事例研究

衛星画像データにもとづく広域的農業開発適地選定

稲垣敏之・星仰・秋山侃・石田憲治・永嶋彰代嗣・池辺八洲彦

1. はじめに

リモートセンシング技術の進歩により，人工衛星を用いて，広大な地域にわたる情報を短時間のうちに収集できるようになった．衛星からの広域情報を有効に利用できる分野は多い．たとえば，LANDSAT 衛星から画像データは数多くの資源管理情報を与え，農地・農作物・森林，都市環境などの保全や災害対策の長期的計画に役立ちはじめている [1].

農学の分野では，LANDSAT 衛星によってもたらされる植生・バイオマス，土地利用環境などの情報は既存の地理的情報や気象情報と組み合わせてさらに高度な情報へ加工され，広域的農業情報として利用されている [2]．その一例が広域的農業開発適地選定計画である．衛星情報を用いる広域的農業開発適地選定については．ランキング(ranking)法，パターン(PATTERN, Planning Assistance Through Technical Evaluation of Relevant Number) 法 [3] など，いくつかの土地評価手法が開発されている．しかし，これらの手法による土地評価結果を対象地域の農業開発計画の具体的立案に結びつけるための研究は行なわれていなかった．

本研究では，未開拓・低開発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の最適化問題を考察する．まず，ある土地が農業生産，特に水稲生産の目的に使用できるための条件を記述する水稲収量モデルを作成する．次に衛星画像データおよび既存の地理的情報・気象情報にもとづく広域的農業開発適地選定の最適化問題を定式化し，実データのもとで栃木県下都賀(しもつが)郡を想定した広域的農業開発適地選定の例を示す．

2. 農業開発

2.1 水稲収量モデル

日本での水稲生育および土地の水田開発・転用の可否を規定するさまざまな属性のうち，次の8項目を主要属性として設定する．

(A1) 有効土層厚——灌がいされた水を保持し，作物の根が養分吸収を行なう土層(有効土層)の厚さ(cm).

(A2) れき含量——土壌中にれきが含まれている度合い．土層断面中のれきの面積割合(%)で表示する．

(A3) 土性——土壌粒子の混合割合によって土壌を分類したもの．

(A4) 7～8月の月平均最高気温(℃)

(A5) 5～9月の合計降水量(mm)

いながき としゆき 筑波大学電子・情報工学系*
ほし たかし 筑波大学学術情報処理センター
あきやま つよし 農水省農業環境技術研究所
いしだ けんじ 農水省農業土木試験場
ながしま あきよし 筑波大学情報学類
いけべ やすひこ 筑波大学電子・情報工学系
*〒305 茨城県新治郡桜村天王台1－1－1

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会. 無断複写・複製・転載を禁ず.

（A6） 7～8月の合計日照時間(hr)

（A7） 土地利用現況——土地が現在どのような状態にあるかを示す．本報告では土地表面が土で覆われている陸域と，遊水池など水で覆われている水域とに分けて考える．これは，陸域と水域とでは水田に転用するための造成工法がまったく異質であることによる．

（A8） 傾斜度——土地の傾斜の度合い(度°分′)．

以上の8属性を土壌，気象，土地被覆，地形の4つの大項目に分類し，各属性の「状態」を開田地区分級基準にもとづいて定めたものを表1に示す．なお，状態番号が大きい状態ほど良好な状態を表わす．

日本において水田耕作が農業経営として成立するには，経営規模や現行の生産者米価などを考慮すると，陸域では面積10a(アール）当り少なくとも350kg程度の収量が必要であると考えられる．また現在の水稲収量の上限は約 700kg/10 a である．そこで陸域面積 10 a 当り水稲収量の実現可能値の集合 S_L を次のように定める．

$S_L \equiv \{0,\ 250,\ 350,\ 400,\ 450,\ 500,\ 550,\ 600,\ 650,\ 700\}$

なお水田経営のほぼ限界収量と考えられる 250 kg/10 a をも考察の対象に含め，収量0は250kg/10 a 未満を表わす．

水域の場合は陸域との地力の差があることを考慮して，水田経営を成立させる面積10 a 当り水稲収量の実現可能値の集合 S_W を次のように設定する．

$S_W \equiv \{0,\ 300,\ 400,\ 500\}$

ところで，上述の属性の状態が良くなるほどその土地の水稲生産性が高まると考えるのは自然であろう．そこで，ある土地の属性 $A_i(1 \leqq i \leqq 8)$ の状態を x_i，属性ベクトルを $X=(x_1, \cdots, x_8)$，その土地10 a 当りの水稲収量を，陸域に対しては $f=f_L(x)$，水域に対しては $f=f_W(x)$ で表わすとき，f は x について単調非減少（$x \geqq y$ のとき $f(x) \geqq f(y)$）であると仮定する*.

