

4. 結果と考察

(1) まさ土の含水比と分光特性

今回の一連の試験に使用したまさ土試料は瀬戸内海沿岸部の呉市周辺より得たもので、粒径加積曲線を図-2に示す。表-1にまさ土の諸性質を示す。土の含水比による分光特性は土の種類、色彩、地表面温度によって異なるが、まさ土の場合、

表-1 まさ土試料の諸量

比重 G_s	均等係数 U_c	最大粒径mm	60%粒径mm	30%粒径mm
2.63	15.38	19.1	2.0	0.55

比較的に規則性のある結果が得られた。図-3は含水比3.83%、6.64%、9.52%のまさ土試料の分光測定結果である。含水比3.83%が最も高い反射率を示し0.75 μm で40%、1.05 μm で50%の値となっている。次に含水比6.64%が7～8%低い反射率となり、同様の変化率で続いている。含水比9.52%は0.70 μm で20%、1.05 μm で40%の反射率となり、含水比が高いほど低い反射率となっている。図-4は含水比12.73%、14.64%、17.45%の場合である。含水比12.73%が最も高い反射率を示し、0.75 μm で30%、1.05 μm で45%の値となっている。含水比14.64%は12.73%の場

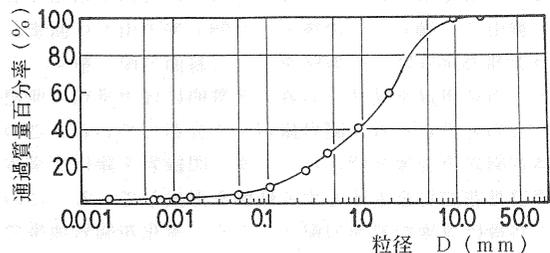


図-2 まさ土試料の粒径加積曲線

合より約4%低い反射率となっている。含水比17.45%は0.65 μ mで20%、1.05 μ mで35%の反射率を示している。しかし、0.75 μ mの値が急変しているのは、測定時の太陽光に雲等による影響が入ったためである。図-5は含水比18.28%、22.88%の場合である。18.28%の含水比の反射率は0.50 μ mで20%、0.95 μ mで40%の値を示しているまた1.05 μ mで約5%の差異が見られるが、高含水比、特に20%前後の含水比では反射率に相違がないことがわかる。温度の関係から言えば、これは地盤に水分が存在と、地表の温度が上昇せず、むしろ気化熱による地表面温度の低下をきたし、反射率が下降したのと考えられる。又、土の色調から言えば、一般に乾燥している土の表面は明るく、まさ土の場合黄色～黄褐色で水分を含むと茶褐色となりやや明度が落ちる⁵⁾。まさ土含水比の分光測定の限界値は、20%前後である。すなわち、図-5に見られるように、含水比が20%近くになると、反射率が上昇しはじめたり、値にばらつきが出て不安定になり、区別がつきにくくなる、これはまさ土と水が過飽和状態となり、まさ土よりも、むしろ水そのものの反射率を示すためである。又、他の土、たとえば粘性土の場合はこれまでの研究では、少量の含水比で表面の色相が灰黒色となり、10%程度から低い反射率となりそれ以上の含水比ではほぼ同様の低反射率を示す。今後、10%以下の含水状態の反射率をとり、その限界の含水比を知る必要がある。図-6にまさ土含水比とその時の地表面温度の関係を示す。含水比が高いと地表面温度は低くなり逆比例となっている⁶⁾。

(2) まさ土の表層厚さと分光特性

まさ土の表層厚さを測定する必要性を2、3述べる、先ず1番目は、まさ土地盤での斜面崩壊型式として表層崩壊型が圧倒的に多い事である。まさ土の強度常数である内部摩擦角や粘着力の大きさや給排水の状況、降雨強度等により多少異なるが、一般的には表層崩壊型と言える。次に斜面崩壊の規模は表層厚さと崩壊高(斜面高)、及び崩壊幅から得られる崩壊土砂量による、又、崩壊が発生する斜面の表

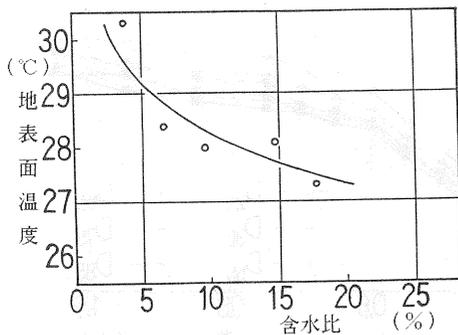


図-6 含水比と地表面温度の関係

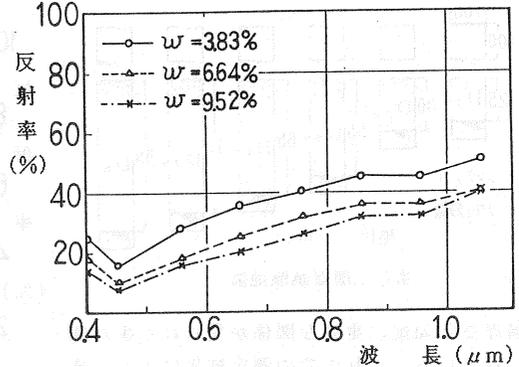


図-3 含水比と反射率の関係 (w=3.83~9.52%)

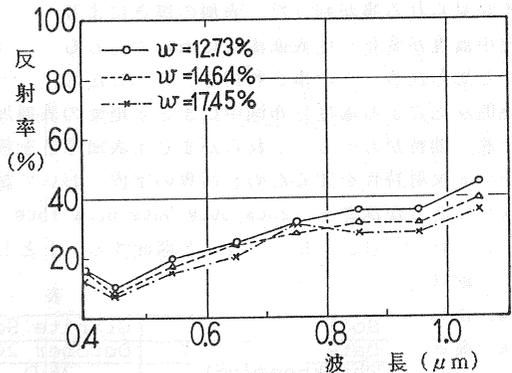


図-4 含水比と反射率の関係 (w=12.73 ~ 17.45%)

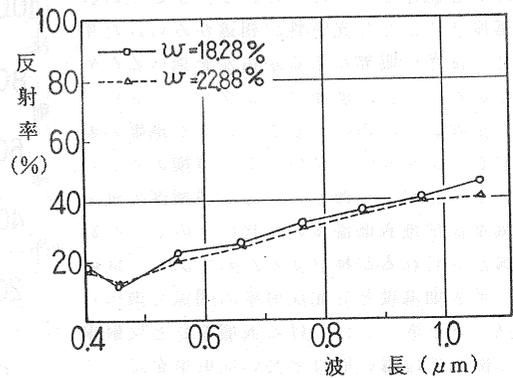


図-5 含水比と反射率の関係 (w=18.28 ~ 22.88%)

