

# 生存圈研究

## Sustainable Humanosphere

No. 19

2023年



京都大学 生存圈研究所



# 目次

巻頭言	1
<b>総説</b>	
1. 宇宙の電波が生存圏を変える？	2
	栗田 怜
2. 揺らしてわかる！木造住宅の耐震性能	9
	中川 貴文
3. 繰り返し変形が木造住宅の耐震性能に及ぼす影響	15
	井上 涼
4. 大気の乱れを見る	21
	Hubert Luce
5. 樹木地上部における炭素蓄積量の年変動推定	29
	田邊 智子

## 巻頭言

「生存圏研究 (Sustainable Humanosphere)」は、2006 年に第 1 号が発刊され、その後、毎年度 1 冊ずつ発刊され、今回第 19 号の発刊となりました。生存圏研究所の理念を発信する重要な出版物として継続的に発刊されている雑誌ですが、時代の変化と共に進化し、より効果的で持続可能な手段で情報を発信していくために、今般、発行形態を少しずつ変更させてきました。昨年度からは、発刊以来、継続してきた印刷物（紙の雑誌）の発行を停止し、オンラインでの公開に一元化することにしました。これは、単にペーパーレスによるコスト削減や省エネの推進だけではなく、デジタル技術により得られる読者と著者のメリットを追求していく契機となると考えています。

私事ですが、大学院生時代には、図書館で司書のアルバイトをしていました。毎週のように送られてくる最新の論文雑誌を新刊コーナーに並べ、バックナンバーは合冊して階下の書庫へ。お気に入りの雑誌の最新号を手に取り、当時まだ目新しかったカラーの図表に心躍らせました。千頁を超えるような製本雑誌がびっしり詰まった薄暗い書庫の中から目的の論文を探し出すのには苦勞しました。貸出カードに教授や先輩の名前を見つけて少し嬉しくなりました。他大学の図書館に依頼した論文の複写が郵便で届くのを今か今かと待ち侘びました。自分の書いた論文が掲載された雑誌が届いたときには、真っ先に手に取り、喜びました——時代は変わり、図書館で紙媒体の雑誌を読む機会は大きく減りました。査読を終えた論文は、即座にオンライン公開され、SNS で世界中に拡散されます。カラフルな図表や写真で溢れた数十メガバイトの論文も、タブレットやスマートフォンを使って、いつでも、どこでも、瞬時にダウンロードして、読むことができます。動画コンテンツ、論文の内容を補完する大容量データなど、研究の理解を深め、論文の内容をよりダイナミックに、インタラクティブに伝えるオンラインコンテンツが導入されています。そして、ここ数年、(私が今この巻頭言を書きながらそうしているように) AI によるデータ分析や言語処理が、論文の作成、編集、閲覧、分析に至るまで様々な場面で活用されるようになってきました。ノスタルジックな図書館の雰囲気や紙の温もりは今も大好きですが、デジタル技術の活用は、科学研究のコミュニケーションの発展に必要不可欠です。

生存圏研究所は、2004 年の発足以来 19 年にわたり研究活動を続けてきました。本研究所が推進する生存圏科学は、人間が生きていく上で必須の空間を「生存圏」として捉え、その現状を正確に診断して評価し、生起する様々な問題に対して包括的な視点に立った解決策の提示を目指します。異なるバックグラウンドを持つ研究者たちと協働し、持続発展可能な社会の構築に向け、分野横断的な新しい学問領域の開拓に取り組んでいます。本号に掲載された論文のラインナップも多様性に富む生存圏研究所ならではの感じます。

生存圏研究所では、これからも持続発展可能な社会の構築に向けて取り組んでいきます。その一助として本誌「生存圏研究 (Sustainable Humanosphere)」が広く講読され、研究者のみならず一般の方々にも手に取っていただけるようになることを期待して、巻頭言とさせていただきます。

令和 5 年 11 月 20 日

生存圏研究所 広報委員会

委員長 飛松 裕基

# 宇宙の電波が生存圏を変える？

栗田 怜<sup>1\*</sup>

## Contributions of “waves in space” to Humanosphere

Satoshi Kurita<sup>1\*</sup>

### 概要

我々の住む地球は、分厚い大気に覆われ、固有磁場を有する惑星である。大気は、地表面からの高度が上がるにつれて薄くなり、いわゆる「真空状態」と呼ばれる宇宙空間に達する。実のところ、この宇宙空間は、「プラズマ」と呼ばれる電気を帯びた非常に密度の薄い気体で満たされており、その中をさまざまな電波が伝播している。このプラズマ中を伝播する電波である「プラズマ波動」により、宇宙空間の環境は大きく変動していることがわかっている。近年の研究では、その影響が地球の高層大気まで及ぶことが明らかになってきている。本稿では、プラズマで満たされた宇宙空間に関する基本構造とその変動に加え、高層大気まで影響を及ぼす過程について紹介する。

### 1. はじめに

地球の大気は重力によって地表面に捉えられた中性の気体で構成されており、その密度は高度が上昇するにつれて減少していく。質量の重いものがより重力の影響を受けるために、気体を構成する分子の中で軽いものほどより高い高度まで存在する。また、高度 80km を超えると、大気の一部は太陽光線を浴びて電離し、プラスの電気を帯びたイオンと、マイナスの電気を帯びた電子に分離する。この地球大気が一部電離した領域を電離圏と呼ぶ。図 1 に、高度 700km 程度までにおける、地球大気の構造を示す。我々の普段の生活に密接に関係のある領域はおおむね高度 10km 程度であるが、地球の大気はより高高度まで広がっており、その温度や密度によってさまざまな呼称を持つ。特に、オゾン層は高度 30km 前後にピークを持ち、高度 90km 程度まで広がっている。また、電離圏は高度 70-80km 程度に位置する D 層から、さらに上空では高度域によって E 層・F 層と呼ばれている。国際宇宙ステーションが飛翔する高度は約 400km 程度の電離圏の中であり、地球大気が十分に存在している領域である。一方で、GPS 衛星が周回する高度約 20,000km や、気象衛星が周回している高度約 36,000km では、地球の中性大気の影響はほぼなく、非常に希薄なプラズマが存在するのみである。興味深く、また、注意しなければならないのは、この希薄なプラズマの状態が時々刻々と変化していくことで、時には人工衛星にとって危険な状態にまで達することである。宇宙空間は静かで穏やかな領域ではなく、激しく変化に富んだ領域であり、この変化を理解することを、地上付近の天気予報になぞらえて「宇宙天気予報」と呼び、現在積極的に研究が進められている。

### 2. 地球周辺の宇宙環境

宇宙空間、特に、地球周辺の宇宙環境にはさまざまな種類のプラズマが存在している。これらのプ

---

2023 年 8 月 14 日受理.

<sup>1</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏電磁環境探査分野.

\* E-mail: kurita.satoshi.8x@kyoto-u.ac.jp

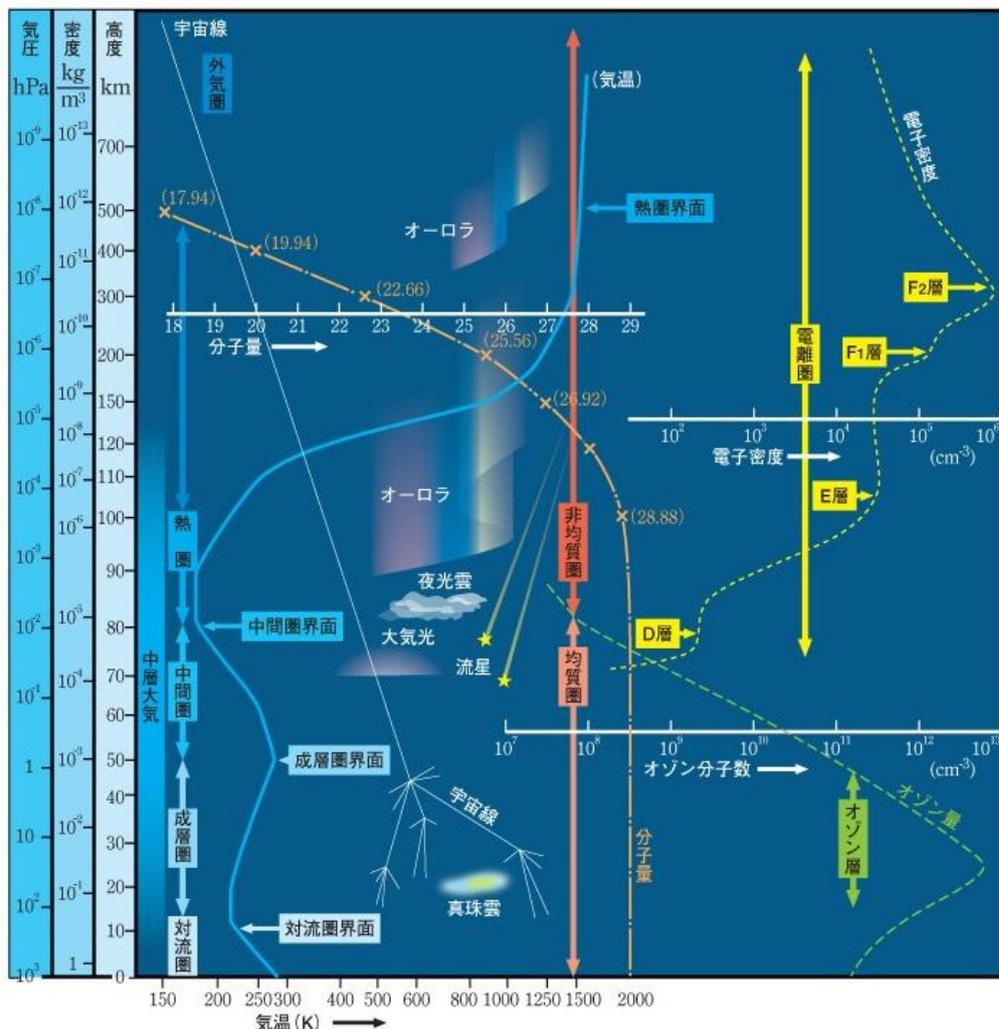


図 1：高度 700km 以下における大気の大気圧・密度・温度・大気平均分子量の変化。右側にはオゾンの高度分布と電離圏の電子密度も示している。<sup>1)</sup>

ラズマは、太陽を起源とするものと、地球の電離圏を起源とするものがある。

太陽は、巨大なプラズマの塊であり、また、巨大な磁石でもある。太陽からは、プラズマと磁場が宇宙空間に向かって絶えず噴出しており、「太陽風」となって地球などの惑星に向かって流れてきている。地球もまた磁石を有しており、太陽風の磁場と相互作用をすることによって、地球の磁場が支配的となる「磁気圏」と呼ばれる空間を形成する(図 2)。

この磁気圏の中には太陽風のプラズマが流入し、地球の磁場に捕捉されて地球の周りを周回している。地球の周りを周回しているプラズマの中で、10-100 キロ電子ボルト程度のエネルギーを持つものを「リングカレント」、1メガ電子ボルト以上のエネルギーを有するものを「放射線帯」と呼ぶ。放射線帯の電子の速さは、ほぼ光の速さに等しく、非常に高いエネルギーを有していることがその名前の由来であり、前述の人工衛星の障害を引き起こす原因となるプラズマ群である。地球の電離圏からは、磁気圏に向かってプラズマが湧き出してきており、磁気圏の中を電離圏プラズマの一部が満たしているような領域が存在する。この領域を「プラズマ圏」と呼び、構成するプラズマのエネルギーは1電子ボルト程度であると考えられている。

図 3 に、プラズマ圏・リングカレント・放射線帯の存在する典型的な領域を示しているが、興味深いのは、エネルギーが異なるプラズマ群が、一緒の領域に存在していることである。例えば、我々の

身の回りで考えてみると、100度の熱湯と0度の冷たい水を同量混ぜると、50度のお湯ができるのに対して、プラズマではそうならない、ということである。

この異なるエネルギーのものが同居できる、という宇宙空間のプラズマの特異な性質は、このプラズマが極端に希薄で、粒子同士の衝突がほぼ起こらないことに起因する。前述のお湯ができる過程において、熱湯はエネルギーが高い水分子、冷たい水はエネルギーが低い水分子で構成されている。これらを混ぜた時、エネルギーが高い水分子がより低い水分子にエネルギーを与え、全体の水分子が同じようなエネルギーを持った状態がお湯である。プラズマの場合、衝突によるエネルギー交換が起こらないために、異なるエネルギーを持つプラズマ群同士が同居できるのである。この粒子同士の衝突のしやすさの目安として、ある粒子が別の粒子に衝突するまでの距離を用いることがある。太陽風のプラズマの場合、この距離はおおよそ太陽-地球間の距離に相当し、ほぼ衝突しない、といえる。このプラズマのことを、「無衝突プラズマ」と呼ぶ。

ここで、太陽風を起源とするリングカレント・放射線帯でエネルギーが大きく異なっていることは興味深い。衝突を経ることなく、エネルギーを交換・獲得する過程が存在することを意味している。

### 3. 宇宙の電波：プラズマ波動

無衝突のプラズマがエネルギーを獲得する過程で重要な役割を持つのが、プラズマ中を伝播する電波である「プラズマ波動」である。我々の生活に関係のある大気中を伝播する電波は電場・磁場を有するが、プラズマ波動の性質は周辺のプラズマ環境に大きく依存する。これは、プラズマが電気を帯びた粒子の集まりであり、プラズマ波動の電場・磁場に影響を与えるためである。逆に、プラズマ波動の持つ電場・磁場が周辺のプラズマ波動に影響を与えることもあり、プラズマとプラズマ波動の間の相互作用により、宇宙環境が変化していく。この相互作用を「波動粒子相互作用」と呼び、地球周辺の宇宙環境の変動を考える上で不可欠な物理メカニズムである。

前述のプラズマ圏の冷たいプラズマ・リングカレントに対応する熱いプラズマは、波動粒子相互作用

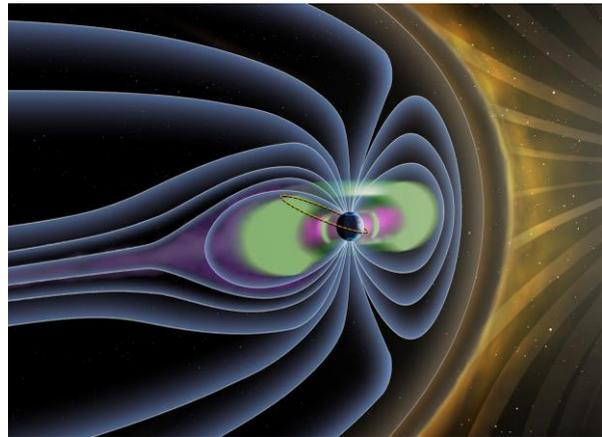


図2: 磁気圏の模式図<sup>2)</sup>。図の右側に太陽があり、太陽から噴き出すプラズマと磁場が地球の固有磁場が相互作用した結果、地球の磁場が支配的な領域である磁気圏が図の左側に向かって広がっている様子を示している。

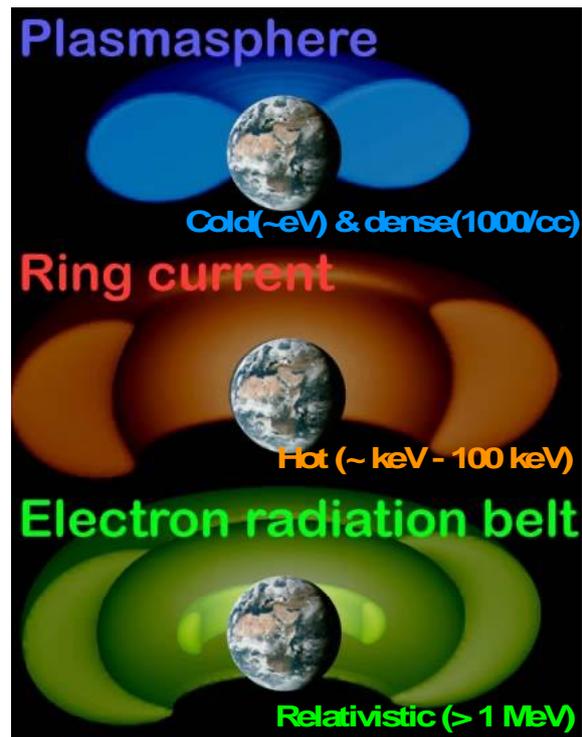


図3: プラズマ圏 (plasmasphere)・リングカレント (ring current)・放射線帯 (radiation belt) の典型的な空間分布<sup>3)</sup>

