

Geo-Diagnosis

(前編) 空から見た地球の形

Produced by Working Group 0

学生編集委員会 (WG0) では、企画立案から取材、記事執筆にいたるまで、学生が主体となり活動を行っています。記事は1月号と6月号の年2回発行しています。今年度からはHPを開設し¹⁾、過去の記事も閲覧可能になりました。本年度のテーマはGeo-Diagnosis (地球診断) です。地球をいかにして精密に測定評価しているのか、山の高さから平地の微妙な段差まで広いダイナミックレンジを地図ではどう表現しているのか、地震の指標となる活断層をどう評価しているのか、など興味深い技術を一部ですが紹介します。

○○○はじめに○○○

—「お母さん、ひざが痛いよ〜」「まあ、太郎くん、大丈夫？先生に診てもらいなさい」「どれどれ太郎くん、診せてくれるかな？」近所で評判の名医さんは早速、問診、触診、レントゲンなどの検査を行いました。「骨折ですね」とお医者さんは診断を下します。—

人は症状がでると、診断を受け、治療することで健康を保っていますが、地球の場合はどうでしょうか。地球の誕生から46億年が経ちます。45~40億年前に海ができ、40億年前に生物が誕生し、植物の光合成により4.3億年前にオゾン層が形成される、というように長い時間をかけて成長を遂げてきました²⁾。今もなお、地震や火山などによって変化し続けており、特に現在、環境問題などさまざまな症状に悩まされています。昨年度、学生編集委員会で行ったクリーンエネルギーのように³⁾、昨今、環境技術の革新が著しく注目されています。一方で、地球表層や内層を診断検査する技術も研究が進み、地球についての理解が深まりつつあります。そこで本年度は、“Geo-Diagnosis (地球診断)”と題して、地球の診断/計測技術を調査しました。地球診断というテーマに沿い、前編は空から地球表層の“形”を測定する技術、後編は地球内層の“ひび割れ”検査技術の動向について取り上げます。

本編では、地球表層部にスポットをあて、その先端測量技術を紹介します。地殻変動に伴い刻々と変化する地球表層形状の測定は、防災や土地利用などにおいて、重要性が古くから認識されています。伊能忠敬が初めて日本地図を作製してから約200年経ちますが⁴⁾、現在の測量技術はどうなっているのでしょうか。測量、地形計測、地殻変動測定について取材を行いました。

○○○航空写真測量○○○

地図作成のための測量は昔から三角測量法が基本原理で

あり、現在は三角測量の原理に基づいたステレオ法が主流です⁵⁾。ステレオ法とは、物体を2台のカメラで撮影し、表面の座標値を求める方法です。測定の概略を図1に示します。今、仮定として、同じカメラを2台使用し、それぞれの光軸は平行で、カメラレンズの主点からフィルム面までの距離 a が等しく、フィルムは光軸に直角に置かれているものとします。2つの光軸間距離 (基準線) を l とします。物体上の点 $P(x, y, z)$ とフィルム面の対応点 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ の座標の間には次の関係があります。

