【土木計画学研究・論文集　No.16　1999年9月】

等式制約を緩和した施設配置モデルの大規模問題への適用
－宅地開発における公園配置－

Development of A Two-Dimensional Urban Facility Allocation Model under Relaxation of Equality Constraints　- Park Allocation in a New Town -

花岡伸也*，稲村　肇**
By Shingya HANAOKA and Hajime INAMURA

1．はじめに

従来，公園等の面的都市施設の配置問題は施設と利用者間の誘致圏域分割問題として設定され，モデルが開発されてきた[1]．実際に，住区基幹公園の配置計画ではシビルミニマムに基づいた誘致圏域分割の考え方が適用されており[2]，実用上大きな役割を果たしている．しかし，施設配置問題においては，各土地の持つ自然資源の有効活用という観点から，誘致圏の考え方に加えて土地利用間の土地分級比較の観点を含めて問題設定する必要があると考える．例えば宅地開発における公園配置を考えるとき，公園立地のための分級結果と宅地やその他施設（商業施設，教育施設）立地のための分級結果を比較した上で公園立地点を定めることは，自然資源活用のためには不可欠である．

以上の考え方のもと，宅地開発における公園配置計画を評価するため，各土地の分級結果の総和を最大化する公園配置問題を考える．この問題は，公園および各土地利用の分級値を求め，その結果に基づき宅地開発区域内の土地を公園あるいは他土地利用に割り当てる最適配置問題，つまり整数組合せ最適化問題として定式化される．整数組合せ最適化問題は規模の増加に対して指数的に計算量が増えるため，現実問題のような大規模問題を解くことが可能な数理計画的厳密解法は見つかっていない．そのため，近年の計算機性能向上による高速化に伴い，大規模な組合せ最適化問題に対して効率的な方法で短時間に近似解を求める近似解法が提案されてきた[3]．中でも，Hopfield型ニューラルネットワークモデル[4]（以下，Hopfieldモデル）は局所解探索能力に優れたモデルであり，類似したより多くの局所最適解（代替案）を提示することで，公園配置計画策定を行うプランナーの意志決定を効果的に支援できるモデルと言える．

そこで，本研究では近似解法の基本モデルとしてHopfieldモデルを採用する．しかし，Hopfieldモデルで大規模組合せ最適化問題を解く際，制約を完全に満たすために制約条件の重み係数を高めると精度の低い近似解に収束する[5]，あるいは実用的な時間内に制約条件を完全に満足するのは困難[6]という課題が指摘されてきた．この課題を解決するため，筆者らはゾーンに区分された空間に土地利用を配置する組合せ最適化問題に対して，ファジィ制約という形で等式制約を緩和する手法を開発し，小規模な数値実験を通してその有効性を確認している[7]．しかし，大規模問題に対するその手法の実用可能性の検討は行っていない．

以上より，本研究の目的は次とする．まず，誘致圏と土地分級の尊重という二つの概念に基づいた公園配置問題を組合せ最適化問題として定式化する．次に，小規模問題で有効性を示した緩和等式制約応用の近似解法を改良し，大規模問題における実用可能性を検討することによって，その有効性を検証する．

2．最適化問題としての公園配置計画目標の設定

本研究では問題を単純化するために新規の宅地開発を想定し，公園と宅地（商業施設，公共施設等の建造物立地を伴う土地利用の総称と位置づける）の二つの土地利用が，メッシュで区切られた空間に同時に配置されることを仮定する．このとき，公園配置計画に関わる主体者は，公園から存在効果や利用効果を享受する家計（宅地購入者）と，宅地や公園の開発費用を負担し，販売を行うディベロッパーの2つとなる．ここでは，主体者間の行動の理論的整合性を持たせるため，都市経済学の考え方を用いて最適化目標を設定する．すなわち，smallな開発地域におけるディベロッパーの利潤最大化行動と家計の競争による宅地の購入を仮定し，目標設定を行う．

まず，単一財として宅地を生産しているディベロッパーを想定し，ディベロッパーの利潤最適化行動を概念的に定式化する[8]．宅地を需要する家計の準線形型の効用関数，およびそのときの予算制約式は次のように定式化できる．

$$u = u(y) + x \tag{1}$$

$$s.t.\ \ py + x = M \tag{2}$$

ここで，uは家計の効用水準，yは単一財としての宅地，$u(y)$は宅地の消費による効用，xは合成財の消費，pは宅地の価格，Mは家計の所得である．

式(1)，式(2)より，所得Mを固定値として無視すると，家計の居住に関する消費者余剰$s(y)$は次式で与えられる．

$$s(y) = u(y) - py \tag{3}$$

Keywords　大規模組合せ最適化，施設配置問題
*正会員　情報博　（財）運輸政策研究機構　運輸政策研究所
105-0001　東京都港区虎ノ門3-18-19　虎ノ門ﾏﾘﾝﾋﾞﾙ
TEL 03-5470-8415　FAX 03-5470-8419
**F会員　工博　東北大学教授　大学院情報科学研究科

また，ディベロッパーの費用関数を$c(y)$とすると，ディベロッパーの利潤関数は式(4)となる．

$$\pi(y) = py - c(y) \tag{4}$$

式(3)，式(4)より，社会的厚生関数Wは式(5)となる．

$$W(y) = s(y) + \pi(y) = u(y) - c(y) \tag{5}$$

ここで，家計は競争により宅地購入すると仮定していることから，各家計は必ず付け値で宅地を購入する．この場合，家計の消費者余剰は生じないため，式(3)より効用関数$u(y)$はpyと等しい．つまり，ディベロッパーの利潤最大化は社会的厚生の最大化と等しくなる．

