マツノザイセンチュウ接種木樹冠の地上調査および空中写真による追跡

松浦 邦昭^{*1}・中北 理²・小林 一三³・星崎 和彦⁴・太田 和誠⁵・田代 隼人⁶

寒冷地等でのマツ材線虫病の被害の拡大を防ぐため、病原線虫の媒介者マツノマダラカミキリ幼虫の穿入している被害木を見落とさなく探査し、それらを駆除処理することが求められている。空中写真の利点を最大限に活用して枯損木を探査する技術を開発する研究に取り組んでいる。マツ材線虫病の進行を2種の空中写真（ナチュラルカラーおよび赤外カラー）と地上観測により経時的に追跡するため、30本のマツからなるマツノザイセンチュウ接種区を設けた。空中写真の解像度は12.5 cmで、この解像度で接種木の発病による樹冠の変化を個体別に追跡した。個別判読（個体別の追跡）のためのキーは画像に写る樹冠の色、形および、地上に設けた航空標識との位置関係とした。草地の中に立つ接種マツは、初秋に、判読が困難な個体もあったが、2006年10月の撮影ではすべての接種木の個別判読が可能であった。地上観測のために設けた8段階から構成される樹冠針葉変化区分のとりえかたは、2種の空中写真で異なった。

キーワード：地上探査、赤外カラー空中写真、ナチュラルカラー空中写真、マツ材線虫病、樹冠針葉変化区分

Kuniaki Matsuura,^{*1} Osamu Nakakita,² Kazumi Kobayashi,³ Kazuhiko Hoshizaki,⁴ Kazumasa Ohta,⁵ and Hayato Tashiro⁶ (2010) Identifying Crown Changes in Pine Trees Artificially Inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus* Using Ground Surveys and Aerial Photography. J. Jpn. For. Soc. 92: 72-78. To prevent an enlargement of the pine forest injury from pine wilt disease, it is necessary to survey and control the injured pine trees without any oversights because of their being infested with larvae of the Japanese pine sawyer, the transmitter of pathogenic nematodes. Now, we are investigating the development of techniques to identify the diseased trees by applying the advantage of aerial photography. For the observation of changes in crown color according to the progression of pine wilt disease using two types of aerial photography (natural-color and infrared-color) and a ground survey, thirty pine trees were artificially inoculated with pine wood nematode in June to August of 2006. Crown changes caused by the disease were pursued with a resolution of 12.5 cm for aerial photographs. Keys of individual identification were color and form of crown, and position from the on-the-ground mark assigned for each tree. In early autumn, some of the inoculated pine trees standing in a grassy area were difficult to identify, but all of the inoculated pine trees were identical in the middle of October 2006. Infrared-color aerial photography was slightly more sensitive than natural-color aerial photography for the eight crown stages in a ground survey, which served to indicate the degree of crown change caused by pine wilt disease.

Key words: ground survey, infrared-color aerial photography, natural-color aerial photography, pine wilt disease, stages of crown change

I. は じ め に

マツノザイセンチュウの被害は、北海道と青森県を除く全国に広がり、寒冷地や高標高地においては、今日なお新たに被害が拡大している（林野庁森林保護対策室，2009）。このマツノザイセンチュウによる被害が広がるのには、伝播者としてのマツノマダラカミキリの関与がある（Mamiya and Enda, 1972）。そこで、被害木に潜む伝播者マツノマダラカミキリを駆除することを目的とする防除事業が全国的に行われている。通常駆除すべき被害木は、道路からの目視で地上探査され、踏査により確認される。しかし、しばしば林内外の各種障害物で視界が遮られるため、被害木の見落としが生じることを避けられない。見落とされた被害

木は、林内に放置され、新たな伝染源となる。地上探査の困難さが、伐倒駆除事業の成果が上がりにくいことの主要な要因とされている。地上探査に避けられない各種障害物による見落としを回避する技術の開発は被害木駆除での緊急の課題と考えられる。

ところで、空中は林冠を他の妨げなく見通せる場であり、被害木の見落としを確実に防げる場である。上空のもつその利点を十分に生かす方法として、空中写真を利用することが考えられる。空中写真については、これまでもその利点を活用し、被害地域の被害程度を評価しようとの実験的取り組みがされ、被害の把握に利用できる可能性が示された（中島ら，1973；林野庁，1976）。しかし、空中写真が実際の防除事業に広く利用されるところにはいって

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: cxqhx035@ybb.ne.jp

¹ 〒300-1206 牛久市ひたち野西4-25-7 (4-25-7 Hitatino-nishi, Ushiku 300-1206, Japan)

² 独立行政法人森林総合研究所東北支所 〒020-0123 盛岡市下厨川字鍋屋敷92-25 (Touhoku-branch, Forestry and Forest Products Research Institute, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriya-gawa, Morioka 020-0123, Japan)

³ 〒168-0072 東京都杉並区高井戸東1-8-12 (1-8-12 Takaido-higashi, Suginami-ku, Tokyo 168-0072, Japan)

⁴ 秋田県立大学生物資源科学部 〒010-0195 秋田市下新城中野 (Faculty of Bioresource Sciences, Akita Prefectural University, Shimoshinjo-nakano, Akita 010-0195, Japan)

