

# 1.5 車線の道路における 待避区間の最適配置に向けた 遺伝的アルゴリズム及び多目的最適化の適用

天野 和洋<sup>1</sup>・前田 宗宏<sup>2</sup>・中村 泰広<sup>3</sup>・清 雄一<sup>4</sup>・大須賀 昭彦<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

E-mail: amano@kajima.com

<sup>2</sup>正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島赤坂別館)

E-mail: maedamu@kajima.com

<sup>3</sup>正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 KI ビル)

E-mail: nakay@kajima.com

<sup>4</sup>非会員 電気通信大学准教授 大学院情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

E-mail: seiuny@uuc.ac.jp

<sup>5</sup>非会員 電気通信大学教授 大学院情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

E-mail: ohsuga@uuc.ac.jp

近年、道路整備において局部改良等を弾力的に組合せた 1.5 車線の道路の適用が可能になった。一時的な大型車の増加を伴う建設工事においても 1.5 車線の道路の考え方が有効となるが、待避区間を適切かつ安価に配置するためには交通シミュレーションによる試行錯誤が必要であった。筆者らは、シミュレーションの代替手段として、先に確率的な車両到着間隔を考慮した高速な評価手法を構築した。本論文では、待避区間の配置計画を拡張コストの最小化問題と考え、構築した手法に遺伝的アルゴリズムを組合せて最適配置を検討した。その結果、従来方法に比べ、検討時間を 8 時間から 4 分に大幅短縮した上、拡張コスト、平均待ち時間ともに削減する有効な解を得た。さらに、多目的最適化の観点から拡張コストと平均待ち時間のトレードオフ関係を明らかにした。

**Key Words:** road improvement for 1.5 lanes, traffic simulation with probability arrival, genetic algorithm, multi-objective optimization, trade-off analyses

## 1. はじめに

近年、従来であれば全線 2 車線道路で整備してきた道路に、1 車線改良や 2 車線改良、待避所などの局部改良を組合せた 1.5 車線の道路<sup>1)</sup>と呼ばれる整備方法が適用できるようになり、短期間に低コストで効果的な道路整備が可能になった。トンネルやダムなどの山間部における建設工事においては、工事のための資材搬入や土砂搬出に伴って、狭隘な道路に一時的に大型車の往来が集中する場合がある。それまで主に小型車のみが通行していた道路に想定以上の大型車が通ることになるが、工事期間が限定されていて恒常的な交通量の増加ではないことから、2 車線改良では過剰投資となる可能性があり、1.5 車線の道路の考え方を適用することが有効となる。

1.5 車線の道路の利点は、地域の状況に応じて自由度の高い設計ができることであるが、一方で待避所の設置方法などの選択肢が多くなることから、より良い改良案を得るためには様々な検討と多大な労力が必要となる。そのため、各自治体では検討をスムーズに進めるためのローカルルールとして、ガイドライン等による整備基準<sup>2,3)</sup>を策定している。ガイドラインでは、公共インフラとしてのサービス水準(旅行速度など)の維持を基準としていることが多く、建設工事に伴う一時的な交通量増加への対応や整備コストの最小化を考慮した場合には、より詳細な検討が必要となる。特に交通量が多い区間に対しては、車両の具体的な挙動を評価できる交通シミュレーション<sup>4)</sup>等を併用し、車両のすれ違いに使用する待避区間の検討を行うことが効果的である。図-1には、こ

これまで待避区間の最適配置を検討する際に、筆者らがシミュレーションを用いて実施してきた従来の検討フローを示す。ここで最適配置とは、一定の待ち時間制約を満たした上で、拡幅コストを最小化する待避区間の場所の組合せを決定することである。はじめに、現地調査の結果等から必要と思われる拡幅箇所と待避区間を仮決定した上で、シミュレーションを用いて計画交通量に対する処理能力を評価する。もし最初に設定した待避区間で計画交通量を処理できない場合には、点線範囲 (f) における拡幅箇所の見直しと交通シミュレーションによる評価を繰り返す必要があった。必要な待避区間が複数になる場合もあるため、その拡幅パターンには際限がなく、労力や時間を要する煩雑な作業となっていた。

このような作業の負荷を軽減するとともに判断基準を明瞭化する方策として、例えば山内ら<sup>9)</sup>は、簡易シミュレーションを用いて大型車混入率と日交通量から必要な2車線区間の割合を求める選定表を作成し、参照が容易な整備基準の指針を提案している。試行錯誤を軽減する有効な指針であるが、待避区間の設置間隔は極力均等とすることが望ましいとしており、道路線形などを考慮した具体的な拡幅計画は別途必要となる。また、文献2)として引用した島根県の1.5車線の改良調査・設計マニュアルの参考資料<sup>6)</sup>においては、対向車とのすれ違いの影響を考慮した旅行速度を算出するための推定式が提示されている。様々なパターンが想定されていて有用な資料であるが、必要な待避区間の延長について特別な設定は行われていない。建設工事に関わる搬送経路を想定した場合には、大型車混入率が通常よりも高くなる可能性が高いことから、すれ違いができない狭隘区間の評価に加えて、すれ違いを行う待避区間についても大型車の滞留台数に見合った延長であるか否かを評価できることが重要となる。