$$x_1 = ax/z \quad (1)$$

$$y_1 = y_2 = ay/z \quad (2)$$

$$x_2 - x_1 = al/z \quad (3)$$

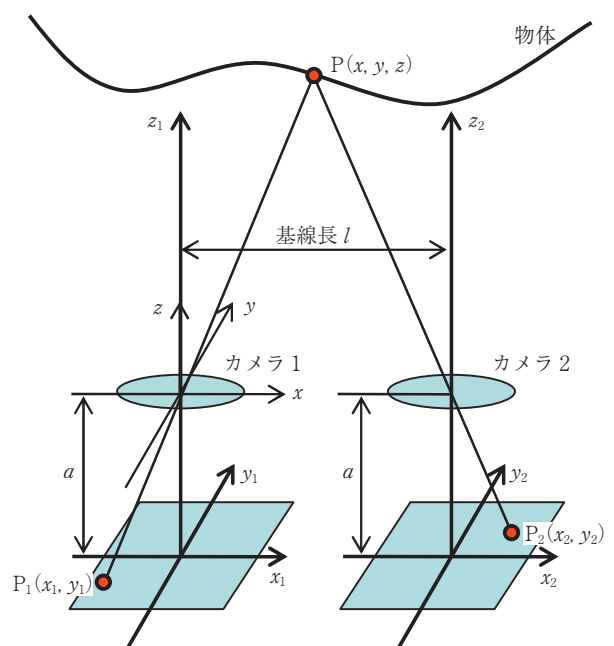


図1 ステレオ法 の概念

式 (3) より z を求め、式 (1), (2) より x, y を求めます。

航空写真測量は、航空機から同じ地区を撮影 (60% ラップ) した 2 枚の写真を使用して地図を作成します。従来の航空写真測量では、現地測量によって座標が既知である地点 (ここには写真に写るように航空測量標識を設置しておく) を、写真上で多数精密に測定し、撮影した航空機の空中での位置や姿勢を逆解析し (空中三角測量)、図化機で実体視しながら等高線を描くことで地形図を作製してきました。現在では、撮影時の飛行機自身の XYZ 座標から道路や建物の形状、地表面の高さの座標を求めます。飛行機の自己座標および傾きは GPS (Global Positioning System), IMU (Inertial Measurement Unit) というセンサを用いて、撮影時の座標と傾きをダイレクトに記録していきます。これらセンサの発展により高精度化され、また現地作業が省力されて、効率化されました。図化機は現在では PC 図化機を用いています。

●●●航空レーザ測量技術●●●

近年、航空レーザ測量技術が急速に発展し、従来の航空写真測量では得られない高精度の地形データ (DEM: Digital Elevation Model) が得られるようになりました。この航空レーザ測量技術とは、上空を水平飛行する航空機から、真下に向かってレーザ光を照射し、地面に反射して戻ってくるまでの時間を計測することで、地面までの距離を測定します。航空写真測量と比較し、高精度な測定を可能にしています。

航空レーザ測量の処理手順は、まず能動的センシングにより⁶⁾波長 1064 nm の近赤外線レーザ光を毎秒 15~20 万発地表面に照射し、レーザ光の反射により地表面までの距離を計測します。航空機上の GPS 受信データと、地理情報がすでに分かっている地上基準局の GPS 受信データを照合することで、レーザ光のセンサヘッドの位置、またセンサヘッドの姿勢を計測する装置 (IMU) によって自己姿勢を高精度に把握することができます。これら三つのセンサの情報を統合することによって (図 2) レーザ光 1 発ごとの地上側点の位置情報 (緯度、経度、標高) をデジタルデータとして取得します⁶⁾。航空レーザ測量では 1~5 m のメッシュサイズ、高さ方向に 20~30 cm の精度が得られ、航空写真撮影で従来写らなかった地形も、航空レーザ測量であれば計測することができるようになりました。

ここで、航空レーザ測量の特徴や苦勞についてアジア航測株式会社 千葉氏、藤井氏、木村氏にお話を伺いました。

- Q 構造物や樹木等がある中で、地表面はどのように計測されているのでしょうか？
- A レーザ測量にはモードがあり、図 3 のように一つの照射パルスに対して複数のパルスを受光します。ファーストパルスは樹木や建物として、またラストパルスは地表面として分離し、フィルタリング処理を施すことで図 4 のように地表面の高さを抽出す

