

乱流プロセスを中心とした植生–大気間の相互作用に関する理論的な研究

渡辺 力

(北海道大学 低温科学研究所)

Theoretical studies on vegetation–atmosphere interactions, focusing on turbulent transport processes

Tsutomu WATANABE

(Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University)

1. はじめに

このたびは、伝統ある日本農業気象学会学術賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦いただいた桑形恒男博士、学会賞審査委員会および会員の皆様へ厚く御礼申し上げます。今大会が開催された仙台の地において学生として研究の世界に足を踏み入れて以来、40年近くにわたって地道に続けて来た研究に対し、このような過分の評価を頂きましたことは、まさに望外の喜びです。これまで温かく受け入れて下さいました本学会の皆様へ改めて感謝申し上げます。

以下に、これまでの研究の概略を紹介させていただきます。なお、文中のお名前や所属はすべて当時のものです。

2. 微気象学との出会い

地表面に近い大気境界層における気象学(微気象学)との出会いは、学生として東北大学理学部地球物理学教室の近藤純正教授の研究室(気象学研究室)に所属したときに遡ります。当時の研究室では、近藤先生の強いリーダーシップの下、各種の地表面における大気との運動量や熱の交換過程に関わる研究が精力的に進められ、教員の先生方や大学院生の皆さんが、次のようにそれぞれ異なる種類の地表面に関する研究を担当されていました。積雪地(山崎剛さん、沼田洋一さん)、植生地(川中敦子さん、松島大さん)、裸地(三枝信子さん)、幾何面(石田祐宣さん)、広域地表面(山澤弘実さん、菅原広史さん)、複雑地形(安田延壽先生、佐藤威先生、萩野谷成徳先生、桑形恒男さん、大草直子さん)。後に各分野をリードして行かれることになる多くの優れた先輩・同僚・後輩が集まり、ゼミや輪読会ではさながら学会セッションのような高度なディスカッションが繰り返されていました。そこで見聞きし学んだことが私の研究人生の血肉となったわけですが、特に強く心に刻まれたことは、境界領域研究の面白さでした。大気境界層は文字通り大気と地表の境界です。そこでの気象を理解しようとするとき、大気の物理を考えなければならぬのはもちろんですが、それでは足らず、地表面の中身についての理解を欠くことができません。そして、当時の研究室メンバーは、それぞれ雪氷学、水文学、土壌物理学、植物生理学などの勉強に時間を惜しまず、まさに境

界領域の研究に意欲的に取り組んでいました。その姿勢が強烈な刺激になったことは言うまでもありません。とはいえ、入門したての頃は、頭の上を「空気力学的粗度」や「摩擦速度」など謎のキーワードが飛び交うゼミでのやり取りを聞きながら、それに何とかついていけるようになりたいという一心で教科書や文献を読み漁る日々でした。このときの経験が、その後の研究の土台をなす大きな財産になりました…。

…と、まるで勤勉な学生だったかのように書いてしまいましたが、実際には、またの名を「野球物理学教室」とも言われる専攻での研究室対抗野球大会に向けて野球練習に没頭したり、花見、芋煮会、サンマ焼きなどのイベントや趣味にうつつを抜かず不良学生であったことは正直に記しておきます。

