

## 第 6 章 赤外線サーモグラフィの河川堤防の湿潤部検知への適用性検討

## 第6章 赤外線サーモグラフィの河川堤防の湿潤部検知への適用性検討

|       |                                         |      |
|-------|-----------------------------------------|------|
| 6.1   | はじめに .....                              | 6-1  |
| 6.2   | 本研究の背景と目的 .....                         | 6-2  |
| 6.2.1 | 堤防の点検・巡視の現状と技術開発の方向性 .....              | 6-2  |
| 6.2.2 | 熱赤外線映像法の応用例の概要 .....                    | 6-2  |
| 6.2.3 | 熱赤外線映像法を河川堤防湿潤部検知へ適用する上での技術的課題 .....    | 6-6  |
| 6.3   | 盛土実験・現地観測の概要 .....                      | 6-8  |
| 6.3.1 | 盛土供試体を用いた地表面温度観測実験 .....                | 6-8  |
| 6.3.2 | 実堤防での地表面温度観測 .....                      | 6-13 |
| 6.4   | 堤防湿潤部検知への赤外線熱画像法の応用に関わる技術的課題の検討 .....   | 6-17 |
| 6.4.1 | 堤防のり面浸潤部に生じる温度差の大きさとその特徴（課題1, 4） .....  | 6-17 |
| 6.4.2 | 堤防のり面に繁茂する植生が湿潤部検知に与える影響（課題2） .....     | 6-37 |
| 6.4.3 | 堤防のり面の土質の不均質さによる地表面温度差（課題3） .....       | 6-41 |
| 6.4.4 | 急激な日射量変化に対する地表面温度の応答（課題4） .....         | 6-50 |
| 6.4.5 | 風に対する地表面温度の応答（課題4） .....                | 6-55 |
| 6.4.6 | 赤外線サーモグラフィの撮影角度、距離の違いによる検出温度の違い（課題5） .. | 6-58 |
| 6.5   | まとめ .....                               | 6-61 |
|       | 参考文献 .....                              | 6-63 |

## 6.1 はじめに

本研究は、堤防点検・巡視の一層の効率化・高度化に向けた取り組みの一つとして、赤外線サーモグラフィを用いた堤防湿潤部の検知について検討したものである。

まず、熱赤外線映像法の基本的な枠組み・考え方について、実用化した事例を参考にして整理するとともに、堤防点検・巡視への応用にあたっての技術的課題について整理した(6.2)。次に、実堤防での観測および堤防を模擬した盛土での実験について概説する(6.3)とともに、得られたデータを用いて各課題について検討した結果を示す(6.4)。最後にまとめとして、熱赤外線映像法の堤防湿潤部検知への応用にあたっての前提条件、気象条件などに関する本研究の成果をまとめて示し、それを踏まえて実用性についての所見を示した(6.5)。

植生が繁茂している状態では、堤防湿潤箇所の検知が困難な結果となった。また、検知に適した時間帯が日中の2～3時間程度であり、地表面の温度が雲の有無や風など気象の状況変化の影響を受けやすい。以上より、一般的な堤防点検・巡視時に熱赤外線映像法を併用して湿潤箇所を検知するのは、手法の技術的熟度・業務効率の両面から現段階では難易度が高いと思われる。

しかしながら、堤防植生を短く刈り揃えることができ、気象条件が安定している間に調査を終了できる特定範囲内であれば湿潤部検知は可能と考えられ、今後、湿潤部の範囲とその時間変化など詳細調査の1つの手段としての活用が期待される。

## 6.2 本研究の背景と目的

### 6.2.1 堤防の点検・巡視の現状と技術開発の方向性

河川堤防は、長い治水の歴史の中で補強、補修を重ねて機能を高めてきた長大な構造物である。現在においても、河川堤防の安全性確保のために補強との両輪として点検・巡視を行い、安全性に影響を与える変状を効率的かつ確実に検知し、適宜補修を行うといった管理が必要不可欠である。直轄河川の堤防点検は、徒歩による目視観察を基本とし、毎年、堤防の全延長にわたり行われている<sup>1),2)</sup>。今後はこうした管理を継続するとともに、手法のより一層の効率化・高度化が望まれる。その実現に向けた取り組みの一つとして、計測機器などを活用してより客観的・定量的な観測を行い、その結果から変状の状態評価を行う手法開発が行われている。例えば、電気、電磁などの物理探査手法を複数組み合わせる堤防内部の土質や相対的に透水性の高い部位等を把握する手法（統合物理探査<sup>3)</sup>）や、レーザ測量機器と GPS を搭載した車両により堤防形状をより詳細に測量する手法（Mobile Mapping System<sup>4)</sup>）が挙げられる。

本研究は、こうした機器を用いた状態評価手法の開発の一つであり、赤外線サーモグラフィを用いた堤防湿潤部の検知について検討した。堤防湿潤箇所は、堤防の相対的弱部となることが懸念されており、その箇所は出水や降雨後に行われる点検・巡視において、長い期間に渡り表土が高含水でぬかるんでいる状態、湿性植物の繁茂、さらにのり面から浸出した水で形成されるのり尻近傍の水たまりなどから検知することが行われている<sup>2)</sup>。

熱赤外線映像法とは、撮影被写体の中で相対的な温度差を視覚的かつ定量的に記録できる装置である赤外線サーモグラフィを用いて、温度差から周囲と状態の異なる箇所を抽出する手法である（詳細は 6.2.2 参照）。本研究は、堤防の湿潤箇所と乾燥箇所に温度差が生じると考え、本手法を堤防湿潤範囲の検知に応用し、堤防点検・巡視を高度化・効率化することを目指したものである。

### 6.2.2 熱赤外線映像法の応用例の概要

コンクリート構造物などの点検・診断では、欠陥部を検出する非接触・非破壊の手法として熱赤外線映像法が既に実用化されており、点検対象物に日射、気温変化に生じる表面温度の日変動を熱画像として面的に測定し、熱容量などの違いにより生じる温度差から欠陥部を検出する手法が示されている<sup>5)</sup>。以下では、参考文献 5) をレビューし、本手法の要点について整理する。

#### 1) 熱赤外線映像法の特徴

熱の伝わり方には、高い温度にある物体から低温度の物体へ熱の移動がおこる熱伝導、空気や液体が熱せられて熱の移動がおこる対流、物体が持つ熱エネルギーが電磁波として放出される放射の 3 つの形態がある。これらの熱の移動の形態によって物質は常に温度変化を生じる。熱赤外線映像法は物体から放射される熱赤外線エネルギー（主に水蒸気による吸収・放出の少ない波長 8~13 $\mu$ m）を測定し、その表面温度を平面的に映像化することにより物体内部の状態や性質を調査する手法である。

熱赤外線映像法の主な特徴は以下のとおりである。

- ① 測定対象物の温度を非破壊・非接触で計測できる
- ② 温度分布として映像化された状態で表示されるため平面的な観察が容易である

- ③ 暗闇での観測が可能である
- ④ 応答速度が速く、動いている物体の観測が可能である
- ⑤ 温度情報を映像として記録できるため管理が容易である

## 2) 吹付けのり面の欠陥部検出への応用事例

道路周辺のコンクリート・モルタル吹付けのり面の老朽化に伴う空洞化による剥離、湧水による漏水箇所の欠陥部の検出への応用事例<sup>5)</sup>について、調査手法の要点を以下に示す。

### (1) 温度差の生じる基本的な機構

吹付けのり面は、日中には日射により温められ、夜間には外気によって冷やされる。外的な影響を受けた吹付けのり面は地山の性状や、湧水、吹付け厚さなどの比熱の違いや伝導率の違いによって熱移動に差を生じ、吹付け背後の地山性状によっていくつかの規則性を持った表面温度分布として現れる。吹き付けのり面の背後性状に応じた日中および夜間における表面温度の応答が図-6.2.1及び図-6.2.2のように整理されている。

日中、吹付けのり面は日射を受け、一部は反射するもののモルタル層に吸収されて熱を持つ。その熱は、各所の地山背後などの性状に応じて温度勾配をもって地山へ移動する。その際、吹付けのり面の背後に空洞や湿潤部が存在すると熱移動に差異が生じ、結果として表面温度に差ができる。空洞内の空気層は、熱伝導率が小さく熱容量も小さい。このため、背後に空洞が存在する場合は、日射による地山への熱移動が空気層により妨げられ健全部と比較して表面の温度が高い。一方、水は熱容量が大きいので、吹付け背後に湿潤部や水の層が存在した場合は地山への熱移動が促進され、健全部と比較して表面温度が低くなる。ただし、湧水、地下水の温度が相対的に高い場合は温度差が生じにくくなることが考えられる。また、吹付け背後が土砂化した層である場合には、層を構成する土質、空気、水の構成比率などの違いに応じて、空洞部または湿潤部と類似した応答を示すと考えられている。

夜間、外気の気温の低下、放射冷却により、吹付けのり面に蓄積された熱エネルギーは、表面から空気中に放射される。この結果、表面温度は時間とともに徐々に低下する。この冷却過程において、吹付け背後に空洞が存在する場合では、地山から熱供給が遮断されるため、健全部と比較して急激に表面温度は低くなる傾向を示す。一方、吹付け背後に湿潤した層がある部分では、熱容量が大きいので相対的に温度が低下しにくい傾向を示す。

### (2) 温度差・温度変化幅による欠陥部検知の基本的考え方

一日を通じての吹付けのり面の表面温度の変化について、地山の性状を空洞部、土砂部、湿潤部、健全部の4つの状態にわけて計測された一例が図-6.2.3のように示されている。この結果によると日中では空洞部、土砂部、健全部、湿潤部の順に、また夜間では健全部、土砂部、空洞部、湿潤部の順で表面温度が高くなっており、そのため日中と夜間の温度変化幅を見ると空洞部、土砂部、健全部、湿潤部の順に大きくなる。

コンクリート・モルタル吹付けのり面の空洞化による剥離、湧水による漏水箇所の欠陥部の検出は、上記のように各部での各時点での温度差、および日中と夜間の相対的な温度変化幅から、

吹付けのり面の4つの状態を判別しうることを活用したものである。表-6.2.1に示すように各地山性状と表面温度差・温度変化幅の関係が整理されている。

### (3) 温度測定障害

実際の吹付けのり面の表面は、平坦で均一な状態になく凹凸があり、草木、苔などが繁殖している場合がある。凹凸がある場合、日中の吹付けのり面の表面には、日射の方向によって陰影が生じる。陰の部分では、日射が遮られ日射エネルギーの供給が小さくなり、直接日射を受ける部分に比べ低温となる。また、草や木、苔などは表面への日射を遮り、表面の温度計測の障害となる。こういった障害は温度特性に特殊性をおび、性状を推測する場合には注意が必要とされている。

| 日射の吸収・反射       |      |      |     |
|----------------|------|------|-----|
| 吹付背後の地山性状と表面温度 |      |      |     |
| 表面温度           | 背後性状 | 熱伝導率 | 熱容量 |
| 特に高い           | 空洞部  | 特に小  | 小   |
| 高い             | 土砂部  | 小    | やや小 |
| 低い             | 健全部  | 中    | 中   |
| 特に低い           | 浸潤部  | 中    | 特に大 |

図-6.2.1 日中における吹付けのり面の熱移動<sup>5)</sup>

| 日中の蓄積された熱エネルギーの放射 |      |      |     |
|-------------------|------|------|-----|
| 吹付背後の地山性状と表面温度    |      |      |     |
| 表面温度              | 背後性状 | 熱伝導率 | 熱容量 |
| 低い                | 特に高い | 特に小  | 小   |
| 低い                | 土砂部  | 小    | やや小 |
| 高い                | 健全部  | 中    | 中   |
| 低い                | 浸潤部  | 中    | 特に大 |

図-6.2.2 夜間における吹付けのり面の熱移動<sup>5)</sup>

表-6.2.1 吹付のり面の地山性状と表面温度の一般的パターン<sup>5)</sup>

|     | 吹付背後の性状 | 深夜<br>早朝 | 日中   | 2時刻の<br>温度変化 |
|-----|---------|----------|------|--------------|
| I   | 空洞部     | 低温       | 特に高温 | 温度変化が特に大きい   |
| II  | 土砂部     | 低温       | 高温   | 温度変化が大きい     |
| III | 湿潤部     | 低温       | 特に低温 | 温度変化が特に小さい   |
| IV  | 健全部     | 高温       | やや低温 | 温度変化が小さい     |

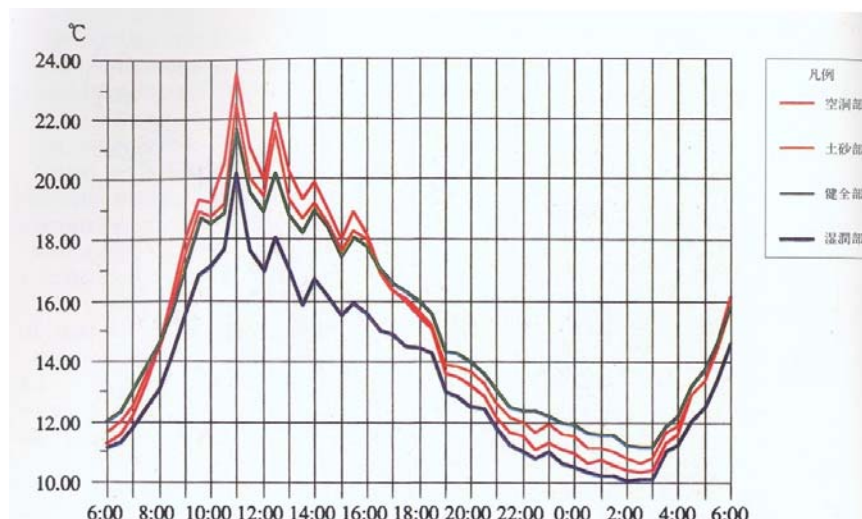


図-6.2.3 吹付のり面における表面温度の日変化<sup>5)</sup>

### 6.2.3 熱赤外線映像法を河川堤防湿潤部検知へ適用する上での技術的課題

河川堤防の湿潤箇所を検知する点検・巡視の実務と、6.2.2 に示したコンクリート・モルタル吹付けのり面への応用事例とを対比することにより、本研究で検討対象とする技術的課題の抽出を試みた。対比は、下記2点の観点から行った。

- 1) 赤外線サーモグラフィの撮影被写体となる吹付けのり面と堤防のり面の状態の差異。すなわち、堤防のり面は吹付けコンクリート・モルタルと異なり、一般に植生が一面に繁茂している。さらに場所によってのり面を構成する土質が多様であり、吹付けコンクリート・モルタルに比較して性状の場所的な差異が大きいと想定される。
- 2) 湿潤状態が比較的検知しやすい出水・降雨後の水が有意に浸出している期間内に、堤防全延長に渡って点検・巡視を行うこと。すなわち、河川堤防の管理実務への適用にあたっては、ある一定期間内に堤防全延長について調査できる効率性が強く求められる。

抽出した技術的課題を表-6.2.2 に示す。

表-6.2.2 赤外線調査手法の河川堤防への適用上の課題

|     |                                                              |
|-----|--------------------------------------------------------------|
| 課題1 | 堤防のり面の浸潤部に熱画像から判別できる程度の温度差が地表に現れるか                           |
| 課題2 | 堤防のり面は植生で被われているが湿潤部との温度差を検出することが可能か                          |
| 課題3 | 堤防のり面の土質は不均質であるが、土質による温度差への影響はどの程度か                          |
| 課題4 | 延長の長い堤防を全くの同一気象条件下で熱画像撮影するのは困難であるが、湿潤部検知への影響を無視できる条件範囲はどの程度か |
| 課題5 | 堤防全延長の熱画像を効率よく取得する工夫として、一枚の画像で捉えられるのり面面積を広くできる遠距離撮影の導入は可能か   |

本研究での各課題に対する検討内容を下記のとおり設定した。

#### ●課題1：堤防のり面の浸潤部に熱画像から判別できる程度の温度差が地表に現れるか

6.2.2 2) に示した温度差の生じる基本的機構を踏まえると、土砂で構成される堤防のり面では、土粒子、粒子間の空気、水の構成比率によって変化する熱容量・熱伝導率の差異によって温度差が生じると推定される。近藤は、土の表面から地中への熱交換の速度は、土中の水分量に比例すると指摘している<sup>6)</sup>。浸潤部ののり面は、飽和していると考えられることから、日射の供給を受けた場合、乾燥している箇所に比べて低温を示すと考えられる。ただし、湿潤部以外の箇所も、出水直後には降雨により湿潤状態となっていると考えられるため、浸潤箇所との温度差は生じにくく、乾燥する過程において温度差が徐々に生じてくると考えられる。

このように温度差が生じうるか、さらにその大きさが赤外線サーモグラフィで捉えられるほどの大きさであるか、実際に観測を行い確認する。

なお、吹き付けのり面の事例では、健全部、空洞部、土砂部、湿潤部といった4つの状態を判別するために、表-6.2.1 に示したように日中・夜間での温度差および日中と夜間の温度変化幅を用いているが、堤防のり面への応用にあたっては湿潤部を判別すればよいので、本研究では日中での温度差を用いて判別することを前提に技術開発を行っている。

●**課題2：堤防のり面は植生で被われているが湿潤部との温度差を検知することが可能か**

堤防のり面は、一般にはシバなどの植生が一面に繁茂している。これらに被陰されることで、日中は地表面の温度が上昇しにくいこと、さらに赤外線サーモグラフィによる熱画像の撮影にあたっては、植生部の温度が測定され、地表面の温度を捉えられないことが想定される。

そこで植生により地表面が覆い隠された状態、草刈りを行い植生個体間に裸地が見える状態および植生を剥いで完全に裸地にした状態とした実堤防のり面で温度観測を行い、湿潤部検知に及ぼす植生の影響を明らかにする。

●**課題3：堤防のり面の土質は不均質であるが、土質による温度差への影響はどの程度か**

河川堤防を構成する土質は均一ではなく場所によって異なると考えてよい。そこで、のり面の土質条件（粒度分布、締め固め）に応じて、湿潤部と乾燥部の温度差に差異が生じうるかを明らかにする。

●**課題4：延長の長い堤防を全くの同一気象条件下で熱画像撮影するのは困難であるが、湿潤部検知への影響を無視できる条件範囲はどの程度か**

赤外線映像法の既存の調査手法を踏まえると、最も温度差が発生する南中時（12:00付近）を中心として調査すると考えられる。しかし、延長の長い河川堤防では、ほぼ同一の時刻と見なせる間に、多地点で熱画像を撮影するのは、実務においてはまず不可能である。したがって、浸潤部との温度差が比較的大きい時間帯内に場所を変えていき、随時撮影することとなる。撮影時刻が異なることで、堤防のり面の日射の供給量、調査時の風速、気温、湿度が違うことであるので、それを原因として温度差が生じ、湿潤部の検知に影響を及ぼすことが懸念される。

そこで、晴天時を対象に温度差がほぼ同程度となる時間帯および風の条件を、実堤防の観測から明らかにする。また、雲によって一時的に日射が遮られることによる堤防のり面の温度低下については、日射が雲で遮られた直後からののり面温度低下の応答の早さと大きさ、再び日射を受けて温度が回復するのに要する時間について堤防を模した盛土を用いた実験より明らかにする。

●**課題5：堤防全延長の熱画像を効率よく取得する工夫として、一枚の画像で捉えられるのり面面積を広くできる遠距離撮影の導入は可能か**

堤防のり面を天端からのり尻まで一度に撮影するとなると、堤防天端からまたは堤防のり尻に撮影者を配置することとなる。この場合、のり面に対してほぼ垂直に撮影することは困難となる。熱画像の撮影にあたっては、一般に対象物に正対して撮影することが望ましいとされるため、のり面に対して低角度となる天端やのり尻からの撮影を想定して、熱画像による温度測定の精度検証を行う。

### 6.3 盛土実験・現地観測の概要

#### 6.3.1 盛土供試体を用いた地表面温度観測実験

飽和度、土の粒度、間隙比を変えた盛土を供試体として、接触式の温度センサによる地中温度計測、赤外線サーモグラフィによる地表面温度の計測を行う実験を実施した。以下に、実験装置、観測項目と測定機器についてまとめて示す。

##### 1) 実験装置

実験は、国土技術政策総合研究所内の河川模型実験施設に以下に示す供試体を設置し、屋外環境のもとで供試体の温度変化を観測するものである。

供試体は、図-6.3.1に示す容器内に土砂を締め固めることで作成したものである。容量の内壁は、高さ500mm×幅1000mm×奥行1000mmであり、側壁と底面に厚さ100mmの発砲スチロールを設置することで、外気との熱交換を遮断する構造とした。底面には、碎石を詰めることで透水層を設けるとともに、その側面に水供給パイプを接続し、外部タンクから水を供給できる仕組みとした。タンク内の水位と供試体内の水位は連動しており、実験期間中にタンク内水位を供試体地表面と同一に保つことで供試体の飽和度100%を維持し、これにより堤防湿潤部を模擬した。

供試体は、表-6.3.1に示すように全7個を作成した。その内訳は、粒度分布3種に対してそれぞれ飽和度を2種に設定した計6個と粒度分布のうち1種について間隙比を変えた1個の計7種である。

##### (a) 粒度分布3種類の設定

2.2に後述する地表面温度観測を行った一級河川堤防のり面において複数箇所での粒度分布を測定した。その結果、粒度分布曲線が図-6.3.2に示す「上限粒径（細粒）」と「下限粒径（粗粒）」の範囲内に位置し、平均としては「平均粒径」の粒度分布となった。このような粒径の場所的な差異があることを考慮して、本実験では、図-6.3.2に実践で示した「平均土」「細粒土」「粗粒土」の3種を用いることとした。各粒度分布の土は、黒土と川砂を配合することで作成した。

##### (b) 飽和度2種類の設定

上記したように水タンクの水位を調節することで、表面に水が浮き出るような状態となる湿潤部を模擬した。また、供試体の作成後に水の供給を行わない自然状態の土（不飽和）により通常のり面部を模擬した。不飽和の供試体の飽和度は、粒度分布により異なるが60～80%程度であった（表-6.3.1参照）。

##### (c) 土の締め固めの設定

基本とした供試体（表-6.3.1のNo1～6）では、堤防土工マニュアル<sup>7)</sup>を参考にして、最大乾燥密度で85%以上の締固め度となるように、最適含水比付近で締固めて作成した。これに加えて、締固め度を低くした供試体を1検体用意した（表-6.3.1のNo7）。これは、土の表面から地中への熱交換の速度は、土中の水分量に比例するとの知見<sup>6)</sup>に基づいて、飽和状態の土で水分量、すなわち間隙比の異なる2検体で地表・地中温度を比較するため

ある。締固め度を低くした供試体は、「粗粒土」を用いて締固めを行わずに作成した。表-6.3.1に示すように、締め固めた場合の間隙比  $e=0.57$  (No.5) に対して、締め固めない場合には 1.36 となった (No.7)

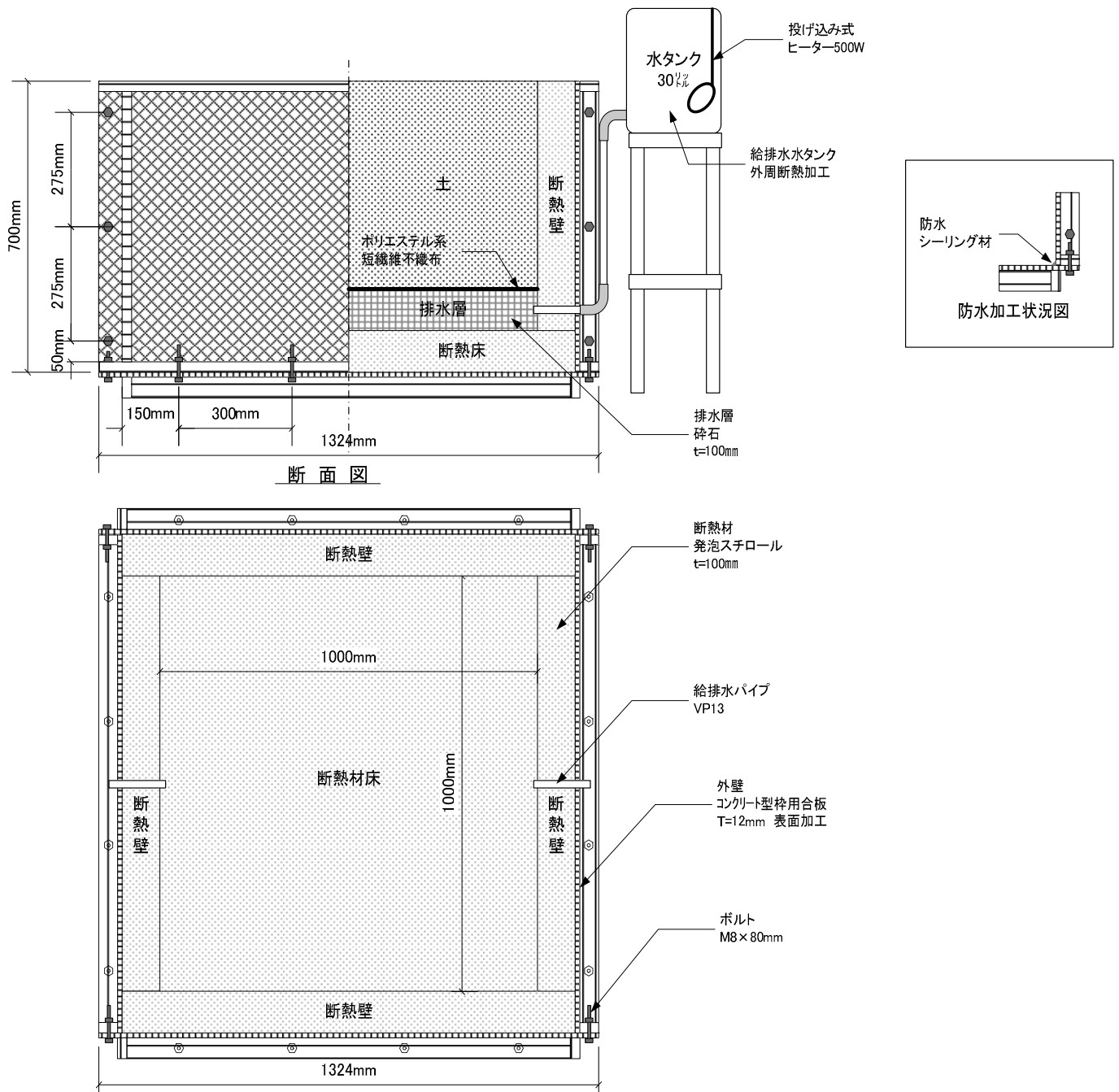


図-6.3.1 実験に使用した供試体の構造

表-6.3.1 作成直後に測定した各供試体土の土質

| No. | 材料 | 飽和条件 | 密度 | 土粒子密度<br>g/cm <sup>3</sup> | $\rho_t$<br>g/cm <sup>3</sup> | wn<br>% | e    | $\rho_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | 飽和度<br>% | 配合量(kg) |       |       | 備考  | 試験終了時の<br>確認データ               |       |
|-----|----|------|----|----------------------------|-------------------------------|---------|------|-------------------------------|----------|---------|-------|-------|-----|-------------------------------|-------|
|     |    |      |    |                            |                               |         |      |                               |          |         |       |       |     | $\rho_t$<br>g/cm <sup>3</sup> | e     |
|     |    |      |    |                            |                               |         |      |                               |          | 黒土      | 砂     | 水     |     |                               |       |
| 1   | 細粒 | 飽和   |    | 2.6                        | 1.26                          | 43.4    | 1.96 | 0.88                          | 57.6     | 753.8   |       |       | 実測値 | 1.33                          | 2.14  |
| 2   | 細粒 | 不飽和  |    | 2.6                        | 1.39                          | 67      | 2.12 | 0.83                          | 82.0     | 753.8   | 0.0   | 146.2 | 実測値 | 1.49                          | 1.98  |
| 3   | 平均 | 飽和   |    | 2.6                        | 1.30                          | 23.8    | 1.48 | 1.05                          | 41.9     | 546.1   | 234.0 |       | 実測値 | 1.30                          | 1.68  |
| 4   | 平均 | 不飽和  |    | 2.6                        | 1.36                          | 38      | 1.64 | 0.99                          | 60.3     | 546.1   | 234.0 | 119.9 | 実測値 | 1.52                          | 1.54  |
| 5   | 粗粒 | 飽和   |    | 2.6                        | 1.80                          | 9       | 0.57 | 1.65                          | 40.7     | 81.1    | 729.9 | 89.0  | 実測値 | 1.78                          | 0.62  |
| 6   | 粗粒 | 不飽和  |    | 2.6                        | 1.86                          | 18      | 0.65 | 1.58                          | 72.1     | 90.0    | 810.0 | 0.0   | 実測値 | 1.93                          | 0.54  |
| 7   | 粗粒 | 飽和   | 緩い | 2.6                        | 1.16                          | 5.3     | 1.36 | 1.10                          | 10.1     | 56.1    | 505.2 | 0.0   | 実測値 | 1.64*                         | 1.22* |

※は実験後に検体に変形したため参考値

「飽和」条件の飽和度が 100%となっていないが、これは給水前に測定したためである

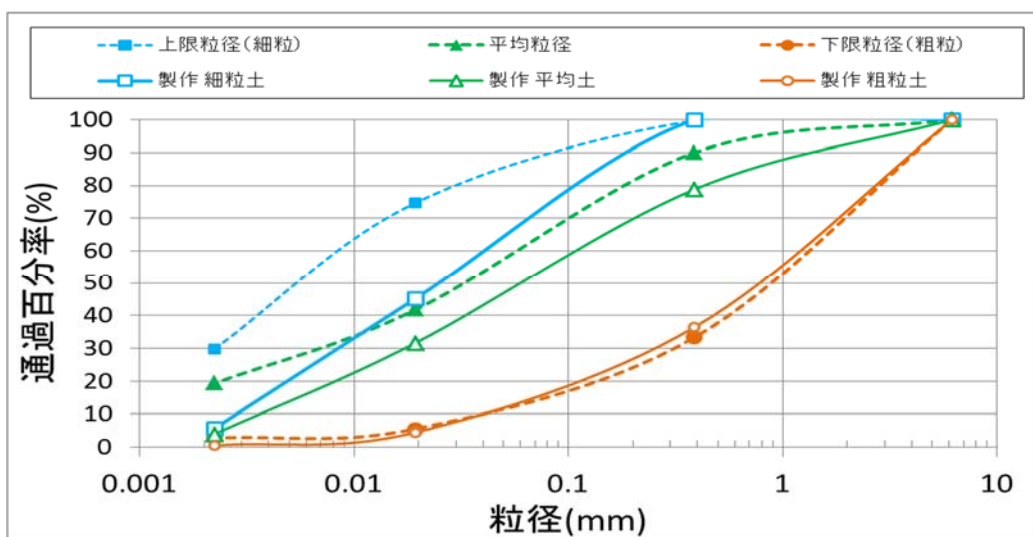


図-6.3.2 3種類の土質の粒度分布

## 2) 計測項目と測定機器

### (a) 観測時の気象観測

供試体設置地点の近傍において、日射量を4成分放射計、気温・湿度をラジエーションシールド付の気温湿度計、また風速をプロペラ式風速計によって測定した。

### (b) 検体アルベド値の測定

各検体のアルベド値は、(a)で用いた4成分放射計を各試験検体に1時間ごとに数分設置し測定を行った。

### (c) 土中の温度、水分量

熱電対と水分量計を、地表面から深さ10、20、50、100、200、500mmに設置して測定した。

#### (d) 地表面温度

赤外線サーモグラフィによる熱画像から地表温度を測定した。1枚の熱画像内に7種の供試体全てが収められる位置から撮影した。図-6.3.3に供試体の配置と撮影位置を示す。撮影した熱画像と可視画像の一例を写真-6.3.1に示す。

