

# 空中写真判読による函南原生林の 40年間の林冠変化

中園悦子\*†・武生雅明\*\*・田中信行\*\*\*・大丸裕武\*\*\*

(平成 27 年 5 月 21 日受付/平成 27 年 7 月 24 日受理)

**要約:** 冷温帯・暖温帯境界域における常緑広葉樹の過去から現在にかけての分布変化の検出の可能性を検証するため、落葉広葉樹林と常緑広葉樹林の接する函南原生林を対象に、異なる年次のオルソ空中写真を用いて樹冠の分布図を作成した。1976 年秋と 2005 年秋の 2 時期の空中写真を単画像オルソ化し、標高 600 m, 700 m, 800 m の調査区内 (150×150 m) の樹冠を常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの 3 タイプに目視判読で分類し、その面積変化を調べた。この時 2012 年冬の空中写真を補足的に使用して、2005 年の画像での常緑広葉樹の確認を行った。2005 年の分類結果を基準とすることで、単独で常緑広葉樹と落葉広葉樹の分類が困難な 1976 年データを分類することができた。その結果、全ての調査区で林冠ギャップ面積が 40 年の間に減少していることがわかった。また、600 m 調査区では落葉広葉樹の樹冠面積にはほとんど変化が見られず、常緑広葉樹の樹冠面積のみが増加していること、一方、700 m, 800 m の調査区では落葉広葉樹、常緑広葉樹の両方の樹冠面積が増加していることがわかった。従って空中写真の判読により、人為影響の非常に少ない常緑広葉樹の 40 年間の分布変化を抽出することが可能であるとわかった。

**キーワード:** オルソ画像, 樹冠面積, 常緑広葉樹, 植生分布変化

## 1. はじめに

地球温暖化に伴い、平均気温は世界では 1880 年～2012 年に 0.85℃ 上昇し<sup>1)</sup>、日本ではこの 100 年に 1.14℃ の割合で上昇した<sup>2)</sup>との報告がある。また、このような気候変化に伴い、過去数十年の間に自然植生の分布が変化していることが報告されている<sup>3-5)</sup>。このような気候変化の影響による植生の分布変化を把握するためには、森林帯の移行域で、遷移の影響の少ない遷移後期段階の老齢自然林で起こっている微小な変化を、できるだけ広域で、最低でも数十年の期間について把握することが必要である。

日本の場合、このような変化を把握するデータのの一つとして空中写真が挙げられる。空中写真は 1940 年代に、まず米軍によって撮影されており、以降 50 年代から白黒写真が蓄積され、当時の森林の状況について判断することが可能である。特に 1970 年代半ばにカラー空中写真が全国で撮られているため、現在から約 40 年を遡って森林変化をカラー写真で追うことが可能である。空中写真による樹種判読については、70 年代にはすでに複数の論文が報告されているが<sup>6,7)</sup>、その多くが目視による判読である。特に常緑広葉樹と落葉広葉樹の分離については、まだ自動で行うことは困難であり、広範囲の解析を行った例は多くない<sup>8)</sup>。空中写真に基づいて過去から現在の植生変化を抽出し、

環境要因の変化と結びつけた研究例としては湿原植生を対象とした安田ら<sup>9)</sup>の研究、亜高山帯優占種のオオシラビソを対象とした SHIMAZAKI<sup>10)</sup>の研究がある。しかし冷温帯の落葉広葉樹林と暖温帯の常緑広葉樹林の境界域における常緑広葉樹の樹冠面積の変化については試みられていなかった。

そこで今回は、暖温帯常緑広葉樹林と冷温帯落葉広葉樹林の境界域に自然林が良く残存している静岡県の函南原生林を対象地とし、空中写真によって常緑広葉樹の樹冠面積の変化を追うことが可能であるかどうかを確認することを目的とした。この研究では、最新の空中写真の判読結果を基にして、過去に遡りながら同一個体の樹冠を同定することで、単独では常緑広葉樹と落葉広葉樹の区別が困難な過去の画像の判読精度を向上できると考えた。この方法により常緑広葉樹の樹冠面積の経年変化を、植生帯境界域において標高間で比較することを試みた。

