

階層ベイズモデルによる林業労働災害の発生に及ぼす要因

猪俣雄太*・中田知沙*・山口浩和*

猪俣雄太・中田知沙・山口浩和：階層ベイズモデルによる林業労働災害の発生に及ぼす要因. 森利誌 38 (1) : 13 ~ 22, 2023. 林業の傷害災害に影響を及ぼすと考えられる労働者の年齢, 高性能林業機械の導入状況, 立木サイズ, 急傾斜地での作業, 広葉樹の生産量を変数とした統計モデルを構築し, 各変数が林業の傷害災害発生率に及ぼす影響を評価した。統計解析の結果, 急傾斜地での作業は傷害災害発生率を上げ, 高性能林業機械の導入は発生率を下げる事が分かった。また, 若年従事者の増加は傷害災害発生率を上げ, 高齢従事者は傷害災害発生率を下げる事が分かった。これらの成果より, 傷害災害発生率の低減には, 急傾斜地での作業を減らすこと, 高齢従事者を増やし, 若年従事者を減らすこと, 高性能林業機械の導入することが, 統計上は有効であることが示された。しかし, 急傾斜地での作業や林業従事者の年齢を調整するのは困難であることから, 傷害災害発生率の低減には, 高性能林業機械の導入が現状では有効であり, 更に傷害災害発生率を下げるには, 若年従事者の傷害災害発生率を下げる必要性があることが分かった。

キーワード：労働災害, 高性能林業機械, 年齢

Yuta Inomata, Chisa Nakata and Hirokazu Yamaguchi : **Evaluation of occurrence factor of occupational accidents in forestry using a hierarchical Bayesian model. J. Jpn. For. Eng. Soc. 38(1): 13 – 22, 2023.** This study used a statistical model to elucidate the influence of work conditions on occupational non-fatal accidents in forestry, with the working conditions as a variable. Statistical analysis showed that operations in steep slope areas contributed to increased non-fatal accident rate, while the use of forestry machines decreased the rate of non-fatal accidents. The rate of non-fatal accident occurrence was also influenced by the age of workers, with high or low rates being observed with increased number of young or old workers, respectively. Effective measures to potentially lower the non-fatal accident rate, includes reducing the number of young workers, reducing operation in steep slope areas, increasing the number of old workers, and increasing the use of forestry machines. However, due to difficulties in modifying operations in steep slope areas or workers age, the two measures are considered non-realistic, while the use of forestry machines is practical and can be more effective in lowering non-fatal accident rate. Notably, lowering the rate of non-fatal accident among young worker is necessary to lower the overall non-fatal accident rate occurrence in forestry.

Keywords : occupational accidents, forestry machine, age

1. はじめに

林業の労働災害数は 2015 年に 1619 件であったのに対し, 2020 年は 1275 件となり, 344 件減少している (林業・木材製造業労働災害防止協会 2022a)。一方で, 労働者 1000 人当たりの労働災害数 (死傷年千人率) は 27.0 から 25.5 と, 依然として高く, 全産業の平均の 10 倍ほどである。リスクアセスメントの観点では, 労働災害を引き起こす潜在的危険 (ハザード) と人の両者が存在しないと, 労働災害は発生しないと考えられている (厚生労働省 2013)。秋山 (2016) は, 林業作業の特徴を, ①自然条件の影響を受ける不整地, 傾斜地での作業, ②重量物・不定型な物を扱う作業, ③振動・騒音を伴う機械, 鋭利な刃物による作業, ④張力のかかったワイヤロープを扱う作業, ⑤不整地・傾斜地を走行する車両系機械による作業と整理し, このような作業は潜在的危険がある

ため, 林業の労働災害発生率が高い, と述べている。これまで, 潜在的危険を顕在化させないために, 発生した労働災害の原因を分析し, 災害の特性から再発防止対策を提案する研究が行われている。例えば, 機械や器具を対象とした分析 (鹿島・今富 2005, 鹿島・上村 2008, 2010, 今富ら 2011) や作業を対象とした分析 (松本 1999, 豊川・鹿島 2000, 鹿島・鈴木 2012, 山田 2016, 猪俣ら 2019, 林業・木材製造業労働災害防止協会 2022b), 被災者の属性と労働災害との関係 (今富・奥田 1994, 沼田 1995, 今富 2003, 2006, 猪俣ら 2022) などがある。このような研究により, 林業全体の労働災害の特性が解明されつつある。

一方で, 労働災害の発生には地域により差異があり, 労働災害発生率は都道府県単位で異なる。例えば, 2010 年と 2015 年の国勢調査 (総務省 2021) における岩手県

2022 年 8 月 31 日受付, 2022 年 12 月 15 日受理

連絡先 (Corresponding author) : 猪俣雄太 (Yuta Inomata) E-mail : y_inomata@ffpri.affrc.go.jp

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

と高知県の林業従事者は2,100～2,500人程度で同程度であるが、岩手県の労働災害数は79件（2010年）から55件（2015年）に推移したのに対し、高知県は134件から89件に推移している。両県の労働災害数を国勢調査の林業従事者数で割って得た年千人率で比較すると、2010年の岩手県は30.7を示し、高知県は61.2を、2015年の岩手県は23.3を示し、高知県は36.9を示しており、岩手県は高知県より年千人率は小さい。これは、林分状況や斜面傾斜、作業システム、高性能林業機械等の機械化状況、作業者の属性、安全教育体系の違いなどの作業条件が各都道府県で異なるためと想像できる。しかし、現状では作業条件を構成するどの要因がどの程度、労働災害の発生に影響を及ぼしているかわかっていない。一方、労働災害は頻発する事象ではないため、各要因の影響を評価するには長期わたるデータ収集が必要である。労働災害数は都道府県ごとに毎年、公表され、高性能林業機械の導入台数など、作業環境を構成するいくつかの要因は毎年または隔年で公表されており、都道府県単位での作業条件の長期データが整いつつある。

複数の要因が、ある事象に及ぼす影響を解析する手法としては、重回帰分析・分散分析などの誤差構造を等分散性の正規分布と仮定した一般線形モデルが用いられてきた。近年はマルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMCと呼ぶ）を汎用的に使える確率的プログラミング言語が開発されたことで、一般化線形混合モデルや階層ベイズモデルを容易に構築できるようになった。これらのモデルは正規分布以外の誤差構造をモデル化でき、また測定できなかった個体差や調査地差（変量効果）を変数に組み込める特徴を持つ。解析ツールの進展により、一般化線形混合モデルや階層ベイズモデルによる解析が心理学や生態学、社会学など、幅広い分野（例えば、清水2018、深澤・角谷2009、久保2012、松浦2016）で行われ、各パラメータが評価されている。林業の労働災害は、滅多に発生する事象ではない上に、0以上の離散値をとることから、労働災害数のばらつきを正規分布と仮定しにくく、また安全教育体系、安全風土・文化などの要因は、都道府県によって違いがあるものの、定量化が難しいという実情もある。このため、一般化線形混合モデルや階層ベイズモデルといった変量効果を組み込んだ統計モデルを用いることで、労働災害の発生に及ぼす各要因の影響を明確にできる可能性がある。

そこで、本研究では統計モデルを用いて、各要因が持つ潜在的な危険性を定量化することと、そのモデルから得た成果を基に、労働災害低減に向けた対策を提案することを目的とする。

