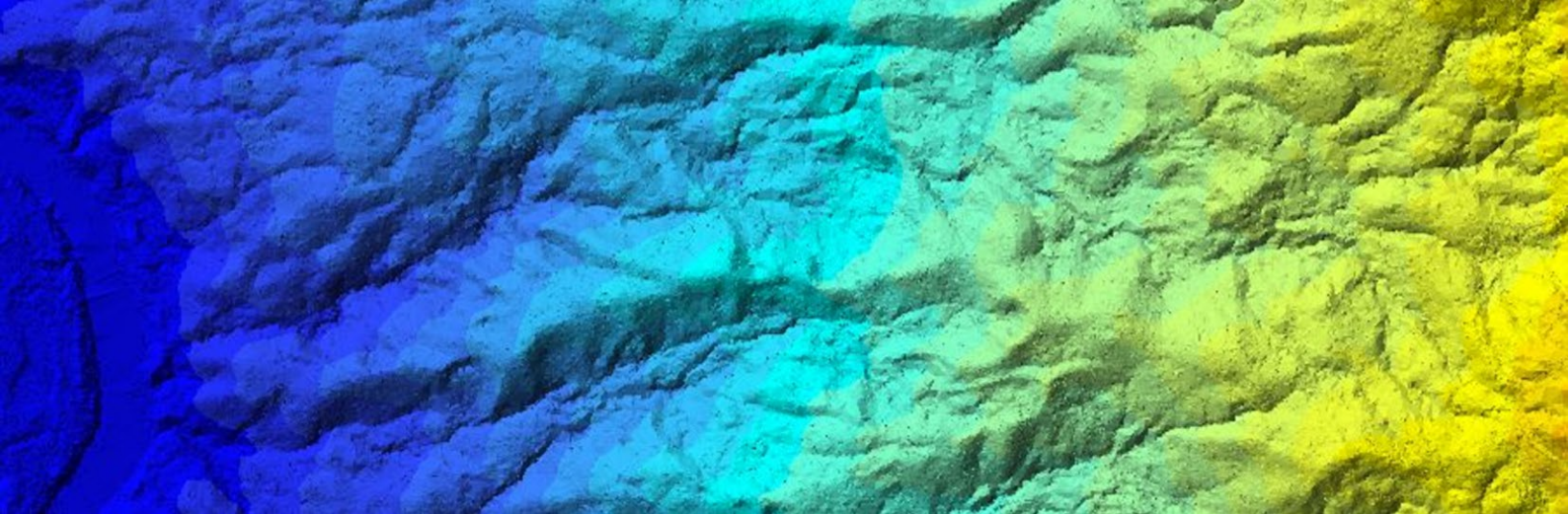
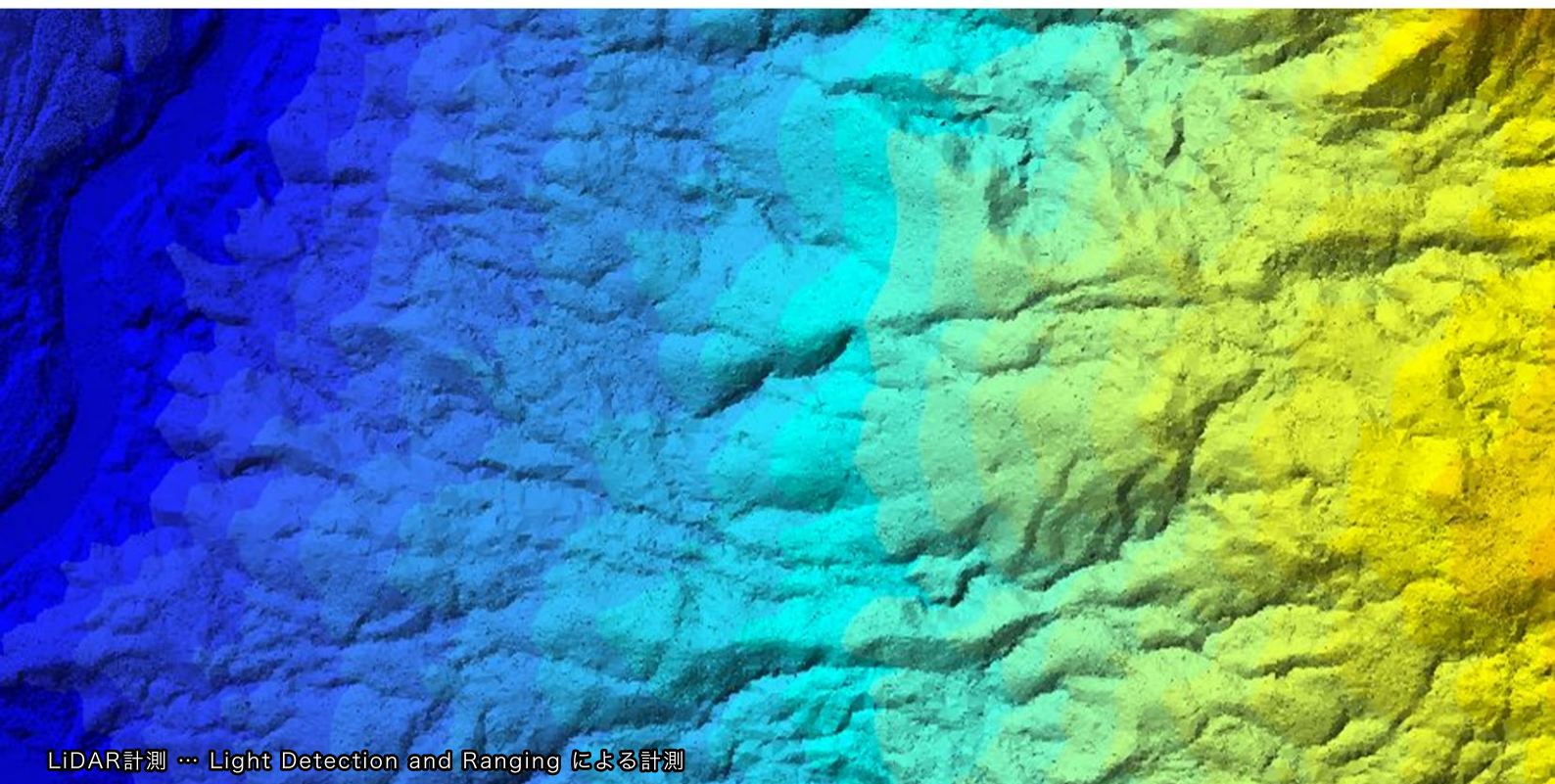




**「熱帯雨林における三次元森林構造の
航空機計測技術の開発」
LiDAR計測による航測手法の標準化（仕様書）**



平成27年1月
株式会社パスコ



本書は農林水産省農林水産技術会議委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト」D-1 系「高精度リモートセンシングによるアジア地域熱帯林計測技術の高度化」(平成 23～26 年度、代表機関：国立研究開発法人森林総合研究所)による成果である。

©株式会社パスコ、平成 27 年

本資料は、熱帯雨林において航空機による LiDAR 計測（航空レーザ測量）を実施する際の標準仕様を取り纏めた資料である。

本資料の基本的な内容は、日本の国土交通省（国土地理院）が作成した作業規程の準則（*1）（第 7 章 航空レーザ測量）を参照した。

仕様書には、本研究開発において航空レーザ測量を実施したマレーシア国（サバ地区）での計測実績や海外における作業環境、対応結果等を勘案して、その内容を反映させた。

（*1） 作業規程の準則 … 日本の測量法（昭和二十四年法律第百八十八号）第三十四条の規定に基づき制定され、その後、平成 25 年 3 月 29 日までに改正されている。

以下、本仕様書内容の目次（構成）は、以下の通りである。

◎一般規定等	1
①業務目的と業務計画	1
②業務範囲	2
③業務期間	2
④資料とデータ	3
⑤欠測、瑕疵	3
⑥作業におけるトラブルと安全対策	4
⑦製品(データ)の帰属	5
⑧関係法令等	5
◎業務の詳細	6
はじめに(航空レーザ計測および空中写真撮影によるデータ処理の流れ)	6
①計測対象範囲(面積)の確定	7
②計測対象地域の気象と計測時期の検討	8
③計測対象地域の地形情報の確認と収集	9
④計測対象地域の林相情報の確認と収集	10
⑤計測対象地域周辺の飛行場と飛行条件の事前確認	11
⑥座標系および GNSS(GPS)観測点(固定局)の設置	12
⑦計測時に使用する航空機(プラットフォーム)と計測諸元	14
⑧使用する LiDAR 機材	16
⑨データ検証用の調整用基準点の設置業務計画	18
⑩LiDAR 計測後および空中写真撮影後のデータ作成	19
引用・参考文献・参考資料	22

◎一般規定等

項目名
①業務目的と業務計画
研究や業務の背景およびデータ仕様やデータの解析目的等を明確にする。 研究や業務が複数年に跨る場合は、単年度毎の業務目的や進捗方針を明確にしておく、準備の段階からより確実かつ効率的な計画や実対応が実施し易くなる。 同内容を明確にした上で、LiDAR計測時における計測スペック、空中写真撮影の解像度、取得するデータの必要精度、使用機材の選定や作業環境の確保(調整)を実施する。
海外作業における留意事項
日本国内で公共測量としてLiDAR計測を実施する場合は、国土交通省(国土地理院)が作成した作業規程の準則(第7章航空レーザ測量)に基づき、標準的な業務計画を立てるが、海外の作業においては、実施国において、同様の基準が無いことも想定して、業務計画時には、以下の点に留意しながら、計画を立てることが大切である。 「業務概要」 ・業務目的の明確化 ・対象地域:実施国とデータ計測(撮影)およびデータ作成地域の明確化 ・業務委託者と業務受託(実施)者およびそれぞれの連絡先 ・作業対象面積(km²)の明確化。詳細は「業務の詳細:①計測対象範囲(面積)の確定」へ記載。 ・計測(撮影)時に使用する航空機(プラットフォーム)の選定と計測諸元の明確化 詳細は「業務の詳細:⑦計測時に使用する航空機(プラットフォーム)と計測諸元」へ記載。 また海外での実施にあたり、作業者が海外企業に委託するケースも勘案すると、以下の点についても留意しておくことが大切である。 ・海外企業への委託先の選定と評価 (同企業の技術力、LiDAR 作業の実績(経験)、航空機および LiDAR 機材の保有状況、データ解析環境の有無(HW および SW の保有状況等) ・同企業への情報伝達方法(契約期間中の打合せ回数、作業進捗の確認(管理)方法等) ・業務(研究)における計測(撮影)データの必要スペックや精度の考え方、データ処理方法に対する共通認識。 ・実施国における必要許可や申請等が必要な場合の対応可否