3. 植物群落の微気象・熱・水・炭素収支モデル開発

さて、大学院で私に与えられた研究テーマは「植生地における潜熱輸送のパラメタ化」でした。「少し難しく時間がかかりそうだから君に向くよ」という理由からです。近藤先生はいつの間にか私のこだわり症を見抜かれていました。それから、当時助手でいらした佐藤威先生のご指導の下、春～秋は毎週のように、宮城県内の水田や草地、山形県のリンゴ園に通い、微気象観測に明け暮れることになりました。先輩・後輩を問わず、研究室の皆さんには毎回サポートして頂きました。一方、秋～冬は数値モデルの開発です。私が学部4年の頃、博士課程を卒業間際だった川中敦子さんより、研究室で代々開発されてきた群落多層モデル(Kondo and Kawanaka, 1986)のプログラムを伝授して頂きました。それを解読し、植物による蒸散や群落内の水蒸気輸送を取り入れ、群落熱収支のすべての要素を含んだモデルを完成させ、観測とモデルを合わせ、潜熱も含めた熱交換をパラメタ化することを目指したわけです。先生の予言通り、あちこちに壁がはだかる難しい課題でした。研究が滞るたび、「ツトム君、これはあれよね…」から始まる近藤先生の慧眼コメントに何度も救って頂きました。そうして、国内外の農業気象分野の文献を読み漁りながら群落内の混合距離モデルを考案し(Watanabe and Kondo, 1990)、群落多層モデルを完成させるとともに植生地のバルク輸送係数という形でパラメタ化を行い(Kondo and Watanabe, 1992)、簡便な単層モデル(Watanabe, 1994)に凝縮することができました。

<https://agrmnet.jp/wp-content/uploads/2024-F-1.pdf>

2024年6月3日 受付

Copyright 2024, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

後日のこととなりますが、前者の多層モデルは、さらに光合成・呼吸とリンクした気孔応答などの生理過程を追加することで植物群落の熱・水・炭素収支モデル MINCER (Watanabe et al., 2005)として完成し、さらに江守正多さん(環境研)、高田久美子さん(地球フロンティア)、横沢正幸さん(農環研)、原登志彦さん(北大)、隅田明洋さん(北大)、戸田求さん(北大)らとの共同研究において、動的植生—陸面モデル MINoSGI (Watanabe et al., 2004; Toda et al., 2009)へと発展させることができました。さらに直近では、丸山篤志さん(農環研)や桑形恒男さん(農環研)による、水田での結露環境の解析モデル (Maruyama et al., 2023)に応用されています。また、後者の単層モデルは、高田さんや江守さんが中心となって開発された、大気大循環モデルにおける陸面モデル MATSIRO (Takata et al., 2003)に用いられるとともに、桑形さんや濱寄孝弘さん(北農研)によって水田水温の予測モデルとして拡張され (Ku wagata et al., 2008; 桑形ら, 2019)、現在も農業気象分野での応用が進められています。

また大学院時代に話を戻しますと、博士課程の学生の頃、メソ気象学をご専門とする木村富士男先生が助教授として着任されました。木村先生による講義や輪読会では、流体力学の基礎方程式の数値解析法について学ぶ機会が与えられ、数値流体力学を少し身近に感じることができるようになりました。その輪読会で学んだことがきっかけで、植物群落におけるスカラー量の輸送を、乱流クローザーモデルを用いて表現する多層モデルを構築することになります (Watanabe, 1993)。また、後に自身で大気の局域循環モデルを組み上げることもつながり、広域森林による領域気候に対する影響評価 (渡辺・下山, 2015)を行い、最近の伊川浩樹さん(農環研)や桑形さんらとの共同研究において、水田の気候緩和機能を評価する研究 (Ikawa et al., 2021)に利用されることとなります。さらには、後に述べる乱流の数値シミュレーションをゼロから始めようと思えたのも、このときの学びがあったからこそです。