## 2. 対象地と使用データ

対象地は静岡県田方郡函南町の箱根外輪山の山腹斜面に位置する函南原生林である。標高 550～840 m の広範囲に渡って自然林が残存している。箱根地域では、この標高は暖温帯常緑広葉樹林と冷温帯落葉広葉樹林との移行部に当たり、下部でのアカガシ優占林から上部ではブナ優占林へ

\* 森林総合研究所 (東京大学生産技術研究所)

\*\* 東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科

\*\*\* 森林総合研究所

† Corresponding author (E-mail: nakazo@iis.u-tokyo.ac.jp)

と変化していく。標高間で常緑広葉樹と落葉広葉樹のそれぞれの樹冠面積の経年変化を比較するため、標高約600m, 700m, 800mにそれぞれ150×150mの調査区を設定した(図1)。

今回、調査区内を常緑広葉樹と落葉広葉樹、そして林冠ギャップの3タイプに分類することを考えて空中写真を選じた。対象地域の空中写真は1947/10/02, 1976/11/03, 1979/06/03, 1983/11/08, 1994/11/09, 1999/12/07, 2005/11/08, 2012/12/05の8時期画像が存在する。このうち1947年と1979年は白黒写真である。常緑広葉樹と落葉広葉樹の樹冠の形状には大きな差異がないため、カラー空中写真を使用する必要があり、白黒写真については今回対象から省いた。残りの画像のうち、常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの3タイプを抽出できるのは秋の画像のみである。この条件が満たされるもののうち最も古い画像が1976/11/03であり、最新の画像が2005/11/08のもの

であったため、この2時期を選んだ。ただし秋の画像だけでは常緑広葉樹と落葉広葉樹の識別が難しかったため、2012年の冬の画像を参考として、両者を識別することとした。

オルソ画像作成には、既存のDEMを使用する単画像オルソ法と、2画像をマッチングさせることで作成されるDSM(Digital Surface model)を使用するステレオマッチング法がある。森林に使用する場合、前者は樹高の影響による面積誤差が生じるが、樹冠の形状は保たれる。一方後者はDSMを使用するため面積の精度は高いが、マッチングがうまくいかない場合、狭い面積内で画像が大きくゆがむ場合がある。この研究では、現在の樹冠と過去の樹冠を同定する必要があったので、国土地理院発行の10m解像度のDEMと25000分の1地図を使用した単画像オルソの処理を行った。単画像オルソ作成に使用したソフトウェアはERDAS Imagine 13である。

### 3. 解析方法

#### (1) 2005年現在の樹冠の判読と検証

2005年の空中写真を用いて、現在の樹冠の判読を行った。まず調査区ごとに、2005年オルソ画像上の判読可能な全ての樹冠についてポリゴンを作成した。この時連続する同一コースの空中写真を用いて立体視を行い、個々の樹冠の境目を判読した。ただし落葉広葉樹のみ、常緑広葉樹のみの樹冠がまとまっている場所については、複数の樹冠をまとめてポリゴンにした。調査区を設定した線上に樹冠があった場合、その樹冠全ての面積を解析対象とした(図2a)。また樹冠ポリゴンの間の隙間については林冠ギャップに分類し、それぞれをポリゴン化した(図2b)。

作成した各ポリゴンに対しては、常緑および落葉の判定を行った。2005年の写真だけでは困難であった。そこでまず、2005年と2012年の画像を比較し、同じ位置・形の樹冠を同一個体と判定した。次に2012年12月の画像上で緑色であった樹冠を常緑広葉樹と推定し、これにより2012年に常緑広葉樹と推定された樹冠と同一個体と判定

