

WNI 気象文化創造センター「第9回気象文化大賞」研究助成 成果報告書

研究課題：樹木年輪を用いた過去の気温復元の不確実性に関する研究：復元記録に過去の土壤水分環境と大気汚染が与える影響

研究代表者：鄭 峻介 北海道大学 北極域研究センター

要旨

本研究では、20世紀後半以降の北半球高緯度域で観測される樹木年輪幅と気温の相関関係悪化、その原因となっている環境因子を特定し、樹木年輪を用いた気温復元記録に潜んでいる不確実性を明らかにすることを目的とした。つまりは、樹木年輪幅と気温変動の相関関係の悪化の原因となっている環境因子を特定することである。その環境因子として、近年大きく変化している、1) 植物が利用する土壤水分環境、2) 植物に届く日射量を制限する雲被覆量、3) 人間活動に起因する大気汚染、この3つに注目した解析を実施し、下記の結果を得た。

- (1) 夏季の気温変動により樹木年輪幅変動が規定されているサイトのうち、22~27%のサイトでは、樹木年輪幅と気温との間に時間的安定性が高い相関関係が観測された。一方で、夏季以外の気温変動により樹木年輪幅変動が規定されているサイトでは、時間的安定性が高い相関関係はほとんど観測されなかった。
- (2) 樹木年輪幅と気温変動の間に時間的安定性が高い相関関係が観測されるサイトは、主に、北極ヨーロッパ・ユーラシア地域と、カナダの海岸地域に分布していた。
- (3) 樹木年輪幅と気温変動との相関関係の悪化には、降水量と土壤水分環境、さらには雲被覆度が影響を与えている地域が存在していることを確認した。それら影響は空間的にバラつきが大きく、地域的な特徴を明らかにすることは難しかったが、北緯50°以南の温暖な地域においては、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の悪化は、降水量が少ない期間・土壤水分指標が乾燥を示す期間に顕在化しやすい傾向が見られた。
- (4) 大気中の硫黄酸化物 (SO₄) 濃度が極めて高い年が観測されると、その年、もしくは数年のタイムラグを持ち、樹木年輪幅が低下する傾向が見られたが、樹木年輪幅変動と大気汚染環境の間に明瞭な関係性を確認することはできなかった。大気汚染は、樹木成長量の増加と低下のどちらにも寄与する可能性があり、そのプロセスは複雑である。今後の課題として、よりプロセスベースのアプローチが必要不可欠であることが示唆される。

また、本研究助成の成果の一部を下記の国際誌と国内学会にて公表した。

1. Tei, S, Sugimoto, A., 2020. Excessive positive response of model-simulated land net primary production to climate changes over circumboreal forests, *Plant-Environment Interactions*, <https://doi.org/10.1002/pei3.10025>.
2. Tei, S, Takano, S., Yasunari, J. T., Uncertainty of tree-ring based temperature reconstruction: Effects of soil moisture environment and air pollution on reconstruction records, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, 2020.7.12-16, Poster presentation.

1. はじめに

地球環境の将来を予測するには、100年スケールで起きる現象を的確に理解することが必要である。しかしながら、全球観測記録は過去100年間しかないため、数十年以上の時間スケールにおける気候変動を理解するには、プロキシ記録を用いた古気候復元が不可欠である。古気候復元は、人間活動の影響のない過去の気温変動パターンやメカニズムの理解を助け、近年の気候変動を自然変動と人為変動に分離して理解することを可能とする。人為変動の大きさに関する情報を提供することは、我々人類が今後取るべき温暖化対策の正しい選択に影響を与えるため、社会に大きなインパクトを与える。さらに、古気候復元は、未来を予測する気候モデルの能力を検証することも可能であり、過去に生じた気候変動に対して誤った解釈をすることなく、将来の気候変動を正確に予測し、その対応策を検討する上で、非常に重要な学問分野である。

国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告書における、過去1000-2000年の気温変動の根拠の多くは、樹木年輪幅・密度による復元推定値である。樹木年輪は気温の優秀なプロキシデータであると長く考えられてきた。しかし、20世紀後半以降の北半球高緯度域で、樹木年輪幅や密度と、気温の年々変動の相関関係が崩れている (図1: Briffa et al., 1998, *Science*; D'Arrigo et al., 2008, *Glob. Planet. Change*)。つまり、近年、樹木年輪で気温を推定することが困難になっており、IPCC報告書における気温変動は、不確かな可能性が十分ある。

近年の気温復元には、気温変動と相関関係のよい樹木年輪の期間 (図1: 1880年～1960年) だけ使用されている。しかしながら、1880年以前にも樹木年輪が気温変動を反映せず、プロキシ記録として機能していない期間が存在する可能性があり、この方法での復元値は信頼性に乏しい。しかし、これまで何も解決されることがなく、そのような復元が繰り返されてきた。このままでは、我々が過去の気候変動を誤って解釈し、不正確な未来予測に行きつく可能性がある。

