第Ⅱ部門　　水資源の変動を考慮した食糧生産計画立案のための最適化プロセス

京都大学大学院工学研究科　学生員　○吉弘　昌史
京都大学防災研究所　正会員　堀　智晴
京都大学防災研究所　正会員　野原　大督

1. 序論

近年、世界的な人口増加に伴って食糧需要量は増加し続けており、今後さらなる食糧増産が必要であると予測されている。FAO によると、世界の水消費の 70%近くが農業用水であると言われており、気候変動による水資源の変化がもたらす食糧生産への影響評価は、今後の水資源と社会との関係を考えていく上で必要不可欠である。その評価を行う上で、例えば、数種類の圃場への数種類の作物の作付け組み合わせを変化させて気候変動時の致命的なリスクを回避するような組み合わせ最適化問題や、灌漑ルールを最適化することにより農業用水使用量あたりの収量の最大化を目的とする問題等を考えると、こういった組み合わせ最適化問題では網羅的な探索法で解を探索するのは難しく、発見的探索法を用いる必要がある。

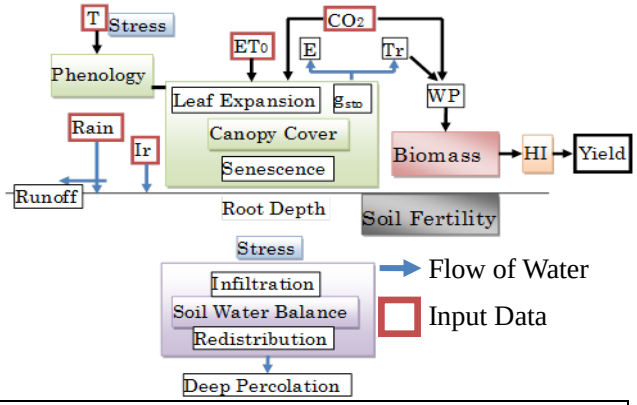
そこで、本研究では作物成長シミュレーションと最適化を組み合わせたハイブリッドなモデルで組み合わせ問題に対する解探索を行い、求解方法やその効率を検討する。

2. 作物成長モデル AquaCrop の概要

モデルの空間解像度が自由に設定可能、全地域、全気候に対応、多様な作物に対応、水資源の変動に対する反応の表現性といった条件を考慮して FAO によって開発されたモデル AquaCrop を選択した。

AquaCrop では日数(day)の代わりに、作物への温度の影響度合いを表す積算成長度日GDD(℃ day) という単位を使用し、日々のGDDの積算量に基づいて作物の成長と発育段階を表現する。また作物の成長は作物蒸散量に比例する。作物の最終収量を最終バイオマス量と収穫指数に分割して表現することで、生育環境条件によるバイオマス量への影響と、収穫器官(収穫指数)への影響を区別できる。

$$B = WP \times \sum Tr \qquad [1]$$



T：最高・最低気温　ET_0：大気蒸発散需要量
CO_2：大気中 CO_2 濃度　Rain：降水量　Ir：灌漑水量

図 1　AquaCrop の基本構成要素

$$Y = B \times HI \qquad [2]$$

ここに、Yは最終収量(t/ha)、Bは最終バイオマス量(t/ha)、HIは収穫指数(%)、Trは作物蒸散量(mm)、WPは作物水生産性(t/ha·mm)であり、HIはバイオマス量に占める収量の割合を表し、WPは作物蒸散量あたりのバイオマス生産量を表すパラメータである。

AquaCrop では土壌中の水収支を考え、土壌水分量に基づいて、作物の成長へのストレスを考える。水不足ストレスは葉の成長、作物蒸散量、葉の早期老化、収穫指数という 4 つの要素への影響に分けて考える。また、低温による作物へのストレス影響は、バイオマス生産量の減少と、開花期間の受粉の失敗による収穫指数の減少として表現される。

3. Genetic Algorithm(GA)概要

今回用いた GA は SGA(Simple Genetic Algorithm)をベースにした。遺伝子表現は、問題に応じて任意に変更でき、次世代に残す個体はルーレット選択により選ばれる。交叉は一点交叉により行い、突然変異は 1 箇所の遺伝子座の値を別の値に置換する操作を行う。遺伝子長、1 世代の個体数、突然変異率は任意の値を問題に応じて設定できるようにした。

Masashi YOSHIHIRO, Tomoharu HORI, Daisuke NOHARA　yoshihiro.masashi.86v@st.kyoto-u.ac.jp

