

GISを活用した道路斜面のリスク評価
に関する共同研究報告書
航空レーザ計測による道路斜面基図
作成要領（案）

平成16年2月

独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ(地質)
材料地盤研究グループ(土質)
アジア航測株式会社
応用地質株式会社
基礎地盤コンサルタンツ株式会社
国際航業株式会社
住鉱コンサルタント株式会社
日本工営株式会社

Copyright©(2004)by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずして これを行ってはならない。

GISを活用した道路斜面のリスク評価 に関する共同研究報告書

航空レーザ計測による道路斜面基図 作成要領（案）

独立行政法人土木研究所	材料地盤研究グループ地質チーム	上席研究員	脇坂 安彦*
〃	材料地盤研究グループ地質チーム	上席研究員	佐々木 靖人
〃	材料地盤研究グループ地質チーム	主任研究員	阿南 修司
〃	材料地盤研究グループ地質チーム	研究員	柴田 光博
〃	材料地盤研究グループ土質チーム	上席研究員	恒岡 伸幸**
〃	材料地盤研究グループ土質チーム	上席研究員	小橋 秀俊
〃	材料地盤研究グループ地質チーム	研究員	加藤 俊二
アジア航測株式会社	コアテクノロジー事業部レーザ計測グループ	マネージャ	沼田 洋一
〃	コアテクノロジー事業部防災グループ	技 師	高山 陶子
応用地質株式会社	技術本部防災保全センター道路防災グループ	主 任	本木 浩也
基礎地盤コンサルタンツ株式会社	ジオエンジニアリング事業部探査開発室	室 長	井上 誠
国際航業株式会社	技術センター	技師長	中筋 章人
〃	技術センター瀬戸島研究室	室 長	瀬戸島 政博
〃	国土空間事業本部空間計測部	主任技師	織茂 郁
〃	国土空間事業本部空間計測部	技 師	中村 三友
住鋤コンサルタント株式会社	技術開発部	部 長	千葉 昭彦
〃	仙台支店 地質グループ	グループ長	佐々木孝雄
日本工営株式会社	コンサルタント国内事業本部	技師長	小俣 新重郎
〃	環境エンジニアリング事業部ライフサイクルマネジメント部	課 長	藤原 鉄朗
	環境エンジニアリング事業部ライフサイクルマネジメント部	技 師	金本 康宏

* 現 国土交通省 近畿地方整備局 大戸川ダム工事事務所 所長

** 現 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路研究官

要旨

本報告書は、土木研究所と民間6社との共同研究「GISを活用した道路斜面のリスク評価に関する研究」における平成11～14年度までの成果をとりまとめたものである。

本報告書は、道路斜面防災調査に必要な高精度の基図データ取得の手段として、航空レーザ計測手法を使用する際の手順・方法等を取りまとめたものである。

キーワード：航空レーザ計測、道路斜面防災、基図作成、GIS

關於日本經濟發展之研究

日本經濟發展之研究

關於日本經濟發展之研究

(著) 趙雲龍

ま え が き

道路斜面災害に対する総合的なリスクマネジメント技術を実現させるためには、膨大な数にのぼる道路斜面の抱えるリスクを効率的に評価していくことが不可欠である。また、道路への岩盤・斜面崩壊のリスクを正しく把握するためには、危険箇所の情報を面的に把握し、ハザードマップ（危険度マップ）として評価することが必要である。そのためには、多くのデータを総合的に取り扱う必要があるので、データの取得・整理段階から解析・評価・管理までの全段階において、GIS（Geographic Information System：地理情報システム）を活用した体系（これを「道路斜面防災 GIS」と仮称）を導入することで、一連の作業を効率的かつ効果的に行うことが可能となる。

本共同研究では、リモートセンシングなどの調査法による斜面の面的調査から GIS による整理手法、GIS を用いた斜面ハザード評価ならびにハザードマップの作成手法について検討を行ってきた。その成果として、次の 4 種類の報告書を作成した。

- ・ 航空レーザ計測による道路斜面基図作成要領（案）【本報告書】
（道路斜面防災調査に必要な高精度の基図データ取得の手段として、航空レーザ計測手法を使用する際の手順・方法等を取りまとめたもの。）
- ・ 道路斜面ハザードマップ作成要領（案）
（道路に災害を及ぼす危険性のある斜面を的確に抽出し、ハザードマップとして図化するための標準的な方法を取りまとめたもの）
- ・ 道路斜面防災 GIS 標準仕様書（案）
（道路斜面防災 GIS アプリケーションシステムに必要な機能やデータ連携・システム連携に関する指針を示すものである。道路斜面防災に関する各種 GIS アプリケーションシステムが相互に連携を図り、効果的な運用を実現するために作成したもの）
- ・ 道路斜面防災 GIS データ整備標準仕様書（案）
（道路斜面防災 GIS に供するデータの作成・管理・更新に関する標準的な手法を整理したもの）

これらの要領（案）、仕様書（案）と、GIS 等の新たな技術を活用することにより、膨大な数に及ぶ道路斜面の安全対策が、効率的かつ効果的に行えることを期待する。

目 次

1. 既存基図の概況	1
1.1 基図の種類	2
1.2 道路斜面防災調査と基図	3
2. 航空レーザ計測システムの概要	5
2.1 航空レーザ計測システムとは	5
2.2 システムの特徴	6
2.3 システムの精度	7
3. 航空レーザ計測による基図の作成手順	9
3.1 作業のフロー	9
3.2 作業方法	10
1) 計画・準備	10
2) 地上GPS基準局の選点	10
3) 航空レーザ計測	10
4) 地上GPS基準局観測	11
5) レーザデータ解析	11
6) デジタルカメラ等の撮影	13
7) ノイズデータ処理	13
8) 地物フィタリング処理	13
9) 三次元データ加工	14
3.3 各種作成データ	14
1) 標高データ	14
2) 等高線図	15
3) 断面図	15
4) デジタルオルソフォト	15
5) その他	15
4. 今後の課題と展望	24

目 次

第一章 緒論	1
第二章 基礎理論	10
第三章 實驗方法	25
第四章 實驗結果	40
第五章 討論	55
第六章 結論	70
第七章 參考文獻	85
第八章 附錄	100
第九章 索引	115
第十章 圖表	130
第十一章 表格	145
第十二章 公式	160
第十三章 圖解	175
第十四章 圖例	190
第十五章 圖說	205
第十六章 圖表	220
第十七章 表格	235
第十八章 公式	250
第十九章 圖解	265
第二十章 圖例	280
第二十一章 圖說	295
第二十二章 圖表	310
第二十三章 表格	325
第二十四章 公式	340
第二十五章 圖解	355
第二十六章 圖例	370
第二十七章 圖說	385
第二十八章 圖表	400
第二十九章 表格	415
第三十章 公式	430
第三十一章 圖解	445
第三十二章 圖例	460
第三十三章 圖說	475
第三十四章 圖表	490
第三十五章 表格	505
第三十六章 公式	520
第三十七章 圖解	535
第三十八章 圖例	550
第三十九章 圖說	565
第四十章 圖表	580
第四十一章 表格	595
第四十二章 公式	610
第四十三章 圖解	625
第四十四章 圖例	640
第四十五章 圖說	655
第四十六章 圖表	670
第四十七章 表格	685
第四十八章 公式	700
第四十九章 圖解	715
第五十章 圖例	730
第五十一章 圖說	745
第五十二章 圖表	760
第五十三章 表格	775
第五十四章 公式	790
第五十五章 圖解	805
第五十六章 圖例	820
第五十七章 圖說	835
第五十八章 圖表	850
第五十九章 表格	865
第六十章 公式	880
第六十一章 圖解	895
第六十二章 圖例	910
第六十三章 圖說	925
第六十四章 圖表	940
第六十五章 表格	955
第六十六章 公式	970
第六十七章 圖解	985
第六十八章 圖例	1000
第六十九章 圖說	1015
第七十章 圖表	1030
第七十一章 表格	1045
第七十二章 公式	1060
第七十三章 圖解	1075
第七十四章 圖例	1090
第七十五章 圖說	1105
第七十六章 圖表	1120
第七十七章 表格	1135
第七十八章 公式	1150
第七十九章 圖解	1165
第八十章 圖例	1180
第八十一章 圖說	1195
第八十二章 圖表	1210
第八十三章 表格	1225
第八十四章 公式	1240
第八十五章 圖解	1255
第八十六章 圖例	1270
第八十七章 圖說	1285
第八十八章 圖表	1300
第八十九章 表格	1315
第九十章 公式	1330
第九十一章 圖解	1345
第九十二章 圖例	1360
第九十三章 圖說	1375
第九十四章 圖表	1390
第九十五章 表格	1405
第九十六章 公式	1420
第九十七章 圖解	1435
第九十八章 圖例	1450
第九十九章 圖說	1465
第一百章 圖表	1480

