数理計画モデル分析における気象リスク評価方法の拡張に関する一考察

—気象リスクを考慮した水稲乾田直播栽培の経営的評価を事例として—

孫 雯莉^{1)*}・大石 亘²⁾・ルハタイオパット プウオンケオ²⁾・松下 秀介²⁾

Consideration of Variation of Weather Risk Evaluation Methods in a Mathematical Programming Model: Case Study of Evaluation of Direct Seeding Rice in Dry Paddy Fields with Possible Machine Work Time Restriction

Wenli Sun^{1)*}, Wataru Oishi²⁾, Puangkaew Lurhathaiopath²⁾ & Shusuke Matsushita²⁾

A mathematical programming model is effective in both farm planning and managerial evaluation of farming systems. This paper evaluates the possibility of introducing direct seeding rice in dry paddy fields by using such a model. In the model, the possible machine work time restrictions that are decided by the hourly precipitation data of the past 10 years are considered. Moreover, based on the estimated machine work time, the study uses the method of 100,000 random samplings with

replacement to obtain 100,000 sets of estimations of possible machine work time. Each of these sets is incorporated into the model and the optimal solutions are calculated. By comparing the optimal solutions for the past 10 years, and an estimation with the optimal solutions of 100,000 times simulation, it is verified that the proposed method is appropriate and useful for more possibilities are considered by using this method.

キーワード：数理計画法，直播栽培，気象リスク，無作為復元抽出

1. はじめに

国内コメ市場における米価下落の傾向が続いている。このような背景のもと、全国の水田作経営では、水稲作部門における直播栽培技術導入等による生産性向上や省力化・低コスト化、経営所得安定対策等による手厚い助成を背景とした転作田での飼料生産等、様々な対応策が取り組まれている。また、稲WCS（稲発酵粗飼料）の導入等、飼料用稲生産に関する多くの積極的な導入事例が報告されている。

このような背景のもと、本研究では、東北日本海側多雪地域における大規模水田輪作体系の実証研究に注目する。具体的には、実証経営における技術導入試験データ、水田作経営に関する各種経営指標を

用いて東北地方のA県B市における大規模経営体を想定した数理計画モデルを構築する。そして、このモデルに気象リスク（降雨による機械作業リスク）を組み込み、実証経営におけるV溝乾田直播導入の効果を分析する。特に、分析手法としての気象リスク評価方法の拡張を検討する。

2. 気象リスク評価研究の動向と本研究の課題

農業経営が直面しているリスクのひとつに気象条件がある。具体的には、個々の農作業はそれぞれの作業適期における気象条件の影響を受け、時期別作業別の投入可能労働時間の年次変動は小さくない。そこで、本研究では、降雨量による作業可能時間へ

¹⁾ 筑波大学大学院生命環境科学研究科; Graduate School of life and Environmental Sciences, Tsukuba University

²⁾ 筑波大学生命環境系; Faculty of Life and Environmental Sciences, Tsukuba University

* E-mail: s1436013@u.tsukuba.ac.jp

©地域農林経済学会

表 1. 気象リスク評価研究の動向

文献	分析期間	気象データの 種類	分析 ソフト
南石他 (1996)	1991～1995	降雨データ	micro-NAPS
南石・向井 (1997)	1990～1992	降雨データ	micro-NAPS
斎藤 (1998)	1988～1997	降雨データ	FAPS
前川 (1998)	1987～1996	降雨データ	FAPS
遠藤・須藤 (1999)	1996～1998	気温と降雨 データ	FAPS
土田 (2011)	1991～2000	降雨データ	FAPS

資料：筆者らの整理による。

の影響に注目し、この事象を気象リスクと定義する。

例えば、気象リスクを考慮せずに営農計画を立てた場合、現実には生じる気象条件次第では、作業の遅延・不能といった不測の事態が生じる可能性がある。このため、大規模水田作経営では、降雨条件などの気象リスクを考慮した営農計画策定とそのための手法開発が求められている。

