

集中豪雨時の斜面表層部における  
降雨流出浸透特性に関する研究

平成 23 年 2 月 23 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

古賀博久

## 要旨

近年日本において、温暖化に伴う気候変動の影響の一つと捉えられる局所的な短期間集中豪雨、いわゆるゲリラ豪雨の発生が増加し、それに起因する斜面崩壊あるいは地すべりによる土砂災害が増加することが懸念されている。日本は国土の大部分が急峻な地形からなり、斜面に近接して住宅地および道路・線路が形成されている場合が多く、斜面災害発生時の被害が拡大する可能性が高い。

従来、斜面災害は防災という観点から維持補修が検討されてきたが、成熟型社会においては予防保全の観点から維持補修を検討する必要がある。さらには斜面災害に対する損失を最小限に止めるために、道路管理者による早期警戒に対する意思決定が求められるが、その是非を判断するための基準として、降雨と斜面の安定性との関連を適切に評価する必要性が高まっている。

そこで、ゲリラ豪雨とスコールの降雨特性の類似性に着目し、ゲリラ豪雨時の斜面における雨水流出および雨水浸透のメカニズムの解明を目的として、カセサート大学（タイ）との共同プロジェクトとしてタイ・ナコンナヨックにおいて、スコール時の斜面における降雨流出浸透特性の原位置計測が2007年9月より実施されている。また、これまでに、斜面における雨水の流出浸透挙動を予測する手法として拡張型マルチタンクモデルが提案されており、本計測サイトで得られた観測結果を適用することでそのモデルの妥当性、および適用範囲について検証されている。

本研究では、原位置計測結果をもとに、斜面表層部における雨水の流出浸透特性に関する考察を述べるとともに、タンクモデルを用いて斜面表層部における水収支の詳細な分析を行う。さらに、斜面表層部の浸透特性を反映した新しい土砂災害早期警戒体制の手法について検討を行う。

## 目次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 序論 .....                       | 1  |
| 1.1 研究の背景 .....                      | 1  |
| 1.2 研究の目的 .....                      | 1  |
| 1.3 既往研究との関連 .....                   | 2  |
| 1.4 本論文の構成 .....                     | 5  |
| 第 2 章 水収支に関する原位置計測 .....             | 6  |
| 2.1 タイにおける原位置計測の概要 .....             | 6  |
| 2.2 表面流出量の算定方法 .....                 | 8  |
| 2.3 浸透量の算出方法 .....                   | 8  |
| 2.3.1 手法 1 .....                     | 8  |
| 2.3.2 手法 2 .....                     | 9  |
| 2.4 原位置計測結果と考察 .....                 | 10 |
| 第 3 章 表層タンクのパラメータ同定手法の改良 .....       | 12 |
| 3.1 拡張型マルチタンクモデル .....               | 12 |
| 3.1.1 拡張型マルチタンクモデルの概要 .....          | 12 |
| 3.1.2 表層タンク .....                    | 12 |
| 3.2 表層タンクのパラメータ同定手法 .....            | 13 |
| 3.2.1 カルマンフィルタ .....                 | 13 |
| 3.2.2 時系列ノッチ逆算浸透量の算出方法 .....         | 16 |
| 3.2.3 誤差計算 .....                     | 16 |
| 3.3 実斜面への適用結果と考察 .....               | 17 |
| 3.3.1 本手法と従来の手法の比較 .....             | 17 |
| 3.3.2 パラメータの傾向 .....                 | 19 |
| 3.3.3 順解析の結果と考察 .....                | 20 |
| 第 4 章 先行降雨履歴を反映した土砂災害早期警戒体制の検討 ..... | 22 |
| 4.1 先行履歴降雨指標 API の概要 .....           | 22 |
| 4.2 改良先行履歴降雨指標 MAPI の算定 .....        | 23 |
| 4.2.1 改良先行履歴降雨指標 MAPI の概要 .....      | 23 |
| 4.2.2 原位置計測に基づく低減率 $K_i$ の算定 .....   | 23 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 4.3 MAPI の適用結果 .....          | 24 |
| 4.4 MAPI と間隙圧の関係 .....        | 25 |
| 4.5 新しい土砂災害早期警戒体制の検討 .....    | 27 |
| 4.5.1 MAPI の長期降雨指標への適用性 ..... | 27 |
| 4.5.2 短期降雨指標の検討 .....         | 28 |
| 第 5 章 結論 .....                | 29 |
| 参考文献 .....                    | 31 |
| 謝辞 .....                      | 32 |

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

近年日本において，地球温暖化に伴う気候変動の影響の一つと捉えられる局所的な短期間集中豪雨，いわゆるゲリラ豪雨の発生が増加し，それに起因する斜面災害が多発しつつある．日本でのゲリラ豪雨に起因する斜面災害の代表例としては，2009年7月および2010年7月に，それぞれ山口県防府市および広島県庄原市で発生した，集中豪雨による斜面崩壊に伴う土石流被害が挙げられる．

日本は国土の大部分が急峻な地形からなり，斜面に近接して住宅地および道路・線路が形成されている場合が多く，斜面災害発生時の被害が拡大する可能性が高い．

日本における豪雨時の斜面災害に対するハード面での防災対策としては，地下水排除工およびアンカー工といった対策工を施工することで，斜面の安定性を高める対策が行われている．

また，ソフト面での防災体制としては，いわゆるスネークカーブと呼ばれる過去の豪雨災害時の時間雨量と累積降雨量（あるいは連続雨量）を組み合わせた限界降雨包絡線を用いて通行規制を行う方法が代表例として挙げられる<sup>1)</sup>．しかし，ゲリラ豪雨の発生が顕在化し始めたのが過去数年であること，ゲリラ豪雨の特性が短期間で集中的であることを鑑みると，上述の時間降雨および累積降雨を判断指標に用いることは必ずしも適切でないと考えられる．そこで，降雨量のみでなく，斜面における降雨流出浸透特性を反映した新しい土砂災害早期警戒体制を検討することは，地盤工学分野において喫急の課題となる．

## 1.2 研究の目的

本研究では，ゲリラ豪雨時における雨水流出特性，および雨水の斜面内部への浸透特性を明らかにし，その特性を反映した土砂災害早期警戒体制に関する提案をすることを目的とし，以下のように展開する．

まず，実斜面における計測データをもとに，斜面に降った雨水が，斜面内部への浸透量と表面流出量へどのような比率で分離されるかについて把握する．続い

て、斜面における雨水の流出浸透挙動を予測する手法の一つとして提案される、拡張型マルチタンクモデルの表層部のパラメータ同定手法の精度を高め、そのタンクモデルを用いて、斜面表層部における水収支の詳細な分析を行う。さらに、実斜面より得られた計測結果をもとに、降雨流出浸透特性を反映した土砂災害早期警戒体制に関する提案を行う。

### 1.3 既往研究との関連

本節では、降雨時における雨水浸透挙動、および豪雨に対する土砂災害早期警戒体制に関する既往の研究を概観し、それらの中での本研究の位置づけを述べる。

降雨時における地盤内への雨水浸透特性を把握するため、室内試験、および原位置計測は数多く行われているが<sup>2),3)</sup>、原位置計測、特にゲリラ豪雨の原位置計測はゲリラ豪雨が近年増加傾向にあるとはいえ、その発生回数が限定的であり、かつどの地域で発生するかを予測することが困難であるため、国内では十分な計測データを確保することは困難である。

上述した課題に対処するため、大津ら<sup>4)</sup>はゲリラ豪雨の降雨特性と熱帯性気候地域におけるスコールの降雨特性の類似性に着目した。熱帯性気候地域では雨季にあらゆる箇所において高頻度でスコールが発生しており、斜面への降雨浸透に着目した原位置計測が容易であると推測される。ここで、スコールと日本におけるゲリラ豪雨の発生機構については、気象学的観点からは異なるものであるとの指摘もある。しかし、同研究においては、短時間に高強度の降雨が集中する場合の斜面における雨水の流出浸透特性を検討するという観点からは、両者は同等の外乱条件であると捉えている。

このような観点から、大津ら<sup>4)</sup>はゲリラ豪雨発生時の斜面内部への降雨浸透のメカニズムの解明を目的として、カセサート大学（タイ）との共同プロジェクトとして、タイ・ナコンナヨックにおいて、2007年9月より原位置計測を行ってきた。

本研究では、原位置計測結果をもとにして、斜面に降った雨が、斜面内部への浸透量と表面流出量へどのような比率で分離されるかについて検討する。また、その結果をもとにして、計測精度の検討についても行う。

また、これまでに Ohtsu ら<sup>5)</sup>は斜面崩壊の一つである不飽和領域における浅層崩壊に着目し、斜面安定性評価の前段階として、降雨時における雨水の流出浸透挙動を予測する手法として、不飽和領域を考慮した拡張型マルチタンクモデルを提案してきた。さらに各計測サイトで得られた観測結果を適用することでそのモデルの妥当性、および適用範囲について検証してきた。

Hotta<sup>6)</sup>は表層タンクのパラメータ同定をカルマンフィルタの原理を用いて行い、実斜面における観測値との比較・検討により高い精度で降雨時における法尻部の流出挙動を表現した。一方で、中腹流出量および中腹浸透量については、観測値と解析結果に差が見られた。

そこで、本研究ではパラメータ同定手法の改良を行い、解析結果をもとに降雨時における雨水の流出浸透挙動の詳細な分析を行う。

土砂災害早期警戒体制については、現在、一般的に以下の流れで行われている。

**図 1.1** に示すように長期降雨指標と短期降雨指標の二つの降雨指標を用い、過去の災害事例を踏まえて、土砂災害の発生する危険性が高いと考えられる領域と発生の可能性が低いと考えられる領域を分離する。その領域を区分する線を土砂災害発生危険基準線 CL (Critical Line) と呼び、それまでの降雨状況の軌跡として表したスネーク曲線によって、土砂災害発生の切迫性を判断する。一般的には、スネーク曲線が CL に到達するまでに 2 時間以上の余裕が確保できることを想定した位置に警戒基準線 WL (Warning Line)、1 時間以上の余裕が確保できることを想定した位置に避難基準線 EL (Evacuation Line) をそれぞれ設定し、災害に対する警戒、および避難の体制に入れている。NEXCO や JR では、長期降雨指標として連続雨量、短期降雨指標として時間雨量を用いて、通行規制、および運転規制を行っている。

しかし、Soralump<sup>7)</sup>は、タイにおける過去の斜面崩壊事例の分析結果から、斜面内部において体積含水率が高まっている場合には、豪雨発生直後、すなわち対象とする降雨の累積降雨量が微小な場合にも、斜面崩壊が発生する危険性を指摘している。つまり、上述した降雨量のみを反映した方法には、問題があることを示唆している。このため、Soralump<sup>7)</sup>は斜面崩壊において降雨の先行履歴効果を考慮するため、第 4 章で説明する先行履歴降雨指標 (Antecedent Precipitation Index: 以下、API)を用いた早期警戒体制を提案している。日本でも、降雨の先行履歴効果を考慮した土砂災害早期警戒体制の手法として、近年、砂防部局では実

効雨量を用いた手法，気象庁では土壌雨量指数<sup>8)</sup>を用いた手法を採用するようになってきている。

実効雨量は土砂災害の発生に及ぼす先行降雨の影響を考慮した累加雨量のことで，最新の雨量の影響を大きく，過去の雨量ほど小さく反映している．ここで，実効雨量は半減期を用いて，式(1.1)で算出される．

$$R_t = r_t + \sum_{n=1} a_n \cdot r_{t-n} \tag{1.1}$$
$$a_n = 0.5^{n/T}$$

ここに， $R_t$ [mm]は時刻  $t$  の実効雨量， $r_t$ [mm/hr]は時刻  $t$  の時間雨量， $a_n$ は減少係数，および  $T$ [hr]は半減期を示す．ここで，実効雨量への影響を考慮して，減少係数 0.004 以上になる期間が目安となる．

現在，各都道府県の砂防に関する機関の多くで，**図 1.2** に示す総合土砂災害対策検討委員会による手法（提言案）が採用されている<sup>9)</sup>．この手法は，地表および地中の水分量を表す 2 種類の実効雨量によって基準雨量を設定するものである．実効雨量の半減期は，鈴木ら<sup>10)</sup>によるタンクモデル貯留量の推移特性と類似するように，1.5 時間および 72 時間を採用し，それぞれ短期降雨指標および長期降雨指標としている．しかし，半減期は，花崗岩地帯におけるタンクモデルと類似性の高いものとしているために，必ずしも他の地盤条件に適用できるとは限らないという問題がある．

土壌雨量指数は，気象庁で土砂災害警戒情報，および大雨警報・注意報の発表基準として用いられている．これは，土壌中の水分貯留量を，解析雨量と降水短時間予報等の雨量データから 3 段直列タンクモデルを用いて指数化したものである．しかし，この手法で用いているパラメータは全国一律のものであり，植生，地質，風化等を考慮していないという問題がある．

Soralump が提案した API を用いた手法は，タイで計測されているのが日雨量のみであるため，評価する観測値として日雨量を用いている．しかし，ゲリラ豪雨やスコールの場合，短時間に高強度の降雨が集中するため，日雨量を用いて通行規制等の判断を行うことは適切でないと考えられる．そこで，本研究では，原位



置計測結果をもとにして、評価する観測値に 10 分間雨量を用いるとともに、地盤内水分貯留量の減衰を考慮した、改良先行履歴降雨指標 (Modified Antecedent Precipitation Index: 以下, MAPI) を提案する。10 分間雨量を用いることで、ゲリラ豪雨の短時間に高強度の降雨が発生するという特性を加味することができ、リアルタイムで情報を提供することも可能となる。最後に、MAPI を用いた新しい土砂災害早期警戒体制の立案についての検討も行う。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 5 章からなる。

第 1 章において、序論として研究の背景、目的、および既往の研究との関連を述べた。

第 2 章では、実斜面における計測データを用いて、斜面に降った雨が、斜面内部への浸透量と表面流出量へどのような比率で分離されるかについて検討する。そして、その特性について考察を加えるとともに、本研究における原位置計測の計測精度について検討する。

第 3 章では、拡張型マルチタンクモデルの表層タンクのパラメータ同定手法の改良を行い、その精度を検討するとともに、解析結果をもとに雨水の流出浸透挙動の詳細な分析を行う。

第 4 章では、第 2 章、および第 3 章で得られた知見をもとに、斜面表層部の降雨流出浸透特性を反映した新しい土砂災害早期警戒体制の立案に関する検討を行う。

第 5 章では、第 2 章、第 3 章、第 4 章で示した結果から本研究の結論として、斜面表層部における雨水の流出浸透特性について得られた知見を述べるとともに、本研究で提案した新しい早期警戒体制についての考察を述べる。最後に、今後の検討課題、および展望について述べる。

## 第2章 水収支に関する原位置計測

本章では、タイ・ナコンナヨックで計測されたデータを使用して、斜面に降った雨が、斜面内部への浸透量と表面流出量へどのような比率で分離されるかについて検討する。そして、その特性について考察するとともに、本研究における原位置計測の計測精度について検討する。

### 2.1 タイにおける原位置計測の概要

ゲリラ豪雨のような局所的短期間集中降雨時の、斜面における雨水流出および雨水浸透のメカニズムの解明を目的として、タイ・ナコンナヨックにおける道路脇斜面において、2007年9月から原位置計測を行っている。計測器配置に関する断面図、および平面図を **図 2.1**、および **図 2.2** に示す。同図に示すように、当該斜面では、土壌水分計、テンシオメータ、水位計および雨量計を設置して、それぞれ体積含水率、間隙圧、表面流出量、および降雨量を計測している。また、当該斜面における中腹部の集水面積は **図 2.2** における  $A_2=150\text{m}^2$ 、法尻部の集水面積は  $A_3+A_4=425\text{m}^2$  とする。なお、2010年よりそれぞれの計器の計測間隔が、無降雨時には10分間であり、降雨時のみ1分間となるように自動制御している。しかし、2008年の計測間隔は降雨時についても10分間であるため、本研究においては2010年のデータについても、10分間隔のデータへの置き換えを行った。

ここで、当該斜面の地質は、**図 2.3** に示すように、中生代ジュラ紀から白亜紀の流紋岩の風化帯からなっており、表層部は高温多湿の条件下での強風化によって粘土化したものである。風化の模式図については **図 2.4** に示す。また、室内試験によって得られた当該斜面の力学特性を **表 2.1** に示す。透水特性については、表層部の飽和透水係数は、 $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{ cm/sec}$  であった。**図 2.5**<sup>11)</sup>に斜面中腹部 GL-0.6m, GL-1.0m および法尻部 GL-0.6m, GL-1.0m における粒径加積曲線を示す。なお、土の粒径にはふるい分けだけでは分析できない細粒分が多く含まれているため、ふるい分け分析およびストークスの法則にもとづく水沈降分析によって粒度分析を行っている。粒度分布は斜面法尻部 GL-0.6m 以外  $D_{50}$  が約 0.03mm 以下であることから斜面を構成している地質は細粒分が卓越していると判断される。また、**図 2.6**<sup>11)</sup>に三角座標による分類を示す。この結果から、中腹部 GL-0.6m は

礫まじり砂質細粒土，中腹部 GL-1.0m は砂質細粒土，法尻部 GL-0.6m は粘性土質砂質礫，法尻部 GL-1.0m は砂礫まじり細粒土で構成されていると推定される。

土壌水分計は深度 0.1m，0.2m，0.3m，0.4m，0.6m，および 1.0m において，電圧形式により計測を行っており，式(2.1)に示す多項式校正によって体積含水率に換算している。

$$\theta = 0.32 - 0.09V + 0.72V^2 - 0.34V^3 \quad (2.1)$$

ここに  $V[V]$  は電圧，および  $\theta$  は体積含水率を表す。

また，斜面に建設されている水路に対して V ノッチを設置し，V ノッチからの越流水位を水位計により計測している。なお，越流水位と表面流出量の関係は JIS B 8302 のせき式流量公式に定められる次式を用いている。

$$Q = 0.00084 \times H^{2.5} \quad (2.2)$$

ここに  $Q[m^3/min]$  は表面流出量， $H[cm]$  は越流水位を表している。

第 2 章および第 3 章において，2008 年 5 月 19 日から 2008 年 11 月 4 日の間に得られた計測データのうち，表 2.2 に示す 24 降雨を 2008 年の対象降雨とし，2010 年 4 月 17 日から 2010 年 9 月 26 日までの間に得られた計測データのうち，表 2.3 に示す 16 降雨を 2010 年の対象降雨とする。なお，降雨終了の基準については，1 時間の無降雨をもって降雨の終了としている。これは，ゲリラ豪雨の特性である短時間に降雨が集中するという特性を考慮している。また，対象降雨における累積降雨量の発生頻度を図 2.7 に示し，降雨継続時間の発生頻度を図 2.8 に示す。

図 2.7 に示すように，2008 年，および 2010 年の累積降雨量の平均値はともに 38mm である。降雨継続時間の平均値については，図 2.8 に示すように，2008 年が 1.8 時間，一方 2010 年が 2.3 時間となっており，計測年による相違が見られる。しかし，この相違は，高強度の降雨が集中した後の低強度の降雨が続く時間の相違によるものであり，高強度の降雨が短時間に集中しているという点では，計測年による相違はないといえる。これは，表 2.2 および表 2.3 より算出される最大 10 分間雨量の平均値が両年ともに 11mm 程度であることから裏付けられる。ここで，対象降雨のうち，特に，ゲリラ豪雨の短時間に高強度の降雨が集中するという特

性を顕著に表す降雨を図 2.9 に示す。同図に示すように、両年ともに高強度の降雨が 30 分から 40 分の間に集中していることが確認される。

## 2.2 表面流出量の算定方法

まず、それぞれの V ノッチで、10 分間隔で計測される 1 分あたりの流出量から 10 分あたりの流出量を式 (2.3) により求める。

$$Q(t)_{10\text{min}} = 10 \cdot (Q(t)_{1\text{min}} + Q(t - \Delta t)_{1\text{min}}) / 2 \quad (2.3)$$

ここに、 $Q(t)_{10\text{min}}[\text{L}/10\text{min}]$  は時刻  $t$  における 10 分間流出量、 $Q(t)_{1\text{min}}[\text{L}/1\text{min}]$  は時刻  $t$  における 1 分間流出量、 $Q(t - \Delta t)_{1\text{min}}[\text{L}/1\text{min}]$  は時刻  $t - \Delta t$  における 1 分間流出量を表している。また、 $\Delta t$  は 10 分としている。さらに、斜面法尻部における表面流出量を当該斜面から集水される全ての表面流出量であると捉え、式 (2.4) を用いて集水域全体の表面流出量  $Q_{all}[\text{L}/10\text{min}]$  を求める。

$$Q_{all} = Q_2 - Q_3 \quad (2.4)$$

ここに、 $Q_2[\text{L}/10\text{min}]$  および  $Q_3[\text{L}/10\text{min}]$  は、それぞれ V ノッチ No.2 および No.3 で計測される表面流出量を表している。

## 2.3 浸透量の算出方法

斜面内部への浸透量の算出方法について、以下で 2 つの手法を説明する。

### 2.3.1 手法 1

手法 1 は、図 2.1 に示す斜面中腹部に設置した土壌水分計 No.1 より計測された、降雨開始から終了時までの体積含水率変化の累積量を斜面内部への浸透量と定義する手法である。式 (2.5) を用いてそれぞれの層の地盤内の水分貯留量を算出する。その上で、式 (2.6) により、ある時刻  $t$  における斜面内部への浸透量を求め、降雨開始時から終了時までの総和を計算する。手法 1 では、これを対象降雨の総浸透

量とする。

$$Y_i(t) = D_i \cdot \theta_i(t) \quad (2.5)$$

$$q_I(t) = \sum_{i=1}^6 (Y_i(t) - Y_i(t - \Delta t)) \quad (2.6)$$

ここに、 $D_i$ [mm]は図 2.10 における斜面内部の  $i$  番目の層厚、 $\theta_i(t)$ は時刻  $t$ における深度  $i$  の体積含水率、 $Y_i(t)$ [mm]は時刻  $t$ における  $i$  番目の層の水分貯留量を表す。また、 $q_I(t)$ [mm/10min]は単位面積あたりの斜面内部への浸透量、 $\Delta t$  は 10 分としている。

### 2.3.2 手法 2

手法 2 は、以下に示す式 (2.7) に基づき、集水域全体に降った累積降雨量から総流出量、および欠損雨量を差し引き、その値を集水面積の総和で除した値を、単位面積あたりの斜面内部への浸透量と定義する。ここで、欠損雨量とは表層植生が保持する水量のことである。

$$q_I = (Q_P - Q_R - Q_S) / A \quad (2.7)$$

ここに、 $q_I$ [L/m<sup>2</sup>]は表面流出量から逆算して算定される単位面積あたりの浸透量で、単位としては、[L/m<sup>2</sup>]は[mm]と等価である。 $A$ [m<sup>2</sup>]は集水域全体の面積、 $Q_P$ [L]は集水域全体に降った累積降雨量、すなわち累積降雨量に集水面積を乗じた値、 $Q_R$ [L]は 1 雨における集水域全体の総流出量、 $Q_S$ [L]は集水域全体の欠損雨量、すなわち欠損雨量に集水面積を乗じた値である。当該斜面での欠損雨量は、原位置計測結果より 1m<sup>2</sup>あたり 5mm と定めるものとする (図 2.11)。同図において、横軸は降雨開始から初めて流出が観測された時の累積降雨量で、縦軸はその時のそれぞれのノッチで観測された表面流出量である。累積降雨量が欠損雨量 5mm を超えるまでは流出が発生せず、5mm を超えた後は、表面流出量が同図の回帰直線で示したようにほぼ線形的に増加する傾向を示す。

ここで、手法 1 は土壌水分計 No.1 における斜面中腹部の 1 点に対応する量を与える。それに対して、手法 2 は斜面全体での平均量を与えるものである。

## 2.4 原位置計測結果と考察

タイにおける原位置計測により得られた結果の内，1 雨における表面流出量，浸透量について考察する．

まず，**図 2.12** は降雨期間における表面流出量の時系列データである．降雨波形と表面流出量の波形については類似性が見られるが，10 分程度の時間遅れを伴って表面流出が発生していることが確認される．

**図 2.13** は，総流出量と累積降雨量との関係を示す．計測された総流出量は，同図のように，累積降雨量が増加するにつれて増加する傾向にある．なお，同図において，2008 年と 2010 年に計測された値を区別して示したが，計測年による相違はほとんど見られない．次に，**図 2.14** は，**図 2.13** に示す総流出量をその降雨の累積降雨量で除した値を流出率として定義し，その流出率と累積降雨量との関係を示したものである．同図に示すように，流出率は累積降雨量が増加するにつれて増加するが，0.8 程度に収束する傾向となる．ここで，表面流は，降雨強度が地表面の浸透能を上回る場合における浸透しきれない雨水である．本計測サイトは難透水性の風化流紋岩であるため，流出にまわる割合は大きくなっていると考えられる．また，本研究で対象としているのは短期間集中豪雨であり，短期間に降雨が集中するほど，地盤の浸透能を上回る量が増加する．その地盤の浸透能を上回る量が流出にまわるため，累積降雨量の増加に伴い，流出率が増加したと推察される．ここで，降雨期間中における蒸発はないと仮定すると，降雨は表面流出，浸透量，欠損雨量に分離される．このうち，欠損雨量は降雨の規模に関わらず 5mm であり，累積降雨量が多くなるほど欠損雨量の占める割合が小さくなる．したがって，降雨量の増加に伴い表面流が卓越し，流出率の最大値が 0.8 程度になることが分かる．本計測を行っているタイを始めとする東南アジア諸国の斜面で，ガリ浸食に代表される斜面表面の浸食が多発している．表面流が卓越することが，その斜面表面の浸食の発生要因になっていると推察される．

続いて，**2.3**における2つの手法による斜面内部への浸透量の算定結果を**図 2.15**に示す．同図に示すように，2つの手法による斜面内部への浸透量の算定結果はばらついた分布にはなるが，手法1と手法2の分布が概ね等しくなり，いずれの結果も累積降雨量の増加に伴って，浸透量が増加する傾向を示す．手法1と手法2の分布が等しいということから，斜面中腹部の不飽和領域において，鉛直方向

の浸透が卓越していることが分かる。なぜなら、鉛直方向だけでなく、地盤内で水平方向の流れが生じていれば、地盤内の水分量変化を直接計測している手法 1 は、水平方向の流れからの水分量変化も加算されるため、手法 1 の値の方が大きくなると考えられるためである。しかし、特に累積降雨量が多い範囲においては、手法 2 に比べ、手法 1 の値が小さくなっている。これは、手法 2 は表面流出量から逆算することにより算出しているため、全浸透量を計測することができるのに対して、手法 1 は土壌水分計により 0.1m 以深を計測しているために、地表面に近く、水分量変化が最も顕著である 0m から 0.1m における水分量変化を的確に捉えきれていないことに起因すると考えられる。特に、累積降雨量が多いほど、この水分量変化が大きいため、**図 2.15** に示す結果になったと推察される。次に、斜面内部への浸透量を累積降雨量で除した値を斜面内部への浸透率と定義し、**図 2.16** に累積降雨量と浸透率の関係を示す。浸透率は累積降雨量が増加するにつれて減少し、0.1 から 0.2 程度に収束する傾向となる。浸透率の傾向は、**図 2.17** に示す Horton<sup>12)</sup>により示された結果と調和的である。ただし、**図 2.16** の累積降雨量が小さい 10mm から 30mm の範囲における浸透率の分布は、30mm から 40mm の範囲における分布と同等、ないし若干小さくなっている。これは、累積降雨量が小さい降雨は、降雨全体のうち欠損雨量の占める割合が大きくなることが原因であると推察される。

また、**図 2.16** は**図 2.14** に示した流出率と累積降雨量の関係と調和的な結果となり、水収支に関して整合性が確認される。以上の結果より、当該斜面での体積含水率および表面流出量の測定に関して、若干の誤差が出る場合はあるものの、計測精度が高いということが裏付けられる。

## 第3章 表層タンクのパラメータ同定手法の改良

本章では、**図 3.1** に示す拡張型マルチタンクモデルにおける表層タンクのパラメータ同定手法の改良を行い、その精度を検討するとともに、解析結果をもとに雨水の流出浸透挙動の詳細な分析を行う。

### 3.1 拡張型マルチタンクモデル

#### 3.1.1 拡張型マルチタンクモデルの概要

タンクモデルは 1972 年に菅原<sup>13)</sup>によって考案された広域を対象とした流出計算手法であり、簡易に各流域の水収支および水循環を表現することを可能とするモデルである。このタンクモデルの基本概念を拡張し異なる形状のタンクを組み合わせることで、斜面における表面流出、浸透および地下水位の変動を表現することを目的に考案されたのがマルチタンクモデルである。高橋ら<sup>14)</sup>は斜面リスク評価の一環として、降雨時における地下水位の変動をマルチタンクモデルの適応により予測した。このタンクモデルを改良し、斜面不飽和領域における土壌水分量の変動を予測することを可能としたのが拡張型マルチタンクモデルである。

拡張型マルチタンクモデルの概要について以下で説明する。**図 3.1**において、 $P$  は降雨量、 $E$  は蒸発量、 $X$  は各タンクの貯留量、 $H$  は流出孔までの高さ、 $\alpha$  は流出係数、 $\beta$  は浸透係数を表す。また、 $U$ 、 $M$ 、 $L$  はそれぞれ斜面の上段(Upper)、中段(Middle)、下段(Lower)を表す添え字である。ここで、本研究では、表層タンクのパラメータ同定手法の改良を行い、斜面表層部における雨水の流出浸透挙動の詳細な分析を行うので、**図 3.1**には表層タンクのみを示している。

また、拡張型マルチタンクモデルでは 1 雨に対し、各パラメータは時間的に変化せず一定値を用いて降雨時の斜面における雨水の流出浸透挙動を表現する。

#### 3.1.2 表層タンク

**図 3.1** に示す 3 つの表層タンクはそれぞれ斜面上部、中腹部、および法尻部におけるタンクを表し、斜面表層部において発生する表面流出量、および不飽和領域への浸透量を分類することができる。また、表層タンクにおける流出孔までの高さ  $H$  は、第 2 章で述べた欠損雨量を表現するものであり、同様に 5 mm と設定



した．さらに，3つの表層タンクを連結させることにより，斜面上流で発生した表面流出量が下流における表面流出量にあるいは浸透量に与える影響を考慮している．

ここで，タンクモデルにおいて，流出量，および浸透量は式(3.1)，式(3.2)を用いてそれぞれ算出される．

$$\text{If } \begin{cases} X_i - H_i \leq 0 \\ X_i - H_i > 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} q_{R,i} = 0 \\ q_{R,i} = \alpha_i \cdot (X_i - H_i) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$q_{L,i} = \beta_i \cdot X_i \quad (3.2)$$

$q_{R,i}$ [mm/10min]は表面流出量， $q_{L,i}$ [mm/10min]はタンクから斜面内部への浸透量である． $i=U, M, L$ で，つまり上段，中段，下段それぞれ上式を用いて算出される．

## 3.2 表層タンクのパラメータ同定手法

拡張型マルチタンクモデルの表層タンクにおいては，逆解析手法のひとつであるカルマンフィルタの概念を用いて未知パラメータの抽出を行い，誤差計算をすることにより最適パラメータを求める．以下でそのパラメータ同定の過程について説明する．

### 3.2.1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは，未知パラメータがある離散型の状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができる．ここで，カルマンフィルタの基本概念を図3.2に示す．今，ある状態 $t$ から状態 $t+\Delta t$ に遷移する場合には，式(3.3)の状態方程式を用いて表すことができる．また状態 $t+\Delta t$ に遷移した後にある観測値が与えられた場合には，式(3.4)の観測方程式を用いて未知パラメータを更新することで最適なパラメータを求めることができる．

$$X(t+\Delta t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + \mu(t) \quad (3.3)$$

$$Y(t+\Delta t) = C(t+\Delta t)X(t+\Delta t) + \varepsilon(t) \quad (3.4)$$

ここに  $X(t)$  は未知パラメータ， $Y(t)$  は観測値， $A(t)$  は遷移行列， $B(t)$ ，および  $U(t)$  は既知ベクトル， $C(t)$  は観測行列， $\mu(t)$  はシステムノイズ，および  $\varepsilon(t)$  は観測ノイズである．

また，前述したようにカルマンフィルタの概念は，未知パラメータがある離散型の状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができるが，拡張型マルチタンクモデルにおける構成式は非線形であるため，本研究ではテーラー展開によって線形化を行っている．

カルマンフィルタの観測方程式に必要な観測値として，本研究では下段タンクの側孔からの流出量，および中段タンクの底孔からの浸透量を対象とする．

ここで，表層タンクにおける水収支の関係式を式 (3.5) から式 (3.7) に示す．

$$\frac{dX_U}{dt} = (P - E) - \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \beta_U \cdot X_U \quad (3.5)$$

$$\frac{dX_M}{dt} = (P - E) + \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \beta_M \cdot X_M \quad (3.6)$$

$$\frac{dX_M}{dt} = (P - E) + \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \beta_M \cdot X_M \quad (3.7)$$

また， $X(t)$ ， $\alpha(t)$ ， $\beta(t)$  はテーラー展開を用いて式 (3.8) から式 (3.10) で表される．なお，2 次以上の微小項は無視している．

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \cdot \frac{dX(t)}{dt} \quad (3.8)$$

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \Delta t \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} \quad (3.9)$$

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + \Delta t \cdot \frac{d\beta(t)}{dt} \quad (3.10)$$

ここで，**図 3.2** に示す表層タンクにおける雨水流出過程，および浸透過程のカルマンフィルタの各行列式は以下の形で表される．

$$X(t) = \left[ \frac{dX_U}{dt} \quad \frac{dX_M}{dt} \quad \frac{dX_L}{dt} \quad \frac{d\alpha_U}{dt} \quad \frac{d\alpha_M}{dt} \quad \frac{d\alpha_L}{dt} \quad \frac{d\beta_U}{dt} \quad \frac{d\beta_M}{dt} \quad \frac{d\beta_L}{dt} \right]^T \quad (3.11)$$

$$Y(t) = \left[ \frac{dq_{I,M}}{dt} \quad \frac{dq_{R,L}}{dt} \right]^T \quad (3.12)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} -(\alpha_U + \beta_U) & 0 & 0 & -(X_U - H_U) & 0 & 0 & -X_U & 0 & 0 \\ \alpha_U & -(\alpha_M + \beta_M) & 0 & (X_U - H_U) & -(X_M - H_M) & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & \alpha_M & -(\alpha_L + \beta_L) & 0 & (X_M - H_M) & -(X_L - H_L) & 0 & 0 & -X_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

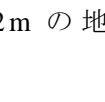
$$B(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.14)$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} 0 & \beta_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L & 0 & 0 & X_L & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} (R-E) - \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \beta_U \cdot X_U \\ (R-E) + \alpha_U \cdot (X_U - H_U) - \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \beta_M \cdot X_M \\ (R-E) + \alpha_M \cdot (X_M - H_M) - \alpha_L \cdot (X_L - H_L) - \beta_L \cdot X_L \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

上述した流出浸透計算の行列式において，表層部における下段タンクの流出量の差分，および中段タンクの浸透量の差分を数値解析のインプットデータとして与え，逆解析によって流出係数 $\alpha$ ，および浸透係数 $\beta$ のパラメータセットを得る．既往の研究<sup>6)</sup>において，下段タンクの流出量は斜面法尻部の表面流出量とし，中段タンクの浸透量は，土壤水分計 No.1 で計測される深度 0.2m の体積含水率を用いて，式(3.17)で算出されてきた．

$$q_{I,M} = 200 \cdot \Delta\theta_2 \quad (3.17)$$

ここに  $q_{I,M}$ [mm/10min] は中段タンクの浸透量， $\theta_2$  は  2.10 における 0.2m の地点

における体積含水率である。10 分間の体積含水率変化量に 0m から 0.2m までの層厚を乗じている。本研究では、2.3.2 の考えをもとにノッチ逆算浸透量を時系列で求め、それを新たなカルマンフィルタのインプットデータ、および観測値として用いる。その算出方法については、3.2.2 で説明する。

### 3.2.2 時系列ノッチ逆算浸透量の算出方法

まず、時系列ノッチ逆算浸透量の算出にあたり、以下の 2 つの条件を仮定する。

- 1) 欠損雨量は 5mm で、累積降雨量が 5mm を越えるまで流出、浸透は発生しない。
- 2) 対象としている雨水が、降雨発生から法尻部で計測されるまでにかかる時間は 10 分間である。

累積降雨量が 5mm を超えるまで流出が発生しないことについては、2.3.2 で述べた (図 2.11)。また、対象としている雨水が、降雨発生から法尻部で計測されるまでにかかる時間が 10 分であることについては、2.4 で述べた (図 2.12)。ここで、浸透についても、累積降雨量が欠損雨量を上回ってから、浸透が発生するという仮定をおいている。この 2 つの仮定のもとに、浸透量を式(3.18)で求める。

$$\begin{aligned}
 P \leq 5\text{mm} \quad , \quad q_I(t) &= 0 \\
 P \geq 5\text{mm} \quad , \quad q_I(t) &= q_P(t) - q_R(t - \Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

ここに、 $P[\text{mm}]$ は累積降雨量、 $q_I(t)[\text{mm}/10\text{min}]$ は時刻  $t$  における単位面積あたりの浸透量、 $q_P(t)[\text{mm}/10\text{min}]$ は時刻  $t$  における降雨量、 $q_R(t - \Delta t)[\text{mm}/10\text{min}]$ は時刻  $t$  の 10 分前に法尻で計測された表面流出量を集水面積  $575\text{m}^2$  で割った値である。

2.3.1 で説明した手法 1 は計測深度が 0.1m からであるため、0m から 0.1m の層における地盤内貯留量の変化を的確にとらえることができない。そこで、本研究では、ノッチ逆算浸透量をカルマンフィルタのインプットデータ、および観測値として用いる。

### 3.2.3 誤差計算

図 3.3 に示す過程で、誤差計算を用いて最適パラメータを求める。まず、カルマンフィルタで得られたパラメータセットをそれぞれタンクモデルに代入し、解析流出量、および解析浸透量を得る。そして、観測値と解析値の誤差の和、およ