用を考える上で特に重要な役割を果たす。冷たいプラズマは一般的に最も高い密度を持っており、プラズマ波動から見れば、波動が伝播する際の「媒質」としての役割を持つ。つまり、冷たいプラズマの密度の変化は、磁気圏内におけるプラズマ波動の伝播の仕方に大きな影響を与える。一方で、リングカレントの熱いプラズマは、プラズマ波動の振幅を増大させるためのエネルギー源であると考えられており、熱いプラズマの数が地球周辺の宇宙空間において増大し、不安定となると、プラズマ波動が現れる。熱いプラズマによって生まれたプラズマ波動が冷たいプラズマを媒質として伝わり、放射線帯に対応するエネルギー帯の電子を生み出す、というメカニズムが現在では提唱されており、異なるエネルギー帯のプラズマが、プラズマ波動を介して結合するという「エネルギー間階層構造」が形成されていると言われている。

数あるプラズマ波動の中でも、ホイッスラーモード・コーラス波動と呼ばれる電磁波が、地球周辺の宇宙環境では重要な役割を持っていると考えられている。このプラズマ波動は、電子のサイクロトロン周波数よりも低い周波数帯域に存在し、地球磁気圏においては、人間の可聴域の周波数帯に対応する。科学衛星によって取得されたコーラス波動の信号を音声に変換すると、鳥の囀りのように聞こえる事が、このプラズマ波動の名前の由来である。我が国の科学衛星である「あらせ」衛星で観測されたコーラス波動の事例を図4に示す。コーラス波動は、短い時間に周波数の変化を繰り返す電磁波であることが大きな特徴である。

コーラス波動の持つ重要な特徴として、磁気圏に存在する幅広いエネルギー帯の電子と波動粒子相互作用によってエネルギーの交換を行うことができることが挙げられる。放射線帯は、リングカレントの電子の一部がコーラス波動からエネルギーを受け取り、メガ電子ボルトまで加速されているという説が現在では有力視されている。一方で、コーラス波動は、リングカレントや放射線帯電子が地球磁場に沿って跳ね返り運動をしている軌道を乱し、その結果、地球の大気へと降り込む過程を引き起こすことも知られている(図5)。これは、波動粒子相互作用が宇宙空間のプラズマの変動だけでなく、大気への降り込みを引き起こすことで、宇宙の変動と地球大気の変動を紐づけていることを示唆している。

#### 4. 高エネルギー電子大気降り込みと高層大気変動現象

コーラス波動によって大気に降り込んだ電子は、地球の高層大気へと吸収されることで磁気圏からは消滅することになる。その一方で、大気へと降り込んだ電子は、自身の持つエネルギーを高層大気を構成する分子・イオンに与え、大気の電離や加熱を引き起こす。分子・イオンは、降り込み電子からえた余剰なエネルギーを光として放出するが、この光がオーロラに対応する。オーロラは、宇宙から地球大気に向かって高いエネルギーを持つプラズマが到来していることを示しているのである。

コーラスなどのプラズマ波動との波動粒子相互作用の結果として発光しているオーロラは、いわゆるカーテン状のオーロラではなく、ぼんやりとしたオーロラに対応する。このオーロラを「ディフューズオーロラ」と呼んでいる。ディフューズオーロラにも種類があり、特に、周期的にオーロラの強度が変化するものは「脈動オーロラ」と呼ばれている。脈動オーロラは、その発光のON/OFFは、コーラス波動のON/OFFに対応するという説が提案されてきた。あらせ衛星と、地上に展開されたオーロラ観測用カメラ群の協調観測により、この説が実証されている。

脈動オーロラを光らせるような電子のエネルギーは、概ね数千電子ボルトから数十キロ電子ボルト

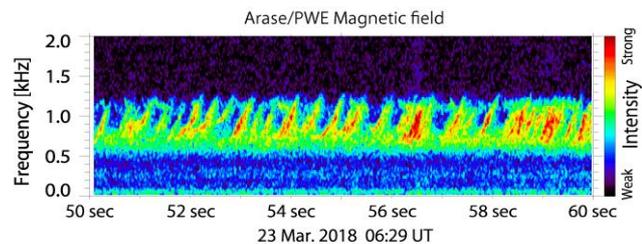


図4：あらせ衛星に搭載された電波観測装置で受信されたコーラス波動の1例<sup>4)</sup>。横軸が時間を、縦軸は電波の周波数を示しており、電波強度が色で表されている。

ト程度であることが知られている。図 6 は、磁気圏から降り込んだ電子が、大気分子を電離させる効率を示しており、電子が到達できる最低高度は、その電子が最も電離を引き起こす高度に対応する。脈動オーロラを引き起こす電子は、図 6 から、高度 80km 付近まで侵入し、地球大気 of 電離・加熱を引き起こしていると考えられている。近年の研究によれば、コーラス波動は脈動オーロラを引き起こす電子に加えて、数百キロ電子ボルトから 1 メガ電子ボルトを超えるような、放射線帯に存在する電子も降り込ませることが明らかになっている。これらのエネルギーの非常に高い電子は、脈動オーロラの電子よりもより低い高度まで到達し、大気の電離・加熱を引き起こすと考えられる。脈動オーロラは一般的に見られるオーロラであるため、脈動オーロラに伴う大気の電離・加熱現象は頻繁に発生し、地球大気の組成変化に大きな影響を与えると示唆されており、数値実験などにおいて、オゾンを破壊するとされる窒素酸化物の量の変化が引き起こされる可能性が示されてきている。

この高エネルギー電子の大気降り込みが引き起こす電離・加熱現象による影響は近年大きな注目を浴びており、研究が盛んに進められ始めている。オーロラの活動の活発化に伴い、窒素酸化物の量が変化する現象が知られていたが、オーロラに伴う降下電子のみを考慮したモデルでは説明することができず<sup>7)</sup>(図 7)、モデルと観測結果の差異が明らかではなかった。しかしながら、このオーロラに伴う高エネルギー電子の降り込みを組み込むことが、観測結果とモデルの差異を埋める要因となりうるため、振り込み電子のエネルギー分布やその量を定量的に調査する試みが進められている。

#### 4. おわりに

以上に述べたように、宇宙空間で自然に発生する電波のプラズマ波動は、波動粒子相互作用を通して、地球の高層大気へ高エネルギー電子を降り込ませる。この過程により、地球の大気では電離・加熱が起こり、大気中の窒素酸化物やオゾンの量に変化が起こる。この大気中の成分の変動によって、地球の大気が太陽光からのエネルギーを吸収する量に変化が起こり、大気 of 温度構造に影響を及ぼす可能性が提案されている。大気 of 温度構造に変化が起きると、大気 of 構造が安定となる状態にも変化が起きる可能性がある。もしかすると、

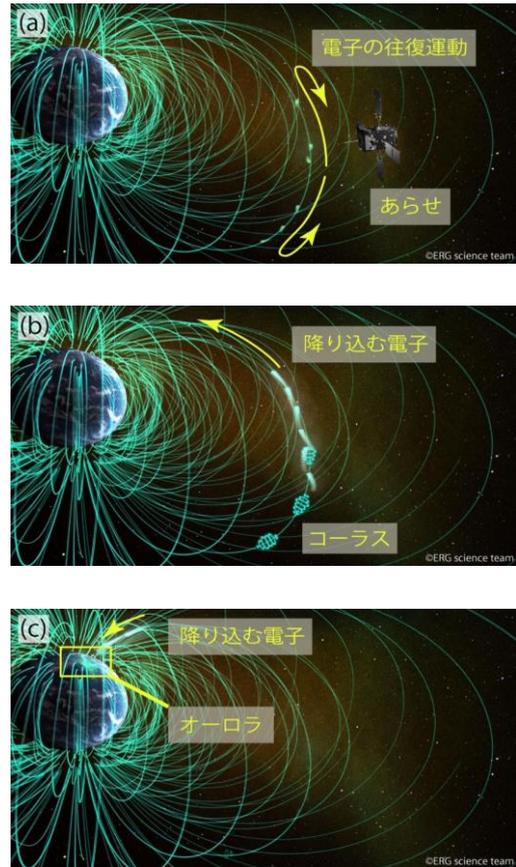


図 5 : コーラス波動との相互作用により、磁気圏内の電子が消失する過程の模式図<sup>5)</sup>

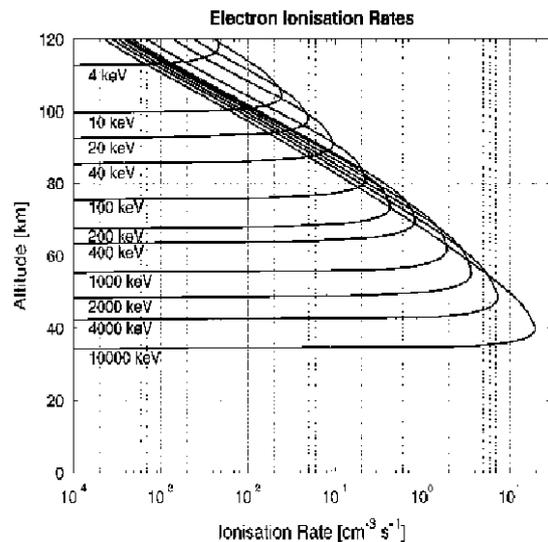


図 6 : 地球大気 of 電離を引き起こす効率を、高度と降り込み電子 of エネルギーごとに計算した理論値<sup>6)</sup>

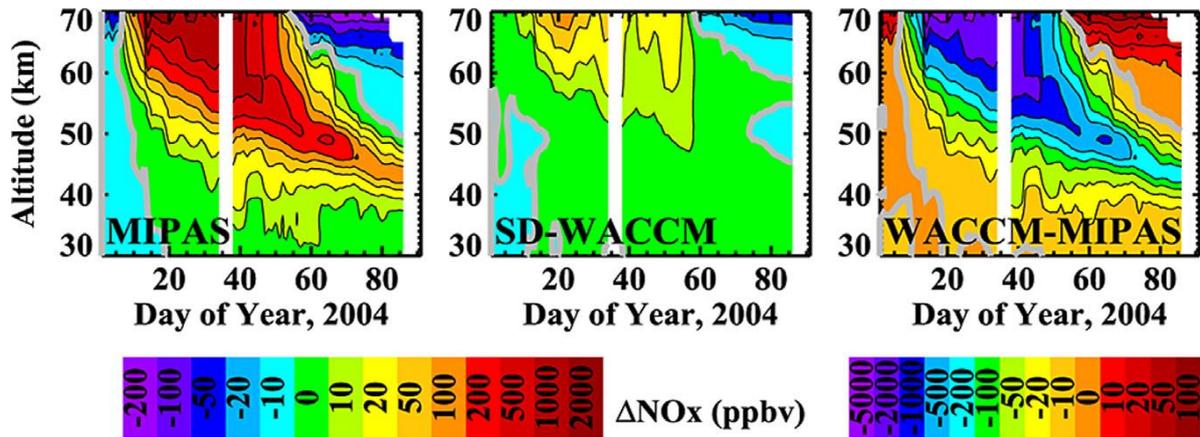


図 7 : 左から順に、MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmosphere Sounding) で観測された窒素酸化物の 2004 年 1 月 1 日に対する変化量、SD-WACCM (Specified Dynamics version of Whole Atmosphere Community Climate Model) と呼ばれるモデルから計算された窒素酸化物の変化量、MIPAS の観測結果と SD-WACCM の数値計算結果の差分<sup>7)</sup>

長い地球の大気進化の過程で、宇宙からの高エネルギー粒子降り込みによる電離・加熱が、過去に重要な役割を果たしていた時期があったかもしれない。一見、宇宙と地球の大気は無関係に見えるものの、宇宙で起きた現象が、大気に大きな影響を及ぼす、かもしれないということである。

上記で可能性についてのみ言及しているが、これは、高エネルギー電子による降り込みの量が不確定な部分が多くあり、実際にどれほど大気の温度構造などに影響を与えているかが十分に把握できていないためである。高エネルギー電子の降り込みの量は、宇宙空間に存在する量と、プラズマ波動の電波の強さなどに関係があり、宇宙環境を丹念に探査する必要がある。降り込んでくる量を定量的に、直接評価することも重要であろう。

現在、人類の活動は宇宙へと拡大していき、宇宙圏を理解することが生存圏の科学として重要視されていく一方、宇宙と大気が結合しており、影響を与えているという側面にも注目し、生存圏全体を理解していく側面も重要である。

## 参考文献

- 1) 理科年表オフィシャルサイト : [https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo\\_006.html](https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo_006.html)
- 2) 宇宙科学研究所、ジオスペース (地球周辺の宇宙空間) と太陽風の相互作用、想像図 : <https://www.isas.jaxa.jp/gallery/feature/erg/02.html>
- 3) Ebihara, Y. and Y. Miyoshi, Dynamic Inner Magnetosphere: A Tutorial and Recent Advances, “The Dynamic Magnetosphere”, W. Liu and M. Fujimoto, IAGA Special Sopron Book Series Vol. 3, p145-187, 2011.
- 4) ジオスペースが奏でる音 : <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/outreach/sound.shtml.ja>
- 5) 宇宙科学最前線 : 明滅するオーロラの期限に光を照らす <https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/190605.html>
- 6) Turunen, E., et al., Impact of different precipitation energies on NO<sub>x</sub> generation during geomagnetic storms, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **71**, 1176–1189, doi:10.1016/j.jastp.2008.07.005.
- 7) Marshall et al., The AEPEX mission: Imaging energetic particle precipitation in the atmosphere through its bremsstrahlung X-ray signatures, *Advances in Space Research*, **66**, 1, 66-82, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.003>.