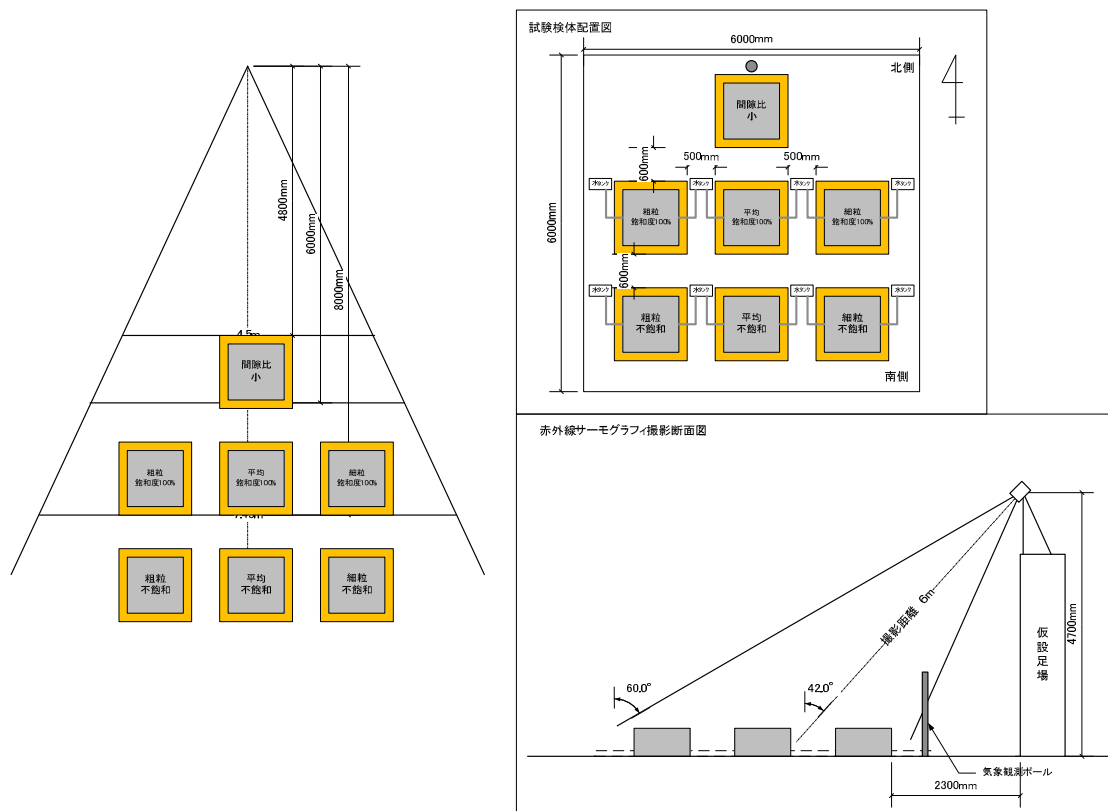


図-6.3.3 検体配置および赤外線サーモグラフィカメラによる撮影の仕方

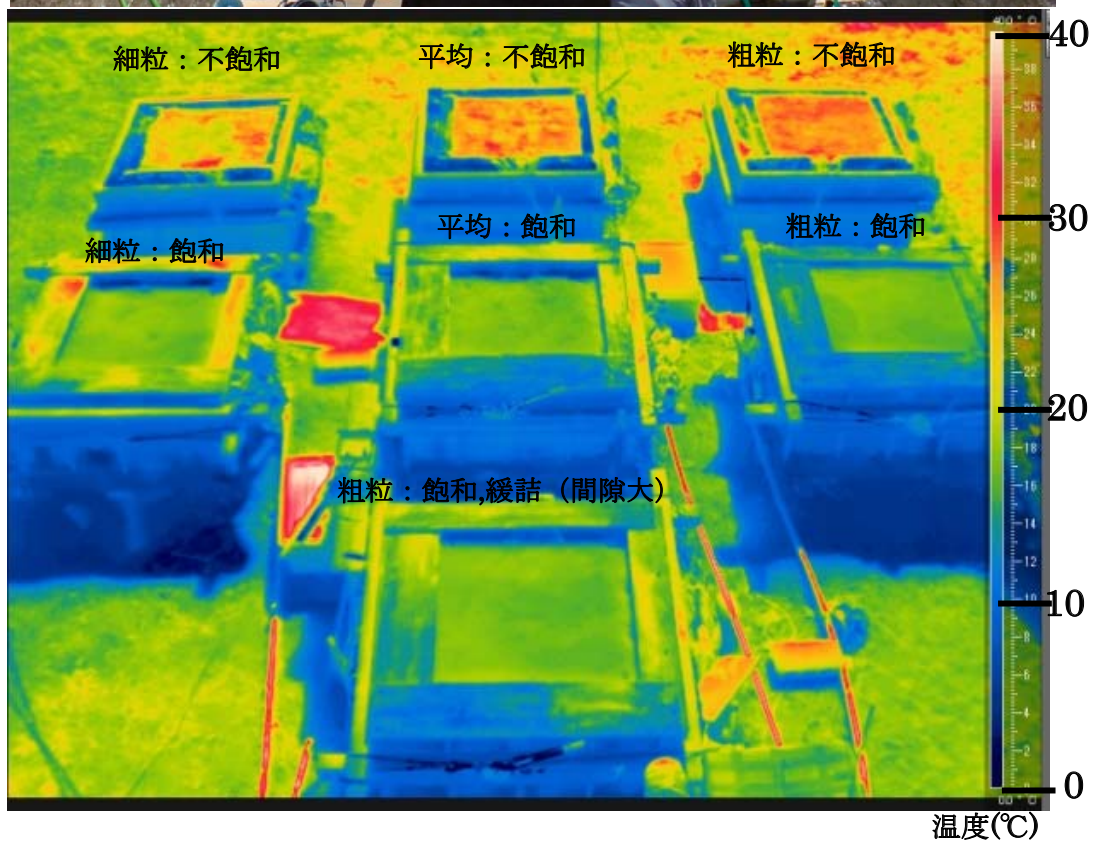
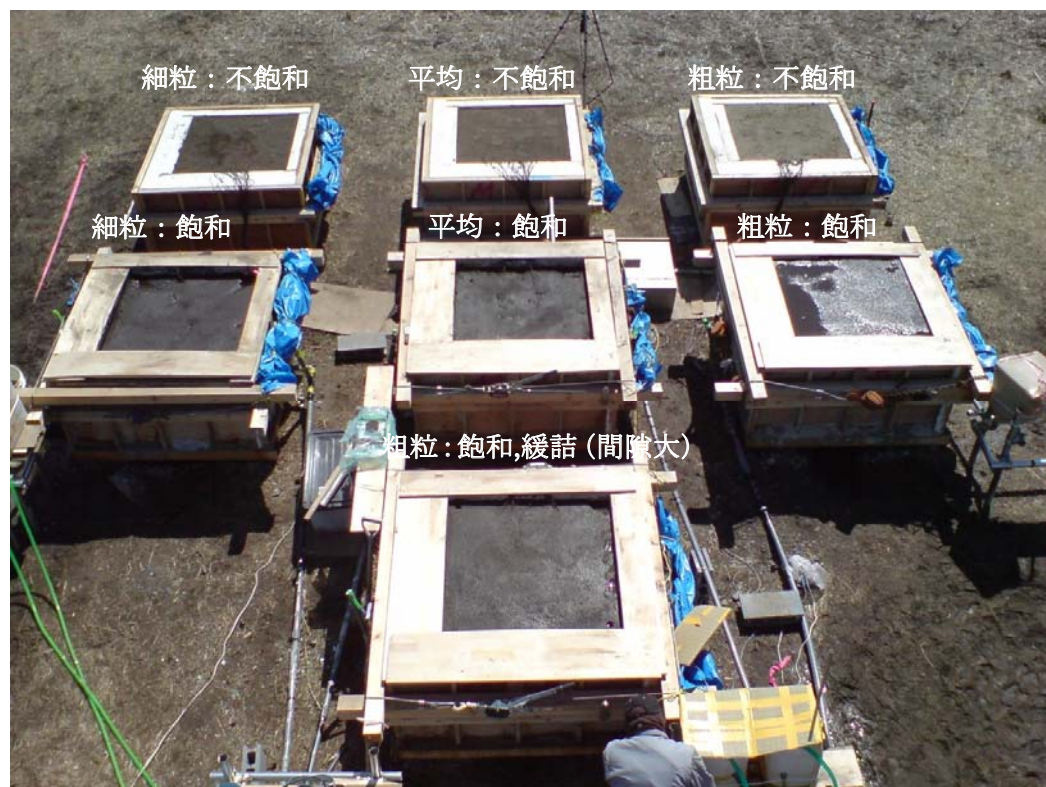


写真-6.3.1 可視画像および赤外線サーモグラフィカメラによる撮影写真（平成24年3月13日12:00撮影）

### 6.3.2 実堤防での地表面温度観測

実堤防での地表面の温度変化特性を明らかにするため、接触式の温度センサによる地中温度計測、赤外線サーモグラフィによる地表面温度の計測を実施した。以下に、観測地点、観測項目と測定機器についてまとめて示す。

#### 1) 観測地点

関東地方整備局管内の国管理堤防のうち、既往の点検・巡視で降雨後に堤防縦断方向に40mに渡りしぼり水が確認された堤外側のり面を観測対象として選定した。対象区間の状況を写真-6.3.2に示す。観測地点は、しぼり水が確認された箇所とそれに隣接しており浸潤が認められない箇所の計2地点に図-6.3.4に示すように設置した。以下、湿潤部に設置した観測地点をNo.1、浸潤が認められない地点をNo.2と呼ぶこととする。

各観測地点は、堤防の法線方向に4m、横断方向に3mの範囲である。これを図-6.3.5に示すように1m四方の12区画に分割し、そのうち1区画において植生による被陰の影響を排除するため、50cm×50cm程度の範囲の表土を掘削して裸地面とした。各観測地点における12区画の状況を写真-6.3.3及び写真-6.3.4に示す。裸地面を観察すると、観測箇所No.1では表面が湿っており飽和に近い状態であるが、No.2は浸潤しておらず表面は乾燥状態であった(10月)。ただし、観測時(2月)にはNo.1,2の地表面状態に差異が認められなかった。



写真-6.3.2 観測対象区間の概況 (のり尻からのしぼり水)

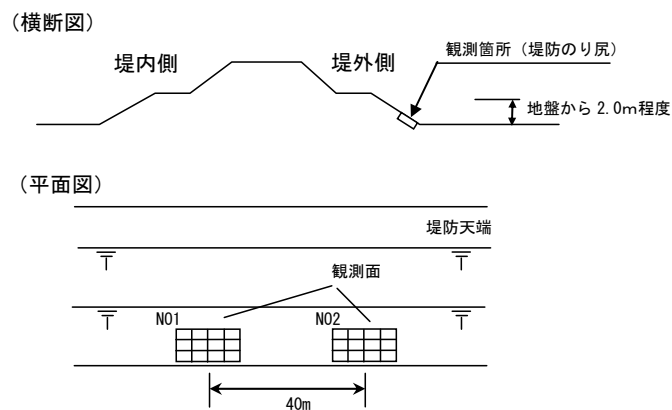


図-6.3.4 河川堤防のり面に設けた地表面温度の観測地点

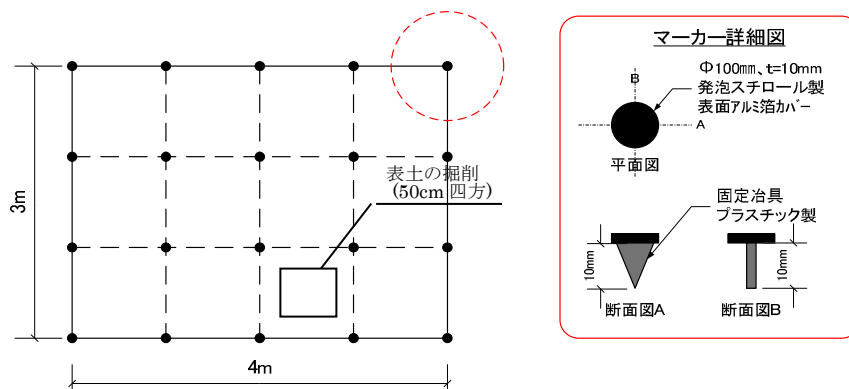


図-6.3.5 各観測地点の12区画区分と表土掘削箇所

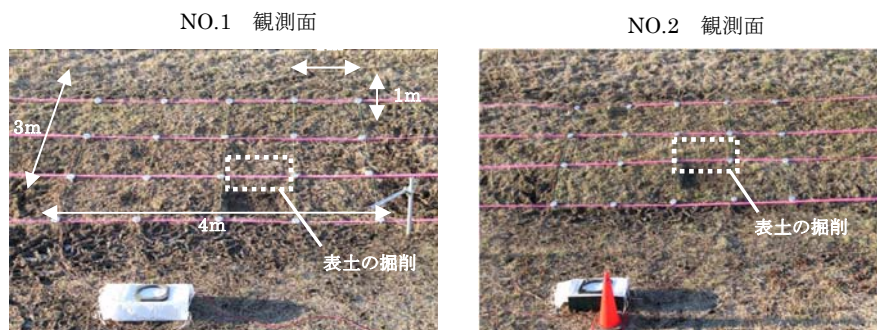


写真-6.3.3 各観測箇所ののり面状況

|              | NO 1 | NO2 |
|--------------|------|-----|
| 10月7日撮影      |      |     |
| 2月19日撮影(観測日) |      |     |

写真-6.3.4 各観測箇所の表土掘削箇所の状況

## 2) 計測項目と測定機器

地表面温度の観測は、赤外線サーモグラフィカメラにより行った。地表面温度の観測と合わせて、気温、湿度、日射量の気象観測を行った。

### (1) 熱画像撮影

熱画像撮影は、No.1,2 地点にそれぞれ同機種の赤外線サーモグラフィカメラを固定設置し、1分間隔で同時に行った。撮影条件（撮影位置、角度、距離）を図-6.3.6に示す。

撮影対象の堤防のり面は、 $22.5^{\circ}$  程度の傾斜であり、のり尻に立ってカメラを構えても、のり面に正対しての撮影が困難であった。赤外線サーモグラフィカメラを用いた調査では、のり面に対して  $90^{\circ}$ （正対） $\pm 60^{\circ}$  までが撮影角度として望ましいとされていることから、観測対象とした12区画の上端が堤防のり面に対して  $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$  の範囲内の撮影角度となるように、堤防のり尻付近に高さ4.7mの足場を設けて撮影角度を調整した。

また、赤外線サーモグラフィから撮影対象までの距離が離れると、画像1画素あたりの撮影面積が大きくなり、撮影対象とする植生間の裸地部と植生部での温度を区別して測定することが困難となる。また、撮影距離は現地の足場の設置箇所、撮影角度の都合から、12m程度となった。以上を踏まえて、撮影距離が最長となる区画上端での1画素あたりの撮影範囲が20mm四方以下となる解像度を有する、表-6.3.2に示す赤外線サーモグラフィカメラを選定した。

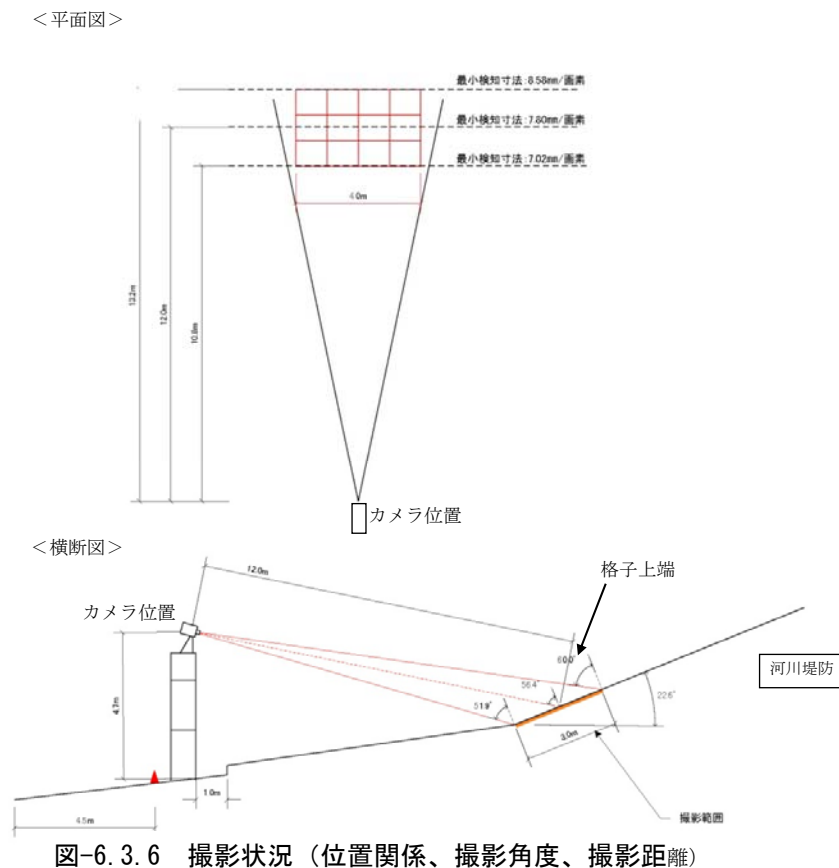


表-6.3.2 使用した赤外線サーモグラフィの仕様

| 本体写真                                                                              | 寸法・性能     |                    | 数量 | 単位 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|----|----|
|  | メーカー      | フリーアー（米国）          | 2  | 台  |
|                                                                                   | 型番        | SC620              |    |    |
|                                                                                   | 検出方式      | 非冷却2次元マイクロボロメータ    |    |    |
|                                                                                   | 最小温度分解能   | 0.065℃（@30℃）       |    |    |
|                                                                                   | 検出波長      | 7.5～13μm           |    |    |
|                                                                                   | 有効画素数     | 640（H）×480（V）      |    |    |
|                                                                                   | 空間分解能     | 0.65mrad 標準レンズ時    |    |    |
|                                                                                   | 視野角       | 24°（H）×18°（V）標準レンズ |    |    |
|                                                                                   | 可視カメラ     | 300万画素             |    |    |
|                                                                                   | ノイズリダクション | 無・低・高              |    |    |

## (2) 気象観測

観測箇所の堤防のり尻付近において日射量（全天日射）、気温・湿度、風向・風速の観測を行った。使用した測定機器を表-6.3.3に示す。

表-6.3.3 気象観測に使用した機器の仕様

| 機材名称        | 寸法・性能      |                                                       | 数量 | 単位 |
|-------------|------------|-------------------------------------------------------|----|----|
| 精密<br>全天日射計 | メーカー       | 英弘精機                                                  | 1  | 台  |
|             | 型番         | MS802                                                 |    |    |
|             | 感度         | 約7μV/W・m <sup>-2</sup> （約7mV/kW・m <sup>-2</sup> ）     |    |    |
|             | 内部抵抗：      | 約500Ω                                                 |    |    |
|             | 応答速度（95%）  | 約5秒                                                   |    |    |
| 温湿度計        | メーカー       | ヴァイサラ                                                 | 1  | 台  |
|             | 型番         | HMT333                                                |    |    |
|             | 相対湿度       |                                                       |    |    |
|             | 計測範囲       | 0～100 % RH                                            |    |    |
|             | +20℃における精度 | ± 1.0 % RH（0～90 %RH）<br>± 1.7 % RH（90～100 %RH）        |    |    |
|             | センサ        | ヴァイサラ HUMICAP® 180R                                   |    |    |
| 風向風速計       | 温度         |                                                       | 1  | 台  |
|             | 計測範囲       | -40～+80℃                                              |    |    |
|             | +20℃における精度 | ± 0.2℃                                                |    |    |
|             | センサ        | Pt100 RTD 1/3 クラス B IEC751                            |    |    |
|             | メーカー       | 小笠原計器製作所                                              |    |    |
|             | 型番         | CW800C                                                |    |    |
|             | 検出方法       | 風向 尾翼/単速ポテンショ（1kΩ）<br>風速 プロペラ/交流発電機                   |    |    |
|             | 測定範囲       | 風向 0～355°（0～16方位）<br>風速 0～60m/s                       |    |    |
|             | 検出方法       | 風向 ±5° 以内<br>風速 10m/s 以下 ±0.5m/s 以内<br>10m/s 以上 ±5%以内 |    |    |

## 6.4 堤防湿潤部検知への赤外線熱画像法の応用に関わる技術的課題の検討

本章では、6.2.3に整理した5つの技術的課題について、6.3に示した観測・実験結果に基づいて検討した結果をまとめて示す。

### 6.4.1 堤防のり面浸潤部に生じる温度差の大きさとその特徴（課題1, 4）

課題1は、検知したい湿潤部にその他周囲と比べて温度差を生じること、その大きさが赤外線サーモグラフィで捉えられる程度であるか、といった赤外線熱画像法が適用できる基本条件に関するものである。このような基礎的な検討を行うにあたり、まず種々の要因により温度差が生じうると考えられる実堤防を対象とするのではなく、日射、土質等の条件を統一し、土の飽和度のみを変えた6.3.1に示した盛土実験から湿潤部に生じうる温度差について調べることにした。なお、実堤防で考慮すべき場所的な土質の差異、植生による被陰の等の影響については、6.4.2以降において検討する。

赤外線サーモグラフィにより測定した各供試体の地表面温度と気象観測結果を時系列で整理した結果を図-6.4.1～図-6.4.5に示す。同一粒度の供試体間で比較すると、日射量の日変化に応じて飽和土と不飽和土の地表面温度差が生じており、日射量が最大となる12時前後で温度差が最大となることが多く、11～13時の間では温度差の差異は小さい。そこで12時時点での温度差を粒度別に整理した結果を図-6.4.6および表-6.4.1に示す。細粒土の温度差が平均土および粗粒土に比べて小さくなる結果となったが、全ての日で1℃以上の温度差となっており、十分に赤外線サーモグラフィで捉えられると考えられる。なお、各観測日における各供試体の平均体積含水率・飽和度を表-6.4.2に示すが、初日において不飽和土の値が若干大きめとなっているが、それ以外では観測期間を通して概ね一定値を保っている。

次に、図-6.4.7～図-6.4.26に示す各供試体の鉛直温度測定結果から、飽和度の違いによる地表面温度差について地中への熱伝達の観点から考察を加える。同図より、地表面から100mm程度までの範囲で温度に日変動が生じており、地表面温度と同様に12時前後で最高温度を示すことが多いことが分かった。そこで12時時点に着目し、鉛直温度分布を比較した一例を図-6.4.27に示す。不飽和土は地表面から1cm程度で急激に温度が低くなり、それ以深でも深さに応じて徐々に温度低下する。飽和土の供試体でも深さに応じて温度低下する傾向が認められるが、不飽和土に比べて深さ1cm程度までの温度低下が小さく、それ以深では不飽和土に比べて若干緩やかに温度低下する傾向が認められる。特に着目すべきは、赤外線サーモグラフィで取得した地表面温度では温度差が8.1℃あるのに対し、地表面から深さ1cmの温度差が1.0℃と小さくなっていることである。これは、地表面のごく薄い土層（本実験では1cm以下）の水分の有無が、地表面の温度変化に大きく影響していることを示している。

実験時の目視観測であるが、不飽和土ではごく表面で供試体の土が完全に乾燥して「ばさばさ」の状態となっていた。こうしたごく表面の状態の差異が、飽和土と不飽和土の深

さ方向温度分布や赤外線サーモグラフィによる表面温度の差をもたらしたと考えられる。今回の実験ではこの点を突き詰めて機構を明らかにするには至らなかった。

以上の実験結果から、観測上の留意事項として以下が挙げられる。

- 湿潤部の温度検知に適した温度差がほぼ同程度となる時間帯は 11～13 時である。
- 湿潤部の検知にあたっては、地表面から 1cm 程度の厚さまで完全に飽和した湿潤状況であることが条件となると考えられる。例えば、これより以深で完全に飽和した湿潤部であっても表面に温度差が生じない可能性がある。
- さらに、不飽和部では地表面から厚さ 1cm 程度の表層を踏み荒らすなどで乱してしまった場合には、その直後に赤外線サーモグラフィによる表面温度測定を行うと、温度が低くなり湿潤部との区別が困難になることが懸念される。