そこで、本研究では樹木年輪パラメータ (幅と密度) のうち、全球規模で使用可能なデータ数が圧倒的に多い樹木年輪幅に着目し、気温との相関関係悪化の原因となっている環境因子を特定し、復元記録に潜んでいる不確実性を明らかにすることを目的とした。

つまりは、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の悪化の原因となっている環境因子を特定することである。その環境因子として、近年大きく変化している、1) 植物が利用する土壌水分環境、2) 植物に届く日射量を制限する雲被覆量、3) 人間活動に起因する大気汚染、この3つに注目し、樹木年輪幅に与える影響を明らかにする。

2. 方法

本研究で使用するデータセットを表1にまとめた。本研究の目的1)および2)に関しては、全球を対象としたデータ解析を実施した。目的3)については、解析対象地域は、アメリカ海洋大気庁(NOAA)のデータベース上に樹木年輪幅データと大気汚染物質濃度データ(アイスコアからの復元推定値:硫酸塩・硝酸塩濃度など)の両者が存在する、アラスカ、アメリカ北西部、ヨーロッパ南部、ユーラシア南西部とした(図2:樹木年輪データは、アイスコア採取地点に最寄りのサイトのものを使用した)。本報告書では、アラスカのMt. Logan サイト(60.58N, -140.58E, Osterberg et al., 2008, Geophysical Research Letters)と、ヨーロッパのColle Gnifetti(45.93N, 7.87E, Sigl et al., 2018, The Cryosphere)での解析結果について、報告する。

各樹木年輪サイトにおいて、年輪幅と気温との相関関係の時間変化を求め、両者の相関関係の悪化と、(1)降水量・土壌水分量指標、(2)雲被覆度、の変動パターンの対応関係を調べた。また、樹木年輪幅変動と、3)大気汚染の変動パターンの対応関係を調べた。それらを通して、1)植物が利用する土壌水分環境、2)植物に届く日射量を制限する雲被覆量、3)人間活動に起因する大気汚染、が樹木年輪幅に与える影響を明らかにし、復元記録に潜んでいる不確実性を明らかにすることを試みた。

3. 結果と考察

3-1. 過去120年間における樹木年輪幅と気温との相関関係の空間分布

図3(a)に、過去120年間における樹木年輪幅と気温変動との相関関係の全球における空間分布を示す。ここでは、気温変動に対する樹木応答のタイムラグ(Tei et al., 2017 Global Change Biology; Tei and Sugimoto. 2018, Global Change Biology)を考慮し、前年6月から当年10月までの月平均気温と樹木年輪幅の相関係数を総当たりにすべて計算し、サイトごとに最も有意な相関が得られた月の相関係数をプロットしている。北極圏に位置するサイトでは、樹木年輪幅は気温と正の相関を示す傾向が見られた。一方で、北緯50°以南のサイト、特にアメリカ地域のサイトでは、両者の間に負の相関関係が得られる傾向が見られた。

図3(b)は、樹木年輪幅と気温との間に有意な正の相関関係が観測されたサイトのみ抜粋して示したものである。北極ヨーロッパ・ユーラシア地域、およびカナダ・アラスカの海岸地域において、比較的多くのサイトが分布していた。アメリカ地域においても、海岸部の一部のサイトでは、樹木年輪幅が気温と有意な正の相関関係を示していた。ま

た、ヨーロッパ地域においては、北極圏に限らず、比較的全域に樹木年輪幅が気温変動と有意な正の相関関係を示すサイトが分布していたが、それ以外の地域においては、北極圏より南部の地域 (<67° N) において、特に内陸地での分布が非常に少ないという特徴が見られた。

樹木年輪幅が気温変動と有意な正の相関係数を示すサイトにおいて (図 3b)、どの月の気温との相関係数がどの程度プロットされているかを表 2 に示す。樹木年輪幅と当年夏 (6,7,8 月) の気温変動との相関係数が最も有意となり、図 3b にプロットされているサイトが極めて多いことが分かった。北極圏などの寒冷な地域では、基本的には、春から夏にかけての気温 (本研究では、全球で一様的に、6 月を夏季に含めて定義しているが、実際には、北極圏において 6 月は春に分類すべきである) が樹木成長量に大きな影響を与えるとすると、これまでの先行研究の報告 (Tei et al., 2017 *Global Change Biology*; Tei and Sugimoto, 2018, *Global Change Biology*) と矛盾しない結果が得られた。

3-2. 過去 120 年間における樹木年輪幅と気温との相関関係の時間変化

樹木年輪幅と気温変動 (前年 6 月から当年 10 月までの月平均気温を候補とし、サイトごとに最も有意な相関関係が得られた月の気温) との 21 年移動相関を計算し、60% 以上の期間 (21 年間の相関係数を計算する各ブロックを一つの期間として) で有意な正の相関を示したサイトを図 4(a) に示す。ここで示されているサイトは、樹木年輪幅と気温との相関関係が時間的に安定であり、樹木年輪幅を気温のプロキシとして過去の気温変動を復元することが適当であると考えられるサイトである。樹木年輪幅が気温との時間的に安定な有意な正の相関関係を示すサイトにおいて (図 4a)、どの月の気温との相関係数がどの程度プロットされているかを表 3 に示す。ほぼすべてのプロットが、樹木年輪幅と当年夏の気温との相関関係であることが分かった。本結果から、樹木年輪幅は夏季の気温の良いプロキシにはなり得るが、夏季以外の季節に関しては、相関関係の時間的安定性に乏しく、その復元値に大きな不確実性が潜んでいる可能性が高いことが示唆される。

