不飽和領域における拡張型マルチタンクモデルの

パラメータ同定手法に関する研究

平成 22 年 2 月 23 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

川合 良治

要旨

日本は国土の大部分が急峻な地形からなり、斜面に近接して住宅地、および道路・線路が形成されている場合が多く、斜面災害発生時の被害が大きくなりやすい傾向にある. また、急激な地球の気候変動に伴い、近年日本において局所的な短時間集中豪雨、いわゆるゲリラ豪雨の発生件数が増加し、それに起因する斜面崩壊などの災害が増加することが懸念されている.

これらの影響から、ゲリラ豪雨を起因とした斜面崩壊発生のメカニズムを解明 することがますます重要となっている.斜面崩壊の中でも特に浅層崩壊は土壌中 の飽和度の上昇に伴う正の間隙水圧の発生が原因となることが多いことから、ゲ リラ豪雨時における雨水の斜面内部への浸透挙動を把握することは非常に重要で あると考えられる.そこで、降雨によって発生する斜面における表面流と不飽和 領域における雨水浸透挙動を評価する手法として提案される拡張型マルチタンク モデルを用いて、降雨時の水の挙動がモデル化されてきた.

ゲリラ豪雨時の斜面内部への雨水浸透のメカニズムの解明を目的とし、カセサート大学(タイ)との共同プロジェクトとしてタイ・ナコンナヨックにおいて、 その降雨特性がゲリラ豪雨と等価であると推定されるスコール時の斜面における 表面流量と斜面内部の体積含水率の変化についての現地計測が平成 19年9月より 実施されている.

本研究ではこの実斜面における計測データに基づいて、実測値と解析値を比較 することにより、斜面内部の不飽和領域における拡張型マルチタンクモデルの適 用範囲について考察するとともに、拡張型マルチタンクモデルのパラメータ同定 手法について改良を加える. さらに、降雨開始時からの土壌中の水の挙動につい て詳細な分析を加えることとする.

i

目 次

第	1章	序	論…	••••	••••	•••••	••••	••••	• • • •	• • • • •	••••	••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••	••••	• • • • •	••••	•••••		•••••	1
	1.1	研究	、の 律	旨景	••••	••••	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	••••	••••		•••••		1
	1.2	研究	。 の E	目的	••••	••••	•••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••				2
	1.3	既往	の積	开 究	と 0	り関	連…	••••	• • • • •	••••		••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••			•••••	2
	1.4	本 論	i文の	り構	成.	• • • • • •	••••	••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••	••••		••••	••••	• • • • • •	••••	••••	• • • • • •		•••••	3
第	2章	拡	張 型	! マ.	ルチ	タン	ンク	ŧ	デュ	レ	• • • • •	••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••	••••	•••••	••••	•••••		•••••	5
	2.1	拡張	型、	マル	チタ	マメ	クモ	デ	ル.		••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••			•••••	5
	2.1	l .1	拡張	L型	マル	ノ チ	タン	ク	τ÷	デル	ィの	概	要.	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••		•••••		5
	2.1	1.2	表 層	の	タン	ク	モデ	ル.		••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••	• • • • • •		•••••	5
	2.1	1.3	不 飽	和	領坷	もの	タン	ク	τ÷	デル	•	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••		•••••	•••••	6
	2.2	パラ	メ -	- タ	同方	と手	法…	••••	• • • • •	• • • • •		••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••	•••••		•••••	6
	2.2	2.1	パラ	א ו	ータ	同	定 手	法(の材	既要	Į	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••		•••••	•••••	6
	2.2	2.2	カル	ィマ	ンフ	ィ	ルタ	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	••••		•••••	•••••	7
	2.2	2.3	ב =	_ —	ラル	ィネ	ット	י כ י	- ?	י. ל	••••	••••	••••	••••	••••	••••		••••	••••		•••••		9
	2.2	2.4	乱数	なを	用い	いるこ	方法	••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	•••••	11
	2.2	2.5	誤 差	計	算…	••••	•••••	••••	••••	••••	••••	• • • • •	• • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	•••••	•••••	11
第	3章	実	際の	斜ī	町 へ	の通	5月.	••••	••••	••••	••••	••••	• • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	•••••	13
	3.1	スコ	— J	レ時	の *	占性	土斜	面	に	対す	する	適	用。	••••	••••	••••	••••	•••••	••••	••••	•••••	•••••	13
	3.1	1.1	ナコ	レ	ナヨ	ーツ	クの	斜	面の	の概	t要	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	• • • • • •	••••	13
	3.1	1.2	適用] 結	果	•••••	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	••••	•••••	••••	•••••	14
	3.1	1.3	カル	ィマ	ンフ	7.	ルタ	の	問題	遉 点	ī	••••	••••	••••	••••	••••	•••••		••••	•••••	• • • • • •	• • • • • •	16
	3.1	1.4	浸透	§係	数と	:立	ち上	が	9.	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • •	••••	••••	••••	••••	•••••	• • • • • •	•••••	18
	3.1	1.5	1分	間	隔 計	测.	• • • • • •	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••	•••••	• • • • •	•••••	•••••	•••••	18
	3.2	日本	の障	锋 雨	時の	り砂	質 土	斜	面	にす	対す	- 3	適	用.	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	• • • • • •	•••••	19
	3.2	2.1	阪和	〕道	の翁	面(の 概	要.	• • • • •	••••		••••	••••	••••	••••	••••	••••	• • • • • •	••••	•••••	•••••	•••••	19
	3.2	2.2	適用	丨結	果	••••	•••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	•••••	•••••	•••••	19
	3.3	考察		••••	•••••		••••	••••	• • • • •	• • • • •	• • • • •	••••	••••	• • • • •	• • • • •	••••	• • • • •	• • • • • •	••••	•••••	• • • • • •	•••••	20

3.3.1	パ ラ メ ー タ 同 定 手 法	
3.3.2	拡張型マルチタンクモデルの適用範囲	

第	4 章	パ ラ メ ー タ の 時 間 的 変 化	
	4.1	パ ラ メ ー タ の 時 間 的 変 化	
	4.2	適 用 結 果	23
	4.3	考察	23
	4.3	3.1 立ち上がり	23
	4.3	3.2 浸透係数と降雨強度	24
	4.3	3.3 降雨履歴の影響	

第 5 1	章	ま	٤	හ	٤i	結	論	••••		•••	•••	•••	•••	• • • •	• • • •	•••	• • • •	• • • •	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••••	• • • •	••••	••••	••••	.27
5.1	10	ŧ٤	ු න්	と	結	論	•••		•••	•••	• • • •	• • •	••••	•••	•••	••••	•••	•••	••••	• • • •	•••	•••	•••	••••	•••	••	•••	• • • • •		••••	••••	••••	.27
5	5.1.	1	不	飽	和	領	域	タ	ン	ク	_ກ	バ	ミラ	×		・タ	同	一定	:手	法	ŧ.	•••	•••	• • • •	•••	•••	•••		•••	••••	••••	••••	.27
5	5.1.	2	拡	張	型	र	ル	チ	タ	ン	ク	Ŧ	デ	ル	ヮ	適	用	範	囲	•••	•••	•••	•••	• • • •	• • •	•••	•••	••••			••••		.27
5.2	4	今後	色の	課	題	•••	•••	•••	•••	•••	• • • •	• • • •		•••	•••	• • • •	•••	•••	••••		•••	•••	•••	••••		•••	•••	• • • • •	•••		••••	• • • •	.28

参	考	文	献	t	•••	•••	•••	•••	•••	•••	• • • •	•••	••	•••	•••	••	•••	•••	•••	••	•••	••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••	•••	••	• • • •	••••	••••	29)
謝	辞	•••	••	•••	•••	•••	•••	•••	•••		•••	•••	•••	•••	•••	••	••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••	•••	•••	• • • •	••••	••••	3()

第1章 序論

1.1 研究の背景

斜面崩壊は我々の生命と日常生活に深刻な被害を及ぼす最も危険な自然災害 の一つであり,降雨は斜面崩壊の主たる原因の一つである.近年では地球温暖化 に伴う気候変動の影響の一つと据えられている局所的な短時間集中豪雨,いわゆ るゲリラ豪雨の発生が日本で増加しており,気象庁による気候変動の報告による と,図 1.1 に示すように時間雨量 50 mm を超える雨が着実に増えてきている.ま た,図 1.2 に示すように時間雨量 80 mm を超える雨も 1976 年~1986 年と 1998 年 ~2008 年の 10 年間の平均発生回数で約 2 倍に増加している.

日本は国土の大部分が急峻な地形からなり,斜面に近接して住宅地,および道路・線路が形成されている場合が多く,斜面災害発生時の被害が大きくなりやすい傾向にある.ゲリラ豪雨の増加により,それに起因する斜面崩壊などの土砂災害の増加が懸念されている.

また,従来斜面災害は防災という観点から維持補修が検討されてきたが,成熟 型社会においては予防保全の観点から維持補修計画の最適化に関する課題に対処 していく必要がある.さらには斜面災害に対する損失を最小限に止めるためには, 道路管理者による早期警戒に対する意思決定が求められるが,その是非を判断す るための基準として,降雨と斜面安定性との関連を適切に評価する必要がある.