既往の研究成果においても、気象リスクを考慮した数理計画分析を援用した水田作経営への意思決定支援に関連した研究がいくつか存在する。例えば、過去の気象条件に基づいた作業可能時間の推定と、その結果に基づいた数理計画モデルの構築とその分析を行った研究として、南石他 (1996)、南石・向井 (1997)、斎藤 (1998)、前川 (1998)、遠藤・須藤 (1999)、土田 (2011) を指摘したい。表 1 では先行研究における使用したデータの特徴と気象リスクの分析ソフトを示している。

まず、南石他 (1996) は、大規模水田経営における不耕起乾田直播栽培技術を評価している。具体的には、分析対象地に最も近いアメダス観測地点の 1991 年から 1995 年までの時間降水量データを用い、降雨による作業可能時間の影響を受ける作業制約を考慮し、どの降雨パターンでも作業が実施できるような計画法を提案した。南石・向井 (1997) では 1990～1992 年 3 年間の降雨条件と各年次のみの降雨条件を考慮し、それぞれモデルを作成し、水田作経営の適正経営面積の推定方法を提示した。

斎藤 (1998) は、1988 年から 1997 年までの 10 年間の降雨状況に対応した営農計画と秋作業時多雨年の 3 年間の除いた降雨状況に対応した営農計画を檢

討して直播導入の条件を分析・検討した。

遠藤・須藤 (1999) は 1996, 1997, 1998 年の各年の気象変動による水稻の生育経過の変化と作業可能時間の変化を考慮した数理計画手法を用いて、水稻直播栽培の導入可能性を分析した。

土田 (2011) は 1991～2000 年 10 年間のアメダスデータをもとに、降雨による播種・収穫作業への影響を考慮した数理計画モデルを構築し、水田作経営に大麦と飼料用稲が導入される可能性を提示した。

以上の研究成果に共通していることは、気象リスク推定に使用したデータが分析対象期間に実際に生じた気象現象に基づいた情報の範囲に限定されているということである。つまり、将来の意思決定場面において、対象期間には発生しなかった気象条件を想定した営農計画策定への意思決定支援には十分に分析力を発揮できないという問題が指摘できる。

一方、前川 (1998) は、過去に発生した気象条件から一般的な情報を作り出す試みを行っている。具体的には、1987～1996 年の 10 年間の降雨データから算出した作業可能時間が正規分布に従うものと仮定し、機械毎、旬毎に作業可能時間の平均値と標準偏差を求め、一定の確率で機械作業が支障なく実施できる機械作業可能時間を推定している。また、その結果をもとに、FAPS を援用した数理計画分析を実施している。

本研究では、気象リスク評価方法の拡張を提案し、過去 10 年間の降雨量の影響を受ける作業可能時間の年次変動による試算結果と本手法で作出した作業可能時間による試算結果を比較し、提案する手法の分析力を検討する。

具体的に、まず、実証経営における技術導入試験データ、水田作経営に関する各種経営指標を用いて東北地方の A 県 B 市における大規模経営体を想定して、2005 年 1 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日までの過去 10 年間アメダスの時間降雨量データを用いて数理計画モデルを構築し、各年度における気象条件下での最適解を求める。FAPS により推定した各年度主要な作業における旬別機械作業可能時間 (表 2) を基礎データとして、特定の分布を仮定しない無作為復元抽出によりサンプリングし、10 万パターンの気象リスクの組合せを得る¹⁾。また、これらの組合せをそれぞれ単体表に組み込んで線形計画法 (以下