$x_i \in \Omega_i \equiv \{0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4\}$, $1 \leqq i \leqq 8$, $i \neq 3, 5$

$x_i \in \Omega_i \equiv \{0,\ 1,\ 2,\ 3\}$, $i=3, 5$

$f_L(x) \in S_L$, $f_W(x) \in S_W$

水稲収量 f の値（収量レベル；f のレベルと呼ぶ）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「最小パスベクトル」によって表現する．本報告では，関数 $f: \Pi_{i=1}^{8} \Omega_i \to S$ が全射的かつ単調非減少であるとき，$f(x) \geqq k$ かつ $x > y$ なる任意の y に対して $f(y) < k$ を満たすベクトル x を，レベル k の最小パスベクトルと呼ぶ．筆者らのうちの秋山と石田が作物学および農村計画学の立場から設定した最小パスベクトル $x=(x_1, \cdots, x_8)$ を表2に示す．

なお，水稲収量モデル f と多状態コヒレント・

表1 日本での水稲生育と土地の水田開発・転用の可否を規定する主要8属性と「開田地区分級基準」にもとづく属性状態の定義

状態	土壌関連属性			土地被覆関連属性	
	有効土層厚	れき含量	土性	土地利用現況 陸域	土地利用現況 水域
4	100cm以上	3％未満	——	水田使用可	水田使用可
3	100～70cm	3～15％	壌質	畑地	水深1m以浅
2	70～40cm	15～20％	砂壌質 壌粘質	笹生地 野草地	1～2 m
1	40～25cm	20～30％	砂質 粘質	森林	2～6 m
0	25cm以下	30％以上	強粘質	市街地	6 m以深

状態	気象関連属性			地形関連属性
	7～8月の月平均最高気温	5～9月合計降水量	7～8月合計日照時間	傾斜度
4	25～30℃	——	350hr以上	35′ 以下
3	22～25℃ 30℃以上	1500mm以上	300～350hr	35′～3°
2	19～22℃	800～1500mm	225～300hr	3～8°
1	18～19℃	300～800mm	150～225hr	8～10°
0	18℃以下	300mm以下	150hr以下	10° 以上

* ベクトル x, y に対し，$x \geqq y$ で $x_i \geqq y_i (\forall i)$，また $x > y$ で $x_i \geqq y_i (\forall i)$ かつ $x_j > y_j (\exists j)$ を表わす．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

システムとの関係を以下に述べる．多状態コヒレント・システムは通常の2状態コレヒント・システムの場合と異なり，幾種類かのコヒレント性の概念が存在する[4—6]．strongly coherent, coherent, weakly coherentなどがそれであるが，[4—6]では，システムがn個の要素から成るとき，システムの状態集合Sおよび要素iの状態集合Ω_iに対し

$$S=\Omega_i,\quad 1\leqq i\leqq n \qquad (1)$$

を仮定している．(本報告の水稲収量モデルfでは(1)は成立しない)

これに対し，Ohi & Nishida [7] は，(1)を要求しないより一般的なコヒレント性の概念をいくつか提案している．それらのうち，Griffith [5] による weakly coherent 性の拡張概念であるFHN-weakly coherent性は，関数$f:\Pi_{i=1}^{n}\Omega_i\to S$が全射的かつ単調非減少であるとき，各$i$ $(1\leqq i\leqq n)$に対して$f(k_i,x)\neq f(j_i,x)$を満たすベクトル(k_i,x)と(j_i,x)が存在することとして定義されている．ここで

