

斜面崩壊土砂の運動と堆積に関する研究

2021 年 1 月

土田 章仁

目 次

	頁
第 1 章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	5
参考文献	8
第 2 章 斜面崩壊がもたらす災害の現状	10
2.1 斜面崩壊による土砂災害の現状と取り組み	10
2.1.1 近年の土砂災害の現状	10
2.1.2 がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊の特徴	10
2.1.3 土砂災害防止法による土砂災害警戒区域の設定	13
2.1.4 鳥取県内における道路の被災事例	17
2.2 災害事例に基づく崩壊土砂の到達距離	19
2.2.1 調査データ	19
2.2.2 崩壊土砂の到達距離	20
2.3 まとめ	22
参考文献	25
第 3 章 既往の知見と研究	26
3.1 過去の崩壊事例の収集と整理による方法	26
3.2 力学的な計算に基づく方法	30
3.2.1 質点の運動としてのモデル化	30
3.2.2 土砂を剛体の集合体と捉えた数値解析法	41
3.3 まとめ	45
参考文献	47

第 4 章 崩壊土砂の到達域に関する室内模型実験と 質点モデルによる表現	49
4.1 乾燥砂の流下実験	51
4.1.1 室内模型実験の概要	51
4.1.2 実験に用いた砂試料	52
4.1.3 平板斜面実験	53
4.1.4 定幅流路実験	61
4.2 Fringe 投影による堆積砂の形状把握	66
4.2.1 実験の概要	66
4.2.2 堆積砂の表面形状計測および重心位置の算出	68
4.2.3 斜面傾斜角度と堆積域との関係について	69
4.3 質点モデルによる土塊同士の衝突・乗り越え運動の表現	74
4.3.1 モデル 1	76
4.3.2 モデル 2 (衝突モデル)	77
4.3.3 モデル 3 (乗り越えモデル)	79
4.3.4 室内模型実験と計算値の比較	81
4.3.5 考 察	88
4.4 まとめ	91
参考文献	95
第 5 章 個別要素法による崩壊土砂の流下運動の解析	96
5.1 解析に用いた個別要素法	97
5.1.1 個別要素法の概要	97
5.1.2 要素形状の選定	101
5.1.3 楕円要素の接触判定	102
5.2 個別要素法による流下シミュレーション	103
5.2.1 解析に用いる物性値	103
5.2.2 解析条件	104
5.2.3 斜面を流下する要素の運動と堆積形状に関する解析結果	109

	頁
5.3 粒状体の重心位置の追跡とエネルギー損失	120
5.4 まとめ	125
参考文献	128
第 6 章 質点を用いた崩壊土砂の運動のモデル化と考察	129
6.1 重心位置の軌跡を辿る質点の計算を行うための計算法	130
6.2 計算に用いた粒状体の重心位置の運動経路	135
6.3 個別要素法による解析結果と計算値の比較	136
6.4 室内模型実験結果と計算値の比較	139
6.5 粒状体の運動エネルギー損失の摩擦係数による表現	142
6.6 考 察	150
6.7 まとめ	152
参考文献	155
第 7 章 結 論	156
7.1 各章における結論	156
7.2 まとめ	161
7.3 今後の課題	162
付 録	165
付録 A Fringe 投影による堆積砂の形状把握	166
付録 B 楕円形要素の接触判定	186
謝 辞	196

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国の国土面積の多くは山地や丘陵地であり、山間部の住宅地では、その背後に急傾斜地が迫っていることが多い。また、産業の発展とともに山間部にも多くの主要道路が整備されてきた。このような道路は、山間部を縫うように建設されており、多数の法面を有している。さらに、我が国には、脆弱な地盤が広く分布しており、かつ、地盤災害の誘因となる降雨や地震が多い。このため、道路の近傍の地山や住宅背後の急傾斜地などでは、斜面崩壊、土石流、落石および岩盤崩壊などによる災害が多数発生しており、危険な箇所での生活を余儀なくされる住民も少なくない。我々、技術者は、このような土砂災害から人命や資産を守る使命があることは言うまでもない。

なお、本研究では、参考文献¹⁾と同じく、斜面破壊のうち、地すべりに比較して小規模で、急傾斜部分で比較的急速に斜面が破壊するものを斜面崩壊と呼んでいる。類似語として、がけ崩れ、山崩れ、土砂崩壊が挙げられている¹⁾。また、土砂災害は、大雨や地震などを引き金とした、土石流、地すべり、がけ崩れなどによる土砂の移動によって人命や財産が脅かされる自然災害とされており²⁾、土砂災害の種類を示すとき、斜面崩壊による自然災害は、がけ崩れと呼ばれている。このため、本研究でも土砂災害の種類を示す際には、がけ崩れという用語を用いている。

さて、上述したように、一般に土砂災害は、土石流、地すべり、がけ崩れなどに大別されているが、特にがけ崩れの発生度合いが高いようである^{3) 4)}。がけ崩れによる土砂災害は、土石流や地すべりに比べると、災害発生時の被害規模は小さいものの、被災状況によっては人命、財産等が失われることに変わりない。さらに、山間部の道路では、がけ崩れによる土砂災害のために道路が通行不能となり、集落が孤立することも少なくない。従来、斜面崩壊に対しては、崩壊の恐れのある箇所の安定性を向上させる発生源対策および崩壊土砂から道路などの施設を守る防護対策など、いわゆるハード対策に重点を置いた防災対策が行われる

ことが多かった。そして、斜面の防災対策に関する研究では、発生源対策への関心が高かったように思われる。例えば、斜面の安定性を評価するための力学的なアプローチとして、古くは極限平衡法を用いた斜面安定解析手法の開発や改良⁵⁾、さらには、斜面崩壊の主たる要因である降雨時の斜面内の地下水位変動を考慮するために FEM による飽和-不飽和浸透流解析を適用した研究⁶⁾などが挙げられる。また、斜面の安定性を検討する際に必要となる地山のせん断定数を逆解析によって推定する研究⁷⁾も行われてきた。斜面安定対策工の設計・施工技術についてもアンカー工や地山補強工などの研究⁸⁾や開発が進み、多くの現場で施工されており、対策効果が認められている。一方で、豪雨時にいったいどの斜面が危険なのか？どの程度の降雨量で崩壊に至るのか？を予知・予測しようとする研究⁹⁾も行われてきた。例えば、コンピューターの計算能力の向上や GIS などの地理空間情報の取得とシステムの普及に伴って、現在では、土壌雨量指数を用いた土砂災害警戒情報システム¹⁰⁾が実際に運用されており、斜面崩壊の予知とそれに基づく避難によって被害の軽減がはかられている。このように、発生源対策、崩壊箇所および崩壊時期の予測に関する研究と技術開発が精力的に進められてきており、これらの成果は斜面の防災対策に大きく貢献している。

しかし、近年、これまでに経験したことがないような豪雨が多発し、これに伴ってがけ崩れによる土砂災害時の被災状況も拡大・多様化するようになってきた。また、地震も多発しており、それに伴う斜面崩壊も頻発している。2018年の9月に北海道厚真町で地震に伴うがけ崩れによる土砂災害が発生したことや、同年7月には西日本の各地で豪雨に伴う土砂災害が起こったことは記憶に新しい。したがって、豪雨や地震などの様々な誘因によって引き起こされる土砂災害に対して、早急に防災対策を講じることで、地域の産業や文化はもちろん、国民の安心と安全を守ることが、強く求められている¹¹⁾。しかし、現在、我が国の財政はひっ迫しており、さらに、団塊世代の引退や少子化に伴う人材不足も深刻になってきている。これに加えて、我が国においては土砂災害の発生が予想される危険個所が非常に多いことから、防災施設工事を進めていくためには膨大な時間と費用が必要となる。したがって、土砂災害から人

命や財産を守るためには、土砂災害の防止工事等のハード対策とともに、ソフト面の対策の推進が重要となっている¹²⁾。

土砂災害に関するソフト対策では、危険性のある区域を設定しハザードマップを作成することや警戒避難体制の整備や危険箇所への新規住宅等の立地制限、地域住民の防災意識の向上等が必要となる。がけ崩れによる土砂災害に対して、このようなソフト面での防災対策を進めていく上では、斜面崩壊時の崩壊土砂の到達域の推定を行い、危険区域（崩壊土砂の到達範囲）を予測する必要がある。しかし、従来の斜面の安定性評価や崩壊箇所・崩壊時期の予測に関する技術では、崩壊土砂の到達範囲に関する情報は得られない。また、ソフト対策の推進においては、斜面崩壊時の危険区域の設定に関する情報公開が必要となるが、現時点の危険区域の評価は、地形判読や既往災害事例の統計解析結果などに基づいた手法が多く、特に被害範囲などに関しては具体性や力学的根拠が乏しい。令和2年3月の「近年の土砂災害における課題等を踏まえた土砂災害対策のあり方について」の社会資本整備審議会の答申¹³⁾では、土砂災害警戒区域等の設定に対して実施すべき対策として、土砂災害や土砂災害警戒区域等に関する科学的知見の蓄積と指定基準等の技術的改良が示されており、土砂災害に対する予測技術の向上が求められている。

以上のように、現在の我が国では、財政および人的資源の制約のある中で、土砂災害への防災対策を効果的、効率的そして情報を公開しながら推進していく必要がある。そして、斜面崩壊に関しては、崩壊土砂の到達距離の予測技術の向上が期待されていると考えられる。

1.2 本研究の目的

斜面崩壊時の土砂の到達距離に関する既往の研究を大別すると、過去の災害時などの崩壊事例データを統計解析した結果を用いて予測する手法^{14) 15)}と崩壊土砂の運動を力学的にモデル化し、これを数値計算によって解く手法がある。後者の数値計算による手法では、崩壊土砂の運動をモデル化する際、土塊全体を1つの質点か剛体としてとらえる^{16) 17)}

か、あるいは、剛体の集合体として取り扱われている¹⁸⁾ことが多い。

崩壊事例データの統計解析による手法は、参照した事例データの精度に解析結果が影響されるため、適用範囲について注意が必要である。また、地形や地質が異なるデータを用いている場合などでは、推定された到達域の結果の解釈が難しくなること、および、この手法では流下経路上のエネルギー推定が難しいなどの問題がある。

剛体の集合体による数値解析では、個別要素法などが考えられるが、解析時のパラメータの設定が難しく、また、計算自体も煩雑である。現在では、斜面を流下する粒状体の運動などについて定性的には表現が可能になっていると考えられるが、多数の現場に対応しなければならない実務においては未だに使い難いのが現状である。さらに、個別要素法などの数値解析では、実務者の解析に関する能力・判断等の差異によって解析結果がばらつくことが課題となる。有限要素法（FEM）による静的な応力 - 変形解析でさえ、十分に活用されていない現状を踏まえると、実務においては理論構成がやや複雑な数値解析手法はハードルが高く、普及が困難であると言わざるを得ない。

質点モデルによる解析では、必要とするパラメータの数も個別要素法などに比べて少なく、簡便に解析が進められる利点がある。実務では、多くの現場に対応でき、かつ、検討に要する費用が安価であることが求められる。したがって、実務的には、質点モデルのような現象を単純化したモデルであったとしても理論構成やパラメータ設定が容易な予測手法の開発が望ましいと考えられる。

質点モデルによる予測手法では、次の3つの課題があると考えられる。

1 つ目は質点の運動に対する抵抗力の評価である。これについては、既往の研究において既に議論されている。運動に対する抵抗力として固体摩擦と流体摩擦が提案¹⁹⁾されており、その運動方程式も示されている。

2 つ目はモデルに用いるパラメータの設定である。解析モデルにおけるパラメータは、そのモデル化に依存すると考えられることから、実際の災害データを多く収集し、提案されたモデル毎に同定を行っていくことが考えられる。

最後の 3 つ目の課題は、崩壊土砂の斜面法尻部における堆積（静止）

を含む運動状態の変化が到達域（到達距離や堆積形状）に及ぼす影響の評価である。例えば、土田ら²⁰⁾の報告では、2015年に発生した広島豪雨災害において、3度の崩壊が連続して発生し、先発の崩壊によって発生した斜面法尻部の地形変化のため、後発の崩壊による土砂は運動方向を大きく変えた可能性が指摘されている。このことは、崩壊土砂の到達域は、斜面法尻部の初期地形だけでなく、法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程にも影響を受けていることを意味している。特に、斜面勾配が急で、かつ、斜面法尻部で勾配が急変するような場合には、到達域に及ぼすその影響が大きいことが考えられる。しかし、質点モデルでは、斜面法尻部における土砂同士の衝突や堆積などの影響を表現する方法が無いのが現状である。既往の研究¹⁹⁾では、斜面および斜面下方の原地形をそのまま質点の移動経路として設定しており、崩壊土砂の斜面法尻部における運動状態の変化は考慮されていない。したがって、崩壊土砂の到達域予測では、斜面法尻部における土砂同士の衝突や堆積などがもたらす崩壊土砂の運動状態の変化が堆積域に及ぼす影響の評価が重要であると考えられる。

本研究の目的は、斜面崩壊を対象として、質点モデルによる崩壊土砂の到達距離予測手法の開発に向けて、斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動状態の変化が崩壊土砂の堆積域、堆積形状に与える影響を検討し、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について示すことである。

1.3 本論文の構成

本研究では、斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動とその結果として生じる運動経路の変化に着目し、乾燥砂を用いた室内模型実験と個別要素解析（DEM）により、斜面を流下する粒状体の堆積域、堆積形状および遷緩点における重心経路の情報、運動エネルギーの変化に関して検討した。斜面傾斜角度などの因子が堆積形状に与える影響を示すとともに、質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予

測では、斜面の原形状を質点の滑動経路とするのではなく、遷緩点付近における粒状体重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要があることを示している。

本論文の構成と各章の概要を以下に示す。

第1章では、まず、土砂災害の内、斜面災害に関する従来の研究、近年の土砂災害の状況および今後の防災対策の方向性について概説した。そして、斜面防災における崩壊土砂の到達範囲の予測の必要性について述べた後、実務で期待される質点モデルによる予測手法における課題を示した。また、本研究の目的を示し、本論文の全体構成を概説した。

第2章では、近年の土砂災害の現状と災害への取り組みについて概説するとともに、土砂災害の中でも特に発生の度合いが高い、がけ崩れによる土砂災害時の崩壊土砂の到達域の特徴について、既往の研究成果を用いて示した。

第3章では、崩壊土砂の到達域予測に関して、これまでに得られている知見を整理した。既存資料に基づく予測手法、力学的な計算結果に基づく予測手法に関する既往の研究成果を紹介し、これらの予測手法の課題を示した。

第4章では、まず、乾燥した砂試料を用いた室内模型実験により、砂試料の体積、設置高さおよび斜面傾斜角度が砂の到達域に与える影響について検討した。また、質点による到達域の予測モデルを考えるにあたっては、土砂の堆積形状とその重心位置についても考える必要がある。このため、室内模型実験時の堆積砂への **Fringe** 画像投影とその画像解析によって、流下方向の堆積形状と重心位置を求めた。これらの実験結果から、流下させた砂試料の量、下部平面から試料箱の下端までの高さおよび斜面傾斜角度の変化が、水平面に堆積した砂試料の堆積形状、流下方向の到達距離および重心位置に及ぼす影響について検討した。

続いて、崩壊土砂の到達域は、斜面法尻部の初期地形だけでなく、法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程にも影響を受けていると考えられることから、滑動による質点モデルを用いて、遷緩点付近における崩壊土砂の運動状態の変化が到達域に及ぼす影響について検討を行った。斜面法尻部での土砂堆積にともなう影響を、勾配急変部における土

砂同士の衝突運動と土砂の乗り越え運動の2つの単純な運動モードでの表現を試みた。そして、記述した計算モデルの計算結果と室内模型実験結果との比較を示し、土砂の衝突あるいは乗り越え運動の到達域への影響を検討した。これらの結果から、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察を行った。この考察から、到達域の推定では、崩壊土砂の運動とその結果として生じる崩壊土砂の運動経路の変化にも留意が必要であることを示した。

第5章では、質点モデルによる崩壊土砂の到達距離の予測では、崩壊土砂が斜面を流下し、堆積に至るまでの崩壊土砂の運動エネルギーおよび重心位置の運動経路に関する情報が必要と考えられることから、室内模型実験と同寸法で、楕円形要素を用いたDEMによる2次元の流下シミュレーションを行い、斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路とエネルギーの変化について検討した。その結果、粒状体の重心位置の運動経路は、遷緩点付近で凹状の形状を示し、斜面の原形状に沿った経路とはならないことがわかった。この事実を立てば、質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測解析では、粒状体の重心位置の運動経路を表現できる新たな計算方法が必要と考えた。

このことから、第6章では、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とする計算モデルを用いて、DEM結果および室内模型実験結果の斜面傾斜角度と到達距離との関係の再現を試みた。質点の滑動経路には、DEM結果の粒状体の重心位置の運動経路を用いた。このモデルの計算値とDEMによる粒状体堆積後の重心位置および模型実験の堆積砂の重心位置を比較した。検討結果から、質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測では、遷緩点付近における粒状体重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要があることを示した。

第7章では、本研究で得られた結論と今後の課題についてまとめた。

【参考文献】

- 1) (社) 土質工学会：土質工学用語辞典，130p., 1990.
- 2) 国土交通省 関東地方整備局：土砂災害について，www.ktr.mlit.go.jp/river/bousai/river_bousai00000078.html，(参照 2020.12.10).
- 3) 水管理・国土保全局 砂防部保全課 土砂災害対策室：令和元年の土砂災害，国土交通省，2020.3.25，www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/rldosha/rldoshasagainogaiyou.pdf，(参照 2020.12.10).
- 4) 岡本敦，富田陽子，水野正樹，林真一郎，西本晴男，石井靖雄，千葉伸一：土砂災害警戒避難に関するデータ解析共同研究，国土技術政策総合研究所資料，No.682，2012.
- 5) 望月秋利，三笠正人，勝田守文：2つの斜面安定計算法の提案，土木学会論文集，No.370/III-5，pp.261-270，1986.
- 6) 鵜飼恵三，蔡 飛，若井明彦，阪上最一：集水ボーリング工の効果に関する定量的評価手法の提案，地すべり，Vol.35，No.3，pp.1-7，1998.
- 7) 山上拓男，植田康宏：地すべり地強度定数の新しい逆算法 (I) —基本概念—，地すべり，Vol.21，No.2，pp.16-21，1984.
- 8) 山上拓男，山川 治：斜面安定工におけるアンカー力の新しい算定法，土と基礎，Vol.38，No.5，pp.51-56，1990.
- 9) 倉本和正，鉄賀博己，東 寛和，荒川雅生，中山弘隆，古川浩平：RBFネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究，土木学会論文集，Vol.672/VI-50，pp.117-132，2001.
- 10) 国土交通省河川局砂防部，気象庁予報部，国土交通省国土技術政策総合研究所：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)，2005.
- 11) 土田孝：2018年7月の西日本豪雨による土砂災害の特徴，地盤工学会誌，Vol.67，No.7，Ser.No.738，pp.1-3，2019.
- 12) (社) 全国治水砂防協会：土砂災害防止法令の解説—土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律，pp.1-22，2003.

- 13) 社会資本整備審議会 河川分科会 土砂災害防止対策小委員会：近年の土砂災害における課題等を踏まえた土砂災害対策のあり方について（答申），国土交通省，2020.3.31, www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001342249.pdf, (参照 2020.12.10).
- 14) 反町雄二：崩壊土砂の流下範囲，土木技術資料，Vol.19, No.10, pp.37-42, 1977.
- 15) 大久保駿，吉松弘行，綱木亮介：資料解析によるがけ崩れの崩土の到達距離の予測，地すべり，Vo.32, No.2, pp.26-31, 1995.
- 16) 奥田節夫：斜面崩壊にともなう物質の移動過程，地質学論集，No.28, pp.97-106, 1986.
- 17) 森脇寛：円弧斜面上を滑べる崩壊土塊の運動について，新砂防，Vol.36, No.3, pp.10-16, 1983.
- 18) 武藏由育，山崎美穂，水山高久，小杉賢一郎：崩壊土砂の運動のシミュレーション手法に関する研究，砂防学会誌，Vol.64, No.3, pp.37-45, 2011.
- 19) 芦田和男，江頭進治，神矢弘：斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究，京大防災研究所年報，No.27, B-2, pp.331-340, 1984.
- 20) 土田孝，森脇武夫，熊本直樹，一井康二，加納誠二，中井真司：2014年広島豪雨災害において土石流が発生した溪流の状況と被害に関する調査，地盤工学ジャーナル，Vol.11, No.1, pp.33-52, 2016.

第2章 斜面崩壊がもたらす災害の現状

本章では、近年の土砂災害の現状と災害への取り組みについて概観するとともに、土砂災害の中でも特に発生の度合いが高い、がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊の特徴を示し、これらの状況を認識する。そして、斜面崩壊に対する防災対策を進めていく上で期待される崩壊土砂の到達範囲の予測技術について記述する。

2.1 斜面崩壊による土砂災害の現状と取り組み

2.1.1 近年の土砂災害の現状

図2-1は、平成21年～令和元年の過去11年間の土砂災害の発生件数を示したものである¹⁾。図に示すように近年の土砂災害の発生件数は、非常に多い。平成30年の発生件数は3,459件であり、これは年間の過去最多件数を記録した平成16年の2,537件を上回り、集計を開始した昭和57年以降では最多件数である。また、令和元年の発生件数1,996件であり、これは昭和57年以降では4番目に多い件数である。特に近年では、大雨や地震が多発しており、これに伴って多くの土砂災害が発生している。

降雨や地震にともなう突発的な斜面崩壊では、崩壊が発生してからの保全対象物までの土砂の到達時間が非常に短い。したがって、このような状況下で防災施設の設置（ハード対策）、警戒区域や避難経路の設定（ソフト対策）を行うためには、斜面崩壊の発生箇所や発生時刻の予測だけでなく、崩壊土砂の到達域の予測技術の確立が重要であると考えられる。

2.1.2 がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊の特徴

一般に土砂災害は、土石流、地すべり、がけ崩れなどに大別されている。図2-1を見ると、これらの内、特にがけ崩れの発生件数が多いことがわかる。なお、がけ崩れが土砂災害として扱われるのは、がけ下に民

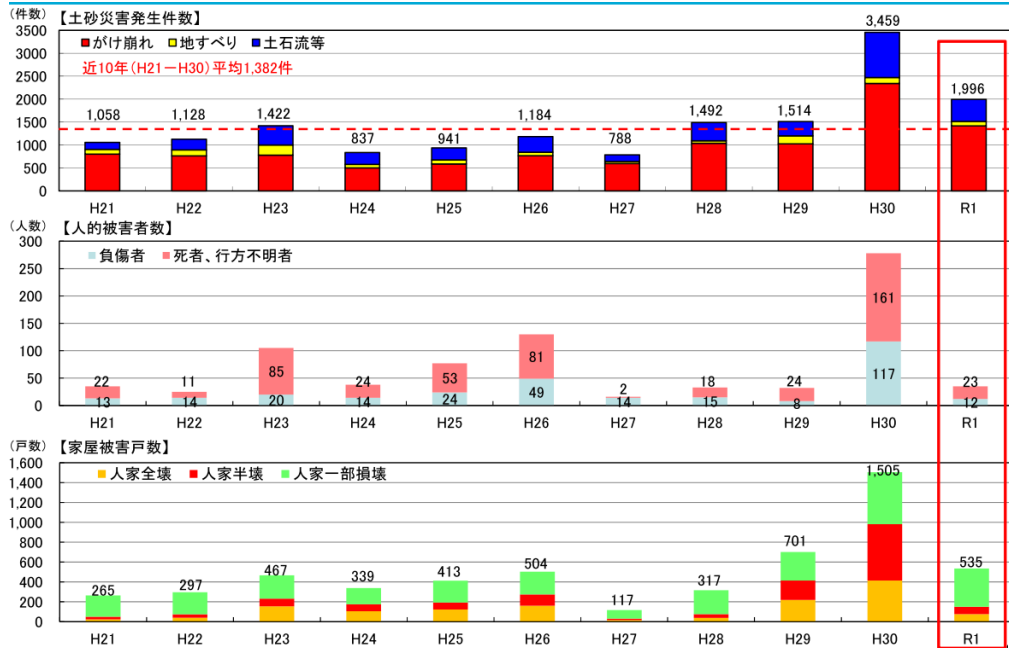


図 2-1 土砂災害の発生件数と人的・家屋被害（平成 21～令和元年）¹⁾

家や道路など被害を受けるべきものがある場合に限られ、一般の山地崩壊とは区別されることが多い。がけ崩れによる土砂災害は、土石流や地すべりに比べると、災害発生時の被害規模は小さいものの、被災状況によっては人命、財産等が失われることになり変わらない。また、山間部ではがけ崩れによる土砂災害のために道路が通行不能となり、集落が孤立することも少なくない。

がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊の特徴として、次のようなことが挙げられる。

1つ目は、斜面崩壊時のすべり面の深さが浅い、表層崩壊である場合が多いことである。図2-2は、崩壊の規模と土砂量や対策種類などとの関係を示したものである²⁾。図に示すように、表層崩壊では、土砂量が 100m^3 ～数千 m^3 程度と小さく、到達距離は深層崩壊に比べると短く、発生頻度が高い。一方、深層崩壊は土砂量が約1万 m^3 ～数億 m^3 までと、土砂量の範囲が非常に大きい。土砂量が大きいほど到達距離も大きくなる

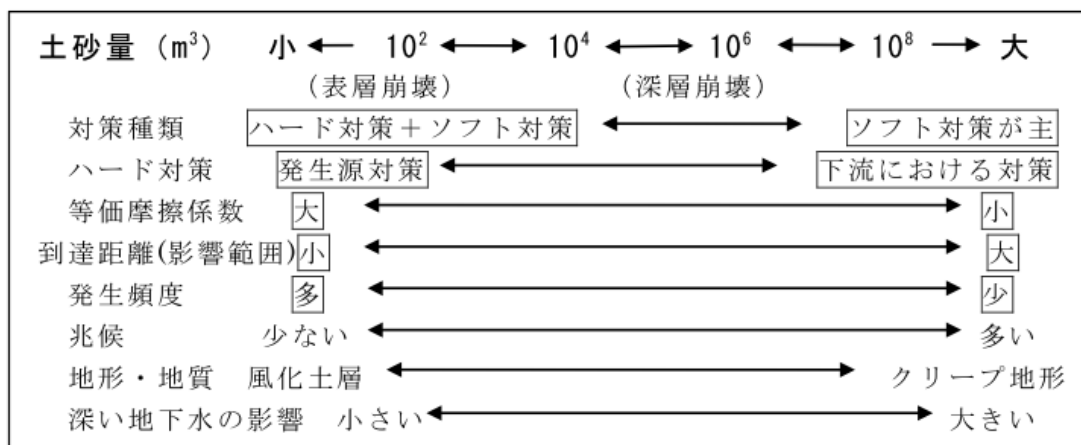


図 2-2 斜面崩壊の規模による各種特徴²⁾

が、その発生頻度は低い。このような傾向の違いは、ハード対策やソフト対策を検討する上で重要である。すなわち、対策の面から見ると、表層崩壊では発生源対策や防護対策などのハード対策も有効であることから、ハード対策とソフト対策を併せた対策を講じることが可能となるが、大規模な深層崩壊についてはハード対策が困難であり、ソフト対策が主となる。

2つ目は、斜面崩壊時の土塊の動きが突発的で、その移動速度が大きいため、崩壊が発生してからの保全対象物までの崩壊土砂の到達時間が非常に短いことである。土砂災害に関する予測技術の内、斜面崩壊の発生場所や発生時刻については、土壌雨量指数などを用いた大雨警報・注意報などのように既に実用化されているものもある。しかしながら、崩壊の発生場所やその時刻の予測精度は、未だ十分とは言い難い。したがって、このような状況下でハード対策、ソフト対策を行うためには、斜面崩壊の発生時刻の予測だけではなく、崩壊が発生した場合の土砂の到達域の予測モデルを用いて、被害範囲の予測や対策施設の設計を行うことが必要となる。

3つ目は、がけ崩れによる土砂災害では、保全対象物が斜面下方の住宅や道路であり、斜面法尻部で勾配が急変している箇所が多いことである。例えば、高梨ら³⁾によれば、国土技術政策総合研究所で整理している昭和56年～平成6年のがけ崩れによる土砂災害の実態データから、全

データ数の約8割が斜面下方の土地形状が平坦地であることを報告している。また、後述するように、「土砂災害防止法」⁴⁾では斜面の傾斜度30°以上を急傾斜地としているが、保全対象物の背後には50°、60°といった勾配が急な斜面が数多く存在しているのが実態であろう。道路のり面も同様である。すなわち、がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊では、斜面勾配が急で、かつ、斜面法尻部で勾配が急変するような場合が多い。このため、崩壊土砂の到達域の予測にあたっては、崩壊土砂の運動経路やエネルギー損失の評価が予測精度に与える影響が大きいことが考えられる。

2.1.3 土砂災害防止法による土砂災害警戒区域の設定

周知のように、我が国では、全国各地で毎年のように土砂災害が発生しており、住民の暮らしに大きな影響を与えている。さらに、新たな宅地開発が進み、それに伴って土砂災害の発生する恐れのある危険な箇所が年々増加し続けている。このような危険な箇所の全てを土砂災害防止工事等によって安全な状態にして行こうとすると、膨大な時間と費用が必要となる。したがって、このような土砂災害から人命や財産を守るためには、土砂災害の防止工事等のハード対策とともに、危険性のある区域を明らかにし、その中で警戒避難体制の整備や危険箇所への新規住宅等の立地制限等のソフト対策を充実させていくことが大切となる。

このような背景と平成11年6月29日に広島市、呉市を襲った6.29広島災害とをきっかけに、平成12年5月8日に「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」（以下、「土砂災害防止法」と称する）が公布され、翌年の平成13年4月1日から施行された。土砂災害対策に関する法律には、「砂防法」、「地すべり等防止法」および「急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律」のいわゆる「砂防三法」が既に施行されていたが、これらは、工事を主とするハード対策が中心の法律である。一方の「土砂災害防止法」には、工事に関する規制はなく、土砂災害対策に関するソフト対策に重点をおいた法律である。すなわち、がけ崩れなどの土砂災害の発生が予想される箇所では、土砂災害の防止

第2章 斜面崩壊がもたらす災害の現状

工事等のいわゆるハード対策だけでなく、住民の命を守るための警戒指南措置の充実、建築物の安全性の強化、開発行為の制限などのいわゆるソフト対策を併せて展開していくことが必要であることが示されたと言える。しかし、施行後に発生した災害において、土砂災害の危険性等の周知が徹底されていない、防災情報の住民へ伝達方法の不備および避難勧告・避難指示等の発令・解除のタイミングや責任の所在が不明確などの課題が出てきた。このような課題を解決すべく、図2-3に示すような数度の改正（平成17年7月、平成23年5月、平成27年1月、平成29年6月）を経て現在に至っている⁵⁾。

「土砂災害防止法」で対象となる土砂災害は、急傾斜地の崩壊（がけ崩れ）、土石流および地すべりである。図2-4に示すように、都道府県によって基礎調査が行われ、土砂災害警戒区域（通称：イエローゾーン）および土砂災害特別警戒区域（通称：レッドゾーン）が設定され、指定された区域は都道府県の公報に公開される。

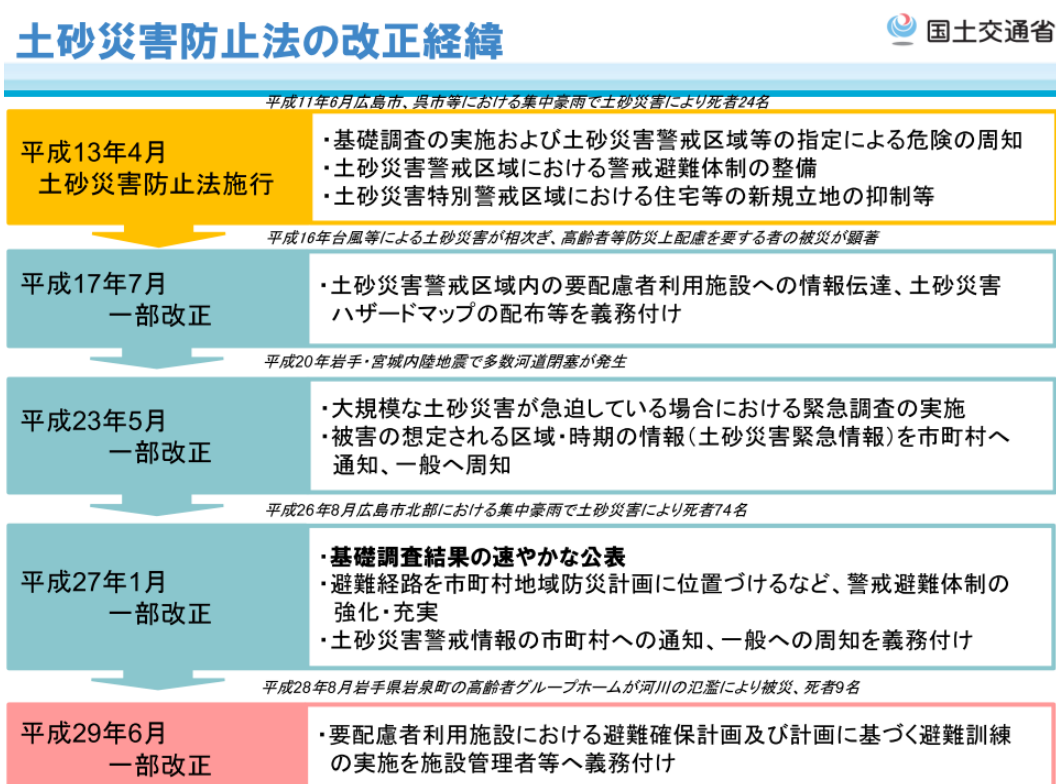


図 2-3 土砂災害防止法の改正経緯⁵⁾

急傾斜地の崩壊（がけ崩れ）を対象とする場合のイエローゾーンは、次のような条件で設定される（図2-5）。

- イ) 傾斜度が30度以上で高さが5m以上の区域
- ロ) 急傾斜地の上端から水平距離が10m以内の区域
- ハ) 急傾斜地の下端から急傾斜地高さの2倍以内の区域
(50mを超える場合は50m以内の区域)

(社) 全国治水砂防協会：土砂災害防止法令の解説⁶⁾では、表層崩壊に起因する過去のがけ崩れによる土砂災害時のデータによれば、以下の結果が得られているとされており、上記のハ)はこの結果から設定されているようである。

- ① 崩土の到達距離 (L) を急傾斜地の高さ (H) で除した値は、全体の99%が2未満となっている。
- ② 崩土の到達距離 (L) は、全体の99%が50m未満となっている。

令和2年2月29日時点で指定されている急傾斜地の崩壊（がけ崩れ）の土砂災害警戒区域数が403,649箇所（内、土砂災害特別警戒区域は344,322箇所）と膨大な数であることを踏まえると、この方法は急傾斜地の高さ (H) のみをパラメータとした簡便な方法であり、実務的ではあると考えられる。しかし、斜面崩壊にともなう崩壊土砂の到達距離は、斜面の高さだけでなく、斜面の勾配や横断的な形状、崩壊土砂量などによって異なると考えられる。このため、「土砂災害防止法」で対象となる急傾斜地以外の例えば道路や鉄道などの防災対策においては、斜面の高さだけでなく、斜面の勾配や横断的な形状なども考慮できる簡便な到達距離の予測手法の適用が望ましいと考える。

土砂災害防止法の概要

土砂災害防止法[※]とは、土砂災害から国民の生命を守るため、土砂災害のおそれのある区域について危険の周知、警戒避難態勢の整備、住宅等の新規立地の抑制、既存住宅の移転促進等のソフト対策を推進しようとするものです。
※正式名称「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」

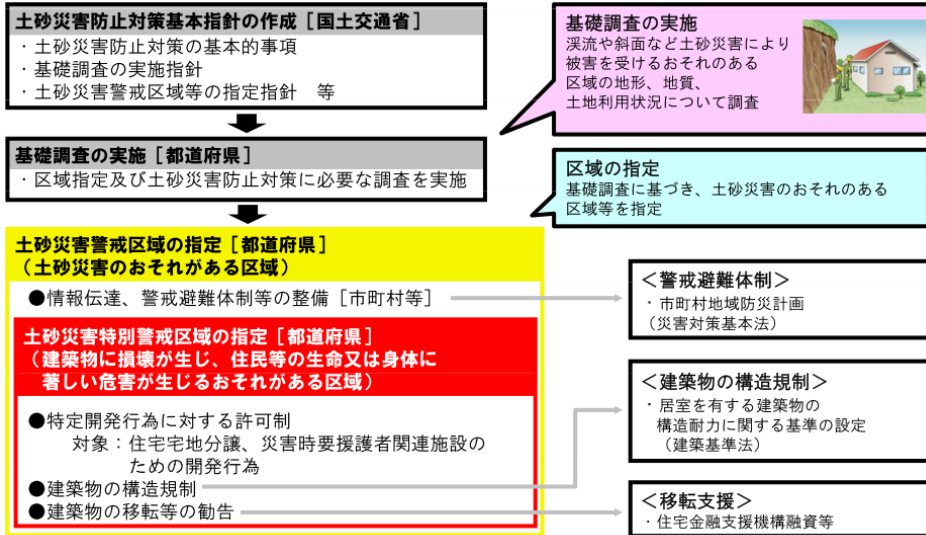


図 2-4 土砂災害防止法の概要⁵⁾

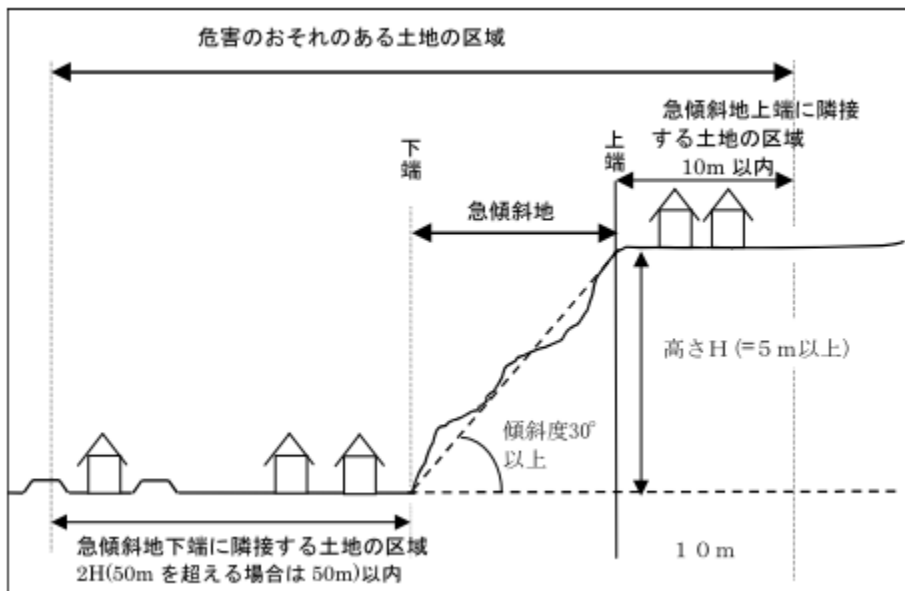


図 2-5 急傾斜地のイエローゾーンの設定⁷⁾

2.1.4 鳥取県内における道路の被災事例

ここでは、住民の生活基盤となる道路について、筆者にとって身近な鳥取県内でのがけ崩れによる土砂災害の事例を示しておく。

平成30年9月29日、鳥取県では西日本にのびる前線の影響で雨が降りはじめ、9月30日には台風24号の接近に伴い雨が強まり、同日6時21分に大雨警報が発令された。9月29日1時から10月1日6時までの総降水量は、鳥取市鹿野で389.5ミリ、この期間の最大1時間降水量は、鳥取市青谷で44.0ミリを観測した。この豪雨で、9月30日夕方、県道鳥取鹿野倉吉線の鳥取市御熊で、県道近傍の斜面が崩壊し、崩壊土砂が道路の全幅にわたって堆積したため、全面通行止めとなった（図2-6）。この崩壊土砂の先端は、道路を横断して反対側の路肩を越えるものであった。続いて、最初の崩壊地点から約50m東側でも崩壊が発生した。この崩壊も県道近傍の斜面で発生したものであり、崩壊土砂が道路まで到達した。この箇所では県道に待避所があり、一般部に比べて道路敷幅が広がったものの、崩壊土砂の先端は県道を横断して反対側の民有地で達している。これら2度の斜面崩壊により、県道上の2箇所で崩壊土砂が堆積し、約2日間の全面通行止めとなった。幸い人的な被害は無かった。この台風24号では、この他にも鳥取県内の県管理の道路だけで13箇所余りが数日間にわたって全面通行止めまたは片側交互通行となり、災害復旧の妨げとなった。

このように近年では、気候変動による豪雨の増加により、「土砂災害防止法」の対象である急傾斜地だけでなく、住民の生活基盤となる道路においても、がけ崩れによる土砂災害が同時多数的に発生し、被災箇所が増加している。このことは、緊急車両の通行や救助活動の妨げとなる地点が増加することに繋がり、住民の安全を脅かすものとなる。したがって、道路の防災計画の立案においては、守るべき路線を選択し、必要な箇所の対策を優先的に進めるなど、プライオリティをつけて計画的に実施していくことが必要と考えられる。



図 2-6 鳥取県内における道路の被災事例 崩壊土砂の状況⁸⁾

2.2 災害事例に基づく崩壊土砂の到達距離

武藏ら⁹⁾は、我が国におけるがけ崩れによる土砂災害の事例について、崩壊土砂の到達距離および崩壊土砂の攪乱状況、擁壁等の施設による影響などに着目して、崩壊土砂の移動実態を整理している。

2.2.1 調査データ

武藏ら⁹⁾が調査対象としているデータは、平成16～17年に国土交通省へ提出された「土砂災害報告」におけるがけ崩れによる土砂災害1,861件のうち、掘削など的人為的誘因により発生したものを除き、崩壊斜面および堆積土砂の位置と状況が判別できる写真、縦断図、平面図が添付されている152の事例である。図2-7に対象とした崩壊事例の位置を示す。

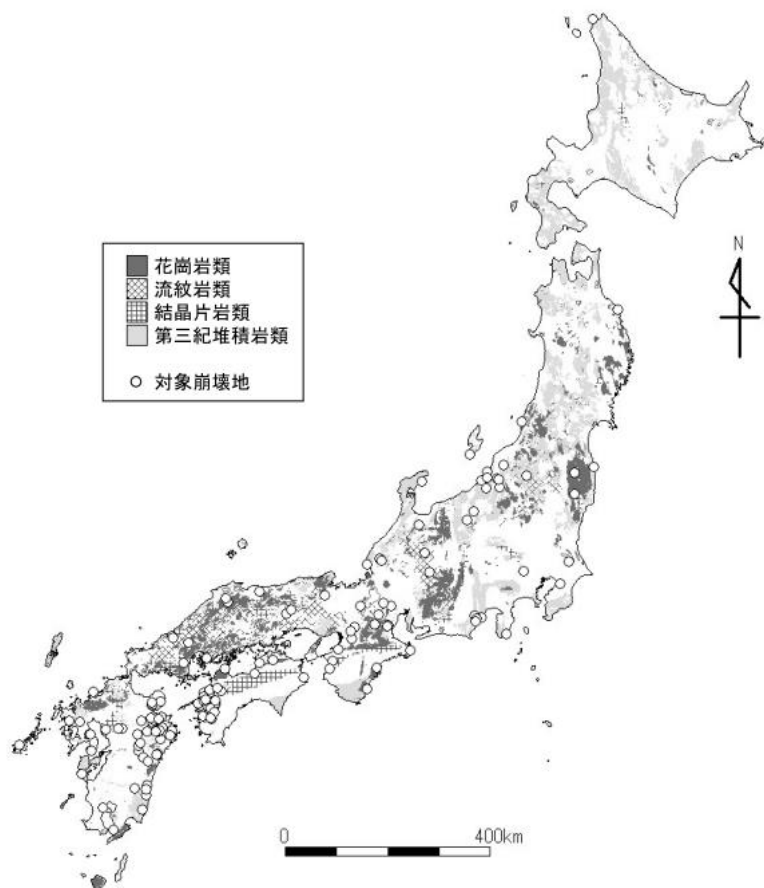


図 2-7 調査対象としている崩壊箇所の位置⁹⁾

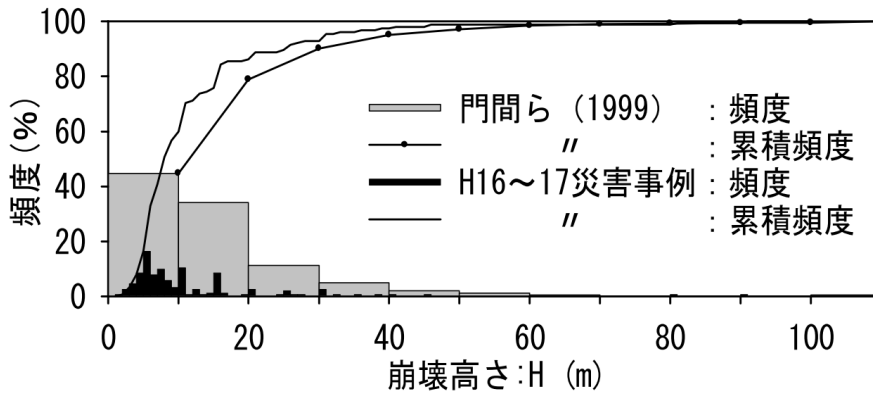


図 2-9 崩壊高さ(H)の頻度⁹⁾

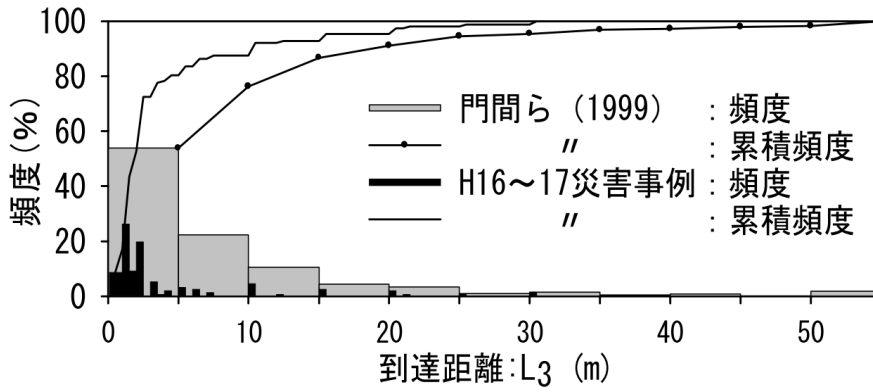


図 2-10 崩壊土砂の到達距離(L₃)の頻度⁹⁾

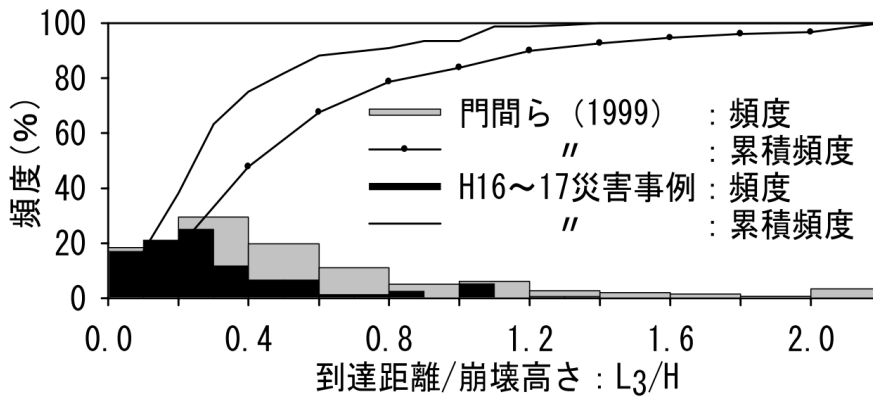


図 2-11 崩壊土砂の到達距離/崩壊高さ(L₃/H)の頻度⁹⁾

2.3 まとめ

本章で示した内容をまとめると以下のようなものである。

(1) 近年の土砂災害の現状と災害への取り組みについて

- ① 近年の土砂災害の発生件数は非常に多く、平成30年の発生件数は過去10年間の発生件数の平均の3倍近くにのぼっている。
- ② 令和2年2月29日時点で指定されている急傾斜地の崩壊（がけ崩れ）の土砂災害警戒区域数は403,649箇所にもものぼる。
- ③ このような危険な箇所の全てを土砂災害防止工事等によって安全な状態にして行こうとすると、膨大な時間と費用が必要となる。財政・人力的な制約のため、すべての斜面へのハード対策は困難であり、ソフト面での対策の推進が必要である。
- ④ このため、「土砂災害防止法」によって、ハード対策（防災施設の設置など）だけでなく、ソフト対策（警戒区域や避難経路の設定）を併せて展開した対策が進められている。

(2) がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊の特徴と到達距離について

- ① 一般に土砂災害は、土石流、地すべり、がけ崩れなどに大別されているが、過去の土砂災害の発生件数を見ると、特にがけ崩れの発生度合いが高い。
- ② がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊は、表層崩壊である場合が多く、発生頻度が高い。対策の面から見ると、表層崩壊では発生源対策や防護対策などのハード対策も有効であることから、ハード対策とソフト対策を併せた対策が可能となる。
- ③ がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊は、土塊の動きが突発的で、その移動速度が大きいため、崩壊が発生してからの保全対象物までの崩壊土砂の到達時間が非常に短い。このような状況下でハード対策、ソフト対策を行うためには、斜面崩壊の発生時刻の予測だけではなく、崩壊が発生した場合の土砂の到達域の予測モデルを用いて、被害範囲の予測や対策施設の設計を行うことが必要と

なる。

- ④ がけ崩れによる土砂災害時の斜面崩壊地点では、斜面勾配が急で、かつ、斜面法尻部で勾配が急変するような場合が多い。このため、崩壊土砂の到達域の予測にあたっては、崩壊土砂の運動経路やエネルギー損失の評価が予測精度に与える影響が大きいことが考えられる。
- ⑤ 武蔵ら⁹⁾のがけ崩れによる土砂災害事例の整理結果では、崩壊土砂の到達距離は、5m未満の場合が5～8割を占めている。また、崩壊土砂の到達距離/崩壊高さの値は、0.5未満が約8割、1.0未満が約9割を占めている。このことから、「土砂災害防止法」でのイエローゾーンの設定条件は、安全側の設定と考えられる。

現在、我が国では、土砂災害から人命、財産を守る取り組みが精力的に進められてきている。しかし、前出の図2-1に示したように、土砂災害による人的被害者数や家屋被害戸数が大幅に減少しているとは言えず、過去と同程度の被害を受けている。これは、土砂災害の危険個所が膨大な数にのぼるため、土砂災害の警戒区域設定とその情報公開が完了していたとしても、防災施設計画（ハード対策）、警戒区域や避難経路の設定（ソフト対策）などの災害防止対策が、財政や人的資源の制限のため、十分に進んでいないことが考えられる。また、近年の土砂災害が、同時多数的に発生し被災状況が大規模化していることも一因と思われる。このようなことから、早急に防災対策を講じることで、国民の生活と安心・安全を守ることが、災害が多発する中で強く求められている。そして、財政および人的資源の制約のある中で、今後、さらに効果的、効率的に防災対策を推進していくためには、ソフト面での対策の充実が重要となると考えられる。

斜面崩壊に対する防災対策に関して、このようなソフト面での対策を推進していく上では、斜面崩壊時の崩壊土量と到達域の推定を行い、危険区域（崩壊土砂の到達範囲）を設定する必要がある。しかし、従来の斜面安定計算の主流である極限平衡法では、崩壊位置や崩壊土量を推定することはできても、被害範囲を想定するために必要となる崩壊土砂の

到達距離に関する予測は不可能である。また、ソフト対策の推進においては、斜面崩壊時の危険区域の設定に関する情報公開が必要となるが、現時点での危険区域の評価手法は、地形判読や既往災害事例の統計解析結果などに基づいたものが多く、特に被害範囲などに関しては具体性や力学的根拠に乏しい。

以上のように、財政および人的資源の制約や情報公開における客観性が求められる中で、防災対策を効果的、効率的に推進していくためには、力学的な根拠に基づいた崩壊土砂の到達距離の予測手法が期待されている。また、実務においては、多くの現場に対応でき、かつ、検討に要する費用が安価であることが求められる。したがって、実務的には、質点モデルのような現象を単純化したモデルであったとしても理論構成やパラメータ設定が容易な予測手法の開発が望ましいと考えられる。

【参考文献】

- 1) 水管理・国土保全局 砂防部保全課 土砂災害対策室：令和元年の土砂災害，国土交通省，2020.3.25, www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r1dosha/r1doshasagainogaiyou.pdf, (参照 2020.10.2).
- 2) 深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員 報告・提言，(社)砂防学会，pp.12-15, 2012.
- 3) 高梨和行，森田威孝，森山清郁，水山高久，寺田秀樹幸：急傾斜地崩壊による崩土到達距離と下端に隣接する急傾斜地以外の土地の傾斜度の関係について，平成15年度砂防学会研究発表会概要集，pp.66-67, 2003.
- 4) (社)全国治水砂防協会：土砂災害防止法令の解説－土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律，16p., 2003.
- 5) 実効性のある避難を確保するための土砂災害対策検討委員会：第1回委員会 配布資料4 土砂災害警戒区域の検証，国土交通省，2019.9.18, www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_jikkousei/180911/04shiryo4.pdf, (参照 2020.10.2).
- 6) (社)全国治水砂防協会：土砂災害防止法令の解説－土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律，55p., 2003.
- 7) 埼玉県：土砂災害警戒区域等指定のための基礎調査マニュアル Ver.4 第二編 急傾斜地の崩壊編，2018.4, www.pref.saitama.lg.jp/a1007/sabo1/documents/kisocyouyam-kyukeisya.pdf, 急-5p., (参照 2020.10.2).
- 8) 鳥取県災害対策本部会議：台風第24号に係る鳥取県災害対策本部会議資料，鳥取県，2018.10.1, www.pref.tottori.lg.jp/secure/1212895/301001typhoon24kaigi.pdf, (参照 2020.10.2).
- 9) 武蔵由育，水山高久：がけ崩れ災害における崩壊土砂の運動の実態，砂防学会誌，Vol.61, No.5, pp.31-36, 2009.
- 10) 門間敬一，千田容嗣，海老原和重：がけ崩れ災害の実態，土木研究所資料，No.3651, 1999.