び最大値を計算し，それぞれのパラメータセットの偏差値を式(3.19)で求める．

$$y = \frac{10(x - \mu_{er})}{\sigma_{er}} + 50 \quad (3.19)$$

ここに  $x$  はそれぞれの誤差， $y$  は偏差値， $\mu_{er}$  は誤差の平均， $\sigma_{er}$  は誤差の標準偏差を表す．

最後に，式(3.20)で偏差値の和を求め，その和が最小となるパラメータセット  $i$  を最適パラメータとする．

$$z = \sum_{i=1} y_i \quad (3.20)$$

ここに， $y_i$  はそれぞれの偏差値， $z$  は偏差値の和を表す．

既往の研究<sup>6)</sup>では，誤差計算の対象を中段タンクの流出量，および浸透量，下段タンクの流出量としていた．しかし，本研究では，**図 3.4** に示すように，中腹部での流出がほとんど計測されていないため，中段タンクの流出量を誤差計算の対象から除き，中段タンクの浸透量と下段タンクの流出量のみを用いる．

### 3.3 実斜面への適用結果と考察

#### 3.3.1 本手法と従来の手法の比較

2008年24降雨のうち3降雨，2010年16降雨のうち2降雨，計5降雨について，従来の手法，および本手法により，それぞれ表層タンクのパラメータ同定を行った結果として，解析値と観測値の比較を**図 3.5**から**図 3.9**に示す．**図 3.6**は累積降雨量が少なく，最大10分間雨量が10mm以下の降雨で，**図 3.5**および**図 3.8**は累積降雨量が中程度で最大10分間雨量が10mm以上の降雨，**図 3.7**および**図 3.9**は累積降雨量が多く，最大10分間雨量が10mm以上の降雨である．比較対象は法尻流出量と中腹浸透量とし，それぞれ  $a$  を法尻流出量， $b$  を中腹浸透量とする．また，**図 3.5**から**図 3.9**において，本手法を(1)，従来の手法を(2)に示す．

法尻流出量については，従来の手法，本手法ともに，解析値が観測値に近い値

となっている。中腹浸透量については、従来の手法では、解析値が大きく観測値から外れているが、本手法では、解析値が観測値に近い値となった。また、降雨の違いによる解析精度の差はほとんど見られなかった。

しかし、本手法により精度が向上したのは、誤差計算の対象を3つから2つに減らしたことによるものであると考え得る。そこで、観測値は従来の手法により与え、誤差計算の対象を本手法と同様、法尻流出量と中腹浸透量の2つにして解析を行った。その結果を **図 3.5** から **図 3.9** に(3)として示し、比較検討を行う。

(3)についても、(1)(2)の場合と同様に、法尻流出量の高い精度で表現することが可能である。しかし、中腹浸透量については、誤差計算の対象を一つ減らしても解析結果は(2)の場合と同様に、解析値が観測値から大きく外れるという結果になった。

(2)(3)で、解析結果が観測値から大きく外れたのは、中腹浸透量の観測値の与え方自体に問題があったものと考えられる。従来の手法では、0m から 0.2m までの体積含水率の変化量を中腹浸透量と定義していたため、観測値が実際の現象に比べ、非常に小さい値となっていたと推察される。特に、体積含水率が減少すると、浸透量が 0 を下回り、物理的に意味をなさない。また、中腹流出量についても、降雨中においても、ほぼ 0[L]で中腹部では流出が適切に観測されていない状態であったため、(2)(3)では、誤差計算の際に法尻流出量の誤差のみを小さくするような形でパラメータセットが選択されていると考えられる。

本手法では、表面流出量から逆算することにより中腹浸透量を求め、それを観測値として与えている。そのため、降雨期間中の浸透量をもれ落ちなく、観測値として反映することができていると考えられる。それに比べ、従来の手法では、0.2m 以深への浸透量を考慮していない。また、0m における体積含水率の変化を計測することができていないため、0m から 0.2m の土壌水分量変化についても、的確に捉えることができていない。その結果、解析精度に大きな差が見られたということは、観測値を適切に与えたことが、本手法により精度が上がった大きな要因であると推察される。

本手法により、法尻流出量、中腹浸透量ともに高い精度で表現することが可能となり、表層タンクのパラメータ同定の精度は向上したと推察される。しかし、未だ法尻流出量、中腹浸透量ともに若干の誤差があり、このことは以下のように考察される。すなわち、降雨期間中にパラメータセットを一定としていることが

誤差の原因であると推察される。本研究では、カルマンフィルタの原理を用いて、観測値をインプットデータとして使用して、流出係数、および浸透係数の値を初期値 ( $t=1$ ) から  $t=2$ ,  $t=3$ , … と更新させて、観測値に合うパラメータセットを絞り込み、誤差計算により最適なパラメータを得る。その最適なパラメータセットはある時刻  $t$  における値であるため、降雨期間中、常にそのパラメータセットであるわけではなく、それぞれのパラメータは時々刻々と変化していると考えられる。しかし、本来タンクモデルはそれぞれのタンクの持つ特性を把握し、斜面における雨水の流出浸透挙動を簡潔にモデル化することを目的として開発された手法である。これまで十分な知識と経験を持つ技術者の存在なしには、適切なパラメータを設定することは非常に困難であったが、拡張型マルチタンクモデルによるパラメータ同定手法は簡易かつ体系的にパラメータを設定することを目的としており、本手法により得られた結果はその目的を達成できたといえる。したがって、本手法により得られるパラメータセットは 1 雨を通じての平均的な値ではあるが、高い精度で斜面における雨水の流出浸透挙動を表現することが可能であるといえる。

### 3.3.2 パラメータの傾向

2008 年 24 降雨、および 2010 年 16 降雨、計 40 降雨の表層タンクのパラメータ同定を本手法により行った。表 3.1、および表 3.2 にその結果を示し、図 3.10 に 40 降雨の最適パラメータの傾向を示す。中段タンク、および下段タンクに関するパラメータはある一定の傾向が見られる。それぞれのパラメータの傾向に着目すると、同図に示すように、流出係数、浸透係数ともに中段タンクに比べ、下段タンクの値が小さい傾向がある。このことから、タンクモデル上で、法尻貯留量が中腹貯留量に比べて多くなると推察される。それに比べ、上段タンクに関するパラメータはばらつきが大きい結果となった。このような傾向が見られる要因としては、カルマンフィルタを適用する際に上段タンクに関する観測値を入力していないこと、および誤差計算の対象に上段タンクが含まれていないことが挙げられる。

また、 $\beta_M$  および  $\beta_L$  と累積降雨量の関係について、それぞれ図 3.11、および図 3.12 に示す。図 3.11、および図 3.12 に示されるとおり、累積降雨量が増加するにつれて、 $\beta_M$ ,  $\beta_L$  ともに減少し、0.1 から 0.2 に収束する傾向を示す。この傾向は

図 2.16 の浸透率と累積降雨量の関係と調和的である。しかし、10mm から 30mm の範囲、つまり累積降雨量が小さい範囲の浸透係数の分布は、30mm から 40mm の範囲における浸透係数の分布と同等、ないし若干小さくなっている。これは、累積降雨量が小さい場合、降雨全体のうち、5mm と設定している欠損雨量の占める割合が大きいため、浸透量の占める割合が小さくなり、その観測値に合わせるようにそれぞれの浸透係数の最適値を選んでいることが原因であると推察される。

### 3.3.3 順解析の結果と考察

本節では、本手法により得られた最適パラメータをタンクモデルに与えることにより、斜面中腹部および法尻部の貯留量、表面流出量、浸透量を算出するとともに、斜面表層部における雨水の流出浸透挙動について詳細な分析を行う。対象降雨については、3.3.1 と同様の 5 降雨とする。本節における法尻流出量、および中腹浸透量は 3.3.1 における法尻流出量、および中腹浸透量の解析値を指していることに留意されたい。

まず、図 3.13 に中腹部、および法尻部の貯留量を示す。同図に示すように、法尻貯留量が中腹貯留量に比べて多くなっている。これは、表 3.1、および表 3.2 に示すように、 $\alpha_M > \alpha_L$  かつ  $\beta_L$  が  $\beta_M$  とほぼ同じ値、もしくは  $\beta_L$  が  $\beta_M$  に比べて小さくなっているためであると推察される。貯留量が中腹部に比べ法尻部の方が多いことは、すなわち、降雨期間中に法尻部に雨水が集中することを示唆する。

次に、図 3.14 に中腹部、および法尻部の表面流出量を示す。同図に示すように、法尻流出量が中腹流出量に比べて多くなっている。流出係数が  $\alpha_M > \alpha_L$  であるにも関わらず、このような結果となったのは、法尻貯留量が中腹貯留量に比べて多いこと、集水面積が法尻部の方が大きいことに起因する。

また、浸透量についても同様に、中腹部に比べて法尻部の方が多い結果となった（図 3.15）。2.4 で述べたように、斜面全体における 1 雨全体の浸透量という巨視的な観点から見ると、1 点に対応する量と平均量が概ね等しい結果が得られた。しかし、タンクモデルを用いて、斜面表層部における水収支の詳細な分析を行うと、浸透量は中腹部に比べ、法尻部の方が多いという結果が得られた。浸透係数について、 $\beta_L$  が  $\beta_M$  とほぼ同じ値、もしくは  $\beta_L$  が  $\beta_M$  に比べて小さくなっているにも関わらず、法尻浸透量が多くなるのは、法尻貯留量が中腹貯留量に比べて多いためであると推察される。また、図 3.16 に示す累積降雨量と累積浸透量の関係か



らも浸透量が法尻部の方が多いことが明らかであり，累積降雨量が多いほど，その傾向が顕著であるといえる．これは，降雨が短時間に集中するほど，斜面全体における全浸透量のうち，法尻部の占める割合が大きくなることを示唆する．つまり，ゲリラ豪雨のような短期間集中降雨の場合，法尻部における斜面崩壊の危険性が高くなるということである．以上は，タンクモデル上で表現される雨水の流出浸透挙動であることに留意されたい．実際の原位置計測結果についても着目してみると，**図 3.17** に示すように，降雨時における中腹部の体積含水率の変動に比べ，法尻部の変動の方が大きい．このことから，やはり法尻浸透量の方が中腹浸透量に比べて多いと推察される．

以上より，降雨が発生すると，斜面法尻部に雨水が集中するとともに，浸透量が多くなり，間隙水圧が大きくなると推察される．また，法尻部は地下水面にも近いため，間隙水圧がより大きくなりやすい条件下にある．さらに，**2.4** より降雨の増加に伴い，流出が卓越することを考慮すると，斜面不飽和領域における代表的な斜面崩壊である浅層崩壊は，法尻部の間隙水圧が大きくなり，法尻部でまず崩壊が発生し，表面流により浸食されて，法尻部から中腹部へと崩壊が拡大していくものと推察される．

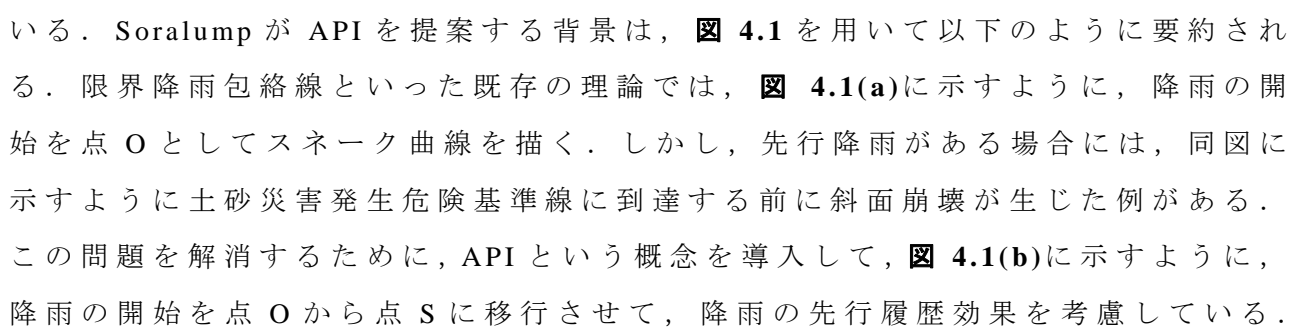
## 第4章 先行降雨履歴を反映した土砂災害早期警戒体制の検討

第2章，および第3章で斜面表層部における雨水の流出浸透挙動に関する結果を示すとともに考察を加えた．本章では，第2章，および第3章で得られた知見をもとに，斜面表層部における降雨流出浸透特性を反映させた土砂災害早期警戒体制の立案に関する検討を行う．具体的には，斜面内部への浸透特性を反映させることにより，降雨の先行履歴効果を考慮した降雨指標 MAPI を提案し，長期降雨指標として適用することを検討する．そして，降雨の流出特性についても加味し，MAPI を用いた新しい土砂災害早期警戒体制について検討を行う．

### 4.1 先行履歴降雨指標 API の概要

1.3 で述べたように，本研究で原位置計測を行っているタイでは，降雨の先行履歴効果を考慮した降雨指標 API を用いた早期警戒体制を提案している．API は式(4.1)により求められる．

$$API_t = (K_t \times API_{t-1}) + P_t \quad (4.1)$$

ここに， $API_t$ [mm]および $API_{t-1}$ [mm]は，それぞれある日  $t$ ，およびその1日前時点  $t-1$  での先行履歴降雨指標を， $K_t$ は低減率， $P_t$ [mm/day]はその日の日雨量を表す．この関係式のもつ物理的な意味は，右辺第1項が，斜面内部で先行降雨により体積含水率が高まっている影響を表現するものである．なお，式(4.1)における低減率  $K_t$ は，日本において適用されている実効雨量の減少係数  $a_n$  と本質的には等価である．しかし，Soralump の方法において，低減率  $K_t$ はタイの公的機関によって発表される1日当たりの降雨量から蒸発量を除いた量と降雨量の比が適用されている．Soralump が API を提案する背景は， **図 4.1** を用いて以下のように要約される．限界降雨包絡線といった既存の理論では，**図 4.1(a)**に示すように，降雨の開始を点 O としてスネーク曲線を描く．しかし，先行降雨がある場合には，同図に示すように土砂災害発生危険基準線に到達する前に斜面崩壊が生じた例がある．この問題を解消するために，API という概念を導入して，**図 4.1(b)**に示すように，降雨の開始を点 O から点 S に移行させて，降雨の先行履歴効果を考慮している．

## 4.2 改良先行履歴降雨指標 MAPI の算定

### 4.2.1 改良先行履歴降雨指標 MAPI の概要

API の概念は，降雨の先行履歴効果を定量的に表現する上で有効であると推察される．しかし，評価する観測値が日雨量であることから，リアルタイムで情報を提供することができない．そこで，原位置計測結果をもとにして，評価する観測値に 10 分間雨量を用いるとともに，低減率  $K_t$  を斜面内部への浸透量を反映して算定した，MAPI を提案する．MAPI は，式(4.2)により算定される．

$$MAPI_t = (K_t \times MAPI_{t-1}) + P_t \quad (4.2)$$

ここに， $MAPI_t$ [mm] はある時刻  $t$  における改良先行履歴降雨指標， $MAPI_{t-1}$ [mm] はその時刻  $t$  から最も近い過去の降雨時点  $t-1$  における改良先行履歴降雨指標， $K_t$  は低減率， $P_t$ [mm/10min] は 10 分間雨量を表す．

### 4.2.2 原位置計測に基づく低減率 $K_t$ の算定

図 4.2 に示すように，斜面中腹部にある土壌水分計 No.1 によって観測された降雨に伴う GL-0.1m の体積含水率の変動に着目すると，降雨開始直後から上昇し，降雨終了後も体積含水率の初期値に回復しない．次の降雨開始時においても，前の降雨開始時の体積含水率まで減少していない場合，地盤内の水分貯留量を先行降雨の履歴として評価する必要があると考えられる．ここで，地盤内の水分貯留量は式(4.3)により算定される．

$$Y = \sum_{i=1}^6 D_i \cdot \theta_i \quad (4.3)$$

ここに， $Y$ [mm] は表層から GL-1.0m までの水分貯留量， $D_i$ [mm] は図 2.10 における  $i$  番目の層厚， $\theta_i$  は同図における深度  $i$  の体積含水率を表す．降雨終了時貯留量と降雨開始時貯留量の差が降雨により増加した土壌水分量であると捉えられ，これを降雨終了時の斜面内部への残存浸透量と定義する．同様に，次回降雨前貯留量と降雨開始時貯留量の差を次回降雨開始前の残存浸透量と定義し，斜面内部への

浸透量の減衰を考慮した低減率  $K_t$  の算出を試み、以下に示す。

$$K_t = \frac{S_n}{S_f} \quad (4.4)$$

$$S_n = Y_n - Y_s \quad S_f = Y_f - Y_s$$

ここに、 $K_t$  は低減率、 $S_f$  [mm] は降雨終了時の残存浸透量、 $S_n$  [mm] は次回降雨前の残存浸透量、 $Y_s$  [mm]、 $Y_f$  [mm]、および  $Y_n$  [mm] はそれぞれ降雨開始時、降雨終了時、および次回降雨開始前の水分貯留量を表す。以上の式で算定される低減率  $K_t$  は、降雨による地盤内への浸透と地盤内での水分貯留効果を考慮し、斜面の安定性と物理的に関連付けた値であることに留意されたい。つまり、深部への浸透と蒸発散による地盤内の土壌水分量の減少を低減率  $K_t$  によりどちらも考慮することができる。ここで、低減率  $K_t$  の算定にあたり、斜面の安定性を検討する上で危険であると考えられる法尻部の体積含水率を用いなかったのは、法尻部が豪雨時に飽和する場合があります、その時、体積含水率が降雨中においても一定となり、浸透量の減衰を適切に反映することができないためである。

### 4.3 MAPI の適用結果

2008 年、2010 年に観測された降雨に伴う体積含水率の変動を対象として、式 (4.4) によって算定された低減率  $K_t$ 、経過時間の関係を **図 4.3(a)** に示す。同図に示すように、経過時間が長くなるにつれて、低減率が減少している。これは、時間の経過に伴い、降雨履歴の影響が排水によってなくなることを示唆している。**図 4.4** にタイ・ナコンナヨックの地盤内水分挙動模式図を示す。同図に示すように、排水の要因は、タイが属する熱帯性気候特有の灼熱状態による蒸発の影響が大きいものと推察される。また、当該斜面の地盤は細粒土で構成され、透水性は低いいため、深部への鉛直浸透による影響は少ないと推察される。**図 4.3(a)** に対して、近似曲線をひいたものを **図 4.3(b)** に示す。以下に曲線の回帰式を示す。

$$K_t = 6.381 \times 10^{-8} t^2 - 5.437 \times 10^{-4} t + 1.000 \quad (4.5)$$

ここで、 $K_t$  は低減率、 $t[\text{min}]$  は経過時間を表す。図 4.3(b) に示すように、低減率  $K_t$  は経過時間 2880 分、つまり 48 時間以上経過すると 0 よりも小さくなる。これは、次回降雨前の地盤内の水分貯留量が前回降雨開始時の初期貯留量よりも小さくなったと捉えられ、降雨の先行履歴効果は消滅していると判断できる。そこで、経過時間が 2880 分以上である場合、 $K_t=0$  とする。また、降雨期間中については、 $K_t=1$  とする。

以下で、原位置計測結果を用いて、MAPI 算定の具体的な流れを説明する。まず、降雨の対象は図 4.5(a) に示す  $MAPI_k$ 、 $MAPI_l$  とする。ここで、時刻  $l$  から最も近い過去の降雨時点が時刻  $k$  であることに留意されたい。図 4.5(b) に示すように、時刻  $k$  から時刻  $l$  までの経過時間は 410 分であるので、式(4.5)の  $t$  にその値を代入することにより、低減率は 0.786 と算定される。そして、その値を用いて式(4.2)によって MAPI を算定する。図 4.6(b) に 9/1 から 9/3 までの降雨を対象に横軸に MAPI、縦軸に 10 分間隔の降雨量を示す。ここで、MAPI の初期値を 0mm とするのは 2880 分以上降雨のない時点とし、この時は前の降雨の履歴がない状態にあるといえる。9/2 の 18:30 からの降雨に着目すると、実線で示した方が横軸に MAPI、点線で示した方が横軸に連続雨量をとったものであるが、横軸に MAPI をとった方が右側に移行しているのが確認できる。このことから、連続雨量では反映できなかった先行降雨履歴の影響を MAPI で反映することが可能であると解釈される。

#### 4.4 MAPI と間隙圧の関係

本節では、斜面の安定性と MAPI を関連付けるために、間隙圧の変動、および MAPI と間隙圧の相関から MAPI の有用性について考察を行う。ここで、不飽和無限斜面における斜面安全率は次式により算定される。

$$F_s = \frac{\{c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b\}}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \quad (4.6)$$

$$u_w = u'_w - u_a$$

ここに、 $F_s$  は安全率、 $\gamma[\text{kN/m}^3]$  は土の単位体積重量、 $c'[\text{kPa}]$  は有効粘着力、 $\phi' [^\circ]$  は有効内部摩擦角、 $\phi^b [^\circ]$  はサクションによる強度増加パラメータ、 $H[\text{m}]$  はすべ

り面深さ， $\alpha[^\circ]$ は傾斜角， $u_w[\text{kPa}]$ は間隙水圧， $u_a[\text{kPa}]$ は間隙空気圧， $u'_w[\text{kPa}]$ は間隙圧を示す．間隙圧の増加により安全率が低下することが式(4.6)により示される．また，間隙圧の増加はサクシジョンの減少を表し，サクシジョンが消滅すると，サクシジョンによる強度増加の項が消滅し，安全率が著しく低下する．したがって，間隙圧が正圧となることは，斜面安定を検討する上で危険であると捉えられる．

まず，**図 4.7** および **図 4.8** にそれぞれ中腹部および法尻部における間隙圧の変動を示す．**(a)**には 10 分間雨量の変動，**(b)**には MAPI の推移をともに載せる．中腹部では MAPI の値がどれだけ大きくなっても間隙圧が正圧にはならない．それに対して，法尻部では MAPI の値が大きくなると，間隙圧が正圧となる．したがって，法尻部が斜面安定を検討する上で危険であると捉え，9/1 の 22:00 から 9/4 の 15:00 (**図 4.9**) まで，および 9/28 の 12:30 から 9/30 の 9:00 まで (**図 4.10**) に着目し，詳細な考察を行う．降雨発生時に，特に，0.4m の間隙圧がより大きな値を示すため，0.4m の間隙圧の変動に着目する．MAPI との比較対象として，6 時間連続雨量および 12 時間連続雨量を用いる．なお，NEXCO では 6 時間連続雨量，JR では 12 時間連続雨量を長期降雨指標として用いていることに留意されたい．

**図 4.9(b)** および **図 4.10(b)** に示すように，MAPI が増加するにつれて間隙圧が増加し，MAPI が減少するにつれて間隙圧が減少しており，間隙圧の変動と MAPI の推移に類似性が見られる．また，**図 4.9(a)** および **図 4.10(a)** に示すように，最大 10 分間雨量が 10mm を越える降雨が観測されたとき，間隙圧が正圧となる．しかし，**図 4.9** における 9/3 の 22:00 前後の降雨は，最大 10 分間雨量が 5mm 程度かつ累積降雨量も少ないにも関わらず，間隙圧が正圧となる．これは，先行降雨の影響で地盤内の水分貯留量が多かったために，サクシジョンがあまり回復しておらず，低強度の降雨でも間隙圧が正圧となったと推察される．連続雨量は，対象降雨前の 12 時間以上の無降雨により，連続雨量がリセットしているために 0mm から始まっており，先行降雨の影響が反映できていない．それに対して，MAPI は，対象降雨の開始時刻における値が上に移行しており，先行降雨履歴を反映している．以上のような比較的強度の降雨にも関わらず，サクシジョンが十分回復していなかったために，間隙圧が正圧となる現象が **図 4.10** においても確認できる．

また，**図 4.9(b)** において，連続雨量が 6 時間もしくは 12 時間の無降雨により連続雨量をリセットするが，その時点においても間隙圧が正圧を示している．**図 4.11(b)** および **(c)** に示す間隙圧と連続雨量の相関から，連続雨量 0mm にリセット

する時点においても間隙圧が正圧であることが明らかである。これは、次回降雨が低強度の降雨でも、斜面崩壊が発生する危険があるにもかかわらず、連続雨量を 0mm にリセットをしているために、通行規制の発令が遅れる、もしくは発令がなされない可能性があることを示唆している。それに対して、MAPI と間隙圧の相関（**図 4.11(a)**）から、MAPI の値が大きいほど、間隙圧が大きくなっており、MAPI の値が 0mm の時点では、サクションが回復していることが分かる。このことから、MAPI は、先行降雨の影響を適切に反映していると推察される。

以上より、10 分間雨量が 10mm を越える高強度の降雨が発生した場合の他に、先行降雨の影響で地盤内の水分貯留量が多い状態で降雨が発生した場合に法尻の間隙圧が正圧まで上昇するといえる。その地盤内の水分量が多い状態を MAPI により表現することが可能であると推察される。

## 4.5 新しい土砂災害早期警戒体制の検討

本節では、MAPI を用いた新しい土砂災害早期警戒体制の立案に関する検討を行う。その比較対象として、1.3 で述べた砂防機関の多くで採用されている降雨の先行履歴効果を考慮した、総合土砂災害対策検討委員会による手法を用いる。

### 4.5.1 MAPI の長期降雨指標への適用性

本項では、72 時間実効雨量との比較により、MAPI の長期降雨指標への適用性について検討する。総合土砂災害対策検討委員会による手法では、長期降雨指標として、地中の水分量を表す 72 時間実効雨量を用いている。まず、地中における間隙圧の変動と 72 時間実効雨量の推移を比較し、当該斜面における 72 時間実効雨量の適用性について検討する。ただし、実効雨量は時間雨量に対して定義されているため、当該斜面において観測された時間雨量から 72 時間実効雨量を算出している。また、地表付近の 0.2m に比べ、0.4m の間隙圧を地中における間隙圧として捉えた方が適切であると推察されるため、0.4m の間隙圧の変動に着目する。**図 4.12(b)**、**図 4.13(b)**に示すように、間隙圧の変動と 72 時間実効雨量の推移は類似性が見られるが、間隙圧が正圧となる時の実効雨量が、時間の経過とともに大きくなっている。降雨発生後、間隙圧が正圧を初めて示す際の実効雨量が、**図 4.12**においては 69mm および 86mm、**図 4.13**においては 104mm および 113mm である。

これは、72時間実効雨量は半減期が長いため、先行降雨の影響を過大に評価していることを示唆する。それに対して、MAPIは、**図 4.9**、**図 4.10**に示すように、間隙圧が初めて正圧を示す際の値が50mmから60mmとなっており、時間の経過による増加は見られない。このことから、MAPIは適切に先行降雨の影響を反映しており、長期降雨指標として用いることが可能であると推察される。

しかし、**図 4.14(b)**に示すように、降雨発生後、間隙圧が初めて正圧を示す際のMAPIが小さい値の場合もある。ただし、この時、**図 4.14(a)**に示すように、10分間雨量が10mm以上である短時間に高強度の降雨が観測されており、時間雨量もしくは10分間雨量等の短期降雨指標を組み合わせることにより、上述した問題についても解決できると考えられる。

#### 4.5.2 短期降雨指標の検討

総合土砂災害対策検討委員会による手法では、短期降雨指標として、地表の水分量を表す1.5時間実効雨量を用いている。この半減期は、タンクモデルの表層貯留量の推移特性と類似するように設定されている。そこで、斜面表層部における解析法尻貯留量の推移を**図 4.15**に示す。解析法尻貯留量は、本手法により表層タンクのパラメータ同定を行った結果より算出した10分間隔の値である。それに対して、**図 4.15(b)**の1.5時間実効雨量、および**図 4.15(c)**の時間雨量は1時間間隔のデータである。**図 4.15(a)**の10分間雨量の変動が最も法尻貯留量の推移特性と類似しているが、実際に通行規制等の判断に10分間雨量を用いるのは適切でない。なぜなら、10分間雨量は時々刻々と変化するため、仮に10分間雨量を短期降雨指標として適用すると、通行規制の発令と解除を頻繁に行わなければならない、管理をするのが困難であると考えられるためである。1.5時間実効雨量については、**図 4.15(b)**に示すように、高強度の降雨が発生した場合、法尻貯留量の減衰に比べ、1.5時間実効雨量の減衰が遅いことが確認される。それに対して、時間雨量は、**図 4.15(c)**に示すように、時間雨量の変動と法尻貯留量の推移が調和的である。

以上より、**図 4.16**に示す仕組みで、降雨の先行履歴効果による崩壊をMAPIで評価し、短期間集中豪雨の場合に表面流が卓越して発生する斜面表面の浸食による崩壊を時間雨量等の短期降雨指標で評価することは、新しい土砂災害早期警戒体制の手法として有用であると推察される。通行規制の発令と解除については、データを蓄積していくことにより、基準線を設定する必要がある。



## 第5章 結論

本研究においては、近年日本で、豪雨に起因する斜面災害が多発していることを踏まえて、集中豪雨に起因する斜面崩壊の主要因となる斜面表層部の雨水の流出浸透特性を明らかにすることを目的として、タイ・ナコンナヨックにおける原位置計測結果に基づき、斜面表層部における雨水の流出浸透特性について考察を加えた。それとともに、原位置計測結果をもとに、豪雨時の土砂災害早期警戒体制の立案に関する検討を行った。この結果として得られた知見は、以下のように要約される。

- 1) 斜面において、集中豪雨のように、短時間に高強度の降雨が発生する場合、表面流が卓越し、流出率の最大値が 0.8 程度になる。これが、斜面表面の浸食の発生要因となるものと推察される。
- 2) 降雨量の増加に伴い、斜面内部への浸透率が小さくなり、0.1 から 0.2 程度に収束する傾向を示す。この傾向は、Horton により示された結果と一致するものである。
- 3) V ノッチで計測される表面流出量から逆算して浸透量を算定し、これを観測値として用いることで、表層タンクのパラメータ同定の精度が向上した。また、本手法による解析結果において、降雨の違いによる解析精度の差が見られなかったことから、降雨パターンに依らず、本手法は適用可能であると推察される。
- 4) 浸透量は、斜面全体における 1 雨全体の浸透量という巨視的な観点から見ると、原位置計測結果より、中腹部における 1 点に対応する量と平均量が概ね等しいといえる。これは、斜面不飽和領域における浸透は、鉛直方向が卓越することを示唆する。しかし、タンクモデルを用いて、斜面表層部における雨水の流出浸透挙動について詳細な分析を行うと、法尻部における浸透量が中腹部に比べて多くなる結果が得られた。また、この結果は体積含水率の変動が中腹部に比べ、法尻部の方が大きいことから裏付けられる。したがって、法尻部が地下水面に近いことも加味すると、間隙水圧が上昇しやすい条件化にあるといえる。以上より、集中豪雨により最も早期に斜面の安定性が損なわれる領域は、法尻部であると推察される。さらに、1)の流出特性の知見より、降雨量の増加に伴い、表面流が卓越することにより発生する斜面表面の浸食が斜面崩壊を加速させると推察される。

5) 10 分間雨量を用いるとともに、原位置での地盤内の水分貯留量の変動に基づき、先行履歴降雨指標 API を改良した改良先行履歴降雨指標 MAPI を作成した。また、斜面の安定性を考慮する上で、間隙圧の変動、および MAPI と間隙圧の相関から MAPI が先行降雨の影響を適切に反映していることを示した。新しい土砂災害早期警戒体制の立案にあたり、MAPI は、長期降雨指標として適用可能であると推察される。

最後に、本研究の今後の検討課題および展望として、以下のことが挙げられる。

本研究で原位置計測を行ったタイ・ナコンナヨックの斜面の地質条件は風化流紋岩からなるため、透水性が低く、雨水の斜面内部への浸透が大きい条件である。しかし、集中豪雨に起因する斜面崩壊の多くは、風化花崗岩、いわゆるまさ土からなる斜面において発生している。そこで、今後はタイ・プーケットの風化花崗岩からなる斜面でナコンナヨックと同様の原位置計測を行うことにより、透水性の高い地盤における雨水の流出浸透挙動の検討を行う。

また、新しい土砂災害早期警戒体制を検討する上で、**図 5.1(a)**に示すように、タイ・ナコンナヨックの地盤は透水性が低いために、排水の要因は、熱帯性気候特有の蒸発散の影響が大きい。それに対して、タイ・プーケットでは、**図 5.1(b)**に示すように、蒸発散に加え、深部への浸透による排水の影響も大きくなると推察される。そこで、新しい計測サイトにおける低減率  $K_r$  を算定することにより、地質条件の差異による降雨の先行履歴効果の大小について検討を行う。そして、地質条件の差異を加味した新しい早期警戒体制の確立を目指す。ここで、**図 5.2**に示すように、温暖湿潤気候である日本においては、排水の要因を検討すると、タイに比べて蒸発散の影響が小さい。そこで、気候条件の違いによる蒸発散の差異を考慮するような形で、タイにおける原位置計測結果より算定した低減率  $K_r$  を補正することにより、MAPI を日本の早期警戒体制に適用することを検討する所存である。

## 参考文献

- 1) 杉山友康，布川修：降雨時の斜面崩壊危険度と鉄道における運転規制，土と基礎，Vol.55，No.9，pp.14-16，2007
- 2) 杉井俊夫，竹下裕二：不飽和地盤の浸透特性の評価方法，土と基礎，Vol.55，No.9，pp.20-22，2007
- 3) Nishigaki,M.: Research on Behavior of Groundwater and Its Application to Foundation Engineering, Dissertation of Kyoto University, 1979
- 4) 大津宏康，堀田洋平，高橋健二，中村一樹，新村知也：熱帯性豪雨(スコール)に起因する斜面降雨浸透に関する原位置モニタリング，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009 論文集，pp.1-6，2009
- 5) Ohtsu,H., Hotta,Y., Takahashi,K. and Nakamura,K.: A Study on Applicability of Modified Multi-Tank Model for Unsaturated Soil Slope, Proceedings of EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering 2008, pp.184-191, 2008
- 6) Hotta Yohei: Evaluation of Unsaturated Soil Slope Stability against Heavy Rainfall Using Modified Multi-Tank Model System, Master's thesis of Kyoto University, 2009
- 7) Soralump,S.: Landslide Risk Management in Thailand using API model, Proceeding of EIT-JSCE Joint International Symposium, pp.42-81, 2009
- 8) 岡田憲治：土壌雨量指数，測候時報，69-5，pp.67-100，2001
- 9) 建設省河川局砂防部：総合土砂災害対策検討委員会における低減および検討結果，1993
- 10) 鈴木雅一，福嶋義宏，武居有恒，小橋澄治：土砂災害発生の危険雨量，砂防学会誌，Vol.31，No.3，pp.1-7，1979
- 11) Nimura Tomonari: A Study on Runoff-Infiltration Characteristics of the Weathered Soil Slope caused by a Squall, Master's thesis of Kyoto University, pp.27, 2010
- 12) Horton,E. R.: An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity, Soil Sci. Soc. Am., Proc., 5, pp.399-417, 1940
- 13) 菅原正巳：水文学講座流出解析法，共立出版，pp.206-211，1972
- 14) 高橋健二，大津宏康，大西有三：タンクモデル法を用いた地下水位挙動を考慮した斜面リスク評価の研究，地盤工学会誌，Vol.5，No.10，pp.15-17，2003

## 謝辞

最後になりましたが、本論文を締めくくるにあたり、本研究にご協力いただいた方々、お世話になった方々に感謝の意を表します。

京都大学工学研究科・大津宏康教授には、素晴らしい研究環境を提供していただくとともに、お忙しい中、様々なご助言・ご指導をいただきました。また、研究の当初、「日の丸を背負って自分は研究している。それくらいの気概を持って研究に臨みなさい。」とおっしゃっていただき、自分の研究に対して常に誇りを持って臨むことができました。本当に心からお礼申し上げます。

京都大学工学研究科・三村衛准教授には、本論文の副査を務めていただき、不十分な部分について質問をしていただくことで、本論文を充実させることができました。深く感謝致します。

京都大学工学研究科・塩谷智基准教授には、学生との交流を積極的に図っていただきました。特に、研究で行き詰った時に声を掛けていただき、非常に励みになりました。深く感謝致します。

京都大学工学研究科・稲積真哉助教には、研究室での生活を有意義に過ごす上で多くのご支援をいただきました。深く感謝致します。

水文技術コンサルタント株式会社・高橋健二氏、応用地質株式会社・矢部満氏には、本研究の本質に関わる部分について鋭い視点からご助言いただきましたことに心からお礼申し上げます。

伊東宏美秘書には、研究生活のあらゆる面でサポートして頂き、不自由なく研究を遂行できるように様々な配慮していただきましたことに深く感謝致します。また、大津研究室の諸先輩方には、研究だけにとどまらず、生活面においても親切にして頂き、非常に有意義で楽しい研究生活を送ることができました。心からお礼申し上げます。また、同回生の方々とは、ともに助け合い、切磋琢磨しながら研究に打ち込むことができました。本当にありがとうございました。

最後に、両親をはじめとする家族には、本研究だけにとどまらず、大学で不自由なく勉学に打ち込むことができる環境を与えていただくとともに、あらゆる面でサポートしていただきました。改めて心から感謝の意を表します。

表2.1 当該斜面の力学特性

|                               |       |              |      |
|-------------------------------|-------|--------------|------|
| 斜面傾斜角 [° ]                    | 27.65 | 間隙率          | 1.05 |
| 土の単位体積重量 [kN/m <sup>3</sup> ] | 17.66 | 有効粘着力 [kPa]  | 14.5 |
| 土粒子密度 [g/cm <sup>3</sup> ]    | 2.71  | 有効内部摩擦角 [° ] | 33.9 |
| 乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1.33  |              |      |

表2.2 対象降雨(2008年)

| Label  | 累積降雨量 | 継続時間  | 最大10分間<br>雨量 |
|--------|-------|-------|--------------|
| Units  | [mm]  | [min] | [mm/10min]   |
| 5/19   | 30.5  | 90    | 20.5         |
| 5/21   | 21.5  | 120   | 8.5          |
| 5/22   | 34.0  | 140   | 10.5         |
| 5/24   | 48.5  | 160   | 9.0          |
| 5/28_1 | 22.0  | 70    | 10.0         |
| 5/28_2 | 22.5  | 190   | 8.5          |
| 5/29   | 51.5  | 340   | 13.0         |
| 5/30   | 34.5  | 150   | 11.5         |
| 6/2    | 39.5  | 250   | 10.5         |
| 6/3    | 24.0  | 60    | 9.0          |
| 6/12   | 34.5  | 130   | 7.5          |
| 7/30   | 81.0  | 110   | 19.0         |
| 8/3    | 40.0  | 80    | 12.0         |
| 8/5    | 13.0  | 80    | 7.5          |
| 8/21   | 55.0  | 80    | 17.0         |
| 8/27   | 22.5  | 70    | 7.0          |
| 9/8    | 60.5  | 130   | 15.0         |
| 9/15   | 24.5  | 180   | 7.0          |
| 9/18   | 75.5  | 320   | 9.0          |
| 9/19   | 41.5  | 150   | 9.5          |
| 9/30   | 17.5  | 40    | 11.0         |
| 10/1   | 46.0  | 110   | 15.5         |
| 10/29  | 33.0  | 50    | 16.0         |
| 11/4   | 43.0  | 110   | 13.0         |