そこで筆者らは文献7)において、まず図-1の網掛け部分(d)に対応した計画交通量を処理できるか否かを迅速に確認するための手段として、狭隘区間と待避区間のそれぞれを高速に計算できる評価手法を構築した。評価手法は、狭隘区間に対してその手前で発生する待ち時間を算出する評価式と、待避区間に対して隣接狭隘区間での待ち時間の間に到着する車両台数に必要な区間長を計算する評価式から構成される。さらに、大型車と小型車の混在や、確率的な車両到着間隔も考慮できる一般的な手法として整備した。単一の狭隘区間に対する平均待ち時間と両端における必要待避区間長について、評価式とシミュレーション結果の値を比較したところ、両者の平均絶対誤差は非常に小さく、十分に交通シミュレーションを代替できることが確認できた。

本論文では、これをさらに進め、狭隘区間が断続的に続く道路延長全体に対する (f) の繰り返しを効率化する

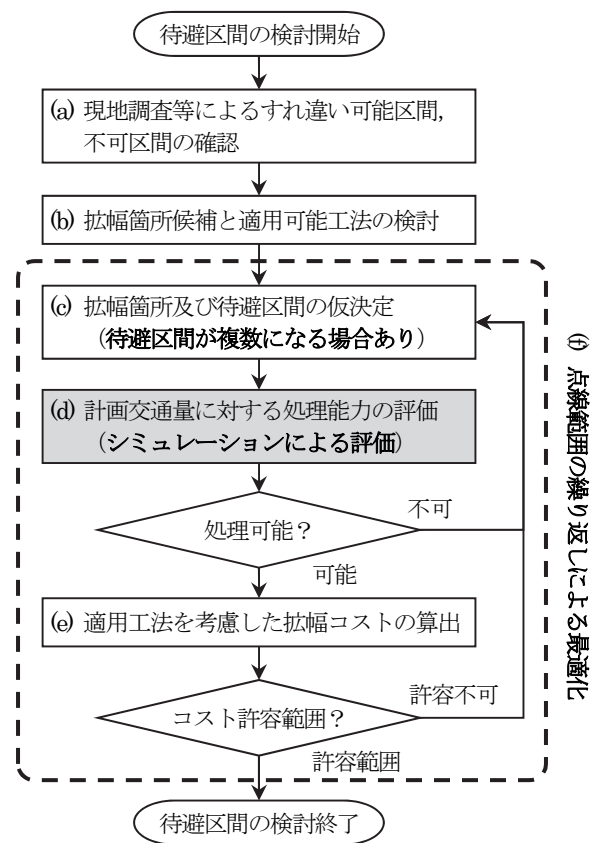


図-1 待避区間の最適配置に関する従来の検討フロー

ため、評価手法に基づく制約条件と地形的な制限を加味した拡幅パターンの組合せを拡幅コストの最小化問題として考えた上で、最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム (以下、GA と略す)<sup>8,9,10)</sup>を適用し、その有効性を確認した。遺伝子のモデル化に際しては、工事に必要な設備や材料の設置場所を確保するため、既存の待避区間からの連続的な拡幅を表現できる構造とした。なお、筆者らの先行研究である文献11)においても、待避区間の最適化にGAを適用しているが、大型車のみを対象に、かつ車両到着を等間隔に仮定した限定的な評価手法を用いたものであった。特に確率的な車両到着間隔を考慮しない場合には、考慮した場合の約20倍という非現実的な待ち時間を算出したケースを文献7)で確認しており、極端なケースに偏った評価にならないためにも、確率的な車両到着間隔を考慮できることが重要といえる。

最適化手法として適用したGAは、選択淘汰・交叉・突然変異といった生物進化の原理から着想を得たアルゴリズムである。目的関数の微分可能性や単峰性に関する情報がない場合でも適用可能で、本論文のような離散的な変数を扱う組合せ最適化問題やNP困難な計算量を持つ問題に多く応用されている。土木計画分野におけるGAの応用に関しては、文献12)で詳しく整理されている。

## 2. 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用方法

### (1) 拡幅パターンの遺伝子表現

拡幅においては、既存の待避区間を起点として、道路延長方向の前後にどの程度拡幅（待避区間を延伸）できるかを考える。その際、拡幅する単位を小型車の車両全長に相当する 5m で離散化することによって、探索対象の組合せ数を抑えることとする。これにより各区間の拡幅パターンは、拡幅距離をその単位で割った拡幅ブロック数で表現できる。また、谷側と山側では拡幅できる距離や適用可能工法が異なることから、山側を正数、谷側を負数、拡幅なしを 0 で表現した。なお、幅員方向の拡幅については、文献 7) で設定した大型車同士のすれ違いが可能な幅員（直線区間で 6m, 曲線区間で 7.6m）を基準とする。以上から、対象の道路延長全体に対する一連の拡幅パターンの組合せは、既存待避区間の始点側と終点側に対応した値を順番に並べた整数値型の遺伝子として表現できる。また、それぞれの遺伝子座には拡幅できる距離に応じて個別の下限と上限が設定される。遺伝子表現のイメージを図-2 に示す。

