

交通流評価式と最適化手法による
建設工事計画の高度化に関する研究
—進化計算を用いた車両待避区間の最適配置—

天野和洋

電気通信大学大学院情報システム学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2018 年 9 月

交通流評価式と最適化手法による
建設工事計画の高度化に関する研究
—進化計算を用いた車両待避区間の最適配置—

博士論文審査委員会

主査	大須賀 昭彦	教授
委員	田中 健次	教授
委員	南 泰浩	教授
委員	佐藤 寛之	准教授
委員	清 雄一	准教授

著作権所有者

天野 和洋

2018

Advanced Planning for Construction Work
based on Traffic Evaluation Formulas and an Optimization Method
- Optimizing Placement of Passing Places for Vehicles
using Evolutionary Computation –

Kazuhiro Amano

Abstract

Traffic simulation is used to evaluate its effect on the surrounding environment during construction. Additionally, in the construction such as tunnels and dams in mountainous areas, traffic simulation is used to evaluate the transportation efficiency of construction vehicles traveling on narrow roads. In cases where traffic of large-size vehicles is higher than assumed, road improvements will be required. On roads where traffic increases significantly, numerous traffic simulations are conducted to determine appropriate places to pass. This is a complicated and time-consuming process.

This study aims to develop evaluation formulas for passing and narrow sections as an alternative to traffic simulations and to reduce the time required for iterative simulations. The proposed formulas can evaluate cases with large- and small-size vehicles and where vehicle arrival distributions demonstrate probability fluctuations. A comparison of the proposed formulas to traffic simulations for a single narrow section relative to average wait time and the required lengths of passing sections demonstrated that the average absolute error difference was minimal. In other words, we confirmed that the proposed formulas are sufficiently accurate to substitute for traffic simulations.

For cases that require multiple passing places, we considered the combination of widening patterns under constraint conditions based on the evaluation formulas and the topographical restrictions as the minimization problem of widening costs. Then, we

adopted a genetic algorithm (GA), which is an optimization method based on evolutionary computation, and we applied the GA to a case based on a real problem. In comparison with conventional method using traffic simulations and manual efforts, it was possible to obtain an effective solution that reduced the study time from eight hours to four minutes and also reduced widening costs and average wait time. Moreover, the characteristics of the trade-off relation between widening costs and average wait time were clarified using parametric studies and multi-objective optimization based on the GA.

In conclusion, the proposed method can eliminate the complications involved in optimizing the placement of passing sections while maintaining the prediction accuracy of the conventional traffic simulation method. In addition, it can evaluate the trade-off between widening costs and wait times. Furthermore, the proposed optimization approach can be expected to contribute the advancement of the planning work using traffic simulations in construction projects.

交通流評価式と最適化手法による 建設工事計画の高度化に関する研究 —進化計算を用いた車両待避区間の最適配置—

天野 和洋

概要

土木・建築分野に関わる建設工事においては、計画段階から工事中や竣工後の利用状況、周囲への影響度合いを視覚化して、計画の妥当性・安全性を確認しておくことが重要であり、シミュレーション技術が強力な手段となっている。このうち交通シミュレーションは、工事中の近隣環境への影響評価に利用されているが、山間部での建設工事においても、狭隘道路でのすれ違いを伴う工事車両の運搬効率の評価に活用されている。トンネルやダムなどの工事では、資材搬入や土砂搬出における工事車両の効率運行は施工計画上の重要な課題であるが、狭隘な道路に想定以上の大型車が通ることで、そのままの道路では計画交通量を処理できないケースが発生する。そのような場合には、拡幅による局所改良を行うことで、低コストで待ち時間を十分に減らす方策が必要となる。計画交通量が多い区間に対しては、交通シミュレーションと人による試行錯誤を繰り返すことで待避区間を検討することになるが、必要な区間が複数になるなど拡幅パターンの組合せは非常に多く、労力や時間を要する煩雑な作業となっていた。

本論文では、計算時間のかかる交通シミュレーションを代替し、計画交通量を処理できるか否かを評価するための手段として、狭隘区間とすれ違いが可能な待避区間のそれぞれに対する評価値を高速に計算できる交通流評価式（以下「評価式」と記す）を提案している。評価式は、狭隘区間に対する待ち時間を算出する評価式と、待避区間に対する必要な区間長を計算する評価式から構成される。また、大型車と小型車の混在や確率的な車両到着間隔を考慮できる汎用的な評価式となっている。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シミュレーションにおいて

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、評価式において確率的な車両到着間隔を考慮できることは重要である。提案した評価式の妥当性を確認するため、狭隘区間を1か所だけ設けた簡易モデルを用意して、交通シミュレーションとの結果比較を行った。全ケースに対する両者の平均絶対誤差は狭隘区間における平均待ち時間で4.8秒、待避区間における平均必要待避区間長で3.3mと非常に小さく、多くのケースで合致した結果となった。計算時間についても、交通シミュレーションによる1ケースあたりの計算時間が約12分だったのに対して、評価式による計算時間は100ミリ秒未満となり、評価式の方が交通シミュレーションの7千の一以下の時間で実行できる結果となっている。

さらに、狭隘区間が断続的に続く道路延長全体に対する待避区間の最適配置を行うにあたっては、提案した評価式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考え、進化計算による最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム(GA)を適用している。遺伝子表現に関しては、拡幅工事に必要な資機材の設置場所を想定して既存の待避区間を基点とした連続的な拡幅を表現できる構造であること、道路延長方向の拡幅可能範囲を離散化することで探索空間の削減を図っていること、谷側と山側で拡幅可能範囲や適用可能工法が異なる点を表現できることなど、現実の問題に即したモデル化を可能とする特徴を持っている。狭隘区間が複数箇所となる実問題に基づいた事例に適用して本手法の有効性を確認したところ、本手法においては、従来の交通シミュレーションと人による試行錯誤の結果に対して、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ている。加えて、パラメータスタディとGAをベースとした多目的最適化を実施することで、拡幅コストと待ち時間の間にあるトレードオフ関係を明確化するとともに、最終世代における非劣解集合を観察することによって、主要パラメータである許容待ち時間の設定値が妥当であることを確認している。

この研究成果は、交通シミュレーションによる従来手法の予測精度を維持した上で、待避区間の最適配置における煩雑さを解消することに加え、拡幅コストと待ち時間のバランスを検討する際の有用な判断材料を提供する効果がある。さらには、このような最適化アプローチを通じて、これまで交通シミュレーションを用いた実施してきた建設工事計画の高度化に寄与していくことが期待できる。

目 次

第1章 序 論	1
1.1. 本研究の背景.....	1
1.1.1. 建設工事における計画業務とシミュレーション技術	1
1.1.2. 交通シミュレーションと1.5車線の道路	3
1.2. 本研究の目的と貢献.....	4
1.2.1. 狭隘区間と待避区間に対する評価式の提案	6
1.2.2. 進化計算を用いた待避区間の最適配置.....	7
1.3. 本論文の構成.....	8
第2章 関連研究	9
2.1. 交通シミュレーションに関する研究	9
2.1.1. 交通シミュレーションの分類	9
2.1.2. 追従モデルに基づく交通シミュレーション	11
2.2. 最適化手法に関する研究.....	12
2.2.1. 進化計算：遺伝的アルゴリズム	14
2.2.2. 多目的最適化	17
2.3. シミュレーションと最適化に関する研究	20
2.4. 1.5車線の道路に関する研究	23
第3章 狭隘区間と待避区間に対する評価式の提案	25
3.1. 評価式の定式化.....	25
3.1.1. すれ違い可能な車種の組合せと区間制約	26
3.1.2. 車両の到着分布.....	28
3.1.3. 狭隘区間の評価式（待ち時間の算出）	31
3.1.4. 待避区間の評価式（必要待避区間長の算出）	36
3.1.5. 区間制約に応じて考慮すべき小型車交通量	39
3.2. 評価式と交通シミュレーションとの比較検証	40
3.2.1. 狭隘区間に関する検証	44
3.2.2. 待避区間に関する検証	45
3.2.3. 計算時間の評価.....	50

3.2.4. 確率変動の有無による平均待ち時間の違い	50
3.3. 評価式の要件に関する確認	52
第4章 進化計算を用いた待避区間の最適配置	53
4.1. 進化計算：遺伝的アルゴリズムの適用方法.....	53
4.1.1. 拡幅パターンの遺伝子表現と遺伝的操作.....	53
4.1.2. 遺伝子の評価方法	56
4.2. 事例適用による評価.....	58
4.2.1. 適用問題の概要.....	58
4.2.2. 適用結果と従来方法との比較検証.....	60
4.2.3. 許容待ち時間に関するパラメータスタディ	64
4.2.4. 多目的最適化を用いたトレードオフ分析.....	69
4.3. 提案手法の活用シナリオ.....	79
4.4. 最適化の要件に関する確認	84
第5章 結 論	87
5.1. 本研究のまとめ	87
5.1.1. 課題・目的.....	87
5.1.2. 提案内容	88
5.1.3. 評価結果	89
5.2. 今後の課題	92
5.2.1. 評価式の拡張（信号制御，誘導員による台数制御）	92
5.2.2. 最適化モデルの拡張（既存待避区間に関する前提の有無）	94
5.2.3. 意思決定者の選好を反映した多目的最適化	95
謝 辞	97
参考文献	99
付 録	107
研究業績	135

目 次

図 1-1	シミュレーション技術の建設分野における解析例	2
図 1-2	拡幅による局所改良を用いた待避区間の確保	4
図 1-3	待避区間の最適配置に関する従来の検討フロー	5
図 2-1	利用目的による交通シミュレーションの分類	10
図 2-2	最適化問題の分類と組合せ最適化の解法.....	14
図 2-3	GA における探索のイメージ.....	15
図 2-4	GA の基本アルゴリズム	16
図 2-5	GA における遺伝的操作に関する模式図	16
図 2-6	スカラー化による多目的最適化と課題.....	18
図 2-7	SPEA2 の基本アルゴリズム.....	19
図 3-1	交通シミュレーションと評価式の関係	25
図 3-2	すれ違いに必要な道路幅員.....	27
図 3-3	車両到着間隔に関する確率算定イメージ.....	29
図 3-4	狭隘区間の関連パラメータ	32
図 3-5	先頭車両の待ち時間の算定概念図	33
図 3-6	平均待ち時間の対象台数の算定概念図	34
図 3-7	最大待ち時間における対向車両到着時間の算定概念図	36
図 3-8	待避区間の関連パラメータ	37
図 3-9	シミュレーション結果の可視化例	41
図 3-10	すれ違いロジックの基本フロー.....	41
図 3-11	狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ	46
図 3-12	狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ	47
図 3-13	待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ	48
図 3-14	待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ	49
図 4-1	拡幅パターン遺伝子表現.....	54
図 4-2	既存待避区間の数と交叉点数の関係例	55

図 4-3	突然変異に関する模式図	56
図 4-4	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	61
図 4-5	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	65
図 4-6	GA における収束グラフ：許容待ち時間「60 秒」	67
図 4-7	GA における収束グラフ：許容待ち時間「120 秒」	67
図 4-8	GA における収束グラフ：許容待ち時間「180 秒」	68
図 4-9	GA における収束グラフ：許容待ち時間「240 秒」	68
図 4-10	GA における収束グラフ：許容待ち時間「300 秒」	69
図 4-11	多目的最適化における解集合（第 500 世代×4 回分）：拡大表示.....	70
図 4-12	多目的最適化における解集合（第 0 世代×4 回分）	73
図 4-13	多目的最適化における解集合（第 1 世代×4 回分）	73
図 4-14	多目的最適化における解集合（第 5 世代×4 回分）	74
図 4-15	多目的最適化における解集合（第 10 世代×4 回分）	74
図 4-16	多目的最適化における解集合（第 50 世代×4 回分）	75
図 4-17	多目的最適化における解集合（第 100 世代×4 回分）	75
図 4-18	多目的最適化における解集合（第 500 世代×4 回分）	76
図 4-19	拡幅コストに対する遺伝子パターン数分布（第 500 世代×4 回分）	77
図 4-20	拡幅箇所数に対する遺伝子パターン数分布（第 500 世代×4 回分）	77
図 4-21	拡幅総延長に対する遺伝子パターン数分布（第 500 世代×4 回分）	78
図 4-22	平均待ち時間に対する遺伝子パターン数分布（第 500 世代×4 回分）	78
図 4-23	従来手法による待避区間の最適配置に関する検討フロー.....	79
図 4-24	提案手法（パラメータスタディ）による検討フロー.....	80
図 4-25	提案手法（多目的最適化）による検討フロー	81
図 4-26	パレートフロントの屈折点と着目すべき解領域.....	83
図 4-27	凹形状の屈折点に対する考え方.....	84
図 5-1	選好を反映した非劣解集合の構成イメージ.....	95
図 B-1	狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ：区間制約「低」	122
図 B-2	狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ：区間制約「中」	123

図 B-3	狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ：区間制約「高」	124
図 B-4	狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ：区間制約「低」	125
図 B-5	狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ：区間制約「中」	126
図 B-6	狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ：区間制約「高」	127
図 B-7	待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「低」	128
図 B-8	待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「中」	129
図 B-9	待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「高」	130
図 B-10	待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「低」	131
図 B-11	待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「中」	132
図 B-12	待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「高」	133

表 目 次

表 2-1	基本機能による交通シミュレーションの分類.....	10
表 2-2	シミュレーションと最適化の組合せに関する研究事例と課題.....	22
表 3-1	すれ違い可能な車種の組合せと区間制約.....	28
表 3-2	到着分布に対する算定式（その 1）.....	29
表 3-3	到着分布に対する算定式（その 2）.....	30
表 3-4	到着分布に対する算定式（その 3）.....	31
表 3-5	考慮すべき小型車交通量.....	39
表 3-6	シミュレーションに用いたパラメータ一覧.....	42
表 3-7	シミュレーション結果の待ち時間に関する統計情報（狭隘区間長：200m）.....	43
表 3-8	交通シミュレーションと評価式の計算時間の比較.....	50
表 3-9	確率変動の有無による平均待ち時間の比較（区間制約「低」）.....	51
表 4-1	区間別の適用可能工法と区間制約.....	58
表 4-2	既存待避区間と拡張可能ブロック数.....	59
表 4-3	その他のパラメータ一覧.....	60
表 4-4	適用結果と検討時間の比較.....	62
表 4-5	許容待ち時間に対する結果比較.....	66
表 4-6	多目的最適化に関するパラメータ一覧.....	70
表 4-7	非劣解集合の範囲別比較.....	72
表 5-1	すれ違い制御方式による切り替わりサイクルと捌け残り台数に対する違い.....	93
表 A-1	シミュレーション結果のスナップショットと統計情報：区間制約「低」.....	107
表 A-2	シミュレーション結果のスナップショットと統計情報：区間制約「中」.....	112
表 A-3	シミュレーション結果のスナップショットと統計情報：区間制約「高」.....	117

第1章 序 論

1.1. 本研究の背景

1.1.1. 建設工事における計画業務とシミュレーション技術

土木・建築分野に関わる建設工事においては、扱う構造物の規模が大きく、周辺環境や近隣施設、交通インフラ等との相互作用・関連性が強い。そのため、計画段階から工事中や竣工後の利用状況や周囲への影響度合いを視覚化して、計画の妥当性・安全性を確認しておくことは重要な意味がある。建設工事には土木工事と建築工事があり、そのうち建築工事は建築物を扱う工事で、土木工事は建築工事以外の工事となる。建設工事や建築物の詳細は、建設業法（第一章総則第二条）や建築基準法（第一章総則第二条の一）等に定義されているが、一般に、建築では住宅やオフィスビル、商業施設などのような人が内部で活動する空間を扱い、土木では道路や橋、トンネル、ダムといった人の暮らしを支えるための社会インフラを扱う。建築分野における計画業務は、主に設計の比較的初期段階に関わるものが多く、建築物に対する要求や条件に従って形の基本を造り出すことが主な目的となる [1]。建物の基本的な構造や外観を設計することに加え、内部から見た人間の行動や心理に適した建築物を計画することも重要である。一方、土木分野においては社会そのものやそれを取り巻く環境も対象となることから、道路計画や鉄道計画、都市交通計画など、より広範なものが含まれる [2]。また、施工期間や供用期間が長くなることが多いため、円滑な建設計画を立案することや維持管理を含めた事業全体をマネジメントすることも土木計画の一つといえる。さらに、土木・建築に共通した部分として建造物に関する防災計画も重要であり、建物内での火災に対する避難検証や、津波に対する広域での避難計画などが対象となる。

計画・設計業務を行うにあたっては、その計画の妥当性や根拠を技術的に評価・検証するための手段として、様々な物理実験が行われてきた。例えば、建物の耐震性能を測るための振動実験では、実際の建物に模した何分の一かの模型や、場合によっては実物大の建築物に実際に発生した地震と同等の振れを与え、固有周期や崩壊までのプロセスを詳しく分析することで必要な建物の構造や強度を検討する。また、風の影響を評価するためには、巨大な風洞装置を構築して、実際に風が当たった時の流れを見ることで、建物の形状に対する影響度

合いを確認している。しかし、物理実験だけでは規模的にも費用的にも限界があることから、古くからシミュレーション技術が強力な手段となっていた。先に挙げた建物や地盤の地震応答に関する構造解析、風や水・熱などの流体解析のほか、音や振動の伝搬計算といった物理シミュレーションがその例である。風や熱の解析は、建物の強度に関する検討のみならず、建築計画における人の住空間を対象とした温熱環境の評価にも使われている。また、音や振動のシミュレーションも室内の快適性を評価するための技術として使われる一方、工事中の騒音・振動対策に関する検討にも有効である。さらに、連続性が高く物理法則に従う物理シミュレーション以外にも、人や車の挙動のような離散的な状態変化や社会システムを扱うシミュレーションがあり、近年マルチエージェント・シミュレーションを用いて評価するケースが増えている。マルチエージェント・シミュレーションは、行動主体である人や車をエージェントとして、それらの行動ルールと相互作用をモデルとして記述することによって、対象とする社会システムを模倣しようとするものである。実験が難しい社会現象を個々のエージェントの行動を記述することで、ボトムアップ的に再現しようとするアプローチである。単独のエージェントにはそれほど複雑な行動ルールは記述しないが、複数のエージェントの相互作用によって実際の社会現象に相当する複雑で知的な振る舞いを見せるものをマルチエージェントととらえることができる [3]。建設分野においては、人流による混雑評価や建築計画における人間行動への影響評価、工事中の施工地区周辺の交通流解析に適用できる。文献 [4] 等に基づき、建設分野におけるシミュレーション技術の解析例を図 1-1 に整理する。

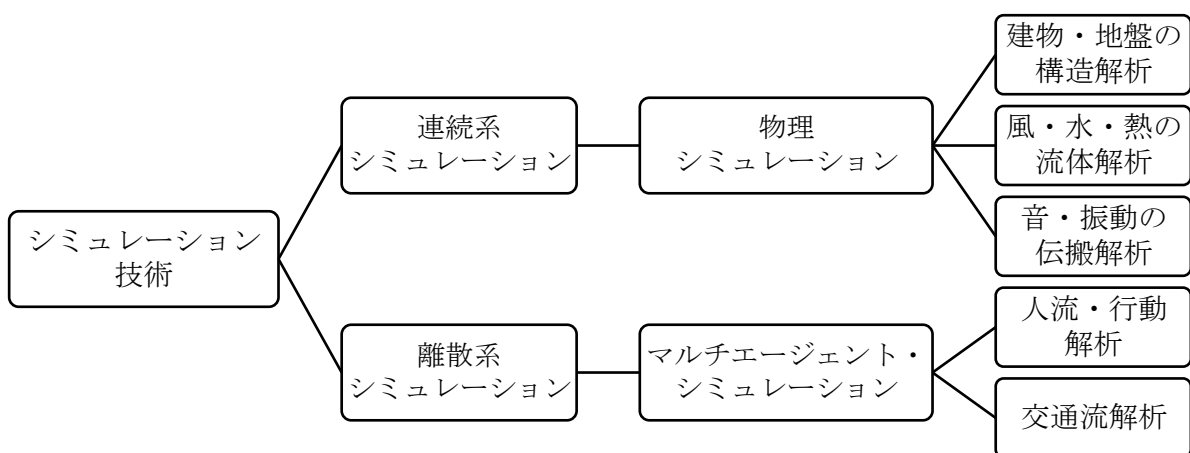


図 1-1 シミュレーション技術の建設分野における解析例

このうち筆者らは、人流・行動解析の分野において 2006 年頃からマルチエージェント型のシミュレータを開発し、様々な用途施設に対する実務適用を進めている。当初は、道路工事や駅改良工事に伴う歩行者通路計画の検討・評価ツールとして、浅野 [5] が提案する衝突回避の予測行動ロジックに基づく実座標ベースのシステムを構築した [6]。その後、避難計画への適用を進める中で、熱・煙の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析の結果を人間行動に反映できるよう機能拡張を行った [7]。放射受熱量や減光係数の人への影響度合いについては、火災分野の既往研究 [8] [9] の成果を取り入れた。また、避難開始に至る心理状態の変化を再現するため、位寄 [10] のモデルに基づき個人差を考慮した状態遷移モデルを組み込んでいる。交通流解析についてもかなり以前から取り組んでいる。交通シミュレーションの計画業務への適用に関しては、次節の 1.1.2 に詳しく記載する。

1.1.2. 交通シミュレーションと 1.5 車線の道路

交通シミュレーション [11] [12] は、車社会の成熟に伴って道路投資額が頭打ちになる中、最も効果の高い道路整備計画を立案するためのツールとして注目されるようになった。交通に関する従来の評価手法には「交差点飽和度」や「混雑度」といった静的な評価法が使われてきた。静的評価法では単体の交差点に対して交通需要を満足するか否かは評価できても、近接する複数の交差点間での影響を動的に評価することは難しい。さらに近年では、交通規制や交通制御、渋滞情報の提供による影響の評価など交通施策の多様化が進んでおり、短時間に状況が刻々と変わるような交通環境においては、交通シミュレーションのような動的な評価手法が有効となる。建設工事においても、工事中の近接道路における工事規制や工事車両の搬入搬出時の影響評価に交通シミュレーションを活用しており、さらには駅前広場計画での複雑な動線交錯を含む検討にも使用されている [13]。

一方、都市部以外、特に山間地域での建設工事においては、狭隘道路でのすれ違いを伴う工事車両の資材等運搬効率の評価が重要になっており、交通シミュレーションを適宜用いて、すれ違い時の車両の制御方法や待避区間の妥当性の検証を行っている。近年、これに関連して、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弾力的に組合せた 1.5 車線の道路 [14] 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も，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工事車両のような大型車の往来が集中する場合がある．工事車両の運搬効率の確保は施工計画上の重要な課題であるが，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から，そのままの道路ではすれ違いが困難なために大渋滞が発生してしまうなど，工事のみならず一般車両への影響も計り知れない．とはいえ，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る．そこで，1.5車線の道路の考え方を適用して，交通シミュレーションによる検証を適宜行いながら図1-2のような拡幅による局所改良を行うことによって，低コストで待ち時間を十分に減らすことが有効となる．

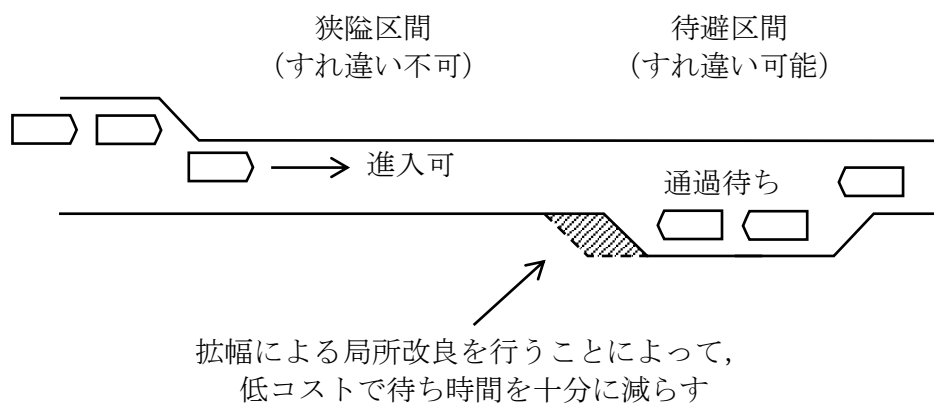


図 1-2 拡幅による局所改良を用いた待避区間の確保

1.2. 本研究の目的と貢献

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くの労力が必要となる．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 [15] [16] 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。特に計画交通量が多い区間に対しては、車両の動的な挙動を評価できる交通シミュレーションを併用して、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 1-3 には、待避区間の最適配置を検討する際に、筆者らがこれまで交通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。

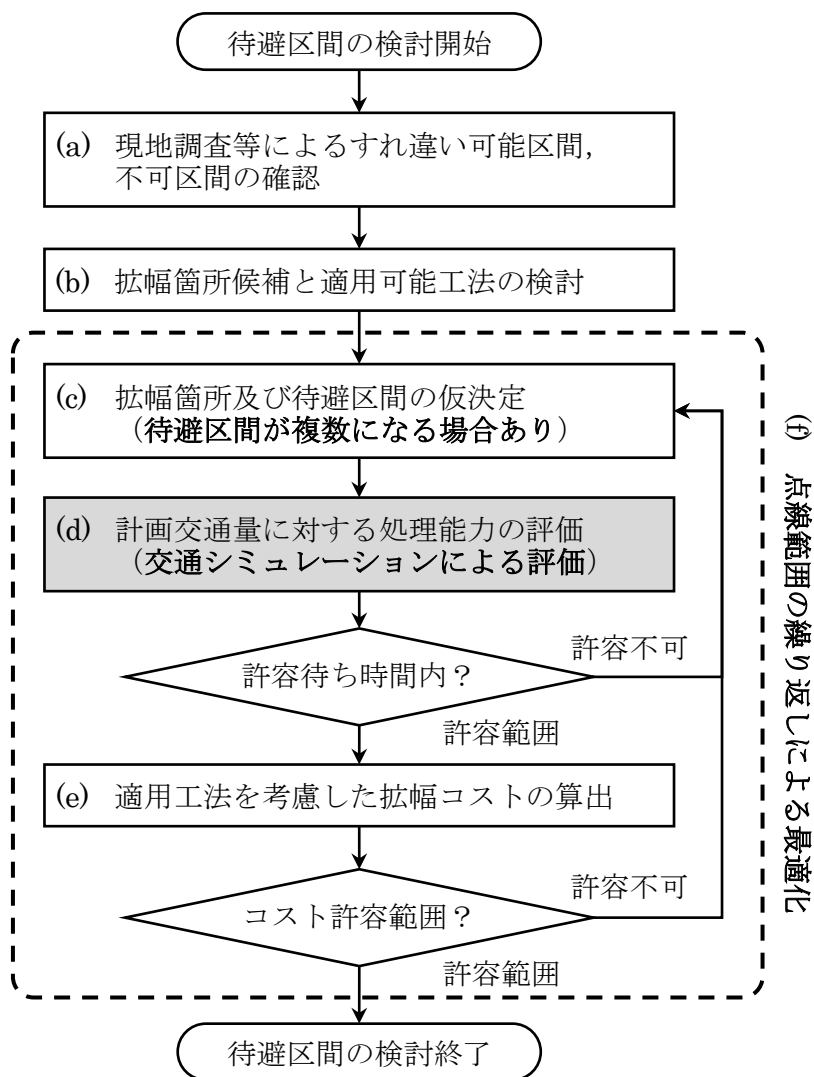


図 1-3 待避区間の最適配置に関する従来の検討フロー

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、拡張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張箇所と待避区間を経験と勘を基に仮決定した上で、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は拡張コストもしくは待ち時間の面で不十分な結果となった場合には、図 1-3 の点線範囲 (f) における拡張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など、その拡張パターンは非常に多く検討時間がかかる上に、試行錯誤となることで最適配置の導出も困難と言わざるを得なかった。

そこで本論文では、計算時間のかかる交通シミュレーションの代替手段として、まず図 1-3 の (d) に対応した評価手法について、大型車・小型車の混在や車両到着の確率変動も考慮できる、一般的で高速な評価式を構築することとした。さらに、その評価式に最適化手法を組み合わせることで、待避区間の最適配置と迅速で効果的な整備計画のための手法の確立を目指すこととした。特に、確率的な車両到着を含む交通シミュレーションにおいては、シミュレータの高速化やパラメータスタディのような段階的なアプローチだけでは網羅的な検証に限界がある。確率変動も考慮した評価手法に数理的な最適化手法をうまく融合することができれば、人の経験や勘よりも最適に近い解導出が期待できる。なお、繰り返し検証後の最適化された拡張計画に対しては、最後にあらためて交通シミュレーションによる確認を行うことも可能であり、拡張パターンが多岐にわたるケースでは、評価式による区間評価の高速化の効果はより大きくなる。例えば、既存待避区間の前後 50m までを広げる組合せの総数は、5m 単位で考えて $(50/5)^2 = 10^2$ 通りとなるが、同様の待避区間が 3 か所あった場合、さらにその 3 乗 $(10^2)^3 = 10^6$ 通りと指数的に増えていくためである。

1.2.1. 狭隘区間と待避区間に対する評価式の提案

交通シミュレーションを実行するにあたっては、検討中の計画に対する問題点のあぶり出しや対策効果などの比較検討であれば、数回のシミュレーションと可視化によっても十分な効果を得られる。また、入力パラメータ（設計変数）の評価項目（目的関数）に対する感度を分析する場合には、パラメータスタディによる評価を行うことが多い。しかし、変化させた

い設計変数の数が多く、取り得る範囲も広い場合、実行すべき組合せが膨大となり最良案を見つけ出すことが困難となる。そこで、図 1-3 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交通シミュレーションを代替する手段として、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中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。なお、待避中の車両群のうち先頭車両が動き出してから最後尾車両が動き出すまでのタイムラグについても、大型車では無視できないことから評価式に盛り込んでいる。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。詳細は第 3 章に記載する。

1.2.2. 進化計算を用いた待避区間の最適配置

待避区間の長さが足りない場合には、拡幅工事を行って必要な区間長を確保する必要がある。しかし、断続的に狭隘区間が続くケースでは拡幅方法の組合せが多数考えられるため、その都度交通シミュレーションを実行して確認するには限界があった。そこで本論文では、狭隘区間が断続的に続く道路延長全体に対して、図 1-3 の (f) における繰り返しを効率化するため、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考えた上で、組合せ最適化に対応した最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム (GA) [17][18][19] を適用した。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 [20] においても、待避区間の最適配置に 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。3.2.4 に記載するとおり、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も確認してお

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。最適化手法の適用方法については、第4章に詳細を記載する。

1.3. 本論文の構成

第2章以降の内容について、概略の構成を記載する。

まず第2章においては、関連研究を整理する。交通シミュレーションに関する研究として、交通シミュレーションの分類と、その中でも評価式で考慮すべき要素を含んだ追従モデルに基づく交通シミュレーションについての概要を説明する。また、最適化手法に関する研究としては、はじめに最適化手法全般を概観した後に、遺伝的アルゴリズムを中心とした進化計算に関する手法、さらに多目的最適化に関する研究について記載する。その後、シミュレーションと最適化手法の組合せに関する研究について説明する。最後に、本研究の主な適用先である1.5車線の道路に関する研究について記載する。

第3章では、提案手法である評価式による交通シミュレーションの代替方法について記載する。3.1では、評価式の具体的な構成方法として、すれ違い可能な車種の組合せと区間制約や車両の到着分布に関する内容に加え、狭隘区間と待避区間のそれぞれの評価式の定式化方法について説明する。加えて、区間制約に応じて考慮すべき小型車交通量について補足する。3.2では、評価式と交通シミュレーションとの比較検証について掲載する。狭隘区間に関する結果比較、待避区間に関する結果比較、計算時間の比較、確率変動の有無による平均待ち時間の違いについて整理する。

続いて第4章では、進化計算による最適化の適用方法と評価結果について記載する。4.1においては、拡幅パターンの遺伝子表現や遺伝子の評価方法など、具体的な遺伝的アルゴリズムの適用方法について説明する。その後4.2では、最適化手法の事例適用と評価について記載する。適用問題の概要、適用結果と従来方法との比較、許容待ち時間に関するパラメータスタディの結果について記載する。さらに、多目的最適化を用いたトレードオフ分析の結果を掲載する。4.3では、提案手法の活用シナリオを整理する。

最後の第5章では結論を述べる。本研究のまとめを行うとともに、今後の課題について記載する。

第2章 関連研究

2.1. 交通シミュレーションに関する研究

ここでは交通シミュレーションに関する研究として、交通シミュレーションの分類と、その中でも提案手法である評価式で考慮すべき要素を含んだ追従モデルに基づく交通シミュレーションについての概要を説明する。

2.1.1. 交通シミュレーションの分類

はじめに、一般的な交通シミュレーションの分類を整理した上で、本研究において着目すべき分類上の分野と考慮すべき要素を確認する。交通シミュレーションの分類方法としては、従来、微視的な交通シミュレーションモデルの「マイクロモデル」と巨視的な交通シミュレーションモデルの「マクロモデル」という分類がなされてきた。マイクロモデルは、車両一台一台の挙動を表現することで、比較的狭い範囲での詳細な交通状況をシミュレーションすることができるモデルである。一方、マクロモデルは、車両群を水のような流体として扱うことで、大量の車両の流れを表現することができ、ある地域の道路網や都市レベルの交通状況をシミュレーションすることができるモデルである。

「マイクロ/マクロ」による分類は車両をモデル化する際の方法論に基づくものであるが、近年では、利用目的と判断基準による分類法も提案されている。図 2-1 はそのような分類を行った文献 [21] に記載されている分類法を引用したものであり、「a) 空間的な規模/b) 車両交通への着目点/c) 経路選択行動」の3つの視点から整理されている。また、文献 [11] においても適用対象に適した交通シミュレーションを選択できるように、「マイクロ/マクロ」とは異なる分類法を提示している。表 2-1 はその分類法を引用したものであるが、「①進行方向の車両移動/②車線変更挙動/③経路選択モデル」の3つの基本機能からシミュレーションモデルを4種類のクラスに分類している。このうち、「①進行方向の車両移動」は従来の「マイクロ/マクロ」による分類に近い（追従タイプがマイクロ、交通流特性タイプがマクロ）が、これとは別に「②車線変更挙動」と「③経路選択モデル」の有無を考慮している。

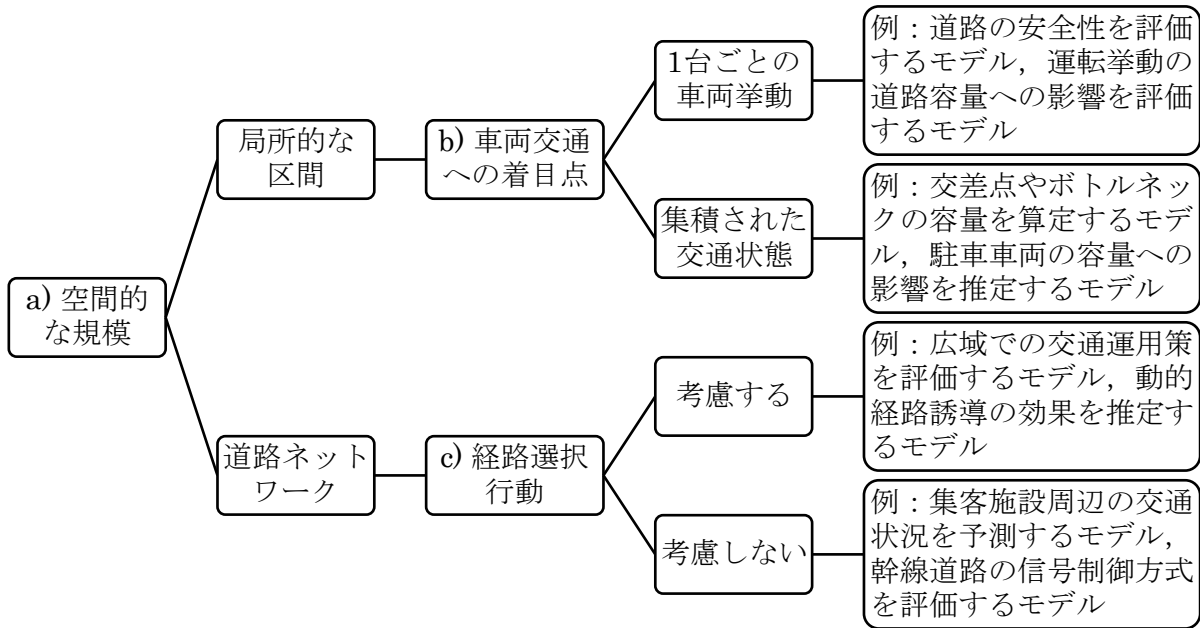


図 2-1 利用目的による交通シミュレーションの分類

表 2-1 基本機能による交通シミュレーションの分類

	①進行方向の車両移動	②車線変更挙動	③経路選択モデル
クラスⅠ	追従タイプ	考慮する	外生
クラスⅡ	追従タイプ	考慮する	内包
クラスⅢ	交通流特性タイプ	考慮する	内包
クラスⅣ	交通流特性タイプ	考慮しない	内包

本論文では、狭隘道路でのすれ違い挙動を扱うことになるが、車両同士の狭隘区間への進入判断などのような非常に細微な動きを表現する必要があるため、「ミクロ/マクロ」の分類では「ミクロシミュレーション」が適していると考えられる。また、利用目的による分類に関しては、「a) 空間的な規模」は「局所的な区間」、「b) 車両交通への着目点」は「1台ごと

の車両挙動」に着目したいので 1 番上段のモデルに分類される。基本機能による分類では、「①進行方向の車両移動」は「追従タイプ」が適合しているが、「②車線変更挙動」と「③経路選択モデル」については特に使用しないので、「クラスⅠ」か「クラスⅡ」であれば良い。筆者らが従来検討で使用してきた交通シミュレーション「REST」 [11] [12] [22] は、追従タイプのミクロシミュレーションであり、さらに車線変更挙動と経路選択モデルも有していることから「クラスⅡ」に属する。また、すれ違い挙動において待避中の後方車両が動き出すまでの間には一定のタイムラグが発生するが、追従モデルであればタイムラグも考慮可能である。つまり、追従モデルは狭隘道路でのすれ違い挙動に適したモデルといえる。

2.1.2. 追従モデルに基づく交通シミュレーション

本論文で提案する評価式が代替しようとしている交通シミュレーションは、後方車両が動き出すまでのタイムラグを考慮できる追従モデルに基づく交通シミュレーションである。追従タイプのシミュレーションでは、前方車両との速度差や距離から自車両の挙動を決定する追従式が定義されており、これまで数多くの追従式が提案されてきた。古くは 1950 年代に遡り、米谷、佐佐木の追従理論 [23] や Chandler, Herman らによる理論 [24] (GM モデル) がその先駆けである。これらのモデルは、それまでの追従理論にはなかった運転者の反応時間遅れが追従式に盛り込まれていることが特徴であり、その後、Gazis と Herman らによって式(2-1)の形で一般化された [25]。

$$a_{n+1}(t+T) = \lambda \left(\frac{(v_{n+1}(t+T))^m}{(x_n(t) - x_{n+1}(t))^l} \right) (v_n(t) - v_{n+1}(t)) \quad (2-1)$$

ここで、 x_n : n 番目の車両の位置、 v_n : n 番目の車両の速度、 a_n : n 番目の車両の加速度、 t : 時刻、 T : 刺激に対するドライバーの知覚・反応時間、 λ : 定数である。その後も数多くのモデルが考案されているが、そのうち Hidas は前方車両との間隔（車頭距離）に着目して、後方車両の加速度が車頭距離に反比例しない式(2-2)を提案した [26]。

$$\begin{aligned}
 a_{n+1} = & \frac{T}{\alpha \cdot T + \frac{1}{2}T^2}(v_n - v_{n+1}) + \frac{T}{\alpha \cdot T + \frac{1}{2}T^2}(x_n - x_{n+1} - \alpha v_{n+1} - \beta) \\
 & + \frac{\frac{1}{2}T^2}{\alpha \cdot T + \frac{1}{2}T^2}a_n
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

α と β は定数であり、より正確には実測値等から回帰して推定する必要があるが、簡易的には停止時（速度・加速度ともに0）の車頭距離から β を、目標速度時（速度が一定で加速度が0）の車頭距離から α を仮定することができ、実用性が高い。前述の交通シミュレーション「REST」では、Gazis, Hidas どちらのモデルにも対応できるが、実用性の面に加え、待避区間長の検討で不可欠な要素となる停止時及び目標速度時の車頭距離を正確に反映できることから、Hidas のモデルを使用している。つまり、評価式の構築においても、これらを加味した式であることが重要となる。

2.2. 最適化手法に関する研究

最適化問題を解くということは、「与えられた制約条件の下で、ある目的関数を最大化もしくは最小化する解を求めること」であるが、問題の性質に応じて様々な解法・手法が提案されており、進化計算もその一つである。ここでは、最適化手法全体を概観した後に、本論文で採用した進化計算及び後半で実施した多目的最適化に関する研究を整理する。

最適化問題のうち、目的関数及び制約条件のすべてが一次関数で表現される問題は、線形計画問題または線形最適化問題と呼ばれ、いずれかが一次関数でない場合には非線形計画問題、非線形最適化問題となる。さらに、設計変数（説明変数）が整数のような離散的な値のみをとる時には、整数計画問題、整数最適化問題となる。これらの問題は総称して数理計画問題と呼ばれ、その解法も総称して数理計画法と呼ばれる。そのうち、線形最適化問題に対する解法は、単体法（シンプレックス法）や内点法、カーマーカー法など、十分に実用的なアルゴリズムが存在する [27] [28]。非線形最適化問題に対しては、目的関数の勾配情報（微分）を活用した、最急降下法や共役勾配法、Newton法などが利用できる [28] [29]。ただし、こ

これらの手法は初期値に依存するため、解空間が多峰性を持つような場合には、厳密な解（大域的最適解）ではない局所解に陥る可能性がある。一方、整数計画問題においては、勾配情報を直接利用することができないことから問題はより複雑化する。そこで、整数の説明変数を一旦実数に拡張して問題を緩和する線形計画緩和によるアプローチや、緩和した条件を目的関数に反映させるラグランジュ緩和、さらに説明変数の一部のみが整数である線形計画問題（混合整数線形計画問題）に対しては、緩和法を発展させた分枝限定法によるアルゴリズムが提案されている [30] [31]。しかし、一般的な整数計画問題は組合せ爆発を起こす可能性のある組合せ最適化問題となり、多項式時間で解けない問題もしくはそれ以上に難しい NP 困難な問題に属するようになる。