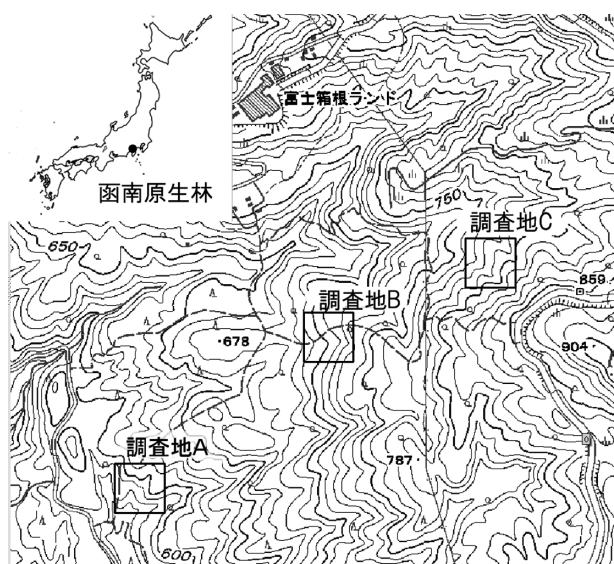


図1 函南原生林内調査地

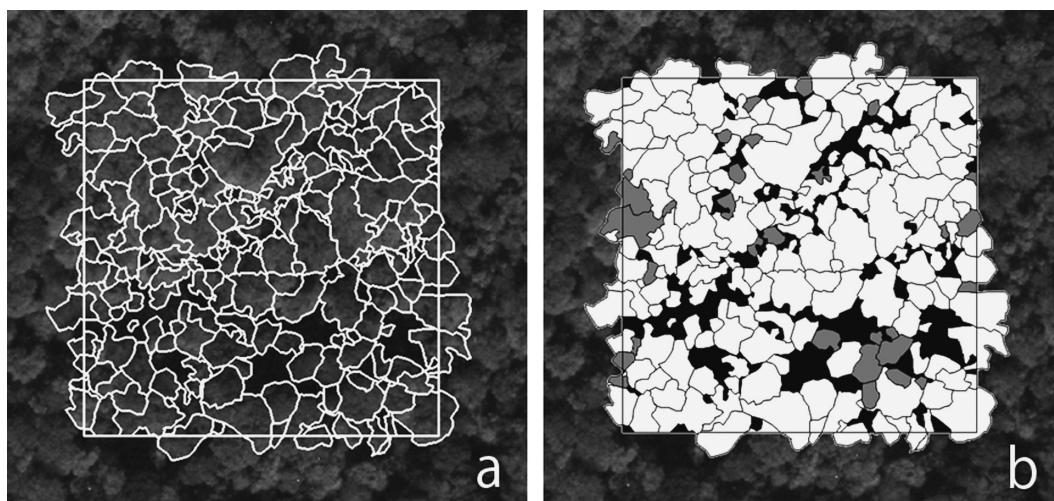


図2 樹冠分割例(a)とその分類(b):白:落葉広葉, 灰:常緑広葉樹, 黒:林冠ギャップ



された2005年の樹冠は常緑広葉樹と判定した。一方、2012年に常緑広葉樹と推定された樹冠と対応しなかった樹冠は落葉広葉樹と判定した。この場合、2005年の色調については、明らかに紅葉が起こっている場合は落葉広葉樹の可能性が高いと判定し、その結果を2012年の画像の色調と比較、確認した上で落葉広葉樹と判断した。しかし2005年に緑色であるという情報については、常緑広葉樹と落葉広葉樹の識別には基本的に反映していない。今回、調査区内で2005年に存在しているが2012年に確認できなかった樹冠は存在しなかったため、2012年の画像から2005年の画像の常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読を全て行うことが可能であった。以上の方法で2005年の3か所の調査区で、常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読を行なった。

2012年の写真を参照した上で行った2005年現在の判読結果を検証するために、同じ函南原生林内の学習の道の周囲の樹冠を同じ方法で判読した。その上で1976年の空中写真を撮影したのとほぼ同じ時期である2013年11月1日に現地調査を行い、空中写真と対応が可能だった樹冠について、判読の精度を検証した。

