

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20580172

研究課題名（和文）温暖化がカラマツの肥大成長および材質に及ぼす影響評価

研究課題名（英文）Effects of climate change on radial growth and wood quality of Japanese larch

研究代表者

安江 恒（YASUE KOH）

信州大学・農学部・准教授

研究者番号：00324236

研究成果の概要（和文）：カラマツ(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.)造林木を対象に、温暖化に伴う気候変動が肥大成長量や密度に及ぼす影響を解明することを目的とし、第一に、年輪年代学的手法を適用して国内4生育地における気候応答解析を行った。第二に、異なる標高域を対象に年輪形成過程を把握するための形成層活動観測を行った。年輪幅および年輪内密度の気候応答について、生育地の温量指数の増加に伴う高温の抑制的効果は認められなかった。開葉、分裂開始、二次壁肥厚開始日は気温に依存していることが示唆された。一方、形成の終了時期の標高依存性は認められなかった。以上の研究より、温暖化に伴う肥大成長量や材質の顕著な変化は無いと予想される。

研究成果の概要（英文）：We investigated effects of climate change on radial growth and wood quality of Japanese larch (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) plantations. We compared climatic responses of ring width and densities among 4 sites using a dendrochronological technique. We also observed seasonal changes in radial growth of Japanese larch trees growing on different altitudes.

The results of climate responses do not revealed increase of negative effect of high temperature on radial growth along increased Kira's Warmth Index. The observations on seasonal changes in radial growth revealed that initiations of cell division and secondary wall deposition are strongly affected by temperature, on the other hand, suspension of cambial activity do not controlled by temperature. It can be concluded that future warming will not inhibit both ring widths and densities of Japanese larch.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |
| 2009年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2010年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：材質・物性

1. 研究開始当初の背景

IPCC 第4次報告(2007)では人為由来の地球温暖化の進行が確実であることが確認されるとともに、その影響の深刻さの一端が明らかにされた。急激な気候変化が我が国の森林に及ぼす影響も危惧される。森林の主構成要素である樹木の樹幹部は重要な木材資源であるとともに、大気中二酸化炭素の主要な固定源でもあり、樹木の肥大成長におよぼす温暖化の影響を把握することは、持続的な木材生産や炭素排出権国際競争力維持のために重要である。

ニホンカラマツ(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) (以下、カラマツ)は我が国の寒冷地における主要造林樹種であり、成長が早く、かつ材密度が高いため、林業においても、大気中 CO₂ 濃度抑制においても重要な役割を果たす。本来は中部山岳から関東にかけて隔離的に分布するが、現在では主に中部山岳から北海道に至る地域に広く植栽されている。近年の乾燥・加工技術の進歩と、ロシア材の資源枯渇、高騰を受け、急速に伐採量を増やし、今後も需要の増加が見込まれる。一方、急激な気候変化は、カラマツの生育適地を変え、成長や材質を変化させる可能性がある。しかしながら、現在のところ、野外での実測データに基づいた知見はほとんど得られておらず、カラマツの成長や材質の気候応答に関する研究が急務である。

2. 研究の目的

樹木の肥大成長の結果として毎年1層ずつ形成される年輪は、生育時に受けた環境の影響を記録している。従って、年輪を用いることで、現在生育している樹木の肥大成長履歴と気候変動の関係を直接解析することが可能で、肥大成長の気候応答を明らかにすることが出来る。本研究では、国内に生育するカラマツ造林木を対象に、温暖化に伴う気候変動が肥大成長量や密度に及ぼす影響を説明することを目的とし、植栽されている上限・下限・北限・南限に近い地点における気候要素に対する反応を比較検討した。また、カラマツの形成層における木部細胞の分裂開始、壁肥厚の開始、早晚材移行、形成層活動の終了を規定する要因については、未だよくわかっていない。そこで、異なる標高域に生育する個体について、同一成長期について経時的な観察を行うことにより、肥大成長フェノロジーを把握し、同時に、木部形成の各ステージの開始や終了と環境要因との関係を検討する。

まず第一に、年輪気候学的手法を適用し、過去約50年間の年輪幅や年輪内密度値と気象データとの関係を統計的に解析し、環境応答および環境変動に伴う年輪幅や年輪内密度値の変化を定量的に明らかにした。第二に、

