

# A Study on Maize Productivity under Continuous Cultivation in Farmers' Fields in Sainyabuli Province, Northern Laos

## 北部ラオスのサイニャブリ県の農家圃場でのトウモロコシ連作の生産性に関する研究

京都大学大学院農学研究科 作物学分野 藤竿和彦

### 第1章 緒言

ラオスの畑作地ではこの数十年間に陸稲の焼畑栽培が商品作物の連作におき変わり、北部ラオスでは特にトウモロコシの栽培面積が大きく増加した。ラオスで生産されたトウモロコシの多くは隣国に輸出されているため、畑作地の生産性の変化は自国だけでなく、他国にも影響がある。こうした状況に際し、ラオスでの安定的なトウモロコシ生産が望まれる。しかし、トウモロコシは施肥も土壌保全管理も行われずに連作されてきたために、土壌肥沃度と収量の低下が危惧されてきた。しかし、ラオスでは連作下の生産性を調べた研究例は少ないため、実態は把握されておらず、持続的な栽培に必要な管理も明らかとなっていない。そこで、本研究はラオスでの(1)トウモロコシ連作にともなう収量と土壌肥沃度の実態解明と、(2)持続的な栽培管理方法の提示の基礎となる減収要因の解明を目的とした。

第一目的を達成するために連作にともなう収量と土壌肥沃度の変動を定量的に評価した(第2、3章)。第二の目的を達成するために土壌と収量の関係を統計的に解析することで連作にともなう減収を引き起こす要因を考察した(第4章)。また、現地施肥試験により肥料の生産性への効果を明らかにした(第5章)。最後に、トウモロコシ生産の実態と持続的な栽培に必要な栽培管理について考察した(第6章)。

### 第2章 トウモロコシ連作のもとでの収量変動

トウモロコシ連作にともなう収量低下は多くの報告例があるものの、その収量低下速度は研究によって異なる。この違いは気候、地形、土壌などに起因するため、北部ラオスの収量変動の実態はこれらの要因との関係から知る必要がある。そこで本研究では地形特性が異なる圃場で、トウモロコシ連作にともなう収量変動を定量的に評価することを目的とした。過去の収量変動を評価するために連作年数が異なる圃場間で収量を比較するクロノシリーズ法を用いて収量変動を分析した。

2014年と2015年にサイニャブリ県ケンタオ郡で、トウモロコシの連作年数の異なる40筆の農家圃場で、1筆につき3地点で調査を行った。各調査地点で連作年数と収量を調査し、両者の関係を検討した。連作年数は聞き取りにより調査した。また、地形特性の収量に対する影響を調べるために、圃場の傾斜角と圃場内の調査地点間の相対的な位置関係を用いて、全ての調査地点を4つの地形型(傾斜圃場の上部、同中部、同下部、ならびに水平圃場の水平部)に分類した。連作のもとでの収益性を調べるために栽培コストを聞き取り調査した。連作年数と地形型の収量への影響を調べるために共分散分析を行った。収量の変化を定量的に評価するために回帰分析を行った。

共分散分析の結果から連作年数が長い農家圃場ほど圃場の平均収量が低かったことが示

された。また、共分散分析の結果と地形型ごとの回帰分析の結果から、連作下の収量低下傾向は傾斜圃場の上部のみで有意であり、傾斜圃場の中部では 10%以下で有意だったことが示された。回帰分析の結果から 30 年間の連作のもとで収量は圃場平均で  $1.9 \text{ t ha}^{-1}$  低下したと考えられた。栽培コストを考慮すると、調査地の栽培方法ではトウモロコシ連作は経済的に継続可能な期間は 43 年間だと推定された。以上の結果から、調査地ではトウモロコシ連作下で収量が低下傾向にあり、栽培管理の改善が安定生産に必要なだと示唆された。そして、収量の低下傾向は傾斜圃場の上部で顕著であり、この地点で栽培管理の改善が求められた。調査地の収量低下速度は熱帯気候における他の研究結果と比較して遅かったことが示唆された。

### 第 3 章 トウモロコシ連作のもとでの土壌肥沃度

既存の多くの研究でトウモロコシ連作のもとで土壌肥沃度が低下したことが報告されており、これが収量の低下の原因だったと考察されている。調査地は熱帯気候下で一年間を通して気温が高く、降雨強度が強いため、土壌有機物が分解されやすく、浸食により土壌を失いやすい環境だと推測された。また、畑作地の多くが傾斜圃場に位置することから、土壌浸食の影響が大きいと推測された。そこで、本章では調査地でのトウモロコシ連作下の土壌肥沃度の変化を評価することを目的とした。第 2 章と同様に、クロノシーケンス法により連作下の土壌肥沃度の変化を分析した。