項目名
②業務範囲
LiDAR計測時の作業範囲や計測後のデータ作成範囲等を事前に明確にしておく。 業務委託者と業務受託(実施)者間にて、計測(撮影)範囲の認識にズレが生じないようにする。具体的には既存の図面やインターネット上の電子地図(例:Google Earth等)へ事前に作業範囲を明示し、共通認識を持つておくことが大切である。
海外作業における留意事項
海外における作業の場合、計測(撮影)実施国における既存図面や(特に)熱帯雨林地域における既存図面があると、計測(撮影)対象地域の明確化と作業従事者間との共通認識を持つ上で役に立つ。 特に熱帯雨林地域においては、森林区域と周辺道路以外にランドマークとなるような顕著な建物や境界線が存在しないことも想定されるため、可能な限り詳細かつ大縮尺の図面やデータがあることが望ましい。 また計測(撮影)対象範囲を囲った図形の座標情報が存在すると、GIS(Geographic Information System)やインターネット上の電子地図(例:Google Earth等)への重ね合わせが容易となり、計画準備の段階から共通認識や作業数量の把握が容易となる
項目名
③業務期間
実施国および作業対象範囲の確定後、作業計画を立てるが、計測対象範囲(面積)や計測対象場所の天候状況により、作業期間が大きく変わる可能性がある。 業務計画を立てる上では、航空機やLiDAR機材の手配状況も勘案しながら、必要な業務期間を予測する必要がある。これに伴い、必要な作業人員、作業環境を並行して確保しておくことが大切である。
海外作業における留意事項
LiDAR計測の場合、計測(撮影)対象範囲に対して、計測(撮影)までが無事に完了出来れば、その後工程となるデータ処理は、当初計画を立てた予定(進捗)との差異を確認しながら、適宜計画を見直すことが出来る。 しかし、実施国において、以下の状況が発生すると後工程に大きく影響を受ける可能性もある。 ・長期に渡る天候障害の発生や計測(撮影)に適した機会が少ない場合 ・(万一)機体、機材のトラブルが発生した場合 当初計画の段階では、業務期間全体を勘案した初期計画を立てるが、作業途中の障害発生が起きることも想定しておく必要がある。 万一、計測(撮影)の完了が遅れた場合は、後工程となるデータ処理について、受託(実施)者は、海外環境において作業従事者の増員やデータ処理環境の増強等の対応が確実にできるかどうかを事前に見極めておくことが大切である。

項目名
④資料とデータ
作業計画時および業務遂行時は、以下の関連資料やデータ収集を事前に実施しておくことが得策である。 各資料に対する主な利用目的は、()内に記載した。 ① 計測作業における飛行関連資料(実施国において、飛行計画を立てる際に利用する。) ② 計測対象地域における既存の気象情報(実施国での年間を通して、計測(撮影)に適した時期を判断するために使用する。) ③ 計測対象地域における既存の地形情報(実施国において飛行計画を立てる際に、飛行可能な高度や飛行の安全を確認するために使用する。) ④ 計測対象地域におけるGNSS(GPS)関連資料(航空機が計測(撮影)を実施している時間帯(前後含む)に飛行軌跡を算出するが、この際に実施国におけるGNSS(GPS)環境を判断するために使用する。)
海外作業における留意事項
上記に列挙した資料や情報は、可能な限り最新かつ情報量が多いことが望ましい。また利用に当たっては、帰属を確認の上、必要に応じて事前に使用許可を得ておくことも大切である。 また海外企業への委託を行う場合には、日本から提供する資料(情報)や当該作業による成果品を含めて、全て委託者に帰属し、受託先はいかなる状況においても、複製、対外公表、貸与、使用してはならないことについて、確約させておくことが重要である。
項目名
⑤欠測、瑕疵
海外での計測作業や同データを基にした各種データ作成では、データの欠落や仕様に基づいたデータが作成されないこと、当初計画した作業期間内にデータが納品されないことも想定しておく。 この場合、瑕疵を明確にしておくことが必要である。特に実施国以外へデータを持ち出す制限が発生する場合、日本以外において作業を実施する場合がある。この場合、海外企業に対しては、データの欠測や瑕疵内容に関する条件等を事前に提示し、両者間で合意しておくことが必要である。
海外作業における留意事項
海外企業への作業委託に対しては、作業内容と瑕疵も含めた以下の項目を列挙しておくことが得策である。 ・ 業務目的、作業工期、作業打合せ方法と実施回数 ・ 対象地域(実施国とデータ計測(撮影)およびデータ作成地域) ・ 作業面積(計測(撮影)面積とデータの処理面積(※)) (※)… 計測(撮影)は海外企業で実施し、データ処理の一部または全てを日本国内で実施することも想定して、それぞれ項目を分ける。 ・ 業務委託者と業務受託(実施)者の連絡先(連絡体制) ・ 計測および撮影の仕様(スペック) ・ 作業遅延の場合の保証および瑕疵 ・ 成果品の種類やデータフォーマットおよび納品方法(場所)、同データの帰属

項目名
⑥作業におけるトラブルと安全対策
計測作業においては、航空機を使用して上空における作業が発生する。またデータ取得後の検証作業等では、現地（熱帯雨林や同周辺）における地上作業が発生する。どちらの作業も航空機や車を利用し、安全の確保に十分留意する必要がある。また地上作業では、熱帯雨林内で危険な動植物との遭遇や急な天候変化、急峻な地形においては、作業員の転倒や落石事故等も考えられるため、作業員への装備、現地での通信環境等、安全に配慮した事前の計画が重要となる。万一、トラブルや事故が発生した場合においても、連絡体制や連絡手段の確保を確実に行之、人命救助を最優先のもと作業に従事する必要がある。
海外作業における留意事項
上述の通り、熱帯雨林や同周辺における地上作業では、危険な動植物との遭遇や急な天候変化、急峻な地形における危険作業を伴う可能性もある。そこで、以下の点に留意しながら、作業を進める必要がある。 ○安全対策（地上作業） ・特に山野での作業では毒ヘビ、蜂等に注意し、長袖上着、ズボン、靴、手袋等、これらに対応できる服装が望ましい。また大型動物への対策として作業時は熊避けスプレーや熊鈴等も携行する。 ・緊急連絡網を携帯する。（衛星携帯電話も携行することが望ましい。） ・服装は、作業服のボタン、袖口、ズボンの裾をしっかり閉める。 ・救急用具を携行し、簡易的な応急手当を行うことが出来るようにしておく。 ・現地まで車によるアクセスの場合は、自動車の始業点検（目視）と燃料の残量確認やスペアタイヤの携行。 ○安全対策（航空機による作業） ・実施国における航空法及び運行基準等による運行制限を遵守し、天候判断を含めた無理のない飛行を行う。 ・空港待機時の作業可否判断や飛行時の作業中止判断は、天候の推移や風の影響等を考慮した上で、運航制限等に基づく機長判断とし、安全飛行を最優先とする。 ・LiDAR計測作業では、危険防御手順及び警告標識等の正確な認識など、システム操作を習熟したものが携わるものとし、レーザに対する事故防止及び人体保護に努める。 ・飛行前後（離陸前・着陸後）は、機体、機材の点検を実施する。 機体の点検 … （主に）主翼、機体等の破損の有無の確認、燃料・救急用品の搭載状況の確認を行う。 機材の点検 … （主に）機材の設置状況（位置ずれ、外れや緩み等）、LiDAR 機材の動作とオペレーションソフトの動作状況を確認する。

