

# 森林産業における木材輸送費用最小化に対するメディアン型アプローチ

誌名	森林利用学会誌
ISSN	13423134
著者名	瀧,誠志郎 稲川,敬介 高田,克彦
発行元	森林利用学会
巻/号	34巻3号
掲載ページ	p. 137-140
発行年月	2019年7月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 森林産業における木材輸送費用最小化に対するメディアン型アプローチ\*

瀧誠志郎\*\*・稲川敬介\*\*\*・高田克彦\*\*\*\*

瀧誠志郎・稲川敬介・高田克彦：森林産業における木材輸送費用最小化に対するメディアン型アプローチ。森利誌 34 (3) :137 ~ 140, 2019. 日本は国土の約 68% が森林で覆われている世界有数の森林大国であるが、1970 年代以降、森林産業は急激に衰退した。これを受けて本研究では、森林産業に貢献する情報技術の応用を試みる。森林の業界において、多くの場合、伐採された木材は山土場と呼ばれる一時的な集積所に集めて、そこから大型トラックで輸送するのが一般的である。本研究ではこの山土場の位置を適切に決定することにより、木材の輸送費用をできるだけ少なくするモデルを提案する。モデルは、オペレーションズ・リサーチの手法のひとつである  $P$ -メディアン問題を適用する。 $P$ -メディアン問題は、児童の歩行距離を最小にするような小学校の場所の選定などに応用される枠組みである。本研究においては児童の歩行距離を木材の輸送費用とみなすことにより、輸送費用を最小にする山土場の選択に応用する。モデルの実現に必要な木材量や輸送距離は、秋田県の森林に関する地理情報システム（森林 GIS）から得ることができ、実際のデータを用いた数値実験例も紹介する。このような情報技術の活用方法を提示するにより、森林産業の発展に資することを目的とする。

キーワード：森林産業、地理情報システム (GIS)、最適化、山土場

Seishiro Taki, Keisuke Inakawa and Katsuhiko Takata : **Median Problem Approach for Minimization of Wood Transportation Cost. J. Jpn. For. Eng. Soc. 34(3): 137 - 140, 2019.** Japan is one of the forest-rich countries in the world that 68% of the land is covered by forest, however, the forestry and wood industry in Japan has changed into un-active from 70s. In this research, we try to show an approach of information technology for solving problems of the forest industry. In many cases, harvested logs are collected at a temporary place in mountain site, which called the log yard, and the logs are transported from the log yard by large tracks to wood industries. This research proposes an optimization model, which aims to minimize the transportation cost of woods to decide locations of log yards. The model is based on the  $P$ -median problem that is one of the techniques of Operations Research. The  $P$ -median problem is a framework, which applies for a decision problem of location for elementary school to minimize walking distances of children. The forest Geographic Information System (forest GIS) can inform the volume of woods and distance for each area. Using these real data, we show a numerical example.

**Keywords** : erosion, cross-drain, precipitation, road maintenance, road surface drainage

連絡先 (Corresponding author) : 瀧誠志郎 (Seishiro Taki) Email : s\_taki@ffpri.affrc.go.jp

\* Median Problem Approach for Minimization of Wood Transportation Cost

\*\* Seishiro Taki 森林総合研究所 For. and Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687

\*\*\* Keisuke Inakawa 秋田県立大学システム科学技術学部経営システム工学科 Dept. Manage. Sci. and Eng., Fac. Systems Sci. Tech., Akita Pref. Univ., Yurihonjo 015-0055

\*\*\*\* Katsuhiko Takata 秋田県立大学木材高度加工研究所 Inst. Wood Tech., Akita Pref. Univ., Noshiro 016-0876

1. はじめに

日本は国土の約 68%が森林で覆われている世界有数の森林大国である。代表的な森林資源である木材は、燃料としての薪炭材、木工用具の材料、寺社や住宅の建築材などに利用され、古くから日本人の生活は森林と密接にかかわってきた。しかしながら、1970 年代、外国産木材の輸入自由化が始まると、安価な外国産木材の需要が高まり始めた。さらに、外国産木材の需要増大と時期を同じくして、家庭用燃料が薪炭から化石燃料に置き換わるという科学技術的な変革が起こった。結果として、日本の森林資源は建材及び燃料材として競争力を失い、日本の木材自給率は 2002 年に一時 18.8%まで落ち込んだ(林野庁 2017)。その後回復傾向にあるものの、間伐などの手入れがなされずに放置された森林の荒廃と伐期適齢期に至った森林の適切な利用が喫緊の課題である。

