

LiDAR データを用いた林道設計手法と作業道配置手法の開発¹⁾

Development of forest road design and strip road networks arrangement support techniques using LiDAR data¹⁾

齋藤仁志^{2,3)}
Masashi SAITO^{2,3)}

¹⁾ 本論文は東京農工大学に提出した学位論文である
Review article of the Dr. thesis Tokyo University of Agriculture and Technology

²⁾ 東京農工大学大学院連合農学研究科
United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture

³⁾ 宇都宮大学農学部森林科学科 〒 321-8505 宇都宮市峰町 350
Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350
Mine, Utsunomiya, 321-8505, Japan

| 目 次 | 法の検討 |
|---------------------------------|------------------------------|
| 第 1 章 序論 | 4.1 目的 |
| 1.1 背景 | 4.2 調査地の概要 |
| 1.2 既往の研究 | 4.3 自動設計手法の開発 |
| 1.3 本研究の目的 | 4.3.1 通過候補点の決定 |
| 第 2 章 林道設計への LiDAR データの適応性の検討 | 4.3.2 動的計画法による路線探索 |
| 2.1 目的 | 4.3.3 設計結果 |
| 2.2 LiDAR データの概要 | 4.4 土工量推定精度の検証 |
| 2.2.1 LiDAR とは | 4.5 開設費用計算 |
| 2.2.2 LiDAR の測定方法 | 4.6 まとめ |
| 2.2.3 LiDAR データの加工 | 第 5 章 崩壊危険地域を考慮した林道設計自動化手法 |
| 2.3 LiDAR データの検証 | の検討 |
| 2.3.1 調査地の概要 | 5.1 目的 |
| 2.3.2 調査路線 | 5.2 調査地と手法 |
| 2.3.3 標高データの算出 | 5.2.1 調査地と使用データ |
| 2.3.4 結果 | 5.2.2 崩壊危険度判定 |
| 2.4 LiDAR データを利用した林道設計手法の検討 | 5.2.3 自動路線設計手法 |
| 2.4.1 既開設点の土工量推定 | 5.3 結果と考察 |
| 2.4.2 LiDAR データを利用した代替路線作成手法の検討 | 5.3.1 土層厚推定 |
| 2.4.3 林道設計方法 | 5.3.2 崩壊危険地域予測 |
| 2.4.4 スプライン補間の原理 | 5.3.3 土層厚を考慮した路線設計結果 |
| 2.4.5 土工量算出プログラム | 5.3.4 崩壊危険地域を考慮した路線設計結果 |
| 2.4.6 土工量の比較 | 5.4 まとめ |
| 2.4.7 代替路線の検討 | 第 6 章 LiDAR データを活用した作業道配置手法の |
| 2.4.8 費用の比較 | 検討 |
| 2.5 まとめ | 6.1 目的 |
| 第 3 章 LiDAR データを用いた地表面推定手法の検討 | 6.2 調査地の概要 |
| 3.1 目的 | 6.3 施業対象林分決定手法 |
| 3.2 フィルタリング手法 | 6.4 路網配置手法 |
| 3.2.1 ローラー法のフィルタリング手順 | 6.4.1 集材線配置 |
| 3.2.2 交角法のフィルタリング手順 | 6.4.2 基幹作業道配置 |
| 3.3 交角法による DTM 作成 | 6.4.3 支線作業道配置 |
| 3.3.1 供試データの概要 | 6.4.4 費用計算 |
| 3.3.2 基幹林道終点付近におけるパラメータの検討 | 6.5 まとめ |
| 3.3.3 ナカイリ林道起点付近におけるパラメータの検討 | 第 7 章 総括 |
| 3.4 まとめ | 謝辞 |
| 第 4 章 LiDAR データを活用した林道設計自動化手 | 引用文献 |
| | 和文要約 |
| | Summary |

第1章 序論

1.1 背景

森林から木材等の資源を搬出し、安定的で効率的な木材生産を行うだけでなく、国土保全や水源涵養機能、地球温暖化防止機能等の公益的機能を維持する観点からも、森林整備が必要である。なかでも、木材の生産コストの低減、労働力の減少と高齢化や多様な森林施業の促進のために機械化は必須であり、平成21年に策定された、森林・林業再生プランにおいても、機械導入のための路網整備の徹底が必要とされている（林野庁 2010a）。さらに、森林・林業再生プラン推進本部に設置された、路網作業システム委員会において、木材生産活動における路網整備の重要性をより認識しやすくし、路網整備を加速化するために、これまで使用していた道の区分（図-1.1）を変更することを提言している（図-1.2）。



図-1.1 これまでの路網の役割と配置のイメージ（林野庁 2010a）



図-1.2 これからの路網の役割と配置のイメージ（林野庁 2010b）

路網を「車道」と、主として林業用の機械が走行する「森林作業道」に区分し、さらに「車道」を一般の車両の走行を予定して開設する「林道」と森林施業専用の車両の走行を予定して開設する「林業専用道」に区分する（林野庁 2010b）。ただし、本研究においては林道についてはこれまでどおり林道とし、作業道を基幹作業道、作業路を支線作業道と定義する。

また、地形傾斜・作業システムに対応する路網整備水準の目安として表-1.1の値が提示され、このプランでは今後10年間で、低コスト作業システムの構築を行うため、車両系集材システムでは100m/ha以上、架線系作業システムでは30~50m/haほどの路網密度を目標とした路網整備を目標としている（林野庁 2010c）。このように、国内の木材産業が衰退傾向にある中、木材生産を推進するための効率的な基盤路網整備計画を立案することの重要性が高まっている。

表-1.1 地形傾斜・作業システムに対応する路網整備水準の目安（林野庁 2010c）

| 区分 | 作業システム | 基幹路網 | | | 補助路網 | 路網密度 |
|------------------|--------|-------|-------|-------|--------|---------|
| | | 林道 | 林業専用道 | 小計 | 森林作業道 | |
| 緩傾斜地 (0~15°) | 車両系 | 15~20 | 20~30 | 35~50 | 65~200 | 100~250 |
| 中傾斜地 (15~30°) | 車両系 | 15~20 | 10~20 | 25~40 | 50~160 | 75~200 |
| | 架線系 | - | - | - | 0~35 | 25~75 |
| 急傾斜地 (30~35°) | 車両系 | 15~20 | 0~5 | 15~25 | 45~125 | 60~150 |
| | 架線系 | - | - | - | 0~25 | 15~50 |
| 急峻地 (35°~) | 架線系 | 5~15 | - | 5~15 | - | 5~15 |

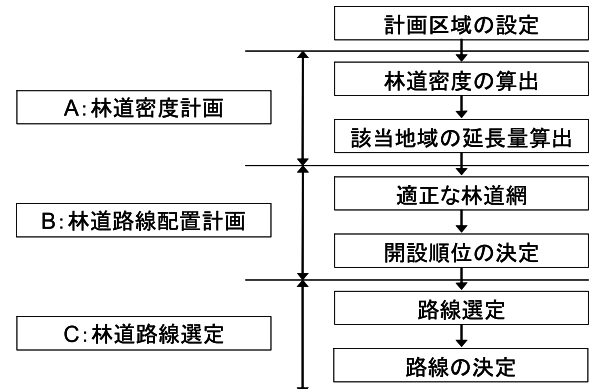


図-1.3 路網整備計画立案の流れ（小林ら 2002）

基盤路網整備計画（林道計画）の流れを図-1.3に示す（小林ら 2002）。基盤路網整備計画を立案するに当たって、まず行うことは目標とする路網密度の算出である。単純な矩形モデルで想定すると、路網密度と平均到達距離は以下の関係となる。

$$D = 2,500/St$$

D : 路網密度 (m/ha) St : 平均到達距離 (m)

を想定し、実際の林内で生じる迂回を、迂回係数1.5として距離基準方式を用いて算出し、この値を南方ら(1985)が提案した低規格林道を考慮した複合路網密度理論（コストミニマム方式）を用いて検証している（林業土木コンサルタンツ 2007）。

次に行う路網配置では、路線の規格と開設順位を決定する必要がある。路線の規格は規模や用途によって、林道・作業道・作業路に分類される。前述の路網作業システム委員会においても、傾斜・作業システムごと必要となる路線の規格を提示しており、これまでも澤口(1996)による研究で、利用区域面積に応じた路網の規格は、 $0ha < 作業路 \leq 21ha$ 、 $21ha < 作業林道 \leq 636ha$ 、 $636ha < 林道 2級 \leq 3,123ha$ 、 $林道 1級 > 3,123ha$ とされており、利用地域ごとに適切に路線を配置していく必要がある。

最後に路線選定は図上での予測・現地踏査・測量を行い、各図面を作成、土量・費用等を算出しながら、複数の路線の中で適切な路線形を決定する。

そして、基盤路網整備計画（林道計画）が終了したら、その計画に基づき林道設計、また、実際に作業する場合に必要な作業道・路計画、設計に移る。ただし、最適林道密度の算出は南方(1977)、南方ら(1985)により、路網配置、路線選定手法は小林(1983)によ

り確立され、林野庁などの計画で利用されているのに対して、林道設計、作業道路網配置計画に関しては、神崎 (1974)、酒井 (1981、1982、1986) など様々な研究が行われ、林道の概略設計に用いられているものの、これらの作業に必要な詳細な地形データが存在していないことから、現在、林道・作業道路網の配置計画の立案は踏査結果などを元に森林基本図などの図面上で検討されている (図-1.4)。



図-1.4 森林基本図に基づく路網配置の例 (鹿沼市私有林)

林道設計に関しては地図上での路線選定、踏査、ハンドレベルを用いた路線選定、平面・縦断・横断測量およびこれら設計図面の作成、数量計算、コスト計算と非常に多くの労力を必要とし、最良の林道を設計するためには長年の経験が必要になる。特に、開設費用、安定性、集運材効率等を考慮し、複数の開設候補路線の比較を行う代案の作成には、多くの労力を必要とする。作業道設計に関しては林道設計と同様な手順を踏む場合とともに地形図上のみで行われることも多いが、地図から得られる、等高線などの地形情報では作業道設計を進める上で必要な精度が得られず、現場では作業道施工時に細部計画の見直し、代案の作成を行いながら開設を進めてきた。また、効率的な林業を展開するには林道・作業道設計の省力化だけでなく、低コストで耐久性の高い作業路網と高性能林業機械を組み合わせた、低コスト作業体系の構築も必要となってくる。なかでも、作業道路網の配置は作業者の経験に依るところが大きく、実際に配置を行う際には、林分条件、地形条件、作業方法等様々な条件を考慮した上で、路網を配置し、開設順位を決定する必要がある。

これらの状況から、今後路網整備を推進していくにあたり、作業者に大きな負担となっていた現地踏査等の労力を減らし、経験の浅い作業業者でも、効率的な作業道配置を行う指針となる、地形再現性の高い情報を用いた、自動設計手法の開発を行い、路線設計・配置の支援を行っていく必要性が高まってきている。

1.2 既往の研究

従来から、様々な条件を考慮しながら基盤路網整備計画を適切に行うため、各段階において指標となる値や、支援手法が研究されており、路線開設量の指標となる路網密度、施業効率や生産性を考慮した適性配置とその評価指標に関する研究が中心となってきた。路網密度の理論的展開は、開設費と集材費の合計を最少とする、マチュース理論 (Mathews 1942) から始ま

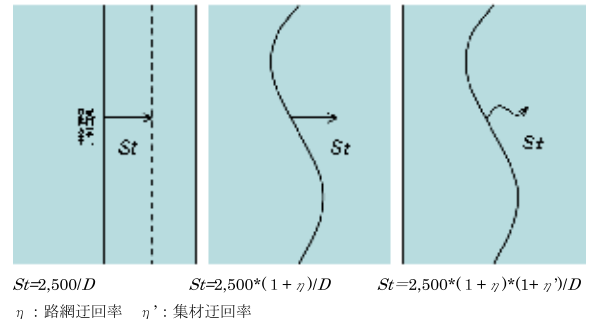


図-1.5 路網・集材迂回概念

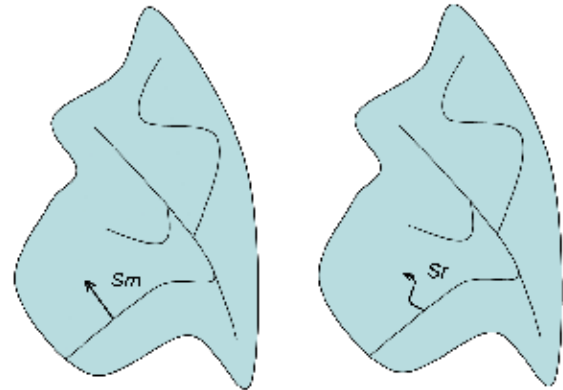


図-1.6 修正係数の概念

り、我が国へ急峻な地形に適応を検討した Kamiizaka (1963、1966)、Kato (1967) らによる研究がなされ、限界林道度提唱 (Minamikata 1967) から歩行費用を含んだ林道路網密度理論 (南方 1977)、低規格林道を考慮した複合路網密度理論 (南方ら 1985) と発展しており、理論的には 1980 年代にほぼ完成した。その後も、木材輸送能力に着目した飽和密度 (酒井 1987) や、高性能林業機械の導入を念頭に置いた、作業機械出力をパラメータとした路網密度決定方法 (田坂ら 2002) など、各条件において適性路網密度が研究されてきており、路網密度の指標が把握可能となっている。

これらの研究では、主に林地を矩形モデルとして想定しているが、実際にはそのような林地は存在せず、山岳林では地形による路網・集材の迂回が生じる (図-1.5)、また、対象となる森林の形状も不整形なものであるため、Segebaden (1964) によって路網密度修正係数 ($V\text{-corr}$)、林内迂回修正係数 ($T\text{-corr}$) が提唱されている (図-1.6)。急峻な日本の森林に適応するため様々な路網密度修正係数 ($V\text{-corr}$) が検討されており (堀ら 1971、神崎ら 1990、小林ら 1991) おおむね 1.5 ~ 2.0 程度の値となる報告がなされている。これらによって算出された適性路網密度を目標とした路網配置を検討していくが、図-1.1、1.2 でも示されているとおり、路線の役割ごとに適性に配置する必要がある。

また、配置された林内作業における路網の可否を判断する指標としては、堀 (1971、1987) による林内到達距離の分布を評価する手法や、酒井ら (1990) による格子点法による到達距離の推定法、石川ら (1995)

の地理的最適手法を用いた路網評価方法などが挙げられる。近年では、路網を林内作業の効率化のみで評価するのではなく、地域の基盤として路線の接続等のネットワークを評価する研究も行われている（吉村ら1997、松本ら2000、中澤ら2007）。

路網計画の立案を適正化し、路線開設の優先順位を決定する研究として、山岳林における高規格な林道網配置方法（酒井1982、1983、小林1983）から低規格林道を含む複合路網（小林1991、酒井1987、澤口1996）、さらに低規格な作業路を含むトラクタ集材路網（井上1989）などが検討されてきている。また、既知の点を接続する際の評価値を最適化する方法として、線形モデルを用いた収穫予測を用いて開設順位を決定する手法（南雲ら1983）、路線勾配の適正化を行う方法（酒井1986）などが検討されてきた。

これまでの研究では、必要となる路網密度や配置後の評価は可能となるが、配置計画を立案する具体的な形にはならず、配置計画を適正化する手法も、データや計算機の制限、高規格林道を中心とした森林基盤整備が推進されていた背景もあり、市町村や大流域を対象とした研究・解析が中心であった。海外においては、Dahlin et al.(1992)、Chung et al.(2001)などが10ha~100ha程の範囲で配置計画を検討しているが、この中で計画した範囲より大きな範囲での路網配置の最適化とは繋がらないことを示している。両者の立場は異なるものの、大流域での路網配置と、小規模な路網配置は異なったアプローチで検討が必要であることを示唆している。そのため、現在必要とされている、林班・小班レベルでの具体的な路網の配置や、実際の配置計画を立案する際の手法を開発する必要がある。

各路線の設計を支援し、効率的な路線線形設計手法についての研究は、数値地形情報の発展・普及と共にデジタルデータを用いた自動化手法を中心として発展してきた。神崎（1973）はダイナミック・プログラミングを用いた適正な路線設計手法の検討を行った。具体的には、路線通過点が決定されている林道において、費用・土工量・勾配に関する評価関数を定め、開設区間毎に、制限勾配内で最適な評価関数値を取る縦断勾配決定手法を提案した。この手法では、勾配変化点をあらかじめ指定しなければならない点や、勾配線の探索が通過線上に限られる点などが課題として残された。また、神崎（1974）では、地図上にフリーハンドで描画した情報をもとに、電子計算機上で車両通行を行う際に無理のない運転操作が可能である林道線形を求める方法として、路面勾配等の各評価関数を最小化する路線設計手法を提案している。北川（1972）は、電子計算機上で林道の予備設計の自動化を行う手法として、二点間を均一な縦断勾配で結ぶ最短経路の探索を行っている。平賀（1972）は、伐区形状のパターンから、集材路網配置の適正化を検討している。酒井（1981）は数値地形図を用いた、設計路線の土工量推定と、地形区分による路線の開設難易を判断する方法を開発し、さらに酒井（1982、1983）では、端点除去法で到達林分を減らすことなく、効果的な配置を行う手法を考案し、集材距離、林道開設距離等のパラメ

ータを指標とした配置の最適化手法を検討しており、これらの研究によって林道設計に数値地形図を適用することの有用性が示されてきた。小林（1983）は計算機による路線配置自動に関する研究を行った。この中で、切土量、盛土量を平均化し、土工量を削減するための手法として、切土・盛土断面は切土高の自乗に比例すると仮定に立ち、各点の切土・盛土高の自乗和を最小化する三次回帰式を用いて線形を決定した。研究自体は、大域的な路網配置が中心となるため、細部路線設計手法としての応用範囲は限られるが、この研究によって林道設計全般における計算機を用いた自動設計の実用化の可能性が示された。また、国外では Reutebuch（1988）が DEM を用いたコンピュータ上での設計を行い、Liu et al.(1993) が二点間においての、開設費用・メンテナンス費・運搬コスト等を考慮した路線設計や Dean（1997）の収穫量がある林地へのアクセスを考慮した、路網を設計する“branch evaluation”というヒューリスティックな手法の開発を行うなど、発展が見られた。

配置計画では各路線の細かな線形を考慮せずに行うことが多いが、より詳細な設計を行う方法として、市原（1985）は捨土量、計画高、縦断勾配による制約条件付きの最小二乗法を適用し、土工量を最小とする縦断線形を求める手法の効果を示し、田坂ら（1996）は土工量を抑え、地形に順応した路線決定方法として3次式スプラインを用いた曲線補間法による路線設計方法を提案している。しかし、これまでの研究においては、計算機の処理的な制約や、地形情報の解像度等が問題となり、具体的な林道設計を検討するというよりは、概略設計や路線の配置計画が研究の中心であった。また近年では、Aruga et al.（2005）では、環境負荷低減のための林道開設手法として高精度 DEM とスプライン関数を用いた林道設計手法の検討を行っている。ただし、この研究では設計した路線の現地での検証は行っていない。

一方、これらの研究に用いられている数値地形情報についても、各分野において研究が進められている。国内での数値地形情報は電子計算機の進歩に伴い昭和49年度より国土地理院と旧国土庁が、国土情報の数値化の整備を始めており、村井ら（1974、1978）、松崎ら（1976）、福田（1974）によって地形情報の数値化手法や地形解析方法が検討されている。森林工学分野では、後藤ら（1982、1983）が点格子状のデータ出力と傾斜分布図を用いた、森林施業と路線計画について検討している。芝（1986）は山岳地域の地形特性を、地形周波数解析を利用した手法により計量化を検討し、堀ら（1989）は林道設計対象地の地形形状の計測方法を検討しており、各研究に適応されてきた。特に北川（1991）によって、山岳地域地形解析システムの構築には、格子状の数値地形モデルの適応が効果的であることが示されている。

しかし、数値地形図の有用性は高いものであるが、多くの研究の中で地形図や航空写真の情報から作成する数値地形情報の解像度が低く、山岳地域において複雑な地形の再現性等が課題とされていた。このような

状況を踏まえ、近年高精度GPS受信機や慣性航法装置を用いた、航空機搭載レーザースキャナによる測量技術が発達してきた (Flood et al.1997、Naeseet 1997)。航空機 LiDAR と呼ばれる、これらのシステムを用いた測量方法によって、従来に比べ高い解像度の三次元情報が取得可能となり、森林地域での計測に導入され始めている (村上ら 1997、長谷川 1999)。これまで、森林を対象としたものでは森林の資源量把握 (大政ら 2000、洲濱 2001) や、地すべり予測、土砂流出量の推定 (浅野 2001、松岡ら 2009) 等に利用されている。森林工学分野では、LiDAR データの入手が容易な国外では、Coulter et al. (2001)、Christopher (2006) や Russell et al. (2010) によって路線設計、路網配置に活用されているが、国内では有賀ら (2004) や Saito et al. (2008) などによって林道設計に適用され始めてはいるものの、高解像度地形情報の活用が進んでいない。

1.3 本研究の目的と構成

本研究では、これまでの数値地形図では地形の再現が低く実用化が困難であった、林道設計支援手法を、森林域の詳細な地形を把握可能な航空機 LiDAR データを用いて改善し、開設コスト、安全性等を考慮した、林道設計・作業道配置支援手法の開発を行う。林道設計では、通常の道路設計と異なり開設コストの制約が大きく、開設コストを低く抑えるための工夫として、構造物を少なくするための路線開設位置、土工量を最小化する線形の採用などの手法が必要になる。このため、コンピュータ上で自動設計を行う際には、詳細な地形情報が不可欠となる。

そこで、第二章では従来使用されてきた DTM に比べ、詳細な地形形状を把握できるとされている、LiDAR データを林道設計に適用した際の有効性について検討した。宇都宮大学農学部附属船生演習林で開設された林道を対象に、LiDAR 計測によって作成された DTM と従来から用いられている地形図から作成した DTM で、林道開設時における土工量を推定し、代替路線の設計手法の検討を行った。

第三章では LiDAR データの地表面推定手法について検討した。LiDAR データの地形再現性は高いものであるが、開空部に比べ、林内の誤差が増大するなどの欠点をもつため、地表面上にある樹木等のノイズをフィルタリングする必要がある。しかし、これまでの LiDAR 計測は、都市部を対象としたものが多く (政春 2006)、フィルタリング手法を森林域に適用すると小規模な尾根や沢、路肩等の微地形の再現性に問題があるため、森林域を対象としたフィルタリング手法の開発を行い、地形の再現性の向上を図った。

第四章では、3次式スプラインとダイナミック・プログラミングを用い、林道開設費用を抑えた自動設計手法の検討を行った。林道の線形は地形に順応しながら、開設費用を抑え、路線全体での土工量のバランスをとることが望ましい。そこで、任意に設定した始点から終点間において、自動的に通過候補点を決定し、3次式スプラインで点間を補間しながら、最小の開設

費用となる線形を選択する方法を開発し、船生演習林の林道延長区間を対象として設計を行った。

実際に林道を開設する際には、林道設計技術者は開設費用のみでなく、林道の耐久性・維持管理費用等を考慮した設計を行っている。そこで第五章では、斜面の崩壊危険性を考慮した林道設計手法を検討した。無限長斜面安定解析式を用いて、演習林内の崩壊危険分布図を作成し、危険範囲を林道が通過する際に修復費用を見込んだ開設費用を算出する手法を開発した。

これまでの章では、林道もしくは基幹作業道の設計を主に検討していた。効率的な基盤路網整備を行う際には、基幹道から伸びる、支線作業道の配置も重要となる。そこで第六章では、林分条件、地形条件、経営計画を考慮した、作業道配置支援プログラムの開発を行った。

作業道の配置は林況や集材システムに即して、開設順位、路網密度等を決定する必要があるが、林況が記載されている森林簿は、現状から乖離している場合も多く見られ (露木 1998)、配置計画検討の際にあまり有効ではない。そこで、これまで利用してきた LiDAR データから標高・傾斜などの地形情報だけでなく、各小班の植栽密度・樹高・単木位置などの林分条件を把握できる点を生かし、現在の林況を高精度に把握し、作業道配置に利用する手法を検討した。これらの検討の結果、基幹林道設計から作業道路網配置までの、路線整備計画支援手法の開発を試みた。

以上の検討を踏まえ、第7章では総括を行った。

第2章 林道設計への LiDAR データの適応性の検討

2.1 目的

森林内路網配置を検討するうえで、複数の開設候補路線の比較を行うための代案作成には、多くの労力を必要とした。これを改善するため今日までデジタル地形モデル (DTM) や GPS を用いた、林道設計の負担を軽減するため様々な林道設計支援方法が開発されてきた。しかし、これら手法では解像度が 50 m や 10 m 程度となり、地形の再現性が低いことから、土工量推定に誤差が生じるなどの欠点があり、実際の設計には適用困難であった。本章では以上の点を改善することを目的として微地形の測定精度が高いとされる LiDAR データを用いた、代案林道設計手法の開発を行った。

2.2 LiDAR データの概要

2.2.1 LiDAR とは

LiDAR とは Light Detection And Ranging の略称であり一般的には光波計測を指す。レーザが計測にマイクロ波を用いるのに対し、LiDAR では直進性の高いレーザ光線を用いており、測定点から求対象点までの距離や対象物の反射強度を取得可能なセンサである。スポットを固定した点で計測の場合は、2点間の距離変化を求めることができる。三次元計測用のレーザ測距装置には、面的にデータを得るためミラーを一軸または多軸式で回転させるものと、光ファイバーを扇形にセットしてスキャンするタイプがある。具体的測定装

置としては、地上に設置して横方向から形状を測定する地上レーザスキャナや、航空機に搭載して直下の形状を測定する空中レーザ計測装置、海面と海底を測定するレーザ測深装置などがある（加藤 2004）。

国内では航空測量に使用可能な装備が備わっている場合は、航空レーザ測量システムと称するが、他にも空中レーザ計測装置、航空レーザ計測装置、レーザスキャナ、レーザプロファイラなどの異なる名称を持つ。正式な名称としては、Airborne Scanning LIDAR が妥当と思われるが、海外では単に LiDAR と表記することが一般的である。本論では船生演習林において航空レーザ測量システムで計測したデータを LiDAR データと称する。

2.2.2 LiDAR の測定方法

LiDAR システムは、移動体プラットフォーム搭載のレーザスキャニングシステム、姿勢計測装置、空中 GPS 局の機器から構成され、対象面に向けて発射されるレーザと、地面や樹木などの反射面から戻ってくる反射パルスとの時間差を測定する。航空機の姿勢とレーザを発射した正確な位置は、空中 GPS 局と地上 GPS 局となる既知点（電子基準点等）を使用した GPS 測定や、姿勢計測装置により測定できるため、測定された地表面との距離をもとに、地形や樹冠の 3 次元形状が算出できる。

2.2.3 LiDAR データの加工

レーザの反射パルスは、発射したレーザビームの拡散範囲内に高さの差があった場合、最初に当たって反射してきたパルス（First pulse）と最後に反射してきたパルス（Last pulse）が生じる。従って、樹木が繁茂する対象地では First pulse から作成された数値表層モデル（以下 DSM）は樹冠のデータを示し、Last pulse から作成された DSM の多くは地表面 DSM を示すが、地表の落枝や下層植生により影響を受けるとされている。また、密植地や大径木が存在する林分、崖などの急傾斜地を含む複雑な地形の場合には、単一な人工林や下層植生の少ない落葉樹林、緩傾地の測定に比べて誤差が大きくなることが明らかにされている（杉盛ら 2002）。本研究では、一般的な LiDAR データにもとづく代案作成を研究対象とすることから、LiDAR データより朝日航洋(株)が作成した 1 m グリッドの DTM を使用して検討を進める。このデータは平成 15 年 10 月 21 日にヘリコプタ搭載 LiDAR により作成された。

2.3 LiDAR データの検証

2.3.1 調査地の概要

調査は平成 17 年 6 月 13 日から 11 月 1 日まで宇都宮大学農学部所属船生演習林第 4 林班に設置された基幹林道大天頂沢線、平成 14～16 年の開設地とし、特に LiDAR データ測定前後に開設された部分を選定した。図-2.1 に調査地の概況を、表-2.1 に LiDAR データ諸元を示す。