⁵ 西武造園株式会社 〒171-0022 東京都豊島区南池袋2-30-11 (Seibu Landscape Co., Ltd., 2-30-11 Minamiikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-0022, Japan)

⁶ 共立航空撮影株式会社 〒181-0015 三鷹市大沢5-21-13 (Kyouritsu Aerial Photo Co., Ltd., 5-21-13 Oosawa, Mitaka 181-0015, Japan) (2009年8月10日受付；2009年11月14日受理)

いない。これはこれまでの空中写真はアナログ写真が用いられ、写真自体に位置情報が与えられていないものであったこと、カラー写真画像の変化と地上調査とを個別別に詳細に合致させ検証していく取り組みではなかったこと、空中写真が高価なことなどが原因と思われる。現在、中北ら(2007b)はデジタル写真技術を活用し、GPSと空中写真を組み合わせることで、見落としの懸念のない被害木の探査手法を開発し、伐倒駆除事業の推進に役立てようとするプロジェクト研究に取り組んでいる。その概要は、空中写真の利点を最大限に生かし、高い解像度(地上水平解像度約12 cm)で撮った空中写真をオルソ化し、被害地域のオルソ空中写真に点状に写りこんだ枯死木画像とその位置情報を携帯端末機器に移行し、位置情報を利用して被害木の立つ現地に速やかに到達するという技術システムを開発しようとするものである。

被害木を空中探査するにあたり、マツ材線虫病被害木の個別判読性をまず検討することとした。次に、これまでのマツ枯れの研究で検討されてこなかったマツ材線虫病の進行が空中写真にどのように反映するのか、いつの時期の撮影が要防除木を判読するのに適するのかの情報を得たいと考えた。そのため、本報告では、被害拡大が懸念されている寒冷地にある秋田県下にマツノザイセンチュウの人為接種区を設けた。そして、「樹冠針葉変化区分」を設け、接種木の発病による樹冠の経時変化をこの区分により個別別に地上で追跡する一方、同じ接種個体の樹冠をナチュラルカラー空中写真(以後、ナチュラルカラー)および赤外カラー空中写真(以後、赤外カラー)画像で追跡した。これにより地上調査でとらえた樹冠針葉変化区分と空中写真画像との関連を明らかにした。

II. 材 料 と 方 法

1. マツノザイセンチュウの接種：接種試験地、接種木、接種源線虫の培養と接種

接種試験地を秋田県立大学(秋田市下新城野字街道端)構内の37~49年生クロマツ林(平均樹高11.3 m, 平均胸高直径16.8 cm)に設けた。このクロマツ林は標高差10 m以内の平坦な海岸砂丘地に位置し、林外は草本や道路で占められている。接種木をその林縁木から選び、当地のマツノマダラカミキリ *Monochamus alternatus* 成虫の後食期間(小林, 2007)に当たる2006年6月21日、7月10日、8月2日の3回接種を行った。接種には各回10本の供試木を用いたが、この10本を1接種区とし、3接種区30本で試験を行った。接種源にはマツノザイセンチュウ *Bursaphelenchus xylophilus* の強病原性アイソレート Ka-4 を定法で培養して用いた。線虫接種部位は、地上約3 m 高の樹幹とした。この接種部位に、直径6.5 mm、深さ4~5 cmの穴をあけ、供試木1本当たり6万頭になるよう線虫懸濁液を注いだ。

2. 接種木の地上調査

1) 樹脂流出量調査

マツ材線虫病による発病の有無を知るため、最初の接種日の2006年の6月21日から10月9日まで3週間おきにすべての接種個体について小田式樹脂流出量調査(小田, 1967)を行い、マツノザイセンチュウ接種個体のマツ材線虫病への発病をみた。

2) 樹冠針葉の外観変化の追跡

接種木の樹冠の針葉は旧葉変色から落葉までマツ材線虫病の進行により外観的に変化する。これまでもマツ材線虫病に特異的な外観の変化はマツ枯れの診断(小林・中原, 1982)に用いられてきている。しかし、それは地上観察でとらえた接種木の外観の変化が空中写真にどう連動しているかを精査しようとする本研究の目的に用いるには十分なものではない。そこで、これまでの報告と被害木の経過観察を基にして、マツ材線虫病による外観の変化、主に樹冠針葉の変化を客観的に評価する基準「樹冠針葉変化区分」を設けることとした。

まず、針葉の変色など外観が変化する前には、樹脂流出の低下で察知できる内部的なマツ材線虫病への罹病段階がある。本論ではこれについて、外観的には同じでも両者間には発病の有無という本質的な大きな違いがあることを考慮し、両者を、「緑色(樹脂流出正常)」, すなわち健全(以後「健全」という)と「緑色(樹脂流出低下)」, すなわち発病(以後「樹脂低下」という)に区分した。樹脂流出低下後には、目にみえる針葉の変化が現れる。それらを時期の早い順に「旧葉変色」(ただし、変色後の旧葉の離脱を含む)、「色あせ」(緑色が淡黄緑色に褪色)、「黄色枯れ」, 「赤色枯れ」, 「くすみ」(変色した葉が暗褐色に黒ずむ)とし、その後の脱葉段階を「落葉」とした。これらにより、「樹冠針葉変化区分」の構成を全部で8段階とした(図-1)。