表2.3 対象降雨(2010年)

| Label | 累積降雨量 | 継続時間  | 最大10分間<br>雨量 |
|-------|-------|-------|--------------|
| Units | [mm]  | [min] | [mm/10min]   |
| 4/17  | 49.0  | 180   | 12.0         |
| 5/1   | 32.0  | 70    | 8.0          |
| 5/12  | 30.0  | 80    | 16.5         |
| 5/22  | 26.0  | 80    | 7.0          |
| 5/24  | 31.0  | 150   | 7.5          |
| 5/25  | 22.5  | 50    | 9.0          |
| 5/27  | 38.5  | 210   | 9.0          |
| 6/3   | 59.5  | 100   | 12.0         |
| 6/4   | 55.0  | 90    | 14.0         |
| 6/6   | 23.0  | 60    | 8.0          |
| 6/20  | 91.0  | 160   | 17.5         |
| 9/2   | 32.5  | 100   | 12.5         |
| 9/7   | 54.5  | 160   | 15.5         |
| 9/18  | 14.0  | 30    | 10.0         |
| 9/20  | 16.0  | 50    | 10.5         |
| 9/26  | 38.0  | 90    | 9.0          |

表3.1 表層タンクの最適パラメータ(2008年)

| Label  | 累積降雨量 | $\alpha_U$ | $\alpha_M$ | $\alpha_L$ | $\beta_U$ | $\beta_M$ | $\beta_L$ |
|--------|-------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Unit   | [mm]  |            |            |            |           |           |           |
| 5/19   | 30.5  | 0.477      | 0.579      | 0.212      | 0.420     | 0.463     | 0.343     |
| 5/21   | 21.5  | 0.797      | 0.556      | 0.203      | 0.455     | 0.347     | 0.294     |
| 5/22   | 34.0  | 0.870      | 0.291      | 0.293      | 0.265     | 0.133     | 0.370     |
| 5/24   | 48.5  | 0.756      | 0.676      | 0.252      | 0.970     | 0.404     | 0.212     |
| 5/28_1 | 22.0  | 0.281      | 0.554      | 0.127      | 0.520     | 0.480     | 0.284     |
| 5/28_2 | 22.5  | 0.297      | 0.982      | 0.132      | 0.449     | 0.388     | 0.237     |
| 5/29   | 51.5  | 0.224      | 0.924      | 0.280      | 0.815     | 0.393     | 0.101     |
| 5/30   | 34.5  | 0.790      | 0.586      | 0.287      | 0.621     | 0.209     | 0.205     |
| 6/2    | 39.5  | 0.361      | 0.686      | 0.220      | 0.924     | 0.315     | 0.161     |
| 6/3    | 24.0  | 0.781      | 0.695      | 0.289      | 0.937     | 0.402     | 0.296     |
| 6/12   | 34.5  | 0.842      | 0.434      | 0.259      | 0.144     | 0.288     | 0.376     |
| 7/30   | 81.0  | 0.752      | 0.695      | 0.245      | 0.945     | 0.290     | 0.214     |
| 8/3    | 40.0  | 0.921      | 0.332      | 0.466      | 0.595     | 0.131     | 0.336     |
| 8/5    | 13.0  | 0.322      | 0.956      | 0.052      | 0.619     | 0.378     | 0.137     |
| 8/21   | 55.0  | 0.463      | 0.553      | 0.341      | 0.765     | 0.267     | 0.279     |
| 8/27   | 22.5  | 0.790      | 0.586      | 0.287      | 0.821     | 0.209     | 0.205     |
| 9/8    | 60.5  | 0.856      | 0.459      | 0.377      | 0.707     | 0.170     | 0.270     |
| 9/15   | 24.5  | 0.850      | 0.369      | 0.365      | 0.297     | 0.153     | 0.177     |
| 9/18   | 75.5  | 0.850      | 0.369      | 0.365      | 0.697     | 0.153     | 0.177     |
| 9/19   | 41.5  | 0.814      | 0.604      | 0.422      | 0.790     | 0.208     | 0.189     |
| 9/30   | 17.5  | 0.796      | 0.591      | 0.196      | 0.212     | 0.209     | 0.300     |
| 10/1   | 46.0  | 0.828      | 0.684      | 0.265      | 0.735     | 0.450     | 0.259     |
| 10/29  | 33.0  | 0.230      | 0.736      | 0.300      | 0.453     | 0.351     | 0.344     |
| 11/4   | 43.0  | 0.776      | 0.748      | 0.272      | 0.273     | 0.245     | 0.307     |



表3.2 表層タンクの最適パラメータ(2010年)

| Label | 累積降雨量 | $\alpha_U$ | $\alpha_M$ | $\alpha_L$ | $\beta_U$ | $\beta_M$ | $\beta_L$ |
|-------|-------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Unit  | [mm]  |            |            |            |           |           |           |
| 4/17  | 49.0  | 0.444      | 0.630      | 0.164      | 0.484     | 0.492     | 0.231     |
| 5/1   | 32.0  | 0.407      | 0.919      | 0.077      | 0.613     | 0.605     | 0.189     |
| 5/12  | 30.0  | 0.181      | 0.924      | 0.108      | 0.631     | 0.654     | 0.336     |
| 5/22  | 26.0  | 0.752      | 0.678      | 0.146      | 0.467     | 0.407     | 0.212     |
| 5/24  | 31.0  | 0.396      | 0.856      | 0.145      | 0.299     | 0.342     | 0.352     |
| 5/25  | 22.5  | 0.814      | 0.602      | 0.222      | 0.193     | 0.208     | 0.390     |
| 5/27  | 38.5  | 0.779      | 0.545      | 0.178      | 0.876     | 0.349     | 0.205     |
| 6/3   | 59.5  | 0.752      | 0.678      | 0.146      | 0.767     | 0.407     | 0.212     |
| 6/4   | 55.0  | 0.751      | 0.735      | 0.135      | 0.297     | 0.248     | 0.221     |
| 6/6   | 23.0  | 0.374      | 0.671      | 0.132      | 0.407     | 0.310     | 0.162     |
| 6/20  | 91.0  | 0.790      | 0.586      | 0.287      | 0.821     | 0.209     | 0.205     |
| 9/2   | 37.5  | 0.816      | 0.604      | 0.324      | 0.190     | 0.208     | 0.289     |
| 9/7   | 54.5  | 0.835      | 0.270      | 0.242      | 0.703     | 0.136     | 0.191     |
| 9/18  | 14.0  | 0.779      | 0.580      | 0.171      | 0.331     | 0.210     | 0.211     |
| 9/20  | 16.0  | 0.769      | 0.690      | 0.172      | 0.747     | 0.404     | 0.302     |
| 9/26  | 38.0  | 0.447      | 0.571      | 0.225      | 0.287     | 0.274     | 0.377     |

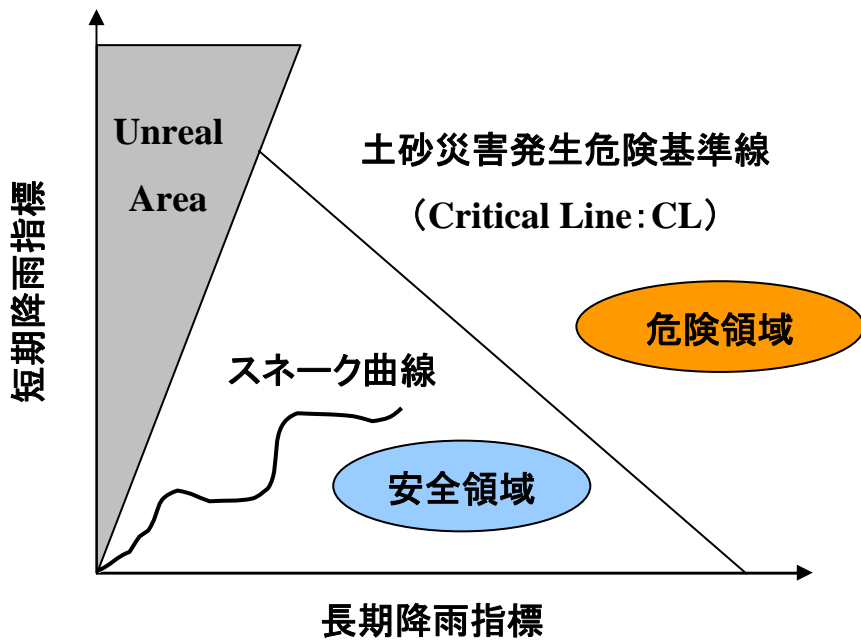


図1.1 一般的な土砂災害早期警戒体制の概念図

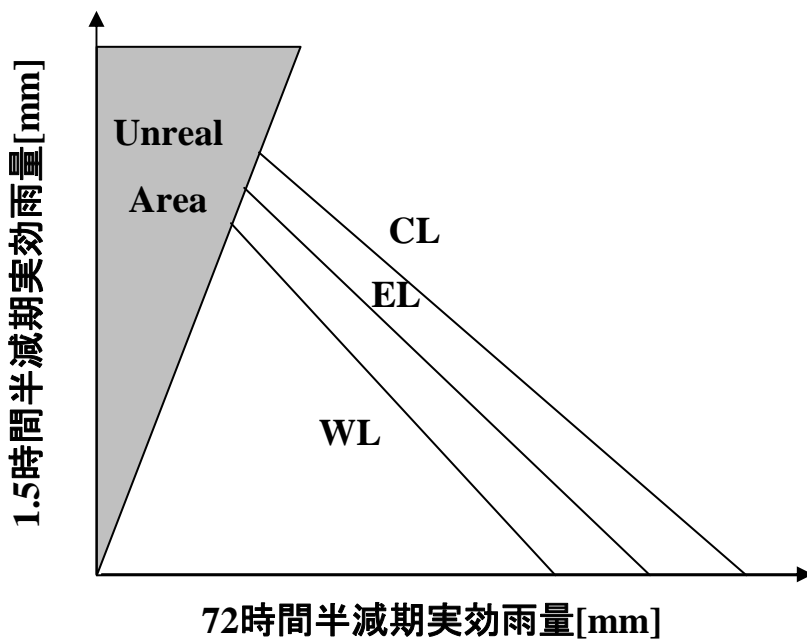


図1.2 提言案

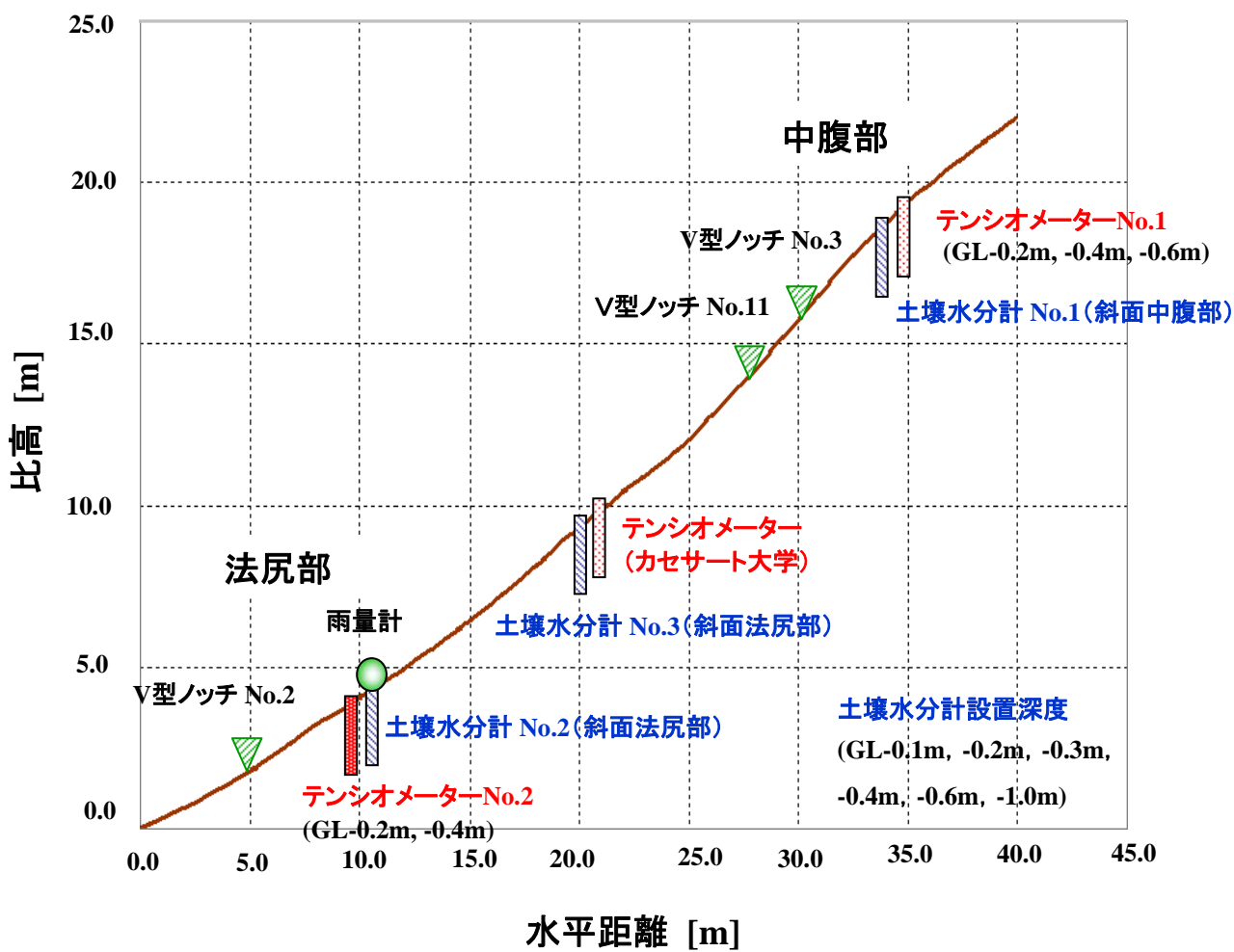


図2.1 斜面断面図





図2.3 原位置モニタリングサイトの露頭

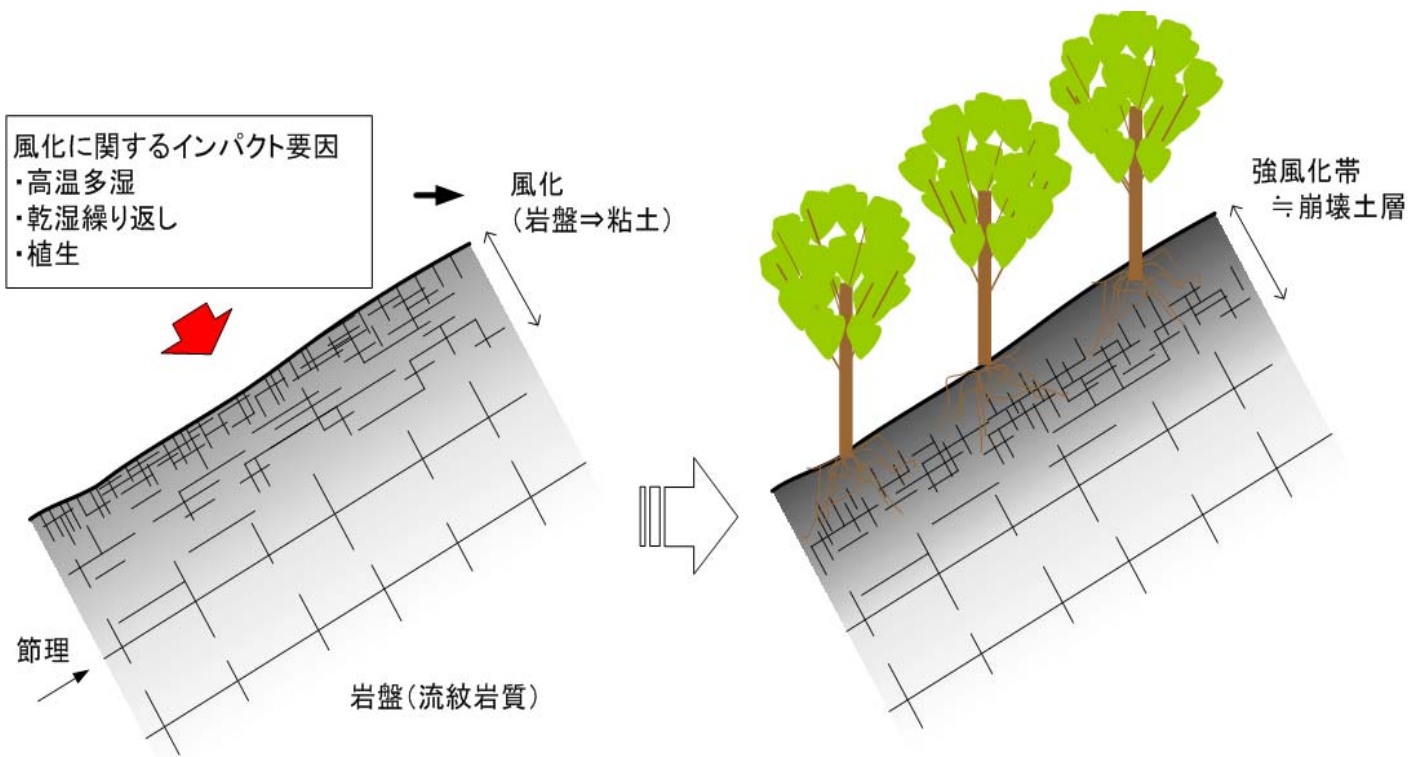


図2.4 風化の模式図

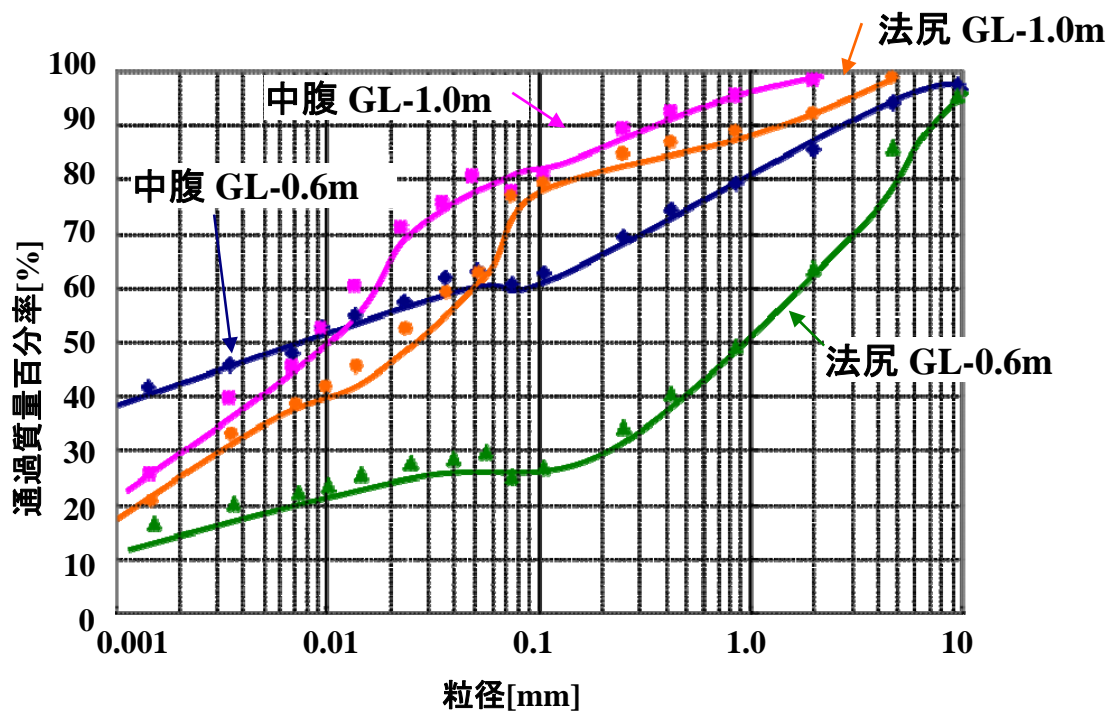


図2.5 粒径加積曲線

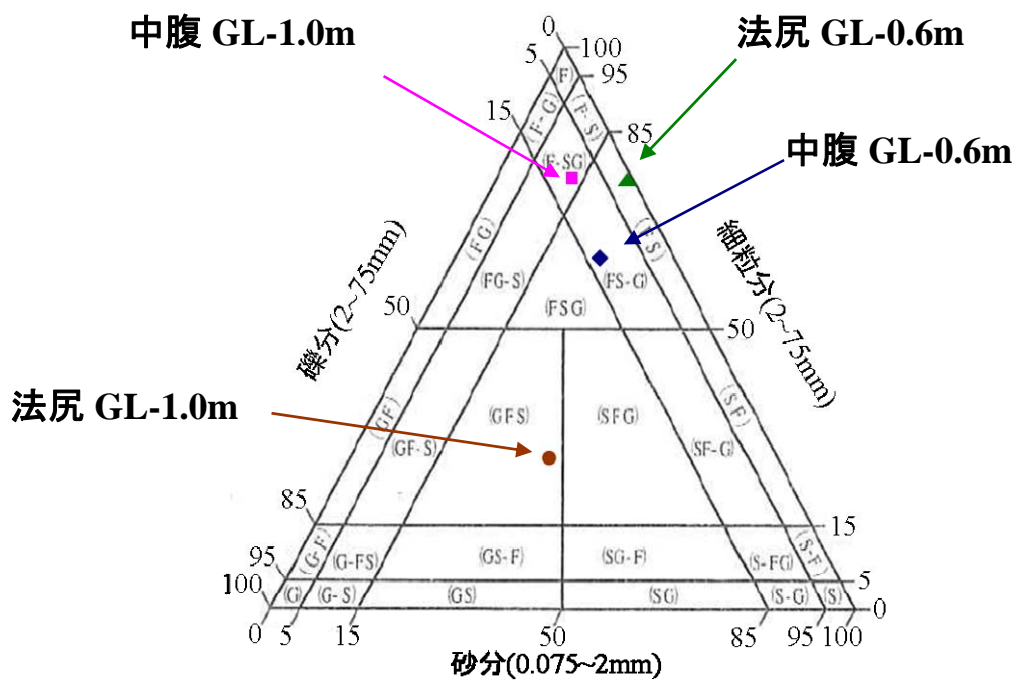


図2.6 三角座標による分類

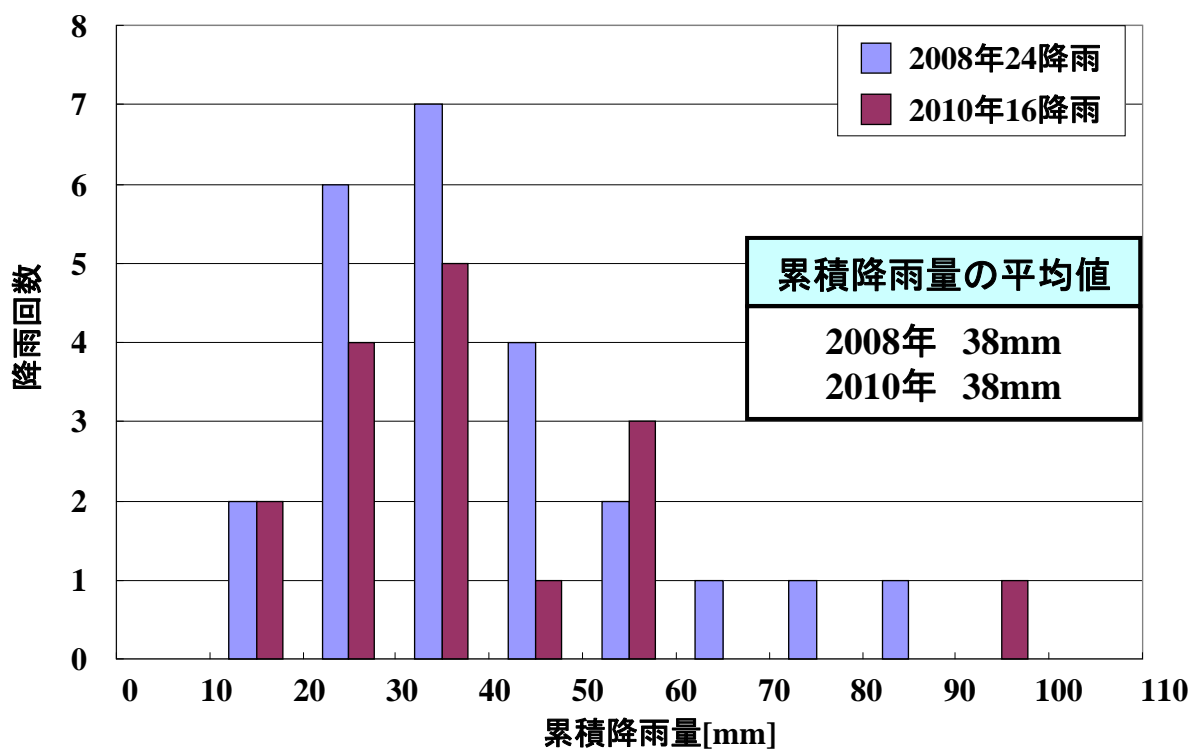


図2.7 累積降雨量の発生頻度

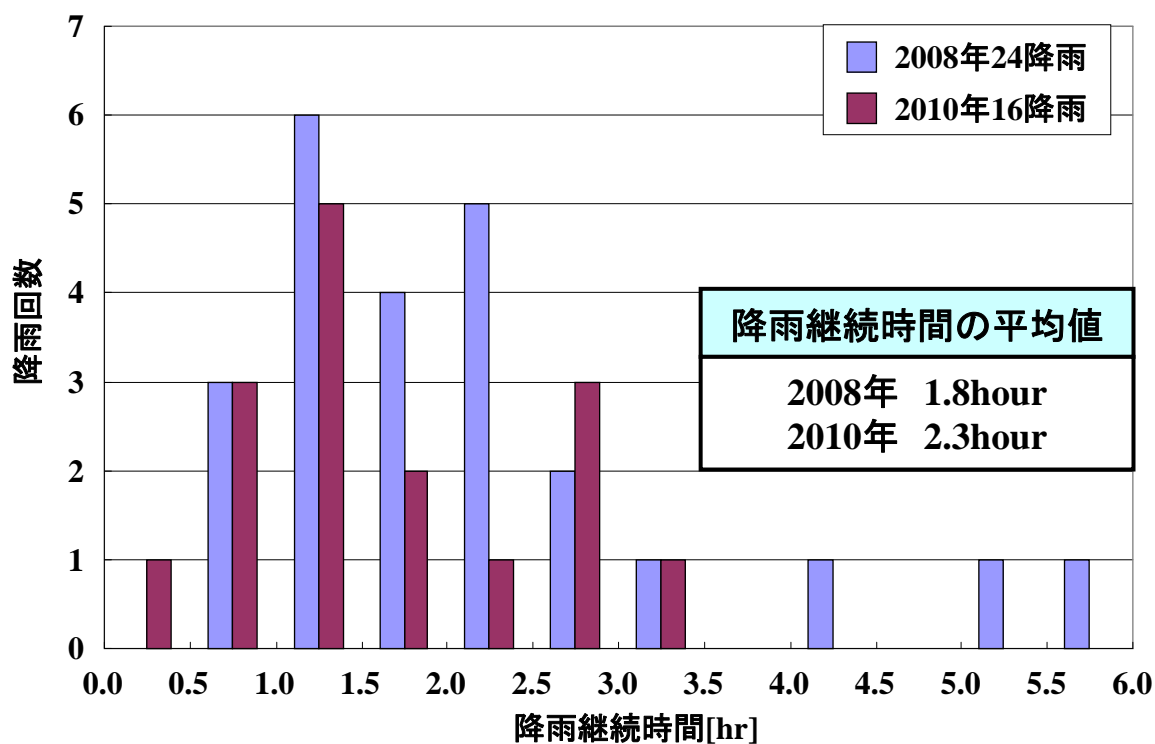
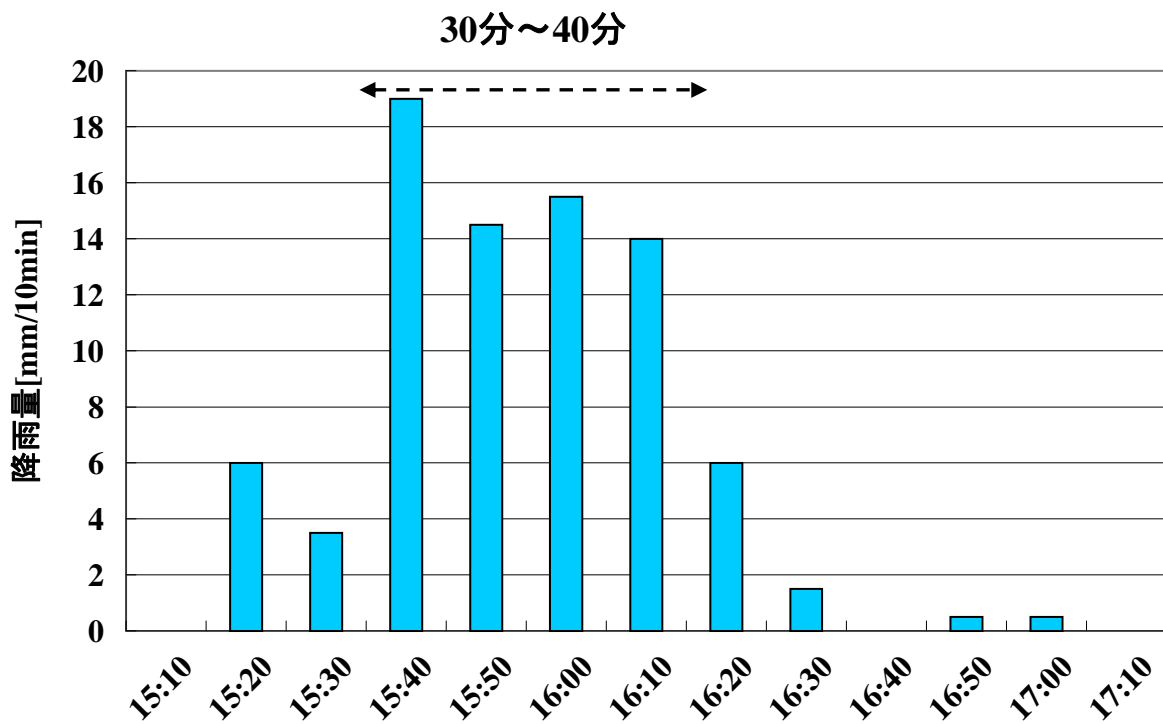
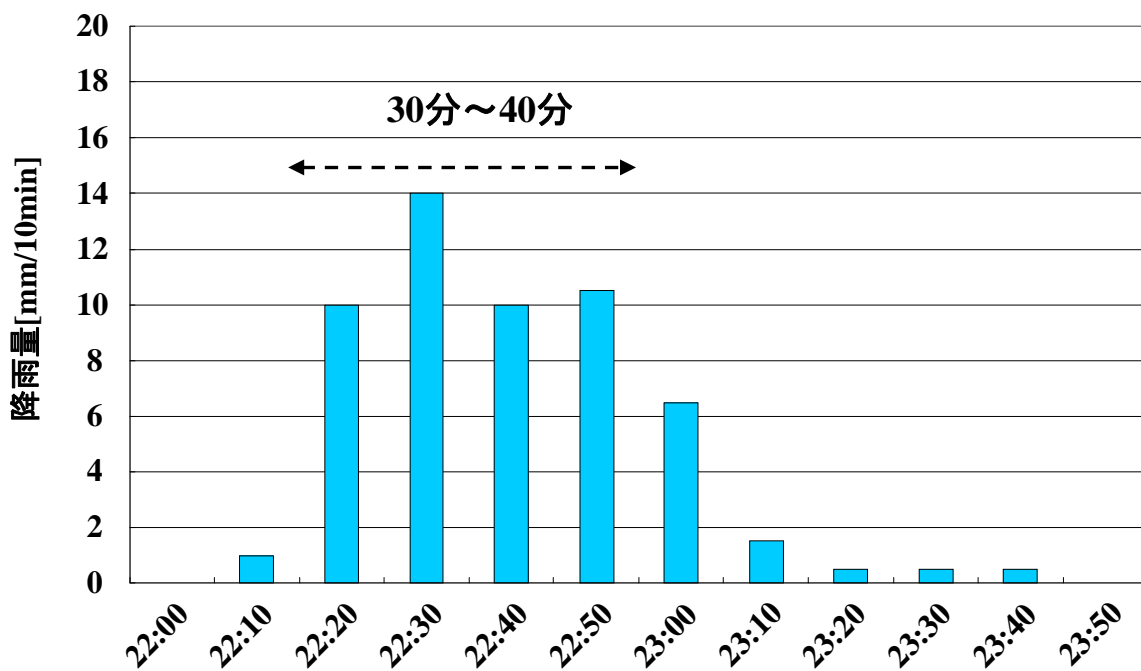


図2.8 降雨継続時間の発生頻度





(a) 降雨記録(2008年7月30日)



(b) 降雨記録(2010年6月4日)

