

# トドマツへの林業機械による意図的な損傷により発生した腐朽

森林総合研究所北海道支所 山口 岳広  
森林総合研究所 倉本 恵生

## はじめに

北海道では比較的緩斜面の人工林が多いことから、車両系林業機械を用いて林内を直接走行し伐採・搬出を行なう作業システムが近年広く普及しつつある<sup>(1)</sup>。しかし、このような大型機械による列状間伐等での伐出作業では、残存立木に機械による損傷を生じて、それらの傷口から腐朽菌が侵入して残存木に腐朽・変色などの材質劣化を生じる恐れがある<sup>(10)</sup>。特にトドマツでは、このような傷から腐朽菌が入りやすいことが実際の損傷被害調査や剥皮試験から明らかになっている<sup>(1,16-21)</sup>。これまでにトドマツ損傷部から侵入する腐朽菌としてレンガタケ(*Heterobasidion orientale*)が報告されているが<sup>(16,17)</sup>、他の腐朽菌の種類やその腐朽侵入速度などについてはまだ不明な点が多い。そこで、本研究では実際に林業機械を用いてトドマツを意図的に損傷させることにより、その後に入ってきた腐朽菌の種類と腐朽の進展を明らかにすることを目的として試験と調査を行ったので報告する。

## 材料と方法

### 1) 林業機械による意図的な損傷

機械による損傷試験は、2012年7月（以下夏期）および2013年2月（以下冬期）に北海道札幌市にある森林総合研究所北海道支所実験林内の39年生（損傷当時）トドマツ林（傾斜2~4°）で行なった。この試験は既に報告されている側根損傷実態調査の試験<sup>(6,19)</sup>と同時に実施した。あらかじめ選定したトドマツ立木に、地上から高い位置（地上高1.8~2.3m）と低い位置（地上高0~0.8m）、また傷の大きさを大（188~825cm<sup>2</sup>）と小（18~181cm<sup>2</sup>）に設定して損傷予定位置に印を付けておいた。0.45クラス油圧ショベル（コマツ社製PC-120）を用い、装着したフェラーパンチャーアタッチメントや履帯を意図的にトドマツ幹の印に当てて損傷させた（図-1A）。損傷程度は、多少の強弱はあるが材が露出し木部が傷つく状態であった（図-1B・C・E・F）。トドマツ1個体につき1箇所を損傷させた。夏期は37本、冬期は24本の処理を行なったが、これらのうち、2017年11月に12本、2018年11月に13本を伐倒して試験に供した。供試木の胸高直径および樹高（いずれも伐採時）を表-1に示す。

### 2) 損傷部位の解体と腐朽進展の計測

各供試木は損傷部端から上下方向に10~30cm間隔で玉

切り、材の横断面画像をデジタルカメラで記録した（図-2）。これらの画像から各横断面における皮付きおよび材断面面積と腐朽断面面積を画像解析ソフトImageJ（NIH, USA; <https://imagej.nih.gov/ij/>）を用いて計測した。変色だけでなく材の軟化が観察される状態を確認して腐朽材と判定した。軸方向腐朽進展長は傷の軸方向上下端からの距離とした。材の軟化はなく材変色のみが傷の上下端から進展しているだけの場合は「腐朽なし」と判定した。腐朽材先端部分の軸方向腐朽進展長は軸方向に材を分割して測定した。幹材積および腐朽材積は、玉切りした両端の材断面面積・腐朽断面面積の平均値と軸方向の長さの積から求めた。腐朽先端部分の材積は錐体とみなし、腐朽断面面積×腐朽先端までの軸方向長さ×1/3として算出した。

供試木の個体ごとに損傷から伐採・解体処理までの期間が異なるので、比較単位を揃えるため軸上方向腐朽進展長および腐朽材積を損傷から伐採・解体までの年数で除し、年当たりの進展長・材積増加量として比較した。経過年数については、損傷時から伐採までの間に経過した成長期の回数を考慮して、2017年伐採の供試木は夏期損傷を5.5年、冬期損傷を5年、また2018年伐採木は夏期損傷を6.5年、冬期損傷を6年として算出した。また、損傷高の低い供試木では地下部にまで腐朽が進展していたケースがあることから、軸方向の腐朽進展長については上方向の距離で、腐朽材積量に関しては採材できた高さ（ほぼ地際）までの値で比較した。