調査地は尾根沿いに位置し、マツ、ナラ、コナラなどの高木と、ツツジ、ヤシヤブシなどの低木で構成さ

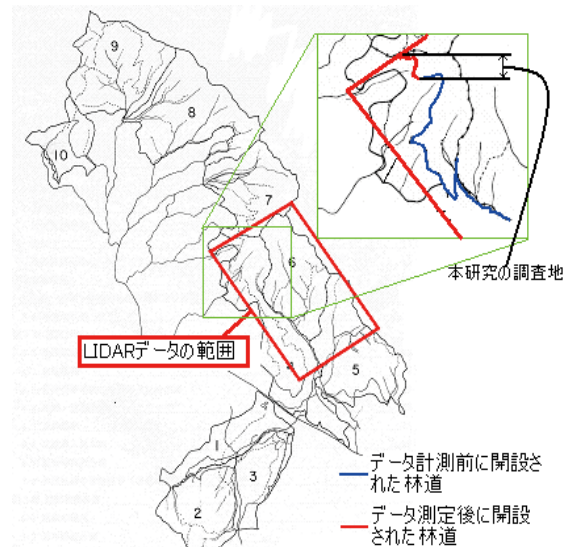


図-2.1 調査地

表-2.1 今回使用された LiDAR 測量システムの諸元

| データ取得年月日 | 2003年10月21日 |
|----------|---------------------------|
| 対地高度 | 500 m |
| 対地速度 | 25 m/s |
| 点密度 | 8.82points/m ² |
| システム | ALTM1225 |
| レーザ波長 | 1.064 μm |
| レーザ発射頻度 | 25,000 Hz |
| スキャン頻度 | 27 Hz |
| スキャン角度 | 24 ° |
| 使用データ | First and Last |
| ビームの広がり角 | 0.2, 1.0 mrad |
| 水平方向の精度 | X, Y < 0.5 m |
| 垂直方向の精度 | Z < 15 cm (one shot) |



図-2.2 調査地の状況

れた針広混交林内にある。開設された林道の切土法面には岩が露出しており植生の回復は認められなかった（図-2.2）。

2.3.2 調査路線

表-2.2 路線測量結果

| | 東距(m) | 北距(m) | 標高(m) | | 東距 | 北距 | 標高 |
|------|----------|----------|--------|-----|----------|----------|--------|
| GPS3 | -1141.51 | 86768.57 | 386.22 | p11 | -1242.52 | 87132.29 | 424.44 |
| p1 | -1175.37 | 86810.28 | 391.45 | p12 | -1199.71 | 87174.27 | 431.65 |
| p2 | -1214.80 | 86827.18 | 394.81 | p13 | -1185.30 | 87223.00 | 438.79 |
| p3 | -1225.44 | 86858.41 | 396.94 | p14 | -1263.45 | 87215.00 | 445.43 |
| p4 | -1236.07 | 86896.22 | 400.38 | p15 | -1305.20 | 87240.73 | 453.53 |
| p5 | -1224.96 | 86922.15 | 402.71 | p16 | -1331.91 | 87240.33 | 456.96 |
| p6 | -1255.40 | 86966.82 | 406.98 | p17 | -1292.44 | 87322.41 | 464.57 |
| p7 | -1285.37 | 86978.77 | 408.62 | p18 | -1311.75 | 87337.59 | 465.85 |
| p8 | -1275.92 | 87012.76 | 411.17 | p19 | -1390.67 | 87336.74 | 468.20 |
| p9 | -1247.91 | 87036.72 | 412.39 | p20 | -1395.52 | 87356.83 | 468.92 |
| p10 | -1262.27 | 87057.39 | 414.15 | p21 | -1353.30 | 87381.72 | 470.30 |

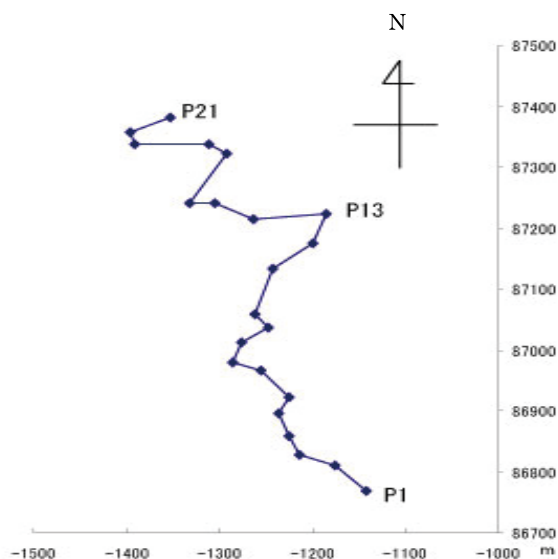


図-2.3 トラバース測量位置

調査地では、トータルステーション (TOPCOM,GPT-2005F) を用いて路線の測量を行い、路線位置を測定した (表-2.2、図-2.3)。路線測量では GPS 基準点を起点とし往復測量を行うことにより閉合比 (1/3,015) を算出した。

さらに、各測点から放射法により林道に直行する直線上の点を測定し横断面を得た。測量では林道の中央、左端、右端、左右の林内 2~3 点を対象とした (図-2.4)。横断測量は LiDAR データ測定時の林道終点から、新規開設方向に 10 m おきに 20 点と終点から反対方向



図-2.4 横断測量の位置の例



図-2.5 横断測量の様子



図-2.6 横断測量点の配置図

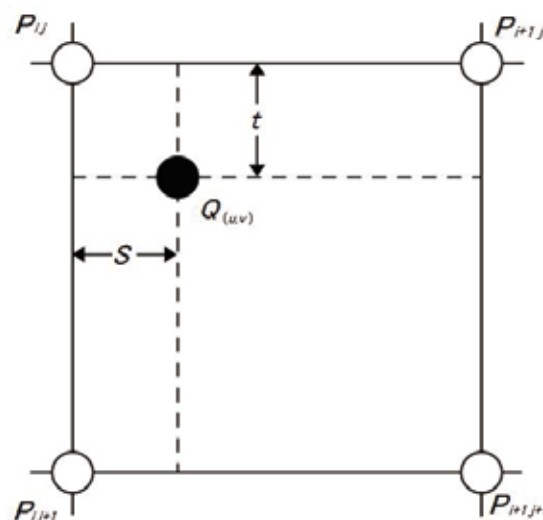


図-2.7 共一次内挿法の概念図

に 9 点とした。横断測量の様子と実施位置を図-2.5、2.6 に示す。

2.3.3 標高データの算出

LiDAR データより作成された DTM は、1 m グリッドの格子状に配列されたデータであるため、共一次内挿法で各点の標高を求める。共一次内挿法とは 2×2 ウィンドウ内の 4 つの値を使用し、共一次関数によって出力値を計算する手法で、平均化によるスムージングの効果がある。図-2.7 において求める点を $Q(u,v)$ 、各点の値を P_{ij} とすると、

$$Q(u,v) = (1-s)(1-t)P_{ij} - (1-s)tP_{ij+1} + s(1-t)P_{i+1j} + stP_{i+1j+1} \dots (1)$$
 としてウィンドウ内の値を求めることができる。これにより求めた標高とトータルステーションによる測量で得た標高を比較検証した。

また従来使用されてきた DTM との比較を行うため 1/5,000 森林基本図から作成した 10 m グリッドの DTM を使用した。

2.3.4 結果

LiDAR データとの比較は、測定後に開設された横断面では、地山から削られた部分を除く全点で、測定前に開設された部分では全点を対象に行った。結果を図-2.8、2.9 に示す。図より明らかなおと、データ測定後に開設された 127 点では誤差の二乗平均が 1.04 m、測定前 90 点では 1.35 m と誤差は小さかった。

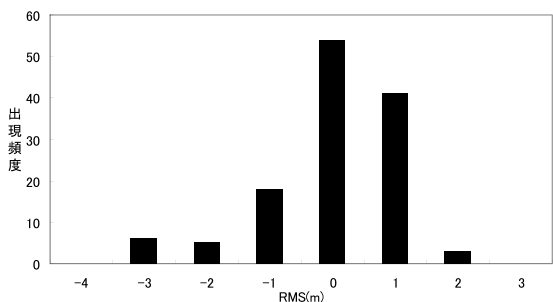


図-2.8 未開設部分の地表面推定誤差

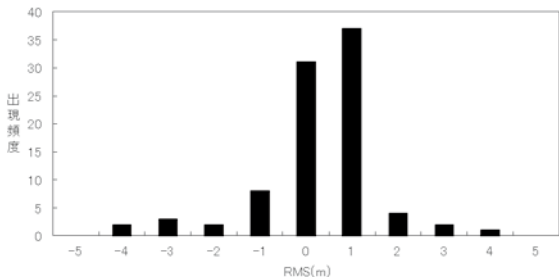


図-2.9 既開設部の地表面推定誤差

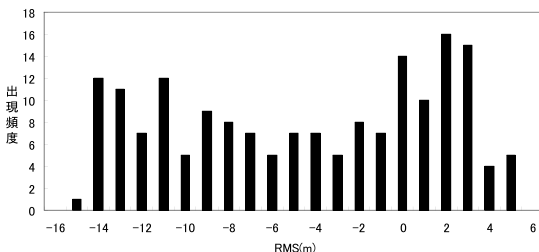


図-2.10 10 mグリッドのDTMの地表面推定誤差

同様の手法で従来のDTMを用いて比較した結果を図-2.10に示す。従来のDTMでは全点(217点)の誤差の二乗平均が6.02 mとなり、大きな誤差が生じた(図-2.10)。これらの結果から従来のDTMを用いた手法に比べ、LiDARデータを用いた手法により大幅に誤差が削減されることが明らかにされた。

しかし、LiDARデータ自体にも測定前の区間に大きな誤差が生じていた。部位別に見ると、上部が開けている林道の中央・左端のみ(20点)での誤差が0.33 mとなったのに比べ、左右の林内70点での誤差が1.50 mとなることなどから、林道に接する広葉樹林や林床の植物がレーザを遮った可能性が原因と考えられる(図-2.11)。

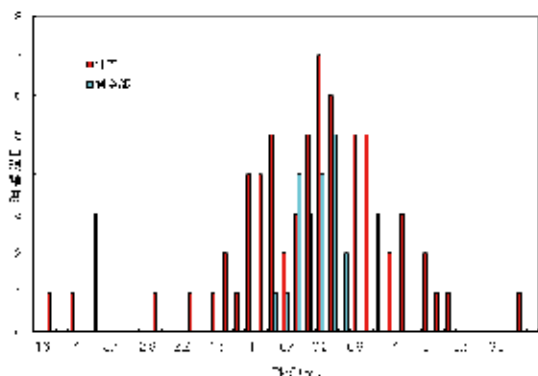


図-2.11 林内・開空部での地表面推定誤差

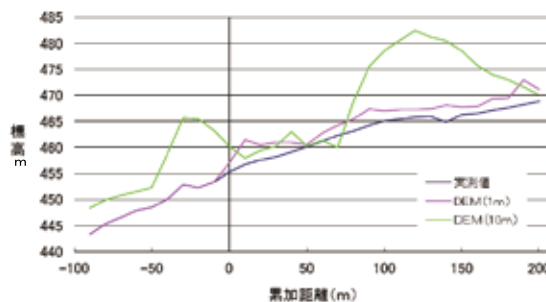


図-2.12 グリッド間隔による縦断面図の変化

また、縦断面の比較より(図-2.12)、1 mメッシュのDTMでは、距離0 m以下に示される既開設部分では良く路線の標高を推定しており、未開設部分でも地山と路面に生じるほぼ一定の差が良く再現されていることが明らかである。一方、10 mメッシュのDTMでは大きな誤差発生が認められた。

2.4 LiDARデータを利用した林道設計手法の検討

2.4.1 既開設部の土工量推定

LiDARデータ測定後に開設された林道の土工量を推定するために、LiDARデータから得たプロフィールを用いて横断面の切土・盛土面積を算出し、平均断面法による土工量算出を試みた。算出にあたり横断面は以下の条件により定めた点で囲まれる部分と仮定した。1) 法面上部がLiDARデータによるプロフィールと重ならない場合は、林道開設後の崩落とみなし法面の延長線と地山が交わる点を法頭とする。2) 法面下部の土砂堆積を除去するため路面と法面の交点を法尻とする。3) 路肩が交わらない場合は、地山を路肩まで延長し測量によって得た線との交点を定めた。4) 地山面が1 m以上ずれている場合は、LiDARの測定誤差とみなし地山線を路肩と重なるまで移動し、以降は前出の手法により断面を定めた(図-2.13、表-2.3)。

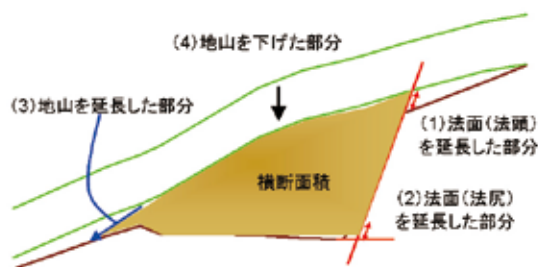


図-2.13 横断面積推定の例

表-2.3 求められた横断面積

| 位置 | 横断面積(m ²) | 位置 | 横断面積(m ²) |
|------|-----------------------|------|-----------------------|
| 0m | 11.35 | 110m | 15.49 |
| 10m | 61.01 | 120m | 10.34 |
| 20m | 17.15 | 130m | 7.25 |
| 30m | 15.17 | 140m | 15.17 |
| 40m | 13.12 | 150m | 6.77 |
| 50m | 3.06 | 160m | 8.19 |
| 60m | 10.26 | 170m | 12.39 |
| 70m | 16.91 | 180m | 9.11 |
| 80m | 32.88 | 190m | 31.50 |
| 90m | 3.82 | 200m | 42.52 |
| 100m | 15.25 | | |

調査地の林道は、路盤の安定を得るため切土のみで開設されていることから、求められた横断面積は全て切土面積となる。さらに算出された面積をもとに平均断面法による土工量の推定が可能となる。平均断面法では、通過点*i*における断面積を*A_i*、*i+1*における断面積を*A_{i+1}*、*i*と*i+1*間の区間距離を*d*とすると、下式により土工量*V*が求められる。

$$V = \frac{d}{2}(A_i + A_{i+1}) \dots\dots\dots(2)$$

表-2.3より算出した各区間の土工量を表-2.4に示す。

表-2.4 区間土工量の推定結果

| 区間 | 切土量(m ³) | 区間 | 切土量(m ³) |
|------|----------------------|-------|----------------------|
| 0m- | 367.00 | 100m- | 164.24 |
| 10m- | 473.36 | 110m- | 135.46 |
| 20m- | 176.13 | 120m- | 74.99 |
| 30m- | 153.83 | 130m- | 123.59 |
| 40m- | 83.74 | 140m- | 114.68 |
| 50m- | 72.14 | 150m- | 81.79 |
| 60m- | 143.36 | 160m- | 114.83 |
| 70m- | 256.41 | 170m- | 117.84 |
| 80m- | 188.87 | 180m- | 247.73 |
| 90m- | 76.15 | 190m- | 430.34 |
| | | 合計 | 3596.48 |

2.4.2 LiDAR データを利用した代替路線作成手法の検討

LiDAR データを利用して土工量推定を行うため、林道の通過点、路面高を定め、プログラムにより林道設計を行い、横断面積を求め、土工量推定を行った。本研究ではプログラムは Microsoft VisualC++ .net を使用し作成した。

2.4.3 林道設計方法

既開設点の土工量と LiDAR データを利用して推定した土工量の比較を行うため、プログラムによる林道設計にあたり、横断測量で得られた既設路線の中心点を通過の候補点として使用し、また幅員も開設された林道と同様の 3.5 m に設定した。同様に、法勾配についても現地測量により得られた区間法勾配の平均値を使用した。路線位置は測量によって得た 10 m ごとの林道の中心座標をスプライン曲線で補間し、各区間を 10 分割した点とした。路面高は 10 m ごとの林道路面中心の標高を用い、補間した点では各区間の距離に比例按分し決定した。

2.4.4 スプライン補間の原理

補間とは、測定値が飛び飛びの値のとき、それぞれの測定点の間を合理的につなぐ方法である。補間の代表的な方法としては、線形補間、ラグランジュ補間、スプライン補間がある。線形補間とはそれぞれの測定点間を直線でつなぐ方法である。ラグランジュ補間とは、*n* 点の測定点が与えられたときに、点列全てを *n-1* 次の多項式で当てはめる方法であり、高次式になると振動が生じやすいとの欠点を持つ(田坂ら 1996)。スプライン補間は範囲を細かく分割し、その区間ごとに異なる多項式で補間する方法であり、数値の不安定さが生じにくい。また、計算量が比較的少量であるこ

とや、変曲点を持つ最低次数の多項式であることから、3 次式スプラインが用いられている(山口 1976)。以上の理由から、本研究では、実際の測量データ間の補間方法として、3 次式スプライン補間を用いた。

パラメータ *t* による、3 次式スプライン曲線セグメントは、

$$P(t) = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 \dots\dots\dots(3)$$

と表せる。今回、*P(t)* は、*x(t),y(t)* を要素とする平面位置ベクトルとする。また、パラメータ *t* の変動範囲は横断測量点間の各区間長とする。スプライン曲線セグメントをあらわす式の係数 *A,B,C,D* は、各セグメント両端の位置ベクトル *P_i,P_{i+1}* と接線ベクトル *P'_i,P'_{i+1}* を与えることにより決定される。

$$A = P_k \dots\dots\dots(4)$$

$$B = P'_k \dots\dots\dots(5)$$

$$C = \frac{3(P_{k+1} - P_k)}{t_{k+1}^2} - \frac{2P'_k}{t_{k+1}} - \frac{P'_{k+1}}{t_{k+1}} \dots\dots\dots(6)$$

$$D = \frac{2(P_k - P_{k+1})}{t_{k+1}^3} + \frac{P'_k}{t_{k+1}^2} + \frac{P'_{k+1}}{t_{k+1}} \dots\dots\dots(7)$$

3 次式スプラインの曲率が近似的に連続となるためには、それぞれ 2 つのセグメントの接続点において、位置ベクトル、1 次導関数、2 次導関数ともに連続となればよい。2 次導関数が連続であるという条件式を一般化すると、

$$t_{k+2}P'_k + 2(t_{k+1} + t_{k+2})P'_{k+1} + t_{k+1}P'_{k+2} = \frac{3}{t_{k+1}t_{k+2}} \{t_{k+1}^2(P_{k+2} - P_{k+1}) + t_{k+2}^2(P_{k+1} - P_k)\} \dots\dots\dots(8)$$

また、これらの未知の接線ベクトルを算出するには、通過候補点の位置ベクトル *P_i* だけでなく、曲線の両端の接線ベクトル *P'₁,P'_n* の指定が必要となる。林道開始点と林道終点の曲率は 0 となることから、スプライン曲線は自由端条件下にあるものとする、

$$P'_1 + \frac{P'_2}{2} = \frac{3(P_2 - P_1)}{2t_2} \dots\dots\dots(9)$$

$$P'_{n-1} + 2P'_n = \frac{3(P_n - P_{n-1})}{t_n} \dots\dots\dots(10)$$

の 2 つの条件が加わり、スプライン曲線セグメントを表す式の係数 *A,B,C,D* が算出され、スプライン曲線が決定される。これによって求められた路線形は図-2.14 のようになり、接線ベクトル *P'(t)* より補間した点の法線の単位ベクトル *H(t)* を *hx(t),hy(t)* の平面位置ベクトルとすると、

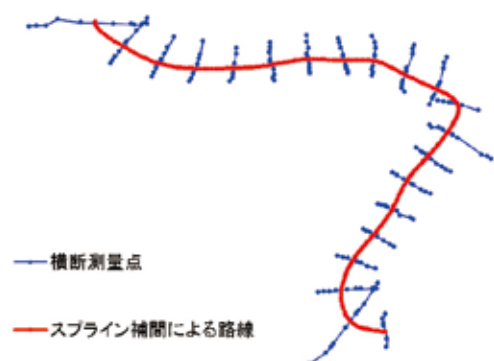


図-2.14 スプライン補間を得た路線形

$$hx(t) = \cos\left(A \tan\left(-\frac{x'(t)}{y'(t)}\right)\right) \dots\dots\dots(11)$$

$$hy(t) = \sin\left(A \tan\left(-\frac{x'(t)}{y'(t)}\right)\right) \dots\dots\dots(12)$$

となり 1 m 間隔で左右に 15 m までの各座標について、LiDAR データから共一次内挿法で標高を算出し、地山の横断面とした (図-2.15)。

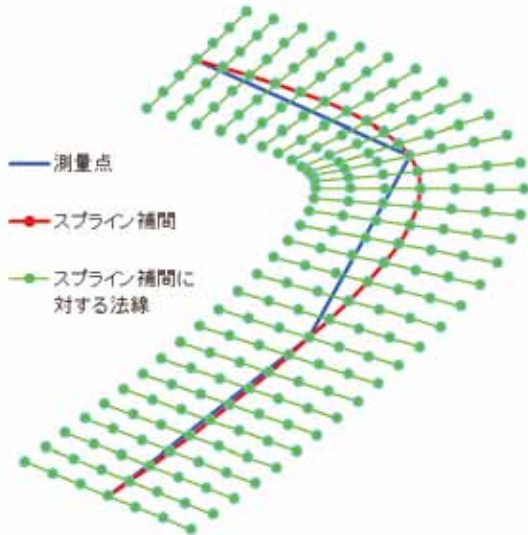


図-2.15 スプライン補間に対する法線の一部

2.4.5 土工量算出プログラム

以下の手順で土工量の算出を行った (図-2.16)。

- ① 林道通過点座標の決定
- ② 横断面図作成点の決定
- ③ 横断面図作成点の標高を入力し地表面を決定
- ④ 地表面の各区間の傾きを求める
- ⑤ 法線の中心に路面高を定める
- ⑥ 定めた点から幅員の距離で両側に離れた点を定める
- ⑦ 求めた2点より法面の平均勾配と地表面の各区間の式より左右の交点を求める。ただし地山と法面の傾きの関係から交点を得られなかった場合、法勾配2分の擁壁を入れて交点を求める (図-2.17)。
- ⑧ 地表面とこれらの点で囲まれた範囲区間の面積を算出し横断面積とする
- ⑨ 横断面積より平均断面法により土工量を算出する
これによって求められた土工量は表-2.5となった。

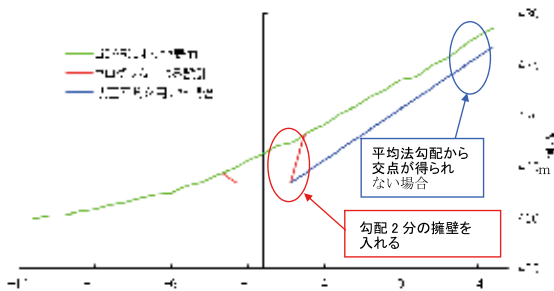


図-2.17 擁壁を入れる場合の例

2.4.6 土工量の比較

土工量の 10 m ごとの比較結果を図-2.18 に示す。

表-2.5 代案作成プログラムによる推定土工量

| 区間 | 切土量(m³) | 区間 | 切土量(m³) |
|------|---------|-------|---------|
| 0m- | 227.60 | 100m- | 140.33 |
| 10m- | 266.67 | 110m- | 135.60 |
| 20m- | 166.61 | 120m- | 70.73 |
| 30m- | 165.13 | 130m- | 155.31 |
| 40m- | 202.16 | 140m- | 192.36 |
| 50m- | 222.42 | 150m- | 97.96 |
| 60m- | 92.45 | 160m- | 130.40 |
| 70m- | 152.07 | 170m- | 113.27 |
| 80m- | 272.45 | 180m- | 248.05 |
| 90m- | 226.78 | 190m- | 363.15 |
| | | 合計 | 3641.51 |

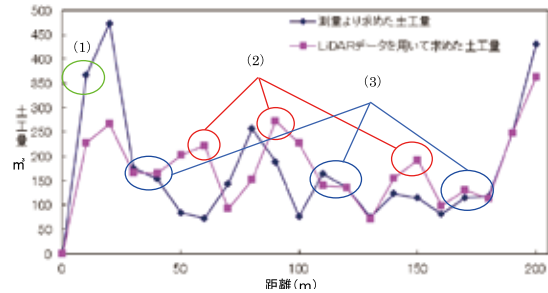


図-2.18 各区間で発生した土工量の比較

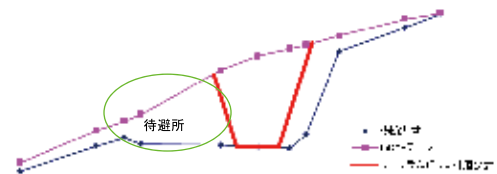


図-2.19 (1)の例 待避所

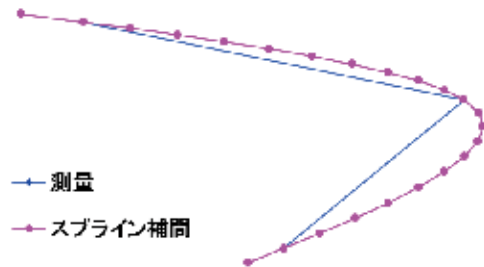


図-2.20 (2)の例 カーブの頂点

図より明らかなおお、区間によっては誤差が生じている。この原因として、曲線部での土工量推定の手法とプログラムによる設計の方法に誤差があると予想された。そこで各区間について検証する。

(1)の部分では図-2.19のように開設された林道には待避所があり、プログラムでは待避所を想定していないことから、この区間での土工量に大きなずれを生じることになった。また路肩部分と法上面の差も生じているため土工量が大きくなった。

(2)の部分では図-2.20のようにカーブの頂点に位置しているが、10 m おきの各点を直線補完された測量データによる土工量推定で平均断面法を用いたため、カーブのふくらの土工量が含まれていない。しかし、スプライン曲線によって補完された点は測量点を 10 分割しているため、平均断面法を用いてもほぼカーブの土工量が推定できるため、プログラムによる土工量推定のほうが大きくなる。

(3)は直線部にあたり、横断面もよく一致していたた

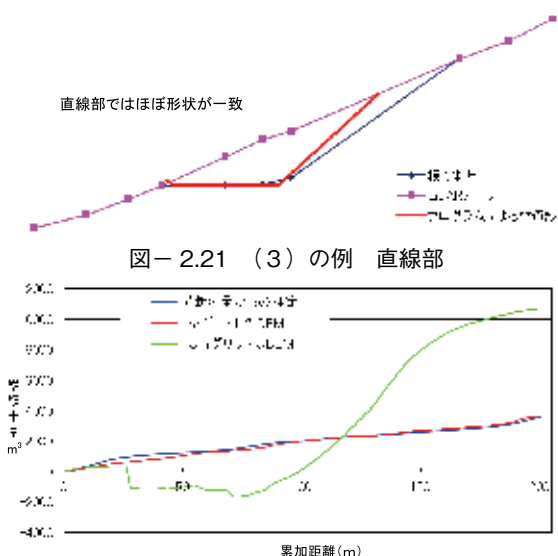


図-2.21 (3)の例 直線部

図-2.22 累積土量の比較

め図-2.21のように、土工量の差もあまりなかった。次に累積土量の比較を行った。結果は図-2.22のようになり、横断測量からの推定は3,546.48m³であるのに対し、1mグリッドDTMを用いた場合は3,641.51m³となり誤差は2.67%となった。これに対して、10mメッシュのDTMにする推定土工量は10,637.6m³となり、誤差も199%となる。以上のことからこのプログラムによって代替路線の検討が可能であると考えられる。

2.4.7 代替路線の検討

調査地の林道は地形順応型で設計されており、すべて切土で施工されているため、代替路線検討の一例として土工量・費用ともに小さくなると考えられる、0線設計法で設計を行い、土工量・費用の比較を行った。林道設計方法は、計画高を0線設計法で通過点の地山の標高とし、幅員は3.5m、法面の勾配を切土法面はLiDARデータによる設計と同様に各区間の平均勾配を用い、盛土法面は1:1とした(図-2.23)。このような条件で土工量を算出したところ、図-2.24のようになり切土量+662.35m³、盛土量-