図2.9 降雨記録の一例

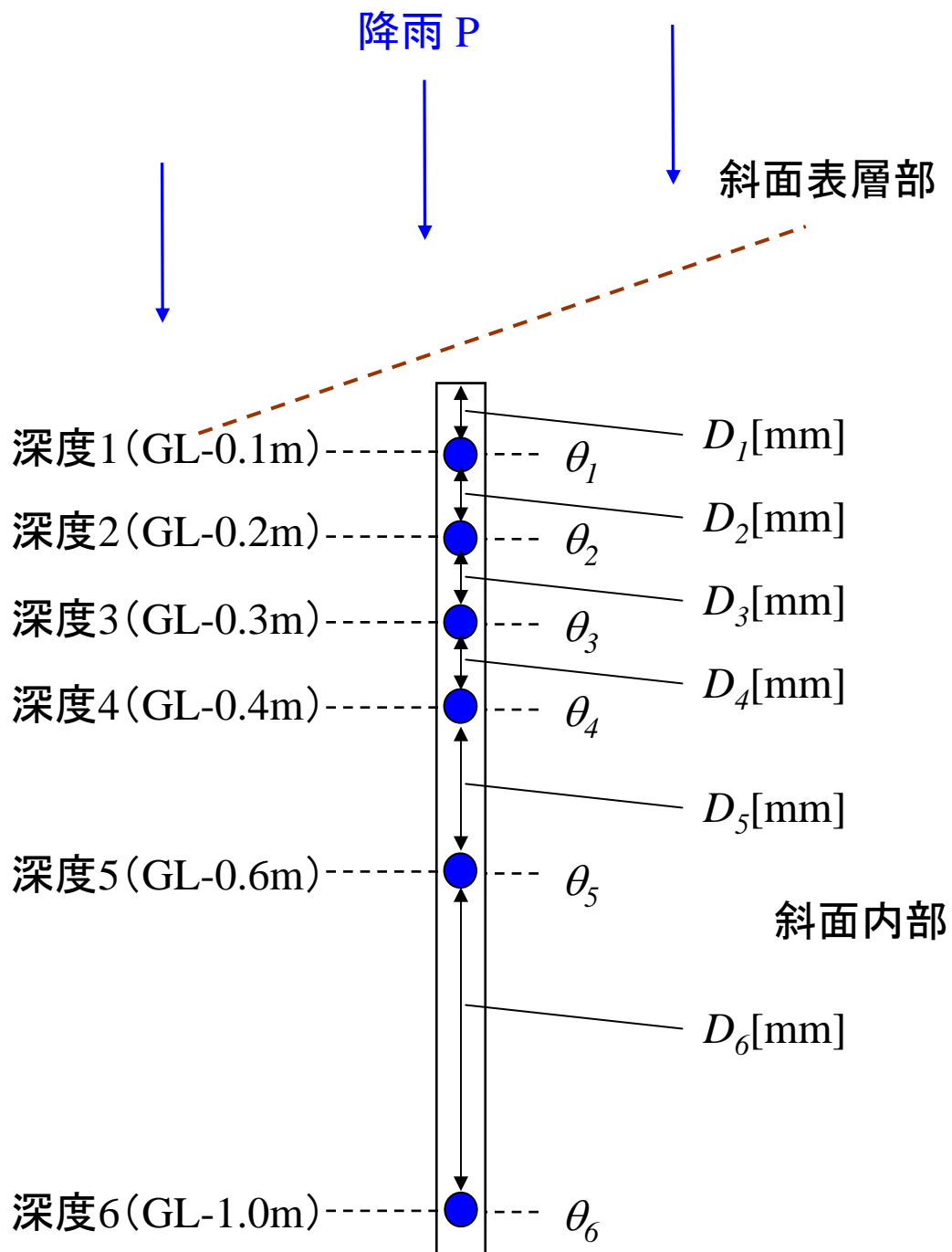


図2.10 土壤水分計の設置深度図

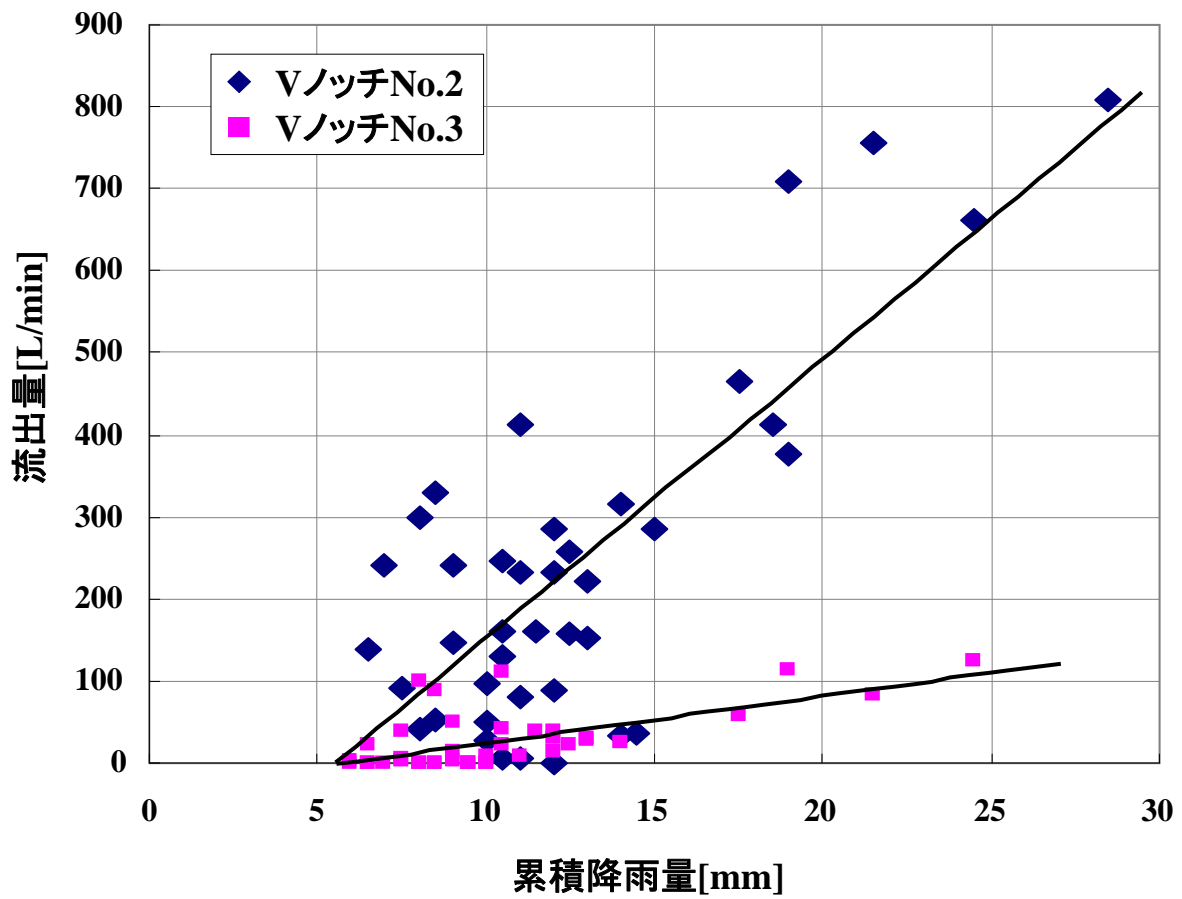
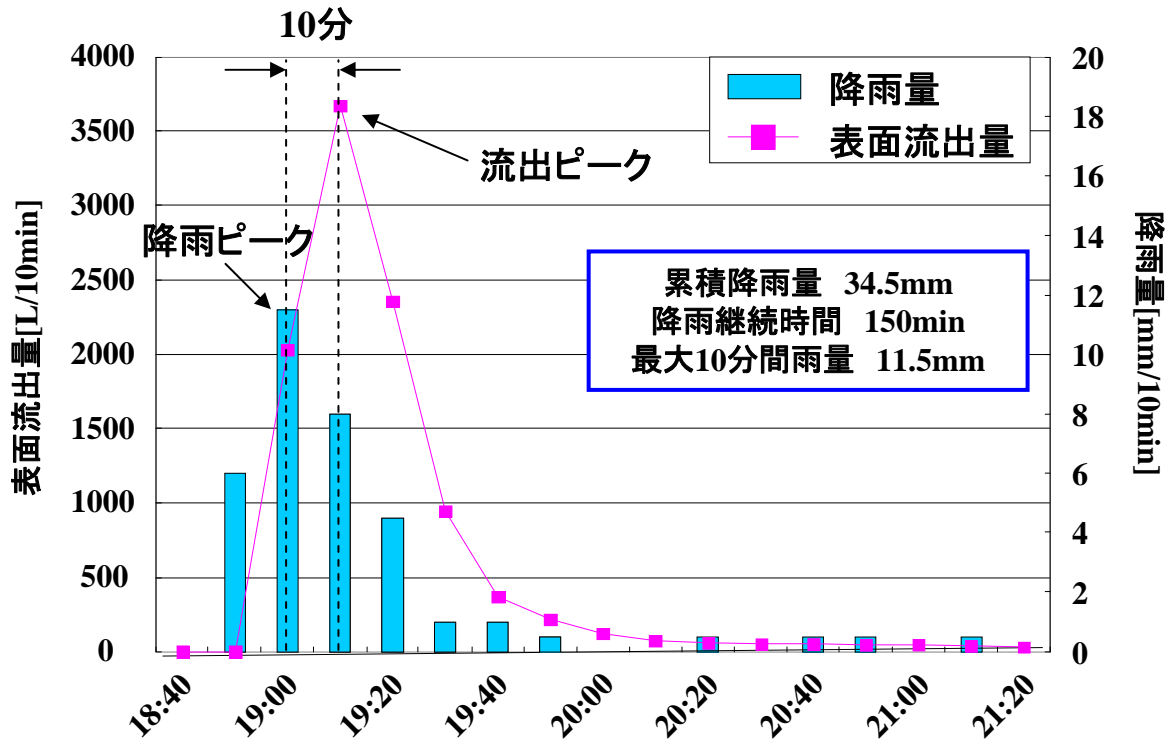
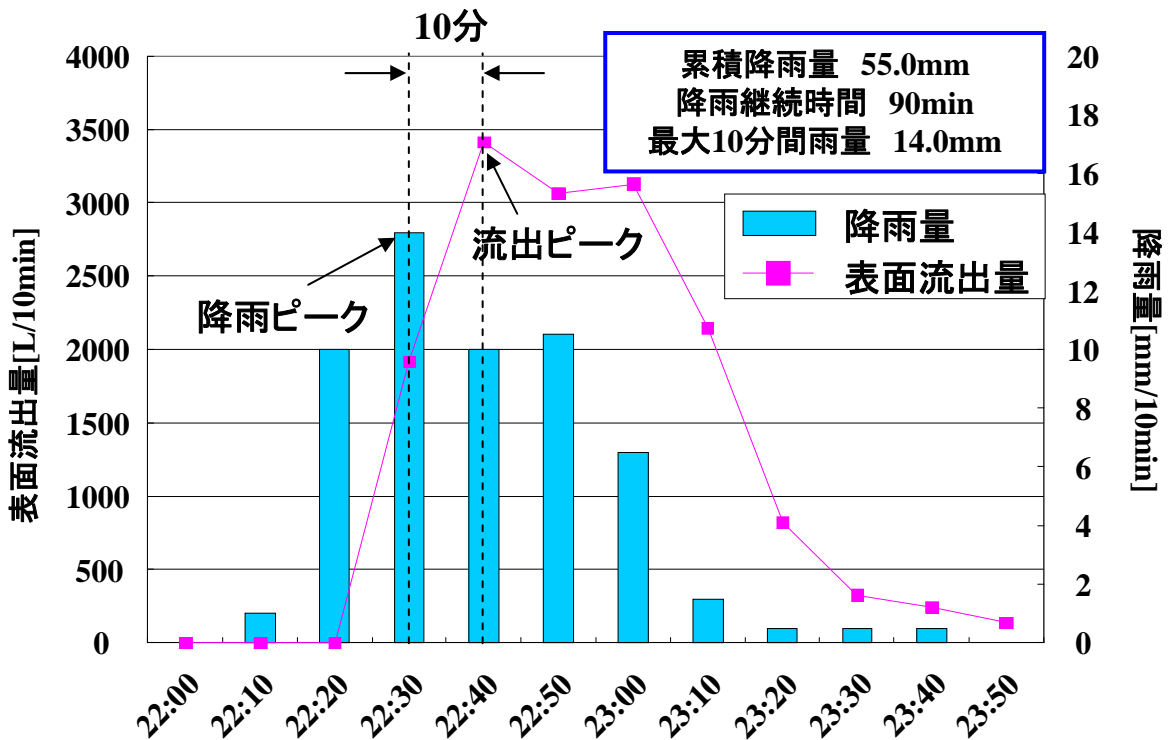


図2.11 欠損雨量



(a) 2008年5月30日



(b) 2010年6月4日

図2.12 表面流出量時系列データ

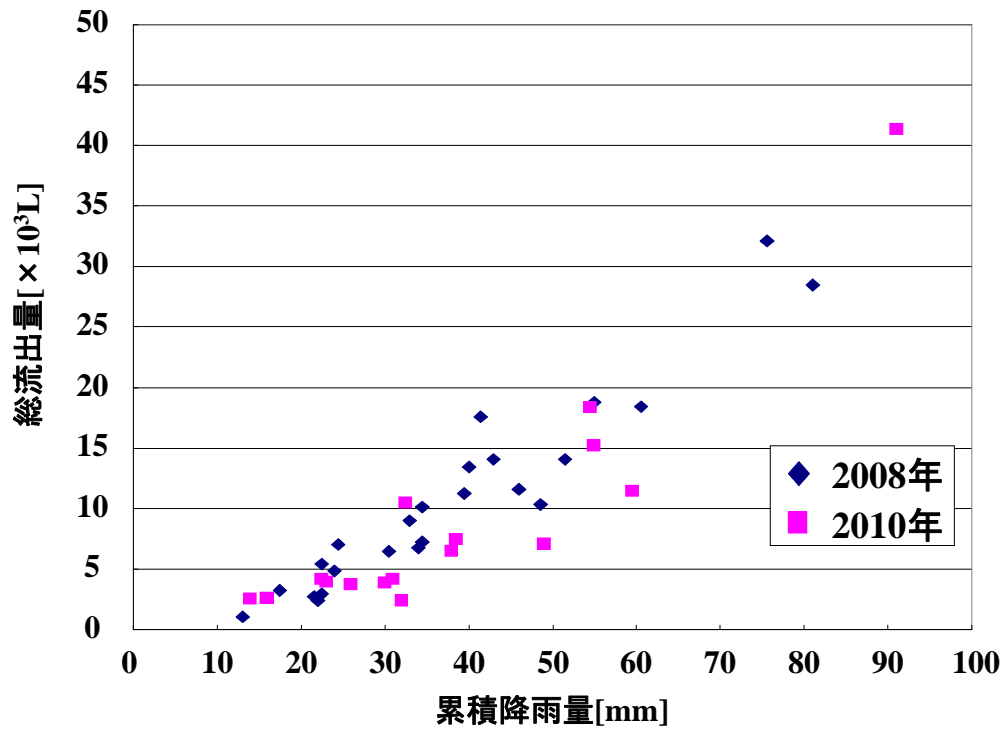


図2.13 総流出量と累積降雨量の関係

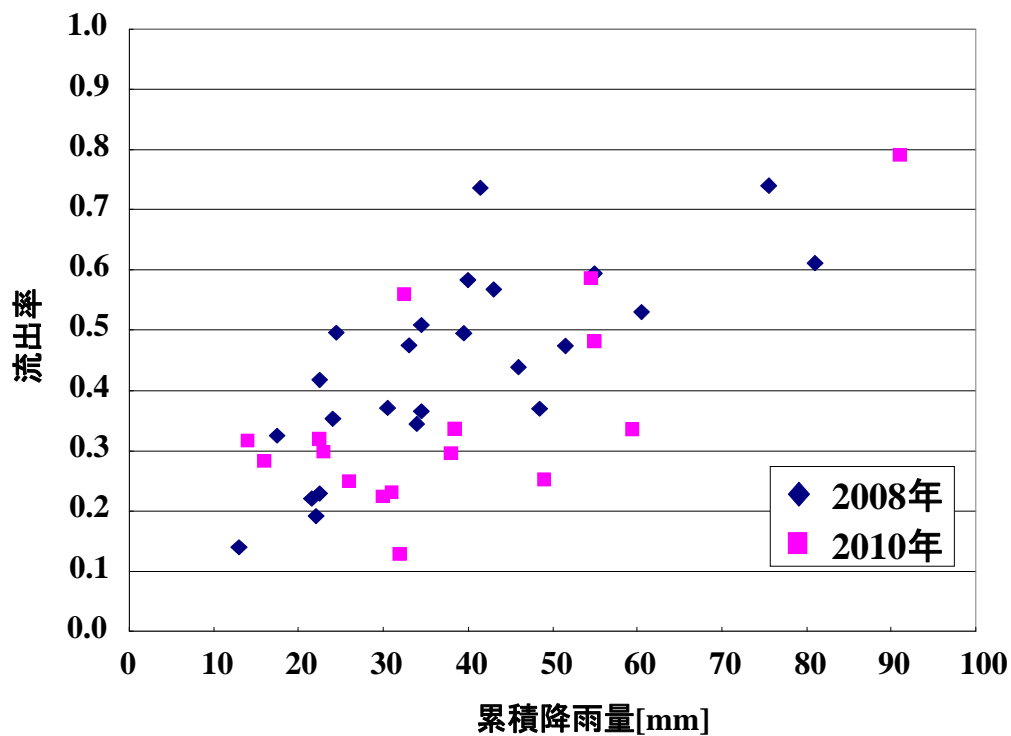


図2.14 流出率と累積降雨量の関係

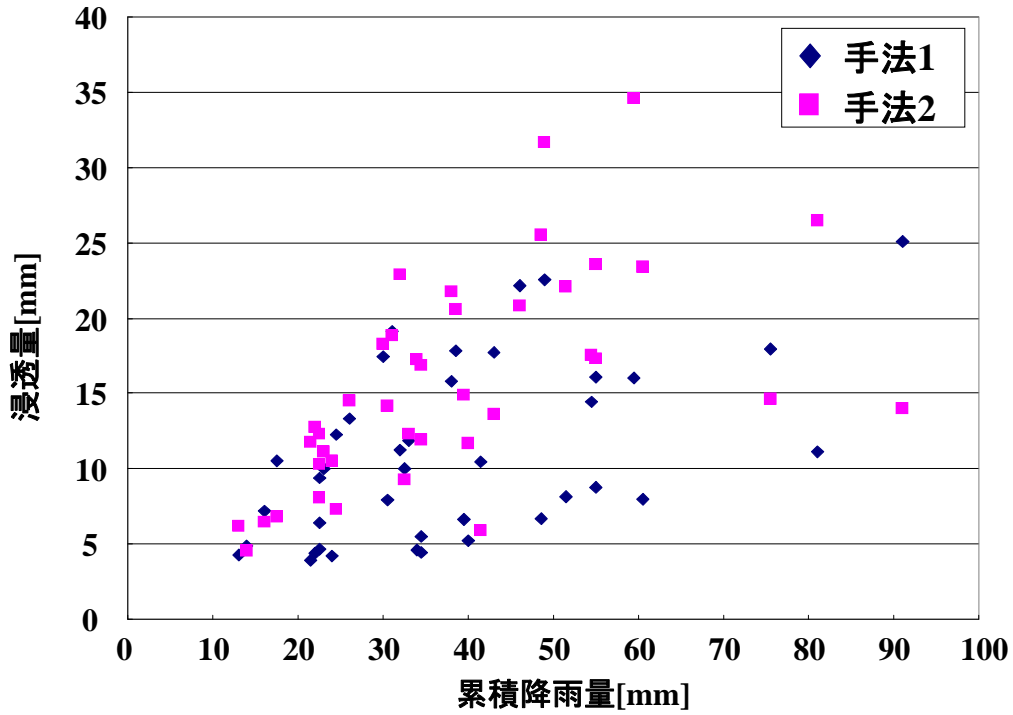


図2.15 浸透量と累積降雨量の関係

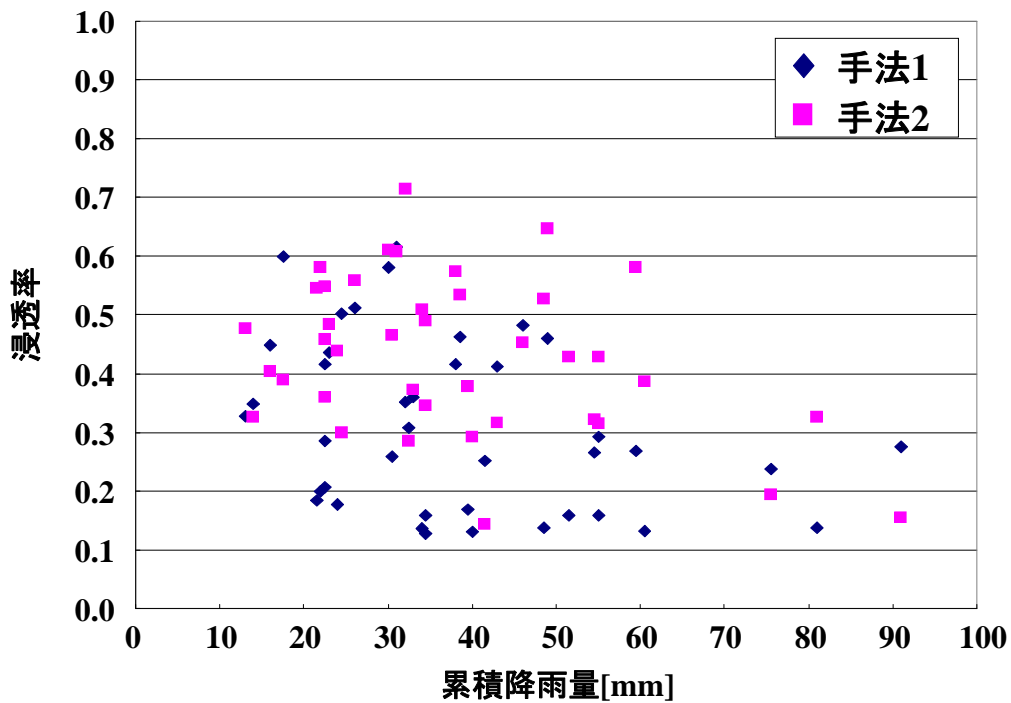
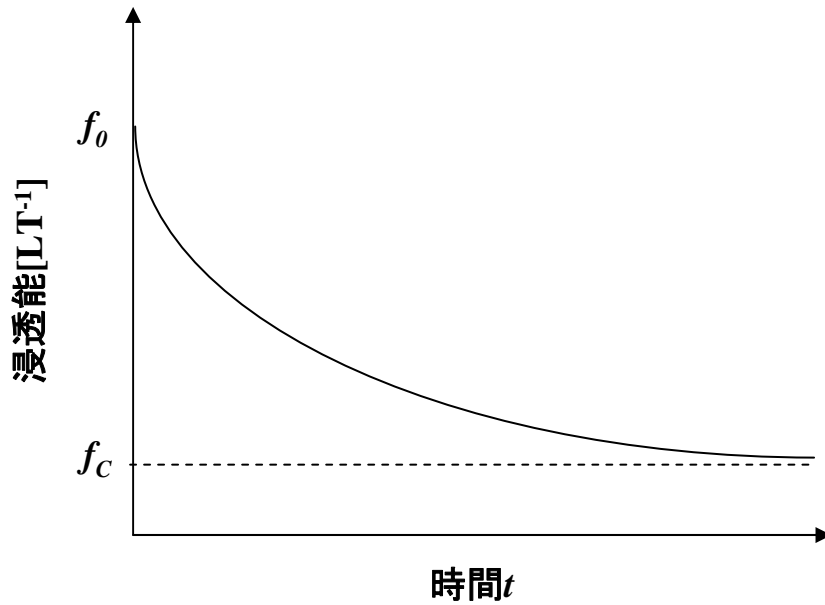


図2.16 浸透率と累積降雨量の関係



$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

$f(t)$ : 浸透開始時刻から時間  $t$  経過したときの浸透能 [LT<sup>-1</sup>]

$f_c$ : 時刻が無限大に経過したときの最終浸透能 [LT<sup>-1</sup>]

$f_0$ : 浸透開始時刻での浸透能 [LT<sup>-1</sup>]

$k$ : 浸透能の減衰を支配するモデル定数

図2.17 ホートンの浸透理論

|                 |             |                |
|-----------------|-------------|----------------|
| $P$ : 降雨量       | $E$ : 蒸発散   | $X$ : 貯留量      |
| $\alpha$ : 流出係数 | $H$ : 流出孔高さ | $\beta$ : 浸透係数 |

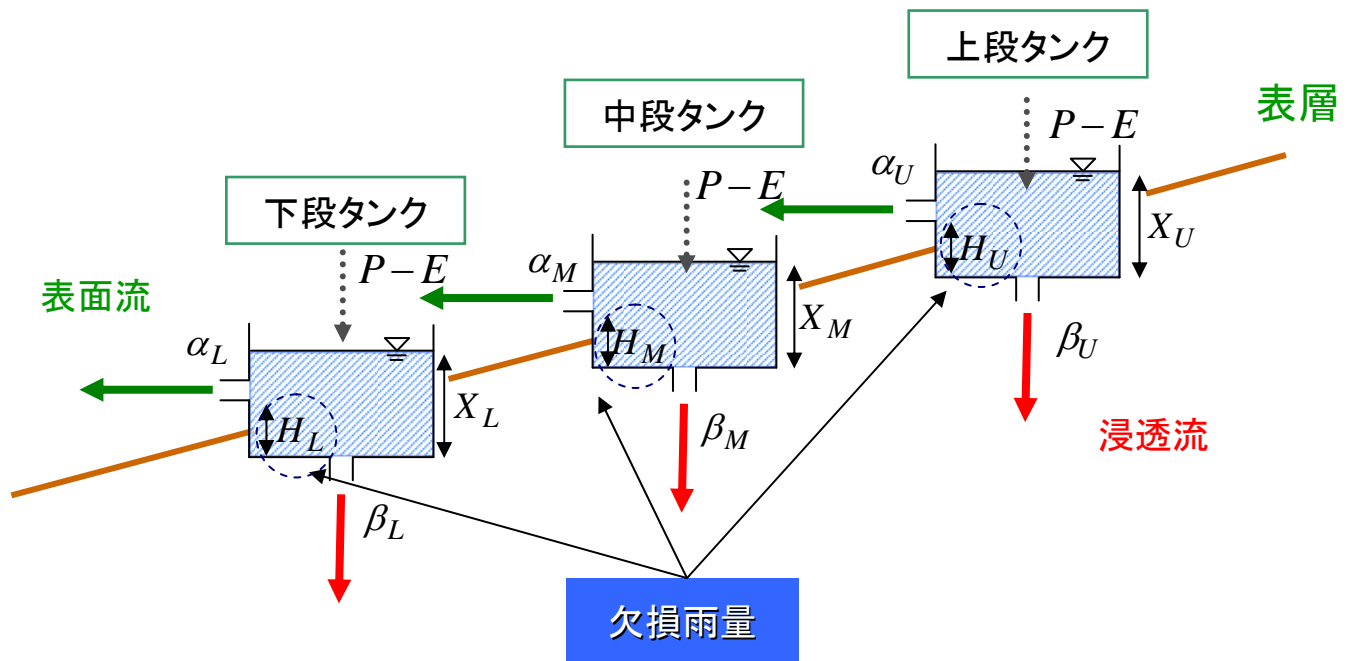


図3.1 拡張型マルチタンクモデル(表層タンク)



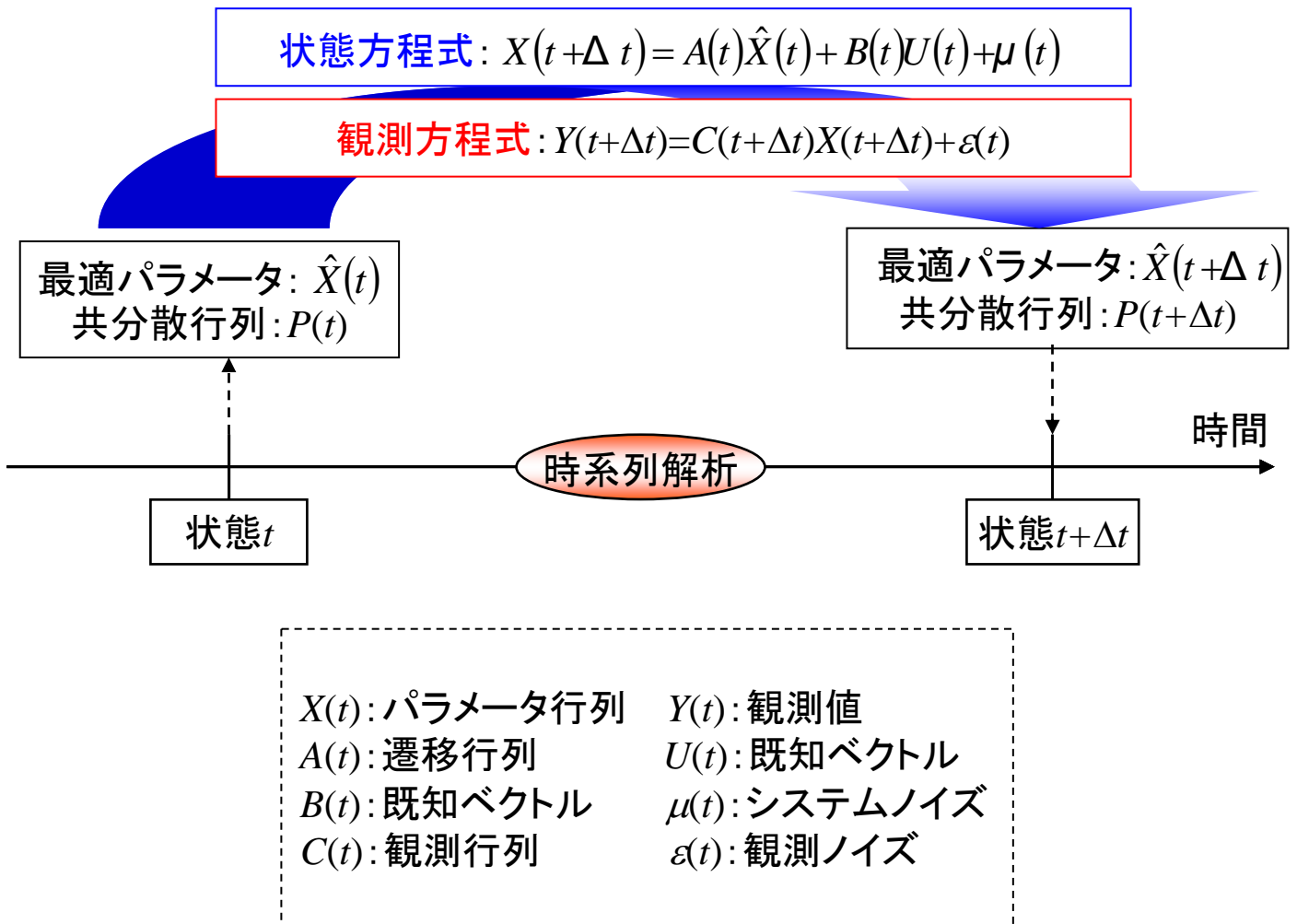
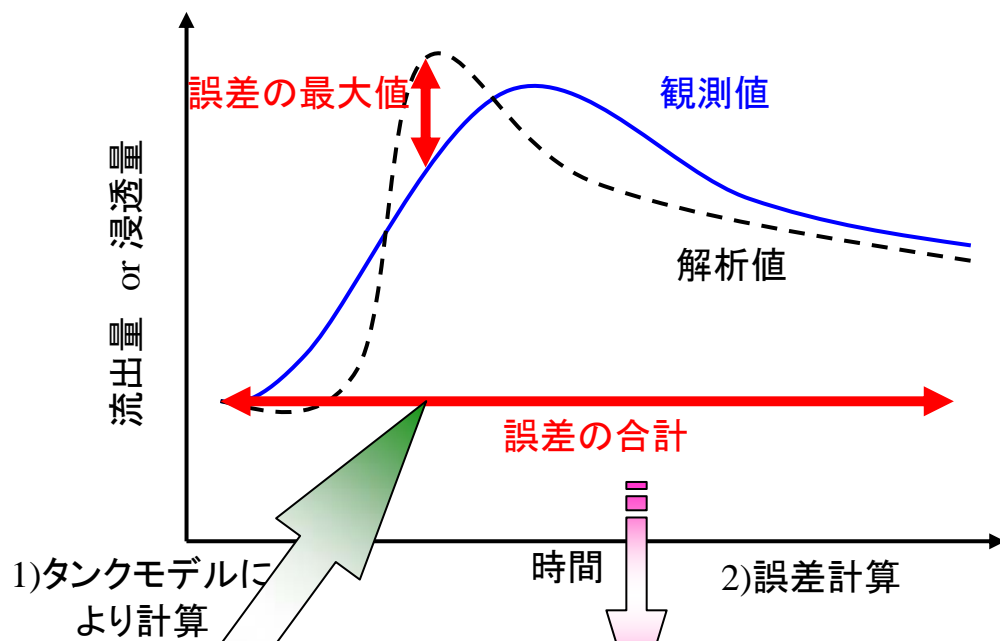
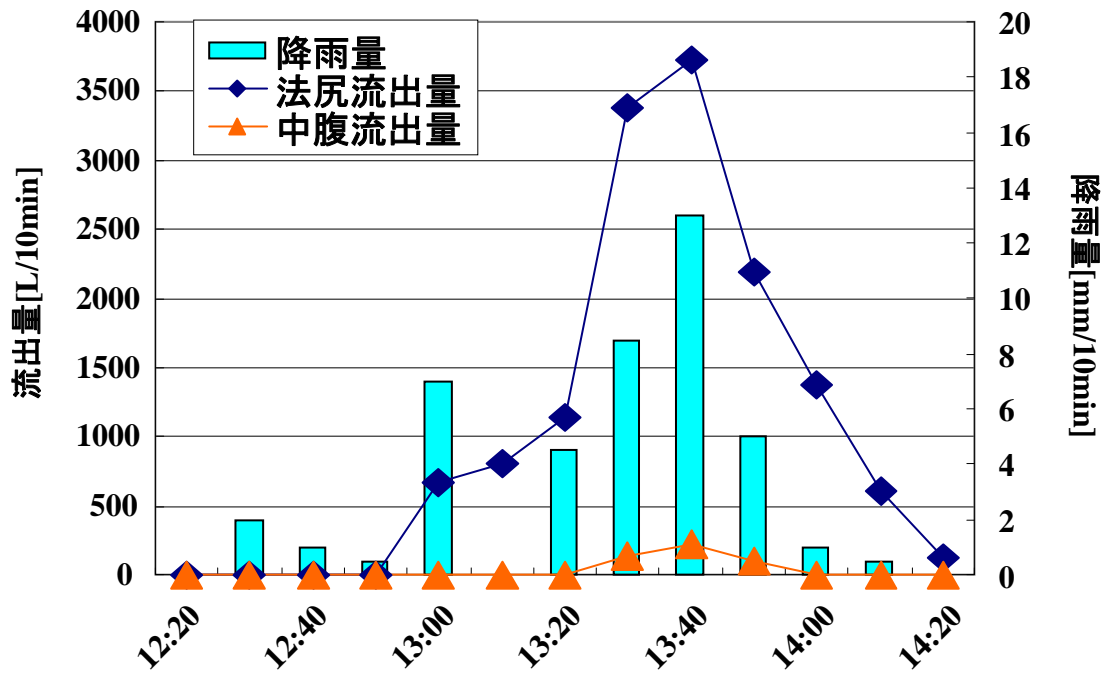


図3.2 カルマンフィルタの基本概念

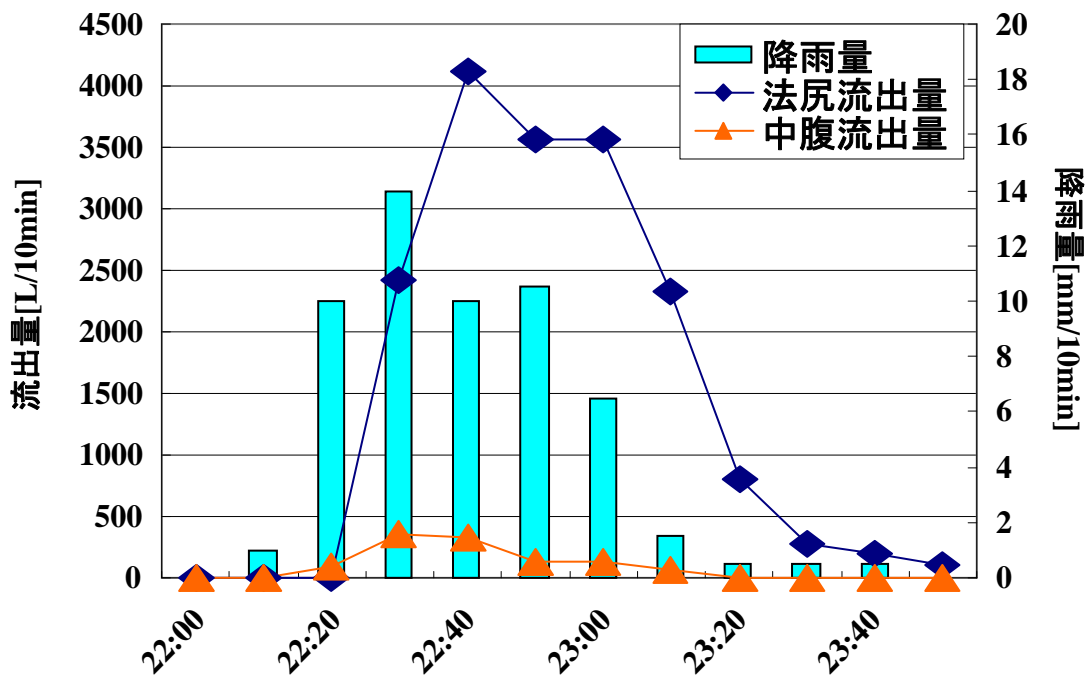


|       |            | パラメータ |           |                 | 誤差の最大値, および合計    |                  |       | 偏差値 |       |    |
|-------|------------|-------|-----------|-----------------|------------------|------------------|-------|-----|-------|----|
| セット番号 | $\alpha_U$ | ...   | $\beta_L$ | 流出量合計 ( $y_1$ ) | 流出量最大値 ( $y_2$ ) | 浸透量最大値 ( $y_n$ ) | $y_1$ | ... | $y_n$ | 合計 |
| 1     | 0.25       | ...   | 0.32      | ...             | ...              | ...              |       |     |       |    |
| ..... |            | ...   |           | ...             | ...              | ...              |       |     |       |    |
| 5000  |            | ...   |           | ...             | ...              | ...              |       |     |       |    |
|       |            |       |           | Avg. of $y_1$   | Avg. of $y_2$    | Avg. of $y_n$    |       |     |       |    |
|       |            |       |           | S.D. of $y_1$   | S.D. of $y_2$    | S.D. of $y_n$    |       |     |       |    |

図3.3 誤差計算の過程



(a) 2008年11月4日



(b) 2010年6月4日

图3.4 流出量

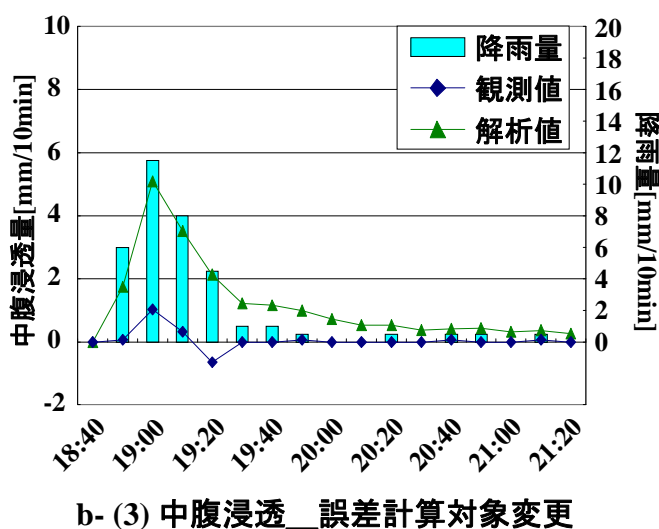
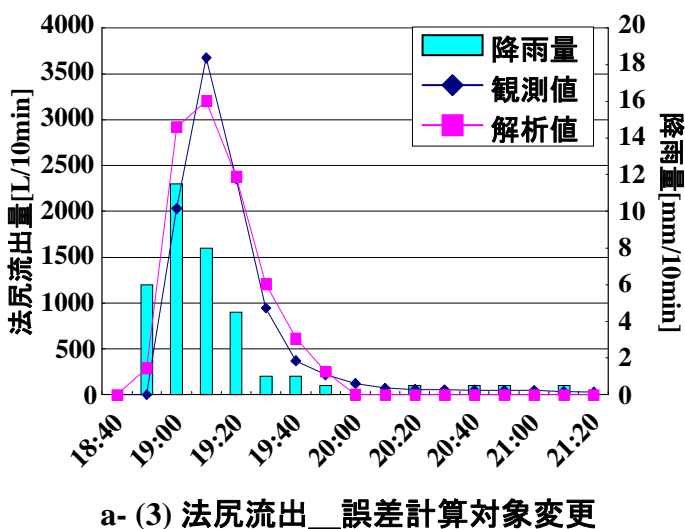
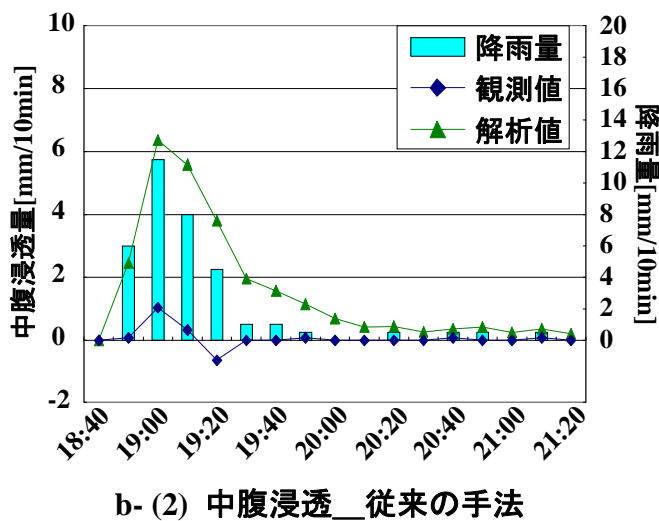
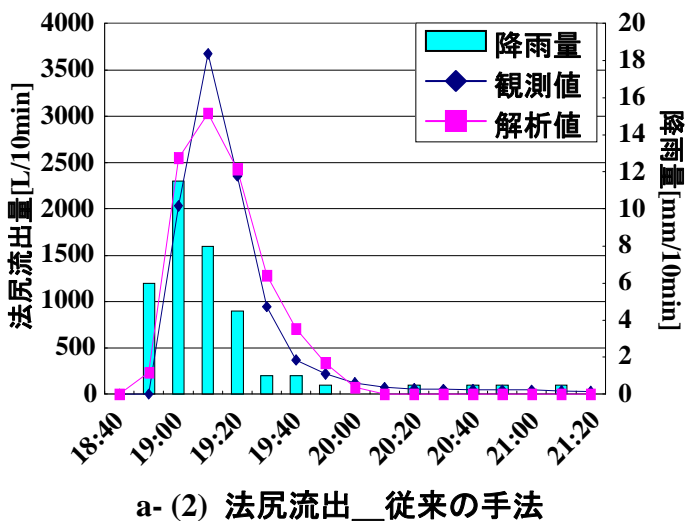
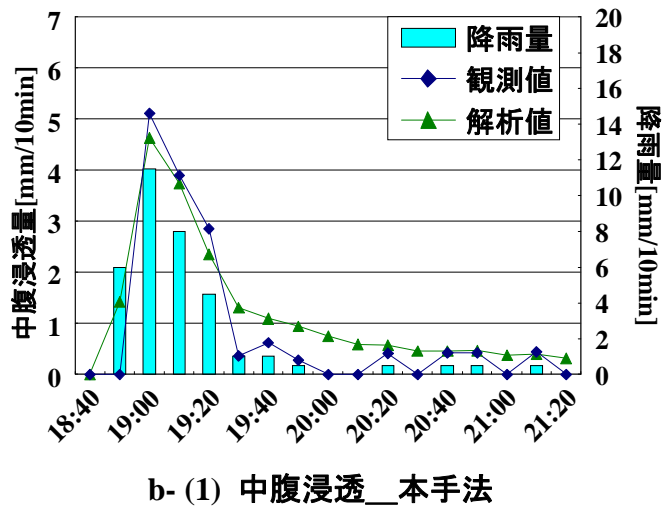
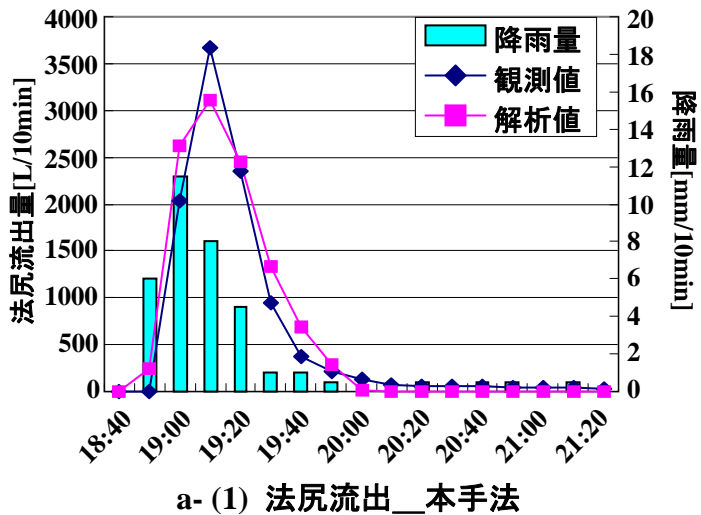
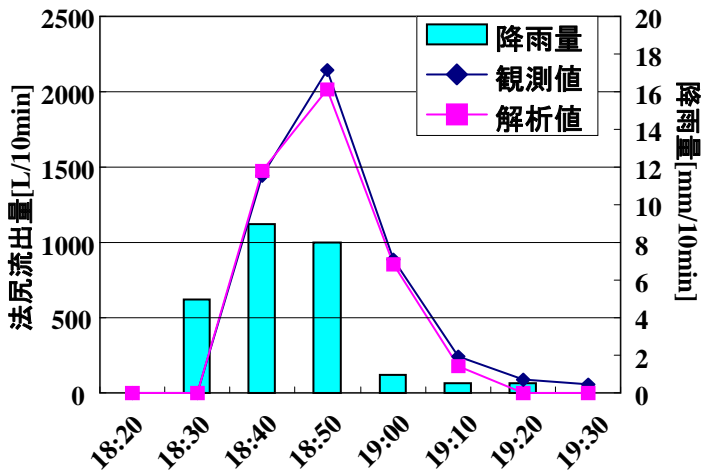
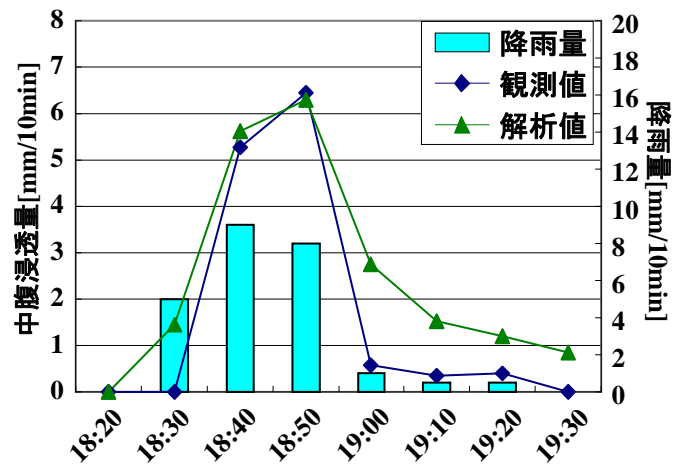