異なる標高に生育するカラマツを対象に、肥大成長フェノロジーを2年間に渡り観測し、木部細胞の分裂、分化、拡大、細胞壁肥厚の期間と速度を把握した。以上で得られる知見を総合することにより、温暖化に伴う気候変動が、形成層における木部形成に関与し、その結果として肥大成長量や年輪構造が変動する過程を検討した。

3. 研究の方法

(1) 異なる生育地における気候応答解析

① 試料採取と測定

試料採取地として、九州大学北海道演習林(以下、足寄)、信州大学西駒演習林(以下、西駒)、信州大学農学部南箕輪演習林(以下、南箕輪)、九州大学宮崎演習林(以下、椎葉)を設定した(図1, 表1)。足寄では、北向き

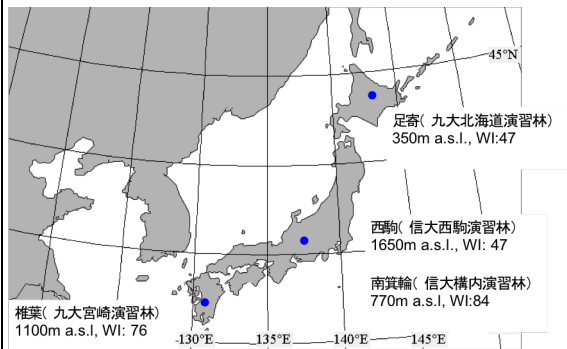


図1 試料採取地

斜面、南向き斜面の2カ所を設定した(以下、足寄北、足寄南)。いずれも「信州」由来のカラマツが植栽されている造林地である。

表1 試料採取地の概況

| 調査地 | 足寄北 | 足寄南 | 西駒 | 南箕輪 | 椎葉 |
|-----------|---|---|------------------|----------------------------------|---|
| 林班 | 九州大学北海道演習林 27林班に小班 | 九州大学北海道演習林 27林班に小班 | 信州大学西駒演習林 1林班に小班 | 信州大学構内演習林 3林班に小班 | 九州大学宮崎演習林 24林班に1小班 |
| 標高(m) | 350 | 350 | 1650 | 773 | 1100 |
| 北緯 | 43°14' | 43°14' | 35°49' | 35°51' | 32°22' |
| 東経 | 143°33' | 143°33' | 137°59' | 137°56' | 131°10' |
| 傾斜方位 | 北東 | 南西 | 南東 | 傾斜なし | 傾斜なし |
| 露量指数 | 47 | 47 | 46.5 | 84 | 76.3 |
| 林分 | 52 | 54 | 50 | 57 | 55 |
| 平均樹高(m) | 22.4 | 28.7 | 14.8 | 20.3 | 17.4 |
| 平均DBH(cm) | 31.8 | 37.0 | 23.1 | 31.1 | 31.3 |
| 施業履歴(概略) | 1973年 開伐(8月) 1973年 開伐(11月) 1979年 列状開伐 1985年 定性開伐 | 1972年 開伐 1979年 開伐 1980年 開伐 1980年 風倒木処理 1983年 開伐 | 不明 | 1988年 開伐 1989年 開伐 1990年 開伐 | 1967年 除伐 1976年 除伐(12月) 1977年 開伐(2月) 1981年 開伐(1月) |

供試木として、樹幹が傾斜していたり、ネズミによる食害を受けているもの、樹幹の内部が腐っている個体を除外し、調査地につき無作為に30~40個体を選択した。根張りを含まないように地上高0.5~1メートルの高さで成長錐(内径5mm)を用いて、1個体につき2方向から年輪コア試料を採取した。採取したコア試料は紙ストローに封入し、純水で満たした容器に入れて3~5日間熱水抽出した後、水気を十分に切り、トルエン・エタノール(トルエン:エタノール=1:2)混合液中でソックスレー抽出器を用いて3日間抽出し、密度を測る際に障害となる抽出成分を抽出した。その後、溝を掘った埋め木に接着し、ツインソーを用いて樹軸方向に厚さ