以上より，本研究における公園配置計画の最適化目標はディベロッパーの利潤最大化であり，かつ社会的厚生（社会的純便益）の最大化でもある式(5)とする．

3．土地分級の評価方法の提案

（1）土地分級による効用評価方法

（a）不動産鑑定評価の適用

本章では前章の問題設定に従い，効用$u(y)$，費用$c(y)$の土地分級による評価方法を提案する．まず，前章の仮定より効用関数$u(y)$は宅地購入による消費pyと等しいことから，効用の評価方法を定めるにあたって宅地価格の決定方法から考える．

一般に，宅地の販売価格はディベロッパーの販売戦略に基づき決定されるが，その基本評価値は不動産鑑定評価に基づいた地価と，そこに建築される建造物の価格で定まる．不動産鑑定評価は，例えば肥田野ら[9]によってヘドニックアプローチによる社会資本整備効果計測に用いられており，公園のような非市場財の評価が可能である．公園の便益評価は仮想的市場評価法（CVM）や旅行費用法を用いて計測されており[10),11)]，これら手法の有効性が示されている．しかし本研究では，宅地価格の中で地価が大きな比重を占めていること，および評価値設定の容易性を考慮し，不動産鑑定評価を効用の評価方法として採用する．

不動産鑑定評価において，公園は宅地に隣接した場合にのみ宅地価格の外部効果に反映される．シビルミニマムに基づいた配置においてはどの宅地もいずれかの公園の誘致距離圏内に含まれており，誘致距離圏内に住んでいる公園利用者の効用は均質で，差は生じないとしているのが理由である．

ただし，公園利用者である住民は公園までの移動距離抵抗を持っている．そのため，移動によって生じる不効用（移動費用）が公園利用によって得られる効用に対して大きくなる場合には，その公園を利用しなくなると考えられる．従って，誘致距離内の公園利用者の効用は均質と言う従来の考え方ではなく，移動費用の概念を持った誘致距離の考え方が必要であると言える．そこで，本研究ではある宅地に隣接している公園だけでなく，誘致距離圏内にある公園も外部効果として宅地価格に反映されるものとする．

表-1　法地条件別宅地価格の減価格差率[12)]

区分	法地の位置		法地の傾斜の状況	
	傾斜方位	格差率	水平面に対する傾斜角度	格差率
利用可能な法地	南	100%	15°未満	70-80%
	東	80%		
	西	70%		
	北	60%		
利用不可能な法地	南	100%	15°以上30°未満	50-60%
	東	80%		
	西	70%	30°以上	40-50%
	北	40%		

表-2　本研究で用いる自然資源要因別公園価格の格差率

項目	条件	格差率
眺望	優れる	3%
水系の有無	あり	3%
緑地の有無	緑被率50%以上	2%
	緑被率20%-50%	1%
南斜面勾配	勾配角度3°-5°	3%
	勾配角度5°-10°	2%
	勾配角度10°-15°	1%

（b）宅地価格の評価方法

不動産鑑定は不動産鑑定士の豊富な経験によって合理的な値が鑑定評価値として用いられている．ただし，原則的には土地価格比準表[12)]を基本として比準値が定められている．本研究では，自然資源条件の違いを比較した場合の価格評価を必要としている．ここで，自然資源による環境要因として，法地の項目は実際の宅地販売価格の減価要因として大きな影響を与えている．また，勾配方位および勾配傾斜角の程度によって格差率が定義されていることから，本研究では法地の格差率を宅地価格の評価指標として採用する．

土地価格比準表より，法地の格差率は平坦地を100%とした場合の減価格差率として表-1が与えられており，傾斜方位の格差率と傾斜状況の格差率を乗じて求められる．そこで，宅地価格の格差率を以下のように決定する．まず，隣接する8方位のメッシュとの中心標高差を比較し傾斜角を求める．その中で最も勾配の大きい方位をそのメッシュの傾斜方位と定め，その時の傾斜角度との関係からそのメッシュの法地条件による格差率を決定する．ただし，5°未満は平坦地とみなして100%とし，斜め方位の場合の傾斜方位格差率は中間の格差率を選択した．

（c）公園価格の評価方法

本研究では自然資源を有効活用した公園立地の必要性を唱えており，街区公園を始めとする小規模公園もその理念に基づいて配置されるべきと考える．しかし，公園内の自然資源要因別の格差率は土地価格比準表では得られない．そこで，日本不動産研究所・仙台支所にヒアリング調査を行い，公園内部資源となる自然資源属性に関する具体的な不動産鑑定調査結果を紹介して頂いた．

ヒアリング調査および鑑定調査資料より，本研究では分級要因として指標化可能な項目として，眺望の良好性，水系の有無，緑地（植生）の有無，土地勾配方位（南斜面のみ）の４項目を公園の自然資源要因として採用することとする．これら各項目の格差率を表-2にまとめる．また，各メッシュの総合的な格差率は４項目の格差率の総和として与える．

（２）土地分級による費用評価方法

（ａ）宅地費用の評価方法

自然資源の重要な属性の一つとして土地の形状があり，その違いが費用に表れる項目として，宅地や公園の造成費が挙げられる．そこで，本研究では宅地造成費および公園造成費を費用の評価要因として用いる．