## 著者プロフィール



栗田 怜 (Kurita Satoshi)

<略歴> 2014年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了(博士(理学)) / 同年名古屋大学太陽地球環境研究所 学振PD / 2017年名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究員 / 2019年名古屋大学宇宙地球環境研究所 ERGサイエンスセンター特任助教 / 2020年京都大学存圏研究所准教授、現在に至る。<研究テーマと抱負> 飛翔体による宇宙電磁環境探査、宇宙環境の地球超高層大気への影響に関する研究。<趣味など> ウェイトトレーニング、ドライブ、バレーボールなどのスポーツ観戦

# 揺らしてわかる！木造住宅の耐震性能

中川 貴文<sup>1\*</sup>

## Seismic performance of wooden houses clarified by shaking table tests and numerical simulations

Takafumi Nakagawa<sup>1\*</sup>

### 概要

「最近の木造住宅はどの程度の地震に耐えられるか？」家をお持ちの方や購入を検討されている方には非常に興味があるテーマだと思います。阪神淡路大震災以降、実物大の木造住宅を巨大な実験装置の上に再現して揺らし、直接耐震性能を確認する「振動台実験」が数多く行われてきました。また、実大振動台実験をコンピュータ上で再現するシミュレーション手法が開発され、住宅会社等での導入が進み、揺らして耐震性能を確認することが身近になってきています。木造住宅の耐震性能確保の仕組みと、生存圏研究所が無償公開している耐震シミュレーションソフトについて解説します。

### 1. 地震と木造住宅

日本は3つのプレートの境界に位置していることもあり、古くから何度も地震被害を受けていた歴史がある。写真1は建物の被害が大きかった代表的な地震であるが、どの地震でも耐震性の低い木造住宅が倒壊し多くの命が失われた。記憶にあたらしい所では1995年兵庫県南部地震での死者は6000人を超え、多くが木造住宅の倒壊による圧死と言われている。このような歴史の中で、1950年の福井地震の頃から木造住宅の地震被害の調査が学者によって行われた。この調査から同じ重量だとすると壁の多い建物ほど被害が少ないという傾向が出ている。すなわち壁を入れると耐震性が向上するということである。

日本の耐震基準である建築基準法では、この壁を「耐力壁」と呼んでいる。耐力壁の量が多いほど耐震性が高い建物ということになり、耐震基準では、安全性確保のための耐力壁の最低の量、必要壁量が決められている。必要壁量は地震被害調査の結果を受けて度々見直され、1981年に改正された建築基準法（新耐震基準と呼ばれる）の必要壁量が現在も使われている。2000年には木材を連結する「接合部」の基準や基礎の基準も見直され、現在に至っている。



1923 関東大震災



1948 福井地震



1995 阪神淡路大震災



2016 熊本地震

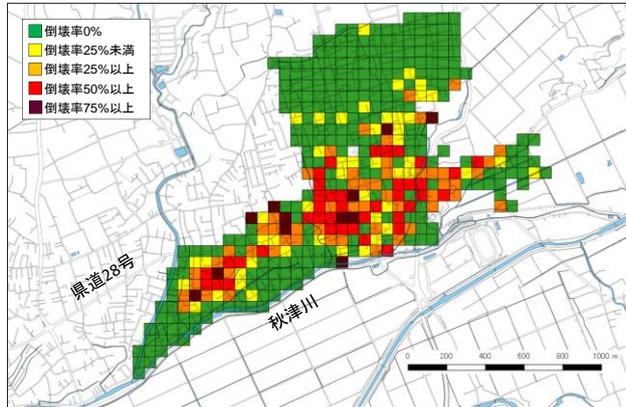
写真1 木造住宅の被害が大きかった地震

2023年9月14日受理

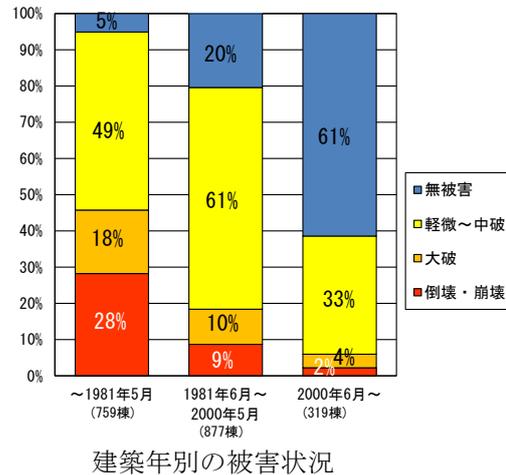
<sup>1</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生活圏木質構造科学分野

\* E-mail: nakagawa@rish.kyoto-u.ac.jp

2016年熊本地震では益城町中心部で観測史上初、震度7が2度記録された。旧耐震の木造住宅の多くが倒壊し、新耐震基準で建てられたの木造住宅でも100棟以上の倒壊が確認されている。しかし、2000年以降に建設された木造住宅の倒壊の割合は2%程度であったという調査結果がある(図1)。記録された地震動は相当大きいものであったので、壁量計算が巨大地震でも倒壊しないことを規定する役割を十分果たしたと言える。



益城町中心部での倒壊率の分布



建築年別の被害状況

図1 2016年熊本地震における木造住宅の被害<sup>1)</sup>

## 2. 振動台実験 ～究極の耐震性能検証法～

「最近の木造住宅はどの程度の地震に耐えられるか？」そのような疑問に直接回答できる方法がある。人工的に地震動を発生させることができる実験装置「振動台」である。振動台では巨大な鉄のテーブルを何本もの油圧ジャッキで動かし、過去に発生した地震の揺れを再現することができる。木造住宅は鉄筋コンクリート造などに比べると重量が軽いので、振動台実験の上に実物大で建設して、大きな揺れを発生させることができる。日本には阪神淡路大震災以降、多くの振動台実験施設が建造されてきたが、震災から10年後の2005年に世界最大の振動台「E-ディフェンス」<sup>1)</sup>が建造された。E-ディフェンスは世界中で発生した地震の波形を再現して、建物が完全に倒壊するまで揺らすことができる。



地震動入力前



地震動入力後

写真2 実大振動台実験の様子(E-ディフェンスにて撮影)

### 3. 倒壊しない住宅から住み続けられる住宅へ

E-ディフェンスなどの振動台を活用して、木造住宅の耐震性検証が行われ、性能向上が図られてきた。図1ではその成果が現在の木造住宅に反映されているともみられるが、熊本地震の2年後に同実施された調査結果<sup>2)</sup>(図2)では2000年以降に建設された木造住宅の約20%が更地になっているか、立て替えられていることが分かった。二つの調査結果が示していることは、倒壊しない耐震性能は壁量計算で担保できたが、住み続けることができないほどダメージを受けた木造住宅が多く存在していたということである。

熊本地震で記録されたような地震動でも住み続けられる耐震性能とはどのようなものか? 振動台で揺らせば答えが明確にわかるが、1回揺らすだけでも膨大な費用がかかってしまうし、建物を建てる度に揺らすことは不可能である。

こんな疑問に明確に回答できる解決策がある。京都大学生存圏研究所がWEB上で無償公開している耐震シミュレーションソフト wallstat (ウォールスタット) である。

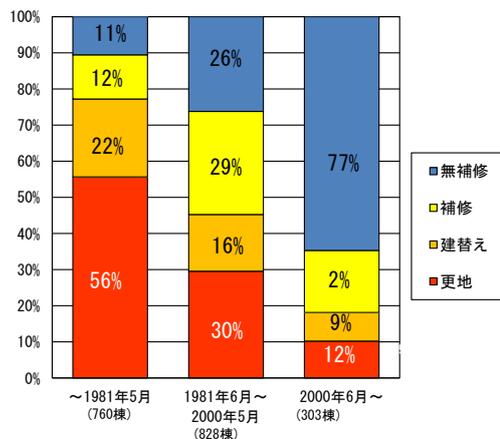


図2 熊本地震から2年後の状況<sup>3)</sup>

### 4. 耐震シミュレーションソフト「wallstat」

このソフトでは建てる前の木造住宅や、耐震改修を検討している既存木造住宅に振動台実験と同じようにあらゆる地震動を入れて揺らして、計算結果をアニメーションで見ることができる。耐震性が足りないと、振動台と同じくリアルに倒壊する。図3に示した通り動画から建物の弱点等も知ることができる。

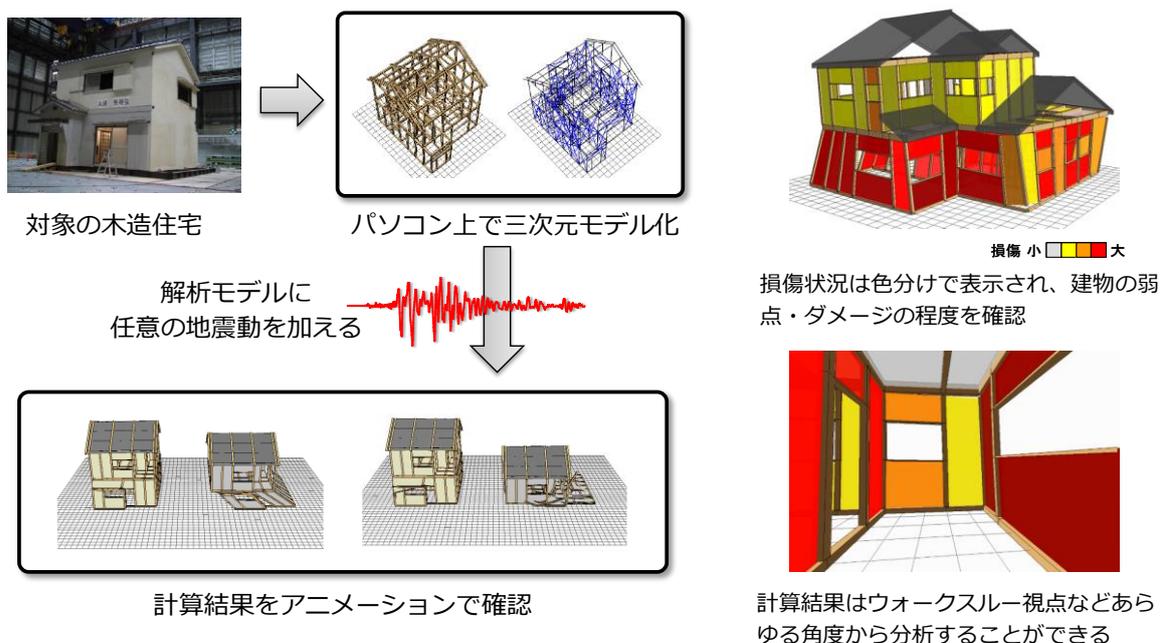


図3 耐震シミュレーションソフト「ウォールスタット」の概要

超高層ビルと同じ「時刻歴応答解析」と呼ばれる高度な計算法を行うソフトであるが、従来の計算手法では困難だった「完全に倒壊する」までを独自の計算理論<sup>3)</sup>で可能となっている。

wallstat は先ほど紹介した実大振動台実験との比較・検証を重ねて改良を続けてきたため、実験に裏付けられたリアルな計算が可能となっている。小規模な住宅会社や工務店にはコスト面で実現が難しかった実大振動台実験がこのソフトにより身近になってきている。耐震性能の目に見える証明につながるため、wallstat を実務で導入する取り組みが工務店・設計事務所等で増えつつある。wallstat はウィンドウズのソフトで簡単な操作でモデル化することができ、図面があれば画面を見ながら木造住宅の解析モデルを作成し、変形の大きさ、損傷状況、倒壊の有無等の解析結果をアニメーションによって確認することができる。数値解析の専門知識が無くても実際に目で見て地震時の木造住宅の応答挙動や、耐震性能を確認できるため、高校生や大学生の教育用ツールとしても使われている。wallstat は誰でも無料でダウンロード可能で、youtube で操作方法を詳しく学ぶこともできるので、興味のある方はぜひ使っていただきたい。

ダウンロード URL : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~nakagawa>  
 wallstat の使い方 : <https://www.youtube.com/c/wallstatchannel>



図 4 は過去に行われた実大振動台実験の映像と、wallstat による計算結果を比較した動画のスナップショットである。振動台実験は同じ平面・立面プランで壁の強さや接合部の強さを変えた試験体で、耐震設計法の検証のために実施されたものである。振動台実験で確認された倒壊過程が wallstat のシミュレーションによって精度よく再現されていることがわかる。図 5 は 5 階建ての CLT パネル工法（木材を板状に加工した材料で構成する構法）と五重塔の解析モデルであるが、振動台実験で揺らすことが難しい建物もシミュレーションでは揺らしてみることが実現する。

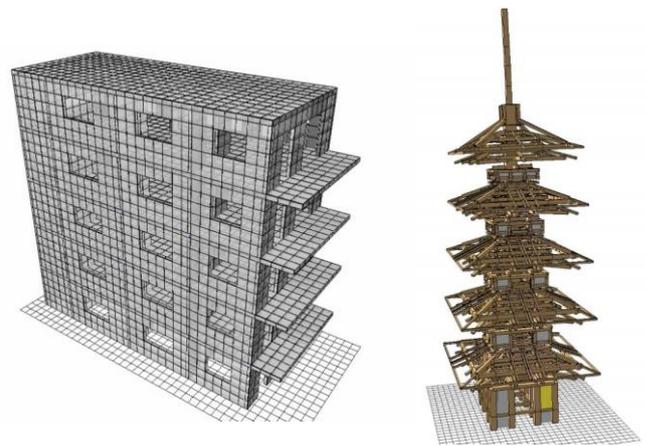


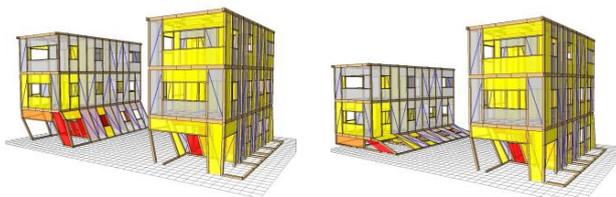
図 5 wallstat の解析モデル（CLT パネル工法、五重塔）



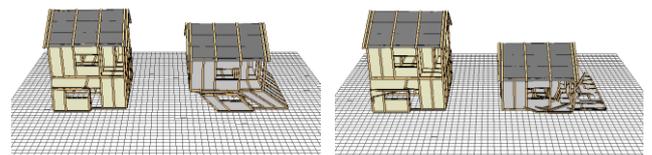
3 階建て実大木造住宅の振動台実験



2 階建て実大木造住宅の振動台実験



wallstat の計算結果



wallstat の計算結果

図 4 実大振動台実験と wallstat の計算結果の比較映像

## 5. 耐震性能の見える化の取り組み

wallstat は 2010 年からインターネットで公開を開始したが、現在（2022 年）まで、図 6 に示した通り、5 万件以上のダウンロードを記録している。これまでユーザーの要望を取り入れて、バージョンアップを重ねてきたが、実務者の利用が急速に増えたのが、CAD（キャド）連携機能の追加である。木造住宅を設計する際には、建築士がパソコンを活用して三次元的な図面を作成する。その設計のためのソフトを CAD（Computer Aided Design）ソフトと呼ぶが、wallstat は日本で販売されているほとんどの CAD ソフトとデータ連携する機能を持っていて、建築士が作成した図面情報があれば、ボタンひとつで簡単にシミュレーション用の解析モデルを作成することができる。特に木造住宅を構成する木材を建設時に機会加工（プレカット）するための設計図はプレカット図面と呼ばれているが、現在、木造軸組構法のプレカットの利用率が 90%を超えていて、ほとんどの木造住宅が生産時の情報を活用して wallstat のシミュレーションを簡単に実行できる状況にある。

著者が代表である一般社団法人耐震性能見える化協会<sup>4)</sup>では、wallstat の技術者の認定を行っている（2022 年の登録者数：470 人）。住宅の購入を検討している消費者が、耐震シミュレーションで購入予定の自宅を揺らしてみたいと思えば、近所の認定技術者に相談できる体制も整いつつある。住宅会社の中には、施工する木造住宅全棟を事前に wallstat で揺らしてみしてから耐震性能をチェックして販売する会社も増えてきている。今後もこのような取り組みが増えて、耐震性能のさらなる向上につながることに期待したい。