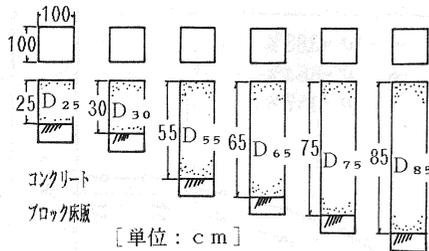


図-7 まさ土層厚試験地盤

層厚さと勾配に重要な関係が見られる事が知られている。これまでの測定結果により、まさ土の分光特性として表層厚さにおける有意差が見られる事が判った。表層の厚さにより地中温度が変化し地表面温度に表れてくるものと思われる。この事を利用し、R/S法の

熱的応答による温度分布図中にまさ土地盤の表層厚変化が得られれば広域なまさ土地域の表層厚分布の予測に期待がもてる。これらがまさ土表層厚さを検討する目的である。そこで表層厚さの異なる地盤での分光反射特性を知るため呉高専の学内において試験地盤を作成した。試験地盤は縦100 cm横100 cmは同じであるが深さを、25cm, 30cm, 55cm, 65cm, 75cm, 85cm, の6種類(以下、6種類の試験地盤をD₂₅、D₃₀、D₅₅、D₆₅、D₇₅、D₈₅と略記する。)とした。又、各試験地盤の底面にはコンクリートブロック(縦10

cm、横10 cm、高さ40cmの角柱)を横に並べ敷きつめた。試験地盤を図-7に示す。6種類の

深さを設定したのは、これまでまさ土の表層厚さにより分光特性に相違がみられた事、又、深さに限界があるか否かを調べるためである。一方、底面にコンクリートブロックを埋設したのは、まさ土の自然地盤の基岩をコンクリートブロックに置換えることにより基岩上を覆う、まさ土表層部の地中温度及び地表面温度の変化にどのような影響が見られるか検討するためである。同時に地表面温度と分光反射率の関係も調べる。図-8と表-2における表層厚さと反射率の関係では薄い層ほど高い反射率を示している。波長帯域0.75 μmにおける反射率はD₂₅で60%、D₃₀で56%、D₅₅で

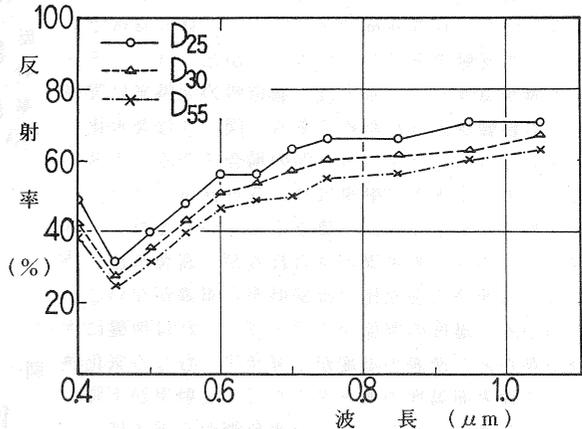


図-8 表層厚さと反射率の関係 (D₂₅~D₅₅)

表-2 表層厚さと温度変化

Soil	Granite Soil			Granite Soil			Granite Soil		
Date	October 20, 1986			October 20, 1986			October 20, 1986		
Thickness (cm)	25-D ₂₅			30-D ₃₀			55-D ₅₅		
Time	11:00	11:20	13:00	11:00	11:20	13:00	11:00	11:20	13:00
Temperature (°C)	18.0	18.0	19.0	18.0	18.0	19.0	18.0	18.0	19.0
Surface Temp. (°C)	25.0	27.0	30.0	24.0	26.0	29.0	23.0	23.0	27.0
Soil	Granite Soil			Granite Soil			Granite Soil		
Date	October 20, 1986			October 20, 1986			October 20, 1986		
Thickness (cm)	65-D ₆₅			75-D ₇₅			85-D ₈₅		
Time	11:00	11:20	13:00	11:00	11:20	13:00	11:00	11:20	13:00
Temperature (°C)	18.0	18.0	19.0	18.0	18.0	19.0	18.0	18.0	19.0
Surface Temp. (°C)	23.0	25.0	29.0	23.0	24.0	27.0	24.0	25.0	29.0

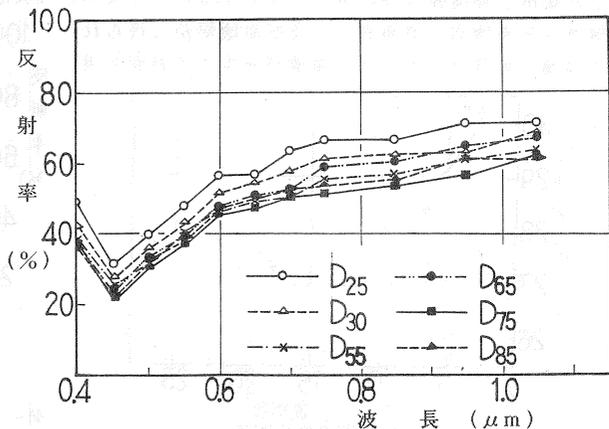


図-9 表層厚さと反射率の関係 (D₂₅~D₈₅)