$(k_i,x)\equiv(x_1,\cdots,x_{i-1},k,x_{i+1},\cdots,x_n)$

表2から，本報告の水稲収量モデルfは，このFHN-weakly coherent システムの実例となっていることがわかる．

表 2　水稲収量とその達成条件——多状態コヒレント・システムの最小パスベクトルによる記述　(注)「P 8」等は図5の説明用のパス番号

収量レベル (kg/10a)	最小パスベクトル			
	陸域			水域
700	P 1 (34343444)			
650	P 2 (34343344)			
600	P 3 (34333344)	P 4 (44233344)		
550	P 5 (34332344)	P 6 (44232344)		
500	P 7 (34212344)	P 8 (24232244)	P 9 (33232244)	P 19(33231344)
450	P 10(33222244)	P 11(33231344)		
400	P 12(22221244)	P 13(33131344)		P 20(23231244)
350	P 14(34212244)	P 15(23121244)	P 16(22121344)	
300				P 21(22121244)
250	P 17(23111144)	P 18(12132244)		

2.2　属性改善モデル

前節で述べた8属性のうち，気象3属性（7～8月の月平均最高気温，5～9月の合計降水量，7～8月の合計日照時間）は，状態を改善することはできない．また土壌属性のうち，土性の状態も改善は困難であるとされる．以下では，有効土層厚，れき含量，土地利用状況，傾斜度の4属性のみを状態改善可能属性とする．

これら4属性の状態を改善する造成工法としては，次の方式が一般的である．

（A 1）　有効土層厚——客土（きゃくど：他の場所から土壌を運び入れ，散布すること）による．

（A 2）　れき含量——土壌中に含まれるれきを人力あるいは機械力（ストーンピッカー，ロックピッカーなど）によって取り除く除れき作業による．

（A 7）　土地利用現況（陸域）——状態1→2は伐採・抜根，状態2→3は刈払い・火入れ・雑物除去，状態3→4は畦畔（あぜ）造成・漏水防止の各作業による．

（A 7）　土地利用現況（水域）——築堤の後，排水．

（A 8）　傾斜度——図1に示すような切盛土工（きりもりどこう）による．

現行の農業土木工法とそのコストを考慮して，上述の4属性の状態改善コストを表3のように設定する．

3.　広域的農業開発適地選定のための最適化問題

農業開発計画の立案では，開発後の対象地域から見込まれる水稲総収量と，そのために必要な開発総コストとの兼合が重要な課題となる．本節では，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（開発しない

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

という決定をも含めて）を定める最適化問題を定式化する．

3.1 水稲総収量 J

水田への転用が不可能な市街地や国立公園などを除き，開発計画の対象地域は N 個の区画から成るものとする．N 個の区画を陸域に属するものと水域に属するものとに分け，陸域，水域の区画集合をそれぞれ T_L, T_W で表わす．農業開発後（まったく開発手段を講じない場合をも含む）における区画 n の面積10 a 当り水稲収量を f_n，区画 n の面積を a_n（単位10 a）とすると，対象地域からの水稲総収量 J は次式で与えられる．

$$J=\sum_{n\in T_L}a_nf_n+\sum_{n\in T_W}a_nf_n \qquad (2)$$

ただし，$n\in T_L$ のとき $f_n\in S_L$, $n\in T_W$ のときは $f_n\in S_W$ とする．以下に，農業開発の有無および開発方式を示す決定変数を導入して f_n を表現する．なお陸域，水域のいずれの場合も f_n の表現式の導出過程は同一であるので，陸域の場合のみを示す．

レベル k の最小パスベクトルを $p_{kj}(j\in I_k)$ と書く．ここで I_k はレベル k の最小パスベクトルの添字集合とする．区画 n の現在（開発前）の属性ベクトルを $x(n)$，開発後の属性ベクトルを $\tilde{x}(n)$ とすると，区画 n を水田に転用するための開発とは

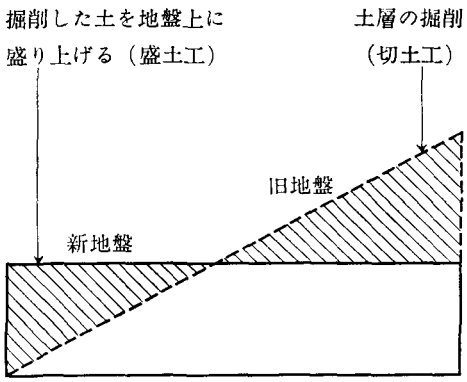

図 1 傾斜地の平坦化．切盛土工では切土と盛土の土量を等しく設計するのを原則とする

表 3 有効土層厚，れき含量，土地利用現況（陸域・水域），傾斜度の属性状態改善コスト（単位：万円/10a）

状態 前＼後	有効土層厚			れき含量			陸域			水域			傾斜度		
	4	3	2	4	3	2	4	3	2	4	3	2	4	3	2
3	48			5			10			100			24		
2	71	48		15	10		35	25		500	400		60	40	
1	94	71	48	20	15	5	70	60	35	1000	900	500	210	198	150