4. 適用した組み合わせ問題

圃場をJ箇所想定して、1 圃場では大豆、ばれいしょ、小麦、てんさいの 4 作物のうち 1 種の作物を選択的に栽培する。既定の期間、その圃場では選ばれた作物を栽培し続けるものとする。このとき、2005 年から 2008 年の間の生産性指標の総和を最大にするような作付けパターンを求める問題に適用し、求解能力を評価した。この問題は以下のような式で表される。

$$\max_{x,w} \mathrm{F}(\boldsymbol{x}, w) = \max \sum_{i=1}^{\mathrm{m}} \sum_{j=1}^{\mathrm{J}} \frac{\mathrm{f}_i(x_j, w) - \mathrm{f}_{\mathrm{std},x_j}}{\mathrm{f}_{\mathrm{std},x_j}}$$

$$\textbf{s.t.} \qquad \boldsymbol{x} = \{x_1, x_2, \cdots, x_j\}, x_{1\sim j} = \text{soybean, potato, wheat, sugarbeet}$$

$$m_i = \text{meteorogical data(2005~2008)}$$

$$w = \text{water management(rainfed)}$$

$\mathrm{f}_i(x_j, w)$: 作物jを水管理方法wで生産した時のi年の収量

$\mathrm{f}_{\mathrm{std},x_j}$: 作物$j$を水管理方法$w$で生産した時の標準収量

2005 年から 2008 年の期間で生産性指標の総和が最大となる作物は、テンサイであった。そこで、GA により解を探索させ、全ての圃場でテンサイを栽培するという結果を探索させて、探索性能や探索効率を評価した。

5. 適用結果・考察

まずは、個体数 30、圃場数 10、突然変異率 0.1 の条件下で適用し、各世代の指標値（以下、適応度）の最大、平均、最小を示したものが図 1 である。全ての圃場でテンサイを栽培するという解に 37 世代程度で辿りついた。各世代の適応度の平均値から世代が進むごとに順調に最適解に接近していることが確認できる。一方で適応度最大値は、解に辿りついていないのに数世代にわたって改善が見られない場合があるため、探索の収量判定には平均値を用いるのが良いと思われる。

表 1 は圃場数 4 の場合と圃場数 10 の場合について、個体数 10、30、50、100 に対してそれぞれ突然変異率 0.1、0.01、0.001 と変化させて 50 回シミュレーションを行ったとき、最大適応度の探索に成功した回数を示した。

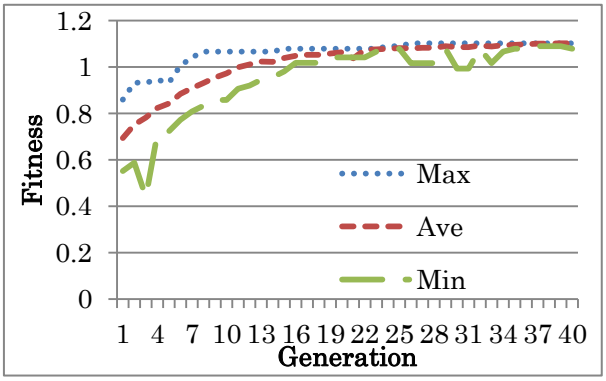


図 1 2005~2008 の最大値への収束の様子

表 1 それぞれの個体数、突然変異率における解探索成功数(50 回中)

		突然変異率		
	Farm=4	0.1	0.01	0.001
個体数	10	39	35	28
	30	50	48	44
	50	50	50	50
	100	50	50	50

		突然変異率		
	Farm=10	0.1	0.01	0.001
個体数	10	2	3	3
	30	33	20	16
	50	50	42	38
	100	50	50	50

個体数が大きいほど最大適応度を発見する確率は高まることがわかった。しかし、個体数が多いとたとえ最大適応度がみつかったとしても他の個体に適応度の低いものが多く含まれるため収束は遅くなる。

突然変異率が低いほど、局所解に陥りやすい傾向がわかった。圃場数 10、個体数 10 の事例より圃場数に対してあまりにも個体数が小さすぎると突然変異率に関わらず解探索は不可能であると言える。

6. 結論

作物成長モデル AquaCrop と最適化アルゴリズム GA を組み合わせたモデルを利用した圃場への作付け組み合わせ問題を考える時、圃場数 10、つまり GA の遺伝子長 10 程度の解探索範囲までであれば、個体数 50、突然変異率 0.1 程度の条件下で、GA による求解能力は十分実用に足るだろうと判断した。