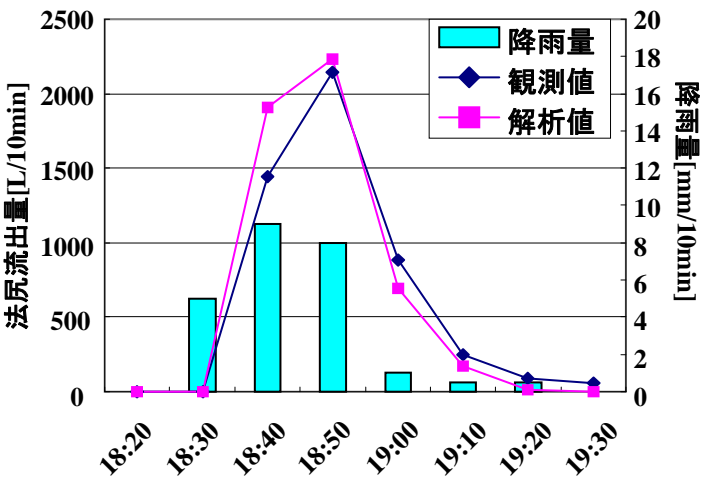
図3.5 法尻流出量, 中腹浸透量の比較(2008年5月30日)



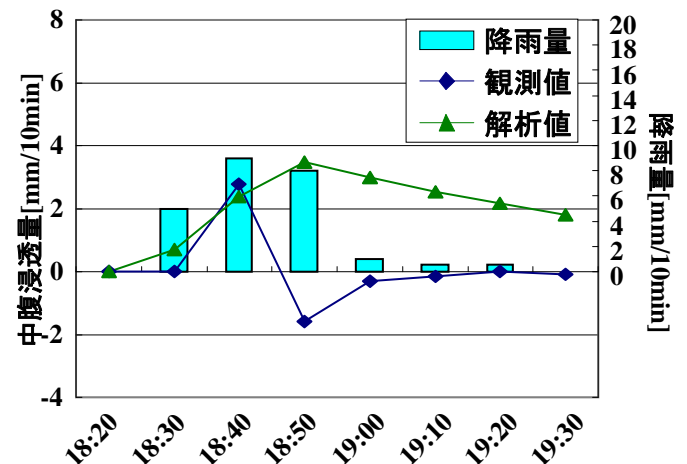
a- (1) 法尻流出\_本手法



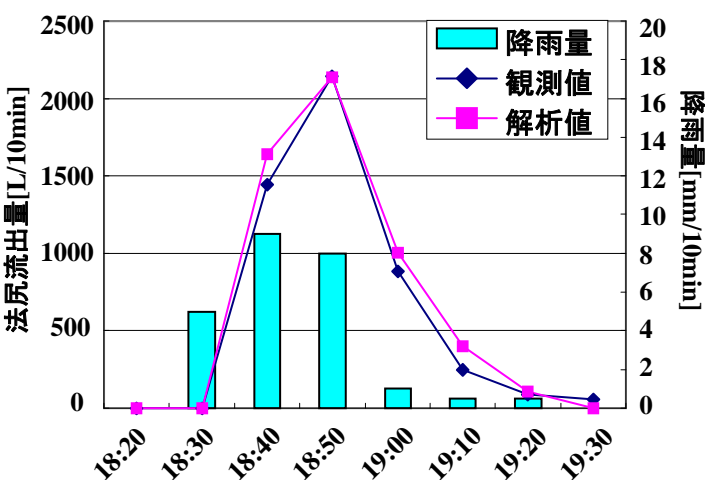
b- (1) 中腹浸透\_本手法



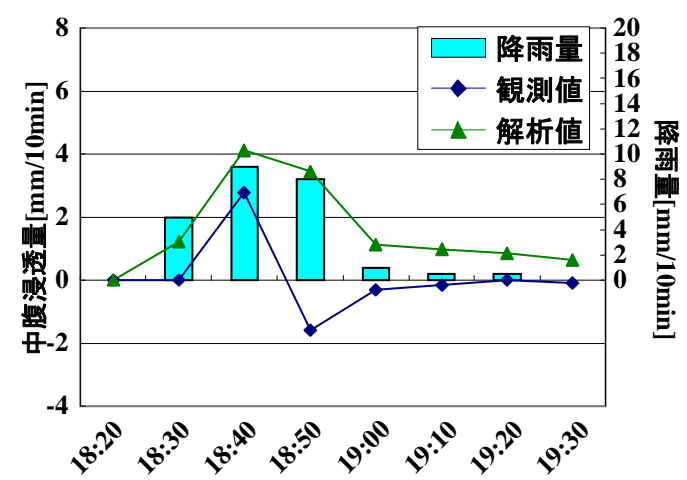
a- (2) 法尻流出\_従来の手法



b- (2) 中腹浸透\_従来の手法

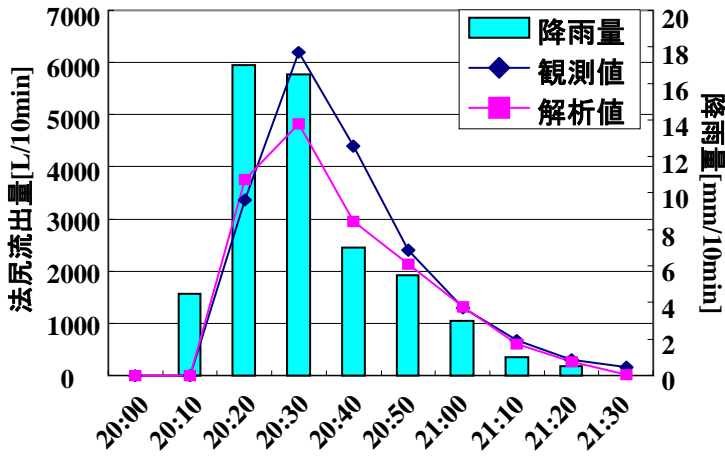


a- (3) 法尻流出\_誤差計算対象変更

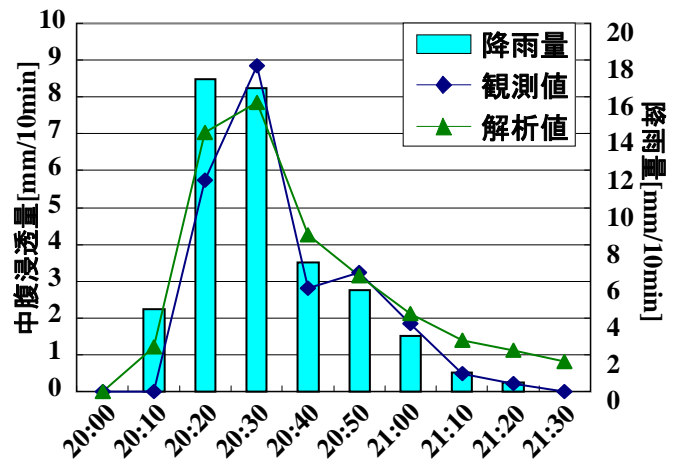


b- (3) 中腹浸透\_誤差計算対象変更

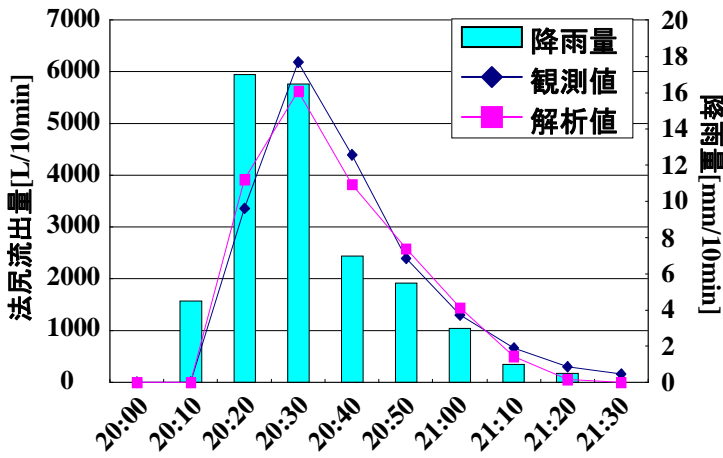
図3.6 法尻流出量, 中腹浸透量の比較(2008年6月3日)



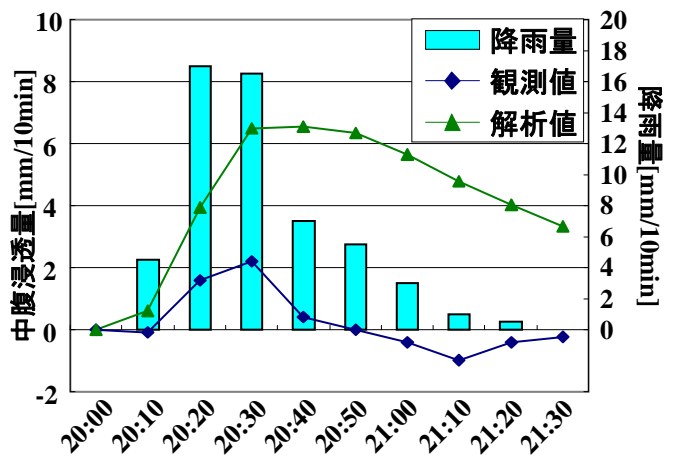
a- (1) 法尻流出\_本手法



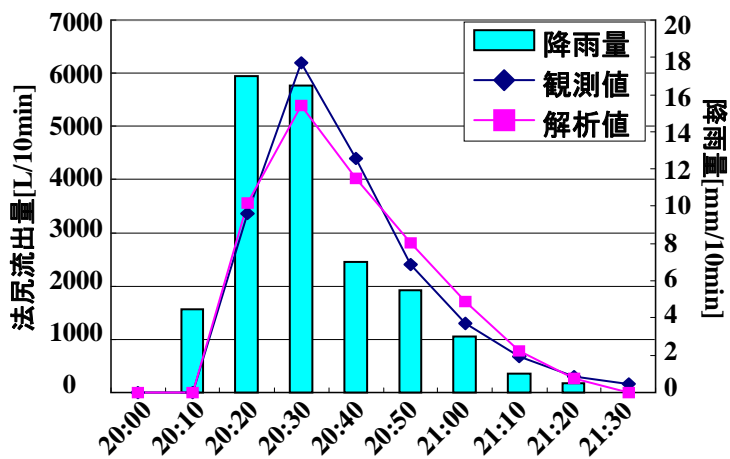
b- (1) 中腹浸透\_本手法



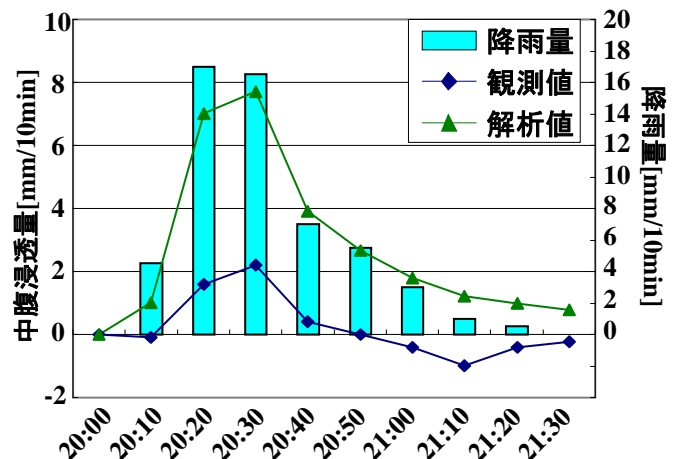
a- (2) 法尻流出\_従来の手法



b- (2) 中腹浸透\_従来の手法

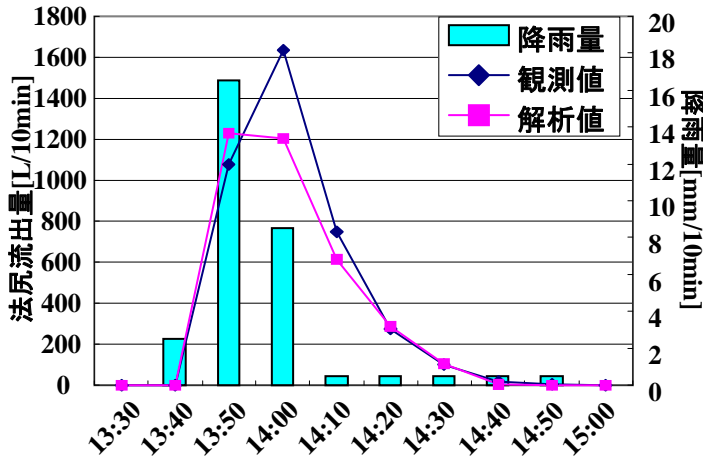


a- (3) 法尻流出\_誤差計算対象変更

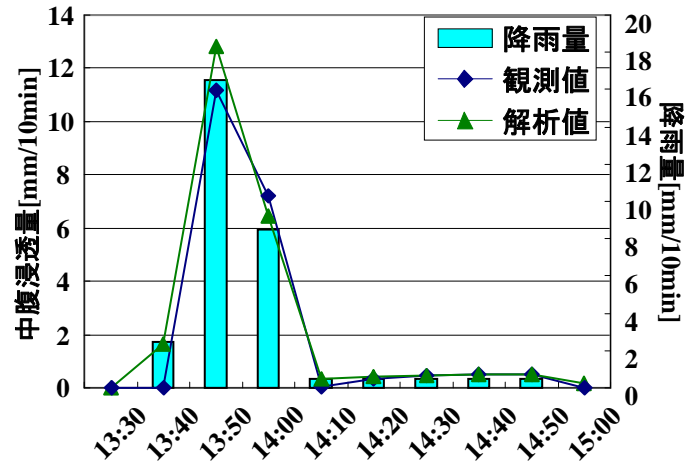


b- (3) 中腹浸透\_誤差計算対象変更

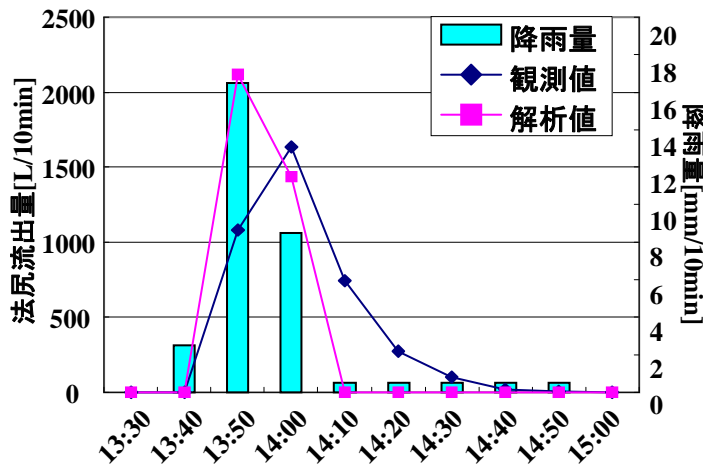
図3.7 法尻流出量, 中腹浸透量の比較(2008年8月21日)



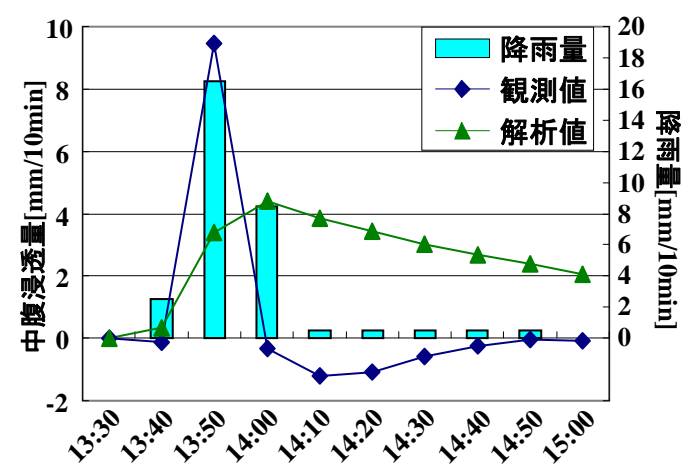
a- (1) 法尻流出\_本手法



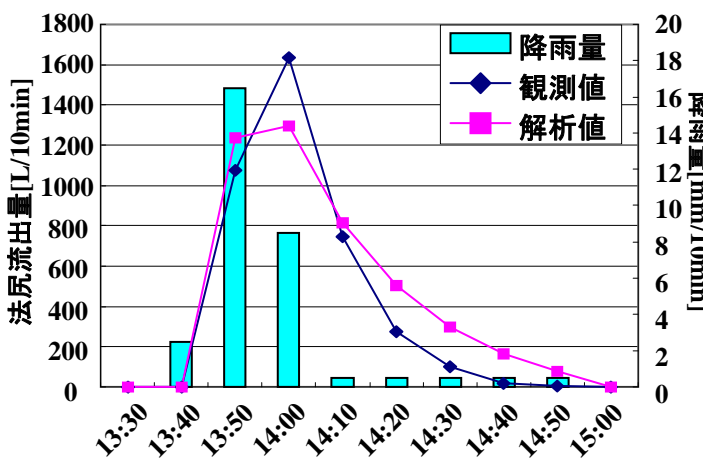
b- (1) 中腹浸透\_本手法



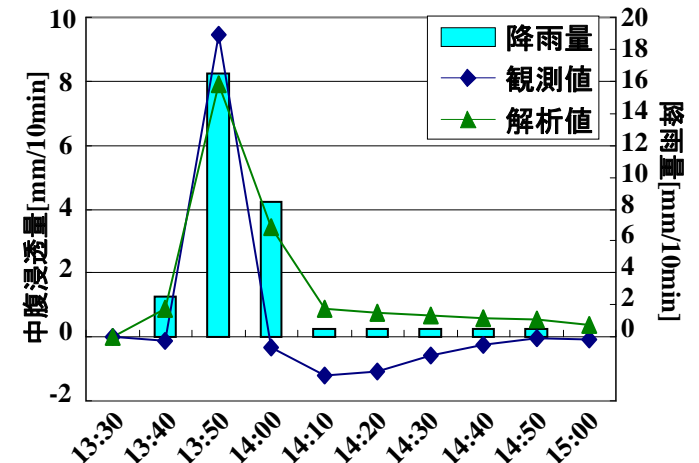
a- (2) 法尻流出\_従来手法



b- (2) 中腹浸透\_従来手法

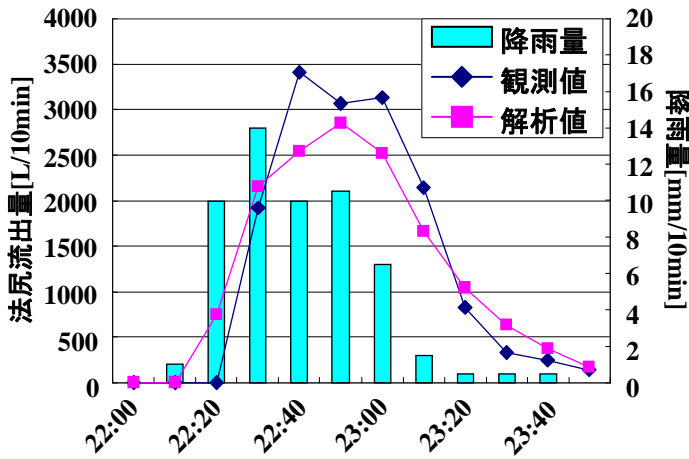


a- (3) 法尻流出\_誤差計算対象変更

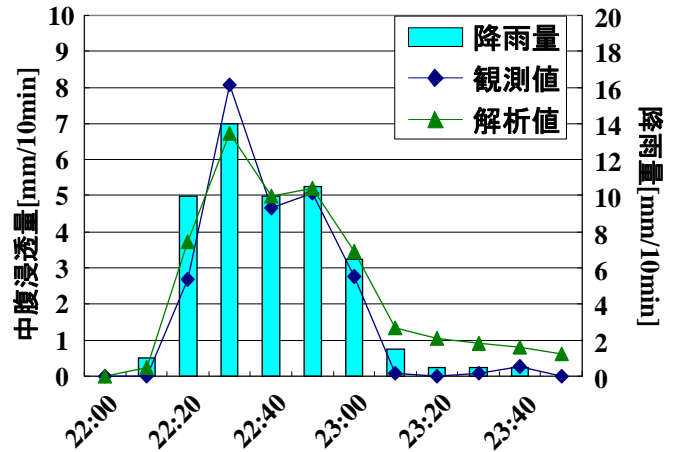


b- (3) 中腹浸透\_誤差計算対象変更

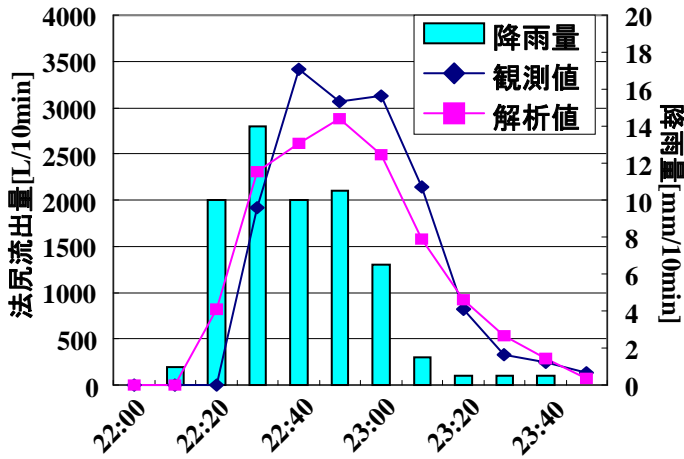
図3.8 法尻流出量, 中腹浸透量の比較(2010年5月12日)



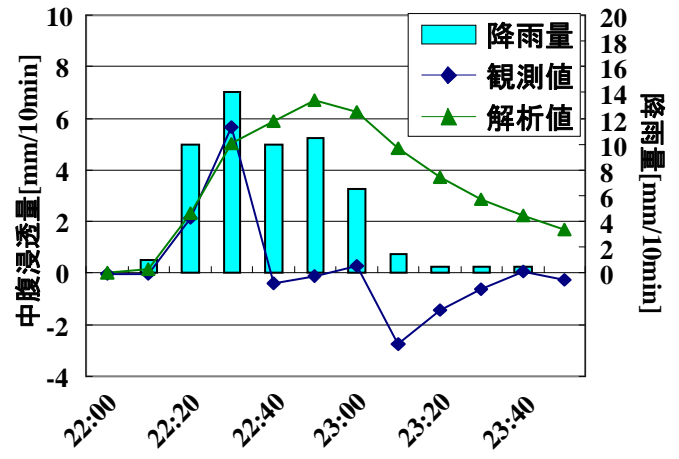
a- (1) 法尻流出\_本手法



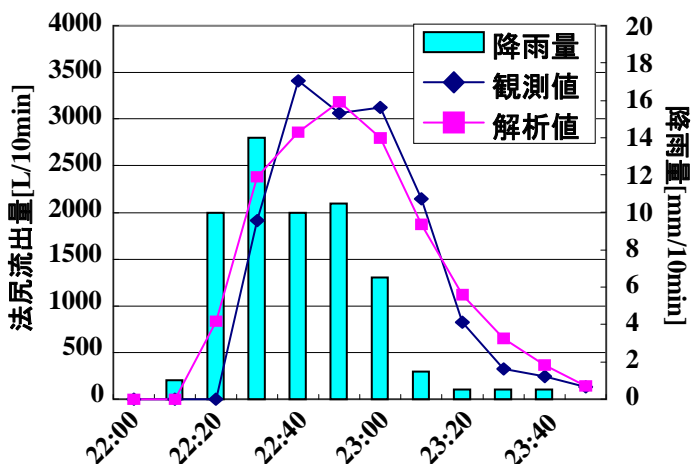
b- (1) 中腹浸透\_本手法



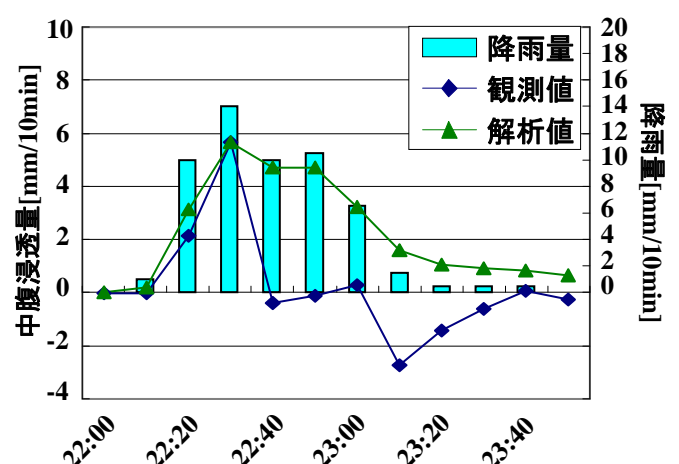
a- (2) 法尻流出\_従来手法



b- (2) 中腹浸透\_従来手法



a- (3) 法尻流出\_誤差計算対象変更



b- (3) 中腹浸透\_誤差計算対象変更

図3.9 法尻流出量, 中腹浸透量の比較(2010年6月4日)



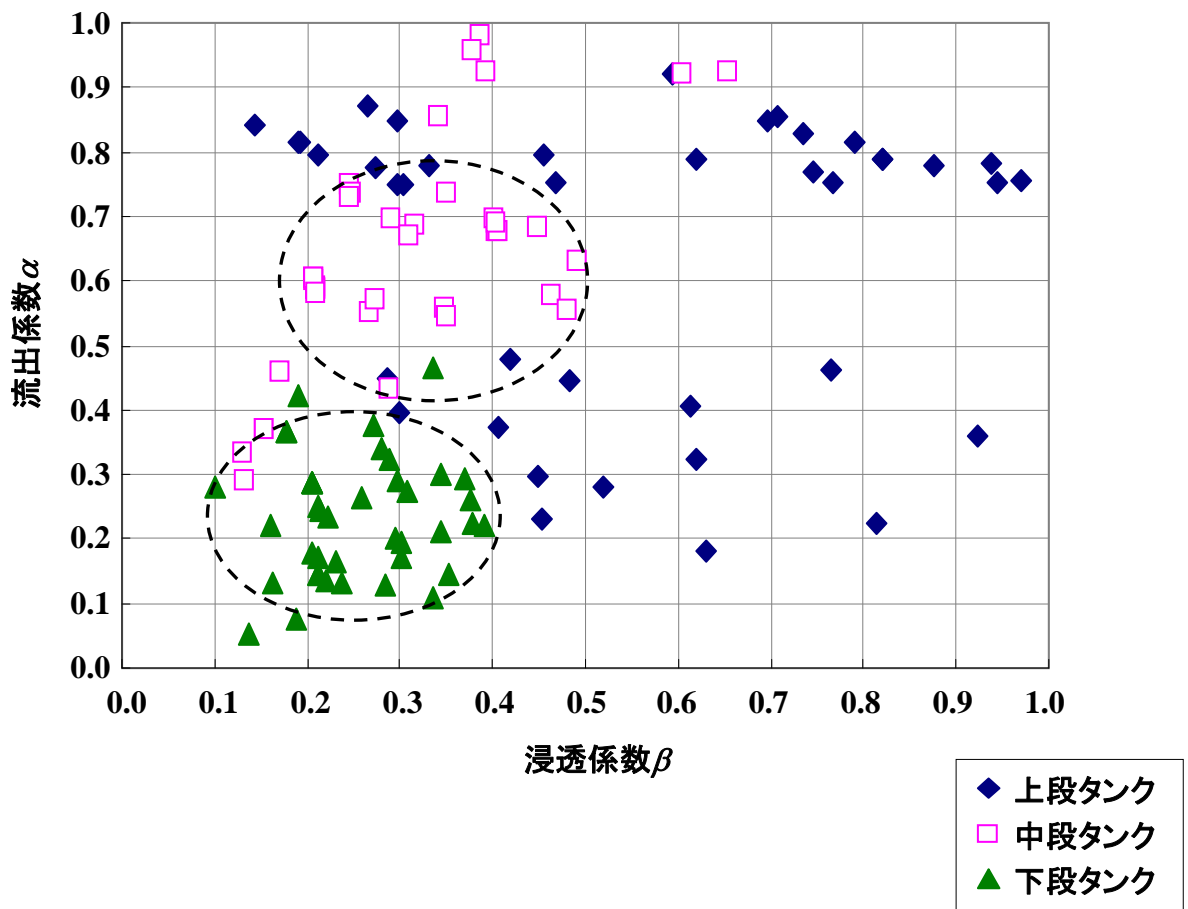


図3.10 表層タンクのパラメータの傾向

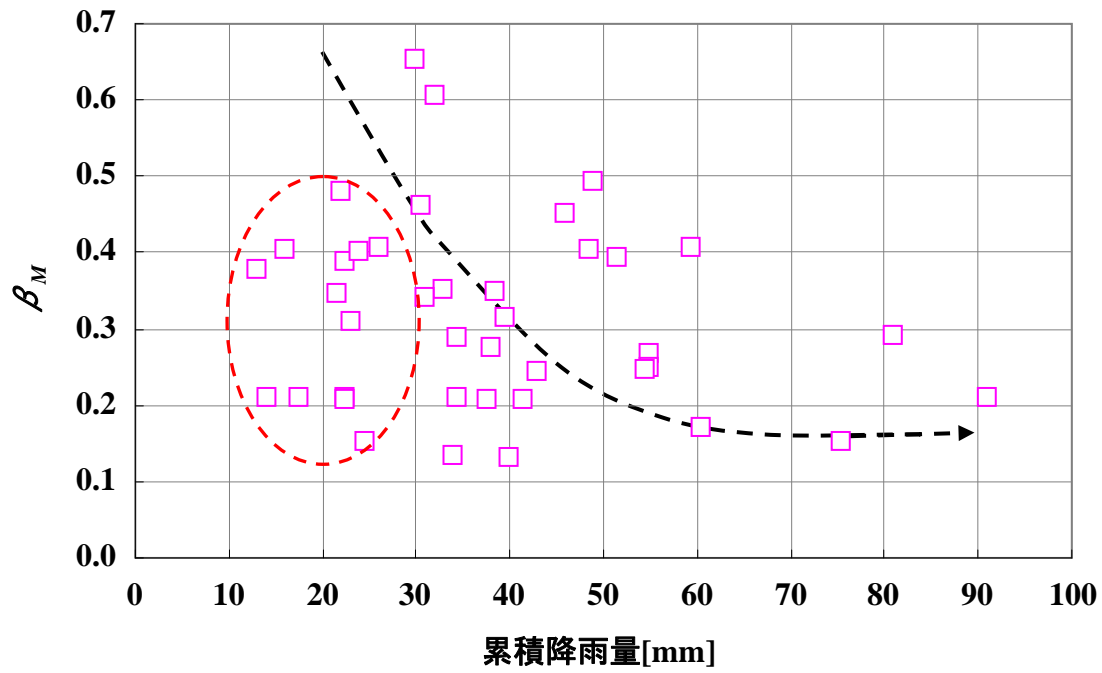


図3.11  $\beta_M$ の傾向

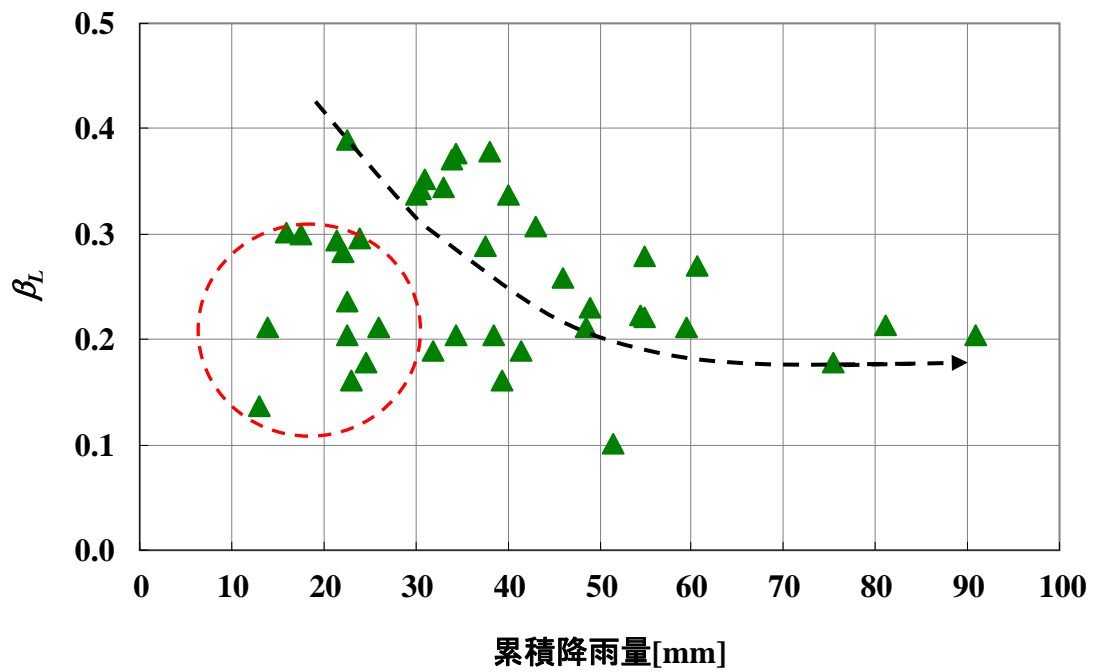
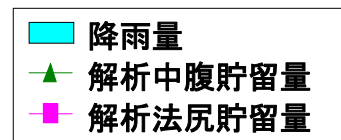
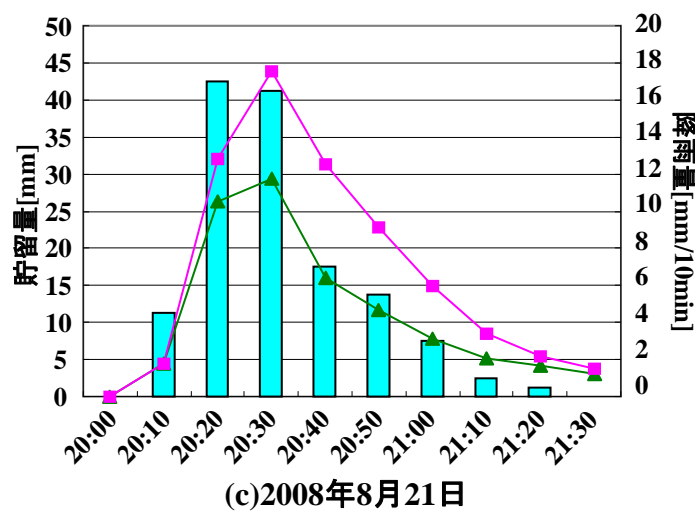
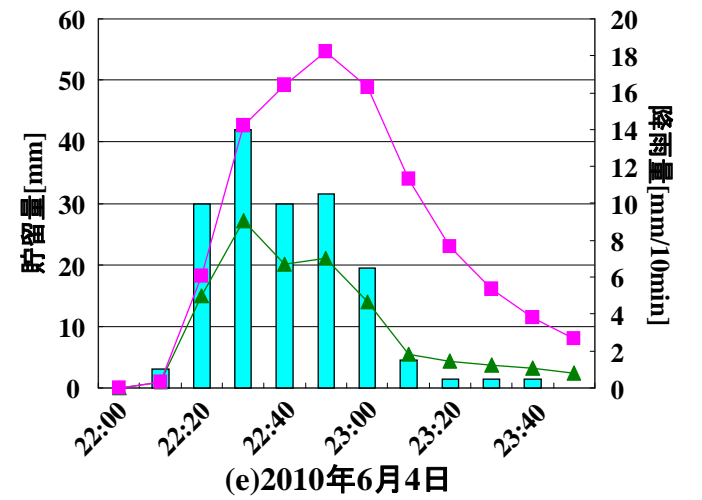
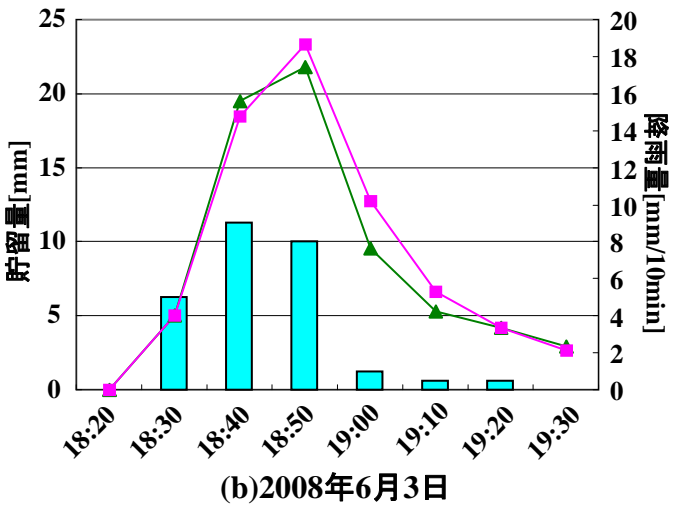
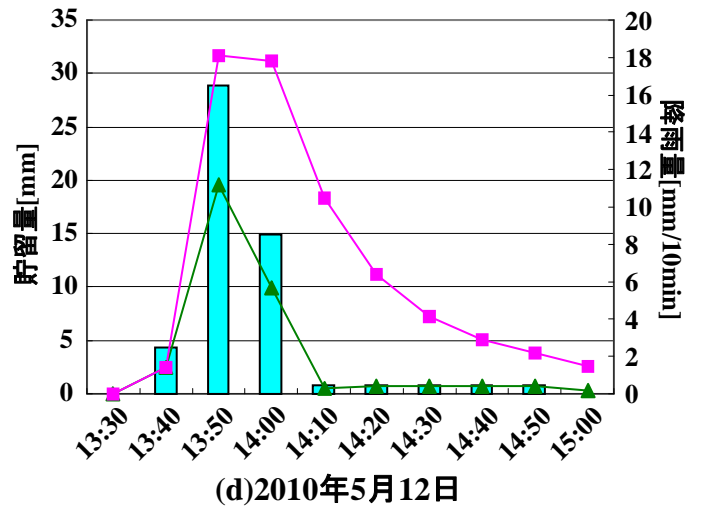
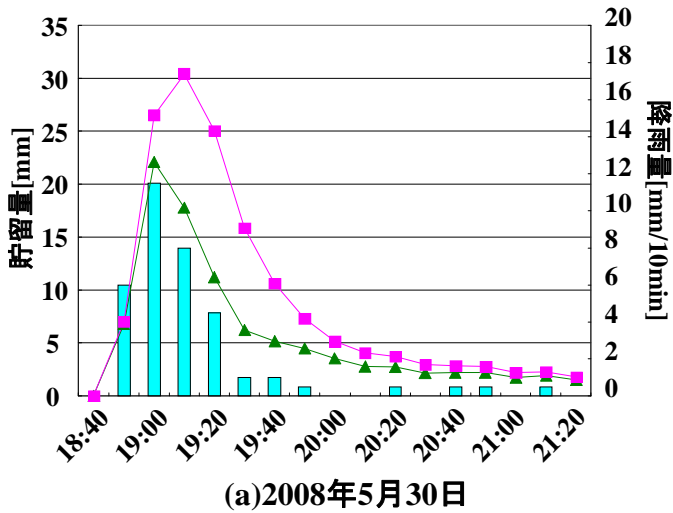
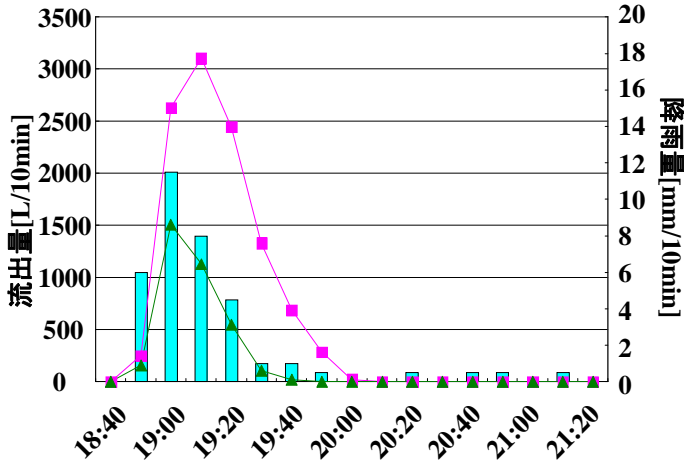