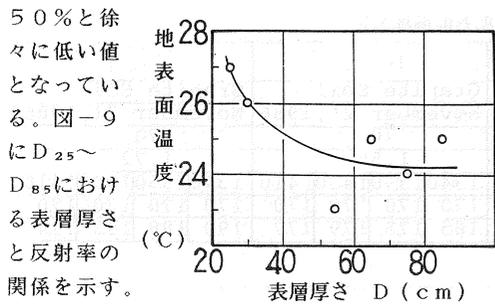


図-10 表層厚さと地表面温度の関係の反射率は

50%と徐々に低い値となっている。図-9に D_{25} ～ D_{85} における表層厚さと反射率の関係を示す。 D_{65} 、 D_{75} の反射率は再び上昇し、56%の値を示し、 D_{30} と同じ値となっている。表-2の11時20分の地表面温度と表層厚さの関係は図-10のようになり、両者の間に相関が見られる。すなわち、薄い層厚では高い地表面温度を示し、厚い層になるに従って地表面温度が減少している。これと関連して反射率も不安定となり D_{25} ～ D_{55} の反射率の各値は厚さに従い低くなっているが D_{65} 以上の厚さにおいては相関性がなくなっている。次に含水比と表層厚さとの関係を図-11と図-12で見ると表面含水比は薄い層ほど低く、厚い層は高い。 D_{55} までその傾向が見られるが、 D_{65} 以降になると表面含水比が再び低くなり D_{75} ～ D_{85} では2.4%となる。地中含水比についてと見る D_{25} ～ D_{65} の4種類は深さとともに含水比は増加し最大で約8%まで上昇しその差は D_{25} の3%から D_{55} の4%までと大きい。しかし、 D_{75} と D_{85} の2種類については最大で約6.5%の含水比で深さ方向についても大きな変化が見られない。6種類のいずれの層厚においても10cm深さ付近に含水比の変曲点が見られ増加率が減少し、含水比の勾配が急になっている。

又、基礎岩盤に近づくとその量は1%以内であるが若干、含水比が増加している。これらの結果を考察すると、まず表層厚さと反射率では地表面温度による影響が大きく出ていると思われる。 D_{25} ～ D_{55} までの層厚で、薄い表層をもつ地盤の地表面温度は高く、厚い表層 D_{55} の温度は低くなる。この事から反射率が大きくなるのは地表面温度が高くなるためである事がわかる。そして地表面温度は地表面含水比と関係があると思われる。地表面含水比を見ると薄い表層厚さの D_{25} が最も低く、 D_{55} まで徐々に増加している。 D_{65} ～ D_{85} になると再び減少し低い地表面含水比となる。この地表面の含水状態が地表面温度に影響を与えていると思われる。又、一方 D_{25} ～ D_{85} のような深さが異なっている地盤に一定の降雨を受けた時、透水状況が同じで底面部が透水不良な地盤である場合、地表から層底面までの鉛直距離が浸透距離となる。透水不良地盤（基岩）までの浸透距離が短かく薄い層厚の D_{25} ～ D_{55} の地盤では深くなるに従って含水比は高くなり、鉛直距離が長いので、 D_{65} ～ D_{85} の地盤では含水比は低く、又変化の少ない値となったものと考えられる。

(3) まさ土の密度と分光特性

試験地盤の形、及び底面部のコンクリートブロック埋設等は先の層厚試験地盤と同様であるが深さを70cmと厚くした。3ヶ所の地盤は各々締め固め方を変化させ、一層25回、三層35回、五層55回

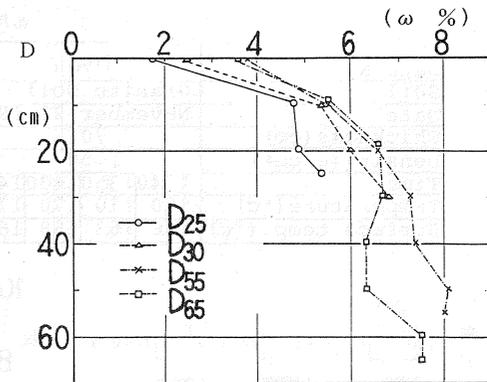


図-11 表層厚さと含水比の関係 (D_{25} ～ D_{65})

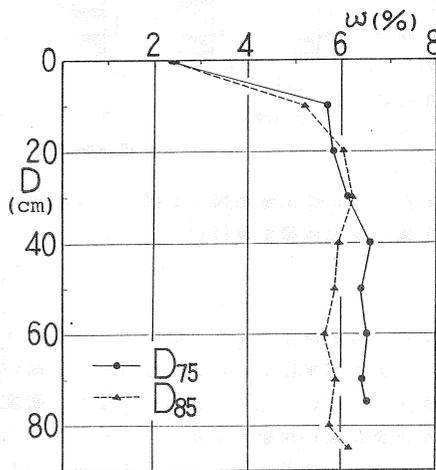


図-12 層厚と含水比の関係 (D_{75} ～ D_{85})

(以下、

表-3 密度と地表面温度変化

3種類
の試験
地盤を
D₇₀₋₁、
D₇₀₋₂、
D₇₀₋₃

Data No.	D ₇₀₋₁				D ₇₀₋₂				D ₇₀₋₃			
Soil	Granite Soil											
Date	November 21, 1986											
Thickness (cm)	70											
Density (g/cm ³)	1.50				1.55				1.72			
Time	13:40	13:50	14:00	14:10	13:40	13:50	14:00	14:10	13:40	13:50	14:00	14:10
Temperature (°C)	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
Surface temp. (°C)	16.6	16.3	15.8	16.4	18.5	17.5	17.9	17.7	19.0	18.8	19.3	19.4

と略記

する)と
した。締
め固め方
法は人の
足で跳び
上がるよ
うに踏み
固めた。
荷重は約
0.3
Kgf/cmと

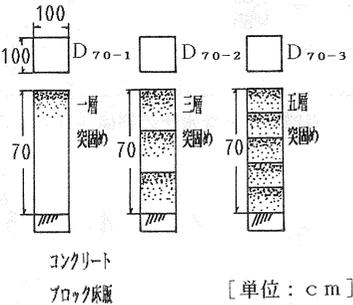


図-13 まさ土の密度試験地盤

思われる。密度試験地盤図を図-13に示す。

各地盤の単位体積重量はD₇₀₋₁で $\gamma_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$ 、D₇₀₋₂で $\gamma_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$ 、D₇₀₋₃で $\gamma_d = 1.72 \text{ g/cm}^3$ である。分光測定の結果を図-14、表-3に示す。分光反射率は γ_d の大きなD₇₀₋₃が高い反射率を示し、次にD₇₀₋₂、D₇₀₋₁となり、密度の大きな地盤が高い反射率を示している。0.4~0.5 μm の波長帯域ではその差が少ないが0.55 μm から各地盤の反射率に大きな差が出ている。密度と含水比の関係を図-15に示す。地表面の含水比はD₇₀₋₁で $\omega = 6.9\%$ 、D₇₀₋₂で $\omega = 8.0\%$ 、D₇₀₋₃で $\omega = 8.6\%$ となり γ_d が高くなると含水比も高くなっている。深さ方向の含水比は10cm深さまで増加しているが、それ以後の50cm深さまでいずれも変化はなく底面に近い60cm深さで若干増加し9%台になり、70cm深さで再び減少している。全体的に大きな変化はないがD₇₀₋₃の γ_d の大きな地盤ではわずかに高め値となっている。密度と地表面温度との関係ではD₇₀₋₁で16.3°C、D₇₀₋₂で17.5°C、D₇₀₋₃で18.8°Cとなり密度との相関が見られ密度が高いと地表面温度も上昇している。これらは土の締め固めにより地中の熱量が増加したためと考えられる。すなわち地盤が締め固められたことにより間隙比が小さくなり地中の空気量が減少

