

樹幹温度測定による樹木健全度評価手法の検討

- ナラ集団枯損被害地におけるミズナラの測定事例 -

矢田 豊・江崎功二郎・鎌田直人*

はじめに

現在、都市の緑地や森林において、樹木の健全度を客観的に評価するニーズが増加しつつある。樹木の健全度（衰退度）は、外観やフェノロジーなどにより評価されているが、樹幹部における樹液流速も生理的特性値のひとつとして、重要な指標のひとつであると考えられている（1）。

樹幹部の樹液流速の測定法としては、ヒートバルス法や Granier 法が考案され、広く用いられている（2、3）。両者とも測定システムは比較的高価かつ取扱は煩雑で、一般の森林や緑地の管理者が気軽に扱えるものではない。またともにセンサを樹幹に挿入することが必要であり、測定対象の樹木に損傷を与える。

一方、樹幹温度を測定することにより樹液流速（あるいは樹木の健全度、活力度）を評価しようとする試みが、これまでも報告されている。中尾ら（4）、松本ら（5）、太田ら（6）は樹幹温度と活力度等との関係について調査し、樹幹温度の絶対値、または樹幹温度と気温の較差や樹幹温度の日格差等により、樹木の健全度（活力度）を評価できる見通しを報告している。しかし、これらの解析手法では同一環境条件下の健全木の測定値との比較が必要で、調査時期や立地環境の異なる測定対象を評価できる絶対的な指標の提示には至らなかった。小林ら（7）は、上下2点の樹幹温度と、幹と同等の物性を有する比較物の温度を評価することで樹液流速を推定する理論式を導いた。樹幹下部の温度は根から吸い上げられる土壌水分の影響を受け、地温に近い値となる。一方、樹幹上部では気温や日射、風等の影響を受け、高い位置ほど林内気温に近い値になるものと考えられ、これらの関係を適切に評価することにより、

樹液流速や樹幹部の水分通道阻害状況の指標を得ることができると考えられる。しかし、樹幹が急激な気温変化や風の影響を受けたとき、または樹幹温度が低いときには樹液流速の評価は困難になることが予想され（7）、連続的な温度測定記録から指標値を算出しようとする場合には、それらの影響をすべて機械的に除去することは難しい。

ちなみに、上記の報告は大学構内または高速道路サービスエリアの緑地などで調査が行われており、林内と比べると日射や風の影響を受けやすい条件下での測定であったと推測される。また、上記の報告はすべて植栽地の環境条件の影響等により外見的に衰退が認められている個体と健全個体との比較であり、枯死に至る病害に罹病した個体を対象とした検討は行われていなかった。

近年日本海側の各地で被害が拡大しているナラ集団枯損被害は、病原菌（*Raffaelea quercivora* 以下、ナラ菌と表記）をカシノナガクイムシ（*Platypus quercivorus* 以下、カシナガと表記）が伝播する伝染性樹木病害である。カシナガの坑道からナラ菌が樹幹辺材部に侵入し、辺材部の細胞の壊死・葉の萎凋症状を経て枯死に至る（8）。カシナガの穿入は初夏から始まり、早い個体では7月中に枯死することから、樹幹内では急激に水分通道阻害が進行するため、特定個体の通水機能低下に伴う樹幹温度の変化をみるためには適した材料であると考えられる。

小林ら（9）は、伐採後20日間放置したナラの丸太で、対象区等よりもやや多いカシナガ雄成虫が捕獲されたことを報告し、カシナガ雄成虫が寄主からの匂い成分（カイロモン）により誘引された可能性を示唆している。カイロモンがどのような状態の寄主からより多く発散されるのかについては今のところ不明であるが、カシナガが穿入・

*金沢大学大学院自然科学研究科

本報告の一部は、樹木医学会第5回大会（2000）、第12回樹木病害研究会（第113回日本林学会大会研究集会、2002）、および樹木医学会第7回大会（2002）にて発表した。

本研究の一部は、文部省科学研究費「萌芽の研究（課題番号11876036）」の助成を受けて行ったものである。

繁殖しやすい状態の寄主からより多くのカイロモンが放出されているのかも知れず、そのような寄主個体には生理的な異常がある可能性も高い。その異常を樹幹温度測定により検知することができれば、カシナガの“穿入危険度”等を事前に予測することが可能となると考えた。

筆者らは1998年8～9月(10)、および1999年6～11月(11)に、ナラ集団枯損被害発生地のナラの樹幹温度測定を実施した。これらの調査によりカシナガ穿入木と未穿入木の樹幹温度特性の比較を試み、両者の間には差が認められたが、各個体毎に導かれた指標にはばらつきが大きく、十分に実用的な指標を得るまでには至らなかった。また、これらの調査では、カシナガ穿入前の樹幹温度のデータはほとんど得られず、カシナガの穿入等を事前に予測するための検討はできなかった。

