

## 論文

# 農業農村計画分野における地点訪問最適化を応用した既往研究レビュー

森澤 健作\*<sup>1</sup> 山下 良平\*<sup>2</sup>

### 要 旨

圃場分散に伴う圃場管理の難しさや移動時間のロス拡大等の影響に対し、逐次改善を進めていくことは極めて重要な課題である。本稿は、圃場分散の問題を念頭におき、農村の巡回サービス等まで含めた既往研究に焦点をあてた。そして圃場分散が与える影響やその評価法、巡回管理の最適化、巡回作業条件を加えた作業計画の3領域に分類した。そのうえで圃場巡回の最適化に資する知見や課題を整理した。その結果、労働負担が特に大きい水管理等の圃場巡回にかかる移動時間のロス低減の改善可能性を模索する必要性を指摘した。また、今後の農地集積や借地錯綜化後の利用調整等の取組み支援として、巡回管理にかかる移動時間の圧縮限界をシミュレーションするツールの構築を提案した。圃場間移動の時間ロスを定量的に評価することは、農地集積の合理化や経営計画の策定・改善の論点として広範に活用できると考える。

キーワード：圃場分散／農地集積／巡回管理／巡回セールスマン問題

### はじめに

#### (1) 背景・目的

経営農地が分散錯圃するわが国特有の土地条件は、土地利用型農業のさまざまな問題に関わってきた。借地集積型の大規模経営における無作為な圃場枚数の著しい増大は、分散範囲の拡大、圃場間の遠距離化を生じさせる（原ら，2008）。過去の実態調査では、担い手の約4割が農地集積の進まない理由の一つに圃場分散をあげる（注1）。これは生産コストの低減や経営規模の拡大に限界をもたらすことを暗示させ、現在直面する農地集積の停滞要因（注2）の一つと考えられる。土地改良法の改正では、農地中間管理機構に預けた農地に係る工事同意や費用負担を求めずに圃場整備等の基盤整備が実施できる新制度の創設を定めた（注3）。新制度は未整備農地や荒廃農地を含めた面的整備を計画し易いものとする。そして農地の再流動化が図られ、担い手への効果的な農地集約が期待される。

こうした農地集約の進め方とは矛盾の調整で発生してきた圃場分散については、学術誌においてさまざまな特集が生まれ、栽培管理への影響や機械の作業効率を問題意識とする事例研究が多い。

急速な規模拡大に伴う圃場分散を背景とし、効率的な巡回行動を必要とする生産現場では、これらの研究成果がどのように活かせるのか。本稿では、圃場分散に伴い複雑化する圃場巡回の改善や農村地域の巡回サービス等の既往研究に焦点をあてた。このなかで地点訪問の最適化手法を応用した研究、及び類似する研究で得られた知見や課題について整理することを目的とした。上記整理は、国の制度設計と併せて生産現場におけるコスト削減や規模拡大に伴う問題を展望していくうえで有用と考える。

#### (2) 整理の方向性

圃場分散は多くの地域で農業の生産性を低下させる。しかし、その十分な解決の方策は講じられていない。圃場分散とは、梅本（1996）の定義により、圃場枚数の増加に伴う遠隔化、拡散化、錯綜化を扱う。梅本の圃場別生産管理の研究は、圃場分散と作業の関係性を分析する先行研究とされる。そこで本稿の整理にあたっては、掲載された1996年前後から2018年6月迄の学術論文等を中心に行った。

