

QOL指標を用いた撤退・再集結地区選定への 遺伝的アルゴリズムの適用 -旧上越市を対象として-

青野隆仁¹，長尾征洋²，戸川卓哉³，加藤博和³，佐野充²

¹非会員 株式会社 電通（〒105-7001 東京都港区東新橋1-8-1）

E-mail: blue26912@yahoo.co.jp

²非会員 名古屋大学 大学院環境学研究科（〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町B4-1(780)）

E-mail:nagao@urban.env.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学 大学院環境学研究科（〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町C1-2(651)）

E-mail:togawa@urban.env.nagoya-u.ac.jp

本研究では、都市の持続可能性を確保するためにコンパクト化を進める際の都市的利用中止（撤退）地区および再集結地区の選定を、QOL（Quality Of Life）指標最大化および市街地維持費用最小化を規範として行う方法論を基に、遺伝的アルゴリズムを用いて都市形態の最適化を行った。新潟県旧上越市に適用した結果、市街地維持費用最小化モデルの場合、地価が低く築年数が経過している住宅の多い地区が撤退し、鉄道駅周辺や商業施設の充実した幹線道路沿線へ集結する必要が示された。QOL最大化モデルの場合、郊外部のうち交通利便性が低い地区から撤退し、高い地区へ集結する必要が示された。また、QOLと市街地維持費用を同時に重視する中間モデルでは、先に市街地維持費用削減効果の大きい地区を移転させ、その後QOLの向上につながる移転の実施が最適であることが示された。

Key Words : compact city, genetic algorithm, quality adjusted life year, quality of life, retreat and re-concentration

1. はじめに

(1) 研究の背景

日本の都市では、高度経済成長期以降、人口増加やモータリゼーションの進行に伴い、市街地が拡大してきた。拡大した市街地の既設社会資本の多くは、21世紀前半に更新時期を迎え、自治体の財政を圧迫することが懸念される^{1,2)}。また、人口減少に伴って自治体の財政収入が漸減すると予測され、これに高齢化に伴う社会保障費の増加が加わると、社会資本の整備・維持のための財源確保が困難になり、都市の持続的発展は難しくなる。一方で住民の求める生活レベルは高度化かつ多様化しており、総人口減少下で地域の人口を維持していくために、自治体は住民の要求を満たし、QOL（Quality Of Life）を確保していかなければならない。その手段の一つとして、市街地の密度を高め、集約的な都市形態にすることでインフラや行政サービスの効率を高めると期待されるコンパクトシティ化があげられる³⁾。

(2) 研究の目的

本研究では都市域を小単位に分割し、都市域の集約に向けて、どの地区の利用を中止（撤退）し、どの地区の利用を促進（再集結）していくべきかを最適化計算の手法の一つである遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm : GA）を用いて決定する。それに基づいて、どのような都市形態が最適解として導出されるかを検討することを目的とする。

撤退・再集結地区の選定は、市街地維持費用やQOLの変化に着目し、財政的な効用を生み出せるような撤退・再集結地区を選定する。地区の選定にあたっては組み合わせの総数だけ解の候補があり、その数は地区数に依存するが、小地区単位で分析を行うため、組み合わせ総数は膨大となり、総当たり評価では有限時間内で解を導出できる保証はない。そのため、計算時間が大幅に削減でき、かつ精度の高い最適解が得られるGAを用いる。本研究では以下の3つのモデルについて最適シナリオを導

出する。

- ① 市街地で住民が享受するQOLを基にした**QOL最大化モデル**
- ② 市街地維持費用の経年推移を考慮し、自治体の財政支出を抑える**市街地維持費用最小化モデル**
- ③ ①と②の**中間のモデル**

実際の都市を対象に最適化計算を行い、都市域の撤退・再集結による市街地維持費用の削減効果やQOLの変化、最適な都市形態に関して検討する。

2. 分析方法

(1) 遺伝的アルゴリズムによる最適化計算

都市域を詳細地区単位で評価するために、4次メッシュ（500m×500m）に分割する。都市域は地図上では緯度・経度で表される2次元表記になっているが、GAに用いるためにメッシュ単位で表記された2次元配列から遺伝子配列を模した1次元配列に変換する（コーディング）。これを1個体とする。GAの手法に基づき、複数個体を評価し、最も評価値の高い個体を解候補とする。再び2次元配列に変換し、都市形態を再現する（デコーディング）。

