

農業気象学的アプローチによる乾燥地の観測・モデリング・
モニタリングと土地管理・砂漠化対策への展開
木村 玲二（鳥取大学乾燥地研究センター）

1. はじめに

このたびは、伝統と榮譽ある日本農業気象学会学術賞を賜り、誠に光栄に存じます。日本農業気象学会奨励賞を受賞以来25年余り、主として乾燥地の現場を中心に調査・研究を続けてきた者として、身に余る名誉であるとともに、改めて身の引き締まる思いであります。本賞にご推薦くださいました荊木康臣学会長、高山成理事、学術賞に際して温かい励ましをお寄せくださった会員の皆様、さらに学会賞審査委員会の委員長・委員の皆様をはじめ、学会関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

2. 大学が異なる学部・修士・博士の時代

私の学部、修士、博士の大学はすべて異なります。学部は弘前大学農学部で、当時世間で話題になっていたバイオテクノロジーに憧れて入学しました。しかし、結果として生物や化学中心の学問は自分には適しておらず、学科改編と時を同じくして、卜藏建治先生が率いる「農業気象学」研究室が新設され、研究室の分属を決める折に、その門を叩きました。「リンゴ台風」や「平成の大凶作」と呼ばれる気象災害が立て続けに発生した時期であり、青森県が甚大な被害を受ける現実を実習や調査で目の当たりにしました。現場に根ざした研究の視点について多くのことを学ぶとともに、農業気象という学問が、現場と社会を支えるうえで極めて重要な役割を担っていることを強く認識するようになりました。

学部3年時に、図書館で出会った遠山征雄著『砂漠緑化への挑戦』は、私に強い衝撃を与えました。偶然にも遠山先生と卜藏先生のご縁から、鳥取大学乾燥地研究センター（乾地研）を訪問する機会を得ました。鳥取大学大学院農学研究科に入学後、砂丘内にある乾地研で2年間、微気象（特に熱収支）の研究に没頭しました。測器やデータロガーの扱いを全く知らなかった私が、神近牧男先生や大槻恭一先生、先輩方のご指導の下、圃場作りから観測、解析、学会発表、論文の投稿という一連の研究プロセスを経験できたことは、大きな達成感を与えてくれました。鳥取砂丘は模擬的な乾燥地環境として理想的であり、基礎的な微気象研究に十分な場でした（引用文献 1,3,11,12）。

そうした折に、後輩が何気なく紹介してくれた出版されたばかりの『水環境の気象学』（近藤純正著）は、私の人生を決定づける二冊目の本となりました。熱・水収支研究に没頭していた私にとって、本書は新しい情報に満ちた、知的興奮を覚える一冊でした。この時、私にとって近藤先生は、学問の在り方を体現する特別な存在となったのです。学会発表をきっかけに近藤先生から便箋三枚にわたるご感想を後日郵便で頂き、この出来事が東北大学大学院理学研究科への編入を決定的にしました。編入後、出来もしない背伸びばかりの私に「木村君にしかできない研究がある」という先生の言葉は、その後の研究姿勢を形作る大きな指針となりました。博士課程の三年間は苦難の連続でしたが、先生と過ごした三年間は、研究者としての姿勢と学問に向き合う覚悟を身をもって学ぶ、かけがえのない時間でした。1999年には、ソルガムやシバ圃場での熱収支観測の成果が評価され、当学会の奨励賞を受賞しました（1,2）。

3. 再び乾地研へ

学位取得後、岡山大学資源生物（現：植物）科学研究所非常勤講師として木村和義先生と共に雨濡れ葉の分光反射特性（4）、琉球大学理学部助手として石島英先生と共に沖縄本島北部の熱・水収支の研究（5）に関わりましたが、再び教員として乾地研に戻ってきました。着任後は、中国、モンゴル、エジプト、トルコなどの乾燥地を対象として、水・熱循環過程の理解を基盤に、現地観測、数値モデリング、衛星リモートセンシングを段階的に統合し、乾燥地における土地劣化（＝砂漠化）や黄砂発生の実態解明と、その対策に資する情報提供を目的として研究に取り組んできました。以下に、本賞受賞に至った研究の概要をご紹介します。

3.1. 熱収支の現地観測

乾燥地で熱収支の観測を行う目的はいくつかありますが、一番の目的は、限られた水をいかにして使っているのか、または使うのかということを解明することにあると思います。2001年から約15年間、大型プロジェクトや科学研究費の下、中国黄土高原や河西回廊、モンゴル・ゴビ砂漠などの乾燥・半乾燥地域において、地表面熱・水収支およびCO₂収支の観