1. 既存基図の概況

1.1 既存基図の種類

ここでは、既存の地図のうち、道路周辺の地形状況がある程度把握でき、調査に利用可能な地図を「基図」として、その主なものを以下に示す。

国土地理院の地図

縮尺 1/2,500～1/5,000 の国土基本図もあるが、主に 1/25,000 以上の小縮尺地形図である。広域の案内図、概況図などに使用されることが多い。

表 1.1-1 最近における日本の主要地図一覧表

(島ほか、1981 を一部修正し編集し直したもの)

地図名	発行機関名	作成年	縮尺	大きさ色数	特長・備考
□地形図	建設省 国土地理院	明18～	1/5万	柁 1～4色	地形のほか、植生、市街、交通等の現況を表わした最も基本的な地図で、大正15年に日本内地が完成。現在3～5年ごとに修正されている。1,251面(全国)
□集成図	建設省 国土地理院	昭42～47	1/5万	菊 8～12色	1/5万の地図のうち、大都市や有名な観光地等の区域を1枚にまとめた地図。日光等7面が刊行中。
□地形図	建設省 国土地理院	明43～	1/2.5万	柁1～4色	1/5万にひきつづき、全国をカバーする最も基本的な地図。4,241面(昭和52年3月現在刊行面数)
□地勢図	建設省 国土地理院	明19～	1/20万	6色	1ないし数府県程度の範囲の地勢や交通などを見やすく表わした地図。
□地方図	建設省 国土地理院	昭41～	1/50万		日本全国を6地方2諸島(北海道Ⅰ、北海道Ⅱ、東北、関東甲信越、中部近畿、中国四国、九州、小笠原南西諸島)にわけてあらわ
□1/100万 国際図	建設省 国土地理院	昭42～	1/100万	四六12色	世界各国が協力してそれぞれの国について統一した図式と縮尺でつくっている地図。地名はローマ字。日本の分担は、北日本、中央日本、南日本の3面
□1/100万 日本	建設省 国土地理院	昭43～	1/100万	5色	1/100万国際図の地名を日本語にあらためた地図。
□日本と その周辺	建設省 国土地理院	昭46～	1/300万	四六12色	わが国全域と周辺を収めた地図。
□国土基本図	建設省 国土地理院	昭35～	1/5,000	四六1色	国土の開発、保全計画の基礎として、国土の現況を正確に把握することを目的とした大縮尺の地図。 5,541面(約55,700km ²)(昭和52年3月現在)
□国土基本図	建設省 国土地理院	昭35～	1/2,500	四六1色	1,849面(約4,600km ²)(昭和52年3月現在)
□骨格図	建設省 国土地理院	昭39～	1/2,500	四六1色	大都市についてとくに細し設置された細部基準点と道路、鉄道、水路など骨格を表した地図。 684面、約1,600km ² (昭和52年3月現在)

都市計画図、市町村図

都市計画区域では、縮尺 1/2,500 の都市計画図(都市計画基本図)が作成され自治体の窓口で販売されており、この白図は基図として用いることができる。ただし、都市域が前提であるため道路斜面災害の山地部まで網羅されていることは少ない。また、等高線は航測図化のみによるため精度は期待できない。

また市町村によっては、縮尺 1/2,500～1/10,000 程度の市町村図を全域で作成している所もある。

森林基本図

各県の民有林部では、地域森林計画の策定のために縮尺 1/5,000 の森林基本図が作成されており、森林管理局などで購入することができる。等高線は航測図化のみによるため精度は期待できない。また、多年にわたって更新が行われず、古い情報であることも多い。

道路台帳附図、路線図

道路台帳附図は道路を対象とした基図として最も大縮尺(1/500)の地図であるが、等高線はほとんど記載されていないか、あっても尾根までは網羅されていない場合が多い。

なお、事務所によっては、管理道路に沿った縮尺 1/2,500～1/5,000 程度の路線図が作成されている場合もある。

市販のデジタル地図

近年、デジタル化された地図が一般的に市販されるようになっている。主なものとして、数値地図 50m メッシュ(標高)[国土地理院]、GISMAP Terrain(10m メッシュ DEM)[北海道地図]、S=1/2,500 レベルの等高線図等[各社]などがある。

その他

土砂災害新法(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)の施行により、精度の良い地形情報をもった砂防基盤図の整備が急務となっている。道路にも利用可能と考えられる。

1.2 道路斜面防災調査と基図

1) 既存基図の問題点

道路斜面の防災管理においては、危険箇所の調査・計画のため精度の良い基図データの取得が不可欠である。特に、近年問題となっている、道路斜面背面からの土砂流出のような災害形態を把握するためには、道路から斜面上方尾根までの地形情報が精度良く記載された基図を用い、災害地形を把握することが重要である。

しかしながら現状では、前節の「既存基図」に示すように、道路管理の基本図となっている道路台帳に等高線は道路沿いのごく一部が記載されるのみである。路線沿いに縮尺 1/2,500 程度の地形図が図化されている路線は少数であり、大多数の路線では、地形情報を得ようと思えば都市計画図や森林基本図を利用するほか無い。その場合、等高線は航測図化のみによるため精度に疑問が残るほか、必要な地域が図化されていない場合も多い。

主な利用目的に応じた大まかな基図縮尺に、既存基図の例とその問題点を加え、表 1.2-1 に示す。

ここで、広域の写真判読などは $S=1/25,000 \sim 1/5,000$ 程度の小縮尺基図を用いることが多く、等高線の精度はやや粗くともある程度目的は達することができるものと考えられる。また、 $S=1/500$ 程度の大縮尺地形図を用いるような詳細設計を行うにあたっては、別途現地測量が実施されることが多い。したがって特に問題と考えられるのは、路線沿いの面的な地形特性をやや詳細に把握する目的で使用されるような、 $S=1/2,500 \sim 1/1,000$ 程度の精度の良い既存基図が存在しないことである。このような目的では、高さ 1m 程度の段差や幅 10m 以内の沢などの微地形が問題となることが多く、既存の航測のみによる地形図では、このような詳細な地形は表現されていない可能性が高い。

表 1.2-1 基図縮尺と利用目的

基図縮尺	主な利用目的	対応 DEM メッシュ 精度(参考)	既存基図	
			基図の例	問題点
1/25,000 ～ 1/5,000 程度	広域の写真判読など	10m～50m	地形図 森林基本図	等高線データの精度が悪い
1/2,500 ～ 1/1,000 程度	地表踏査 地形解析、地形判読	2m～5m	都市計画図	山地部は整備されていない 等高線データの精度が悪い
1/1,000 ～ 1/500 程度	設計 詳細調査	1m～2m	道路台帳附図	等高線はほぼ道路沿いのみ

2) 望ましい基図

上述の既存基図の問題点をふまえ、必要と考えられる基図の条件を以下に示す。

- ・ 図化範囲は災害地形単位（尾根まで）を網羅すること
- ・ 必要精度は縮尺 1/2,500～1/1,000 程度（DEM メッシュ精度で 1m～5m 程度）
- ・ 高さ精度 1m 前後の微地形を表現可能なこと
- ・ 最新情報の更新が容易なこと
- ・ 災害後等、迅速な図化が可能なこと
- ・ 地形解析や GIS 等への取り込み等が容易なデジタルデータであること

これらの条件をみたす基図を作成するにあたり最適な手法として、近年の新しい測量技術である航空レーザスキャナを用いた測量（以下、航空レーザ計測）があげられる。次章以降に、航空レーザ計測の概要と、航空レーザ計測による基図の作成手順、今後の課題と展望等を述べる。

2. 航空レーザ計測システムの概要

2.1 航空レーザ計測システムとは

航空レーザ計測システムの概念図を図 2.1-1 に示す。航空機（プラットフォーム）から地上に向けてレーザパルスを照射し、地上から反射してくるレーザとの時間差より、プラットフォームと地上のレーザパルスが反射する地点の距離を計算する。また、GPS を 1 台しか使わない単独測量でなく、地上基準局と航空機の 2 台の GPS を使用する連続キネマティック測量を行うことによって、プラット