1. 55mmの試料を切り出した。

恒温恒湿室(20℃, 相対湿度60%, 含水率12%に相当)にて5日間調湿した試料を, 標準吸収体と共にフィルム(FUJIFILM Industrial X-RAY FILM IXFR)上に置き, 軟X線撮影装置(Softex EMBW 特製)を用いて撮影した(管電圧20 kVp, 管電流14 mA, 照射距離2.2 m, 照射時間3分30秒)。

軟X線撮影フィルムをスキャナー(EPSON GT-X900)を用いて, 分解能2400 dpi(約0.01mm/pixel)にて256階調白黒画像として読み込み, 年輪解析プログラムWinDENDRO 2005a(Regent Instruments)を用いて, 年輪幅, 年輪内平均密度, 年輪内最大密度を測定した(図2)。

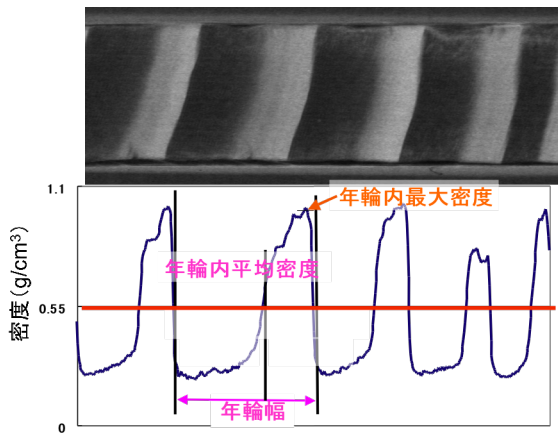


図2 軟X線デントメトリによる年輪幅および年輪内密度値の測

定

② クロノロジーの構築

目視及び統計的手法(COFECHAプログラム)によるクロスデイティングを行った。年代照合ができた年輪幅と年輪内最大密度時系列について32年スプライン曲線をあてはめて標準化を行い, 全個体の指数の平均であるクロノロジーを作成した。

気候応答解析

③ 気候応答解析

気象データは, 調査地に最も近く, 観測期間の長い特別地域気象観測所の記録を使用した。使用する気象データは, 日平均気温, 日最高気温, 日最低気温, 降水量の月合計, 日照時間の月合計値とした。日照時間は1986年から全国の観測所で測定機器がジョルダン式日照計から回転式日照計へと変わっているため補正を行った(勝山 1987)。各クロノロジーと前年4月~当年10月の気象データの関係性について単回帰分析を行った。

(2) 形成層活動期間観測

① 調査地

調査地は, 信州大学農学部南箕輪演習林(長野県上伊那郡南箕輪村, 標高770m)および信州大学農学部西駒演習林(長野県上伊

那郡南箕輪村, 標高1250, 1430, 1650m)とした(図3)。調査地に生育している樹齢44~58年のカラマツ造林木について, 各標高につき生育良好な5個体を供試木とした。



図3 形成層活動観測調査地

② 観察方法

各供試木について, 打ち抜き法(2009年3月26日~9月24日)とナイフマーキング法(2008年4月16日~2009年9月24日)と樹冠写真撮影(2009年3月26日~2009年11月5日)を, 約1~2週間間隔で行った。

打ち抜き法には直径2mmのポンチを用い, 形成層を打ち抜いた。試料は採取後直ちにグルタルアルデヒド溶液で固定し, エタノールシリーズで脱水した。そしてエポキシ樹脂で包埋し, ロータリーマイクロームを用いて厚さ2~5μmの切片を作成した。作成した切片は, 光学顕微鏡および偏光顕微鏡で観察した。

ナイフマーキング法では, 刃幅18mmのナイフを用い, 障害を与えた。11月に直径15mmのポンチを用いてすべての傷害部位をブロック状に採取し, 5×5×5mmの小片にトリミングした後, スライディングマイクロームを用いて厚さ20~25μmの切片を作成した。