第3章 既往の知見と研究

前章で述べたように、我が国では、今後さらに防災対策を効果的、効率的に推進していく必要があり、これには、力学的な根拠に基づいた崩壊土砂の到達距離の予測手法が期待されている。このとき、斜面防災の観点では、崩壊により運動を開始した土砂が保全すべき構造物が存在する区域に到達する可能性、そしてその可能性があるならば、その到達時などの運動エネルギーをはじめとする情報を得ることが重要である。

このような崩壊土砂の到達域の予測に関する研究は、これまでも多く行われている。大別すると、過去の災害時などの崩壊事例データを統計解析した結果を用いて予測する手法と崩壊土砂の運動を力学的にモデル化し、これを数値計算によって解く手法がある。後者の数値計算によるシミュレーションでは、崩壊土砂の運動をモデル化する際、土塊全体を1つの質点か剛体としてとらえる^{1) 2) 3)}か、あるいは、剛体の集合体として取り扱われている^{4) 5)}ことが多い。

本章では、これら3つのアプローチによる研究の概要を示すとともに、課題について記述する。

3.1 過去の崩壊事例の収集と整理による方法

既存資料に基づく方法とは、崩壊事例に基づいて、地形、地質などの因子をもとに到達域を推定する統計的手法である。我が国においては、反町⁶⁾の研究が最も古いと考えられる。反町は全国601個（昭和47年～昭和49年）のがけ崩れによる土砂災害データについて、崩壊土砂の流下距離の検討を行った。その結果、崩壊土砂の到達距離は10m以内が2/3を占めること、また、崩壊高（がけ下から崩壊部の最上端までの直高）／到達距離の値が1以下の斜面崩壊の発生率が80%以上にのぼることを報告している。その後の研究においては、森脇⁷⁾が流下高さ／到達距離と崩壊土砂が流下する斜面の勾配の間に直線関係が見られること、また、井料ら⁸⁾は流下高さ／到達距離と崩壊土量との間に関連があることを報告している。これらの研究は何れも崩壊土砂の到達距離に関与する影響因

子（斜面勾配や崩壊土砂量など）と到達距離との関係を検討したものである。統計的手法を用いて到達域を推定するためには、各影響因子が到達距離に及ぼす、その度合いについて知る必要があるが、そのような検討事例は少ない。現時点では、寺田⁹⁾および大久保ら¹⁰⁾の研究に見られる程度である。このように、斜面の崩壊個所および崩壊時刻の予測に関する研究に比べると、崩壊土砂の到達域を統計的な手法によって予測しようとする研究は未だに少ないようである。以下では、比較的最近の研究成果である大久保ら¹⁰⁾の報告について概要を述べる。

大久保ら¹⁰⁾は、三井ら¹¹⁾が報告した昭和58年～昭和60年の間に発生したがけ崩れによる土砂災害データの内、豪雨を誘因とするものに限定してデータを抽出した。抽出データにおける斜面崩壊の発生件数は約2,000箇所、各箇所当り50項目以上の影響要因が調査されているとしている。大久保らは、この抽出データの数が膨大であるため、パソコンによる計算処理が困難であることを理由に、これらのデータの内の330箇所に検討対象を絞っている。そして、表3-1に示すような26項目の影響要因について崩壊土砂の到達距離に与える影響を、数量化理論I類を用いて検討を行っている。

表 3-1 解析に用いられている影響要因¹⁰⁾

アイテム名		区分数		
斜面の向き		8		
斜面の型	横断方向	6		
	縦断方向	6		
斜面上端の状態		4		
斜面下端の状態		7		
地質	表層	7		
	基岩	8		
地被物の状態	種類	7		
	密度	3		
崩土の状態		3		
崩壊頭部の位置		2		

アイテム名	区分数	レンジ	相関関係	
斜面下端の傾斜角	2	6.66	0.2226	
角斜面の	平均傾斜	7	10.69	0.1829
	崩壊頭部との傾斜	7	10.61	0.2229
斜面の高さ	5	17.30	0.4488	
表層の深度	6	21.64	0.2195	
崩壊の規模	崩壊高	7	27.82	0.6330
	崩壊幅	8	23.58	0.4733
	崩壊深	9	14.25	0.2926
	崩壊の斜面長	6	26.85	0.5804
	崩壊土量	8	28.10	0.5738
降雨	発生時までの連続雨量	4	15.03	0.2765
	発生時の日雨量	5	10.76	0.2386
	発生時までの24時間雨量	8	14.45	0.3283
	発生時の雨量	5	19.03	0.2278
	発生時までの最大時間雨量	5	12.84	0.2734

検討の結果，崩壊土砂の到達距離が長くなることに関連する因子として，崩壊高，斜面の縦断形状（**図3-1**参照），崩壊土量，斜面下端の状態（**図3-2**参照）および連続雨量を挙げている．連続雨量については，降雨に伴い崩壊土砂の水分含有量が多くなると，流動化しやすくなることを理由として述べている．大久保ら¹⁰⁾の研究では，斜面の縦断形状，斜面の下端の状態といった斜面および斜面下方部の原地形情報が到達距離の予測値へ及ぼす影響が大きいとしている．彼らの研究では，斜面部の原地形について**図3-1**や**図3-2**のような分類を行っている．しかし，例えば**図3-1**中の「2.下降型」と「4.複合S型」を斜面上端部の法肩形状で区別しているものの，どの程度の形状の差異をもってして両者を区別するのかなどについて明確にされていない．このような原地形情報の差異が到達距離に与える影響については，統計的手法に比べて，質点や粒状体解析などの力学的な計算手法のほうが評価し易いと考えられる．

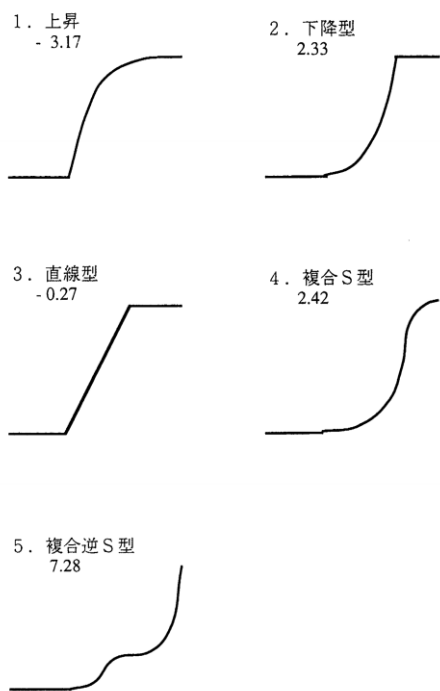


図 3-1 斜面の縦断形状の分類¹⁰⁾

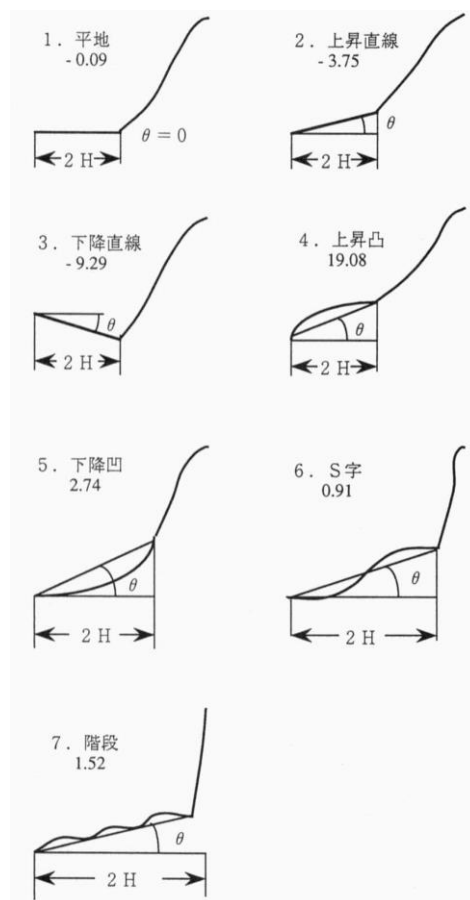


図 3-2 斜面下端の状態の分類¹⁰⁾

既存資料に基づく方法では、数値計算では取り込みにくい因子も考慮でき、現実性のある推定結果が提供できることが考えられる。今後、研究が進めば、GISとのカップリングにより広域的な情報整理、到達の可能性のある地域・地点の絞り込みにも適用できよう。しかし、この手法では参照した事例データの精度・量に解析結果が影響される。例えば地形や地質が異なるデータを用いた場合などでは、推定された到達域の結果の解釈が難しくなる。適用範囲について常に議論しておく必要がある。このため、個別の事例における到達域や流下経路上の崩壊土砂のエネルギー推定には適していないと考えられる。

3.2 力学的な計算に基づく方法

3.2.1 質点の運動としてのモデル化

(1) 奥田の研究¹⁾

奥田¹⁾は、斜面を流下する土砂の運動について、解析的な考察を加えるために、もっとも単純な力学的モデルとして、土砂を一つの質点と見なして取り扱った。土砂の運動を斜面上の質点の滑動とし、これに速度の二乗に比例する流体抵抗の項を考慮している。そして、**図3-3**に示すような、斜面上の質量 M の物体が傾斜角 θ の斜面に沿って運動するときの運動方程式を次のように示した。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = Mg \cdot \sin \theta - \mu Mg \cdot \cos \theta - KA \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (3-1)$$

ここに、 x は質点の流下距離（斜面下方方向を正）、 g は重力加速度、 μ は動摩擦係数、 K は運動に対する流体抵抗の比例係数および A は相対的な流体運動に対する物体の代表断面積としている。

奥田¹⁾は、**図3-4**のような、上方の急斜面と下方の緩斜面が連続した2直線斜面沿いの土砂の運動について、式(3-1)における流体抵抗を無視し、摩擦抵抗のみを考慮した場合の解析例を示した。解析例（**図3-5**）では、崩壊によって生じた土砂が上方の斜面沿いに流下し、勾配が緩やかな下方斜面に到達すると減速が始まり、ついには停止して土砂の堆積が生じる過程について説明を行っている。このことから、簡易な質点力学的なモデル化であっても、土塊全体の運動については、ある程度近似的に運動の特徴を表現できるとしている。なお、奥田¹⁾は、式(3-1)のモデル化では、運動方程式に流体抵抗を導入しているが、流体抵抗に関する係数を求めることが非常に困難であることを指摘している。

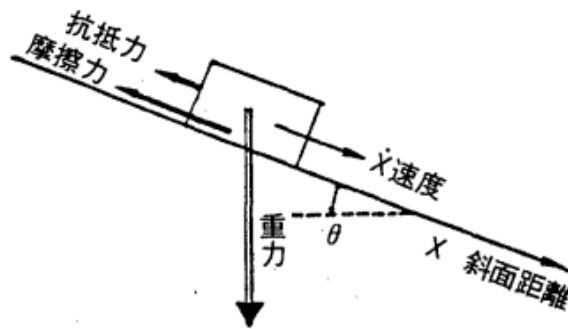
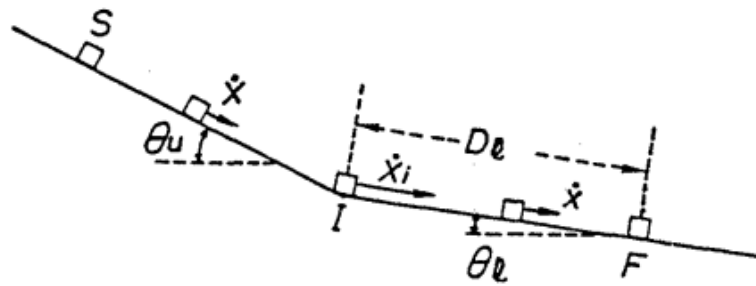
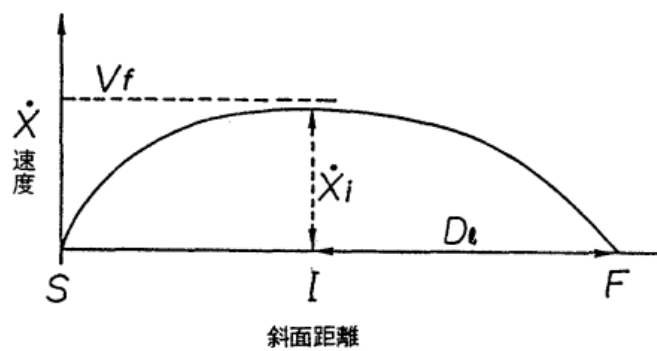


図 3-3 2 直線斜面における物体の運動解析¹⁾



S 出発点, I 斜面接続点, F 停止点,
 D_l 下方斜面沿い走行距離

図 3-4 斜面沿いの物体の運動¹⁾



SI 間加速, IF 間減速, \dot{x}_i I 点通過速度,
 V_f 終端速度

図 3-5 物体の運動の速度変化¹⁾

(2) 山口の研究¹²⁾

昭和46年9月7日から8日にかけて、台風25号が千葉県下を襲った。この台風による豪雨と強風のため、家屋被害を生じた斜面崩壊箇所は約660箇所、55名の死者が出た。山口¹²⁾は、この災害について、過疎地であることを考慮すると被災の程度は異常とも言うべきものであったと述べている。

山口¹²⁾は、このような崩壊土砂による土砂流が、家屋を襲い、倒壊事故や人身事故を起こすことを、いかに予知し、適当な対策をたてるかという点に関心を示した。そして、土砂流の解析を行い、当現場の災害発生直後に小野寺ら¹³⁾が行った現地調査結果との対比を行った。

土砂流の解析を行うにあたって山口¹²⁾は、土石流と異なり、土砂流は流下中に土を巻き込んで漸次体積が増えることが少ない点で問題を簡単にするものの、次のような理由で厳密な解析は極めて難しいとしている。

- ・ 流下斜面あるいは基礎地盤の形状が複雑であること
- ・ 表土の厚さが一定でないこと
- ・ 土の圧縮ひずみ特性やポアソン比が不明確であるため流れを変形物体の力学として取り扱う上で難点があること
- ・ 流下中の土砂は局部的に変動して混合し合いながら動くが、その間の粘性あるいは摩擦による内部エネルギーの損失の法則が明らかにされていないこと

そこで、山口¹²⁾は土砂崩壊では表層すべりが多いことに着目して、下記のような3つの仮定を行い、問題を単純化した。

- ① 滑落する土層の厚さは一定とする。
- ② 運動中、土層の運動方向の伸び縮みはない。したがって、滑り運動中、土層の厚さは変化せず、同時に対流的加速度はなく運動はNewton力学の法則に支配される。
- ③ 斜面勾配と崩壊土砂の拡がる地盤の勾配が、それぞれ一定であるような折れ線上の拘束面に沿う土砂流とする。

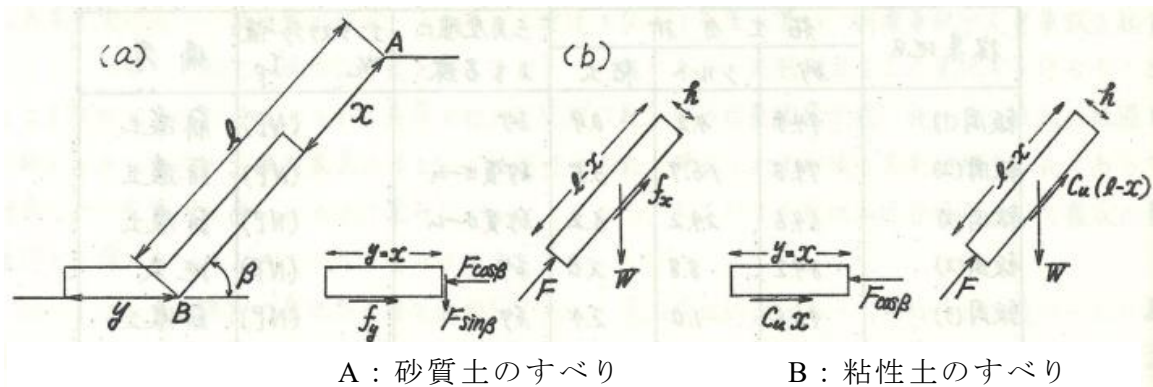


図 3-6 山口のモデルの説明¹²⁾

これらの仮定に基づいて、図3-6に示すようなモデル化を行い、上方の斜面と下方の水平面が連続した2直線斜面沿いの土砂流の運動方程式を示した。この運動方程式では土砂流内のエネルギー消散を無視していることから、計算される土砂の到達距離は大きめの値を与えている。なお、斜面から滑落する表土が砂質土の場合と粘性土の場合について運動方程式を示しており、表層土底面での抵抗力は、砂質土の場合では摩擦抵抗のみが発揮されるものとし、粘性土の場合には粘着抵抗のみとしている。

このモデルは、先の①、②および③の仮定から質点系のモデルと言えるが、質点と見なした土層が有限の長さを持つこと、そして、1つの質点内にも関わらず土層底面での摩擦抵抗力が水平面部と斜面部で異なる点が特徴的である。また、このモデルにおける崩壊土砂の到達距離は、有限長の土層先端が斜面法尻から移動した距離として与えられる。通常、崩壊土砂を1つの質点と見なした場合、斜面を滑動した質点が、水平面に到達した後に停止した位置は、堆積した崩壊土砂の重心位置として考えられるが、山口¹²⁾のモデルはこの点でも一般的な質点解析の考え方と異なっている。

山口¹²⁾は、図3-7のように、小野寺ら¹³⁾が行った現地調査結果とモデル計算値との対比を行っている。図の縦軸の拡がり長さ比 ξ は崩壊土砂の到達距離 x （文献中では拡がり長さとして表現）と斜面長 L との比であり、 $\xi = x/L$ とされている。なお、現地における斜面傾斜角度 β と斜面長 L の計

測位置や方法は定義されていないため不明である。図では実測値による β と ξ の関係を砂質土および粘性土に分類してプロットされている。また、図中には摩擦係数を0.3としたときの山口¹²⁾の砂質土の滑りモデルの計算値が実線で示されている。モデルの表層土塊は完全飽和状態と仮定しており、土塊の単位体積重量には $\gamma_{\text{sat}}=18\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma_{\text{sub}}=8\text{kN/m}^3$ を用いている。なお、山口¹²⁾が用いた小野寺ら¹³⁾の調査報告を詳細に見ると、砂質土としてプロットされているデータの内、図中の $\beta=70^\circ$ における ξ が0.66と0.75でのプロットデータ、および、 $\beta=45^\circ$ における ξ が0.75のプロットデータは、それぞれ、細砂・粘土の互層、関東ローム、および、泥岩とされている（図中○）。これらの ξ が小さい理由として、例えば崩壊土砂が塊状であった可能性が疑われる。一方、粘性土としてプロットされているデータの内、 $\beta=52.5^\circ$ における ξ が1.03のプロットデータは、節理の多いシルト岩とされており、流下する崩壊土砂が塊状とはならず、砂質土と同じく粒状体のような挙動をした可能性が考えられる（図中○）。

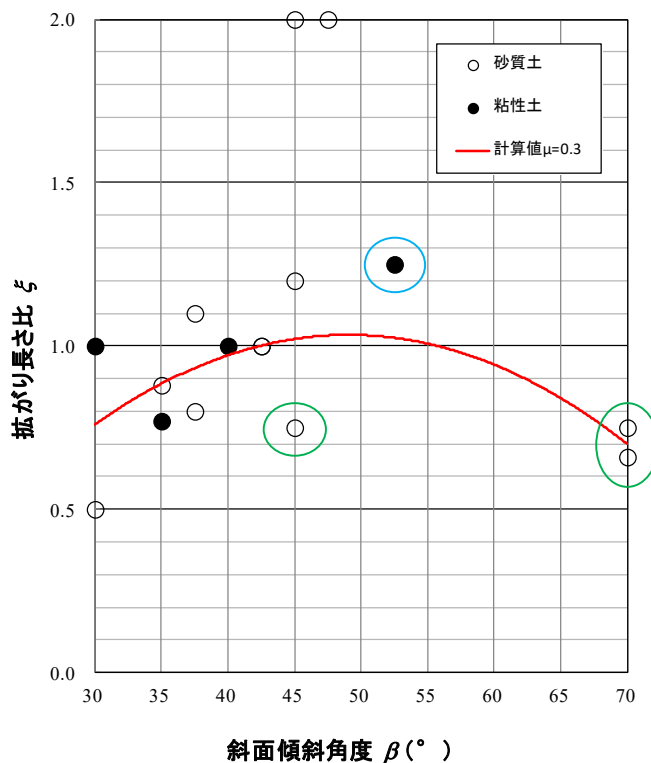


図 3-7 現地調査結果とモデル計算値との比較¹²⁾

(一部加筆・修正)

図3-7から、モデルの計算値は β の増加とともに大きくなるが、 $\beta=50^\circ$ 付近で最大値を示した後は、減少傾向を示すことがわかる。これを小野寺ら¹³⁾による砂質土の実測データと比較すると、計算値は、 $\beta=45^\circ$ 付近までは実測値の傾向を表現できている。ただし、 $\beta=50^\circ$ 以上についてはデータがないため、実測値がモデル計算値のように減少傾向を示すか否かは判断できない。斜面崩壊が懸念される斜面では、 $\beta=50^\circ$ 以上の急斜面も多く存在するため、確認が必要と考えられる。

(3) 森脇の研究²⁾

森脇²⁾は、円弧状の斜面上を滑動する崩壊土塊の速度・到達距離を推定できる運動方程式を質点の力学に基づいて導いた。この運動方程式では、円弧斜面上および円弧斜面上から直線斜面上に移動して停止する崩壊土塊の運動を1つの質点の運動とみなし、すべりに抵抗する力として摩擦抵抗を考えており、円運動によって生じる遠心力を導入している。したがって、崩壊土塊の運動は動摩擦係数値と円弧の曲率半径に依存している。森脇²⁾は、この運動方程式を大型降雨実験施設の斜面崩壊実験での結果の1例と7カ所の現場事例に適用した。

大型降雨実験施設の斜面崩壊装置は、幅1.5m、斜面の長さ6m、斜面の傾斜角度 40° 、水平部の長さ3m、土層深さ0.5mの鋼鉄製土槽のものであり、片側壁には透明の強化ガラスが用いられている。実験装置の上方から散水を行い、斜面上の土塊を不安定化させて崩壊に至らせている。このとき、モータードライブカメラによって崩壊土塊の連続撮影を行っている。実験に使用した土は千葉県佐原産山砂であり、土層の締め固め乾燥密度は 1.48g/cm^3 、初期含水比は約8%としている。実験装置および実験後の崩壊後の土塊の様子は図3-8に示すようである。

森脇²⁾は図3-8に示す実験結果から、すべり面を推定した。そして、提案した運動方程式を用いて、この実験結果の土塊停止位置に直目して、動摩擦係数 f を逆算した。

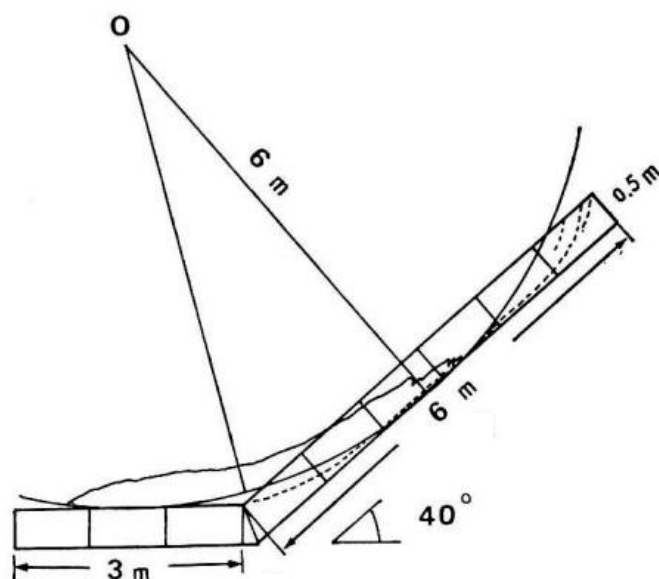


図 3-8 実験装置および実験後の崩壊後の土塊の様子²⁾

また、表3-2に示すような現場事例についても提案した運動方程式を用いた場合の動摩擦係数の逆算を行っている。そして、これらの動摩擦係数 f と崩壊前の土塊が位置する斜面の勾配 $\tan\phi_i$ との関係を図3-9のように整理した。この図から、 f と $\tan\phi_i$ の間には明瞭な直線の関係がみられるとしており、その直線を最小二乗法により求めたものを図中の式で表わした。なお、森脇²⁾は、この式は崩壊土塊や斜面を構成する材料の物性的な検討にもとつたものではなく、斜面上を滑べる土塊の運動論にもとづいた計算結果から統計的に見いだしたものであり、ここでいう動摩擦係数とは一般に力学や物理学で定義づけられている摩擦係数ではなく、みかけ上の動摩擦係数と呼ぶべきものであると述べている。

このモデルでは、質点の運動に円運動によって生じる遠心力を導入している点に特徴を持つ。しかし、何故に質点が円弧上を移動すると見なしているのかについては議論されていない。また、このモデルで崩壊土砂の到達距離を推定するためには、崩壊部のすべり面と一致する円弧の中心とその曲率半径が必要となる。しかし、斜面崩壊では事前にすべり面形状を推定することが困難である。予めすべり面の推定が行われている地すべりなどに適用範囲が限定されると考えられる。また、このモデ

ルでは、崩壊土塊を1つの質点とみなしていることから、計算される質点の停止位置は土塊の重心位置と考えられる。したがって、動摩擦係数を逆算する際には、表3-2に示した各現場事例における土塊の重心位置が必要と考えられるが、どのようにしてこれを求めたのかについては言及されていない。

表 3-2 適用事例と計算結果²⁾

事 例	発生日時	誘 因	地 質	崩壊土量 (m ³)	ϕ_i ($\tan \phi_i$)	ϕ_f	a (m)	計 算 結 果		
								f	最大速度 (m/sec)	到達時間 (sec)
室内崩壊実験	1981. 8	降雨	砂質土 (千葉県佐原産)	3.7	40.0° (0.84)	14.5°	6	0.49	1.8	2.7
高場山地すべり(10)	1970. 1.22	"	風化砂岩	130,000	36.0° (0.73)	18.1°	120	0.50	5.7	10.3
繁藤地すべり(5)	1972. 7. 5	"	千輝緑凝灰岩	94,000	33.5° (0.66)	-1.5°	180	0.27	13.1	13.2
銚子市塚本地区(2)	1972. 9. 6	"	砂質土	—	31.5° (0.61)	3.0°	135	0.30	9.3	11.5
竜ヶ水崩壊(3)	1977. 6.24	"	安山岩	1,800~2,400	45.0° (1.00)	10.0°	832	0.48	28.9	27.5
伊豆大池地区(9)	1978. 1.14	地震	ローム	37,200	25.0° (0.47)	-6.8°	410	0.15	17.7	20.2
伊豆中木地区(6)	1974. 5. 9	"	凝灰岩	—	38.5° (0.80)	4.0°	139	0.36	11.4	11.5
伊豆トモロ岬(4)	1978. 1.14	"	凝灰角礫岩	150	58.0° (1.60)	30.0°	105	0.90	9.0	8.9

ϕ_i, ϕ_f はそれぞれ、崩壊土塊の初期位置および停止位置における斜面角度、また a は円弧の曲率半径、 f は動摩擦係数を表わす。また、事例の項の () 内数字は引用文献番号を示す。

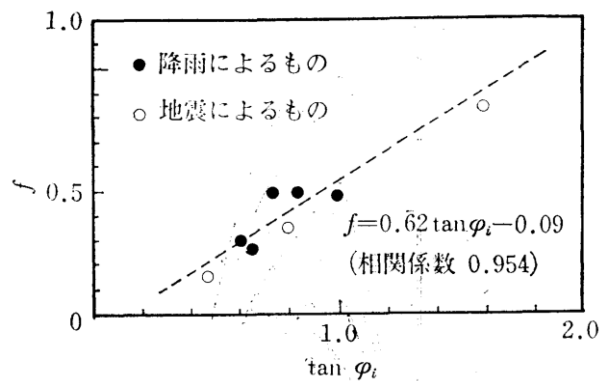
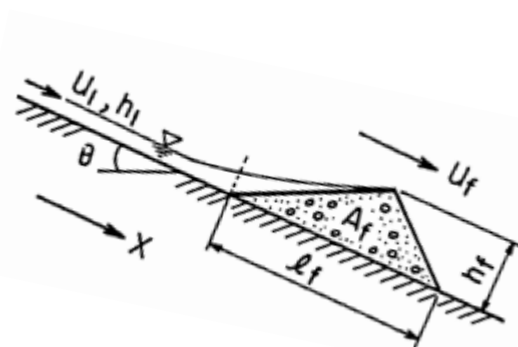


図 3-9 動摩擦係数 f と崩壊土塊の初期位置における斜面勾配 $\tan \phi_i$ との関係²⁾

(4) 芦田らの研究³⁾

芦田ら³⁾は、奥田¹⁾の提案における摩擦および流体抵抗に関するパラメータ推定についての課題を解消すべく、質点の運動に対する抵抗力として固体摩擦と流体摩擦を導入した運動方程式を提案した。芦田ら³⁾が指摘する奥田¹⁾の提案モデルの課題は次のようである。

- ・奥田¹⁾のモデルでは、土塊の挙動は動摩擦係数と流体抵抗の比例係数の2つの係数によって規定される。
- ・しかし、このモデルでは、土塊の質量に応じてこれらの係数を変化させなければ、実際の土塊の挙動を説明できない。
- ・これらのパラメータをいかにして推定するかが課題となっている。



A_f : 土塊の断面積, u_f : 土塊の滑動速度, θ : 斜面傾斜角,
 l_f : 土塊の長さ, h_f : 土塊の厚さ, u_1 : 表面流の流速, h_1 : 表面流の水深

図 3-10 芦田らのモデル化³⁾

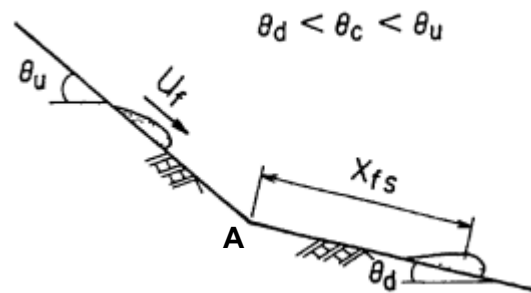
これらの問題を解決するため、芦田ら³⁾は、斜面上における土塊の運動を図3-10のようにモデル化し、土塊を移動させる力として重力の斜面方向成分と土塊と表面流との相対速度に起因する力を考えている。一方、抵抗力としては固体摩擦と流体摩擦を考えている。ここで、固体摩擦は摩擦係数と土塊の有効垂直反力との積で表わす、流体摩擦は土塊と斜面の境界における流体のせん断に起因するものとしている。これらの仮定に基づいて、土塊の運動方程式を記述した。流下中の土塊の断面積は変化しない、そして土塊の質量も変化しないものとしている。芦田ら³⁾は、

この運動方程式は斜面傾斜角、固体摩擦を表す動摩擦係数および流体摩擦に関する流体抵抗係数に支配されるとしている。そして、斜面傾斜角が予め与えられるパラメータであることから、動摩擦係数と流体抵抗係数が重要であると述べている。

続いて、これらのパラメータについて実験的な検討を行っている。実験は、前出の図3-10のような形状に整形した土塊を斜面上で滑動させるものであり、土塊の挙動を調べるために実験装置の斜面の側面からビデオカメラによる撮影を行っている。また、土塊材料の粒径の影響と滑動させる斜面の表面粗度の影響を見るため、土塊材料中の砂粒径と斜面粗度を変化させている。その結果、動摩擦係数と静摩擦係数との比が土塊の滑動速度、斜面および土塊の材料の条件に依存せずに概ね一定値をとること、したがって、静摩擦係数を測定すれば動摩擦係数が推定されると報告している。流体抵抗係数については、滑動条件には依存しないが斜面条件によって異なること、また、同一の斜面条件でもパラメータの値が広い範囲にあることを述べており、今後の課題としている。

次に、滑動距離と停止距離について、実験値と提案する運動方程式での計算値との比較を行っている。この内、停止距離の検討において芦田ら³⁾は、図3-11の θ_d 斜面上流端（図中のA点）における土塊の速度の設定が問題になると述べている。そして、上下斜面の傾斜角が急変するところでは、エネルギー保存則や運動量保存則関係を厳密に議論することが困難であることを指摘している。このため、工学的または防災科学の立場からは、斜面勾配の急変部において、 θ_d 斜面下流端の土塊速度の θ_d 方向の成分が保存されると見なしても差し支えないものと思われるとしている。

最後に芦田ら³⁾は、昭和58年7月豪雨による山腹崩壊4例の実際の現地データに対して、提案している運動方程式を用いて解析を行っている。解析では、実験で得られた流体抵抗係数値の1/10程度の値を用いることにより、ほぼ良好な結果を得たとしているが、流体抵抗係数について、今後の重要な課題であるとしている。



θ_u : 上方斜面の傾斜角, θ_d : 下方斜面の傾斜角, θ_c : 滑動限界傾斜角,
 x_{fs} : 土塊の停止距離, u_f : 土塊の滑動速度

図 3-11 土塊の停止距離と斜面の傾斜角³⁾

3.2.2 土砂を剛体の集合体と捉えた数値解析法

(1) 大倉の研究⁴⁾

大倉⁴⁾の研究は、崩壊土砂の流動化機構を解明しつつその到達距離を予測するため、流動化発生メカニズムの実証的解明、流動化発生メカニズムを内在した到達距離予測モデルの開発および到達距離予測に関する基礎的知見の取得を行ったものである。大倉⁴⁾の到達距離予測モデルは個別要素法を用いており、間隙水の影響を考慮するために粘弾性粒状体モデルを導入している。

大倉⁴⁾は、実験と数値解析により、崩壊土塊中の間隙が水で満たされている場合、非排水せん断に伴う土粒子骨格構造の破壊が過剰間隙水圧発生の誘因となって崩壊土塊が流動化することを示した。また、崩壊土砂の間隙が水で充たされていない場合には、崩壊土中の土塊相互の衝突機会が増加することで、流動化が進むとしている。

これらの結果に基づいて、大倉⁴⁾は到達距離予測モデルを提案した。提案するモデルは個別要素法を用いており、流動化の要因となる間隙水の影響を考慮するために粘弾性粒状体モデルを導入している。そして、流動化を再現した乾燥粒子崩壊実験および岩屑雪崩実験を行い、それらの観測データとシミュレーション結果との比較からモデルが妥当であるとしている。また、実験ならびにシミュレーションモデルによる感度分析の結果から、落石や岩屑雪崩の摩擦抵抗は流下ブロックの動摩擦係数あるいは転がり摩擦係数の内、小さいほうに規定されるとしている。

大倉⁴⁾の研究では、流動化発現の基本的なメカニズムが、粒子間の衝突による運動量の伝達、または、粒子骨格構造の破壊に伴う過剰間隙水圧の発生であると述べている。そして、これを表現した数値シミュレーションモデルを開発することで、流動化した崩壊の到達距離予測を試みている。しかし、このシミュレーションにおいては、水で飽和された要素間のばね係数の設定が難しく、パラメトリックスタディを行った上で、ばね係数の値を設定している。土塊の流動化発現を表現しようとするために、個別要素解析時のパラメータ設定がより難しくなっていることがうかがえる。

(2) 武藏らの研究⁵⁾

武藏ら⁵⁾は、急傾斜地崩壊による災害では、崩壊土砂の多くが部分的に土塊の形状を維持した状態となっており、完全に流動化していないことに注目した。そして、過去の崩壊土砂の運動に関する研究では、土砂が流動化した状態での移動に着目しており、実際の災害事例で多く見られるような崩壊土砂の一部が形状を維持した状態で流下する場合の解析例がないことを指摘している。

武藏ら⁵⁾は、このような部分的に土塊の形状を維持した状態の崩壊土砂の移動について解析する方法を確立することを目的として、複数の円形粒子が剛結した要素を用いた個別要素法および要素間に間隙物質による効果を表す「間隙ばね」を導入した拡張個別要素法による解析例を示した。

研究では、まず、流動化状況の違いによる崩壊土砂の移動状況の違いについて考察するため、**図3-12**に示すような水路実験装置を用いて砂試料（平均粒径は0.66mm）の流下実験を行っている。実験装置の斜面部は勾配が可変であり、斜面上での水路幅30cm、水路長180cm、水平部では水路幅60cm、水路長180cmとされている。水路底面は木製である。実験時の斜面傾斜角度は35°、40°、45°の3通りである。この実験では、斜面傾斜角度に関わらず、砂試料を流下させる斜面長を一定としている。このため実験開始時の砂試料の位置エネルギーは斜面傾斜角度ごとに異なるものとなる。また、流動化状況の違いによる砂試料の移動状況の違いを観察するため、流下試料の水分条件を変化させている。水分条件は、乾燥状態、体積含水率約35%の不飽和湿潤状態および飽和状態の3ケースである。流下試料の体積は明確でない。

実験結果は**図3-13**のように示しており、乾燥状態の砂試料の場合、全ての斜面傾斜角度において、土塊形状が維持されずに流下するとされている。不飽和湿潤状態では、流下する試料の一部が形状を維持した状態であったとしている。ただし、斜面傾斜角度35°、40°の場合、それぞれ、試料全体積の9割、8割程度が試料箱に残留したと報告している。そして、飽和状態では、実験開始直後に砂試料中の水が流失し、不飽和状態となって土塊を維持したまま移動する現象が確認されたとしている。

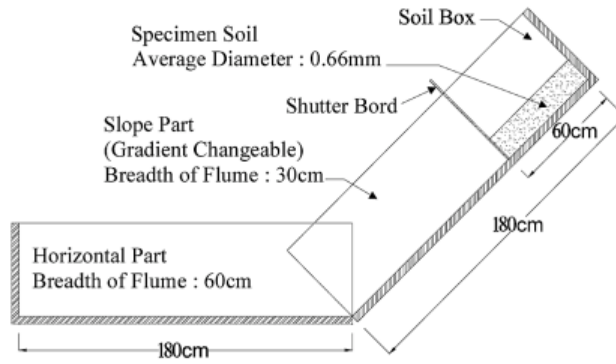
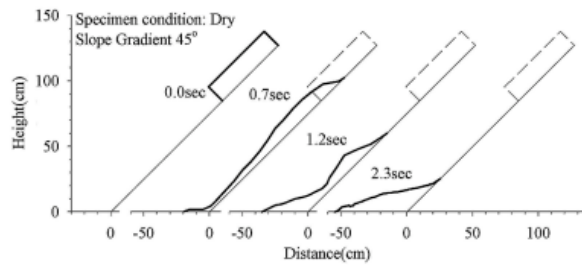
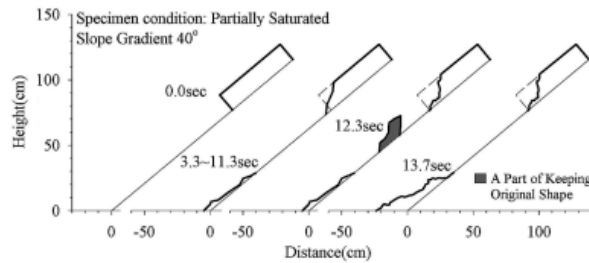


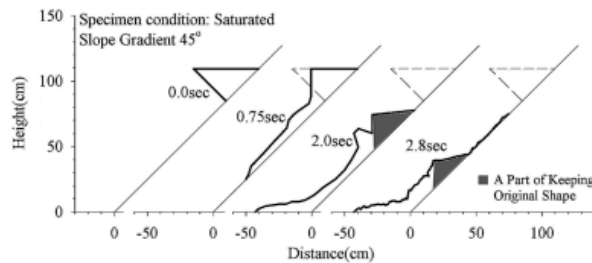
図 3-12 武藏らの水路実験装置⁵⁾



崩壊土砂の形状変化
(乾燥状態 勾配 45°)



崩壊土砂の形状変化
(不飽和湿潤状態 勾配 40°)



崩壊土砂の形状変化
(飽和状態 勾配 45°)

図 3-13 武藏らの実験結果例⁵⁾

次に武藏ら⁵⁾は、実験結果から、彼らが対象とする現象は、斜面を流下する土塊の形状の維持と流動化が混在するものであり、連続体と不連続体が混ざったものの移動とともに、連続体から不連続体への変化などを再現する必要があるとしている。目黒ら¹⁴⁾が提案する拡張個別要素法 (EDEM) は、個別要素法の各要素間に間隙物質の効果を表す「間隙ばね (Pore-Spring)」を導入し、連続体から不連続体までを解析するものであり、これによって実験結果の再現計算を行っている。EDEMでは、DEMでの各要素同士の接触時にのみ作用する反発ばねに加えて、要素間の結合を表現するための引張りに作用する間隙ばねを導入する。間隙ばねは、要素同士が近接している間は、要素が接触していなくても引張力を伝達するが、要素間の距離が十分離れた場合、あるいはクーロンせん断破壊基準以上のせん断力を受けた場合には破壊され、それ以降は力を伝達しないものとされている。また、武藏ら⁵⁾は、崩壊土砂の運動を個別要素法で表現する場合に円形要素を用いると、転がり抵抗がないために、要素の移動距離が過大になる可能性があるとし、再現計算においては、3個の円形粒子を結合させた要素と1個の円形粒子からなる要素を混在させている。再現計算の対象には、飽和状態の斜面傾斜角度 45° を選んでいる。その結果、武藏ら⁵⁾は、提案する手法を用いて、適切な間隙ばね係数の設定を行えば、崩壊土砂の一部が形状を維持したまま移動する実験結果が再現できるとしている。なお、再現計算におけるパラメータの値には、実験結果の再現性が良い値が用いられている。連続体から不連続体への変化などを再現するために、個別要素解析時のパラメータ設定がより難しくなっていることがうかがえる。

防災対策においては、崩壊土砂の到達域を事前に予測する必要がある。多数の現場に対応しなければならない実務において、個別の現場に対して適切なパラメータ設定を事前に行うことは難しいと考えられる。

3.3 まとめ

以上に述べてきたように、既存資料に基づく方法では、植生などの数値計算では取り込みにくい因子も考慮でき、過去の事例解析を根拠資料とすることから、現実性のある推定結果が提供できることが考えられる。また、異なる種々の因子を考慮することが可能な点で効率的な手法である。GISとのカップリングによる広域的な情報整理、到達の可能性のある地域・地点の絞り込みにも適していよう。しかしながら、この手法では参照した事例データの精度や量に解析結果が影響される。例えば地形や地質が異なるデータを用いた場合などでは、推定された到達域の結果の解釈が難しくなる。適用範囲について常に議論しておく必要がある。このため、個別の事例における到達域や流下経路上のエネルギー推定には適していないと考えられる。

一方、剛体の集合体による数値解析や質点モデルでは、個別の地点において、解析結果をもとに到達域、エネルギーなどの情報を提供する。解析対象地点の地形情報を用いることができるが、地盤情報のモデル化、例えば摩擦角の数値などの解析結果への影響を評価する必要がある。

前者の剛体の集合体による数値解析では、個別要素法における研究のように要素形状、要素間の摩擦、減衰定数さらには間隙水の考慮などが進められている。しかし、これらのパラメータの設定は難しく、また、計算自体も煩雑である。現在では、崩壊土砂の流下など、粒状体の運動について定性的には表現が可能になっていると考えられるが、多数の現場に対応しなければならない実務においては未だに使い難いのが現状である。また、地盤工学会のアカデミックロードマップ¹⁵⁾では、数値解析に用いるパラメータの設定法の合理化や実務者が解析を実施する際の能力・判断等の差異による解析結果のばらつきが実務設計における課題とも言われている。有限要素法（FEM）による静的な応力 - 変形解析でさえ、十分に活用されていない現状（FEM自体の理論、構成則などが理解されていない）を踏まえると、実務においては理論構成がやや複雑な数値解析手法はハードルが高く、普及が困難であると言わざるを得ない。

質点モデルによる解析では、必要とするパラメータの数も（剛体の集合体による解析に比べて）少なく、簡便に解析が進められる利点がある。実務的には、質点モデルのような現象を単純化したモデルであったとしても理論構成やパラメータ設定が容易な予測手法の開発が望ましい。

ところで、土田ら¹⁶⁾の報告では、2015年に発生した広島豪雨災害において、3度の崩壊が連続して発生し、先発の崩壊によって発生した斜面法尻部の地形変化のため、後発の崩壊による土砂は運動方向を大きく変えた可能性が指摘されている。このことは、崩壊土砂の到達域は、斜面法尻部の初期地形だけでなく、法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程にも影響を受けていることを意味している。特に、斜面勾配が急で、かつ、斜面法尻部で勾配が急変するような場合には、到達域に及ぼすその影響が大きいことが考えられる。しかし、質点モデルに関する既往の研究^{1) 2) 3)}では、崩壊土砂全体を1つの質点と見なしたときの質点の運動に対する抵抗力となる摩擦抵抗と流体抵抗などに関する議論が多く、崩壊土砂の運動経路に関しての研究は見当たらない。高橋・吉田¹⁷⁾が、斜面法尻部で勾配が急変する場合の土砂堆積をともなう崩壊土砂の運動について報告しているが、これは土石流の停止に関するものであり、斜面勾配が急なケースまでは検討されていない。このように、崩壊土砂の到達域の予測に関して、斜面法尻部で土砂堆積をともなう場合の土砂の運動については未だに不明な点が多いのが現状と思われる。

これらのことから本研究では、斜面崩壊を対象として、質点モデルによる崩壊土砂の到達距離予測手法の開発に向けて、斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動とその結果として生じる運動経路の変化に着目して検討を行う。次章では、はじめに、乾燥砂を用いた室内模型実験により、斜面を流下する砂試料の堆積域、堆積形状について検討を行う。そして、滑動による質点モデルを用いて、遷緩点付近における崩壊土砂の運動状態の変化が到達域に及ぼす影響について検討する。

【参考文献】

- 1) 奥田節夫：斜面崩壊にともなう物質の移動過程，地質学論集，No.28, pp.97-106, 1986.
- 2) 森脇寛：円弧斜面上を滑べる崩壊土塊の運動について，新砂防，Vol.36, No.3, pp.10-16, 1983.
- 3) 芦田和男，江頭進治，神矢弘：斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究，京大防災研究所年報，No.27, B-2, pp.331-340, 1984.
- 4) 大倉陽一：崩壊の流動化機構ならびに到達距離予測に関する研究，森林総合研究所研究報告，Vol.3, No.2, pp.109-164, 2004.
- 5) 武藏由育，山崎美穂，水山高久，小杉賢一郎：崩壊土砂の運動のシミュレーション手法に関する研究，砂防学会誌，Vol.64, No.3, pp.37-45, 2011.
- 6) 反町雄二：崩壊土砂の流下範囲，土木技術資料，Vol.19, No.10, pp.37-42, 1977.
- 7) 森脇 寛：崩土の到達距離予測，地すべり，Vol.24, No.2, pp.10-16, 1987.
- 8) 井料達生，落合英俊，林 重徳，梅村 順：1992：山腹斜面崩壊時の崩壊土量と到達距離について，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，pp.852-853, 1992.
- 9) 寺田秀樹：可能性線形回帰分析による崩土の到達の検討，新砂防，Vol.47, No.1, pp.37-42, 1994.
- 10) 大久保駿，吉松弘行，綱木亮介：資料解析によるがけ崩れの崩土の到達距離の予測，地すべり，Vo.32, No.2, pp.26-31, 1995.
- 11) 三井広人，大浦二郎：がけ崩れ災害実態（昭和58年～昭和60年），土木研究所資料，No.2429, 1987.
- 12) 山口柏樹：土砂災害に対する土質工学的実態調査「昭和46年台風25号による千葉県下災害の実態調査」報告書，文部省特定研究（昭和46年度）災害科学，pp.75-82, 1972.
- 13) 小野寺 透，吉中竜之進，風間秀彦：土砂崩壊に対する土質工学的実態調査「昭和46年台風25号による千葉県下災害の実態調査」報告書，文部省特定研究（昭和46年度）災害科学，pp.53-74, 1972.

- 14) 目黒公郎, 伯野元彦: 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東大地震研究所彙報, 第63巻, pp.409-468, 1988.
- 15) 「アカデミックロードマップと発展史・人物史」の委員会: 4.4 地盤の数値解析の実務への適用, 地盤工学会,
www.jiban.or.jp/images/file/AR_PDF/4-4AR.pdf, (参照 2020.11.16).
- 16) 土田孝, 森脇武夫, 熊本直樹, 一井康二, 加納誠二, 中井真司: 2014年広島豪雨災害において土石流が発生した溪流の状況と被害に関する調査, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.1, pp.33-52, 2016.
- 17) 高橋保, 吉田等: 土石流の停止・堆積機構に関する研究(1) —勾配の急変による堆積—, 京大防災研究所年報, No.22, B-2, pp.331-340, 1979.

