

# 博士論文

航空レーザー計測値を用いた土砂水理解析データの構築と表示に関する研究

(Construction of Sediment Hydraulic Analysis Data and Display of the Analysis Results using Airborne Laser Measurements)

2019年3月

立命館大学大学院理工学研究科  
環境都市専攻博士課程後期課程

梶山 敦司

立命館大学審査博士論文

航空レーザー計測値を用いた土砂水理解析データの  
構築と表示に関する研究

(Construction of Sediment Hydraulic Analysis Data and  
Display of the Analysis Results using Airborne Laser  
Measurements)

2019年3月  
March 2019

立命館大学大学院理工学研究科  
環境都市専攻博士課程後期課程  
Doctoral Program in Advanced Architectural, Environmental and  
Civil Engineering Graduate School of Science and Engineering  
Ritsumeikan University

梶山 敦司  
KAJIYAMA Atsushi

研究指導教員： 里深 好文 教授  
Supervisor : Professor SATOFUKA Yoshifumi

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 土砂災害の発生状況と対策の状況	1
1.1.2 土石流数値シミュレーションの現状	1
1.2 研究の目的と構成	3
第2章 航空レーザー計測値を用いた地形形状抽出手法に関する研究	6
2.1 概要	6
2.2 縦横断形状抽出プログラムの開発	7
2.2.1 入力データ	7
2.2.2 プログラムの処理内容	8
2.2.3 出力データ	8
2.3 プログラムの実行例と設定条件の違いによる影響評価	10
2.3.1 対象地の概要	10
2.3.2 入力データ	10
2.3.3 プログラムの実行結果	12
2.4 土砂流出解析の実行と抽出条件の違いによる影響	16
2.4.1 解析条件	16
2.4.2 解析データの組み合わせ	17
2.4.3 縦横断形状の変更による解析結果への影響	17
2.5 まとめ	21
第3章 航空レーザー計測値を用いた溪流幅抽出手法に関する研究	22
3.1 概要	22
3.2 溪流幅抽出プログラムの開発	22
3.2.1 入力データ	22
3.2.2 プログラムの処理内容	23
3.2.3 出力データ	25
3.3 プログラムの実行と抽出条件の違いによる影響	25
3.3.1 対象地の概要	25
3.3.2 入力データ	25
3.3.3 プログラムの実行例と実行結果への影響	27
3.4 土砂流出解析の実行と抽出条件の違いによる影響	30
3.4.1 解析条件	30
3.4.2 縦横断形状および溪流幅抽出条件の変更による解析結果への影響	30
3.4.3 溪流幅設定条件の変更による解析結果への影響	35
3.5 まとめ	40
第4章 溪流幅を考慮した一次元土砂水理解析結果の平面二次元化手法に関する研究	41
4.1 概要	41

4. 2	溪流幅を考慮した一次元解析結果の平面二次元化手法の開発	42
4. 2. 1	入力データ	42
4. 2. 2	プログラムの処理内容	42
4. 2. 3	出力データ	45
4. 3	プログラムの実行例と実行結果の評価	45
4. 3. 1	対象地の概要	45
4. 3. 2	入力データ	46
4. 3. 3	プログラムの実行例と実行結果	48
4. 4	まとめ	53
第5章	地形形状を考慮した一次元土砂水理解析結果の平面二次元化手法に関する研究	55
5. 1	概要	55
5. 2	航空レーザー計測値が存在する場合の平面二次元化手法の開発	55
5. 2. 1	入力データ	55
5. 2. 2	プログラムの処理内容	56
5. 2. 3	出力データ	59
5. 3	プログラムの実行例と実行結果	59
5. 3. 1	対象地の概要	59
5. 3. 2	入力データ	59
5. 3. 3	プログラムの実行例と実行結果	62
5. 4	まとめ	68
第6章	結論	69
6. 1	本論文の成果	69
6. 2	今後の課題	70

## 目 次

図-2.1 溪流位置情報の例	7
図-2.2 縦横断形状抽出フロー	8
図-2.3 縦横断形状抽出のイメージ	9
図-2.4 対象地域と解析データ作成範囲	10
図-2.5 解析に用いたデータの溪流位置	11
図-2.6 溪流位置と各グリッド間隔で作成した等高線	15
図-2.7 ハイドログラフ	16
図-2.8 解析条件の違いによる下流端の最大流量の変化	18
図-3.1 溪流幅抽出フロー	24
図-3.2 溪流幅と断面積の模式図	24
図-3.3 対象地域と解析データ作成範囲	25
図-3.4 溪流を抽出した地形図(等高線 1m 間隔, 拡大範囲 1 表示)	26
図-3.5 ハイドログラフ	27
図-3.6 解析条件の違いによる下流端の最大流量の変化	31
図-3.7 最大流速と最大水深	39
図-4.1 プログラムの処理内容	43
図-4.2 一次元解析結果の平面二次元表示イメージ	44
図-4.3 対象地域(熊本県白川)の位置図	45
図-4.4 一次元解析に用いたハイドログラフ	48
図-4.5 一次元解析結果の最大水深および最大流速の表示	49
図-4.6 一般的な一次元解析結果の表示例	49
図-4.7 水深の時系列変化の表示例	51
図-4.8 GIS データ出力時の格子間隔別の表示例	52
図-4.9 一次元解析と二次元解析結果の最大水深表示の接合	53
図-5.1 プログラムの処理内容	57
図-5.2 LP データを用いた地形形状を考慮した	58
図-5.3 対象地域と解析データ作成範囲	59
図-5.4 一次元解析に用いたハイドログラフ	61
図-5.5 開発した手法を用いた一次元解析結果の表示例	63
図-5.6 一般的な一次元解析結果の表示例	64
図-5.7 水深の時系列変化表示例	65
図-5.8 堆積層厚の時系列変化表示例	66
図-5.9 グリッドサイズ変更による見え方の違い	67

## 表 目 次

表-2.1 断面作成諸元	7
表-2.2 溪流の位置情報(一部を表示)	12
表-2.3 プログラムを用いて抽出した縦横断形状	14
表-2.4 解析パラメータ	16
表-2.5 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(1m 等高線による溪流抽出)	19
表-2.6 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(5m 等高線による溪流抽出)	20
表-3.1 溪流幅抽出パラメータ	22
表-3.2 溪流の位置情報(一部を表示)	26
表-3.3 横断形状抽出条件の違いによる溪流幅の変化	29
表-3.4 解析パラメータ	30
表-3.5 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(1m 等高線による溪流抽出)	32
表-3.6 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(5m 等高線による溪流抽出)	33
表-3.7 溪流幅の設定方法を変更した場合の流量と堆積層厚の変化(1m 等高線による溪流抽出)	37
表-3.8 溪流幅の設定方法を変更した場合の流量と堆積層厚の変化(5m 等高線による溪流抽出)	38
表-4.1 溪流中心位置データの例	46
表-4.2 計算点における溪流幅の例	47
表-4.3 一次元解析結果の例	47
表-4.4 グリッドサイズ変更によるデータ容量の違い	50
表-5.1 溪流位置データの例	60
表-5.2 一次元解析結果の例	61
表-5.3 解析パラメータ	62

## 要 旨

近年、集中豪雨などに伴って土石流災害が頻発しており、土石流災害を軽減するために各溪流において砂防計画が検討されている。しかし、土石流の発生が懸念される対象となる溪流が数多く存在するため、整備が追いついていない状況である。そのため、現在より効果的な砂防計画を行うことを目的として、土石流数値シミュレーションを用いて砂防計画する手法が提案されている。また、シミュレーションを用いたハザードマップ作成手法が提案され、実運用されている。

しかしながら、土石流シミュレーションを実施するためには、現地状況を確認したうえで地形形状や溪流幅などをひとつひとつ設定する必要があり、多数の溪流に対し機械的に条件を設定することが困難であった。また、土石流数値シミュレーションを用いたハザードマップの作成では、二次元解析を用いた場合は表現手法が確立されており、解析結果をそのままハザードマップとして利用が可能であるが、入力データの作成や解析に時間がかかる状況である。一方、一次元解析を用いた場合は、入力データ作成は二次元解析と同様の状況であるが、解析時間は二次元解析に比べ格段に速く実施することができる。しかし、一般の方々が容易に判断できる平面二次元上の表現手法が確立されていないため、ハザードマップの作成自体が困難な状況にある。

このことから、本研究では土石流シミュレーションソフトの利用を効率化し、砂防計画を迅速に立案可能とするため、航空レーザー計測値から「縦横断形状」および「溪流幅」を自動で抽出する手法を考案し、プログラムを開発した。また、開発したプログラムを清水寺北部の溪流に適用した結果を示すととともに、「縦横断形状」および「溪流幅」の抽出条件が解析結果へ及ぼす影響を分析し、各種データの作成及び使用条件の適正範囲と妥当性について評価した。また、一次元解析結果を容易に判断できるように、これまで河床縦断グラフのみで表示されてきた一次元解析結果を、容易に判断可能なハザードマップとするため、「河道幅(溪流幅)を考慮して平面二次元で表現する手法」と「航空レーザー計測値を用いて、河道地形形状を正確に反映し、水面範囲および土砂堆積・浸食範囲を地形図上に表示できる平面二次元表現する手法」を考案し、GIS データとして出力するプログラムを開発した。河道幅を考慮して平面二次元で表現する手法では、

開発プログラムを用い熊本県白川を対象として適用した例を示した。航空レーザー計測値を用いて平面二次元で表現する手法では、開発プログラムを用い清水寺北部の溪流に適用した例を示した。そのうえで、最大水深と最大流速の表示例と水深の時系列変化の表示例をもとに平面二次元化することによって、解析結果を容易に理解できることを示した。また、分離して示されることが多かった平面二次元解析結果と一次元解析結果の接合例を示した。

2019年3月

## Abstract

In the recent years, debris flow disasters have been occurring frequently following torrential rains, and erosion control plans are being studied with regard to all mountain streams to reduce debris flow disasters. However, since several mountain streams that can become targets of debris flow exist, the maintenance is difficult. Therefore, to conduct a considerably effective erosion control plan, a method using numerical simulation of debris flow has been proposed. Further, a method of developing hazard maps using simulation has been proposed and even put to practice.

However, to conduct the debris flow simulation, since it is necessary to confirm the on-site conditions and set one by one, the topographic shape, mountain stream width etc., it was difficult to set the conditions for an extensive number of mountain streams mechanically. Moreover, in the development of hazard maps using debris flow numerical simulation, when using two-dimensional analysis, a representation method has been established where although the analysis result can be directly used as the hazard map, input data creation and analysis takes time. Further, when using one-dimensional analysis, although the input data creation is similar to that of the two-dimensional analysis, analysis can be conducted much rapidly than the two-dimensional analysis. However, since a planar two-dimensional representation method that can be easily deciphered by people has not been established, the development of hazard map itself becomes difficult.

Therefore, in this study, to optimize the use of the debris-flow simulation software and make it possible to readily draft the erosion control plan, we developed a method to automatically extract the “longitudinal and transverse shapes” and the “mountain stream width” from the airborne laser measurements and developed a program. Further, in addition to displaying the results of applying the developed program to the mountain streams in the northern part of Kiyomizu-dera, we analyzed the effect of the extraction conditions of “longitudinal and transverse shapes” and “mountain stream width” on the analysis results and evaluated the scope and validity of the conditions for the development and usage of various data.

Moreover, to convert the one-dimensional analysis results that displayed only the longitudinal profile graph of the riverbed into a hazard graph that can be readily deciphered, we developed a “planar two-dimensional representation method that considers the river channel width (stream width)” and “a method that accurately reflects the river channel topography using airborne laser measurements and expresses the water surface range, sediment deposition, and erosion range in a planar two-dimensional representation that can be displayed on a topographic map.” In addition, we developed a program to output it as GIS data. As an example of applying the planar two-dimensional representation method that considers the river channel width, we present the application of the developed program with regard to the Shirakawa River in Kumamoto Prefecture. As an example of applying the method of planar two-dimensional representation using airborne laser measurements, we present the application of the developed program on the mountain streams in the northern part of Kiyomizu-dera. In addition, by developing it into a two-dimensional plane based on the displayed examples of maximum water depth and maximum flow velocity, and the example of time series change of water depth. We have demonstrated that the analysis results can be readily understood. Further, a combined example of the planar two-dimensional analysis results and one-dimensional analysis results that are often displayed separately is illustrated.

March/2019

## 第1章 序論

### 1. 1 研究の背景

#### 1.1.1 土砂災害の発生状況と対策の状況

日本は国土面積の3分の2程度が山地となっており、近年の集中豪雨に伴って土石流が頻発する状況となっている。例えば、平成30年7月豪雨災害では被害が全国におよび土砂災害の発生が2,512件(土石流は769件)<sup>1)</sup>確認されている他、平成29年7月九州北部豪雨災害では福岡県および大分県を中心に土砂災害の発生が307件(土石流は163件)<sup>2)</sup>、平成28年台風10号に伴う大雨では東北地方および北海道において土砂災害の発生が177件(土石流は161件)<sup>3)</sup>、平成27年台風18号に伴う大雨では関東地方を中心に土砂災害の発生が177件(土石流は36件)<sup>4)</sup>、平成26年8月豪雨災害では被害が全国におよび土砂災害の発生が637件(土石流は239件)<sup>5)</sup>確認されている。このように、集中豪雨に伴い広域かつ同時多発的に土砂災害が毎年のように発生し、災害発生直後の新たな土石流の発生などの二次災害の予測・評価もあわせて、迅速な対策が求められている状況となっている。

以上の背景のもと、効率の良い対策を実施し、土石流災害を軽減するために、各溪流において砂防計画が検討され、現在ハード対策・ソフト対策が順次進められている。しかし、対象となる溪流が膨大な数にのぼるため、現状では整備が十分に追いついていない状況にあり、効率的な砂防計画の立案が望まれている。砂防計画では、溪流の規模や保全対象の重要度など外形的な指標によることが一般的である。近年、より効率的に施設配置を検討するために、土石流数値シミュレーション(以下、土石流解析と略称する)を実施することにより、効果的な砂防計画の検討手法が提案されているものの、膨大な溪流すべてに対してハード対策の実施が困難であるため、土石流数値シミュレーションを実施し、ハザードマップを作成するソフト対策も求められている。

#### 1.1.2 土石流数値シミュレーションの現状

土石流解析の数値計算手法は、中川ら<sup>6)</sup>や江頭ら<sup>7)</sup>により体系化され、それに基づく土石流解析が和田ら<sup>8)</sup>、中谷ら<sup>9)</sup>、松本ら<sup>10)</sup>などによって、次元解析手法および二次

元解析手法として開発されている。一次元解析手法および二次元解析手法で、対策工の効果を見込む手法も提案されており、解析手法の研究は進んでいる。しかし、一次元解析を行うためには「溪流の縦断形状」、「溪流の幅」、「溪流の堆積土層厚」を手動で入力する必要があり、このデータ作成には現地調査に加え、地形量の数値化や整理が必要なため、複数の溪流で土石流解析を実施する上で障害となっている。一方、二次元解析を行うためには、現地調査により「溪流の堆積土層厚」を推定する必要があり、現地調査結果をもとにデータを作成する必要があるうえ、二次元解析の実施は一次元解析に比べ時間がかかる状況となっている。対象となる溪流が多い我が国では、一次元解析実施においては入力データの作成、二次元解析実施においては入力データの作成および計算時間が課題となっている。

一方、近年の情報処理技術の向上に伴い、航空レーザー測量により詳細な山間部の地形情報を得ることができ、基盤地図情報（数値標高5メッシュ）<sup>12)</sup>として提供され、比較的容易にデータを入手することができる。これらの情報を用いることによって、土石流解析に必要なデータを迅速かつ客観的に作成する手法を開発することができれば、容易に多数の溪流に対して土石流解析を実施できると考えられる。また、詳細な地形データが得られることで、これまで議論されてこなかったデータの作成条件が解析結果に与える影響についても分析し評価することが可能な状況となっている。

さらに、近年、情報公開・住民参加型の説明会などが必要とされる時代であり、一般の人にもわかりやすく水理現象を説明する機会が増大している。また、災害が突発化・激甚化しており、災害時にはより迅速かつ正確に水理現象を把握する必要性が増している。しかし、現在用いられている従来の水理計算結果の表示方法では、十分とは言えない状況である。

通常、水理現象を把握するために、上流から氾濫開始地点までの一次元解析の結果は、河床縦断のグラフで表示されることが多い。河床縦断のグラフを見慣れた熟練技術者であれば、解析結果を容易に把握することができるが、見慣れていない若手技術者および一般市民にとっては、位置情報と関連付けが難しいため、解析結果を読み取れないことが多い。このため、より容易に位置情報と関連付けて表示できれば、一次元解析結果を把握することができるものと考えられる。解析結果を平面上で表示する手法として、氾濫開始地点から氾濫域までの平面二次元解析結果の表示手法は確立されており、ソフトウェア(たとえば CommonMP<sup>12)</sup>, iRIC<sup>13)</sup>など)上で平面位置と対比しながら解析結果を見ることが可能である。一次元解析結果を地図上で表示できるソフトとしては、現在

HyperKANAKO<sup>14)</sup>などが存在し、溪流中心線に沿う線のデータとして着色される手法が開発されている。これらの手法は、地形図と合わせて表示することによって、位置的な関係の把握が可能となるため、河床縦断のグラフより次元解析結果を理解しやすくなっている。ここで、より直感的に判断を可能にするためには、溪流の中心線を着色するだけでなく、溪流内を次元解析結果の数値で着色することによって、溪流の幅や蛇行状況などとの対比が容易になると考えられる。その結果をGISデータとして、作成することができれば、ArcGIS<sup>15)</sup>、QGIS<sup>16)</sup>、SIS<sup>17)</sup>などを用いて、地形図などと重ね合わせを行うことができ、容易にハザードマップなどの作成が可能になると考えられる。

## 1. 2 研究の目的と構成

以上の背景をもとに、土石流解析に関する課題を抽出すると以下ようになる。

- ・集中豪雨に伴って同時多発的に発生する土石流災害に対する効率的なハード対策およびソフト対策が必要となっている。
- ・効率的な対策を実施するためには、土石流シミュレーションを実施する必要があるが、次元解析を実施する上で入力データ「縦断形状」、「溪流幅」、「堆積土層厚」を的確かつ迅速に作成することが課題となっている。
- ・これまで次元解析に用いる地形データを詳細に得ることができなかったため、入力データの条件によって解析結果にどのような影響を与えるか議論されてこなかった。そのため、解析に用いるデータ作成条件が不明確である。
- ・次元解析結果の解釈がより容易にできる平面二次元上で表現する方法がなく、次元解析結果をもとにハザードマップを作成する方法がない。

上記課題を解決するために、本論文では、近年整備されつつある航空レーザー計測値を用いて、次元解析実施に必要な入力データのうち「縦断形状」および「溪流幅」を作成する手法を開発した。また、開発したプログラムを用いて次元解析を行い、次元解析結果の感度分析を実施し、妥当な解析データを作成する入力データの条件を整理した。また、次元解析結果をもとに一般市民にも容易に判断でき、ハザードマップ作成にも利用できるようにするため、『溪流内の幅を考慮して地図上で表示できる平面二次元表現手法』と『山間部における次元解析結果に対して、溪流の地形形状を正確に反映し、水面範囲および土砂堆積・浸食範囲を地形図上に表示できる平面二次元表現手法』を開発した。

本論文の各章は以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本論文の目的、各章の構成について概要を述べる。

第2章においては、効率的な土石流解析の実施を目的に、溪流のモデル化のうち航空レーザー計測値を用いて「縦横断形状」を抽出プログラムを開発した。また、京都市清水寺北部の溪流を対象とした開発プログラムの実行結果を示し、考えられる有効な入力データの種類を示した。さらに、流出解析を実施し各種入力条件の違いによって解析結果がどのように変化するか示し、望ましい抽出条件を提案した。

第3章においては、第2章において抽出した縦横断形状を基に、溪流のモデル化のうち、「溪流幅」を抽出プログラムを開発した。また、京都市清水寺北部の溪流を対象とした開発プログラムの実行結果を示し、考えられる有効な入力データの種類を示した。さらに、流出解析を実施し各種入力条件の違いによって解析結果がどのように変化するか示し、望ましい抽出条件を提案した。

第4章においては、一次元解析結果に対し、各解析断面の溪流幅を用いて平面二次元上で表現するプログラムを開発した。また、熊本県内を流下する河川の蛇行部と直線部が特徴的な白川を対象とした開発プログラムの実行結果を示し、本プログラムの有効性を示した。

第5章においては、第4章において示した表示方法をさらに発展・高度化し、一次元解析結果に対し、航空レーザー計測値を用いて地形形状を加味した平面二次元上で表現するプログラムを開発した。また、京都市清水寺北部の溪流を対象とした開発プログラムの実行結果を示し、本プログラムの有効性を示した。

第6章においては本研究で得られた研究成果の要約と今後の研究課題について記述した。

## 参考資料

- 1) 国土交通省：平成30年7月豪雨による土砂災害の発生状況(9月25日時点),  
[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/H30\\_07gouu\\_180925.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/H30_07gouu_180925.pdf), 2018
- 2) 国土交通省：平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の概要,  
[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29\\_kyushu\\_gouu/gaiyou.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_kyushu_gouu/gaiyou.pdf), 2017
- 3) 国土交通省：台風第10号による土砂災害発生状況,  
[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/161003%20900\\_taifuu10gouniyorudosyasai\\_gai.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/161003%20900_taifuu10gouniyorudosyasai_gai.pdf), 2016
- 4) 国土交通省：平成27年の土砂災害,

- [http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h27dosha/H27\\_dosyasaigai.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h27dosha/H27_dosyasaigai.pdf), 2015
- 5) 国土交通省：平成26年の土砂災害,  
[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h26dosha/150331\\_H26saigai.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h26dosha/150331_H26saigai.pdf), 2014
  - 6) 中川一・高橋保・澤田豊明・里深好文：計画土石流の設定と避難計画，京都大学防災研究所年報，第39号B-2，p.347-371，1996
  - 7) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，p.485-490，1988
  - 8) 和田孝志・里深好文・水山高久：土石流計算における1次元・2次元シミュレーションモデルの結合，砂防学会誌，Vol.61，No.2，p.36-40，2008
  - 9) 中谷加奈・里深好文・水山高久：GUIを実装した土石流一次元シミュレータ開発，砂防学会誌，Vol.61，No.2，p.41-46，2008
  - 10) 松本直樹・和田孝志・中谷加奈・里深好文・水山高久：粒径変化を考慮した土石流氾濫予測手法に関する研究，砂防学会誌，Vol.65，No.3，p.3-11，2012
  - 11) 国土地理院：基盤地図情報（数値標高5メッシュ）
  - 12) CommonMP 開発・運営コンソーシアム：CommonMP，<http://framework.nilim.go.jp/>
  - 13) iRIC Project：河川シミュレーションソフト iRIC，<http://i-ric.org/ja/>
  - 14) 堀内成朗・岩波英二・中谷加奈・里深好文・水山高久：LPデータを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発：砂防学会誌，Vol.64，No.6，p.25-31，2012
  - 15) Esri：ArcGIS Desktop，<https://www.esri.com/products/arcgis-desktop/>
  - 16) QGIS プロジェクト：QGIS，<http://qgis.org/ja/site/>
  - 17) Informatix：SIS，<http://www.informatix.co.jp/sis/>

## 第2章 航空レーザー計測値を用いた地形形状抽出手法に関する研究

### 2. 1 概要

近年の集中豪雨に伴って土石流が頻発している状況にあり、土石流災害を軽減するために、各溪流において砂防計画が検討され、現在ハード対策・ソフト対策が順次進められている。しかし、対象となる溪流が膨大な数にのぼるため、現状では整備が十分に追いついていない状況にあり、効率的な砂防計画の立案が望まれている。砂防計画では、溪流の規模や保全対象の重要度など外形的な指標によることが一般的である。近年、より効率的に施設配置を検討するために、土石流数値シミュレーション(以下、土石流解析と略称する)を実施することにより、効果的な砂防計画の検討手法が提案されている。土石流解析の数値計算手法は、中川ら<sup>1)</sup>や江頭ら<sup>2)</sup>により体系化され、それに基づく土石流解析が和田ら<sup>3)</sup>、中谷ら<sup>4)</sup>、松本ら<sup>5)</sup>などによって開発されている。この解析には、一次元解析部分では「溪流の縦断形状」、「溪流の幅」、「溪流の堆積土層厚」を手動で入力する必要があり、これらのデータ作成には現地調査に加え、地形量の数値化や整理が必要であり複数の溪流で土石流解析を実施する上で障害となっている。

一方、近年の情報処理技術の向上に伴い、航空レーザー測量により詳細な山間部の地形情報を得ることができ、基盤地図情報(数値標高5メッシュ)<sup>6)</sup>として提供され、比較的容易にデータを入手することができる。これらの情報を用いることによって、土石流解析に必要なデータを迅速かつ客観的に作成する手法を開発することができれば、容易に多数の溪流に対して土石流解析を実施できると考えられる。

上記状況であることから、効率的に土石流解析を実施可能にするため、入力データのうち、「溪流の縦断形状」の情報を航空レーザー測量結果から自動的に抽出し出力するプログラムを開発した。また、開発したプログラムを用い、これまで地形形状を機械的に抽出する方法がなかったため、議論されてこなかった地形情報の細かさが解析結果にどの程度影響を与えるかについて評価した。

## 2. 2 縦横断形状抽出プログラムの開発

近年容易に取得が可能となった航空レーザー計測結果を用いて、一次元解析を実施する縦横断形状を抽出するプログラムを開発した。なお、横断形状の抽出は、第3章に示す溪流幅を抽出する際にも利用する。

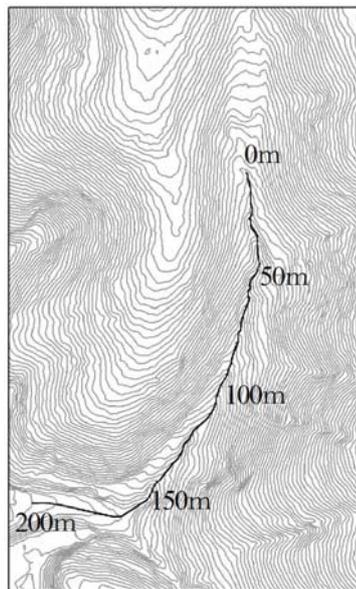
### 2.2.1 入力データ

縦横断形状抽出プログラム入力データは、以下の3つを用意する。

- 1) 溪流位置情報：平面直角座標の X, Y (図-2.1)
- 2) 標高データ：平面直角座標系で整理された格子状の標高データ
- 3) 断面作成諸元：縦断形状抽出間隔, 横断面作成幅, 横断形状抽出間隔

(表-2.1 参照)

なお、断面作成諸元のうち縦断形状抽出間隔は計算断面間隔(縦断間隔), 横断面作成幅は横断面を作成する幅(第3章において示す溪流幅抽出プログラムに用いる), 横断形状抽出間隔は横断面を作成する間隔を示している。



(a) 溪流の位置

id	X座標(m)	Y座標(m)
1	-19505.4	-111267.1
2	-19504.3	-111272.9
3	-19504.0	-111278.9
4	-19504.4	-111281.2
5	-19505.0	-111282.3
6	-19504.4	-111284.6
7	-19501.4	-111291.2
8	-19500.8	-111301.3
9	-19505.4	-111310.1
10	-19506.0	-111317.9

(b) 溪流位置情報(一部を表示)

図-2.1 溪流位置情報の例

表-2.1 断面作成諸元

項目	値	単位
縦断形状抽出間隔	5	m
横断面作成幅	200	m
横断形状抽出間隔	1	m

### 2.2.2 プログラムの処理内容

本研究で開発したプログラムのデータ処理内容を以下に示す。また、データ処理フローを図-2.2に示し、処理内容のイメージを図-2.3に示す。

- ① 入力データの読み取り(図-2.3(a)).
- ② 縦断形状抽出位置(図-2.3(b)), 横断面作成範囲(図-2.3(c))の設定.
- ③ 横断形状抽出位置の設定(図-2.3(d)).
- ④ ②および③の抽出地点の高さを標高データより線形補間(図-2.3(e)).
- ⑤ ④において計算された標高データに対し, 上流端を基点として出力.