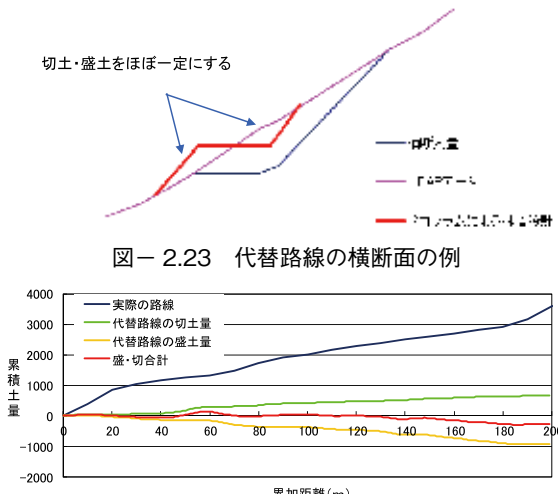


図-2.23 代替路線の横断面の例

図-2.24 代替路線の累積土量比較

944.38m³、累積土量-282.03m³となり、土工量はほぼ0m³となった。

2.4.8 費用の比較

算出された土工量から、開設費用の比較を行うために作業時間を求める。切土にショベル系掘削機、盛土にはブルドーザ、運搬にトラックを使用し各作業能力を以下のように決定した(日本林道協会2004)。

1) ショベル系掘削機の時間当たりの作業量

Q: 時間当たり作業量 (m³/h), q0: バケツ容積 (0.6m³), k: バケツ係数 (0.8), f: 土量換算係数 (普通土: 1/1.45), E: 作業効率 (0.8), Cm: サイクルタイム (普通土: 32秒) とし以下の式で求める。

$$Q = \frac{60q_0kfE}{C_m} \dots\dots\dots(13)$$

これより時間当たりの作業量は29.73m³/hとした。

2) ブルドーザ (11 t) の時間当たりの敷ならし作業量

Q: 時間当たりの敷ならし作業量 (m³/h), E: 作業効率 (0.6), D: 仕上がり厚さ (0.3 m) とし、

$$Q = 10E(11D+8) \dots\dots\dots(14)$$

より時間当たりの敷ならし作業量は67.8m³/hとした。また、ブルドーザ (11 t) の時間当たり締め固め作業量は、

Q: 時間当たり締め固め作業量 (m³/h), V: 締め固め速度 (3,500m/h), W: 1回の有効締め固め幅 (0.7m), N: 締め固め回数 (5回) とし、

$$Q = \frac{VWDE}{N} \dots\dots\dots(15)$$

より時間当たり締め固め作業量は88.2m³/hとした。

3) トラック時間当たりの運搬土量

Vt: 時間当たりの運搬土量 (m³/h), q: 一台あたりの積載土量 (m³), Cm: サイクルタイム, E: 作業効率 (0.9), W: 許容積載重量 (4 t), w: 地山の単位体積重量 (砂質土: 1.8t/m³), β: 運搬状況による係数 (4.8), L: 片道運搬距離 (2km), a: 積み込みその他作業時間 (バックホウ平積0.6Gとして: 11分)、

$$Vt = \frac{60}{C_m} qE \dots\dots\dots(16)$$

$$q = \frac{W}{w} \dots\dots\dots(17)$$

$$C_m = \beta L + a \dots\dots\dots(18)$$

より、時間当たりの運搬土量は5.7m³/hとした。

これより作業時間を算出し、実際の路線と代替路線の作業時間の比較を行うと表-2.6となり、実際の切土のみの施工に比べ、代替路線は土工量が小さく、作業時間も大きく減少することがわかる。

表-2.6 作業時間の比較

| | 各作業時間(時間) | | | | 合計 |
|-------|-----------|---------|--------|-------|--------|
| | 切土量(m³) | 盛土量(m³) | 切土 | 盛土 | |
| 実際の路線 | 3596.48 | 0 | 120.72 | 0.00 | 630.48 |
| 代替路線 | 662.35 | 944.38 | 22.23 | 24.64 | 49.07 |

また、費用を表-2.7~2.9の単価表より算出すると、表-2.10となった。表-2.10からも明らかとなり0線設計法によって設計した代替路線では費用は低くなった。このように代替路線の比較検討が容易にでき

表-2.7 ショベル系掘削機運転単価表

| ショベル系掘削機運転単価表 (一時間あたり) | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| | 単位 | 単価(円) | 金額(円) |
| 特殊運転手 | 0.18人 | 17300 | 3114 |
| 軽油 (排出ガス対策型) | 18L | 72 | 1296 |
| 機械損料 | 1h | 4300 | 4300 |
| 合計 | 1h | | 8710 |

表-2.8 ブルドーザ運転単価表

| ブルドーザ運転単価表 (一時間あたり) | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|
| | 単位 | 単価(円) | 金額(円) |
| 特殊運転手 | 0.19人 | 17300 | 3287 |
| 軽油 (排出ガス対策型) | 14L | 72 | 1008 |
| 機械損料 | 1h | 5230 | 5230 |
| 合計 | 1h | | 9525 |

表-2.9 トラック運転単価表

| トラック運転単価表 (一時間あたり) | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| | 単位 | 単価(円) | 金額(円) |
| 一般運転手 | 0.16人 | 14500 | 2320 |
| 軽油 | 6.8L | 72 | 490 |
| 機械損料 | 1h | 4300 | 4300 |
| タイヤ損耗費 | 1h | 196 | 196 |
| 合計 | 1h | | 4096 |

表-2.10 開設費用の比較 (単位:円)

| | 切土費用 | 盛土費用 | 運搬費用 | 合計 | 1mあたりの開設費用 |
|-------|-----------|---------|-----------|-----------|------------|
| 実際の路線 | 1,051,429 | 0 | 2,550,920 | 3,602,349 | 18,012 |
| 代替路線 | 193,640 | 234,661 | 198,525 | 626,826 | 3,134 |

るため、様々な代案を比較することができ、本プログラムによる代案検討の省力化は有効であると考えられる。

2.5 まとめ

本章ではLiDARデータから作成した1mメッシュのDTMを用いて標高を算出し、林道設計を行った結果、図-2.22、2.24などからも従来のDTMを使用した場合よりも地形の再現性が高く、代替路線の検討が可能であることが明らかとなり、LiDARデータを活用した手法による代案検討の省力化の有効性が認められた。

しかし、LiDARデータも林道上など上部が開けている37点での誤差が0.34mで、左右の林内など上部が樹幹に覆われている、もしくは下層植生が存在する53点では誤差が1.53mと大きな開きがある。そこで、第三章にてLiDARの生データから正確に地表面を推定する手法を確立し、より正確な地形情報の取得方法を検討する。

また、本章では代替路線の検討は計画高を手動で入力し、路線通過点も測量データを使用した。これらの決定を自動化する手法や、費用計算を自動化すれば、始点と終点を指定するだけで、土工量や費用を最小とする設計など、様々な条件で効率的な林道設計案を提示することが可能になり、これにより林道設計の大幅な省力化が期待できるため、第四章で自動化手法の検討を行う。

第3章 LiDARデータを用いた地表面推定手法の検討

3.1 目的

前章においてLiDARから作成した、DTMは林道路線設計に有効であることが示されたが、LiDARデータ自身の問題として林内における、地形再現性の低下があげられた。これは、主に林内に存在する樹木や植生が影響しており、DTMとして利用する際に、これらのノイズを取り除く必要がある。山岳林においての、ノイズフィルタリングは杉盛(2002)などによって研究されてきたが、精度は低いものであった。国外においては、Kraus et al.(1998)、Means et al.(2000)などによってDTMが作成されているが、地物が多く、地形の変化も大きい日本の森林には適応困難であった。そこで、本章では日本の山岳林に適したノイズフィルタリング手法の検討を行った。

3.2 フィルタリング手法

DSMを自動的にフィルタリングし、DTMを抽出する一般的な手法として最低点抽出法、曲面近似法、ローラ法などが存在する(政春2006、横田ら2006)。最低点抽出法は検査点を中心に、半径10m以内の円など一定の範囲から最低標高点を抽出し、すべての検査点を移動させながら順次、最低標高点を取得し、これをもとに地表面を作成する方法である(図-3.1)。曲面近似法は林冠部にあたる上層と地形にあたる下層のデータのうち、下層側の地形部に沿うように曲率を変化させて近似曲面を作成し、その曲面から許容範囲内にある点を抽出する手法である(図-3.2)。また、ローラ法は地形の最低点に沿って一定半径をもったローラを転がすように処理を行い、半径+許容値内にある

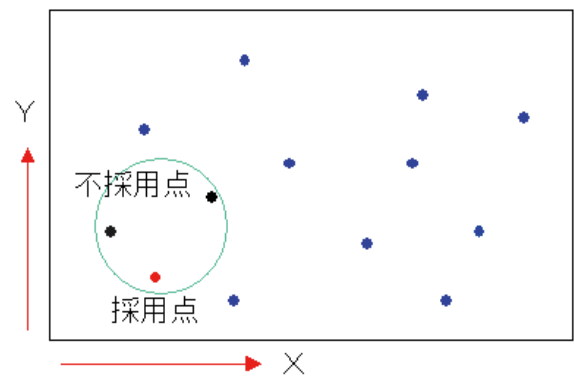


図-3.1 最低点抽出法

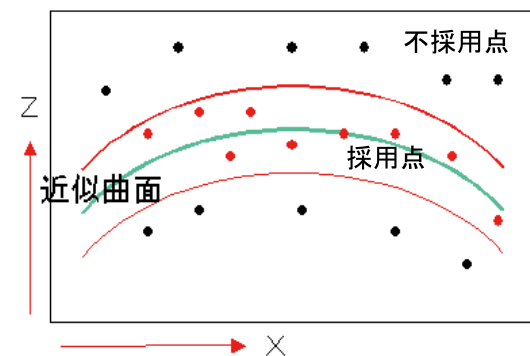


図-3.2 曲面近似法

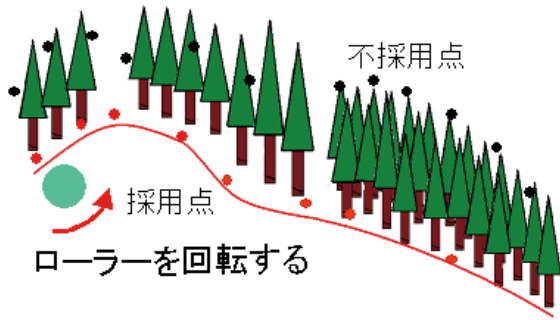


図-3.3 ローラ法概念図

点を抽出する方法である(図-3.3)。これらの手法では地形を曲面で抽出するため、小尾根や谷、路肩が削除される傾向がある。傾斜の方向によってはデータの偏りが生じる。

そこで、従来の曲面的なフィルタリング手法では削除されがちであった小尾根や路肩等の小さな凹凸を再現するため、対象点を直線的に結び、各直線間の交角に許容値を設けることで地表面を再現できると考え、交角法アルゴリズムを構築した(図-3.4)。本研究では交角法の精度検証を、船生演習林においてLiDAR計測してDTMを作成した朝日航洋で使われているローラ法と比較しながら行い、林道設計対象地のDTMを作成した。

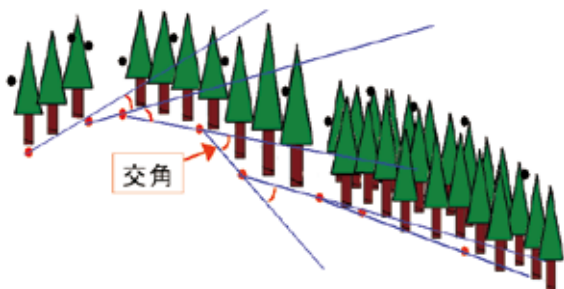


図-3.4 交角法概念図

3.2.1 ローラ法のフィルタリング手順

ローラ法と交角法を用いて地表面推定を行うための共通の前処理として、LiDAR データから処理を行う範囲を X 方向、Y 方向に一定幅に分割し、ラインごとにそれぞれ XZ、XY 平面を作成し、各平面上の散布点列に対して抽出処理を行う。具体的には X、Y が一定範囲となるデータの切り出し、切り出したデータのソーティングが行われる。これらの前処理終了後、各地表面抽出処理を行い、抽出点より X、Y 方向で重複点を除去することにより採用点を決定し、DTM を作成する(図-3.5)。

ローラ法のフィルタリング手順は、開始点より順次 2 点を通る円を発生させ、発生した円からの距離が半径 $R + \text{許容値}$ 内に収まる点を地表面として採用する。この処理を繰り返し行い、不要な点を除去し地表面の推定を行う(図-3.6)。

ローラ法の採用点は半径、ローラ幅、許容値により一意に定まり、半径・ローラ幅を増加させると大きな構造物、樹木等を除去でき、また、半径・ローラ幅を

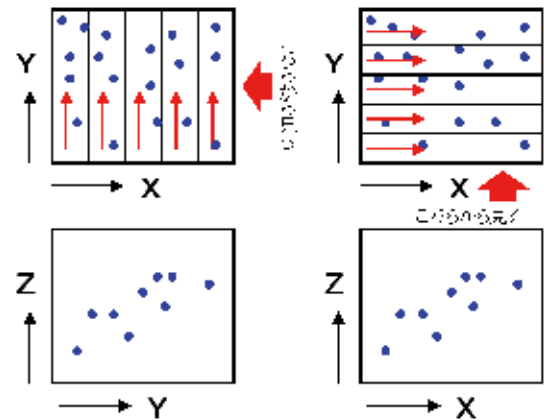


図-3.5 データ分割

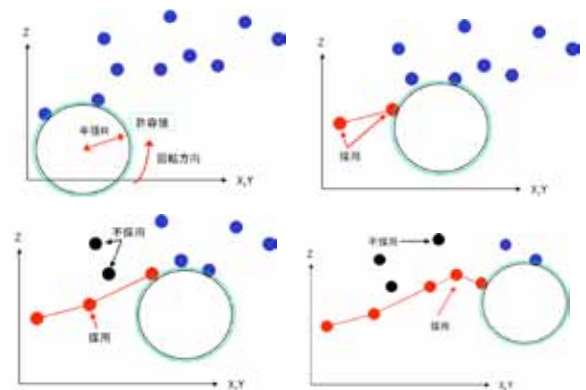


図-3.6 ローラ法の手順

縮小すると小さな地形変化に追従することができる。また、許容範囲を大きくすると急激な地形変化を捉えることが可能となり、点採用の許容範囲を小さくすると不要なデータの除去が可能となる。

3.2.2 交角法のフィルタリング手順

交角法では以下のアルゴリズムによって処理を行う。

- 1) 開始点 i と次点 $i+1$ を直線で結びこれを仮に地表を表わす線とする(以下、地表線)。
- 2) $i+2$ が地表線 $\pm a$ の範囲にあれば採用して、 $i+1$ 、 $i+2$ を通る線を新たな地表線として次点に移り、同様の手順を繰り返す。
- 3) また、範囲内になければ順次、交角が $\pm a$ 以内となる候補点を探索し新たな地表線を作成する。

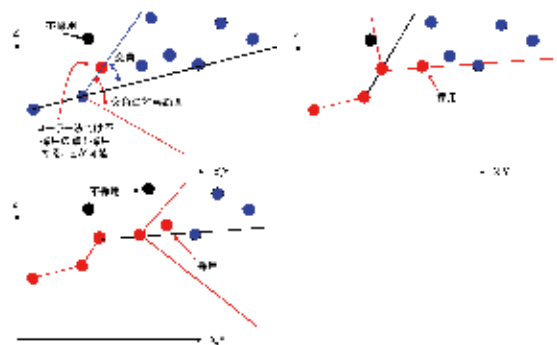


図-3.7 交角法の手順

交角の許容範囲を $+a$ 側にも取るため、ローラ法で除去されている点を採用することが可能となり、ローラ法で削除されがちな路肩や小尾根などを再現することができる (図-3.7)。

なお、今回使用した手法では林道法面などの急激な変化点を採用するため、交角の許容範囲外であっても近距離の点は採用することにした。具体的には検査点 $i+1$ と $i+2$ の二点のなす三角形の底辺と面積が一定値以下ならば採用する許容範囲を設けている (図-3.8)。本研究では林道法面を最大2分と想定して底辺0.2 m、高さ1.0m、面積0.1 m^2 とした。

交角法の抽出能力は、交角の許容範囲、データ分割幅、三角形の許容値により決定される。交角の許容範囲と三角形の許容値を大きくし、処理幅を小さくすると多くのデータを残すことが可能となり地形の識別能力が高くなるが、樹木、下層植生など地表面付近の測定データが残留し、ノイズを生じる。また交角の許容範囲と三角形の許容値を小さくし、データ分割幅を大きくすると採用されるデータ数が少なくなり、大きな構造物やノイズも除去できるが、微地形の識別能力が低くなることが予想される。

3.3 交角法によるDTMの作成

3.3.1 供試データの概要

研究の供試データとして、前章と同様の2003年に

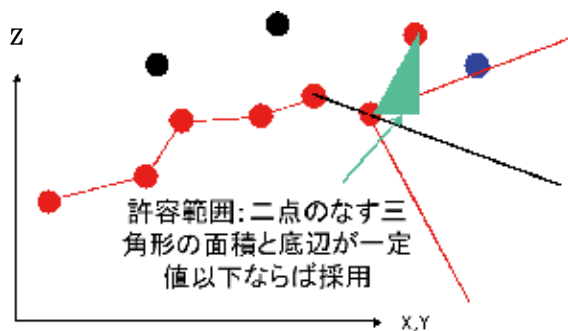


図-3.8 許容値の設定

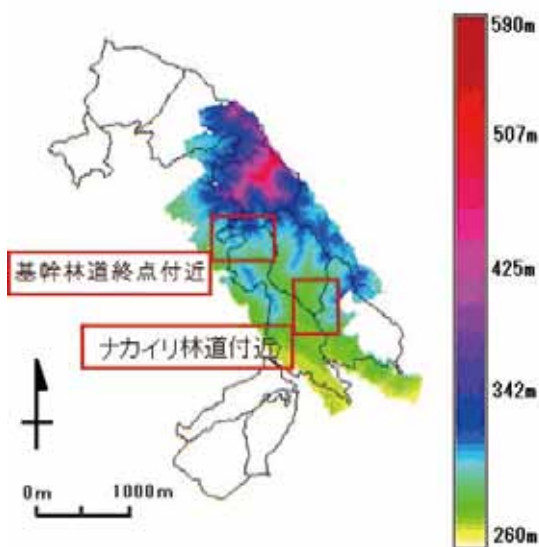


図-3.9 船生演習林 LiDAR データの範囲

測定された船生演習林の LiDAR の LP (Last Pulse) データを使用した。LiDAR 測定を行った全範囲は図-3.9の着色された区域である。供試区域は基幹林道(大天頂沢林道) 開設終点付近とナカイリ林道起点付近である。基幹林道終点付近は尾根付近に位置し、主な林分構成樹種はアカマツと広葉樹であったため、比較的レーザの到達率が高い区域である。対象地範囲は東西、南北それぞれ235m、205mの4.7haの区域であり、LiDARによる測定点数537,460点、点密度は11.16点/ m^2 であった(図-3.10、3.11)。ナカイリ林道起点付近は、沢沿いに位置する。主な樹種はスギとヒノキの若齢林であり、特にヒノキ林では林冠が閉鎖しており、林床にレーザが到達しにくい条件下である。本演習林におけるヒノキ林でのレーザの地表面到達率は2%~5%程度であることが報告されている(松英ら2006)。対象範囲は南北245m、東西200mの4.9ha、全点数397,086点、点密度8.01点/ m^2 である(図-3.12、3.13)。

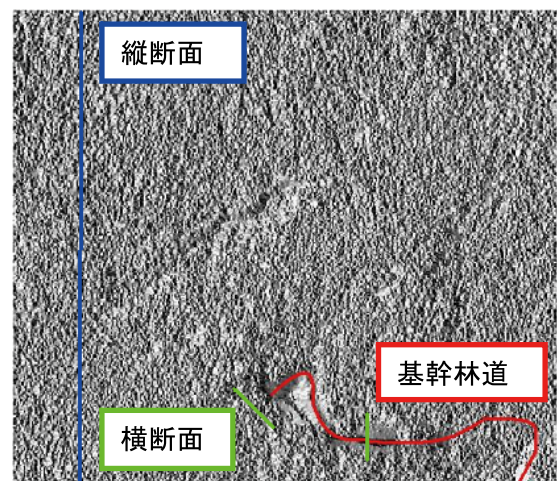


図-3.10 基幹林道終点付近のDSM



図-3.11 基幹林道終点付近の状況

3.3.2 基幹林道終点付近におけるパラメータの検討

基幹林道終点付近のデータを用いて地表面形状抽出を行ううえで、適正なパラメータを決定するため、交角法は交角の許容値とデータ分割幅を、ローラ法は半径とデータ分割幅を変化させながら処理を行った。

基幹林道終点付近の処理後に、各手法により地表面として採用された点数を表-3.1、3.2に示す。表より明らかなおり抽出条件の変化によって採用点数が大

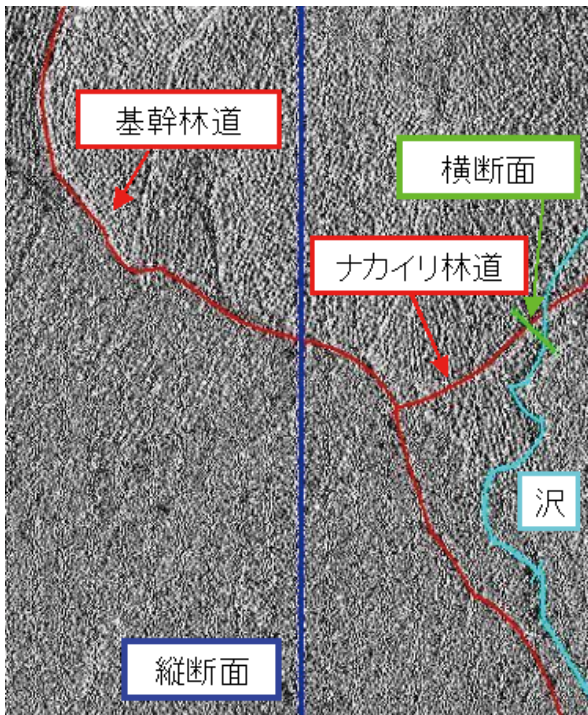


図- 3.12 ナカイリ林道の DSM



図- 3.13 ナカイリ林道の状況

表- 3.1 交角法処理後の地表面採用点数

| 分割幅/交角 | 30度 | 35度 | 40度 | 45度 | 50度 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.5m | 13993 | 31788 | 69732 | 71294 | 89835 |
| 1.0m | 9955 | 21902 | 51303 | 52361 | 73197 |
| 1.5m | 7802 | 16879 | 39975 | 40593 | 61263 |
| 2.0m | 6592 | 13388 | 31203 | 31239 | 51041 |
| 2.5m | 5204 | 10754 | 25594 | 26029 | 43687 |
| 3.0m | 4623 | 9189 | 21334 | 21606 | 38387 |
| 5.0m | 2863 | 5052 | 11749 | 11749 | 22998 |

表- 3.2 ローラ法処理後の地表面採用点数

| 分割幅/半径 | 5.0m | 10.0m | 12.5m | 15.0m | 17.5m | 20.0m | 30.0m |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.5m | 68788 | 65223 | 51062 | 43251 | 40246 | 37654 | 30496 |
| 1.0m | 43185 | 38023 | 29014 | 26505 | 24432 | 22623 | 17843 |
| 1.5m | 32304 | 26917 | 21153 | 19233 | 17686 | 16359 | 12755 |
| 2.0m | 30008 | 22868 | 20368 | 16415 | 14919 | 13636 | 10437 |
| 2.5m | 21708 | 16847 | 13837 | 12436 | 11387 | 10489 | 8128 |
| 3.0m | 18711 | 14274 | 11756 | 10648 | 9792 | 8920 | 6920 |
| 5.0m | 11973 | 8640 | 7313 | 6539 | 5957 | 5480 | 4265 |

大きく変化する。特に交角法では抽出点数の変化範囲が広く、パラメータの設定を適正に行うことにより、地形の再現性を高めることが出来ると判断された。そこで、GRASS GIS 6.2 を使い、処理後の採用点（ベクタデータ）をもとに、各点間をスプライン補間し、0.2m グリッドの DTM（ラスタデータ）を作成した。また、作成された DTM（ラスタデータ）を用いて陰影図を作成し、ノイズの除去状況や地形の再現性を目視により確認した。

分割幅を 2.0m に固定し、採用点列決定のための交角範囲を 25 度から 50 度まで変更した結果を図- 3.14a ~ f の陰影図に示す。次に適切なパラメータを決定するために、325 × 350 グリッドの林道付近のデータを抜き出し、各グリッドの周囲 5 × 5 グリッド内で、標高の最大値及び最小値を抽出し、その差分を求めた。差分が小さければ微地形再現性が低く、また大きすぎるとノイズが残っていると考えられる。差分の頻度分布を図- 3.15、表- 3.3 に示す。差分値が 25 度から 35 度までの範囲では実際の地形の勾配よりも交角の設定が小さいために、差分の分布も 0.6 m 以



図- 3.14a 交角 25°



図- 3.14b 交角 30°

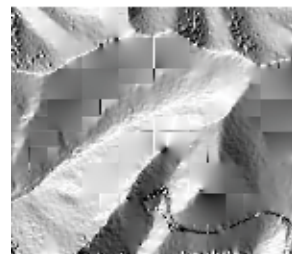


図- 3.14c 交角 35°

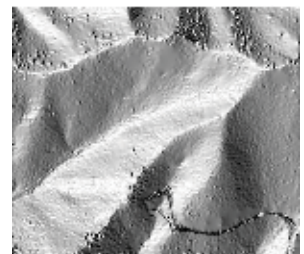


図- 3.14d 交角 40°

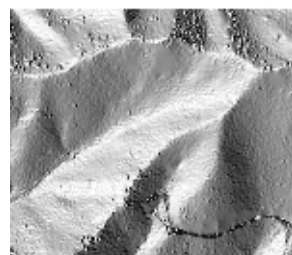


図- 3.14e 交角 45°



図- 3.14f 交角 50°

図- 3.14 交角法による処理結果 1（分割幅 2.0 m）

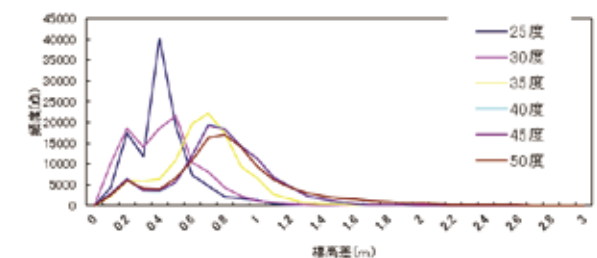


図- 3.15 交角変化時の差分頻度分布の比較

表-3.3 交角変化時の差分頻度分布の比較

| データ区間 | 25度 | 30度 | 35度 | 40度 | 45度 | 50度 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1m | 4220 | 10127 | 2286 | 2870 | 2817 | 2447 |
| 0.2m | 17392 | 18580 | 5955 | 6289 | 6387 | 5934 |
| 0.3m | 11775 | 14123 | 5895 | 3619 | 3634 | 4138 |
| 0.4m | 40270 | 18511 | 6313 | 3427 | 3468 | 3874 |
| 0.5m | 19135 | 21563 | 10938 | 5672 | 5642 | 6477 |
| 0.6m | 7317 | 10374 | 19661 | 11969 | 11937 | 10854 |
| 0.7m | 4674 | 7975 | 22233 | 19438 | 19348 | 16275 |
| 0.8m | 2127 | 4261 | 17382 | 18385 | 18411 | 17144 |
| 0.9m | 1581 | 2198 | 9335 | 14344 | 14319 | 14112 |
| 1.0m | 1234 | 1095 | 6571 | 11271 | 11309 | 9303 |
| 1.1m | 405 | 670 | 2688 | 6797 | 6789 | 6171 |
| 1.2m | 143 | 320 | 1523 | 4429 | 4432 | 4284 |
| 1.3m | 128 | 196 | 605 | 2277 | 2283 | 2904 |
| 1.4m | 143 | 73 | 284 | 1448 | 1444 | 2180 |
| 1.5m | 135 | 79 | 282 | 817 | 835 | 1732 |
| 1.6m | 143 | 113 | 231 | 294 | 291 | 1420 |
| 1.7m | 138 | 153 | 134 | 154 | 156 | 1100 |
| 1.8m | 137 | 234 | 115 | 118 | 116 | 855 |
| 1.9m | 157 | 91 | 99 | 83 | 82 | 627 |
| 2.0m | 149 | 81 | 34 | 38 | 39 | 462 |
| 2.1m | 157 | 82 | 14 | 12 | 12 | 293 |
| 2.2m | 143 | 75 | 11 | 0 | 0 | 226 |
| 2.3m | 197 | 75 | 12 | 0 | 0 | 159 |
| 2.4m | 26 | 73 | 15 | 0 | 0 | 112 |
| 2.5m | 6 | 59 | 23 | 0 | 0 | 127 |
| 2.6m | 5 | 34 | 20 | 0 | 0 | 76 |
| 2.7m | 13 | 33 | 22 | 0 | 0 | 63 |
| 2.8m | 16 | 32 | 31 | 0 | 0 | 46 |
| 2.9m | 14 | 34 | 22 | 0 | 0 | 48 |
| 3.0m | 27 | 31 | 22 | 0 | 0 | 46 |

