マルチタンクモデルにおける
パラメータ同定手法の開発

2008 年 3 月 3 日

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

赤木　舞

要旨

近年，多発する局所的で集中的な豪雨により土砂崩れなどによる斜面災害が頻発している．特に日本では，急峻な山の端を縫うように道路が敷かれている場合が多く，一度斜面災害が発生すれば被害は甚大となる可能性が高い．被害最小化を図るために，道路管理者による通行規制などが実施されている．マルチタンクモデルは，降雨時の雨水の表面流出と浸透流とへの分離，並びに斜面内への浸透メカニズムの解明を可能にし，降雨時の斜面安定性解析において有効な手段となりうる．この手法は，タンクモデルの基本概念を発展させせることで斜面に特化して開発された流出解析手法である．システムの簡易性や予測精度の高さなどで優れているが，一方でパラメータの設定が煩雑であるという問題点があった．そこで，本研究ではこのマルチタンクモデルの体系的なパラメータ同定手法を開発した．本研究では，同定段階においては，マルチタンクモデルの特徴及び本手法の実用段階での制約からカルマンフィルタとニューラルネットワークの 2 つの解析手法を用いた手法の開発を行った．さらに，事例検証として室内実験及び Chantaburi での観測結果に適用することで本手法の妥当性を示した上で，古座及び Nakhon Nayok といった実斜面に適用することで本手法の適用性を検証した．

目次

第1章　序論

1.1　研究の背景

近年，局所的かつ集中的な降雨が日本国内においても多発するようになり，各地で豪雨に起因する災害が頻発している．特に被害が大きいものが，道路に隣接した斜面で発生する山崩れや土砂崩れである．日本の国土の大部分は，急峻な地形からなるために，道路が斜面に隣接しているケースが多く，今後これらの被害は増加する傾向にあると考えられる．それに加え，斜面災害は一度崩壊が発生するとその被害が甚大であるという点からも道路管理者にとっては斜面の防災上非常に重要な問題であると捉えられてきた．

現在，斜面災害による被害の予防段階としては，防災点検や防災対策工事が実施されている．それに対して，実際に被害発生に至った場合の損害を最小限に食い止めるために実施されているのが交通規制をはじめとする警戒体制の確立である．現在，交通規制は気象庁から提供されるデータに基づき道路管理者によって実施されているが，道路が人々の生活の中で担う重要度に比例して，道路管理者の判断はより迅速かつ的確であることが求められる難しいものとなる．そこで，道路管理者が交通規制の是非を判断する際の有効な判断基準として，降雨時の斜面の安定性評価が着目されている．降雨時の斜面崩壊は，一般的には斜面における浸透流解析と捉え，飽和—不飽和浸透流解析 [1]による斜面内の地下水挙動と有限斜面の安定問題として評価される．なお，榎ら [2]によれば，降雨による斜面崩壊では崩壊土塊の厚さが薄い表層崩壊が一般的であると指摘されている．

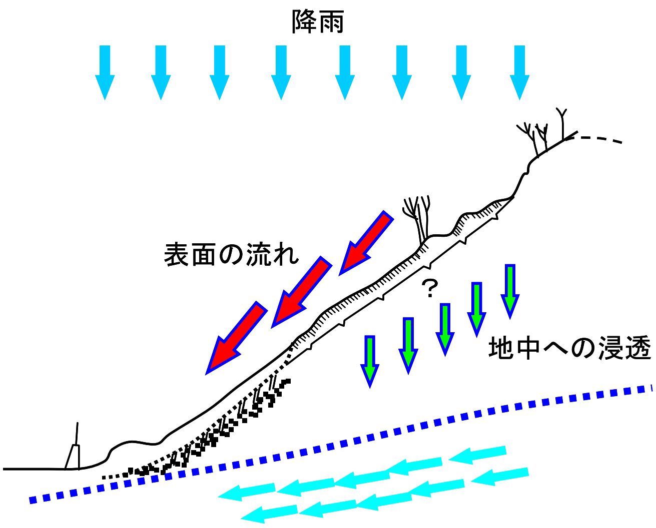


図 1-1　降雨時の斜面に生じる水の流れ

斜面において，雨水は図 1-1 に示すように地表面を流れる表面流と地中を流れる浸透流に分かれる．地中への浸透に関しては，地表面付近の深度の浅い領域に関しては鉛直方向の流れが卓越しており，その一方である深さから地下水面までの領域においては鉛直方向

に加え水平方向への流れが存在することが経験的な知見として得られている.この特徴は,前述したように斜面の崩壊形態においては表層崩壊が一般的であることを加味すれば,斜面の安定性評価を行う際には,斜面の地表付近の浸透流に着眼して解析を行う事の必要性を示唆している.斜面における表面流及び浸透流の流量を予測する際に,有効だと考えられる手法が本研究で提案するパラメータ同定手法の対象となっているマルチタンクモデルである.マルチタンクモデルは,タンクモデルの斜面への応用形で高橋ら[3)]によって斜面補強の優先順位付けの判断基準のひとつとして提案されている降雨を対象とした斜面崩壊に伴うリスク評価手法に関する研究の中で開発されたモデルである.具体的には,マルチタンクモデルは流出解析や広域地下水問題において適用されることの多かったタンクモデルの基本概念を拡張することで,特定の斜面ごとの地下水変動評価を可能にしたモデルで,従来の数値解析法とは異なり,不飽和領域の水の流れに関しては垂直方向のみと仮定していることから,斜面の表層領域に特化した浸透流解析手法であるということができる.また統計手法に基づく危険度判定等とは異なり,斜面の持つ力学特性を考慮可能であるといった利点がある.現在,その有用性の検証段階であるが,将来的には斜面防災を実施する際に有効な判断基準を提供する手法であると推察される.

1.2 研究の目的

先述したように,マルチタンクモデルは斜面の安定性評価に特化した解析手法であり今後より活用が期待される手法であるが,実用段階においての課題も存在する.後に斜面にマルチタンクモデルを適用した場合のモデルの形状について紹介するが,その形状をみれば分かるように,非常に多数のパラメータの設定が必要なのである.これまで,タンクモデルのパラメータは技術者による試行錯誤を通して設定されてきた.しかし,斜面に適用されたタンクモデルは非常に複雑な非線形構造を有しているためモデル全体に対するパラメータの影響が明確ではなく,かつパラメータの数自体も増加することからパラメータ設定は非常に煩雑な作業であった.

本研究では,今後マルチタンクモデルがより一般化されるためには,体系的なパラメータ同定手法の構築が必要不可欠であると判断し,カルマンフィルタとニューラルネットワークといった 2 つの手法を組み合わせることでマルチタンクモデルのパラメータ同定手法の構築を試みた.

1.3 本研究の構成

第 1 章において,本研究の背景及び目的について概説した.第 2 章では,タンクモデルの概要,タンクモデルの斜面への応用形であるマルチタンクモデル及びさらに改善を加え

た拡張型マルチタンクモデルの概要について解説したのち，タンクモデルの基本形に対するパラメータ同定手法に関する既往の研究を紹介する．第 3 章においては，本研究で提案するパラメータ同定手法において用いる解析手法について示す．本同定手法においては，カルマンフィルタ及びニューラルネットワークの 2 種類の解析手法を用いるが，それぞれについて概要を整理した後，マルチタンクモデル及び拡張型マルチタンクモデルに適用する際の適用方法について詳述する．第 4 章及び第 5 章では，事例検証を通して本手法の妥当性及び性質について考察する．具体的には，第 4 章では事例検証として室内実験及び Chantaburi で行われた実験を取り上げ．不飽和領域に対する本手法の妥当性と特徴について考察する．また第 5 章では，実斜面に対して拡張型マルチタンクモデルを適用することで実斜面に対する本手法の妥当性と問題点も含めた性質について考察する．最後に第 6 章においては，本研究の結論と今後の展望について記す．

第2章　タンクモデル及びパラメータ同定手法に関する既往の研究

本章では，タンクモデルの考え方とそのパラメータ同定手法に関する既往の研究について紹介したのち，本研究において解決すべき課題の整理を行う．

2.1 タンクモデル

本節では，タンクモデルの基本的な考え方に加え，さらにそれを発展させたマルチタンクモデル及び拡張型マルチタンクモデルについて説明する．タンクモデルはそのシステムの簡易性と再現性の高さから，降雨—河川流出の関係を明らかにする流出解析として広く用いられている手法である．その対象は，主に河川とその流域といったような広い範囲とされている．これに対しマルチタンクモデル及び拡張型マルチタンクモデルは，斜面の安定性解析問題における浸透流解析に対応するために，斜面に特化して開発された流出解析手法である．本研究の提案するパラメータ同定手法は，マルチタンクモデル及び拡張型マルチタンクモデルを対象としたものである．

2.1.1 タンクモデルの概要

タンクモデルは，1976 年に菅原によって提案された流出計算法[4)]である．仮想の貯留型タンクを複数個組み合わせることにより，流出機構のモデル化を試みたものであり，簡易なシステムにも係わらず流域における水収支や水循環を十分に説明することが可能である．また大きな特徴としては，適用範囲の広さが挙げられる．これは，対象流域の大きさや特性に応じて，組み合わせるタンクの個数や配置を変化させることができるためである．ただし，流出機構から精度高いシミュレート結果を得るためには，孔の位置及び孔の係数などのパラメータを適切に設定する必要がある．

前述の通り，タンクモデルは対象地域の特性に合わせて様々な形状を取る事が可能であるが，ここでは直列 2 段タンクモデルについて模式図を図 2-1 に示しながら説明する．

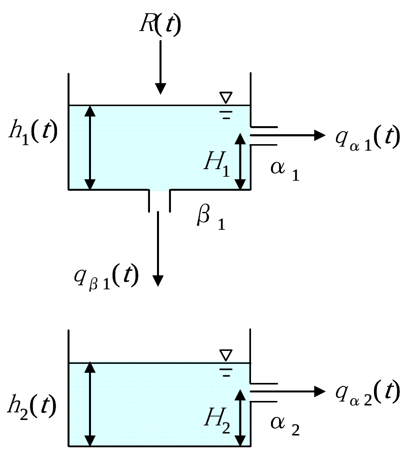


図 2-1　直列 2 段タンクモデル

直列 2 段タンクモデルは，貯留型タンクを縦に 2 段組み合わせたもので，降雨―流出量の関係をモデル化したもので，上段のタンクには側壁に 1 つ，底に 1 つの孔が，下段タンクには側壁に 1 つの孔があり，計 5 つのパラメータが存在する．

図 2-1 で，R(t)は降雨量，$h_1(t)$及び $h_2(t)$は各タンク内の単位面積あたりの貯水量(以下，貯留高と称す)，$q_{\alpha 1}(t)$，$q_{\alpha 2}(t)$及び $q_{\beta 1}(t)$は各タンクからの流出量，α_1，α_2 は各タンクの側壁の孔(以下，側孔と称す)の流出係数及び β_1 は上段タンクの底の孔(以下，底孔と称す)の流出係数を表現している．また,H_1 及び H_2 は，各タンクの側孔までの底からの高さを示している．

各タンクからの流出量及び各タンクの貯留高の算定方法について，図 2-1 に準じて説明する. 上段タンク及び下段タンクの側孔からの流出量 $q_{\alpha 1}(t)$及び $q_{\alpha 2}(t)$は, それぞれ式(2.1),式(2.2)のように表現される．式より，タンク内の貯留高が側孔の高さに達しない場合，流出量は 0 として算定されることが確認される．これは，降雨―流出量関係における反応の遅延を表現するものである．

$$q_{\alpha 1}(t)=\begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_1(t)<H_1 \\ \alpha_1(h_1(t)-H_1) & \phantom{\text{for}} \quad h_1(t)\geq H_1 \end{cases} \tag{2.1}$$

$$q_{\alpha 2}(t)=\begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_2(t)<H_2 \\ \alpha_2(h_2(t)-H_2) & \phantom{\text{for}} \quad h_2(t)\geq H_2 \end{cases} \tag{2.2}$$

また，上段タンクからの底孔からの流出量 $q_{\beta 1}(t)$は，式(2.3)のように表現される．

$$q_{\beta_1}(t)=h_1(t)\beta_1 \tag{2.3}$$

ここで，式(2.1)から式(2.3)で求められる流出量は時間ステップ t での値である．これを受けて，時間ステップ t+1 での各タンクの貯留高 $h_1(t)$及び $h_2(t)$は，式(2.4)および式(2.5)から算出される．

$$h_1(t+1)=h_1(t)-q_{\alpha 1}(t)-q_{\beta 1}(t)+R(t+1) \tag{2.4}$$

$$h_2(t+1)=h_2(t)-q_{\alpha 2}(t)+q_{\beta 1}(t) \tag{2.5}$$

時間ステップを増やしながら上記の計算を繰り返すことで，時間毎の各タンクからの流出量及び各タンク内の貯留高が算定可能となる．例えば，上段タンクをある流域の上流部分，下段タンクをその流域の下流部分と捉え，観測値に合うように各孔の流出係数などのパラメータを設定することで，その流域における降雨―流出の関係を予測かつ利用することができる．

2.1.2 マルチタンクモデル（3 連 1 次元タンクモデル）

マルチタンクモデル [5]は，降雨時の斜面の安定性問題を斜面内の地下水挙動と有限斜面の表層崩壊に関する問題として取り組んだ結果，開発された流出解析である．降雨時の斜面における降雨，浸透，流動さらに再湧出するまでの流動経路や，降雨波形に対する地下水の応答の遅延が表現できることが，マルチタンクモデルの最大の特徴である．

まず，マルチタンクモデルの基本となるのは，図 2-2 に示す 3 連 1 次元タンクモデルである．これは図 2-1 に示した直列 2 段タンクモデルの下段タンクの流出孔を二つに改良し，さらに斜面の上部，中間部及び下部に連結したものである．

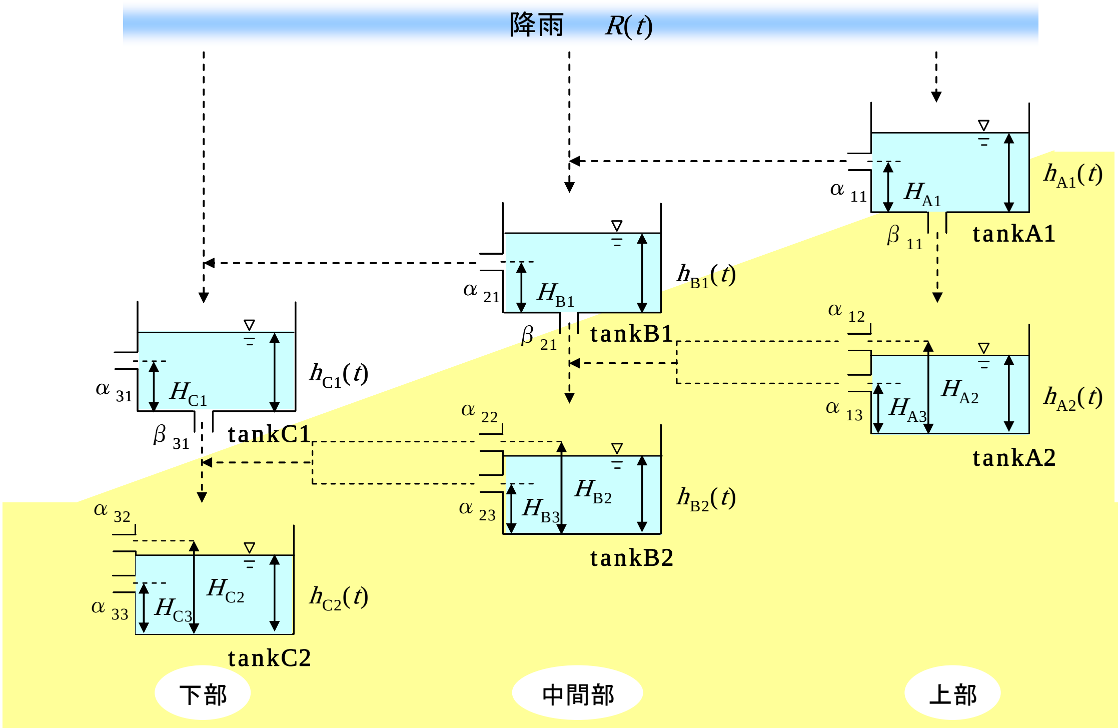


図 2-2　3 連 1 次元タンクモデル

図 2-2 において，α はタンクの側孔の流出係数，β は上段タンクの底孔の浸透係数を表す．加えて，H は側孔の底からの高さを表す．例えば，3 連 1 次元タンクモデルにおいては，21 個のパラメータが存在することになる．降水量は R(t)，タンクの貯留高は h (t)，孔からの流出量は q (t)と表す．各タンクについては，後の表記の簡便化のために各タンクを tankA1，tankA2，tankB1，tankB2，tankC1，tankC2 と称す．

最も重要な点は，各タンクの働きの捉え方である．具体的には，上段タンクは斜面表面部分をモデル化したものと捉えており，側孔と底孔は各々ホートン流と降雨浸透を発生させると考える．また，下段タンクは斜面内部への浸透流をモデル化したもので，側方浸透に加えて地下水流を表現している．前述したように，マルチタンクモデルは斜面の安定性問題を斜面内の地下水挙動として取り組んだ結果，開発された手法である．下段タンクの

貯留高に注目することで，降雨—地下水の関係のモデル化を可能にしている．

各タンクからの流出量及び各タンクの貯留高の算定方法について，図 2-2 に準じて説明する．斜面上部の表面部分をモデル化した tankA1 の側孔からの流出量 $q_{\alpha 11}(t)$と底孔から斜面内部への浸透量 $q_{\beta 11}(t)$は，式(2.6)及び式(2.7)と書ける．

$$q_{\alpha 11}(t)=\begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A1}(t)<H_{A1} \\ \alpha_{11}(h_{A1}(t)-H_{A1}) & \phantom{\text{for}} \quad h_{A1}(t)\geq H_{A1} \end{cases} \tag{2.6}$$

$$q_{\beta_{11}}(t)=\beta_{11}h_{A1}(t) \tag{2.7}$$

斜面内の側方浸透を表している tankA2 の側孔からの流出量 $q_{\alpha 12}(t)$，$q_{\alpha 13}(t)$は，式(2.8)及び式(2.9)と書ける．

$$q_{\alpha 12}(t)=\begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A2}(t)<H_{A2} \\ \alpha_{12}(h_{A2}(t)-H_{A2}) & \phantom{\text{for}} \quad h_{A2}(t)\geq H_{A2} \end{cases} \tag{2.8}$$

$$q_{\alpha 13}(t)=\begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A3}(t)<H_{A3} \\ \alpha_{13}(h_{A3}(t)-H_{A3}) & \phantom{\text{for}} \quad h_{A3}(t)\geq H_{A3} \end{cases} \tag{2.9}$$

これと同様にして tankB1 及び tankB2，tankC1 及び tankC2 の各孔からの流出量が算定される．これらの式によって算定される時間 t における各孔からの流出量と降雨量から，時間 t＋1 における各タンクの貯留高を導出する．なお，マルチタンクモデルの水収支計算における特長として，tankA1 の側孔からの流出量 $q_{\alpha 11}(t)$は tankB1 に降雨と共に $q_{\alpha 11}(t)$ ＋ R(t)として流入し，また tankA2 の側孔からの地下水流 $q_{\alpha 12}(t)$及び $q_{\alpha 13}(t)$は tankB1 からの底孔からの浸透量に加えて tankB2 に $q_{\alpha 12}(t)$＋$q_{\alpha 13}(t)$＋$q_{\beta 21}(t)$として流入する．

まず，斜面上部の tankA1 及び tankA2 の貯留高は式(2.10)及び式(2.11)のように表される．

$$h_{A1}(t+1)=h_{A1}(t)-q_{\alpha 11}(t)-q_{\beta_{11}}(t)+R(t+1) \tag{2.10}$$

$$h_{A2}(t+1)=h_{A2}(t)-q_{\alpha 12}(t)-q_{\alpha 13}(t)+q_{\beta_{11}}(t) \tag{2.11}$$

次に，斜面中間部の tankB1 及び tankB2 の貯留高は式(2.12)及び式(2.13)のように表される．

$$h_{B1}(t+1)=h_{B1}(t)-q_{\alpha 21}(t)-q_{\beta_{21}}(t)+R(t+1)+q_{\alpha 11}(t) \tag{2.12}$$

$$h_{B2}(t+1)=h_{B2}(t)-q_{\alpha 22}(t)-q_{\alpha 23}(t)+q_{\beta_{21}}(t)+q_{\alpha 12}(t)+q_{\alpha 13}(t) \tag{2.13}$$

最後に，斜面下部の tankC1 及び tankC2 の貯留高は式(2.14)及び式(2.15)のように表される．

$$h_{C1}(t+1)=h_{C1}(t)-q_{\alpha 31}(t)-q_{\beta_{31}}(t)+R(t+1)+q_{\alpha 21}(t) \tag{2.14}$$

$$h_{C2}(t+1)=h_{C2}(t)-q_{\alpha 32}(t)-q_{\alpha 33}(t)+q_{\beta_{31}}(t)+q_{\alpha 22}(t)+q_{\alpha 23}(t) \tag{2.15}$$

マルチタンクモデルの中でも最も簡潔なモデルである 3 連 1 次元タンクモデルは，貯留型タンクを 2 つ縦方向に並べた 1 次元タンクモデルを 3 列連結することによって構成されていることを説明した．最も高い位置に設定され基点としての役割を果たしている上部タンク，その下に設定された中間タンク，最下部に設定された下部タンクは，それぞれ異なった特性を持つ斜面の各部に対しての流出解析を可能にしている．具体的には，各タンクの貯留高及び各孔からの流出量を比較検討することで，上部においては垂直方向の地中への浸透状態，中間部では上部同様に垂直方向の浸透流に加え卓越した側方浸透流，また下部においては還元水と高い含水状態を把握することが可能となる．

2.1.3 拡張型マルチタンクモデル

降雨時の斜面の安定性問題について考える際，降雨時の土中への浸透の様子を知ることが非常に重要な要素であることは明白である．2.1.2 で述べた 3 連 1 次元タンクモデルは，降雨時の土中の浸透状況を主に地下水の挙動を用いることで表現しようと試みた手法であったが，地下水に加えて降雨の浸透状況を評価する際の評価項目として重要であるのが，不飽和領域における土中水分量である．現在，不飽和領域における土中水分量を予測する際に，実際に用いられている手法として最も一般的なものは，有限要素法による浸透流解析などの数値解析手法である．しかし，不飽和領域における水の浸透特性は強い非線形性を有しているため，従来の解析手法では非常に複雑な計算が必要とされてきた．特に，薄いの地中への浸透を対象とする場合には繰り返し計算が必要となり極めて複雑な計算過程となる．この問題に対して，不飽和領域の浸透現象をより簡潔にモデル化するために開発された手法が不飽和領域を考慮したマルチタンクモデルシステム [5)](以下，これを拡張型マルチタンクモデルと称す)である．

この拡張型マルチタンクモデルでは，模式図を図 2-3 に示すように不飽和領域に複数個のタンクを並べ，各タンク間の水の移動を調べることにより，各深度における飽和度及び下の層への降雨の浸透状況を分析することができる．

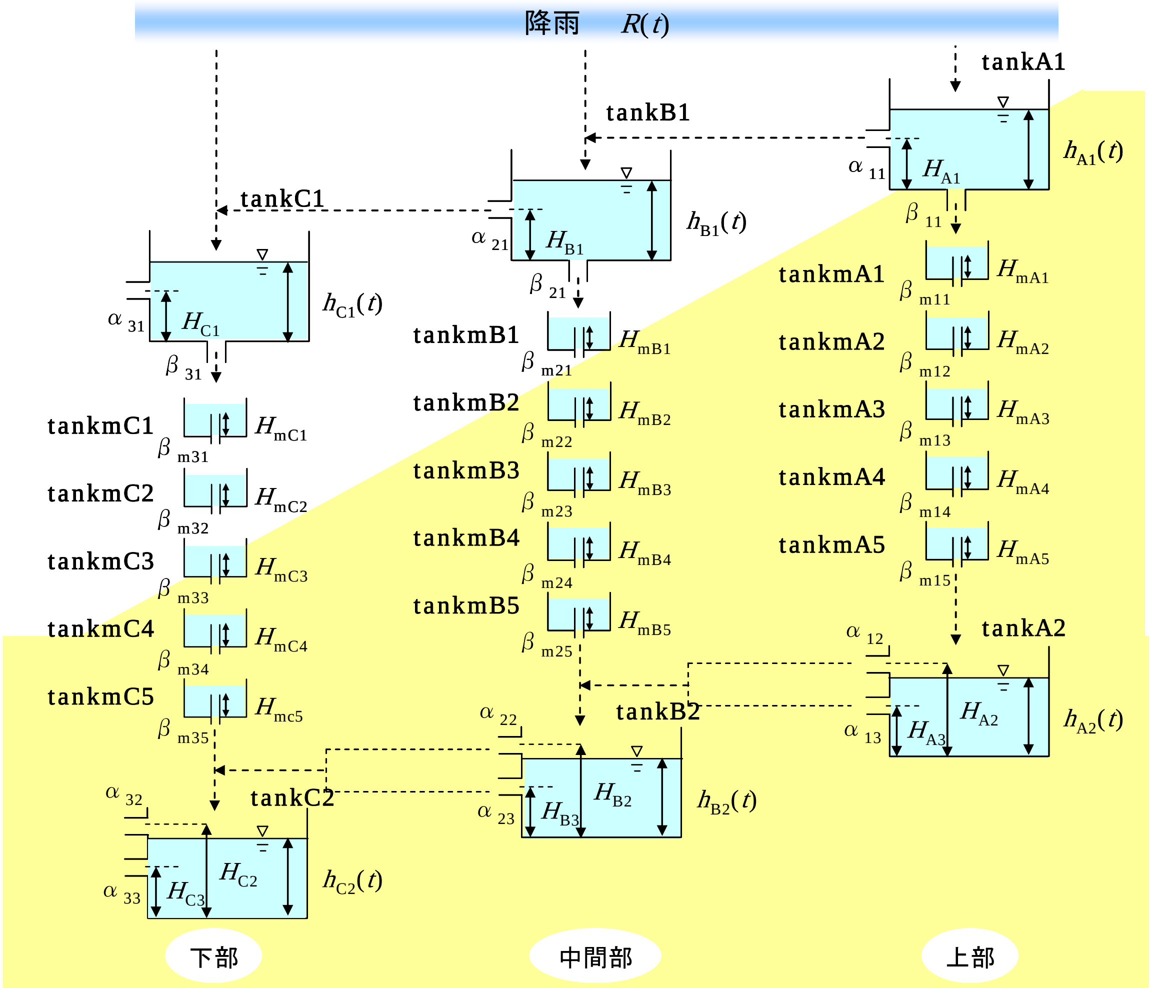


図 2-3 拡張型マルチタンクモデル

図 2-3 において，α は側孔の流出係数，β は上段タンクの浸透係数を表す．H は側孔の底からの高さを表す．加えて，β_m は不飽和領域の浸透を表す 5 個のタンク(以下，これを中段タンクと称す)の浸透係数，H_m は，中段タンクの底孔の底からの高さ(以下，立ち上がりと称す)を表す．降水量は $R(t)$，各タンクの貯留高は $h(t)$，各孔からの流出量は $q_x(t)$(ただし，x＝各孔の流出係数)と表す．各タンクについては，後の表記の簡便化のために tankA1，tankA2，tankmAn(n=1,2,3,4,5)，tankB1，tankB2，tankmBn(n=1,2,3,4,5)，tankC1，tankC2，tankmCn(n=1,2,3,4,5)と称す．

図 2-3 からもわかるように，2.1.2 で紹介した 3 連 1 次元タンクモデルに対して，中段タンクを加えただけの非常に単純な形である．中段タンクは，底孔が底面にそのまま設置されているのではなく，ある立ち上がりを持っているという特徴があるが，この立ち上がりは土の保水能力に対応するパラメータで同定すべきパラメータの一つとなっている．土

の保水能力とは，土粒子と土壌水の間に作用する付着力のより土壌全体が土壌水をひきつけている能力である．土は数多くの間隙を持つ多孔質体と考えられるため，土壌間隙中に土壌水が存在しこのような力が生じる．この土の保水能力と体積含水率の間には関数関係が存在し，土壌水分特性曲線と呼ばれる．しかし，この土壌水分特性曲線は土壌の固相の特徴によって変化するため，斜面ごとの曲線の特定は困難であるというのが現状である．

まず，各タンクからの流出量及び各タンクの貯留高の算定方法について，図 2-3 に準じて説明する．斜面上部の表面部分をモデル化した tankA1 の側孔からの流出量 $q_{\alpha 11}(t)$と底孔から斜面内部への浸透量 $q_{\beta 11}(t)$は，式(2.16)及び式(2.17)と書ける．

$$q_{\alpha 11}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A1}(t) < H_{A1} \\ \alpha_{11}\left(h_{A1}(t) - H_{A1}\right) & \quad\quad\; h_{A1}(t) \geq H_{A1} \end{cases} \tag{2.16}$$

$$q_{\beta_{11}}(t) = \beta_{11} h_{A1}(t) \tag{2.17}$$

また，中段の tankmA1 の底孔からの流出量 $q_{\beta m11}(t)$は式(2.18)のように書ける．

$$q_{\beta m11}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{mA1}(t) < H_{mA1} \\ \beta_{m11}\left(h_{mA1}(t) - H_{mA1}\right) & \quad\quad\; h_{mA1}(t) \geq H_{mA1} \end{cases} \tag{2.18}$$

同様にして，tankmA2，tankmA3，tankmA4，tankmA5 の底孔からの流出量は算定される．さらに下段の tankA2 の側孔からの流出量 $q_{\alpha 12}(t)$，$q_{\alpha 13}(t)$は，式(2.19)及び式(2.20)と書ける．

$$q_{\alpha 12}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A2}(t) < H_{A2} \\ \alpha_{12}\left(h_{A2}(t) - H_{A2}\right) & \quad\quad\; h_{A2}(t) \geq H_{A2} \end{cases} \tag{2.19}$$

$$q_{\alpha 13}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A3}(t) < H_{A3} \\ \alpha_{13}\left(h_{A3}(t) - H_{A3}\right) & \quad\quad\; h_{A3}(t) \geq H_{A3} \end{cases} \tag{2.20}$$

上段タンクと下段タンクの各孔からの流出量に関しては，2.1.1 の 3 連 1 次元タンクモデルで示した式と全く同じであることを確認されたい．上部のタンクを例にとり，その上段，中段，下段タンクからの流出量の算定方法について説明したが，中部及び下部のタンクからの流出量に関しても同様の計算を適用する．

次に, タンク内の貯留高の算定式について説明する. まず, tankA1 から順に, tankmA1, tankmA2, tankmA3, tankmA4, tankmA5, そして tankA2 の貯留高の算定式を式(2.21), 式(2.22), 式(2.23), 式(2.24), 式(2.25), 式(2.26), 式(2.27)に示す.

$$h_{A1}(t+1) = h_{A1}(t) - q_{\alpha_{11}}(t) - q_{\beta_{11}}(t) + R(t+1) \tag{2.21}$$

$$h_{mA1}(t+1) = h_{mA1}(t) - q_{\beta_{m11}}(t) + q_{\beta_{11}}(t) \tag{2.22}$$

$$h_{mA2}(t+1) = h_{mA2}(t) - q_{\beta_{m12}}(t) + q_{\beta_{m11}}(t) \tag{2.23}$$

$$h_{mA3}(t+1) = h_{mA3}(t) - q_{\beta m13}(t) + q_{\beta m12}(t) \tag{2.24}$$

$$h_{mA4}(t+1) = h_{mA4}(t) - q_{\beta_{m14}}(t) + q_{\beta_{m13}}(t) \tag{2.25}$$

$$h_{mA5}(t+1) = h_{mA5}(t) - q_{\beta_{m15}}(t) + q_{\beta_{m14}}(t) \tag{2.26}$$

$$h_{A2}(t+1) = h_{A2}(t) - q_{\alpha 12}(t) - q_{\alpha 13}(t) + q_{\beta_{m15}}(t) + R(t+1) \tag{2.27}$$

同様にして, tankB1, tankB2, tankmBn(n=1,2,3,4,5), tankC1, tankC2 及び tankmCn(n=1,2,3,4,5)の貯留高も算定できる. ただし, 3 連 1 次元タンクモデル同様, マルチタンクモデルの水収支計算の特色から tankB1, tankB2, tankC1 及び tankC2 の貯留高は式(2.28), 式(2.29), 式(2.30), 式(2.31)で与えられる.

$$h_{B1}(t+1) = h_{B1}(t) - q_{\alpha 21}(t) - q_{\beta_{21}}(t) + R(t+1) + q_{\alpha 11}(t) \tag{2.28}$$

$$h_{B2}(t+1) = h_{B2}(t) - q_{\alpha 22}(t) - q_{\alpha 23}(t) + q_{\beta_{m25}}(t) + q_{\alpha 12}(t) + q_{\alpha 13}(t) \tag{2.29}$$

$$h_{C1}(t+1) = h_{C1}(t) - q_{\alpha 31}(t) - q_{\beta_{31}}(t) + R(t+1) + q_{\alpha 21}(t) \tag{2.30}$$

$$h_{C2}(t+1) = h_{C2}(t) - q_{\alpha 32}(t) - q_{\alpha 33}(t) + q_{\beta_{m35}}(t) + q_{\alpha 22}(t) + q_{\alpha 23}(t) \tag{2.31}$$

不飽和領域を考慮したタンクモデルとして紹介している 3 列 7 段のタンクモデルは, 斜面の高度ごとに上部, 中部及び下部の 3 列に 1 次元タンクモデルを配置し, さらに不飽和領域の鉛直方向の水の挙動を表現するための 5 段の中段タンクを上段タンクと下段タンクの間に設置しているが, この中段タンクの数は斜面の特性に応じて自由に変更可能である. 当然, 斜面を構成している土壌の性質は均一ではないと考えられるため, タンクの数が極端に少ないと深度毎の飽和度を考える際に十分な予測精度が得られない危険性がある. 逆に, 中段タンクの数を多くすることで, 不飽和領域での非線形な水分移動現象に対して対応可能であるが, 本研究では, 測定機器の制約から, 中段タンクは 5 段としている.

2.2 タンクモデルにおけるパラメータ同定手法に関する既往の研究

菅原の提案したタンクモデルの特徴は，集約すれば，非線形の流出機構を持ち，タンクの数や配置を対象の特性ごとに決定することが可能で，孔の数，孔の位置及び孔の流出係数などのパラメータを得られている流出量などの観測値に合うように適切に設定することで精度高く流出量を予測できるというものである．これらパラメータの設定は，通常は観測値を参考にしながら試行錯誤の結果，決定されるものである．しかし，流出量に対して各パラメータがどれほどの影響を与えているかは明白ではなく，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なことである．

そこで，市原ら[6)]はカルマンフィルタによりパラメータが同定されるタンクモデルを 3 種類提案し，それにより流出予測の可能性について検討している．本研究では，3 種類のタンクモデルについて簡単に紹介した後に，特にその考え方を参考にした 3 つ目のモデルについて紹介する．

市原らの提案するタンクモデルは以下の 3 種類である．

モデルI.　孔の位置が変動する直列 3 段モデル

モデルII.　孔の位置が変動する 1 段モデル

モデルIII.　孔の位置と孔係数が変動する 1 段モデル

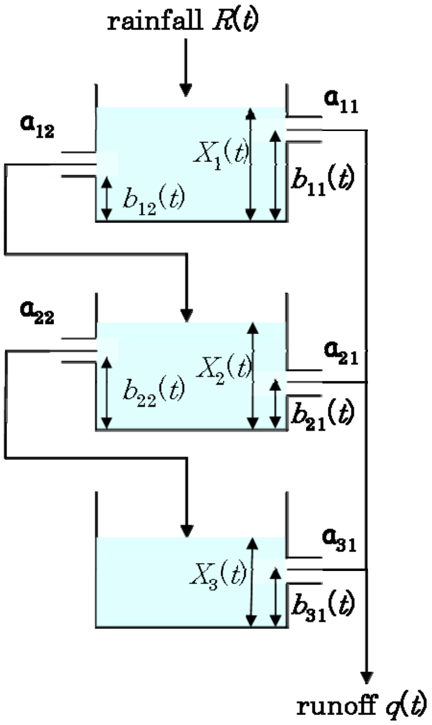
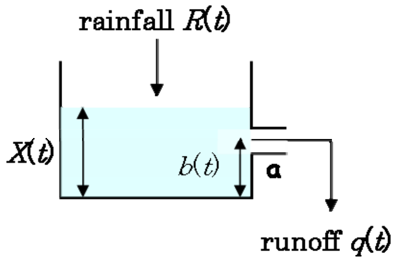
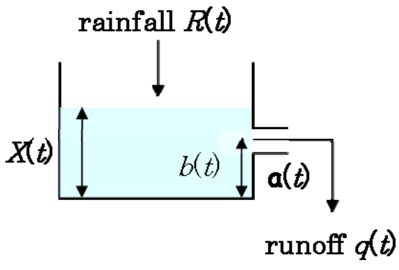
それぞれのモデルの特徴を表 2-1 にまとめる．表 2-1 において，$a(t)$は各孔の流出係数，$b(t)$は各孔の底からの高さ，及び $X(t)$は各タンク内の貯留高を表現している．なお，必要な観測値として挙げられている $q(t)$は，各タンクからの流出量の合計を表し，モデル I であれば式(2.32)，モデルⅡ及びⅢであれば式(2.33)，式(2.34)として算出される．

$$q(t)=a_{11}(X_1(t)-b_{11}(t))+a_{21}(X_2(t)-b_{21}(t))+a_{31}(X_3(t)-b_{31}(t)) \tag{2.32}$$

$$q(t)=a(X(t)-b(t)) \tag{2.33}$$

$$q(t)=a(t)(X(t)-b(t)) \tag{2.34}$$

表 2-1 各モデルの概要

<table>
<tr><th></th><th>タンクモデル</th><th>未知
パラメータ</th><th>既知
パラメータ</th><th>必要な
観測値</th></tr>
<tr><td>モデルⅠ</td><td>
</td><td>$b_{11}(t)$
$b_{12}(t)$
$b_{21}(t)$
$b_{22}(t)$
$b_{31}(t)$
及び
$X_1(t)$
$X_2(t)$
$X_3(t)$</td><td>a_{11}
a_{12}
a_{21}
a_{22}
a_{31}</td><td>$R(t)$
$q(t)$</td></tr>
<tr><td>モデルⅡ</td><td>
</td><td>$b(t)$
及び
$X(t)$</td><td>a</td><td>$R(t)$
$q(t)$</td></tr>
<tr><td>モデルⅢ</td><td>
</td><td>$a(t)$
$b(t)$
及び
$X(t)$</td><td></td><td>$R(t)$
$q(t)$</td></tr>
</table>

モデルⅠにおいては，各孔の流出係数を既知として扱うかわりに各孔の底からの高さを未知パラメータとしている．各孔からの高さを変化させることで，算定値を観測値に合わせていくという方針である．直列 3 段タンクという一般的な流域の流出解析に用いられているモデルを利用して，タンクモデルのパラメータ同定を行う際にカルマンフィルタを用いることの有効性を確認するためのモデルである．

モデルⅡは，モデルⅠのタンクモデルをより簡潔にした 1 段のタンクモデルを適用することで，パラメータと流出量の関係を直接的なものにし，カルマンフィルタが観測値を未知パラメータに十分反映し得るかという点を確認するためのモデルである．

モデルⅢは，手法の実用性向上のために提案されたモデルである．これまで，既知として取り扱われていた各孔の流出係数を未知数とした場合が取り上げられている．本来，各孔の流出係数は未知数であるため，モデルⅢは実用段階において最も適用範囲の広い手法であると考えられる．本研究で提案するパラメータ同定手法は，このモデルⅢにおける考え方を参考にしている．

このため，モデルⅢの考え方について述べる． モデルⅠ及びⅡとの違いは，表 2-1 からも明らかなように各孔の底からの高さだけではなく各孔の流出係数をパラメータとしているかどうかである．ここで，カルマンフィルタについて少し触れる．詳しくは 3 章で述べるが，カルマンフィルタでは状態方程式と観測方程式の 2 つの方程式を基にして未知パラメータの最適推定が進められる．各孔の流出係数をパラメータに加えた場合，その計算段階においてこれら 2 つの方程式が非線形方程式となるのである．例として，観測方程式を取り上げてみる．式(2.34)はモデルⅢの観測方程式であるが，これから未知パラメータである $a(t)$と $X(t)$及び $b(t)$が掛け合わされている．この状態のままでは最適推定を行う事ができないため，これらを線形化する必要がある．そこで，未知パラメータをテーラー展開し，2 次の微小項を無視するという処理を加える．具体的には，未知パラメータ $X(t)$，$a(t)$，$b(t)$をテーラー展開することで，式(2.35)，式(2.36)及び式(2.37)のように変換する．

$$X(t) = X(t-\Delta t) + \Delta t \cdot dX(t-\Delta t)/dt \tag{2.35}$$

$$a(t) = a(t-\Delta t) + \Delta t \cdot da(t-\Delta t)/dt \tag{2.36}$$

$$b(t) = b(t-\Delta t) + \Delta t \cdot db(t-\Delta t)/dt \tag{2.37}$$

この処理により，未知パラメータ自体ではなく未知パラメータの差分が最適推定されるカルマンフィルタが実行可能となる．この手法により得られた結果は，用意された流出量のデータの観測値との誤差も小さく，またピーク時間がほぼ一致しているなど，モデルⅠ及びモデルⅡと比べても遜色のない結果が得られている．さらに，既知パラメータがない，つまりあらかじめ設定しておくパラメータが必要ないという点からも，提案された 3 種類のモデルの中で最も優れていると判断されている．ただ，降雨の変動が激しい長期の流出量予測に対しては誤差が大きくなるという問題が指摘されている．これは，大きな変動に対するカルマンフィルタの対応能力が十分でないことと，モデルⅢではタンクモデルが 1 段でかつ流出孔が 1 つという単純な形をとっているため流出を区分できず，複雑な流れの表現が難しいためである．

2.3 本研究における課題の整理

拡張型マルチタンクモデルに対して経験のある技術者でなくとも利用可能なパラメータ同定手法の確立のために，以下の課題に着目して研究を進める．

1. マルチタンクモデルの各段のタンクの持つ特徴を考慮した手法の提案
2. パラメータ同定手法に対応した適切な観測項目及び観測点の選定

まず，マルチタンクモデル，特に本研究で対象としている拡張型マルチタンクモデルの特性としては，その仕組みは非常に簡単なものであるが，タンクの数が多くパラメータ数も非常に多いと言える．そのため，拡張型マルチタンクモデルのような多次元タンクモデルにおいては，前節で紹介したタンクモデルとは異なり，直接カルマンフィルタを用いた定式化をすることが困難である．この点を考慮すれば，カルマンフィルタを適用する際には，より計算過程を単純化するような工夫が必要である．また，カルマンフィルタは先述したように観測値が激しく変動するような場合，計算が発散してしまうことが多く，誤差が大きくなる，あるいは解が得られない場合がある．そこで，新たな解析手法の導入も有効な手段であると考えられる．本研究では，カルマンフィルタでは対応できない部分に対してニューラルネットワークを用いてパラメータ同定を行う手法を提案している．

次に，適切な観測点の選定の重要性に関して記述する．カルマンフィルタを用いるにせよ，ニューラルネットワークを用いるにせよ，必ずその計算段階において観測値が必要となる．そこで，どの値を測定し，用いるのかを選択しなくてはならない．パラメータ同定精度に着目すれば，観測値の種類はできる限り多く，またパラメータとの関係性が深いことが重要である．しかしながら，パラメータ同定手法の実用面のことを考慮に入れれば，観測値の種類はできる限り少なく，また測定自体が簡易であることが求められる．本研究では，表面流出と土中の体積含水率を測定値として用いる手法を提案し，それに対して事例を用いた検証を行う．