○3月12日

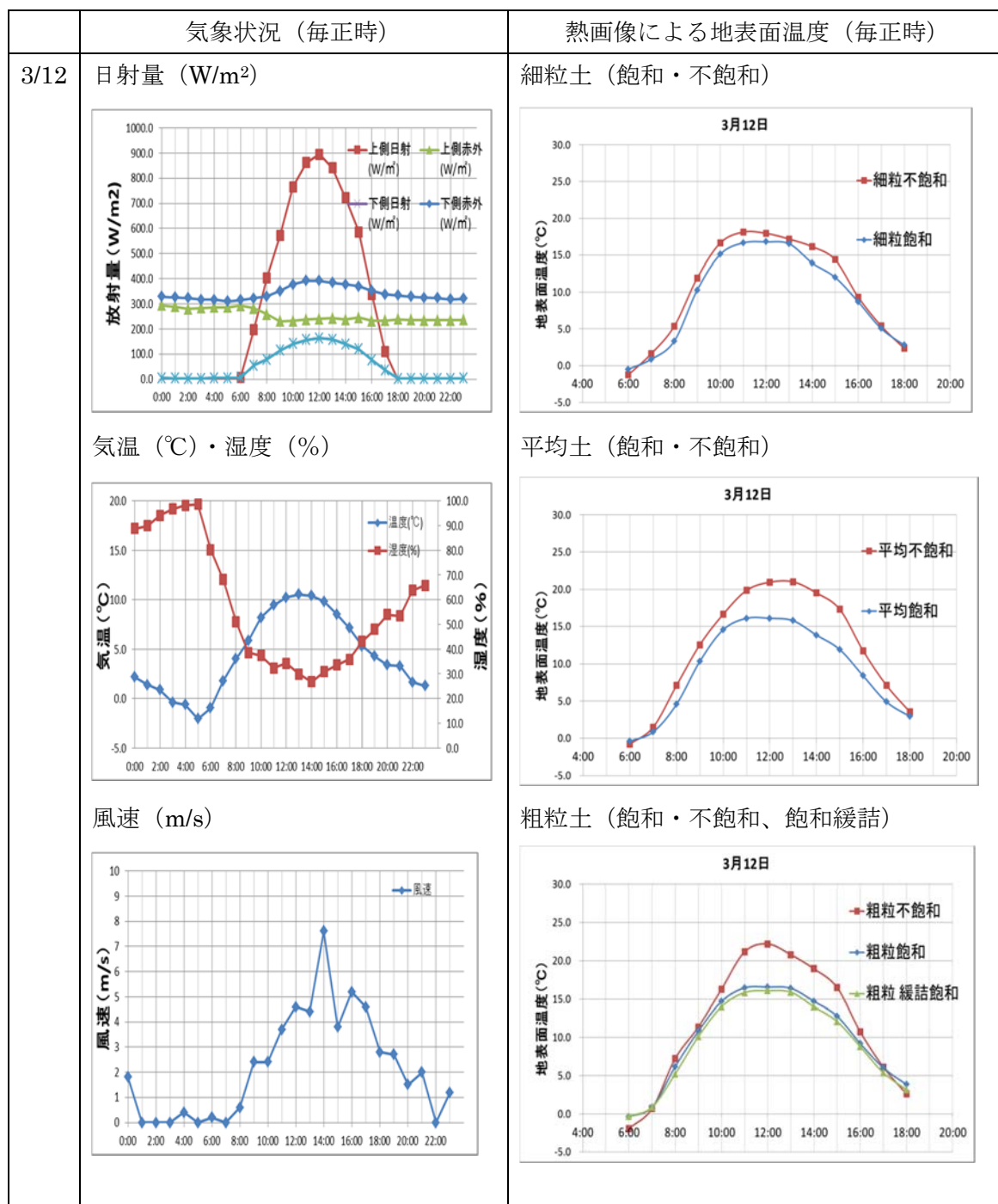


図-6.4.1 供試体実験における表面温度の測定結果（3月12日）

○3月13日

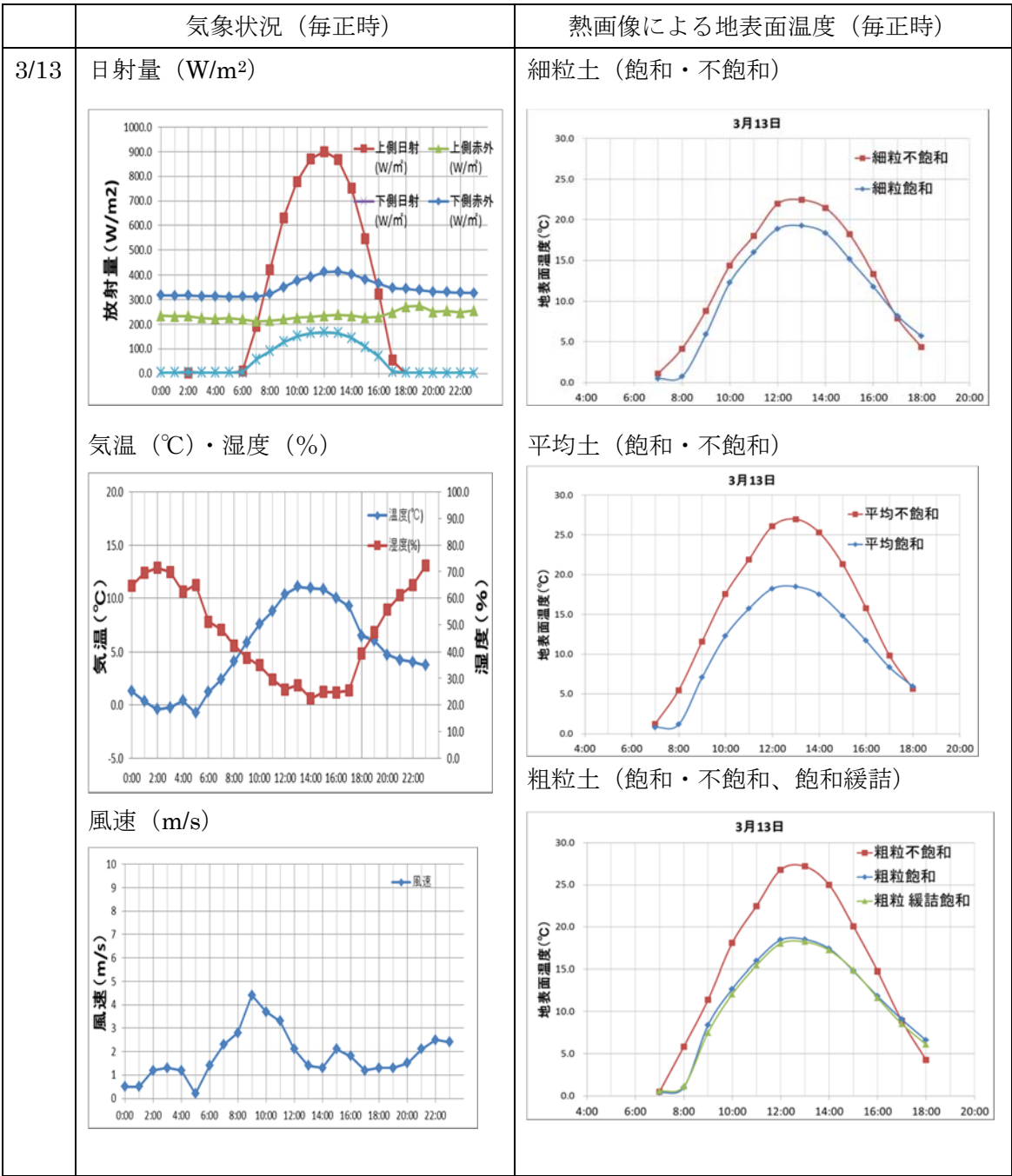


図-6.4.2 供試体実験における表面温度の測定結果（3月13日）

○3月14日

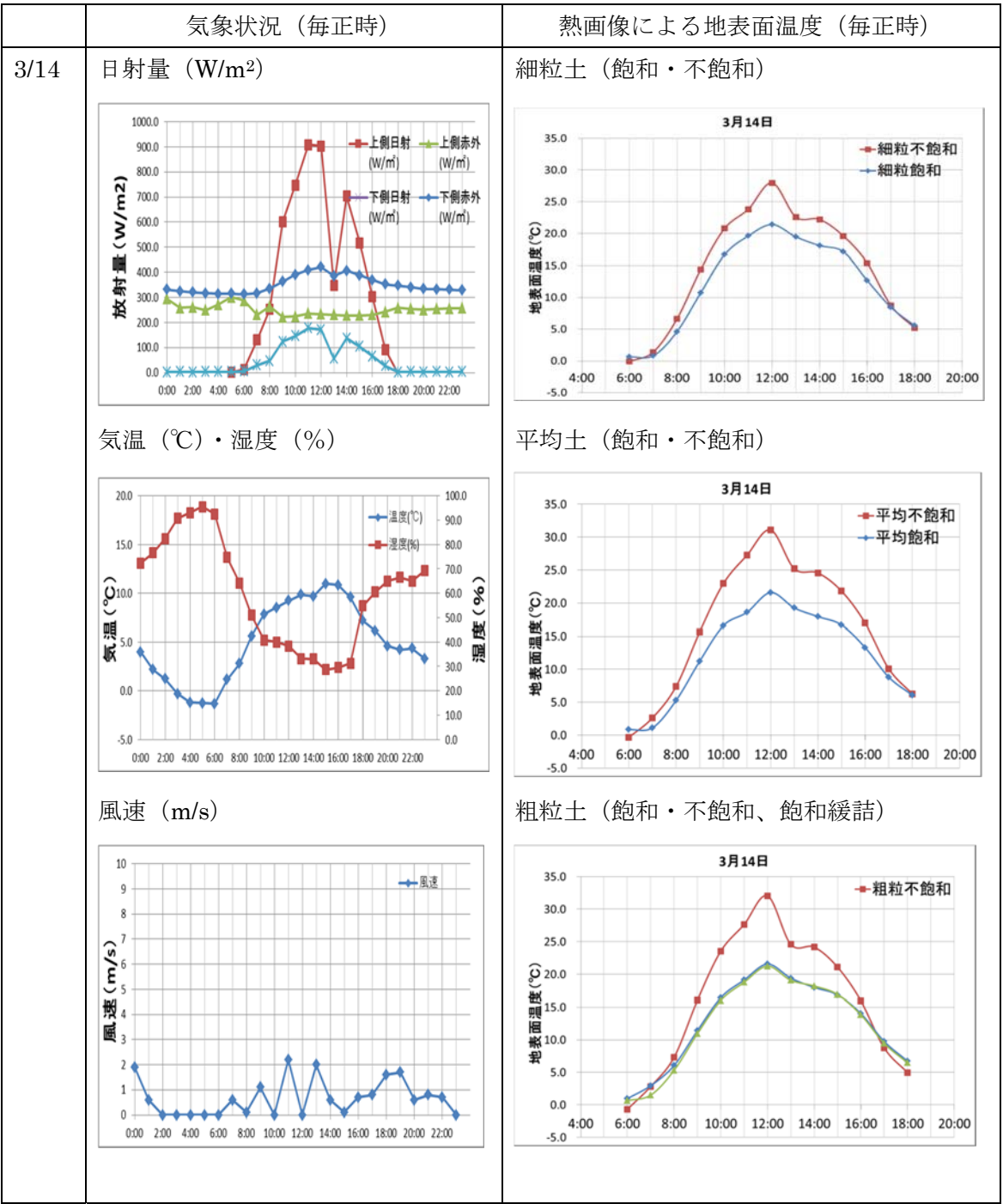


図-6.4.3 供試体実験における表面温度の測定結果（3月14日）

○3月15日

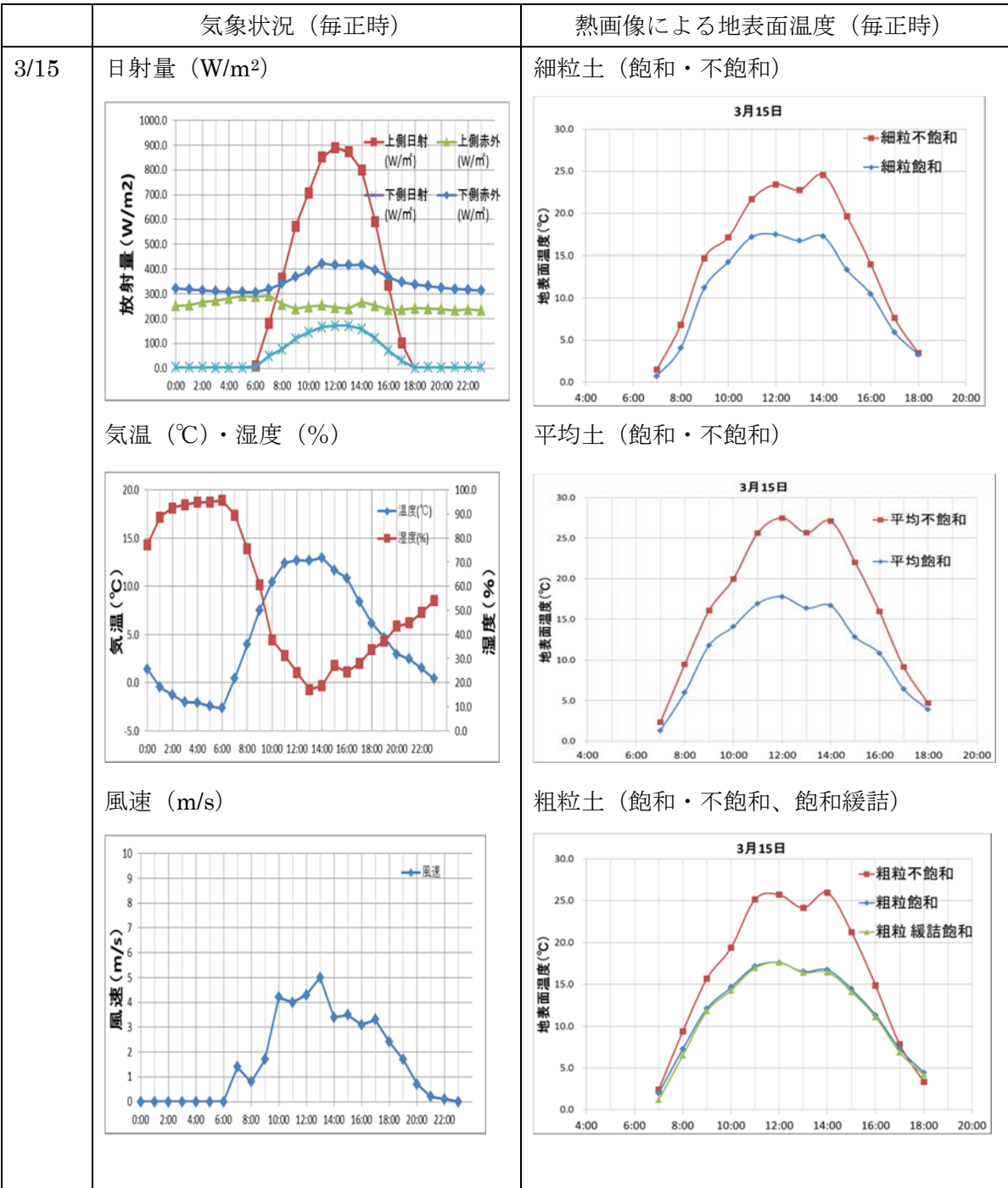


図-6.4.4 供試体実験における表面温度の測定結果（3月15日）

○3月16日

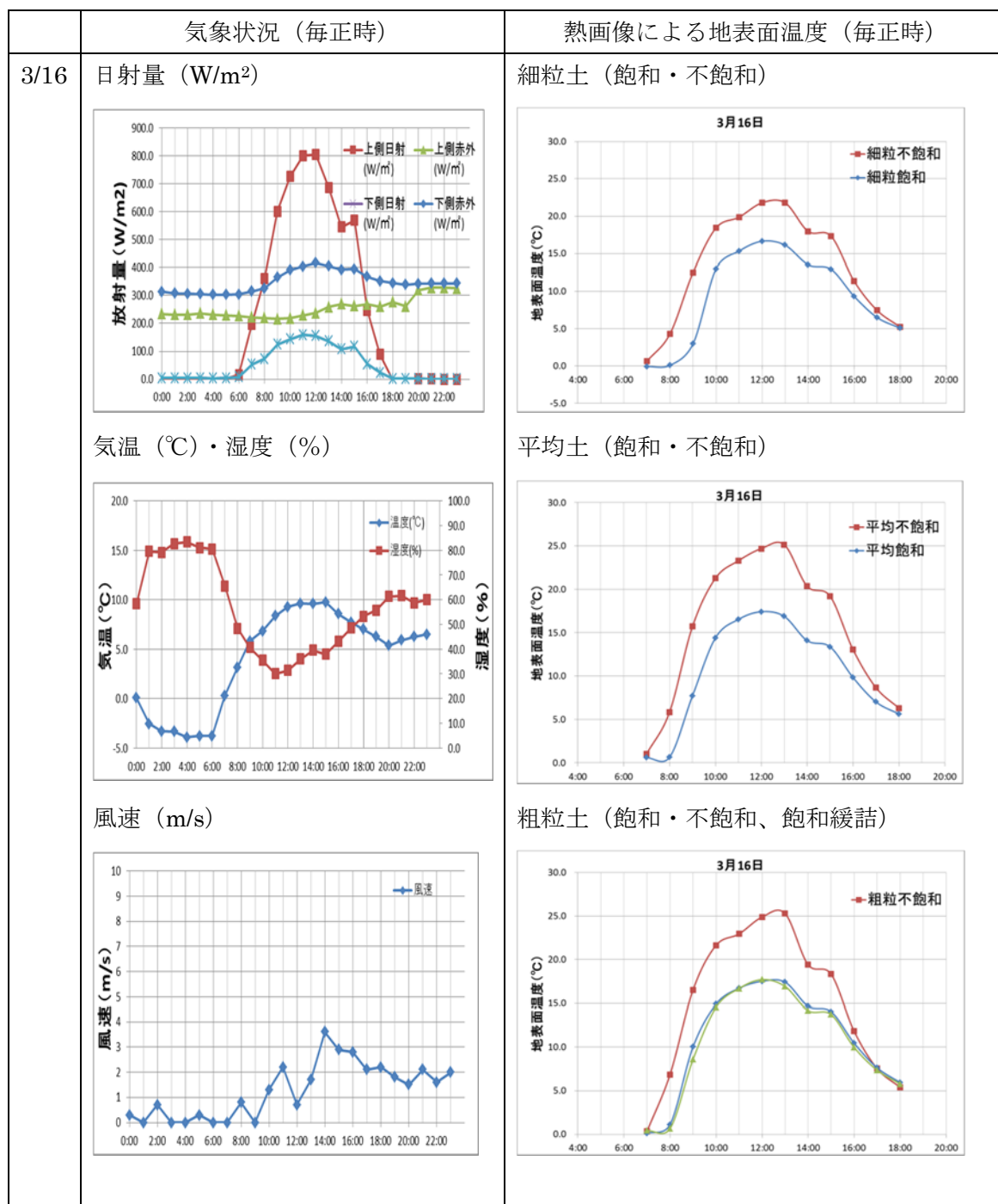


図-6.4.5 供試体実験における表面温度の測定結果（3月16日）

表-6.4.1 供試体実験における表面温度の測定結果

| 日付   | 時刻    | 細粒          |             |      | 平均          |             |      | 粗粒          |             |      | 粗粒 緩詰       |               |
|------|-------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|---------------|
|      |       | 不飽和         | 飽和          | 温度差  | 不飽和         | 飽和          | 温度差  | 不飽和         | 飽和          | 温度差  | 飽和          | 粗粒飽和-<br>粗粒緩詰 |
| 3/12 | 7:00  | 1.6         | 0.9         | 0.8  | 1.5         | 0.9         | 0.6  | 0.7         | 0.9         | -0.2 | 0.9         | 0.0           |
|      | 8:00  | 5.4         | 3.3         | 2.0  | 7.1         | 4.6         | 2.5  | 7.3         | 6.2         | 1.0  | 5.2         | 1.0           |
|      | 9:00  | 11.9        | 10.3        | 1.6  | 12.6        | 10.3        | 2.2  | 11.4        | 10.8        | 0.6  | 10.1        | 0.7           |
|      | 10:00 | 16.6        | 15.1        | 1.5  | 16.7        | 14.6        | 2.1  | 16.3        | 14.7        | 1.6  | 14.0        | 0.7           |
|      | 11:00 | <b>18.1</b> | 16.7        | 1.5  | 19.8        | <b>16.1</b> | 3.7  | 21.2        | 16.5        | 4.7  | 15.8        | 0.6           |
|      | 12:00 | 17.9        | <b>16.8</b> | 1.2  | <b>21.0</b> | <b>16.1</b> | 4.8  | <b>22.2</b> | <b>16.6</b> | 5.7  | <b>16.1</b> | 0.5           |
|      | 13:00 | 17.2        | 16.5        | 0.6  | <b>21.0</b> | 15.8        | 5.2  | 20.8        | 16.4        | 4.4  | 15.9        | 0.5           |
|      | 14:00 | 16.1        | 13.9        | 2.2  | 19.5        | 13.9        | 5.7  | 19.0        | 14.7        | 4.2  | 14.0        | 0.7           |
|      | 15:00 | 14.4        | 12.0        | 2.4  | 17.3        | 11.9        | 5.4  | 16.5        | 12.8        | 3.7  | 12.1        | 0.7           |
|      | 16:00 | 9.3         | 8.7         | 0.6  | 11.7        | 8.4         | 3.4  | 10.8        | 9.2         | 1.5  | 8.8         | 0.4           |
|      | 17:00 | 5.4         | 5.1         | 0.4  | 7.1         | 4.9         | 2.2  | 6.1         | 6.1         | 0.1  | 5.4         | 0.6           |
|      | 18:00 | 2.4         | 2.8         | -0.4 | 3.6         | 3.0         | 0.6  | 2.6         | 3.9         | -1.2 | 3.2         | 0.7           |
|      |       |             | 温度差平均       | 1.2  |             | 温度差平均       | 3.2  |             | 温度差平均       | 2.2  | 温度差平均       | 0.6           |
|      |       |             | 最大温度差       | 2.4  |             | 最大温度差       | 5.7  |             | 最大温度差       | 5.7  | 最大温度差       | 1.0           |
| 3/13 | 7:00  | 1.1         | 0.5         | 0.6  | 1.2         | 0.8         | 0.4  | 0.5         | 0.4         | 0.1  | 0.6         | -0.2          |
|      | 8:00  | 4.1         | 0.7         | 3.4  | 5.4         | 1.1         | 4.3  | 5.8         | 1.0         | 4.8  | 1.1         | -0.1          |
|      | 9:00  | 8.8         | 5.9         | 2.9  | 11.6        | 7.0         | 4.5  | 11.4        | 8.4         | 3.0  | 7.5         | 0.9           |
|      | 10:00 | 14.4        | 12.3        | 2.1  | 17.6        | 12.3        | 5.3  | 18.1        | 12.7        | 5.4  | 12.1        | 0.6           |
|      | 11:00 | 18.0        | 16.0        | 2.0  | 21.9        | 15.7        | 6.2  | 22.5        | 16.0        | 6.5  | 15.4        | 0.5           |
|      | 12:00 | 22.0        | 18.9        | 3.1  | 26.1        | 18.2        | 7.8  | 26.8        | <b>18.5</b> | 8.3  | 18.0        | 0.4           |
|      | 13:00 | <b>22.4</b> | <b>19.3</b> | 3.2  | <b>27.0</b> | <b>18.5</b> | 8.5  | <b>27.2</b> | <b>18.5</b> | 8.7  | <b>18.2</b> | 0.3           |
|      | 14:00 | 21.4        | 18.3        | 3.1  | 25.3        | 17.5        | 7.8  | 25.0        | 17.4        | 7.6  | 17.2        | 0.2           |
|      | 15:00 | 18.2        | 15.1        | 3.1  | 21.3        | 14.8        | 6.5  | 20.1        | 14.8        | 5.3  | 14.9        | -0.1          |
|      | 16:00 | 13.3        | 11.8        | 1.6  | 15.8        | 11.7        | 4.1  | 14.8        | 11.8        | 2.9  | 11.6        | 0.2           |
|      | 17:00 | 7.9         | 8.2         | -0.3 | 9.8         | 8.3         | 1.5  | 8.9         | 9.1         | -0.2 | 8.5         | 0.5           |
|      | 18:00 | 4.4         | 5.7         | -1.3 | 5.6         | 5.9         | -0.3 | 4.3         | 6.6         | -2.3 | 6.1         | 0.5           |
|      |       |             | 温度差平均       | 1.9  |             | 温度差平均       | 4.7  |             | 温度差平均       | 4.2  | 温度差平均       | 0.3           |
|      |       |             | 最大温度差       | 3.4  |             | 最大温度差       | 8.5  |             | 最大温度差       | 8.7  | 最大温度差       | 0.9           |
| 3/14 | 7:00  | 1.4         | 0.8         | 0.6  | 2.6         | 1.1         | 1.5  | 2.8         | 2.9         | -0.1 | 1.5         | 1.4           |
|      | 8:00  | 6.6         | 4.6         | 2.0  | 7.4         | 5.3         | 2.1  | 7.3         | 6.0         | 1.3  | 5.3         | 0.8           |
|      | 9:00  | 14.4        | 10.7        | 3.7  | 15.6        | 11.2        | 4.4  | 16.0        | 11.4        | 4.6  | 10.9        | 0.5           |
|      | 10:00 | 20.8        | 16.7        | 4.1  | 22.9        | 16.6        | 6.4  | 23.5        | 16.4        | 7.1  | 16.0        | 0.4           |
|      | 11:00 | 23.8        | 19.6        | 4.2  | 27.3        | 18.6        | 8.7  | 27.6        | 19.1        | 8.5  | 18.8        | 0.3           |
|      | 12:00 | <b>28.0</b> | <b>21.4</b> | 6.6  | <b>31.1</b> | <b>21.6</b> | 9.5  | <b>32.0</b> | <b>21.5</b> | 10.5 | <b>21.2</b> | 0.3           |
|      | 13:00 | 22.6        | 19.5        | 3.1  | 25.2        | 19.3        | 6.0  | 24.6        | 19.4        | 5.2  | 19.1        | 0.3           |
|      | 14:00 | 22.2        | 18.1        | 4.1  | 24.6        | 17.9        | 6.6  | 24.2        | 18.0        | 6.2  | 18.2        | -0.2          |
|      | 15:00 | 19.6        | 17.1        | 2.5  | 21.8        | 16.7        | 5.1  | 21.1        | 16.8        | 4.3  | 16.9        | -0.1          |
|      | 16:00 | 15.4        | 12.7        | 2.7  | 17.0        | 13.3        | 3.7  | 15.9        | 14.0        | 1.9  | 13.8        | 0.2           |
|      | 17:00 | 8.7         | 8.4         | 0.3  | 10.1        | 8.8         | 1.3  | 8.7         | 9.7         | -1.0 | 9.4         | 0.3           |
|      |       | 5.2         | 5.6         | -0.4 | 6.2         | 6.1         | 0.2  | 4.9         | 6.7         | -1.8 | 6.5         | 0.3           |
|      |       |             | 温度差平均       | 2.8  |             | 温度差平均       | 4.6  |             | 温度差平均       | 3.9  | 温度差平均       | 0.4           |
|      |       |             | 最大温度差       | 6.6  |             | 最大温度差       | 9.5  |             | 最大温度差       | 10.5 | 最大温度差       | 1.4           |
| 3/15 | 7:00  | 1.5         | 0.7         | 0.8  | 2.3         | 1.3         | 1.0  | 2.4         | 2.0         | 0.4  | 1.2         | 0.8           |
|      | 8:00  | 6.8         | 4.0         | 2.8  | 9.5         | 6.0         | 3.5  | 9.4         | 7.3         | 2.1  | 6.5         | 0.8           |
|      | 9:00  | 14.7        | 11.2        | 3.5  | 16.1        | 11.8        | 4.3  | 15.7        | 12.1        | 3.5  | 11.8        | 0.3           |
|      | 10:00 | 17.1        | 14.3        | 2.9  | 20.0        | 14.1        | 5.8  | 19.4        | 14.6        | 4.7  | 14.3        | 0.4           |
|      | 11:00 | 21.7        | 17.2        | 4.5  | 25.6        | 16.9        | 8.7  | 25.2        | 17.1        | 8.1  | 16.9        | 0.2           |
|      | 12:00 | <b>23.4</b> | <b>17.5</b> | 5.9  | <b>27.5</b> | <b>17.8</b> | 9.7  | <b>25.7</b> | <b>17.6</b> | 8.1  | <b>17.6</b> | 0.0           |
|      | 13:00 | 22.8        | 16.7        | 6.0  | 25.6        | 16.4        | 9.3  | 24.1        | 16.5        | 7.7  | 16.4        | 0.1           |
|      | 14:00 | 24.6        | 17.3        | 7.3  | 27.1        | 16.6        | 10.5 | 26.0        | 16.7        | 9.3  | 16.4        | 0.3           |
|      | 15:00 | 19.6        | 13.3        | 6.3  | 22.0        | 12.9        | 9.1  | 21.2        | 14.4        | 6.8  | 14.1        | 0.3           |
|      | 16:00 | 14.0        | 10.5        | 3.5  | 15.9        | 10.8        | 5.1  | 14.9        | 11.3        | 3.5  | 11.1        | 0.2           |
|      | 17:00 | 7.6         | 6.0         | 1.7  | 9.1         | 6.4         | 2.7  | 7.8         | 7.3         | 0.5  | 6.9         | 0.4           |
|      | 18:00 | 3.5         | 3.3         | 0.2  | 4.7         | 3.9         | 0.8  | 3.3         | 4.4         | -1.1 | 4.2         | 0.3           |
|      |       |             | 温度差平均       | 3.8  |             | 温度差平均       | 5.9  |             | 温度差平均       | 4.5  | 温度差平均       | 0.3           |
|      |       |             | 最大温度差       | 7.3  |             | 最大温度差       | 10.5 |             | 最大温度差       | 9.3  | 最大温度差       | 0.8           |
| 3/16 | 7:00  | 0.7         | -0.1        | 0.7  | 1.0         | 0.6         | 0.4  | 0.4         | 0.1         | 0.2  | 0.4         | -0.3          |
|      | 8:00  | 4.3         | 0.1         | 4.2  | 5.8         | 0.6         | 5.2  | 6.9         | 1.1         | 5.7  | 0.7         | 0.5           |
|      | 9:00  | 12.5        | 3.0         | 9.5  | 15.7        | 7.7         | 8.0  | 16.5        | 10.0        | 6.5  | 8.6         | 1.4           |
|      | 10:00 | 18.4        | 13.0        | 5.4  | 21.3        | 14.4        | 6.9  | 21.6        | 14.9        | 6.7  | 14.5        | 0.4           |
|      | 11:00 | 19.9        | 15.3        | 4.5  | 23.3        | 16.5        | 6.8  | 22.9        | 16.7        | 6.2  | 16.7        | 0.0           |
|      | 12:00 | <b>21.8</b> | <b>16.6</b> | 5.1  | <b>24.7</b> | <b>17.4</b> | 7.3  | 24.9        | <b>17.5</b> | 7.4  | <b>17.7</b> | -0.2          |
|      | 13:00 | <b>21.8</b> | 16.1        | 5.7  | 25.1        | 16.9        | 8.3  | <b>25.3</b> | 17.4        | 7.9  | 16.9        | 0.5           |
|      | 14:00 | 18.0        | 13.5        | 4.4  | 20.4        | 14.1        | 6.3  | 19.4        | 14.7        | 4.7  | 14.2        | 0.5           |
|      | 15:00 | 17.3        | 12.9        | 4.4  | 19.2        | 13.4        | 5.8  | 18.3        | 14.1        | 4.3  | 13.7        | 0.3           |
|      | 16:00 | 11.4        | 9.3         | 2.0  | 13.1        | 9.8         | 3.2  | 11.8        | 10.5        | 1.4  | 10.0        | 0.5           |
|      | 17:00 | 7.5         | 6.5         | 0.9  | 8.7         | 7.0         | 1.6  | 7.5         | 7.6         | -0.1 | 7.4         | 0.3           |
|      | 18:00 | 5.2         | 5.1         | 0.2  | 6.3         | 5.6         | 0.7  | 5.4         | 5.9         | -0.6 | 5.8         | 0.2           |
|      |       |             | 温度差平均       | 3.9  |             | 温度差平均       | 5.0  |             | 温度差平均       | 4.2  | 温度差平均       | 0.3           |
|      |       |             | 最大温度差       | 9.5  |             | 最大温度差       | 8.3  |             | 最大温度差       | 7.9  | 最大温度差       | 1.4           |

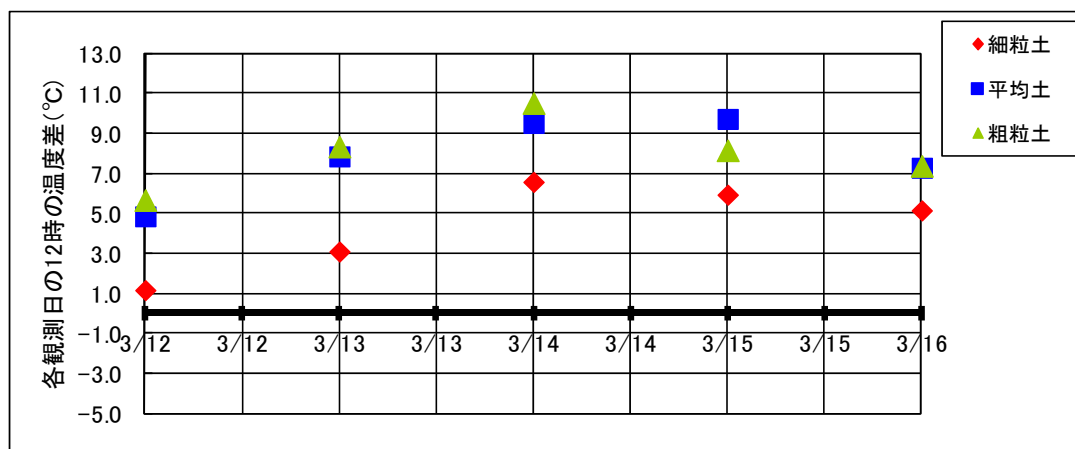


図-6.4.6 各観測日 12 時における飽和・不飽和の地表面温度差

表-6.4.2 各観測日における各供試体の平均体積含水率・飽和度

| 粒度条件 | 飽和条件 | 間隙比 $e$<br>(土質試験値) | 表層10mmの1日の平均体積含水率 $\theta$ |       |       |       | 飽和度 $S_r\%$ (計算値) |       |       |       |
|------|------|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
|      |      |                    | 3月12日                      | 3月13日 | 3月14日 | 3月15日 | 3月12日             | 3月13日 | 3月14日 | 3月15日 |
| 細粒   | 不飽和  | 1.96               | 46.0%                      | 42.0% | 40.0% | 41.0% | 69.5              | 63.4  | 60.4  | 61.9  |
| 細粒   | 飽和   | 2.12               | 67.0%                      | 67.0% | 67.0% | 67.0% | 98.6              | 98.6  | 98.6  | 98.6  |
| 平均   | 不飽和  | 1.48               | 35.0%                      | 33.0% | 33.0% | 33.0% | 58.6              | 55.3  | 55.3  | 55.3  |
| 平均   | 飽和   | 1.64               | 62.0%                      | 62.0% | 62.0% | 62.0% | 99.8              | 99.8  | 99.8  | 99.8  |
| 粗粒   | 不飽和  | 0.57               | 33.0%                      | 31.0% | 31.0% | 31.0% | 90.9              | 85.4  | 85.4  | 85.4  |
| 粗粒   | 飽和   | 0.65               | 39.0%                      | 39.0% | 38.0% | 38.0% | 99.0              | 99.0  | 96.5  | 96.5  |
| 粗粒   | 飽和   | 1.36               | 57.0%                      | 57.0% | 58.0% | 58.0% | 98.9              | 98.9  | 100.0 | 100.0 |

