

分級結果に基づく土地利用配置支援モデルの開発

花岡伸也¹・稻村 肇²・清水英範³

¹学生会員 東北大学大学院 情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

²フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院情報科学研究科

³正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

本研究では、土地分級結果に基づいた土地利用の配置過程を支援するモデルの開発を行った。ここではこの配置問題を最適化問題としてとらえ、Hopfield型ニューラルネットワークを解法として適用した。また土地利用配置問題では、厳密な制約条件よりむしろ柔軟性を持った制約が現実的なため、制約条件にメンバーシップ関数を応用したファジィ制約を取り入れた。現実問題を模した数値実験よりモデルの実用性について検討を行ったところ、以下の結果が得られた。
(1) ファジィな値で配置案を表現できることにより、柔軟性のある土地利用計画を提案でき、同時にモデル終了の問題を解決できた。
(2) プランナーの計画目標として設定した一定の重みパラメータの関係のもと、複数の類似した代替案の比較検討が可能なモデルを開発できた。

Key Words: allocation of land use, Hopfield neural network, fuzzy constraint function

1. はじめに

我が国における土地利用計画の策定過程は、基本的に以下の2つの段階に分けて考えるのが一般的である。すなわち、既存および計画決定済みの社会基盤施設や地形条件等を外生的に与え、各土地利用に対するその土地の適性度を検討し、評価を行う土地分級過程。および、その分級結果を基に、上位計画から与えられる各土地利用の総面積や形状あるいは隣接関係等を考慮し、実際にそれらの土地利用を配置する過程である。

このような計画策定の過程は、各地域の社会的諸要因および人々の価値意識と深く関係する複雑な判断過程であるため、計画の新規作成あるいは既存計画の定期的な見直しには多大な労力と時間、費用を要してきた。しかも、得られた計画案から恣意的側面を排除するのは容易ではない。そのため、これらの問題点を解決することを目的として、従来より土地利用計画策定を支援する研究がいくつか行われてきた^{①, ②, ③}。ところが、従来の研究は分級過程の支援を目的としており、配置過程に対しては考慮されないか、あるいは考慮されたとしても、各土地利用の総面積を一致させるように分級結果の上位の土地から割り当てる程度のことがなされている場合が一般的であった。従って、土地利用計画策定全体の合理性を高めるために、配置過程を考慮した支援手法を開発する必要がある。以上の背景に基づき、土地利用計画策定における配置過程を計算機によって支援するモデルを開発し、現実問題を模した数値実験によりその実用性を検討する

ことが本研究の目的である。

本研究における配置過程の評価基準は、分級過程で得られた分級結果、およびそれとトレードオフ関係にある同種土地利用の連担度（形状のまとまりの度合い）の2つである。トレードオフの関係にある評価基準を用いる場合、プランナーは両評価基準を適度なバランスで満たした配置案の提示を目標とするのが一般的と言える。このような計画目標のもと、計算機によって迅速かつ自動的に幾つかの代替案を作成し、それらの比較検討を容易にすることが本支援モデルの位置づけである。

なお、本研究は筆者らが土木計画学研究発表会で発表した一連の研究^{④, ⑤}の問題点を改善し、それらをまとめたものである。

2. 本研究における土地利用配置の考え方

(1) 目的関数の定式化

本研究の土地利用配置の考え方は図-1の通りである。すなわち、各土地利用(j)に対する各土地(i)の分級結果を所与として、ある目的関数と制約条件のもと、各土地（以下、ゾーン）に土地利用のいずれかを割り当てるという最適割当決定問題と考える。

ここで、土地分級結果に基づき配置を行うという観点から、「各ゾーンの分級結果の総和をできるだけ大きくするように各土地利用を配置する」という目的関数を式(1)のように定式化する。

$$\max f(X) = \sum_i \sum_s (U_{is} X_{is}) \quad (1)$$

$$(i=1, 2, \dots, I; s=1, 2, \dots, S)$$

ただし、 U_{is} ：土地利用 s に対するゾーン i の適性度
 X_{is} ：ゾーン i の土地利用
 (s) ならば 1, その他 0 とする 2 値変数)

(2) 空間的制約条件の定式化

a) 土地利用間の隣接関係を考慮した従来研究

土地利用モデルの中で土地利用主体間の隣接関係を考慮したモデルは幾つか開発されているが、これらは土地分級評価の段階で適性度に影響を与えるものとして隣接の影響を応用してきた。例えば、黒田ら⁶は土地利用主体間の隣接関係を交互作用効果とし、それを立地ポテンシャル（適性度）に影響を与える係数として定式化している。しかし、同種土地利用の連担性・形状や隣接するゾーンの土地利用関係をどう扱うかといった条件は、土地利用配置を決定する段階で始めて考慮できるものである。本研究では、土地利用配置を決定する際に考慮すべきこれらの課題を、制約条件として定式化する。

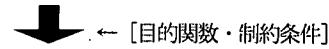
b) 地域的連担性・形状条件

土地利用計画における設定基準は、建設省都市局長通達「用途地域に関する都市計画の決定基準（1972年4月）」⁷等によって、その大枠が規定されている。この決定基準は建設省による原則的な指針であり、実際には各地域の計画戦略や個別事情によって適宜制約が設けられるのが普通である。これによると、それぞれの用途地域に対して「形状は整形とする」といった形状にまとまりを求める基準がよく見られる。また、用途地域を例に用いた土地分級過程の支援を目的とした従来研究⁸によると、「実際の用途地域指定においては各用途地域の地域的連担性をかなり考慮している。これは、生活や生産活動、あるいは社会基盤整備の効率性の視点から、計画案の作成過程において考慮するべき重要な要因である。」という分析結果が得られている。