今回適用対象とする新潟県の旧上越市（2005年1月1日に周辺13町村を編入する以前を指す）における撤退・再集結地区の候補メッシュ数は244であり、1メッシュにつき3パターンがある（詳細は(3)で説明する）。その組み合わせによって 3^{244} 通りの解候補がある。 3^{244} 通りを逐次評価するには膨大な計算時間が必要になる。したがって、演算時間が比較的少なく、交叉や突然変異といった処理によって局所解への没入を避けられるGAは、今回の最適化計算に適している。

(2) 最適化計算で用いる各種データ

a) 生活環境質（QOL）指標の定義

本研究では、加知ら⁴⁾の定義に従い、市街地内各地区における居住者のQOLがa)社会資本や公共・民間施設の充実度、眺望や景観の良好度、災害発生可能性といった居住地区から得られる環境の物理量と、b)そこに居住する個人の主観的な価値観によって決定されると考える。a)については、交通利便性（Accessibility：AC）、居住快適性（Amenity：AM）、災害安全性（Safety & Security：SS）の3つの要素からなる「生活環境質向上機会（Life Prospects：LPs）」を定義し用いる。このLPsにb)の居住者の価値観を表す重みを乗じたものをQOL指標として定義し、式(1)のように定式化する。

$$QOL_{pi} = \sum_{j=1}^4 w_{ACp} AC_{ij} + \sum_{j=1}^4 w_{AMP} AM_{ij} + \sum_{j=1}^4 w_{SSp} SS_{ij} \quad (1)$$

ここで、 QOL_{pi} ：性別・年代別グループ p の地区 i でのQOL、 $w_{ACp} w_{AMP} w_{SSp}$ ：性別・年代別グループ p のLPsの各評価要素に対する価値観（重み）、 j ：LPsの評価要素の番号。

QOL指標の尺度は一般に主観量が用いられることが多いが、絶対値の解釈や、他の物理的・社会経済的指標と関連付けは困難である。そこで加知らは余命指標の1つである「生活の質により調整された生存年数（Quality Adjusted Life Year：QALY）」^{5,6)}を式(2)のように定式化し、QOL尺度として用いる。

$$QALY_p = \int_a^{a+T} W_p^{QOL}(t) C t \exp(-\beta t) \times \exp\{-r(t-a)\} dt \quad (2)$$

ここで、 $QALY_p$ ：個人 p のQALY、 a ：調査開始年、 T ：期待余命、 $W_p^{QOL}(t)$ ：個人 p が t 年の居住から得られるQOLのレベルによる重み、 $C \exp(-\beta t)$ ：1年間の生存から感じるQOLの年齢 (t) に応じた補正係数、 $\exp\{-r(t-a)\}$ ：時間割引率、 C, β, r ：パラメータ。

式(2)において年齢間の重みと時間割引率をそれぞれ1、また $dt=1$ と仮定して離散型で書くことにより、式(3)を導出できる。

$$\begin{aligned} QALY_p &= \sum_{t=1}^T W_p^{QOL}(t) \\ &= \underbrace{1 + \dots + 1}_T + \{W_p^{QOL}(1) - 1\} + \dots + \{W_p^{QOL}(T) - 1\} \\ &= \underbrace{T}_{\text{Life Expectancy}} + \underbrace{\sum_{t=1}^T \{W_p^{QOL}(t) - 1\}}_{\text{Gain of Life Expectancy}} \\ &= LE_p + GLE_p \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 LE_p ：個人 p の期待余命、 GLE_p ：個人 p の獲得余命。

本研究では式(3)の獲得余命（Gain of Life Expectancy：GLE）を用いてQOLを評価する。GLEには余命の獲得だけでなく、QOLの低下による余命の損失も含まれる。

b) 市街地維持費用の算出

市街地維持費用については、加知ら⁷⁾や鈴木ら⁸⁾の研究を参考に道路・水道・ガス・公共下水道・農業集落排水・合併処理槽・小学校・公園を対象として推計を行う。 t 年、地区 i のインフラ維持費 $cost_{it}$ を式(4)によって表す。

$$Cost_{it} = \sum_Y \sum_a f_{Ya} \cdot P_{Y,a}(t) \quad (4)$$

ここで、 f_{Ya} ：経過年数 a の都市施設 Y における単位量当たり

にかかる費用、 P_{Yat} ： t 年における経過年数 a の都市施設 Y の存在量。

(3) 実際の都市における最適化計算

a) 旧上越市における最適化計算

本研究の対象都市である旧上越市（図 1）は 1971 年に旧高田市と旧直江津市が合併して成立したため、古くからの中心市街地が 2 つ存在する。また、そのほぼ中間の春日山地区に市役所が立地し、その周辺に市街地ができた近年では郊外部にも市街地が広がりつつある。また、豪雪地帯であるため、除雪やインフラ維持に多額の費用がかかる。少子化、高齢化も都市部や山間部を中心に進んでおり、日本の地方都市が抱える問題の代表例であるといえる。