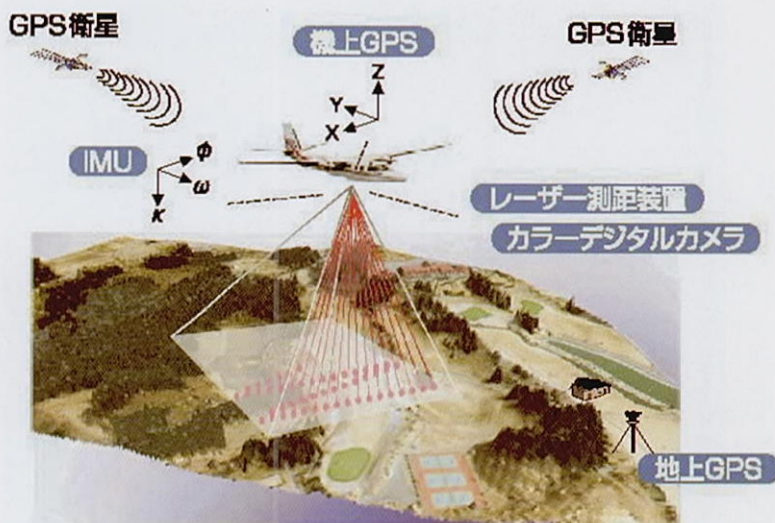


図 2.1-1 航空レーザ計測システムの概念図

ホームの正確な位置を随時計測し、さらに IMU（Inertial Measurement Unit 慣性計測装置）によってプラットフォームの 3 軸の姿勢（ ω , ϕ , κ ）を記録する。レーザ測距によるプラットフォームと地上のレーザパルスが反射する地点の距離、GPS によるプラットフォームの正確な位置、IMU によるプラットフォームの 3 軸の姿勢（ ω , ϕ , κ ）の 3 つのデータを解析することにより、1 パルスごとの地表の三次元情報つまり（X, Y, Z）の計測が可能となる。

データ間隔は進行・横断方向ともに平均 1~2m 程度が標準的であるが、この間隔は航空機の飛行速度や高度と、レーザパルスを機体に対して左右にスキャンする時のミラーの振り角（スキャン角度）やスキャン頻度を変更することによって適宜設定可能である。狭い地域でより高密度なデータ取得を行うときは、飛行速度や高度を落としスキャン角度を小さく設定し、広範囲でよりスピーディーな計測を行うときには、飛行速度や高度を上げてスキャン角度を大きく設定するというように、用途に応じてさまざまなデータ取得が可能となる。

さらに、多くの航空レーザ計測機器はレーザにより 3 次元データを取得するだけでなく、デジタルカメラ等の計測可能な画像取得装置を併せて搭載している。レーザと同じく GPS、IMU からカメラの正確な位置、姿勢を把握し、地上での対空標識設置および標定を行わずにステレオモデルの作成が可能である。このステレオ画像を使用することにより、崖地や道路などのブレイクラインの取得およびレーザ点の確認を行うことができる。また、レーザデータから生成する 3 次元データと、デジタルカメラ等

によって取得するデジタル画像より、効率的に精密なデジタルオルソフォトを作成することもできる。

航空レーザ計測に必要な地上基準点は、連続キネマティック測量に必要な1ヶ所の地上GPS基準局のみとなる。そのため、従来のような対空標識設置をはじめ計測に関わる作業量の大幅な軽減が可能となり、立ち入りが危険な山間地などの計測においても現地に立ち入る必要がない。

2.2 システムの特徴

航空レーザ計測の特徴を以下に記す。

□メリット

- ・1～2m間隔という高密度、高精度な地形データを広範囲にわたり効率的に得ることができる。
- ・森林山地でも、写真測量と異なり経験に頼らず直接的に地形を計測することができる。
- ・デジタルでデータを取得するので、計測後の工期が短い。またGISにも迅速にデータを移入することができる。
- ・計測と同時にデジタルカメラでカラー画像を取得し、効率的にオルソフォトを作成できる。また、オルソフォトと等高線を重ねて表示することで、地形と地表性状をわかりやすく表現できる。
- ・対空標識設置が不要で、計測に際して現地に立ち入る必要がないので、山間地でも安全性が高い。
- ・尾根までの図化を行うことで、道路から確認できない危険箇所も把握することができる。
- ・DEM（数値標高モデル）が作成できるので、任意箇所の断面図を取得することが可能。それにより、斜面高・勾配の見誤り等が防止できる。また、DEMから勾配等の地形量を容易に算出でき、広域の危険度を把握することができる。
- ・オルソフォトを基図に重ねて用いたり、鳥瞰図表示するなどして視覚的な表現が可能である。またこれをもとに判読を行えば、容易にGIS等に取り込むことができる。

□デメリット

- ・森林（樹葉）の密度が高いとレーザの地面への到達が制約され、計測精度が影響を受ける。そのため、地域によっては計測時期が限定されることがある。
- ・高密度とは言え離散的な計測点から地形を再現するため、道路の端や斜面傾斜の変化線などが、等高線で表現した時に多少なまって表現される。それを防ぐためには、別途画像からブレイクラインを取得して等高線を整形する必要がある。

2.3 システムの精度

1) 誤差要因

航空レーザ計測システムは多くのサブシステムにより構成されているため、誤差要因が多数存在する(表 2.3-1)。誤差要因は大きく分けて、飛行機の位置を求める GPS、姿勢を求める IMU、飛行機から地上までの距離を測るレーザ測距、座標変換などが挙げられる。したがって計測は、これらの個々のシステム特性を十分理解して行う必要がある。

表 2.3-1 航空レーザ計測の誤差要因

誤差要因	誤差量・分解能
GPS の誤差	・高速移動体計測による誤差 ・サイクルスリップによる誤差 ・GPS 衛星の受信個数・配置 ・電離層の状態
IMU の誤差	・3 軸の角度の分解能および測定誤差 ・初期化時の誤差
レーザ測距の誤差	・レーザ測距の分解能および測定誤差
座標変換	・WGS84 から世界測地座標系(平面直角座標系)への変換誤差 ・本来の測地座標系がもっているひずみ(ジオイド)の変換誤差

このように、航空レーザ計測システムにはいくつもの誤差要因があるため、その測量結果の精度をあらかじめ解析的に定義することは困難である。したがって、航空レーザ計測を行う際には、その目的や要求制度によって、適宜精度を検証することが望ましい。以下、代表的な精度検証方法を記す。

① 水平精度の検証

水平精度を検証するには、四隅の座標が既知の建物の真位置を基準とし、航空レーザ計測で得られた建物の外形とのずれを評価する。ただし、航空レーザ計測ではデータがランダムなレーザ測点群として得られるため、建物の形がはっきりとは分らない。そこで、まず計測点間隔をできるだけ密に設定して計測を行う。そして、隣接する計測点どうしを比較することで建物の境界部分(壁や稜線)を抽出する(図 2.3-1)。その結果と建物の境界部分とのずれを計測することによって検証を行う。

② 高さ精度の検証

高さ精度を検証するには、三角点の標高値や水準測量結果などを基準とし、航空レーザ計測で得られた測点の標高値の差を評価する。ただし、レーザは必ずしも基準値として比較する点にちょうど照射されるとは限らない。そこで、基準とする標高の実測値と、レーザ測点より TIN で内挿して得られる同じ平面位置の標高値や、基準値ともっとも平面位置の近いレーザ測点の標高値を比較することによって、検証を行う(図 2.3-2)。

