

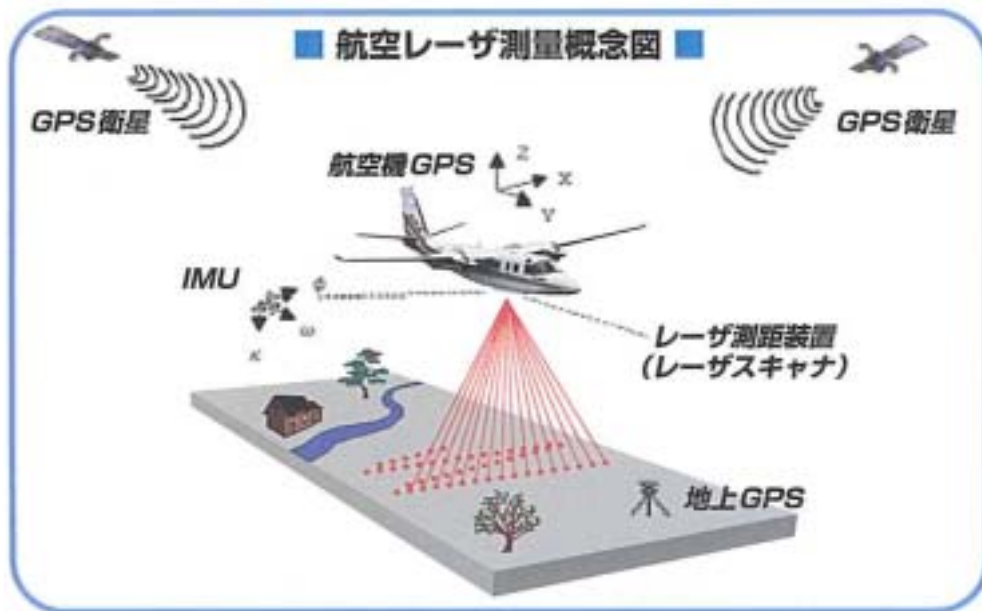
## 13．空中レーザを用いた地形計測

### 13．1 空中レーザプロファイラの概念

空中レーザ計測は、航空機（飛行機またはヘリコプター）から地上に向けて多数のレーザパルスを発射し、地表面や地物で反射して戻ってきたレーザパルスから、高密度な三次元デジタルデータを取得する新しい技術である。

この技術は、次の3つの要素技術の統合化により実現されたものです。

- (1) - GPS (Global Positioning System)  
地上GPSと航空機GPSにより高速で移動する航空機の位置を求める装置
- (2) - IMU (Inertial Measurement Unit)  
航空機の姿勢と加速度を求めるための慣性計測装置
- (3) - レーザ測距装置（レーザスキャナ）  
レーザを送受光し、地上の測点までの距離を求めるための装置



航空写真測量と空中レーザ計測の最も大きな違いは以下の点である。

航空写真測量：写真という中間媒体を用いて人的（間接的）に地物や地形データを得る。

空中レーザ計測：レーザを利用して直接的に地形データを得る。

「航空レーザ測量ハンドブック」より

## 13.2 作業概要

### 13.2.1 概要

「空中レーザを用いた地形計測」を、計測時期（植生繁茂期、落葉期、積雪期）と計測方法（高度）の異なる条件で実施し精度の比較検討を行うとともに積雪寒冷地への適用の妥当性と、道路管理のための適用条件の抽出を目的として実施した。

具体的には、植生繁茂期と落葉期（それぞれ対地高度を2ランク設定）における地形表現の違い、さらに落葉期と積雪期（それぞれ対地高度を2ランク設定）のデータの差分から積雪深を算出し、その妥当性を検討した。

#### （1）対象地域

対象地域は、次の2地区を設定した。

国道230号 無意根地区 約3.5km<sup>2</sup>  
（定山溪トンネルから中山峠にかけての地域）  
国道452号 芦別地区 約3.0km<sup>2</sup>  
（芦別川沿い三段の滝周辺の地域）

#### （2）計測

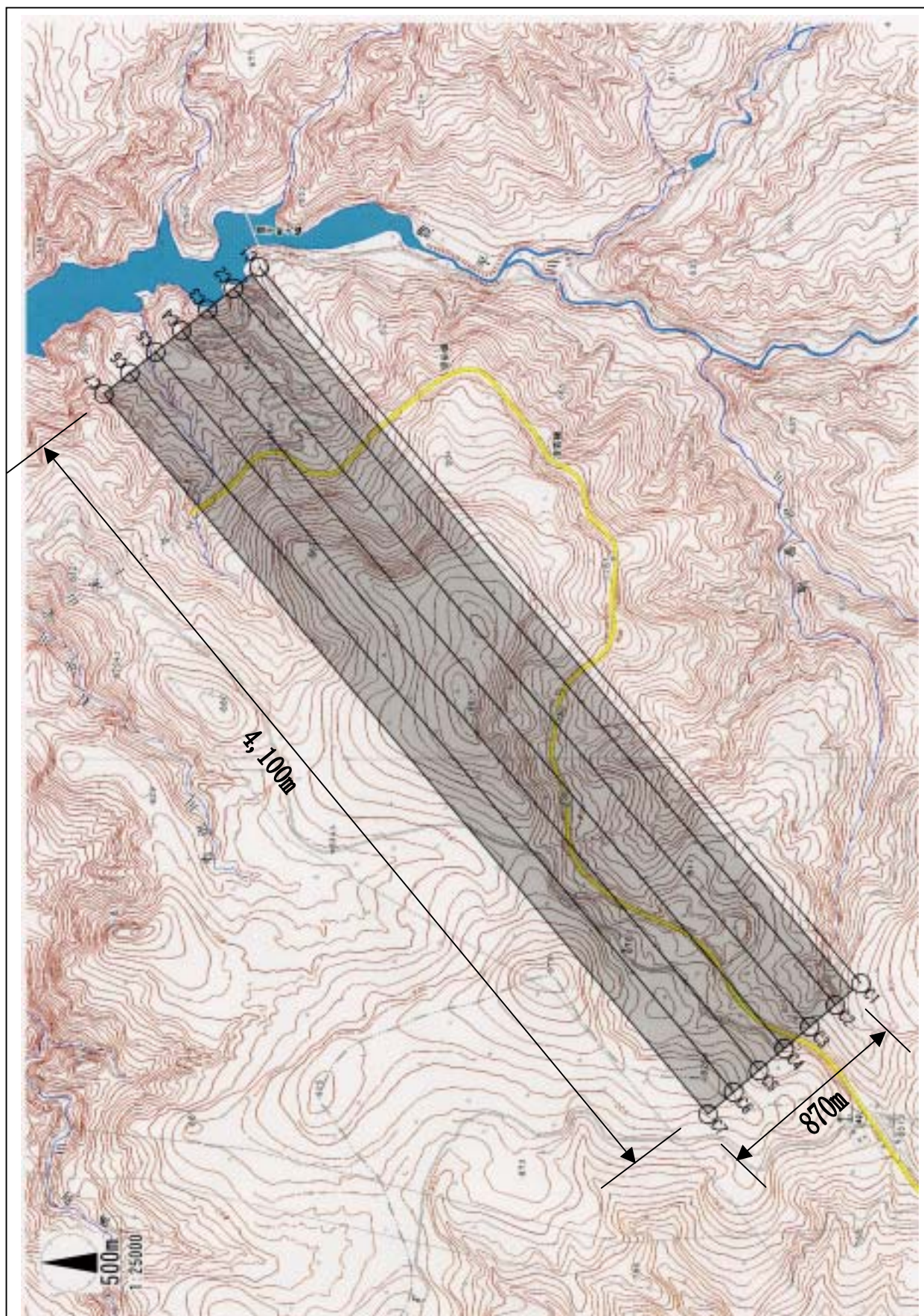
| 時 期   | 高 度       | 計 測 時 期    | 230 号 | 452 号 |
|-------|-----------|------------|-------|-------|
| 植生繁茂期 | 低・高高度2ランク | 平成15年9月下旬  | ○     | -     |
| 落葉期   | 低・高高度2ランク | 平成15年10月下旬 | ○     | ○     |
| 積雪期   | 低・高高度2ランク | 平成16年3月中旬  | -     | ○     |

