

土地分級結果に基づく用途地域の配置問題

Optimal Allocation Problem of Land Use Zones

Based on the Results of Land Suitability Analysis and Some Constraints

清水英範*, 河合毅治**

By Eihan SHIMIZU and Takeharu KAWAI

This study concerns how to allocate land use zones for zoning regulation under the condition that the results of land suitability analysis are given. Important factors to be considered are size of each land use zone, relationship between adjacent land use zones, etc. This allocation process is formulated as optimization problem which maximizes the sum of land suitability under some constraints representing the above factors. It is demonstrated that "augmented Lagrangean function" of this problem can be programmed and solved on the Hopfield neural network model. The adaptabilities of the formulation and optimization procedure are examined in the practical example.

1. はじめに

用途地域指定をはじめとする土地利用計画の策定過程は、基本的には次の2つの過程に分けられる。すなわち、既存及び計画決定済みの社会基盤施設等を所与として、各計画区域（用途地域指定であれば各用途地域）に対する各土地の適地度を検討、評価する過程（土地分級あるいは土地利用適性評価といった段階）と、この結果をもとに上位計画から与えられる各計画区域の総面積や隣接条件等を考慮して実際に計画区域を配置する過程である。

土地利用計画の策定過程を計算機によって支援するための研究は従来から数多く行われている。しかし、これらのほとんどは上記の土地分級に相当する過程の支援を目的としており、計画区域の配置過程に対しては考慮されないか、考慮されたとしても各

計画区域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になされている場合が一般である。

一方実際の計画策定や見直しでは、分級結果は言うまでもなく、計画区域の地域的な連担性や隣接関係等の条件をかなり考慮して行われていることも事実である。計画支援システムは現実に行われている計画策定作業をそのまま支援することを目的としたものではない。しかし、もしこれらの条件を考慮して合理的な手法によって計画区域を配置できれば、条件を逐次変更あるいは追加することにより、多様な計画代替案を効率的かつ客観的に作成することができ、これにより計画策定過程全体の合理性を高めることができると考えられる。

本研究は、このような計画区域の配置過程を計算機によって合理的に支援する手法を構築することを目的としており、具体的には用途地域指定を例に、この問題を最適化問題として定式化し、その実用的な解法について検討する。

* 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 学生員 東京大学生産技術研究所
(〒106 港区六本木7-2-2-1)

2. 最適化問題としてみた用途地域配置問題

ここで考える用途地域の配置問題は、用途地域(s)ごとに土地(i)に与えられる分級結果(その用途地域に対する適地度)を所与として、ある種の最適規範(目的関数)と種々の制約条件のもとに、各土地に用途地域のいずれかを割り当てる、いわゆる最適割り当て問題と考えることができる。(図1)

【土地分級結果】 土地(i)

	1	2	3	4	...
1種住専	1	0	8	9	6
2種住専	8	7	1	0	9
⋮					
工業専用	7	9	6	2	

用途地域(s)

【用途地域配置】

	1	2	3	4	...	(%)
1種住専	1	0	0	0		12
2種住専	0	0	1	1		20
⋮						
工業専用	0	1	0	0		2
計	1	1	1	1	...	

用途地域(s)

各用途地域の計画面積

基準・目的関数
・制約条件

図1 用途地域配置の考え方

(1) 目的関数の定式化

目的関数の規範としては、土地分級結果を尊重するという観点から、「各土地の分級結果の総和をなるべく大きくするように用途地域を配置する」と考えるのが自然であろう。

すなわち、目的関数は以下のように定式化する。

$$\min. f(x) = -\sum_i \sum_s (U_{is} x_{is}) \quad \dots (1)$$

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

ただし、 U_{is} : 用途地域sに対する土地iの適地度

x_{is} : 土地iの用途地域

sならば1; sでないならば0

(2) 制約条件の定式化

a) 考慮すべき条件

用途地域の配置にあたって考慮すべき主な制約条件としては以下のようなものが考えられる。

① 単一用途条件

各土地に与えられる用途地域は1つである。

② 総面積条件

各用途地域の総面積は一般に上位計画等によって別途定められている。

以上の条件は、この問題のいわば物理的な制約条件といえるものである。この他にも、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」(昭和47年4月)(以後単に決定基準と呼ぶ)によって以下のような条件が定められている。¹⁾