第4章 崩壊土砂の到達域に関する室内模型実験と 質点モデルによる表現

崩壊土砂の到達域（到達距離や堆積形状）に与える因子には、崩壊土砂の地質や含水状態、流下する斜面の地表状態（粗さなど）、崩壊土砂の体積、斜面崩壊部と下部水平面との高低差および斜面の傾斜角度などが挙げられる。実際の崩壊事例に基づいて、これらの因子が到達域に与える影響を統計的な手法によって推定することも考えられるが、地質や流下する斜面の地表状態が異なる例を含むデータを参照する場合には結果の解釈が難しくなる。また、実例での到達域に関するデータは、複数の因子が同時に影響した結果であり、各因子の個別の影響の評価が難しい。これに対して、室内での模型実験では、限られた条件下での小規模なものとはなるが、各影響因子の設定がコントロールし易く、結果の解釈が容易となる。がけ崩れによる土砂災害では、保全対象物が斜面下方の住宅や道路であり、斜面法尻部で勾配が急変している箇所が多い。保全対象物の背後には 50° 、 60° といった勾配が急な斜面が数多く存在しているのが実態であろう。また、高梨ら¹⁾によれば、国土技術政策総合研究所で整理しているがけ崩れによる土砂災害時の実態データ（昭和56年～平成6年）から、全データ数の約8割が斜面下方の土地形状が平坦地であることを報告している。このような、斜面勾配が急で、かつ、斜面法尻部で勾配が急変する場合には、斜面の傾斜角度の違いが到達域に及ぼす影響が大きいことが推察される。

このようなことから、本章では、乾燥した砂試料を用いた室内模型実験を実施し、崩壊土砂の体積、斜面崩壊部と下部水平面との高低差、そして、斜面の傾斜角度が崩壊土砂の到達域に与える影響について観察する。流下させる砂試料、斜面板と水平板の材質は全ての実験ケースで同一とした。実験では、傾斜した板上を流下する砂が下部水平面に到達したときに形成する堆積物の形状に注目する。実験結果に基づいて、砂試料の体積、下部水平面から試料箱の下端までの高さの違い、そして斜面の傾斜角度が砂の堆積形状、到達域に与える影響について考察を行う。また、流下する土砂の運動を理解し、質点の滑動でモデル化するにあた

っては、土砂の堆積形状とその重心位置についても考える必要がある。そこで、Fringe投影²⁾³⁾とその画像解析によって、堆積砂の流下方向断面の形状を計測し、重心位置の算出を行い、斜面傾斜角度および下部水平面から試料箱の下端までの高さの違いが砂の堆積形状、重心位置に与える影響について考察する。

また、前章でも述べたように、崩壊土砂の到達域は、斜面法尻部の初期地形だけでなく、法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程にも影響を受けていることが考えられる。このことから、本章では、滑動による質点モデルを用いて、遷緩点付近における崩壊土砂の運動状態の変化が到達域に及ぼす影響について検討を行う。まず、斜面法尻部での土砂堆積にともなう影響を、勾配急変部における土砂同士の衝突運動と土砂の乗り越え運動の2つの単純な運動モードで表現する。そして、記述した計算モデルの計算結果と室内模型実験結果との比較を示し、土砂の衝突あるいは乗り越え運動の到達域への影響を検討する。これらの結果から、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察を行う。

4.1 乾燥砂の流下実験

4.1.1 室内模型実験の概要

室内模型実験装置の模式図を図4-1に示す。斜面部と水平面を構成する二面の板には、市販のコンパネを使用した。斜面傾斜角度 β は斜面部を構成するコンパネの角度を変えることで調整した。がけ崩れによる土砂災害では斜面下方の土地形状に平坦地が多いことから、実験装置における斜面下部の平面は水平とした。本実験では、平面な斜面上に試料箱を設置し砂試料を流下させる実験⁴⁾⁵⁾⁶⁾（以降平板斜面実験とする）と斜面および水平板部に設けた長方形の溝型の流路内で砂試料を流下させる実験（以降定幅流路実験）を行った。平板斜面実験での砂試料は、溝型流路を設置しないため、下流に向けて斜面板上を斜面流下直交方向にも拡がりながら流下し、水平板上に堆積する。一方の定幅流路実験では、砂試料が流下できる幅が定幅化される。定幅化することで、後出の個別要素解析や質点モデルによる2次元の解析に条件を近づけることを目的としている。

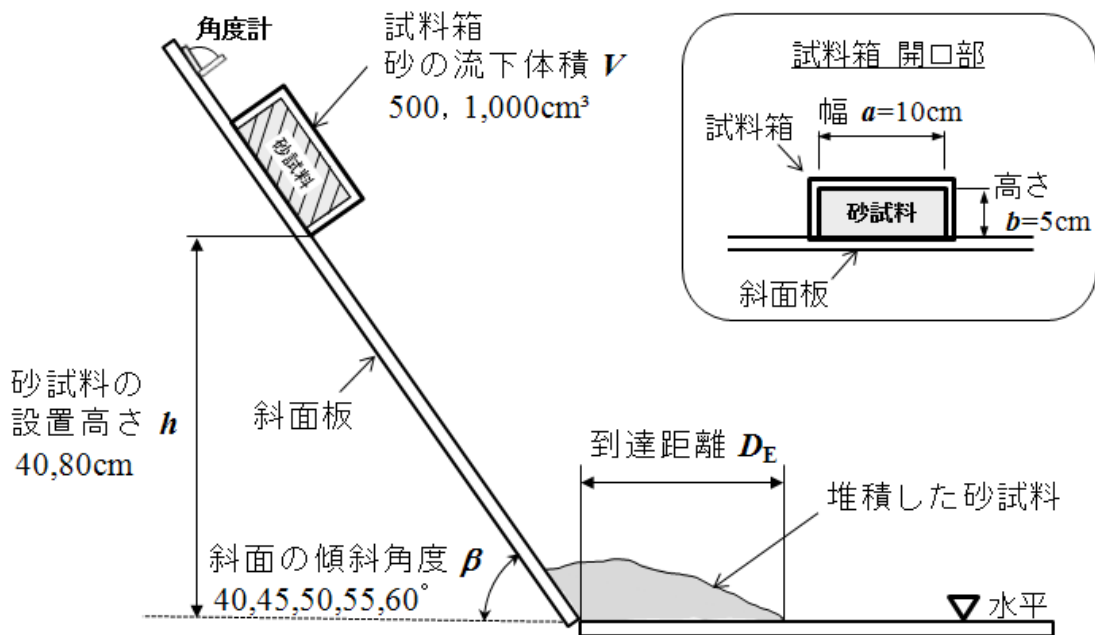


図 4-1 室内模型実験装置の模式図

4.1.2 実験に用いた砂試料

実験には、粒径2mm以下で自然乾燥状態の砂試料（鳥取砂丘砂，安息角 30° ，含水比 $w=0.23\%$ ）を使用した。砂試料の特性を表4-1に示す。表中の土粒子密度はJIS A 1202，最大密度・最小密度はJIS A 1224によって求めた。また，砂試料の地盤材料の工学的分類方法（地盤工学会基準：JGS 0051-2009）による小分類は砂(S)， D_{50} が 0.33mm ， U_c が 1.25 である。砂試料の粒径加積曲線は図4-1に示すようである。

表 4-1 実験に用いた砂試料の特性

土粒子密度	最大密度	最小密度
2.652g/cm^3	1.719g/cm^3	1.398g/cm^3

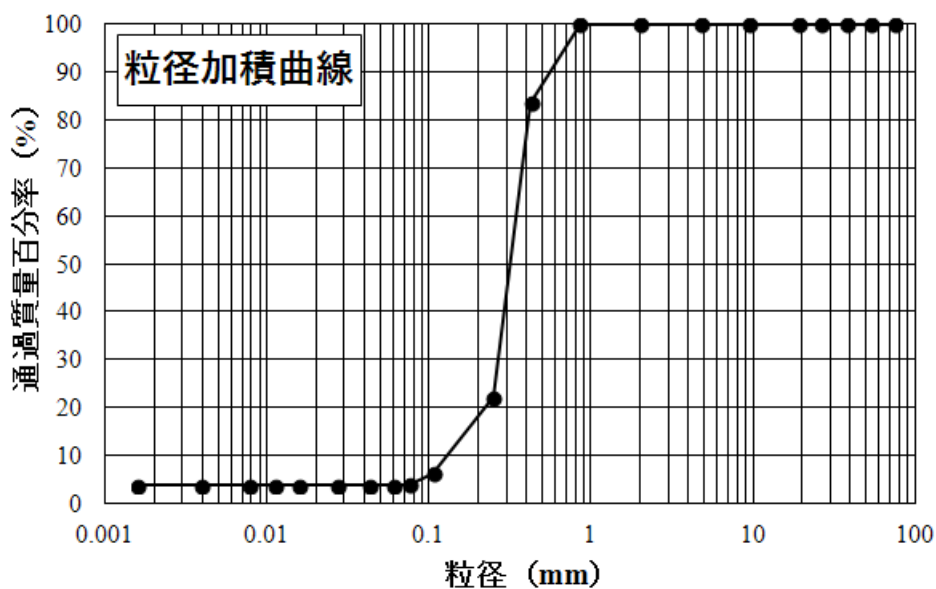


図 4-2 実験に用いた砂試料の粒径加積曲線

4.1.3 平板斜面実験

(1) 実験方法

図4-3に平板斜面実験で用いた模型を示す．本研究では，斜面下部の平面位置から試料箱の下端までの高さを設置高さ h と称することとする．斜面上に設置した試料箱の斜面下方側の断面形状は，図中に示すように幅 $a=10\text{cm}$ ，高さ $b=5\text{cm}$ の長方形である．

斜面板および水平板には，市販のコンパネを用いている．これらの板の表面は，流下試験後に斜面板上に砂粒子が残留することを確認できない凹凸状態にある．したがって，板表面と砂の間に生じる摩擦角は，実験に用いた乾燥砂が示す安息角より小さいと言える．

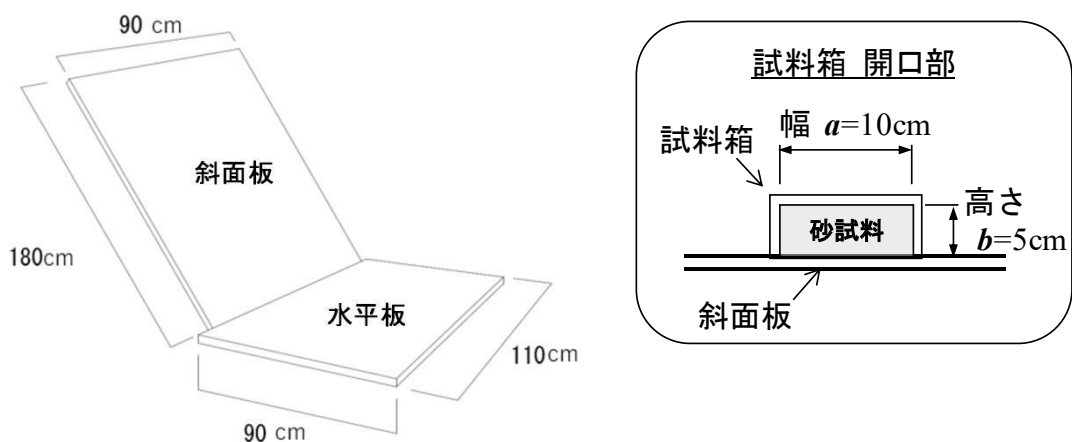


図 4-3 平板斜面実験で用いた室内模型実験装置の概要

表4-2に平板斜面実験における実験ケースを示す。斜面を流下した砂の堆積形状，到達域は，砂が流下する斜面の勾配，砂試料の量および砂試料の設置高さによって変化すると考えられる。このことから，斜面の傾斜角度 β が40, 45, 50, 55, 60°の5通り，砂の流下体積 V が500, 1,000cm³の2通り，砂試料の設置高さ h を40, 80cmの2通りの計20通りの条件で室内実験を実施した。本実験での斜面傾斜角度 β は，がけ崩れによる土砂災害発生箇所のような急斜面を想定した設定である。

表 4-2 平板斜面実験における実験ケース

斜面の傾斜角度 β	砂の流下体積 V	砂試料の設置高さ h
40° 45° 50° 55° 60°	500cm ³ 1,000cm ³	40cm 80cm

実験では，まず，斜面板上の所定の位置に設置した試料箱に砂を入れ，ヘラ棒で砂表面を均す。そして，図4-4のように試料箱の斜面下方側の板を引抜けば，砂は一気に斜面下方に向かって運動を開始する。試料箱から流下した砂試料が斜面底面部に堆積した後，図4-5Aのように堆積砂の流下方向の最大の長さ（到達距離 D_E ）とそれに直交する方向の最大の長さ（幅 W_E ）を計測した。このときの計測方法は次のとおりである。まず，堆積した砂で下部水平板に方眼状に描いている黒線や板表面が視認できない範囲を堆積部とする。そして，この堆積部の末端の斜面部勾配線が水平板と交差すると目視で判断できる位置（図4-5Bの矢印部）として D_E と W_E を計測した。飛散している砂粒子は計測に含めていない。

表4-2に示した各実験ケースについて3回以上の実験を実施した。試料のリリースがスムーズに実施された実験の計測値の平均から大きく逸脱するもの（平均の5%を超えるもの）を取り除いたのちに，3つのデータを得て平均値を求めている。

本実験においては、質量によって試料体積 V の管理を行っている。実験の前段階として体積が $1,000\text{cm}^3$ となるように作成した試料箱に鳥取砂丘砂を3回に分けて充填し、質量を測定した。同様の実験を3度実施し、平均となる質量 $1,491\text{g}$ を本試料における体積 $1,000\text{cm}^3$ とした（相対密度 $D_r=33.4\%$ ）。体積 500cm^3 は、 $1/2$ 倍の質量である 745g である。

図4-3中に示したように、試料箱の斜面下方側での砂試料の断面形状は幅 $a=10\text{cm}$ 、高さ $b=5\text{cm}$ の長方形であり、 $V=500\text{cm}^3$ と $V=1,000\text{cm}^3$ で同じである。 $V=500\text{cm}^3$ と $V=1,000\text{cm}^3$ では、試料箱の斜面下方側から斜面上方側へ向けての試料箱内での砂試料の長さが異なる。本実験では斜面下部の平面位置から試料箱の下端までの高さを試料箱の設置高さ h として実験を行っている。このため、同一の β における試料箱内での砂試料の重心位置の斜面下部の平面位置からの高さは、 h の値が一定の場合でも、 $V=500\text{cm}^3$ と $V=1,000\text{cm}^3$ で異なっている。また、 h の値が一定で、かつ、同一の V であっても、 β によって試料箱内の砂試料の重心位置の斜面下部の平面位置からの高さが異なることになる。

なお、試料箱内の砂試料の重心位置の斜面下部の平面位置からの高さを砂試料の設置高さとする場合には、 $V=500\text{cm}^3$ と $V=1,000\text{cm}^3$ で、砂試料が流下する斜面長が異なることになる。また、同一の V であっても、 β によって砂試料が流下する斜面長が異なる。このように、試料箱内で斜面流下方向に長さを持つ砂試料を用いる場合、砂試料の重心位置の斜面下部の平面位置からの高さを砂試料の設置高さとし、砂が流下する斜面長を一定とする実験は困難である。また、試料箱内での砂試料の単位体積重量が一定となるように砂試料を充填することは困難であり、試料箱内の砂試料の重心位置を正しく知ることが難しい。これらのことから、本研究では、斜面下部の平面位置から試料箱の下端までの高さを試料箱の設置高さ h として実験を行った。

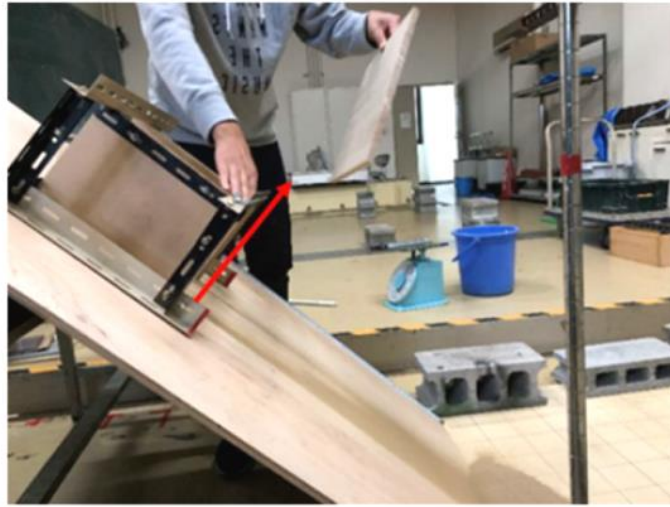
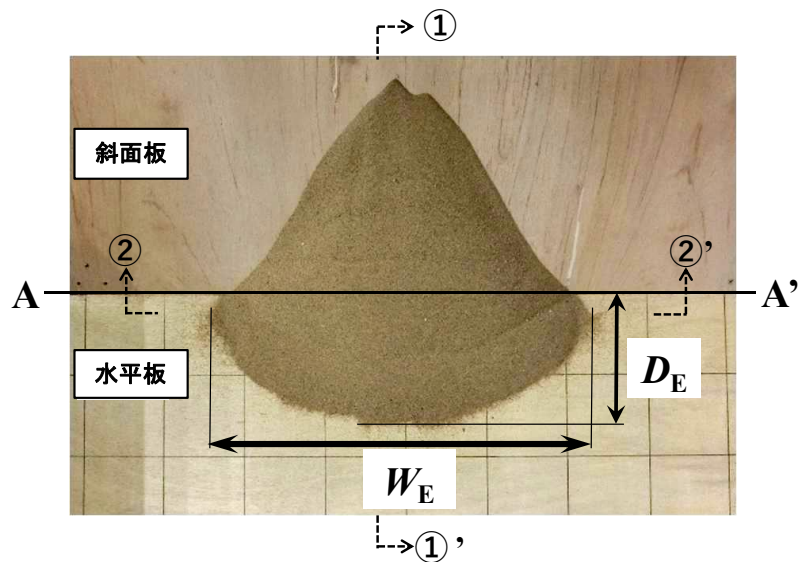
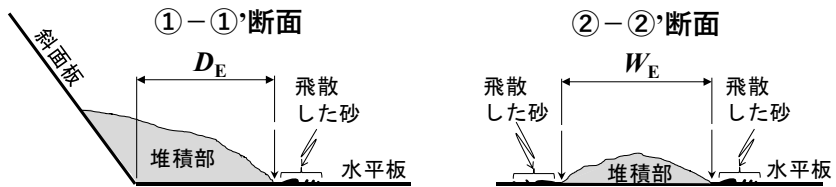


図 4-4 実験状況 試料箱斜面下方側の開放



A : 平面写真



B : 模式断面図

図 4-5 平板斜面実験における堆積砂の到達距離 D_E と幅 W_E

(2) 実験結果

平板斜面実験結果の1例として、 $V=1,000\text{cm}^3$ 、 $h=80\text{cm}$ における斜面傾斜角度 β が 45° と 50° での堆積状況を図4-6に示す。斜面傾斜角度 β が大きいほうが到達距離 D_E が大きい様子が見られる。

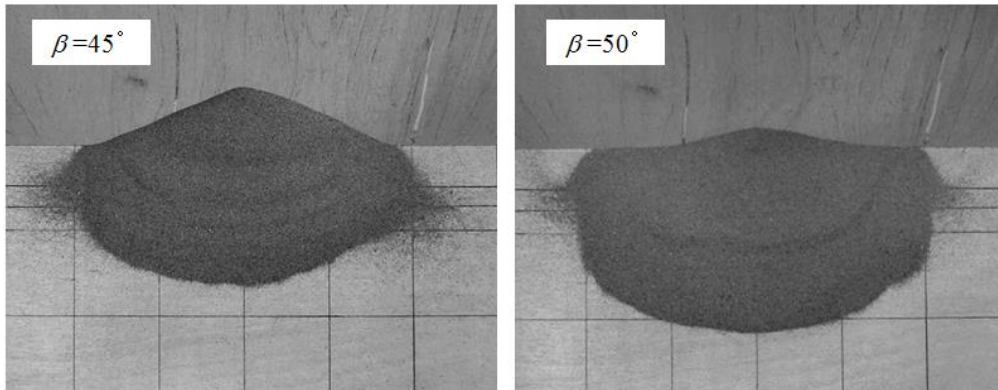


図4-6 平板斜面実験結果の堆積状況例 ($V=1,000\text{cm}^3$ 、 $h=80\text{cm}$)

(a) 斜面傾斜角度、流量、設置高さとの関係

図4-7は、平板斜面実験結果の斜面傾斜角度 β と到達距離 D_E との関係を示したものである。また、図4-8は斜面傾斜角度 β と堆積砂の幅 W_E との関係を示したものである。これらの図中のデータは、前述したような3つのデータの平均値である。

図4-7に示すように、実験時の斜面傾斜角度 ($\beta=40\sim 60^\circ$) の範囲において、到達距離 D_E は、何れの V および h においても、 β の増大とともに、増加傾向を示した。また、 h の値が一定の場合、 V が大きいほど D_E が大きいことが判る。そして、 V の値が一定の場合、 h が大きいほど D_E が大きくなった。

一方、堆積砂の幅 W_E は、図4-8に示すように、 β の増大にともなう変化は観察されなかった。 D_E と同様に、 h の値が一定の場合には V が大きいほど W_E が大きく、 V の値が一定の場合には h が大きいほど W_E が大きい傾向が見られた。

なお、前述したように、試料箱内での砂試料の重心位置の斜面下部の平面位置からの高さ（初期位置における砂試料の位置エネルギー）は、同一の h であっても、 V や β の値によって異なるが、このことによって、

図4-7および図4-8に示す β と D_E または W_E との関係の傾向が大きく変わることはないものと考えている。

(b) 到達域の定量的表現の試み

図4-7および図4-8から判るように、斜面傾斜角度 β と到達距離 D_E および堆積砂の幅 W_E との関係は、 h だけでなく砂試料の体積 V によっても異なっている。このことから、砂試料の体積 V と同体積を有する立方体の一辺長($V^{1/3}$)を用いて、 D_E および W_E を無次元化した値($D_E/V^{1/3}$, $W_E/V^{1/3}$)で実験結果を整理した。

図4-9は、実験結果を用いて整理した β と無次元化した到達距離 $D_E/V^{1/3}$ との関係を示したものである。同様に、図4-10は β と無次元化した堆積砂の幅 $W_E/V^{1/3}$ との関係を示したものである。

前出図4-7の β と D_E との関係では、 h の値が一定の場合、 $V=500\text{cm}^3$ に比べて $V=1,000\text{cm}^3$ のほうが、全体的に D_E の値が大きいなどの違いが見られたが、図4-9のように $D_E/V^{1/3}$ を用いた整理では、両 V の値での β と $D_E/V^{1/3}$ との関係に大差がない。図4-10の β と $W_E/V^{1/3}$ との関係については、 β と $D_E/V^{1/3}$ との関係ほどではないが、 β と W_E との関係に比べると、同一の h の値での両 V の値の β と $W_E/V^{1/3}$ との関係が近づいているように見える。

この結果は、崩壊土砂の到達距離や堆積幅の推定を行う際には、崩壊土砂量そのものではなく、崩壊土砂量と同体積を有する立方体の一辺長($V^{1/3}$)を用いたほうが、崩壊斜面の傾斜角度や崩壊高さの違いによる到達距離の変化が把握し易くなることを示唆している。

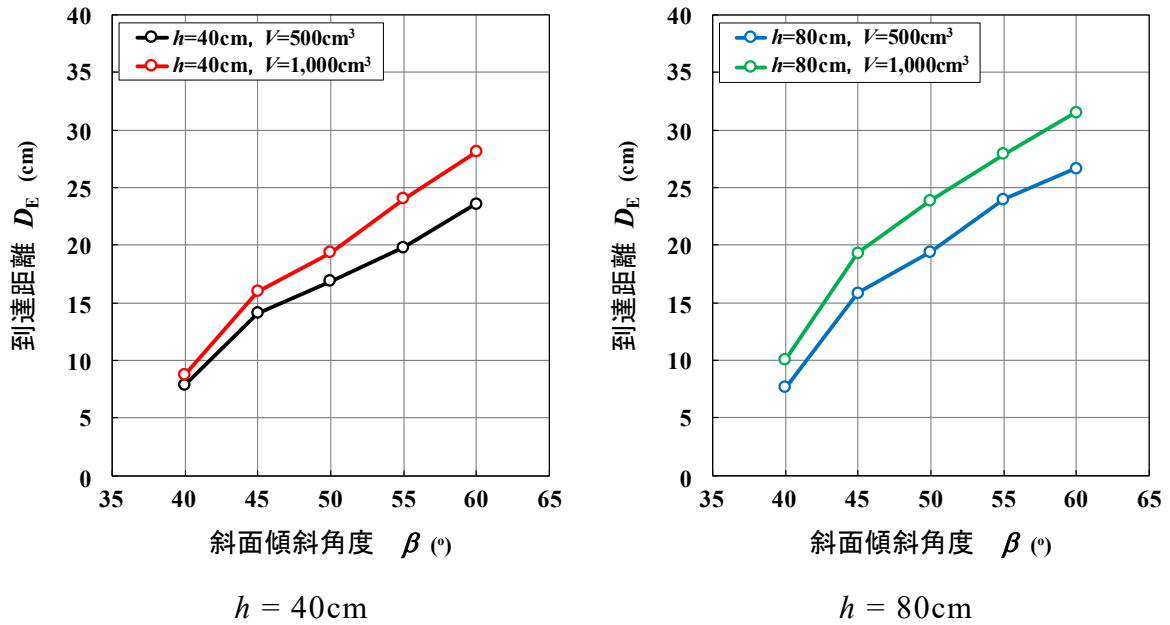


図 4-7 斜面傾斜角度 β と最大到達距離 D_E との関係

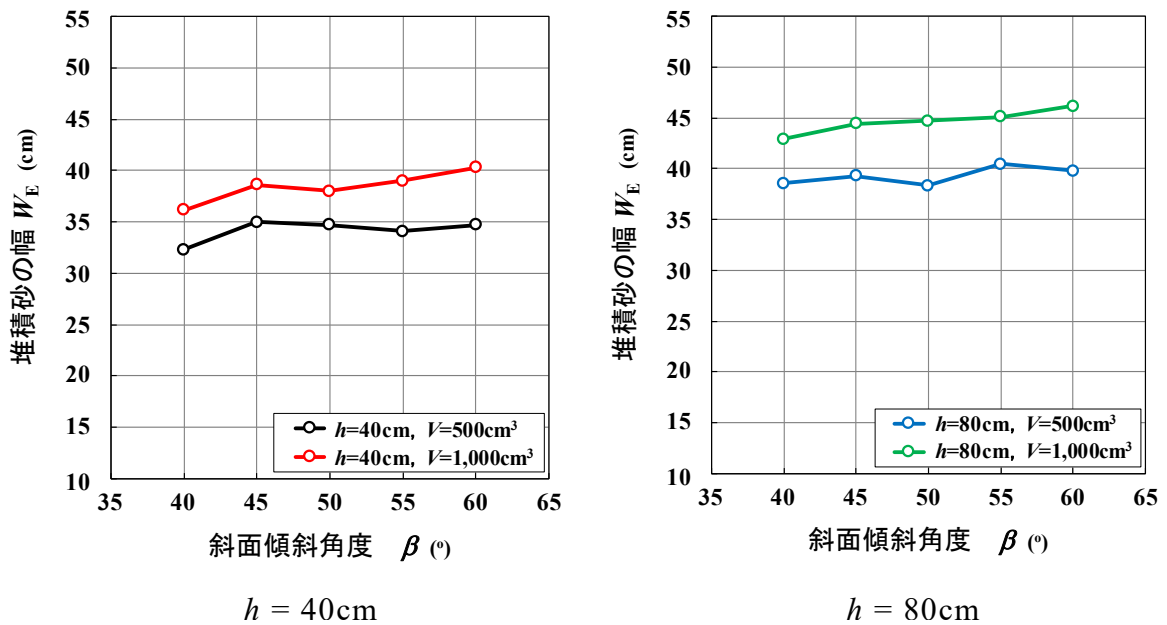


図 4-8 斜面傾斜角度 β と堆積砂の最大幅 W_E との関係

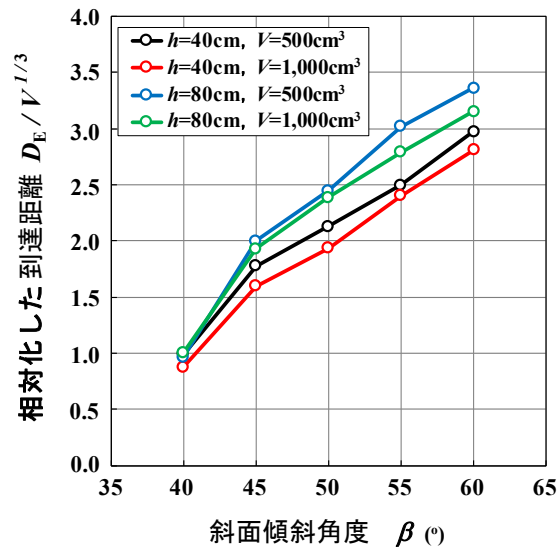


図 4-9 斜面傾斜角度 β と無次元化した到達距離 $D_E/V^{1/3}$ との関係

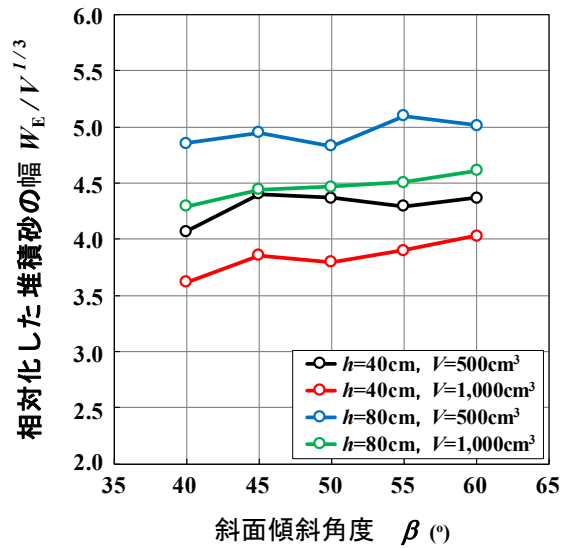


図 4-10 斜面傾斜角度 β と無次元化した堆積砂の幅 $W_E/V^{1/3}$ との関係

4.1.4 定幅流路実験

(1) 実験方法

図4-11に定幅流路実験で用いた模型を示す。平板斜面実験と同じく、斜面下部の平面位置から試料箱の下端までの高さを設置高さ h と称する。

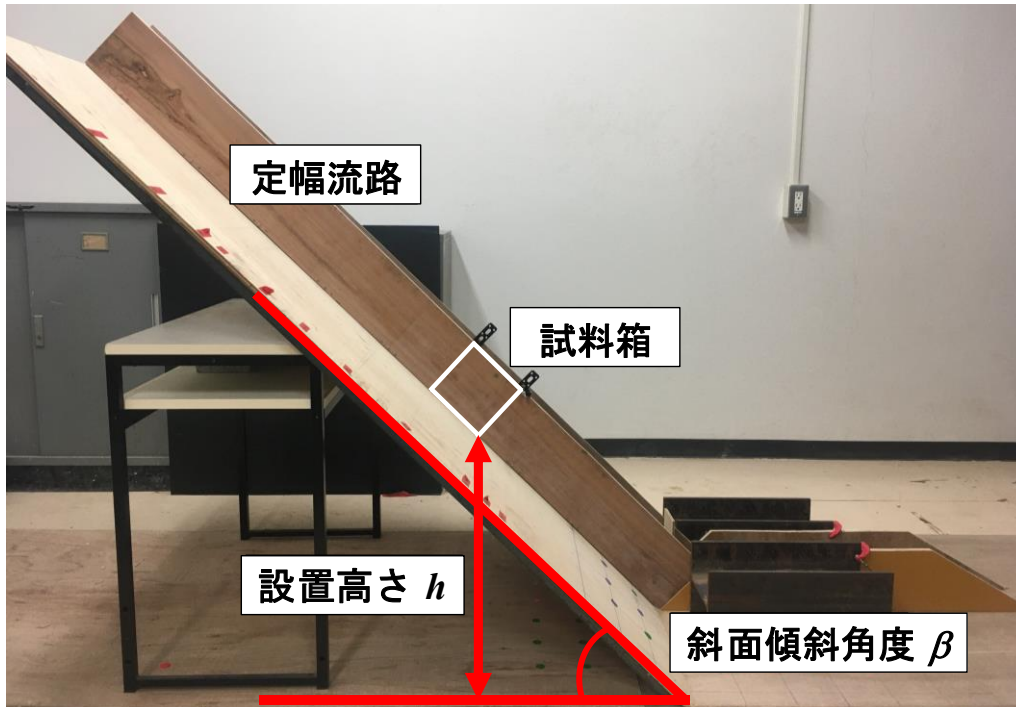


図 4-11 定幅流路実験で用いた室内模型実験装置

斜面板および水平板は、平板斜面実験で用いたものと同じである。斜面上に設置した試料箱の斜面下方側の断面形状も平板斜面実験で用いたものと同じく、幅 $a=10\text{cm}$ 、高さ $b=5\text{cm}$ の長方形である。



本実験では、流下方向の運動・到達距離に注目するために流路を設け、試料の運動方向を限定している。斜面板上の流路については、流路の両側共に斜面板と同一の板材を用いている。水平板上の流路は、一方の片側は斜面板と同一の板材、もう一方の面は砂試料の堆積状況を観測するために透明なアクリル板を用いている。流路幅は試料箱の斜面下方側の断面と同じく 10cm とした。この流路を定幅流路と称する。

表4-3に定幅流路実験における実験ケースを示す。平板斜面実験と同

じく、斜面の傾斜角度 β が40, 45, 50, 55, 60°の5通り、砂の流下体積 V が500, 1,000cm³の2通り、砂試料の設置高さ h を40, 80cmの2通りの計20通りの条件で室内実験を実施した。

表 4-3 定幅流路実験における実験ケース

斜面の傾斜角度 β	砂の流下体積 V	砂試料の設置高さ h
40°	500cm ³ 1,000cm ³	40cm 80cm
45°		
50°		
55°		
60°		

実験では、平板斜面実験と同じく、まず、斜面板上の所定の位置に設置した試料箱に砂を流し入れ、ヘラ棒で砂表面を均す。試料体積 V の管理方法は平板斜面実験と同じである。そして、4-12のように試料箱の斜面下方側の板を引抜けば、砂は一気に斜面下方に向かって運動を開始する。試料箱から流下した砂試料が斜面底面部に堆積した後、堆積砂の流下方向の最大の長さ（到達距離 D_E ）を計測した。平板斜面実験と同様に、砂粒子が単独で飛散しているような場合は堆積しているとみなさず、計測に含めていない。堆積した砂試料の状況の1例を4-13に示す。表4-3に示した各実験ケースについて3回以上の実験を実施した。試料のリリースがスムーズに実施された実験の計測値の平均から大きく逸脱するもの（平均の5%を超えるもの）を取り除いたのちに、3つのデータを得て平均値を求めている。

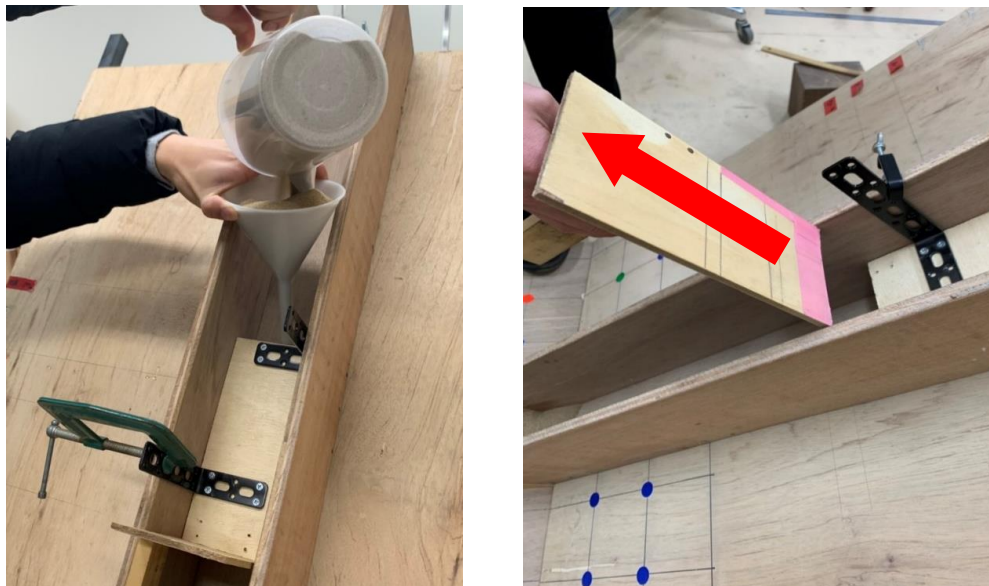


図 4-12 実験状況 試料充填の様子と試料箱斜面下方側の開放

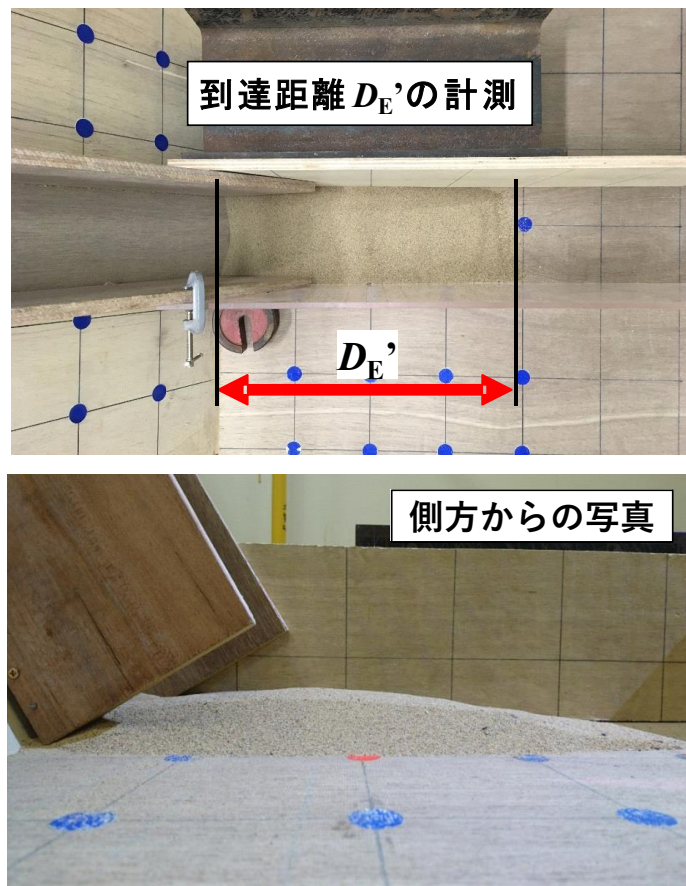


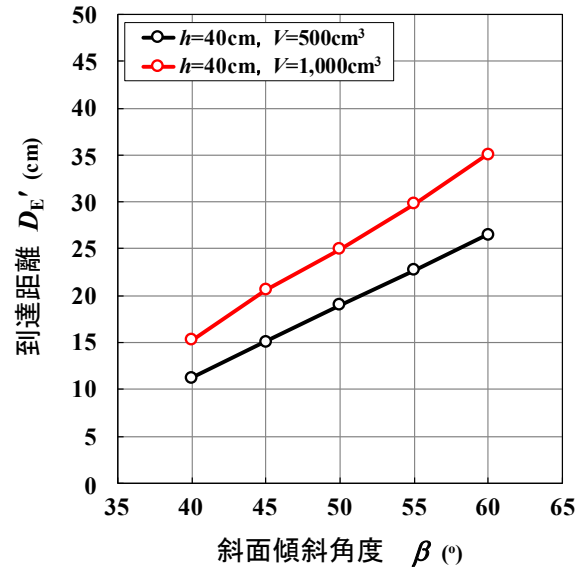
図 4-13 定幅流路実験における堆積砂の到達距離 D_E'

(2) 実験結果

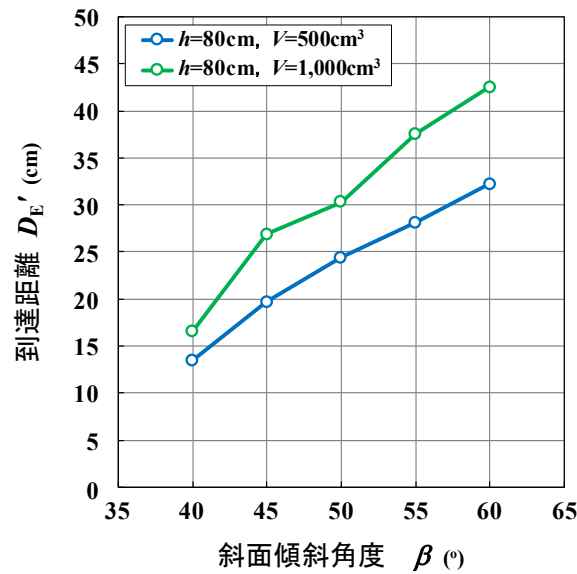
図4-14は、定幅流路実験結果の斜面傾斜角度 β と到達距離 D_E' との関係を示したものである。図中のデータは、前述したような3つのデータの平均値である。

図4-14に示すように、実験時の斜面傾斜角度 ($\beta=40\sim 60^\circ$) の範囲において、到達距離 D_E' は、何れの V および h においても、 β の増大とともに、増加傾向を示した。また、 h の値が一定の場合、 V が大きいほど D_E' が大きいことが判る。そして、 V の値が一定の場合、 h が大きいほど D_E' が大きくなった。

これらの実験結果の傾向は前出の図4-7の平板斜面実験と同様であるが、定幅流路実験の到達距離 D_E' は平板斜面実験の到達距離 D_E に比べて大きな値を示している。この原因として次のようなことが考えられる。定幅流路実験では、砂試料が流下、堆積できる斜面および水平板上での幅（流下方向に対して直交方向）が流路の側壁で定幅化されている。一方の平板斜面実験での砂試料は、斜面流下直交方向にも拡がりながら流下し、水平板上に堆積する。このため、定幅流路実験での斜面流下時の砂試料の流下方向の運動エネルギーが、平板斜面実験に比べて大きいことが考えられる。



A : $h = 40\text{cm}$



B : $h = 80\text{cm}$

図 4-14 斜面傾斜角度 β と最大到達距離 D_E' との関係

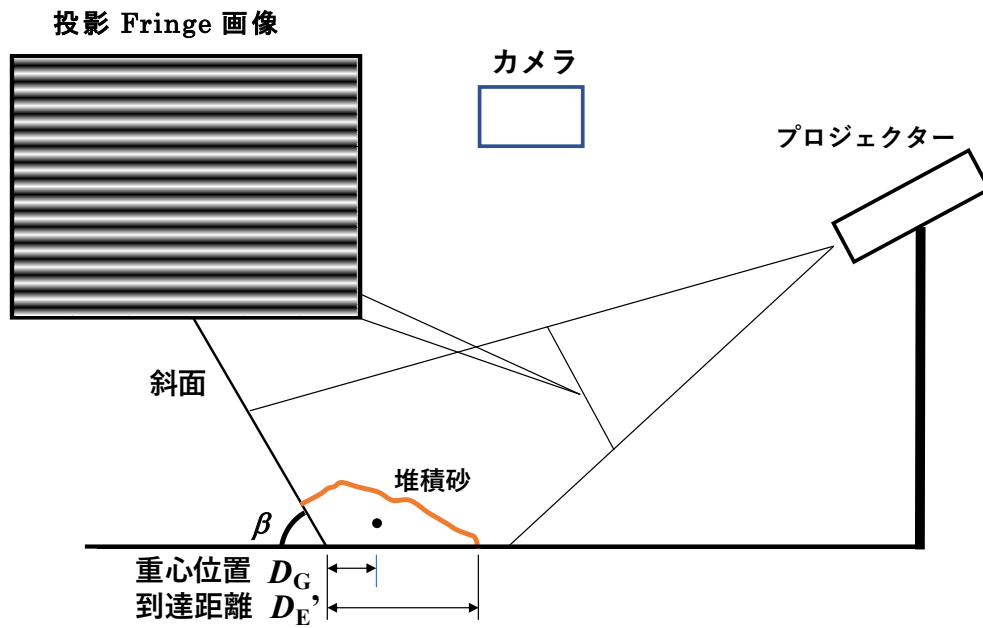
4.2 Fringe 投影による堆積砂の形状把握

前節においては，砂試料が堆積したと判断できる領域の先端を到達距離として整理した．しかし，流下する土砂の運動を理解し，質点の滑動でモデル化するにあたっては，崩壊土砂全体の代表点である重心位置についても考える必要がある．そこで，画像解析によって堆積砂の流下方向断面の形状を計測し，重心位置の算出を行う．そして，重心位置と到達距離の関係性や，試料の運動エネルギーを踏まえた考察を試みる．

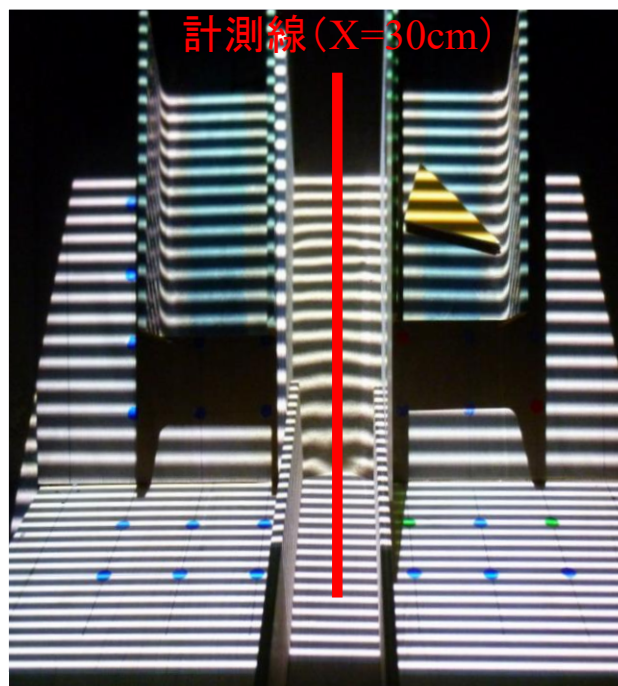
4.2.1 実験の概要

本解析は，堆積した砂試料にFringe画像を投影し，画像解析を行うことで表面形状を計測するものである²⁾³⁾．**図4-15A**に実験装置の概要図を示す．実験は，照明を消灯し，室外光を遮断した暗室状態で実施した．実験は，定幅流路実験で堆積した砂試料に対して実施した．堆積砂の中心を流下方向の1計測線（**図4-15B**）について，物体の有無（砂の堆積前後）による高さの変化を取得する．これを用いて，堆積砂の表面形状と重心位置を算出する．なお，本研究における画像処理には鳥取大学総合メディアセンターが提供する MATLAB 2018a を利用している．また，本研究で，デジタルカメラはFUJIFILM FinePix XP30，プロジェクターはEPSON EB-SO4を使用した．

巻末の付録Aに，Fringe画像投影法による計測方法を示している．



A: 実験装置の概要



B: 投影Fringe画像と計測線

図4-15 実験装置の概要と投影Fringe画像

4.2.2 堆積砂の表面形状計測および重心位置の算出

ここでは、前節の定幅流路実験で堆積した砂試料に対して、Fringe画像投影とその画像解析によって計測した堆積砂の流下方向の表面形状と重心位置についてまとめる。堆積砂の表面形状の計測を行った実験ケースは、斜面の傾斜角度 β が40, 45, 50, 55, 60°の5通り、砂の流下体積 V が1,000cm³の1通り、砂試料の設置高さ h が40, 80cmの2通りの計10通である。堆積砂の中心を流下方向の1計測線（図4-15B）について、物体の有無（砂の堆積前後）による高さの変化を取得する。これを用いて、堆積砂の表面形状と重心位置を算出する。

形状計測について、物体の有無による高さの変化が得られる点の数は、対象物上に投影されている波形がピーク値を示している点の数となっている。そこで、Fringeパターンについて、基本パターンと、基本パターンから1/4周期ずらしたもの、波長を1/2倍し、周期を $\pm 1/3$ 周期ずつずらしたパターンの計5パターンを照射することで取得点数を増やした。物体の表面形状は、得られた計測点を直線で結び、多角形で近似している。図4-16の模式図に示すように、得られた多角形について、斜面板と水平板との交点を原点として三角形に分割したうえで、重心位置を算出した。このとき、堆積している砂試料内での単位体積重量は一定と仮定している。図中に示すように、 D_G は堆積砂の重心位置の斜面法尻部(斜面板と水平板の接合部)からの水平方向の距離である。また、 H_G は堆積砂の水平板からの高さである。

なお、計測した点での砂の堆積前後の高さの変化が2mm以下である場合、模型実験に使用した乾燥砂試料の最大粒径以下であり、模型実験においても堆積していない領域としているため、その点は堆積砂の表面形状を表す計測点として使用していない。また、斜面板や水平板上で明らかに堆積砂が計測されていない領域で堆積前後の高さの変化が計測されている点については、画像解析の過程で生じた誤差であると考えられるため除外している。

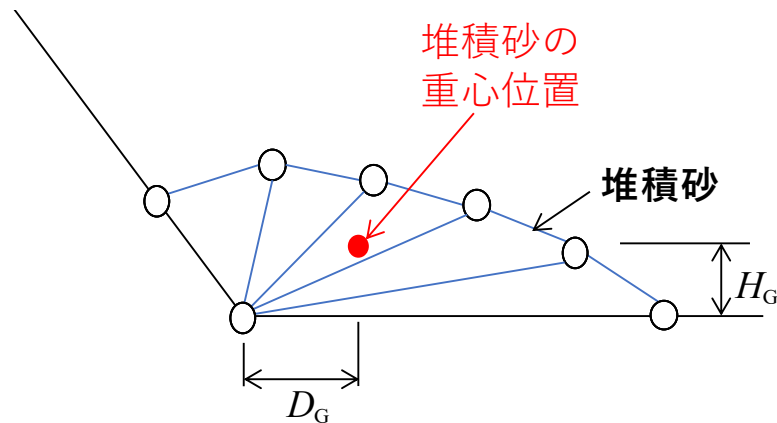


図4-16 堆積砂の鉛直断面の模式図 重心位置の決定

4.2.3 斜面傾斜角度と堆積域との関係について

図4-17および図4-18は、堆積した砂試料の計測線（図4-15B）上での鉛直断面図（図4-16参照）である。図4-17, 4-18中には、 D_G , H_G および定幅流路実験で計測した到達距離 D_E' も併せて記載している。また、図4-19は、斜面傾斜角 β と D_E' , D_G , D_G/D_E' （重心位置/到達距離）および H_G との関係を整理したものである。

(1) 斜面傾斜角度 β と到達距離, 重心位置との関係

まず、定幅流実験で計測した到達距離 D_E' と画像解析求めた重心位置 D_G との関係について述べる。図4-19 Aおよび図4-19 Bは、斜面傾斜角度 β と到達距離 D_E' および重心位置 D_G との関係を示したものである。両図に示すように、実験時の斜面傾斜角度（ $\beta=40\sim 60^\circ$ ）の範囲においては、 D_G は D_E' と同様に、何れの h の値においても、 β の増大とともに、増加傾向を示している。ただし、 D_G の β の増大に伴う増加の割合は、 D_E' に比べて小さい。

図4-19Cは、 β と D_G/D_E' （ D_G と D_E' の比）との関係を示したものである。図には h が40cm, 80cmの両ケースを併せて示している。図に示すように、両 h の値での β と D_G/D_E' との関係は近い値を示している。また、両 h の値での β と D_G/D_E' との関係は、 β の増大とともに増加傾向を示し、 $\beta=55^\circ$

で最大となった後、減少している。限られた条件下での室内模型実験での傾向であるが、興味深い結果である。崩壊土砂の重心位置を代表した質点モデルの計算結果から、崩壊土砂の最大到達距離を見積もる際に、この知見が役立つことが期待される。

(2) 斜面傾斜角度 β と堆積形状との関係

次に、斜面傾斜角度 β と堆積形状の関係について述べる。図4-17、図4-18は画像解析によって求めた堆積砂の鉛直断面図である。これらの図を見ると、砂試料の設置高さ h が40cm、80cmのいずれの場合も、斜面傾斜角度 β が 40° 、 45° のときには斜面板上に砂試料が残っている様子が確認できる。定幅流路実験時の目視でも斜面板上に砂試料が残留している様子が確認されている。そして、定幅流実験時の目視、画像解析による形状計測のどちらの場合でも、斜面傾斜角が 50° を超えると、砂試料の大半は水平板上に堆積する。水平板上に堆積する砂試料の高さは、 $\beta=45^\circ$ 付近で最大となり、 β の増加に伴い小さくなる傾向が見られる。

また、図4-19 Dは、 β と水平板上に堆積した砂試料の重心位置の水平面からの高さ H_G との関係を示したものである。図に示すように、 H_G は斜面傾斜角度 β の増大とともに、低くなる傾向を示している。

以上の結果は、砂試料の堆積形状、到達距離、重心位置は、斜面傾斜角度 β の変化に大きな影響を受けていることを示している。この斜面傾斜角度 β の影響は、斜面法尻部（遷緩点）での土砂の運動エネルギーや重心位置の運動経路の変化によるものと考えられる。したがって、崩壊土砂の到達域の予測では、これらに関する情報が必要である。

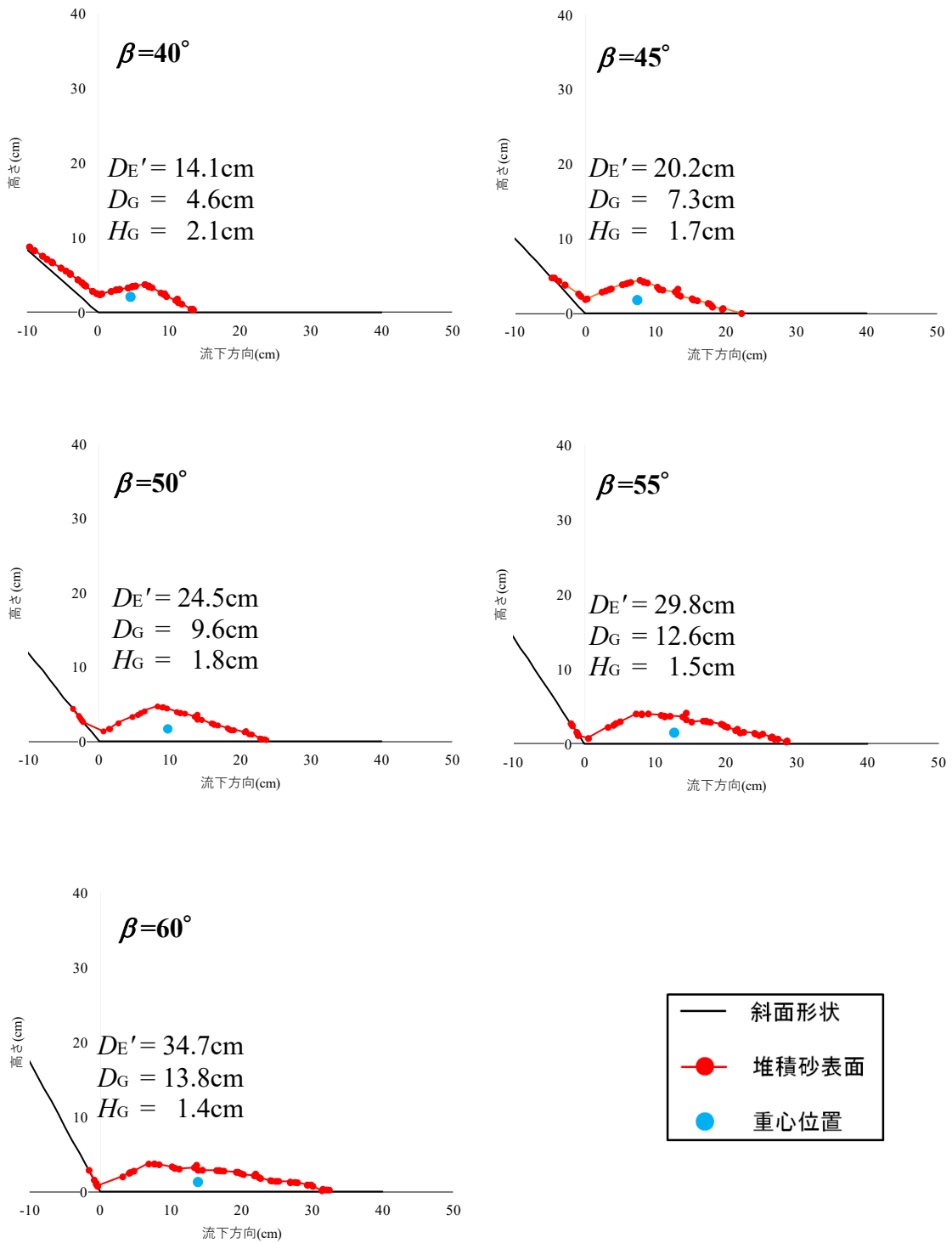


図4-17 堆積砂の鉛直断面図 ($h=40\text{cm}$, $V=1000\text{cm}^3$)

第4章 崩壊土砂の到達域に関する室内模型実験と質点モデルによる表現

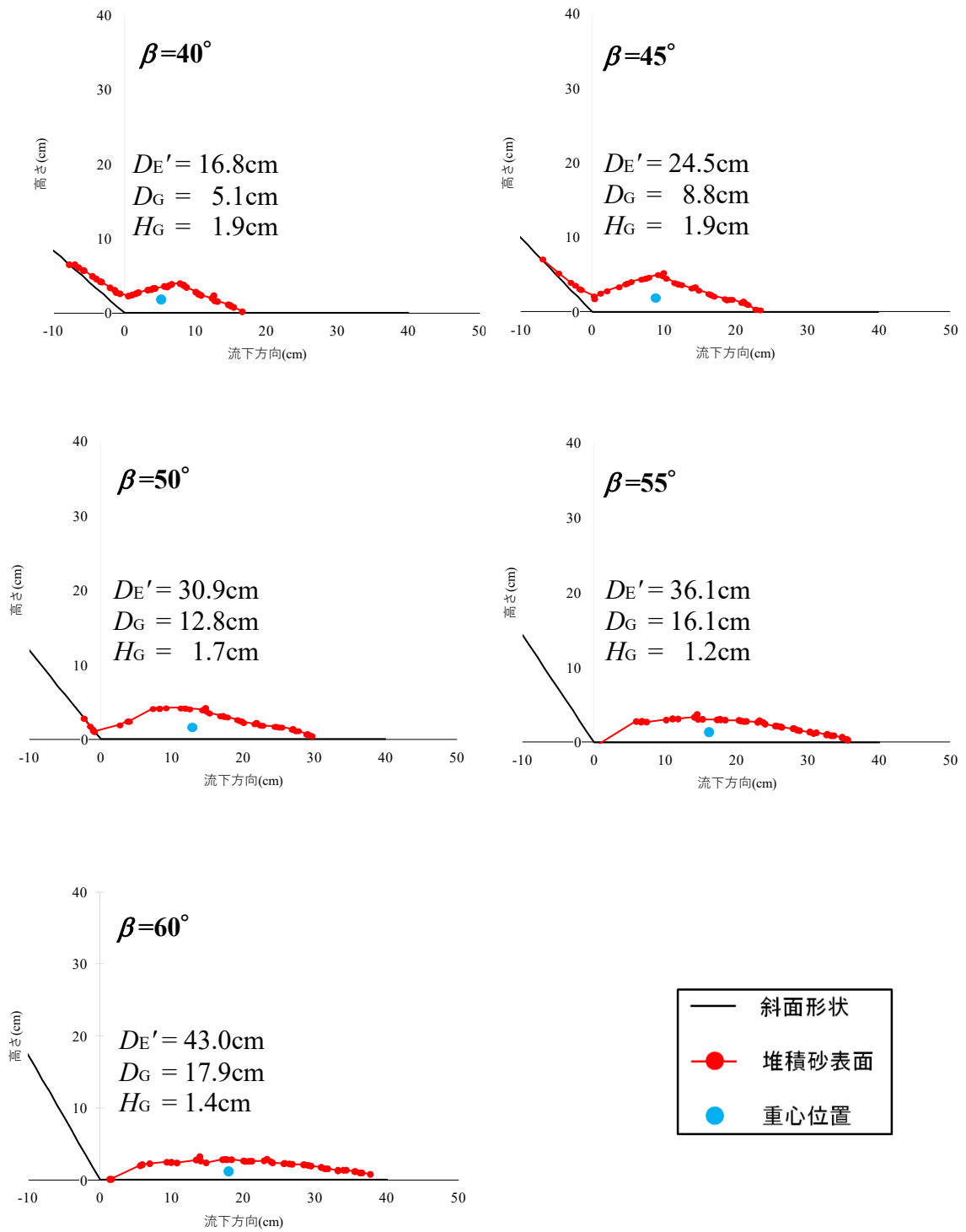
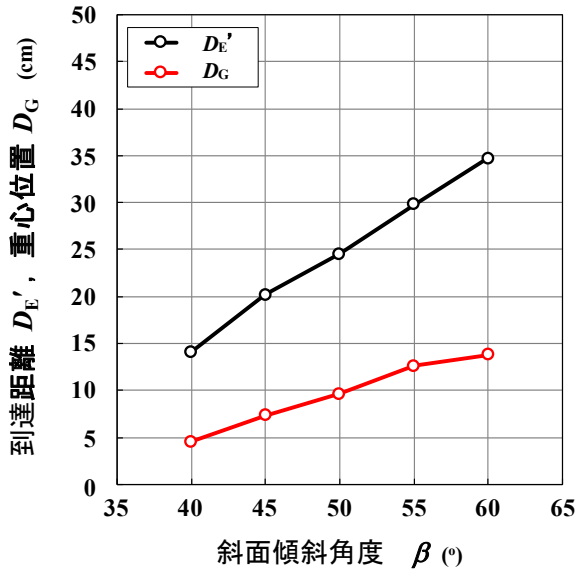
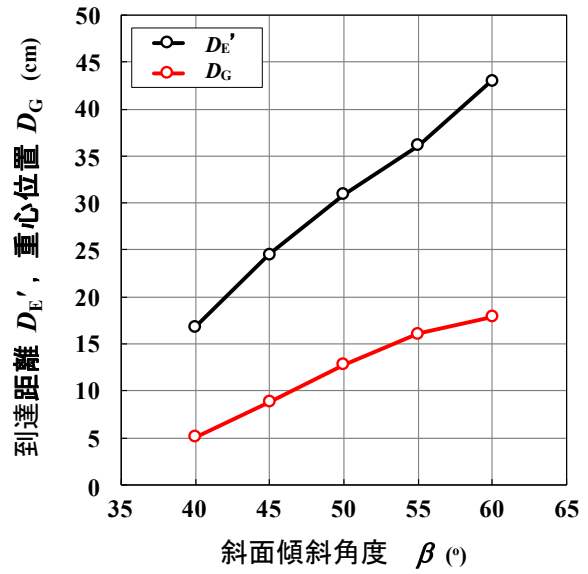