土砂災害の一つである地すべりはすべり破壊と浅層崩壊に分類され,前者は飽 和領域において生じることが明らかにされている.一方,浅層崩壊は不飽和領域 において土壌水分量が増加し,正の間隙水圧が発生することで引き起こされるこ とが多い.しかしながら,降雨浸透量と不飽和土のせん断応力の減少との間の関 連性などその詳細なメカニズムは明らかにされていない.したがって上記で述べ た気象条件の変化に伴い,降雨時における浅層崩壊のメカニズムを解明すること が求められており,斜面安定性を評価するにあたり,とりわけ災害を引き起こす 危険性が高いゲリラ豪雨時における降雨の斜面内部への浸透挙動,および土壌水 分量の変化を把握することが重要となっている.

1.2 研究の目的

本研究では、ゲリラ豪雨時における雨水の斜面内部への浸透挙動を予測する手法の一つとして提案される拡張型マルチタンクモデルのパラメータ同定手法の精度を高め、降雨時の雨水浸透挙動をモデル化することを目的とし、以下のように展開する.

今までに構築されたパラメータ同定手法により, 実斜面より得られた計測デー タを用いてその手法の精度を検討し, 改良を行う. さらに, 改良したパラメータ 同定手法を用いて拡張型マルチタンクモデルの適用範囲について検討を行い, 解 析結果をもとに降雨時の雨水浸透挙動について分析を行う.

1.3 既往研究との関連

本節では, 拡張型マルチタンクモデルを用いた降雨時における雨水の浸透挙動に関する既往の研究を概観し, それらの中での本研究の位置づけを述べる.

日本における豪雨時の防災体制は、過去の豪雨災害発生時の累積降雨量、およ び時間降雨量を組み合わせた限界降雨包絡線を基準とする方法、すなわち降雨量 のみに着目した事例が大勢を占めている¹⁾.しかし、近年増加傾向のあるゲリラ 豪雨の特性を考慮すると、従来の防災体制をそのまま適用することが必ずしも適 切ではないと推察される.また、降雨に起因した斜面崩壊という観点では、降雨 に対して地中にどの程度の水分が浸透するかを解明することが本質的に重要な課 題と考えられる.地盤内への水分浸透特性についての室内試験、および原位置計 測は数多く行われているが²⁾³⁾、原位置計測、特にゲリラ豪雨の原位置計測はゲ リラ豪雨が近年増加傾向にあるとはいえ、その発生回数が限定的であり、かつど の地域で発生するかを予測することが困難であるため、国内では十分な計測デー タを確保することは困難であると推測された。

上述した課題に対処するため,大津⁴⁾はゲリラ豪雨の降雨特性と熱帯性気候地 域におけるスコールの降雨特性の類似性に着目した.熱帯性気候地域では雨季に あらゆる箇所において高頻度でスコールが発生しており,斜面への降雨浸透に着 目した原位置計測が容易であると推定される.また,地質条件の相違のため斜面

崩 壊 の 発 生 機 構 が 日 本 と 異 な る 可 能 性 も あ る が , そ の 原 因 と な る 斜 面 内 へ の 降 雨 浸 透 特 性 の 把 握 と い う 観 点 で は 類 似 性 を 見 る こ と が で き る と 考 え ら れ た .

このような観点から、大津ら⁴⁾はゲリラ豪雨発生時の斜面内部への降雨浸透の メカニズムの解明を目的として、カセサート大学(タイ)との共同プロジェクト として、タイ・ナコンナヨックにおいて平成19年9月より現地計測を行ってきた. また、ナコンナヨックでの計測値、および後述する拡張型マルチタンクモデルでの 解析値との比較・検討を行うために地質条件の違う日本の阪和道においても現地 計測が行われてきた.

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

堀田⁶⁾は表層タンクのパラメータ同定をカルマンフィルタを用いて行い,実斜面における観測値との比較・検討により高い精度で降雨時における雨水の挙動を 表現した.一方で,不飽和領域タンクのパラメータ同定はニューラルネットワー クを用いて行ったが,解析結果と観測値との間に大きな差が見られた.

Thamrongsak SUWANISHWONG ら⁷⁾はその不飽和領域タンクのパラメータ同定 の精度向上を目的とし、不飽和領域タンクのパラメータ同定を表層タンクと同様 にカルマンフィルタを用いて行うことを試みた.

本研究では、同様にカルマンフィルタを用いて斜面不飽和領域における拡張型 マルチタンクモデルのパラメータ同定を行い、その精度向上を目指す. さらに、 そのパラメータ同定手法の改良を行うとともに、その適用範囲について考察する.

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる.

第1章において、序論として研究の背景、目的、および既往の研究との関連について述べた.

第 2 章では,本研究で用いる拡張型マルチタンクモデルの概要,およびそのパ ラメータ同定手法について説明する.

第3章では、実際の斜面における計測データを用いることにより、第2章で説明した拡張型マルチタンクモデルの適用範囲について考察を行い、そのパラメー タ同定手法について改良を加え、その精度について検討する.

第4章では,第2章で説明した拡張型マルチタンクモデルに適用するパラメー タを時間的に変化させて実斜面における計測データを用いて解析を行い,その手 法の妥当性について検討する.さらに,解析結果をもとに降雨時の雨水浸透挙動 について分析を行う.

第5章では,第3章,第4章で示した拡張型マルチタンクモデルの実際の斜面への適用結果から結論として得られた知見を述べる.最後に,今後の検討課題についても述べる.

第2章 拡張型マルチタンクモデル

本章では、拡張型マルチタンクモデルの説明を行う.まず、拡張型マルチタン クの概要について触れ、次に各タンクのパラメータ同定手法について述べる.

2.1 拡張型マルチタンクモデル

2.1.1 拡張型マルチタンクモデルの概要

タンクモデルは、1972年に菅原⁸⁾によって考案された広域を対象とした流出計 算手法であり、簡易モデルだが各流域の水収支、および水循環を適切に表現する ことが可能である.

このタンクモデルの基本概念を拡張し異なる形状のタンクを組み合わせること で、斜面における表面流出、浸透量、および地下水位の変動を表現することを目 的に考案されたのがマルチタンクモデルである. 高橋ら⁹⁾は斜面リスク評価の一 環として、降雨時における地下水位の変動をマルチタンクモデルを適応すること で予測検討を行った. しかしながら、マルチタンクモデルを用いて斜面安定性を 評価する場合、その適応範囲は飽和領域に限定され、不飽和領域における浅層崩 壊に対応することが困難であった.

本研究では、斜面不飽和領域における土壌水分量の挙動を適切に予測するため に、図 2.1 に示す不飽和領域を考慮した拡張型マルチタンクモデルを用いる. こ こで R は降雨量, E は蒸発量, X は各タンクの貯留高, H は流出孔あるいは浸透 孔までの高さ, α は流出係数, β は浸透係数を表す. また, U, M, L はそれぞれ 斜面の上段(Upper), 中段(Middle), 下段(Lower)を表す添え字である.

また, 拡張型マルチタンクモデルでは一降雨に対し, 各パラメータは時間的に 変化せず一定値を用いて降雨時の斜面における水の挙動を表現する.

2.1.2 表層のタンクモデル

図 2.1 に示す 3 つの表層タンクはそれぞれ斜面上部, 中腹部, および法尻部に おけるタンクモデルを表し, 斜面表層部において発生する表面流出量, および不 飽和領域への浸透量を表現することができる. また, 表層タンクにおける流出孔

までの高さは,降雨開始時から植生などの影響で表面流出が発生するまでの降雨 量を示す欠損雨量を表現するものであり,ナコンナヨックでの計測結果より 5 mm と設定した.さらに,複数の表層タンクを連結させることにより,斜面上流で発 生した表面流出量が下流における表面流出量にあるいは浸透量に与える影響を考 慮している.

2.1.3 不飽和領域のタンクモデル

本研究では,不飽和領域における降雨の浸透挙動に関して以下に述べる2つの 仮定条件に基づき構築された不飽和領域タンクを用いる.

まず,図 2.2 に示すように斜面表層付近における不飽和領域では,鉛直方向の 浸透流が卓越すると仮定し,底孔のみを有するタンクモデルを設定している.ま た,図 2.3 に示すように上部からの浸透流に対しては,まず土粒子周りでの吸着 がおこり,ある限界状態に達した後に下層への浸透が始まるものと仮定する.こ の仮定条件に基づき,各不飽和領域タンクに底孔までのある一定の高さのノズル を設定し,タンク内の貯留高がノズルの高さを超える場合のみ下部タンクへの浸 透が始まる構造としている.この各タンクのノズルの高さを、以後「立ち上がり」 と呼ぶ.ここで,斜面を構成している土壌の性質は各深度において異なるため, 浸透流による土壌水分量の変化特性を適切に表現するために,不飽和領域タンク の数を適切に決定する必要がある.本研究では,後述するように事例検証に用い る計測機器の観測点との適合性より,不飽和タンクの数とタンク高さをそれぞれ 設定している.

2.2 パラメータ同定手法

2.2.1 パラメータ同定手法の概要

|表 層 タ ン ク の パ ラ メ ー タ 同 定 は 堀 田 ⁶⁾の 研 究 結 果 を 引 用 す る .

不飽和領域タンクのパラメータ同定は、まず各タンクの浸透係数βと立ち上が り H(mm)の組(以下、パラメータセットと表す)を 2.2.2 で後述するカルマンフ ィルタや 2.2.3 で後述するニューラルネットワーク、または 2.2.4 で後述する乱数 を用いて数セット得る. そのパラメータセットを拡張型マルチタンクモデルに適 用し,降雨量と各計測深度における体積含水率の実測値から 2.2.5 で述べる誤差 計算によって得られたパラメータセットを最適パラメータとする.