4. 森林の微気象・フラックス研究

大学院修了後に就職した森林総合研究所では、気象研究室の谷誠室長を始め、同室の大谷義一さん、森澤猛さんの下、自由に研究をさせて頂きました。まず取り組んだのは森林の遮断蒸発時における熱収支に関する研究です。ちょうど、遮断蒸発が森林水収支の大きな割合を占めることが話題になっていた頃です。隣の研究室にいらした水谷完治さんが、森林における降雨時の顕熱フラックスの測定データをお持ちでしたので、多層モデルを用いて大きな遮断蒸発が起こるメカニズムを調べられないかと考えました。水谷さんは別の研究室にいらした山野井克己さんと、農工研の大型風洞をお借りして降雨中の超音波風速計の振る舞いを調べ、降雨が強すぎなければ顕熱フラックスが測定可能なことを突き止めました (Mizutani et al., 1997)。一方、私は研究所の風洞で濡れた小枝の蒸発実験を行うことで遮断蒸発のサブモデルを構築し、多層モデルに取り入れた計算を行いました。しかし、遮断水によって葉が濡れると、大気からの顕熱が群落に供給されることで蒸発が維持され、葉が乾くとともに次第に蒸散が復活する一連の様子を再現できたものの (Watanabe and Mizutani, 1996)、大きな遮断蒸発をもたらすメカ

ニズムには迫り切れませんでした。これは今も私の中の未解決課題の1つです。

同じ頃、森林における微気象やフラックスの通年観測に取りかかりました。当時、熱収支や CO₂ フラックスを長期的に観測した例はまだ少なく、データを積み重ねておくことが森林と気候の相互影響を知る上で重要だと考えたためです。私は言い出すのみでしたが、観測地の選定からタワー建設の手配や費用交渉など、必要な準備は大谷さんや谷室長がご尽力下さり、埼玉県川越市に観測タワーを設置することができました。そのお二人はもちろんのこと、山野井さん、岡野通明さん、溝口康子さん、野口正二さん、水谷さん、千葉幸弘さんや、学生だった安田幸生さん(千葉大)らとともに、乱流、微気象、土壌、水文等の測定系を立ち上げました。最初の頃はデータ回収とメンテのために週1回現地に通う必要がありましたが、これまでにないデータに触れる好奇心に突き動かされたことをよく覚えています。この観測からは、観測手法の確立と検証 (Yasuda et al., 1997; Watanabe et al., 2000; Yasuda and Watanabe, 2001)、データ品質の管理法 (Yasuda et al., 2005)、土壌呼吸の特性 (Mizoguchi et al., 2005)に関する成果が得られました。が、肝心の熱収支や CO₂ フラックスの長期データの公表はほんの一部 (安田ら, 1998; 渡辺, 2001)にとどまってしまう。それが今でも大きな心残りになっています。公表を躊躇した原因は、渦相関フラックスが熱収支を満たさない、いわゆる熱収支の不均衡 (インバランス) 問題でした。今となっては広く知られている問題ですが、当時は観測に不備があると考え、測器の校正を見直し、森林貯熱量の簡易推定法を開発し (渡辺・大谷, 1998)、移流影響の可能性を調べたりしましたが、原因は明らかになりませんでした。そのうちに海外での観測結果が数多く報告されるようになり、はるかに理想的なサイトでも同じ問題が生じることが分かり、実は渦相関法の原理に原因があることを疑うようになりました。

5. 乱流の数値シミュレーション

ちょうどその頃、植生乱流の研究をリードしてこられた Roger Shaw 教授 (UC Davis) による特別講義を聴く機会があり、植生キャノピー流れの Large-Eddy Simulation (LES) と出会います。講義中、群落内の渦巻く流れが鮮やかに可視化される様子にすっかり魅了されながら、これで不均衡問題を解明できる、そんな期待で頭が一杯になりました。そして、それから数年、LES の勉強とプログラミングに取り憑かれます。トイレや風呂場の壁のタイルを計算格子に見立てては、適切な数値解法 (特に圧力の求め方) の導出に悩む日々。そうして、ようやく出来上がったモデルを用い、渦相関法は、一点での時系列データに基づく以上、空間を代表するフラックスに比べて系統的に過小評価になることを示すことができました。これをある研究会で発表したところ、驚いたことに神田学さん (東工大) もまったく同じ研究をされていることが分かり、急遽、共著論文の執筆が決まりました (神田ら, 2002; 渡辺・神田, 2002; Kanda et al., 2004)。このときのより詳しい経緯は別稿 (渡辺, 2004) に記してあります。しかし、不均衡問題がそれで氷解したわけではなく、その後も国内外で多くの研究が行われてきましたが、未だ決定的な原因究明には至っていないように思われます (これもまた私の中の未解決課