組合せ最適化問題に対する解法は、混合整数線形計画問題と同じく分岐限定法のほか、動的計画法が使われ、問題の性質をうまく使うことで一定サイズの問題までは厳密解を得ることができる。しかし、問題の性質がよく分からない場合や一定規模を超える問題については厳密解を得ることが困難となり、局所解に陥るリスクを減らしながらも現実的な時間で良質な近似解を得る方法が有効となる。特に、特定の計算問題に依存しない近似解法は「メタヒューリスティクス」と呼ばれ、近傍探索法や進化計算がその代表例となる。近傍探索法にはタブーサーチ [32] [33] やシミュレーティッド・アニーリング [34] があり、近似解法の中でも比較的単純なアルゴリズムとなっている。一方、進化計算は生物進化の仕組みを模倣した多点探索型のアルゴリズムで、遺伝的アルゴリズムをはじめとした解法が数多く提案されている [35]。以上に挙げた最適化問題と組合せ最適化の解法を整理すると、図 2-2 のように表現できる。

本論文で扱う問題は、単一狭隘区間での説明変数と評価関数の関係はある程度想定できるものの、狭隘区間と待避区間の制約条件が交互に影響し合って制約を満たさない状態が不連続的に出現する可能性から、非線形的な解空間が想定される。よって、非線形計画法などの適用も考えられたが、解空間が多峰性を持つ可能性と後述する拡張の離散化等から、組合せ最適化問題ととらえることが妥当と考えた。そこで、組合せ最適化問題に対する汎用的な解法である進化計算、特に後半で実施する多目的最適化とも親和性が高い GA を採用することとした。

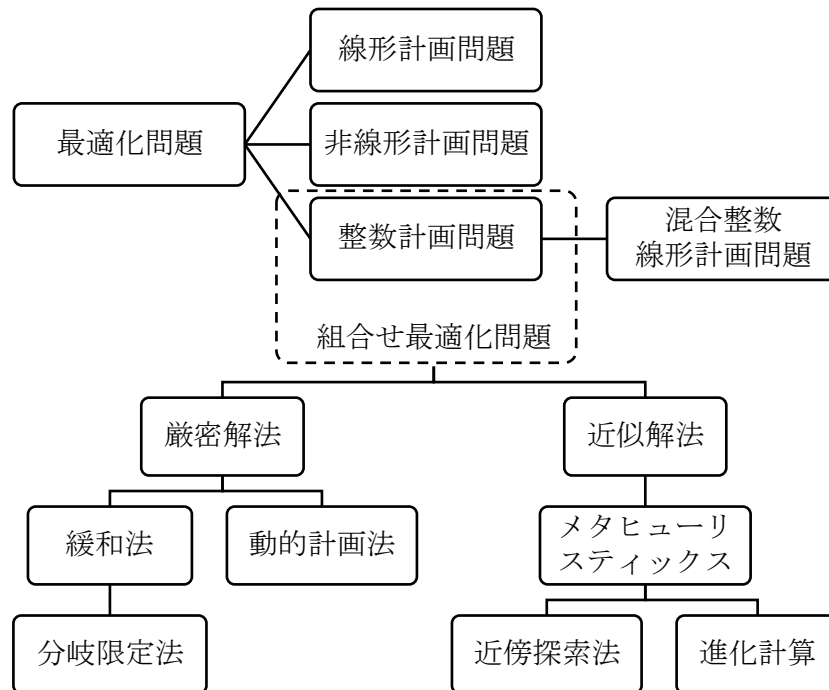


図 2-2 最適化問題の分類と組合せ最適化の解法

2.2.1. 進化計算：遺伝的アルゴリズム

本研究の対象問題は、複数の狭隘区間と待避区間が交互に関連し合った場合に、多峰性を持つ複雑な解空間になる可能性がある。進化計算は、多峰性を持つ解空間においても多点探索による大域探索を実行できる可能性を持っている点からも本研究に適している。ここでは進化計算の概観及び本研究で適用した遺伝的アルゴリズムの特徴について触れる。

進化計算には、遺伝的アルゴリズム (GA) に代表される遺伝的手法や群知能と呼ばれる手法がある。このうち群知能とは、単純な要素が協調して秩序ある行動を生み出す自己組織化の概念を応用したもので、その一手法である粒子群最適化 (PSO) は動物の群れが餌の在りかを共有するのを模倣して、群における最良解と多数の局所的な優良解の両方を保持しながら幅広く探索する手法である [36] [37] [38]。一方、GA は、解候補の多様性を実現するための遺伝的操作である選択淘汰・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 [17] [18] [19]。交叉で個々の解の良い部分をつなげてさらに良い組合せを生

み出したり，突然変異でそれまで検討していなかった新しい組合せを見つけたりしながら，確率的に多点同時に幅広く探索する手法である．群知能と同様に，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，多点探索の能力から大域探索を実行できる可能性を持っており，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も多く応用されている．図 2-3 には GA における探索のイメージを，図 2-4 には GA の基本アルゴリズムを，図 2-5 には交叉と突然変異の方法を模式的に表したものを掲載する．

土木計画分野における GA の応用に関しては，文献 [39] で詳しく整理されている．その中では，道路ネットワークにおける道路整備順位の決定問題 [40] や既存橋梁の最適維持管理計画の策定 [41]，コミュニティバスの路線網策定におけるスケジューリング問題 [42] などの適用分野が取り上げられている．筆者らも，文献 [43] において橋梁群の維持管理計画のコスト最小化及び年度費用の均等化に GA を適用した．各橋梁をどのような維持管理シナリオで運用すればコストが少なく，かつ中長期的な予算制約下で支出を平準化できるかという組合せ最適化問題に帰着したものである．本論文で扱っている道路環境等の制約条件下でのコスト最小化問題と共通した部分も多い．また，大小関係を評価できる目的関数が定義できれば比較的容易に適用が可能であり，さらに次節の 2.2.2 で説明する多目的最適化にも適した多点探索能力を有することから，本論文では GA を適用することとした．

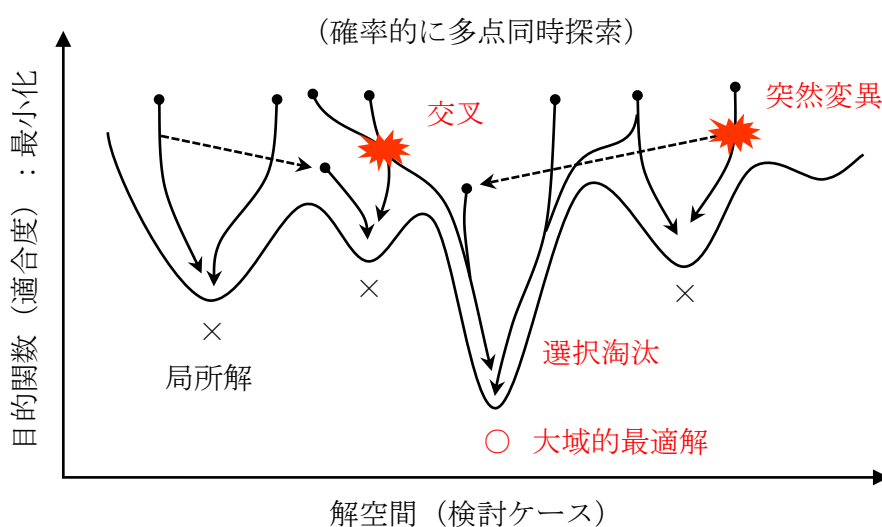


図 2-3 GA における探索のイメージ

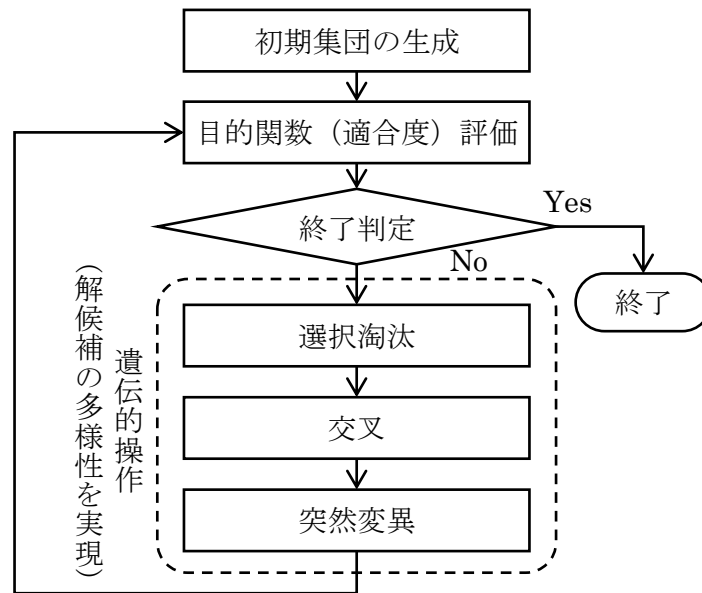


図 2-4 GA の基本アルゴリズム

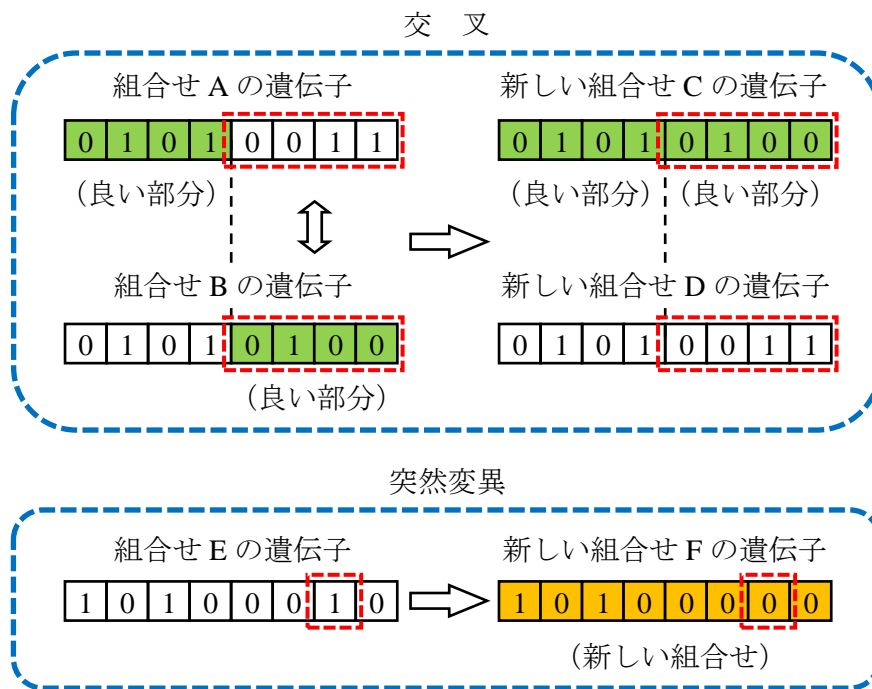


図 2-5 GA における遺伝的操作に関する模式図

2.2.2. 多目的最適化

計画業務においては、コスト最小化などの単目的に終始した検討だけでなく、それとは相反する利便性等とのバランスやトレードオフ関係を確認しながら検討を行うことができれば、全体を俯瞰した納得性の高い意思決定を行うことにつながり有効である。ここでは、多目的最適化の定義と研究の概観に加え、本研究で扱った進化的多目的最適化について述べる。

まず、目的関数が一つである単目的最適化では、一般に式(2-3)のように定式化される。ここで、目的関数の最大化を行う場合には、 $f(x)$ をマイナス倍すれば良い。また、 X は変数空間 Ω の実行可能領域であり、いくつかの等式もしくは不等式を満たす集合が制約条件として与えられることが多い。

$$\begin{aligned} \text{目的関数} : f(x) \in R &\rightarrow \text{最小化 (最大化)} \\ \text{制約条件} : x \in X \subseteq \Omega \end{aligned} \quad (2-3)$$

一方、多目的最適化においては、複数の目的関数を同時に扱うことから、式(2-4)のように定式化できる。ただし、ベクトル値をとる目的関数の最小化は、式(2-5)の二項関係に基づいて評価する。また、最大化問題に対しては二項関係の不等号を逆にする。

$$\begin{aligned} \text{目的関数} : f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \in R^m &\rightarrow \text{最小化 (最大化)} \\ \text{制約条件} : x \in X \subseteq \Omega \end{aligned} \quad (2-4)$$

$$f(x) < f(y) \Leftrightarrow \forall i : f_i(x) \leq f_i(y) \wedge \exists i : f_i(x) < f_i(y) \quad (i = 1, \dots, m) \quad (2-5)$$

ここで、 $f(x) < f(y)$ が成り立つとき、 x は y を支配（優越）するといい、 x を支配する解が実行可能領域 X に存在しない場合に、 x をパレート最適解という。このような解は、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であり、一般に一つとは限らず複数個からなる解集合となる。パレート最適解は複数の目的に対してバランスのとれた解であり、パレート最適解集合は目的関数空間ではパレートフロントと呼ばれる。パレートフロントを観察することで、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。つまり、多目的最適化における最小化とは、パレートフロントに該当するパレート最適解集合を見つけ出すことである。

多目的最適化における初期の研究では、複数の目的関数を重み付き線形和によるスカラー化で単目的化し、かつスカラー化における重み付けを調整しながら、パレート最適解を逐次探索する方法が主流であった。しかしながら、スカラー化による探索は図 2-6 からも分かるように直線による探索に等しく、非凸な部分でのパレート解を抽出することが困難であった。なお、単目的における厳しい制約条件の一部を目標として目的関数化するゴールプログラミング [44] も多目的最適化のアプローチの一つである。さらに、各目的関数はこの程度であれば良いとする希求水準との差分を用いてスカラー化する希求水準法として、満足化トレードオフ法 [45] などが提案されている。

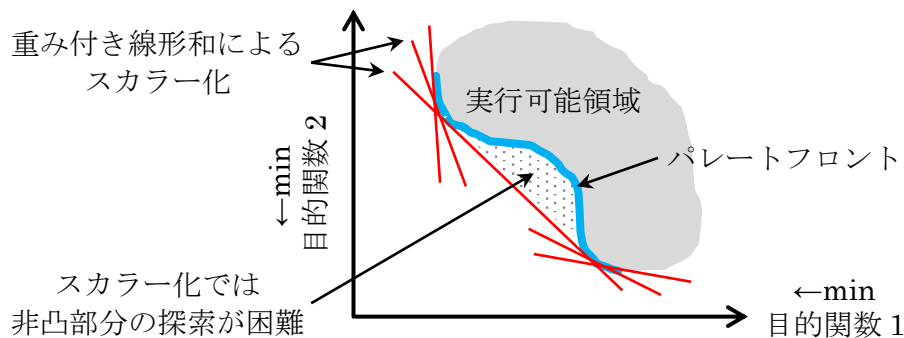


図 2-6 スカラー化による多目的最適化と課題

以上のように、単目的の最適化を拡張して解一つひとつを逐次探索することには限界があるため、近年は、GA 等進化計算の多点探索能力に着目して、複数のパレート解を一斉に探索する進化的多目的最適化が発展してきた。例えば、VEGA (1985), MOGA (1993), NSGA [46] (1994), SPEA (1999), NSGA-II (2000), SPEA2 [47] (2001) など、様々なバリエーションが存在する [48]。このうち SPEA2 は、本論文で採用した多目的最適化手法である。図 2-7 は、文献 [49] から一部引用した SPEA2 の基本アルゴリズムである。SPEA2 の特徴としては、それまでに見つかった解を外部のアーカイブに保存する点や、解の多様性を維持するためのクラスタリング・アルゴリズムである端切りオペレータを有する点を挙げるこ

ができる。その後、近傍での交叉方法などを取り入れた SPEA2+ [50] や、非劣個体の選択アルゴリズムにおいて、より広範でバランスの取れた解を選択するための改良が施された SPEA3 [51] も提案されているが、計算速度と実装の容易さを重視して採用は見送った。なお、進化計算はもともと近似解法であり、その進化計算を用いた進化的多目的最適化も近似解法である。特に解の探索過程においては、その時点で真のパレート最適解を得られている保証はなく、真の解とは区別して非劣解と呼ばれる [52] [53]。本論文においては、特に明記しない場合には、パレート最適解は非劣解であり、パレートフロントも非劣解集合から形成される非劣フロントを指すこととする。

- Step 1 **初期化**：初期母集団 P_0 と空のアーカイブ \overline{P}_0 を生成する。なお、 N は母集団の個体数、 \overline{N} はアーカイブの個体数とする。
- Step 2 **適合度割当て**： P_t と \overline{P}_t における個体適合度を計算する^{※1}。
- Step 3 **環境選択**： P_t におけるすべての非劣個体を \overline{P}_t へコピーし、 \overline{P}_{t+1} とする。ただし、 $|\overline{P}_{t+1}| > \overline{N}$ の場合には、端切りオペレータ^{※2}を用いて \overline{P}_{t+1} を削減する。また、 $|\overline{P}_{t+1}| < \overline{N}$ の場合には、 P_t における優良個体 $\overline{N} - |\overline{P}_{t+1}|$ 個分を \overline{P}_{t+1} へコピーし、 \overline{P}_{t+1} の個体数を \overline{N} にする。
- Step 4 **終了判定**：もし $t \geq T$ もしくはその他の終了条件が満たされた場合、 \overline{P}_{t+1} の中の非劣個体群が最終的な解として出力され探索は終了する。そうでなければ、Step 5へ進む。
- Step 5 **メイティング選択**： \overline{P}_{t+1} からバイナリトーナメント選択によって N 個分の P_{t+1} を選択する。
- Step 6 **変化**： P_{t+1} に対して交叉と突然変異オペレータを実行する。(Step 2へ)

※1 全個体を各適合度に基づいて目的関数空間に配置した後、自分に対する非劣解の数を使って適合度を置き換える。パレート解（非劣解）の適合度は常に0。

※2 端切りオペレータは、解集合上の端点は残しながら、最も隣り合う距離の小さい個体から順に削減する仕組みになっている。その結果、より分散された解集合が得られる。

図 2-7 SPEA2 の基本アルゴリズム

土木計画分野における多目的最適化の応用例としては、施設の最適配置計画に適用した文献 [54] や、都市間交通ネットワークの最適化に適用した文献 [55] などがある。前者は施設の配置パターンを、後者は都市間交通の運行本数を説明変数としており対象問題は異なるが、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などの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。本論文においても、平均待ち時間の低減が利便性の最大化、拡幅コストの削減が投資の最小化となることから、同様のトレードオフ関係を対象とした問題と考えることができる。

2.3. シミュレーションと最適化に関する研究

シミュレーションと最適化に関する研究としては、本研究と異なるアプローチのものがいくつか存在する。ここでは、各アプローチの特徴を整理するとともに課題を確認する。

シミュレーションを活用するにあたっては、検討中の計画に対する問題点のあぶり出しや対策効果などの比較検討であれば、数回のシミュレーションと可視化によっても十分な効果を得られる。しかし、パラメータスタディなどにおいて、変化させたい変数の数が多い場合や取り得る範囲が広い場合には、実行すべき組合せが膨大となり最良案を見つけ出すことが困難となる。シミュレーションに対してパラメータを幅広く検証するための最適化手法の適用に関する研究としては、例えば物理モデルが確立されていて勾配計算が可能な分野を中心に、形状最適化または最適設計問題、最適設計探索と呼ばれる研究分野がある。最適設計探索では、システムを決定する設計変数とシステムの状態を記述する状態変数を組合せて評価関数を定義して、状態変数を決定する状態方程式は等式制約として扱う。また、勾配を求める際には、直接微分法や Lagrange 乗数法による随伴変数法などが用いられる [56] [57]。これらは非線形計画問題の拡張適用と考えられることから、解空間が多峰性を持つ可能性のある問題や組合せ最適化問題にはあまり適していないといえる。

一方、シミュレーションの結果を網羅的に検証するためのアプローチのうち、社会・経済シミュレーションのような離散事象に対する分析・最適化を行う方法としては、井庭が博士論文においてシミュレーションモデルのフレームワーク化に関する方法論を提案している [58]。動的なモデル（エージェントモデル）の構成方法を「モデル・パターン」としてまとめ

るとともに、入力モデルに UML (Unified Modeling Language) [59] を用いることで、非常に汎用性の高いプラットフォームを提供するものである。しかし、UML によるモデリングはオブジェクト指向設計を対象としないシステム開発では十分な普及には至っておらず、対象のシミュレーションモデルをプラットフォームに対応して構築するには一定の習熟度が必要である。また、筆者も国立情報学研究所トップエスイープロジェクトの修了制作において、シミュレーションモデルに実装レベルのモデル検査ツールである Java PathFinder [60] を適用して、検証機能を有する離散事象シミュレーションフレームワークを提案した [61]。シミュレータを上位から制御・操作し、入力パラメータを逐次変化させることで、モデルの妥当性や最適性を自動検証するというものである。ここでも入力モデルに UML を用いており、検証はシミュレーション全体に対してではなく、非決定性に関わる部分のみを取り出した抽象シミュレータに対して実施するなど高速化のための工夫を取り入れているが、確率的な要素まで考慮すると現実的な時間で実行可能な問題のサイズに限界があった。なお、雪島・山本は粒子群最適化法を用いたシミュレーションの最適化システム S3 Simulation System を提案しており、確率的な要素も考慮されている [62]。有償ソフトウェアとしても発展しているが、対象のシミュレーションモデルの精度や構造を維持したまま同システム上に実装することは一定の習熟度と困難が伴う。

その他にも、modeFRONTIER [63] や Optimus [64] など市販の最適化ソフトウェアがいくつか存在する。これらのソフトはユーザが所有する既存のシミュレータとの間に入出力インターフェイスを定義することで、シミュレータを直接起動、実行しながら最適化を行う仕組みを採用している。入出力インターフェイスを用意する必要があるが、既存シミュレータの精度をそのまま維持することができるため、適用のハードルは低い。また、このようなソフトウェアの一つである HEEDS [65] では、最適化アルゴリズムに SHERPA [66] という最適化手法を取り入れている。SHERPA は、大域的探索と局所探索を組み合わせ、少ない探索回数で最適解を得ようとするアルゴリズムである。操作性の面でも優れているが、いずれのソフトウェアもかなりの高額であることに加え、確率的な変動も含む膨大なケースについてシミュレータそのもので最適化計算を行うことは、近年の計算機環境の進化をもってしても限界がある。

以上の研究事例とそれぞれの課題を表 2-2 に整理する。これらの課題を解決するためには、シミュレーションを代替する高速な評価式に最適化手法を組合せた本論文のアプローチが有効であると考えられる。

表 2-2 シミュレーションと最適化の組合せに関する研究事例と課題

研究分野・事例	概要・特徴	課題
形状最適化・最適設計探査	非線形計画問題の拡張適用で、物理モデルが定義されていて勾配計算が可能な分野に適している	解空間が多峰性を持つ可能性のある問題や組合せ最適化問題には不向き
井庭の博士論文	社会・経済シミュレーションに対して分析・最適化を行うための汎用プラットフォームの提案	対象問題の精度を維持したまま、入力モデルである UML ですべてをモデル化するのは困難
天野のトップエスイー修了制作	モデルの妥当性や最適性を自動検証する離散事象シミュレーションフレームワークを提案	確率的な要素まで考慮すると、現実的な時間で実行可能な問題のサイズに限界
雪島・山本の論文	粒子群最適化法を用いたシミュレーションの最適化システムの提案、確率的な要素にも対応	対象問題の精度を維持したまま、システム独自モデルで実装するのは一定の習熟度が必要
市販の最適化ソフトウェア	既存シミュレータを直接実行しながら最適化、独自の最適化アルゴリズムも実装	確率的な変動も含む膨大なケースを、シミュレータそのもので最適化計算を行うことは困難

2.4. 1.5 車線の道路に関する研究

本研究の主な適用先である 1.5 車線の道路は、既存道路の活用を図りながら、地域の状況に応じて自由度の高い設計ができることが利点である。しかし、実際に整備を行うにあたっては、待避所の設置方法などの整備基準が不明確な部分もあり、目標とするサービス水準を達成できるかどうかの保証がないという問題があった。そこで、判断基準を明瞭化する方策として、例えば山内ら [67] 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。簡易シミュレーションでは、交通量、大型車混入率、2 車線区間の割合を変化させたケースを実施して、それぞれの小型車と大型車の区間速度を算定している。その上で、対象区間の交通条件で目標サービス速度を達成するのに必要な 2 車線区間の割合を整理して選定表としてまとめている。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箇所の検討は別途必要となる。

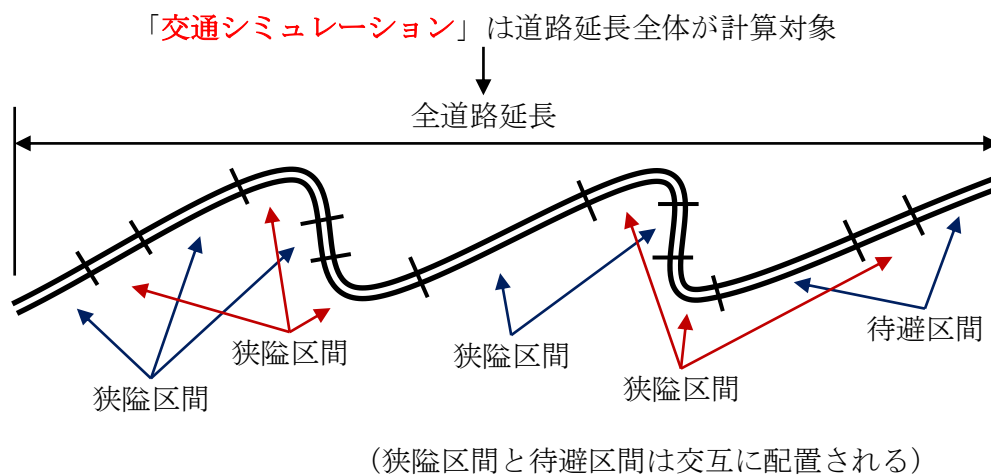
また、先に引用した島根県の 1.5 車線の改良調査・設計マニュアル [15] の参考資料 [68] においては、対向車とのすれ違いの影響を考慮した旅行速度を算出するための推定式が提示されている。資料では、旅行速度への影響要因として、平面線形（曲線半径）、道路幅員、視距（平面視距及び縦断視距）、対向車の影響を挙げており、仮定したモデルケースに対してそれぞれの条件を変化させながら速度算定を行っている。様々なパターンが想定されていて有用な資料であるが、通常の 1.5 車線の改良が計画される路線は大型車の交通量が非常に少ない路線となるため、必要な待避区間の延長については大型車同士のすれ違いを考慮した特別な設定は行われていない。しかしながら、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かなり高くなることが予想される。このことから、狭隘区間による旅行速度の低下のみならず、待避区間に対し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。

以上から、道路線形など実際の道路状況を考慮した具体的な拡幅箇所の検討が可能で、待避区間長に対する評価にも対応した提案手法の開発を行うに至った。

第3章 狭隘区間と待避区間に対する評価式の提案

3.1. 評価式の定式化

この章では、計算時間のかかる交通シミュレーションの代替手段として、先の図 1-3 の (d) に対応した評価式を構成する。ここで、交通シミュレーションでは道路延長全体を計算対象とするのに対して、評価式では道路延長を狭隘区間と待避区間を分解した上で、それぞれの区間に対する評価を重ね合わせることで全体を評価する。狭隘区間の評価式は、狭隘区間長に対して手前で発生する待ち時間を算出し、全体の待ち時間は全狭隘区間の評価値を合算する。待避区間の評価式では、隣接狭隘区間長に対する待ち行列の長さを算出し、滞留台数分の大型車が待避できる長さかどうかを評価する。図 3-1 は、交通シミュレーションと評価式がどのような関係にあるかを図化したものである。なお、狭隘区間と待避区間は常に交互に配置される。



「評価式」は狭隘区間と待避区間を個別に評価

狭隘区間の評価＝狭隘区間長に対する待ち時間

(全体の待ち時間は全狭隘区間の合算)

待避区間の評価＝隣接狭隘区間長に対する待ち行列の長さ

(滞留台数分の大型車が待避できる長さ)

図 3-1 交通シミュレーションと評価式の関係

ここで評価式を構成するための要件を、以下に列挙する。

- ① 後続車両の発進時のタイムラグを考慮するなど、追従モデルによる予測精度を十分に維持していること
- ② 道路幅員に応じてすれ違いが可能な車両の組合せが異なることから、大型車と小型車の混在に対応した仕組みであること
- ③ 極端なケースに偏った評価にならないように、車両の到着間隔に確率変動を考慮していること
- ④ 狭隘区間と待避区間の両方について、確率的な車両の到着間隔に対応して平均値と最大値で評価できること

次節以降では、これらの要件に対応した評価式の構成方法について述べることにする。

3.1.1. すれ違い可能な車種の組合せと区間制約

評価式を定式化するにあたって、まずはすれ違いに必要な道路幅員について考える。車両の幅員は、「道路構造令の解説と運用」[14]に準拠して、以下の長さで設定した。また、カッコ内は曲線区間内での必要幅員である。

- ✓ 小型車（普通乗用車等）：1.7m（1.9m）
- ✓ 大型車（ダンプカー、観光バス等）：2.5m（3.3m）

さらに、停止や後退を伴うようなすれ違いの発生を極力除外するため、すれ違い時は最低限、対向車との離隔を 0.5m、路肩側の側方余裕を 0.25m 確保することですれ違いの可否を判断することとした。図 3-2 は、すれ違いに必要な道路幅員を図化したものである。

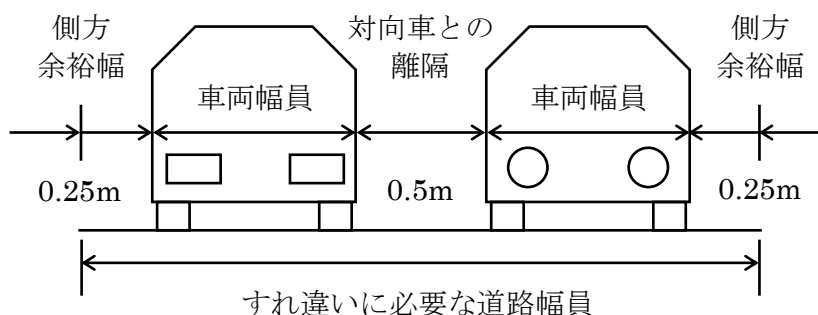


図 3-2 すれ違いに必要な道路幅員

ここで、道路が持つ車両同士のすれ違いに関する制約（以下、区間制約）を、道路形態（直線／曲線）と道路幅員に応じて分類すると、表 3-1 のように整理することができる。図 1-3 の (a) と (b) における検討の判断基準となるものである。なお、見通しが悪く目視やミラーによって反対車両の確認が不可能な狭隘（すれ違い不可）区間に対しては、効率的な車両運行を優先して、出来る限り待避（すれ違い可能）区間に改良することを前提条件とした。つまり、狭隘区間の両端においては、原則ドライバーは反対方向の車両を確認できるものと考ええる。また、道路幅員が表 3-1 の境界値に近い比較的狭い待避区間で、すれ違い時の速度低下が懸念される場合には、区間評価で使用する平均速度の値を周辺よりも低く設定することによって対応する。

なお、区間制約は常に対面通行が可能な「無」のほかに「低」「中」「高」を加えた 4 段階となるが、区間制約が異なると考慮すべき小型車の交通量も変化する。例えば、大型車同士だけがすれ違いできない区間制約「低」においては、対向車列内の小型車は進行方向の車両が狭隘区間に進入することを阻害しないので、その分の交通量は考慮する必要がない。一方、小型車同士でもすれ違いが不可となる区間制約「高」では、小型車・大型車すべての交通量を考慮しなくてはならない。大型車と小型車のすれ違いができない（小型車同士のみがすれ違いできる）区間制約「中」に関しては、考慮すべき小型車の交通量を一部軽減補正して扱うことができる。以下の評価式の構成では、補正前と補正後の 2 種類の小型車交通量を取り扱うので、留意が必要である。具体的な補正量は 3.1.5 で後述する。

表 3-1 すれ違い可能な車種の組合せと区間制約

道路幅員 ^{※1}	車種の組合せ ^{※2}			区間制約
	大型車 同士	大型車と 小型車	小型車 同士	
6.0m 以上	○	○	○	無
7.6m 以上				
5.2~6.0m	×	○	○	低
6.2~7.6m				
4.4~5.2m	×	×	○	中
4.8~6.2m				
4.4m 未満	×	×	×	高
4.8m 未満				

※1 上段：直線区間，下段：曲線区間

※2 ○：すれ違い可能，×：すれ違い不可

3.1.2. 車両の到着分布

車両交通の到着分布は、交通量が少ない場合には指数分布（ポアソン到着）に従い、交通量が多く車両同士の独立性が失われると複数台から構成される車群がポアソン到着を示すアーラン分布に従うとされる [69]が、より適用性を拡大するために以下の4種類の確率分布を想定する。

- ✓ アーラン分布
- ✓ 指数分布（アーラン分布における位相 $k = 1$ ）
- ✓ 一定間隔（アーラン分布における位相 $k \rightarrow \infty$ ）
- ✓ 正規分布

また，図 3-3 のように確率密度関数 $f(x)$ に加え，1時間あたりの想定交通量 N や到着間隔の期待値 $IE = 3600/N$ （秒）， $f(x)$ の累積分布関数 $F(x)$ ，またその逆関数 $F^{-1}(p)$ から算出したパーセント点を用いて，車両の到着間隔に関する確率算定を行うこととする．表 3-2～表 3-4 には，各到着分布に対する算定式を掲載する．ここで， μ は到着間隔の期待値 IE ，アーラン分布における位相 k は想定される車群の台数，正規分布の σ は標準偏差とする．

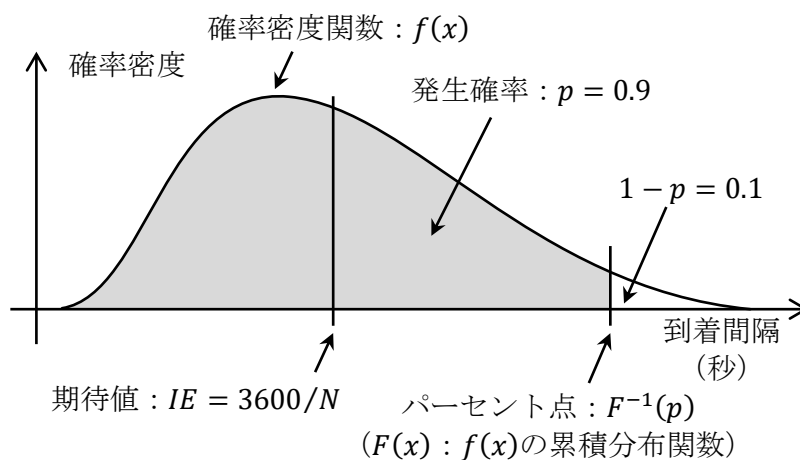


図 3-3 車両到着間隔に関する確率算定イメージ

表 3-2 到着分布に対する算定式 (その 1)

到着分布	計算項目	算出式
指数分布	確率密度関数	$f(x) = \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu}$ $(x \geq 0, \mu > 0)$
	累積分布関数	$F(x) = 1 - e^{-x/\mu}$
	逆関数 (パーセント点)	$F^{-1}(p) = -\mu \log(1 - p)$ $(0 \leq p < 1, \mu > 0)$

表 3-3 到着分布に対する算定式 (その2)

到着分布	計算項目	算出式
アーラン分布	確率密度関数	$f(x) = \frac{x^{k-1} e^{-x/\mu}}{\mu^k (k-1)!}$ $(x > 0, k \in \mathbb{N} > 0, \mu > 0)$
	累積分布関数	$F(x) = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(x/\mu)^i}{i!} e^{-x/\mu}$
	逆関数 (パーセント点)	$k > 0$ に一般化されたガンマ分布を利用
(参考) ガンマ分布	確率密度関数	$f(x) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\mu}}{\Gamma(k)\mu^k}$ $(x > 0, k > 0, \mu > 0)$
	累積分布関数	$F(x) = \frac{\gamma(k, x/\mu)}{\Gamma(k)}$ $\gamma(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$
	逆関数 (パーセント点)	一般には Newton 法などの反復アプローチにて算出
一定間隔	確率密度関数	$\begin{cases} f(x) = 1 & (x = \mu) \\ f(x) = 0 & (x \neq \mu) \end{cases}$
	累積分布関数	$\begin{cases} F(x) = 0 & (x < \mu) \\ F(x) = 1 & (x \geq \mu) \end{cases}$
	逆関数 (パーセント点)	$F^{-1}(p) = \mu$ $(0 \leq p < 1, \mu > 0)$

表 3-4 到着分布に対する算定式 (その 3)

到着分布	計算項目	算出式
正規分布	確率密度関数	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $(\sigma > 0)$
	累積分布関数	$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right)$ $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$
	逆関数 (パーセント点)	一般には Newton 法などの反復アプローチにて算出

3.1.3. 狭隘区間の評価式 (待ち時間の算出)

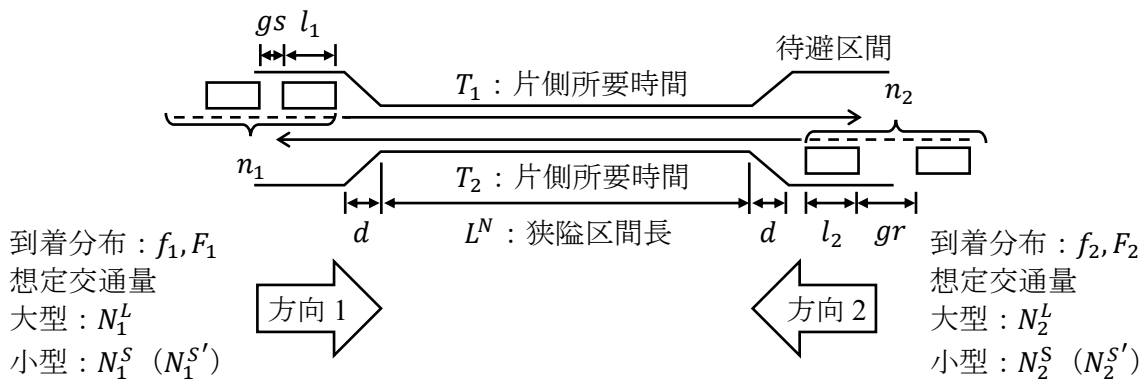
狭隘区間を評価する指標として、旅行速度や旅行時間、待ち時間が考えられる。対象区間における旅行速度や旅行時間は走行時の平均速度を一定とすれば待ち時間から算出可能であり、値の大きさが日常的な感覚として想像しやすく許容範囲も設定しやすいことから、本論文では待ち時間を評価指標として扱うこととした。また、到着分布の確率変動から待ち時間も確率的に変化するため、平均値と最大値の 2 種類の値を求めることとした。図 3-4 には、狭隘区間の主なパラメータを整理しておく。

ここで、方向別の 1 台あたりの片側所要時間 T_i ($i = 1, 2$)は、式(3-1)で算出することができる (加速度を除く)。また、平均車両全長 l_i については、式(3-2)のように大型車の車両全長 l^L と小型車の車両全長 l^S を想定交通量で加重平均した値を用いる。

$$T_i = \frac{L^N + d \times 2 + l_i}{v} \quad (3-1)$$

$$l_i = \frac{N_i^L \times l^L + N_i^S \times l^S}{N_i^L + N_i^S} \quad (3-2)$$

まず、方向1から狭隘区間に到着した先頭車両が、方向2から来る対向車の通過を待つ時間を考える。方向1の車両が狭隘区間に進入するためには、方向2から来る対向車の狭隘区間への到着間隔が、方向2の片側所要時間 T_2 を超えなければならない。そこで、対向車の到着間隔 $IE_2 = 3600 / (N_2^L + N_2^{S'})$ を期待値とした累積分布関数 F_2 から、到着間隔が T_2 以下となる



- L^N : 狭隘区間長 (m)
- T_1, T_2 : 片側所要時間 (秒)
- N_1^L, N_2^L : 大型車想定交通量 (台/h)
- N_1^S, N_2^S : 小型車想定交通量 (台/h)
- $N_1^{S'}, N_2^{S'}$: 区間制約に応じた小型車補正交通量 (台/h)
- n_1 : 方向1 滞留台数 (台)
- n_2 : 方向2 通過台数 (台)
- f_1, f_2 : 到着確率密度関数
- F_1, F_2 : 到着累積分布関数
- l_1, l_2 : 平均車両全長 (m)
- gs : 停止時車両間隔 (m) (例：2 m)
- gr : 走行時車両間隔 (m) (例：15 m)
- d : 車線変更区間距離 (m) (例：5 m)
- v : 平均速度 (m/s) (例：4.2 m/s = 15 km/h)

図 3-4 狭隘区間の関連パラメータ

確率 $p_2 = F_2(T_2)$ を求める．ここで，対向車の小型車交通量には，区間制約に応じた補正交通量 N_2^S' を用いることに注意する．このとき，対向車 n_2 台が通過して $n_2 + 1$ 台目の到着間隔が T_2 を超える場合の確率は $p_2^{n_2} \times (1 - p_2)$ となる．また，その際の所要時間は $n_2 \times \min(T_2, IE_2)$ であるので，方向1の先頭車両の待ち時間は式(3-3)で表すことができる．

$$W_1^H = \sum_{n_2=0}^{\infty} p_2^{n_2} \times (1 - p_2) \times n_2 \times \min(T_2, IE_2) = \frac{p_2}{1 - p_2} \times \min(T_2, IE_2) \quad (3-3)$$

この式は， $1/(1 - p_2)$ 台に1台の確率で十分な到着間隔が空くとして $1/(1 - p_2) - 1 = p_2/(1 - p_2)$ 台が通過する所要時間であるとも考えることができる．先頭車両待ち時間の算定イメージを図3-5に示す．