接種以後8月13日までの樹冠の調査は主に目視で行い、空中写真撮影日の9月15日および10月15日前後には、デジタルカメラ撮影も加えた。

3. 空中写真による接種木の追跡

1) 接種木個別判読のための航空標識の設置

空中写真上で接種木を個別判読するため、各接種個体からあまり離れない場所で、上部空間が南北に45度以上開けた東側に1台ずつ、標識(0.9 m×0.9 m, 白色板)を設置した(図-2)。

2) 空中写真撮影

空中撮影に用いた航空機はセスナ C206G である。撮影に用いたカメラはウィルド RC30 で、焦点距離15 cm, 撮影高度775 m, 撮影縮尺5千分の1で行った。使用した写真フィルムは、ナチュラルカラーフィルム(コダック2444)と赤外カラーフィルム(コダック1443, このフィルムでは赤外光を赤, 赤光を緑, 緑光を青, 青光を黒に発色)を用いた。そして、2006年7月31日、8月27日、9月15日、10月15日の午前11時から15時の間の快晴時に標定図に基づき行われた飛行で、撮影がされた。撮影されたナ

図-1. 接種木の地上調査に用いた樹冠針葉変化区分

「健全」、「樹脂低下」においては、針葉は緑色、「旧葉黄化」においては旧葉が黄化したり、落葉する。「色あせ」においては緑色が褪色してうす緑色、「黄色枯れ」、「赤色枯れ」は針葉の色あいが変化する。「くすみ」段階では針葉が褐色に黒ずむ。「落葉」段階では針葉は脱離する。なお、「落葉」段階の写真は試験地周辺で2007年2月に、それ以外は試験地、試験期間に撮影したものである。

健全 No.789 9/15			樹脂低下 No.780 9/15			旧葉変色 No.790 8/27		
G	N	I	G	N	I	G	N	I
色あせ No.790 9/15			黄色枯れ No.796 10/15			赤色枯れ No.775 10/15		
G	N	I	G	N	I	G	N	I
くすみ No.778 10/15			落葉			樹冠針葉変化区分		
G	N	I	G	N	I			
			該当なし			G:地上樹冠	N:ナチュラルカラー樹冠	I:赤外カラー樹冠

図-3. 樹冠針葉変化区分別地上写真と、空中写真（ナチュラルカラー、赤外カラー）対比

表中NおよびIはそれぞれナチュラルカラー、赤外カラー空中写真。Gは接種木の樹冠の状態が属する樹冠針葉変化区分別の地上撮影画像を示し、空中写真に近い時期の写真。また、NおよびIは試験地全体を空中撮影したナチュラルカラーおよび赤外カラーJPG画像から地上撮影と同一個体の樹冠画像を切り取ったものである。ナチュラルカラーでは緑、黄緑、褐色に変化し、赤外カラーでは赤、赤と白の中間色、黄白色に変化している。なお、本試験においては、試験最終時の2006年の11月上旬までに落葉した個体はなかった。

ナチュラルカラーおよび赤外カラーフィルムは標準処理で現像、焼付けした。そして、焼付けられた写真をスキャナにより読み取ってデジタル画像とした。撮影時に取得したGPS/IMU（位置/慣性計測ユニット）のデータを使って幾何補正を行い、精密正射写真（オルソ画像、地上水平解像度は12.5 cm）を作成した（中北ら、2007b）。

4. 接種木の空中写真による個別判読

1) 空中写真による個別判読

空中写真撮影は、7月31日、8月27日、9月15日、10

図-2. 赤外カラー空中写真でみた線虫接種木樹冠

図の白色長方形中の数字は接種木の個体番号。番号と結ばれているのは航空標識（白色小四角形）。航空標識と結ばれているのが接種個体の樹冠。標識と樹冠を結んでいる線の色は紺が6月21日、赤が7月10日、緑が8月2日の接種木。図内には自然感染5本も写っている。本図は2006年10月15日撮影の接種木の赤外カラー空中写真であり「健全」、「樹脂低下」は赤、「旧葉変色」、「色あせ」は主に赤と白の中間色、「黄色枯れ」、「赤色枯れ」および「くすみ」木は白あるいは黄色に写っている。

月15日の4回行ったが、各撮影日のナチュラルカラーおよび赤外カラーに写った供試個体について、図-2の10月15日の赤外カラー撮影画像の例のように、航空標識との位置関係および樹冠の色・形によって個別判読した。

2) 2種空中写真における撮影時期別樹冠色

個別判読されたナチュラルカラーおよび赤外カラーのすべての個体の樹冠画像を切り取り、エクセルのシート上に撮影時期別、接種区別に並べた。その上で、撮影時期別、

接種区別に同じ樹冠色の個体数を集計した。

3) 樹冠針葉変化区分別樹冠色

地上調査での樹冠針葉変化区分と空中写真での樹冠色との関係をみるため、エクセル上に配置された撮影時期別、接種区別の個々の樹冠画像を樹冠針葉変化区分別のセルに順次貼り付け直す作業を行った。ただし、地上調査は2～

