

多雪地帯スギ林における燃材向け 木質バイオマス発生量の推定

図子 光太郎

Estimating the production of low-quality logs and timber cutoffs in Sugi stands of heavy
snow regions for woody biofuel production

Kotaro ZUSHI

富山県農林水産総合技術センター
森林研究所研究報告

No.9 平成29年3月31日 発行

Reprinted from

BULLETIN

OF

THE TOYAMA FORESTRY RESEARCH INSTITUTE

No.9 2017.3

多雪地帯スギ林における燃材向け木質バイオマス発生量の推定

図子 光太郎

Estimating the production of low-quality logs and timber cutoffs in Sugi stands of heavy snow regions for woody biofuel production

Kotaro ZUSHI

根元曲がりを含むスギ林分における発電用燃材向けの低質材および端材の発生量推定モデルの作成を試みた。富山県内の18箇所のスギ林分の543本を造材し、低質材（C材）および端材の発生量を調査した。C材率（C材材積 / 幹材積）は、林分により3.3%から50.9%の範囲をとり、平均すると22.5%となった。端材率（端材材積 / 幹材積）は、0.7%から14.9%の範囲をとり、平均すると5.5%となった。対象となる立木の胸高直径、樹高、樹幹形状級を説明変数とし、ハードルモデルを用いてC材および端材の発生量に関する推定モデルを作成した。推定モデルを用いて調査林分におけるC材発生量を予測した結果、平均二乗誤差および平均誤差率はそれぞれ0.31m³および9.2%となった。また、端材発生量を予測した結果、平均二乗誤差および平均誤差率はそれぞれ0.06m³および6.4%となった。作成した予測モデルを用いることによって根元曲がりを含むスギ林分における燃材向け木質バイオマスの発生量予測を実用的な精度で行えることが示された。

キーワード：スギ林、根元曲がり、低質材、端材、木質燃料

1. はじめに

再生可能エネルギー固定価格買取制度を背景に木質バイオマス発電所の建設が全国的な広がりを見せている。こうしたなか、富山県においても2015年から木質バイオマス発電所（発電規模5750kw）が稼働を開始した。この新たな発電所の場合、パームヤシ殻を助燃剤として用いるが、そのうえで年間約30,000tの燃材を消費する。木質バイオマス発電所の稼働は新たな木材需要を生み出すと同時に、周辺地域における林業の経営や収益構造に多大な影響を及ぼす。このため、森林所有者やその経営委託を受ける林業事業者は、経営計画の策定や収益性の検討にあたって、用材生産量だけではなく、燃材向け木質バイオマスの生産量についても把握する必要がある。

主伐や間伐などの施業が実施される際、林地や土場に残留される枝葉、梢端、根株、端材および大きな曲がりや腐食などを有する低質材などは全て潜在的に発電用燃材として利用できる。しかし、その発生場所、形、大きさなどによって収集・運搬の効率やそれにかかる経費は大き

く異なる。このため発電用燃材としてどこまで利用可能とするかは判断の分かれるところである。上村ら（2009）は、青森、岩手、秋田の北東北3県を対象に、道路から500mの範囲内で行われた主伐および間伐によって発生した端材と枝葉を林地由来の木質バイオマスとして発生量の推定を行った。山田ら（2013）は針葉樹の主伐については枝葉や末木を、間伐および広葉樹については全木を燃材として利用できると仮定し、長期的な燃材の供給可能量について検討した。一方、鈴木ら（2009）および酒井ら（2015）は、収集運搬に要するコストを考慮した場合、林道周辺の土場で発生する低質材あるいは端材のみが燃材として利用可能であるとし、その発生量の推定を試みた。本研究を進めるにあたり、富山県において燃材の生産実態について調査したところ、材長2mあるいは4mの低質材が発電用燃材の大部分を占め、端材については一部で利用が認められたものの、枝葉や根株が燃材として搬出された事例はなかった。このことから本論では造材工程で発生する低質材および端材について燃材として利用可能であると