図 4(b) は、樹木年輪幅と気温変動 (前年 6 月から当年 10 月までの月平均気温を候補とし、サイトごとに最も有意な相関が得られた月の気温) との 21 年移動相関を計算し、有意な正の相関が 60% 以下の期間 (21 年間の相関係数を計算する各ブロックを一つの期間として) でしか観測されなかったサイトをプロットしたものである。すなわち、樹木年輪幅と気温変動との相関関係が時間的に不安定であり、樹木年輪幅を気温のプロキシとして過去の気温変動を復元することが不適當であると考えられるサイトである。樹木年輪幅が気温と時間的に不安定な相関関係を示すサイトにおいて (図 4b)、どの月の気温との相関係数がどの程度プロットされているかを表 4 に示す。樹木年輪幅と当年夏の気温変動との相関関係も一定数プロットされているものの、図 4a と比べると、明らかに樹木年輪幅と当年夏以外の気温との相関関係が多くプロットされていることが分

かる。

3-3 樹木年輪幅と気温との相関関係の悪化に(1)降水量・土壌水分量指標の変化、(2)雲被覆度の変化、が与える影響

樹木年輪幅と気温変動との21年移動相関を計算し、有意な正の相関が60%以下の期間でしか観測されなかったサイトにおいて(図4b)、その移動相関時系列と、気温、降水量、土壌水分指標(SPEI)、雲被覆度の21年移動平均時系列で、偏相関係数を計算した(図5a-d)。ここでは、気温、降水量、土壌水分指標(SPEI)、雲被覆度が、樹木年輪と気温変動との21年移動相関時系列変動の約50%以上の変動成分を説明可能であることが期待される、偏相関係数0.7以上(もしくは-0.7以下)のサイトのみをプロットしている。本研究課題の目的は、年輪幅と気温との相関関係の悪化と、(1)降水量・土壌水分量指標、(2)雲被覆度、の変動パターンの対応関係を調べることではあるが、ここでは、それらに加えて気温変動パターンとの対応関係も調べた。

樹木年輪幅と気温との21年移動相関時系列の変動が、気温の21年移動平均時系列の変動パターンで良く説明されるサイトが、カナダ・アメリカ地域、およびヨーロッパ・ユーラシア・東アジア地域で、それぞれ観測された(図5a)。カナダ・アメリカ地域と東アジア地域では正の偏相関関係、ヨーロッパ・ユーラシア地域では負の偏相関関係が観測されるケースが多く見られた。前者の地域では、寒冷期において、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の不確実性が高まることを示唆している。一方で、後者のサイトでは、温暖期において、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の不確実性が高まることが示唆される。

樹木年輪幅と気温との21年移動相関時系列の変動が、降水量の21年移動平均時系列の変動パターンで良く説明されるサイトは、北極圏ではほとんど観測されず、より南方の地域、特に北緯50度以南の地域で比較的良好に観測される傾向が見られた(図5b)。多くのサイトにおいて、正の偏相関関係が観測され、降水量が少ない期間には、樹木年輪幅を気温のプロキシとした過去の気温復元値の不確実性が大きくなる可能性を示唆した。この要因としては、降水量が少ない期間には、樹木が利用可能な土壌水分量も少ない傾向にあり、樹木の成長量が気温よりも水分環境で律速されることになるため、樹木年輪幅と気温との相関関係が弱まるものと考えられる(Tei et al., 2014, *Polar Science*; Tei et al., 2017, *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*)。

樹木年輪幅と気温との21年移動相関時系列の変動が、土壌水分指標変動(SPEI)の21年移動平均時系列の変動パターンで良く説明されるサイトが、ヨーロッパ南部・ユーラシア・中東・東アジア地域で観測された(図5c)。一方で、北米・中南米地域での分布頻度は低かった。北緯50°以南に位置する中東地域では、正の偏相関関係が観測され、土壌が乾燥している期間には、樹木年輪幅を気温のプロキシとした過去の気温復元値の不確実性が大きくなる可能性が示唆された。この要因としては、先に述べた、降水

量との関係性と同様のプロセスが考えられる。一方で、ヨーロッパ南部・ユーラシア地域では、負の偏相関関係が観測された。土壤が湿潤である時に、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の不確実性が高まることが示唆されるが、そのプロセスについては不明であり、今後の更なる解析が必要である。