図3.12  $\beta_L$ の傾向

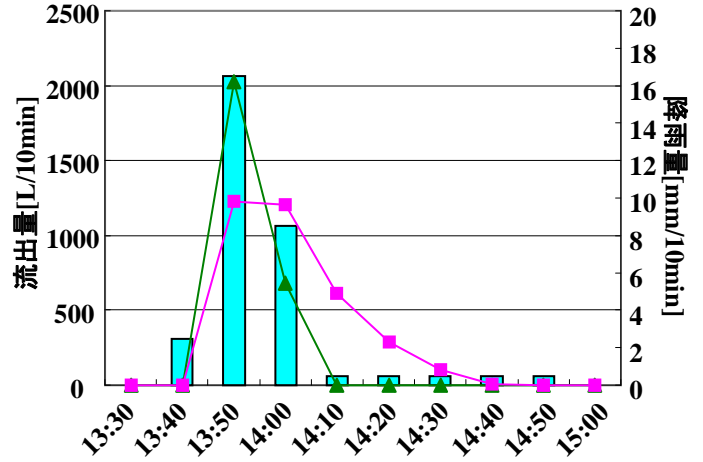


| Label     | 累積降雨量 | 最大10分間雨量   |
|-----------|-------|------------|
| Units     | [mm]  | [mm/10min] |
| 2008/5/30 | 34.5  | 11.5       |
| 2008/6/3  | 24.0  | 9.0        |
| 2008/8/21 | 55.0  | 17.0       |
| 2010/5/12 | 30.0  | 16.5       |
| 2010/6/4  | 55.0  | 14.0       |

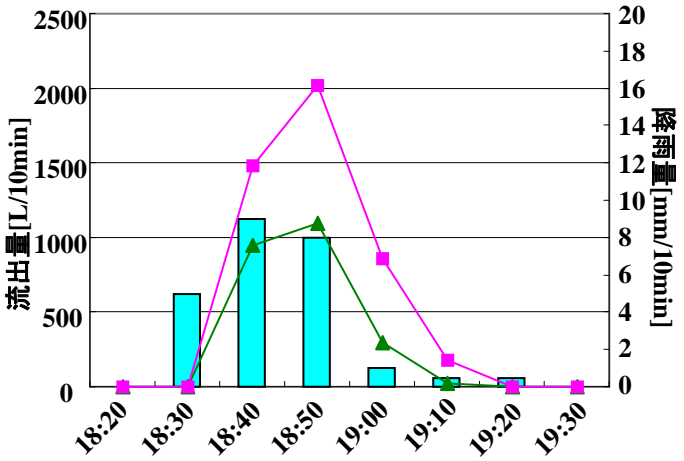
図3.13 解析貯留量



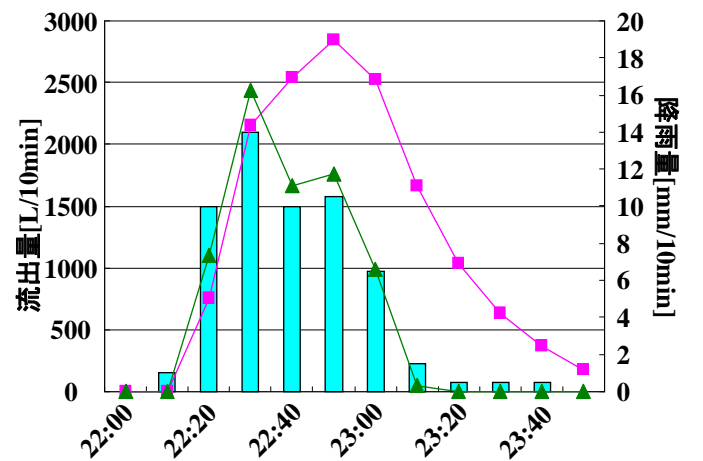
(a)2008年5月30日



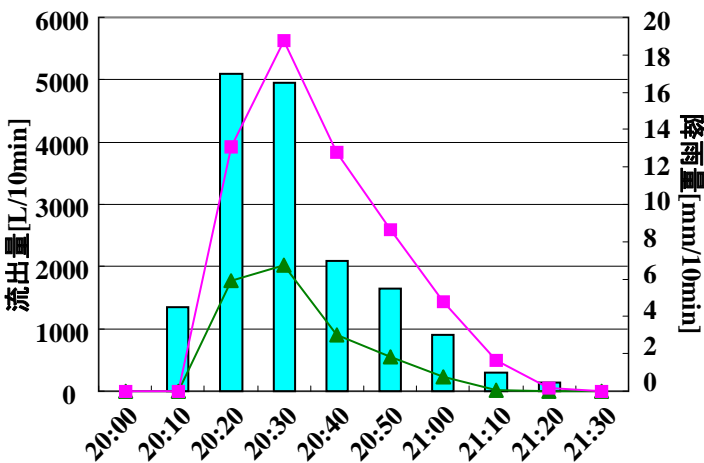
(d)2010年5月12日



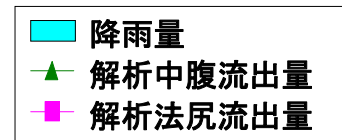
(b)2008年6月3日



(e)2010年6月4日

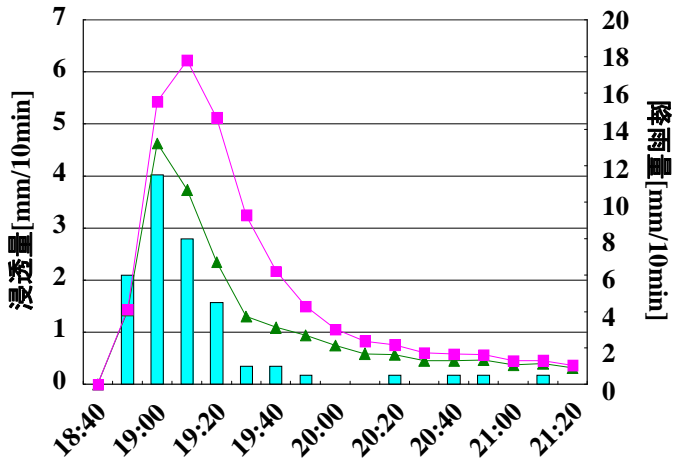


(c)2008年8月21日

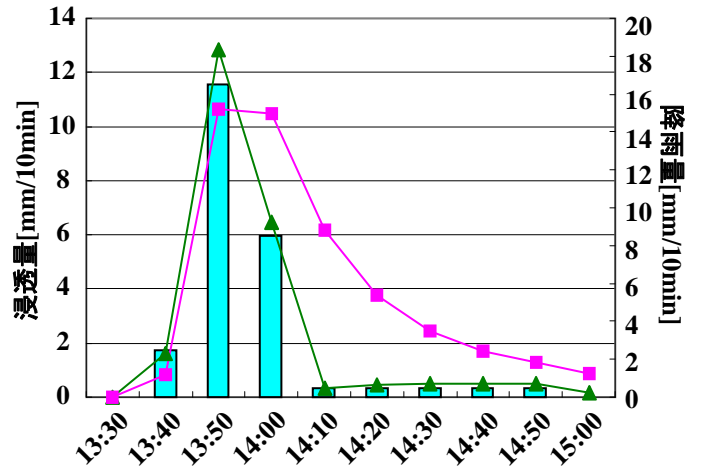


| Label     | 累積降雨量 | 最大10分間雨量   |
|-----------|-------|------------|
| Units     | [mm]  | [mm/10min] |
| 2008/5/30 | 34.5  | 11.5       |
| 2008/6/3  | 24.0  | 9.0        |
| 2008/8/21 | 55.0  | 17.0       |
| 2010/5/12 | 30.0  | 16.5       |
| 2010/6/4  | 55.0  | 14.0       |

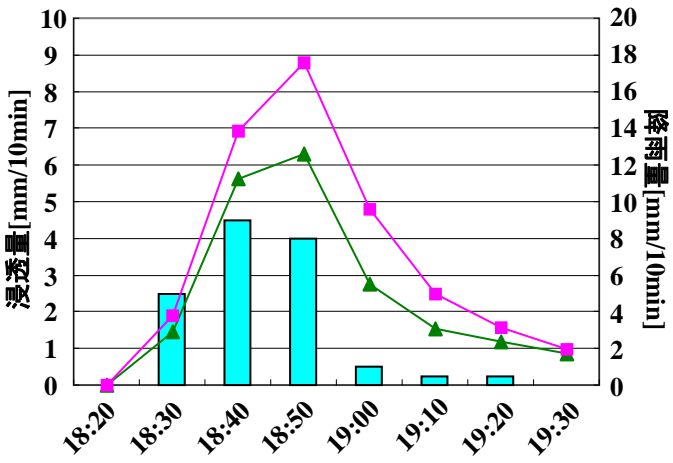
図3.14 解析流出量



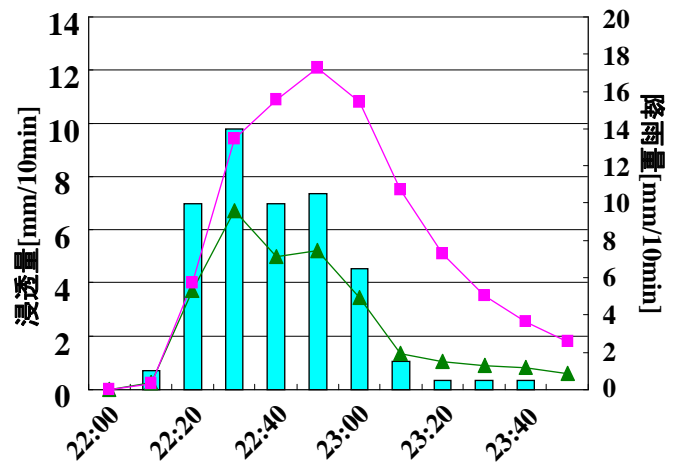
(a)2008年5月30日



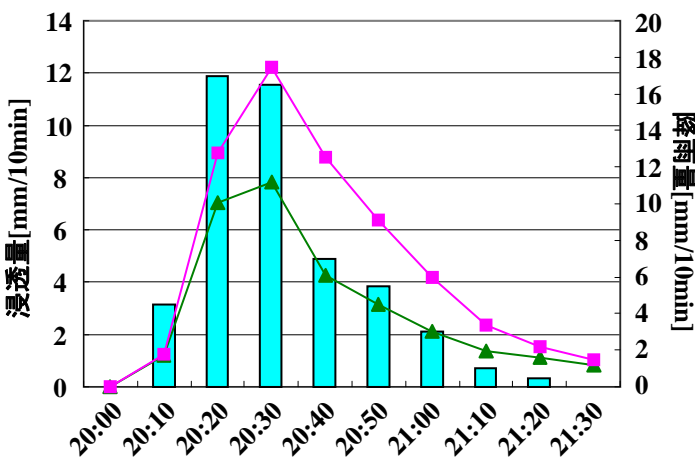
(d)2010年5月12日



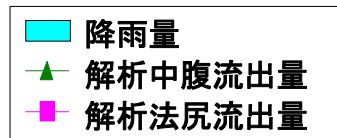
(b)2008年6月3日



(e)2010年6月4日



(c)2008年8月21日



| Label     | 累積降雨量 | 最大10分間雨量   |
|-----------|-------|------------|
| Units     | [mm]  | [mm/10min] |
| 2008/5/30 | 34.5  | 11.5       |
| 2008/6/3  | 24.0  | 9.0        |
| 2008/8/21 | 55.0  | 17.0       |
| 2010/5/12 | 30.0  | 16.5       |
| 2010/6/4  | 55.0  | 14.0       |

図3.15 解析浸透量

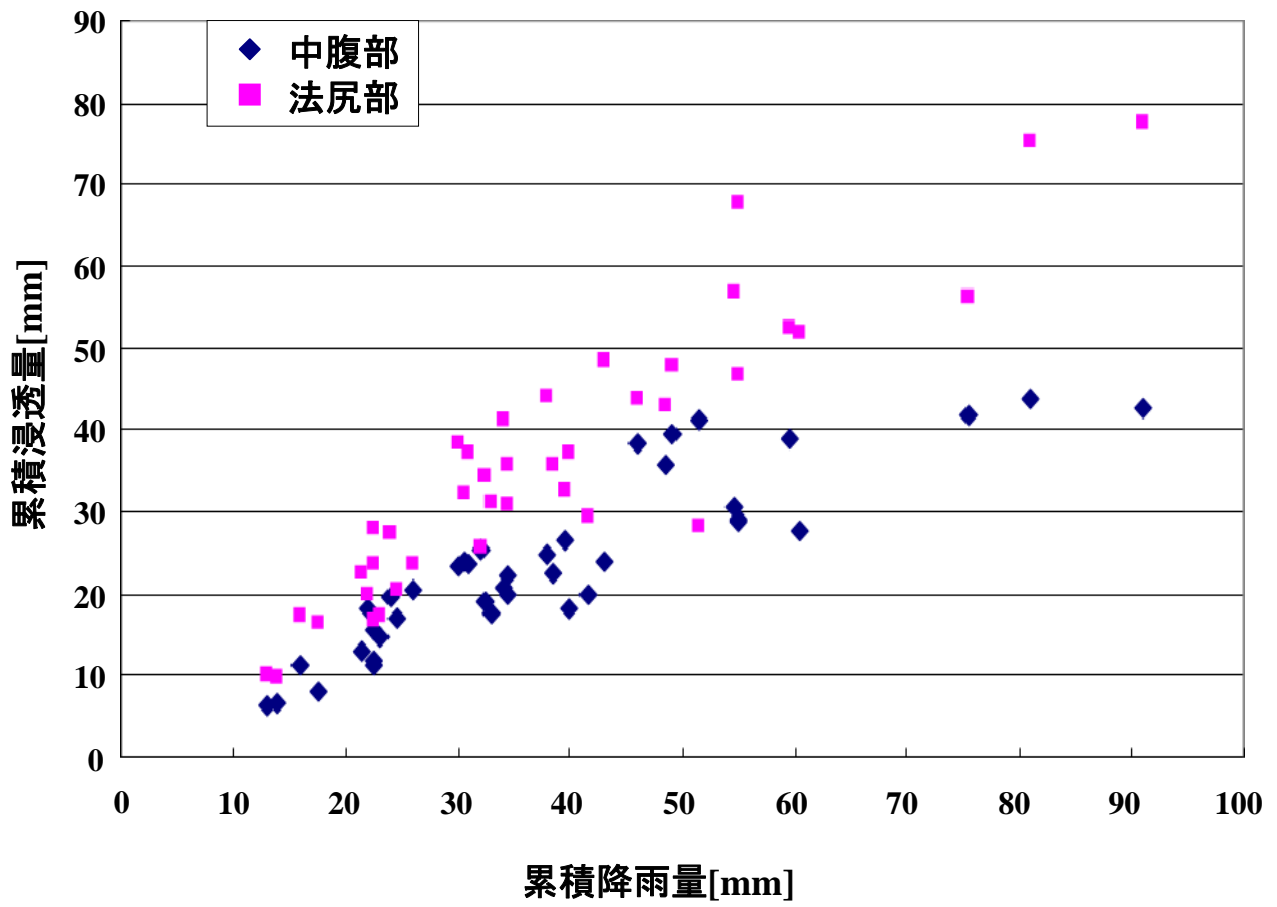
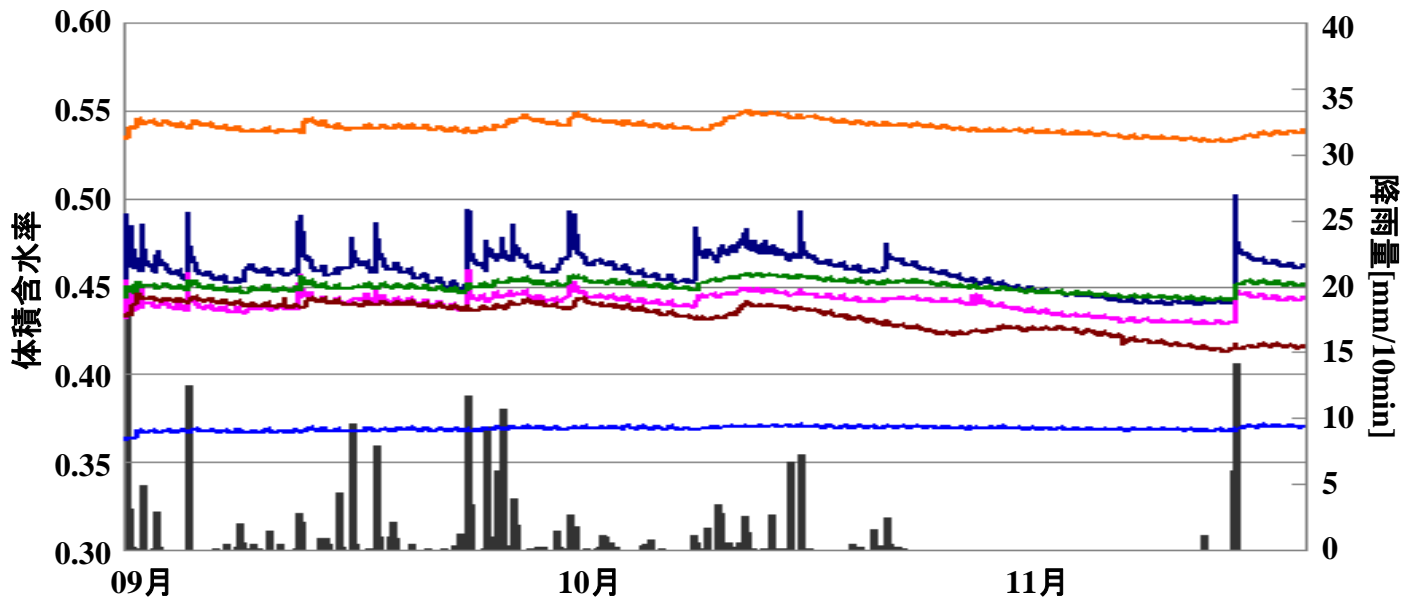
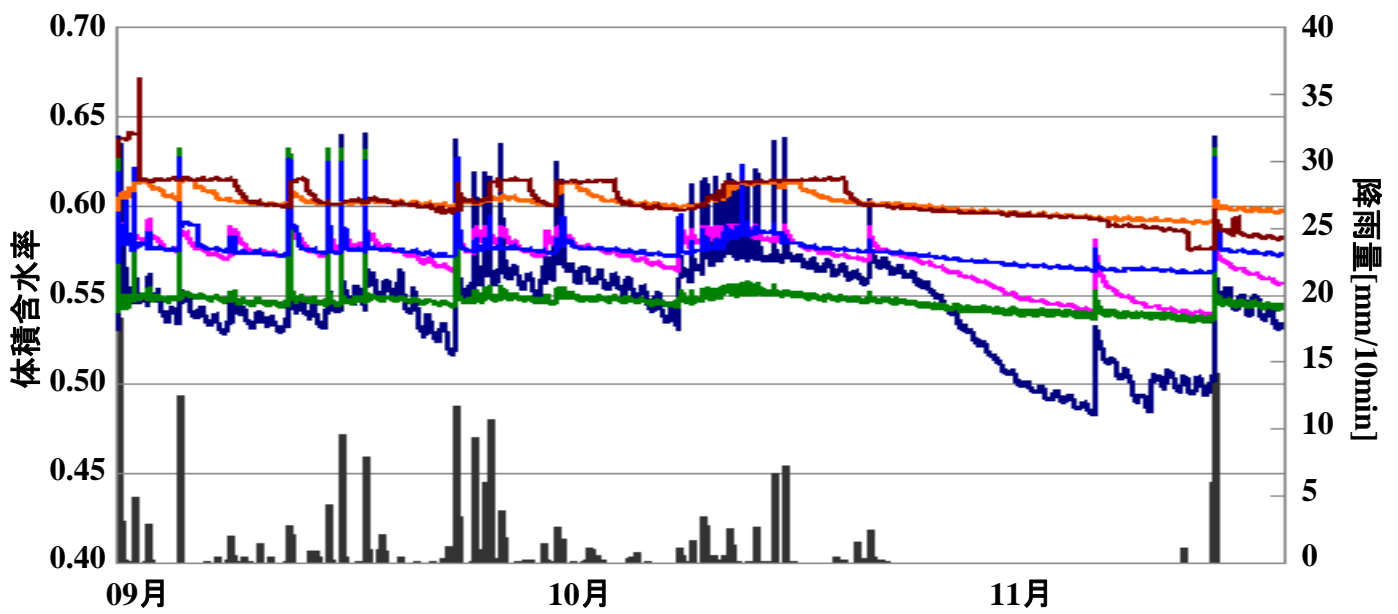


図3.16 累積降雨量と累積浸透量の関係



(a) 中腹部



(b) 法尻部

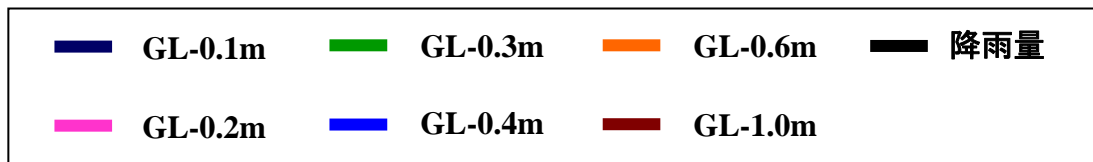
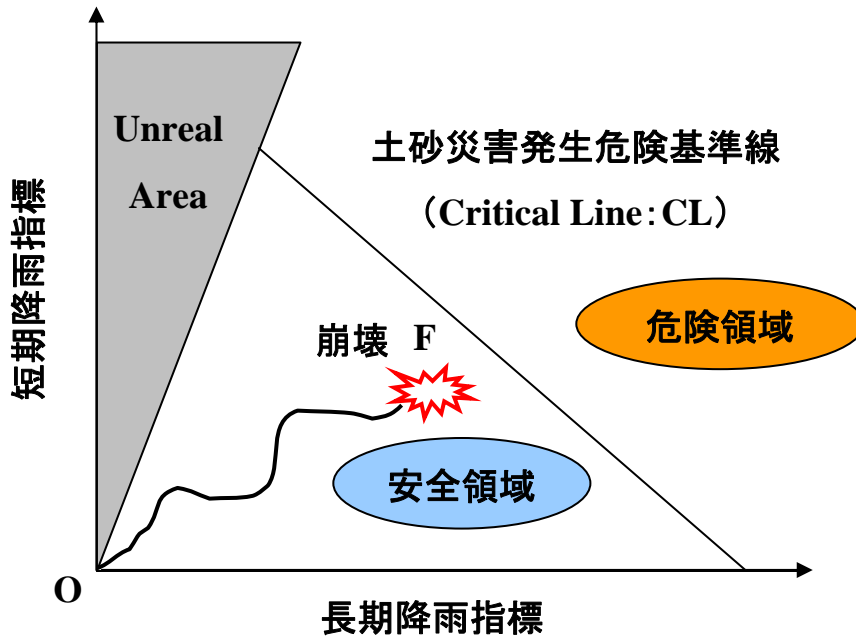
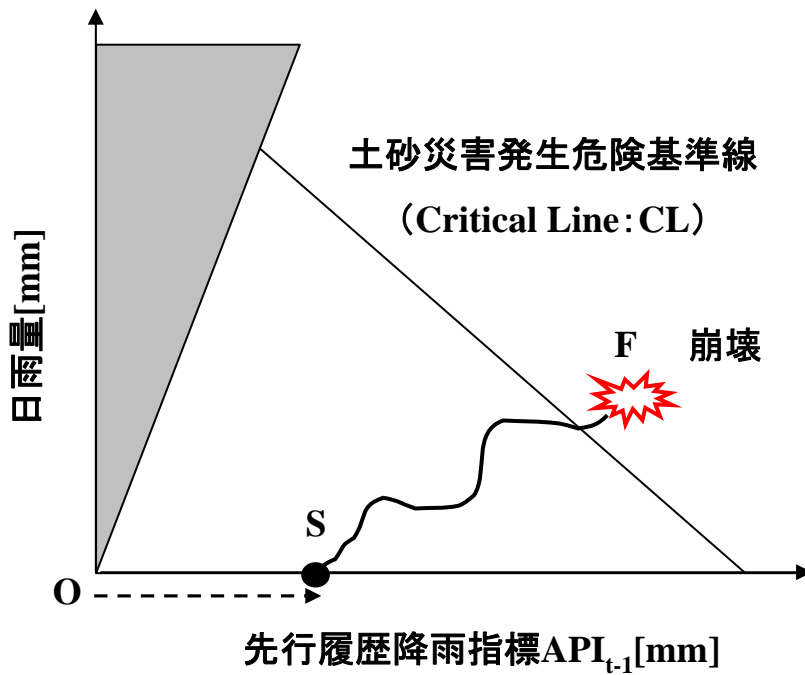


図3.17 体積含水率の変動(2010年9月~11月)



(a) 限界降雨包絡線を用いた早期警戒体制



(b) APIを用いた早期警戒体制

図4.1 早期警戒体制の比較



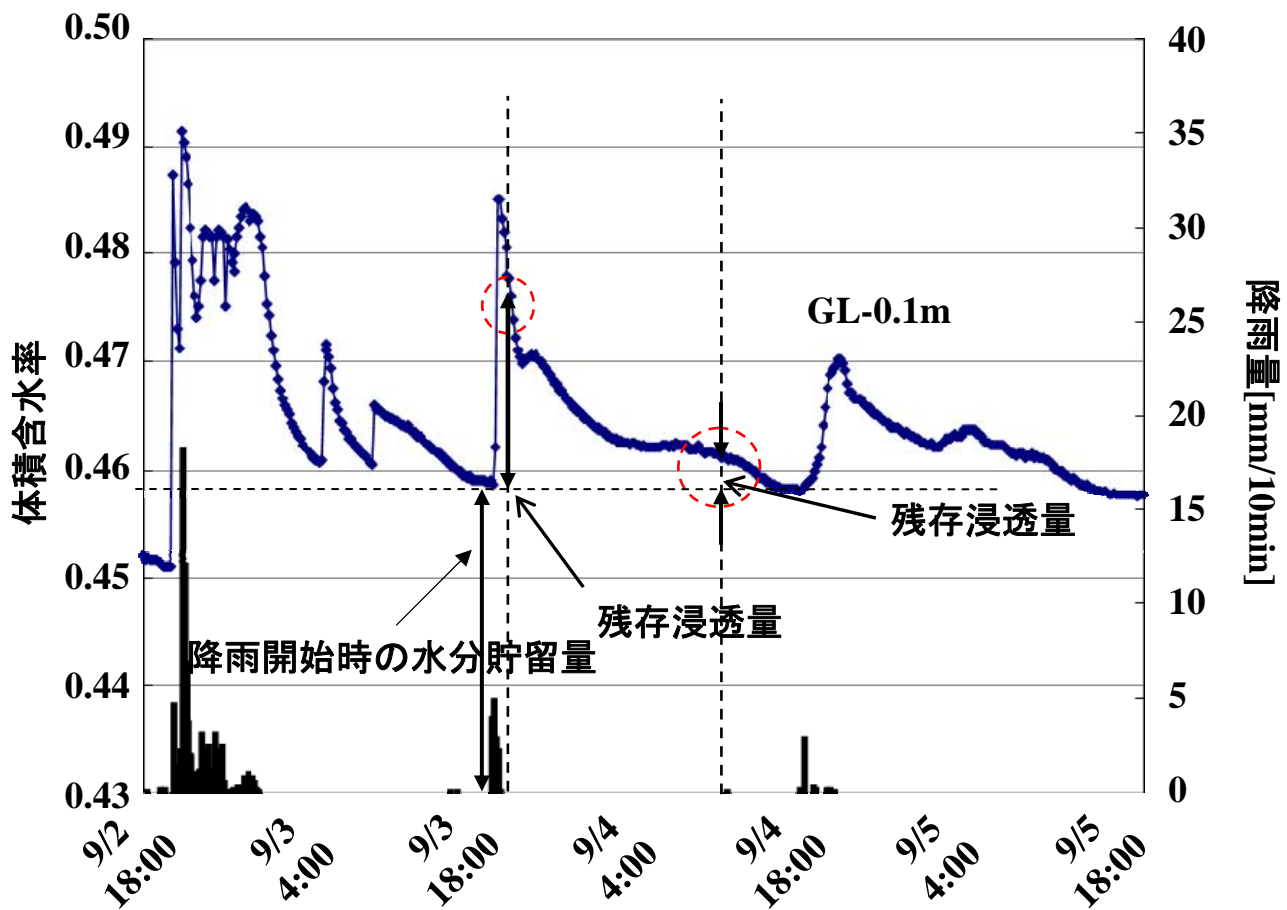
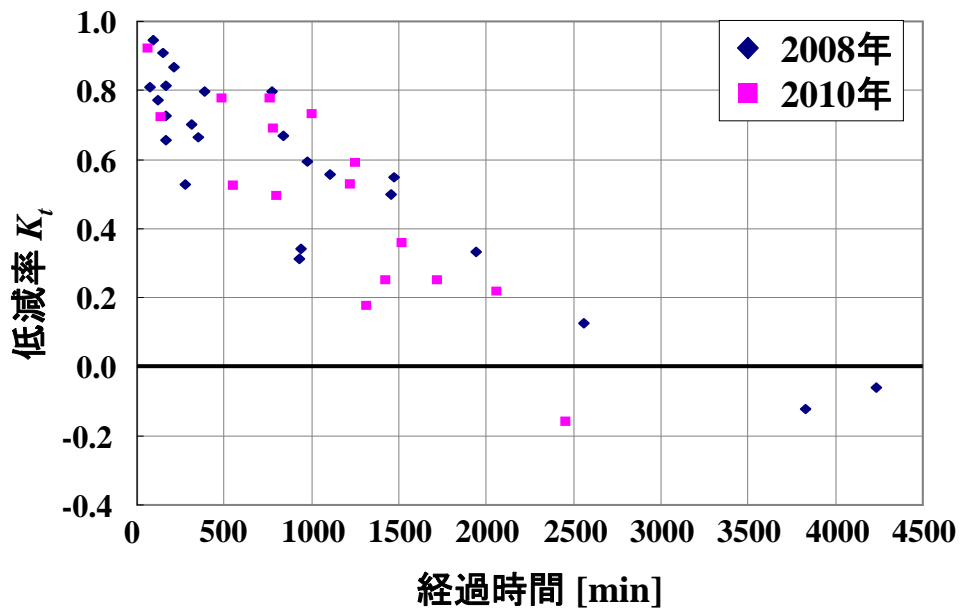
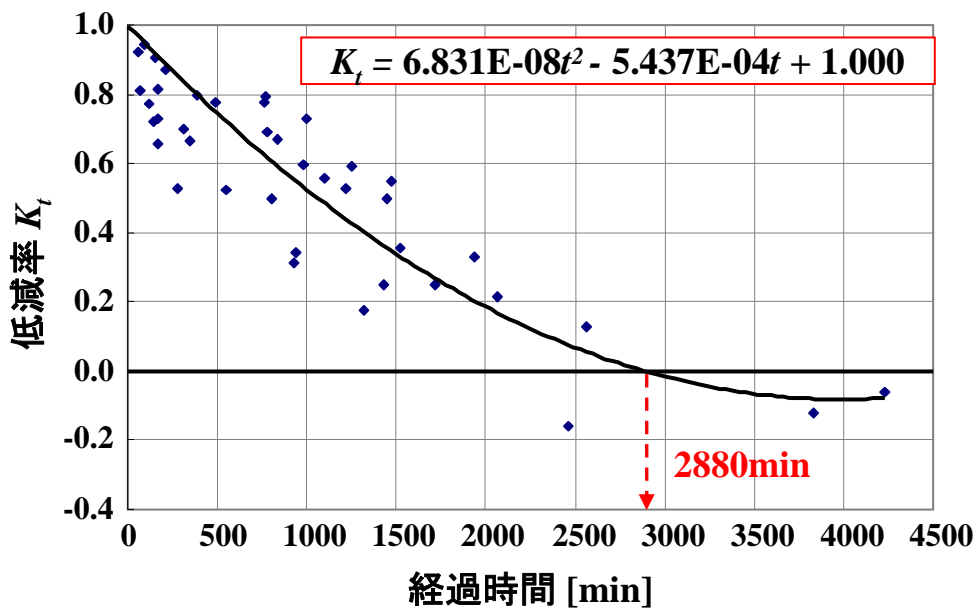