下に集中しており微地形の再現性が低いことがうかがわれる。また、35度では差分1.3m以上の点はあまり

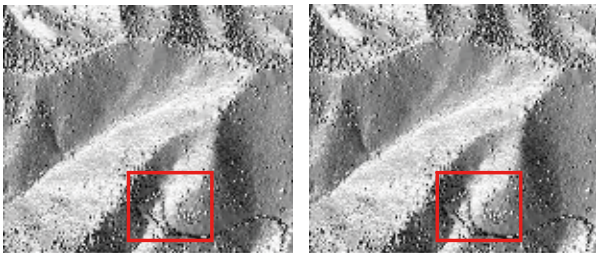


図-3.18a 分割幅 0.5 m

図-3.18b 分割幅 1.0 m



図-3.18c 分割幅 1.5 m

図-3.18d 分割幅 2.0 m



図-3.18e 分割幅 2.5 m

図-3.18f 分割幅 3.0 m



図-3.18g 分割幅 5.0 m

図-3.18 交角法による処理結果2 (交角45°)
(赤枠: 図-3.17の範囲)

存在していない。8分~1割程度の林道法面では、5×5グリッドの範囲で差分が1.41m~1.76mになるため、法面の再現性が低い。これは、陰影図の目視によっても確認できる。50度になると差分が2.0m以上と、8分の法面勾配の差分よりも大きくなる部分が多く残り、地形以外のノイズも採用されてしまっていると判断できる。このため、林道法面の再現性が高く、ノイズとなる点が存在しない(2.1m以上)40度か45度がこの場所には最も適していると考えられるが、今回は若干ではあるが採用点数の多い45度を最適とした。また、図の比較においてもノイズの少なさや、法面等の微地形の再現性から、45度が最適と判断できる。

次に交角は45度で固定し、データの分割幅を変化させてデータ分割幅の影響を検討する。図-3.18a~gに結果に基づく陰影図を示す。交角の検討と同様の方法で最大値と最小値の差分を算出し頻度分布図を作成した(図-3.16、表-3.4)。分割幅0.5mから1.5mまでは差分が2.0m以上のノイズとなる点が多く残っている。分割幅2.5m以上ではノイズはほぼ除去されているが、8分の法面を想定した際の差分1.76m前後の値である1.5m以上2.0m以下の法面と考えられる点が削除されすぎて再現性が低くなっている。また、分割幅を大きくするに従って、差分0.7mから0.8mの値が増加している。分割幅0.5mと5.0mで処理を行った陰影図に差分0.7m~0.8mの範囲を重ねた結果を図-3.17に示す。図から明らかなおとおり、分割幅が大きいと細かな地形の凹凸が平滑化されすぎている。特に、法面付近では0.7~0.8mの範囲が上部に

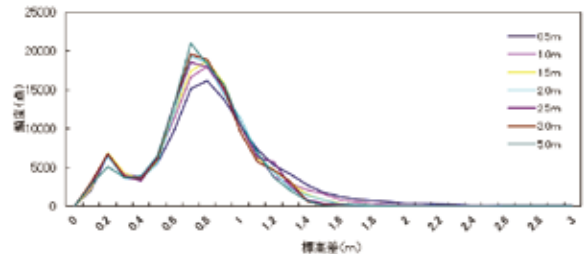


図-3.16 処理幅変化時の差分頻度分布の比較

表-3.4 処理幅変化時の差分頻度分布の比較

| データ区間 | 0.5m | 1.0m | 1.5m | 2.0m | 2.5m | 3.0m | 5.0m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1m | 2003 | 2285 | 2223 | 2817 | 2601 | 3003 | 2715 |
| 0.2m | 6593 | 6673 | 6861 | 6387 | 6697 | 6743 | 5061 |
| 0.3m | 4253 | 4136 | 4312 | 3634 | 3812 | 3902 | 3702 |
| 0.4m | 3558 | 3674 | 3361 | 3468 | 3250 | 3471 | 3852 |
| 0.5m | 5531 | 6197 | 5999 | 5642 | 6406 | 6063 | 6479 |
| 0.6m | 9692 | 11166 | 11972 | 11937 | 13103 | 13018 | 13034 |
| 0.7m | 15126 | 16615 | 17383 | 19348 | 18526 | 19612 | 20968 |
| 0.8m | 16147 | 18042 | 18705 | 18411 | 17928 | 18884 | 18272 |
| 0.9m | 13680 | 14739 | 15767 | 14319 | 15182 | 15064 | 15657 |
| 1.0m | 10419 | 10628 | 10262 | 11309 | 10295 | 9476 | 10550 |
| 1.1m | 7333 | 6618 | 6161 | 6789 | 6272 | 5735 | 6976 |
| 1.2m | 5295 | 3786 | 4660 | 4432 | 5693 | 4695 | 3682 |
| 1.3m | 4152 | 2866 | 3049 | 2283 | 2677 | 3123 | 2012 |
| 1.4m | 2692 | 2103 | 1518 | 1444 | 771 | 637 | 735 |
| 1.5m | 1756 | 1620 | 809 | 835 | 314 | 206 | 56 |
| 1.6m | 1250 | 762 | 320 | 291 | 140 | 84 | 0 |
| 1.7m | 919 | 493 | 152 | 156 | 52 | 35 | 0 |
| 1.8m | 686 | 319 | 74 | 116 | 32 | 0 | 0 |
| 1.9m | 527 | 200 | 50 | 82 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0m | 373 | 119 | 26 | 39 | 0 | 0 | 0 |
| 2.1m | 332 | 92 | 26 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2m | 230 | 76 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.3m | 180 | 61 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.4m | 110 | 55 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5m | 116 | 48 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.6m | 88 | 35 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.7m | 104 | 35 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8m | 54 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.9m | 62 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0m | 65 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

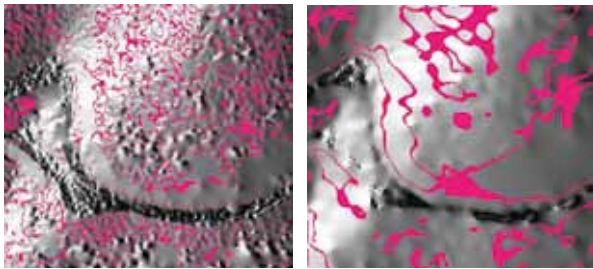


図-3.17 差分0.7~0.8mの範囲 (左:処理幅0.5m 右:処理幅5.0m) 位置し、法尻が平滑化されたことが見える。陰影図の比較からも分割幅2.0mがノイズを取り除きながらも、法面等の微地形をよく再現していると判断できる。従って、この場所では分割幅2.0mが最も適している。

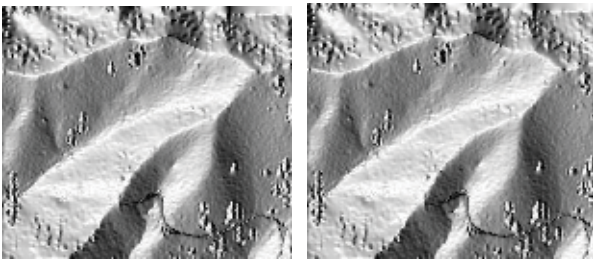


図-3.19a 半径5.0m 図-3.19b 半径10.0m

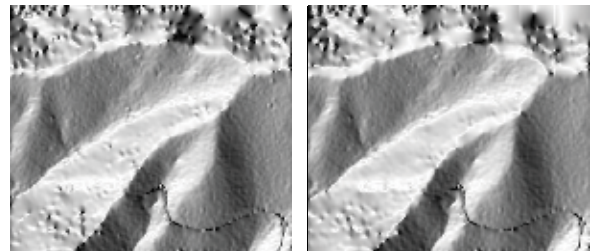


図-3.19c 半径12.5m 図-3.19d 半径15.0m

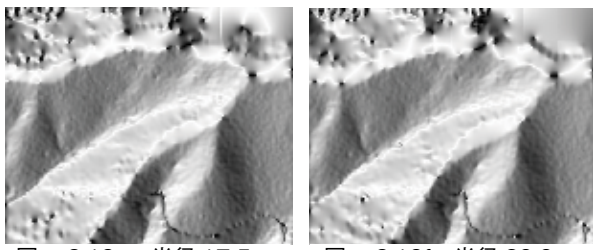


図-3.19e 半径17.5m 図-3.19f 半径20.0m

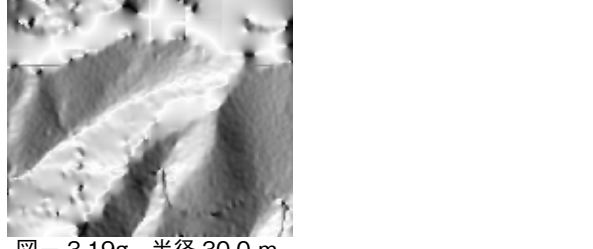


図-3.19g 半径30.0m

図-3.19 ローラ法による処理結果1 (分割幅2.0m)

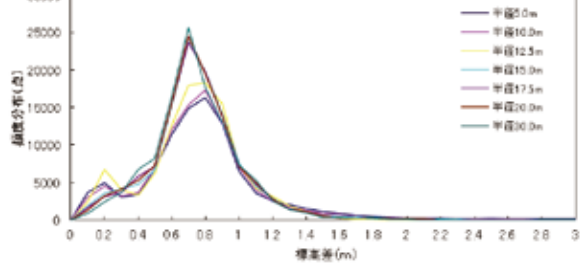


図-3.20 ローラ半径変化時の差分頻度分布の比較

表-3.5 ローラ半径変化時の差分頻度分布の比較

| データ区間 | 半径5.0m | 半径10.0m | 半径12.5m | 半径15.0m | 半径17.5m | 半径20.0m | 半径30.0m |
|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.0m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1m | 3670 | 3070 | 2412 | 1902 | 1726 | 1366 | 861 |
| 0.2m | 4929 | 4459 | 6779 | 3592 | 3180 | 3261 | 2385 |
| 0.3m | 3043 | 3243 | 4062 | 4177 | 3732 | 4107 | 3688 |
| 0.4m | 3418 | 3718 | 3305 | 4809 | 5830 | 5301 | 6727 |
| 0.5m | 6789 | 6810 | 6202 | 6681 | 7102 | 7183 | 8180 |
| 0.6m | 11316 | 12016 | 12537 | 15241 | 15387 | 15390 | 16335 |
| 0.7m | 14857 | 15357 | 17954 | 23816 | 23732 | 24518 | 25727 |
| 0.8m | 16276 | 17276 | 18316 | 19716 | 19765 | 19469 | 17676 |
| 0.9m | 12881 | 12991 | 15474 | 14175 | 13843 | 13923 | 13100 |
| 1.0m | 6463 | 7063 | 7278 | 7525 | 7297 | 7105 | 7296 |
| 1.1m | 3622 | 4022 | 4216 | 4530 | 4740 | 4905 | 5315 |
| 1.2m | 2505 | 2550 | 3176 | 2842 | 2715 | 2821 | 2533 |
| 1.3m | 2084 | 1802 | 1863 | 1549 | 1557 | 1456 | 1454 |
| 1.4m | 1496 | 1296 | 1144 | 1039 | 1173 | 1141 | 939 |
| 1.5m | 1122 | 922 | 561 | 594 | 606 | 517 | 374 |
| 1.6m | 870 | 670 | 230 | 473 | 295 | 257 | 367 |
| 1.7m | 650 | 350 | 102 | 317 | 244 | 231 | 261 |
| 1.8m | 443 | 257 | 53 | 181 | 223 | 227 | 313 |
| 1.9m | 362 | 225 | 25 | 145 | 230 | 203 | 104 |
| 2.0m | 295 | 209 | 20 | 131 | 168 | 164 | 87 |
| 2.1m | 252 | 154 | 21 | 98 | 179 | 181 | 29 |
| 2.2m | 246 | 113 | 17 | 106 | 27 | 25 | 0 |
| 2.3m | 213 | 98 | 15 | 77 | 0 | 0 | 0 |
| 2.4m | 213 | 87 | 5 | 29 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5m | 227 | 53 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 2.6m | 209 | 51 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 2.7m | 199 | 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8m | 188 | 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2.9m | 168 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0m | 127 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

同様にローラ法の最適条件の検討を行った。分割幅を2.0m、許容範囲を0.2mで固定し、ローラ法の半径を変化させた結果を図-3.19a~gに示す。ローラ半径5.0m、10.0mでは樹木による大きなノイズが残りに、17.5m以上では路面や斜面上部などが過度に平準化する。差分の頻度分布は図-3.20、表-3.5となり、半径5.0mや10.0mでは差分2.1m以上のノイズが残りに、

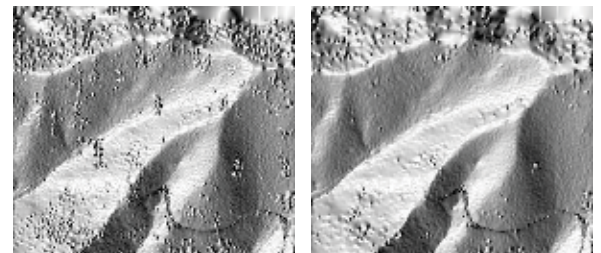


図-3.21a 分割幅0.5m 図-3.21b 分割幅1.0m

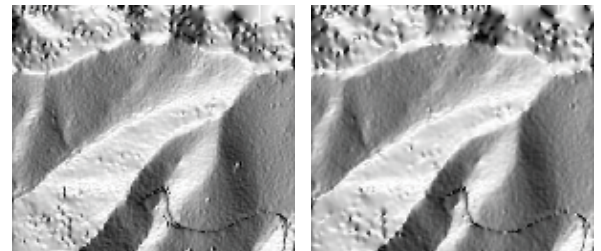


図-3.21c 分割幅1.5m 図-3.21d 分割幅2.0m

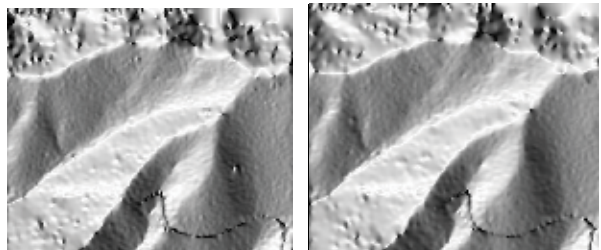


図-3.21e 分割幅2.5m 図-3.21f 分割幅3.0m

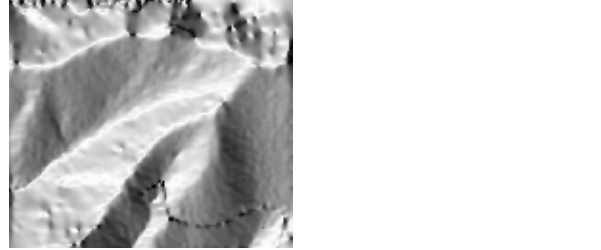


図-3.21g 分割幅5.0m

図-3.21 ローラ法による処理結果2 (半径12.5m)

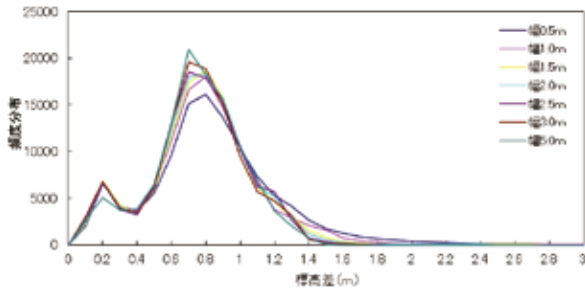


図- 3.22 分割幅変更時の頻度分布

表- 3.6 分割幅変更時の頻度分布

| データ区間 | 幅0.5m | 幅1.0m | 幅1.5m | 幅2.0m | 幅2.5m | 幅3.0m | 幅5.0m |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1m | 2003 | 2285 | 2223 | 2412 | 2601 | 3003 | 2715 |
| 0.2m | 6593 | 6673 | 6861 | 6779 | 6697 | 6743 | 5061 |
| 0.3m | 4253 | 4136 | 4312 | 4062 | 3812 | 3902 | 3702 |
| 0.4m | 3558 | 3674 | 3361 | 3305 | 3250 | 3471 | 3852 |
| 0.5m | 5531 | 6197 | 5999 | 6202 | 6406 | 6063 | 6479 |
| 0.6m | 9692 | 11166 | 11972 | 12537 | 13103 | 13018 | 13034 |
| 0.7m | 15126 | 16615 | 17383 | 17954 | 18526 | 19612 | 20968 |
| 0.8m | 16147 | 18042 | 18705 | 18316 | 17928 | 18884 | 18272 |
| 0.9m | 13680 | 14739 | 15767 | 15474 | 15182 | 15064 | 15657 |
| 1.0m | 10419 | 10628 | 10262 | 10278 | 10295 | 9476 | 10550 |
| 1.1m | 7333 | 6618 | 6161 | 6216 | 6272 | 5735 | 6976 |
| 1.2m | 5295 | 3786 | 4660 | 5176 | 5693 | 4695 | 3682 |
| 1.3m | 4152 | 2866 | 3049 | 2863 | 2677 | 3123 | 2012 |
| 1.4m | 2692 | 2103 | 1518 | 1144 | 771 | 637 | 735 |
| 1.5m | 1756 | 1620 | 809 | 561 | 314 | 206 | 56 |
| 1.6m | 1250 | 762 | 320 | 230 | 140 | 84 | 0 |
| 1.7m | 919 | 493 | 152 | 102 | 52 | 35 | 0 |
| 1.8m | 686 | 319 | 74 | 53 | 32 | 0 | 0 |
| 1.9m | 527 | 200 | 50 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0m | 373 | 119 | 26 | 20 | 0 | 0 | 0 |
| 2.1m | 332 | 92 | 26 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 2.2m | 230 | 76 | 8 | 17 | 0 | 0 | 0 |
| 2.3m | 180 | 61 | 10 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| 2.4m | 110 | 55 | 10 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 2.5m | 116 | 48 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.6m | 88 | 35 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.7m | 104 | 35 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.8m | 54 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.9m | 62 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0m | 65 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

半径 15.0 m 以上になると、平滑化が進み 0.7 ~ 0.8m の値が増加する。従って、この場所ではローラ半径 12.5 m が最も適していると判断した。

次に半径を 12.5 m と固定し、データ分割幅を変化させて適正分割幅を求めた (図- 3.21a ~ f)。差分は図- 3.22、表- 3.6 となり、分割幅 0.5 ~ 1.5 m では差分 2.1 m 以上のノイズが多く残り、分割幅 2.5 m 以上では法面を再現していると考えられる差分 1.5 m 以上の点が減少している。また、陰影図からも分割幅 1.5 m 以下ではノイズが残り、分割幅 2.5 m 以上では平滑化が進み、路肩や幅員の再現性が低くなっていることが見て取れる。従って、分割幅 2.0 m が最も適していると判断できた。

最も適していると考えられた交角 45 度、分割幅 2m の交角法では地表面として 31,239 点 (抽出率 5.84%、0.66 点/m²) が採用され (表- 3.1)、半径 12.5m、分割幅 2.0m のローラ法では 20,868 点 (抽出率 3.90%、0.42 点/m²) が地表面として採用された (表- 3.2)。交角法、ローラ法ともに最適値と判断した DTM から林道付近のデータを抜き出し、傾斜の分布を求めた結果は図- 3.23、3.24 となった。図からも明らかなおり、交角法では 10° 以下の林道の部分と 30° 以上の法面と見られる部分の境界が明確になっており、この付近の林道幅員 4.0 m が再現されているのに対し、ローラ

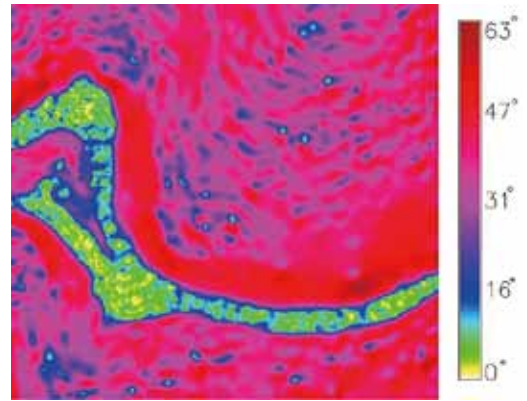


図- 3.23 交角法傾斜分布

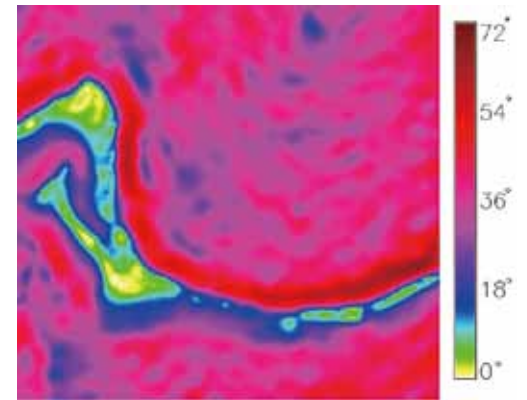


図- 3.24 ローラ法傾斜分布

ラ法では路肩から路面にかけて平滑化されてしまい、路肩が明確にならず、幅員も再現されていない。最適と判断できる陰影図 (図- 3.18d、3.21d) と士で比較すると、交角法の方がノイズの削減が出来ていることから、地形抽出、ノイズ削減ともに交角法が効果的であると判断できる。また、抽出点数が、30,000 点程度となる図- 3.18e、3.21a の比較からでも明らかであり、交角法ではノイズが除去されているのに対し、ローラ法では樹木等の残存ノイズが認められる。

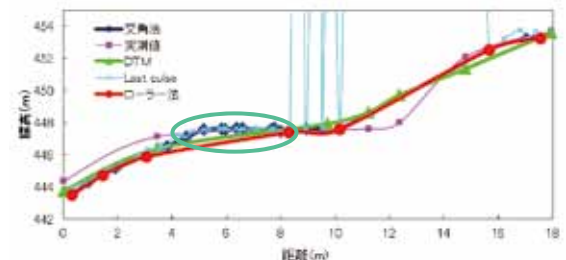


図- 3.25 林道の横断面図

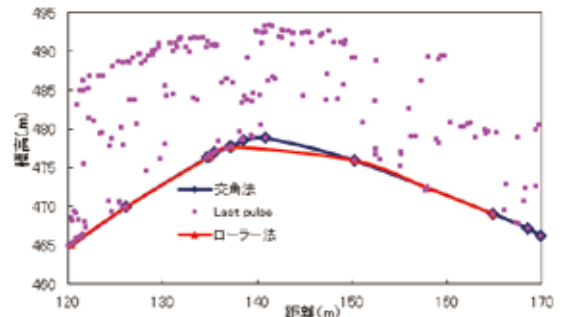


図- 3.26 縦断面図

次に、次章の林道設計で活用する基幹林道終点付近の地表面抽出状況の比較を行った。比較にあたり交角法、ローラ法、実測値、LP、メーカーが手動+自動フィルタリングで作成したDTMより横断面と縦断面を作成した(図-3.25、3.26)。特に横断面では交角法による処理がローラ法で削除された路肩形状を再現することなど、当初の目的を達成することができたと考えられる。縦断面においても、両者ともノイズを取り除けているが、交角法は斜面上部や細かな凹凸部の点を比較的多く残すことに成功していることが見て取れる。

実際に林道設計でGISを活用することを想定すると、作成されたベクタポイントをラスターデータに変換して使用することも多く、また、本研究でもラスター形式のデータ使用を前提にプログラムの開発を進めている。そこで、交角法、ローラ法で処理を行った後、1mグリッド、0.2mグリッドのDTMに加工し、DTMより作成された縦断面図、横断面図の精度検証をおこなった。

縦断面図(図-3.27)は交角法で交角を変更しながら処理を行った1mグリッドDTMである。Y軸は交角25度の線を基準として各パラメータで処理を行った標高に+10mずつのオフセットを行って表示した。パラメータ決定のときに見られた傾向がここでもほぼ同様に現れている。すなわち、交角が35度以下のものは実際の地形の勾配よりも交角の設定が小さいために地形が再現できておらず、50度ではノイズを除去しきれていない。

ローラ法で半径を変更しながら処理を行ったDTMから作成した縦断面図(図-3.28)では、ノイズはほぼ取り除かれているが、半径を大きくするにしたがって凸部の採用点が減少し、地表面の円滑化が進むことが明らかである。

横断面で実測値と交角法、ローラ法で作成した1m、0.2mグリッドDTM、メーカーが作成の1mグリッドDTMの比較を図-3.29、3.30に示す。各DTMの標高は実測値と同様、各座標の標高をもとに共一次内挿法によって算出した。林道開設前にLiDAR測定を行

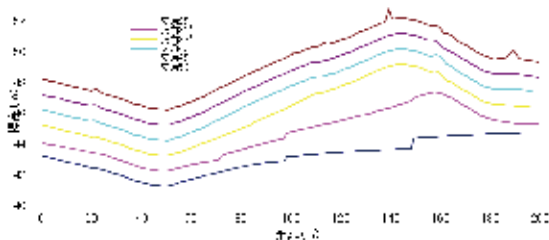


図-3.27 交角法による縦断面

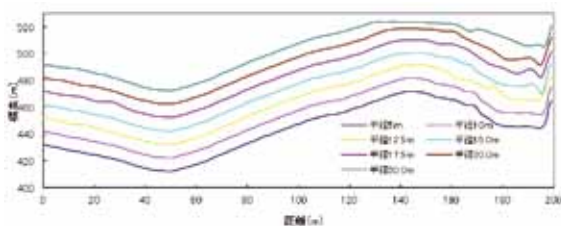


図-3.28 ローラ法による縦断面

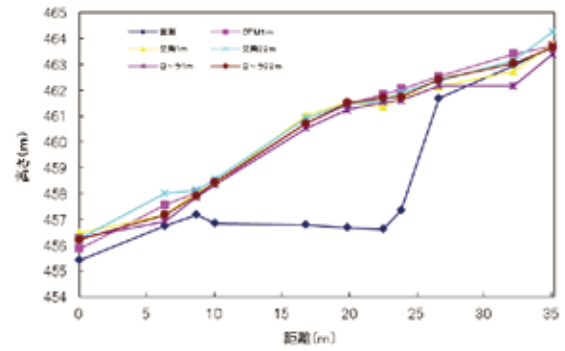


図-3.29 開設前横断面

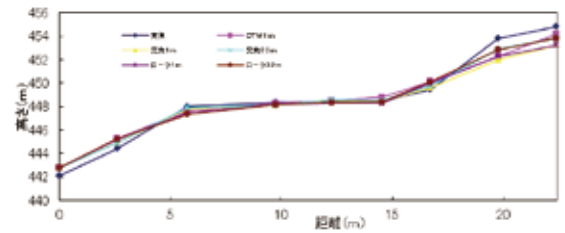


図-3.30 開設後横断面

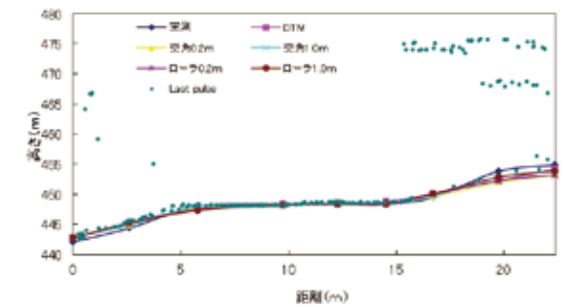


図-3.31 開設後横断面+LP

った図-3.29の結果からも明らかとおり、地山を正確に再現できており、土工量推定での活用が期待できる。林道開設後に測定した図-3.30では路面上の点では、ほぼ再現できていたが、法面上部では実測値と差が生じていた。これは、同じ横断面にLast Pulseを加えた図-3.31で見られるように、法面上部では樹木の影響からLPがあまり地表面に到達していないため、推定の差が生じたと考えられる。また、グリッドサイズ、実測、自動、手動による明確な違いは現れていない。