樹木年輪幅と気温との 21 年移動相関時系列の変動が、雲被覆度の 21 年移動平均時系列の変動パターンで良く説明されるサイトが、アメリカ・カナダの海岸地域、及びヨーロッパ地域でよく観測された (図 5d)。一方で、東アジア地域ではわずかに観測されたものの、ユーラシア地域ではほとんど観測されなかった。アメリカ・カナダの海岸地域、及びヨーロッパ地域において、観測された偏相関関係が正であるサイトと、負であるサイトが混在していた。前者のサイトにおいては、雲被覆度が低い期間に、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の不確実性が高まることが示唆される。この結果は、雲が少ない期間は少雨である可能性が高く、従って、樹木が利用可能な土壤水分量も少ない傾向にあり、樹木の成長量が気温よりも水分環境で律速されていた可能性が考えられる。一方で、後者のサイトでは、雲被覆度が高い期間には、植物に届く日射量が制限され、樹木の成長量が気温よりも日射量環境で律速されることで、樹木年輪幅と気温との相関関係が弱まるものと考えられる。アメリカ・カナダ地域では、そのようなサイトが、より海岸部に近い地域によく分布していることから、海洋性気候下の比較的湿潤な地域では、日射量が樹木成長量を規定する一つの重要な因子である可能性が考えられる。

3-4 樹木年輪幅変動に (3)大気汚染が与える影響

樹木年輪幅変動と、アイスコアから復元された大気汚染物質である硫黄酸化物 (SO₄) 濃度の変動パターンとを比較したところ、アラスカとヨーロッパどちらのサイトにおいても、極めて大きな硫黄酸化物 (SO₄) 濃度が復元されると、その年、もしくは数年のタイムラグを持ち、樹木年輪幅が低下する傾向も見られたが、明瞭な関係性は確認することはできなかった (図 6a-b)。本報告書では、硫黄酸化物 SO₄ の解析結果を示しているが、他の大気汚染物質 (例えば、硝酸塩濃度)、さらには、アラスカとヨーロッパ以外のサイトにおいても、同様の結果が得られている。

樹木年輪幅変動に大気汚染が与える影響を明らかにすることが困難であった理由の一つには、大気汚染濃度は樹木成長量の増加と低下のどちらにも寄与する可能性があり、そのプロセスが複雑であることが挙げられる。大気汚染物質は、日射の散乱光を増加させることを通して、樹木の光合成光環境を改善する (成長量の増加)。その一方で、雲形成の核となり、雲被覆度を増加させ、樹木への日射を遮る可能性もある (成長量の低下)。さらに、雲被覆度の増加は、降水量を増やす可能性があり、乾燥域では、樹木成長量を増加させる可能性さえある。

樹木年輪幅変動に大気汚染が与える影響は非常に複雑なプロセスであり、今後よりプロセスベースのアプローチが必要になると考えられる。また、大気汚染物質濃度データ

が存在する地域が少なく、偏っていることも、影響の検出を難しくした一因であると考えられる。今後、大気汚染物質濃度データがより充実し、プロセスベースの研究が進むことで、その影響が明らかになることが期待される。

4.まとめ

本研究では樹木年輪と気温の相関関係悪化の原因となっている環境因子を特定し、復元記録に潜んでいる不確実性を明らかにすることを目的とし、下記の結果を得た。

- (1) 夏季の気温変動により樹木年輪幅変動が規定されているサイトのうち、22~27%のサイトでは、樹木年輪幅と気温との間に時間的安定性が高い相関関係が観測された。一方で、夏季以外の気温変動により樹木年輪幅変動が規定されているサイトでは、時間的安定性が高い相関関係はほとんど観測されなかった。
- (2) 樹木年輪幅と気温変動の間に時間的安定性が高い相関関係が観測されるサイトは、主に、北極ヨーロッパ・ユーラシア地域と、カナダの海岸地域に分布していた。
- (3) 樹木年輪幅と気温変動との相関関係の悪化には、降水量と土壤水分環境、さらには雲被覆度が影響を与えている地域が存在していることを確認した。それら影響は空間的にバラつきが大きく、地域的な特徴を明らかにすることは難しかったが、北緯50°以南の温暖な地域においては、樹木年輪幅と気温変動との相関関係の悪化は、降水量が少ない期間・土壤水分指標が乾燥を示す期間に顕在化しやすい傾向が見られた。
- (4) 大気中の硫黄酸化物(SO₄)濃度が極めて高い年が観測されると、その年、もしくは数年のタイムラグを持ち、樹木年輪幅が低下する傾向が見られたが、樹木年輪幅変動と大気汚染環境の間に明瞭な関係性を確認することはできなかった。大気汚染は、樹木成長量の増加と低下のどちらにも寄与する可能性があり、そのプロセスは複雑である。今後の課題として、よりプロセスベースのアプローチが必要不可欠であることが示唆される。