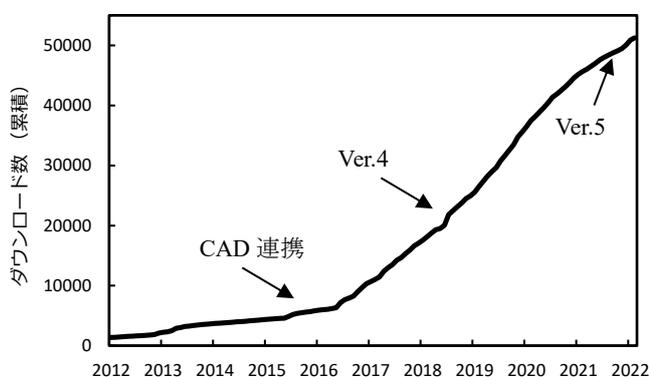


図 6 wallstat のダウンロード数の推移

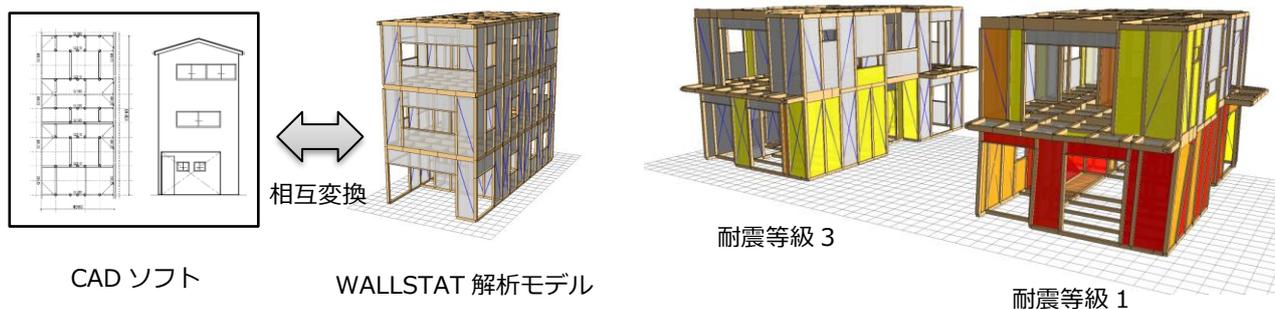


図 7 耐震等級の比較シミュレーション

### 3. おわりに

壁量計算では倒壊しない基準を定めているが、巨大地震でも住み続けられる性能までは規定していない。熊本地震で記録されたような地震動でも住み続けられる耐震性能とはどのようなものか？ wallstat を使えば明確に回答できる。wallstat を用いた耐震基準+アルファの見える化が普及し、耐震等級の取得や施主が求める耐震性能の実現に繋がることを目指して、今後も研究開発と普及活動を継続していきたい。

### 参考文献

- 1) 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会報告書
- 2) 角田ほか「2016 年熊本地震から2 年経過した益城町市街地の被災建物の現況調査」日本地震工学会論文, 2019, 第19巻1号, pp.21-33
- 3) 中川貴文：「大地震動時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発」建築研究資料, 第128号
- 4) 一般社団法人耐震性能見える化協会HP <https://www.wallstat.jp/>

### 著者プロフィール



中川 貴文 (Takafumi Nakagawa)

<略歴> 1998 年東京大学農学部卒業／2003 年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了／民間企業を経て 2005 年～国土交通省国土技術政策総合研究所・(国研) 建築研究所／2018 年～現在 京都大学生存圏研究所准教授／(一社) 耐震性能見える化協会 代表理事／博士(農学)・博士(工学) <主な研究> 巨大地震の際の被害軽減を目的とした木造の耐震研究、耐震化推進に資する教育・普及活動

# 繰り返し変形が木造住宅の耐震性能に及ぼす影響

井上 涼<sup>1\*</sup>

## Effect of repetitive deformations on seismic performance of wooden houses

Ryo Inoue<sup>1\*</sup>

### 概要

地球環境や住民の資産維持などの観点から木造住宅についても長寿命化が求められている。木造住宅は、使用期間内において蟻害や腐朽といった生物劣化や繰り返し変形を経験することによって耐震性能が低下する可能性がある。後者について、大地震を複数回にわたって受ける場合や大地震を受けた住宅がその後に余震を受ける場合を想定した、比較的大きな変形の繰り返しを対象とした劣化挙動についての検討は進められており、地震応答解析に用いるための耐力要素の復元力特性なども提案されているところである。本稿では、このような繰り返し変形による木造住宅の耐震性能劣化に着目した既往の研究について紹介しつつ、筆者が取り組んだ、通常では弾性域とみなされるような小変形の繰り返しが木造住宅の耐震性能や大地震時の応答変形に影響するか否かを検討した内容を紹介する。

### 1. はじめに

近年、環境問題に対する関心の高まりとともに、炭素固定化などを目的として木材の積極的な利用を目指した取り組みが進められている。建築分野においては、特に木材を構造材として用いた建築物の建設が促進されている。一方で、木造住宅についても地球環境および森林環境、さらには住民の資産維持などの観点から、2009年に長期優良住宅普及促進法が施行されるなど、長寿命化が求められている状況にある。木造住宅を長期的に使用するためには、これから建てられる新築住宅の高耐震化はもちろんのこと、既存住宅についても適切な改修・修繕をおこなっていく必要がある。

一般的に耐震性能は新築時の性能をもって議論されることが多い。しかし、木造住宅は、使用期間内に腐朽や蟻害といった生物劣化、または繰り返し変形することなどによって耐震性能が低下する可能性がある。前者について、耐力要素に生物劣化が生じた場合には急激に耐震性能が低下すると考えられる。そこで、生物劣化を受けた既存木造住宅の残存耐震性能の正確な評価を目指して、強制的に劣化処理を施した耐力要素について性能確認実験を実施し、得られた実験データをデータベース化するなど<sup>例え</sup>ば、様々な取り組みが進められているところである。後者は、使用期間内に複数回受ける可能性がある地震によるものである。繰り返し変形を経験することで、新築時と比較して耐力や剛性が低下することが考えられる。実際に2016年熊本地震の際には、2度にわたる震度7の大地震に加え、複数回の余震が観測された。表1は、各県庁所在地について、過去30年における震度ごとの地震発生回数を気象庁震度データベース<sup>2)</sup>より調べ、最大数を記録した県庁所在地のデータを震度ごとに示し

---

2023年10月5日受理。

<sup>1</sup>〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1 熊本大学大学院 先端科学研究部

\* E-mail: rinoue@arch.kumamoto-u.ac.jp

たものである。例えば、震度 3 は茨城県水戸市、震度 5 強は岩手県盛岡市での発生回数である。震度 4 や 5 弱といった地震が各地でしばしば発生しているほか、地域によっては震度 3 程度の小地震が多発している状況にある。したがって、このような複数回の地震による繰り返し変形が木造住宅の耐震性能に与える影響を把握しておくことは重要であると考ええる。

繰り返し変形による劣化現象は一般的に疲労現象と呼ばれており、建築分野では特に鋼構造分野で研究が進んでいる。これは鋼材の疲労現象が耐震性能へ与える影響が大きいためである。一方で木造住宅においても、面材耐力壁や筋かい耐力壁といった主要な耐力要素について、繰り返し変形による劣化傾向の把握が進められている。本稿では、木造住宅の耐力要素や耐震性能に繰り返し変形が与える影響について、既往の文献と併せて著者のこれまでの研究として、中小地震を想定した小変形の繰り返しに着目した検討内容を紹介する。

表 1 過去 30 年間に於ける各震度に対応する地震の最大発生回数

震度階	震度 2	震度 3	震度 4	震度 5 弱	震度 5 強
発生回数	679	335	81	7	3

## 2. 大変形の繰り返しによる影響

本章では、繰り返し変形による劣化傾向について報告している既往文献をいくつか簡単に紹介する。

木造住宅の主な耐力要素は耐力壁であり、近年は合板耐力壁などの面材壁と筋かい壁の 2 種が主流となっている。特に面材壁は釘接合部の性能が重要となるため、耐力壁のみならず、釘接合部についても繰り返し変形による劣化挙動について検討されている。釘接合部は地震による正負交番繰り返し荷重を受けた場合に低サイクル疲労を引き起こすことが知られており、特に繰り返される変形が大きい場合には、耐力や靱性が低下することが報告されている。釘接合部の劣化現象について報告した例として、例えば、宮澤<sup>3)</sup>は、釘接合部の風や地震時の挙動を明らかとすることを目的として数百から数千の繰り返し荷重下での耐力低下について実験的に検証しており、振幅 1 mm 以上では釘の破断を伴う疲労破壊の可能性を報告している。徳田<sup>4)</sup>は、主材をベイツガ製材、側材をベイツガ合板とした試験体の実験結果より、実用上の疲労限度を耐力比にして約 30% と提案している。澤田ら<sup>5)</sup>は、CN50 釘を用いた合板とホワイトウツドの接合部について 0.5 mm から 5.0 mm までの変形を 10 回ずつ繰り返した実験結果を報告し、ピーク荷重の低下傾向を確認している。平井ら<sup>6)</sup>は、CN50 釘を用いたラーチ合板とトドマツの接合部実験より、動的載荷の場合は釘の低サイクル疲労が起こる可能性を示している。

また、耐力壁についての先行研究として例えば次のようなものがある。大野ら<sup>7)</sup>や梶川ら<sup>8)</sup>は、筋かい耐力壁および合板耐力壁について、定振幅を最大 10 回繰り返す実験をおこない、その結果を報告している。下村ら<sup>9)</sup>は、木造住宅の耐風性能を評価するための復元力特性を検討することを目的とした繰り返し加力実験を実施しており、荷重およびエネルギー吸収性能が繰り返し回数の増加とともに低下することを報告している。村地ら<sup>10)</sup>は、1/200 rad 以上の変形を対象としたランダム載荷により耐力の劣化傾向を考察し、疲労寿命について論じている。さらに、五十田ら<sup>11)</sup>は、枠組壁工法仕様の石膏ボード壁を対象とし、1/120 rad 以上の変形の繰り返しによる劣化傾向を確認し、合板壁などと比較して荷重低下が大きいことを報告している。山崎ら<sup>12)</sup>は、筋かいおよび合板耐力壁を対象とし、一連の研究において大変形域での繰り返し載荷による耐力の劣化傾向を報告している。具体的に、終局変位の 1/2 倍以上の繰り返しによって、筋かい壁では最大耐力が低下、合板壁の場合にはほとんど耐力がなくなったこと、繰り返し回数の増加に伴う荷重低下は一定値に収束する傾向がみられ、変形が大きいほど収束値が小さくなることなどを報告している。また、繰り返し変形に対する劣化を抑制することを目的に、制振素材を耐力壁に組み込む試みもいくつかなされている(例えば<sup>13)</sup>)。

これらは主に、複数回の大地震を受ける場合や大地震を受けた住宅がその後の余震を受ける場合を

想定した地震時挙動の追跡を目的としたものであり、降伏変位を超えるような変形の繰り返しによる劣化特性に着目して実施されたものが多い。繰り返し回数が増すごとにピーク荷重は低下していくが、特に最大荷重を迎えるような大変形が繰り返される場合には目立った耐力低下がみられ、釘の疲労破壊が発生するようである。なお、このような比較的大きな変形の繰り返しについては、地震応答解析に用いるための劣化を考慮した復元力特性<sup>14)</sup>なども提案されているところである。

### 3. 小変形の繰り返しによる影響

一方で筆者らは、降伏変位以下の小変形の繰り返しに着目した。大地震と比較して稀地震以下の中小地震の発生頻度は高く、変形は小さくとも繰り返される回数は多くなる。実際に、表1に示すように例えば茨城県では過去30年間で震度3の地震が300回程度発生している状況である。小変形が多数回繰り返される場合であっても、大変形と比較すると微量ながら、等価剛性やエネルギー吸収性能の低下が考えられる。そこで、一般的に弾性域とみなされ、現状考慮されていない中小地震による小変形の繰り返しが、釘接合部や面材耐力壁の強度性能に与える影響を把握するとともに、木造住宅の耐震性能に与える影響を把握することを目的とした。

#### 3.1 釘接合部および実大壁の小変形の繰り返し実験

釘接合部および実大壁について小変形を繰り返し、劣化傾向を確認した<sup>15,16)</sup>。釘接合部(図1)については、側材として構造用合板、OSB、MDF(いずれも $t=9\text{ mm}$ )、および石膏ボード( $t=12.5\text{ mm}$ )の4種、主材としてスギ集成材とSPFの2種、接合具としてN50釘とCN50釘の2種を組み合わせる試験体を作成した。実大壁(図2)については、幅910 mm、高さ2730 mmの仕様で、面材は釘接合部試験体と同様の構造用合板と石膏ボードの2種とし、N50釘を用いて150 mmピッチで軸組材に留め付けた。なお、釘接合部については各仕様6体ずつ、壁試験体については3体ずつ試験に供した。

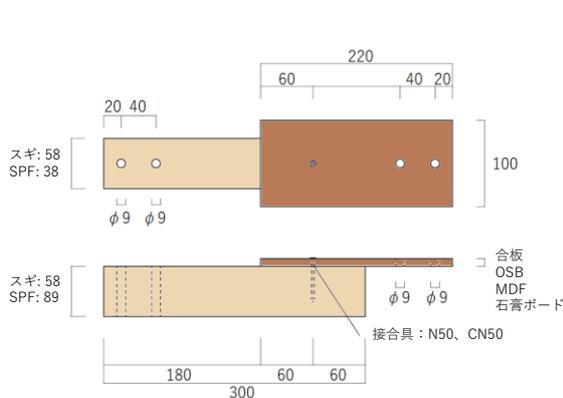


図1：釘接合部試験体寸法(単位：mm)

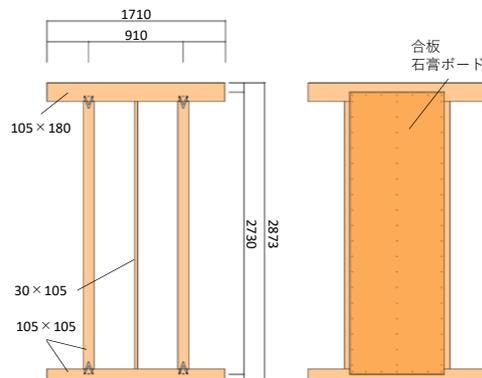


図2：壁試験体寸法(単位：mm)

釘接合部、実大壁それぞれ、表2に示すように中小地震を想定した小変形を繰り返した。例えば釘接合部の場合の加力スケジュールは、 $\pm 0.2\text{ mm} \rightarrow \pm 0.5\text{ mm} \rightarrow \pm 1.0\text{ mm} \rightarrow \pm 1.5\text{ mm} \rightarrow \pm 2.0\text{ mm}$ の変形を順に多数回繰り返した後、最大荷重

表2 制御変位と繰り返し回数

制御変位(実大壁) ( $\pm\text{rad}$ )	制御変位(釘接合部) ( $\pm\text{mm}$ )	繰り返し回数
1/2000	0.2	200
1/1000	0.5	200
1/450	1.0	50
1/300	1.5	50
1/200	2.0	10

の 8 割まで荷重が低下するまでの単調引張加力である。また、一般的な性能評価試験で用いられる加力スケジュールに従って載荷したものを対照試験体として、小変形を繰り返した試験体との強度特性値の比較に用いた。

実験結果の例として、実大壁試験体について、図 3 に各ステップにおけるピーク荷重の推移を 1 回目の荷重に対する割合として示し、表 3 に完全弾塑性モデルによって算出した強度特性値の一覧を示す。

接合部試験体、壁試験体共に、同一振幅が繰り返される状況において、微小な変形の場合でもピーク荷重が低下することが明らかとなった。また、小変形の繰り返しにおいても、既往文献<sup>11)</sup>と同様に石膏ボード壁の荷重低下傾向は合板壁と比較して大きいことを確認した。釘接合部の実験では、本研究で取り上げた木質面材を用いた釘接合部のピーク荷重の低下傾向は、いずれの軸組材、接合具を用いた場合でも概ね同様であるという結果を得ている。

一方で、いずれの面材の場合においても、繰り返し小変形が釘接合部や実大壁の降伏耐力や最大耐力といった強度特性値に明確な影響を与えないことが明らかとなった。これは、鋼板釘打ち接合部について、疲労試験で破壊しなかった試験体に対して静的実験をおこなった結果<sup>17)</sup>とも一致するところである。繰り返される変形が小さい内は、経験変形までの荷重が低下するものの、新規変形では、初期骨格曲線まで荷重が回復していく（新規変形における荷重値を低下させない）傾向がみられたためである。