本報告ではこれらのことを踏まえ、ナラ集団枯損被害地のミズナラを対象として高さの異なる2点の樹幹温度の測定を行い、樹幹温度による樹木健全度評価の可能性と、カシナガの穿入と寄主の健全度の関係について、検討する。

調査法

1 調査時期と調査地

樹幹温度の測定は、2000年の6月5日から9月12日までの間、石川県加賀市三谷県有林内のナラ集団枯損被害地の調査区で行った(標高:約300m、斜面方位:N、斜面傾斜:約30°)。本試験地では1998年よりナラ集団枯損被害が始まり、2000年春には測定木周囲の50%のミズナラが枯死していた(12)。この林分で、調査開始以前にはまったくカシナガの穿入を受けていないミズナラ7個体を選び、測定対象木とした(DBH:15～25cm)。

2 カシナガキクイムシの穿入経過

江崎ら(12)の調査により、全調査個体の地上高1.5mまでの穿入孔数が2週間おきに調査されたので、その結果を本研究に利用した。また、それとは別に各調査木の葉色の変化を約1週間毎に調査し、カシナガ穿入後の葉の変色が始まった日と全部の葉が枯死した日を記録した。

以後、各調査木を区別するために、カシナガ穿入開始時期と葉の変色・枯死の時期が特に早かった個体をa、穿入時期がaに次いで早く穿入数も多かった2個体をb-1およびb-2、穿入時期

が遅く穿入孔数が少なかった3個体をc-1、c-2およびc-3、本調査期間中には穿入がなかった1個体をdと表記する。また、b-1、b-2、c-2、dの各個体では9月以降も穿入孔が増加したが、本報告では樹幹温度を測定した間の穿入孔数として8月までの穿入孔数を検討対象とし、これを以下穿入孔数と表記する。

3 樹幹温度の測定

対象木の、樹幹北側の地上高150cmおよび50cmの樹幹表面各2点(設置間隔10cm)の樹幹温度を10分間隔で測定した。測定には、温度測定用データロガー(T&D社製TR-71S)をタッパーケースに格納して使用した。タッパーケースの下部には水抜き用の穴を開け、降雨や結露等による水分がケース内にたまらないようにした。温度センサは標準添付のサーミスタセンサを用い、受感部を幹に沿わせ、外側をテープ状およびゲル状のシリコン系の充填剤で被覆し、ビニルテープで固定した(図-1)。以下、本法による測定値を樹幹温度と表記する。樹幹温度の測定と同時に、地上高約1mに設置した30cm×40cmの日覆いの下に温度センサを据え付け、林内気温を測定した。使用した測定器の公称精度は±0.5であったが、器差補正を施すことにより0.1の差を比較することが可能となった。器差補正済みの各センサの測定値を調査対象木の高さ毎に平均し、それぞれの地上高の樹幹温度とした。



図-1 温度センサの設置状況

4 測定値の処理

樹木健全度評価のために、以下の指標を考案した。

地上高150cmの樹幹温度の指標(T_{150})

林内気温が25～26であった時刻の測定値について、時刻ごと、調査個体ごとに、地上高150cm

の樹幹温度と個体 d の地上高150cmの樹幹温度の差を算出した。その算出値を日ごとに平均し、それぞれの日の、林内気温25～26 における地上高150cmの樹幹温度の指標とした（以下、この値を T_{150} と表記）。

地上高150cmと50cmの樹幹温度の差の指標 (T_{150-50})

時刻ごと、調査個体ごとに、林内気温25～26 であったときの地上高150cmの樹幹温度と同50cmの樹幹温度の差を算出し、 T_{150} と同様に個体 d の同様の算出値との差をとり、地上高150cmと50cmの樹幹温度の差の指標とした（以下、この値を T_{150-50} と表記）。

いずれの指標とも、林内気温が25 以上になった時間が1時間未満（10分間隔の測定回数で5回以下）であった日は欠測日とした。

これらの指標について、カシナガ穿入後の経日変化の傾向をみるために、カシナガ穿入後から測定終了まで（枯死した個体は枯死まで）の回帰直線を求めた。また、穿入孔数と8月中の T_{150-50} および T_{150} の平均値について回帰分析を行った。さらに、8月以前に枯死した個体についても評価するために、穿入孔数と、上述の T_{150-50} および T_{150} の経日変化の回帰直線の傾きとの関係について回帰分析を行った。