5. 図表

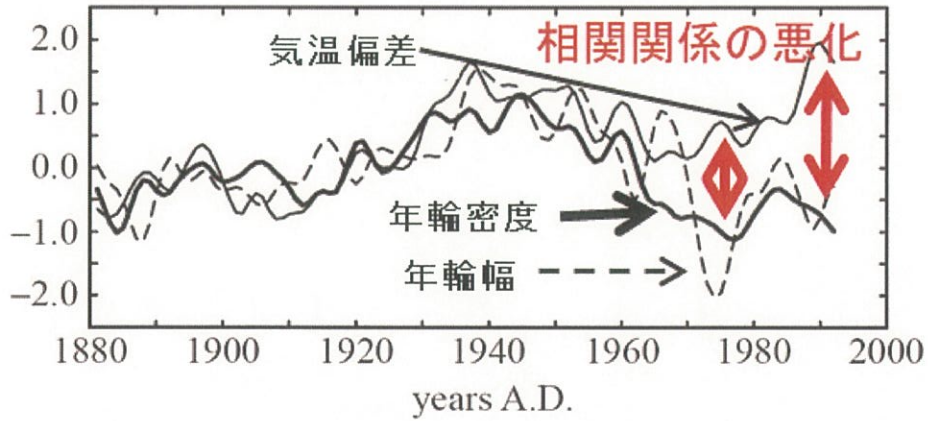


図1：20年平滑された北半球高緯度域の年輪幅（破線）と年輪密度（太い実線）の時系列（314地点の年輪データを使用）。同地域の4月～9月の気温偏差（細い実線）（Briffa et al., 1998, Science）