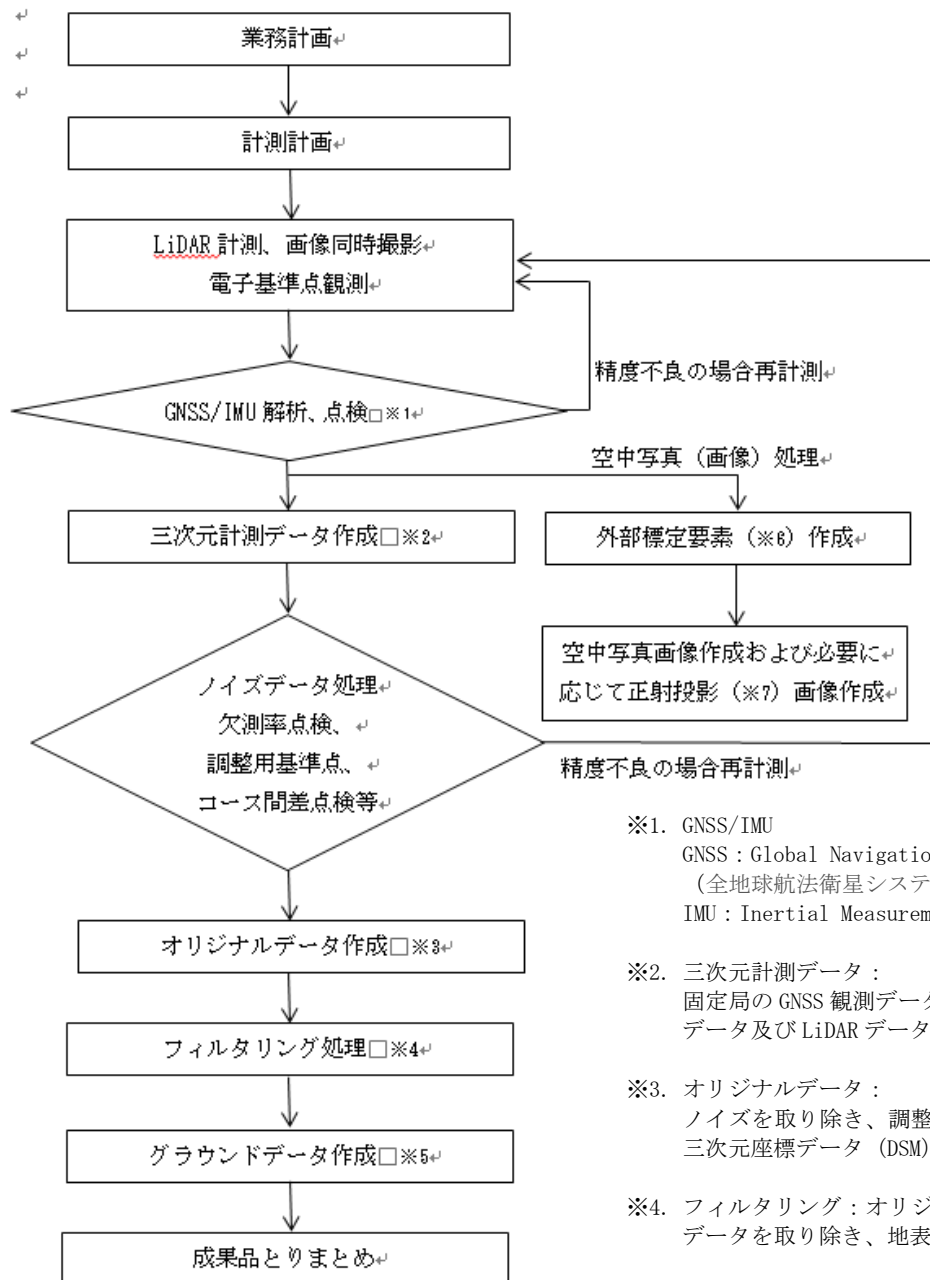
項目名
⑦製品(データ)の帰属
計測および同データより作成された加工物等の帰属を事前に明確にしておくことが必要である。またデータ作成後の保管場所や保管期間においても事前に調整しておくことが望ましい。
海外作業における留意事項
作業計画前、業務遂行時、業務遂行後に関わらず、作業受託者に提供した関連資料や既存データおよび計測(撮影)後のデータと同データより作成した副産物データに対するデータの帰属は、全て作業発注を実施した会社または業務委託者にあることを明言する。特に、全ての作業が終了した後は、作業依頼をした会社にデータのバックアップ(正・副)が確実に行われていることを確認の上、海外における作業会社内からは、作業前に貸与したデータも含めて、全てのデータを消去することを誓約させる。
項目名
⑧関係法令等
各作業における関係法令を事前に調査しておくことが得策である。調査結果によっては、予め作業対象国における作業申請や同申請における作業承認が必要なケースを想定しておくことも必要である。また海外へのデータの持ち出し可否等も確認し、必要な対応を予め実施しておく。
海外作業における留意事項
日本での作業を基本とした場合、地上(測量)作業および航空機による作業に関連する関係法令等は、以下の内容が挙げられる。 ○地上(測量)作業関連 ・測量法(昭和 24 年法律第 188 号) ・〇〇地方整備局測量業務共通仕様書 ・国土交通省公共測量作業規程の準則(平成 25 年 3 月) ・測量成果電子納品要領(案)(平成 20 年 12 月) ○航空機による作業関連 ・航空法(平成 23 年 8 月改正)及び航空法施行規則(平成 23 年 11 月改正 国土交通省) 海外における作業においても、同類の関係法令や作業規程の有無等を確認の上、実施国における作業申請や同申請に対する作業承認が必要な場合は、事前に準備しておくことが必要である。 また測量関連の規程は、実施国における資料や法律等も参考にしながら、本業務で作業実施する場合と大きく差異があるかどうかを確認しておく。大きく差異がある場合は、作業従事者に対して、その点を周知徹底しておくことも必要である。

◎業務の詳細

はじめに（航空レーザ計測および空中写真撮影によるデータ処理の流れ）

日本では、LiDAR計測を実施する際、下図の作業フローを標準としてデータ処理を行う。(図1)プロジェクトにより、成果品も異なるため、作成するデータの種類と形式については、その都度協議が必要である。国によって定められた規程もあるため、その内容も参考にできる場合がある。

<日本の場合の作業フロー 例>



- ※1. GNSS/IMU
GNSS : Global Navigation Satellite System
(全地球航法衛星システム)
IMU : Inertial Measurement Unit (慣性計測装置)
- ※2. 三次元計測データ :
固定局のGNSS観測データ、航空機上のGNSS観測データ、IMUデータ及びLiDARデータを取得し、統合したデータ
- ※3. オリジナルデータ :
ノイズを取り除き、調整用基準点を用いて標高値を調整した三次元座標データ (DSM)
- ※4. フィルタリング : オリジナルデータに対し、地物に反射したデータを取り除き、地表面に反射したデータを抽出する処理
- ※5. グラウンドデータ : フィルタリング処理で地表面に抽出されたデータ (DTM)
- ※6. 外部標定要素 : 撮影した各写真画像の撮影主点 (撮影位置)
- ※7. 正射投影 : 撮影した空中写真を基に、地形の標高を考慮して、凹凸や写真の傾きを補正する。補正後は地図と同じレベルで重ね合わせが可能。正射投影画像は、オルソ画像とも呼ぶ。

図1 LiDAR計測の標準的な作業フロー

項目名

①計測対象範囲(面積)の確定

計測対象範囲は、データが必要となる範囲を勘案の上、熱帯雨林における三次元森林構造を事前に把握、検討して決める。LiDAR計測は、事前に計測計画を立てた飛行コースに沿って、計測作業を行う。実際の計測作業では、上空における飛行高度の制限や計測コースの端では、点密度が粗になることもあるので、これらを勘案して、計測対象範囲よりも一回り大きめの範囲を計測できるような計測対象範囲を確定する必要がある。

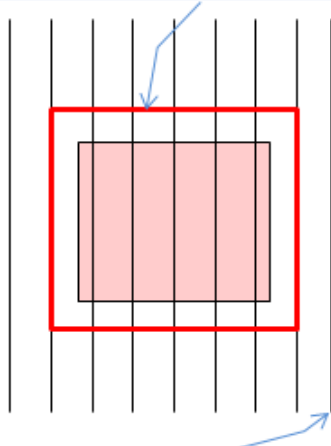
具体的には、計測対象範囲の外周を格子間隔(点間隔)の10倍以上の距離を延伸して計画を立てる。(図2)

海外作業における留意事項

日本国内を計測する場合は、国境を意識することは殆ど無い。しかし海外において作業(飛行)する場合は、この点に留意する必要がある。(図3)特に計測対象範囲は、自国内にあっても、計測範囲の境界が国境付近に隣接する場合は、注意が必要である。具体的には、飛行する航空機が計測コース端からの旋回範囲を含めて、隣接国に侵入しないような飛行計画を立てることが基本である。(図4)

万一、他国側に侵入する可能性がある場合は、事前に飛行可否の確認を行い、飛行可能な場合には、事前の飛行許可を得ておくことが重要である。国により飛行許可を発行するまでに時間が掛かる場合も想定されるため、事前確認は重要である。

例)点密度1点/m²の計画を立てる場合
計測対象範囲から10(m)以上の距離を延伸する
範囲で計画を立てる。



対象範囲の両端は点が粗になることがある。
対象範囲よりも外側に1コース設定することを推奨する。

■ 計測対象範囲 ■ 実際の計画範囲
— 計画コース

図2 計測対象範囲と計画の延伸イメージ

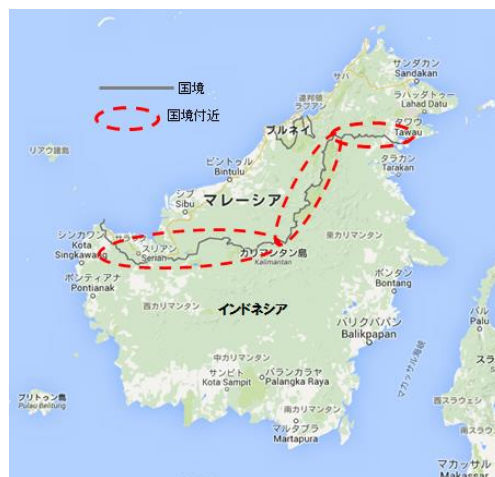


図3 国境付近を飛行する場合(例)

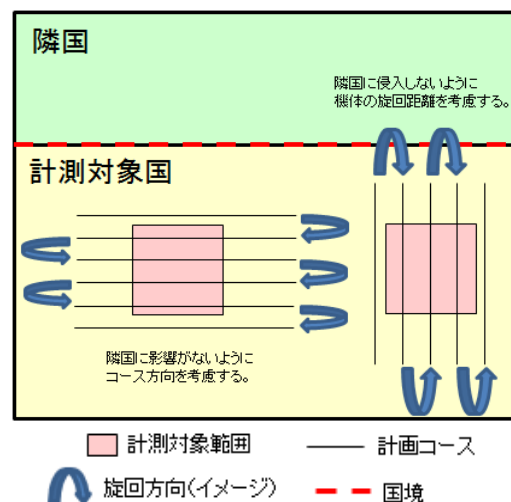


図4 国境付近における飛行計画(例)

②計測対象地域の気象と計測時期の検討

LiDAR計測を行う場合、使用する航空機下に雲や霧が発生していないことが望ましい。航空機下に雲や霧が発生している状況で計測を実施した場合、レーザ光の特性により雲や霧での吸収や乱反射を起こし、地上までレーザ光が届かず、データの欠測やノイズが発生する。また、航空機が安全飛行を確保できないほどの天候障害(強風、降雨、濃霧等)の場合は、計測自体が困難となる。計測対象範囲が小さく、年間を通して気象条件が安定している地域では、計測時期の配慮(検討)は少なく済む。一方、計測対象範囲が大きく、年間を通して気象条件が安定しない地域では、現地における年間気象状況等の情報収集を事前に行い、計測に適した時期を予め見極めておくことが大切である。