対象となる旧上越市に属するメッシュから、居住人口が 1 人以上の居住メッシュを抽出する。これに国土交通省国土計画局が提供する土地利用細分メッシュを反映させ、居住メッシュにおいて 8 割以上の土地が農地あるいは林地として利用されているメッシュは、撤退・再集結地区の候補から除外する。これは、居住と仕事が近接する地区では、撤退・再集結を行うのは適切ではないと判断したためである。また、寺院が集中している高田駅西側の地区も撤退・再集結地区の候補から除外する。

以上より、撤退・再集結地区候補として、GA で扱う 244 メッシュを抽出した。1 個体の遺伝子配列の長さを 244 とし、1 メッシュに 1 遺伝子を対応させる。1 個体の遺伝子配列は、撤退・再集結の様子を表している。遺伝子には 0, 1, 2 の 3 パターンのいずれかが入り、0 が入る地区は“現状維持”，1 が入る地区は“撤退地区”，2 が入る地区は“再集結地区”に選定すると定義する。各個体の遺伝子配列に従い個体の評価値を算出し、この評価値が高くなるように遺伝子配列を組み替える。

シミュレーションの対象期間は 45 年間（2005～2049 年）とし、5 年を 1 期としてその期での評価値を算出し、最適な遺伝子配列を求める。なお、各期における GA のの開始時は、前の期の最適解として求められた人口分布

を基にする。

再集結地区の選定においては人口容量（受け入れ可能人口）の設定が必要である。本研究では、式(5)に基づき地区ごとの受け入れ可能人口を設定する。これは、既存のインフラ設備範囲内で各地区の法定容積率までは住民が転入可能であるとするものである。式(5)の計算値まで受け入れることによって、既存のインフラストックを最大限活用できることを意味しており、再集結に伴って新たなインフラ整備を必要としないモデルである。

$$CAP_i = (FAR_{li} - FAR_{ri}) \times \frac{POP_i}{FAR_{ri}} \quad (5)$$

ここで、 CAP_i ：メッシュ i の人口容量、 FAR_{li} ：メッシュ i の法定容積率、 FAR_{ri} ：メッシュ i の実質容積率、 POP_i ：メッシュ i の人口。

b) 撤退・再集結に要する費用

撤退・再集結実施に必要な費用を式(6)，(7)のように定義する。

$$COST_T_i = cost_{bi} + cost_{li} + cost_{hi} \quad (6)$$

$$COST_S_i = \begin{cases} 0 & \text{人口容量以内の再集結の場合} \\ cost_{ni} & \text{人口容量以上の再集結の場合} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $COST_T_i$ ：メッシュ i の撤退にかかる費用、 $cost_{bi}$ ：メッシュ i の建物取り壊し費、 $cost_{li}$ ：メッシュ i の住宅地買収費、 $cost_{hi}$ ：メッシュ i の住宅補償費、 $COST_S_i$ ：メッシュ i に再集結するのにかかる費用、 $cost_{ni}$ ：新たにメッシュ i に整備するインフラ整備費。