3週間おきに行ったが、いずれの日も空中写真撮影日とは一致していない。そこで地上調査を行った日のうち、空中写真撮影日に近い日（7月31日の空中撮影に対しては8月1日を、8月27日の空中撮影に対しては8月20日を、9月15日の空中撮影に対しては9月21日を、10月15日の空中撮影に対しては10月9日を）の地上調査の観測データ（樹冠針葉変化区分）を用いて、樹冠針葉変化区分別に、樹冠色別本数を求めた。その上で樹冠針葉変化区分間、写真種類別に樹冠色の構成に有意差があるか否かを、‘二つの独立な標本の χ^2 検定’（スネデカー・コ克蘭、1972）により明らかにした。

III. 結 果

1. 地上調査による接種時期別樹脂流出および樹冠針葉色の变化

表-1に、接種区別、樹冠針葉変化区分別の本数を示した。これにより、樹脂流出の低下、針葉の変色および落葉について述べる。

1) 樹脂流出の低下

マツ材線虫病への発病を示す「樹脂低下」の本数をみると、6月21日接種区では、接種20日後の7月10日には8本と大部分が「樹脂低下」（発病）だった。7月10日接種区では、接種21日後の8月1日（第1回空中撮影の翌日）には2本の「樹脂低下」木があった。8月2日接種区では、接種18日後の8月20日には4本が樹脂流出低下を起こした。接種時期は違っても、接種後20日程度での発病（樹脂流出低下）が確認された。

2) 針葉の変色

針葉の変色をみると、6月21日接種区では、接種61日後の8月20日に「旧葉変色」4本、「色あせ」4本、「黄色枯れ」1本があり、接種92日後の9月21日に「色あせ」

表-1. 線虫接種木樹冠針葉の経日変化（地上調査）

線虫 接種日	樹冠針葉 変化区分	調査日					
		6/21	7/10	8/1	8/20	9/21	10/9
6/21	健全	10	2	4	1	1	1
	樹脂低下	0	8	6	0	0	0
	旧葉変色	0	0	0	4	0	0
	色あせ	0	0	0	4	1	1
	黄色枯れ	0	0	0	1	5	0
	赤色枯れ	0	0	0	0	3	6
	くすみ	0	0	0	0	0	2
	落葉	0	0	0	0	0	0
7/10	健全	10	10	8	0	0	0
	樹脂低下	0	0	2	2	1	0
	旧葉変色	0	0	0	5	0	0
	色あせ	0	0	0	2	4	2
	黄色枯れ	0	0	0	1	4	2
	赤色枯れ	0	0	0	0	1	5
	くすみ	0	0	0	0	0	1
	落葉	0	0	0	0	0	0
8/2	健全	10	10	10	6	1	1
	樹脂低下	0	0	0	4	2	0
	旧葉変色	0	0	0	0	4	0
	色あせ	0	0	0	0	2	4
	黄色枯れ	0	0	0	0	1	5
	赤色枯れ	0	0	0	0	0	0
	くすみ	0	0	0	0	0	0
	落葉	0	0	0	0	0	0

6/21～8/23は樹冠の地上からの目視による調査。9/21および10/9はデジタルカメラで画像記録。8/1を第1回（7月31日）、8/20を第2回（8月27日）、9/21を第3回（9月15日）、10/9を第4回（10月15日）の空中写真撮影日それぞれに合わせた地上調査日とした。上表で健全は緑色（樹脂流出正常）を、樹脂低下は緑色（樹脂流出低下）を示す。

表-2. 撮影時期別2種空中写真による個別判読

線虫 接種日	樹冠色	ナチュラルカラー写真撮影日				樹冠色	赤外カラー写真撮影日			
		7/31	8/27	9/15	10/15		7/31	8/27	9/15	10/15
6/21	緑	10	2	2	1	赤	10	1	1	1
	黄緑	0	5	2	0	中間色	0	5	1	0
	褐色	0	2	3	9	黄白色	0	3	7	9
	判読困難	0	1	3	0	判読困難	0	1	1	0
	判読困難木の樹冠針葉変化区分	No. 772 (8.27, 旧葉変色) ; No. 772, 773, 788 (9.15, 黄色枯れ)				判読困難木の樹冠針葉変化区分	No. 784 (8.27, 色あせ) ; No. 788 (9.15, 黄色枯れ)			
7/10	緑	10	8	3	0	赤	10	2	0	0
	黄緑	0	2	5	3	中間色	0	8	6	0
	褐色	0	0	1	7	黄白色	0	0	3	10
	判読困難	0	0	1	0	判読困難	0	0	1	0
	判読困難木の樹冠針葉変化区分	No. 792 (9.15, 黄色枯れ)				判読困難木の樹冠針葉変化区分	No. 792 (9.15, 黄色枯れ)			
8/2	緑	10	8	3	1	赤	10	7	4	1
	黄緑	0	1	5	4	中間色	0	3	5	2
	褐色	0	0	1	5	黄白色	0	0	1	7
	判読困難	0	1	1	0	判読困難	0	0	0	0
	判読困難木の樹冠針葉変化区分	No. 796 (8.27, 樹脂低下) ; No. 799 (9.15, 黄色枯れ)				判読困難木の樹冠針葉変化区分	該当なし			