2. 材料と方法

2.1 分析対象期間と用いた資料

労働災害には死亡災害と傷害災害（死亡以外の災害）がある。死亡災害は年30～40件程度発生し、傷害災害

は年1200件以上発生している。精度の高い結果を得るには、ある程度の発生数が必要となることから、本研究では発生数の多い傷害災害を分析対象とし、傷害災害数を林業労働者数で割った値を傷害災害発生率と定義し、都道府県別の傷害災害発生率を年次ごとに算出した。都道府県別の傷害災害発生率は厚生労働省から公表されていないことから、本研究では「業種別・都道府県別死傷災害発生状況」（厚生労働省2022）から死亡災害を除いた数値を傷害災害数として用い、国勢調査（総務省2021）の各都道府県の「林業従事者数」を林業労働者数として用い、都道府県別の傷害災害発生率を算出した。林業労働者数は様々な統計資料に記載されるが、本研究においては長期データを解析するため、林業の定義が変更されずにデータとしての継続性があり、また都道府県単位でデータが整理されている必要がある。国勢調査の「林業従事者数」はこのような条件を満たすことから、本研究に用いた。

労働安全に関するこれまでの研究から、作業者の年齢（猪俣ら2022、農林水産省2021）や高性能林業機械の導入（岡ら2011）が労働災害に影響を及ぼしていることが分かっている。また、感覚的・経験的には急傾斜地は緩傾斜地より危険性が高く、伐採立木のサイズが大きいほど危険で、針葉樹伐採より広葉樹伐採の方が危険であると考えられる。これらの感覚・経験および既往の研究を参考に、本研究では表-1の変数を傷害災害発生率の影響分析に用いた。年齢の影響を表す変数として、高齢者率 se （林業従事者に占める65歳以上の割合）と若年者率 yo （林業従事者に占める35歳未満の割合）を用い、高性能林業機械の導入の影響を表す変数として、従事者1000人当たりの高性能林業機械導入台数 ma を用いた。急傾斜地の影響を表す変数として、30度以上の伐採面積を林業従事者数で割った従事者1人当たりの急傾斜地伐採面積 sl を用い、伐採立木のサイズの時系列データがないため、 ha 当たりの針葉樹供給量 vc および広葉樹供給量 vb を立木サイズの影響を表す変数とした。広葉樹は形状や樹形、硬さなどが針葉樹とは異なるため、針葉樹より伐採・搬出が難しいと考えられ、広葉樹の伐採量が多いほど、傷害災害発生率が高くなると予想される。そこで、針葉樹伐採・搬出に対する広葉樹伐採・搬出の相対的な危険度を表す変数として、針葉樹供給量に対する広葉樹供給量の比 rb を用いた。その他に、社会基盤や社会情勢が傷害災害発生率に及ぼす影響を明らかにするために、路網拡充の影響として林道密度 fo を変数に組み込み、労働安全に関する法令改正やガイドラインの作成などの政策やそれに伴う従事者の意識変化が林業全般の安全に及ぼす影響として、年次 pe_i を組み込んだ。更に、上記の変数以外に安全教育体系やその地域独自の安全風土・文化などの定量化できていない地域の特性 pr_j を変数に用いた。

各変数の算出方法（表-1）は、高齢者率 se ・若年者

率 y_o は国勢調査の林業従事者数を用い、従事者 1 人当たりの高性能林業機械導入台数 ma は国勢調査と林野庁が行っている機械台数調査（林野庁 2021）を、従事者 1 人当たりの急傾斜地の伐採地面積 sl は Shimizu and Saito (2021) が公開している伐採履歴から得た伐採面積と GIS で算出した地形傾斜（10m メッシュ）を用いた。ha 当たりの針葉樹伐採量 vc および広葉樹伐採量 vb は木材需給報告書（農林水産省 2022）の主要樹種別素材生産量と Shimizu and Saito (2021) の伐採面積データを用い、針葉樹伐採量に対する広葉樹伐採量の比 rb は木材需給報告書（農林水産省 2022）の主要樹種別素材生産量を、林道密度は森林・林業統計要覧（林野庁 2022）から算出した。従事者 1 人当たりの急傾斜地伐採面積 sl は年次・都道府県によって、変動の大きい変数のため、常用対数に変換した値を統計モデルに用いた。分析対象年次は高性能林業機械が導入され始めた 1990 年から、最新の国勢調査のデータがある 2015 年までとし、これらの変数を都道府県別に年次ごとに整理した。また、年次による影響は経年変化を明確にできるように、5 年次単位（年次のカテゴリーは 1990～1994 年、1995～1999 年、2000～2004 年、2005～2009 年、2010～2014 年、2015 年の 6 カテゴリーであり、2015 年のみ 1 年次である）とした。変数の算出に用いた機械台数調査、伐採面積、木材需給

報告書、森林・林業統計要覧は毎年次の調査であるが、国勢調査は 5 年ごとの調査であり、データの無い年次がある。国勢調査のデータがない年次は前後の国勢調査から線形補間した値を代用した。また、林業従事者数の少ない都道府県では、労働災害発生率の変動が大きく、各要因の影響評価が難しいため、1990 から 2015 年の林業従事者数の平均値が 1000 人以上の都道府県を本研究の分析対象（対象外は千葉県、東京都、神奈川県、富山県、大阪府、香川県、佐賀県、沖縄県の 8 地域であり、それ以外の 39 地域が対象）とした。

2.2 統計モデル

本研究では 10 種の変数を用いた統計モデルを構築する。「年次」と「地域特性」はカテゴリー値であり、この 2 変数以外は連続値である。カテゴリー値となる 2 変数は該当するカテゴリーのみ適用され、データ全体を大域的（固定効果）に説明する変数ではなく、該当するデータのみを説明する局所的（変量効果）な変数である。久保（2012）は、変量効果が複数ある場合、階層ベイズモデルが有効であることを述べている。本研究では 2 つの変量効果があることから、統計モデルとして階層ベイズモデルを用いる。