第3章　パラメータ同定手法における基本的な考え方

3.1　基本方針

最初に，本研究で開発したパラメータ同定手法の対象は，拡張型マルチタンクモデルであることを確認しておきたい．これは，パラメータ同定手法を開発するにあたり，適用性の広さ及びタンクモデルの形状が変化した場合の対応力という点を重視した結果，拡張型マルチタンクモデルが最も優れていると考えためである．

次に，本手法には，以下の 2 つの特徴がある．

1. ニューラルネットワークとカルマンフィルタという 2 種類の手法を適用
2. タンクモデルを大きく 2 つの領域に分解

まず，2 種類の手法を用いることとした経緯を示す．マルチタンクモデルにおけるパラメータ同定手法を難しくしている最も大きな原因は，その非線形な流出機構である．これに耐えうる解析手法として最初に注目したのが，ニューラルネットワークであった．しかし，ニューラルネットワークによる解析を精度高く行うためには，同定すべきパラメータと同数あるいはそれ以上の種類の観測値が必要で，且つ，それらの観測値はパラメータとの関係性が保証されたものでなければならない．そこで，多くの斜面構造物の現状を見てみると，ニューラルネットワークの適用を可能とするような詳細な測定は実施されておらず，適切なパラメータを得ることは現状のままでは難しいことが分かった．この問題に対処するために,観測値が少ない状態でもパラメータ同定を進めることを可能とするために，カルマンフィルタの導入を試みた．ただし，2.3 に先述したような理由からカルマンフィルタは対応しきれない部分が存在し十分な同定結果が得られない場合等が考えられるため,単独の利用では精度が担保されない可能性がある．そのため，観測値が比較的得やすい領域に関しては，ニューラルネットワークを適用した．カルマンフィルタ及びニューラルネットワークの各手法の適用手法については，続く 3.2 及び 3.3 において詳述する．

本手法は，ある一つのマルチタンクモデルに対して，カルマンフィルタを適用する領域とニューラルネットワークを適用する領域とに分けてパラメータ同定を行う．これは，各解析手法の特徴と斜面における観測の実状を考慮したためである．具体的に言えば，上段タンクにおいては，仮想した貯留型タンク内の貯留高にあたる地表部分の体積含水率，また上部，中間部及び下部タンクからの流出量にあたる斜面の各高度におけるホートン流の流量を実際に測定することは難しい．そのため，観測値が少なくてもパラメータ同定の可能なカルマンフィルタを適用している．それに対して，各深度に配置した仮想の貯留型タンクの貯留高にあたる体積含水率が比較的観測値が得やすく，それに加えて流出機構において非線形が特に強く表れるような複雑な構造を持っているためにカルマンフィルタの適用が難しいと考えられる．そのため，中段タンクに関しては，ニューラルネットワークを適

用した．タンクモデルの領域分類及び適用した解析手法を模式的に図 3-1 に示す．ただし，本研究においては，地下水を示す下段タンクに関しての検討が行われていないため，図は下段タンクを除いた 3 列 6 段タンクとなっている．

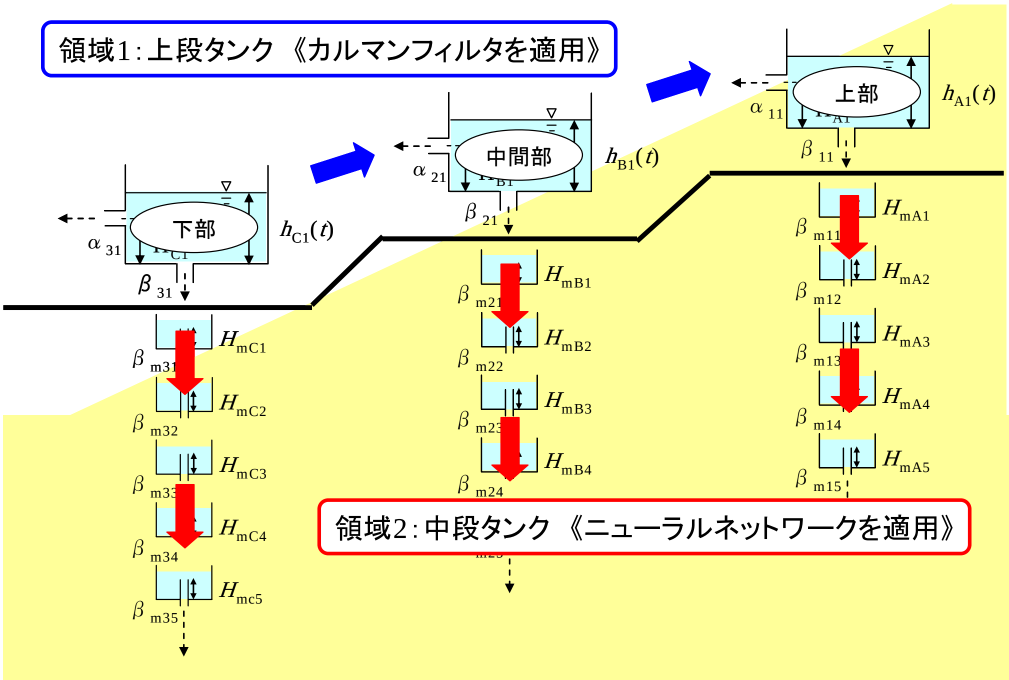


図 3-1　領域及び適用する解析手法

最後に，パラメータ同定の全体の流れを図 3-2 にそのフローチャートを示しながら説明する．

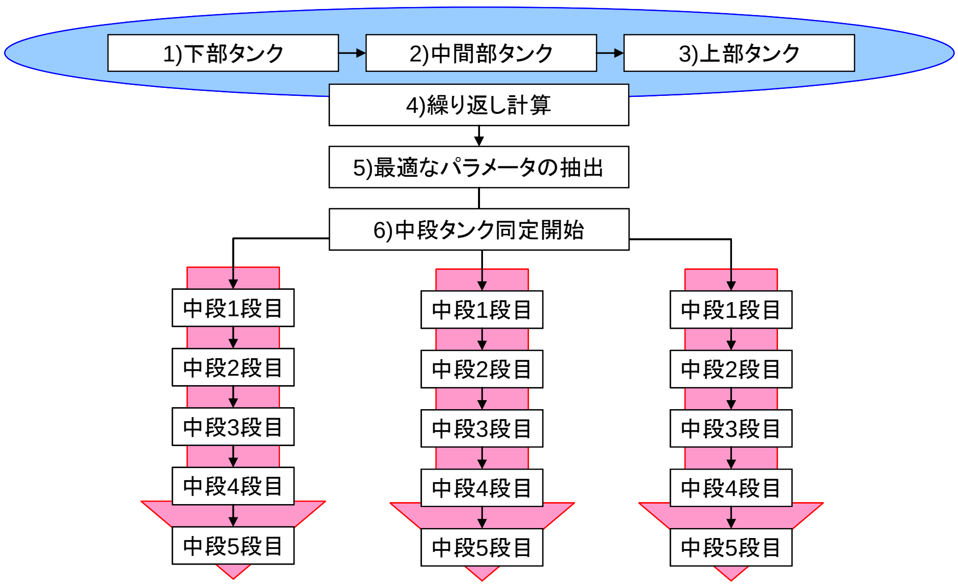


図 3-2　パラメータ同定手順

本手法のパラメータ同定はまず上段下部タンクから開始される．下部から中間部そして上部と同定を進め，この 3 ステップの繰り返し計算により上段タンクのパラメータとして

α_{11}，β_{11}，α_{21}，β_{21}，α_{31}，β_{31}の最適値を設定する．その後，上段タンクの最適パラメータを用いて，中段タンクのパラメータ同定へと進む．中段タンクのパラメータ同定はニューラルネットワークを適用し，深度の浅い地点から順に同定を行う．

3.2 カルマンフィルタと適用モデル

上段タンクのパラメータ同定手法に適用したカルマンフィルタの概要と，その適用モデルについて記す．カルマンフィルタは，利用するデータの種類が少なくてもパラメータ同定が可能であり，またデータの蓄積が必須でない等の利点がある．ここで説明するカルマンフィルタは，線形離散過程の推定において用いられる離散時間系予測型カルマンフィルタである．

3.2.1 カルマンフィルタの概要

カルマンフィルタは，誤差のある観測値から時間領域において変化する線形動的システムの状態を推定する手法である．[7)8)]

いま，未知パラメータが，ある離散過程の状態方程式にしたがって変化している場合を考える．状態 t から状態 $t+1$ への遷移が式(3.1)のような線形変換で表されるものとする．これを状態方程式と呼ぶ．

$$X(t+1) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + \omega(t) \tag{3.1}$$

ここで，$X(t)$は$(n \times 1)$次元の状態変数ベクトル，$A(t)$，$B(t)$及び $U(t)$は既知の行列であり，$A(t)$は$(n \times n)$次元の線形系の遷移行列，$B(t)$は$(n \times r)$次元，$U(t)$は$(r \times 1)$次元のベクトルである．$\omega(t)$は系に加わるシステムノイズである．なお，状態変数ベクトルとは，システム内における直接計測不可能なパラメータのことである．

状態 $t+1$ に移った後に式(3.2)で表されるような観測値 $Y(t+1)$が与えられるものとする．これを，観測方程式と呼ぶ．

$$Y(t+1) = C(t+1)X(t+1) + e(t+1) \tag{3.2}$$

ここで，観測値が m 個与えられている場合，$Y(t+1)$は$(m \times 1)$次元の状態変数ベクトル，$C(t+1)$は$(m \times n)$次元の観測行列である．$e(t+1)$は観測ノイズである．

状態変数 $X(t)$は不規則ベクトルで平均値 $\overline{X}(t)$と共分散 $P(t)$は，式(3.3)及び式(3.4)と書ける．また，システムノイズベクトルである $\omega(t)$の平均値が $\overline{\omega}(t)$で，共分散行列が $Q(t)$である場合，式(3.5)及び式(3.6)のように表される．

$$\mathrm{E}\left[X(t)\right]=\overline{X}(t) \tag{3.3}$$

$$\mathrm{E}\left[\left(X(t)-\overline{X}(t)\right)\left(X(t)-\overline{X}(t)\right)^T\right]=P(t) \tag{3.4}$$

$$\mathrm{E}\left[\omega(t)\right]=\overline{\omega}(t) \tag{3.5}$$

$$\mathrm{E}\left[\left(\omega(t)-\overline{\omega}(t)\right)\left(\omega(t)-\overline{\omega}(t)\right)^T\right]=Q(t) \tag{3.6}$$

ここで，$X(t)$と $\omega(t)$が無相関であるとすれば，$X(t+1)$も不規則ベクトルとなるため，状態 t+1 における平均値 $\overline{X}(t+1)$と共分散 $M(t+1)$は式(3.7)及び式(3.8)のように表される．

$$\overline{X}(t+1)=\mathrm{E}\left[X(t+1)\right]=A(t)\overline{X}(t)+B(t)U(t)+\overline{\omega}(t) \tag{3.7}$$

$$M(t+1)=\mathrm{E}\left[\left(X(t+1)-\overline{X}(t+1)\right)\left(X(t+1)-\overline{X}(t+1)\right)^T\right]=A(t)P(t)A(t)^T+Q(t) \tag{3.8}$$

さらに，観測ノイズである $e(t+1)$の平均値と共分散をそれぞれ式(3.9)及び式(3.10)で与えられると仮定する．

$$\mathrm{E}\left[e(t+1)\right]=0 \tag{3.9}$$

$$\mathrm{E}\left[e(t+1)e(t+1)^T\right]=R(t+1) \tag{3.10}$$

以上より，式(3.7)，式(3.8)及び式(3.2)で状態 $t+1$ での状態量の平均値，共分散行列ならびに観測方程式が与えられているため， $Y(t+1)$の観測が行われた後の最適推定値 $\hat{X}(t+1)$及びその推定誤差の共分散行列 $P(t+1)$が式(3.11)及び式(3.12)で与えられる．

$$\hat{X}(t+1)=\overline{X}(t+1)+K(t+1)\left\{Y(t+1)-C(t+1)\overline{X}(t+1)\right\} \tag{3.11}$$

$$P(t+1)=M(t+1)-K(t+1)C(t+1)M(t+1) \tag{3.12}$$

ここで，$K(t+1)$は状態 $t+1$ におけるカルマンゲインであり式(3.13)で求められる．

$$K(t+1)=M(t+1)C(t+1)^T\left\{C(t+1)M(t+1)C(t+1)^T+R(t+1)\right\} \tag{3.13}$$

以上が，カルマンフィルタの最適推定の計算過程である．

3.2.2 マルチタンクモデルへの適用モデル

本研究で用いる観測値は，下部タンク側孔からの流出及び中間部タンクの底孔からの浸透量の 2 種類である．パラメータ同定の大まかな流れは図 3-3 に示す通りである．

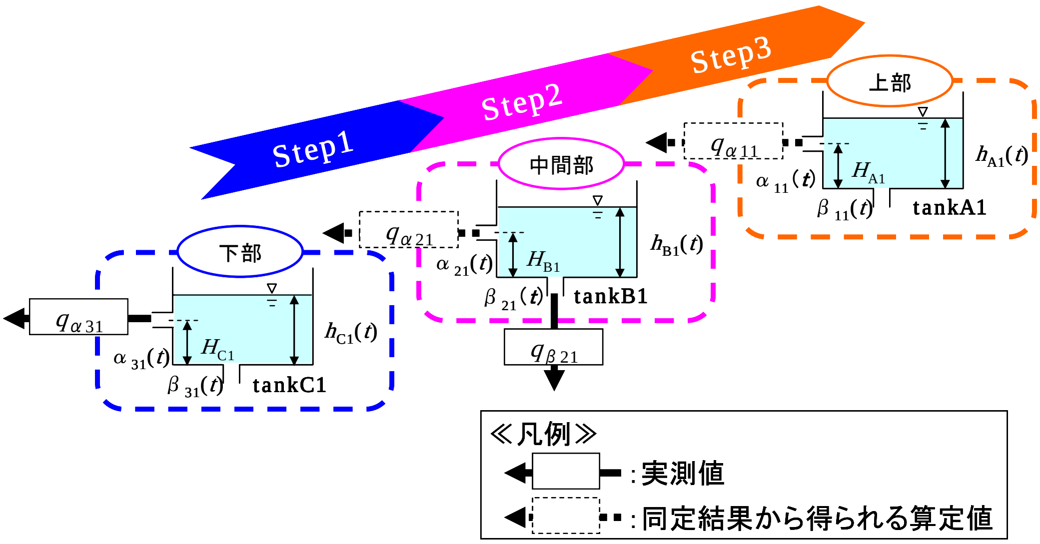


図 3-3　上段タンクのパラメータ同定の手順と用いる観測値

パラメータ同定の詳細について説明する．Step1，Step2 及び Step3 の各同定段階において同定される状態量及び同定に用いられる観測値について，表 3-1 にまとめた．

表 3-1　各同定段階において同定される状態量と用いられる観測値

	状態 t	同定段階		
	状態量	Step1	Step2	Step3
下部	$\alpha_{31}(t)$	○ α_{31}		
	$\beta_{31}(t)$	○ β_{31}		
	$h_{C1}(t)$	○ h_{C1}		
中間部	$\alpha_{21}(t)$	○ α_{21}' →	○ α_{21}	
	$\beta_{21}(t)$		○ β_{21}	
	$h_{B1}(t)$	○ h_{B1}' →	○ h_{B1}	
上部	$\alpha_{11}(t)$		○ α_{11}' →	○ α_{11}
	$\beta_{11}(t)$			○ β_{11}
	$h_{A1}(t)$		○ h_{A1}' →	○ h_{A1}
	用いる観測値 $Y(t)$	$\Delta q_{\alpha_{31}}$：観測値	$\Delta q_{\alpha_{21}}$：$\alpha_{21}'\left(h_{B1}'-H_{B1}\right)$ $\Delta q_{\beta_{21}}$：観測値	$\Delta q_{\alpha_{11}}$：$\alpha_{11}'\left(h_{A1}'-H_{A1}\right)$

○…次の Step において更新される状態量(ここでは，α' のように表記)

○…繰り返し計算を行うことで更新される状態量(ここでは，α のように表記)

ある状態 t において，上段タンクのパラメータ同定は Step1 から Step3 の 3 つの段階に区分される．まず，Step1 において同定されるパラメータは，α_{31}，β_{31}，h_{C1}，α_{21}，h_{B1} である．この中で，α_{21} 及び h_{B1} は，Step2 における観測値，流出係数 α_{21} の孔からの流出量を与える際に用いられる．また，この 2 つのパラメータは Step2 の計算によって値が更新される．次に，Step2 で同定されるパラメータは，α_{21}，β_{21}，h_{B1}，α_{11}，h_{A1} である．ここでも Step1 同様，α_{11} 及び h_{A1} は，次の Step3 において観測値を与える際に用いられると同時に値が更新される．Step3 で同定されるパラメータは，α_{11}，β_{11}，h_{A1} である．以上で，状態 t での上段タンクの全パラメータが同定されたことになる．この結果をさらに更新していく形で，状態 t+1 でのパラメータ同定を行っていく．

ここまでの記述により，カルマンフィルタを用いた上段タンクにおけるパラメータ同定手法の全体の流れを示した，以下では，3 列のマルチタンクモデルにおけるカルマンフィルタの推定過程の定式化について詳述する. まず, 下部タンクより計算を開始するのだが, 下部タンクの連続の式は以下のようになる．なお，これ以降の計算過程の定式化においては，各タンクの流出係数・貯留高等については図 3-3 を参照されたい.

(i) $h_{B1}(t) \geq H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$\frac{dh_{C1}}{dt} = R(t) + \alpha_{21}(t)(h_{B1}(t) - H_{B1}) - \alpha_{31}(t)(h_{C1}(t) - H_{C1}) - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.14}$$

(ii) $h_{B1}(t) \geq H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$\frac{dh_{C1}}{dt} = R(t) + \alpha_{21}(t)(h_{B1}(t) - H_{B1}) - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.15}$$

(iii) $h_{B1}(t) < H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$\frac{dh_{C1}}{dt} = R(t) - \alpha_{31}(t)(h_{C1}(t) - H_{C1}) - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.16}$$

(iv) $h_{B1}(t) < H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$\frac{dh_{C1}}{dt} = R(t) - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.17}$$

ここで，$\alpha_{21}(t)$，$\alpha_{31}(t)$及び$\beta_{31}(t)$が同定すべきパラメータで，本来ならば一定値として扱われるべきであるが，カルマンフィルタを用いたパラメータ同定段階においては時々刻々と変化する値であるため，時間空間で変化する系として表現している．$h_{B1}(t)$及び$h_{C1}(t)$は中間部のタンク及び下部タンクの貯留高で測定不可能な値であるため，これも同定すべき変数として扱う．ただし，側孔の底からの高さである H_{B1} 及び H_{C1} は，通常ならば未知のパラメータとして扱われるべきであるが，降雨開始から表面流出までの欠損雨量から予測することが可能であるため, 本研究内では同定対象として考慮にはいれていない.

本研究における状態方程式及び観測方程式は，式(3.18)及び式(3.19)として与える．ここでは，システムノイズベクトル $\omega(t)$及び観測ノイズ $e(t)$を 0 と仮定している．

$$X(t+1) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \tag{3.18}$$

$$Y(t+1) = C(t+1)X(t+1) \tag{3.19}$$

ただし， $X(t)$，$A(t)$，$B(t)$， $U(t)$， $Y(t)$及び $C(t)$については，後述する式として与えられる．ここでの特徴的な処理としては，式(3.14)から式(3.17)から分かるように，連続式が未知パラメータ同士の掛け合わされた非線形方程式となっていることが確認できることから，2.2 の式(2.35)から式(2.37)で紹介したようにテーラー展開を用いた変換により線形化を行う点である．式(2.35)から式(2.37)における Δt は 1 とする．

以上を踏まえて定式化を進めれば，$X(t)$は状態変数ベクトルで式(3.20)のように置ける．ちなみに，テーラー展開を用いた変換を行う際の状態変数ベクトル $X(t)$の構成要素は，すべて各変数の差分となるため，得られる予測値は各変数の変化量となる．

$$X(t) = \begin{bmatrix} \dfrac{dh_{B1}(t)}{dt} \\ \dfrac{dh_{C1}(t)}{dt} \\ \dfrac{d\alpha_{21}(t)}{dt} \\ \dfrac{d\alpha_{31}(t)}{dt} \\ \dfrac{d\beta_{31}(t)}{dt} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

また，$A(t)$は既知の行列で，中間部タンクの側孔から流出の有無，またその各々に対して下部タンクの側孔からの流出の有無の計 4 通りに場合分けができる．流出量の有無は，各タンク内の貯留高と側孔の底からの高さとの比較で表現できるため,以下のように書ける．

(i) $h_{B1}(t) \geq H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21}(t) & -\alpha_{31}(t) - \beta_{31}(t) & h_{B1}(t) - H_{B1} & -(h_{C1}(t) - H_{C1}) & -h_{C1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

(ii)　$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21}(t) & -\beta_{31}(t) & h_{B1}(t) - H_{B1} & 0 & -h_{C1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

(iii)　$h_{B1}(t) < H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_{31}(t) - \beta_{31}(t) & 0 & -(h_{C1}(t) - H_{C1}) & -h_{C1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

(iv)　$h_{B1}(t) < H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_{31}(t) & 0 & 0 & -h_{C1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

$B(t)$は既知の行列で以下のように与える.

(i)〜(iv)のとき

$$B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

さらに, $U(t)$は制御入力で以下のように書ける.

(i)　$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$U(t) = P(t) + \alpha_{21}(t)\{h_{B1}(t) - H_{B1}\} - \alpha_{31}(t)\{h_{C1}(t) - H_{C1}\} - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.26}$$

(ii)　$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$U(t) = P(t) + \alpha_{21}(t)\{h_{B1}(t) - H_{B1}\} - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.27}$$

(iii)　$h_{B1}(t) < H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$U(t) = P(t) - \alpha_{31}(t)\{h_{C1}(t) - H_{C1}\} - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.28}$$

(iv)　$h_{B1}(t) < H_{B1}$かつ$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$U(t) = P(t) - \beta_{31}(t)h_{C1}(t) \tag{3.29}$$

観測方程式内の $Y(t)$を与える観測値は，側孔からの流出量のみとする場合と側孔からの流出量及び底孔からの浸透量とする場合の 2 通りがある．下部タンクにおいては前者であるため，観測値は式(3.30)で表現される．

$$q\alpha_{31}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{C1}(t) < H_{C1} \\ \alpha_{31}(t)\{h_{C1}(t) - H_{C1}\} & \phantom{\text{for}} \quad h_{C1}(t) \geq H_{C1} \end{cases} \tag{3.30}$$

式(3.30)は非線型方程式となっているため，これに対してテーラー展開による線形化を行えば，$Y(t)$は式(3.31)となり，既知の行列である．

$$Y(t) = \frac{dq\alpha_{31}(t)}{dt} \tag{3.31}$$

$C(t)$は，式(3.32)及び式(3.33)のように書ける．

(ⅰ)，(iii)　$h_{C1}(t) \geq H_{C1}$のとき

$$C(t) = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{31}(t) & 0 & h_{C1}(t) - H_{C1} & 0 \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

(ⅱ)，(iv)　$h_{C1}(t) < H_{C1}$のとき

$$C(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

上記において，状態方程式と観測方程式の定義を行った．次の段階として，カルマンフィルタによる $X(t)$の予測値の算出過程について記す．

まず，t=1 の状態から開始する．初期条件として，各状態量の初期値は式(3.34)のように設定している．

$$\begin{gathered} h_{B1}(1) = 50 \\ h_{C1}(1) = 50 \\ \alpha_{21}(1) = 0.1 \cdots 1.0 \quad (0.1\text{刻みで}10\text{通り}) \\ \alpha_{31}(1) = 0.1 \cdots 1.0 \quad (0.1\text{刻みで}10\text{通り}) \\ \beta_{31}(1) = 0.1 \cdots 1.0 \quad (0.1\text{刻みで}10\text{通り}) \end{gathered} \tag{3.34}$$

また，t=1 において $X(1)$の平均値と最適値は同じとし，式(3.35)に示すように状態量の変化量の初期値は全て 0 を与えている．

$$\overline{X}(1) = \hat{X}(1) = \begin{bmatrix} \frac{dh_{B1}(1)}{dt} \\ \frac{dh_{C1}(1)}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}(1)}{dt} \\ \frac{d\alpha_{31}(1)}{dt} \\ \frac{d\beta_{31}(1)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

各孔の流出係数については，初期値として 0.1 から 1.0 の 10 通りの値を与えることで，繰り返し計算回数が少ない状態でも同定結果が得られるようにしている．また，各タンクの貯留高の初期値を 50(単位は㎜)としているのは，土が全く乾燥した状況ではなく，ある程度の水分を含んでいる状態を表しているが，これは初期値を 0 としてしまうとカルマンフィルタの計算が停止するために便宜上与えた値である．そのため，対象地域の土壌と降雨の状況に合わせて変更可能な値であると言える．

次に，$X(1)$の共分散行列である $P(1)$は乱数を用いることで式(3.36)のように与えている．

$$\begin{aligned} P(1) &= \left[\left(X(1) - \overline{X}(1)\right)\left(X(1) - \overline{X}(1)\right)^T\right] \\ &= \frac{1}{n}\begin{bmatrix} RN_{h_{B1}1} - \frac{dh_{B1}(1)}{dt} & \cdots & RN_{h_{B1}n} - \frac{dh_{B1}(1)}{dt} \\ RN_{h_{C1}1} - \frac{dh_{C1}(1)}{dt} & \cdots & RN_{h_{C1}n} - \frac{dh_{C1}(1)}{dt} \\ RN_{\alpha_{21}1} - \frac{d\alpha_{21}(1)}{dt} & \cdots & RN_{\alpha_{21}n} - \frac{d\alpha_{21}(1)}{dt} \\ RN_{\alpha_{31}1} - \frac{d\alpha_{31}(1)}{dt} & \cdots & RN_{\alpha_{31}n} - \frac{d\alpha_{31}(1)}{dt} \\ RN_{\beta_{31}1} - \frac{d\beta_{31}(1)}{dt} & \cdots & RN_{\beta_{31}n} - \frac{d\beta_{31}(1)}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RN_{h_{B1}1} - \frac{dh_{B1}(1)}{dt} & \cdots & RN_{h_{B1}n} - \frac{dh_{B1}(1)}{dt} \\ RN_{h_{C1}1} - \frac{dh_{C1}(1)}{dt} & \cdots & RN_{h_{C1}n} - \frac{dh_{C1}(1)}{dt} \\ RN_{\alpha_{21}1} - \frac{d\alpha_{21}(1)}{dt} & \cdots & RN_{\alpha_{21}n} - \frac{d\alpha_{21}(1)}{dt} \\ RN_{\alpha_{31}1} - \frac{d\alpha_{31}(1)}{dt} & \cdots & RN_{\alpha_{31}n} - \frac{d\alpha_{31}(1)}{dt} \\ RN_{\beta_{31}1} - \frac{d\beta_{31}(1)}{dt} & \cdots & RN_{\beta_{31}n} - \frac{d\beta_{31}(1)}{dt} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{3.36}$$

ここで，RN は乱数を示し，$h_{B1}(t)$及び $h_{B2}(t)$に対しては 0 から 10 の範囲で，$\alpha_{21}(t)$，$\alpha_{31}(t)$及び$\beta_{31}(t)$に対しては 0 から 1 の範囲で与えている．さらに，t=2 における $X(t)$の平均値 $\overline{X}(2)$及び共分散行列 $M(2)$は式(3.37)及び式(3.38)のように表される．

$$\overline{X}(2) = A(1)\hat{X}(1) + B(1)U(1) \tag{3.37}$$

$$M(2) = A(1)P(1)A(1)^T \tag{3.38}$$

次に，予測誤差分散に閉める状態の変動分を示したカルマンゲインは式(3.39)と書ける.

$$K(2) = M(2)C(2)^T \{C(2)M(2)C(2)^T\} \tag{3.39}$$

ただし，$C(2)$の行列を構成する各要素は，式(3.32)及び式(3.33)から分かるように差分ではないため，各要素の値は初期値と $\hat{X}(1)$，$\overline{X}(2)$から式(3.40)及び式(3.41)のようにして算定される.

$$\alpha_{31}(2) = \alpha_{31}(1) + \frac{d\hat{\alpha}_{31}(1)}{dt} + \frac{d\overline{\alpha}_{31}(2)}{dt} \tag{3.40}$$

$$h_{C1}(2) = h_{C1}(1) + \frac{d\hat{h}_{C1}(1)}{dt} + \frac{d\overline{h}_{C1}(2)}{dt} \tag{3.41}$$

これらの値を用いて，最適推定値 $\hat{X}(2)$が式(3.42)のように算定される.

$$\hat{X}(2) = \overline{X}(2) + K(2)\{Y(2) - C(2)\overline{X}(2)\} \tag{3.42}$$

また，ここでの $\hat{X}(2)$の共分散 $P(2)$は式(3.43)で与えられる.

$$P(2) = M(2) - K(2)C(2)M(2) \tag{3.43}$$

観測値を与えながら，以上の流れに沿って繰り返し計算を行うことでより実際の状況を反映した $X(t)$を得ることができる.

同様の計算過程を踏んで中間部および上部タンクのパラメータ同定も進めることができる. 各タンクにおける連続の式, 状態方程式及び観測方程式を構成する各行列式を記す. 中間部タンクにおける連続の式は式(3.44)から式(3.47)である.

(i) $h_{A1}(t) \geq H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$ のとき

$$\frac{dh_{B1}}{dt} = R(t) + \alpha_{11}(t)(h_{A1}(t) - H_{A1}) - \alpha_{21}(t)(h_{B1}(t) - H_{B1}) - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.44}$$

(ii) $h_{A1}(t) \geq H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) < H_{B1}$ のとき

$$\frac{dh_{B1}}{dt} = R(t) + \alpha_{11}(t)(h_{A1}(t) - H_{A1}) - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.45}$$

(iii)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$のとき

$$\frac{dh_{B1}}{dt} = R(t) - \alpha_{21}(t)(h_{B1}(t) - H_{B1}) - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.46}$$

(iv)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) < H_{B1}$のとき

$$\frac{dh_{B1}}{dt} = R(t) - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.47}$$

以降では，状態方程式を構成する各ベクトルについて記述する．まず，中間部タンクにおける状態変数ベクトル $X(t)$は，連続の式から考えれば式(3.48)のように書ける．

$$X(t) = \begin{bmatrix} \dfrac{dh_{A1}(t)}{dt} \\ \dfrac{dh_{B1}(t)}{dt} \\ \dfrac{d\alpha_{11}(t)}{dt} \\ \dfrac{d\alpha_{21}(t)}{dt} \\ \dfrac{d\beta_{21}(t)}{dt} \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

次に，行列 $A(t)$は以下のように書ける．

(i)　$h_{A1}(t) \geq H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{11}(t) & -\alpha_{21}(t) - \beta_{21}(t) & h_{A1}(t) - H_{A1} & -(h_{B1}(t) - H_{B1}) & -h_{B1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

(ii)　$h_{A1}(t) \geq H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) < H_{B1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{11}(t) & -\beta_{21}(t) & h_{A1}(t) - H_{A1} & 0 & -h_{B1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.50}$$

(iii)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_{21}(t) - \beta_{21}(t) & 0 & -(h_{B1}(t) - H_{B1}) & -h_{B1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.51}$$

(iv)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) < H_{B1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_{21}(t) & 0 & 0 & -h_{B1}(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.52}$$

さらに，$B(t)$は既知の行列で以下のように書ける．

(ｉ)～(iv)のとき

$$B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.53}$$

最後に $U(t)$は制御入力で以下のように書ける．

(i)　$h_{A1}(t) \geq H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$のとき

$$U(t) = P(t) + \alpha_{11}(t)\{h_{A1}(t) - H_{A1}\} - \alpha_{21}(t)\{h_{B1}(t) - H_{B1}\} - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.54}$$

(ii)　$h_{A1}(t) \geq H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) < H_{B1}$のとき

$$U(t) = P(t) + \alpha_{11}(t)\{h_{A1}(t) - H_{A1}\} - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.55}$$

(iii)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) \geq H_{B1}$のとき

$$U(t) = P(t) - \alpha_{21}(t)\{h_{B1}(t) - H_{B1}\} - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.56}$$

(iv)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$かつ$h_{B1}(t) < H_{B1}$のとき

$$U(t) = P(t) - \beta_{21}(t)h_{B1}(t) \tag{3.57}$$

前述したように，観測方程式内の $Y(t)$を与える観測値は，本手法においては，側孔からの流出量のみとする場合と側孔からの流出量及び底孔からの浸透量とする場合の 2 通りが

ある．中間部タンクにおいては後者であるため，観測値は式(3.58)及び式(3.59)で表現される．

$$q_{\alpha 21}(t)=\begin{cases}0 & \text{for} \quad h_{B1}(t)<H_{B1}\\ \alpha_{21}(t)\{h_{B1}(t)-H_{B1}\} & \quad\quad\; h_{B1}(t)\geq H_{B1}\end{cases} \tag{3.58}$$

$$q_{\beta_{21}}(t)=\beta_{21}(t)h_{C1}(t) \tag{3.59}$$

この 2 式は非線型方程式となっているため，これらに対してテーラー展開による線形化を行えば，観測値 $Y(t)$は式(3.60)となり， $C(t)$は，式(3.61)及び式(3.62)のように書ける．

$$Y(\mathrm{t})=\begin{bmatrix}\dfrac{dq_{\alpha 21}(t)}{dt}\\ \dfrac{dq_{\beta_{21}}(t)}{dt}\end{bmatrix} \tag{3.60}$$

(i)，(iii)　$h_{B1}(t)\geq H_{B1}$のとき

$$C(\mathrm{t})=\begin{bmatrix}0 & \alpha_{21}(t) & 0 & h_{B1}(t)-H_{B1} & 0\\ 0 & \beta_{21}(t) & 0 & 0 & h_{B1}(t)\end{bmatrix} \tag{3.61}$$

(ii)，(iv)　$h_{B1}(t)<H_{B1}$のとき

$$C(\mathrm{t})=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \beta_{21}(t) & 0 & 0 & h_{B1}(t)\end{bmatrix} \tag{3.62}$$

中間部の同定を行う際の各状態量の初期値の設定及び状態変数ベクトル $X(t)$の初期値の設定は，式(3.63)及び式(3.64)のように書ける．中間部タンクの側孔の流出係数および側孔の底からの高さに関しては，下部タンクのパラメータ同定結果を初期値として用いそれを更新するという形をとっていることに留意されたい．本研究では，下部タンクで得られた 10 通りの同定結果のそれぞれに対して，中間部タンクでさらに 10 通りの初期値の与えるため，100 通りのパラメータのセットが存在することになる．

$$\begin{gathered}h_{A1}(1)=50\\ h_{B1}(1)=\text{下部タンクの同定結果}\\ \alpha_{11}(1)=0.1\cdots 1.0 \quad (0.1\text{刻みで}10\text{通り})\\ \alpha_{21}(1)=\text{下部タンクの同定結果}\\ \beta_{21}(1)=0.1\cdots 1.0 \quad (0.1\text{刻みで}10\text{通り})\end{gathered} \tag{3.63}$$

$$\overline{X}(1) = \hat{X}(1) = \begin{bmatrix} \frac{dh_{A1}(1)}{dt} \\ \frac{dh_{B1}(1)}{dt} \\ \frac{d\alpha_{11}(1)}{dt} \\ \frac{d\alpha_{21}(1)}{dt} \\ \frac{d\beta_{21}(1)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.64}$$

次に上部タンクにおける，連続の式，状態方程式及び観測方程式を構成する各行列式を記す．上部タンクの連続の式を考える際には，上部タンクからの流出量の有無によってのみ場合分けを行えばよいため，以下に示すように 2 通りの場合分けが考えられる．その結果，連続の式は式(3.65)及び式(3.66)として表される．

(i) $h_{A1}(t) \geq H_{A1}$のとき

$$\frac{dh_{A1}}{dt} = R(t) - \alpha_{11}(t)(h_{A1}(t) - H_{A1}) - \beta_{11}(t)h_{A1}(t) \tag{3.65}$$

(ii) $h_{A1}(t) < H_{A1}$のとき

$$\frac{dh_{A1}}{dt} = R(t) - \beta_{11}(t)h_{A1}(t) \tag{3.66}$$

これより，状態変数ベクトル $X(t)$は式(3.67)のように書ける．

$$X(t) = \begin{bmatrix} \frac{dh_{A1}(t)}{dt} \\ \frac{d\alpha_{11}(t)}{dt} \\ \frac{d\beta_{11}(t)}{dt} \end{bmatrix} \tag{3.67}$$

次に，行列 $A(t)$は以下のように書ける．

(i) $h_{A1}(t) \geq H_{A1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} -\alpha_{11}(t) - \beta_{11}(t) & -(h_{A1}(t) - H_{A1}) & -h_{A1}(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.68}$$

(ii)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$のとき

$$A(t) = \begin{bmatrix} -\beta_{11}(t) & 0 & -h_{A1}(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

さらに $B(t)$は既知の行列で以下のように書ける.

(ⅰ)〜(iv)のとき

$$B(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

最後に $U(t)$は制御入力で以下のように書ける.