$$\exists k\in S_L-\{0\},\ \exists j\in I_k:\tilde{x}(n)\geqq p_{kj} \qquad (3)$$

を満たすような $x(n)$ から $\tilde{x}(n)$ への遷移を表わす．

区画 n の開発に関する決定変数 $z_{kj}(n)$ を次のように定義する．

$$z_{kj}(n)\equiv\begin{cases}1 & \text{区画 } n \text{ の農業開発目標を } p_{kj} \text{ の達成}(\tilde{x}(n)\geqq p_{kj}) \text{ におく}\\ 0 & \text{それ以外}\end{cases}$$

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個指定すればよいから，

$$\sum_{k\in S_L}\sum_{j\in I_k}z_{kj}(n)=1 \qquad (4)$$

ここで $I_0\equiv\{0\}$ とし，また

$$z_{00}(n)\equiv\begin{cases}1 & \text{区画 } n \text{ にはまったく開発手段を講じない}\\ 0 & \text{それ以外}\end{cases}$$

とする．(4)によって，区画 n に対して開発を実施するか否か，実施する場合は属性の改善方式が一意的に表現される．以上のことから次式を得る．

$$f_n=\sum_{k\in S_L}k\sum_{j\in I_k}z_{kj}(n) \qquad (5)$$

3.2 開発総コスト H

区画 n に関する決定変数のベクトルを $z(n)$ と記す．すなわち $z(n)=(z_{kj}(n):k\in S_L,\ j\in I_k)$，あるいは $z(n)=(z_{kj}(n):k\in S_W,\ j\in I_k)$．開発 $z(n)$ の実施に要する面積10 a 当りのコストを h_n とする．対象地域の開発総コスト H が区画について加法的であると仮定すると，

$$H=\sum_{n\in T_L}a_nh_n+\sum_{n\in T_W}a_nh_n \qquad (6)$$

次に前節と同様，陸域に属する区画 n に対する h_n の表現式を示す．

区画 n の開発目標が最小パスベクトル p_{kj} の達成にある場合，その目標達成に要する面積10 a 当り開発コストの最小値を $c_{kj}(n)$ とすれば，h_n はま

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ず次のように表わされる．

$$h_n=\sum_{k\in S_L}\sum_{j\in I_k}c_{kj}(n)z_{kj}(n) \qquad (7)$$

ここで，$c_{00}(n)\equiv 0$ とする．

属性 Ai の状態遷移 $u\to v$ に必要な面積10 a 当りのコストを $g_i(u,v)$ ($u<v$ のとき $g_i(u,v)>0$, $u\geqq v$ のとき $g_i(u,v)=0$) とする．区画の開発コストが属性について加法的であると仮定すれば，属性ベクトル $x(n)=(x_1(n),\cdots,x_8(n))$ で記述される区画 n が最小パスベクトル $p_{ki}=(p_{kj1},\cdots,p_{kj8})$ を達成するのに要する開発コストの最小値 $c_{kj}(n)$ は次式で与えられる．

$$c_{kj}(n)=\sum_{i=1}^{8}g_i(x_i(n),p_{kji}) \qquad (8)$$

以上のことから次式を得る．

$$h_n=\sum_{k\in S_L}\sum_{j\in I_k}z_{kj}(n)\sum_{i=1}^{8}g_i(x_i(n),p_{kji}) \qquad (9)$$

3.3 最適化問題

広域的農業開発適地選定の最も基本的なケースとして，水稲総収量 J の最大化と開発総コスト H の最小化とを同時にはかりたいとする場合を考える．すなわち，次の2目的最適化問題を考察する．