### 2.2.3 出力データ

本プログラムより出力されるファイルは以下の2つからなる。

- 1) 縦断形状：設定間隔の距離と標高データ。表-2.1に示す入力条件の場合，5m 間隔のデータが出力される。
- 2) 横断形状：設定間隔の横断形状。表-2.1に示す入力条件の場合，幅 200m に対し 1m 毎の標高データが出力される。

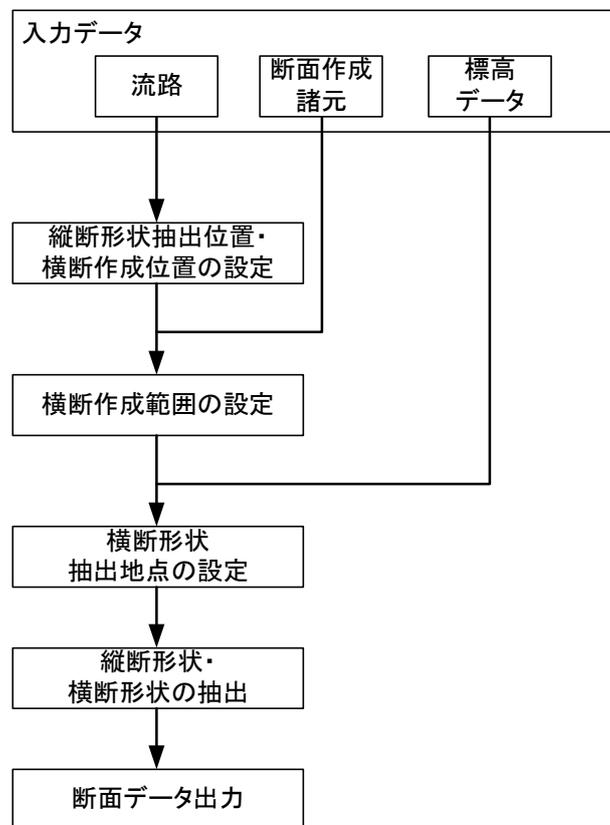


図-2.2 縦横断形状抽出フロー

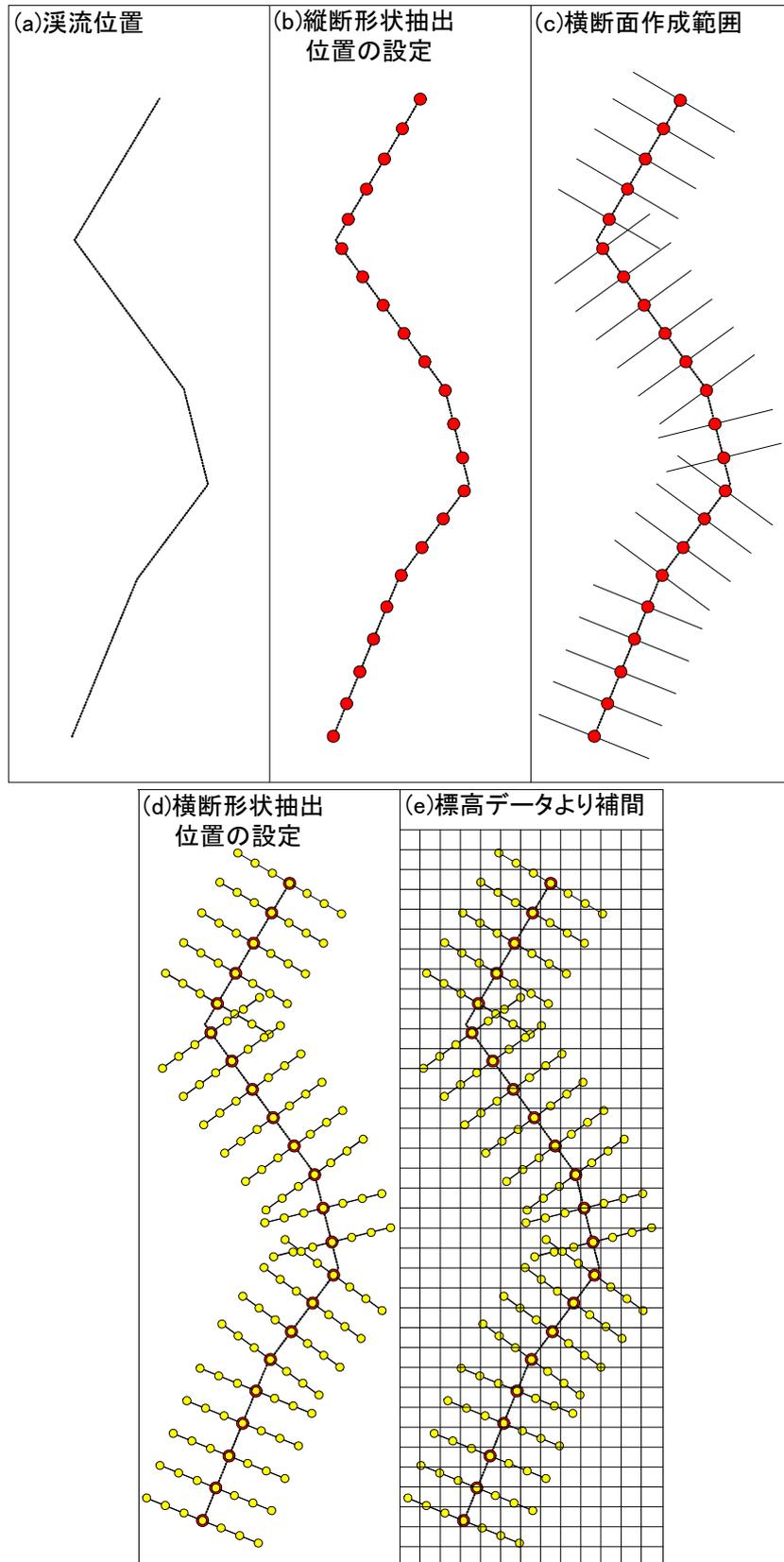


図-2.3 縦横断形状抽出のイメージ

## 2. 3 プログラムの実行例と設定条件の違いによる影響評価

### 2.3.1 対象地の概要

対象地は溪流内に既存の砂防ダムが無く、詳細な LP データが存在する京都府京都市東山区清水にある清水寺周辺とした(図-2.4)。対象溪流の流域面積は約 3ha, 平均流路勾配は約 10°であり、流路長は約 200m である。なお、図中に示した拡大範囲は、後に示す図の位置を示している。

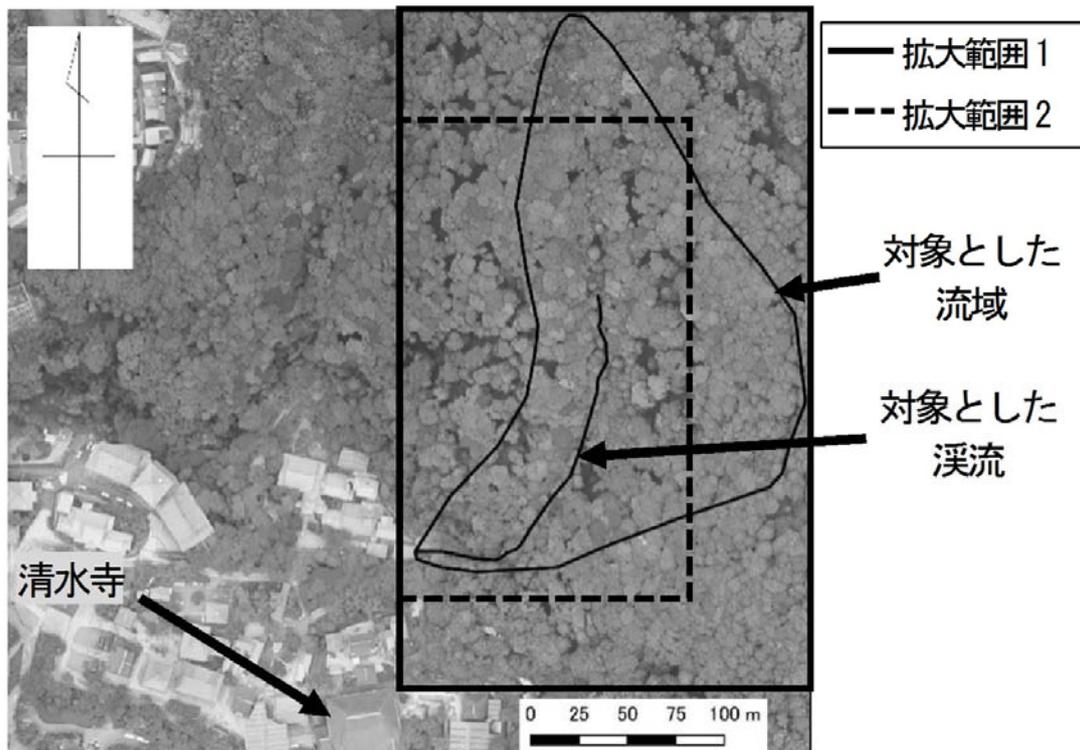


図-2. 4 対象地域と解析データ作成範囲

### 2.3.2 入力データ

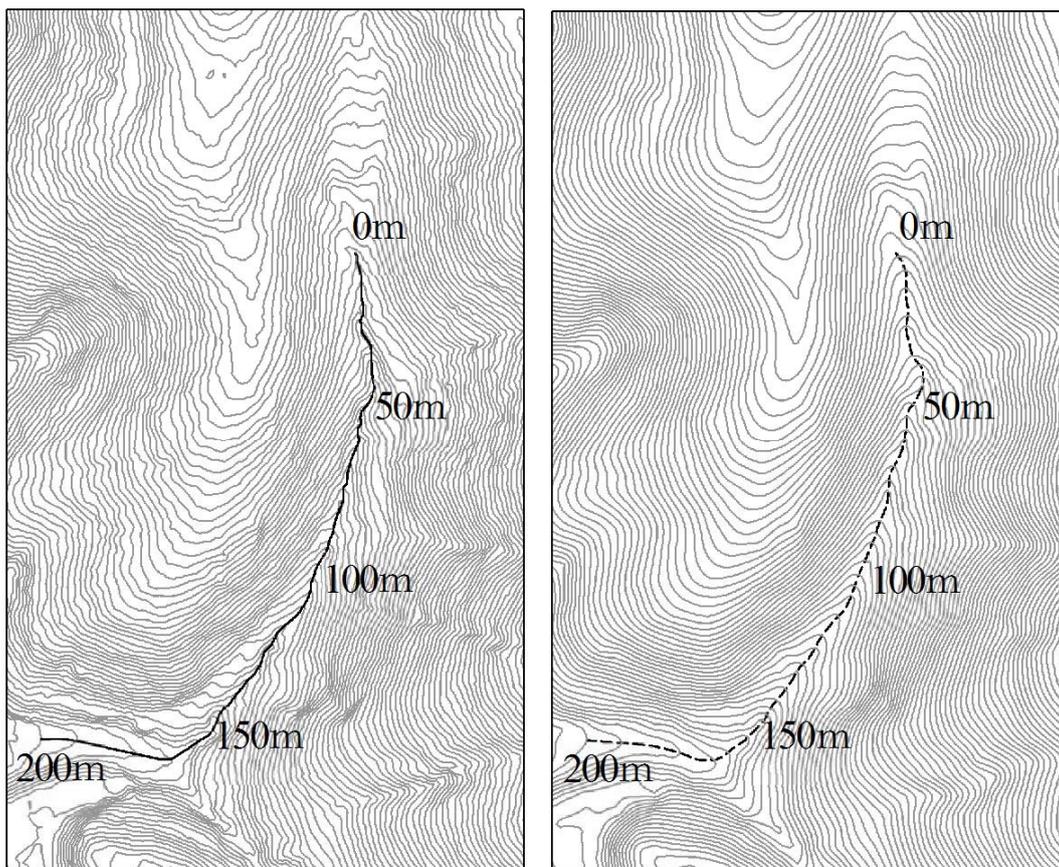
プログラム実行に、以下のデータを使用した。

- ①標高データ：5 ケース (1m, 2m, 5m, 10m, 25m グリッド間隔のデータ, 0.5m グリッドの LP データをもとに、データを間引いて作成した (中日本航空株式会社提供) )。
- ②溪流位置情報：2 ケース (①の標高データから 1m グリッドと 5m グリッドのデータをもとに等高線を作成し、等高線から判読により溪流の位置情報を抽出した。図-2.5(a)に対象とした溪流を示し、図-2.5(b)に各等高線により判読した溪流

を示す。また、表-2.2に抽出した溪流位置の情報の一部を示す。)

③縦断形状抽出間隔：5 ケース(1m, 2m, 5m, 10m, 25m)

なお、溪流位置情報はLPデータなどを用いた場合、落水線などによって自動で抽出することは可能である。しかし、自動抽出を行った場合、大局的な流下方向と横断方向が局所的に同じ向きになる箇所が存在する可能性がある。同じ向きになった箇所において横断面を作成した場合、溪流の形状をなさないことが想定され、溪流幅抽出に適さない断面が作成される可能性が残る。そのため、本プログラムでは自動抽出は行わず溪流判読により設定した。また、LPデータは5mグリッドあるいは1mグリッド程度のデータとして提供されることが多いことから、溪流位置情報は5mと1mグリッドのLPデータをもとに発生させた等高線から作成した。以後、溪流位置情報を5mグリッドの等高線から発生させたデータを「溪流位置5mグリッド」、1mグリッドの等高線から発生させたデータを「溪流位置1mグリッド」と呼ぶ。



(a) 1m グリッドより作成

(b) 5m グリッドより作成

図-2.5 解析に用いたデータの溪流位置

表-2. 2 溪流の位置情報(一部を表示)

id	X座標(m)	Y座標(m)
1	-19505.4	-111267.1
2	-19504.3	-111272.9
3	-19504.0	-111278.9
4	-19504.4	-111281.2
5	-19505.0	-111282.3
6	-19504.4	-111284.6
7	-19501.4	-111291.2
8	-19500.8	-111301.3
9	-19505.4	-111310.1
10	-19506.0	-111317.9

### 2.3.3 プログラム実行結果

縦横断形状抽出プログラムの出力は、次の組み合わせで実行した。

溪流抽出データ：2 ケース（標高グリッド間隔 1m と 5m より発生させた等高線判読による溪流位置）

縦断形状抽出間隔：1 ケース（1m）

標高データのグリッド間隔：5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）

実行結果の特徴を以下に示す。

#### (1) 標高データのグリッド間隔の違いによる地形形状の変化

縦断作成間隔を 1m に固定し、標高データのグリッド間隔を 5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）変更した場合の地形形状抽出結果を表-2.3 に示す。

縦断形状は、表-2.3 に示すようにグリッド間隔が 1m, 2m, 5m の標高データを用いた場合、概ね同様の形状で上流から下流に向かって低くなる傾向を示す。一方、グリッド間隔が 10m と 25m の標高データを用いた場合、上流よりも下流が高くなる箇所がみられる。縦断形状 100m 地点の横断形状では、標高データ 1m グリッドで作成したデータを基準とすると、2m グリッド、5m グリッド、10m グリッドまでは同様の形状を示す。しかし、25m グリッド間隔のデータでは、溪床の形状が平滑化され凹部が不明確になり、

最低標高が他のグリッドより高くなる。図-2.6に各グリッドで作成した等高線図を示すが、1m~5mグリッド間隔までの溪流では溪流の最深部を通過しているのに対し、10mと25mのグリッド間隔では、抽出した溪流の位置が最深部を通らない。縦断形状において逆勾配（下流標高>上流標高）となっている箇所は、部分的にこのような等高線との関係となり、縦断形状100m地点の横断形状になっていると考えられる。

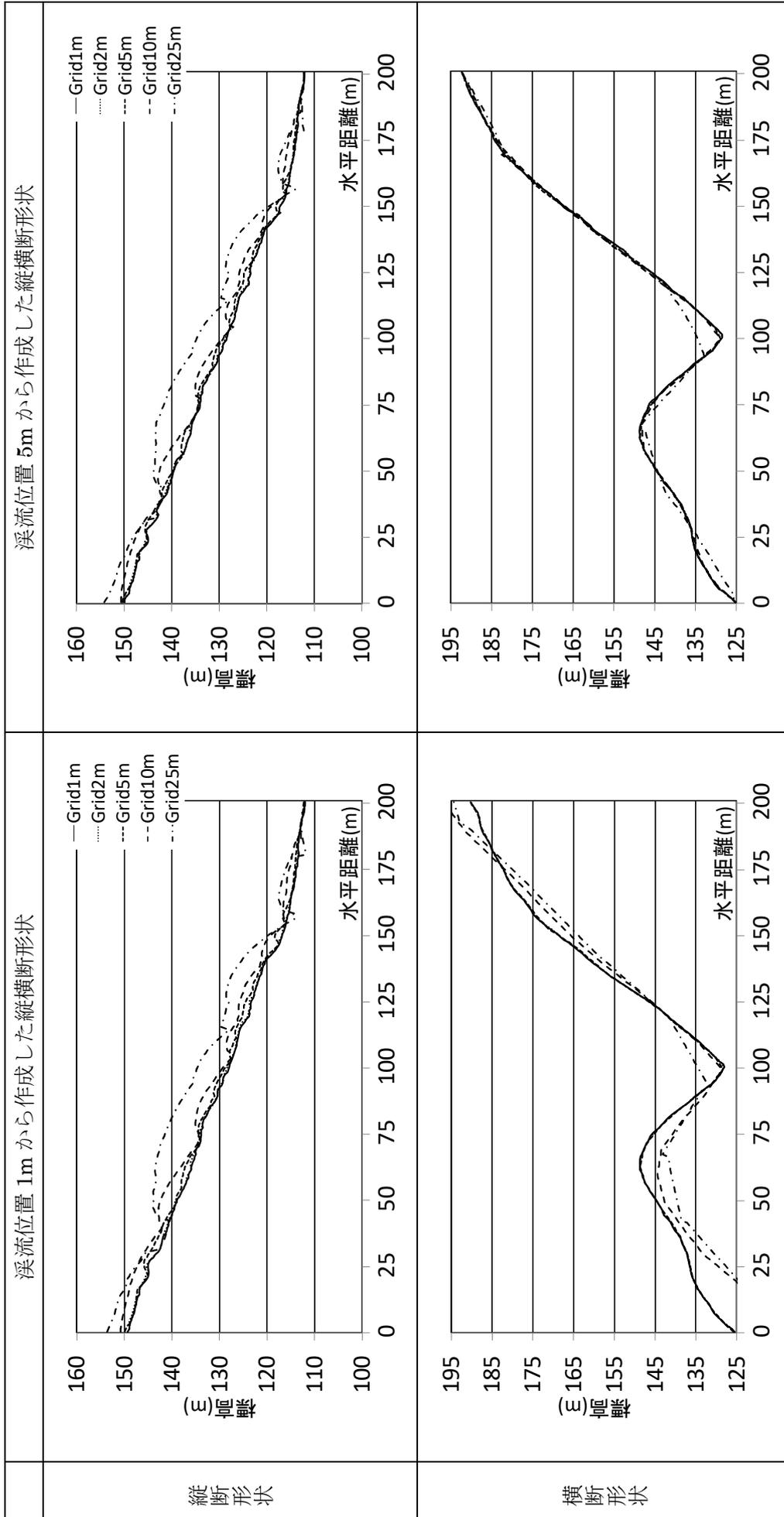
### (2) 溪流位置情報の違いによる地形形状の変化

縦断形状は、表-2.3に示すように、概ね同様の形状を示している。一方、横断形状は、溪流部である中心付近では同様の形状を示すが、右岸において異なる形状を示している。これは、図-2.6に示すように、「縦断形状100m地点付近における横断形状の抽出方向が異なること」、「溪流位置1mグリッドの右岸端部付近において各グリッドの等高線間隔が異なること」によって、横断形状が異なったものと考えられる。

### (3) 縦横断形状抽出に関わる提案値

(1)および(2)の結果から、標高グリッド間隔1mと5mより発生させた等高線判読による溪流位置情報を用いる場合、「5m以下の間隔の標高データ」を用いることが望ましいと考えられる。

表-2.3 プログラムを用いて抽出した縦横断面形状



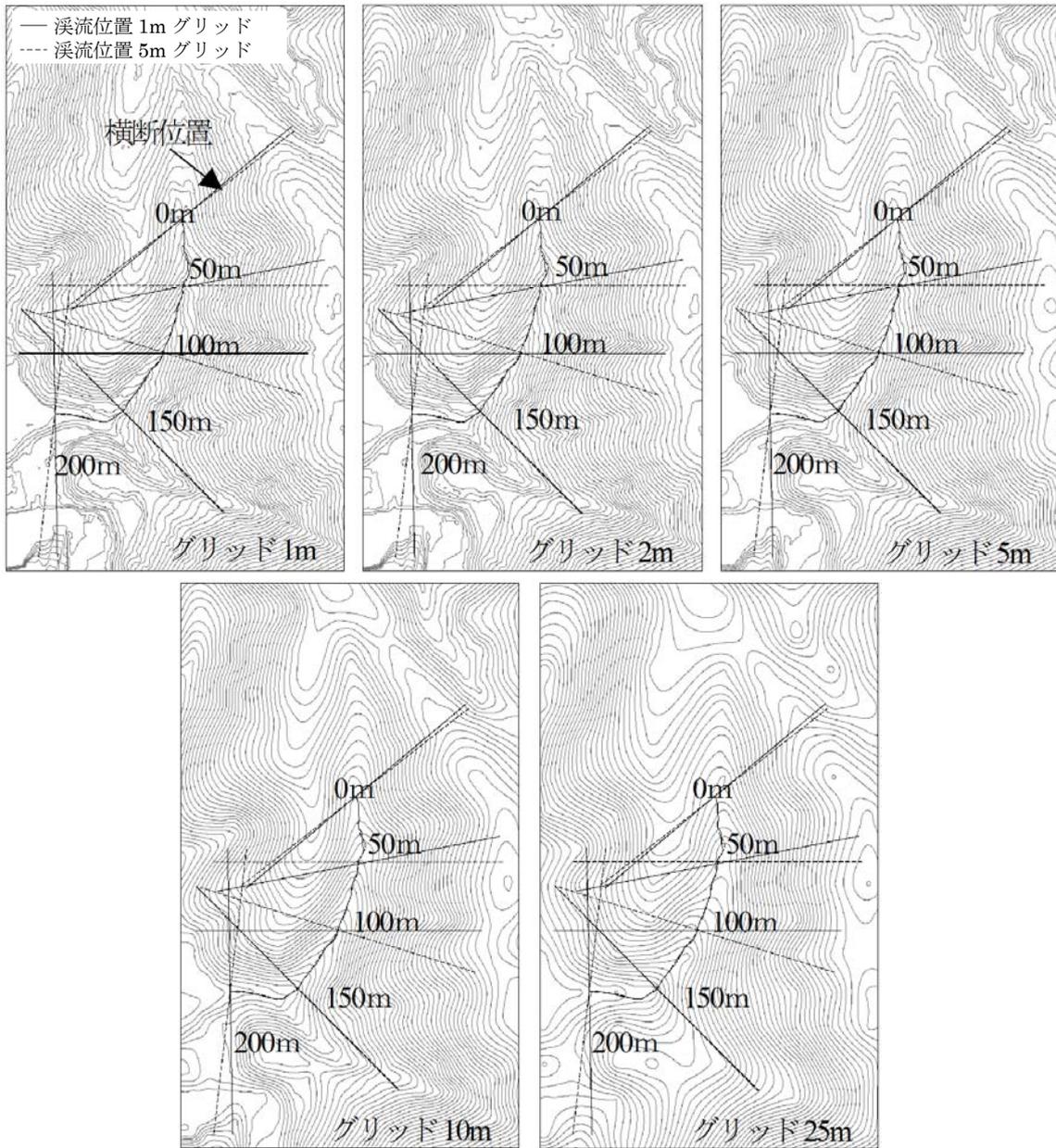


図-2. 6 溪流位置と各グリッド間隔で作成した等高線  
(等高線 2m 間隔, 拡大範囲 2 表示)