(i)　$h_{A1}(t) \geq H_{A1}$のとき

$$U(t) = P(t) - \alpha_{11}(t)\{h_{A1}(t) - H_{A1}\} - \beta_{11}(t)h_{A1}(t) \tag{3.71}$$

(ii)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$のとき

$$U(t) = P(t) - \beta_{11}(t)h_{A1}(t) \tag{3.72}$$

観測方程式内の $Y(t)$を与える観測値は，上部タンクにおいては側孔からの流出量のみであるため，観測値は式(3.73)で表現される.

$$q_{\alpha 11}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad h_{A1}(t) < H_{A1} \\ \alpha_{11}(t)\{h_{A1}(t) - H_{A1}\} & \phantom{\text{for}} \quad h_{A1}(t) \geq H_{A1} \end{cases} \tag{3.73}$$

式(3.73)は非線型方程式となっているため，これに対してテーラー展開による線形化を行えば，$Y(t)$は式(3.74)となり，既知の行列である $C(t)$は，式(3.75)及び式(3.76)となる.

$$Y(\mathrm{t}) = \frac{dq_{\alpha 11}(t)}{dt} \tag{3.74}$$

(ⅰ), (iii)　$h_{A1}(t) \geq H_{A1}$ のとき

$$C(\mathrm{t}) = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(t) & h_{A1}(t) - H_{A1} & 0 \end{bmatrix} \tag{3.75}$$

(ⅱ), (iv)　$h_{A1}(t) < H_{A1}$ のとき

$$C(\mathrm{t}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.76}$$

上部の同定を行うときの各状態量の初期値及び，$X(t)$の初期値の設定においては，中間部タンクのパラメータ同定結果を更新するため，式(3.77)及び式(3.78)のように書ける．

$$\begin{aligned} &h_{A1}(1) = \text{中間部タンクの同定結　果} \\ &\alpha_{11}(t) = \text{中間部タンクの同定結　果} \\ &\beta_{11}(t) = 0.1 \sim 1.0 \quad (0.1\text{刻みで}10\text{通り}) \end{aligned} \tag{3.77}$$

$$\bar{X}(1) = \hat{X}(1) = \begin{bmatrix} \dfrac{dh_{A1}(1)}{dt} \\ \dfrac{d\alpha_{11}(1)}{dt} \\ \dfrac{d\beta_{11}(1)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.78}$$

3.3 ニューラルネットワークと適用モデル

中段タンクのパラメータ同定手法に適用したニューラルネットワークの概要と，その適用モデルについて記す．本節では，ニューラルネットワークの持ついくつかの特徴の中で特に以下の 2 点に注目して説明を行う．

1. 優れた非線形の写像能力
2. 学習による様々な環境への適応性

3.3.1 ニューラルネットワークの概要

まず，ニューラルネットワークの特徴である非線形性への対応力を生み出す要因は，その構造である．ニューラルネットワークとは，生物の神経細胞(ニューロン)の判断機能をモデル化したユニットを多数組み合わせて，ある高次の判断機能をソフト的・ハード的に実現したものである．[9)]ニューロンの概略及び人工ニューラルネットワーク基本ユニットの概念図である図 3-4 を参考に，ニューロンの判断機能とそのモデル化について記す．

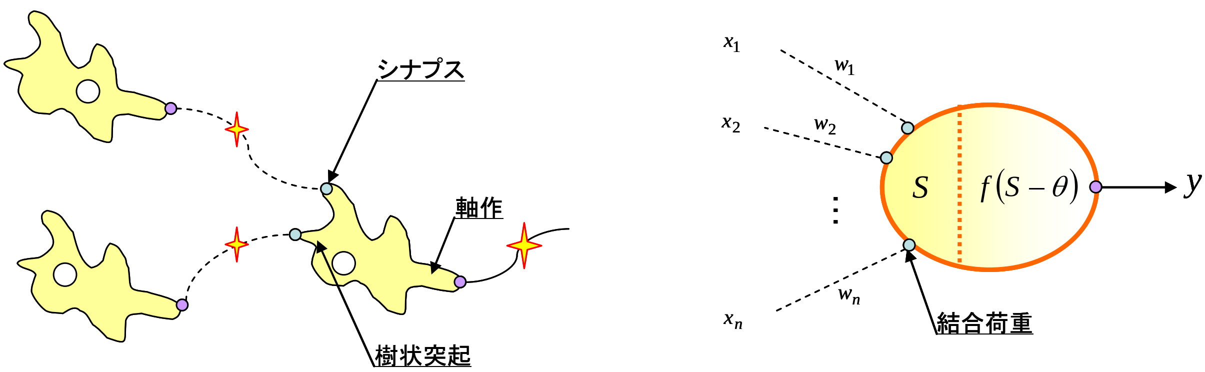


図 3-4　生体ニューロン(左)及び人工ニューロン(右)

生物におけるニューロンでは，ニューロン間の信号伝達は電位の変化によって起こる．いくつかのつながり(シナプス)から入力信号が入り，電位に変換されてニューロン内に伝わることにより電位が上昇し，ある閾値を超えることでニューロンが反応を示す．このように閾値を越えた状態になった場合，ニューロンは次のニューロンへ信号を伝達するという構造を持っている. これに対し, 人工ニューラルネットワーク基本ユニットにおいては, 入力要素の総和を式(3.79)に示す結合関数により算出し，それがある閾値を越えるかどうか，超えた場合は次のユニットに伝達を行うという判断を式(3.80)に示す伝達関数に行わせる.

$$S = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i \tag{3.79}$$

$$y = f(S-\theta) = \frac{1}{1+e^{-\alpha(S-\theta)}} \tag{3.80}$$

ここで,結合関数内の S は前層からの入力値に重み付けを乗じたものの総和, x_i は入力要素，w_i は入力要素に対して行われる重み付けで，結合荷重と呼ばれる．これはシナプスごとの入力信号の電位への変化効率を表したもので, シナプスごとの伝達効率は異なるため, w_i も入力値ごとに異なる値となる．伝達関数の y は出力を表し，S と閾値の差をシグモイド関数で変換することにより得られる値である． α はシグモイド関数の傾きを示す．シグモイド関数とは準線形連続関数で， α を変化させることにより図 3-5 のように線形に近い応答から非線形性の大きな応答までが表現可能である．

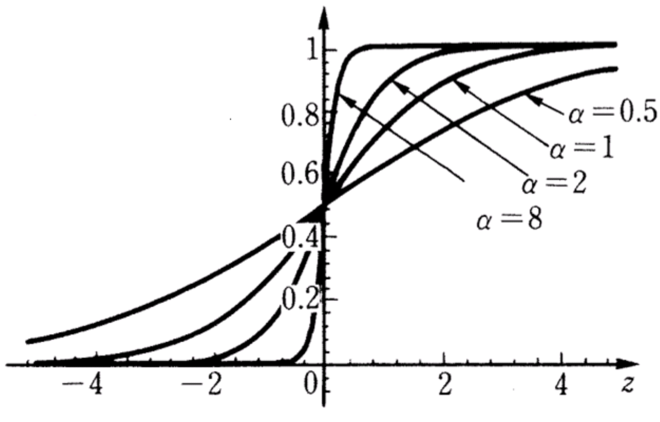


図 3-5　シグモイド関数と α の関係

ニューラルネットワークは，上述したような構造を持つ基本ユニットを繋げることによって構成されている．この構成法は大きく分けると，階層結合型ニューラルネットワークモデルと相互結合型ニューラルネットワークモデルとに分類できる．階層結合型ニューラルネットワークモデルは，入力から出力までの基本ユニットがすべて順方向のみに結合さ

れているモデルである．一方，相互結合型ニューラルネットワークモデルは，入力から出力までの基本ユニットの結合が順方向に限らず相互結合の形態を持つ場合もありえるという特徴がある．本研究では，図 3-6 に示すような入力層，中間層および出力層を持つ階層型ニューラルネットワークモデルを適用している．中間層の数ならびに各層の基本ユニット数は自由に設定することが可能である．

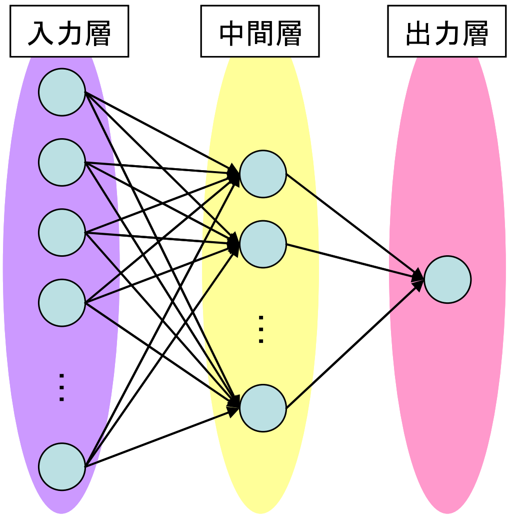


図 3-6　階層型ニューラルネットワークモデル

次に，ニューラルネットワークの広い適応性を支える要因である学習法について記述する．ニューラルネットワークの学習には，入力値に対して期待する出力値が与えられる「教師あり学習」と期待する出力値が与えられていない「教師なし学習」がある．

教師あり学習は，学習用データの出力とニューラルネットワークから予測される出力を比較することにより，その差をできるだけ小さくすることを目的に式(3.79)に示す w_i，つまり結合荷重を変化させることで進められる．学習用データは教師データとも呼ばれ，入力とそれに対する理想的な出力の組み合わせである．一方，教師なし学習は，入力に対する出力が用意されていないといった外的基準が全くない状態で与えられたデータを自動的に分類する学習法である．データの背後に存在する本質的な構造を抽出する際などに用いられる．

本研究では，マルチタンクモデルのパラメータという数字を具体的に同定するという必要性から教師あり学習を採用する．また，学習の際のニューラルネットワークシミュレータとして，NEUROSIM/L[10)]を使用する．このソフトウェアでは，3 層構造のニューラルネットワークが採用され，学習には誤差逆伝播法が用いられている．

誤差逆伝播法について簡単に説明する．誤差逆伝播法は与えられた教師データを下に，各単位ユニットでのネットワークで得られる結果と教師データの誤差(局所誤差)を計算し，結合荷重を調整することにより局所誤差の最小化を図る．さらに，その局所探索の繰り返しによって，大局的な極小点を見つけ出すというアルゴリズムである．

3.3.2 マルチタンクモデルへの適用モデル

マルチタンクモデルでは，中段タンクに対してニューラルネットワークを適用する．これは，中段タンクに対しては微分形を用いる定式化を適用した場合，実測値の不確実性を直接的に反映することとなるため，より強固なアルゴリズムであるニューラルネットワークを利用した方が,その処理能力の早さなどからも実用に適していると考えたためである．中段タンクの形状は，図 2-3 にも示したように底面に立ち上がりを持つ浸透孔の設置された貯留型タンクを直列に 5 段連ねた構造となっている．拡張型マルチタンクモデルの中間部を例に取り，パラメータ同定の全体の流れを模式的に図 3-7 に示す．

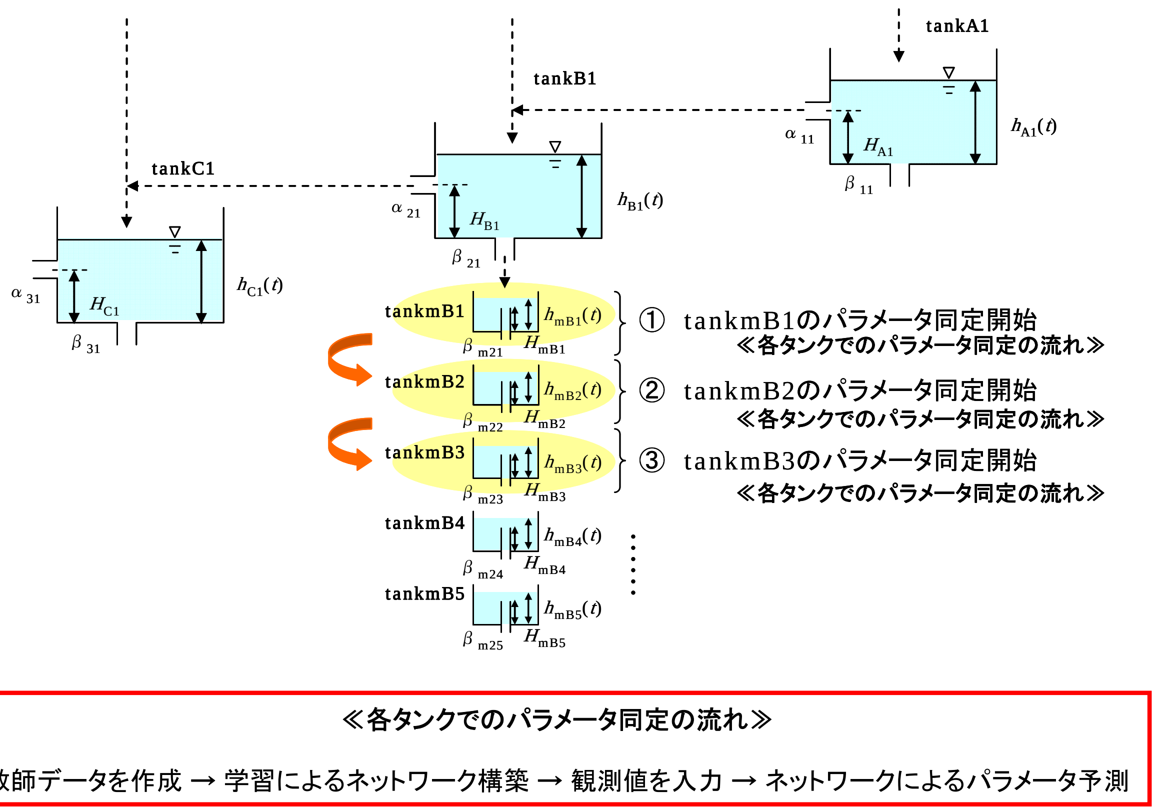


図 3-7　中段タンクにおけるパラメータ同定の流れ

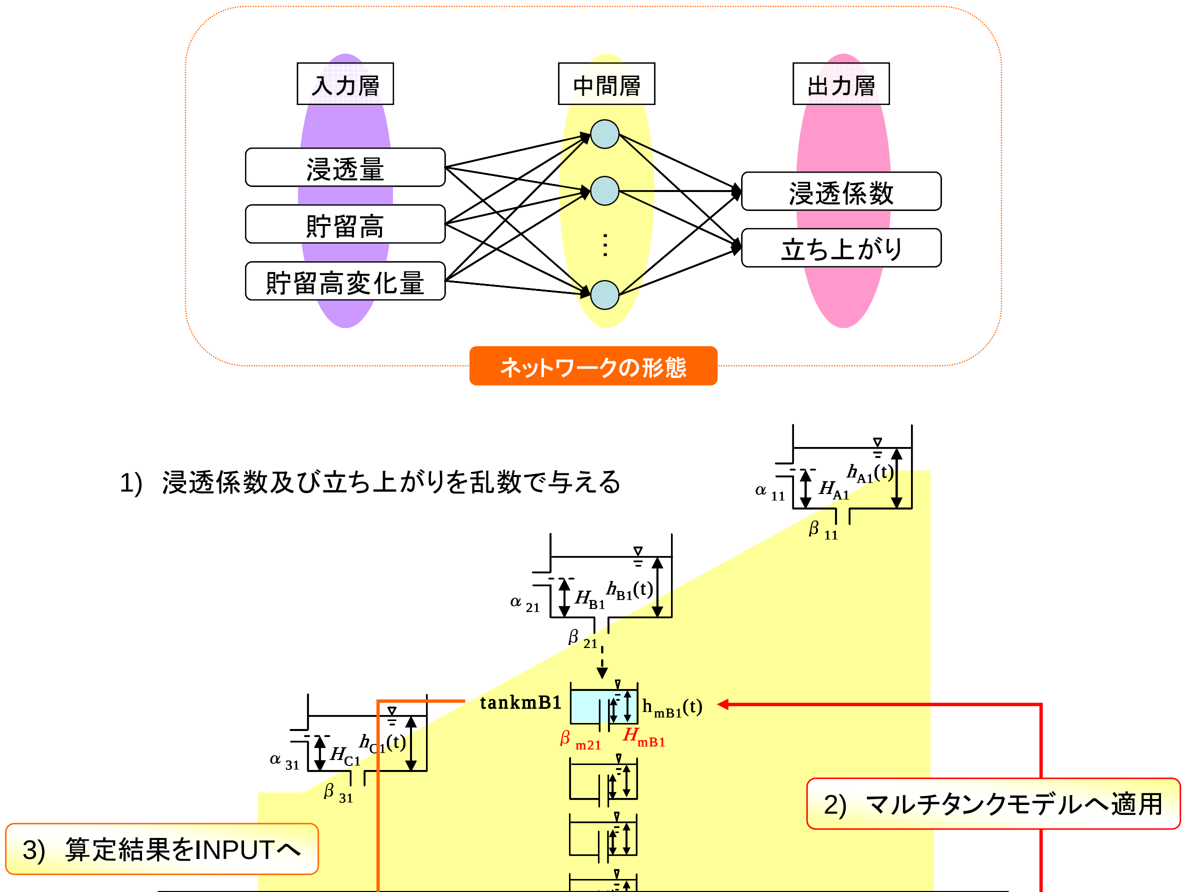
中段タンクにおけるパラメータ同定では，赤枠内に示す≪各タンクでのパラメータ同定の流れ≫を深度の浅いタンクから順に実行する．

tankmB1 で同定されたパラメータは，tankmB2 のパラメータ同定を行う際の教師データ作成の段階において反映され，また，tankmB3 のパラメータ同定を行う際には，その教師データを作成する際に tankmB1 及び tankmB2 で同定されたパラメータが用いられている．つまり，ある深度のタンクのパラメータは，その深度より浅い位置に配置されたタンクのパラメータの影響を受けて決定されていくことになる．

この赤枠内の≪各タンクでのパラメータ同定の流れ≫について詳述する．これは，各タンクのパラメータ同定の際に行われる一連の具体的な手順を示したものである．まず，最

初に教師データの作成とあるが，本研究では，パラメータの値をネットワークの予測結果として得るために出力側に各タンクのパラメータを設定し教師データを作成した．適用したネットワークの形状及び教師データ作成の手順に関しては，図 3-8 にまとめ，詳細については後述する．次に，作成した教師データを基に学習を行わせネットワークを構築させる．さらに，構築したネットワークを用いて出力予測，つまりタンクのパラメータ予測を行わせるのである．ここで，ネットワークに与える入力は観測値を基に算定されるものである．これら観測値の扱い方については，3.4 において記述する．

また，最終段階のパラメータ予測に際しては，入力が n セットあれば出力も n セット存在する．この場合は，同定結果をタンクモデルに適用した際に得られる貯留高から得られる飽和度と観測値から算定される飽和度の誤差の二乗和が最小のものを最適パラメータとして選び出す．



	INPUT			OUTPUT	
	浸透量	貯留高	貯留高変化量	浸透係数 β_m	立ち上がり H_m
1	$h_{B1}\times\beta_{21}$			$0\leqq RN<1$	$0\leqq RN<X_H$
…….				$0\leqq RN<1$	$0\leqq RN<X_H$
700	$h_{B1}\times\beta_{21}$			$0\leqq RN<1$	$0\leqq RN<X_H$

X_H:タンクの深さ×間隙率の値を参考に決定

図 3-8　ネットワークの形状及び教師データ作成方法

ニューラルネットワークにおける教師データの役割については先述したが，どのような教師データを作成するかは解析結果の精度に影響を与える非常に重要な検討課題である．本研究では，図 3-8 中に示すように入力(INPUT)に上段タンクからの地中への浸透量，タンクの貯留高及び貯留高変化量，出力(OUTPUT)に浸透係数及び立ち上がりを設定した．

教師データの作成方法について説明する．まず，教師データの作成の準備段階として，図 3-8 の 1)に示すように，浸透係数を 0 以上 1 未満の範囲の乱数で，また立ち上がりを 0 以上 X_H 未満の範囲の乱数で与えたパラメータセットを用意する．

次に用意したパラメータセットをマルチタンクモデルに適用し，流量計算を行う．これにより，各時点での対象とするタンク内の貯留高とその時点での貯留高変化量を算定することができる．算定した値を INPUT の欄に記入する．これを全てのパラメータセットに対して行う事で，教師データを作成する．ただし，INPUT の一つである浸透量に関しては，tankmB1～tankmB5 の全ての深度における段階において，上段タンクから地中への浸透量の値を用いている．

また，ここでは，時系列を追えないニューラルネットワークを時系列が重要な役割を占めるタンクモデルに対応させるために，用意したパラメータをタンクモデルに適用し INPUT に記入する算定結果を選ぶ際に，一部の時間帯から値を取るのではなく時系列全体から値を取るという処理を行っている．具体的には，タンクモデルの計算期間が 0 時から 1 時間刻みで 10 時までだとすれば，教師データの n セットのうち，最初の 1 セットは 0 時の時点での算定結果を選択，2 セット目には 1 時の時点の算定結果を選択，さらにこのまま続けて 11 セット目には 10 時の時点算定結果を選択，そして 12 セット目には 0 時の時点での算定結果を選択という流れで教師データの作成を行っている．

3.4 観測値のタンクモデルへの適用法

タンクモデルに適用する観測値としては，表面流出量及び土中の体積含水率の 2 種類を想定している．

まず表面流出量に関して記述する．表面流出量は斜面の下端で測定された斜面全域からの流出量を流域面積で割るという処理を行っている．これは，タンクモデルにおける流出量が単位面積あたりの値であるためである．

次に，土中の体積含水率について記す．土壌水分計を用いて測定された誘電率を以下の校正式 [11)]を用いて，体積含水率に変換している．

$$\theta = -0.057 - 0.66\mathrm{V} + 8V^2 - 27.91V^3 + 49.23V^4 - 42.46V^5 + 14.47V^6 \qquad (3.81)$$

ここで，θ は体積含水率，V は計器読み値で単位は $Volt$ である．

本研究において，最終的にパラメータを評価する際に用いる判断指標は飽和度である．そこで，体積含水率から式(3.82)の関係を用いて飽和度を算定する．

$$Sr = \frac{\theta}{n} \tag{3.82}$$

ここで，Sr は飽和度，θ は体積含水率，n は間隙率を表す．

土壌水分計によって各観測点において観測された体積含水率及び各観測点間の距離は，本研究では図 3-9 のようにタンクモデルへ適応している．

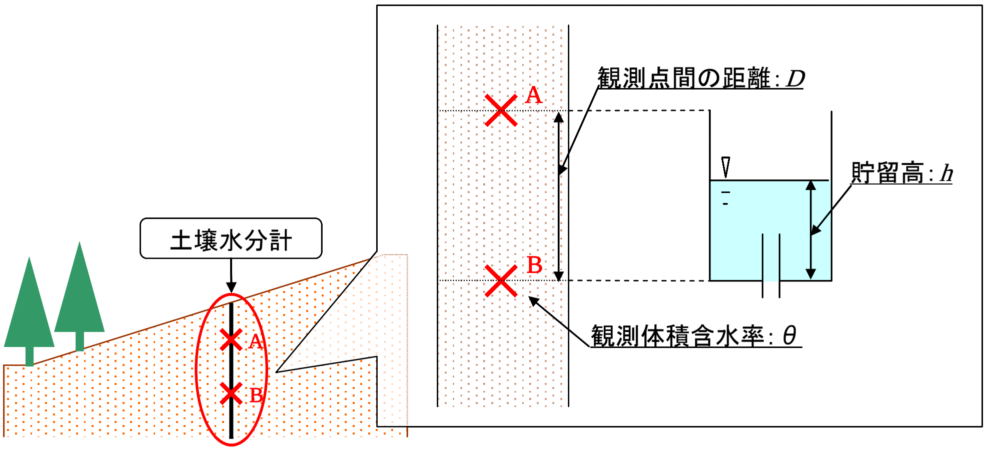


図 3-9　斜面の不飽和領域へのタンクモデル適用例

斜面の不飽和領域に対して図 3-9 に示すように土壌水分計を用いて深度 A および深度 B の 2 つの深度で体積含水率の測定を行った場合を考える．この時，AB 間のタンクは，図 3-9 のように想定できる．具体的には，観測点である AB 間の距離 D をタンクの深さとして考え，このタンク内の貯留高 h を深度 B での観測含水率 θ を用いて，式(3.83)のような関係式で与えることができる．

$$h = D \times \theta \tag{3.83}$$

これは，体積含水率が式(3.84)で表されることを受けて，タンクの深さ D は式(3.84)の分母である $Va + Vw + Vs$ に相当するためである．

$$\theta = \frac{Vw}{Va + Vw + Vs} \tag{3.84}$$

ただし，Va は土を構成している空気の層の体積，Vw は土を構成している水の層の体積ならびに Vs は土を構成している土粒子の層の体積を表している．

第4章　不飽和領域に関する適用性検討

2 つの事例を通して，不飽和領域を考慮した直列タンクモデルに対してニューラルネットワークを用いたパラメータ同定手法がどれほどの精度を持つか，またその問題点について検証する．

4.1　一次元カラム実験を用いた室内実験事例検証

4.1.1　一次元カラム実験概要

一次元カラム実験 [12)]は，図 4-1 に示す装置を用いており，試料は砂，試料の長さは 60cm である．試料に対しては，10cm ごとの体積含水率が測定されている．この観測点を上から順に No.1，No.2，No.3，No.4 及び No.5 とする．得られた測定結果を表 4-1 及び図 4-2 に示す．

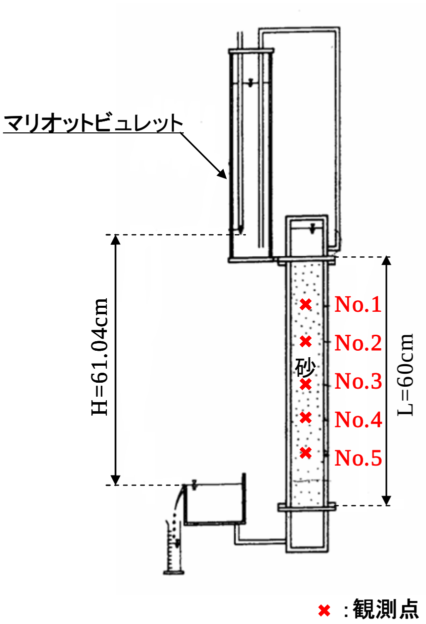


図 4-1　定水位透水試験装置

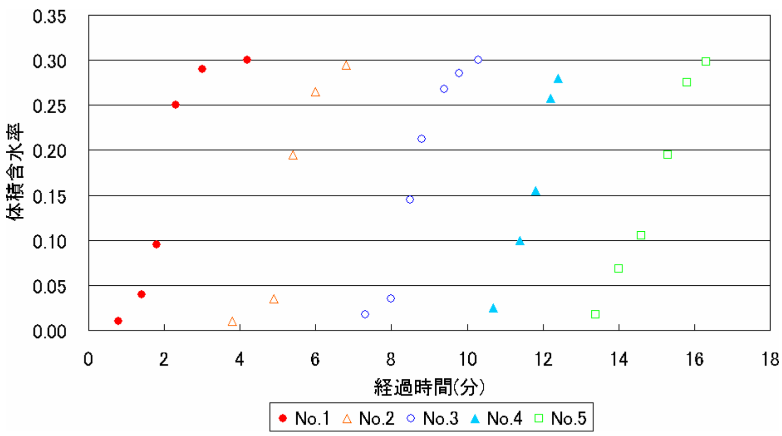


図 4-2　一次元カラム実験測定結果

表 4-1　一次元カラム実験測定結果

時間(分)	No.1
0.8	0.010
1.4	0.040
1.8	0.095
2.3	0.250
3.0	0.290
4.2	0.300

時間(分)	No.2
3.8	0.010
4.9	0.035
5.4	0.195
6.0	0.265
6.8	0.295

時間(分)	No.3
7.3	0.018
8.0	0.035
8.5	0.145
8.8	0.212
9.4	0.268
9.8	0.285
10.3	0.300

時間(分)	No.4
10.7	0.025
11.4	0.100
11.8	0.155
12.2	0.258
12.4	0.280

時間(分)	No.5
13.4	0.018
14.0	0.068
14.6	0.105
15.3	0.195
15.8	0.275
16.3	0.298

4.1.2 適用タンクモデル及びパラメータ同定手法の概要

実験では 10cm ごとに観測点があるため，直列五段タンクモデルを適用した．実験装置と適用した直列 5 段タンクの関係は図 4-3 に示したとおりである．

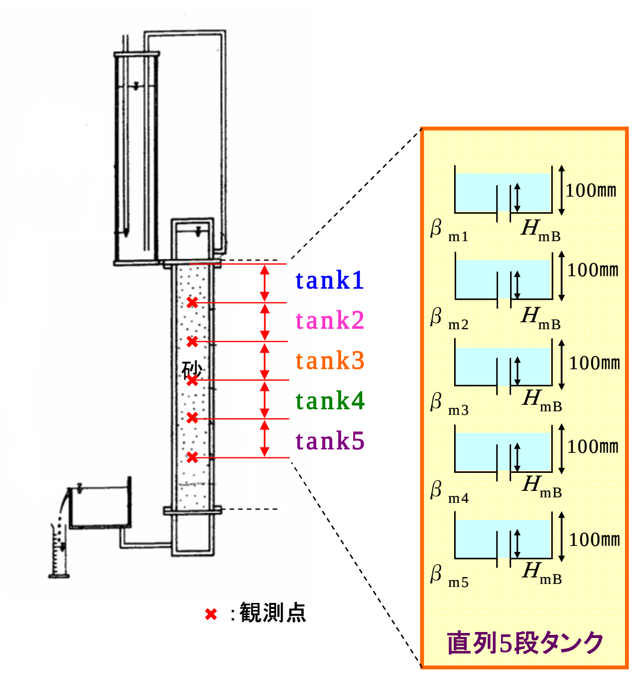


図 4-3　実験装置と適用したタンクモデル

図 4-3 からもわかるように，各タンクの浸透孔には立ち上がりがあり，不飽和領域を考慮したモデルとなっている．

次に，パラメータ同定手法の概要について説明する．主に，タンクモデルの解析に当たり加えた条件とニューラルネットワークへの入力条件について説明する．

最初に，タンクモデルの解析条件に関して記述する．一次元カラム実験の実験結果をタンクモデルに適用するにあたり，上部からの水の供給状況に関するデータを得ることができなかったため，tank1 の貯留高の変化を参考に水の供給状況について推定した．一次元カラム実験における推定供給量は表 4-2 及び図 4-4 及び表 4-1 に示す値を用いている．

表 4-2　推定供給量

時間(分)	推定供給量(mm)
0.0	0.0000
0.1	0.0625
0.2	0.1250
0.3	0.1875
0.4	0.2500
0.5	0.3125
0.6	0.3750
0.7	0.4375
0.8	0.5000
0.9	0.7500
1.0	1.0000
1.1	1.0000

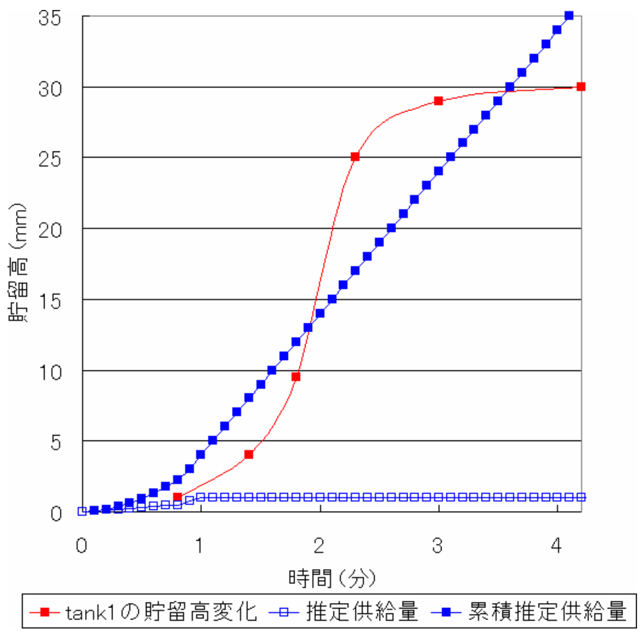


図 4-4　一次元カラム実験における推定供給量

推定供給量を考える際には，tank1 の貯留高と累積供給量の関係を考慮した．具体的には 0 分から 1 分まではタンク内の貯留高の 3 分の 1 の値を推定供給量とし，それ以降は 1mm を一定値として与えている．参考値となっているタンク内の貯留高は，観測結果の体積含水率に以下の仮定条件に基づき算定された値である．

・ 間隙率 n=0.3

・ タンクの深さ=100 ㎜

間隙率を 0.3 とおいた理由は，図 4-2 より体積含水率の最大値が約 0.3 であり，且つこの状態の飽和度は 100%であると考えて，式(3.82)より求めた．タンクの深さを 100 ㎜とした理由は，図 3-9 に示したように観測点間の距離をタンクの深さと考えたためである．

以上のようにして推定された供給量を代入することによって，タンクモデルの計算を行

うことが可能となった．ちなみに，本事例でのタンクモデルの計算期間は 0 分から 0.1 分刻みで 17 分までとしている．

次に，ニューラルネットワークへの入力条件に関して記述する．前章で示した図 3-7 及び図 3-8 に沿って，ニューラルネットワークを用いたパラメータ同定を行う．最初の段階で得られる tank1 の教師データの一部を表 4-3 に示す．

表 4-3　教師データ例

	tank1 の教師データ				
	IN	IN	IN	OUT	OUT
	供給量	貯留高 1	貯留変化 1	浸透係数 1	立ち上がり 1
set_1	0.06	0.06	0.06	0.65	20.02
set_2	0.13	0.19	0.13	0.12	26.81
set_3	0.19	0.38	0.19	0.12	24.96
set_4	0.25	0.63	0.25	0.98	8.31
set_5	0.31	0.94	0.31	0.77	9.02
set_6	0.38	1.31	0.38	0.72	3.96
set_7	0.44	1.55	0.24	0.70	1.46
set_8	0.50	2.25	0.50	0.66	14.25
set_9	0.75	3.00	0.75	0.39	15.06
set_10	1.00	4.00	1.00	0.95	14.67
set_11	1.00	5.00	1.00	0.16	29.96
set_12	1.00	5.70	0.73	0.25	4.89

一次元カラム実験では教師データ数は 700 セットで，表 4-3 よりセットごとに供給量が変化していること，それに伴い貯留高及び貯留高変化量も様々な値をとっていること，浸透係数が 0 以上 1 未満の乱数で与えられていること，また立ち上がりが 0 以上かつタンクの深さ 100㎜に間隙率 0.3 を乗じた 30㎜未満の乱数で与えられていることが確認できる．

作成した教師データをニューラルネットワークに学習させ，ネットワークを形成させた後与える入力について説明する．入力は，供給量，対象としているタンクの貯留高及び貯留高変化量の 3 種類であるが，それぞれ以下のようにして値を得ている．

1.　供給量：表 4-2 に示した値
2.　貯留高：観測された体積含水率にタンクの深さ 100㎜ を乗じた値
3.　貯留高変化量：観測点に対して線形補完を行い，その傾きに 0.1 を乗じた値

表 4-4 に tank1 から tank5 までのパラメータ同定で用いた各入力値を示す.

表 4-4　各タンクの入力値

(a) tank1

IN	IN	IN
浸透量	貯留高 1	貯留変化 1
0.50	1.00	0.13
1.00	4.00	0.50
1.00	9.50	1.38
1.00	25.00	3.10
1.00	29.00	0.57
1.00	30.00	0.08

(b) tank2

IN	IN	IN
浸透量	貯留高 2	貯留変化 2
1.00	1.00	0.03
1.00	3.50	0.23
1.00	19.50	3.20
1.00	26.50	1.17
1.00	29.50	0.38

(c) tank3

IN	IN	IN
浸透量	貯留高 3	貯留変化 3
1.00	1.80	0.02
1.00	3.50	0.24
1.00	14.50	2.20
1.00	21.20	2.23
1.00	26.80	0.93
1.00	28.50	0.43
1.00	30.00	0.30

(d) tank4

IN	IN	IN
浸透量	貯留高 4	貯留変化 4
1.00	2.50	0.02
1.00	10.00	1.07
1.00	15.50	1.38
1.00	25.80	2.58
1.00	28.00	1.10

(e) tank5

IN	IN	IN
浸透量	貯留高 5	貯留変化 5
1.00	1.80	0.01
1.00	6.80	0.83
1.00	10.50	0.62
1.00	19.50	1.29
1.00	27.50	1.60
1.00	29.80	0.46

4.1.3 パラメータ同定結果

表 4-4 に示した各タンクの入力値を基にニューラルネットワークの予測したパラメータの値及びその中から選択した最適パラメータの値は表 4-5 に示したとおりである．色つきのセル内の値が，最も観測結果と近い値を与える最適パラメータとなっている．

表 4-5 各タンクのパラメータ同定結果

(a) tank1

浸透係数 1	立ち上がり 1
0.50	6.08
0.20	3.52
0.74	25.20
0.88	28.09
0.20	19.61
0.24	21.13

(b) tank2

浸透係数 2	立ち上がり 2
0.49	9.40
0.16	3.30
0.91	29.68
0.62	28.35
0.10	17.45

(c) tank3

浸透係数 3	立ち上がり 3
0.50	10.09
0.23	5.70
0.75	29.32
0.78	29.33
0.31	23.87
0.11	16.84
0.12	17.72

(d) tank4

浸透係数 4	立ち上がり 4
0.49	15.13
0.54	16.51
0.55	16.71
0.56	17.65
0.55	16.01

(e) tank5

浸透係数 5	立ち上がり 5
0.50	15.15
0.49	16.12
0.47	15.04
0.45	14.92
0.43	14.11
0.45	14.09

それぞれの同定結果を見ると，tank1 から tank3 では同定されたパラメータはかなりばらつきを持っている，また一方で，tank4 及び tank5 ではパラメータはほぼ似たような値を取っていることがわかる．

表 4-5 で示された最適パラメータをまとめたものが表 4-6 で，これをタンクモデルに適用し，それによって得られる貯留高を飽和度に換算することによって，飽和度という判断指標の元で算定値と観測値の比較を行ったものが図 4-5 である．各タンクの同定されたパラメータを見ると，tank1 から tank3 においては浸透係数及び立ち上がりがほぼ同じ値を示していることが確認できる．一方で，tank4 及び tank5 はそれよりも小さな値となっている．

表 4-6　一次元カラム実験における最適パラメータ

	浸透係数	立ち上がり
tank1	0.88	28.09
tank2	0.91	29.68
tank3	0.78	29.33
tank4	0.56	17.65
tank5	0.45	14.09

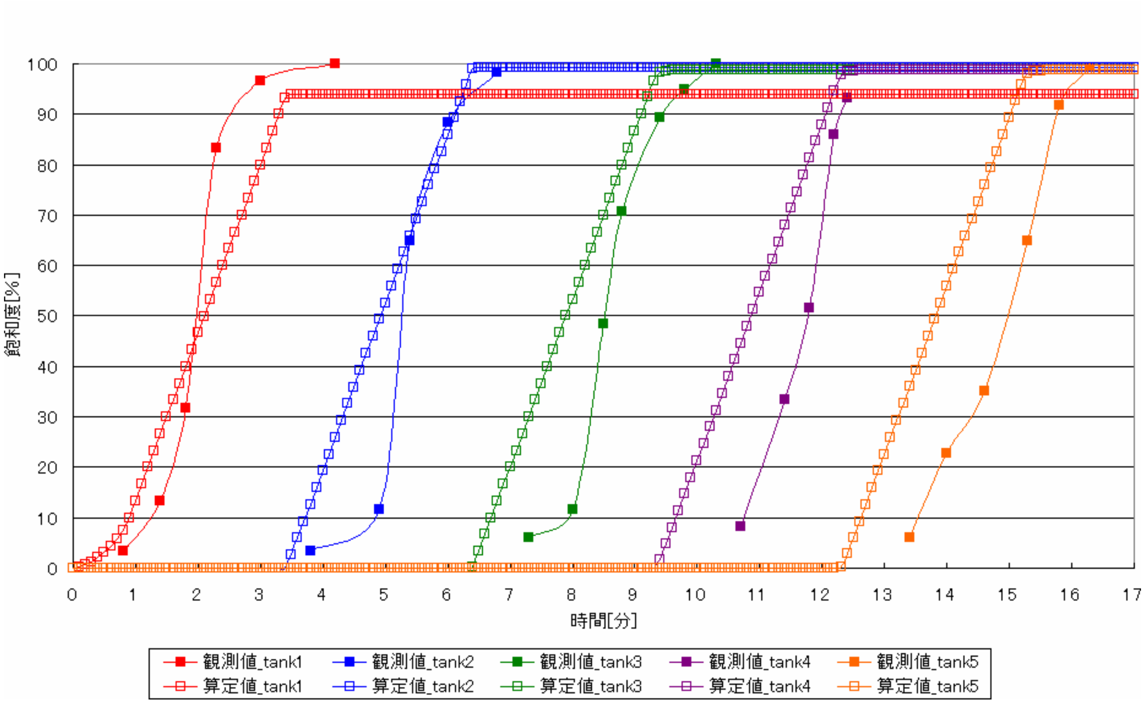


図 4-5　飽和度による全タンクの算定値と観測値の比較

4.1.4　本手法の妥当性の検証

本手法によって同定された各タンクのパラメータが観測値を表現できているのかを検証する．図 4-5 を見ると，降雨を 1.1 分以降は一定値で与えているために，算定結果が直線的に増加しており観測値の持つ変化率の変化が十分に表現できていないという問題点はあるものの，飽和度の変化が始まる時点及び飽和度が 100%になるまでの経過時間はほぼ一致しているといえる．

ただ，全体的な印象として，深度が深くなるほど実際の値に比べて算定結果の変化開始時点が早くなっている．これは，tank4 および tank5 の深い深度におけるタンクのパラメータ同定結果の特に立ち上がりの値に問題があると推測される．表 4-6 における各深度における立ち上がりの値に着目すると，tank1 から tank3 では約 30 ㎜程度の値を示している．本研究ではタンクの深さを 100 ㎜，間隙率を 0.3 としているため，これは土壌内の間

隙に全て水が入ったと考えた場合の水のみの総量と同値であると判断できる．しかし，tank4 及び tank5 では立ち上がりの値が約 17 及び 15 と低い値を示しており，tank1 から tank3 に比べて水の保水能力が低く予測されたことを示唆している．

tank4 および tank5 において同定されたパラメータの値が小さい理由としては，ニューラルネットワークに学習させた教師データの入力と出力間の関係性が希薄であったために学習によって構築されたネットワークが実状を十分に表現できない可能性が挙げられる．

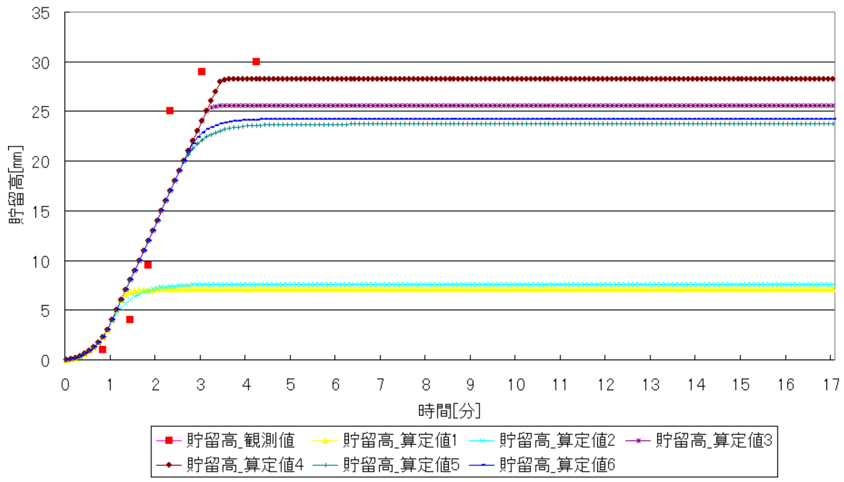
実際，tank4 及び tank5 では，どの入力に対しても得られるパラメータが一定で，その値は学習データ作成時にパラメータに与えた乱数の平均値になっている．これはニューラルネットワークの作成したネットワークが tank4 及び tank5 の特性を十分に表現できていないことを示唆している．これは，学習時に与えた教師データの入力の一つである浸透量の問題と捉えることができる．具体的には，全ての深度のタンクにおいて教師データの入力の一つである浸透量を砂柱の上部に浸透する量と設定しているために，深度によっては浸透量と貯留高・貯留高変化量の間に水の浸透に要する時間の影響を受けた大小関係に隔たりができる場合がある．つまり，同じパラメータを入れた場合においても，異なる経過時間であれば浸透量が大きな値をとる一方で貯留高・貯留高変化量は小さくなる，あるいはその反対のことが生じる可能性がある．この場合，教師データの入力・出力間の関係性が希薄となりニューラルネットワークの学習によるネットワークの形成に悪影響を与えていると推測される．一次元カラム実験の事例においては，パラメータ同定に必要な教師データにおける入力・出力間の関係性の健全度が保証される深度の限界が tank3 であったと判断できる．

4.1.5 タンクモデル内におけるパラメータの影響範囲に関する検証

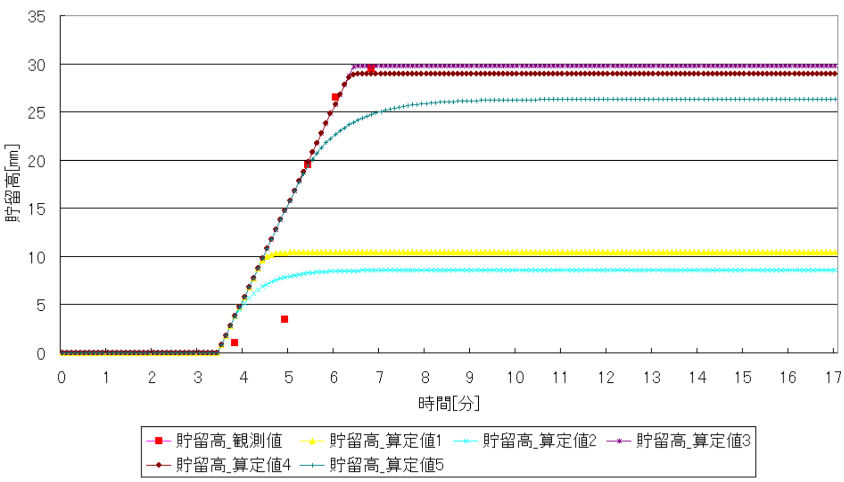
タンクモデルを運用する際には，パラメータは非常に重要な役割を果たしているが，そのパラメータの中には影響力の小さいパラメータも存在する．具体的に言えば，評価指標を貯留高または飽和度にした場合，それらの絶対値に影響を与えないパラメータが存在することがある．これらの影響を与えないパラメータは，従来のように試行錯誤によりパラメータ同定が行われてきた状況下では，特に明文化されることがなかった．そこで，不飽和領域を考慮した直列タンクモデルという限定的なモデルの中ではあるが，各パラメータの影響範囲について考察する．

表 4-5 に示した tank1 から tank5 のパラメータ同定結果をみると tank1 から tank3 ではかなりパラメータの同定結果にばらつきがある事が確認できる．そこで，これらの値をタンクモデルに適用した場合，タンク内の貯留高という指標に対してパラメータの与える影響に関して tank1 から tank5 まで順に図 4-6 に示した結果を用いて検討する．ただし，図 4-6 の凡例における貯留高_観測値という項目は，観測値として得られた体積含水率を 3.4 で示した考え方を用いてタンク内の貯留高に換算した値である．また，ここでは体積

含水率のような実地盤内の値ではなく，純粋にタンクモデルというモデル内においてパラメータがモデルの算定結果に与える影響について明確にするためにあえて指標をタンク内の貯留高としている．

