

歩行者の心理的負荷を重視した総合的な  
信号交差点設計・制御ガイドラインの構築に関する研究

**Guideline Formulation for Signalized Intersection Design  
Considering Impacts on Pedestrians' Psychology**

鳩山 紀一郎

## 論文要旨

鳩山 紀一郎

近年、交通空間において歩行者や自転車の安全性や快適性への配慮がなされるようになってきた。しかし、依然として交差点、とりわけ大規模な信号交差点は自動車にとっても歩行者にとっても交通処理上の隘路であり、交通事故の多発する箇所である。これに対して従来は、安全性を追求するために利用者の円滑性を犠牲にするという対策がなされてきたが、結果として利用者が苛立ち、無理な行動をとるなど、安全性に悪影響が生じる可能性が明らかになってきた。従って今後は、安全性と円滑性を両立させるようなハード・ソフト両面の交通対策が必要とされる。

わが国の大規模信号交差点の安全性・円滑性に関する重要課題の一つに、信号サイクル長の短縮が挙げられる。従来から欧米諸国などと比較しても長めに設定されているわが国のサイクル長は、利用者の心理や、交通容量、環境に対して悪影響があることが指摘されており、短縮が望まれている。しかし、歩行者の横断時間確保の原則が各現示時間設計上の足かせとなり、結果として長いサイクル長による信号制御を余儀なくされてきたのである。従って、高齢時代を迎えたわが国において、サイクル長の短縮は単純には望ましくない可能性があり、歩行者の特性に充分配慮した方策が必要となる。

本研究では、横断歩道に中央帯を設け、中央帯を積極的に利用した二段階横断方式と合わせてサイクル長を短縮することが、以上の社会的ニーズに適う交差点設計であると考え、歩行者の挙動特性や生理心理（「苛立ち」、「慌しさ」及び「不安」）特性を詳しく把握した上で、歩行者と自動車の双方の観点から交差点を評価できるモデルを構築し、両者にとって安全かつ円滑な交差点設計制御方策をガイドラインとして提案することを目的としている。

本研究の構成は次の通りである。まず、第1章で本研究独自の着想である大規模信号交差点におけるサイクル長の短縮の重要性を詳しく述べたあと、第2章では交差点の信号制御や歩行者に関する国内外の研究をレビューすることで本研究の位置づけを明確化する。次に第3章では、海外の特にヨーロッパ諸都市における交差点設計事例を紹介し、中央帯を活用した二段階横断方式の有効性について述べる。そして第4章では、歩行者の横断行動原理を観察に基づいて提案し、実験により検証すべき項目を示す。また第5章では、実空間における実験が困難な歩行者実験を行うために本研究で独自に開発した、歩行者がVR実験空間内を実際に歩くことのできるヴァーチャル歩行シミュレータ PedECS に関して説明する。この実験装置を用いて、第6章では歩行者の信号待ち時の不快感を計測し、第7章では中央帯滞留時の歩行者の不快感を計測、第8章では情報提供を行った場合の歩行者の行動変化を分析する実験を行い、横断行動原理の検証を行う。これらの結果を用いて、第9章では、歩行者と自動車の双方のシミュレーションを行うことのできる総合交差点設計制御評価モデル CEMID を開発し、様々な交差点のシミュレーション分析を第10章で行い、その結果をまとめることによって、第11章で信号交差点の設計・制御ガイドラインを提案する。最後に第12章では本研究の成果をまとめるとともに、今後の展開において求められることについて述べる。

本研究によって得られた結論は、以下のとおりである。

#### (1) 歩行者横断行動原理の解明

第4章における観察実験の結果から、歩行者の横断行動は、『交差点に至る前から、残っている歩行者現示時間と距離を推測しながら、ある程度の速度の範囲内で歩行速度を調節しながら歩く』という行動原理によって説明できることを示した。この原理に基づくと、歩行者の時空間ダイアグラム上には、安心して歩き続けられる「安心領域」、少し走らないと渡りきれない「焦燥領域」、走っても信号に間に合わない「断念領域」の3種類の心理的時空間領域が形成されることになり、歩行者はこの領域ごとに行動を変化させると考えることができる。

#### (2) 信号待ち時間の際の歩行者の苛立ちの把握

第6章において、歩行シミュレータ PedECS を用いて非高齢者・高齢者を被験者に実験を行い、以下を明らかにした。これにより、歩行者の苛立ちは非高齢者、高齢者それぞれについて、待ち時間のみの関数として定義可能であることを示すことができた。

- ① 非高齢者・高齢者ともに、待ち時間が長くなるにつれて苛立ちを感じるようになる。
- ② 高齢者よりも非高齢者の方が、待ち時間に対する感覚が高く、苛立ちを感じやすい。
- ③ 苛立ちの感じ方は、横断歩道の距離には依存しない。

#### (3) 中央帯滞留時における不安感の把握

第7章において、様々な中央帯における歩行者の滞留時の不安感を計測する実験を行い、以下を明らかにした。この結果から、歩行者が不安感を感じない中央帯とするには、3.5m 以上の幅員を確保するか、2.5m 以上のものに防護柵を設ける必要があることを示すことができた。

- ① 中央帯の幅員が広くなるにつれて歩行者の感じる不安感は軽減される。
- ② 防護柵の設置には、1.0m 程度の中央帯幅員の拡張効果が認められる。
- ③ 中央帯における歩行者の不安感を軽減するには、中央帯を頑丈なものにするだけでなく、他者から視認されやすくする、親しみやすいものにするといった工夫が必要である。
- ④ 中央帯の幅員は、苛立ちの感じ方にはあまり影響を与えない。

#### (4) 残り時間に関する情報提供効果の把握

第8章においては、残り時間表示器を設置した場合における歩行者の歩行行動変化を計測する実験を行い、以下を明らかにした。結果として、情報提供の効果は明らかになったものの、歩行者の慌しさを心理的に計測するのは困難であることがわかった。

- ① 情報提供により歩行者は横断中に歩行速度をあまり変動せずに歩行できるようになる。
- ② 歩行者の慌しさを VR 空間内の実験から主観的尺度を用いて説明するのは難しく、実際の歩行速度に強く依存する可能性がある。

## (5) シミュレーション分析によるサイクル長の短縮効果の把握

第 10 章では、総合的な交差点設計制御評価モデル CEMID を用いて、様々な交差点構造・交通量・サイクル長におけるシミュレーション分析を行い、歩行者に関する指標（待ち時間・苛立つ人の割合・慌しさの代替的指標であるエネルギー代謝量）、自動車に関する指標（待ち時間・CO<sub>2</sub>排出量・エネルギー代謝量）を算出して比較した。その結果以下が得られ、サイクル長を短縮することによる効果と実現可能性が明らかになった。

- ① サイクル長の短縮は、ピーク時など交差点に負担がかかる時間帯には適当ではない。
- ② 交差点に負担がかからない限り、サイクル長の短縮は自動車にとって大きな効果がある。
- ③ 歩行者の観点からは、非高齢者・高齢者によって反応は異なるが、交通量の微調整や現示の切り分けなどの工夫を行うことで、サイクル長の短縮は充分に実現可能である。

## (6) 信号交差点の設計・制御ガイドラインの提案

以上の結果を総合的に判断して第 11 章では、歩行者が走ったり自動車と錯綜したりする影響を考慮した『調整歩行速度』という概念を定義した上で、以下の項目を信号交差点でサイクル長の短縮を行うためのガイドラインとして提案した。なお、歩行速度 1.2m/s での横断時間が確保不可能の場合は残り時間表示装置を設けることが望ましいことを別途記述している。

- ① 交差点の飽和度が 0.75 程度以下であり、自動車への負荷がかからないこと。
- ② 調整歩行速度 0.9m/s での横断時間が確保できない場合には中央帯を設置可能なこと。
- ③ 中央帯を設ける場合は幅員を 3.5m 以上とするか、2.5m 以上で防護柵を設置可能なこと。
- ④ 非高齢者の調整歩行速度 1.5m/s での横断時間を確保できること。確保できない場合には、現示の切り分けを行うか、従道路の交通量を調整できること。

本研究では更に、ガイドラインの実用化に向けて、道路幅員ごとに必要な交差点改善項目を簡潔にまとめたガイドライン簡易対照表を作成した。また、国道 20 号の東京都内区間を対象に、ガイドライン簡易対照表に基づいて交差点改善方策を実施した場合の費用と効果を概算し、その妥当性を検証した。

今後の展開にあたっては、以下の課題に関して更に取り組む必要がある。

第一に、研究手法上の課題である。本研究は基本的には VR を用いた室内実験とシミュレーションに基づいているため、ガイドラインに基づく交差点の設計・制御が実用に適うかを、実際の交差点における試行的実施から検証していく必要がある。その際、本研究では十分に扱っていない複数の交差点群について、サイクル長の短縮を行って効果を確認しておく必要がある。

第二に、法令上の課題である。現行法上、中央帯の利用に関しては明記されていないため、歩行者が横断を中断することのできる場所として中央帯が存在することを明確に定義すべきであろう。特に、歩行者の青点滅信号の意味については、「中央帯がある場合は中央帯で停止すること。」などという記述が求められることになる。

第三に、情報提供方法に関する課題が挙げられる。信号現示に関する情報を歩行者が十分に認識できる状況を創出するためには、カウントダウン式の残り時間表示装置を設置するなど、より解像度の高い正確な情報提供方法が求められる。しかし、技術上の理由によりわが国では正確な情報が必ずしも出せない場合がある。この状況を改善する技術を開発すること、また、残り時間表示には青点滅時間に関する情報も提供できるようにするが今後求められるものと思われる。

第四に、管理体制上の課題である。本研究で提唱した二段階横断方式とサイクル長の短縮の導入のためには、中央帯の整備を道路管理者（国道の場合は国土交通省）が、信号制御の改変及び残り時間表示装置の導入を交通管理者（警察）が行う必要がある。そのため、財源の統合化など、両者のより一層の協力体制を確立することが求められるものと思われる。

第五に、やむを得ず十分な幅員の中央帯を設けることができない場合、特に 1.5m 程度の幅員を考えなければならないケースにおいて、どのような追加的な防護設備が必要となるかについても検討を行う必要があるものと思われる。

本研究は、既存の交差点に対してサイクル長の短縮を実施する場合、或いは道路を新設してサイクル長の短い交差点を設置する場合に、二段階横断方式の導入を含めてどのように設計・制御すべきか、その方法論を提案したものである。これによって、都市部に存在する多くの交差点において、また殆どの時間帯において、サイクル長の短縮が実現され、歩行者にとっても自動車にとっても安全かつ快適な交通空間を提供することができるものと考えている。

## 目 次

第1章 序 論	1
1.1 大規模交差点設計に求められる新しい考え方	2
1.2 サイクルタイム短縮の必要性	3
1.3 本研究の目的	4
1.4 本研究の構成	4
第2章 既往研究のレビューと本研究の位置づけ	6
2.1 交差点の信号制御に関する研究動向	7
2.2 歩行者・高齢者に関する研究動向	8
2.2.1 歩行者の挙動に関する研究	8
2.2.2 歩行者の生理心理に関する研究	9
2.2.3 歩行者支援技術に関する研究	10
2.3 本研究の位置づけと意義	11
第3章 海外の交差点における設計事例の紹介	12
3.1 欧州における交差点調査の実施	13
3.1.1 ロンドンにおける交差点調査	13
3.1.2 フランクフルトにおける交差点調査	16
3.1.3 パリにおける交差点調査	18
3.1.4 三都市間の横断歩道設計方式の比較	20
3.2 海外の交差点に見られるその他の工夫	20
3.3 二段階横断方式の特徴	21
第4章 歩行者横断行動原理の提案	24
4.1 観察実験の実施	25
4.1.1 観察実験の手順	25
4.1.2 観察実験の結果	26
4.2 歩行者横断行動原理の提案	26
4.2.1 横断行動原理の解釈1 ～現示の切り分けがない場合～	27
4.2.2 横断行動原理の解釈2 ～現示の切り分けを行った場合～	28
4.3 検証項目の設定	30

第5章 歩行シミュレータ P e d E C Sの開発	32
5.1 実験空間に求められる要件	33
5.2 既往のVRシミュレーション技術	33
5.2.1 没入型VRシミュレータ	33
5.2.2 頭部搭載型ディスプレイを用いたVRシミュレータ	34
5.2.3 トレッドミルを用いた歩行シミュレータ	34
5.3 追従型歩行シミュレータ P e d E C S	36
第6章 信号待ち時間における不快感の計測	39
6.1 実験環境の整備	40
6.1.1 サンプル交差点とその特徴	40
6.1.2 実験ケースの設計	41
6.2 計測指標の設定	43
6.2.1 生理的指標	43
6.2.2 主観的指標	46
6.3 実験の方法	47
6.3.1 被験者	47
6.3.2 日時及び場所	47
6.3.3 実験器材	47
6.3.4 実験の手順	48
6.4 実験の結果と考察	49
6.4.1 非高齢者と高齢者の苛立ちの主観的評価の差異	50
6.4.2 苛立ちの主観評価と横断距離の関係	51
6.4.3 心拍変動解析による苛立ちの計測	52
6.5 現実空間との差異の検証	54
6.5.1 被験者	54
6.5.2 日時及び場所	54
6.5.3 実験器材	54
6.5.4 実験の手順	54
6.5.5 検証の結果	54
第7章 中央帯滞留時における不快感の計測	56
7.1 実験環境の整備	57
7.1.1 サンプル交差点とその特徴	57
7.1.2 実験ケースの設計	58

7.2	計測指標の設定	60
7.2.1	生理的指標	60
7.2.2	主観的指標	61
7.3	実験の方法	62
7.3.1	被験者	62
7.3.2	日時及び場所	62
7.3.3	実験器材	62
7.3.4	実験の手順	65
7.4	実験の結果と考察	66
7.4.1	中央帯の構造が不安感に与える影響	66
7.4.2	中央帯の安全性に関する評価軸の分析	67
7.4.3	中央帯の幅員が苛立ちに与える影響	70
7.4.4	生理指標と不快感との関係	70
7.4.5	中央帯の選好に関する分析	73
7.5	現実空間との差異の検証	74
7.5.1	被験者	74
7.5.2	日時及び場所	74
7.5.3	実験器材	75
7.5.4	実験の手順	75
7.5.5	検証の結果	76
<b>第8章</b>	<b>情報提供下における歩行行動分析</b>	<b>78</b>
8.1	実験環境の整備	79
8.1.1	サンプル交差点とその特徴	79
8.1.2	実験ケースの設計	79
8.2	計測指標の設定	82
8.3	実験の方法	84
8.3.1	被験者	84
8.3.2	日時及び場所	84
8.3.3	実験器材	84
8.3.4	実験の手順	85
8.4	実験の結果と考察	87
8.4.1	心理的時空間領域の存在の検証	87
8.4.2	情報提供の効果に関する分析	89
8.4.3	歩行方法と慌しさの主観評価の関係	90