## 2. 4 土砂流出解析の実行と抽出条件の違いによる影響

### 2.4.1 解析条件

縦横断形状抽出プログラムによって、条件を変更し抽出した地形形状が土石流の流出解析結果に与える影響を分析した。なお、土石流の流出解析には、堆積層厚 1m、土砂濃度を 0.3、溪流幅を 5m と固定し、kanako<sup>4)</sup>を用いた。解析に用いたパラメータを表 2.4 に示す。また、解析に用いたハイドログラフを図 2.7 に示す。

表-2. 4 解析パラメータ

項目	値	単位
計算時間	1800	s
計算時間間隔	0.01	s
砂礫の密度 $\sigma$	2650	kg/m <sup>3</sup>
水の密度 $\sigma$	1000	kg/m <sup>3</sup>
重力加速度	9.8	m/s <sup>2</sup>
水深の最小値	0.01	m
河床の容積濃度	0.65	
マンングの粗度係数	0.03	
侵食速度係数	0.0007	
堆積速度係数	0.05	
堆積速度における慣性力を考慮した時の係数	0.9	
平均粒径	0.45	m
砂の内部摩擦角	35	°

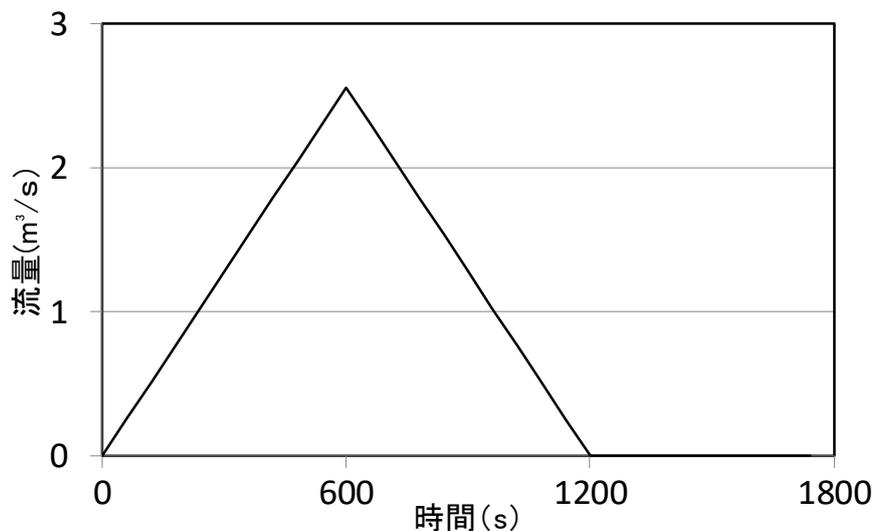


図-2. 7 ハイドログラフ<sup>7)</sup>

## 2.4.2 解析データの組み合わせ

縦横断形状抽出手法の違いによる解析結果への影響を比べるために、次の組み合わせで解析を実施した。組み合わせによる解析結果の特徴を以下に示す。

溪流抽出データ：2 ケース（標高グリッド間隔 1m もしくは 5m より発生させた等高線から判読）

縦断形状抽出間隔：5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）

横断形状抽出間隔：1 ケース（1m）

標高データのグリッド間隔：5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）

溪流幅：1 ケース（5m）

なお、溪流幅については、現地調査<sup>7)</sup>により得られた数値を利用した。

## 2.4.3 縦横断形状の変更による解析結果への影響

各ケースで実施した下端における最大流量を図-2.8に示す。また、横断形状抽出間隔を 1m に固定、縦断形状抽出間隔を 5 ケース(1m, 2m, 5m, 10m, 25m)変更、標高データを 3 ケース(1m, 2m, 5m)変更した場合の流出解析結果を表-2.5 および表-2.6 に示す。

### (1) 標高データのグリッド間隔の違いによる解析結果への影響

下端の最大流量は標高データのグリッド間隔が 1m, 2m, 5m の場合、縦断形状抽出間隔が 1m, 2m, 5m の場合とほぼ同様の値となる。一方、標高データのグリッド間隔が 10m 以上の場合、下端の最大流量がばらつく結果となっている(図-2.8)。

### (2) 縦断形状抽出間隔による違いによる解析結果への影響

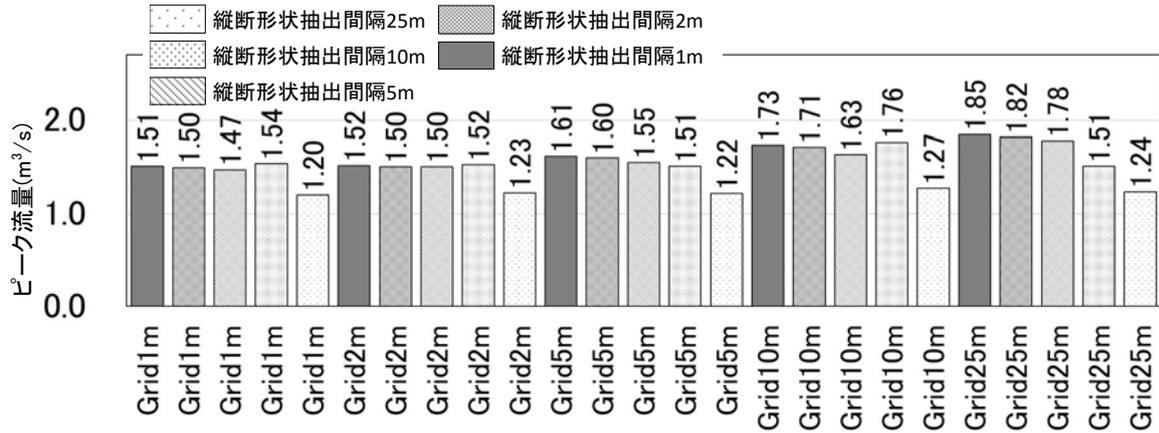
下端の最大流量は、1m グリッド、2m グリッド、5m グリッドのいずれの結果でも縦断間隔を 25m で設定した場合に、下端の最大流量が小さくなっており、25m 以外の設定ケースでは概ね同様の流量となっている。一方、堆積土層厚と位置の関係図では、0～175m 地点までは同様の傾向を示すが、縦断形状 25m のみ 200m 地点において堆積傾向が大きい値となっている。このことから、縦断形状 25m の下端の最大流量が減少した理由は、堆積・侵食の影響（下流側の堆積傾向による縦断形状の緩勾配化の影響）を大きく受けた可能性が考えられる。

### (3) 溪流位置抽出情報の違いによる解析結果への影響

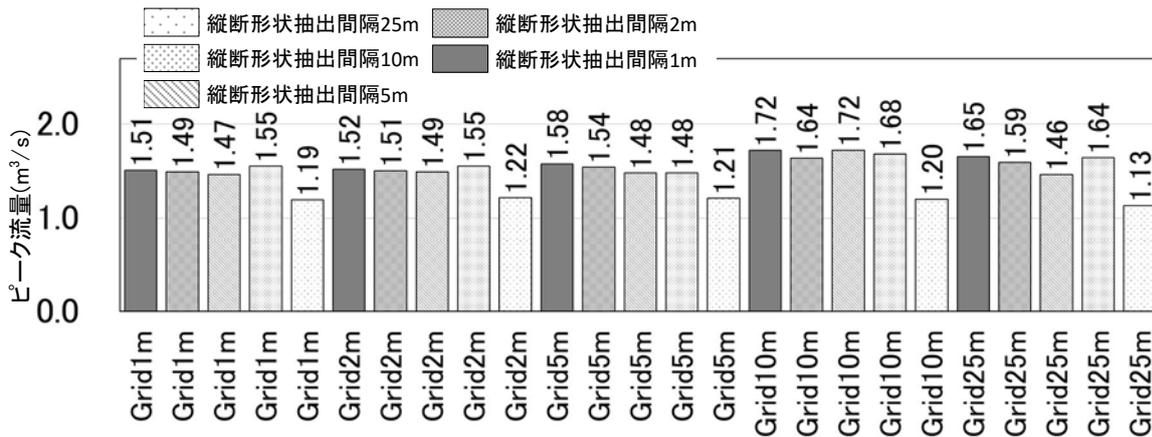
下流端の最大流量は、最大値に若干の違いは認められるものの、解析結果はほぼ同様の傾向となっている。

(4) 縦横断形状抽出方法に関わる提案値

(1)および(2)の結果から、標高グリッド間隔 1m と 5m より発生させた等高線判読による溪流位置情報を用いる場合、「5m 以下の間隔の標高データ」かつ「縦断形状抽出間隔を 10m 以下」を用いることが望ましいと考えられる。



(a) 1m 間隔の等高線図から抽出した溪流の場合



(b) 5m 間隔の等高線図から抽出した溪流の場合

図-2. 8 解析条件の違いによる下流端の最大流量の変化

表-2. 5 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(1m等高線による溪流抽出)

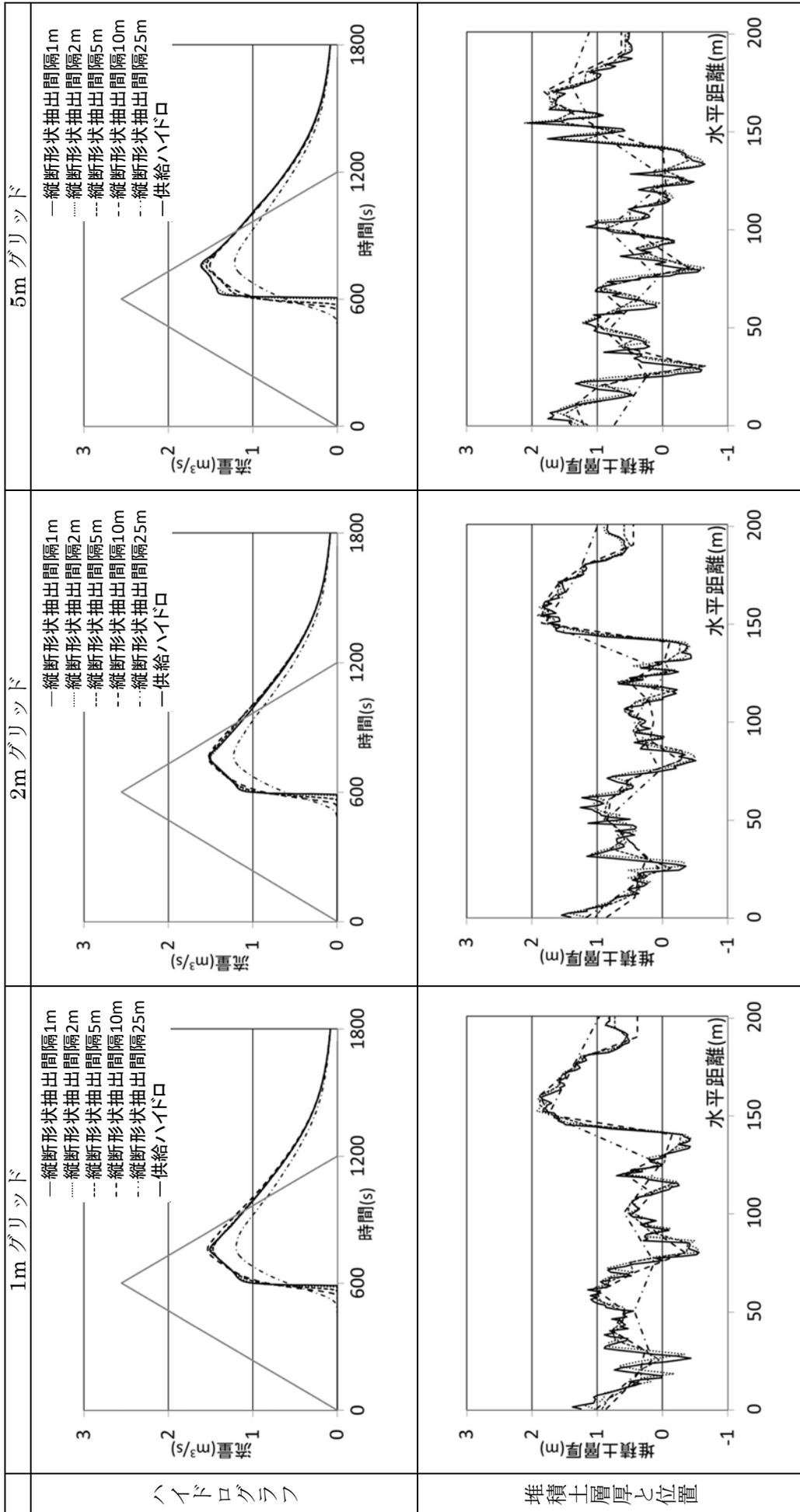
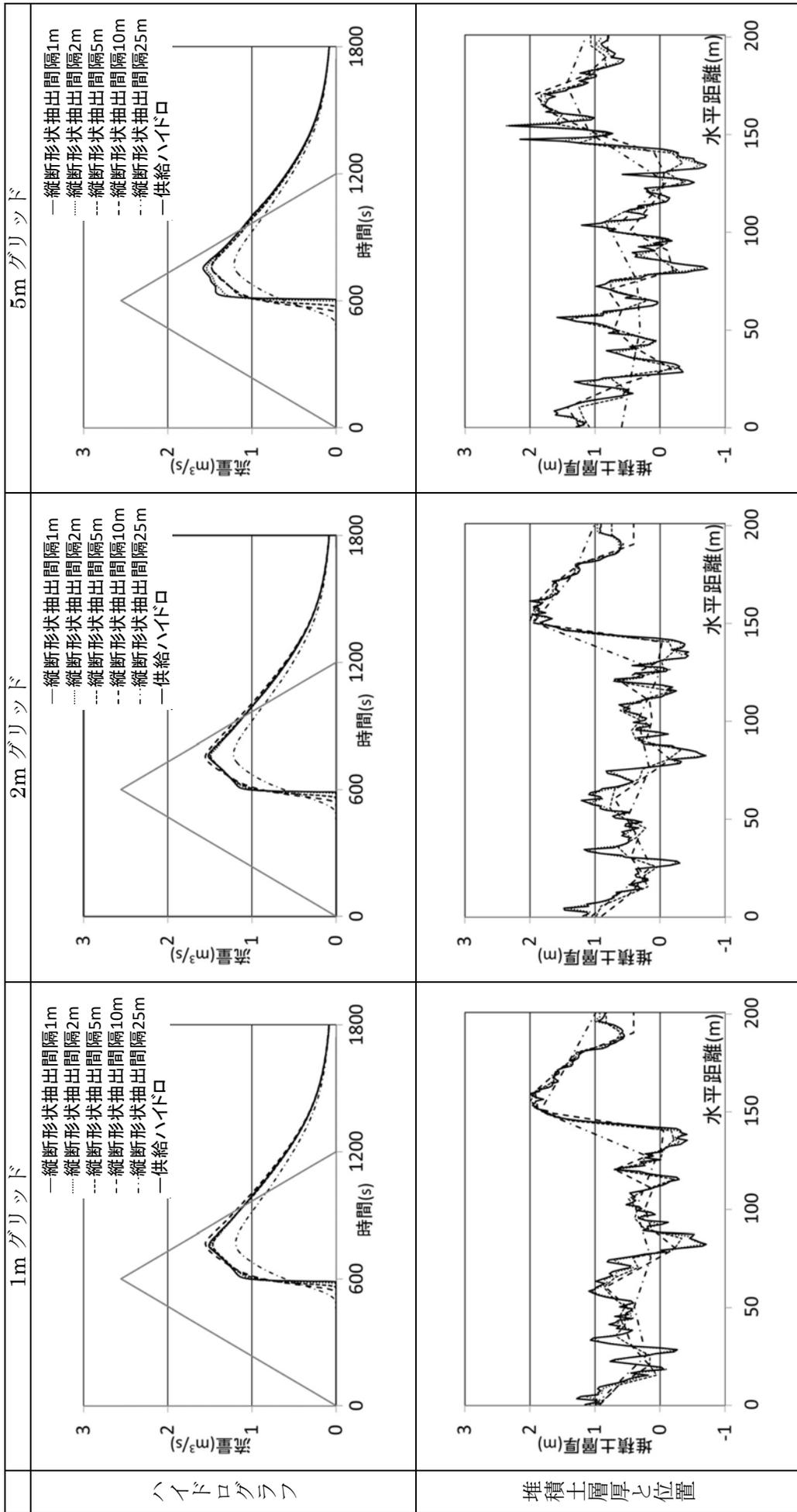


表-2. 6 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化 (5m 等高線による溪流抽出)



## 2.5 まとめ

本章では、地形データをもとに土石流解析の入力データとして必要となる「溪流の縦断形状」を自動で抽出するプログラムを開発した。また、開発したプログラムを用いて清水寺周辺の地形データをもとに実行例を示し、「溪流の縦断形状」の抽出方法の変更が解析にどのような影響を与えるかを評価した。

その結果、以下のことを示した。

- ① 縦断形状抽出プログラムを用いて縦断形状を抽出する場合
  - ・地形データは、5m 以下の間隔の標高データを用いる必要があること
- ② 縦断形状の抽出間隔が解析結果に及ぼす影響
  - ・地形データは、5m 以下の間隔の標高データを用いれば良いこと
  - ・縦断形状抽出間隔は、10m 以下に設定すれば良いこと

以上のことから、以下の条件で縦断形状を抽出すれば概ね妥当であると考えられる。

- ・地形データは、5m 以下の間隔の標高データを用いる必要があること
- ・縦断形状抽出間隔は、10m 以下に設定すれば良いこと

## 参考資料

- 1) 中川一・高橋保・澤田豊明・里深好文：計画土石流の設定と避難計画，京都大学防災研究所年報，第39号B-2，p.347-371，1996
- 2) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，p.485-490，1988
- 3) 和田孝志・里深好文・水山高久：土石流計算における1次元・2次元シミュレーションモデルの結合，砂防学会誌，Vol.61，No.2，p.36-40，2008
- 4) 中谷加奈・里深好文・水山高久：GUIを実装した土石流一次元シミュレータ開発，砂防学会誌，Vol.61，No.2，p.41-46，2008
- 5) 松本直樹・和田孝志・中谷加奈・里深好文・水山高久：粒径変化を考慮した土石流氾濫予測手法に関する研究，砂防学会誌，Vol.65，No.3，p.3-11，2012
- 6) 国土地理院：基盤地図情報（数値標高5メッシュ）
- 7) 縄手洋介・梶山敦司・藤本将光・里深好文：清水寺周辺溪流における土石流氾濫解析，歴史都市防災論文集，Vol.10，p.59-66，2016

## 第3章 航空レーザー計測値を用いた溪流幅抽出手法に関する研究

### 3.1 概要

第2章では、一次元解析の実施に必要な「縦断形状」を航空レーザー測量によって得られる地形情報をもとに抽出手法および抽出間隔が解析結果に及ぼす影響を示した。本章では、さらに効率的に土石流解析を実施可能にするため、入力データのうち、「溪流幅」の情報を航空レーザー測量結果から自動的に抽出し出力するプログラムを開発した。また、開発したプログラムを用い、「縦断形状」と「溪流幅」の抽出条件が解析結果にどの程度影響を与えるかについて評価した。

### 3.2 溪流幅抽出プログラムの開発

近年容易に取得が可能となった航空レーザー計測結果を用いて、一次元解析を実施に用いる溪流幅を抽出するプログラムを開発した。なお、縦断形状および横断形状の抽出については、第2章に示した手法を用いた。

#### 3.2.1 入力データ

入力データは、以下の3つを用意する。

- 1) 縦断形状：第2章に示したプログラムにより出力されたデータ
- 2) 横断形状：第2章に示したプログラムにより出力されたデータ
- 3) 溪流幅抽出パラメータ：粗度係数，溪流幅設定流量，設定溪流幅の上限（
- 4) 表-3.1 参照）

表-3.1 溪流幅抽出パラメータ

項目	値	単位
粗度係数	0.030	
溪流幅設定流量	2.556	m <sup>3</sup> /s
設定溪流幅の上限(m)	50	m

### 3.2.2 プログラムの処理内容

本研究で開発したプログラムのデータ処理内容を以下に示す。また、データ処理フローを図-3.1に示す。

- ① 入力データの読み取り
- ② 横断形状をもとに次の作業を実施
  - a. 水位を設定(初期値 0.01m の水位を設定)
  - b. 設定水位の矩形断面時の溪流幅を横断形状から抽出
  - c. 溪流幅と水位から流水の断面積と潤辺を算出
- ③ 縦断形状をもとに勾配を抽出
- ④ マニングの公式により②において算出した「流水の断面積」, 「潤辺」, ③において抽出した「勾配」, 溪流幅抽出パラメータの「粗度係数」より, 流速を算出
- ⑤ ④において算出した「流速」と②で算出した「流水の断面積」より流量を算出
- ⑥ において算出した「流量」と溪流幅抽出パラメータの「溪流幅設定流量」を比較, 同程度の場合は設定水位時の溪流幅を出力する。異なる場合は, 水位を変更(設定水位に 0.01m を足す)し再度計算する。

なお, 溪流幅と断面積(流積)は, 図-3.2 に示す矩形断面で近似した。また, 谷出口などでは溪流の形状をなさない断面となり, この断面をもとに溪流幅を算出した場合, 非現実的な溪流幅となる可能性が想定される。そのため, 設定溪流幅に上限値を設けられるようにした。