以下簡略化のために, 誤差計算を行う際に拡張型マルチタンクモデルに適用す るパラメータセットをカルマンフィルタを用いて与える場合を「手法1」, ニュー ラルネットワークを用いて与える場合を「手法2」, 乱数を用いて与える場合を「手 法3」と表すこととする.

2.2.2 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは逆解析手法の一つであり、未知パラメータがある離散型の 状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができる¹⁰⁾.ここ で、カルマンフィルタの基本概念を図 2.4 に示す.今、ある状態 t から状態 t+1 に遷移する場合には、式(2.1)の状態方程式を用いて表すことができる.また状態 t+1 に遷移した後にある観測値が与えられた場合には、式(2.2)の観測方程式を用 いて未知パラメータを更新することで最適なパラメータを求めることができる.

$$X(t+1) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + \mu(t)$$
(2.1)

$$Y(t+1) = C(t+1)X(t+1) + \varepsilon(t)$$
(2.2)

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

また,先述したようにカルマンフィルタの概念は,未知パラメータがある離散 型の状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができるが, 拡張型マルチタンクモデルにおける構成式は非線形であるため,本研究ではテー ラー展開を行うことで線形化している¹¹⁾.

「手法1」

2.2.1 で述べた最初のパラメータセットをカルマンフィルタを用いて与える場合,図2.5に示す各タンクの貯留高の変化は以下の式(2.3)~式(2.7)で表せる.

$$\frac{dX_1}{dt} = \beta \cdot X - \beta_1 \cdot (X_1 - H_1)$$
(2.3)

$$\frac{dX_2}{dt} = \beta_1 \cdot (X_1 - H_1) - \beta_2 \cdot (X_2 - H_2)$$
(2.4)

$$\frac{dX_3}{dt} = \beta_2 \cdot (X_2 - H_2) - \beta_3 \cdot (X_3 - H_3)$$
(2.5)

$$\frac{dX_4}{dt} = \beta_3 \cdot (X_3 - H_3) - \beta_4 \cdot (X_4 - H_4)$$
(2.6)

$$\frac{dX_5}{dt} = \beta_4 \cdot (X_4 - H_4) - \beta_5 \cdot (X_5 - H_5)$$
(2.7)

また, *X_t*, *β_t*, *H_t*はテーラー展開を用いて以下の式(2.8)~(2.10)で表せる.

$$X_{t} = X_{t-\Delta t} + \Delta t \cdot \frac{dX_{t-\Delta t}}{dt}$$
(2.8)

$$\beta_t = \beta_{t-\Delta t} + \Delta t \cdot \frac{d\beta_{t-\Delta t}}{dt}$$
(2.9)

$$H_{t} = H_{t-\Delta t} + \Delta t \cdot \frac{dH_{t-\Delta t}}{dt}$$
(2.10)

ここで, 図 2.4 に示す降雨浸透過程のカルマンフィルタの各行列式は以下の形で表される.

	$\left[-\beta_{M1}\right]$	0	0	0	0	$\beta_{_{M1}}$	0	0	0	0	$-(X_{M1} - H_{M1})$	0	0	0	0
	β_{M1}	$-\beta_{M2}$	0	0	0	$-\beta_{M1}$	β_{M2}	0	0	0	$(X_{M1} - H_{M1})$	$-(X_{M2}-H_{M2})$	0	0	0
	0	$\beta_{_{M2}}$	$-\beta_{M3}$	0	0	0	$-\beta_{M2}$	β_{M3}	0	0	0	$(X_{M2} - H_{M2})$	$-(X_{M3} - H_{M3})$	0	0
	0	0	β_{M3}	$-\beta_{M4}$	0	0	0	$-\beta_{M3}$	β_{M4}	0	0	0	$(X_{M3} - H_{M3})$	$-(X_{M4} - H_{M4})$	0
	0	0	0	$\beta_{_{M4}}$	$-\beta_{\rm M5}$	0	0	0	$-\beta_{M4}$	$\beta_{\rm M5}$	0	0	0	$(X_{M4} - H_{M4})$	$-(X_{M5} - H_{M5})$
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_t =$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

 $C_{t} = \begin{bmatrix} \beta_{1} & 0 & 0 & 0 & -\beta_{1} & 0 & 0 & 0 & X_{1} - H_{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{2} & 0 & 0 & 0 & -\beta_{2} & 0 & 0 & 0 & X_{2} - H_{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{3} & 0 & 0 & 0 & -\beta_{3} & 0 & 0 & 0 & X_{3} - H_{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{4} & 0 & 0 & 0 & -\beta_{4} & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{4} - H_{4} & 0 \end{bmatrix}$

 $x_{t} = \begin{bmatrix} dX_{1} & dX_{2} & dX_{3} & dX_{4} & dX_{5} & dH_{1} & dH_{2} & dH_{3} & dH_{4} & dH_{5} & d\beta_{1} & d\beta_{2} & d\beta_{3} & d\beta_{4} & d\beta_{5} \end{bmatrix}^{T}$

上述した浸透計算の行列式において、表層タンクからの浸透量と計測された土 壌水分量の変化を数値解析のインプットデータとして用いる. このインプットデ ータを用いて、初期値(t=1)として最初に与える浸透係数β, および立ち上がり H(mm)をカルマンフィルタで計算することにより t=2, t=3, …と計算対象の終了 時間まで更新させる. こうして得られたパラメータセットの中で、 0<β<1かつ 0<H を満たすものだけを抽出し, 2.2.4 で説明する誤差計算に代入するパラメータ セットとする.

2.2.3 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは非線形問題に比較的強いため,テーラー展開を加味 したカルマンフィルタを用いた定式化が不要になる.一方で入力層と出力層間に おいてネットワークを構築するためには,出力層以上の入力数が必要となる問題 点も挙げられるが、不飽和領域においては各深度の土壌水分量を比較的簡便に計 測することが可能であるために十分対応可能と推察される.

ニューラルネットワークは生物の神経細胞間の信号の伝達機能に基づいたモ デルであり、複雑な非線形関係も表現することが可能である.ニューラルネット ワークにおける基本ユニットにおいては,入力要素の総和を式(2.11)に示す結合関 数により算出し,それがある閾値を越えた場合に次のユニットに伝達するという 判断を式(2.12)に示す伝達関数に行わせることができる.

$$S = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i$$
 (2.11)

$$y = f(S) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(S - \theta)}}$$
 (2.12)

ここに, 結合関数内の S は入力値に重み付けを乗じたものの総和, x_iは入力要素, および w_iは入力要素に対する重み付けを表し, 結合荷重と呼ばれる. 結合荷 重 S がユニット内と閾値 θ との差をシグモイド関数で変換することで出力値 y を 得ることができる.

なお、本研究ではニューラルネットワークシュミレーターとして NEUROSIM/L を使用し、ネットワークとして 3 層構造を採用し、学習手法は Back Propagetion (誤差逆伝播法)に基づいて行っている.

「手法2」

2.2.1 で述べた最初のパラメータセットをニューラルネットワークを用いて与 える場合、入力層として降雨強度、タンク内の貯留高、およびその変化量を、出 力層として不飽和タンクの浸透係数、および立ち上がりを想定する、具体的な同 定手順は図 2.6 に示す通りである、まず、浸透係数、および立ち上がりとして乱 数を各不飽和領域タンクに与えることで貯留高、およびその変化量を計算し教師 データを得る、それらの教師データに基づいたネットワークを構築し、その後入 力値として観測値を与えることで浸透係数、および立ち上がりのパラメータセッ トを数セット得ることができる、最後にそのパラメータセットを拡張型マルチタ ンクモデルに適用し、2.2.4 で述べる誤差計算によって最適パラメータが得られる.

2.2.4 乱数を用いる方法

「 手 法 3」

2.2.1 で述べた最初のパラメータセットをカルマンフィルタまたはニューラル ネットワークを用いて絞り込みを行わず, 乱数で与える. これを本研究では「手 法 3」と定義し,立ち上がりは各深度の体積含水率の実測値から立ち上がりの値と して考えられる範囲の値を乱数で与え,浸透係数は 0~1 の間の値を乱数で与える. こうして得られた立ち上がりと浸透係数のパラメータセットをタンクモデルに適 用し, 誤差計算を行うことで最適パラメータを得る.

2.2.5 誤差計算

2.2.2 で述べたカルマンフィルタ, 2.2.3 で述べたニューラルネットワーク, または 2.2.4 で述べた乱数により得られたパラメータセットを拡張型マルチタンクモデルに適用することで, 計算対象時間の各タンクの貯留高が計算値として得られる. ここで, パラメータセット *i* (*i*=1~*n*)を拡張型マルチタンクモデルに適用した際の時間 *t*における各タンクの貯留高の計算値を *H'*_{t,i}とする. また, 各タンク高さに相当する深度で計測された体積含水率から, 各タンクの時間 *t*における貯留高の実測値が得られ, これを同様に *H*_{t,i}とおく. 計算値と実測値との差(|*H*_{t,i} - *H'*_{t,i}|)をそれぞれ時間 *t*, およびパラメータセット*i*ごとに計算する.