測結果を蓄積してきました(7,15,22,35)。当初は、機材の輸出や現地での受け取り、相手国側との様々な調整、観測の規制などによって、研究成果が出るまで苦労の連続でしたが、2005年頃から相手国側の研究力向上や業者さんによるバックアップ(輸出や設置)のおかげで、観測方法や研究成果が急激にレベルアップしました。観測の結果、河西回廊やゴビ砂漠では、観測期間内の降水量と蒸発散量がほぼ等しく、降った雨の大部分が短期間のうちに蒸発によって大気へ戻る環境であること、蒸発散に関与する土壌層は非常に浅く、地表面から十数センチ程度の薄い層で水と熱のやり取りが集中的に生じていること、などを明らかにしました。一方、比較的雨の多い黄土高原では(36)、年降水量が300mmを超えると水の流出が生じ、天水農業が可能であることを示しました。これらの知見は、乾燥地における水資源を定量的に理解する基盤を与えるとともに、限られた水を前提とした土地利用の在り方を検討する上で重要な基礎情報となりました。

3.2. 流域や地域スケールへの拡張

大型プロジェクトでは、研究課題がいくつかのグループに分けられていたため、同じ黄土高原でも観測サイトが異なりました。地上観測によって得られた知見を点的な理解にとどめるのではなく、流域や地域スケールへ拡張することを目的として、熱収支モデルと衛星データを統合した解析を行う必要が出てきました。我々のサイトだった神木県六道溝流域は面積が7km²あり、畑地、灌木地、草地等、土地利用が複雑で、流域全体の熱・水収支を把握するには、衛星による地表面温度や光学データを用いるのは必須でした。衛星データの取扱いが苦手な私に、岡田周平さんがデータの取得やソフトウェアの取扱いまで熱心に指導して下さいました。バルク法を取り入れた蒸発散推定アルゴリズムを作成し(16,17)、流域内の土地利用を考慮した水収支評価により、降水が蒸発散、浸透、流出としてどのように配分されるかを定量的に示すとともに、斜面や谷部など地形条件に応じた適切な土地利用のあり方について、相手国研究者と共に検討を行いました。この成果は、「持続可能な土地管理」を現地で議論する際の、客観的な科学的根拠として活用され、その後の中国側の研究結果より、2017年には明らかな植生の増加が認められています。

さらに、黄土高原全体における熱・水収支を把握するため、バルク法による土壌3層モデルを開発しました。前述の観測が示している通り、乾燥地における土壌中の水分移動は浅い層に限られ、深層では水蒸気による移動が主となります。黄土高原には少なくとも5種類の土壌がありましたので、土壌水分特性曲線や水蒸気拡散距離等のパラメーターを決定するのに非常に苦労しました(6,13)。しかし、このモデルのおかげで、黄土高原全体の乾燥度地図を作成することができ、さらには土地劣化地域や潜在的植生分布の特定に至りました(14)。また、後述の黄砂研究でもモデルは大いに役立ちました。表面の土壌水分が黄砂の発生に大きく影響するからです(18)。

3.3. 黄砂研究への移行そしてグローバルな砂漠化モニタリングへの拡張

2000年以降、日本における黄砂観測日数が増えてきたこと、それに伴う健康被害が社会的に問題視されてきたこと等の理由で、大型プロジェクトの下、黄砂研究に携わることになりました。モンゴルの2地点における現場を中心に、現地観測、小型境界層風洞の開発・実験(8,9)、モデル計算を組み合わせることで、植生・レキ被覆や地表面の湿潤状態が黄砂の発生を強く抑制することを定量的に示しました(10,19,20,33,34)。特に、枯れ草が地表面を被覆するとともに、風による運動量を吸収し、サルテーション粒子を捕捉することで飛砂やダストの発生を抑制する役割を持つことを明らかにしたことは、黄砂が多発する非生育期における草地の重要性を定量的に示した点で意義が大きかったと考えられます。これらの成果を基に、衛星データを用いた東アジア黄砂ハザードマップを構築し、ウェブ上で公開することで、黄砂発生リスクに関する情報提供を行ってきました(25,29)。本研究の成果は、黄砂災害の予測・情報提供に資する取り組みとして評価され、新聞をはじめとする複数のメディアにおいて紹介されました。

これら一連の研究の発展として、再解析データに依存せず、衛星データのみを用いて地表面の乾燥状態を評価できるSatellite-based Aridity Index(SbAI)を森山雅雄先生と共同で開発・検証しました(21)。森山先生との出会いは、石黒悦爾先生を通じてのものでしたが、それからの衛星を利用した研究の幅を大きく広げて下さいました。私は、画像収集からアルゴリズム開発まで、「すべて自分でやらなくては研究者ではない」と当時は思っていたのですが、森山先生は、「何言ってるの、木村さんがやる必要ないよ。」とおっしゃってくれたことは、前述の近藤先生のご指摘と共に私の研究人生を大きく変えた一つの出来事だったと思っています。