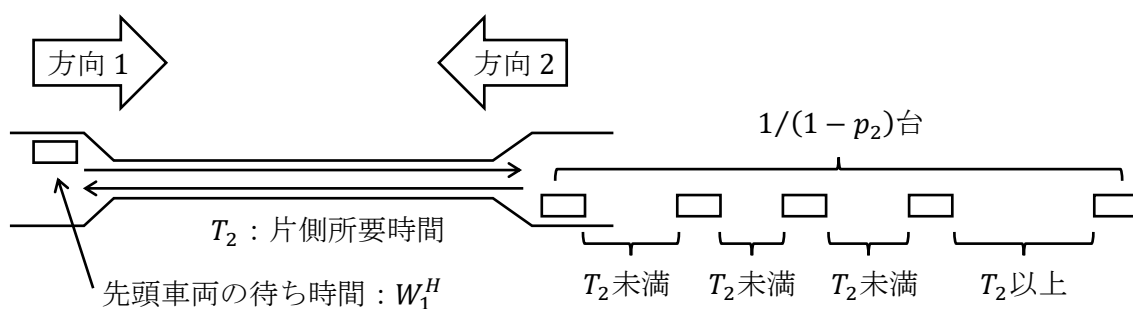


図 3-5 先頭車両の待ち時間の算定概念図

次に，この W_1^H を用いて平均待ち時間を算出する． W_1^H の間に方向1の車両が n_1 台溜まるとした場合，平均到着間隔は W_1^H/n_1 であり，各車両の待ち時間は後から到着する車両であるほど W_1^H/n_1 ずつ少なくなると考えられるので，待ち時間の累計は $W_1^H/n_1 \times n_1 \times (n_1 + 1)/2$ となる．また，先頭車両が動き出してから，2台目の車両が動き出すまでのタイムラグは，停止時間間隔が走行時間間隔に広がるまでの時間であるため，その累計も考慮して足し合わせると，待ち時間の合計は $W_1^T(n_1) = W_1^H/n_1 \times n_1 \times (n_1 + 1)/2 + (gr - gs)/v \times (n_1 - 1) \times n_1/2$ となる．一方，次に方向2の車両が狭隘区間に進入するまでの方向1の到着台数は，対向車の計算時と同様に， $IE_1 = 3600/(N_1^I + N_1^S)$ を期待値とした累積分布関数 F_1 ，到着間隔が T_1 以下となる

確率 $p_1 = F_1(T_1)$ から、 $C_1^P = p_1/(1 - p_1)$ と表すことができる。ここで、 IE_1 の計算に用いる小型車交通量は補正前の交通量 N_1^S である。既に、 n_1 台が到着していることを考慮すれば、到着台数は n_1 以上となる C_1^P の倍数になる。なお、先頭車両が動き出してから最後尾車両が動き出すまでのタイムラグも考慮して、その間に到着する追加台数 $\Delta n_1 = (gr - gs)/v \times (n_1 - 1)/IE_1$ を加味する。また、区間制約に応じて軽減した小型車 $\Delta C_1^P = (N_1^S - N_1^{S'})/N_1^{S'}$ 台は、方向2が狭隘区間への進入を開始しても通行可能である。以上から、平均化における分母となる総対象台数 $C_1^T(n_1)$ と平均待ち時間 $W_1^A(n_1)$ は、式(3-4)と式(3-5)で表すことができる。ここでceilingは、少数以下を整数に切り上げる関数である。また、平均待ち時間の対象台数の算定概念図を図3-6に示す。

$$C_1^T(n_1) = j_1 \times C_1^P + \Delta C_1^P \quad s.t. \quad j_1 = \text{ceiling}((n_1 + \Delta n_1)/C_1^P) \quad (3-4)$$

$$W_1^A(n_1) = W_1^T(n_1)/C_1^T(n_1) \quad (3-5)$$

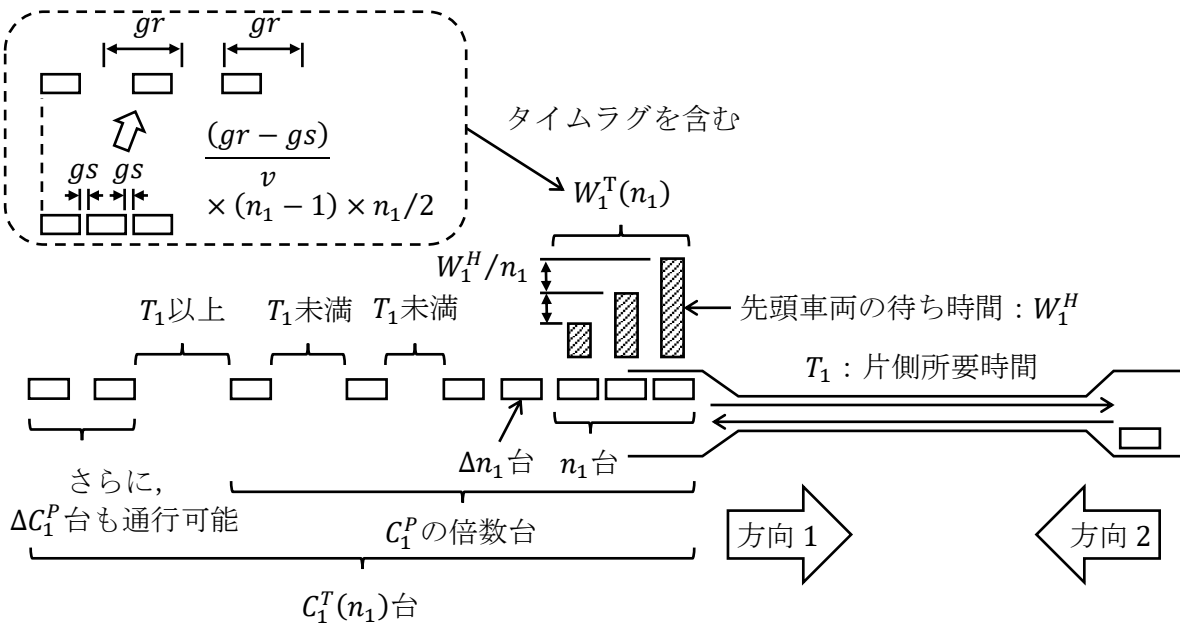


図 3-6 平均待ち時間の対象台数の算定概念図

n_1 台が滞留する確率は、到着分布 f_1 を n_1 台分足し合わせた畳み込み分布 g_{1,n_1} の累積分布関数 G_{1,n_1} を用いて、 $p_1^A(n_1) = G_{1,n_1}(W_1^H) - G_{1,n_1+1}(W_1^H)$ と考えることができる。ここで、 $n_1 + 1$ 台の合計到着時間が W_1^H 以下となれば、そのうちの n_1 台の合計到着時間も W_1^H 以下であるので、 $p_1^A(n_1)$ は0以上である。また、到着間隔は車両全長分の移動時間である $(l_1 + gr)/v$ よりも小さくなることはないので、 n_1 の最大値は $c_1^X = W_1^H \times v / (l_1 + gr)$ となる。よって、全体の平均待ち時間 W_1^A は、 $p_1^A(n_1)$ を正規化した上で $W_1^A(n_1)$ との積の和を取った式(3-6)で与えられる。

$$W_1^A = \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times W_1^A(n_1) \Big/ \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \quad (3-6)$$

続いて、最大待ち時間を考える。対向車が T_2 以上の到着間隔を空けずに連続 k_2 台到着する確率は、最初の1台を除いて $(1 - p_2)^{k_2-1}$ となる。この確率が T_2 以上の間隔を空けて到着する確率 p_2 以下になったときの k_2 が、対向車の最大通過台数と考えられる。よって、 $(1 - p_2)^{k_2-1} = p_2$ を k_2 で解き、 $k_2 = \log p_2 / \log(1 - p_2) + 1$ を得る。方向1の待ち時間は k_2 台の車列の合計到着間隔に対応するが、その合計到着間隔が T_2 以下になる確率が0でない場合には、観測時間が長くなればなるほど最大待ち時間も無限に長くなる。そこで、方向2の到着分布 f_2 を k_2 台分足し合わせた畳み込み分布 g_{2,k_2} を考え、さらに観測時間を交通量のピーク時間 T^P に限定して、その時間内での最大値分布を考える。 k_2 台の車列が T^P 時間内に到着する回数は $m_2 = (N_2^L + N_2^S) / k_2 \times T^P / 3600$ であり、 g_{2,k_2} の累積分布関数を G_{2,k_2} とすると、 m_2 回試行時の最大値分布の最頻値は、 m_2 が大きくなると特性最大値である $G_{2,k_2}^{-1}(1 - 1/m_2)$ に収斂する [70]。最大値分布の特性最大値は平均値と異なるが、本論文では評価指標としての実用性を重視する観点から、特性最大値を最大待ち時間の評価値として代用する。従って、最大待ち時間 W_1^M は式(3-7)にて算出することができる。最大待ち時間における対向車両到着時間の算定イメージを図3-7に示す。

$$W_1^M = \min(G_{2,k_2}^{-1}(1 - 1/m_2), k_2 \times T_2) \quad (3-7)$$

方向2に対しても、1と2の添え字を反転して同様に計算できる。よって、平均待ち時間 W^A については交通量に応じた加重平均(式(3-8))を、最大待ち時間 W^M についてはどちらか大きい方の値(式(3-9))を採用することで、狭隘区間に対する評価式を定義する。

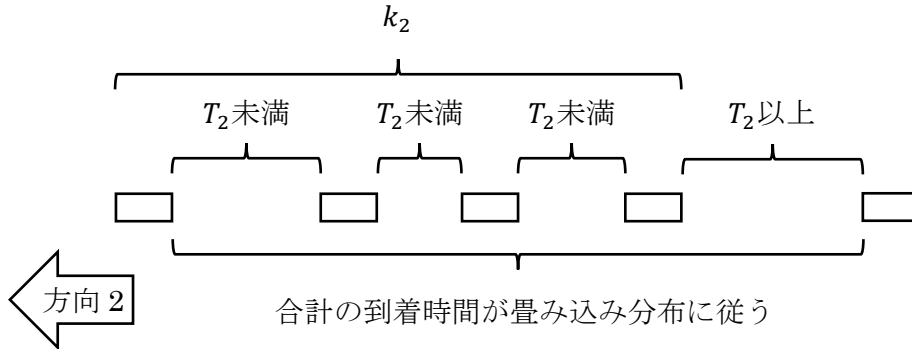


図 3-7 最大待ち時間における対向車両到着時間の算定概念図

$$W^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times W_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times W_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (3-8)$$

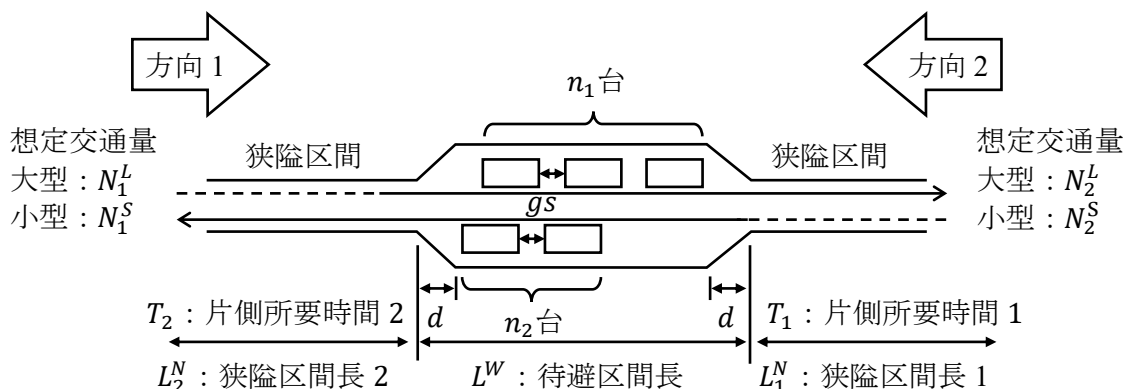
$$W^M = \max(W_1^M, W_2^M) \quad (3-9)$$

3.1.4. 待避区間の評価式（必要待避区間長の算出）

狭隘区間では待ち時間を評価指標としたが、待避区間に関しては、待ち時間の中に滞留する車両の台数と必要な待避区間長が問題となる。はじめに、平均的に必要な待避区間長を算出する方法について考える。図 3-8 には、待避区間の関連パラメータを掲載する。

まず、3.1.3 と同様に、 W_1^H の間に方向 1 の車両が n_1 台溜まった場合を考える。各車両から見た前方の待ち台数は、後から到着する車両ほど増えていくことから、累積的に加算される。また、 n_1 台の最後尾車両が動き出すまでのタイムラグの間に到着する追加台数は Δn_1 であったので、 n_1 台滞留時の平均待ち台数 $C_1^A(n_1)$ と平均必要待避区間長 $L_1^A(n_1)$ は、式(3-10)及び式(3-11)にて算出することができる。

$$C_1^A(n_1) = \frac{(n_1 + \Delta n_1) \times (n_1 + \Delta n_1 + 1)}{2 \times C_1^T(n_1)} \quad (3-10)$$



- L^W : 待避区間長 (m)
- T_1, T_2 : 片側所要時間 (秒)
- L_1^N, L_2^N : 狭隘区間長 (m)
- n_1, n_2 : 滞留台数 (台)
- N_1^L, N_2^L : 大型車想定交通量 (台/h)
- N_1^S, N_2^S : 小型車想定交通量 (台/h)
- gs : 停止時車両間隔 (m) (例: 2 m)
- d : 車線変更区間距離 (m) (例: 5 m)

図 3-8 待避区間の関連パラメータ

$$L_1^A(n_1) = l_1 \times C_1^A(n_1) + gs \times (C_1^A(n_1) - 1) \quad (3-11)$$

以上から、平均待ち時間と同様、 n_1 台が滞留する確率と掛け合わせて和をとることによって、全体の平均待ち台数 C_1^A と平均必要待避区間長 L_1^A を、式(3-12)及び式(3-13)で定義することができる。

$$C_1^A = \frac{\sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times C_1^A(n_1)}{\sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1)} \quad (3-12)$$

$$L_1^A = \frac{\sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times L_1^A(n_1)}{\sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1)} \quad (3-13)$$

続いて、最大待ち台数であるが、まずは最大待ち時間の間に方向1に到着する台数 k_1 を算出する。対向車の通過時間 W_1^M は最大値分布を用いて算定したが、進行方向に関してはより詰まって到着する可能性を考慮して、最小値分布を扱うこととする。最大値分布と同様に、方向1の到着分布 f_1 を k_1 台分足し合わせた畳み込み分布 g_{1,k_1} を考え、さらに観測時間を交通量のピーク時間 T^P に限定してその時間内での最小値分布を考える。 k_1 台の車列が T^P 時間内に到着する回数は $m_1 = (N_1^L + N_1^S)/k_1 \times T^P/3600$ であり、 g_{1,k_1} の累積分布関数を G_{1,k_1} とすると、 m_1 回試行時の最小値分布の最頻値は、特性最小値である $G_{1,k_1}^{-1}(1/m_1)$ に収斂する [70]。ただし、 k_1 はこの時点で未定台数であるが、 $G_{1,k_1}^{-1}(1/m_1)$ は k_1 に対して単調増加であるため、最大先頭待ち台数 C_1^W は式(3-14)で決定することが可能である。

$$C_1^W = \max(k_1) \quad s.t. \quad G_{1,k_1}^{-1}(1/m_1) \leq W_1^M \quad (3-14)$$

さらに、最後の車両が動き出すまでのタイムラグを考慮して、 $\Delta C_1^W = (C_1^W - 1) \times (gr - gs)/(v \times IE_1)$ を加えれば、最大待ち台数 C_1^M と最大必要待避区間長 L_1^M を、式(3-15)及び式(3-16)で算出することができる。

$$C_1^M = C_1^W + \Delta C_1^W \quad (3-15)$$

$$L_1^M = l_1 \times C_1^M + gs \times (C_1^M - 1) \quad (3-16)$$

最後に、方向2に対しても添え字の1と2を入れ替えて同様に計算し、平均待ち台数 C^A と平均待避区間長 L^A については交通量に応じた加重平均 (式(3-17), 式(3-18)), 最大待ち台数 C^M と最大待避区間長 L^M についてはどちらか大きい方の値を採用 (式(3-19), 式(3-20)) することで、待避区間の評価式を定義する。

$$C^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times C_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times C_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (3-17)$$

$$L^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times L_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times L_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (3-18)$$

$$C^M = \max(C_1^M, C_2^M) \quad (3-19)$$

$$L^M = \max(L_1^M, L_2^M) \quad (3-20)$$

3.1.5. 区間制約に応じて考慮すべき小型車交通量

3.1.1 で触れたとおり，区間制約に応じて考慮すべき小型車の交通量は変化する．特に，小型車同士のみがすれ違いできる区間制約「中」については，大型車の交通量によっても影響が異なる．方向 1 から来る小型車が方向 2 から来る大型車と出会う確率は，1 を上限にそれぞれが狭隘区間を通り抜けるのに要する時間に到着する台数を掛け合わせた値，つまり， $\min(1, N_1^S \times T_1/3600 \times N_2^L \times T_2/3600)$ で与えられる．よって，この確率に小型車の交通量を掛けた値が，区間制約が「中」の場合に考慮すべき小型車交通量となる．表 3-5 に区間制約に対応した小型車の補正交通量を整理する．

表 3-5 考慮すべき小型車交通量

区間制約	考慮すべき小型車交通量
「低」 大型車同士のみ すれ違い不可	$N_1^{S'} = 0$
「中」 小型車同士のみ すれ違い可	$N_1^{S'} = N_1^S \times \min\left(1, N_1^S \times \frac{T_1}{3600} \times N_2^L \times \frac{T_2}{3600}\right)$
「高」 小型車同士も すれ違い不可	$N_1^{S'} = N_1^S$

3.2. 評価式と交通シミュレーションとの比較検証

狭隘区間と待避区間の評価式の妥当性を検証するため、2,000mの直線道路の中央付近に狭隘区間を1か所だけ設けた簡易モデルを用意して、交通シミュレーションとの結果比較を行った。本研究の対象は、実際の車両を用いた実験が困難な分野でもあるため、従来の交通シミュレーションの結果を正として、その結果との差異によって妥当性を評価した。また、簡易モデルは直線で表現するが、道路幅員による区間制約を考慮することで曲線区間の評価も代用する。シミュレーションシステムには、すれ違いロジックの組込みが比較的容易であり、文献 [69] における標準検証を実施済みである「REST」を用いた。シミュレーション結果の可視化例を図 3-9 に、組み込んだすれ違いロジックの基本フローを図 3-10、計算に用いたパラメータを表 3-6 に示す。ここで、想定交通量は大型車と小型車の合計を片側 60 台/h として、大型車の混在数を 10 台刻みで変動させた。また、建設工事を想定して 60 台すべてが大型車のケースも考慮した。狭隘区間長については、200m から 600m を 50m 単位で変化させた。区間制約も 3 種類すべて実施したので、ケース数は $7 \times 9 \times 3 = 189$ ケースとなる。また、到着分布には指数分布を想定し、曇み込み分布には、滞留台数もしくは到着台数を位相とするアーラン分布を用いて計算した。なお、交通シミュレーションでは加速度を考慮していることから、評価式での所要時間の算定においても、加速度を考慮した補正を行った。シミュレーション回数は、車両の発生間隔を設定する際の疑似乱数系列を各ケース 100 回ずつ変えて実施し、待ち時間と必要待避区間長の平均値と各回の最大値の平均値を集計した。また、交通量のピーク時間を 1 時間とするため、1 回のシミュレーションで計算する走行時間を 1 時間 15 分として、そのうち始めの 15 分間は非定常状態と考えて集計から除外した。

表 3-7 は、シミュレーション結果のうち、狭隘区間長が 200m のケースについて、待ち時間に関する統計情報をまとめたものである。統計情報としては、乱数系列ごとの平均値に関する情報と最大値に関する情報、さらに標準偏差に関する情報を集計した。ここで、「平均値の平均値」とは乱数系列ごとの平均値の平均であり、乱数系列によって母数が異なることから、「全体の平均値」とは若干値が異なっている。一方、「最大値の最大値」も乱数系列ごとの最大値の最大であるが、あくまでも最大値であることから、「全体の最大値」と必ず一致する。また、「標準偏差の倍数」は「(最大値の平均値 - 全体の平均値) / 全体の標準偏差」によって

算出したものであり，最大値分布が平均値分布に対してどの程度の規模を持っているかを推し量る材料としている。

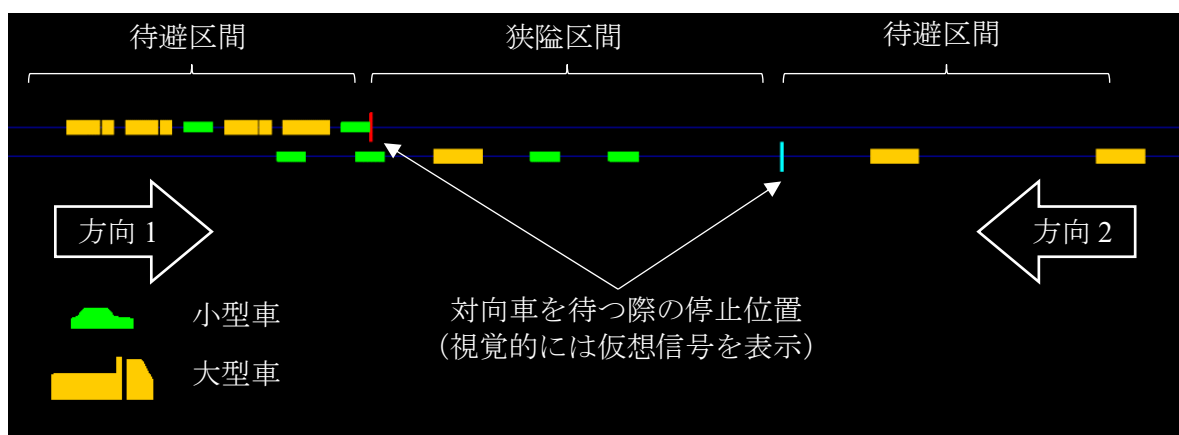


図 3-9 シミュレーション結果の可視化例

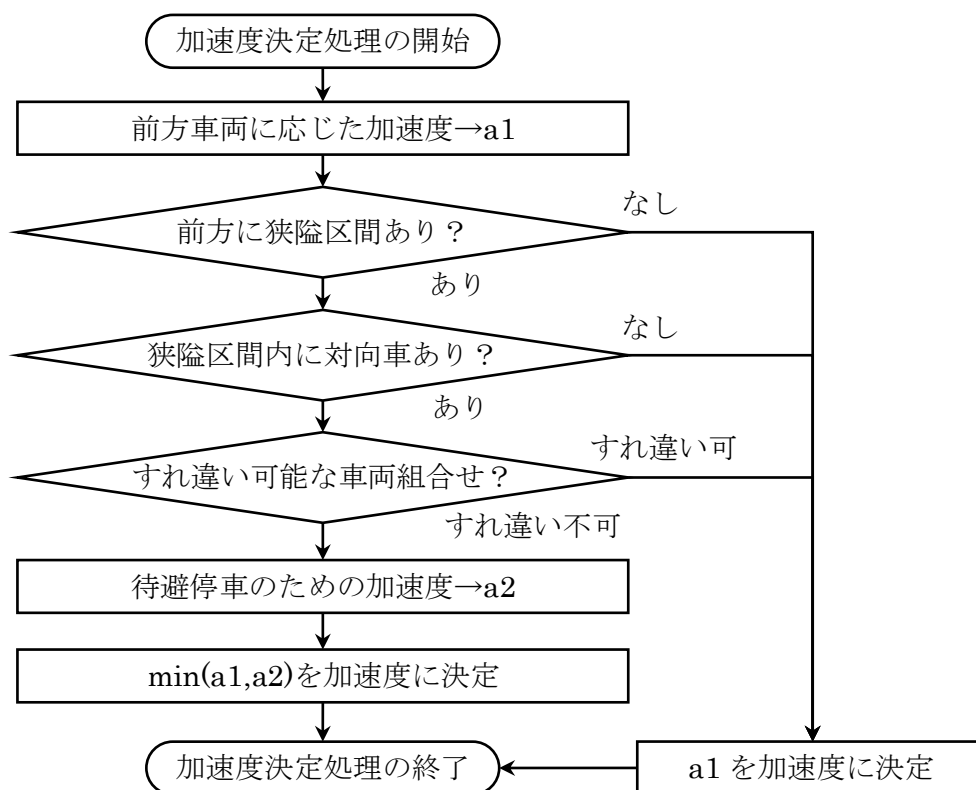


図 3-10 すれ違いロジックの基本フロー

表 3-6 シミュレーションに用いたパラメータ一覧

パラメータ名		設定値
l^L	大型車車両全長	8 m
l^S	小型車車両全長	5 m
N_i^L	大型車想定交通量	0~60 台/h
N_i^S	小型車想定交通量	$60 - N_i^L$ 台/h
v	平均速度	15 km/h
—	発進時加速度	3 km/h/s
gs	停止時車両間隔	2 m
gr	走行時車両間隔	15 m
L^N	狭隘区間長	200~600 m
d	車線変更区間距離	5 m
—	車両到着間隔の確率分布	指数分布

大型車交通量が 0 台/h のケースでは、大型車同士のみがすれ違い不可となる区間制約「低」と小型車同士のみがすれ違いできる区間制約「中」については、特に交互通行を阻害する要因がないため、待ち時間は発生していない。一方、すべての車両が大型車となる大型車交通量 60 台/h のケースでは、どの区間制約の場合でもすれ違いが不可となるため、統計情報もすべて同じ値となっている。続いて表を横に見てみると、区間制約「低」では、大型車の交通量が増えるにつれて待ち時間も少しずつ増えており、区間制約「中」においては、大型車交通量 30 台/h での値の増え方が「低」より顕著である。また、小型車同士もすれ違いが不可となる区間制約「高」では、すべての対向車両が進行の阻害要因となるため、大型車の交通量が増えなくても統計情報に大きな違いは発生していない。なお、標準偏差の倍数は、平均して 4.2 程度であった。これは、最大待ち時間の平均が平均待ち時間に標準偏差の 4.2 倍を加えたあたりに位置していることを示しており、最大待ち時間の平均付近の待ち時間が発生する頻度はそれほど高くないことが分かる。

表 3-7 シミュレーション結果の待ち時間に関する統計情報（狭隘区間長：200m）

区間制約	待ち時間に関する 統計情報（秒）	片側交通量（台/h）：大型車／小型車		
		0／60	30／30	60／0
「低」	全体の平均値	0.0	4.4	18.3
	平均値の最小値	0.0	0.1	9.1
	平均値の平均値	0.0	4.3	18.1
	平均値の最大値	0.0	13.0	29.0
	全体の最大値	0.0	215.4	323.7
	最大値の最小値	0.0	11.8	80.1
	最大値の平均値	0.0	83.8	168.0
	最大値の最大値	0.0	215.4	323.7
	全体の標準偏差	0.0	15.0	35.2
	標準偏差の倍数	0.0	5.3	4.2
「中」	全体の平均値	0.0	13.7	18.3
	平均値の最小値	0.0	5.3	9.2
	平均値の平均値	0.0	13.5	18.1
	平均値の最大値	0.0	22.3	29.1
	全体の最大値	0.0	260.0	323.7
	最大値の最小値	0.0	60.0	80.1
	最大値の平均値	0.0	144.6	168.3
	最大値の最大値	0.0	260.0	323.7
	全体の標準偏差	0.0	29.0	35.2
	標準偏差の倍数	0.0	4.5	4.3
「高」	全体の平均値	17.8	18.0	18.3
	平均値の最小値	9.0	9.2	9.2
	平均値の平均値	17.6	17.8	18.1
	平均値の最大値	28.5	28.8	29.1
	全体の最大値	323.9	322.6	323.7
	最大値の最小値	80.3	79.0	80.1
	最大値の平均値	166.8	166.4	168.3
	最大値の最大値	323.9	322.6	323.7
	全体の標準偏差	34.8	34.9	35.2
	標準偏差の倍数	4.3	4.2	4.3

なお、付録 A には、狭隘区間長が 400m と 600m のケースを含めたシミュレーション結果の詳細情報として、結果可視化時のスナップショット（画面キャプチャ画像）と統計情報を掲載する。

3.2.1. 狭隘区間に関する検証

図 3-11 と図 3-12 は、狭隘区間の評価指標である待ち時間について評価式とシミュレーション結果を比較したものである。なお、図中の平均絶対誤差は式(3-21)及び式(3-22)で算出した値であり、このうち W_{sim}^A と W_{sim}^M は各ケース 100 回分のシミュレーション結果の平均値と最大値を集計したものである。

$$\text{平均待ち時間の平均絶対誤差} = \sum_{\text{対象ケース}} |W^A - W_{sim}^A| / \text{対象ケース数} \quad (3-21)$$

$$\text{最大待ち時間の平均絶対誤差} = \sum_{\text{対象ケース}} |W^M - W_{sim}^M| / \text{対象ケース数} \quad (3-22)$$

平均待ち時間を比較した図 3-11 のうち、区間制約が「低」の大型車同士のみがすれ違いきないケースについては、大型車の数が多くなるほど待ち時間が増えており、評価式とシミュレーションの結果はほぼ同じ傾向を示している。両者の平均絶対誤差は 3.6 秒であり、シミュレーションの結果を十分に追従できている。区間制約が「中」のケースでは、大型車の数が少ない場合において若干かい離があるものの、平均絶対誤差は 7.5 秒とおおよそ合致している。区間制約が「高」のケースは大型車数に依らず同じ結果となるが、評価式の結果もその上に重なっており、一致した傾向を示している（平均絶対誤差は 3.2 秒）。なお、全ケースでの平均絶対誤差も 4.8 秒であり、非常に小さな値に収まっている。

一方、最大待ち時間を比較した図 3-12 では、特に狭隘区間長が長いグラフ右側のケースにおいて、評価式がシミュレーション結果よりも大きな値を示している。多少過大評価にはなるものの、安全側での判定が可能であると考えられる。区間制約が「中」では、評価式がシミュレーションの結果を下回っているケースも見受けられるが、区間制約「低」～「高」全体での平均絶対誤差は 147.7 秒（2 分半程度）であり、最大待ち時間のレベルをおおよそ把握するには十分な結果といえる。ただし、最大待ち時間は平均待ち時間の 7～8 倍の大きさがあり、発生頻度の少ない最大待ち時間に基づいた設計は過剰設計となる可能性があることから、通常は平均値を評価基準とし、最大値は参考値とすることが現実的であると考えられる。実際、

表 3-7 においても触れたように、最大待ち時間の平均は平均待ち時間に標準偏差の 3.3 倍（狭隘区間長 200～600m 全体の平均，200m では 4.2 倍）を加えたあたりに位置しており，発生頻度はそれほど高くないことが予想できる。

3.2.2. 待避区間に関する検証

図 3-13 と図 3-14 は，評価式とシミュレーションの必要待避区間長の結果を比較したものである。図中の平均絶対誤差は，式(3-23)及び式(3-24)により算出した。また， L_{sim}^A と L_{sim}^M については，待ち時間と同様に計算した。

$$\text{平均必要待避区間長の平均絶対誤差} = \sum_{\text{対象ケース}} |L^A - L_{sim}^A| / \text{対象ケース数} \quad (3-23)$$

$$\text{最大必要待避区間長の平均絶対誤差} = \sum_{\text{対象ケース}} |L^M - L_{sim}^M| / \text{対象ケース数} \quad (3-24)$$

評価式における必要待避区間長は，離散値である待ち台数に車両全長を掛けて算出していることから，階段状のグラフとなっている。特に，必要区間長の値が小さい平均値グラフ（図 3-13）の方が視覚的にその傾向は強いが，平均絶対誤差は 3.3m（区間制約「低」で 3.3m，区間制約「中」で 2.8m，区間制約「高」で 3.7m）と車両全長一台分以下の値になっており，かなりの精度で整合している。

図 3-14 の最大必要待避区間長については，最大待ち時間と同様，総じて評価式の方がシミュレーション結果よりも大きな値を示している。とはいえ，全体の平均絶対誤差は 24.4m，大型車 3 台分程度となっており，最大値の水準を掴む上では十分に実用的なレベルといえよう。

なお，付録 B には，評価式と交通シミュレーションとの比較結果について，数値情報を含めた詳細を掲載する。

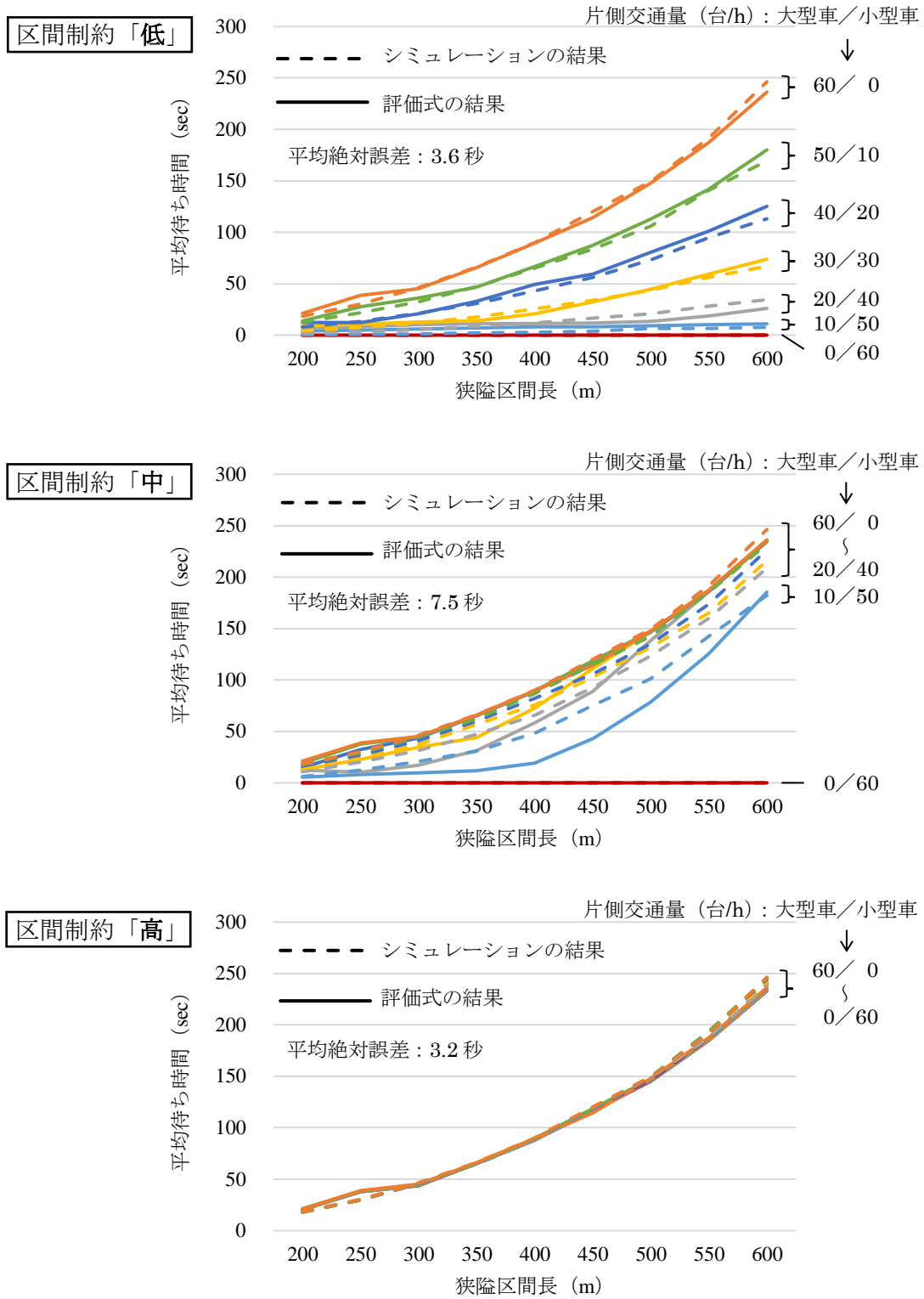


図 3-11 狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ

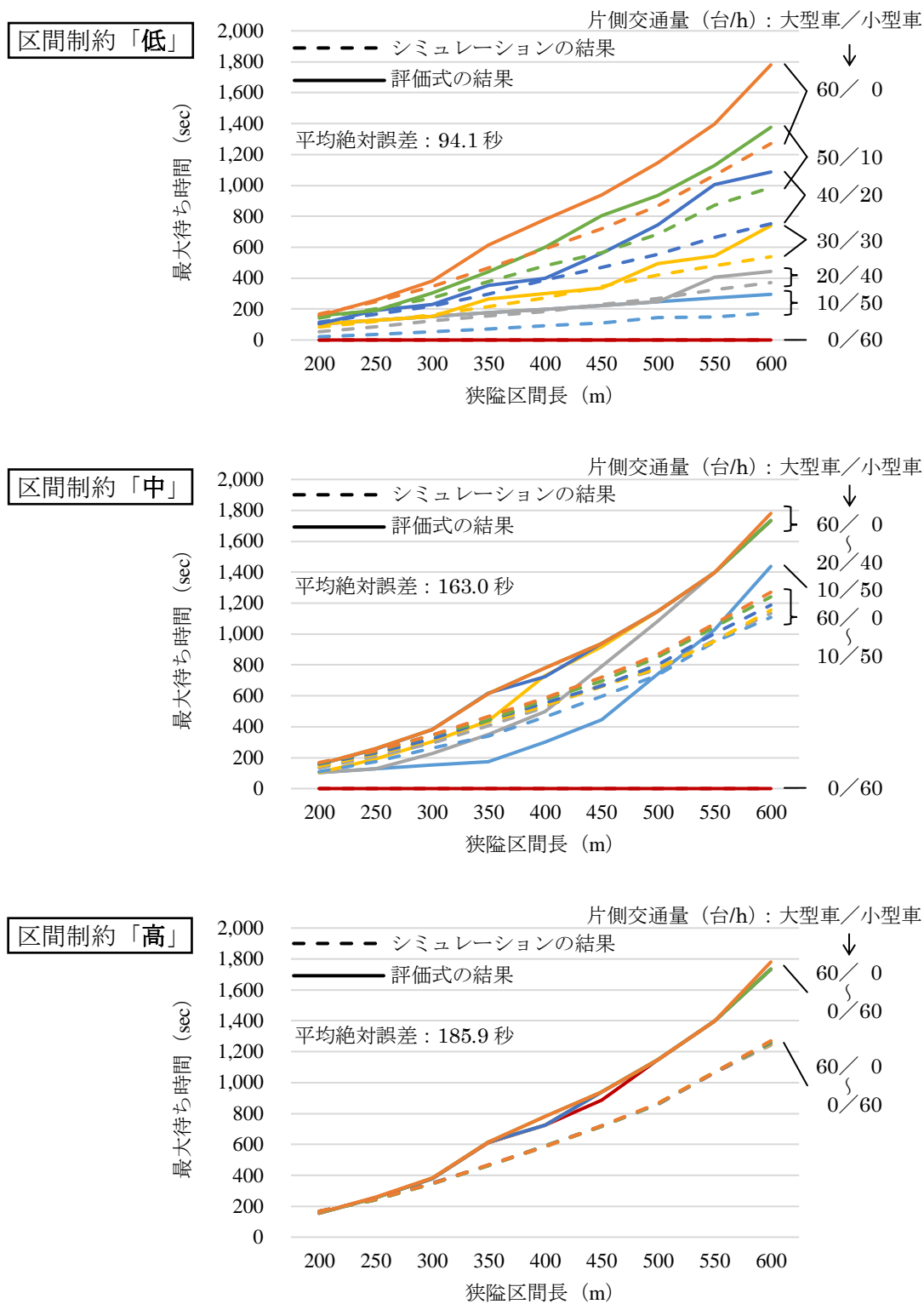


図 3-12 狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ

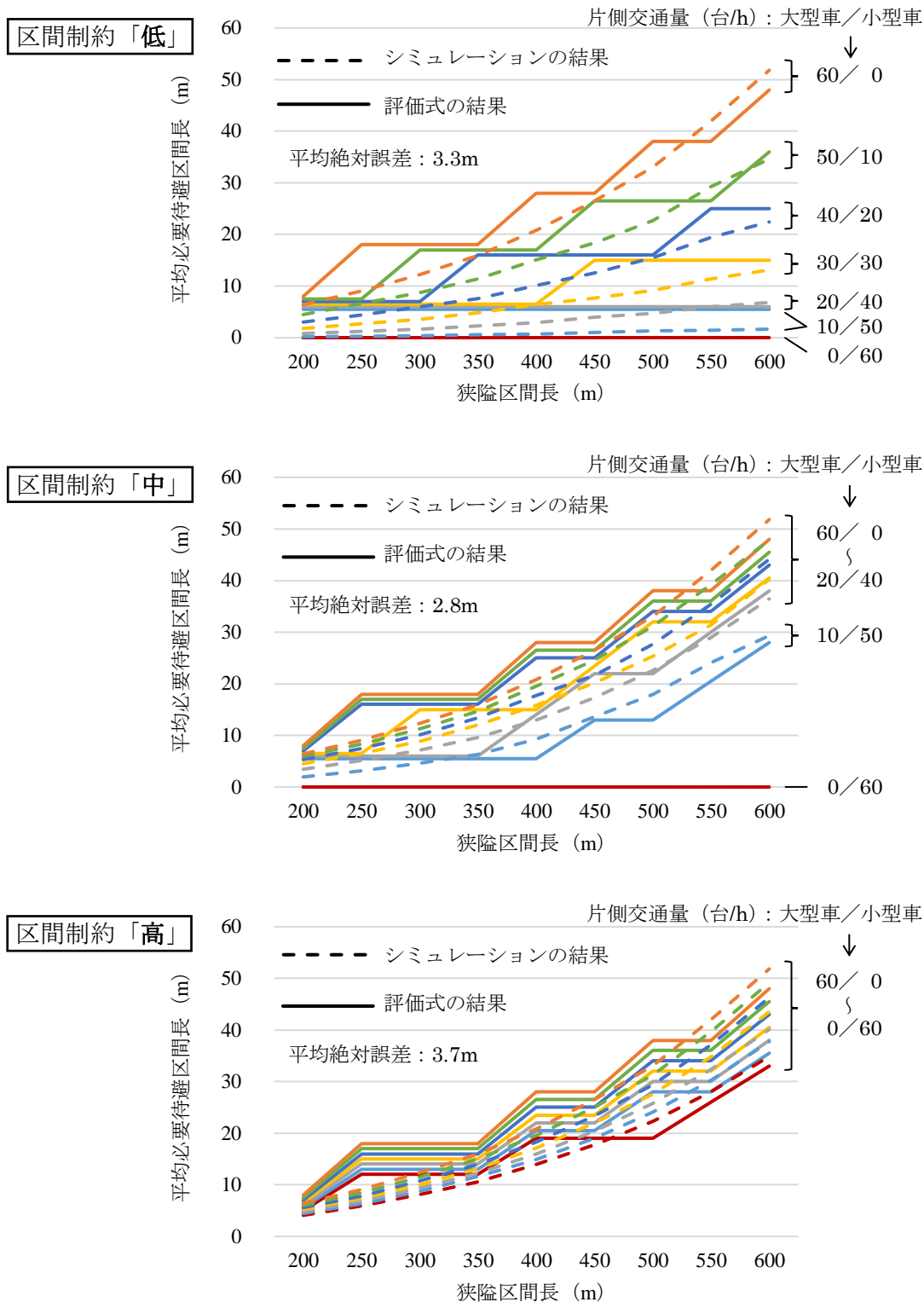


図 3-13 待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ

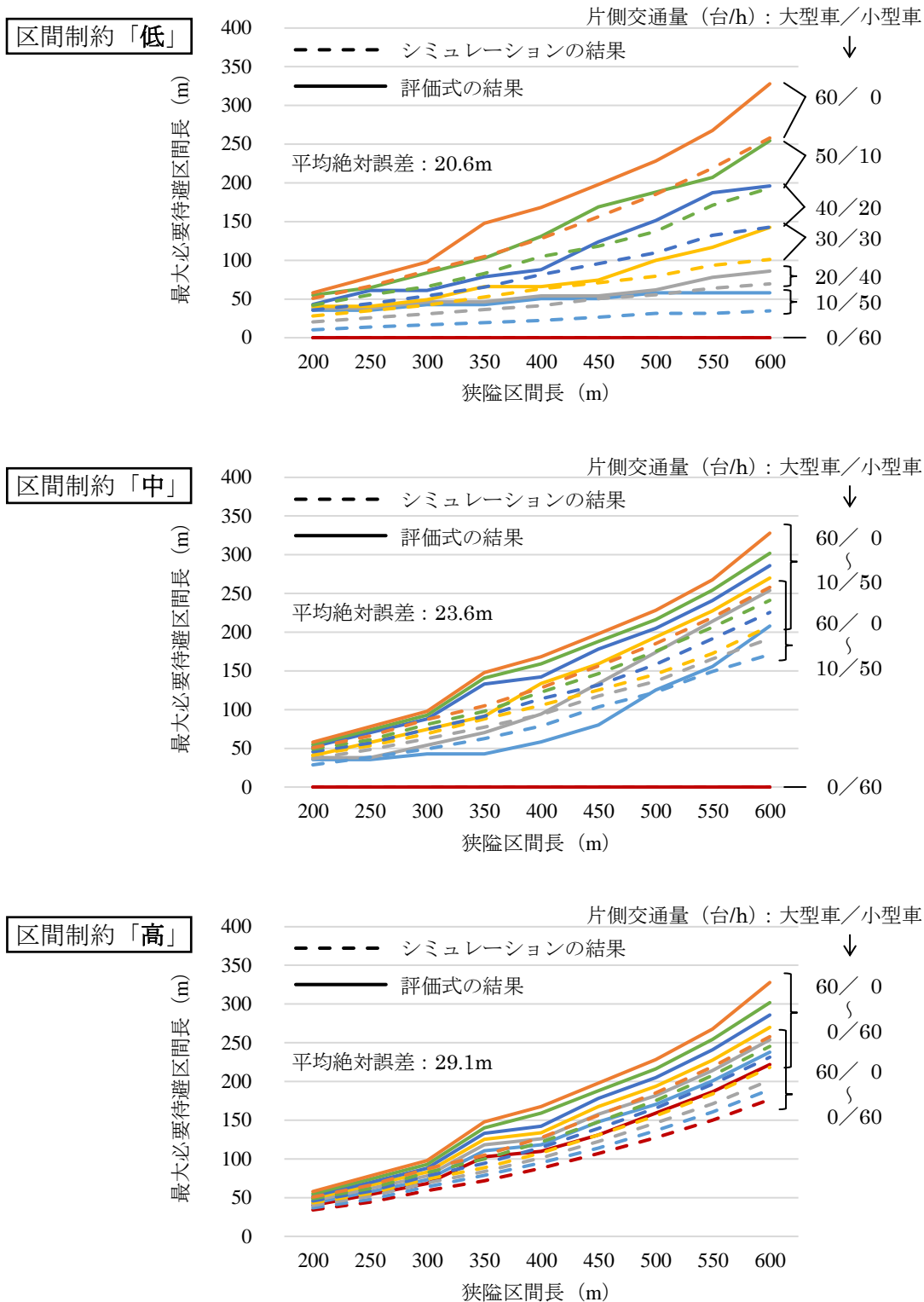


図 3-14 待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ

3.2.3. 計算時間の評価

今回実施した狭隘区間 1 か所のモデルについて、計算時間を評価した。表 3-8 のとおり、交通シミュレーションによる 1 ケース (1 時間 15 分間分×疑似乱数 100 系列) あたりの計算時間は約 12 分であったが、評価式による計算時間は 100 ミリ秒未満であった (計算環境: Intel Core i7 2.6GHz, メモリ 16GB)。評価式の方が、一回の試行を交通シミュレーションの 7 千の一以下の時間で実行できる計算になる。狭隘区間が複数個所になれば評価したいケース数は飛躍的に増えていくため、全体の検討時間の短縮という観点からも評価式を用いるメリットはさらに大きくなる。なお、交通シミュレーションの計算時間には、バッチ処理としてバックグラウンドで実行していることから、結果の描画に要する時間は含まれていない。