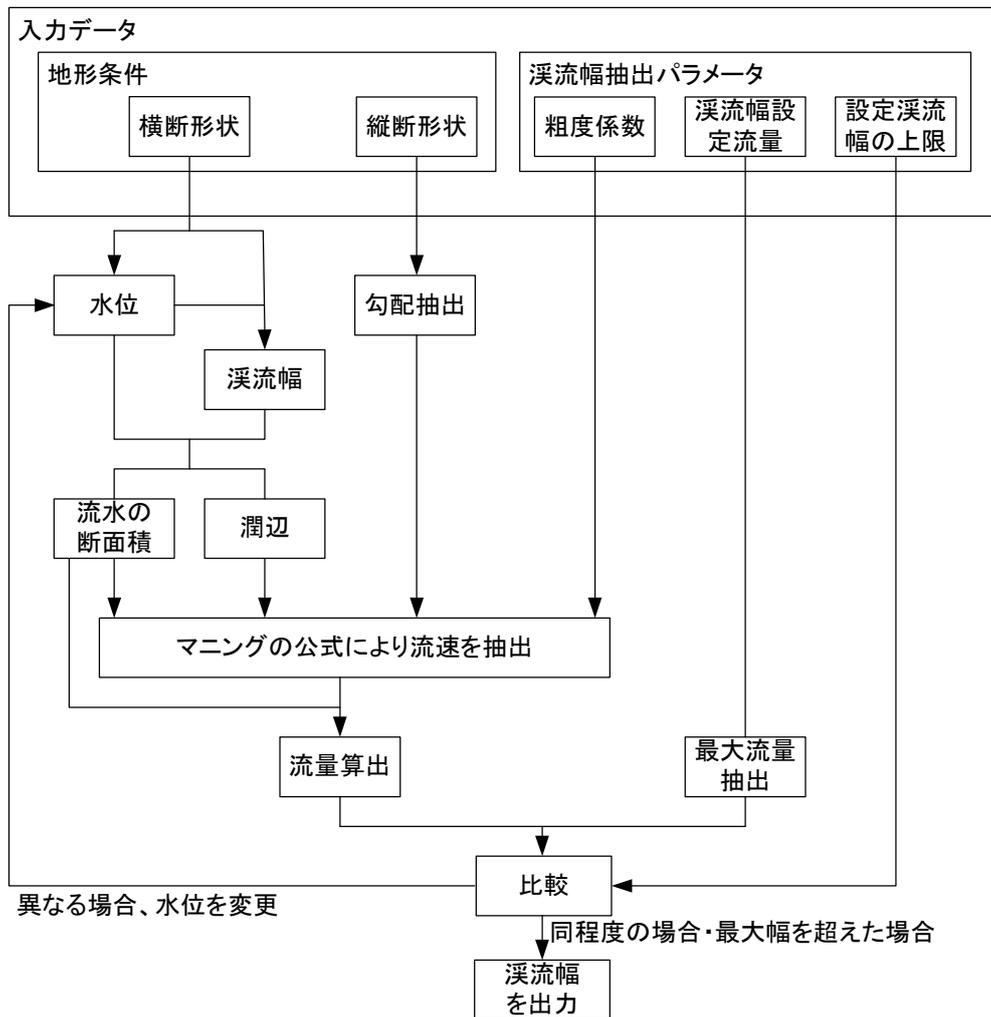


図-3. 1 溪流幅抽出フロー

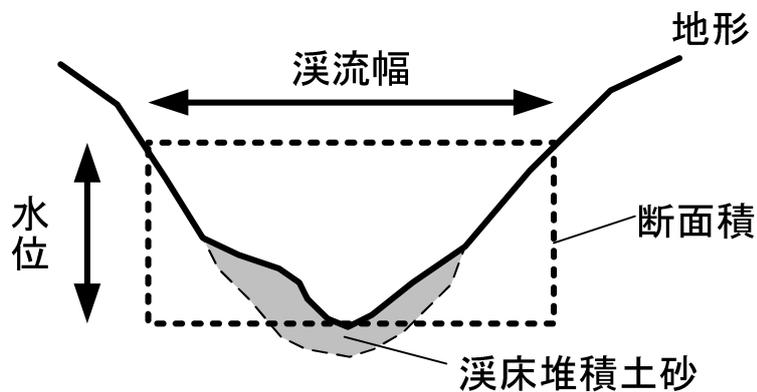


図-3. 2 溪流幅と断面積の模式図

### 3.2.3 出力データ

本プログラムより出力されるファイルは、「設定間隔毎の溪流幅」である。

## 3.3 プログラムの実行と抽出条件の違いによる影響

### 3.3.1 対象地の概要

対象地は第2章と同様に溪流内に既存の砂防ダムが無く、詳細なLPデータが存在する京都府京都市東山区清水にある清水寺周辺とした(図-3.3)。対象溪流の流域面積は約3ha, 平均流路勾配は約10°であり, 流路長は約200mである。なお, 図中に示した拡大範囲は, 後に示す図の位置を示している。

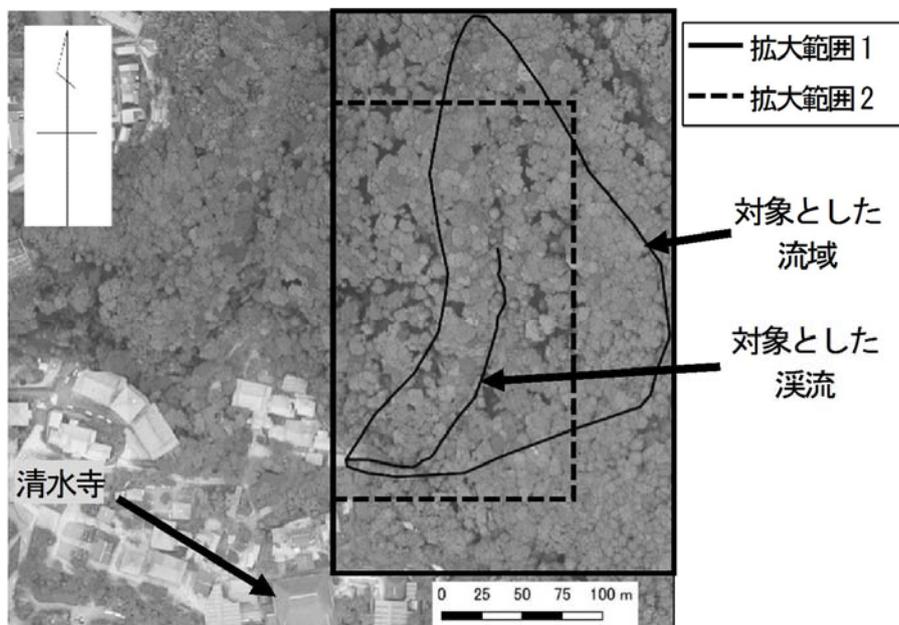


図-3.3 対象地域と解析データ作成範囲

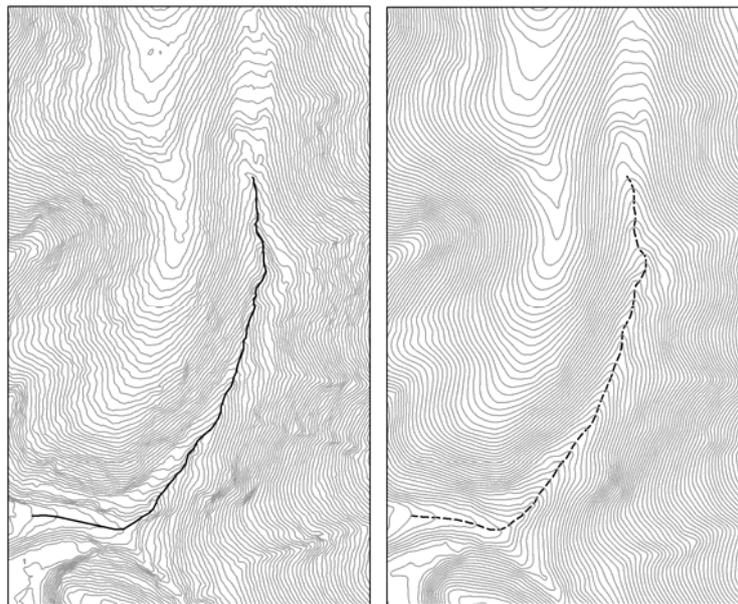
### 3.3.2 入力データ

プログラム実行に, 以下のデータを使用した。

- ①標高データ：5 ケース (1m, 2m, 5m, 10m, 25m グリッド間隔のデータ, 0.5m グリッドのLPデータをもとに, データを間引き作成した)。
- ②溪流位置情報：2 ケース (①の標高データから 1m グリッドと 5m グリッドのデータをもとに等高線を作成し, 等高線から判読により溪流の位置情報を抽出した。図-3.3 に対象とした溪流を示し, 図-3.4 に各等高線により判読した溪流を示す。また, 表-3.2 に抽出した溪流位置の情報の一部を示す。)
- ③縦断形状抽出間隔：1 ケース(5m)

④ハイドログラフ(最大流量  $2.556\text{m}^3/\text{s}$ ) : 1 ケース(図-3.3 に示す流域を対象とした図-3.5 に示すハイドログラフを用いた。)

なお、溪流位置情報は第2章と同様に自動抽出は行わず溪流判読により設定した。また、LP データは5m グリッドあるいは1m グリッド程度のデータとして提供されることが多いことから、溪流位置情報は5m と1m グリッドから等高線を発生させた。以後、溪流位置情報を5m グリッドの等高線から発生させたデータを「溪流位置5m グリッド」、1m グリッドの等高線から発生させたデータを「溪流位置1m グリッド」と呼ぶ。



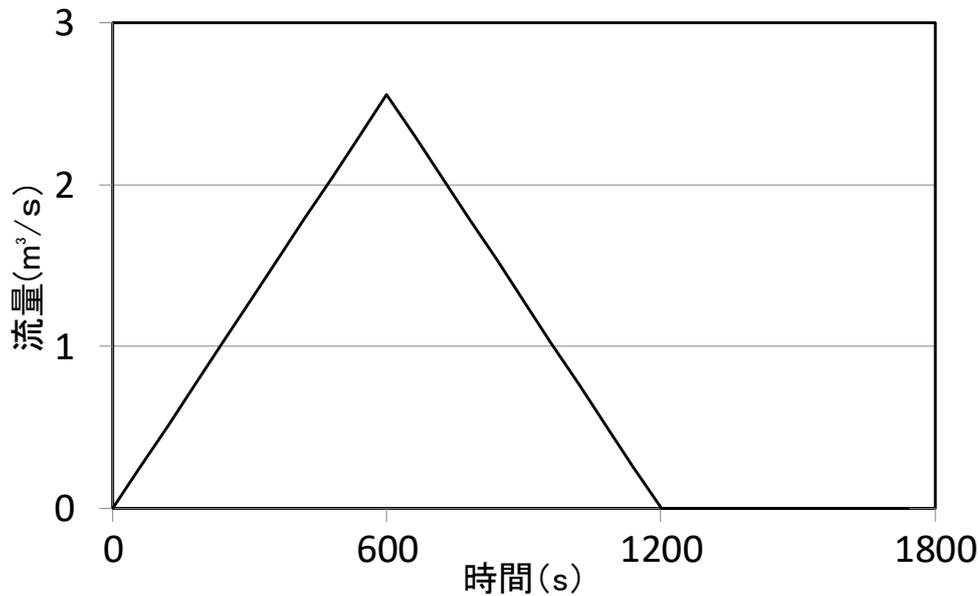
(a) 1m グリッドより作成

(b) 5m グリッドより作成

図-3. 4 溪流を抽出した地形図(等高線 1m 間隔, 拡大範囲 1 表示)

表-3. 2 溪流の位置情報(一部を表示)

id	X座標(m)	Y座標(m)
1	-19505.4	-111267.1
2	-19504.3	-111272.9
3	-19504.0	-111278.9
4	-19504.4	-111281.2
5	-19505.0	-111282.3
6	-19504.4	-111284.6
7	-19501.4	-111291.2
8	-19500.8	-111301.3
9	-19505.4	-111310.1
10	-19506.0	-111317.9

図-3.5 ハイドログラフ<sup>1)</sup>

### 3.3.3 プログラムの実行例と実行結果への影響

溪流幅抽出プログラムの出力は、次の組み合わせで実行した。各組み合わせによる実行結果の特徴を以下に示す。

溪流抽出データ：2 ケース（標高グリッド間隔 1m と 5m より発生させた等高線判読による溪流位置）

縦断形状抽出間隔：1 ケース（5m）

標高データのグリッド間隔：5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）

横断形状抽出間隔を 1m に固定し、標高データのグリッド間隔を 5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）に変更した場合の溪流幅の抽出結果を表-3.3 に示す。なお、(a)は溪流位置情報 1m グリッド、(b)は溪流位置情報 5m グリッドを用いた結果である。

#### (1) 標高データのグリッド間隔による溪流幅の変化

グリッド間隔が 1m および 5m 程度の場合、2.5~6.0m 程度の範囲で細かく上下する傾向が見られる。一方 10m 間隔と 25m 間隔の場合、溪流幅が 10m を超える箇所も現れる結果となっている。25m グリッドを用いた場合に、溪流幅が最も広がっている縦断形状 85m 地点の横断図(横断形状抽出間隔 1m 固定、標高データのグリッド間隔を変化させた場合)を表-3.3 に示す。標高データのグリッド間隔が 1m, 2m, 5m は同様の形状を示すが、10m と 25m は凹部の地形が丸められた形状となっている。この横断形状の違いにより溪流幅が大きく算定されたものと考えられる。

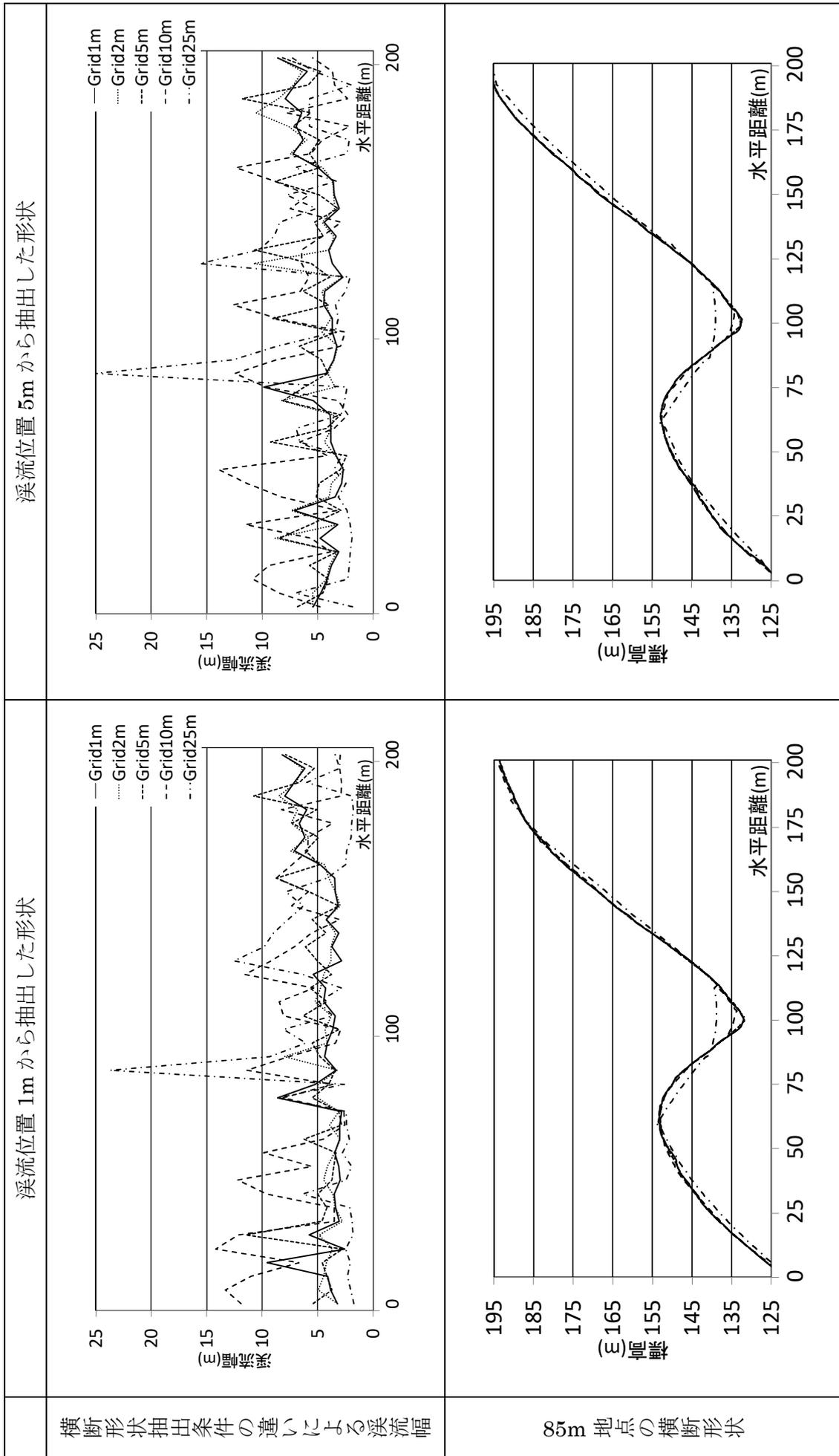
## (2) 溪流位置情報の違いによる溪流幅の変化

溪流幅は、溪流位置情報にかかわらずほぼ同様の形状を示す。

## (3) 溪流幅抽出方法に関わる提案値

(1)および(2)の結果から、標高グリッド間隔 1m と 5m より発生させた等高線判読による溪流位置情報を用いる場合、「5m 以下の間隔の標高データ」を用いることが望ましいと考えられる。

表-3.3 横断形状抽出条件の違いによる溪流幅の変化



### 3. 4 土砂流出解析の実行と抽出条件の違いによる影響

#### 3.4.1 解析条件

縦横断形状抽出プログラムによって、条件を変更し抽出した地形形状が土石流の流出解析結果に与える影響を分析した。なお、土石流の流出解析には、堆積層厚 1m、土砂濃度を 0.3 と固定し、kanako<sup>2)</sup>を用いた。解析に用いたパラメータを表-3.4 に示す。

表-3. 4 解析パラメータ

項 目	値	単位
計算時間	1800	s
計算時間間隔	0.01	s
砂礫の密度 $\sigma$	2650	kg/m <sup>3</sup>
水の密度 $\sigma$	1000	kg/m <sup>3</sup>
重力加速度	9.8	m/s <sup>2</sup>
水深の最小値	0.01	m
河床の容積濃度	0.65	
マンシングの粗度係数	0.03	
侵食速度係数	0.0007	
堆積速度係数	0.05	
堆積速度における慣性力を考慮した時の係数	0.9	
平均粒径	0.45	m
砂の内部摩擦角	35	°

#### 3.4.2 縦横断形状および溪流幅設定条件の変更による解析結果への影響

##### (1) 解析の組み合わせ

溪流幅設定方法の違いによる解析結果の変化を比べるために、次の組み合わせで解析を実施した。組み合わせによる解析結果の特徴を以下に示す。

溪流抽出データ：2 ケース（標高グリッド間隔 1m もしくは 5m より発生させた等高線から判読）

縦断形状抽出間隔：5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）

横断形状抽出間隔：1 ケース（1m）

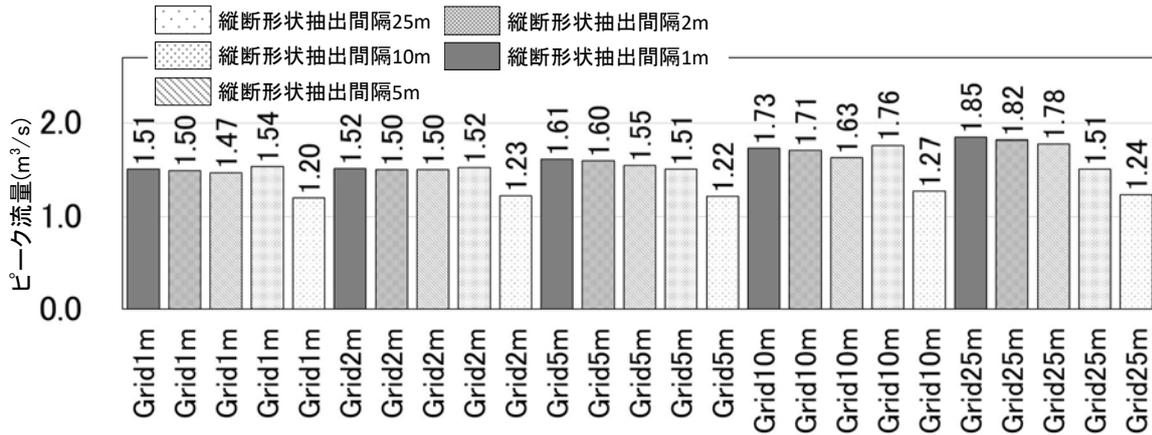
標高データのグリッド間隔：5 ケース（1m, 2m, 5m, 10m, 25m）

溪流幅設定流量：1 ケース(2.556m<sup>3</sup>/s)

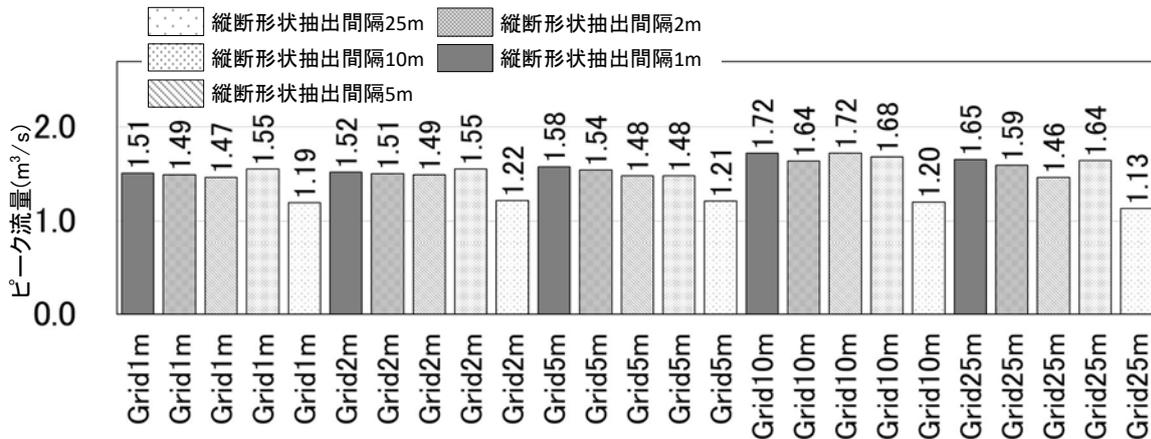
なお、溪流幅設定流量(2.556m<sup>3</sup>/s)は、解析に用いるハイドログラフ<sup>1)</sup>の最大流量とした。

(2) 解析結果

各ケースで実施した下端における最大流量を図-10 に示す。また、横断形状抽出間隔を1mに固定、縦断形状抽出間隔を5ケース(1m, 2m, 5m, 10m, 25m)変更、標高データを3ケース(1m, 2m, 5m)変更した場合の流出解析結果を表-3.5 および表-3.6 に示す。



(a) 1m 間隔の等高線図から抽出した溪流の場合



(b) 5m 間隔の等高線図から抽出した溪流の場合

図-3. 6 解析条件の違いによる下流端の最大流量の変化

1) 標高データのグリッド間隔の違いによる解析結果への影響

下端の最大流量は標高データのグリッド間隔が 1m, 2m, 5m の場合、縦断形状抽出間隔が 1m, 2m, 5m の場合とほぼ同様の値となる。一方、標高データのグリッド間隔が 10m 以上の場合、下端の最大流量がばらつく結果となっている(図-3.6)。

表-3. 5 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(1m等高線による溪流抽出)