打ち抜き法では, ①分裂開始(形成層帯に新しい分裂面が確認できる), ②二次壁肥厚開始(偏光顕微鏡で複屈折が確認できる)の二段階に, ナイフマーキング法では, ①二次壁肥厚開始(二次壁肥厚中の変形した仮道管が傷害部位に確認できる), ②見かけの分裂終了(見かけ上分裂活動は終了しているが, マーキングに伴う傷害組織および木部を追加的に形成している), ③分裂完全休止(マーキングに伴う傷害組織および追加木部を形成していない)の三段階に分類した。樹冠写真撮影では, 各供試木の樹冠の様子を定点固定カメラで撮影し, ①開葉(葉の緑色または葉の針状のシルエットの確認), ②黄葉(葉の黄色の確認), ③落葉(8割以上の葉が落ちてい)に注目して観察した。

形成層活動を調べる一般的な方法である、打ち抜き法、ナイフマーキング法によって得られる情報には差があるが、未だに整理されていない。特に、打ち抜き法とナイフマーキング法が示す木部形成段階については、吉村らの報告のみである。そこで、本研究では、同一個体について打ち抜き法とナイフマーキング法を並行して適用して観察を行い、両者の示す形成段階、両者の長所や限界を整理することも同時に行った。そのうえで、信州カラマツの形成層活動期間と、標高や葉のフェノロジーとの相互の関係性、環境要因との関係を検討した。

4. 研究成果

(1) 異なる生育地における気候応答解析 ①クロノロジーの構築

クロノロジーを施業歴と照らし合わせた。南箕輪、足寄南においては間伐の影響は明らかではなかったが、足寄北においては、1979年の列状間伐後、急激な年輪幅の拡大傾向がみられたので年輪幅の気候応答解析において1979~1981の期間分を除去した。年輪内平均密度には影響がみられなかったため、密度のデータはそのまま使用した。西駒の年輪幅について、1979年、1980、1981年は年輪幅が著しく狭まっていた。また、1978年の年輪内最大密度が低かった。一方、直線距離で約5km離れた南箕輪ではこのような減少は全く認められなかった。従って、年輪幅の減少は1978年に発生した病害または虫害に起因すると予想され、その影響がないと思われる1987年以降についてクロノロジーを作成した(図4-6)。得られたクロノロジーの個体間平均相関係数は、国内における針葉樹で報告されている値の範囲内であり、各個体が同調して変動していることから、これらの年輪指標は気候などの環境要素によって影響を受けて変動している可能性が高い(表2)。