表 3-8 交通シミュレーションと評価式の計算時間の比較

計算方法	計算時間
従来手法: 交通シミュレーション	約 12 分
提案手法: 評価式	100 ミリ秒未満

3.2.4. 確率変動の有無による平均待ち時間の違い

ここで、車両の到着間隔に関して確率変動を考慮するか否かでシミュレーション結果がどのように違うかを確認しておく。表 3-9 は、区間制約「低」における結果の比較である。シミュレーションの実施条件は、3.2 のはじめに記載した方法と同じに設定した。上段が確率変動あり、下段が変動なしの平均待ち時間であるが、大型車の混在台数が多いほど、または対象の狭隘区間長が長いほど待ち時間の差が大きくなっていることがわかる。特に、通過所要時間が平均到着間隔を超える網掛けのケースにおいては、その差が顕著である。確率変動を考慮しない場合には車両の到着間隔は一定になるが、網掛けのケースでは狭隘区間を通過中の車両が通過し終える前に後続車両が到着してしまい、反対方向の車両がいつまでも狭隘区間に進入できないという非常に極端な現象が発生してしまうためである。実際には到着間隔

が長い間一定であることは稀であり，対向車が進入できるタイミングは交通量に応じて少なからず存在するはずである．より現実に近い現象を考慮するためには，車両の到着分布において確率変動を考慮することは重要といえる．

表 3-9 確率変動の有無による平均待ち時間の比較（区間制約「低」）

大型車台数	狭隘区間長（m）に対する平均待ち時間（秒）				
	200	300	400	500	600
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.4	1.3	2.9	6.5	7.7
	0.6	2.2	3.5	6.4	8.8
20	1.8	5.6	11.5	21.0	34.4
	2.8	10.1	15.3	35.7	44.2
30	4.4	11.8	25.6	43.6	67.0
	6.9	26.1	37.0	99.6	113.4
40	7.9	21.4	43.1	73.2	113.1
	12.9	58.4	74.3	224.6	238.2
50	12.6	32.3	65.1	105.8	169.4
	20.3	131.0	143.8	572.7	578.7
60	18.3	46.1	90.2	149.5	246.3
	27.6	985.7	985.3	983.2	984.9

上段：確率変動あり，下段：確率変動なし

網掛け：通過所要時間が平均到着間隔を超えるケース

3.3. 評価式の要件に関する確認

提案した評価式に対する要件を以下に再掲する。

- ① 後続車両の発進時のタイムラグを考慮するなど、追従モデルによる予測精度を十分に維持していること
- ② 道路幅員に応じてすれ違いが可能な車両の組合せが異なることから、大型車と小型車の混在に対応した仕組みであること
- ③ 極端なケースに偏った評価にならないように、車両の到着間隔に確率変動を考慮していること
- ④ 狭隘区間と待避区間の両方について、確率的な車両の到着間隔に対応して平均値と最大値で評価できること

これらの要件のうち、①については追従モデルでも重要な要素となる後続車両が動き出すまでのタイムラグや車間距離を考慮したことで、シミュレーションと評価式の絶対誤差は平均待ち時間で4.8秒、平均必要区間長で3.3mと非常に小さく、両者の予測結果はほぼ合致したものとなった。さらに、一回の試行を交通シミュレーションの7千の一以下の時間で実行できることを確認した。

②については、道路幅員に応じて4段階のすれ違い可能な車種の組合せを区間制約として構成し、すべての組合せについて対応した。また、③についてはアーラン分布をはじめとした4種類の車両到着分布を考慮した。最後の④についても、最大値については、若干過大評価ではあったが、狭隘区間と待避区間、それぞれ平均値と最大値による評価が可能になった。以上から、当初設定した要件はほぼすべて満足する評価式を提案することができた。

第4章 進化計算を用いた待避区間の最適配置

4.1. 進化計算：遺伝的アルゴリズムの適用方法

この章では，狭隘区間が断続的に続く道路延長全体に対して，先の図 1-3 の (f) における一連の繰り返しを自動化してこれまでの煩雑さを解消するため，最適化手法の適用方法を提案する．対象となる問題は，評価式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に対する拡幅コストの最小化問題であり，以下の要件を満たす最適化方法を考える．

- ① 道路状況に応じて拡幅可能範囲や適用可能工法が考慮できるなど，現実の問題で行う検討項目に即したモデルになっていること
- ② 従来の人手による試行錯誤と比較して，より高速に，かつなるべく拡幅コストの低い解を導出できること
- ③ 計画業務において待ち時間と拡幅コストのバランスを検討する際の意思決定に有効な情報を提供できること

以下では，これらの要件に対応した待避区間の最適化方法について述べる．

4.1.1. 拡幅パターンの遺伝子表現と遺伝的操作

拡幅においては，拡幅工事に必要な資機材の設置場所を確保することを想定し，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，拡幅延長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．これによって，現実の問題で行う検討に即したモデル化が可能となる．なお，幅員方向の拡幅については，3.2 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。なお、1か所（既存待避区間の始点側もしくは終点側）の拡幅においては、狭い領域で山側と谷側の工事を同時に行うことは困難かつ非効率であることから、山側か谷側どちらかを連続して拡幅することとし、両方が混在するようなケースは想定しない。ただし、始点側と終点側では異なる側面の工事を行うことができるものとする。なお、それぞれの遺伝子座には拡幅できる距離に応じた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4-1に示す。

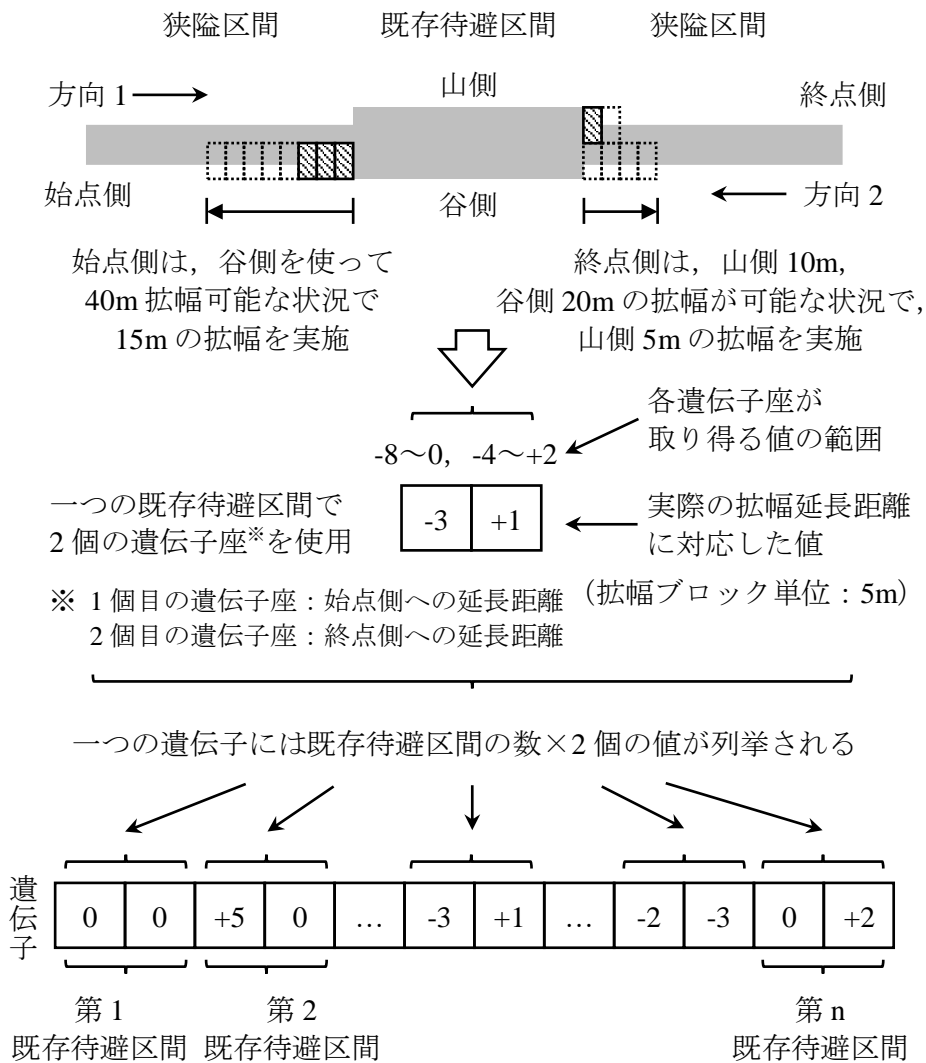


図 4-1 拡幅パターンの遺伝子表現

遺伝的操作に関しては、まず交叉において、既存待避区間に対して3か所程度毎に交叉が行われることを想定した値を設定した。交叉点数（交叉位置の数）をあまり多く設定して既に形成された部分的に良い組合せを壊すことがないように、近しい遺伝子座はある程度まとまって交叉されることに配慮した。具体的には、既存待避区間が5か所であれば交叉点数は $\text{round}(5/3) - 1 = 1$ 、既存待避区間が10か所であれば交叉点数は $\text{round}(10/3) - 1 = 2$ といった具合である。ただし、実際の交叉位置は乱数を用いてばらつきを持って決定しているため、3か所の既存待避区間が常に固定的に交叉される保証はない。図4-2には、既存待避区間の数と交叉点数の関係例を表した図を掲載する。

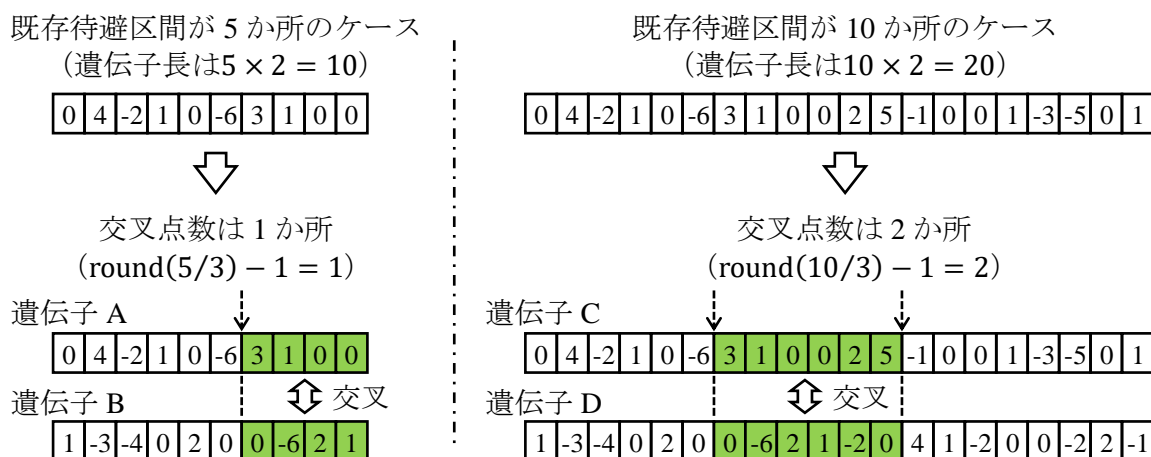


図 4-2 既存待避区間の数と交叉点数の関係例

また突然変異においても、遺伝子表現の特徴を考慮した仕組みを取り入れることとした。遺伝子表現においては山側振幅を正数、谷側振幅を負数で表すこととしたため、同じ振幅延長でも山側の場合と谷側の場合では数値差が大き過ぎて、連続性が損なわれる可能性がある。そこで、突然変異確率とは別に、山側と谷側の反転確率というパラメータを設けて、突然変異確率に基づいて突然変異を行うことになった遺伝子座に対しては、その反転確率で符号の反転のみを行い、そうでない場合に限って通常の突然変異を実施する仕組みを導入した。つまり、山と谷の反転を行いやすくすることで、その距離を近づけて連続性の欠如をできる限り減らすことを狙ったものである。突然変異に関する模式図を図4-3に示す。

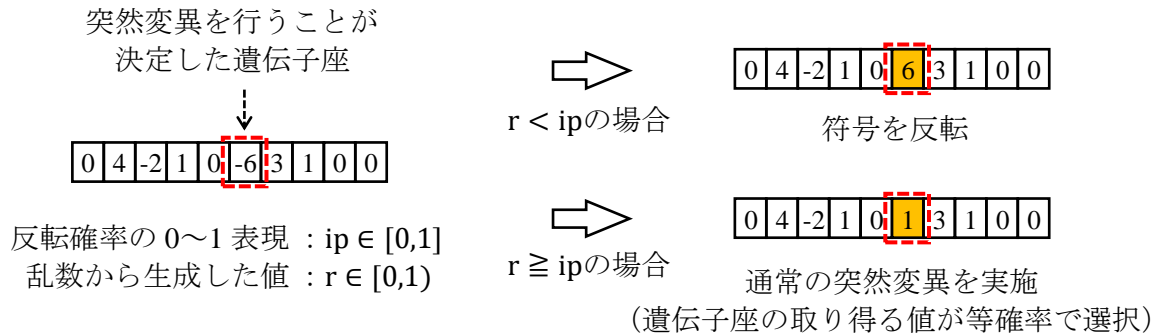


図 4-3 突然変異に関する模式図

4.1.2. 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平均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中に到着する車両台数に必要な区間長（平均必要待避区間長）以上であることを制約条件として加味する。制約条件の確認では、3.2で構成した評価式を用いる。評価に際しては、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。このとき、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）も考慮して整理する。なお、評価式は汎用的に平均値と最大値の両方を評価できる構成としたが、一方で最大値レベルが発生する頻度はそれほど高くないことも確認しており、最適化においては過大評価にならないよう、平均値を用いて評価することとした。

評価式を簡単に再掲すると、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(4-1)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とることによって全体の平均待ち時間 W^A を算出する。

$$W^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times W_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times W_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (4-1)$$

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

待避区間については、式(4-2)から隣接する狭隘区間に対する滞留台数を計算した上で、平均必要待避区間長以上であるか否かを判定する。このとき、待避区間から車両が溢れてしまいそうな場合には、一つ手前の待避区間に止まって狭隘区間の途中では停止しないものとする。ここで、 $\widetilde{C}_1^A(n_1)$ 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とする(式(4-3))。なお、先の式(3-10)と(3-12)で定義した $C_1^A(n_1)$ 、 C_1^A は、各車両が狭隘区間に到着した時点の滞留台数を、止まらずに通過した車両も含め、式(3-4)で定義した総対象台数 $C_1^T(n_1)$ で平均化した値である。待避区間の必要延長を考える場合には、止まらずに通過した車両は平均化の対象から外して、より安全側で簡易的な式(4-3)を用いることとした。その上で、 $p_1^A(n_1)$ 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 \widetilde{C}_1^A を計算し、方向2とともに加重平均をとることで全体の滞留台数 C^A を算出する。(式(4-2))

$$\widetilde{C}^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times \widetilde{C}_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times \widetilde{C}_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (4-2)$$

$$\text{where } \widetilde{C}_i^A = \sum_{n_i=1}^{c_i^X} p_i^A(n_i) \times \widetilde{C}_i^A(n_1) \Big/ \sum_{n_i=1}^{c_i^X} p_i^A(n_i) \quad (i = 1,2)$$

$$\widetilde{C}_1^A(n_1) = n_1 + \Delta n_1 \quad (4-3)$$

最終的に、狭隘区間の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平均必要待避区間長に達しない場合には、その遺伝子に全区間を拡幅したことに相当する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。

4.2. 事例適用による評価

4.2.1. 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。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4-1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。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。また、拡幅ブロック単位を5mとしたときの、各既存待避区間からの拡幅可能ブロック数は、表4-2のとおりである。表4-1で示した適用可能工法の一部には拡幅が不可能な区間も含まれるが、拡幅の可否は表4-2の上限と下限から判断する。なお、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。また、ここでは固定費（拡幅延長にかかわらず発生する費用）までは考慮していないが、必要に応じて拡幅コスト算出時に考慮することも可能である。

表 4-1 区間別の適用可能工法と区間制約

始点 (m)	適用可能工法 ^{※1}		区間 制約 ^{※2}	始点 (m)	適用可能工法 ^{※1}		区間 制約 ^{※2}
	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 工法単価は、工法 A : 150 万円/5m, 工法 B : 80 万円/5m, 工法 C : 120 万円/5m

※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 4-2 既存待避区間と拡幅可能ブロック数

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幅可能なブロック数
(正数：山側，負数：谷側， 0：拡幅不可)

その他のパラメータは表 4-3 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。最小施工距離は拡幅ブロック単位に合わせ、最小待避区間長は大型車 2 台程度が待避できる長さを想定した。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た。遺伝的操作に関するパラメータは、文献 [71] [72] [73] 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4.1.1に示した考え方に従い、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。

表 4-3 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	拡幅ブロック単位	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 %
		山側谷側反転確率	50 %
		計算世代数	200

4.2.2. 適用結果と従来方法との比較検証

図 4-4 は、対象区間について 400m 毎を 1 行に区切った上で、区間制約や拡幅不可区間、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幅箇所を加えたものである。また、表 4-4 には、試行したケースに対する拡幅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(4-1) 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,

表 4-4 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。

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 3.2 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、従来の方法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．ケース 1 が選択した中間地点は既存待避区間が短く，一見そこを使用すると拡幅コストがかさむように見えるが，トータルでは安価となった．人の感覚に左右されない GA の利点が現れた結果といえる．

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．最適化に際しては，評価式ではなく交通シミュレーションをそのまま使用する方法も考えられるが，3.2.3 の計算時間の比較においても 7 千倍の違いがあることを確認しており，計算機環境がさらに高速化された場合でも実行できる試行回数の差は依然大きい．検討時間の差は，試行錯誤を自動化したことによる時間短縮に加えて，計算時間そのものの差異が累積した結果といえる．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かかる時間は極力除外している．また，交通シミュレーションはバッチ処理としてバックグラウンドで実行していることから，描画に要する時間も含まれていない．

なお，待避区間長の設定基準としては，平均必要待避区間長を算出するための評価式を用いて設定している．実際には平均値を超える到着も考えられるが，4.1.2 にも記載したように，待避区間から溢れてしまいそうな場合には一つ手前の待避区間で待避するものとして，狭隘区間の途中で停止するようなケースは想定しないこととした．現状では一つ手前の待避区間への影響までは十分に考慮できていないことになるが，結果としては問題なく処理できており，ピーク時間を通じて全体として平均化されたものと考えられる．実際，3.2.2 で確認した必要区間長の最大値分布は，待ち時間と同様に，最大値の平均が平均必要区間長に標準偏差

の3.5倍を加えたあたりに位置しており、極端なケースが起こる可能性はそれほど高くなく、平均値による評価で十分な説明ができているといえよう。ただし、待避区間から溢れた車両の隣接待避区間への詳細な影響評価は、今後の課題として後述することにする。

4.2.3. 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分に増加させる、もしくは旅行速度を15km/hから12km/hに低下させる程度の待ち時間として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4-3のままとした。

図4-5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4-5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4.2.2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数か所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。

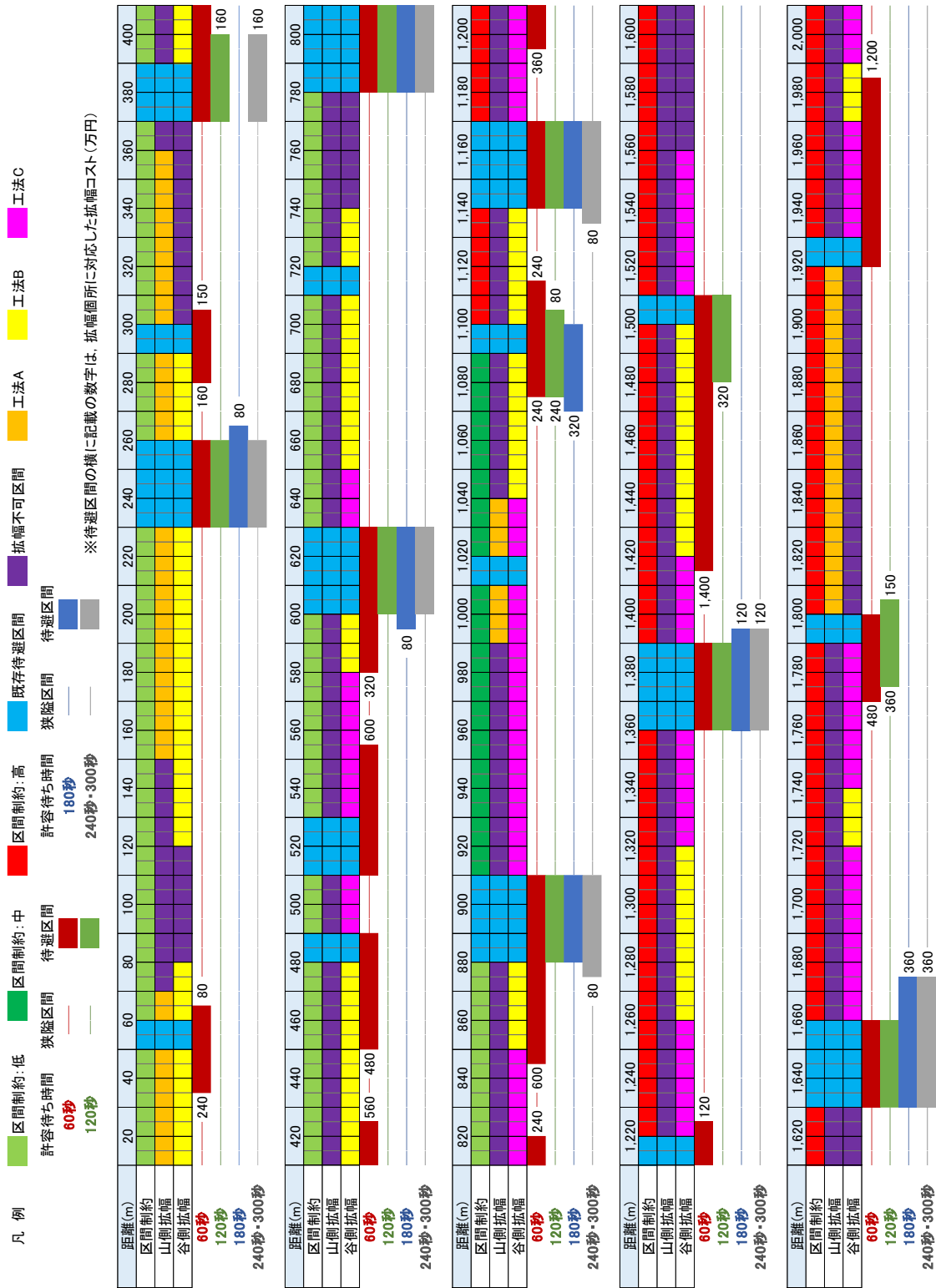


図 4-5 許容待ち時間に対する有効な待避区間と具体的な拡幅箇所

表 4-5 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				

図 4-6～図 4-10 には、各許容待ち時間に対する解を算出した際の遺伝的アルゴリズムにおける収束グラフの一例を掲載する。乱数系列によって最適解に到達する世代数は多少異なるが、傾向はほぼ同じである。許容待ち時間「60 秒」においては、第 86 世代で最小解に到達したが、解の平均値は第 100 世代を超えるあたりまで安定していない。許容待ち時間が「120 秒」～「240 秒」ではより早く収束し、さらに「300 秒」では第 36 世代というかなり早い段階で最小解に到達している。これは、制約の強い許容待ち時間「60 秒」では制約条件を満たさない致死遺伝子が多く発生する一方で、制約の弱い「300 秒」では致死遺伝子が少なく有効な解がより多くなることで収束が早まっている可能性が考えられる。実際、許容待ち時間「60 秒」における全世代の全個体数に対する致死遺伝子の比率は 9.8%であったのに対して、「300 秒」では 5.8%程度まで低減されている。

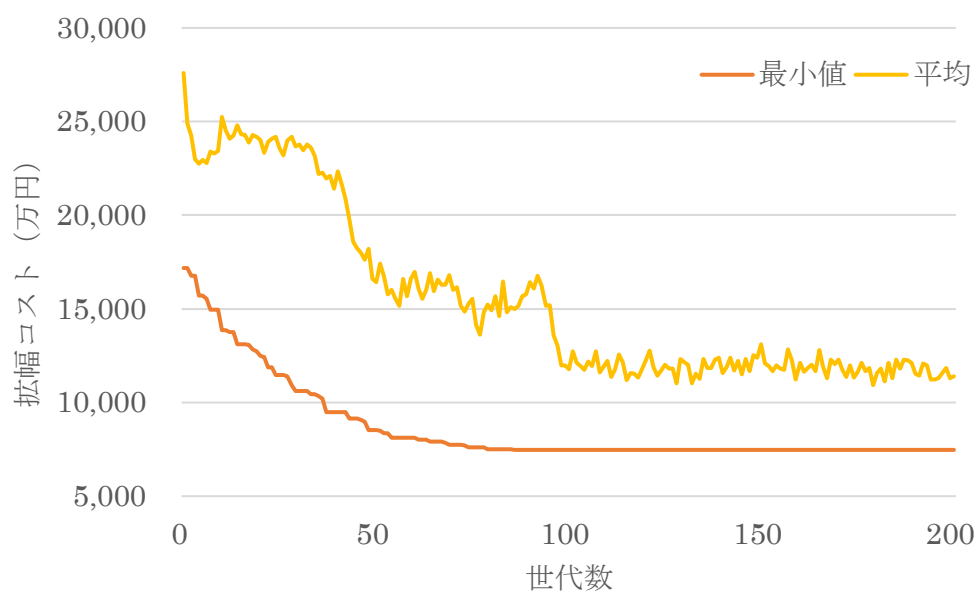


図 4-6 GA における収束グラフ：許容待ち時間「60 秒」

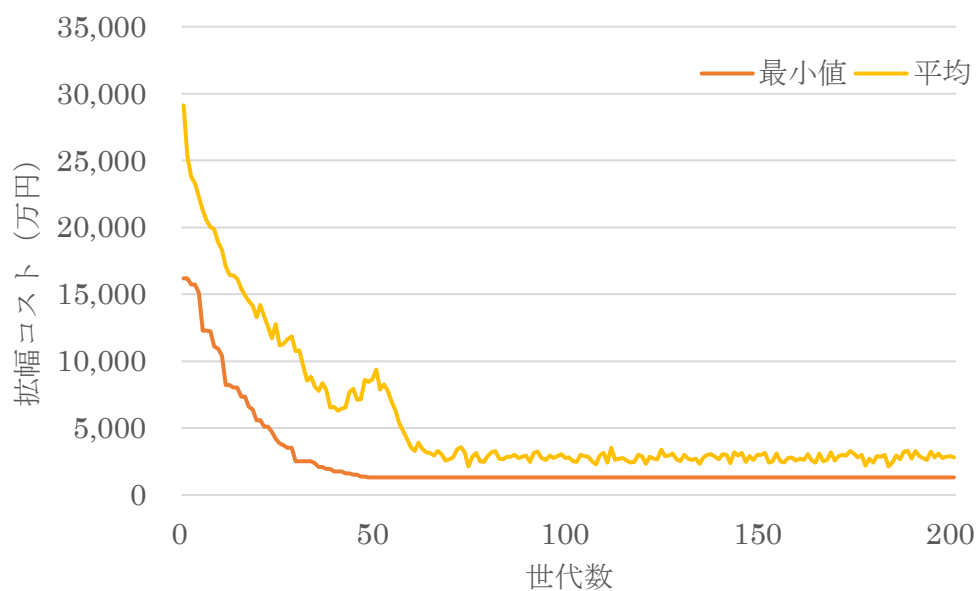


図 4-7 GA における収束グラフ：許容待ち時間「120 秒」

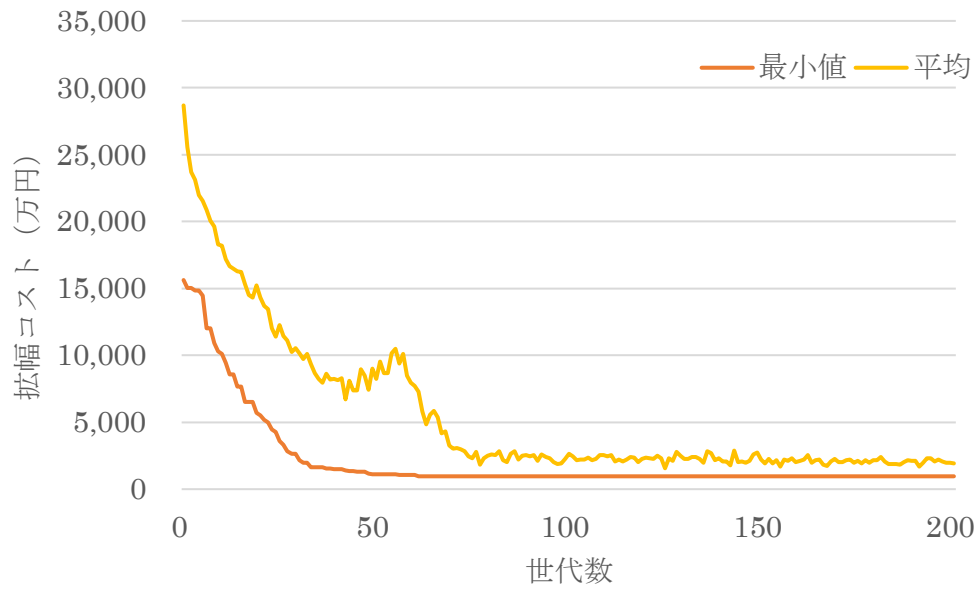


図 4-8 GA における収束グラフ：許容待ち時間「180 秒」

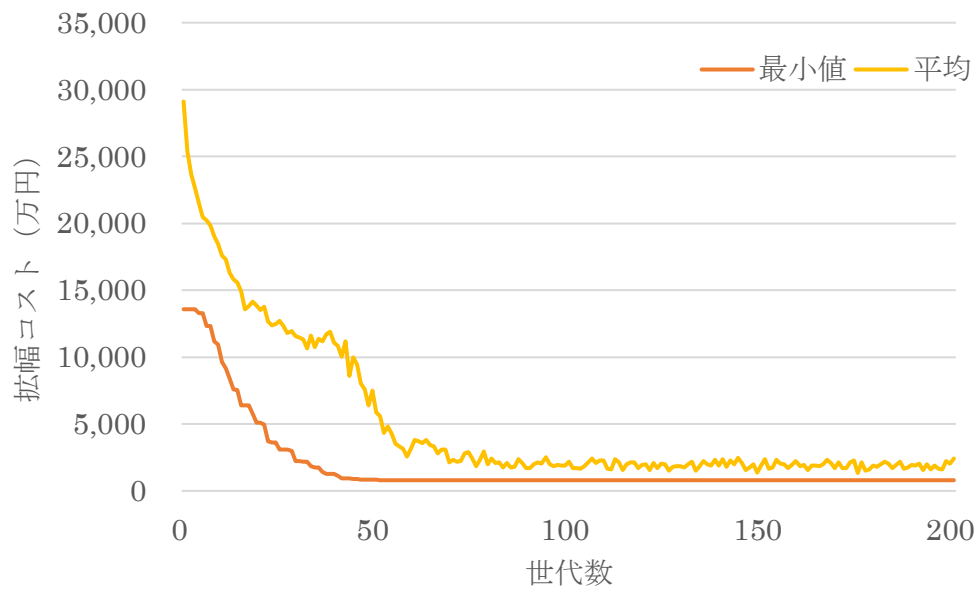


図 4-9 GA における収束グラフ：許容待ち時間「240 秒」

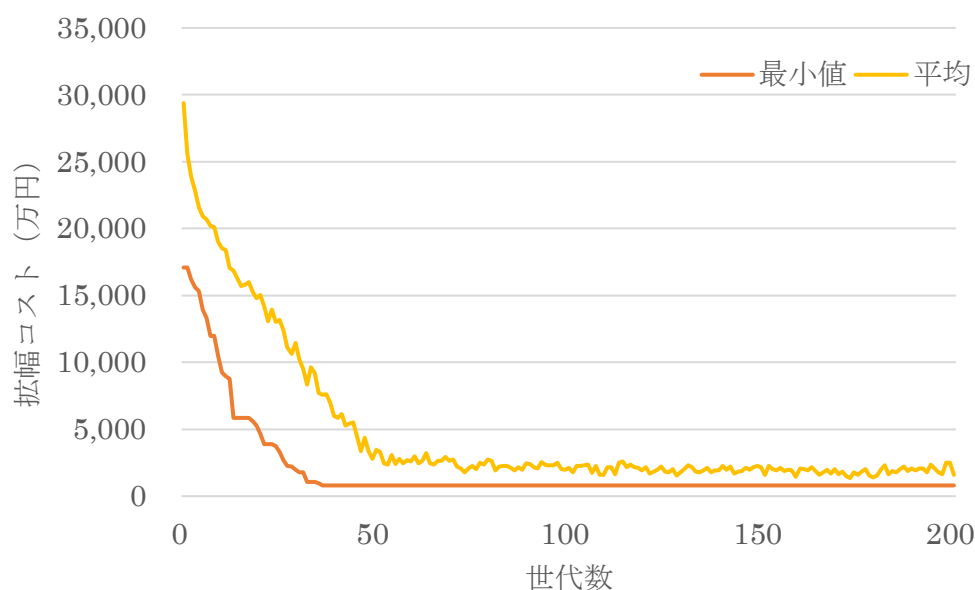


図 4-10 GA における収束グラフ：許容待ち時間「300 秒」

4.2.4. 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、拡張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」を扱う。パレート最適解が目的関数空間内で形成するパレートフロントを観察することで、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、複数の解候補を多点探索する進化計算は多目的最適化との親和性も高い。本論文では、そのような進化計算による多目的最適化手法の一つであり、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（端切りオペレータ）を有する SPEA2 [47] を利用して、パレート最適解（正確には近似解となるため非劣解）の探索を行った。関連研究については、2.2.2 を参照されたい。SPEA2 における遺伝的操作では、4.1.1 に記載した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 4-6 のとおりである。

表 4-6 多目的最適化に関するパラメーター一覧

パラメータ名	設定値	パラメータ名	設定値
目的関数 1	拡張コスト	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

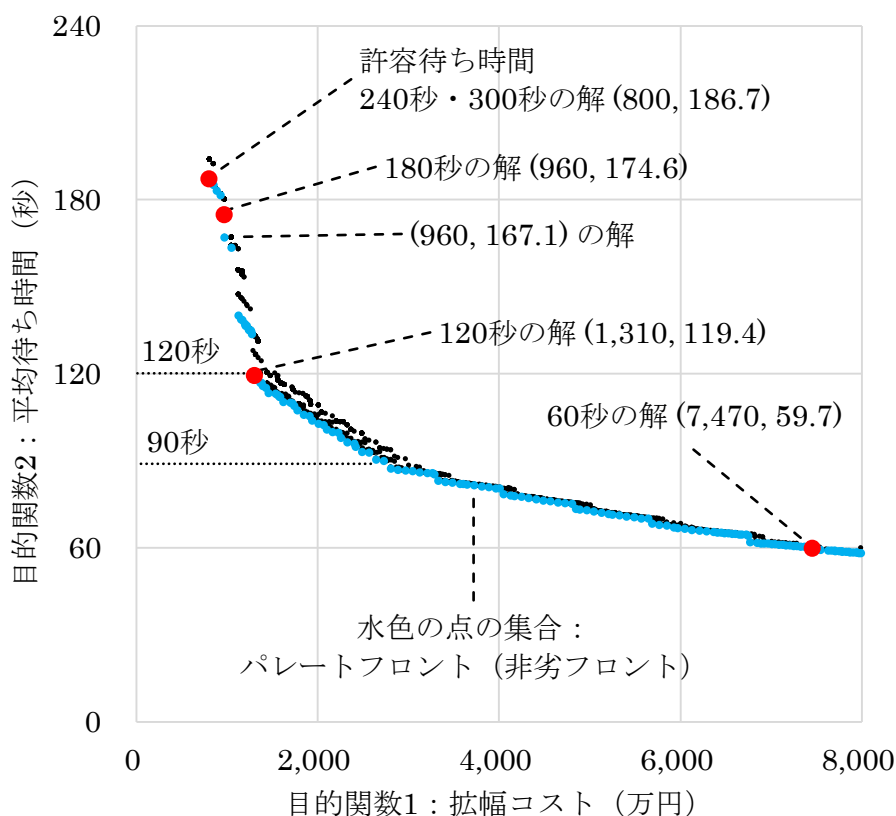


図 4-11 多目的最適化における解集合 (第 500 世代×4 回分) : 拡大表示

図 4-11 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 世代までの計算について乱数系列を変えて 4 回実施した上で最終世代の結果を重ね合せたものである。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（非劣解）である。パレートフロント（非劣フロント）は、拡張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張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、4.2.3 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）を非劣解集合と比較したところ、許容待ち時間 60 秒、120 秒、240 秒・300 秒の各解に一致するものが非劣解集合に含まれていることが確認できた。一方、180 秒の解は非劣解集合には含まれておらず、パラメータスタディの解と同じ拡張コスト 960 万円の非劣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張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、パレートフロントは、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 秒くらいまでは拡張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張コストが増えていく様子を見ることができる。このことから、拡張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 4-7 は、非劣解集合を平均待ち時間 120 秒と 90 秒の 2 か所で区切り、範囲毎の結果を集計して比較したものである。平均待ち時間が 120 秒以上の範囲 A では、必要な拡張箇所数は平均で 5.8 か所であるのに対して、90 秒以上 120 秒未満の範囲 B では 8.2 か所、90 秒未満の範囲 C では 15.1 か所と急激に増えている。さらに、待ち時間を 1 秒減らすのに必要な拡張コスト及び拡張延長の増分も比較したところ、同様の傾向が確認できた。平均待ち時間を減らしていくと、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くなることを考慮すると、グラフに見える屈折点は必要な拡張箇所数や拡張単価の大きな変化点であると考えられる。

表 4-7 非劣解集合の範囲別比較

		範囲 A ^{※1}	範囲 B ^{※1}	範囲 C ^{※1}
解の範囲	平均待ち時間 (秒)	186.7 - 120.6	119.4 - 90.2	87.3 - 60
	拡張コスト (万円)	800 - 1,280	1,310 - 2,720	2,800 - 7,400
	拡張延長 (m)	40 - 70	70 - 135	140 - 400
各範囲内の の平均値	拡張箇所数 (箇所)	5.8	8.2	15.1
	拡張コスト増÷待ち 時間減 (万円/秒) ^{※2}	32.2	103.5	297.5
	拡張延長増÷待ち時 間減 (m/秒) ^{※2}	0.1	7.7	14.5

※1 平均待ち時間 120 秒以上を範囲 A, 90 秒以上 120 秒未満を範囲 B, 90 秒未満を範囲 C とする.