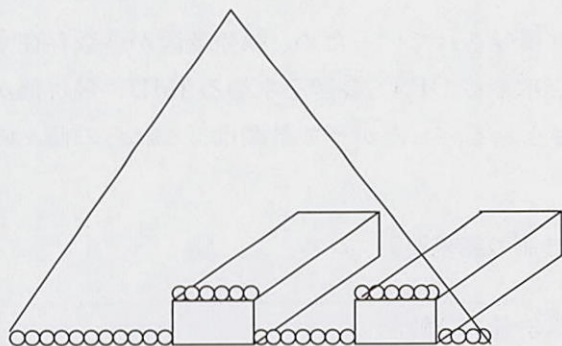


図 2.3-1 水平精度検証の概念図

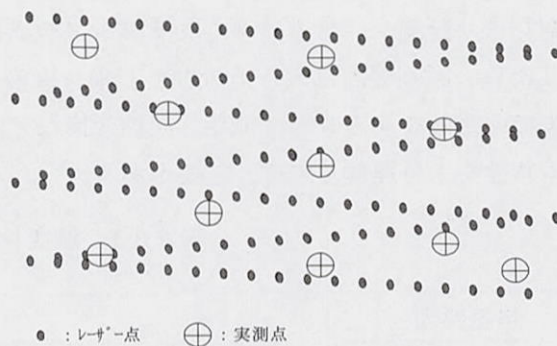


図 2.3-2 高さ精度検証の概念図

2) 誤差対策

誤差要因を十分理解した上で、できる限り誤差を小さくするように表 2.3-2 に示すような対策をとって計測を実施する必要がある。

表 2.3-2 誤差要因とその対策

誤差要因	対策
GPS の誤差	・ あらかじめ最新の GPS 衛星歴を確認し、捕捉可能な衛星数、PDOP が最適な時間帯に計測を行う。 ・ 連続キネマティック法による計測誤差は地上基準局と移動局間の距離（基線長）に依存するので、およそ 30km 以内を目安として基線長をできるだけ小さくする。 ・ 高速移動体計測の誤差は加速度に大きく関わってくるため、できるだけ一定の速度で飛行する。
IMU の誤差	・ 初期化時の誤差を小さくするために、離陸前に機体（センサ部）の水平、真北方向を求めるためのイニシャライズの時間を充分にとる。

3. 航空レーザ計測による基図の作成手順

3.1 作業のフロー

作業は図 3.1-1 に示す作業フローに従って実施する。なお、図中黄色および緑色で表された項目およびそれに付随する項目は必須ではなく、必要に応じたオプション項目である。

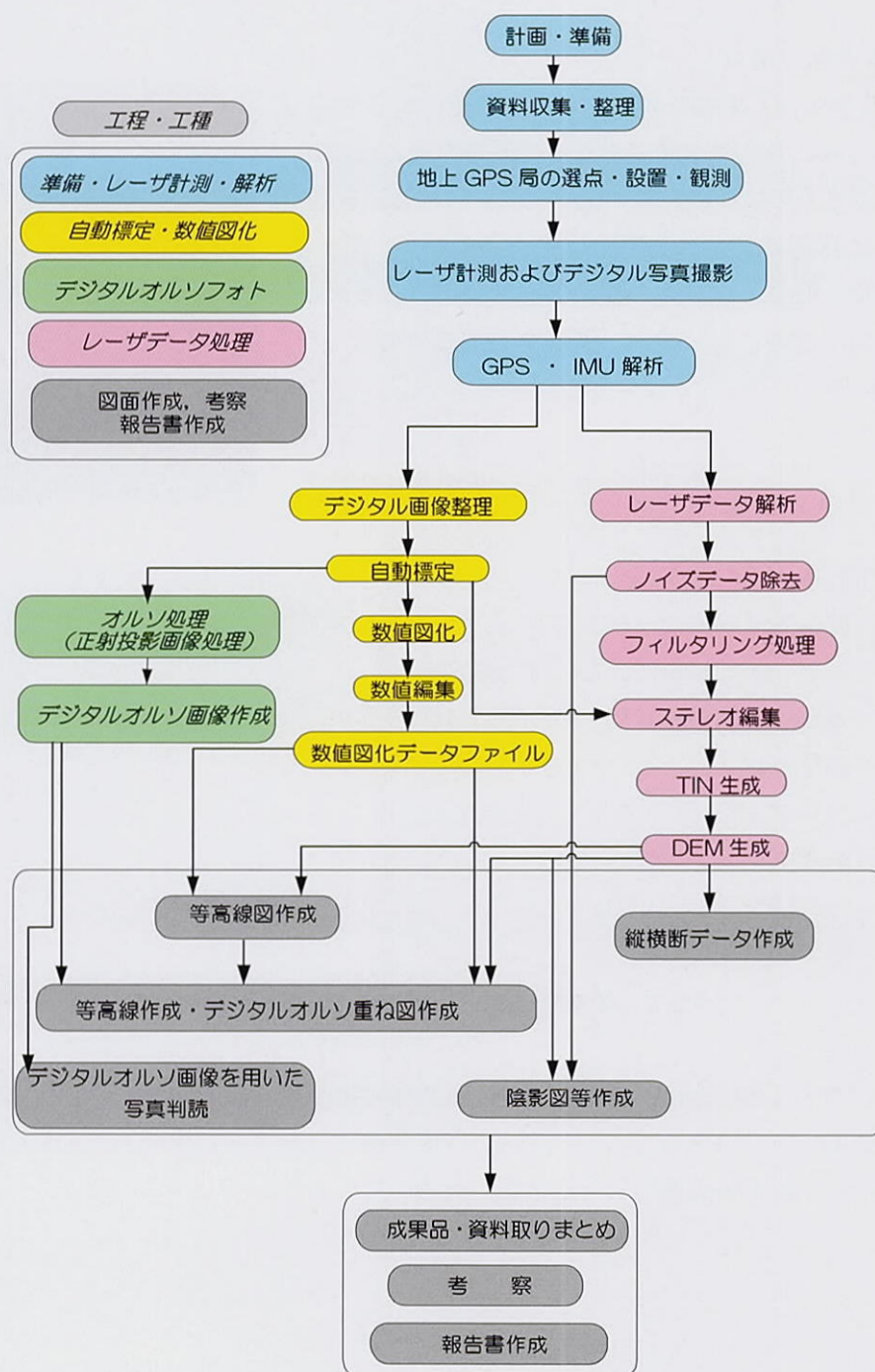


図 3.1-1 作業のフロー図

3.2 作業方法

1) 計画準備

特記仕様書等を十分に理解した上で目的に適する計測データが作成できるよう計画し、必要な機材、資料の準備を行う。特に計測密度に応じたレーザ計測時の計測諸元、無駄のない効率的な計測コース等、使用する空港の状況、天候、GPS の衛星の配置状況などを十分に考慮した上で計画する。

2) 地上 GPS 基準局の選点

地上 GPS 基準局は、連続キネマティック測量による航空機（プラットフォーム）の位置を確定する上で基準となる点であり、精度向上のためには極力計測地区から近い（30km を目安とする）地点に設置できるよう選点する。GPS のアンテナを設置するときに、仰角 5 度以上の視界が必要であり、サイクルスリップを防ぐためにも、樹木・構造物・電波障害等のない基準点を選点する。



図 3.2-1 地上 GPS 基準点の設置例

3) 航空レーザ計測

航空レーザ計測システムにより地表面の 3 次元座標を計測する。レーザによる測距データ、航空機（プラットフォーム）に搭載する GPS データ、IMU による航空機の姿勢情報（ ω , ϕ , κ ）をハードディスクやデータテープ、PC カードなどに記録する。計測軌跡の解析結果例を図 3.2-2 に示す。



図 3.2-2 計測軌跡の例

レーザ計測と同時に、地上 GPS 基準局および航空機に搭載した GPS 受信機において 1 秒毎に GPS 観測を行う（図 3.2-3）。GPS 観測では、地上 GPS 基準局と航空機に搭載した GPS 受信機が、共通の衛星を常時最低でも 4 個取得している必要がある。