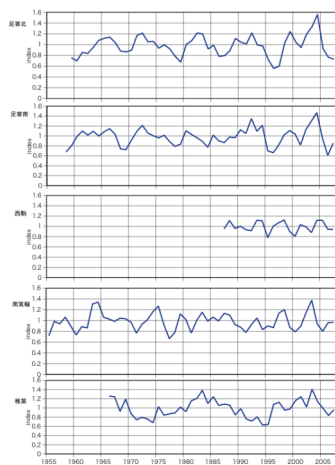


図4 カラマツの年輪幅クロノロジー

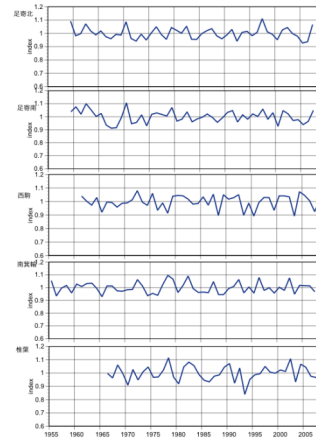


図5 カラマツの年輪内平均密度クロノロジー

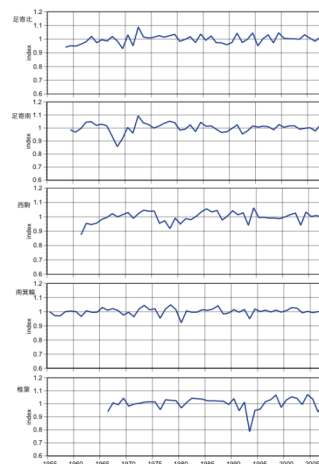


図6 カラマツの年輪内年輪内最大密度クロノロジー

| | | 個体数 | クロノロジーに用いた試料数 | クロノロジーの期間 | 個体間平均相関係数 | 個体間平均相関係数を算出した期間 |
|-----|---------|-----|---------------|-----------|-----------|------------------|
| 足寄北 | 年輪幅 | 30 | 73 | 1959-2007 | 0.46 | 1967-2007 |
| | 年輪内平均密度 | 30 | 73 | 1958-2007 | 0.30 | 1966-2007 |
| | 年輪内最大密度 | 30 | 73 | 1958-2007 | 0.33 | 1965-2007 |
| 足寄南 | 年輪幅 | 30 | 72 | 1959-2007 | 0.34 | 1964-2007 |
| | 年輪内平均密度 | 30 | 73 | 1958-2007 | 0.32 | 1963-2007 |
| | 年輪内最大密度 | 30 | 73 | 1958-2007 | 0.40 | 1967-2007 |
| 西駒 | 年輪幅 | 40 | 80 | 1987-2008 | 0.34 | 1987-2008 |
| | 年輪内平均密度 | 40 | 72 | 1961-2008 | 0.38 | 1961-2008 |
| | 年輪内最大密度 | 40 | 71 | 1961-2008 | 0.38 | 1961-2008 |
| 南箕輪 | 年輪幅 | 40 | 60 | 1955-2007 | 0.32 | 1964-2007 |
| | 年輪内平均密度 | 40 | 57 | 1955-2007 | 0.36 | 1966-2007 |
| | 年輪内最大密度 | 40 | 57 | 1955-2007 | 0.27 | 1967-2007 |
| 椎葉 | 年輪幅 | 40 | 61 | 1966-2008 | 0.34 | 1966-2008 |
| | 年輪内平均密度 | 40 | 75 | 1966-2008 | 0.23 | 1966-2008 |
| | 年輪内最大密度 | 40 | 47 | 1966-2008 | 0.34 | 1966-2008 |

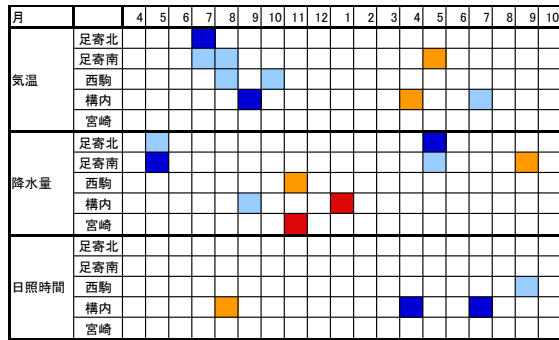
表2 クロノロジーの概要

②気候応答解析

年輪幅に関して、椎葉を除く全地点で前年の成長期終盤である夏季の気温と年輪幅の間で負の相関が示されていた(図7)。成長期終盤に気温が高いことで呼吸量が増える、または水ストレスが生じる事で、翌年に持ち越す光合成生産物の量が減る可能性が指摘される。特に、南箕輪と西駒の年輪幅と日照時間との負の相関、有意ではないが降水量と

正の相関が得られていることから、カラマツの天然分布の南限に近い南箕輪と西駒では水ストレスが影響していると考えられる。一方、椎葉では降水量が多く、また川沿いの平地に生えていたため水ストレスの影響がないのではないかと考えられた。

年輪内平均密度について、南箕輪と西駒では7月の気温と日照が正に寄与していた(図8)。また、椎葉では、6月の降水量が負に、



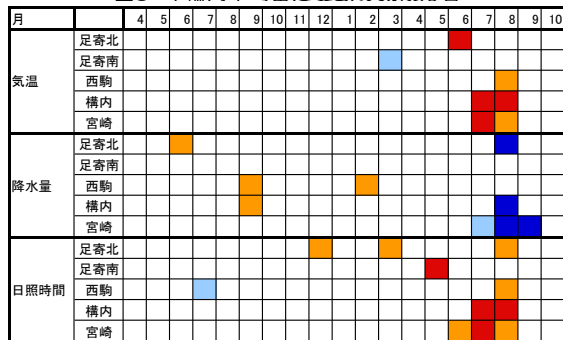
濃い塗りつぶしは $p < 0.01$ 、薄い塗りつぶしは $p < 0.05$ で有意な相関を示す。