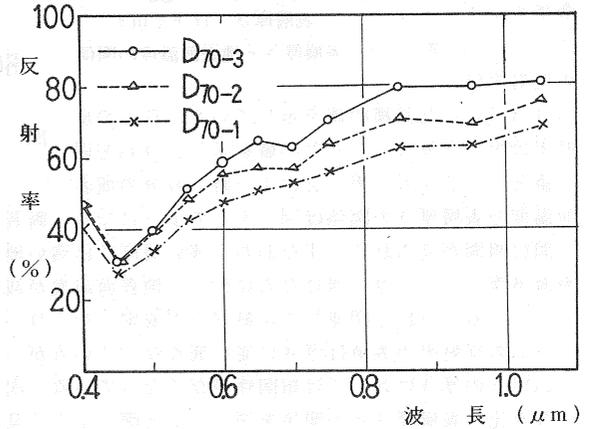


図-14 密度と反射率の関係

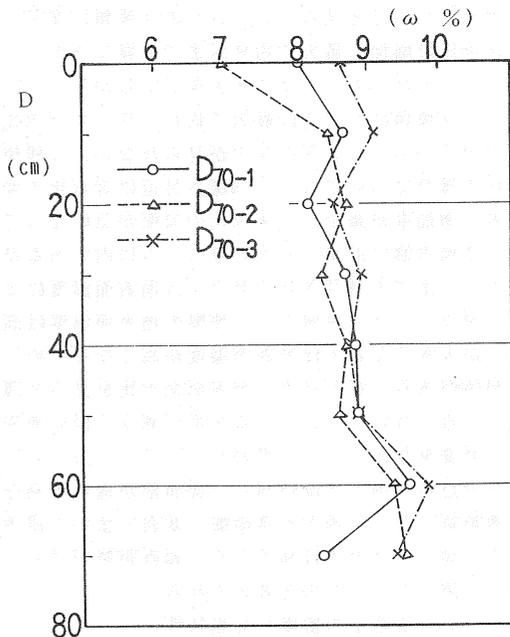
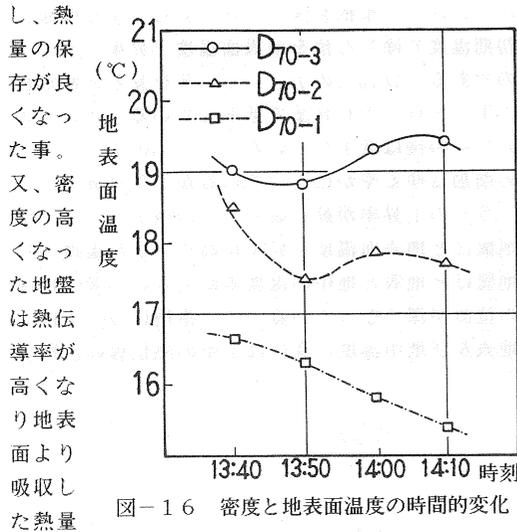


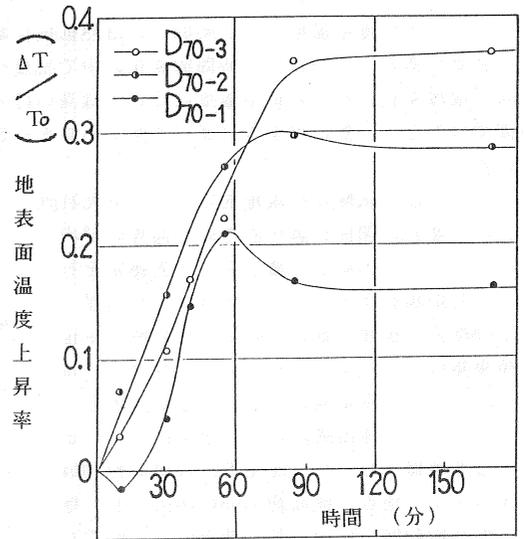
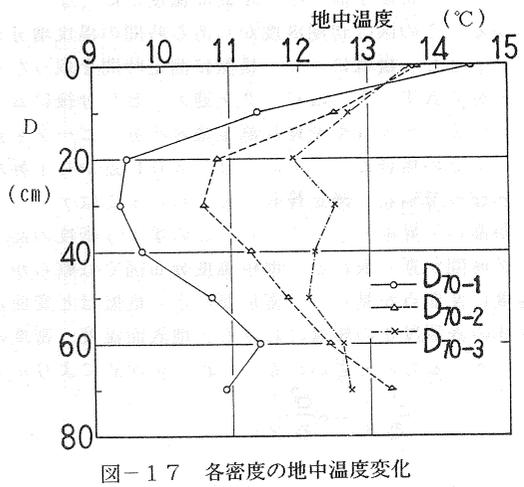
図-15 各密度の深さと含水比の関係



を地表面下の地盤に伝える。これらの事柄により土中の熱量が増加したためと考えられる。又、地表面温度が時間的にどのように変わるかを見たものが図-16である。D70-1では時間とともに地表面温度は下降し、0.5時間の間に1.0℃以上の温度降下が見られる。D70-2も13:40に18.5℃をピークに下降し、約1.0℃の減少が見られる。D70-3においては13:50に若干下降しているがその後上昇し、約1.5℃地表面温度が高くなりD70-3は正の勾配となっている。

次に密度と地中温度について測定した結果を図-17に示す。方法は赤外放射温度計により試験地盤を径10cmで垂直方向に掘削し各深さ毎に放射温度を順次測定していった。D70-1では深さとともに温度が下降し30cm深さでピークとなり、40cm深さより地中温度が上昇し、60cm深さまで続く。D70-2の地表面温度は13.8℃で30cmの地中温度は10.6℃となる。その後、上昇に転じ13.5℃まで上り、ほぼ地表面温度にまで戻る。D70-3の地表面温度は13.6℃で最も低い地中温度を見ると20cm深さで12℃まで下がり70cm深さでは12.8℃まで上昇している。これらの地盤の中で地中温度の変化が最も少なくなっている。したがって密度の小さいゆるい地盤ほど地中の温度差が大きく地表面温度と地中温度の差が5℃となっている。密度の大きな締め固められた地盤では地表、地中の温度差は小さく1.7℃となっている。又、地中温度の変曲点がゆるい地盤ほど深く30~40cm深さで見られ、締まった地盤では20cm深さに変曲点が見られる。これらの事から密度と反射率、密度と地中温度の間に高い相関が見られる。

