

学 位 論 文 題 名

樹木の凍裂発生要因の研究

学位論文内容の要旨

樹木の凍裂とは、寒冷時に樹幹がその放射縦断面を破断面として割裂する現象である。近年、北海道内陸部のような酷寒地の林木ばかりでなく、本州や九州地方のスギ造林木にも凍裂が多発していることが明らかにされており、育林上の問題となっている。凍裂害を防除、あるいは軽減するための有効な手段は確立されていない。その発生の実態やしくみについても、不明の点が数多く残されている。このような背景から、本研究では、凍裂発生の時期と気温条件の調査、凍裂樹幹の物性的・構造的特性の解明、人工凍裂の誘発実験を行い、凍裂の発生要因について検討した。内容の要旨は以下のとおりである。

緒言では、既往の文献に従って凍裂の実態について概説するとともに、凍裂の発生機構に関する従来の仮説の問題点を指摘した。これに基き、本研究の目的と範囲を明らかにし、さらに本論文の構成について述べている。

第1章では、凍裂発生の時期と気温について検討している。古い凍裂の多くは、気温が+数℃～-10℃程度の範囲内で変動する初冬の比較的短い期間内（道北地方で11月下旬～12月中旬、札幌近郊で12月中～下旬）に集中的に再割裂することが確認された。新たな凍裂の場合、古い凍裂が集中的に再割裂するのと同時期、同程度の気温下で発生するものがあることが確認された。この調査により、凍裂は必ずしも厳寒期に気温が著しく低下するときに発生するわけではなく、-10℃程度の気温下でも発生するものと判断された。

第2章では、凍裂木の構造的特性を検討するために、6樹種22本の凍裂木について、樹幹の内部構造や外部形態を調べている。22本すべての凍裂樹幹の心材部で、凍裂の割れとは別に内部割れが発達しているのが観察され、とくに凍結状態で観察すると、それらの内部割れの空隙には氷晶が析出しているのが認められた。内部割れの発達形状は様々であり、目回りが著しく発達するもの、放射状の内部割れだけが発達するものなどが認められた。22本の試料のうち4樹種16本の

試料については、軟X線写真観察や含水率測定により樹幹内の水分分布を調べ、新凍裂木を含むいずれの試料でも、高含水率心材部が形成されていることを確認した。これに対して、従来の報告のいくつかで指摘されている樹幹の損傷や外部形態との関連については、一部の凍裂木で認められたにとどまった。これらの結果から、高含水率心材部やその内部に認められる内部割れは、凍裂の発生に強く寄与していることが示唆された。

第3章では、凍裂の発生と高含水率心材部、内部割れの関連を検討するために、凍結・融解過程での凍裂樹幹の高含水率心材部の放射方向の寸法変化の挙動の特性を調べている。凍裂樹幹の高含水率心材部は、凍結に伴い限界ひずみに近い膨張を起こすことが確認された。これに対して、凍裂をもたない樹幹の心材部は、含水率の高低に拘わらず、凍結の際に凍裂樹幹の高含水率心材部のような膨張を起こさなかった。この実験に使用した凍裂樹幹の高含水率心材部には、よく発達した目回りが発生しており、凍結によりその空隙に氷晶が析出したのに対して、凍裂を含まない樹幹部位より採取した試験体には、目回りは発生していない、という構造的な違いが認められた。これらの結果から、高含水率心材部によく発達した目回りをもつ凍裂樹幹では、内部膨張が凍裂の発生要因になっているものと判断され、その内部膨張の直接の原因は、氷晶析出により目回りの空隙が拡大することであると推察された。