③ 隣接条件

性質の異なった用途地域が隣接することによって互いに悪影響を及ぼすことを防ぐことを目的とする。

例えば決定基準によれば、「第一種住居専用地域は原則として商業地域、工業専用地域、工業地域、準工業地域に接しないこと」等とされている。

④ 最小面積条件

単一用途地域の一团もしくは性質の類似した複数の用途地域の集団に面積の下限を設け、一体とした土地利用を図ることを目的とする。

同じく決定基準においては、「第一種住居専用地域はおおむね20ha以上とする」、「商業地域はおおむね5ha以上とする」等と定められている。

⑤ 形状条件

用途地域の一团あるいは集団に対して極端に複雑な形や線状の形を避け、効率のかつ一体とした土地利用を図ることを目的とする。

決定基準においても、「各用途地域はなるべく整形にすること」とされている。また「商業系用途地域は必要に応じて幹線道路沿道等に路線状に指定する」とされているが、「線状の部分が連続して500m以上に及ぶことは避けること」と定められている。

以上で例として示した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ことになる。

b) 制約条件の定式化

制約条件には、その判断基準が比較的明確で定式化が容易なものと、判断基準が定性的かつ不明確なために一意に定式化することが困難なものがある。

前者の例が上記①～③であり、各々以下のような定式化が可能である。

① 単一用途条件

$$1 - \sum_s x_{is} = 0 \quad \dots (2)$$

$$x_{is}(1-x_{is})=0 \quad \dots(3)$$

② 総面積条件

$$A_s - \sum_i a_i x_{is} = 0 \quad \dots(4)$$

③ 隣接条件

$$x_{is}x_{i's'}=0 \quad \dots(5)$$

ただし、 A_s : 用途地域 s の必要総面積

a_i : 土地 i の面積

i' : i に隣接した土地

s' : s との隣接を禁止された用途地域

一方後者のような条件に対しては、計画者等の判断を補完するような便宜的な手法や条件式を設定し、これを試行錯誤的に変えることによって多様な代替案を作成するという方法が適当と考えられる。

本研究では、上記④の最小面積条件、⑤の形状条件を考慮し、なるべく一団となる用途地域の面積を大きくし、かつそれらの形状が整形となるようにするという観点から、以下のような目的関数を設定し、式(1)とともに多目的問題として考えることにする。

$$\min. g(X) = -\sum_i \sum_{i'} \sum_{s'} x_{is} x_{i's'} \quad \dots(6)$$

いずれにしても以上示した目的関数や制約条件の関数形は一意に決まるものではない。そのため、様々な定式化に対して比較的容易に対応可能な汎用的かつ実用的な解法が要求される。

3. 解法

(1) 条件無し問題への変換

この問題を乗数法の考え方から条件無し問題に変換する。すなわち、目的関数として以下のような拡張ラグランジュ関数を用いる。²⁾

$$L(x) = (\text{目的関数}) + \lambda * (\text{制約関数}) + (R/2) * (\text{制約関数})^2 \quad \dots(7)$$

ここで、 λ : ラグランジュ乗数

R : 2次のペナルティ・パラメータ

この問題は、組み合わせの数が土地の数に対して指数関数的に増大するいわゆるNP完全問題であり、厳密解を求めるのは事実上不可能である。そこで本研究では、同様のNP完全問題である巡回セールスマン問題等を実用的な時間内に近似的に解くことに

成功したニューラルネットワークモデルの1つであるHopfieldモデル³⁾の応用を試みる。

(2) Hopfieldモデルの最適化問題への応用

ニューラルネットワークモデルは、神経細胞(ニューロン)が相互に結合することにより情報処理を行っていることにヒントを得たものであり、ニューロン(ユニットと呼ぶ)の状態とそれらの結合状態をモデル化することにより、ある種の情報処理を行うことを目的としている。

ニューラルネットワークモデルの一般的な特徴は以下の通りである。

- ① ユニットへの入力は複数である。
- ② ユニットからの出力は1つであり、その出力が他のユニットの入力になる。
- ③ ユニットは内部状態を持ち、それはあまり複雑でない入力の関数で定まる。
- ④ ユニットからの出力はあまり複雑でない内部状態の関数で定まる。

Hopfieldモデルはニューラルネットワークモデルのなかでも最も利用されるものであり、一般に上記の特徴を以下のような関数で表す。なお、以下の記号の添字 i, j は本節のみに有効である。

$$u_i = \sum_j T_{ij} V_j + I_i \quad \dots(8)$$

$$V_i = (1/2)(1 + \tanh(u_i/\theta)) \quad \dots(9)$$

ここで、 u_i : ユニット i の内部状態

V_i : 出力状態、 I_i : 固有状態

T_{ij} : ユニット i, j 間の結合強度

θ : ユニット i の感度を示すパラメータ
この値が小さいほど、 V_i は $\{0, 1\}$ の状態に近づく。

この時、 T_{ij} が対称行列で、ユニットの状態変化が非同期的であれば、以下の関数 E がLyapunov関数となり、その値が減少する方向にユニットの状態が変化することが分かっている。