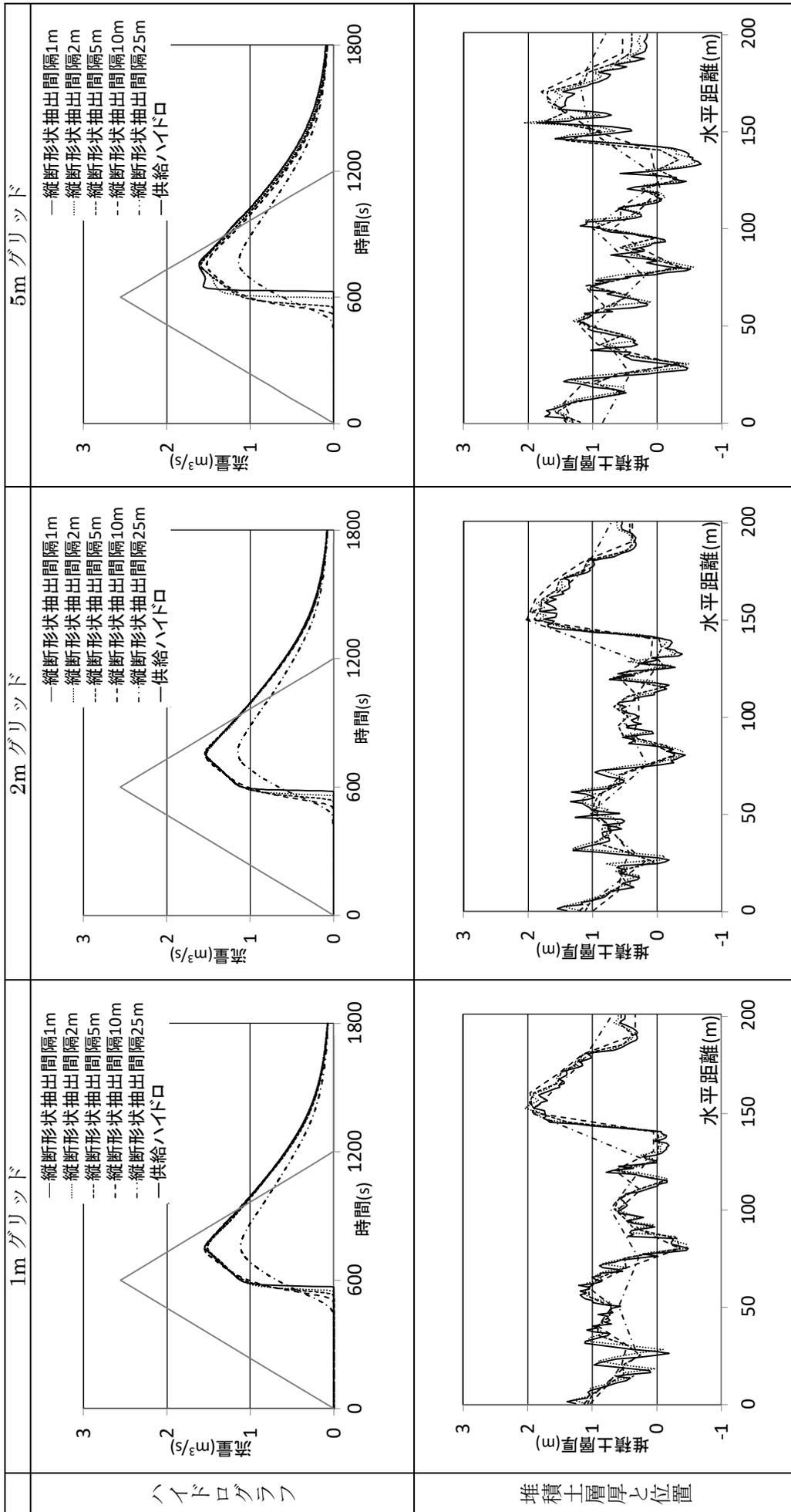
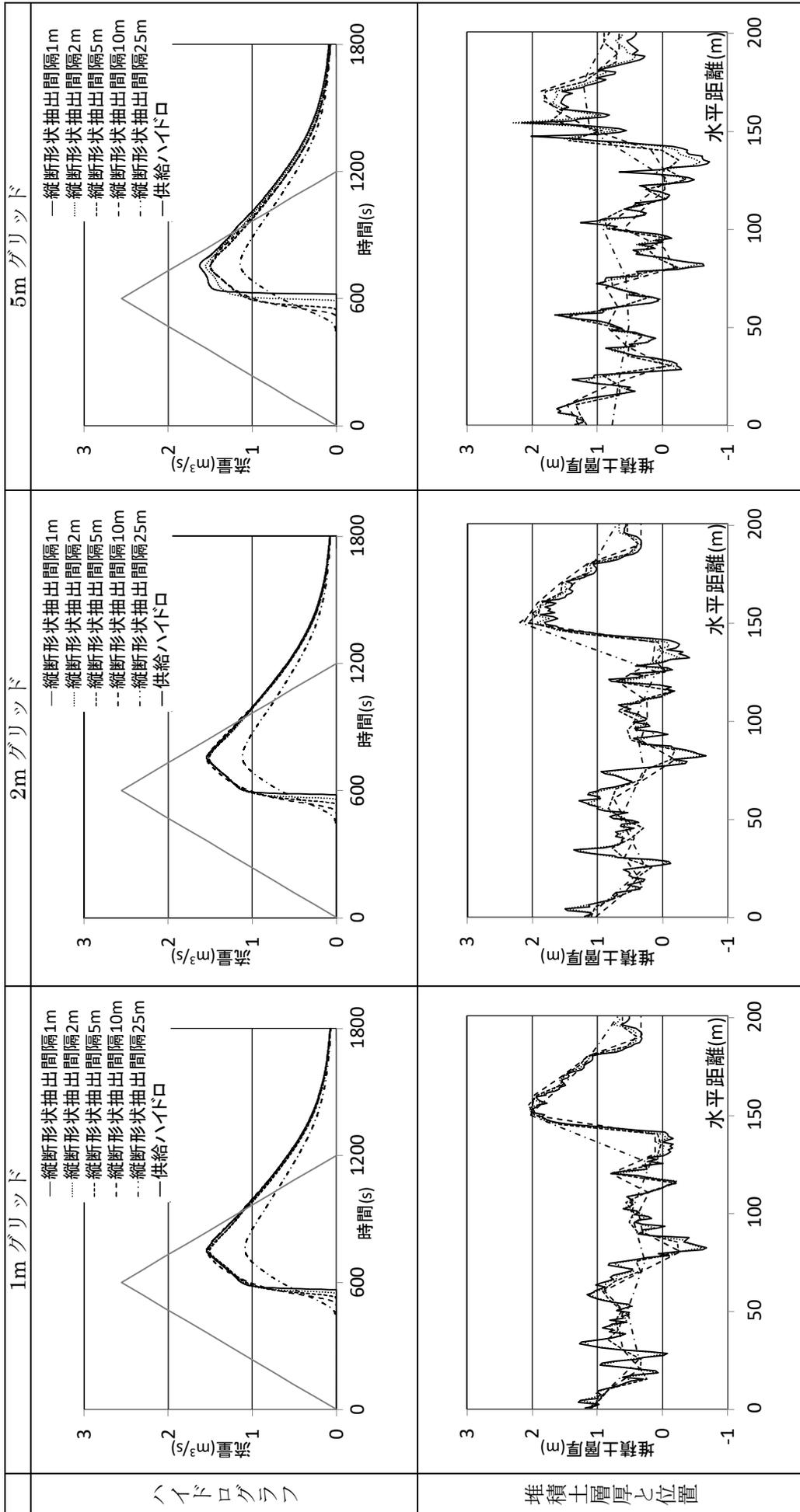


表-3. 6 縦断形状抽出の違いによる流量と堆積層厚の変化(5m 等高線による溪流抽出)



## 2) 縦断形状抽出間隔による違いによる解析結果への影響

下端の最大流量は、1m グリッド、2m グリッド、5m グリッドのいずれの結果でも縦断間隔を 25m で設定した場合に、下端の最大流量が小さくなっており、25m 以外の設定ケースでは概ね同様の流量となっている。一方、堆積土層厚と位置の関係図では、0～150m 地点までは同様の傾向を示すが、縦断形状 25m のみ 150m より下流側で堆積傾向が大きい値となっている。このことから、縦断形状 25m の下端の最大流量が減少した理由は、堆積・侵食の影響（下流側の堆積傾向による縦断形状の緩勾配化の影響）を大きく受けた可能性が考えられる。

## 3) 溪流位置抽出情報の違いによる解析結果への影響

下流端の最大流量は、最大値に若干の違いは認められるものの解析結果はほぼ同様の傾向となっている。

## 4) 縦横断形状抽出方法に関わる提案値

(1)および(2)の結果から、標高グリッド間隔 1m と 5m より発生させた等高線判読による溪流位置情報を用いる場合、「5m 以下の間隔の標高データ」かつ「縦断形状抽出間隔を 10m 以下」を用いることが望ましいと考えられる。

### 3.4.3 溪流幅設定条件の変更による解析結果への影響

#### (1) 解析の組み合わせ

溪流幅設定方法の違いによる解析結果の変化を比べるために、次の組み合わせで解析を実施した。組み合わせによる解析結果の特徴を以下に示す。

溪流抽出データ：2 ケース（標高グリッド間隔 1m もしくは 5m より発生させた等高線から判読）

縦断形状抽出間隔：1 ケース（1m）

横断形状抽出間隔：1 ケース（1m）

標高データのグリッド間隔：1 ケース（1m）

溪流幅は①溪流幅設定流量を変更して溪流幅を設定した場合、②算出された溪流幅の全点もしくは複数の計算点で平均化した場合、③簡易的な設定方法として溪流幅を一律で与えた場合について比較した。解析結果を表-3.7 および表-3.8 に示す。

#### ①溪流幅算出時の対象流量を変更して溪流幅を設定した場合

- ・ 解析実施流量の最大流量  $2.556\text{m}^3/\text{s}$  を用い設定
- ・ 解析実施流量の最大値の 2 倍の流量  $5.112\text{m}^3/\text{s}$  を用い設定
- ・ 解析実施流量の最大値の 0.5 倍の流量  $1.278\text{m}^3/\text{s}$  を用い設定

#### ②算出された溪流幅の全点もしくは複数の計算点で平均化した場合

- ・ 溪流幅抽出後に全点の平均
- ・ 溪流幅抽出後に 3 点の移動平均
- ・ 溪流幅抽出後に 5 点の移動平均

#### ③簡易的な設定方法として溪流幅を一律で与える場合

- ・ 溪流幅を一律にした 4 ケース(5m, 10m, 15m, 20m)

#### (2) 解析結果

##### 1) 溪流幅抽出時の流量を変更した場合

下流端の最大流量に大きな違いは認められない。土石流の到達時間（流量増加が始まる時間）は、解析流量最大値の 2 倍値により溪流幅を設定したケースで少し遅くなり、解析流量最大値の 0.5 倍値により溪流幅を設定したケースで少し早くなる結果が得られた。一方、堆積土層厚の変化では、同様の傾向を示すが、解析流量最大値の 2 倍値を用いて溪流幅を設定したケースでは、130m より下流部において解析実施流量により溪流

幅を設定した場合よりやや少なく、解析実施流量の0.5倍の値を用いて溪流幅を設定したケースでは130mより下流部において最大流量よりやや大きな値となる。

## 2) 溪流幅算出後に幅を平均した場合

下流端の最大流量に大きな違いは認められない。土石流の到達時間（流量増加が始まる時間）および最大流量到達時間もほぼ同じ時間である。一方、堆積土層厚の変化では、移動平均したケースのみ、150mより下流部で他のケースより堆積する傾向を示す。

## 3) 溪流幅を一律で与えた場合

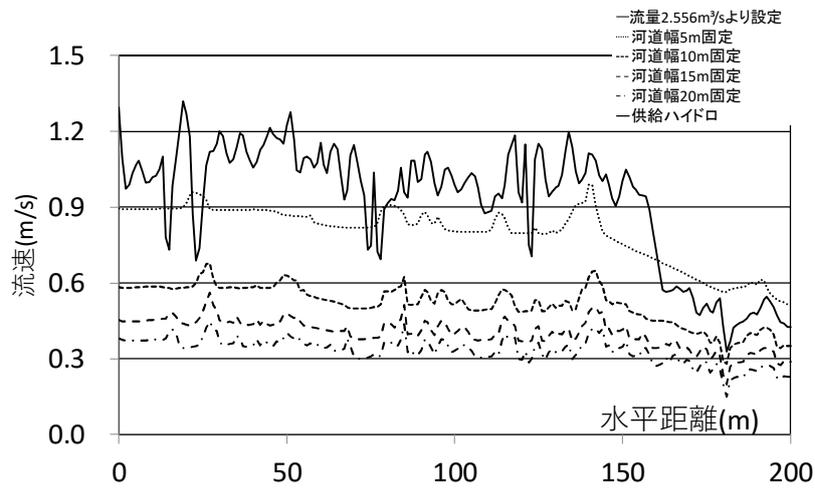
下流端の最大流量に大きな違いは認められない。土石流の到達時間（流量増加が始まる時間）および最大流量到達時間は、溪流幅が広くなるに従い遅くなる傾向が見られた。一方、堆積土層厚の変化では、5mの場合は解析実施流量で溪流幅を設定した場合とほぼ同様の値となっているが、溪流幅を広くする毎に130mより下流部において小さな値となっている。ここで、流量増加が始まる時間の変動を分析するため、溪流幅を一定値で固定した場合の各地点の最大流速と最大水深を図-3.7に示した。溪流幅を広くする毎に最大流速が小さくなり、最大水深も小さくなる。これらのことから、溪流幅が広い方が土石流の到達時間が遅くなる要因は、溪流幅が広くなり流動深が低下することで抵抗が増大し、流速が低下したことが原因と考えられる。

表-3.7 溪流幅の設定方法を変更した場合の流量と堆積層厚の変化(1m等高線による溪流抽出)

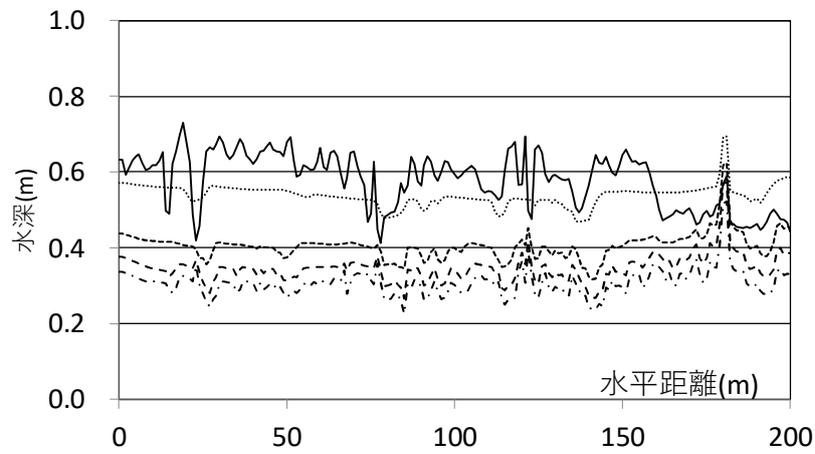
	流量を変更し溪流幅の設定した場合	溪流幅を平均化し設定した場合	溪流幅を一定幅で固定した場合
ハイドログラム	<p>                     — 流量2.556m<sup>3</sup>/sより設定                      ..... 流量5.112m<sup>3</sup>/sより設定                      --- 流量1.278m<sup>3</sup>/sより設定                      — 供給ハイドロ                 </p>	<p>                     — 流量2.556m<sup>3</sup>/sより設定                      ..... 全点の平均                      --- 3点の移動平均                      -.- 5点の移動平均                      — 供給ハイドロ                 </p>	<p>                     — 流量2.556m<sup>3</sup>/sより設定                      ..... 河道幅5m固定                      --- 河道幅10m固定                      -.- 河道幅15m固定                      — 河道幅20m固定                      — 供給ハイドロ                 </p>
堆積土層厚と位置	<p>                     ..... 5m固定                      --- 10m固定                      -.- 15m固定                      --- 20m固定                      — 2.556m<sup>3</sup>/sより設定                 </p>	<p>                     ..... 3点の移動平均                      -.- 5点の移動平均                      --- 5m固定                      --- 10m固定                      -.- 15m固定                      --- 20m固定                      — 2.556m<sup>3</sup>/sより設定                 </p>	<p>                     ..... 5m固定                      --- 10m固定                      -.- 15m固定                      --- 20m固定                      — 2.556m<sup>3</sup>/sより設定                 </p>

表-3.8 溪流幅の設定方法を変更した場合の流量と堆積層厚の変化(5m等高線による溪流抽出)

	流量を変更し溪流幅の設定した場合	溪流幅を平均化し設定した場合	溪流幅を一定幅で固定した場合
ハイドログラム	<p>                     流量2.556m<sup>3</sup>/sより設定                      流量5.112m<sup>3</sup>/sより設定                      流量1.278m<sup>3</sup>/sより設定                      供給ハイドロ                 </p>	<p>                     流量2.556m<sup>3</sup>/sより設定                      全点の平均                      3点の移動平均                      5点の移動平均                      供給ハイドロ                 </p>	<p>                     流量2.556m<sup>3</sup>/sより設定                      河道幅5m固定                      河道幅10m固定                      河道幅15m固定                      河道幅20m固定                      供給ハイドロ                 </p>
堆積土層厚と位置			



(a) 最大流速



(b) 最大水深

図-3.7 最大流速と最大水深

### 3.5 まとめ

本章では、効率的に土石流解析を実施可能にするため、入力データのうち、「溪流の縦断形状」、「溪流幅」の情報を航空レーザー測量結果から自動的に抽出し出力するプログラムを開発した。また、開発したプログラムを用いて清水寺周辺の地形データをもとに実行例を示し、「溪流の縦断形状」と「溪流の幅」の抽出方法の違いにより、断面形状にどの程度影響を与えるか評価した。

その結果、以下のことを示した。

- ① 溪流幅抽出プログラムを用いて溪流幅を抽出する場合
  - ・地形データは、5m 以下の間隔の標高データを用いる必要があること
- ② 縦断形状の抽出間隔と溪流幅の抽出条件が解析結果に及ぼす影響
  - ・地形データは、5m 以下の間隔の標高データを用いれば良いこと
  - ・縦断形状抽出間隔は、10m 以下に設定すれば良いこと
  - ・溪流幅設定の対象流量は、解析に用いる流量の最大値を採用すれば概ね妥当な解析結果が得られること

以上のことから、以下の条件で溪流幅を抽出すれば妥当であることを示した。

- ・地形データは、5m 以下の間隔の標高データを用いる必要があること
- ・縦断形状抽出間隔は、10m 以下に設定すれば良いこと
- ・溪流幅設定の対象流量は、解析に用いる流量の最大値を採用すれば概ね妥当な解析結果が得られること

### 参考資料

- 1) 縄手洋介・梶山敦司・藤本将光・里深好文：清水寺周辺溪流における土石流氾濫解析，歴史都市防災論文集，Vol.10， p.59-66， 2016
- 2) 中谷加奈・里深好文・水山高久：GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発，砂防学会誌，Vol.61， No.2， p.41-46， 2008

## 第4章 溪流幅を考慮した一次元土砂水理解析結果の平面 二次元化手法に関する研究

### 4. 1 概要

近年、情報公開・住民参加型の説明会などが必要とされる時代であり、一般の人にもわかりやすく水理現象を説明する機会が増大している。また、災害が突発化・激甚化しており、災害時にはより迅速かつ正確に水理現象を把握する必要性が増している。しかし、現在用いられている従来の水理計算結果の表示方法では、十分とは言えない状況である。

通常、水理現象を把握するために、上流から氾濫開始地点までの一次元解析の結果は、河床縦断のグラフで表示されることが多い。河床縦断のグラフを見慣れた熟練技術者であれば、解析結果を容易に把握することができるが、見慣れていない若手技術者および一般市民にとっては、位置情報と関連付けが難しいため、解析結果を読み取れないことが多い。より容易に位置情報と関連付けて表示できれば、一次元解析結果を把握することができるものと考えられる。

解析結果を平面上で表示する手法として、氾濫開始地点から氾濫域までの平面二次元解析結果の表示手法は確立されており、ソフトウェア(たとえば CommonMP<sup>1)</sup>、iRIC<sup>2)</sup>など)上で平面位置と対比しながら解析結果を見ることができる。

一方、一次元解析結果を地図上で表示できるソフトとしては、HyperKANAKO<sup>3)</sup>などが存在し、溪流の中心線に沿う線のデータとして着色される手法が開発されている。これらの手法は、地形図と合わせて表示することによって、位置的な関係の把握が可能となるため、河床縦断のグラフより一次元解析結果を理解しやすくなっている。より直感的に判断を可能にするためには、溪流中心線を着色するだけでなく、溪流内を一次元解析結果の数値で着色することによって、溪流幅や蛇行状況などとの対比が容易になると考えられる。

このことから、本研究では、河床縦断のグラフに見慣れていない若手技術者や一般市民でも容易に一次元解析結果を読み取れるようにするため、『溪流内の幅を考慮して地

図上で表示できる平面二次元表現手法』と『山間部における一次元解析結果に対して、溪流地形形状を正確に反映し、水面範囲および土砂堆積・浸食範囲を地形図上にて高精度で表示できる平面二次元表現手法』を開発した。また、開発した手法を用い解析結果の数値が保持され、地形図などと重ね合わせが可能な GIS データとして出力するプログラムを開発した。

本論では、一次元解析結果を平面二次元上で表現する手法を示したうえで適用例を示す。『溪流内の幅を考慮して地図上で表示できる平面二次元表現手法』では、溪流を河道と見立て、熊本県内を流下する、河川の蛇行部と直線部が特徴的な白川に適用した例を示す。また、『溪流内の幅を考慮して地図上で表示できる平面二次元表現手法』では、この手法を用いて作成した一次元解析結果に平面二次元解析結果を組み合わせることにより、上流から氾濫域までの一連の解析結果を表示した例についてもあわせて示した。なお、山間部を対象として適用した例については、第5章において示した。

## 4. 2 溪流幅を考慮した一次元解析結果の平面二次元化手法の開発

一次元解析結果である水深や流速などの情報を解析に用いた溪流幅の情報および溪流位置の情報をもとに、平面二次元上で表現するプログラムを開発した。

### 4.2.1 入力データ

入力データとしては、以下に示す3つのデータを用意する。

- ① 溪流中心位置：一次元解析を実施する区間の始点、屈曲点、終点の溪流中心位置の平面直角座標系の X,Y 座標
- ② 溪流幅：一次元解析を実施した計算点の溪流幅
- ③ 一次元解析結果：水深、流速などの一次元解析結果のうち表現したいデータ

### 4.2.2 プログラムの処理内容

開発したプログラムのデータ処理内容を以下に示す。また、データ処理フローを図-4.1に示し、処理内容のイメージを図-4.2に示す。

- (a) 入力データ①の溪流位置(屈曲点)及び入力データの溪流幅を入力(図-4.2(a))
- (b) 溪流沿いの溪流幅と一次元解析結果の値を上下の計算点の幅と解析結果から補

間(図-4. 2(b))

- (c) 溪流の流路方向と溪流幅をもとに着色範囲を設定(図-4. 2(c))
- (d) 着色範囲が重複する箇所は, 安全側の評価とするため高い値を採用, 欠損する箇所は屈曲点の値を採用する. (図-4. 2(d))
- (e) (d)の結果をもとにグリッドの作成(図-4. 2(e))
- (f) (e)のグリッドに対し解析結果の値を着色(図-4. 2(f))

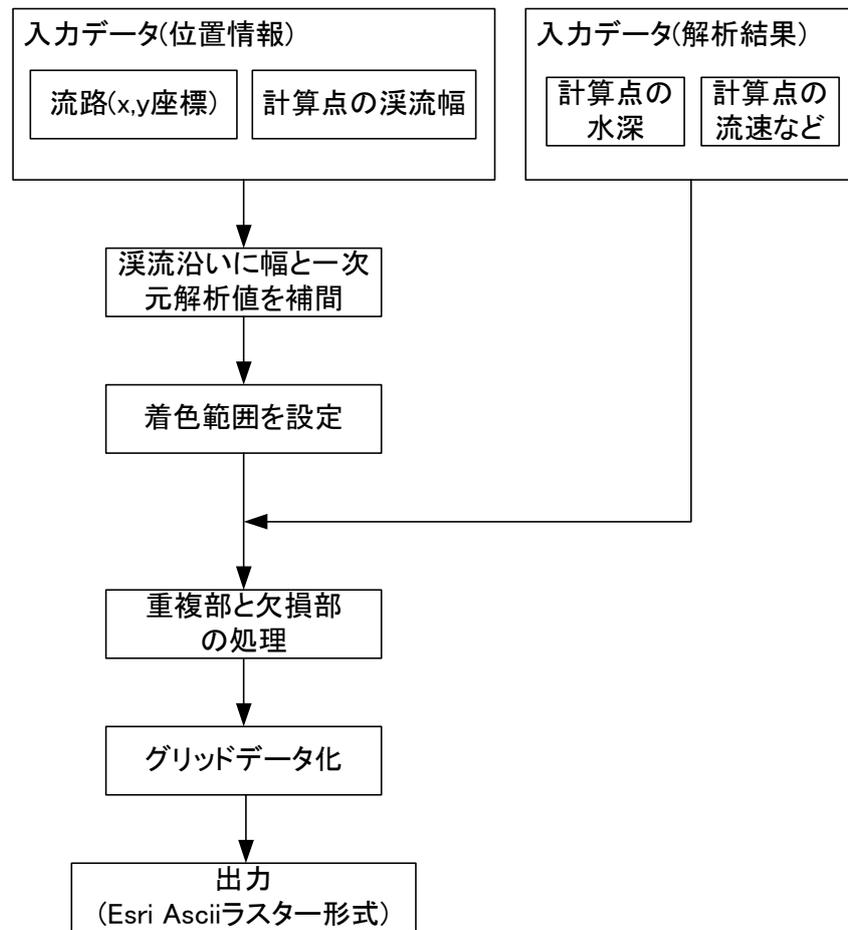


図-4. 1 プログラムの処理内容

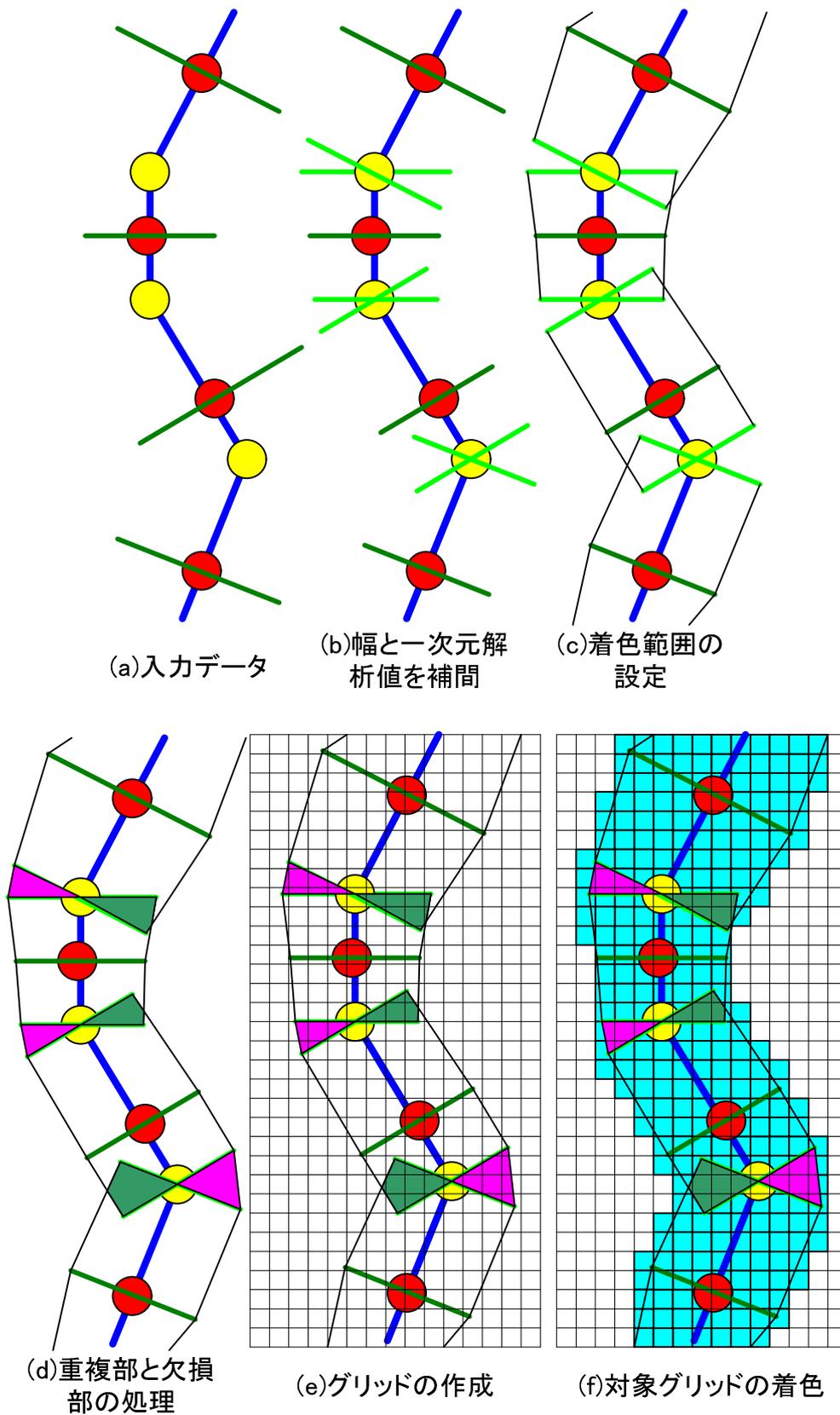


図-4. 2 一次元解析結果の平面二次元表示イメージ

### 4.2.3 出力データ

出力データは、テキストデータで確認することができる ESRI ASCII ラスター形式<sup>4)</sup>とした。ESRI ASCII ラスター形式は、ESRI 社製ソフト ArcGIS 上においてデータ処理が行なえるデータとして開発されたが、フリーオープンソフトウェアである QGIS<sup>5)</sup>やシェアウェアである SIS<sup>6)</sup>などでも拡張子を変更することによって表示できる形式である。