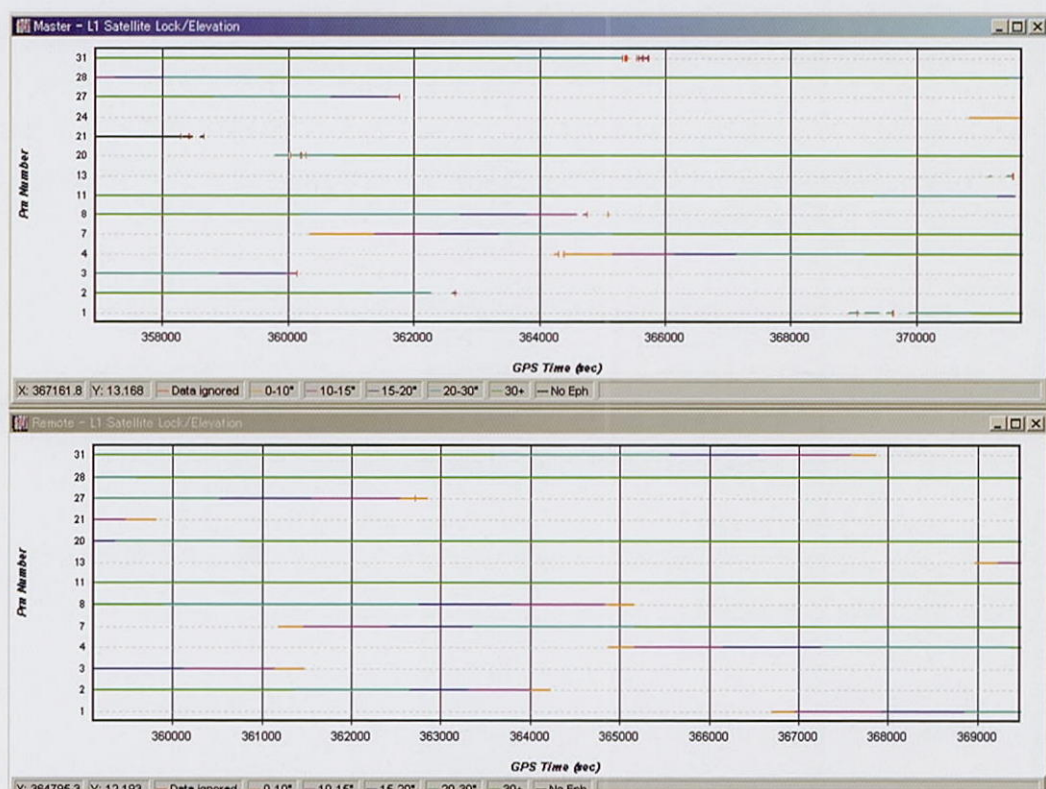


図 3.2-3 GPS 受信状況の例（上段：地上基準局、下段：航空機を示す）

4) 地上局 GPS 基準局観測

レーザ計測と同時に 2) 項で選定した地上 GPS 基準局において 1 秒毎に GPS 観測を実施する。

5) レーザデータ解析

航空機側で計測する GPS 衛星データおよび IMU データと、地上 GPS 基準局で計測する GPS 衛星データを解析し、航空機の正確な 3 次元位置および航空機の姿勢・方位を算出する。そして、それとレーザ測距データを統合することで、地表面の 3 次元データを求める。これらの処理は下記のように大きく 3 ステップの工程により実現される。

STEP①：プラットフォームの 1 秒間隔の位置確定

連続キネマティック測量により、1 秒ごとに取得した航空機の GPS データと地上 GPS 基準局のデータを解析することによって、プラットフォームの正確な位置を確定する。

STEP②：プラットホームの位置確定

STEP①によって求められた航空機位置データは1秒間隔のデータである。航空機は約200kmの速さで飛行しているため、1秒間に約55m移動してしまう。この1秒間を補うために200Hzで記録されたIMU（Inertial Measurement Unit 慣性計測装置）データも活用し、プラットホームのより正確な位置と傾き（ ω 、 ϕ 、 κ ）を常時決定する。

i) STEP①によって1秒間隔の位置が決定する。

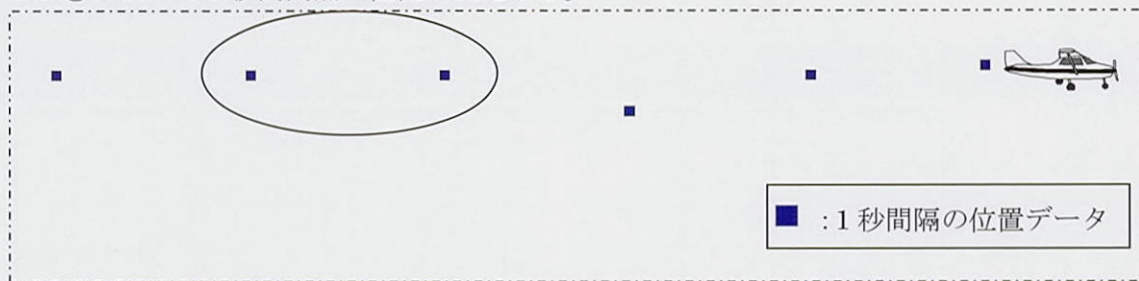


図 3.2-4 GPS データ

ii) 200Hzで記録されたIMUのデータをつなげて、曲線にする。

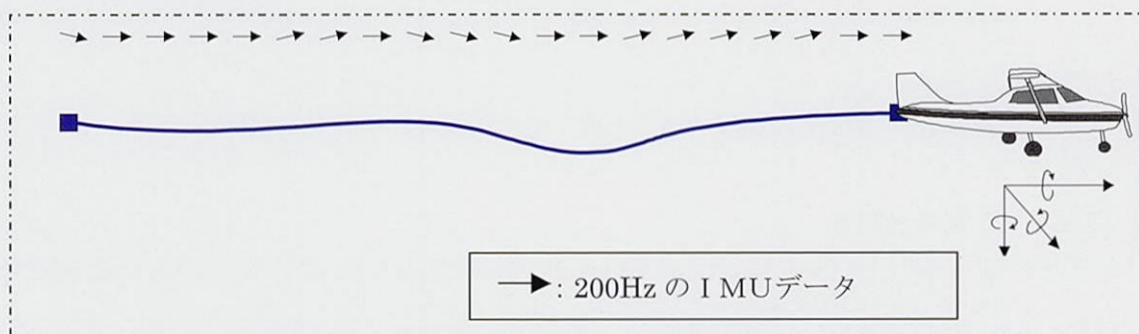


図 3.2-5 IMU データ

iii) ii)の結果を元に1秒間隔の位置データをつなげて曲線にし、プラットホームの正確な位置、傾きを決定する。

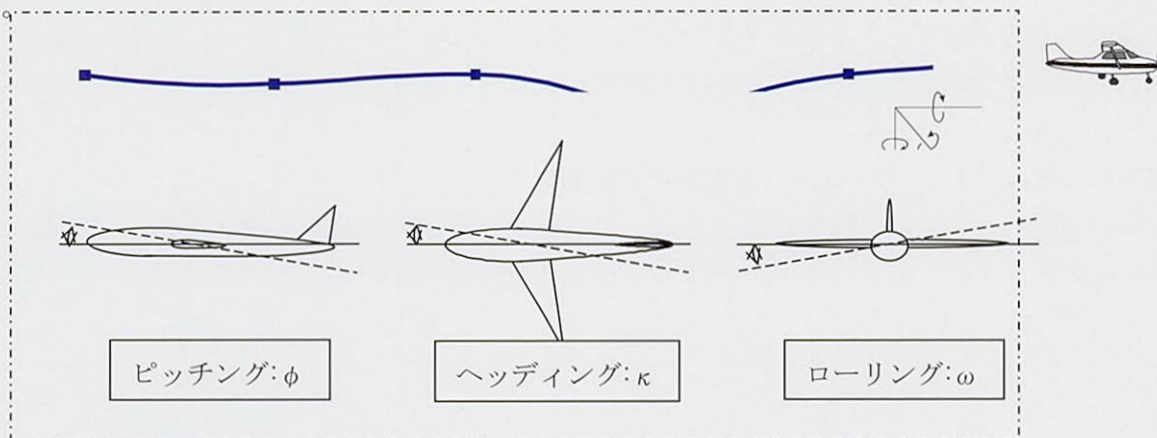


図 3.2-6 航空機の傾き

STEP③：3次元データ作成

レーザ測距によって求められたプラットフォームと地表面との距離と、STEP②によって求められるプラットフォームの位置・傾きを解析して、地表面の3次元データ(X, Y, Z)作成を行い、コースごとに作成されたデータを足しあわせて、対象地域のデータを作成する。

6) デジタルカメラ等の撮影

航空レーザ計測システムによる計測と同時に、必要に応じて航空機に搭載されたデジタルカメラ等の画像取得装置によりステレオ撮影を行う。GPS・IMUデータは、デジタルカメラ等の画像の各撮影主点に対する3次元位置および傾きデータ算出処理にも用いられる。