○3月12日

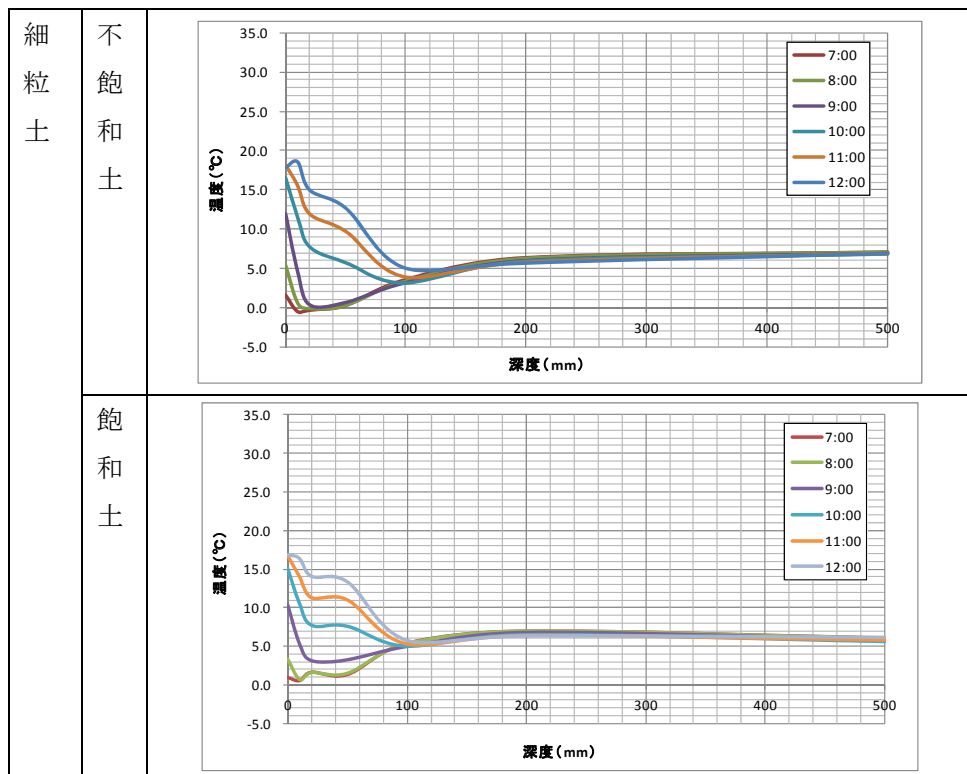


図-6.4.7 供試体実験における地中温度の測定結果(3月12日:細粒土)

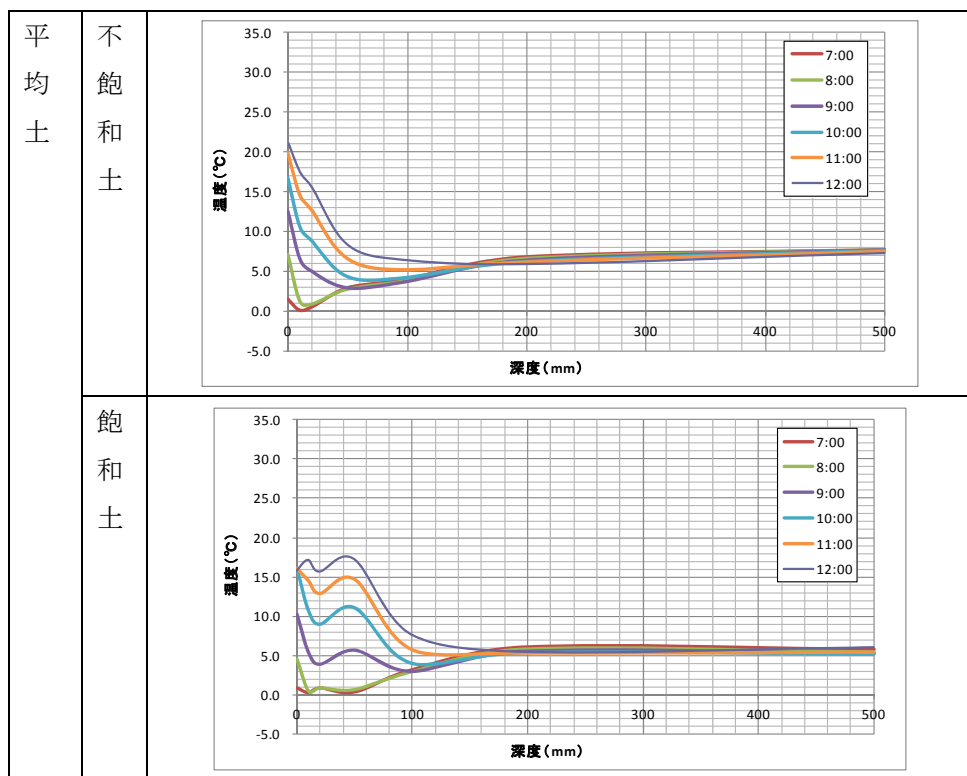


図-6.4.8 供試体実験における地中温度の測定結果(3月12日:平均土)