※2 待ち時間を 1 秒減らすのに必要な拡張コスト及び拡張延長の増分.

図 4-12～図 4-18 は, 世代の進行に応じた解集合の分布を示したものである. 第 0 世代では非常にばらついていた分布が徐々に左上方向に押し伸ばされ, 非劣フロントに重なっていく様子が見て取れる. 許容待ち時間「60 秒」の解と「120 秒」の解は第 100 世代で既に現れるが, その他の解は第 500 世代に近付かないと現れない. 単目的での収束性能に関しては, 4.2.3 において確認したとおり, 許容待ち時間「60 秒」の方が収束に時間がかかっており, 「240 秒」「300 秒」の方が早く収束していた. 多目的最適化では, 許容待ち時間を設けていないため制約条件は必要待避区間長のみとなる. 制約条件を満たす待避区間長を確保するためには, 単純には拡張コストを掛けることが有効である. そのため, 拡張コストの高い解が致死遺伝子になり難いことから, 初期の段階においてはグラフ右寄りの解が発生しやすいことになる. このことが, 世代の進行に伴ってグラフが右から左に伸びていくことの要因と考えられ, 単目的とは逆の傾向を示している点が興味深いとともに, 致死遺伝子が収束性に影響しているという点では注意が必要といえる.

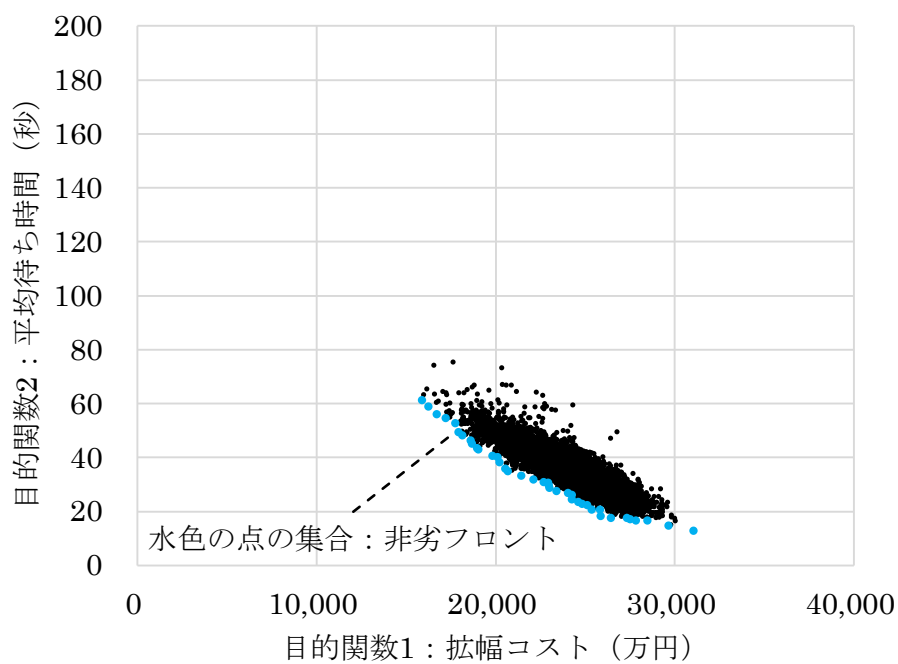


図 4-12 多目的最適化における解集合（第 0 世代×4 回分）

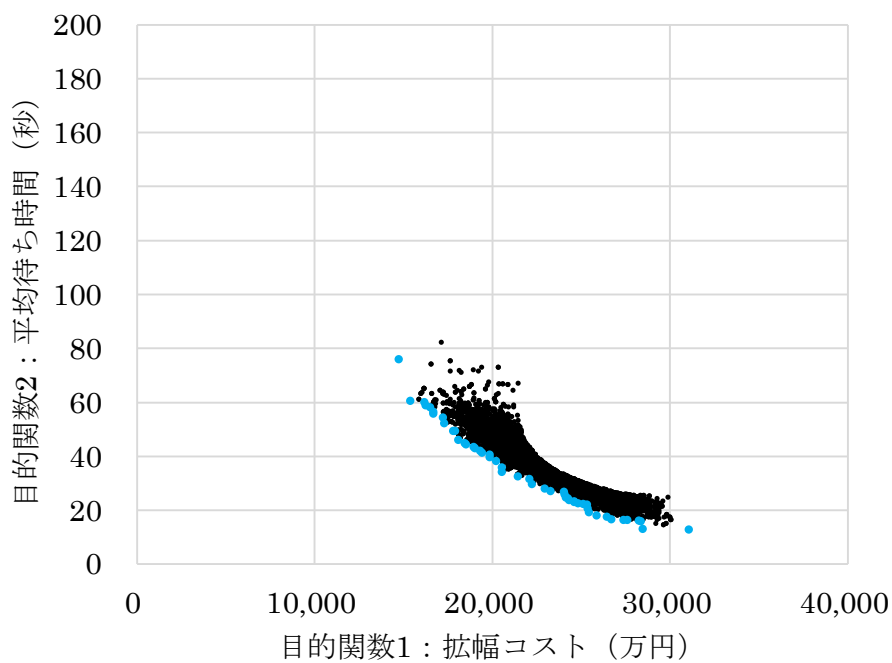


図 4-13 多目的最適化における解集合（第 1 世代×4 回分）

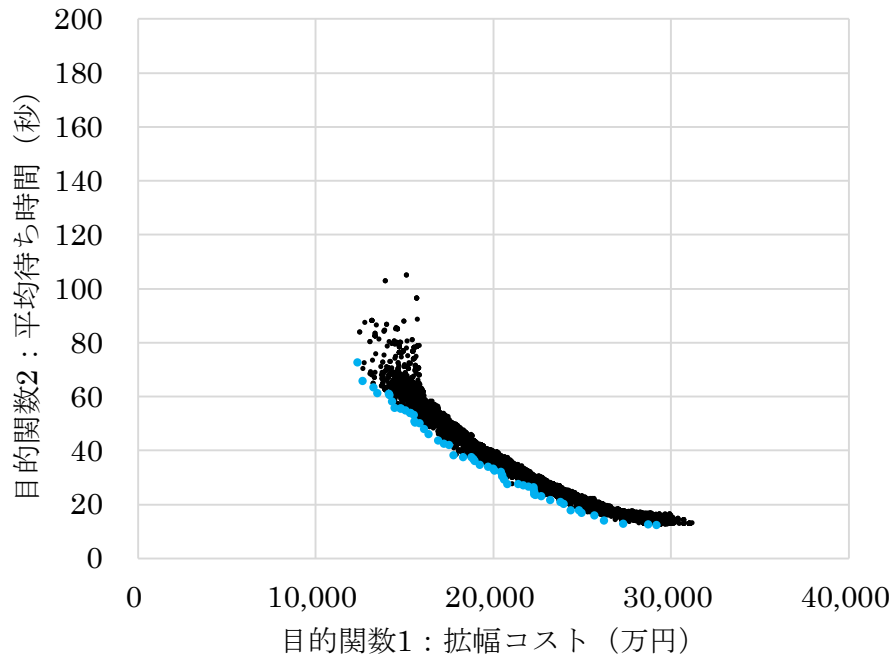


図 4-14 多目的最適化における解集合（第5世代×4回分）

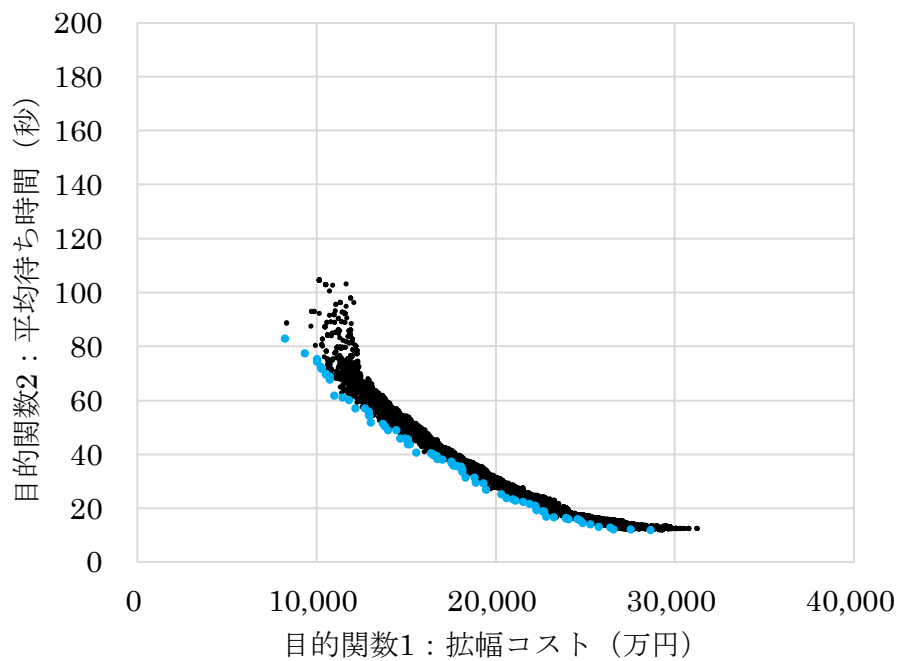


図 4-15 多目的最適化における解集合（第10世代×4回分）

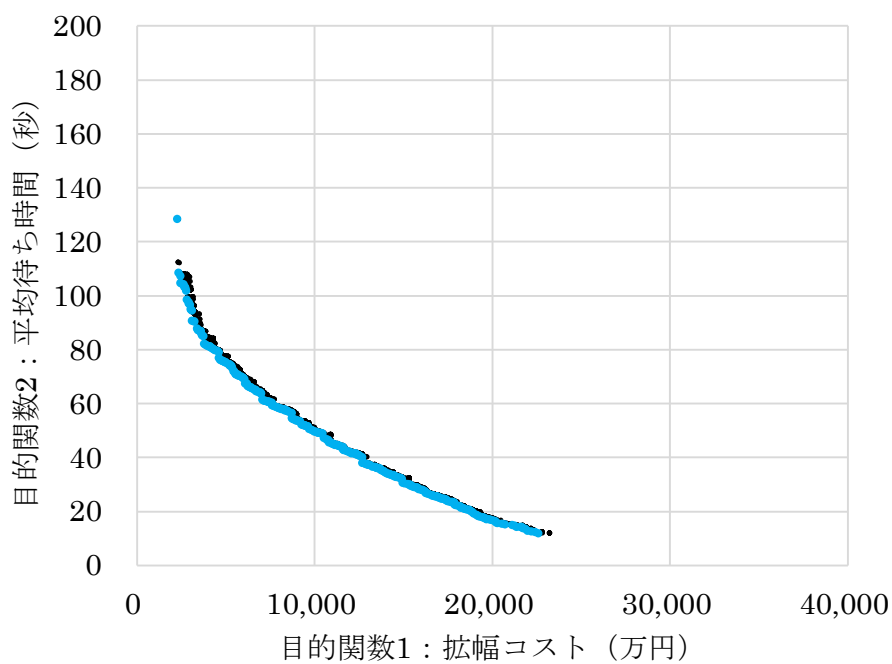


図 4-16 多目的最適化における解集合 (第 50 世代×4 回分)

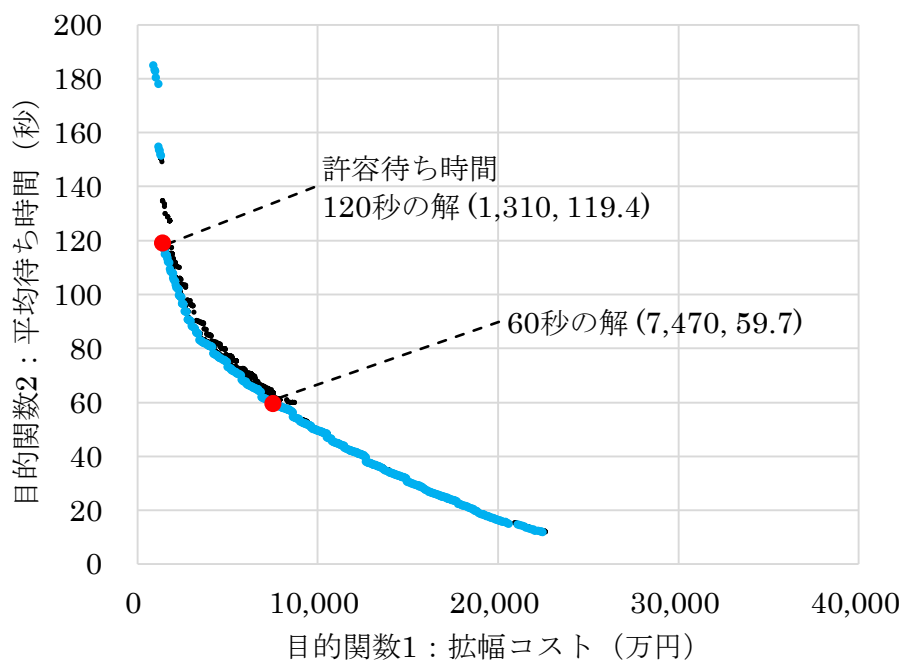


図 4-17 多目的最適化における解集合 (第 100 世代×4 回分)

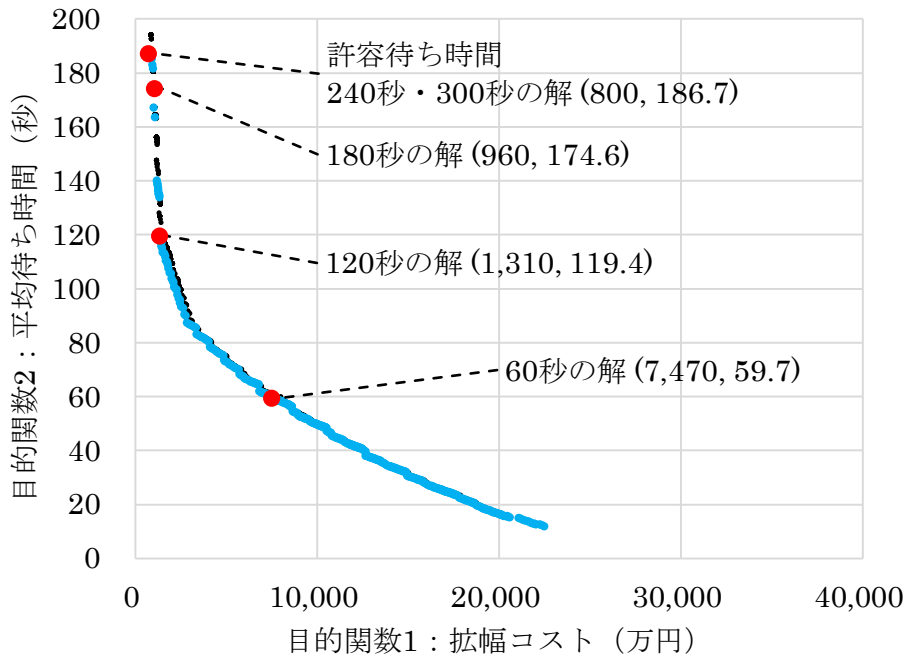


図 4-18 多目的最適化における解集合 (第 500 世代×4 回分)

なお、検討時間に関しては、ある程度広範な非劣解集合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。

最後に、第 500 世代の解集合について、もう少し詳しい構成内容を確認しておく。まず、図 4-19 は拡張コストに対する遺伝子パターン数分布であるが、1,000 万円単位で区切った度数分布では 2,000 万円くらいまでのパターン数が圧倒的に多いものの、3,000 万円以上も裾野が長く、2 億円あたりまで 200 パターン前後の度数が並んでいる。ここで、パターン数（度数）は遺伝子の組合せパターンの数であり、重複は排除している。また、致死遺伝子も除外した。図 4-20～図 4-22 には、それぞれ拡張箇所数、拡張総延長、平均待ち時間に対する遺伝子パターン数の分布を掲載した。拡張箇所数と拡張総延長については、拡張コストと同様、階級の低いところにピークがあり、それ以外の部分では度数はそれほど上がらないものの裾野の長い分布となっている。平均待ち時間については、一部にパターン数の少ない階級もあ

るが、平均では 10 秒の範囲に約 300 パターン近い組合せが存在しており、より施工性の高い組合せなど、様々なバリエーションを選べる可能性が残っているものと考えられる。

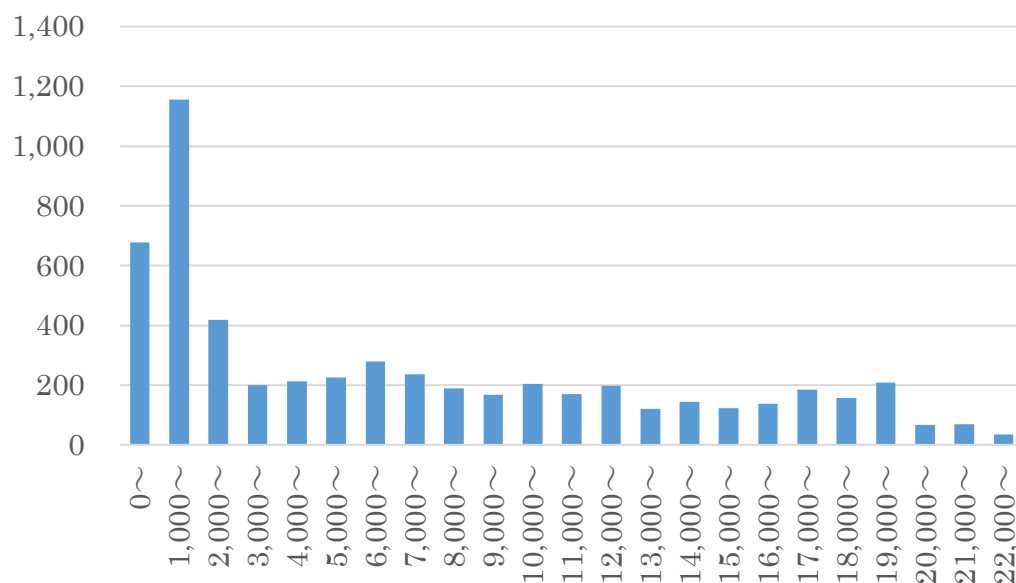


図 4-19 拡幅コストに対する遺伝子パターン数分布 (第 500 世代×4 回分)

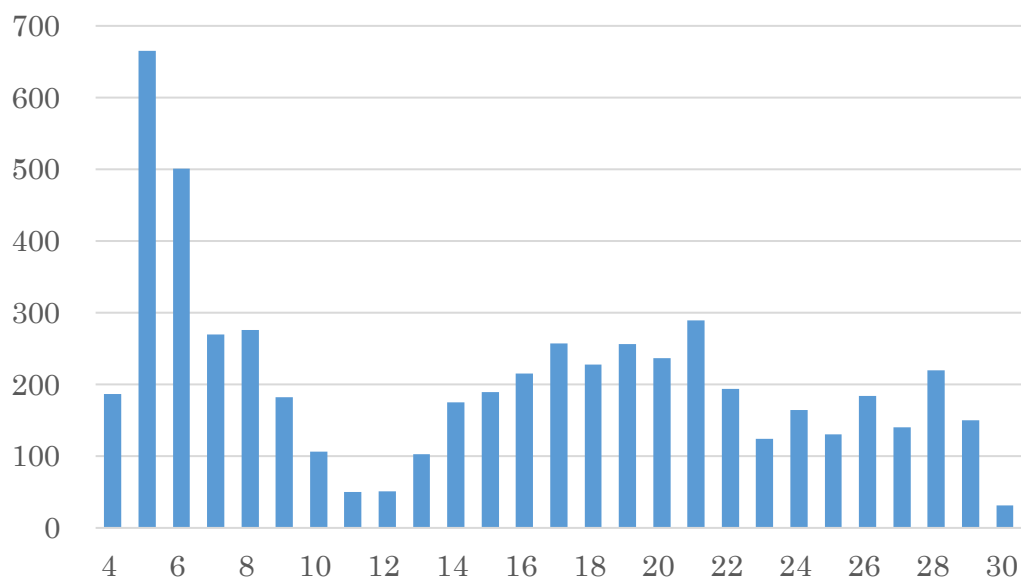


図 4-20 拡幅箇所数に対する遺伝子パターン数分布 (第 500 世代×4 回分)

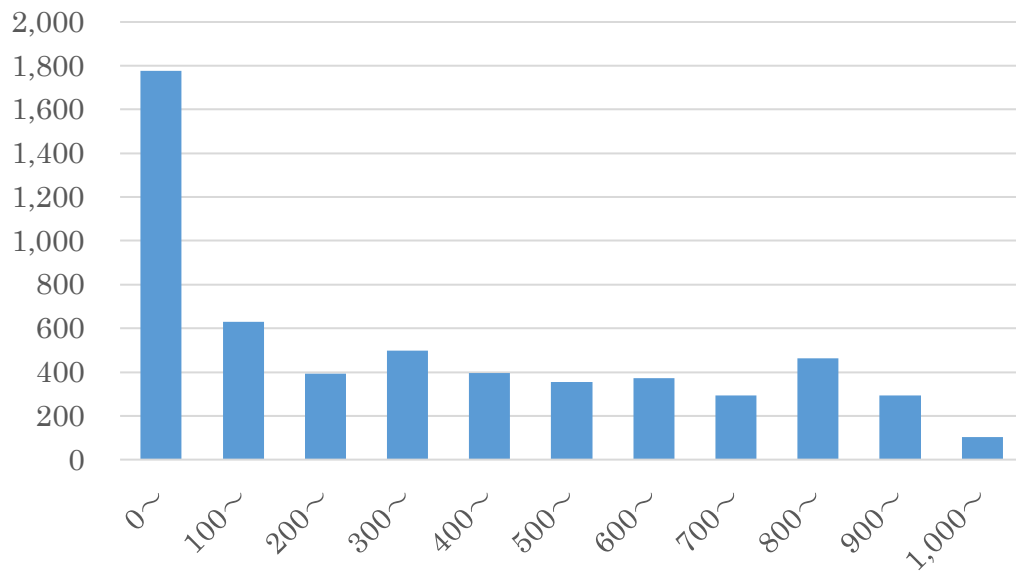


図 4-21 幅総延長に対する遺伝子パターン数分布 (第 500 世代×4 回分)

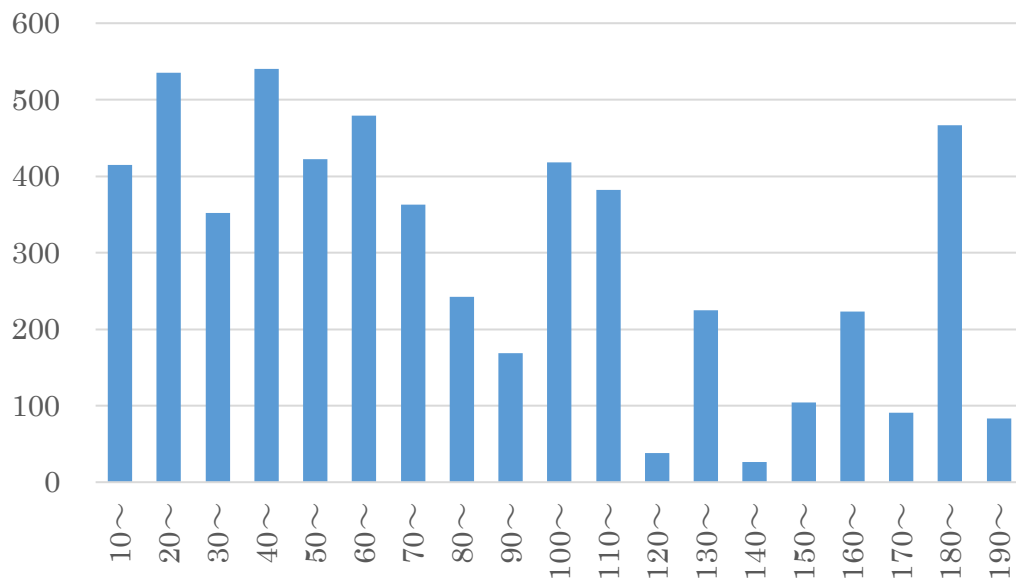


図 4-22 平均待ち時間に対する遺伝子パターン数分布 (第 500 世代×4 回分)

4.3. 提案手法の活用シナリオ

ここでは、本提案手法の活用シナリオを整理する。先の図 1-3 において待避区間の最適配置に関する従来の検討フローを記載したが、許容待ち時間に関する検討を追加したものを図 4-23 に再掲する。図中の色分けについては、緑色は手作業や試行錯誤が必要な作業、水色は自動化できる作業、オレンジ色は自動化できるが一定の処理時間を要する作業とした。

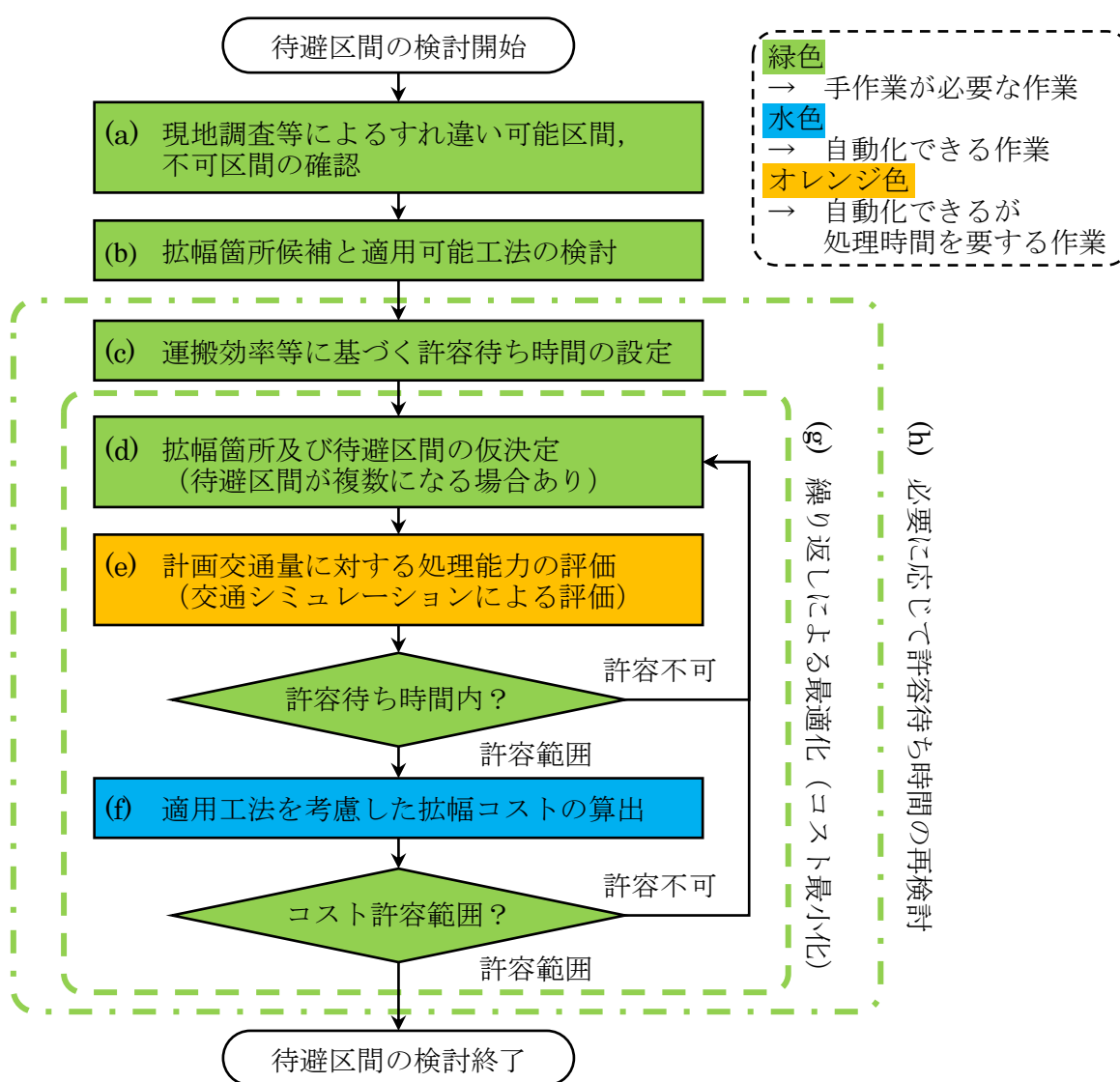


図 4-23 従来手法による待避区間の最適配置に関する検討フロー

続いて、提案手法のうち、許容待ち時間に関するパラメータスタディを行う際の検討フローを図 4-24 に示す。ある許容待ち時間に対するコスト最小化（近似解の導出）は、GA によって自動化され、手作業を介入するの必要なくなる（図中の(g)）。その結果、導出された解でどうしてもコストが見合わないような場合には、許容待ち時間の設定に立ち返ってパラメータスタディを行うことによって、より納得性の高い解に近付けていくことが可能である（図中の(h)）。

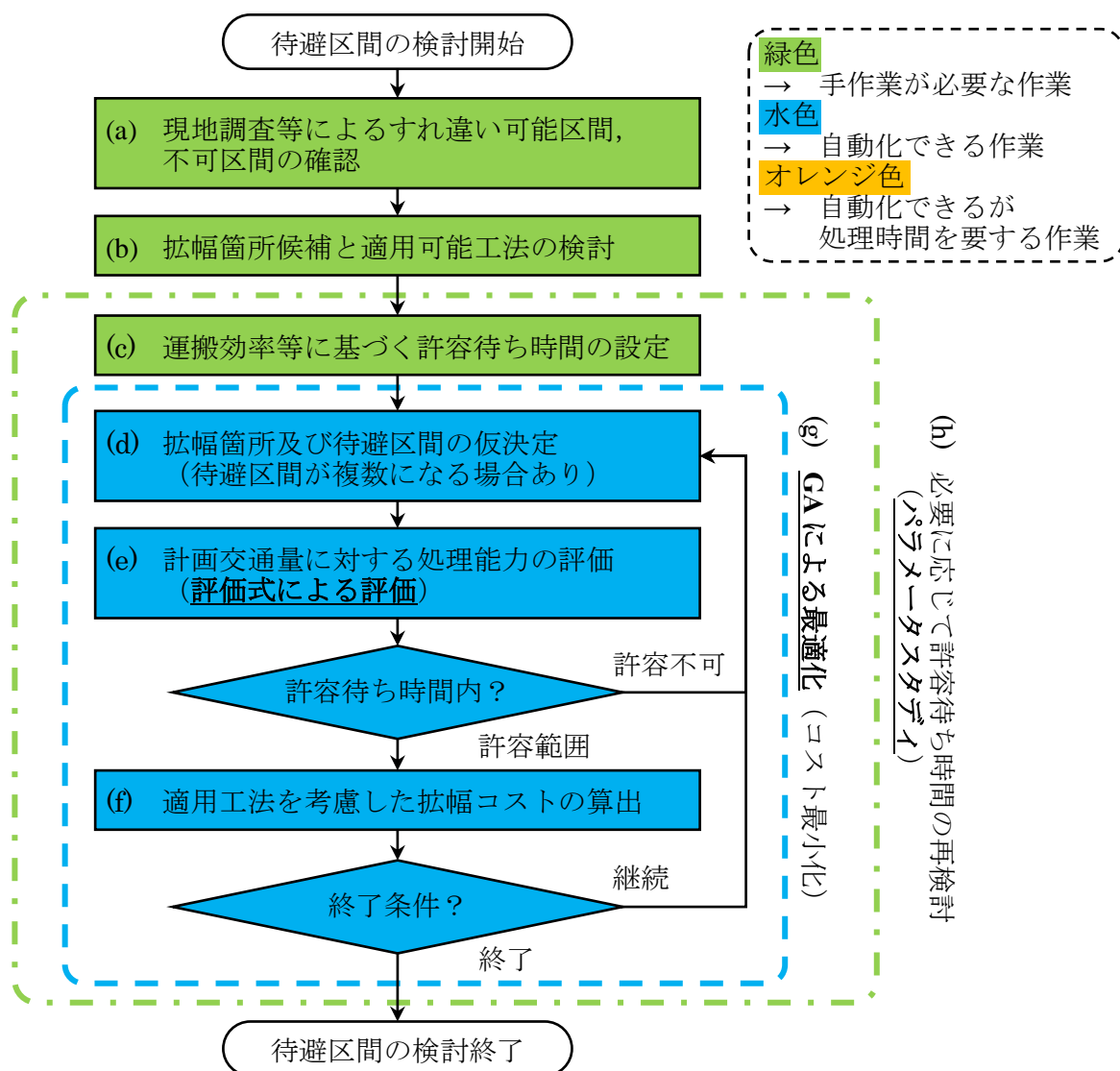


図 4-24 提案手法（パラメータスタディ）による検討フロー

図 4-25 は、提案手法のうち、多目的最適化を用いた際の検討フローである。多目的最適化では、許容待ち時間に対する拡幅コスト最小化と許容待ち時間に関するパラメータスタディが同時に実行され、ある程度の時間は要するもののコストと待ち時間のトレードオフ関係の導出までがほぼすべて自動化される（図中の(f)）。後は、導出されたトレードオフ関係を確認しながら、最終的な拡幅箇所と待避区間の配置を決定すれば良い（図中の(g)）。

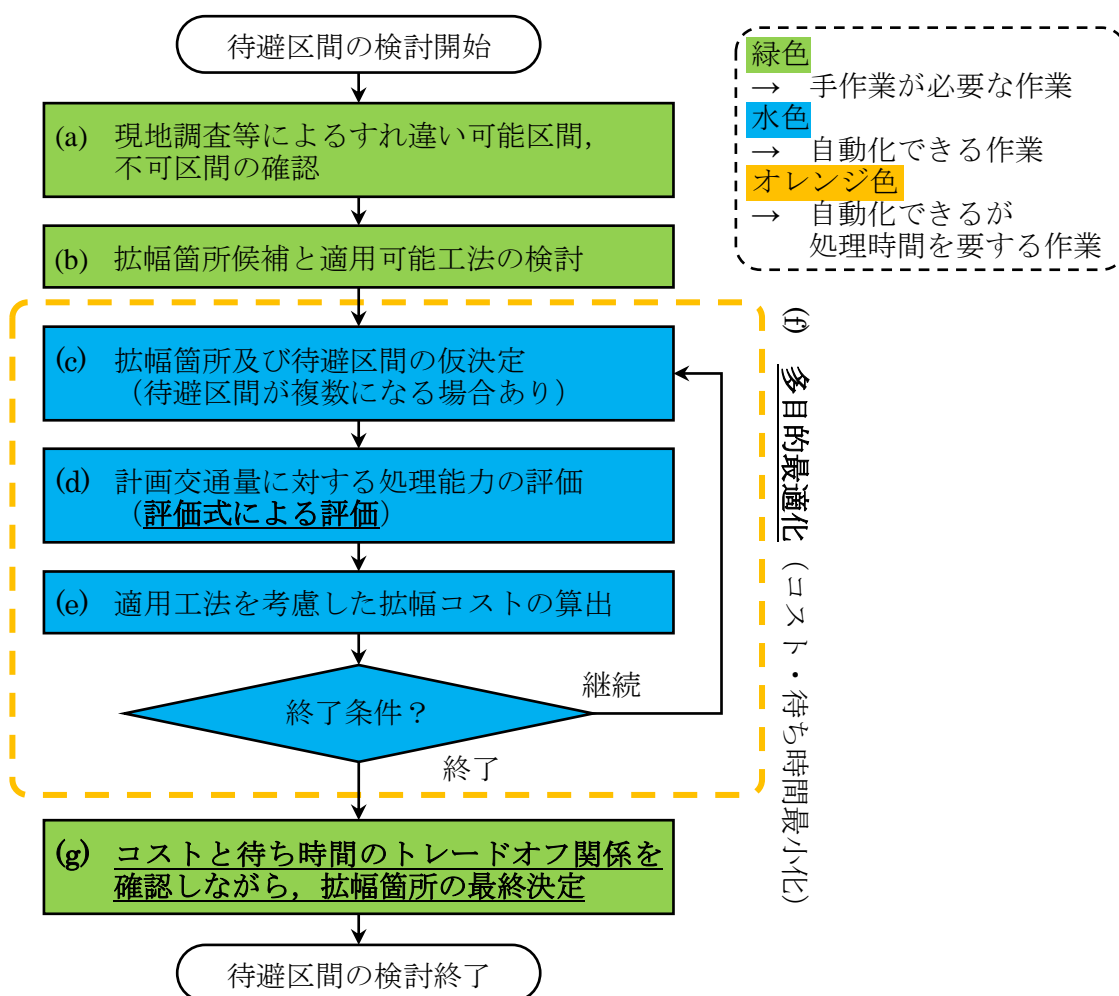


図 4-25 提案手法（多目的最適化）による検討フロー

トレードオフ関係を確認する際には、パレートフロント（非劣フロント）の屈折状況を観察することが重要となる。4.2.4 で述べたように、パレートフロントの大きな屈折点は、許容

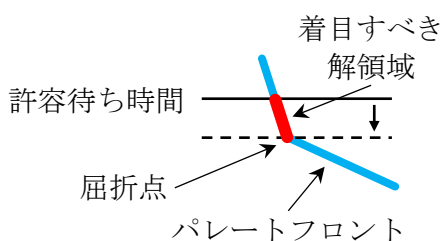
待ち時間を減らしていった際に拡張コストが急激に増加し始める変化点であった。一方、許容待ち時間は関連する建設工事に必要な運搬効率等からある値を想定することができる。先の適用事例では 2,000m の旅行時間を 8 分から 10 分に増加させる、もしくは旅行速度を 15km/h から 12km/h に低下させる程度の待ち時間として 120 秒を仮定した。最終的に、想定される許容待ち時間を屈折点に重ね合わせて着目すべき解領域を特定し、さらにその領域内の解を精査することで最終決定を下すことができる。また、待ち時間ではなく拡張コストを基準としたいようなケースであっても、許容待ち時間の代わりに想定した許容拡張コストを屈折点に重ね合わせて同様の検討を行うことが可能である。以上の手順を整理すると、次のように記述できる。

- ① パレートフロントの大きな屈折点を確認する。
- ② 想定される許容待ち時間もしくは許容拡張コストを屈折点に重ね合わせて、着目すべき解領域を特定する。
- ③ 着目領域内の解を精査して最終決定を行う。

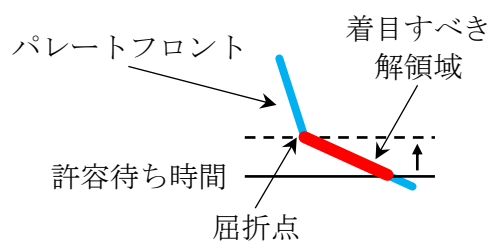
このうち②の手順においては、許容待ち時間または許容拡張コストの屈折点との位置関係から、図 4-26 に記載した場合分けを行うことができる。上段 a は、これまでの検討のように許容待ち時間を基準とするケースについて場合分けをしたものである。左側の a-1 は、許容待ち時間が屈折点の上にある場合であり、許容待ち時間を屈折点まで引き下げても拡張コストはそれほど上がらない。一方、右側の許容待ち時間が屈折点の下にある場合 (a-2) は、屈折点まで許容待ち時間を引き上げられれば拡張コストを大幅に下げることができる。下段 b は許容拡張コストを基準とするケースについて整理したものであり、左側 b-1 は許容拡張コストが屈折点の左にある場合である。この場合は、許容拡張コストを屈折点まで引き上げることができれば、待ち時間を大幅に抑えることができる。逆に、b-2 の許容拡張コストが屈折点の右にある場合には、許容拡張コストを屈折点まで引き下げても待ち時間はそれほど上がらないことになる。どちらの目的関数を基準とした場合でも、一方の目的関数を屈折点に寄せる分にはもう一方の目的関数への影響を少なく抑えることができ、これらの判断材料を用

いることで、待ち時間と拡張コストの増加をともに抑えた有効な解を選択することが可能となる。

a) 許容待ち時間を基準とする場合

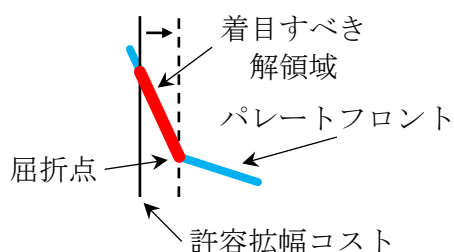


a-1) 許容待ち時間が
屈折点の上にある場合

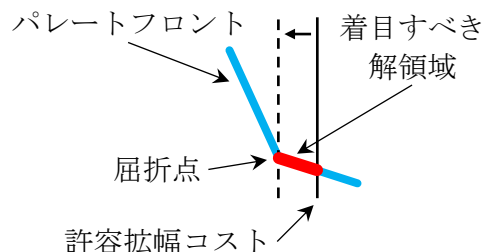


a-2) 許容待ち時間が
屈折点の下にある場合

b) 許容拡張コストを基準とする場合



b-1) 許容拡張コストが
屈折点の左にある場合



b-2) 許容拡張コストが
屈折点の右にある場合

図 4-26 パレートフロントの屈折点と着目すべき解領域

なお、パレートフロントの屈折点の形状については、これまでグラフ上で右下に凸であることを仮定してきた。パレートフロントには同じ待ち時間の中で最もコストの少ない解が配置されているので、待ち時間をさらに減らすためにはより単価の高い拡張箇所に置き換える必要がある。つまり、待ち時間を減らせば減らすほど急激に拡張コストが上がっていくことが想定できるため、基本的に凸形状を仮定して問題ないと考えられる。もし、凹形状の屈折

点があった場合には、凸形状とは逆にそこへ近付くと急激に拡幅コストか待ち時間が増える場所でもあることから、そのような屈折点に近付くことは得策ではないといえることができる。