○：計測実施    -：計測実施しない

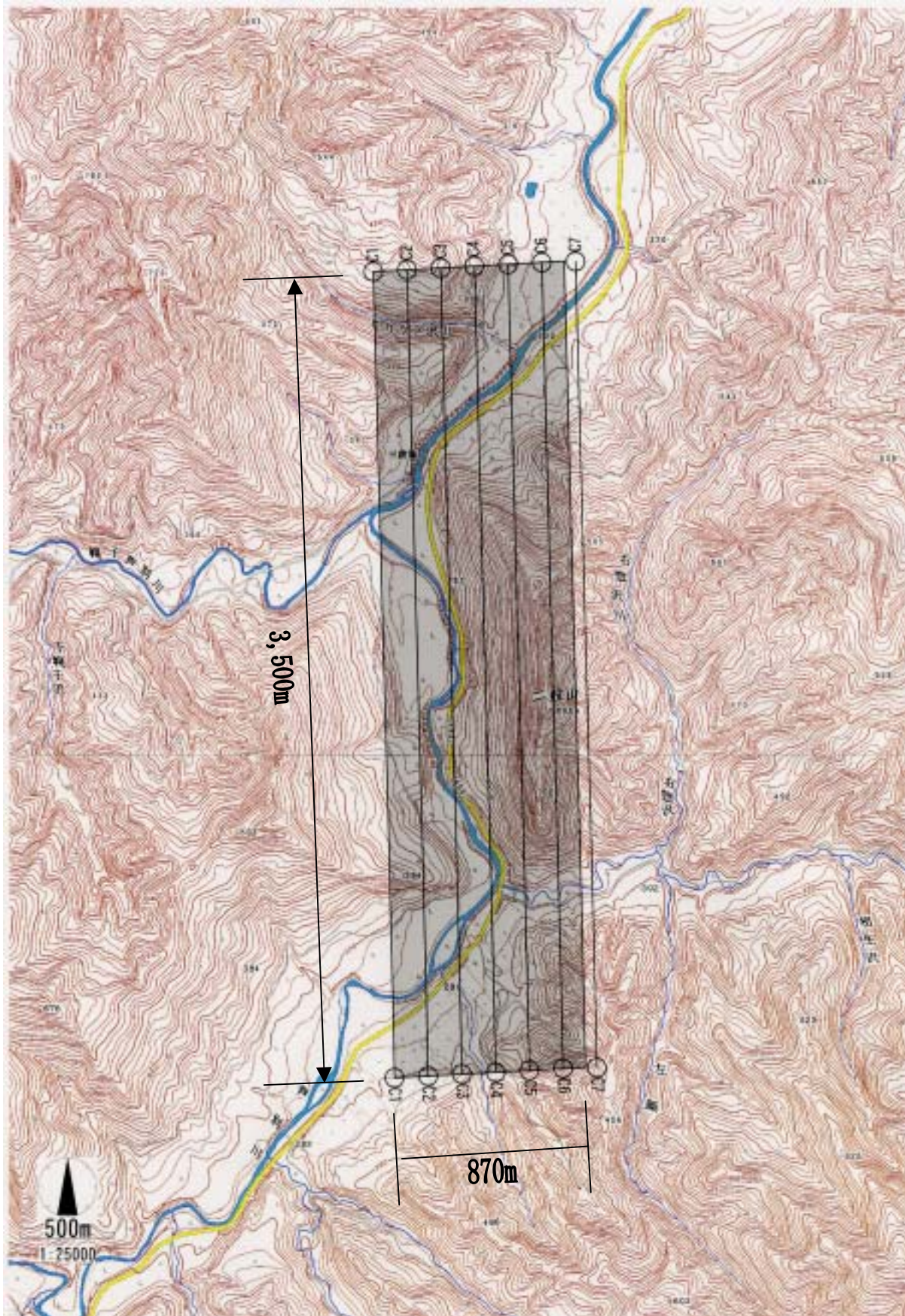
#### （3）作業量

| 路線名  | 面積<br>(km <sup>2</sup> ) | 高高度計測（1800m） |        | 低高度計測（900m） |        |
|------|--------------------------|--------------|--------|-------------|--------|
|      |                          | コース数         | 延長（km） | コース数        | 延長（km） |
| 230号 | 3.56                     | 3            | 12.3   | 7           | 28.7   |
| 452号 | 3.04                     | 3            | 10.5   | 7           | 24.5   |