海外作業における留意事項

熱帯雨林が存在する地域では、高温多湿な状況が推定される。このような地域では、1日の中でも天候の変化が激しく、多くの低層雲が発生し易いため、計測機会に恵まれないことも多い。(図5)また年間を通して降雨時期が多く、航空機が安全に飛行できる機会に恵まれる日数が限られることがある。(図6)



午前 10 時の状況写真

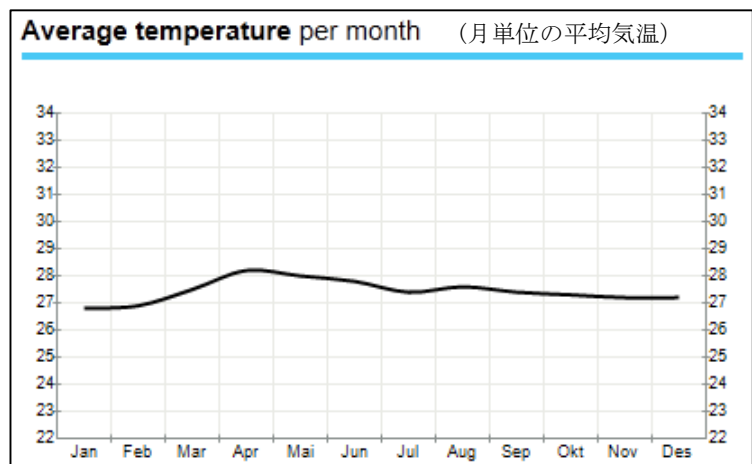


午後 12 時の状況写真 (同日)

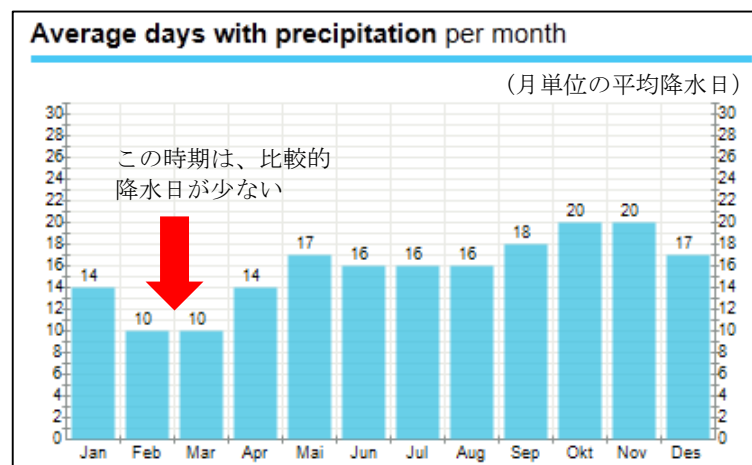


午後 14 時の状況写真 (同日)

図5 本作業での天候に関する定点観測例



熱帯雨林地域のため、年間を通して高温であることが容易に判断できる



年間を通して降水日は多いが、2～3月は比較的少ないので、この期間を計測に適した時期として検討することも一案である

図6(マレーシア) Long Pasia Airport, Sabahにおける

月別の年間平均気温と降水日数データより(1961～1990年)

項目名

③計測対象地域の地形情報の確認と収集

計測対象地域および周辺地域が平坦な地形の場合、点密度のバラツキは発生し難く、航空機の飛行も安定し安全で飛行し易い。

一方、計測対象地域および周辺地域が急峻な地形の場合、点密度のバラツキは発生し易く、コース間の重複部分において、欠測が生じる可能性があるため、コース間の重複面積を十分に確保する必要がある。

海外作業における留意事項

日本では、国土地理院が発行している数値地図(国土基本図情報)に5mメッシュ標高、10mメッシュ標高、50mメッシュ標高のデータが含まれ、この情報を参考にしながら、計測時における飛行計画を立てることが出来る。これにより、急峻な地形に対する計測コース間での重複部分の確認やデータの欠測する可能性を事前にシミュレーションすることが出来るので、有効である。

海外作業における計測計画においても、計測対象範囲の既存地形情報が入手出来れば、計測前に簡易的な判断を行うことが出来るので、事前に既存地形情報の有無を確認することが望ましい。

なお、急峻な地形の場合は、最低でもコース間における重複面積を50%以上確保することを推奨する。

また、点密度が粗になる可能性がある箇所は、計測コースをさらに交差させ、データ欠測が無いように計画する。

(図7)

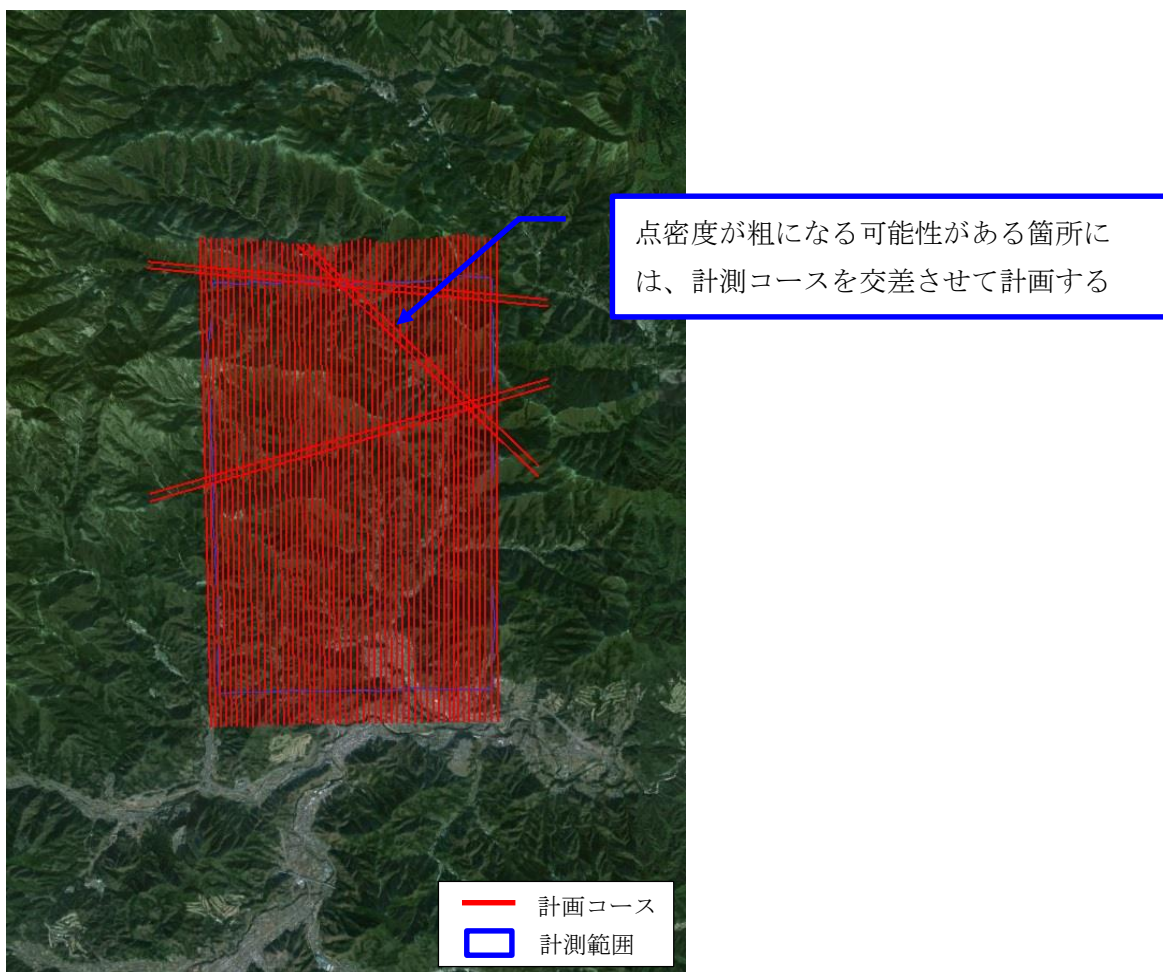


図7 急峻な地形における計測計画(例)

④計測対象地域の林相情報の確認と収集

LiDAR計測においては、樹冠の状況や樹木の粗密により、上空より計測(照射)したレーザ光が地表面(地面)に到達する確率が大きく変わる。(図8)

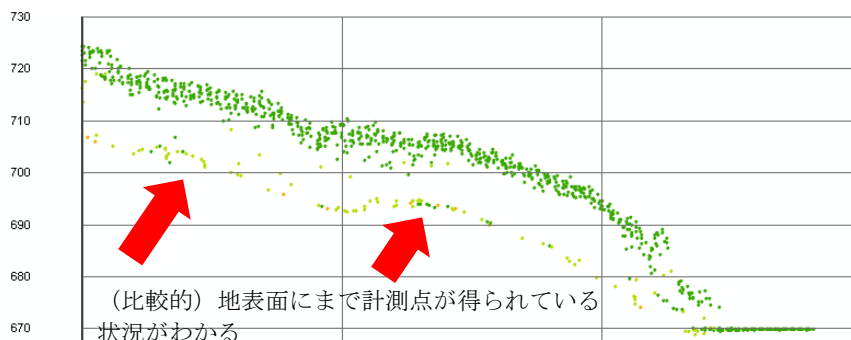
計測対象地域における熱帯林の林相情報等を計測前に入手し、レーザ光が地表面まで到達しやすい樹種が繁茂しているか、または到達し難い樹種が繁茂しているかの状況を判断しておくことが望ましい。

これにより計測計画時の計測点密度を高め計画する必要があるかどうかについて、ある程度判断することが出来る。なお、実際の計画においては、現地の林内へ出向き、地上からどの程度の太陽光が差し込むかを事前に確認しておくことも得策である。(図9)

海外作業における留意事項



スギ(樹高 15m程度)の状況写真と計測点の断面図(右)



広葉樹(コナラ等)の状況写真と計測点の断面図(右)