## (2) 過去画像の判読

1976年画像での樹冠を常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの3タイプに分類した。ただし1976年画像は紅葉の途中の時期に撮影されており、単独では常緑広葉樹と落葉広葉樹の識別ができない。そこで2005年の識別結果を参考にした。

まず、2005年と同様に1976年の樹冠を区別してポリゴン化した。この時2005年のポリゴンと比較して、相対的な位置、色調、テクスチャが類似する樹冠を2005年の樹冠と同一個体と判定した。2005年と同一と判定された樹冠については、色調の確認を行った。1976年の画像では緑色ではない樹冠は落葉広葉樹と判定できるので、まずその判定を行い、その上で2005年の判定結果と矛盾がないかどうかを確認した。常緑広葉樹の可能性のある樹冠については、40年の間、位置が変わらず、かつ極端な面積減少が起こっていない場合、2005年と1976年の樹冠は同じ樹冠であると考え、2005年の判定結果をそのまま当てはめた。

しかし撮影時期は約40年の間隔が空いているため、全ての樹冠を2005年の樹冠に対応させることはできなかった。そこで、対応できなかった樹冠については、はじめに1976年の写真の色調に基づいて落葉広葉樹か、常緑広葉樹かを判定した。常緑広葉樹と判定した場合、その色調と、2005年との対応から常緑広葉樹と判断された樹冠の1976年の画像上での色調とを比較した。それらが近似している場合は常緑広葉樹、その他は落葉広葉樹と結論づけた。この時、2005年と同様に対象区線上の樹冠についてはその全ての面積を解析対象に含めた。1976年と2005年の2時期の画像上では、対応できない樹冠も複数存在したが、対応できない樹冠のほとんどが1976年にはないが2005年であったもので、その逆は少なかった。また、2005年の判定と比較する際に2012年の空中写真の立体視を行い、

1976年の樹冠と比較し、2005年の画像だけでは同じ樹冠か判断できない場合の判断の参考とした。

## (3) 面積変化の抽出

上述したように単画像オルソによる面積は正確ではない。特に林冠ギャップの面積は空中写真の撮影方向でかなり異なる可能性がある。同一調査区に対し、同一コース内のオーバーラップする空中写真から作成したオルソ画像を用意した。2枚のオルソ画像間から抽出した常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの3タイプの面積割合が近似しており、かつ2方向から作成したオルソ画像間の面積の差よりも年度の異なるオルソ画像間での面積変化のほうが大きい場合、時間経過による面積変化が生じていると推定できると考えられる。そこで、出来るだけ真上から撮影された写真と、斜めから撮影された写真の両方を単画像オルソ化し、それぞれの画像における調査区内の樹冠を常緑広葉樹、落葉広葉樹、林冠ギャップの3タイプに分類し、面積を算出し、両画像から得られた結果を平均した。この平均値を用いて標高別の調査区内で常緑広葉樹、落葉広葉樹、および林冠ギャップの面積割合が40年間でどのように変化しているか、その傾向を示した。ポリゴン作成・面積の計算に使用したソフトウェアはTNTmips var 2009である。

## 4. 結 果

### (1) 現在の樹冠の判読と検証

調査区と同一林内の学習の道周辺における、2012年の画像を参照した上で行った2005年の判読結果と現地の調査と比較した結果を表1に示す。常緑広葉樹については90%、落葉広葉樹については100%の正答率となった。このうち誤判読を行っていた3つの樹冠について原因を調べたところ、2012年の画像では上層の落葉広葉樹の葉が落ちており、より下層の常緑広葉樹が透けて見えていたこと

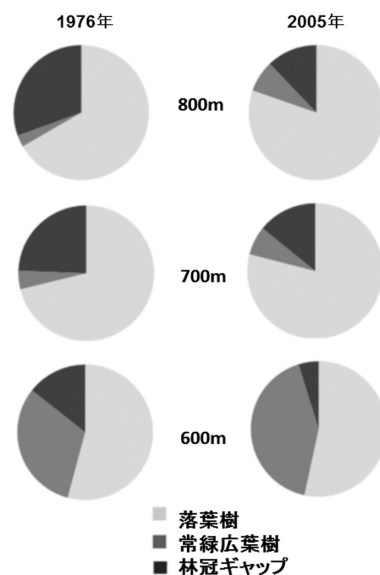


図3 各調査区・年代での落葉広葉樹、常緑広葉樹、林冠ギャップの面積 (%)