拡張型マルチタンクモデルにパラメータセット*i*を適用した際の*t*=1~*m*におけるタンクの水位の差の合計を*x_i*, *t*=1~*m*における水位の差の最大値を*y_i*とおく.

$$x_{i} = \sum_{t=1}^{7} \left(\left| H_{t,i} - H'_{t,i} \right| \right) \qquad (i = 1 \sim n)$$
(2.13)

$$y_i = Max(|H_{t,i} - H'_{t,i}|)$$
 $(i = 1 \sim n , t = 1 \sim m)$ (2.14)

 $x_i(i=1 \sim n)$ の平均を μ_s ,標準偏差を σ_s , $y_i(i=1 \sim n)$ の平均を μ_m ,標準偏差を σ_m とすると、それぞれ以下のようになる.

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$
(2.15)

$$\sigma_{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2}}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}}{n}\right)^{2}}$$
(2.16)

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$
(2.17)

$$\sigma_{m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} y_{i}^{2}}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_{i}}{n}\right)^{2}}$$
(2.18)

 $x_i \ge y_i$ の偏差値をそれぞれ X_i , Y_i とすると,

$$X_{i} = \frac{x_{i} - \mu_{s}}{\sigma_{s}} \times 10 + 50 \quad (i = 1 \sim n)$$
(2.19)

$$Y_{i} = \frac{y_{i} - \mu_{m}}{\sigma_{m}} \times 10 + 50 \qquad (i = 1 \sim n)$$
(2.20)

となる.

偏差値の和 X_i + Y_iが最小となるようなパラメータセット iを最適パラメータと する (図 2.7).

次章では、実際の斜面で計測されたデータを本章で説明した拡張型マルチタン クモデルに適用することで、そのパラメータ同定手法の精度を検証するとともに 拡張型マルチタンクモデルの適用範囲について考察する.

第3章 実際の斜面への適用

本章では、日本、およびタイで計測されたデータを使用して、不飽和領域における拡張型マルチタンクモデルの適用性、およびそのパラメータ同定手法について検討する.

3.1 スコール時の粘性土斜面に対する適用

3.1.1 ナコンナヨックの斜面の概要

本研究で提案する拡張型マルチタンクモデルの有用性を検討するために、本モ デルに適合する斜面モニタリングシステムを考案し、タイのナコンナヨックにお ける道路脇斜面において 2007 年 9 月から降雨量、表面流出量、および土壌水分量 を 10 分間隔で計測している.ナコンナヨックにおける実験斜面の地質は流紋岩が 高温多雨の条件化で風化し、粘土化したものであり、図 3.1 および図 3.2 に示す ように、雨量計を斜面法尻部(No.2)に 1 機、土壌水分計を斜面中腹部(No.1, およ び No.3)と斜面法尻部(No.2)に 3 機, 水位計を斜面中腹部(No.11, および No.3)と 斜面法尻部(No.2)に 3 機設置している.各土壌水分計は深度 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.6m, および 1.0m における電圧形式による計測を行っており、式(3.1)に 示す多項式校正によって体積含水率に換算している.

$$\theta = 0.32 - 0.09V + 0.72V^2 - 0.34V^3 \tag{3.1}$$

ここに V[v]は電圧, および θ は体積含水率を表す.

また、斜面に建設されている水路に対して V ノッチを設置し、V ノッチからの 越流水位を水位計により計測している. なお、越流水位と表面流出量の関係は以 下の校正式(3.2)を用いている.

$$Q = 0.00084 \times H^{2.5} \tag{3.2}$$

ここに Q(m³/min)は表面流出量, H(cm)は越流水位を表している.

本モニタリングによって計測された観測値を拡張型マルチタンクモデルへ適用 する際,表面流出量 No.11 と体積含水率 No.1 を Middle tankの観測値,表面流出 量 No.2,および体積含水率 No.2 を Lower tankの観測値として取り扱うものとす る.また,不飽和領域タンクの深度は 0.1 m を除いた 0.2 m から 1.0 m の 5 深度を 採用する.

ここで, ナコンナヨックにおける計算対象時間は降雨開始時から 10 分間隔で t=1~7の70分間としている. これは「短時間に高強度の降雨」というスコールの 特性を加味したものである.

本研究では 2008 年 5 月 19 日から 2008 年 9 月 19 日の間に得られた計測データのうち,図 3.3,および図 3.4 に示す 14 降雨を計算対象降雨とした.

また、この 14 降雨を堀田ら⁵⁾が行った降雨重心による降雨パターンの定義に従い分類を行った. 降雨スネークカーブの重心を降雨重心と定義し、一雨降雨重心 20 mm 以上かつ降雨強度重心 4 mm 以上の比較的強い降雨を N-1 パターン、それ 以外を N-2 パターンと分類し、図 3.5 に示す.

3.1.2 適用結果

· 浸 透 量

不飽和領域タンクの計算をする際の表層タンクからの浸透量に関して、次の 2 通りの定義をした.

漸化式による定義

図 2.5 に示す通り各タンクの水位を X(mm), 立ち上がりを H(mm)とする. 添え 字 (1~5)を不飽和領域タンクの上部からの番号とすると,各タンクの水位の変化は 以下の式(3.3)~式(3.7)で表現される.

- $(\tanh 1) \qquad \qquad Q_{0,t} Q_{1,t} = X_{1,t+1} X_{1,t} \qquad (3.3)$
- (tank2) $Q_{1,t} Q_{2,t} = X_{2,t+1} X_{2,t}$ (3.4)
- (tank3) $Q_{2,t} Q_{3,t} = X_{3,t+1} X_{3,t}$ (3.5)
- $(tank4) Q_{3,t} Q_{4,t} = X_{4,t+1} X_{4,t} (3.6)$
- $(tank5) Q_{4,t} Q_{5,t} = X_{5,t+1} X_{5,t} (3.7)$

 $X_{i,t}$ (*i*=1~5)はある時刻 t における各深度の体積含水率に各タンク高さを乗じた値であり、 $Q_{i,t}$ (*mm*)はタンク*i* (*i*=1~5)からの単位面積あたりの浸透量である. ここで、最下部タンクの浸透量は計測していないため $Q_{5,t}=0$ と仮定すると、表層 タンクからの浸透量 $Q_{0,t}$ は式(3.3)から式(3.7)の辺々の和をとることにより、以下 の式(3.8)で定義できる.

$$Q_{0,t} = \sum_{i=1}^{5} (X_{i,t+1} - X_{i,t})$$
(3.8)

以下の計算において、 $Q_{0,t} < 0$ となった場合は $Q_{0,t} = 0$ として計算する.

表層タンクのパラメータによる定義

表層タンクのパラメータ同定結果より,降雨量の実測値を表層タンクに与えることで表層タンクから不飽和領域タンクへの浸透量が得られる.計算対象の 14 降雨に対して,堀田⁵⁾の研究結果を元にカルマンフィルタを用いて表層タン クのパラメータ同定を行った.その結果を**表 3.1**に示す.

計算対象領域

本研究において Upper tank は仮想的に設定したタンクであり,表層タンクのパ ラメータを同定する際,Upper tank に関する観測値を入力しておらず,Upper tank のパラメータは Middle tank,および Lower tank の観測値に合うように求められた パラメータであるため,Upper tank のパラメータを用いて得られる値を不飽和領 域タンクの計算に用いるのは不適と考えられる.

また,斜面法尻部では土壌水分計 No.2 が集水領域内に設置されていないため, 土壌水分計 No.2 より得られた計測値を斜面法尻部における不飽和領域の実測値 として使用するのは適切ではないと考えられる. さらに,技術者の長年の経験か ら得られた知見から斜面法尻部において鉛直浸透が卓越しているという仮定も深 度によっては成り立たない場合があると考えられる.

上述の理由により,本研究で不飽和領域の計算対象として扱うのは斜面中腹部のみとする.

・浸透係数、および立ち上がりの初期値
 カルマンフィルタを用いて計算を行う際に最初に浸透係数と立ち上がりの初期

値を与える必要がある. 各深度の体積含水率の計測値が 40~50%の間にほぼ収まっていることから, 立ち上がりを体積含水率 40~50 %に相当する値で与える. また, 浸透係数は各タンクとも 0 から 1 までの値を 0.1 刻みで与える.

・適用結果

3.1.2 で分類した 14 降雨のうち, N-1 に分類される 3 降雨と N-2 に分類される 2 降雨に対して, 手法 1, および手法 2 の解析値と実測値との体積含水率の比較を 図 3.6 から図 3.10 に示す. ここで, 図中の「カルマン 1」は表層タンクからの浸透量を体積含水率の漸化式による定義を用いて計算した場合(以下, 手法 1-1 と する),「カルマン 2」は表層タンクのパラメータによる定義を用いて計算した場 合(以下, 手法 1-2 とする)の結果を表す.

全体的な手法1と手法2による解析結果の違いとして,深部においては手法1 における解析結果の方がより実測値に近いと言える.深度が浅いGL-0.2mにおい て図 3.7,図 3.8,図 3.10に示すように手法2による解析結果の方が実測値に近く なっているが,手法2の解析結果の方が実測値に近い場合は手法1,手法2の解 析結果が共に大きく実測値から外れており,必ずしも手法2の精度が良いとは言 えない.

手法2よりも手法1の解析結果の方がより実測値に近いと言えるが、全体としてそれほど大きな差はないと言える.また、手法1-1と手法1-2を用いて計算した結果から、表層タンクからの浸透量に関して2通りの定義の違いによる解析結果の精度の差はないと言える.