図7 年輪幅変動の気候応答



濃い塗りつぶしは $p < 0.01$ 、薄い塗りつぶしは $p < 0.05$ で有意な相関を示す。

図8 年輪内平均密度変動の気候応答



濃い塗りつぶしは $p < 0.01$ 、薄い塗りつぶしは $p < 0.05$ で有意な相関を示す。

図9 年輪内最大密度変動の気候応答

日照が正に寄与していた。したがって梅雨時の日照時間が長く、最高気温が高いと年輪内平均密度が高くなると言える。足寄北、足寄南とそのほかの調査地との共通点はなかった。足寄北、足寄南の間でも共通点は見られなかった。足寄北では当年8月の気温と、足寄南では当

年の9月の日照時間と正の相関が認められた。このことから平均気温が一定以上になることで光合成生産量が増加し、密度が高くなるのではないかと考えられる。

③ 将来の成長予測

気象庁(2006)によれば、年平均気温は椎葉では 2.4°C 、西駒では 2.8°C 上昇し、7月の降水量は椎葉では変わらず、西駒では10%上昇し、椎葉と西駒で7月の無降雨日数は1日減ると予測されている。椎葉では夏季の気温が高くなるため年輪幅は広くなると考えられる。年輪内平均密度、年輪内最大密度には気温の増加が促進的に、降水量の増加が抑制的に作用するため、密度が将来どのように変化するか予測できなかった。西駒の年輪幅では夏季の降水量が増加すると年輪幅は広くなると予想できる。年輪内平均密度、年輪内最大密度では気温が促進的に作用するが、降水量も増加し抑制的に作用するため将来どのように変化するか予測が出来なかった。

(2) 形成層活動期間観測

① 観察方法の比較

打ち抜き法での分裂開始確認時には、ナイフマーキング法での新生細胞の確認は出来なかった(図10)。ナイフマーキング法での二次壁肥厚開始確認は打ち抜き法での確認と同様か数日遅れていた。ナイフマーキング

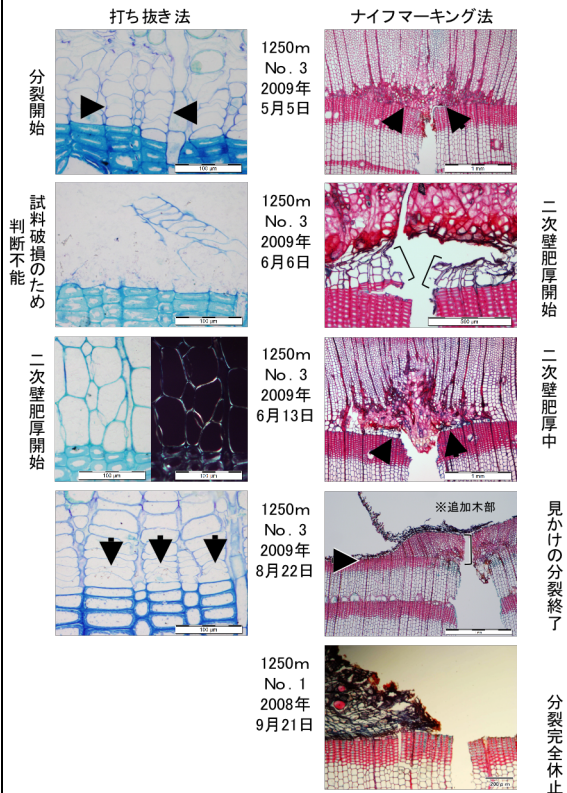


図10 打ち抜き法とナイフマーキング法による新生木部の観察

法で見かけの分裂活動が終了し、追加木部形成中の期間について、打ち抜き法では薄い細胞壁が観察された。この薄い細胞壁は、新しい分裂面なのか拡大中の一次壁なのか区別が困難であったため、打ち抜き法による分裂終了は特定できなかった。この期間は、分裂活動は見かけ上終了しているが刺激を受けると分裂活動を一時的に再開できる状態であるため、区別が困難になっていると考えられる。

以上の結果より、形成層細胞の分裂開始の観察には打ち抜き法が適していること、二次壁肥厚開始確認は両者で可能なこと。分裂終了確認にはナイフマーキング法が適していることが明らかになった。