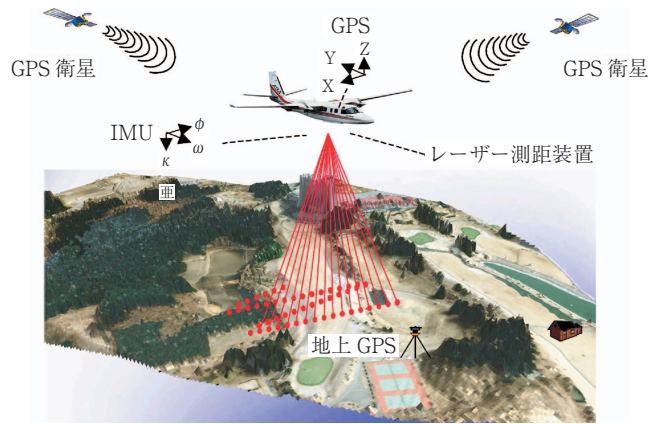


図 2 航空レーザ測量による高精度 DEM^{a)}

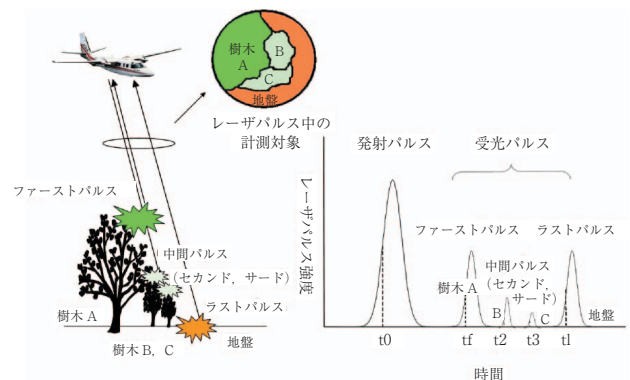


図 3 レーザ測量モード^{a)}

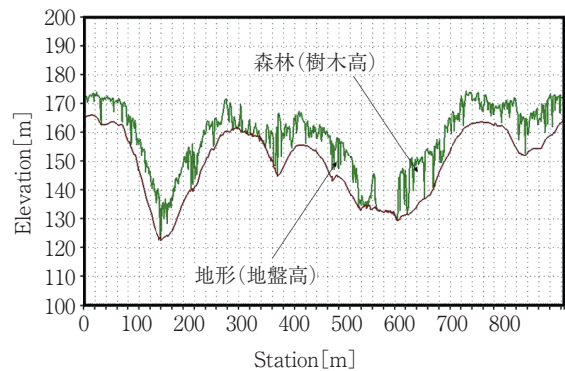


図 4 フィルタリング後のデータ^{a)}

^{a)} アジア航測株式会社提供 (図 2~4)

ることが可能となります。

航空レーザ測量の特徴として、高精度・高密度な地形データが迅速に取得できること、森林地帯でも高精度計測が可能であることが挙げられます。また航空レーザ測量では、直接三次元座標を取得するため、基準点を使用した現地測量を必要としません。

- Q 航空レーザ測量に適した季節や天候はありますか？
- A 芽吹き前、落葉後の実施が良いです。またレーザ光照射に影響を与える雲・霧・雨のときには計測でき

ませんが、雲の下での計測は可能です。現在日本一雨量が多いため計測機会の少ない、世界遺産屋久島での測定も検討されています。

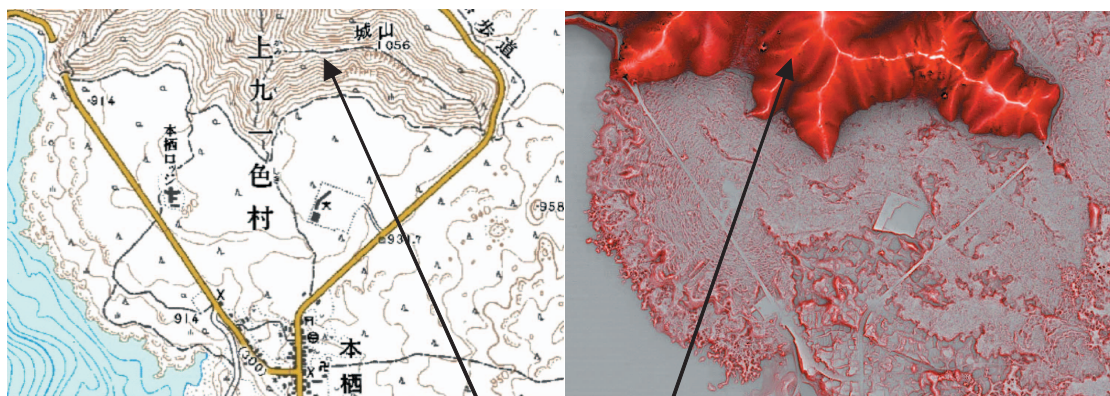
今後はヘリコプターによる低高度レーザ測量により、さらなる高密度計測、また防災などへの利用が期待されています。