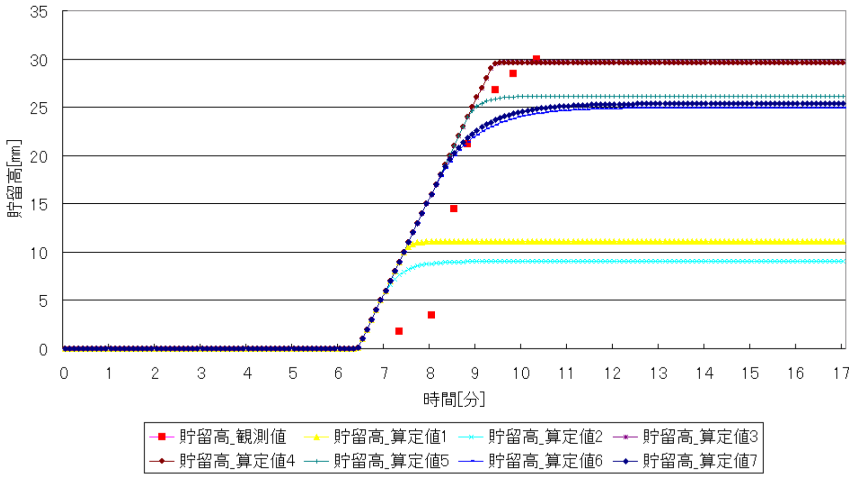


(a) tank1

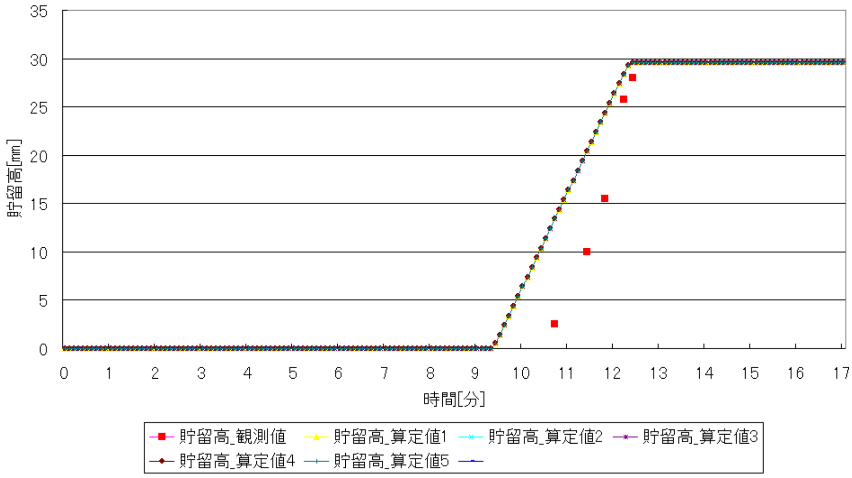


(b) tank2

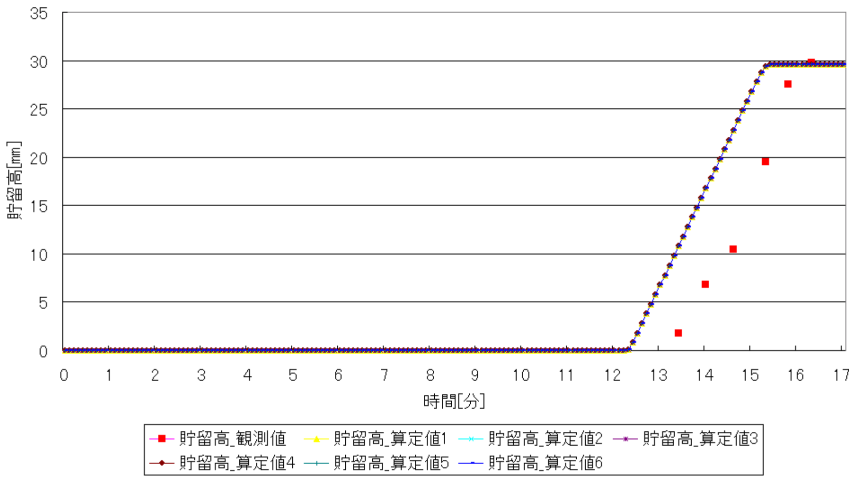
図 4-6　貯留高による各タンクの算定値と観測値の比較



(c) tank3



(d) tank4



(e) tank5

図 4-6　貯留高による各タンクの算定値と観測値の比較

図 4-6 から，深度の浅い tank1 から順に tank2，tank3 と水が溜まっていく様子が確認できる．それに加えて，図 4-6 の(a)，(b)，(c)では，同定結果として得られたパラメータのばらつきに対応して貯留高の変化の様子も幅を持っていることが確認できる．パラメータにばらつきの見られなかった(d)及び(e)では算定値が全てほぼ同じ値をとっている．パラメータのばらつきが貯留高の値に変化を与えることは当然であるが，図 4-6 の(a)，(b)，(c)をみると，パラメータは貯留高の最大値には影響を与えるが，値の変化が開始する時点には影響を与えておらず，貯留高の値の変化開始時点は，上段からの浸透の開始時点とほぼ一致している．また，本手法は上段タンクから同定を開始するため，例えば tank3 の同定段階においては tank1 及び tank2 のパラメータの値は決定済みである．そのため，tank3 のパラメータにばらつきがあっても上からの浸透量は変化せず貯留高の値の変化の開始時点は変わらない．逆に言えば，tank3 の貯留高がうまく表現できない場合は tank1 及び tank2 のパラメータを操作することで，tank3 の値を変化させることが可能となる．

さらに，タンクモデルにおける貯留高の収束値は浸透係数の値の大小ではなく立ち上がりにのみ依存していると推測される．これを検証するために，tank1 を例として表 4-7 に示すように浸透係数が変化せず立ち上がりのみが変化する場合(trial 1)と浸透係数が変化し立ち上がりは変化しない場合(trial 2)を考え，貯留高の変化の様子について比較を行う．

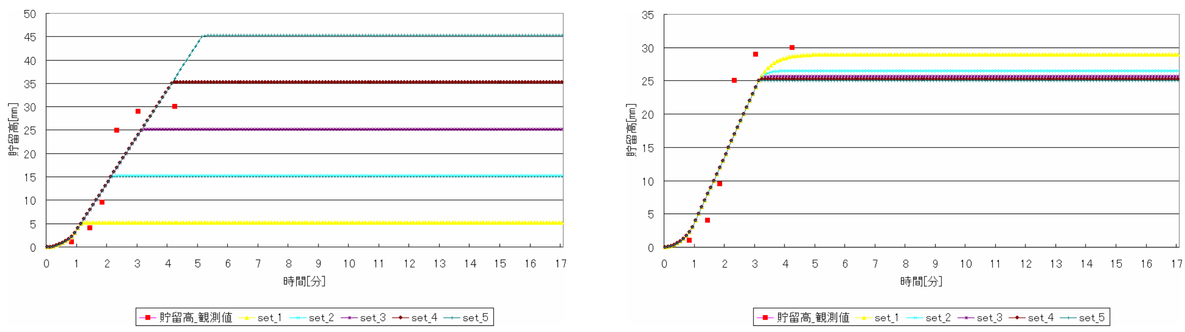
表 4-7　tank1 におけるパラメータの影響検証

(a) trial 1

	浸透係数	立ち上がり
set_1	0.8	5
set_2	0.8	15
set_3	0.8	25
set_4	0.8	35
set_5	0.8	45

(b) trial2

	浸透係数	立ち上がり
set_1	0.2	25
set_2	0.4	25
set_3	0.6	25
set_4	0.8	25
set_5	1	25



(a) trial 1　　(b) trial 2

図 4-7　tank1 におけるパラメータの影響検証結果

図 4-7(a)から，浸透係数を一定とし立ち上がりの値のみを変化させた場合，立ち上がりが大きな値をとるにしたがって，貯留高の最大値も大きくなっていることが考えられる．一方，立ち上がりを固定値とし浸透係数を 0.2 から 1.0 まで変化させた図 4-7(b)を見ると，浸透係数が最も小さい set 1 の貯留高が若干大きくなっているが，set1 から set 5 まではぼ値に大きな違いがないことが分かる．以上より，不飽和領域においてタンクモデルを適用する際には浸透孔の立ち上がりが貯留高に与える影響が大きいという知見が得られた．

4.2 Chantaburi 事例検証

タイ中央部の東に位置する Chantaburi において，カセサート大学が実施した実地実験結果を用いて，室内実験ではなく実地実験の場合の本手法の妥当性について検証を行う．

4.2.1 Chantaburi 概要

実施サイトは図 4-8 に示すように 5m×5m の正方形の領域で，その領域に対して人工降雨のためのスプリンクラーと数個の間隙水圧計が設置されている．本検証では，図 4-8 右図のように斜面に設定された S1, S2 及び S5 の 3 点を本研究の対象事例として選定した．

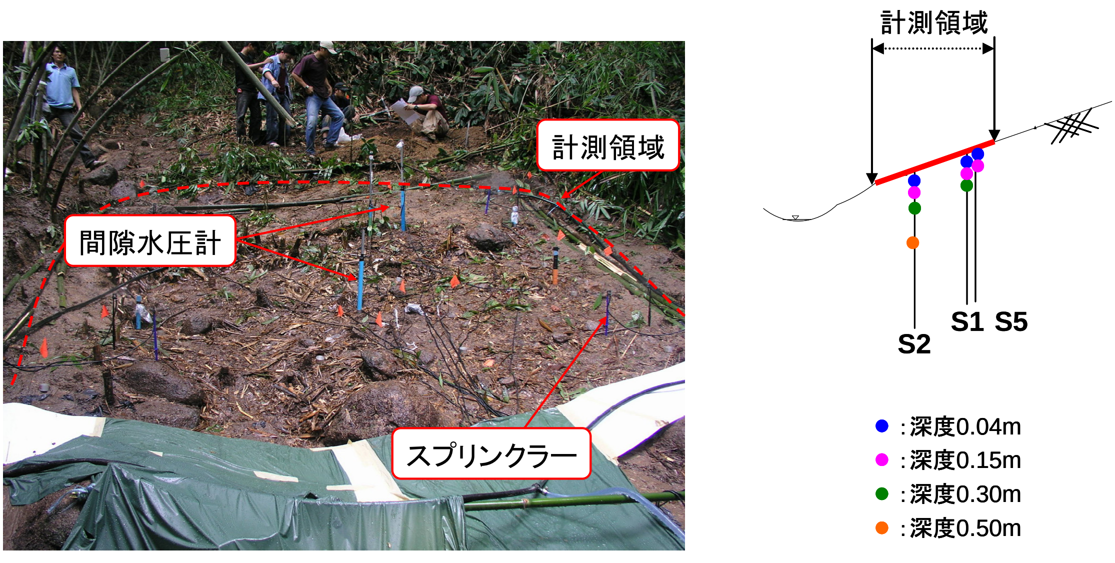


図 4-8　実験サイト

S1 では 0.04m, 0.15m 及び 0.30m の 3 つの深度において, S2 では 0.04m, 0.15m, 0.30m 及び 0.50m の 4 つの深度において，また S5 では 0.04m 及び 0.15m の 2 つの深度において間隙水圧が算定されている．

本研究では，負圧から体積含水率の推定の際に，Van Genuchten 関数モデルを用いている．関数モデル内のパラメータは，カセサート大学の開発したパラメータ同定法によって本サイト内の別領域に与えられた値を準用している. Van Genuchten 関数モデルを式(4.1)

及び式(4.2)に，用いた各パラメータの値を表 4-8 に示す

$$Se = \frac{1}{\left(1 + |p \times \psi|^{n}\right)^{m}} \tag{4.1}$$

$$\theta = Se(\theta_s - \theta_r) + \theta_r \tag{4.2}$$

表 4-8　Van Genuchten 関数モデルパラメータ

深度	0.04m・0.15m	0.30m・0.50m
p	0.04	0.052
n	0.50	0.85
m	0.65	0.19

スプリンクラーにより与えられる降雨を図 4-9 に記す．2007 年 7 月 29 日の 15:07 から 16:42 間の自然降雨の後，同日の 17:30 から 20:40 までの 190 分間は 0.12 ㎜/分(7.2 ㎜/時)程度，その約 15 時間後の翌日 7 月 30 日の 11:45 から 14:35 間の 170 分間は 0.20 ㎜/分(12 ㎜/時)程度，さらにその直後から 16:05 間の 90 分間は 0.28 ㎜/分(16.8 ㎜/時)程度の雨が与えられている．

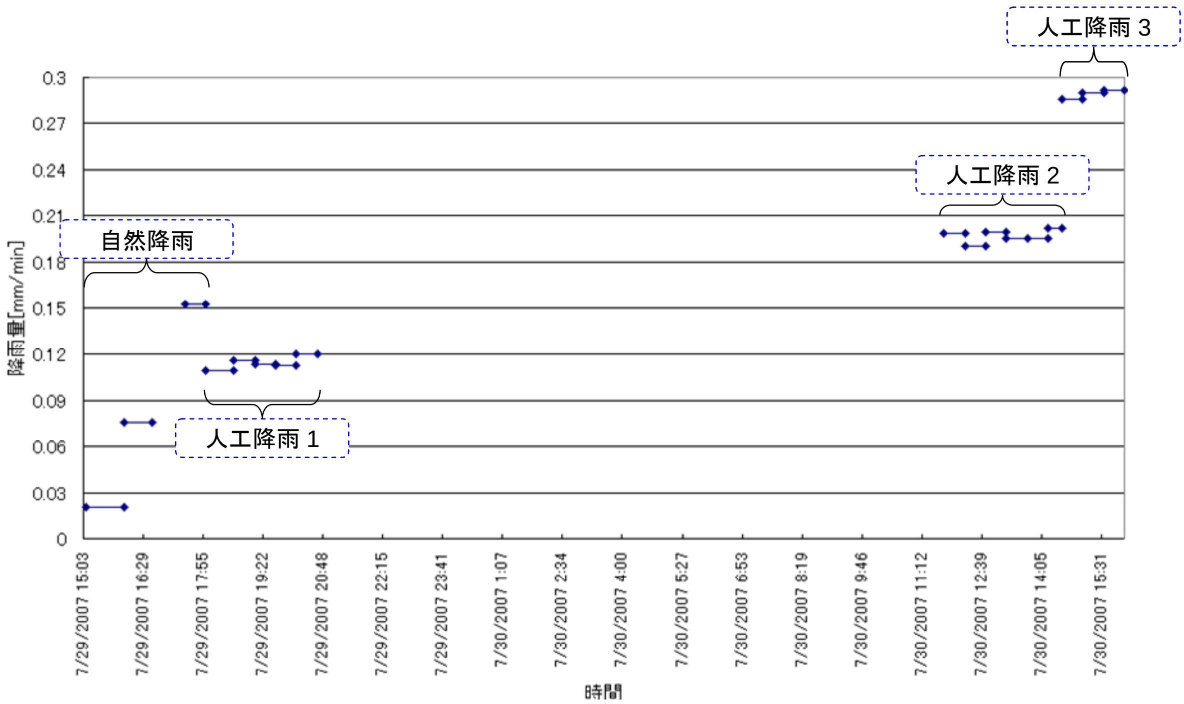


図 4-9　人工降雨

この降雨の下に，S1，S2 及び S5 で測定された間隙水圧を体積含水率に，さらにその値を飽和度に換算した結果，図 4-10，図 4-11 及び図 4-12 が得られた．ただし，体積含水率から飽和度への換算は式(3.82)に基づいて行っており，間隙率 n は 0.442 である．

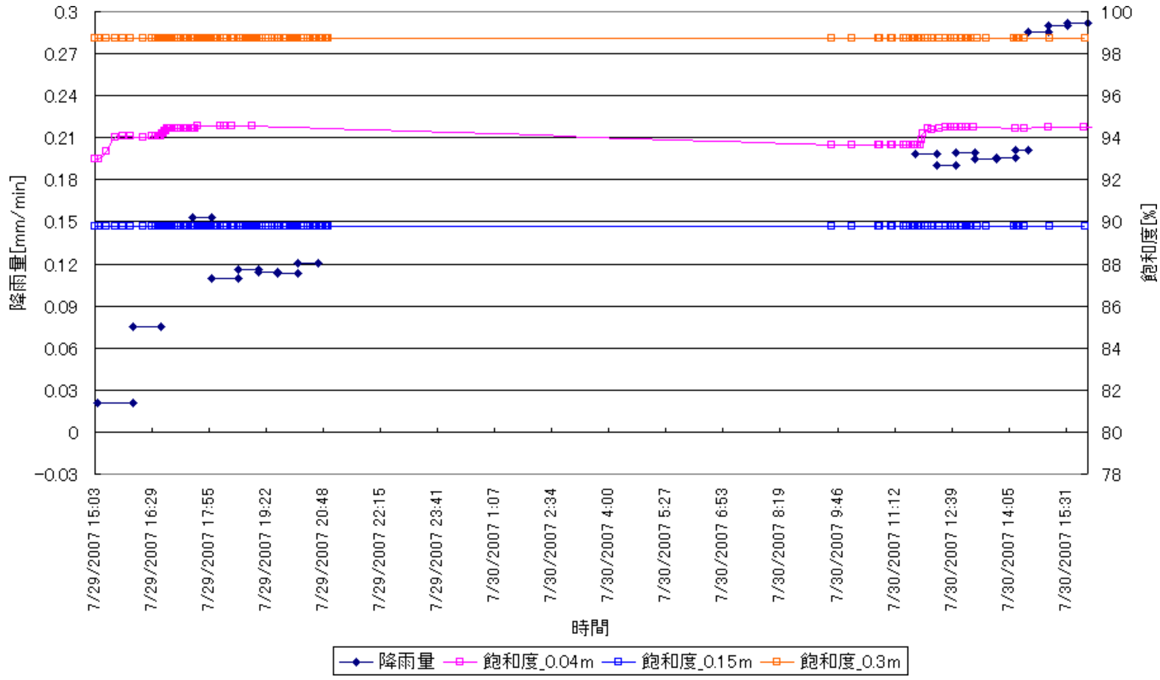


図 4-10　S1 における各深度の飽和度と人工降雨の関係

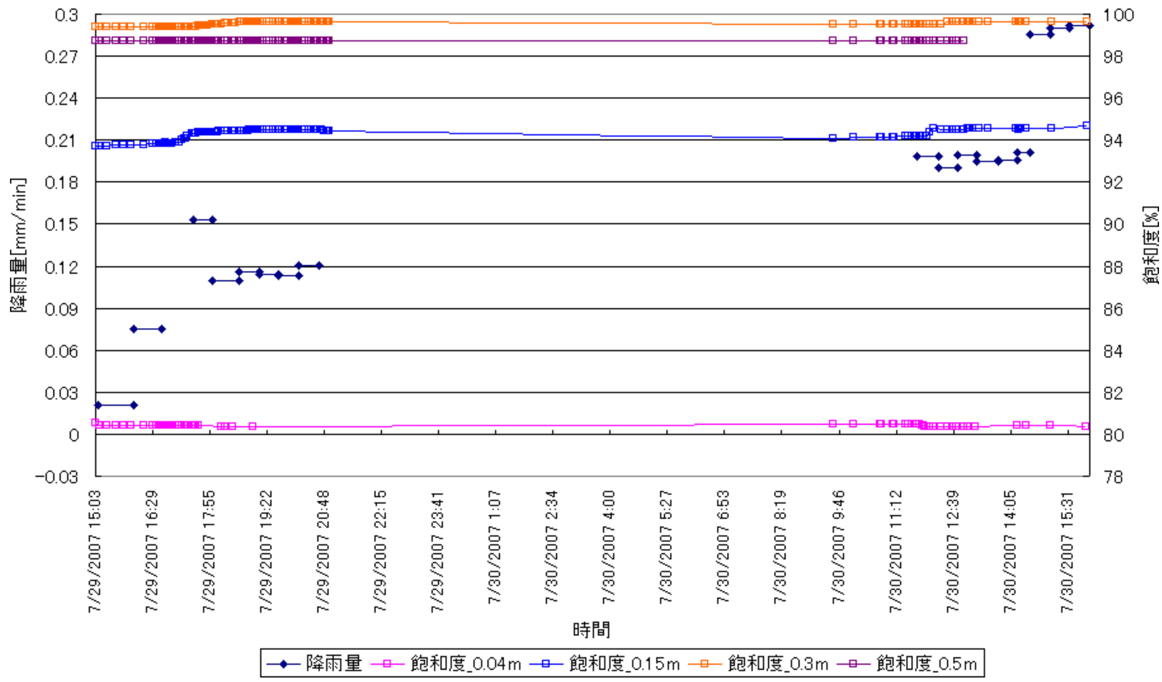


図 4-11　S2 における各深度の飽和度と人工降雨の関係

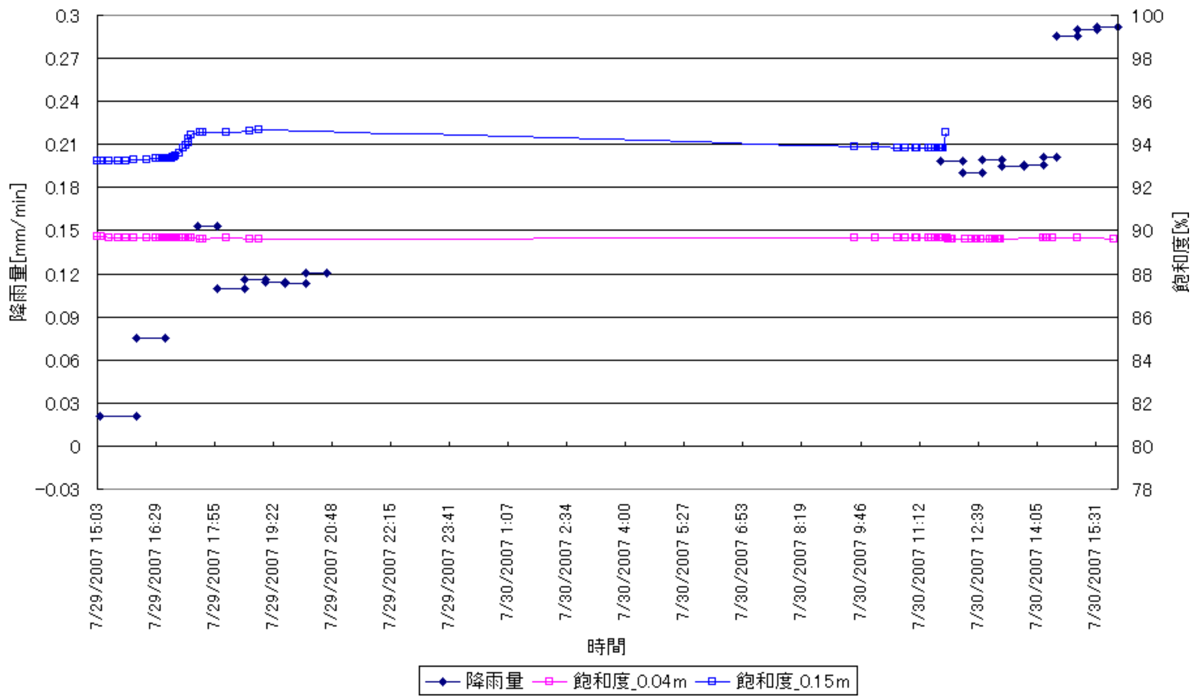


図 4-12　S5 における各深度の飽和度と人工降雨の関係

全地点において飽和度が非常に高く，人工降雨によって若干増加の傾向を示すものもあるが大きな変動は見られないという特徴が確認できる．

4.2.2 適用タンクモデル及びパラメータ同定手法の概要

各地点の各深度で得られているデータを参考に，図 4-13 を基本形とし，S1 では不飽和領域を考慮した直列 3 段タンク，S2 では不飽和領域を考慮した直列 4 段タンク，S5 では不飽和領域を考慮した直列 2 段タンクを適用する．

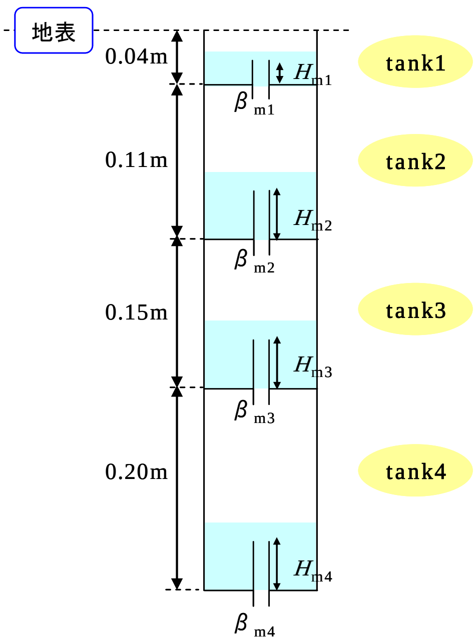


図 4-13　適用タンクモデルの基本形

次に，パラメータ同定手法の概要について説明する．不飽和領域を考慮した直列タンクに対してニューラルネットワークを適用するにあたり，まず教師データの作成を行う．ニューラルネットワークへの入力は，浸透量，タンク内の貯留高及びその単位時間あたり(ここでは 1 分)の変化量としているが，それら各入力値について説明する．教師データの一部を表 4-9 に示す．なお．入力の浸透量は一次元カラム実験の供給量と同義である．

表 4-9　教師データ例

	S1　tank1 の教師データ				
	IN	IN	IN	OUT	OUT
	浸透量	貯留高 1	貯留変化 1	浸透係数 1	立ち上がり 1
set_1	0.02043	0.02043	0.00000	0.41058	14.46384
set_2	0.02043	0.04086	0.02043	0.95430	9.56718
set_3	0.02043	0.06128	0.02043	0.05716	13.92694
set_4	0.02043	0.08171	0.02043	0.45577	9.18442
set_5	0.02043	0.10214	0.02043	0.09997	9.16151
set_6	0.02043	0.12257	0.02043	0.47125	11.54878
set_7	0.02043	0.14299	0.02043	0.23114	10.04188
set_8	0.02043	0.16342	0.02043	0.77244	4.29024
set_9	0.02043	0.18385	0.02043	0.95147	7.84283
set_10	0.02043	0.20428	0.02043	0.71221	12.75005
set_11	0.02043	0.22470	0.02043	0.15879	1.64467
set_12	0.02043	0.24513	0.02043	0.62780	8.92952

Chantaburi では，タンクモデルを適用する対象期間を人工降雨が与えられている 2007 年 7 月 29 日 15:07 から 2007 年 7 月 30 日 16:05 までとし，教師データ数は 1499 セットと設定している．また，教師データ作成の際に乱数で与えるパラメータについては，浸透係数は 0 以上 1 未満，立ち上がりはタンクの深さ 40 ㎜に間隙率 0.442 を乗じた値を参考に 0 以上 18 ㎜未満として与えている．

作成した教師データをニューラルネットワークに学習させネットワークを形成させた後，それに観測値に基づいた入力を与える．入力は，それぞれ以下のようにして値を得ている．

1. 浸透量：観測時間に対応した人工降雨
2. 貯留高：観測された体積含水率に各タンクの深さを乗じた値
3. 貯留高変化量：観測点間の変化量を観測間隔(分)で割った値

各地点における観測回数及び観測間隔が異なり，また観測回数が 100 回を超えているため，表 4-10 に各地点の入力値の一部を示す.

表 4-10　入力値例　(S1 における深度 0.04m 及び 0.15m)

S1	IN	IN	IN
0.04m	浸透量	貯留高 1	貯留変化 1
1	0.02042	16.44045	0.00000
2	0.02042	16.50736	0.00557
3	0.02042	16.61793	0.00921
4	0.02042	16.63780	0.00152
5	0.02042	16.63780	0.00000
6	0.07545	16.62187	-0.00083
7	0.07545	16.63780	0.00122

S1	IN	IN	IN
0.15m	浸透量	貯留高 2	貯留変化 2
1	0.00000	43.01724	0.11878
2	0.00000	43.56590	0.07838
3	0.00000	43.62623	0.00502
4	0.00000	43.67686	0.00006
5	0.00000	43.67150	-0.00020
6	0.00000	43.67150	0.00000
7	0.00000	43.67150	0.00000

0.15m 地点の浸透量は, 上の tank1 から tank2 への浸透ではなく地表面から地中への浸透，つまり人工降雨量を意味することに留意されたい．他の地点，タンクに関しても同様で浸透量は人工降雨量と同値である.

4.2.3 パラメータ同定結果

入力値から得られた各地点での最適パラメータを表 4-11 に示す.

表 4-11　最適パラメータ

(a) S1

	浸透係数 β_m	立ち上がり $H_{\beta m}$
tank1	0.47361	16.03364
tank2	0.45395	42.33459
tank3	0.37405	30.84828

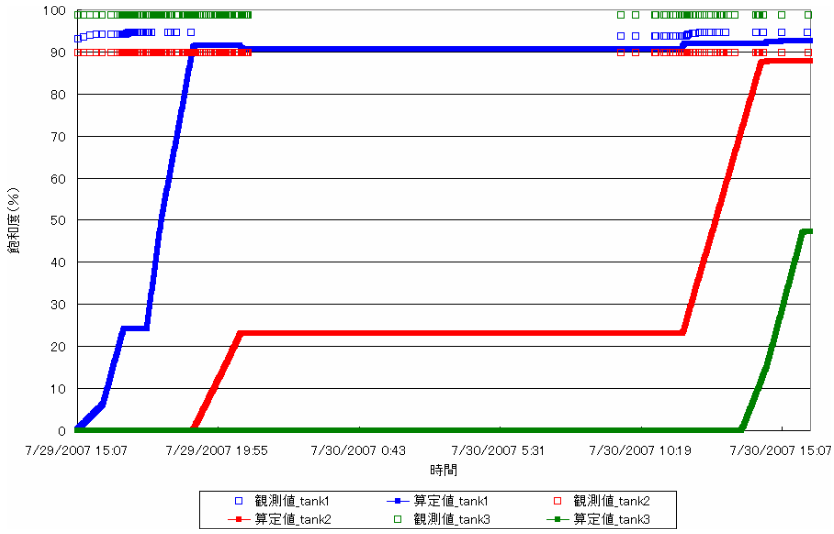
(b) S2

	浸透係数 β_m	立ち上がり $H_{\beta m}$
tank1	0.48690	13.90703
tank2	0.39127	48.22869
tank3	0.33861	29.89911
tank4	0.49904	44.19744

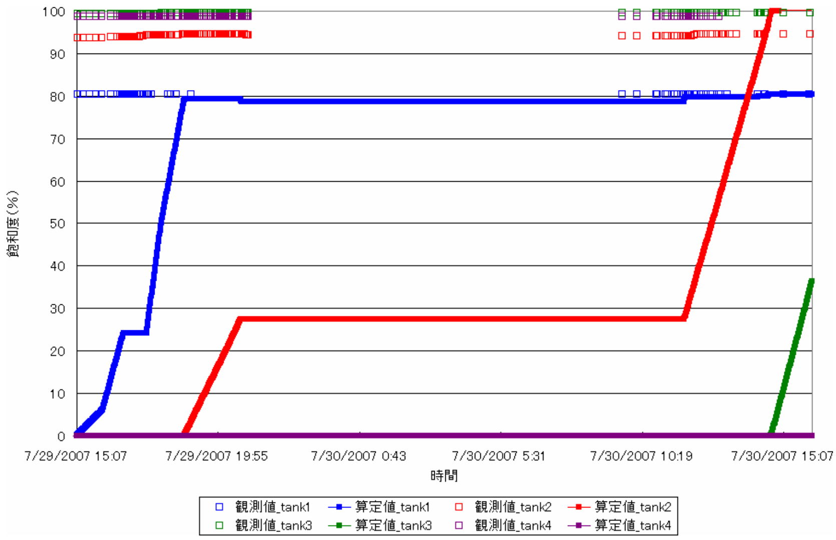
(c) S5

	浸透係数 β_m	立ち上がり $H_{\beta m}$
tank1	0.48716	15.33431
tank2	0.47734	45.69256

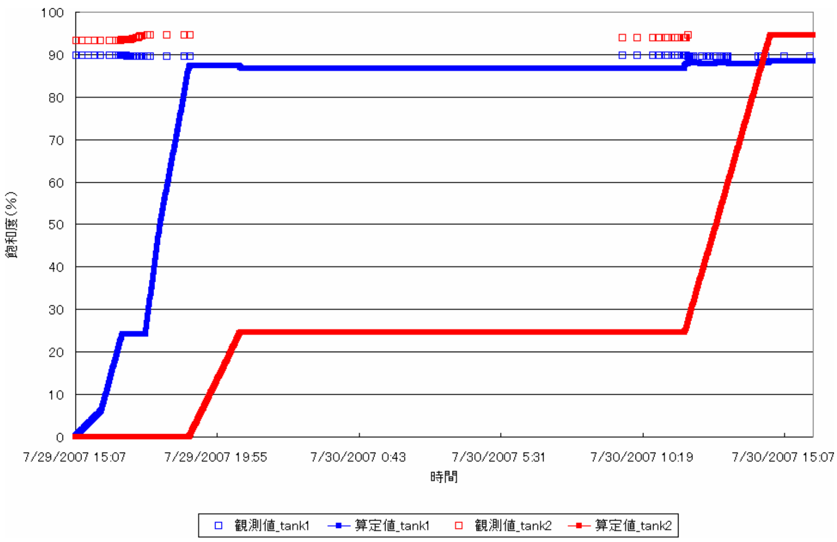
最適パラメータから算定される飽和度と観測された飽和度の比較を図 4-14 に示す.



(a)　S1



(b) S2



(c) S5

図 4-14　各地点の飽和度による算定値と観測値の比較

4.2.4 本手法の妥当性の検証

本サイトは 5m×5m といった比較的狭い範囲に区切られており，なおかつ植生や地形にも大きな変化が見られないことから，同深度における浸透係数や立ち上がりといったパラメータはほぼ同値であると推察される．これについて，表 4-11 に基づいた検証を行う．

まず，tank1 では S1，S2 及び S5 の全地点において浸透係数及び立ち上がりはほぼ同じ値が得られている．次の tank2 においても，S1 と S5 ではほぼ一致した値が得られている．しかし，S2 では浸透係数が比較的小さく，立ち上がりが大きくなっていることから，他の地点に比べて水が浸透しにくいという予測結果が得られていることがわかる．tank3 に関しては，S1 と S2 しかないため比較が難しいが，tank1 及び tank2 に比べて土壌の保水能力の減少及び透水性の低下が見られる．tank4 に関しては S2 のデータしかないが，S1 及び S2 で得られた tank3 の結果よりも浸透係数及び立ち上がり共に増加していることが分かる．

以上のことより，本手法はパラメータの値が実際の物理現象に沿っているかという観点から言えば，tank1 及び tank2 においては妥当であるが，tank3 及び tank4 では十分ではないといえる．特に tank4 に関しては，S2 の結果を深度方向に見ることで，一次元カラム実験の tank4 及び tank5 同様，ニューラルネットワークによるネットワーク構築が不適当であることが指摘できる．なぜなら，図 4-14(b)の観測値_tank3 及び観測値_tank4 に示すように tank3 と tank4 はほぼ同程度の飽和度が観測結果として得られており，tank4 において tank3 よりも保水能力及び透水性が高くなるという状態は実際の物理現象からは考えにくいためである．

Chantaburi で得られた観測地の大きな特徴には，各地点の各深度における観測飽和度がかなり高い値を示しているという点と人工降雨による飽和度の値の変化が極めて小さいという点である．

まず，前者は土壌内に人工降雨以前にかなりの水分量が保持されたことを示している．図 4-14 に見られる算定値の見せる非定常挙動は，土壌水分量が人工降雨による貯留が進むことによりが観測値に近づいていく過程にあることが意味している．

次に後者に関してであるが，これは地中への水の浸透が非常に少ないということを表しているのではなく，人工降雨の強度が土中の飽和度に変化を与えるのには十分でなかったことを意味している．例えば，S1 の深度 0.04m に位置する tank1 内の飽和度を 1%上げるためには，0.1768 ㎜/分(10.608 ㎜/時)の降雨強度が必要となる．実際に，S1 の tank1 における人工降雨と tank1 からの浸透量の関係を見てみると図 4-15 のように飽和度が均衡状態になった後は，2 つの値がほぼ等しくなっていることがわかる．S2 と S5 に関しても同様のことが確認されている．

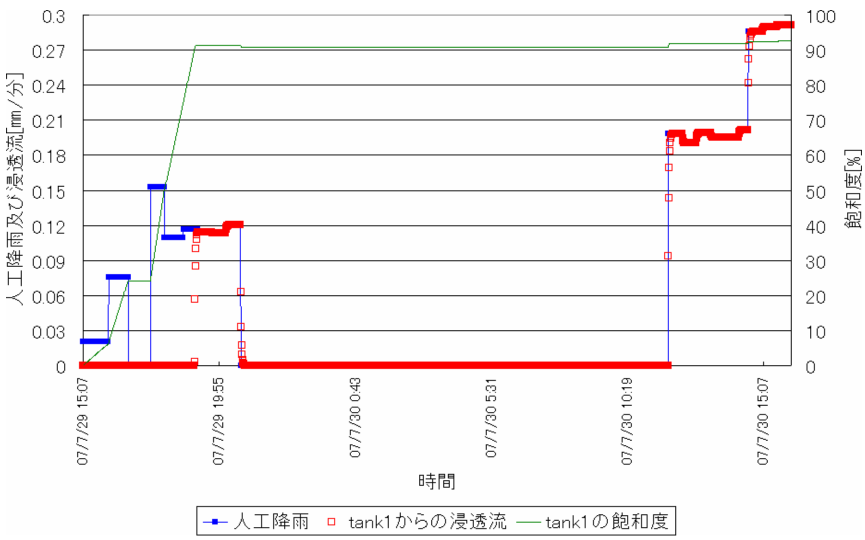


図 4-15　S1 の tank1 における人工降雨と浸透流の関係

以上の 2 点から，本事例では最適パラメータを決定する際に，タンク内の貯留高の変化の様子が追えているかではなく，タンク内の均衡状態を十分に表現できているかに着目した．具体的には，同定されたパラメータを適用し得られた計算結果の中で，上部からの浸透量と下部への浸透量がほぼ同値となり土壌内の水の量が変化していない部分に注目し，その値が実際の観測値に近いものを最適パラメータとしている．

そのような観点から図 4-14 を見ると，全地点で tank1 に関しては優秀なパラメータが得られているといえる．また，tank2 に関しても S1 及び S5 では最終的にほぼ観測値に近い値が得られている．S2 においては 100%を超えるという結果になっており，先述したように S2 では tank2 の浸透係数が他の地点よりも小さいことからも，透水性を小さく予測しすぎていると考えるのが妥当である．次に，S2 の tank3 を見ると，明らかに水分量が不足していることがわかる．また，S2 の tank4 も 0 となっておりタンクモデル内の貯留高が 0，つまり上部タンクからの浸透がなく全く機能してないということが読み取れる．これらの原因は，タンクモデルで計算を行う際に貯留高の初期値を 0 としているためである．深度の浅い地点に位置するタンクのように，上からの水の供給量が十分にある場合は貯留高の初期値を 0 としても対応可能であるが，深度の深い地点に位置するタンクに対して短期間でパラメータの同定を行ためには，0 ではなくその地点での観測結果を考慮するような初期値を与えることが必要となる．

以上より，実斜面における物理現象を十分表現している点，また，土壌内の水分量の収束値に着目した場合の適合性という 2 つの点より，本手法の精度は深度によって異なり，上から 2 段のタンク，すなわち比較的浅い地点においては優秀なパラメータを得ることができるが，それより下のタンクでは単純な設定ではパラメータ同定が不可能な場合が存在する．そして，その場合はタンク内の貯留高に対してある一定の初期値を与えることで対処できると推測される．

4.2.5 初期条件の与える影響に関する考察

本節では先ほど指摘した，タンク内の貯留高の初期値に関して考察を加える．まず，S1 の tank2 と tank3 に関して検討を加える．以下の 2 段階にわけて検討する．

1. tank3 のみに観測された飽和度を考慮した初期値を与える
2. tank2 及び tank3 に観測された飽和度を考慮した初期値を与える

2 段階に分けた目的としては，まず tank3 のみに飽和度を考慮した初期値を与えることによって，初期値が 0 の場合との違いを検証する．その後に初期値が 0 の場合もある程度満足できる結果を得ていた tank2 に対しても飽和度を考慮した初期値を与えることで，どれほどの改善が見られるのか，またそれによって tank3 に何か影響が現れるのかを検証する．ここで与える初期値であるが，飽和度からタンク内の貯留高を算定した値とし，tank2 に対しては 43.758 ㎜，tank3 に対しては 64.974 ㎜を用いた．

まず，tank3 のみに飽和度を考慮した初期値を適用した場合，図 4-14(a)は図 4-16 のように改善された．これを与える最適パラメータは表 4-12 である．

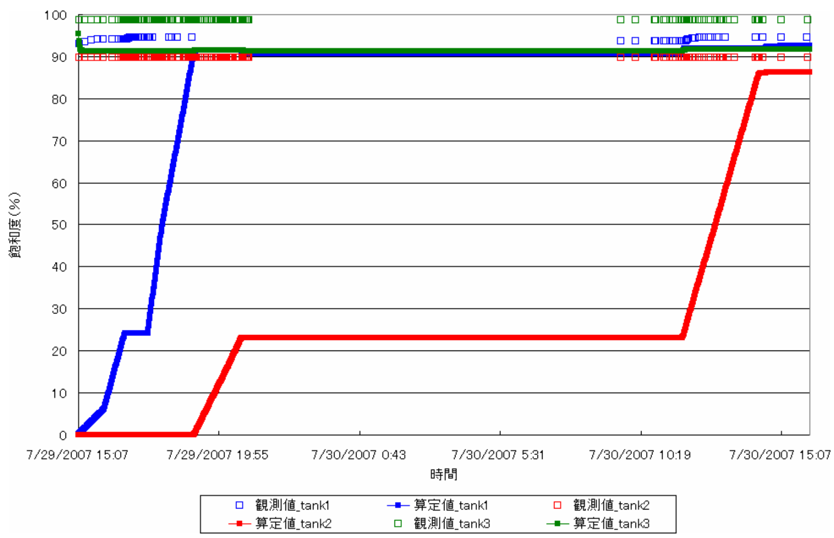


図 4-16　tank3 のみに初期値を与えた場合の飽和度による算定値と観測値の比較

表 4-12　各パラメータの値(左：改善前　右：改善後)

	浸透係数 β m	立ち上がり H_β m
tank1	0.47361	16.03364
tank2	0.45395	42.33459
tank3	0.37405	30.84828

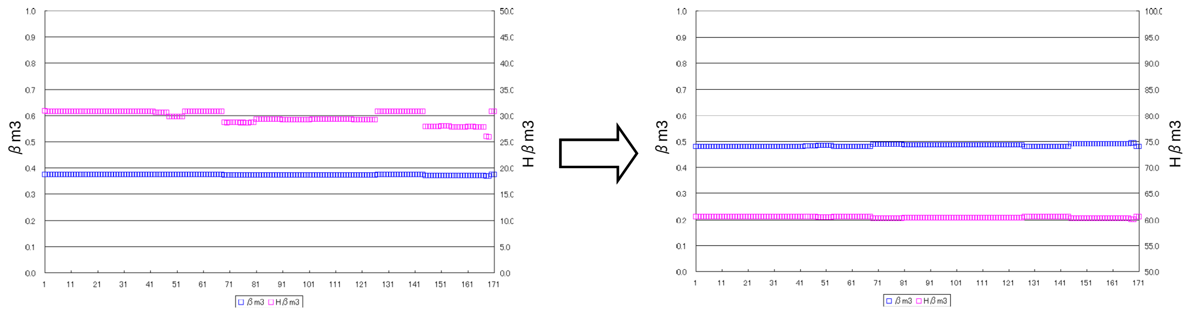
⇒

	浸透係数 β m	立ち上がり H_β m
tank1	0.47362	16.03364
tank2	0.45395	42.33459
tank3	0.48077	60.55870

飽和度を考慮した初期値を与えたところ，図 4-16 から tank3 の飽和度が高い点で安定し，かつ平衡状態となっているという改善がみられた．また，表 4-12 においても各深度間のパラメータの関係が実際の物理的性質を反映したものとなっている．

以上のことから，飽和度など土中水分量に関する物性値が得られており，なおかつその物性値から土中内水分量が多いと判断される場合は，あらかじめそれを考慮した初期値を与えることで，短期間で精度良くパラメータの同定が可能となるという知見が得られた．

参考として，初期値を与えることによるパラメータの変化を図 4-17 に示す．



<改善前>　　<改善後>

図 4-17　tank3 パラメータ同定結果の傾向

図 4-17 の左軸は改善前，改善後のグラフとも浸透係数の軸で 0 から 1 までが，右軸は立ち上がりの軸で，改善前は 0 から 50 までが，改善後は 50 から 100 までが示されている．浸透係数は青い点で，立ち上がりは赤い点で表されている．飽和度を考慮した初期値を加えることによって，教師データ内のばらつきが減少し，優れたネットワークが構築されることで同定結果のばらつきが減少した．

次に，tank2 に対しても飽和度を考慮した初期値を適用した場合を示す．これにより図 4-17 はさらに図 4-18 に改善された．最適パラメータは表 4-13 のように変化した．