別紙計測計画図は低高度計測コースを示してある



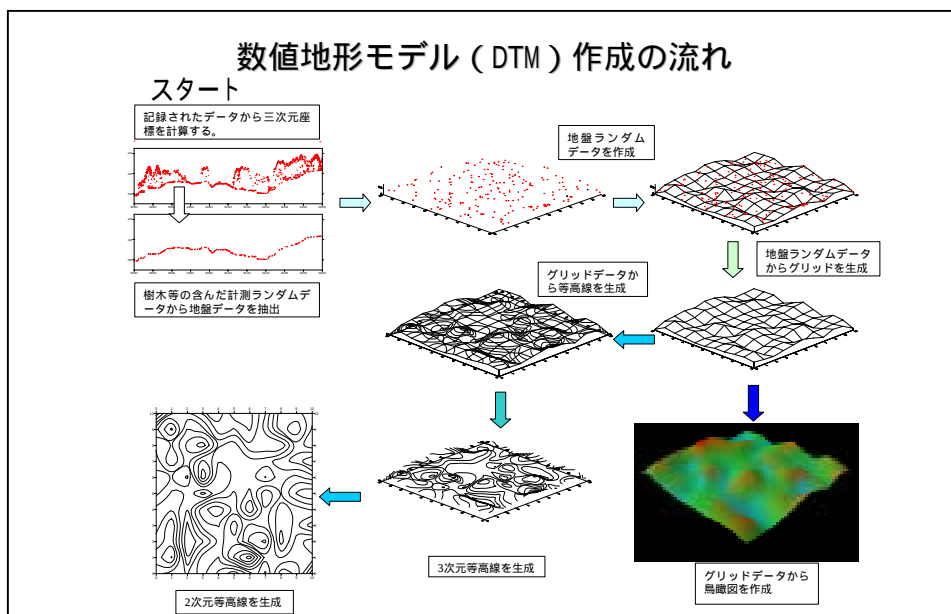
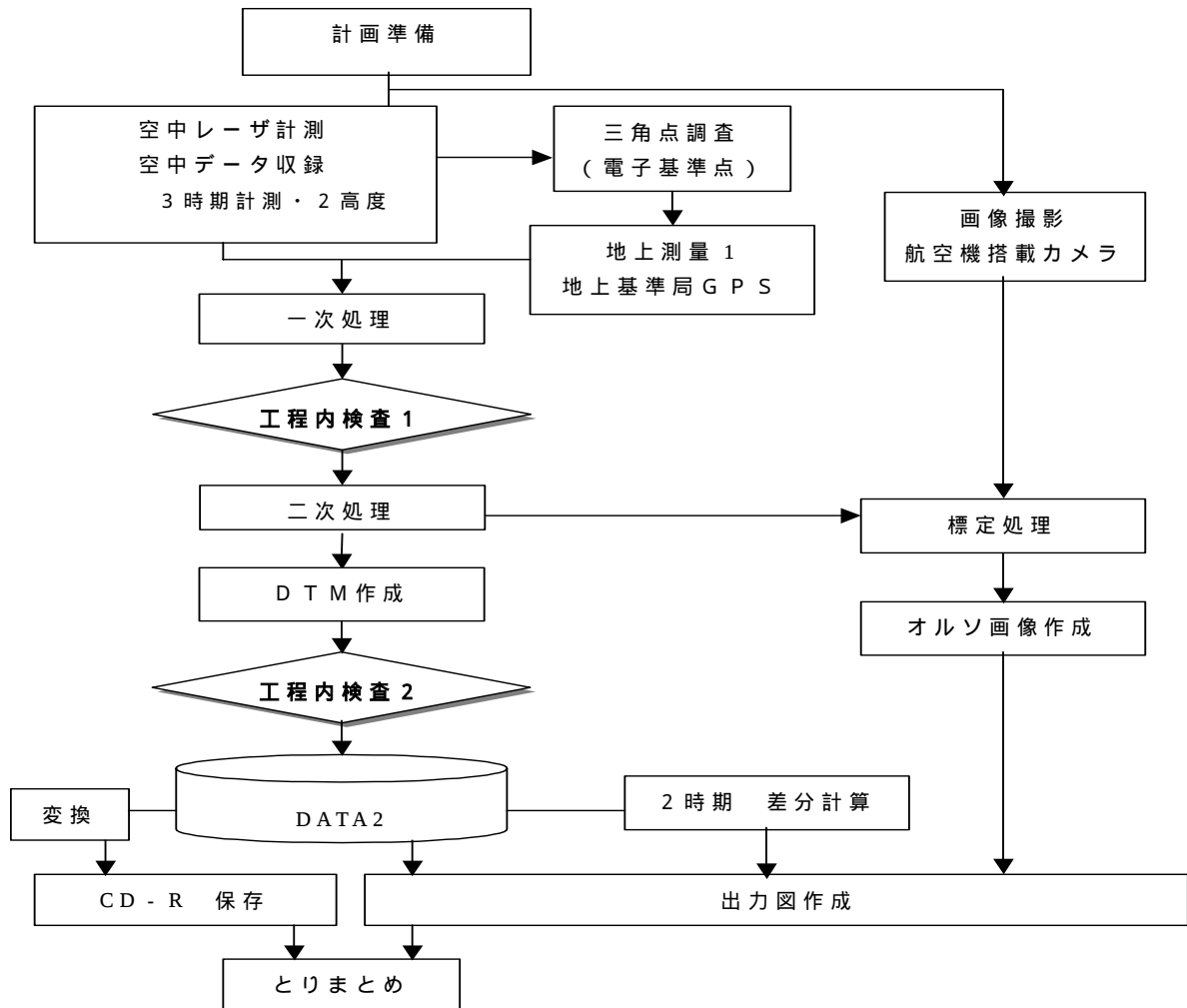
国道 230 号 コース図



国道 452 号 コース図

### 13.2.2 作業フロー

本作業のフローは以下の通りである。



### 13.2.3 作業方法

#### (1) 主要機器

| 作業工程    | 機器名称                                                                           | 数量                   |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| レーザ測量   | 空中レーザ計測システム<br>ALTM 1225DC オプティック社製<br>航空機 セスナ 208 (キャバソン)<br>もしくは AS350 (回転翼) | 1 システム<br>1 機<br>1 機 |
| GPS 測量  | GPS-600 ノバテル社製                                                                 | 1 台                  |
| データ処理   | ASR (データ解析システム)                                                                | 1 システム               |
| データ編集   | CAD マイクロステーション                                                                 | 1 セット                |
| DTM 作成  | 計算機 パーソナルコンピュータ                                                                | 2 台                  |
| デジタルカメラ | ALTM4K02 アプラニクス社製                                                              | 1 台                  |
| 出力      | インクジェット<br>プロッタ HP1055                                                         | 1 台                  |

#### (2) 空中レーザ計測

GPS 受信機 (航空機局と地上基準局) IMU (慣性計測システム: 航空機の 3 軸の姿勢の制御と加速度の計測) スキャナ装置付きレーザ測距装置を搭載した空中レーザ計測システムを使用し、航空機を計測コース上を飛行させ、必要なデータを取得した。

#### (3) 計測密度および飛行高度の設定

- ・対地高度 約 900m 及び約 1800m
- ・レーザ発射数 25000 回 / s
- ・コース間隔 150m 及び 400m
- ・重複率 50%
- ・平均計測密度 1.0 点 / m<sup>2</sup> 以上
- ・ビーム拡散度 0.2mrad

#### 【レーザスキャナ装置仕様】

| 項 目                | 仕 様                               |
|--------------------|-----------------------------------|
| レーザ発射回数            | 25,000Hz                          |
| スキャン回数             | $a \times n < 580$                |
| スキャン角度 (半角)        | $0 \sim \pm 20^\circ$             |
| スキャン形状             | ZigZag                            |
| 受信パルスモード           | First/Last 同時                     |
| ビーム拡散度             | 0.2 or 1.0mrad                    |
| 測距精度               | $\pm 0.15\text{m}/1 \text{ ショット}$ |
| 座標精度               | $\pm 0.5\text{m}$ (対地 1000m)      |
| 照射角度精度             | $0.005^\circ$ (POS)               |
| 対地高度               | 300 ~ 2000m                       |
| 飛行速度 (プラットフォームに依存) | 50 ~ 300km/h                      |
| レーザ波長              | 1064nm (Nd:Y04)                   |
| レーザ強度              | クラス 4                             |

