# 高精度、広範囲、短工期のルート選定調査技術
## ～パイプラインエンジニアリングと空間情報収集技術の融合～

Research technology for selecting the pipe-line route in high precision, wide area, short term
～Fusion of pipe-line engineering and the research technology in gathering amounts of spatial information～

浅野　秀敏　Hidetoshi ASANO
日鉄住金 P&E ㈱
東日本支社　設計部　パイプライン設計室　マネジャー

東　　俊平　Shunpei HIGASHI
日鉄住金 P&E ㈱
東日本支社　設計部　パイプライン設計室

那須　　徹　Tohru NASU
日鉄住金 P&E ㈱
東日本支社　プロジェクト工事部　部長

松本　博文*　Hirofumi MATSUMOTO
日鉄住金 P&E ㈱
東日本支社　設計部　部長

抄　録

近年 IT 技術等の進歩に伴い、各種調査技術も格段の進歩を遂げてきており、特に空間情報収集技術に関しては、GPS・IMS 等を使用し、地表面に顕われている情報を全て取り込み、３D 情報のままで設計に利用可能な領域まで達している。パイプラインエンジニアリングの分野においても、着工後のルート変更を防止するために、①面的広範囲な調査を望む声が強く、さらに地元対策として②調査時秘匿性の確保、管理者協議を有利に進めるための③短工期で高精度のアウトプットなどの高度な要求に対応する必要がある。

われわれは、数年前より次世代の調査方法に着目し、動画情報取得技術の FS システムの適用性の向上や360°ハイブリッドマップ（Location View）の導入、空中写真を適用するための最適な飛行高度の検討、モービルマッピングの図化の精度の調査・確認、測定限界をカバーし補完する方法、レーザー測量成果とオルソ画像の合成方法などについて、測量会社・地盤調査会社と協力し適用性の検討を行ってきた。今回、さまざまな空間情報収集に関する先端技術を INPEX 富山ラインエンジニアリングに適用させ、施主の要求に高いレベルで応えることが出来たのでここに実例を交え報告する。

Abstract

IT technologies have made remarkable advances in recent years, especially for the research technology in gathering amounts of spatial information. By using GPS, IMS, and so on, we are then able to input the ground surface information to create, design and utilize it for the purpose of 3D information. Therefore makes it possible for us to deal with advanced requests such as the following below.

1. Wide spread investigation, for preventing the route change during the construction.
2. When an investigation is held; keep the information secret from the local residents.
3. Shorter term, higher precision output is needed.

We have made a huge success in business with INPEX Toyama line project; at present the technology being used are from years ago but now an investigation has been started.

＊〒141-0032　東京都品川区大崎1-5-1　大崎センタービル　Tel：03-6865-6000

・To improve the application for FS systems.
・Introduce 360 degree hybrid map(Location View).
・Examine optimum flying height to take aerial photos.
・Examine and confirm the precision of illustrated Mobil mapping.
・The way of covering and supplement the measuring limit.
・The way of composing visual images.

## 1 緒言

従来のエンジニアリングでのパイプラインルート調査は、工期的な制約から、机上であらかじめ想定した２～３ルートを中心に、当該道路沿いに行われるため始終点を結ぶ線的な調査に留まり、始終点を含む面的にとらえると調査範囲が狭かった。また道路形状図も道路管理者の道路台帳をベースに作成しているため現地との差異がかなり大きく、実施設計時に再度測量調査が必要になるなどの問題があった。

INPEX 富山ラインにおいて施主は、エンジニアリング時点と工事完了時点で発生する差異を極力少なくするために、調査実行時点において面的広範囲で高精度な成果を要求し、加えてほぼ同じルートとなる北陸新幹線の長期間に亘る建設に対する地元感情を考慮した調査時の秘匿性も要求、さらに降雪地帯で実質的な調査期間が９～11月の３ヶ月しかないという条件が重なり、現地踏査等の従来手法では達成困難であると想定された。このため本調査では以前より着目していた車両や飛行体でのレーザー測量等による先進空間情報収集技術を導入した。

## 2 富山ライン建設工事の概要

INPEX 富山ライン(図１参照)は、新潟県糸魚川市の新青海ライン田海 VS を基点とした設計圧力７MPa、口径500A、延長約100km の、高圧長距離パイプラインである。このパイプラインは、新潟県長岡市を基点とした、現在日本で最長クラスのパイプラインの一部を構成している。