このような背景を受けて、本研究では、森林に関する地理情報システム (GIS) の活用方法のひとつとして、森林データを業務の効率化に積極的に利用する事例について紹介する。ここでは、山土場と呼ばれる木材の一時集積場所を、数理モデルの最適化計算によって決定する方法を提案する。これまで作業員の知識と経験を元に決められていた山土場の位置の決定に対して、木材の総輸送費用を最小にする点を求めるという数理手法を応用することにより、人間がおこなう山土場選定作業の支援を試みるものである。

2. 問題設定と目的

日本における木材自給率は、2015 年に 33.2%まで回復している。しかしながら、自給率が 90%以上だった 1950 年代とは状況が全く異なっている(林野庁 2017)。そこで、本研究では、森林 GIS データを活用した森林産業における業務の効率化について考える。

木材の輸送費用最小化を目的として、 $P$ 箇所の山土場を決定する問題について考える。そのため、ここでは各林分から山土場までの移動費用を最小にするような山土場の選定について考える。

山土場とは、伐採した木材を一時的に集めておく集積場所である。多くの場合、山土場から先は大型トラックで輸送するため、比較的 low コストで木材を輸送できる。一方、伐採から山土場までの輸送は多くの林業機械や人件費を利用するため、高コストである。よって、山土場の位置は、全体の輸送費用に大きく関係する。

3. モデルの構築

輸送費用と山土場の選択の関係について、ある領域の森林を単純化した簡単な例を用いて説明する。いま、図-1 の全体を管理する森林領域とする。この領域は A から I までの 9 つの林分で構成されており、林分 A, C, E, F には山土場を建築可能であると仮定する。山土場を建設可能な林分 A, C, E, F を一括して山土場候補地と

呼ぶ。各林分内にある木材の量は表-1 の通りとし、ある山土場候補地から特定の林分に木材を輸送する際の輸送費用の単価は表-2 の通りであると仮定する。単純な例であるので、それぞれの表において単位は省略する。

いま、図-1 の領域に 2 箇所の山土場を建設する状況について考えてみる。たとえば、山土場候補地の A と C に山土場を建設したと仮定すると、林分 D は、山土場 A と C のふたつの内、山土場 A の方に近いので、林分 D の木材は山土場 A に輸送される。このとき、林分 D の木材量は 600 であり、林分 D から山土場 A まで木材を輸送する輸送費用の単価は 1 であるので、林分 D のすべての木材を山土場 A まで輸送する際の輸送費用は、 $600 \times 1 = 600$  となる。同様に、林分 I は、山土場 C の方に近いので、林分 I の木材は山土場 C に輸送される。このとき、林分 I の木材量は 360 であり、林分 I から山土場 C まで木材を輸送する輸送費用の単価は 2 であるので、林分 I のすべての木材を山土場 C まで輸送する際の輸送費用は、 $360 \times 2 = 720$  となる。

このように、ある山土場候補地に山土場の建設を仮定すると、それぞれの林分の木材はできるだけ近い山土場に輸送され、そのときの総輸送費用も計算可能となる。

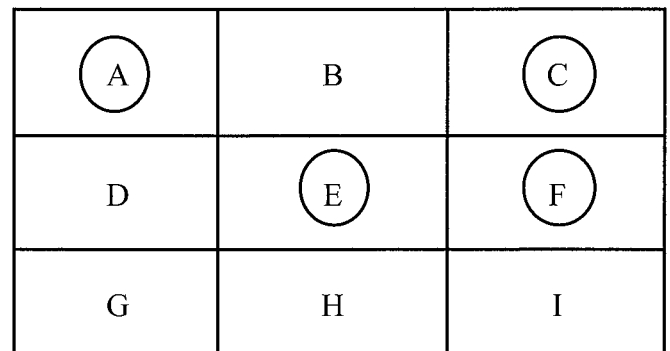


図-1 領域と山土場建設可能な林分のイメージ

表-1 各林分の木材量

林分	木材量	山土場建設
A	800	可能
B	550	
C	780	可能
D	600	
E	1,020	可能
F	1,020	可能
G	1,020	
H	1,020	
I	360	

表-2 各林分間の輸送費用 (距離)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	1	2	1	2	3	2	3	4
C	2	1			2	1	4	3	2
E	2	1	2	1	0	1	2	1	2
F	3	2	1	2	1	0	3	2	1

山土場候補地 A と C に山土場を建設すると仮定するとき、林分 A, B, D, E, G, H の木材は山土場 A に輸送され、林分 C, F, I の木材は山土場 C に輸送される（輸送費用が等しい林分 B, E, H はどちらに運んでもよい）。また、このときの総輸送費用は 10,030 と計算される。