○3月12日

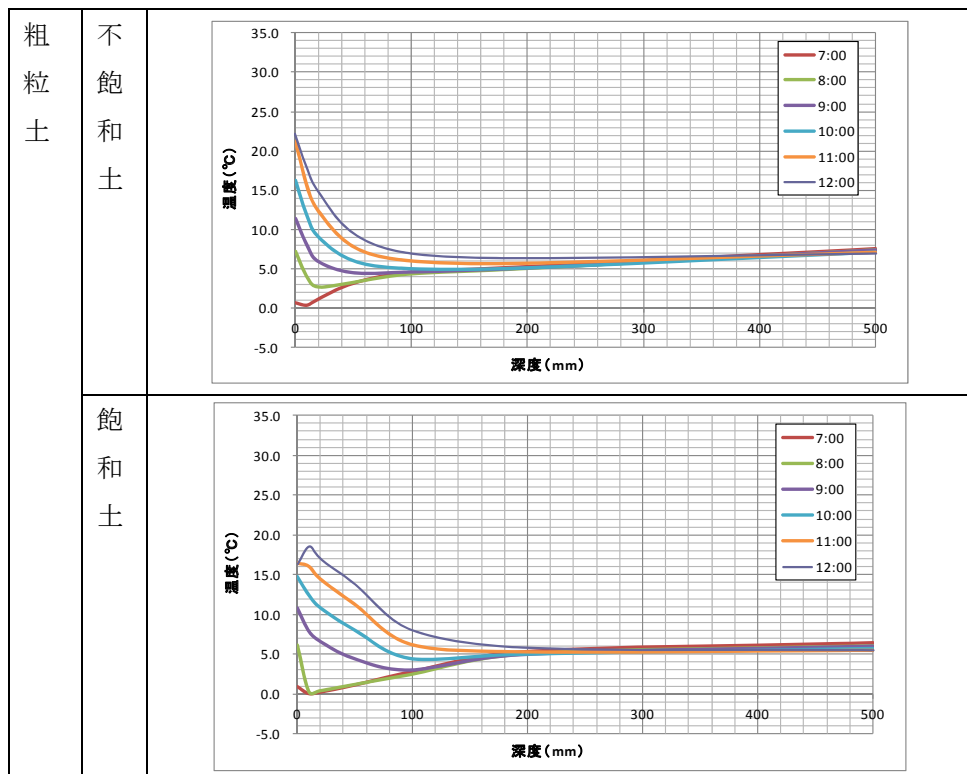


図-6.4.9 供試体実験における地中温度の測定結果（3月12日：粗粒土）

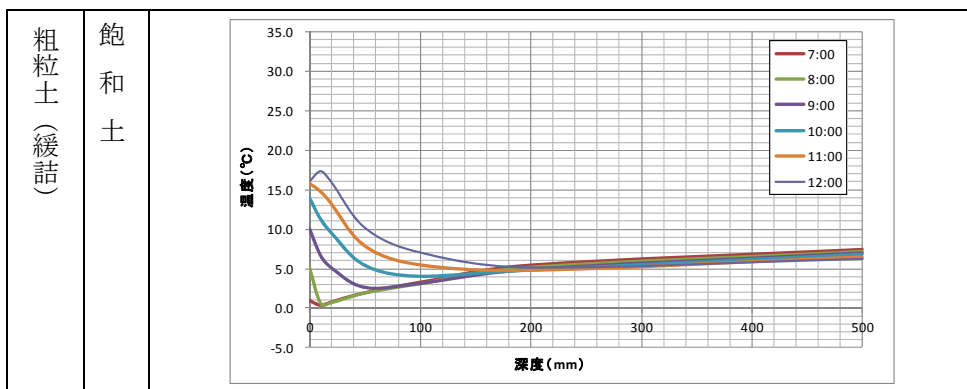


図-6.4.10 供試体実験における地中温度の測定結果（3月12日：粗粒土緩詰）

○3月13日

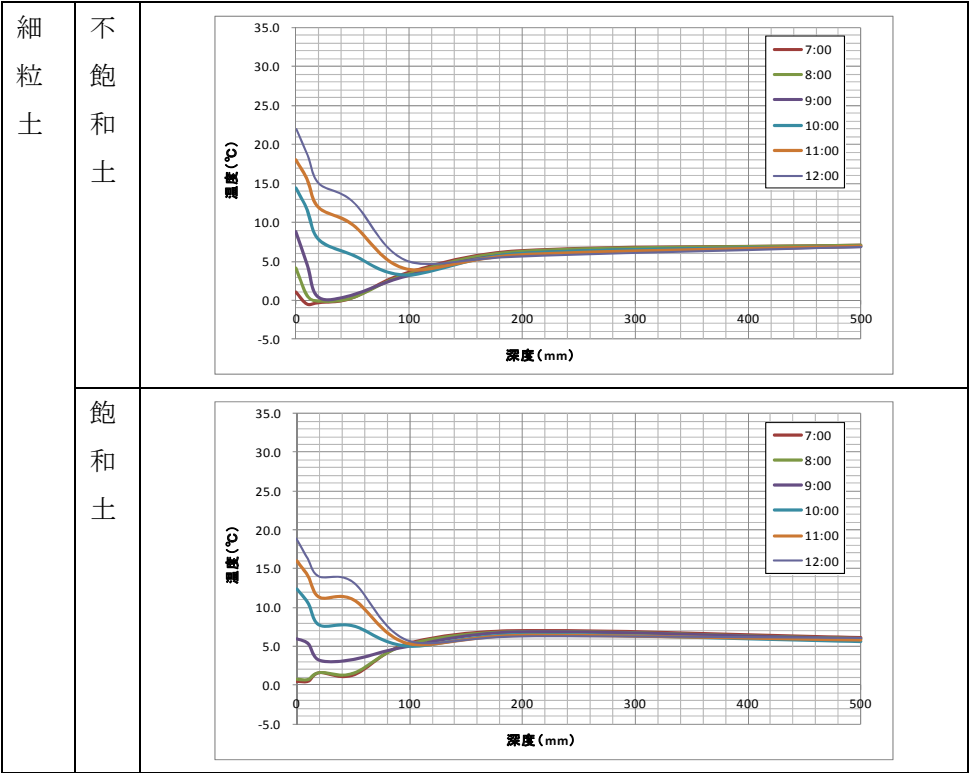


図-6.4.11 供試体実験における地中温度の測定結果（3月13日：細粒土）

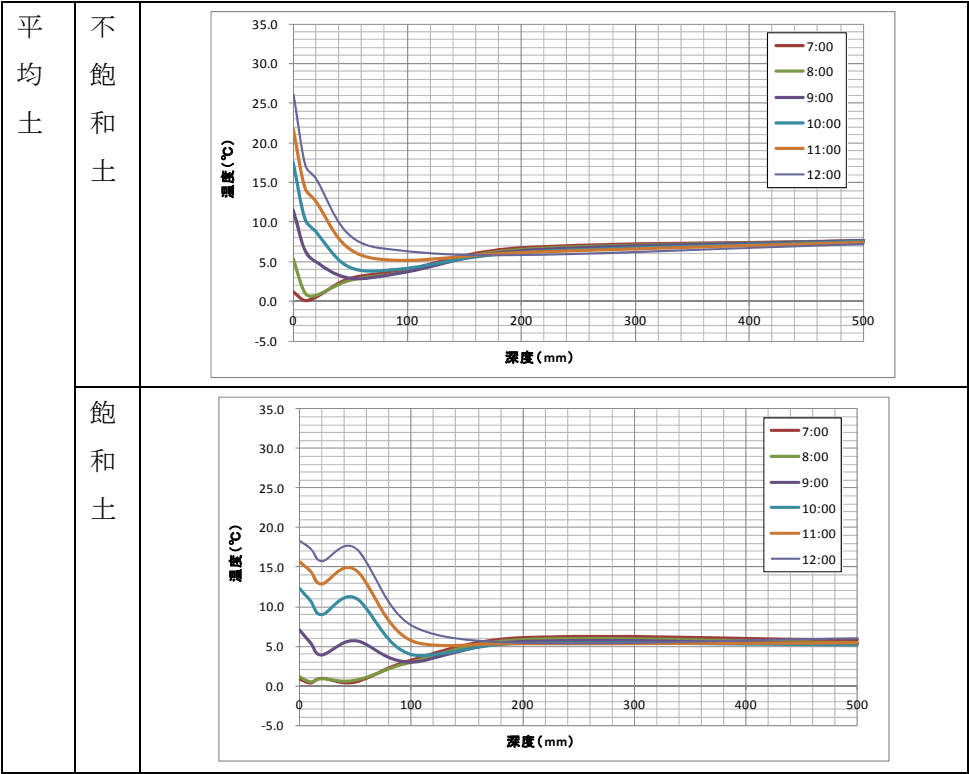


図-6.4.12 供試体実験における地中温度の測定結果（3月13日：平均土）

○3月13日

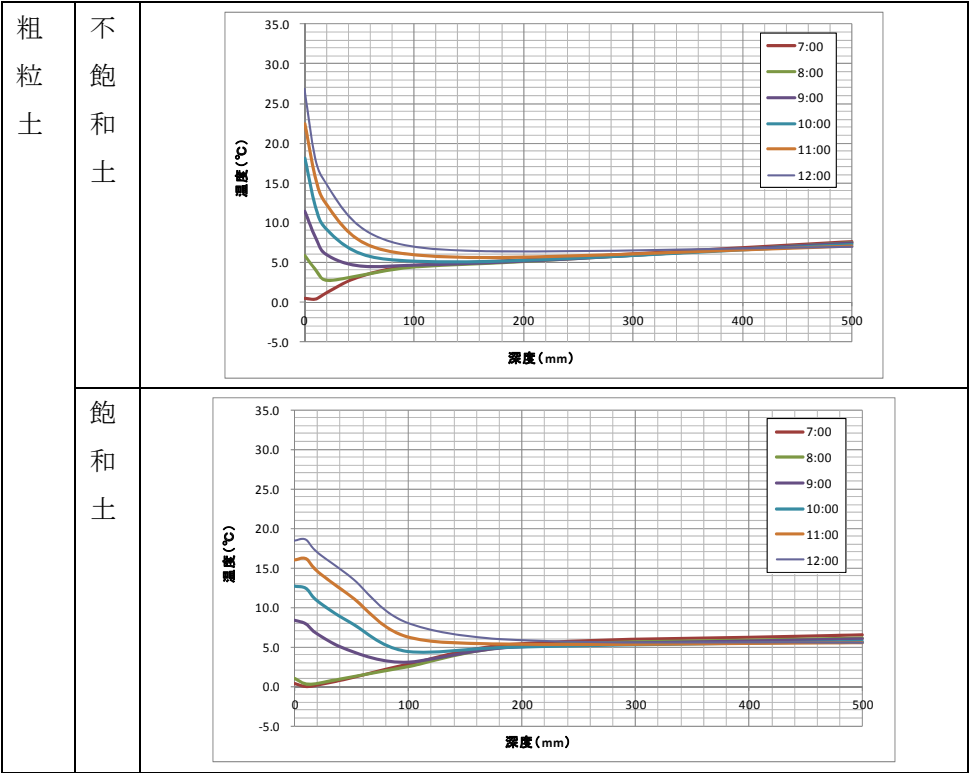


図-6. 4. 13 供試体実験における地中温度の測定結果（3月13日：粗粒土）

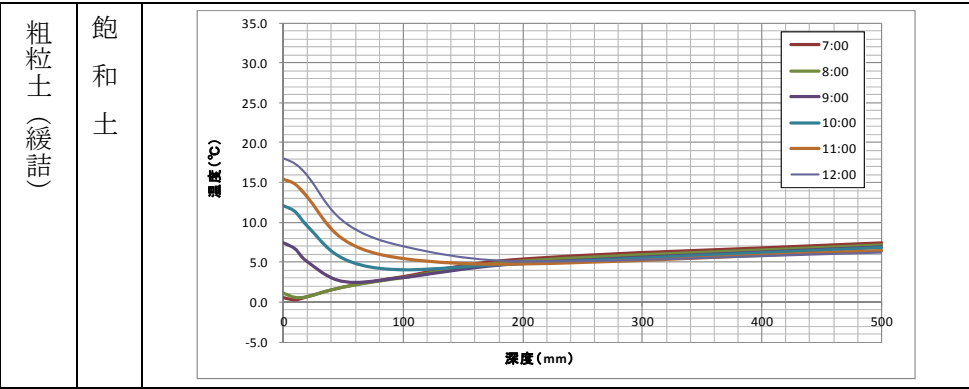


図-6. 4. 14 供試体実験における地中温度の測定結果（3月13日：粗粒土緩詰）

○3月14日

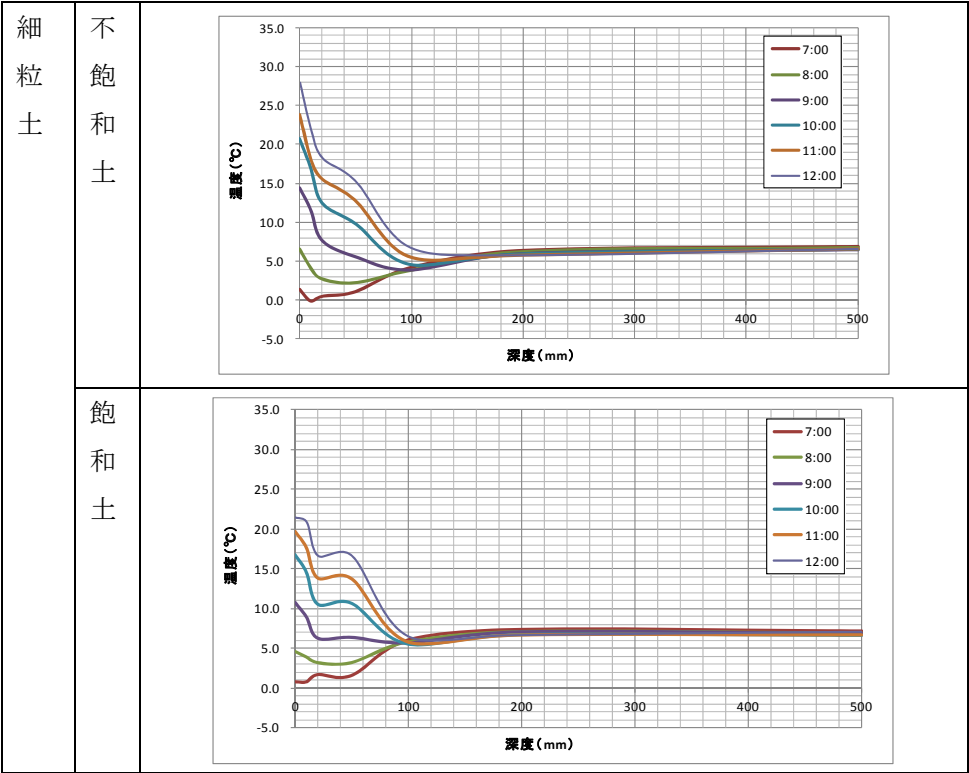


図-6.4.15 供試体実験における地中温度の測定結果（3月14日：細粒土）

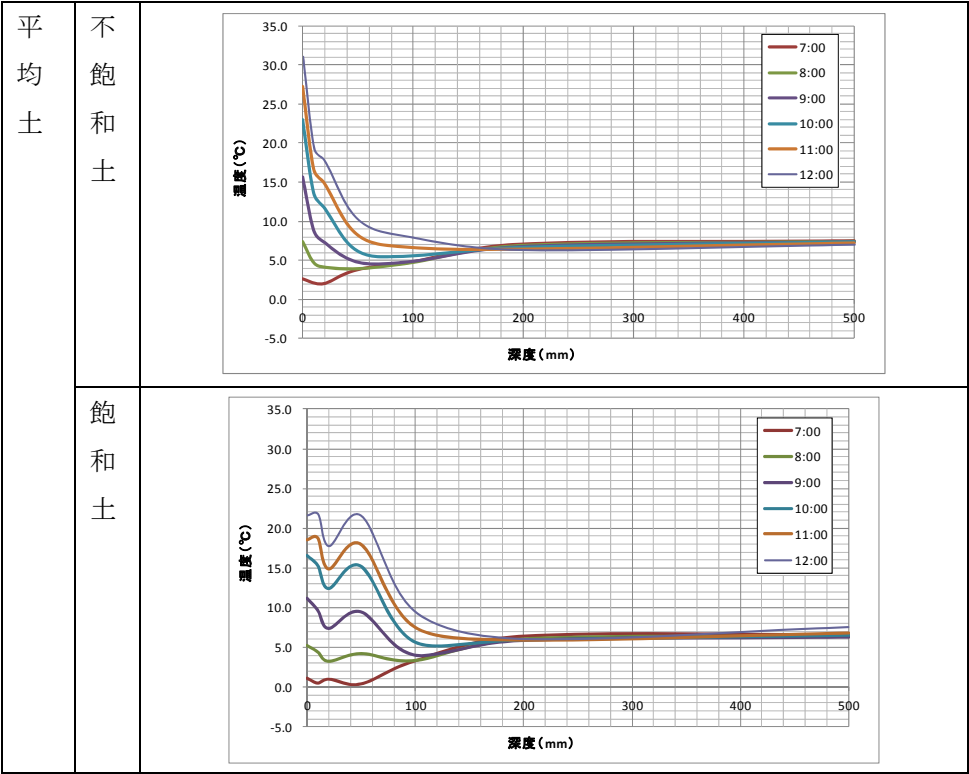


図-6.4.16 供試体実験における地中温度の測定結果（3月14日：平均土）

○3月14日

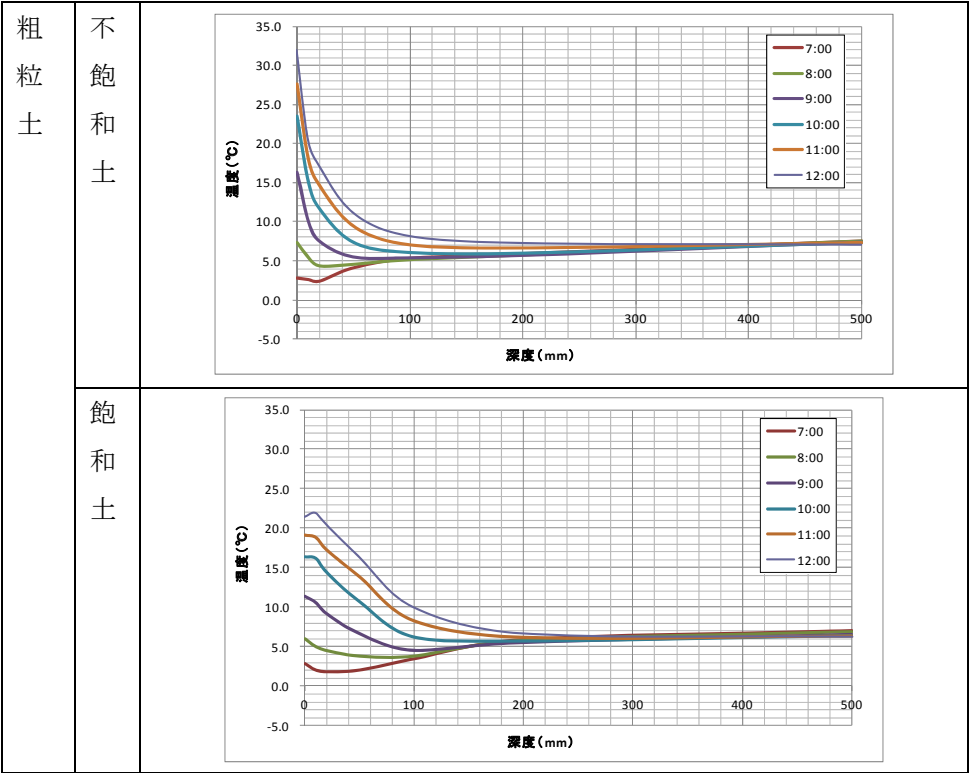


図-6.4.17 供試体実験における地中温度の測定結果（3月14日：粗粒土）

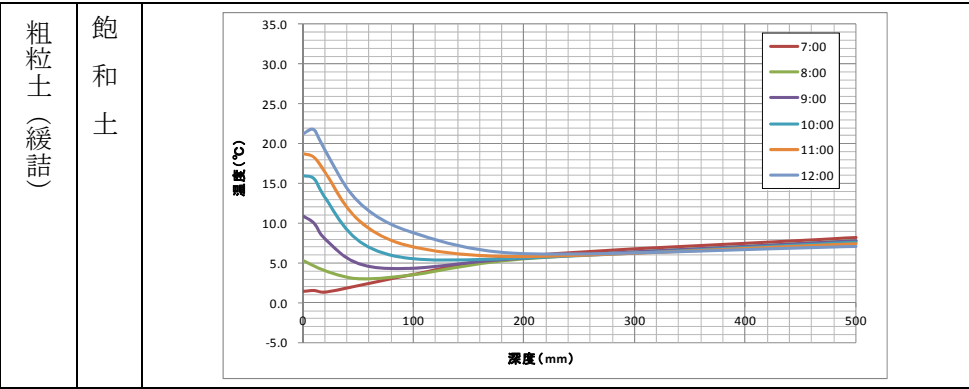


図-6.4.18 供試体実験における地中温度の測定結果（3月14日：粗粒土緩詰）

○3月15日

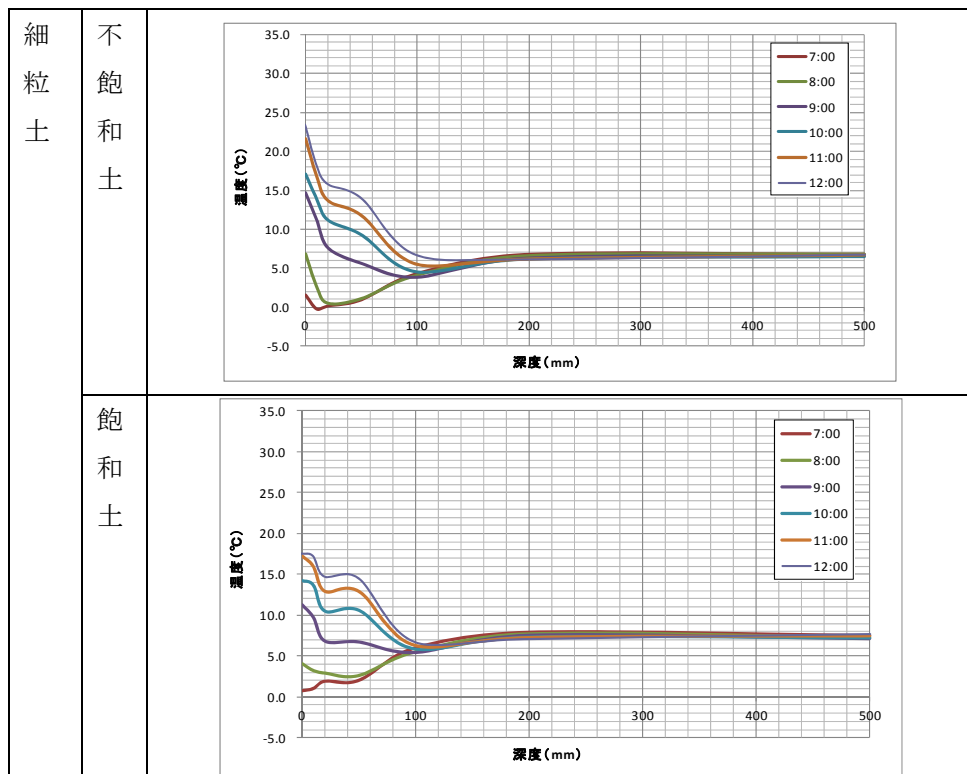


図-6.4.19 供試体実験における地中温度の測定結果（3月15日：細粒土）

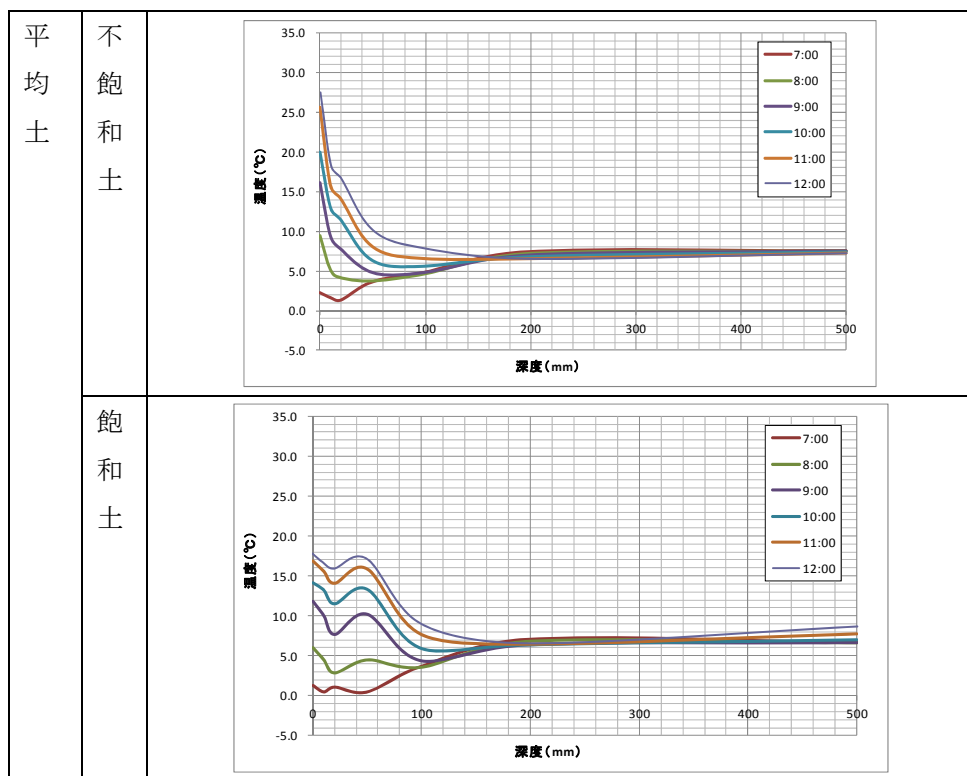


図-6.4.20 供試体実験における地中温度の測定結果（3月15日：平均土）

○3月15日

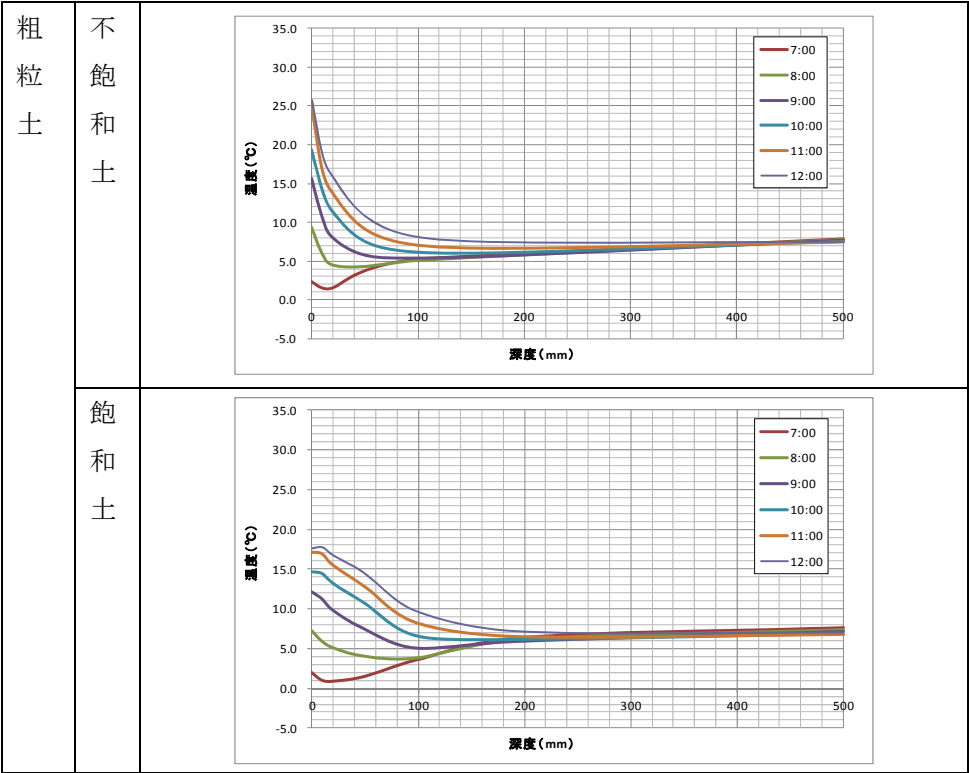


図-6. 4. 21 供試体実験における地中温度の測定結果（3月15日：粗粒土）

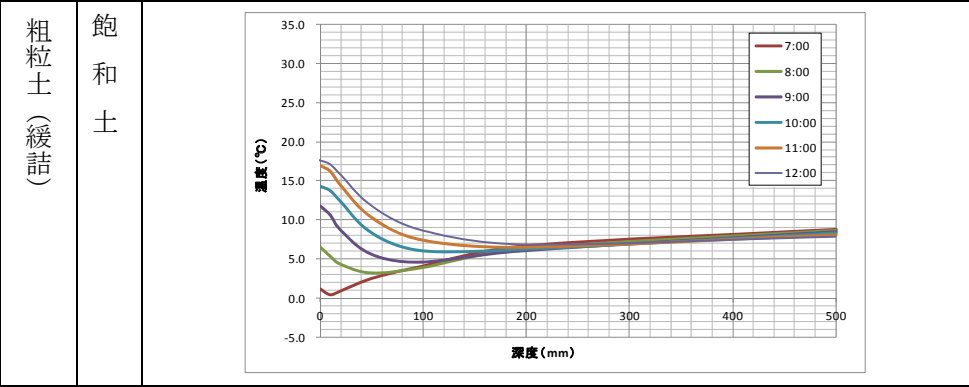


図-6. 4. 22 供試体実験における地中温度の測定結果（3月15日：粗粒土緩詰）

○3月16日

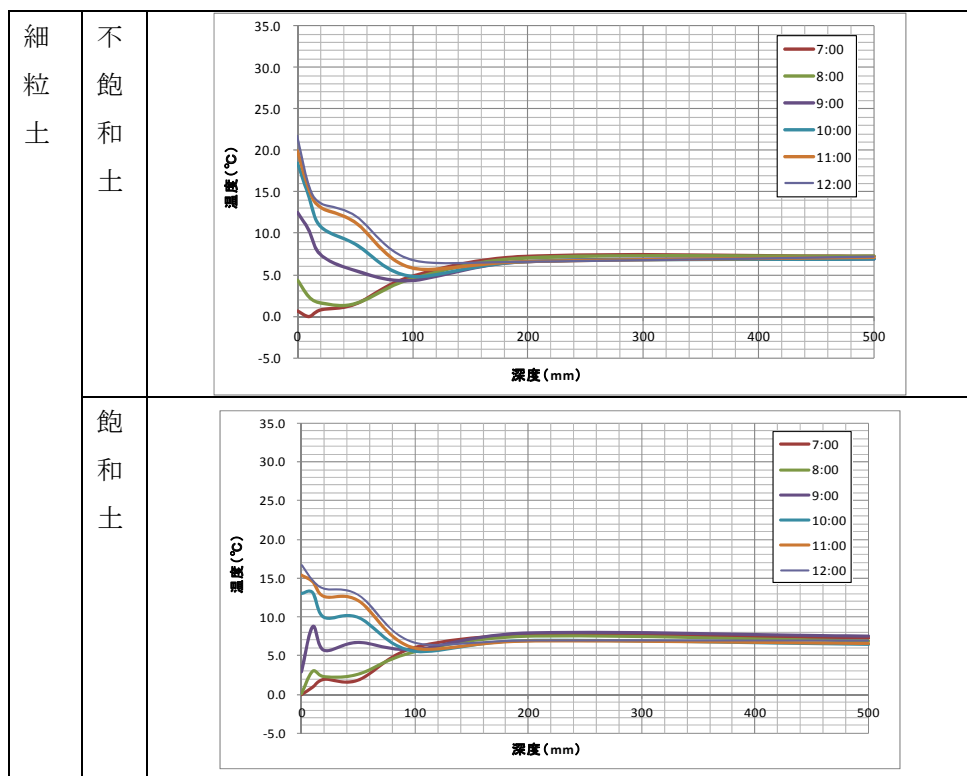


図-6. 4. 23 供試体実験における地中温度の測定結果（3月16日：細粒土）

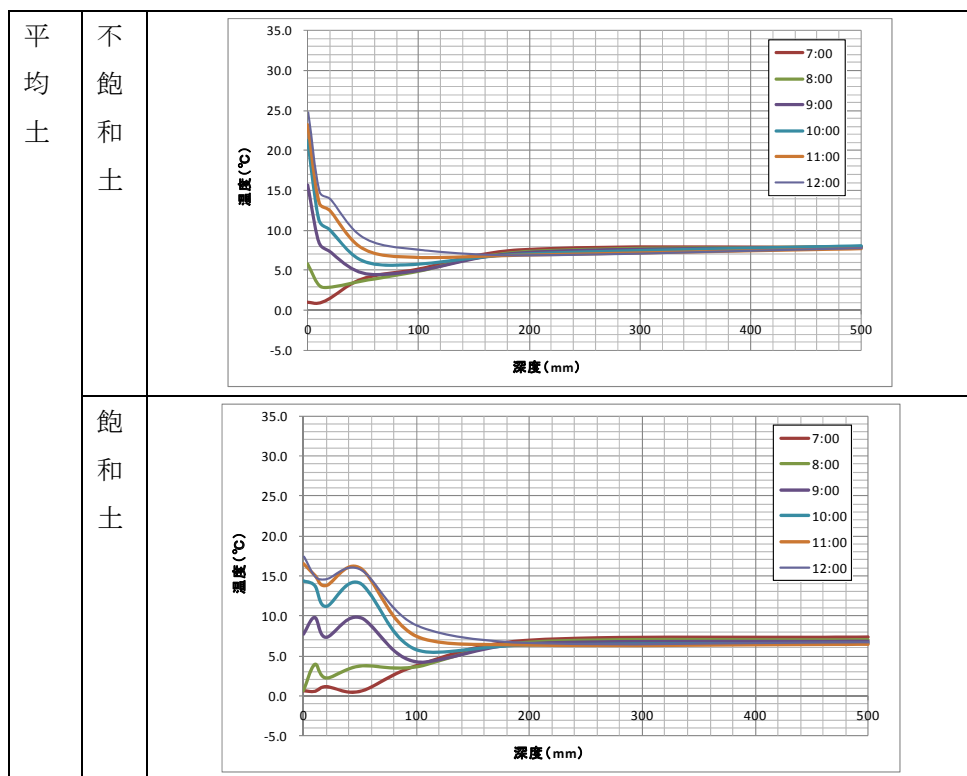


図-6. 4. 24 供試体実験における地中温度の測定結果（3月16日：平均土）

○3月16日

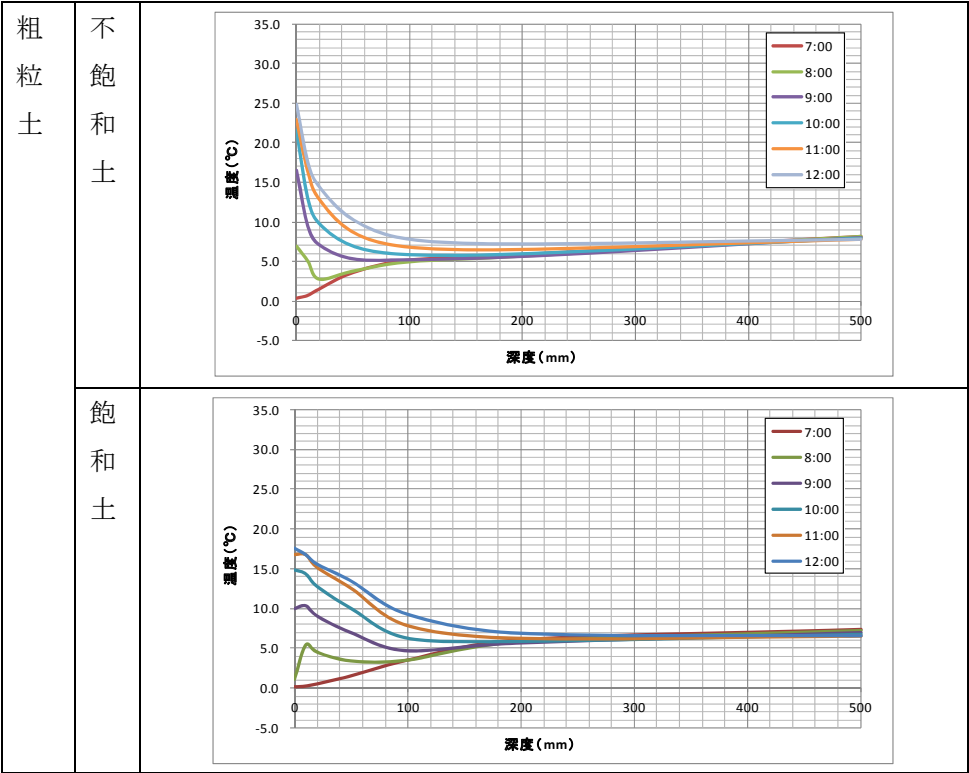


図-6.4.25 供試体実験における地中温度の測定結果（3月16日：粗粒土）

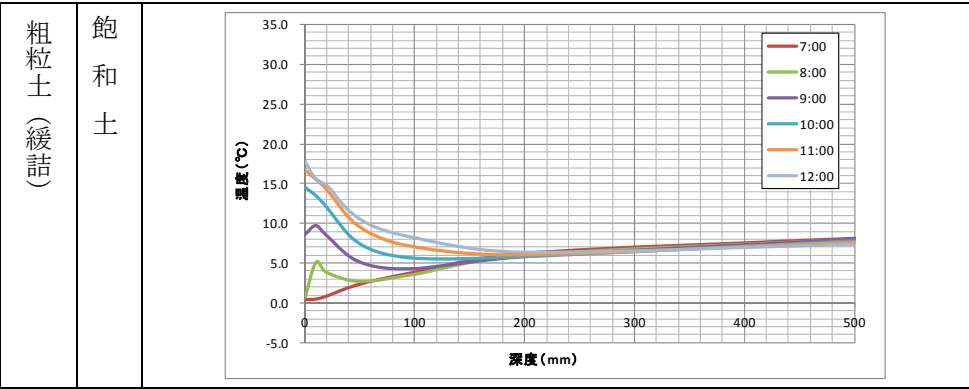


図-6.4.26 供試体実験における地中温度の測定結果（3月16日：粗粒土緩詰）

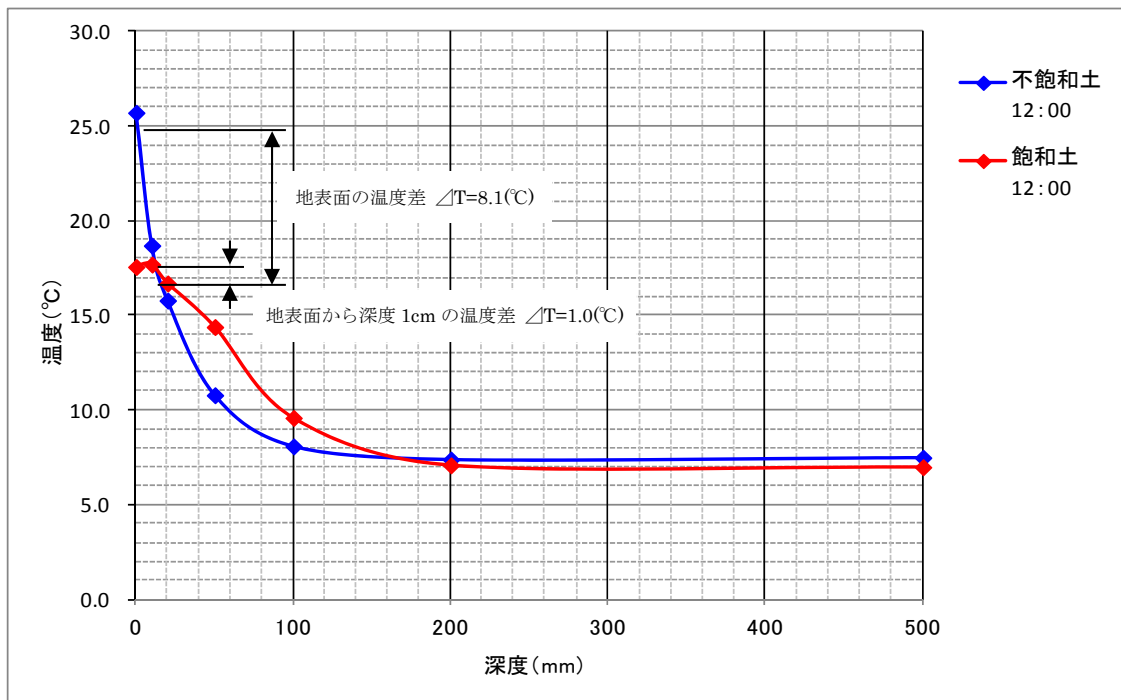


図-6. 4. 27 粗粒土供試体実験における飽和土と不飽和土の温度測定結果（3 月 15 日）

#### 6.4.2 堤防のり面に繁茂する植生が湿潤部検知に与える影響（課題2）

6.3.2 に示した実堤防の観測結果から植生と裸地における地表面温度の日変化と 12 時時点の温度幅を比較することにより、植生が湿潤部の検知に及ぼす影響について検討する。

No.1（湿潤部）と No.2（通常部）の観測地点で 7:00、12:00、18:00 に撮影した熱画像を写真-6.4.1～写真-6.4.6 に示す。概観すると、表土を掘削して裸地にした区画(人工裸地)とその周囲の植生が繁茂している区画では温度が異なり、植生の温度が高い場合が多い。これは、植生と裸地の熱容量が違うこと、地表下との熱交換の効率が違うためと考えられる。また、植生部であっても場所によって温度の差異が比較的大きく、7:00 時点で 2～4℃の 2℃程度、12:00 時点では 10～16℃で 6℃程度、18:00 時点では 5～7℃で 2℃程度の幅が認められた。

熱画像に見られた上記の特徴を定量的に調べるため、各観測地点に設置した 12 区画から代表 4 区画について植生の繁茂範囲から 2 箇所（植生部）、植生の隙間から露出していた地表面から 1 箇所（裸地（植生間））の温度を熱画像から抽出した。併せて、人工裸地の範囲から 2 箇所（人工裸地(表面掘削)）において同様に温度を測定した。各箇所の位置は写真-6.4.1～写真-6.4.6 上に印を付けて示している。

図-6.4.28 および図-6.4.29 に、No.1（湿潤部）と No.2（通常部）について裸地（植生間）の温度の測定結果を示す。日射の供給の少ない 7:00 および 18:00 では No.1, No.2 ともに温度のばらつきが相対的に小さい。また、日射の供給が多い 12:00 では、日射の少ない時刻に比べ温度が高く、温度幅も大きくなった。No.1 と No.2 の人工裸地（表面掘削）における温度測定結果を図-6.4.30 および図-6.4.31 に示す。人工裸地と裸地（植生間）は地表面温度に有意な差がなく、温度幅も同程度となった。

一方、図-6.4.32 および図-6.4.33 に示す No.1 と No.2 の植生部における温度は、7:00 および 18:00 には人工裸地と裸地（植生間）と同程度であるが、12:00 の温度はやや高めであり、その検出された温度幅は、No.1, No.2 とも 5℃程度と大きい。

以上から、植生部の温度は地表面より高温を示す傾向にあり、地表面の温度を測定しているとはいえない。また、検出する温度幅も広くばらつく傾向にある。また、草丈を低く刈った植生間の裸地の温度は、人工裸地（表面掘削）と同程度の温度を示したことから、草刈り後の裸地部を対象とした赤外線サーモグラフィにより、湿潤部検知が可能と推察される。

なお、No.1（湿潤部）と No.2（通常部）の人工裸地(表面掘削)の 12:00 における温度を比較すると、No.1（湿潤部）のほうが大きく、6.4.1 の盛土実験と逆の結果となっている。写真-6.3.4 に 2 月の観測時と 10 月の場所選定時の表面状態を示したが、これらを比較すると堤体からのしぼり水で掘削面が湿潤した状態が観測時には見られなくなっており、これが逆転の生じた理由と思われる。この結果は、6.4.1 で指摘した温度差による湿潤部検知が表面の乾燥状態に大きく影響を受けることを示唆する現地観測結果の一例と考えられる。

以上より、堤体湿潤部を温度差によって検知するためには、1)植生に覆われていない裸地

部であること、2)地表面まで完全に湿潤状態となっている（しぼり水が地表面まで達しており、かつ乾燥で失う水量より多く湧出する状態が保たれている）ことが前提になると考えられる。

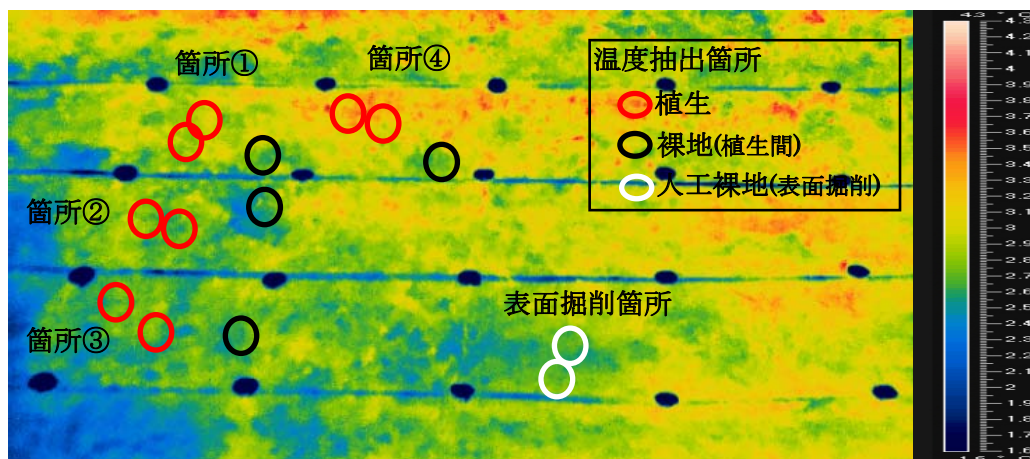


写真-6.4.1 N01 赤外線熱画像（2月19日7:00撮影）

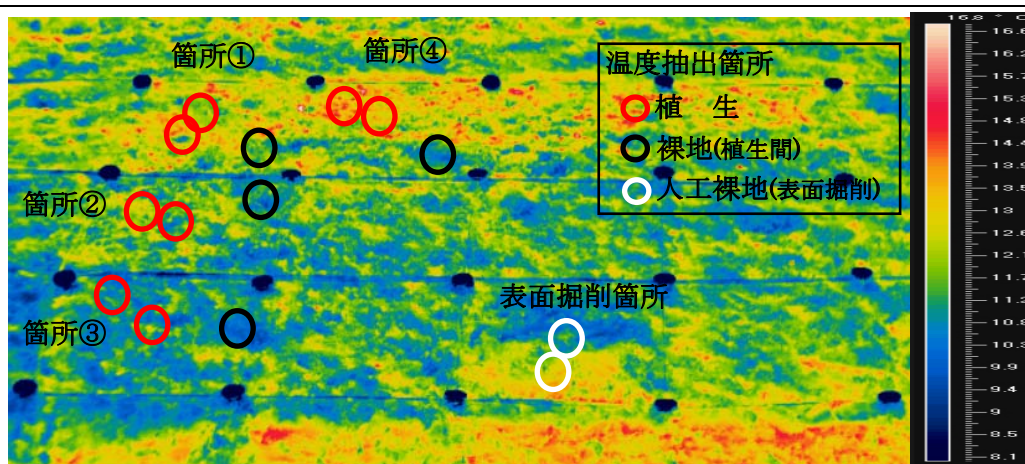


写真-6.4.2 N01 赤外線熱画像（2月19日12:00撮影）

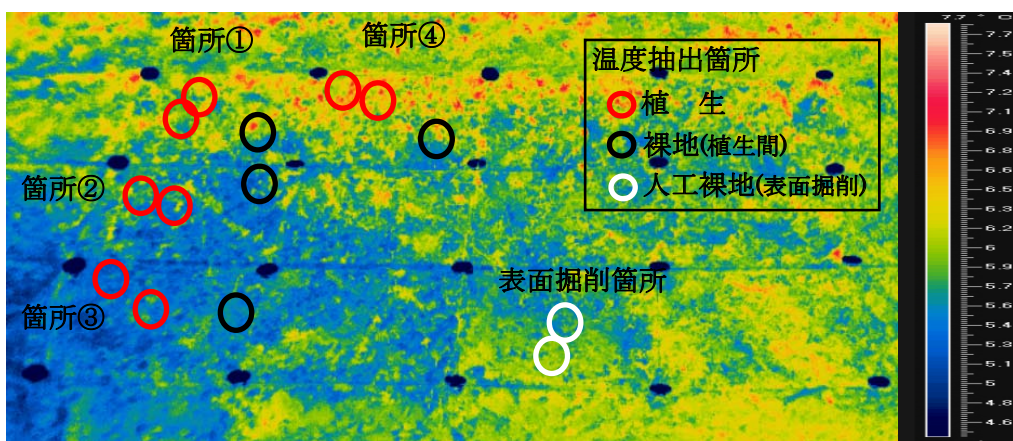


写真-6.4.3 N01 赤外線熱画像（2月19日18:00撮影）

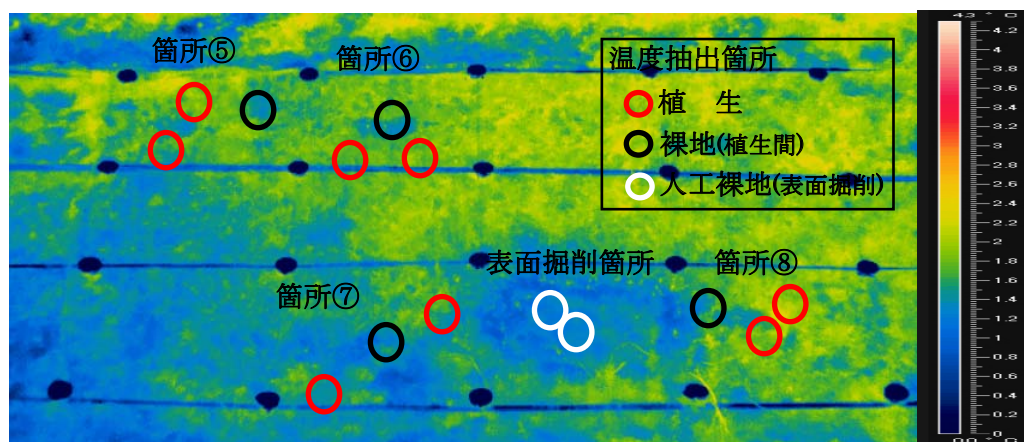


写真-6.4.4 N02 赤外線熱画像 (2月19日 7:00 撮影)

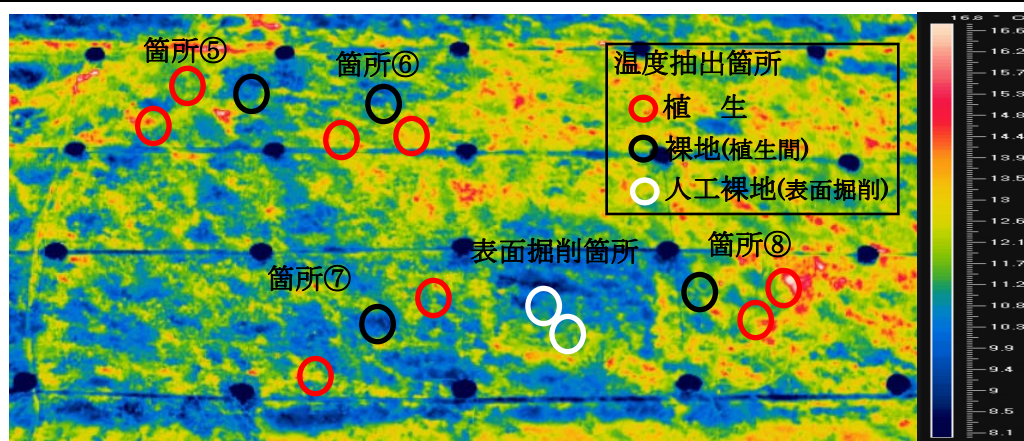


写真-6.4.5 N02 赤外線熱画像 (2月19日 12:00 撮影)

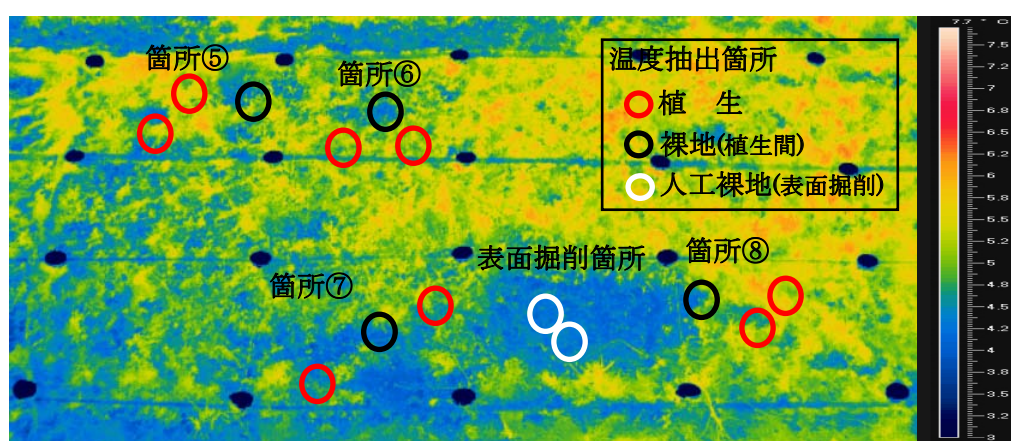


写真-6.4.6 N02 赤外線熱画像 (2月19日 18:00 撮影)