題です)。また、同じ LES モデルにより、スカラー量や風速の時系列にランプ構造をもたらす流れ場の空間構造を明らかにし、その形成に従来とは異なるメカニズムが関与する可能性を指摘することができました (Watanabe, 2004, 2009)。これが、混合距離に関する最初の論文を書き、以来、持ち続けた疑問(植生乱流の斉一性の由来)に対する答えになりました。

6. 学生の皆さんと

北大に着任後は、同時に着任した下山宏さんとともに、(まったく無謀にも)出身研究室のような視野の広い研究室を作ることを目指してきました。これまで、学生の皆さんと、群落乱流はもとより、地形と大気冷却、森林と積雪の熱収支、森林の防風・防雪機能、大気境界層の乱流構造、地吹雪現象などに関する研究を進め、後に研究室に合流された川島正行さんは、メソ気象モデルを駆使して雲や降水が関わる気象の解明研究を学生らと進めています。

例えば、接地境界層の乱流については、直線上に多数配置した測器群を用いた水平構造の観測や PIV と呼ばれる画像計測法を導入して行った時空間構造の観測(渡辺・下山, 2019)では、数値解析が先行してきた乱流空間構造を、野外観測によって直接解析する道筋をつけることができました。また、北海道という自然に恵まれたフィールドを研究に生かすことができるのも北大の魅力の一つです。これまで、道内に散在する局所的に極低温な気温が出現する地点における、気温低下のメカニズムと周辺地形との関係に関する局地気候的なテーマや、森林下の雪面熱収支や防風・防雪林の機能評価など、身近に存在する雪と森林が関わる研究課題について、いずれも現地観測や数値シミュレーション及びデータ解析を併用した研究を進めてきました。これらの研究では、佐藤篤司先生(防災科研・北大)や根本征樹さん(防災科研)のご指導を仰ぐとともに、森林総研北海道支所の山野井さんや溝口さんのご協力を頂きました。一方、乱流の数値シミュレーションを用いる研究では、稲垣厚至さん(東工大)、小野寺直幸さん(原子力機構)、長谷川雄太さん(原子力機構)らとの共同研究により、格子ボルツマン法という比較的新しい流体計算法を用いた LES モデルを新たに構築し、並列計算機を用いた植生乱流の高速シミュレーションを可能にすることができました (Watanabe et al., 2020, 2021)。さらに、このモデルとラグランジュ的な粒子追跡モデルを組み合わせ、地吹雪粒子と流れの相互作用の解析 (Watanabe et al., 2024) や、有限幅の森林が花粉やエアロゾルなどの物質拡散に及ぼす影響など、農業気象や防災等の観点から、より現実的な課題に適用する研究を進めています。

学生の皆さんと進めているこれらの研究は、いずれもまだ萌芽的なものが多いですが、今後も深化を続け、少しでも農業気象学の進展に寄与するとともに、その過程を通して、社会に貢献する若者の成長を後押ししたいと思います。

7. おわりに

言うまでもないことですが、研究の面白さは、教科書にまだ載っていないような新事実を追求できるところにあります。とはい

え、教科書の内容を正しく消化していなければ、真に新規性のある研究を行うことは多くの場合難しいでしょう。一方で、教科書を盲信し過ぎるのも問題です。そのバランスの取り方は人それぞれだと思いますが、こだわり症な私の場合は、自分自身が納得するまで調べなければ先に進めない傾向が強いです。効率はずこぶる悪いです。短期間で多くの成果が求められる時世にあつて、若い皆さんにお勧めできるやり方ではありません。ただ、効率を追求し過ぎるあまり、基礎が揺らいでしまつては、意味深い研究を続けて行くことが難しくなることも確かです。1つ2つ、既に先人がやっているようなことであっても、とことん調べ尽くして納得するという経験は、これからの研究生活において決して無駄にならないように思います。また、それが十分可能な環境が用意されることを願ってやみません。