図 4-27 に、凹形状の屈折点に対する考え方を整理しておく。

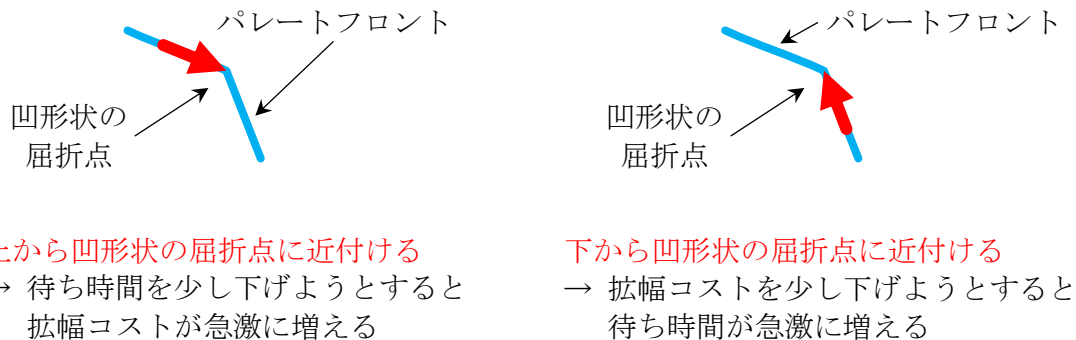


図 4-27 凹形状の屈折点に対する考え方

4.4. 最適化の要件に関する確認

待避区間の最適化に関する要件を以下に再掲する。

- ① 道路状況に応じて拡幅可能範囲や適用可能工法が考慮できるなど、現実の問題で行う検討項目に即したモデルになっていること
- ② 従来の人手による試行錯誤と比較して、より高速に、かつなるべく拡幅コストの低い解を導出できること
- ③ 計画業務において待ち時間と拡幅コストのバランスを検討する際の意思決定に有効な情報を提供できること

これらの要件のうち、①については山側と谷側に異なる拡幅可能範囲や適用可能工法を道路状況に応じて設定できる遺伝子表現を行ったことで、現実の問題で行う検討項目に即したモデル化を実現した。②についても、事例適用において、従来手法である交通シミュレーションとの平均待ち時間の差異が 3.4 秒と小さく両者が整合した結果となったことに加え、検

討時間も 8 時間から 4 分に大幅短縮した上、拡張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。よって、①と②に関しては、待避区間の最適配置における煩雑さを解消でき、十分に要件を満足できたものとする。

一方、③については、パラメータスタディと多目的最適化を通じて、拡張コストへの影響を低く抑えるための適切な許容待ち時間を明らかにするなど、待ち時間と拡張コストのバランスを検討する際の有用な情報を提供することができた。さらに、多目的最適化におけるパレートフロントの屈折点に着目することで、待ち時間と拡張コストの増加をともに抑えた有効な解を選択する手順など、本提案手法の活用シナリオを整理した。ただし、多目的最適化を実施する際には単目的の最適化に比べて計算時間がそれなりに多くかかることが留意点であり、パラメータスタディを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ことも確認した。また、収束性が致死遺伝子に左右されている部分も見受けられたこともあり、注目したい箇所をより早く深く探索できる手法に発展させることができれば、さらに意思決定に有効な情報を提供できる手法に発展できるものと考えられる。

第5章 結 論

5.1. 本研究のまとめ

5.1.1. 課題・目的

土木・建築分野に関わる建設工事においては、計画段階から工事中や竣工後の利用状況、周囲への影響度合いを視覚化して、計画の妥当性・安全性を確認しておくことは非常に重要であり、従来の物理実験に加えてシミュレーション技術が強力な手段となっていた。建物や地盤の地震応答解析、風や水・熱などの流体解析、音や振動の伝搬計算などの物理シミュレーションの他、人や車の挙動のような社会システムを扱う離散事象シミュレーションがそれに当たる。そのうち、交通シミュレーションは、車社会の成熟に伴って最も効果の高い道路整備計画を立案するためのツールとして発展してきた。交通に関する従来の評価手法には「交差点飽和度」や「混雑度」といった静的な評価法が使われてきたが、近接する複数の交差点間での影響を動的に評価することは難しい。短時間に状況が刻々と変わるような交通環境においては、交通シミュレーションのような動的な評価手法が有効となる。建設工事においては工事中の近接環境への影響評価に交通シミュレーションを利用しているが、都市部以外の山間地域での建設工事においても、狭隘道路でのすれ違いによる工事車両の資材運搬効率の評価に活用している。

近年、待避所などの局部改良を弾力的に組合せた 1.5 車線の道路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、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。資材運搬における工事車両の効率運行は施工計画上の重要な課題であるが、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り、計画交通量を処理できないようなケースも発生し得る。とはいえ、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、1.5 車線の道路の考え方と交通シミュレーションによる検証を適宜行いながら、局部改良による部分的な拡幅によって待避区間を確保していくことが有効となる。

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、選択肢が多く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。特に計画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を併用し、車両のすれ違いに使用する待避区間の最適配置を行うことが効果的である。ここで、待避区間の最適配置とは、一定の待ち時間制約を満たした上で、拡張コストを最小化する待避区間の場所の組合せを見つけることである。しかしながら、必要な待避区間が複数になる場合もあるため、その拡張パターンは非常に多く、労力や時間を要する煩雑な作業となっていた。そこで本論文では、計算時間のかかる交通シミュレーションの代替手段として高速な評価式を構築することとした。さらに、最適化手法と組合せていくことで、待避区間の最適配置と迅速で効果的な整備計画のための手法の確立を目指すこととした。

5.1.2. 提案内容

交通シミュレーションを実行するにあたっては、検討中の計画に対する問題点のあぶり出しや対策効果などの比較検討であれば、数回のシミュレーションと可視化によっても十分な効果を得られる。しかし、パラメータスタディにおいて、変化させたい設計変数の数が多く、取り得る範囲も広いような場合には、実行すべき組合せが膨大となり最良案を見つけ出すことが困難となる。そこで、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交通シミュレーションを代替する手段として、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中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。

さらに、狭隘区間が断続的に続く道路延長全体に対する拡張箇所の検討と計画交通量に対する処理能力の評価に関する繰り返しを効率化するには、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張パターンの組合せを拡張コストの最小化問題として考えた。その上で、進化計算による最適化手法である遺伝的アルゴリズムを適用した。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。また、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り、拡幅延長をその単位で割った拡幅ブロック数で各区間の拡幅パターンを表現することとした。遺伝子の評価における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た。制約条件の判定においては、先の評価式を用いて行うが、条件を満たさない場合には、その遺伝子に全区間を拡幅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こととした。

5.1.3. 評価結果

道路が持つ車両同士のすれ違いに関する制約（区間制約）を、道路形態と道路幅員に応じて 4 種類に分類した上、常に対面通行が可能なケースを除く 3 種類について、提案手法である評価式と交通シミュレーションとの比較検証を行った。検証においては、2,000m の直線道路の中央付近に狭隘区間を 1 か所だけ設けた簡易モデルを用意して、交通シミュレーションとの結果比較を行った。想定交通量は大型車と小型車の合計を片側 60 台/h に固定して、大型車の混在数を 10 台刻みで変動させた。また、建設工事も想定して 60 台すべてが大型車であるケースも想定した。狭隘区間長については、200m から 600m の間を 50m 単位で変化させた。到着分布には指数分布を想定した。シミュレーション回数は、車両の発生間隔を設定する際に利用する疑似乱数系列を各ケース 100 回ずつ変えて実施し、待ち時間と必要待避区間長の平均値と各回の最大値の平均値を集計した。

結果としては、追従モデルでも重要な要素となる後続車両が動き出すまでのタイムラグや車間距離を考慮したことで、全ケースに対する両者の平均絶対誤差は平均待ち時間で 4.8 秒、平均必要待避区間長で 3.3m と多くのケースで合致した結果となり、その妥当性を確認することができた。ただし、最大待ち時間に関する平均絶対誤差は 147.7 秒（2 分半程度）、最大必要待避区間長について 24.4m（大型車 3 台分程度）となっており、評価式がシミュレーショ

ン結果よりも過大評価となっていた。とはいえ、安全側での判定であるとともに、最大値の水準を掴む上では十分に実用的なレベルと考えられる。また、計算時間については、交通シミュレーションによる1ケース(1時間15分間分×疑似乱数100系列)あたりの計算時間が約12分だったのに対して、評価式による計算時間は100ミリ秒未満であった。評価式の方が、一回の試行を交通シミュレーションの7千の一以下の時間で実行できる結果となった。最後に、車両の到着間隔に関して確率変動を考慮するか否かでシミュレーション結果がどのように違うかを確認した。大型車の混在台数が多いほど、または対象の狭隘区間長が長いほど待ち時間の差が大きくなったが、特に、通過所要時間が平均到着間隔を超えるケースにおいてその差が顕著であり、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も確認できた。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。

以上から、評価式については、計算時間のかかる交通シミュレーションの代替手段として必要な要件「追従モデルによる予測精度の維持」「大型車と小型車の混在」「車両到着における確率変動の考慮」「狭隘区間及び待避区間の平均値と最大値による評価」をすべて満たすものを提案することができた。

続いて、交通シミュレーションを代替する評価式にGAを組合せた待避区間の最適配置手法について、実問題をベースとした事例に適用してその結果の妥当性を確認した。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複雑なケースであったが、山側と谷側に異なる拡幅可能範囲や適用可能工法を道路状況に応じて設定できる遺伝子表現によって、問題なくモデル化を行うことができた。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。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た。遺伝的操作に関するパラメータについても、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。提案手法による結果は、拡幅総延長が70m、拡幅コストが1,310万円、平均待ち時間の合計が119.4秒となった。念のため、提案手法で得られた拡幅パターンの組合せについて、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なかった。平均待ち時間も116秒となり、評価式との差異は3.4秒と小さく、両者は整合した結果となった。ま

た、従来方法である交通シミュレーションと人による試行錯誤の結果とも比較したところ、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して、許容待ち時間を 60 秒から 300 秒まで 60 秒刻みで増やしながら、拡張コストと平均待ち時間のトレードオフ関係を確認した。許容待ち時間が 60 秒のケースでは、拡張コストの最小値は 7,470 万円とかなり高額となった。120 秒のケースについては 1,310 万円、180 秒では 960 万円、240 秒及び 300 秒のケースではどちらも拡張コストが 800 万円となった。拡張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張が必要となってコストが増加する。つまり、拡張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が、パラメータスタディではその様子が明確に表れた。また、遺伝的アルゴリズムにおける収束グラフでは、許容待ち時間が長いほど、つまり制約条件が弱いほど致死遺伝子の数が少なく有効な解がより多くなることで、収束が早まっていることを確認した。

最後に、トレードオフ分析をさらに進めて多目的最適化を実施した。多目的最適化においては、拡張コストと平均待ち時間の二つの目的関数を同時に扱った。その結果、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）」は、拡張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張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た。また、パラメータスタディの結果のうち、平均待ち時間 60 秒、120 秒、240 秒・300 秒については一致するものがパレートフロント（非劣フロント）に含まれていたが、180 秒についてはパラメータスタディの解と同じ拡張コストでもさらに平均待ち時間の低い、より良い解を見つけ出していた。さらに、パレートフロントは左下を凸にした折れ線を描いており、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た。左上から平均待ち時間を下げていくと、120 秒くらいまでは拡張コストがあまり上がらないが、120 秒を下回るあたりから急激に右に折れ曲がっていた。つまり、拡張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、最初に仮定した許容待ち時間 120 秒が妥当であったことを確認した。また、非劣解集合をより詳しく確認したところ、パレートフロントに見える屈折点は必要な拡張箇所数や拡張

単価の大きな変化点であることが推察できた。さらには、これらの結果を基に、本提案手法の活用シナリオを整理した。

以上から、最適化手法の適用に関する要件を確認すると、「現実の問題で行う検討手順に即したモデル」と「従来方法に比べてより良い解の導出」については十分にクリアできたものと思われる。また、計画業務における意思決定、特にコストと待ち時間のバランスを検討する際に「有効な情報の提供」は実現できており、このような最適化アプローチを通じて、建設工事における交通シミュレーションを用いた計画業務の高度化に寄与していくことが期待できる。しかしながら、検討時間に関しては、ある程度広範な非劣解集合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ろう。

5.2. 今後の課題

5.2.1. 評価式の拡張（信号制御，誘導員による台数制御）

本論文では、待避区間の両端においては、車両同士が対向車の有無を確認し合いながらすれ違いを行う方式を想定した。しかし、どうしても視認性の確保が難しい場所やより確実な安全性が求められるような場合には、信号機を設置して制御したり、誘導員によって通過台数を確認しながら誘導したりする方式が採用される場合がある。信号制御や誘導員による台数制御にも対応するためには、評価式をそれぞれに対応した形に拡張する必要がある。例えば、信号制御方式に対応するためには、待ち時間を算出する際の先頭待ち時間 W_1^H を信号サイクル時間から算出する必要がある。また、1回の青信号で通過できなかった捌け残り台数を次のサイクルでの待ち台数に加味することも必要になる。一方、誘導員による台数制御についても、進入車両の切り替わりサイクルは所定台数の到着時間に応じて可変となるが、やはり捌け残り台数の次サイクルへの追加は考慮しなくてはならない。すれ違い制御方式による切り替わりサイクルと捌け残り台数に対する違いを、表5-1に整理しておく。

表 5-1 すれ違い制御方式による切り替わりサイクルと捌け残り台数に対する違い

制御方式	進入車両の切り替わりサイクル	捌け残り台数の考慮
対向車 確認方式	対向車の到着間隔に依存	不要
信号 制御方式	信号サイクルに依存	必要
台数 制御方式	対向車の到着間隔に依存	必要

工事中の仮設信号を用いたすれ違い制御に関する研究は、文献 [74] [75] にあるようなシミュレーションを用いたものや、文献 [74] 内にも記載されている実験から構築した理論式 [76] [77] がある。今後は、これらとの整合を確認しながら、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ことが課題である。

なお、4.2.2 に記載した通り、ある待避区間から溢れてしまいそうな車両は一つ手前の待避区間で待避することとしたが、現状ではそのような場合の隣接待避区間に対する詳細な影響までは十分に考慮できていないという課題があった。よって、評価式を拡張するにあたっては、感度分析等も用いながら滞留台数に関する最大値分布のより詳しい性状を確認するとともに、待避区間に収まらないケースでの隣接待避区間への影響を十分に考慮した形で取り組むこととする。また、3.2 のシミュレーションとの結果比較においては、交通量が比較的少ない山間部でかつ工事車両による往復運行が想定されることから、到着分布には指数分布を仮定し、交通量についても 2 方向が同じとなるケースについてのみ検証を実施した。より広範には、到着分布にアーラン分布や正規分布を想定したケースや、2 方向の交通量が非対称となるケースについても検証を行う必要があると考える。

5.2.2. 最適化モデルの拡張（既存待避区間に関する前提の有無）

本論文では、遺伝子のモデル化に際して、工事に必要な設備や材料の設置場所を確保することを想定して、既存の待避区間からの連続的な拡張を表現する構造とした。また、1か所（既存待避区間の始点側もしくは終点側）の拡張においては、山側か谷側どちらかを連続して拡張することとし、両方が混在するようなケースは想定しないという制約を設けていた。一方で、資機材の設置場所を近傍にある複数個所で共有することができれば、特に既存待避区間を前提としない拡張箇所の選択や山側と谷側の工事の混在も可能となり、拡張箇所の選択方法も大幅に拡大する。前述の既存待避区間を前提としたモデルでは、既存待避区間の始点側と終点側に対応した拡張ブロック数を順番に並べた整数値型の遺伝子となったが、既存待避区間を前提としない場合には、次のようなモデル化が考えられる。

- ✓ 既存待避区間と拡張不可区間（山側も谷側も不可）を除くすべての拡張可能区間を拡張単位にブロック化し、拡張するブロックは「1」、しないブロックは「0」とするバイナリ型の遺伝子でモデル化する。
- ✓ 遺伝子の評価時には、まず「最小施工距離（これより短い拡張は行わない）」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）」から不要な拡張を排除する。
- ✓ 残った拡張ブロックに対しては、山側と谷側で拡張コストが安い方を選択（どちらかが拡張不可なら反対側）し、合計の拡張コストに加算していく。
- ✓ 最後に評価式による制約条件を確認し、制約を満たさない場合には致死遺伝子とする。

しかしながら、4.2で試行した事例について、制約条件や隣接する狭隘区間同士の影響を考慮しない場合の単純な最大ケース数を比較してみると、既存待避区間を前提とする場合が約 2.5×10^{41} ケースであるのに対して、既存待避区間を前提としない場合には約 2.2×10^{99} ケースに膨れ上がってしまう。実際には、制約条件等を利用してケース数を減らす工夫をしていく必要があると思われるが、適用性を拡大するためにも今後の研究課題と考える。

なお、本論文で実施した既存待避区間を基点としたモデルに関しても、4.1.1に記載した既存待避区間数の交叉点数への配慮や突然変異で導入した反転確率に関する仕組みについて、

その効果の評価が未実施のままである。今後のさらなる展開に際しては、その効果を計測して評価しておく必要がある。また、交叉位置に関して一つの既存待避区間の前後はセットにして切り離さないようにしたり、交叉時にも親同士の間合せから何らかのルールで新しい値を設定して多様性を創出したりするなど、さらなる工夫の余地も残されている。

5.2.3. 意思決定者の選好を反映した多目的最適化

多目的最適化の課題の一つとして、意思決定者の選好を反映した最適化がある。意思決定者の選好（希求水準）があるときは、希求水準に近い解を優先的に選択したい。許容待ち時間の想定がある場合などは、その付近が一つの対象となる。4.2.4 での分析においても、制約条件の設定状況に応じて収束性もしくは初期に現れる解の特性や傾向が異なることを確認した。これは制約条件を満たさない解を致死遺伝子としたことが一つの原因であり、制約条件に相当する内容をはじめから遺伝子モデル内に埋め込み、致死遺伝子となる解を極力減らすように工夫することで、意図しない傾向を排除することができるものと考えられる。また、意思決定者の選好がある程度明確な場合には、選考に近い解をより多く提示することができる最適化手法が理想的である。そのような研究には文献 [78] などがあり、希求水準法と融合した適合度評価を行う方法が提案されている。これらの手法に関する本研究への適用可能性の検討は今後の課題である。

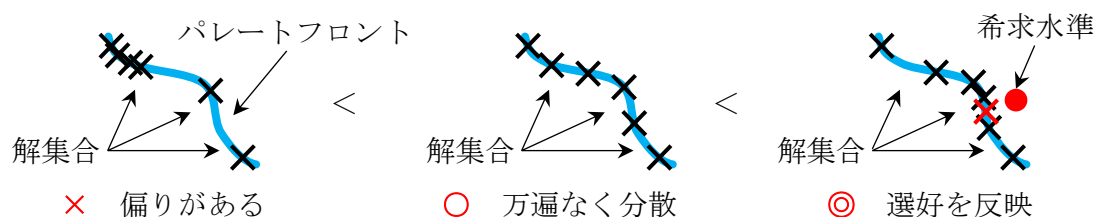


図 5-1 選好を反映した非劣解集合の構成イメージ

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始丁寧かつ熱心なご指導をいただきました大須賀 昭彦 教授、清 雄一 准教授に心から感謝の意を表します。また、投稿論文の共著研究者であり、筆者の勤務先である鹿島建設株式会社の前田 宗宏 氏と中村 泰広 氏には、ご多用にもかかわらず貴重なご意見をいただき深く感謝申し上げます。同じく、様々なご支援をいただいた鹿島建設株式会社の吉清 孝 氏、石田 雅利 氏、岩本 賢治 氏、野呂 好幸 氏をはじめとする職場・勤務先の方々、大須賀・田原・清研究室の皆様にも大変感謝いたします。

さらに、審査を快く引き受けてくださいました大学院情報理工学研究科の田中 健次 教授、南 泰浩 教授、佐藤 寛之 准教授には、ご多用の中、貴重なご指導をいただき論文の質を高めることができました。感謝申し上げます。また、現慶應義塾大学理工学研究科の栗原 聡 教授にも、研究テーマの検討等において有意義なご指導をいただきました。誠にありがとうございました。

本研究は、国立情報学研究所トップエスイープロジェクトへの参加が大きなきっかけとなりました。特に、同プロジェクトを創設され、国立情報学研究所の副所長を務められた現早稲田大学理工学術院の本位田 真一 教授をはじめ、大須賀・田原・清研究室の田原 康之 准教授、国立情報学研究所の吉岡 信和 准教授と石川 冬樹 准教授、大阪大学大学院情報科学研究科の中川 博之 准教授には、大学院進学への機会を作っていただいたことに加え、多大なご支援・ご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。

最後に、大学院への進学を後押しし、在学中の3年間を支えてくれた妻 和栄と息子 広大にも、心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 鈴木成文: 建築計画, 実教出版, 1975.
- [2] 土木学会 編: 土木計画学シリーズ (1) 土木計画学の成立と背景, 技報堂, pp.1-15, 1978.
- [3] 本位田真一, 飯島正, 大須賀昭彦: エージェント技術, 共立出版, pp.26-27, 1999.
- [4] 樋口良之: 離散系のシステムモデリングとシミュレーション解析, 三恵社, 2007.
- [5] 浅野美帆: 歩行者交通流動評価のためのシミュレーションモデルの開発ー予測行動を考慮して, 東京大学大学院, 2007.
- [6] 中村泰広, 野呂好幸, 北山真, 前田宗宏, 大山寛夫, 今村崇, 北村義宜, 天野和洋: 駅改良工事における施工中の旅客流動・安全性評価ー旅客流動シミュレーション「SIM-WALKER」の適用ー, 土木学会第68回年次学術講演会, Vol.68, No.VI-271, pp.541-542, 2013.
- [7] 天野和洋, 今関修, 抱憲誓, 井田卓造: 熱煙流動を考慮した避難シミュレータの開発, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.182-183, 2013.
- [8] 長谷見雄二, 重川希志依: 火災時における人間の耐放射限界について, 日本火災学会論文集, Vol.31, No.1, pp.7-14, 1981.
- [9] 神忠久: 煙の中での歩行速度について, 火災, Vol.25, No.2, pp.44-48, 1975.
- [10] 位寄和久: 避難行動モデルに関する研究ー火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案ー, 日本建築学会論文報告集, Vol.325, pp.125-132, 1983.
- [11] 交通工学研究会: 交通シミュレーション適用のススメ, 丸善出版, pp.30-175, 2004.
- [12] 交通工学研究会: 交通シミュレーションクリアリングハウス,
<http://www.jste.or.jp/sim/index.html> (アクセス日: 2018-1-12).

- [13] 北山真, 今村崇, 北村義宜, 野呂好幸: 駅前広場空間の高度化利用に関する研究—ITSを活用した効率的・弾力的な空間運用に関する考察—, *土木計画学研究・講演集*, 29, p.VII(123), 2004.
- [14] 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, pp.32-103, 2004.
- [15] 島根県: 1.5車線の改良調査・設計マニュアル, 2005.
- [16] 新潟県: 1.5車線の道路整備ガイドライン, 2007.
- [17] J. H. Holland: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- [18] D. E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [19] 北野宏明 編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- [20] 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*, Vol.68, No.IV-009, pp.17-18, 2013.
- [21] 赤羽弘和, 大口敬, 吉井稔雄, 堀口良太: 交通シミュレーションモデルの実用化に向けての課題, *土木計画学研究・講演集*, No.20(1), pp.521-523, 1997.
- [22] 鹿島建設: 交通シミュレーションシステム「REST」,
http://www.kajima.co.jp/tech/c_urban_infra/analysis/index.html#body_02 (アクセス日: 2018-1-12).
- [23] E. Kometani, T. Sasaki: On the Stability of Traffic Flow (Report-I), *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol.2, No.1, pp.11-26, 1958.
- [24] R. E. Chandler, R. Herman, E. W. Montroll: Traffic Dynamics: Studies in Car Following, *Operations Research*, Vol.6, No.2, pp.165-184, 1958.
- [25] D. C. Gazis, R. Herman, R. W. Rothery: Nonlinear Follow-The-Leader Models of Traffic Flow, *Operations Research*, Vol.9, No.4, pp.545-567, 1961.

- [26] P. Hidas: A Car Following Model for Urban Traffic Simulation, *Traffic Engineering & Control*, Vol.39, No.5, pp.300-309, 1998.
- [27] 今野浩: 線形計画法, 日科技連出版社, 1987.
- [28] 田村明久, 村松正和: 最適化法, 共立出版, 2002.
- [29] 今野浩, 山下浩: 非線形計画法, 日科技連出版社, 1978.
- [30] 今野浩, 鈴木久敏 共同編集: 整数計画法と組合せ最適化, 日科技連出版社, 1982.
- [31] 茨木俊秀: 組合せ最適化一分枝限定法を中心として一, 産業図書, 1983.
- [32] F. Glover: Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence, *Computers and Operations Research*, Vol.13, No.5, p.533-549, 1986.
- [33] F. Glover, M. Laguna: Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [34] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr, M. P. Vecchi: Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol.220, No.4598, p.671-680, 1983.
- [35] 永田裕一: 多点探索型アルゴリズムの基礎と最前線, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.58, No.12, pp.708-715, 2013.
- [36] J. Kennedy, R. Eberhart: Particle Swarm Optimization, *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, pp.1942-1948, 1995.
- [37] A. Engelbrecht: Fundamentals of Computational Swarm Intelligence, Wiley, 2005.
- [38] C. Blum, D. Merkle: Swarm Intelligence: Introduction and Applications, Springer Publishing, 2008.
- [39] 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.
- [40] 田村亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, *土木学会論文集*, Vol.1994, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994.

- [41] 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明: Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定, *土木学会論文集*, Vol.1998, No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- [42] 高山純一, 柳沢吉保, 中野泰啓: コミュニティバスの路線網策定システムの構築, *土木計画学研究・論文集*, Vol.18, No.4, pp.705-711, 2001.
- [43] 天野和洋, 大谷芳輝: 遺伝的アルゴリズムによる橋梁群の維持管理費用の均等化, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.54, No.11, pp.659-663, 2009.
- [44] A. Charnes, W. W. Cooper: Goal Programming and Multiple Objective Optimization, *European Journal of Operational Research*, Vol.1, No.1, pp.39-54, 1977.
- [45] 中山弘隆: 多目的計画法に対する満足化トレードオフ法の提案, *計測自動制御学会論文集*, Vol.20, pp.29-35, 1984.
- [46] K. Deb: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, Wiley, 2001.
- [47] E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele: SPEA2 : Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization, *Evolutionary Methods for Design, Optimisation, and Control*, pp.95-100, 2002.
- [48] 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—, 現代図書, pp.29-123,145-147, 2007.
- [49] 渡邊真也: 遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化に関する研究, 同志社大学大学院, 2001.
- [50] M. Kim, T. Hiroyasu, M. Miki, S. Watanabe: SPEA2+: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*, Vol.3242, pp.742-751, 2004.

- [51] F. Rudziński: Finding Sets of Non-Dominated Solutions with High Spread and Well-Balanced Distribution using Generalized Strength Pareto Evolutionary Algorithm, *16th World Congress of the International Fuzzy Systems Association (IFSA) / 9th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT)*, pp.178-185, 2015.
- [52] 佐藤寛之: 進化計算による多数目的最適化, システム／制御／情報, Vol.60, No.7, pp.265-271, 2016.
- [53] 渡邊真也: パレート解分析のための技術動向, システム／制御／情報, Vol.60, No.7, pp.272-277, 2016.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] J. S. Arora: Introduction to Optimum Design Third Edition, Elsevier, 2012.
- [57] 畔上秀幸: 形状最適化問題, 森北出版, 2016.
- [58] 井庭崇: 社会・経済シミュレーションの基盤構築—複雑系と進化の理論に向けて—, 慶應義塾大学大学院, 2003.
- [59] The Object Management Group: About the Unified Modeling Language Specification Version 2.5.1, The Object Management Group, <http://www.omg.org/spec/UML> (アクセス日: 2018-3-1).
- [60] NASA: Java Path Finder, <http://babelfish.arc.nasa.gov/trac/jpf> (アクセス日: 2018-3-1).
- [61] 天野和洋: 検証機能および変更容易性を有する離散事象シミュレーションフレームワーク, 国立情報学研究所トップエスイープロジェクト, 第2期修了制作, 2007.

- [62] 雪島正敏, 山本晃成: S3 Simulation System の開発 3-シミュレーション最適化-, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 秋季研究発表会, pp.138-139, 2011.
- [63] ESTECO S.p.A: modeFRONTIER | www.esteco.com, ESTECO S.p.A, <https://www.esteco.com/modefrontier> (アクセス日: 2018-5-1).
- [64] n. solutions: Optimus | Noesis Solutions | Noesis Solutions, noesis solutions, <https://www.noessolutions.com/our-products/optimus> (アクセス日: 2018-5-1).
- [65] SIEMENS: HEEDS | MDX, SIEMENS, <https://mdx.plm.automation.siemens.com/heeds> (アクセス日: 2018-5-1).
- [66] T. Mannucci, E. v. Kampen, C. C. d. Visser, Q. P. Chux: SHERPA: a safe exploration algorithm for Reinforcement Learning Controllers, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, p.15, 2015.
- [67] 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, Vol.60, No.4-230, pp.459-460, 2005.
- [68] 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.
- [69] 交通工学研究会: 交通流シミュレーションモデルの標準検証プロセス~Verification マニュアル (案) ~, p.5, 2002.
- [70] E. J. Gumbel, 河田竜夫, 岩井重久, 加瀬滋男 監訳: 極値統計学—極値の理論とその工学的応用—, 生産技術センター新社, pp.80-166, 1978.
- [71] K. DeJong: An Analysis of the Behavior : A Class of Genetic Adaptive Systems, University of Michigan, 1975.
- [72] 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.
- [73] W. Spears: Crossover or Mutation, *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol.2, pp.221-237, 1993.

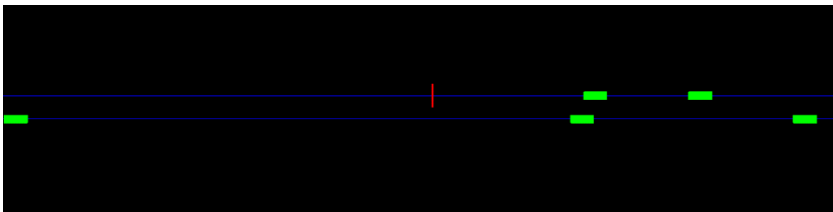
- [74] 中沢喜久雄: 建設工事用車両の運行シミュレーション, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol.30, No.10, pp.620-628, 1985.
- [75] 和田かおる, 飯田進一, 山本幸司: 道路工事における仮設信号の動的制御支援用シミュレーションモデルの開発, *建設マネジメント研究論文集*, Vol.2, pp.77-84, 1994.
- [76] F. Webster: Traffic signal settings, No.39, Great Britain Road Research Laboratory, 1958.
- [77] J. C. Tanner: A Problem of Interference Between Two Queues, *Biometrika*, Vol.40, pp.58-69, 1953.
- [78] Y. Yun: Multiple criteria decision making with generalized DEA and an aspiration level method, *European Journal of Operational Research*, 158, p.697-706, 2004.

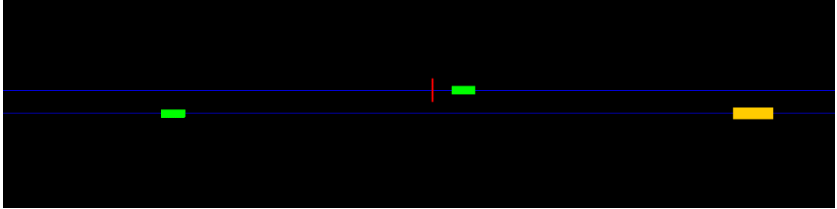
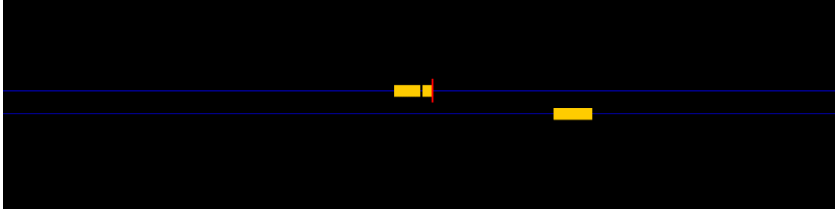
付 録

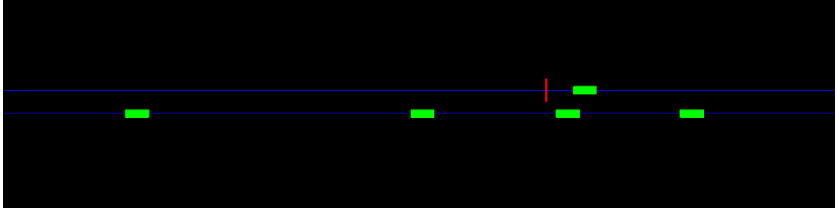
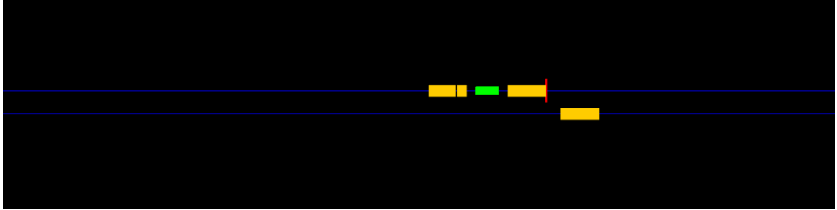
付録A シミュレーション結果に関する詳細情報

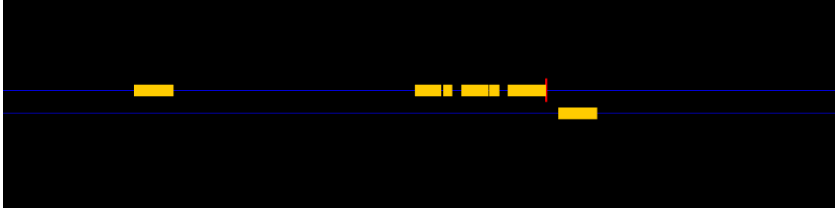

表 A-1～表 A-3 は、シミュレーション時のスナップショット（結果再生時の画面キャプチャ画像）と統計情報を、狭隘区間長が 200, 400, 600m, 大型車混在台数が 0, 30, 60 台を代表的なケースとして、区間制約ごとに整理したものである。なお、各表は複数ページにわたるものであるが、表題は先頭のページにのみ記載するので注意されたい。また、表内に関する注釈は 3 表に共通のものであることから、表 A-3 の最後にまとめて掲載する。

表 A-1 シミュレーション結果のスナップショットと統計情報：区間制約「低」

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
200	0/60	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最小値	0.0	0.0	平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最大値	0.0	0.0	全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	最大値の最小値	0.0	0.0	最大値の平均値	0.0	0.0	最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	全体の標準偏差	0.0	0.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最小値	0.0	0.0																																	
平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最大値	0.0	0.0																																	
全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
最大値の最小値	0.0	0.0																																	
最大値の平均値	0.0	0.0																																	
最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
全体の標準偏差	0.0	0.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="579 730 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>4.4</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>4.3</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>13.0</td> <td>4.3</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>215.4</td> <td>58.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>11.8</td> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>83.8</td> <td>28.1</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>215.4</td> <td>58.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>15.0</td> <td>5.3</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>5.3</td> <td>5.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	4.4	1.8	平均値の最小値	0.1	0.1	平均値の平均値 ^{*1}	4.3	1.8	平均値の最大値	13.0	4.3	全体の最大値 ^{*2}	215.4	58.0	最大値の最小値	11.8	8.0	最大値の平均値	83.8	28.1	最大値の最大値 ^{*2}	215.4	58.0	全体の標準偏差	15.0	5.3	標準偏差の倍数 ^{*3}	5.3	5.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	4.4	1.8																																	
平均値の最小値	0.1	0.1																																	
平均値の平均値 ^{*1}	4.3	1.8																																	
平均値の最大値	13.0	4.3																																	
全体の最大値 ^{*2}	215.4	58.0																																	
最大値の最小値	11.8	8.0																																	
最大値の平均値	83.8	28.1																																	
最大値の最大値 ^{*2}	215.4	58.0																																	
全体の標準偏差	15.0	5.3																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	5.3	5.0																																	
	60/0	 <table border="1" data-bbox="579 1391 1329 1783"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>18.3</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>9.1</td> <td>3.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>18.1</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>29.0</td> <td>11.7</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>323.7</td> <td>118.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>80.1</td> <td>28.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>168.0</td> <td>50.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>323.7</td> <td>118.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>35.2</td> <td>11.2</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>4.2</td> <td>4.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	18.3	6.4	平均値の最小値	9.1	3.1	平均値の平均値 ^{*1}	18.1	6.3	平均値の最大値	29.0	11.7	全体の最大値 ^{*2}	323.7	118.0	最大値の最小値	80.1	28.0	最大値の平均値	168.0	50.8	最大値の最大値 ^{*2}	323.7	118.0	全体の標準偏差	35.2	11.2	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.2	4.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	18.3	6.4																																	
平均値の最小値	9.1	3.1																																	
平均値の平均値 ^{*1}	18.1	6.3																																	
平均値の最大値	29.0	11.7																																	
全体の最大値 ^{*2}	323.7	118.0																																	
最大値の最小値	80.1	28.0																																	
最大値の平均値	168.0	50.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	323.7	118.0																																	
全体の標準偏差	35.2	11.2																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.2	4.0																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
400	0/60	 <table border="1" data-bbox="579 730 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>全体の平均値^{*1}</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>平均値の最小値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>平均値の平均値^{*1}</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>平均値の最大値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>全体の最大値^{*2}</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>最大値の最小値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>最大値の平均値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>最大値の最大値^{*2}</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>全体の標準偏差</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>標準偏差の倍数^{*3}</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最小値	0.0	0.0	平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最大値	0.0	0.0	全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	最大値の最小値	0.0	0.0	最大値の平均値	0.0	0.0	最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	全体の標準偏差	0.0	0.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最小値	0.0	0.0																																	
平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最大値	0.0	0.0																																	
全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
最大値の最小値	0.0	0.0																																	
最大値の平均値	0.0	0.0																																	
最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
全体の標準偏差	0.0	0.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="579 1391 1329 1783"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>全体の平均値^{*1}</td><td>25.6</td><td>6.4</td></tr> <tr><td>平均値の最小値</td><td>3.3</td><td>1.2</td></tr> <tr><td>平均値の平均値^{*1}</td><td>25.4</td><td>6.3</td></tr> <tr><td>平均値の最大値</td><td>78.3</td><td>14.2</td></tr> <tr><td>全体の最大値^{*2}</td><td>826.2</td><td>133.0</td></tr> <tr><td>最大値の最小値</td><td>69.9</td><td>25.0</td></tr> <tr><td>最大値の平均値</td><td>271.6</td><td>63.5</td></tr> <tr><td>最大値の最大値^{*2}</td><td>826.2</td><td>133.0</td></tr> <tr><td>全体の標準偏差</td><td>60.8</td><td>14.2</td></tr> <tr><td>標準偏差の倍数^{*3}</td><td>4.0</td><td>4.0</td></tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	25.6	6.4	平均値の最小値	3.3	1.2	平均値の平均値 ^{*1}	25.4	6.3	平均値の最大値	78.3	14.2	全体の最大値 ^{*2}	826.2	133.0	最大値の最小値	69.9	25.0	最大値の平均値	271.6	63.5	最大値の最大値 ^{*2}	826.2	133.0	全体の標準偏差	60.8	14.2	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.0	4.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	25.6	6.4																																	
平均値の最小値	3.3	1.2																																	
平均値の平均値 ^{*1}	25.4	6.3																																	
平均値の最大値	78.3	14.2																																	
全体の最大値 ^{*2}	826.2	133.0																																	
最大値の最小値	69.9	25.0																																	
最大値の平均値	271.6	63.5																																	
最大値の最大値 ^{*2}	826.2	133.0																																	
全体の標準偏差	60.8	14.2																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.0	4.0																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	60 / 0	 <table border="1" data-bbox="579 728 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>90.2</td> <td>20.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>42.5</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>89.0</td> <td>20.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>262.8</td> <td>66.5</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,672.7</td> <td>368.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>262.5</td> <td>48.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>587.9</td> <td>127.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,672.7</td> <td>368.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>158.0</td> <td>35.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	90.2	20.8	平均値の最小値	42.5	6.3	平均値の平均値 ^{*1}	89.0	20.4	平均値の最大値	262.8	66.5	全体の最大値 ^{*2}	1,672.7	368.0	最大値の最小値	262.5	48.0	最大値の平均値	587.9	127.8	最大値の最大値 ^{*2}	1,672.7	368.0	全体の標準偏差	158.0	35.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	90.2	20.8																																	
平均値の最小値	42.5	6.3																																	
平均値の平均値 ^{*1}	89.0	20.4																																	
平均値の最大値	262.8	66.5																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,672.7	368.0																																	
最大値の最小値	262.5	48.0																																	
最大値の平均値	587.9	127.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,672.7	368.0																																	
全体の標準偏差	158.0	35.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1																																	
600	0 / 60	 <table border="1" data-bbox="579 1386 1329 1780"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最小値	0.0	0.0	平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最大値	0.0	0.0	全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	最大値の最小値	0.0	0.0	最大値の平均値	0.0	0.0	最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	全体の標準偏差	0.0	0.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最小値	0.0	0.0																																	
平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最大値	0.0	0.0																																	
全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
最大値の最小値	0.0	0.0																																	
最大値の平均値	0.0	0.0																																	
最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
全体の標準偏差	0.0	0.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0																																	