## 4.3 プログラムの実行例と実行結果の評価

開発したプログラムの実行例を以下に示す。

### 4.3.1 対象地の概要

プログラムの実行例として、河道幅を溪流幅と見立て、直線部と蛇行部が適度に分布する熊本県北部を流れる白川とした(図-4.3 参照)。白川は熊本県の中央部を東西に流下する延長 74km、流域面積 480km<sup>2</sup> の一級河川である。対象区間は黒川合流後～河口までの約 47km 区間とした。なお、一次元解析結果の範囲および二次元解析結果の範囲を図-4.3 にあわせて示した。

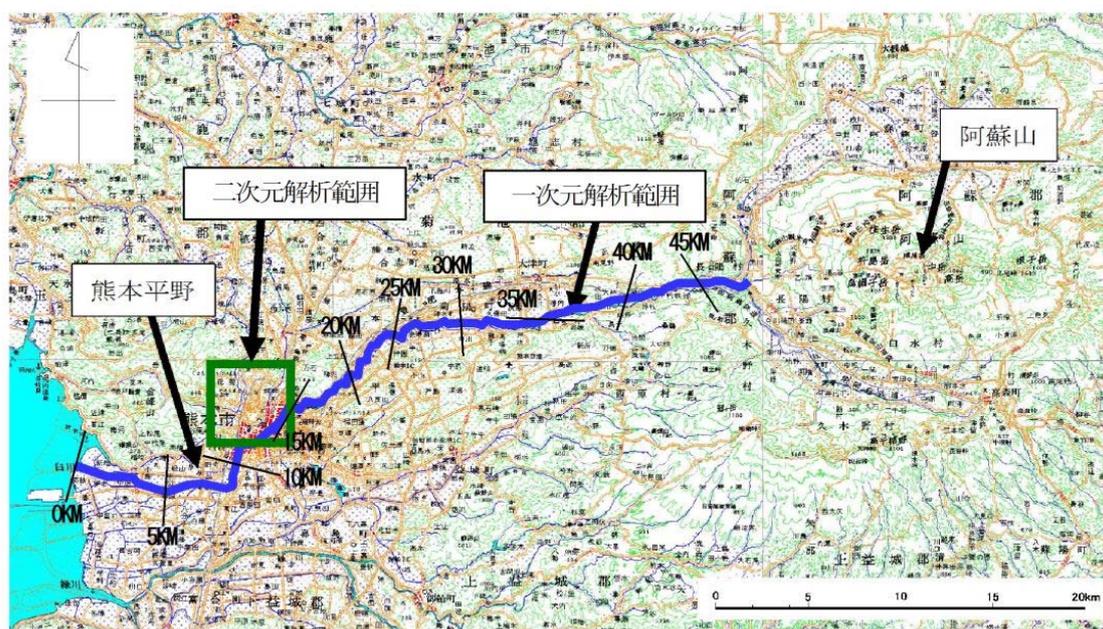


図-4.3 対象地域(熊本県白川)の位置図  
(国土地理院の電子地形図 20 万分 1<sup>7)</sup> に追記して作成した.)

### 4.3.2 入力データ

プログラムでは、以下の3つのデータを使用した。

- ① 溪流中心位置：始点，屈曲地点，終点の平面直角座標系の座標を抽出したデータ(表-4.1にデータの一部を示す)。国土交通省国土政策局「国土数値情報(河川データ：熊本<sup>8)</sup>)」をもとに，対象範囲の溪流データを作成した。
- ② 溪流幅：国土地理院の基盤地図情報のうち水涯線<sup>9)</sup>をもとに，100m毎の計算点の溪流幅を抽出したデータ(図-4.3，表-4.2にデータの一部を示す)。
- ③ 一次元解析結果：一次元解析結果から各計算点の水深，流速などを抽出したデータ(表-4.3にデータの一部を示す)。本研究では，一次元解析シミュレーションプログラム kanako<sup>10)</sup>により，図-4.4に示すハイドログラフ<sup>11)</sup>を使用し，不等流計算を行った結果を用いた。なお，本研究では不等流計算を用いた結果により適用した例を示したが，②の溪流幅における解析結果が出力できる計算手法であれば，どの解析手法でも適用可能である。

なお，①～③のデータは，上流から下流に向かって，並べたデータとした。

表-4.1 溪流中心位置データの例

id	X座標(m)	Y座標(m)
1	-1459.65	-13959.38
2	-1497.09	-13980.44
3	-1502.53	-13983.92
4	-1566.61	-14024.91
5	-1590.16	-14035.44
6	-1644.36	-14059.64
7	-1672.13	-14077.66
8	-1688.40	-14088.25
9	-1774.29	-14138.08
10	-1800.24	-14153.13
11	-1882.30	-14184.32
12	-1928.94	-14198.61
13	-1942.07	-14200.18
15	-1977.47	-14204.39
16	-1980.33	-14204.73
17	-2018.34	-14205.24
18	-2045.55	-14197.04
19	-2068.42	-14184.78
20	-2090.02	-14165.34

表-4. 2 計算点における溪流幅の例

id	距離	河道幅(m)
1	47KM400M	27.07
2	47KM300M	22.77
3	47KM200M	20.04
4	47KM100M	31.25
5	47KM000M	16.19
6	46KM900M	19.11
7	46KM800M	16.86
8	46KM700M	51.83
9	46KM600M	39.74
10	46KM500M	26.55
11	46KM400M	24.63
12	46KM300M	24.44
13	46KM200M	25.49
14	46KM100M	24.97
15	46KM000M	21.70
16	45KM900M	17.49
17	45KM800M	24.99
18	45KM700M	21.68
19	45KM600M	20.72
20	45KM500M	19.74

表-4. 3 一次元解析結果の例

距離	流速(m/s)	最大水深(m)
47KM400M	11.88	11.50
47KM300M	13.83	11.50
47KM200M	14.41	9.20
47KM100M	14.95	9.59
47KM000M	16.32	11.83
46KM900M	17.13	11.25
46KM800M	16.24	6.17
46KM700M	14.92	5.00
46KM600M	14.71	6.97
46KM500M	14.96	8.87
46KM400M	15.20	9.10
46KM300M	15.34	8.86
46KM200M	15.41	8.72
46KM100M	15.56	9.34
46KM000M	15.88	10.90
45KM900M	16.02	9.96
45KM800M	15.98	9.09
45KM700M	16.07	9.95
45KM600M	16.19	10.35
45KM500M	16.27	10.35

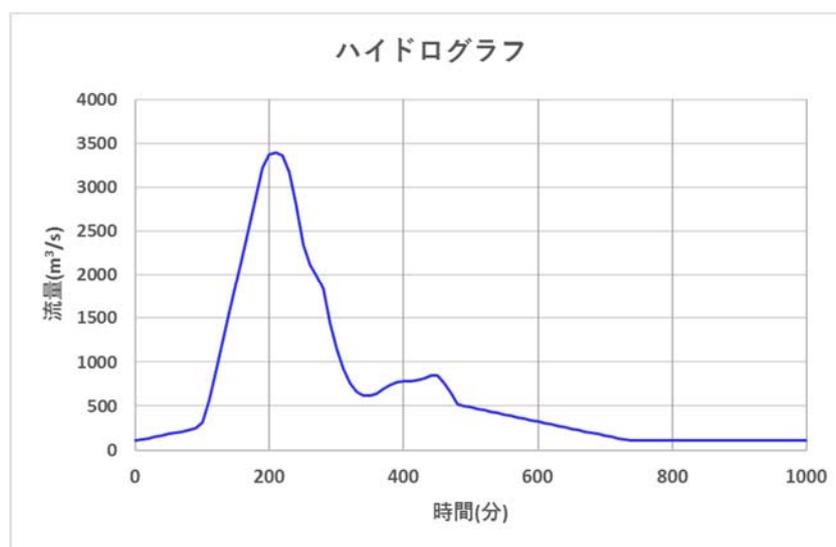


図-4. 4 一次元解析に用いたハイドログラフ

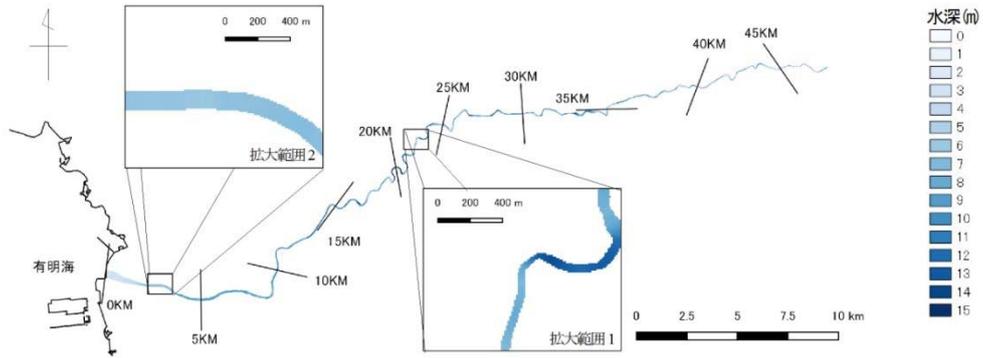
### 4.3.3 プログラムの実行例と実行結果

#### (1) 最大水深と最大流速の表示例

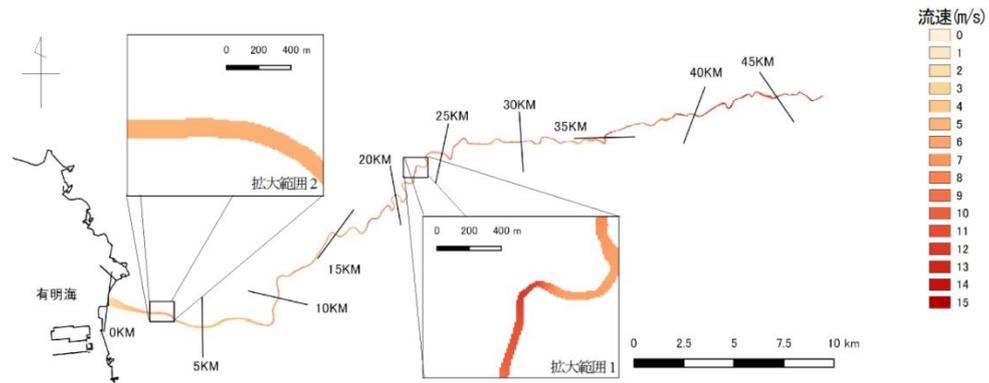
一次元解析結果の各計算地点における最大水深および最大流速に対し、プログラムを実施した結果を図-4.5に示す。また、これまでの解析結果の出力例のうち、河床縦断グラフで表示された最大水深および最大流速の結果を図-4.6(a)に示し、従来の溪流幅を考慮しない平面二次元表示として出力されていた結果を図-4.6(b)に示す。

図-4.6(a)に示す河床縦断グラフは、水深と流速の関係を容易にみることができ、距離標によって位置情報が表現されているため、グラフを見慣れていないと位置情報の判断が難しい。しかし、本研究で開発した手法を用いた結果である図-4.5(a)および図-4.5(b)では、どの位置で水深が深く、どの位置で流速が早いかを容易に把握することができる。

また、溪流内に川幅を考慮して水深あるいは流速が着色されたことにより、これまで溪流幅が考慮されていない図-4.6(b)に示す手法で表示されていたものと異なり、拡大範囲1に示すように溪流幅が広くなると流速が遅くなり、溪流幅が狭くなると流速が早くなることを図上で把握することができる。また、溪流幅が狭くなる手前では、水深が深くなっている様子を読み取ることが可能である。このように、溪流幅を考慮して平面二次元的に図化することによって、水理計算結果を容易に把握することが可能である。

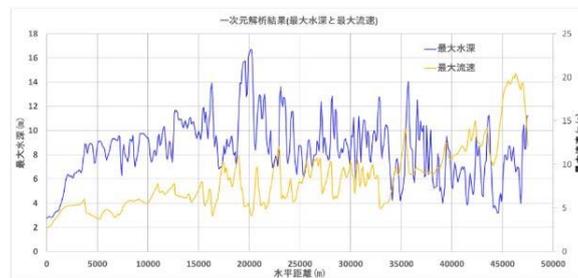


(a) 最大水深の表示 (10m グリッド)

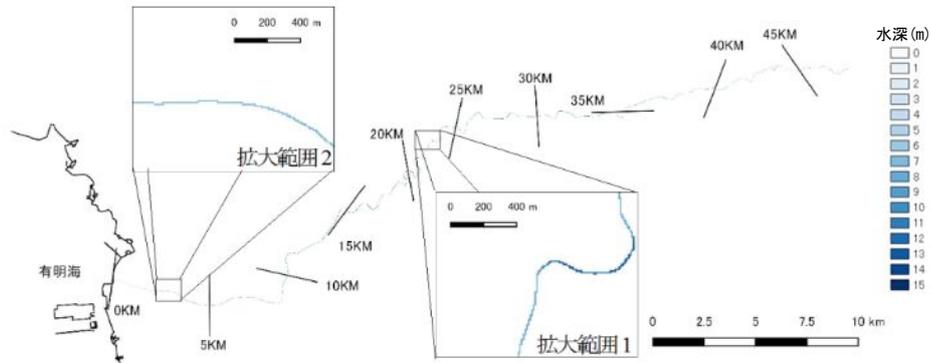


(b) 最大流速の表示 (10m グリッド)

図-4. 5 一次元解析結果の最大水深および最大流速の表示



(a) 河床縦断グラフ



(b) 最大水深表示 (10m グリッド)

図-4. 6 一般的な一次元解析結果の表示例

## (2) 水深の時系列変化

一次元解析結果のうち 500 分後、1000 分後、1500 分後 2000 分後の 4 パターン、データ出力した例を図-4.7 に示す。時系列的に表示することによって、水理計算結果である洪水流が、上流から河口まで流下する時間や上流から指定位置(家屋や避難場所)まで流下する時間を把握することが可能である。また、解析結果を計算間隔ごとに細かく出力することによって、動画の作成も可能であり、情報公開や住民参加型の説明会などに有効活用できると考えられる。

## (3) グリッド間隔の違いによる比較

GIS データ出力時のグリッド間隔を 5m, 10m, 25m, 50m の 4 パターン、データ出力した例を図-4.8 に示す。また、出力されたデータ容量を表-4.4 に示す。南北約 12km, 東西約 36.5km を対象とした場合、いずれの場合も大縮尺の表示では大きな違いが認められない。一方、5m のグリッド間隔では 234.5MB とデータ容量が大きくなるが、拡大部において溪流幅と水深の関係を表現することが可能である。しかし、50m のグリッド間隔の場合、2.5MB とデータ容量が小さくなるが、溪流幅の拡大部において図が粗くなり溪流幅と水深の関係が読み取れない状況となっている。また、25m グリッド間隔の場合も溪流幅がほぼ同一となっていることから、白川を対象として拡大して水理現象を説明するためには、グリッド間隔を 10m より細かく出力する必要があると考えられる。

表-4.4 グリッドサイズ変更によるデータ容量の違い

格子間隔 (m)	格子数		データ容量 MB
	X方向	Y方向	
5	7304	2535	234.5
10	3653	1268	58.6
25	1462	508	9.4
50	732	254	2.5

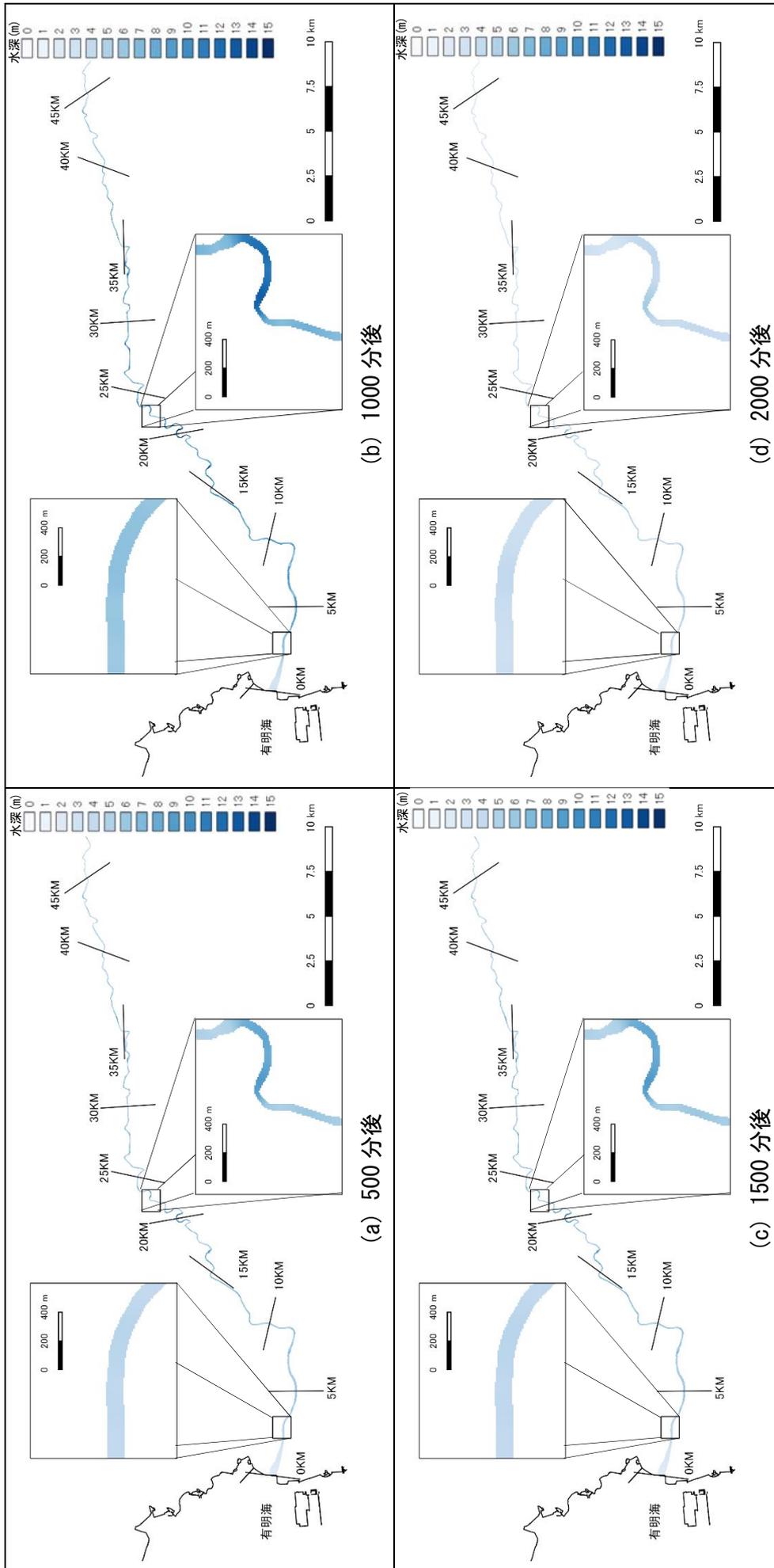


図-4.7 水深の時系列変化の表示例

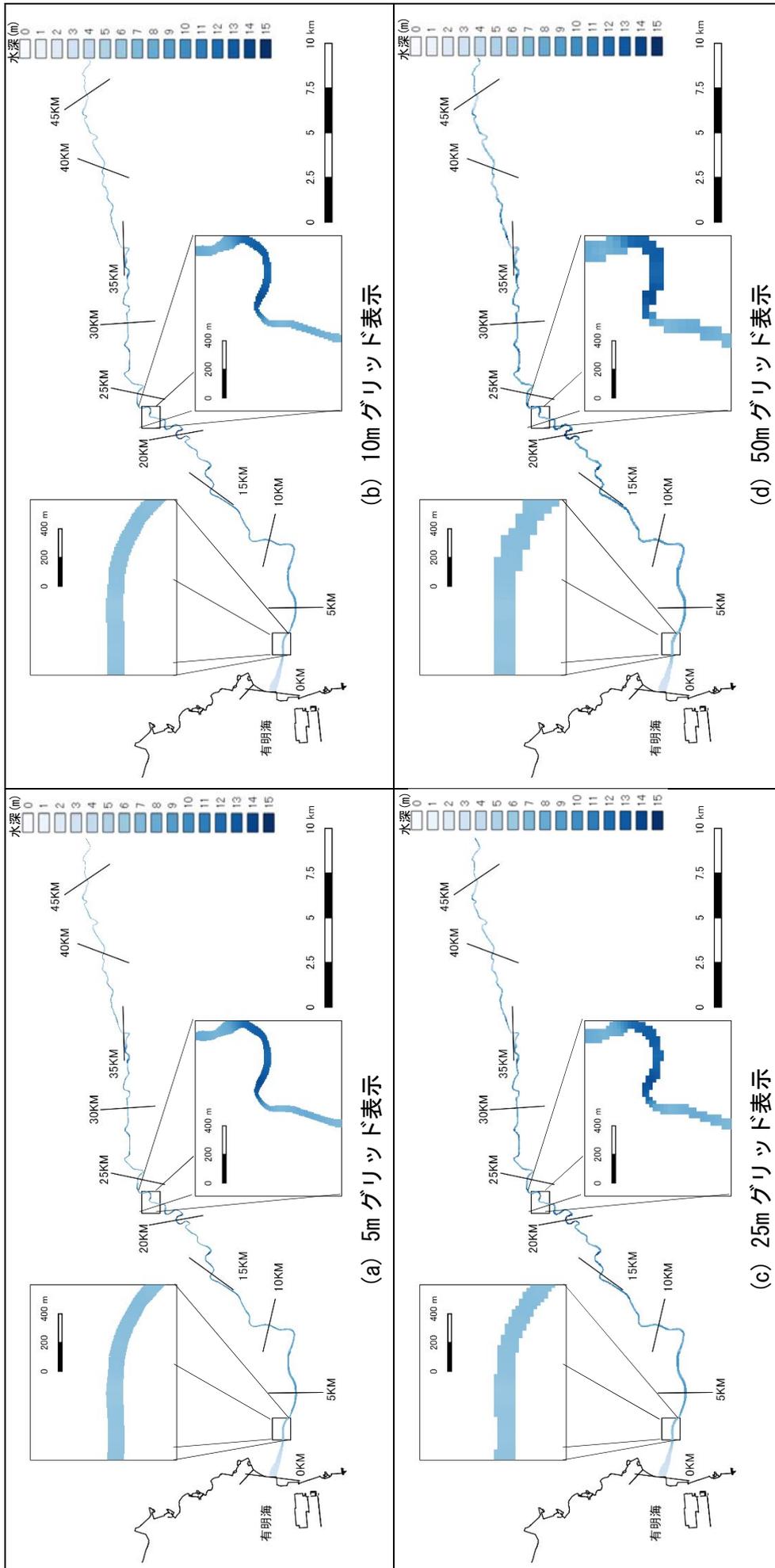


図-4.8 GIS データ出力時の格子間隔別の表示例

#### (4) 二次元解析結果の接合と GIS データの重ね合わせ例

平面二次元において、5mメッシュの標高データ<sup>11)</sup>を用いて氾濫解析を行った結果との接合と国土数値情報の行政区域データ(熊本)<sup>12)</sup>を入れた例を図-4.9に示す。本研究で開発した手法により出力した結果に対し、二次元解析を実施した範囲のデータを入れ替えることによって、水理計算結果を上流から氾濫域までの水理計算結果を上流から氾濫開始地点までの溪流幅と水深(流速表示の場合は流速)の関係、氾濫開始地点から氾濫域における水深を一枚の図として表示することが可能である。また、他のGISデータと重ね合わせることにより、水理計算結果と場所の特定が容易になる。