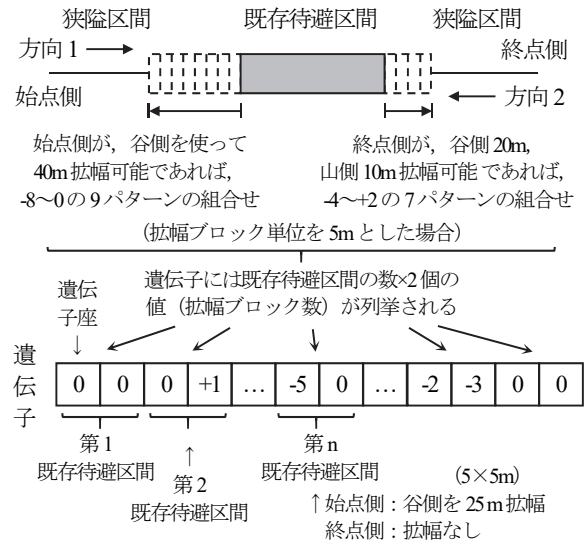


図-2 拡幅パターンの遺伝子表現

### (2) 遺伝子の評価方法

目的変数は拡幅コストであり、遺伝子の適応評価においては、各拡幅ブロック数に適用工法の単価を掛けて足し合わせることで拡幅コストの総額を算出して判断する。ただし、狭隘区間については待ち時間の総計が指定した時間内に収まっていること、待避区間については隣接狭隘区間での待ち時間の間に到着する車両台数に必要な区間長以上であることを制約条件として加味する。制約を満たしているか否かの評価には、文献 7) で構成した評価式を用いる。具体的には、まず各遺伝子座に設定された拡幅ブロック数から、狭隘区間と待避区間を交互にそれぞれの区間長に変換する。なお、変換に際しては、最小施工距離（これより短い拡幅は行わない）や最小待避区間距離（これより短い区間は待避区間と扱わない）も考慮した。設定した数値は 3 章に記載する。

狭隘区間については、確率的な車両到着間隔を考慮した式(1)により平均待ち時間を算出する。ここで、 $W_1^A$  は方向 1 の車両のみに着目した平均待ち時間で、 $W_1^A(n_1)$  は方向 1 の車両が狭隘区間手前で  $n_1$  台溜まった場合の平均待ち時間、 $C_1^X$  は  $n_1$  が取り得る理論上の最大値である。また、 $p_1^A(n_1)$  は滞留台数が  $n_1$  となる確率であり、方向 1 の到着確率分布  $f_1$  を  $n_1$  台分足し合せた畳み込み分布  $g_{1,n_1}$  の累積分布関数  $G_{1,n_1}$  と、滞留台数の先頭車両の平均待ち時間  $W_1^H$ （対向車の到着確率分布から決定）を用いて、 $p_1^A(n_1) = G_{1,n_1}(W_1^H) - G_{1,n_1+1}(W_1^H)$  として計算することができる。最終的には、方向 1 の大型車想定交通量  $N_1^L$  と小型車想定交通量  $N_1^S$ 、同じく方向 2 の  $N_2^L$  と

$N_2^S$  を用いて、それぞれの平均待ち時間に対する加重平均を取ることで全体の平均待ち時間  $W^A$  を算出する。

$$W^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times W_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times W_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S}$$

where

$$W_i^A = \frac{\sum_{n_i=1}^{c_i^X} p_i^A(n_i) \times W_i^A(n_i)}{\sum_{n_i=1}^{c_i^X} p_i^A(n_i)} \quad (i = 1, 2)$$

待避区間については、式 (2) から隣接する狭隘区間に対する滞留台数を計算し、その上で必要な区間長以上であるか否かを判定する。ここで、 $C_1^A(n_1)$  は  $n_1$  に対して最後尾車両が動き出すまでのタイムラグを考慮して補正した台数であり、 $p_1^A(n_1)$  を掛け合せて積み上げることで方向 1 のみに着目した滞留台数  $C_1^A$  を計算する。さらに、方向 2 とともに加重平均を取ることで全体の滞留台数  $C^A$  を算出する。

$$C^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times C_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times C_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S}$$

where

$$C_i^A = \frac{\sum_{n_i=1}^{c_i^X} p_i^A(n_i) \times C_i^A(n_i)}{\sum_{n_i=1}^{c_i^X} p_i^A(n_i)} \quad (i = 1, 2)$$

最後に、平均待ち時間の合計があらかじめ設定した許容待ち時間を超えるか、いずれかの待避区間が必要な区間長に達していない場合には、その遺伝子に全区間を拡張したことに相当するような大きなペナルティを加えて、次世代には残らない致死遺伝子に設定する。

### 3. 実問題への試行適用と評価

#### (1) 適用問題の概要

本手法の有効性を確認するため、実際に現地調査を行った実問題を基に、待避区間の最適配置を試行した。対象の区間は 2,000m, 途中 19 か所の既存待避区間が点在する。ここで、道路線形等から視認性の確保が必要な部分については、あらかじめ必須待避区間として既存待避区間に含めることとした。拡張ブロック単位を 5m としたときの、各既存待避区間からの拡張可能ブロック数は表-1のとおりである。また、道路の周辺状況から適用可能な工法 (A~C) を区間別に整理したものを表-2 に示す。各行には、始点から次行の始点までに適用できる工法を記載した。一部に拡張が不可能な区間も含まれるが、拡張の可否は表-1 の上限と下限から判断する。併せて、実測した各区間の道路幅員に応じたすれ違い可能な車種の組合せについても、区間制約として併記した。

その他のパラメータは表-3のとおりである。交通条件については現地調査時の結果に基づいて設定しており、大型車は 10t ダンプトラックを仮定した。最小施工距離は拡張ブロック単位に合わせ、最小待避区間長は大型車 2 台程度が十分に待避できる長さを想定した。なお、実問題の適用に先立っては、道路条件を単純化した総当たり計算が可能な問題をいくつか用意した上で、厳密解への収束性を事前に確認している。遺伝的操作に関するパラメータは、文献 13), 14), 15) を参考に事前確認時の収束性能と問題規模の比率等から総合的に判断して設定した。ここで、世代ギャップは次世代において入れ替えを行う遺伝子の比率であり、世代内の多様性維持への寄与を期待したものである。また、交叉点数 (交叉位置の数) の 5 は 19 か所の既存待避区間を 6 分割することで、3 か所程度毎に交叉が行われることを想定した値である。