トータルステーションによる実測値標高と実測値の座標点においてDTMより共一次内挿法で算出した標高の平均二乗誤差による比較を行った。分析対象点は、開空部に当たる林道の路面、路肩(20点)と、測定後に開設された横断面の地山から削られた部分を除く全点(127点)とした。開空部ではレーザーの地表面到達率が高いため手法の違いによる差はあまり認められなかったが、交角法はメーカー作成のDTMと同等の精度となった(表-3.7)。

全点における誤差の頻度分布(図-3.32)より明らかとおり、ローラ法では実測値に比べ、過小な値が

表-3.7 開空部での平均二乗誤差比較

| DTM1m | 交角 1m | 交角 0.2m | ローラ法 1m | ローラ法 0.2m |
|-------|-------|---------|---------|-----------|
| 0.33m | 0.34m | 0.32m | 0.43m | 0.41m |

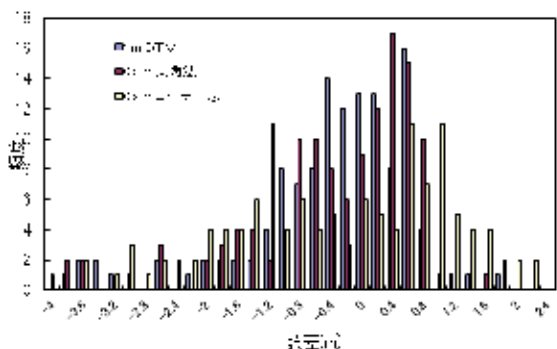


図-3.32 全点における平均二乗誤差の頻度分布

多い傾向が認められたのに対し、交角法ではプラスの値が多くなる傾向が認められた。これは交角法により細かい凹凸、特に凸部の採用点がローラ法より多く抽出されたことによると考える。また、全体の平均二乗誤差は表-3.8に示すとおり、交角法を用いることによ

表-3.8 全点での平均二乗誤差比較

| DTM1m | 交角 1m | 交角 0.2m | ローラ法 1m | ローラ法 0.2m |
|-------|-------|---------|---------|-----------|
| 1.35m | 1.38m | 0.91m | 1.39m | 1.03m |

り採用点数が増加するため、0.2 mにグリッドサイズを変更することによって、1mグリッドに比べ精度が格段に向上した。前章において、1 mグリッドDTMを土工量推定値に用いた際の、実測値との誤差が2.67%で、十分な精度を持つことが明らかとなっていることから、0.2mグリッドでさらに精度の高い推定が可能となったと考えられる。

3.3.3 ナカイリ林道起点付近におけるパラメータの検討

ナカイリ林道周辺地域を対象に前述の方法で、最適条件の検討を行った。各条件での抽出点数を表-3.9、3.10に示す。

表-3.9 交角法処理後の抽出地表面点数

| 分割幅/交角 | 30度 | 35度 | 40度 | 45度 | 50度 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.5m | 60891 | 70681 | 75792 | 75792 | 70278 |
| 1.0m | 48933 | 57356 | 67406 | 67466 | 71641 |
| 1.5m | 41421 | 48376 | 57697 | 57697 | 67112 |
| 2.0m | 35872 | 42056 | 50106 | 50106 | 62213 |
| 2.5m | 31491 | 36998 | 44746 | 44746 | 56922 |
| 3.0m | 28469 | 33198 | 40047 | 40047 | 52013 |
| 5.0m | 19339 | 22303 | 26829 | 26829 | 36419 |

表-3.10 ローラ法処理後の抽出地表面点数

| 分割幅/半径 | 5.0m | 10.0m | 12.5m | 15.0m | 17.5m | 20.0m | 30.0m |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.5m | 62303 | 50697 | 36675 | 33104 | 30133 | 27744 | 21195 |
| 1.0m | 35876 | 28112 | 20988 | 18679 | 16917 | 15389 | 11541 |
| 1.5m | 26062 | 19905 | 14979 | 13332 | 12022 | 10886 | 8136 |
| 2.0m | 24383 | 15421 | 13236 | 11637 | 10455 | 9462 | 7003 |
| 2.5m | 17105 | 12536 | 9666 | 8562 | 7712 | 7047 | 5269 |
| 3.0m | 14682 | 10550 | 8195 | 7245 | 6585 | 5984 | 4425 |
| 5.0m | 9564 | 6590 | 5291 | 4680 | 4205 | 3815 | 2802 |

抽出点数変化は基幹林道終点付近での結果とほぼ同様の傾向を示した。図-3.33a~fの交角を変更した陰影図で見ると、基幹林道終点付近より小さい交角40度以上でノイズが多く見られた。この原因は付近の地形勾配が林道終点付近に比べ比較的ゆるやかなためだと考えられ、35度が最適値と見て取れた。図-3.34a~gに示した分割幅を変更した陰影図では2.0 m以下ではノイズが多く、3.0 m以上では林道周辺の点が削除されすぎてしまい再現性が低くなっている。

従ってこの区域では分割幅は2.5 mを最適値とした。しかし、この区域の林道の上部に存在する無間伐のヒノキの若齢林では、レーザの地表面到達率が極端に低く、どの抽出条件下においても地形の再現性が低くなっていた。

同地域を対象とし、半径を段階的に変更したローラ法による処理結果を図-3.35a~gに示す。結果から明らかなどおり、半径5.0 mではノイズが残る。一方、12.5 m以上では地形の一部に過大な平滑化が認められるため、10.0 mが最適値と判断できる。図-3.36a~gに示した分割幅の比較では林道終点付近の場合と同様、2.0 mが最適値となった。ローラ法による処理結果でも林道上部のヒノキ林の地形抽出は不可能であった。

抽出された採用点を基に交角法、ローラ法によって1 mグリッドDTMを作成し、縦断面図、横断面図(図-3.37、3.38)の比較を行った。図-3.12に処理前のLPデータで比較した縦断面、横断面の位置、林道、沢の位置を示してある。

縦断面の比較では、ヒノキ林に当たる図右側の部分で交角法、ローラ法ともに、凹凸が存在している。現地の地形は凹凸の少ない勾配がほぼ一定したヒノキ林であるため、ノイズが取り除かれておらず、メーカー作成のDTMより地形再現性が低くなっている。これ

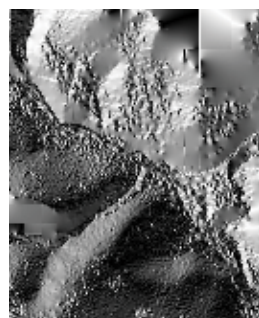


図-3.33a 交角 25°

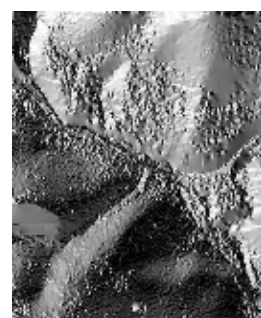


図-3.33b 交角 30°

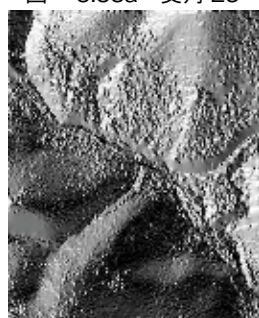


図-3.33c 交角 35°



図-3.33d 交角 40°

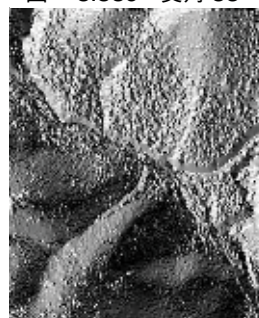


図-3.33e 交角 45°



図-3.33f 交角 50°

図-3.33 交角法による処理結果3 (分割幅 2.5 m)

はレーザの地上到達率が低く、地形抽出に人為的な推定が不可欠であったことによると考えられる。一方、横断面図では、沢や林道などの開空部で抽出点と実測値がほぼ一致するものの、鬱閉したヒノキ林部分では、全ての手法が実測値より過大となり、レーザが地表面に到達していないことがうかがわれた。

3.4 まとめ

地表面推定手法として交角法を提案し、LiDAR データによる処理結果をもとに最適処理条件を検討した。今回提案した交角法による処理では、ローラ法による処理に比べ、路肩や小尾根等の再現性が高くなり、地表面の小さな凹凸も再現できることが確認された。またこの手法の精度は、メーカーがコンピュータによる自動抽出の後、手作業でフィルタリングを行って作成している DTM と等しく、自動的に高精度な地表面高度、DTM を作成する手法が開発出来たと考え

る。従って、この手法を林道設計に応用することにより、地形形状の把握から代案作成、路線設計、土工量推定、コスト計算までを高い精度を保ちながら、自動化できる可能性が高まったと考えられる。

しかし、ナカイリ林道付近のヒノキ林の例に見られるとおり、鬱閉した林分では、レーザの到達率が低く、地形が十分把握できないことが明らかにされた。このような部分に対し、自動フィルタリング処理を実行すると、地形の再現性の低下につながる事が明らかとなった。また、LiDAR の特性として、計測経路と計測対象斜面の傾斜の方向によってはデータの偏りが生じ、季節や森林を構成する樹木によってはレーザが遮られ地上まで数%しか到達しないこともあり、抽出自体が困難となる場合もある。したがって、今後の課題として地形や地表の条件によって、複数の手法を組み合わせる方法の検討、最適抽出条件の自動設定や測定地形に合わせた計測経路、計測時季等の



図- 3.34a 分割幅 0.5 m



図- 3.34b 分割幅 1.0 m



図- 3.34c 分割幅 1.5 m



図- 3.34d 分割幅 2.0 m



図- 3.34e 分割幅 2.5 m



図- 3.34f 分割幅 3.0 m

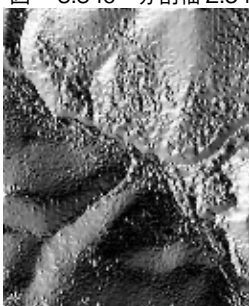


図- 3.34g 分割幅 5.0 m

図- 3.34 交角法による処理結果 4 (交角 35°)

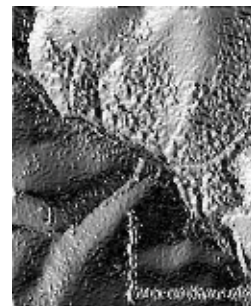


図- 3.35a 半径 5.0 m

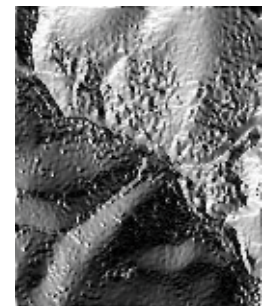


図- 3.35b 半径 10.0 m

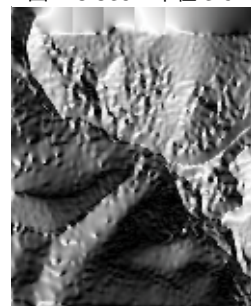


図- 3.35c 半径 12.5 m



図- 3.35d 半径 15.0 m



図- 3.35e 半径 17.5 m

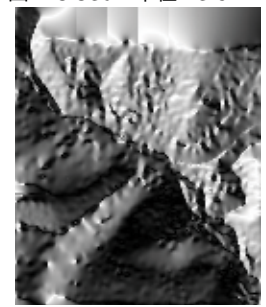


図- 3.35f 半径 20.0 m

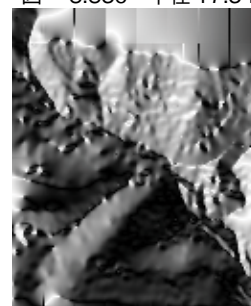


図- 3.35g 半径 30.0 m

図- 3.35 ローラ法による処理結果 3 (分割幅 2.0 m)



図- 3.36a 分割幅 0.5 m

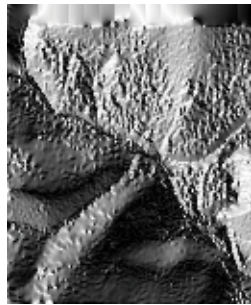


図- 3.36b 分割幅 1.0 m

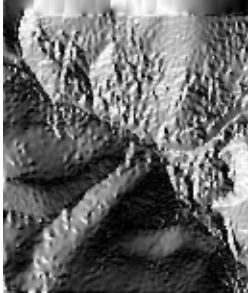


図- 3.36c 分割幅 1.5 m

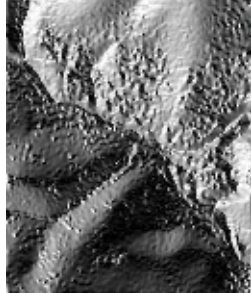


図- 3.36d 分割幅 2.0 m

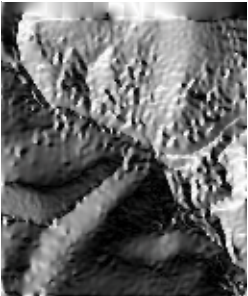


図- 3.36e 分割幅 2.5 m

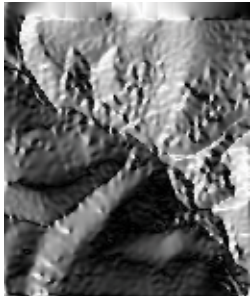


図- 3.36f 分割幅 3.0 m

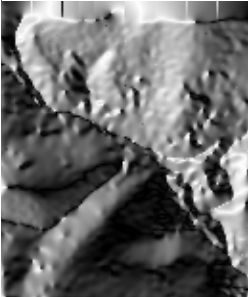


図- 3.36g 分割幅 5.0 m

図- 3.36 ローラ法による処理結果 4 (半径 12.5 m)

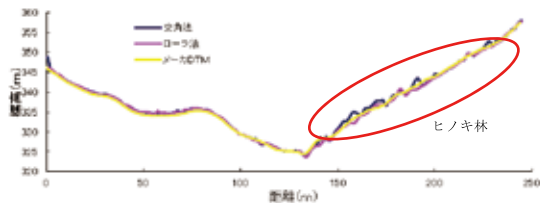


図- 3.37 縦断面での比較

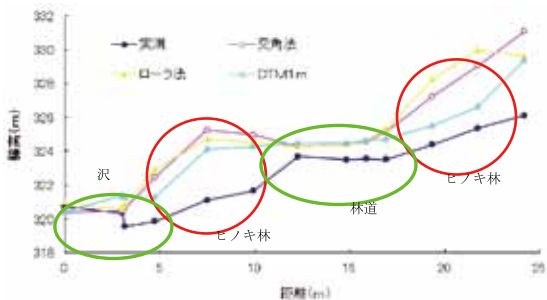


図- 3.38 横断面での比較

検討などが挙げられる。

第四章 LiDAR データを活用した林道設計自動化手法の検討

4.1 目的

林道の設計では、一般道路に比べ開設コストによる制約が大きいことから、開設コストを低く抑えるための工夫として、構造物を少なくするための路線開設位置、土工量を最小化する線形の採用などの手法が必要になる。また、法面の崩壊や路面侵食による森林への土砂流出などによる森林環境へ与える影響を抑え、維持補修費用を削減するためにも、土工量を最小化する開設手法の導入が必要となる。そのため、従来から林道設計を自動化し、適切な設計案を比較する手法が必要とされている。

第二章において、LiDAR データを基にした DTM を用いた、路線設計の可能性を提示したが、路線通過位置は手動で決定しており、必ずしも適性であったとは言えない。そこで本章では、2 点間を接続する際に、開設費を最少とする路線探索を行う、自動路線設計手法の開発を行った。

4.2 調査地の概要

林道設計対象地は、地表面推定の検証に用いた基幹林道既開設地点から北にのびる開設部分であり (図- 4.1)、地形や樹木等の条件は地形抽出のための供試区域とほぼ同じである。したがって、交角法により高精度の DTM が作成できると考え、1 m グリッド DTM を作成した (図- 4.2)。対象区域は南北 500 m、東西 300 m の 15ha の区域であり、LiDAR による全測点数が 1,326,084 点、点密度 8.84 点 /m² である。地形抽出のための最適な処理条件は交角については前章と等しい 45 度、処理幅は 3.0 m となった。

4.3 自動設計手法の開発

4.3.1 通過候補点の決定

本研究では、田坂ら (1996) の提案する 3 次式スプ

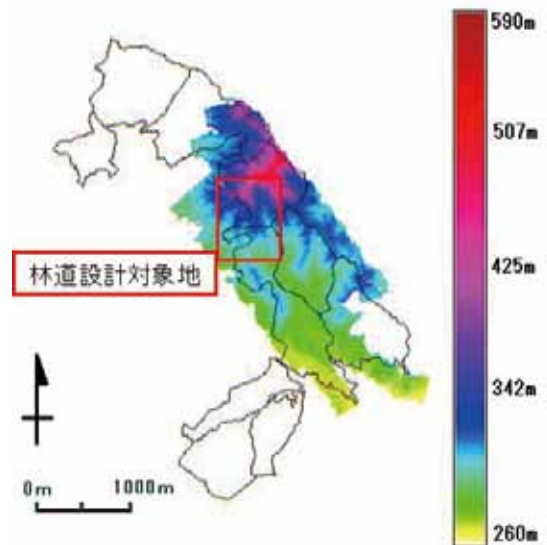


図- 4.1 対象地の範囲

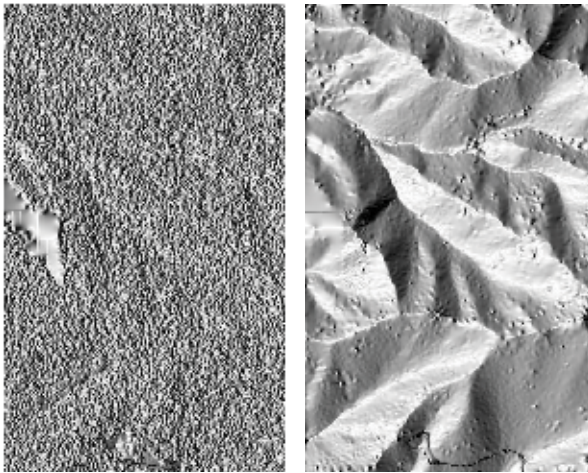


図-4.2 林道設計対象地の陰影図 (左: 処理前 右: 処理後)

ライン補間における路線決定方法が、切り盛りを均衡させ、土工量を抑えた地形順応型林道を想定する際に効果的であると同時に、パーソナルコンピュータクラスの計算機でも短時間に処理が可能であると考え、この補間方法を採用した。作成した DTM を用いて地形順応型林道設計を行うために、以下の手順で 3 次式スプラインの通過候補点を決定するプログラムを作成した。

通過候補点決定アルゴリズム

- 1) 始点 (B.P) と終点 (E.P) を指定する (図-4.3)。
- 2) 始点を通過する等高線を発生させる。
- 3) 終点より、2) で発生させた等高線に足をおろし、この点を P とする。この時 E.P と P の標高差を h とする。
- 4) 始点から P までの等高線にそった距離 l を求める
- 5) 標高差 h を累加距離 20 m ごとに設定した点 i それぞれについて距離に比例配分する。(以下、標高差分 Δh)

$$i\Delta h = 20 * \frac{i * h}{l} \dots\dots\dots(19)$$



図-4.3 通過候補点決定過程 1) ~ 5)

- 6) 各 i 点より最急傾斜方向に標高差分 $i \Delta h$ だけ移動した点を通過候補点とする (図-4.4)。
- 7) 候補点列 (x_i, y_i, z_i) に対して 3 次元スプライン補間し、路線形を決定する。

今回は 2002 年に LiDAR 計測が行われた時点での林道終点を始点とし、約 800 m 先の 2005 年までに新設された林道上の点を終点とした。ただし、今回の林道路線開設地域は、演習林の境界に位置するため、上記手順 6) で一定以上の標高を変化させると境界を超える部分が生じた。このため、路線を境界付近の点で分割し、二度に分けて処理を行った (図-4.5)。

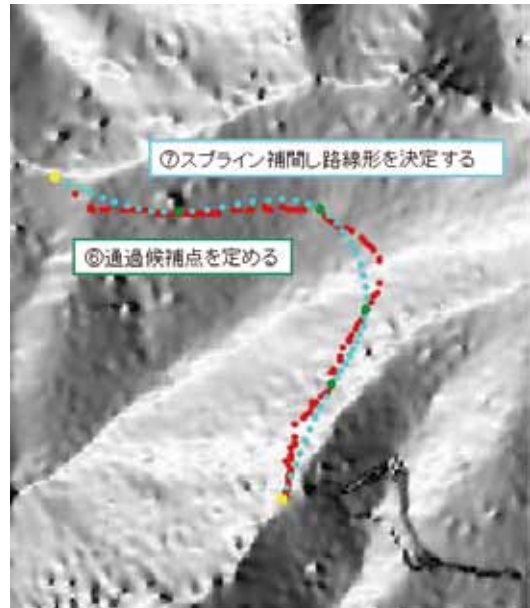


図-4.4 通過候補点決定過程 6)、7)

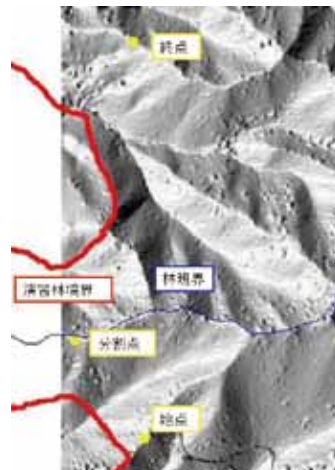


図-4.5 分割点の位置

4.3.2 動的計画法による路線探索

作成した線形は地形に沿って、滑らかな曲線で結ばれているものの土工量、費用については考慮していないため、この線形を基準として土工費用を最小化する線形を探索する。動的計画法は目的関数の最小化または最大化を得る手法として、広く用いられている (神崎 1973、酒井 1983)。本研究においては、最小土工費用路線を探索する手法として採用した。

最小土工費用路線を探索するために、前述のスプラ

イン補間によって作成した路線形各点の曲率半径を求め、各極点を通過候補点とする(図-4.6)。その点の法線上の両側に1m間隔で10mまで通過候補点列を発生させる(図-4.7)。

次に、候補点列上の各点を組み合わせ線形を描く。この際各区間を10分割した点の、地山横断面を作成し、平均断面法により路線の土工量、法面長等を求め、費用を算出する。なお、幅員は4.0m、法面勾配は盛土1:1、切土1:0.8、法面長が3m以上となる場合は擁壁1:0.2とした。

通過候補点列 L_1 の端点 P_1 から L_2 上の各点を通過

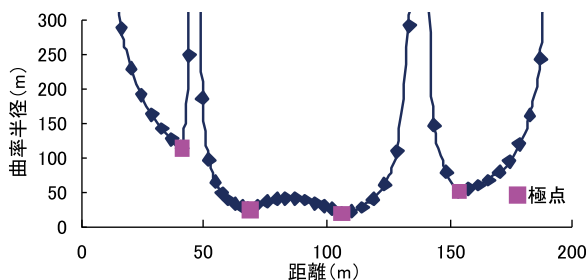


図-4.6 曲率半径の変化

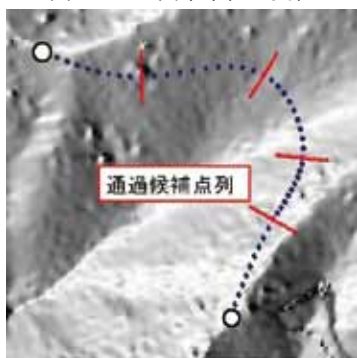


図-4.7 通過候補点列の決定

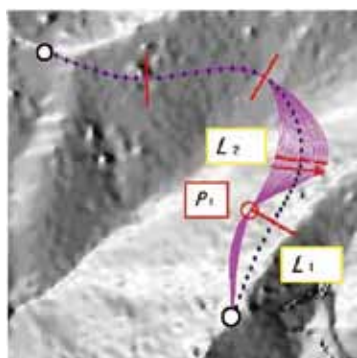


図-4.8 L_1P_1 での路線選択

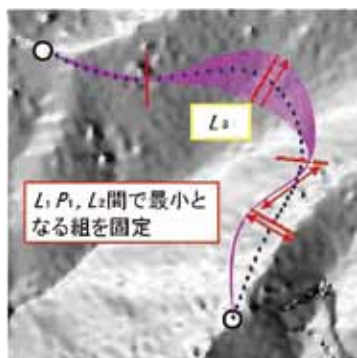


図-4.9 L_3 での路線選択

候補点としたスプライン曲線を発生させ(図-4.8)、その中で最小土工費用となる組み合わせから、 L_3 各点に対し作成した線形の中で最小費用となる組み合わせを LIP_1 の路線として採用する(図-4.9)。

この手順を繰り返し、 L_1 上で最小となる候補点を採用する。同様に各線上で通過候補点を決定し、その通過候補点の平面座標、標高を3次元で補間することで、平面線形と縦断線形を決定する。

4.3.3 設計結果

図-4.10 が得られた線形である。図からも見て取れるように、設計区間が約200mと短いものの、地形順応型で開設された実際の林道と、平面上で通過候補点の法線方向に最大3m程度しか離れておらず、ほぼ一致している。この手法を用いて分割点より先の約650m延長した林道を設計した結果を図-4.11に示す。この路線においても平面上も法線方向に最大10m程度離れてはいるものの、線形はほぼ一致する。

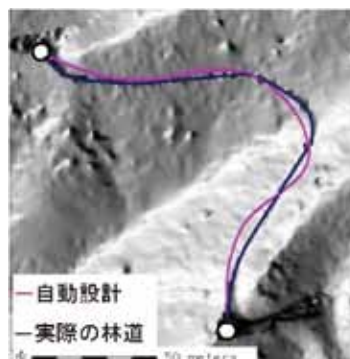


図-4.10 設計結果(約200m)



図-4.11 設計結果(約650m)

両者の縦断面図を図-4.12、4.13に示す。図-4.12では、0mから60mの区間において実際の林道と異なっているが、実際の林道と同様に尾根沿いを通過していくと、地山の横断勾配が大きくなり、土工量の増加を招くため、横断勾配が緩くなる方向へ路線を選定したと考えられる。また、図-4.13では地形順応型として開設された既設林道に比べても、さらに勾配の変化が抑えられている。土工量は実際の林道線形を用いて0線設計を行った林道に比べ、切土が多くなっ

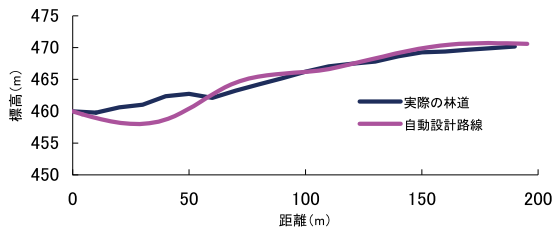


図- 4.12 縦断面比較 (約 200 m)

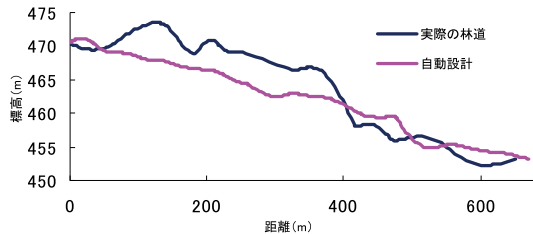


図- 4.13 縦断面比較 (約 650 m)

ているものの、盛土とほぼ同等になり、累加土量を抑えることに成功している (表- 4.1)。

表- 4.1 土工量の比較

| | 切土量(m ³) | 盛土量(m ³) | 累加土量(m ³) |
|--------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 自動設計路線(200m) | -972.41 | 967.63 | -4.78 |
| 実際の林道(200m) | -662.35 | 1204.38 | 542.03 |
| 自動設計路線(650m) | -3650.58 | 3714.00 | 63.42 |
| 実際の林道(650m) | -3927.29 | 4517.90 | 590.60 |