宅地開発全体の造成費用は，切土（掘削押土，運搬）および盛土（締固め，敷均し）の土工量が大きな割合を占める．従って，これら費用を土地分級の評価指標とした．土工費用は，一般に開発地内で切盛土量が一致するように宅地の宅盤面をバランスよく設定した後，宅盤面に対する高低差分の土工量から求められる．本研究ではメッシュ単位の土地利用配置を考えていることから，メッシュ一辺単位のヒナ段を造成すると仮定した．この場合，ヒナ段単位で平坦面を造成することになり，隣接するメッシュ間の相対高度差を概ね傾斜角度とみなせる．よって，メッシュ間の相対高度差の比較により，メッシュ内部を平坦部にするための切盛土工量を定められる．この考え方に従い，法地条件による宅地価格の評価と同様，隣接する８方位のメッシュ中心標高間を比較しそれぞれの傾斜角を求め，その中で最も勾配の大きい方位との相対高度を，切盛土工量にかかる費用を代替的に示す指標として定義した．その上で，適用区域の最大相対高度を１と基準化した[0,1]の実数値を各メッシュの分級値として与えた．切土・盛土の積算費用単価は，住宅・都市整備公団発行の宅地開発における土木工事の積算要領[13]から決定した．

（ｂ）公園費用の評価方法

公園価格評価の際に自然資源要因として採用した４項目のうち，緑地と水系は公園に必要な自然資源として必要不可欠な要素と言える．そこで，緑地および水系の存在しないメッシュには費用を要すると仮定し，メッシュ当たりの植樹にかかる費用を公園造成費として用いることとした．具体的な値を設定するために仙台市役所へヒアリング調査を行ったところ，標準面積2500㎡の街区公園の植樹に関する費用として一般に10000[円/㎡]を申請することが明らかとなった．従って，宅地造成費との相対的な関係から，[0,1]の実数値を分級値として与えた．その値は緑地・水系のないメッシュに対して一律に与えることとし，緑地・水系どちらかがあるメッシュの公園造成費はかからないものとした．

４．等式制約を緩和した公園配置モデルの開発

（１）メッシュ座標空間における評価関数の定式化

（ａ）効用関数の定式化

２章において，公園配置問題の最適化目標を概念的に定式化した．ここでは，式(5)のように定式化した最適化目標を，0-1整数計画問題の目的関数として改めて定式化する．同時に，制約条件も定式化する．

まず，宅地yの代替変数として，行i（i=1,2,…,I），列j（j=1,2,…,J）のメッシュ座標と土地利用用途pの関係を意味する土地利用決定の２値変数X_{ij}^{p}（メッシュijの土地利用がpならば１，その他０）を導入する．また，土地利用pが１のとき宅地，２のとき公園とする．

ここで，各メッシュの公園と宅地に対する分級値を効用として評価するために，次のような仮定をおく．

①効用関数$u(y)$は，土地分級結果と移動費用の概念を有した誘致距離の２つの考え方によって定められる．

②宅地購入者は自宅周辺にある公園から享受する効用を完全に把握している．

③公園の利用行動を考えるとき，同規模の公園に着目すれば最寄りの公園を選択している場合が多いと考えられ，「同規模公園で比較した場合，最寄りの公園を選択している利用者が約70%を占めている」という調査結果も得られている[14]．よって，宅地購入者の公園選択行動として，自宅周辺にある複数の公園の中で最大効用を与える公園を択一的に利用する．

以上の仮定に基づいて効用関数を定式化する．

まず，移動費用の概念による誘致距離を意味するものとして，本研究では土地区画整理事業における路線価の接近係数の考え方を援用する．メッシュijの土地利用が宅地であり，単位メッシュ規模の公園の誘致距離をSメッシュとする．路線価の接近係数は宅地メッシュijとその誘致距離S圏内にあるメッシュmnとの関係式として，式(6)のような移動による効用逓減関数として定式化できる．ここで，Rは定位距離（効用が逓減せず，等レベルに保たれる距離限度）であり，Nは関数形を定める逓減特性（値が大きいほど距離逓減率が急）である．

$$SR_{ij}^{mn} = \left\{ \frac{S - \sqrt{(i-m)^2 + (j-n)^2}}{S - R} \right\}^{N} \tag{6}$$

式(6)を用いて効用関数の定式化を行うが，現実的な効用の評価を行うためには，公園の規模を考慮した定式化が必要である．しかし，本研究では簡単のため規模の相違による選択行動の変化に関しては考慮せず，公園の規模は一律に単位メッシュであり，それらすべての公園メッシュを比較対照とした上で仮定③に基づき択一的選択行動をとると仮定する．

宅地メッシュijの誘致距離S圏内にあるメッシュmnの土地利用vのいくつかが公園となっている場合，仮定①および②より最大効用は公園価格分級値PP_{mn}に接近係

数SR_{ij}^{mn}を乗じた値として表せる．ここで，仮定③より宅地メッシュijの誘致距離圏内の中で，最大効用を与える公園メッシュmnがその宅地メッシュに外部効果を与えることから，効用関数$U(X)$は式(7)のように定式化できる．ただし，メッシュijに隣接するメッシュmnに公園がない場合は宅地価格分級値RP_{ij}のみによって効用が定められる．δ_1^p，δ_2^vはクロネッカーのデルタである．

$$U(X)=\sum_{ij}\sum_{p}\{RP_{ij}(1+\max_{mn}SR_{ij}^{mn}PP_{mn}\delta_2^v X_{mn}^v)\}\delta_1^p X_{ij}^p \quad (7)$$