この結果、35本の既往研究を抽出した。そして抽出した既往研究を以下の3領域に分類し整理した。まず、圃場分散が農業生産や管理作業に与

\*<sup>1</sup> 石川県立大学大学院 自然人間共生科学専攻

\*<sup>2</sup> 石川県立大学 生物資源環境学部 環境科学科

表1 投稿原稿のレビュー対象の論文

区分	番号	論文	研究内容・対象	研究方法・手法（開発）	得られた知見・結果
圃場分散化	(1)	梅本 (1996)	家族経営を対象とした圃場分散の影響に対処する生産管理の改善	生産管理における作業効率や収収・品質の維持を図るための管理行動の内容と行動理由の実態調査から分析	一定の稠密な栽培管理が可能な作物・品種配置、水管理を考慮した作業順序設定が一般化可能な改善として提起
	(2)	鹿内ら (2007)	圃場分散が作物の生産性に及ぼす影響	圃場分散の評価指標を圃場面積、事務所からの距離、周囲圃場面積とし、作物収収との相関を分析	圃場間距離が作物収収に負の影響を与え、サトウキビの低収の一因である可能性を指摘
	(3)	西村 (2009)	圃場分散状況と圃場集積効果の検証	収穫作業のGPS記録をもとに機械の移動効率を示す指標を年度ごとに算出し比較分析	機械が近隣圃場を順次収穫可能とする集積形態では圃場間の移動効率が向上することを確認
	(4)	有本ら (2014)	農家の自発的な区画交換が農地団地化に繋がる可能性の検討	区画交換のサイクル形式を作成し参加率に応じて団地化がどの程度可能かシミュレーション分析	農家の参加率が1/4程度では団地化の進展が難しいことを指摘、より多くの区画の逐一交換が効果的と提起
	(5)	井上ら (2011)	圃場分散が堆肥運搬・散布の作業効率に及ぼす影響	機械の散布時間・散布面積の線形回帰モデル式を作成し作業効率に影響する圃場分散の要因を分析	散布時間は堆肥の積込場所、散布面積は圃場面積、通作距離、圃場分散度の影響を統計的に確認
	(6)	加藤ら (2016)	水稲作の収穫作業の能率を規定する要因分析	機械の作業能率の線形回帰モデル式を作成し圃場分散を表す指標や降雨等が作業能率に及ぼす影響を分析	作業能率は圃場分散度、降雨日数が負の影響を与え、機械の非効率性の一因である可能性を指摘
巡回管理の最適化	(7)	小林 (1993)	事例ベース推論の枠組みを利用した最適化手法	既存事例の座標点コードでベアを作成し既存地点の訪問順序を新規訪問地点に継承し解を改善	訪問地点が50程度では計算時間が少なく解は安定
	(8)	片山ら (1994)	従来のTSP近似アルゴリズムの組み合わせによる効率化の検討	探索能力の高いHC法、SA法を適用し、都市サイズごとに最良解と計算時間を記録し効率性を評価	局所解を避けるため、HC法に確率を導入した方法で解を収束させ、訪問地点100を上限に最適解を算出
	(9)	田中ら (1995)	米国532都市のTSP問題でのSOM法の最適化手法	Angeniolの方法を基礎とした解法にノード総数の変化(最適モメント)による慣性項を追加し解を探索	都市数と最適モメントの関係を一連の実験から導き、得られた準最適解の計算時間は1/4に短縮
	(10)	藤村ら (1999)	改良SOM法によるTSPの準最適解を与える手法	最適ノード更新による利得パラメータの変化とノードの増減を準最適解はAngeniolの解に対し辺路長が数%の増加で計算時間は短縮、都市数に関係なく時間短縮が可能	準最適解はAngeniolの解に対し辺路長が数%の増加で計算時間は短縮、都市数に関係なく時間短縮が可能
	(11)	西見ら (2009)	SOM法によるTSPの準最適解を現実的な時間で与えるための改良	初期ノードの配置、解を収束させるための更新係数を検討し、経路長の精度及び計算時間の値を評価	初期ノードの配置はあまり結果に変化がないが、更新係数の検討において計算時間の短縮に有効性を確認
	(12)	神野ら (2009)	SOM法を用いた調査結果分析	SOMの入力ベクトル2次元上に配置し参照ベクトルの成分からデータ全体の特性を把握	解釈が困難な多成分の分析が、視覚的に多次元のデータ間特性を捉え客観的に把握可能であることを確認
	(13)	内田ら (1996)	空間の階層構造を利用したTSPの近似解法	空間を4等分し都市のある空間の中心点を通る仮巡回路を形成、その分割と合成を繰り返して解を改善	部分空間の仮想都市的な中心座標と都市座標の点間距離の収束を確認し、階層的な分割と合成の有効性を確認
	(14)	坂上ら (2000)	従来のTSP近似アルゴリズムである構築法(Greedy法)の改良	都市から他都市のコスト平均 $\mu$ を求め都市 $i$ のコストを $C_{ij} - (\mu - \mu_i)$ に書き換え総コストを最小とする解を探索	従来のGreedy法と比較し平均計算時間は変わらないが、解の精度は向上
		"	従来のTSP近似アルゴリズムである改善法(2-opt法)の改良	次の訪問先の候補となる巡回路からパス2本を選び、パス上の都市を組み替えて最小パスを求め改善	従来の2-opt法と比較し解の精度は向上するが、計算時間は長い時間が必要
	(15)	大植ら (2005)	並列タプーサーチによる局所探索法	並列処理により解の交換情報を通信によりプロセス間で共有し解を改善	並列タプーサーチの通信による実装が最適解の誤差を小さくする効果があることを確認
	(16)	高橋ら (2011)	拡張遺伝子交叉オペレータ交代法による最適化手法	ACOより局所的に最適で多様な解を生成し、これを引継ぎEAXIにより大域的に最適な経路長を探索	EAXI, ACO単独の経路長と比較し改善を確認、最適経路長と平均経路長の相対誤差が小さく有効性を確認
	(17)	高橋ら (2012)	再帰的拡張遺伝子交叉オペレータ交代法による最適化手法	ACOの生成解をEAXでローカルサーチ収束を2回繰返し、別系列の改善解と併せ最適な経路長を探索	交互操作で多様性の高い巡回路群を得て、別系列の巡回路群との併合により最適巡回路長の収束を確認
	(18)	小林ら (2011)	遺伝的アルゴリズムにおける多様性の指標化	遺伝子の位置的属性と順序的属性を多様性(属性数)で比較し指標化、多様性は突然変異率を定量化	突然変異率0.001%で位置的属性は多様性が減少、一方、順序的属性は維持されており指標化としての適正を確認
	作業計画の最適化	(19)	大土井ら (1999)	1台の機械が分散する圃場を作業する時の移動経路の最適化手法	GAを適用し遺伝子配列をコード化、適応度は総移動距離と適応度に応じたランク選択で解を改善
(20)		大土井ら (2001)	圃場分散を考慮した農作業計画の最適化	GAを適用し複数の機械への圃場割当てをコード化、最短巡回経路の距離を単純化して計算時間を短縮	単純化した距離の評価が最短巡回経路の距離と相関が高く、この評価を用いた適応度の計算の妥当性を確認
(21)		梅本 (2011)	圃場間移動の実態把握と土地利用調整の進め方の検討	非連担で集積する経営体を対象としてGPSで農業機械の行動を精緻に調査し、圃場間移動の時間のみ抽出し検討	ある機械の日平均移動時間が最大1.1時間に及ぶことを明らかにし農業機械の効率的運用の必要性について言及
(22)		西村ら (2012)	圃場分散が圃場間移動に与える影響解析	GPSロガー記録から稼働時間に占める圃場間移動の割合を設定範囲別に整理し圃場分散の影響を定量的に評価	同規模面積では分散範囲が小さいほど圃場間移動コストは低減、面積規模が大きいと効果の低減を確認
(23)		大黒ら (2004)	GISを用いた水稲作春作業計画支援システムの開発	大黒らの定義による「圃場分散度」に圃場数を乗じた総和を最小とする経路探索をシステム化	圃場分散度が実際の圃場間移動距離と相関が高く圃場間移動計画の指標としての適性を確認
(24)		西村 (2007)	作業の連続工程における総所要時間の予測シミュレーションの開発	圃場巡回ルートを1日の作業限界時間で分割し現実的な最短ルートをシミュレーションにより探索	1日の時間制限のあるなかで移動時間と作業時間を合わせた総所要時間が最小となる経路探索を具体化
(25)		西村 (2018)	巡回経路探索法を利用した圃場情報のリスト化手法の開発	経路探索は圃場群の最短経路上で圃区内隣接性を考慮する多段階経路探索でリスト化	順序リストで圃区内の隣接性を確認、隣接性を保持する土地利用調整が圃場分散度を改善することを確認
(26)		細井ら (2005)	農村地域に分散する水道施設の効率的な施設巡回計画	GAを適用し遺伝子配列は施設順序をコード化、適応度は総所要時間とし総コストの最小とする巡回ルートを探査	総所要時間と総費用の算定式をモデル化、自動監視装置の設置による平常時、災害時の最適化計画について言及
(27)		坊ら (2010)	総距離と稼働時間の二目的配送計画問題における探索法の提案	最小化にBest Cost Route Crossoverを適用、操作個体数の割合がバレット解の質と計算時間に与える影響を評価	総距離はBCRC操作の効果が大きく、操作個体数が数%で質の高いバレット解を探索可能であることを確認
(28)		稲本ら (2012)	分解法に基づく二目的配送計画問題の解法とその評価	部分バレット解を合成した近似バレット解を抽出、解の性質が保存される確率や近似バレット集合の精度を評価	距離と時間のばらつきが等しい場合、近似バレット集合の精度、解の性質が保存される確率が高い傾向を確認
(29)		川中子 (2005)	ゴミ収集車の総移動距離の最小化する最適化の検討	一般化割当て法とヘービング法の2つの手法から総移動距離にかかる指標に對しての手法が有利・優位性を評価	経路長さ、集積所数、集積所間距離の最大値を比較した結果、どちらの方法が良いか結論は出ず
(30)		吉良ら (2012)	先行順序制約等の経路問題に対する局所探索法の提案	異なる探索空間の中で解を探索し、実行可能領域への写像を介した解(業務完了時間の最小化)を評価	探索空間に単純なintra-swap近傍操作を与えることで解の局所改善を確認
(31)		村上ら (2013)	電力設備の停電計画の最適化手法	タプーサーチ法を用いて作業停止に伴う系統間距離を評価指標とし設備の系統操作の切替回数の最小化を探索	停止回路遮断器の距離の最小化が系統操作の切替回数を考慮した作業計画となることを確認
(32)		藤田ら (2014)	乗合タクシーサービスの最適化手法	構築法による料金収入と必要台数のシミュレーションから損益分岐経費を推計し採算性を評価	1ヵ月1台当たりの経費損益分岐点を示し、黒字化になる採算性の可能性について言及
(33)		能美 (2017)	移動図書館の効率的な巡回サービスの改善可能性	巡回条件を考慮したプログラミングで探索、実際の巡回ルートの総所要時間に対し短縮された総所要時間を評価	訪問時間帯や巡回頻度を考慮した条件付巡回ルートは道路密度の低い中山間地域でも短縮効果を確認
(34)		山下ら (2017)	農地集積に伴う圃場間移動のTSPの検討	段階的な規模拡大シナリオのもと巡回管理の総移動距離と総移動時間の増加傾向をシミュレーション分析	ランダム集積では総移動距離の増加傾向は減速する一方、総移動時間は異なった増加傾向を示すことを確認
(35)		佐藤ら (2018)	農家の移動経路の判別手法の開発と経路選択の分析	GPSを利用し移動経路を確定したうえで農家が選択する経路と理論上の最短経路の乖離がたらす要因を分析	圃場分散が通作時間を増大させることを確認、地形条件により遠回りとなる経路を選択している実態も確認