<b>第9章 総合交差点設計制御評価モデルの開発</b>	<b>93</b>
9.1 既往の交通シミュレータ	94
9.1.1 自動車のシミュレーション	94
9.1.2 歩行者のシミュレーション	97
9.2 交通シミュレータAIMSUNの概要	99
9.2.1 モデルの特徴	99
9.2.2 シミュレーションプロセスと入力データ	100
9.3 総合交差点設計制御評価モデルの構築	102
9.3.1 歩行者速度選択アルゴリズムの導入	103
9.3.2 歩行者属性データ	105
9.3.3 自動車属性データ	106
9.3.4 交差点評価指標	106
 <b>第10章 様々な交差点のシミュレーション分析</b>	 <b>110</b>
10.1 歩行者速度選択アルゴリズムの有効性の検証	111
10.1.1 サンプルとする交差点	111
10.1.2 シミュレーションの設定	112
10.1.3 シミュレーションの実施と比較	113
10.2 単一交差点と複数交差点群におけるシミュレーションの比較検討	114
10.2.1 サンプルとする交差点群	115
10.2.2 シミュレーションの設計	115
10.2.3 最適オフセットの選定	117
10.2.4 シミュレーション結果の比較	118
10.3 単一交差点におけるシミュレーション分析	119
10.3.1 交通需要とサイクル長の短縮効果	119
10.3.2 8車線道路を主道路とする交差点のシミュレーション	122
10.3.2.1 8車線道路同士の交差点	122
10.3.2.2 8車線道路と4車線道路との交差点	127
10.3.2.3 8車線道路と2車線道路との交差点	131
10.3.3 4車線道路を主道路とする交差点のシミュレーション	135
10.3.3.1 4車線道路同士の交差点	135
10.3.3.2 4車線道路と2車線道路の交差点	138
 <b>第11章 信号交差点の設計・制御ガイドライン</b>	 <b>143</b>
11.1 実験及びシミュレーションの結果のまとめ	144
11.1.1 自動車の指標にみる特徴	144

1 1. 1. 2 歩行者の指標にみる特徴	145
1 1. 2 交差点設計・制御の基本方針	148
1 1. 3 交差点の設計・制御ガイドライン	149
1 1. 4 ガイドラインに基づく交差点の設計例	151
1 1. 5 ガイドラインの簡易対照表	154
1 1. 6 ケーススタディ～甲州街道を事例に	155
1 1. 6. 1 交差点改善費用の検討	156
1 1. 6. 2 交差点改善の効果の検討	156
1 1. 6. 3 対象道路における費用と効果	157
<b>第12章 結 論</b>	<b>158</b>
1 2. 1 本研究の成果のまとめ	159
1 2. 2 今後の展開へ向けて	162
<b>参 考 文 献</b>	<b>165</b>
<b>謝 辞</b>	<b>171</b>
<b>付 録 資 料</b>	<b>173</b>
A. AIMSUN API プログラムソース	174
B. 甲州街道（東京都内）の交差点データ	183

# 第1章

## 序 論

本章では、研究の着想に至った背景を説明すべく、まずこれまでのわが国の交差点設計を振り返り、新しい交差点設計の考え方であるサイクル長の短縮について説明を加えたあと、本研究の目的と構成に関して述べるものとする。

### 1. 1 大規模交差点設計に求められる新しい考え方

わが国における交差点の設計は、まず初期においては単一の自動車の挙動或いは一組の自動車対の視点から、制動停止のための視距や曲線半径などを考慮することで設計されてきたといわれている。次第に自動車の数が増えてくると、単一の自動車ではなく自動車群を扱う必要性から車線や交通島などの概念が生まれ、交通信号による運用が始まることになる。そして、歩行者や自転車の快適性や安全性に関しても配慮がなされるようになり、一時期は横断歩道橋をあらゆる箇所に設置する動きも見られたが、近年では高齢者や障害者へも配慮がなされ、エレベータの設置や緩やかな傾斜の導入がなされたり、横断歩道橋を撤去したりする例も見られるようになってきている（交通工学研究会、2002）。しかしながら、依然として交差点、とりわけ大規模な信号交差点は自動車にとっても歩行者にとっても交通処理上の隘路であり、同時に交通事故の多発する箇所である。実際、警察庁の統計によると、1年間に生じる全交通事故件数のうち50%以上が交差点付近で起きていることが分かっている。近年、様々な規制の強化やITS技術、医療技術の進展に伴って、図1-1に示したように死傷事故件数自体は減少してきているが、発生件数は減少してはならず、然るに小規模な事故が増大している傾向が読み取れる（警察庁交通局、2006）。

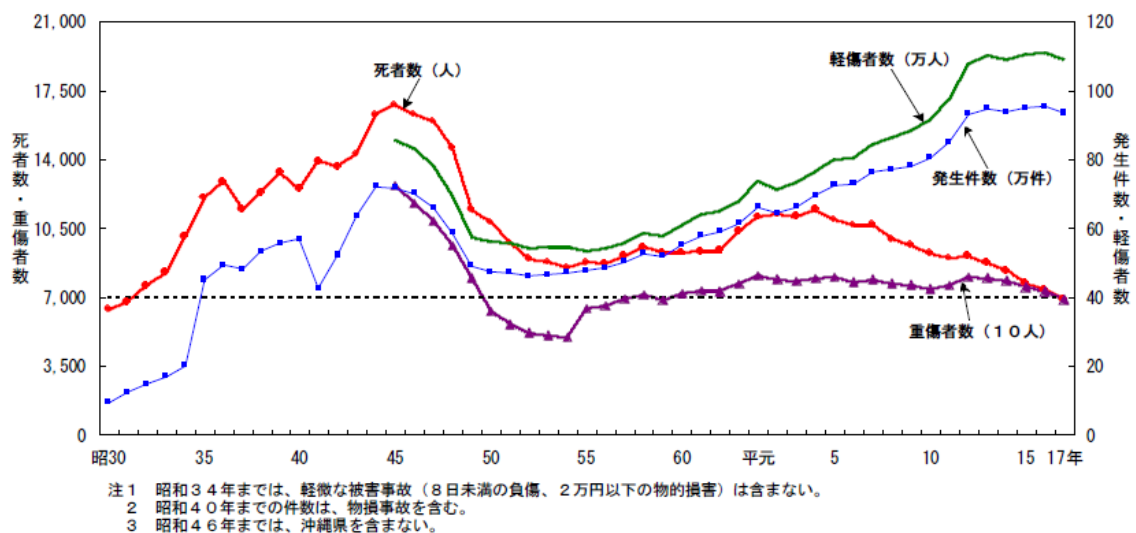


図1-1 近年の交通事故の発生状況（警察庁交通局、2006）

小規模な事故が減少していかない背景には、交差点構造の改良方策の効果が十分に評価されてこなかったこともあるが、交差点安全対策の基本的思想が円滑性よりも安全性偏重であったことが挙げられよう。これまで円滑性を追求することは安全性を阻害し、安全性を追求することは円滑性を阻害すると考えられてきたが、安全対策の効果を詳細に分析した研究（清水・森地・福原、

2003)によると、安全性を追求するために円滑性を犠牲にした結果が、更に安全性に悪影響を及ぼす可能性が否定できないことがわかっている。即ち、安全性と円滑性はトレードオフ関係にあるものではなく、正の相関を有する可能性も大いにあるということである。

以上より、歩行者、自動車双方にとって安全かつ円滑な交差点設計を追求していくことが、交通空間における社会厚生最大化に繋がるものと考えられる。そのためには、交差点構造のハード設計と、信号制御方式や情報提供などのソフト設計を合わせて総合的に考えることが急務であるといえよう。

## 1. 2 サイクル長の短縮の必要性

わが国の大規模信号交差点の安全性・円滑性に関する重要課題の一つに、長い信号サイクル長の短縮が挙げられる。桑原(2000)が、「1950年代からの従来理論では、サイクル長を長くすればするほど単位時間あたりの損失時間の割合が小さくなるため、需要が大きくなればなるほどサイクル長を長くして、時間を有効に利用するというのが原則となってきた。」としているように、わが国の大規模な信号交差点では、従来から欧米諸国などと比較してもサイクル長は長めに設定されており、特に交通量の多い幹線道路になると、都心部で140秒、地方部では180秒を超えるものも数多く見られる。長すぎるサイクル長は、以下のような弊害を生じるといわれている。

### ① 利用者心理上の問題

赤現示で待っている際、歩行者やドライバーは行動を制約されることになる。サイクル長が長くなり赤時間が増えると、歩行者やドライバーは苛立ちを増大させる。人はイライラしてくると、攻撃的な交通行動に出やすくなるものである(藤田、1994)。従ってサイクル長が長くなると、交差点に無理矢理進入したり、信号無視をしたりという攻撃的な交通行動が生じやすくなり、交通事故に繋がる危険性が増大し、安全性が脅かされる可能性が十分にある。

### ② 交通容量上の問題

信号交差点では、左折車は歩行者・自転車と、右折車は対向車との交錯によって交差点内及び手前に滞留することになる。サイクル長が長くなるほど右左折車の待機列が長くなり、右左折車の専用ポケットをオーバーフローして直進車の飽和交通流率を低下させてしまう恐れがあり、交通円滑性に支障をきたすことがある(櫻田、2002)。

### ③ 環境上の問題

自動車は赤現示で待っている際にアイドリングをする。アイドリング中の自動車からは、地球温暖化の原因となるCO<sub>2</sub>、光化学スモッグの原因となるNO<sub>x</sub>やHC、人体の呼吸器系に悪影響を及ぼすSPM(浮遊性粒子状物質)を含む排気ガスが常に発生している。サイクル長が長くなり待ち時間が増えることで、交差点付近で発生する有害物質の総量は増加する<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> 交差点の極近傍では、サイクル長を短縮した場合の方が自動車の発進頻度の増加に伴ってガス排出量が増加すると指摘する研究(小根山、2003)もあるが、交差点に起因する信号待ち車両全体から排出されるガスの総量はサイクル長を短縮した方が減少するものと本研究では考えている。

わが国でサイクル長を短くできない理由には、先述の従来理論における考え方に加え、「歩行者の横断時間確保の原則」の存在が挙げられる。即ち、交差点に横断歩道が付置されている場合は、歩行者が横断を完了するために必要な青時間を確保すべきであり、青点滅時間になるべく含まずにこの時間を提供すべきである、という考え方が従来から存在していた。そのため、長い横断歩道を含む大規模信号交差点においては、それぞれの現示に対する必要最低時間が歩行者横断時間の側から決まり、必然的にサイクル長が長くなってしまっていた。近年高齢時代を迎え、次第に歩行速度の遅い歩行者の割合が増えてくる中でこの原則が継続すると、更に長いサイクル長が求められることが予想される。実際、清水・木村・吉岡（1991）や山田・山形（1996）をはじめ、高齢者の横断時間確保のために歩行者青時間・点滅時間を長くする方向で再検討すべきとする研究は多く見られる。従って、単純にサイクル長を短縮するだけでは望ましくなく、歩行者の特性を充分把握した上で歩行者に配慮した方策を考えていかなければならない。そのためには、人がどう挙動しているか（行動）だけでなく、どう感じているか（認知）、どう体が反応しているか（生理）についても把握し、それぞれが整合していることを示すという生理心理学的手法（山田富美雄、1998）が最適と考えられるが、まだこの視点による研究蓄積は少ないのが実情である。

### 1. 3 本研究の目的

本研究は、わが国に大規模な信号交差点における安全性・円滑性向上方策としてサイクル長の短縮に注目し、歩行者・自動車双方にとって安全かつ円滑な交差点設計を行うためのハード・ソフト両面の方策を、これを実現した場合の効果を定量的に把握した上で、交差点設計のガイドラインとして提案することを目的とするものである。中でも、既往研究の少ない歩行者の挙動特性や生理心理特性について詳しく調べることで、交差点設計への提案を行うために歩行者と自動車の双方の観点から交差点を評価できるモデルを構築することに重点を置くことにしている。

なお、本研究では横断歩道に中央帯を設け、中央帯を積極的に利用した二段階横断方式と合わせてサイクル長を短縮することが、上記の要件を満たす交差点設計であると考えている。

### 1. 4 本研究の構成

本研究の構成を図 1-2 に示す。まず本章において本研究独自の着想である大規模信号交差点におけるサイクル長の短縮の重要性を述べたあと、第2章では国内外においてどのような研究が既になされてきたかを総括し、本研究の位置づけを明確化する。次に第3章では、海外の特にヨーロッパの諸都市における交差点設計の事例を紹介し、わが国ではまだ例のあまり見られない、中央帯を活用した二段階横断方式の有効性に関して述べる。前項の目的でも述べたとおり、この方式を用いたサイクル長の短縮が最もわが国に有効な方策であろうと考えるところである。

第4章では、実際の交差点における観測調査を踏まえ、歩行者がどのような行動原理に基づいて横断行動を行っているかに関して仮説を立て、それらを立証するにはどのような検証が必要か

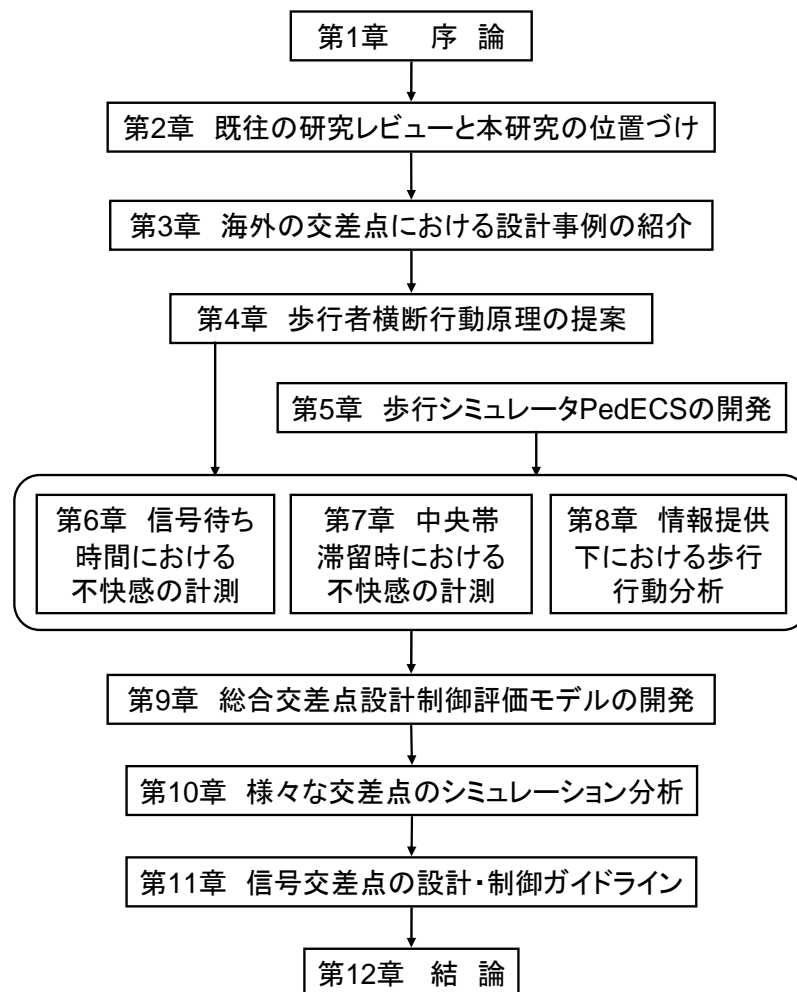


図1-2 本研究の構成フロー図

を論ずる。第5章では、歩行者の横断行動を実験するための自由度の高い実験装置として開発したヴァーチャル歩行シミュレータ PedECS に関して説明を行う。この実験装置を用いて、第6章では歩行者が信号待ちをしている際にどのような不快感を感じているのかを計測し、第7章では中央帯で滞留している際に歩行者はどのような不快感を感じているのかを計測し、第8章では歩行者に信号の残り時間に関する情報提供を行った場合に歩行者はどのように行動を変化させるかを分析する実験を行う。