表1 空中写真判読結果と現地調査の比較

		2005年と2012年の組み合わせによる判読	
		常緑樹冠	落葉樹冠
現地調査	常緑樹冠	27	0
	落葉樹冠	3	33

表2 各標高・年度・撮影方向1(斜め), 2(できるだけ真上)の落葉広葉樹, 常緑広葉樹, 林冠ギャップ面積(単位: m<sup>2</sup>)

標高	年度	撮影方向	落葉広葉樹	常緑広葉樹	林冠ギャップ
800m	1976	1	15466	649	7489
		2	16040	673	6941
	2005	1	19606	1818	3215
		2	20123	1915	2773
700m	1976	1	17014	998	6315
		2	17618	1156	5546
	2005	1	19557	1742	3614
		2	19749	1680	3409
600m	1976	1	13010	7569	3836
		2	13038	7570	3062
	2005	1	12651	10290	1179
		2	13313	10048	1166

がわかった。

(2) 40年間の樹冠面積の変化傾向

時期の異なるオルソ画像間の面積差の絶対値は、落葉広葉樹で42~4111m<sup>2</sup>, 常緑広葉樹で634~2599m<sup>2</sup>, 林冠ギャップで2277~4221m<sup>2</sup>となった。一方、連続して撮影された空中写真からのオルソ画像による面積差の絶対値は落葉広葉樹で28~662m<sup>2</sup>, 常緑広葉樹で1~242m<sup>2</sup>, 林冠ギャップ13~774m<sup>2</sup>となり、標高600mの落葉広葉樹面積以外では時期の異なるオルソ画像の面積差の絶対値のほうが異なる方向から撮影されたオルソ画像の面積差の絶対値よりも大きかった(表2)。また2方向から作成したオルソ画像の間で、3タイプの面積割合の傾向は非常に近似していた。

2方向から撮影されたオルソ画像による各タイプの樹冠面積平均を算出し、標高別の調査区内で常緑広葉樹, 落葉広葉樹, および林冠ギャップの面積割合を算出し、標高ごとにその変化を比較した(図3)。どの調査区に於いても減少したのは林冠ギャップ面積のみであった。標高700m調査区と800m調査区では、常緑広葉樹と落葉広葉樹は共に増加していた。標高600m調査区では落葉広葉樹の割合は54%から53%とほとんど変化しなかったが、常緑広葉樹の割合は31%から42%と、大きく増加していた。

5. 考 察

(1) 現在の空中写真判読の検証結果について

2005年の樹冠について、2012年の空中写真を判読の参考として用い、常緑広葉樹と落葉広葉樹を分類した。結果、常緑広葉樹, 落葉広葉樹ともに9割を越える正答率となった。

本研究では、常緑広葉樹と落葉広葉樹の双方の樹冠面積

を抽出するために、常緑広葉樹と落葉広葉樹の双方の樹冠にまだ葉が残っている時期の画像(今研究では2005年)を基準とし、出来るだけ近い年代の冬の画像(今研究では2012年)を参考として、樹種の判定を行った。複数の落葉広葉樹の判読を空中写真で行う場合については、秋季の紅葉から落葉直前までの間に短い時間間隔で空中写真を撮影し、その色調変化から樹種の特徴を抽出する研究が報告されている<sup>11)</sup>。常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読を行う場合についても、最低でも2時期の空中写真を使用することが判読精度の向上に有効であることが示された。この場合、参考として落葉の完了した冬の画像が必要である。また基準となる画像については、紅葉などによってそれぞれの樹冠の色調が異なる秋のほうが、樹冠ポリゴンを作成するのに適していた。