なお、接合部の劣化傾向を既存の面材張り大壁の耐力計算方法に適用することで、実大壁の荷重低下傾向を概ね説明可能であることも確認している。

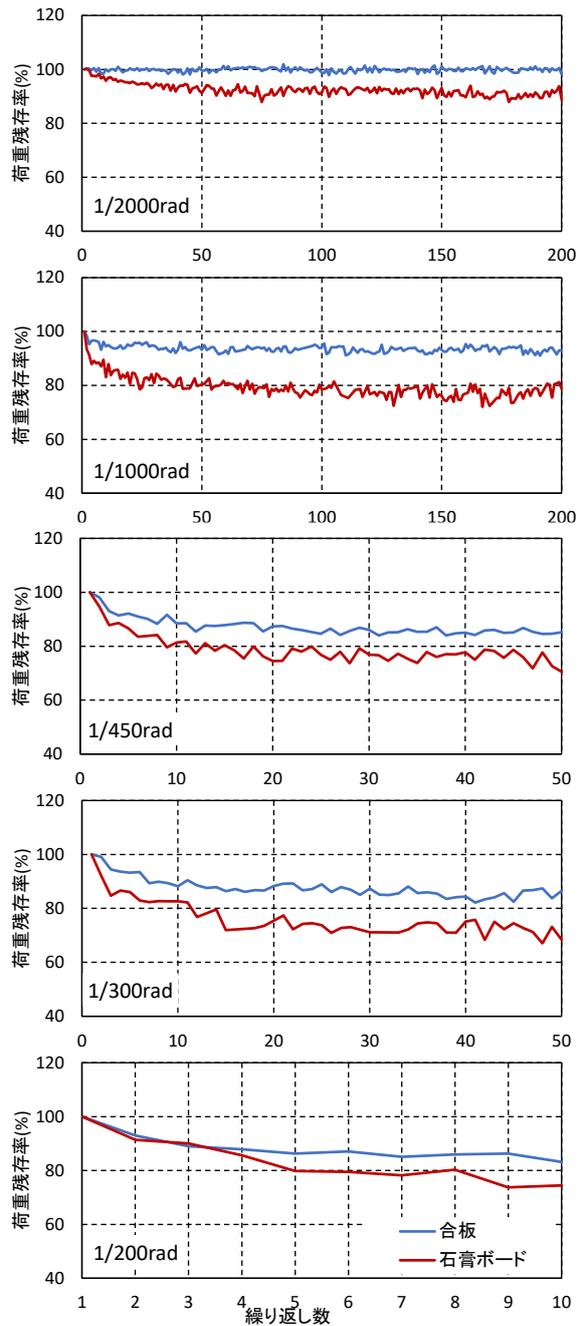


図 3：ピーク荷重の推移（壁試験体）

表 3：強度特性値の一覧（壁試験体）

		$P_{max}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$K$ (kN/mm)	$P_u$ (kN)
合板	対照試験体	7.35	4.16	0.92	6.61
	繰り返し試験体	6.83	4.06	0.76	6.01
	繰り返し／対照	0.93	0.98	0.82	0.91
石膏ボード	対照試験体	3.97	2.55	0.49	3.60
	繰り返し試験体	4.07	2.44	0.55	3.61
	繰り返し／対照	1.02	0.96	1.13	1.00

### 3.2 小変形の繰り返しを考慮した地震応答解析

実験で得られた合板壁および石膏ボード壁の経験変形と繰り返し数関係を基に算出したピーク荷重の低減係数を用いて、2 質点系せん断モデルによる応答解析を実施した<sup>18)</sup>。復元力特性は五十田らが提案している改良 EPHM<sup>14)</sup>とした。なお、1/200 rad 以上の繰り返しでは、既往の劣化則を用いて指向点の荷重低下を表現した。解析条件の詳細については割愛するが、耐力要素は合板耐力壁と石膏ボード壁のみとし、仕上げはモデルに含めていない。また、小変形の繰り返しが新規変形での荷重に影響しないものとした。解析パラメータは、降伏時のせん断力係数  $C_0$  (1 階の存在せん断耐力/建物重量) 8 種、石膏ボード壁が耐力中に占める割合 3 種 (0%、20%、40%)、劣化条件 4 種 (大地震のみを入力する場合、震度 3 を 300 回、震度 4 を 100 回、震度 5 弱を 10 回入力後にそれぞれ大地震を入力する場合)、大地震波 8 種 (KiK-net 益城 (前震、本震)、JMA 神戸、JR 鷹取、想定波 (東海・富士、霞が関)、JMA 川口、KiK-net 日野) とした。震度 3、4 及び 5 弱の地震波は BSL2 に倍率を乗じて作成した。線形加速度法、減衰定数は初期剛性比例型で 5% として応答解析を実施した。なお、基準法で規定される要求性能をギリギリ満たす住宅の  $C_0$  は 0.2 から 0.3 程度となる。

解析結果として、図 4 に健全の場合に大地震が入力された場合と比較した応答倍率を示す。ただし、ここには健全時の応答変形が倒壊相当となった解析モデルの結果は含んでいない。また、図中の割合は、石膏ボードが耐力中に占める割合を示す。地震波や耐震性能の組み合わせによって応答倍率にばらつきがみられたものの、平均応答倍率に着目すると、 $C_0$  が 0.2 以下となるような著しく耐震性能の低い住宅を除けば、中地震を複数回経験する場合でも大地震時の応答変形に大きく影響しないことが明らかとなった。さらに、保有耐力に占める石膏ボードの割合の違いで、応答倍率に特筆すべき差異は認められず、考慮の必要が小さいことがわかった。これは、大地震時には応答変形が必ず新規領域に入るためであると考えられる。

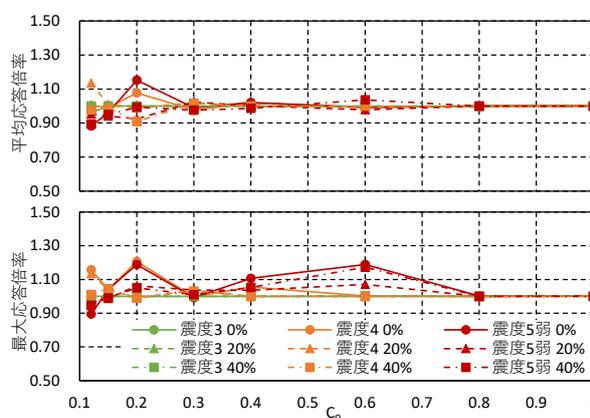


図 4 健全に対する最大応答変形の倍率

## 4. まとめ

本稿では、使用期間内に発生する可能性のある複数回の地震による繰り返し変形が、木造住宅の耐震性能に及ぼす影響に着目した研究内容を紹介した。

最大荷重を迎えるような大変形の繰り返しは釘の疲労破壊の要因となり、耐力や靱性に大きく影響することが既往研究によって明らかとされていること、またその後の地震時の応答変形に影響を与える可能性があることを示した。また、筆者が取り組んだ複数回の中小地震による繰り返し変形を受ける場合については、釘接合部や実大耐力壁の実験から、経験変形までの領域でピーク荷重や等価剛性の低下が認められるものの、一般的な性能評価に用いられる降伏荷重や最大荷重といった強度特性値には明確に影響しないことを明らかとした。また、複数回の中小地震が大地震時の応答変形に与える影響は小さいことを確認した。

現行基準では大地震時に建物が倒壊しないことを想定して必要性能が規定されているため、大地震後に継続的に住宅に住み続けるためには、基準に対して保有耐力を引き上げる必要がある。中小地震の影響は小さいという結果が得られたが、いずれにせよ、必要耐震性能に対して余裕をもった性能を付与しておくことで、より長く使い続けることのできる住宅が実現するのではないかと考える。

## 参考文献

- 1) 森拓郎, 田中圭, 河野孝太郎, 中畑拓巳, 築瀬佳之, 栗崎宏, 腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断耐力の推定, 材料, 63 (4), pp. 314-319, 2014
- 2) 気象庁, 震度データベース, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>, 2020年6月9日参照
- 3) 宮澤健二, 釘せん断接合部の繰返し荷重における耐力と変形特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1289-1290, 1985
- 4) 徳田迪夫, 釘接合部の両振れ繰返し力に対する疲労特性, 木材学会誌 33 (7), pp.605-609, 1987
- 5) 澤田圭, 平井卓郎, 繰返し加力が機械的接合部のせん断力に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.75-76, 2009
- 6) T. Hirai, T. Uematsu, Y. Sasaki, M. Toda, O.G. Wanyama, K. Sawata, Dynamic responsive characteristics of nailed plywood timber joint under harmonic vibrations, J. Wood Sci., 58, 408-416, 2012
- 7) 大野吉昭, 岡部実, 佐久間博文, 下屋敷朋千, 耐力壁の水平加力試験における繰返し回数の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.279-280, 2000
- 8) 梶川久光, 三津橋歩, 高木良, 小川春彦, 六車典子, 野口弘行, 木質系実大耐力壁面の動的挙動に関する研究 その5 繰返し回数による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.457-458, 2008
- 9) 下村祥一, 大熊武司, 加工方法の違いが木造軸組工法耐力壁の復元力特性に及ぼす影響とそのモデル化手法 木造軸組構法耐力壁の耐風性能評価用復元力特性に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集 607, pp.133-140, 2006
- 10) 村知朋和, 五十田博, 三宅辰哉, 橋爪丈夫, 合板耐力壁の最大変形と累積エネルギーをパラメータとした限界性能に関する実験, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 50, pp.85-88, 2007
- 11) 五十田博, 岡崎友也, 三宅辰哉, 木造耐力壁の最大変形と累積エネルギーを指標とした限界値に関する一考察 その3 せっこうボードの繰返し実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.197-198, 2009
- 12) 山崎義弘, 神田健吾, 坂田弘安, 任意変形履歴を受ける木造耐力壁の耐力及びエネルギー吸収性能 繰返し地震動を受ける木質構造物の劣化挙動に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 84 (765), pp.1443-1451, 2019
- 13) 峯村廣紀, 五十田博, 服部学, 余震や繰返し加力に対する劣化を抑制した壁を組み込んだ木造住宅の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 79 (698), pp.491-498, 2014
- 14) 人見祐策, 五十田博, 河合直人, 大変形と繰返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力モデル -木造建物の地震時挙動に関する研究 その2-, 日本建築学会構造系論文集, 75 (646), pp.2299-2306, 2009
- 15) R. Inoue, T. Mori, A. Ariki, S. Matsumoto, Evaluation of single shear performance of nailed joint damaged by cyclic deformation due to moderate earthquakes, Construction and Building Materials, 342, 128044, 2022
- 16) R. Inoue, T. Mori, S. Matsumoto, Effect of numerous small deformations caused by moderate earthquakes on shear performance of wooden walls, Construction and Building Materials, 364 130016, 2023
- 17) 林知行, 佐々木光, 鋼板釘打ち接合部の疲労特性, 木材研究・資料, 17, 112-121, 1983
- 18) R. Inoue, T. Mori, S. Matsumoto, Effect of Numerous Small Deformations Due to Moderate Earthquakes on Seismic Response of Wooden Houses, Buildings 13(4), 1062, 2023

## 著者プロフィール



井上 涼 (Ryo Inoue)

<略歴> 2018年広島大学工学部第四類(建設・環境系)建築プログラム卒業 / 2020年広島大学大学院工学研究科建築学専攻修了 / 2023年広島大学大学院先進理工系科学研究科先端理工系科学専攻修了(博士(工学)) / 2023年京大生存在圏研究所ミッション専攻研究員 / 2023年熊本大学大学院先端科学研究部助教、現在に至る。<研究テーマと抱負>安全に長期使用が可能な木質構造の実現のための研究<趣味>ドライブ、旅行、モータースポーツ観戦など。

# 大気の乱れを見る

## ルース ウベール<sup>1\*</sup>

### See atmospheric turbulence

Luce Hubert<sup>1\*</sup>

#### 概要

大気の乱れ（大気乱流）とは、速度や向きが不規則に変化する大気の流れのことです。大気乱流は、航空機の安全運航、気象予報の精度、大気汚染物質の拡散、風力発電機の寿命、地上からの天体観測などに影響を与えます。雲を伴う目に見える乱流は、乱流のごく一部の姿で、しばしば雲から遠く離れた場所でも発生し、晴天大気乱流（Clear Air Turbulence: CAT）と呼ばれます。乱流は風速や屈折率の乱れを発生させるため、これらの乱れに感度を持つセンサーやリモートセンシング装置を、乱流検出に利用することができます。本稿では、地上のドップラーレーダーや、気球や小型無人航空機（UAV）に搭載されたセンサーが、この目的のためにどのように利用されるかなどについて紹介します。

#### 1. はじめに

乱流とは、流体の流れが不規則になったもので、スケール、位置、向きが常に変化する。空間上のどの地点でもその時間的変化は予測不能である。それに対して、乱流でない流れ場は層流とよばれる。乱流はレオナルド・ダ・ヴィンチ（1452～1519年）によって研究されたが（図1）、アイルランドの物理学者オズボーン・レイノルズ（1842～1912年）の研究により、乱流のメカニズムがより深く理解されるようになった。

大気中では、雲の中や縁で発生する乱流が目に見えることがある。しかし、雲のない領域でも発生することがある。これは晴天大気乱流（CAT）と呼ばれる。雲ないので肉眼では見ることができない。航空機の乗客は、CATによって発生する衝撃をよく経験する。しかし、このような衝撃は、熱対流や波動に伴う垂直方向の気流によっても発生することがあり、乱流とは呼べないものもあるが、これらの動きは、しばしば乱流の原因となる。



図1. レオナルド・ダ・ヴィンチによる乱流の表現（～1508年）。(Royal Collection Trust Copyright Her Majesty Queen Elizabeth II 2021)

#### 2. 乱流の発生源

地球の重力と空気の圧縮性のため、空気の密度は高度が高くなるほど小さくなる。重い空気は軽い空気の下にあるため、そのままにしておくと時間が経ってもこの状態を維持することになる。空気は安定していると言われている。しかし、水平方向の空気の動きや空気密度の変化がある場合、強制的または自発的に垂直方向の動きが発生することがある。これらは、それぞれ動的不安定性、対流不安定性と呼ばれる。不安定性が増幅されると、運動エネルギーが流体の減衰能力を超えることがある。このとき、動きが乱れることになる。乱流状態への移行は、流体の粘性にも依存する。粘性は、運動に対抗する能力を反映する流体の特性である。

2023年11月8日受理.