ところが、(1) の分級結果の総和を最大とする目的関数のみを最適化すると、各ゾーンは分級結果に従って土地利用を決定し、各土地利用は形状にまとまりを持たず分散されて配置される可能性が大きい。これでは、上記事情を考慮すると現実的な土地利用配置とは言えない。よって、効率的かつ一体とした土地利用を図ることを目的とした制約条件を定式化する必要がある。

ここで、この条件は目的関数とトレードオフの関係にあると考えられることから、目的関数との相対的な関係によって定められる関数として定式化できる。そこで、「一団となる土地利用の面積をなるべく大きくし、かつそれらの形状が整形となるようにする」という関数を以

《土地分級結果》		土地 (i)				
土		1	2	3	4	~
地	住居地域	10	7	8	6	
利	商業地域	8	5	10	9	
用	~					
(s)	工業地域	4	9	6	2	



《土地利用配置》		土地 (i)					計画面積比
土		1	2	3	4	~	
地	住居地域	1	0	0	0		15
利	商業地域	0	0	1	1		20
用	~						
(s)	工業地域	0	1	0	0		3
	計	1	1	1	1		100

図-1 土地利用配置の考え方

下のように定式化する。

$$\max g(X) = \sum_i \sum_{i'} \sum_s X_{is} X_{i's} \delta_{sz} \quad (2)$$

ただし、 i' ： i に隣接する土地

z ：面積を大きく、整形したい土地利用

δ_{sz} ：クロネッカーのデルタ

c) 隣接禁止条件

性質の大きく異なる土地利用の隣接によって互いに悪影響を及ぼすことを防ぐことは、土地利用配置計画上重要である。例えば、上述の決定基準⁷の中でも、第1種住居専用地域に対して、「原則として商業地域、工業専用地域、準工業地域に接して定めないこと」という条件がある。よって、隣接禁止条件として、以下の関数を定式化する。

$$X_{is} X_{i's} = 0 \quad \forall i \quad (3)$$

ただし、 s' ： s との隣接を禁止された土地利用

(3) 物理的制約条件の定式化

a) 総面積条件

各土地利用の総面積は、上位計画に従って別途定められているものとし、これを制約条件とする。

$$1 - (\sum_i a_i X_{is}) / A_s = 0 \quad \forall s \quad (4)$$

ただし、 a_i ：土地 i の面積

A_s ：土地利用 s の計画総面積

b) 単一土地利用条件

各ゾーンに割り当てられる土地利用は一つであるとみなし、これを制約条件として以下のように定式化する。

$$1 - \sum_s X_{is} = 0 \quad \forall i \quad (5)$$

(4) 本モデルの土地利用計画策定の中での位置づけ

本研究では土地利用の配置過程を最適化問題としてとらえ、定式化を行った。しかし、土地利用配置計画における計画目標を全て解析的な関数として一意に定式化されることは現実的に有り得ない。従って、本モデルを数理的な最適解を求めるものとしてではなく、最適化の概念を援用したモデルとして位置づける。このようなモデルの位置づけに基づき、以下に解法を提案する。

3. 解法

(1) Hopfield型ニューラルネットワークモデルの適用

この配置問題は、組合わせの数がゾーン数に対して指数関数的に増大するNP完全な問題である。この問題の解法として近年様々なものが提案されているが、本研究では実用的な時間内にNP完全問題を近似的に解くことに成功したHopfield型ニューラルネットワークモデル（以下、Hopfieldモデル）を適用する^{8), 9), 10)}。

Hopfieldモデルは、エネルギー最小化原理により式(6)のように定義されたエネルギー関数を局所的に最小化する。

$$E(X) = -(1/2) \sum_i \sum_s \sum_j \sum_t T_{isjt} X_{is} X_{jt} - \sum_i \sum_s I_{is} X_{is} \quad (6)$$

ただし、 T_{isjt} ：ニューロン is, jt 間の結合強度

I_{is} ：入力バイアス（固定状態）

ここで、本問題をHopfieldモデルで解くため、ペナルティ関数法を用いて、0-1の2次最小化問題に変換した評価関数を以下のように定式化する¹¹⁾。

$$\begin{aligned} L(X) = & -\sum_i \sum_s U_{is} X_{is} - W_1 \sum_i \sum_{i'} \sum_s X_{is} X_{i's} \delta_{s2} \\ & + W_2 \sum_i \sum_{i'} \sum_s \sum_{s'} X_{is} X_{i's} \\ & + W_3 \sum_s \left\{ 1 - \left(\sum_i a_i X_{is} \right) / A_s \right\}^2 \\ & + W_4 \sum_i \left(1 - \sum_s X_{is} \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 W_1, W_2, W_3, W_4 ：正の重みパラメータ

式(7)を展開し、式(6)と比較することによってニューロン間の結合強度 T_{isjt} および入力バイアス I_{is} を定義できる。この際、 $L(X)$ の2次項は多重1次形式である必要があり¹²⁾、この点に注意して式(8)を導いた⁹⁾。式(8)より

$L(X)$ をエネルギー関数で表現することが可能となった。

$$L(X) = const.$$

$$\begin{aligned} & -\sum_i \sum_s \left\{ U_{is} - W_3 (a_i^2 / A_s^2 - 2a_i / A_s) + W_4 \right\} X_{is} \\ & - (1/2) \sum_i \sum_s \sum_j \sum_t \left\{ 2W_1 \sum_l \delta_{jl} T_{l(i)} \delta_{st} \delta_{s2} \right. \\ & \left. - 2W_3 (a_i a_j / A_s^2) \delta_{st} (1 - \delta_{ij}) - 2W_4 \delta_{ij} (1 - \delta_{st}) \right. \\ & \left. - 2W_2 \sum_p \sum_l \delta_{jl} T_{l(p)} \delta_{tp} K_{p(s)} \right\} X_{is} X_{jt} \end{aligned} \quad (8)$$

