

## 地域営農システムの生産性・持続性の解明と解析手法の展開

—日本での田畑輪換と中国での集約的多毛作を対象に—  
稲村達也 (奈良県立橿原考古学研究所)

地域営農システムにおける生産性と持続性の両立は、地域における農業生産の確保とともに農家の維持・拡大の両面から不可欠である。日本では集落営農が、中国では農家請負制度が、それぞれ地域農業を支える重要な体制になっている。日本では「田畑輪換」が集落営農の持続性を支える農法に位置付けられている一方、中国では「集約的多毛作」が展開している。稲村氏は、これら地域営農システムを支える田畑輪換ならびに中国の集約的多毛作を対象に、その生産性と持続性を両立させるための栽培技術の解明・評価と解析手法の展開において多大な研究成果をあげてきた。

### 1. 集団田畑輪換における生産性の解明と評価

日本の田畑輪換は、16世紀末から17世紀初めに始まり、盛衰を大きく繰り返しながら第二次世界大戦中の中断を経て、1960年ころまで転換畑での商品作物による現金収入を目的に行われた。そして、水田総合利用対策(1967-68年)以降は、米生産過剰に対処する土地利用としての田畑輪換が行われている(著書1)。稲村氏は、奈良県桜井市大西(水田32ha)の集団田畑輪換圃場群を対象に一連の研究を行った。1980年代(生産調整割合約29%)は水田3年と輪換畑1年のブロックローテーションを行っていたが、2000年以降(同約52%)は水田1年と輪換畑1年のローテーションへと変化させていた。稲村氏は、同集団内のブロック間およびブロック内圃場間の土壌および作物形質の変異を詳細に調査し、水田期間が1年となった輪換田では、全窒素と全炭素の低下に伴い土壌からの窒素発現量が減少しているが、輪換田水稲に特有の高い窒素吸収特性によって一毛作田に比較して高い生産性が維持されていることを明らかにした(業績1)。また水稲およびコムギの収量が輪換ブロック内および圃場内において大きく変動することを収量センサー付きコンバインでの調査から示し、その変動を是正する可変管理の必要性を指摘した(業績2,3)。そして、水稲では幼穂形成期の地上部窒素保有量の空間変動に応じて穂肥を制御する可変施肥(業績2)、コムギでは播種時土壌含水比の空間変動に応じて播種量を制御する可変播種(業績3,4)、そしてダイズでは莢数を介して収量に強く影響する開花期以降の乾物生産量の空間変動を推定するための植生指数(クロロフィル指数と日射量の積の積算値)を提唱した(業績5,6)。

さらに、このような施肥や栽培管理を実施するには、年次間変動の小さな土壌形質(SOM, TN, TCおよび粒径組成など)の空間変動に基づいた輪換ブロックの設定が重要であると指摘した(業績1,2,3,7,8,9,10)。すなわち、同調査対象では1980年代において、土壌調査に基づかないで農家の経験によって集団田畑輪換(32ha)の4つの輪換ブロックが設定されており、それは年次間変動の小さな土壌形質の分布パターンを反映していたが(業績10)、2000年以降(2つのブロック)では両者の一致度は低く、生産性と持続性の確保のためには土壌形質の空間変動に応じた輪換ブロックの再構築が必要であると指摘した(業績8)。