ここで若干の検討を行う。高密度の地盤面の含水比は高くなっている。これは密度が高くなったため地盤の透水係数が低くなり、保水性が高められ含水比が高くなったと考えられる。そして、この実験では含水比が高くなると、地表面温度が高くなり反射率が高くなっている。これは、含水比と地表面温度とのこれまでの関係と相違が見られるが地盤密度の影響により地中の熱伝導の状況も変化したものと思わ



れる。又、密度が高いほど地表面温度が高くなっている。これらの事柄を図-18で見るとより明確にわかる。この図は初期温度からある時間の温度増分を初期温度で除した値を地表面温度上昇率 ($\Delta T/T_0$) とし、縦軸にとり、横軸に測定時間を取ったものである。D70-1の $r_a = 1.5$ を見ると測定後55分で $\Delta T/T_0$ はピークを迎え、85分後に $\Delta T/T_0 = 0.168$ まで低下している。D70-2の $r_a = 1.55$ はやや遅れ測定後85分でピークを迎えてその後は低下している。D70-3の $r_a = 1.72$ の場合 $\Delta T/T_0 = 0.36$ 付近から上昇率の増加はゆるやかになっているが170分でピークとなっている。測定後60分くらいまでは $r_a = 1.55$ の上昇率が最も高く、その後 $r_a = 1.72$ が高い上昇率となっている。この事より密度の高い地盤ほど地表面温度上昇率が高く、また温度のピーク時間が遅く表れる。地中温度分布図では軟らかい地盤ほど地表と地中の温度差が大きい。又、地中温度に変曲点が見られ、密度が小さい地盤ほど変曲点の位置が深くなっている。この事柄については、前述の表層厚さの相違における、地表面温度、密度の地表及び地中温度の変化は土中の熱伝導の法則に従っているものと思われる。これらを次式により示す、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \tag{3}$$

$$\kappa = \frac{K}{c \cdot \rho} \tag{4}$$

ここで、Tは地中温度、tは時間、 κ は熱拡散係数、Zは地中深さ、Kは熱伝導率、cは比熱、 ρ は土の密度である。この式より時間の変化の中で密度や比熱の相違により地中温度が影響を受ける事がわかる。層厚変化における地中温度については深いほど温度が低くなるが地表からある一定の熱量を一定時間受けたとき、熱伝導率等に従って熱エネルギーを吸収し、地中温度が時間とともに上昇すると考えられる。

(4) 盛土試験及び現地測定による分光特性
 表層と基岩の関係を調べるため呉高専の学内でコンクリート床版上に盛土をし分光測定を行った。各面積を 1 m^2 とし、3cm厚、5cm厚、10cm厚の3種類を敷きつめた。その時の単位体積重量は $r_a = 1.46 \sim 1.48 \text{ g/cm}^3$ あった。一方、現地測定については前述のとうりであるが呉市休山周辺の大入地区にある、まさ土自然地盤で行った。測定地点は標高約300mの休山(I)地点、標高約350mの休山(II)地点、標高約420mの休山(III)地点の3ヶ所である。表層厚さは簡易貫入試験機により測定し、休山(I)地点は6cm厚と23cm厚、休山(II)地点は5cm厚と10cm厚、休山(III)地点は

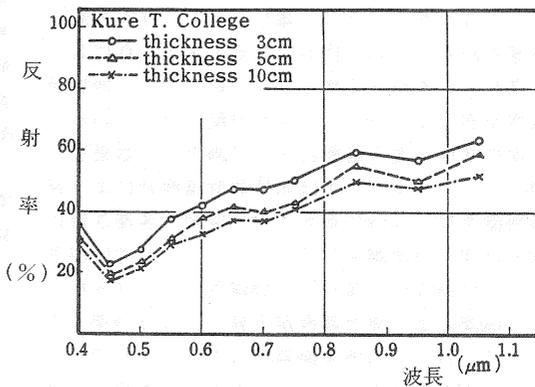


図-19 盛土層厚と反射率の関係

表-4 現地の表層厚さと地表面温度

Data No.	No. 1			No. 2		No. 3		No. 4	
Soil	Granite Soil (Kure T.C.)			Granite Soil (Mt. YASUMI, I)		Granite Soil (Mt. YASUMI, II)		Granite Soil (Mt. YASUMI, III)	
Date	December 4, 1984			November 30, 1984		January 16, 1985		October 18, 1985	
Time	12:25			11:00		12:00		13:40	
Temperature (°c)	16.0			10.9		7.0		20.5	
Thickness (cm)	3	5	10	6	23	5	10	51	57
Surface Temp. (°c)	28	30	28	22	15	27	27	30	31

(Kure T.C.; Kure Technical College)

5.1cm厚と5.7cm厚を各々得た。分光反射率の測定は1984年11月～1985年10月の間の晴天日に実施した。呉高専で行った盛土試験の結果を図-19と表-4に示す。表-4のNo.1は1984年12月4日12:25に測定し、気温は16℃であった。3種類の盛土表面温度は3cm厚で28℃、5cm厚で30℃、10cm厚で28℃であった。反率は3cm厚が最も高い値となり、5cm厚、10cm厚の順であった。なお、コンクリート床版温度は27℃であった。図-20と表-4のNo.2は休山(I)6cm厚と23cm厚の反射率である。地表面温度は各々22℃、15℃で反射率は6cm厚が高い値である。標高300m地点であるため気温は11:00で10.9℃と低いが反射率に差が出ている。図-21と表-4のNo.3は休山(II)5cm厚と10cm厚の値で地表面温度はいずれも27℃であ

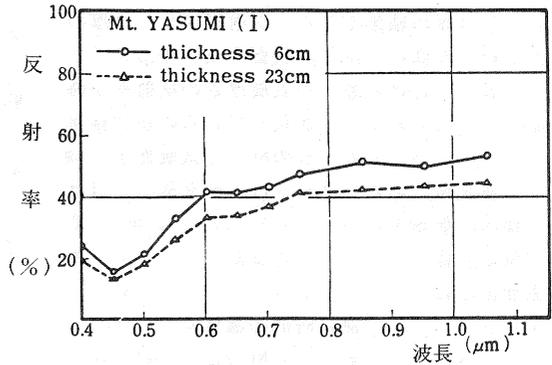


図-20 表層厚さと反射率の関係(休山I)