<sup>1</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏観測データ解析分野

\* E-mail:luce.hubert.3w@kyoto-u.ac.jp

大気中では、密度の低い（暖かい）空気の上に密度の高い（冷たい）空気があるとき、熱対流不安定性が生じる。その結果、鉛直方向の上昇気流と下降気流が発生する。これらの動きは対流セルを形成し（図 2a）、最終的に乱流になる。例えば、対流不安定性は、日中熱された地面と接触している空気が加熱されることで発生することがある。また、降水が蒸発して乾燥した層の上部が冷やされることによっても発生する。下からの加熱と上からの冷却のいずれの場合も、これらの不安定性は、発生源から垂直方向に 1km 以上離れた場所で CAT を引き起こす可能性がある<sup>1)</sup>。識別が困難な場合が多いため、航空機にとって危険である。

動的不安定は、安定した空気界面が水平速度の鉛直変化に拘束されることで発生する。水平速度の垂直変化率、すなわち鉛直方向の速度勾配を "ウィンドシア" と呼ぶ。ウィンドシアが十分強いと、界面で波が発生する。波が大きくなると、ロールができたり、割れたりする。この波は「ケルビン-ヘルムホルツ波」と呼ばれ、雲の上で見られることもあるが、雲がないところでは気づかれないことが多い。動的不安定性は、異なる速度で移動する 2 つの気塊が出会い、暖かい空気の塊が冷たい空気の塊と重なる気象前線において頻繁に発生する。

水に石を投げ入れると水面に波が立つように、大気中にも重力波と呼ばれる波が発生することがある。例えば、山岳波は大気重力波の一種で、安定した空気の塊が山を越えて上空に押し上げられることで発生する。下流で発生した波が増幅・砕波が起こる、遠く離れた場所でも（最大数百 km!）乱流を発生させることがある。

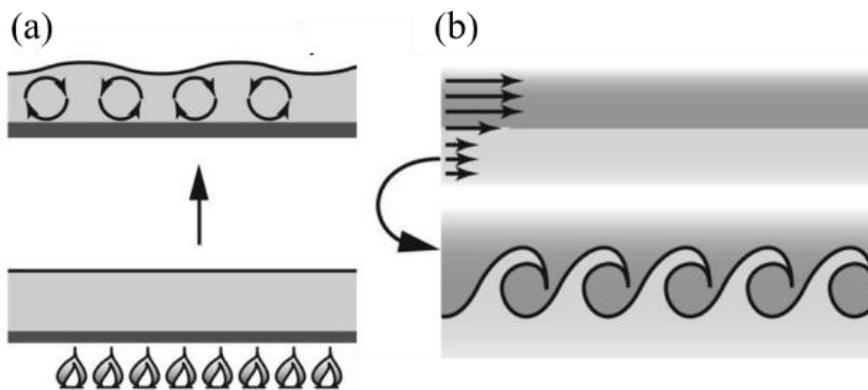


図 2. (a) 底面からの加熱によって生じる対流不安定性の模式図、(b) 動的不安定性の模式図 (Gallay and Brun, 2017 より引用)。

### 3. 乱流のいくつかの特性

不安定性が発生すると、運動が渦を形成する移行が起こることがある。大きな渦は小さな渦に分裂し、大きな渦から小さな渦へのエネルギー移動が可能になる（図 3）。小さな渦は、流体の分子粘性によって減速され消滅し、その運動エネルギーは熱に変換される。このように、ある渦がより小さな渦にエネルギーを与える過程を「コルモゴロフ・エネルギー・カスケード」(Kolmogorov energy cascade) と呼ぶ（図 3）。この現象は、エネルギーが注入される外部スケール (outer scale)  $l_0$  と、運動エネルギーが熱に変換される内部スケール (inner scale)  $l_\eta$  によって制限された「慣性小領域」(inertial subrange) と呼ばれるスケール範囲で生じる<sup>2)</sup>。

<sup>2)</sup> 乱流体力学では、渦の特徴的な長さをスケール(scale)と定義している。スケール  $l$  は波数  $k$  に対して  $k \sim 2\pi/l$  で表される（図 3）。

乱流混合は、速度のランダムな変動だけでなく、温度や湿度の変動も引き起こす。この温度や湿度の変動は、後述するレーダーの標的となる。

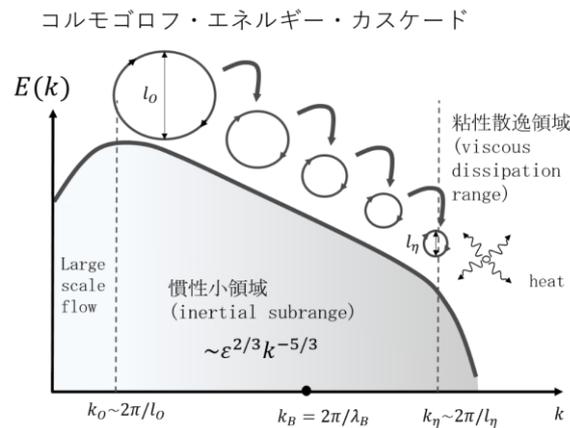


図 3. 乱流スペクトル（エネルギーが波数成分に分布する様子）を模式的（対数スケール）。

#### 4. 乱流の影響

大気の流れは、航空輸送に影響を与えるだけではない。また、人間活動に関連する多くの分野に影響を及ぼす可能性がある。

天気予報の質は、基本的に大気中およびその境界におけるエネルギーと物質の輸送と移動を表現し、予測する能力に依存している。これらの予測をより小さな空間・時間サイズで行うと、乱流がエネルギーバランスに与える影響は大きくなる。実際、乱流は混合を引き起こすため、熱、運動量、物質の鉛直方向輸送に関与している。現在の数値予報モデルでは（まだ）乱流運動を表現できないが、より大きなスケールでの影響を考慮する必要がある。これは「乱流のパラメタリゼーション」と呼ばれる。正しいパラメタリゼーションを行うには、乱流の特性を十分に理解する必要がある。大気モデルは、乱流のパラメタリゼーションが不十分なため、数値メッシュサイズを小さくすると非現実的な結果になることがよくある。

乱流は、自然由来の汚染（火山の脱ガス、放射能など）や人為由来の汚染（化学工業、石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料、交通輸送など）の拡散に重要で役割を果たすのは明らかである。しかし乱流は、風力発電機の効率を低下させ、装置の部品の摩耗や損傷を増加させることによって、その寿命にかなりの影響を与える可能性がある。

乱流は、大気中の電磁波の伝搬にも影響を与える。物質が波の伝搬に与える影響を表すために、「屈折率」という無次元数 (n) が定義されている。屈折率とは、真空中の光速を物質中の光速で割った値であり、物質中での光の進み方を記述する上での指標である。屈折率 n が変化すると、電磁波の伝搬に影響を与える。例えば、水と空気の界面で光が屈折したり反射したりすることは、誰もが経験したことがあることだろう。下層大気では、空気の屈折率は主に温度と湿度に依存する。そのため、乱流によって屈折率の揺らぎが発生する。この大気の揺らぎが、夜間に見える星のまたたきを引き起こすのである。このように、地上からの天体観測では、大気の揺らぎがしばしば問題となる。大気中を伝搬する電磁波は屈折、反射、散乱のいずれかを受ける（図 4）。特に、光通信を中心とした通信に影響が出る可能性がある。

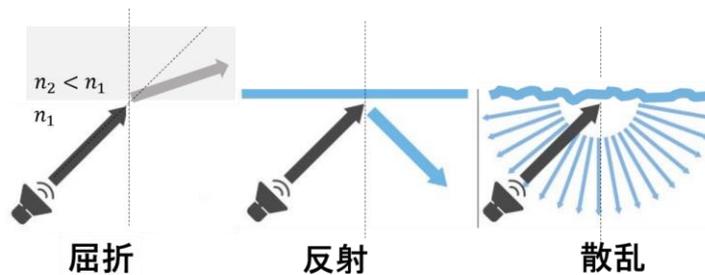


図 4. 界面からの屈折、表面からの反射、粗面からの散乱(等方性散乱：散乱は方向には依存しない)。

## 5. レーダーによる大気乱流観測

レーダー技術は、ある種の電波が温度や湿度の変化に敏感であることを利用している<sup>2)</sup>。送信アンテナを使い、パルス変調波を標的に向かって短時間送信する。標的で散乱されたパルスは受信アンテナで受信される。一般的に、送受信に同じアンテナを使用する。この場合、乱流からの後方散乱エコーが測定される(図 5)。送信パルスと受信パルス間の時間を測定することで、標的までの距離を算出することができる。

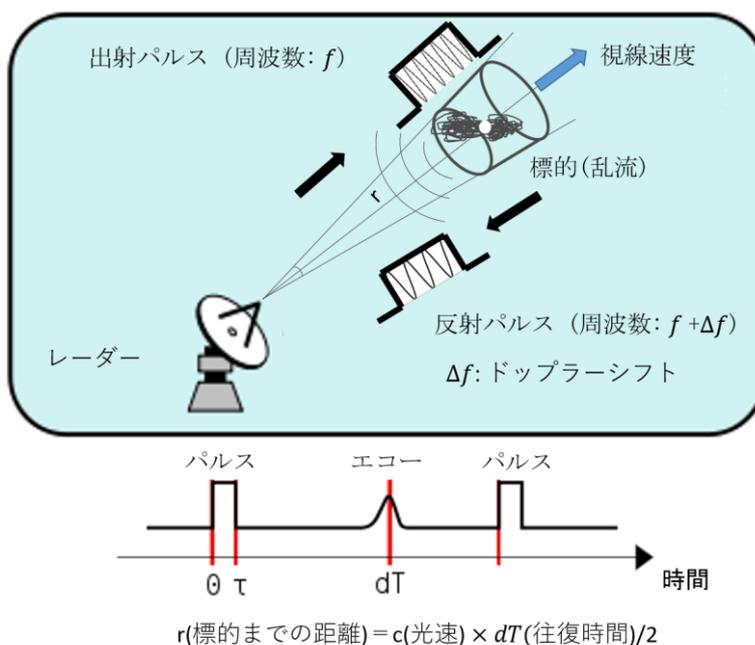


図 5. レーダーの原理。

乱流後方散乱のメカニズムは、ブラッグ条件(Bragg selection)原理に基づいている。レーダー波の半波長( $\lambda_B$ )に相当する距離で屈折率が変化すると、電波が同位相で足しあわされ、建設的干渉が発生する。等方性乱流からのブラッグ後方散乱が起こるためには、 $\lambda_B$ が乱流の内部スケール $l_\eta$ より大きく、外部スケール $l_o$ より小さい必要がある(波数 $k_B = 2\pi/\lambda_B$ を図 3 に示す)<sup>3</sup>。実際には、CATのエコーを受信できるパルスレーダーは、数十センチメートル(UHF)から数メートル(VHF)の波長で動作している。運用する高度範囲(成層圏～対流圏、約1～20km)にちなんでVHFでは「STレーダー」、UHFで

<sup>3</sup> ただし、速度揺らぎのスペクトルと屈折率揺らぎのスペクトルは区別して考える必要がある。2つのスペクトルは、簡略化のため合成されている。

は「ウィンドプロファイラー」(約 0.3~5km) と呼ばれる。図 6 は、信楽 MU 観測所に設置された VHF 帯 MU レーダー (周波数 46.5MHz、波長 6.45m)<sup>3)</sup> と LQ7 ウィンドプロファイラー (周波数 1357MHz、波長 22cm) のアンテナアレイを示したものである。



図 6. (左) 滋賀県甲賀市信楽町にある MU レーダーアンテナアレイ全景写真。(右) LQ7 ウィンドプロファイラーアンテナアレイ。

レーダーエコーの強さは、基本的にブラッグ波長における空気の屈折率変動の振幅に依存する。したがって、非常に強いエコーは、温度および/または湿度の激しい変動に対応する。この特性により、動的不安定性または対流不安定性に関連する乱流を観測できる。図 7 は、MU レーダーで観測された動的不安定性による波状ロールを形成した例である。

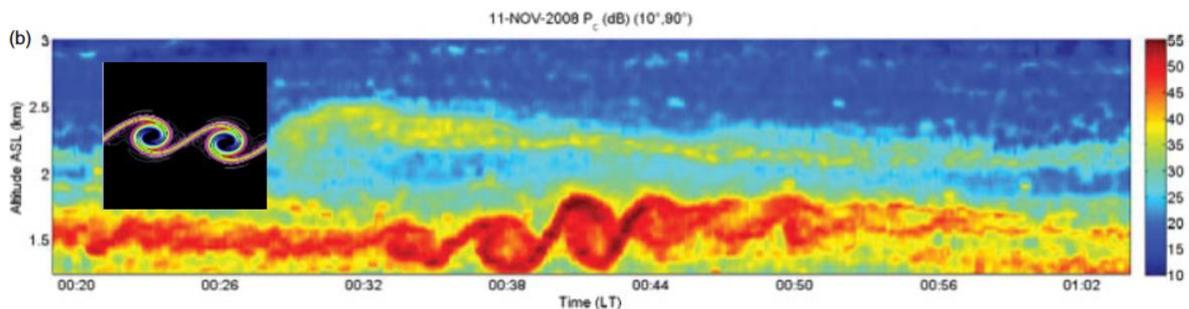


図 7. MU レーダーエコーパワーの分布図。ケルビン-ヘルムホルツ不安定性によるロールが何本も連続する様子が描かれている。

しかし、エコーの強度と動的乱流の強度 (速度揺らぎによる) は必ずしも一致しない。ミルクを注いだコーヒーカップをかき混ぜ続けると、やがてコーヒーとミルクの間の不均一性がなくなるのと同じように、乱流が活発な間は温度や湿度の不均一性が小さくなり、その結果エコーの強さも小さくなる。

ST レーダーやウィンドプロファイラーはドップラーレーダーである。ドップラー効果を使って風を測定する。ドップラー効果とは、送信機と標的との距離が時間的に変化すると、送信波と受信波の周波数や波長がずれることである。したがって、標的が視線方向に一定速度で移動している場合、受信波の周波数は送信波の周波数からずれることになる。この周波数差は、視線速度に比例する。図 8a は、この理想的なケースにおける「ドップラースペクトル」を模式的に表したものである。乱流による速度変動がある場合、ドップラーピークはドップラー周波数の平均値付近で広がる (図 8b)。このスペクトルの広がりを見積もることで、図 3 で定義した乱流運動エネルギー (TKE) を推定することができる。広がりが大きいほど、TKE は大きくなる。

単位時間あたりに散逸する運動エネルギーの量を TKE 散逸率  $\varepsilon$  と呼ぶ。 $\varepsilon$  は乱流の強さを定量化したものである。航空分野では (Energy dissipation Rate)  $EDR = \varepsilon^{1/3}$  が使用される。慣性乱流の場合、乱流スペクトルのレベルは  $\varepsilon^{2/3}$  に比例する (図 3)。乱流の外部スケールがわかっているならば、レーダー計測で得られた TKE から  $\varepsilon$  を推定することができる。しかし、この推定は困難であり、長年にわたって研究が続けられてきた。それは、(1) 慣性乱流以外の複数の現象が速度変動スペクトルに寄与している可能性があること (非乱流運動など)、(2) 慣性領域のスペクトル範囲や慣性領域外の乱流の特性はまだ非常によく分かっておらず、おそらく乱流源によって大きく変動すること、(3) レーダー測定から TKE を推定するには多くの機器効果を考慮しなければならないこと、などが理由である。このように、 $\varepsilon$  を求めるために用いられるモデルは、非常に単純化された仮説に基づくものである。これらのモデルは、乱流を直接測定できる原位置観測装置と比較して評価されなければならない。これらの機器は、気象観測気球や最近では小型無人航空機 (UAV) に搭載されることがある。

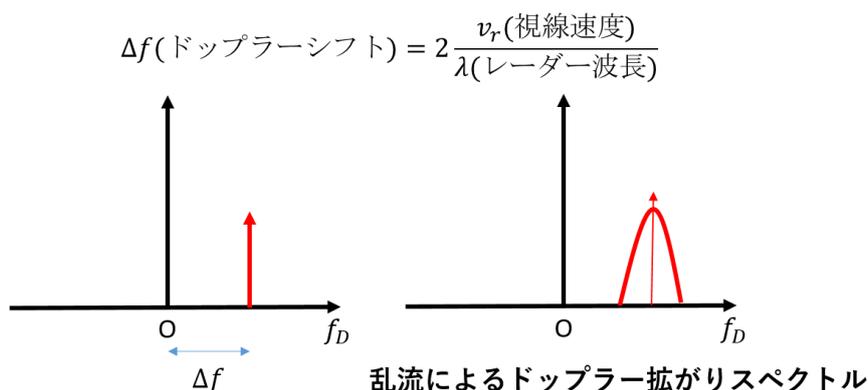


図 8. 乱流のない場合 (右) とある場合 (左) のドップラースペクトルの理想化された表現。

## 6. 現場観測による大気乱流

EDR は民間航空機で測定され、パイロットレポート (PIREPs) に記載されている<sup>4)</sup>。これは、かなり不正確でパイロットの主観的なものである。気象観測用気球の下に吊るされたラジオゾンデを使って、高度 30km までの気圧、温度、湿度、速度を測定することは、世界中で毎日行われていることである (図 9a)。ラジオゾンデの観測は、精度が十分でなく、垂直分解能も不十分であるため、乱流を測定するためのものではない。しかし、センサーの性能は向上しており、標準的なラジオゾンデのデータから乱流のパラメータを推定する処理方法が開発されている。この推定は間接的なものであり、まだ検証の必要のある仮定やモデルに基づいている<sup>5)</sup>。