また富山ラインは、以下に特徴を示すとおり非常に工事難易度の高いパイプラインルートである。

①始点付近は、親不知・子不知で有名な海岸付近まで山岳地帯が張り出した地形のためトンネル工法が主体となる。
②富山平野部は黒部川・神通川などの有名な大河川が多く、シールド工法適用箇所が多い。
③魚津・呉羽山などの断層帯があり技術的課題が多い。
④冬季には積雪が多く、一般埋設部は農道主体のため農繁期に施工ができないといった施工時期の制約を受ける。

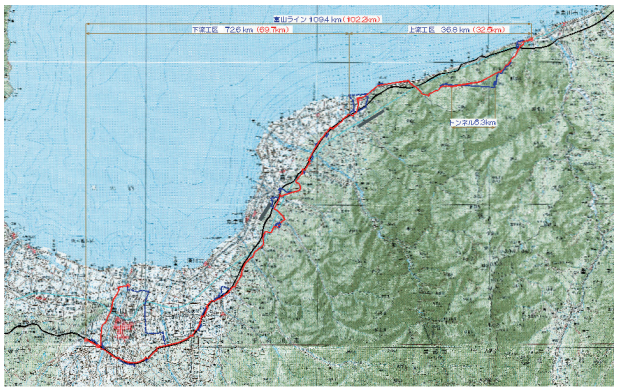



図１　富山ラインルート
Fig. 1　The route of Toyama line

## 3 空間情報収集技術の適用

### 3.1　モービルマッピング

#### 3.1.1　特徴・性能

モービルマッピングとは、デジタルカメラ等による映像データを、車両に搭載した GPS・レーザースキャナー・IMU(慣性航法装置)などの測位センサーによる三次元位置情報と、それに関連付けられた空間情報として走行しながら収集する技術である。

これにより現地に降り立つことなく、車両に乗ったままで、既設占有物やマンホール、道路路面表示(路面ペイント)の計測から図面化までが可能となる。図２にモービルマッピング調査フローを示す。

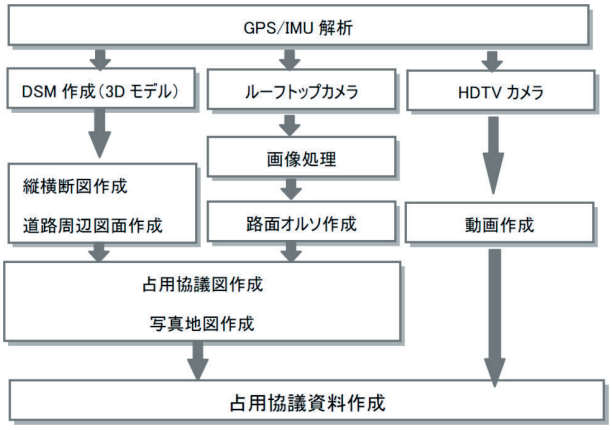



図２　モービルマッピング調査フロー
Fig. 2　The flow chart of Mobile mapping survey

図面化はレーザーデータから直接平面図をトレースして作成する手法や、撮影されたデータから道路内写真図（路面オルソデータ）を作成する方法などがあるが、いずれも絶対位置精度10cm 以内（図３参照）にて作成可能で、縮尺１／500はもとより縮尺１／250地形図作成のための地形測量で要求される標準偏差12cm にも十分収まる精度が得られることが確認できた。