#### ( 4 ) 地上 GPS 基準局の設置

地上 GPS 基準局は、連続キネマティック処理による航空機の位置を確定する上で基準となる点であり、計測地域から 30km 以内を目安に選点し、空中レーザ計測時に、必要なデータを地上基準局において取得した。

#### ( 5 ) GPS/IMU 統合処理 ( 一次処理 )

計測作業時に得られた地上基準局の GPS データ、航空機 GPS データ、レーザの距離、スキャン角さらに航空機の姿勢データを総合的に解析計算 ( ここでノイズ除去が行われる ) し、1 測点ごとの 3 次元座標を求め 3 次元データベースを作成した。また、得られた 3 次元座標 ( UTM ) を日本測地系平面直角座標系 12 系に変換し、さらに世界測地系に変換した。

#### ( 6 ) データ編集 DTM 作成 ( 二次処理 )

三次元データベースから樹木等の影響を受けたデータを取り除いた ( フィルタリング処理 ) 地表面の 1m グリッドの DTM データを作成した。この DTM データから等高線図、縦横断面図、デジタルオルソ画像などのデータを作成したり、また積雪期の DTM と落葉期の DTM からグリッド毎の積雪深を算出した。

#### ( 7 ) 出力図作成

( 6 ) で得られた DTM から等高線図を作成し、積雪深図などの主題図と重ね合わせて印刷したり、必要に応じて等高線の間隔を間引いたりする作業も実施した。

### 1 3 . 3 結果

#### 1 3 . 3 . 1 一般国道 2 3 0 号計測結果

国道 230 号において繁茂期・落葉期の比較を 1km<sup>2</sup> の範囲の全データ数と編集後の地盤到達データ数を透過率として計算し、得られた結果を表 1 3 - 1 に示す。

表 1 3 - 1 国道 230 号地盤データ透過率  
(対地高度と計測時期)

| 対地高度・<br>条件 (m) | 全データ<br>(/m <sup>2</sup> ) | 地盤データ<br>(/m <sup>2</sup> ) | 基準密度<br>(/m <sup>2</sup> ) | 透過率<br>(%) | 落葉 900<br>基準<br>(/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------|------------------------------------|
| 繁茂 1800         | 1.28                       | 0.24                        | 0.22                       | 18.8       | 1.21                               |
| 落葉 1800         | 0.45                       | 0.18                        | 0.36                       | 40.0       | 0.90                               |
| 繁茂 900          | 2.33                       | 0.42                        | 0.20                       | 18.3       | 1.10                               |
| 落葉 900          | 1.96                       | 0.59                        | 0.59                       | 30.1       | 1.96                               |

：回転翼を固定翼の条件に変換した数値（地盤×112÷237；1800m時×2）

表の見方は、対地高度 1800m で飛行する航空機から発射されたレーザが、繁茂期の時 128 万点中 24 万点が地上にヒットしたとみる。また比較用に同一条件で計測した場合の密度を基準密度として記した。繁茂期の透過率は対地高度 1800m で 18.8%、900m で 18.3% であるのでこの時期における対地高度の変化は透過率に大きく影響していないように見える。落葉期の場合、透過率では 1800m で 40.0% であり、900m で 30.1% となった。

次ページ以降に結果の縮小図を添付してあるが、図 1 3 - 3 では上記結果の条件下で、作図した 4 種の等高線図を示す。対地高度、繁茂期・落葉期において、大局的な違いは認められなかった。これは、繁茂期の計測を 9 月末に行っており、標高 800m の国道 230 号中山峠付近はすでに落葉が始まっていたことに起因したものと推定される。

図 1 3 - 1 : 落葉期のオルソ画像

図 1 3 - 2 : 既存の 1/5,000 森林基本図に重ねて、10m 等高線で比較したところ、レーザ特有の線の凸凹の表示以外に谷地形の細かい入りこみなどの相違が認められる。

図 1 3 - 3 : 2 時期の高度を変えて計測した 1m 等高線図

これは、縮小図であるため、急崖斜面では 5m の計曲間隔が接近して黒くなっているが 4 種の図の表示内容に大きな差異は認められない。

図 1 3 - 4 : 1m 等高線図、陰影図、鳥瞰図など数種類の加工図を表示したもので、上部中央の鳥瞰図 (DSM) は図 1 3 - 1 のオルソ画像を利用して作成される。