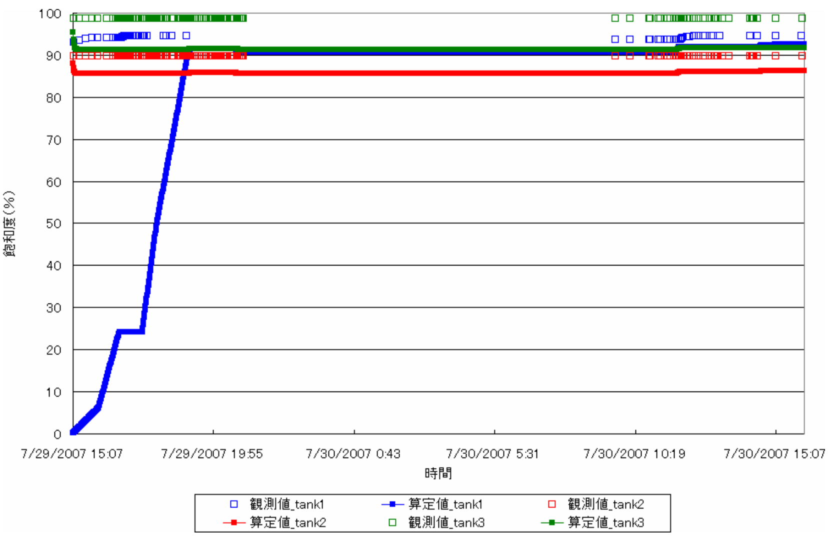


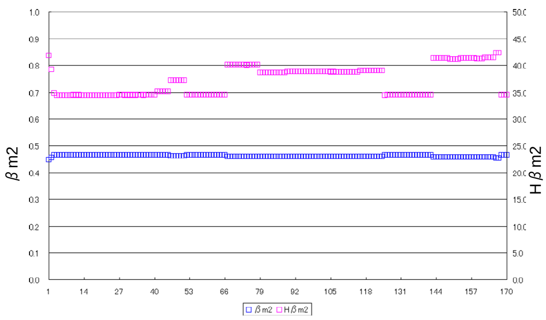
図 4-18　tank2・tank3 に初期値を与えた場合の飽和度による算定値と観測値の比較

表 4-13　各パラメータの値(左：tank3 のみ　右：tank2・tank3)

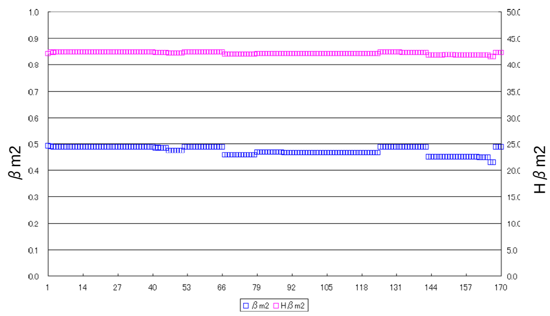
	浸透係数 β_m	立ち上がり $H_{\beta m}$
tank1	0.47362	16.03364
tank2	0.45395	42.33459
tank3	0.48077	60.55870

	浸透係数 β_m	立ち上がり $H_{\beta m}$
tank1	0.47362	16.03364
tank2	0.49289	42.17821
tank3	0.46159	60.42976

図 4-18 において tank2 の飽和度の値が更新されているのがわかる．しかし，図 4-17 と比べると，最終的な平衡状態の飽和度の値はそれほど変化していない．例えば，飽和度を考慮した初期値を与えていても平衡状態に達するまでの経路が異なるだけで，最終値にはそれほど大きな差はないのではないと判断できる．また，表 4-13 からも分かるように，tank2 の浸透係数が増加し，tank3 の浸透係数が減少していること以外は tank2 及び tank3 の立ち上がりの値もそれほど変化していない．参考として，飽和度を考慮した初期値を与える場合の tank2 のパラメータがどのような影響を受けたのかを図 4-19 に示した．



<改善前>



<改善後>

図 4-19　tank2 パラメータ同定結果の傾向

改善前，改善後のグラフとも左軸は浸透係数の軸で 0 から 1 までの値が示されており，右軸は立ち上がりの軸で 0 から 50 までが示されている．浸透係数は青い点で，立ち上がりは赤い点で表されている．飽和度を考慮した初期値を加えることによって，立ち上がりの同定結果のばらつきが減っていることが確認できる．これは，教師データの入力値である貯留高のばらつきが減少したため，ニューラルネットワークにより精度の高いネットワークが構築されたためであると推測される．

以上より，飽和度の値が常に高い地盤においては，飽和度を考慮した貯留高の初期値を与えることでパラメータ同定が円滑にかつ短期間で精度高く行なうことが可能であることを確認した．しかし，長期間の計算が可能な状況であれば，初期値を特に設定しなくとも十分優良な同定結果が得られると考えられる．また，0 以外の初期値を特別に与えた場合，与えた初期値が大きすぎたために，水を排出する方向に偏ったパラメータが同定され，透水性の過大評価や土の保水能力の過小評価につながる危険性があることを意識する必要がある．

第5章 原位置計測結果に関する適用性の検討

本章では実斜面として古座及び Nakhon Nayok の事例を通して実斜面に拡張型マルチタンクモデルシステムを適用し，カルマンフィルタ及びニューラルネットワークを用いたパラメータ同定手法の妥当性及び問題点について考察する．

5.1 古座事例検証

和歌山県の古座地区において，実施された観測結果を用いて本手法の検証を行う．

5.1.1 古座概要

古座で対象とする斜面は，過去の崩壊履歴から中腹部の歩道簡易舗装に水平方向最大 4m 程度のずれが確認されており，その断面は図 5-1 に示すとおりである．図 5-1 からもわかるように，斜面頂上付近と中腹部の 2 地点において深度 0.8m 及び 2.8m の 2 深度に対し土壌水分計による観測が行われている．斜面中腹の観測点を C1，頂上付近の観測点を C2 と称する．

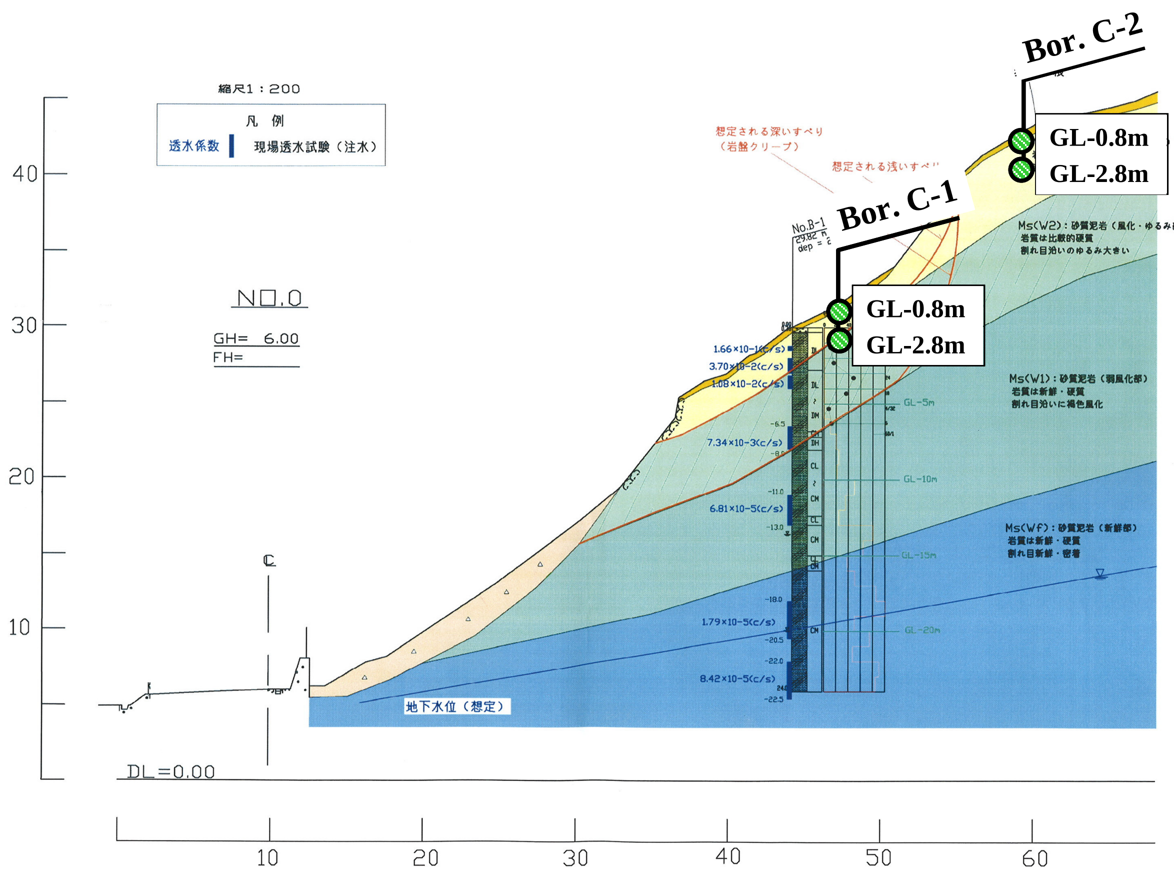


図 5-1 古座地区断面図

古座地区では日単位で降雨が観察されている．本章では，観測値のうち飽和度が負となる領域を除いた図 5-2 に示す 2006 年 2 月 4 日から 2006 年 7 月 30 日のデータを用いてパラメータ同定を進めた．ただし，タンクモデルによる飽和度及び流量計算では計測が行われた全期間である 2005 年 11 月 4 日から 2006 年の 11 月 8 日までのデータを用いた．

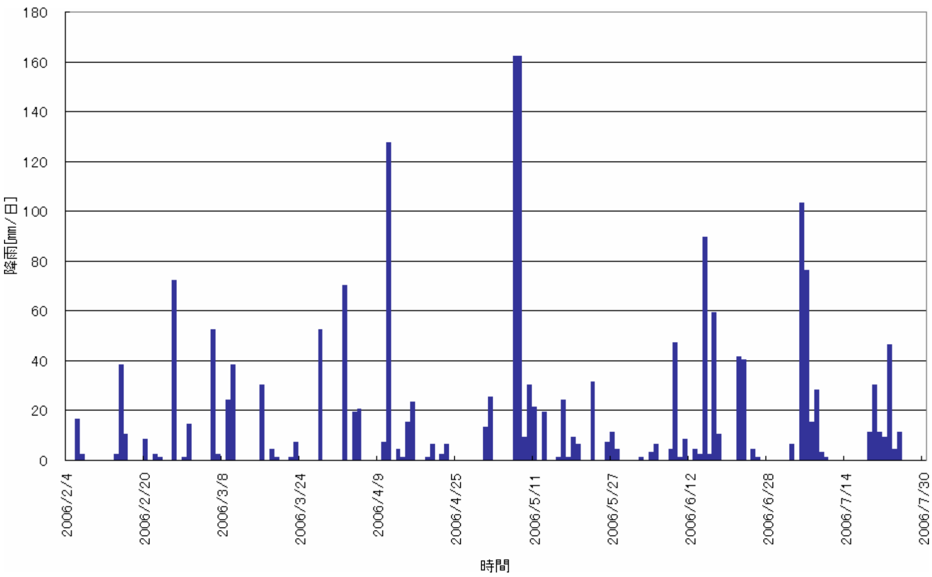


図 5-2　降雨

C1 及び C2 の各深度で測定された体積含水率から算定される飽和度は，図 5-3(a)及び(b)に示すとおりである．

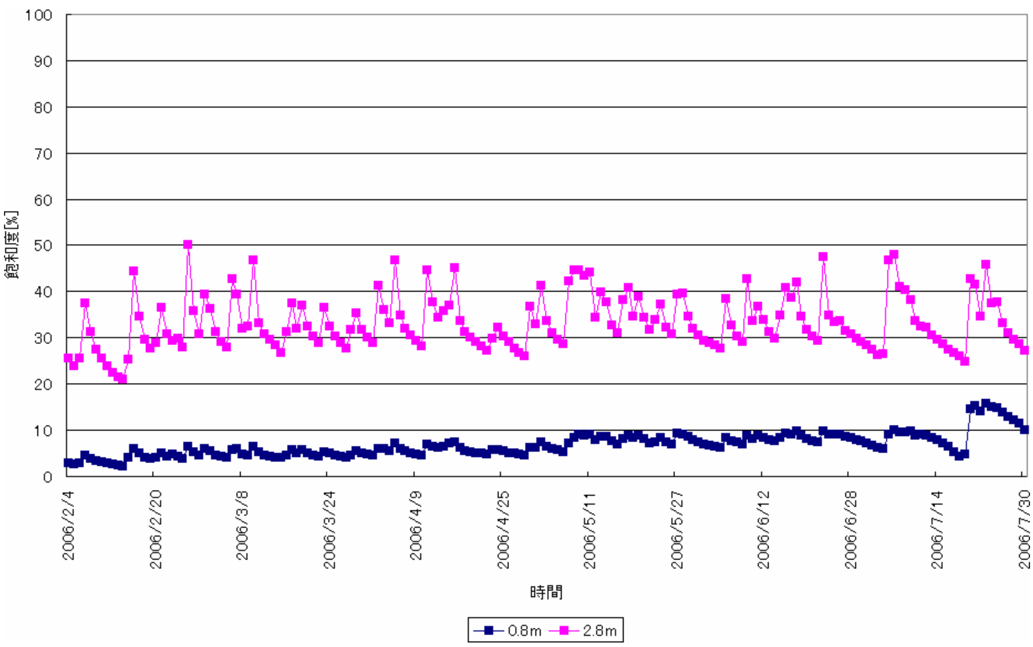


図 5-3 (a) C1 における観測飽和度

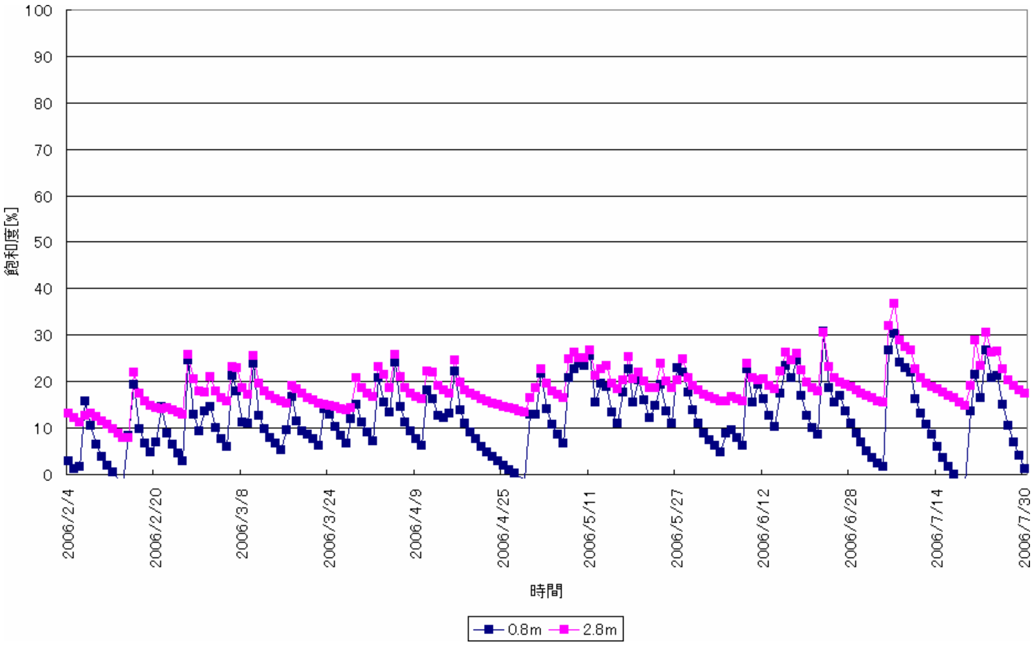


図 5-3 (b) C2 における観測飽和度

5.1.2 適用タンクモデル及びパラメータ同定手法の概要

古座に対しては不飽和領域を考慮した 3 列 3 段モデルを適用する．図 5-4 にその概要を示す．

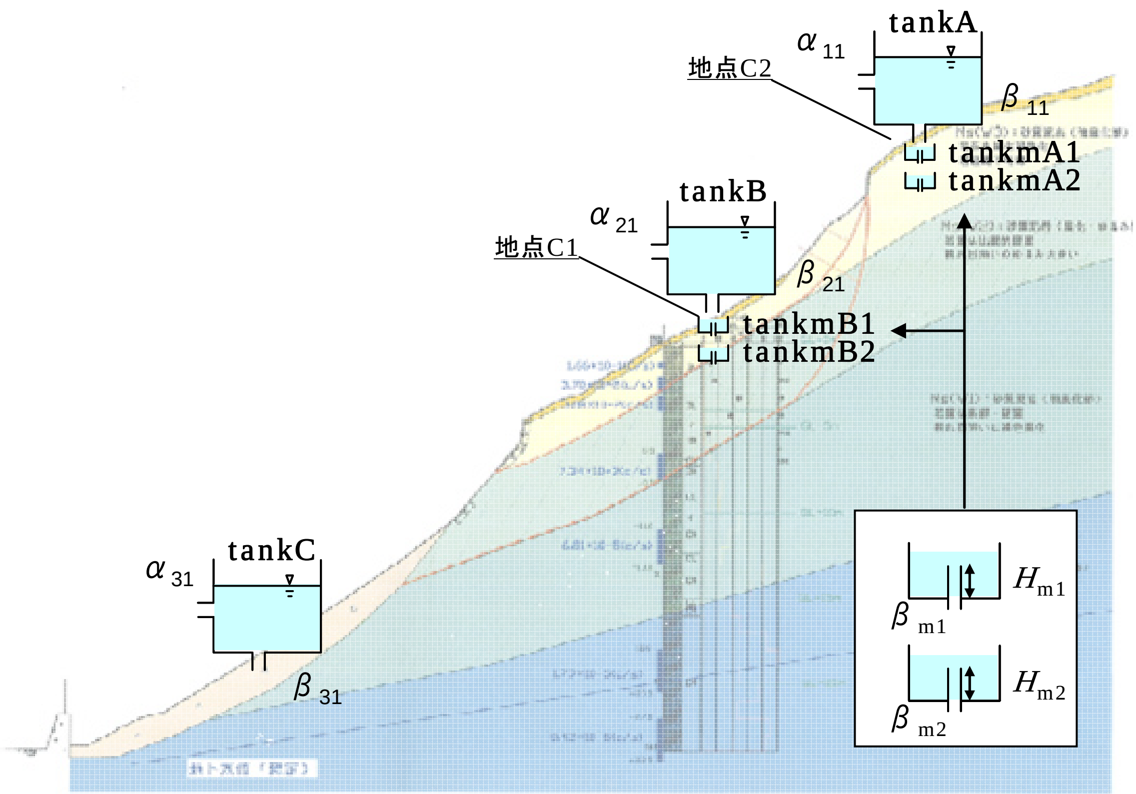


図 5-4 適用タンクモデル概要

C2 に tank A，C1 に tank B，斜面の下部に tank C，不飽和領域には 2 段の直列タンクを設け，深度 0.8m に tankmA1 及び tankmB1 を，深度 2.8m に tankmA2 及び tankmB2 を設定している．tankmA1 及び tankmB1 のタンクの深さは 800 ㎜，tankmA2 及び tankmB2 のタンクの深さは 2000 ㎜である．また，上段タンクの側孔までの底からの高さは 30 ㎜と仮定している．

次に，パラメータ同定手法の概要について説明する．拡張型マルチタンクモデルであるため，上段はカルマンフィルタ，中段はニューラルネットワークといった 2 種類の手法を組み合わせることによりパラメータを同定する．パラメータ同定の流れとしては，まず上段タンクのパラメータを全て同定し，その値を用いることによって中段タンクのパラメータ同定を進めていく．

上段においては，カルマンフィルタを下部へ用いる際に，tank C からの流出量及び tank B からの浸透が観測値として必要となる．本事例では，tank C からの流出に関する観測が実施されていないため，推定値を用いるという対処法を取っている．この推定値は，試行錯誤によって推定されたパラメータをタンクモデルに適用することにより算定された値である．この推定流出量の値と推定パラメータを図 5-5 及び表 5-1 に示す．

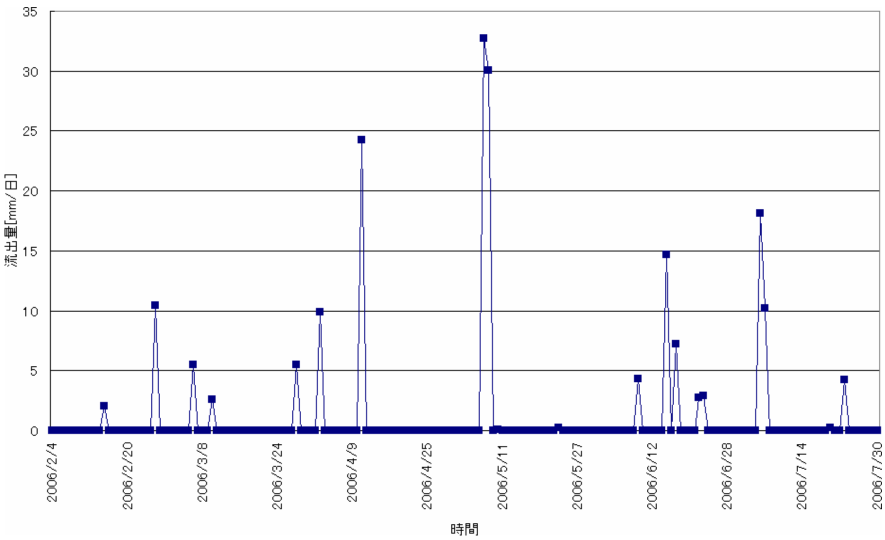


図 5-5　推定流出量

表 5-1　　試行錯誤により得られたパラメータの値

tank C のパラメータ	
流出係数 α_{31}	0.2
浸透係数 β_{31}	0.9

tank B のパラメータ	
流出係数 α_{21}	0.2
浸透係数 β_{21}	0.9

tank A のパラメータ	
流出係数 α_{11}	0.2
浸透係数 β_{11}	0.9

また，tank B からの浸透量は直接的に計測することが非常に難しい値であるため，本事例においては，C1 の深度 0.8m で測定された tankmB1 の飽和度から算定されるタンク内の貯留高の値を用いて対処することとした．具体的には，図 5-6 に示すように貯留高の時間変化量を近似的に浸透量と捉える．ただし時間変化量が負の場合は 0 とした．

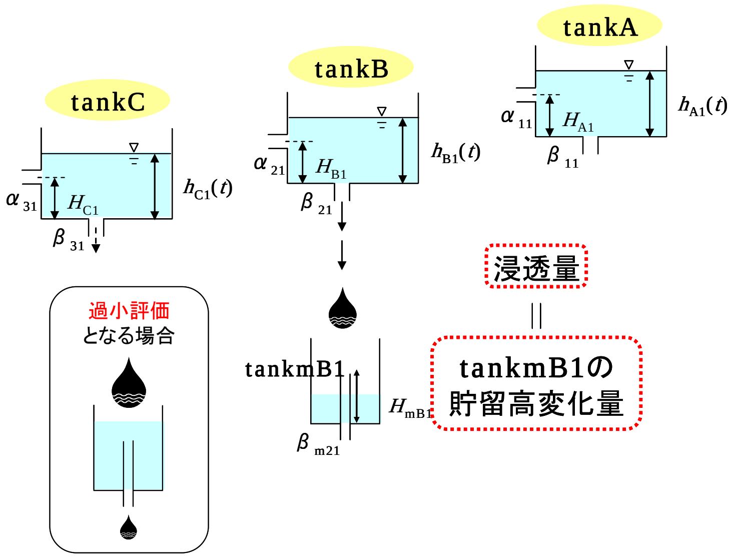


図 5-6　中間部タンクからの浸透量の求め方

タンク内の貯留高変化量と tank B からの浸透量が等しいという現象は，tankmB1 から tankmB2 への浸透量が 0 の場合成立する．tankmB1 から tankmB2 の浸透量が存在すれば，この近似は過小評価となることが考えられ，これによりパラメータ同定の精度が低くなる可能性はある．しかし，tank B からの浸透量を観測値に入れない場合，同定される浸透係数に制約を加えることができず，同定過程で浸透計数の値が収束しないため，本事例では上記の考え方を用いた．以上がカルマンフィルタによる計算を行うために必要な観測値を求める経緯である．与えた観測値は表 5-2 に示す．

表 5-2　カルマンフィルタに与えた観測値

時間	Rainfall[mm/日]	$\Delta q_{\alpha_{31}}$	$\Delta q_{\beta_{21}}$ $(=\Delta h_{B1}(t))$
2006/2/5	0	0	0
2006/2/6	16	0	0.50489
2006/2/7	2	0	6.58431
2006/2/8	0	0	-7.08921

$q_{\alpha 31}$:tankC の側孔からの流出量　$q_{\beta 21}$:tankB の底孔からの浸透量

3-2 でも触れたが，本研究ではカルマンフィルタの構成式に対して，テーラー展開による線形化を行っているために，観測値は全て差分となっていることに留意されたい．つまり，計算段階で観測方程式に代入する観測値は，表 5-2 中の Δ浸透量(=ΔΔ貯留高)とあるように，tankmB1 の体積含水率にタンクの深さ 800 ㎜を乗じた値，つまり tankmB1 内の貯留高の差分の差分となる．

次に，不飽和領域の直列タンクのパラメータ同定について説明する．不飽和領域のタンク数は直列の 2 段タンクとなっている．同定手法はこれまでと全く同様である．tannkmB1 のパラメータの同定を行った後，その値を代入して tankmB2 のパラメータ同定を行う．まず，教師データの作成段階において，ニューラルネットワークに学習させるデータの入力は，浸透量，タンク内の貯留高及びその単位時間あたり(ここでは 1 日)の変化量である．教師データの一部を表 5-３に示す．

表 5-3　教師データ例

	C1 tankmB1 の教師データ				
	IN	IN	IN	OUT	OUT
	浸透量	貯留高 1	貯留変化 1	浸透係数 1	立ち上がり 1
set_1	0.224	103.248	-2.608	0.411	99.181
set_2	10.085	170.911	0.450	0.954	170.449
set_3	5.031	75.560	0.900	0.057	7.417
set_4	1.887	167.955	-1.961	0.456	163.361
set_5	0.707	273.328	0.707	0.100	285.551

教師データ数は 700 セット設定している．また，教師データ作成の際に乱数で与えるパラメータについては，浸透係数は 0 以上 1 未満，立ち上がりは各タンクの深さに間隙率 0.491 を乗じた値を参考に与えている．このことから，C1 及び C2 の tankm1 ではタンクの深さは 800 ㎜であるため立ち上がりは 0 以上 392.8 未満の乱数，tankm2 ではタンクの深さが 2000 ㎜であるため立ち上がりは 0 以上 982 未満の乱数となる．さらに，4.2.5 で考察した初期値については，飽和度は低いと判断し初期値は 0 としている．

次の段階として，作成した教師データをニューラルネットワークに学習させネットワークを形成させた後，それに対し観測値に基づいた入力を与えパラメータの予測を行わせる．各入力は，それぞれ以下のようにして値を得ている．

1. 浸透量：上段タンクにおいて算定されたパラメータをタンクモデルに適用することにより算出される値．具体的には，C1 に対しては tank B からの浸透量を用い，C2 に対しては tank A からの地中への浸透量の値を用いる．

2.　貯留高：観測された体積含水率に各タンクの深さを乗じた値

3.　貯留高変化量：上記のようにして算定された貯留高の日変化量

例として, C1 における tankmB1 及び tankmB2 における入力値の一部を表 5-4 に示す.

表 5-4　入力値例　(C1 における tankmB1 及び tankmB2)

C1	IN	IN	IN
tankmB1 (0.8m)	浸透量	貯留高 1	貯留変化 1
1	0.598	11.554	0.000
2	0.224	4.280	-7.274
3	10.085	6.713	2.433
4	5.031	61.677	54.965
5	1.887	41.513	-20.164

C1	IN	IN	IN
tankmB2 (2.8m)	浸透量	貯留高 2	貯留変化 2
1	0.598	5.252	0.000
2	0.224	5.037	-0.214
3	10.085	17.965	12.928
4	5.031	10.509	-7.456
5	1.887	6.264	-4.245

浸透量は，tank B からの流入量であるため深度 0.8m に位置する tankmB1 においても深度 2.8m に位置する tankmB2 でも同じ値が用いられていることがわかる.

5.1.3 パラメータ同定結果

以上の手順を踏んで求められたカルマンフィルタ・ニューラルネットワークを用いたパラメータ同定の結果を示していく．これらのパラメータはタンクモデルに適用した結果得られる各算定値と観測値との誤差が小さいものを選択したものである．観測値は tank C からの流出と tank B の浸透があるが，流出を重視してパラメータを選択している.

まず，上段タンクにカルマンフィルタを適用することによって同定されたパラメータを示す．上段タンクにおけるカルマンフィルタでは，表 5-2 に示すデータを用いて行われた結果，有効な解が 16 種類存在した．有効な解とは，浸透係数が 0 以上 1 以下でかつ立ち上がりが負ではないパラメータのセットを示す．その中から誤差最小となったパラメータは表 5-5 である.

表 5-5　上段タンクの最適パラメータ

tank C		tank B		tankA	
流出係数 α_{31}	浸透係数 β_{31}	流出係数 α_{21}	浸透係数 β_{21}	流出係数 α_{11}	浸透係数 β_{11}
0.890656	0.898906	0.756008	0.625041	0.102906	0.593263

これらをマルチタンクモデルに適用することによって求められる流出量と表 5-1 に示したパラメータにより算定される推定流出量の比較結果を図 5-7 に示す.

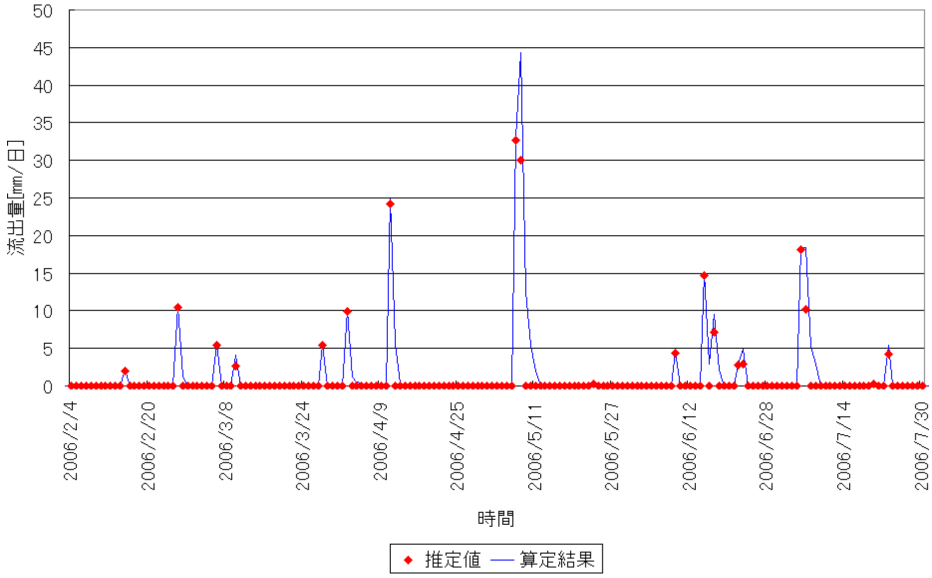


図 5-7　推定値と算定値

また, C1 の tank B からの浸透量を指標にして観測値と算定結果を比較した結果を図 5-8, C2 の tank C からの浸透量を指標にして観測値と算定結果を比較した結果を図 5-9 に示す.

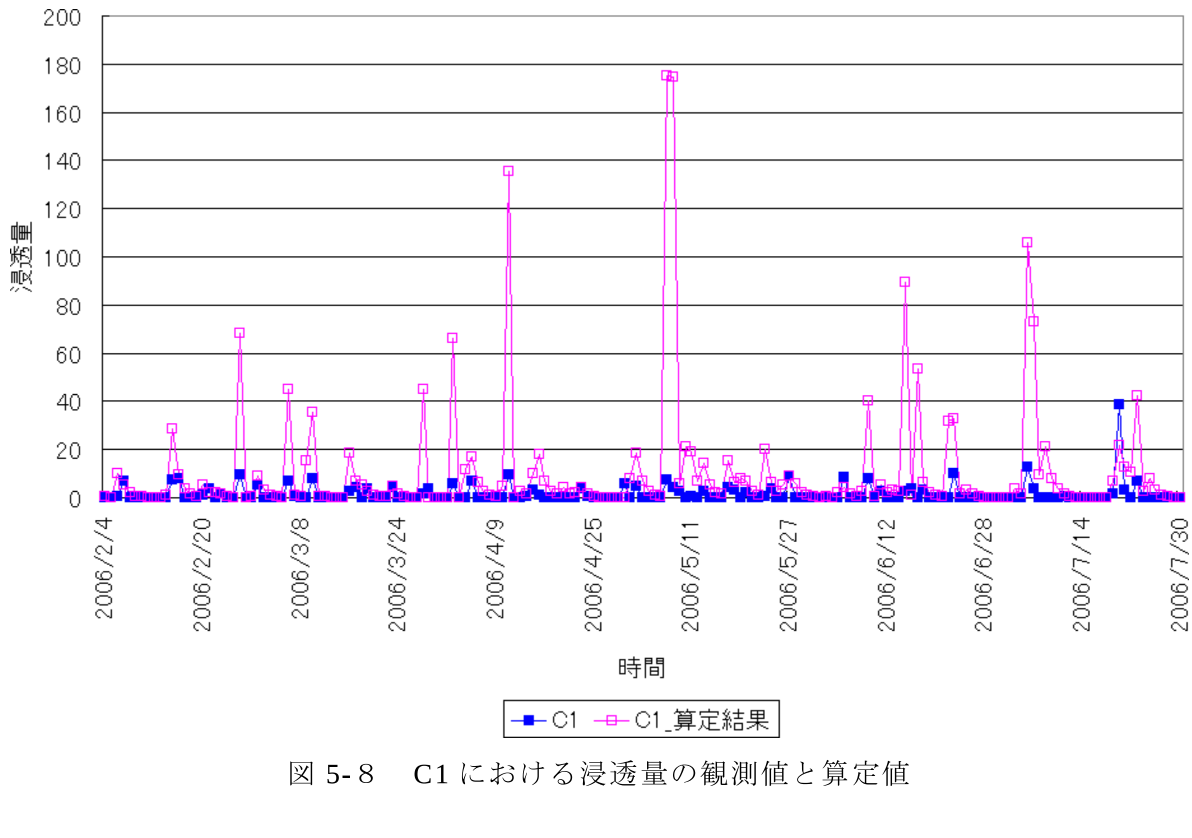


図 5- 8　C1 における浸透量の観測値と算定値

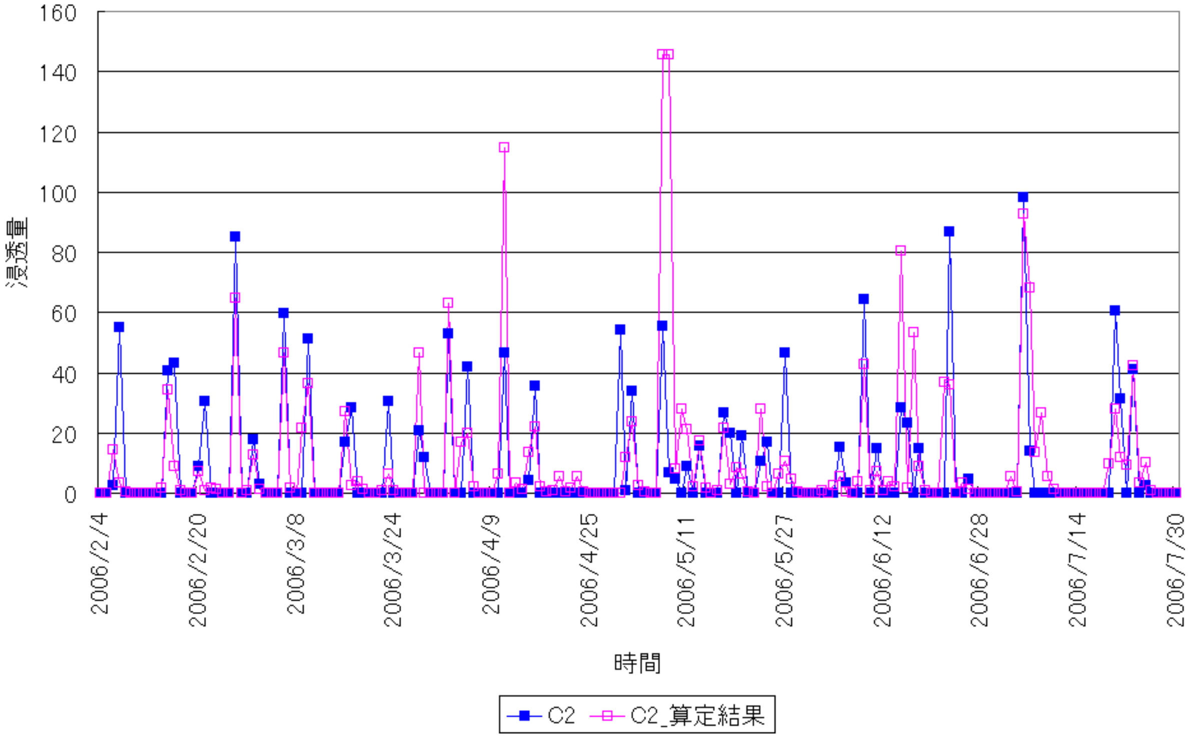


図 5-9　C2 における浸透量の観測値と算定結果

次にニューラルネットワークにより同定された，中段タンクのパラメータ同定結果を表 5-6 に示す．

表 5-6　中段タンクの最適パラメータ

中間部	
浸透係数 β_{m21}	0.574
立ち上がり H_{mB1}	24.619
浸透係数 β_{m22}	0.249
立ち上がり H_{mB2}	303.852

上部	
浸透係数 β_{m11}	0.5726
立ち上がり H_{mA1}	40.555
浸透係数 β_{m12}	0.527
立ち上がり H_{mA2}	172.907

これらの最適パラメータと表 5-5 に示した上段の最適パラメータをマルチタンクモデルに適用することにより算定される各タンクの貯留高及び飽和度の 2 つの指標を用いて，算定結果と観測値の比較を行う．

まず，中間部タンクの同定結果を図 5-10 及び図 5-11 に示す．

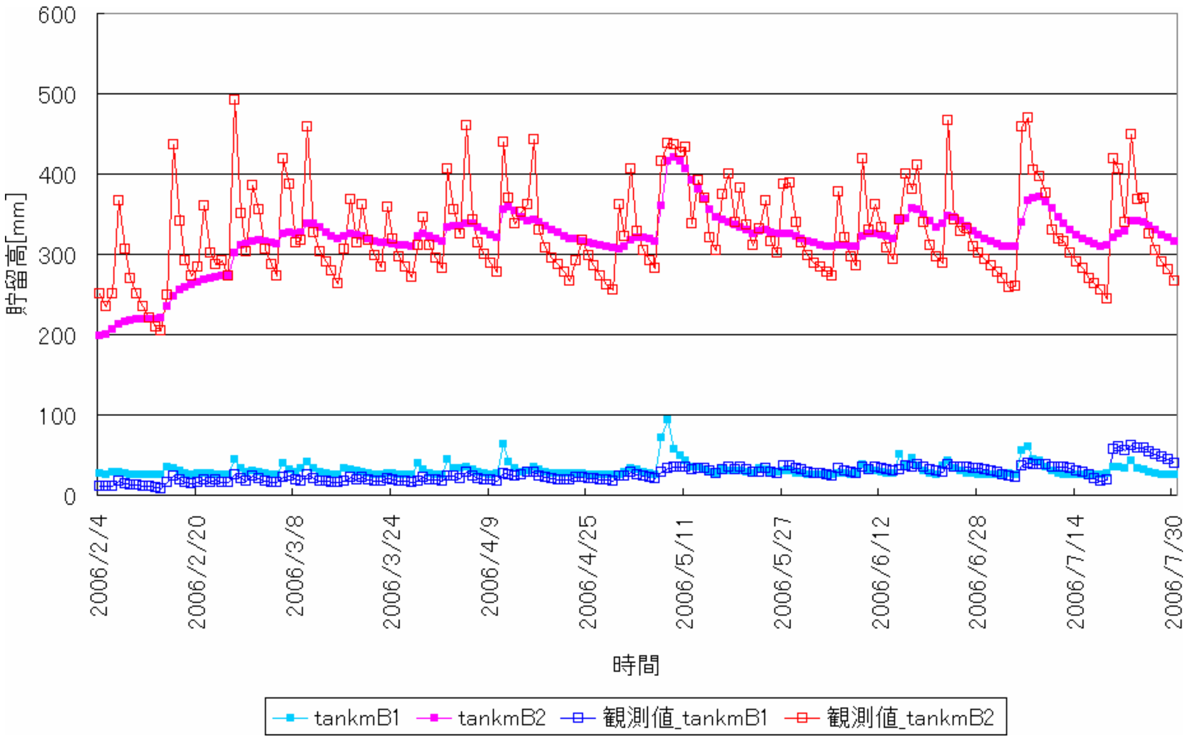


図 5-10　貯留高による算定値と観測値の比較

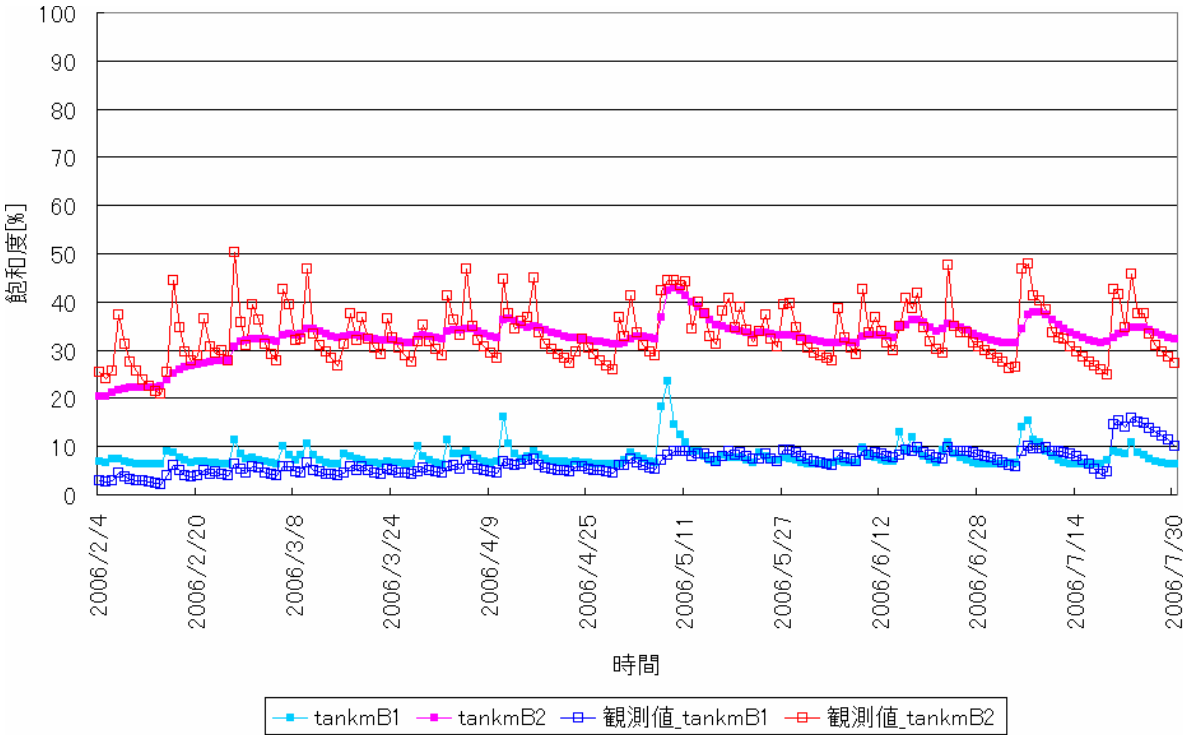


図 5-11　飽和度による算定値と観測値の比較

次に上部における同定結果を同様に図 5-12 及び図 5-13 に示す.