SbAIは、地表面温度の日較差や放射特性に着目した指標であり、地上観測データや既存の乾燥度指数(=年降水量/年蒸発散量)、実際の干ばつ事例との比較を通じて妥当性を確認してきました。幸いにも、世界中の研究者によって使用・検

証され、YouTubeでも解析についての講座が公開されています。この手法により、干ばつや風食的砂漠化を国、大陸規模、さらには全球規模で一貫してモニタリングすることが可能となりました(23,24,26,28,30)。

SbAIと植生指標を組み合わせた解析から、近年の乾燥地では、地域によって劣化が進行する一方で、政策や土地管理の影響を受けて回復傾向を示す地域も存在することが明らかになりました(27)。また、乾燥度指数と植生量の関係を整理することで、乾燥地における草原や乾燥地林の気候学的な安定条件を示し、森林再生だけでなく、草原の維持管理が持つ重要性をSOC隔離の点などから明確にしました(31)。さらに、2000年以降、土地劣化面積および乾燥地の分布は地球規模で年々減少傾向にある一方、2015年以降は再び増加に転じ、特にアフリカ・サヘル地域や中央アジアにおいて土地劣化や干ばつの影響が顕著であることを示しました(32)。これらの成果は、乾燥地における土地劣化の進行と回復を客観的に把握するための指標体系を提供するとともに、政策や土地管理の効果を広域かつ定量的に評価する基盤を築き、さらには、森林偏重になりがちな再生戦略に対し、草原を含む多様な植生タイプの持続的管理の重要性を示し、乾燥地の適応的土地利用や国際的な砂漠化対策に科学的根拠を与えたと考えられます。

4. おわりに

私の研究は、乾燥地における水・熱循環の理解を出発点として、現場観測に基づく物理的理解を、モデル化と衛星データによって空間的・時間的に拡張し、最終的に土地管理や環境対策へと結び付けることを目指してきたものです。今後も、本賞に満足することなく、ポストAGI(Artificial General Intelligence)時代に向けた乾燥地の持続的利用と環境保全に資する科学的知見の創出、およびその社会実装に向けた研究を継続していきたいと考えております。

これまでの研究は、申すまでもなく、私一人の力で成し得たものではございません。多くの先生方、研究仲間や事務の皆様、業者の皆様そして学生の皆様に支えられて今日の私がございます。お名前を挙げれば枚挙にいとまがなく、ここで個別にご紹介することは控えましたが、改めて心より感謝申し上げます。最後に、私を研究の道へと導き、常に温かく見守り励ましてくださいました、卜藏建治先生、神近牧男先生、大槻恭一先生、近藤純正先生、木村和義先生、石島英先生に、あらためて深甚なる感謝を申し上げます。ありがとうございました。

引用文献

1. 木村玲二, 近藤純正, 大槻恭一, 神近牧男, 1997a: 砂丘砂ソルガム圃場におけるバルク輸送係数と蒸発効率の推定. 農業気象 53, 131-140.
2. 木村玲二, 近藤純正, 大槻恭一, 木原康孝, 1997b: 潜熱輸送に対する葉面バルク係数のモデル化と芝生圃場への適用. 農業気象 53, 307-314.
3. 木村玲二, 近藤純正, 大槻恭一, 神近牧男, 1999: 植生面蒸発散量のモデリングモデルおよび観測による検証一. 水文水資源学会誌 12, 17-27.
4. 木村玲二, 木村和義, 田中丸重美, 大槻恭一, 2000: 雨濡れによる作物葉の分光反射特性と植生活性度指数. 水文水資源学会誌 13, 355-361.
5. 木村玲二, 石島英, 横山拓哉, 2001: 赤外線放射温度計による地表面温度と熱収支モデル計算による地表面温度の比較. 天気 48, 371-382.
6. 木村玲二, 高山成, 神近牧男, 松岡延浩, 2004: 黄土高原における土壌水分と熱収支—土壌3層モデル内のパラメータの決定とモデル計算の結果—. 農業気象 60, 55-65.
7. 木村玲二, 阿不来堤阿不力堤甫, 多炭雅博, 王維真, 2014: 中国河西回廊の草原荒地における蒸発散量. 沙漠研究 23, 93-99.
8. 劉佳啓, 木村玲二, 2017a: 小型簡易風洞の境界層形成に関する研究. 日本砂丘学会誌 63, 113-119.
9. 劉佳啓, 木村玲二, 2017b: 小型風洞において自然界に近い粗度長を伴う境界層を生成する手法の開発. 日本砂丘学会誌 64, 1-8.
10. Abulaiti A, Kimura R, Shinoda M, Kurosaki Y, Mikami M, Ishizuka M, Yamada Y, Nishihara E, Gantsetseg B, 2014: An observational study of saltation and dust emission in a hotspot of Mongolia. Aeolian Research 15, 169-176.
11. Kimura R, Kondo J, 1999: Studies on the relationships among the leaf transfer coefficient for water vapor, soil water content, and spectral reflectance. Journal of Meteorological Society of Japan 77, 873-886.