表2. 分析対象となる旬別機械作業可能時間 単位：時間/旬

機械作業	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
トラクタ 50 ps：水稻播種乾田 4月下旬	76.5	31.5	58.5	67.5	49.5	72.0	31.5	63.0	76.5	90.0
田植機 6 条：水稻田植 5 月中旬	96.0	86.4	67.2	86.4	81.6	81.6	86.4	96.0	96.0	96.0
田植機 6 条：水稻田植 5 月下旬	110.1	90.0	110.1	90.0	110.1	85.0	110.1	110.1	110.1	100.1
コンバイン 6 条：水稻収穫 8 月下旬	53.2	44.4	84.3	53.2	62.1	88.7	71.0	97.6	62.1	79.9
コンバイン 6 条：水稻収穫 9 月上旬	41.6	66.5	37.4	79.0	83.1	41.6	62.3	45.7	41.6	54.0
コンバイン 6 条：水稻収穫 9 月中旬	47.8	79.7	47.8	79.7	67.7	27.9	19.9	51.8	47.8	35.9
コンバイン 6 条：水稻収穫 9 月下旬	60.3	52.8	67.9	52.8	71.6	56.6	45.2	56.6	71.6	67.9
コンバイン 6 条：水稻収穫 10 月上旬	25.2	46.8	57.6	61.2	21.6	39.6	32.4	57.6	50.4	64.8
コンバイン 6 条：水稻収穫 10 月中旬	44.0	64.3	54.2	60.9	33.9	47.4	47.4	30.5	23.7	30.5
トラクタ 50 ps：小麦播種 9 月下旬	60.3	52.8	67.9	52.8	71.6	56.6	45.2	56.6	71.6	67.9
汎用コンバイン 2 m：小麦収穫 7 月上旬	50.1	30.1	70.2	70.2	60.2	90.2	60.2	75.2	45.1	70.2
トラクタ 50 ps：大豆播種 6 月上旬	100.3	80.2	90.2	75.2	85.2	100.3	95.3	95.3	100.3	85.2
汎用コンバイン 2 m：大豆収穫 10 月中旬	44.0	64.3	60.9	60.9	33.9	54.2	54.2	33.9	23.7	30.5
乗用管理機：大豆病害虫防除 8 月下旬	62.1	44.4	84.3	53.2	71.0	88.7	71.0	97.6	62.1	79.9
湛水条播機 5 条：水稻播種 5 月上旬	65.4	93.4	84.1	93.4	93.4	84.1	65.4	60.7	88.7	88.7
湛水条播機 5 条：水稻播種 5 月中旬	96.0	86.4	62.4	86.4	67.2	76.8	86.4	91.2	96.0	91.2

資料：筆者らの整理による。

LP と略称する) による所得最大化の最適解を求める (以下、10 万回シミュレーションと略称する)。そして、単年度の気象条件下における最適解と 10 万回シミュレーションの結果を比較して、拡張した評価方法の分析力を検証する。すなわち、以上の手続きにより、過去に生じた気象現象に関する情報の効果的な利用可能性について検討する。

3. 分析モデルの概要

分析モデルにおいては、経営耕地 50 ha、借地可能面積 10 ha、全て水田とし、地代は 2 万円/10 a、労働力は専従者 3 名、臨時雇用可能人数 6 名と設定した。助成金等に関する制度に関しては、平成 27 年度の水準に設定とした。FAPS を用いた試算モデルにおける目標に関する設定については、最低所得 1,500 万円 (第一目標)、平均所得 4,000 万円以上 (第二目標) と設定した。また、制約条件として、転作率の下限を 20% とした。他方、飼料米への手厚い補助金のためにこれへの作付が多くなりやすいと考えられたため、飼料用稲の様々な負の外部性を考慮し、飼料米の作付面積を 20% 以下とする制限を設けた。他方、降雨条件によって作業可能時間が制限される機械作業は、水稻では移植・播種・収穫、小麦及び大豆

では播種・防除・収穫であるとした²。

設定する営農プロセスは水稻移植、水稻湛水直播、小麦、大豆、稲 WCS 湛水直播、水稻 V 溝直播 (飼料米) と水稻 V 溝直播 (主食米) である (表 3)。

4. 分析結果及び考察

(1) 過去 10 年間の降雨実績による経営評価

FAPS を用いて計算した単年度の降雨条件による機械作業可能時間を基礎とした最適結果は表 4 のとおりである。水稻 V 溝直播 (飼料米) は 10 年間のうち 7 ヶ年において導入されている。作付面積は最小 1.1 ha、最大 8.7 ha までである。他方、水稻 V 溝直播 (主食米) は利益係数が低いため、どの降雨パターンにおいても導入されていない。