した。

先にも示したように燃材向け木質バイオマスの発生量についてはこれまでに多くの研究が行われている。これらの研究において木質バイオマスの発生量は、幹材積や林分蓄積に対する低質材、端材、枝葉などの発生量の比率をもとに算出されることが多い。しかし、これらの比率は対象となる林分を構成する立木のサイズや形質によって変化する恐れがある。従って広域レベルでの木質バイオマス発生量を概算する場合には問題がないとしても、林分レベルでの木質バイオマス発生量の推定や収益予測などにこうした手法を用いた場合、大きな誤差が生じるかもしれない。また、富山県のような多雪地帯では積雪による根元曲がりの発生が一般的であり、根元曲がりの程度によって低質材や端材の発生量が大きく変動することが知られている（羽田1960; 図子・嘉戸 2015）。そこで、本論では多雪地帯における燃材向け木質バイオマスの発生量を林分レベルで推定できるようにするため、根元曲がりを有するスギ人工林において、造材工程で発生する低質材や端材の量を調査し、根元曲がりを考慮した低質材および端材の発生量推定モデルの作成を試みた。

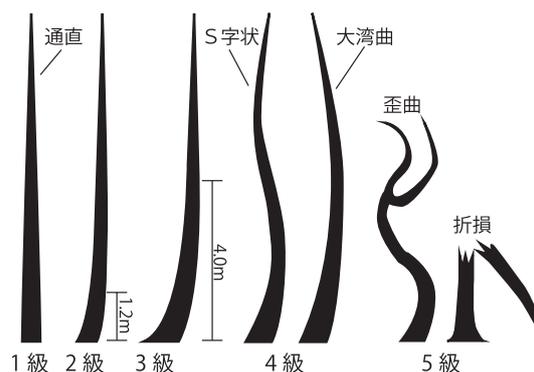


図-1 樹幹形状分類基準

2. 調査方法

調査は富山県内の18箇所のスギ林分において合計543本の立木を対象に行った（表-1）。供試する立木について、伐倒前に胸高直径および樹高を測定するとともに、樹幹形状分類基準（図-1）に基づいて幹の形状を分類した。この分類基準の詳細は既往の報告（図子・嘉戸 2015）に記されている。なお、立木の樹幹形状を評価したところ、5級に分類された立木が少なかったことから、本論では5級と4級の立木を併せて解析した。

立木の伐倒はチェーンソーにより、伐倒木の玉切りおよび枝払いのプロセッサにより行った。

表-1 調査対象木の概要

| 調査林分 | 調査本数 | 平均胸高直径 cm | 平均樹高 m | 平均幹材積 m ³ | 樹幹形状級（本数） | | | | |
|------|------|---------------|--------------|-------------------------|-----------|----|----|----|----|
| | | | | | 1級 | 2級 | 3級 | 4級 | 5級 |
| 安居 | 16 | 26.81 (±7.0) | 19.72 (±3.7) | 0.59 (±0.39) | 0 | 4 | 2 | 10 | 0 |
| 河西 | 29 | 27.17 (±5.2) | 17.98 (±3.8) | 0.52 (±0.28) | 16 | 7 | 3 | 3 | 0 |
| 岩木 | 12 | 25.57 (±7.4) | 19.71 (±4.1) | 0.55 (±0.34) | 0 | 10 | 1 | 1 | 0 |
| 吉友 | 101 | 22.04 (±5.6) | 13.87 (±4.7) | 0.30 (±0.23) | 2 | 26 | 35 | 36 | 2 |
| 山川 | 32 | 27.75 (±11.1) | 17.58 (±5.5) | 0.66 (±0.58) | 14 | 10 | 5 | 2 | 1 |
| 七分一 | 8 | 30.05 (±8.8) | 20.29 (±4.8) | 0.76 (±0.52) | 0 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| 小菅沼 | 13 | 19.35 (±4.6) | 14.93 (±3.3) | 0.24 (±0.16) | 0 | 5 | 7 | 1 | 0 |
| 上牧 | 23 | 22.96 (±3.0) | 16.66 (±4.2) | 0.35 (±0.15) | 0 | 17 | 5 | 1 | 0 |
| 須山 | 13 | 28.63 (±6.8) | 24.59 (±4.3) | 0.83 (±0.55) | 2 | 8 | 3 | 0 | 0 |
| 西笹津 | 54 | 24.83 (±10.1) | 16.47 (±3.1) | 0.47 (±0.51) | 2 | 15 | 24 | 8 | 5 |
| 大玉生 | 29 | 24.40 (±6.1) | 17.45 (±4.1) | 0.44 (±0.27) | 0 | 18 | 7 | 3 | 1 |
| 田粳 | 35 | 30.00 (±7.7) | 23.28 (±2.8) | 0.84 (±0.50) | 4 | 13 | 8 | 10 | 0 |
| 頭川 | 15 | 39.13 (±2.9) | 26.42 (±2.4) | 1.42 (±0.23) | 11 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 堂ノ上 | 67 | 25.64 (±6.4) | 20.29 (±4.4) | 0.56 (±0.35) | 9 | 47 | 10 | 1 | 0 |
| 布尻 | 43 | 23.51 (±5.3) | 18.30 (±3.7) | 0.42 (±0.24) | 14 | 18 | 7 | 3 | 1 |
| 北一 | 9 | 41.87 (±7.6) | 25.81 (±2.3) | 1.60 (±0.54) | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 |
| 末友 | 36 | 24.00 (±6.8) | 19.63 (±2.8) | 0.48 (±0.28) | 6 | 23 | 4 | 1 | 2 |
| 箕輪 | 8 | 38.90 (±12.4) | 24.05 (±6.3) | 1.44 (±0.99) | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 |