$$(l=1, 2, \dots, 8; p=1, 2, \dots, P)$$

ただし、 $T_{l(i)} \equiv l' : i$ に隣接するゾーンの集合の l 番目

$K_{p(s)} \equiv s' : s$ との隣接を禁止された土地利用

$P : s$ に対して隣接を禁止した土地利用数

なお、本モデルは数理的な最適解を求める目的としていないため、従来研究^{4), 5)}で用いたラグランジエ乗数法は適用しない。

(2) ファジィ制約の応用

a) 土地利用配置問題における制約条件の意味

実際の土地利用計画策定において、プランナーは全ての制約条件を完全に満たす代替案を考案しているわけではなく、許容範囲という適度な領域を持った制約、すなわちファジィな制約のもとで策定を行なっている。例えば宅地開発のマスター・プランにおいて、公園・緑地計画面積は開発区域の20%といった形で定められるが、実際に配置を決定する段階ではその値の前後で決められる。

従って、程良い柔軟性を持ったファジィな制約条件を用いることがこの問題では必要であり、より現実的なモデル化であると言える。具体的に、本研究の制約条件からファジィな制約条件の必要妥当性を考えてみる。

①隣接禁止条件

この条件をあらゆるゾーンに対して東西南北すべての方向で厳密に満たすことは現実的に難しい。よって、隣接を禁止した土地利用同士が部分的にはある程度接していても構わない、という柔軟な計画方針が必要である。

②総面積条件

実際の土地利用計画では、上位計画により各土地利用の面積の割合はほぼ決められている。しかし、適用に際してはその区域の個別事情や時間的な制約が考慮され、厳密にその計画を実行するのは困難なことが多い。従って、ある程度幅を持たせた策定内容の方がよりよい計画指針になると思われる。

③単一土地利用条件

ある単位ゾーンに対して、厳密に「ある土地利用が適しており、その他の土地利用は適していない」とするのではなく、「このゾーンはある土地利用に対してはこの程度、別の土地利用に対してはこの程度適している」と表現した方が、この配置問題ではより適切ではないかと考えられる。なぜなら、単位ゾーンに一つの土地利用を

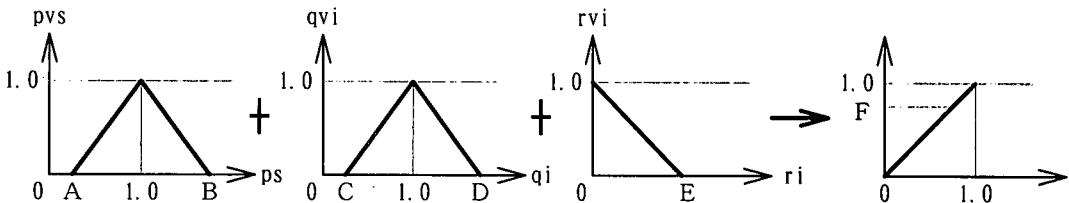


図-2 ファジイ制約を用いたモデル終了ルールの概念図

限定して配置することは、特にまとまった土地利用の境界線上にあるゾーンでは難しい判断であり、複数の土地利用の配置の可能性を示唆した方がより実用的だからである。

以上のように、本研究の条件からも柔軟性を持ったファジイな制約条件が妥当であることが示された。

b) モデル終了の問題

ペナルティ関数法による解法を用いると、制約条件を完全に満足した収束解を得ることは困難なことがわかつているため¹¹⁾、従来より収束性を高めるためにいくつかの手法が提案されてきた^{13), 14), 15)}。本研究の従来モデル^{4), 5)}においてもラグランジエ乗数法を用いて収束性を高めることを試みたが、それでも制約条件をすべて満足する収束解は得られていない。よって、本モデルの収束性の問題を解決する必要がある。

ところが前述の通り、土地利用配置問題における実際の制約条件は許容範囲という形で柔軟性を備えている。そこで、緩やかな制約条件下でモデルが収束できる一つの方法として、ファジイ制約を応用することを提案する。

c) ファジイ制約の応用方法

制約条件に柔軟性を持たせ、さらにモデル終了の問題を解決する方法として、ファジイ集合を表すメンバーシップ関数を制約条件に応用し、ファジイ制約として表現することを提案する。ニューラルネットワークモデルは X_{is} の中間的な値をしきい値処理で0, 1にできるという利点を持つ。しかし、その点が逆に従来からの最適化手法と同様「集合に含む、含まれない」という結果しか得られない欠点ともなる。ところが、メンバーシップ関数を用いると0から1の間の値を用いて、「ある程度含まれる」というファジイな領域を示すことができ、許容範囲を持った制約条件を表現できる。

各制約条件に対するメンバーシップ関数の応用方法として、ファジイ推論の考え方を援用した。すなわち、地域的連担性・形状条件を除いた3つの制約条件を前件部変数として考え、モデルの終了条件をそれらに対応した後件部的なものとし、これを用いてモデル終了の判断を行うこととした。なお、地域的連担性・形状条件は目的関数的意味合いを持つ条件として定式化しているので、ファジイ制約は応用しない。

総面積条件については、計画総面積 A_s とニューラル

ネットワークで計算されたそれぞれの土地利用の総面積との比を式(9)のように p_s とし、 p_s が1.0のとき制約条件を完全に満たし、1.0から離れるほど制約条件の満足度が低下するメンバーシップ関数を式(10)のように定式化する。

$$p_s = \left(\sum_i a_i X_{is} \right) / A_s \quad (9)$$

$$pv_s = \begin{cases} -p_s/(A-1) + A/(A-1) & (A \leq 1.0) \\ -p_s/(B-1) + B/(B-1) & (B > 1.0) \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 pv_s ：総面積条件のメンバーシップ値