(2) 気象リスク評価方法の拡張による経営評価

10 万回シミュレーションの結果から、プロセスの作付状況をもとに 13 の作付パターンを得た (表 5)。

このとき、出現回数が一番多い作付パターンは①水稻移植と小麦、大豆、稲 WCS の組合せであり、3.6 万回を超えている。②は水稻湛水直播、水稻移植と小麦、大豆、稲 WCS、水稻 V 溝直播 (飼料米) の組合せであり、出現回数が約 3.5 万回である。他方、③水稻移植と小麦、大豆、稲 WCS、水稻 V 溝

表 3. 想定する営農プロセスの変動費及び収益性

作物名	品種	技術体系	移植（播種）時期	収穫時期	収量 (kg/10 a)	単価 (円/kg)	補助金 (円/10 a)	粗収益 (万円/10 a)	第 1 次変動費 (万円/10 a)	利益係数 (万円/10 a)
水稻	あきたこまち	移植	5 月中旬	9 月下旬 10 月上旬	580	192	7,500	11.87	4.85	7.02
水稻	あきたこまち	湛水直播	5 月上旬	10 月上旬	500	192	7,500	10.33	3.60	6.74
水稻	まっしぐら 主食米	V 溝直播	4 月下旬	9 月下旬 10 月上旬	543	130	7,500	7.81	4.13	3.68
水稻	まっしぐら 飼料米	V 溝直播	4 月下旬	9 月下旬 10 月上旬	600	30	84,160	10.22	4.15	6.07
稲 WCS	夢あおば	湛水直播	5 月上旬	9 月上旬	1,040	20	93,000	11.37	4.34	7.03
小麦	ネバリゴシ	ドリル播き	9 月下旬	7 月上旬	300	17	58,214	6.33	2.96	3.37
大豆	リュウホウ	粉剤	6 月中旬	10 月中旬	210	113	55,824	8.45	2.63	5.81

資料：筆者らの整理による。

表 4. FAPS による計算結果の概要

降雨パターン		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
最適解	農業所得（万円）	1,116	1,639	1,671	1,722	997	1,336	1,134	1,577	1,440	1,593
	年間総労働時間（h）	5,195	5,680	5,519	5,890	5,138	5,544	5,316	5,984	5,910	5,946
	作付面積計（10 a）	475.6	500.0	500.0	500.0	473.2	500.0	493.7	500.0	500.0	500.0
	水稻直播（湛水）	0.0	1.6	19.5	35.2	0.0	0.0	0.0	17.3	0.0	20.9
	水稻移植	117.6	183.8	143.0	183.8	100.8	173.6	151.2	204.2	204.2	204.2
	小麦	167.7	47.3	34.2	22.2	200.7	135.3	181.2	76.8	117.6	70.3
	大豆	93.3	136.0	129.3	127.5	71.8	114.9	114.9	71.8	50.3	64.6
	稲 WCS	97.0	100.0	87.3	100.0	100.0	65.1	46.5	100.0	97.0	83.7
	水稻 V 溝直播（主食米）	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	水稻 V 溝直播（飼料米）	0.0	31.3	86.9	31.3	0.0	11.2	0.0	29.9	30.9	56.3

資料：FAPS を用いて計算した。

表 5. 10 万回シミュレーション LP 結果の作付パターン

作付パターン	水稻湛水直播	水稻移植	小麦	大豆	稲 WCS	水稻 V 溝直播 （主食米）	水稻 V 溝直播 （飼料米）	出現回数
①	0	1	1	1	1	0	0	36,329
②	1	1	1	1	1	0	1	34,234
③	0	1	1	1	1	0	1	17,870
④	1	1	1	1	0	0	1	4,185
⑤	0	1	1	1	0	0	0	3,952
⑥	0	1	1	1	0	0	1	1,767
⑦	1	1	0	1	1	0	1	1,303
⑧	1	1	1	1	1	1	1	148
⑨	0	1	1	1	1	1	1	96
⑩	0	1	0	1	1	0	1	66
⑪	1	1	1	1	0	1	1	41
⑫	0	1	1	1	0	1	1	8
⑬	1	1	0	1	1	1	1	1
出現回数	39,912	100,000	98,630	100,000	90,047	294	59,719	100,000
利益係数 (万円/10 a)	7.02	6.74	3.68	6.07	7.03	3.37	5.81	