カッコ内は標準偏差

表-2 丸太品質等級の分類基準

| 品質等級 | 分類基準 | | | | |
|---------------|-------------------|------|--------|-----------|------------------|
| | 矢高率 | 材長 | 末口径 | 節 | その他欠点 |
| A材(末口径30cm未満) | 0.25 cm / m 以下 | 4m以上 | 8cm以上 | 長径が10cm以下 | 虫食い、腐れおよび割れがないこと |
| A材(末口径30cm以上) | 0.5 cm / m 以下 | | 30cm以上 | | |
| B材 | 0.25 ~1.25 cm / m | 2m以上 | 15cm以上 | 長径が15cm以下 | 腐れおよび割れがないこと |
| C材 | — | 2m以上 | 8cm以上 | — | — |

丸太の長さは基本的に4mとし、根元側から造材し、梢端側で4mの長さが確保できない場合のみ長さ2mでの採材も可とした。また、幹から採材される長さ2m未満の材を端材と定義した。最小利用直径は8cmとし、径がこれに満たない材は丸太および端材には含めなかった。なお、玉切りにおける鋸断位置はオペレータの判断に任せしたが、出来るだけ通直な丸太を多く採るよう心掛け、曲がりや欠点のある部位は端材として除かれた。

造材された丸太は、末口直径（皮付き）、元口直径（皮付き）、材長、最大矢高を測定し、表-2に示す基準によって、A材、B材、C材の3つの品質等級に分類した。本論では、ここでC材とされたものを燃材向けの低質材として取り扱った。また、端材については、末口直径、元口直径、材長を測定した。丸太および端材の材

積は、(1)式（富山県林業試験場 1996）を用いて樹皮厚を求め、樹皮厚を差し引いた皮なし直径と材長からスマリアン式により算出した。

$$B=0.1016d^{0.6423} \quad (1)$$

ここでBは樹皮厚（cm）、dは皮付き直径（cm）をあらわす。

立木から発生するC材および端材の量を推定する統計モデルを作成した。その際、C材や端材が発生しない立木が多く存在した。そこで、これに対応するためハードルモデル（Zuur and Ieno 2016）により解析を行った。ハードルモデルは応答変数が0になるかどうかの確率と0をとらない場合にどのような数値をとるかについて2段階で推定を行う。ここでは、C材および端材の発生の有無を推定するための発生確率モデ

