

耕地転用を考慮した中国の 広域的農業開発の適地選定モデル

Land Transform Model with Proping Plan
for the Areal Agricultural Development in China

星 仰** 田中 健次*** 佐藤 博****

By Takashi Hoshi, Kenji Tanaka, Hiroshi Sato

The purpose of this study is to develop an arable land transform model for the areal agricultural development. Some researches have been done for agricultural development. One of them is a land transform model of a product. In the model, it is carried out clearing forest land and soil amendment for some lots which is suitable to cultivation area. The model will be improved to multi-products model of the areal cultivation. This paper describes a new multi-products model considering proping plan in the lots. The new model is formulated as a optimization problem, and includes reduction of the problem in the number of variables.

1. はじめに

山林・原野などの未墾地などから農地を開くことを農業開発とよぶ。具体的農業開発計画として、土壌、地形、土地被覆、気象などの諸条件を考慮して開発すべき地区を選び出す農業開発適地選定問題¹⁾や水資源確保のための水路敷設・井戸配置²⁾、品種改良や肥料開発等の農業研究開発への投資、農業研究開発施設の配置問題などが挙げられる。

リモートセンシング技術による画像データの入手

により広大な地域に渡る情報が短時間のうちに収集可能となった現在、農学の分野においても、これらの情報は既存の地理的情報や気象情報と組み合わせるさらに高度な情報へ加工され、広域的農業情報の農業開発計画などに利用されてきている。文献1)では、信頼性理論のアプローチおよびLANDSAT衛星による広域的農業情報に基づいて、多数の区画を含む広大な対象地域のどの区画をどのように開発するかという具体的開発計画立案のための広域的農業開発適地選定が考察されている。そこでは対象地域を造成工事の基本単位となる土地区画に分割し、各区画ごとに開発方式を定める最適化問題が定式化された。しかし、開発対象地域を分割して定めた各区画の開発に関する決定が互いにほとんど独立である。文献2)では、適地選定、開発方式に加えて水路敷設計画をも同時に決定できる最適化問題が定式

* キーワード Optimization,
Land Transform Model,
Areal Agricultural Development

** 正会員 工博 茨城大学教授 工学部情報工学科

*** 理博 茨城大学助手 工学部情報工学科

**** 学生員 茨城大学大学院情報工学専攻

(〒316 日立市中成沢4丁目12-1)

化された。この問題は文献1)の最適化問題を包含する、より一般的な多重線形0-1計画問題である。また、水路敷設計画とそれに付随する水資源制約を通じて、複数区画間で開発に関する決定が明確な相互関連を持つ点に特徴があった。しかし、これらの文献で提案された適地選定モデル(収量モデル)は、唯一の作物(水稲が例として取り上げられている)に対して耕地を獲得あるいは開墾するものであり、多種類の農作物を栽培している地域を対象とする農業開発計画に対してはさらに発展の道があろう。

そこで本論文では複数の作物に対する農業開発適地選定のためのモデルを作成することを試みる。ここで提案するモデルは従来の適地選定モデル¹⁾を拡張したものであり、作物耕地の転用という概念を新たに取り入れる。耕地転用は(被転用作物が過剰でない限り)被転用作物耕地を他の土地区画に確保しなければならないという副作用を伴うが、未開拓・低開発地域を新規開発するよりも開発費用の削減が期待できる。

ここでは広域的農業開発適地選定の仮想対象として中華人民共和国河北省満城県を想定する。満城県は2鎮と23郷からなり、総面積約732km²(平原45.6%、丘陵54.4%)をもつ。全体的に見てまだ未開拓・低開発地域と思われる山地も多い。主要作物は1989年の資料では対耕地面積比、小麦37.1%、玉蜀黍26.4%、綿花13.1%である。

しかしながら満城県を想定して定式化される複数作物に対する適地選定のための最適化問題は、線形0-1計画問題としては大規模なものになるので求解が困難になることが想定される。そこで、満県県の行政的・地理的背景を踏まえて、問題の規模を縮小するためのアプローチを提案する。それは県全体を開発対象地域とする代わりに、コンパクトな形状を持ついくつかの開発領域を決定し(開発領域選定モデル)、それぞれの開発領域において適地選定モデルを当てはめて、各区画の開発方式を決定しようとするものである。