A, B ：総面積条件の領域パラメータ

総面積条件と同様、単一土地利用条件においても各ゾーン i の計画面積 a_i とニューラルネットワークの計算面積との比を式(11)のように q_i とし、 q_i が1.0のとき制約を完全に満たし、1.0からの差で満足度が低下するメンバーシップ関数を式(12)のように定式化する。

$$q_i = \left(\sum_s X_{is} \right) / a_i \quad (11)$$

$$qv_i = \begin{cases} -q_i/(C-1) + C/(C-1) & (C \leq 1.0) \\ -q_i/(D-1) + D/(D-1) & (D > 1.0) \end{cases} \quad (12)$$

ただし、 qv_i ：単一土地利用条件のメンバーシップ値

C, D ：単一土地利用条件の領域パラメータ

また、隣接禁止条件については、計算中に各ゾーンにどの土地利用が主として配置されているのか定めておく必要があるので、「各ゾーンにおいて少なくとも一つの土地利用が $X_{is} > X_{lim}$ となったとき、その土地利用が配置されているとみなす」という条件をまず定める。その上で、各ゾーンにおいてそのゾーンに接した「隣接を禁止した土地利用 s' 」のゾーン数を式(13)のように r_i とし、 r_i が0のとき1.0となるメンバーシップ関数を式(14)のように定式化する。

$$r_i = \sum_l \sum_s \sum_{s'} X_{is} X_{is'} \quad (13)$$

$$rv_i = -(1/E)r_i + 1 \quad (14)$$

ただし、 rv_i ：隣接禁止条件のメンバーシップ値

E ：隣接禁止条件の領域パラメータ

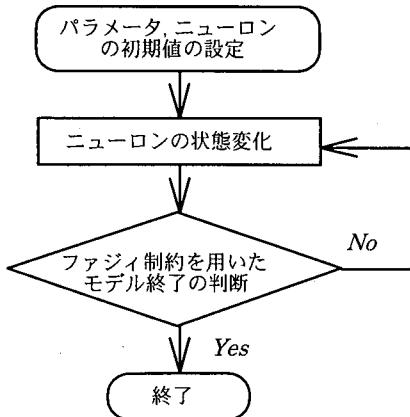


図-3 アルゴリズムの概要

以上の前件部変数として考えたメンバーシップ値 $p_{v_i}, q_{v_i}, r_{v_i}$ の平均値が、制約条件の総合的な満足度を定めるモデル終了条件のパラメータ F の値より大きくなつた時、モデルが終了すると設定する。ここで、モデル終了条件を「後件部的なもの」と前述したのは、この条件がファジ集合を意味するメンバーシップ関数ではないからである。

図-2にメンバーシップ関数を応用した制約条件およびモデル終了条件を用いたファジ制約のルールの概念図を示す。

(3) アルゴリズム

Hopfieldモデルとファジ制約を統合したアルゴリズムの概要を図-3に示す。ニューラルネットワークの状態変化の計算の後、図-2のファジ制約のルールに従って計算を繰り返す。

図-3におけるニューラルネットワークの状態変化は以下の方法で行われる。いま、ニューロン i_s の内部状態を H_{is} 、出力を V_{is} 、入力バイアスを I_{is} とすると、時間に閑して離散的な Hopfield モデルは以下のように定式化できる^{10), 16)}。

$$H_{is} = \sum_j \sum_t T_{isjt} V_{jt} + I_{is} \quad (15)$$

$$V_{is} = (1/2) \{1 + \tanh(H_{is}/\theta)\} \quad (16)$$

$$E(V) = -(1/2) \sum_i \sum_s \sum_j \sum_t T_{isjt} V_{is} V_{jt} - \sum_i \sum_s I_{is} V_{is} \quad (17)$$

ただし、 θ : 感度パラメータ

$$\text{このとき, } T_{isjt} = T_{jitis}, T_{isis} = 0 \quad (18)$$

を満たし、かつ非同期的にニューロンの状態変化を行つた場合、式(17)のエネルギー関数（リアプロフ関数）の値が減少する方向にニューロンの状態が変化する。状態変化は、式(15)で一つのニューロンを選択し、その内部

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

図-4 ゾーン番号

U1.1=.8	U2.1=.5	U3.1=.3	U4.1=.1	U5.1=.3
U1.2=.5	U2.2=.7	U3.2=.3	U4.2=.7	U5.2=.5
U1.3=.4	U2.3=.6	U3.3=.8	U4.3=.5	U5.3=.3
U1.4=.2	U2.4=.4	U3.4=.6	U4.4=.4	U5.4=.6
U6.1=.6	U7.1=.5	U8.1=.7	U9.1=.4	U10.1=.8
U6.2=.4	U7.2=.7	U8.2=.4	U9.2=.5	U10.2=.4
U6.3=.8	U7.3=.4	U8.3=.6	U9.3=.3	U10.3=.3
U6.4=.2	U7.4=.2	U8.4=.5	U9.4=.9	U10.4=.4
U11.1=.7	U12.1=.4	U13.1=.4	U14.1=.3	U15.1=.4
U11.2=.3	U12.2=.6	U13.2=.6	U14.2=.6	U15.2=.5
U11.3=.4	U12.3=.2	U13.3=.7	U14.3=.5	U15.3=.9
U11.4=.6	U12.4=.8	U13.4=.2	U14.4=.3	U15.4=.6
U16.1=.5	U17.1=.7	U18.1=.8	U19.1=.8	U20.1=.5
U16.2=.1	U17.2=.3	U18.2=.4	U19.2=.5	U20.2=.3
U16.3=.4	U17.3=.8	U18.3=.3	U19.3=.3	U20.3=.7
U16.4=.7	U17.4=.4	U18.4=.2	U19.4=.4	U20.4=.9
U21.1=.8	U22.1=.3	U23.1=.4	U24.1=.5	U25.1=.3
U21.2=.6	U22.2=.4	U23.2=.8	U24.2=.3	U25.2=.8
U21.3=.3	U22.3=.6	U23.3=.6	U24.3=.8	U25.3=.6
U21.4=.3	U22.4=.8	U23.4=.3	U24.4=.3	U25.4=.4