次に、カシナガ穿入前の樹幹温度特性からカシナガの穿入数を推定することができるかどうかについて検討するために、6月中の T_{150-50} および T_{150} の平均値と穿入孔数について回帰分析を行った。

T_{150-50} および T_{150} は穿入孔数が0であった個体 d の値からの差をみた指標であることから、 T_{150-50} および T_{150} の平均値と穿入孔数の回帰関係は定義上原点を通るべきである。このことから上記の回帰分析はすべて、原点を通る回帰直線を対象として行った。

結果および考察

1 カシナガキクイムシの穿入経過

各調査木へのカシナガの穿入経過と測定木の状態を図 - 2 に示す。おおよその傾向として、穿入開始時期が早いほど穿入孔数が多く、葉の変色が始まる時期や葉の枯死の時期も早くなる傾向が認められた。

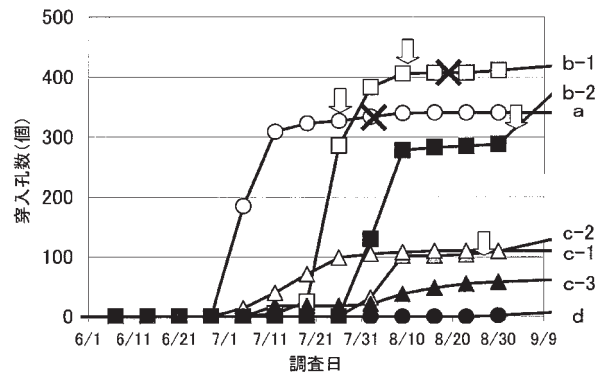


図 - 2 各調査木へのカシナガキクイムシの穿入経過
 ↓: 葉の変色の確認日 X: 枯死確認日

2 樹幹温度の指標の検討

林内気温と地上高150cmの樹幹温度の関係を調べたのが図 - 3 である。また同様に、林内気温と地上高150cmと50cmの樹幹温度の差の関係をみた（図 - 4）。図 - 3、4 とともに正の相関が認められ

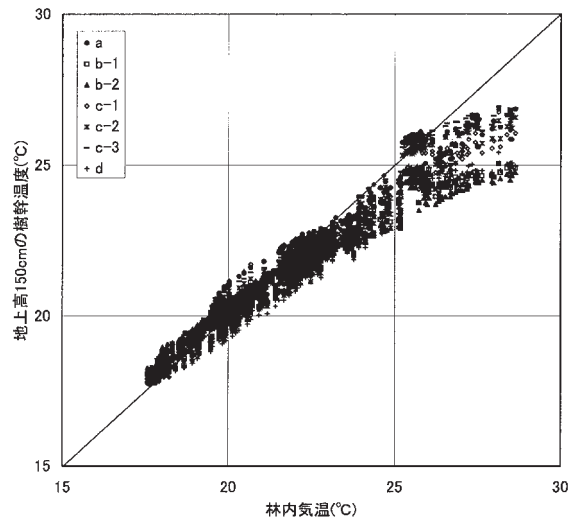


図 - 3 林内気温と地上高150cmの樹幹表面温度の関係（6月26～30日）

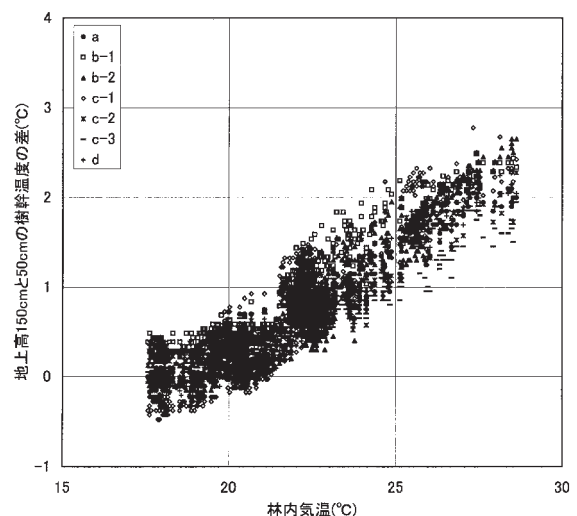


図 - 4 林内気温と地上高150cmと50cmの樹幹表面温度の差の関係（6月26～30日）

たが、地上高150cmの樹幹温度（図 - 3）では、気温が高くなると樹幹温度の上昇が頭打ちになる傾向が認められた。両図は6月26～30日の測定値の例であるが、全測定期間を通じて、ほぼ同様な傾向が認められた。また、測定個体によって林内気温と樹幹温度の関係が異なる傾向がうかがわれた。これらの傾向は、以前の調査（10、11）でも認められた。以上のことから、各個体の樹幹温度特性（特に樹幹温度の差）を比較するためには、林内気温がある程度高い一定の基準温度で検討することが必要であると考えられた。そこで、以後の検討では、林内気温25 以上になった時間が1時間以上あった日の、林内気温が25～26 の時の樹幹温度について検討する。