しかしながら、この例は直感的にわかり易いので、A と C に山土場を建設するよりも、A と F に建設する方が輸送費用を少なくできると思うかもしれない。実際、A と F に山土場を建設する場合、林分 A, B, D, G の木材は山土場 A に輸送され、林分 C, E, F, H, I の木材は山土場 F に輸送され、総輸送費用は 6,950 と計算される。このように、どこに山土場を建設するかによって、総輸送費用は大きく変化する。

この例では、直感的なわかり易さのために、輸送費用の単価を単純に林分の縦横の林分の移動数（距離）としているが、実際には、標高や勾配などさまざまな要因を考慮した一般的な費用となる。

#### 4. P - メディアン問題型の定式化

先の例では、4 箇所候補地から 2 箇所の山土場を選択して建設する場合の木材の総輸送費用を計算した。このとき、4 箇所候補地から任意の 2 箇所の山土場を選択する組合せの総数は、6 通りであるので、原理的には 6 通りのすべての山土場の建設案の総輸送費用を計算し、総輸送費用を最も少なくする山土場の組合せを選択すればよい。しかしながら、候補地が 10 箇所あった場合、その中から 4 箇所山土場を選択する組合せの総数は 210 通りとなる。さらに、50 箇所候補地から 20 箇所の山土場を選択する組合せの総数は 47 兆通り以上となる。このような膨大な数の総輸送費用を有限時間内にすべて計算する事は難しい。よって、ここでは P - メディアン問題として定式化し、最適化計算によって最適な山土場を選択する手法について考える。

P - メディアン問題は、オペレーションズ・リサーチの手法（久保ら 2002）のひとつであり、児童の歩行距離を最小にするような小学校の場所の選定などに応用される枠組みである。本研究においては、児童の歩行距離を木材の輸送費用とみなすことにより、輸送費用を最小とする山土場の選択に応用する。

山土場選定における P - メディアン問題は、集合と変数と定数を以下のように定義する事により、定式化する事ができる。

集合：

$i \in S$  : 山土場候補地の集合

$j \in T$  : 林分の集合

変数と定数：

定数  $d_j$  : 山土場候補地  $i$  から  $j$  への輸送費用

$i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M$

$w_j$  : 林分  $j$  の木材量

変数  $x_i$  : 山土場候補地  $i$  に山土場を建設する時 1, そうでない時 0 をとる建設変数

$y_{ij}$  : 林分  $j$  の木材が山土場候補地  $i$  の山土場に輸送される時 1, そうでない時 0 をとる割当て変数

定式化：

$$\min. \sum_i \sum_j w_j d_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_i x_i = P, \quad (2)$$

$$\sum_i y_{ij} = 1, \quad \forall j \quad (3)$$

$$y_{ij} - x_i \leq 0, \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$x_i, y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (5)$$

ここで、(1) 式は、最小化される目的関数であり、すべての林分から建設されるそれぞれの山土場までの輸送費用の総和である。林分  $j$  の木材量  $w_j$  と、林分  $j$  から山土場候補地  $i$  までの輸送費用  $d_{ij}$  を乗じることにより、 $w_j d_{ij}$  は木材量当たりの輸送費用となる。ただし、この輸送費用は割当て変数  $y_{ij}$  が 1 の場合のみカウントされ、割当て変数  $y_{ij}$  が 0 の場合は無視される。これにより、(1) 式は特定の山土場が選択されるときの総輸送費用となる。

また、(2) 式は、配置決定する山土場数が P 箇所であることを条件付けている。(3) 式は、各山土場  $i$  について割当て変数  $y_{ij}$  の和をとると値が 1 になるという条件である。これは、各林分  $j$  が必ずいずれかひとつの山土場  $i$  に割当てられることを意味する。

(4) 式は、技巧的な式であり、 $x_i$  を移項すると  $y_{ij} \leq x_i$  となる。この式により、 $y_{ij}$  は  $x_i$  以下の値しか取ることができない。よって、 $x_i = 1$ 、すなわち山土場候補地  $i$  に山土場が配置されるときのみ、割当て変数  $y_{ij}$  は 1 の値をとることができる。反対に、 $x_i = 0$  の場合は、すべての  $j$  について強制的に  $y_{ij} = 0$  となる。最後に、(5) 式は、 $x_i, y_{ij}$  が取りうる値は 0 か 1 のみであるというバイナリ制約である。

また、この問題では、輸送距離を最小化するような山土場への自然な割当てが実現される。よって、ハーベスト・ユニットの分割をおこないたい場合は、各山土場を中心とする P 個のハーベスト・ユニットを同時に決定することも可能である。