3.1.3 カルマンフィルタの問題点

本来, 実測値をインプットデータとして使用しカルマンフィルタを用いて浸透 係数,および立ち上がりの値を初期値(t=1)から t=2, t=3, …と更新させることで, 実測値に合うパラメータセットを絞り込むという利点があった.しかし, 2.2.2 で 述べたカルマンフィルタを用いて最初のパラメータセットを得る上で問題点が生 じた.タイ・ナコンナヨックで計測したデータを用いて解析した際, 表層タンク からの浸透量と各深度の体積含水率のインプットデータを与えることによりカル マンフィルタを用いて浸透係数と立ち上がりを初期値から t=2, t=3, …と更新さ せた後, 0<β<1かつ0<Hを満たすパラメータセットのみを抽出した結果, ほぼ

t=1 の時の値, つまり初期値しか残らず, t=2 のパラメータセットがごくわずかに 条件を満たすだけで t=3 以降のパラメータセットはすべて条件を満たさなかった. すなわち, 2.2.5 で述べた誤差計算を行う際に, 拡張型マルチタンクモデルに適用 するパラメータセットが自ら与えた初期値に大きく依存してしまい, カルマンフ ィルタを用いて計算をする利点がほぼ失われてしまう. 逆に, 初期値として与え る立ち上がりの値が真値から大きく外れていると, 誤差計算をして得られる結果 の精度も落ちると考えられる.

また、ニューラルネットワークもカルマンフィルタと同様に、誤差計算を行う 前に実測値に合うようなパラメータセットを絞り込む意味合いがあった.カルマ ンフィルタまたはニューラルネットワークを用いたパラメータセットの絞り込み の精度の差が、手法1と手法2における解析結果の精度の差につながると推定さ れるが、3.1.2 で示した通り手法1と手法2の解析結果に大差がないことから、ニ ューラルネットワークを用いたパラメータセットの絞り込みの精度も高くないと 考えられ、手法2を用いても包括的に実際の水の挙動を表現するのには限界があ ると考えられる.

上述した問題点が生じたことに加え、本研究で用いているパラメータ同定手法 は 2.2.5 で述べた誤差計算が重要な役割を果たしていることから、 2.2.4 で述べた 手法 3 を用いて解析を行うことを試みた. ナコンナヨックにおける各深度の体積 含水率がほぼ 40~50%の間にあることから、立ち上がりの値は各タンクの体積含 水率 40 %~50 %に相当する値を乱数で与え、浸透係数は 0~1 の間の値を乱数で 与えた. これにより、誤差計算を行う際にタンクモデルに与えるパラメータセッ トがカルマンフィルタやニューラルネットワークの計算結果によって制限されな くなり、より広範囲のパラメータセットの中から最適パラメータを探すことが可 能となる.

乱数により与えるパラメータセットの数を決定するために、5000 セット、10000 セット与えた場合をそれぞれ計算し、その結果を図 3.6 に示す. グラフより、5000 セットの場合と 10000 セットの場合で結果にほぼ相違が見られないことから、乱 数で与えるパラメータセットは 5000 セットで十分であると考えられる.

手法 1, 手法 2, および手法 3の解析値と実測値との体積含水率の比較を図 3.6 から図 3.19 に示す. ここで, 図 3.11 から図 3.19の「カルマン」は手法 1-1の結 果を表す. 手法 3 において, 各パラメータセットを拡張型マルチタンクモデルに

適用した際の計算では、表層タンクからの浸透量は表層タンクのパラメータによる定義を用いて計算を行った.

図 3.6 から図 3.19 に示す通り, 3.1.1 で分類した計算対象 14 降雨の中で一雨降雨重心と降雨強度が共に最も大きい降雨である 7 月 30 日(図 3.7)と最も小さい降雨である 9 月 15 日(図 3.10)の GL-0.2m における結果を除いたすべての降雨,およびすべての深度で手法 3 の解析結果が最も実測値に近く, さらにその精度も手法 1, 手法 2 に比べ格段に向上している. これにより, 手法 3 が一番精度よく最適パラメータを求められると考えられるとともに, これが現状のパラメータ同定手法を用いて拡張型マルチタンクモデルで表現できる範囲の限界であると推察される.

3.1.4 浸透係数と立ち上がり

降雨進行に伴う各計測深度における体積含水率の実測値と解析値の変化および 浸透係数と立ち上がりの値を図 3.20 から図 3.29 に示す. 図中の「立ち上がり」 は、立ち上がり H(mm)の値を各タンク高さで割った値、すなわち、各タンクにお ける立ち上がりの体積含水率に相当する値を表す.「解析値」は手法 3 による計算 値である. 図 3.26 から図 3.29 に示す通り、GL-0.6m 以深では体積含水率が一定 であることから飽和状態であると推測される. この状態を拡張型マルチタンクモ デルでは、立ち上がりの体積含水率相当値を体積含水率とほぼ同じ値とし、浸透 係数をほぼ1にすることで表現している. すなわち、飽和状態に達している時に さらに水が上部タンクから浸透してきた場合は、それをすべて下部タンクへ浸透 させることで体積含水率が一定であることを表現している.

3.1.5 1分間隔計測

将来的に斜面安定性評価を考えるにあたり、斜面浅層部における降雨浸透挙動 をモデル化するためにはより詳細な計測データが必要であると考えられる. そこ で 5.2 に後述するように、筆者らは 2010 年 6 月よりタイ・ナコンナヨックにおい て計測間隔を 1 分にして集中的に計測を行う予定である. それに先立ち、2008 年 9 月に試験的に 1 分間隔で降雨量、表面流量、および土壌中の体積含水率の計測 を行った. 1 分間隔で計測されたデータを用いて手法 3 で解析を行った結果、**図** 3.30 に示すように GL-0.2m、および GL-0.3m では包括的に水分挙動を表現するこ とができている. さらに、10 分間隔で計測されたデータを使用した解析結果と比

ベ,1 分間隔で計測されたデータを使用した解析結果の方が実測値との誤差が少なく精度が高いと言える.これは計測間隔を短くすることでタンクモデル内における時間誤差の影響が少なくなったためと考えられる.また,GL-0.4m以深では計測間隔が10分の時(図3.18)と同様に体積含水率の解析値と実測値がほぼ一致した.

3.2 日本の降雨時の砂質土斜面に対する適用

3.2.1 阪和道の斜面の概要

阪和道 KP83.7 地点の高盛土において、斜面中腹部のみで 0.5m, 1.0m, 1.5mの 3 深度で間隙水圧と体積含水率を計測した.その概要を図 3.31 に示す.計測地点 の傍には「名草池」と呼ばれる溜池が存在し、対象となる高盛土は名草池提体に 腹付けされている.以下, この計測地を「阪和道」と表す.

本計測地の特徴として、ナコンナヨックの土質が粘性土であるのに対し阪和道 は砂質土であること、今回解析に使用した 2004 年 11 月 11 日、および 2004 年 11 月 12 日の降雨はゲリラ豪雨と呼ばれるほど高強度ではないこと(図 3.32)、ナコ ンナヨックに比べて計測深度間隔が 0.5 mと大きいこと、さらに計測時間間隔が 30 分間隔と長いことが挙げられる.

3.2.2 適用結果

本研究ではまず阪和道の 2004 年 11 月 12 日 0:30~4:00 の計測データを使用し, 手法 1-1 と手法 3 による解析値と実測値を比較した(図 3.33). 図中の β (浸透係 数)は手法 3 の解析結果である. 阪和道はナコンナヨックに比べ計測時間が 30 分と長いこと,そして砂質土で透水係数が大きいという特徴からとりわけ GL-1.0m での実測値の体積含水率の変化が大きくなっているが,拡張型マルチタ ンクモデルでは手法 1-1 と手法 3 のどちらの方法を用いてもその変化を表現しき れていない. また,手法 1-1 よりも手法 3 を用いた場合の方が実測値に近い結果 となっていることから, 阪和道のような砂質土に対しても乱数を用いてパラメー タ同定を行えばよいと言える.

次に,降雨開始から降雨終了までの長時間での水の挙動をどの程度表現可能か を検証するために 2004 年 11 月 11 日 10:00~17:00 の計測データを使用し,手法 3

での解析値と実測値の比較を同様に行った(図 3.34).

GL-0.5m, GL-1.5m においては包括的に体積含水率の上昇の挙動は表現できている.しかし, GL-1.0m においては阪和道で想定しているタンクの高さが 0.5m と比較的高く,また計測時間間隔も 30 分と長いため,一計測時間中に大幅に体積含水率が増加する結果となっており,その体積含水率の大幅な増加を表現しきれていない.

・タンク数の見直し

本研究において、筆者は阪和道における実測値の計測深度に合わせて 3 段のタ ンクを想定し拡張型マルチタンクモデルを適用してきた. しかしながら、計測深 度の間隔が 0.5m と大きく実際の水分挙動を表現しきれなかった. 一方で、技術 者の経験的知見をもとに阪和道の斜面(図 3.35)に図 3.36に示すような 5 段のタ ンクを想定し、各タンクのパラメータを経験的な合わせ方で求めた. その結果、 図 3.37に示すように 2004 年 11 月 11 日および 12 日の飽和度が大きく変動する挙 動をタンクモデルで表現することが可能であることがわかった. すなわち、拡張 型マルチタンクモデルにおいてタンクの数を適切に想定することで、より正確な 水分挙動を表現することが可能と言える.

3.3 考察

3.3.1 パラメータ同定手法

ナコンナヨックにおける手法 1-1 と手法 2 の解析結果から、手法 2 に比べ手法 1-1 の方がより実測値に近い結果となった. さらに、ナコンナヨックと阪和道の 実斜面における実測値を用いて手法 1-1 および手法 3 で解析を行った結果、手法 3 における解析結果の精度の方が極めて高く、ナコンナヨックにおいては実測値 に極めて近い結果が得られた.