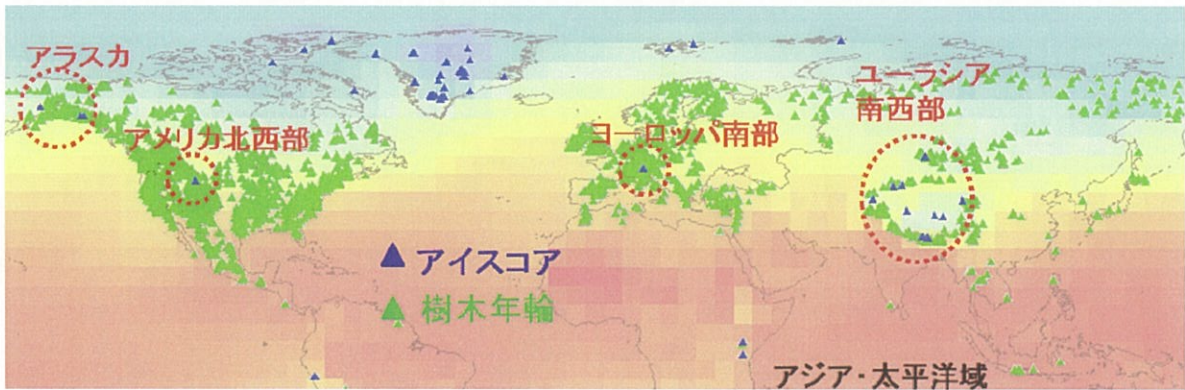


図2：アイスコアと樹木年輪データの分布：本研究で利用するデータ地点（赤点線）

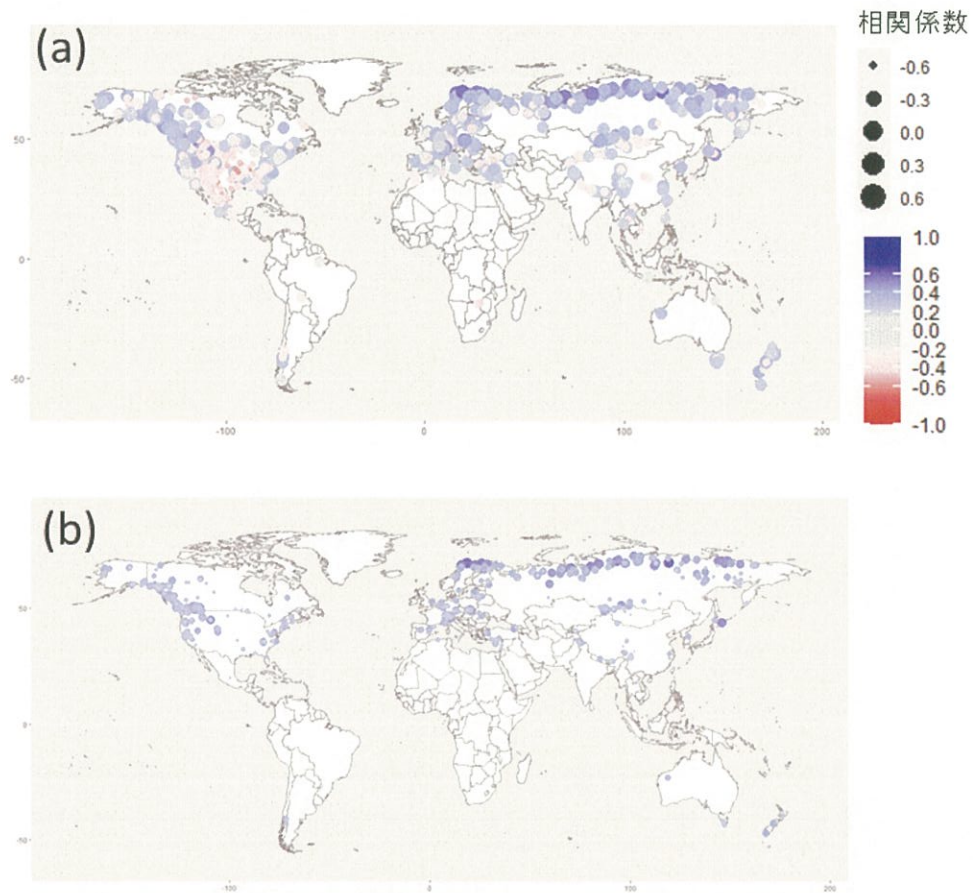


図 3. (a)過去 120 年間に於ける樹木年輪幅と気温との相関関係の全球空間分布。(b)樹木年輪幅と気温との間に有意な正の相関関係が観測されたサイトの相関係数分布。

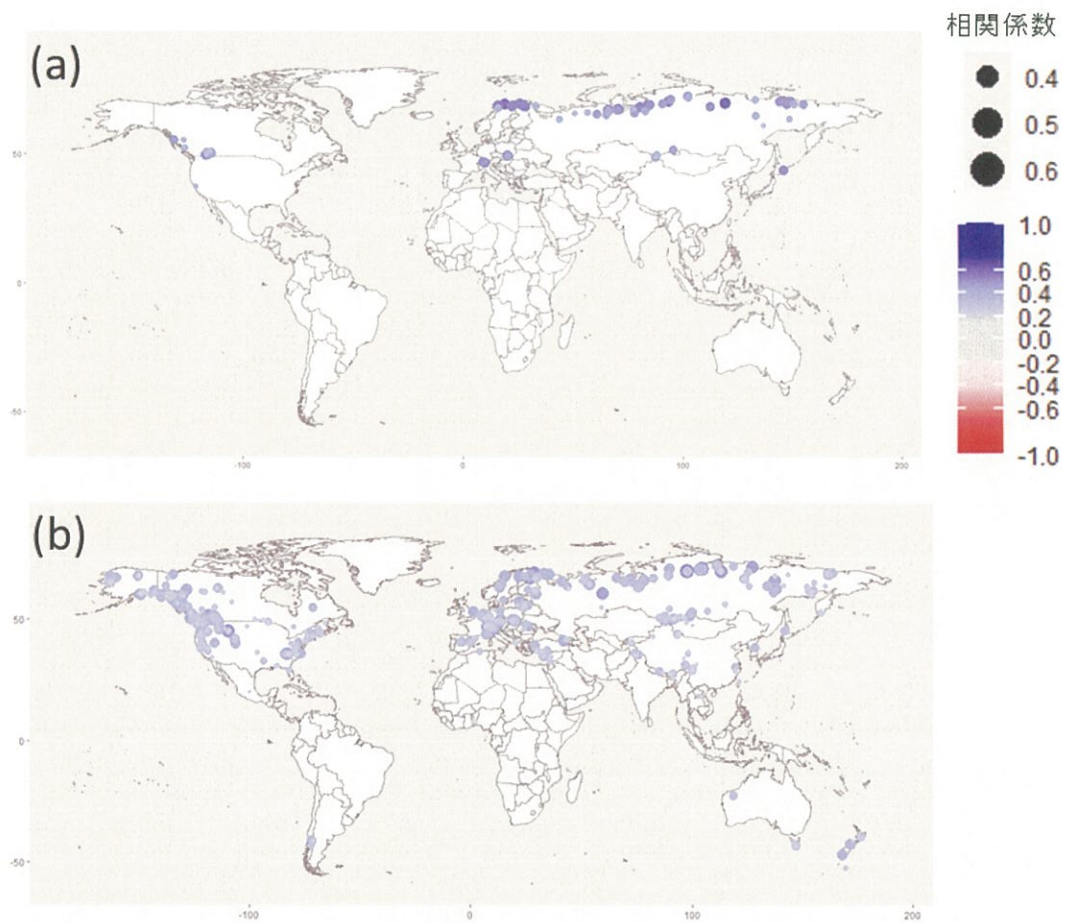


図4. 過去120年間に於いて、樹木年輪幅と気温との間に有意な正の相関関係が観測されたサイトのうち、(a)樹木年輪幅と気温との21年移動相関を計算し、60%以上の期間で有意な正の相関を示したサイト、(b)有意な正の相関を示した期間が60%以下であったサイト。