える影響やその評価法を中心とする「圃場分散化」に関する研究を1点目とした。つぎに圃場枚数の増加に伴い複雑化する圃場巡回を鑑みて、総コストが最小となる経路探索等の「巡回管理の最適化」に関する研究を2点目とした。また、作業条件や制約を加えた応用問題として「作業計画の最適化」に関する研究を3点目とした。本稿のレビュー対象とした既往研究の概要を表1においてテーマ別に示す。

## 1. 圃場分散化に関する研究

経営面積の規模拡大の過程で生じる圃場管理や移動時間のロス拡大等の影響に対し、逐次改善を進めていくことは極めて重要な課題である。圃場管理については、梅本（前掲：1996）が作物単収と品質の維持を図る改善として生産管理の稠密さの程度を調整することを提起した。規範的な理論と比較し、現実的な概念に基づく改善は一般化可能な改善として妥当性が高い。移動時間の低減を図る行動原理につながるものではなかったが、行動理由を分析し必要性を提起する手法は管理改善の有効なアプローチと考える。

鹿内ら（2007）は圃場の位置的条件を指標とし、圃場分散が栽培管理の遅れを生じさせ、低単収の一因になる可能性を指摘した。また、西村（2009）は農業機械の圃場間移動距離、及び稼働時間に占める移動時間の割合を指標とし、効果的な集積形態について検証した。近隣圃場を順次収穫する作業形態はいずれの指標も改善の方向性を示した。これらの研究はどれも同作型を扱っており、検証結果は限定的としているが、圃場分散が農業生産や機械の効率的運用への影響を示した意義の高い成果といえる。

圃場分散の影響分析に関連し、有本ら（2014）は農家の自発的な区画交換による農地団地化問題を取り上げた。本研究では、より多くの参加による区画の斉交換が効果的であると結論づける。それでも換地や交換分合の資源配分は利害が発生し易く合意形成が容易でないことも知られる（能美，1995・中嶋ら，2011）。特に、借地錯綜化後の自発的な土地利用調整は時間と労力がかかるがゆえ、包括的な議論に至らないケースが想定される。そこで合意形成を図る指標の一つとして、例えば、圃場分散による影響を定量的に捉えることができるならば、農地団地化の具現化へ向けた有効なアプローチとなりうる。