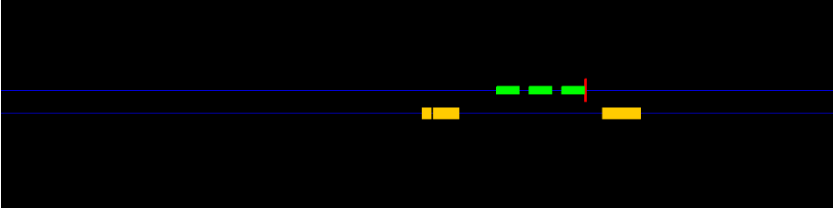
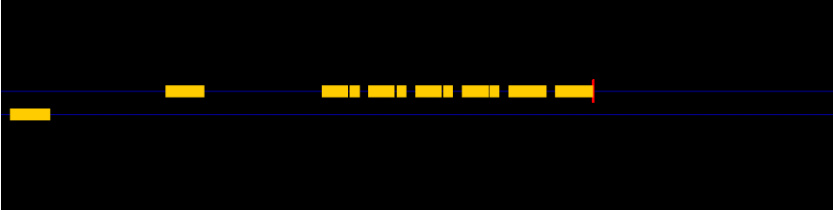
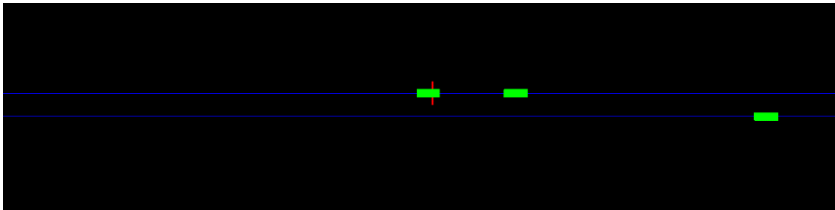
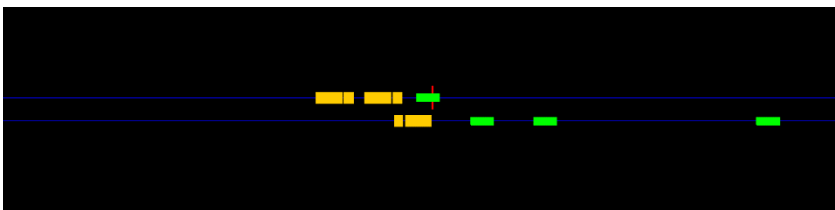
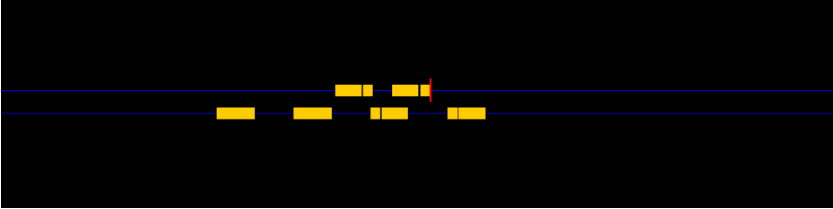
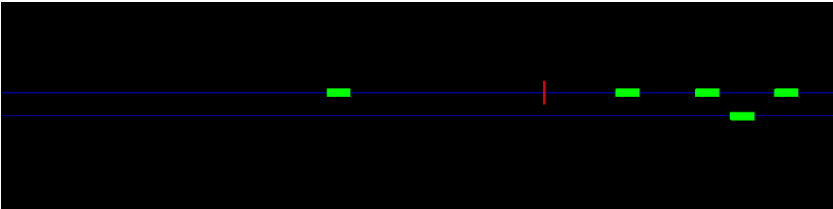
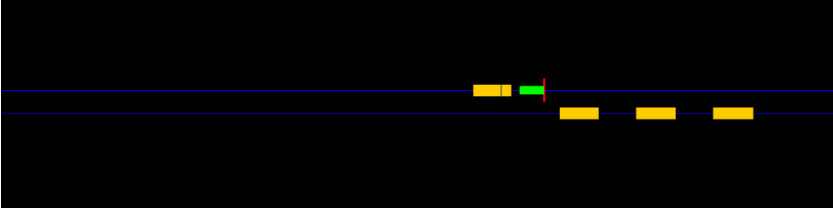
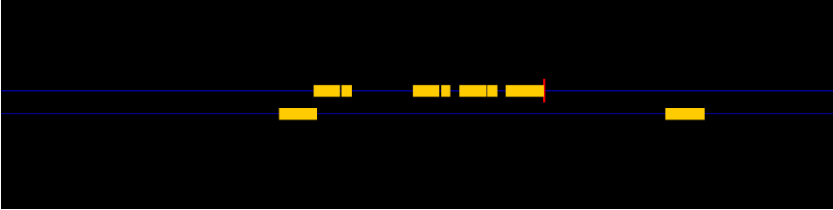
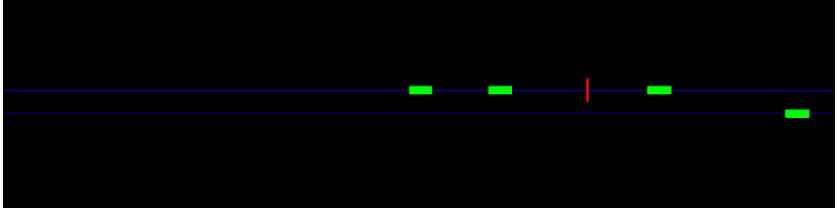
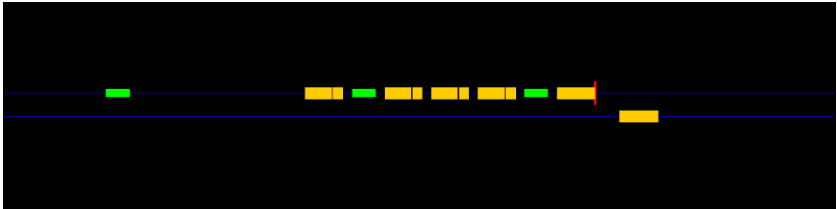
狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="580 730 1331 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>67.0</td> <td>13.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>14.1</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>66.0</td> <td>12.9</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>187.0</td> <td>41.1</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,401.9</td> <td>267.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>127.1</td> <td>46.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>538.6</td> <td>101.1</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,401.9</td> <td>267.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>140.3</td> <td>26.4</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.4</td> <td>3.3</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	67.0	13.1	平均値の最小値	14.1	3.6	平均値の平均値 ^{*1}	66.0	12.9	平均値の最大値	187.0	41.1	全体の最大値 ^{*2}	1,401.9	267.0	最大値の最小値	127.1	46.0	最大値の平均値	538.6	101.1	最大値の最大値 ^{*2}	1,401.9	267.0	全体の標準偏差	140.3	26.4	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.4	3.3
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	67.0	13.1																																	
平均値の最小値	14.1	3.6																																	
平均値の平均値 ^{*1}	66.0	12.9																																	
平均値の最大値	187.0	41.1																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,401.9	267.0																																	
最大値の最小値	127.1	46.0																																	
最大値の平均値	538.6	101.1																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,401.9	267.0																																	
全体の標準偏差	140.3	26.4																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.4	3.3																																	
	60/0	 <table border="1" data-bbox="580 1391 1331 1783"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>246.3</td> <td>51.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>88.0</td> <td>16.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>242.0</td> <td>50.7</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>569.4</td> <td>118.7</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>2,570.6</td> <td>508.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>462.9</td> <td>88.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>1,270.4</td> <td>258.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>2,570.6</td> <td>508.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>389.0</td> <td>79.8</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>2.6</td> <td>2.6</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	246.3	51.8	平均値の最小値	88.0	16.4	平均値の平均値 ^{*1}	242.0	50.7	平均値の最大値	569.4	118.7	全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0	最大値の最小値	462.9	88.0	最大値の平均値	1,270.4	258.0	最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0	全体の標準偏差	389.0	79.8	標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	246.3	51.8																																	
平均値の最小値	88.0	16.4																																	
平均値の平均値 ^{*1}	242.0	50.7																																	
平均値の最大値	569.4	118.7																																	
全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0																																	
最大値の最小値	462.9	88.0																																	
最大値の平均値	1,270.4	258.0																																	
最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0																																	
全体の標準偏差	389.0	79.8																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6																																	

表 A-2 シミュレーション結果のスナップショットと統計情報：区間制約「中」

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																		
		200	0/60	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最小値	0.0	0.0	平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最大値	0.0	0.0	全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	最大値の最小値	0.0	0.0	最大値の平均値	0.0	0.0	最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	全体の標準偏差	0.0	0.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																		
全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																		
平均値の最小値	0.0	0.0																																		
平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																		
平均値の最大値	0.0	0.0																																		
全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																		
最大値の最小値	0.0	0.0																																		
最大値の平均値	0.0	0.0																																		
最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																		
全体の標準偏差	0.0	0.0																																		
標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0																																		
200	30/30	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>13.7</td> <td>4.5</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>5.3</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>13.5</td> <td>4.5</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>22.3</td> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>260.0</td> <td>97.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>60.0</td> <td>15.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>144.6</td> <td>41.5</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>260.0</td> <td>97.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>29.0</td> <td>8.8</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>4.5</td> <td>4.2</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	13.7	4.5	平均値の最小値	5.3	1.6	平均値の平均値 ^{*1}	13.5	4.5	平均値の最大値	22.3	8.0	全体の最大値 ^{*2}	260.0	97.0	最大値の最小値	60.0	15.0	最大値の平均値	144.6	41.5	最大値の最大値 ^{*2}	260.0	97.0	全体の標準偏差	29.0	8.8	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.5	4.2	
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																		
全体の平均値 ^{*1}	13.7	4.5																																		
平均値の最小値	5.3	1.6																																		
平均値の平均値 ^{*1}	13.5	4.5																																		
平均値の最大値	22.3	8.0																																		
全体の最大値 ^{*2}	260.0	97.0																																		
最大値の最小値	60.0	15.0																																		
最大値の平均値	144.6	41.5																																		
最大値の最大値 ^{*2}	260.0	97.0																																		
全体の標準偏差	29.0	8.8																																		
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.5	4.2																																		

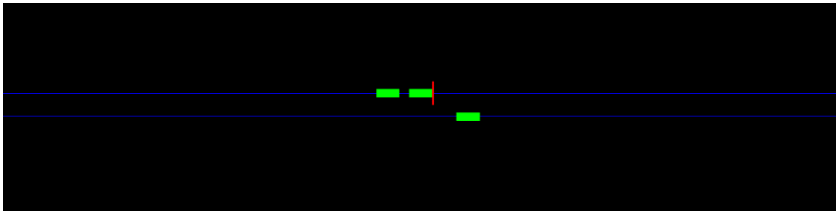
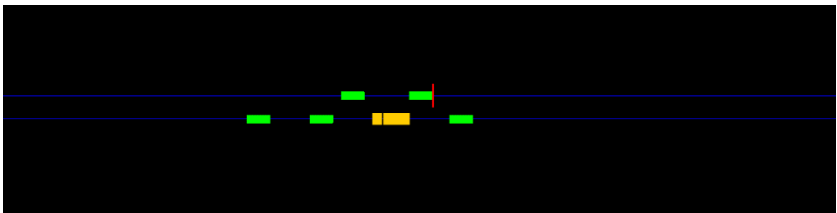
狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	60 / 0	 <table border="1" data-bbox="580 730 1331 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>18.3</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>9.2</td> <td>3.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>18.1</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>29.1</td> <td>11.7</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>323.7</td> <td>118.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>80.1</td> <td>28.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>168.3</td> <td>50.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>323.7</td> <td>118.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>35.2</td> <td>11.2</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>4.3</td> <td>4.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	18.3	6.4	平均値の最小値	9.2	3.1	平均値の平均値 ^{*1}	18.1	6.3	平均値の最大値	29.1	11.7	全体の最大値 ^{*2}	323.7	118.0	最大値の最小値	80.1	28.0	最大値の平均値	168.3	50.8	最大値の最大値 ^{*2}	323.7	118.0	全体の標準偏差	35.2	11.2	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.3	4.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	18.3	6.4																																	
平均値の最小値	9.2	3.1																																	
平均値の平均値 ^{*1}	18.1	6.3																																	
平均値の最大値	29.1	11.7																																	
全体の最大値 ^{*2}	323.7	118.0																																	
最大値の最小値	80.1	28.0																																	
最大値の平均値	168.3	50.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	323.7	118.0																																	
全体の標準偏差	35.2	11.2																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.3	4.0																																	
400	0 / 60	 <table border="1" data-bbox="580 1388 1331 1780"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>0.0</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最小値	0.0	0.0	平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0	平均値の最大値	0.0	0.0	全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	最大値の最小値	0.0	0.0	最大値の平均値	0.0	0.0	最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0	全体の標準偏差	0.0	0.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最小値	0.0	0.0																																	
平均値の平均値 ^{*1}	0.0	0.0																																	
平均値の最大値	0.0	0.0																																	
全体の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
最大値の最小値	0.0	0.0																																	
最大値の平均値	0.0	0.0																																	
最大値の最大値 ^{*2}	0.0	0.0																																	
全体の標準偏差	0.0	0.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	0.0	0.0																																	

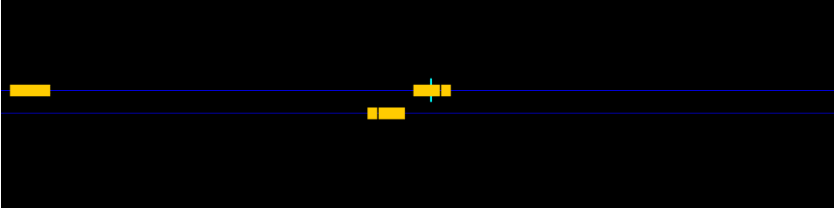
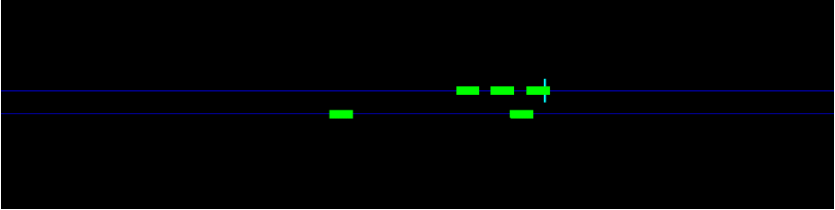
狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="580 730 1331 1124"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>75.6</td> <td>15.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>26.0</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>74.6</td> <td>15.5</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>252.0</td> <td>57.6</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,672.4</td> <td>317.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>221.6</td> <td>36.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>536.5</td> <td>105.2</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,672.4</td> <td>317.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>142.1</td> <td>28.3</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.2</td> <td>3.2</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	75.6	15.8	平均値の最小値	26.0	4.0	平均値の平均値 ^{*1}	74.6	15.5	平均値の最大値	252.0	57.6	全体の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0	最大値の最小値	221.6	36.0	最大値の平均値	536.5	105.2	最大値の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0	全体の標準偏差	142.1	28.3	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.2
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	75.6	15.8																																	
平均値の最小値	26.0	4.0																																	
平均値の平均値 ^{*1}	74.6	15.5																																	
平均値の最大値	252.0	57.6																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0																																	
最大値の最小値	221.6	36.0																																	
最大値の平均値	536.5	105.2																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0																																	
全体の標準偏差	142.1	28.3																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.2																																	
	60/0	 <table border="1" data-bbox="580 1391 1331 1785"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>90.2</td> <td>20.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>42.5</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>89.0</td> <td>20.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>262.8</td> <td>66.5</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,673.0</td> <td>368.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>262.5</td> <td>48.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>587.9</td> <td>127.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,673.0</td> <td>368.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>158.0</td> <td>35.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	90.2	20.8	平均値の最小値	42.5	6.3	平均値の平均値 ^{*1}	89.0	20.4	平均値の最大値	262.8	66.5	全体の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0	最大値の最小値	262.5	48.0	最大値の平均値	587.9	127.8	最大値の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0	全体の標準偏差	158.0	35.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	90.2	20.8																																	
平均値の最小値	42.5	6.3																																	
平均値の平均値 ^{*1}	89.0	20.4																																	
平均値の最大値	262.8	66.5																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0																																	
最大値の最小値	262.5	48.0																																	
最大値の平均値	587.9	127.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0																																	
全体の標準偏差	158.0	35.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1																																	

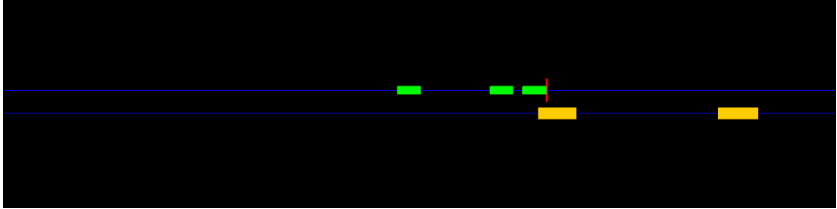
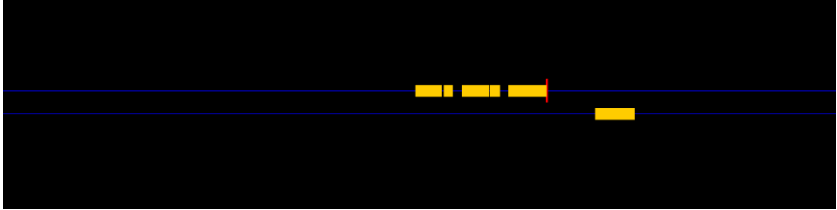
狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
600	0/60	 <table border="1" data-bbox="579 728 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>全体の平均値※1</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>平均値の最小値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>平均値の平均値※1</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>平均値の最大値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>全体の最大値※2</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>最大値の最小値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>最大値の平均値</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>最大値の最大値※2</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>全体の標準偏差</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> <tr><td>標準偏差の倍数※3</td><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値※1	0.0	0.0	平均値の最小値	0.0	0.0	平均値の平均値※1	0.0	0.0	平均値の最大値	0.0	0.0	全体の最大値※2	0.0	0.0	最大値の最小値	0.0	0.0	最大値の平均値	0.0	0.0	最大値の最大値※2	0.0	0.0	全体の標準偏差	0.0	0.0	標準偏差の倍数※3	0.0	0.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値※1	0.0	0.0																																	
平均値の最小値	0.0	0.0																																	
平均値の平均値※1	0.0	0.0																																	
平均値の最大値	0.0	0.0																																	
全体の最大値※2	0.0	0.0																																	
最大値の最小値	0.0	0.0																																	
最大値の平均値	0.0	0.0																																	
最大値の最大値※2	0.0	0.0																																	
全体の標準偏差	0.0	0.0																																	
標準偏差の倍数※3	0.0	0.0																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="579 1386 1329 1780"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>全体の平均値※1</td><td>216.1</td><td>40.2</td></tr> <tr><td>平均値の最小値</td><td>75.7</td><td>9.1</td></tr> <tr><td>平均値の平均値※1</td><td>211.8</td><td>39.2</td></tr> <tr><td>平均値の最大値</td><td>504.8</td><td>90.8</td></tr> <tr><td>全体の最大値※2</td><td>2,231.7</td><td>443.0</td></tr> <tr><td>最大値の最小値</td><td>429.4</td><td>49.0</td></tr> <tr><td>最大値の平均値</td><td>1,155.0</td><td>208.1</td></tr> <tr><td>最大値の最大値※2</td><td>2,231.7</td><td>443.0</td></tr> <tr><td>全体の標準偏差</td><td>357.3</td><td>64.6</td></tr> <tr><td>標準偏差の倍数※3</td><td>2.6</td><td>2.6</td></tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値※1	216.1	40.2	平均値の最小値	75.7	9.1	平均値の平均値※1	211.8	39.2	平均値の最大値	504.8	90.8	全体の最大値※2	2,231.7	443.0	最大値の最小値	429.4	49.0	最大値の平均値	1,155.0	208.1	最大値の最大値※2	2,231.7	443.0	全体の標準偏差	357.3	64.6	標準偏差の倍数※3	2.6	2.6
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値※1	216.1	40.2																																	
平均値の最小値	75.7	9.1																																	
平均値の平均値※1	211.8	39.2																																	
平均値の最大値	504.8	90.8																																	
全体の最大値※2	2,231.7	443.0																																	
最大値の最小値	429.4	49.0																																	
最大値の平均値	1,155.0	208.1																																	
最大値の最大値※2	2,231.7	443.0																																	
全体の標準偏差	357.3	64.6																																	
標準偏差の倍数※3	2.6	2.6																																	

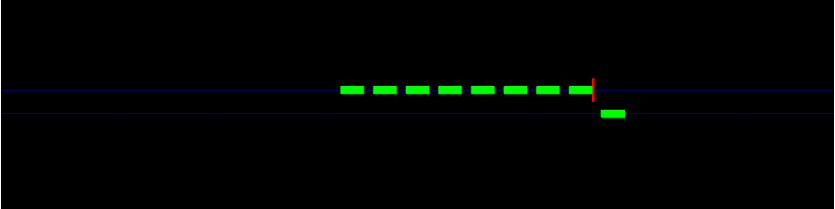
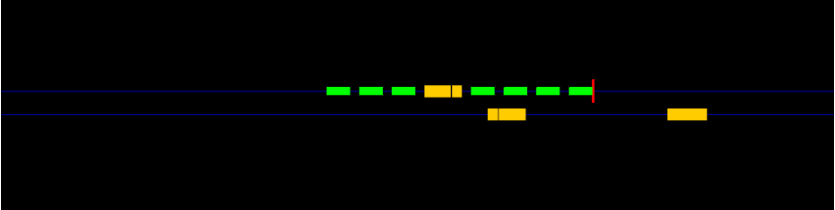
狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	<p style="text-align: center;">上段：スナップショット</p> <p style="text-align: center;">下段：各種統計情報</p>																																	
	60 / 0	<div style="text-align: center;">  </div> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td style="text-align: center;">246.3</td> <td style="text-align: center;">51.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td style="text-align: center;">88.0</td> <td style="text-align: center;">16.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td style="text-align: center;">242.0</td> <td style="text-align: center;">50.7</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td style="text-align: center;">569.4</td> <td style="text-align: center;">118.7</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td style="text-align: center;">2,570.6</td> <td style="text-align: center;">508.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td style="text-align: center;">462.9</td> <td style="text-align: center;">88.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td style="text-align: center;">1,270.4</td> <td style="text-align: center;">258.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td style="text-align: center;">2,570.6</td> <td style="text-align: center;">508.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td style="text-align: center;">389.0</td> <td style="text-align: center;">79.8</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td style="text-align: center;">2.6</td> <td style="text-align: center;">2.6</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	246.3	51.8	平均値の最小値	88.0	16.4	平均値の平均値 ^{*1}	242.0	50.7	平均値の最大値	569.4	118.7	全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0	最大値の最小値	462.9	88.0	最大値の平均値	1,270.4	258.0	最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0	全体の標準偏差	389.0	79.8	標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	246.3	51.8																																	
平均値の最小値	88.0	16.4																																	
平均値の平均値 ^{*1}	242.0	50.7																																	
平均値の最大値	569.4	118.7																																	
全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0																																	
最大値の最小値	462.9	88.0																																	
最大値の平均値	1,270.4	258.0																																	
最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	508.0																																	
全体の標準偏差	389.0	79.8																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6																																	


表 A-3 シミュレーション結果のスナップショットと統計情報：区間制約「高」

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
200	0/60	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>17.8</td> <td>4.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>9.0</td> <td>1.9</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>17.6</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>28.5</td> <td>7.3</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>323.9</td> <td>82.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>80.3</td> <td>19.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>166.8</td> <td>34.2</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>323.9</td> <td>82.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>34.8</td> <td>7.4</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>4.3</td> <td>4.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	17.8	4.1	平均値の最小値	9.0	1.9	平均値の平均値 ^{*1}	17.6	4.0	平均値の最大値	28.5	7.3	全体の最大値 ^{*2}	323.9	82.0	最大値の最小値	80.3	19.0	最大値の平均値	166.8	34.2	最大値の最大値 ^{*2}	323.9	82.0	全体の標準偏差	34.8	7.4	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.3	4.1
	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																
全体の平均値 ^{*1}	17.8	4.1																																	
平均値の最小値	9.0	1.9																																	
平均値の平均値 ^{*1}	17.6	4.0																																	
平均値の最大値	28.5	7.3																																	
全体の最大値 ^{*2}	323.9	82.0																																	
最大値の最小値	80.3	19.0																																	
最大値の平均値	166.8	34.2																																	
最大値の最大値 ^{*2}	323.9	82.0																																	
全体の標準偏差	34.8	7.4																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.3	4.1																																	
	30/30	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>18.0</td> <td>5.2</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>9.2</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>17.8</td> <td>5.2</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>28.8</td> <td>9.3</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>322.6</td> <td>99.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>79.0</td> <td>22.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>166.4</td> <td>43.4</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>322.6</td> <td>99.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>34.9</td> <td>9.4</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>4.2</td> <td>4.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	18.0	5.2	平均値の最小値	9.2	2.2	平均値の平均値 ^{*1}	17.8	5.2	平均値の最大値	28.8	9.3	全体の最大値 ^{*2}	322.6	99.0	最大値の最小値	79.0	22.0	最大値の平均値	166.4	43.4	最大値の最大値 ^{*2}	322.6	99.0	全体の標準偏差	34.9	9.4	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.2	4.1
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	18.0	5.2																																	
平均値の最小値	9.2	2.2																																	
平均値の平均値 ^{*1}	17.8	5.2																																	
平均値の最大値	28.8	9.3																																	
全体の最大値 ^{*2}	322.6	99.0																																	
最大値の最小値	79.0	22.0																																	
最大値の平均値	166.4	43.4																																	
最大値の最大値 ^{*2}	322.6	99.0																																	
全体の標準偏差	34.9	9.4																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.2	4.1																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	60 / 0	 <table border="1" data-bbox="580 730 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>18.3</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>9.2</td> <td>3.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>18.1</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>29.1</td> <td>11.7</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>323.7</td> <td>118.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>80.1</td> <td>28.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>168.3</td> <td>50.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>323.7</td> <td>118.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>35.2</td> <td>11.2</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>4.3</td> <td>4.0</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	18.3	6.4	平均値の最小値	9.2	3.1	平均値の平均値 ^{*1}	18.1	6.3	平均値の最大値	29.1	11.7	全体の最大値 ^{*2}	323.7	118.0	最大値の最小値	80.1	28.0	最大値の平均値	168.3	50.8	最大値の最大値 ^{*2}	323.7	118.0	全体の標準偏差	35.2	11.2	標準偏差の倍数 ^{*3}	4.3	4.0
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	18.3	6.4																																	
平均値の最小値	9.2	3.1																																	
平均値の平均値 ^{*1}	18.1	6.3																																	
平均値の最大値	29.1	11.7																																	
全体の最大値 ^{*2}	323.7	118.0																																	
最大値の最小値	80.1	28.0																																	
最大値の平均値	168.3	50.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	323.7	118.0																																	
全体の標準偏差	35.2	11.2																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	4.3	4.0																																	
400	0 / 60	 <table border="1" data-bbox="580 1391 1329 1783"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>88.1</td> <td>13.9</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>42.1</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>86.9</td> <td>13.6</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>258.3</td> <td>46.2</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,672.0</td> <td>257.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>272.6</td> <td>33.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>586.5</td> <td>88.2</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,672.0</td> <td>257.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>156.4</td> <td>24.1</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	88.1	13.9	平均値の最小値	42.1	4.0	平均値の平均値 ^{*1}	86.9	13.6	平均値の最大値	258.3	46.2	全体の最大値 ^{*2}	1,672.0	257.0	最大値の最小値	272.6	33.0	最大値の平均値	586.5	88.2	最大値の最大値 ^{*2}	1,672.0	257.0	全体の標準偏差	156.4	24.1	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	88.1	13.9																																	
平均値の最小値	42.1	4.0																																	
平均値の平均値 ^{*1}	86.9	13.6																																	
平均値の最大値	258.3	46.2																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,672.0	257.0																																	
最大値の最小値	272.6	33.0																																	
最大値の平均値	586.5	88.2																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,672.0	257.0																																	
全体の標準偏差	156.4	24.1																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="580 730 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>89.0</td> <td>17.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>42.2</td> <td>4.7</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>87.8</td> <td>16.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>261.0</td> <td>58.6</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,672.4</td> <td>317.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>277.6</td> <td>36.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>588.4</td> <td>107.5</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,672.4</td> <td>317.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>156.9</td> <td>29.5</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	89.0	17.1	平均値の最小値	42.2	4.7	平均値の平均値 ^{*1}	87.8	16.8	平均値の最大値	261.0	58.6	全体の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0	最大値の最小値	277.6	36.0	最大値の平均値	588.4	107.5	最大値の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0	全体の標準偏差	156.9	29.5	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	89.0	17.1																																	
平均値の最小値	42.2	4.7																																	
平均値の平均値 ^{*1}	87.8	16.8																																	
平均値の最大値	261.0	58.6																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0																																	
最大値の最小値	277.6	36.0																																	
最大値の平均値	588.4	107.5																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,672.4	317.0																																	
全体の標準偏差	156.9	29.5																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1																																	
	60/0	 <table border="1" data-bbox="580 1391 1329 1783"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>90.2</td> <td>20.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>42.5</td> <td>6.3</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>89.0</td> <td>20.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>262.8</td> <td>66.5</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>1,673.0</td> <td>368.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>262.5</td> <td>48.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>587.9</td> <td>127.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>1,673.0</td> <td>368.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>158.0</td> <td>35.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>3.2</td> <td>3.1</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	90.2	20.8	平均値の最小値	42.5	6.3	平均値の平均値 ^{*1}	89.0	20.4	平均値の最大値	262.8	66.5	全体の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0	最大値の最小値	262.5	48.0	最大値の平均値	587.9	127.8	最大値の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0	全体の標準偏差	158.0	35.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	90.2	20.8																																	
平均値の最小値	42.5	6.3																																	
平均値の平均値 ^{*1}	89.0	20.4																																	
平均値の最大値	262.8	66.5																																	
全体の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0																																	
最大値の最小値	262.5	48.0																																	
最大値の平均値	587.9	127.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	1,673.0	368.0																																	
全体の標準偏差	158.0	35.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	3.2	3.1																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
600	0/60	 <table border="1" data-bbox="580 730 1329 1122"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>239.9</td> <td>34.9</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>86.7</td> <td>11.2</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>235.7</td> <td>34.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>561.6</td> <td>80.3</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>2,570.6</td> <td>348.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>462.9</td> <td>61.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>1,246.8</td> <td>176.8</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>2,570.6</td> <td>348.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>383.3</td> <td>54.6</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>2.6</td> <td>2.6</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	239.9	34.9	平均値の最小値	86.7	11.2	平均値の平均値 ^{*1}	235.7	34.1	平均値の最大値	561.6	80.3	全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	348.0	最大値の最小値	462.9	61.0	最大値の平均値	1,246.8	176.8	最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	348.0	全体の標準偏差	383.3	54.6	標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	239.9	34.9																																	
平均値の最小値	86.7	11.2																																	
平均値の平均値 ^{*1}	235.7	34.1																																	
平均値の最大値	561.6	80.3																																	
全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	348.0																																	
最大値の最小値	462.9	61.0																																	
最大値の平均値	1,246.8	176.8																																	
最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	348.0																																	
全体の標準偏差	383.3	54.6																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6																																	
	30/30	 <table border="1" data-bbox="580 1391 1329 1783"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{*1}</td> <td>241.8</td> <td>43.5</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>87.2</td> <td>13.1</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{*1}</td> <td>237.3</td> <td>42.5</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>565.5</td> <td>102.6</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{*2}</td> <td>2,570.6</td> <td>460.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>462.9</td> <td>74.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>1,250.3</td> <td>218.3</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{*2}</td> <td>2,570.6</td> <td>460.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>384.1</td> <td>68.0</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{*3}</td> <td>2.6</td> <td>2.6</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{*1}	241.8	43.5	平均値の最小値	87.2	13.1	平均値の平均値 ^{*1}	237.3	42.5	平均値の最大値	565.5	102.6	全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	460.0	最大値の最小値	462.9	74.0	最大値の平均値	1,250.3	218.3	最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	460.0	全体の標準偏差	384.1	68.0	標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{*1}	241.8	43.5																																	
平均値の最小値	87.2	13.1																																	
平均値の平均値 ^{*1}	237.3	42.5																																	
平均値の最大値	565.5	102.6																																	
全体の最大値 ^{*2}	2,570.6	460.0																																	
最大値の最小値	462.9	74.0																																	
最大値の平均値	1,250.3	218.3																																	
最大値の最大値 ^{*2}	2,570.6	460.0																																	
全体の標準偏差	384.1	68.0																																	
標準偏差の倍数 ^{*3}	2.6	2.6																																	

狭隘区間 長 (m)	大型車/ 小型車	上段：スナップショット 下段：各種統計情報																																	
	60 / 0	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>統計情報</th> <th>待ち時間 (秒)</th> <th>必要区間長 (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全体の平均値^{※1}</td> <td>246.3</td> <td>51.8</td> </tr> <tr> <td>平均値の最小値</td> <td>88.0</td> <td>16.4</td> </tr> <tr> <td>平均値の平均値^{※1}</td> <td>242.0</td> <td>50.7</td> </tr> <tr> <td>平均値の最大値</td> <td>569.4</td> <td>118.7</td> </tr> <tr> <td>全体の最大値^{※2}</td> <td>2,570.6</td> <td>508.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最小値</td> <td>462.9</td> <td>88.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の平均値</td> <td>1,270.4</td> <td>258.0</td> </tr> <tr> <td>最大値の最大値^{※2}</td> <td>2,570.6</td> <td>508.0</td> </tr> <tr> <td>全体の標準偏差</td> <td>389.0</td> <td>79.8</td> </tr> <tr> <td>標準偏差の倍数^{※3}</td> <td>2.6</td> <td>2.6</td> </tr> </tbody> </table>	統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)	全体の平均値 ^{※1}	246.3	51.8	平均値の最小値	88.0	16.4	平均値の平均値 ^{※1}	242.0	50.7	平均値の最大値	569.4	118.7	全体の最大値 ^{※2}	2,570.6	508.0	最大値の最小値	462.9	88.0	最大値の平均値	1,270.4	258.0	最大値の最大値 ^{※2}	2,570.6	508.0	全体の標準偏差	389.0	79.8	標準偏差の倍数 ^{※3}	2.6	2.6
統計情報	待ち時間 (秒)	必要区間長 (m)																																	
全体の平均値 ^{※1}	246.3	51.8																																	
平均値の最小値	88.0	16.4																																	
平均値の平均値 ^{※1}	242.0	50.7																																	
平均値の最大値	569.4	118.7																																	
全体の最大値 ^{※2}	2,570.6	508.0																																	
最大値の最小値	462.9	88.0																																	
最大値の平均値	1,270.4	258.0																																	
最大値の最大値 ^{※2}	2,570.6	508.0																																	
全体の標準偏差	389.0	79.8																																	
標準偏差の倍数 ^{※3}	2.6	2.6																																	

※1 平均値の平均値は乱数系列ごとの平均値の平均であり，乱数系列によって母数が異なることから，全体の平均値とは数値が異なる場合がある．

※2 最大値の最大値も乱数系列ごとの最大値の最大であるが，全体の最大値と一致する．

※3 標準偏差の倍数は「(最大値の平均値－全体の平均値)／全体の標準偏差」にて算出．

付録B 評価式とシミュレーションとの数値比較

図 B-1～図 B-6 には，狭隘区間の評価指標である待ち時間について評価式とシミュレーション結果を比較したものを，図 B-7～図 B-12 には，待避区間の評価指標であ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を比較したものを掲載する．

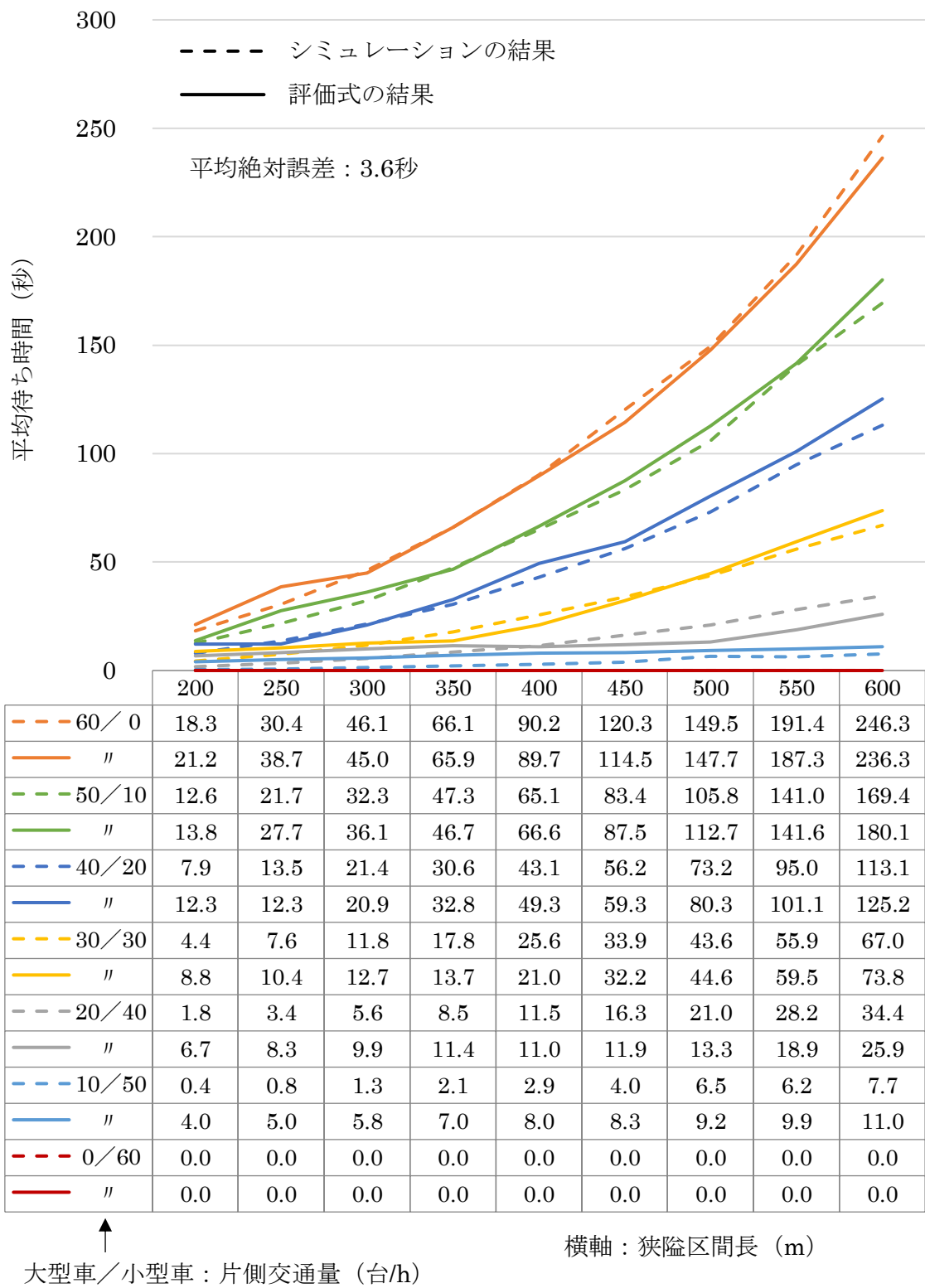


図 B-1 狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ：区間制約「低」

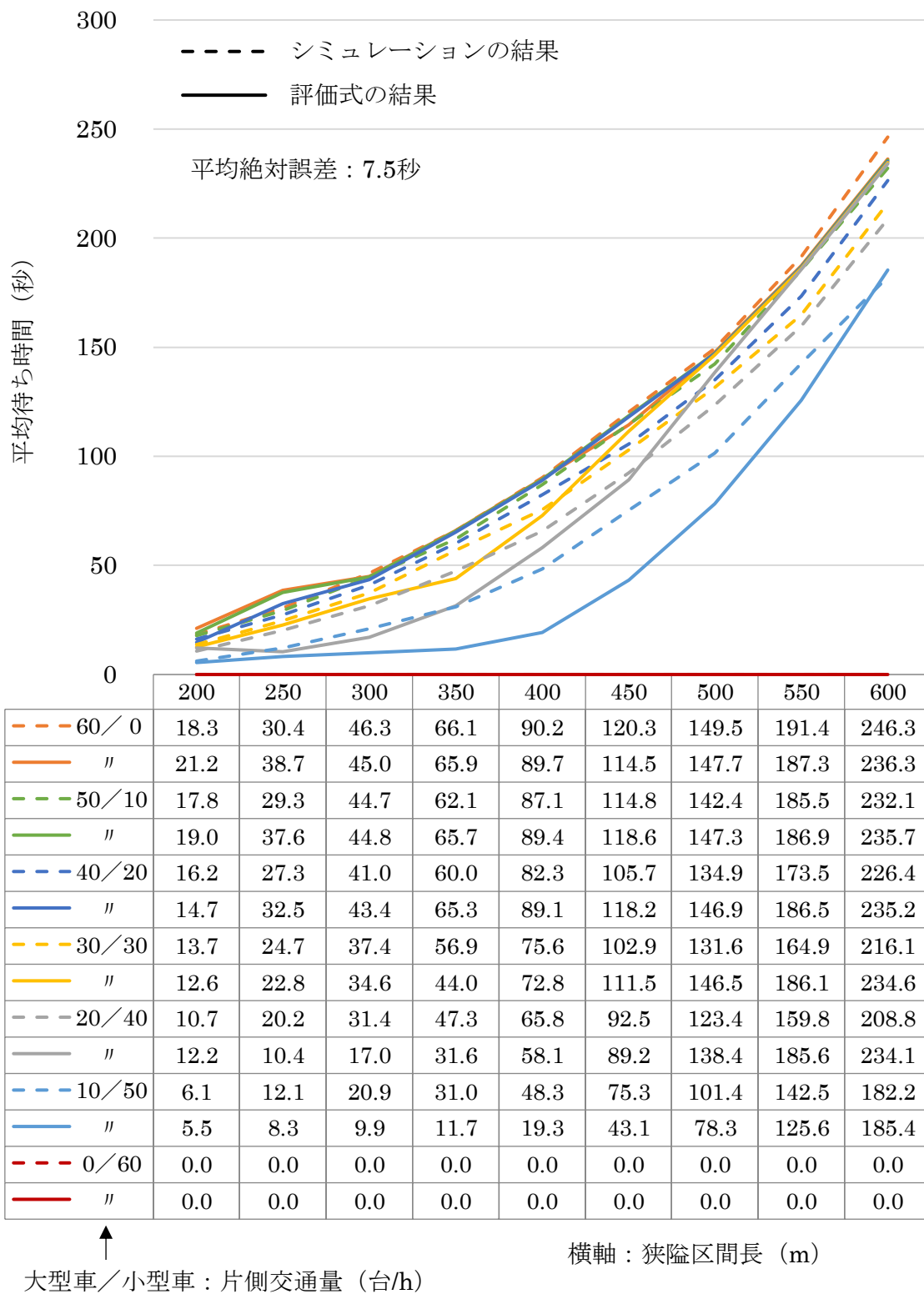
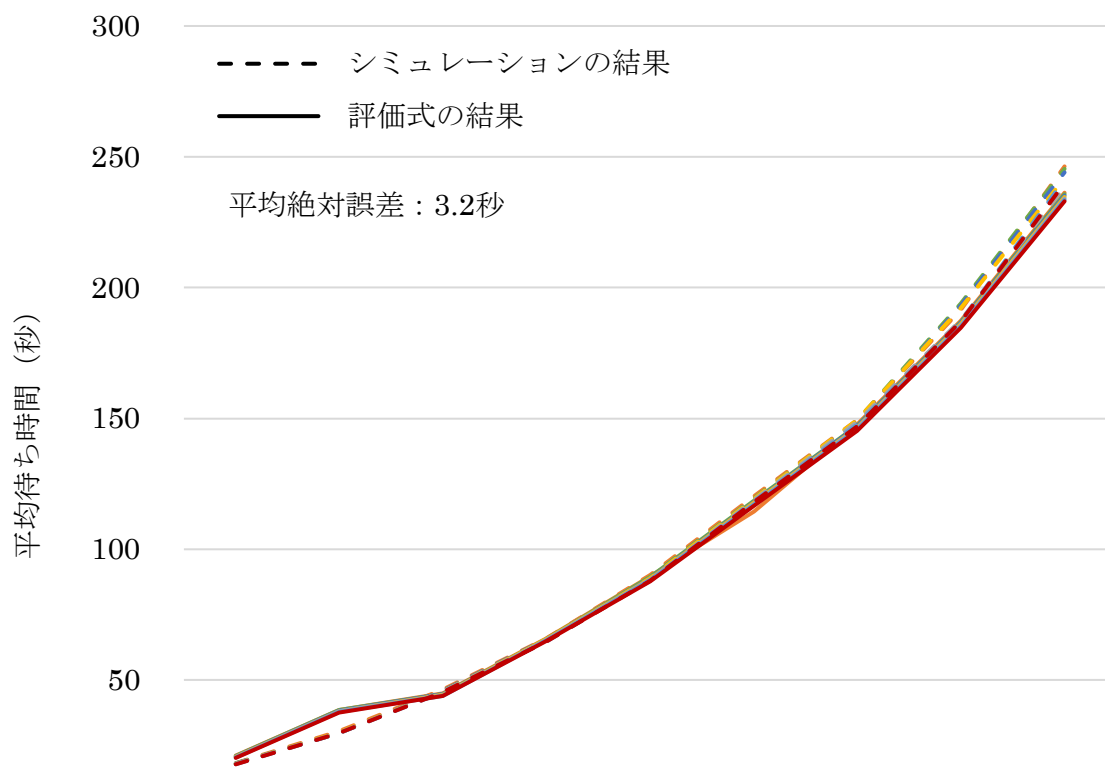