図-5 分級結果

状態を計算した後、式(16)でそのニューロンの出力状態を変更するという形で行われる。本研究では稻村ら¹⁵⁾と同様、状態変化を行うニューロンの順序はランダムとして計算する。従つて、総数個にあたるニューロンが状態変化を行う期間を 1 サイクルと定義する。

4. 数値実験

(1) 数値実験の概要

ここでは、数値実験を通して本モデルの実用可能性について検討を行う。従来研究⁹⁾では、 3×3 の 9 ゾーンで数値実験を行つた。ところが 9 ゾーンでは「一体とした土地利用」や「隣接禁止条件」の結果に対して偶然性が高く、モデルの有効性を判別しにくい。よつて、本研究では 5×5 の 25 ゾーンで数値実験を行う。

いま、図-4に示すゾーン ($i = 1, 2, \dots, 25$) に対して、図-5のように 4 つの土地利用 ($s = 1, 2, 3, 4$) についての分級結果が与えられているものとする。なお、分級結果は任意に与えている。

制約条件は具体的に以下のように与える。

◎総面積条件:	土地利用	1	2	3	4
	総ゾーン数	6	4	9	6

◎隣接条件: 土地利用 2 と 4 の隣接を禁止する。

表-1 本研究で用いる全パラメータ

X_{is} の初期値	各ニューロンの初期値
θ	感度パラメータ
W_1, W_2, W_3, W_4	ニューラルネットワークの重みパラメータ
A, B, C, D, E, F	ファジィ制約のパラメータ
X_{lim}	土地利用決定条件

◎形状条件：全ての土地利用を大きく、整形にする。
以上の条件のもと、各種パラメータの値を変更して実験を行う。

(2) 実験方法

表-1は本研究で設定する必要がある全パラメータである。ニューラルネットワークのネットワークの状態は重みパラメータ間の比に大きく影響を受けることがわかつているため¹⁷⁾、重みパラメータ間の関係を調べることが先決である。そこで、以下のような方法で重みパラメータ間の関係を調査する。なお、分級結果を土地利用配置計画に反映させるため、ニューロン X_{is} の初期値はすべての実験で適性度 (U_{is}) とした。

a) 目的関数の重みパラメータ間の関係

ここでは地域的連坦性・形状条件を目的関数と位置づけ、実際に2つの目的関数間の関係が定量的にトレードオフ関係にあることをセンシティビティーの形で明らかにする。方法として、 W_2, W_3, W_4 の値を固定し、 W_1 の値を変更してその関係を見た。それぞれの目的関数の値は以下の基準で示す。すなわち、適性度最大条件である $f(X)$ は「各ゾーンにおいて X_{lim} を満たした土地利用の適性度（ただし、複数の土地利用が X_{lim} を満たした場合は X_{is} の値の大きい土地利用を選択する）を、全ゾーンについて加算した総和」で示し、地域的連坦性・形状条件である $g(X)$ は「同一の土地利用が各方向で隣接する接点の数、全ゾーンについて加算した総和」で示す。

プレ調査において、ネットワークの状態は状態変化のサイクル数5～15回の間にほぼ安定平衡状態、すなわち収束状態に達することがわかつた。この調査では制約条件を満足する必要はないので、十分収束状態に達したと考えられるサイクル数20回の時にモデルを終了するように設定した。なお、状態変化を行うニューロンの順序はランダムとしているので、同じ W_1 の時、様々な順序パターンで100回計算を行い、その平均値で両者の関係を分析した。

実験結果は図-6の通りである。横軸は $1/W_1$ を示しており、縦軸左は適性度の総和 $f(X)$ 、縦軸右は連坦度の総和 $g(X)$ を示している。このとき、单一土地利用条件は各ニューロンの出力状態（0, 1の決定）に直接影響を

表-2 図-6の実験時に用いた各パラメータ

X_{is} の初期値	U_{is}
θ	$1/W_1$ の0.5～0.6倍
W_4	$1/W_1$ の1.0～1.2倍
W_2, W_3	1.00に固定
A, B, C, D, E, F	収束前に終了しないように固定
X_{lim}	0.60に固定

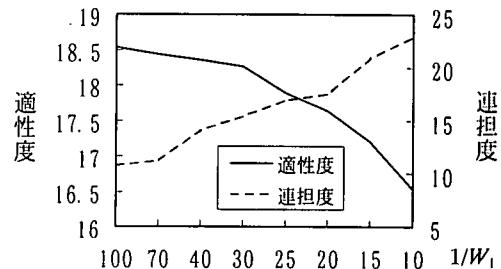


図-6 目的関数の重みパラメータ間の関係
(制約条件を無視した場合)

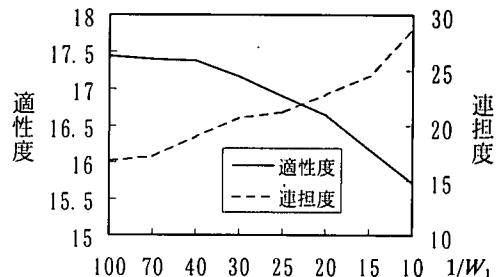


図-7 目的関数の重みパラメータ間の関係
(制約条件を考慮した場合)

与える物理的条件であることから、単一土地利用条件の重みパラメータ W_4 は W_1 に合わせて変化させた。また、適性度と連坦度の関係を適切に図るためにできるだけ最適解に近い局所解を得るために感度パラメータ θ も W_1 に合わせて変化させた。その結果、Hopfieldモデルにおける2つの物理的パラメータを、表-2の関係で変化させることができたことがわかつた。ここで、ファジィ制約の各パラメータは収束状態に達する前にモデルが終了しないように固定している。