7) ノイズデータ処理

レーザデータに含まれるノイズデータを統計処理計算にて除去する。

8) 地物フィルタリング処理

レーザデータ解析後の3次元座標データには、樹木や構造物を含む表層面上のデータを含んでいる(図3.2-7参照)。

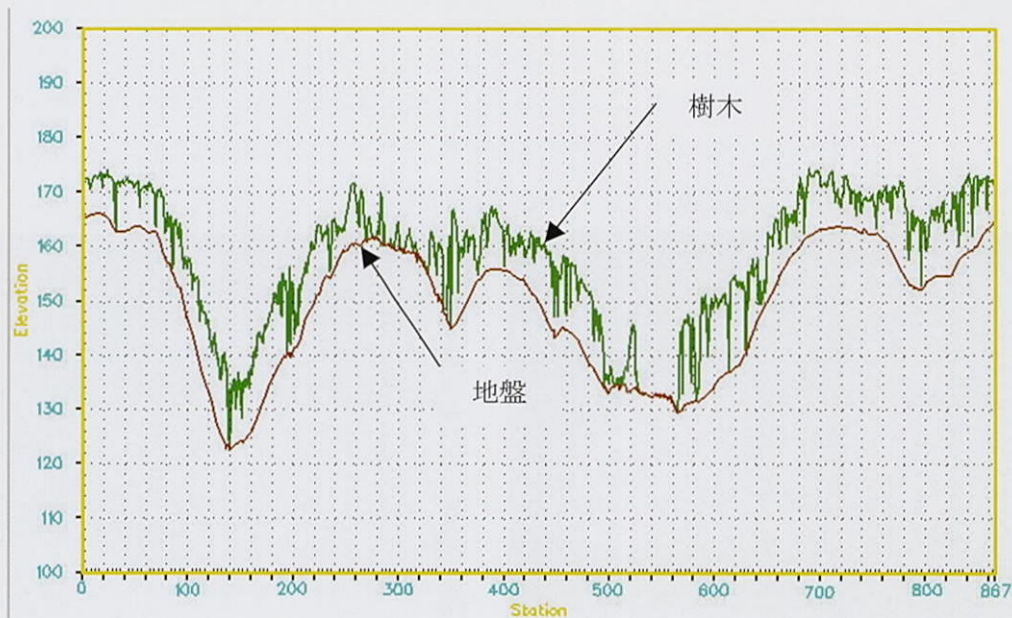


図 3.2-7 森林地におけるレーザデータ解析後の3次元データ(断面図)例

このデータに対して統計処理をほどこし、樹木や建物と考えられるデータを除去することによって、地表面のデータを抽出することができる(図3.2-8)。

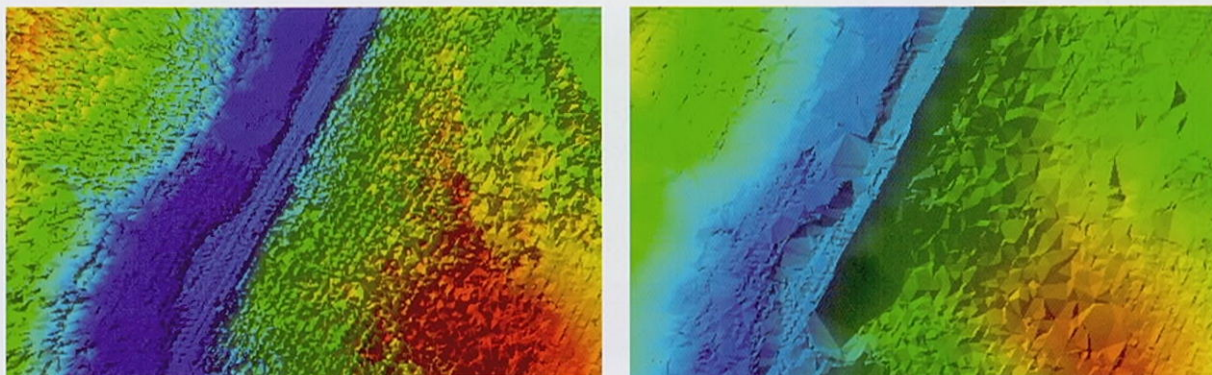


図 3.2-8 地物フィルタリング例（左：フィルタリング処理前、右：処理後）

9) 三次元データ加工

抽出された地表面データ（ランダム点群）から、等高線データやグリッドデータ（DEM や DSM）などの作成を行う。

3.3 各種作成データ

1) 標高データ

フィルタリング処理により抽出されたデータより、CAD や GIS ソフトを用いてグリッドデータの作成等を行う。フィルタリング処理により樹木又は地物、構造物の除去が施されたレーザデータ（ランダムポイント）に TIN を発生させ、一定間隔のグリッドごとに標高を内挿して求める（図 3.3-1）。これらのデータを用いて、等高線図や縦横断図を作成することができる。

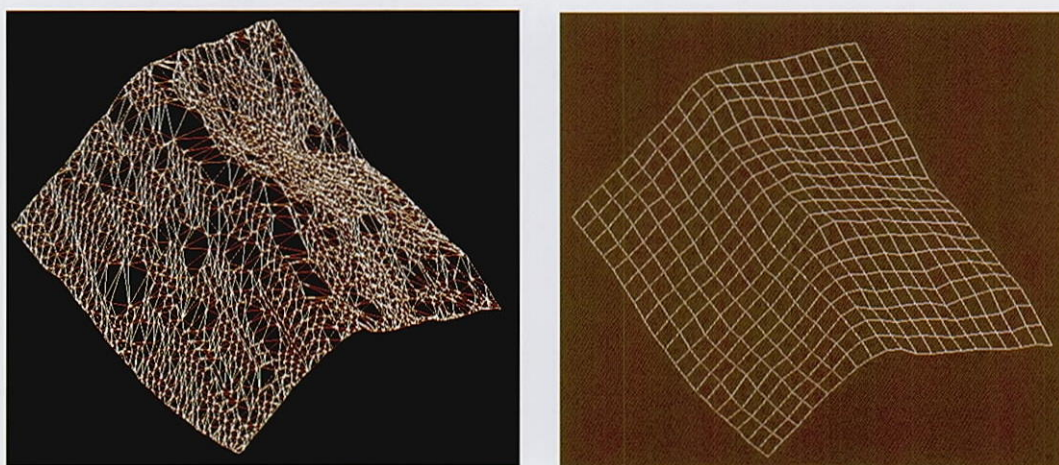


図 3.3-1 ランダムデータとグリッドデータの例

（左：ランダムデータより作成した TIN、右：TIN より作成したグリッドデータ）

2) 等高線図

フィルタリング処理により樹木又は地物、構造物の除去が施されたレーザデータ（ランダムポイント）を X、Y、Z の ASCII ファイルへ変換した後、CAD や GIS に読込んで TIN に変換し、自動コンター発生処理をほどこすことで等高線図を作成することができる（図 3.3-2）。

3) 断面図

2) 項で作成した TIN ファイルから縦横断計測を行い、任意測線で断面図を作成することができる（図 3.3-3）。

4) デジタルオルソフォト

航空レーザ計測システム計測と同時に撮影されるデジタル画像とグリッドデータを用いて、デジタルオルソフォトを作成し、モザイク処理を行うことができる（図 3.3-4）。

従来の航空写真からオルソフォトを作成するには、写真撮影とは別に、標高データを取得する必要があった。また、対空標識等のコントロールポイントを用いて、標定作業も必要であった。しかし、航空レーザ計測システムは、レーザデータ処理の過程でデジタル写真撮影時のカメラの座標 (X, Y, Z) および傾き (ω 、 ϕ 、 κ)、つまり、標定要素がすでに求められているため、大幅に作業過程を省略することが可能である。また、図 3.3-4 に示したように等高線と重ね合わせることで、地表面の形状と高さ情報が取得可能となる。例えば、オルソフォトのみでは地表面の植被により判読が難しい崩壊地や沢などは、等高線を重ねることで判読が容易となる。