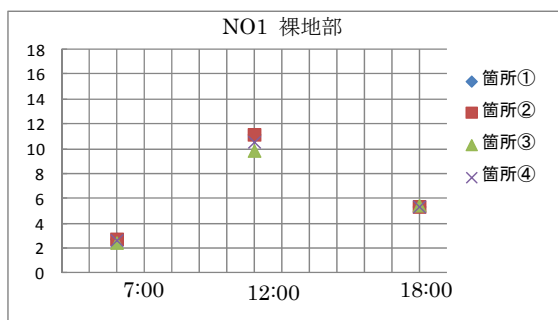


図-6. 4. 28 NO1 の裸地(植生間)の地表面温度

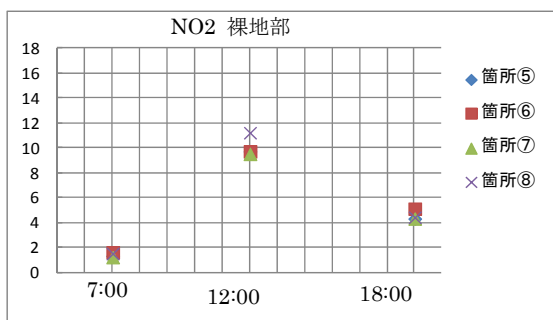


図-6. 4. 29 NO2 の裸地(植生間)の地表面温度

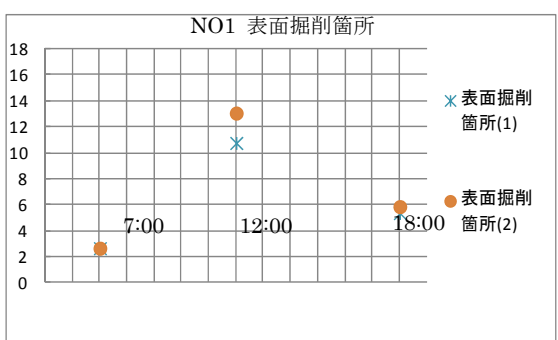


図-6. 4. 30 NO1 の人口裸地(表面掘削)の地表面

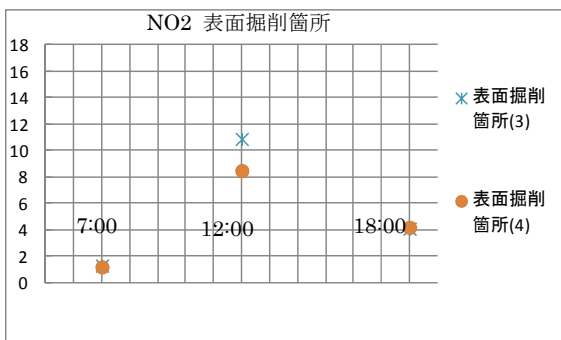


図-6. 4. 31 NO2 の人口裸地(表面掘削)の地表面

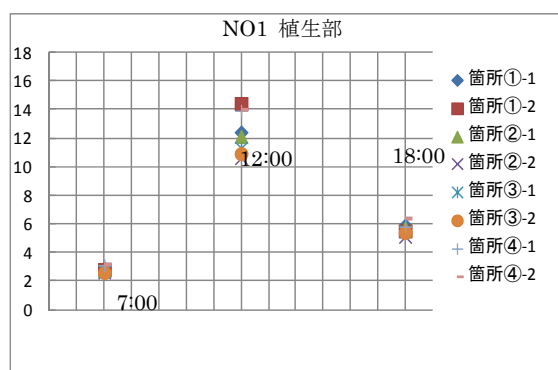


図-6. 4. 32 NO1 の植生の地表面温度

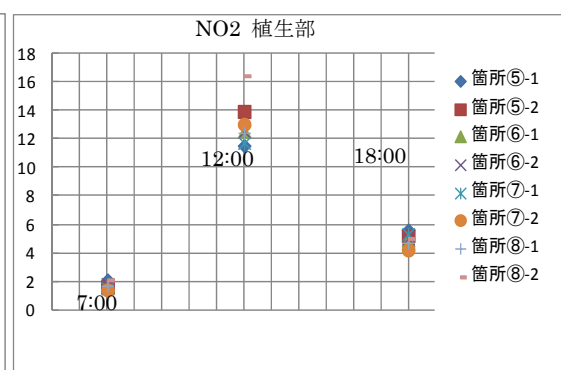


図-6. 4. 33 NO2 の植生の地表面温度

#### 6.4.3 堤防のり面の土質の不均質さによる地表面温度差（課題3）

飽和土と不飽和土の温度差は12時頃に最大になることが、図-6.4.1～図-6.4.5の測定結果から確認された。また、図-6.4.6から日中の飽和土と不飽和土の温度差は、平均土・粗粒土では有意な差が認められないものの、それらに比べて細粒土では2～3℃程度小さくなる傾向が見られた。以下では、こうした土質の違いによる地表面温度の差異に着目して、6.3.1に示した盛土実験結果から詳細を調べるとともに、それに基づいて土質の違いによる温度差の発生傾向について考察を加える。

飽和・不飽和に分けて細粒土、平均土、粗粒土の地表面温度の日変化を比較した結果を表-6.4.3および図-6.4.34～図-6.4.38に示す。飽和土については、各観測日とも土質によらずほぼ同じ温度日変化を示しているが、それに対して不飽和土では日中に平均土・粗粒土より細粒土の温度が低くなる傾向が認められる。この傾向を定量的に捉えるために、温度差が大きい12時に着目して、飽和・不飽和に分けて平均土を基準として粗粒土および細粒土の温度差を算定した結果を図-6.4.39および図-6.4.40に示す。飽和の場合には土質の違いによる温度差は1℃以下であるが、不飽和土の場合には細粒土のみ最大4℃程度小さくなっている。

各観測日における深さ方向温度分布の日変化を示した図-6.4.7～図-6.4.26を参照すると、各供試体とも深さ20cmより地表側で温度分布の変化が生じており、20cm以深ではほぼ一定となっている。温度分布の変化が顕著に生じている深さに着目すると、飽和の場合には細粒土、平均土、粗粒度で概ね10cm、15cm、20cmと粒径が大きくなるに伴って大きくなっている。また、温度が高くなる11,12時の温度分布形状を比較すると、細粒土、平均土では2～3cm以深で温度が深さに伴い明確に低減するが、それより地表側では温度差が小さく、概ね一様となる。それに対して、粗粒土では、10cm程度までほぼ一定勾配で温度が減少する傾向が見られる。このように、地中での蓄熱や熱伝導の特徴に差異が認められるが、12時頃の地表面温度には図-6.4.39に示したように概ね同一の温度となるという興味深い結果となった。

不飽和土の場合では、温度分布の変化が顕著な地表からの深さについては飽和土の場合と同様に粒径に伴って大きくなる傾向が見られる。しかし、11,12時の温度分布形状は、平均土、粗粒度で表面から指数関数的に温度が減少する分布であるが、細粒土ではその傾向が弱まり、表面から1～2cmでは急激に減少するが、それより以深では概ね同一勾配で減少する分布となっている。

一般に土中の水分量が多いほど熱伝導が生じやすいと考えられているが、上記したように飽和の場合に比較して不飽和の場合のほうが温度分布形状の勾配がきつくなる結果はこれと整合的である。

不飽和の場合、図-6.4.40に示したように細粒土の地表面温度が平均土・粗粒土に比べて低くなったが、表-6.4.2に示したように細粒土の体積含水率が10%程度大きいことを踏まえると、地表面から土中への熱伝導が平均土・粗粒土に比べて高いことが一因と考

えられる。こうした熱伝導の差異は、上記した不飽和土の温度分布形状の勾配の差異としても現れていると考えられる。

以上のように今回の実験では、不飽和土の場合には粒径によって地表面温度に差異が生じるが、飽和土では生じないという結果になったが、その理由と機構については、地表面下の温度分布がそれぞれ系統的に異なる特徴までは捉えられたものの、そこから解明するには至らなかった。不飽和土に関しては、土中の水分量の差異が地表面温度に影響を与えると予想された。この予想に基づくと、一般に細粒土は水分を保持しやすい傾向が高いと考えられるので、粒径の大きい場所に比べて細粒土の地表面温度が小さくなる場合が多いと思われる。その差異は最大 4℃に達しており、曇りなど温度差が大きくなる条件の日・時間帯に調査を行うと、細粒土の箇所で湿潤部の検知が困難になる可能性がある（図-6.4.6 参照）。

表-6.4.3 供試体実験における粒径による地表面温度の差異

| 日付   | 時刻    | 不飽和土 |      |      |         |      |    |      |    | 飽和土  |      |      |         |      |    |      |    |      |       |       |
|------|-------|------|------|------|---------|------|----|------|----|------|------|------|---------|------|----|------|----|------|-------|-------|
|      |       | 細粒土  | 平均土  | 粗粒土  | 土質間の差分値 |      |    |      |    | 細粒   | 平均   | 粗粒   | 土質間の差分値 |      |    |      |    | 粗粒   | 粗粒 縦結 | 粗粒-縦結 |
|      |       |      |      |      | 低い      | ←差分→ | 中間 | ←差分→ | 高い |      |      |      | 低い      | ←差分→ | 中間 | ←差分→ | 高い |      |       |       |
| 3/12 | 6:00  | -1.3 | -0.8 | -1.9 | 粗粒      | 0.7  | 粗粒 | 0.5  | 平均 | -0.5 | -0.4 | -0.4 | 粗粒      | 0.1  | 平均 | 0.0  | 粗粒 | -0.4 | -0.3  | 0.0   |
|      | 7:00  | 1.6  | 1.5  | 0.7  | 粗粒      | 0.8  | 平均 | 0.1  | 粗粒 | 0.9  | 0.9  | 0.9  | 平均      | 0.0  | 粗粒 | 0.0  | 粗粒 | 0.9  | 0.9   | 0.0   |
|      | 8:00  | 5.4  | 7.1  | 7.3  | 粗粒      | 1.7  | 平均 | 0.2  | 粗粒 | 3.3  | 4.6  | 6.2  | 粗粒      | 1.2  | 平均 | 1.6  | 粗粒 | 6.2  | 5.2   | 1.0   |
|      | 9:00  | 11.9 | 12.6 | 11.4 | 粗粒      | 0.5  | 粗粒 | 0.6  | 平均 | 10.3 | 10.3 | 10.8 | 粗粒      | 0.0  | 平均 | 0.5  | 粗粒 | 10.8 | 10.1  | 0.7   |
|      | 10:00 | 16.6 | 16.7 | 16.3 | 粗粒      | 0.4  | 粗粒 | 0.0  | 平均 | 15.1 | 14.6 | 14.7 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.4  | 粗粒 | 14.7 | 14.0  | 0.7   |
|      | 11:00 | 18.1 | 19.8 | 21.2 | 粗粒      | 1.7  | 平均 | 1.3  | 粗粒 | 16.7 | 16.1 | 16.5 | 平均      | 0.4  | 粗粒 | 0.2  | 粗粒 | 16.5 | 15.8  | 0.6   |
|      | 12:00 | 17.9 | 21.0 | 22.2 | 粗粒      | 3.0  | 平均 | 1.3  | 粗粒 | 16.8 | 16.1 | 16.6 | 平均      | 0.4  | 粗粒 | 0.2  | 粗粒 | 16.6 | 16.1  | 0.5   |
|      | 13:00 | 17.2 | 21.0 | 20.8 | 粗粒      | 3.6  | 粗粒 | 0.2  | 平均 | 16.5 | 15.8 | 16.4 | 平均      | 0.6  | 粗粒 | 0.1  | 粗粒 | 16.4 | 15.9  | 0.5   |
|      | 14:00 | 16.1 | 19.5 | 19.0 | 粗粒      | 2.8  | 粗粒 | 0.6  | 平均 | 13.9 | 13.9 | 14.7 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.8  | 粗粒 | 14.7 | 14.0  | 0.7   |
|      | 15:00 | 14.4 | 17.3 | 16.5 | 粗粒      | 2.1  | 粗粒 | 0.8  | 平均 | 12.0 | 11.9 | 12.8 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.8  | 粗粒 | 12.8 | 12.1  | 0.7   |
|      | 16:00 | 9.3  | 11.7 | 10.8 | 粗粒      | 1.4  | 粗粒 | 1.0  | 平均 | 8.7  | 8.4  | 9.2  | 平均      | 0.3  | 粗粒 | 0.5  | 粗粒 | 9.2  | 8.8   | 0.4   |
|      | 17:00 | 5.4  | 7.1  | 6.1  | 粗粒      | 0.7  | 粗粒 | 1.0  | 平均 | 5.1  | 4.9  | 6.1  | 平均      | 0.2  | 粗粒 | 1.0  | 粗粒 | 6.1  | 5.4   | 0.6   |
|      | 18:00 | 2.4  | 3.6  | 2.6  | 粗粒      | 0.3  | 粗粒 | 0.9  | 平均 | 2.8  | 3.0  | 3.9  | 粗粒      | 0.2  | 平均 | 0.9  | 粗粒 | 3.9  | 3.2   | 0.7   |
| 3/13 | 7:00  | 1.1  | 1.2  | 0.5  | 粗粒      | 0.6  | 粗粒 | 0.1  | 平均 | 0.5  | 0.8  | 0.4  | 粗粒      | 0.1  | 粗粒 | 0.3  | 平均 | 0.4  | 0.6   | -0.2  |
|      | 8:00  | 4.1  | 5.4  | 5.8  | 粗粒      | 1.3  | 平均 | 0.4  | 粗粒 | 0.7  | 1.1  | 1.0  | 粗粒      | 0.3  | 粗粒 | 0.1  | 平均 | 1.0  | 1.1   | -0.1  |
|      | 9:00  | 8.8  | 11.6 | 11.4 | 粗粒      | 2.6  | 粗粒 | 0.2  | 平均 | 5.9  | 7.0  | 8.4  | 粗粒      | 1.1  | 平均 | 1.3  | 粗粒 | 8.4  | 7.5   | 0.9   |
|      | 10:00 | 14.4 | 17.6 | 18.1 | 粗粒      | 3.1  | 平均 | 0.5  | 粗粒 | 12.3 | 12.3 | 12.7 | 平均      | 0.0  | 粗粒 | 0.4  | 粗粒 | 12.7 | 12.1  | 0.6   |
|      | 11:00 | 18.0 | 21.9 | 22.5 | 粗粒      | 3.9  | 平均 | 0.6  | 粗粒 | 16.0 | 15.7 | 16.0 | 平均      | 0.2  | 粗粒 | 0.0  | 粗粒 | 16.0 | 15.4  | 0.5   |
|      | 12:00 | 22.0 | 26.1 | 26.8 | 粗粒      | 4.1  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 18.9 | 18.2 | 18.5 | 平均      | 0.2  | 粗粒 | 0.4  | 粗粒 | 18.5 | 18.0  | 0.4   |
|      | 13:00 | 22.4 | 27.0 | 27.2 | 粗粒      | 4.5  | 平均 | 0.2  | 粗粒 | 19.3 | 18.5 | 18.5 | 平均      | 0.0  | 粗粒 | 0.7  | 粗粒 | 18.5 | 18.2  | 0.3   |
|      | 14:00 | 21.4 | 25.3 | 25.0 | 粗粒      | 3.6  | 粗粒 | 0.3  | 平均 | 18.3 | 17.5 | 17.4 | 粗粒      | 0.1  | 平均 | 0.8  | 粗粒 | 17.4 | 17.2  | 0.2   |
|      | 15:00 | 18.2 | 21.3 | 20.1 | 粗粒      | 1.9  | 粗粒 | 1.2  | 平均 | 15.1 | 14.8 | 14.8 | 平均      | 0.0  | 平均 | 0.3  | 粗粒 | 14.8 | 14.9  | -0.1  |
|      | 16:00 | 13.3 | 15.8 | 14.8 | 粗粒      | 1.4  | 粗粒 | 1.0  | 平均 | 11.8 | 11.7 | 11.8 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.0  | 粗粒 | 11.8 | 11.6  | 0.2   |
|      | 17:00 | 7.9  | 9.8  | 8.9  | 粗粒      | 1.0  | 粗粒 | 0.9  | 平均 | 8.2  | 8.3  | 9.1  | 粗粒      | 0.1  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 9.1  | 8.5   | 0.5   |
|      | 18:00 | 4.4  | 5.6  | 4.3  | 粗粒      | 0.1  | 粗粒 | 1.3  | 平均 | 5.7  | 5.9  | 6.6  | 粗粒      | 0.2  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 6.6  | 6.1   | 0.5   |
| 3/14 | 6:00  | -0.1 | -0.4 | -0.7 | 粗粒      | 0.3  | 平均 | 0.3  | 粗粒 | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 粗粒      | 0.2  | 平均 | 0.1  | 粗粒 | 1.0  | 0.6   | 0.3   |
|      | 7:00  | 1.4  | 2.6  | 2.8  | 粗粒      | 1.2  | 平均 | 0.2  | 粗粒 | 0.8  | 1.1  | 2.9  | 粗粒      | 0.3  | 平均 | 1.8  | 粗粒 | 2.9  | 1.5   | 1.4   |
|      | 8:00  | 6.6  | 7.4  | 7.3  | 粗粒      | 0.7  | 粗粒 | 0.1  | 平均 | 4.6  | 5.3  | 6.0  | 粗粒      | 0.6  | 平均 | 0.8  | 粗粒 | 6.0  | 5.3   | 0.8   |
|      | 9:00  | 14.4 | 15.6 | 16.0 | 粗粒      | 1.2  | 平均 | 0.4  | 粗粒 | 10.7 | 11.2 | 11.4 | 粗粒      | 0.5  | 平均 | 0.2  | 粗粒 | 11.4 | 10.9  | 0.5   |
|      | 10:00 | 20.8 | 22.9 | 23.5 | 粗粒      | 2.2  | 平均 | 0.6  | 粗粒 | 16.7 | 16.6 | 16.4 | 粗粒      | 0.1  | 平均 | 0.1  | 粗粒 | 16.4 | 16.0  | 0.4   |
|      | 11:00 | 23.8 | 27.3 | 27.6 | 粗粒      | 3.4  | 平均 | 0.4  | 粗粒 | 19.6 | 18.6 | 19.1 | 平均      | 0.5  | 粗粒 | 0.5  | 粗粒 | 19.1 | 18.8  | 0.3   |
|      | 12:00 | 28.0 | 31.1 | 32.0 | 粗粒      | 3.1  | 平均 | 1.0  | 粗粒 | 21.4 | 21.6 | 21.5 | 粗粒      | 0.1  | 粗粒 | 0.0  | 平均 | 21.5 | 21.2  | 0.3   |
|      | 13:00 | 22.6 | 25.2 | 24.6 | 粗粒      | 2.0  | 粗粒 | 0.6  | 平均 | 19.5 | 19.3 | 19.4 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.1  | 粗粒 | 19.4 | 19.1  | 0.3   |
|      | 14:00 | 22.2 | 24.6 | 24.2 | 粗粒      | 1.9  | 粗粒 | 0.4  | 平均 | 18.1 | 17.9 | 18.0 | 平均      | 0.0  | 粗粒 | 0.1  | 粗粒 | 18.0 | 18.2  | -0.2  |
|      | 15:00 | 19.6 | 21.8 | 21.1 | 粗粒      | 1.5  | 粗粒 | 0.7  | 平均 | 17.1 | 16.7 | 16.8 | 平均      | 0.2  | 粗粒 | 0.3  | 粗粒 | 16.8 | 16.9  | -0.1  |
|      | 16:00 | 15.4 | 17.0 | 15.9 | 粗粒      | 0.5  | 粗粒 | 1.0  | 平均 | 12.7 | 13.3 | 14.0 | 粗粒      | 0.6  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 14.0 | 13.8  | 0.2   |
|      | 17:00 | 8.7  | 10.1 | 8.7  | 粗粒      | 0.0  | 粗粒 | 1.3  | 平均 | 8.4  | 8.8  | 9.7  | 粗粒      | 0.4  | 平均 | 0.9  | 粗粒 | 9.7  | 9.4   | 0.3   |
|      | 18:00 | 5.2  | 6.2  | 4.9  | 粗粒      | 0.2  | 粗粒 | 1.1  | 平均 | 5.6  | 6.1  | 6.7  | 粗粒      | 0.5  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 6.7  | 6.5   | 0.3   |
| 3/15 | 7:00  | 1.5  | 2.3  | 2.4  | 粗粒      | 0.8  | 平均 | 0.1  | 粗粒 | 0.7  | 1.3  | 2.0  | 粗粒      | 0.6  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 2.0  | 1.2   | 0.8   |
|      | 8:00  | 6.8  | 9.5  | 9.4  | 粗粒      | 2.6  | 粗粒 | 0.1  | 平均 | 4.0  | 6.0  | 7.3  | 粗粒      | 1.9  | 平均 | 1.3  | 粗粒 | 7.3  | 6.5   | 0.8   |
|      | 9:00  | 14.7 | 16.1 | 15.7 | 粗粒      | 0.9  | 粗粒 | 0.4  | 平均 | 11.2 | 11.8 | 12.1 | 粗粒      | 0.6  | 平均 | 0.3  | 粗粒 | 12.1 | 11.8  | 0.3   |
|      | 10:00 | 17.1 | 20.0 | 19.4 | 粗粒      | 2.2  | 粗粒 | 0.6  | 平均 | 14.3 | 14.1 | 14.6 | 平均      | 0.2  | 粗粒 | 0.4  | 粗粒 | 14.6 | 14.3  | 0.4   |
|      | 11:00 | 21.7 | 25.6 | 25.2 | 粗粒      | 3.5  | 粗粒 | 0.5  | 平均 | 17.2 | 16.9 | 17.1 | 平均      | 0.2  | 粗粒 | 0.1  | 粗粒 | 17.1 | 16.9  | 0.2   |
|      | 12:00 | 23.4 | 27.5 | 25.7 | 粗粒      | 2.3  | 粗粒 | 1.8  | 平均 | 17.5 | 17.8 | 17.6 | 粗粒      | 0.1  | 粗粒 | 0.2  | 平均 | 17.6 | 17.6  | 0.0   |
|      | 13:00 | 22.8 | 25.6 | 24.1 | 粗粒      | 1.4  | 粗粒 | 1.5  | 平均 | 16.7 | 16.4 | 16.5 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.2  | 粗粒 | 16.5 | 16.4  | 0.1   |
|      | 14:00 | 24.6 | 27.1 | 26.0 | 粗粒      | 1.4  | 粗粒 | 1.1  | 平均 | 17.3 | 16.6 | 16.7 | 平均      | 0.1  | 粗粒 | 0.6  | 粗粒 | 16.7 | 16.4  | 0.3   |
|      | 15:00 | 19.6 | 22.0 | 21.2 | 粗粒      | 1.6  | 粗粒 | 0.8  | 平均 | 13.3 | 12.9 | 14.4 | 平均      | 0.5  | 粗粒 | 1.1  | 粗粒 | 14.4 | 14.1  | 0.3   |
|      | 16:00 | 14.0 | 15.9 | 14.9 | 粗粒      | 0.8  | 粗粒 | 1.1  | 平均 | 10.5 | 10.8 | 11.3 | 粗粒      | 0.4  | 平均 | 0.5  | 粗粒 | 11.3 | 11.1  | 0.2   |
|      | 17:00 | 7.6  | 9.1  | 7.8  | 粗粒      | 0.2  | 粗粒 | 1.3  | 平均 | 6.0  | 6.4  | 7.3  | 粗粒      | 0.4  | 平均 | 0.9  | 粗粒 | 7.3  | 6.9   | 0.4   |
|      | 18:00 | 3.5  | 4.7  | 3.3  | 粗粒      | 0.1  | 粗粒 | 1.2  | 平均 | 3.3  | 3.9  | 4.4  | 粗粒      | 0.6  | 平均 | 0.6  | 粗粒 | 4.4  | 4.2   | 0.3   |
| 3/16 | 7:00  | 0.7  | 1.0  | 0.4  | 粗粒      | 0.3  | 粗粒 | 0.4  | 平均 | -0.1 | 0.6  | 0.1  | 粗粒      | 0.2  | 粗粒 | 0.5  | 平均 | 0.1  | 0.4   | -0.3  |
|      | 8:00  | 4.3  | 5.8  | 6.9  | 粗粒      | 1.5  | 平均 | 1.0  | 粗粒 | 0.1  | 0.6  | 1.1  | 粗粒      | 0.5  | 平均 | 0.5  | 粗粒 | 1.1  | 0.7   | 0.5   |
|      | 9:00  | 12.5 | 15.7 | 16.5 | 粗粒      | 3.2  | 平均 | 0.8  | 粗粒 | 3.0  | 7.7  | 10.0 | 粗粒      | 4.7  | 平均 | 2.3  | 粗粒 | 10.0 | 8.6   | 1.4   |
|      | 10:00 | 18.4 | 21.3 | 21.6 | 粗粒      | 2.8  | 平均 | 0.4  | 粗粒 | 13.0 | 14.4 | 14.9 | 粗粒      | 1.4  | 平均 | 0.5  | 粗粒 | 14.9 | 14.5  | 0.4   |
|      | 11:00 | 19.9 | 23.3 | 22.9 | 粗粒      | 3.1  | 粗粒 | 0.3  | 平均 | 15.3 | 16.5 | 16.7 | 粗粒      | 1.2  | 平均 | 0.2  | 粗粒 | 16.7 | 16.7  | 0.0   |
|      | 12:00 | 21.8 | 24.7 | 24.9 | 粗粒      | 2.9  | 平均 | 0.2  | 粗粒 | 16.6 | 17.4 | 17.5 | 粗粒      | 0.8  | 平均 | 0.1  | 粗粒 | 17.5 | 17.7  | -0.2  |
|      | 13:00 | 21.8 | 25.1 | 25.3 | 粗粒      | 3.4  | 平均 | 0.1  | 粗粒 | 16.1 | 16.9 | 17.4 | 粗粒      | 0.8  | 平均 | 0.5  | 粗粒 | 17.4 | 16.9  | 0.5   |
|      | 14:00 | 18.0 | 20.4 | 19.4 | 粗粒      | 1.4  | 粗粒 | 0.9  | 平均 | 13.5 | 14.1 | 14.7 | 粗粒      | 0.5  | 平均 | 0.6  | 粗粒 | 14.7 | 14.2  | 0.5   |
|      | 15:00 | 17.3 | 19.2 | 18.3 | 粗粒      | 1.0  | 粗粒 | 0.9  | 平均 | 12.9 | 13.4 | 14.1 | 粗粒      | 0.4  | 平均 | 0.7  | 粗粒 | 14.1 | 13.7  | 0.3   |
|      | 16:00 | 11.4 | 13.1 | 11.8 | 粗粒      | 0.5  | 粗粒 | 1.2  | 平均 | 9.3  | 9.8  | 10.5 | 粗粒      | 0.5  | 平均 | 0.6  | 粗粒 | 10.5 | 10.0  | 0.5   |
|      | 17:00 | 7.5  | 8.7  | 7.5  | 粗粒      | 0.1  | 粗粒 | 1.1  | 平均 | 6.5  | 7.0  | 7.6  | 粗粒      | 0.5  | 平均 | 0.6  | 粗粒 | 7.6  | 7.4   | 0.3   |
|      | 18:00 | 5.2  | 6.3  | 5.4  | 粗粒      | 0.2  | 粗粒 | 0.9  | 平均 | 5.1  | 5.6  | 5.9  | 粗粒      | 0.6  | 平均 | 0.3  | 粗粒 | 5.9  | 5.8   | 0.2   |