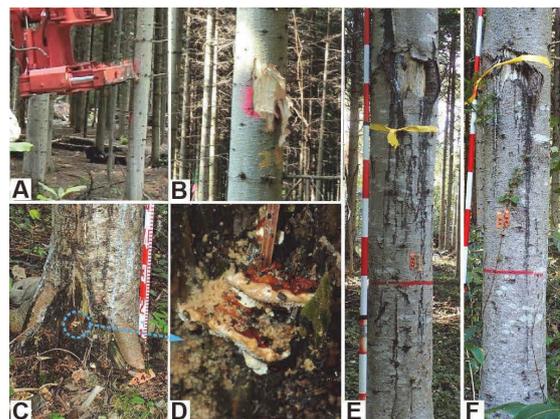


図-1 フェラーパンチャーによるトドマツ幹の意図的な損傷 (A) と損傷直後の状態 (B), C・D・E・F; 供試木伐採直前の損傷状態 (C・E・F) と C の傷上に発生したレンガタケの子実体 (D)

C・E・F はそれぞれ図-2 の左・中・右の図に対応する供試木

表-1 供試木の胸高直径と樹高（伐採時）

区分	平均値	最小	最大
胸高直径 (cm)	24.2	11.1	35.1
樹高 (m)	17.5	11.2	22.4

Takehiro YAMAGUCHI (Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Sapporo 062-8516),  
Shigeo KURAMOTO ( Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687)

Advance of wood decay from the wounds on the stems of *Abies sachalinensis* intentionally injured by forestry machine

3)腐朽菌の分離・同定

腐朽の侵入が認められた場合はベノミール 10ppm を含む PDA 平板培地を用いて腐朽材から腐朽菌の分離を行なった。DNA 塩基配列の相同性検索によって分離された腐朽菌の種を同定するため、Phire Plant Direct PCR Kit (ThermoFischer Scientific 社, USA)を用いて PCR によりリボゾーム DNA の ITS 領域を増幅した。DNA 抽出は分離培養菌糸片からキット添付の抽出バッファーで行なった。PCR はプライマーに ITS-1F~ITS-4B<sup>(2)</sup>を用い、サーマルサイクラーの設定温度と時間に関しては同キットのプロトコールに従った。得られた PCR 産物の塩基配列解析は EurofinGenetic 社(<https://eurofinsgenomics.jp/jp/service/dnasequence/overview/>)に委託した。得られた塩基配列解析結果をもとに GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>)のデータベースから相同性検索を行なった。塩基配列が 99%以上の相同性を持つ種を同一種であると判定した。

表-2 損傷季節・傷サイズ別の供試本数・腐朽があった本数・腐朽菌が分離された本数

( )内の数値は供試本数に対する割合%。

損傷季節	傷サイズ	供試本数	腐朽あり	腐朽菌分離
夏	小	6	5 (83.4)	2 (33.4)
	大	7	5 (71.5)	3 (42.9)
	小計	13	10 (77.7)	5 (38.5)
冬	小	6	4 (66.7)	1 (16.7)
	大	6	6 (100.0)	4 (66.7)
	小計	12	10 (83.4)	5 (41.7)
夏・冬計	小	12	9 (75.0)	3 (25.0)
	大	13	11 (84.7)	7 (53.9)
合計		25	20 (80.0)	10 (40.0)

結果と考察

1)損傷からの腐朽の侵入と分離された担子菌

調査したトドマツ損傷木全体の 25 本のうち 20 本には腐朽の侵入が認められた(表-2)。残りの 5 本は、傷面直下と軸上下方向に数cmから十数 cm 程度の材変色はあったが明瞭な腐朽の侵入はなくまた傷面直下の材で腐朽菌も分離されなかったことから、傷が生じて必ずしもすべてで腐朽が進展するとは限らないことが明らかになった。しかし、8 割の本数頻度で腐朽が発生していることから、やはりトドマツは損傷から腐朽が生じやすいと考えられる。モミ類での損傷部からの腐朽(変色も含む)事例を取りまとめた Vasiliauskas の総説<sup>(14)</sup>では、樹種や調査例によって違いはあるが *Abies* 属樹木において頻度が高い事例が多く示されている。