第4章では、内部割れが凍裂の発生にどのように寄与しているのかを詳しく検討するために、トドマツ凍裂樹幹の水食い材部を凍結状態で実体顕微鏡とcryo-SEMにより直接観察し、材組織や内部割れの空隙での氷晶の局在や構造、内部割れに接する材組織の変形の状態を明らかにしている。水食い材部の材組織はかなり飽水に近い状態であること、内部割れの空隙にも氷晶がほぼ充満していることが確認された。内部割れの近辺の材組織では、表面圧密などの圧縮変形は認められなかった。その破断面からかなり離れた領域の材組織でも、氷晶の析出による内部割れの空隙の拡大に応じて変形を起こしているのが確認された。この観察から、凍裂樹幹には、凍結の際に氷晶析出により目回りや放射状の内部割れの空隙が拡大するのに応じて、水食い材部全体の体積増加を伴う内部変形が引き起こされていることが示唆された。

第5章では、凍裂や内部割れの破壊形態を光学及び走査電子顕微鏡で調べている。凍裂と放射状の内部割れの破断面には、有縁壁孔の壁孔縁の破壊や壁層レベルでの破断面の移行が頻発するという共通点があること、接線破断面の観察では、凍裂の破断面の移行部で放射柔細胞が壁切断破壊を起こしていたのに対し

て、目回りの破断面で放射柔細胞が壁界破壊を起こしているという違いがあること、などの破壊形態的特徴が明らかになった。これらの結果から、凍裂の原因となる応力や内部割れが発生・発達する際の温度条件などについて言及した。

第6章では、(1) 生材の円柱状の樹皮付試料を $-20\sim-80^{\circ}\text{C}$ の冷凍庫に入れ、この試料の中心部を局部的に一定温度に加温することにより試料内部に放射方向の温度勾配を強制的に付与する方法、(2) 含水処理した円板ないし円柱状の樹皮付試料を単に凍結させる方法により、人工的に凍裂を誘発させる実験を行っている。(1)の実験では、試料中心部と冷凍庫内の温度差を $30\sim 100^{\circ}\text{C}$ の様々な条件に設定したが、いずれも凍裂は誘発されなかった。(2)の実験では、一部の試料に樹幹表面まで達する凍裂状の割れ(人工凍裂)が誘発された。人工凍裂が誘発された試料には、凍裂の割れとは別に内部割れが著しく発達していたのに対して、人工凍裂が誘発されなかった試料では、内部割れの発達は軽微であった。凍裂が誘発された試料と誘発されなかった試料との間でみられたこのような構造的な違いは、天然下で発生した凍裂をもつ樹幹と凍裂をもたない樹幹との間で認められた内部構造的な違いとほぼ一致する。従って、内部割れの発達が凍裂の発生に強く寄与しているものと判断された。

以上の野外調査や観察、実験により得られた結果から、凍裂の発生要因について、総合考察を行っている。すなわち、凍裂の発生に不可欠な因子は、樹芯部に位置する高含水率心材部で目回りや放射状の内部割れが発達し、凍結の際に氷晶析出によりその空隙が拡大することであると結論した。内部割れの空隙の拡大により引き起こされる樹幹の内部変形に応じて、樹幹の外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が生じるものと推察される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 深 澤 和 三
副 査 教 授 平 井 卓 郎
副 査 教 授 滝 川 貞 夫
副 査 助 教 授 大 谷 諄

学 位 論 文 題 名

樹木の凍裂発生要因の研究

本論文は、凍裂発生の時期と気温条件の調査、凍裂樹幹の物性的・構造的特性の解明、人工凍裂の誘発実験を行い、凍裂の発生要因について検討したものである。研究結果を6章に区分して記載し、図21、表5、写真103を含み、別に緒言、総合考察を加えた、172頁の和文論文である。引用文献は114であり、参考論文9編が添えられている。

第1章では、道内の3地点で、樹木の凍裂が冬期間のいつ頃、どの程度の気温下で起こるのかを検討している。古い凍裂の多くは、気温が+数℃～-10℃程度の範囲内で変動する初冬（11月下旬～12月下旬）に集中的に再割裂すること、新たな凍裂の場合にも、古い凍裂が集中的に再割裂すると同時期に発生するものがあることを確認した。この調査により、凍裂は必ずしも厳寒期に気温が著しく低下するときが発生するわけではなく、-10℃程度の気温下でも発生し得ることを結論している。