$$E = -(1/2) \sum_i \sum_j T_{ij} V_i V_j - \sum_i I_i V_i \quad \dots(10)$$

すなわち、ある最適化問題の変数を V_i 、目的関数を式(10)の形で表現することができれば、Lyapunov関数の特徴を利用してこの最適化問題を効率的に解

くことができる。ただし、この場合の最適解は局所解である可能性もあることに注意が必要である。

(3) 本問題への応用

いま、Hopfieldモデルの温度パラメータ θ を小さくすることにすれば、制約条件式(3)は結果として必要なくなる。また x に関する3次以上の項は無視するものとする。この時、この問題の拡張ラグランジュ関数は以下のように表される。

$$\begin{aligned} L(x) = & -w_1 \sum_i \sum_s U_{is} x_{is} - w_2 \sum_i \sum_s \sum_s x_{is} x_{is'} \\ & + \sum_s \lambda_s (A_s - \sum_i a_i x_{is}) + (R_\lambda / 2) \sum_s (A_s - \sum_i a_i x_{is})^2 \\ & + \sum_i \mu_i (1 - \sum_s x_{is}) + (R_\mu / 2) \sum_i (1 - \sum_s x_{is})^2 \\ & + \sum_i \sum_s \sum_s \rho_{iis'ss'} x_{is} x_{is'} \quad \dots (11) \end{aligned}$$

ここで、

$\lambda_s, \mu_i, \rho_{iis'ss'}$: ラグランジュ乗数

R_λ, R_μ : 2次のペナルティ・パラメータ
(総面積条件, 単一用途地域条件
に対して各々共通のパラメータ
を用いるものとする)

w_1, w_2 : 多目的最適化問題の重みパラメータ
(本研究では $w_1=0.7, w_2=0.3$ としている)

この式をさらに x_{is} の1次項, 2次項に分けて整理すると、

$$\begin{aligned} L(x) = & -w_1 \sum_i \sum_s U_{is} x_{is} - w_2 \sum_i \sum_s \sum_s x_{is} x_{is'} \delta_{ij} \delta_{st} \\ & + \sum_s \lambda_s A_s - \sum_i \sum_s \lambda_s a_i x_{is} \\ & + (R_\lambda / 2) \sum_s A_s^2 - R_\lambda \sum_i \sum_s a_i A_s x_{is} \\ & + (R_\lambda / 2) \sum_i \sum_s \sum_s a_i a_j x_{is} x_{jt} \delta_{ij} \delta_{st} \\ & + \sum_i \mu_i - \sum_i \sum_s \mu_i x_{is} \\ & + (R_\mu / 2) - R_\mu \sum_i \sum_s x_{is} \\ & + (R_\mu / 2) \sum_i \sum_s \sum_s x_{is} x_{jt} \delta_{ij} \\ & + \sum_i \sum_s \sum_s \rho_{iis'ss'} x_{is} x_{is'} \delta_{ij} \delta_{st} \\ = & (\text{定数項}) \\ & - \sum_i \sum_s (w_1 U_{is} + \lambda_s a_i + R_\lambda a_i A_s + \mu_i + R_\mu) x_{is} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - (1/2) \sum_i \sum_s \sum_s (2w_2 \delta_{ij} \delta_{st} \\ & - R_\lambda a_i a_j \delta_{st} - R_\mu \delta_{ij} \\ & - 2\rho_{iis'ss'} \delta_{ij} \delta_{st}) x_{is} x_{jt} \quad \dots (12) \end{aligned}$$

ただし、 δ はクロネッカーのデルタである。

すなわち、ユニットの状態を以下のように定義すれば、Hopfieldモデルの応用が可能になる。

$$V_{is} = x_{is} \quad \dots (13)$$

$$\begin{aligned} T_{isjt} = & 2w_2 \delta_{ij} \delta_{st} - R_\lambda a_i a_j \delta_{st} - R_\mu \delta_{ij} \\ & - 2\rho_{iis'ss'} \delta_{ij} \delta_{st} \quad \dots (14) \end{aligned}$$

$$I_i = w_1 U_{is} + \lambda_s a_i + R_\lambda a_i A_s + \mu_i + R_\mu \quad \dots (15)$$