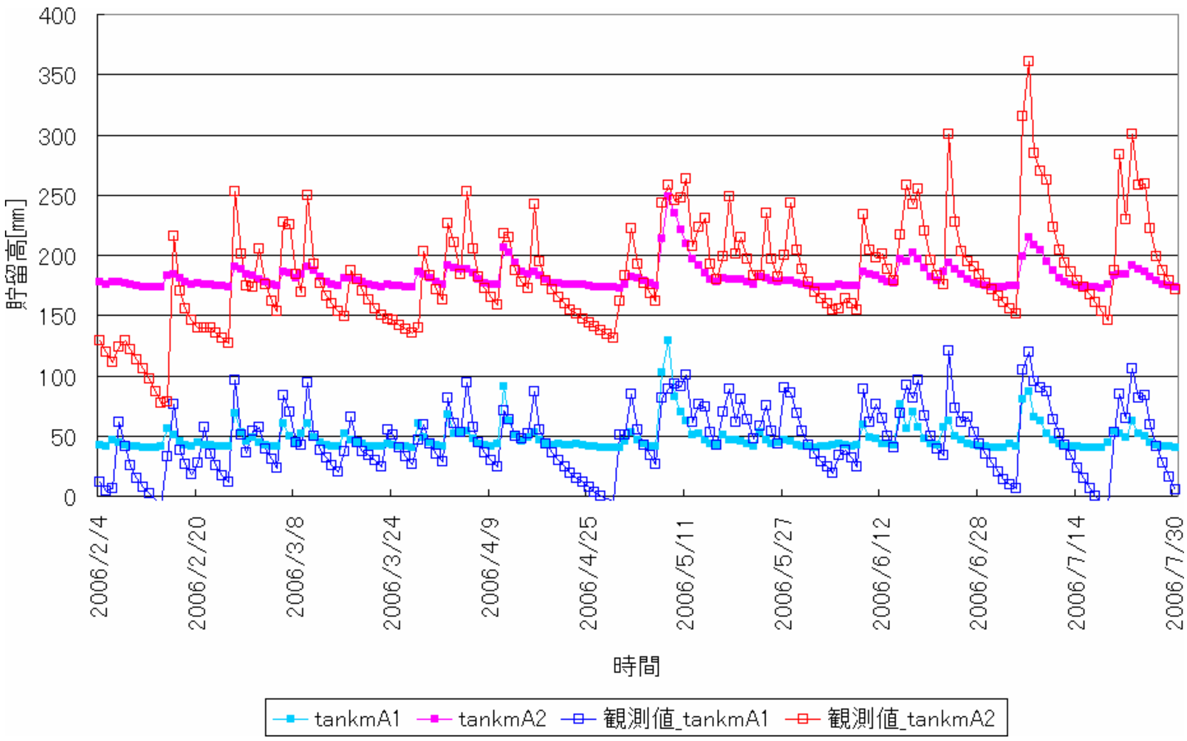


図 5-12　貯留高による算定値と観測値の比較

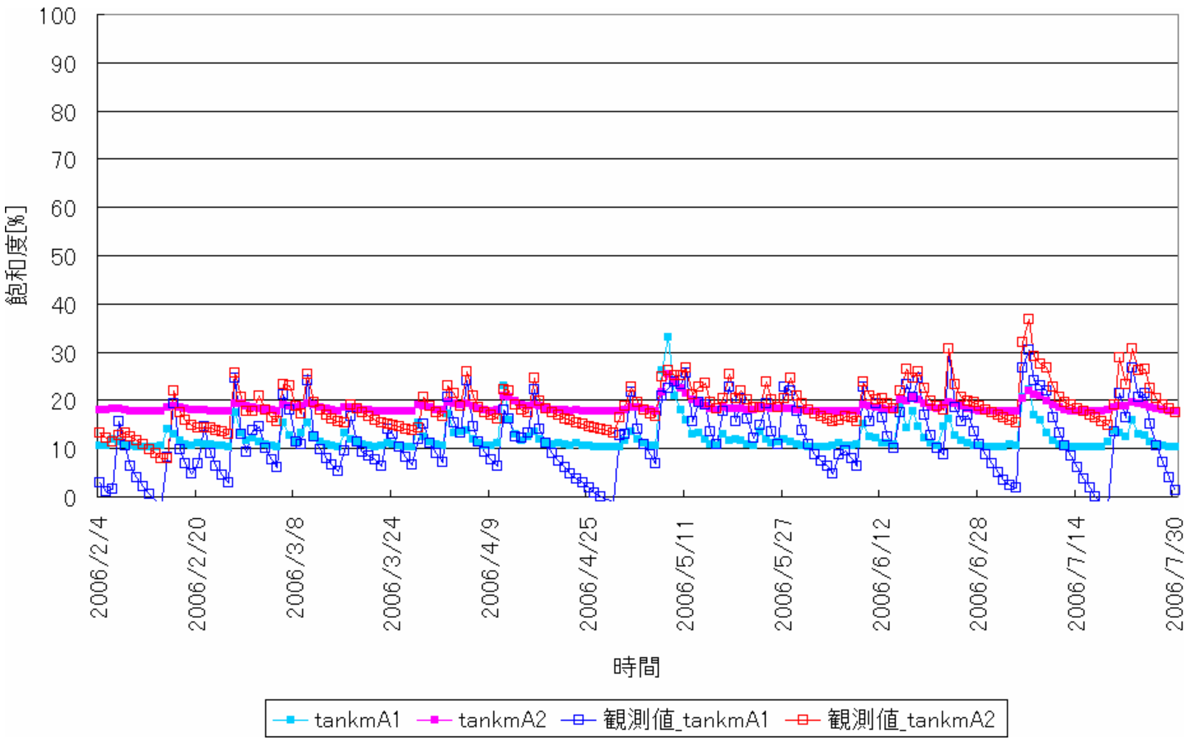


図 5-13　飽和度による算定値と観測値の比較

5.1.4 本手法の妥当性の検証

上段タンクと中段タンクに分けて検証を行う．まず，カルマンフィルタを用いた上段タンクにおいて，図 5-7 からも分かるように推定結果とほぼ一致した結果が得られていることが分かる．古座に関して，表面流出はあくまで推定結果でありタンクモデルに対して既存のパラメータを代入し算定しているため観測誤差などは含んでいない．よって，拡張型マルチタンクモデルのシステム自体の精度が保証されていると仮定すれば，本研究で提案したカルマンフィルタを用いたパラメータ同定手法は，十分に観測結果を反映すると言える．さらに，図 5-8 の C1 における浸透量では算定結果が観測値を上回るという結果が得られており，浸透量の考え方から観測値として与えた値は浸透量の最小値となるため結果は妥当であると判断できる．図 5-9 の C2 における浸透量の観測値はカルマンフィルタの計算過程においては用いられていないが，算定結果と観測値の一致が確認できる．

また，表 5-5 に示すパラメータ同定結果を見ると，降雨時に斜面に生じる物理現象を非常によく表現しているといえる．降雨時の斜面に生じる水の挙動は，一般的には，斜面下部において浸透量が大きくなり中腹部，山頂付近になるにつれて浸透量は低くなるといわれている．表 5-5 の浸透係数の値は，この一般論を十分に説明可能な値となっている．

つぎに中段タンクについて，考察を加える．まず，中間部であるが tankmB1 においては算定値と観測値はほぼ一致した値をとっており，優秀なパラメータであるといえる．ただ，一部で算定値が観測値を上回っているが，これは降雨に反応したもので，浅い部分に設置されたタンクは降雨の影響を直接的に受けるというタンクモデルの性質が表れたものと考えることができる．tankmB2 においては，全体的に算定値のほうが実測値よりも高い値をとっており，実測値の変動を十分に表現できていないと考える．この原因を考えるため，実際に必要な tankmB2 への浸透量とタンクモデルからの算定値の比較を行った．

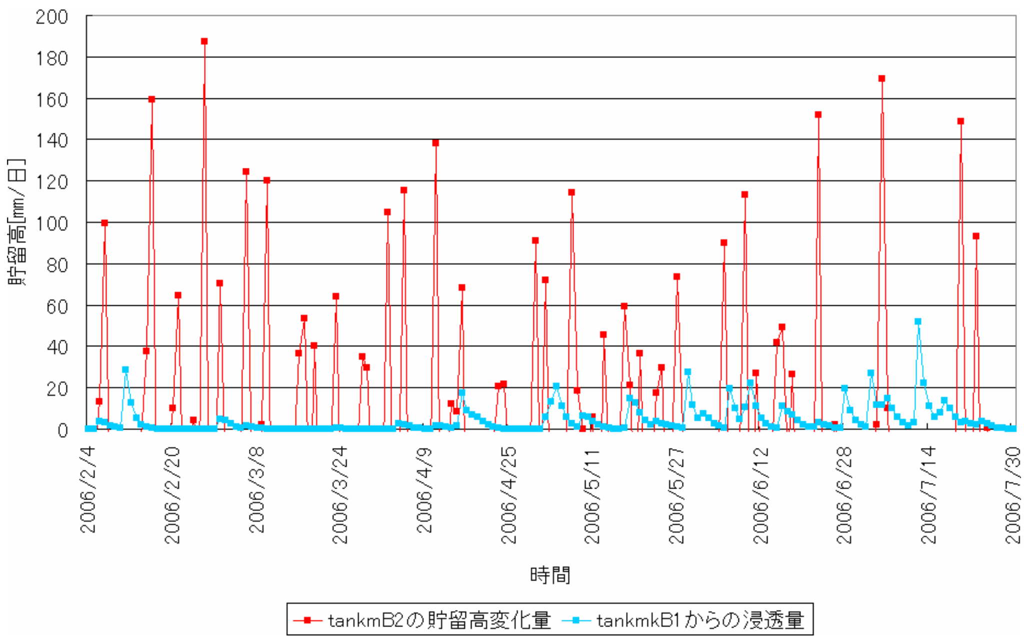


図 5-14　tankmB2 の変化量における観測値と算定値の比較

図 5-14 を見れば明らかに分かるように，絶対的に tankmB2 への浸透量が足りていないことがわかる．これに加えて降雨と tankmB2 の観測値に基づいた必要浸透量の比較を図 5-15 で行う．

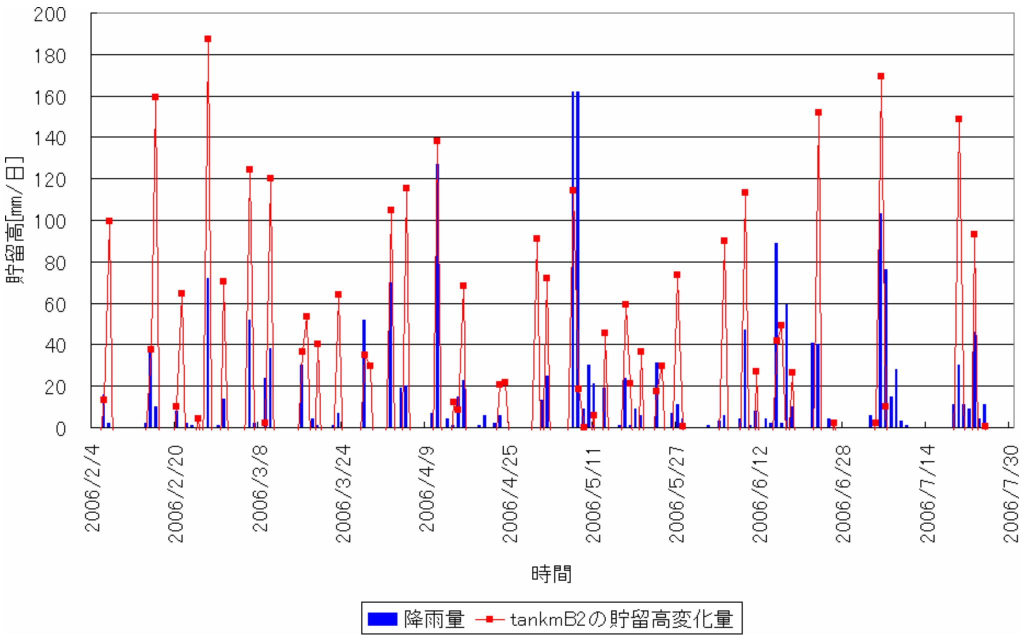


図 5-15　降雨と tankmB2 の観測値から算定された貯留高変化

この比較からいえることは，tankmB2 内の貯留高は実際の降雨以上に増加しているということである．これにより以下の 2 点の可能性が考えられる．

1. 不飽和領域の深部において側方流が発生している
2. 不飽和領域における非線形の浸透機構の区分線形化の際に，観測点間の距離が長いために水分量が過大に評価されている

まず 1 に記した不飽和領域深部における側方流の存在であるが，これは図 5-1 に示した古座の断面図から側方流の可能性が否定できないと推定される．断面図より観測地点 C1 の深度 2.8m の地点には土層の境界があることが確認でき，下の層は比較的硬質の砂質泥岩であるためである．

次に 2 に記した水分量の過大評価についてであるが，これは不飽和領域においては地表面での飽和度が低く，また地中深くなるにつれて飽和度が高くなっており，その間は非線形性が非常に強いという不飽和領域の持つ特性に起因したものである．4 章で扱った事例のように観測点間の距離が短い場合には特に問題はないが，古座のようにタンク間の距離が 2000 ㎜という大きな値になる場合には先に指摘した図 5-14 や図 5-15 のように貯留高変化量が実際の降雨あるいは浸透量を上回るという状態になる．今後，拡張型マルチタンクモデルを適用するに当たっては不飽和領域における測定間隔を短くする必要性があると推測される．以上が，中間部から得られた知見である．

次は，上部について考える．観測値を見ると，貯留高，飽和度ともに tankmA1 と tankmA2

とが連動して動いている様子が良く分かる．飽和度を指標とした図 5-13 における tankmA1 及び tankmA2 の結果をより明確に示すために，個々にまとめたものを図 5-16 及び図 5-17 に示す．

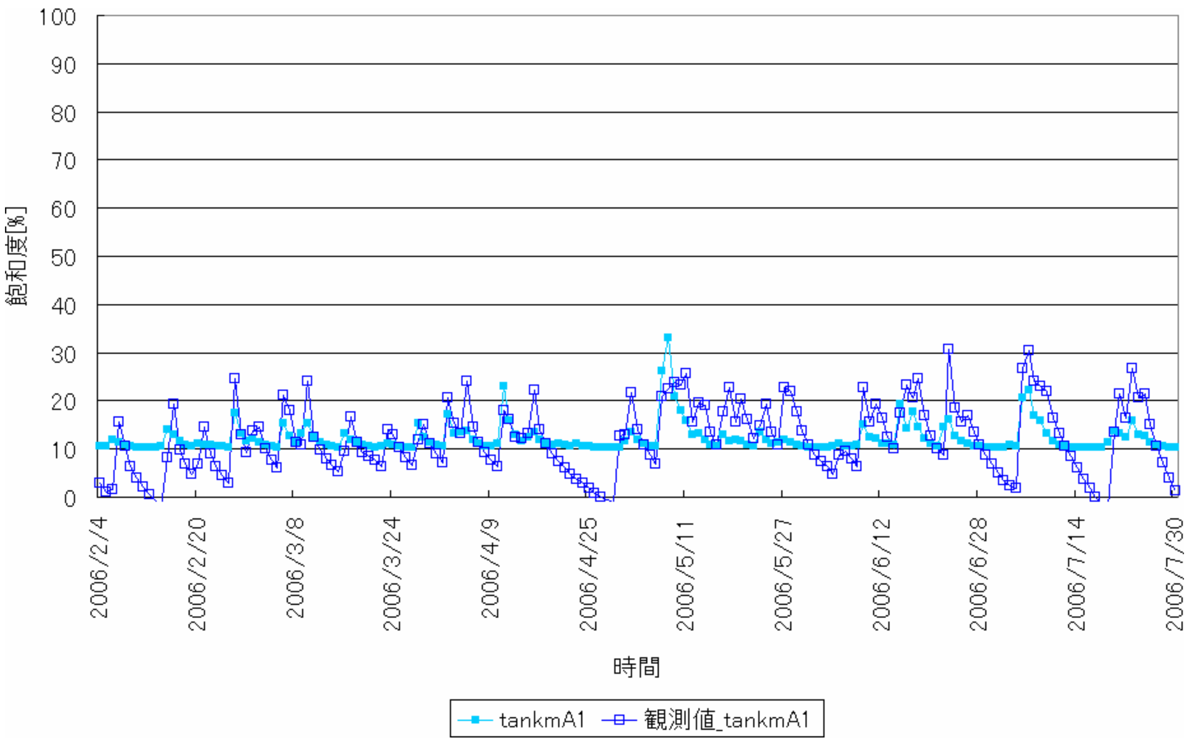


図 5-16　tankmA1 における観測値と算定値の比較

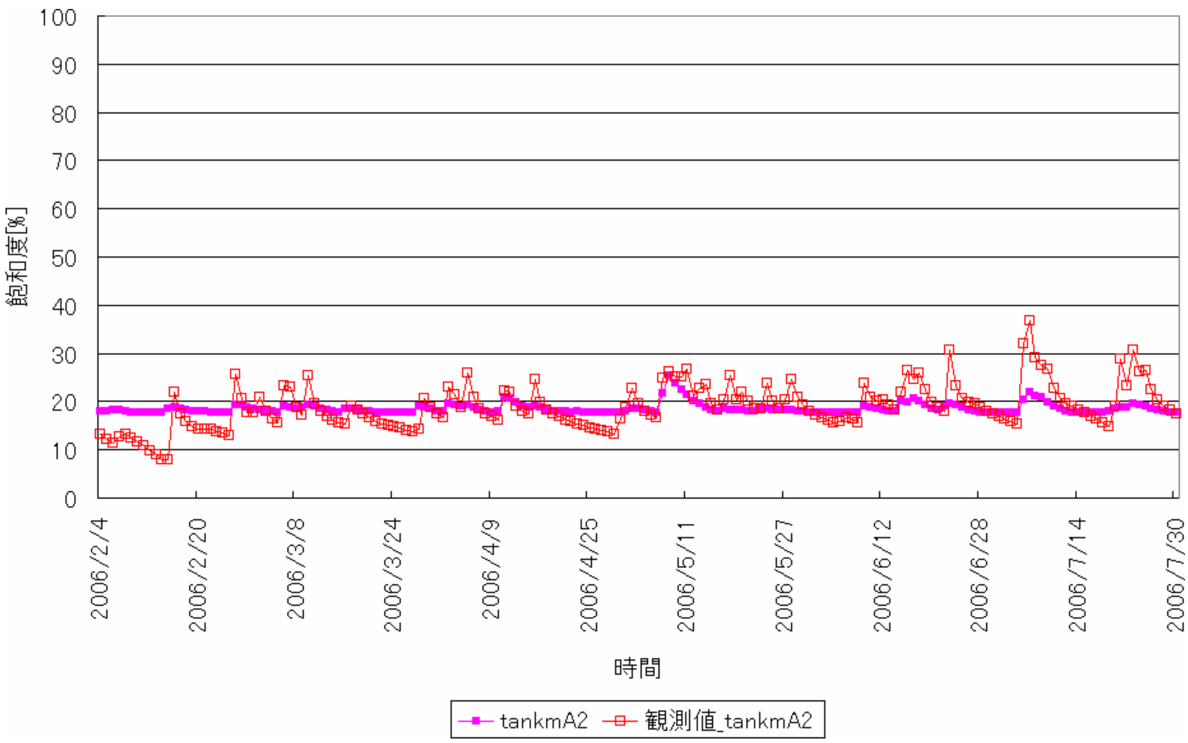


図 5-17　tankmA2 における観測値と算定値の比較

tankmA1 と tankmA2 において，反応の程度及び経過時間の一致が見られる理由としては，先ほどの中間部とは異なり，2 つの観測点が同じ砂質の層内にあることの影響であると推察される．表 5-6 を見ても，tankA1 及び tankA2 の浸透係数はほぼ同じ値を示しており，これは同質の地盤であることを示している．また，立ち上がりの差が大きく開いているが，これは各タンクの深さの影響を直接受けたものであると予想される．上部においては，非常に優れたパラメータを得ることができたと考える．

以上のことから，実地盤の複雑なデータが対象であっても本研究で提案するニューラルネットワークとカルマンフィルタを用いたパラメータ同定手法は，表面流出及び土壌水分量のある程度の傾向をつかむ上で十分な精度を持つと判断できる．ただし，当然ながら設定したタンクモデルが想定外とするような水の挙動が発生している場合に，対処する力が弱いということもいえる．例えば，不飽和領域深部における水平方向の流れは想定していないため，水平方向への流れが大きい場合タンクモデルが機能しない可能性が高い．

5.1.5 降雨時の不飽和領域における水の挙動に関する考察

古座の事例を用いて，降雨時の斜面地表面部分においての水の挙動に関して考える．古座では 2005 年 11 月 4 日から 2006 年 11 月 8 日まで観測が行われ，本研究ではそのうち図 5-18 に示すように，2 月 4 日から 7 月 30 日までの間を対象としている．

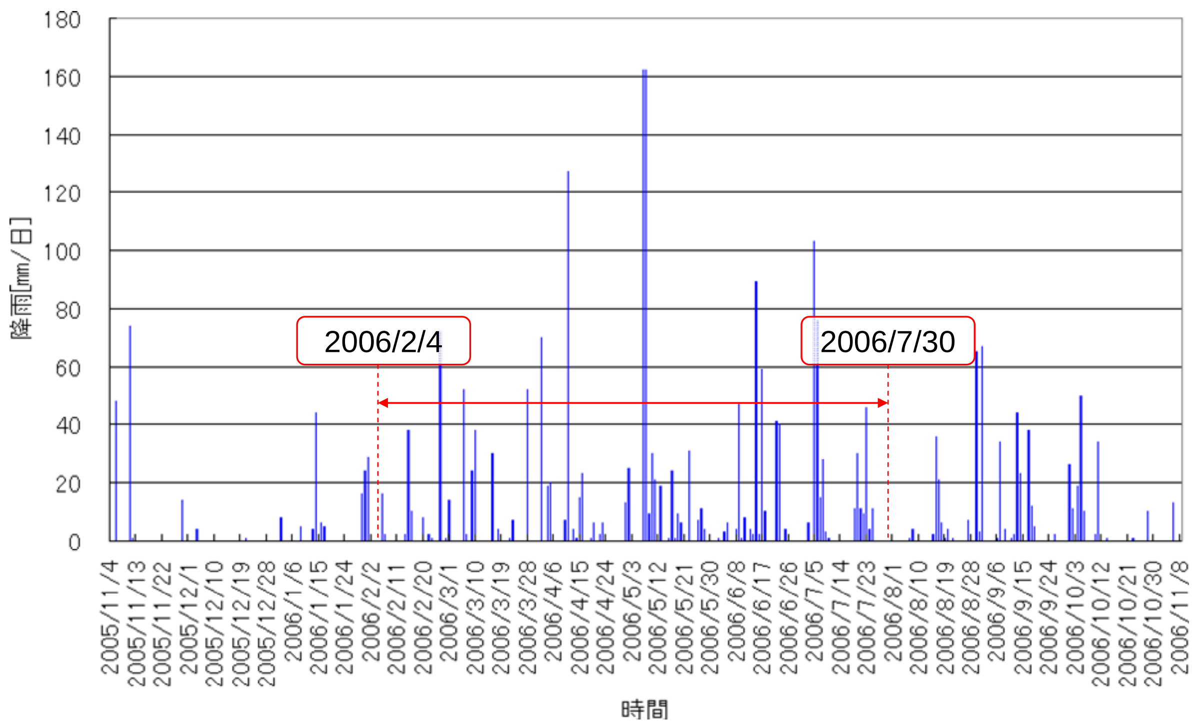


図 5-18　日降雨量の推移

降雨と上段タンク tank A，tank B 及び tank C における降雨と浸透量の関係について考察する．資料として，降雨量と浸透量の比較を図 5-19 に，降雨量と浸透量の比率と降雨量の比較を図 5-20 示す．ただし比率は各タンクの浸透量／降雨量として算定している．

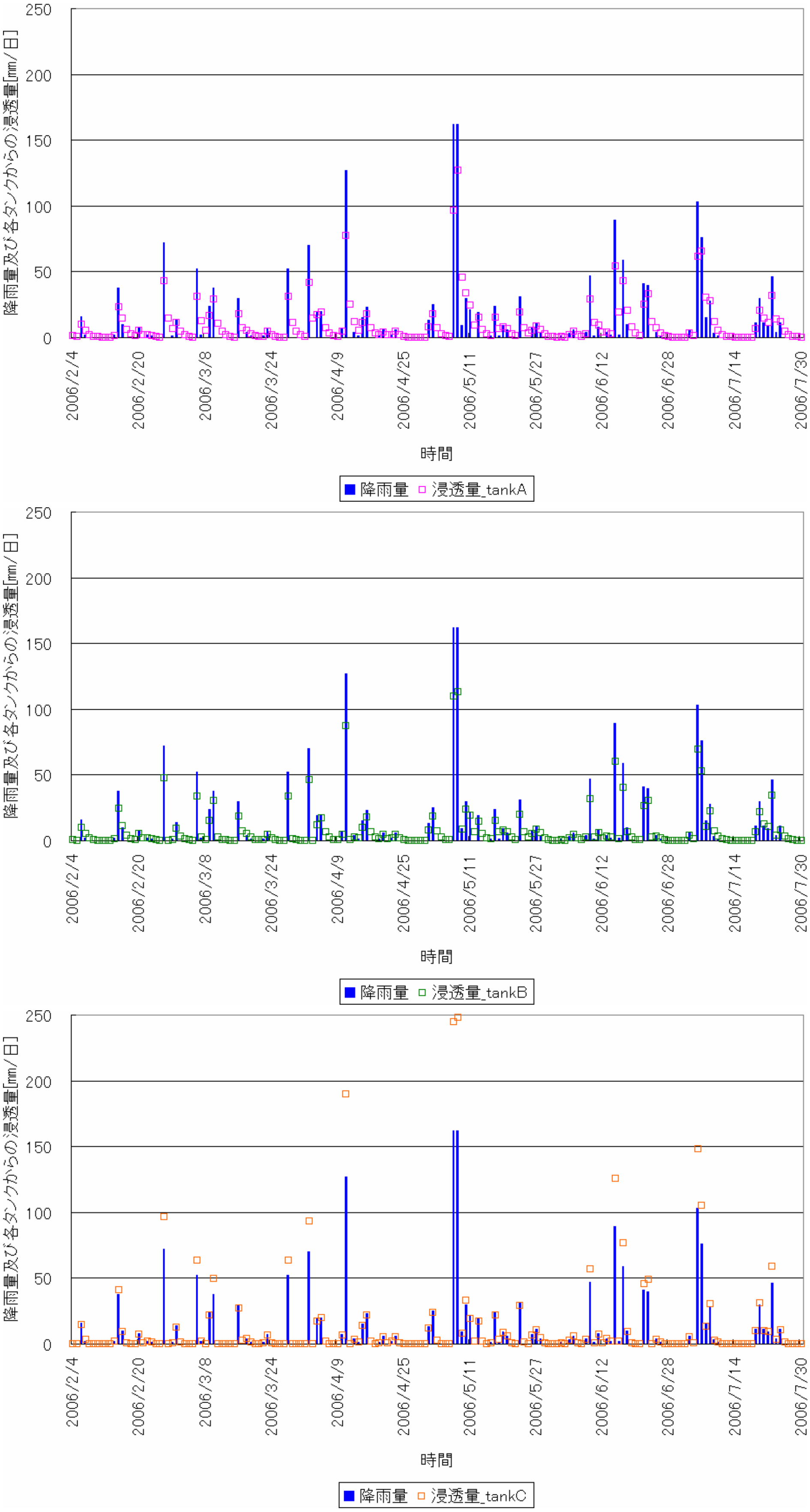


図 5-19　降雨量及び各タンクからの浸透量

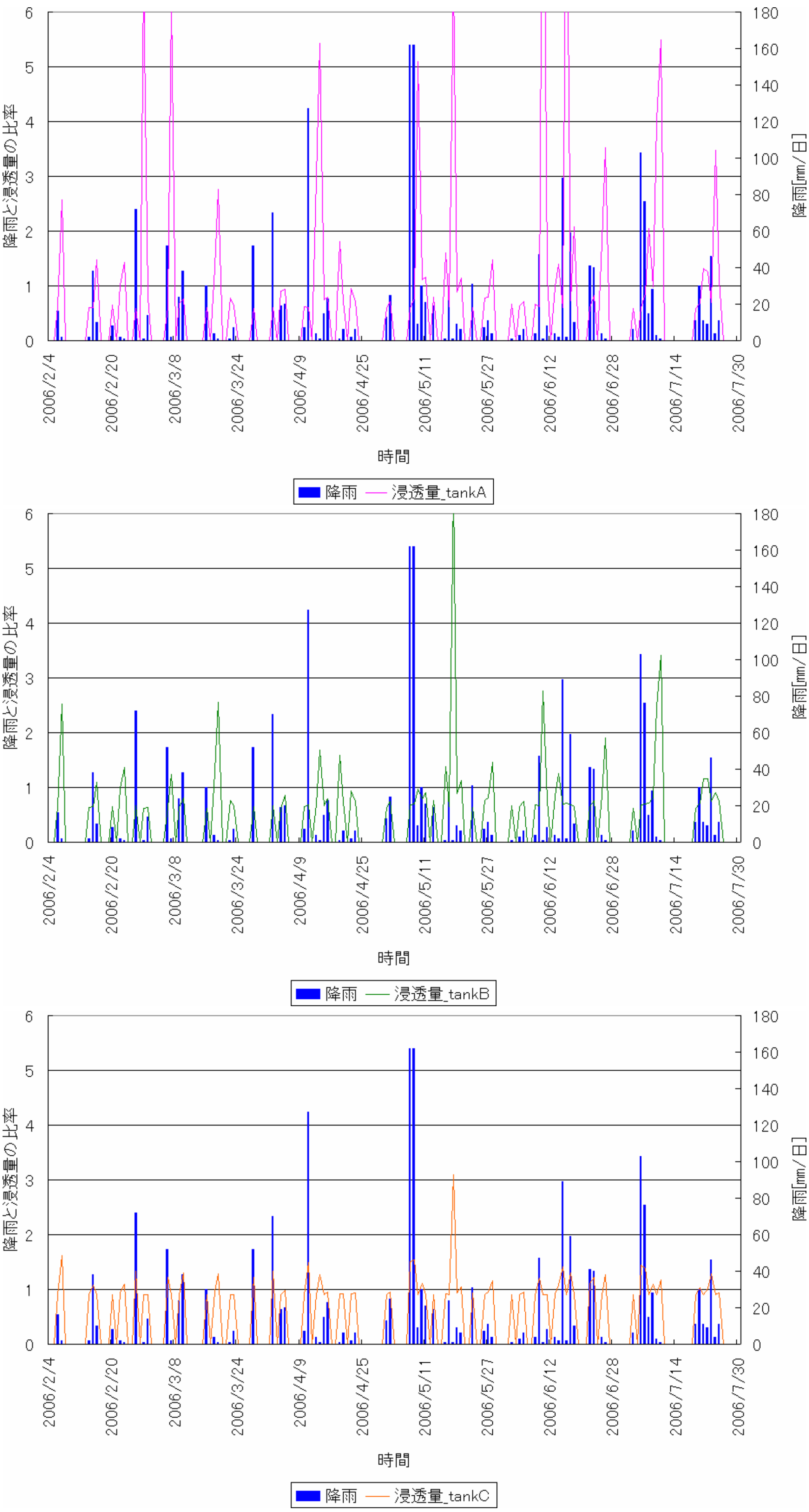


図 5-20　降雨量及び各タンクの浸透量と降雨の比率

まず，降雨と浸透量の関係では，以下の 2 点の特徴が確認できる．

1. tank A 及び tank B では同時間帯の流出量はさほど変わらないが，tank C においては降雨よりもかなり大きな値が浸透している
2. 降雨量が多くなればなるほど浸透量と降雨量の差が大きくなっている

1 に記した特徴からは，tank A から tank B への流入量に比べて tank B から tank C への流入量のほうが大きいことが分かる．これは，斜面における現象として考えてみれば，斜面の頂上付近から中腹部への表面流出の多くはそのまま中腹部から斜面下部へ流れていることを意味している．そのため斜面下部では水がたまり斜面下部における浸透量が大きくなると考えられる．

次に，2 に記した特徴について考える．降雨が少ない時と降雨が多い時を比較すれば，前者では降雨と浸透量の差はほぼ一定である．これに対して後者では，その差が大きくなっていることがわかる．これは，浸透量が貯留高に浸透係数という定数を乗じて求められていることから説明できる．実際，tank C では 2 点目の特徴が顕著に表れているが図 5-20 を見てみると，降雨に対する浸透量の比率の最大値はほぼ一定であることが分かる．

ここで，降雨に対する浸透量の比率について考察を加える．これに関しては図 5-20 から以下の 2 点のような特徴が確認できる．

1. 降雨と浸透量の比が大きく変動している
2. 降雨と浸透量の比率のピークと降雨のピークには時間差が存在する

1 点目と 2 点目の特徴には関連性があると考える．tank A では特に変動幅が大きくなっているが，降雨と浸透量の比率が大きくなるのは強い降雨のあった数日間であることが図から分かる．これは，図 5-19 からは一見，降雨と浸透量のピークが重なっていて時間差がないように解釈できるが，実際は降雨の影響がその後数日間続いているということを意味する．ピーク時には浸透量が少ないが，降雨の少ない時間帯には一定の浸透量があるため，降雨と浸透量の比率が跳ね上がっていると推定される．

一方， tank C でも若干ながら 2 点目の特徴は図 5-20 の 2006 年 5 月 11 日近辺で確認できる．しかし，tank C では比率の振れ幅は小さく，図からその振れ幅はほぼ一定であると言える．降雨と浸透量の比率のピークは 1 前後であり，tank C においては常に降雨とほぼ同量の水が地中に浸透していることがわかる．

これらの考察から，以下の知見を得た．tank C にあたる斜面の下部では，土壌の含む水分量が多くそれゆえ浸透量も多い．しかし，常に土壌内の水分量が多いため，浸透量は降雨に対してほぼ同値となり土壌内の水分含有量は一時的には変化するが短期間で元の状態へと戻る．一方，tank A にあたる斜面上部では，土壌内の水分量が少なく，また土中への浸透力も小さいため浸透量自体が少なくなり，降雨の影響が長期に渡る傾向がある．そのため，降雨の降り始めは問題がないがピーク直後から数日の期間に関しては土中の水分量が高いまま保持されることとなる．

5.2 Nakhon Nayok 事例検証

タイの中部に位置する Nakhon Nayok において，行った実験を基に本手法の検討を行う．

5.2.1 Nakhon Nayok 概要

Nakhon Nayok において，ある斜面を対象に拡張型マルチタンクモデルに対応した観測システムを導入し計測を行った．この観測システムの特徴は，古座では観測されていなかった表面流出の観測を実施している点，不飽和領域に関しては 0.2m，0.3m，0.4m，0.6m 及び 1.0m の 5 つの深度において観測を実施している点及び観測値の測定間隔をこれまでの日単位から 10 分単位へと変更している点の 3 点である．

まず，導入した観測システムならびに対象地域の概要を図 5-21 に示す．

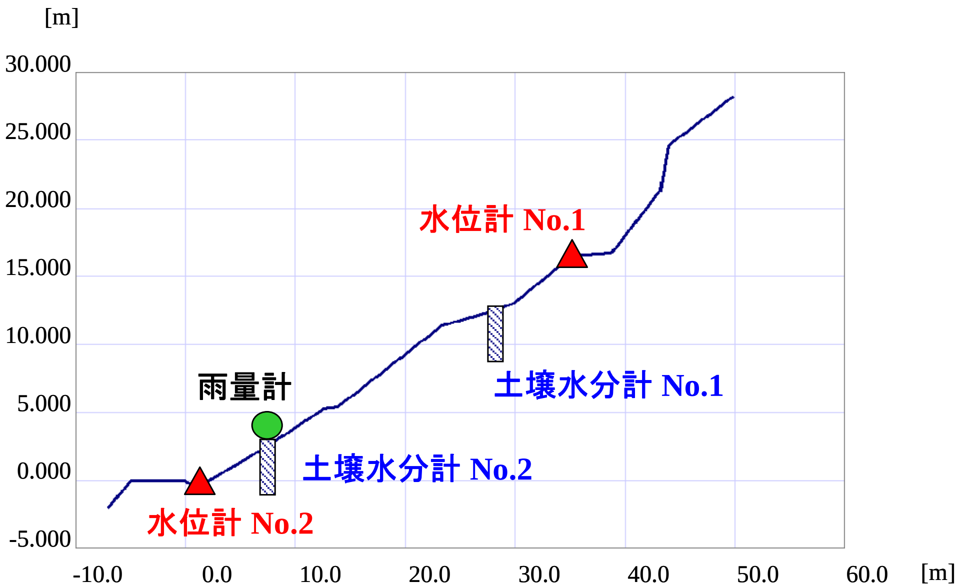


図 5-21　Nakhon Nayok　断面図

対象地域は，道路に隣接した斜面で斜面下部に雨量計，下部及び中腹部に水位計さらに下部及び中腹部に土壌水分計を設置している．

まず，雨量計により測定された降雨のデータを図 5-22 に示す．タイでは雨季には集中豪雨が頻繁に発生し，降り始めから降り終わりまでが 1 時間未満と非常に短く，また降雨強度も大きいという特徴がある．そのため，日単位あるいは時間単位で測定を行っている状態では実際の降雨時の斜面内の状況を把握することは難しい．そこで，測定間隔は 10 分間隔としている．測定期間は 2007 年 9 月 21 日 16:00 から 2007 年 10 月 6 日 16:50 までであるが，そのうち以下の 4 つの期間に対してパラメータ同定手法を適用した．

rainfall 1)　9 月 26 日　4:00～4:30　　　rainfall 3)　9 月 28 日　0:40～2:30

rainfall 2)　9 月 27 日　10:10～11:00　　rainfall 4)　9 月 28 日　18:10～20:40

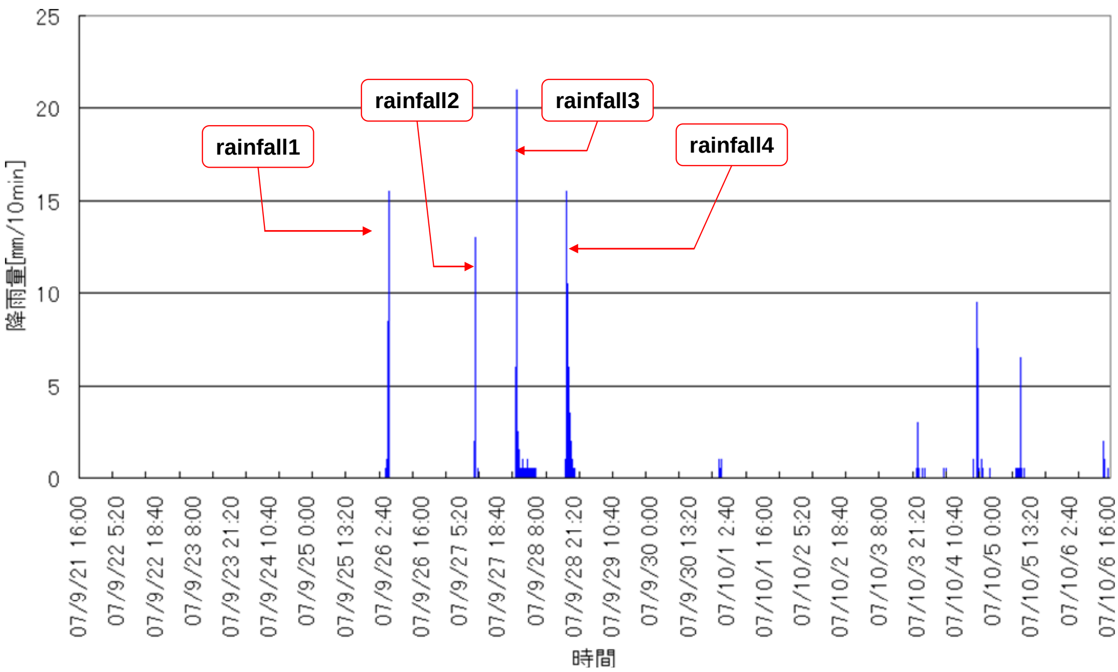


図 5-22　対象降雨

次に，No.2 の水位計によって測定された流出量を図 5-23 に示す．本サイトで測定された流出量に対しては，3.4 に先述したように面積補正を行う必要があるため，集水面積を $500m^2$ として補正後の値を示している．No.1 では装置及び設定環境の問題により表面流出の値が得られなかったため，本検討ではその値を用いていない．

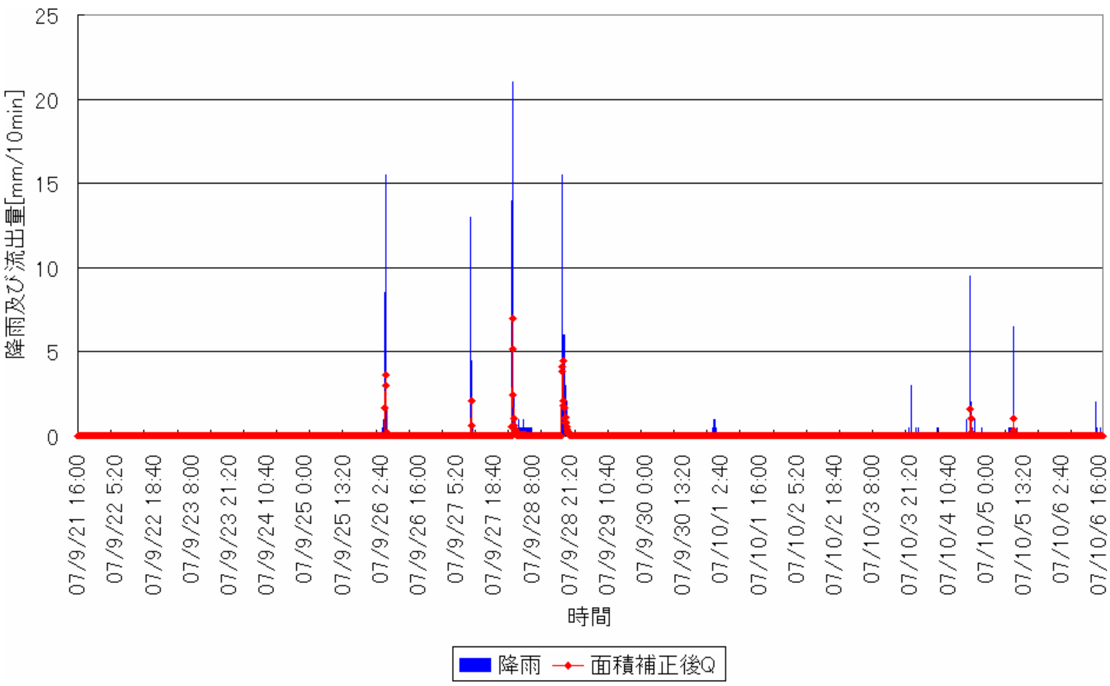


図 5-23　降雨と No.2 における補正流出量

最後に，土壌水分計で測定した体積含水率から算定される飽和度の値を斜面内の 5 深度

について記す．土壌水分計は斜面中腹部の No.1 と下部の No.2 に設置されているが，本研究では，図 5-24 に示す No.1 のデータを用いる．また，間隙率は 0.45 としている．