最大化 $J=\sum_{n\in T_L}a_nf_n(z(n))+\sum_{n\in T_W}a_nf_n(z(n))$

最小化 $H=\sum_{n\in T_L}a_nh_n(z(n))+\sum_{n\in T_W}a_nh_n(z(n))$

条件 $\sum_k\sum_j z_{kj}(n)=1,\ \forall n$

$$z_{kj}(n)\in\{0,1\},\ \forall k,\forall j \qquad (10)$$

この問題は，陸域および水域の区画数をそれぞれ N_L, N_W ($N_L+N_W=N$) とすると，$19N_L+4N_W$ 個の変数をもつ0－1問題である．4節に栃木県下都賀（しもつが）郡を対象とした農業開発適地選定の解析事例を示すが，この比較的小さな例においても $N_L=46$, $N_W=10$ であり，決定変数の総数は914個におよぶ．そこで何らかの手段による問題規模の縮小が必要となる．

本報告では，次の2ステップから成る手法によって問題規模の縮小をはかる．

Step 1（改善不能属性の状態チェック）属性A3－A6の状態は改善不可能である．区画 n の属性ベクトル $x(n)$ がレベル k の最小パスベクトル p_{kj} に対し，

$$\exists i(3\leqq i\leqq 6):x_i(n)<p_{kji} \qquad (11)$$

となるとき区画 n の開発目標は p_{kj} ではありえない．したがって決定変数 $z_{kj}(n)$ を0に限定する．

Step 2（低位レベル最小パスベクトルの消去）表2に示したすべての最小パスベクトルは属性A7，A8に対して最良状態4を要求している．すなわち，区画 n の開発コストは，最小パスベクトルの選択に依存しない部分（属性A7，A8の改善コスト）と最小パスベクトルの選択に依存する部分とに分けられる．このことから，

$$\exists j\in I_k:x_i(n)\geqq p_{kji},\ 1\leqq i\leqq 6 \qquad (12)$$

なるとき，k より低位の最小パスベクトルを開発目標に設定することは無意味であり，決定変数 $z_{mj}(n)$ の値を

$$z_{mj}(n)=0,\ 0\leqq m\leqq k-1,\ j\in I_m \qquad (13)$$

のように限定する．Step 2は(12)を満たす最高位のレベルが得られるまで反復する．

4. 広域的農業開発適地選定

前節の最適化問題にもとづき，栃木県下都賀郡（図2）の農業開発適地選定を模擬実験した例を示す．この地域を緯度・経度それぞれ1分ごとの区画（面積約274ha）に分割すると，市街地など開田不可能な地区を除いて，58区画(陸域46区画，水域10区画）を得る．各区画の属性ベクトルは，次の資料にもとづいて定める．

(a) 有効土層厚，れき含量，土性：水田および畑地土壌生産性分級図（栃木県農業試験場発行）

(b) 気温，降水量，日照時間：アメダス・データ

(c) 土地利用現況：土地利用図(国土地理院発行)およびLANDSAT衛星セマテック・マッパ画像データ

(d) 傾斜度：国土数値情報

なお本報告では，上記の区画のうち現実には水田として使用されているものも土地利用現況状態3（畑地相当）と仮定する．

農業開発適地選定の模擬実験にさいして，図3に示す会話型システムを作成した．本システムは

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

既存の MPS/X（0－1問題の求解）と SAS/graph（属性データ，Pareto 解集合，Pareto 解の図形表示）を援用する形態をもつ．このシステムによって得られた最適化問題(10)のPareto解集合と Pareto解の図形表示例を図4，図5に示す．さまざまな Pareto 解を図示してみると，開発総コストの増大につれて，平地，水域，山地の順に区画開発が進んでいく様子が見られた．また，図5のように十分な開発総コストを想定した例では，栃木県下都賀郡の実際の水田利用に近い状況が得られている．

本事例の最適化問題(10)は本来 914個の0－1変数をもつが，3.3節で与えた問題規模縮小法を適用した結果，Step 1によって396個，Step 2によって381個の変数が削減され，最終的には137変数の問題となった．すなわち，もとの問題の15%の規模に縮小されたことになる．