現地圃場を対象にした生産環境と栽培技術の調査研究では、得られたデータから有用かつ一般性のある情報を得るのは容易でなく、調査自体が極めて多労である。稲村氏は、空間統計およびリモートセンシングの技術を取り入れながら現地調査研究の手法の改良に取り組んだ。集団田畑輪換田(8.6ha)と非集団田畑輪換田(1.6ha)において、水稲の穂肥の可変管理の指標となる幼穂形成期窒素保有量(Npf)の空間変動を解析し、Npfのセミバリオグラムのレンジは前者で40~55m、後者で10~30mであることを見出し、Npfの空間変動パターン(レンジ)に基づく穂肥の可変施肥の単位(施肥量を変化させる単位面積、施肥単位面積)は、集団田畑輪換において大きく、可変管理に有利となることを示した(業績11)。そして、Npfに基づく穂肥施肥量(Nc) ( $Nc = (Nopt - Npf - Ns) / J$ )を求めるために必要な、リモートセンシングによるNpfの推定法(業績8,11,12)、総穎花数と登熟歩合との関係から求められる出穂期の最適窒素保有量(Nopt)、幼穂形成期から出穂期の間に水稲が吸収する土壌由来の窒素量(Ns)および穂肥窒素の吸収率(J)を水稲生育量との関係から推定する手法を提案した(業績13)。ここで、Npfのセミバリオグラムのレンジに基づいた可変施肥による施用窒素の総量が、許容される窒素投入量の上限(土壌窒素環境容量)を超えない範囲で、作物の総収量を最大化するように施肥単位面積ごとの可変施肥量を決定すれば、生産性と持続性が両立されるとした(著書2,シンポ1)。

### 2. 中国雲南省における集約的多毛作の評価とその制御

中国では、1979年に始まる農家請負制度のもとで、生産性をより重視した集約度の非常に高い農業が急増し、生産性と持続性に関する問題が大きくなっている(業績4,14)。そこで、中国の3大汚染湖沼のひとつである「滇池」(雲南省昆明市)沿岸部の多毛作地帯において、汚染が進む3水系において、年間の作付け回数が異なる野菜ハウス栽培圃場(32圃場)と水田一毛作圃場(4圃場)を対象に集約的農業の実態を把握し、そこにおける物質動態の解明とその結果に基づいた栽培管理の改善に関する研究を行った。

伝統的な水田二毛作(水稲-ムギ類・ソラマメ)がハウス栽培での葉茎菜類(茎レタスなど)の多毛作(年6~7作)へと変化し、1作当りの多い施肥量により年間の平均施肥量がN, P, K:177, 44, 110 g/m<sup>2</sup>と非常に多いことを指摘した(業績15)。ここでは、葉茎菜類による施肥窒素の吸収率は低く、最長で10年に及ぶ連作年数とともにさらに低下し、年間の窒素収支(投入量-持出量)は年間の作付け回数とともに増加する窒素投入量の増加により増加していた(業績16)。また、同圃場群では一般的な水田土壌に比較して土壌の全炭素が低いが、それは年間の高い作付け頻度とそれともなう耕起回数の増加および有機資材の投入不足に関与している可能性を指摘した。そして、ハウス土壌の高い硝酸態窒素に起因する地下水汚染の存在を明らかにした(業績16,17)。ハウス土壌中のN, P, K濃度は収穫による持出量に比較して投入量により強く影響され、家畜ふんに比較して化学肥料の投入量の寄与がより大きかった。そこで、化学肥料の投入量削減による収支バランスの改善の効果を検証するために調査圃場の土壌を用いた栽培試験を実施した。化学肥料由来以外の窒素吸収量、化学肥料由来の窒素の吸収率および吸収した化学肥料窒素の乾物生産効率の動態を、化学肥料窒素の投入量の削減下において解析し、年間の作付け回数と連作年数とともに影響される土壌の硝酸態窒素濃度に応じて化学肥料窒素の投入量を削減することで収量を維持しながら収支バランスを改善できること、すなわち生産性と持続性を同時に確保できることを明らかにした(業績17)。

持続性向上技術について、調査地域での栄養素フローの評価から、農地における窒素・リンの余剰量は年間100.7および27.2 kg

/10a と高く、投入量の削減と共に、系外からの持ち込みを削減するための地域内での栄養素循環の重要性を指摘した（業績 18）。そこで、滇池の水質浄化のために湖岸に栽植されているヨシの地上部を刈取って流域外に持ち出し、栄養塩類を除去すると共に、ヨシの飼料化によって地域の窒素循環を適正化させるためには、ヨシの多回刈取りが飼料生産と水質浄化に有効であることを明らかにした（業績 19, 20, 21, 22）。日本の田畑輪換への普及を念頭に、地域内の家庭で実用化されている糞尿のメタン発酵の残渣液の水田への還元の効果を検討し、この長期連用水田での水稻の生育・収量が化学肥料と同等であることを示した（業績 23, 24）。