4.4 土工量推定精度の検証

本節では、実際に開設された林道の土工量を推定し、自動設計プログラムによる推定値と比較検討する。実際に開設された林道の土工量は、2003年と2005年に計測されたLiDARデータの差分を用いて算出した。具体的には図- 4.14の開設後に測定されたデータの陰影図で見て分かるとおり、LiDAR測定により林道の位置形状が正確に把握されていることを利用する。今回の対象地の林道が全切土で開設されているため、林道開設以前の2003年に計測されたデータのDTMと2005年の林道開設後に計測されたデータか

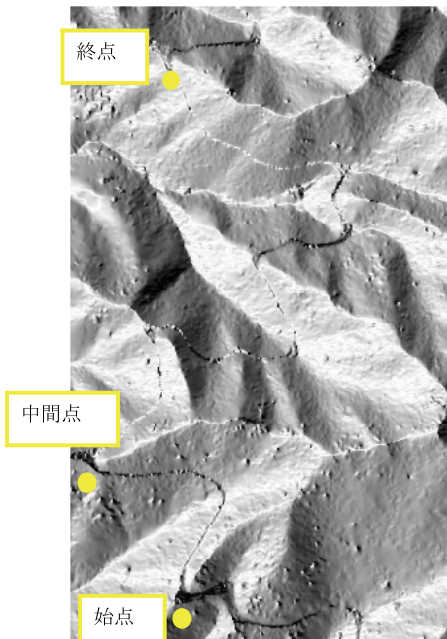


図- 4.14 2005年の林道開設後測定

ら作成されたDTMの標高差が切取高になると仮定した。そこで、2005年の陰影図より路線の位置を読み取り、道路敷きは幅員4.0m、法面を両側各3mと設定し、路線上のDTMの差分とDTMのグリッドサイズを利用して土工量を測定した(図- 4.15,4.16)。今、DTMのグリッドサイズをd、DTM差分をΔhとすると全土工量Vは、

$$V = \Sigma d^2 * \Delta h \dots\dots\dots(20)$$

より推定される。この結果、累積土量は13,487m³と推定された。

自動設計プログラムについては、陰影図より開設された林道の通過点を求め、林道開設前(2003年)のLiDARデータより作成したDTMを用いて、自動設計を行った。プログラムでは、開設された林道と条件を等しくするため全切土で設計を行い、土工量の推定を行った。林道の構造としては、現地の平均的な値を用いることとし、幅員を4.0m、切土勾配、盛土勾配ともに1:1に設定した。この結果、累積土量は14,162m³と推定された。1mグリッドDTMを用いたプログラムによる推定値は、既設林道の実測値との誤差が2.67%となり、実用上十分な精度を持つことが明らかとなっている。

両推定値を比較すると、DTMの差分では二時期で

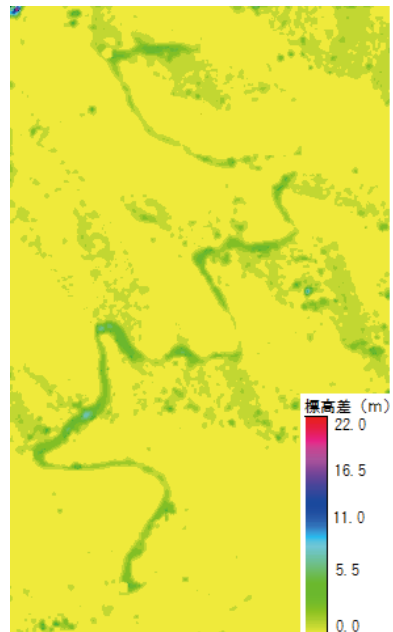


図- 4.15 DTMの差分

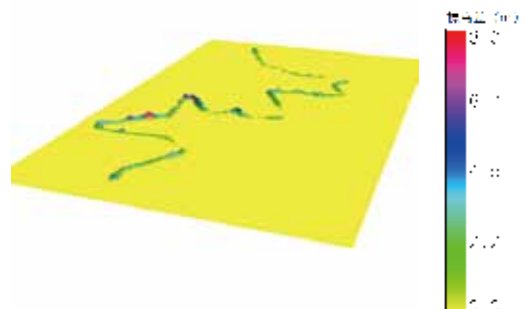


図- 4.16 林道付近を抽出した差分の立体図

測定を行っているため、土砂の堆積や流出による路面・路肩等の標高の変化や、同座標であっても測定時の樹木の揺らぎ等によってレーザの反射位置が変わり、標高が変化する場合があるなどの LiDAR データ自体の誤差を含み、プログラムによる推定では法面の勾配が実際の林道とは異なるなどの問題点があるが、2つの推定値の差は 675.79m^3 、すなわち $0.84\text{m}^3/\text{m}$ と小さく、両推定値とも真値に近いものと考えられる。

4.5 開設費用計算

土工量の推定精度は良好であったため、次に土工費用を算出した。第二章と同様に、切土にショベル系掘削機、盛土にはブルドーザ、運搬にダンプトラックを使用し（表-2.7~2.9）、盛土法面は筋芝工（表-4.2）、切土法面は種子吹付け工で施工（表-4.3）、擁壁費用については、擁壁ごとに個別に設計し、算出する必要があるが、本研究では計算を簡略化するため、平均的施工費として 1m^2 あたり 16,000 円（Ichihara et al, 1996）と仮定し算出した。開設費用は表-4.4 となった。費用の比較では、200 m の設計に比べ、650 m の設計において 1m あたりの費用が高くなっている。650 m の林道では、尾根、谷が連続し地形の大きく変化する区間を通過しているため、擁壁を計画する必要が生じ、費用に大きく影響しているが、どちらの設計においても実際の林道に比べ費用を低減できている。

表-4.2 筋芝工施工単価表

| 筋芝工 (100m^2 当たり) | 単位 | 数量 | 単価(円) | 金額(円) |
|-------------------------------|--------------|------|--------|---------|
| 世話役 | 人 | 0.5 | 19,200 | 9,600 |
| 普通作業員 | 人 | 5 | 13,600 | 68,000 |
| タンパ運転 | 日 | 0.8 | 15,471 | 12,376 |
| 芝 | m^2 | 47 | 390 | 18,330 |
| タンパ運転単価 (1日当たり) | | | | |
| 特殊作業員 | 人 | 0.91 | 16,100 | 14,651 |
| 燃料費 | L | 4.5 | 95 | 428 |
| 機械損料 | 日 | 1 | 392 | 392 |
| 合計 | | | | 108,306 |

表-4.3 種子吹付け工施工単価表

| 種子吹付け工 | 単価 |
|-------------------|-------|
| 1m^2 当たり | 1,860 |

表-4.4 費用比較結果

| | 土工費用 | 伐開+除根+法面費用 | 1mあたり |
|--------------|------------|-------------|---------|
| 自動設計路線(200m) | ¥528,130 | ¥1,463,437 | ¥9,962 |
| 実際の林道(200m) | ¥626,826 | ¥2,315,135 | ¥14,710 |
| 自動設計路線(650m) | ¥2,035,537 | ¥21,658,336 | ¥27,297 |
| 実際の林道(650m) | ¥2,691,623 | ¥29,474,287 | ¥37,665 |

4.6 まとめ

3次式スプライン補間は平面上だけでなく、勾配の変化、法面長を抑えることができ、地形順応型林道設計に効果的であった。また、動的計画法による土工費用最小路線の探索も可能となり、実際の林道に比べ、開設費用を抑えた林道設計を自動的に行うことができた。

しかし、実際の林道は耐久性の向上を考慮して、尾根沿いに作設しており、土工費用最小化を目指す今回の設計手法とは異なる部分もあった。基幹となる路線

の求める、耐久性が高く、維持補修費用の低減も考慮した、林道設計を実現する必要がある。また、開設効率・費用に影響を及ぼす、土質については考慮されていない。

そこで、次章において崩壊危険地域予測と土層厚推定を行い、路線の耐久性、開設費用を考慮した、設計手法を開発する。

第五章 崩壊危険地域を考慮した林道設計自動化手法の検討

5.1 目的

前章において、3次式スプライン補間と動的計画法による地形順応型林道設計自動化手法を検討した。この手法で設計した林道は、実際に開設した林道に比べ低コストの設計が可能となった。しかし、実際の林道開設において重要となる、崩壊危険性や開設作業効率・費用に影響をあたえる土質については考慮していない。梅田ら(2007)、Suzuki et al. (2007) は作業道路網の実態分析を行った。斜面が30度未満に配置、または締固め試験と CBR 値から、急傾斜地は締固め能力の大きな土で構成され、路盤を締固めて構成されている等、危険地域や稜線上における作業道の開設条件明らかにした。その研究において、開設条件にあった配置を行うには、航空レーザ測量等での詳細な DTM が必要であることを示唆している。

また、Yoshimura (1997) は現地調査の結果から、ファジイ積分による崩壊危険地の予測を行い、路線の配置における崩壊・土砂流出による環境への影響を考慮した路線配置を行っている。この論文では崩壊危険地域を抽出し、それを考慮した通過候補点同士をダイクストラ法によって接続し路線配置を行っている。しかし、各路線において土層厚を考慮し土工量を算出することで、費用を低減するなどの具体的な路線設計は行われていない。

そこで5章では、LiDAR による高解像度 DTM を用いて詳細な地形情報を把握することで、土工量・費用を正確に算出しながら、力学的モデルである、無限斜面安定解析式による崩壊危険度判定を行い、危険地域回避を考慮した林道の自動設計手法を開発した。なお、林道開設地の土質を調べるためには、簡易貫入試験器などを使って広範囲の土質調査を行う必要があり、時間と労力を要する。本章では、土層厚の簡易推定方法を検討し、斜面安定解析による崩壊危険地域分布を考慮した、林道設計自動化手法を開発した。

5.2 調査地と手法

5.2.1 調査地と使用データ

調査対象地は船生演習林7林班周辺とした。使用する高解像度 DTM は、2006年に船生演習林内の大天頂沢林道周辺を測定した LiDAR データから、3章で開発した自動フィルタリング手法である交角法で処理を行い、 1m グリッドで作成した。土層厚の推定には簡易貫入試験機を用いた。この試験方法は、質量 5kg のハンマーを 50cm の高さから自由落下させ、コーンを 10cm 貫入させるのに必要な落下回数 (Nc 値) を求め

る事によって、土層の抵抗の垂直的な変化を明らかにする事が出来る。船生演習林における Nc 値による土層区分は、基盤地質が新第三期層・関東ローム層に属することから、既存の研究(逢坂 1987)を参考に Nc 値が 20 以下の土層深を土層厚とした。

5.2.2 崩壊危険度判定

崩壊危険地域を判定する斜面安定解析は無限長斜面安定解析式で行った。船生演習林における表層土が主に砂質土であることから、内部摩擦角は 30°、土の粘着力は 1,730N/m²、土の密度は 2,000 kg/m³ とし、土層厚については演習林内 167 点において行った簡易貫入試験の結果(五島ら 2008)より推定し、アメダス確率降雨量計算プログラムから、フェア式により算出した確率雨量強度を用いて解析をし、安全率が 1 以下となる地域を危険地域とした。

$$F = \frac{c + (\gamma_s \cdot h - \gamma_w \cdot hw) \cdot \cos^2 \theta \tan \phi}{\gamma_s \cdot h \cdot \cos \theta \sin \theta} \dots (21)$$

F:安全率、c:土の粘着力(N/m²)、h:土層厚(m)、θ:傾斜角(°)、φ:土の内部摩擦角(°)、hw:地下水位(m)、γs:土の密度(kg/m³)、γw:水の密度(kg/m³)

5.2.3 自動路線設計手法

本章では、これまでに開発した 3 次式スプライン補間と、動的計画法による地形順応型林道設計自動化手法を用いて設計を行った。

設計条件は、全幅員 4.0m、盛土勾配 1:1、切土勾配 1:0.8、に加え、計画高で横断面を検討した際に基盤を切る場合、切岩が生じるとし、勾配 1:0.3 とした。また、3 m 以上の法面長では勾配が 1:0.2 の法面擁壁を作成する。盛土・切土法面には法面保護工として第四章と同様の施工を行うこととした。ただし、切岩の場合は行わない。この条件で開設費用を算出する(図-5.1)。

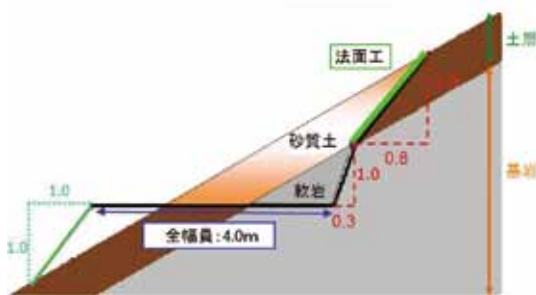


図-5.1 開設条件

加えて、林道の崩壊危険性を考慮し、修復費用も最小となる林道を設計するために、動的計画法による探索を行う際に崩壊危険地域分布を重ね合わせ、危険地域のセル上を林道路面が通過する場合、崩壊が発生し修復が必要になると考えた。修復費用は崩壊が起きた場合は林道をもう一度開設すると考え、崩壊危険地域を通過する区間の開設費用と同額の修復費用を加算し、路線の選択を行った。この際、100 年確率雨量で崩壊する箇所の修復費用を基準として、50 年確率雨量の際は 100 年の 2 倍、10 年確率雨量の際は 10 倍と、各確率雨量に重みを付けて探索を行った。

5.3 結果と考察

5.3.1 土層厚推定

土層厚の大きさは、標高、傾斜、集水面積などの地形要因の影響が大きいことが予想される。調査の結果、土層厚と傾斜、集水域平均奥行きには負の相関がみられた(表-5.1)。

表-5.1 土層厚調査結果

| 斜面傾斜 | 0~15° | 15~25° | 25~35° | 35~45° | 45~55° |
|-------------|----------|-----------|-----------|----------|--------|
| 0~20m | 266(16) | 151.2(61) | 130.8(79) | 86.1(14) | (0) |
| 対数正規分布 | 311 | 171 | 101 | 58 | 32 |
| 差分 | -45 | -19.8 | 29.8 | 28.1 | |
| 20~200m | 182.9(3) | 79.8(6) | 162.1(9) | 67.1(3) | (0) |
| | 217 | 117 | 68 | 38 | 21 |
| | -34.1 | -37.2 | 94.1 | 29.1 | |
| 200~2000m | 83.1(2) | 148.3(7) | 159.6(6) | (0) | (0) |
| | 152 | 81 | 46 | 26 | 14 |
| | -68.9 | 67.3 | 113.6 | | |
| 2000~20000m | (0) | 116(1) | (0) | (0) | (0) |
| | 106 | 55 | 31 | 17 | 9 |
| | | 61 | | | |

調査した地形に偏りがあるものの、これまで経験的にいわれてきたものと近い結果となった。

そこで、対象地全域において土層厚の推定を行うため、傾斜と集水域平均奥行きに着目し、土層厚の推定を行った、飯田ら(1997)の手法の適応を検討した。この方法は傾斜と集水域平均奥行きの両者の組み合わせによってすべての斜面を分類し、これら 2 種類の地形要因ランクの組み合わせごとの土層厚頻度分布は、対数正規分布に近似できるとしている。この手法を適応するため、演習林内において行った簡易貫入試験の結

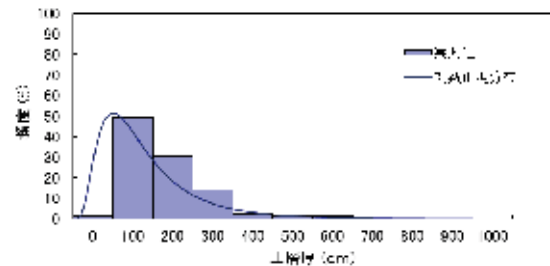


図-5.2 正規分布との対応結果

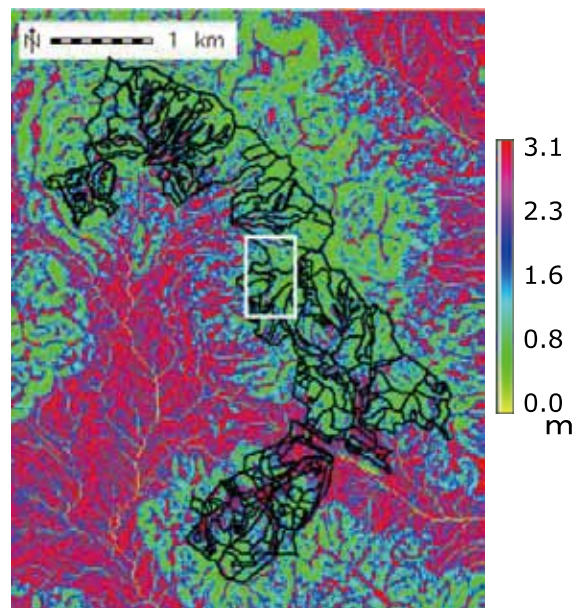


図-5.3 土層厚分布推定結果(路線設計範囲:白枠)

果と比較した。

図-5.2は傾斜25~35°かつ集水域平均奥行き0~20mの理論対数正規分布と実測値の土層厚の比較を示し、表-5.1は全調査結果である。実測値との平均二乗誤差は152.0cmから15.0cmとなり、調査標本数の多いクラスでは特に良好な一致が見られ、土層厚頻度分布は対数正規分布で近似できると考えられた。そこで、対数正規分布から最頻値を読み取り推定土層厚とし、演習林内の推定土層厚マップを作成した(図-5.3)。

5.3.2 崩壊危険地域予測

この土層厚分布を用いて演習林内の確率雨量ごとに斜面安定解析を行い、崩壊危険地域マップを作成した(図-5.4)。50年確率雨量の際には、土層厚分布を導入すると、崩壊危険地域は演習林内18%程度となり、クラス分けせずに、現地調査結果(五島ら2008)から得られた傾斜ごと限界土層厚を適応した場合の14%からやや増加した。また、実際に1998年に起きた崩壊地予測においては、土層厚分布適応なしでは11%予測が的中し、適応後は16%と対数正規分布を用いた土層厚推定法を適応することで、崩壊危険予測が若干改善された。

しかしながら、崩壊危険予測はまだ低いレベルにあるため、崩壊の因子を土層だけでなく、土の密度や崩壊履歴、植生の影響など様々な因子を検討していく必要がある(執印ら2009)。加えて、地山の崩壊のみでなく、路線開設によって引き起こされる崩壊(板谷ら1999)についても検討することでより効果的な配置を行えるように改善する必要がある。

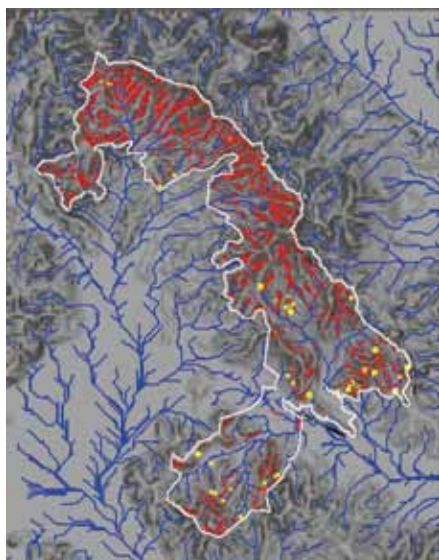


図-5.4 崩壊危険地域分布 (50年確率雨量での崩壊危険地：赤 1998年に発生した崩壊地：黄)

5.3.3 土層厚を考慮した路線設計結果

前章までにおいて、プログラムによる設計は、実測値や2時期のLiDARデータの差による土工量推定結果などからも、高精度であることが明らかである。そこで同様の手法を用いて設計を行った。実際の林道は

全切で設計されているものの、コストを抑えるために切・盛のバランスをとった設計を行った。

線形は土層厚を考慮した場合でもあまり変化はなかったが、図-5.5のように土の厚い部分を避けて通るようになった。縦断面の比較では土層厚を考慮した場合、回避を行った部分で勾配が若干大きくなっているが林道規程内の14%勾配に収まっている(図-5.6)。横断面の比較では、土層厚を考慮した設計では土層の薄い部分を通過しており、切土が少なくなっている(図-5.7)。また、切土面の大半が岩のため法面保護も少ない施工で済んでいる。土工量の比較では、切岩の量が多くなり、切岩を盛土に利用しないと仮定している本研究では運搬量が増加した(表-5.2)。しかし、総

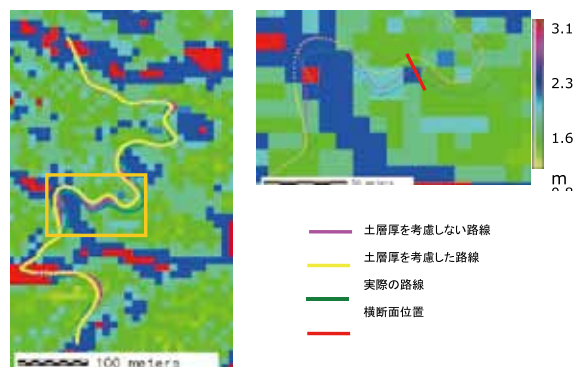


図-5.5 路線設計結果 (右図：オレンジの範囲の拡大図)

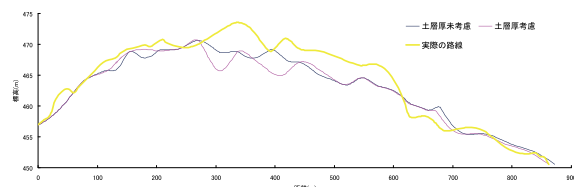


図-5.6 縦断面比較

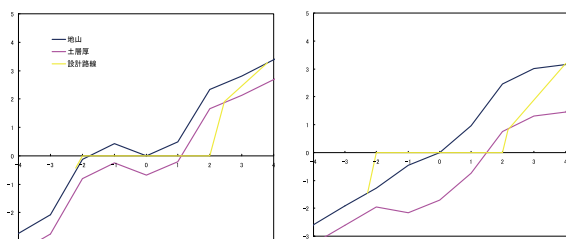


図-5.7 横断面比較

表-5.2 土工量比較 (単位：m³)

| | 土のみ考慮 | 土と岩を考慮 |
|---------|----------|----------|
| 切土量 | 2,366.44 | 1,977.86 |
| 切岩量 | 2,256.56 | 2,745.22 |
| 切土量(合計) | 4,623.00 | 4,723.08 |
| 盛土量 | 4,681.63 | 4,481.99 |
| 運搬土量 | 58.64 | 241.09 |

表-5.3 開設費用比較 (単位：円)

| | 土のみ考慮 | 土と岩を考慮 |
|----------|------------|------------|
| 土工費用 | 2,339,098 | 2,450,479 |
| 法面工費用 | 19,570,977 | 16,309,148 |
| 1mあたりの費用 | 25,626 | 21,839 |

費用の比較では、土層を考慮した場合では土工費用は増加しているものの、法面保護費用が抑えられ、総費用、1 mあたりの費用ともに低コストになった（表-5.3）。

5.3.4 崩壊危険地域を考慮した路線設計結果

図-5.8は10年から100年の確率雨量を適法した際の結果である。開設費用のみで比較すると回避を行わない場合のほうが低くなっている（表-5.4）。表-5.5は崩壊危険地域を通過した割合である。回避を行うと、最大の修復費用がかかる10年確率雨量の範囲を通過する距離が短くなっている。土工費用は回避を行わないほうが低いが、修復費用は回避後のほうが大きくなる。そのため回避を考慮すると、総費用を抑えた設計となった。

縦断面、横断面ともに線形がほぼ同様のため、殆ど差はなかった。確率雨量ごと修復費用を変更しているが、修復費用を同一にして探索しても、ほぼ同様の結果となった。今回の調査地では、10年、20年確率雨量での崩壊地のみを通過しているためと考えられる。

また、林道よりも使用期間が比較的短い作業道は

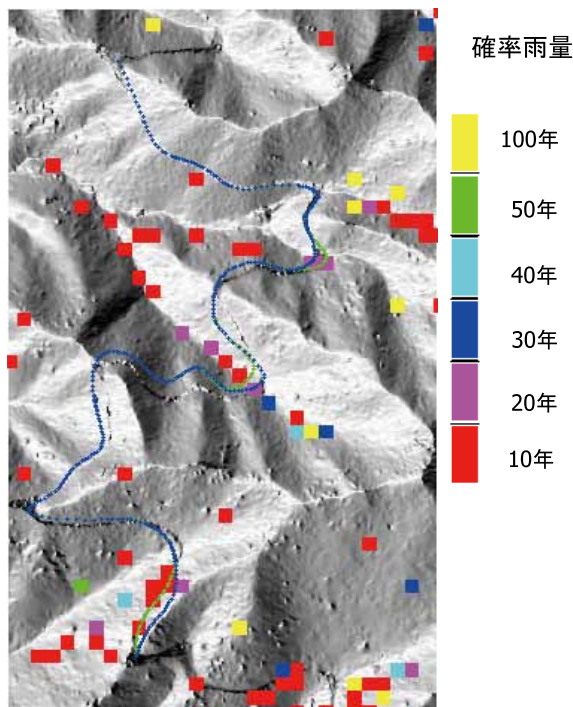


図-5.8 崩壊危険地域を考慮した設計結果
(未考慮の設計：青線 考慮した設計：緑線)

表-5.4 費用比較 (単位：円)

| | 崩壊危険性 未考慮 | 崩壊危険性 考慮 | 10年確率雨量 のみ回避 | 20年確率雨量 のみ回避 |
|----------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 開設費用 | 18,759,627 | 19,852,451 | 18,956,214 | 18,822,390 |
| 修復費用 | 9,353,400 | 4,063,920 | 2,064,422 | 1,086,428 |
| 1mあたりの費用 | 32,880 | 27,972 | 24,586 | 23,309 |

表-5.5 危険地域通過割合 (単位：m)

| | 崩壊危険性 未考慮 | 崩壊危険性 考慮 | 10年確率雨量 のみ回避 | 20年確率雨量 のみ回避 |
|---------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 10年確率雨量 | 35.2 | 10.2 | 9.2 | 35.2 |
| 20年確率雨量 | 18.8 | 18.7 | 18.8 | 9.6 |

低コストで開設する必要があるため、10年、または、20年確率雨量と崩壊しやすい部分のみの回避を考慮した場合は、どちらの場合も1 mあたりの開設費用は抑えられた設計となり、作業設計への適応も可能であることが示唆された。

この調査地においては、あまり差は見られなかったものの、崩壊が多い地域で設計を行う場合、どの確率雨量で回避を行うか考慮する必要がある。基幹林道では長期的な使用（50年）を想定して例えば50年以下のものを回避、作業道では中期的な使用（20年）を想定して例えば20年以下を回避するなどの設定を行い、使用目的を考慮した上で、適正な費用を検討していく必要がある。本章では、修復費用がかかる崩壊危険地域を回避した設計をおこなった。単純な方法で危険度の重みをつけ、開設費用を抑える設計ができた。しかし、崩壊の範囲や種類は様々であるため、崩壊危険性を費用として評価するのではなく、指標として用いる方がより適切であるかもしれない。また、コストの計算方法も崩壊危険地域に擁壁を設計することなども考える必要がある。

5.4 まとめ

本章の結果から、地形と集水域平均奥行きからの土層厚を推定する手法が林道設計に利用可能であることがわかった。土層厚分布を適応し、路線探索を行うことで、開設費用を低く抑える路線が設計可能となった。また、土層厚を崩壊危険地の予測に適応することで、修復費用を見込んだ、低コスト林道を自動的に設計する手法を開発した。

今後の検討課題としては、まず土質の予測方法がある。今回は砂質土と軟岩に区分し、土工費用を算出したが、実際の開設時ではブレイカーを必要とする硬岩によって費用が増加することが考えられる。広域で地質を予測することは難しいが、リモートセンシングによって地質の予測を行う手法も研究されており（丸山2002）、適応性を検討する必要がある。次の課題は崩壊予測についてである。崩壊予測に用いた、無限長斜面安定解析式は一定以上の範囲の崩壊を求めるものである。しかし、林道開設にともなう崩壊は、比較的小さな範囲での予測が必要となる。そこで、高解像度DTMを活用し、熟練の技術者が実際の林道開設現場において考慮している要素を組み込んで行く方法を検討したい。最後に、修復費用については、崩壊したら同様の道を修復するとしたが、崩壊危険地域に擁壁等の構造物を設計した費用と比較を行った上で、路線探索を行う必要がある。