また、3.1.3 で述べたカルマンフィルタを用いる上で生じる問題点に加え、ニュ ーラルネットワークを用いたパラメータセットの絞り込みの精度、さらには本研 究で用いているパラメータ同定手法の中における誤差計算の重みを考慮すると、 実斜面における計測値との比較ですべてにおいて手法3を用いた場合が最も精度 よく実測値に近い結果を得られたことから、乱数を用いて最初のパラメータセッ

トを与える方法が最も精度よく最適パラメータセットを求めることができると考 えられる.その要因は、カルマンフィルタやニューラルネットワークで計算され たパラメータセットを用いて誤差計算を行うと、誤差計算の対象となるパラメー タセットが制限されているためその制限されたパラメータセットの中でしか計算 が行われないが、それに対し、今回誤差計算を行う際にタンクモデルに与えるパ ラメータセットを乱数で与えたことで、パラメータセットの値として考えられる 範囲の値をすべて計算対象として計算したため、より広範囲な値の中から最適パ ラメータを求めることができたためと考えられる.

3.3.2 拡張型マルチタンクモデルの適用範囲

不飽和状態から体積含水率が上昇し飽和状態になる現象(図 3.21 7/30, 9/19, 図 3.33 GL-1.0m, 図 3.34 GL-1.0m)や、体積含水率が一旦上昇しその後減少する現象 (図 3.20 5/19, 6/2, 6/3, 図 3.21 9/15, 9/18)を、一降雨に対して一つのパラメー タセットで表現するのには限界があると言える. なぜならば、降雨開始時の体積 含水率の上昇に合うようにパラメータをセットすると、降雨が進行し飽和状態に 達してもタンクモデルでは体積含水率が上昇するような結果となってしまう.

しかしながら,上述した現象を拡張型マルチタンクモデルで表現するのには限 界があるものの,パラメータ同定手法の改良により包括的に降雨時の雨水浸透挙 動をモデル化することはできたと考えられる.

以上に, 拡張型マルチタンクモデルを用いて解析を行い, ナコンナヨック, お よび阪和道の実斜面における実測値と解析値とを比較することによりパラメータ 同定手法の精度と拡張型マルチタンクモデルの適用範囲について考察してきた. 次章では, 本章で得られた結果をふまえ, これまでのパラメータの与え方そのも のを改良し, より正確な雨水浸透挙動を得られる方法について検討を加える.

第4章 パラメータの時間的変化

前章では、実斜面における計測データを拡張型マルチタンクモデルに適用する ことでそのパラメータ同定手法について検討し、その改良を行った.しかし、降雨 時の斜面への雨水浸透挙動はこれまでの拡張型マルチタンクモデルで表現するこ とのできない部分があることがわかった.その課題に対処するために、本章では、 拡張型マルチタンクモデルに適用するパラメータの与え方を改良し、そのモデル の妥当性を検証するとともに、最終的に早期警戒態勢に対する意思決定の指標を 作る上での参考として、降雨進行に伴う浸透係数の変化についての考察を加える.

4.1 パラメータの時間的変化

これまでは、浸透係数βと立ち上がりHを一降雨で一定として拡張型マルチタ ンクモデルに適用してきた.しかし、実際は下部タンクの貯留高によって浸透係 数は時間的に変化するものと考えられる.一方、一降雨中で立ち上がりの値はそ れほど大きく変化しないと考えられるため、手法3において誤差計算を行う前の パラメータセットとして浸透係数を時間的に変化させ立ち上がりを一定値として 与え、計算を行った.

以下, 第3章まで行ってきたパラメータを時間的に変化させず手法3を用いて 計算する方法を「手法3-A」, 手法3において浸透係数のみを時間的に変化させて 計算を行う方法を「手法3-B」と表す.

手法 3-B において立ち上がりの値は各タンクの体積含水率 40%~50%に相当する 値を与え,その中で実測値との誤差が一番少ない時の値を最適パラメータとして いる.ここでは 2008 年 5 月 24 日の降雨,2008 年 7 月 30 日の降雨,そして 2008 年 9 月 15 日の 3 降雨を計算対象降雨とした.また,降雨終了後の各タンクの浸透 量が時間的にどのように変化していくのかを調べるため,計算対象時間を t=1~15 に増やして計算を行った.本章では浸透係数を時間的に変化させているため,計 算対象時間を t=1~7 から t=1~15 に増やしても,第 3 章の結果との比較において影 響はないと考えられる.

体積含水率の実測値と手法 3-B を用いた場合の解析値, 立ち上がりの体積含水率相当値, 降雨量, 上部タンクからの浸透量, 下部タンクへの浸透量, および比

較のための手法 3-A を用いた場合の立ち上がりの体積含水率相当値を合わせて図 4.1 から図 4.10 に示す.

また、雨水浸透挙動を把握するためには単純な浸透係数の変化だけでなく、実際の上部タンクからの浸透量と下部タンクへの浸透量も考慮する必要性があるため、計測深度ごとに手法 3-B を用いた場合の浸透係数の時間的変化、降雨量、上部タンクからの浸透量、および下部タンクへの浸透量を図 4.11 から図 4.20 に示す.

4.2 適用結果

7月30日と9月15日の2降雨のGL-0.2mにおいて体積含水率の実測値が解析 値よりも一部でわずかに大きな値となっている.これはタンクモデルにおいて表 層タンクからの浸透量が、実測値の体積含水率の上昇分に相当する量よりも少な いために、GL-0.2mのタンクで浸透係数をほぼ0にして下部タンクへの浸透を停 止させても実際の体積含水率の上昇を表現しきれなかったと考えられる.すなわ ち、GL-0.2mの実測値と解析値の差は表層タンクのパラメータ同定に起因するも のであると推察される.表層タンクのパラメータは一降雨一定値として同定を行 っているため、高精度で実際の水の挙動を表現できてはいるが実測値と解析値と の間には差があり、斜面不飽和領域において正確な浸透挙動をモデル化するため には表層タンクのパラメータ同定のさらなる精度向上が望まれる.

GL-0.3mから GL-1.0mでは 2 降雨とも実測値と解析値がほぼ一致し, 手法 3-B を用いて拡張型マルチタンクモデルで実際の水分挙動を表現することが可能であ ることが示せた.

4.3 考察

4.3.1 立ち上がり

立ち上がりの値は3降雨の全深度において、手法3-Bよりも手法3-Aを用いた場合の方が大きくなった.

手法 3-A を用いる場合は浸透係数が時間的に変化しないため、タンクモデルで 立ち上がりの値が小さく設定されてしまうと、解析値の体積含水率の上昇が大き

くなりすぎてしまう.そのため手法 3-A の場合,立ち上がりの値は大きくならざ るを得ない.また、ナコンナヨックの斜面では各深度において体積含水率の変化 がほとんどなく一定である.そのため、手法 3-A を用いる場合、多少体積含水率 が増減しても、誤差計算では体積含水率一定状態を表現するようなパラメータが 実測値との誤差が最小となる最適パラメータとして選ばれる.すなわち、図 4.22 に示すように立ち上がりを体積含水率相当値、浸透係数を1にすることで上部タ ンクからの浸透量と下部タンクへの浸透量を等しくさせ、体積含水率一定を表現 することで実測値との誤差を最も少なくさせている.

一方, 実際の土壌水分量と立ち上がりの差分に浸透係数を乗じた値が下部タン クへの浸透量であるため, 手法 3-B を用いる場合, 立ち上がりの値は実際の体積 含水率よりも小さい方が下部タンクへの浸透量を適切に表現しやすい. 逆に, 立 ち上がりの値が大きくなれば下部タンクへ浸透させることのできる水分量が少な くなる.

しかしながら本研究で用いた手法によってパラメータ同定を行った場合,その 結果として得られるパラメータには実際の現象において物理的意味を持つパラメ ータと実測値に対する数値合わせとして求められるパラメータとがあり,立ち上 がりの値は後者であると推察される.なぜなら,浸透係数が時間的に変化するた め,立ち上がりの値が図 4.1 から図 4.10 のグラフ中で示される値よりも大きくあ るいは小さく同定されても,浸透係数がそれに対応して変化することで実際の体 積含水率の変化を表現することが可能であると考えられるからである.すなわち, 本手法によって同定される立ち上がりの値の精度自体はそれほど高くはないと考 えられる.

4.3.2 浸透係数と降雨強度

浸透係数の値そのものは 4.3.1 で述べたように立ち上がりの値によって変化す ると考えられるため厳密な評価は難しいが, 浸透係数の時間的遷移は物理的意味 を持つと考えられる.

図 4.11 に示す通り、2008 年 7 月 30 日の GL-0.2m において浸透係数は降雨開始 時より一度上昇し、その後小さくなっている. これは降雨強度と雨水の地中への 浸透速度で考えることができる. すなわち、スコールのような降雨強度の強い雨 が降ると表層タンクからの浸透速度が速くなる. 一方で本計測サイトの土壌は粘

性土であるため、下部タンクへの浸透速度が遅く、下部タンクへの浸透量が表層 タンクからの浸透量に比べて小さくなり体積含水率が上昇する. この現象をタン クモデルでは浸透係数が小さくなることで表現しているものと考えられる.