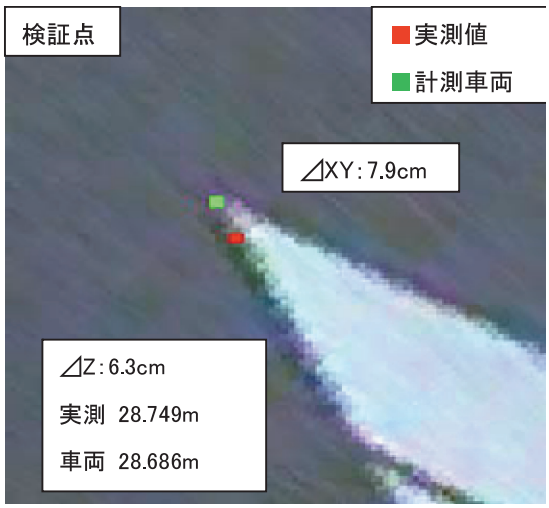



図３　精度検証の結果
Fig. 3　The results of the precision verification

### 3.1.2　パイプラインエンジニアリングへの適用

道路平面図の作成は、パイプラインエンジニアリングにおいてもっとも重要であり、その精度は、後々の作業に大きく影響を与える。これまではエンジニアリングの初期段階で、道路管理者より道路台帳を入手し、これを利用して、ルートの検討・官庁協議資料の作成及び占用申請図の作成を行い、ルートが確定した実施設計段階で、電子平板＋GPS 測量で最終的な平面図を作成していた。同じ情報を有した図面を２度作る無駄と、申請図と実施設計図の差が大きく占用申請の修正などに多くの時間やコストがかかる他、河川や道路横断等の特殊部検討のために長期間の現地での作業が必要であるため、情報流出の時期や量をコントロールできないという問題を抱えていた。

モービルマッピングを適用するに当たり、まず、その撮影可能範囲・撮影速度・精度などを試験走行により確認を行った。そのなかで、撮影可能範囲について、道路境界付近でのひずみが大きく、現状のままでは適用できないとの結論に至った。また、精度に関しても場所を定めた標定点による補正が必要で、効率的な補間測量を計画する必要があることも判明した。施主の意向によりエンジニアリング段階での GPS やトータルステーションを据えた作業および、補足調査といった現地作業が制限されたことから、標定点による補足を満足に行うことができなかった。

このため基本設計エンジニアリングの成果としては、数 cm オーダーの精度を達成することはできなかったが、占用協議図としては十分使用できるものであった。ただし施工図作成においては精度が要求されるため、現地立入りの許可を得た段階で有効な補間測量を実施することにより、所定の精度を確保しモービルマッピングの柔軟性を確認する必要がある。

### 3.1.3　導入の効果

モービルマッピングの導入により、占用協議図と施工図のベースとなる地形図を共用することができ工期面・精度面での効果がある他、以下の利点を有する。

①現地を車で通過するだけでデータの取得ができるため、住民との接触による意図しない情報の流をコントロールすることが可能となる。

②レーザーデータから横断図・縦断図の作成が可能（図４参照）。また施工時に有効な情報として、電柱の位置、電線の高さ等を３次元にて管理できる。図５にレーザーデータによる断面図作成の例を示す。

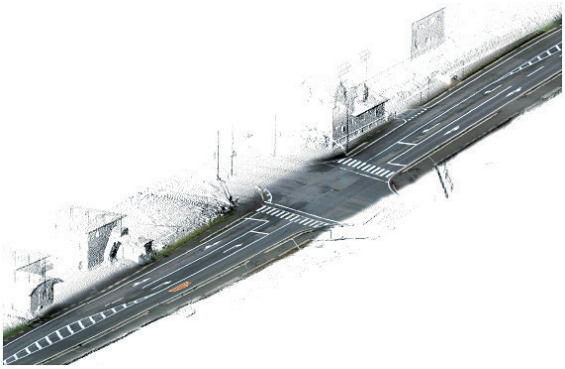


図４　レーザーデータ
Fig. 4　Mobile mapping laser data

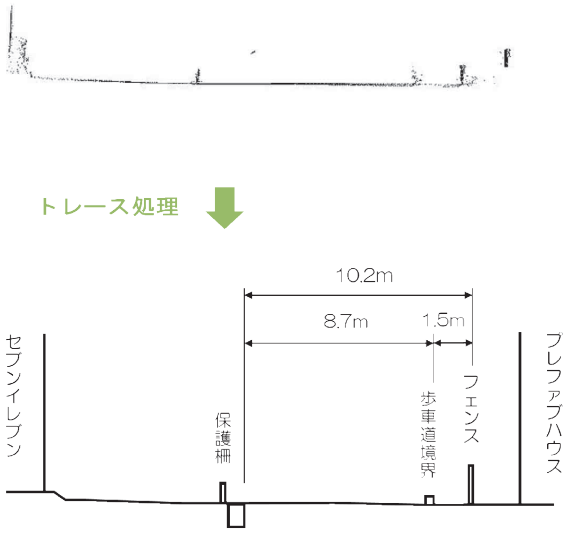



図５　レーザーデータによる断面図作成の例
Fig. 5　Example of a section drawn using Mobile mapping laser data