#### (2) 適用結果と従来方法との比較

図-3 は、対象区間について 400m 毎を 1 行に区切った上で、区間制約や拡張不可区間、適用可能工法を色分けした図に、適用結果における有効な (最小待避区間長以上の) 待避区間と具体的な拡張箇所を加えたものである。また、表-4 には試行したケースに対する拡張コストと平均待ち時間、検討時間を比較したものを記載する。試行ケースは 3 ケースであり、そのうちケース 1 は提案手法

表-1 既存待避区間と拡張可能ブロック数

区間番号	始点 (m)	終点 (m)	始点側*		終点側*	
			下限	上限	下限	上限
1	40	50	-8	+8	-2	+4
2	220	250	-22	+16	-6	+6
3	280	290	-6	+6	0	+12
4	360	380	0	0	-18	0
5	470	480	-18	0	-4	0
6	500	520	-4	0	-14	0
7	590	620	-14	0	-16	0
8	700	710	-16	0	-4	0
9	770	800	0	0	-14	0
10	870	900	-14	0	-20	0
11	1,000	1,010	-20	+4	-14	+4
12	1,080	1,090	-14	0	-8	0
13	1,130	1,160	-8	0	-8	0
14	1,200	1,210	-8	0	-28	0
15	1,350	1,380	-28	0	-22	0
16	1,490	1,500	-22	0	-10	0
17	1,620	1,650	0	0	-26	0
18	1,780	1,790	-26	0	0	+24
19	1,910	1,920	0	+24	-16	0

※ 上限と下限は既存待避区間からの拡張可能なブロック数 (正数: 山側, 負数: 谷側, 0: 拡張不可)

表-2 区間別の適用可能工法と区間制約

始点 (m)	適用可能工法 <sup>※1</sup>		区間制約 <sup>※2</sup>	始点 (m)	適用可能工法 <sup>※1</sup>		区間制約 <sup>※2</sup>
	山側	谷側			山側	谷側	
0	A	B	低	1,130	A	C	高
470	A	C	低	1,250	A	B	高
570	A	B	低	1,310	A	C	高
620	A	C	低	1,410	A	B	高
640	A	B	低	1,500	A	C	高
800	A	C	低	1,710	A	B	高
840	A	B	低	1,730	A	C	高
880	A	C	中	1,960	A	B	高
1,030	A	B	中	1,980	A	C	高
1,090	A	B	高				

※1 各工法の単価は、工法 A : 150 万円/5m, 工法 B : 80 万円/5m, 工法 C : 120 万円/5m と設定  
 ※2 低: 大型車同士でなければすれ違い可能, 中: 小型車同士のみがすれ違い可能, 高: 小型車同士でもすれ違い不可

表-3 その他のパラメータ一覧

パラメータ名	設定値	パラメータ名	設定値
大型車車両全長	8 m	拡張ブロック単位	5 m
小型車車両全長	5 m	最小施工距離	5 m
大型車想定交通量	40 台/h	最小待避区間長	25 m
小型車想定交通量	20 台/h	許容待ち時間	120 秒
平均速度	15 km/h	個体数	1,000
発進時加速度	3 km/h/s	世代ギャップ	80 %
停止時車両間隔	2 m	交叉確率	80 %
走行時車両間隔	15 m	交叉点数	5
車両到着間隔の確率分布	指数分布	突然変異確率	1 %
		計算世代数	200