階層ベイズモデルはベイズ推定を拡張したモデルである。ベイズ推定はデータを得る前にわかっていた確率分

表－1 本モデルに使用した変数と算出資料

変数	記号・数式	説明・出典資料	選択変数	備考
林業従事者数 W （人）	W	W ：林業従事者数（総務省 2021）		国勢調査は 5 年ごとであり、未調査年次の従事者数は前後の調査データより、線形補間した。
林業従事者数に対する 65 歳以上の割合（高齢者率） se （%）	$se = \frac{S}{W} \times 100$	S ：65 歳以上の林業者数（総務省 2021）	○	国勢調査は 5 年ごとであり、未調査年次の従事者数は前後の調査データより、線形補間した。
林業従事者数に対する 35 歳未満の割合（若年者率） y_o （%）	$y_o = \frac{Y}{W} \times 100$	Y ：35 歳未満の林業者数（総務省 2021）	○	国勢調査は 5 年ごとであり、未調査年次の従事者数は前後の調査データより、線形補間した。
従事者 1000 人当たりの高性能林業機械台数 ma （台/人）	$ma = \frac{M}{W} \times 10^3$	M ：高性能林業機械保有台数（林野庁 2021）	○	
従事者 1 人当たりの 30 度以上の伐採面積 sl （ m^2 /人）	$sl = \frac{st}{W}$	st ：30 度以上の伐採面積（Shimizu and Saito 2021）	○	本変数は年次・都道府県によって、変動が大きいため、常用対数の値を変数に用いる。
針葉樹供給量当たりの広葉樹供給量の比 rb （%）	$rb = \frac{Vb}{Vc} \times 100$	Vb ：広葉樹供給量（農林水産省 2022） Vc ：針葉樹供給量（農林水産省 2022）	○	
伐採面積あたりの針葉樹供給量 vc （ m^3 /ha）	$vc = \frac{Vc}{Ac}$	Ac ：針葉樹の伐採面積（Shimizu and Saito 2021）		
伐採面積あたりの広葉樹供給量 vb （ m^3 /ha）	$vb = \frac{Vb}{Ab}$	Ab ：広葉樹の伐採面積（Shimizu and Saito 2021）	○	
林道密度 fo （ km /ha）	$fo = \frac{d}{Af}$	d ：林道総距離（林野庁 2022） Af ：森林面積（林野庁 2022）		
年代の影響 pe	pe	pe ：年次が労働災害に及ぼす影響	○	年次では変動が大きいため、5 年単位の影響をモデルに組み込んだ。
地域特性 pr	pr	pr ：上記以外の各地域の特性	○	林業従事者の少ない都道府県では、傷害災害発生率の変動が大きいため、平均林業従事者数が 1000 人以上の都道府県を対象とした。対象外は千葉県、東京都、神奈川県、富山県、大阪府、香川県、佐賀県、沖縄県の 8 地域であり、それ以外の 39 地域を本研究の対象とする。

布（事前分布）とデータを得ることで算出される尤度から、データを得た後に更新される確率分布（事後分布）を推定する手法であり、階層ベイズモデルでは事前分布の形を決めるパラメータにも事前分布を設定することで、事前分布の階層化を行うモデルである。2つの事前分布が階層ベイズモデルに存在することから、久保（2012）の表記に従い、後者の事前分布を以下、超事前分布と呼ぶ。このような階層モデルを構築することで、個体差や地域差を表す変数効果を推定することができる（深澤・角谷 2009）。

階層ベイズモデル構築にあたり、各年次の道府県ごとの傷害災害数は当該年次の道府県の林業従事者数と傷害災害発生率をパラメータとする二項分布から得られると仮定した（1式）。

$$y_{ij} \sim \text{Binomial}(n_{ij}, Ac_{ij}) \quad (1)$$

y_{ij} : i 年次における道府県 j の傷害災害数

$\text{Binomial}(n_{ij}, Ac_{ij})$: パラメータ n_{ij} と Ac_{ij} の二項分布

n_{ij} : i 年次における道府県 j の林業従事者数

Ac_{ij} : i 年次における道府県 j の傷害災害発生率

i 年次における道府県 j の傷害災害発生率 Ac_{ij} は 0 から 1 の間をとることから、 Ac_{ij} は表 1 の変数と切片 u を組み合わせたロジスティック回帰で算出できると仮定する。全ての変数を用いた線形関数で統計モデルを構築すると、過剰適合の可能性がある。そこで、変数の組み合

わせを評価する WAIC（渡辺 2012）を用い、WAIC が最小となる変数の組み合わせ（ se , yo , ma , $\log_{10}(sl)$, rb , vb , pe_i , pr_j の 8 指標）を本モデルに採用した（2, 3 式）。

$$Ac_{ij} = \frac{1}{1 + \exp(-Z_{ij})} \quad (2)$$

$$Z_{ij} = C_{se} \times se_{ij} + C_{yo} \times yo_{ij} + C_{ma} \times ma_{ij} + C_{sl} \times \log_{10}(sl_{ij}) + C_{rb} \times rb_{ij} + C_{vb} \times vb_{ij} + C_{pe_i} \times pe_i + C_{pr_j} \times pr_j + u \quad (3)$$

ただし、 u は切片とし、 pe_i と pr_j はダミー変数で、 pe_i においては、 i 年次に該当するデータを 1 とし、それ以外を 0、同様に pr_j においても道府県 j に該当するデータを 1 とし、それ以外を 0 とする。 C_{se} , C_{yo} , C_{ma} , C_{sl} , C_{rb} , C_{vb} , C_{pe_i} , C_{pr_j} はダミー変数を含む各変数の係数である。推定される係数の数は C_{pr_j} が 39 個（対象とする道府県数）で、 C_{pe_i} が 6 個（年次のカテゴリー数）、それ以外は 1 個である。各変数の係数は事前分布として、平均 0 の正規分布に従うとし、既往の文献（小森 2019）より、各変数の係数の標準偏差は超事前分布として、半コーシー分布（ $x_0 = 0, r = 20$ ）に従うとした（図 - 1）

統計モデルの構築には、プログラミング言語である Python とベイズ統計ライブラリの PyMC3 から階層ベイズモデルを構築した。本研究では、森林分野で行われている方法（渡辺ら 2017, 壁谷ら 2016）を参考に、50 万回の乱数を生成したマルコフ連鎖を 3 本つくり、初期値