（b）費用関数の定式化

メッシュ別宅地費用分級値をRC_{ij}，同じく公園費用分級値をPC_{ij}とすると，費用関数は式(8)のように定式化できる．

$$C(X)=\sum_{ij}\sum_{p}(\delta_1^p RC_{ij}+\delta_2^p PC_{ij})X_{ij}^p \quad (8)$$

（c）土地利用面積制約条件の定式化

宅地と公園のそれぞれの面積比は上位計画によって外生的に与えられているものとし，これを制約条件とする．ここで，MA_{ij}はメッシュijの面積，TA_pは土地利用pの計画総面積である．

$$(\sum_{ij}MA_{ij}X_{ij}^p)/TA_p=1 \qquad \forall_p \quad (9)$$

（d）土地利用決定制約条件の定式化

本問題を0-1整数計画問題として定式化していることから，各メッシュには原則的に土地利用が一つ与えられるとする．この条件を式(10)のように定式化する．この物理的制約条件によって，ニューロンの0-1の状態を判断する．

$$\sum_{p}X_{ij}^p=1 \qquad \forall_{ij} \quad (10)$$

（2）Hopfieldモデルの公園配置問題への適用

Hopfieldモデルは，式(11)でニューロンの内部状態を変化させ，式(12)の入出力関数により出力状態を変更することによって状態変化を行う．状態変化は式(13)のエネルギー関数の値が減少する方向で行われ，エネルギーを局所的に最小化する．ここで，u_kはニューロンkの内部状態，V_kは出力値，V_lは入力値，w_{kl}はニューロンkl間の結合の重み，I_kは入力バイアス，θは入出力関数の温度パラメータである．

$$u_k=\sum_{l\neq k}w_{kl}V_l+I_k \quad (11)$$

$$V_k=(1/2)\{1+\tanh(u_k/\theta)\} \quad (12)$$

$$E(V)=-(1/2)\sum_{k,l}w_{kl}V_kV_l-\sum_{k}I_kV_l \quad (13)$$

公園最適配置モデルの評価関数をHopfieldモデルに適用するためには，式(13)のエネルギー関数として評価関数を表現する必要がある．すなわち，制約なし２次最適化問題へと変換する必要がある．代表的な変換法であるペナルティ関数法と拡張ラグランジェ乗数法の解の精度と計算時間を比較実験した研究[5]によると，ペナルティ関数法は厳密解と比較した相対誤差が乗数法と比べて大きい．しかし，計算時間に関しては，乗数法はペナルティ関数法に対して平均で約20倍近くかかることを示した．これより，解の精度を重視する場合は乗数法，計算時間の短縮を重視する場合はペナルティ関数法を用いることが望ましいとしている．

本研究の組合せ最適化問題は，式(7)の効用関数の定式化からわかるように誘致距離圏の計算が含まれている分，計算時間が膨大になる．つまり，誘致距離圏内にあるメッシュの累乗分計算量が増加する．累乗数の増加は計算時間の膨大化に直結しており，実用的モデルを開発する上で大きな障害となる．そこで，本研究では計算時間の短縮を重視し，ペナルティ関数法を用いて社会的純便益最適化関数$SS(X)$を式(14)のように定式化する．ここで，W_1，W_2はペナルティパラメータである．

$$\begin{aligned}SS(X)&=-(U(X)-C(X))+(constraint)^2\\&=-\sum_{ij}\sum_{p}\{RP_{ij}(1+\max_{mn}SR_{ij}^{mn}PP_{mn}\delta_2^v X_{mn}^v)\}\delta_1^p X_{ij}^p\\&\quad+\sum_{ij}\sum_{p}(\delta_1^p RC_{ij}+\delta_2^p PC_{ij})X_{ij}^p\\&\quad+W_1\sum_{p}\{1-(\sum_{ij}MA_{ij}X_{ij}^p)/TA_p\}^2\\&\quad+W_2\sum_{ij}\{1-\sum_{p}X_{ij}^p\}^2\end{aligned} \quad (14)$$

（3）温度パラメータの設定とシャープニング

式(12)の温度パラメータθは値が小さいほどニューロンが0-1の状態に近づき，大きいほど中間値の曖昧な状態に留まらせるという形でネットワークの安定性に影響を与える．しかし，その値を小さくしすぎると特定の局所解に常に落ち込み近似解の精度が悪化するという問題がある．そこで本研究では，適切な温度パラメータの設定方法として有効性が指摘されているシャープニング[15]を用いて温度パラメータを改訂する．シャープニングとは，最小化計算の初期段階で温度パラメータの値を大きく設定し，曖昧探索を行うことによって特定の局所解へ入り込みを避け，サイクルを繰り返すにつれて温度パラメータを小さくし，ネットワークを収束状態へと落ち着かせる手法である．