この表でいう樹冠色とは、空中写真で視認される接種木の樹冠の色のことで、それをナチュラルカラーでは緑、黄緑、褐色に、赤外カラーでは赤、赤と白の中間色、黄白色に区分した。上表において「判読困難」とはその撮影日に空中写真画像で個別判読ができなかった接種木本数を示し、「判読困難木の樹冠針葉変化区分」とは、空中写真で判読困難だった個体の地上調査で判断した樹冠針葉変化区分を示す。

1本,「黄色枯れ」5本,「赤色枯れ」3本に移行し,接種110日後の10月9日には「色あせ」1本,「赤色枯れ」6本,「くすみ」2本に移行した。7月10日接種区では,接種42日後の8月20日に5本の「旧葉変色」,2本の「色あせ」があり,73日後の9月21日に「色あせ」4本,「黄色枯れ」4本,「赤色枯れ」1本に移行し,91日後の10月9日には「色あせ」2本,「黄色枯れ」2本,「赤色枯れ」5本,「くすみ」1本に移行した。8月2日接種区では,接種50日後の9月21日に4本の「旧葉変色」,2本の「色あせ」,1本の「黄色枯れ」があり,68日後の10月9日に「色あせ」4本,「黄色枯れ」5本に移行した。接種時期は違っても,接種50~60日後には「旧葉変色」に,接種70日前後には「色あせ」となり,接種70~90日ほどで「黄色枯れ」あるいは「赤色枯れ」になった。

3) 落 葉

本試験における調査期間においては,落葉した個体はみられなかった。

2. 接種木の空中写真による個別判読

ナチュラルカラーおよび赤外カラーのどちらの空中写真においても個別判読が困難な場合がみられた。そこで,各4回の空中写真に読み取れた個体数の多寡を比較し,どちらのいつの空中写真が被害木探査に有効かをみた。ナチュラルカラーにおいては,接種個体の樹冠は主に緑,黄緑,褐色にみえ,赤外カラーにおいては主に,赤,赤と白の中間色,黄白色にみえたので,接種区別,撮影日別にそれぞれの樹冠色を示す個体本数を数えた(表-2)。この表では4撮影日ごとに各30本,全部で計120本と数え,判読困難と表記しているものは,写真上での個別判読が困難であったものを意味する。ナチュラルカラー,赤外カラーともに第2回撮影と第3回撮影に判読困難なものがあった。特に6月21日接種区では第3回撮影日にナチュラルカラーと赤外カラー合わせて4本の判読困難木があった。第4回撮影においては,どちらにも判読困難木はなく,高い判読性が認められた。判読困難の個体が多かった樹冠針葉変化区分は,「黄色枯れ」木で,全10本の判読困難木のうち7本が「黄色枯れ」木であった。第3回目,第4回目の撮影日には,オーチャードグラス等の地表の被覆植物の変色がみられた。

樹冠色別の最大本数は,どの線虫接種区でも調査日順に,ナチュラルカラーでは,緑,黄緑,褐色へと,赤外カラーでは,赤,赤と白の中間色,黄白色へと遷移した。赤外カラーはナチュラルカラーより早期に変色をとらえていた。

3. 樹冠針葉変化区分と各空中写真における樹冠色

空中写真に写る接種木の色は前述のとおり変化していた。そこで,樹冠針葉変化区分と空中写真に写る樹冠色との関係を追及した。図-3はそれぞれの樹冠針葉変化区分に主に表れるナチュラルカラー,赤外カラーの樹冠色である。しかし,線虫接種時期別,撮影日別に,さらに樹冠針葉変化区分別に,それぞれの樹冠色を示す個体本数を数えると,同じ樹冠針葉変化区分でもすべてが同じ樹冠色では

表-3. 樹冠針葉変化区分別2種空中写真での樹冠色

樹冠針葉 変化区分	ナチュラルカラーでの樹冠色			赤外カラーでの樹冠色		
	緑	黄緑	褐色	赤	中間色	黄白色
健全	28	0	0	28	0	0
樹脂低下	14	1	0	12	4	0
旧葉変色	11	3	0	4	9	2
色あせ	5	14	4	0	16	5
黄色枯れ	0	8	6	0	2	15
赤色枯れ	0	0	15	0	0	15
くすみ	0	0	3	0	0	3

上表において区分間の間仕切り線が——は5%の有意水準で有意差が認められたことを示す。

-----は5~10%の有意水準で有意差が認められたことを示す。

-----は有意差が認められなかったことを示す。

上表において横野の間仕切り線は,上下に隣り合う樹冠針葉変化区分間の統計上の有意差の有無(たとえば,ナチュラルカラーでの樹冠色の「健全」と「樹脂低下」間では有意差が認められないのに対し,「黄色枯れ」と「赤色枯れ」の間では有意差が認められる)を示す。また,縦野の間仕切り線は同じ樹冠針葉変化区分での写真種類間の統計上の有意差の有無(たとえば,「健全」,「樹脂低下」区分でのナチュラルカラーと赤外カラーでは有意差が認められないが,「黄色枯れ」では有意差が大きいと認められる)を示す。本試験期間中に落葉したものはみられなかった。

