

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19308

研究課題名（和文）南インドの伝統灌漑に学ぶ持続的灌漑農法のパラダイムシフト～塩集積は絶対悪か？

研究課題名（英文）What is the key mechanisms of sustainable irrigation in south India

研究代表者

杉原 創（Sugihara, Soh）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・特任准教授

研究者番号：30594238

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：南インドで伝統的に行われてきた小規模灌漑畑作におけるCaCO₃岩層の農学的意義を明らかにすることを目的に、2.5年にわたる現地圃場試験（2度のソルガム栽培を含む）と、広域土壌調査および聞き取り調査を実施した。この結果、栽培年度の環境（具体的には干ばつ年+灌漑水不足の常態化）条件下においては、このCaCO₃岩層の存在は、固結層がもたらす水分保持機能という正の面よりも、塩集積および固結層形成による根成長の阻害といったような負の面のほうが大きい可能性が示された。加えて、当地の土壌有機物蓄積量は概して低く、堆肥施用に依存した既存の土地管理法では、土壌肥沃度を維持できても改善はできないことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまでは絶対悪と考えられていた土壌中の塩集積が、特殊な環境条件下においては、実は正の役割を果たすのではないかと、そしてそれが当地で千年以上にわたって持続的に灌漑農業を営むことができた理由なのではないか？という発想に基づいて実施された。しかし残念ながらこれまでのデータからは、この着想が正しいことを示すデータは得られていない。この原因には、気候変動（干ばつの頻発化）や灌漑水不足によって、着想の前提条件であった“特殊な環境条件”そのものが今まさに変異していることが考えられる。一方、現地の土壌肥沃度管理や塩集積機構に関する定量的知見は得られ、現地農業の発展に貢献する重要な知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：To evaluate the significance of CaCO₃-pan layer in irrigated cropland of south India, we conducted 1) the field experiment for 2.5 years, including 2 times sorghum cultivation, and 2) field survey to collect the soil samples and interviews for farmers. We hypothesized that CaCO₃-pan layer could contribute to maintain the soil moisture in the profile causing the better crop yields.

There was little effect of the removal of CaCO₃-pan layer on the crop growth, while it clearly affect the soil moisture dynamics. Removal of CaCO₃-pan layer did increase the soil moisture in the profile, contrary to our hypothesis. This is possibly because, the cultivation years were quite dry due to the climate change and insufficient groundwater to irrigate. These results suggest that the climate and groundwater condition should be drastically changing from the past sustainable irrigation systems, and therefore it is necessary to develop the new management in this area.