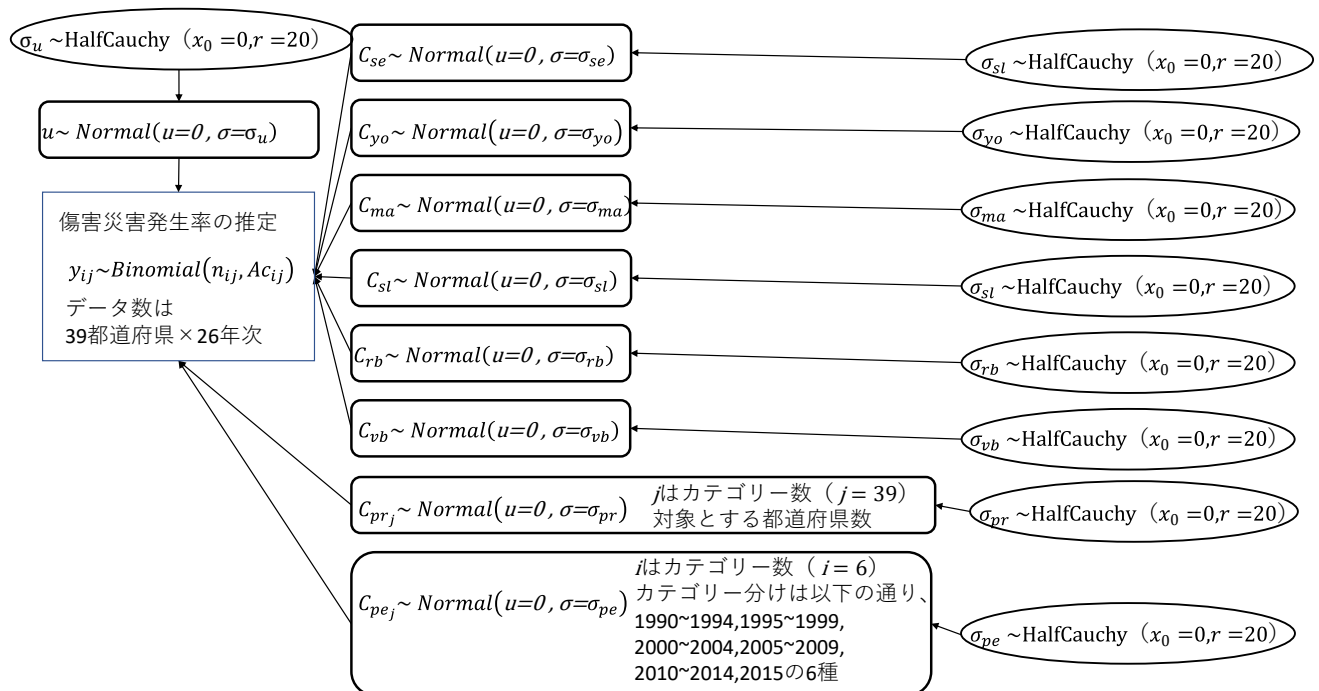


図 - 1 階層ベイズモデルの概要
楕円部が超事前分布を表す

の影響を取り除くために、1回目から10万回目までは推定には使用せず、また、自己相関が生じる可能性があることから、10万回目を以降の残りの40万回に対し、80回ごとに収集したデータから各係数を推定した。シミュレーションの収束指標であるR-hatは全てのパラメータで1を示した。R-hatは1に近いほど収束していると判断でき、本研究では収束の目安である1.1以下(Gelman *et al.* 2013)であり、また得られた各連鎖の軌跡が定常状態に収束していることを目視で確認できたことから、本研究で用いたMCMCによる推定は妥当であると判断した。

2.3 評価方法

本研究では、ベイズ推定によって得た各係数の95%のベイズ確信区間および各変数の四分位数を用いた指標から、各変数が傷害災害発生率に及ぼす影響を評価した。95%のベイズ確信区間は係数の真の値が95%の確率で含まれる区間を表し、確信区間が正にある係数は、傷害災害発生率を増加させる働きを持ち、負にある係数は減少させる働きを、0を含む係数は今回の分析では傷害災害発生率を増加または減少させる働きを明確にできなかったことを表す。また、係数間を比較する際に、確信区間が重なっていない場合は、真の値が重なっていないと判断できるため、その係数間には差があると判断した。

95%ベイズ確信区間は係数の持つ働きや係数間の差の有無を評価できるが、作業環境を構成する各要因の評価には、(3)式における各係数の大きさに加え、係数と変数の積である各項の数値の大きさを比較する必要がある。年次 pe_i および地域特性 pr_j は1と0のダミー変数であるため、年次の項および地域特性の項は係数の数値となるが、それ以外の項は変動する。変動する項があることから、本研究では各項の大きさを比較する方法として、変数の四分位数を用いる。算出方法はまず、各変数の第一四分位数と第三四分位数を抽出し、両四分位数にベイズ推計によって得た係数の平均値をかけて得た範囲を、各項の変動範囲として、算出した。次に、各項の変動範囲を比較して、傷害災害発生率に及ぼす影響の大きさを評価した。第一四分位数と第三四分位数は算出に用いた年次や期間によって変化する。本研究では近年の各項の影響を評価するために、対象期間で最新の年次である2015年のデータから、各変数の第一四分位数と第三四分位数を算出した。

3. 結果

3.1 統計モデルの精度

計算した結果、切片 u の平均値は-3.699となり、95%ベイズ確信区間は-3.962から-3.434となった。各変数の値を0とし、得られた切片 u を(2, 3)式に代入すると、各変数の影響がなかった場合の林業の固有の傷害災害発生率が算出できる。切片 u の95%ベイズ確信区間から算出した固有の傷害災害発生率は0.0187から0.0312(年千人率換算で18.7から31.2)となり、平均値は0.0242(年

千人率換算で24.2)となった。対象となる39道府県の26年次分の傷害災害発生率と、本統計モデルから得た傷害災害発生率の推定値との関係を図-2に示す。推定値と実測値は線形関係の傾向を示し、決定係数は0.77であった。また、本統計モデルから推定した傷害災害発生率と実測値との平均絶対誤差は0.0079(年千人率換算で7.9)であった。

3.2 傷害災害発生率に及ぼす各変数の係数および定数項

ダミー変数以外の変数(se , yo , ma , sl , rb , vb)の係数のベイズ確信区間を図-3に示す。灰色の区間が95%ベイズ確信区間を表し、「○」は平均値を表す。

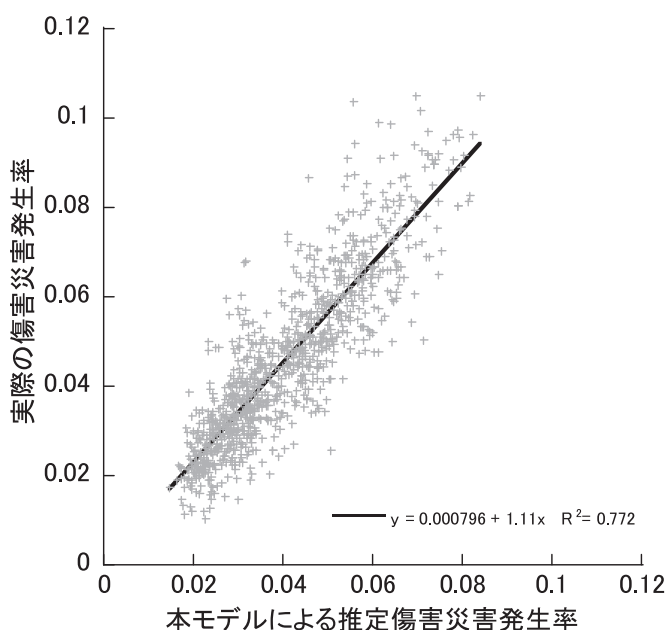


図-2 本統計モデルから算出した傷害災害発生率と実測値との関係

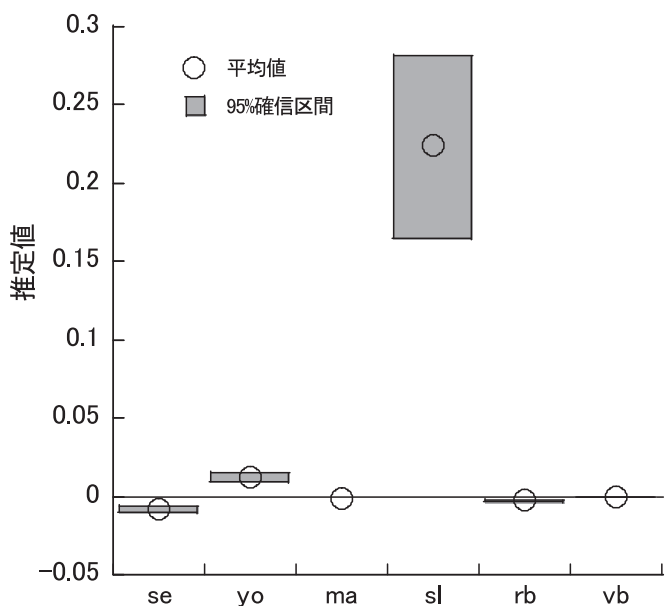


図-3 各変数の係数の推定値

95%ベイズ確信区間の範囲が正である係数は yo , sl , vb であり、確信区間が負の範囲にある係数は se , ma , rb で、確信区間が0を含む係数はなかった。平均値では sl が最も高く、0.224 であり、次に yo の 0.012 と続き、 se が最も小さく、-0.008 であった。 ma の平均値は -0.001 であり、 vb の平均値は 0.007×10^{-2} で、両変数とも 0 に近かった。確信区間が重なる係数がないことから、係数間には差があり、傷害災害発生率を増加させる働きが最も強い係数は sl で、次が yo であり、傷害災害発生率を減少させる働きが最も強い係数は se であった。