ただし、本研究の場合は現状の人口容量以内での再集結を行うようモデル化しているため、式(7)の $cost_{ni}$ については考慮しない。

また、建物補償費 $cost_{hi}$ は、新築住宅には満額、耐用年数（40 年と設定）以上の住宅には補償なしと設定する（図 2）。



図1 旧上越市の概形

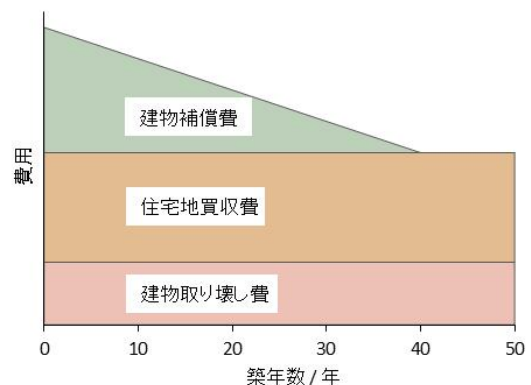


図2 住宅築年数と撤退費の考え方

c) 最適化計算における制約条件

式(8)は市内総人口に関する制約で、撤退地区の住民が必ずどこかに再集結することを示している。

$$POP_{rt} \leq POP_{rc} \quad (8)$$

ここで、 POP_{rt} ：遺伝子によって撤退地区に決定したメッシュの人口の総和、 POP_{rc} ：遺伝子によって再集結地区に決定したメッシュの受け入れ可能人口の総和。

撤退・再集結実施費用の原資は、施策により削減可能な市街地維持費用である。つまり、施策実施費用よりも削減できた市街地維持費用が小さい場合は、自治体は施策実施費用を回収することができず、撤退・再集結は行われるべきではないということになる。そこで、5年毎に上記の判定を行い、削減可能な市街地維持費用を施策実施費用が上回る場合は致死個体とする。また、前年までに撤退・再集結施策によって削減できた市街地維持費用の時間価値を考慮することとし、時間割引率を導入している。

3 結果と考察

(1) 各種指標の最適化計算結果

最適化計算の結果得られた総移転人口、QOL 指標および市街地維持費用を表 1 に示す。QOL 最大化モデルに比べ、市街地維持費用最小化モデルの方が多くの住民が移転しており、積極的に撤退・再集結施策を実施するモデルといえる。また、QOL を最大化すると市街地維持費用は増大し、市街地維持費用を最小化すると QOL が低下しており、この 2 つの指標はトレードオフの関係にあるといえる。

表 1 各種指標の最適化計算結果

	2005年	2049年			
		BAU	QOL最大化 モデル	市街地維持費 最小化モデル	中間 モデル
総移転人口 [人]	-	0	681	4350	2217
QOL [year/人]	1.15	1.17	1.19	1.09	1.15
市街地維持費用 [億円]	72	240	240	215.6	228.8

(2) 最適化による都市形態の変化

a) QOL 最大化モデル

図 3 に QOL 最大化モデルで選定された撤退地区・再集結地区・撤退後再集結地区を示す。再集結地区は 4 である。撤退地区とされた 9 地区のうち、後に 6 地区が再集結地区となるため、純粋な撤退地区は 3 である。撤退後再集結地区になる地区は、QOL は高いが住民数が少ないため、地区単位で得られる QOL が低くなっている。そのため本計算では、これらの地区を一度撤退させ、より QOL の高い地区へ移転し、後にこの地区へ以前の住

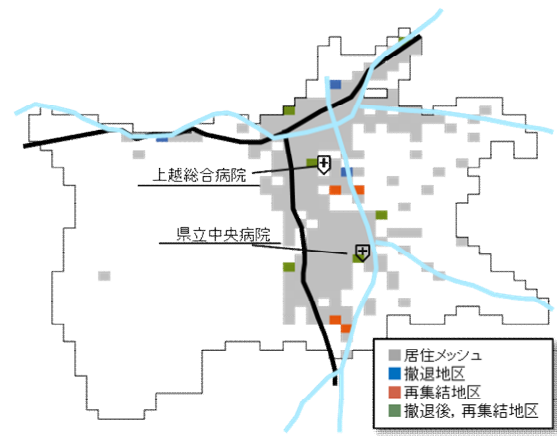


図 3 QOL 最大化モデルの撤退・再集結の様子 (2045～2049年)

民数を上回る住民を移転させることにより、最終的に高い QOL が得られるという形になっている。

QOL（獲得余命）は居住地区平均が 1.46 年/人、撤退地区平均が 0.51 年/人、再集結地区平均は 2.03 年/人となっている。撤退地区から再集結地区へ移転することによって得られる QOL（獲得余命）は「教育・文化施設利便性」で+0.38 年/人、「健康・医療施設利便性」で+0.44 年/人、「人口当たり緑地面積」で+0.61 年/人と他の要素に比べると高い値を示す。

図 3 からわかるように、再集結地区は郊外部の緑地の豊富な地区や、新潟県立中央病院、上越総合病院が立地している地区である。これらの地区に移転することで住民の QOL が向上している。

b) 市街地維持費用最小化モデル

図 4 に市街地維持費用最小化モデルで選定された撤退地区・再集結地区を示す。撤退地区 27、再集結地区 13 となり、居住メッシュ数のうち約 11%にあたる地区が撤退したことになる。