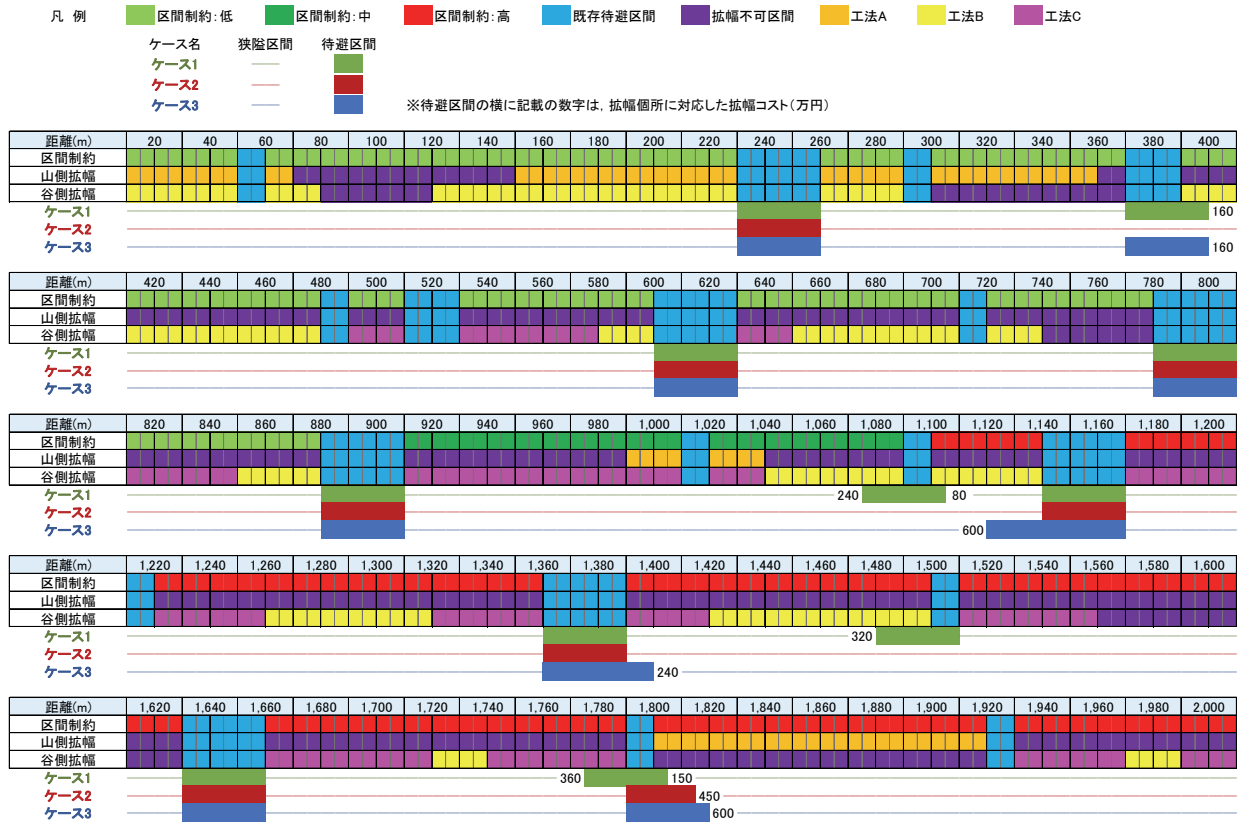


図-3 適用結果 (ケース1~3) における有効な待避区間と具体的な拡幅箇所

である評価式に GA を組合せた計算結果である。拡幅総延長は 70m, 拡幅コストは 1,310 万円, 式 (1) の計算結果である平均待ち時間 (1 台あたりの道路延長全体に対する合計待ち時間の平均) は 119.4 秒であった。なお, 算出された拡幅箇所は, 起点からの距離で 380~390m, 1,065~1,080m, 1,090~1,095m, 1,470~1,490m, 1,765~1,780m, 1,790~1,795m の 6 か所となった。念のため, ケース 1 で得られた拡幅パターンの組合せについて, すれ違い挙動を再現できる文献 7) で用いた交通シミュレーションのモデルに反映して車両の運行状況を確認したところ, 大きな滞留や行き詰まりなどの問題は見られず, 平均待ち時間は 116 秒であった。この値は, 許容待ち時間として仮定した 120 秒を下回っており, さらに提案手法の結果 119.4 秒との差異も 3.4 秒と小さく, 両者はほぼ整合した結果となった。

続いて, 従来の方策である交通シミュレーションと人による試行錯誤を実施した。試行錯誤では, 人手により図面や交通シミュレーションの結果を視覚的・数値的に評価しながら拡幅箇所の調整を繰り返すことになる。ケース 2 には, 試行錯誤の初期段階 (1 回目) の結果を記載する。初期段階では, 通過時間が対向車両の平均到着間隔を下回る最長の狭隘区間長を算出し, その長さを基準に待避区間を設定した。具体的には, 区間制約が「低」の範囲では 350m, 「高」では 230m であり, 狭隘区間が

表-4 適用結果と検討時間の比較

ケース名	計算方法	拡幅総延長 (m)	拡幅コスト (万円)	平均待ち時間 (秒) ※	検討時間
ケース 1	評価式+GA	70	1,310	119.4	4分
ケース 2	交通シミュレーション+人	15	450	231.2	50分
ケース 3		60	1,320	130.4	8時間

※ 平均待ち時間が許容待ち時間である 120 秒を超えないような拡幅の組合せを探索。ただし, ケース 1 以外は 120 秒以下となる組合せには至らなかった。

この距離を超えないように, なるべく等間隔に待避区間を配置した。結果としては, 拡幅延長が 1,790~1,805m の 15m, 拡幅コストも 450 万円と少ないが, 平均待ち時間が 231.2 秒と許容待ち時間である 120 秒を大きく超えることとなった。

ケース 3 は, ケース 2 に対して狭隘区間長の長いところを中心にコストを抑えながら拡幅を行い, さらに 9 回の試行を行った結果である。平均待ち時間が 130.4 秒まで小さくなったものの 120 秒以下には至らず, 拡幅箇所は 380~390m, 1,110~1,130m, 1,380~1,390m, 1,790~1,810m の 4 か所, 拡幅コストは 1,320 万円と若干ではあるがケース 1 の金額を超える結果となった。拡幅コストや待ち時間をさらに低減するためには, それらの値の変