林内気温が25～26 のときの個体dの樹幹温度の変化を図 - 5 に示す。個体dは調査期間中カシナガの穿入を受けなかったため、ナラ菌の影響を受けない健全木の状態を示していると推測される。地上高150cmおよび同50cmの樹幹温度は、測定期間中緩やかな増加傾向を示したが、気温や降雨の影響によると推測される短期的な変動が認められた。また、地上高150cmと50cmの樹幹温度の差は期間中減少傾向を示したが、やはり気温や降雨の影響によると推測される短期的な変動が認められた。このように、健全木においても値が変動した

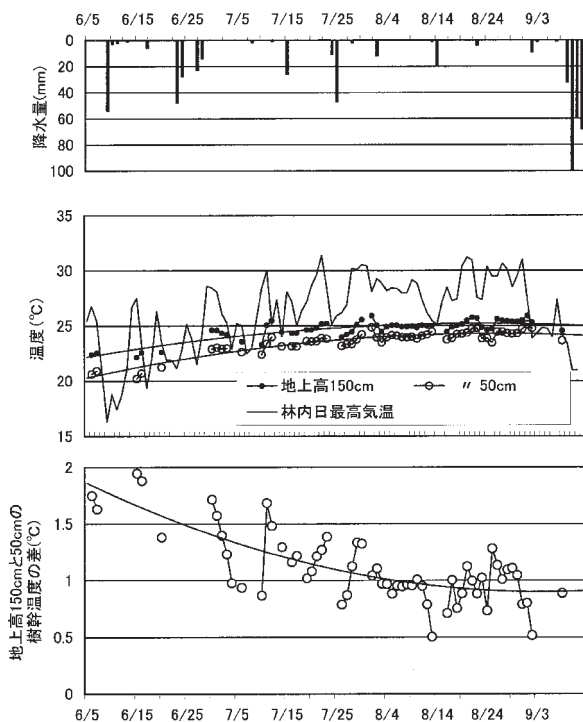


図 - 5 林内気温25 における個体dの樹幹温度の変化
 図中の曲線は2次回帰曲線

ので、各個体の健全度の変化をより明瞭にみるためには、健全木（個体d）と各調査木の樹幹温度指標値の差を比較検討することで、健全木を基準とした温度の傾向を調べるのが適当ではないかと考えた。

3 カシノナガキクイムシの穿入に伴う樹幹温度の変化

各調査木の、 T_{150-50} および T_{150} の経日変化を図 - 6 に示す。カシナガ穿入後の傾向をみるために、カシナガ穿入後から測定終了まで（枯死した個体は枯死まで）の回帰直線を求め、図中に記入した。また、カシナガ穿入前の6月中の両値の平均値を求め、図中に記入した。 T_{150-50} の経日変化をみると、個体b - 1、2では穿入開始後値は大きく減少した。個体aおよび個体c - 1～3ではわずかに減少するか、大きな変化は見られなかった。 T_{150} は、個体b - 1、2で穿入開始後上昇する傾向が認められた。個体aおよび個体c - 1～3ではわずかに減少する傾向が認められた。このような各個体の傾向を比較するために、以下の検討を行った。

各個体の、8月中の T_{150-50} の平均値と穿入孔数の関係を図 - 7 に示す。個体aは7月中に枯死したので欠測とし、個体b - 1については枯死するまでの値を平均して用いた。 T_{150-50} の8月の平均値と穿入孔数の間には、有意な負の相関が認められた（F検定・危険率5%で有意）。この結果は、カシナガの穿入数が多いほど、樹幹温度の上下位置の温度差が小さくなったことを示している。

各個体の、8月中の T_{150} の平均値と穿入孔数の関係を図 - 8 に示す。個体a、b - 1については図 - 7と同様に扱った。 T_{150} の8月の平均値と穿入孔数の間には、有意な正の相関が認められた。（F検定・危険率5%で有意）。

図 - 7、8の検討では、個体d以外が穿入を受けた後の8月の平均値で各個体の樹幹温度の比較を試みたが、個体aについては評価できず、また8月中旬に枯死したb - 1も厳密には他個体と同じ扱いはできない。また、穿入開始時期も個体により異なるため、8月の平均値では、各個体の樹幹温度特性を十分に把握できなかった可能性がある。そこで、各個体で、カシナガが穿入した後の T_{150-50} および T_{150} の経日変化を1次回帰直線で近似し、その傾きを比較した。