5) その他

上記以外にも、標高グリッドデータを利用して下記のような多様な地形表現を行うことが可能である。これらは目的に応じて適宜作成し利用することができる。

① 段彩図

標高にあわせて、段階的に色調を変えて表示するものである。谷や尾根はやや不明瞭であるが、標高の違いや全体的な地形は明瞭に表現される（図 3.3-5①）。

② 段彩陰影図

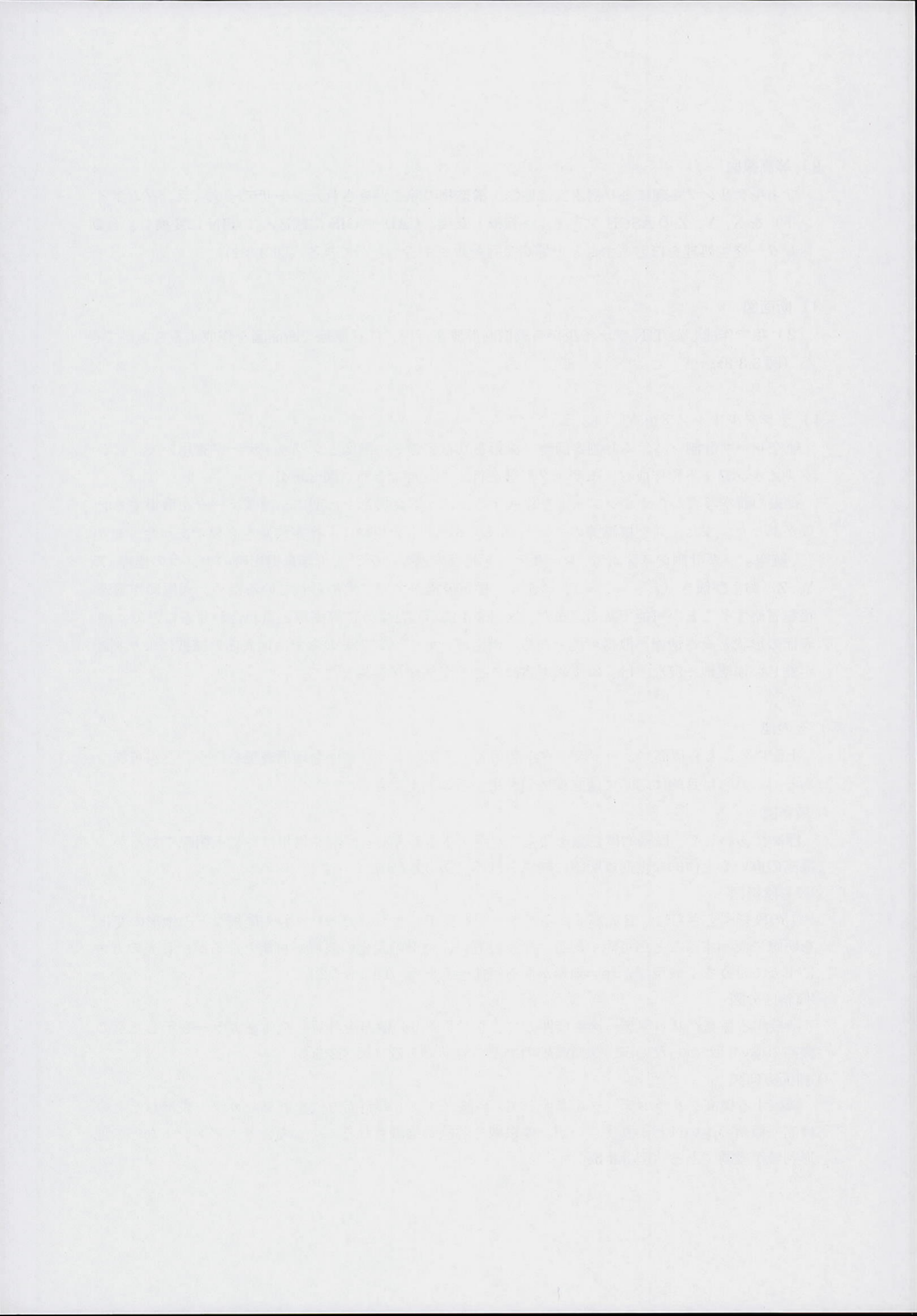
①の段彩図をさらに、日光が当たるイメージを表示したものであり、谷や尾根などの地形の変化を明瞭に表示することが可能である。標高の違い、地形の変化の表現が可能となるが、日光の方角によってはうまく表現できない地形がある可能性もある（図 3.3-5②）。

③ 傾斜区分図

隣接する標高グリッドデータを参照して、各グリッドの傾斜を計算し全体をカラー表示したもの。標高の違いはわからないが、急傾斜地の抽出が容易である（図 3.3-5③）。

④ 斜面方向図

隣接する標高グリッドデータを参照して、当該グリッドの斜面方位を計算しカラー表示したもの。標高や傾斜の違いはわかりづらいが、尾根線や谷線が強調されることから、リニアメントなどの地形判読が容易である（図 3.3-5④）。



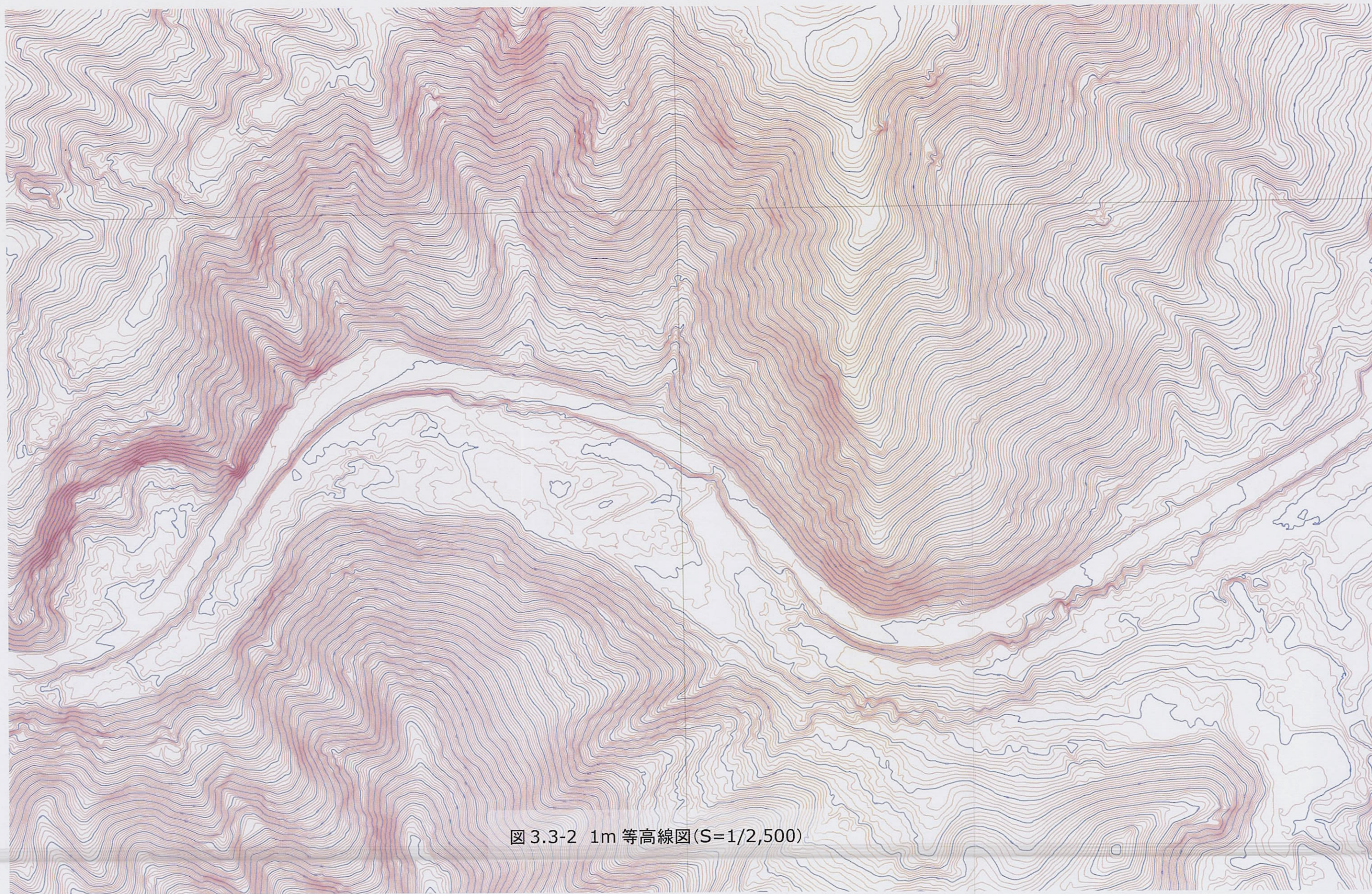


図 3.3-2 1m 等高線図(S=1/2,500)