研究分野：土壌環境学

キーワード：半乾燥熱帯畑作地 小規模灌漑 塩類集積 井戸水灌漑 南インド 持続可能性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまでに、半乾燥熱帯気候である南インドの畑作地帯を主対象に、持続可能な土地資源利用法に関する研究を進めてきた。その過程で実施した広域土壌調査(深さ1mの土壌断面調査を約30地点で実施)において、数千年の歴史を持つとされる伝統的な灌漑農業の実態を検討した。この結果、南インドにはその灌漑様式-土壌環境-農業形態の代表的な組み合わせが2つあることが確認できた。1つが、緩斜面を利用した溜池灌漑と肥沃な沖積土壌(Vertisol)で営まれる水田稲作の組み合わせ、もう一つが本研究課題で対象とする、地下水を利用した井戸水灌漑(古くは牛等の畜力利用で現代はモーターの利用が主)と貧栄養な砂質土壌(Alfisols)で営まれるソルガム・ミレット等の畑作の組み合わせである。非常に興味深いことに、後者に関係した土地利用地帯における現地調査で、伝統的な井戸水灌漑地域の砂質土壌のほぼ全ての土壌断面において、深さ40~60cm以深より、炭酸カルシウムで生成された白いCaCO₃岩層(厚さは20~50cmと地域によりばらつく)を発見した。加えて、最近30年以内に井戸水灌漑を開始した地帯においては、同種の岩層の原型ともいべき固結物(岩というには小さいサイズではあるが同種であることは現地を確認済)の存在も発見した。これらの事実を踏まえると、このCaCO₃岩層は長年の井戸水灌漑により供給・蓄積されたCa等を中心とする人工の塩固結物であると考えられる。また、現地農民への聞き取りから、①最低でも200年は同一地点で雑穀やマメ科作物を井戸水灌漑で栽培している、②CaCO₃岩層は砂質土壌-井戸水灌漑の組み合わせを持つ地帯で数十km四方にわたり広く存在する、③CaCO₃岩層がある畑は水持ちが良く収量が高い、という認識を持っていることが判明し、現地共同研究者からも当地の井戸水灌漑の歴史(特に開始年代)が極めて古い(最低でも500年以上)ことが確認できた。これらの事実は、灌漑によって生成されたCaCO₃岩層が井戸水灌漑の持続性(効率的・節約的な水管理の実現、という意味で)を維持する(正のフィードバック効果を持つ)ことを示唆しており、従来の“灌漑=塩害との戦い”の等式とは全く異なる関係性を示しており、非常に興味深い。そこで本研究では、これらの事実を基に、『仮説:灌漑によって生成した土壌中の炭酸カルシウム岩層が持続的な灌漑農業を可能にした』を立脚し、この仮説を検証することを目的とした。本仮説が事実だとすると、当該地域を始めとした小規模な畑作灌漑の新たな持続性成立要因を解明・提案することが期待できる。しかしこれまでに、このCaCO₃岩層に関連した類似の学術的報告は存在せず、その生成機構や農学的意義に関しても全く不明である。そこで、上述した仮説を多角的に検証する過程で、持続的な小規模畑地灌漑の在り方に関しても、考察を加えていきたい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、南インドの砂質畑作地帯において、数千年の歴史を持つとされる井戸水灌漑農業の持続性成立要因について、当該地域に広く分布するCaCO₃岩層の生成機構や農学的意義について、検討することである。この過程で、疑問①CaCO₃岩層の有無で本当に作物生育が異なるのか(とくにCaCO₃岩層がある場所で作物生育が良いのか)?、疑問②CaCO₃岩層の分布およびそれらと土地利用(とくに灌漑方法やその量・頻度など)とどのように関係するのか?に着目して研究を進めていくこととした。

3. 研究の方法

課題①CaCO₃岩層の有無で本当に作物生育が異なるのか?

この問いを検討するために、南インド・タミルナードゥ州中部のCaCO₃岩層が広く分布する砂質畑作地帯において、後述する処理区を有する圃場栽培試験を2年にわたり実施した。なお本試験のまえに圃場の攪乱の影響をへらすための期間として、約半年間の予備栽培試験も実施している。写真にみるような土壌断面を持つ地点において、2m×1.5m×1.2m(幅×縦×深さ)の穴を3個作成し、CaCO₃岩層に相当する白い岩盤を完全に除去し、その代替として周辺の表層土壌を充填して穴を埋め返すことにより、CaCO₃岩層を除去した処

理区を作成した。この岩盤除去区と無処理区（岩盤あり区）において、ソルガムの栽培試験を実施し、その生育量を評価・比較した。また、温度・水分プローブ等を接続したデータロガーを設置し、土壌断面内の土壌水分動態も評価した。また、栽培試験開始時と、栽培試験2年目の収穫後（2019年12月）に、各処理区において土壌深度ごとに土壌試料を採取し、その塩濃度の違いを測定し処理の影響を検討する。なお当地で常態化しつつある地下水消失の影響を受け、初年度は灌漑なしでの栽培試験を、2年目は生育初期のみ少量の灌漑を、それぞれ行った。



写真：現地圃場試験の土壌断面（左）、CaCO₃ 岩層の除去作業の様子（右上）および CaCO₃ 岩層を構成している岩塊（右下）

課題②CaCO₃ 岩層の分布および理化学性と土地利用の関係とは？

この問いを検討するために、南インド・タミルナードゥ州全体を対象に、広域の土壌調査を実施したほか、50地点を対象に、2年間にわたって計4回、表層土壌と灌漑水を採取し、そのpHとECを測定するとともに土地利用（作付けパターンや灌漑方法・量・頻度など）についての聞き取り調査を行った。これらの結果をもとに、当該地域における土壌肥沃度の礎である土壌有機物（炭素含量）の規定要因を解明するとともに、塩集積の観点から、土地利用と土壌理化学性およびCaCO₃ 岩層の生成に関連がないかを解析する。