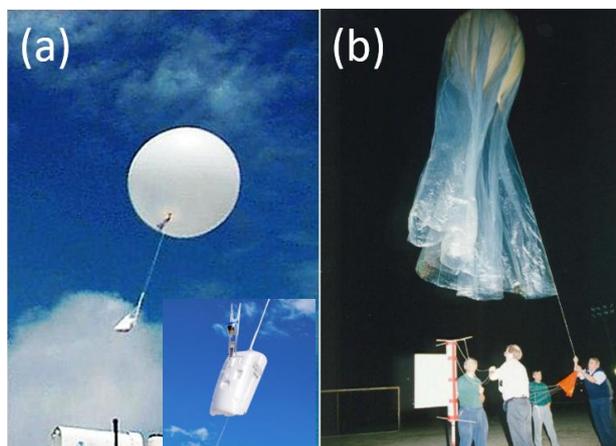


図 9. (a) GPS ラジオゾンデ iMS-100 | 明星電気株式会社 (b) 高解像度気球計測のための特殊装置 (2000 年, 滋賀県甲賀市信楽町)。

温度と速度の乱流変動を直接測定するには、高分解能 (High Resolution -HR-) のセンサーが必要である。HR 温度計測は、直径わずか数マイクロメートルのコールドワイヤーセンサーで行える<sup>6)</sup>。ワイヤー線に一定の電流を流し (加熱しないように十分に低い電流)、温度変化によりワイヤーの抵抗値を変化させる。この変化を測定することで、対応する温度変化を推し量れる。0.001°C の温度変化を 1 ミリ秒で測定できる。しかし、このセンサーは非常に壊れやすく、水滴で壊れてしまうことがある。一方、

乱流速度の変動を直接測定するには、ホットワイヤーセンサーを使用する。ワイヤー線は電流によって加熱され、ワイヤー線の周りの空気の循環によって引き起こされる冷却は、速度に依存する。速度に関する精度は1cm/s程度である。ピトー管のような他の装置も、圧力測定から速度を測定するために使用できる。

飛行プラットフォームに搭載されたHRセンサーにより、温度と速度の時系列を収集できる。時系列をスペクトル解析して、図3に示すような波数分布を推定することで、例えば $\epsilon$ のような乱流パラメータを推定できる。

HRセンサーは、標準的な測定と同様に気象観測気球の下に設置することが可能である(図9b)。しかし、気球の後流によって発生する乱流の影響を受けて測定ができないことがある。後流の影響を軽減するために、気球の上にプラスチック製のケープをかぶせる(図9b)<sup>7)</sup>。また、気球の降下中に計測を行うための新しい装置も開発された。一方、気球は水平方向の風に流されるため発射地点から非常に遠く(時には数百km)へ漂流することがある。このため、レーダーによる観測との比較は困難である。

最近ではドローンを気象学的に利用することがブームになっている。ドローンは空飛ぶロボットで、遠隔操作が可能である。ドローンには、気球と比較して多くの利点がある。例えば、再利用可能な測定器を用いて繰り返し測定することができる。コロラド大学では、上記のセンサーを用いて乱流を測定するために特別に設計された固定翼の航空機型ドローン(DataHawk UAV)を開発した<sup>8)</sup>。DataHawk UAVは超軽量約1kgで翼の幅は約1mしかない。MU信楽観測所で2015年、2016年、2017年の3回のフィールドキャンペーン(ShUREX-Shigaraki UAV Radar EXperimentと呼ぶ)で使用し、MUレーダーおよびLQ7ウィンドプロファイラーと比較した(図10)<sup>9)</sup>。これらの実験では、動的不安定時や対流不安定時に $\epsilon$ を推定するために使用するレーダーモデルの性能を評価した。レーダーとUAVの測定結果が大きく異なるため、多くの不確定要素が存在するが、強い分散を示すものの、 $\epsilon$ 推定値の交差検証が可能となった。(図10h)

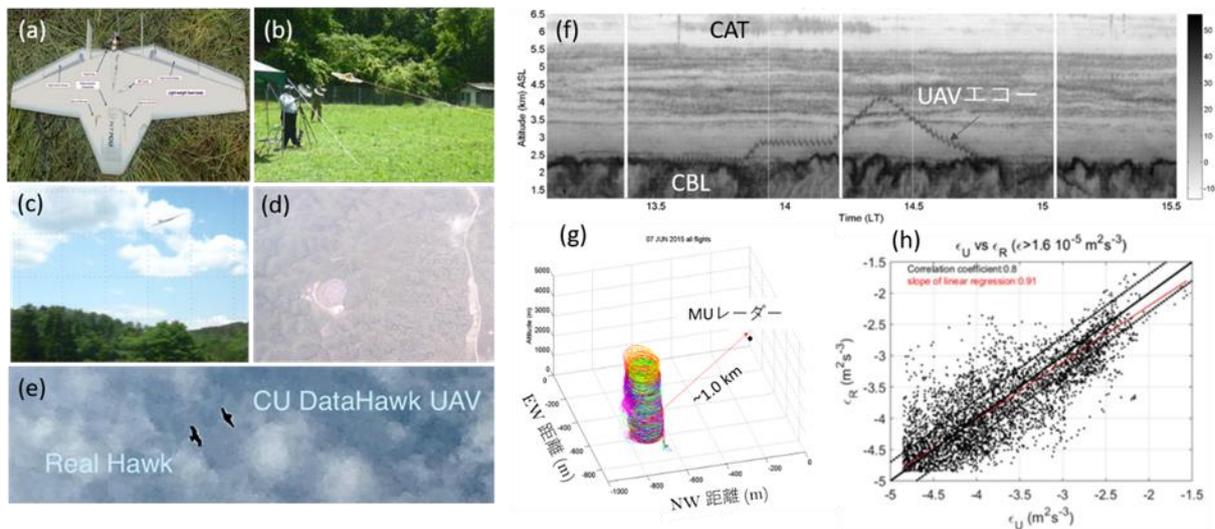


図10 . (a) 乱流センサーを搭載したDataHawk UAV。(b) と(c) SHUREX2015 キャンペーンでの DataHawk UAV の離陸直後の様子。(d) 小型カメラを搭載したDataHawk UAV から見た下側の写真で、MUレーダーが見えている。(e) DataHawk UAV の飛行中のサプライズゲスト。(f) MUレーダーのエコーパワーの分布図。(g) ShUREX2015で観測されたUAVの軌道の3D表示。(h) UAVとレーダーデータから推定される $\epsilon$ の散布図。

## 7. 展望

大気乱流の測定は、依然として困難である。しかし、UAV の開発は、その可能性の大きさから、計測技術の歴史に大きな転機をもたらすものである。間接的ではあるが、時間的・高度的に連続した観測を可能にするドップラーレーダーと同時観測することで、乱流の特性やそれを発生させる動的・対流的不安定性の特性を明らかにすることが可能となる。他の ST レーダーの周辺に乱流センサーを設置するプロジェクトが南極で検討されている (PANSY レーダー、47MHz) <sup>10)</sup>。また、今後検討される予定である (例：インドネシア、赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar)、47MHz) <sup>11)</sup>。

## 参考文献

- 1) A. Kudo, H. Luce, H. Hashiguchi, and R. Wilson, Convective Instability underneath Mid-level Clouds: Comparisons between Numerical Simulations and VHF Radar Observations, *J. Appl. Meteor. Clim.*, 54, 2217-227, 2015.
- 2) 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーリモートセンシング”, 京都大学学術出版会, 2005, pp. 491.
- 3) MUレーダー : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu>
- 4) パイロットレポート (PIREPs) : <https://www.jma-net.go.jp/naha-airport/PIREP.html>
- 5) R. Wilson, F. Dalaudier, and H. Luce, Can one detect small-scale turbulence from standard meteorological radiosondes?, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 969, 1000, 2011.
- 6) HR センサー: [https://ja.wiki5.ru/wiki/Mass\\_flow\\_sensor](https://ja.wiki5.ru/wiki/Mass_flow_sensor)
- 7) H. Luce, M. Crochet, and F. Dalaudier, Temperature sheets and aspect sensitive radar echoes, *Ann. Geophys.*, 19, 899-920, 2001.
- 8) D.A. Lawrence, D. A. and B. B. Balsley, High-resolution atmospheric sensing of multiple atmospheric variables using the DataHawk small airborne measurement system, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 30, 2352-2366, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00089.1>, 2013.
- 9) L. Kantha, D. Lawrence, H. Luce, H. Hashiguchi, T. Tsuda, R. Wilson, T. Mixa, and M. Yabuki, Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015): An overview of the campaign with some preliminary results. *Prog. Earth Planet Sci.*, 4: 19 (DOI 10.1186/s40645-017-0133-x), 2017.
- 10) PANSY (Program of the ANtarctic SYowa MST/IS) レーダー: <https://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>
- 11) 赤道大気レーダー (EAR) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear>

## 著者プロフィール



Hubert Luce

<略歴> 1992年トゥーロン大学・ソフィア-アンティポリス大学卒業 (フランス) / 1996年トゥーロン大学物理学博士 / 1998-2002年 京都大学超高層電波研究センターPostdoctoral Researcher / 2002-2021年トゥーロン大学助教授 / 2021年より京都大学生存圏研究所教授、現在に至る。<研究テーマ> 下層大気のレーダーと「その場」(in situ) データ解析。下層気乱流、波動および不安定性の複合機器観測。大気乱流が鉛直輸送と雲のライフサイクルに与える影響。

## 樹木地上部における炭素蓄積量の年変動推定

田邊 智子<sup>1\*</sup>

### Annual variation in aboveground biomass production

Tomoko Tanabe<sup>1\*</sup>

#### 概要

樹木は、光合成により取り込んだ炭素を材料にして新しい葉や木部を生産する。生産に使われた炭素は枯死して分解されるまで樹体内に蓄積されるため、地球の炭素循環を考えるうえで長期的に炭素を留めておく要素の一つとして重要である。さらに樹木生産量は年により増減することが分かっている。そこで、生産量の年変動に影響する要因を明らかにすることは、全球的な炭素循環と気候との関係を予測する際の基礎的な情報として欠かせない。伐倒を伴わずに生産量の年変動を類推する手段として、高さ 1.3 m の幹の年輪幅を指標とした評価が広く行われてきた。しかしいくつかの先行研究から、樹木の年生産は樹形が相似形を保つように起こるわけではないことが分かり始めている。つまり、ある一つの高さの年輪幅を指標とした従来の手法では、樹木生産量の年変動を正しく評価できていない可能性がある。本稿は樹木地上部の生産量を対象に、年変動を評価するための手法に着目する。これまで用いられてきた指標について整理したうえで、それらの課題と今後の展望について解説する。

#### 1. はじめに

人為由来で放出された CO<sub>2</sub> は陸域と海域が吸収し、残りが大気に蓄積される。過去 80 年間に於いて、人為由来の CO<sub>2</sub> 放出量と海域による吸収量はほぼ一定の右肩上がりを示すが、陸域による吸収量は顕著な年変動を示し、誤差範囲も一番大きい<sup>1)</sup>。したがって、全球的な炭素循環予測を改善するためには、陸域の巨大な炭素プールである森林の炭素蓄積能を確からしく推定することが不可欠である。

大気中の CO<sub>2</sub> は、光合成により葉から樹木に取り込まれ、枝葉や根などの生産に使われることで樹体内に蓄積される。蓄積された炭素量は、乾燥させた樹木の重さを量ることで

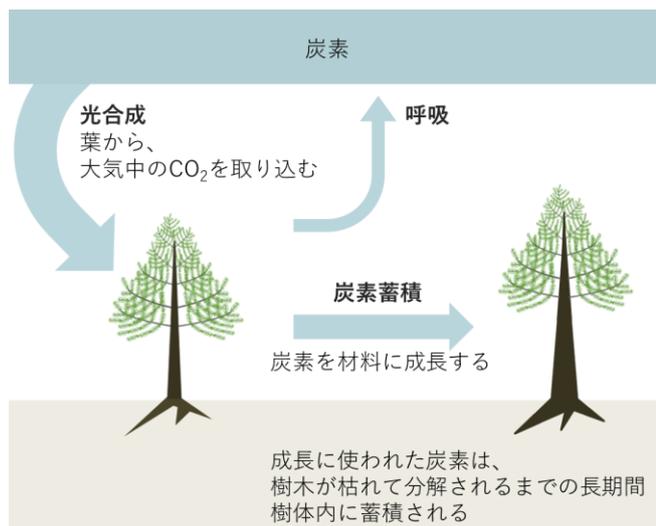


図 1：大気中の炭素が樹木に蓄積されるまでの過程

2023 年 11 月 10 日受理.

<sup>1)</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 大気圏環境情報分野

\* E-mail: tomoko4t@gmail.com

知ることができる<sup>2)</sup>。しかし重さを量るには樹木を伐る必要があるため、炭素蓄積量の年変動を計測することは難しい。そこで個体の重さを量る代わりに、毎年の体積増分を推定する方法もある<sup>3)</sup>。伐倒した個体の幹に沿い、複数の高さから円盤を採取して年輪幅を計測することで過去の幹体積を復元し、体積増分の年変動を算出する。体積から重量に変換する式を作成すれば、個体重の年変動データにも換算できる。データ蓄積のない林分にも適用でき<sup>4)</sup>、復元した体積増分の年変動と気候要因との解析も行われている<sup>5)</sup>。このような手法を使うことで、樹木による過去の炭素蓄積量の年変動を高い精度で推定できるものの、実際には計測が容易な高さ 1.3 m 位置（以下、胸高）の幹の年輪幅を指標とした評価が広く行われてきた<sup>6)</sup>。

気候に季節性のある地域において、樹木が肥大成長を行った履歴は、年輪として毎年樹体内に記録される。幹の肥大成長は、単年度の試料採取から過去の肥大量を数十年にわたり復元でき、年輪年代学的手法を用いることで年輪形成年を正確に知ることができる<sup>7)</sup>。また年輪幅の年変動は地域ごとに似通った変動を示すことから<sup>7)</sup>、気候の影響を強く受けているとされる。そこで、胸高の年輪幅のパターンと、季節や月別で区切った平均気温や合計降水量との網羅的な統計解析により、生産量に影響すると思われる気象要因の抽出が行われてきた<sup>8)</sup>。

一方、胸高の幹肥大量が多い年に、幹伸長量や枝肥大量も多いとは限らないことが分かり始めている<sup>8,9)</sup>。つまり、樹木の年生産は樹形が相似形を保つように起こるわけではないと考えられる。胸高のようなある一つの高さの年輪幅を指標とした従来の手法では、樹木個体全体の生産量の年変動を確からしく評価できていない可能性がある。

## 2. 木部生産量の年変動

樹木に取り込まれた炭素は、頂端分裂組織で行う伸長成長と形成層で行う肥大成長に使われると、木部として長期間樹体内に蓄積される。樹木生産量の年変動は主に肥大量を指標として評価されてきたが、伸長量も樹木生産量の気候応答解析の指標として使われている。

### 2.1 伸長量の年変動

一年に一度冬芽を形成して幹枝を伸長させる樹種は、伸長した後も冬芽の付け根位置に芽鱗痕が残る。隣り合った二つの芽鱗痕間の長さを計測することで、幹や枝の過去の伸長量とその変動を一年単位で復元することができる（図 2）。このように計測される幹の伸長量は、生育地域の気候と高い関係があることが確認され、気候応答解析が行われている<sup>8,10-12)</sup>。枝の伸長量に関しても、低木性樹木において伸長量の年変動が個体間<sup>13)</sup>や異なる地域の山岳間<sup>14)</sup>で強く同調しており、広域に共通して作用する気象要因が伸長量に大きく作用している可能性が考えられている。高木性樹木の枝においても、伸長量の年変動が個体内や個体間の様々な枝で同調していることから<sup>15)</sup>、林分内の各個体に共通する環境要因が伸長量を強く規定している可能性が考えられる。