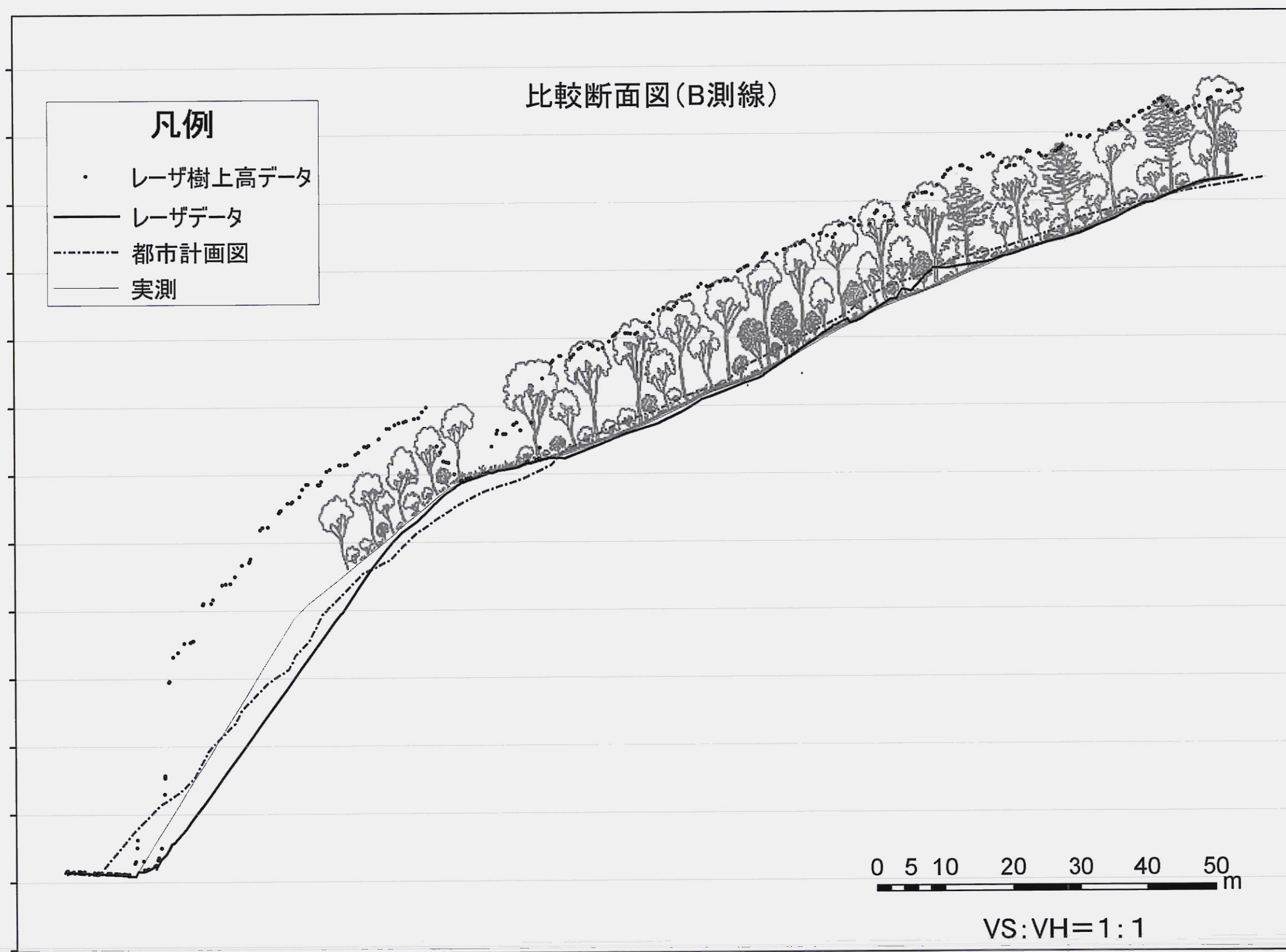


図 3.3-3 断面図



図 3.3-4 オルソフト+1m 等高線図

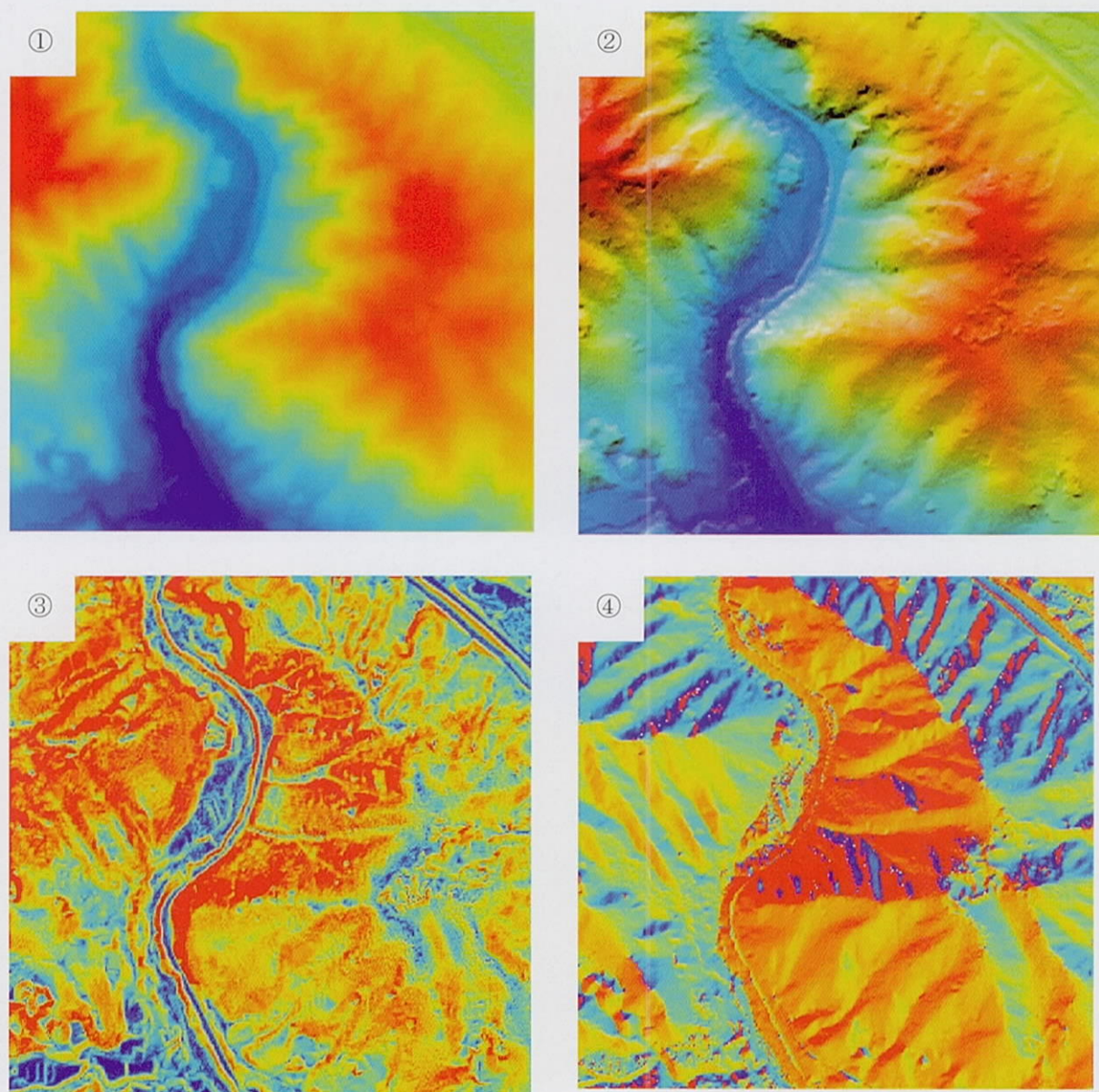


図 3.3-5 その他の地形表現

4. 今後の課題と展望

航空レーザ計測は、最新の測量技術として道路防災分野を含め多様な方面での利活用が進められており、また技術的にも改良が加えられている。その中で、現状での技術的課題と展望を下記に示す。今後は、これらの課題を解決していくことにより、さらなる精度向上・利用促進が期待される。

- ・森林（樹葉）の密度が高いとレーザの地面への到達が制約され、計測精度が影響を受ける。そのため、地域によっては利用目的や計測時期が限定されることがある。今後は、レーザ照射頻度の増加、フィルタリングアルゴリズムの改善などによって、徐々に制約は減少し計測精度が向上していくものと考えられる。
- ・高密度とはいえ離散的な計測点から地形を再現するため、道路の端や斜面傾斜の変化線などが、等高線で表現した時に多少なまって表現される場合がある。それを防ぐためには、同時に取得されるデジタル画像からブレイクラインを取得するなどして、等高線を修正する必要がある。
- ・対空標識設置が不要になったという点で、計測にあたっての現地作業は従来手法と比較して大幅に省力化された。しかし、計測範囲の近傍における地上 GPS 基準点作業は依然として必要であるため、現地作業が皆無になったわけではない。これに関しては、今後は電子基準点を利用することにより徐々に必要性は薄れていくものと考えられる。

参考文献

島 博保・奥園誠之・今村遼平：土木技術者のための現地調査，鹿島出版会，pp.12，1981

THE JOURNAL OF THE AMERICAN MEDICAL ASSOCIATION
PUBLISHED WEEKLY
CHICAGO, ILL., MAY 1, 1930
Vol. 41, No. 19