③走行映像（図６参照）を占用協議時に活用することで、管理者説明を優位に進めることができ、周辺環境の把握が容易でルート選定に対して大きな効果がある。

図６　実際の走行映像（Hi-Vision）（写真）
Fig. 6　Abstract view（Photo）

④レーザー計測データより、これまでは実測でしか取得できなかった路肩などからマンホールまでの相対距離が取得可能となり、現地調査工数を削減できる。

⑤ルート変更に対して、柔軟に対応が可能であるとともに、決定しているルートのみを先行して調査実施することも可能。

## 3.2　超大縮尺空中写真測量

### 3.2.1　特徴・性能

超大縮尺空中写真測量とは、航空機に搭載したカメラにより等高度で重複した連続写真を撮影し、実体鏡や図化機により実体視し図化する技術である。本調査では撮影高度を変更することで、撮影縮尺を１／3000に高めるとともに、部分的に後述する精度向上方法を適用することで、特殊部検討用の詳細図（１／200）を作成する。図７に超大縮尺航空写真測量フローを示す。

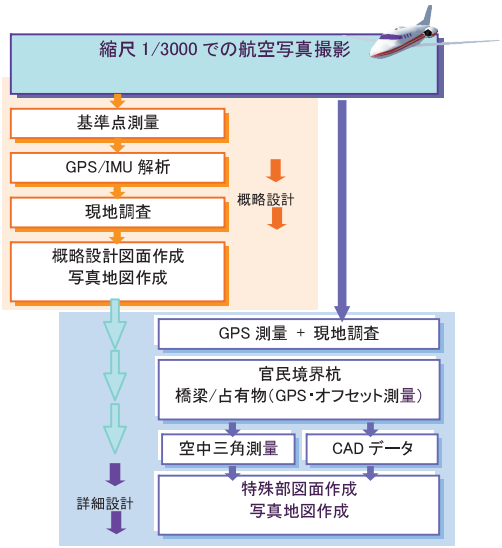
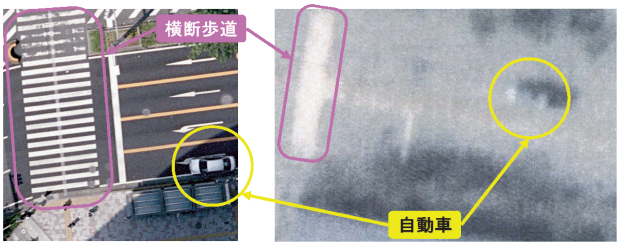



図７　超大縮尺空中写真測量フロー
Fig. 7　The flow chart of aerial measurement in the reduced scale of photos

### 3.2.2　パイプラインエンジニアリングへの適用

パイプラインエンジニアリングにおいて重要な事項の一つに、特殊部の検討が挙げられる。特殊部の検討は、ルートを決定するための要素検討であるため、期間・費用の面から現地における簡単な計測と写真や地形図（１／1000）を拡大したものを使用して工法検討などを行っており、実施時点で大幅な見直しが必要な品質であった。また、空中写真測量は、

短期間で広範囲の図面作成が可能となるが、その反面、実測に比べやや精度が劣り、通常の手法では特殊部の検討が求める精度を満たすことができないとされてきた。現実に、空中写真の図化は、熟練した人間の手によってのみ可能な技術で、図８に示すように写真から地形を判読することは、ほぼ不可能であった。




今　回　　従　来

図８　飛行高度による空中写真の違い
Fig. 8　The difference between 2 aerial photographs

実測では全点直接測量にて地形図を作成するが、空中写真測量は限られた基準点と空中写真から現実界の相似モデル（立体モデル）を作成し地形図を作成するため、その精度は立体モデルのトレース精度に影響される。

航空写真測量の誤差は、空中三角測量の誤差に起因し、その誤差は立体モデル形成における交会残差によって決定される。表１に空中三角測量での立体モデル作成における誤差を示す。