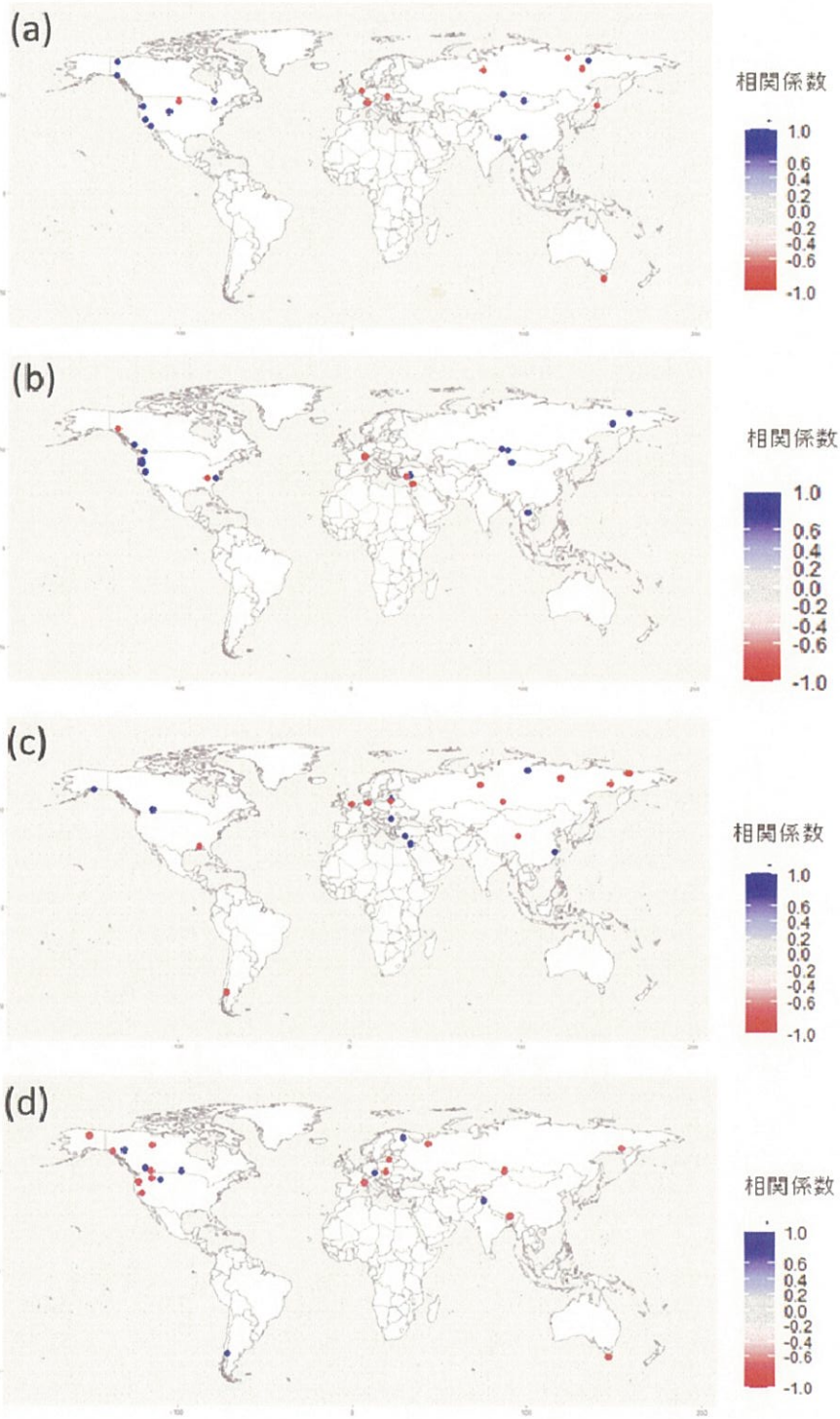


図 5. 樹木年輪幅と気温との 21 年移動相関を計算し、有意な正の相関が 60% 以下の期間でしか観測されなかったサイトにおいて、その 21 年移動相関時期列と、(a) 気温、(b) 降水量、(c) 土壌水分指標 (SPEI)、(d) 雲被覆度の 21 年移動平均時系列での偏相関係数を計算し、その結果、偏相関係数が 0.7 以上 (もしくは -0.7 以下) であったサイトの偏相関係数の分布。