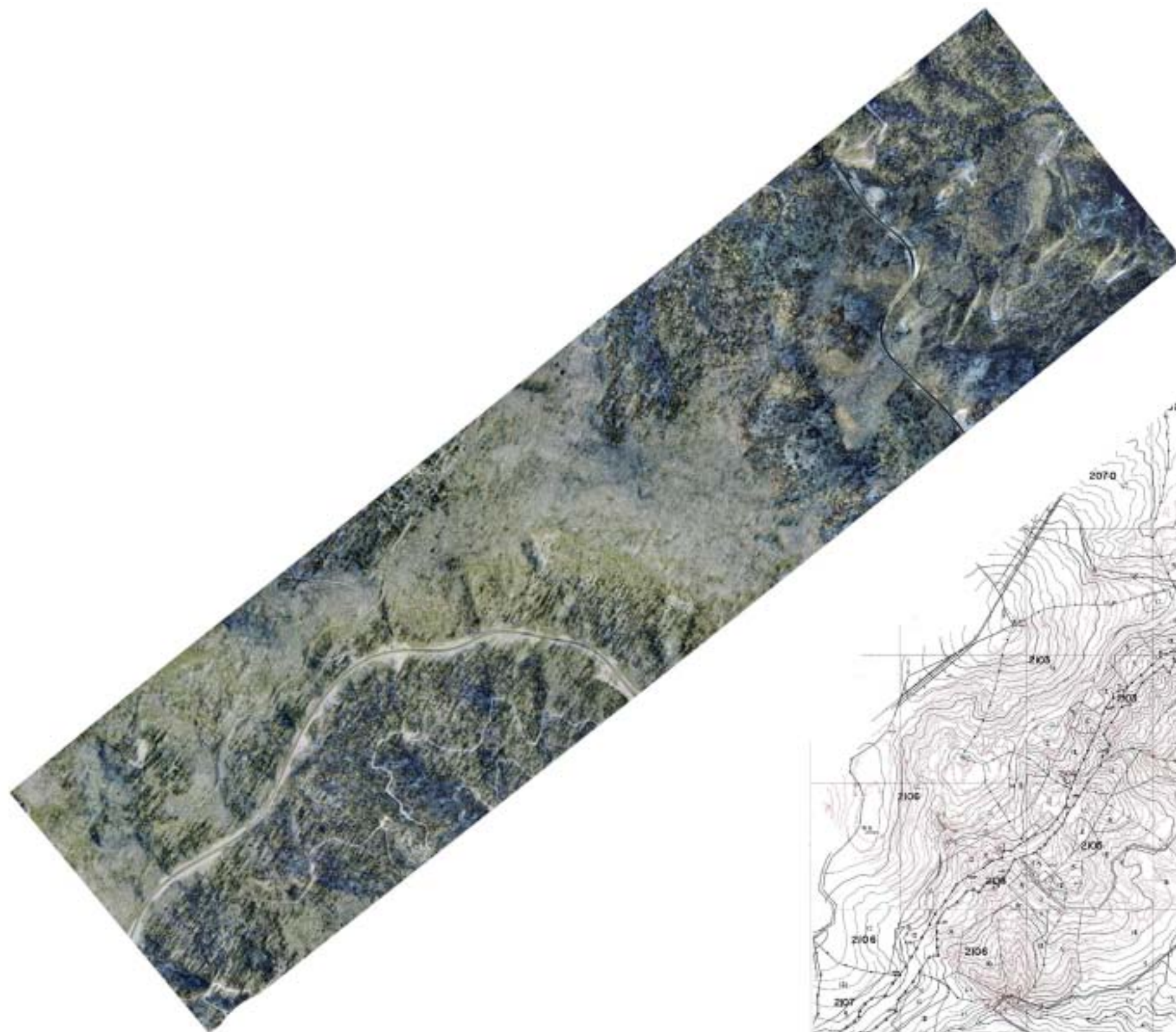


図 1 3 - 1 国道 230 号 落葉期 オルソ画像



図 1 3 - 2 国道 230 号 既存図との比較（低高度）

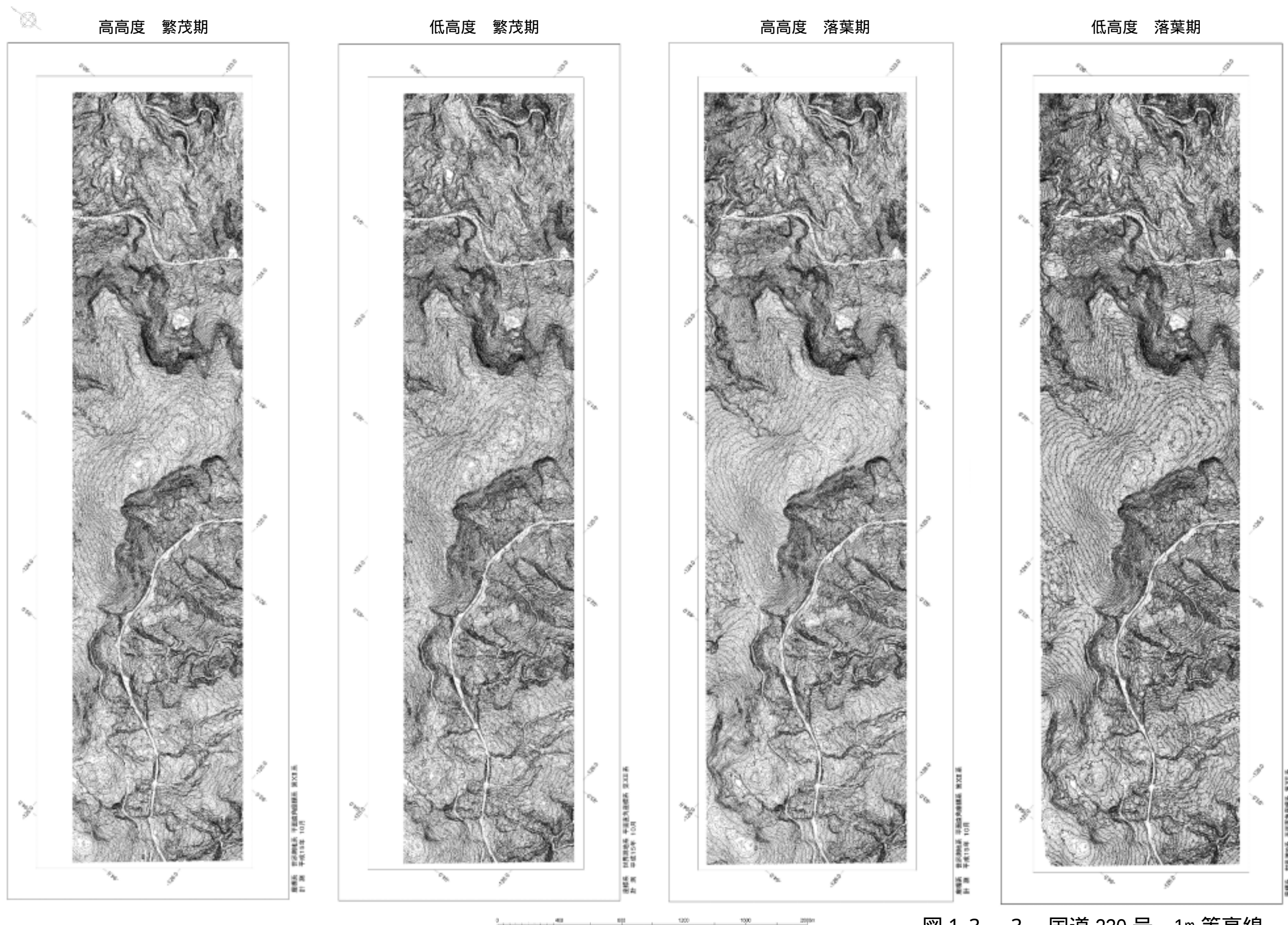
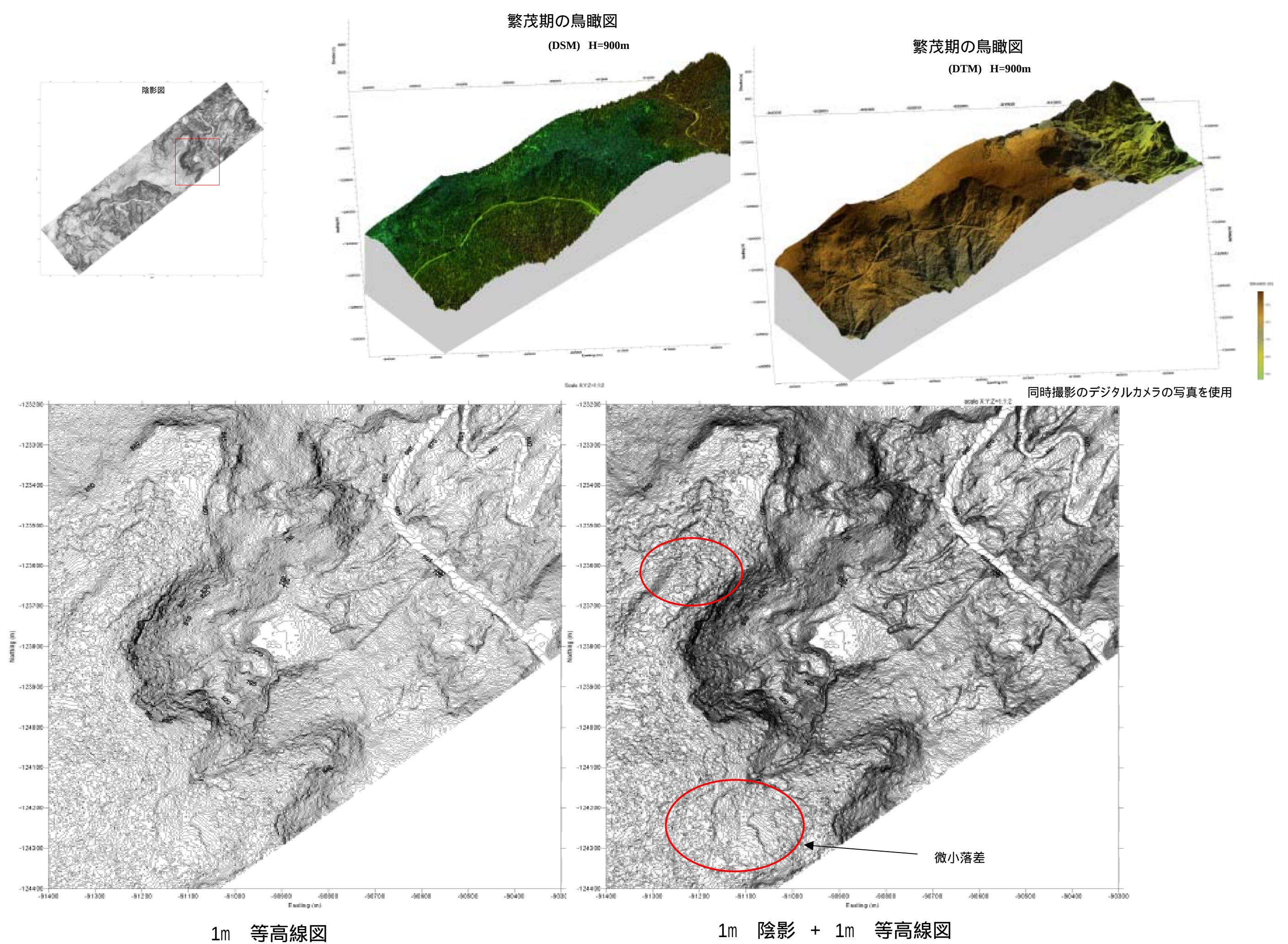