1) 表中の 1 は選択されたこと、0 は選択されなかったことを示す。

直播（飼料米）の組合せの出現回数も1万回を上っている。総じて、10万回シミュレーションの結果では、慣行体系としての水稻移植、大豆、小麦と利益係数が高い稲WCSについては選択結果が安定し、10万回シミュレーションの中約9万回以上採用されている。他方、水稻V溝直播（飼料米）は手厚い補助金があるため、約6万回採用されており、相対的に積極的に作付されることがわかる。

また、単年度の気象条件の場合とは異なり、本研究でのシミュレーションでは、水稻V溝直播（主食米）が採用されるケースも存在した。しかしながら、利益係数の低位性により、その出現回数は10万回中約300回程度と限定された。

(3) 過去10年間の降雨実績による経営評価と気象リスク評価方法の拡張による経営評価の比較

10万回シミュレーションから得られた最適解のうちにおいては、過去10年間の降雨実績による最適解とほぼ同様の結果も得られている（表6）。

表6. 10万回シミュレーションに含まれる過去10年間の降雨実績による最適解

年度	最適所得（万円）	出現回数
2005	1,115.9	15
2006	1,638.5	2
2007	1,670.9	(1)
2008	1,721.9	(1)
2009	997.1	300
2010	1,336.1	26
2011	1,133.6	93
2012	1,577.4	25
2013	1,440.1	16
2014	1,592.7	(3)
最適所得の加重平均		1,099.5

1) カッコ内数値は、完全に一致しないが、類似する最適解（誤差1未満）の数を示している。

具体的に、2009年度気象条件の最適解が300回出現したが、2006年度気象条件の最適解は2回しか出現していない。加えて、2007、2008、2014年度における気象条件の最適解と完全に一致する最適解は出現しなかったが、類似する結果が存在した。

また、単年度の気象条件下における最適所得と10万回シミュレーションの最適所得の間で平均値を比較すると（表7）、後者は約1,242万円であり、前者の1,422万円より小さい。10万回シミュレーションの最適所得を一様分布に当てはめて95%の信頼区間で評価した場合、456.8万円から1,748.9万円の範囲に位置づけられた。これは単年度気象条件の最適所得の最小値と最大値の範囲より大きい。

水稻V溝直播（飼料米）が作付されるケースについては、単年度の気象条件下では7ヶ年度において作付されており、作付面積は最小値1.1ha、最大値8.7haであった。一方で、10万回シミュレーションの結果では、水稻V溝直播（飼料米）が約6万回作付されており、紙幅の制約により具体的な数値は省略するが、推定された作付面積は0.1haから10haの範囲に分布していた。

つまり、10万回シミュレーションによる最適化の作業は、単年度の気象条件下における最適化の結果よりも最適所得の範囲が広く、また、プロセス毎の選択面積の上限下限とその分布を詳細に推定可能となっている。すなわち、作付パターンの出現頻度、期待される最適所得水準の範囲の視点から、よりリスクを考慮した結果になっていることがわかる。

5. まとめ

本研究では東北地方のA県B市における大規模経営体を想定し、気象リスクを数理計画モデルに組み込み、水稻V溝乾田直播導入の可能性を分析した。方法的な面では、過去に生じた気象現象に関する情

表7. 単年度の気象条件下における最適化と10万回シミュレーション結果の比較（単位：万円）

単年度の気象条件下における最適所得		10万回シミュレーション最適所得		
平均値	1,422.4	平均値	1,241.7	
		標準偏差	353.6	
最大値	997.1	平均値の 95%信頼区間	下限	456.8
最小値	1,721.9		上限	1,748.9