図4.2 先行降雨模式図



(a) 低減率 $K_t$ と経過時間の関係



(b) 低減率 $K_t$ の算出式

図4.3 低減率 $K_t$ の概要

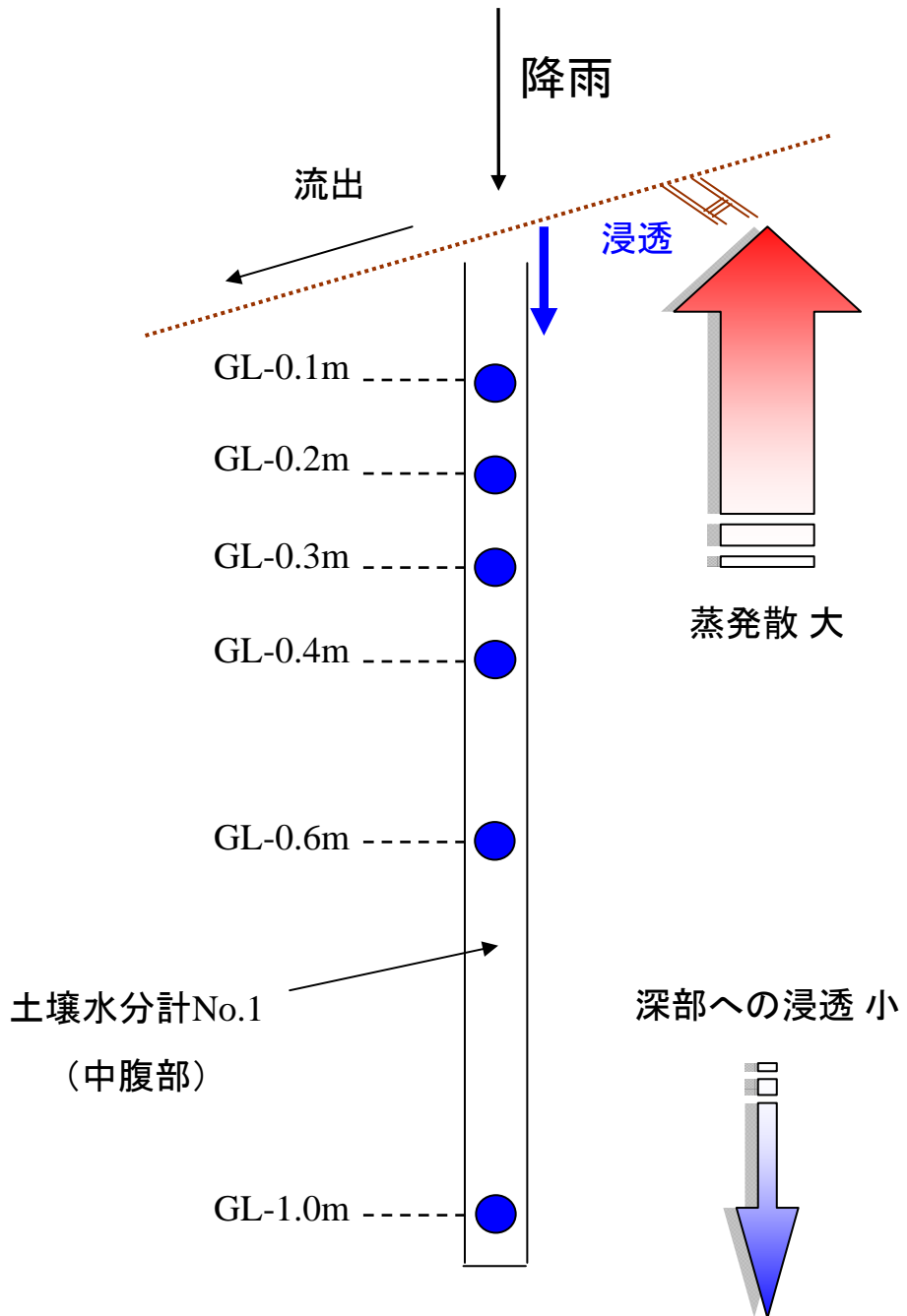
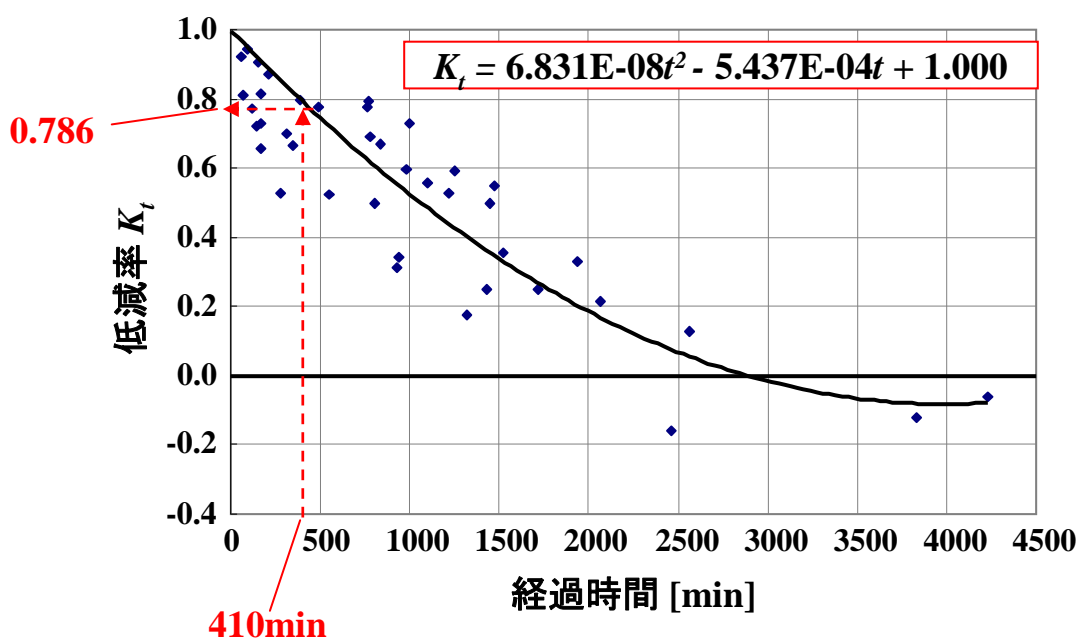
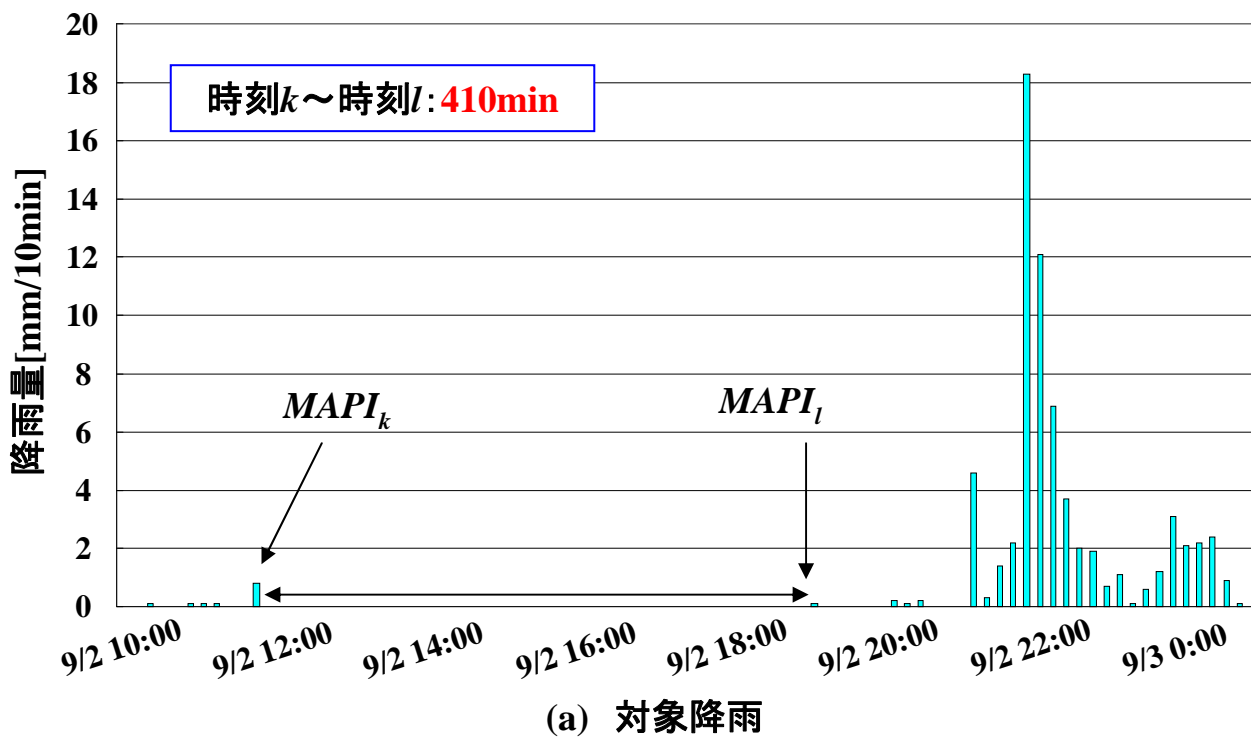


図4.4 タイ・ナコンナヨックの地盤内水分挙動模式図



(b) 低減率 $K_t$ の算出

図4.5 低減率 $K_t$ の算定の流れ

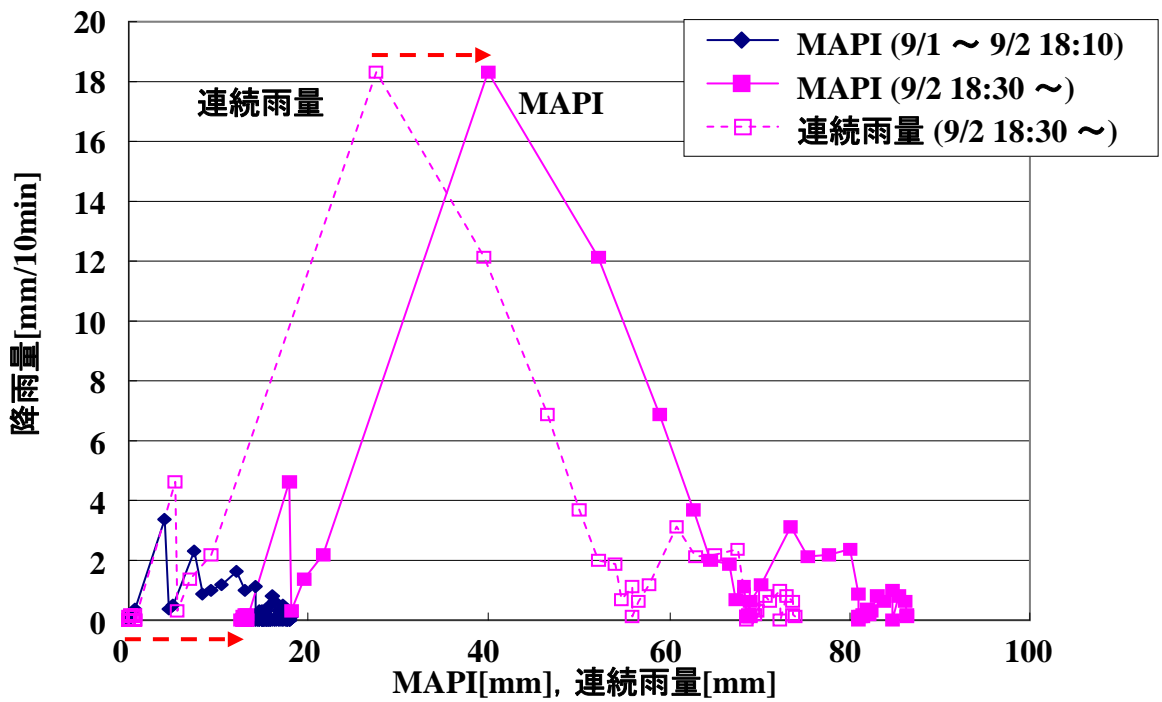
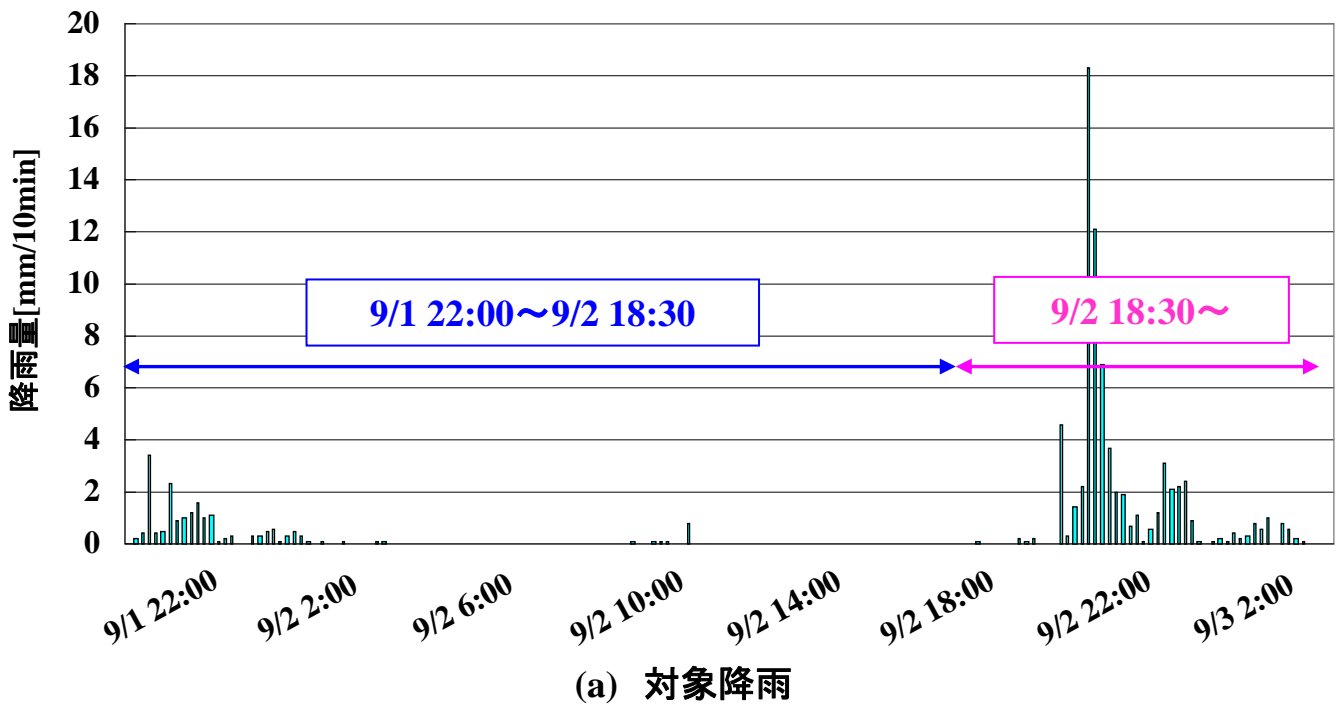
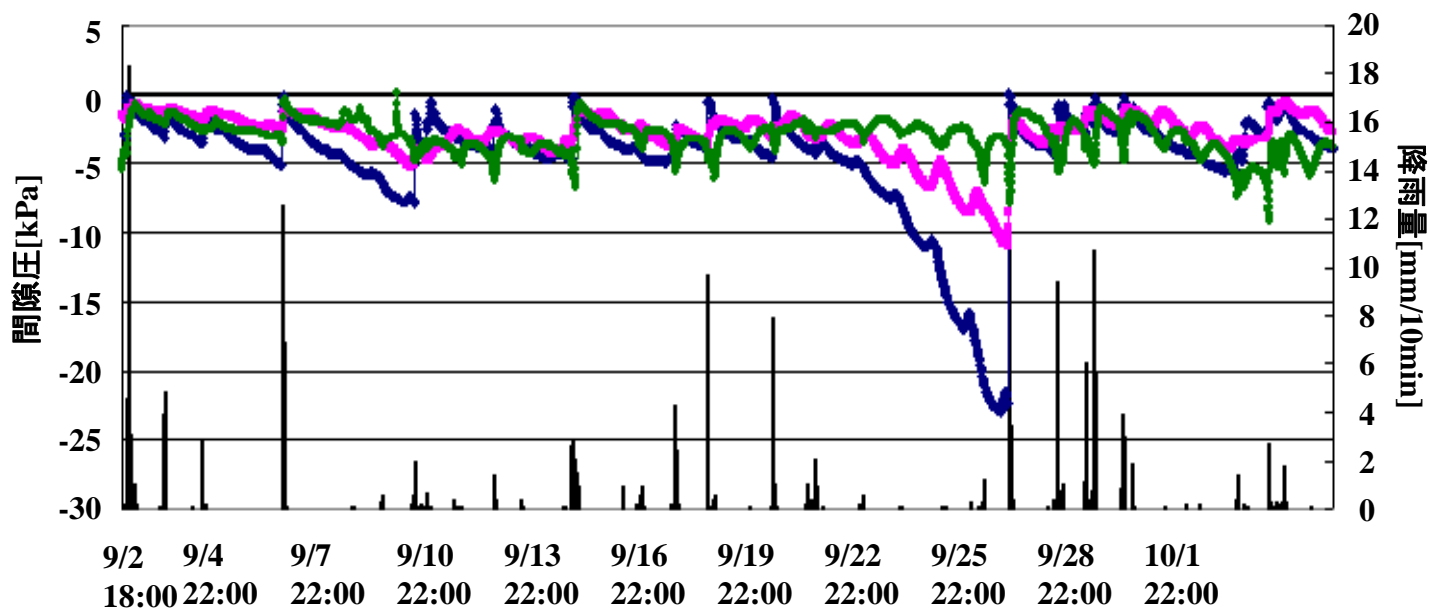
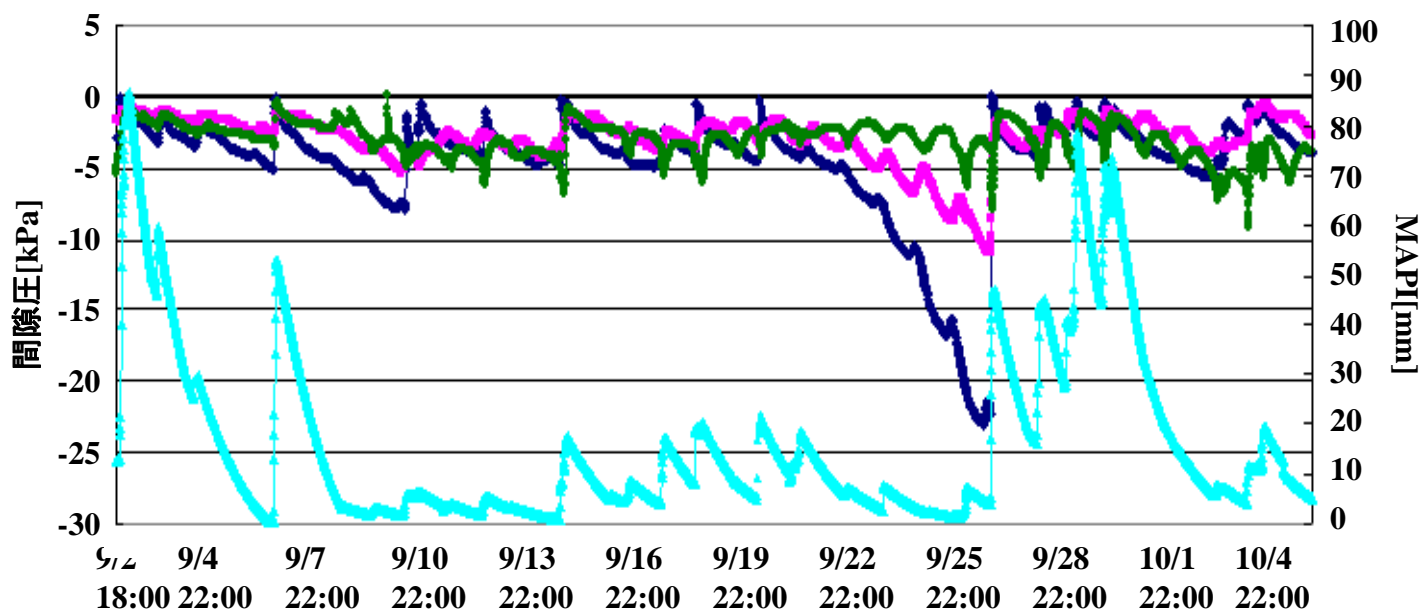
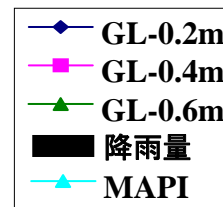


図4.6 MAPIの算定

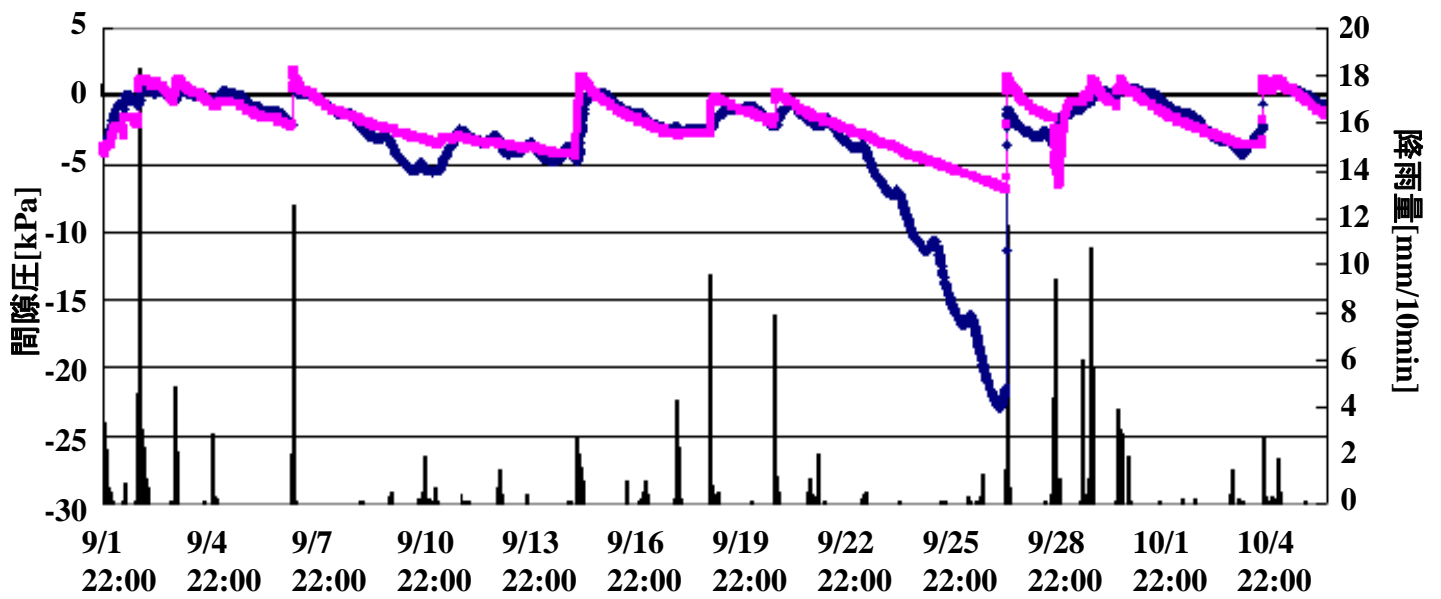


(a) 間隙圧と10分間雨量の変動

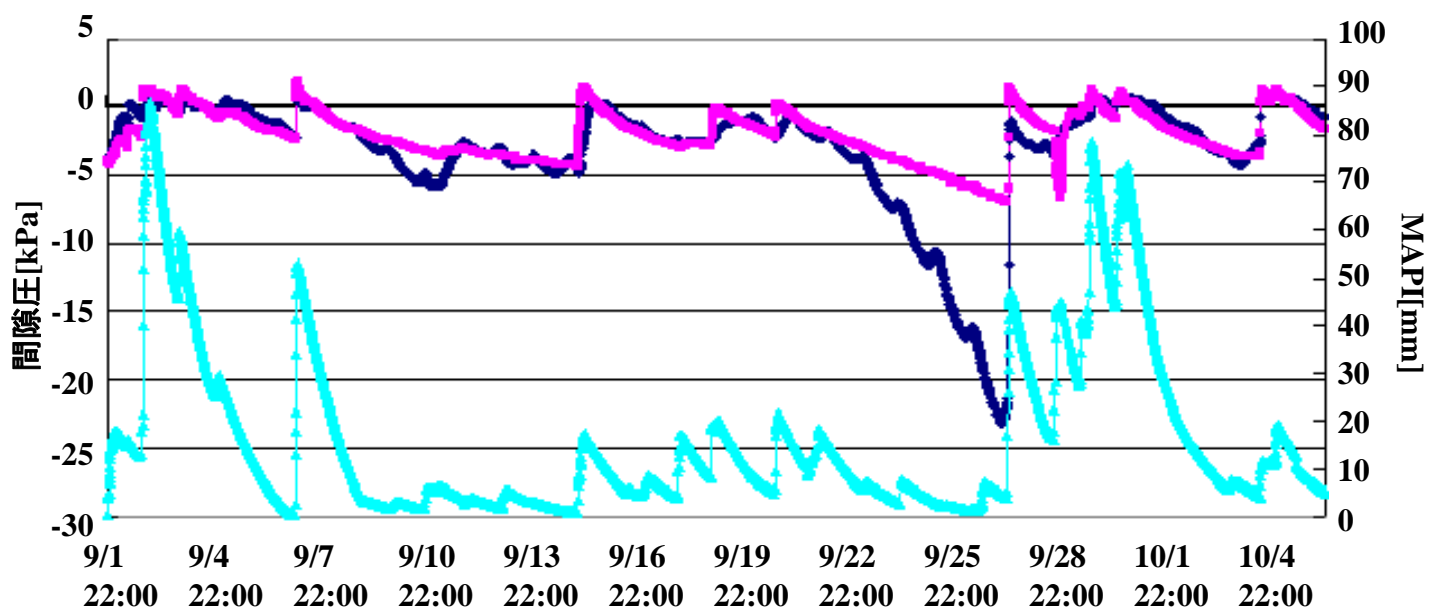
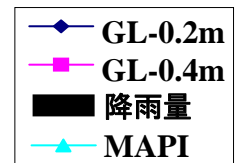


(b) 間隙圧の変動とMAPIの推移

図4.7 中腹部における間隙圧の変動



(a) 間隙圧と10分間雨量の変動



(b) 間隙圧の変動とMAPIの推移

図4.8 法尻部における間隙圧の変動

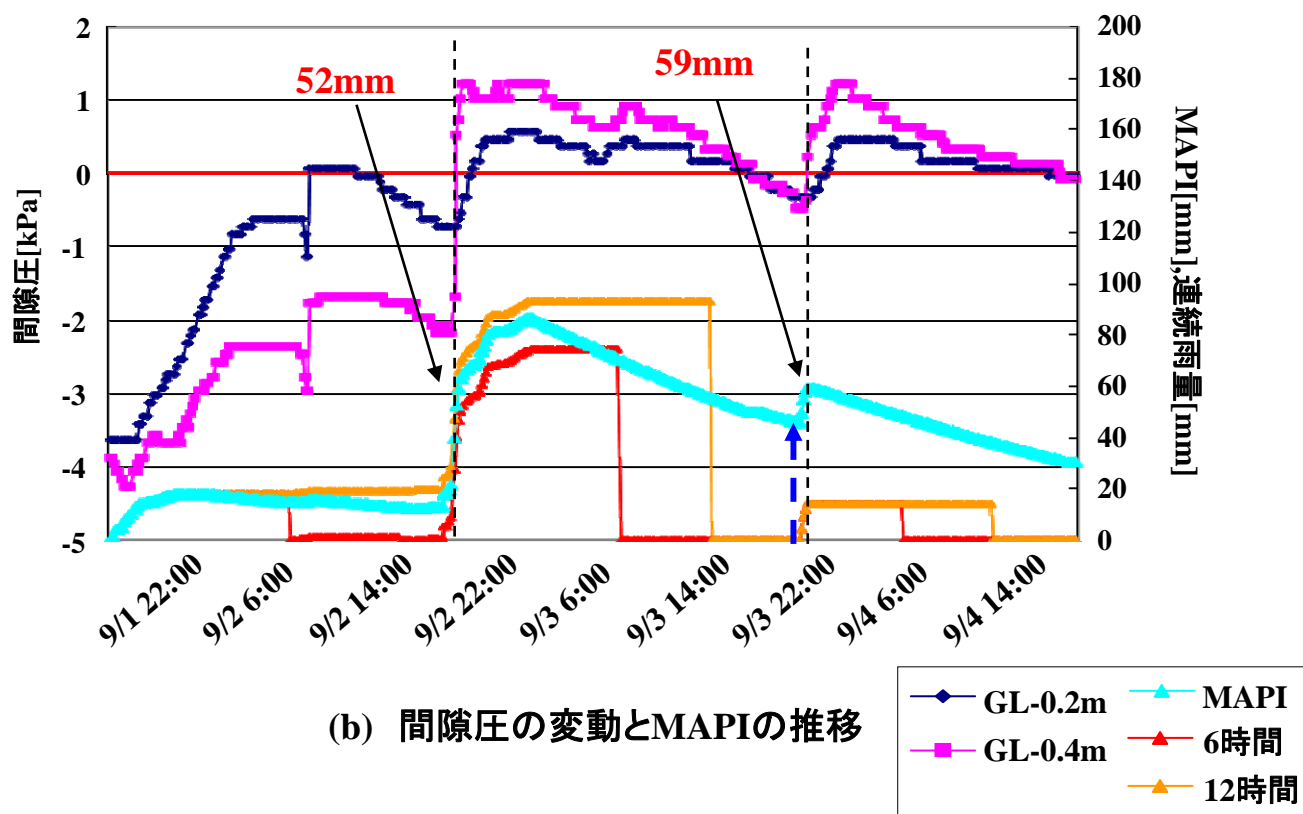
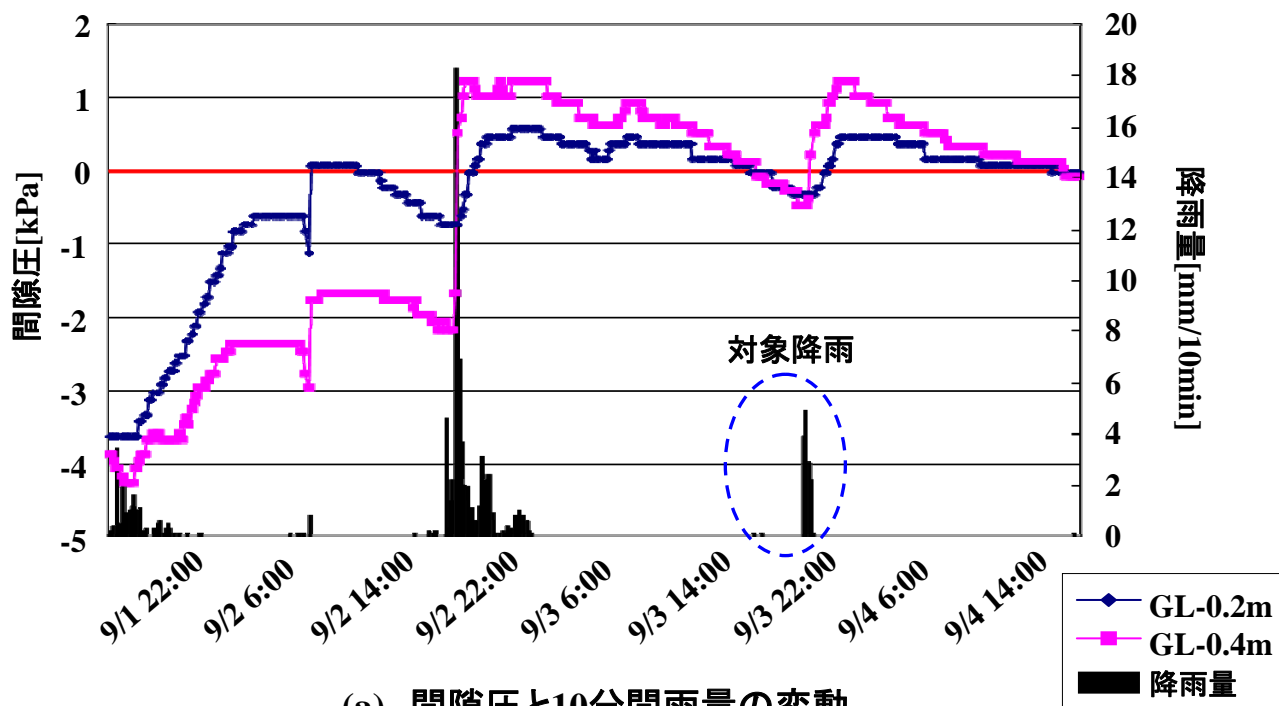


図4.9 法尻部における間隙圧の変動(9/1 22:00~9/4 15:00)



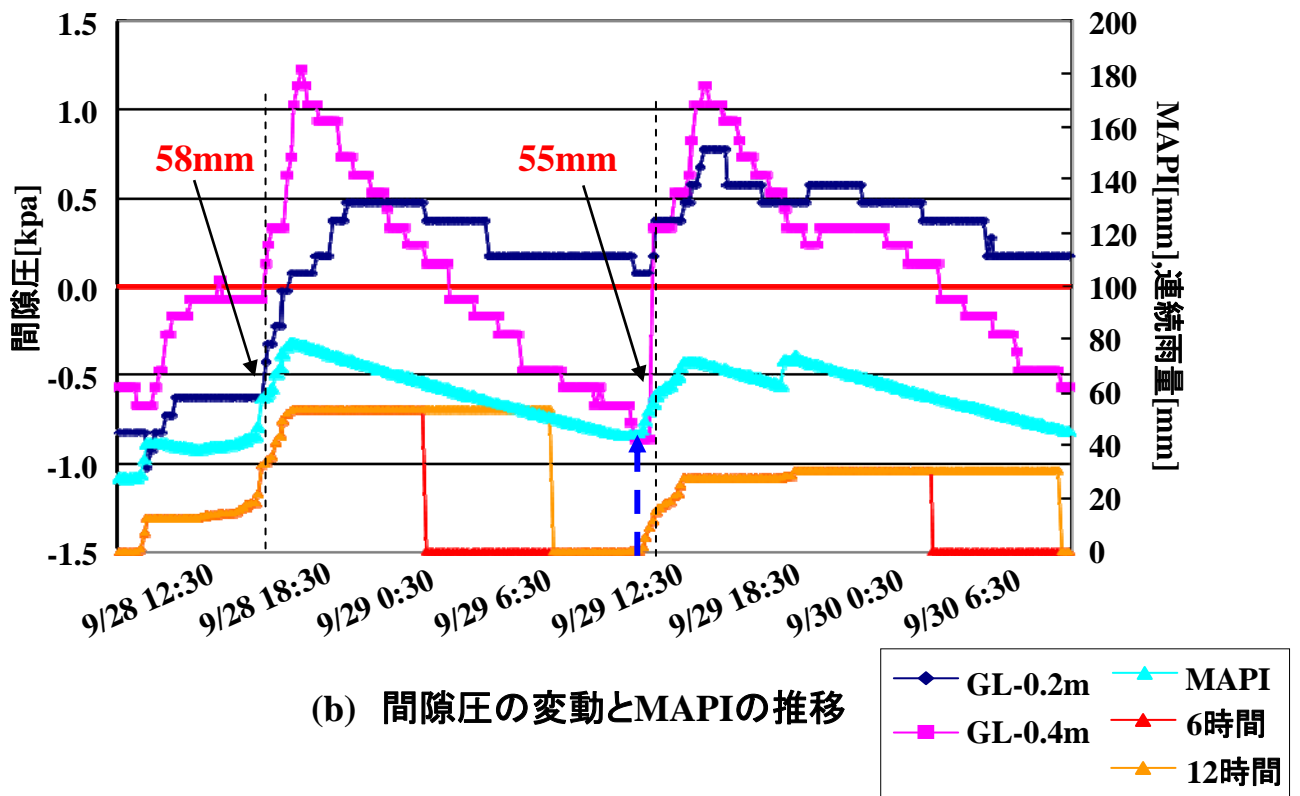
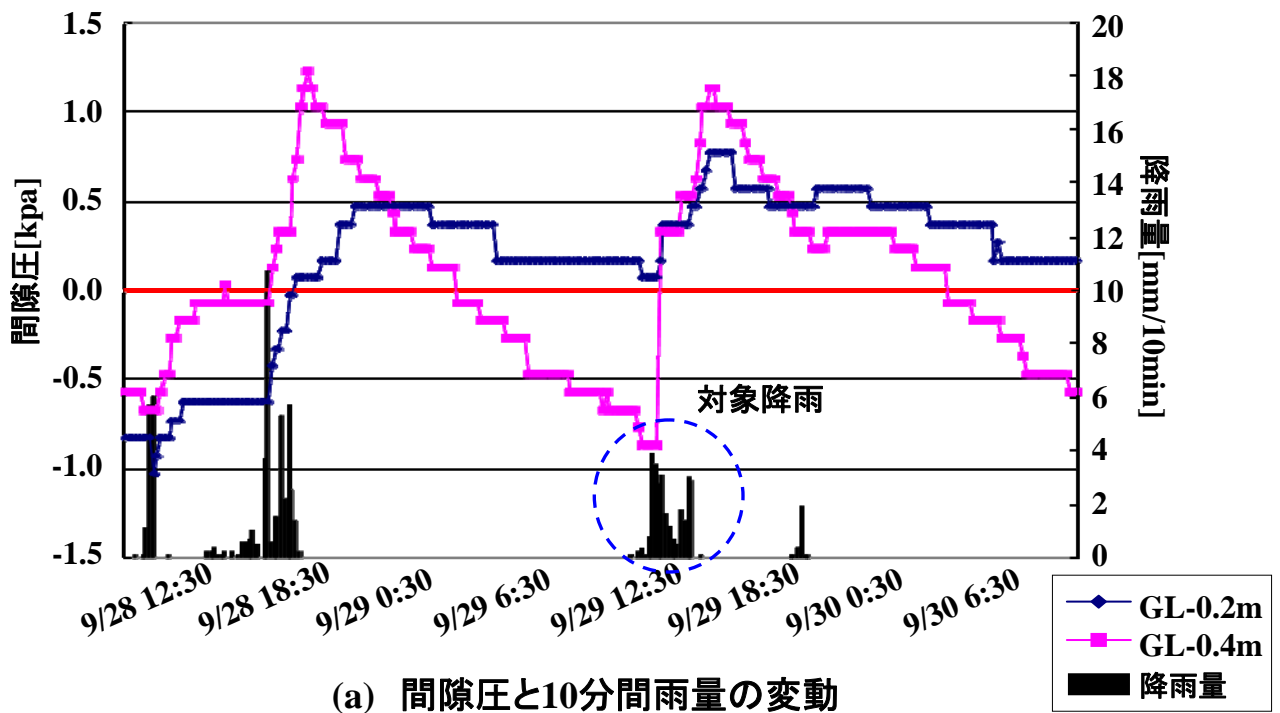
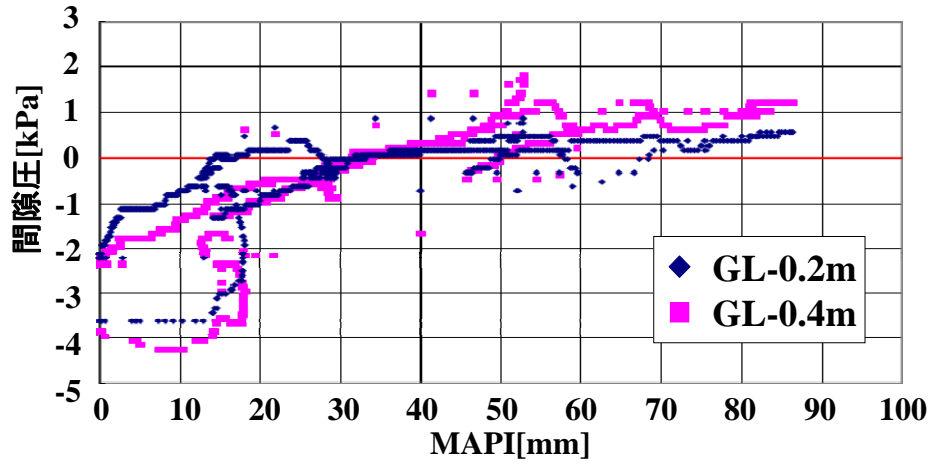
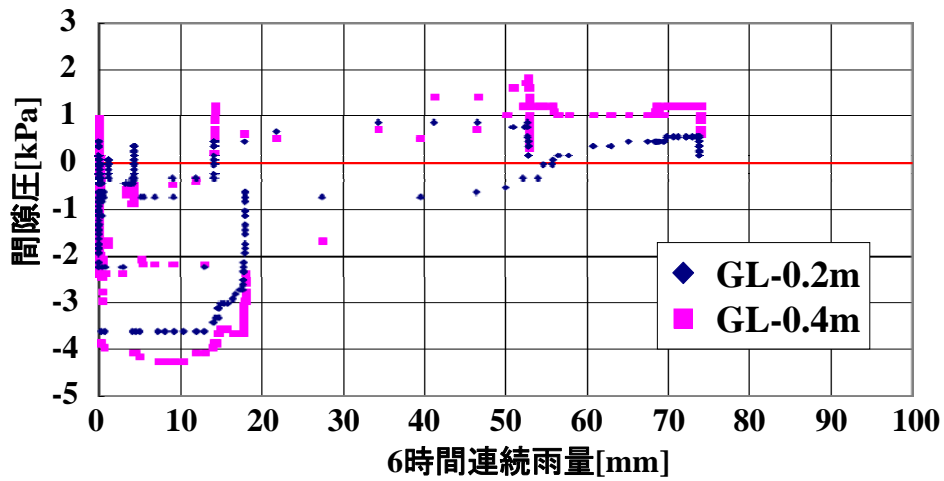