2014 年と 2015 年にサイニャブリ県ケンタオ郡のトウモロコシの連作年数が異なる 40 筆の農家圃場で、1 筆につき 3 地点で調査を行った。土壌肥沃度の評価のために、収穫期に各地点で表層土壌を採取し、12 の土壌特性（全炭素 (TC)、全窒素 (TN)、有効態リン酸 (Av-P)、4 種の交換性陽イオン、pH、土壌粒径組成）を分析した。連作年数は聞き取りにより調査した。地形特性の土壌肥沃度の影響を調べるために第 2 章と同様に調査地点を 4 つの地形型に分類した。連作年数、地形型、播種時期の土壌特性への影響を調べるために共分散分析を行った。土壌特性の変化を定量的に評価するために回帰分析を行った。

連作年数が長い圃場ほど土壌の TC、TN、Av-P、および交換性カリウム (Ex-K) の含量は有意に低かった。共分散分析の結果は播種時期別の土壌特性の違いは有意でなかったことを示した。共分散分析と地形型ごとの回帰分析の結果から、Av-P は傾斜圃場の上部のみで、Ex-K は傾斜圃場の上部と中部のみで有意な低下傾向にあったことが示された。また、この分析結果から、TC と TN は傾斜圃場内の全ての地形型で低下傾向が有意だったが、傾斜圃場の上部で低下速度が速い傾向にあったと示された。これらの結果から、トウモロコシ連作のもとで TC、TN、Av-P、Ex-K が減少しており、低下傾向は傾斜圃場の上部で特に顕著だったと考えられた。回帰分析の結果から 30 年間の連作のもとで TC、TN、Av-P、Ex-K の含量は圃場平均でそれぞれ  $11 \text{ g C kg}^{-1}$ 、 $0.63 \text{ g N kg}^{-1}$ 、 $12 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 、 $0.26 \text{ cmol}_c \text{ K kg}^{-1}$  低下し、連作開始時の約半分の含量になったと推定された。地形型によって土壌特性の低下傾向が違っていったことから、土壌浸食が土壌肥沃度低下の原因の一つだったと考えられた。しかし、回帰分析の結果から得られた TC の低下速度は熱帯気候における他の研究結果と比較して

遅かった。

#### 第4章 共分散構造分析によるトウモロコシ収量の制限要因の解析

第2章と第3章でトウモロコシ連作下に土壤の TC、TN、Av-P、Ex-K および収量が低下したことが示された。このため、これらの土壤養分が収量低下の原因だったと思われる。しかし、地形型によっては収量の低下傾向と土壤養分の低下傾向が一致しなかったため、土壤特性と収量との関係は詳しく調べる必要がある。土壤特性と収量との間の複雑な関係性を明らかにするには共分散構造分析が適している。そこで、本章では共分散構造分析により連作の間に収量を減少させた要因を解明することを目的とした。

サイニャブリ県ケンタオ郡のトウモロコシの連作年数が異なる 40 筆の農家圃場で、1 筆につき 3 地点で調査を行った。各調査地点から 12 の土壤特性、収量ならびにトウモロコシの窒素、リン、カリウムの吸収量および濃度を分析した。収量に対する養分吸収量と養分濃度の影響および、養分吸収量と養分濃度に対する土壤特性の影響を重回帰分析で評価した。この分析結果をもとに共分散構造分析の初期モデルを作成し、データへの適合が良くなるようにモデルの調整を行った。適合度を調べるうえでは root mean square error of approximation (RMSEA)、standardized root mean square residual (SRMR)、goodness of fit index (GFI)、および adjusted goodness of fit index (AGFI) を用いた。最終的に得られたモデルから土壤特性の収量への影響を計算した。また、モデルを用いて TN と Ex-K のみが連作のもとで減少した場合の減収量を推定し、2 章での推定減収量と比較することで、TN と Ex-K の減収への寄与を解析した。