2. 農業開発適地選定モデル

(1) 土地属性とその状態

ここでは作物の生育と土地開発を規定する主要属

性と属性状態の設定の仕方について述べる。開発の対象作物を q_i ($i=1, \dots, I$)、またそれら集合を Q とする。

$$Q = \{q_1, \dots, q_I\} \quad (2.1)$$

作物の生育に影響を与える土地属性を大きく下記の4つの項目に分類する。

土壌関連属性

- 1) 有効土層厚 : 作物の根が養分吸収を行う土層の厚さ
- 2) れき含量 : 土層断面中のれきの面積比
- 3) 土性 : 土壌粒子の混合割合による分類

土地被覆関連属性

- 4) 土地利用現況 : 現在の土地利用状態

地形関連属性

- 5) 傾斜度 : 土地の傾斜の度合い

気象関連属性

- 6) 生産時期の平均最高気温
- 7) 生産時期の月合計降水量
- 8) 生産時期の月合計日照時間

これらのうち属性1~5は、作物の種類に関係なく作物の生育に大きな影響を与える共通の属性であることを仮定する。これに対し気候関連属性6~8は作物の種類ごとに異なる。例えば作物 q_1 の生育は7-8月平均最高気温に影響されるが作物 q_2 は9-10月平均最高気温に影響する場合のように¹⁾。

土地区画(造成工事の基本単位) n における作物 q_i ($i=1, \dots, I$)に関する属性状態を次のようなベクトルによって定義する。

$$x_i(n) = (x_{i1}(n), x_{i2}(n), x_{i3}(n), x_{i4}(n), x_{i5}(n), x_{i6}(n), x_{i7}(n), x_{i8}(n)) \quad (2.2)$$

これにおいて $x_{iv}(n)$ ($v=1, \dots, 5$)は各作物の生育に影響を与える共通の属性であり、 $x_{iv}(n)$ ($v=6, \dots, 8$)は作物 q_i ($i=1, \dots, I$)についての固有の属性である。

各属性の状態は状態番号が大きいほど良好な状態を表すように任意に規定できるが、状態数を大きく設定すると後述の最小パスベクトルや0-1決定変数が増加し、計算可能性や最小パスベクトルの決定に問題が生じる。

作物の生育と土地開発を規定する主要属性と属性状態の定義の一例を表-1に示す¹⁾。これはある1

表－１ 作物の生育と土地開発を規定する主要属性と属性状態の定義例

状態	土 壤 関 連 属 性			土地被覆関連属性	地形関連属性
	有効土層厚	れき含量	土 性	土地利用現況	傾斜度
4	100 以上	0... 3			0 ... 35'
3	70...100	3...20	壤質	耕地	35' ... 3
2	40... 70	15...20	砂壤質・壤粘質	笹生地・野生地	3 ... 8
1	25... 40	20...30	砂質・粘質	森林	8 ... 10
0	0... 25[cm]	30... [%]	強粘質	市街地、国定公園等	10 ... [']

状態	気象関連属性		
	7－8月平均 最高気温	5－9月合計 降水量	7－8月合計 日照時間
4	30...25		350 以上
3	25...22, 30 以上	1500 以上	350...300
2	22...19	1500...800	300...225
1	19...18	800...300	225...150
0	18 以下 [°c]	300以下 [mm]	150 以下 [hr]

つ作物に対する属性状態表の例であり、各作物ごとにこのような表が必要となる。従ってある土地区画における複数作物生育に関する属性の数は $5 + 3I$ 個となるが、各作物 q_i の生育に影響を与える属性の数は 8 個となる。

また、土地利用現況属性の状態を付加的に表すために次のような 2 値状態変数を定義する。

$$y_i(n) = \begin{cases} 1 & \text{区画 } n \text{ で作物 } q_i \text{ を栽培中} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (2.3)$$

(2) 最小バスペクトル

作物 q_i ($i=1, \dots, I$) についての単位面積当たりの収量実現可能値[kg/a] (収量レベルと呼ぶ) を k_{i1} ($i=1, \dots, I$)、またその集合を K_i と定める。

$$K_i = \{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iL_i}\} \quad (2.4)$$

ただし $k_{i1} \leq k_{i2} \leq \dots \leq k_{iL_i}$ とする。作物 q_i ($i=1, \dots, I$) の単位面積あたりの収量の値 k_{i1} ($i=1, \dots, I$) と、その収量レベルを実現する属性状態との関係を、多状態コヒレント・システム信頼性理論の最小バスペクトル p_{i1j} によって表現する。

$$p_{i1j} = (p_{i1j1}, p_{i1j2}, p_{i1j3}, p_{i1j4}, p_{i1j5}, p_{i1j6}, p_{i1j7}, p_{i1j8}) \quad (2.5)$$