実現された都市形態について考察すると、郊外部から中心市街地への移転が起きている。再集結地区は鉄道沿線の中心市街地が多く、郊外部の場合でも国道沿いである。QOL 最大化モデルと比較して、都心への再集結が多く見られることが違いとして挙げられる。中心市街地はインフラストックが豊富である。市街地維持費用最小化モデルで再集結地区に選ばれたこれらの地区は 1 地区当たり約 400 世帯を受け入れることができる。人口容量が多い上に、既存インフラの人口当たり維持費用が低いため、再集結地区として適している。

撤退費用は式(6)に示すように、撤退地区の建物取り壊し費と住宅地買収費、住宅補償費で構成されており、住宅補償費は築年数が耐用年数を超えていれば負担せず済むが、土地買収費と取り壊し費は必ず負担しなければならない。地価が安ければ土地買収費が安く抑えられ、

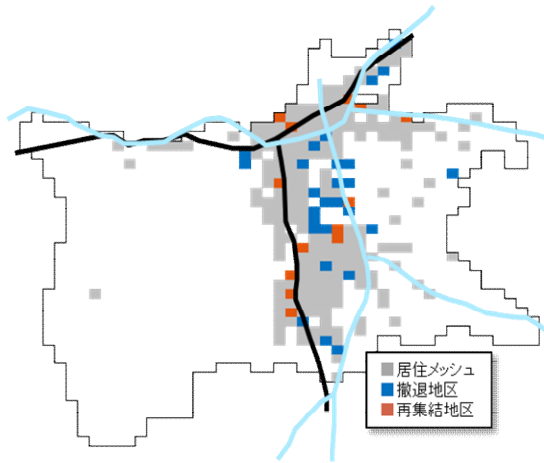


図4 市街地維持費用最小化モデルの撤退・再集結の様子（2045～2049年）

住民数が少なければ住宅数も少なくなるため住宅補償費も抑制できる。したがって市街地維持費用最小化モデルでは、地価が安く住民数が少ない地区が撤退地区に選ばれている。

c) 中間モデル

図5に中間モデルで選定された撤退地区・再集結地区・撤退後再集結地区を示す。撤退地区20のうち、後に再集結地区となる地区が3あるため、純粋な撤退した地区は17である。市街地維持費用最小化モデルより少ないが、全居住メッシュ数の約7%が撤退している。再集結地区は8地区となっている。

実現された都市形態について考察すると、郊外部から中心市街地もしくは郊外部への移転が起きている。再集結地区は市街地維持費用最小化モデルほど顕著ではないものの、鉄道沿線の中心市街地の近く（高田～春日山間や春日山～直江津間）と郊外部の主要な国道沿いに集中している。QOLは居住メッシュ平均が1.46年/人、撤退地区平均が1.80年/人、再集結地区平均は1.91年/人となっている。QOL最大化モデルと違い、中間モデルでは

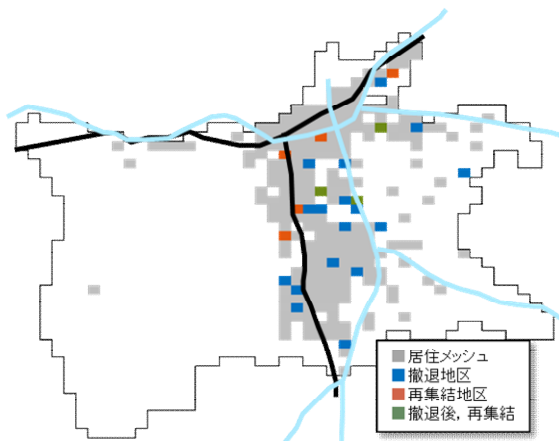


図5 中間モデルの撤退・再集結の様子（2045～2049年）

撤退地区から再集結地区へ移転することで得られる獲得余命には顕著な差が見られなかったが、再集結地区の「教育・文化施設利便性」や「健康・医療施設利便性」は高い値を示しており、これはQOL最大化モデルと共通している。人口当たりの市街地維持費用が高く、移転によるQOLの低下が少ない地区の住民が撤退することで早期に市街地維持費用を削減し、その後に獲得余命が上昇するような移転を行うシナリオが導き出されたといえる。