最後に、こうして自身が迎ってきた道のりを振り返ってみると、どれほど環境に恵まれ、多くの方々に支えられて来たかを思わずにはいられません。この原稿を書きながらも感謝の思いが身に溢れるのを覚えます。これまでご指導下さった先生方や先輩方、苦楽をともに下さった研究仲間の皆さん、私の拙い指導の下でも熱意をもって研究に取り組んで下さった学生の皆さん、視野を広げて下さった各所属機関の研究者の皆さん、温かく受け入れて下さった日本農業気象学会の皆様、すべての方々のお名前をここに記すことはできませんが、幸運にも皆様と出会いそして導かれて来たことが、これまで研究を続けて来られた一番の理由です。この場をお借りして、厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- Ikawa H, Kuwagata T, Haginoya S, Ishigooka Y, Ono K, Maruyama A, Sakai H, Fukuoka M, Yoshimoto M, Ishida S, Chen CP, Hasegawa T, Watanabe T, 2021: Heat-mitigation effects of irrigated rice-paddy fields under changing atmospheric carbon dioxide based on a coupled atmosphere and crop energy-balance model. *Boundary-Layer Meteorology* **179**, 447-476.
- Kanda M, Inagaki A, Letzel MO, Raasch S, Watanabe T, 2004: LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* **110**, 381-404.
- 神田 学, 渡辺 力, Letzel MO, Raasch S, 2002: LES による熱収支インバランス問題に対する検討.(第 1 報) 大気境界層スケールの対流構造の影響. *水文・水資源学会誌* **15**. 243-252.
- Kondo J, Kawanaka A, 1986: Numerical study on the bulk heat transfer coefficient for a variety of vegetation types and densities. *Boundary-Layer Meteorology* **37**, 285-296.
- Kondo J, Watanabe T, 1992: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **49**, 2183-2199.
- Kuwagata T, Hamasaki T, Watanabe T, 2008: Modeling water temperature in a rice paddy for agro-environmental research. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 1754-1766.