圃場分散の数値化や指標化を試みた研究では、

大黒ら（2004）の定義した圃場分散度の考え方が後続の研究者らに影響を与えてきた。圃場分散度は1日の作業対象となる各圃場の中心座標の平均値を中心点とし、そこを起点とする各圃場の中心座標までの平均距離を扱う。これに圃場面積の概念を加味し圃場分散と作物単収との相関分析を試みた研究（前掲：鹿内ら，2007）や、作業能率を表す線形回帰モデル式を作成し圃場分散の要因分析を試みた研究（井上ら，2011・加藤ら，2016）はその一例である。いずれの分析結果も圃場間の位置関係が影響を与えることを指摘した。これは、圃場分散の非効率性や改善効果を定量的に議論するうえで、圃場の位置関係の把握が重要な要素であることを暗示させる。

圃場の位置関係はGIS利用で容易に一元管理できる。そこで各圃場のポリゴンデータから求めた重心座標を用いて、その重心間距離にユークリッド距離を与えて圃場間の移動距離とする研究がある（前掲：鹿内ら，2007・山下ら，2017）。ごく隣接した農地間の移動を考えるならば、重心間距離と実際の移動距離が実質的にあまり変わらないという設定に基づく。しかし、直線距離が大きくなるにつれて実際の道路を通った移動時間と乖離が生じることが想定され、直線距離に応じた補正等の検討は適宜必要と考える。

## 2. 巡回管理の最適化問題に関する研究

巡回管理の最適化とは、地点訪問にかかる総移動距離あるいは総移動時間の最適ルートを導く手法を扱う。この問題に対処しうる研究として、巡回セールスマン問題（Traveling Salesman Problem：以下、「TSP」と略記）の解法があげられる。TSPが効率的に解けると経路計画やスケジューリング等、各分野の作業効率化や費用削減に貢献するとし、世界中で研究されてきた。

TSP問題は、四半世紀前にHopfieldが相互結合方式ニューラルネットワークを適用して10都市の最短経路長の探索に成功し話題となった。近年は遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm：以下、「GA」と略記）やカオスを用いた手法もある。また、非常に有名な方法としてDurbinとWillshawによる弾性ネット・モデルを用いた手法がある。いずれの手法も最適解や準最適解を得るのに長い計算時間を要することが知られる。この課題については、今日のPC性能を考慮し再評価すべきと考えるが、それでもモデル内のパラメータ設定が難しいという側面がある。

都市を対象とした最適化問題については、小林(1993)がTSPの最適化について事例ベース推論の枠組みを利用した手法の有効性について議論している。既存事例と新規事例の間で座標点コードによりペアを作成し、既存訪問地点の通過順序を新規訪問地点に継承させ解を改善する試みである。この手法では、計算時間を小さくし、解の精度については安定することを示した。しかし、実験的に考慮した地点数が50程度と少ないほか、経験的な実証が乏しいという課題がある。

従来のTSP近似アルゴリズムを利用した研究では、片山ら(1994)が山登り法(Hill Climbing)と焼きなまし法(Simulated Annealing)の組み合わせによる有効性を検討している。局所解を抜け出すためにハイブリッド化したアルゴリズムのなかには、計算時間と解の収束について評価の高いものがある。この研究では、訪問地点数の上限を100とする適用範囲を示し、今日の農地集積の実態から考えると若干少ない。しかし、従来のTSP近似アルゴリズムを組み合わせたハイブリッド化手法は、膨大な地点訪問数を扱っていくうで有効な手段の一つと考える。

訪問地点数が500程度の解法については田中ら(1995)がある。Angeniolの方法を援用し、TSPの解法にノード総数の変化による慣性項を追加して準最適解の精度と計算時間の短縮効果を確認している。また、藤村ら(1999)のKohonenの自己組織化特徴マップ(Self-Organizing Map:以下「SOM」と略記)を改良した研究がある。最適ノードの更新による利息パラメータの変化とノードの増減を関連づけた慣性項を追加し、都市数に関係なく計算時間の短縮効果を得た。この他、西見ら(2009)は膨大な都市数を対象として多項式時間で解を得るための改良、神野ら(2009)はSOM法を用いた応用例を示した。いずれも膨大な地点訪問数を扱うSOM法の利点を活かし、準最適解が現実的な時間で収束する。理論上の厳密解が得られないという点はあるものの、実践面の利用を考慮した場合、ある程度の収束条件の下で得られる解にも一定の妥当性があると考えられる。しかしながら、アルゴリズムに組み込む慣性項の関係式や制御するパラメータ設定を必要とする手法は、一般化が難しいという課題が考えられる。

視覚的に捉えやすいTSPの近似解法については空間の階層構造を利用した手法がある(内田ら,1996)。二次元空間を4等分して訪問都市のある空間の中心点を通る仮巡回路を形成し、次層以

降この分割と合成を繰り返し更新する。この手法では、分割した空間の仮想都市的な中心座標とこれに対応する都市座標との点間距離が収束し、精度の良い解が得られることを確認している。本手法は解の最適性を保証するものではない。しかしながら、元のつながりを保持し解を更新する自律分散的な関係を利用したヒューリスティックスの導入は、TSPをはじめとする大規模問題の効率的解法として用途の幅広さがあると考えられる。

ところで、従来の近似アルゴリズムを改良し改善を試みる研究は多い。巡回路の総コストの最小化を目的とした研究では、坂上ら(2000)のGreedy法の改良がある。辺のコストを書き換えて小さい順に探索していく手法で、従来法と比べ計算時間は変わらないが、解の精度を向上させた。この他、坂上らは2-opt法の改良も試みている。パス上の都市を組み換えて最小パスを探索する手法で、従来法と比べ解の精度は向上したが、計算時間に課題を残した。いずれも計算時間の短縮が難しいことを示したが、この結果を発展的に捉えるならば、従来法の性能を改めて確認する裏付けになったともいえる。