图 1 3 - 3 国道 230 号 1m 等高線



陰影の上に等高線を重ねると高さの情報のほかにさらに細かい地形が判別可能である。(赤丸印)

図 1 3 - 4 別手法の加工の表現

### 1 3 . 3 . 2 一般国道 452 号計測結果

国道 452 号においては積雪期に対地高度を変えて計測し、落葉期の計測結果と重ね合せて積雪深がどのようになるかを比較した。

2 時期から判別できる道路の分岐点など 6 地点を標定点として選定し（図 1 3 - 5）2 時期のデータのズレを比較したところ、表 1 3 - 2 , 3 のような結果となった。 水平精度（x,y）は対地高度 900m の方が安定して 10cm 以内に収まっている。

また、積雪深は地点 1 と 4 以外はほぼ同じ値を示しており 6 地区の平均は対地高度 900m で 1.12m、対地高度 1800m で 1.07m であった。

（積雪深は標定した 6 箇所の周辺の雪面および地形の差で求めている。）

表 1 3 - 2 国道 452 号落葉期と積雪期の差  
（対地高度 900m）

| 地点  | x<br>(m) | y<br>(m) | z<br>(m) | H<br>(積雪・m) |
|-----|----------|----------|----------|-------------|
| 1   | - 0.08   | 0.03     | 0.02     | 1.27        |
| 2   | - 0.09   | 0.01     | —        | 1.09        |
| 3   | - 0.09   | - 0.04   | 0.04     | 1.02        |
| 4   | - 0.09   | - 0.03   | —        | 1.28        |
| 5   | - 0.08   | - 0.02   | 0.01     | 0.98        |
| 6   | - 0.07   | - 0.03   | —        | 1.08        |
| ave | - 0.08   | - 0.01   | 0.02     | 1.12        |

表 1 3 - 3 国道 452 号落葉期と積雪期の差  
（対地高度 1800m）

| 地点  | x<br>(m) | y<br>(m) | z<br>(m) | H<br>(積雪・m) |
|-----|----------|----------|----------|-------------|
| 1   | - 0.07   | - 0.02   | 0.02     | 1.08        |
| 2   | - 0.18   | 0.02     | —        | 1.13        |
| 3   | - 0.18   | - 0.01   | 0.02     | 1.01        |
| 4   | 0.00     | 0.02     | —        | 0.98        |
| 5   | - 0.01   | 0.00     | 0.02     | 1.11        |
| 6   | - 0.02   | 0.01     | —        | 1.10        |
| ave | - 0.08   | 0.00     | 0.02     | 1.07        |

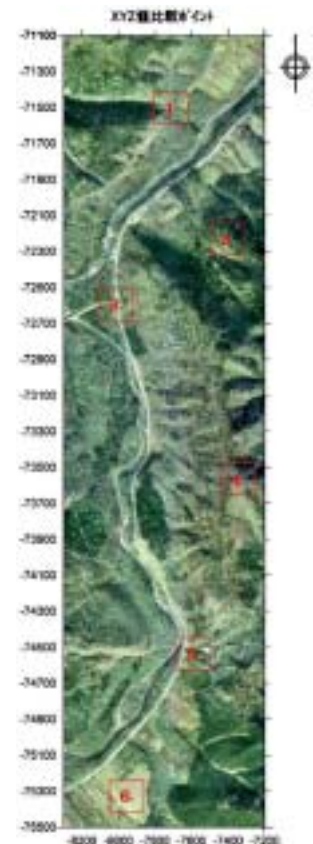


図 1 3 - 5 標定点位置（1 ～ 6）

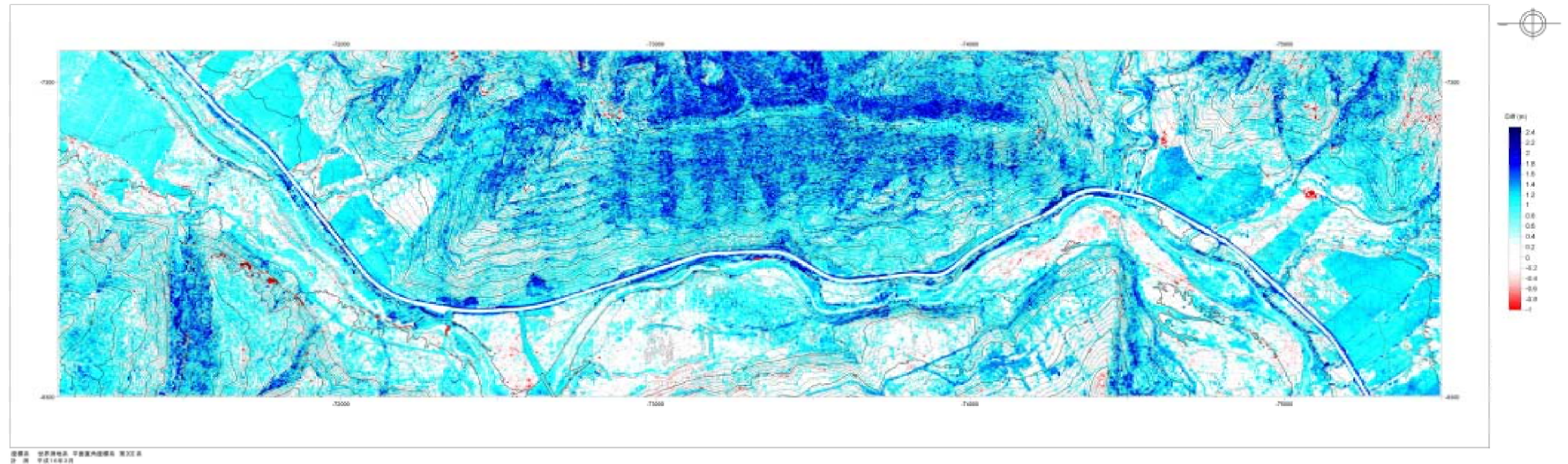
図 1 3 - 6（a）は、積雪期計測高度 900m（低高度）の差分図に 5m コンターを記入したものを示し、積雪深は 20 cm ピッチ表示とし、さらに 0 付近の  $\pm 20$  cm を 0 の表示として図示してある。