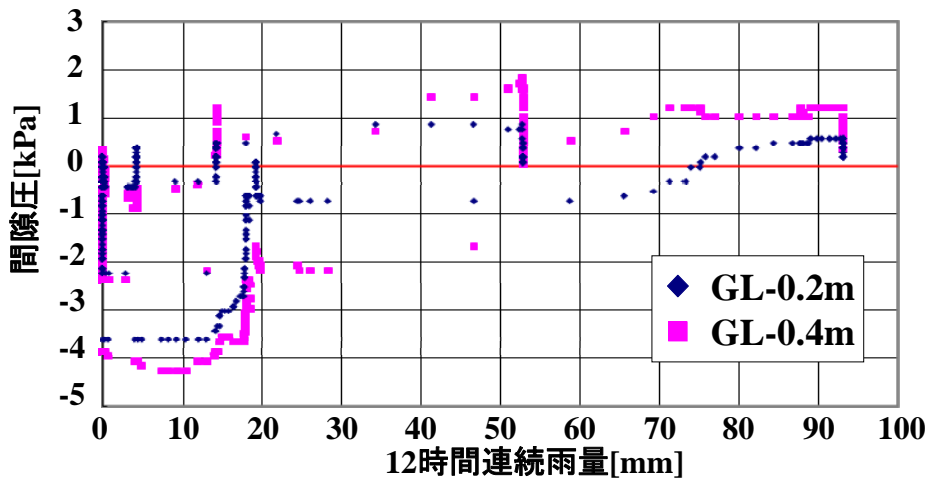
図4.10 法尻部における間隙圧の変動(9/28 12:30~9/30 9:00)



(a) MAPIと間隙圧との相関



(b) 6時間連続雨量と間隙圧との相関



(c) 12時間連続雨量と間隙圧との相関

図4.11 間隙圧との相関(9/1 22:00~9/8 7:20)

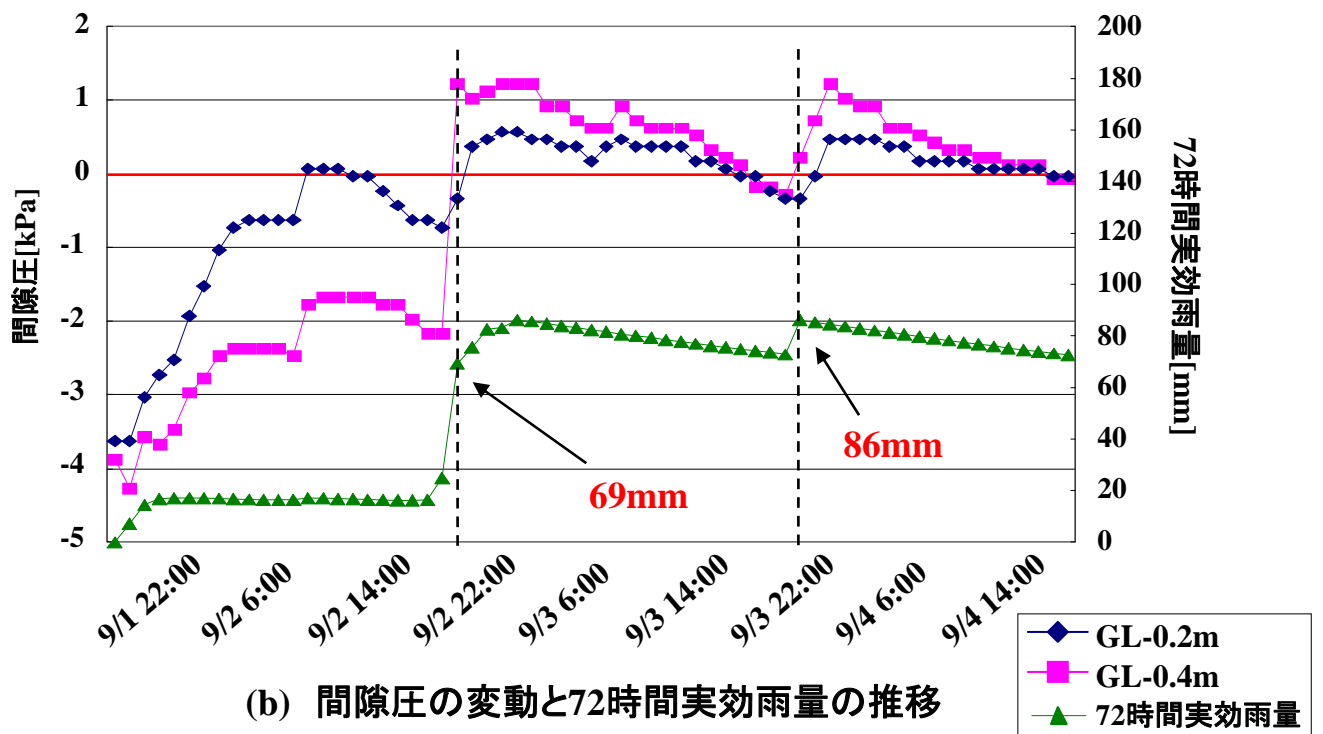
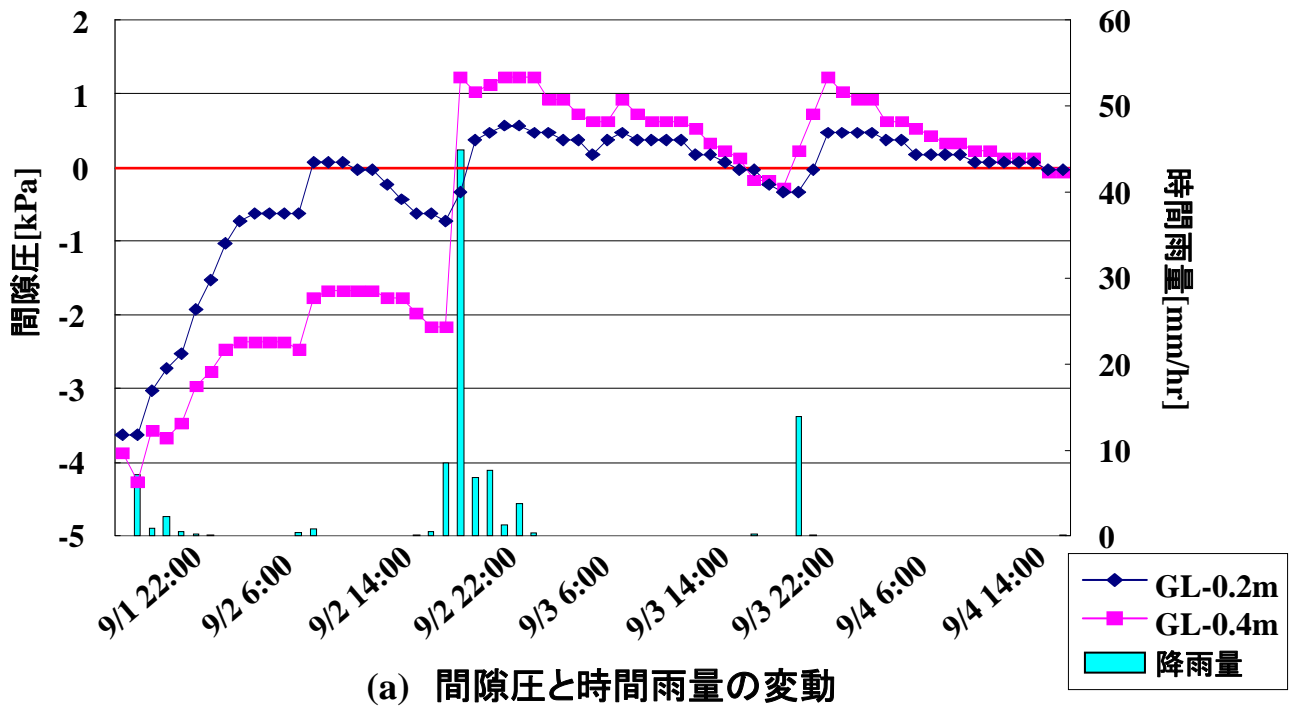


図4.12 法尻部における間隙圧の変動(9/1 22:00~9/4 15:00)

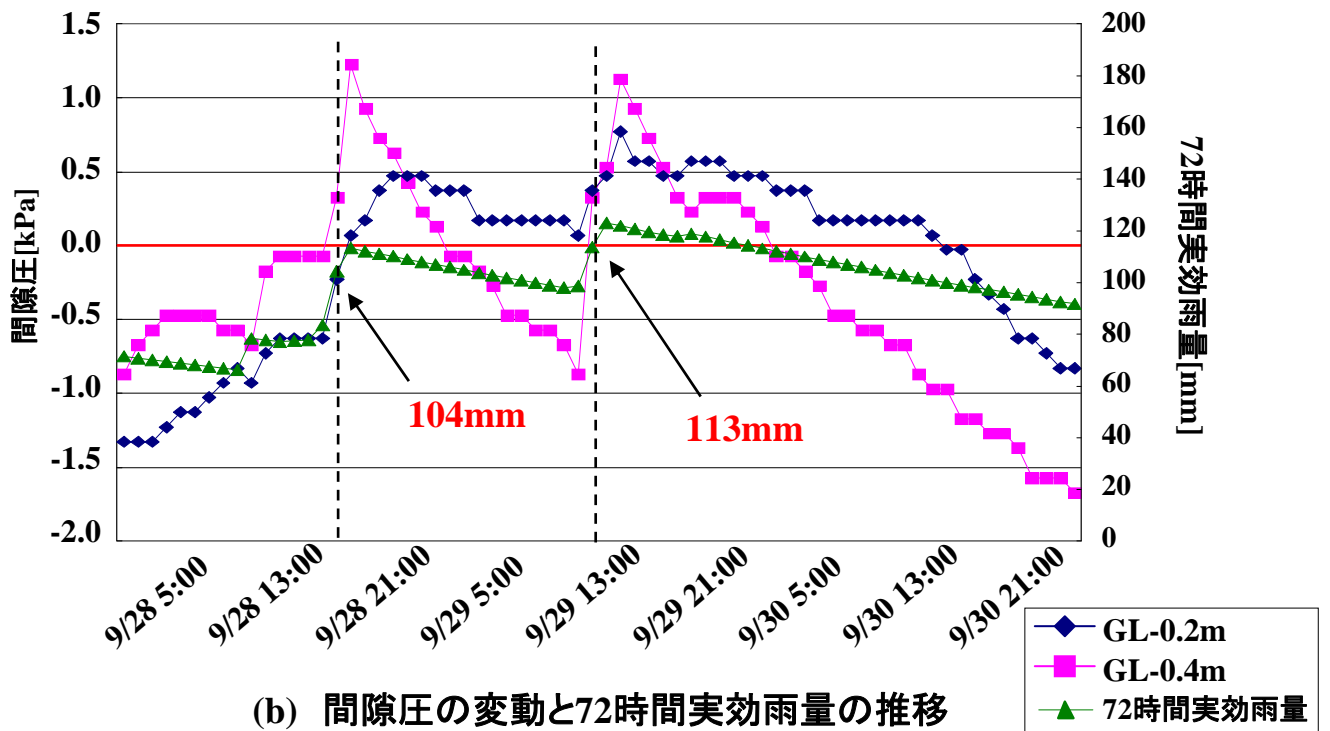
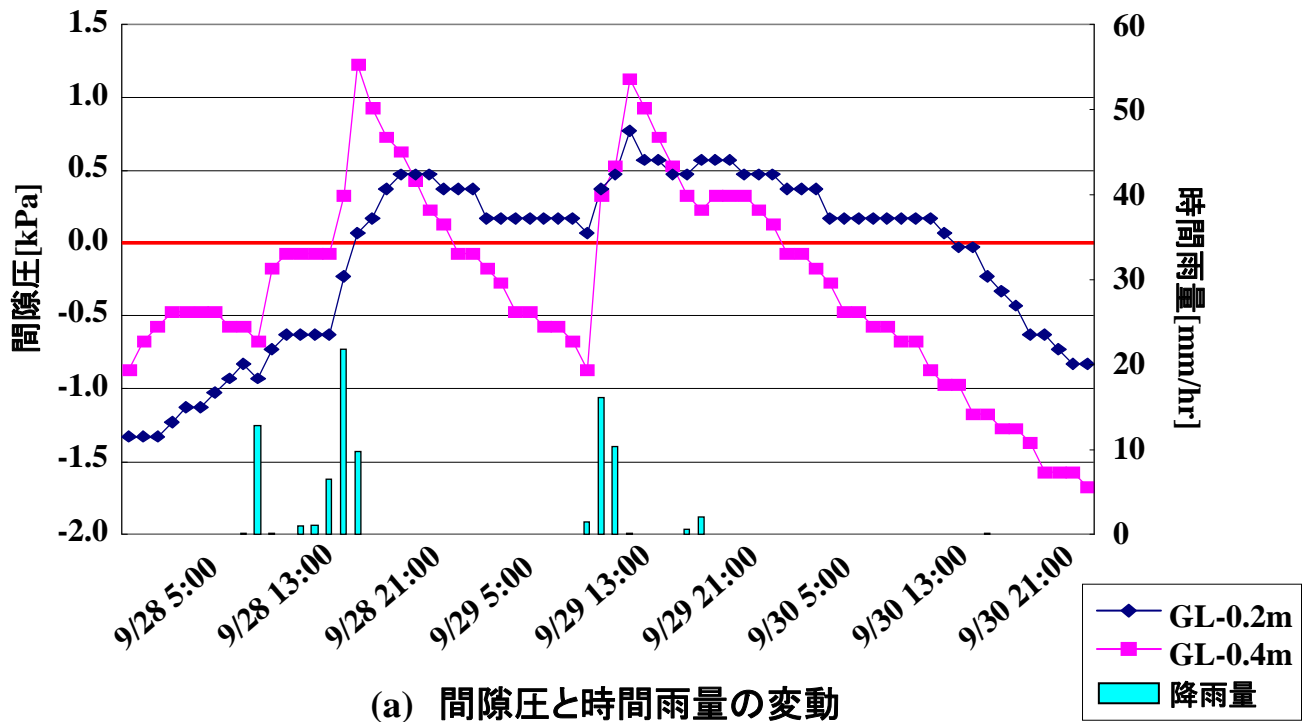
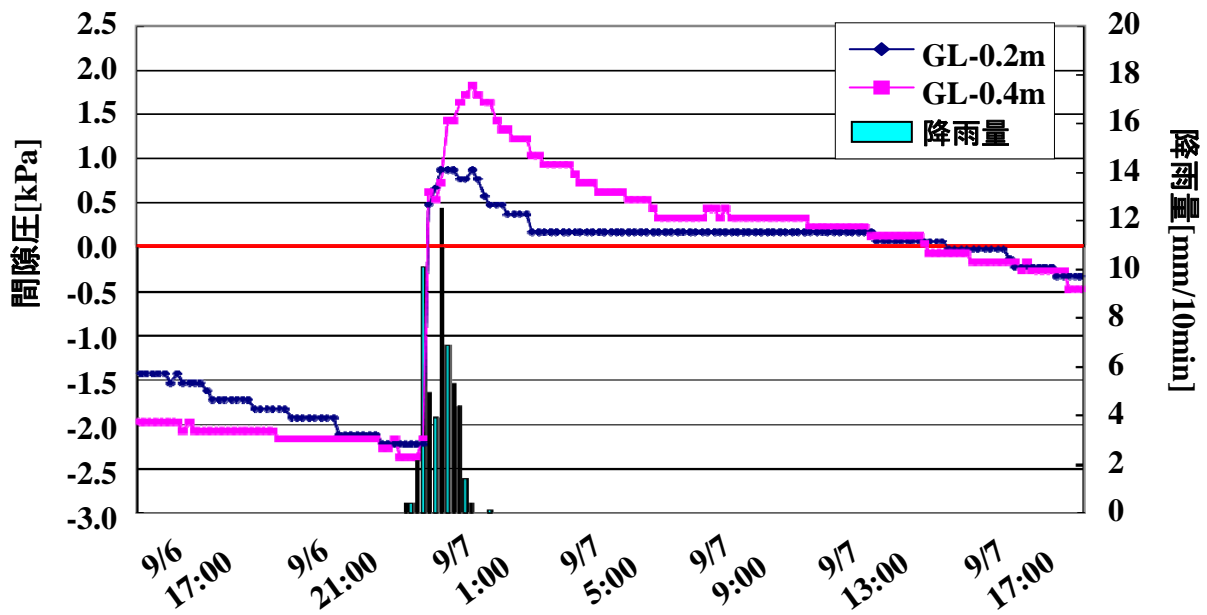
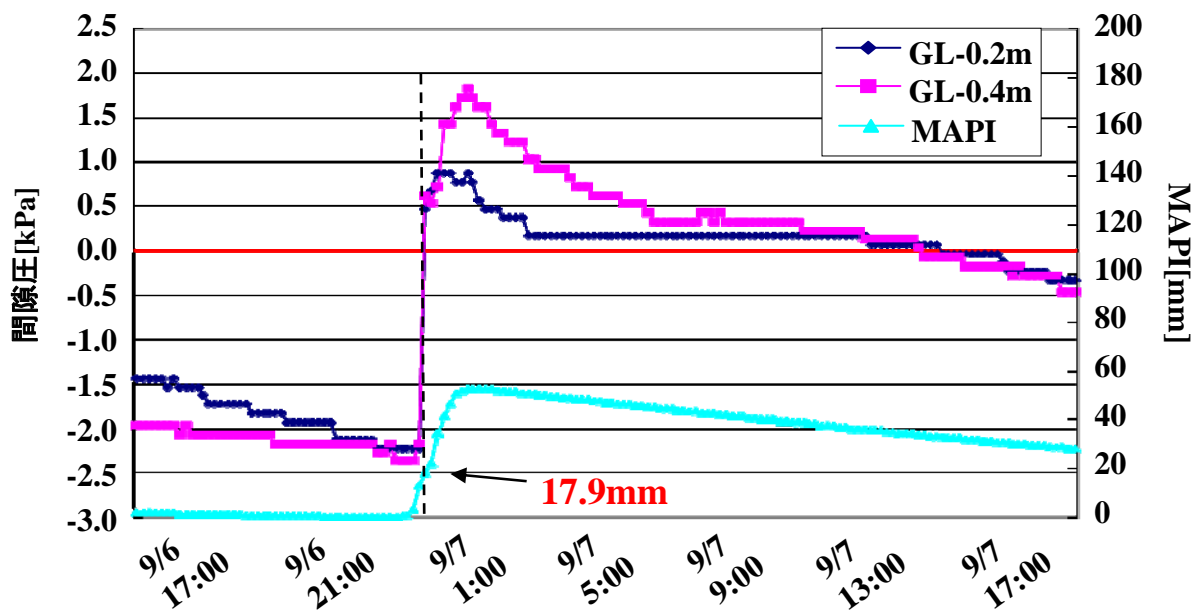


図4.13 法尻部における間隙圧の変動(9/28 5:00~10/1 0:00)

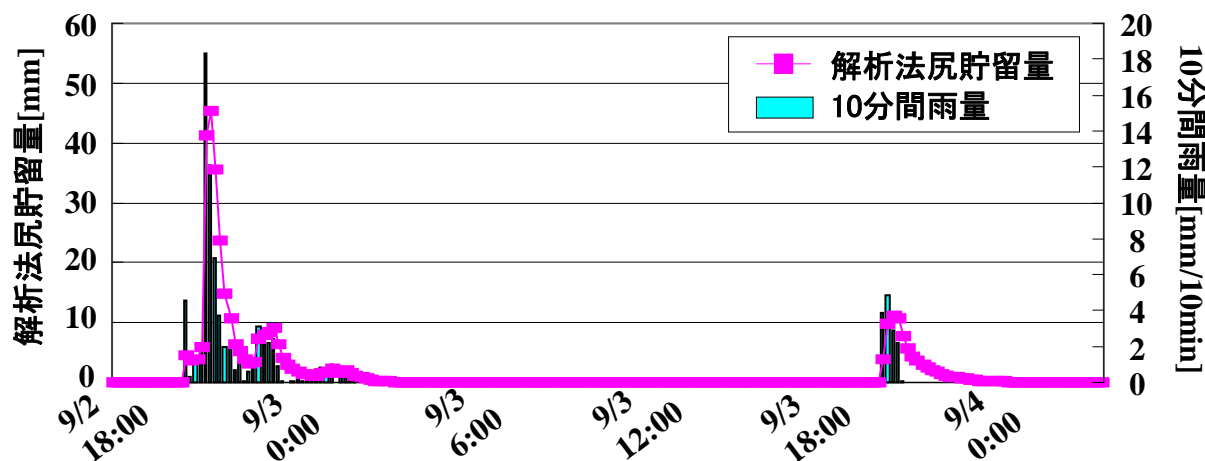


(a) 間隙圧と10分間雨量の変動

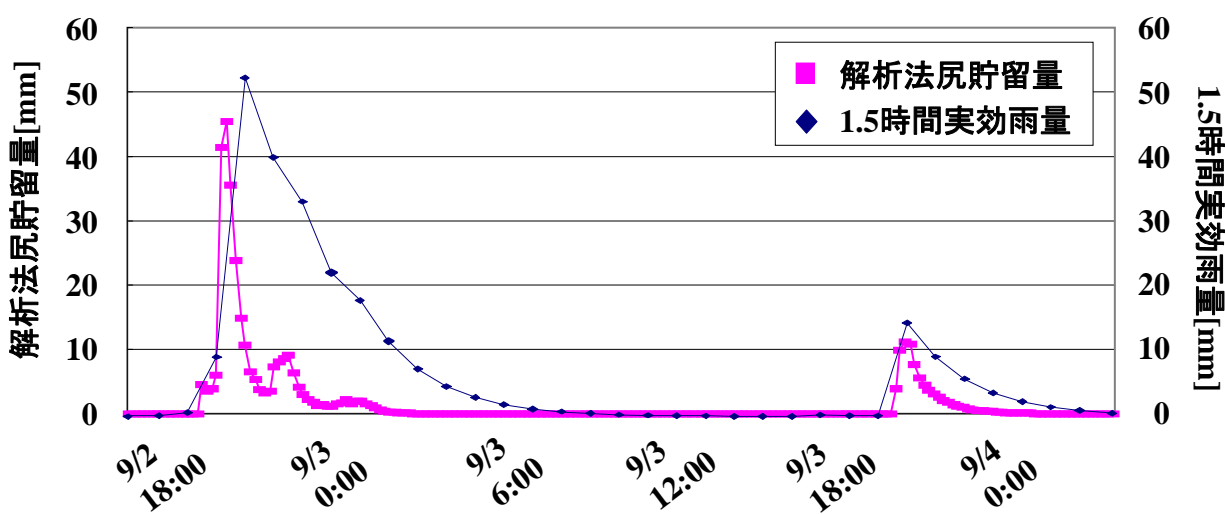


(b) 間隙圧の変動とMAPIの推移

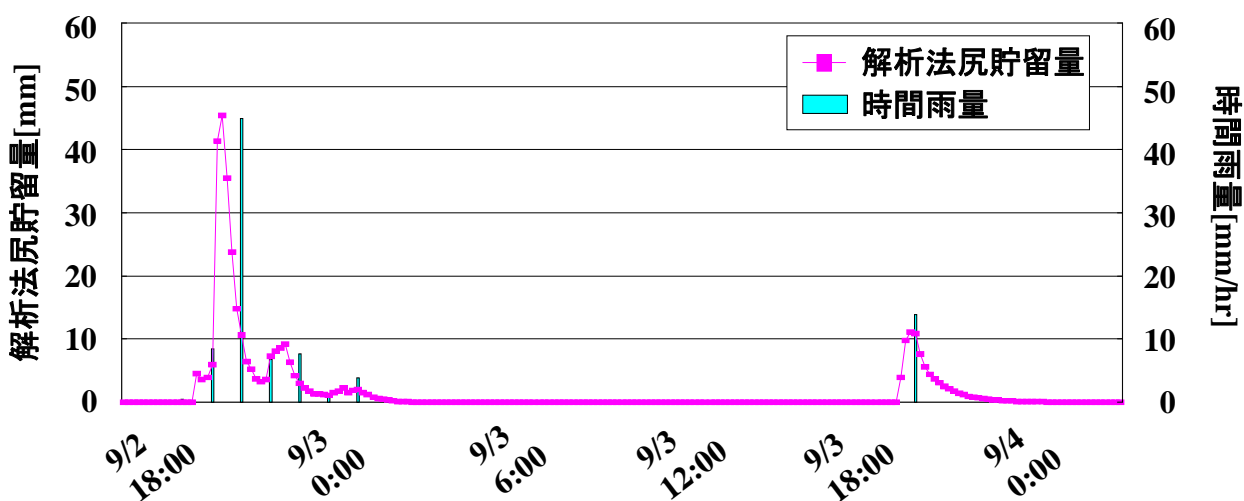
図4.14 法尻部における間隙圧の変動(9/6 17:00~9/7 19:00)



(a) 解析法尻貯留量の推移と10分間雨量の変動



(b) 解析法尻貯留量と1.5時間実効雨量の推移



(c) 解析法尻貯留量の推移と時間雨量の変動

図4.15 斜面表層部における解析法尻貯留量の推移

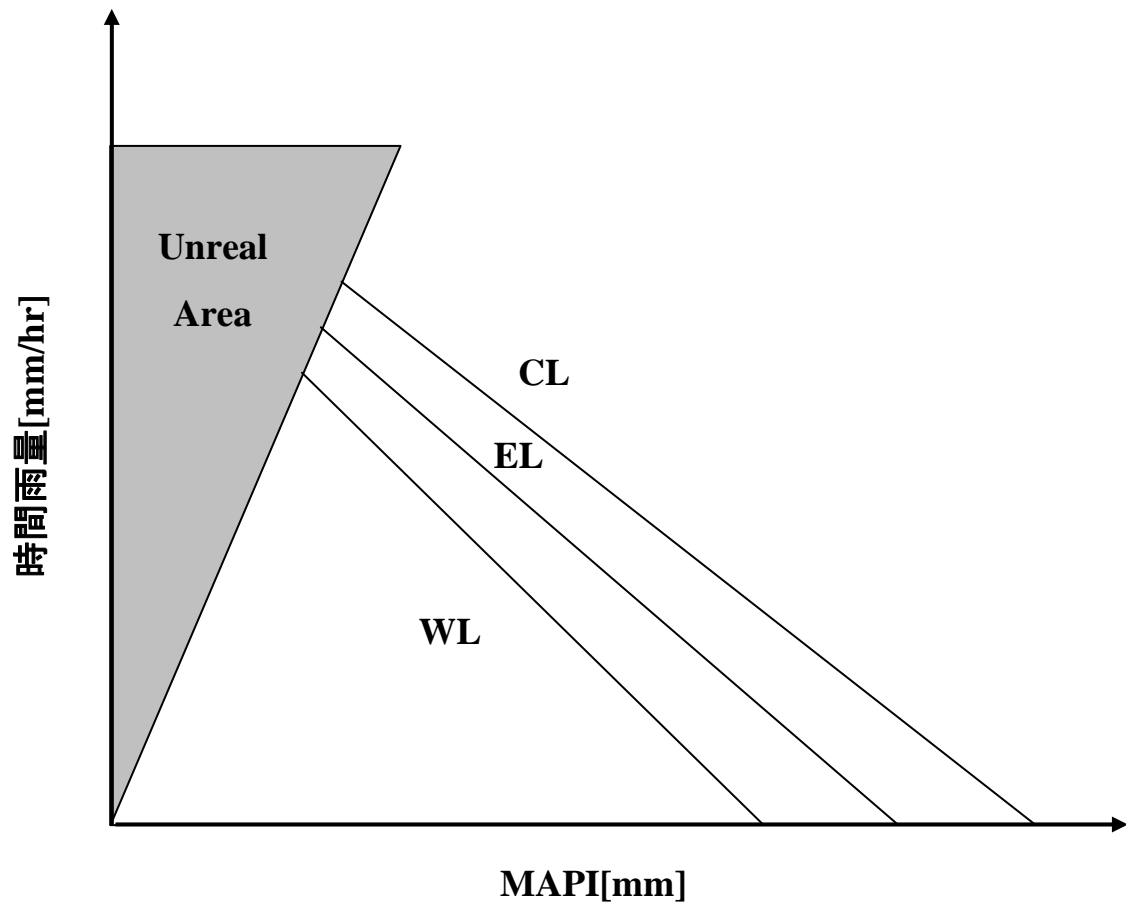


図4.16 新しい土砂災害早期警戒体制の一例

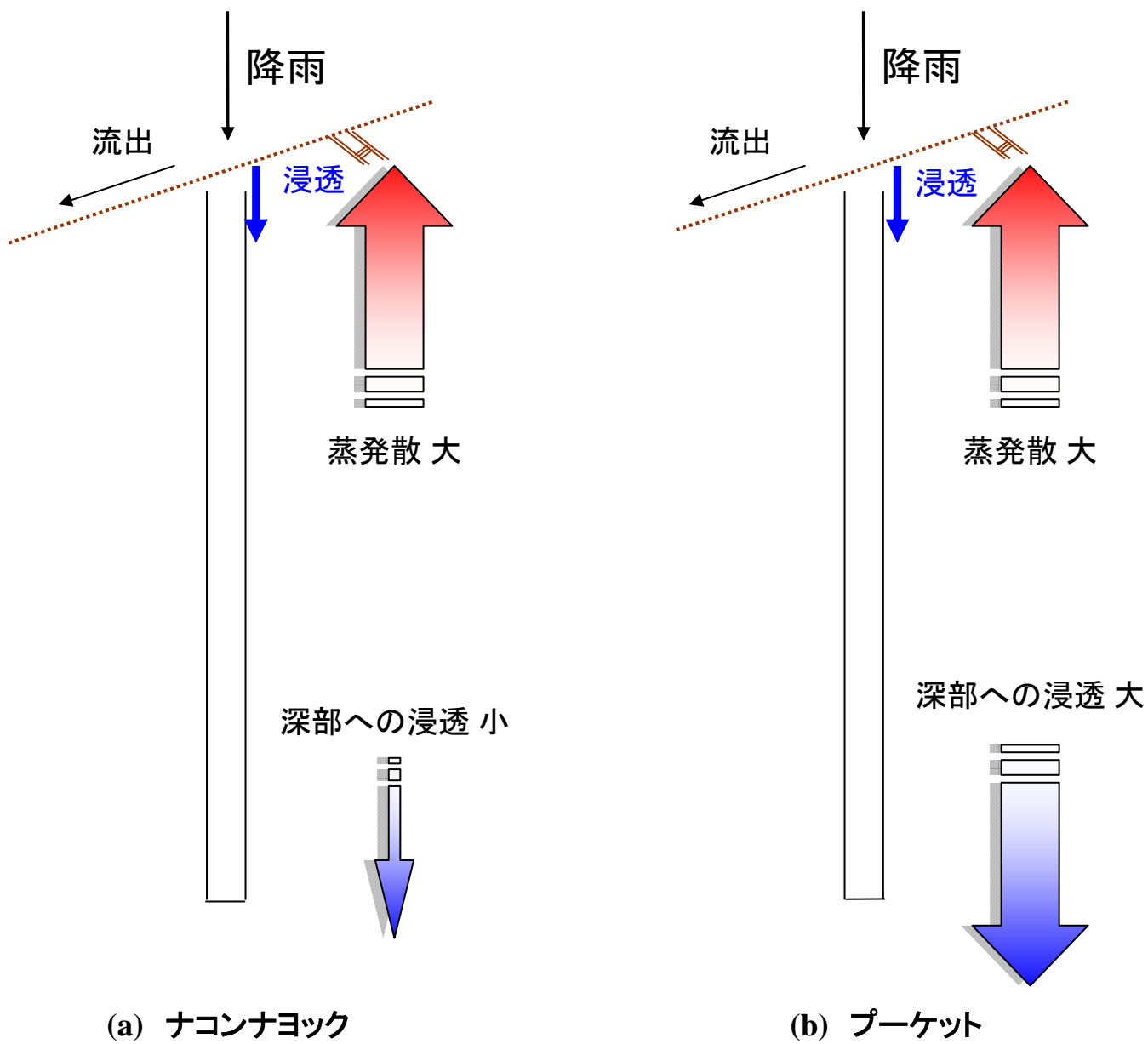


図5.1 タイの地盤内水分挙動模式図



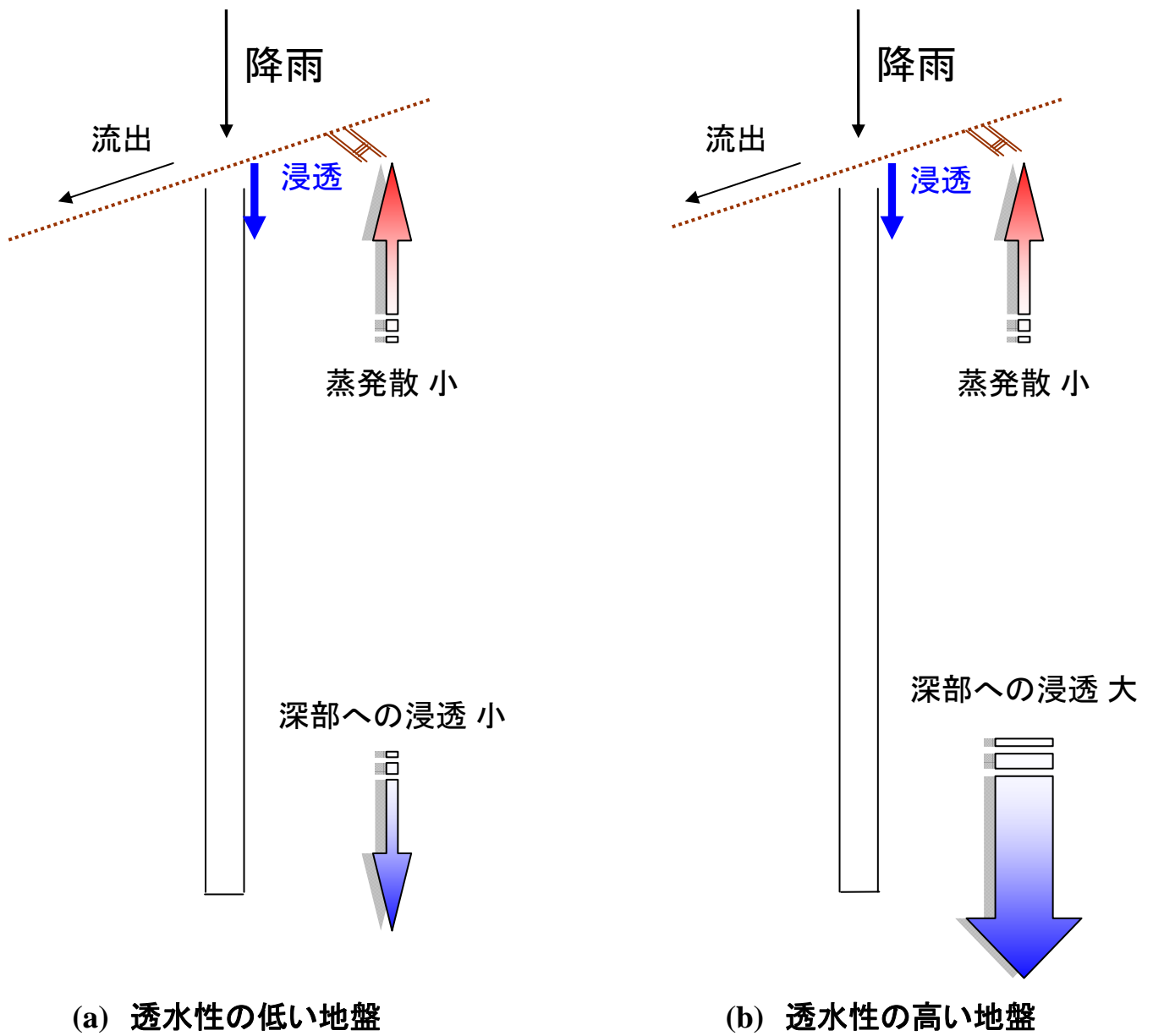


図5.2 日本の地盤内水分挙動模式図