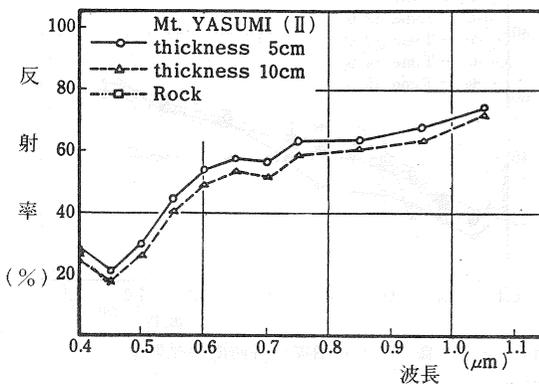


図-21 表層厚さと反射率の関係(休山II)

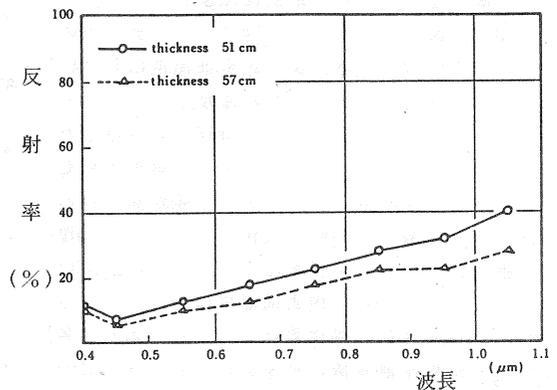


図-22 表層厚さと反射率の関係(休山III)

表-5 表層厚さと地表面温度の時間的变化

Data No.	No.1					No.2					No.3				
Soil	Granite Soil (Kure T.C.)					Granite Soil (Kure T.C.)					Granite Soil (Kure T.C.)				
Date	January 9, 1985					January 9, 1985					January 9, 1985				
Thickness (cm)	3					5					10				
Time	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Temperature (°C)	12.1	11.9	12.2	12.0	13.4	12.1	11.9	12.2	12.0	13.4	12.1	11.9	12.2	12.0	13.4
Surface Temp. (°C)	20.6	22.2	23.9	21.9	20.1	20.3	22.4	24.3	23.4	20.9	20.1	22.1	26.0	23.4	22.1
Data No.	No.4					No.5					No.6				
Soil	Granite Soil (Mt. YASUMI, I)					Granite Soil (Mt. YASUMI, I)					Granite Soil (Mt. YASUMI, II)				
Date	November 30, 1984					November 30, 1984					January 16, 1985				
Thickness (cm)	6					23					5				
Time	11:00	12:00	13:00	13:30	11:00	12:00	13:00	13:30	12:00	13:00	14:00	15:00			
Temperature (°C)	10.9	10.9	11.8	12.5	10.9	10.9	11.8	12.5	7.0	7.8	7.9	5.9			
Surface Temp. (°C)	21.8	26.5	25.4	26.3	16.0	22.4	23.0	24.5	26.4	27.4	27.2	25.2			
Data No.	No.7					No.8					No.9				
Soil	Granite Soil (Mt. YASUMI, II)					Granite Soil (Mt. YASUMI, III)					Granite Soil (Mt. YASUMI, III)				
Date	January 16, 1985					October 18, 1985					October 18, 1985				
Thickness (cm)	10					51					57				
Time	12:00	13:00	14:00	15:00	11:50	12:30	13:00	13:40	11:50	12:30	13:00	13:40			
Temperature (°C)	7.0	7.8	7.9	5.9	18.5	19.0	20.0	20.5	18.5	19.0	20.0	20.5			
Surface Temp. (°C)	27.4	28.6	27.9	24.5	29.2	33.1	32.6	30.7	29.1	33.8	33.3	31.5			

った。反射率では5cm厚が若干高くなっている。図-22と表-4のNo.4は休山(Ⅲ)5.1cm厚と5.7cm厚の結果である。反射率は5.1cm厚の方が約5%高い。次に試験盛土及び休山(Ⅰ)~(Ⅲ)における各々の表層厚さの反射率が時間とともにどのように変化しているのかを検討した。図-23と表-5のNo.1は試験盛土3cm厚の測定値である。グラフは一部を除いてほぼ同様の反射率を示している。11:00~15:00までの気温差は1.5℃、平均気温12.3℃、地表面温度は13:00には23.9℃まで上昇し、平均21.7℃で測定時間の温度差3.8℃である。図-24と表-5のNo.2は5cm厚の場合で地表面温度の平均は22.3℃となり3cm厚より高くなっている。地表面温度差も4.0℃でやはり高くなっている。図-25と表-5のNo.3は10cm厚の測定値で地表面温度は13:00で12.26℃となり、平均温度22.7℃、温度差は5.9℃となり、3cm厚、5cm厚よりもさらに大きくなっている。又、反射率の値も高くなり、各時刻によって大きな差が見られる。図-26と表-5のNo.4は休山(Ⅰ)の6cm厚の測定値である。気温差は1.6で平均温度は11.5℃である。地表面温度は12:00で26.5℃、測定4回の温度差は4.7℃である。各時刻の反射率測定値に差が見られる。図-27と表-5のNo.5は23cm厚測定値では時間とともに地表面温度が上昇し、その温度差が8.5℃と高くなっている、それに対応し反射率が時刻とともに大きな値となっている。図-28と表-5のNo.6は休山(Ⅱ)の5cm厚の値である。12:00~15:00の平均気温は7.2℃でかなり低い地表面温度は13:00に27.4℃と高いが平均温度は26.6℃である。温度差は2.2℃と小さい。反射率にはいずれも差異がない。図-29と表-5のNo.7は休山(Ⅱ)の10cm厚の値である、15:00の反射率が1.05μmで100%近い値となり各波長での反射率が大きくなっている。地表面温度差が4.1℃と高く、