情報工学分野では、大植ら(2005)がタブーサーチ法の並列化による最適化手法を提案している。並列処理による解の情報交換を通信によりプロセス間で共有する時の解の精度を検証し、並列タブーサーチの通信による実装の有無が最適解の誤差を小さくする改善を確認している。また、GAを用いたハイブリッド化手法では、高橋ら(2011・2012)の研究がある。枝組み立て交叉とアントコロニー最適化手法を結合し、巡回路の多様性を確保する効率的な解を探索する再帰的拡張遺伝子交叉オペレータ交代法を提案した。しかし、多様性の大きさを表す指標が曖昧であることから運用の難しさが感じられた。この問題については、小林ら(2011)の提案がある。順序的属性(共通する遺伝子の順序)の属性数を指標とする考え方は、多様性の数値化を可能とし、今後改良を試みる手法の改善効果を定量的に評価する指標の一つになると考える。

### 3. 作業計画の最適化問題に関する研究

作業計画の最適化とは、地点訪問にかかる総移動距離あるいは総移動時間の最小化について、現場の作業条件や制約の実態を踏まえた探索法、及びこれを利用した作業計画の合理化を扱う。

この問題をめぐっては、かつて農業機械学分野

において、圃場巡回の最適化が議論された。機械は一般的に走行速度が低い。それゆえ、圃場間移動の最小化は、作業時間全体に占める圃場内作業の時間割合を高められるため、効率的な作業計画を実現する重要な視点の一つと考える。

大土井ら（1999）は分散する圃場を機械1台で作業する条件下での移動経路の最小化についてGAを用いた手法を提案している。GAモデル内の適応度は総移動距離とし、適応度に応じたランク選択を介して解の収束を試み、結果、100地点を上限とする解の改善を確認した。この手法は、前述したニューラルネットワークを用いた手法のように圃場数の変化に応じてパラメータを設定せずとも最適解が得られる利点がある。その他、大土井ら（2001）は、複数の機械に作業圃場を同時に割り当てる最適手法を提案している。機械の作業時間を均等化し、かつ圃場間の移動時間の最小化を図る問題は、錯綜化した今日の集積実態から考えて十分にありえるケースである。適応度は時間と距離の評価とし、複雑な条件に対処する計算時間とするため、距離の評価は単純化したモデル式とした。しかし、いずれもモデル内のパラメータ推定や適応度の計算が複雑で適用が難しい側面がある。

ところで、農地の面的集積が有効とされるなか、実際にどの程度の作業効率が改善されるのか、特に、圃場間の移動時間それ自体を定量的に把握した研究は少ない。この問題については、非連担で集積する複数の経営体を対象としてGPSを機械に装着し、移動経路や移動時間を調査した報告がある（梅本,2011）。報告では、圃場間移動にかかる時間のみを抽出し、非効率が大いであることを実証している。調査の計測自体が容易ではないなか、移動順序や移動時間を精緻に把握した大変貴重なデータである。

作業の非効率性について圃場間の移動時間に着目し、異なる範囲、異なる規模の圃場群を設定して圃場分散の影響を明らかにしようとした試みがある（西村,2012）。研究のポイントは、圃場分散を無作為に発生させてTSPシミュレートを繰り返し、圃場分散の度合いが与える影響を定量的に分析することにある。仮想的な分散設定ではあるが、同筆数・同規模の圃場群では、圃場分散に応じて移動時間のロスが拡大することを確認した。これまでの集積形態が、個別委託や相対関係によりランダムに発生していたとするならば、時間ロスの将来予測を実践的に読み解くことができる有

用な手法と捉えられる。

圃場分散の影響を考慮した作業計画の最適化を支援する研究では、水稻作春作業を対象としたシステム開発がある（前掲：大黒ら,2004）。適応度は前述した圃場分散度に圃場数を乗じた総和とし、この圃場分散度が実際の圃場間移動距離との相関が高いことから、総移動距離の指標としての利用の可能性を示した。しかし、圃場分散度は1日の作業圃場に限定しており、全圃場を対象とする際は、適応度について別途検討が必要と考えられる。また、圃場間の関係性を考慮した手法ではないため、現行の土地利用や水利使用の意思決定等の制約がある場面では、限定的な適用になるという課題も考えられる。

作業計画の策定を支援する研究では、収穫作業の連続工程における総所要時間を予測するシミュレータ開発がある（西村,2007）。対象の圃場群をいわゆる一筆書きの最短経路探索で結び、その経路を分割し日程を割り当てることで作業計画の最適化を試みている。この方法では、圃場間の関係性を継承する巡回順序をリスト形式で得られるため、さまざまな意思決定場面に応用可能であると考える。しかし、高額なGIS分析オプションを利用しているため、システムの運用上、大きなコストを伴うという側面がある。

圃場の位置関係に着目した研究では、経路探索を距離の最小化という規範的な概念とは別に、圃区内隣接性や合筆可能性を考慮した多段階経路探索法の提案がある（西村,2018）。この方法で得られた順序リストが、地域的な土地利用調整に適用することが可能か否か議論している。複数の経営体を設定し、圃場をランダムに割り当てた仮想的なシミュレーション下ではあるが、再配分結果に改善効果が示され、適用の可能性を示す結果が得られた。面的集積に向けた取組み支援において土地利用調整の効果を定量的に示すことは、強い説得力を持って農地集積のあり方に示唆を与えることができるものと考えられる。しかし、実際の現場での実証に至っていないほか、再配分の割り当てに不公平感が出る等、具現化に向けては検討の余地がまだ残っている。