#### 5. 数値実験例

ここでは、秋田県にかほ市におけるスギ人工林全体から、10 齢級（林齢 46 年生～50 年生）の木材を集積するために、P 箇所の山土場を選択する数値実験例を紹介する。われわれが作成した森林 GIS で検索したところ、2015 年時点のかほ市全体において、10 齢級に相当する林分数は 781 箇所である。実際は、この中から山土場建設に適した場所を保有する林分のみを候補地とすべきであるが、本研究では単純に全ての林分を山土場候補地とする。このとき、781 箇所の候補地から、たとえば 6 箇所の山土場を選択する場合の組合せの総数は 300 兆通

りを超える。

はじめに、森林 GIS で検索した各林分  $j$  の木材量を  $w_j$  とする。また、前節の例と同様に、今回の実験においても移動費用として単純な距離を採用することとし、それぞれの林分  $j$  から各林分（山土場候補地） $i$  までの距離を森林 GIS で計算する。このとき、各林分の平面的重心を代表点とし、移動距離は国土地理院発行の数値地図 25,000（空間データ基盤）の道路距離とする。道路に面していない林分においては、最も近い道路までの距離を加算する。これによって、各林分  $j$  と山土場候補地  $i$  の輸送費用  $d_{ij}$  を近似的に算出する。本モデルにおいて、定数となるデータはこの 2 つのみである。

最適化計算には、NTT DATA 数理システムの最適化ソルバーである Numerical Optimizer® を用いて実装されるプログラムを使用する。使用した計算機は、Intel Core i7-2640 M, 2.8 GHz, 8 GB メモリであり、 $P=2$  のときの計算時間は 5 時間ほどであった。本研究では、上述の設備で  $P=10$  までの問題を解くことができた。図-2 は、 $P=10$  とする場合の実行結果である。ピンマークは、選択された山土場を表す。また、それぞれの山土場と同色の記号は、その山土場に割当てられる林分を表す。

## 6. おわりに

本研究では、山土場数が 10 までの問題について実験をおこなった。しかしながら、より高性能なコンピュータで、山土場数が 100 以上の問題をより高速に解くことができることも確認している。今後は、より大規模な問題が解けることも実証したい。

本研究の一部は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「次世代農林水産産業創造技術」地域のリグニン資源が先導するバイオマス利用システムの技術革新により実施した。

## 引用文献

- 久保幹雄・松井知己・田村明久（2002）応用数理計画ハンドブック. 1354pp, 朝倉書店, 東京.
- 林野庁（2017）平成 28 年度 森林・林業白書 全文. オンライン (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/28hakusyo/zenbun.html>). 2017 年 9 月 26 日参照.

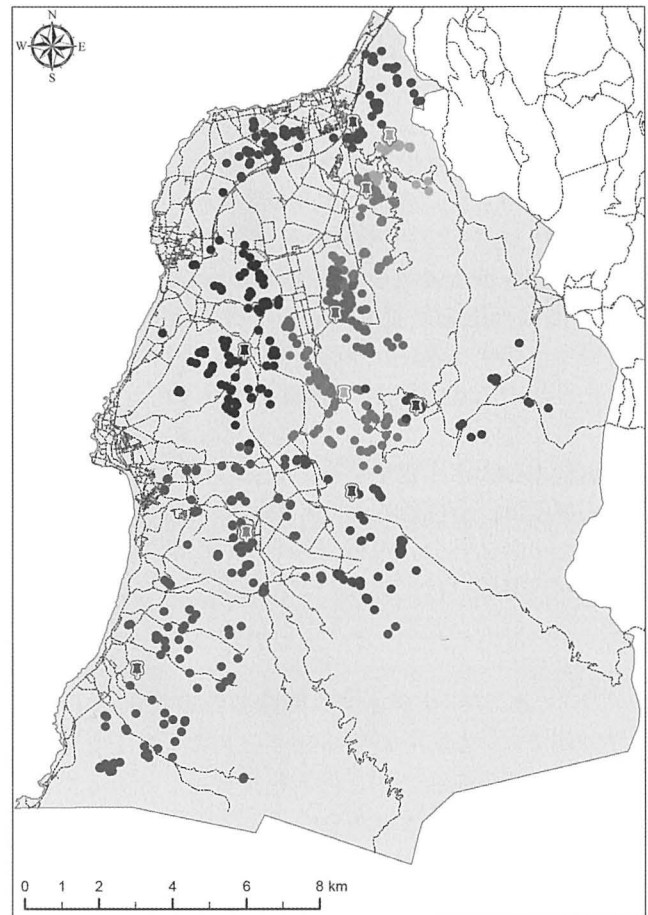


図-2 山土場選択と林分分割の実行結果 ( $P=10$ )