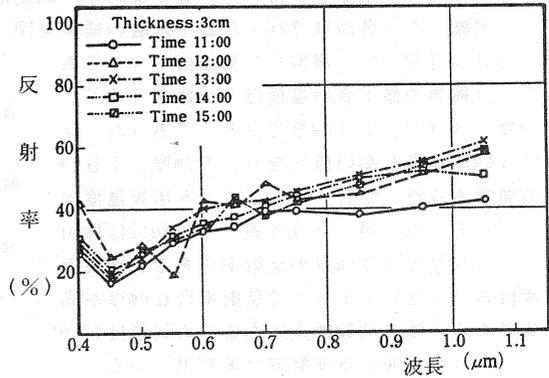


図-23 盛土3cm層厚、各時間の反射率

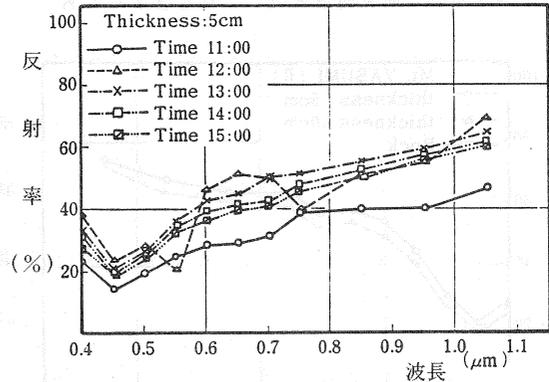


図-24 盛土5cm層厚、各時間の反射率

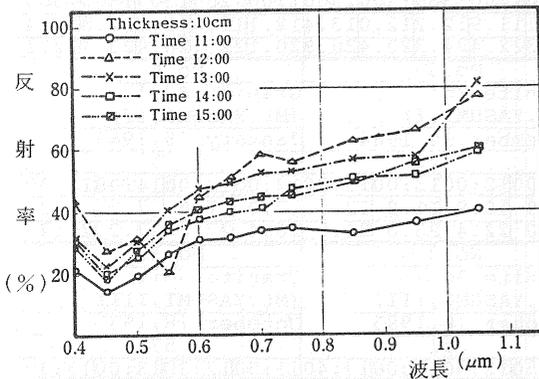


図-25 盛土10cm層厚、各時間の反射率

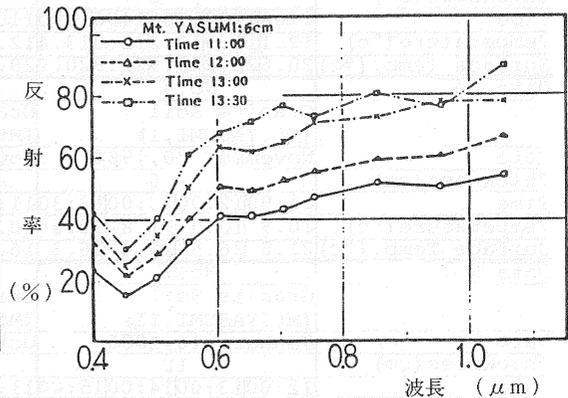


図-26 表層6cm厚、各時間の反射率(休山Ⅰ)

5 cm厚の2.2℃との差が大きく、それにより各時刻の反射率に差が生じたと思われる。図-30と表-5のNo.8は51 cm厚の時間的変化を示したものである。時間は11:50 ~13:40の間で地表面温度は29.2~33.1℃を示し温度差は3.9℃である。反射率は各時刻とも大きな差がなく4~5%差である。図-31と表-5のNo.9は休山(Ⅲ)の57 cm厚の時間的変化である。地表面温度は29.1~33.8℃で12:30が最も高い。温度差は4.7℃となっている。反射率は平均的に10%の差が見られる^{*)}。図-30と図-31を比較すると地表面温度差の大きな57 cm厚の方が反射率の差も大きくなっているのが判る。以上の事柄を検討すると盛土試験では地表面温度については3 cm厚が高く10 cm厚は若干低い、気温が上昇する13:00には10 cm厚の地表面温度が最も高くなっている。休山(Ⅰ)の6 cm厚と23 cm厚では測定初期には地表面温度差が大きく、6 cm厚で21.8℃、23 cm厚で16.0℃あり、温度差は5.8℃であったが、13:30では6 cm厚が26.3℃に対し23 cm厚は24.5℃となり、差が1.8℃と小さくなり厚い層の温度上昇率が大きい事がわかる。休山(Ⅱ)の5 cm厚、10 cm厚の場合、初期値となる測定時刻が12:00であったため地表、地中ともかなり上昇し、10 cm厚の方が地表面温度が高くなっている。13:00には温度

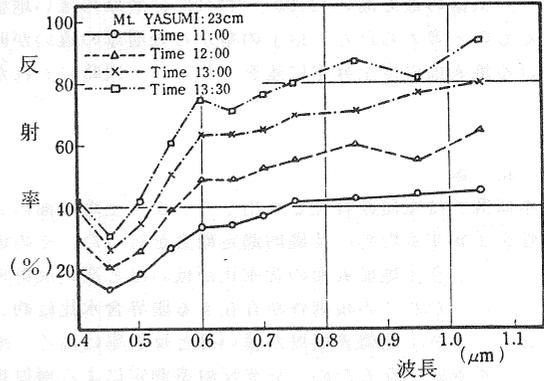


図-27 表層23 cm厚、各時間の反射率(休山Ⅰ)

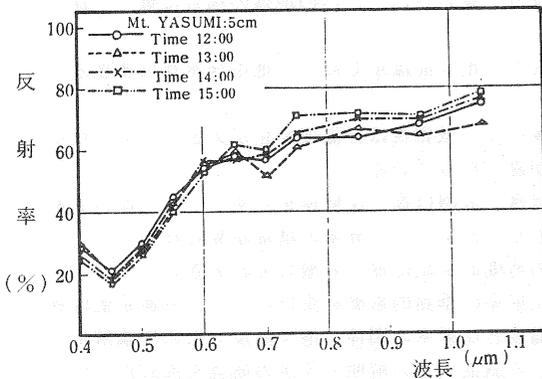


図-28 表層5 cm厚、各時間の反射率(休山Ⅱ)

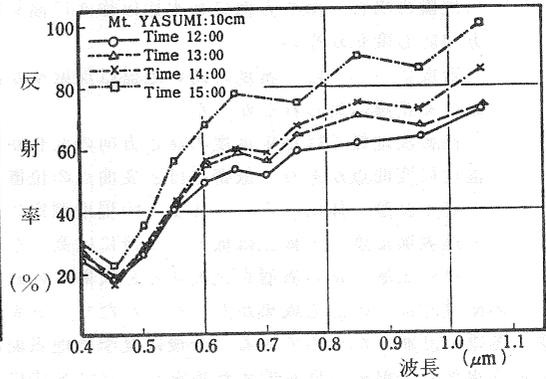


図-29 表層10 cm厚、各時間の反射率(休山Ⅱ)