TSPを施設の管理場面で検討した研究には、細井ら（2005）がある。農村地域に分散する無人の水道施設の経路探索についてGAを用いた手法で検討している。この研究では、自動監視システムの設置による総所要時間と総費用の算定式をモデル化し、コストダウンの可能性をシミュ

レーションで分析している。総費用は、巡回時間にかかる人件費、システムの導入費用、及び運用にかかる維持管理費を考慮したモデル式で算出され、その具体性から汎用性の高さが伺える。また、平常時は総費用、災害時は時間が焦点になるため、求める解の性質の違いから、いわゆる2目的の最適化問題を扱っている。双方を短くするパレート最適解を求める必要がある等、一般には難しい解法ではあるが、公共施設の管理者間では、個別具体的な問題に対処しうる手法として評価が高いと思われる。

複数の評価パラメータを追加した2目的の最適化問題は、坊ら(2010)が総距離と平均稼働時間を目的関数とするパレート探索について議論している。目的関数の最小化にはBest Cost Route Crossoverを適用し、操作個体数が総個体数に占める割合がパレート解の質と計算時間に与える影響を評価の対象としている。その他、稲本ら(2012)は分解法に基づく部分問題のパレート解を求めて合成した近似パレート解を抽出し解の特性について議論している。こうした多目的最適化問題では、目的関数間にトレードオフがある場合、解は単一ではなく複数のパレート最適解集合となり、これを得ることが目標となる。GAは多点探索手法であるため、パレート最適解の集合探索に有利と考えられる。農業分野への利用については、例えば、総距離に圃場巡回の地点数という目的を加え、1日の作業時間を制約した上で、少ない距離で多くの地点を訪問する最適化問題への適用が考えられる。

GA以外の近似アルゴリズムでは、川中子(2005)がゴミ収集車の総移動距離の最小化を目的とし、最適化の手法として一般化割当法とセービング法の2つのアプローチを試みている。この結果、双方に優劣をつけるまでには至らなかったが、道路ネットワークや施設配置の設定により地域性を考慮した手法選択の必要性について言及している。吉良ら(2012)は運送経路・配送経路問題の最適化手法として局所探索法を用いている。提案は「扱い易い異なる探索空間を用意し、そこから本来の実行可能領域への写像を定義する」方法の応用例である。この研究では、探索空間のなかでintra-swap近傍探索を与えて探索し、探索空間から実行可能領域への写像を介した解を評価対象としている。空間検索と写像の生成による実行解が与える変形、改善が良解となることについて、扱える問題の規模について議論はされて

いないものの、制約が複雑なTSPに対する単純なアプローチは応用の可能性が高いと考える。

また、村上ら(2013)は電力設備の停電計画の最適化手法としてタブーサーチ法を用いた。作業停止に伴う系統間距離を評価指標とし設備の系統操作の切替回数の最小化をねらいとする。藤垣ら(2014)は乗合タクシーの最適化手法として構築法によるアプローチを試みている。具体的には、料金収入と必要台数のシミュレーションで損益分岐経費を推計し採算性を評価する。こうした作業手間や採算性を注視する最適化問題は、総コストを基に定量的に評価する研究分野への有益な指針となることが考えられる。

農村地域を対象とした巡回サービスの研究では、能美(2017)がある。この研究では、活動効率が巡回ルートの良い否に影響するとし、移動図書館を事例として効果的な巡回ルートの改善可能性を検討している。最適経路の指標は総所要時間とし、移動時間と停車時間の総和を問う。このなかで、訪問時間帯や巡回頻度を考慮した利用者重視の経路探索において、道路密度の低い中山間地域であっても時間短縮の効果を示した。利用量に主眼を置く検討は、時間短縮に一樣の効果があるとは限らないが、真の巡回サービスを検討する際の重要な視点と考える。

今後も農地集積が進むと予想されるなか、段階的な規模拡大のシナリオを設定し、圃場の巡回管理にかかる総移動距離と総移動時間の増加傾向を読み解く試みがある(前掲:山下ら,2017)。農地集積の進展とその影響を時系列で整理していくため、視覚的に捉え易く汎用性が高いアプローチ法と考える。しかし、圃場間の移動に伴う基本的な動作が完全に捨象されていることなどから、計画的な農地集積との比較分析により非効率性を定量的に示すまでには至っていない。

この他、GPS端末の利用による道路ネットワークの属性を与え、圃場分散の影響を正確に評価し改善につなげていこうとする研究がある。佐藤ら(2018)は、実際の車両にGPSを取り付け圃場と農道、及び各農家の移動経路を判別し、農家の経路選択について評価を試みた。この結果、圃場分散が通作時間を増大させることを確認し、その要因の一つに地形条件による影響を確認した。これまであまり考慮されてこなかった圃場間斜度等の地理情報は、圃場分散の影響を精緻に分析するうえで有用と考えられる。

## おわりに

### (1) 議論のまとめ

圃場分散化については、主に農業生産や管理作業への影響を分析し、その改善や評価を試みる研究を取り上げた。作業効率を改善するうえで、圃場間移動の時間ロスを低減することは重要な視点である。しかし、圃場間の位置関係から機械作業の非効率性を指摘しその改善効果について分析する報告が一部あるものの、特に、管理作業への影響を分析する研究は少ない。生育期間の水管理に費やされる労働負担は大きい。このため、機械の非効率性の言及にとどめず、日常的な圃場巡回にかかる移動時間のロス低減の改善可能性を模索していくこともコストダウンに向けた有効なアプローチとなりうる。