図：広域調査を実施した地点（左）と、当地域の代表的な土壌断面および景観の写真（右）

4. 研究成果

課題①

ソルガムの栽培試験を2年間にわたって実施した結果、当地の作物の地上部乾物重が3.7～5.2Mg/haであること、地上部の窒素吸収量が29.8～55.5kgN/haであること、収量が0.08～0.29Mg/haであること、などが判明した。総じて処理区の影響よりも年次変動の方が大きかった。この原因としては、特に灌漑処理をしなかった初年度が干ばつ年となっており（生育期間中の降水量が約280mm）、とくに収量に大きな影響を与えたことなどが考えられる。栽培年ごとの作物生育に関して処理区の影響を比較した結果、残念ながらこれまでに得られているデータからは、CaCO₃岩層の存在が作物生育に正の影響を与えていることを支持する結果を得るには至っていない。むしろ、CaCO₃岩層除去区のほうが、一部値が高い傾向にあった。この原因としては、まだすべてのデータ解析が終わっていない土壌水分動態の解析をまずは完了させる必要があるものの、初年度の土壌水分動態（0-15 cm、15-45 cm、45-75 cm深にて両処理区で経時的に測定）の結果をみると、除去区のほうが、下層度にまで水がより多く浸透していたことから、灌漑をしない環境下においては、CaCO₃岩層を除去したほうが、作期中の土壌断面全体での水分保持能が高くなる可能性が示された。この結果をうけた仮説に対しての解釈は難しいものの、今回のように灌漑をしていない（できない）条件下では、75 cm以深へ溶脱するほどの大量の水が入る（＝水の利用率が下がる）現象がおきづらいことが想像される（注：少なくとも初年度の栽培中には発生していない）。この事実は、そもそもの仮説の出発点であった、実験を実施した年度の栽培環境（とくに降水量）が、CaCO₃岩層による75 cm以深への溶脱水の保持機能（＝水利用率の改善）を発現するに至らなかったことを示唆している。このあたりについては、2年目の土壌水分動態の解析を進めることで、さらに検討する。また、CaCO₃岩層の除去に伴う土壌断面内の塩動態についても、今後土壌試料の分析をさらに進めることで検討を行い、水・養分動態の観点から、CaCO₃岩層の農学的意義についてさらに検討を行う。

課題②

広域土壌調査の結果（下表参照）、畑地と水田の両方において、土壌 pH がアルカリ性を示し、塩集積が恒常的に起きていることが判明した。特に、井戸水などの地下水を利用した小規模灌漑で営まれている畑地よりも、河川水やダムなどを利用した大規模灌漑で営まれている水田において、塩集積が顕著に起きていることが示唆された。加えて、土壌肥沃度の指標としてよく用いられる土壌有機物（した表では TC）の値が、押しなべて低く、当地の土壌環境が極めて劣悪な状態にあることも判明した。この改善策として、当地では堆肥の積極的な施用をおこなっている。そこで圃場試験において、当地で通常施用されている堆肥施用量が土壌肥沃度に与える影響を検証した結果、施用量は、当地の土壌肥沃度を維持はするも