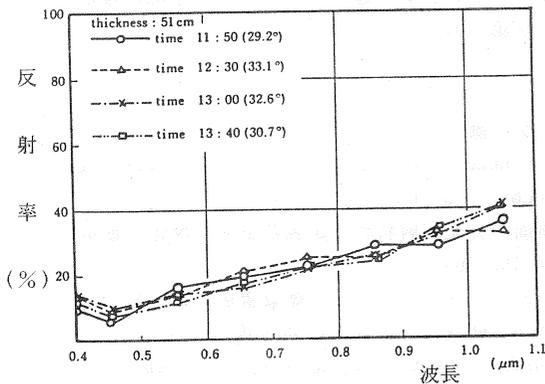


図-30 表層51 cm厚、各時間の反射率(休山Ⅲ)

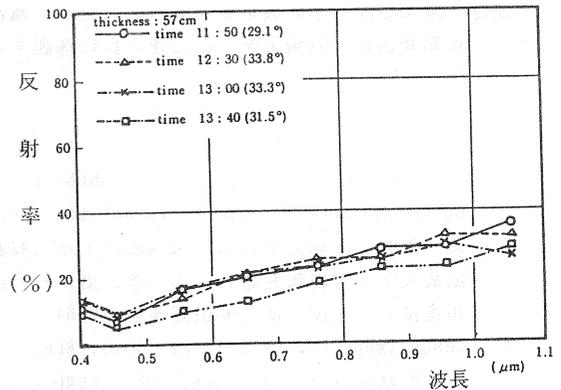


図-31 表層57 cm厚、各時間の反射率(休山Ⅲ)

差がさらに拡がり、反射率は地表面温度とともに高くなっている。休山(Ⅲ)の51cm厚、57cm厚の場合、反射率は双方とも低くなっているが、地表面温度の上昇傾向は他と同様に厚い57cm厚の方が時間とともに高くなっている。これらの休山(Ⅰ)～(Ⅲ)の現地測定では午前の早い時刻では地表、地中とも温度は低い。気温の上昇とともに薄い層の地表面温度は気温及び太陽熱の影響を受けて急に上昇するが、厚い表層をもつ地盤では地表面温度よりも地中温度に影響を受けるため、地表面温度の上昇がゆるやかに起こり、測定初期には低い地表面温度になるものと思われる。その後、時間経過とともに厚い層では徐々に温められ地表、地中の温度上昇と又、厚い層による保温状態との2つの状況が同時に進行し、気温の最も高い13:00～14:00に層厚の薄い地盤より厚い地盤の方が地中及び地表面温度が高くなるものと考えられる。以上の事から表層厚の違いが時間における地表面温度、あるいは時間的变化における地表面温度上昇率に差をもたらし、同時にそれが分光反射率に影響を与えていると考えられる。

5. 結論

本研究では電磁波特性を利用して、まさ土地表面の分光反射率及び放射温度を測定し、まさ土地盤の特性を予知するために基礎的測定研究を行った。その成果を要約すると次の通りである。

- (1) まさ土地盤表面の含水比が低いほど高い反射率を示し、含水比の増加とともに反射率は低下する。ただこの規則性が存在する限界含水比は約20%である。
- (2) まさ土地盤表層厚が薄いほど反射率は高く、地表面温度も高い。この性質は層厚55cm以上で不安定となるため、分光反射率測定による層厚推定の有効性は約50cm厚と言える。
- (3) 層厚の影響を検討するための試験地盤における計測結果によると、浸透距離の短いD₂₅～D₅₅の地盤の場合、深さ方向に含水比は徐々に高くなり、長いD₆₅～D₈₅の地盤の場合は低く、深さ方向にも変化がない。
- (4) 密度については、密度の高い地盤は反射率が高く、地表面温度も高い。地中含水比は密度差における差は見られなかった。
- (5) 高密度地盤では地中温度の深さ方向の変化が少なく、低密度ほど温度変化が大きい。又、地中温度に変曲点があり、低密度ほど変曲点の位置が深くなっている。
- (6) 盛土試験、休山(Ⅰ)～(Ⅲ)の現地測定では薄い表層は高い反射率を示す。一方、厚い表層の地表面温度は午前には低く、午後には高くなるか、あるいは上昇率の増加が見られる。
- (7) 厚い表層と薄い表層を比較すると反射率の値の時間的变化は厚い表層の方が大きい。

この研究で以上の点で成果があった。ただし、分光反射率は季節的影響を受けるが今回の測定値は秋季～冬季に計測したものである。今後は夏季の地表面温度と反射率の関係、地中温度分布の理論解析、地表面温度と反射率の理論的考察等を行いR/S法による斜面災害の解明と予測の研究を進めたい。

謝辞：末筆ながら本研究をまとめるにあたり、観測データの収集に協力いただいた、口和町役場 松島寛治氏、長崎大学 山口速人氏に深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) R. L. Schuster, R. J. Krizek(1978): LANDSLIDES in, Remote Sensing techniques for Landslide detection, Special Report 176, National Academy of Sciences, pp.48-72.
- 2) 網干寿夫・小堀慈久(1985): R/S法による山腹斜面の分光反射特性と地表熱分布に関する研究, 広島大学工学部研究報告, 第33巻, 第2号, pp.153-165
- 3) 和達清夫・土屋 清・安田嘉純他(1976): 「リモートセンシング」, 朝倉書店, pp.110-129.
- 4) Canon Image Editorial Staff(1975): REMOTE SENSING, K. k. Canon, pp.303-308.
- 5) T. J. M. Kennle, H. C. Matthews(1985): Remote Sensing in Civil Engineering, Surry University

- 6) 小堀慈久・網干寿夫(1986):MSSデータにおけるまさ土分光特性に関する研究, 呉工業高等専門学校研究報告, 第22巻, 第1号, pp.103-106.
- 7) 網干寿夫・小堀慈久(1986):まさ土地盤の時間的及び層厚分光特性の研究, 広島大学工学部研究報告, 第34巻, 第2号, pp.189-199.
- 8) 網干寿夫・小堀慈久(1986):まさ土地盤における季節的及び厚い層の分光測定について, 第38回土木学会中国四国支部学術講演概要集, pp.277-278.