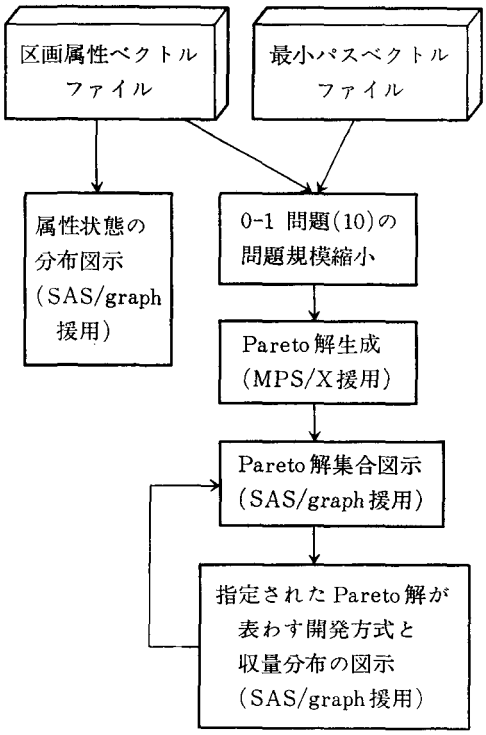

図 3 広域的農業開発適地選定のための会話型システム（FACOM M380用）

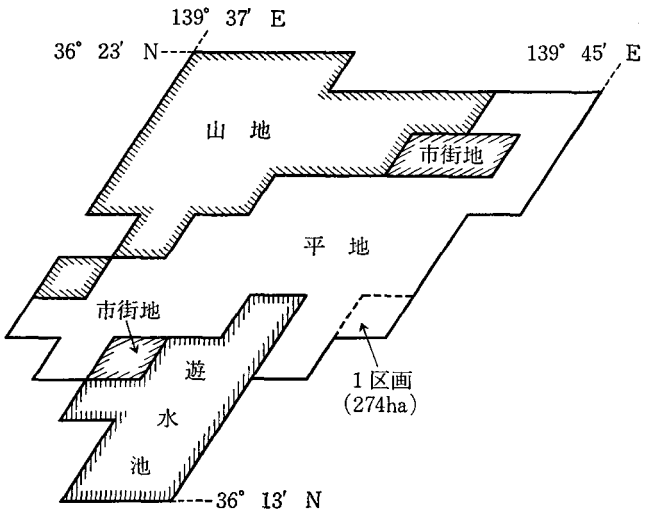

図 2 栃木県下都賀郡の概略図

5. むすび

ここでは日本での農業開発適地適定を想定したが，本報告のモデルは諸外国（たとえば [3]）の場合に対しても基本的には適用可能である．

今後の課題として，以下の諸点が考えられる．

(1) 多年度にわたる農業開発適地選定計画の考察――例：塩水の水域の水田開発には，全工程が終了するまでに数年を要することがある．

(2) 土地区画の開発 $z(n)$ 間の相互関連――例：傾斜地の掘削土を水域への客土として積極的に利用することがある．このような場合は，各土地区画の開発 $z(n)$ を区画ごとに独立に定めることはできない．

(3) 労働生産性・農地保全性の考慮――例：発展途上国の農業開発適地選定では，人口分布あるいは新しい集落の生成などの考慮が必要となる．また災害に対する農地保全性を考慮する場合には，農業開発適地選定問題は確率的性格を帯びたものとなる．

(4) 効率的な0－1問題規模の縮小――本報告では，対象地域の区画の属性ベクトルと最小パスベクトルとの順序，異なるレベルの最小パスベクトル間の順序を考慮して0－1問題規模を縮小す

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

る手法を与えた．この手法は栃木県下都賀郡の例には有効であったが，さらに，多重選択ナップザック問題に関する諸手法（たとえば[8]）の援用が考えられる．

このことに関して有益なご意見・ご助言を賜わった E. L. Johnson 博士（IBM Thomas J. Watson Research Institute），今野浩博士（東京工業大学），森戸晋博士（早稲田大学），鈴木久敏博士（東京工業大学）にお礼申し上げます．

本稿の改訂にさいしてご助言を賜わった編集委員会委員長柳井浩博士（慶応義塾大学）に謝意を表します．

参考文献

[1] 星　仰，最新の LANDSAT のカラー画像：セマテック・マッパ，中央地図株式会社（1985）

[2] 秋山　侃，芝山道郎，“農業用リモートセンサーの開発と利用”，日本リモートセンシング学会誌 5，77–84（1985）

[3] 秋山　侃，深山一弥，“リモートセンシング技術を使った農業開発適地選定”，第 4 回電子計算機利用研究発表会講演要旨，農林水産技術会議事務局（1985）

[4] E. El-Neweihi, et al, “Multistate coherent systems”, J. Appl. Prob. 15, 675–688 (1978)