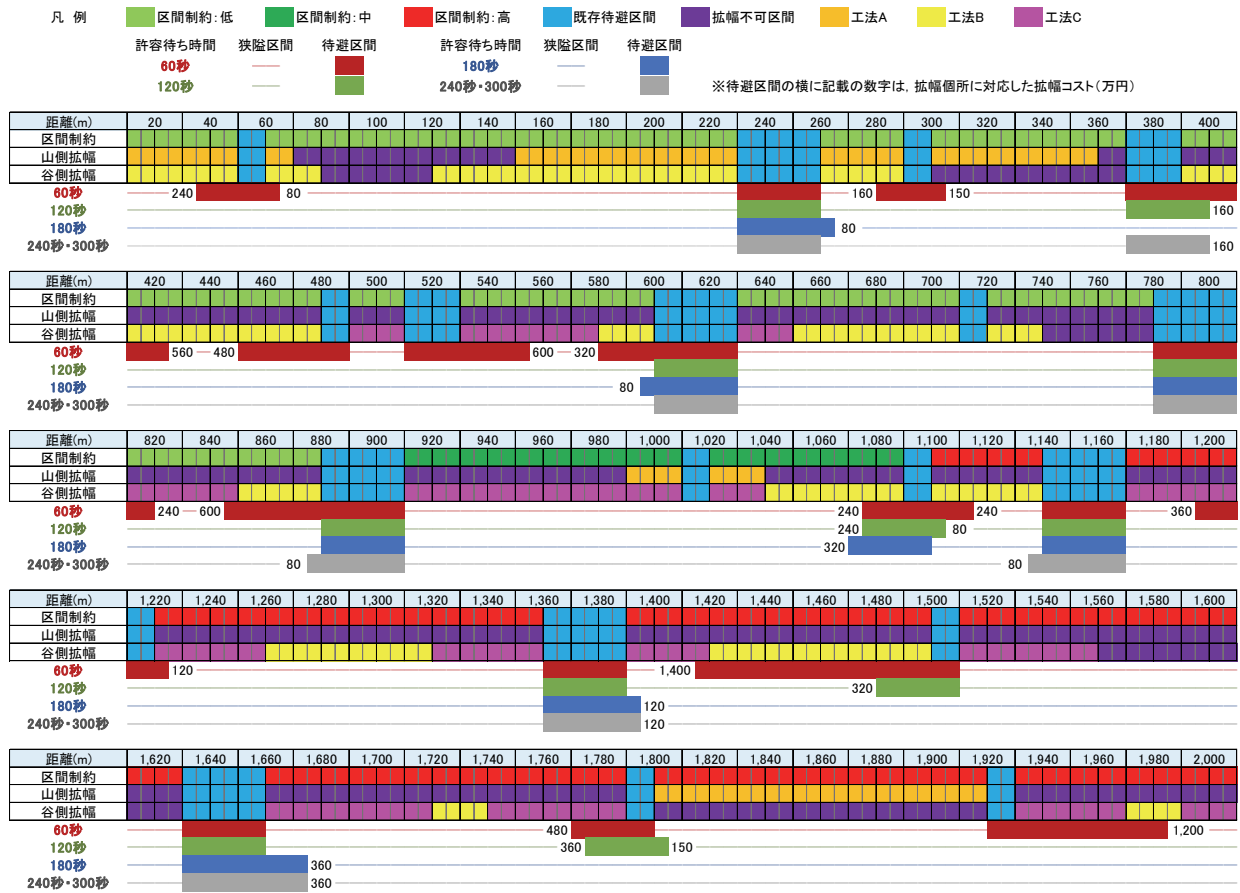


図4 許容待ち時間に対する有効な待避区間と具体的な拡幅箇所

動に注意しながら拡幅箇所の足し引きによる煩雑な試行錯誤を継続することになる。あらためて全体を俯瞰すると、3 ケースで重なる部分は多いものの、提案手法のケース1は全体のコストを抑えながらも、1,065~1,095mや1,470~1,500mの区間などの中間地点をうまく選択していることが分かる。

検討時間に関しては、交通シミュレーションでは1時間15分の車両運行について車両到着間隔を設定する際の疑似乱数系列を100回変更して実施しており、1ケースあたりの計算時間が約36分であった(計算環境: Intel Core i7 2.6GHz, メモリ 16GB)。拡幅箇所を検討する時間等を含めると、1回の試行に50分程度、ケース3までで約8時間を要した。一方、評価式+GAの検討時間(計算時間)は200世代までの計算で約4分であり、非常に短い時間でより良い結果を得た。なお、検討時間の算出にあたっては、データ変換処理など自動化できる作業に掛かる時間は極力除外している。

(3) 許容待ち時間に関するパラメータスタディ

提案手法で設定した許容待ち時間は、設計者が任意に指定できるパラメータであり、今回は2,000mの旅行時間を8分から10分に、もしくは旅行速度を15km/hから

表-5 許容待ち時間に対する結果比較

許容待ち時間 (秒)	拡幅箇所数	拡幅総延長 (m)	拡幅コスト (万円)	平均待ち時間 (秒)
60	17	400	7,470	59.7
120	6	70	1,310	119.4
180	5	50	960	174.6
240	5	40	800	186.7
300				

12km/hの2割低減する程度を許容できる待ち時間として120秒を仮定した。拡幅コストを抑えれば待ち時間が増え、逆に待ち時間を抑えるためには十分な拡幅が必要となってコストが増加する。つまり、拡幅コストと待ち時間の間にはトレードオフの関係が想定できる。そこで、その関係を明らかにするために、提案手法の許容待ち時間を60秒から60秒刻みで増やししながら、拡幅コストに対するパラメータスタディを行った。ここで、許容待ち時間以外のパラメータは表-3のままとした。

図4は許容待ち時間に対する拡幅箇所を示したものであり、表-5は許容待ち時間に対する拡幅コストと平均待ち時間の結果を比較したものである。許容待ち時間60

秒のケースでは、17か所の細かい拡幅が断続的に行われており、待ち時間を低く抑えている。拡幅箇所の詳細位置については計算過程でいくつかの異なるパターンを得られているが、拡幅コストの最小値は7,470万円とかなり高額となった。許容待ち時間120秒のケースについては、条件、結果ともに(2)のケース1と同じものである。許容待ち時間180秒では、拡幅コストが960万円となった。120秒のケースで設定されたいくつかの待避区間を省略した代わりに、前後の待避区間を多少延長することで待ち時間を許容範囲に抑えている。最後の許容待ち時間240秒及び300秒のケースは、どちらも拡幅コストが800万円、平均待ち時間が186.7秒となった。結果を精査したところ、平均待ち時間は180秒を超えたあたりからほとんど増えなくなっており、拡幅コストをさらに減らすために待避区間を短くすると、今度は待避区間に対する制約条件(隣接する狭隘区間に対する滞留台数に必要な区間長以上であること)が満足できなくなることが、240秒と300秒の結果が同じになった理由である。