なお、図-6ではパラメータ間の比を $1/W_1 = 100$ までしか示していないが、比をそれ以上大きくしても適性度の総和の平均値は最大値である19.2まで近づかなかった。これは、本モデルではシャープニングやアーリングなどの局所解から脱する技法を用いていないことから最大値まで近づかなかつたのが原因と考えられる。

b) 制約条件の重みパラメータ間の関係

次に、制約条件間の重みパラメータの関係を分析する。比較方法として、ファジィ制約応用の時に式(9)、式(11)、式(13)で定式化した p_s, q_i, r_i を用いる。それぞれの値の平均値 $(\sum p_s)/S, (\sum q_i)/I, (\sum r_i)/2I$ において、 p_s, q_i は1.0の時に完全に制約を満たし、 r_i は0.0の時に完全に制約を満たしていることから、これらの平均値を用いて制約条件を満たした程度を比較し、制約条件間の関係を調査する。方法として、図-6の調査で W_4 は W_1 に合わせて変化させていたので、 W_4 を基準に3つの制約条件の関係を調べていった。

最初に、総面積条件の重みパラメータ W_3 と W_4 との関係を以下的方法で分析した。まず W_4 の値を固定し、 W_3 も W_4 と同じ値にして、ニューロンの状態変化順序パターン100回分を計算する。このときも、十分収束状態に達したと考えられるサイクル数20回の時にモデルを終了するよう設定している。そこで、その W_3 の値に対応する $(\sum p_s)/S$ の100回の平均値が0.85～1.15の範囲、すなわち総面積条件を適度に満足している領域に入っているれば、徐々に W_3 を小さくし、入っていないければ徐々に大きくするという方法で許容範囲を持つ制約条件を満たす最小の W_3 の値を抽出していった。 W_4 の変化にあわせて上記計算を繰り返した結果、総面積条件をある程度満足するときの W_3 とその時の W_4 との比は概ね2:1であることがわかった。この結果を表-3に示す。このときの W_2 は1.0に固定している。

隣接禁止条件の重みパラメータ W_2 と W_4 との関係についても上記と同様の方法で分析した。このとき、 W_2 の値に対応する $(\sum r_i)/2I$ の許容範囲は0.08以下とした。また、 W_3 は上記分析結果で得られた値を用いた。その結果、隣接禁止条件をよく満足するときの W_2 とその時の W_4 の比として表-3のように約1:2が妥当であることがわかった。

調査結果より、本研究の条件下では、 $W_2 : W_3 : W_4 = 1 : 4 : 2$ のとき3つの制約条件をほぼ満足する解が得られることができた。ただし、ここで示した具体的な比はゾーン数や各ゾーンの適性度といった条件の違いによって大きく異なる可能性があり、条件が変わる度に上述の調査方法を用いて比を定める必要がある。図-7に制約条件の関係を $W_2 : W_3 : W_4 = 1 : 4 : 2$ としたときの $1/W_1$ の値を示す。制約があるため、適性度の値は図-6と比べて全体的に低くなっているが、制約条件をほぼ満たした状態でも目的関数間の重みパラメータのトレードオフ関係は図-6とほぼ同様であることが分かる。

以上のように、ファジィ制約式を用いて各制約条件の満足度を比較することにより、制約条件間の重みパラメータに一定の関係があることを示すことができた。この関係を元に各パラメータを調整することによって、プ

表-3 制約条件のパラメータ間の関係分析結果

$1/W_1$	100	70	40	30	25	20	15	10
W_4	100	70	40	30	26	21	17	12
W_3	185	134	74	57	48	40	29	21
W_2	47	33	18	14	12	10	8	5

* W_3, W_2 はそれぞれの制約条件を適度に満足するときの最小値を示している。

表-4 図-8の時に用いた各種パラメータ

W_1	W_2	W_3	W_4	θ	X_{lim}
1/30	15	60	30	17	0.60
A	B	C	D	E	F
0.0	2.0	0.0	2.0	1.0	0.90

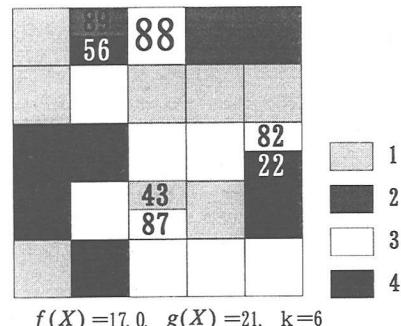


図-8 土地利用配置案の一例

ランナーの計画目標を代替案として表現することが可能となる。

c) ファジィ制約で用いるパラメータの設定

本研究では、現実的な制約を意味するものとして、また適度に制約を満たした時点でモデルを終了させるためにファジィ制約を応用した。従って、ネットワークの状態がほぼ収束状態に達したところでモデルが終了できるようにA～Fの各パラメータを設定する必要がある。また設定に当たっては、ネットワークの状態だけでなくモデル終了率も考慮しなくてはならない。これらのパラメータ設定の影響については、次章で考察する。

(3) 実験結果

図-6および図-7の結果を見ると、プランナーの計画目標とするべき比 $(1/W_1)$ の範囲は15から30であることがわかる。ここでは適性度が高く、連担度もある程度満たしている $1/W_1 = 30$ をプランナーの計画目標として選択する。このときの実験結果の一例を図-8に示す。kはモデル終了までのニューロンの状態変化のサイクル数を示し

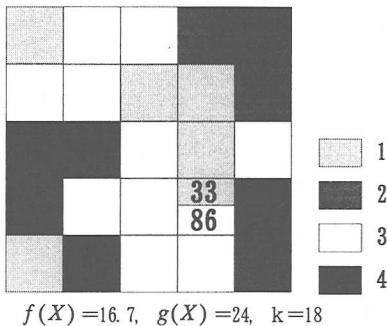


図-9 土地利用配置案の一例
(図-8と全て同じパラメータ)