② 異なる標高域における形成層活動期間

分裂開始および二次壁肥厚開始は、標高の上昇にともなって遅れる傾向を示した(図 11, 12)。開葉も標高の上昇にともなって遅れる傾向を示し、標高が 100m 上昇するごとに、分裂開始時期は 3.0 日、開葉時期は 3.2 日遅くなった。また分裂開始は開葉より 4~5 日

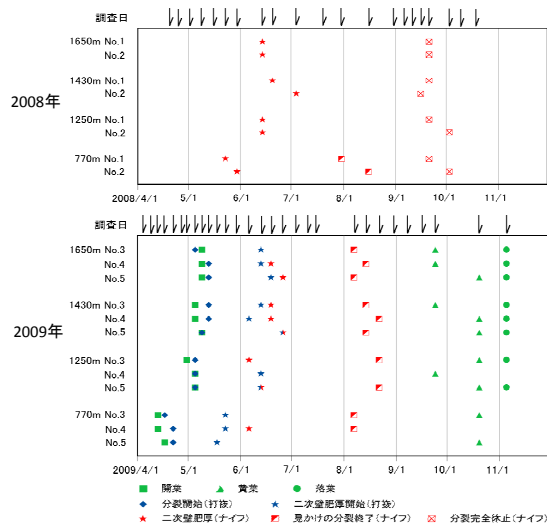


図 11 標高ごとの形成層活動および葉のフェノロジー

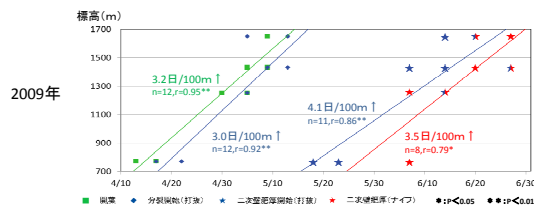


図 12 形成層活動・二次壁肥厚の開始時期と標高の関係

遅れる傾向にあった。黄葉は、ナイフマーキング法での見かけの分裂活動終了よりも 1 ヶ月以上遅れた。2009 年については分裂完全休止は観察できなかった。

開葉、分裂開始、二次壁肥厚開始日と標高の間には非常に高い正の相関があり、これら成長開始は気温による制限を高く受けてい

ることが示唆された。一方、形成の終了時期の標高依存性は認められなかった。気候応答解析においては、年輪幅や密度変動と春の気温との相関は、地点により異なっており、温暖化傾向に伴う成長の早期開始が必ずしも成長量の増大に結びついていないことが示唆された。以上の研究より、温暖化に伴う肥大成長量や材質の顕著な変化は無いと予想される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

①和田鉄平, 細尾佳宏, 安江恒 (2011) 異なる標高に生育する信州カラマツの葉のフェノロジーおよび形成層活動期間. 第 61 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM): A19-P-AM05

②祇園絃一郎, 古賀信也, 内海泰弘, 伊藤万理耶, 安江恒 (2010) 異なる環境傾度に生育するカラマツ造林木の年輪指標と気候要素との関係. 2010 年度「樹木年輪」研究会発表要旨集: 8

③祇園絃一郎・古賀信也・内海泰弘・安江恒 (2010) 宮崎と長野に生育するカラマツ造林木の年輪指標と気候要素との関係. 第 60 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM): A18-0915

④和田鉄平・細尾佳宏・中堀謙二・安江恒 (2010) 打ち抜き法とナイフマーキング法による信州カラマツ形成層活動期間の観測. 第 60 回日本木材学会大会講演要旨集 (CD-ROM): A18-1015

⑤和田鉄平, 中堀謙二, 安江恒 (2009) 異なる標高に生育するカラマツの形成層活動期間. 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集: A15-0945

⑥伊藤万理耶, 中堀謙二, 古賀信也, 安江恒 (2009) 信州と北海道におけるカラマツ造林木の肥大成長の気候応答. 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集: A15-1000

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安江 恒 (YASUE KOH)

信州大学・農学部・准教授

研究者番号: 00324236

(2) 研究分担者

古賀 信也 (KOGA SHINYA)

九州大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 20215213

高橋 耕一 (KOICHI TAKAHASHI)

信州大学・理学部・准教授

研究者番号：80324226

内海 泰弘 (YASUHIRO UTSUMI)

九州大学・大学院農学研究院・助教

研究者番号：50346839