4. 適用

ここでは、実際の土地分級結果に対して本研究で構築した手法を適用する。

(1) 土地分級データ

土地分級の結果としては、筆者らが横浜市港北区を対象として開発している用途地域指定支援システムにより別途求めたものを用いる。⁴⁾このシステムは、ある用途地域に対して、各土地(20mグリッド)の適性を $[0, 1]$ (大きい値ほど他のグリッドに比べその用途地域に対する適地度が大)で定量評価を行うものである。本研究では、港北区の一部(40×40グリッド)を対象地域とした。また用途地域を、①第一種・第二種住居専用地域(住居専用地域)、②住居地域、③近隣商業・商業地域(商業系地域)、④準工業・工業・工業専用(工業系地域)の4つの用途地域グループに統合した。各用途地域グループに対する各土地の適地度は平均値をとった。以後、この用途地域グループを単に用途地域と呼ぶ。

(2) Hopfieldモデルの計算方法

ユニットの状態変化は具体的には以下のような方法で行う。ここでの記号は3.(2)に準ずる。

$$u_i(k) = \sum_j T_{ij} V_j(k) + I_i \quad \dots (16)$$

$$V_i(k+1) = (1/2)(1 + \tanh(u_i(k)/\theta)) \quad \dots (17)$$

(k : 繰返し計算回数)

まず、ランダムに1つのユニットを選択し、その内部状態を式(16)で計算する。次に式(17)により、

そのユニットの出力状態を変更する。そして、再度ランダムに1つのユニットを選択し、同様の計算を繰り返す。このような方法をとることによって、ユニットの状態変化を非同期的に行う。

なお温度パラメータ θ は、いわゆる焼鈍し法の考え方に従って、以下のように減少させていく。

$$\theta(k) = \theta_0 / \log(1+k) \quad \dots(18)$$

(θ_0 : 正の定数, ここでは $\theta_0=10$ とした)

ユニットの出力状態の初期値は、0.25に近い値を適当に与えた。

(3) 他のパラメータの改訂

ラグランジュ乗数、2次のペナルティ・パラメータは、乗数法の考え方に従って改訂する。

$$\lambda_s(k+1) = \lambda_s(k) + R_{\lambda}(k) H_s^{\lambda}(k) \quad \dots(19)$$

$$\mu_i(k+1) = \mu_i(k) + R_{\mu}(k) H_i^{\mu}(k) \quad \dots(20)$$

$$\rho_{ii'ss'}(k+1) = \rho_{ii'ss'}(k) + R_{\rho}(k) H_{ii'ss'}^{\rho}(k) \quad \dots(21)$$

ここで、

$H_s^{\lambda}, H_i^{\mu}, H_{ii'ss'}^{\rho}$: 各々、総面積条件(式(4))、単一用途地域条件(式(2))、隣接禁止条件(式(5))の制約関数

R_{ρ} : 隣接条件に対するペナルティ・パラメータ (乗数法による計算のみに用いる)

また、ペナルティ・パラメータは原則として変化させないが、制約条件の満足度が低い場合(適当な基準による)には以下のように変化させる。

$$R(k+1) = \alpha R(k) \quad \dots(22)$$

(α : 正の定数, ここでは $\alpha=1.2$)

なお、ラグランジュ乗数の初期値は0、ペナルティ・パラメータの初期値は1である。

(4) 適用

対象地域の分級結果から、各グリッドの適性度が一番大きい用途地域に割り当てた用途地域配置(以後、単純割り当てと呼ぶ)を図1に示す。

いま、この地域における現実の用途地域指定状況から求めた各用途地域の総面積を仮に、各用途地域の総面積に対する計画目標と考える。この時、単純割り当てによる方法は表1に示すように計画目標と大きくかけはなれていることがわかる。特に商業系地域は単純割り当てでは現れない。

さらに、住居専用系地域と工業系地域はなるべく隣接しないように配置する、という計画目標を設定したとしよう。この時、図1の単純割り当てによる用途地域配置はこの目標を全く満足していないことがわかる。

そこで種々の制約条件を考慮して、図1の用途地域配置の変更を試みる。

まず、各用途地域の総面積条件、単一用途条件のみを用いてHopfieldモデルの計算を行った。その結果が図2である(図上、商業系地域は■で示されている)。これにより、各用途地域の総面積は設定した計画目標にほぼ一致したが、新たに現れた商業系地域の一团となる面積や形状が著しく劣っていることがわかる。また住居専用系と工業系の境界地域において商業系の適地度が比較的高かったため、商業系地域が住居専用系と工業系の隣接関係を多少緩和するように出現しているが、いまだ全く不十分な状態であることもわかる。

そこで、本研究で定式化したすべての条件を用いて計算を行った。その結果が図3である。これにより商業系地域は、一团となる面積や形状にかなり高い連担性が生じた。また、住居地域や商業系地域がこの連担性を確保しつつ、住居専用系と工業系の用途地域の境界に配置されるようになった。