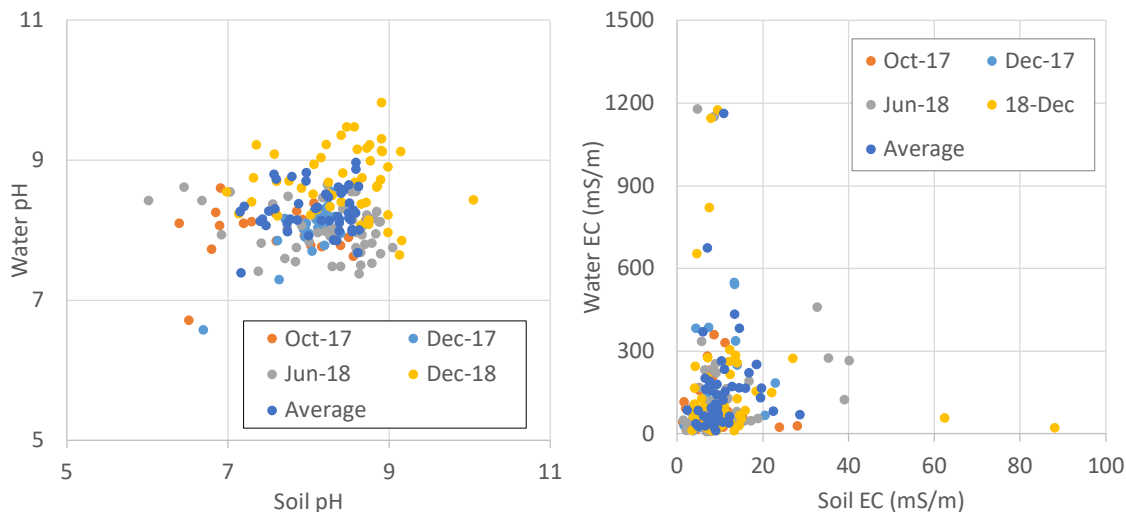
表. 南インドにおける異なる土地利用下での土壌理化学性

		soil pH	EC	Clay	Total C	Na _e	Ca _e	Mg _e	CEC	ESP*
		(1:5)	(mS/m)	(%)	(g kg ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)			(%)	
Crop (N=29)	0-10cm	8.1 (0.2)	12.1ab (1.7)	18.9 (4.0)	4.8b (0.4)	0.5b (0.1)	23.6 (3.7)	6.2ab (1.1)	16.4 (2.5)	3.3b (0.5)
	30cm	8.1 (0.2)	13.6 (2.5)	25.0 (4.1)	3.2 (0.3)	0.9b (0.2)	25.8 (4.0)	6.3ab (1.0)	18.9 (2.5)	4.7b (0.9)
Paddy (N=13)	0-10cm	8.2 (0.2)	18.9a (3.5)	26.4 (4.6)	7.6a (1.1)	1.7a (0.5)	15.2 (2.9)	9.7a (2.0)	19.2 (2.7)	8.6a (1.6)
	30cm	8.5 (0.2)	23.5 (5.8)	29.1 (5.1)	3.3 (0.7)	2.8a (0.8)	15.8 (3.1)	10.7a (2.6)	21.2 (3.3)	12.5a (2.8)
Natural (N=4)	0-10cm	6.8 (0.6)	3.5b (1.9)	-	2.6b (0.2)	0.1b (0.0)	2.8 (1.5)	1.1b (0.5)	4.0 (1.0)	2.6b (1.5)
	30cm	6.7 (0.7)	4.3 (2.1)	-	2.4 (0.3)	0.3b (0.2)	6.0 (2.6)	2.6b (0.9)	8.6 (2.8)	2.7b (1.3)
Garden (N=2)	0-10cm	8.2 (0.3)	9.2 (1.6)	20.8 (5.4)	7.8 (1.7)	0.4 (0.1)	7.7 (7.0)	7.9 (0.7)	17.7 (1.6)	2.5 (0.9)
	30cm	8.4 (0.4)	10.0 (2.5)	29.5 (3.4)	5.6 (0.7)	0.8 (0.6)	7.3 (6.5)	9.6 (1.3)	18.8 (1.8)	4.8 (3.7)

*ESP=(Na_e-CEC)×100 (%)

() Standard error

この改善はしないことが明らかになった。つまり、今後当地で持続的な土地利用を行うためには、現状とは異なる土地管理方策を創出する必要があることが判った。また、広域での灌漑水および土壌表層の pH や塩濃度の経時的な解析の結果（下図参照）も、上述した土壌理化学性の結果を概ね支持しており、灌漑水の塩濃度などで多少の経時変動がみられたものの、概して高く推移しており、すでにタミルナードゥ州一帯で、小規模灌漑の水源の塩類化が進行していること、それに伴う土壌の塩類化も進行していることなどが示唆された。一方で、灌漑水の EC と土壌の EC とは明確な関係がなく、一部地点では十分な灌漑水量を確保することで土壌の塩洗脱が行えていることもうかがえた。今後、聞き取り調査の結果とあわせて、各地点における CaCO₃ 岩層の有無が土壌 pH や EC に与える影響についても検討する。