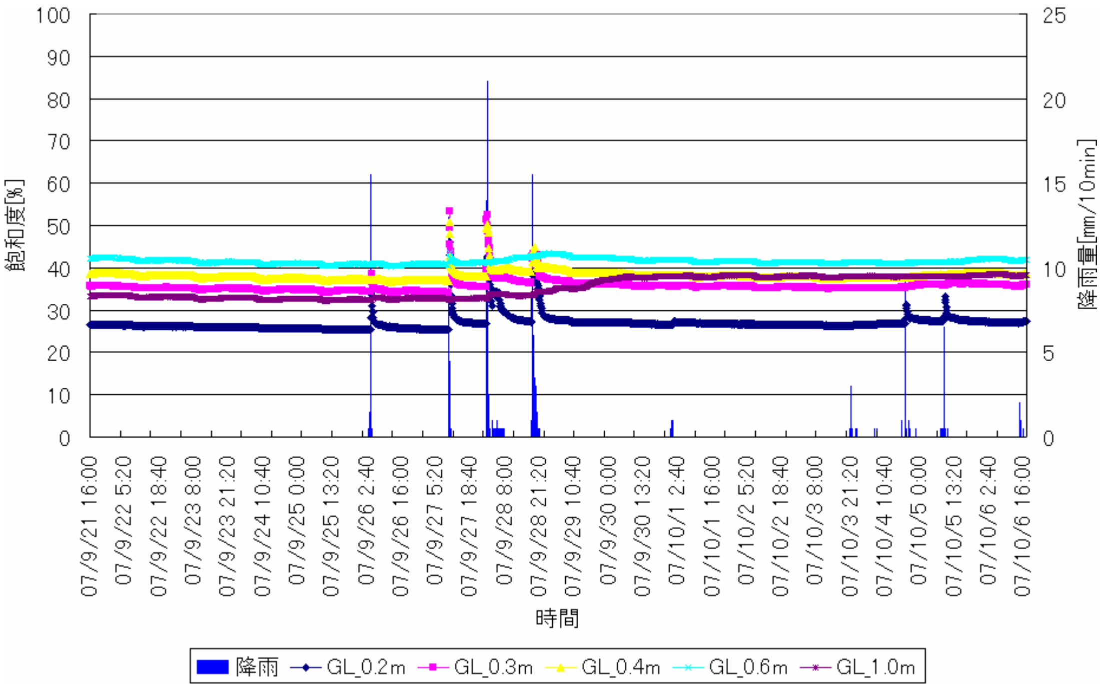


図 5-24　降雨と No.1 における各深度の飽和度

降雨に反応して，各タンクの飽和度が増加している様子が確認できる．特に深度 0.2m での観測値が降雨に敏感に反応している．参考として，斜面下部の No.2 における観測結果を図 5-25 に示す．

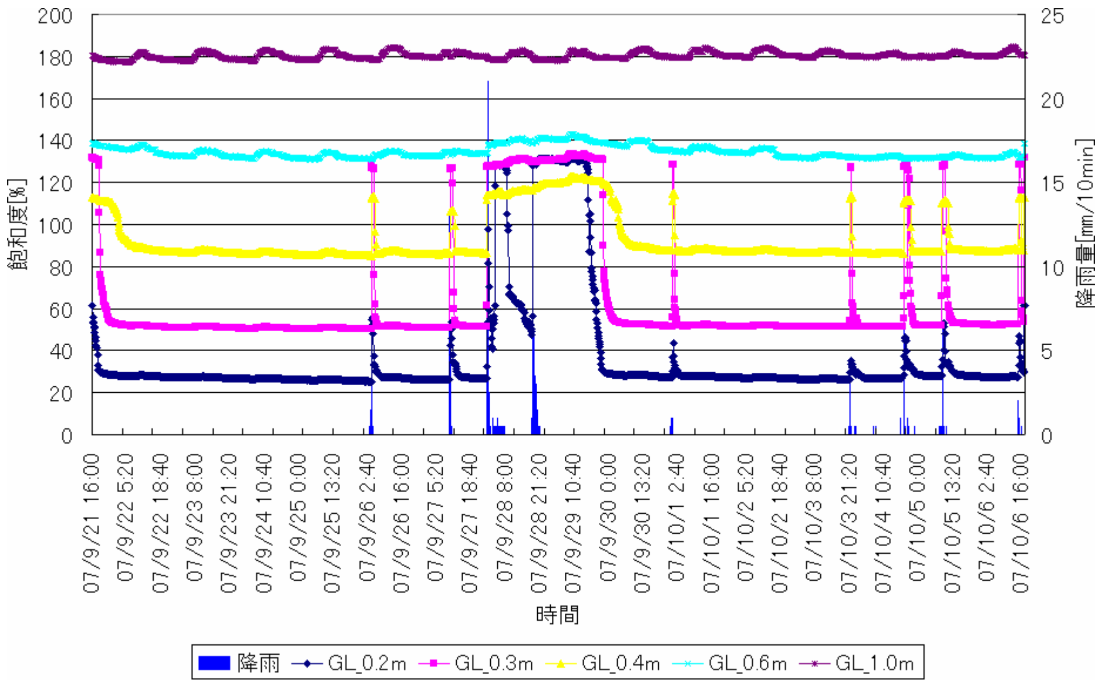


図 5-25　降雨と No.2 における各深度の飽和度

5.2.2 適用タンクモデル及びパラメータ同定手法の概要

本事例に対して適用したタンクモデルの概要について記述する．本検討では，図 5-26 に示すように斜面に対して不飽和領域を考慮したＴ字型 3 列 6 段タンクを採用している．中段タンクは斜面の中腹部に設置された中間部の上段タンクに接続しており，深度方向に 0.2m，0.3m，0.4m，0.6m及び 1.0mの計 5 個のタンクを想定している．各中段タンクの深さは，tankmB1 が 200 ㎜，tankmB2 が 100 ㎜，tankmB3 が 100 ㎜，tankmB4 が 200 ㎜及び tankmB5 が 400 ㎜である．上段タンクの側孔までの底からの高さは欠損雨量がほぼ 0 であることから全て 0.5 ㎜としている．

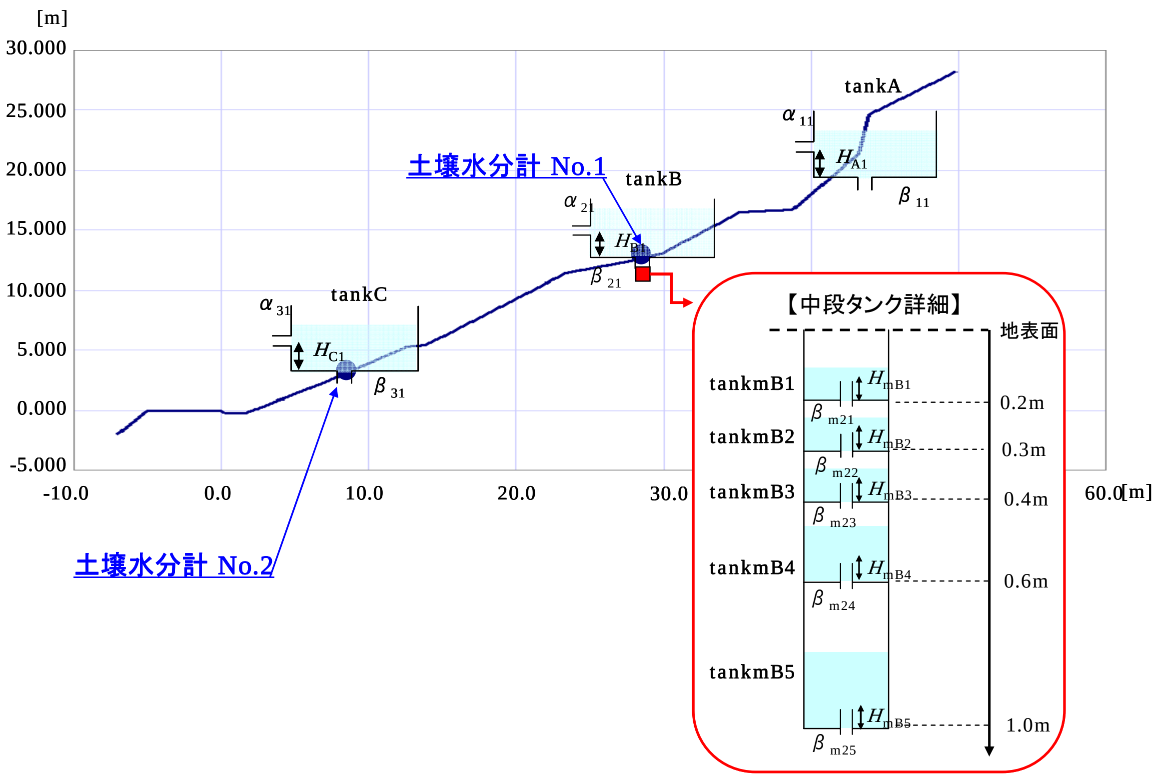


図 5-26　適用タンクモデル概要

次に，パラメータ同定手法の概要について説明する．Nakhon Nayok では古座と同様に上段タンクに対してはカルマンフィルタを用いたパラメータ同定手法を，中段タンクに対してはニューラルネットワークを用いたパラメータ同定手法を適用する．上段タンクのパラメータ同定後，その値を用いて中段タンクのパラメータ同定を行う．上段タンクのパラメータ同定におけるカルマンフィルタへの入力観測値の観測項目は以下である．

1.　降雨
2.　tank C からの流出量
3.　tank B からの地中への浸透量

降雨及び流出量については先ほど示した観測値を用いており，地中への浸透量については古座同様 tankmB1 の貯留高の変化量を浸透量の近似値として用いている．実際に rainfall

1～rainfall 4 に与えた観測値を表 5-7，表 5-8，表 5-9 及び表 5-10 に示す.

表 5-7　rainfall 1 のカルマンフィルタに与えた観測値

時間	Rainfall[㎜/10min]	$\Delta q_{\alpha_{31}}$	$\Delta q_{\beta_{21}}$ $(=\Delta h_{B1}(t))$
2007/9/26 4:00	1.5	0.023239371	0
2007/9/26 4:10	8.5	1.643823578	2.63997
2007/9/26 4:20	15.5	1.971592117	2.37495753
2007/9/26 4:30	14.5	-0.66707503	-2.93341311

表 5-8　rainfall 2 のカルマンフィルタに与えた観測値

時間	Rainfall[㎜/10min]	$\Delta q_{\alpha_{31}}$	$\Delta q_{\beta_{21}}$ $(=\Delta h_{B1}(t))$
2007/9/27 10:10	0	-0.00002634	0
2007/9/27 10:20	2	0.04697928	6.65218530
2007/9/27 10:30	13	2.03229240	5.19221061
2007/9/27 10:40	4.5	-1.46614656	-11.84439591

表 5-9　rainfall 3 のカルマンフィルタに与えた観測値

時間	Rainfall[㎜/10min]	$\Delta q_{\alpha_{31}}$	$\Delta q_{\beta_{21}}$ $(=\Delta h_{B1}(t))$
2007/9/28 0:40	0	0.00005676	0
2007/9/28 0:50	6	0.52903278	11.06767917
2007/9/28 1:00	14	4.63646728	-8.58762486
2007/9/28 1:10	21	1.80936564	-1.71992574

表 5-10　rainfall 4 のカルマンフィルタに与えた観測値

時間	Rainfall[㎜/10min]	$\Delta q_{\alpha_{31}}$	$\Delta q_{\beta_{21}}$ $(=\Delta h_{B1}(t))$
2007/9/28 18:10	0	-0.000430749	0
2007/9/28 18:20	1	0.019317018	0
2007/9/28 18:30	14.5	3.83570999	10.41639399
2007/9/28 18:40	15.5	0.271710617	-10.41639399

$q_{\alpha 31}$:tankC の側孔からの流出量　$q_{\beta 21}$:tankB の底孔からの浸透量

次に，ニューラルネットワークを用いたパラメータ同定手法について記述する．学習データ作成方法は，これまでの 3 事例と全く同じである．ここでは，間隙率は 0.45 としており，教師データ作成の際に乱数で与えるパラメータの範囲については表 5-11 に示すとおりである．教師データ数は 700 セットとしている．

表 5-11　各タンクの乱数で与えるパラメータの範囲

	浸透係数	立ち上がり
tankmB1	$0 \leqq RN < 1$	$0 \leqq RN < 90$
tankmB2	$0 \leqq RN < 1$	$0 \leqq RN < 45$
tankmB3	$0 \leqq RN < 1$	$0 \leqq RN < 45$
tankmB4	$0 \leqq RN < 1$	$0 \leqq RN < 90$
tankmB5	$0 \leqq RN < 1$	$0 \leqq RN < 180$

次に，教師データをニューラルネットワークに学習させネットワークを形成させた後，観測値に基づいた入力を与える．各入力は，以下である．

1. 浸透量：上段タンクにおいて算定されたパラメータをタンクモデルに適用することにより算出される値．
2. 貯留高：観測された体積含水率に各タンクの深さを乗じた値
3. 貯留高変化量：上記のようにして算定された貯留高の日変化量

例として，rainfall 1 における tankmB1 及び tankmB2 における入力値の一部を表 5-12 に示す．

表 5-12　入力値例　(tankmB1 及び tankmB2)

	IN	IN	IN
tankmB1 (0.2m)	浸透量	貯留高 1	貯留変化 1
1	1.500	3.234	1.667
2	8.500	13.311	10.077
3	15.500	31.797	18.486
4	14.500	49.082	17.285
5	1.000	1.567	1.067

	IN	IN	IN
tankmB2 (0.3m)	浸透量	貯留高 2	貯留変化 2
1	1.500	0.000	0.000
2	8.500	0.000	0.000
3	15.500	3.259	3.259
4	14.500	9.766	7.391
5	0.500	13.940	1.807

浸透量は，tank B からの流入量であるため深度 0.2m に位置する tankmB1 においても深度 0.3m に位置する tankmB2 でも同じ値が用いられていることがわかる．

5.2.3 パラメータ同定結果

カルマンフィルタ・ニューラルネットワークを用いたパラメータ同定の結果を示していく．これらのパラメータはタンクモデルに適用した結果得られる各算定値と観測値との誤差が小さいものを選択したものである．観測値は tank C からの流出と tank B の浸透があるが，流出を重視してパラメータを選択している．

まず，上段タンクにカルマンフィルタを適用することによって同定されたパラメータを示す．本事例では，同斜面に対して入力値を 4 種類変えてパラメータ同定を行っている．それぞれの降雨から得られた結果を順に，表 5-13，表 5-14，表 5-15 及び表 5-16 に示す．

表 5-13　rainfall 1 における上段タンクの最適パラメータ

tank C		tank B		tank A	
流出係数 α_{31}	浸透係数 β_{31}	流出係数 α_{21}	浸透係数 β_{21}	流出係数 α_{11}	浸透係数 β_{11}
0.902209	0.931552	0.747147187	0.927090242	0.106525	0.59225

表 5-14　rainfall 2 における上段タンクの最適パラメータ

tank C		tank B		tank A	
流出係数 α_{31}	浸透係数 β_{31}	流出係数 α_{21}	浸透係数 β_{21}	流出係数 α_{11}	浸透係数 β_{11}
0.50169	0.495577	0.583016438	0.938639044	0.350766	0.11365

表 5-15　rainfall 3 における上段タンクの最適パラメータ

tank C		tank B		tank A	
流出係数 α_{31}	浸透係数 β_{31}	流出係数 α_{21}	浸透係数 β_{21}	流出係数 α_{11}	浸透係数 β_{11}
0.484944	0.493285	0.508199	0.873364568	0.534393	0.147731

表 5-16　rainfall 4 における上段タンクの最適パラメータ

tank C		tank B		tankA	
流出係数 α_{31}	浸透係数 β_{31}	流出係数 α_{21}	浸透係数 β_{21}	流出係数 α_{11}	浸透係数 β_{11}
0.487643	0.501158	0.8834018	0.226359784	0.029683	0.980766

さらに，これらの同定されたパラメータを基に中段タンクのパラメータ同定を行った．その結果得られた値を，それぞれの降雨ごとに表 5-17，表 5-18，表 5-19 及び表 5 -20 に示す．ここで，これらのパラメータは同斜面の同地点に対して同定されたもので異なるものは対象降雨のみである．

表 5-17　rainfall 1 における
中段タンクの最適パラメータ

tankmB1	浸透係数 β_{m21}	0.508706
	立ち上がり H_{mB1}	23.27321
tankmB2	浸透係数 β_{m22}	0.426083
	立ち上がり H_{mB2}	6.315904
tankmB3	浸透係数 β_{m23}	0.542059
	立ち上がり H_{mB3}	22.9568
tankmB4	浸透係数 β_{m24}	0.43003
	立ち上がり H_{mB4}	24.64975
tankmB5	浸透係数 β_{m25}	0.567136
	立ち上がり H_{mB5}	39.712

表 5-18　rainfall 2 における
中段タンクの最適パラメータ

tankmB1	浸透係数 β_{m21}	0.464069
	立ち上がり H_{mB1}	22.63231
tankmB2	浸透係数 β_{m22}	0.408058
	立ち上がり H_{mB2}	7.984666
tankmB3	浸透係数 β_{m23}	0.382625
	立ち上がり H_{mB3}	9.36971
tankmB4	浸透係数 β_{m24}	0.456396
	立ち上がり H_{mB4}	46.89104
tankmB5	浸透係数 β_{m25}	0.659553
	立ち上がり H_{mB5}	42.396

表 5-19　rainfall 3 における
中段タンクの最適パラメータ

tankmB1	浸透係数 β_{m21}	0.534329
	立ち上がり H_{mB1}	21.42114
tankmB2	浸透係数 β_{m22}	0.484519
	立ち上がり H_{mB2}	12.73913
tankmB3	浸透係数 β_{m23}	0.382158
	立ち上がり H_{mB3}	8.749127
tankmB4	浸透係数 β_{m24}	0.488274
	立ち上がり H_{mB4}	46.11351
tankmB5	浸透係数 β_{m25}	0.641969
	立ち上がり H_{mB5}	47.047

表 5-20　rainfall 4 における
中段タンクの最適パラメータ

tankmB1	浸透係数 β_{m21}	0.461493
	立ち上がり H_{mB1}	27.70376
tankmB2	浸透係数 β_{m22}	0.511778
	立ち上がり H_{mB2}	8.43324
tankmB3	浸透係数 β_{m23}	0.480739
	立ち上がり H_{mB3}	34.13267
tankmB4	浸透係数 β_{m24}	0.500073
	立ち上がり H_{mB4}	44.63983
tankmB5	浸透係数 β_{m25}	0.497333
	立ち上がり H_{mB5}	44.644

Nakhon Nayok では，最適パラメータは tank C からの流出量及び tank B からの浸透量の 2 つの指標を用いて判断する．具体的には，それぞれ観測値と求められたパラメータをマルチタンクモデルに適用することにより求められる算定値の誤差の絶対値の和が少ないものから順位付けをし，2 つの指標において誤差の小さいパラメータを最適パラメータとしている．

次に，tank C からの流出量及び tank B からの浸透量の 2 つの指標を用いて，各降雨から同定されたパラメータをマルチタンクモデルに適用した結果得られる算定値と観測値の比較を図 5-27 及び図 5-28 において行う.

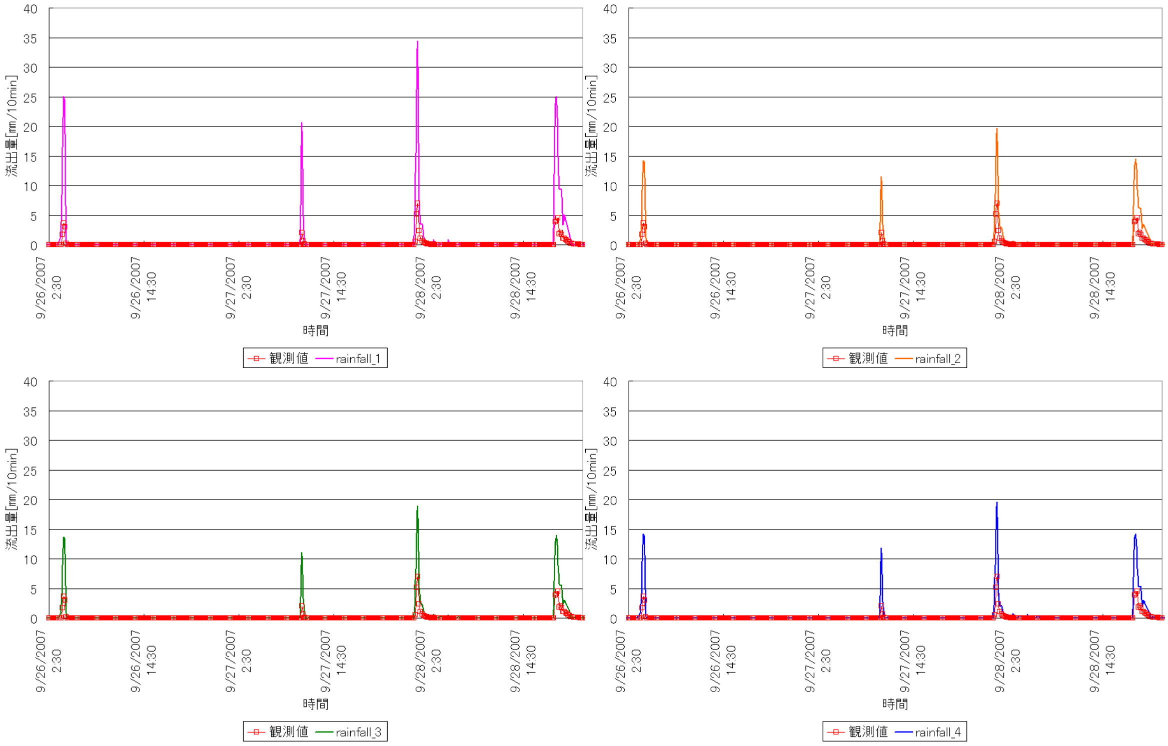


図 5-27　tankC の側孔からの流出量による算定値と観測値の比較

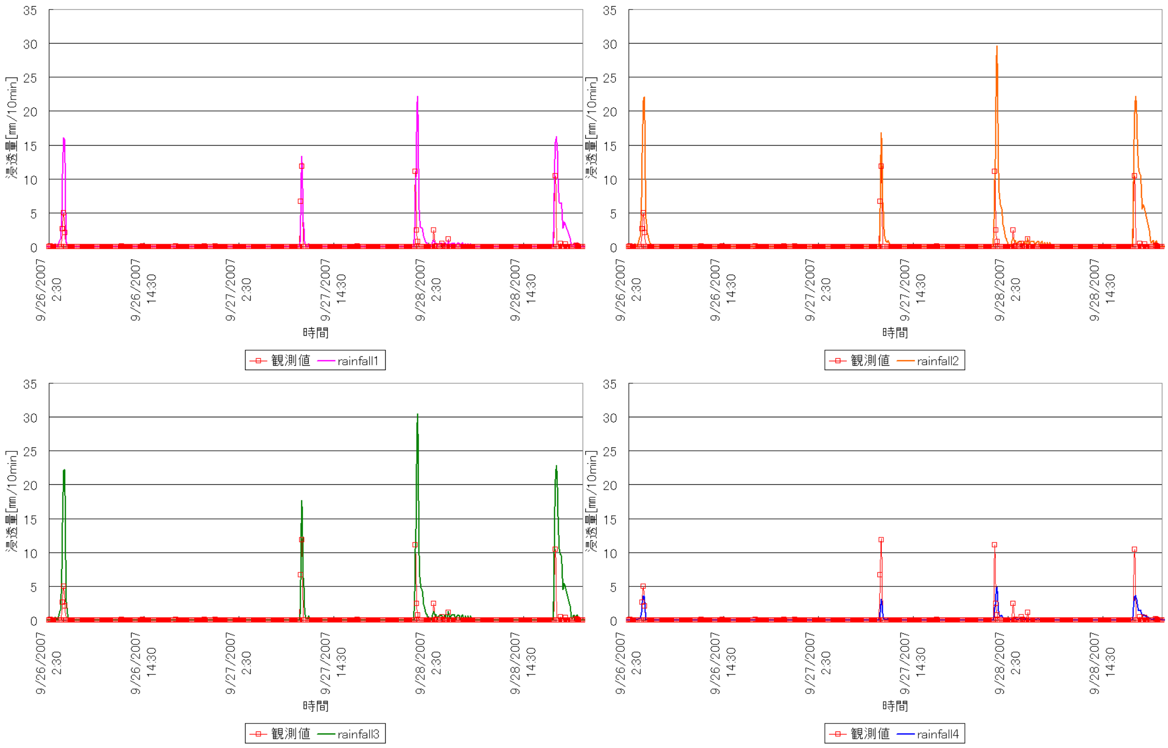


図 5-28　tankB の底孔からの浸透量による算定値と観測値の比較

さらに，不飽和領域における各深度での降雨毎の算定値と観測値の比較を同様に行う．

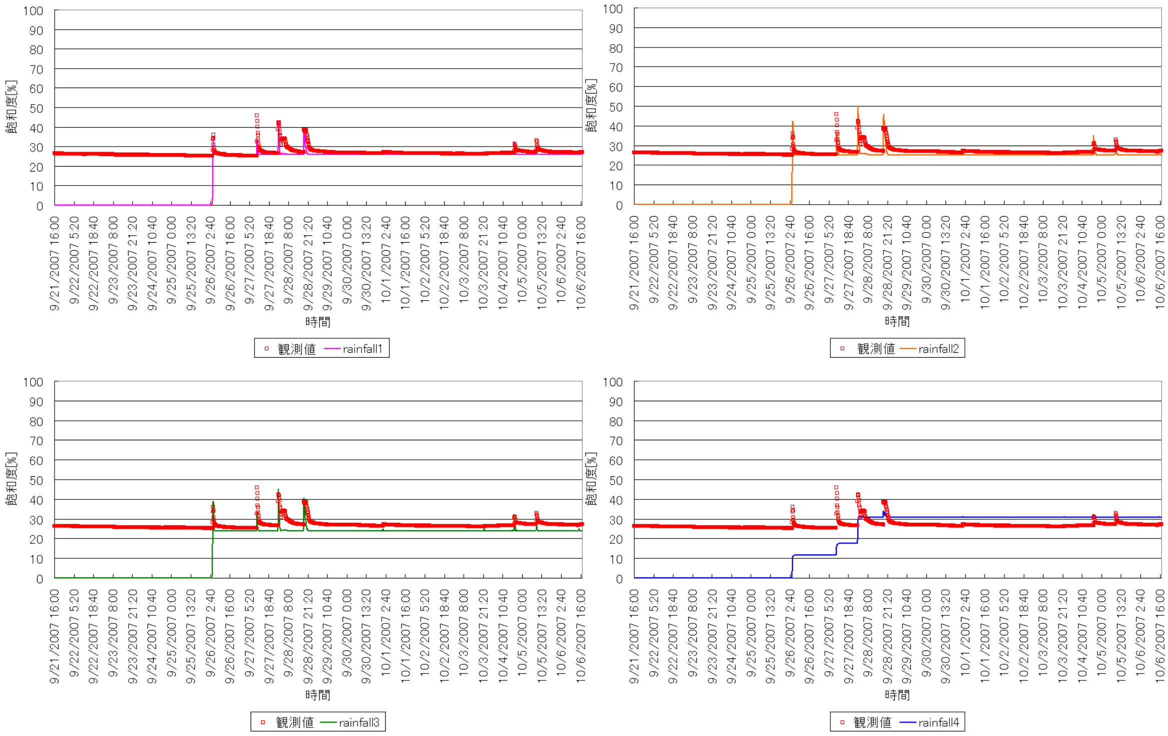


図 5-29　tankmB1 における飽和度による算定値と観測値の比較

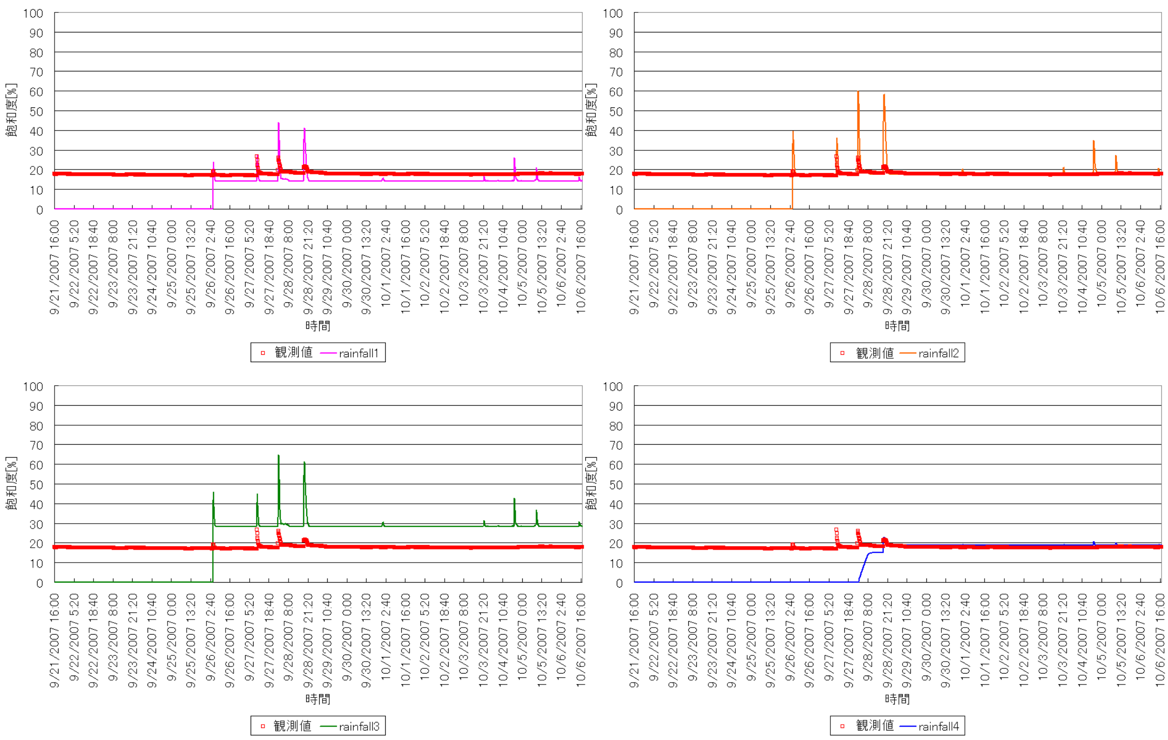


図 5-30　tankmB2 における飽和度による算定値と観測値の比較

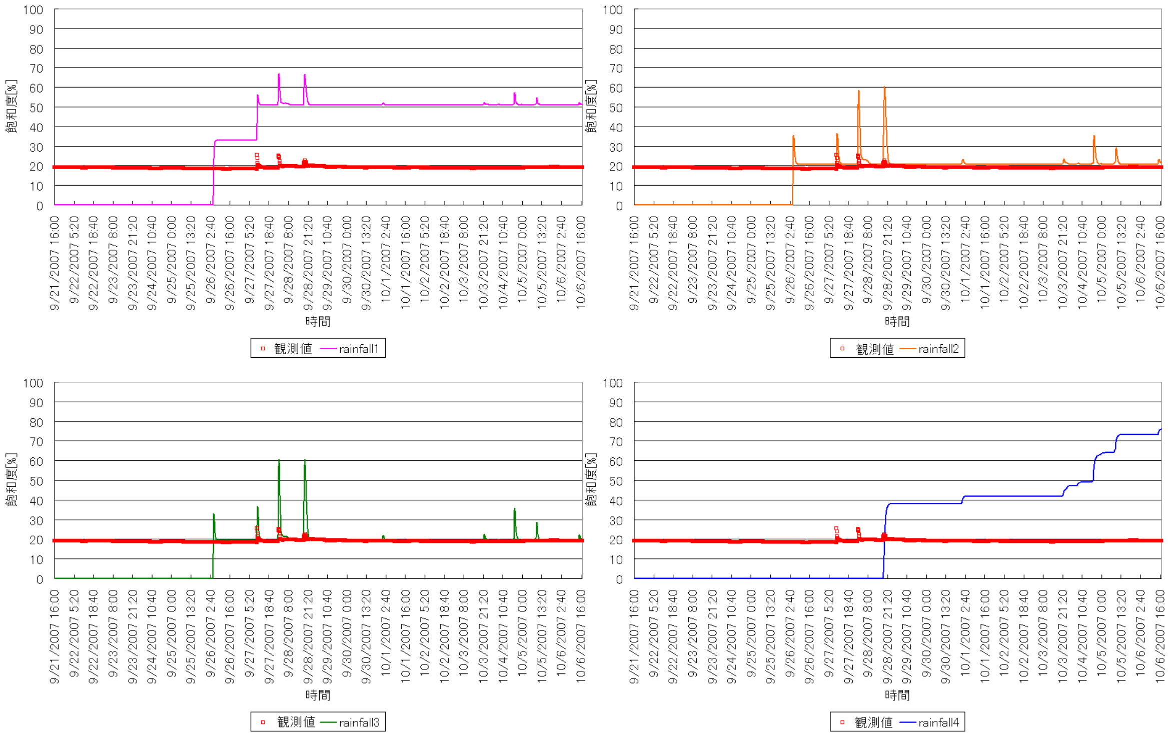


図 5-31　tankmB3 における飽和度による算定値と観測値の比較

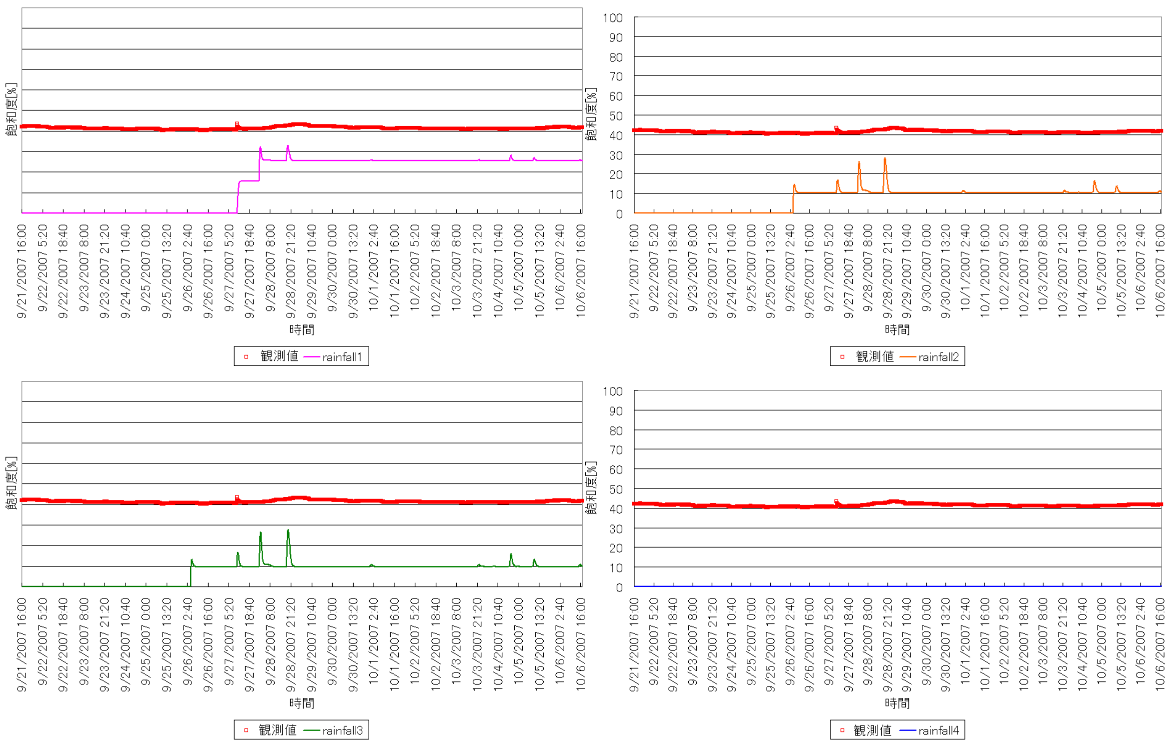


図 5-32　tankmB4 における飽和度による算定値と観測値の比較

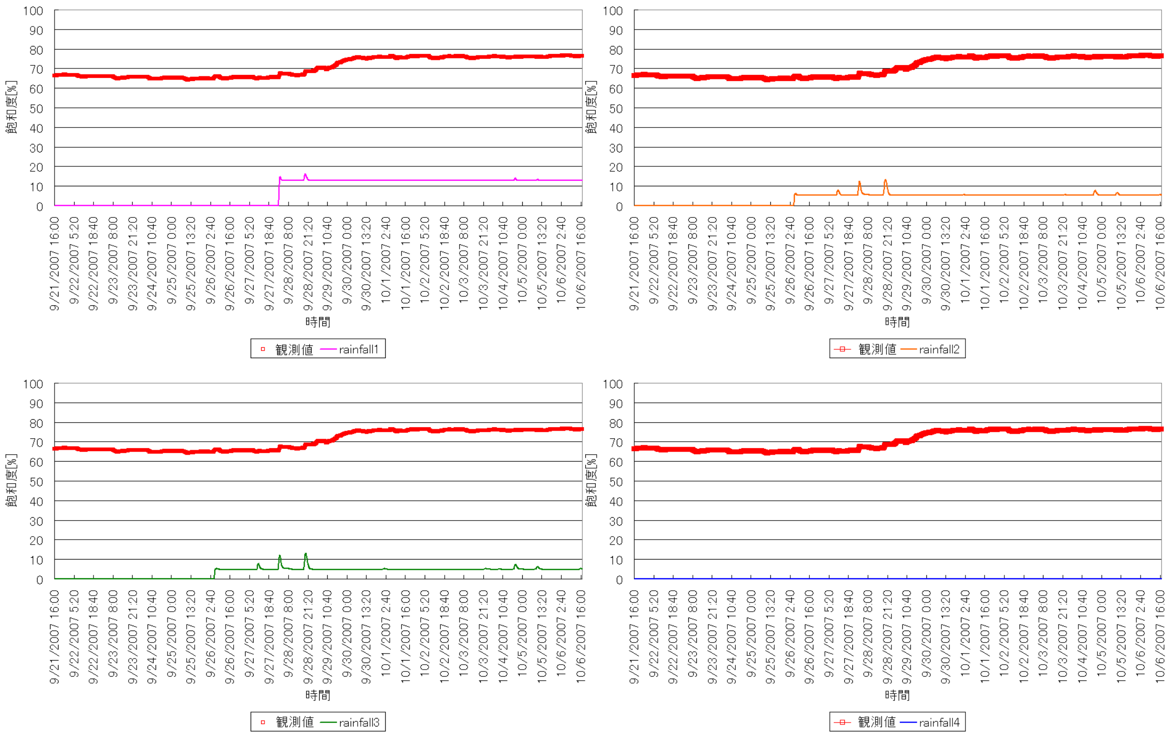


図 5-33　tankmB5 における飽和度による算定値と観測値の比較

5.2.4 本手法の妥当性の検証

上段タンクおよび中段タンクに分けて妥当性の検証を行う．本事例では同一斜面に対して異なる降雨を用いてパラメータ同定を行っており，その結果，表 5-13～5-16 に示すような結果を得た．まず，上段タンクのそれぞれのタンクにおいて同定されたパラメータの傾向について考察する．

tank C においては，表 5-13～表 5-16 から浸透係数及び流出係数はともに約 0.5 という値を取っていることが分かる．rainfall 1 の結果のみ流出係数及び浸透係数がともに約 0.9 という値が得られているが，これに対しては図 5-27 から流出量を大きく見積もりすぎている可能性がある．このように，流出係数及び浸透係数が大きくなった原因はカルマンフィルタに適用した観測値の影響と推察される．実際に，表 5-8 をみれば分かるように rainfall 1 の入力は他の降雨に比べて流出量と浸透量の変化量が共に比較的大きな値であることが確認できる．つまり，タンクモデルにおいてパラメータは入力降雨波形に依存している言える．

次に，tank B について考察する．カルマンフィルタの計算段階において入力として与えた浸透流と同定されたパラメータから算定される浸透流を比較すると，図 5-28 より rainfall 1～rainfall 4 の全ての対象降雨において算定結果の方が大きな値をとっており観測値として用いた浸透量の考え方から妥当な結果が得られている．また，表 5-13～表 5-16 を見ると，tank B における流出係数は 0.7 から 0.9 の間の値をとっており，また浸透係数は約 0.9 の値をとっていることから，斜面の中腹部においては頂上付近や下部に比べて水

の表面流出量及び浸透量が多く,斜面内の水分量は大きく変動すると推察される.一方で，rainfall 4 に基づいて同定された浸透係数が他の値に比べて小さな値をとっているが，これは表 5-10 から浸透係数の変動量の入力値が 0 となっているためである.

最後に tank A の同定結果について考察を加える．表 5-13～表 5-16 から tank A においては流出係数及び浸透係数が共に降雨ごとにばらついた値をとっていることが分かる．これは，カルマンフィルタを用いる際に tank A に関しては実際の観測値を用いていないことが原因である．以上が，上段タンクのパラメータ同定結果に関する考察である．一部，特定の入力値の影響を強く受けている値もあるが，tank C からの流出量及び tank B からの浸透量という 2 つの指標から見れば妥当な結果が得られている.

ここで，tank B 及び tank C で見られる一部のパラメータが特定の入力値の影響を強く受けている理由について考える．特定のしかも計算開始段階の入力値の影響を強く受ける原因は，カルマンフィルタを用いた計算においては，途中で各パラメータの値が発散してしまい繰り返し計算が不可能になる場合が非常に多いためであると推測される．本検討においても，計算回数は最大でも 4 回，大部分は 1 回で計算が発散しているという状況であるために，入力値を継続的に計算過程に反映させパラメータを修正していくということが困難となる場合がある．そのため，本手法の実用段階において斜面固有のパラメータを設定する際には,幾通りかの降雨を用いて同定されたパラメータの傾向の把握が重要である.

次に，中段タンクにおいて得られたパラメータに関して考察する．最初の特徴として，浸透係数が 0.4 から 0.6 の間を取っており地表面は地中に比べて若干浸透率が低い状態になっているという点が挙げられる．この傾向は，tankmB1 から tankmB5 まで同様に言えることで，深部であればあるほど浸透率が上がっていく様子が確認される．また，もう一つ特徴的な点として tankmB2 及び tankmB3 において立ち上がりの値が他の深度に比べて小さくなる場合があることが指摘できる．具体的には，表 5-17 の tankmB2，表 5-18 の tankmB2 及び tankmB3，表 5-19 の tankmB3 及び表 5-20 の tankmB2 において，他の地点で立ち上がりが 20 ㎜程度の値として得られているのに対し，tankmB2 及び tankmB3 における立ち上がりはその半分以下の 6 あるいは 7 といった値を取っている．また,図 5-30 及び図 5-31 からその場合の方が観測値と一致しているということが分かる．これは，実斜面で考えた場合 tankmB2 及び tankmB3 が想定されている深度 0.3m 及び 0.4m の地点では土の保水能力が低く，地表面から浸透してきた水は留まることなくさらに深くへ流れていくことを意味している.