これらの結果を用いて第9章では、交通シミュレータ AIMSUN を用いて歩行者と自動車の双方を扱うことのできる交差点設計の総合的評価モデル CEMID を開発し、様々な交差点におけるシミュレーション分析を第10章で行うことで、様々な交差点様式に対して歩行者と自動車の双方にとって安全かつ円滑な設計方法を調べる。その結果を第11章において信号交差点の設計・制御ガイドラインとして提案し、更に実際の道路においてガイドラインに基づいた交差点改善を行った場合の費用と効果を概算してその妥当性を示した上で、第12章の結論に至るという構成になっている。

## 第2章

# 既往研究のレビューと 本研究の位置づけ

歩行者・自動車双方にとって安全かつ円滑な交差点の設計・制御を行う手法を開発するためには、関連する研究としてこれまでにどのようなものがなされてきたのかを調べ、本研究の位置づけを明確にする必要がある。本章では、既往の研究のレビューを交差点の信号制御に関する研究動向、歩行者・高齢者に関する研究動向のそれぞれの観点からまとめた上で、本研究の位置づけについて述べることにする。

## 2. 1 交差点の信号制御に関する研究動向

まず、特に自動車の観点から、最近の交差点の信号制御に関する研究動向について見ておくことにする。本研究ではサイクル長の短縮を意図しているため、最適サイクル長に関する研究とその他の信号制御方法に関する研究に分けて考える。

最適サイクル長に関する研究としては、古くは英国道路研究所の Webster (1958) の研究に遡ることになる。この研究は、交差点の飽和度と自動車のランダム到着を仮定した際の孤立交差点の最適サイクル長との関係式を、シミュレーション実験によって求めたものである。この結果は「交通信号の手引き」(交通工学研究会、1994) などでも取り上げられ、現在でも一つの指標として用いられている。その後、越 (1975) の研究によって、信号交差点群の系統制御を考えるとサイクル長としては 80 秒~120 秒の範囲内でできるだけ短いサイクル長を用いることが実用的には有効だと結論づけている。サイクル長の短縮については、桑原 (2000) もその必要性を謳っており、櫻田 (2002) も右折車の滞留量を考慮すると孤立交差点においてはサイクル長を現状のものよりも短縮する必要があることを示している。更に、小根山 (2003) は排出ガスの観点から見てもサイクル長の短縮には交差点近傍の排気ガス濃度は上昇するものの、全体としてはガスの排出総量は軽減されることを示唆している。従って、特に自動車の観点から見ると、サイクル長の短縮効果はある程度確認されているといつてよいと思われる。しかし、サイクル長の短縮に関する実務的に有効な手法を提案しているものは見当たらないのが実状といつてよい。これは、歩行者の横断時間をどのように確保するかに関する解決策がボトルネックになっているということと、実際のサイクル長の設定はその大部分が長期間における経験に基づいて交通管理者が微調整してきた経緯があり、これに対する畏敬感と、変更に伴って発生するかもしれないトラブルへの忌避感が障壁となっているものと推測される。

サイクル長の短縮以外の信号制御方法に関する最近の研究としては、浅野ら (2002、2003) によって自動車の信号待ちによる遅れ時間をITSにより直接計測し、信号パラメータをリアルタイムに制御するアルゴリズムCARRENが提唱され、その効果がシミュレーションと社会実験によって説明されている。また、米国のHighway Capacity Manual 2000 (Transportation Research Board、2000) で提案されたデュアルリング制御方式<sup>1</sup>を導入した場合にどの程度交通容量が増加するかを検討した研究(本間・鹿島、2004)なども見受けられる。しかしながら、これらの研究の成果

<sup>1</sup>左折矢(わが国の右折矢)を先出しし、捌き切れた方向から先に直進を認めていく制御方式。本間・鹿田 (2002) によってその信号時間設計法がわが国と比較して紹介されている。

を実用化するためには大幅なシステムの改変が必要になるとともに、自動車の円滑性は向上するものの歩行者の快適性は特に変化はしない可能性が高く、歩行者と自動車双方を考慮した総合的な交差点改善という観点には必ずしもそぐわない可能性がある。従って本研究は、歩行者と自動車の双方を考慮した交差点改善が、比較的簡易な手法によっても実施できることが示されれば、非常に意義深いものとなると考えられる。

## 2. 2 歩行者・高齢者に関する研究動向

自動車に関してはサイクル長の短縮がある程度示唆されてきているものの、実施が困難である主要な要因は、歩行者に関する解決策の不在である。従って、歩行者の観点からサイクル長の短縮可能性を探るためには、高齢者を含む歩行者の特性を十分に把握しておく必要がある。ここでは歩行者の特性を把握するための既往研究を、歩行者挙動に関するもの、歩行者の生理心理に関するもの、そして歩行者を支援する技術に関するものに分けて紹介することにする。

### 2. 2. 1 歩行者の挙動に関する研究

歩行者の挙動に関する研究としては、まず信号交差点における横断歩行者の歩行速度はどのように分布しているのかを 10,000 人を超える大量なサンプルの分析から明らかにした斉藤・有菌 (1986) の研究がある。これによると、社会人の歩行速度の 50 パーセンタイル値は約 1.37m/s (N=11604) であることや、老人のそれは約 1.06m/s (N=146) であることなどが示されている。20 年前のデータではあるが、その調査規模の大きさから、特に社会人の歩行速度は頑健なものと考えてもよいと思われる。なお、米国の Traffic Engineering Handbook 4th Edition (Institute of transportation engineers, 1992) によると歩行者の平均速度は 240ft./min.  $\approx$  1.21m/s となっている。国民性の違いなどの影響も考えられるが、上記の研究における社会人と老人を公平に扱うと、この程度の値が得られることになる。

次に、横断行動中の歩行者のより詳細な挙動を調査した研究としては、信号表示が切り替わる前後で歩行者がどのように歩行速度を変化させるかを調査し、残り時間表示の有効性を示唆している矢野 (2001) の研究や、中央帯がある場合とない場合に歩行者が待ち時間や自動車の存在を考慮しながら横断歩道を横断するかどうかを選択モデルで説明を試みた Hamed (2001) の研究、ヴァーチャル環境下で同様に横断の選択行動を調査した Simpson, Johnston, Richardson (2003) の研究、更には歩行者が左折する自動車に与える影響を横断する方向別に検討した河合・鹿田・片倉・大口 (2003) の研究が挙げられる。但し、これらの研究では、歩行者一人ひとりがどのように横断行動を変容させるかについては明示的に扱われていない。詳細な横断挙動を分析した研究としては、他にアルコール摂取時の横断行動変化とその危険性を調査した研究も存在する (Oxley, Lenné, Corben, 2006)。

また、高齢者の横断行動に着目した研究としては、無信号交差点における高齢者の行動を計測することで、交差点に信号機を設置すべき要件を検討した研究 (三井・矢野・萩田, 1998) や、

信号交差点での高齢者の挙動を非高齢者と比較した研究（矢野、1996）、そして高齢者の挙動を把握したうえで歩行者現示時間の延長必要性に関して述べている研究（Langlois, Keyl, Guralnik, Foley, Marottoli, Wallace、1997；山田・山形、1997）もある。

更に、新しい歩行者用信号の制御方法を導入した場合に歩行者がどのような挙動を示すかを調査した研究としては、米国のような歩行者用赤点滅信号の導入効果を間接的に捉えようと試みた研究（齋藤・森・矢野、1999）や、歩車分離式信号（歩行者おもいやり信号）を試験的に導入してその効果を直接計測した研究（沢田、2003；三村、2003）などが挙げられる。しかし、前者に関しては、結局赤点滅信号は青点滅信号で代用されるなど、信号制御方式の新しい考え方を導入するのは、技術的には可能であっても法制度上不可能なことが多く、室内実験による研究蓄積が必要不可欠ということがわかった。また、後者の歩車分離式信号は歩行者用に1現示を割り振ることになるため、全体としてはサイクル長や歩行者の待ち時間が増加する可能性があり、安全によって円滑が阻害される結果となっている。従って、安全と円滑の両面を実現できるような信号制御方式が求められるところである。

なお、歩行者挙動の特性を把握した上で、歩行者が任意の空間内をどのように移動するかを分析するものとして、交通シミュレーションという手法が存在する。その主なアプローチとしては、歩行者を群集流として扱うマクロなものから個々の歩行者の動きを扱うマイクロなものまで様々である。本研究でも、交差点の評価ツールとして交通シミュレーションを用いることにしているが、これについての既往研究の紹介を含めた詳細は第9章に譲ることにする。

## 2. 2. 2 歩行者の生理心理に関する研究

次に、歩行者の生理心理に関する研究について既往研究を紹介する。まず交通主体としての歩行者の生理反応を扱った研究としては、本研究の先行的研究である家田・鳩山（2002）などに見られる程度と比べてよく、これらの研究成果として歩行者の信号待ち時間時の苛立ちを心拍変動によって計測できることが示されている。その他の交通に関わる生理反応研究としては、道路交通環境と自動車運転時の心拍数との関係について調べたもの（鰐部・高橋・栗本、1996）や、自動車とすれ違う自転車利用者の心拍上昇について調べたもの（清田・角・田上、1997）などがあるが、交通分野における研究蓄積は充分とはいえない。そのため、より多くの既往研究が存在する生理心理学や人間工学の分野における研究蓄積を活用する必要があるものと考えられるが、これに関する詳述は第6章に譲ることにしたい。

一方、歩行者の心理に関わるものは交通の分野、とりわけ交通心理学の分野において多くの研究がなされてきている。まず、歩行者用信号の遵守に関する歩行者の意識をアンケートなどによって明らかにしようとする研究が多く見受けられる。例えば、北折（1999 及び 2002）は、どのような規範意識を持つ人が信号無視行動に及ぶのかを、周辺の歩行者の状況（記述的規範）や信号に対する意識の違いから明らかにしようとしている。その類似研究としてYagil（2000）は、信号無視を含む危険な横断行動を歩行者が行う頻度を、社会的規範や取締り頻度などに対する認識や自動車や歩行者の交通状況などから説明を試みている。また、矢野・森（2002 及び 2003）

は、歩行者の青点滅信号の法的意味<sup>2</sup>が歩行者に必ずしも正確には認識されていないことを示唆している。但し、研究の成果から交差点の設計・制御に関して検討している研究はあまり見られない。この点に関して、本研究では、サイクル長の短縮が実施できれば、歩行者は苛立ちをあまり感じることなく横断ができるようになると考えており、信号の遵守率も向上するものと考えている。

その他の交差点に関する心理研究としては、交差点に対する利用者の主観評価と事故率の関係などから景観整備が安全性の向上に寄与する可能性を示唆した研究（豊田・嶋田・寺内・本多、1996）や、横断歩道利用と歩道橋利用との選択に関するアンケート調査から横断歩道通行時の危険感を調査した研究（山田、2003）、様々な平面横断施設を横断歩行者がどのように選択するかをアンケート調査し、交差点部ではなく単路部における横断歩道の有効性を示唆した研究（Sisiopiku, D. Akin, 2003）、歩行者の通行権（横断禁止箇所を横断している歩行者に対しても自動車は譲らないといけないかなど）に関する市民の認識を調査した研究（Martinez, Porter, 2004）などがある。なお、本研究で重視している中央帯に関する心理研究としては、路肩の様々な位置に歩行者を立たせて不安感を調査し、路肩と中央帯に必要な幅員を推定した研究（高宮・石倉、1996）が存在する程度であり、中央帯を直接的に対象として扱った心理研究は見受けられない。従って、どのような構造の中央帯で歩行者が不快感を感じるのかについては、充分にはわかっていないといえることができる。

### 2. 2. 3 歩行者支援技術に関する研究

歩行者の横断を支援する技術に関する研究についても報告されているものがある。まず、西村・岡本（2001 及び 2002）は、画像処理技術により横断歩道における歩行者を様々な角度から抽出する技術を検討しており、横断歩道の危険予知情報を歩行者やドライバーに知らせるシステムへの展開が期待されている。また、村上（2003）は、携帯端末や PDA などに経路案内や交差点の現示情報などを表示したり、信号制御装置に青時間延長要求を行ったりすることができる PICS と称する歩行者等支援情報通信システムを開発し、実証実験を行っている。その他、カウントダウン式の残り時間表示に着目して、横断態度のアンケート調査とビデオ観測調査を行い、カウントダウン式の残り時間表示には法令順守行動の促進効果があることを調べた研究（Keegan, O'Mahony, 2003）も存在する。以上に限らず、実用的には歩行者 ITS として様々な危険情報、位置情報、経路情報の様々な提供方法が提案されているものの、ITS に関わる研究成果としては自動車に関する研究が圧倒的に多く、歩行者の視点のものは極めて少ないようである。

一方、本研究で着目している歩行者の二段階横断方式については、越・安井・山本・富井（1998）が、安全性に関しては明確な結果は得られなかったものの、実際の交差点における調査に基づくシミュレーション分析からその円滑性向上効果を示しており、更に Bacquie, Egan, Ing（2001）は中央帯の設置が持つ安全性向上効果を明確に説明している。しかしながら、本研究のように、歩

<sup>2</sup>道路交通法施行令では、青点滅信号下では歩行者は道路の横断を始めてはならず、横断している歩行者は速やかにその横断を終わるか、横断を中止して引き返さねばならないとされている。

行者・自動車双方の安全性と円滑性を支援するハード・ソフト的技術として二段階横断方式とサイクル長の短縮の同時実施の有効性を捉えている研究は少ないといわざるを得ず、ここに研究の意義が十分に存在するものと考えることができる。

### 2. 3 本研究の位置づけと意義

以上に示した既往の研究のレビューから、本研究の位置づけを次に明確化しておく。従来より、自動車の視点からサイクル長の短縮の必要性は謳われており、同時に歩行者或いは高齢者の観点から交差点空間の安全性向上の必要性も指摘されて久しい。しかしながら、これらの要件を同時に満たすようなハード・ソフトの技術については未だ解を得ていないのが実情のようである。本研究は、横断歩道に中央帯を設けることによる二段階横断方式とサイクル長の短縮を同時に考えることで、総合的視点からこれらの要件をすべて満たす解決策を提案しようとするものであり、更に横断歩行者の特性を生理心理的側面からも捉えることによって、より利用者の実感にあった交差点設計・制御手法とすること、そしてガイドラインを整備することによって実務上も役に立つアウトプットを得ることを目指している。

以上の点から、本研究は意義あるものと判断することができよう。

## 第3章

# 海外の交差点における 設計事例の紹介

本章では、まず欧州において行った交差点調査に関して述べ、その他の海外の交差点事例を合わせることで、歩行者に充分配慮し、かつサイクル長が短い交差点を設計するための示唆を得ることを目的とする。