T_{150-50} の各個体の回帰直線の傾きの値と穿入孔

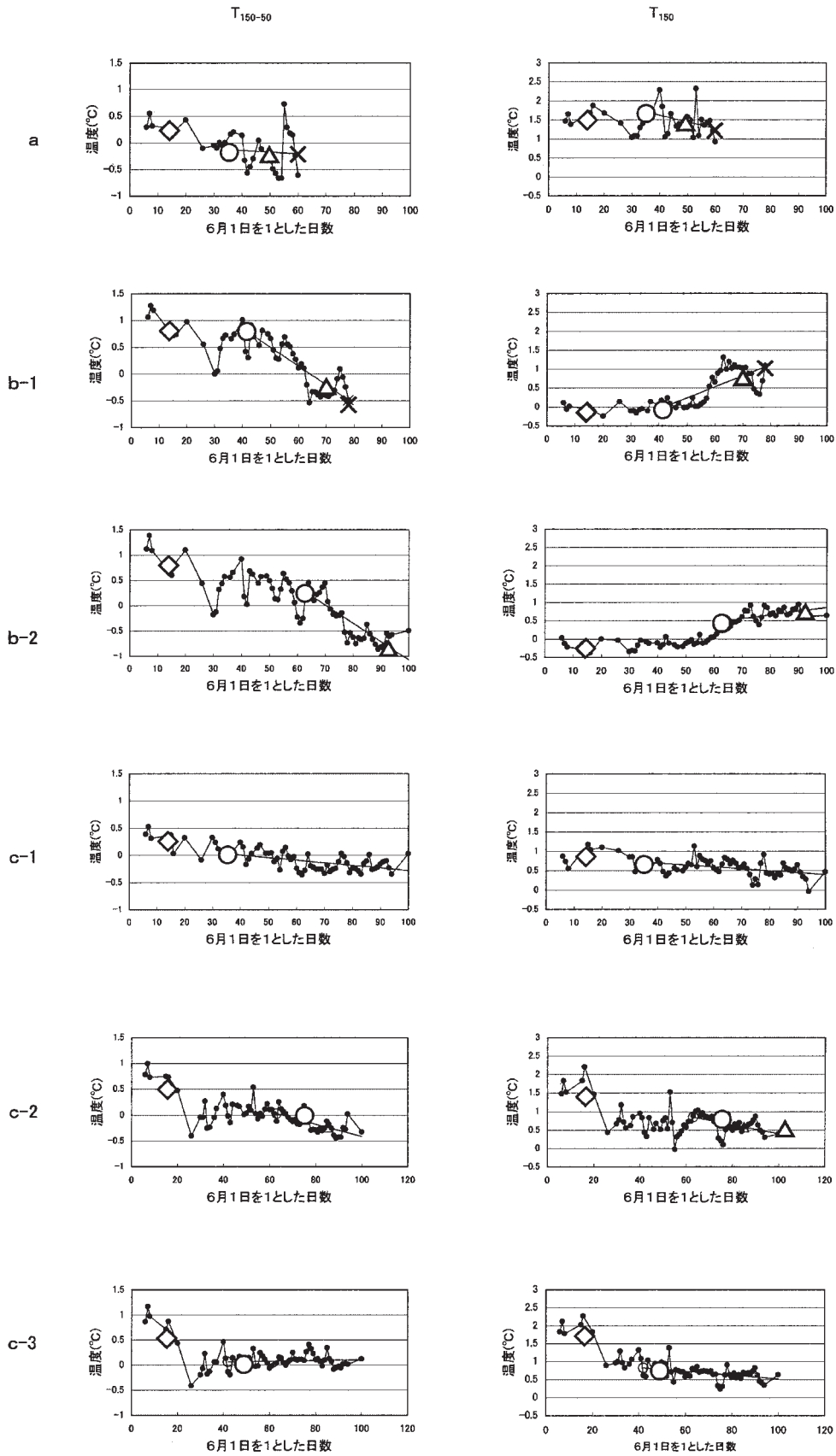


図 - 6 調査個体毎の T_{150-50} , T_{150} の経日変化
 ○ : 6月の平均値 ◇ : 穿入開始日 ○ : 葉の変色開始日 × : 枯死日