シャープニングの改訂スケジュールは様々な方法が考えられるが，本研究では常用対数による式(15)を用いる．これより，初期値となる定数項θ_0を定める必要がある．ここで，tは状態変化のサイクルを意味している．

$$\theta_t=\theta_0/\log(t+1) \quad (15)$$

（4）緩和等式制約の応用

（a）大規模問題における緩和等式制約の問題点

本研究では，筆者らの開発したファジィ制約[7]，すな

わち等式制約を緩和する手法を大規模問題に適用し，その実用可能性を検討することを目的としている．ただし，大規模問題にファジィ制約を応用する場合，小規模問題とは異なりネットワークの収束状態の判定を適切に行うことに注意を払う必要がある．その理由として，大規模問題では一つのニューロンに対する重みが低下することから，モデル終了の判定の際，制約を緩めることによってネットワークが収束状態に安定する前にモデルが終了する可能性が大きくなるからである．土地利用決定条件はニューロンの0-1を判定する制約条件であることから，ネットワークの収束状態に影響を与える．そこで，ファジィ制約を緩和等式制約として改めて定義し直し，制約条件毎にその応用方法を提案する．

（ｂ）土地利用面積条件の緩和等式制約の定式化

土地利用面積条件の制約条件の満足度は，式(16)のように定式化できる．

$$a = \sum_{p}\left\{\left(\sum_{ij} MA_{ij} X_{ij}^{p}\right)\Big/TA_{p}\right\}/P \tag{16}$$

土地利用面積条件については，従来モデルと同様，式(16)を用いて1.0から離れるほど制約条件の満足度が逓減する三角型メンバーシップ関数を式(17)のように定式化する．ここで，a_1，a_2はメンバーシップ関数の領域パラメータであり，制約条件の許容範囲を決定するパラメータを意味している．本研究では，aとそれに対応するメンバーシップ値$MF(a)$が同値となるように，a_1=0.0，a_2=2.0として設定する．

$$MF(a) = \begin{cases} 1 - \dfrac{2|a-1.0|}{a_2 - a_1} & a_1 \le a \le a_2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{17}$$

（ｃ）土地利用決定条件の緩和等式制約の定式化

Hopfieldモデルの各ニューロンは，式(12)の入出力関数によりしきい値処理を用いて0-1を決定する．ここで，大規模問題においてすべてのニューロンを0-1に近い値に収束させるためには，計算スケジュールの長期化，あるいは温度パラメータを非常に小さくすることによる近似解の精度の悪化という犠牲を払う必要がある．また，式(7)の効用関数は，宅地とその誘致距離圏内にある公園の２つのニューロンの土地利用用途の関係によって値を定める関数であるため，計算過程中，あるニューロンが宅地であるか公園であるかを判定するためのしきい値処理を必要とする．

そこで，本研究では，[0,1]の連続値を0-1の２値状態に判定するしきい値に関して，計算過程中に土地利用を判定するしきい値と，十分ニューロンが発火し収束状態にあると判定するしきい値の２段階のしきい値を用いて，これを土地利用決定条件の緩和等式制約とする．

土地利用を判定するしきい値処理には次式を用いる．

$$X_{ij}^{p} = \begin{cases} 1 & X_{ij}^{p} \ge 0.60 \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{18}$$

中間値である0.50でなく0.60をしきい値としたのは，0.50の場合各メッシュの宅地と公園の両ニューロンが0.50となる可能性があるからである．あるメッシュijに対してどちらかの土地利用pが0.60以上であれば，その土地利用に判定されるとほぼみなすことができる．

次に，ニューロンが収束状態にあると判定するしきい値処理として次式を用いる．

$$X_{ij}^{p} = \begin{cases} 1 & X_{ij}^{p} \ge 0.95 \\ 0 & X_{ij}^{p} \le 0.05 \end{cases} \tag{19}$$

各ニューロンが式(19)を満たしたときニューロンは十分発火しており，すべてのニューロンがこの状態にある場合ネットワークは完全に収束状態にあると言える．

以上より，式(18)によって各メッシュの土地利用を判定し，式(19)によってネットワークの収束状態を定めることとする．これにより，大規模問題における計算時間の長期化や近似解の精度の悪化という問題点を克服できると考えられる．また，２段階のしきい値処理によって，「このメッシュにはある土地利用が比較的適している」という土地利用決定の柔軟性も表現することができる．

（ｄ）モデル終了判定条件の設定

土地利用決定条件の緩和等式制約は従来のファジィ制約と異なることから，本研究ではモデル終了条件となる制約条件の満足度の判定は制約条件毎に行うこととする．つまり，100分率で示した制約条件満足度パラメータをTとすると，式(20)および式(21)（式(19)によって0-1を判定した場合）を満たしたとき，かつすべてのニューロンが式(18)を満たしたときをモデル終了と判定する．

$$MF(a) \ge T \tag{20}$$

$$\sum_{ij}\sum_{p} X_{ij}^{p}/(I \times J) \ge T \tag{21}$$

５．大規模問題における実用可能性の実験

（１）実験の概要

（ａ）実験の手順

大規模問題に対する実験は以下の手順で行う．

STEP1）面積制約がない場合，そこで求めた局所最適解は式(14)より十分近似最適解とみなすことができる．そこで，最初に面積制約条件がない場合の近似最適解を探索し，そのときの公園と宅地の土地利用配分比を求める．

STEP2）次に，STEP1で求めた最良の近似最適解のときの土地利用決定条件のペナルティパラメータおよび温度パラメータの設定値を固定する．その上で，面積制約条件のペナルティパラメータを変化させて，制約条件満足度パラメータTの設定値および近似最適解との