また,図 4.16 に示す 2008 年 9 月 15 日の GL-0.2m における降雨開始時のように 降雨強度が小さい場合は、表層タンクからの浸透速度と下部タンクへの浸透速度 に差がないため浸透係数は小さくならない. さらに、降雨継続中において体積含 水率が一旦上昇した後、上部タンクからの浸透量があるにも関わらず体積含水率 が減少する現象に関しても同様に降雨強度と浸透速度の関係で考えることができ る. すなわち、降雨開始から降雨強度が強くなるにつれて下部タンクへの浸透速 度よりも上部タンクからの浸透速度が速くなり、体積含水率が上昇する.その後、 降雨強度が弱くなると下部タンクへの浸透速度の方が速くなり、体積含水率が減 少していく.

GL-0.3mから GL-1.0mの体積含水率の変動がほとんどない深度では、上部タン クからの浸透量が増加すると浸透係数が大きくなり、上部タンクからの浸透量が 減少すると浸透係数が小さくなる傾向がある.これは、手法 3-A を用いる場合は 4.2.2 で述べた通り立ち上がりが体積含水率相当値となり、浸透係数がほぼ 1 とな ることで実際の水分挙動を表現しているのに対し、手法 3-B を用いる場合には立 ち上がりの値が実際の体積含水率よりも小さい.そのため、体積含水率がほぼ一 定の場合、図 4.23、および図 4.24 に示すように上部タンクからの浸透量が多くな ると、立ち上がりの値を超えた水分貯留量中に占める下部タンクへの浸透量の割 合が大きくなり、結果として浸透係数が大きくなる.すなわち、浸透係数を以下 の式(4.1)で表すと、体積含水率がほぼ一定の時は式(4.2)が成り立つ.

$$\frac{Q_{out,t}}{(Q_{in,t}+q_t)-H} = \beta_t$$
(4.1)

$$Q_{in,t} \cong Q_{out,t} \tag{4.2}$$

ここで, *Q_{in,t}*は時間 *t*における上部タンクからの浸透量, *Q_{out,t}*は時間 *t*における下 部タンクへの浸透量, *q_t*は時間 *t*における体積含水率にタンク高さを乗じた値, *H* は立ち上がり, *β*,は時間 *t*における浸透係数を表す. *q*_t と *H* は定数より式(4.1), および式(4.2)より体積含水率がほぼ一定である GL-0.3m 以深では, 浸透係数は降雨に起因する上部タンクからの浸透が始まると 大きくなり, 降雨終了に伴い上部タンクからの浸透量が減少すると小さくなるこ とがわかる. また, GL-0.3m から GL-1.0m では体積含水率の変化があまりなく, 上部タンクからの浸透量と下部タンクへの浸透量がほぼ同じであることから, GL-0.3m, GL-0.4m, GL-0.6m, および GL-1.0m の浸透係数の時間的変化はほぼ同 じ挙動となっている.

4.3.3 降雨履歴の影響

図 3.21 から図 3.24 に示すように、雨期の進行に伴い降雨時における浅層部での体積含水率の変動が大きくなっている. これは、雨期の進行により斜面深部が 飽和に達した、あるいは飽和領域自体が上昇したことにより深部への浸透が起こ りにくくなるためと推察され、長期間での降雨履歴の影響と捉えることができる.

また,短期間で見た場合,図 4.21 に示す 2008 年 5 月 24 日の GL-0.2m における 体積含水率の変化より,一降雨目の体積含水率の上昇よりも二降雨目の体積含水 率の上昇の方がわずかに大きいことがわかる.しかしながら,これは二降雨目の 強雨強度の方が強いため,降雨履歴の影響と断定することはできない.よって, 短い時間間隔での降雨履歴の影響については今後のさらなる計測データの蓄積が 望まれる.

以上より,手法 3-A,および手法 3-B による解析結果と実測値との比較を行い, その精度について検討を行った. さらに,タンクモデルにおける立ち上がりの値 の意味合い,浸透係数と降雨強度の関係性を考察し,降雨履歴の影響を検討して きた. これにより,本計測サイトのような粘性土地盤にゲリラ豪雨のような短時 間に降雨強度の強い雨が降ると,浸透係数が小さくなり,浅層部の体積含水率の 上昇につながると考えられる.また,上述した降雨履歴による影響が短い時間間 隔でも生じているとすれば,一降雨終了後に降る降雨時の方が浅層部の体積含水 率の上昇が大きくなり浅層崩壊につながりやすいと推察できる.これはゲリラ豪 雨並びに追い雨による浅層崩壊の危険性を示唆し,従来の降雨量のみに着目した 防災体制でなく降雨強度等にも着目した防災体制の構築が必要と言える.

次の章では,本研究に関する結論と得られた知見について述べ,最後に今後の 検討課題を示す.

第5章 まとめと結論

本章では,前章までに示した,拡張型マルチタンクモデルのパラメータ同定手法の結論を述べる.また,最後に今後の検討課題について言及し,今後の研究に 繋げるものとする.

5.1 まとめと結論

5.1.1 不 飽 和 領 域 タ ン ク の パ ラ メ ー タ 同 定 手 法

本研究では、これまでニューラルネットワークを用いて行われてきた不飽和領 域における拡張型マルチタンクモデルのパラメータ同定を, カルマンフィルタを 用いて行うことを試みた、その結果、ニューラルネットワークと比較して実測値 に近い解析結果を得ることができたが、カルマンフィルタやニューラルネットワ ークを用いてパラメータセットを絞り込むことで 誤差計算をする 際のパラメータ セットが制限されてしまい、その絞り込みの精度が解析結果に影響を与えてしま うという問題点も生じた.そこで,乱数を用いて最初のパラメータセット与え誤 差計算を行いその精度を検討した結果. 2.2.4 で述べた誤差計算の段階においてよ り誤差の少ない解析結果が得られた.誤差計算を行う前のパラメータセットを与 える方法としては手法 1. 手法 2. および手法 3 の他にも様々な方法は考えられる が. 誤差計算を用いて解析を行う手法では. おそらく手法 3 と同程度の精度の解 析結果しか得られないと推測される.なぜなら、実測値と手法3を用いた解析値 との間に見られる差はパラメータ同定手法に起因するものではなく、拡張型マル チタンクモデルのモデルそのものに起因するものと考えられるからである.すな わ ち , 現 状 の 拡 張 型 マ ル チ タ ン ク モ デ ル を 用 い て 不 飽 和 領 域 タ ン ク の パ ラ メ 一 タ を同定する場合は、本研究で用いた手法3で十分であると推察され、本研究の目 的であるパラメータ同定手法の改良による解析精度の向上は達成できたと考える.

5.1.2 拡張型マルチタンクモデルの適用範囲

拡張型マルチタンクモデルを用いて一降雨に対して一つのパラメータセット で雨水浸透挙動を表現する場合,体積含水率が一定状態から上昇し減少する現象 や不飽和状態から飽和に達して体積含水率が一定となるような現象を表現するの には限界があることが示された.そこで第4章で示した浸透係数を時間的に変化 させる手法 3-Bを用いることで,体積含水率が上昇,減少,または一定となる現 象をすべて拡張型マルチタンクモデルで表現可能となることが示された.

5.2 今後の課題

3.2.2 で示した通り、タンクの数を適切に設定することで体積含水率が大きく変化する挙動も表現可能となることから、今後はタンクの数やタンク高さの設定を 考慮し、その設定手法の構築も必要となる.

また、4.2 で述べた通り、従来の表層タンクのパラメータ同定は各パラメータ を時間的変化させず一定値として計算を行っても実際の水分挙動を十分な精度で 表現できていたため、本研究でもパラメータを一定値として計算した結果を用い たが、不飽和領域タンクの水分挙動をより正確に表現するためには表層タンクの パラメータ同定の精度をさらに追求する必要性があると考えられる.しかしなが ら、表層タンクのパラメータも時間的に変化させて計算させる場合、表層タンク には Upper Tank, Middle Tank, Lower Tank のそれぞれに浸透係数と流出係数があ り、これら6つの係数をどのように変化させて計算するかが課題となる.

さらに、ゲリラ豪雨の"短時間に高強度"という特徴からより短い時間間隔で の土壌水分量の変化ならびに浸透係数の変化を知ることが重要であると考えられ る.計測時間間隔を短くすることで、タンクモデル上での時間誤差の影響が減り、 解析精度の向上も望める.そのため、2010年6月にタイ・ナコンナヨックにおい て 3.1 で述べた計測と同様の計測を1分間隔で行い、今後の研究に繋げる予定で ある.

上述の課題に対する今後の研究により、本手法の利便性の向上ならびに拡張型 マルチタンクモデルの解析精度の向上が望める.計測データの蓄積と拡張型マル チタンクモデルの改良ならびに新しいモデルの構築により、今後、本研究で提案 したパラメータ同定手法を用いて斜面安定性評価の精度の向上につながると考え られる.