以上のように、稲村氏の研究は、日本の田畑輪換および中国の集約的多毛作の生産実態を諸要因の空間的変異と時間的変化の両面から系統的にとらえ、持続性の要件と有効な技術を科学的根拠にもとづいて提示したものである。そして、一連の研究を通じて作物学の根幹的な部分をなすフィールド研究に新たな技術を導入しこれを充実させてきた。これらの業績は、日本作物学会賞を授与するに値するものと評価される。

## 研究業績

1. 池永幸子・松本二香・井上博茂・稲村達也. 2005. 田畑輪換における土壌の窒素発現と水稻による窒素吸収の圃場間と年次間の変異—奈良盆地における4年間の比較—. 日作紀. 74: 291-297.
2. Inamura, T., K. Goto, M. Iida, K. Nonami, H. Inoue and M. Umeda. 2004. Geostatistical analysis of yield, soil properties and crop management practices in paddy rice fields. *Plant Prod. Sci.* 7: 230-239.
3. 稲村達也・吉川茜・松本憲悟・池永幸子・井上博茂・山末祐二. 2007. コムギ収量の圃場内変動をもたらす要因の解析と可変量管理の可能性. 日作紀. 76: 189-197.
4. Inamura, T., Y. Mukai, A. Maruyama, S. Ikenaga, G. Li, X. Bu, Y. Xiang, D. Qin, T. Amano. 2008. Effects of nitrogen mineralization on paddy rice yield under low nitrogen input conditions in irrigated rice-based multiple cropping with intensive cropping of vegetables in southwest China. *Plant Soil.* 315: 195-209.
5. 村田資治・山下紘輝・稲村達也. 2019. 奈良県と山口県においてダイズ品種「サチユタカ」を密植しても増収しない要因の解明. 日作紀. 88(4): 237-245.
6. 村田資治・山下紘輝・足立紘一・日田早織・稲村達也. 2018. 近接リモートセンシングを用いたダイズ地上部乾物重の推定法の高精度化—クロロフィル指数と日射量を組み合わせた新しい植生指数—. 農作業研究. 53(3): 133-142.
7. 池永幸子・松本二香・稲村達也. 2006. 田畑輪換田における水稻 (*Oriza sativa* L.) 収量変動の要因解明. 日作紀 76: 28-36.
8. Ikenaga, S and T. Inamura. 2008. Evaluation of site-specific management zones on a farm with 124 contiguous small paddy fields in a multiple-cropping system. *Precision Agric.* 9:147-159.
9. Inamura, T., A. Yoshikawa, S. Ikenaga, and M. Iida. 2010. Path Analysis of Tiller Density of Winter Wheat Demonstrates the Importance of Practices that Manipulate Clod Size based on Soil Moisture at Seeding in Rice-Wheat Cropping System. *Plant Prod. Sci.* 13: 85-96.
10. 池永幸子・遠藤好恵・稲村達也. 2010. 田畑輪換を実施している連続圃場集合体における土壌特性値の空間変動解析. 土肥誌. 81: 207-214.
11. Ikenaga, S., K. Goto, M. Suguri, M. Umeda and T. Inamura. 2007. Geostatistical analysis of spatial variability of paddy rice nitrogen in paddy-upland rotational fields for extension of precision agriculture. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 69: 69-78.
12. 柳讃錫・村主勝彦・梅田幹雄・稲村達也. 2004. リモートセンシングによるイネの窒素保有量の推定. 農業機械学会誌. 66: 85-96.
13. Inamura, T., Hamada, H., Iida, K. and Umeda, M. 2003. Correlation of the amount of nitrogen accumulated in the aboveground biomass at panicle initiation and nitrogen content of soil with the nitrogen uptake by lowland rice during the period from panicle initiation to heading. *Plant Prod. Sci.* 6: 302-308.
14. 丸山明子・稲村達也・李貴利・朴雪梅・秦達達・向裕華・井上博茂・沈捷・万継宏・天野高久. 2005. 社会主義市場化に伴う農業システムの変化が水田の理化学性に及ぼした影響—中国西南部、四川省攀枝花市仁和区を例として—. 近畿作物・育種研究. 50: 27-30.
15. Wang, Y., T. Tanaka, H. Inoue, K. Li, D. Yang, and T. Inamura. 2015. Annual nutrient balance and soil chemical properties in heavy multiple cropping system in the coastal area of southeast lake Dianchi, Yunnan Province, China. *Plant Prod. Sci.* 18: 323-335.
16. Wang, Y., Li, K., Tanaka, TST, Yang, D., Inamura, T. 2016. Soil nitrate accumulation and leaching to groundwater during the entire vegetable phase following conversion from paddy rice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 106: 325-334.
17. Wang, Y., Tanaka, TST, Li, K., Inamura, T. 2016. Decreasing Input-output Balance by Reducing Chemical Fertilizer Input without Yield Loss in Intensive Cropping System in the Coastal Area of Southeast Lake Dianchi, Yunnan Province, China. *Plant Prod. Sci.* 19: 81-90.
18. Anzai, H., L. Wang, K. Oishi, C. Irbis, K. Li, H. Kumagai, T. Inamura, and H. Hirooka. 2015. Estimation of nitrogen and phosphorus flows in livestock production in Dianchi Lake basin, China. *Animal Science Journal*.
19. Tanaka S. T, C.Irbis, P.Wang, and T. Inamura. 2015. Impact of plant harvest management on function and community structure of nitrifiers and denitrifiers in a constructed wetland. *FEMS Microbiology Ecology* 91(2): 1-10.
20. Tanaka, TST, Irbis, C., Kumagai, H., Inamura, T. 2016. Timing of Harvest of *Phragmites australis* (CAV.) Trin. ex Steudel Affects Subsequent Canopy Structure and Nutritive Value of Roughage in Subtropical Highland. *Journal of Environmental Management* 166: 420-428.
21. Tanaka, TST, Irbis, C., Kumagai, H., Wang, P, Li, K., Inamura, T. 2017. Effect of *Phragmites japonicus* harvest frequency and timing on dry Matter yield and nutritive value. *Journal of Environmental Management* 187: 436-443.
22. Tanaka, TST, Irbis, C., Hama, Y., Wang, P, Li, K., Inamura, T. 2018. A small proportion of litter-derived nitrogen is assimilated by