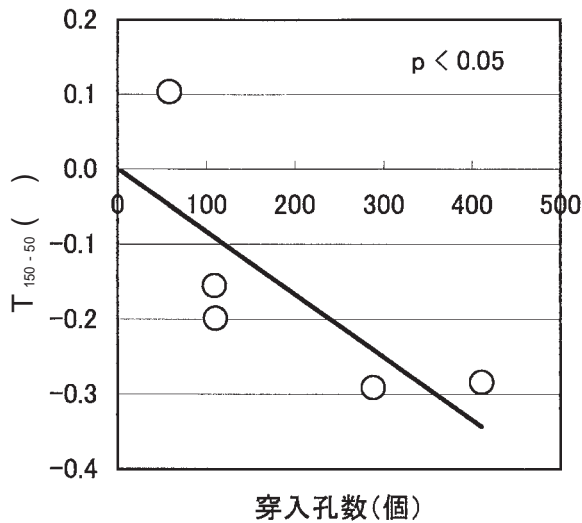


図 - 7 各調査個体の T_{150-50} (8月の平均値) と穿孔孔数の関係
 図中の直線は原点を通る1次回帰直線

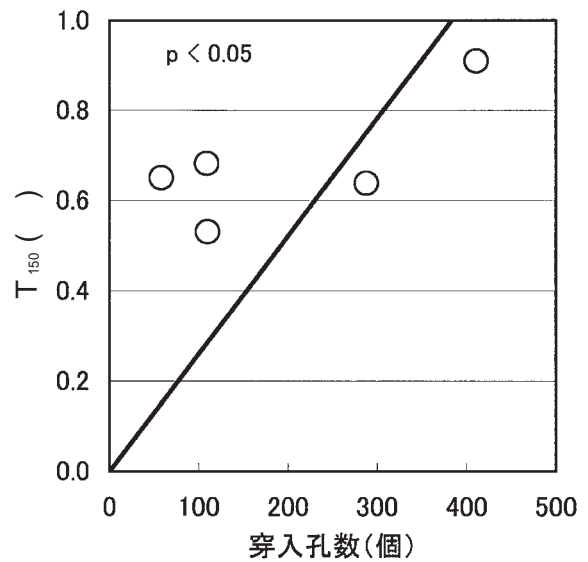


図 - 8 各調査個体の T_{150} (8月の平均値) と穿孔孔数の関係
 図中の直線は原点を通る1次回帰直線

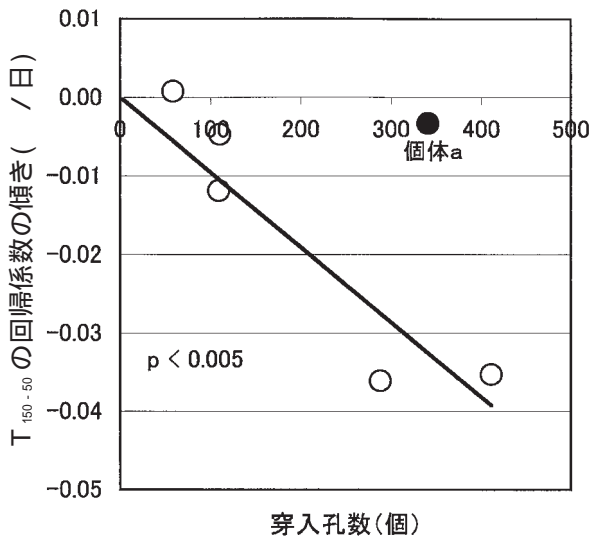


図 - 9 各調査個体の T_{150-50} (回帰係数の傾き) と穿孔孔数の関係
 図中の直線は個体 a を除き、原点を通る1次回帰直線

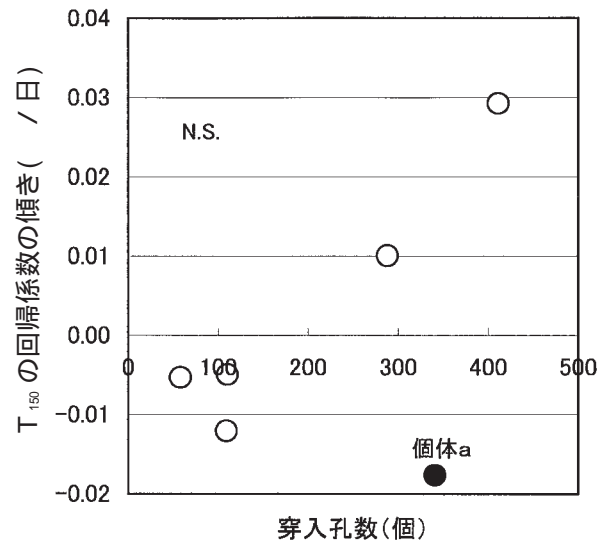


図 - 10 各調査個体の T_{150} (回帰係数の傾き) と穿孔孔数の関係

数の関係を図 - 9 に示す。個体 a が大きく外れた傾向を示した他は、両者の間に高い負の相関が認められた (個体 a を除外した場合、F 検定・危険率0.5%で有意)。