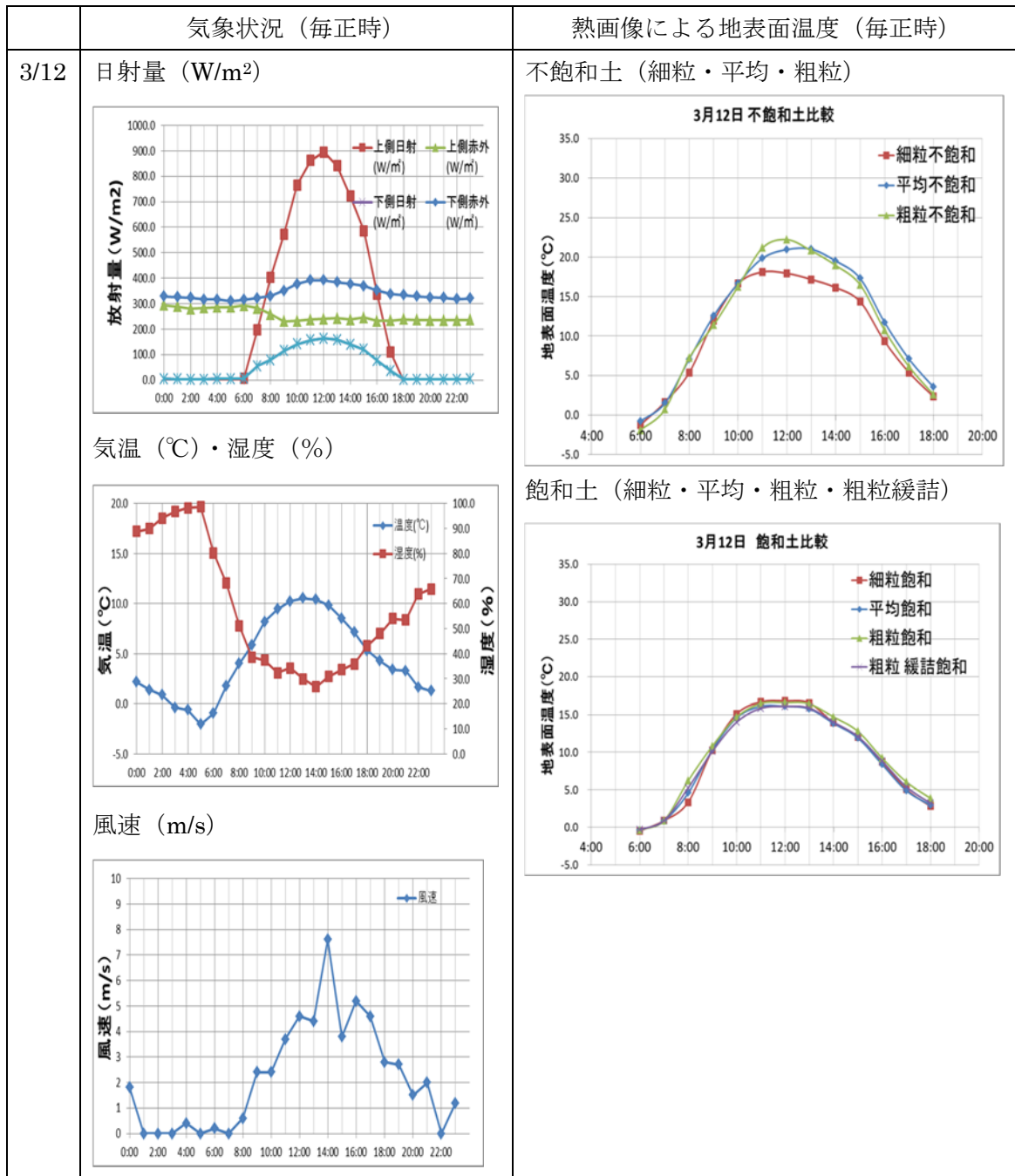


図-6.4.34 供試体実験における表面温度の測定結果（3月12日）

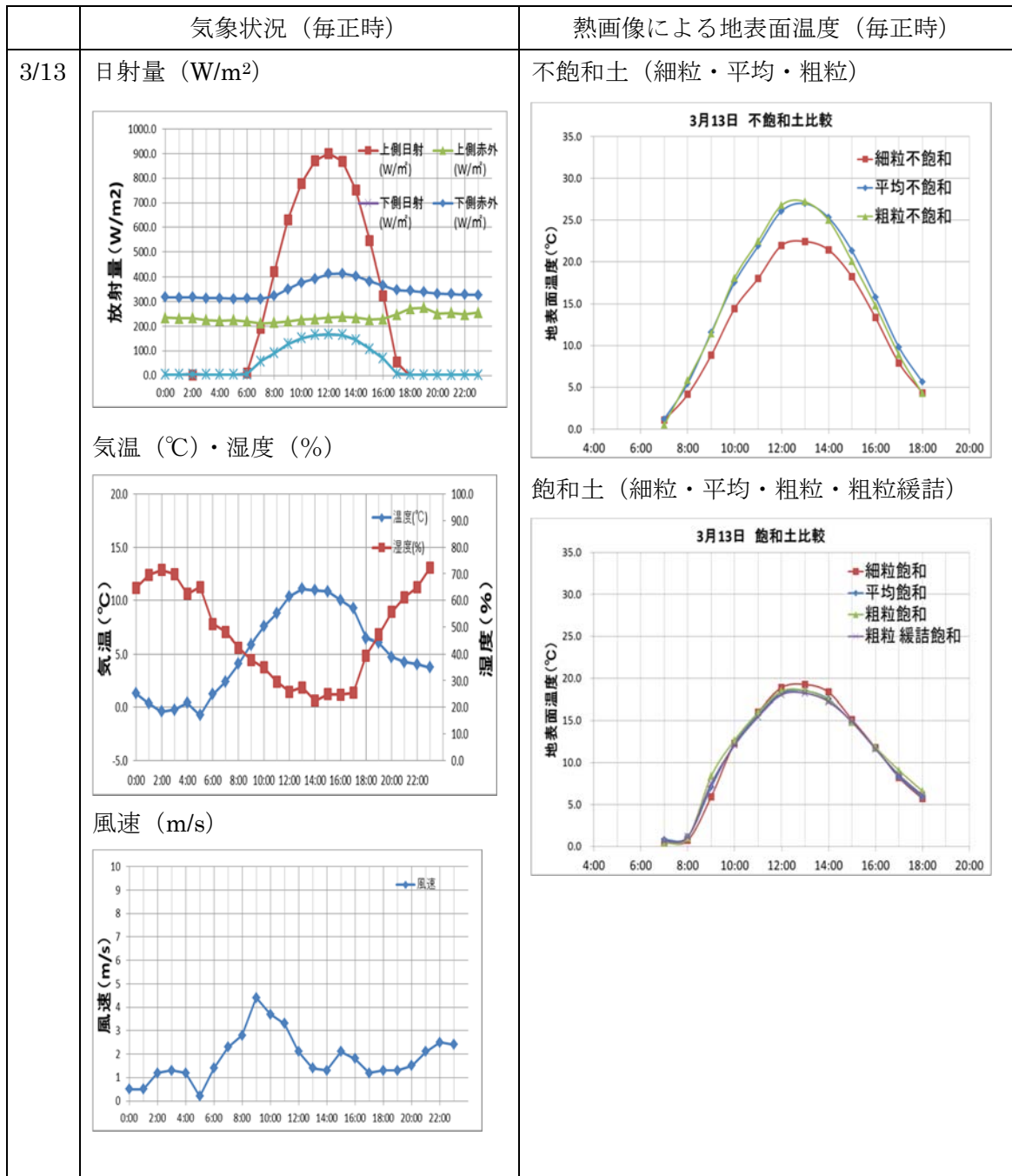


図-6. 4. 35 供試体実験における表面温度の測定結果（3月13日）

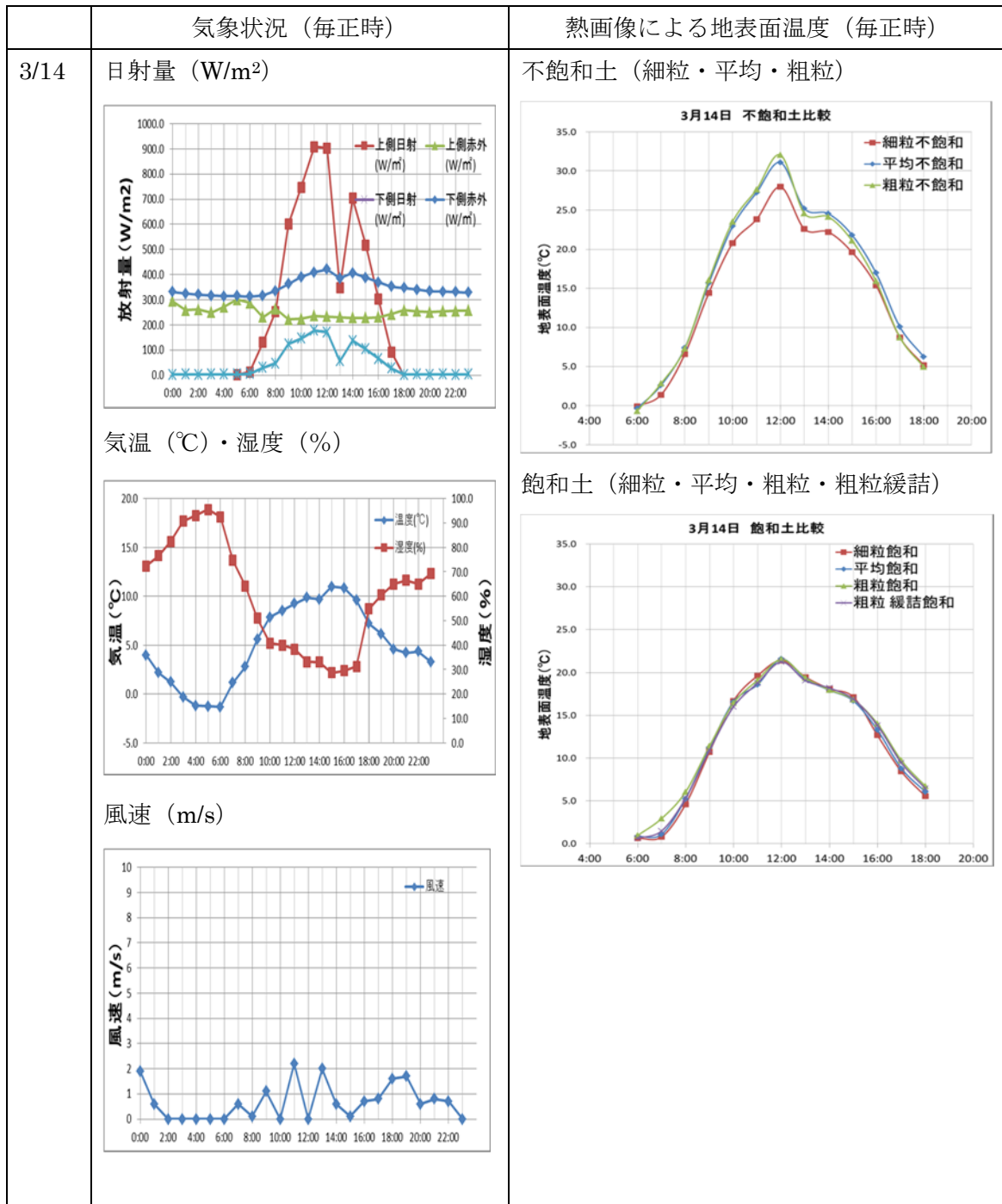


図-6. 4. 36 供試体実験における表面温度の測定結果（3月14日）

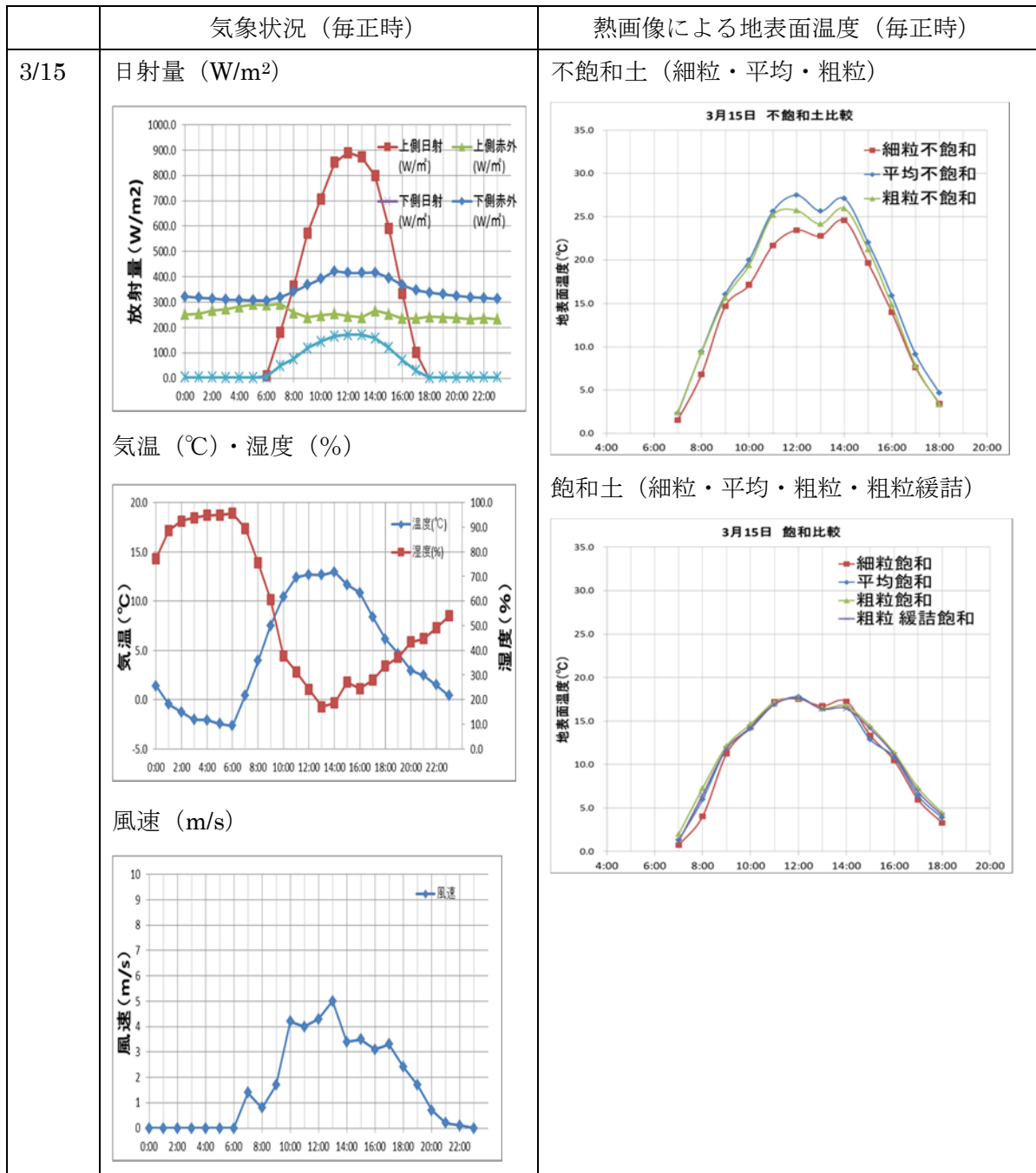


図-6.4.37 供試体実験における表面温度の測定結果（3月15日）

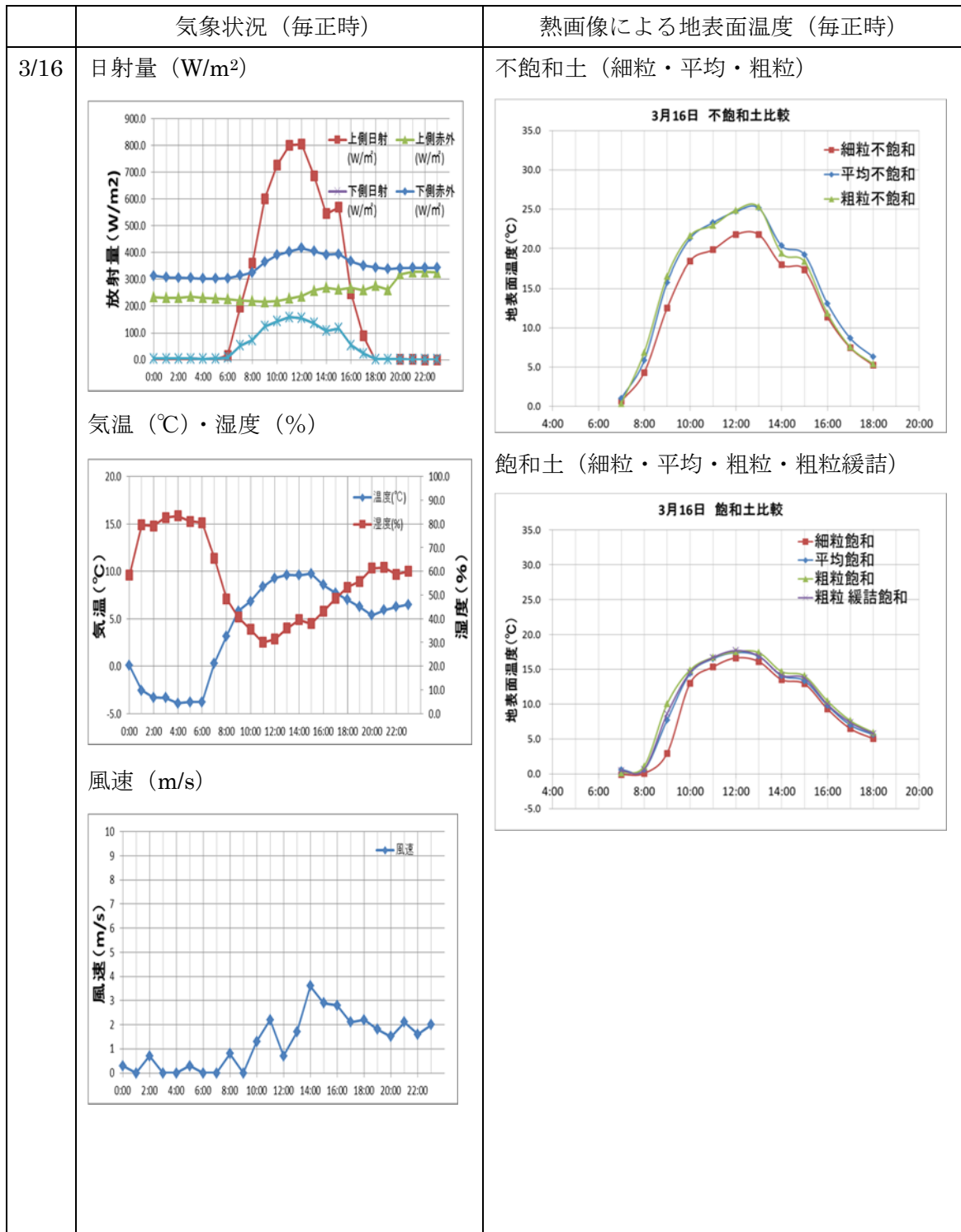


図-6.4.38 供試体実験における表面温度の測定結果（3月16日）

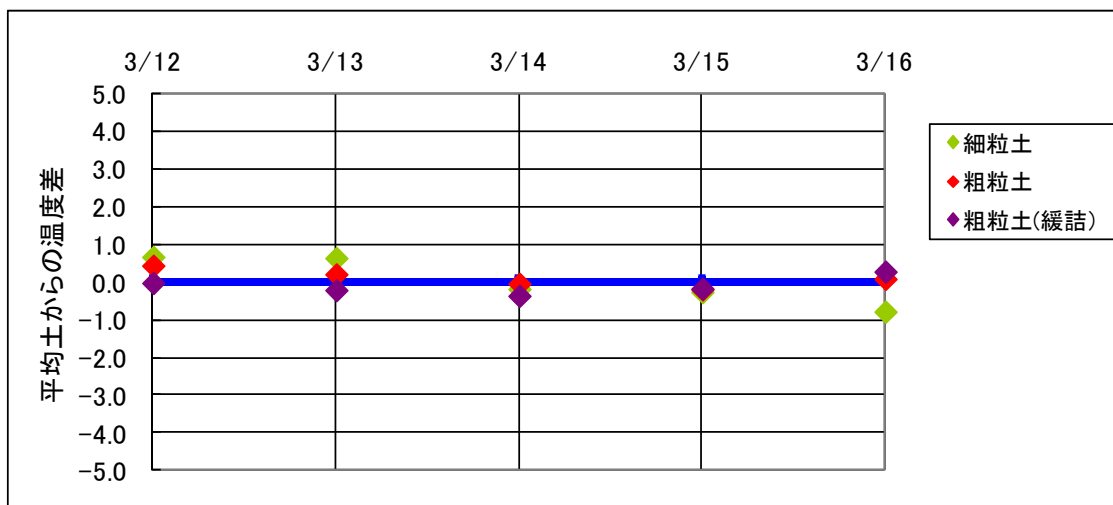


図-6. 4. 39 平均土からの温度差（飽和土）

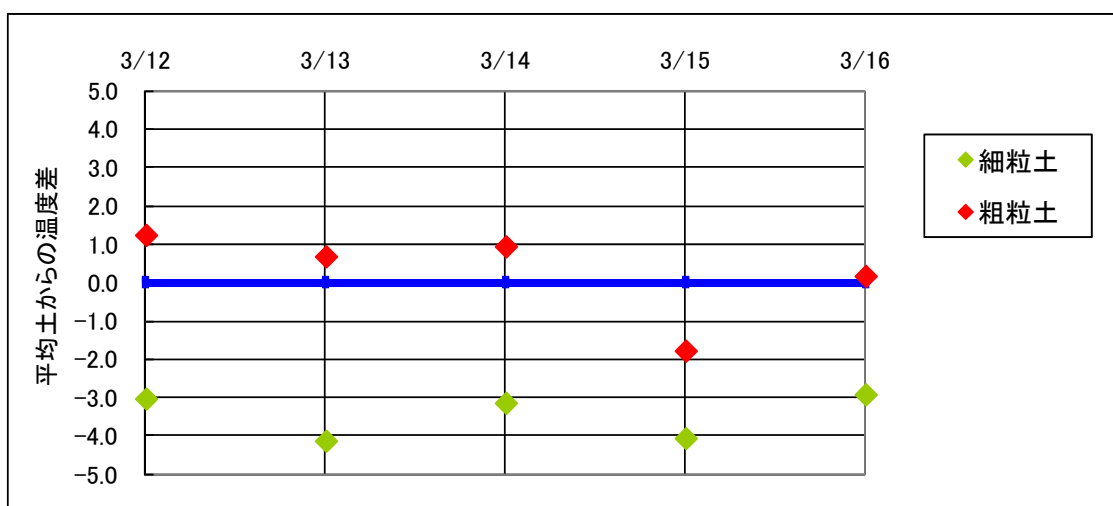


図-6. 4. 40 平均土からの温度差（不飽和土）

#### 6.4.4 急激な日射量変化に対する地表面温度の応答（課題4）

晴天日の場合、日射量は日中にピークを有し、それを挟んで単調に増減する日変化を示すが、雲により一時的に日射が遮られると、そうした日変化に短期間のスパイク状の日射量低減が加わる。6.3.1の盛土実験により観測した日射量の毎分値の日変化の一例を図-6.4.41および図-6.4.42に示す。図-6.4.41はほとんど雲のない晴天日における単調に増減する日変化を観測した例であり、雲のかかった14時付近にのみ短期的低減が生じている。一方、図-6.4.42は、上空に雲が発生している日の観測例であり、12時以降で短期的低減が複数回生じている。同日に測定した地表面温度の毎分値の日変化を図-6.4.43～図-6.4.45示す。各供試体の粒径、飽和・不飽和によらず、日射量の短期的低減に応答して地表面温度が低下している。この結果は、熱画像から湿潤部の検知を行うにあたって、雲によって一時的に日射が遮られることによる堤防のり面の温度低下を考慮する必要性が高いことを示唆する。そこで以下では、日射が雲で遮られた直後からの地表面温度低下の大きさ、および再び日射を受けて温度が回復するのに要する時間について検討を加える。

図-6.4.42において短期的日射量低減が生じている12:00～14:00付近を拡大したものを図-6.4.46に示す。以下では、日射量の低減する期間を時刻の早い順から低減期(1)～(3)と呼ぶ。図-6.4.47～図-6.4.49に細粒・平均・粗粒土の飽和・不飽和での地表面温度の応答に関する観測結果を示した。上記したように、全供試体で数分間程度の日射量の低減でも地表面温度が敏感に応答し、明確に低減する。その低減の大きさは、不飽和土では5℃～10℃であるのに対して飽和土では4℃程度であり、不飽和土の方が大きい。このような温度低下の差異のため、各時刻における飽和・不飽和の温度差が小さくなっている。さらに、各低減期における不飽和土の最小温度は、低減期前後の飽和土の温度と同等またはより低くなる場合もある。

これらの結果から、a) 雲により日射が遮蔽された低減期間において撮影した熱画像を晴天時の熱画像と混在させて湿潤部検知を行うことは不可能であり、それぞれ分けて分析することが必須であること、さらに b) 低減期間とその前後の晴天時では湿潤部と判定する温度差の大きさを変える必要がある、と考えられる。

次に、図-6.4.50に示すように日射の低減が開始した時点からその時点の温度まで回復するまでに要した時間を回復時間と定義し、図-6.4.47～図-6.4.49に示したように回復時間を求めた結果を表-6.4.4に示す。この表には各低減期の低減時間を併記している。低減期(1)では、全ての供試体で地表面温度が回復したが、低減期(2)、(3)では回復しない場合があった。これは、図-6.4.46に示した日射量の経時変化から、低減期(1)は晴天日であれば日射量が最大値をとり、その前後の経時変化が小さい12時頃に位置しているが、低減期(2)、(3)はそれ以降の晴天時であっても日射量が低下していく期間に位置していることの影響を受けたためと考えられる。そこで以下では低減期(1)の結果に着目して検討する。低減期(1)の低減時間が4分であるのに対し、回復時間は11～18分間と大きくなった。したがって、地表面温度が回復するのは、日射量が回復してからさらに7～14分後となる。

上記 a),b)のような湿潤部検知にあたっての複雑さを回避するため、一時的なくもりを避けて熱画像を撮影するような点検を行うことが考えられる。その場合、今回の実験結果に基づくと、晴天に戻った後 10 分程度待機してから撮影を再開することが必要と考えられる。したがって、一日のうちに複数回の一時的な曇りが生じる日では、総待機時間が長くなり撮影の効率が低下することが懸念される。

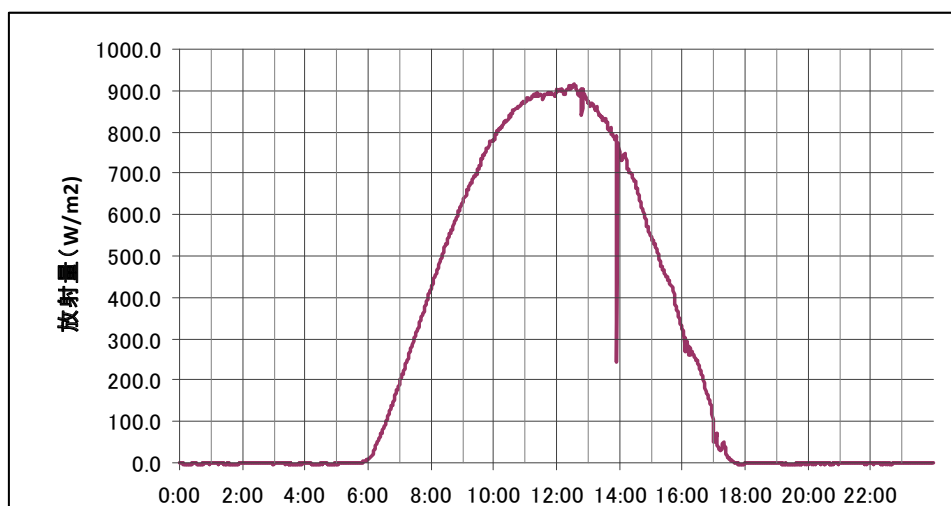


図-6. 4. 41 ほとんど雲のない晴天日における日射量の日変化 (3 月 13 日)

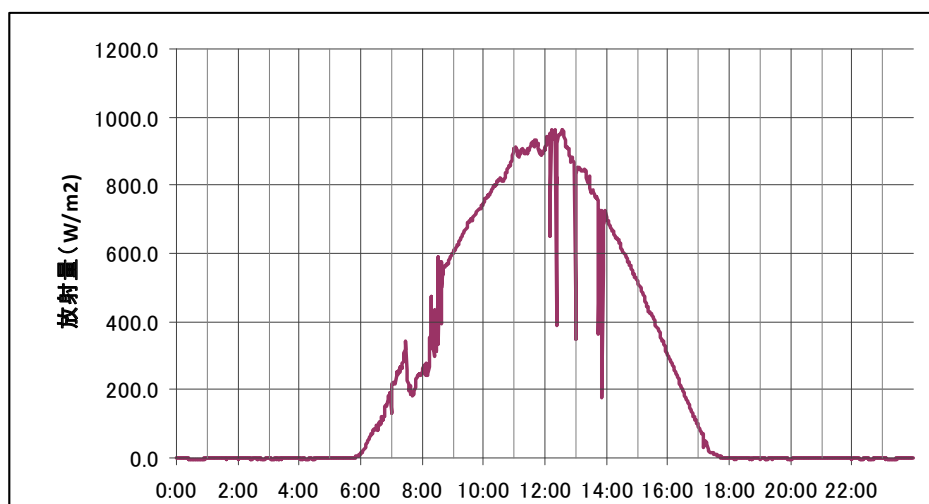


図-6. 4. 42 上空に雲が発生している日の日射量の日変化 (3 月 14 日)