年次の係数 pe_i (図-4) では、「1990～1994年」から「2000～2014年」までの確信区間は0を含み、「2015年」のみ負となった。平均値において、2000年以降は経年とともに値が小さくなり、「2010～2014年」と「2015年」は負となった。「1990～1994年」から「2015年」までの確信区間は重なり合っており、これらの係数間には差があるとは言えなかった。

地域特性を示す係数 pr_j (図-5) では、確信区間が正の範囲にある道府県は15地域(岐阜県、三重県、滋賀県、京都府、兵庫県、奈良県、和歌山県、島根県、岡山県、広島県、山口県、徳島県、高知県、福岡県、大分県)であり、負の範囲にあるのは15地域(北海道、青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県、茨城県、栃木県、埼玉県、新潟県、長野県、熊本県、宮崎県、鹿児島県)、0を含むのが9地域(群馬県、石川県、福井県、山梨県、静岡県、愛知県、鳥取県、愛媛県、長崎県)であった。近畿地方、中国地方、四国地方で確信区間が正となる傾向にあり、北海道、東北地方、南九州地方で負となる傾向にあった。平均値が最も高いのは三重県であり、次が奈良県で、3番目が広島県であり、平均値が最も低いのは青森県であり、次が福島県で、3番目が茨城県

県であった。

3.3 各要因の変動範囲

最新データの2015年において、ダミー変数以外の変動範囲(第一四分位数・第三四分位数と係数の積の範囲)を図-6に示す。平均値を比較すると、正の影響(傷害災害発生率を増加させる)が最も強い項は $C_{sl} \times \log_{10}(sl)$ であり、負の影響が最も強い項は $C_{se} \times se$ であった。図-3では林業従事者1000人当たりの高性能林業機械導入台

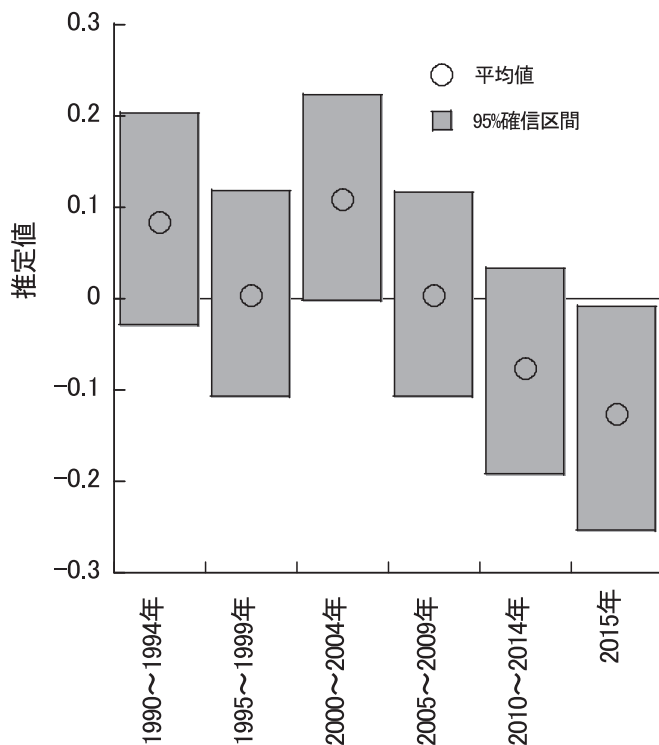


図-4 年次の係数の推定値

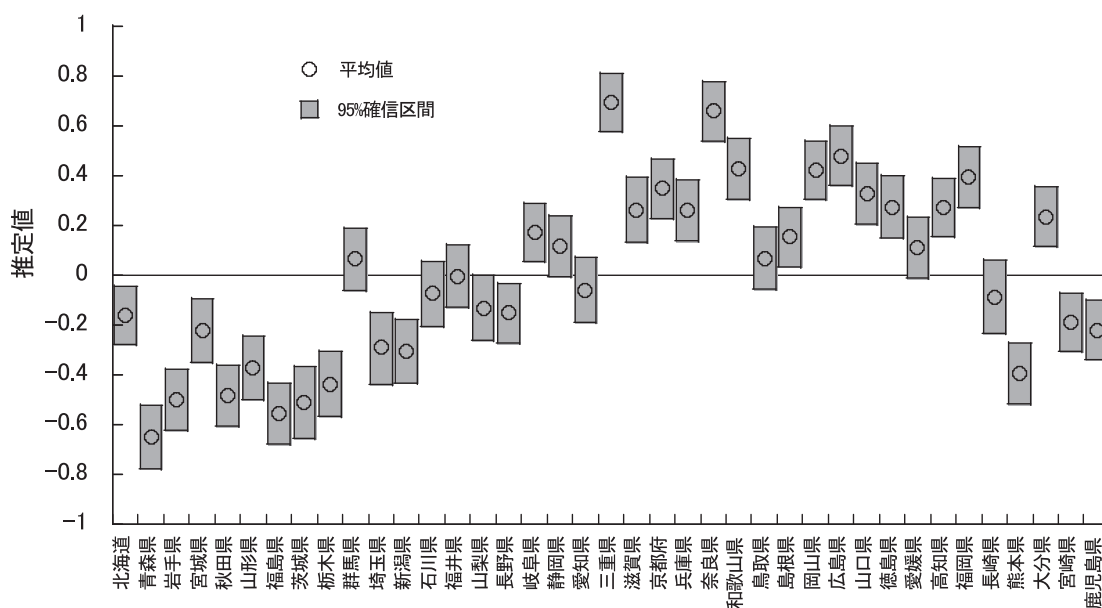


図-5 地域特性の係数の推定値

数 ma の係数 (C_{ma}) の 95% ベイズ確信区間は rb の係数 (C_{rb}) より 0 に近いが、図-6 の変動範囲では rb の項の方が 0 に近い。これは ma と rb の数値が異なるためであり、 ma の第一四分位数は 123 (台/1000 人林業従事者) で、第三四分位数は 195 (台/1000 人林業従事者) となっているのに対し、針葉樹伐採量に対する広葉樹伐採量の比 rb の第一四分位数と第三四分位数はそれぞれ 4% と 22% となっている。 ma の数値が rb より 9~40 倍高いため、各項では ma の方の影響力が大きい。一方、正の影響としては、 $C_{sl} \times \log_{10}(sl)$ が最も大きく、 sl の変動範囲は 0.53~0.61 であり、地域特性を示す係数 (図-5) の奈良県・三重県に次いで高い値であった。地域特性は該当する道府県に適用される要因であり、それ以外には適用されない。奈良県と三重県の地域特性は高い値を示しているが、これはそれ以外の道府県には適用されない。このことから、道府県や年次によらず、傷害災害発生率を増加させる働きが強い項は $C_{sl} \times \log_{10}(sl)$ であった。