相対誤差を相互に比較する感度分析を行う．これより，緩和等式制約の実用可能性を検討する．

STEP3）最後に，制約条件満足度パラメータTの条件を固定し，そのときの配置結果を出力する．そして，配置結果の類似性について比較考察する．

（b）実験適用地区の現況と適用条件の設定

本研究では，仙台市郊外の芋沢地区周辺を大規模問題実験の適用地とする．緑が豊かで起伏の激しい地区であり，地区内には小さな沼，小川がある．また平坦部は水田として利用されている．

モデルに必要な条件を以下のように与える．

1) 適用地域の総面積は225haであり，1メッシュの面積は街区公園の標準面積である0.25ha（50m×50m）とする．従って，30×30の900メッシュが全適用範囲となる．
2) 土地利用面積制約条件として，宅地は675メッシュ（75%），公園は225メッシュ（25%）を与える．
3) 式(6)の効用低減関数において，誘致距離Sは街区公園の誘致距離である5メッシュ(250m)，定位距離Rは1メッシュ(50m)とする．また，逓減特性Nは一般的な非線形距離逓減形である2を用いる．
4) メッシュ当たり宅地価格単価は仙台市芋沢地区近辺の公示地価から求め，82.5百万円/meshとした．またメッシュ当たり宅地費用単価は積算要領より31.9百万円/meshとした．

（2）面積制約条件なしの場合の近似最適解の探索

（a）実験方法

制約条件のペナルティパラメータと温度パラメータは，その設定値によってHopfieldモデルの近似解の精度，収束性（制約条件の満足率）および計算時間に影響を与える．これらパラメータの設定値と各要因の関係について表-3にまとめる．これより，ペナルティパラメータに関しては近似解の精度と制約条件の満足率が，温度パラメータに関しては近似解の精度と計算時間がそれぞれトレードオフの関係にあることがわかる．よって，各項目を適度に満足するパラメータを設定する必要がある．

この実験の目的は面積制約がない場合の最良の近似最適解を求めることにある．そこで，できる限り精度の良い近似解を得るために，土地利用決定条件のペナルティパラメータは小さく，温度パラメータの定数項は大きく設定したときの最も精度の良い近似解を探索する．Hopfieldモデルは計算過程中のニューロン状態変化の順序の違いによって計算結果が異なることから，実験は一様乱数を用いたニューロン状態変化順序別に100回シミュレーションを行い，その平均値を比較することによって行う．モデル収束の判定は，収束状態の判定のしきい値条件である式(19)を，全てのニューロンが満たしたときとする．

表-3　Hopfieldモデルのパラメータ設定値の影響

	ペナルティパラメータ		温度パラメータ	
	大	小	大	小
近似解精度	悪	良	良	悪
制約条件満足率	良	悪	−	−
計算時間	−	−	長	短

表-4　ペナルティパラメータと温度パラメータの関係
1段目：便益[百万円]，2段目：収束までのサイクル数
3段目：宅地メッシュ数，4段目：公園メッシュ数

ペナルティ / 温度		4	5	6	7	8
2.5	benefit	42,808				
	cycle	14.3				
	resident	777.9				
	park	122.1				
5	benefit	43,954	43,559			
	cycle	20.5	18.5			
	resident	814.6	800.0			
	park	85.4	100.0			
7.5	benefit	43,933	**43,975**	43,758	43,353	
	cycle	36.2	24.4	21.0	19.2	
	resident	808.7	814.2	807.1	794.0	
	park	91.3	85.8	92.9	106.0	
10	benefit	43,817	43,907	43,970	43,850	43,578
	cycle	116.3	40.1	27.1	24.1	21.2
	resident	802.3	807.5	812.8	810.7	800.9
	park	97.7	92.5	87.2	89.3	99.1
12.5	benefit		43,818	43,921	43,961	43,897
	cycle		98.3	42.6	29.8	27.2
	resident		802.4	808.1	811.9	812.1
	park		97.6	91.9	88.1	87.9
15	benefit			43,814	43,912	43,945
	cycle			88.9	44.3	32.3
	resident			802.2	807.7	810.8
	park			97.8	92.3	89.2
17.5	benefit					43,907
	cycle					46.2
	resident					807.5
	park					92.5

（b）実験結果

土地利用決定条件のペナルティパラメータが小さ過ぎるとニューロンが0-1に収束しないことから，最低値としてW_2=4を設定し，パラメータセットを順次変更して実験を行った結果，表-4を得た．

この結果より，W_2=5，θ_0=7.5のとき最良の近似解を得られたことがわかった．また，最良近似解の時の土地利用配分量として宅地90.5%，公園9.5%を得た．他のパラメータセットと比較すると，宅地の面積割合がより高いときに良い近似解が得られていることがわかるが，宅地の外部効果として公園を評価していることを考えるとこの配分が公園と宅地の均衡状態であると考えられる．

また，温度パラメータの値が大きくなるにつれて，収束までのサイクル数は明らかに長くなっているが，近似解である便益は必ずしも良くならず，ペナルティパラメータ設定値の大きさと比例した均衡点が温度パラメータ設定値毎に必ず存在している．この原因として，シャープニングによる曖昧初期探索の効果に限界があることを示していると考えられる．