巡回管理の最適化に関しては、複雑化する巡回行動を鑑みて、適用可能性や応用性が高いと考えられる経路探索の研究を取り上げた。局所解を避ける工夫を施した手法では、GAを用いた手法と既存の単純な近傍探索を組み合わせたハイブリッド化手法が有効と考える。前者はGAモデルの設定や適応度の計算が別途必要なこともあり、簡便な手法であるとは言い難い。一方、後者は問題を分割し、元のつながりを保持しつつ、解を段階的に収束させることが可能であるため、TSPなどの大規模問題の効率的解法概念に近く理解し易い。両者ともに移動経路を合理的に導く手法であるため優劣の判断は難しい。しかし、さまざまな行動を柔軟に評価することを念頭におき、生産現場でも扱えるような分かり易い手法を所望するならば、後者の手法を適用することも一案と考える。

作業計画の最適化に関しては、作業条件や制約を考慮した最適ルートを導き、これを利用した支援策等を提案する研究を中心に取り上げた。この結果、圃場分散の深刻さを評価する手法が十分ではなく、地域的な土地利用調整につながる支援策の必要性が考えられた。これまで機械の効率的運用について指摘する報告はあるものの、それでも借地錯綜化後の調整についてはその先の強い説得力が求められる。そこでさまざまな角度から面的集積のメリットを実証し、提言していくことが極めて重要であると考えられる。

### (2) 今後の展望

今後、仮に農地貸借が無秩序に進んだ場合、それらを短期的に逐次修正していくことは実質的に

は困難である。こうしたなか、圃場分散に伴い顕在化する圃場管理の難しさや作業時間ロス拡大の問題は一層深化を必要とする。

そこで今後の展望としては、水田農業の作業時間で最もシェアの大きい巡回管理にかかる移動時間の圧縮限界をシミュレーションするツールの構築が考えられる。圃場間の位置関係を適切に把握しきれていない作業計画や場当たりの作業は、ムダの多い圃場間移動を繰り返し、結果として作業スケジュール全体に影響を及ぼす。ツールの活用としては、例えば、時間ロスが発生すると思われるランダム集積を現行モデルと見立て、計画的な集積との移動時間やコスト比較を定量的に示し、経営計画の策定・改善の論点とすることが考えられる。

今後は、担い手自らが経営指標を見定め、農業経営のリスク管理を主導していく時代が訪れる。健全な農業経営につながるとする有益な手法の開発や、担い手が容易に具現化できるツールの構築は、生産現場のみならず、学術・社会の両面においても十分な意義があると思われる。

### 注釈

1. 農林水産省(参照2018.8.23). 担い手への農地の利用集積の現状と課題. (オンライン). [http://www.maff.go.jp/j/study/nouti\\_seisaku/senmon\\_02/pdf/data1.pdf](http://www.maff.go.jp/j/study/nouti_seisaku/senmon_02/pdf/data1.pdf).
2. 農林水産省(参照2018.8.23). 平成28年度の担い手への農地集積の状況. (オンライン). [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/dai21/siryou2\\_1.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/nousui/dai21/siryou2_1.pdf).
3. 農林水産省(参照2018.8.23). 土地改良法等の一部を改正する法律の概要. (オンライン). <http://www.maff.go.jp/j/law/bill/193/attach/pdf/index-21.pdf>

### 引用文献

- 有本寛・中嶋晋作・富田康治. 2014. 区画の交換による農地の団地化は可能か?—シミュレーションによるアプローチ—. 農業経済研究. 86(3): 193-216.
- 稲本浩也・橋爪悟・矢野智之・橋爪進・小野木克明. 2012. 分解法に基づく2目的巡回セールスマン問題の解法とその評価. 電子情報通信学会技術研究報告.SS. 111(406): 63-68.
- 井上憲一・藤栄剛. 2011. 圃場分散が堆肥運搬散布サービスの作業効率に及ぼす影響. 農業経営研究. 49(1): 33-38.
- 内田大輔・本間経康・阿部健一. 1996. 空間の階層構造を利用したTSPの近似解法について. 計測自動制御学