plant biomass or immobilized in sediments regardless of harvest management as detected by 15N-labeled Phragmites litter in a constructed wetland. *Journal of Environmental Management* 217: 888-896.

23. Nishikawa T, L. Kunzhi, H. Inoue, M. Umeda, H. Hirooka, and T. Inamura. 2012. Effects of the Long-term Application of Anaerobically-digested Cattle Manure on Growth, Yield and Nitrogen Uptake of Paddy Rice (*Oryza sativa* L.), and Soil Fertility in Warmer Region of Japan. *Plant Prod. Sci.* 15: 284-292.
24. Nishikawa, T., K. Kido, K. Li, H. Inoue and T. Inamura. 2013. Temporal growth inhibition of rice plant and growth recovery observed under application of anaerobically-digested cattle manure. *Plant Pro. Sci.* 16(2): 154-165.

#### 著書

1. 稲村達也・中川重年 2001. 現代日本生物誌 7 「イネとスギ」. 岩波書店. 東京. 1-170.
2. 稲村達也 (編著) 2005. 栽培システム学. 朝倉書店. 東京. 1-195.

#### シンポジウム記事

1. 稲村達也. 2008. 営農システムにおける環境保全型農業技術の具現化. 「日本作物学会第 224 回講演会シンポジウム 1. 持続可能な社会の実現に向けた環境保全型農業の構築」. *日作紀*. 77: 219-220.