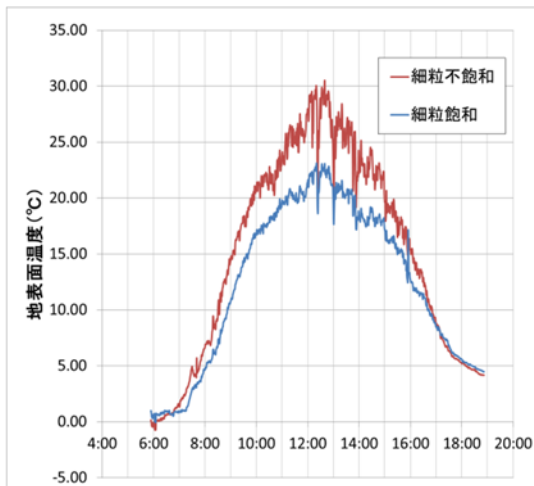


図-6.4.43 細粒土の地表面温度変化

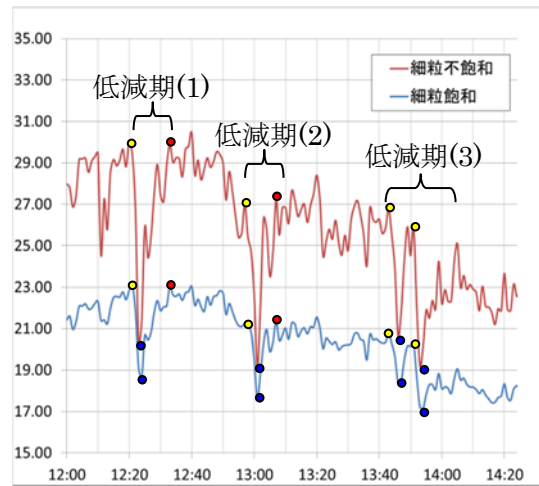


図-6.4.47 細粒土の低減時の地表面温度

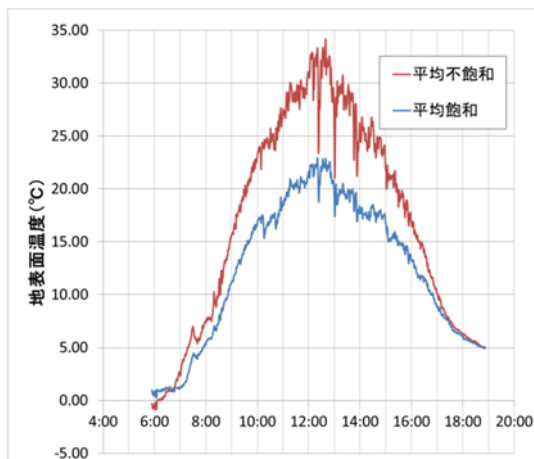


図-6.4.44 平均土の地表面温度変化

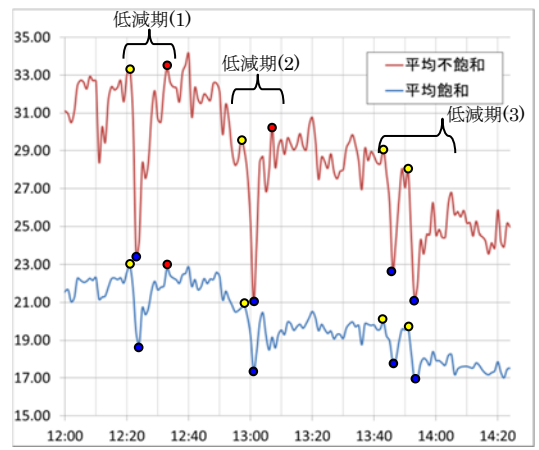


図-6.4.48 平均土の低減時の地表面温度

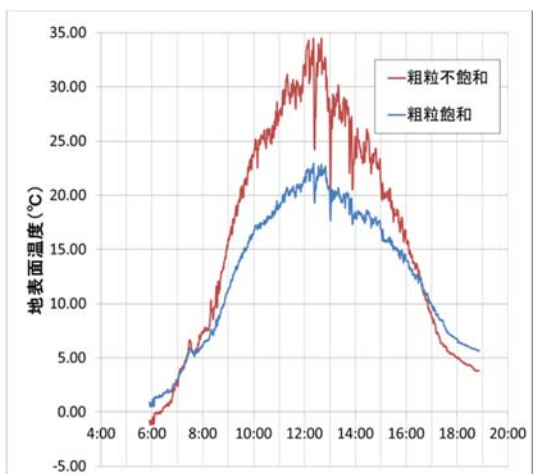


図-6.4.45 粗粒土の地表面温度変化

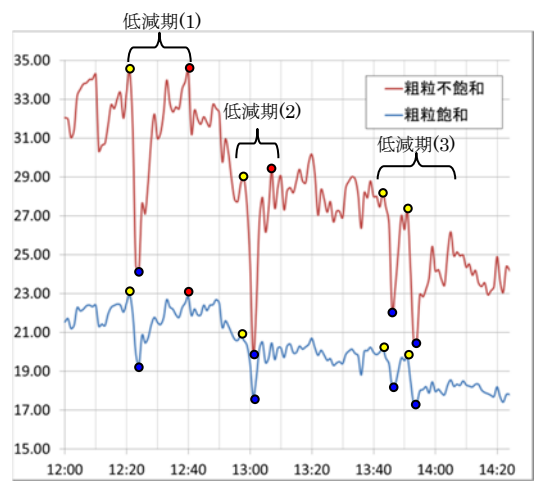


図-6.4.49 粗粒土の低減時の地表面温度

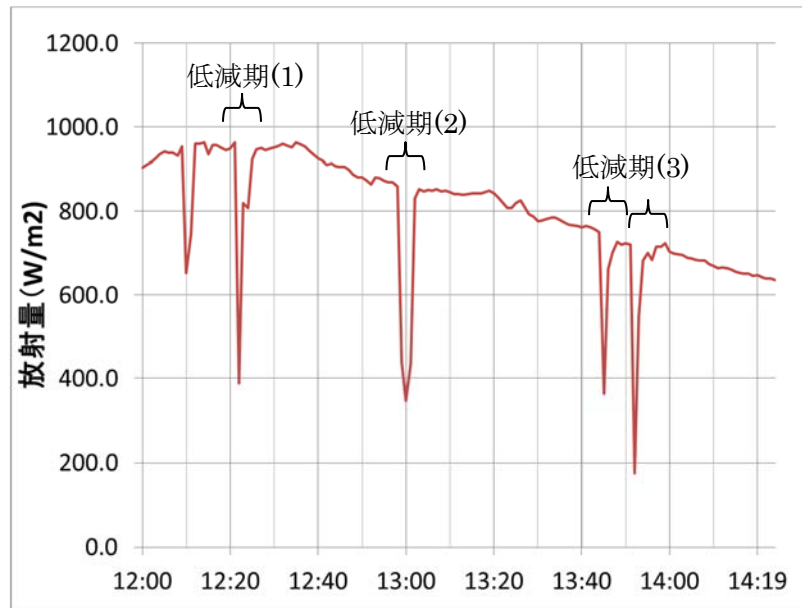


図-6. 4. 46 日射量の低減状況

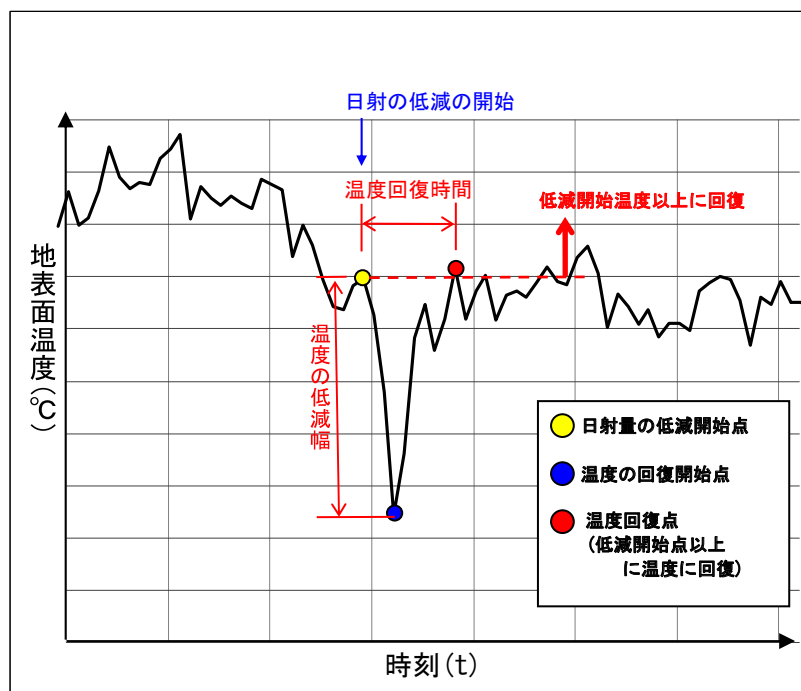


図-6. 4. 50 温度回復時間の定義

表-6. 4. 4 日射の低減時間と表面温度回復時間

|        | 低減期間        | 日射量低減時間 | 表面温度回復時間 |       |        |       |        |       |
|--------|-------------|---------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|
|        |             |         | 細粒土不飽和   | 細粒土飽和 | 平均土不飽和 | 平均土飽和 | 粗粒土不飽和 | 粗粒土飽和 |
| 低減期(1) | 12:21~12:25 | 4分間     | 11分間     | 11分間  | 17分間   | 18分間  | 18分間   | 18分間  |
| 低減期(2) | 12:58~13:02 | 3分間     | 6分間      | 6分間   | 回復せず   | 19分間  | 回復せず   | 19分間  |
| 低減期(3) | 13:51~13:53 | 1分間     | 回復せず     | 回復せず  | 回復せず   | 回復せず  | 回復せず   | 回復せず  |

#### 6.4.5 風に対する地表面温度の応答（課題4）

コンクリート・モルタル吹付けのり面を対象とした赤外線映像法<sup>5)</sup>では、風速の強い日は調査を避けた方がよいとされており、概ね風速 5m/s を目安としている。同様な配慮が堤防のり面の湿潤部検知の場合にも必要であるか検討するため、以下では 6.3.2 に示した盛土実験の結果から、風の強い日と穏やかな日の地表面温度の応答について調べた結果を示す。

風速、日射量、地表面温度の日変化の測定結果を図-6.4.51～図-6.4.54 に示す。図-6.4.51 および図-6.4.52 に示したように、3月12日は、11～13時に風速 3～5m/s 程度の風が継続的に吹く強風日であった。それに対して、図-6.4.53 および図-6.4.54 に示した3月14日は 0～2m/s 程度と同時間の風速が小さい弱風日であった。このように両日 11～13時は風速に差異があるものの、日射量は図-6.4.52 および図-6.4.54 に示したように 900W/m<sup>2</sup>程度とほぼ同じ条件である。この時間内における平均地表面温度を比較すると、強風日では不飽和・飽和でそれぞれ 21℃、16℃であるのに対して、弱風日では 31℃、21℃と高い。風による温度変化は不飽和土の方が大きく 10℃に達している。そのため、飽和・不飽和の温度差は弱風日の 10℃に対して強風日は 5℃と小さくなっている。

以上より、風による地表面温度の変化はある風速以上において顕著に現れると考えられ、堤防のり面の湿潤部検知においても考慮する必要がある。図-6.4.34～図-6.4.37 に示した3月12～15日の観測結果において、日射量が 900W/m<sup>2</sup>程度とほぼ同一である 11～13時に着目して地表面温度および風速の測定結果を比較すると、概ね 2m/s より強い風が吹く日には明確に地表面温度が低下している傾向が見られる。したがって今回の実験の範囲では、風速 2m/s を調査適日の判定の目安として示すことができる。

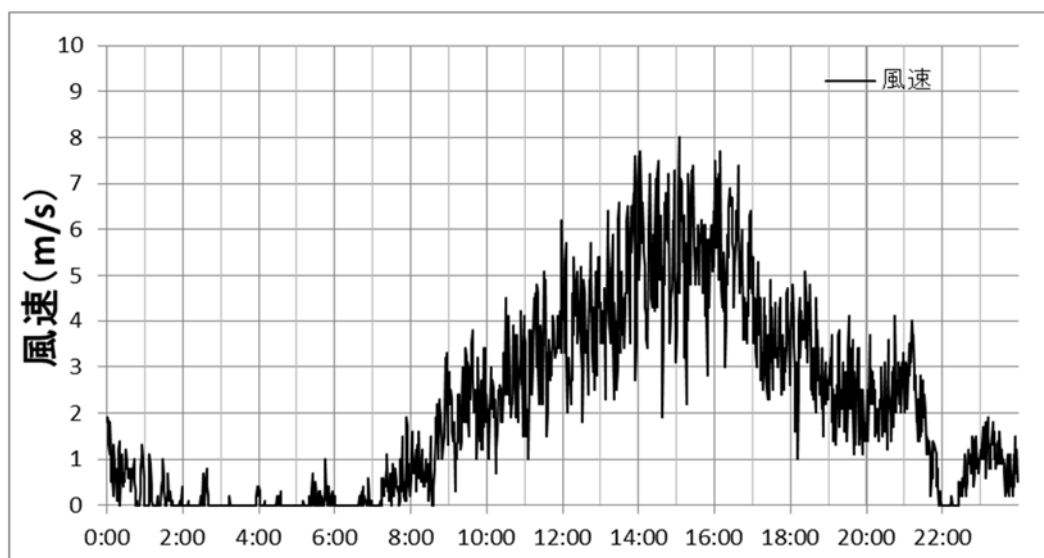


図-6.4.51 供試体実験 3 月 12 日の風速の変化

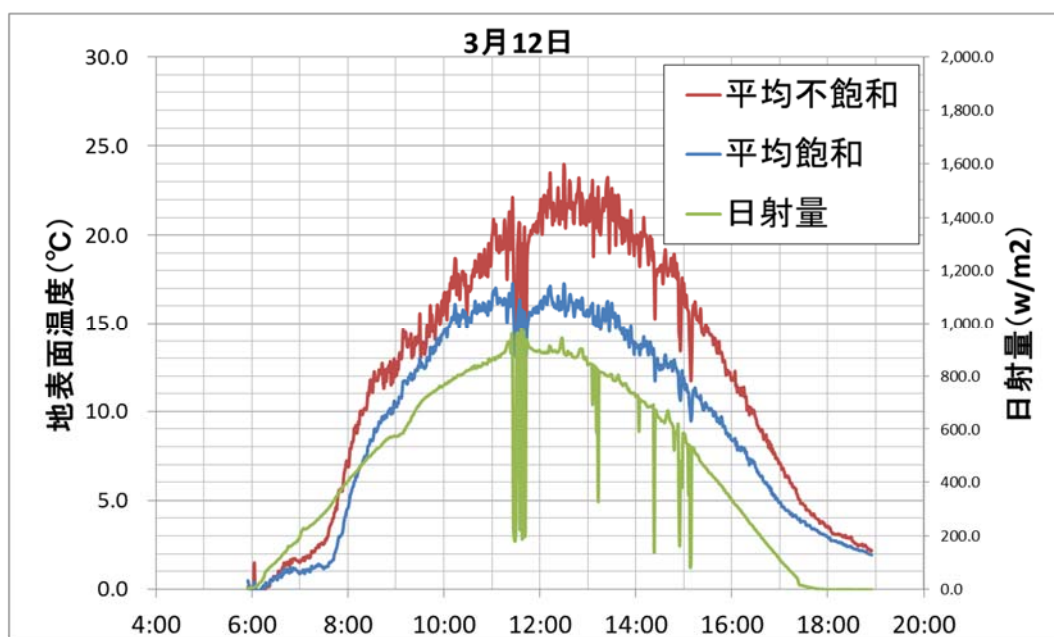


図-6.4.52 供試体実験 3 月 12 日の地表面温度（平均土）と日射量の変化

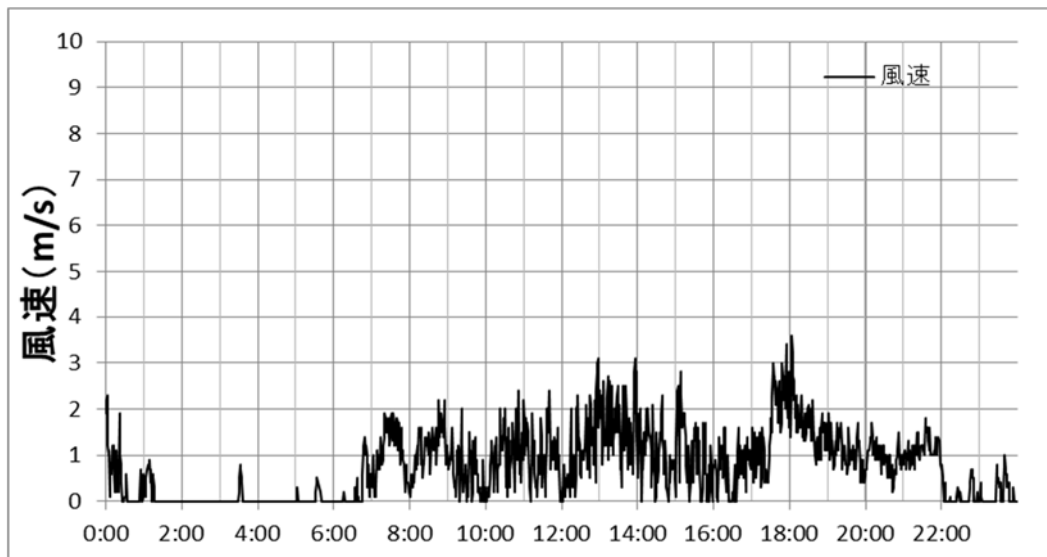


図-6. 4. 53 供試体実験 3 月 14 日の風速の変化

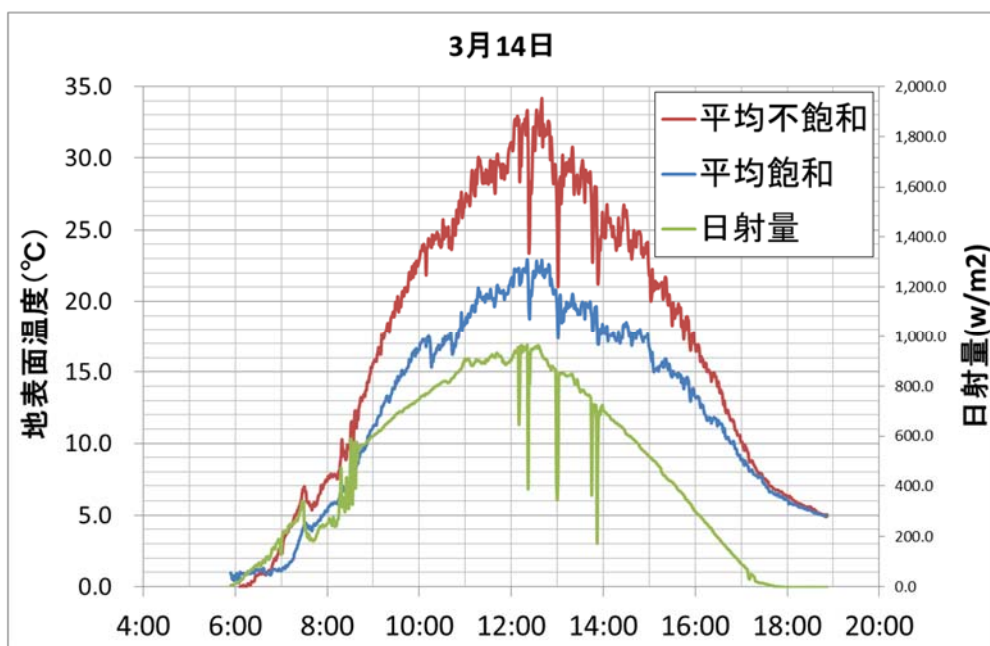


図-6. 4. 54 供試体実験 3 月 14 日の地表面温度（平均土）と日射量の変化

#### 6.4.6 赤外線サーモグラフィの撮影角度、距離の違いによる検出温度の違い（課題5）

赤外線サーモグラフィの撮影角度と距離の違いによる検出温度の誤差の有無の検証として、表-6.4.5 に示す 3 ケースの撮影を行った。各ケースの測定結果を(1)～(3)に示すが、のり面に対して 30～90° および 2～10m の角度・距離であれば誤差は無視しうる程度であることが分かった。

表-6.4.5 ケース一覧表

| Case   | 撮影内容                | 天候    | 撮影日               |
|--------|---------------------|-------|-------------------|
| Case 1 | 角度 90° ,距離 2m・5m    | 晴れ    | H25.1.30          |
| Case2  | 近景距離 2m、角度 45° ・30° | 晴れ、曇天 | H24.2.16,H24.2.17 |
| Case3  | 遠距離 10m、角度 30° ・90° | 晴れ、曇天 | H24.2.16,H24.2.17 |

##### (1) Case1：撮影角度 90°、距離 2m・5m

撮影角度を 90° で固定して、2m と 5m の距離をかえて、10:30～16:00 までの 30 分ごとの撮影を行った。結果を図-6.4.55 に示す。11:30 の距離 2m の撮影は機器の不具合により欠測である。

2m、5m の温度を比較すると、全ての撮影において 1℃未満の温度を示しており、近景 2m 及び 5m の撮影による影響はないと判断される。

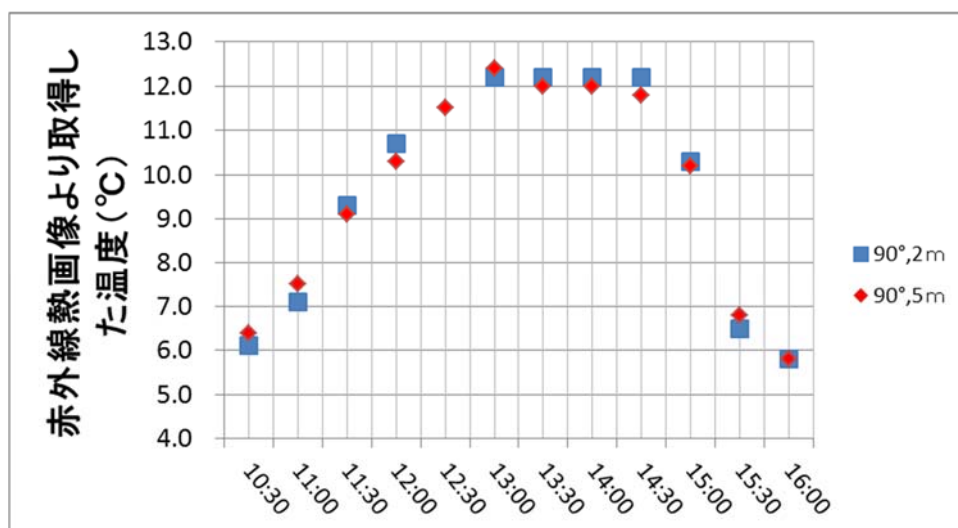


図-6.4.55 Case1：角度 90°，距離 2m・5m

(2) Case2 : 近景距離 2m、角度 45° ・ 30°

撮影距離を 2m で固定し、撮影角度を 45° ,30° にかえて、8:00～18:00 までの 30 分ごとの撮影を晴れ、曇天の 2 日間行った。結果を図-6.4.56 および図-6.4.57 に示す。

45° ,30° の温度を比較すると、全ての撮影において 1℃未満の温度を示しており、低角度による影響は確認されない。

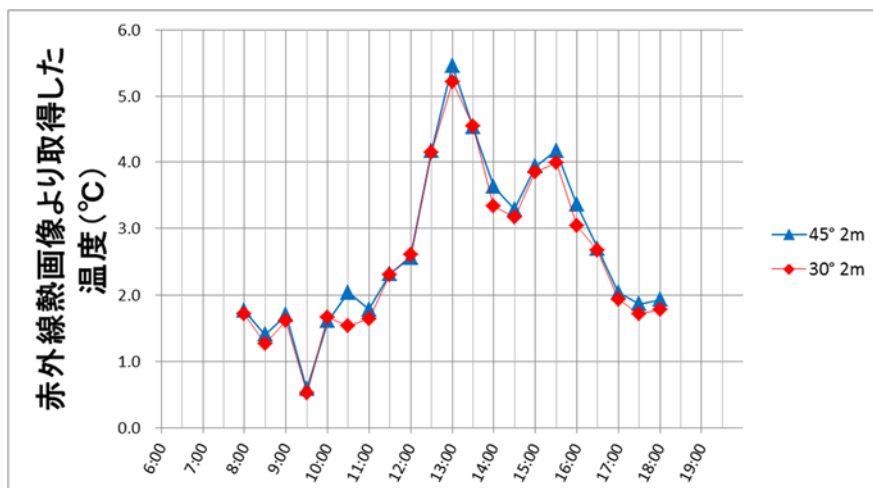


図-6.4.56 Case2 (曇天) : 距離 2m、角度 45° ・ 30°

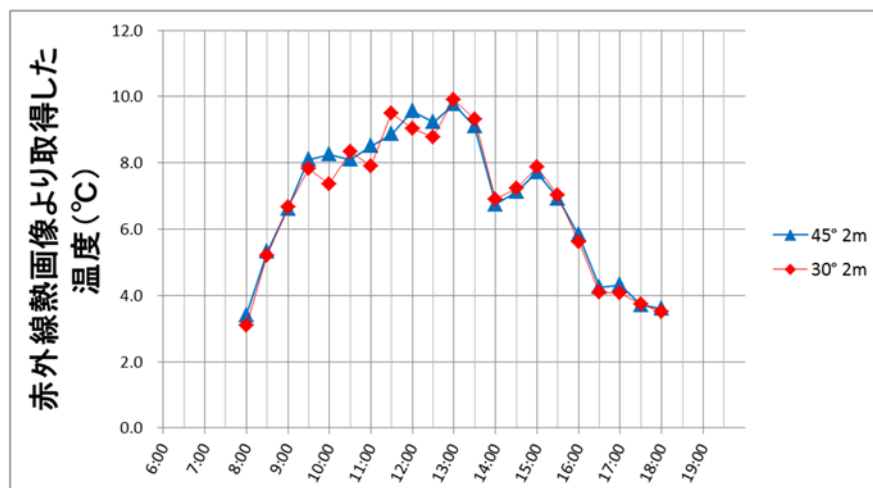


図-6.4.57 Case2 (晴天) : 距離 2m、角度 45° ・ 30°

(3) Case3 : 遠距離 10m、角度  $30^{\circ}$  ・  $90^{\circ}$

撮影距離を 10m で固定し、撮影角度を  $90^{\circ}$  ,  $30^{\circ}$  にかえて、8:00~18:00 までの 30 分ごとの撮影を晴天、曇天の 2 日間行った。結果を図-6.4.58 および図-6.4.59 に示す。

$90^{\circ}$  ,  $30^{\circ}$  の温度を比較すると、全ての撮影において  $1^{\circ}\text{C}$  未満の温度を示しており、低角度による影響は確認されない。

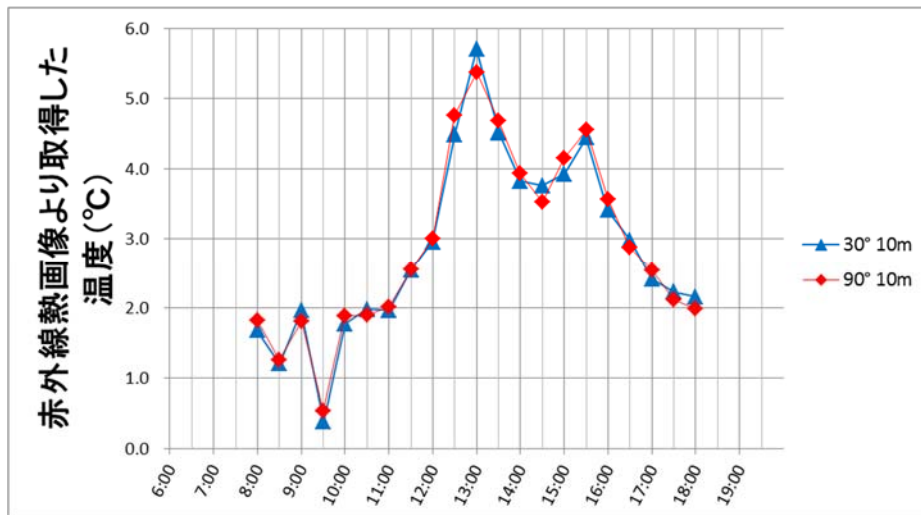


図-6.4.58 Case3 (曇天) : 距離 10m、角度  $30^{\circ}$  ・  $90^{\circ}$

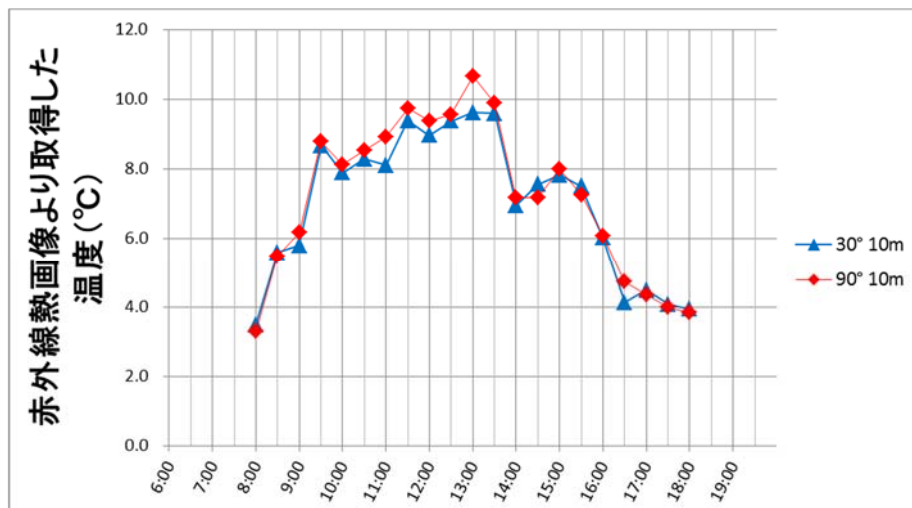


図-6.4.59 Case3 (晴天) : 距離 10m、角度  $30^{\circ}$  ・  $90^{\circ}$

## 6.5 まとめ

本研究の技術的課題に対する検討結果を表-6.5.1 にまとめて示す。植生が繁茂している状態では、堤防湿潤箇所の検知が困難な結果となった。また、検知に適した時間帯が日中の2～3時間程度であり、地表面の温度が雲の有無や風など気象の状況変化の影響を受けやすい。以上より、一般的な堤防点検・巡視時に熱赤外線映像法を併用して湿潤箇所を検知するのは、手法の技術的熟度・業務効率の両面から現段階では難易度が高いと思われる。

しかしながら、堤防植生を短く刈り揃えることができ、気象条件が安定している間に調査を終了できる特定範囲内であれば湿潤部検知は可能と考えられ、今後、湿潤部の範囲とその時間変化など詳細調査の1つの手段としての活用が期待される。

表-6.5.1 本研究の検討課題と得られた成果

| NO | 課題名                                                          | 実験・観測結果                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 検討結果                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 堤防のり面の浸潤部に熱画像から判別できる程度の温度差が地表に現れるか                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・飽和土と不飽和土で1℃以上の温度差が生じ、十分に赤外線サーモグラフィで捉えられた</li> <li>・地表面のごく薄い土層（本実験では1cm以下）の水分の有無が、地表面の温度変化に大きく影響</li> </ul>                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>・湿潤部の検知にあたっては、地表面から1cm程度の厚さまで完全に飽和した湿潤状況であることが条件と考えられる。</li> <li>・不飽和部において地表面から厚さ1cm程度の表層を踏み荒らすなどで乱して温度が低い層が現れた場合、湿潤部との区別が困難になる懸念あり</li> </ul>                                                                                                                                               |
| 2  | 堤防のり面は植生で被われているが湿潤部との温度差を検出することが可能か                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・植生部の温度は地表面より高温を示す傾向にあり、地表面の温度を測定しているとはいえない。</li> <li>・草丈を低く刈った植生間の裸地の温度は、人工裸地（表面掘削）と同程度の温度を示したことから、草刈り後の裸地部を対象とした赤外線サーモグラフィにより、湿潤部検知が可能と推察。</li> </ul>                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・堤体湿潤部を温度差によって検知するための前提条件として、草刈りにより草丈を短くし、植生で覆われていない裸地部の温度を撮影できる状態にすることが挙げられる。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                    |
| 3  | 堤防のり面の土質は不均質であるが、土質による温度差への影響はどの程度か                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・飽和土の場合には土質の違いによる温度差は1℃以下</li> <li>・不飽和土の場合には細粒土のみ最大4℃程度小さくなった</li> </ul>                                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>・曇りなど温度差が大きくなりえない気象条件の日・時間帯の調査では、細粒土の箇所でも湿潤部の検知が困難になる可能性がある</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                       |
| 4  | 延長の長い堤防を全くの同一気象条件下で熱画像撮影するのは困難であるが、湿潤部検知への影響を無視できる条件範囲はどの程度か | <ul style="list-style-type: none"> <li>・温度差が大きいかつ時間的にほぼ一定している時間帯は11～13時</li> <li>・雲によって一時的に日射が遮られると、数分間程度の日射量の低減でも地表面温度が敏感に应答し、明確に低減する。</li> <li>・低減期間の不飽和土の最小温度は、低減期前後の飽和土の温度と同等またはより低くなる場合もある。</li> <li>・日射が低減した時間4分に対して地表面温度の回復に要する時間は11～18分間となった。</li> <li>・概ね2m/sより強い風が吹く日には明確に温度差が小さくなる傾向が見られた</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・湿潤部の温度検知に適した温度差がほぼ同程度となる時間帯の目安は11～13時</li> <li>・雲により日射量が低減した期間において撮影した熱画像を晴天時の熱画像と混在させて湿潤部検知を行うことは不可能。それぞれ分けて分析することが必須。</li> <li>・低減期間とその前後の晴天時では湿潤部と判定する温度差の大きさを変える必要がある</li> <li>・一日のうちに複数回の一時的な曇りが生じる日では、地表面温度回復のための総待機時間が長くなり、調査効率が低下することが懸念される。</li> <li>・風速2m/sが調査適日の判定の目安</li> </ul> |
| 5  | 堤防全延長の熱画像を効率よく取得する工夫として、一枚の画像で捉えられるのり面面積を広くできる遠距離撮影の導入は可能か   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・のり面に対して30～90°および2～10mの角度・距離であれば温度計測誤差は無視しうる程度</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>・堤防のり面への適用において熱画像撮影に関わる特段の制約は撮影距離・角度の観点からはない。課題1～4の条件を踏まえて実施することが肝要。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                              |

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準維持管理編（河川編），  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf), 2013.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領,  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kasen/pdf/tenken\\_youryou\\_h240517.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/tenken_youryou_h240517.pdf), 2012.
- 3) 関東地方河川堤防復旧技術等検討フォローアップ委員会及び統合物理探査検討会 合同委員会：統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する知見～統合物理探査を利用した浸透に対する堤防の安全度評価手法について～,  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000075195.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000075195.pdf), 2012.
- 4) 久保田啓二郎・大浪裕之・西山哲・東良慶：堤防の変状等を高精度に把握するモバイルマッピングシステムの開発, 土木技術資料, 平成 25 年 4 月号, pp. 6-9, 2013.
- 5) 三木博史ほか：熱赤外線映像法による吹付のり面の老朽化診断に関する共同研究報告書, 建設省土木研究所, 共同研究報告書 No.139, 1996.
- 6) 近藤純正：水環境の気象学, 第 1 刷, 朝倉書店, pp.202-203, 1994.