- 会東北支部第166回研究集会講演資料. 161-3: 1-4.
- 梅本雅. 1996. 圃場分散に対する圃場別生産管理の実態と特徴. 農業経営研究. 34(4): 23-33.
- 梅本雅. 2011. 担い手育成に向けた経営管理と支援手法. 担い手の展開に向けた地域的支援手法. 梅本雅編著. 総合農業研究叢書. 66: 203-238.
- 大植裕之・大西克美・中野秀男・榎原博之. 2005. 巡回セールスマン問題を対象とした並列タブーリサーチにおけるプロセス間通信の効果について. 情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決(MPS). 2005(126(2005-MPS-057)): 1-4.
- 大黒正道・高橋英博・寺元郁博. 2004. GISを用いた水稲作春作業計画支援システムの開発. システム農学. 20(1): 23-31.
- 大土井克明・笈田昭・山崎稔・山下道弘. 1999. 農作業計画の最適化に関する研究(第1報). 農業機械学会誌. 61(1): 91-97.
- 大土井克明・笈田昭. 2001. GAによる農作業計画における適応度について. 農業機械学会誌. 63(3): 84-89.
- 片山謙吾・成久洋之. 1994. TSP問題に対するヒューリスティックアルゴリズムの効率化について. 岡山理科大学紀要 A 自然科学. 30: 289-297.
- 加藤雅宜・川向肇・鷺尾信彦. 2016. 圃場分散下における水稲受託作業の効率性要因の定量分析—JA出資型農業法人による酒米(山田錦)の収穫作業を対象にした分析—. 農業情報研究. 25(4): 116-129.
- 川中子敬至. 2005. ゴミ収集車の巡回経路表示システムに関する研究. オペレーションズ・リサーチ. 50(11): 770-776.
- 吉良知文・岩根秀直. 2012. 先行順序付き合流可能運搬経路問題に対する局所探索法. 数理解析研究所講究録. 1773: 77-86.
- 小林雅典・石田好輝. 2011. 遺伝的アルゴリズムにおける多様性の推定方法. 自動制御連合講演会講演論文集. 54(0): 563-566.
- 小林康弘. 1993. 事例ベース推論. 人工知能学会誌. 8(1): 26-36.
- 坂上知英・吉澤慎・太田義勝・大山口通夫. 2000. 巡回セールスマン問題の近似アルゴリズムについて. Research reports of the Faculty of Engineering, Mie University. 25: 81-96.
- 佐藤尅・高橋太郎・崎崎英男・山田七絵・中嶋康博. 2018. GPSトラックデータを利用した農道および農家の移動経路の判別手法と経路選択の評価. 農業農村工学会論文集. 86(1): I\_35-I\_45.
- 鹿内健志・南孝幸・官森林・上野正実. 2007. サトウキビ生産法人に集積された圃場の分散が生産性に及ぼす影響—地理情報システムを用いた分析—. 農作業研究. 42(1): 29-36.
- 神野健二・横田いずみ・井芹慶彦・井料隆太. 2009. 自己組織化マップ(Self-Organizing Maps)法と応用例紹介. 地下水学会誌. 51(2): 151-162.
- 高橋良英・吉川克哉・小林史和・木村翼. 2011. ハイブリッド手法による巡回セールスマン問題の解法. 八戸工業大学紀要. 30: 75-83.
- 高橋良英・木村翼・元田豪. 2012. 再帰的拡張遺伝子交叉オペレータ交代法による巡回セールスマン問題の解法. 八戸工業大学紀要. 31: 67-74.
- 田中慎一・藤村喜久郎・徳高平蔵・岸田悟. 1995. 多都市, 例えば米国532都市TSP問題でのSOM法の最適化. 電子情報通信学会技術研究報告 NC. 95(389): 37-44.
- 中嶋晋作・有本寛. 2011. 換地選定をめぐる利害対立と合意形成—新潟県新発田北部地区の事例—. 農村計画学会誌. 30(1): 65-73.
- 西見康平・加藤友彦. 2009. 自己組織化マップ法による巡回セールスマン問題の解法Ⅱ. 福岡工業大学研究論集. 42(1): 11-17.
- 西村和志. 2007. ネットワーク分析によるコントラクター作業計画の策定. 日本農業経済学会論文集. 2007: 55-60.
- 西村和志. 2009. 暖地コーンコントラクターの圃場分布状況と圃場集積効果の解明. 日本農業経済学会論文集. 2009: 158-165.
- 西村和志・若林勝史・田口光弘. 2012. 圃場分散が農作業圃場間移動に与える影響解析—水田飼料作収穫作業を対象としたTSPによる圃場間移動シミュレート—. 日本農業経済学会論文集. 2012: 100-105.
- 西村和志. 2018. 巡回経路探索法を利用した圃場情報のリスト化手法の開発—圃区内隣接性を確保する多段階経路探索法の開発と適用—. 農業経済研究. 90(1): 77-82.
- 能美誠. 1995. 大区画圃場整備事業に伴う換地の合意形成とその要因. 農村計画学会誌. 14(1): 20-30.
- 能美誠. 2017. 農村地域における諸活動と住民流動の評価と展望—高齢化・人口減少時代のなかで移動図書館車の巡回ルート改善可能性に関する考察—鳥取市立用瀬図書館の移動図書館車「やまなみ号」を事例として—. 農林統計出版. 第三部. 第3章: 189-210.
- 原浩太・草苺仁. 2008. 米作の非効率性と限界生産物価値. 日本農業経済学会論文集. 27-31.
- 藤垣洋平・高見淳史・大森宣暁・原田昇. 2014. 大都市圏郊外の住宅団地を対象とした高利便性の定額制乗合タクシーの成立可能性に関する分析—岐阜県多治見市の住宅団地におけるケーススタディー—. 都市計画



- 論文集, 49(3): 369-374.
- 藤村喜久郎・徳高平蔵・石川眞澄. 1999. 多都市巡回セールスマン問題での改良SOM-TSP法の性能評価. 電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌, 119(7): 875-882.
- 細井由彦・Aklog,D・増田貴則・中村真理子. 2005. 分散して存在する小規模な水道施設の維持管理の効率化に関する研究. 土木学会論文集, 804: I\_25-I\_35.
- 坊敏隆・荒川雅裕. 2010. 総距離と平均稼働時間の二目的配送計画問題におけるハイブリッド探索法の提案. 日本経営工学会論文誌, 61(4): 223-233.
- 村上智勇・藤原彩・岩本伸一. 2013. 作業停止設備近傍開閉器に着目した高速作業停止計画作成手法. 電気学会論文誌 B 電力・エネルギー部門誌, 133(10): 746-752.
- 山下良平・中嶋晋作. 2017. 農地集積に伴う圃場間移動の巡回セールスマン問題の検討—2-opt法を用いたシミュレーションによるアプローチ—. 農業農村工学会論文集, 85(2): I\_245-I\_251.

## Previous study review applying point visit optimization in agricultural rural planning field

Morisawa, Kensaku (Division of Sciences for Bioproduction and Environment, Graduate School of  
Ishikawa Prefectural University)

Yamashita, Ryohei (Department of Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University)

### Abstract

It is important to improve difficulties of paddy field management that accompany farm fragment. In this study, we explored past research on area visit services and other activities in rural areas, with a focus on farm fragment. Subsequently, the impact of farm fragment, its evaluation methods, optimization of management work, work plan with operating conditions, etc., were organized into three categories. The study revealed the need to explore the potential of improving loss reduction in travel time in the course of management work where the labor burden is particularly high. In addition, we propose the development of a tool to simulate the compression limit of travel time for management work to support future efforts in agricultural land acquisition and coordination following complex land leasing activities. Quantitative evaluation of time losses during movement across fields could be widely adopted in farmland acquisition and rationalization, in addition to the formulation and improvement of management plans.

Keywords: field dispersion / agricultural land accumulation / patrol management / tourist salesman problem