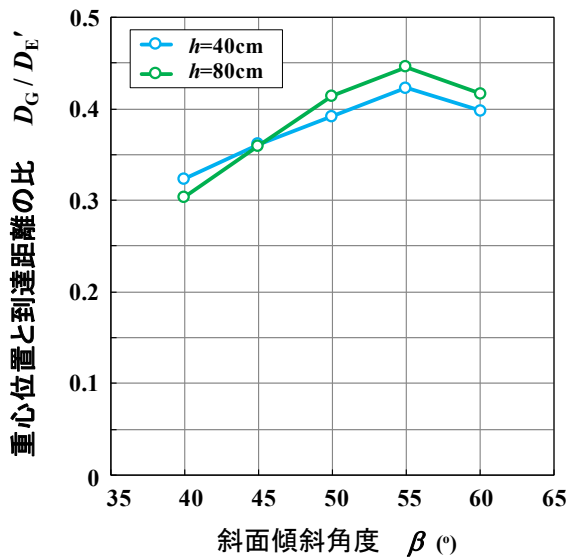
図4-18 堆積砂の鉛直断面図 ($h=80\text{cm}$, $V=1000\text{cm}^3$)



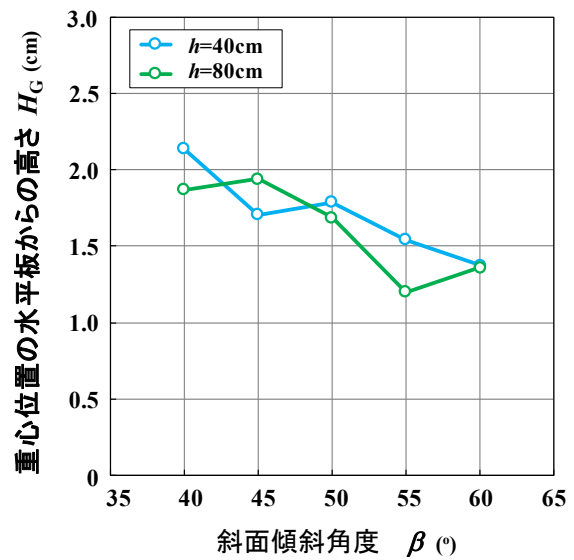
A : β と $D_{E'}$ および D_G との関係 ($h=40\text{cm}$)



B : β と $D_{E'}$ および D_G との関係 ($h=80\text{cm}$)



C : β と $D_G/D_{E'}$ との関係



D : β と H_G との関係

図 4-19 斜面傾斜角 β と $D_{E'}$, D_G , $D_G/D_{E'}$ および H_G との関係

4.3 質点モデルによる土塊同士の衝突・乗り越え運動の表現⁶⁾

土田ら⁷⁾の報告では、2015年に発生した広島豪雨災害において、3度の崩壊が連続して発生し、先発の崩壊によって発生した斜面法尻部の地形変化のため、後発の崩壊による土石流が運動方向を大きく変えた可能性が指摘されている。このことは、斜面法尻部の初期地形だけでなく、法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程が到達域に影響を及ぼすことを意味している。実際の斜面崩壊でも、崩壊部の土砂全体が同時に崩落するとは限らない。例えば、崩壊部下部の土砂が先に崩落した後、時間を置いて崩壊部上部の土砂が崩落することもある。このような場合、崩壊部下部の土砂が斜面法尻部に到達し堆積したところへ、崩壊部上部の土砂が衝突するあるいは乗り越えるといった現象が生じていることが考えられる。また、崩壊部の土砂全体が同時に崩落する場合であっても崩壊部の下部と上部の土砂では、斜面法尻部への到達に時間差があると考えられる。この場合でも、斜面法尻部では土砂の衝突あるいは乗り越えといった現象が少なからず生じていると推測される。特に、斜面勾配が急で、かつ、斜面法尻部で勾配が急変するような場合には、到達域に及ぼすその影響が大きいと考えられる。

このようなことから本節では、滑動による質点モデルを用いて、遷緩点付近における崩壊土砂の運動状態の変化が到達域に及ぼす影響について検討を行う。斜面法尻部での土砂堆積にともなう影響を、勾配急変部における土砂同士の衝突運動と土砂の乗り越え運動の2つの単純な運動モードで表現する。そして、記述した計算モデルによる計算結果と室内模型実験結果との比較を示し、土砂の衝突あるいは乗り越え運動の到達域への影響を検討する。これらの結果から、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察を行う。

前章したような既往の研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾では、崩壊部の土砂全体を1つの質点(1体モデル)としてとらえている。しかし、1体モデルでは、上述したような土砂の衝突あるいは乗り越えといった現象は表現できない。質点間の相互作用や土砂堆積にともなう斜面法尻部の地形変化を考慮できるモデル化が必要である。

このようなことから、ここでは崩壊部の土砂を崩壊部上部と下部の2つの土塊とするモデル化を導入した到達域推定の簡易モデルを示す。そして、斜面法尻部での土砂堆積にともなう影響を斜面－水平面接合部（図4-20のO点）における土砂同士の衝突運動と土砂の乗り越え運動の2つの単純な運動モードでの表現を試みる。

なお、これらのモデルでは、土砂の運動を斜面上の質点の滑動として到達距離の定式化を行っている。奥田⁸⁾が述べているように流体抵抗に関する係数を求めることは困難である。このため、ここで示すモデルを評価する際、不確定なパラメータの影響を避けることを考え、流体抵抗は考慮していない。また、がけ崩れによる土砂災害では斜面下方の土地形状に平坦地が多いことから、簡易モデルにおける斜面の下部平面は水平とした。

4.3.1 モデル1

図4-20に示すように、モデル1は、崩壊部の土砂全体を1つの質点（1体モデル）としてとらえたものであり、流下質量 m の質点が、斜面上を滑動して下部水平面に至るモデルである。質点のO点における速度の水平成分 V_x は式(4-1)で表される。

$$V_x = \sqrt{2gh(1 - \mu \cot \beta)} \cdot \cos \beta \quad (4-1)$$

ここに、 μ は質点と斜面および水平面との摩擦係数、 g は重力加速度である。O点での水平面への入射時の速度を水平方向成分 V_x として、質点が静止するまで滑動運動すると考えると到達距離 D_1 は式(4-2)で表される。

$$D_1 = \frac{h}{\mu \sin \beta} (\sin \beta - \mu \cos \beta) \cos^2 \beta \quad (4-2)$$

式(4-2)のようにモデル1の到達距離 D_1 は、質点の高さ h 、質点と斜面および水平面との摩擦係数 μ 、斜面の傾斜角度 β で表現される。また、モデルの質点は水平面上の滑動に束縛されるので摩擦力を受け続けることになる。この仮定により、到達距離として算出される量は、跳躍運動を考慮するモデルに比べて小さくなる。

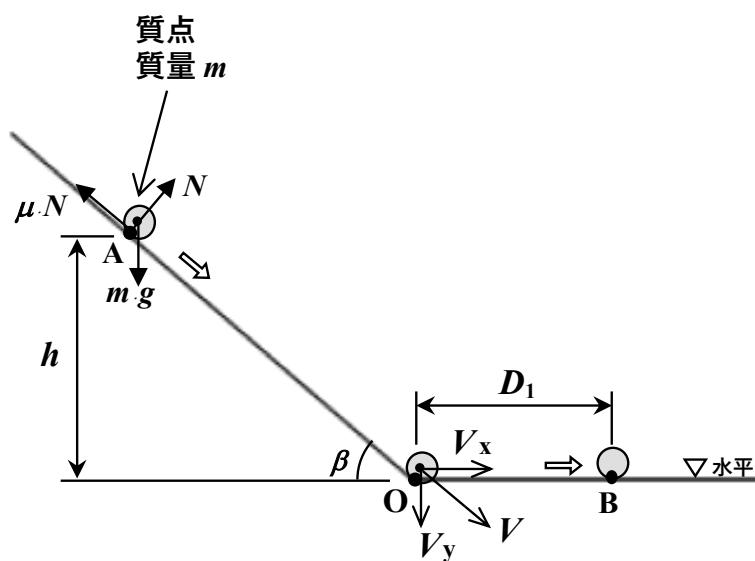


図 4-20 質点モデル 1

4.3.2 モデル2（衝突モデル）

図4-21に示すように，モデル2では，崩壊土砂の運動を崩壊部上部の土砂と下部の土砂の2つの質点（2体モデル）の運動としてとらえる．そして，斜面－水平面接合部（図4-21のO点）において，減速した土砂に（遷緩点到達時の速度を保持した）後続の土砂が衝突（追突）することを想定したモデルである．このモデル2は，崩壊部下部の土砂を質点 S_1 ，崩壊部上部の土砂を質点 S_2 とし，水平部で減速した S_1 に S_2 を衝突させた後，O点から S_1 が停止する位置までの長さを到達距離とするモデルである（図4-21）． S_1 ， S_2 の質量はそれぞれ m_1 ， m_2 とする．

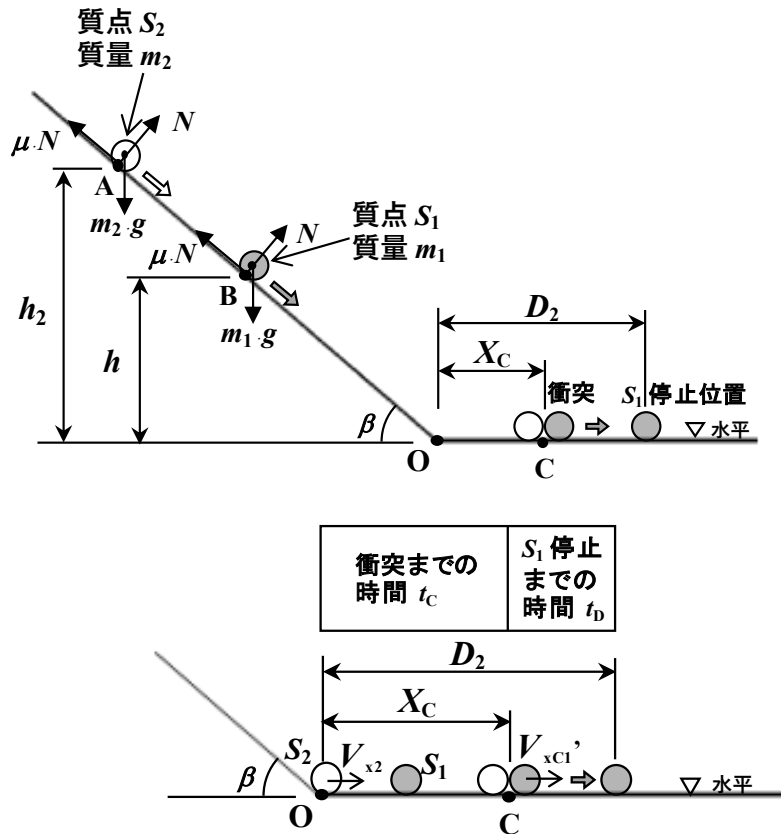


図 4-21 質点モデル 2（衝突モデル）

図4-21のO点での質点 S_1 と S_2 の水平方向速度成分をそれぞれ V_{x1} , V_{x2} とする. これら V_{x1} , V_{x2} の式は, モデル1の V_x と同様である. O点を原点とし, S_2 がO点に到達した時点をも $t=0$ とする. S_1 と S_2 との衝突までの時間を t_c とすると, O点から衝突位置C点までの長さ X_c は次式で求まる.

$$X_c = -\frac{\mu g t_c^2}{2} + V_{x2} t_c \quad (4-3)$$

衝突直前の S_1 , S_2 の水平方向速度を V_{xc1} , V_{xc2} , 衝突直後の水平方向速度を V_{xc1}' , V_{xc2}' , そして S_1 と S_2 との反発係数を e とすると,

$$V_{xc2}' - V_{xc1}' = e(V_{xc1} - V_{xc2}) \quad (4-4)$$

となる. また, 運動量保存則より次式を得る.

$$m_1 V_{xc1} + m_2 V_{xc2} = m_1 V_{xc1}' + m_2 V_{xc2}' \quad (4-5)$$

式(4-4), 式(4-5)から V_{xc1}' を求めると, 次のようになる.

$$V_{xc1}' = \frac{1}{m_1 + m_2} \{ (m_1 V_{xc1} + m_2 V_{xc2}) - e m_2 (V_{xc1} - V_{xc2}) \} \quad (4-6)$$

衝突後, S_1 が停止するまでの時間 t_D は,

$$t_D = \frac{V_{xc1}'}{\mu g} \quad (4-7)$$

したがって, 到達距離 D_2 は次式で与えられる.

$$D_2 = \frac{-\mu g t_D^2}{2} + V_{xc1}' t_D + X_c \quad (4-8)$$

4.3.3 モデル3（乗り越えモデル）

図4-22に示すように、モデル3は、斜面－水平面接合部（図4-22のO点）において、減速した土砂を（遷緩点到達時の速度を保持した）後続の土砂が乗り越えること想定したモデルである。モデル2と同様に、崩壊部の土砂を崩壊部上部の土砂と下部の2つにモデル化する。このモデルでは、崩壊部下部の土砂の先頭部が水平部に到達し、静止することで形成した領域を先着堆積域と呼ぶこととする（図4-22参照）。モデル3は、この先着堆積域の上面を後続の崩壊部上部の土砂（質点 S_2 ）が滑動すると仮定した1体モデルである。

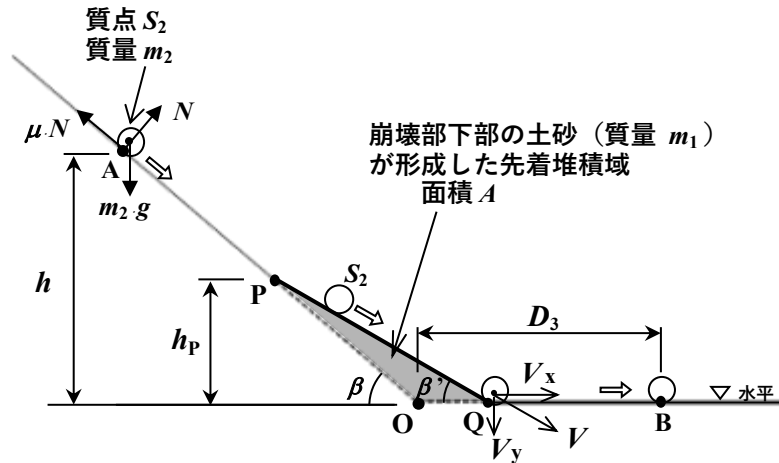


図 4-22 質点モデル3（乗り越えモデル）

運動方程式は、モデル1と同様である。P点でのAP方向の速度を V_2 とすると、同点でのPQ方向速度 V_2' は、これに $\cos(\beta - \beta')$ を乗じた次式となる。

$$V_2' = \left\{ \sqrt{2g \frac{h-h_p}{\sin \beta} (\sin \beta - \mu \cos \beta)} \right\} \cos(\beta - \beta') \quad (4-9)$$

PQ間について、 V_2' を初期速度として与えた運動方程式を解いて、Q点での水平方向速度 V_x を求めると次式となる。

$$V_x = \left\{ \sqrt{V_2^2 + \frac{2gh_p}{\sin \beta'} (\sin \beta' - \mu \cos \beta')} \right\} \cos \beta' \quad (4-10)$$

これより、質点が停止するまでのQB間の長さをモデル1の D_1 と同様に計算すると次のようになる。

$$QB = \frac{V_x^2}{2\mu g} \quad (4-11)$$

到達距離 D_3 は、これにOQの長さを加えた次式で与えられる。

$$D_3 = \frac{V_x^2}{2\mu g} + h_p \left(\frac{1}{\tan \beta'} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (4-12)$$

4.3.4 室内模型実験と計算値の比較

ここでは質点モデル1, モデル2 (衝突モデル) およびモデル3 (乗り越えモデル) による計算値と砂試料による室内実験の内, 定幅流路実験の結果 ($h=80\text{cm}$, $V=500, 1,000\text{cm}^3$) との比較を行う. パラメトリックスタディを行い, 土砂の衝突あるいは乗り越えといった現象の影響および入力パラメータの影響の評価を行う. なお, 室内実験では, 斜面板と水平板に同質のコンパネを用いていることから, 計算時の斜面と水平面の摩擦係数は同一の値とした.

(1) モデル1による計算

h が一定の場合, モデル1の D_1 と斜面傾斜角度 β との関係は, μ のみによって変化する. このことから, μ をパラメトリックに変化させた計算を行い, μ が D_1 と β との関係に与える影響を観察した. D_1 計算時の入力パラメータは表4-4に示す通りであり, μ の値は0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8とした. これは室内実験に使用した砂試料の安息角 30° に対して $\pm 10^\circ$ 程度の範

表 4-4 モデル 1, 2 および 3 の計算時の条件

	質点の 初期高さ h	斜面の 傾斜角度 β	砂-斜面間の 摩擦係数 μ	先着堆積域 の面積 A	質点 S_2 の 高さ h_2	質点 S_1, S_2 の 質量の比率 m_2/m_1	反発係数 e
モデル1	80cm	40° 45° 50° 55° 60°	0.4 0.5 0.6 0.7 0.8	0 cm ²	—	—	—
モデル2			0.5 0.8		$h+20 \cdot \sin\beta$ (cm)	1	0 0.5
			2			0.5	
			9			0.5	
			—			—	
モデル3			50.0cm ² 33.3cm ² 10.0cm ²	1 2 9	—		

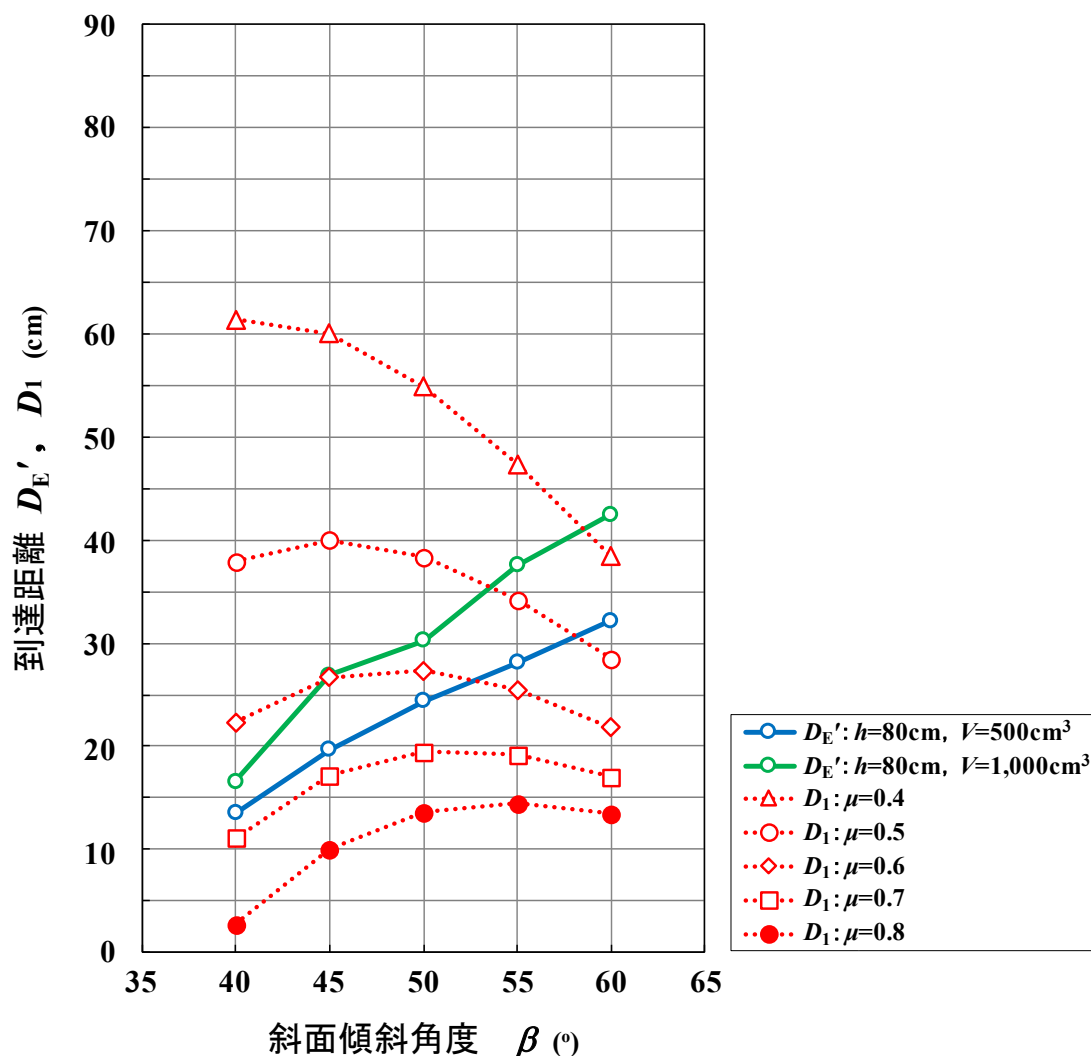


図 4-23 質点モデル 1 と室内実験の到達距離の比較

囲の値となる．質点の初期高さは，室内実験時の砂試料の設置高さ $h=80\text{cm}$ とした．

図4-23に定幅流路実験 ($h=80\text{cm}$, $V=500, 1,000\text{cm}^3$) の到達距離 D_E' とモデル1の計算による到達距離 D_1 の比較を示す．図4-23に示すように，計算される D_1 の値は， μ の値によって大きく異なる． μ の値が大きくなるにつれて， D_1 の値は小さくなり， D_E' に近づく傾向が見られる．

また，室内模型実験での到達距離 D_E は， β の増大とともに，増加傾向を示すが，モデル1の D_1 の値は，何れの μ の値でもある β で最大となり，その後は減少傾向を示す． D_1 が最大となる β の値は， μ の値によって異なる

るが、その範囲は $40\sim 55^\circ$ 付近であった。 μ の値が小さいほうが低角度側の β で D_1 が最大値を示す傾向にあった。

このように、**図4-20**に示したような1質点の滑動とする単純化したモデルでは、 D_E' が β の増大とともに、増加傾向を示すという実験結果が説明できない。例えば、奥田⁸⁾のように流体抵抗の項を考慮した質点モデルでも、この問題が内在していると推察される。斜面法尻部の勾配急変部で何らかのメカニズムを考慮したモデル化が必要である。

(2) モデル2 (衝突モデル)による計算

モデル2の到達距離 D_2 は、質点の高さ h 、質点と斜面および水平面との摩擦係数 μ 、斜面傾斜角度 β の他に、崩壊部下部の土砂の質点 S_1 の質量 m_1 と崩壊部上部の土砂の質点 S_2 の質量 m_2 の比率が影響する。このことから、 m_2/m_1 を変化させた計算を行い、 m_1 と m_2 の比率が D_2 と β との関係に与える影響を観察した。

D_2 計算時の入力パラメータを前出の**表4-4**に示す。表中の m_1 と m_2 の比率 m_2/m_1 は、実験結果に基づく数値ではなく、その比率の大小が D_2 への影響を示す数値設定である。反発係数 e については、 $m_2/m_1=1$ の場合に $e=0, 0.5$ の2ケースを行い、その影響を観察した。 $m_2/m_1=2, 9$ の場合は、 $e=0.5$ とした。前出の**図4-1**に示した実験時の開口部（試料箱内下端）を**図4-21**のB点と考える。 D_1 と同じく、 D_2 の計算時の h は試料箱設置高さ80cmで一定とする。**図4-21**の質点 S_2 の位置A点は、質点 S_1 の質量 m_1 と質点 S_2 の質量 m_2 の比率に応じて設定するのが力学的には適切と考えられる。しかし、 m_1 と m_2 の比率に応じてA点を設定すると、 D_2 の計算値は、 m_1 と m_2 との比率だけでなく、**図4-21**の h_2 の変化の影響も受けたものとなる。このため、本計算では m_1 と m_2 の比率のみの影響を調べるために、**図4-21**の S_2 の位置A点は第4章の**図4-1**に示す試料箱内上端で一定とした。これは、模型実験の範囲で、斜面－水平面接合部において最大の運動エネルギーが発生すると考えられる初期位置の設定である。すなわち、 S_2 の S_1 への衝突の影響が最大となる設定であり、 S_2 の位置を m_1 と m_2 との比率に応じて設定した場合の計算値は本計算の値以下となる。なお、斜面の傾斜角

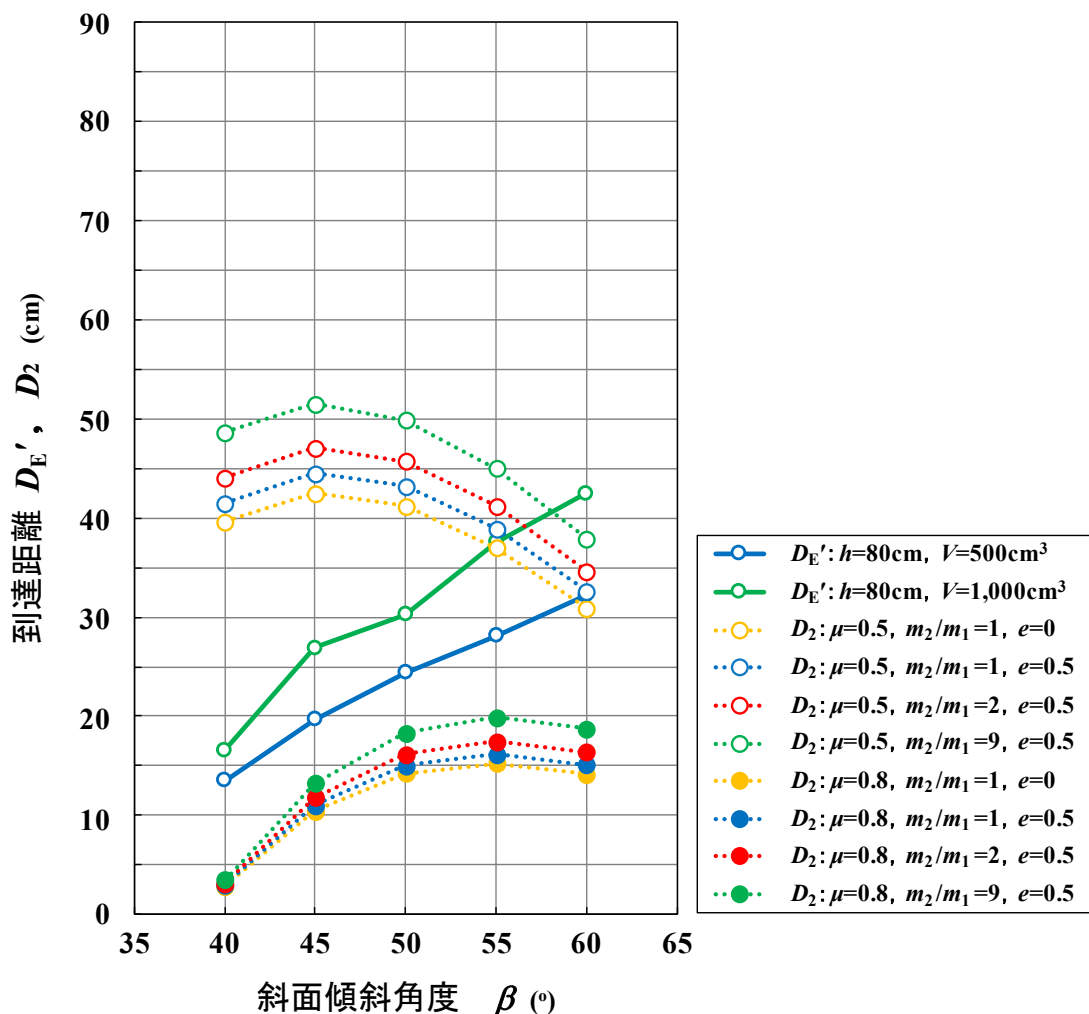


図 4-24 質点モデル 2 (衝突モデル) と室内実験の到達距離の比較

度が変われば、試料箱の斜面上方側高さ h_2 は変化する。 μ の値は、 0.5 と 0.8 の 2 ケースとした。

図 4-24 に定幅流路実験 ($h=80\text{cm}, V=500, 1,000\text{cm}^3$) の到達距離 $D_{E'}$ とモデル 2 の計算による到達距離 D_2 の比較を示す。 図 4-23 と 図 4-24 を比較すると、モデル 2 の到達距離の計算値はモデル 1 よりもやや大きな値を示している。

$m_2 / m_1 = 1$ の場合、その差は小さいものの、 e が大きいほうが D_2 は大きい値を示す。 m_1 と m_2 の比率の影響を見ると、同じ e の場合、 m_2/m_1 が大きいほど D_2 の値が大きくなる傾向を示す。モデル 2 では後続の S_2 が先行する

S_1 に衝突することによって、1体モデルに比べて D_2 が大きくなる。この際、 m_1 に対する m_2 の値が大きいほど D_2 の値が大きくなると考えられる。また、モデル1と同様に、 μ の値が大きいほうが D_2 の値は小さくなり、 $\mu=0.5$ に比べると $\mu=0.8$ のほうが D_E' に近い値を示した。今回のパラメトリックスタディでは、 e や m_2/m_1 に比べて、計算される D_2 の値への μ の影響が大きいことがうかがえる。

実験での到達距離 D_E' は、 β の増大とともに、増加傾向を示すが、 D_2 は、何れの m_2/m_1 、 μ でも、ある β で最大となり、その後は減少傾向を示す。 D_2 が最大となる β の値は、 m_2/m_1 による影響は見られないが、 μ の値によって異なる。 $\mu=0.5$ で $\beta=45^\circ$ 、 $\mu=0.8$ では $\beta=55^\circ$ で D_2 の値は最大となっている。

2体モデルによって、土砂の衝突（追突）という挙動を表現したモデルを用いれば、モデル1のような1質点の滑動とする単純化したモデルに比べて、計算される到達距離は大きくなる。しかし、モデル1と同様に、 D_E' が β の増大とともに、増加傾向を示すという実験結果を説明できていない。

(3) モデル3（乗り越えモデル）による計算

モデル3の先着堆積域の面積 A は、崩壊部下部の土砂の質量 m_1 と崩壊部上部の土砂の質量 m_2 の比率で変化する。そして、これにともない到達距離 D_3 も変化する。このことから、 m_2/m_1 を変化させた計算を行い、 m_1 と m_2 の比率が D_3 と β との関係に与える影響を観察する。

D_3 計算時の入力パラメータを前出の表4-4に示す。このモデル3において先着堆積域の面積を与えるとき、何らかの仮定を必要とする。そこで、試料側面部面積（前出の図4-1ハッチング部）に対して、モデル2における計算時の m_1 と m_2 の比率 $m_2/m_1=1, 2, 9$ (50%, 33.3%, 10%)を仮定した。これら数値50%, 33.3%, 10%は実験結果に基づく数値ではなく、先着堆積域の大小の到達距離への影響を示す数値設定である。なお、前述のモデル1は、モデル3における先着堆積域の面積 $A=0\text{cm}^2$ のケースと言える。また、 D_3 の計算時の図4-22の先着堆積域の β' は実験に使用した砂試料の安息角 30° とした。 D_1 計算時と同じく、 h は室内実験時の砂試料の設置高

さ $h=80\text{cm}$ とした。モデル3では、崩壊部下部の土砂の先頭部が水平部に到達し、静止することで形成した領域を先着堆積域の上面を後続の崩壊部上部の土砂（質点 S_2 ）が滑動すると仮定している。このとき、図4-22のPQ間の摩擦係数 μ を斜面や水平面とは異なる値とすることも考えられる。しかし、PQ間の μ に斜面および水平面とは異なった値を用いると、 D_3 の計算値は、滑動経路の違いによる影響だけでなく、PQ間の μ と斜面および水平面の μ との値の違いによる影響も受けたものとなる。このため、本計算では先着堆積域の上面を質点が滑動することのみの影響を調べるために、PQ間の μ を斜面や水平面と同一の値としている。 μ は0.5と0.8の2ケースとした。

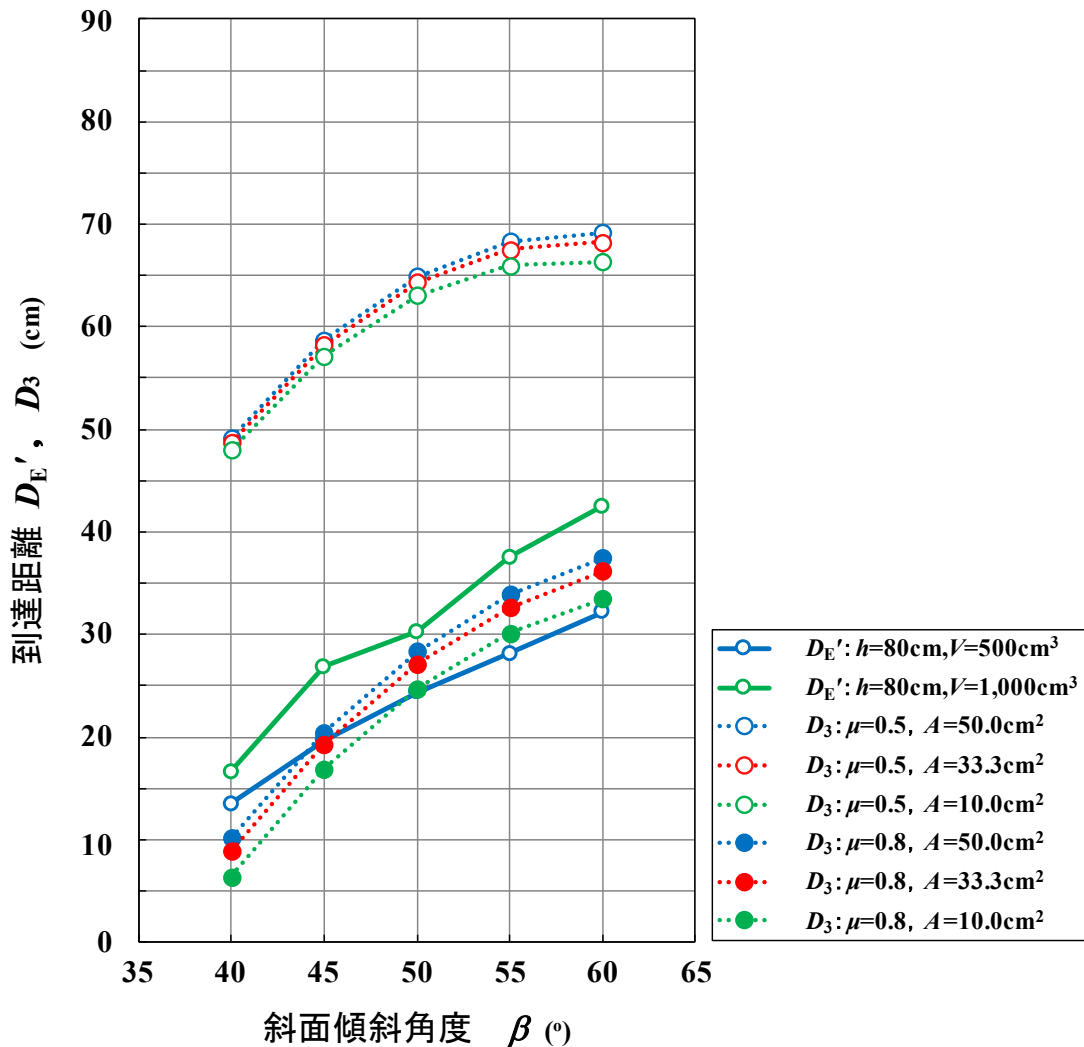


図4-25 質点モデル3（乗り越えモデル）と室内実験の到達距離の比較

図4-25に定幅流路実験 ($h=80\text{cm}$, $V=500, 1,000\text{cm}^3$) の到達距離 D_E' とモデル3の計算による到達距離 D_3 との比較を示す。図4-23, 図4-24と図4-25を比較すると, モデル3の到達距離の計算値はモデル1, モデル2よりも大きな値を示している。そして, モデル3では, 実験結果と同様に, D_3 が β の増大とともに, 増加傾向を示す。先着堆積域の面積 A の影響を見ると, A が大きいほど D_3 の値が大きくなる傾向を示す。すなわち, m_2/m_1 が小さいほうが D_3 の値が大きくなっており, モデル2とは逆の傾向を示している。また, モデル1, モデル2と同様に, μ の値が大きいほうが D_3 の値は小さくなり, $\mu=0.5$ に比べると $\mu=0.8$ のほうが D_E' に近い値を示した。今回のパラメトリックスタディでは, A に比べて, 計算される D_3 の値への μ の影響が大きいことがうかがえる。

このモデル3では, 先着堆積域の設定 (大きさや形状など) も入力値となることを考察しなければならないことが改善点とされる。しかし, 先行した崩壊部下部の土砂が形成した先着堆積域の上を後続の質点 (崩壊部上部の土砂) が滑動するという挙動を表現したモデルを用いれば, モデル1では表現できなかった, D_E' が β の増大とともに, 増加傾向を示すという実験結果をよく説明している。

4.3.5 考 察

本節では、既往の研究における1体モデルでは考慮されていなかった斜面法尻部での土砂堆積にともなう影響を、崩壊部の土砂を崩壊部上部と下部の2つの土塊とするモデル化を導入して、勾配急変部における土砂同士の衝突運動と土砂の乗り越え運動の2つの単純な運動モードで表現した。

モデル2の計算結果から、先行する崩壊土砂に後続の崩壊土砂が衝突することによって到達距離が大きくなる傾向が見られた。また、モデル3の計算結果からは、先行した崩壊土砂が形成した先着堆積域の上面を後続の崩壊土砂が乗り越えることによって到達距離が大きくなること、到達距離が斜面傾斜角度 β の増大とともに、増加傾向を示すという実験結果を表現できた。これらの結果は、到達域の予測モデルでは斜面法尻部での堆積土砂の影響（例えば、堆積域の形成にともなう地形の変化）の考慮が大切であることを示している。

実現象においては、土塊と斜面および水平面との摩擦損失とともに、運動土塊の土粒子間の接触や勾配急変点での損失によってエネルギーが減少すると考えられる。ここで示した質点モデルでは、これらのエネルギー損失を質点と斜面および水平面との摩擦抵抗のみで表現している。したがって、モデル3では $\mu=0.8$ の場合に、実験結果に近い計算値が得られているが、この μ の値は実験に用いた砂試料や斜面の特性などの実態の値ではないととらえるべきと考える。すなわち、今回のような質点モデルを用いて到達距離を推定する場合、 μ の値は物理現象を表すための単なるモデル上のパラメータであることを踏まえて設定を行うことが大切である。

モデル1、モデル2の2つのモデルとモデル3の間に生じた差には以下のような説明が可能である。つまり、その差の理由は、モデル1とモデル2の経路 $P \rightarrow O \rightarrow Q$ （図4-20、図4-21）に対して（O点を経由しない）モデル3の経路 $P \rightarrow Q$ （図4-22）では経路の短縮化が生じて（P点からQ点間の摩擦による）エネルギー損失が小さくなり、Q点における速度はモデル3が一番大きくなる、これに加えて、 $\beta > \beta'$ となるので水平面に入射する

際の速度の水平方向成分は（速度の大きさが同一としても）モデル3の方が大きくなる，という2点の説明である．このことは，到達域の推定では，崩壊土砂の運動とその結果として生じる地形変化（運動経路の変化）に留意が必要であることを示している．水平部への入射に伴い減速した先着部の土砂の上を後続の土砂が追い越してゆくとする方が実現象に近いと言えるが，先着堆積域（速度0）が形成されその上を後続の土砂が滑動するという単純化を図り，実験結果の表現を試みた結果としてまとめている．

図4-26は，画像解析で求めた定幅流実験時（ $h=80\text{cm}$ ， $V=1,000\text{cm}^3$ ）の堆積砂の重心位置 D_G とモデル3（乗り越えモデル）との比較を示したものである．この図から，斜面傾斜角度 β の増大にともなうモデル3の計算値 D_3 の増加の度合いが，実験結果の D_G に比べて大きいことがわかる．このように，モデル3であっても，斜面傾斜角度と堆積砂の重心位置との関係など，実験結果の説明が成立しないところがある．

また，本節で示したモデル2およびモデル3は，それぞれ，斜面法尻部での土砂同士の衝突や乗り越えという運動に特化して，その影響を強調したものであることに注意する必要がある．実現象では，斜面法尻部（遷緩点）付近において，斜面や粒状体中の粒子同士の摩擦と衝突の影響によって，粒状体の運動エネルギーや重心位置の運動経路の変化が生じているものと考えられる．さらに，粒状体を1つの質点と見なす場合，質点位置は粒状体の重心位置を代表している．したがって，粒状体の運動を質点の運動で表現するときには，粒状体の運動エネルギーの変化とともに重心位置の運動経路に関する情報が必要と考えられる．

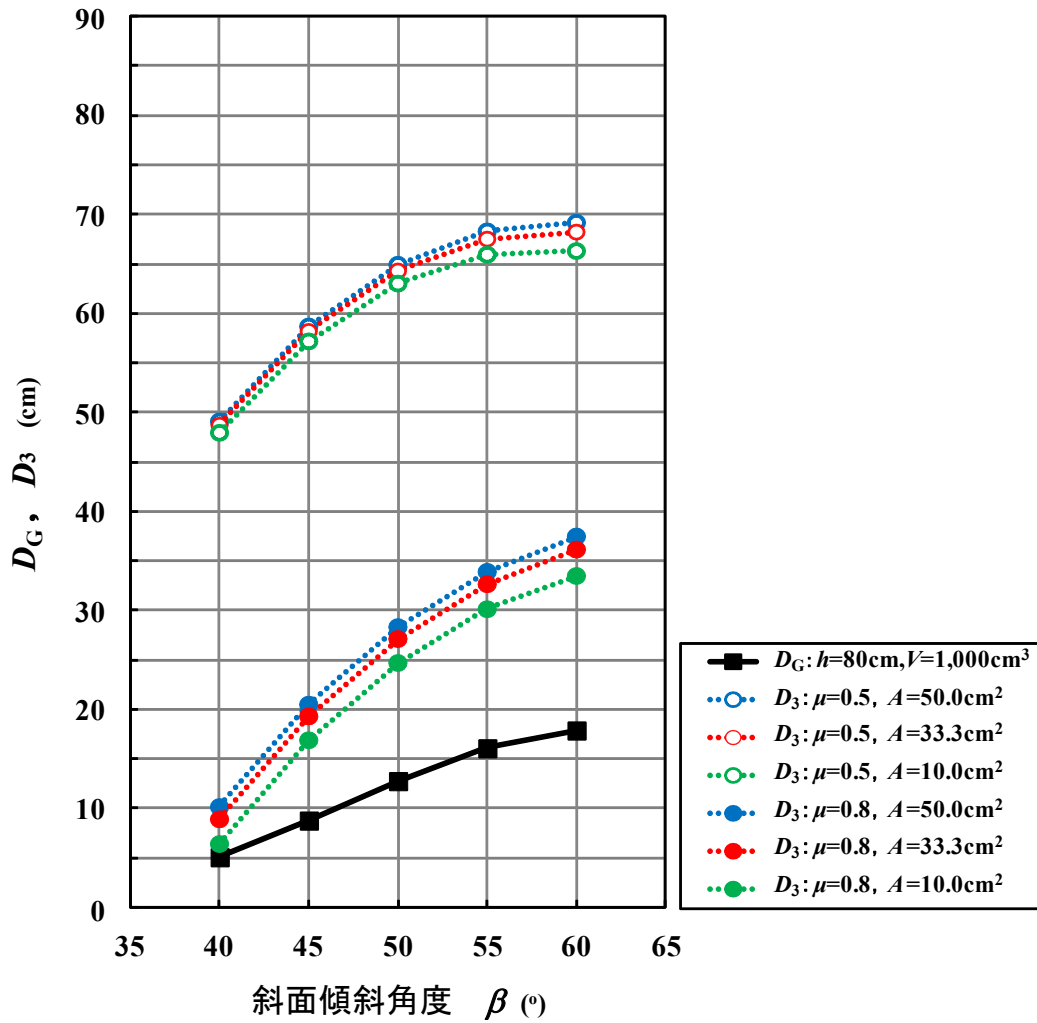


図4-26 質点モデル3（乗り越えモデル）と堆積砂の重心位置 D_G の比較

4.4 まとめ

本章では、まず、乾燥砂を用いた室内模型実験を実施し、斜面傾斜角度などが斜面を流下する粒状体の堆積域や堆積形状に与える影響を検討した。続いて、衝突・乗り越えの2モードを2つの質点の滑動による運動で定式化した質点モデルを用いて、実験結果（斜面傾斜角度と到達距離との関係）の表現を試行し、土砂の衝突あるいは乗り越え運動の到達域への影響を検討した。そして、これらの結果から、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察を行った。本章で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 乾燥砂の流下実験について

- ①室内模型実験の結果、到達距離（堆積砂の流下方向の最大の長さ）は、平板斜面実験、定幅流路実験ともに、斜面傾斜角度 β （40～60°の範囲）の増大とともに、増加傾向を示した。このとき、砂試料の設置高さ h の値が一定の場合には砂試料の体積 V が大きいほど到達距離が大きく、 V の値が一定の場合では h が大きいほど到達距離が大きい傾向が見られた。
- ②平板斜面実験の結果、堆積砂の幅（到達距離の方向に対して直交方向の最大の長さ）は β の増大にともなう変化は観察されなかった。また到達距離と同様に、 h の値が一定の場合には V が大きいほど堆積砂の幅が大きく、 V の値が一定の場合では h が大きいほど堆積砂の幅が大きい傾向が見られた。
- ③平板斜面実験の結果を用いて、到達距離および堆積砂の幅を砂試料の体積 V と同体積を有する立方体の一辺長（ $V^{1/3}$ ）を用いて無次元化した値で β との関係を整理した。その結果、到達域の推定を行う際には、崩壊土砂量そのものではなく、それと同体積を有する立方体の一辺長を用いたほうが、崩壊斜面の傾斜角度や崩壊高さの違いによる到達距離の変化が把握し易くなると考えられる。

(2) Fringe投影による堆積砂の形状把握について

- ①定幅流路実験で堆積した砂試料に対して、Fringe画像投影法による計測を行った結果、堆積砂の表面形状（高低差）や重心位置の情報を得ることが可能となった。
- ②Fringe画像投影法によって取得した堆積砂の重心位置 D_G は、到達距離 D_E' （定幅流路実験）と同様に、何れの h の値においても、 β の増大とともに、増加傾向を示した。ただし、 D_G の β の増大に伴う増加の度合いは、 D_E' に比べて小さいものであった。
- ③ D_G/D_E' （重心位置/到達距離）は、砂試料の設置高さ h が40cmと80cmで近い値を示した。
- ④Fringe画像投影法によって取得した堆積砂の鉛直断面図から、 h が40cm、80cmのいずれの場合でも、 β が 40° 、 45° のときには斜面板上に砂試料が残っているが、 β が 50° を超えると砂試料の大半は水平板上に堆積する様子が観察された。
- ⑤砂試料の重心位置の水平面からの高さ H_G は、 β の増大とともに、低くなる傾向を示した。

(3) 質点モデルによる土塊同士の衝突・乗り越え運動の表現について

- ①土砂の運動を1質点の滑動とする単純化したモデル（モデル1）では、到達距離が斜面傾斜角度の増大とともに、増加傾向を示すという模型実験結果を説明できない。
- ②土砂の衝突という挙動を2体モデルで表現した（モデル2）結果、先行する崩壊土砂に後続の崩壊土砂が衝突することによって最大到達距離が大きくなる傾向が見られた。しかし、到達距離が斜面傾斜角度の増大とともに、増加傾向を示すという模型実験結果を説明できない。
- ③先着堆積域を考慮した1体モデルを用いて乗り越えという挙動を表現した（モデル3）結果、先着堆積域の上面を後続の崩壊土砂が乗り越えると仮定すると到達距離が大きくなることがわかった。また、モデル1、モデル2では表現できなかった、到達距離が斜面傾斜角度の増大とともに、増加傾向を示すという模型実験結果を

よく説明できた。

- ④モデル1, モデル2の2つのモデルとモデル3の間に生じた差について考察した結果, 到達域の推定では, 崩壊土の運動とその結果として生じる地形変化にも留意し, 斜面法尻部の勾配急変部で何らかのメカニズムを考慮したモデル化が必要と考える。
- ⑤モデル2およびモデル3は, それぞれ, 斜面法尻部での土砂同士の衝突や乗り越えという運動に特化して, その影響を強調したものであることに注意する必要がある。
- ⑥実験結果の傾向をよく表現したモデル3であっても, 堆積砂の重心位置と斜面傾斜角度の関係の傾向など, 実験結果の説明が成立しないところがある。

本章での室内模型実験の結果は, 砂試料の堆積形状, 到達距離, 重心位置が, 流下させた砂試料の量, 下部平面から試料箱の下端までの高さだけでなく, 斜面傾斜角度 β の変化にも大きな影響を受けていることを示している。本実験での斜面傾斜角度 β は, がけ崩れによる土砂災害発生箇所のような急斜面も想定した設定であり, このように斜面傾斜角度 β が大きい場合には, 斜面法尻部(遷緩点)付近での原地形の不連続性のために, 摩擦抵抗だけでなく, 壁面や土粒子同士が互いに衝突し合うことによるエネルギー損失が生じており, これが砂試料の運動に大きな影響を与えているものと考えられる。

また, 衝突・乗り越えの2モードを2つの質点の滑動による運動で定式化した質点モデルを用いて, 実験結果の表現を試みた。その結果, 堆積した試料の上を後続する試料が滑動すると仮定した乗り越えモデル(モデル3)が実験結果の傾向をよく表現した。そして, 質点による到達域の推定では, 崩壊土砂の運動とその結果として生じる地形変化(運動経路の変化)にも留意が必要であることがわかった。しかし, このモデル3でも, 堆積砂の重心位置と斜面傾斜角度の関係の傾向など, 実験結果の説明が成立しないところがあった。

本章で示したモデル2およびモデル3は, それぞれ, 斜面法尻部での土砂同士の衝突や乗り越えという運動に特化して, その影響を強調したも

のである。実現象では、斜面法尻部（遷緩点）付近において、壁面や粒状体中の粒子同士の摩擦と衝突の影響によって、粒状体の運動エネルギーや重心位置の運動経路の変化が生じているものと考えられる。さらに、粒状体を1つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。このことから、斜面を流下する土砂の運動を考える上では、粒状体の運動エネルギーの変化や粒状体の重心位置の運動経路に関する情報が必要と考えられる。

しかし、模型実験では、このような粒状体の運動エネルギーや重心位置の運動経路についての情報を得ることは困難である。次章では、DEMによる2次元の粒状体の流下シミュレーションを用いて、模型実験では得ることが難しい粒状体の運動の様子を追跡し、斜面を流下する粒状体の堆積形状やエネルギー損失、重心位置の運動経路について検討する。

【参考文献】

- 1) 高橋保, 吉田等: 土石流の停止・堆積機構に関する研究(1) —勾配の急変による堆積—, 京大防災研究所年報, No.22, B-2, pp.331-340, 1979.
- 2) Stave Cochard, Christophe Ancey: Tracking the free surface of time-dependent flows: image processing for the dam-break problem, Experiments in Fluids, Vol.44, pp.59-71, 2008.
- 3) Chufan Jiang, Beiwen Li and Song Zhang: Pixel-by-pixel absolute phase retrieval using three phase-shifted fringe patterns without markers, Optics and Lasers in Engineering, Voi.91, pp.232-241, 2017.
- 4) 土田章仁, 下條洋介, 西村 強, 河野勝宣: 室内模型実験による斜面崩壊土砂の堆積形状と到達域に関する研究, 第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.143-148, 2018.
- 5) 土田章仁, 河野勝宣, 西村 強, 寺田幸太: 斜面崩壊土砂の堆積形状と到達域に関する室内模型実験, 第52回地盤工学研究発表会講演集, pp.1911-1912, 2017.
- 6) 土田章仁, 下條洋介, 西村 強, 河野勝宣: 斜面を流下する土砂の到達域に関する室内模型実験と質点モデルによる表現, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.1, pp.159-169, 2020.
- 7) 土田孝, 森脇武夫, 熊本直樹, 一井康二, 加納誠二, 中井真司: 2014年広島豪雨災害において土石流が発生した溪流の状況と被害に関する調査, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.1, pp.33-52, 2016.
- 8) 奥田節夫: 斜面崩壊にともなう物質の移動過程, 地質学論集, No.28, pp.97-106, 1986.
- 9) 森脇寛: 円弧斜面上を滑べる崩壊土塊の運動について, 新砂防, Vol.36, No.3, pp.10-16, 1983.
- 10) 芦田和男, 江頭進治, 神矢弘: 斜面における土塊の滑動・停止機構に関する研究, 京大防災研究所年報, No.27, B-2, pp.331-340, 1984.