表1 単純割り当てによる各用途地域の面積

用途地域	単純割り当て	計画目標
住居専用系	703	586
住居	385	454
商業系	0	133
工業系	512	427

(面積はグリッド数による)

5. おわりに

本研究では、用途地域に対する各土地の適地度(土地分級結果)が何らかの方法で与えられた時、用途地域を実際にどのように配置すればよいかという問題に着目した。

土地分級には、既存の社会基盤施設や将来的に建設が決定されている施設等は考慮される。しかし、

基本的には各土地ごと独立に分析され、隣接する土地がどのような用途地域となるか、各土地がどのような面積あるいは形状をなす用途地域内に含まれるのか、といった用途地域指定の結果として生じる土地特性までは考慮のしようがない。そこで用途地域配置には、土地分級結果を十分踏まえつつも、用途地域の面積や形状、隣接関係等を考慮した方法が必要とされる。

本研究では、このような用途地域の配置を合理的に行う方法として、最適化問題の適用を考えた。すなわち、考慮すべき条件を目的関数と制約条件として定式化し、その問題を解くことによって配置を決定する方法である。もちろん、考慮する条件や定式化の方法は適宜変更し、試行錯誤的な検討を行うことを前提としている。本研究の結果、用途地域指定を行う上で考えるような条件においては、計画者の判断を補完するという目的からみれば十分な説得力をもつ定式化が可能であると思われる。また、この種の最適化問題は変数の数が膨大となるが（本研究で行った簡単な例でも $40 \times 40 \times 4 = 6400$ 個の変数をもつ0-1整数計画問題となる）、ニューラルネットワークモデルのHopfieldモデルの応用により、実用的な範囲内の近似値を得られる可能性が示された。これにより、従来ほとんど土地分級の過程のみを対象としていた土地利用計画の計算機支援手法の研究領域を計画区域の配置過程にまで進展させる重要性、及びその実現可能性を多少なりとも示すことができたと考えられる。

本研究には残された課題も少なくない。各用途地域の最小面積条件や形状条件については、他にも数多くの定式化の方法がありうる。特に形状条件では、商業系用途地域のみに線状の形状を許容するといったことを如何に定式化するかは大きな問題である。解法についても、パラメータの感度分析や他手法との比較等を行う段階に至ってない。これらの課題を踏まえ、研究を進展させなければならない。

最後に、本研究を進めるに際し、指導教授である東京大学の中村英夫教授から数多くの有益なご助言を賜った。またHopfieldモデルの応用については、野村総合研究所の赤松隆氏から貴重な知見を得た。以上記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 日本都市計画学会：都市計画マニアル，地域地区編
- 2) 今野浩，山下浩：非線形計画法，日科技連，1978. 3
- 3) 中野馨，飯沼一元他：入門と実習-エロジビ-，技術評論社，1989. 9
- 4) 清水英範，巖網林，中村英夫：知識ベースに基づく用途地域指定支援システム，土木学会論文報告集IV（投稿中）

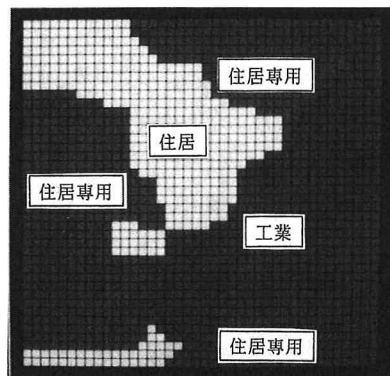


図1 単純割り当てによる用途地域配置

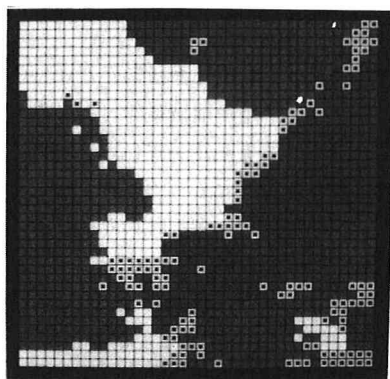


図2 総面積条件のみを考慮した用途地域配置

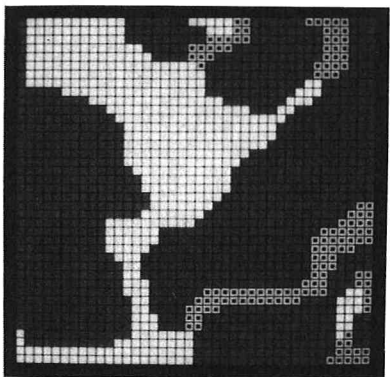


図3 隣接条件，連担性を考慮した用途地域配置