第六章 LiDAR データを活用した作業道配置手法の検討

6.1 目的

前章までにおいて、LiDAR データに基づく高解像度DTMを活用して、路線設計の自動化手法の開発を行ってきた。この手法により、一つ一つの路線ごとの開設費用を抑えた自動設計が可能となったが、実際に各林分で施業を行う際には、到達する林道だけでなく、

作業道の配置も重要となる。これらの配置を検討するには、林分条件、作業システム、路網密度等の様々な条件を考慮しなければならず、経験の少ない作業員にとっては困難な作業であり、経験豊富な作業員にとっても大きな負担となるため、具体的な計画案を簡易に把握可能な配置支援手法の開発が必要とされている。そこで、本章では LiDAR データを活用し、現況の詳細な情報をもとに、作業を考慮した配置計画を提案可能な、配置手法の開発を行った。

6.2 調査地の概要

調査地は前章までと同様、LiDAR 計測されている船生演習林内の7、8林班とした。7林班では、基幹となる大天頂沢林道が縦断しているものの、作業道は開設されていないため、今後施業に応じて作業道配置を検討する必要がある。また、8林班は平成22年度から10年間の船生演習林第7次編成経営計画（宇都宮大学農学部附属演習林2010）において、施業対象とされており路網配置計画を必要としている。

6.3 施業対象林分決定手法

路網配置を行う際には、施業対象の林分を決定し、既設路網から対象林分が施業可能な点まで路網を配置する必要がある。しかし、施業対象林分を決定する大きな指標となる森林簿や森林基本図は、調査が行き届かないこともあり現状と乖離していることも多い（露木1998）。そのため施業計画を立案する際に、実際には間伐が必要な林分であっても、実態が把握できず施業の対象とされないこともあり、間伐遅れ林分が増加する、ひとつの原因となっている。

本章では、広範囲の3次元情報の得られる LiDAR データの特性を活かし、林班内の間伐が必要な小班を抽出し、施業対象とする方法を検討した。前章まで主に用いていたデータは LiDAR 計測の中でも Last pulse をフィルタリングし作成した、地形情報である DTM であるが、地物にあたって最初に反射する First pulse が示す表層モデルである DSM を活用することで、単木の位置、樹冠、樹高等が把握可能である。

そこで、松英ら（2010）の提案する、樹木の込み具合の指標である相対幹距比を用いた、要間伐林分指数を適応し、作業対象林分の抽出を行った。

相対幹距 S_r (%) は、林分密度の尺度で、林分の平均樹幹距離（平均幹距）(m) と林分の上層木の平均樹高 H (m) との比で表わされる。

$$S_r = \frac{\sqrt{M/N}}{H} * 100 \dots\dots\dots(22)$$

M : 林分面積 (m²)、 N : 林分立木本数 (本/m²)

算出方法は以下の手順で、まず各グリッドで LiDAR データから上層木平均樹高と立木本数を算出する。上層木平均樹高と立木本数の算出には LiDAR データから作成した DTM と DSM 差から樹冠モデルである DCHM (Digital Canopie Hight Model) を 0.5 m グリッドで作成し、局所最大値フィルタ法によって単木の梢端を抽出して立木位置、立木本数を決定し（松英ら2010、伊藤ら2009）、各立木に DCHM 値を樹高

として与え、上層木平均樹高を算出した。これらの値を用いて任意のグリッドサイズごとの要間伐林分指数を算出する。なお、本研究ではグリッドサイズは 10m とした。また、西沢（1972）によると、要間伐林分抽出指数の基となる、相対幹距の値と間伐の関係について、国有林のスギの収穫表調整に用いられた林分では、資料の分析の結果、強度間伐で 21%、中度間伐で 17%、弱度間伐で 13%、無間伐で 10% 程度と明らかとされている。そこで、相対幹距 S_r の値が 10% 以上 13% 未満、13% 以上 17% 未満、17% 以上 21% 未満、21% 以上の 4 段階にクラス分けし、間伐が必要な順に 1, 2, 3, 4 の指数とした。これらの値より、小班の平均間伐必要度が 3 以下かつ、樹種構成がスギ・ヒノキ林分である小班を作業対象地として決定した。

抽出結果は図-6.1 となり、7林班では、4 小班、9.1ha、8林班では 8 小班、11.4ha を作業対象地として決定し、路網配置を行った（図-6.2）。

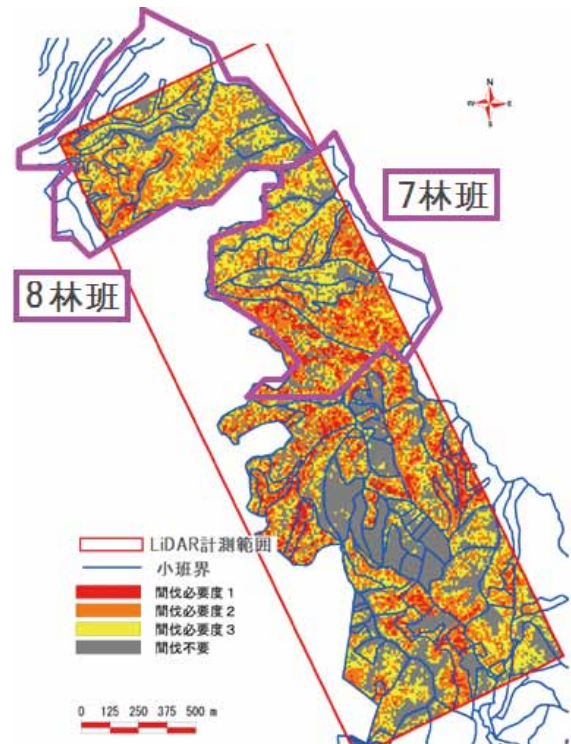


図-6.1 間伐必要度分布

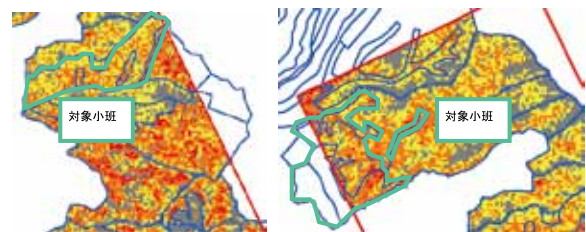


図-6.2 作業対象小班 (左: 7林班 右: 8林班)

6.4 路網配置手法

前章までに検討してきた、路線設計手法では林道、もしくはそれに準ずる高規格な作業道を対象としていた。本章ではそれらの基幹となる路線から、抽出した土場まで到達する作業道路路網配置を行う。これまでも道の区分として、規定に沿って開設される林道、運材トラック等が通行可能で規定外のものを作業道、さ

らに低規格でトラック等が進入不可能なものを作業路とされていた(酒井 2004)。近年では、森林林業再生プラン推進本部内に設置されている、路網・作業システム検討委員会では、路網の区分として、従来の規定に沿った規格で開設される林道に加え、規定からは外れるもののトラック等の通常の車両が通行可能な林業専用道、フォワーダ等の林業機械の走行を想定した森林作業道の組み合わせを、今後の路網整備の方針としていくことを提案している。

そこで、4tトラックが通行可能で運材効率の高い作業道を基幹作業道、フォワーダで集材土場まで到達する作業道を支線作業道と定義し、これらを組み合わせで配置する手法を検討した。また、基幹作業道は最大勾配 20%、全幅員 4.0m、支線作業道は最大勾配 40%、全幅員 3.0m と設定した。

6.4.1 集材線配置

路網配置を行う際には、各路線の到達点をまず決定する必要がある。到達点に関しては、小班の重心(酒井 1982)や、路線同士の接続点(Yoshimura1997)を目標とする手法などが研究されている。これらの手法では、広範囲における路網配置において平均集材距離が短縮することを重視しているため、集材範囲を平面上で検討しており、すべての範囲で実際に集材可能になるとは限らない。

また、架線集材と路網の研究として大川畑(1988)が従来型架線と林道路網について、田坂ら(2000)がニューラルネットワークを用いてタワーヤードの架線の適正配置を検討しているが、路線配置の手法を提示するには至っていない。

本研究においては、詳細な地形情報から集材線の設置が可能である点を抽出し、それらを接続する手法を検討する。集材システムは、車両系と架線系に大別されるが、近年では車両系は、200m/ha ほどの高密度路網を開設し、路線上からウィンチによる集材を行うシステムや、架線系はベースマシンを転用でき、簡易に架線を架設可能なスイングヤードを用いた、集材システムが注目されている(林野庁 2010)。しかし、高密度路網の開設は急傾斜地では困難であり、安易な開設は崩壊の要因にもなる。また、スイングヤードによる集材は主索を用いない簡易架線集材のため、集材距離は 70~80m 程度で行われており、現状の間伐作業のみであれば対応可能なものの、今後の主伐等で大径材の集材には適さない。そこで、急傾斜地で行う架線と路網を組み合わせた集材システムである、チェーンソー伐倒・タワーヤード集材・プロセッサ造材を想定する。タワーヤードによる架線集材では、機械の規模によるものの、小型タワーヤードで 200m、中型では 600m 程度の架線集材が可能である。調査地の船生演習林においても、伐出を行う際はタワーヤードによる架線集材が一般的に行われており、この集材システムを選択した。

架線集材では、作業の安全性、集材の容易さを考慮し、地形の最急傾斜方向に沿って、架線を設置する。つまり、周囲の地形の最傾斜方向の集合である、流水

線を集材線とする場合が多い。そこで、以下の手順で集材線を決定した。

- 1) GRASS GIS 6.3 の flow line 機能で 5m メッシュの DTM を用いて、流水線を発生させ、集材線の配置候補とする(図-6.3)
- 2) 細かな流水線を除去するため、作業対象小班内かつ線長が 50m 以上ある、流水線のみを抽出する
- 3) 抽出した流水線の両端を結び候補線を配置する
- 4) 候補線から、最大横取り距離 20m を想定したバッファを発生させ集材範囲が 50% 以上重なる線を削除する
- 5) 流水線は集水範囲の集まる沢に発生するため、集材線が尾根沿いまで到達しないので、作業対象小班を超えない範囲で上部の点を尾根に向かって延長し、集材線を決定する。(図-6.4)
- 6) 抽出した集材線の標高の高い側にある点を上荷土場、低い点を下荷土場とし、これらを接続する路網配置を行う。



図-6.3 流水線結果(8林班)

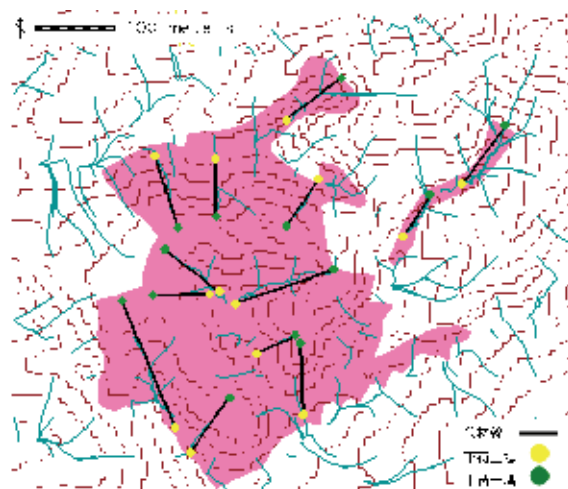


図-6.4 集材線配置結果(8林班)

6.4.2 基幹作業道配置

基幹作業道はトラックによる運材を行うため、運搬効率が高いものの、比較的高規格な設定であるため開設単価は高くなる。そのため、土場同士を接続する必

要があるものの、開設距離はなるべく抑える必要がある。そこで、各点間をすべて接続し、それらの経路の中ですべての点を通過する最短の経路である、シュタイナー木（経路）を利用する手法を検討した。シュタイナー木は、各枝に重みを与えた、完全結合グラフから、全ノードを接続し、重みの総和が最小となるような組み合わせを求める問題である、最少木問題の解決手法の一つである。この手法は、GIS上で容易に実行すること可能で、道路ネットワーク、通信ネットワークや、送電施設の適正位置問題等に広く応用されており、Clark et al.(2000)、Stuckelberger et al. (2004)などもグラフ理論ともに、路網のネットワーク問題を解決する手法として用いており、本研究においても適応可能であると考えた。

基幹作業道配置手法は以下の手順で行う、まず各集材土場をノードとし、すべてのノードを接続するドロネー網を作成する（図-6.5）。

このドロネー網からシュタイナー木を選択すると、集材土場同士がすべて基幹作業道で結ばれ、トラックで高効率な運材が可能であれば理想的であるが、実際には各点間の地形形状が影響し、制限勾配内で接続が不可能であったり、大きな迂回が発生し開設コストの増大を招く。また、土場のみをノードとしたドロネー

網では通過候補点が少なく、各ノード間の中間を通るようなルートは選択できない。そこで次に、ドロネー網の補完的關係である、ポロノイ分割を利用し各ノード間を分割する。ポロノイ分割とドロネー網の交点をノードとすることで、通過候補点はほぼ2倍となり土場同士の間も候補とすることができる。ただし、すべての交点をノードとすると点数が増大し過ぎるため、隣接する点間を接続する線上にある点のみを候補点とし、既設路網と接続を可能とするため、既設路網到達点も候補点として加えた（図-6.6）。

この候補点をノードとした、ドロネー網を作成する。この段階では点間の勾配は考慮されていないため、すべての点間を接続しているが、基幹作業道の規格で路線探索する際に、大きな迂回が発生しないように、点間の勾配が30%以上のものを除外し、再びドロネー網を作成した。このドロネー網から、最少連結木であるシュタイナー木を作成し、基幹作業道の候補線とする（図-6.7）。候補線において、路線設計手法を適応し最少開設費用路線を設計するため、接続したノード間をDijkstra法（Dijkstra1959）で制限勾配かつ、開設土量を最小化する路線の探索を行った（図-6.8）。

配置結果のセルを20mごとに抽出し、通過候補点として、路線設計手法を適応した結果は図-6.9とな

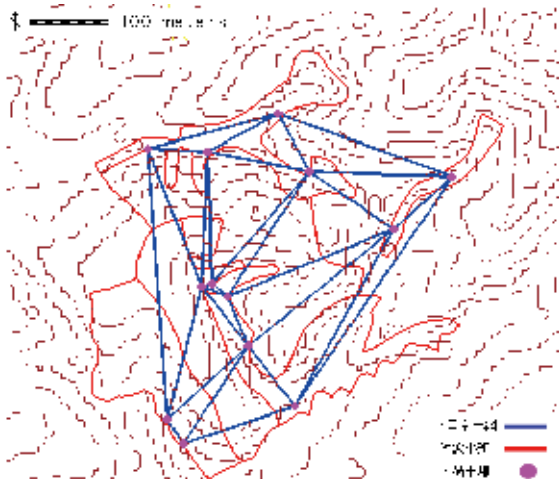


図-6.5 土場(下荷)のみを接続したドロネー網(8林班)

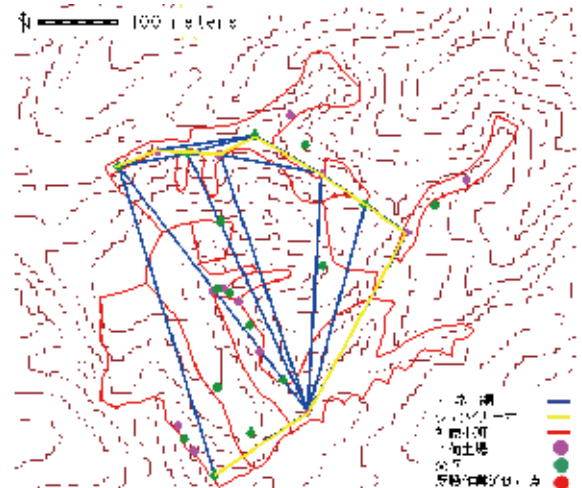


図-6.7 シュタイナー木検索結果(8林班)

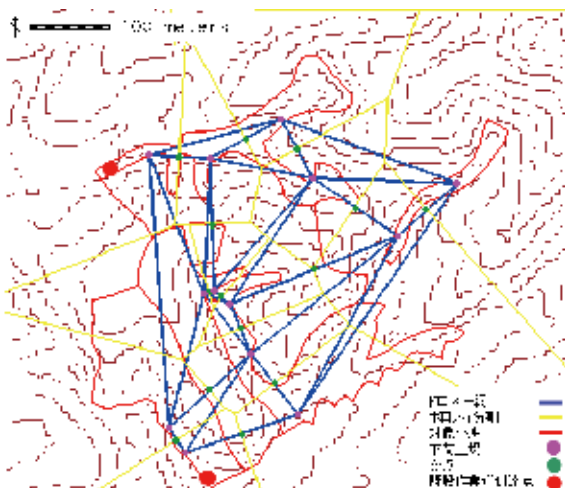


図-6.6 ドロネー網とポロノイ分割の交点抽出結果(8林班)

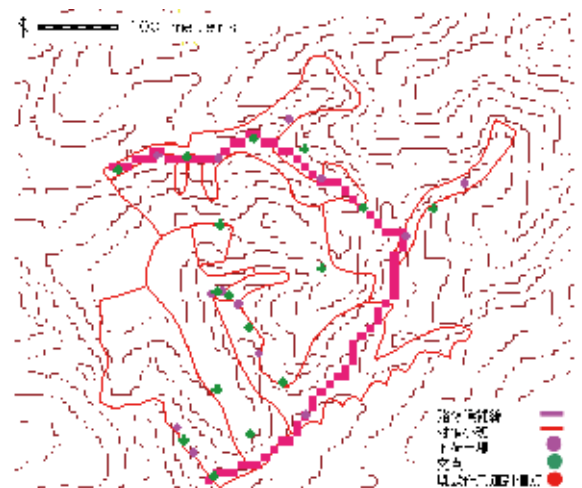


図-6.8 Dijkstra法による路線探索結果(8林班)



図-6.9 基幹作業道設計結果 (8林班)



図-6.10 配置結果 (8林班)

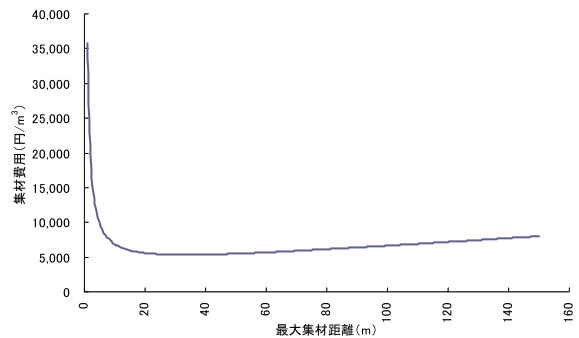


図-6.11 集材費の推移 (V = 245.5m³/ha)

り、なめらかな線形で設計することができた。

6.4.3 支線作業道配置

基幹作業道のみでは、すべての集材土場に接続できていないため、基幹作業道が通過していない土場から、支線作業道の規格を制限とした、Dijkstra法で基幹作業道まで路線探索を行い、支線作業道候補線とした。この線を基幹作業道配置と同様の手順で、路線設計を行い支線作業道の配置とした (図-6.10)。

6.4.4 費用計算

配置結果から、施業費用を推定するため各作業費用を算出する。集材費用は直接集材費 (Ycy)、タワーヤードの架設撤去費 (Ycs)、消耗品費 (Yco) の合計とし、船生演習林の調査結果から、図-6.11の式を適応した。最大集材距離は集材線の長さとし、集材材積は集材線より最大横取距離 20 m のバッファ領域を作成、この

範囲内にある立木本数に各林分の単木材積を乗じたものに、間伐率 30% を乗じて算出した。

$$Y_{cy} = \frac{T_c \times (muc + luc)}{3,600 \times pv} \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$T_c = \frac{L_y}{vcl} + \frac{2ly}{vy} + sdt \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$Y_{cs} = \frac{luc \times Sw}{3,600 \times 4ly \times L_y \times V} \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$Sw = \frac{2L_y}{vw \times 1,000} + sw \quad \dots\dots\dots(26)$$

Ycy: 直接集材費 (円 / m³)、Tc: 平均サイクルタイム (秒 / 回)、muc: 機械経費 (円 / h)
 luc: 労務経費 (円 / h)、pv: 一回あたりの積載量 (m³ / 回)、Ly: 最大集材距離 (m)
 vcl: 平均搬器走行速度 (m/s)、ly: 平均横取り距離 (m)、vy: 平均横取り速度 (m/s)
 sdt: 荷掛・荷卸時間 (秒 / 回)、Ycs: 架設撤去費 (円 / m³)、Sw: 架設撤去時間 (h)
 V: 単位面積あたり出材量 (m³/m²)、vw: 歩行速度 (km / h)、sw: 歩行時間を除く架設撤去時間 (h)

これらの計算に用いる因子は表-6.1に示す。消耗品費は既報の値 (全国林業改良普及協会 2001) を参考に 86 円 / m³ とした

運材費用は集材土場から、支線作業道上をフォワーダで運搬し、基幹作業道上では 4tトラックで運搬する想定で、澤口 (1996) を参考に決定した。

$$\text{フォワーダ } V_c = V * 0.493 * Lt + 2,660 \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$\text{トラック } V_c = V * 0.290 * Lt + 810 \quad \dots\dots\dots(28)$$

Vc: 運材費用 (円 / m³)、V: 運材量 (m³)、Lt: 運材距離 (m)

開設費用は前章までと同様の方法で、路線設計手法で求めた、土工費用を用いて算出している。ただし、崩壊危険度は考慮していない。

近隣の森林組合の調査結果 (仲畑ら 2010) からチェーンソー伐倒費用は 892 円 / m³、プロセッサによる造材費用は 1,011 円 / m³ とした。

路線開設費用計算の結果は表-6.2となり、作業道作設費用を含めた場合 20,343 円 / m³、作業道作設費用を除いた場合 10,241 円 / m³ と妥当な数字となった。8林班では基幹作業道が、下荷土場を接続したほうが、上荷土場を接続した場合よりも総費用が安くなった。これは基幹作業道が沢沿いに配置されたため、上げ荷

表-6.1 集材費用計算因子

| | |
|--------------------|-------|
| 平均搬器走行速度(m/s) | 0.91 |
| 平均横取り距離(m) | 10.00 |
| 平均横取り速度(m/s) | 0.13 |
| 荷掛・荷卸時間(s/回) | 87.00 |
| 架設撤去時間(歩行時間を除く)(h) | 0.71 |
| 歩行速度(km/h) | 2 |
| 機械経費(円/h) | 5,035 |
| 労務経費(円/h) | 0 |

表-6.2 路網開設費用結果 (8林班)

| | | 開設費 | 開設距離 | 円 / m |
|----|----|------------|-------|--------|
| 下荷 | 基幹 | ¥4,970,505 | 789m | ¥6,300 |
| | 支線 | ¥2,886,917 | 637m | ¥4,532 |
| 上荷 | 基幹 | ¥5,037,290 | 800m | ¥6,297 |
| | 支線 | ¥4,778,316 | 1032m | ¥4,630 |

土場に到達するまでの支線作業道の開設延長が長くなり、開設費用が大きくなっていることが、原因と考えられる。また、作業費用を合計した結果(表-6.3)も下荷集材が低コストとなった。集材範囲と施業対象面積の割合である開発率を見てみると57%ほどで、低い割合となっている(表-6.4, 図-6.12)。

7林班においては、下げ荷・上げ荷ともに配置結果は異なるものの、開設距離はほぼ同様となり、費用は大きく変わらない結果となった(表-6.5, 6.6)。開発率は81%となり、集材線が効率よく配置された(表-6.7, 図-6.13)。

8林班では開発率が低くなったが、これは流水線から発生する基本的な集材線のみを想定した結果であ

表-6.7 開発率結果 (7林班)

| | |
|--------|-------|
| 対象小班面積 | 9.1ha |
| 集材面積 | 7.4ha |
| 開発率 | 81% |

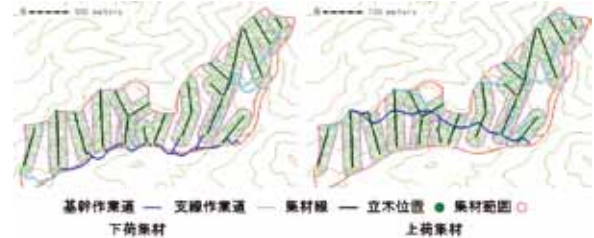


図-6.13 7林班集材範囲

る。実際の集材作業では、土場の接近した点では、タワーヤードを据え置き、集材線を放射状にかけ替えながら集材するため、計算結果よりも開発率は大きくなると考えられる。また、今回は上荷・下荷土場同士のみの接続であるため、集材線と重なった支線作業道が配置されている部分があるが、土場の組み合わせを探索しながら、最適な配置を検討していく必要がある。

6.5 まとめ

LiDAR データに基づく高解像度 DTM・DSM を用いて、集材作業を考慮した路網配置計画手法を開発した。これまでの配置手法に比べ、高解像度情報による詳細な現況を用いることで、施業対象小班を抽出しながら、実際の作業を想定した配置計画案を提案可能となった。今後の課題としては、今回の集材方法はタワーヤードを想定しているが、スイングヤードを用いたシステムや、高密度路網で路線上から、ロングリーチハーバスタやグラブプロダを用いた集材システムに対応可能にする必要がある。また、これと併せて土場の組み合わせを考慮しながら、より現場での作業に生かせる形での配置を行えるように改善する必要がある。

第7章 総括

本研究では、LiDAR データに基づく高解像度 DTM・DSM を利用し、開設費用最小となる路線設計自動化と、作業対象林分内における路網配置手法を開発し、コンピュータ上で基幹道から支線作業道までの配置計画支援が可能となった。以下研究を総括する。

第二章において路線開設前後に計測した、LiDAR データから作成した 1m グリッドの DTM を利用し、路線開設時の土工量推定を行った。実測値との比較において、従来用いられていた 10 m グリッドの DTM に比べ、高精度で土工量を把握することが可能で、代替路線検討に利用可能なことが明らかとなった。

第三章では、LiDAR データから地形情報を利用する際の問題点である、地形以外のノイズを取り除く手法について検討した。LiDAR はレーザーの反射を利用するため、3次元形状を測定する際に、枝葉や植生等の地物によって遮られ、未処理の状態では地形形状のみを表してはいない。そこで、様々なフィルタリング

表-6.3 伐出費用結果 (8林班)

| | | 下荷 | 上荷 |
|----------------------------|----|-------------|-------------|
| 運材費 | 基幹 | ¥126,371 | ¥158,332 |
| | 支線 | ¥171,643 | ¥277,776 |
| 集材費 | | ¥6,187,672 | ¥6,187,672 |
| 伐倒 | | ¥693,808 | ¥693,808 |
| 造材 | | ¥786,368 | ¥786,368 |
| 合計(路網費用を除く) | | ¥7,965,862 | ¥8,103,955 |
| 円/m ³ (路網費用を除く) | | ¥10,241 | ¥10,419 |
| 伐出費用合計 | | ¥15,823,284 | ¥17,919,561 |
| 円/m ³ | | ¥20,343 | ¥23,038 |

表-6.4 開発率結果 (8林班)

| | |
|--------|--------|
| 対象小班面積 | 11.4ha |
| 集材範囲 | 6.5ha |
| 開発率 | 57% |

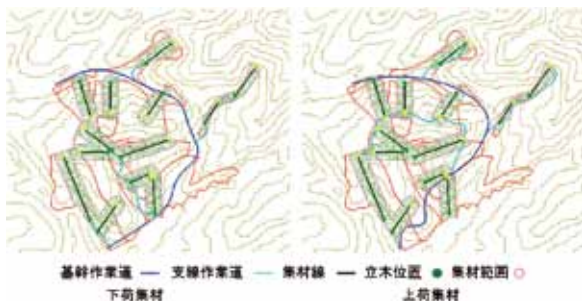


図-6.12 8林班集材範囲

表-6.5 路網開設費用結果 (7林班)

| | 開設費 | 開設距離 | 円/m | |
|----|-----|------------|------|--------|
| 下荷 | 基幹 | ¥3,847,401 | 589m | ¥6,532 |
| | 支線 | ¥2,881,034 | 640m | ¥4,502 |
| 上荷 | 基幹 | ¥3,327,353 | 507m | ¥6,563 |
| | 支線 | ¥3,308,078 | 731m | ¥4,525 |