(4) 多目的最適化を用いたトレードオフ分析

トレードオフ関係の分析をさらに進めて、拡幅コストと平均待ち時間の二つの目的関数を同時に扱う多目的最適化を実施することとした。多目的最適化では、ある目的関数の値をさらに良くするためには他の目的関数の値を悪化せざるを得ないような解の集合「パレート最適解(非劣解)」を扱うことになる。パレート最適解を観察することで、対象の目的関数間におけるトレードオフ関係の詳細を確認することができる。また、パレート最適解は、単一解ではなく複数の解から構成される集合であることから、複数の解候補を一斉に探索するGAを拡張した手法が数多く提案されている<sup>16,17)</sup>。本論文では、そのような多目的GAの一つであり、解の多様性を維持するためのクラスタリング・アルゴリズムを有するSPEA2<sup>18)</sup>を利用して、パレート最適解の探索を行った。SPEA2における遺伝的操作では、2章に記載の遺伝子モデルをそのまま使用した。ただし、平均待ち時間を目的関数とすることから、許容待ち時間はあらかじめ設定せずに目的関数を評価することとした。多目的最適化に関するその他のパラメータは、表-6のとおりである。なお、土木計画分野における多目的最適化の適用については、施設の最適配置計画に使用した文献19)や、都市間交通ネットワークの最適化に応用した文献20)などがあり、どちらも利便性の最大化と、投資もしくは環境負荷の最小化といった相反する複数の目的関数を同時に扱おうとしたものである。

図-5は、多目的最適化の結果を二つの目的関数の側面からグラフ化したものであり、500世代までの計算を乱数を変えて4回実施した上で最終世代の結果を重ね合せ

表-6 多目的最適化に関するパラメータ一覧

パラメータ名	設定値	パラメータ名	設定値
目的関数1	拡幅コスト	交叉確率	80%
目的関数2	平均待ち時間	交叉点数	5
個体数	2,000	突然変異確率	1%
世代ギャップ	80%	計算世代数	500

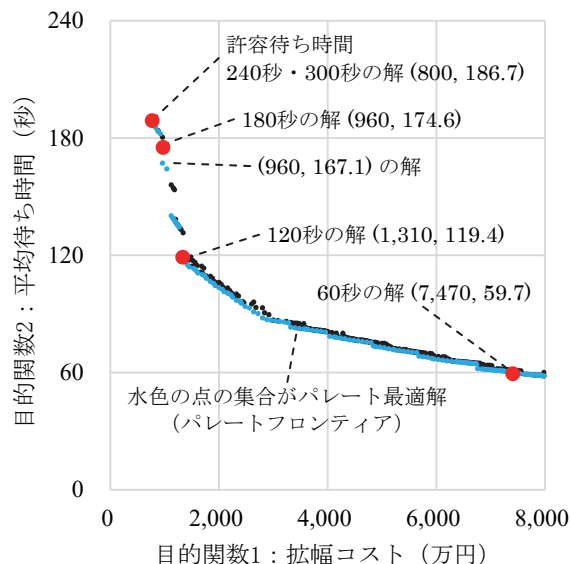


図-5 多目的最適化における解集合(第500世代×4回分)

たものである。解集合は複数の点から構成されており、グラフ内の解集合の中で左下方向の縁に位置する解がパレート最適解である。パレート最適解は、拡幅コストが高くなると平均待ち時間が低くなり、逆に平均待ち時間が高くなると拡幅コストが低くなっており、明確なトレードオフの関係を示している。さらに、(3)で実施したパラメータスタディの結果(グラフ内は赤丸で表示)をパレート最適解と比較したところ、平均待ち時間60秒、120秒、240秒・300秒の各解に一致するものがパレート最適解に含まれていることが確認できた。一方、180秒の解はパレート最適解には含まれておらず、パラメータスタディの解と同じ拡幅コスト960万円のパレート最適解は平均待ち時間が174.6秒ではなく167.1秒であった。パラメータスタディでは、平均待ち時間が制約条件である許容待ち時間以下であれば良く、得られた解はそれを満たしていた。しかし、多目的最適化では同じ拡幅コストでもさらに平均待ち時間の低い組合せを探索するため、パラメータスタディの解に比べて平均待ち時間が7.5秒ほど低い、より良い解を見つけ出したことになる。

また、パレート最適解を結んだ限界線にあたるパレートフロンティア(グラフ内における水色の点の集合)は、

左上から右下にかけて、左下を凸にした折れ線を描いている。特に、平均待ち時間で120秒と90秒あたりの2か所で大きく折れ曲がっている。左上から平均待ち時間を下げていくと、120秒くらいまでは拡幅コストがあまり上がらないが、120秒を下回るあたりから右に折れ曲がり、90秒以下ではさらに急激に拡幅コストが増えていく様子が見て取れる。このことから、拡幅コストへの影響を低く抑えるためには平均待ち時間を120秒以上で想定することが有効であると考えることができ、先に仮定した許容待ち時間120秒はちょうどその下限に相当している。なお、表5の拡幅箇所数を振り返ると、許容待ち時間120秒以上では5~6か所であるのに対して、60秒では17か所とかなり多い結果となっている。また、平均待ち時間をより低く抑えるためには、徐々に単価の高い工法を必要とする箇所を選択せざるを得ない可能性が高くなる。つまり、グラフに見える屈折点は必要な拡幅箇所数と拡幅単価の大きな変化点と考えられる。