表１　空中三角測量での立体モデル作成における誤差
Table 1　Margin of error in 3 dimensional model formations via aerial triangulation

| 撮影縮尺 | 撮影高度 | 地上解像度 | 交会残差30μ15μでの標準偏差・最大誤差 |
|---|---|---|---|
| 1/1000 | 150m | 9μ／0.9cm | 30μ⇒3cm，6cm<br>15μ⇒1.5cm，3cm |
| 1/2000 | 300m | 9μ／1.8cm | 30μ⇒6cm，12cm<br>15μ⇒3cm，6cm |
| 1/3000 | 450m | 9μ／2.7cm | 30μ⇒9cm，18cm<br>15μ⇒4.5cm，9cm |
| 1/8000 | 1200m | 9μ／7.2cm | 30μ⇒24cm，48cm<br>15μ⇒6cm，24cm |

※撮影縮尺1/1000においては、航空法に基づく最低安全高度300mのため、実際の撮影は不可

立体モデルを作成するための空中三角測量は、n／２＋１（n＝モデル数）の基準点と隣接する写真の共通点から構成された三角網の解を求めることで、その立体モデルの位置が決定される。したがって立体モデルの精度は空中三角測量にて算出された最適値ともいえる。共通点をVRS/RTK-GPS（video response system/Real time kinematics-GPS）方式により直接測量し、その結果を適用することで飛躍的に精度が向上する。表２にVRS/RTK-GPS方式を適用した場合の読取り分解能を示す。

表２　立体モデルによる読取り分解能
Table 2　Resolution Reading from 3 dimensional model formations

| 撮影縮尺 | 地上解像度 | 読取り分解能 |
|---|---|---|
| 1/1000 | 9μ／0.9cm | 0.9cm×0.7＝0.63cm |
| 1/3000 | 9μ／2.7cm | 2.7cm×0.7＝1.89cm |
| 1/8000 | 9μ／7.2cm | 7.2cm×0.7＝5.04cm |

これにより、コストの上昇を最小限に抑え、詳細検討が必要な地形図の作成は現地で官民境界杭、橋梁等をVRS/RTK-GPS方式にて測量し、当該立体モデルを形成する共通点・基準点に適用することで、空中写真測量においても最大誤差10cm以内にて地形図の作成が可能となった。

### 3.2.3　導入の効果

超大縮尺空中写真測量の導入により、従来は平板測量でしか作成出来なかった特殊部の検討用詳細図に空中写真を適用することが可能となり、以下の利点を得ることが可能となった。

①広範囲の面的な調査を短期間に実施できる。
②現地作業の軽減・ルート変更・延伸等によるデータ構築に柔軟に対応ができる。
③長時間かかる平板測量がなくなることで、調査の秘匿性を確保することができる。
④特殊部の検討期間短縮及び信頼性の向上が可能である。
⑤副次的な効果として、モービルマッピングで取得できない敷地内の家屋形状に関する補完も可能となる。
⑥現地状況を広域に観察・検討する等、多目的に活用が可能となる。

## 3.3　航空レーザー測量

### 3.3.1　特徴・性能

航空レーザー測量は、航空機に搭載したレーザースキャナーからレーザー光を照射し、地形を計測する測量で、レーザー測距・GPS・IMU・解析ソフトウエアという４つの技術により実現されている。図９に航空レーザー測量の概念図を示す。

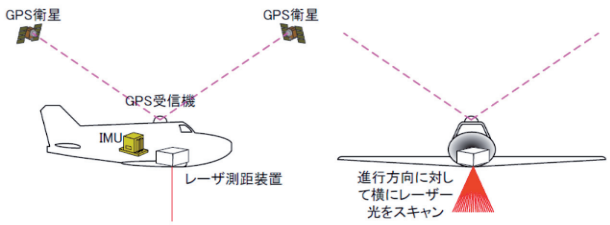



図９　航空レーザー測量概念図
Fig. 9　The concept of the aerial laser surveying

GPS により飛行機の位置を、IMU により飛行機の姿勢を計測しながら、レーザーの照射時間と地表からの反射時間により航空機と地上との距離を決定し、地上の電子基準点と連続キネマティック測量を行うことにより航空機の位置を決定して地上のレーザー反射位置の標高と位置(x, y, z)が決定される。図10に航空レーザー測量フローを示す。