図5 アジア航測の千葉氏、藤井氏と学生編集委員



コーヒーブレイク・赤色立体地図



左の等高線図とは異なり、右の赤色立体地図は山の形状が裸眼で立体的に見える

図6 等高線図(左)と赤色立体地図(右)⁸⁾で表した本栖湖東方の城山付近

図6(左)はよく知られる等高線図です。この等高線図は、素人には読みづらい、等高線間の情報がない、また、細部は山か谷かわからない、直感的に理解できない等、問題点があります。また近年、航空レーザ測量では高密度の地形データが得られますが、等高線間隔が狭くなりすぎるため、表現できないという問題も発生しました。これらの問題を解決するため、等高線図に変わる新たな表現方法として、陰影図や高度段彩図などが提案されていますが、汎用的なものではなく、そこで、アジア航測の千葉氏は、図6(右)の「赤色立体地図」を開発しました⁷⁾。なお、添付CD-ROM、HP¹⁾では、赤色立体地図がカラーでご覧いただけます。

この赤色立体地図は、真上から見た1枚の画像だけで立体的に見えるというもので、ある領域において尾根、谷に着眼してスケーリングした尾根谷度図と傾斜に着眼してスケーリングした斜度図を用います⁸⁾。尾根谷度図はグレースケールで表現し、尾根は白く、谷は黒く表示します。また斜度図は傾斜が急な部分を濃い赤で、緩斜面は薄い赤で表示します。赤色を用いられる理由は、人間の目は色相のうち赤色がもっとも階調豊かに捉えることが可能で、また赤色はディスプレイやプリンタでの表現能力が高いためです。この二つの図を重ね合わせることで、裸眼で立体的に見える地図が完成します。赤色立体地図は、標高の絶対値は得られませんが、広範囲の高低差を明確に表現できるのが特徴です。また赤色立体地図は、等高線図では表現できなかった、山の中にある道路を表現することもできます。

この赤色立体地図の表現方法は、地図作成などのマクロな部分の表示だけでなく、顕微鏡画像などマイクロな部分の表示や、医療の現場への応用も考えられます。このような新たな表現方法を用いることによって、精密工学の分野においても今までと違った景色が見え、新たな世界が広がるのではないのでしょうか。