図：南インドの広域調査で採取した灌漑水と土壌表層の pH（左）および EC（右）の関係性（2年間で計4回採取・測定した）

まとめ

今回の研究の結果、南インドで伝統的に行われてきた小規模灌漑畑作における CaCO₃ 岩層の農学的意義について、明確に示すことはできなかった。しかし、栽培年度の環境条件下（具体的には干ばつ年＋灌漑水不足の常態化）においては、この CaCO₃ 岩層の存在により、土壌水分保持機能の正の面よりも、塩集積および岩層形成による根成長の阻害といったような負の面のほうが大きいことが示唆された。この結果は、計画当初に描いていたストーリーとは異なるものであるものの、近年当地で顕在化している、気候変動による干ばつの多発と灌漑水の消失（理由はおもに灌漑のやりすぎに伴う地下水位の低下）によって、これまでの持続的な“小規模”灌漑が成立していた栽培環境が今まさに変化している（悪いほうに変化している）可能性を示しており、今後の土地管理方策を検討するうえで非常に示唆に富んでいる。つまり小規模灌漑から“超小規模”灌漑技術の創出へと、その必要性が遷移しているとすれば、従来のアプローチと同様になってしまうが、現在の過酷な水環境に適した塩を“溜めない”灌漑技術・土地管理技術の創出が必要になる、といえよう。

加えて、熱帯アルカリ性土壌が広く分布する当地の土壌有機物蓄積量が極めて低いことが定量的に明らかになり、堆肥施用に依存した既存の土地管理法では、土壌肥沃度を維持することはできても改善するには至らないことなども判明した。これらのことから、今後は、新規有機資材などの利用も念頭にいれながら新たな土地管理方策を創出することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Seki M, Sugihara S, Miyazaki H, Araki R, Jegadeesan M, Ishiyama S, Tanaka U, Tanaka H	4. 巻 9
2. 論文標題 Effect of traditional cultivation management on CO2 flux in the dry tropical cropland of South India	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Agronomy	6. 最初と最後の頁 347
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/agronomy9070347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 関真由子、杉原創、宮寄英寿、Jegadeesan M、田中治夫
2. 発表標題 南インドの畑作地におけるバイオ炭の施用が土壌の窒素動態および作物生育へ与える影響の解明
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seki M, Sugihara S, Miyazaki H, Jegadeesan M, Tanaka H
2. 発表標題 Effect of biochar application on soil carbon dynamics and crop productivity in a dry tropical cropland of south India
3. 学会等名 4th Soil Conservation Society of India International Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sugihara S, Seki M, Nonomura E, Miyazaki H, Jegadeesan M, Kannan P, Tanaka H
2. 発表標題 Soil carbon and other nutrient conditions under different land use in Tamil Nadu, South India
3. 学会等名 14th ESAFS（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seki M, Sugihara S, Miyazaki H, Jegadeesan M, Kannan P, Tanaka H
2. 発表標題 Biochar combined with manure application can decrease organic matter decomposition compared to manure alone in the dry tropical cropland of south India
3. 学会等名 EGU2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nonomura E, Sugihara S, Seki M, Miyazaki H, Jegadeesan M, Kannan P, Tanaka H
2. 発表標題 Fractionation of soil organic carbon under different land management in dry tropics, south India
3. 学会等名 EGU2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関真由子・杉原創・宮寄英寿・Jegadeesan M・田中治夫
2. 発表標題 南インドの畑作地におけるバイオ炭の施用が 土壌炭素動態および作物生育へ与える影響の解明
3. 学会等名 日本熱帯農業学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関真由子・杉原創・宮寄英寿・Jegadeesan M・田中治夫
2. 発表標題 南インドの畑作地におけるバイオ炭の施用が 土壌の炭素動態および作物生育へ与える影響の解明
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seki M, Sugihara S, Miyazaki H, Araki R, Jegadeesan M, Ishiyama S, Tanaka U, Tanaka H
2. 発表標題 Impact of traditional farming on soil CO2 flux and C budget in the dry tropical cropland of southern India
3. 学会等名 EGU (European Geoscience Union) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉原創、宮寄英寿、関真由子、Jegadeesan M、田中治夫
2. 発表標題 南インド・タミルナードゥ州における広域土壌調査報告-第二報
3. 学会等名 日本ペドロロジー学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	宮寄 英寿 (Miyazaki Hidetoshi) (30455232)	一般財団法人地球・人間環境フォーラム(研究推進ユニット)・研究推進ユニット・研究官 (82821)	