なく,二つの樹冠色にまたがる区分があった。そこで,同じ樹冠針葉変化区分がどの樹冠色ととれるのかを知るため,撮影時期,線虫接種時期を区別しないで,樹冠針葉変化区分ごと,写真種類ごとにとらえられた樹冠色本数を表-3に示した。また,この表では間仕切り線を用いて,樹冠針葉変化区分,あるいは写真種類において,隣接する二つのセル間に統計的な有意差があるかどうかを示している。以下,それぞれの樹冠針葉変化区分の画像特性を述べる。

樹冠針葉変化区分の「健全」木の樹冠はすべてナチュラルカラーで緑,赤外カラーで赤ととらえられたのに対し,「樹脂低下」木は健全な樹冠とは異なる色合いであるナチュラルカラーで黄緑色,赤外カラーで赤と白の中間色を示すものも少数みられたが,「健全」との間に統計的な有意差は認められなかった。「旧葉変色」木については,ナチュラルカラーと赤外カラーとでとらえ方の違いがみられた。これは,地上調査で「旧葉変色」とされたものの多数(15本中11本,73.3%)を赤外カラーでは赤と白の中間色(9本)および黄白色(2本)にとらえたことによるもので,「樹脂低下」木との間に明確な差がみられた。それに対して,ナチュラルカラーでは,多数を緑ととらえており,「樹脂低下」段階との差はみられなかった。「色あせ」木については,ナチュラルカラーでは地上調査で「色あせ」であったものの多数を黄緑にとらえることで「旧葉変色」と差が生じた。赤外カラーでは「色あせ」としたもので赤ととらえるものはなく,中間色が多かった。そのため,「旧葉変色」との間に統計的な有意差は認められず,多数を中間色である黄緑ととらえたナチュラルカラーとこの段階でのとらえ方の違いは認められなかった。「黄色枯れ」については,ナチュラルカラーと赤外カラーでとらえ方が異なり,赤外カラーでは「色あせ」とは違い,ほとんどの「黄色枯

れ」木を黄白色ととらえたのに対し、ナチュラルカラーでは「色あせ」との有意差はなかった。「赤色枯れ」、「くすみ」については、ナチュラルカラーと赤外カラーで樹冠針葉変化区分間、空中写真種類間で差がなく、ともに最終の色合いであるナチュラルカラーで褐色、赤外カラーで黄白色ととらえた。

IV. 考 察

本研究では初めに、地上調査のための基準として、8段階の「樹冠針葉変化区分」を設けた。この区分の中で、「落葉」区分は調査期間においてみられなかったが、それを除けば、地上での判定でマツノザイセンチュウを接種した木の樹冠針葉は、「健全」、「樹脂低下」、「旧葉変色」、「色あせ」、「黄色枯れ」、「赤色枯れ」、「くすみ」の順に変化していた。

一方、ナチュラルカラーおよび赤外カラーで樹冠をとらえると、外観的に症状のでない樹脂流出低下段階のマツ材線虫病罹病木を探知することは無理であるが、赤外カラーであれば「旧葉変色」段階の樹冠針葉の外観変化をとらえられ、さらに外観的に緑色があせてきた段階になればナチュラルカラー写真にも変化がとらえられる等が明らかになった。そこで、樹冠針葉変化区分と2種の空中写真画像の変化との関係、またそれは被害木探査にどのような意義をもつのかについて考察する。

1. 接種木の樹冠針葉の外観変化の空中写真での追跡

樹冠針葉変化区分と空中写真での樹冠画像との関係についてまず、述べる。

1) 個別判読性

今回の4回の空中撮影における撮影条件は撮影高度等一定であり、用いた精密正射（オルソ）写真の地上水平解像度はいずれも12.5 cmであった。この解像度はマツノザイセンチュウ接種木を写真上で個別に追跡するのに十分であるとともに、正射写真のためどの個体もほぼ真上からの画像であることにより、マツノザイセンチュウ接種3区、計30個体について、マツ材線虫病の進展によるマツ樹冠の変化をはじめ個別に、空中写真で追跡できたといえる。

2) 樹脂流出低下木の探査

傷つけ部からの樹脂流出の低下現象はマツ材線虫病でみられる多くの病理現象の中でも、最も早い時期の病態反応である（岸，1988）。そこで、何らかの方法で発病を早期に発見できれば、殺線虫剤処理などで治療することも可能ではないかと期待される（松浦，1984）。しかし、空中写真でその段階の発病木を選択的に探査できるような指標はみつかっていない（小林ら，1976；中北ら，2007a）。樹脂流出低下段階の発病木を空中写真で選択的に探査することの困難さが、本報告でも示されたといえる。

3) 発病に伴う接種木樹冠色の変化

樹脂流出は樹体内へのマツノザイセンチュウの侵入によって低下・停止するが、それとともに樹幹中の水分通導の障害がみられる（鈴木，1992）。ただし、樹脂流出低下の段階では、水分通導の障害はあっても針葉への水の供