第 5 章 個別要素法による崩壊土砂の流下運動の解析

前章では、砂試料の堆積域は、流下させた砂試料の量、下部平面から試料箱の下端までの高さだけでなく、斜面傾斜角度 β の変化にも大きな影響を受けていることがわかった。そして、衝突・乗り越えの 2 モードを 2 つの質点の滑動による運動で定式化した質点モデルを用いて、実験結果（斜面傾斜角度と到達距離との関係）の表現を試みた。その結果、堆積した試料の上を後続する試料が滑動すると仮定した乗り越えモデル（モデル 3）が実験結果の傾向をよく表現した。そして、質点による到達域の推定では、崩壊土砂の運動とその結果として生じる地形変化（運動経路の変化）にも留意が必要であることがわかった。しかし、このモデル 3 でも、堆積砂の重心位置と斜面傾斜角度の関係の傾向など、実験結果の説明が成立しないところがあった。粒状体を 1 つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。このことから、斜面を流下する土砂の運動を考える上では、粒状体の運動エネルギーの変化とともに運動経路（崩壊土砂の重心位置）に関する情報が必要であることを述べた。しかし、室内模型実験あるいは実際の災害現場のデータであっても、このような粒状体の運動エネルギーの変化や粒状体の重心位置の運動経路などの情報を得ることは困難である。

個別要素法（DEM）^{1) 2)}では、斜面を流下する粒状体の運動の様子を逐次追跡することで、斜面崩壊が起こってから崩壊土砂が斜面を流下し、堆積に至るまでの運動が表現できる。これによって、斜面を流下中の粒状体の運動エネルギーや重心位置の経路といった、模型実験では得ることが難しい、運動の様子を時々刻々と追跡することが可能となる。

本章では、はじめに、本解析で用いる DEM について概説する。続いて、要素数、要素の初期配置領域の面積および要素間の摩擦係数などの入力値が、到達距離や堆積形状などの解析結果に及ぼす影響を検討する。そして、DEM による 2 次元の粒状体の流下シミュレーションの結果を用いて、斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路とエネルギーの変化について検討、考察を行う。

5.1 解析に用いた個別要素法

5.1.1 個別要素法の概要

ここでは、個別要素法（DEM）の概要について述べる．DEMは、解析の対象を剛体の集合体としてモデル化する手法である¹⁾²⁾．剛体要素個々の並進運動ならびに回転運動に関する運動方程式を逐次解法により解き、求まる要素相互の位置の変化で解析対象の変形を表現する．この手法では、**図5-1**に示す剛体要素の並進ならびに回転の運動方程式は次のようになる．

$$\mathbf{F}_i = m_i \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{r}_i \quad (5-1)$$

$$\mathbf{T}_i = I_i \frac{d^2}{dt^2} \boldsymbol{\omega}_i \quad (5-2)$$

ここに、 \mathbf{F}_i ：要素*i*に働く力、 \mathbf{r}_i ：位置ベクトル、 m_i ：質量、 \mathbf{T}_i ：力のモーメント、 $\boldsymbol{\omega}_i$ ：回転角、 I_i ：慣性モーメントである．

時刻*t*において、式(5-1)、(5-2)より加速度が求まれば、時刻*t*+ Δt における速度ならびに位置は次のように求めることが可能である．

$$\begin{aligned} \left(\frac{d \mathbf{r}_i}{dt} \right)_{t+\Delta t} &= \left(\frac{d \mathbf{r}_i}{dt} \right)_t + \left(\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} \right)_t \Delta t \\ \left(\frac{d \boldsymbol{\omega}_i}{dt} \right)_{t+\Delta t} &= \left(\frac{d \boldsymbol{\omega}_i}{dt} \right)_t + \left(\frac{d^2 \boldsymbol{\omega}_i}{dt^2} \right)_t \Delta t \end{aligned} \quad (5-3)$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{r}_i)_{t+\Delta t} &= (\mathbf{r}_i)_t + \left(\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} \right)_t \Delta t \\ (\boldsymbol{\omega}_i)_{t+\Delta t} &= (\boldsymbol{\omega}_i)_t + \left(\frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} \right)_t \Delta t \end{aligned} \quad (5-4)$$

要素同士の衝突あるいは接触時の弾性成分および局所的な塑性変形などによるエネルギー損失による，式(5-1)，(5-2)における力の成分を表現するために，図5-2に示すように要素間には，ばねとダッシュポットが並列に配置されている．ばねとダッシュポットからなる系は2つの要素の接触面法線方向(\mathbf{n})と接線方向(\mathbf{s})に挿入されており，要素間の法線方向力 f_n と接線方向力 f_s は次のように求める．まず，弾性ばねに発生する力 e_n ， e_s は，

$$\Delta e_n = k_n \Delta u_n, \quad e_n := e_n + \Delta e_n \quad (5-5)$$

$$\Delta e_s = k_s \Delta u_s, \quad e_s := e_s + \Delta e_s \quad (5-6)$$

次に，ダッシュポットに発生する力 d_n ， d_s は，

$$d_n = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t}, \quad d_s = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (5-7)$$

したがって，法線方向力 f_n と接線方向力 f_s は次のようになる．

$$f_n = e_n + d_n, \quad f_s = e_s + d_s \quad (5-8)$$

ここに， u_n ， u_s はそれぞれ接触開始以降の要素重心の接触面垂直方向相対変位量，接線方向相対変位量， k_n ， k_s はそれぞれ法線方向，接線方

向のばね係数， η_n ， η_s はそれぞれ法線方向，接線方向のダッシュポットの粘性係数である． Δu_n ， Δu_s は Δt 間の増分量であること示す．なお， u_s には要素重心の相対変位量に要素重心回りの回転による変位量が加算される．接線方向のばねの力には，次の摩擦則が適用される．

$$abs(e_s) \geq \mu e_n + c \text{ のとき, } e_s = \mu e_n \cdot sign(e_s), \quad d_s = 0 \quad (5-9)$$

ここに， μ は摩擦係数， c は $e_n=0$ の時のせん断強度， abs は()の量の絶対値， $sign(a)$ は a の符号を付すことを示す．

式(5-8)で計算された力は要素間に定義される局所座標系内の成分であるので，式(5-1)，(5-2)への代入に際して，全体系の成分変換が必要である．要素形状としては，2次元であれば円や多角形，3次元であれば球や多面体の利用が可能であるが，多角形や多面体を採用すれば，円や球に比べて接触判定の手順が多くなり，演算に要する時間が長くなることに注意が必要である．また，3次元では，解析モデルの作成が煩雑であり，計算にも非常に時間を要する．このため，本研究では，2次元での粒状体の流下シミュレーションを行う．

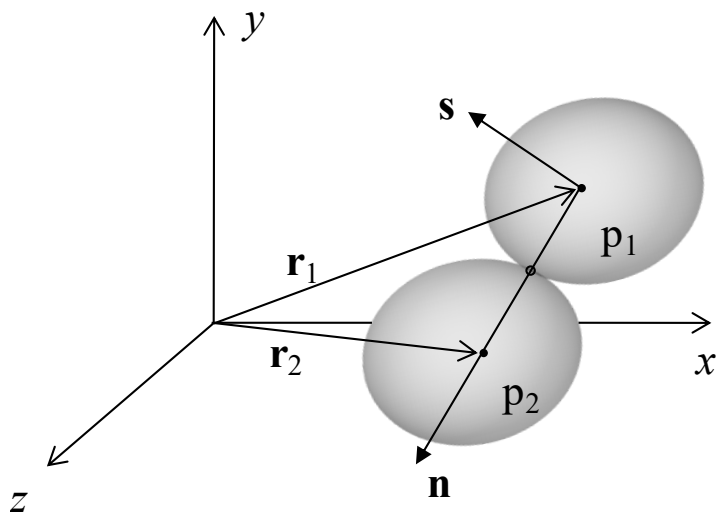


図5-1 接触状態にある2要素

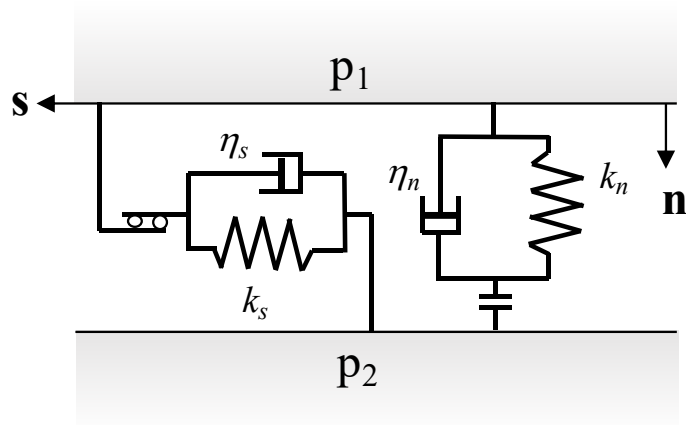


図 5-2 要素間に発生する力を計算するためのばねとダッシュポット










5.1.2 要素形状の選定

斜面を流下する粒状体の要素形状の候補として、2次元の解析では、円形、楕円形、多角形が考えられる。多数の要素を用いた解析であることを踏まえて、最も単純な形状である円形を基準に考え、接触判定の手順の容易さ、転がり抵抗の表現、形状を決定する諸元の数といった3つの観点から、要素形状について表5-1のように比較した。

はじめに、円形の接触判定は中心間の距離によって判定できるため容易である。しかし、転がり抵抗が表現できず、形状の自由度についても半径を変化させることによる要素寸法の大小でしか表現できないため、実際の粒子の動きを再現するのは困難であると考えられる。多角形は、転がり抵抗の表現には支障がなく、形状の自由度についても、頂点の数、辺の長さを変化させることによって表現できる点から円形よりも実際の粒子に近いものが再現可能だが、各頂点における接触判定が複雑であるため、本研究では採用していない。楕円形の接触判定は円形と比較すると複雑ではあるものの、接触力が必ずしも要素の中心を通るわけではないことから転がり抵抗が表現でき、長短軸の比率を変えることで多様な粒子の表現が可能であるという特徴を備えている。以上の理由から、本研究では楕円形要素を採用した。

なお、円形の要素を用いた既往の研究では、例えば大倉ら³⁾は、転がり抑制モーメントを導入して円形の要素の回転を抑制している。また、倉岡ら⁴⁾は複数の円形粒子を剛結させた要素を導入することにより、回転に対する抵抗を持たせている。しかし、これらの手法では、転がり抵抗を表現するために、転がり摩擦抵抗などのパラメータが必要となり、そのパラメータ設定が難しい。このため、要素自体の形状で転がり抵抗を表現できる楕円形要素を用いるほうが、簡潔であり、パラメータ設定や計算が容易であると考えている。

表 5-1 要素形状の比較

	円形	楕円形	多角形
要素形状			
接触判定			
転がり抵抗の表現			
形状を構成する諸元	半径	短径, 長径	頂点数, 辺長

(◎ : 容易, ○ : 比較的容易である, △ : 比較的困難である)

5.1.3 楕円形要素の接触判定

放物線などをはじめとした二次曲線には、楕円形と直線が含まれている。本研究のDEMで用いる楕円形要素の接触判定は、これらの二次曲線の性質を利用している。巻末の付録Bに、楕円形要素の接触判定の概要を示している。

5.2 個別要素法による流下シミュレーション

ここでは、斜面を流下する粒状体の運動を DEM を用いて解析する際の入力値が粒状体の運動に与える影響を検討する。粒状体の運動エネルギーの変化・堆積形状を算出し、堆積に至るまでの過程を表現するシミュレーションを行った上で、DEM に用いる要素数、要素の初期配置領域の面積、要素間（および要素－壁間）摩擦係数、これらの入力値が、流下する土砂の運動を表現する際、到達距離や堆積形状などの解析結果にどのような影響をおよぼすのかを検討し、その結果について考察を行う。

5.2.1 解析に用いる物性値

DEM の壁や要素同士の接触時の運動において、減衰定数や時間増分等の解析に用いるパラメータは粒子の運動や到達距離に大きく影響することが考えられる。ここで、今回の解析については、要素位置の相対的な変位によって、粒状体の運動を追跡することから、要素個々の変形（剛性）を左右するばね係数 k よりも、要素形状や衝突・滑動時の摩擦係数が計算上、重要な因子となることが考えられる。そこで、本研究における各種物性値は、以下のように設定した。

要素質量を m 、重力加速度を g とすると、1つの要素を水平で剛な床に置いたとき、要素の接点における変形量 δ は $\delta = mg/k$ で表される。これに対して、本研究では、ばね係数 $k = 1 \times 10^6$ N/m を与えることで、接点における変形量が楕円形要素の長径(0.25cm)の $1/10^6$ 程度となるように設定し、要素自体の変形が極めて小さく、無視できるものとした。これより、ばね係数 k をヤング率やポアソン比などから決定することは行わない。

次に、ばね係数 k と要素の質量 m から固有周期 T は以下の式で表される。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5-10)$$

時間増分 Δt は式(5-10)から算出された固有周期 T の 1/10 以下となるように、 $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$ sec とした。また、臨界減衰係数は $\eta_0 = 2\sqrt{mk}$ で表されるが、計算値の安定を考慮すると、減衰定数は 1 以下とする必要がある。以上のように設定した本解析に用いる物性値を表 5-2 に示す。

表 5-2 解析に用いた物性値

粒子の密度 ρ	2,650 (kg/m ³)
ばね係数 k	1.0×10^{-6} (N/m)
減衰定数 ξ	0.75
時間増分 Δt	1.0×10^{-6} (sec)
重力加速度 g	9.8 (m/s ²)

5.2.2 解析条件

本研究の DEM による 2 次元の粒状体の流下シミュレーションでは、前章の定幅流路実験と同様に試料箱内に敷き詰められた要素を流下させることで、その運動エネルギーと堆積形状を解析結果として算出する。

(1) 解析モデル

図 5-3 に DEM による 2 次元の粒状体の流下シミュレーションに用いた解析モデルを示す。図に示すように、斜面の傾斜角度を β とした一様勾配斜面上に、高さ h の位置へ要素の初期配置領域を設置することで、第 4 章の室内模型実験と同寸法の斜面、試料箱を再現した。DEM では、模型実験と同様に、図 5-3 中に示す初期配置領域の下側面 A を除去して要素群を流下させ、その運動エネルギーと堆積形状を解析結果として算出する。なお、前述の初期配置領域とは、室内模型実験時の試料箱内の砂試料側面に相当するものである。また、先発の要素と後発の要素が斜面傾斜角度や要素間および要素－壁間の摩擦係数によって、堆積形状にどのように影響を及ぼしあうのかを観察するため、図のように初期配置領域の上・下部で 2 等分して色分けした。

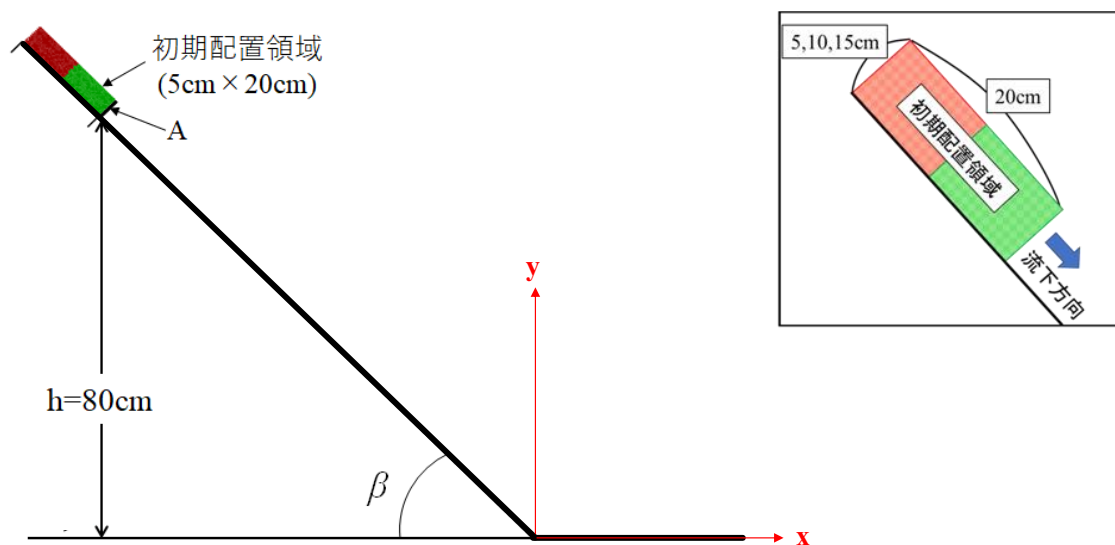


図 5-3 斜面上に剛体要素群を配置した解析モデル

(2) 解析ケース

表 5-3 に DEM による 2 次元の粒状体の流下シミュレーションの解析ケースを示す. DEM によるシミュレーションは, 斜面下部の平面位置から初期配置領域の下端までの高さを設置高さ $h=80\text{cm}$ とし, 斜面の傾斜角度 β は表 5-3 中の角度を用いて行った. また, 要素数や要素間および要素-壁間の摩擦係数 μ (摩擦角 ϕ) の値, 初期配置領域の面積が粒状体の運動に与える影響を調べるため, 表中に示すような ϕ の値や初期配置領域の面積でのシミュレーションを行った. なお, 要素間と要素-壁間の摩擦角 ϕ の値には同じ値を用いた. また, 初期配置領域の面積は, 表中に示すように断面寸法を変更することで表現した.

表中の初期配置領域の面積 100cm^2 (試料箱断面寸法 $5\text{cm}\times 20\text{cm}$) は, 流下体積 $V=1,000\text{cm}^3$ の室内模型実験時の試料箱中の砂試料側面と同寸法を用いたものである. 要素数の影響の多少を調べる際には, この面積を固定して, 要素寸法を変化させることで要素数を増減させた. 摩擦角 ϕ の値は一定である. 表 5-3 中には, このときの各要素数における楕円形要素の寸法を示している. 楕円形の長径を a , 短径を b で表示している. なお, 楕円形の扁平率 $((a-b)/a)$ は 0.5 とした.

また, 模型実験や実斜面を想定したとき, 流下させる試料 (土砂) の

体積の大小が運動エネルギーや到達距離，堆積形状に影響を与えることが考えられる．本シミュレーションでは，流下させる試料（土砂）の体積の大小を初期配置領域の面積の大小で表現した．初期配置領域の面積の大小の影響を調べる際には，摩擦角 ϕ と要素寸法を固定し，初期配置領域の面積を変化させた．初期配置領域の面積は，初期配置領域開口部の高さを変化（5cm，10cm，15cm）させて増減した．要素群中の各要素の形状および寸法は同一とした．

要素間および要素－壁間の摩擦角 ϕ の影響を調べる際には，要素数，要素寸法および初期配置領域の面積は固定した．要素群中の各要素の形状および寸法は同一とした．

表 5-3 解析ケース

	設置高さ h	斜面傾斜角度 β	要素間および 要素－壁間の 摩擦角 ϕ	初期配置領域 断面寸法	要素数	要素寸法 長径 $a \times$ 短径 b
要素数の 影響検討	80cm	35°	30°	5cm×20cm	790個	0.25cm×0.125cm
		40°			3,180個	0.125cm×0.0625cm
		45°				
50°		5cm×20cm		19,850個	0.05cm×0.025cm	
55°						
60°						
初期配置領域の 面積の影響検討	80cm	35°	30°	5cm×20cm	790個	0.25cm×0.125cm
		40°		10cm×20cm	1,580個	
		45°		15cm×20cm	2,370個	
50°		5cm×20cm		790個		
55°						
60°						
摩擦角の 影響検討	80cm	40°	35°	5cm×20cm	790個	0.25cm×0.125cm
		45°				
		50°				
55°		35°	5cm×20cm	790個		
60°						
60°						

(3) 解析結果の整理方法と解析結果例

図 5-4 は，DEM によるシミュレーションの粒状体が堆積した後の様子を模式的に示したものである．同図には解析結果の堆積形状の整理方法を示してある．同図に示すように，到達距離 D_x は，斜面と水平面の接合部からの距離とするが，要素単体の最大到達距離を示すものではなく，

堆積物としての先端要素までの距離としている．同様に堆積物としての重心位置を (G_x, G_y) ，堆積高さを D_y として堆積形状のデータとする．これらのデータを取得することで，解析条件の違いによる堆積形状の変化を可視化するとともに，重心位置の経路をはじめとする，模型実験では解明できない斜面流下中の粒状体の運動を逐次追跡し，摩擦等によるエネルギー損失が粒状体の運動や堆積形状にどのような影響を与えるのかを考察する．

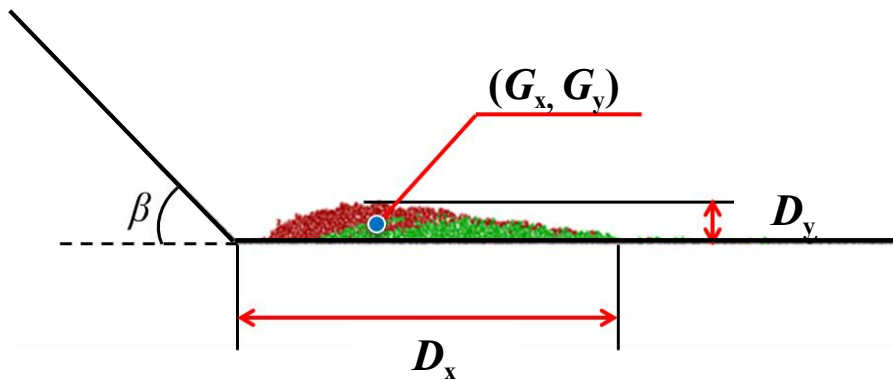


図 5-4 粒状体堆積後の様子と堆積形状の整理方法

図 5-5 は，DEM によるシミュレーション時の粒状体が斜面を流下する運動の様子を時間ごとに整理した解析結果例である．この図の解析条件は，要素数 790 個，斜面傾斜角度 $\beta = 45^\circ$ ，要素間および要素－壁間の摩擦角 $\phi = 30^\circ$ である．先述したように，先発の要素と後発の要素が斜面傾斜角度や要素間および要素－壁間の摩擦係数によって，堆積形状にどのように影響を及ぼしあうのかを観察するため，図のように初期配置領域の上・下部で 2 等分して色分けした．図に示すように，初期配置領域の下側面 A (図 5-3 参照) を除去すると，要素は流下を開始する．そして，要素は斜面上を流下し，水平面に堆積する様子が表現されていることがわかる．斜面法尻部 (遷緩点) 付近では，先発の要素群が水平面に衝突して広がった後，水平面には薄い堆積層が形成されている．そして，初期配置領域の位置の上部にあった後発の要素は，堆積物に衝突して，堆積物上に広がることになる．最終的な堆積状況を図 5-5 (1.5 秒) に示す．

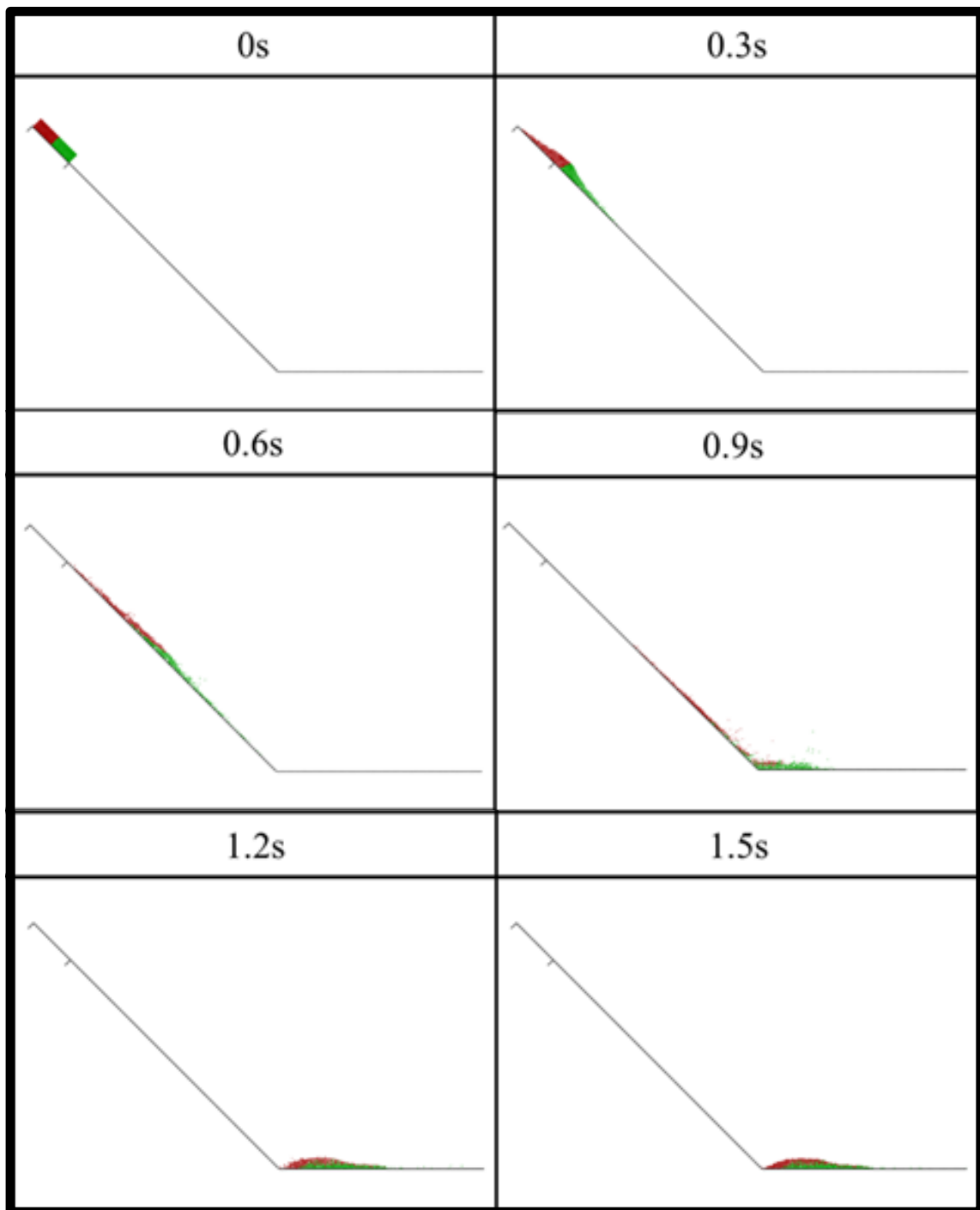


図 5-5 DEM シミュレーション例 (粒状体の流下の様子)

5.2.3 斜面を流下する要素の運動と堆積形状に関する解析結果

(1) 要素数が粒状体の運動と堆積形状に与える影響

DEMでは、要素数の設定が必要となる。周知のように、少ない要素数では計算時間が短く、逆に、要素数が多くなれば計算時間は長くなる。したがって、効率的な計算を行うには、要素数の多少が運動エネルギーや堆積形状に与える影響について確認しておく必要があると考える。ここでは、楕円形要素数の多少が運動エネルギーや堆積形状に与える影響を考察する。

初期配置領域の面積を一定とした上で、要素寸法を変更して初期配置領域に敷き詰められる要素数を増減させている。初期配置領域の設置高さ h は 80cm で一定、斜面の傾斜角度 β は 35, 40, 45, 50, 55° の 5 通りである。前出の表 5-3 に示した解析ケースの内、初期配置領域の面積 100cm^2 (断面寸法 $5\text{cm}\times 20\text{cm}$)、要素間および要素-壁間の摩擦角 $\phi=30^\circ$ の解析ケースである。要素数および要素寸法は表 5-3 に示したとおりである。

図 5-6 は、運動エネルギーの変化の様子を示したものである。同図の横軸は時刻であり、初期配置領域下端の境界を解放した時刻を $t = 0\text{sec}$ としている。縦軸は全要素の運動エネルギー ($mv^2/2$) の総和 E_v を、初期配置における要素が持つ位置エネルギー (mgh_g) の総和 E_e で除した値を用いている。ここに、 h_g は初期配置領域に敷き詰められた楕円形要素全体としての重心位置での高さを表す。図中のプロット点は、時間増分 $\Delta t = 1.0\times 10^{-6}\text{sec}$ に対して計算回数 10,000 回ごと、すなわち、0.01sec ごとの E_v/E_e の値をプロットしたものである。なお、ここでは要素数が 790 個、3,180 個および 19,850 個の 3 パターンの比較を行っているが、19,850 個については要素数の増大による影響が極めて小さいこと（例えば、図 5-6 中の 3,180 個と 19,850 個の E_v/E_e の値の差が小さい）が考えられたことに加え、計算時間が膨大であることから、傾斜角 $\beta = 45^\circ$ の場合のみ解析を行っている。また、図中のマーカー色は、緑色が斜面傾斜角 $\beta = 35^\circ$ 、青色が $\beta = 45^\circ$ 、赤色が $\beta = 55^\circ$ の解析結果を示している。

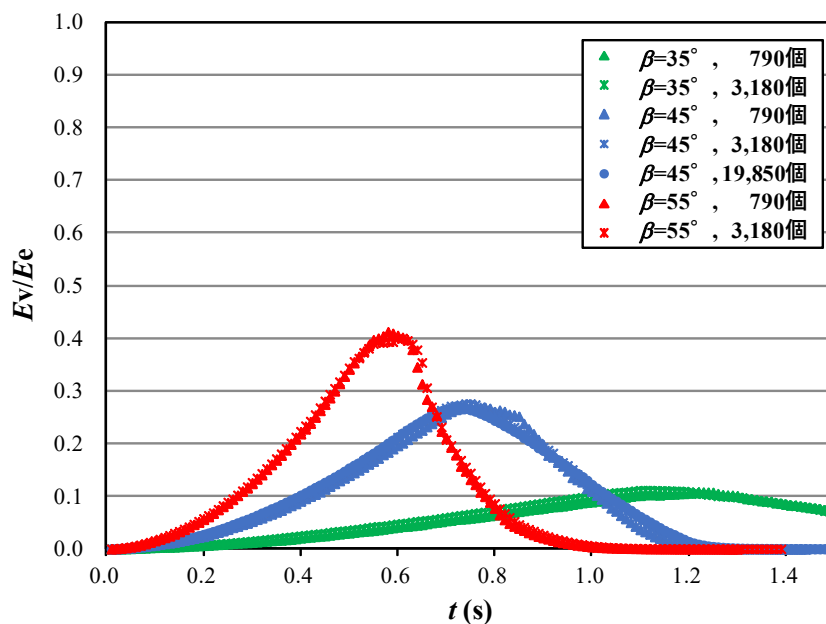


図 5-6 要素数が運動エネルギーの変化に与える影響

図 5-6 に示すように、いずれの斜面傾斜角度においても時刻 t と E_v/E_e の関係（運動エネルギーのピークの時刻や経路）に、要素数の多少による大きな差異は見られない。このことから、同一体積の場合、DEM によるシミュレーション時の要素数の多少による粒状体の運動エネルギーへの影響は小さいことがわかる。

図 5-7 および図 5-8 は、斜面傾斜角 β と前出の図 5-4 に示した D_x 、 G_x との関係を示したものである。これらの図に示すように、 D_x 、 G_x は、斜面傾斜角 β の増大とともに、増加傾向を示している。これらの解析結果は、前章の室内模型実験の結果と同様の傾向である。要素数の多少とその影響について着目すると、要素数が多いほうが同一 β に対する D_x 、 G_x は共にわずかに大きな値を示す。これは、初期配置領域の面積を一定としているため、要素数を増加させたことで要素個々の質量が小さくなることから、壁面や要素同士の衝突による一部要素の飛散が主な原因の 1 つとして挙げられる。

図 5-9 および図 5-10 は、堆積物としての形状への要素数の多少の影響を見るため、 β と G_x/D_x （重心位置/到達距離）、 D_y/D_x （堆積高さ/到達距離）との関係を整理したものである。両図から、 G_x/D_x および D_y/D_x

は、いずれの β でも同程度の値を示しており、各要素数間における解析値の差は最大で約5% (D_y/D_x , $\beta=35^\circ$) に収まっている。

また、 $\beta=35^\circ$ では G_x/D_x が小さく、 D_y/D_x が大きいことから、流下方向の長さが短く、堆積高が大きい堆積形状となっていることがわかる。そして、 β が大きくなると G_x/D_x が大きくなり D_y/D_x が徐々に減少しており、堆積高が低く薄い堆積形状へ変化している。この傾向は室内模型実験と同様であり、DEM の結果からも堆積域、堆積形状が斜面傾斜角度の影響を受けていることがわかる。

また、図 5-11、図 5-12 は、 $\beta=45^\circ$ の場合の流下後の要素の堆積状況を示したものである。図 5-11 が要素数 790 個、図 5-12 が要素数 3,180 個のものである。これらの図から、堆積後の形状は要素数が多くなるほど、滑らかな形状を示すことがわかるが、堆積後の概形や、色分けされている前・後方の要素の位置関係（後方の要素が覆いかぶさるような形で堆積する）に大きな差異は見られない。

以上の結果を踏まえると、要素数の変化が運動エネルギーの変化や堆積形状に与える影響は小さいものであり、今回の解析条件（要素数 790 個、3,180 個）においては、計算時間等の負担を考慮すれば、要素数 790 個で解析を行うことが、より効率的である。

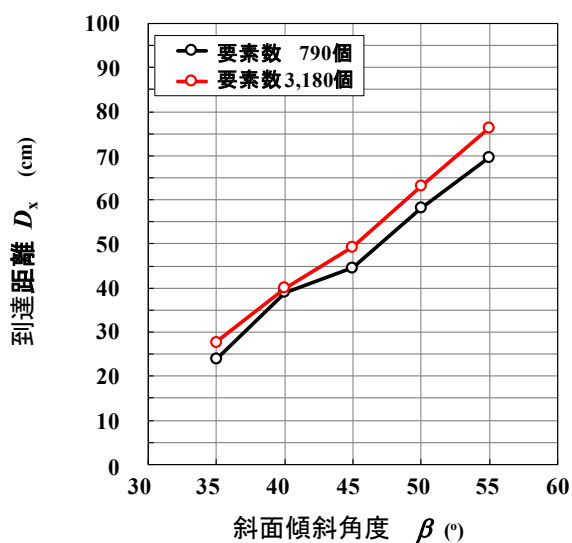


図 5-7 斜面傾斜角 β と D_x との関係

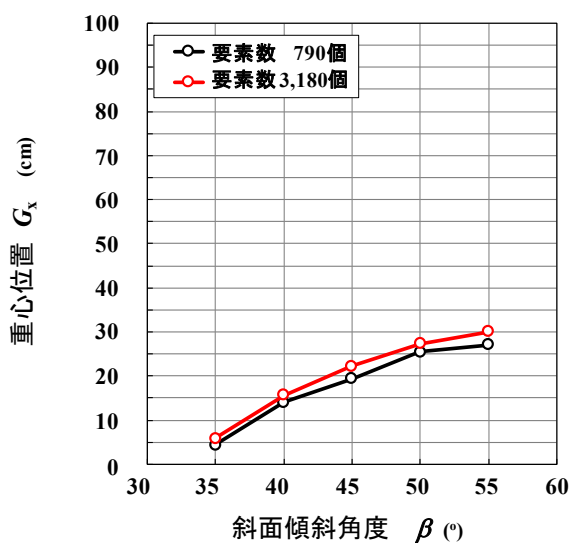


図 5-8 斜面傾斜角 β と G_x との関係

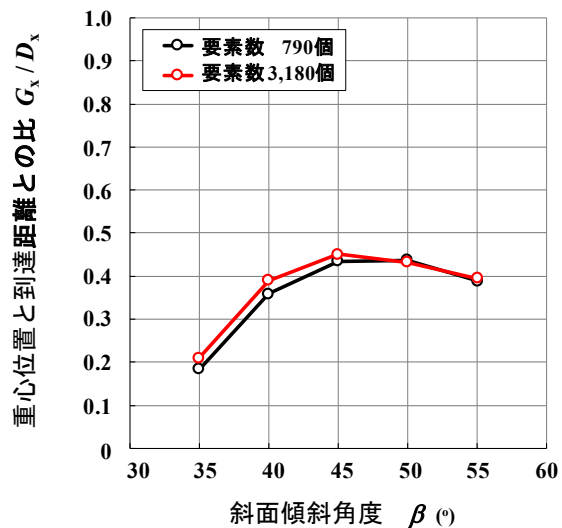


図 5-9 斜面傾斜角 β と G_x/D_x との関係

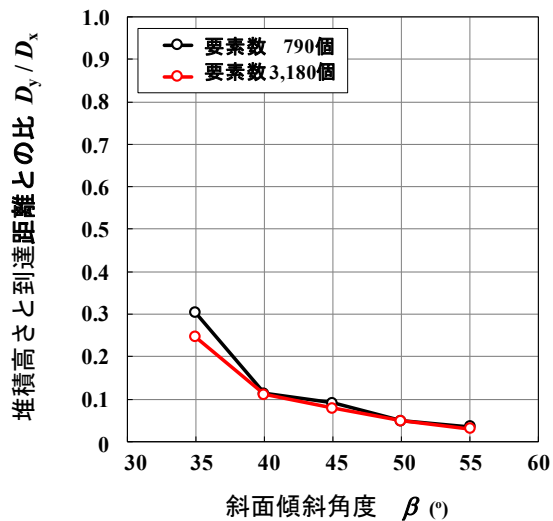


図 5-10 斜面傾斜角 β と D_y/D_x との関係

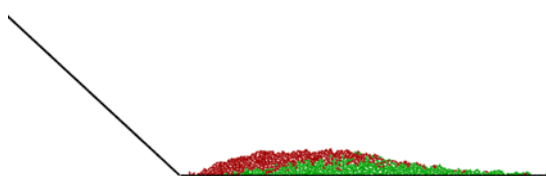


図 5-11 堆積形状(要素数 790 個)

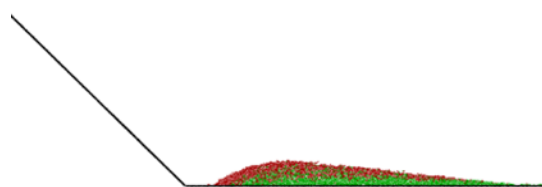


図 5-12 堆積形状(要素数 3,180 個)

(2) 初期配置領域の面積が粒状体の運動と堆積形状に与える影響

模型実験や実斜面を想定したとき、流下させる試料（土砂）の体積の大小が運動エネルギーや到達距離、堆積形状に影響を与えることが考えられる。本節の DEM による 2 次元の粒状体の流下シミュレーションでは、流下させる試料（土砂）の体積の大小を初期配置領域の面積の大小で表現した。そして、初期配置領域の面積の大小が粒状体の運動エネルギーや堆積形状に与える影響を考察する。なお、初期配置領域の面積は、初期配置領域開口部の高さを変化（5cm, 10cm, 15cm）させて増減した。

解析条件は、前出の表 5-3 に示したとおりである。初期配置領域の設置高さ $h=80\text{cm}$ 、摩擦角 $\phi=30^\circ$ 、要素寸法は長径 $a=0.25\text{cm}$ 、短径 $b=0.125\text{cm}$ で一定とする。各初期配置領域の面積に対応する要素数は表 5-4 に示すとおりである。斜面の傾斜角度 β は 35, 40, 45, 50, 55, 60° の 6 通りである。

図 5-13 に、運動エネルギーの変化の様子を示す。図の縦軸、横軸および斜面傾斜角度を区別するマーカー色については前出の図 5-6 と同様である。この図より、初期配置領域の面積が大きいほど E_v/E_e の最大値は小さく、ピークを迎える時刻が早くなることがわかる。また、斜面傾斜角度 β が大きくなるほどその影響が大きい傾向が読み取れる。この要因としては、初期配置領域の面積が大きい場合、領域開口部の高さが高いため初期配置領域の解放と同時に領域上部の要素が崩落するように流下を始めることから、解放直後に鉛直方向に対する速度が急激に大きくなる。このため、ピークを迎える時刻が早くなり、 E_v/E_e の最大値が小さくなる傾向を示すと考えられる。

図 5-14, 図 5-15, 図 5-16 および図 5-17 は、斜面傾斜角 β と前出の図 5-4 に示した D_x , G_x , G_x/D_x および D_y/D_x との関係を示したものである。

図 5-14, 図 5-15 に示すように、斜面傾斜角 β の増大とともに、 D_x , G_x は増加傾向を示している。そして、 D_x は初期配置領域の面積が大きいほど、大きな値を示している。また、 β が大きくなると、 G_x は初期配

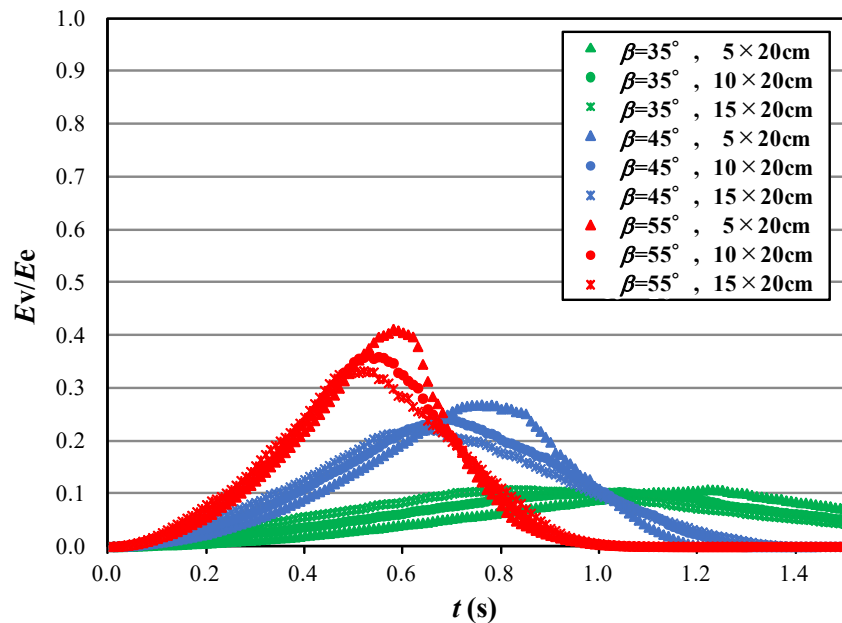


図 5-13 初期配置領域の面積が運動エネルギーの変化に与える影響

置領域の面積の大小による影響を受けやすいことがうかがえる。次に、
 図 5-16, 図 5-17 より、堆積形状について考察する。両図に示すように、
 β と G_x/D_x および D_y/D_x との関係は、初期配置領域における領域開口部
 の高さが 10cm, 15cm では同程度の値を示す。しかし、これらの関係は
 開口部高さが 5cm の場合とはやや異なっており、堆積形状についても初
 期配置領域の面積の大小が影響を与えていることがわかる。

以上のことから、初期配置領域の面積の大小が粒状体の運動・堆積形
 状に与える影響は比較的大きく、DEM を用いて、実際の斜面崩壊土砂の
 到達域を推定する際には、崩壊土砂の体積に合せた適切な設定が必要と
 言える。

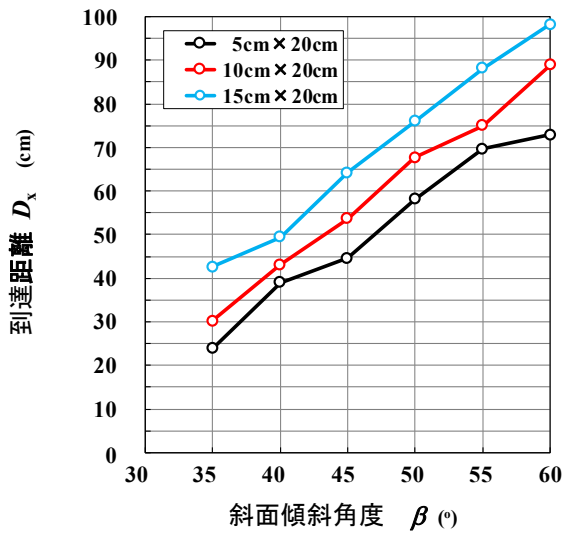


図 5-14 斜面傾斜角 β と D_x との関係

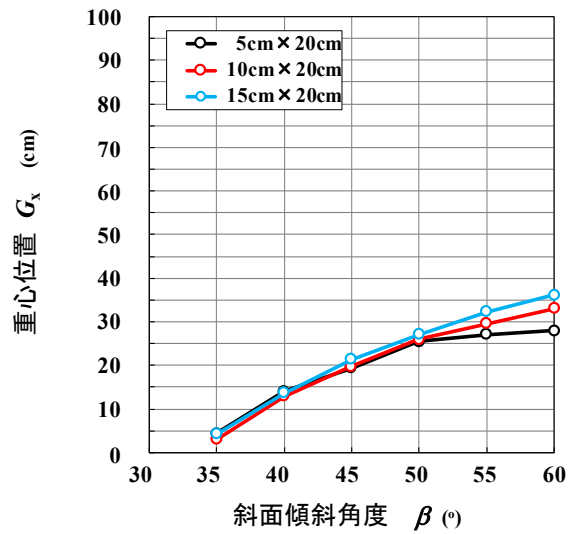


図 5-15 斜面傾斜角 β と G_x との関係

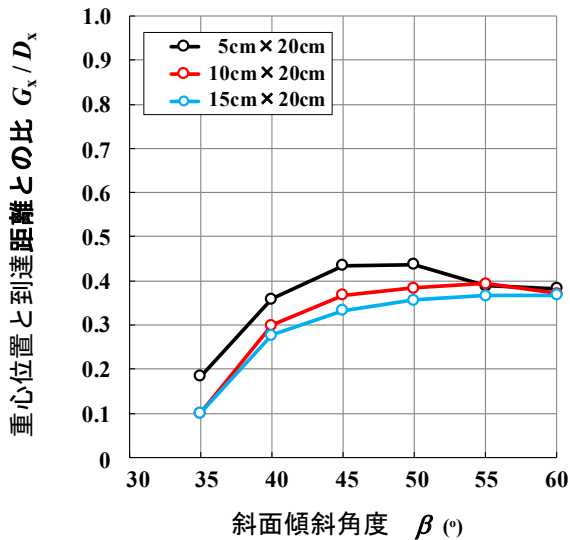


図 5-16 斜面傾斜角 β と G_x/D_x との関係

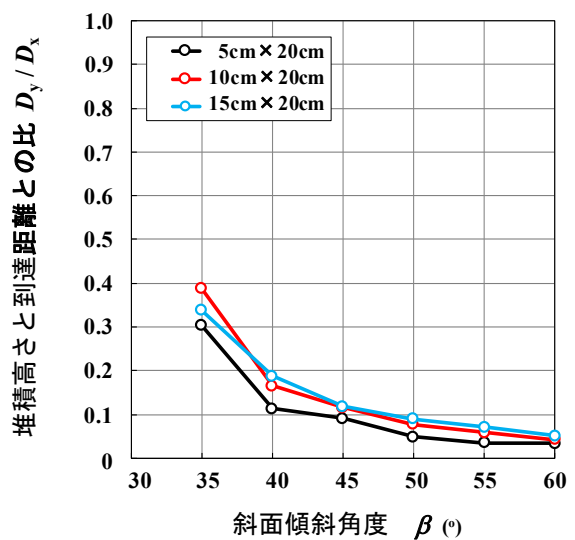


図 5-17 斜面傾斜角 β と D_y/D_x との関係

(3) 摩擦係数が粒状体の運動と堆積形状に与える影響

DEMによるシミュレーションで、斜面を流下する物体の運動を表現するに当たっては、摩擦係数が解析結果に大きな影響を与えることが考えられる。ここでは、DEMにおける要素間および要素-壁間の摩擦係数 μ （摩擦角 ϕ ）の違いが運動エネルギーや堆積形状に与える影響を考察する。

解析ケースは、前出の表 5-3 に示したとおりである。試料箱の設置高さ h は 80cm, 試料箱面積 100cm^2 (試料箱面寸法 5cm×20cm), 要素数 790 個, 斜面の傾斜角度 β は 40, 45, 50, 55, 60°の 5 通りである。要素寸法は長径 $a=0.25\text{cm}$, 短径 $b=0.125\text{cm}$ で一定とする。要素間と要素-壁間の摩擦角 ϕ は同一の値とし、 $\phi=30^\circ$ と 35° の 2 パターンについて計算を行った。

図 5-18 に、 $\phi=30^\circ$ と 35° での運動エネルギーの変化の様子を示す。図の縦軸、横軸および斜面傾斜角度を区別するマーカー色については前出の図 5-6 と同様である。表 5-4 は、図 5-18 に示した時刻 t と E_v/E_e との関係における E_v/E_e の最大値および E_v/E_e が最大値を示す時刻(T_e)をまとめたものである。なお、表 5-4 では E_v/E_e の最大値を $E_{v_{max}}/E_e$ で表示している。

これらの図表より、いずれの斜面傾斜角度 β においても摩擦角 ϕ の値が大きいかいほうが $E_{v_{max}}/E_e$ の値が小さい。そして、 β が小さい程、その差が大きい。また、斜面傾斜角度の小さい $\beta=35^\circ$ の場合には、 t と E_v/E_e の関係が最大値をとる時刻が $\beta=45^\circ$, 55° の場合に比べて遅い(約 0.3sec)ことがわかる。

図 5-19, 図 5-20, 図 5-21 および図 5-22 は、斜面傾斜角度 β と前出の図 5-4 に示した D_x , G_x , G_x/D_x および D_y/D_x との関係をそれぞれ示したものである。なお、図 5-19, 図 5-20 および図 5-21 には、それぞれ、前章の定幅流路実験で得られた堆積した砂試料の到達距離 D_E' , 重心位置 D_G および D_G/D_E' も併せて示している。定幅流路実験の実験条件は、試料箱の設置高さ $h=80\text{cm}$, $V=1,000\text{cm}^3$, 斜面傾斜角度 β は $40^\circ\sim 60^\circ$ である。

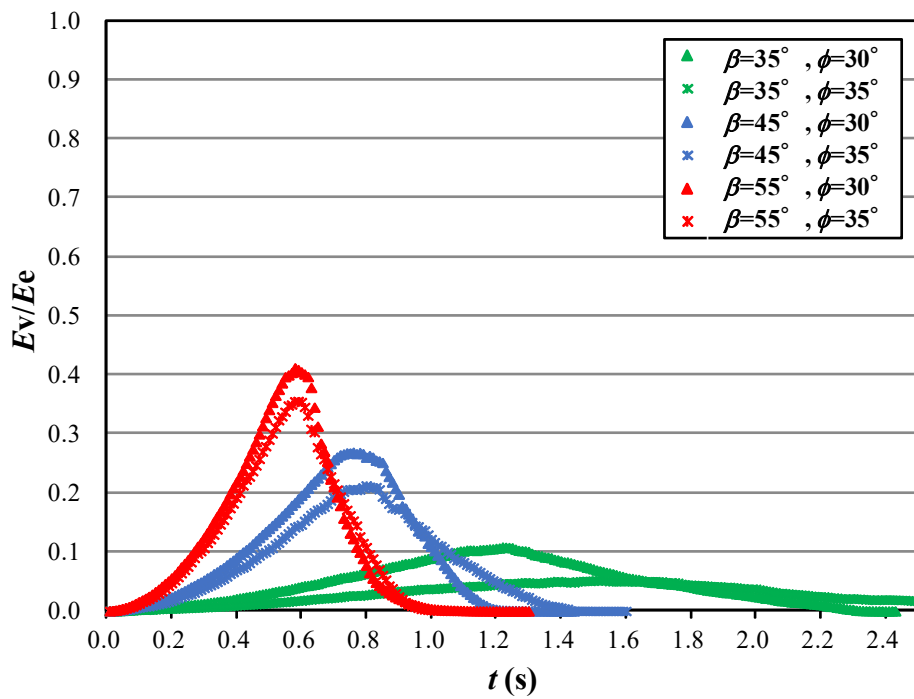


図 5-18 摩擦角 ϕ が運動エネルギーの変化に与える影響

表 5-4 Ev/Ee の最大値(Ev_{max}/Ee)とその時刻 T_e

	T_e (s)		Ev_{max}/Ee	
	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=35^\circ$
$\beta=35^\circ$	1.22	1.53	0.108	0.052
$\beta=45^\circ$	0.76	0.80	0.269	0.213
$\beta=55^\circ$	0.58	0.59	0.412	0.356

図 5-19, 図 5-20 から, 前項と同様に, 斜面傾斜角 β の増大とともに, D_x , G_x は増加傾向を示す. このとき, 摩擦角 ϕ が大きいほうが同一の β に対する D_x , G_x がともに小さな値を示しており, 到達距離が摩擦角の影響を受けていることがわかる. 図 5-21 および図 5-22 から, 堆積形状への影響を見ると, β が小さいほうが摩擦角の影響が大きいことがうかがえる. また, 図 5-20 を見ると, 摩擦角が小さいほうが D_y/D_x の値が小さくなっており, 摩擦角が小さくなると堆積形状が水平面に薄く広がる傾向を示している. 以上のように, 摩擦係数が粒状体の到達距離や重心位置, 堆積形状に及ぼす影響は大きく, 特に堆積形状については, 斜面傾斜角度が小さいほどその影響が大きくなる傾向が見られた. 実斜面や模型実験における崩壊土砂の到達距離や堆積形状を再現あるいは予測する際には, その取扱いに注意が必要である.

次に, DEM と模型実験との比較を行う. 図 5-19, 図 5-20 から, 斜面傾斜角 β と D_x , G_x との関係は, 模型実験と同様の傾向を示している. また, 図 5-21 に示すように, 斜面傾斜角 β と G_x/D_x との関係も模型実験と同様の傾向を示している. 図 5-19 に示すように, DEM 結果の到達距離 D_x は, $\phi=30^\circ$, $\phi=35^\circ$ の両計算値ともに, 実験値よりも大きな値を示した. また, 図 5-20 に示すように, DEM 結果の重心位置 G_x についても, $\phi=30^\circ$, $\phi=35^\circ$ の両計算値ともに, 実験値よりも大きな値を示している. これは, 定幅流路実験では, 砂試料が斜面板だけでなく, 流路の側壁にも接触しながら流下していることが1つの要因と考えている.

以上のように, 本研究で用いている DEM モデルの計算値は, 到達距離や重心位置の値については室内模型実験結果の値よりも大きな値を示すが, 実験値と斜面傾斜角 β との関係などの実験結果の傾向をよく表現していると考えられる. 次節ではこの DEM モデルを用いて, 斜面を流下中の粒状体の運動エネルギーや重心位置の経路について検討する.