RMSEA、SRMR、GFI、AGFI はそれぞれ 0.063、0.036、0.91、0.73 であり、最終的に得られたモデルは土壤特性と収量との関係を妥当な精度で説明していると考えられた。土壤特性の中で TN が収量に対して最も強い正の効果を持ち、Ex-K が次に強い正の効果を持っていた。モデルから連作下の TN と Ex-K の減少に起因する減収量は、2 章で推定した連作下の全減収量の 52% と 30% にそれぞれ相当したと推定されたため、これらの土壤特性の減少が連作下の減収の主要な原因だったと考えられた。一方、Av-P の収量に対する効果は弱く、土壤中のリン含量はトウモロコシが生育するのに十分な量が存在したと思われる。TN は窒素吸収量への正の効果が高く、Ex-K はカリウム吸収量と窒素吸収量に対する正の効果が強かった。30 年間の連作下に TN と Ex-K が減ったことで、トウモロコシの窒素とカリウムの吸収量はそれぞれ  $27 \text{ kg ha}^{-1}$  と  $23 \text{ kg ha}^{-1}$  低下したと考えられた。モデルを用いた TN と Ex-K の減収への寄与を解析した結果、傾斜圃場の上部では TN と Ex-K の減少だけでは説明できない減収量があり、その他の減収要因があったと考えられた。一方、傾斜圃場下部では TN の減少の収量への効果を弱める要因があったものと考えられた。こうした要因を探ることが今後求められる。

#### 第5章 施肥処理のトウモロコシ生産性に対する効果の評価

第3章の結果から連作下に土壤の TC、TN、Av-P と Ex-K が低下したことが示されたこと

から、施肥を用いた養分補給により収量が増加することが期待された。このため、本章では施肥処理の収量、養分吸収量、および収益性への効果を調べることを目的とした。

2015年にサイニャブリ県ケンタオ郡の19筆の農家圃場で、1筆につき3地点で調査を行った。各地点で施肥区と無施肥区を設け、施肥区では窒素、リン酸、カリをそれぞれ100 kg ha<sup>-1</sup>、50 kg ha<sup>-1</sup>、50 kg ha<sup>-1</sup>施用した。収穫期にトウモロコシの収量と12の土壌特性ならびに窒素、リン、カリウムの吸収量を調査した。地形特性の影響を調べるために第2章と同様に調査地点を4つの地形型に分類した。収量と養分吸収量に対する施肥処理、地形型および播種期の影響を調べるために分散分析を行った。収量と養分吸収量に対する土壌特性と施肥処理の影響を調べるために共分散分析を行った。

施肥処理により収量ならびに窒素、リンおよびカリウムの吸収量は有意に増加した。この結果から、窒素、リン、カリウムのいずれかが収量制限要因だったと考えられた。収量と三養分の吸収量に対して地形型と播種時期は施肥処理との交互作用がなく、ほとんどの土壌特性も施肥処理との交互作用がなかった。リン吸収量に対してAv-Pは施肥処理と有意な交互作用があったものの、Av-Pの含量が低い水準だと施肥効果へ明瞭な影響はなかった。以上の結果から、分析した土壌特性および地形型の変動の範囲内では施肥処理は収量を増加させると考えられた。しかし、施肥効果の変動をもたらした要因は不明であった。また、本結果から施肥処理は収益性に対する効果が小さいことが示唆された。さらに、施肥処理が長期間にわたって効果的かどうかは不明確である。このため、施肥効果の変動要因の解明、経済的な効果の改善、長期間での施肥効果の検討が今後の課題として残った。

## 第6章 総合考察

第2章と第3章から調査地の農家圃場ではトウモロコシ連作により収量ならびに土壌のTC、TN、Av-PおよびEx-Kが低下しており、これらの低下傾向は傾斜圃場の上部で顕著だった実態が示された。第4章から収量低下の原因は主にTNとEx-Kの減少による窒素およびカリウムの吸収量の不足であったと考えられた。第5章での施肥試験の結果と第2、3章での地形型別の土壌肥沃度と収量の低下傾向の結果から、傾斜圃場の上部に施肥を集中させることが効果的な持続的栽培管理の一つになると期待された。ただし、肥料の効果については検討すべき課題が残った。また、第3章の結果から、収量低下を根本的に解決するためには土壌保全と堆肥や緑肥の施用が必要だと考えられた。

第3章から調査地ではTCの減少速度は比較的遅かったと示唆された。TCとTNは一般的に密接に関係していること、および第4章でTNが収量に強い影響を持っていたと示されたことから、第2章で観察された比較的遅い収量低下速度にはTCとTNの減少速度が関係していたと考えられた。TCの低下速度が遅かった原因を更に調査することで、熱帯気候下での有機物保持において有用な知見が得られると期待された。

本研究からラオスのトウモロコシ連作が行われている畑作地で生産性が低下している実態ならびに収量制限要因が明らかとなった。また、持続的な栽培管理の一つが提案された。本研究で得られた知見は今後の生産性の予測や栽培管理の検討で役立つものと考えられる。