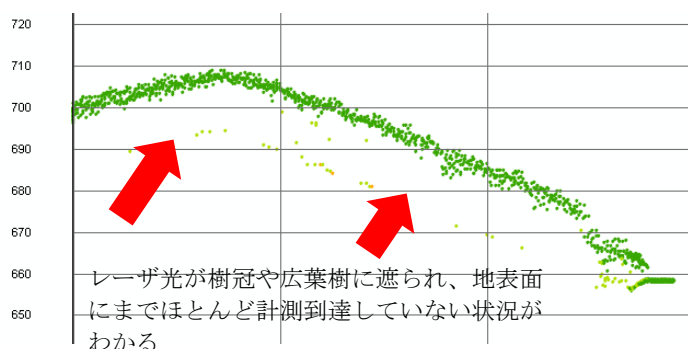


図8 樹種の違いによる計測点の地表面への透過率を比較した例(日本における作業の一例)



天空状況の確認位置より西側



天空状況の確認位置より北側



魚眼レンズを使用して天空状況を確認した例



天空状況の確認位置より南側



天空状況の確認位置より東側

図9 本作業において、林内において魚眼レンズにより天空状況を確認した状況と同地点からの周辺写真

項目名

⑤計測対象地域周辺の飛行場と飛行条件の事前確認

飛行計画時は、LiDAR機材を搭載した航空機が安全に飛行するための配慮が必要となる。この際、計測対象地域および周辺地域が急峻な地形の場合、航空機が安全に飛行するためにクリアランス(高度の余裕)を確保する必要がある。計測においては、航空機が滞留する飛行場と現地計測対象地域までの飛行安全を確保することも大切である。滞留する飛行場と計測対象地域までの移動距離が短いほど、天候判断も行い易く、現地対象地域上空における飛行時間も長時間確保できるので有利である。自国内の飛行場であっても国際空港や国内専用空港等空港が使用できる条件も異なるので、事前に計測対象周辺地域における利用可能な空港を調査しておくことが得策である。(図10)また、飛行地域によっては、空域制限や飛行管制による調整が実施され、飛行方向の指示や飛行その物の制約を受けるので、この点も事前に確認しておくことが望ましい。(図11)

海外作業における留意事項

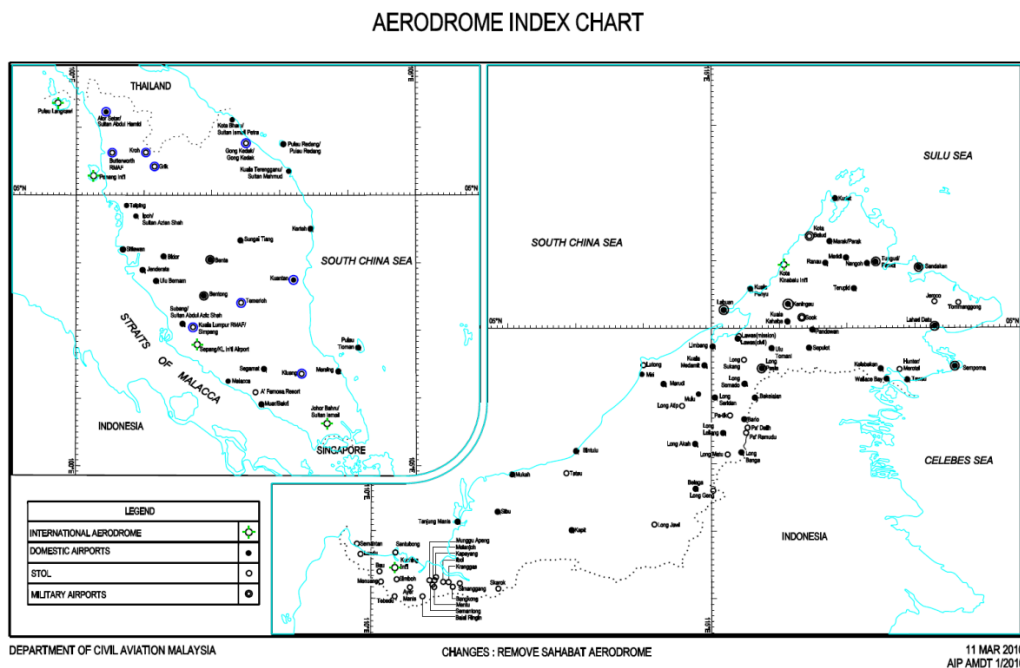
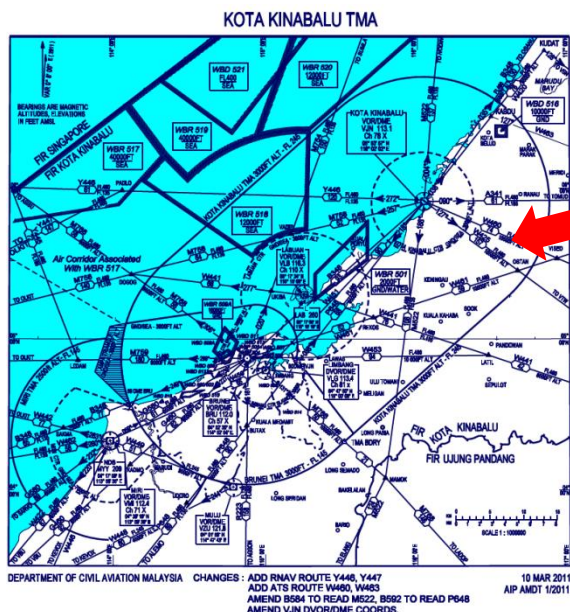


図10 マレーシア国内における飛行場一覧 (DEPARTMENT OF CIVIL AVIATION MALAYSIAのHP情報より)



飛行エリアにより、飛行侵入禁止区域や飛行可能な高度帯などが詳細に決められている。

図11 マレーシア国(コタキナバル周辺)における飛行管制区域図 (DEPARTMENT OF CIVIL AVIATION MALAYSIAのHP情報より)

⑥座標系および GNSS(GPS)観測点(固定局)の設置

測地座標系は、一般的な『経緯度系(BL系)』とGNSS(GPS)などで使用される『地心3次元系』がある。

(BLは、独語で緯度はBreite、経度がLängeである。日本では、明治時代ドイツから測量を学んだために、国内では経度をLongitude、緯度をlatitudeなどの英語で表記する慣習はなくBL系を用いている。)

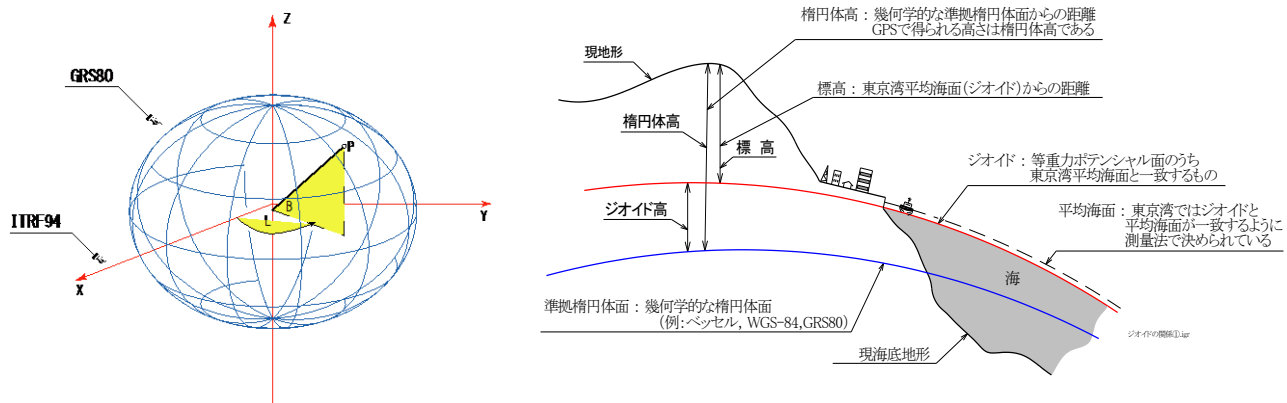


図12 地心3次元座標系のイメージ図(左)および「楕円体高」・「ジオイド高」・「標高」の関係図(右)

GNSS(GPS)による位置座標は、事前にわかっているGNSS(GPS)の位置情報を基にGNSS(GPS)と観測する点(位置)との距離を計測することで、観測点の位置座標を求める。この際に基準となる座標系は、一般的に測地座標系とそれに付随する準拠楕円体(地球の形状を定義)とで構成される。これにより、地球上の任意な位置が座標(X,Y,Z)で表現される。準拠楕円体は、100以上の種類があり、各国で自国に最適な準拠楕円体を採用している。日本では2002年4月の「測量法の改訂」で世界測地系として『ITRF94(International Terrestrial rotation Frame 1994)』座標系が採用され、準拠楕円体はGRS80楕円体を使用している。

さらにGNSS(GPS)により任意の位置の高さを求める際には、楕円体高が算出される。しかし、地図上で使用する高さは、標高であるため、楕円体高から標高への変換が必要となる。海岸線から離れた内陸の標高は、平均海水面を仮想的に内陸に延長した基準面からの高さ(距離)として定義される。この平均海水面は、理想的には1つの等重力ポテンシャル面(重力ポテンシャルの値が等しい面)を形成し、これは一般にジオイド面と呼ばれている。ある地点の標高とは、その地点から「ジオイド面まで鉛直方向に測った距離」と定義されている。

地球表面上でおこなわれた測量の結果を平面上に投影する場合、歪みが生じる。投影法によって「距離」に歪みを吸収させる方法、あるいは「角度」に歪みを吸収させる方法がある。平面上の角度と曲面(地球表面)上の角度が一致するように、通常は複素関数の「等角写像」に基づいて、『等角投影』する。