給は継続している。しかし、夏の高温期に水ストレスが高まると木部通水障害（エンボリズム）（池田，2000；梅林ら，2009）が急激に発生し、幹部での水分供給が遮断され、葉を含め全身的な水分不足が生じるようになる。この段階で水分不足に敏感な旧葉（1,2年生葉）が変色（橋本，1976）することが観察されている。これは本報で設けた樹冠針葉変化区分の「旧葉変色」に当たっているものと考えられる。表-3の結果からいえば、この段階の針葉の色構成の変化を、ナチュラルカラーではとらえられなかったが、赤外カラーでは赤と白の中間色としてとらえている。その違いは近赤外部の反射光の変化（安田，2007）が主要因と推察される。さらに、樹幹に残されていた水からの補給もなくなると当年葉が萎凋し、クロロフィルa:b比が変化する（鈴木，1992）ものと思われる。これにより地上撮影では当年葉の緑があせてみえる樹冠針葉変化区分の「色あせ」となると思われ、この段階で、赤外カラーでは赤と白の中間色に、ナチュラルカラーでは緑と褐色の中間の黄緑としてとらえられたと考えられる。

それが、さらに枯死が進み葉の乾燥が進むと、クロロフィル（緑色）濃度の低下や変質をもたらし（倉橋ら，2001）、相対的にカロチンやアントシアニン、キサントフィルのような葉の補助色素の色である黄色や赤色が視認され（安田，2007）、地上調査で「黄色枯れ」、「赤色枯れ」、さらには「くすみ」となり、赤外カラーではこれら3区分を黄白色等に、ナチュラルカラーでは「黄色枯れ」が黄緑色に、「赤色枯れ」、「くすみ」が褐色に写るようになったものと思われる。

なお、「旧葉変色」や「色あせ」段階は、全身死の段階と考えられる。このことは、夏に線虫を接種して発病（樹脂流出の低下）させた後、殺線虫剤処理を行い病気を回復させるという実験において、解剖学的に回復のみられた供試木は、「樹脂低下」の範囲のものに限られた（松浦，2003）ことから推察されることである。

4) 赤外カラーの検出特性

本報では、ナチュラルカラーで認められない「旧葉変色」区分の変調が赤外カラーではとらえられたことを示した。このことは、樹冠表面の葉色の変色がなくとも葉の何らかの生理的变化があれば、それをとらえられる可能性が示されたといえる。赤外カラーのもつこの鋭敏さは、一般的な病害虫や樹木の健全性の早期検出・早期診断に結び付くと思われる。

2. 要防除木の探査

1) 空中写真でマツ樹冠がとらえにくい場合

対象木を個別判読するには、調査対象とする枯損木の樹冠の発色性・表色性ととも、樹冠の輪郭がどれだけ明瞭に写真に写るのかという形状判別性が重要である。この形状判別性の点では、判別対象木が草地に接している場合、「黄色枯れ」区分となった8月下旬から9月中旬にかけての時期には空中写真で存在の確認が困難な個体がみられた（図-2、表-2）。これはこの時期は草本植物が枯れる時期で

もあり、接種木の樹冠周辺の植生の色あい、ナチュラルカラーにおいても、赤外カラーにおいてもマツ枯れの樹冠と似たものとなり、12.5 cm という高解像度の画像においても平面写真では樹冠と周辺との見分けがつけにくく形状判別性が悪くなったのが原因と思われる。

なお、「黄色枯れ」は、草本がさらに変色し、マツの変色も進んだ10月15日撮影時には、ナチュラルカラーにおいても草本と明瞭に区別できるようになって個別判読の困難性は大幅に改善された。また、変色した草本と「黄色枯れ」時期の被害木とが平面的には重なってみえても、草本と木本では立体的な差がある。現在、地上高の要因を加える三次元解析手法が検討されている(小森・青木, 2005)ので、その技術が開発・導入されれば、10月まで待たなくても、赤外カラーの早期検出性を生かし、変色した草本に囲まれた「色あせ」あるいは「黄色枯れ」木を効率よく探知できる可能性はある。