(2) 過去画像の判読精度の向上について

過去から現在にかけての植生分布の変化を追う場合、現在のみではなく過去の画像からも対象となる種の分布範囲を判読する必要がある。しかし今回使用した1976年画像のように、過去の画像では撮影時期を選ぶことが出来ず、単独では正確な常緑広葉樹と落葉広葉樹の判読ができないことも考えられる。

そこで、近年の画像を元にした判読結果を参考とし、過去の画像の判読を行った。この方法は、人為の影響下で増加する常緑広葉樹の変化を樹冠数を指標として追う際に有効であるとの報告がある<sup>8)</sup>。しかし今回の対象地は人為の影響が無い場合、過去と現在の樹冠数の差はかなり小さいことが予想された。そこで現在の樹冠に対応する過去の樹冠ポリゴンを作成し、樹冠面積の変化を追った。対象とする森林が保護林であるため、対応が可能な樹冠については現在の精度の高い判読結果を適用することができる。対象地の樹冠は増加する傾向にあり、過去と現在で対応できなかった樹冠のほとんどが現在の画像のみに存在する樹冠だった。特に常緑広葉樹のうち、現在にはなく過去にあったと推定されたのは全ての調査区を合わせて1本だけであり、これが誤判読であったとしても、全体としての面積の変化には大きな影響はないと考えられる。従って、人為の影響の少ない老齢林の変化に対しても、現在の判読結果を参考にして過去の樹種の推定判読を行う方法は有効であると考えられる。

(3) 40年間の樹冠面積変化の傾向について

標高による常緑広葉樹と落葉広葉樹の樹冠面積の変化の傾向については、標高600mと、標高700m以上とで明確な違いがあり、低標高側では落葉広葉樹の分布が変化しない一方で常緑広葉樹が顕著に増加していることが明らかになった。

これは、過去から現在への温暖化の影響を考えた場合、特に低標高側で常緑広葉樹の専有面積が拡大すると予測されることに合致している。実際、近年(2004~2006年)の調査によると、函南の標高600~800m間では、常緑樹の発芽数および定着数は低標高で多い一方、落葉樹の定着

数と定着率は低標高側で低いとの報告があり<sup>12)</sup>、空中写真判読の結果はこれに矛盾しない。空中写真で判読可能なのは上層木のみである。温暖化に伴う常緑広葉樹の分布拡大は、まず下層木から起こることが予測される。そのため、空中写真での温暖化による分布変化の抽出は、上層変化に先行する下層の常緑広葉樹の増加は把握できないと考えられる。このことは、現地調査と判読結果を比較した際、誤判読であったのが落葉広葉樹であり、その原因が下層の常緑広葉樹であることと一致する。つまり現在上層木が落葉広葉樹であっても、その下層に常緑広葉樹が入っている可能性があり、下層木では常緑広葉樹の分布拡大が上層よりも先に起こっている可能性がある。

## 6. おわりに

今回、現在の樹冠に対して正確な判読を行った場合、その情報は過去の樹種判読の参考としても有効であり、結果常緑広葉樹・落葉広葉樹の過去から現在の分布変化を追うことが可能となった。この分布変化が温暖化を原因とする場合、日本各地で常緑広葉樹分布の落葉広葉樹の分布域への拡大が予想される。異なる場所で、常緑広葉樹と落葉広葉樹が隣接している自然林で、分布変化が起こっているかどうかを抽出し、検討することが今後の目標である。