日本では、昭和30年まで、「二重等角投影法」が使用されていたが、現在は投影精度がよく、世界的に共通した平面直角座標系であるUTM(Universal Transverse Mercator)座標系である『Gauss-Krüger(ガウス・クリューゲル)の等角投影法』を採用している。ただし、UTM座標系は、全地球を対象としており、対象とするエリア(Zone)が広すぎ、日本のように東西に狭い国土には適さない。したがって、日本ではZoneを細分化した独自の平面直角座標系(全19系)を採用しており、それを公共座標系としている。

航空機の飛行位置を正確に得るために、GNSS(GPS)による観測を実施する。具体的には、航空機の離陸時から計測作業を実施し、着陸後までの飛行データを収集する。飛行機側に設定したGNSSアンテナと地上側のGNSS観測点(固定局)との観測データにより、飛行軌跡を算出する。この時、地上側のGNSS観測点(固定局)は、計測対象地域からの基線距離が50kmを超えないように設置することが望ましい。日本の場合は、既に電子基準点網が約20~30km間隔で均一に整備され、常時観測が可能のため、固定局に対する配慮は必要ない。

海外作業における留意事項

前述の通り、準拠楕円体は、各国で自国に最適な準拠楕円体を採用しているため、海外作業においても事前に当該国での準拠楕円体を事前に確認しておくことが大切である。また平面上に投影する場合の座標系の定義についても、事前に確認しておくことが大切である。本作業では、準拠楕円体をWGS84(Geographic System1984)として計算を行い、平面上への投影は、前述のUTM座標系とボルネオ島で用いられているBRSO(Borneo Rectified Skew Orthomorphic)座標系の2種類を用いて、それぞれの座標系における位置座標データを作成

した。またGNSS(GPS)観測点(固定局)について、日本の電子基準点網(約20~30km間隔)とは異なり、海外作業では、電子基準点の網整備が不十分な地域もまだまだ多い。(図13)この場合は、独自にGNSS観測点(固定局)を飛行前までに設置しておく必要がある。(図14)GNSS観測点の情報が無い場合や観測データが欠落する場合、後続のデータ処理に作業に大きく影響を及ぼすため、十分に留意する必要がある。

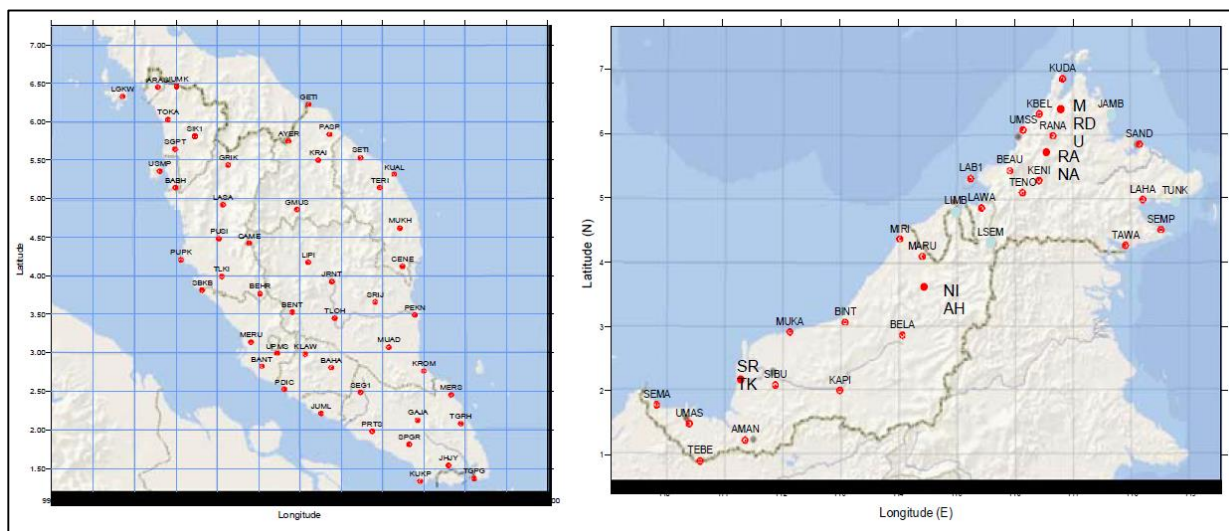


図13 マレーシア国におけるGNSS観測点網の配置状況図(特にボルネオ島側で少ない)



日本の電子基準点情報

- ・設置点数(全国) 約 1,200 点
- ・設置間隔 約 20~30km



本作業(マレーシア)におけるGNSS観測状況と観測点の拡大写真



図14 日本の電子基準点(左)と本作業(マレーシア)において、独自にGNSS観測点を設置して観測した際の状況写真

項目名

⑦計測時に使用する航空機(プラットフォーム)と計測諸元

計測時には、LiDAR機材を搭載する為の航空機を事前に選定し、準備しておく必要がある。航空機の選定は、大きく分けると2つある。一つは、固定翼機(飛行機例:セスナ)に機材を搭載して計測する場合であり、もう一つは、回転翼機(ヘリコプター)に機材を搭載して計測する場合である。(表1)

一般的に固定翼機は、回転翼機に比べて飛行時間が長く、飛行速度も速いため、計測対象地域が遠隔地または広範囲の計測に適すると言われている。一方、回転翼機は、固定翼機に比べて飛行時間は短い、飛行速度が遅くかつ低高度の飛行が可能のため、計測対象地域が小範囲であり、高密度な計測が必要な場合に適すると言われている。

(例)	固定翼機	回転翼機 (本研究で使用した機体)
型式	セスナ208	ベル206B(ヘリコプター)
航続時間(*)	約5時間	約4時間半
長所、短所	長所:広範囲を長時間の対応が可能 短所:天候障害の影響を受けやすい	長所:低高度の計測が可能 短所:広域の範囲は消化に時間が掛かる
機体		

表1 固定翼機と回転翼機の比較

(*)… 機体に搭載する機材の重さ等により、航続時間は異なる。

計測諸元は、目的に応じた取得データを得るために、以下の項目について事前に設定する必要がある。

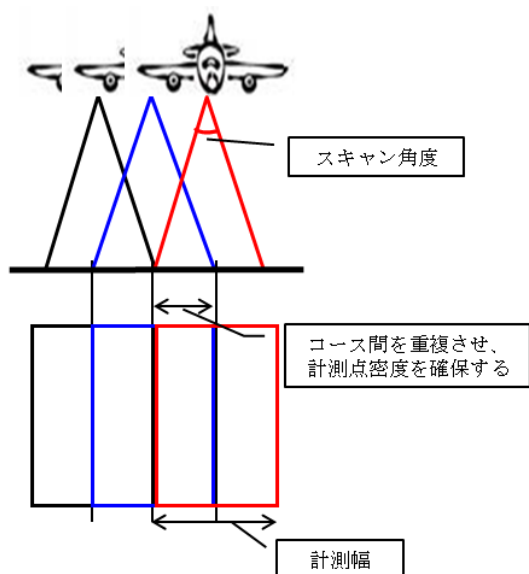
①: 対地高度(図15)	⑤: (航空レーザの)パルスレート(図17)
②: 対地速度	⑥: (航空レーザの)スキャン回数(図17)
③: 計測時のコース間重複度(%) (図16)	⑦: 飛行方向および飛行直交方向の取得点間隔(図17)
④: (航空レーザの)スキャン角度(図16)	



図15 対地高度の概念図

①: 対地高度

航空機の飛行高度とその直下点の標高との差である。
対象範囲内の最高標高から十分な距離を確保する必要がある。



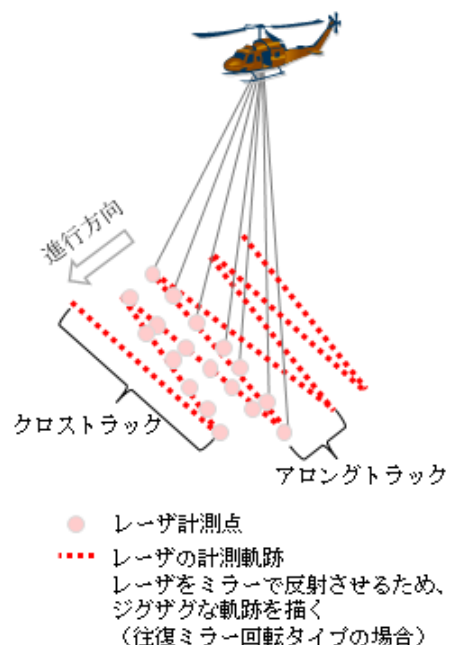
③：コース間重複度

気象条件によって、航空機は計画コースから外れる可能性がある。また、急峻な地形の場合、場所によりレーザの照射が届かない箇所が生じる可能性がある。どの方向からもレーザ照射が届くように、コース間に重複を持たせ、データが欠測しないように計画を立てる。

④：スキャン角度 (Field of View)

レーザをどの程度左右に広げるかに相当し、1コースあたりの計測幅が決まる。

図16 コース間重複とスキャン角度の概念図



⑥：パルスレート

単位時間当たりのレーザパルス発射回数

⑦：スキャン回数

単位時間当たりのレーザ振り子回数

効率よくレーザを照射し分布するには、
飛行方向（アロングトラック）と
飛行直行方向（クロストラック）のレーザ計測点間隔が、
ほぼ同じになるように計画することが望ましい。

図17 パルスレートとスキャン回数のおよび飛行方向と計測方向に関する概念

海外作業における留意事項

日本国内におけるLiDAR機材の保有台数は、国土交通省(国土地理院)の保有機材も合わせて、全30台以上となっており、機材不足という懸念はほとんどなく、仮に使用機材の不具合や故障が生じてても代替機材の手配が比較的容易にできる。

一方、本研究におけるマレーシアにおいては、国の機関も含めてLiDAR機材を直接、保有している会社はほとんど無く、機材調達(調整)に苦労した。また保有台数が少ないが故に、一度、機材故障が発生すると代替機材の調達が難しく、計測期間や天候LiDAR機会が少ない現場においては、後続作業に大きく影響を及ぼす。

海外において、計測を実施する国が決まり次第、まずは同国内におけるLiDAR機材の保有状況や同機材において作業計測が対応可能な会社が存在するかどうかについて、事前に調査をしておくことも大切である。