表-3 調査林分における幹材積およびC材と端材の発生量

| 調査林分 | 幹材積 m ³ | 丸太材積 m ³ | C材材積 m ³ | 端材材積 m ³ | 歩留まり % | C材率 % | 端材率 % |
|------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|----------|----------|
| 安居 | 9.5 | 5.9 | 2.5 | 1.4 | 62.8 | 26.7 | 14.9 |
| 河西 | 15.2 | 13.3 | 2.8 | 0.5 | 87.6 | 18.5 | 3.2 |
| 岩木 | 6.6 | 4.3 | 1.2 | 0.8 | 65.2 | 18.4 | 12.5 |
| 吉友 | 30.4 | 23.3 | 12.1 | 1.1 | 76.7 | 39.8 | 3.5 |
| 山川 | 21.1 | 18.0 | 2.9 | 0.2 | 85.7 | 13.7 | 0.8 |
| 七分一 | 6.1 | 4.7 | 1.7 | 0.1 | 76.9 | 27.3 | 1.1 |
| 小菅沼 | 3.2 | 2.3 | 1.6 | 0.1 | 72.0 | 50.9 | 4.7 |
| 上牧 | 8.0 | 6.7 | 3.3 | 0.4 | 84.0 | 41.6 | 5.1 |
| 須山 | 10.8 | 8.2 | 1.7 | 0.1 | 76.3 | 15.8 | 0.7 |
| 西笹津 | 25.2 | 19.3 | 8.2 | 1.1 | 76.6 | 32.4 | 4.3 |
| 大玉生 | 12.7 | 9.7 | 4.4 | 0.3 | 76.4 | 34.7 | 2.3 |
| 田粳 | 29.5 | 20.5 | 1.5 | 2.3 | 69.7 | 5.2 | 7.8 |
| 頭川 | 21.3 | 15.1 | 0.7 | 1.8 | 70.7 | 3.3 | 8.6 |
| 堂ノ上 | 37.4 | 32.1 | 7.4 | 2.2 | 85.9 | 19.9 | 5.9 |
| 布尻 | 18.1 | 14.3 | 3.5 | 1.3 | 79.1 | 19.3 | 7.4 |
| 北一 | 14.4 | 10.3 | 0.7 | 0.8 | 71.6 | 4.9 | 5.4 |
| 末友 | 17.2 | 13.8 | 5.0 | 0.6 | 80.2 | 29.0 | 3.7 |
| 箕輪 | 11.5 | 8.1 | 0.5 | 0.9 | 70.6 | 4.0 | 7.7 |
| 全体 | 298.1 | 230.1 | 61.7 | 16.0 | 76.0 | 22.5 | 5.5 |

ると、それらが発生した場合の発生量を推定するための発生量モデルの2つを作成した。発生確率モデルは、C材および端材の発生の有無を応答変数に、胸高直径、樹高、樹幹形状分類基準による樹幹形状級を説明変数に、調査林分をランダム効果とし、一般化線形混合モデルを用いて解析を行った。誤差分散には二項分布を仮定し、接続関数にはロジットを用いた。また、発生量モデルは、C材および端材の発生量を応答変数に、胸高直径、樹高、樹幹形状級を説明変数に、調査林分をランダム効果とし、一般化線形混合モデルを用いて解析を行った。誤差分散にはガンマ分布を仮定し、接続関数には対数を用いた。発生確率モデルおよび発生量モデルともに、最適モデルを作成するため赤池情報量規準（AIC）をもとに変数選択を行った。なお、これらの統計解析にあたって、解析ソフトウェアのR ver.3.2.4（R Core Team 2016）とその関数パッケージlme4を使用した。

3. 結果

丸太材積の歩留まり（丸太材積 / 幹材積）は林分によって62.8%から87.6%の範囲にあり、平均76.0%となった（表-3）。C材率（C材材積 /

幹材積）は林分により3.3%から50.9%までかなり大きな差があり、平均すると22.5%となった。端材率（端材材積 / 幹材積）もC材と同様に林分による差が大きく、0.7%から14.9%の範囲をとり、平均すると5.5%となった。また、C材および端材の丸太材積に対する割合は平均するとそれぞれ29.6%および7.7%となった。

C材の発生確率およびC材が発生した場合の発生量について、ハードルモデルによる解析結果を表-4および表-5にそれぞれ示した。また、これらの解析結果から得られるC材の発生確率と発生量の積をモデルによるC材発生量の予測値とし、胸高直径、樹高および樹幹形状級との関係を図-2に示した。C材の発生量は直径が大きくなるに従い増加する傾向があった。また、樹幹形状が1級から4・5級に到るに従ってC材の発生量は増加した。一方、発生確率モデルでは樹高が説明変数として採用されたが、樹高の変化に伴う発生量の変化は小さかった。