カラーオルソ（b）は落葉期のカラー写真を示し、現地検証（無雪期に実施）を行った場所をアルファベットで記してある。

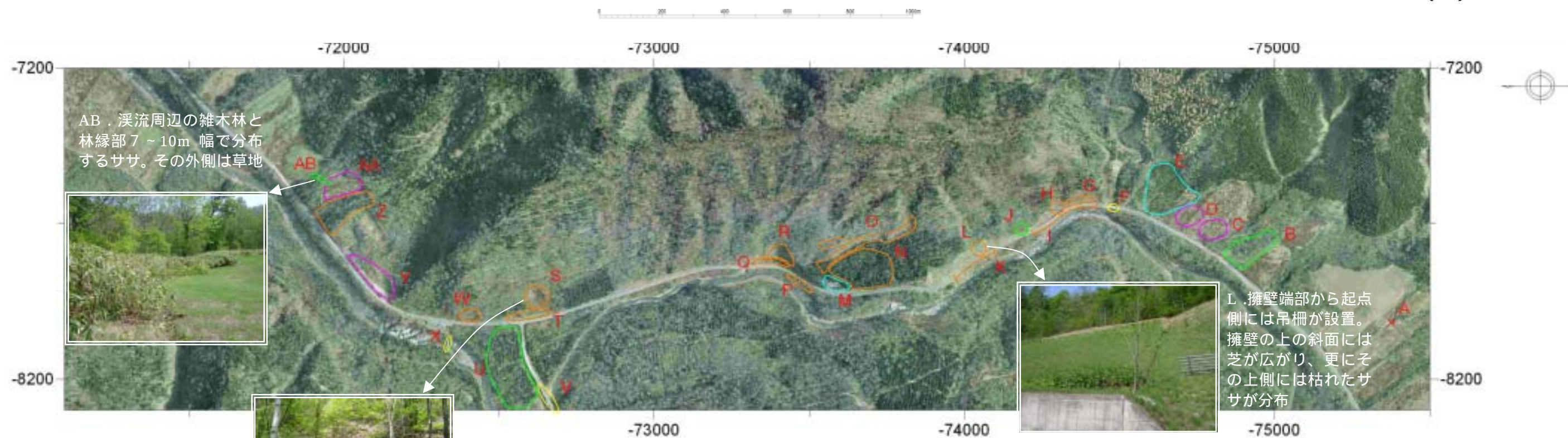
このうち代表的な箇所の説明を以下に記す。

- ・ 地点 S：崩壊地であり 1.4m 前後の積雪深を示す青色となっている。
- ・ 地点 L：斜面長 20m 程度の草地のり面を示し、1m 前後の均一な積雪深を示している。
- ・ 地点 AB：渓流出口付近の落葉雑木林と林床のササ（H:1.6～1.8m）草地である。

国道 452 号（差分 低高度）  
（等高線 5m 間隔）



積雪深図 (a)



カラーオルソ画像 (b)

国道 452 号現地調査箇所図 (オルソ画像)

図 13 - 6 積雪深図 (a) とカラーオルソ画像 (b)

## 1 3 . 4 考察

### 1 3 . 4 . 1 国道 230 号に関する考察

表 1 3 - 1 によると、繁茂期においてレーザデータ透過率が対地高度 900m、1800m とともに 18% 程度の値であったのが、1 ヶ月後の落葉期のデータでは透過率が 30% ~ 40% に上がっており、これは明らかに落葉が進んで地盤が検出できた影響といえる。実際には、9 月下旬の 230 号中山峠付近はすでに植生繁茂の最盛期は過ぎており、本来、夏期の繁茂最盛期には透過率は 18% より下回っていたものと推察される。

落葉期のデータ密度をみると、対地高度 1800m では 0.36 点/m<sup>2</sup>、900m の低高度の方が 0.59 点/m<sup>2</sup> と 1.6 倍以上の密度になっている。また、繁茂期をみると対地高度 1800m で 0.22/m<sup>2</sup>、900m で 0.20/m<sup>2</sup> と大差ない値となっている。求められる精度にもよるが、ビーム照射面積が狭くデータ密度が高い方が細かい形状は再現されるが、ビーム拡散度は一定 (0.2mrad) で設定されているため照射面積は地形面に左右される。すなわち斜面に対しては照射面積は大きくなり、距離の誤差が生じる。これを解消するためには、対地高度を低く設定することにより計測距離が短くなる。

### 1 3 . 4 . 2 国道 452 号に関する考察

積雪深算出は、重ね合せて差分をとる作業であり、この作業で生じる誤差 (ズレ) は積雪深算出に深く影響する。ここでは道路の形状などを利用して精度について検討した。

その結果、比較的精度の高い標定結果が得られた。すなわち、ここで設定した 6 点の標定点のズレは、いずれも装置の保証精度以内に収まった。対地高度 900m で水平のズレは - 0.09m ~ - 0.07m、- 0.04m ~ 0.03m であり、路面の高さのズレは 0.01m ~ 0.04m となった。対地高度 1800m では - 0.18m ~ 0.00m、- 0.02m ~ 0.02m であり路面の高さのズレは 0.02m である。路面近くの積雪深はほぼ 1.1m と収束している。

図 1 3 - 6 によると、白から赤に変わる色調のエリアが存在しており、積雪深ではマイナスの値を示すゾーン (落葉期測定地盤よりも低いというゾーン) となっている。現地確認したところ、林床にササが生育していることが判明した。すなわち、以下の現地での精査結果に示すように、ササ地では落葉期の地盤データが正確に得られず、ササ高の上位 ~ 中位程度を地盤としてしまう可能性が高いことが指摘される。ササ地のデータの修正、取り扱いについては今後の課題である。

#### 現地検証による精査結果

図 1 3 - 6 の AB 地点のエリアのデータを詳細に検討した結果、図 1 3 - 7 の断面図に楕円で示すように落葉期におけるレーザがササの中の地盤まで到達していないということが判明した。(現地調査から当地区のササは 1.5m ~ 1.8m の高さであった。)