### 3. 1 欧州における交差点調査の実施

わが国の目指すべき交差点設計を考える上で、実際に海外ではどのような交差点設計がなされているのかを知っておくことは有意義である。そこで、本研究では既に短いサイクル長で交差点が制御されているといわれている欧州の交差点を対象に調査を行い、実際にどの程度のサイクル長で運用がなされており、歩行者への配慮も含め、どのような工夫がなされているのかを調べることにした。実際に調査を行った都市は、ロンドン（イギリス）、フランクフルト（ドイツ）及びパリ（フランス）であり、期日は2002年10月18日（金）～24日（木）の7日間であった。これらの都市を選定した理由は、第一に首都またはそれに類する都市であり、自動車・歩行者ともに交通量が少なくはないと事前に判断されたためであり、第二にその都市がその国の交通システムを代表する性格を持っていると考えることができたためである。

それぞれの都市において、下記の要領に従って調査を行った。

- ① 第1日目に、都心部のできるだけ多数の交差点を回って、その横断歩道の写真を撮影するとともに、その撮影地点も記録する。
- ② 撮影・記録を行った交差点群を、横断歩道の構造面の特徴に従って類型化する。
- ③ 類型化された各パターンからサンプルとする交差点を数箇所ずつ選別する。
- ④ 第2日目に、図3-1に示した交差点調査票を用いて、その交差点の構造やサイクル長（各現示の制御方式を含む）を詳細に調査する。

次に、各都市における調査の概要と結果についてまとめる。

#### 3. 1. 1 ロンドンにおける交差点調査

今回ロンドンにおいて調査を行った区域は、図3-2に示したとおり City of Westminster を中心とする4km四方程度の区域である。まず、70地点を対象に写真撮影を行って、それらの交差点を4つのカテゴリに類型化した。それら4つの類型を示したものが図3-3であり、それぞれを以下のように名づけることにした。

##### A：クランク型二段階横断方式

まず、横断歩道が柵に覆われた中央帯を境に左右にずれており、歩行者は中央帯で車道と平行な方向に歩いた上で残りの横断を行う方式である。これにより、歩行者の視線が自然と自動車の来る方向に振られ、歩行者の注意を促す効果があるといわれている（Bacquie ら、2001）。また、信号現示も中央帯を境に切り分けられており、歩行者には段階的に青信号が割り当てられることになることが多い。この横断方式において、中央帯は多くの歩行者によって利用されており、中央帯で歩行者が滞留する光景は非常によく見受けられる。

## 交 差 点 調 査 票

都市		日時	月 日 ( ) : ~ :	調査番号	
全 体 像 の ス ケ ッ チ			歩 行 者 用 信 号 現 示		
			サイクル長 _____ 秒		
			赤時間 _____ 秒		
			青時間 _____ 秒		
			点滅時間 _____ 秒		
			歩行者信号と自動車信号とのギャップ		
			歩行者青－自動車赤 _____ 秒		
			自動車赤－歩行者青 _____ 秒		
横 断 歩 道 構 造			中 央 安 全 帯		
幅 _____ m 長さ _____ m			なし あり → 幅 _____ m		
車線数 _____ 車線 ( _____ m / 車線)			<div style="text-align: center;">↓</div> 形状		
残り時間表示装置					
なし あり → 形式					
横 断 歩 道 利 用 者 数			横 断 歩 道 通 過 自 動 車 交 通 量		
横断歩道利用者数 _____ 人 / 1 青時間			歩行者赤現示時通過量 _____ 台 / 1 赤時間		
中央帯利用頻度 _____ 人 / 1 サイクル			歩行者青現示時通過量 _____ 台 / 1 青時間		
特記事項					

図3-1 欧州交差点調査に用いた交差点調査票

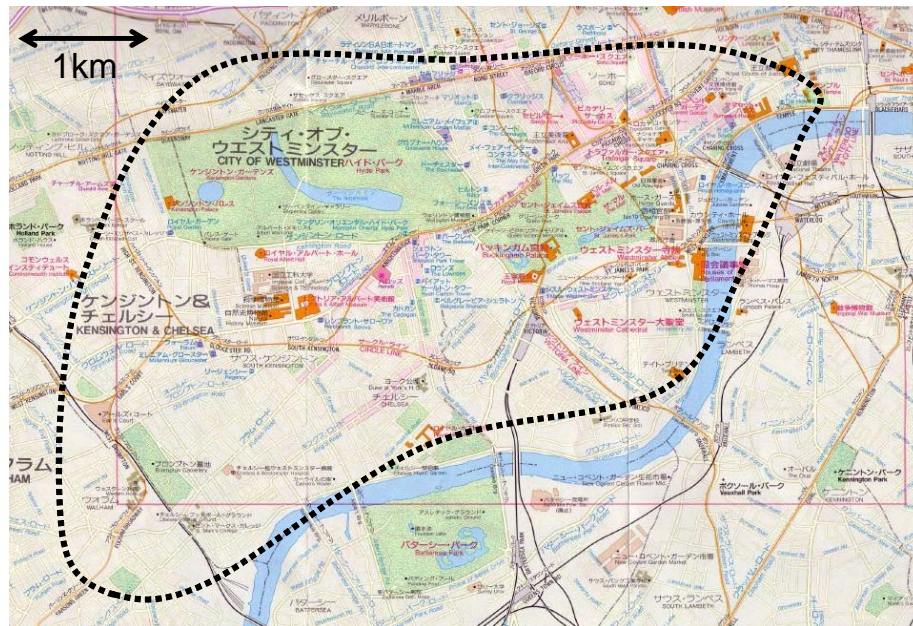


図3-2 ロンドンにおける調査対象区域



A : クランク型二段階横断方式



B : ストレート型二段階横断方式



C : 無信号二段階横断方式



D : 歩行者優先横断（ゼブラ）方式

図3-3 ロンドンの横断歩道構造の類型化

**B：ストレート型二段階横断方式**

次に、クランク型のものとは異なり、横断歩道が中央帯前後でずれていない方式である。この場合信号現示は切り分けずに同時に変化させることが多い。また、中央帯部分にも歩行者用信号灯器が設置されており、歩行者が信号を見やすいように工夫されている。

**C：無信号二段階横断方式**

ロンドンの横断歩道には、必ずしも歩行者に配慮されているとはいえない方式も存在する。図 3-3 の C に示すとおり、歩行者用信号灯器は設置されておらず、歩行者は自動車用の信号や自動車の流れを見計らって横断するという方式である。交通量が多い道路においてもこの方式は多く見受けられる。但し、中央帯はここでも必ず設置されており、歩行者は中央帯までは右を、中央帯からは左を注意して歩けばよい、ということになる。

**D：歩行者優先横断（ゼブラ）方式**

最後に、歩行者を優先するもので、**Zebra Crossing** と呼ばれる方式である。この場合のみ横断歩道が縞で表されており、**Belisha Beacon** と呼ばれる点滅する黄色いボールのついたポールや特別なレーンマークによって、その位置が際立つ工夫がなされている。自動車は横断歩行者がいる間は必ず停止しないといけないルールであり、遵守が徹底されている。

以上、道路構造の観点から類型化を試みたが、信号制御の観点からは、更に **Pelican Crossing**（押しボタンで歩行者信号を変換させる方式）、**Puffin Crossing**（横断歩道手前に歩行者信号を設置し、横断中はセンサーで感知して安全な青時間を出す方式）、**Toucan Crossing**（自転車用信号が併設されている方式）、**Pegasus Crossing**（乗馬者用の信号を併設する方式）などの工夫も存在している。

これらの交差点について、数箇所ずつ選定を行ってサイクル長を計測したところ、クランク型二段階横断方式、ストレート型二段階横断方式ともに平均して 80 秒程度で運用されていた。特にロンドンの横断歩道は、どのような幅員の横断歩道でも中央帯が設置されており、場合によって現示を中央帯前後で切り分けることにより、サイクルを短縮しつつ歩行者を安全に二段階で横断させることに成功しているようである。但し、中央帯が多いため、歩行者の信号無視も多く見受けられる点は注意が必要である。

その他、信号制御方法に関する特徴としては、歩行者用信号が青現示の際は、交差する自動車用信号は赤になっており、歩行者の横断と自動車が交錯することは殆どない点が特筆に値する。クランク型の横断歩道の機能の一つとして、右左折してきた自動車を横断歩道の手前で赤信号によって滞留させるためのポケットとしての機能も存在するようである。

**3. 1. 2 フランクフルトにおける交差点調査**

フランクフルトにおいて調査を行った区域は、図 3-4 に示したとおり中央駅周辺を含む Westend 地区を中心とする 3km 四方程度の区域である。ここでは 33 地点の写真撮影を行い、これらの交差点を図 3-5 に示す 4 つのカテゴリに類型化した。

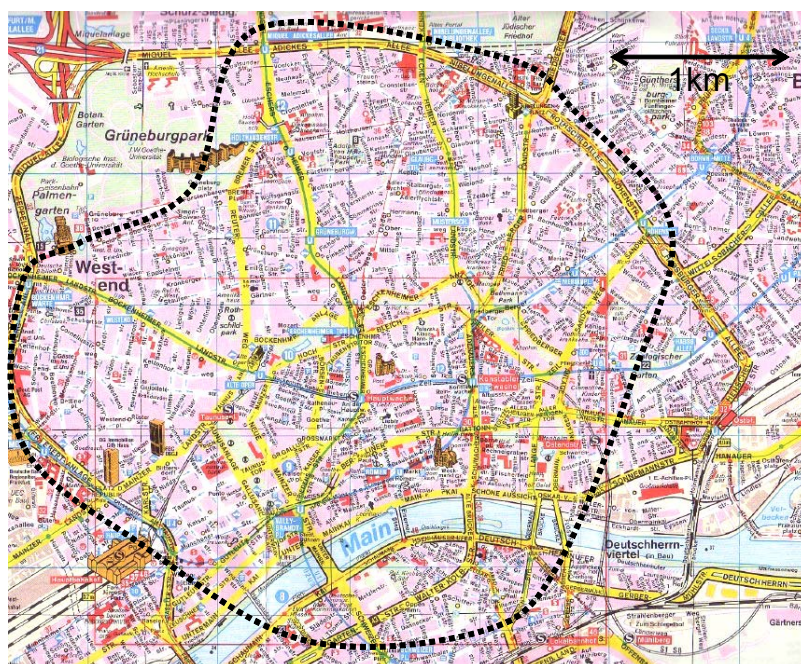


図3-4 フランクフルトにおける調査対象地域



A : クランク型二段階横断方式



B : ストレート型多段階横断方式



C : ストレート型一段階横断方式



D : 歩行者優先横断方式

図3-5 フランクフルトの横断歩道構造の類型化

**A：クランク型二段階横断方式**

ロンドンにおいて数多く見受けられた形式と同様に、横断歩道が中央帯を境に左右にずれ、現示も切り分けている方式である。数はそれほど多くなく、柵の整備が徹底していない場合もあり、歩行者は特にこの横断歩道を好んでは利用せずに、隣接する横断歩道や横断歩道のない箇所を横断しようとする傾向が見られた。

**B：ストレート型多段階横断方式**

フランクフルトの広幅員道路に多くみられるのが、横断歩道中に1つ以上の中央帯が設けられている方式である。現示は切り分けられていることが多く、中央帯ごとに押しボタン式の制御を行う場合も多く見受けられる。

**C：ストレート型一段階横断方式**

特に中央帯を設置せずに、歩行者を一度に横断させる方式であり、わが国の交差点に最も近いものである。

**D：歩行者優先横断方式**

ロンドンの **Zebra Crossing** に相当する方式である。ここでも、歩行者を優先する横断方式のときのみ横断歩道が縞で表されており、歩行者がいる間は自動車は確実に停止しなければならないルールになっている。

これらの交差点について、数箇所ずつ選定を行ってサイクル長を計測したところ、信号制御を行っている交差点の殆どが 90 秒のサイクル長で運用されていることがわかった。また、ロンドンと同様に、自動車と歩行者が交錯しないように現示設計がなされていることもわかった。なお、信号無視はロンドンほど顕著には見られなかった。

**3. 1. 3 パリにおける交差点調査**

最後に、パリにおける調査区域を図 3-6 に示す。調査を行ったのは市内の第 1 区から第 11 区及びその周辺であり、全 36 地点で写真撮影を行い、図 3-7 に示す 4 つのカテゴリに類型化した。

**A：クランク型二段階横断方式**

ロンドンやフランクフルトにおいて見られたものと同様、横断歩道が中央帯によってずれ、現示もずれて設計される方式である。パリでもこの方式の横断歩道は数多く見受けられた。

**B：ストレート型二段階横断方式**

ロンドンのものと同様の方式であり、信号現示は切り分けずに同時に変化し、中央帯部分にも歩行者用信号灯器が設置されているものである。

**C：ストレート型一段階横断方式**

フランクフルトのものと同様、中央帯を設けず歩行者を一度に横断させる方式である。

**D：無信号二段階横断方式**

中央帯が設置されており、信号灯器はない方式である。歩行者優先だが、路面表示が他の方式と同様であり、車両用の信号灯器も存在しないため、車は必ずしも停まってくれない。

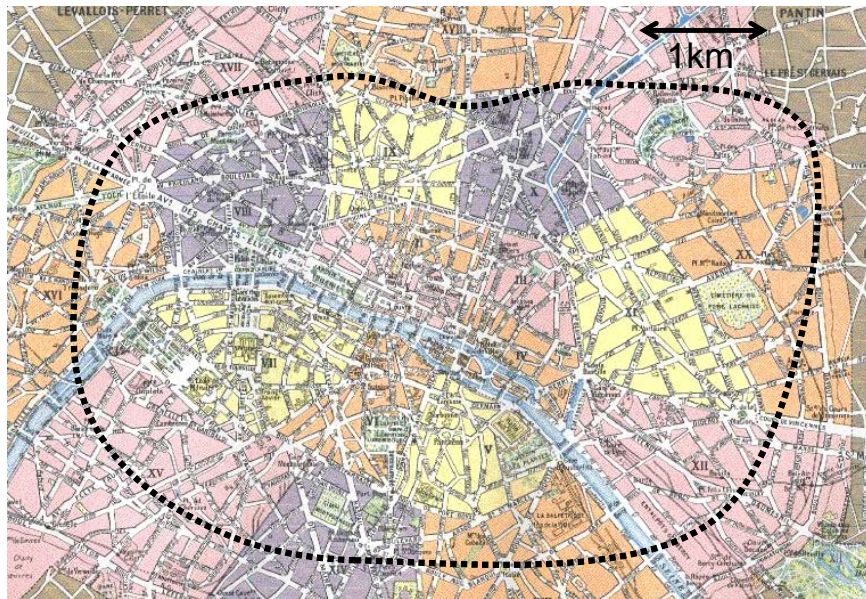


図3-6 パリにおける調査対象地域



A : クランク型二段階横断方式



B : ストレート型二段階横断方式



C : ストレート型一段階横断方式



D : 無信号二段階横断方式

図3-7 パリの横断歩道構造の類型化

これらの交差点から数箇所を選定し、サイクル長を計測したところ、いずれの方式も 65 秒～80 秒程度で運用されていることがわかった。パリでは自動車と歩行者が錯綜しないような現示設計が必ずしもなされているわけではなく、交差点の安全性から見ると他の 2 都市には劣ると考えざるを得ない。

### 3. 1. 4 三都市間の横断歩道設計方式の比較

以上 3 都市において調査を行った結果をまとめると、表 3-1 のようになる。安全性などの評価は主観的なものであり、事故発生件数などのデータから評価したものではないが、実際の交差点における歩行者や自動車の挙動を観察した上での評価であるので、ある程度各都市の特徴を説明付けるものであると確信している。