（3）緩和等式制約の実用可能性の検討

（a）実験方法

ここでは，本研究の主目的である緩和等式制約の実用

表-5　面積制約緩和条件と相対誤差の関係

	面積制約なし	収束条件満足度				
		T=0.900	T=0.925	T=0.950	T=0.975	T=1.00
便益平均値	43,975	41,935	41,500	39,797	38,929	35,981
相対誤差	**0.0%**	**4.6%**	**5.6%**	**9.5%**	**11.5%**	**18.2%**
収束サイクル数	24.4	23.8	27.8	42.2	19.8	10.8
パラメータ設定値	0	2,500	5,000	130,000	250,000	1,300,000

可能性の検討を行う．具体的には，まず面積制約なしの実験で求めた最良のパラメータセットの近似解を本研究の分級結果に基づく近似最適解とみなし，面積制約条件のペナルティパラメータの設定値を変化させることによって，制約条件満足度パラメータTの設定値および近似最適解との相対誤差を相互に比較する感度分析を行う．

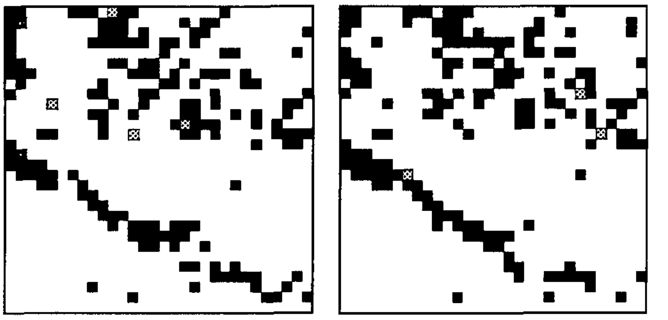
その方法として，まず制約条件度満足度パラメータの値を0.900から1.000まで５段階で区分し，その満足度を満たすための面積制約のペナルティパラメータを決定する．満足度を満たしたかどうかの判断方法として，ニューロンの状態変化順序別の100回の計算のうち，90%以上が目標の満足度を満たしたペナルティパラメータの値を設定値とする．そのときの近似解の平均値を面積制約なしの実験で求めた近似最適解と比較し，その相対誤差と面積制約の緩和レベルを比較して，緩和等式制約の有効性を実証する．

（ｂ）実験結果

表-5に感度分析の実験結果を示す．この結果はあらかじめ設定した土地利用面積条件（宅地75%，公園25%）の設定値の影響から，宅地を減らし，公園を相対的に増やすという制限がかかることにより，緩和条件を厳しくするにつれて近似解の精度が下がっていることを示している．しかし，逆に緩和条件を徐々に緩めるに従って飛躍的に解の相対誤差が低下しており，新たに定めた緩和等式制約の有効性が示されたと言える．

この結果は面積制約条件の設定値に依存していると言えるが，ディベロッパーの利潤最大化と社会的純便益最大化の両問題が一致している本問題において，宅地90.5%，公園9.5%という最適配分量はディベロッパーの立場から考えると現実問題として妥当な値と言え，それと比較して制約条件として設定した宅地75%，公園25%は宅地開発における公園計画面積として一般的に使われている値である．従って，実用的な観点から言って，この実験結果は妥当であると言える．

次に，もう一つの問題である計算時間について考察する．本研究では，大型計算機の並列サーバ（Exemplar Xクラス）でシミュレーションしたところ，１サイクルで約4.5秒，30サイクルで約2分15秒と言う計算時間となり，ペナルティ関数法を用いることによって十分実用的な時間内で収束解を得られることがわかった．ただし，当初SUNワークステーション（CPU:UltraSPARC-Ⅱ,clock 296MHz）で計算を実行していたが，誘致距離の計算に膨大な計算時間を要し，１サイクルで約3分，30サイクルで約90分かかっていた．これより，ペナルティ関数法を用いた場合でも，並列計算機を用いない限り実用的な時間内に収束解を得るのは困難であると言える．



(1) SS=42115 , t=23　R=739 , P=161　　(2) SS=42096 , t=24　R=739 , P=161

1 宅地 $X_{ij}^p \ge 0.95$　　3 公園 $0.60 \le X_{ij}^p < 0.95$
2 宅地 $0.60 \le X_{ij}^p < 0.95$　　4 公園 $X_{ij}^p \ge 0.95$

図-1　収束解上位２つの配置結果

（４）配置結果の考察

ここでは，T=0.900のときの配置結果を例に配置結果の類似性を比較し，解の安定性について検討する．

100回の状態変化順序別計算のうち，収束解上位２つの配置結果を図-1に示す．この図は上が真北方向を示している．ここで，土地利用決定条件の２段階しきい値の設定により，数は少ないがいくつかのメッシュにおいて土地利用決定の柔軟性が表現できていることがわかる（土地利用２の場合）．特に，公園メッシュがある程度まとまった地域の境界線上において土地利用決定の曖昧さが表れており，２段階しきい値として緩和等式制約を応用した有効性が示されていると言える．

これら２つの配置結果の共通点は，法地が急で崖部となっている西から南にかけて連続的な部分が公園となっている点と，その崖部を挟んだ平坦地がほとんど宅地となっている点である．その他，中央から北部にかけて公園が散在しているが，配置案の共通点としてはっきりとしたものではない．プランナーが配置代替案を相互に比較するとき，類似した数多くの代替案を提示するのはプランナーの意志決定支援という点で重要であるが，各代替案の類似度の安定性が求められる．