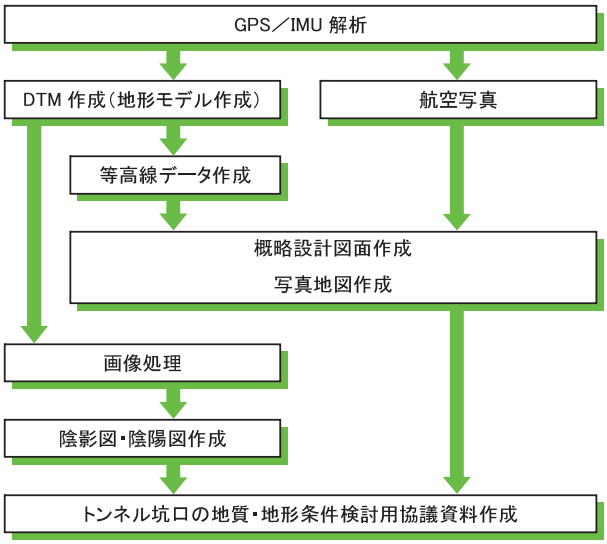



図10　航空レーザー測量フロー
Fig. 10　The flow chart of the aerial laser surveying

レーザースポットは点ではなく円形の面で、樹冠にあたって反射するだけでなく色々なところで反射し最後に地表で反射する。樹木等の最初に反射してくる光をファーストパルス、地表面で最後に反射するものをラストパルス、その間で反射するものをアザーパルスといい、それぞれの高さを検出できる。そのため樹木の位置、樹高を特定することが可能であり、工事の際の伐採計画などにも活用できる。反面、照葉樹のように葉が密に茂るところでは、レーザー光が地上にまで達せず、地面の高さのデータは得られない。図11に山岳部のレーザー測量概念図を示す。

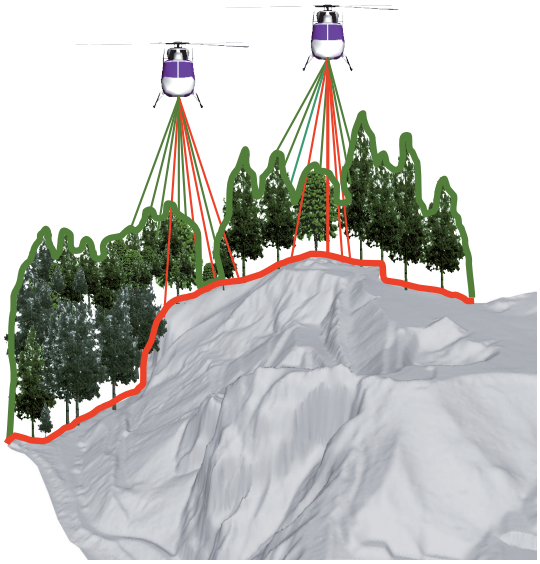


図11　山岳部レーザー測量概念図
Fig. 11　The concept of the laser surveying for mountain areas

また、航空レーザー測量に使われるレーザー光は、青や黒い部分が苦手で、反射して戻ってこない場合があり、このような状況を「欠測」と呼んでいる。更にレーザー光が苦手なものには、静水面があり、少しでも波があればレーザー光は戻ってくる場合が多く、河底の深浅測量は通常のレーザー測量では不可能である。図12に欠測の状況を示す。

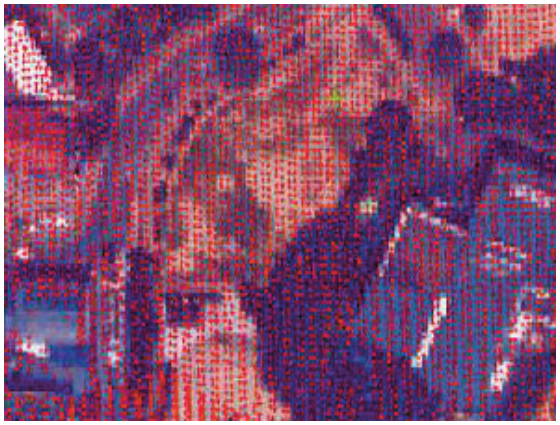


図12　欠測の状況
Fig. 12　The lack of the aerial laser surveying

### 3.3.2　パイプラインエンジニアリングへの適用

これまでトンネルの計画や斜面配管を計画するための山岳部の測量は、人間が重い機材を担いで徒歩で現地に入り、調査予定地周辺の伐採を行う等して視認性を確保した上で直接測量を行っていた。急斜面で、足場が脆く危険で、移動に時間を要すことか