供試本数に対する腐朽本数の割合で見ると(表-2)、夏と冬の損傷季節の違いによる腐朽侵入本数の差は数%で大きな差は見られなかった。一方、傷の大きさに関しては、夏期損傷で小さな傷のほうが大きな傷よりも比率がやや高かったのに対し、冬期損傷では大きな傷のほうが腐朽木の比率がかなり高かった(表-2)。夏・冬全体では大きな傷のほうが小さな傷よりも腐朽侵入本数の比率が高く、傷の大きさが影響している傾向が示唆された。

2)分離された腐朽菌類

腐朽が認められたトドマツ 20 本のうち 10 本からは損傷部から侵入したと考えられる担子菌類が分離された(表-3)。夏期の損傷木 4 本から *Amylostereum chailletii* が、1 本からレンガタケが、冬期の損傷木では *A. areolatum* が 4 本から分離された(表-3, 図-2)。またレンガタケ分離木の損

表-3 分離された腐朽菌の種類と分離本数、軸上方向の年当たり進展長、年当たり腐朽材積増加量

分離された腐朽菌類	分離本数			軸上方向年当たり進展長 平均値(最小~最大) cm・yr <sup>-1</sup>	年当たり腐朽材積増加量平均値 (最小~最大) ×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> ・yr <sup>-1</sup>
	夏期損傷	冬期損傷	計		
<i>Amylostereum chailletii</i>	4	0	4	14.0 ( 0.3~23.8)	0.27 (0.11~0.43)
<i>Amylostereum areolatum</i>	0	4	4	15.4 (12.6~18.7)	0.48 (0.17~0.81)
レンガタケ <i>Heterobasidion orientale</i>	1	0	1	55.6 (55.6~55.6)	1.23 (1.23~1.23)
<i>Sistotremastrum</i> sp.	0	1	1	2.4 ( 2.4~ 2.4)	0.18 (0.18~0.18)

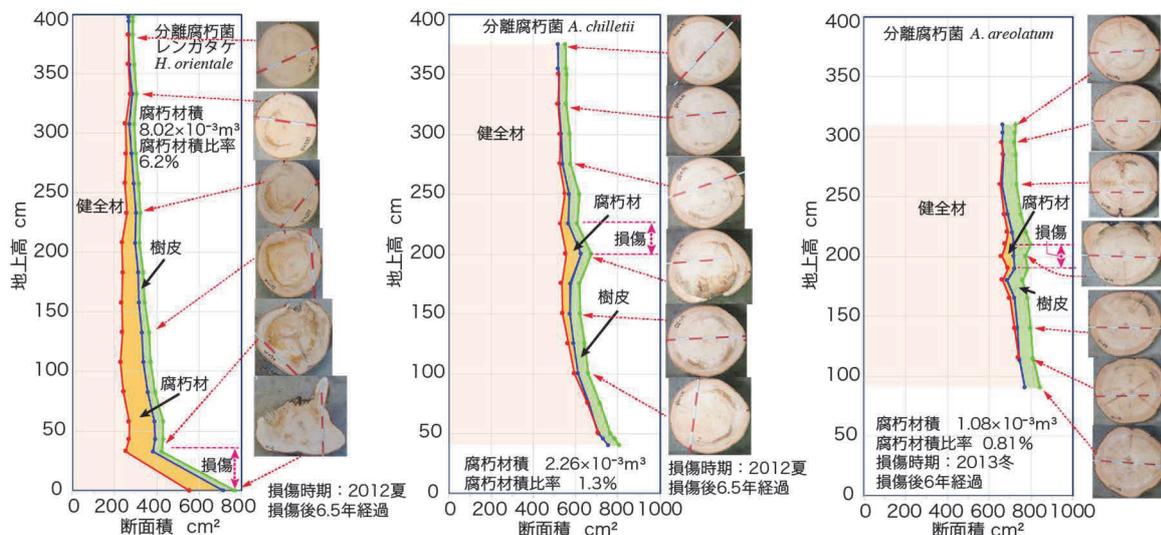


図-2 分離された腐朽菌別の供試木における損傷部位から上下方向の幹横断面積・腐朽断面積と横断面の推移(各腐朽菌の代表例)。赤い矢印の地上高での横断面を示す。横断面画像内の赤白スケールの間隔は 5cm。