そこで，両配置案の類似性を評価するために，次のような方法で各メッシュの土地利用の非適合数を比較した．その方法とは，比較したい２つの配置案について１案と２案の土地利用の相違を見て，１案が宅地，２案が公園である相違（相違Ａ），１案が公園，２案が宅地である相違（相違Ｂ）の２つに分けて類似性を評価するものである．この方法を用いて類似性を評価した結果，相違Ａのメッシュ総数は45，相違Ｂのメッシュ総数は43となった．両者の合計は88メッシュであり，総メッシュ数の約１割が異なるという結果を得た．解の安定性という点では，１割の相違は大きな問題ではないと言えるが，この方法は類似性評価の方法として十分ではない．ただし，

相違Aと相違Bを区別することによって，両者の関係から空間的自己相関を評価する手法を応用できると考えられる．

6．結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる．

1．公園を例に，誘致圏の概念と土地分級の尊重という概念に基づいた施設配置問題を組合せ最適化問題として定式化できた．
2．Hopfieldモデルに緩和等式制約を応用する手法を改良したモデルを開発し，大規模問題におけるモデルの実用可能性を実験した結果，従来指摘されていた問題を解決できた．これにより本モデルの有効性を実証できた．
3．実用性に基づいた宅地と公園のための土地分級評価方法を提案できた．

また今後の課題として，空間的自己相関を評価する手法を用いて配置結果の類似性を評価し，施設配置モデルとしての実用性をより高める必要がある．

謝辞　(株)オオバ阿部賢一様，(財)日本不動産研究所仙台支所二谷一雄所長，同戸張有様，仙台市浅野浩様，同熊谷純様には，資料の提供に快くご協力いただきました．深く感謝申し上げます．また，本手法に対して貴重なコメントを頂いた匿名の査読者の方々に感謝いたします．

参考文献

1）例えば，腰塚武志：公園等の面的施設配置の分析，都市計画学会論文集，No.19，pp.313-318，1984．
2）建設省都市局都市計画課監修：都市計画法令要覧平成7年版，ぎょうせい，pp.1352-1401，1995．
3）茨木俊秀：組合せ最適化の手法－巡回セールスマン問題の例から－，電気学会論文誌C，Vol.114，No.4，pp.411-419，1994．
4）J.J.Hopfield and D.W.Tank：Neural Computation of Decisions in Optimization Problems, *Biological Cybernetics*, Vol.52, pp.141-152, 1985.
5）大堀隆文，山根厚志，佐々木健一：2値モデルニューラルネットによる巡回セールスマン問題の一解法，電子情報通信学会論文誌D-II，Vol.J74，No.12，pp.1788-1793，1991．
6）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．
7）花岡伸也，稲村肇，清水英範：分級結果に基づく土地利用配置支援モデルの開発，土木学会論文集，No.591/IV-40，pp.1-10，1998．
8）井堀利宏：公共経済の理論，有斐閣，1996．
9）肥田野登，平本和弘：資産価値による中規模都市公園の整備効果の計測，都市計画学会論文集，No.21，pp.409-414，1986．
10）森杉壽芳，大野栄治，小池淳，武藤慎一：公園整備事業の便益評価―新しい非市場評価法の提案―，土木学会論文集，No.518/IV-28，pp.135-144，1995．
11）大野栄治，田苗創基，高木朗義：新しい旅行費用法を用いた公園整備事業の便益評価，土木計画学研究・論文集，No.13，pp.401-408，1996．
12）国土庁土地局地価調査課監修，地価調査研究会編著：土地価格比準表（六次改訂），住宅新報社，1992．
13）住宅・都市整備公団：土木工事積算要領平成10年度版，住宅・都市整備公団，1998．
14）天本徳浩，樗木武，辰巳浩，白泰炅：住民の公園利用行動に基づく都市公園配置の最適化モデルについて，都市計画学会論文集，No.27，pp.553-558，1992．
15）秋山泰，山下明良，梶浦正浩，安西祐一郎，相磯秀夫：ガウシアンマシンによる組合せ最適化，電子情報通信学会報告，MBE-88-183，pp.163-168，1989．

等式制約を緩和した施設配置モデルの大規模問題への適用　－宅地開発における公園配置－

花岡伸也，稲村　肇

本研究は公園のような都市施設の配置問題を組合せ最適化問題と位置づけ，等式制約を緩和した準最適化モデル（Hopfieldモデル）の，大規模問題に対する実用性を検証したものである．最適化問題として，土地分級結果の総和の最大化という観点から，宅地開発における公園と宅地の配置問題を誘致圏の概念を含めて定式化した．ただし大規模問題において，等式の面積制約条件はHopfieldモデルの収束性に悪影響を与える．その問題解決のため，緩和した等式制約をモデルに応用した．大規模問題での実験の結果，本モデルは精度の良い近似解を実用的な時間内に得ることを示し，その有効性を実証できた．

Development of a Two-Dimensional Urban Facility Allocation Model Under Relaxation of Equality Constraints - Park Allocation in a New Town -

Shingya HANAOKA and Hajime INAMURA

Allocation plan of urban facilities such as parks must be considered as a combinatorial optimization problem of various facilities, since their location should depend on the viewpoint of land suitability evaluation. However, it is difficult to solve large-scale combinatorial optimization problems even by using an approximate algorithm. This paper formulated a two-dimensional allocation problem of parks and residents as functions included in the service distance concept as well as land suitability evaluation. A model based on Hopfield Neural Network was developed to be an approximate algorithm under relaxation of equality constraints. The case study verified that the model was valid because it model could solve the answers during practical time with precision.