T_{150} の各個体の回帰直線の傾きの値と穿孔孔数の関係を図 - 10 に示す。図 - 9 の場合と同様、個体 d の値は (0, 0) として図中にプロットした。個体 a が大きく外れた傾向を示した他は、両者の間に正の相関が認められたが、有意ではなかった (個体 a を除外した場合、F 検定・危険率5%で棄却)。図 - 9、10 における個体 a の特異性については、後述する。

4 カシナガキクイムシ穿孔前の樹幹温度と穿孔孔数との関係

次に、カシナガ穿孔前の樹幹温度特性からカシナガの穿孔数を推定することができるかどうかについて、検討した。

T_{150-50} のカシナガ穿孔前の6月中の平均値と各個体のカシナガ穿孔数の関係を図 - 11 に示す。個体 a が大きく外れた傾向を示した他は、両者の間に高い正の相関が認められた (個体 a を除外した場合、F 検定・危険率1%で有意)。 T_{150} のカシナガ穿孔前の6月中の平均値と各個体のカシナガ穿孔数の関係を図 - 12 に示す。両者の間には、明瞭な関係は認められなかった (個体 a を除外した

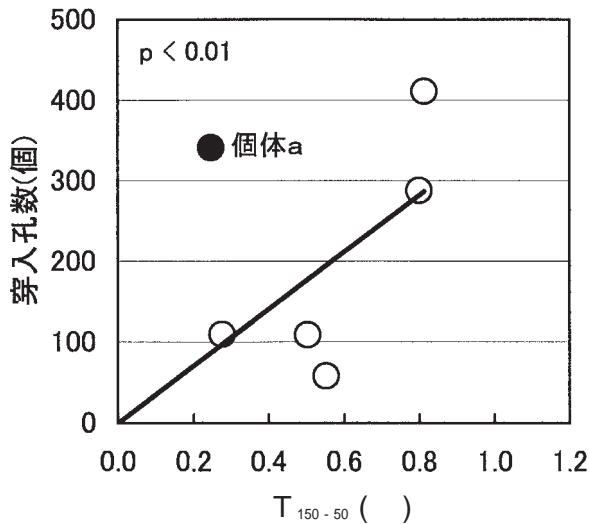


図 - 11 各調査個体の T_{150-50} (6月の平均値) と穿孔孔数の関係
 図中の直線は個体 a を除き、原点を通る 1 次回帰直線

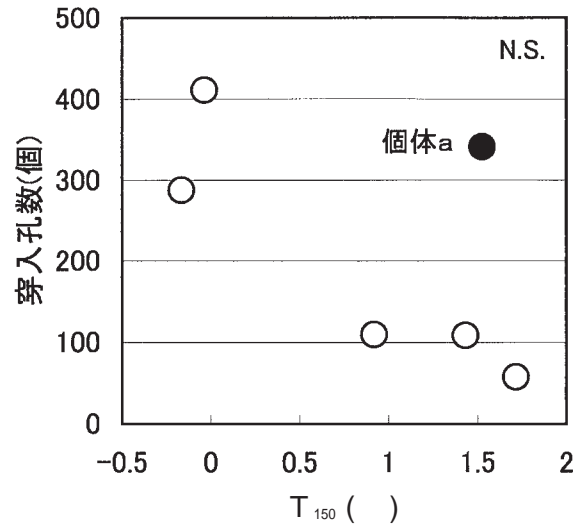


図 - 12 各調査個体の T_{150} (6月の平均値) と穿孔孔数の関係

場合、F 検定・危険率 5% で棄却)。以上の結果は、6月の時点で樹幹上下部位の温度差が大きい個体ほど、7月以降のカシナガの穿孔数が増加したことを示している。

5 樹幹温度の指標値 (T_{150-50} , T_{150}) の、樹木健全度の指標としての意義

カシナガの穿孔孔数が増加すると、ナラ菌による辺材部の変色域 (通水停止域) が拡大し、水分通道阻害の程度が大きくなることから (8)、カシナガ穿孔後の T_{150-50} および T_{150} の変化の原因と考えられる。

個体 a の樹幹温度は、6月平均値、穿孔後の回帰直線の傾きの両方で、他個体と異なる傾向を示した。個体 a は他個体に比べ穿孔時期が早く、穿孔孔数が早く増加し、そして早く枯死した個体である。他個体とは生理状態等が大きく異なったためにこのような結果が得られたのかも知れないが、詳細は不明である。