ら調査範囲も狭い範囲に限られるため効率が悪く、気象条件にも大きく左右され、再調査も容易に行えないという問題点を抱えていた。データの特性から見れば、パイプライン全線において３Ｄデータを取り扱うことが望ましいが、航空レーザーで得られる３Ｄデータは、データ量が膨大で取り扱うことが困難であった。

今回のプロジェクトにおいては、調査対象箇所を山岳部に絞るとともに、検討に真に必要な箇所以外のデータを省略することや、高速な処理に機能を絞ったソフトウエアの導入、さらに描画速度の高速なコンピュータを導入することで対応した。

また、ドットデータの表現力向上のためサーフェース処理したものに、テクスチャーを施すことや、３Ｄデータを活かしてあらゆる角度による地形の状況把握を可能とし、山岳トンネルルート選定経緯を視覚的に分かりやすく表現することができ説得力の高い資料の作成が可能となった。図13に山岳部レーザー測量の成果を示す。

### 3.3.3　導入の効果

航空レーザー測量による３次元データを活用することで、これまでは長期間に亘る現地踏査でしか得られなかったパイプラインルート付近やトンネル坑口付近の地すべり地形や地層傾斜(流れ盤か差し目か)の有無、坑口掘削による地すべり誘発、岩盤滑落発生の可能性などの地形条件を事前に得ることができた。また、正確な地形表現が可能なデジタルデータを取得することで、作業者の熟練度に依存せず、定量的で短期間に作業を完了させることができた。更に、危険を伴う測量作業の軽減が可能となり、安全性・信頼性の向上と工期の短縮が同時に達成された。参考として図14に航空写真測量と航空レーザー測量での等高線図の違いを示す。