4 結論

本研究では新潟県旧上越市を対象に、市街地維持費用、QOL、住民数等のデータを4次メッシュ単位で整備し、コンパクト化を進める際の具体的な撤退地区と再集結地区を、①住民目線のQOL最大化モデル、②自治体目線の市街地維持費用最小化モデル、③住民と自治体の両者の目線を合わせた中間モデル、のそれぞれについて、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化計算することによって選定した。そして各モデルのシミュレーション結果から各モデルの特徴と都市形態について考察した。

その結果、住民のQOLを向上させるには郊外部から郊外部へ移転、特に大型病院のある地区や緑地の豊富な地区へ移転させることが好ましいことが分かった。また自治体の財政負担を少なくするには、人口当たりの市街地維持費用が高い郊外部からインフラストックの豊富な中心市街地へ移転させることが好ましいことが分かった。さらに、住民のQOLを高めつつ自治体の財政負担を少なくするためには、はじめに市街地維持費用が高い地区から撤退し、一定の削減効果を得た後に、住民のQOLが増加するような移転を行うことが望ましいことが分かった。

実際に撤退・再集結施策を実施する場合は、住民のQOLと自治体の財政負担の両方が考慮される必要がある。本研究において、シナリオによる移転人数や都市形態の違いを比較議論できたことから、本研究の手法が有用であるといえる。また、最適化計算により、撤退・再集結地区を選定できたことから、今後都市域のコンパクト化において、そのロードマップを示す手掛かりになると期待される。

参考文献

- 1) 東京都政策報道室：東京都が管理する社会資本の維持更新需要額の推計-2001～2030年度、道路、橋梁、上水道、下水道、地下鉄、住宅を中心に、1998。
- 2) 福田貴之、加藤博和、林良嗣：地方中小都市における都市域拡大が将来の自治体財政に与える影響の分析、第58回土木学会年次講演会講演集、CD-ROM、2003。

- 3) 海道清信：コンパクトシティー持続可能な社会の都市像を求めて，学芸出版社，2001.
- 4) 加知範康，加藤博和，林良嗣，森杉雅史：余命指標を用いた生活環境質（QOL）評価と市街地拡大抑制策検討への適用，土木学会論文集D，Vol.62，No.4，pp.558-573，2006.
- 5) Petrou, S., Renton, A. : The QALY: a guide for the public health physician, Public Health, Vol.107, No.5, pp.327-336, 1993.
- 6) 池上直己，池田俊也，土屋有紀 監訳：医療の経済評価，医学書院，2000.
- 7) 加知範康，山本哲平，川添豊，加藤博和，林良嗣：市街地拡大抑制策評価のための市街地維持コスト推計システムの開発，第36回土木計画学研究・発表会投稿原稿，2007.
- 8) 鈴木祐大，川添豊，柴原尚希，加藤博和：都市域を対象とするライフサイクル環境負荷・維持コスト・QOL推計システムの構築，第4回LCA学会研究発表会講演要旨集，pp.102-103，2009.

An Application of Genetic Algorithm to Retreat and Re-concentration Area Selection - A Case Study for Joetsu City, Niigata Prefecture -

Takahito AONO, Masahiro NAGAO, Takuya TOGAWA,
Hirokazu KATO and Mitsuru SANO

The compact city is a promising urban form from a sustainability viewpoint, especially in developed countries. For urban planners, however, it is difficult to determine which areas should be expected to retreat and which should be re-concentrated. This paper discusses the morphology of an urban area after a retreat and re-concentration policy is implemented. The authors design and implement a genetic algorithm to determine areas that should retreat and those where re-concentration should occur to secure the sustainability of a real local city. Changes in various indices and the urban forms that emerge are discussed. To evaluate this optimization technique, we focus on reducing maintenance expenses and improving the quality of life (QOL) within city government budget constraints. It is found that, in least maintenance cost option, people living in old houses/buildings or low land price areas may leave those districts and re-concentrate into areas where transport is convenient such as around train stations and national routes. In QOL maximization option, people living in the suburbs where transport is relatively inconvenient may move to more accessible areas. In medium option between least maintenance cost and most QOL, suburbs where land prices are low and where houses are old are the prior areas to retreat, followed by suburbs where transport is inconvenient. It is concluded that proposed optimization method, using a genetic algorithm for the evaluation of retreat and re-concentrate policies, is efficient and reliable.