ている。この時用いたパラメータは表-4の通りであり、上段はニューラルネットワークの最小化計算の時に用いるパラメータ、下段はファジィ制約で用いるパラメータを示している。

ゾーン内に示されている数値は各ニューロン X_{is} の値を示している。これらの数値は各ゾーン上のそれぞれの土地利用に対する適用可能性を意味していると考えることができる。ただし、各ゾーンにおいて土地利用 s の値が 90%より大きい場合、そのゾーンに対する土地利用がほぼ適当であるとみなして数値を省略しており、また20%未満の場合は不適当であるとみなしてその土地利用を表示していない。この図から、ゾーン3は88%の可能性で土地利用3が適しており、他のゾーンでは90%以上の可能性でそれぞれ示された土地利用が適していることがわかる。また、ゾーン2、15、18では、それぞれ2つの土地利用の適用可能性が示されている。特に、ゾーン15、18ではまとまった土地利用の境界線上で2つの土地利用の適用可能性を示しており、この支援モデルによって柔軟性のある土地利用配置計画が提案できることがわかる。

次に、表-4と同じパラメータ設定時の別の結果を図-9に示す。Hopfieldモデルのエネルギー関数は多数の極小値を持つため広域的な最適解を得る保証はなく、局所解に収束することがある¹⁰⁾。この実験では状態変化を行うニューロンの順序をランダムとしており、順序の違いにより結果が多少異なることがある。そのため、同じ重みパラメータを設定した実験でも、図-8の配置結果と若干異なる図-9のような結果を得ることができる。このことから、プランナーの計画目標を意味する重みパラメータの設定値が一定の場合でも、幾つかの類似した代替案を提示し、比較検討を行うことが可能なことがわかる。この実験結果は、プランナーが経験だけでは気づくことのできない新たな代替案を与えるという側面も備えており、支援モデルとしての有効性がより高まると思われる。

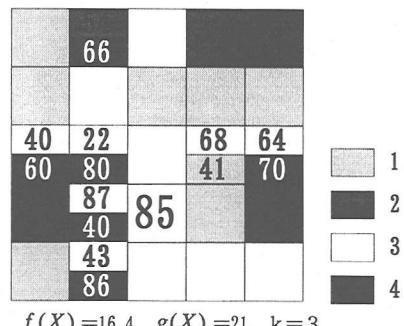


図-10 モデル終了設定パラメータFの影響結果
($F=0.88$ 、他のパラメータ表-4と同じ)

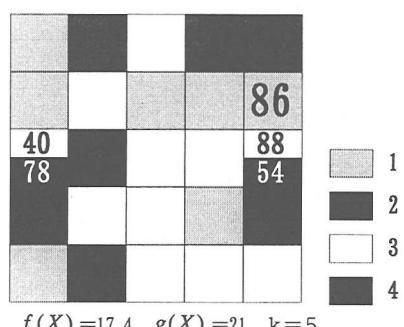


図-11 重みパラメータ W_3 の影響結果
($W_3=75$ 、他のパラメータ表-4と同じ)

表-5 モデル終了設定パラメータFの影響

F	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93
モデル終了率	100%	92%	58%	7%	2%
kの平均	4.82	6.96	8.98	4.57	—

5. 考察

ここでは、ファジィ制約のパラメータ設定の影響についての考察を行う。比較対照を行いやすくするために、図-8の結果と比較する。

まず、モデル終了設定条件であるパラメータFの影響についての考察を行う。図-10は表-4の他のパラメータの値を一定にしたまま、Fの値のみを0.88に変更して計算した結果である。k=3で収束状態に達する前にモデルが終了しており、非常に曖昧な代替案を提示していることがわかる。また逆に、F=0.92の時はk=20までにモデルが終了しなかった。これより、Fの設定はネットワーク状態が収束状態に達したときに、モデルが適切に終了できるかどうかに影響を与えるパラメータであることがわかる。また、ニューロンの状態変化順序のパター

ン100回の試行結果の平均から、モデルの終了率とkの平均について表-5の結果を得た。この表より、本研究の条件下では、Fは0.90か0.91の値に設定するのが適切であることがわかる。

次に、A～Eの各パラメータについてもFと同様他のパラメータを一定にしてそれぞれ計算を行った。その結果、Fと同じくモデルの終了率および終了までのサイクル数への影響に留まることが示された。

ここで、制約条件間のパラメータ変化の影響を見るために、表-4の他のパラメータの値を一定にしたまま W_3 を75に変更して計算を行った結果を図-11に示す。図-8と比較して、若干だが総面積条件をよく満たしていることがわかる。具体的には、図-8の時 $(\sum p_s)/S = 0.87$ であったのに対し、図-11の時は $(\sum p_s)/S = 0.89$ であった。これより、A～Eの各パラメータはモデル終了の判断に影響を与えており、それぞれの制約条件の緩急に対しては影響を与えておらず、制約条件の緩急の程度はニューラルネットワークの重みパラメータの設定が影響を与えていたことがわかった。

6. 結論

本研究において、以下のような結論が得られた。

- 1) 土地分級結果を所与とした土地利用配置問題を最適化問題として定式化することができた。また、Hopfield型ニューラルネットワークモデルを用いた最適化手法に、ファジィ制約を応用することが可能であることが示された。
- 2) この支援モデルの開発によって、分級結果を生かした上で、配置過程を考慮した土地利用計画が提案できることが示された。従って、土地分級を行うモデルとの融合により、実用可能性の高い合理的なシステムが構築できる。
- 3) 制約条件にメンバーシップ関数を応用し、ファジィな値で配置案を表現することによって、柔軟性を持った現実的な土地利用計画の提案が可能となった。また同時に、ファジィ制約の応用によってモデル終了の問題を克服できた。
- 4) プランナーの計画目標として設定した一定の重みパラメータの関係のもと、複数の類似した代替案を提示し、比較検討することが可能なことが示された。