作物 q_i の収量 k_{i1} を達成するための最小バスペクトルが複数存在する (作物 q_i の収量 k_{i1} を達成するた

めの開発方式が複数ある) ので、それらを識別するために $j \in J_{i1}$ (識別番号集合) が用いられる。最小バスペクトルは作物毎に要求されるが、その設定には作物学や農村計画学の知識が必要となる。後述の最適化問題において、開発可能区画それぞれについて唯一の開発方式 (耕地転用も含まれる) すなわち、最小バスペクトルが決定される。

(3) 状態改善可能属性

具体的な開発の実現は、例えば土地区画 n で最小バスペクトル p_{i1j} を達成する (作物 q_i 収量レベル k_{i1} を目標にする) 場合、現在の土地区画 n の属性状態ベクトル $x_i(n)$ が $x_i(n) \geq p_{i1j}$ となるように各属性値を改善することによっておこなわれる。このとき各属性ごとにその状態を変えるために費用がかかる。また耕地転用場合、状態改善コストに加えさらに作物変更のための土地整備費用が課される。

しかしながら上述 8 属性のうちの有効土層厚、れき含量、土地利用現状、傾斜度の 4 属性は状態改善が可能であるが、他の 4 属性は状態を改善することはできない。状態改善可能属性の集合を U とする。

$$U = \{1, 2, 4, 5\}, \quad U^c = \{3, 6, 7, 8\} \quad (2.6)$$

したがって、現在の状態から達成できる最小バスペクトルの数は限定される。この制限は最適化問題の線形 0-1 計画問題としての規模を縮小する (決

定変数を0に固定する) ための手続きとして利用される。

(4) 作物転用・開発に対する制約

作物耕地の転用・開発を考える場合、各領域において新規開墾できる面積には上限がある、などの保護制約が必要となるかもしれない。こうした保護制約は通常開発計画の最初に決定される。このような場合、最適化問題においてそれらを不等式の形で制約条件に加えることによってそれを実現することができる。

3. 満城県農業開発計画のための最適化問題

満城県全体を造成工事の基本単位となるN土地区画に分割する。各区画の面積を a_n [a] ($n=1, \dots, N$) とする。県全体で総収量を対前年比 $+ \lambda \%$ 以上増収させるという条件のもとで、それを達成するのにかかる費用を最小にするような開発方式を区画毎に決定する。

(1) 決定変数

$$z_{lij}(n) = \begin{cases} 1 & \text{最小パスベクトル } p_{lij} \text{ を達成する属性改善を行う} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (3.1)$$

(2) 制約条件

決定変数の2値性を保証するために

$$z_{lij}(n) \in \{0, 1\} \\ (i=1, \dots, l, l=1, \dots, L, n=1, \dots, N, j \in J_{li}) \quad (3.2)$$

また土地区画nを開発する場合、開発の目標とすべき最小パスベクトルは1つでなければならないので

$$\sum_{i=1}^l \sum_{l=1}^L \sum_{j \in J_{li}} z_{lij}(n) = 1 \quad (n=1, \dots, N) \quad (3.3)$$

前年の県総収量を $\bar{\mu}$ 、本年度の県総収量 μ とする。本年度の県総収量を対前年比 $+ \lambda \%$ 以上増収させなければならないので

$$\mu \geq (1 + \lambda / 100) \bar{\mu} \quad (3.4)$$

(3) 総収量 μ

区画nにおける作物 q_i ($i=1, \dots, l$) の面積1a当たりの総収量[kg/a]は

$$\mu_i'(n) = \sum_{l=1}^L \sum_{j \in J_{li}} k_{lij} z_{lij}(n) \quad (3.5)$$

県全体の作物 q_i ($i=1, \dots, l$) の総収量は

$$\mu_i = \sum_{n=1}^N a_n \mu_i'(n) \quad (3.6)$$

従って県全体の作物総収量は

$$\mu = \sum_{i=1}^l \mu_i \quad (3.7)$$

(4) 開発総コスト ν

区画nにおける面積1a当たりの開発費用は

$$\nu'(n) = \sum_{i=1}^l \sum_{l=1}^L \sum_{j \in J_{li}} z_{lij}(n) \\ + \{c_{lij}(n) + t(i', i) \sum_{i'=1}^l y_{i'}(n)\} \quad (3.8)$$

$c_{lij}(n)$ は土地区画nにおける現在の作物 q_i に関する属性状態ベクトル $x_i(n)$ を p_{lij} へ変えるための面積1a当たりの状態改善費用であり、次式で定義される。

$$c_{lij}(n) = \sum_{u \in U} g_u(x_u(n), p_{lij,u}) \quad (3.9)$$

上式の $g_u(x_u(n), p_{lij,u})$ ($u \in U$) は土地区画nにおける現在の状態改善可能属性の状態 $x_u(n)$ から $p_{lij,u}$ へ変えるのに要する面積1a当たりの費用(固定費)である。ただし、 $x_{i'u}(n) > p_{lij,u}$ のとき $g_u(x_u(n), p_{lij,u}) = 0$ 。また、 $t(i', i)$ は耕地を作物 $q_{i'}$ から作物 q_i に転用するのに要する面積1a当たりの土地整備費用である。ただし、 $t(i, i) = 0$ 。