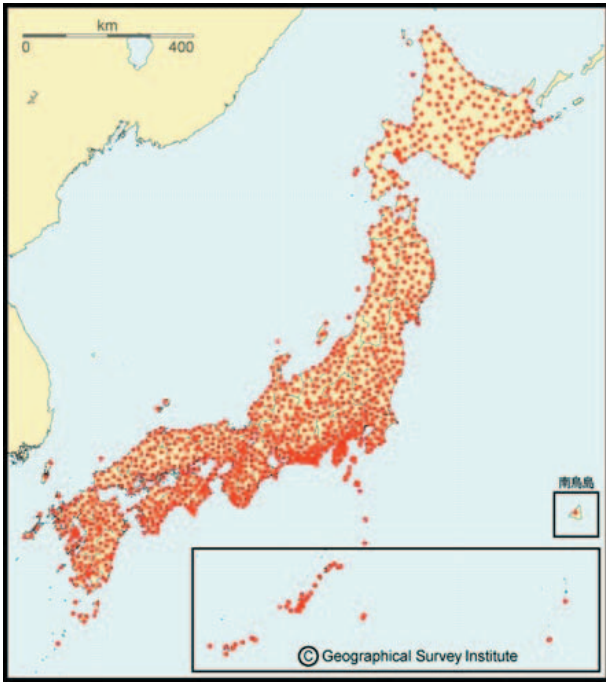


図7 全国展開されている電子基準点：平均 20 km 間隔（東海地方は約 10 km）で設置されている⁹⁾



図9 設置場所の環境に適合した電子基準点形状（左図：富士山頂、右図：沖ノ鳥島）⁹⁾

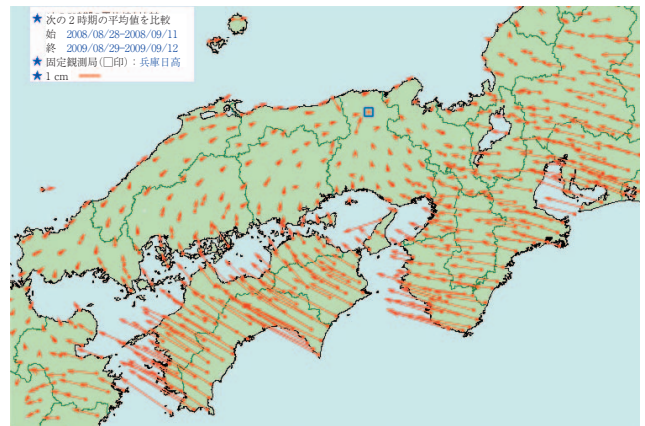


図10 近畿、中国、四国地方の地殻変動⁹⁾

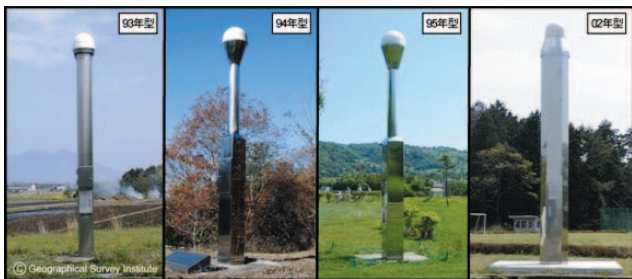


図8 進化する電子基準点のピラー形状⁹⁾

●●● GPS 連続観測システム ●●●

国土地理院は、GPS 連続観測システム：GPS Earth Observation Network System (GEONET) という GPS 観測点の運用を行っており、それぞれの観測点は「電子基準点」と呼ばれています。GEONET とは全国の電子基準点データを毎秒ごとに GPS 中央局（国土地理院）に集め、高密度で高精度な測量網の構築と広域な地殻変動の監視を行うシステムです。電子基準点は、全国 1240 箇所（平成 21 年 4 月現在）に設置されており（図 7）、GPS を利用するための新たな位置の基準です。外観は、高さ 5 m のステンレス製ピラーで、上部に GPS 衛星からの電波を受信するアンテナ、内部には受信機と通信用機器等が格納されています。基礎部には、電子基準点付属金属標と呼ばれる金属標が埋設してあり、トータルステーション等を用いる測量にも利用できるようになっています。図 8 は、電子基準点のピラー形状です。ピラーは 2 重構造となっており、太陽光の照射による熱膨張などの対策を施していま

す。また、電力が得られない地域ではソーラシステムが用いられ、地域特性に応じ異なる形状の電子基準点もあります（図 9）。電子基準点は 24 時間観測を行っており、1999 年に国土地理院が開始した電子基準点データの提供により、各種測量・学術研究や位置情報サービスに利用されています。

地表から概ね数百 km までの地球内部で起きる活動によって生じる地表の変形・変位を「地殻変動」といい、地震・火山を調査・研究するうえで、欠くことのできない観測対象です。地殻変動はプレート運動やマグマの蓄積等に伴いゆっくりと進行する場合と、地震や火山噴火等のイベントに伴って急激に進行する場合があります。地震や火山噴火の調査研究には、イベントの発生サイクルの各局面（イベント前、イベント時、イベント後）において、地殻変動の推移を詳細に分析する必要があります。GPS 連続観測システムでは、24 時間連続の観測データを毎日全国規模で取得して基線解析を行っているため、地殻変動を連続的かつ面的に捉えることが可能であり、その結果、イベントの発生サイクルの各局面で発生するさまざまなタイプの地殻変動を検出しました。

図 10 は、近畿、中国、四国地方の 1 年間の電子基準点水平変動をベクトルで表したものです。この図は兵庫日高を不動点として変動ベクトルを表しています。紀伊半島から四国の中央構造線より南側の地域にフィリピン海プレー