参考文献

- 1)Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S. and Mairiang, W.: Development of a low cost miniature tensiometer and its applications, Proceedings of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007), pp.475-480, 2007
- 2) 杉井俊夫, 竹下裕二: 不飽和地盤の浸透特性の評価方法, 土と基礎,55(9), pp.20-22, 2007
- 3)Nisigaki, M.: Research on Behavior of Groundwater and Its Application to Foundation Engineering, Dissertation of Kyoto University, 1979.
- 4)大津宏康, 堀田洋平, 高橋健二, 中村一樹, 新村知也: 熱帯性豪雨(スコール) に起因する斜面降雨浸透に関する原位置モニタリング, 地盤の環境・計測技術 に関するシンポジウム 2009 論文集, pp.1-6, 2009.
- 5)Ohtsu, H., Hotta,Y., Takahashi,K. and Nakamura, K.: A Study on Applicability of Modified Multi-Tank Model for Unsaturated Soil Slope, Proceedings of EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering 2008, pp.184-191, 2008.
- 6)Hotta Yohei: Evaluation of Unsaturated Soil Slope Stability against Heavy Rainfall Using Modified Multi-Tank Model System, Master's thesis of Kyoto University, 2009.
- 7) T. Suwanishwong, T., Ohtsu, H. and Takahashi, K.: Application of Kalman filter algorithm in Parameters identification of modified Multi Tank Model system, Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, pp.113-121, 2008.
- 8) 菅 原 正 巳: 水 文 学 講 座 流 出 解 析 法, 共 立 出 版, pp.206-211, 1972.
- 9)高橋健二,大津宏康,大西有三:タンクモデル法を用いた地下水位挙動を考慮 した斜面リスク評価の研究,地盤工学会誌,Vol.5,No.10, pp.15-17, 2003.
- 10) 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.
- 11)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.

本論文を作成するにあたり、お世話になった方々に感謝の意を表します.

まず,京都大学大学院工学研究科教授・大津宏康先生にはご多忙の中様々なア ドバイスをいただき,筆者なりに成長することができました.特にサイエンスだ けでなくエンジニアリングの立場から物事を考えることを教えていただき,また 論文を書く上での心得を細かく教授していただいたこと,大変感謝しております.

京都大学大学院地球環境学堂准教授・乾徹先生には本研究の副査として,お忙しい中筆者の論文を読んで頂き,細部にわたり的確な助言をして下さいましたことに深く感謝致します.

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には、学生との交流を積極的に図っていただき、常に新鮮で興味深い様々な知識を与えてくださりありがとう ございました.

京都大学大学院工学研究科助教授・稲積真哉先生には、ご多忙の中においても 研究生活の中で何不自由なく研究に打ち込める環境を作っていただき、大変感謝 いたします.

水文技術コンサルタント株式会社高橋健二氏には,初めての研究に戸惑う筆者 に対し,貴重なご意見をいただきました.ありがとうございました.

伊東宏美秘書には,研究生活のあらゆる面で助けていただきました.心からお 礼申し上げます.

大津研究室の諸先輩方ならびに同回生の方々のおかげで,非常に有意義な研究 生活を送ることができました.本当にありがとうございました.

最後に,本研究だけでなく,何不自由なく大学で勉強できるというすばらしい 環境を与えてくださり,生活面でも常に温かく見守ってくれた家族に心から感謝 いたします.

2008年	$lpha_{_U}$	$\alpha_{_M}$	$\alpha_{\scriptscriptstyle L}$	eta_U	β_{M}	eta_L
5月19日	0.554	0.110	0.474	0.580	0.160	0.217
5月22日	0.601	0.046	0.532	0.503	0.134	0.227
5月24日	0.511	0.052	0.337	0.625	0.158	0.320
5月30日	0.601	0.048	0.531	0.506	0.138	0.226
6月2日	0.601	0.049	0.529	0.508	0.143	0.225
6月3日	0.601	0.048	0.531	0.506	0.138	0.226
6月12日	0.511	0.052	0.337	0.625	0.158	0.320
7月30日	0.623	0.127	0.549	0.486	0.149	0.322
8月3日	0.623	0.124	0.552	0.481	0.141	0.325
8月21日	0.601	0.046	0.532	0.503	0.134	0.227
9月11日	0.132	0.332	0.292	0.894	0.309	0.001
9月15日	0.223	0.125	0.423	0.695	0.249	0.052
9月18日	 0.623	0.127	0.549	0.486	0.149	0.322
9月19日	0.594	0.253	0.633	0.537	0.304	0.142

表 3.1 表層タンクの最適パラメータ

・1時間降水量の年間発生回数

・全国約1300地点のアメダスより集計

・1000地点あたりの回数としている



(引用: 気象庁HP)

図 1.1 1時間降水量50 mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)
・1時間降水量の年間発生回数

・全国約1300地点のアメダスより集計

・1000地点あたりの回数としている



(引用: 気象庁HP)





図 2.1 拡張型マルチタンクモデル











図 2.4 カルマンフィルタ



図 2.5 マルチタンクモデル



図 2.6 ニューラルネットワーク

	水位の差の t=1~7の 合計	水位の差の t=1~7の中 の最大値	合計の偏差値 (A)	最大値の偏差値 (B)	偏差値の 和
パラメータ セット1	x_1	\mathcal{Y}_1	$\frac{x_1-\mu_s}{\sigma_s} \times 10+50$	$\frac{y_1 - \mu_m}{\sigma_m} \times 10 + 50$	$A_{1} + B_{1}$
パラメータ セット2	<i>x</i> ₂	y_2	$\frac{x_2 - \mu_s}{\sigma_s} \times 10 + 50$	$\frac{y_2 - \mu_m}{\sigma_m} \times 10 + 50$	$A_{2} + B_{2}$
	•	•••	•	•••	•••
パラメータ セットi	X _i	${\mathcal{Y}}_i$	$\frac{x_i - \mu_s}{\sigma_s} \times 10 + 50$	$\frac{y_i - \mu_m}{\sigma_m} \times 10 + 50$	$A_i + B_i$
	•	•••	:		•••
平均	μ_{s}	μ_{m}			
標準偏差	$\sigma_{_s}$	$\sigma_{_m}$			

偏差値の和が最小となる時の

パラメータセットが最適パラメータ

図 2.7 誤差計算



図 3.1 計測斜面全体図(タイ・ナコンナヨック)



図 3.2 斜面断面図(タイ・ナコンナヨック)

20 18 16 14 [mm/10min] 副10 画 図 図 8 6 4 2 0 5A19A 5A19A 17:30~18:40 6A2A 2: 10-3:20 6,<u>8</u>12, 8:00~9:10 5A22A 5月24日 21:20-22:30 57-16:00 5月30日 14:50~16:00 6月3日 18:20~19:30 18:40~19:50

(2008年)

(横軸は10分間隔)

図 3.3 計算対象降雨

20 18 16 14 6 4 2 0 9月18日 22:20-23:30 9月19日 22:30-23:40 治計· 7月30日 9月11日 8月3日 9:50~11:00 9F15E Y 8月21日 8月21日 20.00~21:10 15.10~16:20 21 . 40~22 . 50 20:40~21.50

(横軸は10分間隔)

(2008年)

义 3.4 計算対象降雨



図 3.5 降雨重心

































図 3.20 計測深度別体積含水率の比較



図 3.21 計測深度別体積含水率の比較



図 3.22 計測深度別体積含水率の比較



図 3.23 計測深度別体積含水率の比較



図 3.24 計測深度別体積含水率の比較



図 3.25 計測深度別体積含水率の比較



図 3.26 計測深度別体積含水率の比較



図 3.27 計測深度別体積含水率の比較



図 3.28 計測深度別体積含水率の比較


図 3.29 計測深度別体積含水率の比較







図 3.31 阪和道の概要



図 3.32 解析対象降雨



図 3.33 体積含水率の比較



図 3.34 体積含水率の比較

斜面内地下水位変動モデルの算定



図 3.35 阪和道の斜面へのタンクモデル適用

各タンクの係数 TANK1 ----α 11 初期水高: H₀₁= 0 mm 流出1:α11= 0.500 α 11 1段タンク 水位1:H_= 10 mm 浸透孔:β 1 = 0.600 β1 中間タンク 初期水高:H_{m01}= mi 10 mm 水位m1:H_mt= з TANK1 --浸透孔:β_mi= 0.600 mm α_{mt} 產出率:0_{m1}= 0.2 0. 2 m 带水層厚= 0.2 流出高:H_{ma1}= 2 流出孔:α_m= 0.0 n2 初期水高: H_{n02}= 6 mm 水位n2:H_{m2}= 12 TANK1 * 浸透孔:β "ε= 0.900 mm a mg 産出率:θ_{m2}= 0.12 0.3 m 带水層厚= ß 0.5 流出高:H_{mu 2}= 2 流出孔:α_{m2}= 0.0 п8 初期水高:H_{m03}= 1 mm 水位m38:H_{m8}= 1 TANK1 -浸透孔:β_{ma}= α "" 0.600 mm 産出率:0_{m8}= 0.1 0.3 m 带水層厚= 0.8 流出高: H_{mu 3}= 2 流出孔:α_{m8}= 0.0 初期水高: H_{n04}= n4 1.7 mm 水位mal:H_{mal}= 1.5 mm TANK1 -浸透孔:β_{m4}= 0. 150 mm α 産出率:0_{m4}= 0.12 带水層厚= 0.2 m 1.0 流出高:H_{ma4}= 2 流出孔:α_{m+}= 0.0 65 mm п\$ 初期水高: H_{m05} = 水位m5:H_{m5}= 12 mm TANK1 -浸透孔:β_ms= 0.001 mm α π5 產出率:0_{m5}= 0.16 帯水層厚 = 流出高: H_{mu 5} = 0.5 m 10 B 1.5 流出孔:α_{ms}= 0.002

図 3.36 5段のタンクモデル































図 4.21 体積含水率・浸透量の時間変化



図 4.22 浸透係数変化なし

上部タンク

からの浸透量

