

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15872

研究課題名（和文）高信頼性・高速性を両立する最適伐採スケジュールの探索手法

研究課題名（英文）Reliable and fast identification method for stand-level optimal harvesting schedule

研究代表者

守口 海（Moriguchi, Kai）

高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・講師

研究者番号：70814979

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題の目的は、林分の成長モデルと並列計算技術を活用することで、高速かつ信頼性の高い、最適植栽密度・主間伐スケジュールの探索手法を確立することである。まず、GPUの活用に加えて、最適化モデルに工夫を加えることで、実用的な時間で最適施業体系を提示できる探索手法を明らかにした。さらに、最適施業体系の属性値をゾーニングや造林補助体系の設計に用いる、基礎的・具体的な方法について取り組んだ。造林補助政策の下で、どのように木材生産林を選定すべきかを明らかにするとともに、ニューラルネットワークを援用して現実的な問題を扱う手法を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最適施業体系の探索手法は、目的とする森林の機能を最大限に発揮するための方策を考案するための基盤技術であるが、得られた解が真に最適である、もしくは十分にそれに近いという信頼性は、長年曖昧なままであった。本研究ではこの信頼性を一定程度保証する解を、実用的な時間で与える手法を開発した。さらに、最適施業体系の持つ情報は、補助金制度下における木材生産林のゾーニングでとりわけ重要であることを示すとともに、無数の林分が存在する地域・国スケールでも実用可能な、ゾーニングへの現実的な応用方策を示した。

研究成果の概要（英文）：This study investigated reliable and fast methods for identifying optimal forest management systems using forest growth models and modern parallel computing techniques. Using GPGPU and improving the optimization model, the methods to provide the optimal harvesting model in a short time were developed. Furthermore, the framework for designing forest stand selection and associated subsidization policy by using the stand-level optimal management schedules was investigated. Furthermore, a method to apply the framework under actual situations using neural networks was proposed.

研究分野：森林経理学・森林計画学

キーワード：森林施業体系 大域的最適解 焼きなまし法 高速化 ゾーニング GIS 造林補助金制度 ニューラルネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

最適な森林施業体系の探索は、個々の林分の収益性を高めるだけでなく、炭素固定等の公益的機能を最大化する方策を検討する際や、全国規模の収穫計画や補助金制度の設計をする際に、本質的に必要不可欠となる基盤技術である。そのため、今までに様々な最適施業体系の探索手法が提案されてきた。しかし既往研究では、各時点の既存手法に対する優位性が示されるのみに留まり、信頼性が明確な解との比較が行われなかったために、提示された探索手法の信頼性は不明であり、「最適解」がどれほど「最適」であるのか、不明確であった。そこで本課題実施者は、粗い総当たり法で得た解を比較対象としながら、焼きなまし法を応用した、高い信頼性を有する最適施業体系の探索手法の開発に取り組み、高い信頼性を持ちうる探索手法を見出した。一方、十分な探索性能を得るには探索プロセスを制御するハイパーパラメータの調整が必須であった。さらに、最適施業体系を得るために長い計算時間を要するため、実質的には研究用途のみに活用可能であった。すなわち、最適施業体系を実用的な計算時間で提示することや、最適施業体系に付随する情報を全国規模の収穫計画や補助金制度の設計に応用することは、現実的に不可能のままであった。

## 2. 研究の目的

本課題では、高い信頼性を有しつつも高速な、最適施業体系の探索手法の開発を目的とした。さらに、全国規模の収穫計画や造林補助金制度の設計における、最適施業体系の具体的な役割や応用方法の解明を目指した。

## 3. 研究の方法

まず、本課題実施者が2017年に発表した探索手法[1]を、GPUを利用して実行できるように修正を加えたうえで、ハイパーパラメータの最適化を取り入れることで、汎用性を向上させた。また、2017年の探索手法では十分な結果を得られない条件を発見し、その改良を行った。この改良法と、間伐率を離散化した粗い総当たり法とを比較し、計算時間を低減させながらも信頼性を維持・向上させる探索手法を検討した。