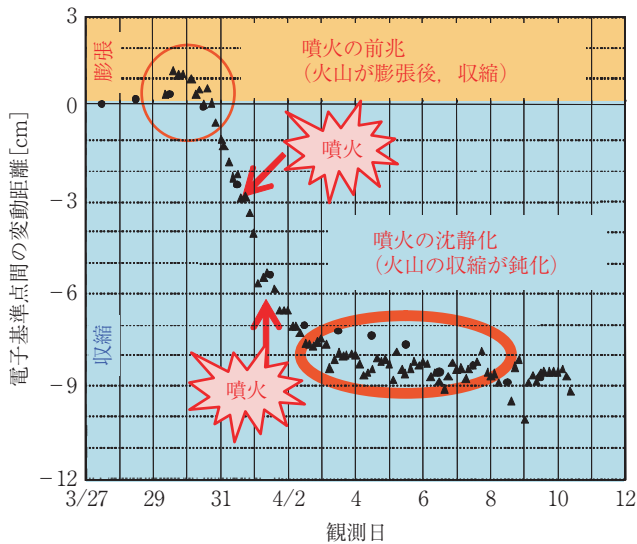


図 11 有珠山噴火前後の基線長変化グラフ¹⁰⁾

トの沈み込みに伴う北西～西北西向きの動きがみられます。これは、フィリピン海プレートの沈み込みによる影響と考えられています。中国地方では観測点間の相対変位が小さく、この地域の内部変形は少ないようです。

図 11 は、有珠山の噴火前後の周辺電子基準点間の距離の変動を表しています。噴火の約 2 日前に発生した距離 1 cm の伸びを検出したことは、噴火予知するうえで非常に重要な情報となります。

電子基準点が提供するデータが、将来の発生が懸念されている大地震や火山噴火の発生可能性を調査研究するうえで、重要な役割を果たすものと期待されます。

○●○お わ り に○●○

時代の流れとともに科学技術は進歩し、GPS、レーザなどの最新技術が計測/測量にも取り入れられている、一方で、測量の基本原則である三角測量法は、今も昔も変わりません。先人の頭脳に感服します。ただやはり、現代の科学の進歩も驚くべきもので、地球の形状を測定する誤差の大きな要因は大気中の水蒸気の濃度というレベルです。地球は常に変化しているので、測量は常に行わなければなりません。100 年後の技術はどれくらい進歩しているのでしょうか。地球の立体形状も分かっているかもしれません。今回は、測量や形状測定技術について述べました。これ



図 12 国土地理院の遠藤氏、河和氏と学生編集委員

らの結果は、インターネットで気軽に地図や衛星写真などが閲覧可能です。われわれが何気なく目にする、それらの情報はどのようにして得られているのか、すこしでも伝われば幸いです。後編 (6 月号に掲載予定) では、地震予知などに重要な地球の内層の診断技術に迫ります。

最後になりましたが、取材および資料の提供にご協力くださったアジア航測株式会社 千葉達朗氏、藤井紀綱氏、木村徹氏ならびに国土交通省国土地理院 遠藤悦夫氏、河和宏氏、野口優子氏には大変お世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) http://www.jspe.or.jp/iinkai/henshu_wg0/index.html, 精密工学会学生編集委員会 WG0.
- 2) 地球のしくみ, 新星出版社, (2006).
- 3) 精密工学会学生編集委員会: クリーンな未来を目指して—太陽光・風力発電技術の最前線—, 精密工学会誌, 75, 6 (2009) 702-706.
- 4) 今野武雄: 伊能忠敬, 新潮社, (1958).
- 5) 谷田貝豊彦: 光計測入門, 丸善, (1988) 141-142.
- 6) 日本測量調査技術協会: 図解航空レーザ計測, (2008).
- 7) 千葉達朗, 鈴木雄介, 平松孝晋: 地形表現手法の諸問題と赤色立体地図, 地図, 45, 1 (2007) 27-35.
- 8) 千葉達朗, 富田陽子, 鈴木雄介, 荒井健一, 藤井紀綱, 宮地直道, 小泉市朗, 中島幸信: 航空レーザ計測にもとづく青木ヶ原溶岩の微地形解析, 富士火山 (2007) 349-363. <http://www.yies.pref.yamanashi.jp/fujikazan/original/P349-363.pdf>
- 9) <http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>
- 10) 国土地理院: GPS 連続観測システム (GEONET) パンフレット.

— 会誌編集委員 WG0 メンバー (平成 21 年度) —

岩瀬勇人 (千葉大学 M2), 遠藤崇訓 (埼玉大学 M1), 小川幸子 (同志社大学 D3), 工藤良太 (東京大学 D1), 近藤余範 (東京工業大学 D3), 高野広樹 (埼玉大学 M1), 道畑正岐 (大阪大学 D3)