表 3-1 欧州 3 都市の横断歩道設計方式の比較

	頻度	自動車 用信号	歩行者 用信号	警告 現示	現示 分け	平均 サイクル	歩車 分離	中央帯設置		中央帯 利用	停車 義務	安全性
								クランク	ストリート			
ロンドン												
①クランク型二段階	◎	あり	あり	あり	あり	80s	◎	○		◎	-	◎
②ストリート型二段階	○	あり	あり	あり	なし	77s	○		○	○	-	○
③無信号二段階	○	あり	なし	-	-	-	-		○	○	なし	△
④歩行者優先	◎	なし	なし	-	-	-	-		○	△	あり	◎
フランクフルト												
①クランク型二段階	△	あり	あり	なし	あり	90s	◎	○		△	-	○
②ストリート型多段階	◎	あり	あり	なし	あり	90s	○		○	○	-	○
③ストリート型一段階	○	あり	あり	なし	なし	90s	△			-	-	△
④歩行者優先	○	なし	なし	-	-	-	-			-	あり	○
パリ												
①クランク型二段階	△	あり	あり	なし	あり	78s	◎	○		○	-	○
②ストリート型二段階	○	あり	あり	なし	あり	73s	○		○	△	-	○
③単純一段渡し	◎	あり	あり	なし	-	80s	△			-	-	△
④無信号二段階	○	なし	なし	-	-	-	-		○	○	なし	×

表より、欧州においては中央帯を活用し、中央帯での滞留も考慮に入れた二段階横断方式が極めて一般的であることがわかる。また、その結果として全ての都市において、平均 100 秒以下のサイクル長を実現していることもわかる。従って、わが国においてもこの方式で設計された交差点を増やすことによって、サイクル長の短縮は可能になるものと考えられる。二段階横断方式の特徴に関しては、3.3 節においてより詳しく述べることにする。なお、本章におけるここまでの研究成果は、下村・鳩山・家田（2003）において既に報告しているものである。

### 3. 2 海外の交差点に見られるその他の工夫

二段階横断方式に加えて、触れておくべき海外の交差点に見られる工夫としては、残り時間表示装置が挙げられる。図 3-8 は台北における、カウントダウン機能が付いた動く LED 式の歩行者用信号灯器である。これに類する歩行者用信号灯器は、台湾や中国本土だけでなく、ベトナムなどの東南アジア諸国、トルコやスペインなどの欧州諸都市においても見られるようになってき

た。わが国においても図3-9に示すような残り時間表示装置は設置され始めて久しいが、殆どが数秒間に一度表示が変化する程度の情報の解像度しか提供することができておらず、数秒間装置を見続けていないとその情報のもつ意味を解釈することができない。特に青時間の情報に関しては提示しないケースも多い。歩行者がより安心かつ快適に横断或いは信号待ちができるためには、より細かい解像度の情報を提供し、歩行者が瞬時にその情報の意味を解釈できるように工夫をするべきであろう。或いは、解像度の粗い情報を提供するものでも、フェイルセーフなシステムとなっていれば、十分に導入の価値はあるものと考えられる。なお、カウントダウン式信号は、海外においては歩行者用信号灯器だけでなく、自動車用信号灯器にも設置され始めている。



図3-8 台北のカウントダウン式歩行者用信号灯器



図3-9 わが国の残り時間表示装置

### 3. 3 二段階横断方式の特徴

ここで、中央帯を活用した二段階横断方式の特徴に関してまとめておくことにする。わが国の交差点設計上、中央帯はこれまで緊急避難的利用のみを対象として作られてきた。実際、道路交通法施行令においても、「人の形の記号を有する青色の灯火の点滅時は、歩行者は道路の横断を始めてはならず、また、道路を横断している歩行者は、速やかにその横断を終わるか、又は横断をやめて引き返さなければならないこと。」とされているだけであるため、中央帯を活用するという思想は生じにくかった。しかしながら、中央帯を積極的に活用する二段階横断方式は、サイクル長の短縮を可能にするだけでなく、次のような性質を持つ。

- ① 現示を切り分けることができる

中央帯にある程度の幅員を持たせることができれば、中央帯の前後で歩行者の青現示を切り分けることができ、より効率的横断を可能とすることができる。わが国の場合、例えば自動車に右折矢が出ているときには、車両が全く通行しない区間には青現示を与えることができる（図3-10 a）。

② 歩行者は横断時に一方向のみ注意すればよい

わが国の場合、歩行者は、中央帯に至るまでは右方向を、中央帯から先は左方向のみを注視していれば、自動車との接触は避けられるため、不注意の事故が減る。（図3-10b）。

（Bacquie, Egan and Ing, 2001）

③ 一度に渡らねばならない距離が短い

高齢者など歩行速度の遅い歩行者が一度に歩かなければならない距離が短くて済むため、横断に負担がかからない。

④ 信号無視行動を誘発する可能性

副作用としては、距離の短い横断歩道になると、信号無視を誘発する可能性もあるため、速度の速い歩行者の横断時間程度は確保する、自動車の無駄青時間を減らす、快適な中央帯にするなど、信号無視の起こらなくする工夫も必要となる。

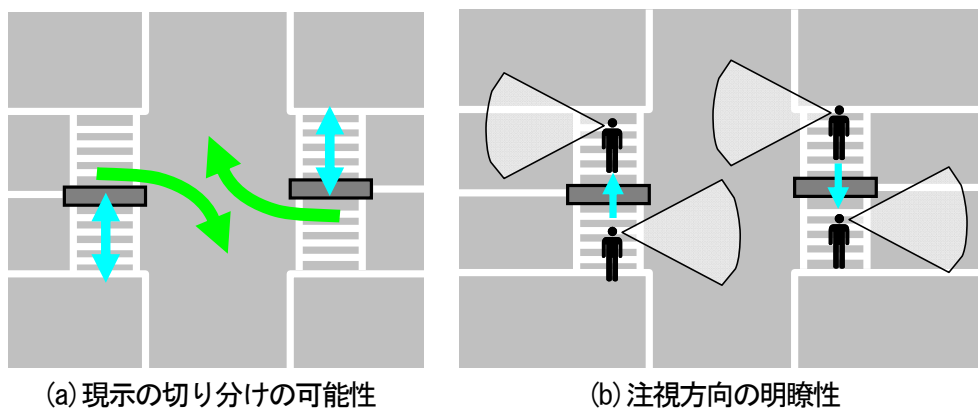


図3-10 二段階横断方式の特徴

以上を考え合わせて、本研究において考える二段階横断方式とは、下記に定義する横断方式のことを言うものとする。

- ① 速度が速い歩行者は通常通り少なくとも1回待てば横断完了できる。
- ② 速度が遅い歩行者は中央帯を活用して最大2回待てば横断完了できる。
- ③ 柵を設けるなど、安全に中央帯で滞留することができる。
- ④ 可能な限り歩行者信号現示を切り分け、効率的横断を可能にする。

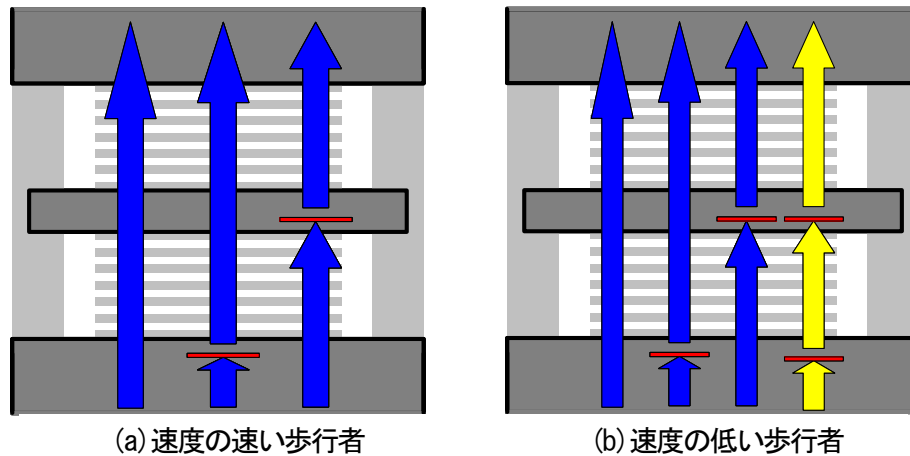


図3-11 二段階横断方式下での歩行様式

図3-11に、上記の①、②に示した2種類の横断様式を模式的に示す。二段階横断方式を導入しても、歩行者現示時間が短すぎると、殆どの歩行者が2回待たねばならず、速度の速い歩行者は耐えかねて信号無視をしたり、苛立ちを募らせたりすることになる。そのため、ある程度の歩行者現示時間を確保した上でサイクル長を短縮することが望まれることになる。あらゆる歩行者が渡りきれような歩行者現示時間を確保するのではないが、速度の速い歩行者は1回で渡れ、速度の遅い歩行者はゆっくりと2回で渡れるように設計することが望ましいと考えるのである。なお、越・安井・山本・富井（1998）でも紹介されているように、現在わが国において二段階横断方式が導入されている交差点は存在する（東京都中野区大和陸橋下、埼玉県さいたま市円阿弥交差点など）が、中央に橋脚が存在するような非常に広幅員な道路が多く、サイクル長も長く設定されているため、その性質を十分に発揮しているとは言いがたい。本研究では、どの程度の幅員の道路を持つ交差点からこのような方式が有効かについても明らかにしていく。

## 第4章

# 歩行者横断行動原理の提案

本章では、既往に十分な研究蓄積がない歩行者の横断挙動について、実際の交差点における観測実験をもとに考察を行うことで、歩行者はどのような原理に基づいて横断歩道を横断しているのかを提案し、更に実験において検証、調査しておくべき項目をまとめることにした。

#### 4. 1 観察実験の実施

まず、実際の交差点において歩行者の横断行動を観察し、歩行者の横断行動原理の手がかりとすることにした。なお本研究では、歩行者は横断歩道に至る手前から歩行速度を調節することができるものと考え、横断歩道の手前領域にも着眼することにした。実験は、2004年7月29日(木) 10:00~17:00(途中雨天により一時中止)、東京都港区青山一丁目交差点の南側横断歩道(図4-1)にて行い、被験者は東京大学の学生を基本とする35名(うち女性9名)とした。また、歩行者の観測方法としては、ホンダビル9階ベランダよりビデオ撮影を行い、後で被験者の位置をトレースしてデータ化することにした。なお、実験に用いた横断歩道は横断距離が約23m、歩行者青時間は30~40秒と変化し、点滅時間は10秒、サイクル長は140~160秒程度であった。



図4-1 観察実験に用いた青山一丁目交差点(左)及び実験の風景(右)

##### 4. 1. 1 観察実験の手順

観察実験の手順は以下の通りである。

###### 【事前準備段階】

- ① デジタルビデオカメラをビルのベランダに固定する。
- ② 実験者は横断歩道から手前に向かって5メートルずつ計測し、そのポイントをビデオに収める。これらのポイントが実験後のデータ化作業時の計測ポイントとなる。

###### 【実験段階】

- ③ 被験者を交差点の20m、35m、50m、65m手前の位置に待機させる。
- ④ 前方の歩行者用信号が青に変化すると同時に実験者は被験者に歩行開始の合図をする。
- ⑤ 被験者はなるべく普段通りの歩き方で横断歩道を横断する。
- ⑥ 以上の行程を一人4回ずつ繰り返す。

#### 4. 1. 2 観察実験の結果

観察実験の結果を、実験開始地点ごとに色分けして示したものが図4-2である。

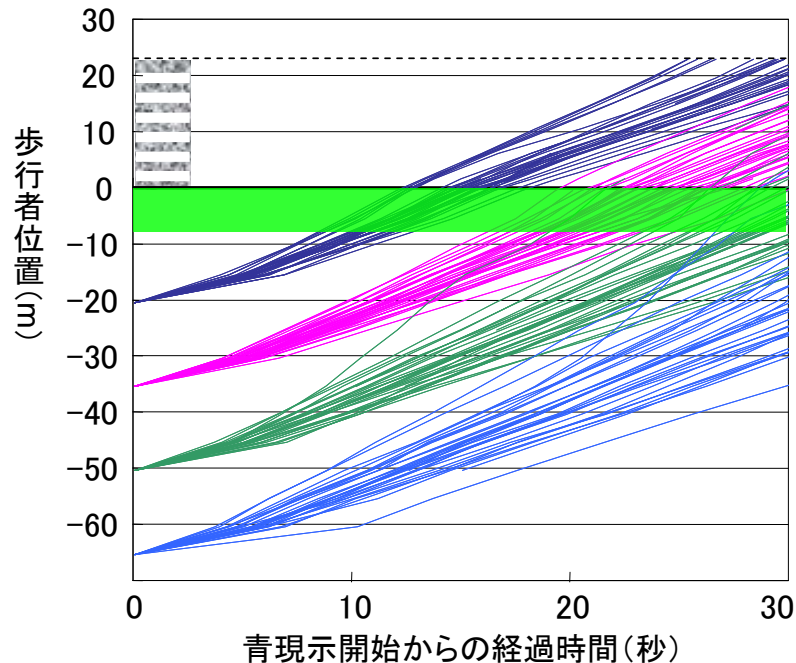


図4-2 歩行開始地点ごとにみた被験者の時空間ダイアグラム

これにより、歩行者は横断歩道の手前から速度を調節している様子が見て取れる。即ち、歩行者は横断歩道手前から、残存時間と距離を推測しながら、ある程度の速度の範囲内で歩行速度を調節しながら歩いているものと考えることができるだろう。また、歩行者によって歩行速度は多様であるが、これにはそもそも歩行者が好む速度が異なる場合と、推測している残存時間が異なっている場合とが存在しているものと考えられる。

#### 4. 2 歩行者横断行動原理の提案

以上の観察実験の結果と、歩行者の横断時の心理に関する先行研究（家田・鳩山、2002）の知見とを合わせ、本研究における歩行者の横断行動原理を次のように考える。

- ① 歩行者には、それぞれ自分が快適に歩くことのできる速度（快適歩行速度 $v_c$ ）がある。
- ② 歩行者には、それぞれ自分が歩いてもよいと思う最大速度（限界歩行速度 $v_{max}$ ）がある。
- ③ 歩行者は、渡らなければならない距離と残っている歩行者現示時間（残存時間）を推測しながら速度を $v_c$ と $v_{max}$ との間で調節する。速度が $v_c$ 以上の場合是不快（慌しさ）を感じる。
- ④ 赤信号などで横断を妨げられた場合、歩行者は不快（苛立ち）を感じる。
- ⑤ やむを得ず中央帯で滞留した場合、歩行者は不快（不安）を感じる。

#### 4. 2. 1 横断行動原理の解釈1 ～現示の切り分けがない場合～

本研究では中央帯を活用した二段階横断方式の導入を目指している。この方式を導入した際に歩行者はどのような行動を取るものと考えられるのか、とりわけ現示の切り分けを行ったときにどのような行動が表出されるのかを、時空間ダイアグラムによって示すことにする。まず、現示の切り分けが行われない横断歩道における歩行者の挙動を図4-3に示す。いずれの場合も、歩行者は十分に慣れた横断歩道、或いは十分に残存時間に関する情報が与えられている横断歩道の手前から行動を開始するものとする。