したがって、県全体の総開発費用は

$$\nu = \sum_{n=1}^N a_n \nu'(n) \quad (3.10)$$

(5) 最適化問題

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \nu \\ &\text{subject to} \\ &\sum_{i=1}^l \sum_{l=1}^L \sum_{j \in J_{li}} z_{lij}(n) = 1 \quad (n=1, \dots, N) \\ &\mu \geq (1 + \lambda / 100) \bar{\mu} \\ &z_{lij}(n) \in \{0, 1\} \\ &\quad (i=1, \dots, l) \quad (l=1, \dots, L, i) \\ &\quad (n=1, \dots, N) \quad (j \in J_{li}) \end{aligned}$$

(3.11)

従来の適地選定モデル¹⁾では、対象地域を単位区画に分割し各区画毎に開発方式を決定する最適化問題が解かれていたがここでの対象地域：中国満城県

は文献1) 2) で扱われた対象地域と比べ広大なため、上記の最適化問題が線形0-1計画問題として計算的に扱える範囲を越えてしまう。ちなみに上記の最適化問題における決定変数 $z_{ijl}(n)$ の数は $N \times I \times L \times E \times |J|$ 個である。

(6) 問題規模の縮小

いくつかの決定変数は次の手続きにより0に固定できる^{1) 2)}。

a) 現在の土地属性状態ベクトルよりも低い最小パスベクトルが開発目標になることはない。

```
for  $\forall n, i, l$ 
  if  $(\exists j \in J_{il} : x_{il}(n) \geq p_{ijl})$ 
    then  $z_{ijl}(n) \leftarrow 0$ 
```

b) 状態改善不可能な属性によって、現在の土地属性状態ベクトルから達成不可能な最小パスベクトルが存在する。

```
for  $\forall n, i, l$ 
  for  $\forall j \in J_{il}$ 
    if  $(\exists u \in U^c : x_{iu}(n) < p_{iju})$ 
      then  $z_{ijl}(n) \leftarrow 0$ 
```

4. 開発領域選定モデル

定式化された最適化問題において、それぞれの区画を独立に開発することは非現実的である。上で作成された適地選定モデルでは、「隣接するいくつかの区画を同時に開発することによって、費用削減に結びつく」というような距離的な問題あるいは同じ資源を複数の区画で共有するという問題が考慮されていない。例えば複数区画間での、造成工事に必要な労働力・資材の共用やそれらの共同輸送など。

そこでこれらの経験的知識を取り入れて新たな最適化アプローチを試みる。その中心は開発の対象となるいくつかの隣接する区画からなる領域(開発領域とよぶ)を R 個決定することである。この後それぞれの開発領域毎に各区画の開発方式を決定するために、上で定式化された最適化問題と同様なものを解く。

R 個のそれぞれの領域は、その面積に比例した規模の開発部隊(労働力・資材・機械を要する)を要すると仮定する。従って県の開発部隊の総合開発能力(1年間で開発できる総面積)という制約条件のもとでそれぞれの領域が決定される。開発部隊とい

う資源制約を通じて複数の区画間で開発に関する決定が間接的ではあるが相互関連を持つことになる。

距離的な問題にたいしては、モデルに直接、距離と輸送費を組み込む代わりに、ここでは領域のコンパクト化を行う。最大にコンパクトな構成とは、その領域を取り囲む境界長が円(最短)になる構成である¹⁾。

(1) 対象地域の分割

対象地域を前述の土地区画よりも十分大きな面積を持つセルに分割する(適地選定モデルにおける土地区画と区別するためにセルという言葉を用いる)。この分割のセルの総数を C とする。

開発領域に対するセルの獲得方策として以下の2方策が考えられる

- a) 開発領域の平均生産性が高くなるようなセルを獲得
- b) 開発領域の平均生産性が低くなるようなセルを獲得

生産性とは耕地面積当たりの収量のことである。方策a)は生産性の良い地域をさらに改善することによって収量増を計るものであり、逆に方策b)は未開墾・低開発地域を耕地化することによって収量増を計るためのものである。対象地域の実情に合わせて方策aと方策b(あるいは他の方策)の割合を代えて採用する。