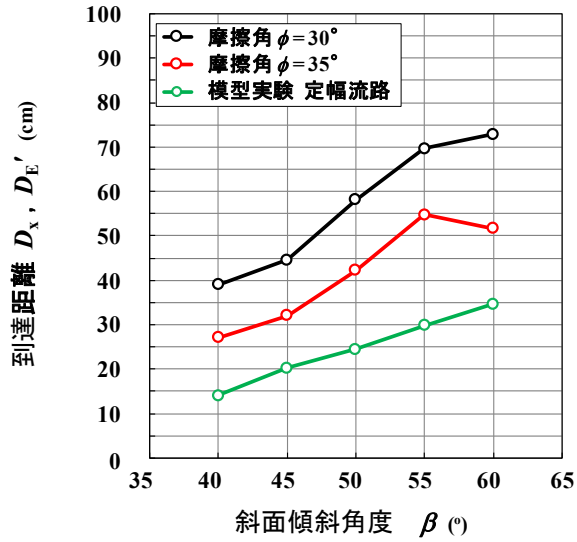


図 5-19 斜面傾斜角 β と D_x との関係

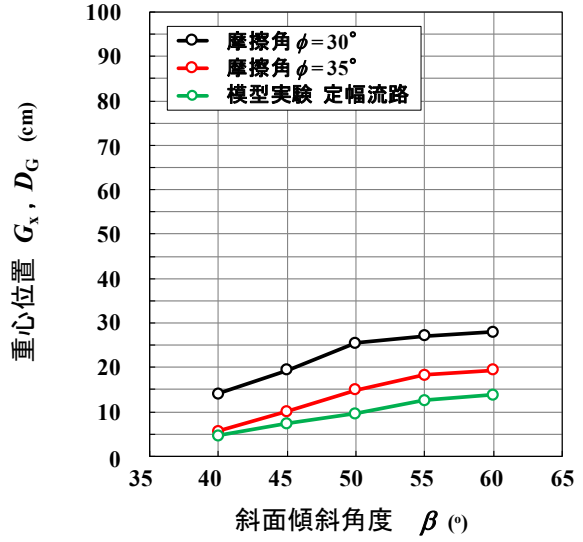


図 5-20 斜面傾斜角 β と G_x との関係

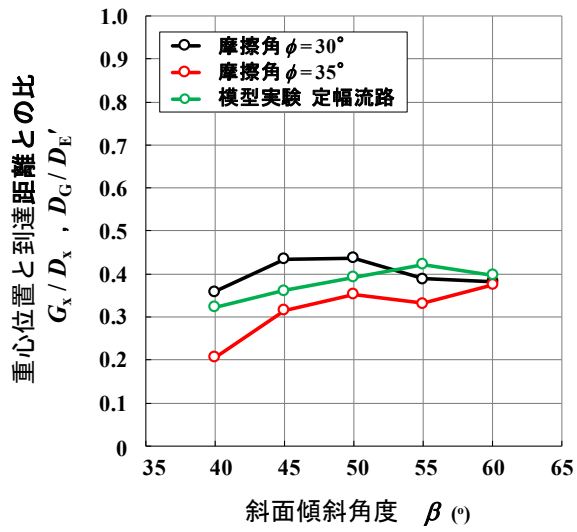


図 5-21 斜面傾斜角 β と G_x/D_x との関係

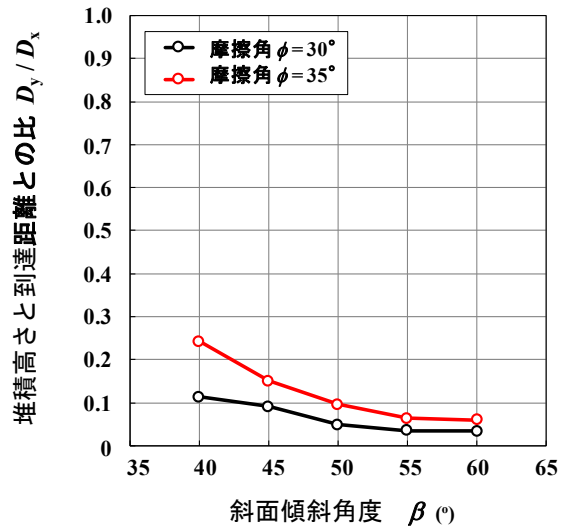


図 5-22 斜面傾斜角 β と D_y/D_x との関係

5.3 粒状体の重心位置の追跡とエネルギー損失

DEMによるシミュレーションでは、斜面を流下する粒状体の運動の様子を逐次追跡することで、斜面崩壊が起こってから崩壊土砂が斜面を流下し、堆積に至るまでの運動を表現できる。これによって、斜面を流下中の粒状体の運動エネルギーや重心位置の経路といった、模型実験では解明できない運動の様子を時々刻々と追跡することが可能となる。ここでは、DEMによるシミュレーション結果から得られる要素群の重心位置の軌跡と、要素個々の重心の並進運動エネルギーの総和 E_v に注目した結果⁵⁾を記載する。

図 5-23 は、土砂の重心位置を追跡するとき、その移動経路は斜面表面形状そのものではなく、さらに遷緩点では（特に先頭部の）減速に伴い、傾斜部分とは異なっているであろうという推定に基づく模式図である。この図では水平面への入射そして静止の例を示しているが、質点解析では勾配変更点では重心軌跡を意識した経路設定あるいは運動経路が地形表面と一致しないことを意識した速度変化のモデル化が必要ではないかという考察である。同図では、簡単のため、土砂の形状変化は考慮せずに図化を実施している。また、図中の h_e は下部水平面を基準面とする要素群の重心位置、 h_v は粒状体の並進運動エネルギー $E_v (=mv^2/2)$ の総和を粒状体の全重量で除した量である。図中の赤色線が示す（下部水平面からの）高さは、剛体要素群の位置をその重心位置 (h_e) に代表させて、力学的エネルギー (h_e+h_v) の変化を示している。

はじめに、粒状体の重心位置 h_e の運動経路について着目する。 $t = 0$ において、初期位置から流下した粒状体の重心位置 h_e は図 5-23 中の青実線で示されるように、粒状体全体の形状の変化に伴って斜面に一度接近しながら流下する。そして、遷緩点では先発の要素が堆積することにより、重心位置 h_e と板面間の距離が大きくなり、 $t = t_1$ において図に示す最終位置に到達するような経路を辿るものと考えられる。次に、斜面を流下する粒状体のエネルギー損失について考える。同図の赤色線に示すように、初期位置において、粒状体が保持する位置エネルギーは、斜面を流下することにより、最終位置に停止するまでに全てのエネルギー

を失うこととなる．ここで，初期位置と最終位置での粒状体の重心位置を直線で結び，その間に生じるエネルギー損失を一定勾配として考える．この時，この直線（緑色線）と水平線とのなす角を見かけの摩擦角 ϕ' とおく．

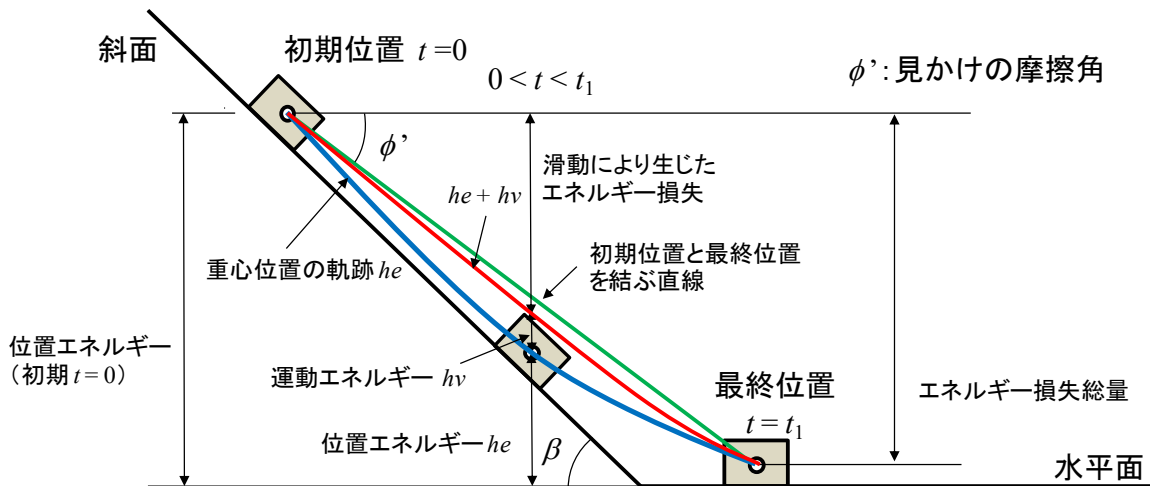


図 5-23 斜面上を滑動する物体のエネルギー変化

図 5-24，図 5-25 および図 5-26 は，DEM シミュレーションから求めた粒状体の重心位置(h_e)と力学的エネルギー(h_e+h_v)の変化を，図 5-23 のように示したものである．DEM の解析条件は，初期配置領域の設置高さ $h=80\text{cm}$ ，初期配置領域が $5\text{cm}\times 20\text{cm}$ ，摩擦角 $\phi=30^\circ$ ，要素数 790 個および要素寸法が長径 $a=0.25\text{cm}$ ，短径 $b=0.125\text{cm}$ である．また，各図は斜面傾斜角 β がそれぞれ， 45° ， 55° および 60° の解析結果である．

これらの図の縦軸は重心位置(h_e)と力学的エネルギー(h_e+h_v)を，また横軸には水平方向の距離 x ($x=0$ ：斜面と水平面との交点位置) をとっており，斜面形状を灰色の実線で表している．図中の緑実線で表すものは，初期位置での重心位置から最終位置での重心位置を直線で結んだもの，すなわち，エネルギー損失を一定と考えた際の勾配を表すもので，見かけの摩擦角 ϕ' を決定する直線である．また，青い点は粒状体の重心位置(h_e)を示しており，計算回数 10,000 回ごとに逐次プロットすることで，常に変形する粒状体の重心位置の軌跡を描いている．同様に，図中の赤

色の×印は、各プロット地点における粒状体の力学的エネルギー(h_e+h_v)をプロットした点である。

これらの図より、初期位置にて保持していた位置エネルギーと各プロット地点での力学的エネルギー(h_e+h_v)との差から、流下に伴うエネルギー損失が生じていることがわかる。また、斜面法尻部（遷緩点）が近づくにつれて、緑実線と h_e+h_v との差が大きくなっている。そして、斜面傾斜角 β が 45° の場合と比較して、 $\beta = 60^\circ$ ではエネルギーの大幅な減少が見られる。また、重心位置(h_e)は、斜面部では斜面勾配とほぼ同程度の下向き勾配であるが、交点付近では徐々にその方向を変えて水平部に達していること、この方向の変化とともに h_v が小さくなることから、要素群の運動エネルギーの減少つまり水平面に入射して減速する要素が生じていること、などが読み取れる。

前出の模型実験や DEM での斜面傾斜角 β と堆積後の粒状体の重心位置との関係で示したように、堆積後の粒状体の重心位置は β の影響を受けている。斜面傾斜角 β が小さい場合、粒状体が水平面へ入射する際の衝突に伴うエネルギー損失が小さく、単純な摩擦抵抗のみでのモデル化でも可能となることが考えられる。しかし、斜面傾斜角 β が大きい場合には、斜面法尻部（遷緩点）付近での原地形の不連続性のために、摩擦抵抗だけでなく、壁面や要素同士が互いに衝突し合うことによるエネルギー損失が生じており、これが粒状体の運動に大きな影響を与えていると考えられる。そして、このときの粒状体の重心位置の経路は、斜面法尻部（遷緩点）付近で凹状の形状を示しており、斜面－水平面に沿った経路とはなっていない。これらのことから、斜面法尻部（遷緩点）では、壁面や要素同士の摩擦と衝突によって、運動エネルギーの減少とともに、粒状体の重心位置の運動経路にも変化が生じており、斜面傾斜角 β が大きい場合には、その影響が大きいものと考えられる。

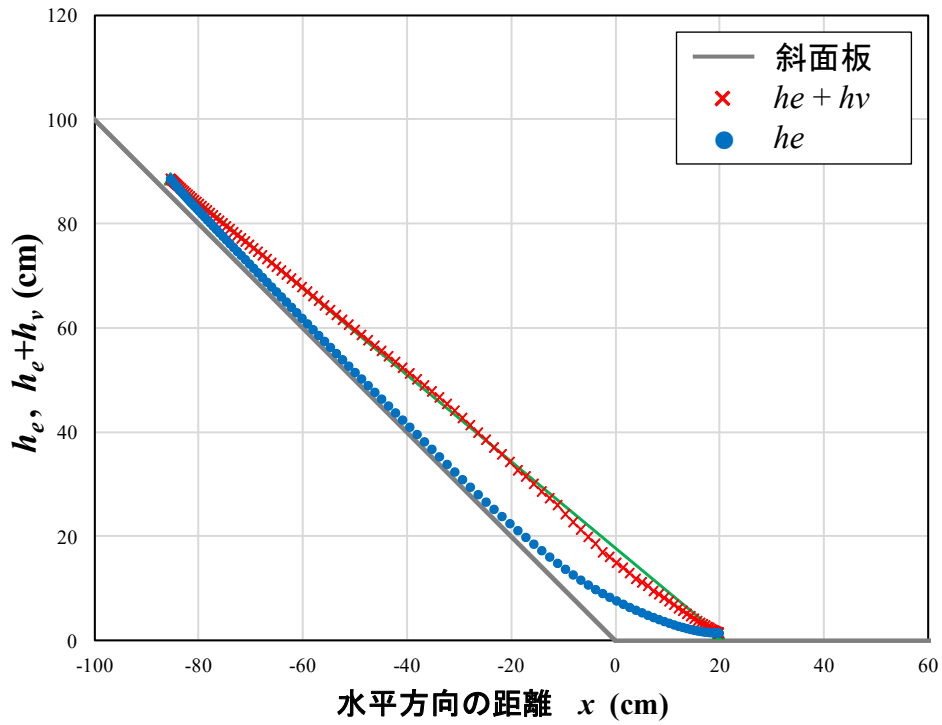


図 5-24 $\beta = 45^\circ$ における粒状体の重心位置とエネルギーの推移

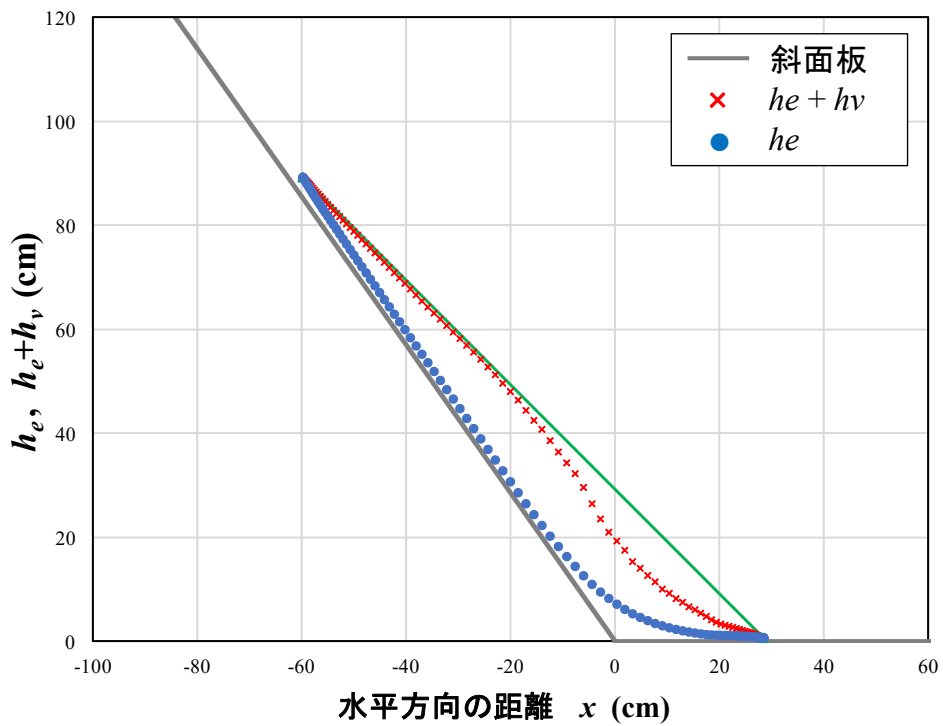


図 5-25 $\beta = 55^\circ$ における粒状体の重心位置とエネルギーの推移

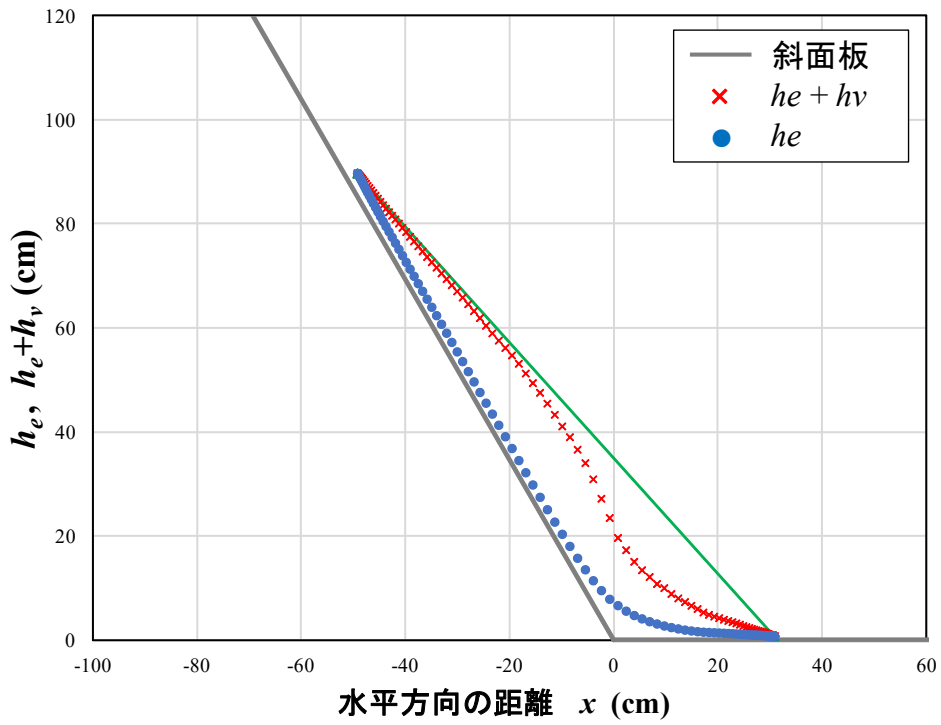


図 5-26 $\beta = 60^\circ$ における粒状体の重心位置とエネルギーの推移

5.4 まとめ

本章では、斜面を流下する粒状体の運動エネルギーの変化や粒状体の重心位置の運動経路に関する情報を得るため、DEMによる2次元の粒状体の流下シミュレーションを用いた検討を行った。このDEMシミュレーションでは、楕円形要素を用いた。要素数、要素の初期配置領域の面積および要素間の摩擦係数などの入力値が、到達距離や堆積形状などの解析結果に及ぼす影響を検討した。そして、DEMによる2次元の粒状体の流下シミュレーションの結果を用いて、斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路とエネルギーの変化について検討、考察を行った。本章で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 個別要素法による流下シミュレーションについて

- ①DEMの結果から、斜面法尻部（遷緩点）付近では、先発の要素群が水平面に衝突して広がった後、水平面には薄い堆積層が形成され、後発の要素がその堆積物に衝突して、堆積物上に広がる様子が観察された。
- ②本解析では、DEMによるシミュレーション時の要素数の多少が粒状体の運動エネルギーの変化や堆積形状に与える影響は小さいものであった。
- ③室内模型実験と同様に、DEMの結果からも堆積域、堆積形状が斜面傾斜角度の影響を受けていることが判った。
- ④本解析での初期配置領域の面積の大小が粒状体の運動や堆積形状に与える影響は比較的大きいものであった。DEMを用いて、実際の斜面崩壊土砂の到達域を推定する際には、崩壊土砂の体積に合わせた適切な設定が必要である。
- ⑤摩擦係数がDEMの結果の粒状体の到達距離や重心位置、堆積形状に及ぼす影響は大きく、特に堆積形状については、斜面傾斜角度が小さいほどその影響が大きくなる傾向が見られた。実斜面や模型実験における崩壊土砂の到達距離や堆積形状を再現あるいは予測する際には、その取扱いに注意が必要である。

- ⑥なお、本解析におけるDEMの計算値は実験値よりも大きなものであったが、これは定幅流路実験では、砂試料が斜面板だけでなく、流路の側壁にも接触しながら流下していることが1つの要因と考えている。

(2) 粒状体の重心位置の追跡とエネルギー損失について

- ①本解析で得られたDEMによるシミュレーション結果を用いて、斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路とエネルギーの変化について整理した。
- ②粒状体の流下に伴うエネルギーの変化は、斜面傾斜角 β が 45° の場合と比較して、 $\beta = 55, 60^\circ$ ではエネルギーの大幅な減少が見られた。このことから、斜面傾斜角 β が大きい場合には、斜面法尻部（遷緩点）付近での原地形の不連続性によって、壁面や要素同士が互いに衝突し合うことによるエネルギー損失が生じており、これが粒状体の運動に大きな影響を与えていると考えられる。
- ③粒状体の重心位置の運動経路は、斜面部では斜面勾配とほぼ同程度の下向き勾配であるが、交点付近では徐々にその方向を換えて水平部に達していること、この方向の変化とともに並進運動エネルギーが小さくなることから、要素群の運動エネルギーの減少つまり水平面に入射して減速する要素が生じていると考えられる。
- ④また、粒状体の重心位置の経路は、斜面法尻部（遷緩点）付近で凹状の形状を示しており、斜面－水平面に沿った経路とはならない。
- ⑤これらのことから、斜面法尻部（遷緩点）では、壁面や要素同士の摩擦と衝突によって、運動エネルギー減少とともに、粒状体の重心位置の運動経路にも変化が生じており、斜面傾斜角 β が大きい場合には、その影響が大きいものと言える。

粒状体を1つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。したがって、質点による解析では、粒状体の重心位置の軌跡こそ必要であると考えられる。そして、本章の個別要素解析（DEM）

の結果, 斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路は, 斜面法尻部(遷緩点)付近で凹状の形状を示すものであり, 原地形とは異なるものであることがわかった. この事実を立てば, 質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測解析では, 重心位置の運動経路を表現できる新たな計算方法が必要と考えられる.

次章では, 粒状体の重心位置の運動経路を滑動経路とする質点モデルを用いた検討を行い, 質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察する.

【参考文献】

- 1) Cundall,P.A. : A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems. Symposium on rock mechanics, Nancy, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 2) Cundall,P.A., Strack,O.D.L. : A discrete numerical model for granular assemblies Authors, Géotechnique, Vol.29, Issue1, pp.47-65, 1979.
- 3) 大倉陽一, 三森利昭, 落合博貴: 個別要素法による崩壊土砂動態解析, 砂防学会誌, Vol.47, No.3, pp.3-10, 1994.
- 4) 倉岡千郎, 中島祐一: 崩壊土砂および防護工の個別要素法によるモデル化, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.137-142, 2008.
- 5) 田村 学, 岩本大祐, 土田章仁, 西村 強, 河野勝宣: 個別要素解析による斜面崩壊土砂の運動と到達距離に関する研究, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.47-52, 2021.

第6章 質点を用いた崩壊土砂の運動のモデル化と考察

第4章、第5章の検討内容と結果をまとめると次のようである。

第4章では、まず、乾燥砂を用いた室内模型実験を実施し、斜面傾斜角度などが斜面を流下する粒状体の堆積域や堆積形状に与える影響を検討した。その結果、砂試料の堆積形状、到達距離、重心位置は、砂試料の量、下部平面から試料箱の下端までの高さだけでなく、斜面傾斜角度 β の変化にも大きな影響を受けていることがわかった。続いて、衝突・乗り越えの2モードを2つの質点の滑動による運動で定式化した質点モデルを用いて、実験結果（斜面傾斜角度と到達距離との関係）の表現を試みた。その結果、堆積した試料の上を後続する試料が滑動すると仮定した乗り越えモデル（モデル3）が実験結果の傾向をよく表現した。そして、質点による到達域の推定では、崩壊土砂の運動とその結果として生じる運動経路の変化にも留意が必要であることがわかった。しかし、このモデル3であっても、堆積砂の重心位置と斜面傾斜角度の関係の傾向など、実験結果の説明が成立しないところがあった。粒状体を1つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。このことから、粒状体の運動を質点の運動で表現するときには、粒状体の重心位置の運動経路に関する情報が必要と考えた。そこで、第5章では、個別要素解析（DEM）を用いて、斜面を流下する粒状体の重心経路の情報、運動エネルギーの変化に関して検討を行った。その結果、粒状体の重心位置の運動経路は、斜面法尻部（遷緩点）付近で凹状の形状を示すものであり、原地形とは異なるものであることがわかった。この事実を立てば、質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測解析では、重心位置の運動経路を表現できる新たな計算方法が必要であると考えた。

これらのことから、本章では、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデルを用いて、DEM結果および室内模型実験結果の斜面傾斜角度と到達距離との関係の再現を試みる。はじめに、粒状体の重心位置の運動経路を辿る質点の計算を行うための計算法を示す。次に、DEM結果の粒状体の重心位置の運動経路を遷緩点付近に円弧を有する斜面を用いて簡易的に表現する。そして、これを滑動経路とした質点モ

デルの計算結果と DEM 結果および室内模型実験結果との比較を行い、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察を行う。

6.1 重心位置の軌跡を辿る質点の計算を行うための計算法

ここでは、粒状体の重心位置の軌跡を辿る質点の計算を行うための簡易な計算法の概要について記述する。

はじめに、**図6-1**に示すように、2次元上の凹型斜面上にn個の点を設置し、これらの点を直線で結ぶことで斜面の概形を表現する。この計算法は、質点が跳躍するような場合（凸型斜面など）は考慮しておらず、質点の運動は斜面および水平面上の滑動のみであることを前提としている。

点*i*から点*i+1*を結ぶ線分で示すように、*x*軸方向からの傾きを θ_i （時計方向正）とすると、*i* → *i+1*の直線の方法ベクトルは、

$$\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i = (x_{i+1} - x_i)\mathbf{i} + (y_{i+1} - y_i)\mathbf{j} \quad (6-1)$$

ここに、 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} はそれぞれ *x* 方向、*y* 方向の基底ベクトルである。

この斜面上を質点が滑動するとき、点*i*と点*i+1*にエネルギー保存則を適用すると、

$$\frac{1}{2}m\mathbf{v}_i^2 + U(x_i, y_i) = \frac{1}{2}m\mathbf{v}_{i+1}^2 + U(x_{i+1}, y_{i+1}) + \int_i^{i+1} \mathbf{F}(\mathbf{r})d\mathbf{r} \quad (6-2)$$

となる。ここに、*m*は質点の質量、 \mathbf{v}_i は速度ベクトル、 $U(x_i, y_i)$ は *x_i*、*y_i*における位置エネルギー、 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ は *i* → *i+1*の直線区間で質点に作用する摩擦力である。ここで、摩擦力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ は次のように表現できる(**図 6-1** 参照)。

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\mu mg \cos^2 \theta_i \mathbf{i} - \mu mg \sin \theta_i \cos \theta_i \mathbf{j} \quad (6-3)$$

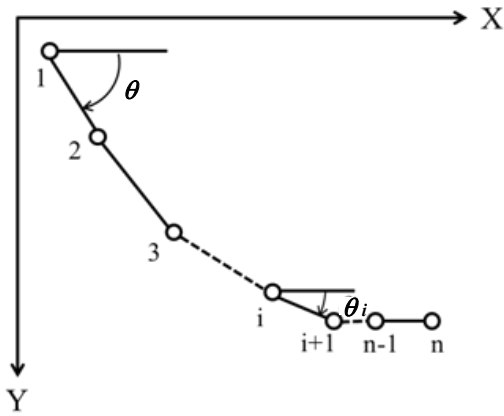


図 6-1 斜面概形

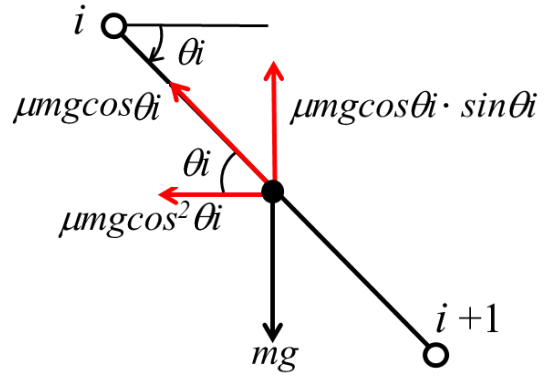


図 6-2 質点に作用する摩擦力

$i \rightarrow i+1$ の経路は $y = \tan \theta_i \cdot x + b$ (b :定数) とするとき,

$$\begin{aligned}
 & \int_i^{i+1} \mathbb{F}(r) dr \\
 &= \int_i^{i+1} \{-\mu mg \cos^2 \theta_i \mathbf{i} - \mu mg \cos \theta_i \sin \theta_i \mathbf{j}\} (dx \mathbf{i} + dy \mathbf{j}) \\
 &= \int_{x_i}^{x_{i+1}} \{-\mu mg \cos^2 \theta_i - \mu mg \cos \theta_i \sin \theta_i \tan \theta_i\} dx \\
 &= \int_{x_i}^{x_{i+1}} -\mu mg (\cos^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i) dx \\
 &= -\mu mg (x_{i+1} - x_i)
 \end{aligned} \tag{6-4}$$

以上より、節点 $i+1$ への入射時の速度 \mathbf{v}_{i+1} は,

$$\begin{aligned}
 v_{i+1}^{in} &= \left\{ v_i^{out2} + U(x_i, y_i) - U(x_{i+1}, y_{i+1}) - \mu mg (x_{i+1} - x_i) \right\}^{1/2} \\
 &= \left\{ v_i^{out2} + 2g(y_{i+1} - y_i) - 2\mu mg (x_{i+1} - x_i) \right\}^{1/2}
 \end{aligned} \tag{6-5}$$

となり、 $i+1$ における、速度ベクトルの大きさ v_{i+1}^{in} を決めることができる。これより、点 $i+1$ への入射時の速度は,

$$\mathbf{v}_{i+1}^{in} = v_{i+1}^{in} \cos \theta_i \mathbf{i} + v_{i+1}^{in} \sin \theta_i \mathbf{j} \tag{6-6}$$

点 $i+1$ から $i+2$ への区間が x 軸方向と、 θ_{i+1} の角度を有しているとすれば $i+1 \rightarrow i+2$ の方向ベクトルは、

$$\overrightarrow{r_{i+1}r_{i+2}} = \cos \theta_{i+1} \mathbf{i} + \sin \theta_{i+1} \mathbf{j}$$

$i+1 \rightarrow i+2$ への速度を \mathbf{v}_{i+1}^{out} と書いて

$$\mathbf{v}_{i+1}^{out} = v_{i+1}^{in} \overrightarrow{r_{i+1}r_{i+2}} = v_{i+1}^{in} \cos \theta_i \cos \theta_{i+1} + v_{i+1}^{in} \sin \theta_i \sin \theta_{i+1} \quad (6-7)$$

これより、

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{i+1}^{out} &= v_{i+1}^{out} \cos \theta_{i+1} \mathbf{i} + v_{i+1}^{out} \sin \theta_{i+1} \mathbf{j} \\ &= v_{i+1}^{in} \left(\cos \theta_i \cos^2 \theta_{i+1} + \sin \theta_i \sin \theta_{i+1} \cos \theta_{i+1} \right) \mathbf{i} \\ &\quad + v_{i+1}^{in} \left(\cos \theta_i \cos \theta_{i+1} \sin \theta_{i+1} + \sin \theta_i \sin^2 \theta_{i+1} \right) \mathbf{j} \end{aligned} \quad (6-8)$$

また、 $i+1$ への入射前後の運動エネルギーの変化に注目すると、

$$\begin{aligned} \Delta E &= \left\{ \left(v_{i+1}^{out} \right)^2 - \left(v_{i+1}^{in} \right)^2 \right\} m / 2 \\ &= \frac{1}{2} m \left(v_{i+1}^{in} \right)^2 \left\{ \left(\cos \theta_i \cos \theta_{i+1} + \sin \theta_i \sin \theta_{i+1} \right)^2 - 1 \right\} \\ &= \frac{1}{2} m \left(v_{i+1}^{in} \right)^2 \left\{ \cos^2 (\theta_{i+1} - \theta_i) - 1 \right\} \end{aligned} \quad (6-9)$$

上式より $\{\cos(\theta_{i+1} - \theta_i)^2 - 1\}$ において、 $\theta_{i+1} = \theta_i$ ならば、エネルギー損失なしとして運動エネルギーの損失分が求められる。

なお、 $\theta_{i+1} > \theta_i$ ならば点 $i+1$ における斜面形状は、凹型とはならない。

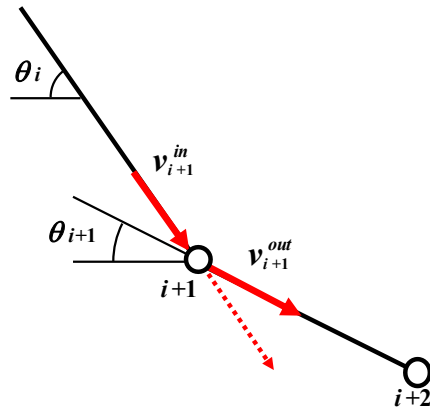


図 6-3 接点入射前後の速度

以上から点 i の位置 (x_i, y_i) のデータを取得すれば点 i での速度が式(6-5), 式(6-7)で求められる. 時刻 t_i に i 点を通じた質点が $i+1$ に到着する時刻を t_{i+1} とすれば, $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ として

$$l_i = v_i^{out} \Delta t + \frac{1}{2} g (\Delta t)^2 (\sin \theta_i - \mu \cos \theta_i) \quad (6-10)$$

ただし,

$$l_i^2 = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 \quad (6-11)$$

これより,

$$\frac{1}{2} g (\sin \theta_i - \mu \cos \theta_i) \Delta t^2 + v_i^{out} \Delta t - l_i = 0 \quad (6-12)$$

$$\Delta t = \frac{-v_i^{out} \pm \sqrt{(v_i^{out})^2 + 2l_i g (\sin \theta_i - \mu \cos \theta_i)}}{2g (\sin \theta_i - \mu \cos \theta_i)} \quad (6-13)$$

$v_i^{out} = 0$ ならば

$$\Delta t = \pm \sqrt{\frac{l_i}{2g (\sin \theta_i - \mu \cos \theta_i)}} \quad (6-14)$$

t_i が既知であれば、これに $i \rightarrow i+1$ に要する時間 Δt を加えることで t_{i+1} を求めることができる。

以上を総合すると、実斜面を直線で連結して、2次元断面と表現すれば、その線上を滑動する質点の動きとして土砂の動きを追跡するモデル化が可能である。入力上の重要な因子は摩擦係数である。

ここで、式(6-5)において{ }内が0以下になるとき質点は $i \rightarrow i+1$ の区間で速度0、すなわち停止することとなる。

そこで停止点が $(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ であるとすると、

$$(x_i + \Delta x < x_{i+1}, y_i + \Delta y < y_{i+1})$$

$$v_i^2 + 2g\Delta y - 2\mu g\Delta x = 0$$

$$v_i^2 + 2g\Delta x \tan \theta - 2\mu g\Delta x = 0$$

$$\therefore x = \frac{v_i^2}{2g(\mu - \tan \theta)}$$

なお、 $\mu = \tan \theta$ のとき $v_{in}^{i+1} = v_{out}^i$

以上が本章で用いる粒状体の重心位置の軌跡を辿る質点の計算を行うための計算法の概要である。

6.2 計算に用いた粒状体の重心位置の運動経路

本研究では、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデルをモデル4と称することとする。

前章のDEMシミュレーションの結果、粒状体の重心位置の運動経路は斜面法尻部（遷緩点）付近で凹状の形状を示し、重心位置が水平部に入ると並進運動エネルギーが減少することがわかった。そして、このときの遷緩点付近における粒状体の重心位置の運動経路は、円弧のような形を描くものであった（5.3節の図5-24、図5-25および図5-26）。

このことから、本研究では、図6-4に示すように、DEM結果の粒状体の重心位置の軌跡を遷緩点付近に円弧を有する斜面を用いて簡易的に表現した¹⁾。そして、6.1節に示した計算法を用いて、この経路上を滑動する質点の計算を行う。このとき円弧の半径は、重心の軌跡に合うように試行によって設定している。

なお、本研究では、遷緩点付近における粒状体の重心位置の軌跡を円弧を用いて表現することを提案しているものではないことを断っておく。

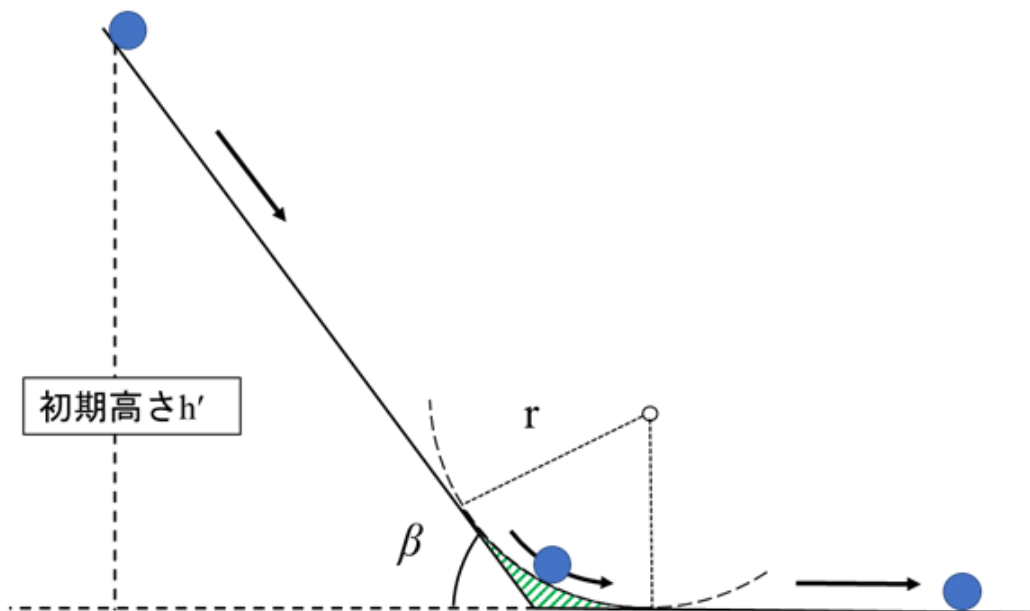


図 6-4 粒状体重心位置の運動経路の簡易的な表現

6.3 個別要素法による解析結果と計算値の比較

前述したように、本研究では、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデルをモデル4と称している。このモデル4の質点の到達距離を D_s とする。DEMシミュレーションで得られている粒状体堆積後の重心位置 G_x とモデル4の質点の到達距離 D_s との比較を行う¹⁾。計算に用いる質点の滑動経路は、6.2節に示した、DEM結果の粒状体の重心位置の軌跡を遷緩点付近に円弧を有する斜面を用いて簡易的に表現した経路とする。そして、この滑動経路を辿る質点の計算を6.1節に示した計算法を用いて行う。このとき、円弧部分の質点の滑動経路は、約100点の微小な区間に分割し、これを直線で結ぶことで円弧に近似させた。

モデル4の計算条件を表6-1に示す。斜面傾斜角度 $\beta=45^\circ$ 、 55° および 60° の3パターンについてモデル4の計算を行った。質点の初期高さ h' は、DEMで用いた初期配置領域(5cm×20cm)の重心位置の高さとした。なお、表中には円弧の半径も示している。この半径は、DEMシミュレーションで得られた粒状体の重心位置の運動経路を用いて試行錯誤で求めた。同表に示すように、斜面傾斜角度 β が大きいほど半径は小さくなっている。このことから、 β が大きいほど、粒状体の重心位置の並進運動の方向に大きな変化が生じており、これに伴って運動エネルギーが失われていることが推察される。

計算に用いる摩擦係数は、前章の図5-23に示した見かけの摩擦角 ϕ' から求めた。見かけの摩擦角 ϕ' は、DEMシミュレーションの粒状体の初期位置と停止位置における、それぞれの重心位置を結んだ直線と水平線とがなす角として求めている。

表6-2および図6-5に、DEMによる粒状体の堆積後の重心位置 G_x と質点の到達距離 D_s との比較を示す。図中のDEMの解析条件は、前章に示したとおりである。これらの図表から、 G_x と D_s との差は最大でも0.9cm($\beta=60^\circ$ の時)とわずかであり、いずれの β においても G_x と D_s が同等の値を示していることがわかる。

このことから、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデル化によって、粒状体の重心位置の運動を質点の運動として簡易的

に表現することが可能と考えられる。そして、この結果は、先に述べたモデル1やモデル2のように、質点の滑動経路を斜面－水平面とするモデル化では表現できないものであり、勾配変化点における粒状体の運動とその結果として生じる粒状体の運動経路の変化にも注目して到達距離の推定を行うことが有効であることを示している。

表 6-1 モデル4の計算条件

斜面の傾斜角度 β	質点の初期高さ h'	見かけの摩擦角 ϕ'	円弧の半径 r
45°	88.8cm	39.6°	71.3cm
55°	89.6cm	45.1°	44.8cm
60°	89.9cm	48.0°	30.8cm

表 6-2 計算結果の比較（モデル4・DEM）

斜面の傾斜角度 β	モデル4 質点の到達距離 D_s	DEM 粒状体の重心位置 G_x
45°	18.4cm	19.4cm
55°	26.4cm	27.1cm
60°	28.8cm	27.9cm

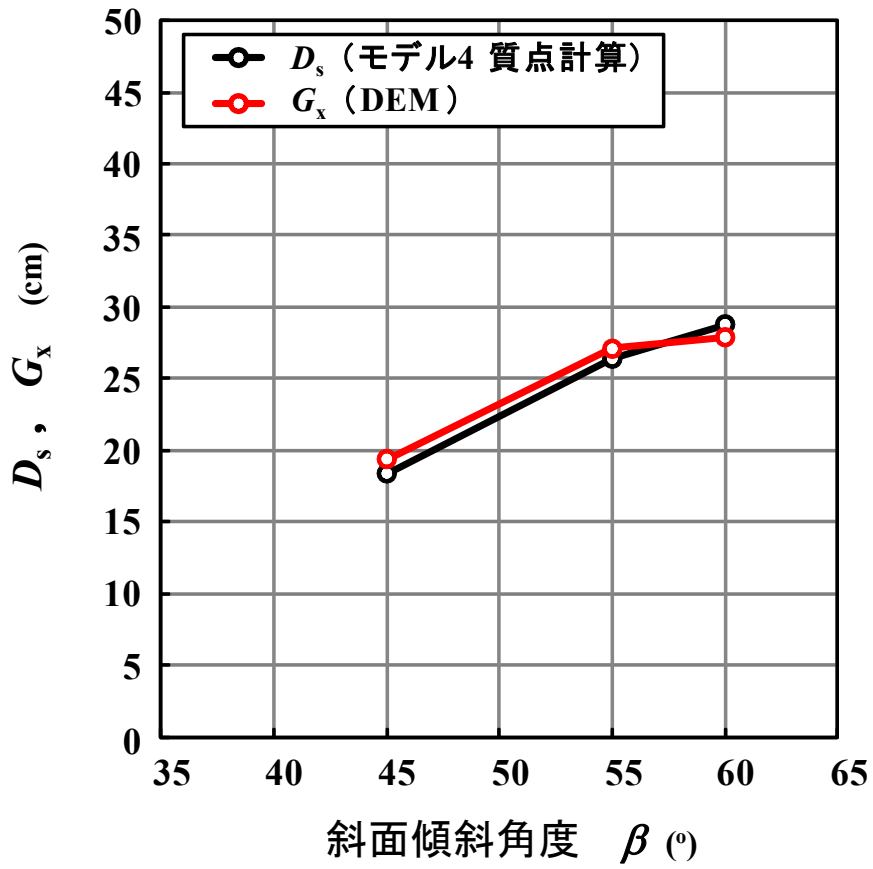


図 6-5 計算結果の比較 (モデル 4・DEM)

6.4 室内模型実験結果と計算値の比較

室内模型実験で得られた砂試料堆積後の重心位置 D_G とモデル4の質点の到達距離 D_s との比較を行う。比較対象とした室内模型実験の実験ケースは、定幅流路実験における砂の流下体積 V が $1,000\text{cm}^3$ 、砂試料の設置高さ h が 80cm である。見かけの摩擦角 ϕ' は、模型実験における初期位置での試料箱の重心位置とFringe画像解析で算出した堆積後の砂試料の重心位置を直線で結ぶことで求めた。なお、模型実験では砂試料の重心位置の運動経路を求めていないため、計算時の質点の滑動経路には、前出のDEMから求めた粒状体の運動経路を用いている。モデル4の計算条件は表6-3に示すとおりである。

表6-4および図6-6に、室内模型実験で得られた砂試料堆積後の重心位置 D_G と質点の到達距離 D_s との比較を示す。これらの図表に示すように、斜面傾斜角度 β の増大に伴う D_s の増加傾向は、 D_G と同様の増加傾向を示しており、実験結果をよく表現している。ただし、いずれの β においても D_s は D_G の値よりも小さな値を示している。また、両者の差はいずれの β においても同程度である。この要因として、室内模型実験で重心位置を求めた際の計測や画像解析時の誤差が挙げられる。

表 6-3 モデル 4 の計算条件

斜面の傾斜角度 β	質点の初期高さ h'	見かけの摩擦角 ϕ'	円弧の半径 r
45°	88.8cm	42.7°	71.3cm
55°	89.6cm	49.4°	44.8cm
60°	89.9cm	52.9°	30.8cm

表 6-4 計算結果の比較（モデル 4・模型実験）

斜面の傾斜角度 β	モデル4 質点の到達距離 D_s	室内模型実験の 重心位置 D_G
45°	7.4cm	8.8cm
55°	13.8cm	16.1cm
60°	15.4cm	17.9cm

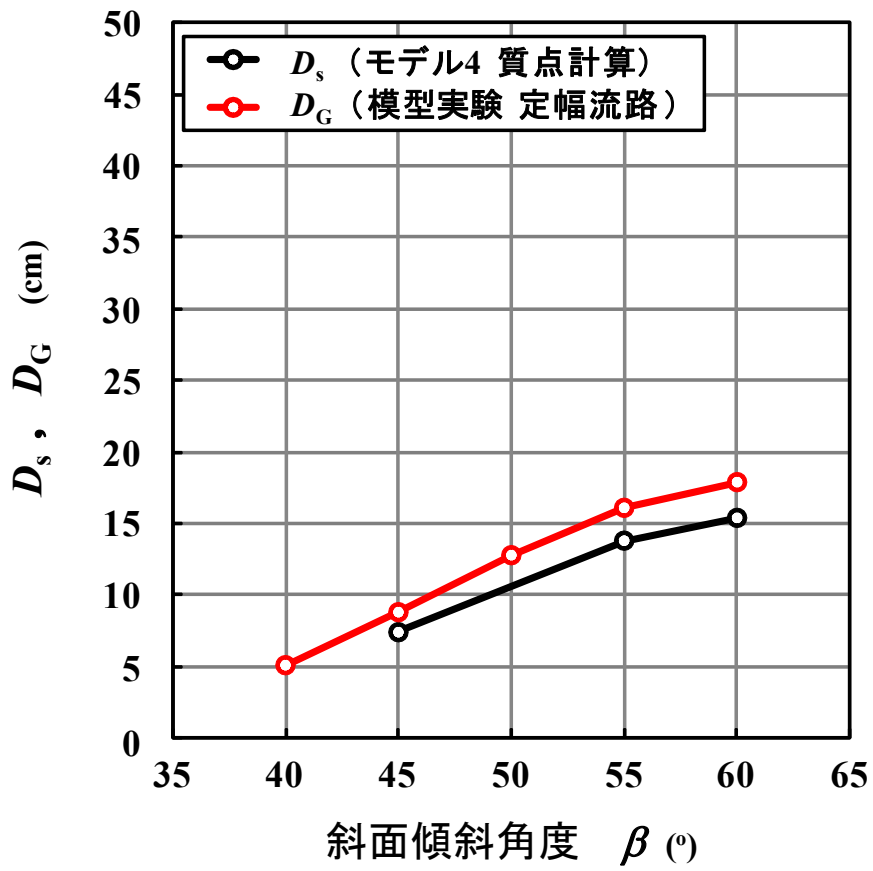


図 6-6 計算結果の比較 (モデル 4・模型実験)

6.5 粒状体の運動エネルギー損失の摩擦係数による表現

第5章の個別要素解析 (DEM) の結果, 斜面を流下する粒状体の運動エネルギーは, 流下に伴いエネルギー損失が生じること, そして, 斜面法尻部 (遷緩点) が近づくにつれてエネルギー損失が大きくなるものであった. ここでは, このような粒状体のエネルギー損失の変化を摩擦係数の変化とした表現を試みる.

DEM の計算結果として, 全要素について運動エネルギーの総和が出力できる. DEM での計算時刻毎の運動エネルギーと粒状体重心の位置エネルギーを用いる. 粒状体の重心位置の軌跡上でのエネルギー損失を摩擦力がなした仕事として摩擦係数の値を求める. このとき, 粒状体を1つの質点と見なす. そして, 粒状体の重心位置の軌跡上での摩擦係数の値の変化を観察し, 斜面流下時, 遷緩点通過時などでのエネルギー損失の特徴や粒状体が流下する斜面の傾斜角度の大小, 斜面勾配の変化量の大小の影響について調べる.

図 6-7A は, DEM で得られた n 個の粒状体の重心位置の計算座標を直線で結ぶことで粒状体の重心位置の軌跡の概形を表現したものである.

図 6-7B 中の $i \rightarrow i+1$ の直線区間で質点に作用する摩擦力 F を次式で表現する.

$$F = \mu' mg \cos \theta_i \quad (6-15)$$

ここに, μ' は消費した運動エネルギーの程度を表現した摩擦係数の値, m は質点の質量, g は重力加速度である. また, 図 6-7B 中の $i \rightarrow i+1$ の直線 (質点の滑動面) の長さ l は次のようである.

$$l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \quad (6-16)$$

$i \rightarrow i+1$ 間に摩擦力 F が行う仕事 W は次のようである.

$$W = -Fl = -\mu' mg \cos \theta_i \cdot l \quad (6-17)$$

$i+1$ 点を基準にとると, i 点における位置エネルギー E_h^i , 運動エネルギー E_v^i および $i+1$ 点における位置エネルギー E_h^{i+1} , 運動エネルギー E_v^{i+1} は, それぞれ以下のように表される.

$$E_h^i = mg \cdot \Delta y = mg \cdot (y_i - y_{i+1}) \quad (6-18)$$

$$E_v^i = \frac{1}{2} m v_i^2 \quad (6-19)$$

$$E_h^{i+1} = 0 \quad (6-20)$$

$$E_v^{i+1} = \frac{1}{2} m v_{i+1}^2 \quad (6-21)$$

ここに, v_i は i 点における速度, v_{i+1} は $i+1$ 点における速度である.

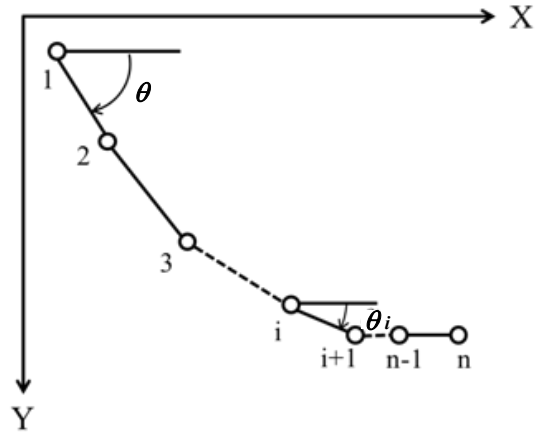
i 点と $i+1$ 点における運動エネルギーの差が摩擦力がなした仕事とすれば,

$$E_h^i + E_v^i - W = E_h^{i+1} + E_v^{i+1} \quad (6-22)$$

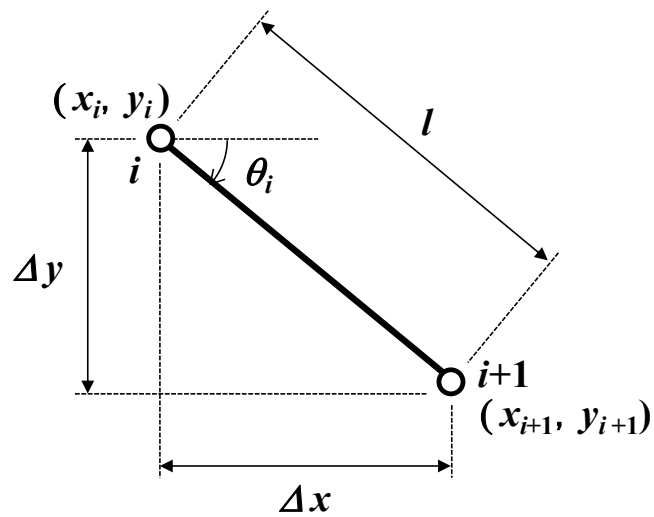
式(6-22)に式(6-16), (6-17), (6-18), (6-19), (6-20)および(6-21)を代入して整理すると次式を得る.

$$\mu' = \frac{1}{2g(x_i - x_{i+1})} \left((v_i^2 - v_{i+1}^2) + 2g \cdot (y_i - y_{i+1}) \right) \quad (6-23)$$

v_i , v_{i+1} に個別要素法で得られた結果を代入すれば, 粒状体が $i \rightarrow i+1$ 区間で消費した運動エネルギーの程度が摩擦係数として表現できる.



A : 重心位置の軌跡の概形



B : 質点の滑動面

図 6-7 粒状体重心位置の軌跡の概形と質点の滑動面の説明

図 6-8, 6-9 および 6-10 に, DEM 解析から求めた粒状体重心位置の軌跡とエネルギーの推移および式(6-23)を用いて計算した粒状体重心位置の軌跡上での摩擦係数 μ' の推移を示す. 各図は, それぞれ, 斜面傾斜角度 β が 45° , 55° および 60° の計算結果である. これらの図の上段の図 A は, 5.3 節で示した図 5-24, 5-25 および 5-26 の再掲である. 下段の図 B は, 粒状体重心位置の軌跡上での摩擦係数 μ' の推移である. 各図の横軸には, 水平方向の距離 x ($x=0$: 斜面と水平面との交点位置) をとっている. 5.3 節の DEM 解析の要素間および要素-壁間の摩擦角の入力値 ($\phi=30^\circ$) を用いて算出した摩擦係数 ($\tan\phi$) を μ_1' , 6.3 節の表 6-1 に示した見かけの摩擦角 ϕ' を用いて算出した摩擦係数 ($\tan\phi'$) を μ_2' とする. 各図の図 B 中には, μ_1' の値と μ_2' の値を併せて示している. なお, 前述したように, 見かけの摩擦角 ϕ' は, DEM 解析の粒状体の初期位置と停止位置における, それぞれの重心位置を結んだ直線 (各図の図 A 中の緑線) と水平線とがなす角として求めている.

これらの図から次のようなことがわかる. まず, 斜面流下時の μ' の値は, β が大きいほど大きな値を示していることがわかる. そして, 斜面流下時の μ' の値は, μ_1' の値よりも大きな値を示している. したがって, 粒状体のエネルギー損失を質点の滑動で表現するならば, 質点解析に用いる摩擦係数は, DEM による粒状体解析における表面摩擦係数の数値よりも大きくする必要がある. そして, このことは, 粒状体内で生じる粒子同士の衝突による損失を見込む必要があることを示していると考えられる. 今回の解析のみで衝突による損失として見込むべき量を定量化することはできないが, 重心軌跡を追跡の上で, その見込むべき量を推定するべきであるということと言えると考えている.