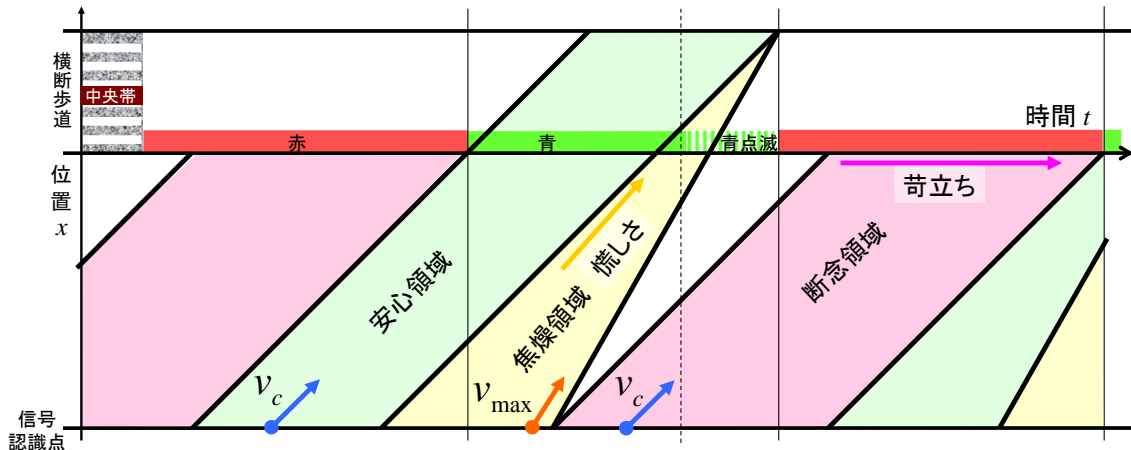


図4-3 歩行者横断行動原理を示した時空間ダイアグラム

その交差点の現示に関する情報を十分に歩行者が持っていれば、歩行者は信号を認識した時点で「このまま快適速度で渡りきれるのか」「少し走れば横断可能か」「走っても間に合わないか」を判断することができる。従って、時空間ダイアグラム上には上記の3種類の領域が形成されることになる。ここではその3種類を「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」と呼ぶことにする。焦燥領域では歩行者は走ることににより「慌しさ」の不快を感じ、断念領域では信号待ちにより「苛立ち」の不快を感じることになる。

また、歩行者が完全な情報を持っていない場合、歩行者は残存時間を周辺の状況から推定し、その推定残存時間を基に上記の3領域を形成し、横断するものとする。このような曖昧な推定残存時間は、現示の変化（赤→青、青→青点滅）を経験することでより正確な情報へと変化することになる。

なお、上記のダイアグラムでは中央帯の利用はなされていないが、信号を横断歩道直前で認識し、断念領域にいたことが分かった場合（図4-4）や、高齢者など歩行速度が遅く限界歩行速度も余り変化しない歩行者が横断する場合（図4-5）などに中央帯は利用されることになる。い

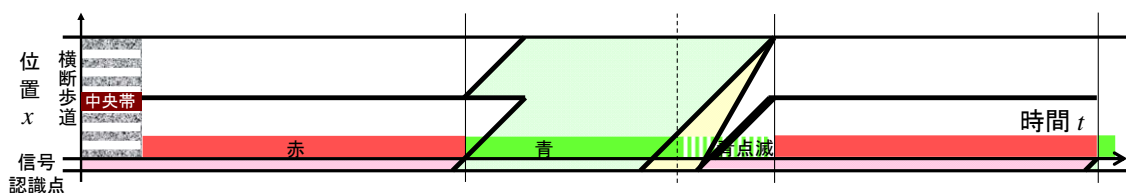


図4-4 横断歩道直前で信号を認識した歩行者の時空間ダイアグラム

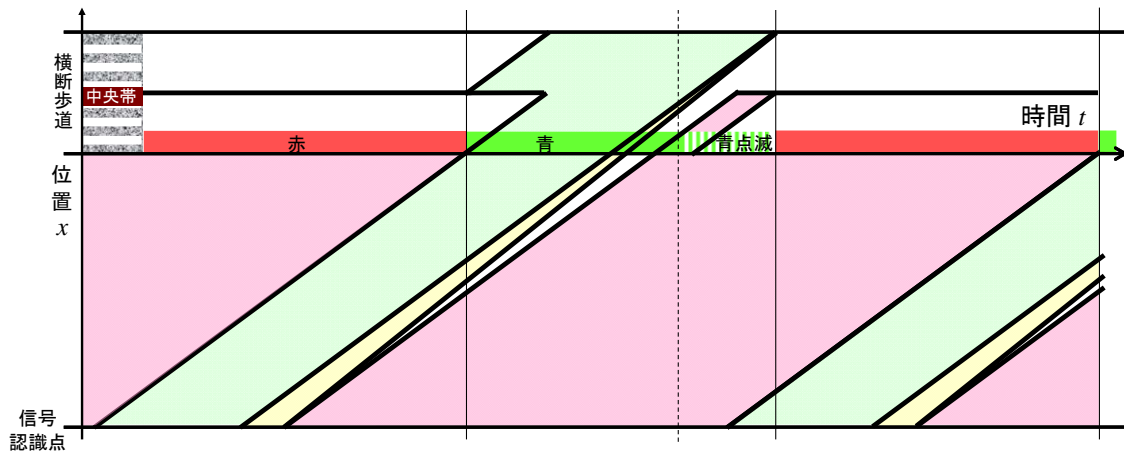


図4-5 歩行速度が遅い歩行者の時空間ダイアグラム

いずれの場合においても、中央帯で滞留することの不快感から、歩行者が敢えて走ってまで中央帯に至るとは考えにくい。ため、快適歩行速度で歩いて中央帯に至れる場合にのみ歩行者は中央帯に行くものとする。

#### 4. 2. 2 横断行動原理の解釈2 ～現示の切り分けを行った場合～

次に、現示の切り分けを行った場合について考える。現示の切り分けには、自動車における2種類の右折専用現示に応じて、2種類の手法が考えられる。即ち、横断歩道と平行する車道が右折専用現示のときに歩行者現示を一部残す方法（図4-6 a）と、横断歩道と交差する車道が右折専用現示のときに歩行者現示を先出しする方法（図4-6 b）である。

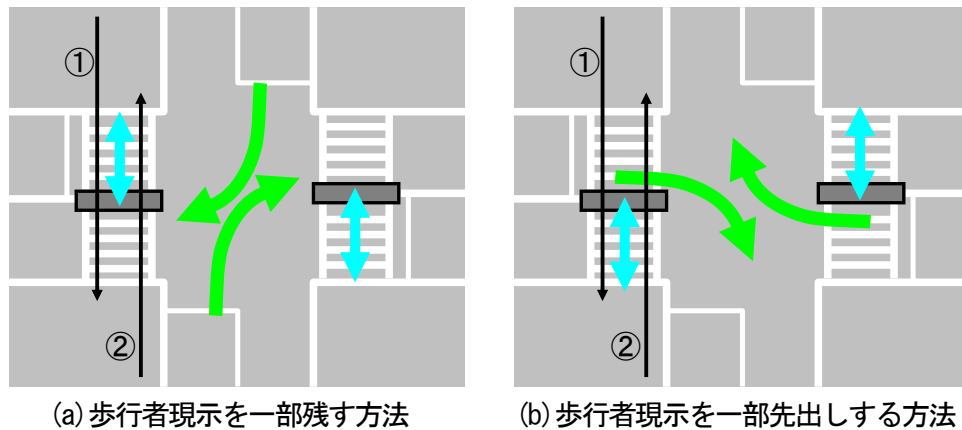


図4-6 2種類の歩行者現示の切り分け手法

このそれぞれに対する歩行者の横断挙動はその横断する方向（図の①、②）によっても異なるため、これらを別々に考える必要がある。まず、歩行者現示を一部残す方法の切り分けを行った際の横断挙動を図4-7に示す。この場合、方向①の歩行者は従来どおりの挙動を取り、歩いて中央帯に至れるときのみ、中央帯に至る。そして、方向②の歩行者は、手前の信号現示から中央帯まで走って行けるかどうかを判断し、その後は奥の信号現示に基づき行動するものとする。

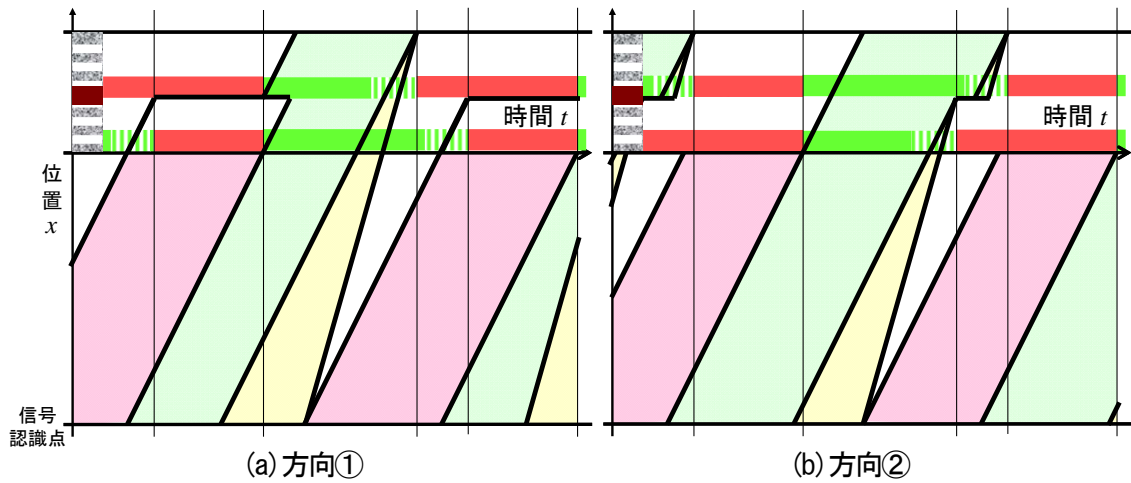


図4-7 歩行者現示を一部残した場合の歩行者挙動

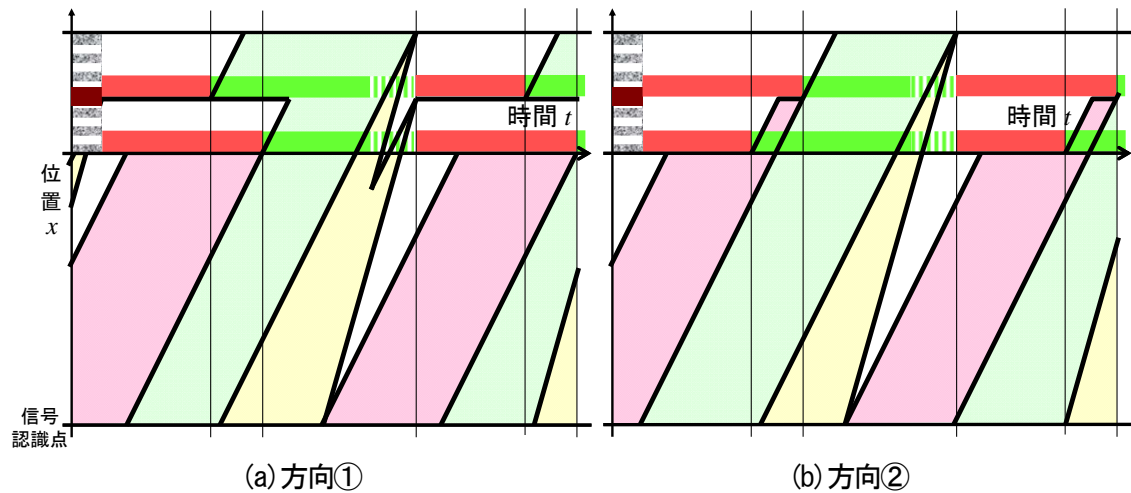


図4-8 歩行者現示を一部先出しした場合の歩行者挙動

次に、図4-8に歩行者現示を一部先出しする方法の切り分けを行った際の横断挙動を示した。方向①の歩行者は、早く横断を完了するため、走って中央帯に至れる場合には中央帯まで走り、次の先出しの歩行者現示を活用するものと考えられる。また、方向②の歩行者は、先出しされる歩行者現示を利用して少しでも前に進もうとするであろう。

更に、歩行者現示を積極的に切り分ける例として、歩行者現示を一部残す方法と先出しする方法を両方同時に実施した場合を図4-9に示す。この場合も、方向①の歩行者は走っても中央帯に至り、次の先出し現示を活用するものと考え、方向②の歩行者は中央帯まで走っていけるかどうかを判断し、できるだけ前に進もうとするものと考えられる。

以上が歩行者現示を切り分けた際の歩行者横断行動原理の解釈である。これらの歩行者現示の切り分け方法のうち、歩行者がもっとも効率的に横断を行えるのは図4-9のケースであることは自明であるため、本研究では歩行者現示を切り分けない方法だけでなく、前述の歩行者現示を積極的に切り分ける方法についても考慮することとする。

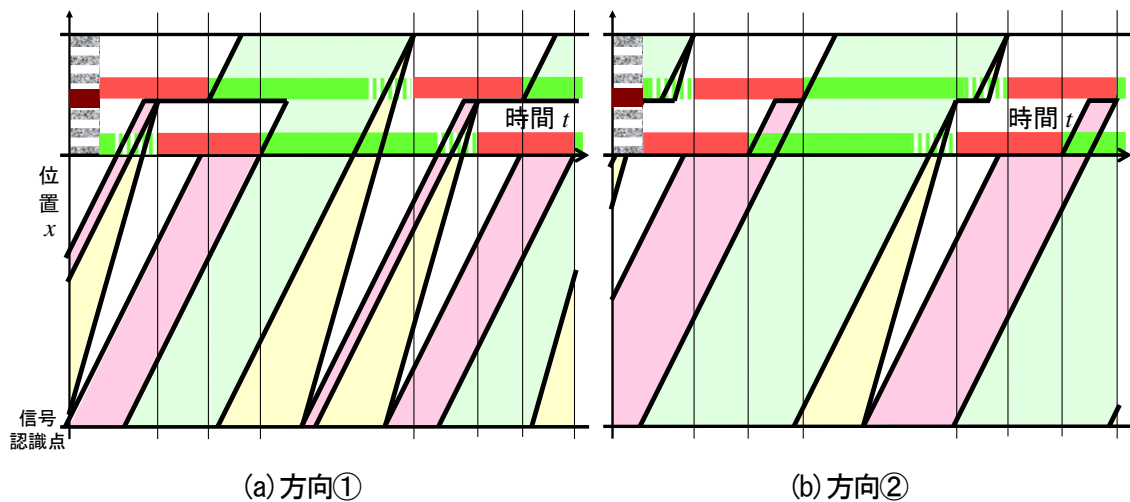


図4-9 歩行者現示を積極的に切り分けた場合の歩行者挙動

#### 4. 3 検証項目の設定

以上が、本研究で提案する歩行者横断行動原理及びその解釈である。但し、この原理は観察実験及び既往の研究を考え合わせた上での仮説である。従って、これらの仮説を検証するためには、いくつか確認しておく必要のある項目がある。なお、前述の「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」を直接測ることは、快適歩行速度や限界歩行速度の多様性から困難である。そのため、間接的指標によってこれらの領域の存在を裏付けることを考えることにする。本研究で検証する項目は以下のとおりである。これらの項目を、心理的、生理的、行動的指標によって計測、検討することによって、総合的指標に基づく交差点シミュレーションモデルの開発へと展開することができるものと考えている。