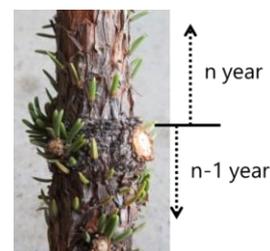


図 2：クロトウヒ (*Picea mariana*) の幹に残る芽鱗痕

### 2.1 肥大量と伸長量の関係

幹の長さ（樹高）と太さ（胸高直径）はアロメトリー関係にあることが知られているが<sup>16-18)</sup>、両者の増加量は環境に対して異なる応答をすることも分かりつつある。たとえば幹の肥大量は、林分密度の影響を強く受ける<sup>19)</sup>。林分密度の影響は、ヨーロッパアカマツ (*Pinus sylvestris*) の幹肥大量で大きく、幹伸長量で小さいことが明らかになった<sup>20)</sup>。また被陰環境下で生育したトドマツ (*Abies sachalinensis*) では、幹が伸長または肥大のいずれかしかしない年があることが報告されている<sup>21)</sup>。炭素分配の優先順位はその年の環境に応じて変化するのかもしれない。さらに幹伸長量と肥大量の年変動は、ヨーロッパブナ (*Fagus sylvatica*)<sup>22)</sup>では似たパターンを示すものの、ヨーロッパアカマツ<sup>23)</sup>や

フランスカイガンショウ (*Pinus pinaster*)<sup>24)</sup>では両者に一年のタイムラグがあり、低木のハイマツ (*Pinus pumila*) では相関がないことが示されている<sup>25)</sup>。そしてマツ科のいくつかの樹種では、幹の伸長量と肥大量はそれぞれ異なる気象要因の影響を受けている可能性が示唆された<sup>9,23,26-29)</sup>。このように、伸長量と肥大量は環境条件に対して異なる応答をする傾向にある。つまり各成長量は、それぞれ異なる要因の影響を受けている可能性があるといえる。これらの研究結果は、樹木の年成長は樹形が相似形を保つように起こるわけではないことを示すとともに、どこかひとつの成長量を指標とした場合、樹木全体の生産量の年変動と気候応答を正しく推定できない可能性を示唆している。樹木生産量が年により変化する要因を明らかにするためには、まず一年あたりの樹木生産量を確からしく推定する必要がある。

### 3. 葉生産量の年変動

樹木は葉から CO<sub>2</sub> を吸収する。葉生産量は森林の炭素吸収能を決定する要因のひとつであり、その年変動を推定できれば、気候変動にともない森林の同化器官量がどのように変化するかを推察できる。落葉樹木に対しては、林床への落葉を定期的に回収することで葉生産量の年変動を推定することができる。しかし常緑樹木においては、一年にいちど全ての葉を落とすといったことがなく、葉寿命も不明瞭であるため、葉生産量の年変動を推定することが難しい。個体の葉現存量が定常状態であると仮定すれば、ある年の葉生産量は落葉量と等しいとみなせるため、落葉樹木と同じ手法で常緑樹木の葉生産量の年変動を推定できるものの、大きな誤差を生む可能性も指摘されている<sup>32-34)</sup>。

#### 3.1 常緑樹木の葉生産量の年変動を推定する方法

全天空写真<sup>35)</sup>やリモートセンシング<sup>36)</sup>を用いた手法では、2年間の葉面積指数 (LAI) の差を計算することで、ある年の葉生産量を推定する。これらの主な課題は、推定された LAI が幹や枝などの木質要素の影響も反映していることにある<sup>37-39)</sup>。またこの手法は、葉が樹冠内でランダムに分布するという仮定が含まれる。しかし、特に針葉樹の樹冠では針葉が枝の周りに固まっているため、ランダムに分布しているとは言い難い<sup>40)</sup>。針葉が密集する度合いを評価して推定に加える必要があり<sup>35)</sup>、その過程に応じて LAI の推定値も変化することが指摘されている<sup>39,41)</sup>。

とはいえ、葉生産量の年変動を広域で推定する際には、これらの画像を用いた推定が有用である。

Kurkela と Jalkanen は、ニードルトレース法 (NTM) と呼ばれる方法を開発し、過去の針葉生産と針葉損失の年変動、および針葉寿命の推定を行った<sup>42)</sup>。NTM は、針葉が幹に付いている間は、付け根の維管束が毎年年輪内に埋め込まれることに着目した手法である。幹の樹皮側から髓側にかけて縦断面を薄く切りながら、各年輪内に残る維管束痕の数を数えることで針葉生産量等の年変動を推定する。この手法により、ヨーロッパアカマツ<sup>10,28,42,43)</sup>およびドイツトウヒ (*Picea abies*)<sup>44,45)</sup>の幹における針葉の生産動態が復元されてきた。同様の手順で枝の針葉動態も復元できれば、樹木個体レベルの葉生産量の年変動が推定可能となる。

クロトウヒ (*Picea mariana*) を対象とした研究では、過去の葉生産量を推定する指標として当年枝長に着目している<sup>15)</sup>。クロトウヒの針葉は当年枝の軸上に並んでいるため (図 3a)、当年枝長はその年の葉生産量に直結していることが考えられた。実際に両者の間には明瞭な線形関係が認められ、当年枝長は葉生産量の指標として有用であることが明らかとなった。また過去の当年枝長は、芽鱗痕

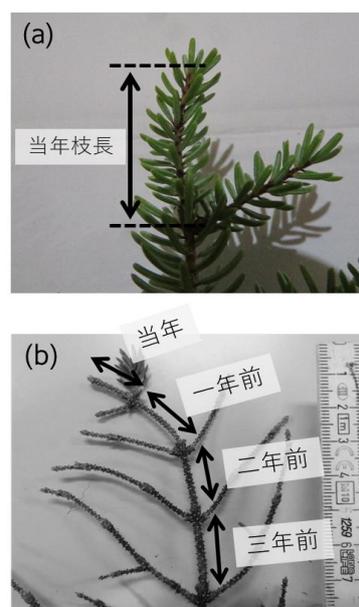


図 3: (a) 針葉が当年枝の軸上に並ぶ様子、(b) 当年枝長の年変動を計測する様子

を判別することで（図 3b）最大 20 年以上復元でき、それらの年変動は個体内の異なる枝間で同調していた。つまり、計測した年変動を枝レベルから個体レベルへとスケールアップできることを示唆している。これらの結果は、過去のデータ蓄積がない林分においても、単年度のサンプリングから過去の葉生産量の年変動を個体レベルで推定できることを意味している。高緯度や高標高地域の広域で優占する、林冠の閉鎖していないさまざまなマツ科常緑針葉樹林への適用が期待できる。また、推定された葉生産量の年変動は、翌年の幹肥大量と正の相関が認められた。一方で決定係数が非常に低いことから、従来の樹木生産量の指標である胸高の幹肥大量から葉生産量の変動を推定することは現実的でないことも明らかとなった<sup>15)</sup>。同化器官と木部とでは、生産量に大きく影響する要因が異なるのかもしれない。

### 3. おわりに

樹木による炭素蓄積量には年変動がある。それらの要因を明らかにするためには、一年分の樹木生産量を定量評価することがまず重要である。一方で、樹木生産量の年変動評価をする際に長らく指標とされてきた胸高の幹肥大量は、木部の伸長量や葉生産量の増減とは必ずしも対応していないことが分かり始めた。樹木は限られた炭素を各器官に分配しているため、ある器官の成長量の増減は、他器官の成長量の増減と密接に関係している可能性が考えられる。胸高の肥大量と他の成長量との定量的関係が分かれば、従来の手法で推定された年変動を、より確からしい値に変換できるようになるかもしれない。また各成長量に影響する要因をそれぞれ明らかにすることで、環境変化に対して樹木生産量がどのように増減するかといった問いに対して、個体レベルの全体像が明らかになるだろう。

### 参考文献

- 1) Friedlingstein, P. *et al.* Global carbon budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* **2022**, 1–159, 2022.
- 2) Gower, S. T. *et al.* Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecol. Appl.* **11**, 1395–1411, 2001.
- 3) Osawa, A., Abaimov, A. P. & Zyryanova, O. A. Reconstructing structural development of even-aged larch stands in Siberia. *Can. J. For. Res.* **30**, 580–588, 2000.
- 4) Sovanchandara, H., Murakami, D., Fujii, S., Aizawa, S. & Osawa, A. Correction of stand variable estimates obtained by the stand reconstruction technique: can stump information improve the predictions? *Sib. Lesn. Zurnal/Siberian J. For. Sci.* 25–45, 2018.
- 5) Niazai, A. *et al.* Application of a u-w method for the detection of boreal forest response to environmental changes in Canada. *J. For. Res.* **26**, 1–11, 2021.
- 6) Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*, Springer Science & Business Media, 1990.
- 7) Kaennel, M. & Schweingruber, F. H. *Multilingual glossary of dendrochronology*, Paul Haupt Publishers, Berne, Switzerland, 1995.
- 8) Mäkinen, H. & Colin, F. Predicting branch angle and branch diameter of Scots pine from usual tree measurements and stand structural information. *Can. J. For. Res.* **28**, 1686–1696, 1998.
- 9) Vennetier, M. *et al.* Climate change impact on tree architectural development and leaf area. *Clim. Chang. realities, impacts over ice cap, sea Lev. risks. Rijeka, Croat. InTech* 103–126, 2013.
- 10) Pensa, M. & Jalkanen, R. Variation in needle longevity of *Pinus sylvestris* L. is related to needle-fascicle production rate. *Tree Physiol.* **25**, 1265–1271, 2005.
- 11) Lindholm, M., Ogurtsov, M., Aalto, T., Jalkanen, R. & Salminen, H. A summer temperature proxy from height increment of Scots pine since 1561 at the northern timberline in Fennoscandia. *Holocene* **19**, 1131–1138, 2009.
- 12) Guan, B. T., Wright, W. E., Chung, C.-H. & Chang, S.-T. ENSO and PDO strongly influence Taiwan spruce height

- growth. *For. Ecol. Manage.* **267**, 50–57, 2012.
- 13) Takahashi, K. Shoot growth chronology of alpine dwarf pine (*Pinus pumila*) in relation to shoot size and climatic conditions: A reassessment. *Polar Biosci.* 123–132, 2006.
  - 14) Sano, Y., Matano, T. & Ujihara, A. Growth of *Pinus pumila* and climate fluctuation in Japan. *Nature* **266**, 159–161, 1977.
  - 15) Tanabe, T., Epron, D. & Dannoura, M. A new approach to identify the climatic drivers of leaf production reconstructed from the past yearly variation in annual shoot lengths in an evergreen conifer (*Picea mariana*). *Trees* 1–12, 2021.
  - 16) Poorter, L., Bongers, L. & Bongers, F. Architecture of 54 moist-forest tree species: Traits, trade-offs, and functional groups. *Ecology* **87**, 1289–1301, 2006.
  - 17) Bontemps, J.-D., Hervé, J.-C. & Dhôte, J.-F. Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. *For. Ecol. Manage.* **259**, 1455–1463, 2010.
  - 18) Iida, Y. *et al.* Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species. *Funct. Ecol.* **26**, 274–282, 2012.
  - 19) Assmann, E. *The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands.* Oxford, 1970.
  - 20) Mäkinen, H., Nöjd, P. & Isomäki, A. Radial, height and volume increment variation in *Picea abies* (L.) Karst. stands with varying thinning intensities. *Scand. J. For. Res.* **17**, 304–316, 2002.
  - 21) Yasuda, Y., Utsumi, Y., Tashiro, N., Koga, S. & Fukuda, K. Cessation of annual apical growth and partial death of cambium in stem of *Abies sachalinensis* under intensive shading. *J. Plant Res.* **131**, 261–269, 2018.
  - 22) Bouriaud, O., Bréda, N., Dupouey, J.-L. & Granier, A. Is ring width a reliable proxy for stem-biomass increment? A case study in European beech. *Can. J. For. Res.* **35**, 2920–2933, 2005.
  - 23) Mäkinen, H. The suitability of height and radial increment variation in *Pinus sylvestris* (L.) for expressing environmental signals. *For. Ecol. Manage.* **112**, 191–197, 1998.
  - 24) Rubio-Cuadrado, Á., Bravo-Oviedo, A., Mutke, S. & Del Río, M. Climate effects on growth differ according to height and diameter along the stem in *Pinus pinaster* Ait. *iForest-Biogeosciences For.* **11**, 237, 2018.
  - 25) Takahashi, K. & Aoki, K. Effects of climatic conditions on annual shoot length and tree-ring width of alpine dwarf pine *Pinus pumila* in central Japan. *J. Plant Res.* **128**, 553–562, 2015.
  - 26) Mäkinen, H. Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. *Trees* **16**, 346–353, 2002.
  - 27) Mäkinen, H., Jyske, T. & Nöjd, P. Dynamics of diameter and height increment of Norway spruce and Scots pine in southern Finland. *Ann. For. Sci.* **75**, 28, 2018.
  - 28) Pensa, M., Sepp, M. & Jalkanen, R. Connections between climatic variables and the growth and needle dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Estonia and Lapland. *Int. J. Biometeorol.* **50**, 205–214, 2006.
  - 29) Levanič, T. *et al.* The climate sensitivity of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in the southeastern European Alps. *Trees* **23**, 169, 2009.
  - 30) Fritts, H. C. *Tree rings and climate.* Academic Press, 1976.
  - 31) Cook, E. R. & Peters, K. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene* **7**, 361–370, 1997.
  - 32) Gower, S. T., Kucharik, C. J. & Norman, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index,  $f_{\text{APAR}}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.* **70**, 29–51, 1999.
  - 33) Ge, R. *et al.* Underestimated ecosystem carbon turnover time and sequestration under the steady state assumption: A perspective from long-term data assimilation. *Glob. Chang. Biol.* **25**, 938–953, 2019.
  - 34) Clark, D. A. *et al.* Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecol. Appl.* **11**, 356–370, 2001.
  - 35) Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I. & Coppin, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.* **121**, 37–53, 2004.
  - 36) Zheng, G. & Moskal, L. M. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors.

*Sensors* **9**, 2719–2745, 2009.

- 37) Neumann, H. H., Den Hartog, G. & Shaw, R. H. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agric. For. Meteorol.* **45**, 325–345, 1989.
- 38) Kucharik, C. J., Norman, J. M. & Gower, S. T. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agric. For. Meteorol.* **91**, 69–88, 1998.
- 39) Leblanc, S. G. & Fournier, R. A. Hemispherical photography simulations with an architectural model to assess retrieval of leaf area index. *Agric. For. Meteorol.* **194**, 64–76, 2014.
- 40) Gower, S. T. & Norman, J. M. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology* **72**, 1896–1900, 1991.
- 41) Gonsamo, A., Walter, J.-M. N. & Pellikka, P. Sampling gap fraction and size for estimating leaf area and clumping indices from hemispherical photographs. *Can. J. For. Res.* **40**, 1588–1603, 2010.
- 42) Kurkela, T. & Jalkanen, R. Revealing past needle retention in *Pinus* spp. *Scand. J. For. Res.* **5**, 481–485, 1990.
- 43) Jalkanen, R., Aalto, T. & Kurkela, T. Development of needle retention in Scots pine (*Pinus sylvestris*) in 1957–1991 in northern and southern Finland. *Trees* **10**, 125–133, 1995.
- 44) Sander, C. & Eckstein, D. Reconstruction of the foliation of *Picea abies* by means of needle traces. *Scand. J. For. Res.* **9**, 311–315, 1994.
- 45) Sander, C. & Eckstein, D. Foliation of spruce in the Giant Mts. and its coherence with growth and climate over the last 100 years. *Ann. For. Sci.* **58**, 155–164, 2001.

## 著者プロフィール



田邊 智子 (Tomoko Tanabe)

<略歴> 2016年信州大学農学部森林科学科卒業／2022年京都大学地球環境学舎資源循環学廊博士後期課程修了(地球環境学博士)／同年同大学農学研究科ポスドク／同年森林総合研究所関西支所ポスドク／2023年京都大学生存圏研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。<研究テーマと抱負> 木部の伸長量と肥大量に着目した樹木生産量と気候の関係解明 <趣味> のんびりお茶や珈琲をいれること。