なお、日本国内において保有している機材を海外で使用方法もあるが、この場合は、輸出側および輸入側それぞれの輸出管理規定に基づいて、機材の輸出入を行う必要があるため、十分な時間を見ておく必要がある。

項目名

⑧使用するLiDAR 機材

計測時に使用するLiDAR機材は、過去10年間の間に大きく技術改良が行われ、特にレーザパルスの最大照射数が大きく向上している。10年前の機材では、1コースあたりに計測できる点は、2～5m四方に1点程度であった。一方、ここ数年で同データは、0.5m～1m四方に1点程度の計測ができるようになってきている。

10年前と比較すると、計測データの点間隔を小さくする事が可能となり、1コースで高密度な計測をすることが可能となった。

また、1つのパルスから複数のリターン数を得る技術(*)が大きく向上され、森林関連における地表面抽出の向上や樹冠内部の森林構造の抽出等に、活用されている。 (*) … 波形記録方式(Waveform)

さらに技術革新に伴い、LiDAR機材の小型化・軽量化が施され、小型の回転翼機にも容易に搭載できるようになっている。

上記背景のもと、計測対象範囲の大きさや必要な計測点密度に応じて、適切なLiDAR機材を選択することで、計測日数や必要コストにも反映されるため、留意する必要がある。また上述の波形記録方式(Waveform)の機能を有している機材であるかどうか選択肢のひとつになる。

海外作業における留意事項

2014年12月現在のLiDAR計測機器の最新情報は次の通りである。(表2)

今回使用した機材と現在の最新機材を比較しても、レーザパルスの最大照射数が大きく向上している。

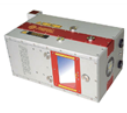
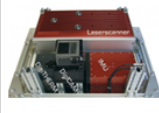
レーザ機器	LMS-Q580 (今回使用した機材)	ALS80-HP	LMS-Q780	Harrier 68i	LiteMapper7800	Orion
メーカー	RIEGL	Leica Geosystems	RIEGL	Trimble	IGI	Optech
リリース年	2007	2008年～2014年リリース				
運用対地高度(m) 最大	1,200	3,500	3,300	1,600	4,100	2500
パルスレート (kHz) 最大	240	1,000	400	400	400	300
ビーム径(mrad)	0.5	0.22	0.25	0.5	0.25	0.25
スキャン角度(度)	±30	±36	±30	±30	±30	±25
波形記録方式 (Wave Form)	あり	あり	あり	あり	あり	あり
機材写真						

表2 LiDAR計測機器の主なスペック比較(2014年12月時点) ※写真は各社のホームページより転載

LiDAR機材の技術革新の速度は、非常に早い。本研究において、計測作業を実施した2012年以降もレーザの最大照射数(パルスレート)が1,000kHzの機材もリリースされている。これは本研究で調達した機材の約4倍の照射数を確保できる。

上述の通り、計測を実施する国によっては、LiDAR機材の保有数が乏しい国もある。よって、海外での作業においては、業務目的やデータの利用目的に応じて、必要な計測密度や作業対象面積を勘案しながら、必要な機材スペックを決めることが重要である。

LiDAR計測を行う際は、同時に画像データを取得することを標準とする。画像を取得することで計測時の状況を把握することが可能となる。(天候状況、樹冠や林相の把握、水部範囲の把握等)また、フィルタリング作業の際は、LiDARデータと画像データを見比べながら処理ができるため、地物の判読にも有効である。

近年、デジタルカメラの種類も多様化している。大判カメラは、高解像度の画像を撮影する事が可能だが、機材の重量が重く回転翼への搭載は不向きである。しかし、1枚あたりで撮影できる範囲は広いので、広域な熱帯雨林を撮影するには適している。レーザ機器の選定同様、デジタルカメラも利用目的に応じて決めることが重要である。(表3)

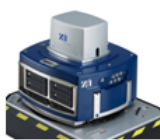
カメラ機器	デジタルカメラ (今回使用した機材)	中判カメラ	大判カメラ	
メーカー	Canon	Leica <u>Geosystems</u>	Z/I Imaging	Microsoft
カメラ名称	EOS-1D <u>MarkIII</u>	RCD30	DMC II-250	<u>UltraCam</u> Falcon Prime
ピクセル数	3,456 × 2,304 (Mediumの場合)	6,732 × 9,000	17,216 × 14,656	17,310 × 11,310
25cm解像度の場合 の1枚あたりの 撮影範囲 (例)	864m × 576	1,683 × 2,250	4,304 × 3,664	4,327 × 2,827
ピクセルサイズ	10.7メガピクセル	6μm	5.6μm	6μm
焦点距離	28mm	83mm	112mm	100mm
最大 解像度	10cm	3.5cm	2.5cm	5cm
搭載可能機体	回転翼	固定翼 回転翼	固定翼	固定翼
取得可能画像	RGB	RGB+NIR	RGB+NIR	RGB+NIR
機材写真				

表3 デジタルカメラのスペック比較(2014年12月時点)

(例) ※写真は各社のホームページより転載

項目名

⑨データ検証用の調整用基準点の設置業務計画

日本の作業規程では、計測後に得られたデータから解析して得られる三次元計測データの点検および調整を実施するための基準点(以下「調整用基準点」)の設置と同点を使用した検証が義務付けられている。

この検証および調整は、計測された3次元計測点の高さ方向の検証および調整を行う。

調整用基準点の設置に関して、準則では以下内容にて定義されている。(表4)

設置場所は、平坦で所定の格子間隔(点間隔)の2倍から3倍までの辺長があるグラウンド、空き地、道路、公園及び屋上等で、樹木や歩道の段差等の障害物がなく、計測が可能な場所とする。

点数は、作業地域の面積(km²)を25で割った値に1を足した値を標準とし、最低数は4点とする。

配点は、作業地域の四隅に設置することを原則とし、所定の平坦地や水準点の位置を考慮し、作業地域全体で均一になるようにするものとする。

データ検証後、較差の平均値の絶対値が25cm以上または標準偏差が25cm の場合は、原因を調査の上、再計算処理又は再測等の是正処置を講じる。

海外作業における留意事項

調整用基準点	日本	海外（熱帯雨林）の場合
設置点数	$(\text{作業地域の面積(km}^2\text{)} / 25) + 1$ を標準とする。最低4点以上とする。	日本と同様の条件にて、配点することが望ましい。しかしながら、熱帯雨林においては、平坦な場所自体を確保することが困難なケースが多々ある。
留意事項	平坦な場所であること 周りに反射の強いものがないこと	熱帯雨林内に平坦な場所を確保することは困難な場合は、熱帯雨林内に続く道路や出来る限り上空視界が確保できる場所を選定する必要がある。
設置イメージ		 (本研究作業で実施した調整用基準点の現地観測状況写真)

表4 日本と海外（特に熱帯雨林）における調整用基準点の違い（例）

項目名

⑩LiDAR 計測後および空中写真撮影後のデータ作成

計測時は、固定局のGNSS観測データ、航空機上のGNSS観測データ、IMU観測データ及びレーザ測距データを取得する。さらにデジタル航空カメラを同時搭載している場合は、デジタル画像写真を同時に撮影する。

固定局のGNSS観測データ、航空機上のGNSS観測データ、IMU観測データを解析して、飛行軌跡データを作成する。日本の作業規程においては、この飛行軌跡データを基に航空レーザ計測データを統合解析し、計測位置の三次元座標データを作成すると定義されている。その後、三次元計測データから調整用基準点成果を用いて、点検・調整したデータ(オリジナルデータ)を作成する。(図18)さらにオリジナルデータの作成後は、同データからフィルタリング処理により、地表面の三次元座標データを作成する。作成されたデータは、グラウンドデータと呼ばれる。グラウンドデータは、熱帯雨林におけるバイオマス推定時の地表面データとして、重要なデータとなるため、同データ作成時のフィルタリング作業には、十分留意する必要がある。

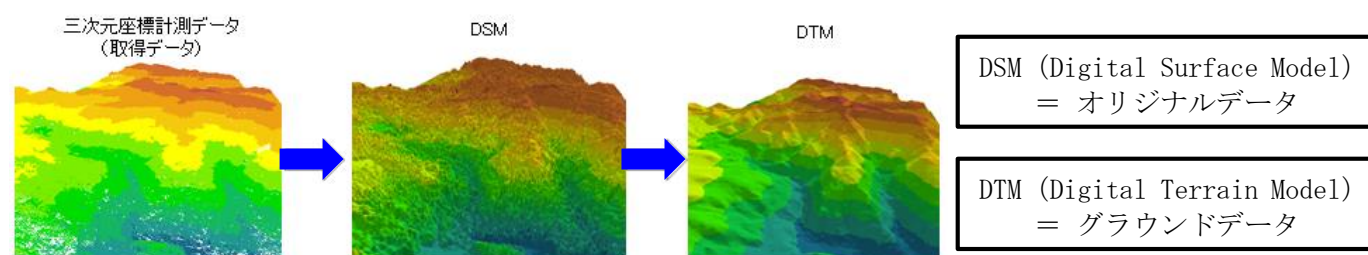


図18 三次元座標データ、オリジナルデータ、グラウンドデータのイメージ (例)

また同時撮影したデジタル画像写真も前述の飛行軌跡データを基に写真毎の撮影位置(撮影主点)を求める。なお、LiDAR計測とデジタル画像写真を同時に実施した場合、飛行軌跡データは同じデータとなる。

LiDAR業務において、このデジタル画像写真は、上述のフィルタリング処理を実施する際の判断に使用する。さらにフィルタリング処理後の点検にも使用する。また熱帯雨林における上空からの撮影においては、樹冠や林冠の状況等も確認が出来る。撮影された写真を1枚ずつ使用することは可能であるが、対象範囲が広域の場合、使い勝手が悪い。この場合は、撮影した各画像写真を基に地形の標高を考慮して、凹凸や写真の傾きを補正し、正射投影画像(オルソ画像)を作成する。その後、対象範囲でモザイク処理を行い、地域全体を1枚のオルソ画像として作成する。この画像写真は、地図と同じレベルで重ね合わせが可能となる。(図19)