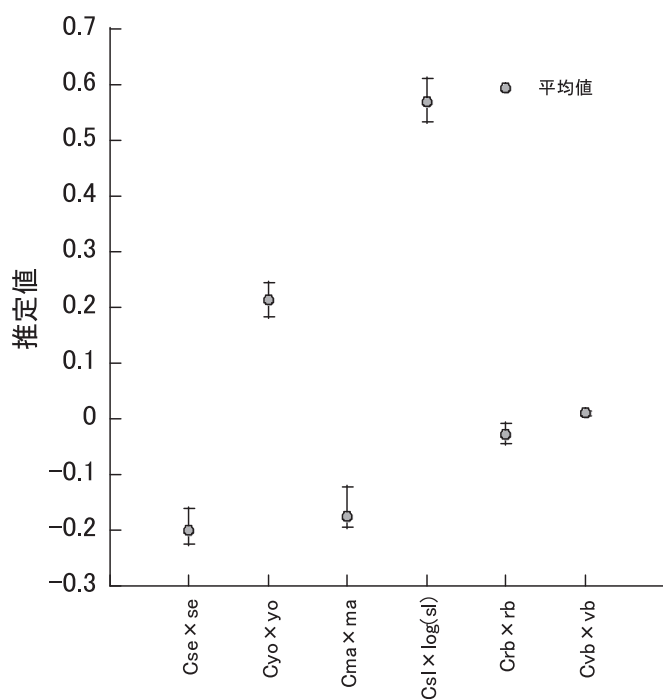


図-6 変数と係数の積の範囲

エラーバーは第一四分位数と第三四分位数に係数をかけた値の範囲

4. 考察

4.1 統計モデルの妥当性および各変数の影響力

本統計モデルの決定係数が 0.7 以上を示したことから、本統計モデルはよく適合し、予測精度が高いと言える。2015 年を除いて、年次の影響を 5 年次単位で分析しており、これを単年次にすると、より精度が高まると予想される。また、本研究ではハーベスタ、フォワーダといった林業機械の導入台数のより詳細なデータを追加することで、予測精度は更に高まると考えられる。ただし、新

たな変数の追加や年次を毎年次単位とすると、推定する係数の数が増えるため、各係数を一意に定められない識別問題が発生し、シミュレーションが収束しない可能性がある。このため、更なる予測精度向上には適切な変数を選択する必要がある。

林業の労働災害と年齢に関する既往の研究 (猪俣ら 2022, 農林水産省 2021) では、若年労働者の傷害災害発生率が高い傾向にあり、高齢労働者の傷害災害発生率は 40 歳代・50 歳代と同程度かやや低い傾向にあることが示されている。また、岡ら (2011) は、高性能林業機械導入により、林業の集材作業時の死亡災害が減少したことを報告し、厚生労働省労働基準局安全衛生部 (2013) は林業の死傷災害数に占める高性能林業機械が原因の死傷災害数の割合が 5% 以下で、高性能林業機械による労働災害は少ないことを明らかにしている。図-3, 6 より、林業従事者の年齢が傷害災害発生率に及ぼす影響として、高齢者率 se は発生率を下げる働きを持ち、若年者率 yo は上げる働きを、高性能林業機械の導入 (ma) は傷害災害発生率を下げる働きを持つことが分かり、これらの結果は既往の研究の結果と一致した。

労働災害に及ぼす急傾斜の影響 (sl) と広葉樹の影響 (rb, vb) に関しては、これまで定量化された研究がない。急傾斜地は緩傾斜地より、転倒・滑落のリスクが高いと考えられ、立木サイズが大きくなると扱う重量が大きくなるため、危険性が増すと考えられる。また、針葉樹は広葉樹より通直であり、裂けや割れが少ない (厚生労働省 2020) といわれており、伐倒作業や造材作業は針葉樹の方が行いやすく、安全と考えられる。このため、 sl, rb, vb の係数は正の働きを持つと予想される。本シミュレーションでは、 sl, vb の係数は正の値を示し、 rb の係数の値は小さいものの、負の値を示した。したがって、従事者 1 人あたりの急傾斜地の伐採面積が増えるほど、広葉樹の ha あたりの供給材積が増えるほど、傷害災害発生率は増加し、針葉樹を伐出するより広葉樹を伐出するほど、傷害災害発生率が減少する結果となった。 rb が負となった要因を明らかにするために、針葉樹供給量に対する広葉樹供給量の比 rb と傷害災害発生率の関係を図-7 に示す。図より、 rb が 100% 以上と高い値である上に、傷害災害発生率が 0.02 から 0.06 と低い値にあるデータが存在する。これらの多くが図中に示す通り、長崎県となっており、特定の道府県のデータの影響を受けた可能性がある。一方で、広葉樹の伐出は針葉樹より危険であり、より慎重に作業するため、その結果として rb が負となった可能性も考えられる。現状のデータでは、様々な解釈が可能であり、 rb が負となった要因を断定できない。そのため、針葉樹伐出と広葉樹伐出の労働災害発生率の違いについては、調査分析が必要である。

地域特性 pr_j は変量効果であり、斜面傾斜や林業従事者の年齢構成、高性能林業機械の導入台数などの変数の影響を除いたときの道府県が持つ「測定できない・測定

しなかった地域差」を表している。従事者の年齢や斜面傾斜などの作業環境以外で、労働災害の発生に影響を及ぼす要因としては、他産業（熊崎ら 2019, 奥平ら 2020, 庄司ら 2002, 北條 2003, 廣瀬ら 2001 など）では、組織や現場の安全風土・文化、安全管理体制を挙げており、林業でも今富（2013）は労働災害の発生が少ない事業体の安全風土について指摘している。このため、地域特性 pr_j には安全風土・文化や安全管理体制の影響が含まれていると考えられる。地域特性 pr_j の係数の地理的分布図（図-8）では、95%ベイズ確信区間が負である地域と正である地域には地理的な偏りがある。このことから、