端材の発生確率および端材が発生した場合の発生量について、ハードルモデルによる解析結果を表-6および表-7にそれぞれ示した。また、これらの解析結果から得られる端材の発生確率と発生量の積をモデルによる端材発生量の予測

表-4 C材発生確率に関する一般化線形混合モデルによる解析結果

| | 推定値 | 標準誤差 | z値 | p |
|--------------|--------|-------|--------|-------|
| 切片 | 2.209 | 0.773 | 2.856 | 0.004 |
| 胸高直径 | -0.061 | 0.024 | -2.510 | 0.012 |
| 樹高 | 0.084 | 0.047 | 1.774 | 0.076 |
| 樹幹形状3級 | 0.807 | 0.405 | 1.991 | 0.046 |
| 樹幹形状4・5級 | 1.776 | 0.640 | 2.776 | 0.006 |
| 標準偏差 調査林分 | 0.972 | | | |

表-5 C材発生量に関する一般化線形混合モデルによる解析結果

| | 推定値 | 標準誤差 | t値 | p |
|--------------|--------|-------|---------|--------|
| 切片 | -3.478 | 0.179 | -19.466 | <0.001 |
| 胸高直径 | 0.036 | 0.004 | 9.482 | <0.001 |
| 樹幹形状2級 | 0.236 | 0.090 | 2.613 | 0.009 |
| 樹幹形状3級 | 0.500 | 0.100 | 5.016 | <0.001 |
| 樹幹形状4・5級 | 0.503 | 0.107 | 4.716 | <0.001 |
| 標準偏差 調査林分 | 0.290 | | | |

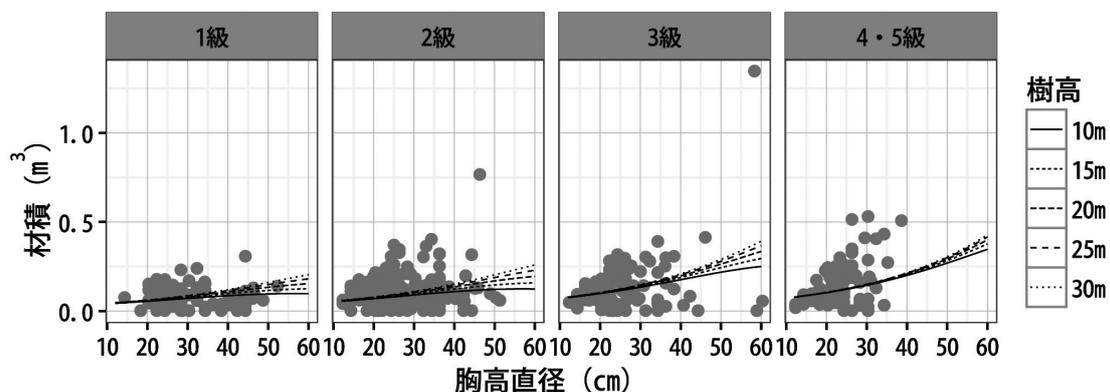


図-2 C材発生量と胸高直径、樹高および樹幹形状級との関係

表-6 端材発生確率に関する一般化線形混合モデルによる解析結果

| | 推定値 | 標準誤差 | z値 | p |
|--------------|--------|-------|--------|-------|
| 切片 | -1.122 | 0.599 | -1.874 | 0.061 |
| 胸高直径 | 0.049 | 0.016 | 3.124 | 0.002 |
| 樹幹形状2級 | 0.644 | 0.236 | 2.723 | 0.006 |
| 樹幹形状4・5級 | 0.791 | 0.317 | 2.492 | 0.013 |
| 標準偏差 調査林分 | 1.510 | | | |

表-7 端材発生量に関する一般化線形混合モデルによる解析結果

| | 推定値 | 標準誤差 | t値 | p |
|--------------|--------|-------|---------|--------|
| 切片 | -5.449 | 0.202 | -26.953 | <0.001 |
| 胸高直径 | 0.079 | 0.005 | 14.469 | <0.001 |
| 樹幹形状4・5級 | 0.443 | 0.100 | 4.423 | <0.001 |
| 標準偏差 調査林分 | 0.231 | | | |