- ① 歩行者は信号待ちをしている際にどの程度苛立つのか、或いは苛立たないのか。
- ② 歩行者は中央帯で滞留しているときにはどの程度不安を感じるのか。
- ③ 情報が与えられたときに歩行者の行動はどう変わるか。交差点の手前から「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」の3つの領域は存在すると言ってよいのか。
- ④ 歩行者が焦って走っている際にはどの程度慌ただしさを感じるのか。

以上の項目を検討するためには、均一な周辺環境の中で様々な交差点の様式を設定して、被験者を様々な位置に置いて実験を試みる必要がある。しかしながら、現実空間においてこのような実験環境を創出するのは非常に困難であり、高コストなものとならざるを得ない。また、中央帯の滞留など、危険を伴う可能性がある実験は、現実空間において行うべきではない。そこで、本研究ではヴァーチャルリアリティの技術を活用し、独自に実験用の歩行シミュレータを開発することで、周辺環境が均一で様々な交差点様式や横断方法を検討することにした。これについては

---

次章で詳しく述べることにする。社会基盤計画におけるヴァーチャルリアリティ技術の適用に関しては、既にドライビングシミュレータを用いた研究として、岩永・本多・田中・白石・桑原(2005)の動的レーンマーキングの研究や清水・安藤(2005)の合流部の運転挙動研究などが見られており、特に自動車の運転挙動を対象として数多く行われてきたところである。しかしながら、歩行者の挙動を対象としたシミュレータは数が少ないため、独自な開発が必要となる。ヴァーチャルリアリティを利用した場合、その現実との差異が問題となる。本研究においても、被験者の現実感を確認するプロセスを取るよう実験の計画を行うことにした。

なお、ヴァーチャルリアリティは、特に現実には存在しないような環境を提示した際に被験者がどのような反応を示すのかを調べ、実現すべき方向性やその際に注意しておくべき課題などのヒントとするために利用すべきである。従って、特に社会基盤計画など実験だけのために実物を作成するにはリスクとコストが高い分野には適切であると考えられる。

## 第5章

### 歩行シミュレータ PedECS の開発

本章では、前章において得られた種々の歩行者の横断行動原理仮説を検証するために実験を行う環境をどのように整備したかについて述べる。まず、実験空間に求められる要件をまとめた上で、これまでに開発された様々なヴァーチャルシミュレータを紹介し、次に本研究で独自に開発したヴァーチャル歩行シミュレータ PedECS に関して説明する。

### 5. 1 実験空間に求められる要件

前章において得られた横断行動原理仮説を検証するためには、以下に示す条件を満たす実験空間を整備することが望まれる。

- ① 赤時間、青時間などの信号現示の制御方式や、横断歩道の長さや中央帯の有無など、交差点の設計変数のうちで本研究が対象とする制御変数を自由に設定できること。
- ② 交差点の周辺環境や信号の形状、自動車の交通量など、本研究では対象としない交差点の設計変数を一定に保持することができること。
- ③ 実験空間内をできるだけ自由に被験者が歩くことができること。特に横断歩道空間のシミュレーションであるから、少なくとも一方向には長距離を歩くことができること。
- ④ 実験空間がある程度現実感を有していること。

上記の条件①、条件②を現実の交差点において満たすことは困難であるため、本研究では仮想現実 (Virtual Reality 以下 VR) 技術を用いて実験空間を創出することとした。また、条件③、④を満たす VR シミュレータはこれまでに例がないため、次節で示す現状のシミュレータを参考にしつつ、独自に新たな歩行シミュレータを開発することとした。

### 5. 2 既往のVRシミュレーション技術

#### 5. 2. 1 没入型VRシミュレータ

まず、東京大学 IML (Intelligent Modeling Laboratory) 内に設置されている没入型 VR シミュレータ CABIN (Computer Aided BIN) を紹介する (図 5-1)。CABIN (Hirose, Ogi, Ishiwata and Yamada, 1999) には、一辺約 3m のスクリーンが正面・両側面・天井面・床面の 5 面に張られており、リアプロジェクト方式で立体視用の映像が投影される。被験者がこの立方体の中に没入すると、その全視界を覆う立体空間が体験できることになる。なお、被験者は没入の際に液晶シャッター付



図 5-1 CABIN の外観 (IML ホームページより)

きの眼鏡を掛け、そこにプロジェクタが右眼視野用の画像と左眼視野用の画像とを交互に出力する。これを眼鏡のシャッターと同期させることにより、立体的な像を被験者が体感することができるシステムである。また、被験者に正確な立体視をさせるためには、被験者の目の位置を計測しなければならないため、眼鏡には磁気センサーが取り付けられている。このセンサーが CABIN の手前に設置されているトランスミッタから出される磁場を感知することで、被験者の目の位置が正確に把握され、画像に反映されるのである。このように磁気センサーを用いた人のトラッキング技術は、本研究でも大いに参考とすべきところである。但し、このシステムは現実感に関しては申し分ないものの、実験空間内の移動が一边 3m の正方形程度に留まるため、本研究のシミュレータとして使用するには適当とは言えない。なお、米国イリノイ大学 NCSA (National Center for Supercomputing Applications) の CAVE (Cruz-Neira, Sandin and DeFanti., 1993) や、通信・放送機構さふ MVL リサーチセンターの COSMOS も同様の没入型シミュレータであり、同様の制約を持つものである。

### 5. 2. 2 頭部搭載型ディスプレイを用いたVRシミュレータ

Simpson ら (2003) は、頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display 以下 HMD) を用いて交差点横断行動を調べるためのシステムを開発している。これも CABIN と同様に磁気センサーによる被験者の目の位置のトラッキングを行いそれに応じた画像を投影するのであるが、画像の投影先がスクリーンではなく HMD である点が CABIN とは大きく異なる点である。HMD に画像を投影する方式では、被験者の位置を抽出してから対応する画像をコンピュータが計算してディスプレイに表示させたため、没入型のシミュレータと比べて画像に遅れが生じる点が問題とされるが、複雑な画像を使用したり、余りにも早い動きを行ったりしない限りは被験者が違和感を感じるような遅れは生じないと考えてこのシステムを適用していると考えられる。また、このシステムの最大の利点は、大型の投影設備を必要としない点であるということができる。しかしながら、使用しているトランスミッタが磁場を 3m 程度までしか飛ばせないという技術的な問題から、大規模な交差点のシミュレーションには不向きであり、本研究における実験に使用するには更なる工夫を要することになる。

### 5. 2. 3 トレッドミルを用いた歩行シミュレータ

本研究に先行する研究として家田・鳩山 (2002) は、大型の設備を必要とせず、かつ大規模な交差点の横断行動をシミュレーションすることができるように、自走式トレッドミル (室内ウォーカー)<sup>1</sup>を用いたシミュレータを試験的に開発している。このシミュレータは図 5-2 に示すように、自走式トレッドミルの前にリアプロジェクト用半透明スクリーン (60 インチ) を置き、後方から画像を投影するというシミュレータである。トレッドミルからは、ベルトの回転とともに

<sup>1</sup> トレッドミルには、モーターでベルトが回転するモーター式と、歩行者が自分の意のままに歩行速度をコントロールできる自走式のものがあるが、ここでは歩行速度を被験者自身が変化できるように、自走式のものを用いられている。

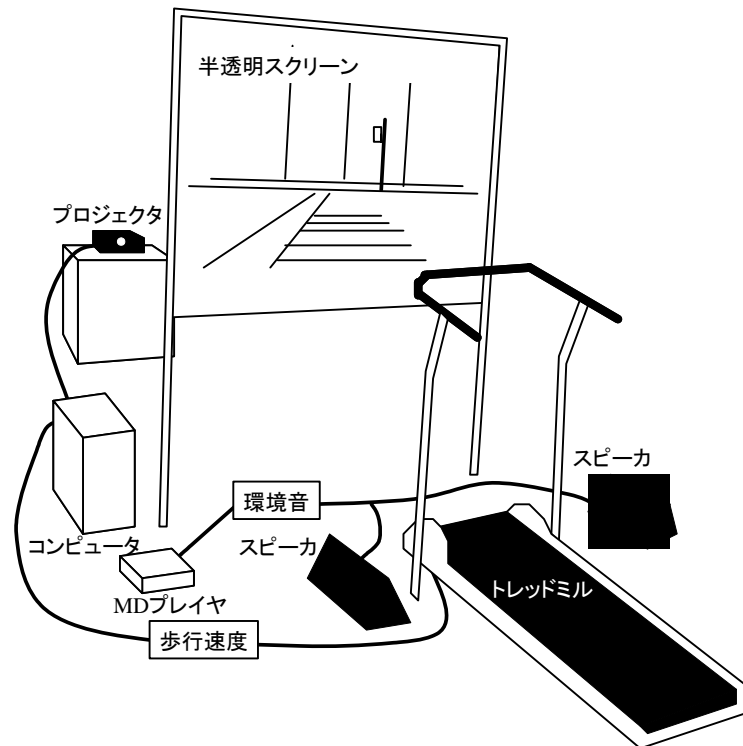


図5-2 トレッドミル式歩行シミュレータの概要



図5-3 トレッドミル式歩行シミュレータによる実験の様子

に電気パルスが出るようになっており、それをコンピュータに搭載したパルスカウンタが検知し、距離に換算して画像に反映させるというシステムになっている。また、トレッドミルの左右にスピーカを配置し、そこから交差点の環境音を流し、臨場感の向上を狙うことにしている。図5-3にその実験の様子を示した。このシミュレータの問題点は、やはり前方の画像のみしか提供されない点と、トレッドミル上の歩行には抵抗感があり、実際の交差点空間における歩行時の感覚とはやはり乖離があるという点である。特に、高齢者はなかなか実験装置に慣れることができず、

実験の実施が困難であったケースも散見されていた。前者はCABINのようにスクリーンを左右にも用意すれば解決されるが、後者を解決することはトレッドミルを使用している以上は困難であると言わざるを得ない。

### 5.3 追従型歩行シミュレータ PedECS

以上のように、既存のシミュレータでは大規模交差点の歩行者行動シミュレーションにはいずれも適さないことがわかった。そこで、本研究では磁気センサーによる位置のトラッキング技術と、トレッドミル方式におけるパルスカウンタの技術を組み合わせ、歩行者が実験空間内を実際に歩くことのできる歩行シミュレータを独自に開発し、「PedECS: Pedestrian Experimental Chasing System」と名づけた。図5-4にその機構の概要を図5-5にそのシミュレーション風景の模式図を示した。磁気センサーが感知する磁場を生成するトランスミッタは、開発時点はやはり既往の研究同様半径3m以内にしか精度よく磁場を生成できないことがわかったため、本研究ではトランスミッタごとワゴンに乗せて移動させ、ワゴンの移動距離をパルスカウンタで検知しようと考えたのが特筆すべき工夫である。

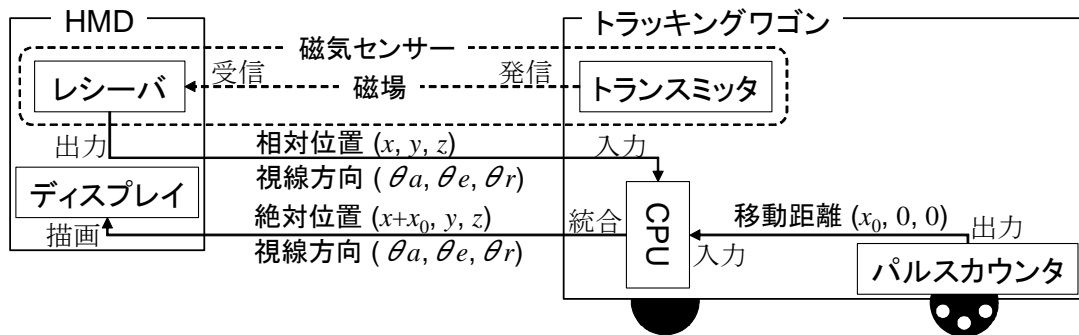


図5-4 PedECSの機構の概要

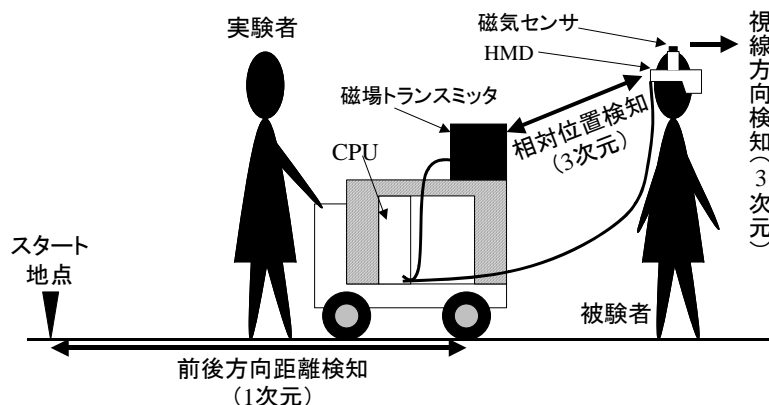


図5-5 歩行シミュレーションの模式図

PedECS は、HMD を着用した歩行者の後ろを、2 種類のセンサーを搭載したトラッキングワゴンが追跡するという追従式の歩行シミュレータである。その詳細について以下で説明する。

トラッキングワゴンは図 5-6 に示す二層型台車であり、被験者のモーショントラッキングを行うために 2 種類の異なったセンサーを搭載している。その一方が、米国 Ascension Technology 社製品の Flock Of Bird (以下、FOB) という磁気モーショントラッキングデバイスである (図 5-7)。FOB は、まず 30cm 立方の拡張トランスミッタが半径約 3m の範囲内に磁場を発生し、それをセンサーが感知することで、そのレシーバの X-Y-Z 位置座標値及び方位角・仰角・回転角を 38,400bps の速度でリアルタイムにコンピュータに返すことのできる装置となっている。もう一つのセンサーが、台車の走行距離を抽出するパルスカウンタである。具体的には、台車の車輪部に磁石を取り付けるとともに、磁石が接近する度にスイッチが ON となる回路素子を車輪部に取り付け、それを電池 (9V) と接続し、台車が移動し磁石がスイッチを ON にする度に発生される電圧パルスをパルスカウンタで読み込むというものである。このように、パルスカウンタによって台車の移動距離を計測し、磁気センサーによって台車と被験者の相対位置及び被験者の視点方向を計測することで、大規模な交差点の横断行動のシミュレーションに適したシステムを構築することに成功した。



図 5-6 トラッキングワゴン



図 5-7 FOB (Ascension Technology ホームページより)

被験者の位置及び視点方向に関する情報を VR 画像に反映させて、被験者に適切な画像を提示する装置としては、EyePhone90 (日商エレクトロニクス社製品、図 5-8) という HMD を用いた<sup>2</sup>。なお、HMD には環境音を聞くためのイヤホンも内蔵するとともに、HMD の頭頂部にトランスミッタから発せられた磁場を感知する磁気センサーが取り付けられている。実験空間に用いる画像