[5] W. S, Griffith, “Multistate reliability models”, J. Appl.Prob. 17, 735–744 (1980)

[6] B. Natvig, “Two suggestions of how to define a multistate coherent system”, Adv. Appl. Prob. 14, 434–455 (1982)

[7] F. Ohi, T. Nishida, “On multistate systems”, IEEE Trans. Reliability 33, 284–288 (1984)

[8] E. L. Johnson, M. W. Padberg, “A note on the knapsack problem with special ordered sets”, Opns. Res. Lett. 1, 38–43 (1981)

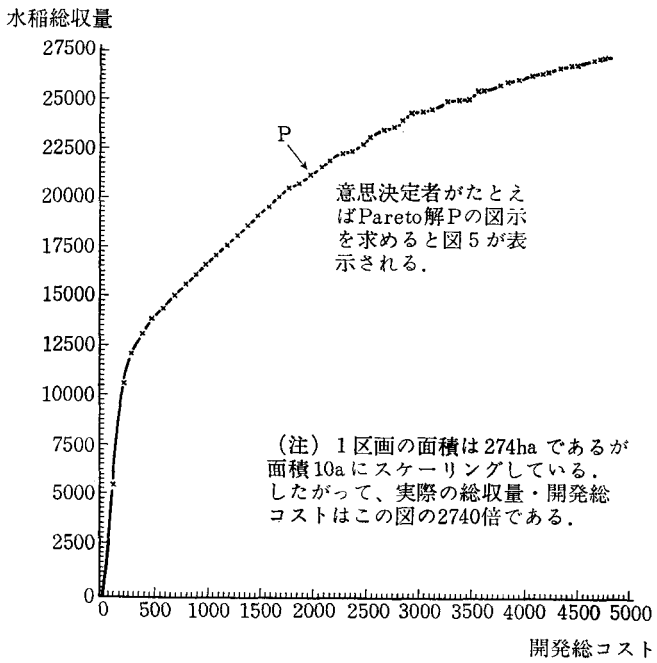

図 4　Pareto 解集合

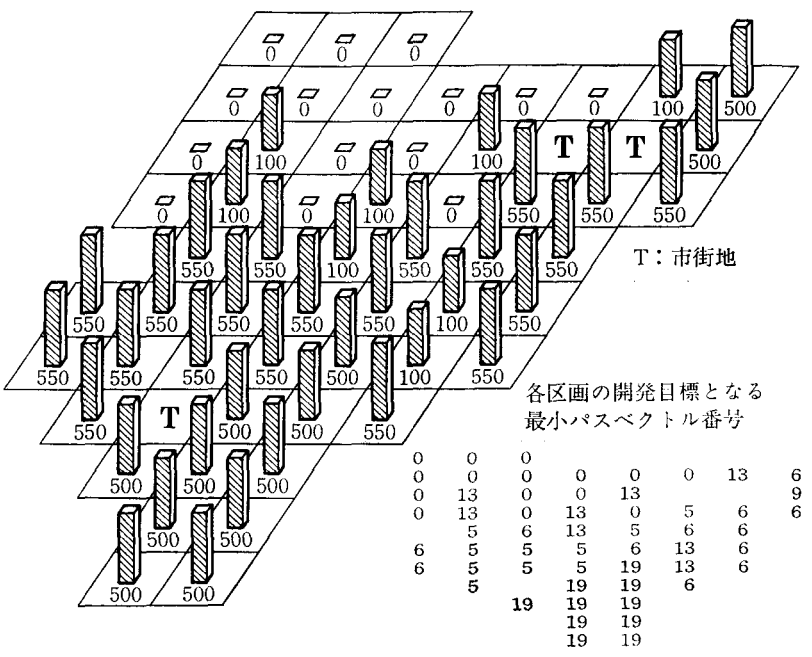

図 5　Pareto 解（図 4 の P 点）が表わす内容の表示——見込み収量（柱高で表示）の分布と各区画の開発方式（目標最小パスベクトル番号で表示）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．