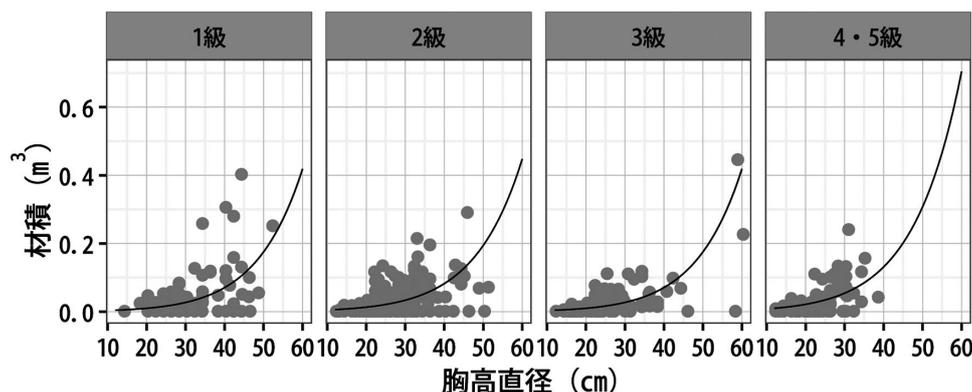


図-3 端材発生量と胸高直径および樹幹形状級との関係

値とし、胸高直径および樹幹形状級との関係を図-3に示した。端材の発生量は胸高直径が大きくなるに従い指数関数的に増加した。また、樹幹形状4・5級では他の樹幹形状級に比べ端材発生量がやや多くなる傾向があったが、その他の樹幹形状級では大きな差は認められなかった。また、樹高は発生確率モデルおよび発生量モデルともに説明変数として採用されなかった。

4. 考察

端材率やC材率は林分間で大きな差が認められ、平均などの1つの代表値で林分レベルの端材やC材の発生量を推定すると実際の発生量と大きく乖離することが確認された。また、鈴木ら(2009)は、高知県において主にスギを対象に造材工程で発生した端材およびC材の発生量を調査し、幹材積に対する端材とC材を加えた材積の割合は平均で14.3%になると報告している。本調査では、C材率が平均22.5%、端材率が5.5%となり、鈴木らの結果に比べ高くなっている。また、鈴木らの結果では、端材の発生量は総じてC材の量を上回り、端材率は12%を超えている。酒井ら(2015)は北海道における広域的な調査から、製材用およびチップ用の丸太を搬出した後の残材の幹材積に対する割合は全木システムで28%、全幹システムで17%としてい

る。このように、低質材や端材の発生量は地域、樹種および用いられる作業システムなどによって大きく異なると考えられる。また、造材地点に残置される端材の量は他地域での調査に比べ少なかった。富山県では根元曲がりやその他欠点があってもC材として積極的に活用するため、残置される端材の量が少ないのかもしれない。

本論で作成したC材および端材に関する推定モデルを用いて、調査林分毎のC材および端材の発生量を予測し、実測値との比較から予測精度を検証した(図-4, 図-5)。C材発生量の平均二乗誤差および平均誤差率はそれぞれ0.31m³および9.2%となった。また、端材発生量の平均二乗誤差および平均誤差率はそれぞれ0.06m³および6.4%となった。林分レベルの発生量予測において、十分に高い精度とはいえないまでも、林業事業者や森林所有者が生産計画や収益予測などの目的に使用するのであれば実用的な精度を有しているといえる。

富山県のような多雪地帯では、素材生産量に占める低質材の割合は従来から非常に高い。今後、木質バイオマス発電所の稼働によって低質材や端材の需要はさらに高まると予想される。また、ここ数年全国的には、用材向けや合板向け丸太の価格はほとんど変化がないかやや低下傾向にあるのに対し、燃料向け丸太の価格は上