傷部露出材上には本菌の子実体が発生していた（図-1C・D）。この結果より、損傷した季節によって侵入していた腐朽菌の種類に明瞭な違いがあることが明らかになった。北欧におけるヨーロッパトウヒでの研究例<sup>(8,12)</sup>では、腐朽菌の種類によっては損傷季節で分離頻度に違いがあることが示されており、損傷季節は腐朽菌の種類に影響を与えていると考えられる。損傷からの腐朽菌の感染は主に空中を飛散している担子胞子の付着によると見られることから、同じ損傷季節に同一種の感染が生じたのは損傷後のある季節に同一種の腐朽菌の担子胞子が空中に浮遊していた可能性が考えられる。

一方で、本研究で分離された *Amylostereum* 属 2 種はキバチ類と共生関係を持つ事が明らかになっており<sup>(3,9,15)</sup>、*Amylostereum* 属菌の感染にキバチ類が関与していることも考えられる。なお、*Vasiliauskas*<sup>(13)</sup>はヨーロッパトウヒ (*Picea abies*) の幹損傷部にキバチの脱出口を観察されたとしているが、本研究ではそのような形跡は見当たらなかった。欧州及び北アメリカでは *A. chailletii*, *A. areolatum* 共にトウヒ類やモミ類の立木損傷から生じた腐朽材から分離され分離頻度も高いことから<sup>(4,5,12,13)</sup>、この 2 種についてはトドマツにおいても損傷部からの腐朽に関与している可能性が高い。

レンガタケについては分離された供試木は 1 本のみで、本数割合は全供試木の 4%、腐朽木の 5%と少なかった（表-3）。徳田ら<sup>(16)</sup>は、トドマツの林業機械による損傷木で本菌が優占的に分離されたことを報告しているが、一方で、エゾシカによる樹皮食害や角こすりなどの被害を受けたトドマツからはレンガタケは分離されなかったという結果<sup>(17)</sup>もある。北欧では、実験的に損傷させたヨーロッパトウヒからレンガタケの近似種である（広義の）マツノネクチタケ *H. annosum* が分離されている<sup>(6)</sup>。

以上の結果から、腐朽に関与する菌の種類は損傷季節の違いやその他の多様な条件の差によって変化することが考えられる。今後、空中浮遊する腐朽菌の種類や季節、あるいはキバチ類など媒介者の行動など伝染環境に関連する条件について明らかにしていく必要がある。

なお、あまり腐朽が進展していない 1 本から分離された担子菌はデータベース上で *Sistotremastrum* sp. と登録されている塩基配列とほぼ一致した。本属菌については、日本での採取記録もなくその実態は不明であるが、腐朽がほとんど進展していない状況から、分離された菌のトドマツ生立木幹への腐朽進展能力はそれほど強くないのではないかと考えられる。また、実際に腐朽が存在しながら材から腐朽菌が分離されない例も全体で半数あった（表-2）。これは恐らく何らかの腐朽菌が侵入し腐朽を生じたが、5~6年の間に腐朽菌が死滅してしまったためと推測されるが、その原因は不明である。

### 3) 年当たり軸方向腐朽進展長・腐朽材積増加量

軸上方向の年当たり腐朽進展長・腐朽材積増加量ともに侵入した腐朽菌の種類により、あるいは同種であっても個体間による差があった（表-3、図-2）。レンガタケによる腐朽は 1 例のみであったが、他の腐朽菌に比べて腐朽進展長や腐朽材積増加量が格段に大きく（表-3、図-2, 3）、この菌の腐朽能力が非常に強いことが示された。間伐作業によるトドマツの幹損傷部からのレンガタケによる腐朽侵入

例では 5 年間で軸上方向へ最大 2.4m という結果が報告されている<sup>(16,17)</sup>。また、損傷を模した剥皮部にレンガタケを人工接種した試験では最大で年当たり軸上方向進展長約 80cm という値も記録されている<sup>(21)</sup>ことから、条件が揃えば本菌はトドマツの損傷部から急速に腐朽を進展させる能力を有すると推測される。

*Amylostereum* 属 2 種による腐朽の比較では、トドマツ個体ごとにばらつきはあるが年当たりの腐朽進展長の平均値には大きな違いがなかった（表-3、図-2）。*Vasiliauskas*<sup>(13)</sup>によるヨーロッパトウヒでの損傷腐朽事例では、*A. areolatum* と *A. chailletii* で軸方向上下の腐朽進展長がどちらも 10 年間に平均 280cm 前後で大きな違いがなかったと報告されているが、本研究でも上方向で年当たり 14~15cm（表-3）とほぼ類似した値であった。年当たりの腐朽材積増加量は *A. areolatum* の平均値がやや大きかったが、腐朽材は放射方向にはあまり進展せずほぼ辺材近辺にとどまっており、腐朽材積比率も低かった（図-2）。したがって、両種ともレンガタケに比べると腐朽進展能力はそれほど大きくはないと考えられる。