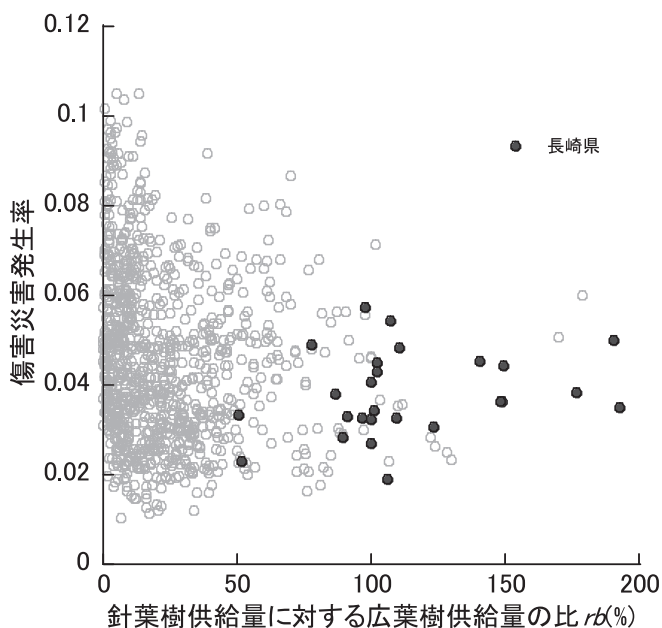


図-7 針葉樹供給量に対する広葉樹供給量の比 rb と傷害災害発生率との関係

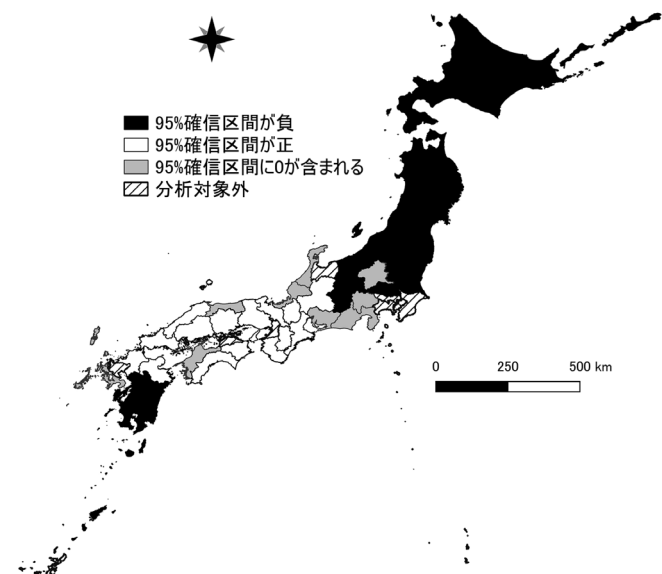


図-8 地域特性の係数の確信区間の地理的分布

安全風土・文化、安全管理体制が地理的な偏りがある可能性が考えられるが、安全風土・文化、安全管理体制に関する知見は十分ではない。また、広域で共通ではあるものの、本研究では変数に使用しなかった要因（例えば、気象といった作業環境）が地理的な偏りを生んだ可能性も考えられる。このため、本研究で得た地域特性 pr_j の偏りについては、安全風土・文化、安全管理体制や気象などに関する更なる調査・分析が必要であろう。

4.2 傷害災害の低減策

本結果より、傷害災害発生率の増加効果のある主な変数は、 yo と sl であり、減少効果のある主な変数は se と ma であった。したがって、傷害災害発生率を減らすには、統計上では yo と sl の数値を減らし、 se と ma の数値を増やすこと、すなわち若年従事者と 30 度以上での作業面積を減らし、高齢従事者と高性能林業機械の導入台数を増やすことと言える。統計から得た結果から、高齢従事者を増やし、若年従事者を減らすことが安全性向上につながるとしても、これは現実的ではない。また、斜面傾斜は自然条件であり、急傾斜地の面積を減らすことも困難であり、最も現実的なのは、高性能林業機械を導入させることである。

そこで、ここでは高性能林業機械導入による死傷災害発生率の低減効果を検討する。低減効果については、ロジスティック回帰で得た係数から算出できる各要因のオッズ比を用いる。オッズ比はある事象の発生確率（本研究では傷害災害発生率）と発生しない確率の比率であり、オッズ比は 2 つのオッズの比を表している。このオッズ比は発生確率が小さい場合、リスク比に近似できる特徴を持つ（横山・田中 1998）。リスク比はある要因が増えた（または減った）場合に発生確率の相対的な増加量（または減少量）を表した指標である。本研究における傷害災害発生率の平均値は 4.6% であり、発生確率が小さいことから、本研究のオッズ比はリスク比に近似できると判断できる。このことから、オッズ比をリスク比と解釈し、以下の条件での高性能林業機械の導入による傷害災害発生率の低減効果を推定した。推定に用いる条件は 2015 年の林業従事者 1000 人当たりの高性能林業機械の導入台数 ma が最小の道府県（滋賀県で 33 台 / 1000 人）が、最大の道府県（茨城県で 406 台 / 1000 人）の水準まで高性能林業機械を導入した場合とし、その場合のオッズ比 ($e^{(C_{ma}(406-33))}$) は 0.69 であった。したがって、 ma 以外の要因が滋賀県の水準のままで、 ma のみ、最大値の水準に達したと仮定した場合の傷害災害発生率は、 ma が最小の時より約 31% ($(1-0.69) \times 100$) 低減することが分かった。上記の推定条件は最小値から最大値になった場合であることから、最も低減効果が高い場合を示している。このため、他の条件では低減効果は小さくなるが、高性能林業機械の導入は作業能率の向上だけでなく、林業の労働安全の向上にもつながると考えられる。

本研究や既往の研究でも若年従事者の傷害発生率は高

齢従事者より高いことが示されているが、持続的に林業を行うには、若年者従事者の確保が重要である。既往の研究より、若年従事者はチェーンソーや刈払い機といった刃物のある道具・機械を起因とした災害が多いことが分かっている（今富・奥田 1994, 猪俣ら 2022）。このため、これらの災害の発生要因について、さらなる研究・分析を行い、若年従事者の労働災害を減らし、若年者率 y_0 の係数を負にすることが重要であると考ええる。

5. おわりに

斜面傾斜や年齢などの要因が傷害災害発生率に及ぼす影響を、ベイズ統計モデルを用いることで定量化した。これにより、急傾斜地での作業は傷害災害発生率を上げる働きを持ち、高性能林業機械の導入は発生率を下げる働きを持つことを明らかにした。ベイズ統計モデルでは変量効果を推定できる。この特性を用いて、これまで明確にでなかった各道府県が持つ地域差の影響を推定した結果、近畿地方、中国地方、四国地方では傷害災害発生率を増加させる特性があることが分かった。この特性には安全風土・文化、安全管理体制や気象条件などの要因が複合的に作用していると考えられるが、知見が不足しているため、更なる分析の必要性を示した。また、本研究ではロジスティック回帰を行っているため、各要因のオッズ比を算出できる。発生確率が小さい場合、オッズ比はリスク比の近似値と解釈できることから、ベイズ統計モデルで得た係数から各要因の数値が増える（または減る）場合の傷害災害発生率の増加量（または減少量）を数値化できるようになった。

これらの成果より、傷害災害発生率の低減には、急傾斜地での作業を減らすこと、高齢従事者を増やし、若年従事者を減らすこと、高性能林業機械の導入することが、統計上は有効であることが分かったが、急傾斜地での作業や林業従事者の年齢を調整するのは困難である。このため、傷害災害発生率を下げるには、高性能林業機械の導入が有効であることを示した。傷害災害発生率を更に下げるには、若年者の傷害災害発生率を下げる必要性があり、そのためには若年者の労働災害の分析・対策が必要であることを示した。

各変数の影響力に関する研究が乏しいため、本研究では線形関係で統計モデルを構築したが、各変数はより複雑な階層性があることや相互作用があることも考えられる。労働災害の研究・分析を進め、統計モデルを改善することで、各要因の影響力の推定精度を高める必要があらう。

6. 謝辞

本研究実施にあたり、森林の伐採地の経年データをご提供いただいた森林総合研究所の志水克人氏に厚く感謝を申し上げる。また、本研究は（国研）森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト（課題番号：2