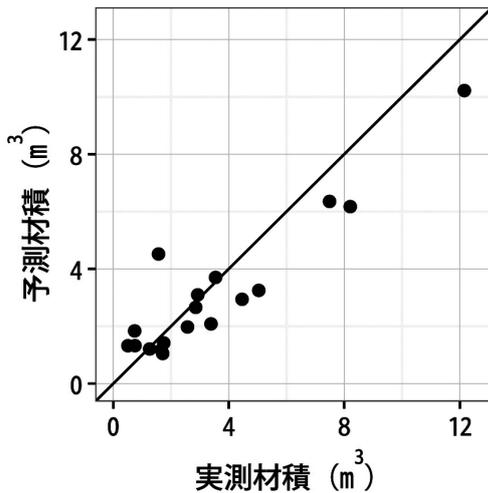


図-4 C材発生量の予測値と実測値の比較

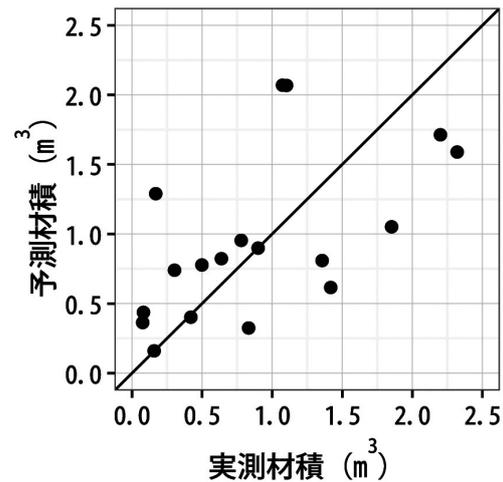


図-5 端材発生量の予測値と実測値の比較

昇傾向にある（農林水産省 2015）。このため、素材生産収益における燃材販売収益の占める割合は高まるはずである。従って経営計画や収益性の検討を行ううえで、ここで示したような林分レベルでの燃材生産量の推定は重要となるであろう。

引用文献

- 羽田清五郎（1960）利用材積に関する研究（5）根曲がり材積について．日林誌42: 127-135
- 上村佳奈, 久保山裕史, 山本幸一（2009）北東北三県における木質バイオマス供給可能量の空間的推定．日エネ誌88:877-883
- 農林水産省（2015）農林水産統計木材価格（平成27年12月）．http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuryu/kakaku/pdf/mokuzai_kakaku_1512.pdf（2016年12月参照）
- R Core Team（2016）R: A language and environment for statistical computing. <https://www.r-project.org/>（2017年1月参照）
- 酒井明香, 寺田文子, 渡辺一郎, 佐々木尚三（2015）北海道における機械作業システムと林地残材率を考慮した林地残材集荷可能量の推定．森利誌 30：71-78
- 鈴木保志, 蘇我山正治, 後藤純一（2009）：利用間伐時に土場および道端に発生する林地残材バイオマスの量と形状分布．森林バイオ利誌 4：43～48

富山県林業試験場（1996）タテヤマスギの細り表．富山県林業試験場

山田容三, 佐藤仁美（2013）伐期の遣いを考慮した利用可能な木質バイオマス資源量の予測－豊田市稲武地区を対象として－．森利誌 28:237-244

岡子光太郎・嘉戸昭夫（2015）：樹幹形状分類を用いたスギ根元曲がり木の利用材積および品質等級別材積率の推定．日林誌 97: 269-275

Zuur, A.F. and Ieno, E.N.（2016）Beginner's Guide to Zero-Inflated Models with R. Highland Statistics Ltd.

Summary

This study develops a model to predict the production of low-quality logs (C logs) and timber cutoffs in Sugi stands comprising crooked trees to produce woody biofuels. Among the 18 study stands, 543 sample trees with crooked stems were bucked and the volume of C logs and cutoffs were measured. C log ratios (C log volume/stem volume) for the study stands ranged from 3.3% to 50.9%, with an average value of 22.5%. Additionally, cutoff ratios (cutoff volume/stem volume) ranged from 0.7% to 14.9%, with an average value of 5.5%. As the data contained many zeros (i.e., no C logs or cutoffs), the prediction models were developed using a hurdle model. With respect to the generation of C logs by the study stands, the prediction model had a root-mean-square error (RMSE) of 0.31 m³ and an average error rate of 9.2%. With regard to the generation amount of cutoffs by the study stands, the prediction model had an RMSE of 0.06 m³ and an average error rate of 6.4%. We demonstrated that the prediction models developed in this study were effective for estimating the generation of C logs and cutoffs in the stand levels.

Keywords: Sugi stands, crooked trees, low quality logs, timber cutoffs, woody biofuel