1) 信頼区間の計算：最適所得の結果の分布が一様分布に従うと仮定し、最大値と最小値からそれぞれ2.5%の範囲を除いた。

報の効果的利用可能性も検討した。

分析結果から明らかになったことは以下の2点である。

まず、10万回シミュレーションの結果から得られる最適所得の分布は、単年度の気象条件下における最適化から得られる最適所得の分布よりもばらつきをもって出現していることが確認された。つまり、本研究で取り組んだ気象リスク評価方法を拡張する試み（10万回シミュレーション）では、作物の組み合わせによる経営計画の実現可能性について、よりリスクを考慮した結果になっていることがわかる。

また、水稻乾田直播栽培の経営的評価の視点からは、10万回シミュレーションの結果から、水稻V溝直播（飼料用米）の導入による所得増大効果と労働投入の省力化効果が定量的に明らかとなった。また、慣行体系としての移植水稻、麦、大豆と補助金の高い稲WCSが積極的に選択されることが確認された。加えて、単年度の気象条件下における最適化では採用されなかった水稻V溝直播（主食米）が採用されるケースの評価も可能であった。

以上の結果、水稻V溝乾田直播導入の可能性を検討する経営的評価分析を事例とした気象リスク評価方法の拡張の提案を通じて、過去に生じた気象現象に関する情報の効果的な利用可能性の視点から、その手法の分析力が確認されたと考える。

一方で、本研究で取り扱うことができなかった課題は以下の通りである。

まず、本研究では、過去に生じた気象現象（降雨量）による作業可能時間への影響に注目して気象リスク評価方法の拡張を検討したが、例えば、気象条件の変化による利益係数の変化（反収等の変化）については考慮できていない。

次に、10万回シミュレーションにおいては、その前提となる仮定として、使用した旬別の降雨データが旬毎に相互に独立していることを採用していた。この仮定の信頼性については、さらに検討する余地が残されている。

加えて、例えば市場リスクなど、気象リスク以外

のリスクも考慮する数理計画モデルの構築についても、取り組むべき重要な視点である。

以上の諸点への取り組みを、残された課題としたい。

付記

本研究は「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業（うち経営評価研究及びマーケティング研究）」における「土地利用型作物を対象とする革新的技術体系の経営経済的效果と地域的インパクトの解明（課題ID：14537980）」（平成26～27年度）による研究成果の一部である。

注

¹ 試算においては、10万回、50万回、100万回のランダムサンプリングを行ったが、結果のパターン数は同じであり、各パターンの出現頻度もほぼ同程度であった。そこで、本研究では10万回の結果を採用する。

² 各作業の作業係数と作業限界降水量はFAPS内の参考資料によって設定した。乾田直播播種の作業限界降水量は移植と湛水直播より厳しく設定した。作業可能時間の推定は、FAPSのシステム内で自動計算の結果を援用した。

引用文献

- 遠藤宏幸・須藤英弥（1999）「生育予測モデルを考慮した水稻直播栽培の経営的評価」『東北農業研究』52, 261-262.
- 斎藤 隆（1998）「水稻専作個別経営体をモデルとした水稻直播栽培の技術評価—宮城県北部平坦地を対象として—」『東北農試総合研究（B）』12, 83-95.
- 土田志郎（2011）「新輪作営農システムの経営的評価（北陸における高品質大麦—飼料用イネ輪作システムの確立）」『ファーマーミグシステム研究』9, 214-228.
- 南石晃明・長野間宏・小柳敦史（1996）「大規模水田作経営における不耕起乾田直播栽培技術の経営的評価：確率的多目的計画モデルによる分析」『1996年日本農業経済学会論文集』, 23-28.
- 南石晃明・向井俊忠（1997）「作業リスクと水田作経営の適正経営面積：作業可能時間の年次変動を考慮した数理計画モデル分析」『農業経営研究』34(4), 67-77.
- 前川英範（1998）「大規模経営におけるスターホイルトラクタによる湛水直播栽培の経営的評価—福井県坂井平坦地域を対象として—」『東北農試総合研究（B）』12, 18-30.