以上の手法では、粗い総当たり法と比較する必要上、間伐実施候補年を定数としていたが、実際には間伐実施年が変数であることを考慮して、より柔軟かつ高速な探索手法を検討した。最適化モデルに改良を加えたうえで、3つの近傍探索法を候補として定義し、互いに比較するとともに、既に考案した手法とも比較することで、信頼性・柔軟性・高速性の面において、より高い性能を有する手法の確立を目指した。

以上の成果により、単一林分の最適施業体系を実用的な時間で提示できる手法が確立されたが、全国規模の収穫計画や補助金制度の設計において、具体的にどのように応用すれば良いか、明確になっていなかった。そこで、最適施業体系の探索手法を、造林補助制度下における木材生産林・補助対象林分の選定に用いる方法論について検討した。その際、地域・国に存在する各林分において、最適施業体系の探索手法を反復的に用いる必要があるために、全国規模の収穫計画や補助金制度の設計に単純に適用すると、非常に長い計算時間を要することが明らかとなった。特に、林分条件が多変数であることに起因して、計算量が指数的に増加する。この問題を緩和するために、機械学習を応用して計算量を低減する方策を検討した。

## 4 . 研究成果

### I. GPU による最適施業体系の高速探索および改良

2017 年に申請者らが開発した最適施業体系の探索手法[1]を、GPU 上で実行できるようにプログラムを作成した。さらに、焼きなまし法において優れたハイパーパラメータを用いられるよう、グリッドサーチとタブーサーチを組み合わせて、ハイパーパラメータ自体も最適化する手法を考案した。このような追加手法を加えたうえで、多数の施業モデルにおいて粗い総当たり法と比較したところ、少数ではあるが、非常に多くの反復計算を行っても、粗い総当たり法より良好な解を得られない場合があることが確認された。その原因を調査したところ、長期に亘って間伐候補年において間伐を見送ることが最適解である場合に、当該事象が発生することが分かった。その原因は以下の通りである。まず、この探索手法は間伐候補年を 5 年毎に固定しており、間伐の見送りは間伐率を 0%にすることで表現される。ただし、間伐率そのものを変数とすると探索性能が低いため[1]、実際には立木本数を変数として、最適施業体系を探索する。これに起因して、最大間伐率が制約条件として与えられた場合、所与の間伐候補年において間伐率が 0%となるような解が発生しにくくなることがある。このことが、上述の問題の原因であることが明らかとなった。そこで、探索初期において間伐率の低い候補解が生成されるよう修正することで、全テストケースにおいて、少数の反復計算でも粗い総当たり法より良好な解を与えられる探索手法が見出された。

### II. 最適化モデルの改良と更なる高速化

上述の手法では、粗い総当たり法で得られる解と混乱なく比較するために、間伐候補年を 5 年毎に固定していた。しかし、焼きなまし法を用いる場合は、実際にはこの制約は不要であり、むしろ柔軟性を不必要に制限しているとさえ言える。さらに、長伐期施業における間伐スケジュールを検討するためには、伐期の延長に伴い変数の数が増加していくため、信頼性の高い最適解を得ることが難しくなる。一方、現実の長伐期施業では間伐間隔が長く、間伐回数はそれほど多くない。そのため、間伐候補年を変数とすれば、形式的には制御変数が 2 倍に増加するが、現実的にはむしろ、制御変数の削減が期待できる。そこで、間伐候補年を可変の変数として最適施業体系の探索を定式化したうえで、焼きなまし法を適用する場合の変数の適切な制御方法について検討した。加えて、最適な植栽本数についても同時に探索できるよう、手法を改良した。3 つの近傍探索法を考案して、最適解の信頼性と計算時間の両面から評価を行い、I. において開発した手法よりも良好な解を、短時間で提示できるようになった。以上の成果により、所与の林分条件に対して、植栽密度、間伐時期・強度、伐期について信頼性の高い最適解を提示できる手法が確立された。

### III. 造林補助政策下における木材生産林選択への最適施業体系の応用

最適施業体系は造林補助政策の下で木材生産林の選択を行う際に、重要な基礎手法であることを、申請者らは 2017 年に明らかにしたが[2]、その時点では一般化された手法の発想に至らなかったため、間伐を考慮しないモデルを用いた、簡易かつ解析的な手法に留まっていた。そこで、間伐等も考慮する、一般化された手法について取り組んだ。その結果、最適施業体系の探索手法を、各林分条件において反復的に用いることにより、造林補助の分配を最適化しつつ、そのもとの最適な植栽密度や主間伐時期・強度をも提示する手法が構成できることを明らかにした。