また、本研究の課題は以下のようにまとめられる。

- 1) 本研究で示した重みパラメータの関係は、ゾーン数や各ゾーンの適性度といった条件の違いによって大きく異なる可能性があり、適用する課題が変わる毎に新たに関係を調べる必要がある。本研究で用いた計算機はSPEC/fp92の処理能力を有している。この計算機でサイク

ル数20回の計算を1000回繰り返すのにかかる所要時間はほぼ10分であり、例えば制約条件間の関係分析に要した総所要時間は40分程度であった。実際問題への適用を考えた場合、所要時間はゾーン数の増加に比例して増えることが予想されるが、処理能力SPEC/fp95を持つ新たな計算機を導入予定であり、従来と比較し飛躍的に計算処理能力が上がる事がわかっている。従って、大規模問題の適用に際しても実用的な時間内に解くことが可能である。

2) 本モデルは、その位置づけのため局所解への入り込みを特に否定していない。従って、状態変化のニューロンの順序によっては収束する局所解が大きく異なり、プランナーの意志決定を迷わせるような代替案が生じる可能性は否めない。この問題に対しては、システムの安定性を前提とした上で、プランナーが極端な局所解を自ら除くことによって解決可能である。システムの安定性に関しては感度パラメータの影響が大きく、感度パラメータを適切な値で設定することが必要となる。

参考文献

- 1) 中村英夫 横谷博光 大島邦彦：土地利用計画策定支援システム、日本都市計画学会論文集 No. 17, pp. 43-48, 1982.
- 2) 福島 健 枝村俊郎：用途地域指定支援システムの研究 日本都市計画学会論文集 No. 25, pp. 343-348, 1990.
- 3) 清水英範 崑 綱林 中村英夫：知識ベースに基づく用途地域支援システム、土木学会論文集 No. 425/IV-14, pp. 107-115, 1991.
- 4) 清水英範 河合毅治：土地分級結果に基づく用途地域の配置問題、土木計画学研究・講演集 No. 13, pp. 425-430, 1990.
- 5) 清水英範 河合毅治：分級結果に基づく最適ゾーニング問題、土木計画学研究・講演集 No. 14(1), pp. 441-446, 1991.
- 6) 黒田勝彦 谷口 守 浦屋 琳 豊岡俊也：COASTモデルによる沿岸域空間利用調整計画法、土木計画学研究・論文集 No. 8, pp. 105-112, 1990.
- 7) (社) 日本都市計画学会編：都市計画マニュアル・地域地区編 pp. 51-76, 1991.
- 8) Hopfield, J.J.: Neural Network and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 79, pp. 2554-2558, 1982.
- 9) Hopfield, J.J.: Neurons with Graded Response have Collective Computational Properties like Those of Two-state Neurons, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 81, pp. 3088-3092, 1984.
- 10) Hopfield, J.J. and Tank, D.W.: Neural Computation of Decisions in Optimization Problems, *Biol. Cybern.* Vol. 52, pp. 141-152, 1985.
- 11) 今野 浩 山下 浩：非線形計画法、日科技連, pp. 217-254, 1978
- 12) (社) 日本工業技術振興協会ニューロコンピュータ研究部会

- 編：ニューロコンピューティングの基礎理論，海文堂出版，pp. 76-97, 1990.
- 13) 秋山 泰, 山下明良, 梶浦正浩, 安西祐一郎, 相坂秀夫：ガウシアンマシンによる組み合わせ最適化, 電子情報通信学会報告, MBE-88-183, pp. 163-168, 1989.
- 14) 乳井孝憲, 稲村 肇：多機材間の需要配分と異機材間の乗り継ぎを考慮した航空機材スケジューリングモデル, 土木計画学研究・講演集 No. 17, pp. 339-342, 1995.
- 15) 稲村 肇, 久永健一郎：航空機材スケジューリングのためのニューラルネットワークアルゴリズムの開発, 土木学会論文集 No. 536/IV-31, pp. 9-21, 1996.
- 16) Takeda, M. and Goodman, J.W.: Neural Networks for Computation: Number Representations and Programming Complexity, *Applied Optics*, Vol.25, No.18, pp.3033-3046, 1986.
- 17) 日高 誠, 湯沢 昭, 須田 熙：ニューラルネットワークによる資源配分を考慮したスケジューリング問題の解法, 土木学会論文集 No. 458/IV-18, pp. 101-109, 1993.
- 18) 秋山孝正：ファジイ理論の土木計画学分野における適用に関する整理と展望, 土木学会論文集 No. 395/IV-9, pp. 23-32, 1988.
- 19) 田中一男：応用をめざす人のためのファジイ理論入門, ラッセル社, 1991.
- 20) 三矢直城, 田中一男 : C言語による実用ファジイブック, ラッセル社, 1989.
- 21) 平野広美 : Cでつくるニューラルネットワーク, パーソナルメディア, 1991.

(1996. 7. 1受付)

THE DEVELOPMENT OF LAND USE ALLOCATION MODEL BASED ON A LAND USE SUITABILITY ANALYSIS

Shingya HANAOKA, Hajime INAMURA and Eihan SHIMIZU

This paper proposes a land use allocation model which supports a decision of land use zoning based on a land suitability analysis. The model, employing the Hopfield neural network algorithm, optimizes allocation of land use under possible constraints. Since a zoning plan is not necessary to satisfy rigid constraints such as a proportion of land use, fuzzy constraint function with membership value are introduced in the model. The results show that this model is useful to provide a set of possible alternatives of land use allocation and it offers much flexible plans through fuzzy solutions.