**謝辞：**本研究は、農林水産省農林水産技術会議「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト」および環境省環境総合推進費「S-8 温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。また、現地調査については早稲田大学の森川靖教授、王迪さんに御協力を頂きました。有難うございました。また、査読者の方々には懇切丁寧な御指導を頂きましたことをここに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) IPCC (2013) Change 2013: The Physical Science Basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, New York, pp5.
- 2) 気象庁 (2013) 気候変動監視レポート 2013. 気象庁, 東京, pp20.
- 3) PAULI H, GOTTFRIED M, GRABHERR G (1996) Effects of Climate Change on Mountain Ecosystems- Upward shifting of Alpine plants. *World Resource Review* 8 (3) : 382-390.
- 4) WALTHER, G R, POST E, CONVEY P, MENZEL A, PARMESAN C, BEEBEE T J C, FROMENTIN J M, GULDBERG O H, BAIRLEIN F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416 : 389-395.
- 5) LENOIR J, GÉGOUT J C, MARQUET P A, de RUFFRAY P, BRISSE H (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20 th century. *Science* 320 : 1768-1771.
- 6) 板垣恒夫 (1976) 空中写真判読による天然林の類型化とその応用に関する研究. 造園雑誌 40 (2) : 2-12.
- 7) 高橋教夫 (1979) 航空写真による樹種の識別に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告 36 (1) : p79-145
- 8) 奥田 賢, 美濃羽靖, 高原 光, 小椋純一 (2007) 京都市東山における過去 70 年間のシイ林の拡大過程. 森林立地 49 (1) : 19-26
- 9) 安田正次, 大丸裕武, 沖津 進 (2007) オルソ化航空写真の年代間比較による山地湿原の植生変化の検出. 地理学評論 80 : 842-856
- 10) SHIMAZAKI M, SASAKI T, HIKOSAKA K, NAKASHIZUKA T (2011) Environmental dependence of population dynamics and height growth of a subalpine conifer across its vertical distribution: an approach using high-resolution aerial photographs. *Global Change Biology* 17 (11) : 3431-3438.
- 11) 長澤良太, 鈴木茂之, 佐野淳之 (2004) ラジコン空中写真を用いた落葉広葉樹林の樹種判読. 森林計画学会 38 (1), 11-21
- 12) 澤田佳美, 中村幸人, 武生雅明, 吉田圭一郎, 磯谷達宏 (2008) 函南原生林における常緑広葉樹林から落葉広葉樹林への林冠優占種実生の発芽・定着数の変化. 第 55 回日本生態学会要旨集 C1-09

# Forty Years of Change in Canopy Predominance of Evergreen Broad-leaved Trees in the Kan-nami Primary Forest Based on Aerial Photographs

By

Etsuko NAKAZONO<sup>\*†</sup>, Masaaki TAKYU<sup>\*\*</sup>,  
Nobuyuki TANAKA<sup>\*\*\*</sup> and Hiromu DAIMARU<sup>\*\*\*</sup>

(Received May 21, 2015/Accepted July 24, 2015)

**Summary** : Detection of the changes in canopy predominance of evergreen broad-leaved trees for 40 years from 1976 to 2005 was examined at the boundary between warm-temperate evergreen broad-leaved forest and cool-temperate deciduous broad-leaved forest in the Kan-nami primary forest by using aerial photographs. Canopies of evergreen and deciduous broad-leaved trees and gaps were distinguished from each other for three study plots (150 m × 150 m in area) set on the three different altitudes; 600 m, 700 m, and 800 m a.s.l., based on the ortho images of aerial photographs in autumn 1976 and 2005. For the discrimination of evergreen canopies in 2005, ortho images in winter 2012 were used as a supplement, because evergreen canopies could be easily distinguished from deciduous canopies in winter. We distinguished the three types of canopies in 1976 after the identification of the same canopies on the ortho images in 1976 and 2005.

Total area of gaps decreased during 40 years in all the three study plots. In the study plot at 600 m, total area of evergreen canopies increased, but that of deciduous canopies did not change. In the two study plots at higher altitude, 700 m and 800 m, both of the total areas of evergreen and deciduous canopies increased during 40 years. It may suggest that the increase in predominance of evergreen broad-leaved trees due to the global warming have already started from lower altitude at the boundary between warm-temperate evergreen broad-leaved forest and cool-temperate deciduous broad-leaved forest.

**Key words** : Ortho image, Crown area, Evergreen broad-leaved tree, Distribution change

---

\* Forestry and Forest Products Research Institute (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

\*\* Department of Forest Science, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

\*\*\* Forestry and Forest Products Research Institute

† Corresponding author (E-mail : nakazo@iis.u-tokyo.ac.jp)