傷面積との関係では、相関係数はやや低いが傷面積が大きいほど腐朽進展長、年当たりの腐朽進展長・腐朽材積増加量が増加する傾向が見られた（図-3）。また、腐朽菌が分離される損傷木では年当たり腐朽進展長・腐朽材積増加量が大きい傾向が見られた。損傷面積が大きくなると材の腐朽・変色に至る割合が高くなり範囲も広がる傾向があるこ

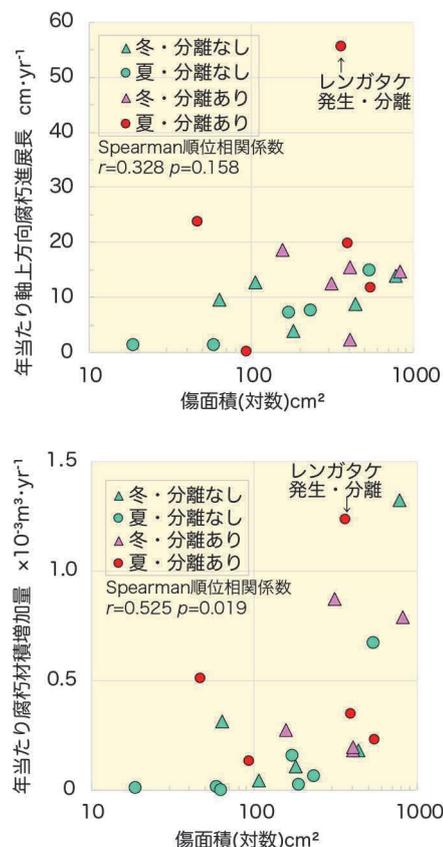


図-3 損傷木の傷面積と年当たり軸上方向腐朽進展長（上）と年当たり腐朽材積増加量（下）の関係

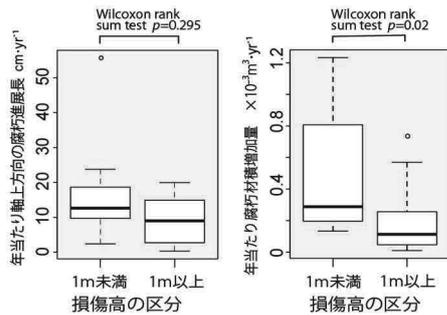


図-4 損傷高を1m未満・以上で区分した場合の年当たり軸上方向の腐朽進展長（左）と年当たり腐朽材積増加量（右）の比較

とが、これまでの研究で報告されている<sup>(8,20)</sup>。前述したように、夏期損傷では小さな傷の腐朽本数比率がやや高かったが、夏・冬全体では大きな傷のほうが腐朽本数の比率が高かった（表-2）ことも考慮すると、傷面積の大小は腐朽進展長や腐朽材積に影響を及ぼしていることが示唆される。

損傷位置の高低との関係では、損傷地上高を1m未満・以上で区分して比較すると、年当たり軸上方向腐朽進展長では統計的な有意差は認められなかったが（Wilcoxonの順位和検定、 $p=0.295$ ；図-4）、年当たり腐朽材積増加量では1m未満の低位置のほうが有意に大きかった

（Wilcoxonの順位和検定、 $p=0.02$ ；図-4）。ただし、損傷高1m未満の区分には腐朽進展長や腐朽材積増加量がかなり大きなレンガタケの腐朽が含まれていることから、これを差し引いて考える必要があるだろう。ただ、高い位置の損傷部における露出した材は地上近くの材より乾燥気味であることも今回観察されており（例えば図-1CとE・F）、また地上部近くの傷では幹の傷に比べて腐朽の感染頻度が高かったという報告<sup>(9)</sup>もあることから、地上近くで腐朽が進展しやすい可能性について今後事例数を増やして検討していくことも必要であろう。