- 桑形恒男, 伊川浩樹, 丸山篤志, 小野圭介, 吉本真由美, 石田祐宣, 渡辺 力, 2019: 水田群落微気象モデルの概要と農学分野への応用. *低温科学* **77**, 125-136.
- Maruyama A, Kuwagata T, Watanabe T, 2023: Observations on dew formation in the rice canopy and its simulation using a multilayer microclimate model. *Journal of Agricultural Meteorology* **79**, 28-37.
- Mizoguchi Y, Ohtani Y, Watanabe T, 2005: Influence of soil temperature and soil moisture on forest floor CO₂ efflux - clarification of the effect of soil moisture using field data. *Journal of Agricultural Meteorology* **60**, 761-764.
- Mizutani K, Yamanoi K, Ikeda T, Watanabe T, 1997: Applicability of the eddy correlation method to measure sensible heat transfer to forest under rainfall conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **86**, 193-203.
- Takata K, Emori S, Watanabe T, 2003: Development of the minimal treatments of surface interaction and runoff (MATSIRO). *Global and Planetary Change* **38**, 209-222.
- Toda M, Yokozawa M, Sumida A, Watanabe T, Hara T, 2009: Foliage profiles of individual trees determine competition, self-thinning, biomass and NPP of a *Cryptomeria japonica* forest stand: a simulation study based on a stand-scale process-based forest model. *Ecological Modelling* **220**, 2272-2280.
- Watanabe T, 1993: The bulk transfer coefficients over a vegetated surface based on K-theory and a 2nd-order closure model. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **71**, 33-42.
- Watanabe T, 1994: Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorology* **70**, 13-35.
- 渡辺 力, 2001: 落葉広葉樹林への応用例. 地表面フラックス測定法(塚本修, 文字信貴編). 気象研究ノート **199**, 177-182.
- Watanabe T, 2004: Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorology* **112**, 307-341.
- 渡辺 力, 2004: まずは調べてみよう, 常識にとらわれずに. 水文・水資源学会誌 **17**, 118-119.
- Watanabe T, 2009: LES study on the structure of coherent eddies inducing predominant perturbations in velocities in the roughness sublayer over plant canopies. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **87**, 39-56.
- 渡辺 力, 神田 学, 2002: LESによる熱収支インバランス問題に対する検討.(第2報)水平一様な植生キャノピー層を含む中立接地境界層における検討. 水文・水資源学会誌 **15**, 253-263.
- Watanabe T, Kondo J, 1990: The influence of canopy structure and density upon the mixing length within and above vegetation. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **68**, 227-235.
- Watanabe T, Mizutani K, 1996: Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **80**, 195-214.
- 渡辺 力, 大谷義一, 1998: 樹幹熱伝導の計算手法に関する考察. *農業気象* **54**, 47-54.
- 渡辺 力, 下山 宏, 2015: 大気と陸面の相互作用. 低温科学便覧(北海道大学低温科学研究所編). 丸善出版, 東京, pp. 239-258.
- 渡辺 力, 下山 宏, 2019: 相互作用の担い手—接地境界層の乱流構造を探る. *低温科学* **77**, 79-86.
- Watanabe T, Ishikawa S, Kawashima M, Shimoyama K, Onodera N, Hasegawa Y, Inagaki A, 2024: Structure of drifting snow simulated by Lagrangian particle dispersion model coupled with large-eddy simulation using the lattice Boltzmann method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **250**, 105783.
- Watanabe T, Nakai Y, Kitamura K, Utsugi H, Tobita H, Ishizuka S, 2005: Scaling energy and CO₂ fluxes from leaf to canopy using multilayered implementation for natural canopy-environment relations (MINCER). *Phyton* **45**, 353-360.
- Watanabe T, Shimoyama K, Kawashima M, Mizoguchi Y, Inagaki A, 2020: Large-eddy simulation of neutrally-stratified turbulent flow within and above plant canopy using the central-moments-based lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorology* **176**, 35-60.
- Watanabe T, Takagi M, Shimoyama K, Kawashima M, Onodera N, Inagaki A, 2021: Coherent eddies transporting passive scalars through the plant canopy revealed by large-eddy simulations using the lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorology* **181**, 39-71.
- Watanabe T, Yamanoi K, Yasuda Y, 2000: Testing of the bandpass eddy covariance method for long-term measurement of water vapour flux over a forest. *Boundary-Layer Meteorology* **96**, 473-491.
- Watanabe T, Yokozawa M, Emori S, Takata K, Sumida A, Hara T, 2004: Developing a multilayered integrated numerical model of surface physics-growing plants interaction (MINoSGI). *Global Change Biology* **10**, 963-982.
- Yasuda Y, Watanabe T, 2001: Comparative measurements of CO₂ flux over a forest using closed-path and open-path CO₂ analyzers. *Boundary-Layer Meteorology* **100**, 191-208.
- Yasuda Y, Watanabe T, Ohtani Y, Mizoguchi Y, Mano M, 2005: Quality control of flux data measured above a deciduous forest. *Journal of Agricultural Meteorology* **60**, 777-780.
- 安田幸生, 渡辺 力, 大谷義一, 岡野通明, 中山敬一, 1998: 落葉広葉樹林における CO₂ フラックスの季節変化. 水文・水資源学会誌 **11**, 575-585.
- Yasuda Y, Watanabe T, Yamanoi K, Ohtani Y, Okano M, 1997: Measurement of scalar flux from a forest using the bandpass covariance method. *Journal of Agricultural Meteorology* **52**, 493-496.