第2章では、凍裂樹幹の構造的特性を検討している。凍裂樹幹の心材部には数多くの内部割れが発達していること、とくに凍結状態ではそれらの内部割れの空隙に氷晶が析出していることを確認している。さらに、内部割れの発達形状は様々であり、目回りが著しく発達するもの、放射状の内部割れだけが発達するものなどの類型があることを指摘している。また、樹幹内の水分分布を調べた結果、いずれも高含水率心材部が形成されていることを確認している。これらのことから、凍裂の発生の内的因子として、高含水率心材や内部割れが強く関与しているものと判断している。

第3章では、凍結・融解過程での凍裂樹幹の高含水率心材部の放射方向の寸法変化の挙動の特性を調べ、凍裂の発生と高含水率心材部、内部割れとの関連を検討している。凍裂樹幹の高含水率心材部は、凍結に伴い限界ひずみに近い膨張を起こすのに対して、凍裂をもたない樹幹の心材部は、含水率の高低に拘わらず、凍結の際に膨張を

ほとんど起こさないことを確認している。さらに、凍裂樹幹の高含水率心材部にはよく発達した目回りが発生しており、凍結によりこの目回りの空隙に氷晶が析出したのに対して、凍裂を含まない樹幹の心材部には目回りは発生していない、という構造的な違いがあることを明らかにしている。このことから、凍結の際に氷晶析出により目回りの空隙が拡大することが凍裂の発生に寄与していることを示唆している。

第4章では、凍結状態の凍裂樹幹の高含水率心材部をcryo-SEMにより直接観察し、氷晶の局在や構造、内部割れに接する材組織の変形の状態を明らかにしている。水食い材部の材組織はかなり飽水に近い状態であること、内部割れの空隙に氷晶がほぼ充満していることを確認している。内部割れの近辺の材組織では表面圧密のような圧縮変形は認められず、その破断面からかなり離れた領域の材組織でも、氷晶の析出による内部割れの空隙の拡大に応じて変形していることを明瞭に示している。これらの結果から、凍裂の発生に対する内部割れの寄与の仕方について言及している。

第5章では、凍裂や内部割れの破壊形態を光学及び走査電子顕微鏡で観察し、凍裂と放射状の内部割れの破断面には、有縁壁孔の壁孔縁の破壊や壁層レベルでの破断面の移行が頻発するという共通点があること、接線破断面の観察では、凍裂の破断面の移行部では放射柔細胞が壁切断破壊を起こしていたのに対して、目回りの破断面では放射柔細胞が壁界破壊を起こしているという違いがあること、などを明らかにしている。これらの結果を踏まえ、凍裂の原因となる応力や内部割れが発生・発達するときの温度条件などについて言及している。

第6章では、(1) 生材の円柱状の樹皮付試料に放射方向の温度勾配を付与する方法、(2) 含水処理した円板ないし円柱状の樹皮付試料を単に凍結させる方法により、人工的に凍裂を誘発させる実験を行っている。実験(2)で、一部の試料に樹幹表面まで達する凍裂状の割れ(人工凍裂)を誘発することに成功している。そして、人工凍裂が誘発された試料には内部割れが著しく発達していたのに対して、人工凍裂が誘発されなかった試料では内部割れの発達は軽微であるという、構造的な違いが認められたことを述べている。これらのことから、凍裂の発生に不可欠な因子は、樹芯部に位置する高含水率心材部で目回りや放射状の内部割れが発達し、凍結の際に氷晶析出によりその空隙が拡大することであると結論している。

以上の研究結果は、内部割れの空隙の拡大により引き起こされる樹幹の内部変形に応じて、樹幹外層部で局所的に高い接線方向の引張り応力が生じることが凍裂の発生要因になっていることを示唆しており、その見解は新知見として高く評価される。

よって審査員一同は、別に行った学力確認試験の結果と合わせて、本論文の提出者佐野雄三は博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。