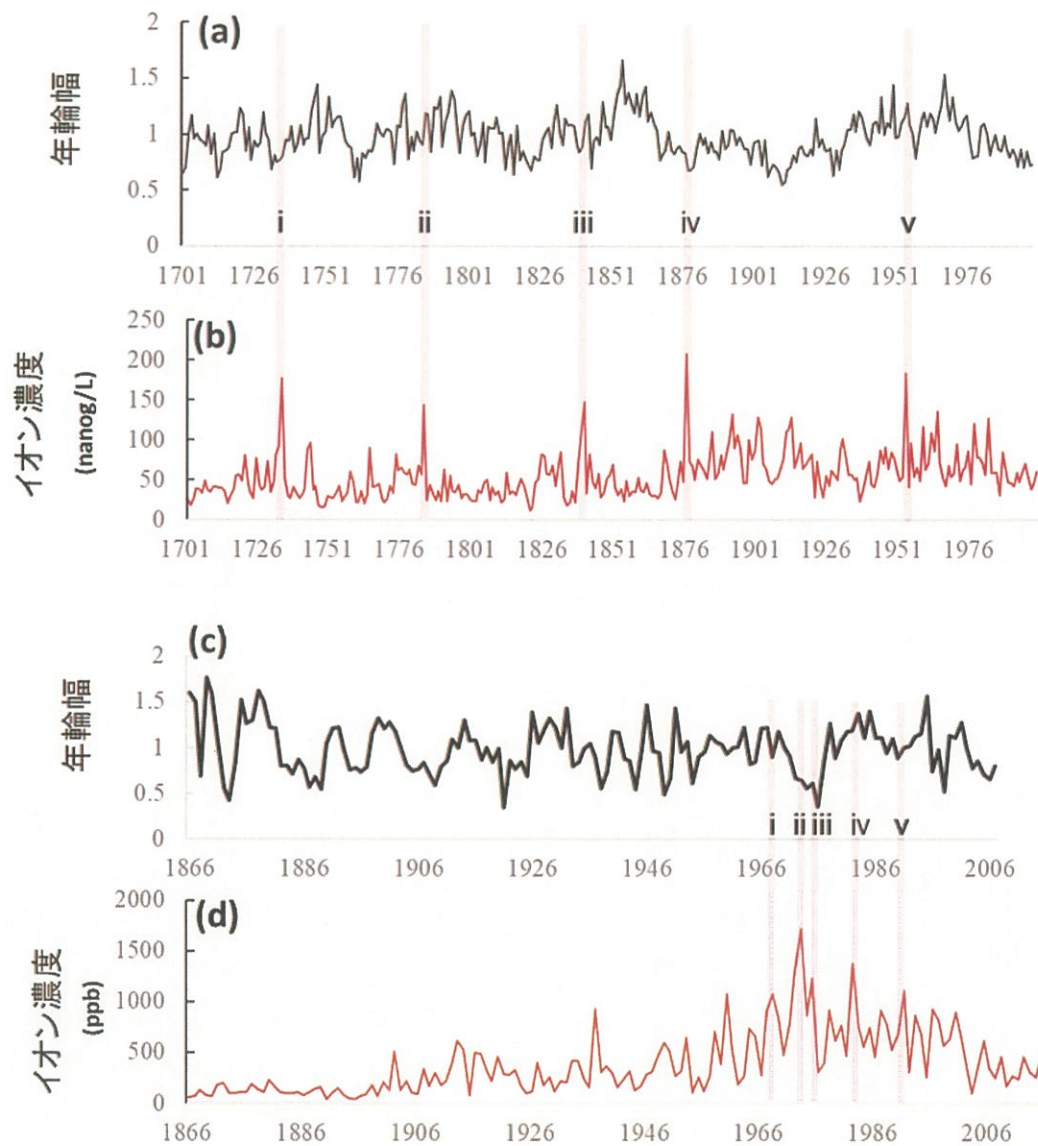


図 6. 樹木年輪幅とアイスコアデータから推定された硫黄酸化物 (SO_4) 濃度。(a-b) Mt. Logan (60.58N, -140.58E, Osterberg et al., 2008, GRL)、(c-d) Colle Gnifetti (c-d: 45.93N, 7.87E, Sigl et al., 2018, The Cryosphere). 硫黄酸化物濃度の上位 5 つのピーク値と樹木年輪幅変動パターンを比較した。

表 1：本申請課題で使用するデータセット

使用データ	データセット名	データ取得元	利用可能期間
樹木年輪幅・密度	International Tree-Ring Data Bank	アメリカ海洋大気庁（NOAA）	過去数十年～数千年
気温・降水量	Climate Research Unit	The KNMI Climate Explorer	1901-2017
土壌水分量指標	SPEI	The KNMI Climate Explorer	1901-2013
雲被覆度	Climate Research Unit	The KNMI Climate Explorer	1901-2018
大気汚染物質濃度:ア イスコアを用いた復元 推定値		アメリカ海洋大気庁（NOAA）	過去数十年～数百年

表 2：樹木年輪幅が気温変動に対して有意な正の相関関係を示すサイトにおいて、どの月の気温が、どの程度選択されているかを示す

月	サイト数
前年6月	12
前年7月	11
前年8月	5
前年9月	8
前年10月	25
前年11月	26
前年12月	10
当年1月	31
当年2月	25
当年3月	25
当年4月	20
当年5月	20
当年6月	157
当年7月	121
当年8月	16
当年9月	6
当年10月	9

表 3：樹木年輪幅が気温変動と時間的に安定な正の相関関係を示すサイトにおいて、どの月の気温が、どの程度選択されているかを示す

月	サイト数
前年10月	1
当年5月	1
当年6月	42
当年7月	27

表 4：樹木年輪幅が気温変動と時間的に不安定な正の相関関係を示すサイトにおいて、どの月の気温が、どの程度選択されているかを示す

月	サイト数
前年6月	12
前年7月	11
前年8月	5
前年9月	8
前年10月	24
前年11月	26
前年12月	10
当年1月	31
当年2月	25
当年3月	25
当年4月	20
当年5月	19
当年6月	115
当年7月	93
当年8月	16
当年9月	6
当年10月	9