次に, 遷緩点通過時の μ' について述べる. 斜面を流下中の粒状体の先頭部が斜面と水平面との交点に到達した時点での粒状体の重心位置は, 斜面上にある. このため, 図 6-8B, 6-9B および 6-10B に示すように, μ' の値は, 粒状体の重心位置が斜面と水平面との交点に達するよりも前に増加傾向を示しはじめている. そして, μ' は粒状体の重心位置が斜面と水平面との交点に達するよりも前に最大値を示し, その後は減少傾向を示す. なお, μ' が最大値を示すときの粒状体の重心位置は, β が 45° ,

55° の場合に比べて、 β が 60° の場合のほうが、斜面と水平面との交点 ($x=0$) に近い位置にある。また、 μ' の最大値は、 μ_1' および μ_2' の値に比べて大きい値を示す。そして、遷緩点通過時の μ' の最大値は β が大きいほど大きな値を示している。このことは、斜面と水平面との交点での勾配の変化量が大きいほど、遷緩点通過時の粒状体の運動エネルギーの損失が大きいことを意味している。なお、粒状体の重心位置が最終位置に達する付近では、 μ' の値が μ_1' の値より小さくなっているが、これは、要素群の運動エネルギーの総和および運動エネルギー変化量が極めて小さくなっているためと考えている。

以上のように、粒状体重心位置の軌跡上での摩擦係数の値の変化を検討した結果、斜面流下時および遷緩点通過時の μ' の値は、DEM 解析の要素間および要素-壁間の摩擦角 ϕ の入力値を用いて算出した摩擦係数 μ_1' よりも大きな値を示すこと、そして、遷緩点通過時の μ' の値は斜面流下時の μ' の値に比べて大きいことがわかった。したがって、質点の運動で粒状体の運動エネルギーの変化を表現するならば、斜面部では DEM 解析時に用いた表面摩擦係数の数値よりも大きくする必要があること、そして、勾配急変点付近では斜面部の摩擦係数に比べて大きな摩擦係数を用いることが必要である。また、斜面流下時の μ' の値が μ_1' の値よりも大きな値を示したことは、斜面部を流下中の粒状体の運動エネルギーが斜面との表面摩擦だけでなく、粒状体内でも消費されていると見なさざるを得ない。この粒状体内での運動エネルギーの損失は、粒子同士の接触によって生じているものと考えられることから、粒子形状や粒度分布に依存することが推察される。また、 β が大きいほど斜面流下時の μ' と μ_1' の値の差が大きくなっていることから、粒状体内での運動エネルギーの損失は、粒状体が流下する斜面の傾斜角度 β も関係していると考えられる。

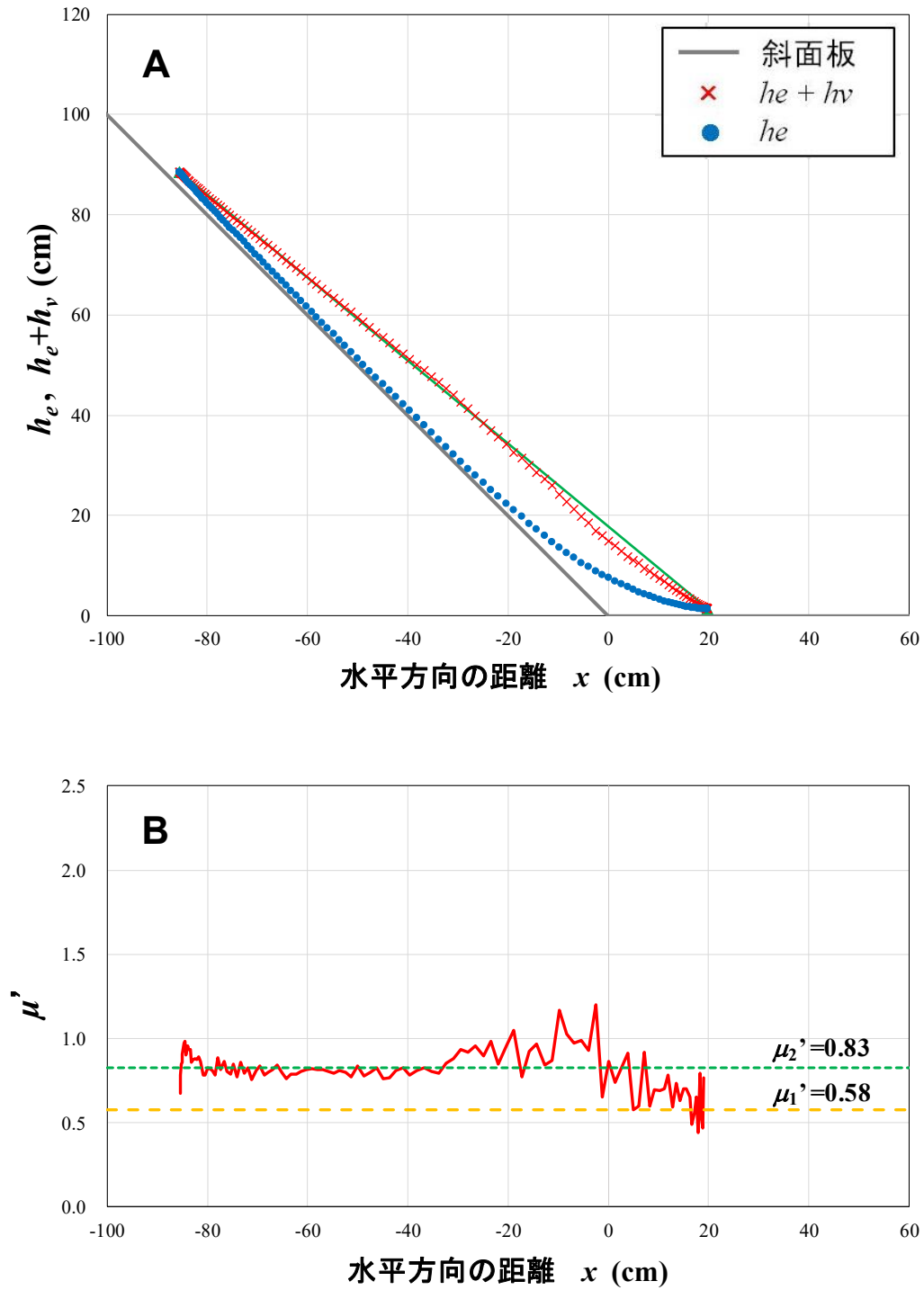


図 6-8 粒状体重心の軌跡とエネルギーおよび μ' の推移 ($\beta = 45^\circ$)

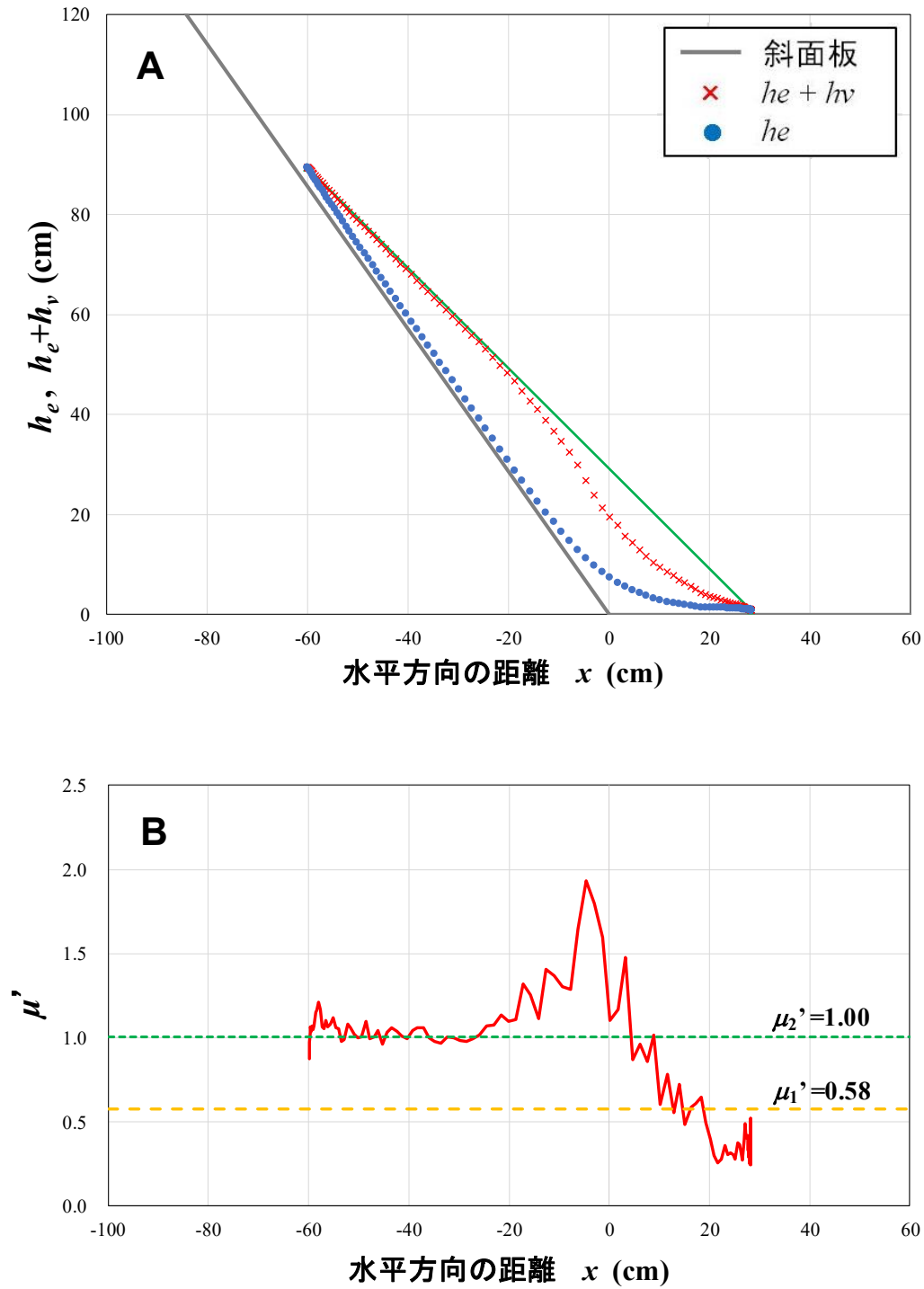


図 6-9 粒状体重心の軌跡とエネルギーおよび μ' の推移 ($\beta = 55^\circ$)

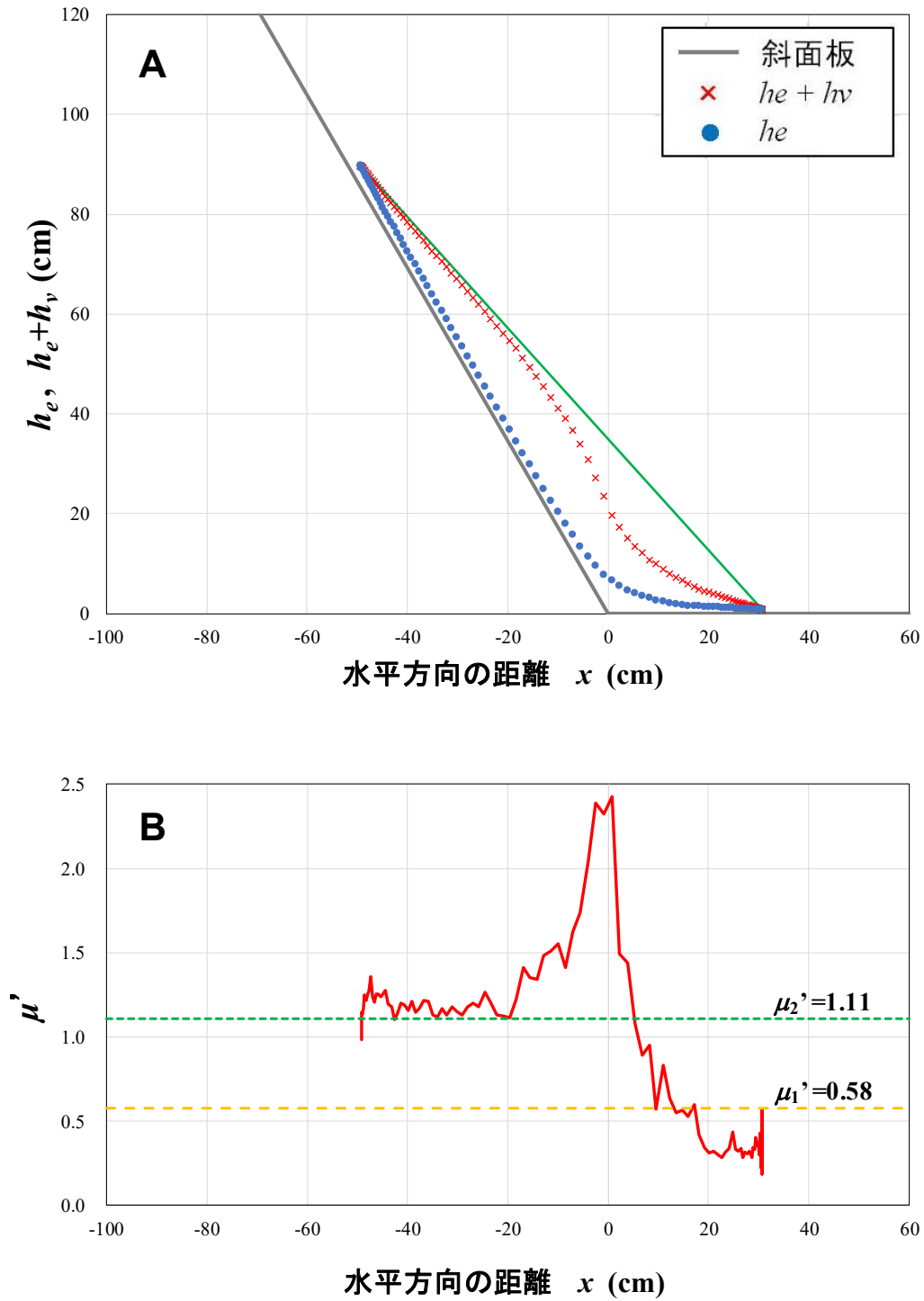


図 6-10 粒状体重心の軌跡とエネルギーおよび μ' の推移 ($\beta=60^\circ$)

6.6 考 察

本章では、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデル（モデル4）を用いて、DEM結果および室内模型実験結果の斜面傾斜角度と到達距離との関係の再現を試みた。DEM結果の粒状体の重心位置の運動経路を遷緩点付近に円弧を有する斜面を用いて簡易的に表現した。そして、この経路上を滑動する質点の計算を行った。

DEMの粒状体堆積後の重心位置 G_x および室内模型実験時の砂試料堆積後の重心位置 D_G とモデル4による質点の到達距離 D_s を比較した。その結果、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路としたモデル（モデル4）を用いて、粒状体の重心位置の運動を質点の運動として簡易的に表現することが可能であった。

第4章では、質点の滑動経路を斜面－水平面とした、モデル1やモデル2（衝突モデル）を示した。両モデルでは、斜面法尻部（遷緩点）における崩壊土砂の運動経路の変化を考慮していない。両モデルの到達距離の計算値は、前出の図4-24および図4-25に示したように、 β の増大とともに増加するが、ある β で最大となった後に減少傾向を示すものであり、模型実験やDEMの結果とは傾向が異なる。したがって、両モデルでは、例え模型実験やDEMの結果から設定した見かけの摩擦角 ϕ' を用いても、粒状体重心位置の軌跡を滑動経路としたモデル4のような結果は得られない。モデル1、モデル2と本章で示したモデル4との大きな違いは、斜面法尻部の勾配変化点における運動経路の変化の考慮の有無である。また、先にも述べているように、粒状体を1つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。したがって、粒状体の運動を1つの質点の運動によって表現するときには、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とすべきと考える。原地形に沿った滑動では粒状体の重心位置の運動経路を表現していると言えない。これらのことから、質点モデルを用いて崩壊土砂の到達距離を予測する場合には、斜面－水平面などの原地形をそのまま用いるのではなく、斜面法尻部などの勾配変化点における崩壊土砂の重心位置の運動経路の変化を踏まえて質点の滑動経路をモデル化しなければならないと考えられる。

また、第4章の図4-26に示したように、モデル3（乗り越えモデル）では、到達距離が β の増大とともに、増加傾向を示すという実験結果を表現できている。このモデル3では先行した崩壊土砂が形成した堆積域の上面を後続の崩壊部上部の土砂が滑動すると仮定しており、このことで斜面法尻部（遷緩点）における質点の滑動経路を変化させていることになる。本章での結果を踏まえると、このように滑動経路を変化させたことが他のモデル1、モデル2に比べて実験結果をよく説明できた要因と考える。ただし、モデル3は、斜面法尻部での土砂の乗り越えという運動に特化して、その影響を強調したものである。したがって、本章で示したように、粒状体の重心位置の軌跡を質点の滑動経路とするほうが、より実現象に近い結果が得られるものと考えられる。

DEMの計算結果を用いて、粒状体のエネルギー損失の変化を摩擦係数の変化として検討を行った。その結果、質点の運動で粒状体の運動エネルギーの変化を表現するならば、斜面部では粒状体解析時に用いた表面摩擦係数の数値よりも大きくする必要があること、そして、勾配急変点付近では斜面部の摩擦係数に比べて大きな摩擦係数を用いることが必要であることがわかった。このことは、例えば、待受け擁壁などの防護対策工に作用する崩壊土砂の運動エネルギーを質点の滑動で求めようとする場合には、解析に用いる摩擦係数の設定が大切であることを示している。

6.7 まとめ

本章では、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とする計算モデルを用いて、DEM 結果および室内模型実験結果の斜面傾斜角度と到達距離との関係の再現を試みた。そして、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について考察を行った。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- ①DEMの粒状体堆積後の重心位置および室内模型実験時の砂試料堆積後の重心位置と粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデル（モデル4）の計算値を比較した。その結果、このモデル化によって、粒状体の重心位置の運動を質点の運動として簡易的に表現することが可能であった。
- ②ただし、モデル4による質点の到達距離 D_s は、いずれの斜面傾斜角度においても室内模型実験結果の重心位置よりも小さな値を示した。この要因としては、室内模型実験における重心位置の画像解析時の誤差が挙げられる。
- ③モデル1、モデル2（衝突モデル）では表現できなかった、到達距離が斜面傾斜角度の増大とともに増加傾向を示すという模型実験やDEMの結果を、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデル（モデル4）では表現可能であった。その要因は、斜面法尻部の勾配変化点における運動経路の変化の考慮の有無にあると考える。
- ④粒状体を1つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。したがって、粒状体の運動を1つの質点の運動によって表現するときには、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするべきである。原地形に沿った滑動では粒状体の重心位置の運動経路を表現していると言えない。
- ⑤モデル3（乗り越えモデル）が実験結果をよく説明した要因は、先行堆積域の上面を質点が滑動すると仮定したことで斜面法尻部

(遷緩点)における質点の滑動経路を変化させたことと考えられる。ただし、モデル3は、斜面法尻部での土砂の乗り越えという運動に特化したものであり、粒状体の重心位置の軌跡を質点の滑動経路とするほうが、より実現象に近い結果が得られるものと考えられる。

以上のことをまとめると、斜面崩壊による土砂の運動を質点モデルで解析するときには、斜面の原形状を質点の滑動経路とするのではなく、粒状体の重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要があるということである。本研究は、質点モデルによる到達域予測手法を示すものではないが、本章で示したような、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデルは、崩壊土砂の重心位置の運動を質点の運動として表現する1つの簡易手法として有効であると考えている。

既往の研究における質点モデルでは、崩壊土砂全体を1つの質点と見なしたときの運動に対する抵抗力となる固体摩擦と流体摩擦などに関する議論が多い。斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動とその結果として生じる運動経路の変化、および、それらの質点の滑動経路への導入について言及されたものは見当たらない。実際、各研究におけるシミュレーションでは、質点の運動経路に原地形が用いられている。このことは、崩壊土砂を質点と見なすとき、その質点の運動経路が原地形であると仮定していることを意味している。一般に自然現象を表現するモデルを構築する場合、何らかの仮定が行われる。このため、構築されたモデルを使用する者は、そのモデルにおける仮定がもたらす影響を認識した上で、計算結果を吟味する必要がある。本章での知見から、質点の運動経路を原地形と仮定した場合の影響を挙げると、斜面傾斜角度の増大とともに到達距離が増加する傾向を示すという模型実験やDEMの結果を表現できないということである。このことは、例えば運動に対する抵抗力として固体摩擦と流体摩擦などを導入して精緻なモデルを構築しても、質点の運動経路を原地形とする限り、崩壊土砂の到達距離の予測が精度良く行えない可能性があることを示唆して

いる。なお、本研究では、実斜面でのデータでの検討を行っていないが、模型実験やDEMで得られた斜面傾斜角度と到達距離との定性的な関係は、実現象でも概ね支持されるものと考えている。

本章でのモデル4の質点の滑動経路は、DEM結果の粒状体の重心位置の軌跡を遷緩点付近に円弧を有する斜面を用いて簡易的に表現した経路とした。そして、この滑動経路を辿る質点の計算を行っている。また、見かけの摩擦角 ϕ' はDEMまたは模型実験の結果から設定している。しかし、実務において崩壊土砂の到達距離の予測を行うためには、現場の地形や地表状況などに応じて、粒状体の重心位置の運動経路（質点の滑動経路）や摩擦係数などのパラメータを設定しなければならない。また、2次元質点モデルで得られる到達距離は、斜面流下方向の粒状体の重心位置である。実務的な手法とするためには、堆積土砂の重心位置と堆積部先端位置、堆積幅との関係も今後検討していく必要がある。本研究では、2次元でのDEMおよび質点モデルを用いた検討を行った。3次元の質点モデルであっても粒状体の重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要があることには変わりないものと予想している。ただし、実務においては、3次元解析によって崩壊土砂の到達距離の予測を行うことは、煩雑で解析費も高くなるため、使用する機会が少ないのが実情であろう。

また、本章では、遷緩点付近における粒状体の重心位置の軌跡を円弧を用いて表現したが、例えば対数らせんなど、他の方法による表現や近似も可能と考えられる。しかし、現時点では、粒状体の重心位置の軌跡を如何に表現あるいは近似すべきかについて結論に至っていない。これらについては、力学的な根拠が必要と考えており、今後の課題である。このように、本研究は、遷緩点付近における粒状体の重心位置の軌跡を円弧を用いて表現することを提案しているものではないことを記しておきたい。

【参考文献】

- 1) 田村 学, 岩本大祐, 土田章仁, 西村 強, 河野勝宣: 個別要素解析による斜面崩壊土砂の運動と到達距離に関する研究, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.47-52, 2021.

第7章 結論

本研究は、斜面崩壊を対象として、質点モデルによる崩壊土砂の到達距離予測手法の開発に向け、斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動状態の変化が崩壊土砂の堆積域、堆積形状に与える影響を検討し、質点の滑動で崩壊土砂の到達距離の予測解析を進める上での運動経路について研究したものである。乾燥砂を用いた室内模型実験と個別要素解析（DEM）により、斜面を流下する粒状体の堆積域、堆積形状および遷緩点における重心経路の情報、運動エネルギーの変化に関して検討を行った。斜面傾斜角度などの因子が堆積形状に与える影響を示すとともに、質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測では、斜面の原形状を質点の滑動経路とするのではなく、遷緩点付近における粒状体重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要があることを示している。

7.1 各章における結論

第2章の結論

第2章においては、近年の土砂災害の現状と災害への取り組み、そして、がけ崩れによる土砂災害時の崩壊土砂の到達域の特徴について概説した。

我が国では、土砂災害から人命、財産を守る取り組みが精力的に進められてきているものの、土砂災害による人的被害者数や家屋被害戸数が大幅に減少しているとは言えない状況を示した。そして、財政および人的資源の制約や情報公開における客観性が求められる中で、今後、さらに効果的、効率的に防災対策を推進していくためには、ソフト対策の充実が重要であり、斜面崩壊時の危険区域（崩壊土砂の到達範囲）の設定では、力学的な根拠に基づいた崩壊土砂の到達距離予測手法が期待されていることを述べた。

第3章の結論

3章においては、崩壊土砂の到達域予測に関して、これまでに得られている知見を整理し、既存資料に基づく予測手法、力学的な運動モデルの計算結果に基づく予測手法に関する既往の研究成果を示した。

崩壊事例データの統計解析による手法は、参照した事例データおよびその精度に解析結果が影響されるため、適用範囲について注意が必要であること、および、この手法では崩壊土砂の流下経路上のエネルギー推定が難しいなどの問題がある。力学的な運動モデルによる手法では、崩壊土砂の運動をモデル化する際、土塊全体を要素の集合体として取り扱うか、あるいは、1つの質点か剛体としてとらえることが多い。前者では、個別要素法が代表的であるが、実務設計においては、多数の現場に対応しなければならないこと、そして、実務者が解析を実施する際の能力・判断等の差異による解析結果のばらつきが課題となることから、解析時のパラメータの設定が難しく、計算自体も煩雑な数値解析手法は、未だに使い難いのが現状である。これらのことから、実務的には、質点モデルのように現象を単純化したモデル化であったとしても理論構成やパラメータ設定が容易な予測手法の開発が望ましいことを示した。しかし、崩壊土砂の到達域は、斜面法尻部の初期地形だけでなく、法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程にも影響を受けていると推察される。このことから、斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動とその結果として生じる運動経路の変化が崩壊土砂の到達域や堆積形状に与える影響の評価が重要であることを述べた。

第4章の結論

崩壊土砂の到達域（到達距離や堆積形状）に与える因子には、崩壊土砂の体積や斜面の傾斜角度などが考えられる。実際の崩壊事例での到達域に関するデータは、複数の因子が同時に影響した結果であり、各因子の個別の影響の解釈が難しい。このため、第4章においては、乾燥した砂試料を用いた室内模型実験により、崩壊土砂の体積、斜面崩壊部と下

部水平面との高低差，そして，斜面の傾斜角度が崩壊土砂の到達域に与える影響について実験的に検討した．

室内模型実験では，流路を設けていない斜面板上で砂試料を流下させた場合の実験（平板斜面実験）と斜面および水平板部に設けた流路内で砂試料を流下させる実験（定幅流路実験）を行った．さらに，質点による到達域の予測モデルを考えるにあたっては，土砂の堆積形状とその重心位置についても考える必要があるため，室内模型実験時の堆積砂へのFringe画像投影とその画像解析によって，流下方向の堆積形状と重心位置を求めた．

実験結果から，水平面に堆積した砂試料の堆積形状，流下方向の到達距離および重心位置は，流下させた砂試料の量，下部平面から試料箱の下端までの高さだけでなく，斜面傾斜角度の変化にも大きな影響を受けることを確認した．本実験での斜面傾斜角度は，がけ崩れによる土砂災害発生箇所のような急斜面も想定した設定であり，このように斜面傾斜角度が大きい場合には，斜面法尻部（遷緩点）付近での原地形の不連続性のために，摩擦抵抗だけでなく，壁面や要素同士が互いに衝突し合うことによるエネルギー損失が生じており，これが砂試料の運動に大きな影響を与えていると考えられる．また，到達距離の推定には，崩壊土砂量と同体積の立方体の一辺長が有用な指標になることが示唆された．

続いて，崩壊土砂の到達域は，斜面法尻部の初期地形だけでなく，法尻部に堆積した土砂の形状や堆積の過程にも影響を受けていると考えられることから，遷緩点付近における崩壊土砂の運動状態の変化が到達域に及ぼす影響について，滑動による質点モデルを用いて検討を行った．斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動の変化について，勾配急変部における土砂同士の衝突運動および土砂の乗り越え運動の2つの単純な運動モードでの表現を試みた．そして，両モデルによる計算値を定幅流路実験の結果と比較するとともに，土砂の衝突あるいは乗り越え運動の到達域への影響を検討した．その結果，乗り越えモデルでは，実験時の斜面傾斜角度（ $40\sim 60^\circ$ ）の範囲において，最大到達距離が斜面傾斜角度の増大とともに大きくなる傾向が表現できることを確認した．一方の衝突モデルでは，このような実験結果の傾向を説

明できなかった。両モデルでの運動経路に関する考察から、到達域の推定では、崩壊土砂の運動とその結果として生じる地形変化（運動経路の変化）に留意が必要であることを示した。しかし、乗り越えモデルでも、堆積砂の重心位置と斜面傾斜角度の関係の傾向など、実験結果の説明が成立しないところがあった。衝突モデルおよび乗り越えモデルは、それぞれ、斜面法尻部での土砂同士の衝突や乗り越えという運動に特化して、その影響を強調したものである。実現象では、斜面法尻部（遷緩点）付近において、壁面や粒状体中の要素同士の摩擦と衝突の影響によって、粒状体の運動エネルギーや重心位置の運動経路の変化が生じているものと考えられる。さらに、粒状体を1つの質点と見なす場合、質点位置は粒状体の重心位置を代表している。このことから、斜面を流下する土砂の運動を考える上では、粒状体の運動エネルギーの変化や粒状体の重心位置の運動経路に関する情報が必要であることを述べた。

第5章の結論

斜面を流下する土砂の運動を考える上では、粒状体の運動エネルギーの変化や粒状体の重心位置の運動経路に関する情報が必要である。しかし、室内模型実験ではこれらの情報の取得は困難である。このため、第5章においては、個別要素法（DEM）による2次元の流下シミュレーションを行い、斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路とエネルギーの変化について検討した。DEMにおける粒状体の要素形状は、接触判定の手順の容易さ、転がり抵抗の表現、形状を決定する諸元の数の3つの観点から比較を行い、楕円形要素を採用した。DEMによる2次元の流下シミュレーションは、室内模型実験と同寸法で行った。はじめに、要素数、要素の初期配置領域の面積、要素間（および要素－壁間）の摩擦係数が粒状体の運動エネルギーや到達距離、堆積形状に与える影響を検討した。その結果、摩擦係数がDEM結果の粒状体の到達距離や重心位置、堆積形状に及ぼす影響が最も大きいことを確認した。続いて、斜面傾斜角度45、55、60°の3つのDEMによるシミュレーション結果に対して、斜面を流下する粒状体の重心位置の運動経路とエネルギー損失に

について検討した。その結果、粒状体の重心位置の運動経路は、斜面部では斜面勾配とほぼ同程度の下向き勾配であるが、交点付近では徐々にその方向を換えて水平部に達していること、この方向の変化とともに並進運動エネルギーが小さくなることから、要素群の運動エネルギーの減少つまり水平面に入射して減速する要素が生じていることが考えられた。また、斜面傾斜角が 45° の場合に比べて 55° , 60° ではエネルギーの大幅な減少が見られた。このように、斜面法尻部（遷緩点）では、壁面や要素同士の摩擦と衝突によって、運動エネルギー減少とともに、粒状体の重心位置の運動経路にも変化が生じており、斜面傾斜角が大きい場合には、その影響が大きいことがわかった。さらに、粒状体の重心位置の経路は、斜面法尻部（遷緩点）付近で凹状の形状を示しており、斜面の形状に沿った経路とはならないことを確認した。この事実を立てば、質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測解析では、重心位置の運動経路を表現できる新たな計算方法が必要と考えた。

第6章の結論

第6章においては、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデルを用いて、DEM 結果および室内模型実験結果の斜面傾斜角度と到達距離との関係の再現を試行した。粒状体の重心位置の運動経路を辿る質点の計算を行うための簡易計算法を示した。DEM 結果の粒状体の重心位置の運動経路を遷緩点付近に円弧を有する斜面を用いて簡易的に表現した。そして、これを滑動経路とした質点モデルの計算結果と DEM による粒状体堆積後の重心位置および模型実験の堆積砂の重心位置を比較した。計算時の見かけの摩擦角 ϕ' は DEM または室内模型実験の粒状体の初期位置と停止位置における、それぞれの重心位置を結んだ直線と水平線とがなす角とした。その結果、粒状体の重心位置の運動経路を質点の滑動経路とするモデル化によって、粒状体の重心位置の運動を質点の運動として簡易的に表現することが可能であった。

以上の結果から、斜面崩壊による土砂の運動を質点モデルで解析するときには、斜面の原形状を質点の滑動経路とするのではなく、粒状体の

重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要があることを示した。

7.2 まとめ

本研究においては、斜面崩壊を対象として、質点モデルによる崩壊土砂の到達距離予測手法の開発に向け、斜面法尻部（遷緩点）などの勾配変化点における崩壊土砂の運動とその結果として生じる運動経路の変化に着目して検討を行った。乾燥砂を用いた室内模型実験と個別要素解析（DEM）により、斜面を流下した粒状体の堆積域、堆積形状および遷緩点における重心経路の情報、運動エネルギーの変化について研究を行った。そして、この結果を受けて、遷緩点付近における崩壊土砂の運動状態の変化が到達域に及ぼす影響について、滑動による質点モデルを用いて検討を行った。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 乾燥した砂の堆積形状、流下方向の到達距離および重心位置は、流下させる砂試料の量、砂試料の設置高さだけでなく、斜面傾斜角度の変化にも大きな影響を受ける。
- ② 斜面法尻部（遷緩点）では、壁面や要素同士の摩擦と衝突によって、運動エネルギー減少とともに、粒状体の重心位置の運動経路にも変化が生じる。
- ③ 斜面傾斜角度が大きい場合、遷緩点付近での運動エネルギーの減少とそれに伴う粒状体の重心位置の運動経路の変化が大きくなる。
- ④ 粒状体の重心位置の運動経路は、遷緩点付近で凹状の形状を示しており、斜面の原形状に沿った経路とはならない。
- ⑤ 質点の滑動で到達距離の推定を行う場合、遷緩点付近での崩壊土砂の運動経路の変化に注目して到達域推定を行うことが有効である。
- ⑥ 質点の滑動による崩壊土砂の到達距離の予測では、斜面の原形状を質点の滑動経路とするのではなく、遷緩点付近における粒状体重心位置の運動経路を想定しながら解析を進める必要がある。

質点モデルにこのような工夫を取り入れることで、遷緩点付近における粒状体の運動変化を表現することが可能となる。これは既往研究の質点モデルにも導入可能である。本研究は質点モデルによる到達域予測手法を示すものではないが、研究で得られた崩壊土砂の運動と堆積に関する結果は、今後の崩壊土砂の到達域の予測手法の開発に向けて役立つものと考えられる。

7.3 今後の課題

本研究では、斜面傾斜角度などの因子が崩壊土砂の堆積形状に与える影響を示すとともに、質点による到達距離の予測では、斜面の原地形ではなく、粒状体の重心位置の経路を想定しながら解析を進めることが有効であることを示した。しかし、実務において崩壊土砂の到達距離の予測を行うためには、現場の地形や地表状況などに応じて、質点の滑動経路や摩擦係数などのパラメータを設定しなければならない。また、今回の室内模型実験およびDEMシミュレーションは限られた条件下、かつ、小規模なものである。例えば、室内模型実験に用いた乾燥砂は土粒子と空気の2相体であり、土粒子の粒径が小さく、粒径範囲も狭い。DEMシミュレーションでは、単一径の粒子を用いている。また、地形上の斜面勾配の急変点を一様斜面－水平面で単純化したモデルで表現した結果である。実際の崩壊土砂は、三相体（土粒子・水・空気）であり、粒径も大きく、粒径の範囲も大きい。したがって、今回の結果から実現象を議論することは難しいと考えている。今後、実斜面での崩壊データなどを用いた検証が必要である。今後の課題としたい。

なお、実斜面での崩壊データから同定されるパラメータは、同定に用いた予測モデルに依存することが予想される。このため同定したパラメータの意味やその取り扱いには注意が必要であると考えている。また、2次元質点モデルで得られる到達距離は、斜面流下方向の粒状体の重心位置である。実務的な手法とするためには、堆積土砂の重心位置と堆積部先端位置、堆積幅との関係も今後検討しておく必要がある。そのために

は、多くの崩壊データを取得・収集して、様々な条件下でのパラメータを整理、検討していくこととなる。この際、本研究での模型実験や DEM シミュレーションで得られた崩壊土砂の堆積に関する知見、例えば、到達距離の推定では崩壊土砂量と同体積の立方体の一辺長が有用な指標になることなどが、崩壊データを整理、理解する上で役立つものと考えている。ただし、がけ崩れなどの土砂災害現場では、堆積土砂の撤去が急がれるため、データの取得が困難となることが予想される。近年では、地上あるいは空中からのレーザースキャナーやステレオ写真撮影などによる非接触型の測量技術が急速に普及していることや本研究で用いたような画像解析（Fringe など）の技術開発も進んでおり、その活用に期待したい。

付 録

付録 A Fringe 投影による堆積砂の形状把握

1. 実験の概要

本解析は、物体にFringe画像を投影し、画像解析を行うことで表面形状を計測するものである¹⁾²⁾。図A-1に実験装置の概要図を示す。実験は、照明を消灯し、室外光を遮断した暗室状態で実施した。プロジェクターのFringe画像照射角度は45°（図A-1参照）、カメラのレンズ位置は後述する格子点座標(XG,YG)=(30cm,30cm)で定義した点の鉛直上方とした。

実験は、第4章の定幅流路実験で堆積した砂試料に対して実施した。堆積砂の中心を流下方向に走る1計測線（図A-2）について、物体の有無（砂の堆積前後）の高さの変化を取得する。これを用いて、堆積砂の表面形状と重心位置を算出する。実験装置および解析に使用する記号は以下のとおりである。

β : 平面板と斜面板のなす角

α : プロジェクターから照射された光線の入射角

γ : 計測点とカメラのレンズ位置によって生じる反射角

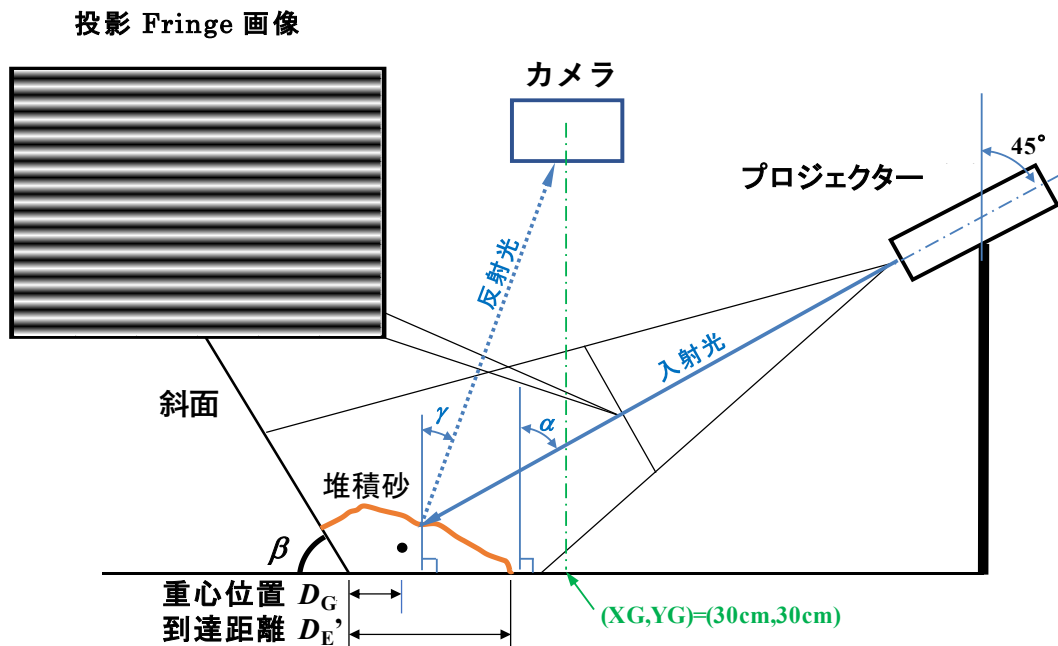
P_p : 物体が無い条件で得られるFringeの波長

P_a : 物体に照射された入射光に対する反射光を鉛直上方で撮影し得られるFringeの波長

P_a' : 反射光が反射角を有するときに撮影される見かけのFringe波長

Δh : 物体と水平面板の高低差

表面形状の計測にはレーザー測量や写真測量といった手法が挙げられるが、本手法の特長は、簡易的な設備で解析を行うことができ、一つの観測点からの写真のみで計測できることである。なお、本研究における画像処理には鳥取大学総合メディアセンターが提供する MATLAB 2018a を利用している。また、本研究で、デジタルカメラはFUJIFILM FinePix XP30、プロジェクターはEPSON EB-SO4を使用した。



図A-1 実験装置の概要と投影Fringe画像

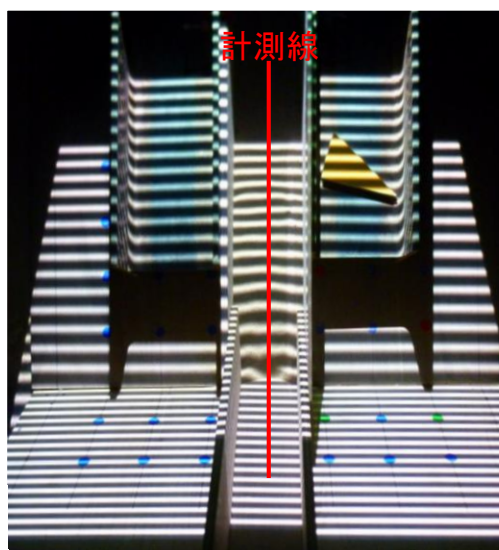
2. 三角波を利用した Fringe 原画像の作成

本解析で用いる波長計測の原理について以下に述べる。

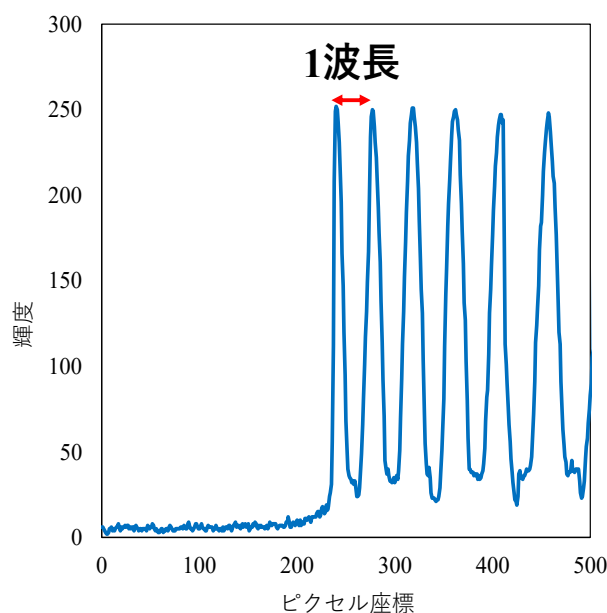
白黒256階調に処理したFringe画像を座標点が既知の水平面板—斜面板と対象物（堆積した試料）に照射する。Fringeパターンとなる白黒模様は黒を0、白を255とした輝度で与えている。

図A-2のように投影された画像を計測線に沿って処理すると、図A-3に示すような波形が計測される。この図に示した波形の頂点から頂点を1波長と定義する。対象物の有無で比較される2枚の画像間で、変化する波長（物体があれば短く計測される）を取得することで、物体の有無（砂の堆積前後）の高さの変化を取得することが可能となる。

図A-1で示したように、対象物にFringe画像を照射し、物体の有無で変化する波長差を読み取ることで、計測点の高低差情報を取得する。本研究では、対象物上に投影されている波形の頂点となる位置が計測点とな



図A-2 撮影画像とおよび計測線



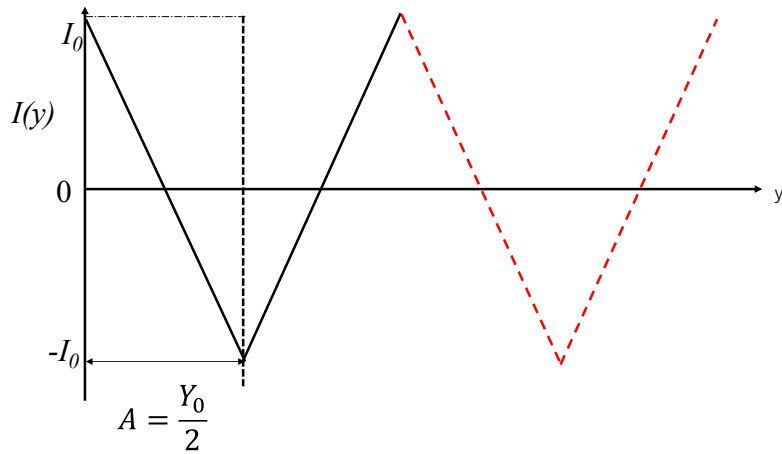
図A-3 計測された波形

る．以下に，Fringe原画像の作成について述べる．Fringe原画像は，白黒0~255の輝度を持つ三角波のパターンを繰り返すことで構成している．三角波は次の式(A-1)で表現される（Fringe画像作成時は，輝度値として $I(y) + I_0$ を使用）．図A-4に $a=0$ としたときの三角波の模式図を示す．($I_0 = 127.5$, $A = 4I_0 / Y_0$ とする)

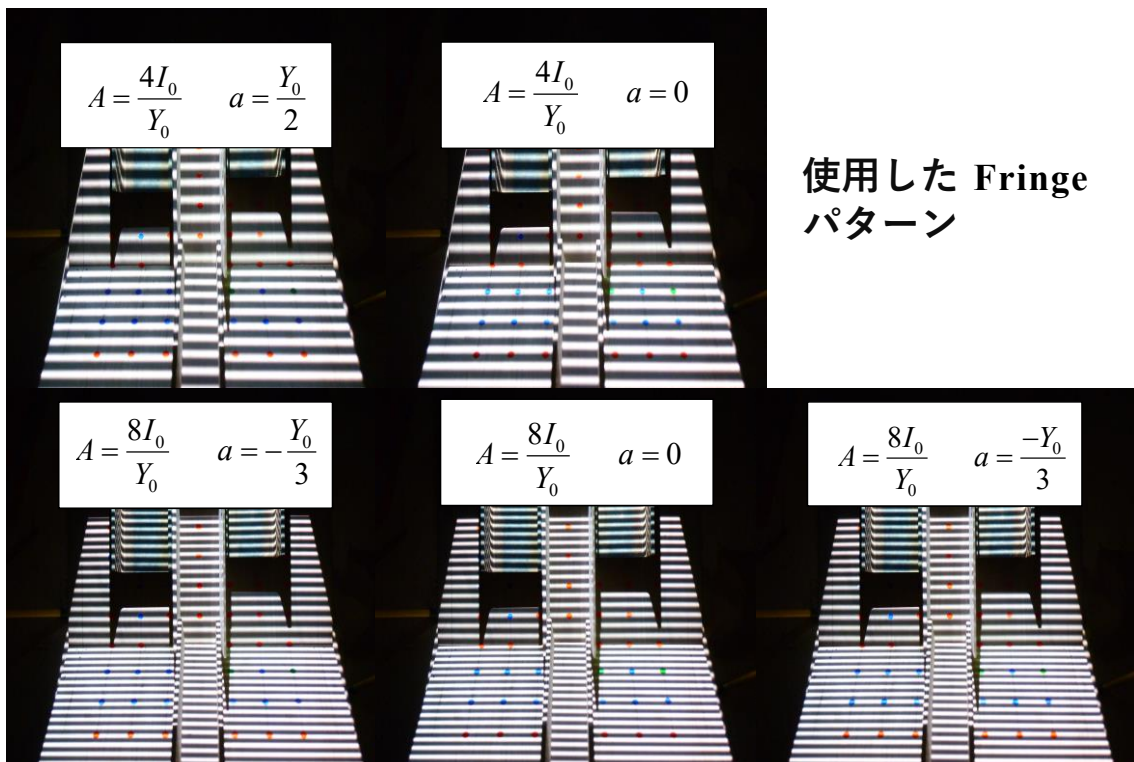
$$I_{(y)} = \begin{cases} -A(y+a) + I_0 & (a \leq y < \frac{Y_0}{2} + a) \\ A(y+a) - 3I_0 & (\frac{Y_0}{2} + a \leq y < Y_0 + a) \end{cases} \quad (\text{A-1})$$

式(A-1)で表現される波形の作成は，白黒256階調で表現される三角波1周期分の波形を基本単位とし， $y > Y_0 + a$ の領域については，図A-4中の赤破線のように複製することでFringe原画像を作成している．また，現段階では1波長の取得において，1枚のFringe原画像から得られる物

体の高低差情報は、波形の頂点数に依存している．そこで、本研究では、計5種類のFringeパターンを物体に照射し取得点数を増やしている．図A-5に実験装置に照射した5種類のFringeパターンを示す．



図A-4 三角波によるFringe原画像の作成



図A-5 堆積砂の形状計測に用いたFringeパターン

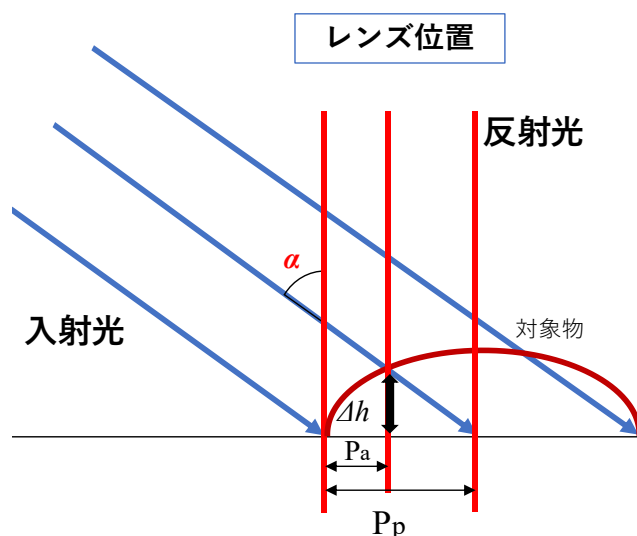
3. 高低差情報取得の原理

ここでは、高低差情報取得の原理を示す。図A-6では、対象物に投影した（平坦部で観測される）波長 P_p のFringeパターンに入射光に対する反射光を鉛直上方で観測した際の（見かけの）波長 P_a であることを表示している。この図より、

$$\Delta h = \frac{P_p - P_a}{\tan \alpha} \quad (\text{A-2})$$

として高低差の読み取りが可能となる。

ただし、この図は入射光と反射光がともに平行光線であり、写真で撮影される座標と実際の水平面－斜面の座標系が一致しているという仮定のもとに成り立っている。しかし、実際にはプロジェクターが照射する光線は拡散光線であり、カメラのレンズに入射する反射光の角度 γ はレンズから遠ざかるにつれて大きくなる。このため、撮影した画像上の座標と実際の水平面－斜面の座標は一致しておらず、波長は一定のパターンとはならない。正確な形状の取得には、反射角 γ と入射角 α の推定が必要であり、計測方法の開発および精度向上に取り組む。



図A-6 高低差情報取得の原理

3.1 画像と被写体位置情報の関連付け

堆積砂の形状計測を実施する前に、画像上の座標と、実際の斜面－平面の座標を一致させる必要がある。ここでは、画像上の座標と実際の座標を一致させるための手順について記述する。

① 実験に用いる板（被写体）への格子点の設置

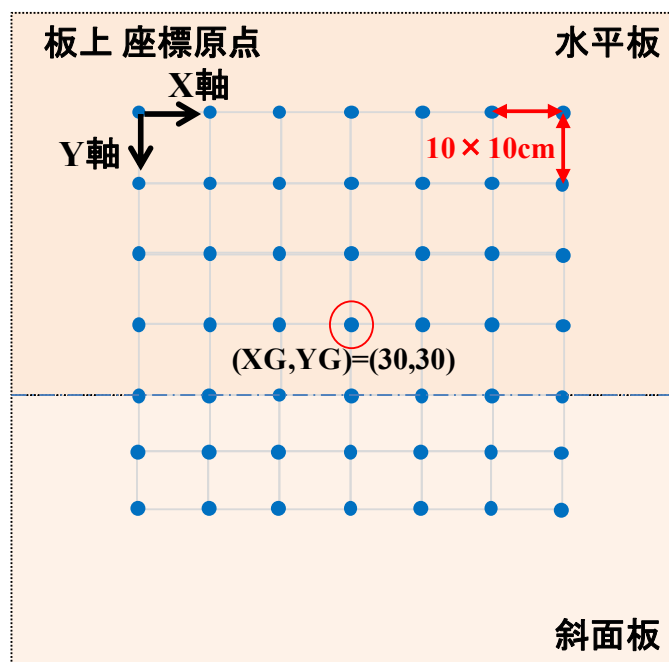
図 A-7 に示すように実験に用いる板（被写体）に正方格子 (10cm×10cm) を描き、格子点上（基準点）にマークを貼りつける。マークの色は、白黒2値化への画像処理後に識別可能な色とする必要がある。この時、実際の板上について座標系(X,Y)を定義し、各格子点の位置を (XG, YG) とする。板上の座標系は、図 A-7 に示すように、7×7 個のマーカの写真の左上に示した点を原点とする。格子点には数値による番号付けを実施し、正方格子を四辺形要素による要素群とするデータ化も実施しておく。

② 格子点の画像取得と 2 値化処理

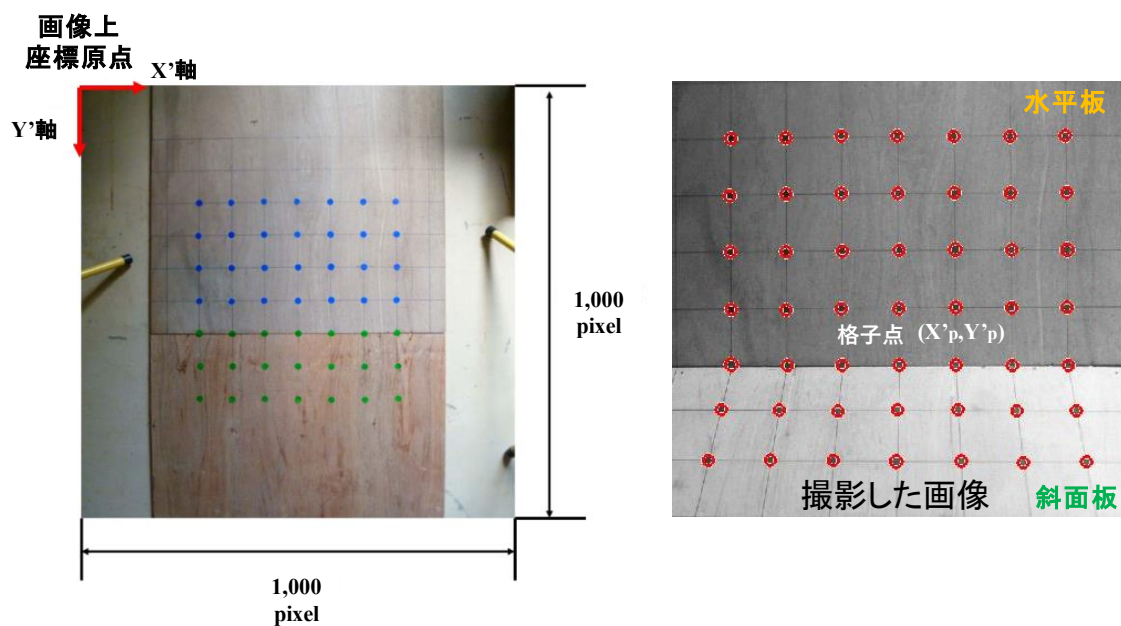
①の設置に対して撮影画像を求める。上述した板上での座標系における (XG, YG)=(30cm, 30cm) の格子点の鉛直上方をカメラのレンズ位置とする (図 A-7)。この時、撮影する写真画像は 1,000×1,000 pixel となるように設定している。図 A-8(1) に示すように、画像の左上の画素を原点として、画像上の座標系(X',Y')を定義する。取得した画像について、白黒2値化処理を行う。2値化処理を実施した画像に対して MATLAB 2018a に装備されている `Imfindcircles` を使用してイメージ内の円形オブジェクト（あらかじめ設置したマーカ）を検出し、格子点のマーカの重心位置を得る。こうして求めた画像上での各格子点の重心位置を (X'p, Y'p) とする (図 A-8(2))。

③ 板上の格子点位置と画像上の格子点位置の関連付け

②で決定した (X'p, Y'p) を (XG, YG) に関連付ける。必要に応じて `Sorting` を実施する。③の段階では、(X'p, Y'p) は位置情報に基づいて番号付けされておらず、順不同である。



図A-7 実験に用いる板（被写体）の座標系と格子点の設置



(1) 画像上の座標系

(2) 画像上の格子点の認識

図A-8 画像上の座標系と格子点の認識

④ 格子内の座標値の取得

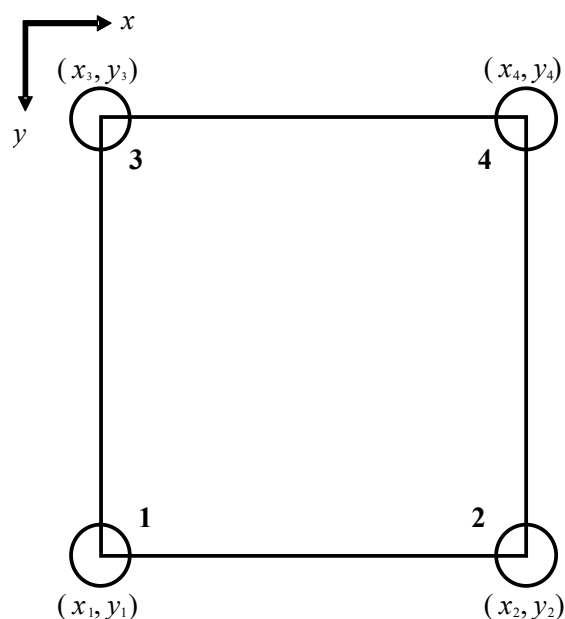
画像上の任意の画素位置 (x'_p, y'_p) に対する実際の板上の位置 (x, y) は、四辺形要素の補間関数を用いて次の手順で求める。図A-9のような4節点四辺形要素の補間関数は次の式(A-3)で表される。

$$x = \sum_{i=1}^4 x_i N_i \quad y = \sum_{i=1}^4 y_i N_i \quad (\text{A-3})$$

ここで、 (x_i, y_i) は実際の板上の格子点の座標の値を用いる。また、 N_i は形状関数である。形状関数 N_i は、次の式(A-4)のように位置の関数として表現できる。

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(x'_p - x_2)(y'_p - y_3)}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_3)} & N_2 &= \frac{(x'_p - x_1)(y'_p - y_4)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_4)} \\ N_3 &= \frac{(x'_p - x_4)(y'_p - y_1)}{(x_3 - x_4)(y_3 - y_1)} & N_4 &= \frac{(x'_p - x_3)(y'_p - y_2)}{(x_4 - x_3)(y_4 - y_2)} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

ここで、式(A-4)の $x_1 \sim x_4$, $y_1 \sim y_4$ は画像上の格子点の座標の値を用いる。形状関数の関係については図A-9のとおりである。



図A-9 4節点四辺形要素に対する形状関数

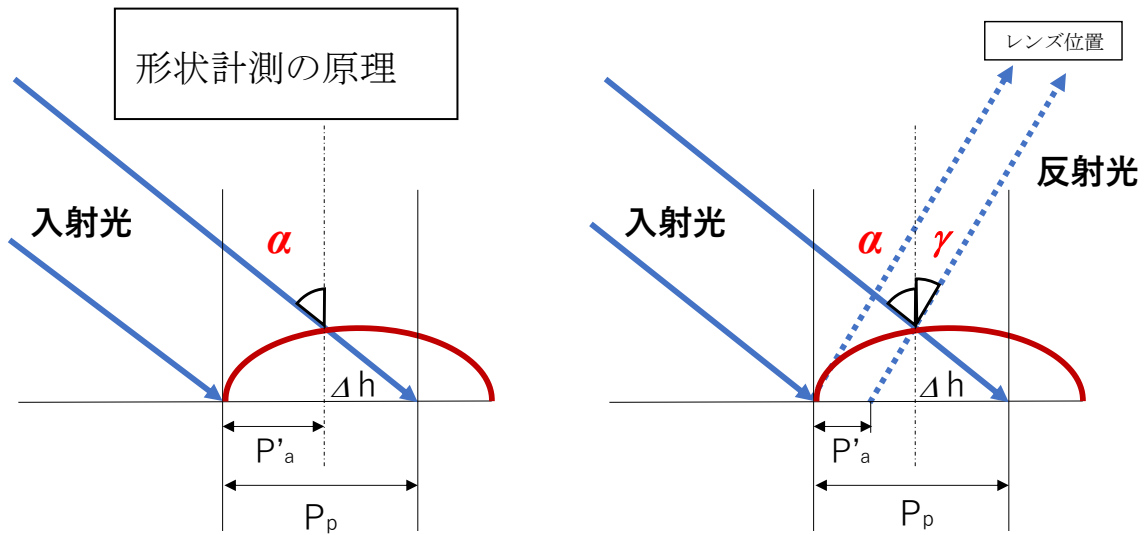
3.2 反射角 γ と入射角 α の推定

物体の高低差情報を取得するためには、前出の「3.1 画像と被写体位置情報の関連付け」で述べた画像上の座標と板上の座標を一致させた上で、計測点とカメラのレンズ位置によって生じる反射角 γ とプロジェクターから照射された光線の入射角 α が必要となる。 γ の値はレンズ位置と計測点との位置関係によって変化する。 α の値は、プロジェクターから照射される光が拡散光線であるため、計測点の位置によって変化する。また、 α の値は、物体の有無によっても変化する。以下に、反射角 γ と入射角 α の推定方法を示す。