カシナガの穿孔に対する T_{150-50} の反応の傾向は、8月平均値でみた場合 (図 - 7) より回帰直線の傾きでみた場合 (図 - 9) に顕著となったが、これはカシナガ穿孔前の値の違い (図 - 11) にも影響された結果と思われる、カシナガ穿孔後の変化傾向のみを反映したものとは言い難い。

図 - 7 および図 - 8 の結果は、通水停止域の拡大に伴い樹幹温度が上昇し、かつ地上高50cmの樹幹温度の上昇度合いが地上高150cmの温度上昇度合いより大きくなり、両地上高の温度差が小さくなったことを示しているものと考えられる。

一方、6月の T_{150-50} が大きい個体ほどカシナガ穿孔数が増加した (図 - 11)。上記の考察から類推すると、6月の樹液流速が大きい個体ほど7月以降のカシナガ穿孔数が増加することになる。

対象木が林冠ギャップに隣接している場合はカシナガの密度が高くなる (13)。また、日気温較差の大きい本数調整伐実施林分でカシナガ穿孔数が増加する傾向が報告されており (14)、これは T_{150-50} の大きい個体でカシナガ穿孔数が増加することと同じ原因による現象である可能性もあるが、詳細は不明である。 T_{150-50} の変化の度合いが、樹液流速の絶対値や、季節による樹木の状態や湿度、土壌中の水分環境等の違いにより変化する可能性もあり、今回の結果だけからこの現象の原因を特定することは難しい。

6 まとめと今後の課題

以上のように、樹幹の水分通道状況の変化を読み取ることでできる樹幹温度指標値を考案することができたが、今回の指標値の計算過程は煩雑で、樹木健全度の評価を行う現場で実用的に活用できる評価方式であるとは言えなかった。よりよい指標値の検討が必要である。

また、カシナガ穿孔前の樹幹温度とカシナガ穿孔数との間にも一定の関係が認められたものの、その原因については特定できなかった。しかしながら、カシナガが寄主個体の生理状態の違い (もしくは日射等環境条件の違い) を感知して、それが穿孔数に反映された可能性があると考えられた。

引用文献

- 1) 福田健二 (2002) 衰退度測定法. (森林立地調査法. 森林立地調査法編集委員会編, 284pp, 博友社, 東京). 74 - 76.
- 2) 玉泉幸一郎 (2002) 蒸散測定法. (森林立地調査法. 森林立地調査法編集委員会編, 284pp, 博友社, 東京). 68 - 70.
- 3) 久保田光政ら (2000) Granier 法による樹液流速量の測定について - 樹体の深度と樹液流量の関係 -. 第111回日林学術講: 139.
- 4) 中尾登志雄ら (1994) 樹木の健全度と幹温度. 日林九支研論集47: 29 - 30.
- 5) 松本陽介ら (1989) 高速道路付帯緑地における樹木の活力度と樹幹温度. 第100回日林論: 423 - 424.
- 6) 太田敬之ら (1992) 樹木活性の判定方法の検討. 日本緑化工学会誌17: 102 - 108.
- 7) 小林達明ら (2000) 樹幹温度による活力度評価法の理論解. 第111回日林学術講: 601.
- 8) 黒田慶子・山田利博 (1996) ナラ類の集団枯損にみられる辺材の変色と通水機能の低下. 日林誌78: 84 - 88.
- 9) 小林正秀ら (2001) カシノナガキクイムシの寄主からの臭いに対する反応の予備調査. 森林応用研究10: 111 ~ 116.
- 10) 矢田 豊ら (1999) 樹幹表面温度の継続測定によるナラ類の活力度把握の試み - ナラ類集団枯損被害地における測定事例 -. 中森研47: 101 - 102.
- 11) 矢田 豊ら (2000) ナラ集団枯損被害地における樹幹表面温度の継続測定 - 樹木衰退度の指標としての可能性 -. 第111回日林学術講: 309.
- 12) 江崎功二郎ら (2002) カシノナガキクイムシの穿入と枯損木拡大経過. 森林防疫51: 12 - 16.
- 13) 井下田寛ら (2004) 林分内の光環境がカシノナガキクイムシの空間分布に及ぼす影響. 中森研52: 107 - 108.
- 14) 小林正秀・柴田 繁 (2001) ナラ枯損発生直後の林分におけるカシノナガキクイムシの穿入と立木の被害状況 () - 京都府舞鶴における調査結果 -. 森林応用研究10: 73 - 78.