#### IV. 林分属性が多変数であるときの木材生産林選択の実用的手法

III. において得られた手法は、最適施業体系の探索コストが大きな制約となるため、林分の属性（例えば地位指数や作業性）ごとにカテゴリー化でき、かつそのカテゴリー数が少ない状況でのみ、応用可能であった。しかし実際には、林分の属性は多変数であり、カテゴリー数は変数の数に対して指数的に振る舞うため、カテゴリー化による計算量の縮減には限界がある。しかしながら、ゾーニング等に最適施業体系の情報を用いる場合、施業体系そのものが必要なのではなく、施業体系から求められる各種属性値が、本質的に必要である。そこで、ニューラルネットワークを関数近似器として用いることで、木材生産林の選択を行うために必須となる施業体系の属性値を、短時間で求められる方法を模索した。

候補手法として、入力を林分の属性とし、出力を必須属性値そのものとしたニューラルネットワークを用いる方法、類似したニューラルネットワークを用いるが、林分の属性を仮想的に変更することで、最適施業体系の探索手法を反復的に用いなくても良い方法、の2種類を考案して、その近似精度を比較した。その結果、後者の手法は計算量の削減効果が高いものの、木材生産林の選択に必須な属性値は直接得られず、ニューラルネットワークの出力値同士をさらに計算する必要があるために、近似精度は前者の手法と比較して低く、実用上は難があると考えられた。一方、の方法については、木材生産林の選択に必須な属性値が、概ね十分と思われる精度で得られることが分かった。この方法は よりも大きな計算量を要するが、長野県のGISデータを用いた検討では、オリジナルの（ニューラルネットワークを用いない）方法と比較して、8倍以上早く計算が完了することが分かった。

#### 文献

- [1] Moriguchi, K., Ueki, T., Saito, M., 2017. European Journal of Operational Research 262, 1094–1108.
- [2] Moriguchi, K., Ueki, T., Saito, M., 2017. Land Use Policy 67, 573–583.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Moriguchi Kai	4. 巻 108
2. 論文標題 Identifying optimal forest stand selection under subsidization using stand-level optimal harvesting schedules	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Land Use Policy	6. 最初と最後の頁 105674 ~ 105674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.landusepol.2021.105674	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Moriguchi Kai	4. 巻 191
2. 論文標題 Developing reliable and fast simulated annealing for stand-level forest harvesting schedule with virtual dimensionality reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 106494 ~ 106494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2021.106494	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Moriguchi Kai, Shirasawa Hiroaki	4. 巻 103
2. 論文標題 Effects of the Change of Harvesting Profit Induced by the Increase of Wood Use for Biomass Fuels on the Annual Supply and Minimal Expense for Subsidy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japanese Forest Society	6. 最初と最後の頁 435 ~ 442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4005/jjfs.103.435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Moriguchi Kai	4. 巻 177
2. 論文標題 Acceleration and enhancement of reliability of simulated annealing for optimizing thinning schedule of a forest stand	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 105691
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2020.105691	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Moriguchi Kai, Ueki Tatsuhito, Saito Masashi	4. 巻 7
2. 論文標題 Establishing optimal forest harvesting regulation with continuous approximation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Operations Research Perspectives	6. 最初と最後の頁 100158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orp.2020.100158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Moriguchi Kai	4. 巻 10
2. 論文標題 Estimating polymorphic growth curve sets with nonchronological data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecology and Evolution	6. 最初と最後の頁 9100 ~ 9114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ece3.6528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Moriguchi Kai, Shirasawa Hiroaki, Aruga Kazuhiro	4. 巻 205
2. 論文標題 Accelerating forest stand selection for subsidization using neural networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 107595 ~ 107595
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2022.107595	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 守口海
2. 発表標題 需要-供給バランスによる価格の変動を考慮した長期・広域伐採計画の立案手法
3. 学会等名 第4回「未利用木材利用可能量推計および収穫システム」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 守口海・白澤紘明
2. 発表標題 地利条件を考慮した最適造林補助配分による木材生産林のゾーニング
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------