実際の計測における入射光と反射光、レンズの関係は図A-10に示すようになる。カメラに入射する見かけの波長 P_a' 、任意点における Δh について、次の式(A-5)および式(A-6)により求めることができる。

$$P_a' + \Delta h \tan \gamma + \Delta h \tan \alpha = P_p \quad (\text{A-5})$$

$$\Delta h = \frac{P_p - P_a'}{\tan \alpha - \tan \gamma} \quad (\text{A-6})$$



図A-10 入射光，反射光およびレンズ位置の関係

図A-10に示すように、 γ はレンズ位置と計測点との位置関係によって変化する。計測位置における γ は、図A-11のように棒を用いて、実際の棒の長さ L_1 と写真上で観測される棒の長さ L_2 から求める。図A-11で用いられている記号は以下のとおりである。

L_1 ：実際の棒の長さ

L_2 ：写真上で観測される棒の長さ

図A-11より反射角 γ は次式から求められる。

$$\tan \gamma = \frac{L_2}{L_1} \quad (\text{A-7})$$

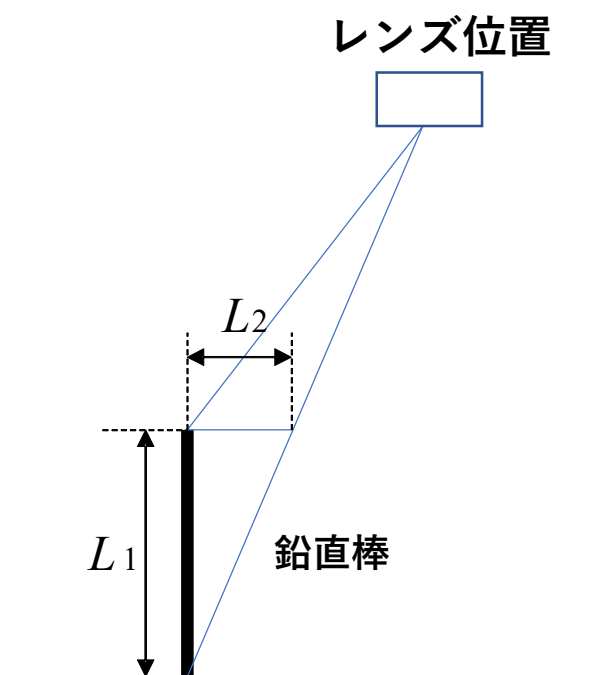
また P_a' について、計測点の位置によって α の値が変化するため、各点について入射角を取得する必要がある。以下にその手法を示す。

プロジェクターから照射される光は図A-12のように、位置によって入

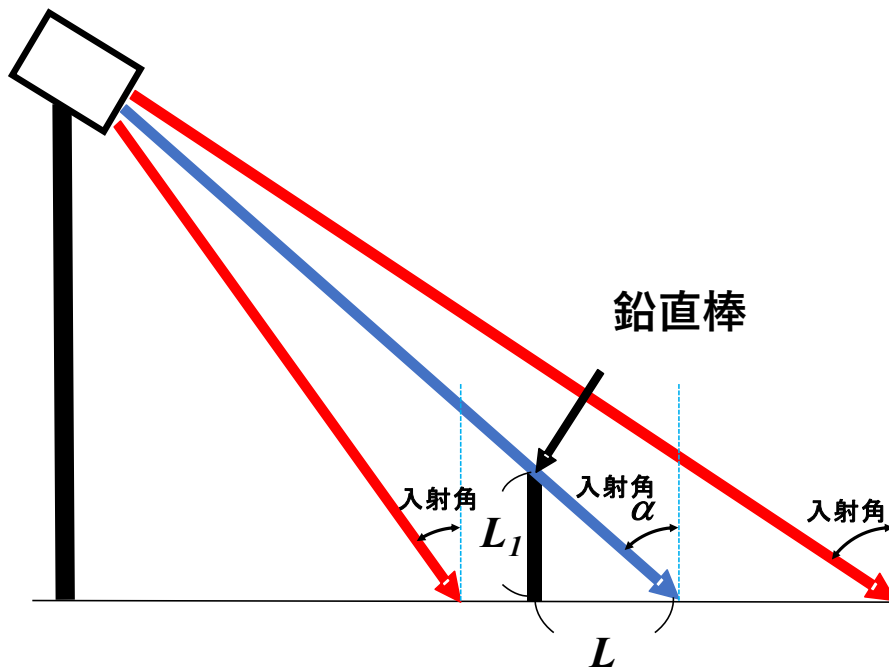
射角が変化する．測定点の位置に長さ L_1 の直棒を鉛直に立てれば，図のようにプロジェクターからの入射光によって水平面に長さ L の影ができる．鉛直棒の長さと影の長さより α は次の式(A-8)から決定できる．

$$\tan \alpha = \frac{L}{L_1} \tag{A-8}$$

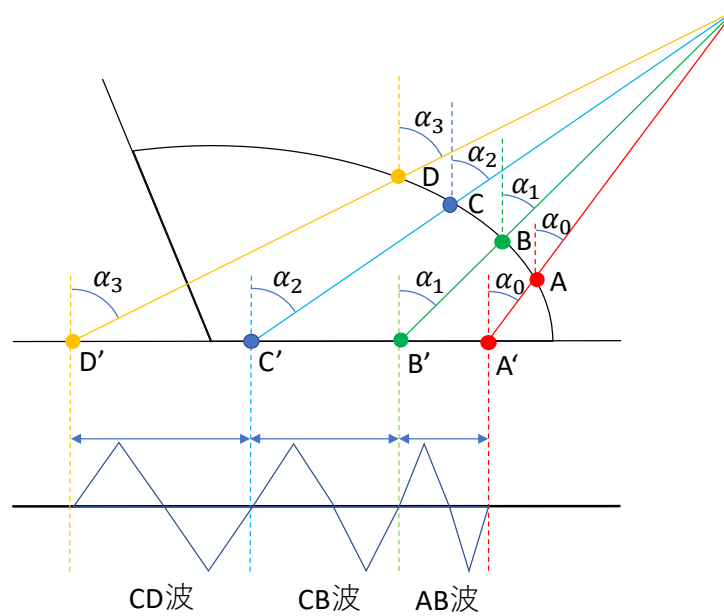
また，計測位置による入射角 α は物体の有無によって変化する．これは，波形の頂点数で定義される波数の関係から，既知の座標上で計測されている入射光と対応させることで，入射角を決定できる．図A-13に例を挙げると，撮影された画像上では，波形の頂点は A,B,C,D点で計測される．物体がない時の波形頂点は，図A-13で示した計測線上のA',B',C',D'で計測されており，入射角は A,B,C,D 点に対応していることを利用し，物体上に投影されているFringeの各点における入射角 α を決定する．



図A-11 反射角 γ の計測



図A-12 計測位置による入射角の違いと推定



図A-13 物体の有無に関する入射角の違いと推定

また、計測点が斜面上に存在する場合の α , γ の決定方法について記述する。

計測点が斜面上に存在する場合、先述の手法で直接的に α , γ を求めることはできない。そこで、図A-14に示すようなA点（斜面遷緩点）、B点（水平面上の入射光の計測点）、C点（斜面上の入射光の計測点）の関係性から α を算出する。まず、平面上について先述の手法で α , γ を算出しておく。三角形ABCについて正弦定理を適用すると次の関係が成り立つ。

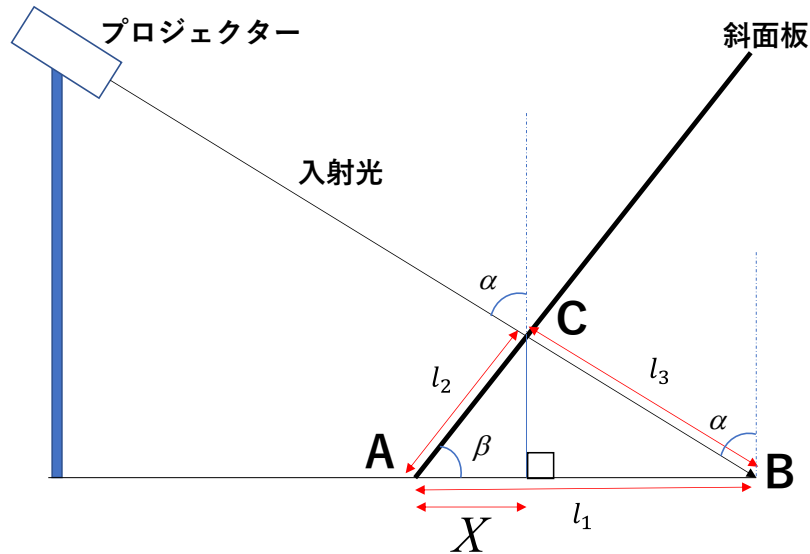
$$\frac{l_1}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta)} = \frac{l_2}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \quad (\text{A-9})$$

これより、斜面法尻部からC点までの水平方向の距離Xは次式で求まる。

$$X = l_2 \cos \beta = \frac{l_1}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \beta} \quad (\text{A-10})$$

求めたX から、斜面上の α を決定する。形状計測については、斜面上に4点の計測点が取れるように平面上で α を計測している。斜面計測線上については、式(A-3), (A-4)の補間関数式を用いて任意点における α を算出する。斜面計測線上の γ についても平面上で γ を算出した上で、同様の手順で求めている。

以上で述べたように、反射角 γ と入射角 α は鉛直棒を用いて求めることができる。しかし被撮影物上の全ての位置で棒を立てて観測を行い α と γ を求めることはできない。このため、板上座標の格子点上の α と γ を求め、式(A-2), (A-3)と同様に格子点内の要素を4節点四辺形要素と考慮して補間関数を用い、要素内の任意の点における α と γ を算出する。以上が反射角 γ と入射角 α の推定手法である。

図A-14 斜面上の α , γ の決定

4. 形状が既知の物体に対する形状計測

形状が既知である斜面板，矩形物体について形状計測を実施し，これまでに述べた本実験におけるFringe画像投影法の計測方法の妥当性と計測精度の確認を行った。

4.1 斜面板の形状計測

実際に試料を流下させる斜面板の形状について，Fringe画像投影法によって計測を行う。図A-15に形状計測を行う斜面板と水平板の説明図を示す。水平板に垂直方向（鉛直方向）をZ軸とする。形状計測は，計測線 $X=30\text{cm}$ におけるYZ断面で行う。

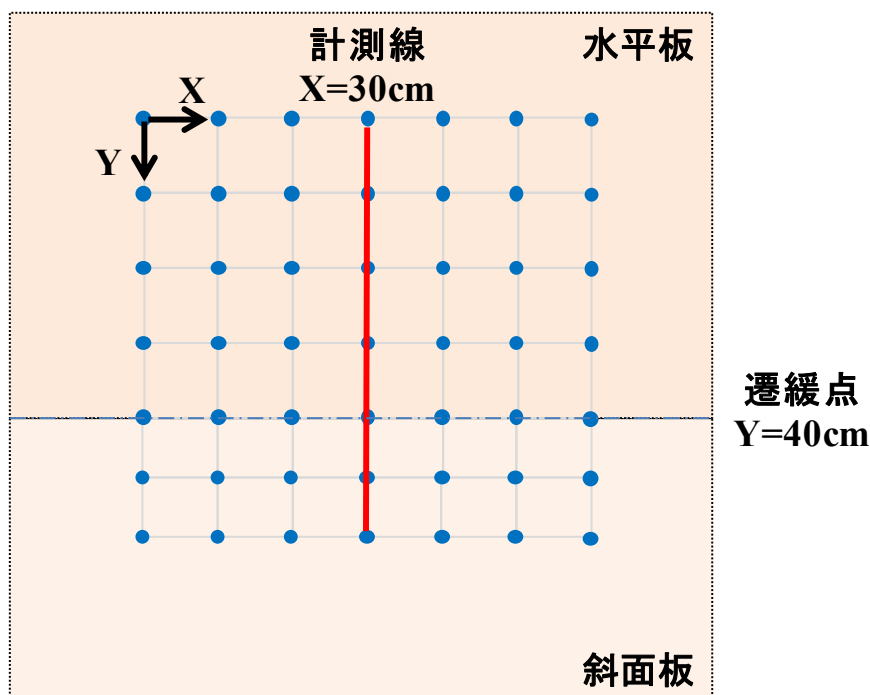
波長の比較を行う2枚の画像（図A-16）は，格子点認識を実施できるようにマーカーを設置した水平面の画像と，計測線上の $Y=40\text{cm}$ を斜面遷緩点， $Y=40\text{cm}\sim 60\text{cm}$ の領域は斜面傾斜角 $\beta=45^\circ$ に設定した斜面板の画像となっている。図A-17に示すように斜面波形における計測線上の $Y=40\text{cm}$ では急激に輝度値が上昇しているが，これは斜面板と水平面板

の接合部に設置した格子点部のマーカーに光が反射していることが原因であると考えられ、Fringeのパターンから除去したうえで波長を計測した。

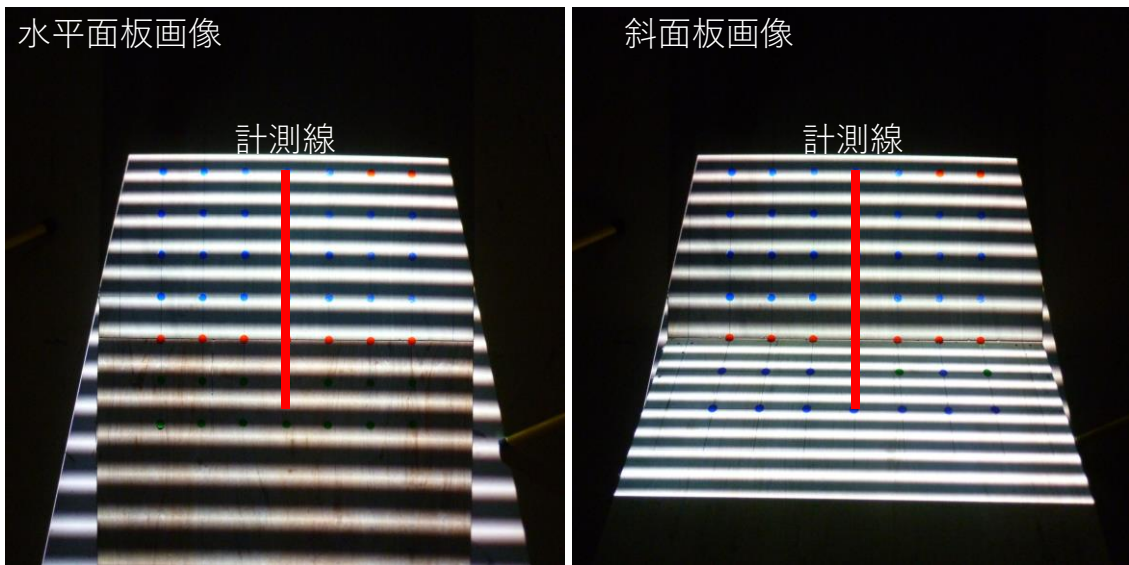
図A-18に斜面の形状計測の結果を示す。前出の「3.2 反射角 γ と入射角 α の推定」で述べた推定手法の効果を確認するため、未補正の点と補正処理を行った点をプロットし、計測精度の確認を行っている。

図A-18に示すように、斜面上には2点の計測点について高低差情報が取得できる。図中の絶対誤差は、斜面と計測値の鉛直方向の差である。Y=42.3cmの斜面上の計測点での相対誤差は、補正無しの場合48.1%、補正ありの場合は5.1(%)である。また、Y=45.8cmの斜面上の計測点での相対誤差は、補正無しの場合42.4%、補正ありの場合は11.3%である。

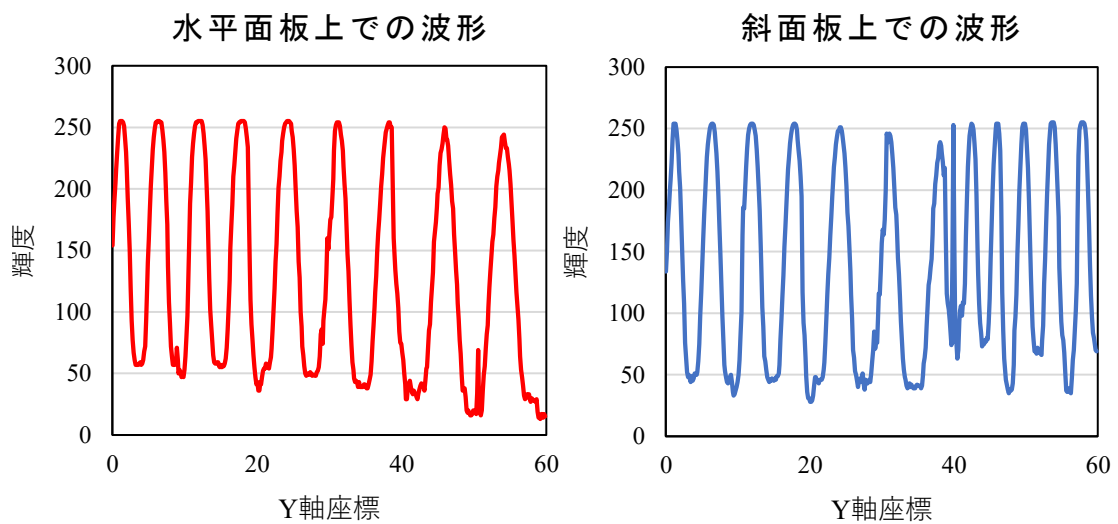
以上の結果から、Fringe画像投影法の計測方法によって形状計測ができること、補正処理を行うことで計測精度が向上することが確認できている。



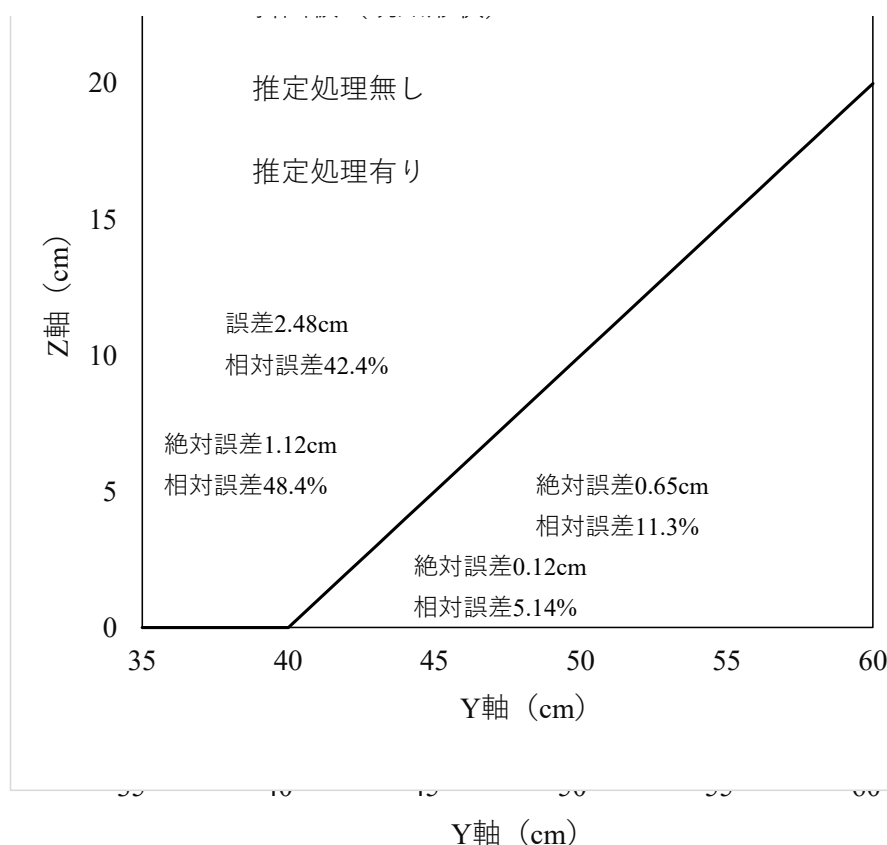
図A-15 形状計測を実施した水平板と斜面板



図A-16 水平板と斜面板の画像



図A-17 計測線における水平板上および斜面板上での波形



図A-18 斜面板の形状計測

4.2 矩形物体の形状計測

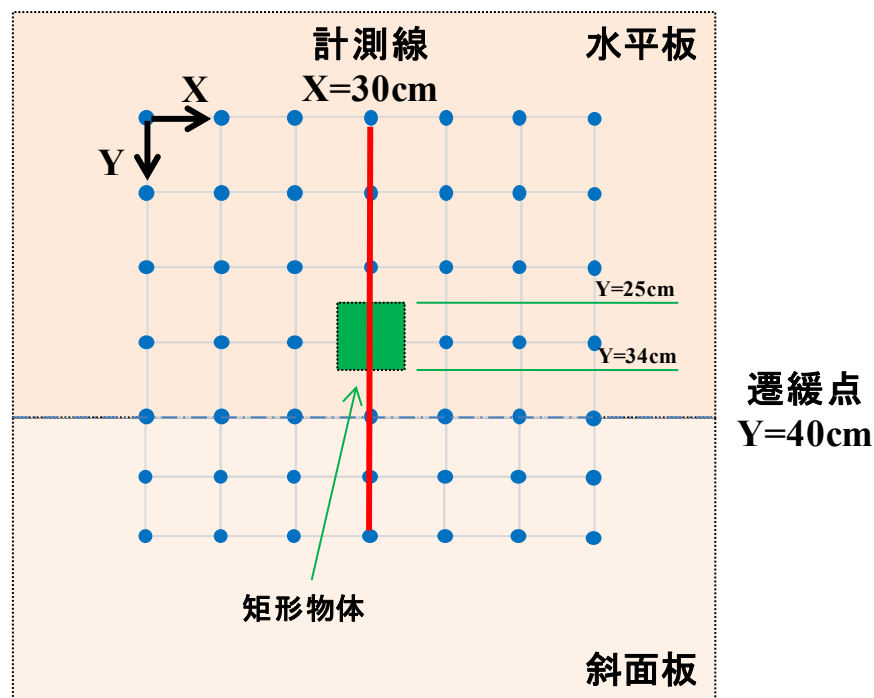
図A-19に形状計測を行う斜面板，水平板および矩形物体の説明図を示す．斜面水平部におけるY=25cm からY=34cmにかけて各辺9cmの矩形物体を設置し，矩形物体の形状計測を実施した．水平板に垂直方向（鉛直方向）をZ軸とする．形状計測は，計測線X=30cmにおけるYZ断面で行った．

矩形物体の有無の枚の画像を図A-20に示す．また，X=30cmの計測線上の波形を図A-21に示す．図のようにプロジェクターから照射された光は，上部だけでなく矩形物体の側面にも投影される．しかし矩形物体の光が投影される側面はカメラでは撮影されないため，側面に入射した波数を考慮し，高低差情報の取得および補正を実施した．また，計測線上のX=34cm以降，波形が検出されていないのは矩形物体の影が影響している．

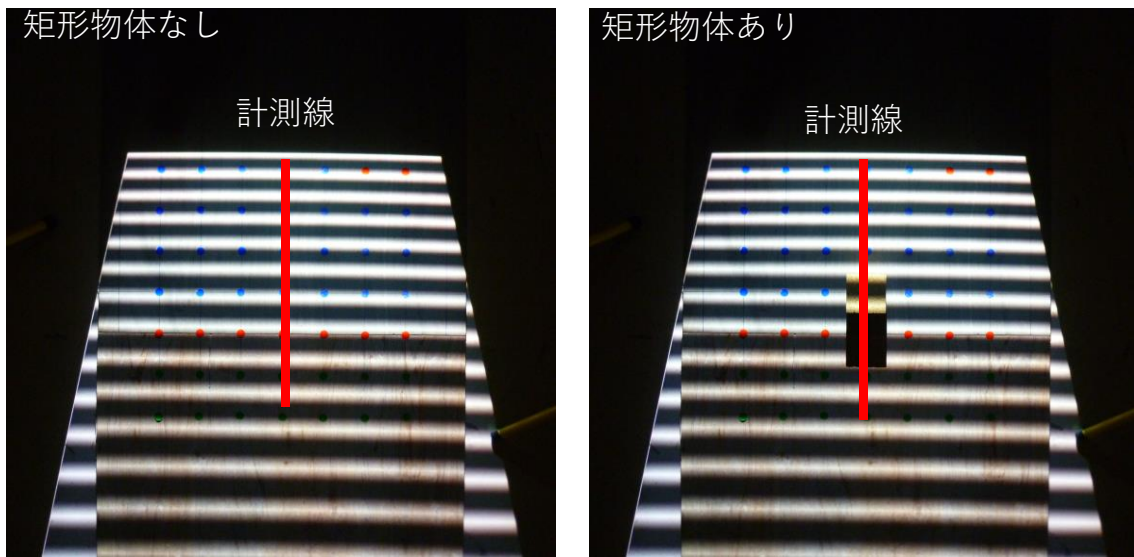
図A-22に矩形物体の形状計測の結果を示す。斜面板の形状計測時と同様に、未補正の点と補正処理を行った点をプロットし、精度の確認を行っている。

2枚の画像（図A-20）から得られる矩形物体の高低差情報は2点であった。Y=25.3cmの矩形物体上の計測点での相対誤差は、補正無しの場合43.0%、補正ありの場合4.9%となった。また、Y=32.4cmの矩形物体上の計測点での相対誤差は、補正無しの場合50.4%、補正ありの場合4.7%となった。

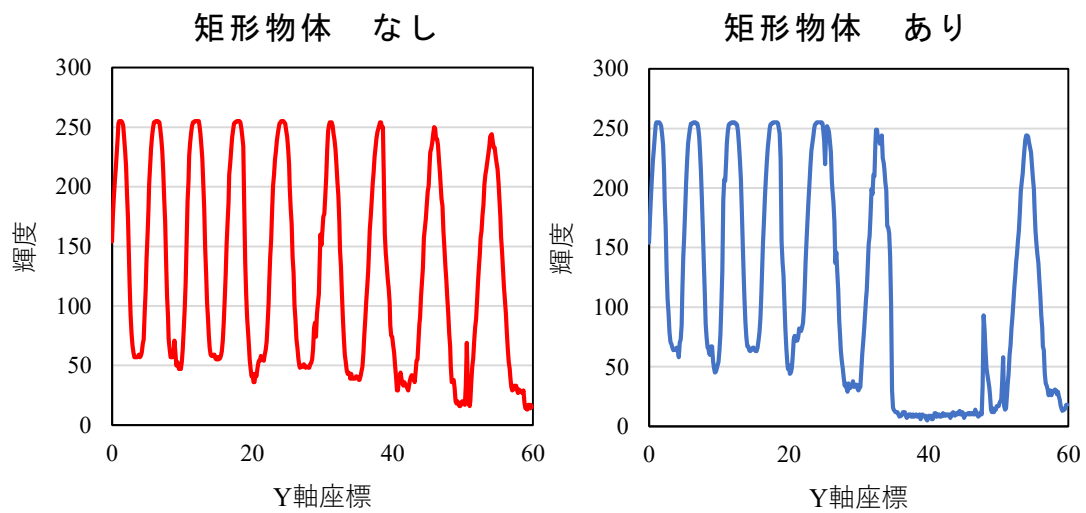
以上の結果から、矩形物体についてもFringe画像投影法の計測方法によって形状計測ができること、補正処理を行うことで計測精度が向上することが確認できている。



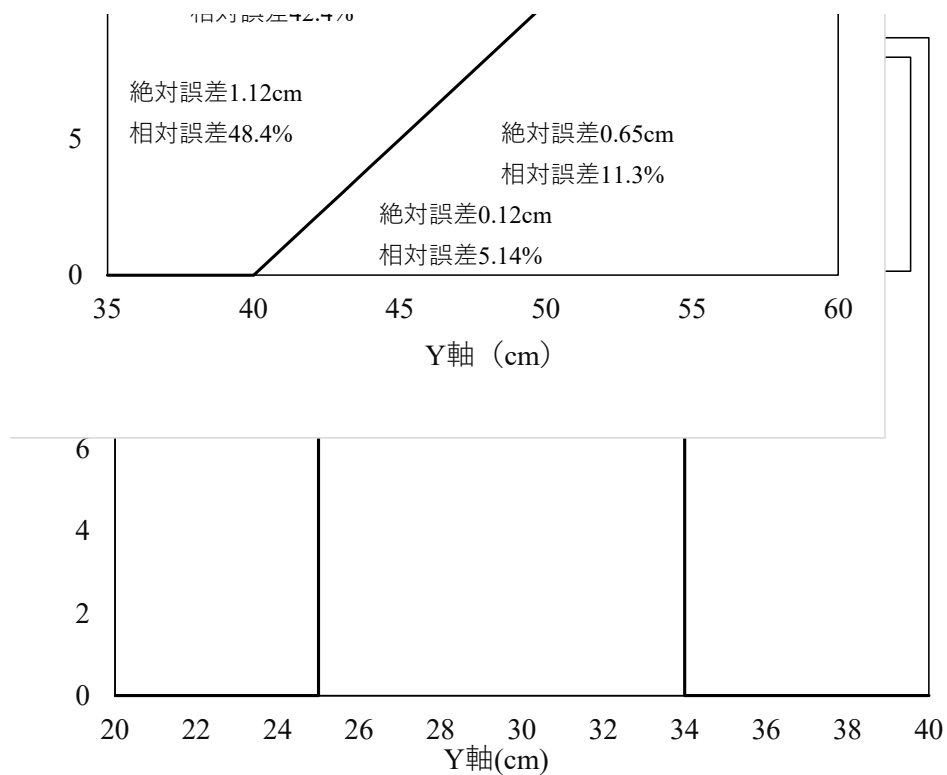
図A-19 形状計測を実施した斜面板，水平板および矩形物体



図A-20 水平板の画像の比較（矩形物体の有無）



図A-21 計測線における水平板上での波形の比較（矩形物体の有無）



図A-22 矩形物体の形状計測

【参考文献】

- 1) Stave Cochard, Christophe Ancey : Tracking the free surface of time-dependent flows: image processing for the dam-break problem, Experiments in Fluids, Vol.44, pp.59-71, 2008.
- 2) Chufan Jiang, Beiwen Li and Song Zhang : Pixel-by-pixel absolute phase retrieval using three phase-shifted fringe patterns without markers, Optics and Lasers in Engineering, Voi.91, pp.232-241, 2017.

付録 B 楕円形要素の接触判定

放物線などをはじめとした二次曲線には，楕円形と直線が含まれている．本研究のDEMで用いる楕円形要素の接触判定は，これらの二次曲線の性質を利用している．

1. 二次曲線の分類

まず，二次曲線の分類について簡単に述べる．

平面上の直交座標（ X, Y ）において，二次曲線の一般形は次の式(B-1)で表される．

$$f(X, Y) = AX^2 + 2HXY + BY^2 + 2GX + 2FY + C = 0 \quad (\text{B-1})$$

ここで， A, B, H のうち，少なくとも一つは0でないと考える．また， D, D_0, σ を次のように表示する．

$$D = \begin{vmatrix} A & H & G \\ H & B & F \\ G & F & C \end{vmatrix} = ABC + 2FGH - AF^2 - BG^2 - CH^2 \quad (\text{B-2})$$

$$D_0 = \begin{vmatrix} A & H \\ H & B \end{vmatrix} = AB - H^2 \quad (\text{B-3})$$

$$\sigma = A + B \quad (\text{B-4})$$

これらの式をそれぞれ，式(B-1)の第一判別式，第二判別式，指標と呼ぶ．これらの値によって，二次曲線は，表 B-1 のように分類される．

表 B-1 二次曲線の分類

	$D_0 \neq 0$		$D_0 = 0$			
$D \neq 0$	$D_0 < 0$ 双曲線	$D_0 > 0$		放物線		
		$\sigma D < 0$ 楕円	$\sigma D > 0$ 空集合			
$D = 0$	相交わる 二直線	1点		$g^2 - aC, f^2 - bC$ のうち、少なくとも1つが		
				正	負	$g^2 - aC$ $f^2 - bC$ = 0
				平行2直線	空集合	一直線

2. 楕円形同士の接触判定

接触判定において、円形要素は半径が一定であり、要素の中心間の距離を測定することによって容易に接触しているか否かを判定できる。多角形要素の場合、要素の各頂点に注目し、その頂点がほかの要素内に存在するかどうかで接触判定を行うことができる。楕円形要素は中心からの距離が一定でなく、頂点を持たないという形状特性を有しているため、これらの方法での接触判定を行うことができない。

そこで楕円形要素間の接触判定には二次曲線束の考え方を導入する。すなわち、平面上の直交座標 (X, Y) において、二つの楕円形要素を表す二次曲線が、それぞれ $f(X, Y) = 0$, $g(X, Y) = 0$ で与えられる場合、次式で表される二次曲線束は、共通交点を通る二次曲線全体を表す式となる。

$$f(X, Y) + \lambda \cdot g(X, Y) = 0 \quad (\lambda \text{は任意定数}) \quad (\text{B-5})$$

この二次曲線が直線となるように λ の値を決定し、得られた直線と楕円形 2 要素との共通交点の有無を調べることによって、接触判定が可能となる。

図 B-1 に示すような 2 つの楕円形要素 i, j 間の接触について考える。
 要素 i, j は全体座標系 (X, Y) 表示による $O_i(X_i, Y_i), O_j(X_j, Y_j)$ を
 原点とする局所座標系 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ によって次式で表される。

$$\frac{x_n^2}{a_n^2} + \frac{y_n^2}{b_n^2} = 1 \quad (n = i, j) \quad (\text{B-6})$$

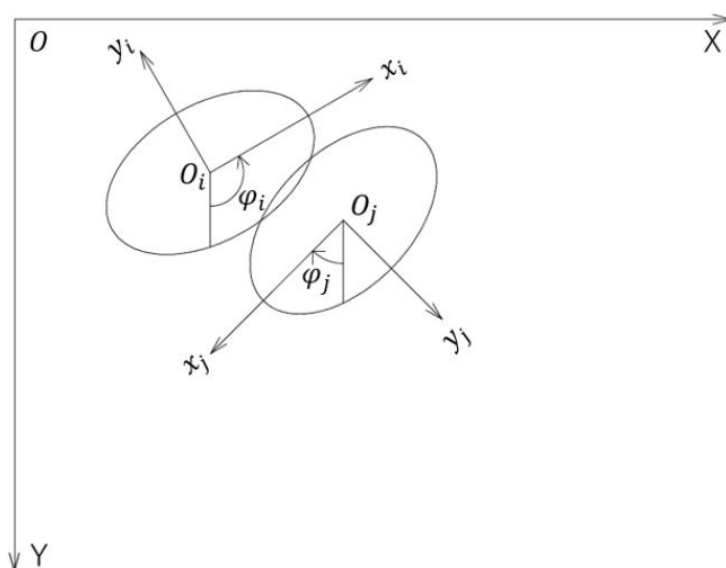


図 B-1 楕円形要素の接触

また、この局所座標系 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ から全体座標系 (X, Y) への変換式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x_n &= (X - X_n) \cos \varphi_n + (Y - Y_n) \sin \varphi_n \\ y_n &= -(X - X_n) \sin \varphi_n + (Y - Y_n) \cos \varphi_n \end{aligned} \quad (n = i, j) \quad (\text{B-7})$$

式(B-6)に式(B-7)を代入し、整理すると、

$$(b_n^2 \cos^2 \varphi_n + a_n^2 \sin^2 \varphi_n)(X - X_n)^2 + 2(b_n^2 - a_n^2) \sin \varphi_n \cos \varphi_n (X - X_n)(Y - Y_n) + (b_n^2 \sin^2 \varphi_n + a_n^2 \cos^2 \varphi_n)(Y - Y_n)^2 = a_n^2 b_n^2 \quad (n = i, j) \quad (\text{B-8})$$

となり，次式を得る．

$$A_n(X - X_n)^2 + 2B_n(X - X_n)(Y - Y_n) + C_n(Y - Y_n)^2 = D_n \quad (n = i, j) \quad (\text{B-9})$$

ここに，

$$\left. \begin{aligned} A_n &= b_n^2 \cos^2 \varphi_n + a_n^2 \sin^2 \varphi_n \\ B_n &= (b_n^2 - a_n^2) \sin \varphi_n \cos \varphi_n \\ C_n &= b_n^2 \sin^2 \varphi_n + a_n^2 \cos^2 \varphi_n \\ D_n &= a_n^2 b_n^2 \end{aligned} \right\} \quad (n = i, j) \quad (\text{B-10})$$

ここで，式(B-9)で表される要素 i ， j をそれぞれ $f(X, Y) = 0$ ， $g(X, Y) = 0$ とみなして，式(B-5)より次式を得る．

$$A_i(X - X_i)^2 + 2B_i(X - X_i)(Y - Y_i) + C_i(Y - Y_i)^2 - D_i + \lambda \{ A_j(X - X_j)^2 + 2B_j(X - X_j)(Y - Y_j) + C_j(Y - Y_j)^2 - D_j \} = 0 \quad (\text{B-11})$$

上式の二次曲線を，一般形に変形する．

$$\left. \begin{aligned}
 & AX^2 + 2HXY + BY^2 + 2GX + 2FY + C = 0 \\
 & \text{ここに,} \\
 & A = A_i + \lambda A_j, \quad H = B_i + \lambda B_j, \quad B = C_i + \lambda C_j \\
 & G = -\{A_i X_i + B_i Y_i + \lambda(A_j X_j + B_j Y_j)\} \\
 & F = -\{B_i X_i + C_i Y_i + \lambda(B_j X_j + C_j Y_j)\} \\
 & C = A_i X_i^2 + 2B_i X_i Y_i + C_i Y_i^2 - D_i \\
 & \quad + \lambda(A_j X_j^2 + 2B_j X_j Y_j + C_j Y_j^2 - D_j)
 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B-12})$$

式(B-12)は、任意定数 λ を含む二次曲線束を表す二次方程式 $f(X)=0$ である。この式の左辺が2つの一次式に因数分解できるように λ の値を決定するには、表 B-1 から明らかのように、式(B-2)において $D(\lambda) = 0$ を満足する λ を求めればよい。

$$\begin{aligned}
 D &= \begin{vmatrix} A & H & G \\ H & B & F \\ G & F & C \end{vmatrix} = ABC + 2FGH - AF^2 - BG^2 - CH^2 \\
 &= (A_i + \lambda A_j)(C_i + \lambda C_j) \{A_i X_i^2 + 2A_i X_i Y_i + C_i Y_i^2 - D_i \\
 &\quad + \lambda(A_j X_j^2 + 2B_j X_j Y_j + C_j Y_j^2 - D_j)\} \\
 &+ 2 \left[-\{B_i X_i + C_i Y_i + \lambda(B_j X_j + C_j Y_j)\} \right] \left[-\{A_i X_i + B_i Y_i + \lambda(A_j X_j + B_j Y_j)\} \right] (B_i + \lambda B) \\
 &- (A_i + \lambda A_j) \left[-\{B_i X_i + C_i Y_i + \lambda(B_j X_j + C_j Y_j)\} \right]^2 \\
 &- (C_i + \lambda C_j) \left[-\{A_i X_i + B_i Y_i + \lambda(A_j X_j + B_j Y_j)\} \right]^2 \\
 &- \{A_i X_i^2 + 2A_i X_i Y_i + C_i Y_i^2 - D_i + \lambda(A_j X_j^2 + 2B_j X_j Y_j + C_j Y_j^2 - D_j)\} (B_i + \lambda B)^2 = 0
 \end{aligned} \quad (\text{B-13})$$

$$\begin{aligned}
 \therefore D(\lambda) = & (-A_i C_j D_j + B_j^2 D_j) \lambda^3 \\
 & + (A_i A_j C_j X_j^2 - A_i C_j D_j + C_i A_j C_j Y_j^2 - C_i A_j D_j + A_i A_j C_j X_i^2 + 2B_i A_j C_j X_i Y_i \\
 & + C_i A_j C_j Y_i^2 - D_i A_j C_j - 2B_i B_j^2 X_j Y_j + 2B_i A_j C_j X_j Y_j + 2B_i B_j^2 X_i Y_j \\
 & + 2C_i B_j^2 Y_i Y_j + 2A_i B_j^2 X_i X_j + 2B_i B_j^2 Y_i X_j - A_i B_j^2 X_j^2 - 2C_i A_j C_j Y_i Y_j \\
 & - 2B_i A_j C_j X_i Y_j - C_i B_j^2 Y_j^2 - 2B_i A_j C_j Y_i X_j - 2A_i A_j C_j X_i X_j - A_i B_j^2 X_i^2 \\
 & - 2B_i B_j^2 X_i Y_i - C_i B_j^2 Y_j^2 + D_i B_j^2 + 2B_i B_j D_j) \lambda^2 \\
 & + (A_i C_i A_j X_i^2 - C_i D_i A_j + A_i C_i C_j Y_i^2 - A_i D_i C_j + A_i C_i A_j X_j^2 + 2A_i C_i B_j X_j Y_j \\
 & + A_i C_i C_j Y_i^2 - A_i C_i D_j - 2B_i^2 B_j X_i Y_j + 2A_i C_i B_j X_i X_j + 2B_i^2 B_j Y_i X_j \\
 & + 2B_i^2 C_j Y_i Y_j + 2B_i^2 A_j X_i X_j + 2B_i^2 B_j X_i X_j - B_i^2 A_j X_i^2 - 2A_i C_i C_j Y_i Y_j \\
 & - 2A_i C_i B_j Y_i X_j - B_i^2 C_j Y_i^2 - 2A_i C_i B_j X_i Y_j - 2A_i C_i A_j X_i Y_j - B_i^2 A_j X_j^2 \\
 & - 2B_i^2 B_j X_j Y_j - B_i C_j Y_j^2 + B_i^2 D_j + 2B_i D_i B_j) \lambda + A_i C_i D_j + B_i^2 D_i = 0
 \end{aligned} \tag{B-14}$$

式(B-14)より次の簡略式を得る.

$$D(\lambda) = t_1 \lambda^3 + t_2 \lambda^2 + t_1 \lambda + t_4 = 0 \tag{B-15}$$

この簡略式は λ の三次代数方程式である. これを Cardano の解法によって解き, 求めた実根の1つを式(B-12)に代入して同式の各係数を決定する.

ここで、表 B-1 の $D=0$ において、二直線は D_0 の値によって大きく二つの領域に分かれていることがわかる。この D_0 の値は、ここでは A, B, H のうち少なくとも一つは 0 ではないとしているので、解析上 D_0 の値が 0 になる可能性は極めて低いものと考えられる。また、 $D_0 \neq 0$ の領域はさらに二つの領域に分けられているが、楕円形要素の解析上、要素同士が一点で接触する確率はほぼ 0 として差し支えないといえる。

以上の考察から、本接触判定では相交わる二直線領域で示すと、 $D=0$ かつ $D_0 < 0$ のみを対象とする。式(B-1)に $D=0$ を代入して、

$$f(x, y) = Ax^2 + 2Hxy + By^2 \quad (\text{B-16})$$

式(B-16)が相交わる二直線となるように因数分解を考えると、次式のように表現できる。

$$A(x - \alpha y)(x - \beta y) = 0 \quad (\text{B-17})$$

ここで、 α, β は式(B-16)で変数 y を省略した $f(x)$ の式

$$f(x) = Ax^2 + 2Hx + B \quad (\text{B-18})$$

の二根となる。式(B-17)より、

$$\left. \begin{aligned} (X - X_0) - \alpha(Y - Y_0) &= 0 \\ (X - X_0) - \beta(Y - Y_0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B-19})$$

この式の二直線と楕円要素との共通交点の有無を調べることで、楕円形 2 要素間の接触・非接触を判定する。

以上が、楕円形要素の基本的な接触判定の概要である。

3. 特殊な場合の接触判定

前節の接触判定法の適用外となっている場合を特殊な場合とし、その場合の接触判定について述べる。これは、**図 B-2** のように、2 要素の長軸回転角 ϕ および長短軸半径が同じ場合ということである。この 2 要素について式(B-14)によって求まる λ の値に、 -1 と一組の共役複素数根が得られるということが分かっている。 $\lambda = -1$ として前出の式(B-12)を用いて二次曲線の各係数を決定しようとしたが、式(B-10)の要素 i, j がともに同じ値をとるため、変数 A, H, B の値のすべてが 0 になり、式(B-12)が一次式となった。

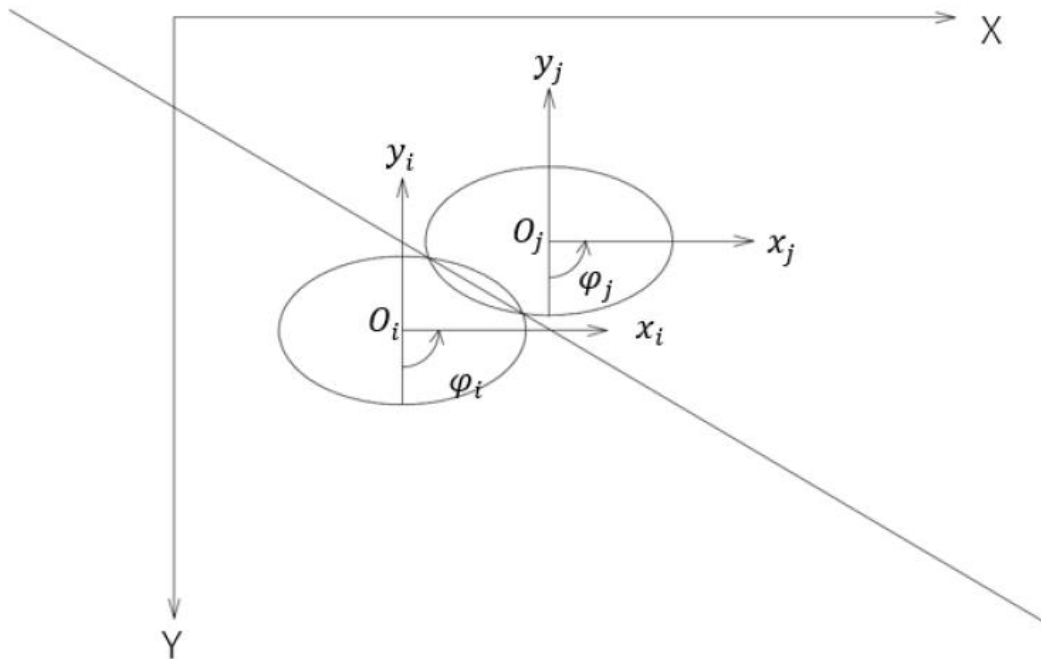


図 B-2 特殊な場合の接触判定

前節までは変数 A, H, B のうち少なくとも 1 つは 0 ではないという前提の下で接触判定を行ってきたため、前節の接触判定は適用できない。そこでこのような場合には式(B-12)をそのまま利用して接触判定を行うこととした。式(B-12)において $A=H=B=0$ として、次の一本の直線が得られる。

$$2GX + 2FY + C = 0 \quad (\text{B-20})$$

この直線式と楕円との共通交点の有無を調べることによって2要素間の接触判定を行う。

4. 楕円形要素と壁面との接触判定

図 B-3 に示すように、楕円形1要素の壁面に対する接触判定方法について述べる。

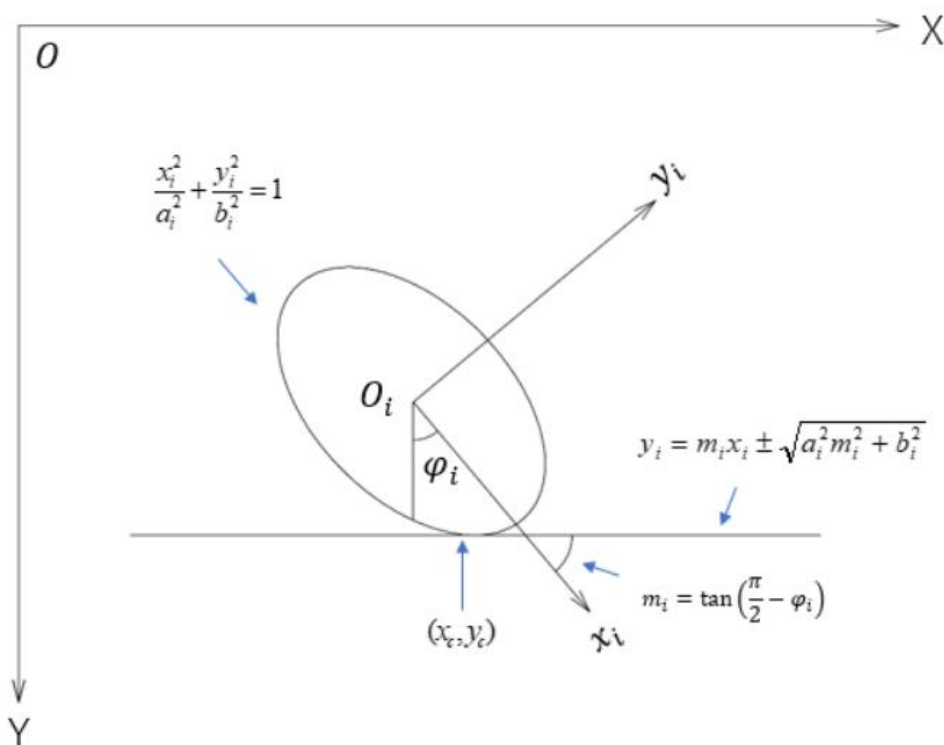


図 B-3 楕円形要素と壁面との接触

図中の要素 i は、重心 O_i を原点に持つ局所座標系 (x_i, y_i) により次式で表される。

$$\frac{x_i^2}{a_i^2} + \frac{y_i^2}{b_i^2} = 1 \quad (\text{B-21})$$

また、局所座標系 (x_i, y_i) の x_i 軸が全体座標系 (X, Y) の X 軸となす角を φ_i 、壁面となす角を m_i とする。要素が壁面と接触していない場合、壁面に最も近い式(B-21)上の点は、次式で与えられる接線の方程式と式(B-21)との交点で与えられる。

$$y_i = m_i x_i \pm \sqrt{a_i^2 m_i^2 + b_i^2} \quad (\text{B-22})$$

ここで複号は、

$$\begin{aligned} \sin \varphi_i < 0 & \quad \text{のとき正} \\ \cos \varphi_i \geq 0 & \quad \text{のとき負} \end{aligned}$$

つまり局所座標系 (x_i, y_i) において、楕円形要素 i と壁面との交点の座標 (x_c, y_c) は、式(B-21)、(B-22)により次式で与えられる。

$$(x_c, y_c) = \left(\mp \frac{a_i^2 m_i^2}{\sqrt{a_i^2 m_i^2 + b_i^2}}, \pm \frac{b_i^2}{\sqrt{a_i^2 m_i^2 + b_i^2}} \right) \quad (\text{複合同順}) \quad (\text{B-23})$$

局所座標系 (x_i, y_i) から全体座標系 (X, Y) への座標変換は、座標 (X_i, Y_i) を全体座標系 (X, Y) で表した要素 i の重心として次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_i + x_i \cos \varphi_i - y_i \sin \varphi_i \\ Y &= Y_i + x_i \sin \varphi_i + y_i \cos \varphi_i \end{aligned} \right\} \quad (\text{B-24})$$

局所座標系による交点の座標 (x_c, y_c) を式(B-24)によって全体座標系に変換し、得られた最下点 (X_c, Y_c) の値と壁面の X 座標の値と比較することにより、 $X_c > X$ ならば要素 i は壁面に接触点 (X_c, Y_c) において接触していると判定する。

謝 辞

本研究の遂行および本論文の作成を行うにあたり、多くの方々にお世話になり、またご指導やご協力をいただきました。ここで深く感謝の意を表したいと思います。

主指導教員の鳥取大学大学院教授の西村強先生には、研究の方向性や考察に至るまで、多大なご指導をいただきました。大学院入学後は、社会人学生であることを気遣っていただき、平日の夜や休日にもかかわらず、打ち合わせをさせていただきました。心から感謝の意を表します。先生からご送付いただくメールに、時折書かれている爆笑ネタはとても良い思い出です。これからもご指導いただければ幸いです。

学位請求論文の審査にあたっては、鳥取大学大学院教授の香川敬生先生、鳥取大学大学院准教授の中村公一先生、そして、鳥取大学大学院准教授の河野勝宣先生に大変貴重なご助言やご指導をいただきました。感謝の意を表します。また、本研究を進めるにあたっては、施工学研究室の池添保雄氏や学生の皆様に多大なご協力をいただきました。感謝の意を表します。

本研究は、アサヒコンサルタント株式会社に在籍しながら完成に到りました。ご支援とご配慮を下された会社の皆様に感謝の意を表します。

私は、徳島での7年間の学生生活の内、6年間で徳島大学工学部建設工学科の地盤工学の研究室である建設一講座で過ごさせていただきました。この間、徳島大学工学部建設工学科教授（現名誉教授）の山上拓男先生には、公私にわたり多くのご指導をいただきました。私が地盤工学の基礎を身につけることができたのは山上拓男先生のおかげです。心から感謝の意を表します。

大学院修了後、私は、広島市の中電技術コンサルタント株式会社に入社しました。28歳のとき、会社の先輩である住岡宣博博士に土質工学会（現地盤工学会）中国支部広島地域の土質工学セミナーに誘っていただきました。土質工学セミナーで揉まれることで、自分自身の力量を知らなさい、足りないものを補いなさい、そして研鑽しなさいとご指導をい

いただきました。土質工学セミナーのメンバーの方々と議論や検討を行い、成果をまとめて発表をおこなうことは非常に楽しいものでした。この経験がなければ、勉強が面白いと感じることは無かったと思います。ご指導、そして機会を与えていただきました住岡宣博博士に感謝の意を表します。鳥取県へ転勤後は、鳥取地域の土質工学セミナーに参加させていただき、ここで西村強先生とお会いすることが出来ました。私を育てていただいた土質工学セミナーおよびセミナーの関係各位に感謝の意を表します。

50歳を過ぎた頃、勉強をさぼっている自分に気が付くとともに、中電技術コンサルタント株式会社の友人が学位取得を目指して頑張っているという話を聞き、大きな刺激を受けました。やり残していることを思い出し、西村強先生の研究室へお伺いしました。学位取得への挑戦です。西村強先生は、浅学な私の主指導教官を快く引き受けていただきました。重ねて感謝の意を表します。58歳にして、ようやく学位論文の完成に到りました。今後、考えることができなくなるまでは、勉強を続けたいと思っています。

最後に、私のわがままを許して大学院へ送り出してくれた、妻と二人の娘にありがとうを言いたい。こんなお父さんですが、これからもよろしく申し上げます。

土田章仁