ア bPS7）「伐倒時の倒伏メカニズムに基づいた伐倒技能の評価手法の構築」の研究成果である。

引用文献

- 秋山孝臣（2016）林業における労働安全対策. 調査と情報 **56** : 6 ~ 7.
- 深澤圭太・角谷拓（2009）始めよう！ベイズ推定によるデータ解析. 日本生態学会誌 **59** : 167 ~ 170.
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dusen, D.B., Vehtari, A. and Rubin, D.B. (2013) Bayesian Data Analysis Third edition. 675pp, Chapman and Hall/CRC, New York.
- 廣瀬文子・小島三弘・長谷川尚子・高野研一・庄司卓郎・鈴木芳美（2001）組織要因と企業の安全レベルに関する調査研究－複数業種間の比較－インシデント調査によるヒューマンファクターに関する基礎的研究. 人間工学 **37** (4) : 169 ~ 184.
- 北條哲男（2003）インシデント調査によるヒューマンファクターに関する基礎的研究. 建設マネジメント研究論文集 **10** : 297 ~ 304.
- 今富裕樹（2003）伐木作業におけるリスクテイキング行動分析. 森利誌 **18** (1) : 37 ~ 42.
- 今富裕樹（2006）安全作業を目指した新規林業就業者の育成に向けて. 森利誌 **20** (4) : 237 ~ 242.
- 今富裕樹（2013）林業事業体の安全意識・行動、組織風土の解明とそれらが安全レベルに及ぼす影響. 森利誌 **28** (4) : 245 ~ 254.
- 今富裕樹・奥田吉春（1994）高齢化林業社会における適正作業. 83pp, 林業科学技術振興所, 東京.
- 今富裕樹・上村巧・加藤隆（2011）フォワーダ作業の災害要因と災害発生の類型化. 森利誌 **26** (1) : 21 ~ 26.
- 猪俣雄太・山口浩和・有水賢吾（2019）林業機械を対象とした労働災害発生頻度の推定. 森利誌 **34** (3) : 123 ~ 130.
- 猪俣雄太・山口浩和・中田知沙（2022）年齢別の林業労働災害発生率の特徴. 森利誌 **37** (1) : 67 ~ 76.
- 壁谷大介・宇都木玄・来田和人・小倉晃・渡辺直史・藤本浩平・山崎真・屋代忠幸・梶本卓也・田中浩（2016）複数試験地データからみたコンテナ苗の植栽後の活着および成長特性. 日林誌 **98** (5) : 214 ~ 222.
- 鹿島潤・今富裕樹（2005）トップハンドルチェーンソーを使用した枝打ち作業の危険要因. 森利誌 **19** (4) : 291 ~ 294.
- 鹿島潤・鈴木秀典（2012）路網作設作業における事故、ヒヤリハット事例. 森利誌 **27** (1) : 31 ~ 37.
- 鹿島潤・上村巧（2008）チェーンソー作業におけるソーチェーンによる被災状況と防護服による災害防止効果. 森利誌 **22** (4) : 275 ~ 278.
- 鹿島潤・上村巧（2010）刈払機を用いた作業の災害分析.

- 森利誌 **25** (2) : 77 ~ 84.
- 小森政嗣 (2019) これからベイズ統計を使ってみたい人にー確率的プログラミング言語のすすめー. 日本音響学会誌 **75** (6) : 351 ~ 357.
- 厚生労働省 (2013) リスクアセスメント担当者養成研修受講者用テキスト (平成 24 年度事業分) (<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeniseil4/dl/1306241.pdf>). 2022 年 8 月 19 日参照.
- 厚生労働省 (2020) チェーンソーによる伐木等作業の安全に関するガイドライン. オンライン, (<https://www.mhlw.go.jp/content/11300000/000590836.pdf>). 2022 年 8 月 19 日参照.
- 厚生労働省 (2022) 労働災害統計. オンライン, (<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/tok/anst00.html>). 2022 年 8 月 19 日参照.
- 厚生労働省労働基準局安全衛生部 (2013) 車両系林業機械の安全対策に係る検討会報告書. 62pp, オンライン, 2018 年 7 月 2 日.
- 久保拓弥 (2012) データ解析のための統計モデリング入門ー一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC. 282pp, 岩波書店, 東京.
- 熊崎美枝子・岡田賢・清水芳忠・庄司卓郎・牧野良次 (2019) 労働者の安全認識に対する影響因子に関する研究. 労働安全衛生研究 **12** (3) : 161 ~ 172.
- 松本誠 (1999) 伐倒作業における重大災害の回避に関する考察. 森利誌 **14** (1) : 19 ~ 26.
- 松浦健太郎 (2016) Stan と R でベイズ統計モデリング. 280pp, 共立出版, 東京.
- 農林水産省 (2021) 令和 2 年度農林水産業・食品産業における労働安全強化対策推進事業のうち新たな現場の作業安全対策の実現に向けた調査委託事業. オンライン, (https://www.maff.go.jp/j/kanbo/sagyoun_anzen/attach/pdf/itaku-10.pdf). 2021 年 6 月 16 日参照.
- 農林水産省 (2022) 木材統計調査. オンライン, (<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai/>). 2022 年 8 月 19 日参照.
- 沼田邦彦 (1995) 京都府における民有林の林業労働災害に関する分析 (II) : 年齢から見た労働災害. 京大農演報 **67** : 113 ~ 123.
- 岡勝・中澤昌彦・佐々木達也・吉田智佳史・上村巧・鹿島潤・加藤隆 (2011) 高性能林業機械の導入後 10 年目における林業労働死亡災害の考察. 森利誌 **21** (1) : 27 ~ 34.
- 奥平啓太・小島智恵・逸見真・竹本孝弘 (2020) 船員災害防止に向けた災害発生要因の分析に関する研究. 日本航海学会論文集 **142** : 45 ~ 52.
- 林業・木材製造業労働災害防止協会 (2022a) 林業労働災害防止関係統計資料. オンライン, (<https://www.rinsaibou.or.jp/disaster/assets/20220707toukei.pdf>). 2022 年 8 月 19 日参照.
- 林業・木材製造業労働災害防止協会 (2022b) 林業における作業別死亡災害. オンライン, (https://www.rinsaibou.or.jp/disaster/assets/18rin08_1.pdf). 2022 年 8 月 19 日参照.
- 林野庁 (2021) 高性能林業機械の保有状況. オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/daisuu.html>). 2022 年 8 月 20 日参照.
- 林野庁 (2022) 森林・林業統計要覧. オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran.html>). 2022 年 8 月 20 日参照.
- Shimizu, K. and Saito, H. (2021) Country-wide mapping of harvest areas and post-harvest forest recovery using Landsat time series data in Japan. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. **104**(15):1-14.
- 清水裕士 (2018) 心理学におけるベイズ統計モデリング. 心理学評論 **61** (1) : 22 ~ 41.
- 庄司卓郎・興水ヒカル・鈴木芳美 (2002) 建設企業における組織風土と安全意識ー属性による認識の違いについてー. 人間工学 **38** (特集号) : 372 ~ 373.
- 総務省 (2021) 国勢調査 (昭和 55 年 ~ 平成 27 年). オンライン, (<https://www.e-stat.go.jp/stat-search?page=1&toukei=00200521>). 2022 年 8 月 20 日参照.
- 豊川勝生・鹿島潤 (2000) アンケートによる伐倒作業技術に関する調査. 森利誌 **15** (3) : 225 ~ 232.
- 渡辺憲・高麗秀昭・小林功・柳田高志・鳥羽景介・三井幸成 (2017) 階層ベイズモデルを用いた丸太の天然乾燥における乾燥時間の推定および丸太の諸形質が乾燥性に及ぼす影響の評価. 木材学会誌 **63** (2) : 63 ~ 72.
- 渡辺澄夫 (2012) ベイズ統計の理論と方法. 226pp, コロナ社, 東京.
- 山田容三 (2016) 安全作業を目指した新規林業就業者の育成に向けて. 森林科学 **78** : 19 ~ 21.
- 横山徹爾・田中平三 (1998) オッズ比と相対危険の関係. 日循協誌 **33** (1) : 36 ~ 39.