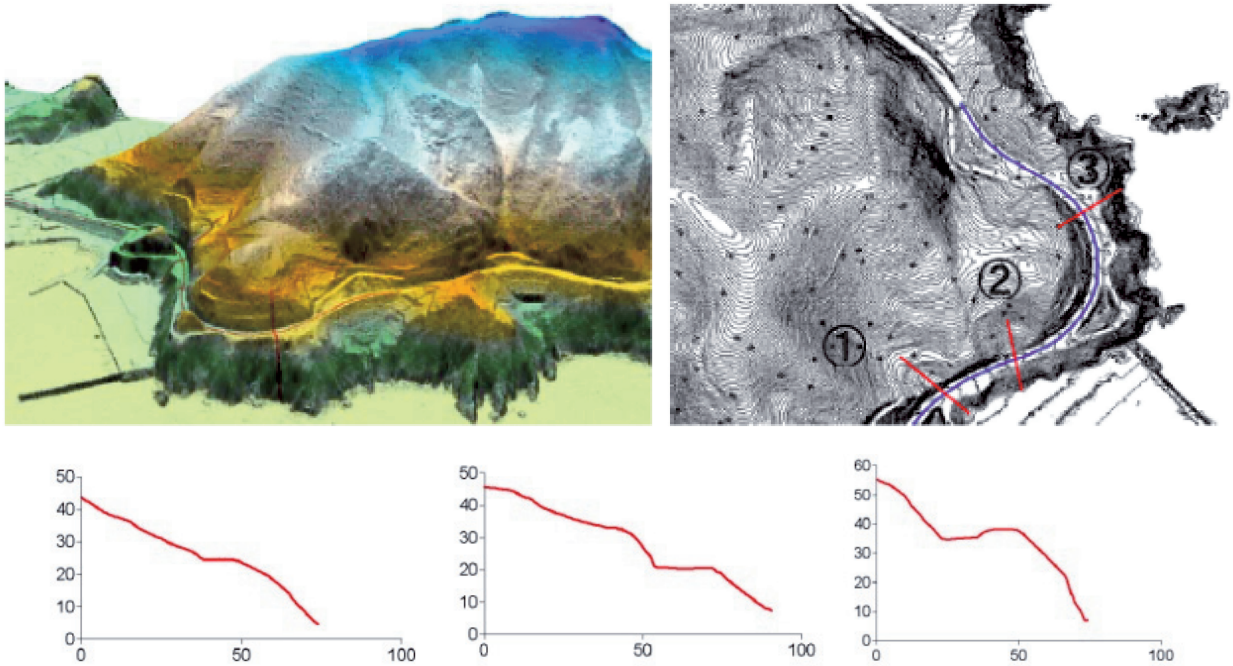



図13　山岳部レーザー測量の成果
Fig. 13　The results of the laser surveying for mountain areas

航空写真測量

航空レーザー測量

図14　航空写真測量と航空レーザー測量での等高線図の違い
Fig. 14　The difference of contour maps between the aerial photo and the laser surveying

## 4　空間情報収集技術の効果と今後の展開

### 4.1　工期面での効果

現地の地形情報収集について、従来は人が現地に赴いて、測量、スケッチ、写真撮影等を行なっていたが、モービルマッピングと航空レーザー測量を適用することにより、大幅な現地作業時間の短縮を図ることができた。しかし得られた情報の整理及びアウトプットに時間を要する結果となり、大幅な工期短縮とはならなかった。そこで今後の展開としては、現地にて得られる非常に多くの情報を容易に整理統合し、パイプラインルート選定に必要となるルート図、比較検討資料、道路管理者識別等のアウトプットを短期間で作成できるシステムの構築が必要と考える。

### 4.2　範囲・精度に関する効果

モービルマッピングと航空レーザー測量の適用により情報の取得範囲を大幅に拡大することが可能となった。今後の展開としてはパイプラインルートの検討段階に応じて情報整理の精度をランク分けし、必要なアウトプットに合わせて取得データを選別する。具体的にはルート比較検討に不要な情報は省略、もしくは次のタイミングでデータ化する等の、取捨選択手法を検討する必要がある。

超大縮尺航空写真測量の適用により、現地実測を省略したにも関わらず縮尺１／200レベルの地形図作成が可能となり、特殊部の計画において絶大な効果を得られた。基準点との結合や、写真において不鮮明な部分の補測を行うことにより、縮尺１／100レベルの地形図も作成可能と考えられるため、ブラッシュアップを図り有効に活用したい。また従来方法に比べて飛行あたりの撮影範囲が小さくなるというリスクを伴うため、ルート変更に備えて部分的に従来高度で撮影することや、撮影コースの複線化等、パイプラインルート検討に合わせた撮影計画を立てる必要がある。

### 4.3　情報管理に関する効果

空間情報収集技術の適用により、従来と比較して圧倒的に現地滞在期間を減らすことができ、調査期間における意図しない情報漏洩は皆無で、秘匿性の確保を効果として実感できている。今後の展開としては、精度を更に向上させるため、全ての現地作業を実施しないという方針で進めるのではなく、公道

における基準点測量や、補足測量等、特に地元住民に対して詳細な説明を必要としない作業については、事前に行政と協議して進めるといった進め方を施主へ提案することにより、空間情報報収集技術の利点を最大限に活かした効率的な運用が可能になると考える。

## 5 結言

先進の空間情報収集技術の導入により、従来時間がかかっていた現地調査や危険であった山岳部の測量から解放され、最適ルートを絞り込むための施主との議論や、河川横断部等の特殊部検討や詳細図を用いた官庁事前協議などに時間を有効に使うことが可能となった。また3Dレーザーデータやオルソ画像等の形式で得られる調査データは、高精度で多くの情報量を有しアウトプット形態は多種多様であったが、弊社が有する多くのエンジニアリング実績を基に有効なデータを見極め、効率的に組み合わせて表現することにより、施主要求仕様を十分満足する調査結果を提出することができたと考えている。これにとどまることなく、複数の調査結果を容易に重ね合わせ表示する技術や調査結果の評価レベルの統一化などにより、高レベルのエンジニアリング成果の作成が可能となることを目指し、現在、GISをベースとし、ハザードデータベース機能(活断層・液状化・津波等)を有する、「パイプラインルートシミュレーター」の開発に着手している。