2) 夏型枯損木(要防除木)の探査

寒冷地の秋田県下に設置した試験地において、マツノマダラカミキリ発生期(小林, 2007)に3回マツノザイセンチュウの人為接種を行ったところ、接種20日後には試験木に樹脂流出低下が起こり、10月中旬までには3接種区合わせて30本中28本、93.3%という高率でその個体が枯損したとみなせる「色あせ」、「黄色枯れ」、「赤色枯れ」、「くすみ」の段階に進んだ。また、接種木は試験終了後、伐倒焼却したが焼却前に調査したところ、その枯損木からはマツノザイセンチュウが検出され、樹皮下からは発病により近隣の前年被害木から羽化・飛来したマツノマダラカミキリ成虫の産卵に由来する本種幼虫がみられた。ただし、こうした経過(マツ材線虫病による枯死とその枯死木での媒介者の増殖)は、温暖地と共通する夏型枯損(マツ材線虫病による当年枯れ)の特徴といえる。これからいえば、寒冷地においても少なくとも10月中旬頃までに赤外カラーで黄白色、ナチュラルカラーで褐色に写る被害木には媒介者が潜んでいる可能性が高いもの(要防除木)である。夏に高温日が続いた年であれば夏型枯損被害木が多く発生し、要防除木となる被害木は多く、大多数が空中写真で10月中旬頃までに枯損が確認されるので集中的に駆除できる。一方、寒冷地は夏の高温日が長く続かないのが通常であり、夏型枯損木より年越し枯れといわれる被害木が多い。年越し枯れ木では、産卵期を過ぎての発病となるため、マツノマダラカミキリの寄生は少なく伝染源となる危険は小さい(岸, 1988)。したがって、緊急に駆除すべき枯損木は少ない。しかし、そうした年でも、少ないとはいえず空中写真で10月中旬頃までに枯損が確認されたものについては、残らず駆除する必要がある。なお、当年冬から翌年春にかけては年越し枯れ木の発生時期であるとともに、駆除残りの要防除木が落葉する時期でもある。年越し枯れの

時期にそれぞれが空中写真にどう写るのかについては今後確認する必要がある。

なお、本研究は、農林水産省技術会議「先端技術を活用した研究高度化事業」予算により行われたものである。

引用文献

- 橋本平一(1976)かん水条件の異なるクロマツ苗におけるマツノザイセンチュウの動態とマツ苗の病態反応. 87 回日林論: 223-235.
- 池田武文(2000)樹木の水分通導機能の確立と消失に及ぼす水ストレスの影響解明. 森林総合研究所所報 137: 4-5.
- 岸 洋一(1988)針葉変色病とマツノマダラカミキリ寄生状況の関係. (マツ材線虫病—松くい虫—精説. 岸 洋一著, トーマス・カンパニー). 99-101.
- 小林富士雄・中原二郎(1982)松枯れを防ぐ—恐ろしい流行病からあなたの松を守るための1問1答と防除の実践例. 157 pp, 第一プランニングセンター.
- 小林富士雄・山根明臣・遠田暢男・山崎三郎(1976)地上撮影の赤外カラー写真によるマツ異常木判別の可能性. 87 回日林論: 305-306.
- 小林一三(2007)寒冷地におけるマツ材線虫病防除の新たなシステム確立のための実践的研究. 平成 17~18 年度研究費補助金(基盤研究(c))研究成果報告書. 103 pp, 秋田県立大学.
- 小森雄介・青木由直(2005)TIP 向け画像作成ツールの開発(CG II, ITS 画像処理, 映像メディア及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告 647: 113-118.
- 倉橋洋一・堀場隆広・森田耕作(2001)分光放射計による樹木活性度の評価. 愛知県工業技術センター研究報告 37: 1-4.
- Mamiya, Y. and Enda, N. (1972) Transmission of *Bursaphelenchus lignicolus* by *Monochasmus alternatus*. Nematologica 18: 159-162.
- 松浦邦昭(1984)浸透性殺線虫剤の立木注入によるマツ材線虫病罹病木の治療(I)6種の浸透性殺線虫剤の治療効果. 日林誌 66: 1-9.
- 松浦邦昭(2003)殺線虫剤の根元注入によりマツ材線虫病から回復したクロマツ樹幹でみられた病徴進展. 森林総合研究所研究報告 2: 75-83.
- 中島 巖(1973)赤外カラー写真による環境と樹木活力の診断. 農業および園芸 48: 195-200.
- 中北 理・松浦邦昭・牛尾吉伸(2007a)赤外カラーによるマツ材線虫接種木の樹冠色調変化. 関東森林研究 58: 59-60.
- 中北 理・中村克典・松浦邦昭・小林一三・星崎和彦・太田和誠・田代隼人・板垣恒夫(2007b)空中写真を活用した松くい虫防除法の開発. 日本森林学会大会発表データベース 118: 699.
- 小田久五(1967)松くい虫の加害対象木とその判定法について. 森林防疫ニュース 16: 263-266.
- 林野庁(1976)赤外カラー写真による松くい虫被害調査報告書. 107 pp, 日本林業技術協会.
- 林野庁森林保護対策室(2009)平成 20 年度松くい虫被害について(平成 21 年 8 月 28 日). 林業と薬剤 189: 10.
- スネデカー・コ克蘭(1972)2つの独立な標本での割合の比較: 2×2 表. (統計的方法 原書第 6 版. 畑村又好・奥野忠一・津村善郎共訳, 岩波書店). 206-209.
- 鈴木和夫(1992)マツ枯損に関する萎凋枯死機構. 森林防疫 41: 59-64.
- 梅林利弘・外岡 遼・福田健二(2009)コンパクト MRI 多点撮像からみたマツ材線虫病通水阻害進展様式. 日本森林学会大会発表データベース 120: 292.
- 安田嘉純(2007)バルーン写真から赤外カラー航空写真へ. 緑色植物の分光反射特性, 赤外カラーの分光感度. (農業リモートセンシング・ハンドブック, 秋山 侃ら編, システム農学会). 252-259, 260-263.