さらに，図 5-29 から図 5-33 を参考にパラメータ同定結果に対して考察を加えていく．まず，図 5-29，図 5-30 及び図 5-31 から深度が浅い tankmB1，tankmB2 及び tankmB3 では算定値と観測値が一致した解が得られていることが確認できる．このことから地表から tankmB3 の区間においては健全なパラメータが得られていると判断できる．一方で，tankmB4 及び tankmB5 の算定値と観測値を比較すると，均衡状態における飽和度の値も

異なり観測値は算定値よりもかなり大きな値をとっていることが確認できる．このことに加えて，降雨に対する挙動もかなり異なっている．具体的には，算定結果では降雨に対して飽和度の上昇が見られるのに対して，観測値では降雨への反応がほぼ見られない．この現象は，図 5-25 に示す斜面の下部である No.2 で測定された飽和度でも同様にみられることから，深度 0.6m 及び 1.0m 地点付近には局所的な難透水層が存在し宙水が存在すると推察される．その場合，不飽和領域とは異なり横方向への流れが卓越するため本研究において適用したマルチタンクモデルでは対応不可能となる．これに対しては，中段に想定するタンクに側孔を設置するなどの対処が必要となる．

以上の上段タンク及び中段タンクに対する検討から，対象とする降雨によって同一斜面であっても得られるパラメータが異なる事を確認したと同時に，同定されたパラメータが示す意味について考察した．また，今回の検討において得られた Nakhon Nayok の最適パラメータは，4 つの対象降雨のうち rainfall2 で得られた値が最も精度が高いと判断できる．

5.2.5　降雨時の斜面全体における水の挙動に関する考察

前節の考察によって得られた Nakhon Nayok における最適パラメータを用いて，図 5-34，図 5-35，図 5-36 及び図 5-37 のように降雨ごとの斜面全体における降雨時の地中へ浸透量及び表面流出について考える．最適パラメータとして用いた rainfall2 の同定結果を表 5-21 にまとめて示す

表 5-21　最適パラメータ

tank C		tank B		tank A	
流出係数 α_{31}	浸透係数 β_{31}	流出係数 α_{21}	浸透係数 β_{21}	流出係数 α_{11}	浸透係数 β_{11}
0.50169	0.495577	0.583016438	0.938639044	0.350766	0.11365

tankmB1	浸透係数 β_{m21}	0.464069
	立ち上がり H_{mB1}	22.63231
tankmB2	浸透係数 β_{m22}	0.408058
	立ち上がり H_{mB2}	7.984666
tankmB3	浸透係数 β_{m23}	0.382625
	立ち上がり H_{mB3}	9.36971
tankmB4	浸透係数 β_{m24}	0.456396
	立ち上がり H_{mB4}	46.89104
tankmB5	浸透係数 β_{m25}	0.659553
	立ち上がり H_{mB5}	42.396

≪ rainfall 1 ≫

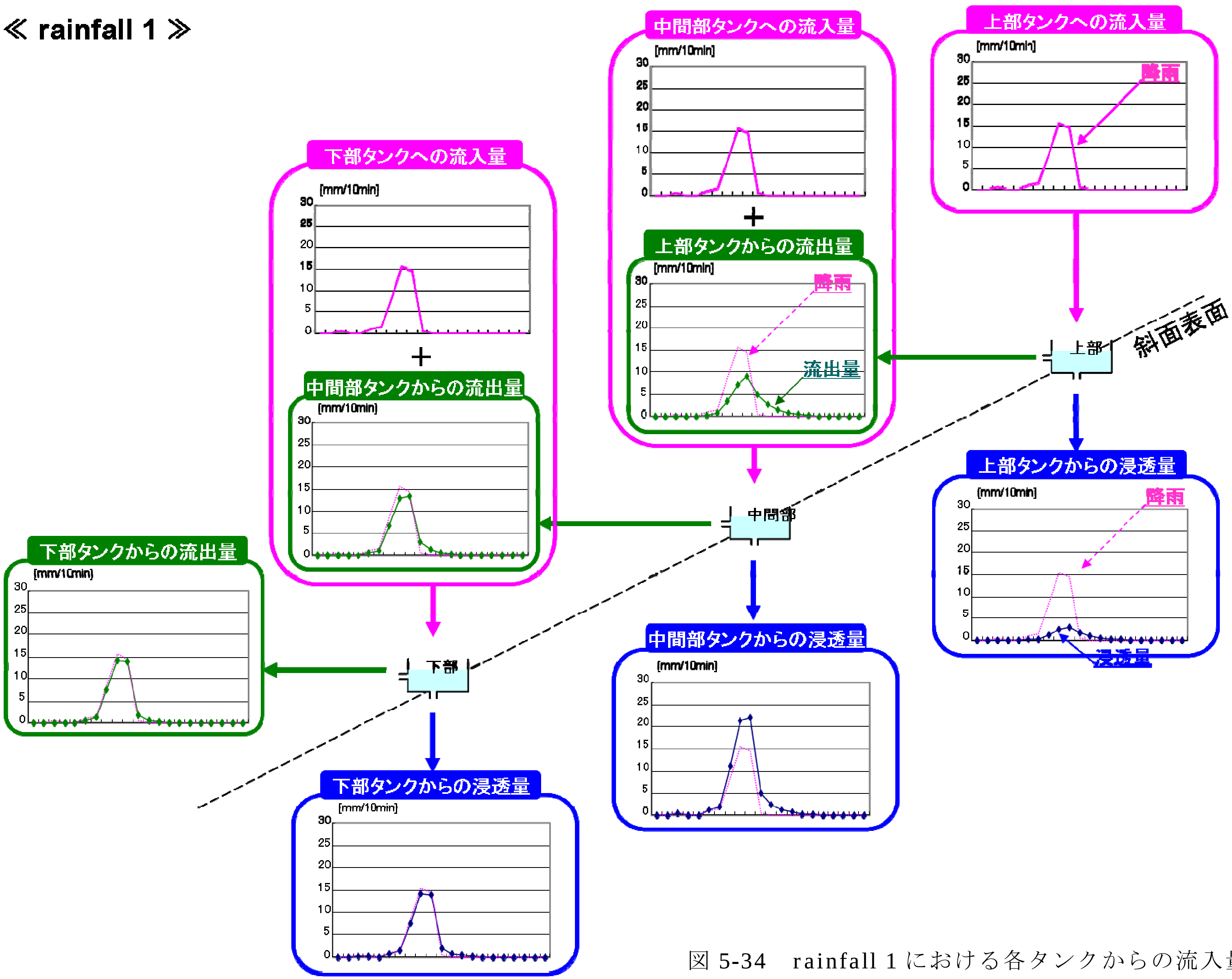


図 5-34　rainfall 1 における各タンクからの流入量および流出量

≪ rainfall 2 ≫

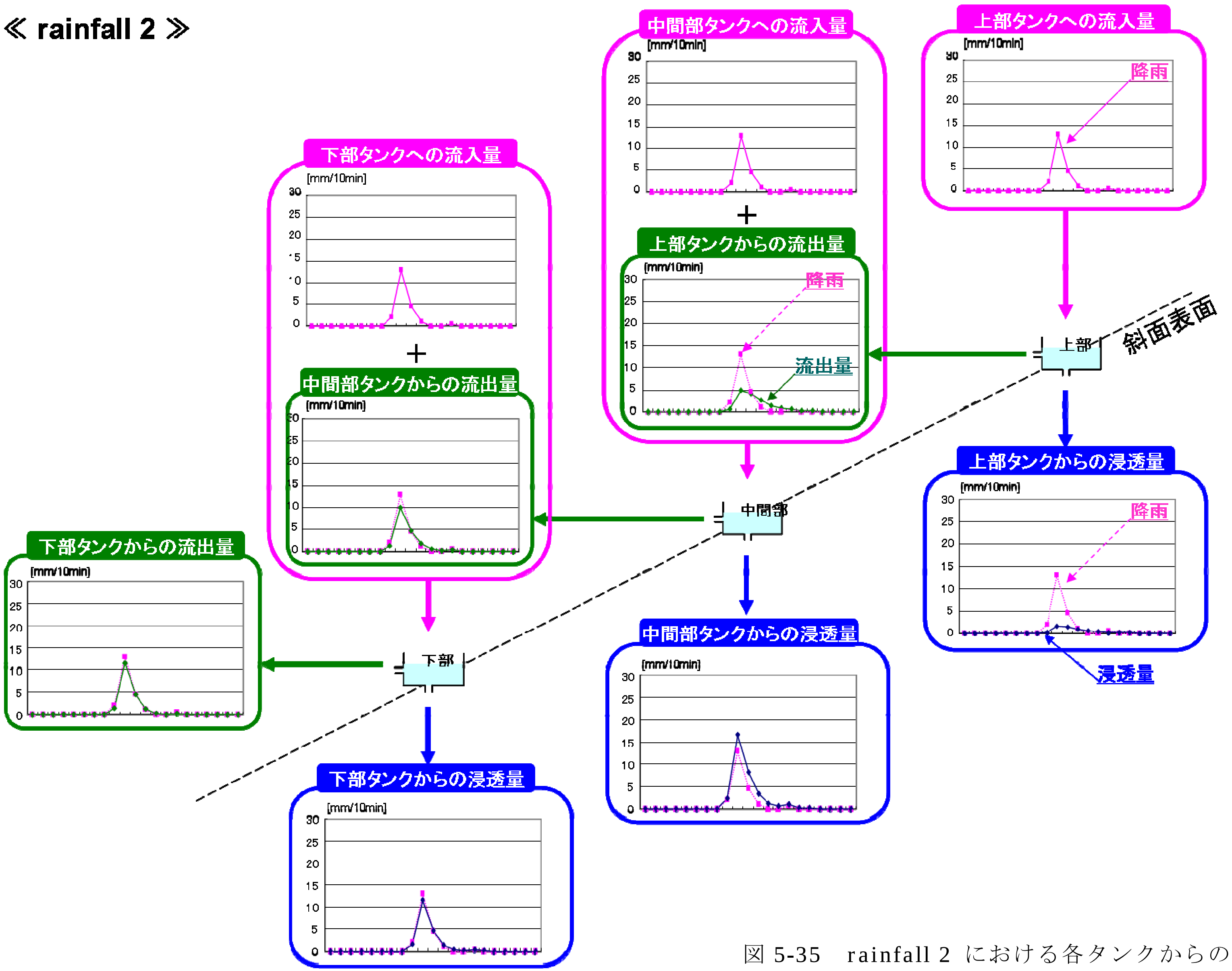


図 5-35 rainfall 2 における各タンクからの流入量および流出量

≪ rainfall 3 ≫

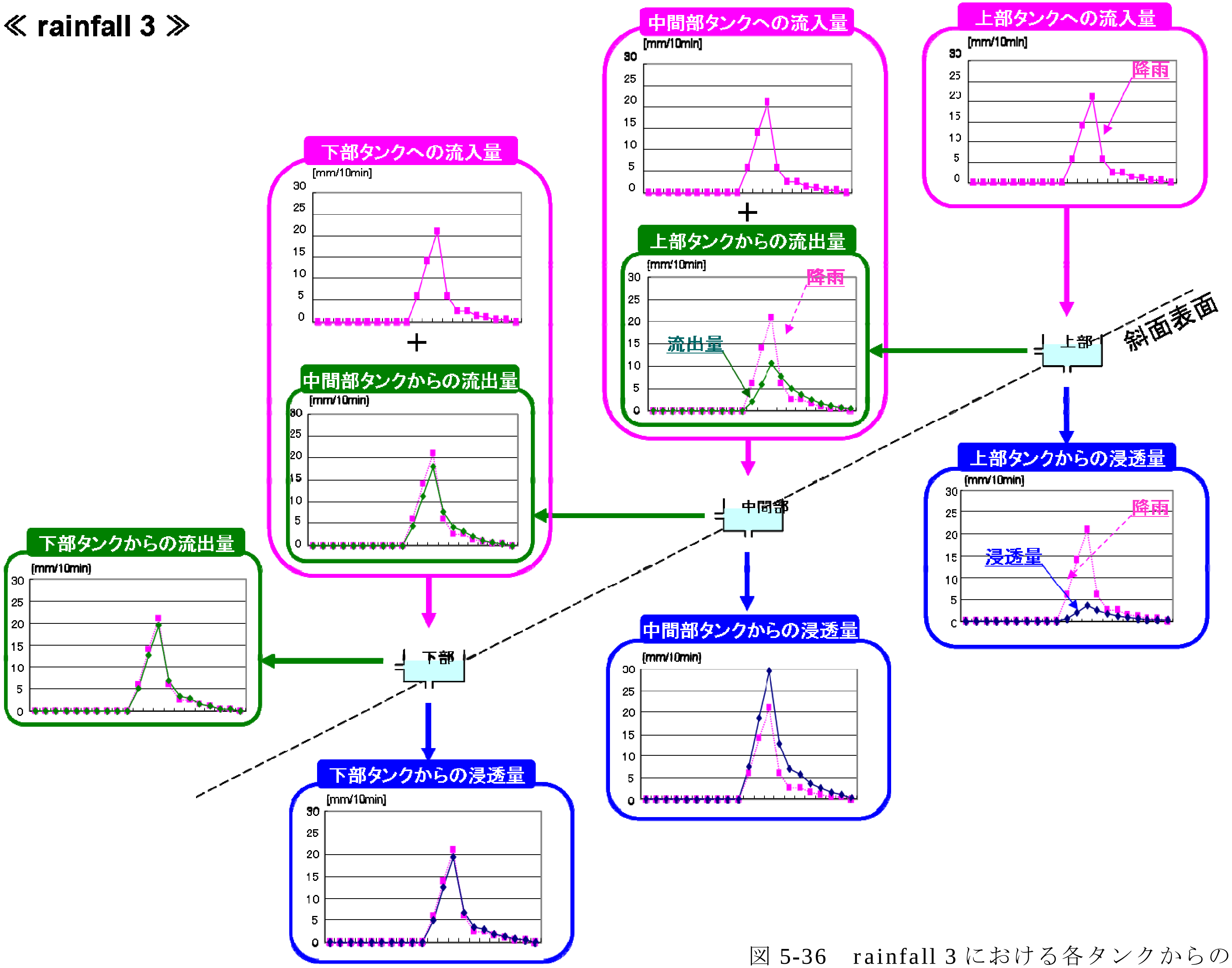


図 5-36　rainfall 3 における各タンクからの流入量および流出量

≪ rainfall 4 ≫

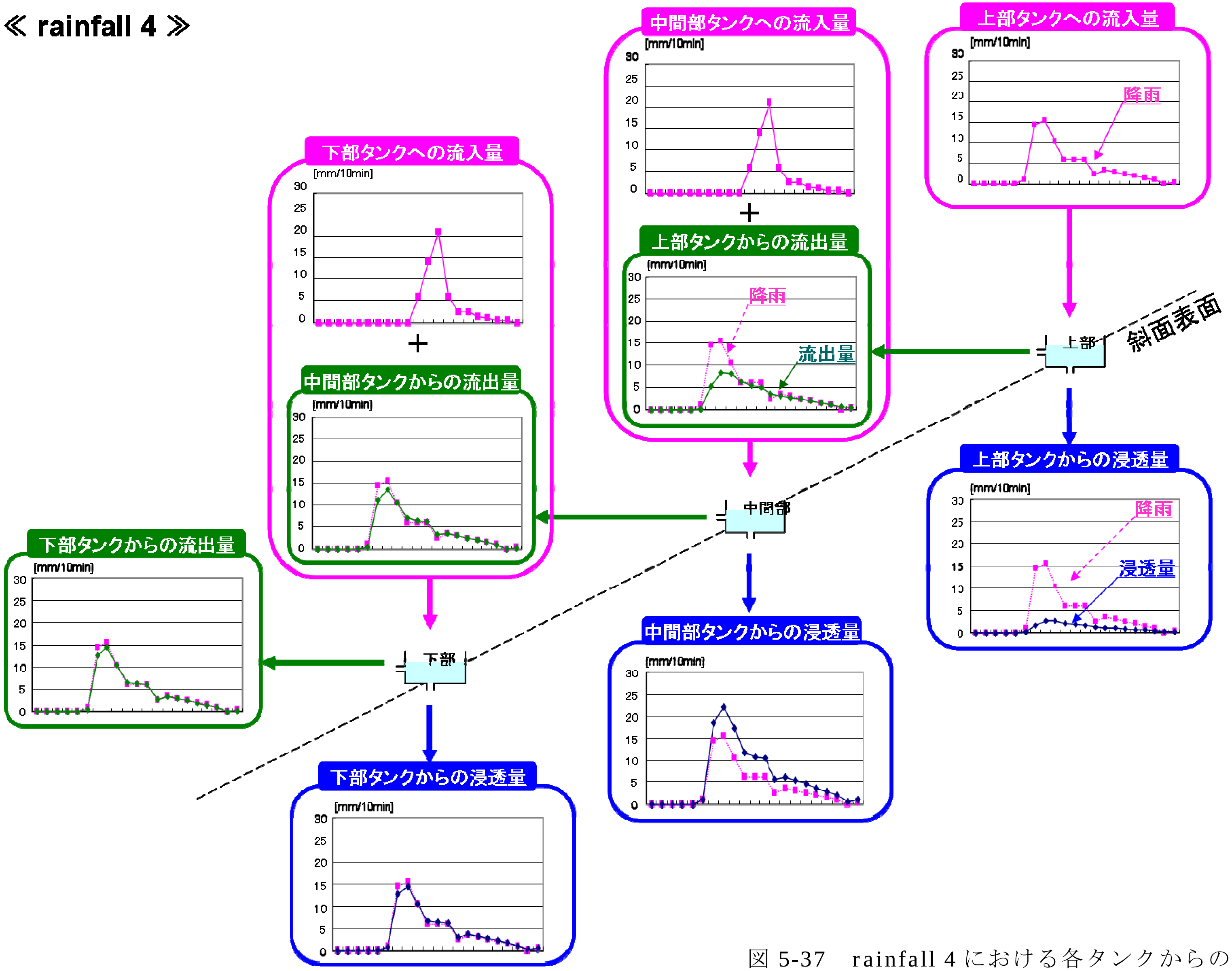


図 5-37　rainfall 4 における各タンクからの流入量および流出量

表 5-21 の赤字に注目しながら考察を進めたい．まず最適パラメータをマルチタンクモデルに適用することにより得られる各タンクの側孔及び浸透孔からの流出量は以下のような特徴を有する．

1. tank A では，降雨波形に関係なく流出量及び浸透量はともに降雨強度の半分以下となる
2. 10 分単位の計測においては，tank A，tank B 及び tank C の側孔からの流出量のピーク時点と実際の降雨のピーク時点は一致している．
3. tank B からの浸透孔からの流出量は，実際の降雨強度の 1.1～1.3 倍程度となる．これは，表 5-21 の赤字に示すように浸透係数が非常に大きい値をとることに加えて，tank A からの流入量が加わることで一時的に tank B 内の貯留高が増加するためであると推察される．
4. tank B の側孔からの流出量はほぼ雨と 1 対 1 で対応している．
5. tank C の側孔からの流出量と浸透孔からの流出量はほぼ一致しており雨と 1 対 1 で対応している．

これらのことはそれぞれ以下のことを示唆している．

1. 降雨時の斜面の地表部分において発生する水の動きは，地表部分へ滞留，地中への浸透及び表面流出の 3 つに大別される．本サイトの斜面の頂上付近においてはこれらのうち地表部分への滞留及び表面流出が卓越している．
2. 10 分計測の場合,本サイトにおける降雨と表面流出との時間差は 0 として問題はない．
3. 本サイトの斜面中腹部においては，浸透流が卓越しており，強い雨が降った場合土中内の水分量が増加し斜面崩壊を引き起こす可能性があると考えられる．その際,表 5-21 より地表から 0.4m から 0.6m の間に水が溜まりやすくなり,この深度が崩壊面となる．
4. 斜面の山頂付近から斜面の中腹部にかけての表面流出と中腹部から下部にかけての表面流出を比較すると，中腹部において表面流出量が急増していることがわかる．このことから,ガリ等の発生による侵食などで斜面中腹部から下部にかけては土砂災害の発生率が高くなる．
5. 斜面下部における表面流出量は,中腹部からの流入量とほぼ変わらないため本サイトでは下部においては地中への浸透量が卓越していると考えられる．そのため降雨時には土壌内の水分量が急増し土壌の強度が弱くなる可能性がある．

第6章　結論及び今後の展望

本研究において，拡張型マルチタンクモデルに対する体系的なパラメータ同定手法を提案した．手法の開発に際して，拡張型マルチタンクモデルシステムの特徴に対処するためにカルマンフィルタとニューラルネットワークの 2 つの解析手法を用いた．その結果，第 4 章，第 5 章に示したように，不飽和領域における土壌水分量および斜面下部での表面流出量の観測を行う事でタンクモデルのパラメータ同定を行う事が可能である事を示した．さらに，事例検証を通して，本手法の特徴に加えマルチタンクモデルの特徴及びパラメータがマルチタンクモデルから得られる各出力値に与える影響について考察した．本研究によって得られた結果及び知見は以下の通りである．

1) 本手法によって求められたパラメータの妥当性について考える際は，それらのパラメータをタンクモデルに適用することで得られる表面流出及び斜面内の各深度による飽和度という指標を用いて判断することができる．主に一次元カラム実験及び NakhonNayok での観測事例による事例検証の結果，本手法は斜面表面および地表付近のタンクに関しては十分な精度を持ったパラメータを同定することが可能であるが，深度が深くになる場合にはニューラルネットワークの学習精度が低くなる，また側方流の存在などにより妥当なパラメータを得られない場合があることがわかった．

2)から 4)には斜面の地表部分に関して得られた知見をまとめる．

2) カルマンフィルタを用いたパラメータ同定結果から，斜面表面に配置されたタンクの各パラメータは斜面の山頂，中腹及び下部のそれぞれが有する特徴を的確に表現している．例えば，山頂付近では浸透係数及び流出係数は共に中腹部や下部のタンクのパラメータよりも小さな値として同定される．これは，頂上付近においては降雨の地中への浸透量が少なく表面流として流れ出る量が多いことを示しており実際の物理現象と一致したものである．
3) カルマンフィルタを用いた同定計算は，観測値の種類が少ないため推定値を観測値として用いるなどの処理をしているにもかかわらず同定されたパラメータを用いた算定結果と観測値はかなり一致した結果が得られた．
4) カルマンフィルタを用いた計算の問題点としては，計算の途中でパラメータの値が発散してしまい繰り返し計算が行えない場合が多い点が挙げられる．今回の検討事例においても，多くて繰り返し回数は 4 回，少なければ 1 回で計算が発散してしまう場合が見受けられた．計算の発散は入力値の絶対値が大きい場合に発生することが多く，実際の斜面に本手法を適用する場合には入力値を数セット用意し比較検討をすることが必要となる．

5)から 7)には，不飽和領域において得られた知見をまとめる．

5) 不飽和領域における，浸透孔の立ち上がりは，流入量と流出量が等しくなる均衡状態における土壌内の水分量に強く影響を与える．そのため，均衡状態での土壌水分量の多い地点においては立ち上がりの値は大きく，土壌水分量の少ない地点においての立ち上がりの値は小さく同定される．

6) 不飽和領域においてタンク数はパラメータではないが，斜面内の水の挙動を正確に知るためには非常に重要な要素であることが確認された．具体的には，古座の事例のように不飽和領域における観測点の距離が開いているような場合は，非線形領域に対して区分線形化を無理矢理行うために，土中水分量を実際よりも多く見積もる結果となり，パラメータ同定の精度に影響を与える．

7) 不飽和領域のパラメータ同定に用いたニューラルネットワークを用いたパラメータ同定手法には,計算段階において次の 3 つの特徴があると考えられる.一点目は，計算時間が比較的短くて済み，特定の斜面に対応させるための複雑な計算を必要としないため誰にでも利用できるパラメータ同定手法として実用的である点である．また，二点目として入力値及び出力値はその種類や数が制限されていないため，観測値の項目の変更やマルチタンクモデルのタンク数などのモデルのシステム自体の変更への対応能力が高く，マルチタンクモデルの広い適用性を制限することがない解析手法であると言える．三点目としては，ニューラルネットワークを利用する際は，教師データの作成が最も大きな課題であるという点である．実状を反映し，かつ幅広く様々な現象の可能性を含んだ教師データを作成する必要性がある．

これらの知見を受けて，本研究の提案したパラメータ同定手法の今後改善すべき課題については以下のように整理できる．

a) 斜面の地表部分に適用したカルマンフィルタを用いたパラメータ同定に関して，中部タンク及び上部タンクの観測値を下流の同定結果からの推定値としている点について今後改善すべきである．具体的には，現在のように下部タンクから 1 つずつ同定を進めるのではなく，上段の全タンクのパラメータ 9 つを状態変数として 1 度に計算できるようカルマンフィルタの定式化を行う必要がある．これにより，カルマンフィルタの算定式の簡潔化及び各タンクのパラメータの相互関係の表現が可能となる．

b) 不飽和領域のニューラルネットワークを用いたパラメータ同定に関して，教師データの精度が非常に重要な役割を担うことは先述した．事例検証の結果から，深度の深い位置に想定されたタンクにおいては，現段階では十分な同定結果が得られておらず，今後パラメータ同定精度向上のために新たな工夫が必要であると考える．例えば, 単純に入力値の種類を増やすことが考えられる. つまり, 地表からの浸透量, タンク内お貯留高及び貯留高変化量という現在の入力を基本として，対象タンクの

上段のタンクからの直接的な浸透量やそのタンクの均衡状態からの変化量などの情報を近似値としてでも入力することでパラメータ同定の精度は向上すると期待できる．

c) 不飽和領域のパラメータ同定に関して，教師データの作成時に，幅広い状況を対象にして教師データを作成することによりニューラルネットワークにより精度の高いネットワークを作成させせることが可能となる．具体的には，パラメータ同定の際に様々な降雨波形に対する教師データの作成並びに雨水の供給のない定常状態における教師データの作成を実施しこれらをストックすることで，降雨波形によるパラメータの傾向及び特定斜面の季節ごとの土壌水分量に対応したパラメータなどを知ることが可能となる．

d) 斜面の地表部及び不飽和領域に関する共通の改善点として，最適パラメータの選定方法を発展させ，何を重要視するかなどの項目を明確にする必要性がある．本研究では，単純に観測値との誤差の絶対値の和が最小値となるパラメータを最適パラメータとして選定してきた．しかし，例えば，Nakhon Nayok のように観測値が流出量と浸透量の 2 種類が得られている場合には，それぞれに対して誤差計算を行い項目ごとの重要度を考慮して誤差最小パラメータを選択するべきである．どちらの項目を優先するかを決定する際には，対象地域の情報が重要となる．また，物理現象から見て適正な値であるかどうか等いくつかの評価項目をあらかじめ組み込み設定しておくことも必要である．

上述の改善により本手法の利便性の向上及びパラメータ同定結果の精度向上が望める．また，Nakhon Nayok で実施したようなマルチタンクモデルに適応した測定システムの構築及び機能向上の推進も重要である．本研究で提案したパラメータ同定手法及び本手法を実用可能とするための測定システムの構築により，斜面へのタンクモデルの適用がより一般的となり,斜面安定性評価に関して優れた評価基準の提供が可能となることを期待する．

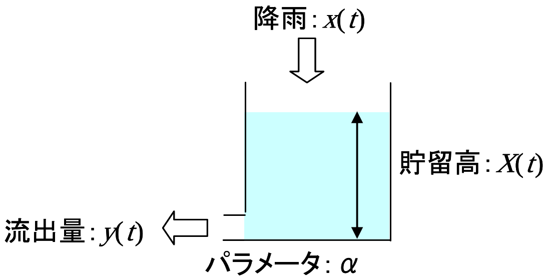
付録

１．タンクモデルの理論方程式の導出

本研究で用いたタンクモデルの流出計算との比較として，タンクモデルの理論方程式の導出を行う．ここでは，指数関数型の流出機構とし，特解を求める手法[4)]を用いる．

1.1　1 段タンクモデルの理論方程式

降雨を $x(t)$，流出量を $y(t)$，貯留高を $X(t)$とし，流出量と貯留高の間にパラメータ α を設定した図付-1 のモデルを用いタンクモデル法の理論方程式の導出を行う．



図付-1　1 段タンクモデル

貯留高 $X(t)$の変化及び流出量 $y(t)$は以下のように表現できる．

$$\frac{d}{dt}X(t) = x(t) - y(t) \tag{付.1}$$

$$y(t) = \alpha X(t) \tag{付.2}$$

式(付.1)と式(付.2)より $y(t)$を消去すると式(付.3)が得られる．

$$\frac{d}{dt}X(t) + \alpha X(t) = x(t) \tag{付.3}$$

次に，式(付.3)の一般解を求めるために，まず特解を求める．式(付.3)の両辺に α を乗じ，式(付.2)を代入すると式(付.4)が得られる．

$$\frac{d}{dt}y(t) + \alpha y(t) = \alpha x(t)t \tag{付.4}$$

右辺を 0 として式(付.5)の手順を踏みながらこれを解けば，式(付.6)が得られる.

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}y(t) = -\alpha y(t) \\ &\leftrightarrow \frac{1}{y(t)}dy(t) = -\alpha dt \\ &\leftrightarrow \int \frac{1}{y(t)}dy(t) = -\int \alpha dt \\ &\leftrightarrow \ln y(t) = -\alpha t + c' \end{aligned} \tag{付.5}$$

$$y(t) = ce^{-\alpha t} \tag{付.6}$$

ここに，c' 及び c は積分定数である．この c を式(付.7)に示すように $z(t)$と置き，式(付.4)に代入すると式(付.8)のように計算を進めることができ最終的に式(付.9)を得る．これを積分すると式(付.10)となる.

$$y(t) = e^{-\alpha t}z(t) \tag{付.7}$$

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}e^{-\alpha t}z(t) + \alpha e^{-\alpha t}z(t) = \alpha x(t) \\ &\leftrightarrow e^{-\alpha t}\frac{d}{dt}z(t) - \alpha e^{-\alpha t}z(t) + \alpha e^{-\alpha t}z(t) = \alpha x(t) \end{aligned} \tag{付.8}$$

$$\frac{d}{dt}z(t) = \alpha x(t)e^{\alpha tt} \tag{付.9}$$

$$z(t) = \int \alpha x(t)e^{\alpha t}dt + c'' \tag{付.10}$$

式(付.10)の右辺第一項の不定積分は，ある時点 t_0(定数)から t(変数)までの積分で表現することができるため，式(付.10)は式(付.11)のように書ける.

$$z(t) = \int_{t_0}^{t} \alpha x(\tau)e^{\alpha\tau}d\tau + c''' \tag{付.11}$$

式(付.11)を式(付.7)に代入すれば，式(付.12)を得る.

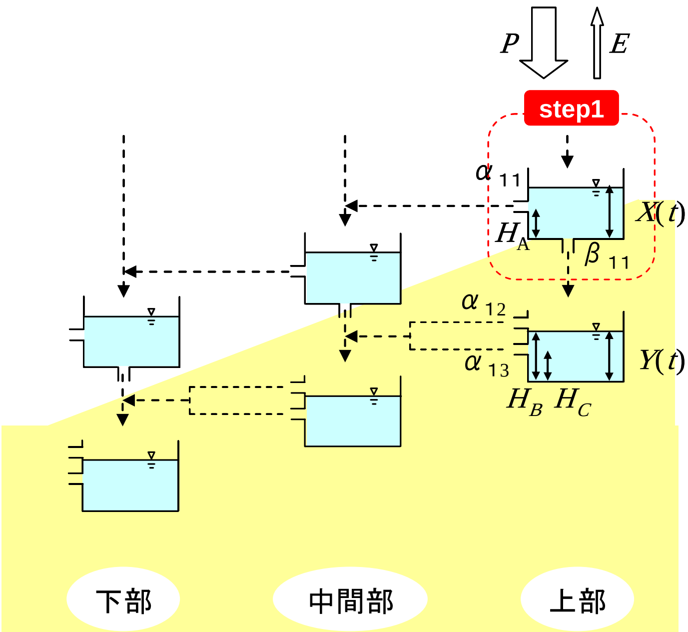
$$y(t) = e^{-\alpha t}\int_{t_0}^{t} \alpha x(\tau)e^{\alpha\tau}d\tau + c'''e^{-\alpha t} \tag{付.12}$$

ここで，$t = t_0$において $y = y_0$とすれば，積分定数である c''' は $y_0 e^{\alpha t_0}$ となるため，式(付.13)のように表すことができる．

$$y(t) = e^{-\alpha t} \int_{t_0}^{t} \alpha x(\tau) e^{\alpha \tau} d\tau + y_0 e^{-\alpha(t - t_0)} \quad (付.13)$$

1.2　3 連 1 次元タンクモデルの理論方程式

1 段タンクモデルで用いた考え方と同様にして，図付-2 に示す 3 連 1 次元タンクモデルにおいて理論方程式の導出を行う．3 連 1 次元タンクモデルにおいては，上部タンクが中間部タンクへ，中間部タンクが下部タンクへ影響を与えるため，理論式の導出は上部タンクから開始される．



図付-2　3 連 1 次元タンクモデル

まず，図付-2 の step1 に示す上部タンクの上段タンクについて考える．貯留高 $X(t)$の変化量は，式(付.14)のように表現できる．

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt} X(t) = P - E - X(t)\beta_{11} - (X(t) - H_A)\alpha_{11} \\ &\leftrightarrow \frac{d}{dt} X(t) = P - E - X(t)(\alpha_{11} + \beta_{11}) + H_A \alpha_{11} \end{aligned} \quad (付.14)$$

ここで，貯留高 $X(t)$，降雨 P，蒸発散量 E，パラメータ α_{11}・β_{11}・H_A とする．

式(付.14)から式(付.15)が得られる．

$$\frac{d}{dt}X(t)+X(t)(\alpha_{11}+\beta_{11})=P-E+H_A\alpha_{11} \tag{付.15}$$

式(付.15)に対し，右辺を 0 として式(付.16)として計算を進め，特解を求めることにより一般解を求める．

$$\begin{aligned}&\frac{d}{dt}X(t)=-X(t)(\alpha_{11}+\beta_{11})\\&\leftrightarrow \frac{1}{X(t)}dX(t)=-(\alpha_{11}+\beta_{11})dt\\&\leftrightarrow \ln X(t)=-(\alpha_{11}+\beta_{11})t+c\end{aligned} \tag{付.16}$$

$$X(t)=c'e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t} \tag{付.17}$$

式(付.17)において積分定数 c' の変わりに $z(t)$とし，式(付.15)に代入する．式(付.18)のように計算を進めると，結果的に式(付.19)が得られる．

$$\begin{aligned}&\frac{d}{dt}z(t)e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}+z(t)e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}(\alpha_{11}+\beta_{11})=P-E+H_A\alpha_{11}\\&\leftrightarrow e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\frac{d}{dt}z(t)-z(t)(\alpha_{11}+\beta_{11})e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}+z(t)(\alpha_{11}+\beta_{11})e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\\&=P-E+H_A\alpha_{11}\\&\leftrightarrow e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\frac{d}{dt}z(t)=P-E+H_A\alpha_{11}\\&\leftrightarrow \frac{d}{dt}z(t)=(P-E+H_A\alpha_{11})e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\end{aligned} \tag{付.18}$$

$$z(t)=\int(P-E+H_A\alpha_{11})e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})t}dt+c'' \tag{付.19}$$

ここで，c'' は積分定数である．

式(付.19)を式(付.17)に代入すると式(付.20)を得る．

$$X(t)=e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\left[\int(P-E+H_A\alpha_{11})e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})t}dt+c''\right] \tag{付.20}$$

式(付.20)の括弧内は，ある時点 t_0(定数)から t(変数)までの積分で表現することができるため，式(付.20)は式(付.21)のように書き直すことができる．

$$X(t)=e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\left[\int_{t_0}^{t}(P-E+H_A\alpha_{11})e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})\tau}d\tau+c'''\right] \quad (付.21)$$

ここで，$t=t_0$において $X(t)=h_{10}$とすれば，積分定数であるc'''は$h_0e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})t_0}$となるため，式(付.22)のように表すことができる．

$$\begin{aligned}&X(t)=e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\left[\int_{t_0}^{t}(P-E+H_A\alpha_{11})e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})\tau}d\tau+h_{10}e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\right]\\ &\leftrightarrow X(t)=e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})t}\int_{t_0}^{t}(P-E+H_A\alpha_{11})e^{(\alpha_{11}+\beta_{11})\tau}d\tau+h_{10}\end{aligned} \quad (付.22)$$

さらに式(付.22)を解いて式(付.23)が得られる．

$$X(t)=\frac{P-E+H_A\alpha_{11}}{\alpha_{11}+\beta_{11}}\left(1-e^{-(\alpha_{11}+\beta_{11})(t-t_0)}\right)+h_{10} \quad (付.23)$$

これによって上部上段タンクの貯留高が算定された．この値を用いることによって，タンクの側孔からの流出量及び底孔からの流出量を算定することができる．

式(付.23)から下段タンクへの浸透量を算定し，その値を用いて上部下段タンクの貯留高を算定すると式(付.24)が得られる．

$$Y(t)=\frac{(R_{11}+h_{10})\beta_{11}}{\theta_{12}}+R_{12}+\left(\frac{R_{11}\beta_{11}}{\theta_{12}-\theta_{11}}+h_{20}-\left(\frac{(R_{11}+h_{10})\beta_{11}}{\theta_{12}}+R_{12}\right)\right)e^{-\theta_{12}t}-\frac{R_{11}\beta_{11}}{\theta_{12}-\theta_{11}}e^{-\theta_{11}t} \quad (付.24)$$

ただし，$Y(t)$は各タンクの貯留高，θ_{11}及びθ_{12}は式(付.25)及び式(付.26)，R_1及び R_2は式(付.27)及び式(付.28)で表される．

$$\theta_{11}=q_{\alpha_{11}}+q_{\beta_{11}} \quad (付.25)$$

$$\theta_{12}=q_{\alpha_{12}}+q_{\alpha_{13}} \quad (付.26)$$

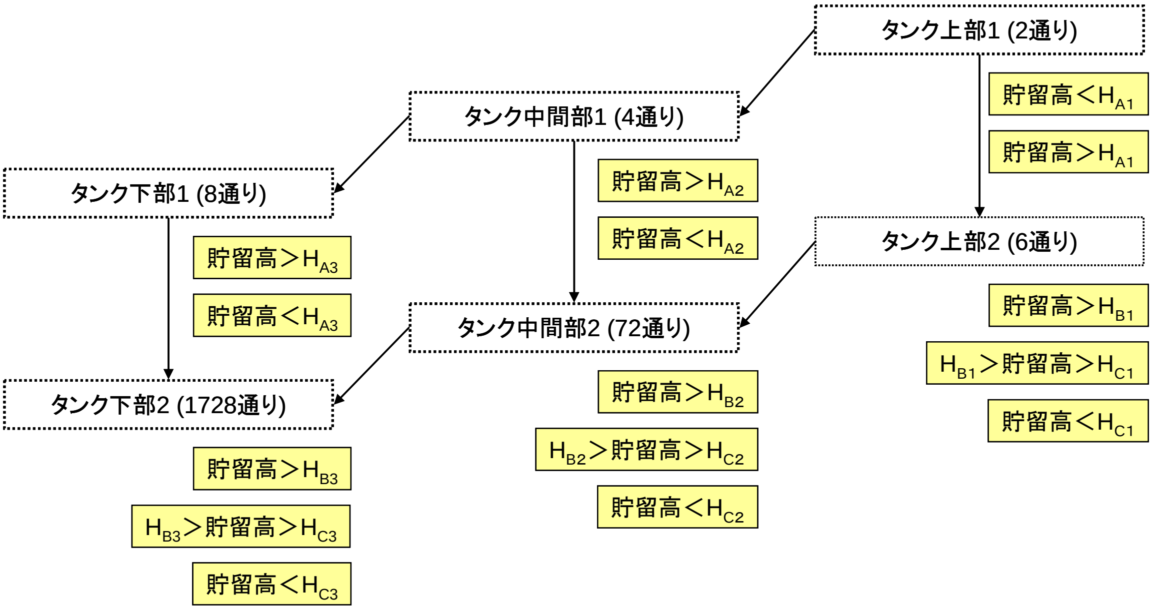
$$R_1=\frac{q_{\alpha_{11}}\times H_A}{\theta_{11}} \quad (付.27)$$

$$R_2=\frac{q_{\alpha_{12}}\times H_B+q_{\alpha_{13}}\times H_C}{\theta_{12}} \quad (付.28)$$

ここで，q_x(x は各孔のパラメータ)は各孔からの流出量である．

1.3　理論式を用いる際の問題点

式(付.22)を用いて，上部上段タンクの側孔からの流出量を算定し，中間部タンクの計算を行うことはできるが，計算を進める場合，側孔までの高さと貯留高の大小関係による側孔からの流出がある場合とない場合がある．具体的には，$H_A > X(t)$，$H_A < X(t)$で場合分けする必要があり，これと同様のことが全てのタンクのパラメータで必要となってくる．そのため，図付-3 に示すように下部タンクの下段においては 1728 通りの式が存在するようになり，非常に煩雑であるという問題点がある．



図付-3　場合分けによる各タンクでの理論式の数

参考文献

1) Y. Ohnishi, H. Shibata and M. Nishigaki : 5th Int. Conf. on Numerical methods in Geomechanics, Nagoya, 275, 1985
2) 榎　明潔：降雨時の斜面表層崩壊，土と基礎，Vol. 47，No. 5，pp. 17-20，2002
3) 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. 51，No. 10，pp. 15-17，2003
4) 菅原正巳；水文学講座流出解析法，共立出版社，1972
5) H. Ohtsu, K. Takahashi, S. Kamide : Development of methodology to Simulate Variation of Moisture Content Caused by Rainfall in Slopes, Proc of Geo-Risk Engineering-Monitoring and Geo-Exploration, pp. 54-59, 2006
6) 市原恒一，豊川勝生，澤口勇雄，川島秀樹：カルマンフィルタにより同定されるタンクモデルによる流出量の予測，日本林学会誌，Vol. 82，No. 2，pp. 125-131，2005
7) 佐藤忠信：地盤工学における逆解析，土と基礎，Vol. 43，No. 5，pp. 67-72，1995
8) 美多　勉：ディジタル制御理論，昭晃堂，pp. 19-21，1984
9) 斉藤和春，渡辺邦夫，M. R. MaheshRajGAUTAM：数量化理論およびニューラルネットワーク(ANN)によるトンネル湧水量予測に関する考察，応用地質，Vol. 42，No. 3，pp. 170-180，2001
10) 富士通株式会社：NEUROSIM(R)/L V4
11) Deita-T Devices：RP2 プロファイルプローブ
12) 西垣　誠：土中水の挙動とその土質基礎工学への応用に関する研究，京都大学学位論文，1980

謝辞

本研究を実施するに当たって，本当に多くの方々に支えていただきました．心から感謝の意を表したいと思います．

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻　大津宏康教授には指導教官として 3 年間御指導いただきました．素晴らしい研究環境を惜しみなく提供していただき，また海外での研究発表等の貴重な機会を与えてくださいました．心より感謝致します．学生との話し合いの場を積極的に持ち，研究を楽しむことを常に忘れない先生の姿勢からは様々なことを教えていただきました．手のかかる学生でご迷惑ばかりおかけしていましたが，先生のようにバイタリティ溢れる社会人になるために今後精進したいと思います．

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻　塩谷智基准教授には，半年間という短い期間でしたが，研究をはじめ様々なアドバイスを頂きました．学生との交流も積極的に図っていただき，新鮮な知識を与えてくださったことに感謝致します．

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻　大西有三教授には，四回生の一年間，大西研究室に席をおかせていただきご指導いただきました．大勢の同期との研究生活を始め，様々な経験の機会を与えてくださったことに感謝致します．

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻　稲積真哉助教には，研究生活の様々な場面でサポートしていただきました．心より感謝致します．

水文技術コンサルタント株式会社　高橋健二氏には，本研究を進めるなかで多大なるご支援を頂きました．本研究は高橋氏の協力なしでは完遂できないものでした．ご多忙の中，私の相談に快く乗っていただき的確な御助言を与えてくださいましたことを感謝致します．

京都大学大学院工学研究科土木施工システム研究室の学生・院生・留学生諸氏とは，研究生活を共に過ごす仲間として非常に有意義な時間を過ごすことができました．

特に，修士二回生の酒井悠君にはこの三年間，幾度となく助けていただきました．常に他者のことにも気遣う姿勢に救われることが多々ありました．心より感謝致します．

経営管理大学院修士二回生の梅川祐一郎君には，Nakhon Nayok の実験サイトにおいて一ヶ月間の観測に御助力頂きましたことを感謝致します．

また，修士一回生の堀田洋平君には Nakhon Nayok の実験サイトでの観測をはじめ，本研究を進める中で，いつも鋭い視点から御助言頂きました．また，学生生活においても共に楽しい時間を過ごすことができました．深く感謝致します．

最後に，私のことを理解し暖かく支えてくれた家族に感謝致します．

ありがとうございました．