図 B-2 狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ：区間制約「中」



0	200	250	300	350	400	450	500	550	600
--- 60/0	18.3	30.4	46.3	66.1	90.2	120.3	149.5	191.4	246.3
— "	21.2	38.7	45.0	65.9	89.7	114.5	147.7	187.3	236.3
--- 50/10	18.2	29.8	46.0	65.4	89.6	119.6	149.3	194.0	245.4
— "	21.0	38.5	44.8	65.7	89.4	118.6	147.3	186.9	235.7
--- 40/20	18.2	29.7	45.8	65.6	89.0	119.4	148.7	193.2	244.0
— "	20.9	38.3	44.6	65.4	89.1	118.2	146.9	186.5	235.2
--- 30/30	18.0	29.9	45.6	65.4	89.0	119.3	149.5	192.3	241.8
— "	20.7	38.2	44.4	65.8	88.8	117.8	146.5	186.1	234.6
--- 20/40	18.0	29.8	45.6	65.1	88.3	118.8	148.8	187.7	238.4
— "	20.6	38.0	44.2	65.5	88.5	117.5	146.1	185.6	234.1
--- 10/50	17.9	29.8	45.5	64.9	88.3	118.3	147.8	187.2	241.3
— "	20.4	37.9	44.1	65.3	88.2	117.1	145.8	185.1	233.5
--- 0/60	17.8	29.8	45.5	64.8	88.1	118.1	146.9	187.2	239.9
— "	20.3	37.7	43.9	65.0	87.9	116.7	145.4	184.7	233.0

↑
大型車/小型車：片側交通量 (台/h)

横軸：狭隘区間長 (m)

図 B-3 狭隘区間の平均待ち時間の比較グラフ：区間制約「高」

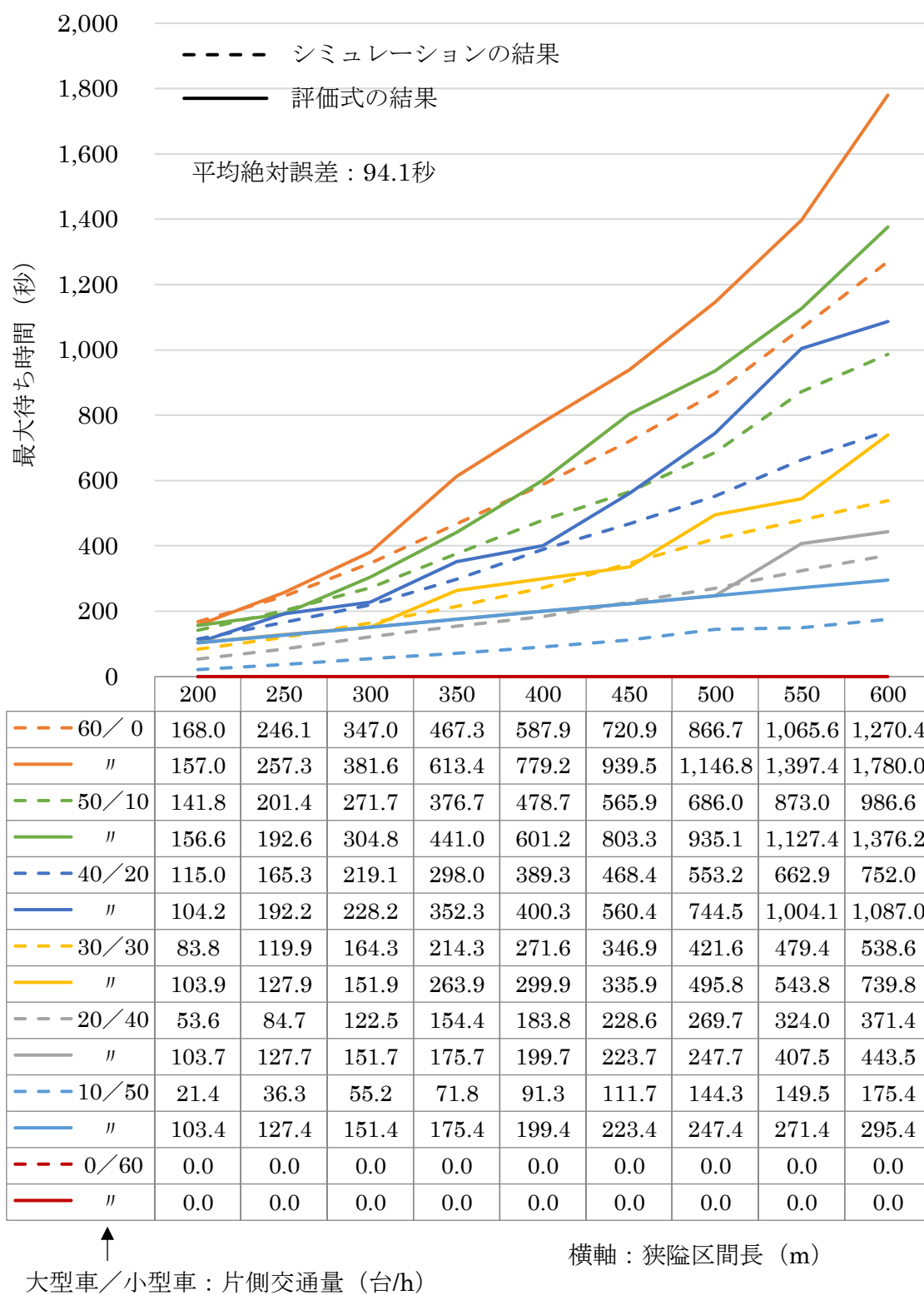


図 B-4 狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ：区間制約「低」

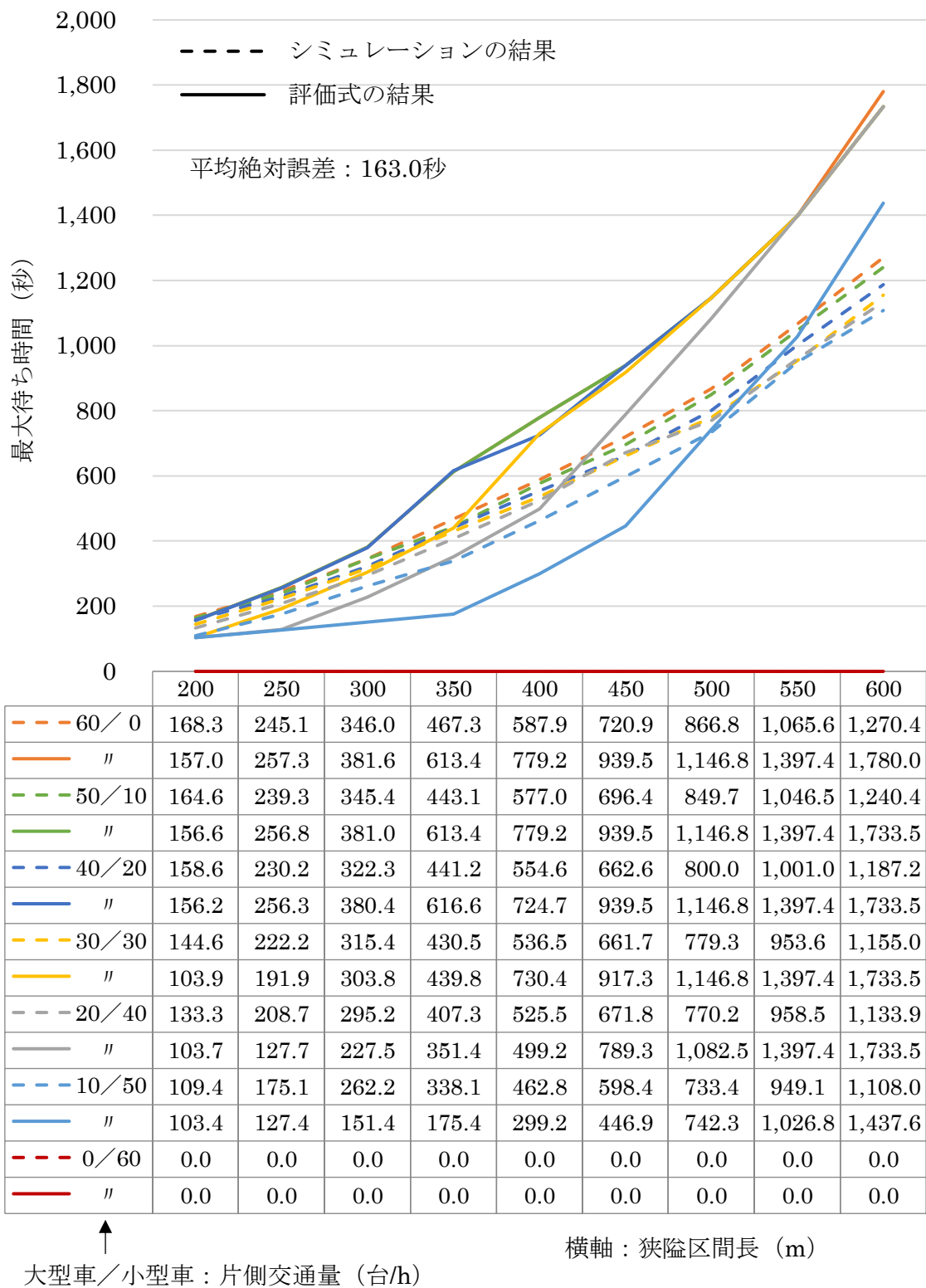


図 B-5 狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ：区間制約「中」

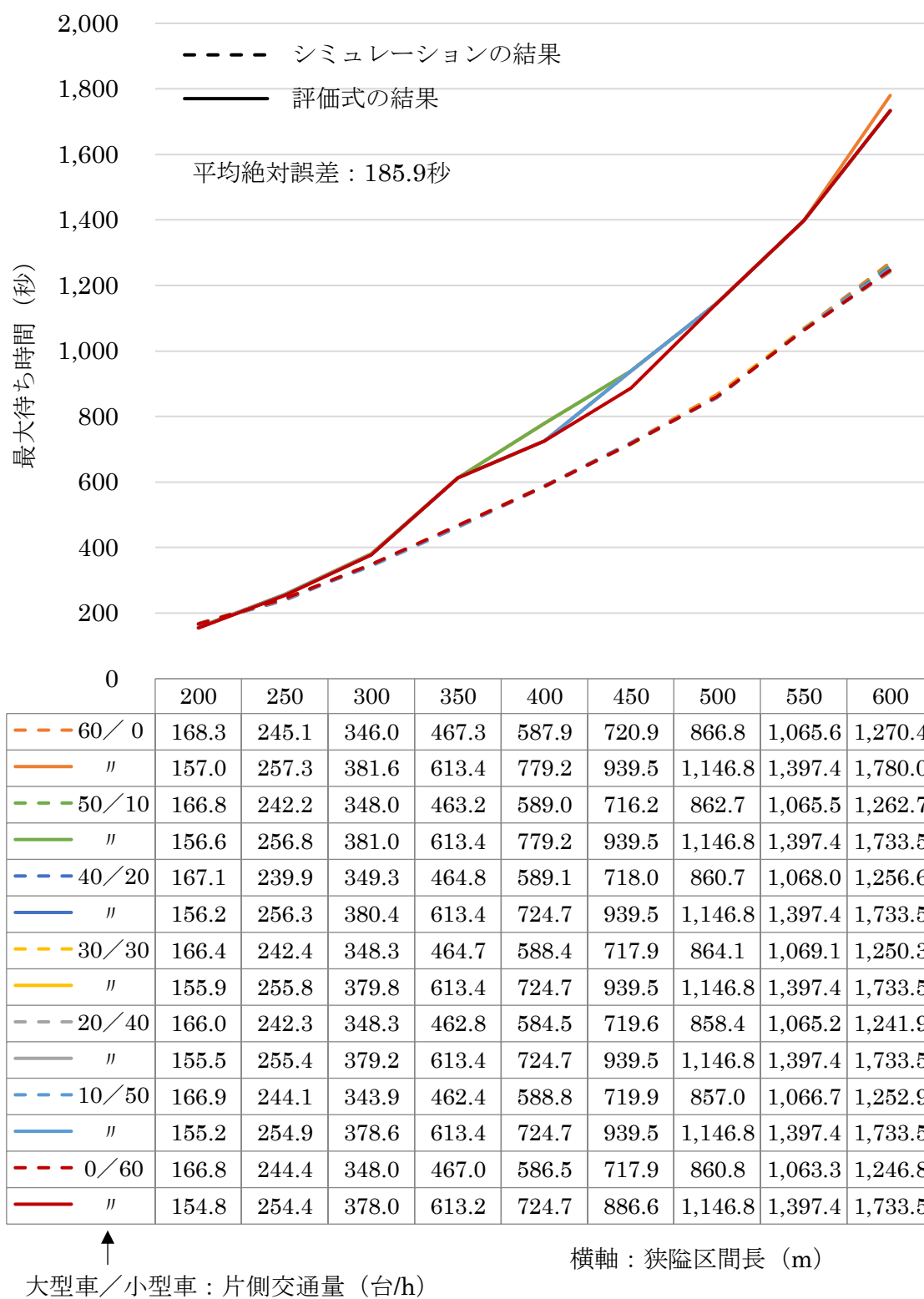


図 B-6 狭隘区間の最大待ち時間の比較グラフ：区間制約「高」

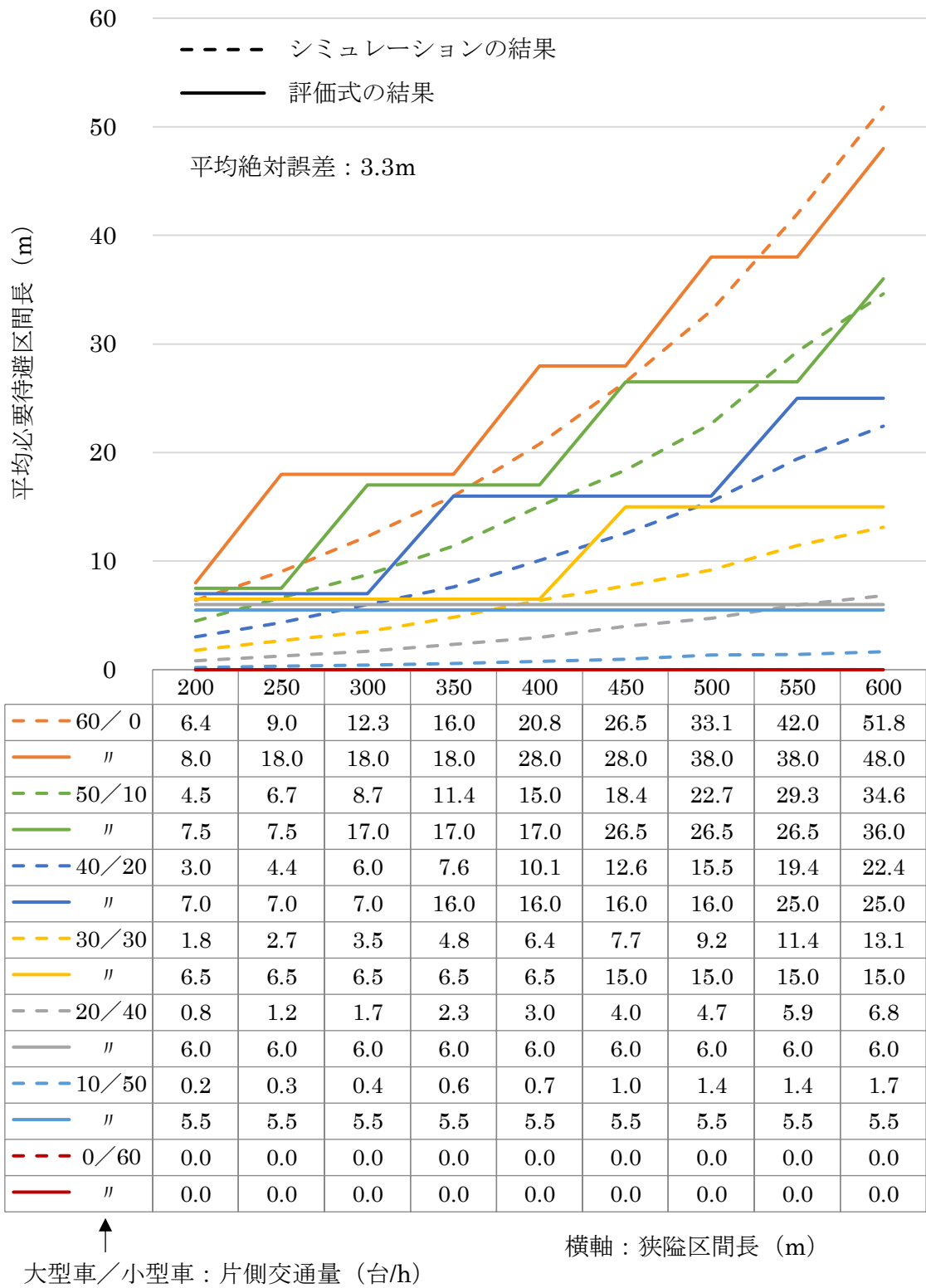


図 B-7 待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「低」

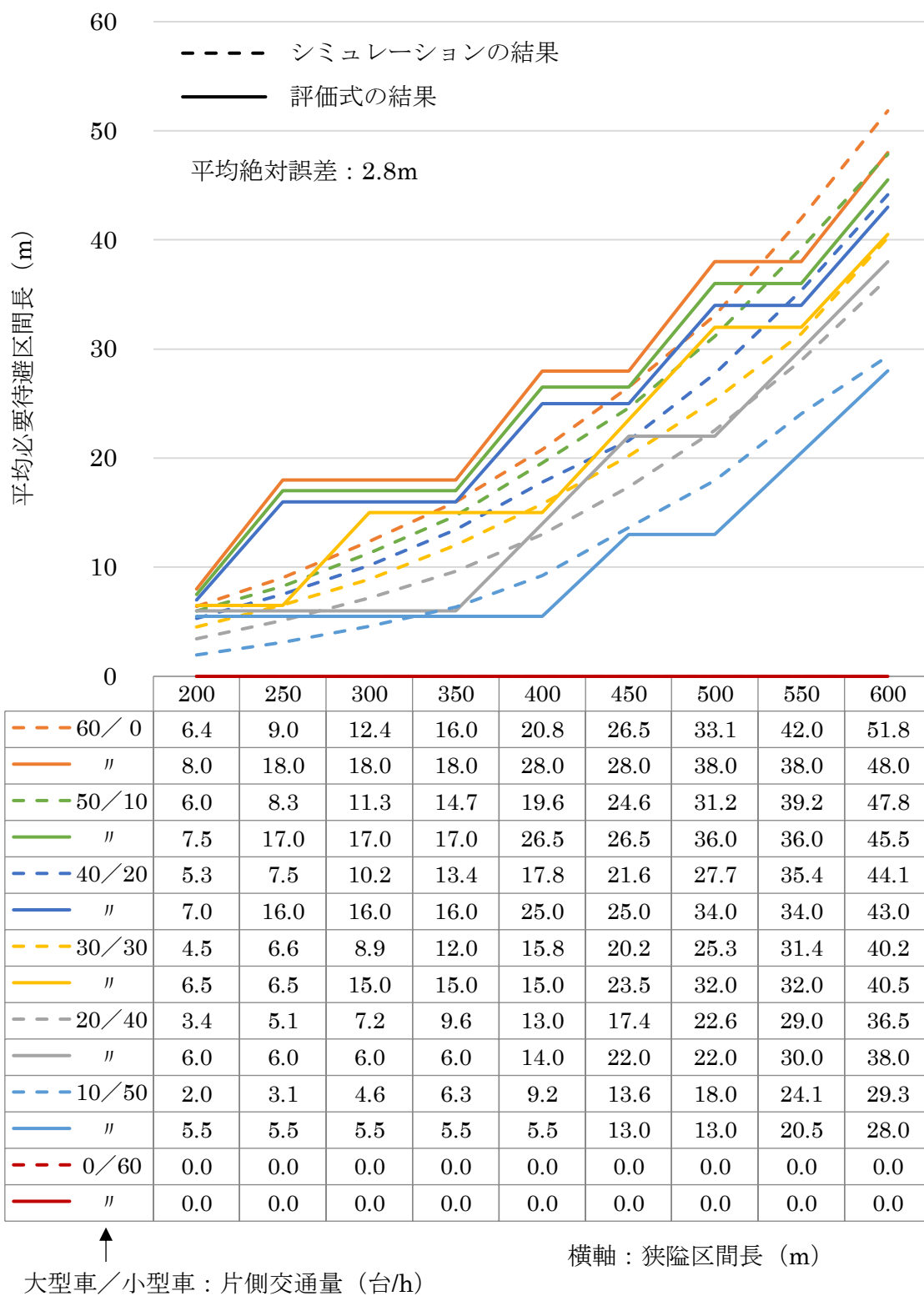
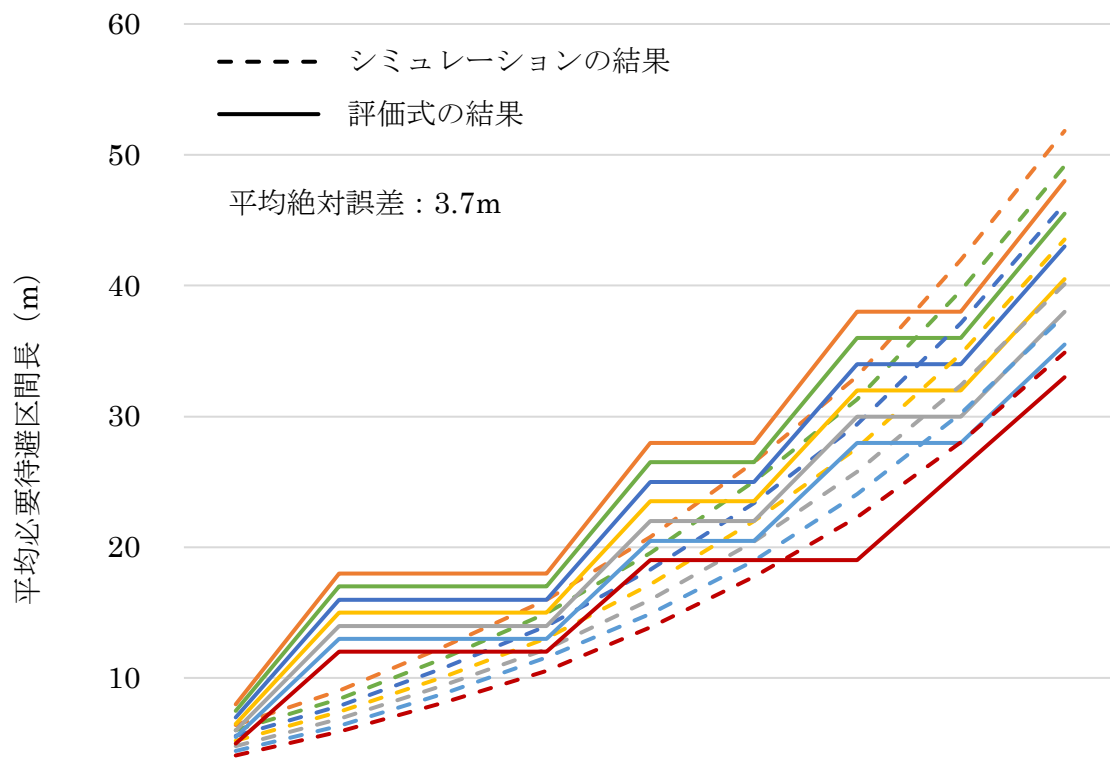


図 B-8 待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「中」



0	200	250	300	350	400	450	500	550	600
--- 60/0	6.4	9.0	12.4	16.0	20.8	26.5	33.1	42.0	51.8
— "	8.0	18.0	18.0	18.0	28.0	28.0	38.0	38.0	48.0
--- 50/10	6.0	8.4	11.5	15.0	19.6	25.0	31.3	39.6	49.2
— "	7.5	17.0	17.0	17.0	26.5	26.5	36.0	36.0	45.5
--- 40/20	5.6	7.9	10.7	14.0	18.3	23.4	29.4	37.1	46.2
— "	7.0	16.0	16.0	16.0	25.0	25.0	34.0	34.0	43.0
--- 30/30	5.2	7.4	10.1	13.1	17.1	22.0	27.6	34.8	43.5
— "	6.5	15.0	15.0	15.0	23.5	23.5	32.0	32.0	40.5
--- 20/40	4.8	6.9	9.4	12.2	16.0	20.4	25.8	32.4	40.1
— "	6.0	14.0	14.0	14.0	22.0	22.0	30.0	30.0	38.0
--- 10/50	4.4	6.4	8.8	11.6	14.9	19.0	24.1	30.2	37.7
— "	5.5	13.0	13.0	13.0	20.5	20.5	28.0	28.0	35.5
--- 0/60	4.1	5.9	8.1	10.5	13.9	17.8	22.3	28.1	34.9
— "	5.0	12.0	12.0	12.0	19.0	19.0	19.0	26.0	33.0

↑
大型車/小型車：片側交通量 (台/h)

横軸：狭隘区間長 (m)

図 B-9 待避区間の平均必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「高」

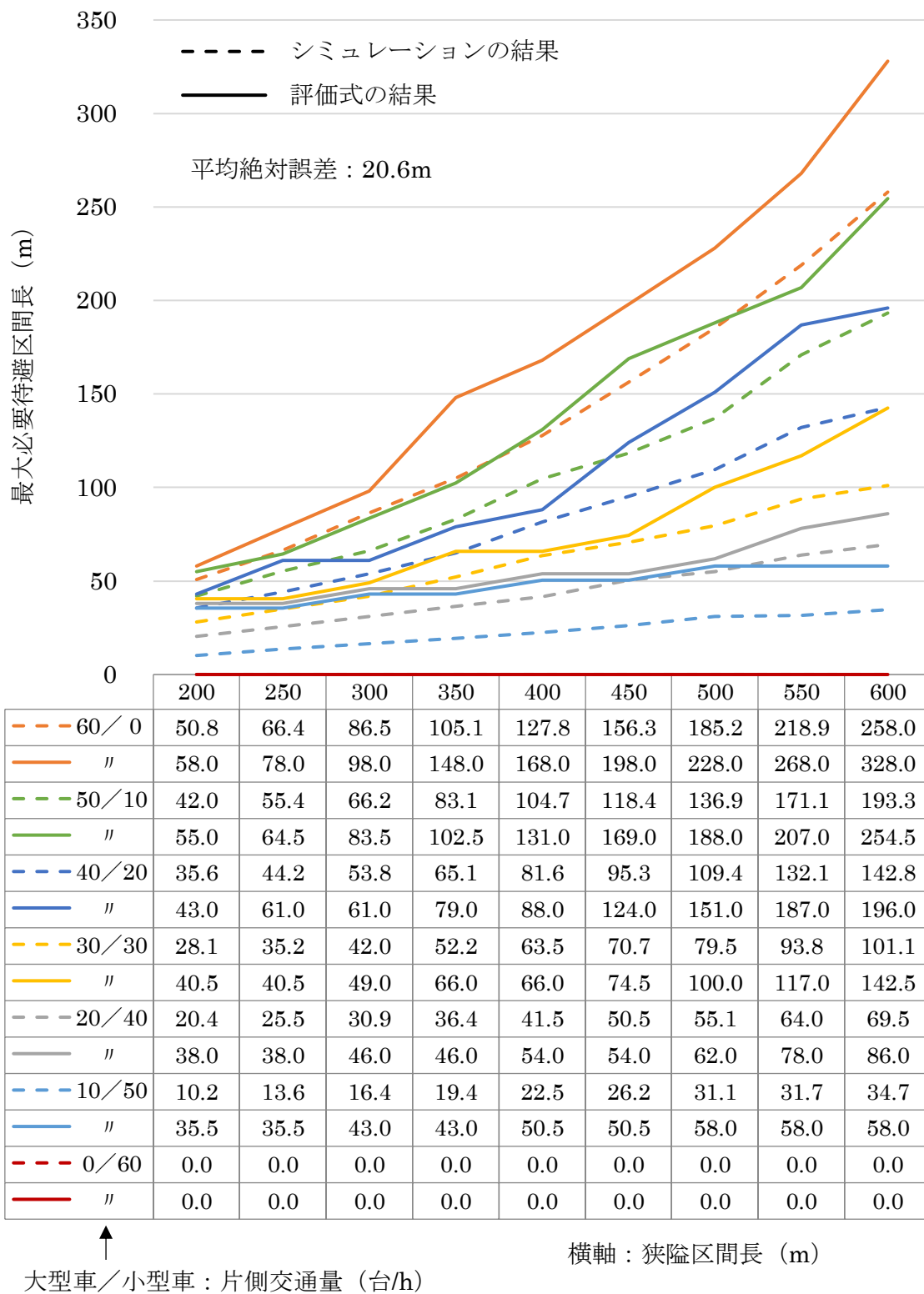


図 B-10 待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「低」

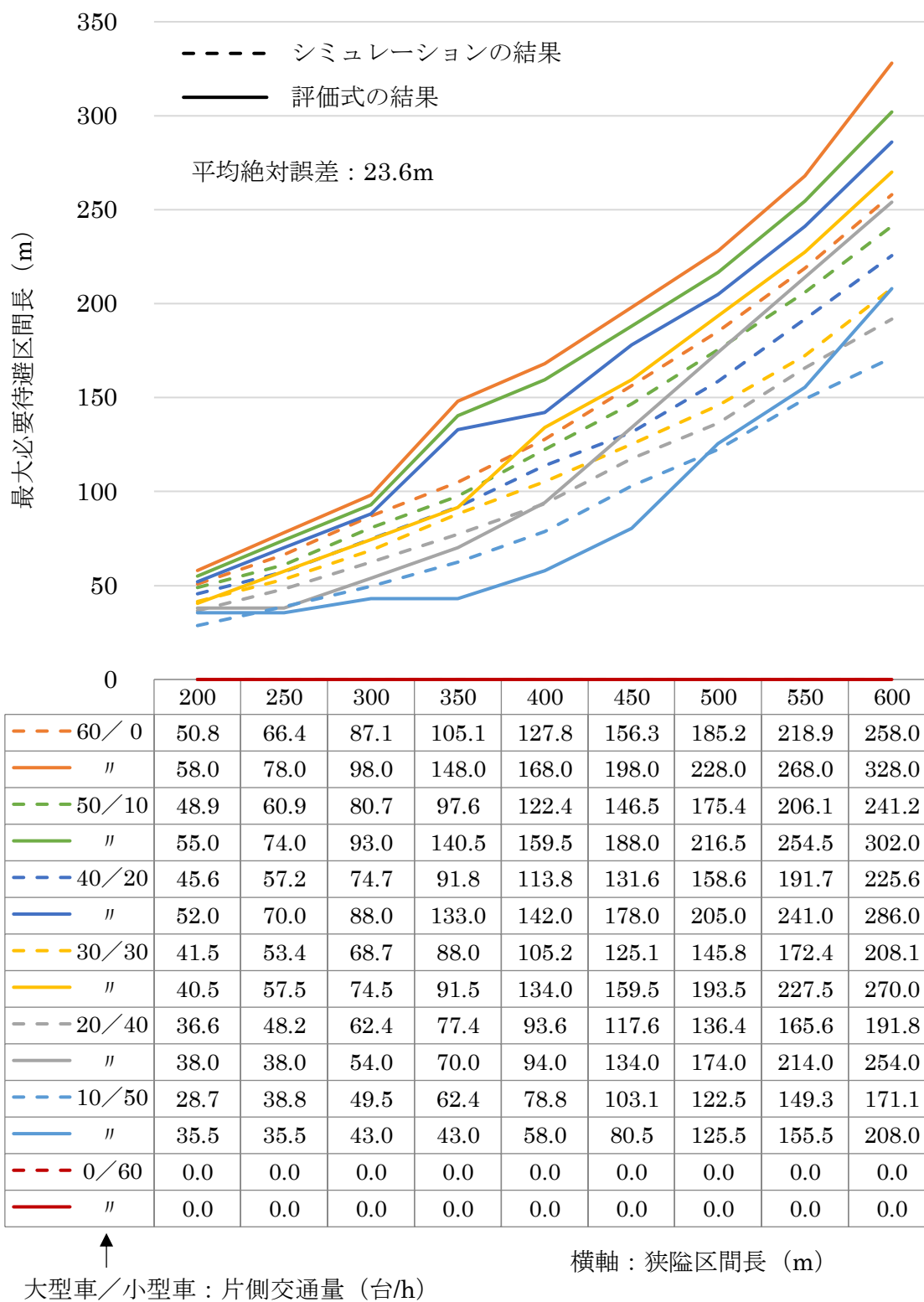
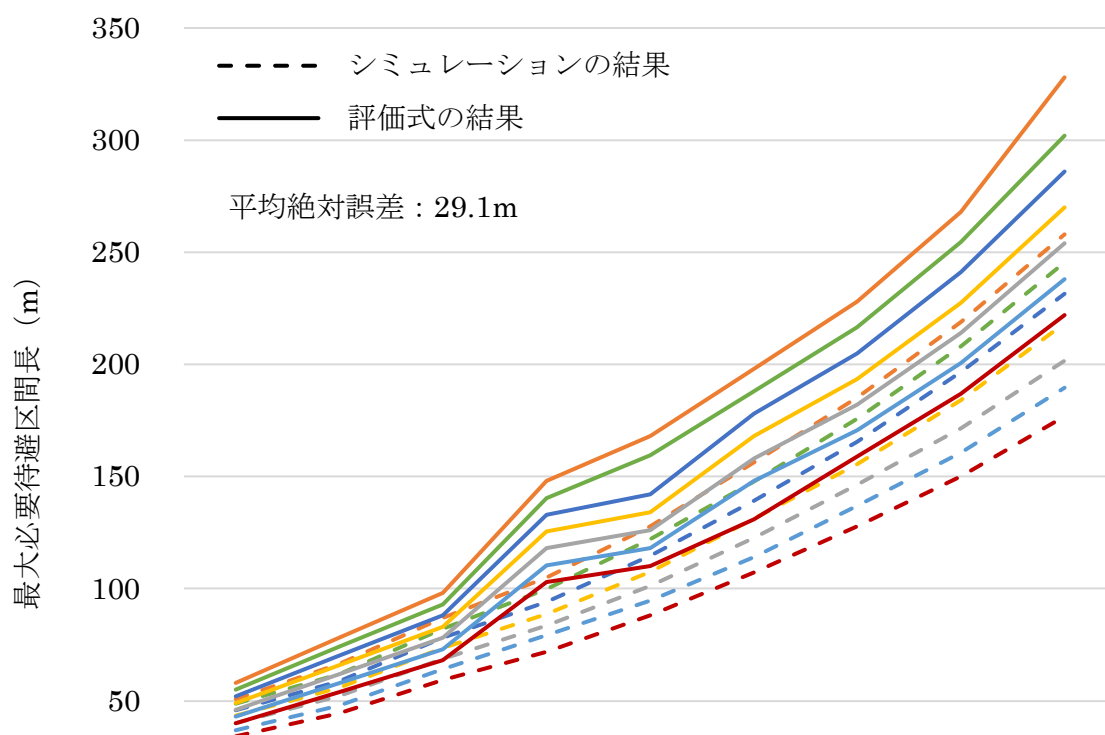


図 B-11 待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「中」



0	200	250	300	350	400	450	500	550	600
--- 60/0	50.8	66.4	87.1	105.1	127.8	156.3	185.2	218.9	258.0
— "	58.0	78.0	98.0	148.0	168.0	198.0	228.0	268.0	328.0
--- 50/10	48.7	62.0	82.2	99.8	122.1	147.9	175.8	208.0	245.4
— "	55.0	74.0	93.0	140.5	159.5	188.0	216.5	254.5	302.0
--- 40/20	45.8	58.7	78.0	94.1	114.6	139.2	165.6	196.6	231.5
— "	52.0	70.0	88.0	133.0	142.0	178.0	205.0	241.0	286.0
--- 30/30	43.4	55.9	73.7	88.8	107.5	131.2	155.5	184.1	218.3
— "	49.0	66.0	83.0	125.5	134.0	168.0	193.5	227.5	270.0
--- 20/40	40.1	52.2	68.6	83.6	101.3	122.6	146.4	171.5	201.7
— "	46.0	62.0	78.0	118.0	126.0	158.0	182.0	214.0	254.0
--- 10/50	36.9	47.9	64.2	79.2	94.7	114.2	136.9	160.6	189.6
— "	43.0	58.0	73.0	110.5	118.0	148.0	170.5	200.5	238.0
--- 0/60	34.2	44.5	59.2	71.9	88.2	107.3	127.7	150.0	176.8
— "	40.0	54.0	68.0	103.0	110.0	131.0	159.0	187.0	222.0

↑
大型車/小型車：片側交通量 (台/h)

横軸：狭隘区間長 (m)

図 B-12 待避区間の最大必要待避区間長の比較グラフ：区間制約「高」

研究業績

学術誌論文

1. 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 (2017.6)
2. 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, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.I_109-I_117 (2018.3)

国際会議論文

3. Amano,K., Maeda,M., Nakamura,Y., Sei,Y., and Ohsuga,A.: An Optimizing Placement of Passing Places in Mountainous Areas with Evolutionary Computing, 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2018), pp.393-400 (2018.6)

参考論文

4. 天野和洋, 右近八郎, 大谷芳輝: 遺伝的アルゴリズムによる橋梁群の維持管理費用の均等化, オペレーションズ・リサーチ, Vol.54, No.11, pp.659-663 (2009.11)
5. 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, Vol.68, No.IV-009, pp.17-18 (2013.9)
6. 天野和洋, 前田宗宏, 中村泰広, 清雄一, 大須賀昭彦: 1.5 車線の道路における確率的な車両到着を考慮した待避区間の最適配置に関する検討, 土木学会土木情報学シンポジウム講演集, Vol.42, pp.223-226 (2017.9)

関連論文の印刷公表の方法及び時期

学術誌論文

1. 全著者名 : 天野和洋, 前田宗宏, 中村泰広, 清雄一, 大須賀昭彦
論文題目 : 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
2017年6月 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.2, pp.124-134
(第3章と関連)
2. 全著者名 : 天野和洋, 前田宗宏, 中村泰広, 清雄一, 大須賀昭彦
論文題目 : 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
2018年3月 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.I_109-I_117
(第4章と関連)

国際会議論文

3. 全著者名 : Amano,K., Maeda,M., Nakamura,Y., Sei,Y., and Ohsuga,A.
論文題目 : An Optimizing Placement of Passing Places
in Mountainous Areas with Evolutionary Computing
2018年6月 Conference proceedings of 17th International Conference on
Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2018), pp.393-400
(第4章と関連)

本論文との関連の詳細

章	節		関連論文 番号	関連する内容
3 章	3.1 節	3.1.1 節	1	すれ違い可能な車種の組合せと区間制約
		3.1.2 節		車両の到着分布
		3.1.3 節		狭隘区間の評価式（待ち時間の算出）
		3.1.4 節		待避区間の評価式（待避区間長の算出）
		3.1.5 節		区間制約に応じて考慮すべき小型車交通量
	3.2 節	3.2.1 節	1	狭隘区間に関する検証
		3.2.2 節		待避区間に関する検証
		3.2.3 節		計算時間の評価
		3.2.4 節		確率変動の有無による平均待ち時間の違い
	4 章	4.1 節	4.1.1 節	2
4.1.2 節			遺伝子の評価方法	
4.2 節		4.2.1 節	2	適用問題の概要
		4.2.2 節		適用結果と従来方法との比較検証
		4.2.3 節		許容待ち時間に関するパラメータスタディ
		4.2.4 節	2	多目的最適化を用いたトレードオフ分析
			3	非劣解集合の範囲別比較

著者略歴

天野 和洋 (あまの かずひろ)

- 1969年 埼玉県に生まれる
- 1988年3月 私立 東京電機大学高等学校 卒業
- 1988年4月 国立 埼玉大学 理学部数学科 入学
- 1992年3月 国立 埼玉大学 理学部数学科 卒業
- 1992年4月 鹿島建設株式会社 入社
- 2006年8月 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所
トップエスイーコース入学
- 2008年3月 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所
トップエスイーコース修了
- 2015年10月 国立大学法人 電気通信大学 大学院 情報システム研究科
社会知能情報学専攻 博士後期課程 入学
- 2018年9月 国立大学法人 電気通信大学 大学院 情報システム研究科
社会知能情報学専攻 博士後期課程 修了予定