検討時間に関しては、ある程度広範なパレート最適解を得るためには十分な個体数と計算世代数をさらに数回繰り返す必要があったことから、全体で約4時間半を要した。解の全体像を把握する上で多目的最適化は非常に強力な手段だが、単目的での所要時間4分に比べるとかなりの時間を要するため、パラメータスタディを適宜併用して主要な点を確認しながら検討を進めることが、迅速な意思決定には効果的であるといえよう。

#### 4. まとめ

本論文では、先に構築した確率的な車両到着間隔を考慮でき、かつ交通処理能力を高速に計算できる評価手法にGAを組合せることで、1.5車線の道路整備における待避区間の最適配置を検討した。実問題をベースとした事例に適用し、その結果の妥当性を交通シミュレーションにより評価したところ、車両運行に問題がない上、平均待ち時間の評価式との差異も3.4秒と小さく、両者は整合した結果となった。また、従来方法との比較においては、検討時間を8時間から4分に大幅短縮した上、拡幅コスト及び平均待ち時間ともに削減する有効な解を得ることができた。さらに、パラメータスタディと多目的最適化を通じて、拡幅コストと平均待ち時間のトレードオフ関係を明らかにした。

今後は、信号制御や誘導員による台数制御にも対応した評価手法の拡張を検討し、より現実的で効果的な整備計画を実現する手法として発展させていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，pp.32-103，2004.
- 2) 島根県：1.5車線の改良調査・設計マニュアル，2005.
- 3) 新潟県：1.5車線の道路整備ガイドライン，2007.
- 4) 交通工学研究会：交通シミュレーション適用のススメ，pp.30-175，丸善出版，2004.
- 5) 山内康弘，小路昭文，鈴木啓之：ローカルルール（1.5車線の道路）の整備手法の検討，土木学会第60回年次学術講演会，2005.
- 6) 島根県：1.5車線の改良調査・設計マニュアル 参考資料，pp.20-45，2005.
- 7) 天野和洋，前田宗宏，中村泰広，清雄一，大須賀昭彦：1.5車線の道路整備における待避区間の最適配置に向けた評価手法の検討，土木学会論文集D3（土木計画学），Vol.73，No.2，pp.124-134，2017.
- 8) Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- 9) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- 10) 北野宏明 編：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993.
- 11) 前田宗宏，野呂好幸，天野和洋，青柳滋彦：1.5車線の道路の拡幅計画における最適化手法としての遺伝的アルゴリズムの適用，土木学会第68回年次学術講演会，2013.
- 12) 有村幹治，田村亨，井田直人：土木計画分野における遺伝的アルゴリズム：最適化と適応学習，土木学会論文集D，Vol.62，No.4，pp.505-518，2006.
- 13) K. DeJong: An Analysis of the Behavior: A Class of Genetic Adaptive Systems, *Doctoral Dissertation*, University of Michigan, 1975.
- 14) J. Grefenstette: Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-16, No.1, pp.122-128, 1986.
- 15) W. Spears: Crossover or Mutation, *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol.2, pp.221-237, Morgan Kaufmann Publisher, 1993.
- 16) K. Deb: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Wiley, 2001.
- 17) 中山弘隆，岡部達哉，荒川雅生，尹禮分：多目的最適化と工学設計—しなやかシステム工学アプローチ—，pp.29-123，現代図書，2007.
- 18) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele: SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multi-objective Optimization, *Evolutionary Methods for Design, Optimisation, and Control*, pp.95-100, CIMNE, 2002.
- 19) 山田忠史，則武通彦，谷口栄一，多賀慎：物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用，土木学会論文集，Vol.1999，No.632/IV-45，pp.41-50，1999.
- 20) 渡邊拓也，柴田宗典，鈴木崇正：多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価手法に関する研究，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.72，No.5，pp.I\_903-I\_916，2016.

(2017.10.26 受付)



AN OPTIMIZING PLACEMENT OF PASSING PLACES  
FOR 1.5 LANES ROAD  
WITH GENETIC ALGORITHM AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

Kazuhiro AMANO, Munehiro MAEDA, Yasuhiro NAKAMURA,  
Yuichi SEI and Akihiko OHSUGA

In mountainous areas, it is available to construct roads of 1.5 lanes which are flexible combinations of local improvements in recent years. In construction works, 1.5 lanes are effective for temporary traffic increase of large-size vehicles. In order to appropriately and inexpensively arrange passing places, it takes trial and error by traffic simulations. Therefore, we previously developed fast evaluation method that can take probabilistic arrival interval of vehicles, as an alternative to traffic simulations. In this paper, we considered placement plan for passing places as a minimization problem of widening costs, and applied GA(Genetic Algorithm) with proposed evaluation method. As a result, in comparison with the conventional method by manual operation, it was possible to obtain an effective solution that drastically shortened the operation time from 8 hours to 4 minutes, and also reduced both the widening costs and the average waiting time. In addition, using multi-objective optimization, trade-off relationship between the widening costs and the average waiting time was clarified.