4)まとめ

本研究の結果から、やはりトドマツは損傷から腐朽が侵入しやすいこと、レンガタケのような強い腐朽能力を持つ種が侵入すると数年でも相当腐朽が進展することが明らかとなった。また、*Amylostereum* 属のように菌の伝播にキバチ類が関与している可能性も示唆されたので、腐朽菌の胞子飛散時期や媒介者も含めた生態の解明、あるいは損傷の高さや損傷後の暴露条件などの因子との関連を今後明らかにしていく必要があると考えられる。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP17K07861「林業機械によるトドマツ幹・根系損傷がもたらす腐朽被害のリスク評価」の助成によって行われた。

引用文献

(1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構林業試験場（編）(2015)トドマツ人工林施業の手引。地方独立行政法人北海道立総合研究機構林業試験場, 美唄. 110pp.  
 (2) Gardes M, Bruns T (1993) ITS primers with enhanced

specificity for basidiomycetes - Application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Mol. Ecol.* **2**: 113-118.  
 (3) Gaut IPC (1969) Identity of the fungal symbiont of *Sirex noctilio*. *Aust. J. Biol. Sci.* **22**, 905-914.  
 (4) Hinds TE, Hawksworth FG, and Davidson RW (1960) Decay of Subalpine fir in Colorado. USDA For. Serv. Res. Pap. RM Forest and Range Exp. Sta. **51**: 1-13.  
 (5) Hinds TE, Wood RE, and Bassett RJ (1983) Wounds and decay in residual corkbar fir. USDA For. Serv. Res. Pap. RM Forest and Range Exp. Sta. **247**: 1-6.  
 (6) 倉本恵生・山口岳広・佐々木尚三 (2013) 建機ベースの林業機械の走行繰り返しによるトドマツの地表部側根の損傷発生. *北方森林研究* **61**: 121-124  
 (7) Parker AK, Johnson ALS, 1960. Decay associated with logging injury to spruce and balsam fir in the Prince Geogeregion of British Columbia. *For. Chron.* **36**, 30-45.  
 (8) Roll-Hansen F and Roll-Hansen F (1980) Micro-organisms which invade *Picea abies* in seasonal stem wounds. I. General aspects. *Hymenomycetes. Eur. J. For. Path.* **10**:321-339.  
 (9)佐野明・三原由美・伊藤進一郎(1995) キバチ属 (*Urocetus*) 2種の共生菌胞子貯蔵器官から分離された菌類. *日林中支論* **43**: 125-126.  
 (10) 佐々木尚三 (2007) 機械作業が森林環境に及ぼす影響. *北方林業* **59** (12) : 1-4.  
 (11) 佐々木尚三 (2012) わが国のCTLシステム～北欧システムとの比較を中心に～. *機械化林業* **705** : 1-8.  
 (12) Vasiliauskas R and Stenlid J (1998) Fungi inhabiting stems of *Picea abies* in a managed stand in Lithuania. *Forest Ecology and Management* **109**: 119-126.  
 (13) Vasiliauskas R (1999) Spread of *Amylostereum areoratum* and *A. chailletii* decay in living stems of *Picea abies*. *Forestry* **72**: 95-102.  
 (14) Vasiliauskas R (2001) Damage to trees due to forestry operations and its pathological significance in temperate forest: a literature review. *Forestry* **74**: 319-336.  
 (15) 寺下隆喜代 (1970) キバチと共生する担子菌類の一種. *日林誌* **52**: 313-316.  
 (16) 徳田佐和子・秋本正信・高橋幸男・由田茂一 (1996) 林業機械作業によるトドマツ立木の損傷と腐朽. *日林論* **107** : 277-280.  
 (17) 徳田佐和子 (1998) 幹の傷はトドマツの腐朽を起ししやすい. *光珠内季報* **110** : 10-14.  
 (18) 徳田佐和子 (2002) トドマツは幹に傷がつくと腐朽するのか-剥皮試験とその結果-. *森林保護* **288** : 27-30.  
 (19) 山口岳広・倉本恵生・佐々木尚三 (2014) 林業機械のトドマツ林内走行試験で発生した地表部側根損傷の実態. *北森研* **62** : 77-80.  
 (20) 山口岳広 (2018) 過去の伐採・搬出作業による攪乱がトドマツ人工林の腐朽被害に与える影響. *北方森林研究* **66**: 87-90.  
 (21) 山口岳広 (2020) 林業機械のトドマツへのレンガタケ接種による腐朽の進展に剥皮処理が与える影響. *北方森林研究* **68**: 35-38