表-6.6 伐出費用結果 (7林班)

| | | 下荷 | 上荷 |
|----------------------------|----|-------------|-------------|
| 運材費 | 基幹 | ¥110,711 | ¥95,162 |
| | 支線 | ¥202,974 | ¥231,926 |
| 集材費 | | ¥3,827,192 | ¥3,827,192 |
| 伐倒 | | ¥577,258 | ¥577,258 |
| 造材 | | ¥654,268 | ¥654,268 |
| 合計(路網費用を除く) | | ¥5,372,403 | ¥5,385,807 |
| 円/m ³ (路網費用を除く) | | ¥8,302 | ¥8,322 |
| 伐出費用合計 | | ¥12,100,838 | ¥12,021,238 |
| 円/m ³ | | ¥18,699 | ¥18,576 |

手法が開発されてきたが、地物が多く、地形形状が複雑な山岳林において有効な手法がないため、独自のフィルタリング手法である交角法を開発した。交角法での自動処理の結果は、自動+手動フィルタリングを行い、メーカが作成したDTMとほぼ同等の精度となり、路肩や尾根などの再現性を高めることが可能となった。

第四章では、任意の始終点間における、開設費用を最小化する路線設計手法を検討した。第二章で検討した、路線設計法は路線の通過候補点を任意で入力していたが、3次式スプラインと動的計画法を用いて、2点間の開設費用が最小となる路線の探索手法を開発した。この手法は、平面線形でなく、勾配の変化、法面長を抑えることができ、地形順応型林道設計に効果的であった。また、土工費用最小路線の探索も可能となり、実際の林道に比べ、開設費用を抑えた林道設計を自動的に行うことができるプログラムを開発することができた。

第五章では、実際の開設時に大きく影響を与える、路線の崩壊危険性と、開設区間の土層厚について検討した。崩壊危険性については、力学的評価手法である、無限長斜面安定解析式に10年ごとの確率雨量を与え、崩壊危険度分布を把握した。土層厚を広域に調査するのは困難なことから、地形傾斜と集水域平均奥行きでクラス分けを行う手法の適応性を検討したところ、現地調査の結果をほぼ再現しており、この手法を用いて土層厚推定が可能であった。斜面安定解析は因子として用いられていない、植生等の影響も大きいと考えられるが、この結果を利用して、路線の修復費用と、切岩を考慮に入れた路線設計が可能となった。

第六章において、これまで検討してきた路線設計手法は各路線の適正化であったが、施業計画においては、効率的な路網の配置も必要となる。そこで、LiDARによる高解像度情報を利用し、集材作業を考慮した路網配置計画手法を検討した。LiDARデータのDSMから、間伐対象林分を把握し作業対象小班の決定、地形情報から集材線の決定、土場位置を結ぶ、ドロネー網とシュタイナー木を利用した基幹作業道配置、各土場を接続する支線作業道配置の順で処理を行う手法を開発した。接続した各作業道において、これまで開発した路線設計を適応し路線開設費用の最小化を行い、DSMより立木の情報を把握し、集運材費用を算出することで、これまでに比べより具体的な配置計画案を提案可能となった。

本研究における手法を利用することで小班規模での路網配置が可能となるが、設計・配置結果をほぼ費用によって評価を行っている。そのため、単価が変わることによって線形・配置に影響を与えられられる。土工量・土質・安全性・作業条件等の評価指標も、施業体系や経営状況によって優先順位が異なってくる。今後は、各指標を費用によってまとめるのではなく、配置計画における優先事項を考慮した上で、より効果的な配置案を提案できるようにしたい。

また、LiDARデータの入手はまだ困難であるが、現在、都市部においてはLiDARをベースとしたDTM

の提供が始まっている。さらに、各測量メーカが一度撮影した範囲をアーカイブとして安価に提供し始めており、今後より普及が進むと考えられる。そのような状況の中で本研究では、LiDARデータを用い高解像度情報を把握することで、施業計画立案に必要な、基幹道設計、集材システムの検討、細部路網配置を行うことができた。また、従来に比べ高い地形再現性であるため、作業費用がより正確に把握可能となり、作業現場において利用可能なレベルでの配置計画を提示することができた。これによって、多くの労力・経験が必要となる、配置計画の支援が可能になったと考えられる。

謝辞

本論文を作成するに当たり、学部生のころから長きに渡って、研究の基礎から終始丁寧に細かな指導を行ってくださった宇都宮大学農学部有賀一広准教授、宇都宮大学農学部田坂聡明教授に心から厚く御礼を申し上げます。また、研究の軸となっているLiDARのデータを提供していただき、様々な貴重なご意見を頂いた宇都宮大学農学部松英恵吾准教授、考察を深めるにあたって貴重なご助言を頂いた、宇都宮大学農学部執印康裕准教授に心から厚く御礼を申し上げます。ご校閲の労をとっていただき、ご指導ご助言頂きました東京農工大学石川芳治教授、岩岡正博准教授に心から感謝の意を表します。そして、研究室での研究、生活面すべてにおいて様々なご支援を頂いた、宇都宮大学農学部森林工学研究室学生諸氏に感謝いたします。

引用文献

- 有賀一広・Miyata, S. (2004) ヘリコプター搭載型レーザー計測システムによる林道測量. 森林利用学会誌 19(1), 49-54
- Aruga, K., Sessions, J., Miyata, E.S. (2005) Forest road design with soil sediment evaluation using a high resolution DEM. *J.For.Res.*10:471-479
- 浅野広樹 (2001) 3D レーザースキャナの地すべり計測への適用性. 第40回日本地すべり学会研究発表講演集, 279-282
- Christopher, S. (2006) Forest Road Decommissioning: Modeling the Effect on Hydrological Connectivity. University of Southern Queensland 69pp
- Chung, W., Sessions, J. (2001) Designing a forest road network heuristic optimization techniques. In Proceedings of the 24th Meeting of the Council of Forest Engineering, July 15-19, Snowshoes, WV.
- Clark, M.M., Meller, R.D., McDonald, T.P. (2000) A three-stage heuristic for harvest scheduling with access road network development. *For.Sci* 6:204-218
- Coulter, E., Chung, W., Akay, A., Sessions, J. (2001) Forest road layout using a high resolution digital terrain model generated from LIDAR data. In Proceedings of the First International Precision Forestry Symposium, June 2001, University of Washington, Seattle, WA.
- Dahlin, B., Sallnas, O. (1992) Designing a forest road network using the simulated annealing algorithm.

- In Proceedings of Computer Supported Planning of Roads and Harvesting Work-shop, 26-28 August 1992, Feldafing, Germany. Edited by J. Sessions. University of Munich, Feldafing, Germany. pp. 36-41
- Dean, D.J. (1997) Finding optimal routes for network of harvest site access roads using GIS-based techniques. *Can. J. For. Res.* 27, 11-22. doi:10.1139/cjfr-27-1-11.
- Dijkstra, E.W. (1959) A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271. doi:10.1007/BF01386390
- Flood, M., Gutelius, B. (1997) Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63(4), 327-329 and 363-366
- 福田正巳 (1974) Digital terrain モデルにおける地形解析について. 日本地理学会春季大会予稿集 62-63
- 五島正裕・執印康裕・田坂聡明・有賀一広・松英恵吾・内藤健司 (2008) 船生演習林における表層崩壊と土層厚・土層構造の関係. 宇都宮大学農学部演習林報告 44,15-31
- 後藤純一 (1982) 山岳林施行に対する数値地形図の応用 (I) - 数値地形図および傾斜分布図について -. 高知大学農学部演習林報告 9,1-13
- 後藤純一・緒方裕明 (1983) 山岳林施行に対する数値地形図の応用 (II) - 林道の概略設計と林内到達時間に基づく林道配置の評価 -. 高知大学農学部演習林報告 10,59-76
- 長谷川裕之 (1999) 3次元 GIS のためのデータ作成 - 航空機搭載スキャナシステムによる形状データ取得 -. 国土地理院時報 (92), 21-26
- 平賀昌彦 (1972) 電算手法による林道網計画法に関する研究 (III) 簡単な伐区形状ボタンによる集材作業道網決定の一方法. 林業試験場研究報告 No.245,99-158
- 堀高夫・北川勝弘・長谷川好正 (1971) 林内到達距離の分布に関する研究. 日本林學會誌 53(11), 355-358
- 堀高夫・北川勝弘 (1987) 点格子法による平均到達距離推定値の誤差. 日本林學會誌 69(4), 146-151
- 堀高夫・李永浩 (1989) 林道網計画対象地の傾斜分布による地形評価 (I) 地形評価指標に関する検討. 日本林學會誌 72(2), 151-153
- 市原恒一 (1985) 作業道の縦断勾配設計法および地形図による土工量推定法. 日本林學會誌 67(6), 228-235
- Ichihara, K., Tanaka, T., Sawaguchi, I., Umeda, S., Toyokawa, K. (1996) The Method for Designing the Profile of Forest Roads Supported by Genetic Algorithm. *Journal of forest research* 1(1), 45-49
- 飯田智之・田中耕平 (1997) 簡易貫入試験から見た土層深と地形の関係. 地形 18(1), 61-78
- 井上源基 (1989) トラクタ集材路網の配置に関する研究 -2- トラクタ集材のための集材路網計画法. 林業試験場研究報告 (353), 1-126
- 石川知明・芝正己・神崎康一 (1995) 地理的最適手法を応用した林内路網配置の評価方法. 日本林學會誌 77(2), 117-123
- 板谷明美・山崎忠久 (1999) 林道開設に伴うつぶれ地の規模とその要因. 森林利用学会誌 15(1), 19-24
- 伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司 (2009) 航空機 LiDAR による樹冠の再現性. 日本森林学会誌 91(5), 326-334
- Kamiizaka, M. (1963) Studies on optimum density of forest roads (I). *J.Jph.For.Soc.* 45,289-292
- Kamiizaka, M. (1966) Studies on optimum density of forest roads (II). *J.Jph.For.Soc.* 48,48-54
- 神崎康一 (1973) 林道設計とダイナミックプログラミング. 日本林學會誌 55(4), 144-148
- 神崎康一 (1974) 林道路線選定の数学的方法について. 日本林學會誌 56(12), 415-424
- 神崎康一・三宅徹 (1990) 急傾斜地作業路網の評価指数について. 京都大学農学部演習林報告 62, 208-214
- Kato, S.(1976)Studies on forest road system -Preliminary report on the road density. *Bull. Tokyo Univ. For.* 63,215-233
- 加藤正人 (2004) 森林リモートセンシング. 日本林業調査会 230 ~ 233
- 北川勝弘 (1972) 林道の路線選定の自動化に関する研究 (I) - 均一な縦断勾配の場合. 第 83 回日本林学会大会講演集, 420-423
- 北川勝弘 (1991) 山岳林地域における地形解析に関する基礎的研究. 名古屋大学農学部演習林報告. 11, 39-192
- 小林洋司 (1983) 山岳林における林道網計画法に関する研究. 宇都宮大学農学部学術報告特輯 (38), 1-101
- 小林洋司・仁多見俊夫 (1991) 小規模林業地における林内路網計画について. 東京大学農学部演習林報告 85, 1-10
- 小林洋司・小野耕平・山崎忠久・峰松浩彦・山本仁志・鈴木保志・酒井秀夫・田坂聡明 (2002) 森林土木学. 朝倉書店 4-9
- Kraus, K., Pfeifer, N.(1998) Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *J. of Photogrammetry & Remote Sensing.* 53, 193-203.
- Liu, K., Sessions, J. (1993) Preliminary planning of road systems using digital terrain models. *J. For. Eng.* 4, 27-32
- 丸山裕一 (2002) ハイパースペクトルデータによる地質・資源調査. 写真測量とリモートセンシング 41(4), 25-28
- 政春尋志 (2006) 航空機レーザースキャナデータのフィルタリング小特集について. 写真測量とリモートセンシング 45(4):5-7
- 松英恵吾・伊藤拓弥・内藤健司 (2006) 航空機 LiDAR による森林資源量推定: 密度の異なるスギ・ヒノキの林分パラメータ推定. 写真測量とリモートセンシング 45(1), 4-13
- 松英恵吾・大澤智也・有賀一広・執印康裕・田坂聡明・内藤健司 (2010) 航空機 LiDAR データによる要間伐林抽出指数の開発. 第 121 回日本森林学会発表

要旨集

- 松本武・北川勝弘 (2000) 山間地域における道路網の配置構造解析と評価指標の検討. 日本林學會誌 82(2), 154-162
- 松岡暁・山越隆雄・田村圭司・長井義樹・丸山準・小竹利明・小川紀一朗・田方智 (2009) LiDAR データの差分処理による流域土砂動態把握の試み. 砂防学会誌 62(1), 60-65
- 松崎健・北川勝弘・鈴木正登 (1976) 数値地形図の自動的作成方法. 24 回日本林学会中部支部大会発表講演集 93-98
- Matthews, D.M. (1942) Cost control in the logging industry. 374pp Mc Graw-hill Book Co. Ins.
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., Hendrix, C.J. (2000) Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 66(11), 1367-1371.
- Minamikata, Y. (1967) Studies on the planning of forest road network. *J.Jph.For.Soc.* 49,53-55
- 南方康 (1977) 林内における基礎路網密度. 日本林學會誌 59,298-300
- 南方康・酒井秀夫・伊藤幸也 (1985) 複合路網の整備目標. 東京大学農学部演習林報告 74,81-96
- 村井俊治 (1974) 地形の数量化. 土木学会誌 58,93-99
- 村井俊治・白殿基・篠田徹 (1978) デジタルテレインモデルとデジタルフォトマップの手法に関する研究. 写真測量 13(1),1-7
- 村上広史・筒井俊洋・柴田拓・岩浪英二 (1997) ヘリコプター搭載型レーザスキャナの 3 次元計測精度. 写真測量とリモートセンシング 36(3), 58-61
- Naessee, E. (1997) Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *J. of Photogrammetry & Remote Sensing*. 52, 49-56,
- 南雲秀次郎・北岡篤 (1983) 線形モデルによる収穫予定法の研究 (II) 東京大学千葉演習林における林道開設順序の決定. 日本林學會誌 65(5), 172-178
- 仲畑力・有賀一広・齋藤仁志・伊藤要・村上文美・金築佳奈江・前田由紀恵 (2010) 那須野ヶ原地域における間伐材搬出作業の機械化による生産性・コスト改善の可能性 - 現状の作業分析から -. 宇都宮大学農学部演習林報告 46, 19-26
- 中澤昌彦・鈴木秀典・岡勝・田中良明・吉田智佳史・近藤耕次・松本武 (2007) ネットワーク分析を用いた山村地域における道路網の発達過程に関する研究. 森林利用学会誌 22(1), 15-20
- 日本林道協会 (2004) 平成 16 年度版森林整備必携. 日本林道協会 :8 ~ 24,265
- 西沢正久 (1972) 森林測定. 農林出版株式会社 348pp
- 大石哲・丸山智康 (2006) フィルタリングの事例と最近の動向. 写真測量とリモートセンシング 45(4):13-17
- 大川畑修 (1988) 架線集材における路網計画に関する研究. 林業試験場研究報告 (351), 1-79
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司 (2000) ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の 3 次元リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌 20(4), 394-406
- 逢坂興宏・塚本良則 (1987) 自然斜面の土層の厚さについて. 緑化工技術 12(3), 1-6
- Reutebuch, S. (1988) ROUTES: A computer program for preliminary route location. USDA Gen. Tech. Publication. PNW-GTR-216, Portland, OR.18p.
- 林野庁 (2010a) 平成 22 年度森林林業白書
- 林野庁 (2010b) 森林・林業基本政策検討委員会最終とりまとめ「森林・林業の再生に向けた改革の姿(案)」の骨子 林野庁業務資料
- 林野庁 (2010c) 路網・作業システム検討委員会最終とりまとめ 林野庁業務資料
- Russell, A. W., Dietterick, B.C., Mastin, T., Strohm, R. (2010) Forest Roads Mapped Using LiDAR in Steep Forested Terrain. *Remote Sens.* 2, 1120-1141.
- Saito, M., Aruga, K., Matsue, K., Tasaka, T. (2008) Development of the forest road design technique using LiDAR data of the Funyu experimental forest. *J. For. Plann.* 13 : 147 ~ 156.
- 酒井秀夫 (1987) 合理的集運材方式に基づく長期的路網計画に関する研究. 東京大学農学部演習林報告 76,1-85
- 酒井秀夫 (2004) 作業道 - 理論と環境保全機能. 全国林業改良普及協会 284pp
- 酒井徹朗 (1981) 林道の概略設計について. 日林論 (92),533-536
- 酒井徹朗 (1982) 林道の配置計画について (I) — 端点除去法—. 京都大学農学部演習林報告 (54), 172-177
- 酒井徹朗 (1983) 林道の配置計画について (II) — 集材距離・開設長による最適配置—. 京都大学農学部演習林報告 (55), 222-229
- 酒井徹朗 (1986) 林道の配置計画について (IV) 林道開設順について. 京都大学農学部演習林報告 (57), 207-216
- 酒井徹朗・楊筱琴 (1990) 格子面法による平均到達距離の推定. 日本林學會誌 72(1), 11-16
- 澤口勇雄 (1996) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第 1 報) 林道路線評価パラメータ. 森林総合研究所研究報告 (372), 1-110
- Segebaden, G. (1964) Studies of cross-country transport distances and road net extension. *Stud. For. Suec.* 18, 9-39
- 芝正己 (1986) 山岳地域の地形特性の計量化に関する基礎的研究. 宮崎大学農学部演習林報告 12,1-76
- Stuckelberger, J.A., Heinemann, H.R., Chung, W (2004) Improving the effectiveness of automatic grid cell based road route location procedures. In proceedings of the 12th International Mountain logging Conference 13-16 June 2004, Vancouver, B.C Edited by M Clark University of British Columbia. Vancouver B.C CD-ROM

- 杉盛啓明・恩田裕一・村出直明 (2003) 樹高の空間分布を考慮した航空機レーザスキャナからの地表面推定手法. 写真測量とリモートセンシング 42(1), 4-11
- 州濱智幸 (2001) LIDAR による森林計測. 森林航測 (193), 7-11
- Suzuki, H., Umeda, S., Yamaguchi, S. (2007) Influence of terrain conditions on forestry road construction on ridges. 森林利用学会誌 22(3), 133-142
- 執印康裕・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明・堀田紀文 (2009) 森林管理を対象とした分布型表層崩壊モデルの適応について 日本緑化工学会誌 36(1), 27-32
- 田坂聡明・越智士郎・松尾毅 (1996) スプライン関数を利用した地形順応型林道の設計. 宇都宮大学農学部演習林報告 32, 17-26
- 田坂聡明 熊倉由典 峰松浩彦 (2000) ニューラルネットワーク手法によるタワーヤダ集材架線の適正配置法. 森林利用学会誌 15(3), 213-220
- 田坂聡明・熊倉由典・峰松浩彦 (2002) 作業機械出力をパラメータとした路網密度の決定方法. 森林利用学会誌 17(3), 133-142
- 露木聡 (1998) 森林分布情報の特性と処理: 森林の位置情報の把握. 情報地質 9(3), 147-153
- 梅田修史・鈴木秀典・山口智 (2007) 作業道路網開設に関する一考察. 森林利用学会誌 22(3), 143-152
- 宇都宮大学農学部森林科学科・附属演習林 (2010) 第7次編成経営計画説明書. 宇都宮大学農学部附属演習林 51pp
- 山口富士夫訳 (1979) コンピュータグラフィックス. 日刊工業新聞社 130 ~ 148
- 横田宏行・中島保・民野孝臣 (2006) ローラー法によるフィルタリング紹介. 写真測量とリモートセンシング 45(4):18-20
- Yoshimura, T. (1997) Development of an expert system planning a forest road based on the risk assessment. Kyoto University Press, Kyoto
- 吉村哲彦・酒井徹朗 (1998) ネットワーク分析を用いた山間部における道路網の評価. 森林利用学会誌 13(3), 193-200
- 全国林業改良普及協会編 (2001) 機械化のマネジメント. 全国林業改良普及協会 239pp

LiDAR データを用いた林道設計と作業道配置支援手法の開発

斎藤仁志

和文要約

本研究は、森林管理、木材生産活動には必要不可欠である林内路網整備を効率的に行うため、これまでの数値地形図では地形の再現性が低く実用化が困難であった、コンピュータ上での林道設計・作業道配置支援手法を、森林域の詳細な地形を把握可能な航空機 LiDAR データを用いて、開設コスト、崩壊危険度等を考慮して開発した。

林道設計では、通常の道路設計と異なり開設コストの制約が大きく、開設コストを低く抑えるための工夫

として、構造物を少なくするための路線開設位置、土工量を最小化する線形の採用などの手法が必要になる。このため、適切な設計を行う際には、詳細な地形情報が不可欠となる。そのために、第二章では従来使用されてきた DTM に比べ、詳細な地形形状を把握できるとされている、LiDAR データを林道設計に適用した際の有効性について検討した。LiDAR 計測によって作成された DTM と従来から用いられている地形図から作成した DTM で、林道開設時における土工量を推定し、代替路線の設計手法の検討を行った。結果は、LiDAR データに基づく DTM を利用することで、2.67% の誤差で土工量が推定でき、代替路線の検討も簡易に可能となった。しかし、森林内においてレーザ計測の誤差が生じていることが明らかとなり、効果的な地形推定手法の検討が必要となった。

第三章では、LiDAR データの地表面推定手法について検討した。これまでのフィルタリング手法は主に都市部を対象としており、森林域に適応すると小規模な尾根や沢、路肩等の微地形の再現性に問題があるため、新たなフィルタリング手法である交角法の開発を行い、地形の再現性の向上を図った。交角法での自動処理の結果は、自動+手動フィルタリングを行い、メーカーが作成した DTM とほぼ同等の精度となり、路肩や尾根などの再現性を高めることが可能となった。

作成した高精度地形情報を活用し第四章では、3次式スプラインとダイナミック・プログラミングを用い、林道開設費用を抑えた自動設計手法の検討を行った。林道の線形は地形に順応しながら、開設費用を抑えるためには、路線全体での土工量のバランスをとることが望ましい。そこで、任意に設定した始点から終点間において、自動的に通過候補点を決定し3次式スプラインで点間を補間しながら、最小の開設費用となる線形を選択する方法を開発した。この手法は、平面線形だけでなく、勾配の変化、法面長を抑えることができ、地形順応型林道設計に効果的であった。また、土工費用最小路線の探索も可能となり、実際の林道に比べ、開設費用を抑えた林道設計を自動的に行うことができた。

第五章では、実際の開設時に大きく影響を与える、路線の崩壊危険性と、開設区間の土層厚について検討した。崩壊危険性については、力学的評価手法である、無限長斜面安定解析式に10年ごとの確率雨量を与え、崩壊危険度分布を把握した。土層厚を広域に調査するのは困難なことから、地形傾斜と集水域平均奥行きでクラス分けを行う手法の適応性を検討したところ、現地調査の結果をほぼ再現しており、この手法を用いて土層厚推定が可能であった。この結果から、路線の修復費用と、切岩を考慮に入れた路線設計が可能となった。

ここまでの章では、林道もしくは基幹作業道の設計を主に検討していた。効率的な基盤路網整備を行う際には、基幹道から伸びる、支線作業道の配置も重要となる。そこで第六章では、効率的な路網配置を行うために、LiDAR による高解像度情報を利用し、集材作業を考慮した路網配置計画手法を検討した。作業道の

配置は林況や集材システムに即して、開設順位、路網密度等を決定する必要があるが、林況が記載されている森林簿は、現状から乖離している場合も多く見られ、配置計画検討の際にあまり有効ではない。

そこで、LiDAR データの DSM から、間伐対象林分を把握し作業対象小班の決定、地形情報から集材線の決定、土場位置を結ぶ、ドロネー網とシュタイナー木を利用した基幹作業道配置、各土場を接続する支線作業道配置の順で処理を行う手法を開発した。接続した各作業道において、これまで開発した路線設計を適応し路線開設費用の最小化を行い、DSM より立木の情報把握し、集運材費用を算出することで、これまでに比べより具体的な配置計画案を提案可能となった。

以上のことから、LiDAR データを用い高解像度情報を把握することで、施業計画立案に必要な、基幹道設計、集材システムの検討、細部路網配置を行うことができた。また、従来に比べ高い地形再現性であるため、作業費用がより正確に把握可能となり、作業現場において利用可能なレベルでの配置計画を提示することができた。これによって、多くの労力・経験が必要となる、配置計画の支援が可能になったと考えられる。

Development of forest road design and strip road networks arrangement support techniques using LiDAR data

Masashi Saito

Summary

This study developed the forest road design and strip road networks arrangement support techniques on a computer in order to efficiently establish forest road networks which were indispensable to forestry management and wood production. This method has been developed using the LiDAR data which represented the details of topography even on the forested areas. This method has also been developed considering establishment costs as well as collapse risk areas.

Since establishment cost constraints of the forest road design were severer than those of the normal road design, it was necessary to minimize the amount of earthwork volumes and to reduce the number of structures. Detailed topographic information was essential for appropriate forest road design. The second chapter examined the effectiveness of the LiDAR data adapted to the forest road design. The LiDAR data can represent a more detailed topography than the existing DTM. Alternative route design methodology was examined while estimating the earthwork volumes of the forest road design with DTM generated from the LiDAR data and the existing topographic maps. The error of earthwork volumes with DTM generated from the LiDAR data was 2.67% compared with those of actual forest roads. Alternative routes could be easily examined with this methodology. However, larger error in the forested areas was discovered. Therefore, it was necessary to examine the effective filtering method which extracted topographic information from the LiDAR data in the forested areas.

The third chapter examined the filtering method of

the LiDAR data. Existing filtering methods have been developed for urban areas mainly. There were problems on the reproducibility of the terrain when adapting these filtering methods to the forested areas. Therefore, the new filtering method, namely "the intersection angle method" has been developed to improve the reproducibility of the terrain in the forested areas. As a result, DTM made with the intersection angle method had almost equal accuracy of DTM created by a manufacturer with automatic and manual filtering methods and reproducibility of terrains such as ridges and valleys or shoulders of forest roads in the forested areas was improved.

The fourth chapter examined the automated design method using a dynamic programming and cubic spline in order to reduce the forest road establishment costs with high resolution DTM made in the third chapter. In order to reduce establishment costs, it was desirable to balance the earthwork volumes for the entire route while adapting to the terrain. This method could find the route with the minimum establishment costs between given two points while determining the candidate points to pass automatically with a cubic spline interpolation and optimizing not only horizontal alignments but also vertical alignments with a dynamic programming. This method could reduce establishment costs compared with actual forest roads.

The fifth chapter examined the collapse risks of forest roads and the soil depth of the establishment section. In order to develop a shallow landslide risk map, a slope stability analysis was carried out using the infinite slope stability analysis formula. The soil depth was surveyed using simple penetration tests and the frequency distributions of the soil depth were estimated as logarithmic normal distributions. A soil depth map was made using the mode values of the lognormal distributions. Then, shallow landslide risk maps were also made by a slope stability analysis using these soil depth distributions. Finally, an automatic forest road design technique was developed with a highly accurate digital terrain model and shallow landslide risk map using cubic spline interpolation and dynamic programming. The program could minimize the earthwork costs while avoiding shallow landslide risk areas.

The previous chapters mainly examined the forest road design. In order to efficiently establish forest road networks, it was important to examine the arrangement of strip road networks extending from forest road networks. The forest road density, the forest road network arrangement, and the order of establishment should be determined based on the forest conditions and yarding system. However, the existing forest registration was not useful because described forest conditions have deviated from the actual forest conditions.

The sixth chapter developed the program to establish forest road networks while estimating forest conditions using LiDAR data. The program established forest road networks using graph theorem which guaranteed a unique solution while estimating forest road establishment costs

and yarding operation costs. Yarding operations were assumed to be conducted along stream flow lines. Forest road networks for transportation were established with Delaunay triangulation and Voronoi diagram. Then, strip road networks for forwarding by a forwarder with 4 ton loading capacity were established so as to connect from forest road networks to landings. This program could help forest operation planners establish forest road networks as well as forestry operation system considering economic balances.

This study developed the filtering method to extract a high-resolution DTM from the LiDAR data and techniques to examine forest road design, yarding system, and forest road networks arrangement for forestry operation plans. These techniques could establish forestry operation plans available in forestry operation sites due to their accuracy.