P_a : 方策aによってセルを獲得する領域の集合

P_b : 方策bによってセルを獲得する領域の集合

$$P_a \cup P_b = \{1, \dots, R\}$$

$$P_a \cap P_b = \phi$$

α_i : セル i の面積

α'_i : セル i の耕地面積

T_i : セル i に隣接するセルの集合

m_{ij} : セル i に隣接するセル j との境界長

γ_i : セル i の総収量

S_{max} : 県の開発部隊の開発可能面積上限

(2) 決定変数

$$\pi_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{セル } i \text{ が領域 } r \text{ に割り当てられる} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (4.1)$$

いくつかのセルを開発不可能地域として定義することもできる(for some r , $\pi_{ir} = 0$)。

各セルは多くても一つの開発領域にしか割り当てられないので、

$$\sum_{i=1}^R \pi_{ir} \leq 1 \quad (i=1, \dots, C) \quad (4.2)$$

(3) 開発領域選定のための最適化問題

それぞれの開発領域についての目的関数は、平均生産性を最大／最小にし、コンパクトさを最大にするためのものである。これらの目的関数を2種類の重み W_1 と W_2 によって結合する。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } Z_r \\ & = \delta W_1 \sum_{i=1}^C (\gamma_i / \alpha_i) \pi_{ir} \\ & \quad + W_2 \sum_{i=1}^C \sum_{j \in T_i} m_{ij} (\pi_{ir} \pi_{jr} + \pi_{ir} \bar{\pi}_{jr}) \end{aligned}$$

(4.3)

ここで $\pi_{ir} = 1 - \bar{\pi}_{ir}$ 。また、 δ は2値変数であり、 $r \in P_+$ のとき $\delta = -1$ 、 $r \in P_-$ のとき $\delta = 1$ とする。 $\bar{\pi}_{ir}, \pi_{jr}$ および $\pi_{ir}, \bar{\pi}_{jr}$ を別の2値変数に置き換えることによってこの問題を線形0-1計画問題に直すことができる。

これらのR個の目的関数を2種類の重み W_+ と W_- によって結合し次の最適化問題を得る。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_{r \in P_+} W_+ Z_r + \sum_{r \in P_-} W_- Z_r \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{r=1}^R \pi_{ir} \leq 1 \quad (i=1, \dots, C) \\ & \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^C \gamma_i \pi_{ir} \leq S_{\max} \\ & \pi_{ir} \in \{0, 1\} \quad (i=1, \dots, C, r=1, \dots, R) \end{aligned}$$

(4.4)

5. 結論と考察

本論文では、複数作物を対象にした農業開発適地選定モデルを作成した。従来の開発計画では、対象地域を単位区画に分割し、各区画毎に開発方式を決定する最適化問題が解かれていたが、ここでの対象地域は今までのものと比べ広大なため、最適化問題が0-1線形計画として計算的に扱える範囲を超越しよう。そこで、対象地域の中からいくつかの開発領域を選定し、それぞれの開発領域ごとに最適化を行う手法を示した。これによって得られる解は元々の最適化問題の局所解にすぎない。しかしながら、

この開発領域選定モデルは問題規模を縮小するため、かつ県の農業開発部隊という資源の共有を扱うために、開発領域の隣接性やコンパクトさを取り入れたということに大きな意義を持つ。

今後の課題として実データを用いてシュミレートし解の性能を評価することが残される。ここで提案されたモデルや最適化問題の結果を満城県地域開発計画のための経済計量モデルの分析⁵⁾に利用する予定である。また、農業開発適地選定に関する研究の応用として、農業関係施設配置による時間遅れをもった効果の出現や、農耕地の地力の衰えによる収量への影響などの時系列的な処理を必要とするモデルの表現および解析法などが興味ある問題と思われる。

参考文献

- 1) 稲垣、星、秋山、石田、永嶋、池辺：衛星画像データにもとづく農業開発適地選定、ハレ・ジョンズ・リサーチ、Vol. 31, No. 8, pp. 512-518, 1986.
- 2) 稲垣、星、秋山、石田、池辺：水路敷設を含む広域的農業開発の最適化：システムと制御、Vol. 31, No. 6, pp. 457-464, 1987.
- 3) 星仰：地理情報処理学、森北出版、pp. 194-195, 1991.
- 4) Benabdallah, S. and Wright, J. R: Multiple Subregion Allocation Problem, J. Urban Planning and Development, Vol. 118, No. 1, Mar., pp. 24-40, 1992.
- 5) 江沢、金子：地域経済の計量分析、頸草書房、1973.
- 6) 三菱総合研究所編：中国情報ハンドブック1992年版、蒼蒼社、1992.