すなわち図 1 3 - 7 の楕円で囲まれている範囲はササが密集していたため、地盤データを正確に得ることができず、ササの上位 ~ 中位を地盤データとしている。レーザデータの編集・解析処理では植生の密集の程度によってはこの状態を地形モデルとして計算することがありうるという結果が今回の計測から得られた。

以上の結果から、このようなエリアは積雪期には降雪の重みでササが倒れこみ、隙間ができて降雪前のデータよりも積雪がのった雪面の標高が低い値を表していたことがわかる。

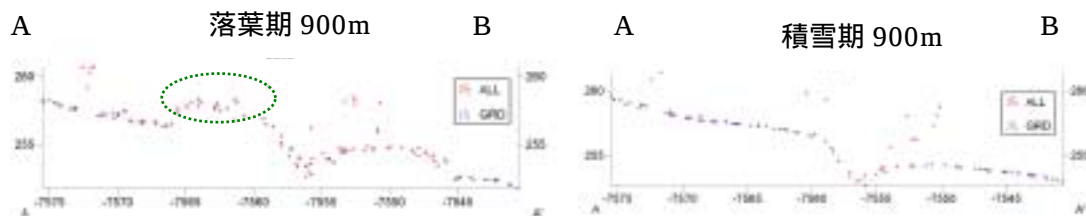


図 1 3 - 7 AB エリアの点群断面図

なお、精度の向上には以下の点に留意して計測を行うべきである。

#### ■対地高度は低くする。

対地高度と位置座標の関係は、一定の拡がりを持って発射されるレーザビームは、斜面の場合、対地高度に応じた拡がりを持って地盤(斜面)に到達するので、ここで生じる誤差は、中心座標を記録することによる誤差と機器の持つ角度分解能の誤差(対地高度の 1/2000 の水平誤差)の両方が加味される。従って、対地高度を低くすると精度があがる。

#### ■地盤の計測時期としては落葉期が適している。

特に、落ち葉などの影響がもっとも少ない融雪直後が適している。ただし、ササ地であるかの確認は、現地踏査などでできるだけ把握すべきである。

### 13.4.3 道路管理面からみた空中レーザ計測の適用性

国道 230 号の当該地域は、地すべり等、特異な地形が認められ、これらの表現は今回の空中レーザ計測で得られた等高線図から比較的簡単に読み取ることが可能である。特に 1m 等高線図からは、遷急線、滑落崖、地すべり移動ブロック、さらには、平坦部や谷地形の表現など非常に細密に示されているので、道路との関わりからこれらの地形判読には適していると言える。(図 13 - 4 参照)

また、別手法の加工表現などは 3 次元デジタルデータの特徴が発揮されており、立体的な地形把握が容易であるので視点移動や動画像化することにより、専門家以外でも対象地形の特徴が理解しやすく、この点も特長と言える。

ただし、急崖斜面やオーバーハングの地形表現は真上方向から発射されるレーザ計測では精度面および死角箇所が計測不可能となるなどの理由で適さない。道路管理のための計測範囲は、少なくとも斜面下部から遷急線よりも上の斜面上部まで(場合によっては更に山側まで)は必要であり、斜め空中からの計測データや最近実務的に用いられつつある地上型レーザ計測との組み合わせなどの工夫も今後求められる。

国道 452 号にみられる寒冷地における積雪深の計測を行う場合、地盤の計測は降雪前の落葉期もしくは融雪後の早い時期に行い、地形データを作成することがより精度が向上する。ただし、ササ繁茂ゾーンのデータの取り扱いについては、地盤の表面が正確に得られていない可能性が高いため、留意が必要である。

積雪観察や雪崩対策など道路管理の面からは、広いエリアの計測の必要性はないのでヘリコプターによる路線沿いに限った計測方法の確立と、いかに迅速にアウトプットが出せるか(リアルタイムレベル)が今後の課題である。さらに、今回の作業を通して分かったことは、計測と同時に可視画像(デジカメによるカラー写真)の撮影は周辺の土地利用や林相を把握したり、さらに図 13 - 4 で示すように鳥瞰図などを作成する上で必要不可欠である。

また、経費の面ではこれまでの航空測量と図化に比べ同等かむしろ安価で時間がかからない傾向にあり、実務的に取り組みやすい。その一方で、この計測が高度な専門的技術に特化されたものであり、出力された地形データは所謂ブラックボックスから出されたデータであることに留意を要する。上記したササ地と同様に、データを裏付ける現地検証点をいくつか設けるなど、運用上の工夫が必要がある。

<参考資料> 積雪面計測における精度検証の例（計測実施会社より提供）

#### 積雪面計測における精度検証

雪面と一般地物との計測の違いの点検を除雪路面と積雪面の段差を直接測定した比高とデータ処理後のレーザ計測点と比較点検を行った例を示す。



除雪後の路面と積雪面



積雪面高と道路面高

左図に示すとおり道路面と積雪面までの比高をスタッフで測定した結果、1.65mであった。同個所のレーザ計測したデータからその段差（比高）は、1.80mであった。右図は分かりやすく等高線に置き換えて示したものである。この検証は、翌年同個所において再度行ったが 0.12mとの結果が得られ、再現性が確認された。つまり積雪面が高く観測されることになる。

$$1.80 - 1.65 = 0.15\text{m}$$

この差が生じるのは、レーザの反射強度差によるレーザスキャナーのシステムの計測誤差と考えられている。この反射強度による影響について早急に解明する必要がある。

### 13.5 今後の課題

今回、国道 230 号および国道 452 号において落葉時期と積雪期に空中レーザ計測を行った。前節まで述べた空中のレーザ計測について、道路管理上、以下のような課題が列記される。

- 1) 急崖斜面やオーバーハングの地形表現は真上方向から発射される空中レーザ計測では精度面および死角箇所が計測不可能となるなどの理由で適さず、斜め空中からのレーザデータや最近実務的に用いられつつある地上型レーザ計測との組み合わせなどの工夫も今後求められる。
- 2) ササ地では落葉期の地盤データが正確にえられず、ササ高の中位程度を地盤としてしまいう可能性が高いことが指摘された。ササ地などの植生による地形補正手法の確立などが必要である。
- 3) 積雪観察や雪崩対策など道路管理の面からは、広いエリアの計測の必要性はなく、ヘリコプターによる路線沿いに限った計測方法の確立や迅速なアウトプット(リアルタイムレベル)のための技術開発が望まれる。
- 3) この計測は高度な専門的技術に特化されたものであり、出力された地形データは所謂ブラックボックスから出されたデータであることに留意を要する。出力データを裏付けるための現地検証点をいくつか設けるなど、運用上の工夫が必要がある。

上記 1) で示した地上型 3D レーザ計測は、研究・試行段階から実務段階へと移行しつつある。その用途も、ここ 1、2 年、岩盤崩壊などの斜面災害のほか、土砂動態計測などの渓床モニタリング、あるいは埋蔵文化財の記録計測などの分野で使用されつつある。今後は、地上型レーザの道路管理面からみた適用性について検討する予定である。