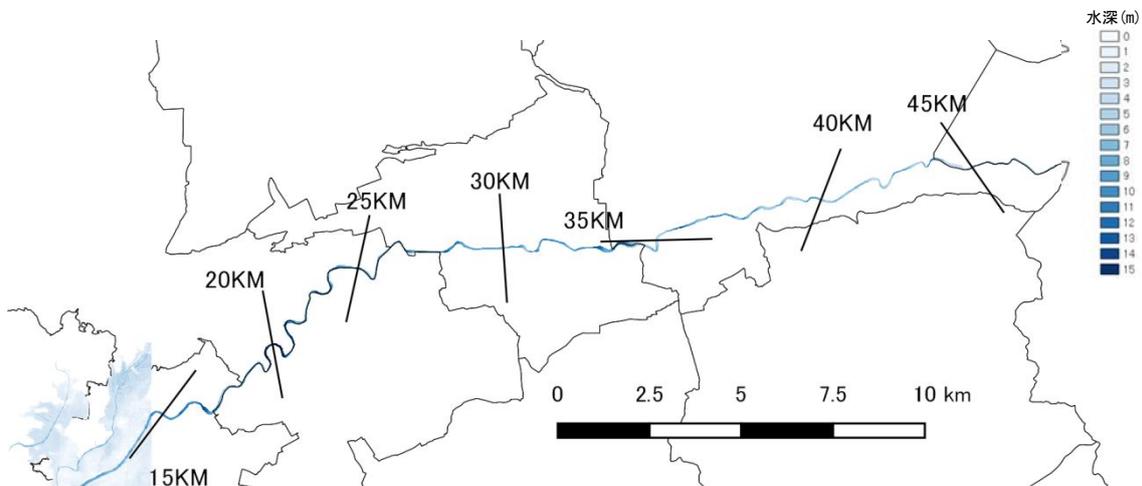


図-4.9 一次元解析と二次元解析結果の最大水深表示の接合  
(国土数値情報の行政区域データ(熊本)<sup>12)</sup>に追記して作成した。)

#### 4.4 まとめ

本章では、河床縦断のグラフを見慣れていない若手技術者や一般市民でも容易に一次元解析結果を読み取れるようにするため、『溪流内の幅を考慮して地図上で表示できる平面二次元表現手法』の開発を行い、河道幅を溪流幅と見立て熊本県白川において適用した例を示した。本章において示した結果をまとめ以下に述べる。

- ・最大水深と最大流速を平面二次元で表示できることを示した。
- ・水深と流速の時系列変化を平面二次元で表示できることを示した。
- ・グリッド間隔の違いによる平面二次元の表示例を示した。
- ・二次元解析結果との接合例を示した。

この手法を用いることによって、水理現象および河床変動(堆積・浸食)などの一次元解析結果を容易に説明性の高い平面二次元表示化できるものと考えられる。

## 参考資料

- 1) CommonMP 開発・運営コンソーシアム : CommonMP ,  
<http://framework.nilim.go.jp/>
- 2) iRIC Project : 河川シミュレーションソフト iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 3) 堀内成朗・岩波英二・中谷加奈・里深好文・水山高久 : LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発 : 砂防学会誌, Vol.64, No.6, p.25-31, 2012
- 4) Esri : ArcGIS Desktop, <https://www.esri.com/products/arcgis-desktop/>
- 5) QGIS プロジェクト : QGIS, <http://qgis.org/ja/site/>
- 6) Informatix : SIS, <http://www.informatix.co.jp/sis/>
- 7) 国土地理院 : 数値地図 200000(地図画像)「熊本」「大分」
- 8) 国土交通省国土政策局 : 国土数値情報 (河川データ : 熊本)
- 9) 国土地理院 : 基盤地図情報 (水涯線)
- 10) 中谷加奈, 里深好文, 水山高久 : GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.41-46, 2008
- 11) 国土交通省九州地方整備局立野ダム工事事務所 : 洪水調節図,  
<http://www.qsr.mlit.go.jp/tateno/damujigyo/aramasi02.html>
- 12) 国土地理院 : 基盤地図情報 (数値標高 5 メッシュ)
- 13) 国土交通省国土政策局 : 国土数値情報 (行政区域データ : 熊本)

## 第5章 地形形状を考慮した一次元土砂水理解析結果の平面二次元化手法に関する研究

### 5. 1 概要

第4章では、河床縦断のグラフに見慣れていない若手技術者や一般市民でも容易に一次元解析結果を読み取れるようにするため、一次元解析結果に対し溪流幅を用いることによって、平面二次元で表現する手法を開発し、その有用性を示した。本章では、さらに『山間部における一次元解析結果に対して、溪流地形形状を正確に反映し、水面範囲および土砂堆積・浸食範囲を地形図上にて高精度で表示できる平面二次元表現手法』を開発した。

本論では、一次元解析結果を平面二次元上で表現する手法『山間部における一次元解析結果に対して、溪流地形形状を正確に反映し、水面範囲および土砂堆積・浸食範囲を地形図上にて高精度で表示できる平面二次元表現手法』を示したうえで適用例を示す。また、一例とし高精細な地形データ(LPデータ)が存在する清水寺を対象として適用した例を示した。

### 5. 2 航空レーザー計測値が存在する場合の平面二次元化手法の開発

一次元解析結果である水深や流速などの情報と溪流位置の情報および航空レーザー計測値をもとに、地形形状を考慮して一次元解析結果を平面二次元上で表現するプログラムを開発した。

#### 5.2.1 入力データ

入力データとしては、以下に示す3つを用意する。

- ① 溪流位置情報：一次元解析実施区間の始点、屈曲点、終点の溪流中心位置の平面直

角座標系の X,Y 座標

- ② 標高データ：航空レーザー計測など面的地形データ
- ③ 一次元解析結果：河床高，水面高，溪流幅および流速，土砂濃度などの一次元解析結果のうち表現したいデータ

### 5.2.2 プログラムの処理内容

本研究で開発したプログラムのデータ処理内容を以下に示す。また，データ処理フローを図-5.1 に示し，処理内容のイメージを図-5.2 に示す。

- (a) ①の溪流位置データ，②の標高データおよび③の解析結果を入力(図-5.2(a))。
- (b) ①のデータより溪流沿いに一次元解析結果の値を②の標高データのグリッドサイズより細かい間隔で補間(図-5.2(b))。
- (c) 溪流沿いに②の標高データのグリッドサイズより細かい間隔で横断面作成位置を設定(図-5.2(c))。
- (d) 横断面作成位置情報をもとに，②の標高データから横断形状を抽出(図-5.2(d))。
- (e) (d)により抽出された地形形状と解析結果を比較し，平面二次化情報(範囲と水深および堆積層厚)を抽出。なお，河床の高さが地形形状より高くなる堆積傾向の場合は図-5.2(e-1)に示す処理を実施，河床の高さが地形形状より低くなる浸食傾向の場合は図-5.2(e-2)に示す処理を加えた。なお，水深と堆積層厚以外の流速や土砂濃度などの地形情報と関係しない数値は，水深の着色範囲に同一の値を付与した。
- (f) (e)の着色範囲抽出結果をもとに，平面二次元上の着色範囲を設定(図-5.2(f))。
- (g) (f)の着色範囲をもとに対象グリッドに対し解析結果を平面二次元情報として数値を付与(図-5.2(g))。

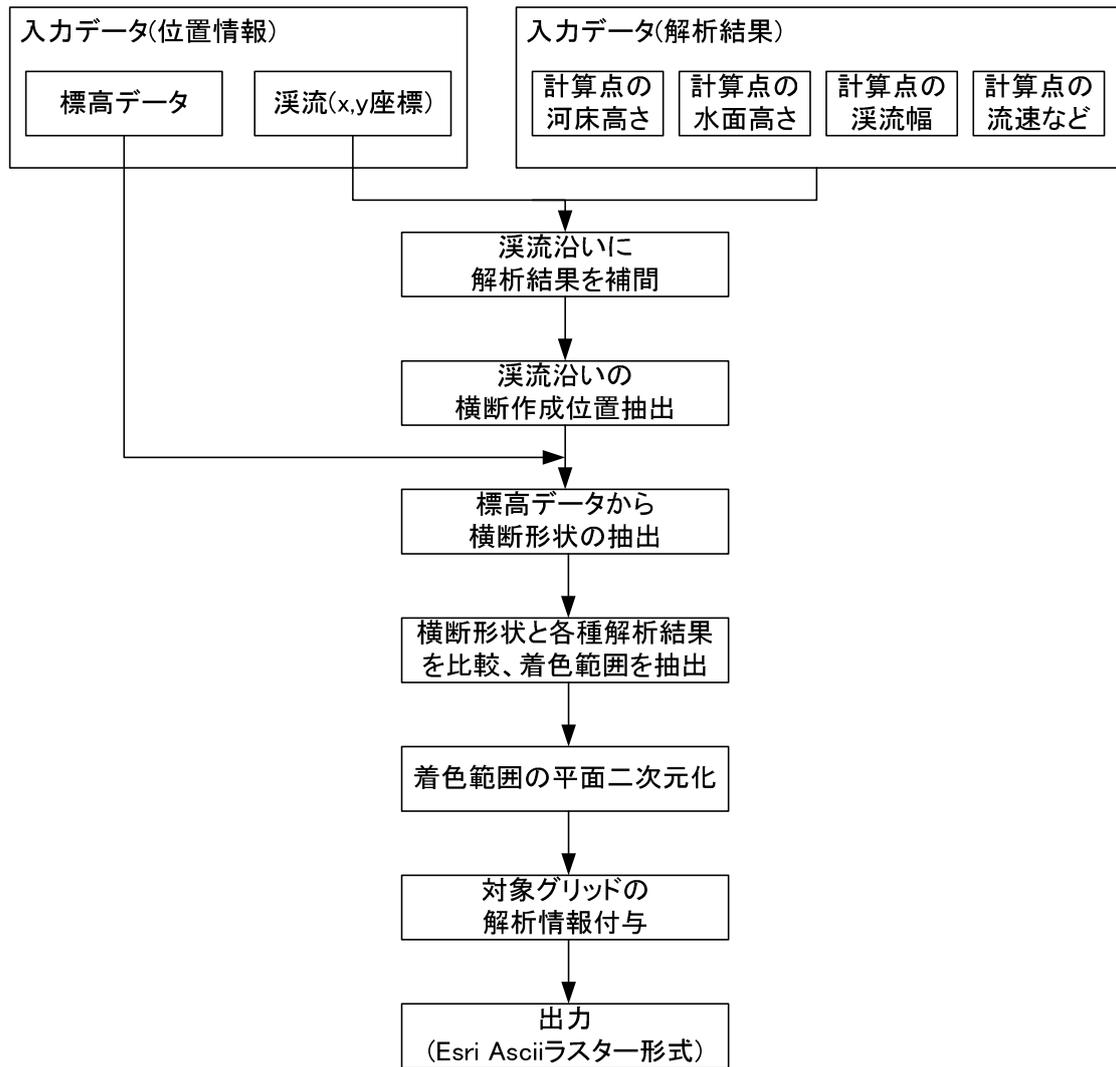


図-5. 1 プログラムの処理内容

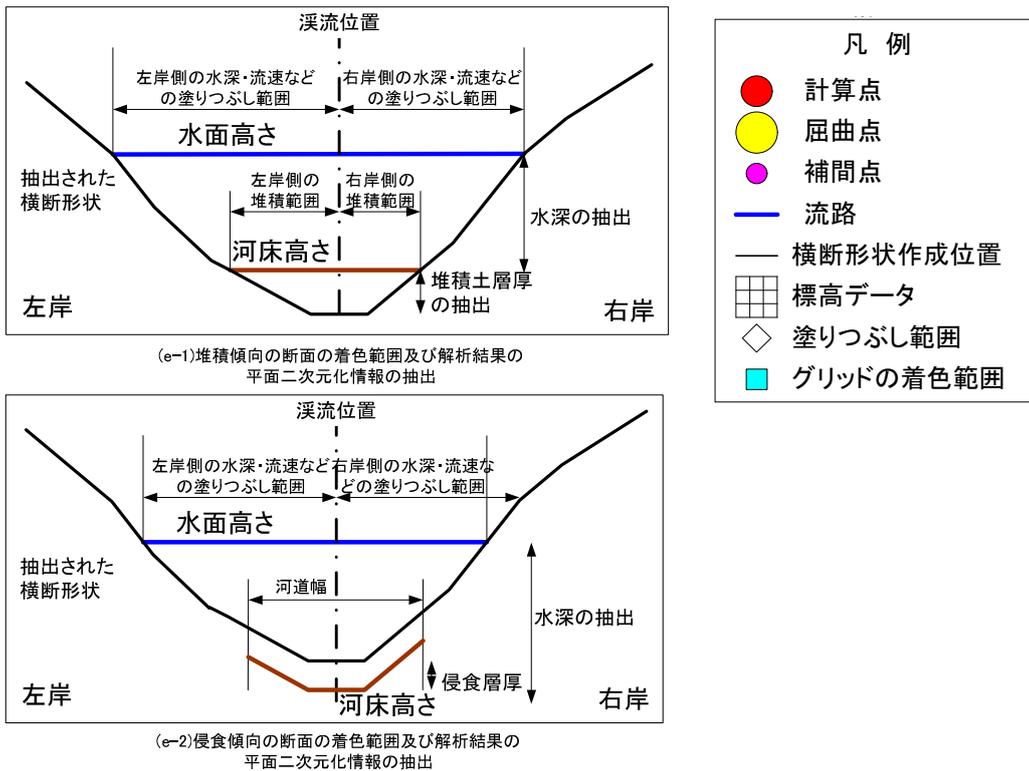
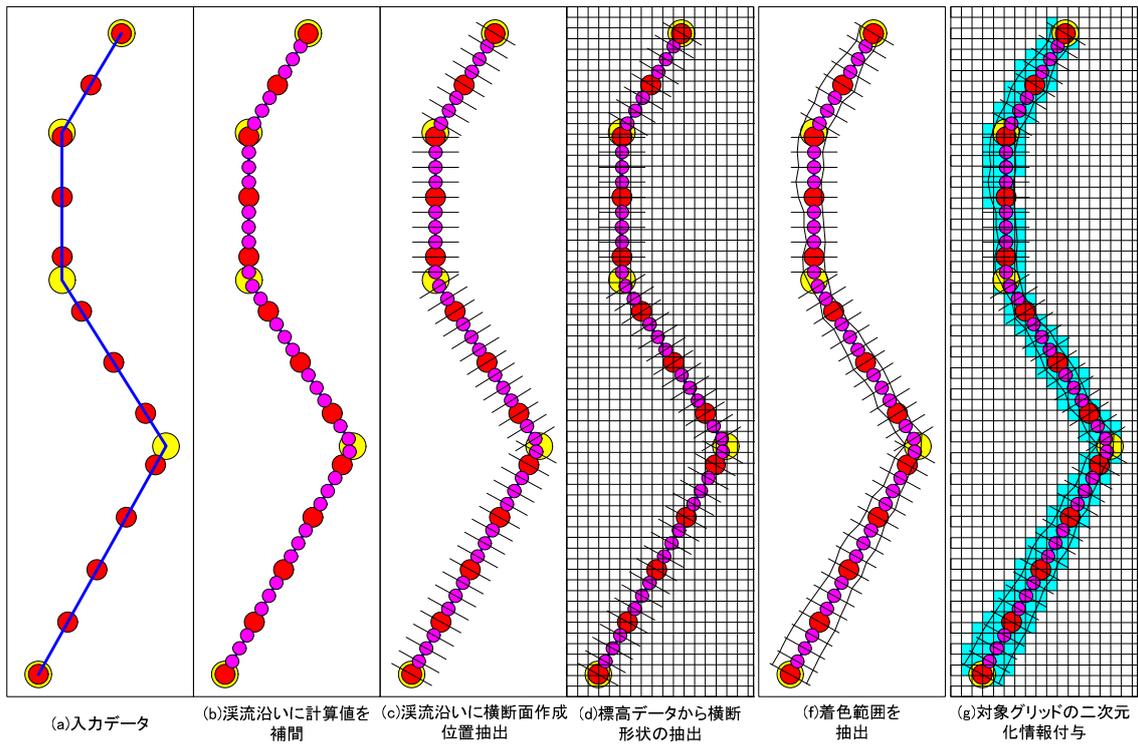


図-5. 2 LPデータを用いた地形形状を考慮した一次元解析結果の平面二次元表示イメージ

### 5.2.3 出力データ

出力データは、テキストデータで確認することができる ESRI ASCII ラスター形式<sup>1)</sup>とした。この形式は、ESRI 社製ソフト ArcGIS 上においてデータ処理が行なえるデータとして開発されたが、フリーオープンソフトウェアである QGIS<sup>2)</sup>やシェアウェアである SIS<sup>3)</sup>などでも拡張子を変更することによって表示できる汎用性の高い形式である。

## 5.3 プログラムの実行例と実行結果

### 5.3.1 対象地の概要

対象地は山間部の溪流であり、詳細な LP データが存在する京都市東山区清水にある清水寺周辺を対象とした。対象とした溪流を図-5.3 に示す。対象とした溪流は、清水寺の北に位置し、溪流面積約 0.04km<sup>2</sup> で溪流長約 200m である。

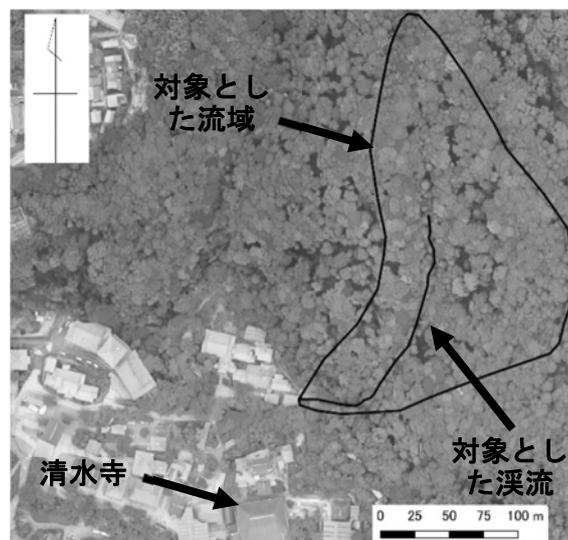


図-5.3 対象地域と解析データ作成範囲

### 5.3.2 入力データ

プログラムでは、以下の3つのデータを使用した。

- ① 溪流中心位置：始点，屈曲地点，終点の平面直角座標系の座標を抽出したデータ(表-5.1 にデータの一部を示す)。
- ② ①に示す標高データより等高線図を作成し，判読により溪流データを作成した。
- ③ 標高データ：1.0m, 2.0m, 5.0m の格子データ (0.5m の LP データをもとに作成(中日

本航空(株)提供))

- ③ 一次元解析結果：一次元解析結果から各計算点の河床高さ、水面高さおよび流速や土砂濃度などを抽出したデータ(表-5.2 にデータの一部を示す)。本研究では、一次元解析シミュレーションプログラム kanako<sup>4)</sup>により、表-5.3 に示すパラメータを使用した不定流計算結果を用いた。なお、流入条件は図-5.4 に示すハイドログラフ<sup>5)</sup>とし、土砂濃度を 0.3 として計算を実施した。なお、本研究では不定流計算を用いた結果により適用した例を示したが、計算結果において河床高さ、水面高さが出力できる計算手法であれば、任意の解析手法で適用可能である。

表-5.1 溪流位置データの例

id	X座標 (m)	Y座標 (m)
1	-19505.3	-111281.6
2	-19504.7	-111283.8
3	-19502.2	-111288.7
4	-19501.8	-111290.6
5	-19501.7	-111292.8
6	-19501.8	-111297.6
7	-19501.5	-111299.2
8	-19500.8	-111300.3
9	-19501.7	-111303.8
10	-19503.6	-111305.7
11	-19505.3	-111308.9
12	-19505.2	-111310.8
13	-19505.8	-111313.5
14	-19505.8	-111316.8
15	-19507.8	-111321.5
16	-19508.8	-111327.5
17	-19509.8	-111329.3
18	-19509.8	-111332.1
19	-19511.0	-111336.8
20	-19513.3	-111340.0
21	-19513.8	-111343.6
22	-19514.0	-111345.6
23	-19516.7	-111350.2
24	-19518.3	-111354.0
25	-19518.8	-111357.4

表-5. 2 一次元解析結果の例

id	距離 (m)	河床高 (m)	水面高 (m)	河道幅 (m)	土砂 濃度	流速 (m/s)
1	0	146.1	146.7	3.0	0.30	1.27
2	5	144.9	145.5	3.0	0.30	1.20
3	10	143.8	144.2	3.4	0.31	1.15
4	15	142.6	143.1	3.3	0.31	1.18
5	20	141.5	142.1	2.8	0.30	1.22
6	25	140.5	141.1	3.0	0.30	1.21
7	30	139.5	140.0	2.9	0.30	1.16
8	35	138.4	139.0	3.4	0.30	1.11
9	40	137.4	138.0	3.4	0.30	1.14
10	45	136.4	137.0	3.1	0.30	1.10
11	50	135.3	136.0	3.8	0.30	1.09
12	55	134.3	135.0	3.3	0.30	1.08
13	60	133.5	133.9	4.1	0.30	1.00
14	65	132.3	132.5	4.9	0.30	1.02
15	70	130.7	131.3	3.4	0.30	1.11
16	75	129.7	130.3	3.3	0.30	1.11
17	80	128.7	129.3	3.4	0.30	1.07
18	85	127.7	128.2	3.8	0.30	1.03
19	90	126.6	127.2	3.8	0.30	1.00
20	95	125.8	126.2	4.2	0.30	1.09
21	100	124.6	125.1	3.1	0.30	1.20
22	105	123.7	124.1	2.8	0.30	1.13
23	110	122.7	123.1	3.8	0.30	1.08
24	115	121.8	122.0	3.6	0.29	1.07
25	120	120.9	121.1	4.4	0.29	1.03

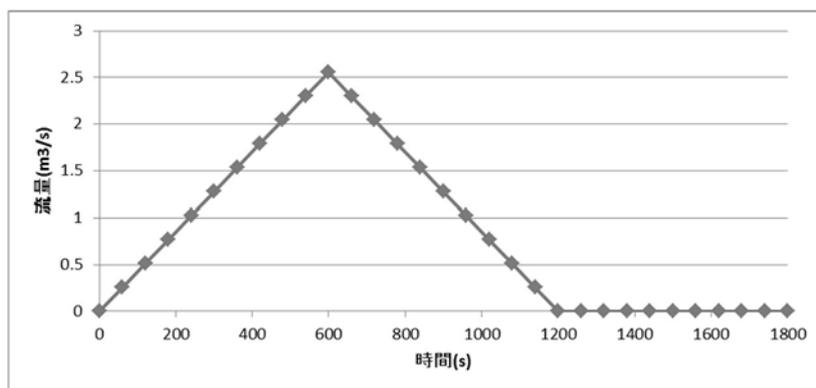


図-5. 4 一次元解析に用いたハイドログラフ

表-5. 3 解析パラメータ

項 目	値	単位
計算時間	1800	s
計算時間間隔	0.01	s
砂礫の密度 $\sigma$	2650	kg/m <sup>3</sup>
水の密度 $\sigma$	1000	kg/m <sup>3</sup>
重力加速度	9.8	m/s <sup>2</sup>
水深の最小値	0.01	m
河床の容積濃度	0.65	
マンニングの粗度係数	0.03	
侵食速度係数	0.0007	
堆積速度係数	0.05	
堆積速度における慣性力を考慮した時の係数	0.9	
平均粒径	0.45	m
砂の内部摩擦角	35	°

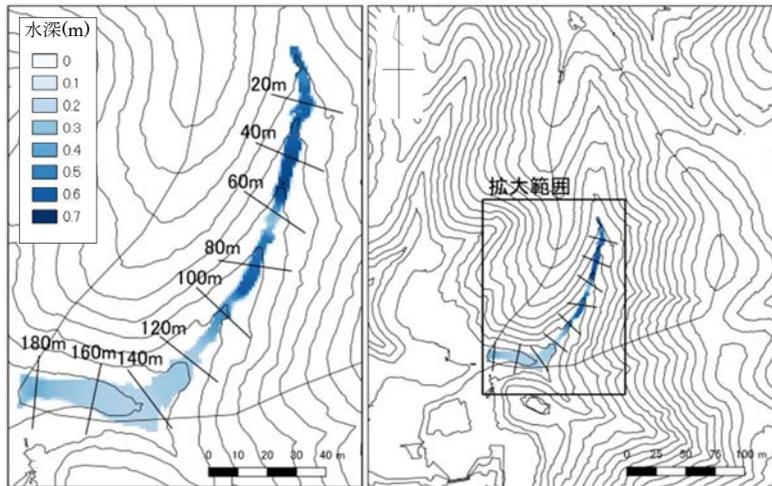
### 5.3.3 プログラムの実行例と実行結果

#### (1) 各種結果の最大値表示例

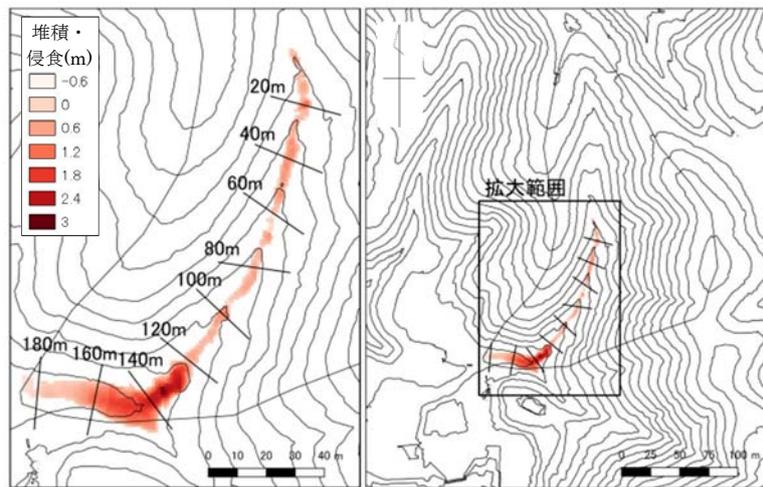
一次元解析結果の各計算地点における最大水位，最大河床高および流速の値に対し，本研究により開発した手法を適用した結果を図-5.5に示す．また，従来手法との比較のため，一次元解析結果を地図上で表示できる HyperKANAKO<sup>6</sup>および第4章に示した表示手法を用いた表示結果を図-5.6に示す（図-5.6(a)：溪流沿いに1ピクセルずつ着色した表現手法，図-5.6(b)：計算点の溪流幅を考慮して着色した表現手法）．