12. Kimura R, Otsuki K, Kamichika M, 1999: Relationships between the zero-plane displacement and the roughness length over sorghum and alfalfa canopies. *Journal of Agricultural Meteorology* 55, 15-24.
13. Kimura R, Kamichika M, Takayama N, Matsuoka N, Zhang X, 2004 : Heat balance and soil moisture in the Loess Plateau, China. *Journal of Agricultural Meteorology* 60, 103-113.
14. Kimura R, Liu Y, Takayama N, Zhang X, Kamichika M, Matsuoka N, 2005: Heat and water balances of the bare soil surface and the potential distribution of vegetation in the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments* 63, 439-457.
15. Kimura R, Fan J, Zhang X, Takayama N, Kamichika M, Matsuoka, N, 2006: Evapotranspiration over the grassland field in the Liudaogou basin of the Loess Plateau, China. *Acta Oecologica* 29, 45-53.
16. Kimura R, 2007: Estimation of moisture availability over the Liudaogou river basin of the Loess Plateau using new indices with surface temperature. *Journal of Arid Environments* 70, 237-252.
17. Kimura R, Bai L, Fan J, Takayama N, Hinokidani O, 2007: Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. *Journal of Arid Environments* 68, 53-65.
18. Kimura R, Bai L, Wang J, 2009: Relationships among dust outbreaks, vegetation cover, and surface soil water content on the Loess Plateau of China, 1999-2000. *CATENA* 77, 292-296.
19. Kimura R, Shinoda M, 2010: Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia. *Geomorphology* 114, 319-325.
20. Kimura R, 2012: Factors contributing to dust storms in source regions producing the yellow-sand phenomena observed in Japan from 1993 to 2002. *Journal of Arid Environments* 80, 40-44.
21. Kimura R, Moriyama M, 2014: Application of a satellite-based aridity index in dust source regions of northeast Asia. *Journal of Arid Environments* 109, 31-38.
22. Kimura R, Abulaiti A, Mano, M, Matsushima D, 2016: Surface heat flux analysis in Gobi Desert steppe, Mongolia—An observation study. *SOLA* 12, 175-180.
23. Kimura R, 2017: Validation and application of the monitoring method for degraded land area based on a dust erodibility in eastern Asia. *International Journal of Remote Sensing* 38, 4553-4564.
24. Kimura R, 2018: Global distribution of degraded land area based on dust erodibility determined from satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 39, 5859-5871.
25. Kimura R, 2018: Satellite-based mapping of dust erodibility in northeast Asia. *Natural Hazards* 92, 19-25.
26. Kimura R, Moriyama M, 2019: Determination by MODIS satellite-based methods of recent global trends in land surface aridity and degradation. *Journal of Agricultural Meteorology* 75, 153-159.
27. Kimura R, 2020: Global Detection of Aridification or Increasing Wetness in Arid Regions from 2001 to 2013. *Natural Hazards* 103, 2261-2276.
28. Kimura R, Moriyama M, 2021: Use of a MODIS Satellite-Based Aridity Index to Monitor Drought Conditions in Mongolia from 2001 to 2013. *Remote Sensing* 13, 2561.
29. Kimura R, 2022: Interannual changes of land surface conditions in Asian dust source regions since 2000. *Journal of Agricultural Meteorology* 78, 174-181.
30. Kimura R, Moriyama M, Şaylan L, 2023: Monitoring of recent aridification in Türkiye using MODIS satellite data from 2000 to 2021. *SOLA* 19, 94-100.
31. Kimura R, Moriyama M, 2024: Recent global distribution of aridity index and land use in Arid Regions. *SOLA* 20, 79-85.
32. Kimura R, Moriyama M, 2025: Area of land degradation in arid regions from 2000 to 2023. *Journal of Agricultural Meteorology* 81, 219-224.
33. Liu J, Kimura R, 2018: Wind speed characteristics and blown sand flux over a gravel surface in a compact wind tunnel. *Aeolian Research* 35, 39-46.
34. Liu J, Kimura R, Miyawaki M, Kinugasa T, 2021: Effects of plants with different shapes and coverage on the blown-sand flux and roughness length examined by wind tunnel experiments. *CATENA* 197, 104976.
35. Şaylan L, Kimura R, Başakin EE, Kurosaki Y, 2024: Variables controlling growing season carbon dynamics in desert shrub ecosystem. *Theoretical Applied Climatology* 155, 4797-4812.
36. Takayama N, Kimura R, Kamichika M, Matsuoka N, Zhang X, 2004: Climatic features of rainfall in the Loess Plateau in China. *Journal of Agricultural Meteorology* 60, 173-189.