海外作業における留意事項

海外における作業では、実施国で計測した生データを基に三次元座標データやオリジナルデータおよびグラウンドデータを作成する際、実施国以外での作業を制約されることもある。この場合は、計測を実施した国内において、作業を実施する必要があり、同国内にて作業対応できる会社や作業機関があるかどうかの事前確認や調整をしておく必要がある。

また、海外の会社に作業委託をする場合、作成するデータの仕様や作業目的等を明確に伝えておく必要がある。特にオリジナルデータの作成では、データの必要精度や点検、調整方法を明確に伝え、データの品質を確保しておくことが重要である。(図20、図21)

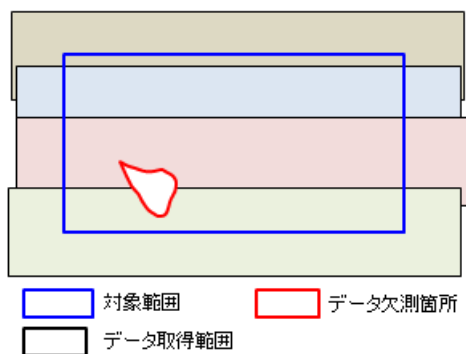


図20 計測データの点検イメージ(例)



図21 計測データのノイズイメージ(例)

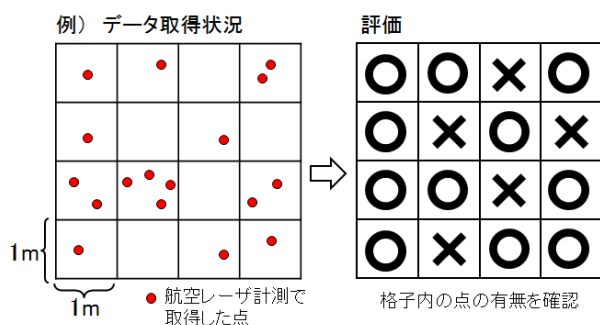


図22 欠測率の点検イメージ(例)

またグラウンドデータの作成では、フィルタリングを実施する対象物(地物)の定義を明確に伝えておく必要がある。またデータ作成後の点検も重要である。

フィルタリングにおける定義やフィルタリング項目の伝達を誤ると地表面の抽出精度に大きく影響を及ぼし、熱帯雨林におけるバイオマス評価の基礎データになるグラウンドデータの精度劣化に繋がる。

同データの精度劣化は、バイオマス評価の精度劣化にも繋がるため、海外におけるフィルタリング作業は特に留意する必要がある。

点検例) 計測範囲全体の点検

計測データは、気流の影響や天候障害(雲)等によりデータが欠損する可能性がある。対象範囲内において、計測漏れが無いのか、十分に点検する。欠測がある場合は、再計測を行う。(図20)

点検例) ノイズ確認、除去

レーザ光が雲・大気中の塵等により反射したり、建物・樹木等に複数回反射する乱反射したりすることで上空や地下方向へ発生する。(図21)

明らかに標高が高い点群は、ノイズデータとして除去する。

点検例) 欠測率の点検、点密度の確認

取得データが仕様に応じた点密度を確保しているか、取得データの均等性(偏りが無い)を確認する。(図22)

欠測が多い場合は、再計測を行う。

欠測率 = 点群の存在しないメッシュ数 / 全体のメッシュ数

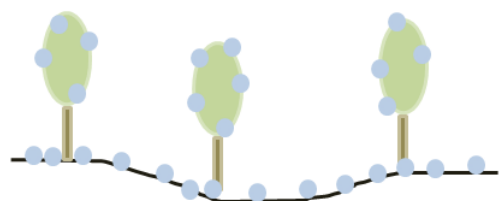
日本では欠測について以下のように定義されている。

メッシュ間隔は、計画するメッシュ間隔を単位とする。

メッシュ間隔が1m未満の場合は15%以下、

メッシュ間隔が1m以上の場合は10%以下を欠測として定義する。

(フィルタリング作業前)



(フィルタリング作業後)

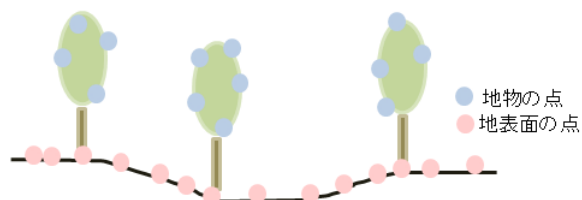


図23 フィルタリングのイメージ(例)

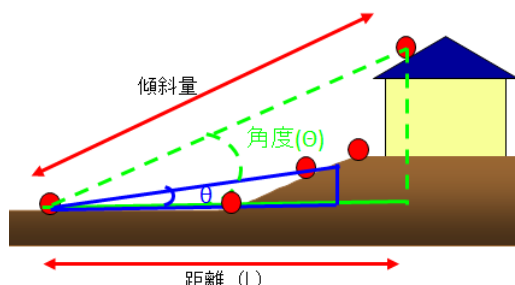


図24 自動フィルタリングのイメージ(例)

フィルタリング作業においては、樹木や建物等の地物点と地表面の点を出来るだけ正確に分類することが重要である。日本の場合、フィルタリング処理は、大きく2種類の手法で行う。(図23)

1) 自動フィルタリング (図24)

地表面抽パラメータを設定し、ソフトウェアにより自動抽出する。(地形モデルと探索される近傍点との角度(θ)、地形モデルと探索される近傍点の垂直距離(L)で決定)地形に応じて設定する。設定を誤ると、ご抽出、抽出漏れが多くなる。

2) 手動フィルタリング

自動フィルタリングで抽出できなかった点や、誤抽出の点群を手動で分類する必要がある。
点が粗になるほど細かく地形を目視確認する必要がある。

特に計測点密度が粗な場合やレーザ計測点が地表面に到達し難い場合、さらに地形の高低差が大きく、凹凸が著しい箇所においては、留意する必要がある。

日本では、作業規程の準則にフィルタリングの対象項目(データとして取り除く対象物)の標準的な定義がある。作業仕様、データの利用用途に応じてフィルタリング対象項目を選定する必要がある。(表5)

交通施設	道路施設等	道路橋(長さ5m以上)、高架橋、横断歩道橋、道路情報板等、照明灯、信号灯
	鉄道施設	鉄道橋(長さ5m以上)、高架橋(モノレールの高架橋含む)、跨線橋、プラットフォーム、プラットフォーム上屋、架線支柱、信号灯支柱
	移動体	駐車車両、鉄道車両、船舶
建物等	建物及び付属施設等	一般住宅、工場、倉庫、公共施設、駅舎、無壁舎(温室、ビニールハウス)、競技場のスタンド、門、プール(土台部分含む)、へい
小物体		記念碑、鳥居、貯水槽、肥料槽、給水塔、起重機、煙突、高塔、電波塔、灯台、灯標、輸送管(地上、空間)、送電線
水部等	水部に関する構造物	浮き桟橋、水位観測施設、河川表示板
植生		樹木、竹林、生垣
その他	その他	大規模な改変工事中の地域、地下鉄工事等の開削部、資材置場等の材料・資材

表5 フィルタリング対象項目(グラウンドデータ対象外の項目) (例)

引用・参考文献・参考資料

- 国土交通省（国土地理院）作業規程の準則
<http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/index.html>
http://psgsv2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/pdf/H25_junsoku_honbun.pdf
- 航空レーザ測量による災害対策事例集（公益財団法人 日本測量調査技術協会）
<http://www.sokugikyo.or.jp/publication/book/13.html>
- 図解 航空レーザ計測 基礎から応用まで（公益財団法人 日本測量調査技術協会）
<http://www.sokugikyo.or.jp/publication/book/11.html>
- DEPARTMENT OF CIVIL AVIATION MALAYSIA
<http://aip.dca.gov.my/>
- General weather pattern of sabah
<http://www.yr.no/place/Malaysia/Sabah/>
- JUPEM Geo portal
<https://www.jupem.gov.my/index.php?action=perkhidmatan-geodetik-rtk>
[https://www.jupem.gov.my/index.php?en&action=produk-geodetik-stesen-gps&setcolor\(\)](https://www.jupem.gov.my/index.php?en&action=produk-geodetik-stesen-gps&setcolor())

以下、各機材メーカーHPより

- RIEGL LMS-Q560（リーグル社）
http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Q560_20-09-2010_01.pdf#search='LMSQ560'
- RIEGL LMS-Q780（リーグルジャパン株式会社）
http://www.riegl-japan.co.jp/product/pdf_1/LMS-Q780_201307.pdf#search='LMSQ780'
- Leica Geosystems ALS80（ライカジオシステムズ株式会社）
http://www.leica-geosystems.co.jp/downloads123/zz/airborne/ALS80/brochures/Leica%20ALS80%20BRO_en.pdf
- Leica Geosystems RCD30（ライカジオシステムズ株式会社）
http://www.leica-geosystems.co.jp/downloads123/zz/airborne/RCD30/Flyer/Leica_RCD30_FLY_ja.pdf
- Trimble Harrier 68i（株式会社ニコン・トリンブル）
http://www.nikon-trimble.co.jp/products/pdf/geospatial/harrier_68i.pdf#search='Harrier+68i'
- IGI LiteMapper7800（IGI社）
<http://www.igi.eu/litemapper.html>
- Optech Orion（Optech社）
<http://www.optech.com/index.php/product/orion-altm/>
- Canon EOS-1D Mark III（キャノン株式会社）
http://web.canon.jp/Camera-muse/camera/dslr/data/2005-2009/2007_eos1d_mark3.html?categ=crn&page=2005-2009
- Z/I Imaging DMC II-250（Z/I Imaging社）
http://www.ziimaging.com/en/zi-dmc-iie-250_32.htm
- Microsoft UltraCam Falcon Prime（マイクロソフト社）
<http://www.microsoft.com/en-us/ultracam/ultracamfalcon.aspx>



「熱帯雨林における三次元森林構造の航空機計測技術の開発」

LiDAR計測による航測手法の標準化（仕様書）