図-5.5に示すとおり，本手法による結果は，従来手法(図-5.6(a)および図-5.6(b))と同様に，水深分布の情報を容易に把握することが可能となっていることがわかる．また，図-5.5(a)に示すとおり，本手法では，従来手法に加え，平面二次元上で横断形状を加味して着色範囲を表現することが可能となり，横断形状の非対称性が強い山間部の溪流(たとえば，140m地点や160m地点)でも，地形形状を考慮した正確な着色範囲を表現することが可能となった．さらに，図-5.5(b)に示すように，堆積域および侵食域および河床の変動状況を横断地形に合致させて表示することが可能となり，水深や流速の出力結果と見比べることにより，溪流幅が広がり勾配が小さくなる地点(たとえば，120m～140m間)において堆積層厚が大きくなり，流速が低減する様子を容易に把握することができる．

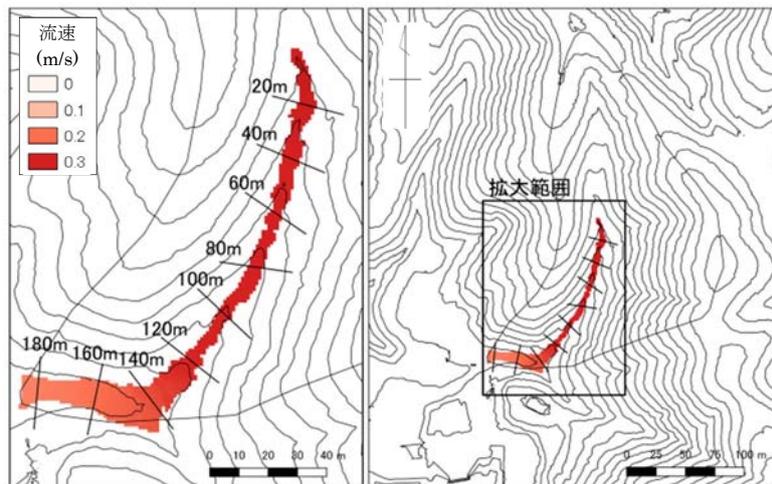
このように，溪流幅を考慮して，水理解析結果を平面二次元的に図化することによって，特徴的な水理現象が発生する箇所・範囲を短時間で容易に把握することが可能となる．またこれに伴い，設定溪流幅と大きく乖離する着色範囲が確認された場合などには，設定溪流幅の検証の必要性，あるいは平面二次元解析などの詳細解析の必要性に関する判断材料として活用することも期待できる．



(a) 水深の表示例

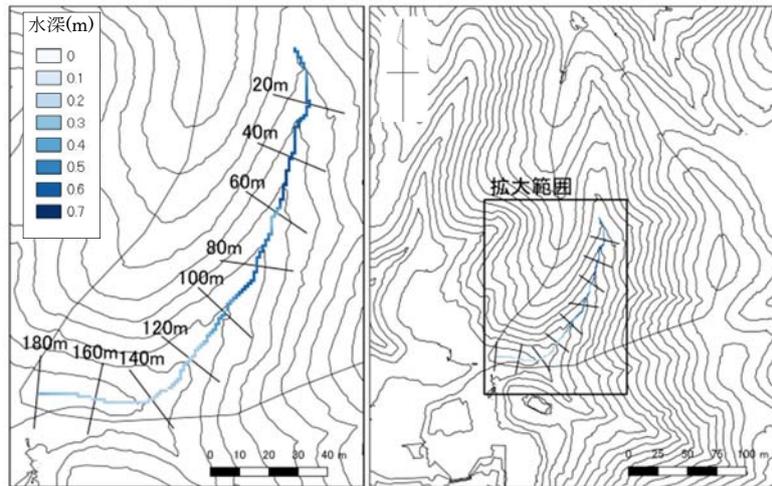


(b) 堆積層厚の表示例

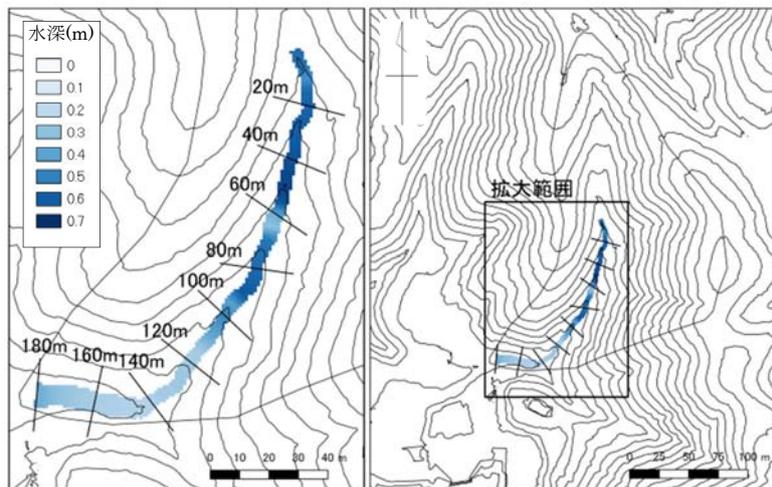


(c) 流速の表示例

図-5.5 開発した手法を用いた一次元解析結果の表示例



(a) 水深の表示例(流路沿い1ピクセル表示)



(b) 水深の表示例(第4章の手法を用いた表示)

図-5.6 一般的な一次元解析結果の表示例

## (2) 水深と堆積土層厚の時系列変化

一次元解析結果のうち300分後、600分後、900分後、1200分後の4パターンに対して、データ出力した水深の表示例を図-5.7に示し、堆積層厚の表示例を図-5.8に示す。水深を時系列的に表示することによって、洪水流が上流から谷出口まで流下する時間や、上流から任意の位置まで流下する時間を容易に把握することが可能である。堆積層厚の変化を表示することにより、土砂の時系列変化も容易に把握することが可能である。また、解析結果を細かい計算間隔で出力することにより、動画の作成も可能であり、情報公開や住民参加型の説明会などの場において、効果的な説明が可能となることが期待できる。

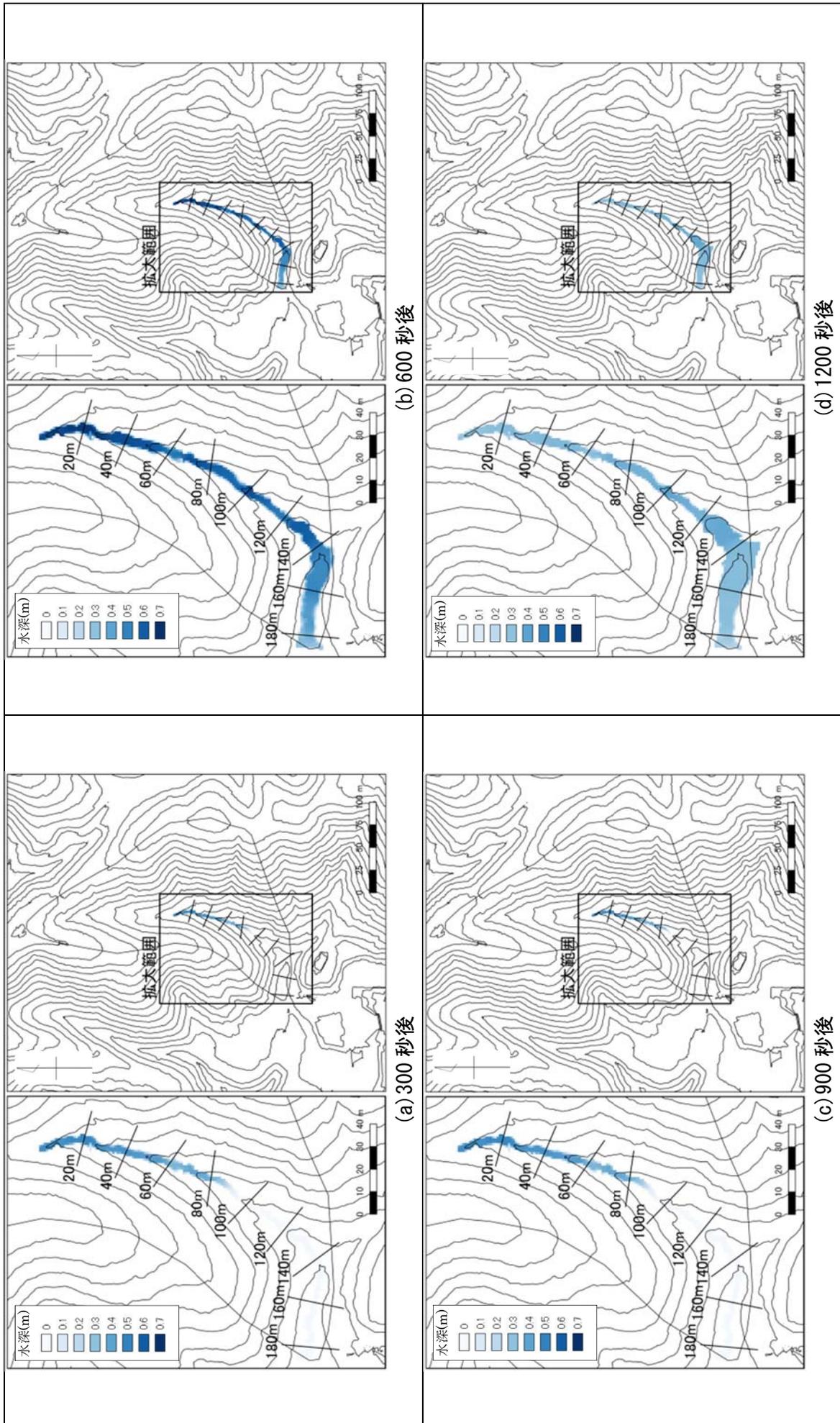
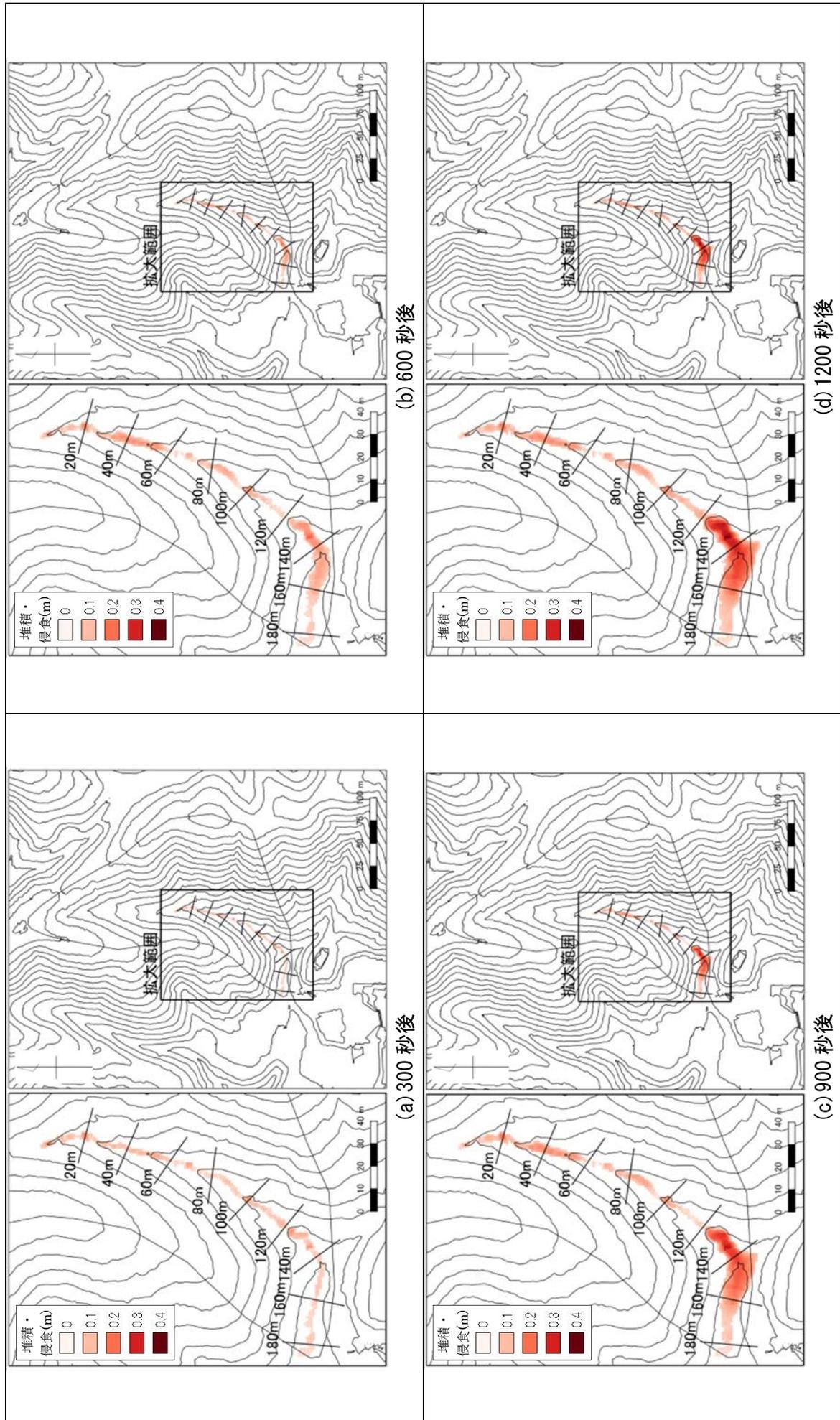


図-5.7 水深の時系列変化表示例

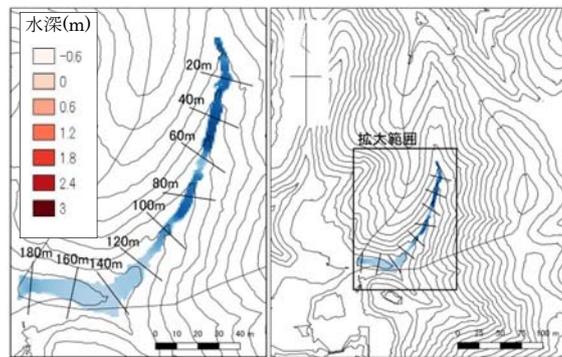


図一5. 8 堆積層厚の時系列変化表示例

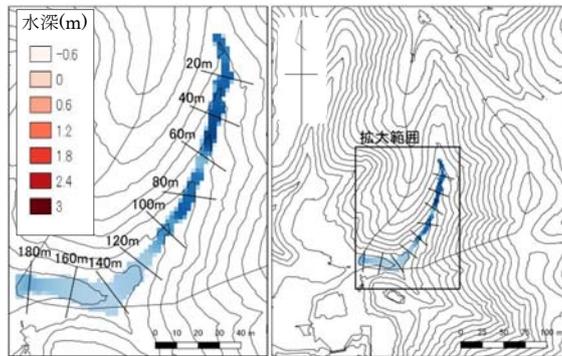
### (3) グリッド間隔の違いによる表示例

GIS データ出力時の標高データを 1m, 2m, 5m の 3 パターン対して、データ出力した例を図-5.9 に示す. 図-5.9(a)に示す 1m グリッド間隔の表示結果と図-5.9(b)に示す 2m グリッド間隔の表示結果は、ほぼ同様の結果となっており、溪流幅と水深の関係を表現することが可能となる.

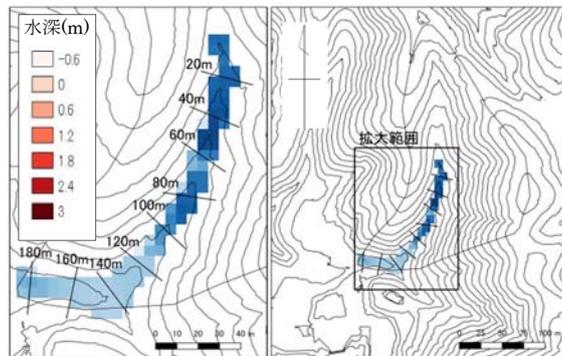
一方、図-5.9(c)に示す 5m のグリッド間隔の表示結果は、グリッドサイズが規制され、溪流幅と水深の関係が不明確である. これは、今回の対象の溪流幅は 3~10m 程度であり、溪流幅より大きなグリッド間隔で出力されたことが要因である. 従って、本ケースではグリッドは 2m より細かく出力する必要があると考えられる.



(a) 1m グリッド



(b) 2m グリッド



(c) 5m グリッド

図-5.9 グリッドサイズ変更による見え方の違い

## 5. 4 まとめ

本章では、河床縦断のグラフに見慣れていない若手技術者や一般市民でも容易に一次元解析結果を読み取れるようにするため、『山間部における一次元解析結果に対して、溪流地形形状を正確に反映し、水面範囲および土砂堆積・浸食範囲を地形図上に表示できる平面二次元表現手法』の開発を行い、清水寺北部の溪流に対して適用した例を示した。本章において示した結果をまとめ以下に述べる。

- ・水深、堆積土層厚と流速を平面二次元で表示できることを示した。
- ・水深と堆積土層厚の時系列変化を平面二次元で表示できることを示した。
- ・グリッド間隔の違いによる平面二次元で表示できることを示した。

この手法を用いることによって、水理現象および河床変動（堆積・浸食）などの一次元解析結果を容易に説明性の高い平面二次元表示化できるものと考えられる。

## 参考資料

- 1) QGIS プロジェクト : QGIS, <http://qgis.org/ja/site/>
- 2) ESRI : ArcGIS Desktop, <https://www.esri.com/products/arcgis-desktop/>
- 3) Informatix : SIS, <http://www.informatix.co.jp/sis/>
- 4) 中谷加奈・里深好文・水山高久 : GUI を実装した土石流一次元シミュレータ開発, 砂防学会誌, Vol.61, No.2, pp.41-46, 2008
- 5) 縄手洋介, 梶山敦司, 藤本将光, 里深好文 : 清水寺周辺溪流における土石流氾濫解析, 歴史都市防災論文集, vol.10, p.59-66, 2016
- 6) 堀内成朗, 岩波英二, 中谷加奈, 里深好文, 水山高久 : LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発 : 砂防学会誌, Vol.64, No.6, p.25-31, 2012

## 第6章 結論

### 6.1 本論文の成果

本論文は、近年している集中豪雨に伴って、同時多発的に発生する土石流を対象として、効率的に土石流シミュレーションを実施し、ハザードマップなどの作成を行えるようにするため、数値解析に必要な入力データのうち「縦断形状」、「溪流幅」を航空レーザー計測値より抽出する手法を開発した。また、開発した手法を用いて、これまで検討されていなかった地形量の入力データが解析結果に与える影響を評価した。さらに、これまで一次元解析結果からハザードマップを作成するために、平面二次元化する手法を開発した。

以下に、各章で得られた主要な研究成果をまとめる。

第1章では、「一次元解析に用いる入力データを容易に作成する手法」と「一次元解析結果を容易に判断できる表現手法」の作成を行う必要性について概説した。その上で、本研究の目的や手法について記述した。

第2章では、一次元解析に用いる入力データうち「縦断形状」を「航空レーザー計測値」から抽出する手法を示した。また、プログラムを開発し、清水寺北部の溪流に対して実施した例を示した。ここでは、溪流幅を現地調査において得られた5m一定として、「縦断形状の抽出間隔」と「航空レーザー計測値のグリッド間隔」を変更した流出解析を行い、間隔の変更により解析結果に与える影響を評価した。その結果、「縦断形状の抽出間隔が10m以下」、「航空レーザー計測値のグリッド間隔が5m以下」程度の条件で縦断形状を抽出すれば妥当であることを示した。

第3章では、一次元解析に用いる入力データのうち「溪流幅」を「解析に用いる流量」と「航空レーザー計測値」から抽出する手法を示した。また、プログラムを開発し、清水寺北部の溪流に対して実施した例を示した。ここでは、「縦断形状の抽出間隔」、「航空レーザー計測値のグリッド間隔」、「流量」を変更した流出解析を行い、間隔の変更および流量の変更により解析結果に与える影響を評価した。その結果、「縦断形状の抽出間隔が10m以下」、「航空レーザー計測値のグリッド間隔が5m以下」、「解析に用いる

ピーク流量」程度の条件で溪流幅を抽出すれば妥当であることを示した。

第4章では、一次元解析結果をハザードマップなどに利用できるように、「溪流などの流路の位置情報」、「計算地点における溪流幅」、「一次元解析結果」の三つのデータから、平面二次元で表現する手法を示した。また、プログラムを開発し、熊本県の白川を対象として、最大水深と最大流速の表示例、水深と流速の時系列変化の表示例、グリッド間隔の違いによる表示例、二次元解析結果との接合した結果の表示例を示し、これまでの一次元解析結果より容易に解析結果を判断できることを示した。

第5章では、第4章で示した河道幅を用いて一次元解析結果を平面二次元表示することで、より現地条件に合った表現を行えるように、「溪流などの流路の位置情報」、「航空レーザー計測値」、「一次元解析実施結果」の三つのデータから、平面二次元表示する手法を示した。また、プログラムを開発し、京都市清水寺北部の溪流を対象として、水深、堆積土層厚と流速の表示例、水深と堆積土層厚の時系列変化の表示例、グリッド間隔の違いによる表示例を示し、これまでの一次元解析結果である河床縦断グラフより、容易に解析結果を判断できることを示した。

## 6. 2 今後の課題

本論文では、横断形状（溪流幅）の算定に際しての溪流位置情報（平面線形）については、視認による判読・設定を行った。今後、より高い精度で効率的に土石流解析を実施するためには、LP データをもとに落水線から溪流位置情報（平面線形）を自動的に抽出し、溪流幅を設定する手法を開発する必要があると考えられる。また、一次元解析の入力データのうち、堆積土層厚については現地調査などを行い、地質や地形条件をもとに設定する必要がある。今後、堆積土層厚についても航空レーザー計測値から推定する手法を開発が必要と考えられる。これら二つの課題を解決することができれば、航空レーザー計測値から入力データの作成ができ、ハザードマップ作成までが一連の流れで実施できるようになると考えられる。

さらに、本論文の成果および上記二つの課題を解決する手法を GIS のプラグインなどとして開発することができれば、より容易に土石流シミュレーションが行える用になり、土石流災害軽減に活用できるようになると考えられる。

## 謝 辞

本論文の執筆を進めるにあたり、懇切丁寧なご指導とご高配を賜りました立命館大学理工学部里深好文教授に心より感謝し、厚くお礼申し上げます。先生には、理工学研究科博士課程後期課程への門戸を開いて頂くとともに、数値解析および表現手法など至るところで多大なご指導を頂きました。

立命館大学理工学部小林泰三教授、同大学理工学部藤本将光准教授には、お忙しい時期にもかかわらず、副査を引き受けて頂きましたことを、深く感謝いたします。

株式会社建設技術研究所大阪本社地圏環境部の向井信之部長には、社会人大学院入学の申請に協力して頂き、二つ目の博士号取得の一步を与えて頂いた。砂防室の柳崎剛室長には、進学先として立命館大学を紹介して頂いた。地圏環境部のあべ松次長には、執筆論文の議論や大学院に通学する機会を頂いた。地圏環境室の方々には、業務の合間に本論文執筆の機会を与えて頂くと共に、ご支援頂いた。また、ダム部の高田康史氏には、大学院進学に際し研究テーマについて議論を頂くとともに、論文執筆に際しても多くの議論をして頂いた。砂防室の上杉大輔氏には、砂防に関わる用語や考え方を教えて頂いた。地圏環境室の黒田卓也氏には、研究および博士論文を執筆に際し、業務実施の補助を頂いた。

鳥取大学大学院工学研究科和田孝志氏には、流出解析についてご教授頂くとともに、論文執筆に際し多くの議論をして頂いた。

中日本航空株式会社の平尾勝一氏には、航空レーザー計測データをご提供頂くとともに、レーザー計測データについてご教授頂いた。

立命館大学理工学部を卒業された、里明信氏、縄手洋介氏には解析データの作成を手伝って頂くとともに、多くの議論をして頂いた。

この多くの励ましと協力を得て本論文をまとめるに至った。

以上の方々に対し、ここに感謝の意を示す。