<sup>2</sup> EyePhone90 は、研究の進展に伴い故障したため、2004 年以降は Virtual Research Systems 社製 V8 という HMD を使用している。



図5-8 トレッドミル式歩行シミュレータの概要



図5-9 PedECSを用いた実験風景

は、基本的にはC++によって書かれているが、3ds Maxなど様々なモデリングソフトウェアで作成した画像を容易に作成・統合することのできるC++のライブラリソフトウェア「World Tool Kit」(旭エレクトロニクス社取扱)も用いている。図 5-9 にPedECSを用いたシミュレーション風景を示す。図のように、このシステムは非高齢者だけでなく、高齢者に対しても使用することのできる汎用性の高いシステムだといえる。本研究ではこのシステムを用いて実験を行うことにする。なお、このシステムの現実感に関しては、鳩山・家田(2002)において既に確認されているところである。

次章より、このシステムを用いて、「歩行者は信号待ちをしている際にどの程度苛立つのか」、「歩行者は中央帯で滞留しているときにはどの程度不安を感じるのか。」そして「情報が与えられたときに歩行者の行動はどう変わるか」及び「歩行者が焦って走っている際にはどの程度慌ただしさを感じるのか。」に関して、実験を行う。

## 第6章

### 信号待ち時間における不快感の計測

本章では、交差点において歩行者が赤信号で信号待ちをする際にどの程度不快感を感じるのか、VR 歩行シミュレータ PedECS を用いた実験によって明らかにする。まず、どのような実験環境を整備したのかについて触れた後、どのような計測指標によって不快感を測ることにしたかを述べ、実際に行った実験の詳細を説明した後、実験結果の考察を行う。最後に現実空間との差異の検証も行う。なお、この実験では、歩行者の感じる不快感が、横断する距離によっても異なるのではないかと考えられたため、これも考慮して実験条件の設定を行うことにした。

## 6. 1 実験環境の整備

まず、実験環境としてどのような交差点をサンプルとして VR 環境を整備し、更には交差点の制御変数をどのように定めたかについて述べておく。

### 6. 1. 1 サンプル交差点とその特徴

VR 空間における実験を行う場合、VR 空間と現実の空間との間で被験者の反応に差異が生じているかどうかを検証する必要がある。そのため、実際の交差点をモデルとして実験空間を作成した。本研究ではサイクル長の短縮を目的としているため、対象としてはサイクル長の長い交差点であり、かつ長い横断距離を持つものが望ましいと考え、湯島一丁目交差点を対象にモデルを作成することにした。この交差点の諸元は表 6-1 に示すとおりであり、この諸元を基本として、具体的な寸法は「改訂 路面表示の手引き（交通工学研究会、1991）」を参考としながら、様々な交差点空間を作成した。交差点の位置及び写真を図 6-1 に、作成した実験空間の画像の例を図 6-2 に示した。また、環境音については、図の★の位置において録音したものを導入した。



図 6-1 湯島一丁目交差点の地図及び風景（★から矢印方向への横断）

表 6-1 湯島一丁目交差点の諸元（2003 年 1 月 15 日 13 時頃計測結果に基づく）

横断歩道の構造		サイクルタイム	139秒
長さ	22m	青時間	21秒
幅	4m	青点滅時間	7秒
車道の車線数	6車線	赤時間	111秒



図6-2 作成した実験用VR画像の例

### 6. 1. 2 実験ケースの設計

この実験においては、実際の交差点の諸元を参考にしながら、そのサイクル長を更に約 3/4、約 1/2 に短縮したケースを設定することにした。また、赤信号を待っている際に歩行者が感じる苛立ちは、その横断距離にも依存する可能性も考えられるため、更に横断歩道距離として実際の交差点よりも長い横断距離を有するものと、短い横断距離のものも加え、合計で9ケースの交差点を作成した。なお、実際の交差点よりも短いサイクル長を組み入れる必要性から、全ての交差点に幅員 4m の中央帯を設置することにした。現状と同じサイクル長を有する交差点であれば、中央帯は設置しなくても歩行者は通行ができるように現示が設計されているはずであるが、サイクル長が短い交差点を取り扱う以上中央帯は不可欠となる。従って、周辺環境の均一性の追及の観点から全ケースに中央帯を設置することにした。また、幅員を 4m としたのは、中央帯で待つ際にあまりにも不安を感じるような中央帯設計では被験者が中央帯を利用したいと思わず、中央帯の利用状況にバイアスが生じる可能性があると考えたからである。高宮（1996）によると、歩行者は自分より前方に 1.5m 以上の余裕があると不安を感じなくなるとしており、この値に更に多少の余裕を設けてこの幅員とした。

なお、実際にサイクル長の短縮が実現されると、より短い赤時間の設定が可能となってくるため、赤時間を 30 秒とする実験ケースも別に設定し、不快感を計測することにした。この場合、赤時間以外の設計変数はサンプル交差点のものと同様のものとした。具体的な実験ケースとその制御変数の組み合わせは表 6-2 に示す通りである。表のケース 4 が、中央帯が設置されてはいるものの、実際の交差点と同程度の設計となっている。

表 6-2 用いた実験ケースと制御変数の組み合わせ

ケース	横断距離 (m)	サイクル長 (秒)	赤時間 (秒)	歩行者現示 時間(秒)	うち青点減 時間(秒)	中央帯の 有無
0	22	58	30	28	7	なし
1	25	151	120	31	8	あり
2	25	114	90	24	6	あり
3	25	77	60	17	3	あり
4	22	148	120	28	7	あり
5	22	112	90	22	5	あり
6	22	75	60	15	3	あり
7	16	142	120	22	5	あり
8	16	107	90	17	4	あり
9	16	72	60	12	2	あり

なお、ケース4以外の制御変数（青時間及び青点滅時間）の組合せの算出方法について解説を加えておくことにする。いずれも「交通信号の手引（交通工学研究会、1994）」に記載されている、一般的な信号現示の設計方法によるものである。

まず、(6.1)式により対象とする交差点の歩行者現示時間（青時間及び青点滅時間） $G_p$ が既に決められていると考える。

$$G_p = \frac{L}{V_p} + \frac{P}{F_p \times W} \quad (6.1)$$

$L$  : 横断歩道の長さ(m)

$V_p$  : 歩行者の歩行速度(m/s) (1m/s が多く用いられる)

$P$  : 1 サイクルあたりの滞留歩行者数 (人)

$F_p$  : 横断歩行者の飽和流量(人/m/s)

$W$  : 横断歩道の幅(m)

湯島一丁目交差点の横断歩道の長さ  $L$  は 22m であり、その時の歩行者現示時間  $G_p$  は 28 秒である。従って、ここで  $V_p=1\text{m/s}$  とすると(6.1)式から以下が得られる。

$$\frac{P}{F_p \times W} = 6 \quad (6.2)$$

この値を設計時の規定値と考え、横断歩道の長さ  $L$  (16m または 25m) を(6.1)式に代入すると、各幅員の歩行者現示時間が算出できる。また、サイクル長を短縮した場合は、中央帯を設置することにより、横断距離  $L$  も短縮できるものとする。具体的には、サイクル長を約 1/2 にした場合は中央帯までの距離を  $L$  とし、サイクル長が約 3/4 の場合には横断歩道の長さで中央帯までの距離の中間値を  $L$  として使用することにした。

また、青点滅時間  $W_p$  については、以下(6.3)式により算出することができる。

$$W_p = k \frac{L}{V'_p} \quad (6.3)$$

$k$  : 係数(1~0.5)

$V'_p$  : 歩行者の青点滅時歩行速度 (1.5m/s が多く用いられる)

ここに湯島一丁目交差点の青点滅時間  $W_p$  と横断歩道の長さ  $L$  を(6.3)式に代入すれば、

$$\frac{k}{V'_p} = \frac{7}{22} \quad (6.4)$$

が得られ、この値と歩行者現示時間の算出の際に用いた横断距離  $L$  から、各ケースの点滅時間が計算できることになる。以上が、それぞれのケースにおける歩行者現示及び青点滅現示の設計方法である。これに赤時間を加えたものが、そのケースのサイクル長ということになる。

## 6. 2 計測指標の設定

次に、この実験に用いることにした計測指標について解説する。この実験では横断歩道で歩行者が信号待ちをしている際の「苛立ち」の不快感に着目している。不快感などの心理に着目する場合は、一般的にはアンケートによる主観的反応や面接法による言語報告の抽出などが用いられることが多い。本研究でもこのような主観的反応も計測指標として用いるが、「苛立ち」は精神負担 (Mental Workload) と考えることもできるため、まず精神負担を反映する指標として、生理的反応に着目する。生理的指標と主観的指標の双方から同様の結果を得られることができれば、いずれかの方法を用いて「苛立ち」の指標化が可能となるものと考えられる。

### 6. 2. 1 生理的指標

精神負担を反映する生理的指標としては、これまでに人間工学や生理心理学の分野を中心に様々な試みがなされている。一般的に、精神負担を計測するうえで、計測が簡便でかつ情動変化をよく反映するのは、心電図や脈波、呼吸などの自律系の反応であるといわれており (大須賀・寺下・下野、1993)、下野・大須賀・寺下 (1998) は心拍と呼吸と血圧の変動から緊張のストレスと単調作業のストレスの計測を試み、特に単調作業に関してその影響が心拍変動に反映されることを示している。また、指先に光を照射してその透過光量から指先の脈動を算出して得られる指尖容積脈波も用いられることがあり、暗算時や温水曝露時の精神負担の計測を行ったもの (澤田・田中・山越、1998) や、視覚刺激による精神負担を計測したもの (小林・木竜・斉藤、1999) などが挙げられる。後者は、計測が容易である点と作業時に被験者が感じる違和感が小さいという面では、本研究で計測する指標として適当と思われるが、いずれの研究も数人の被験者のみを対象に計測を行っているなど、既往研究の蓄積が少なく、充分妥当性な指標であるとはいいいにくい面がある。一方、心拍変動を解析する既往研究は多く、心拍変動から得られる様々な指標を使って精神負担が説明されており、その有効性についても示されているものである。そこで、本研究でも、実験の際に被験者に違和感をできるだけ与えず計測を行えるよう配慮することにしたうえで、心拍変動を生理的指標の計測として用いることにした。なお、心拍変動の解析は、スペクトル解析によって行われることが多い (早野、1988 ; 日下部、1997 ; 早野・岡田、1997 など)。

次に、その解析方法について簡単に述べておくことにする。人の心電図を計測すると図 6-3 に示すような波形が得られる。この波形は時間の早い方から順に P 波・Q 波・R 波・S 波・T 波と呼ばれており、心臓が一回拍動すると P 波から次の T 波までの一連の電位変化が生じる。心拍変動の解析において、この内最も振幅の大きい R 波の周期を用い、これを R-R Interval (RRI) と呼び、心拍数の逆数を表す。ある時刻  $t$  で R 波が観測されると、時刻  $t$  の RRI はその直前の R 波との間隔で定義することができる。ここで、心臓の拍動は交感神経と副交感神経で拮抗的に支配されている。交感神経は主にストレスを感じたときに働き、副交感神経 (心臓迷走神経) はリラックス時に主に働くものとされている (早野、2001)。従って、心拍数の増減は交感神経と副交感神経の両者の影響として表れるため、その変化の原因がどのような感情によるものなのか特

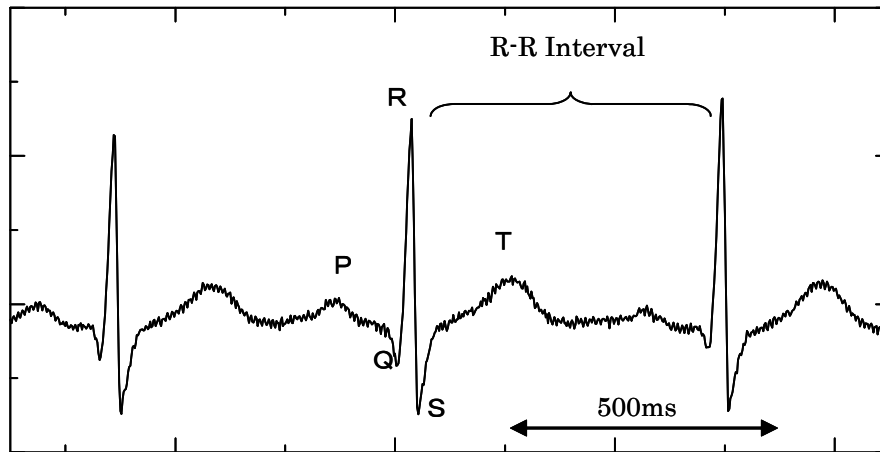


図6-3 心電図の波形とRRI

定しにくい。

そこで本研究では、心拍変動の周波成分をスペクトル解析することにより得られるHFという指標を用いることにした。解析の際は、図6-4に引用した手順のとおり、時系列的にプロットしたRRIの値を1秒間隔で等間隔に補正を行う。この補正RRIデータを用いてスペクトル解析を

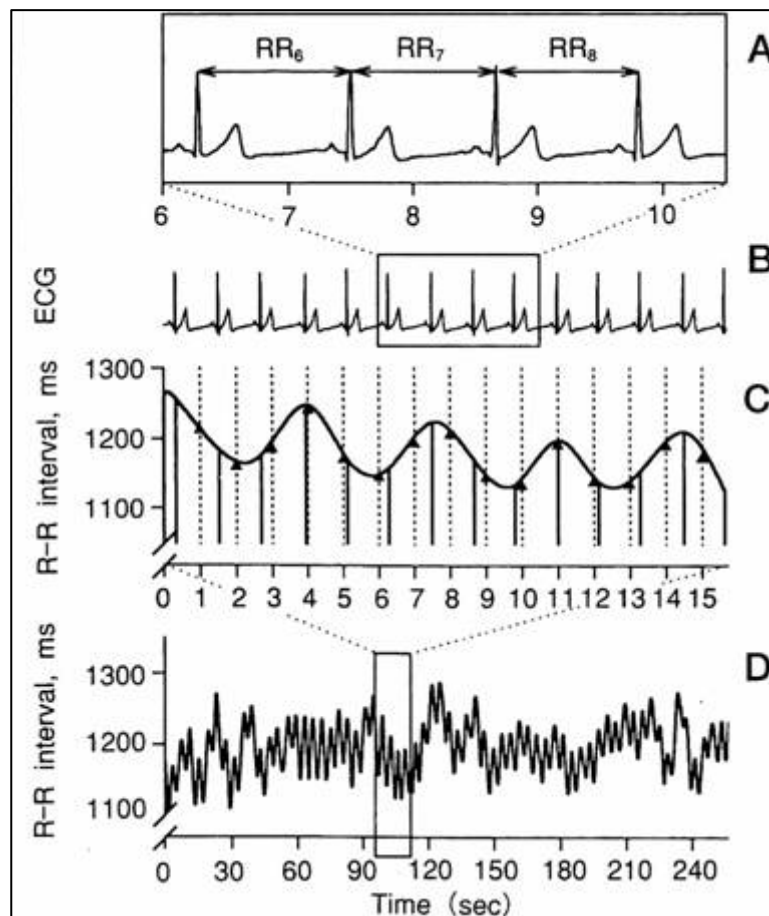


図6-4 RRIの抽出と補正（早野（2001）より抜粋）

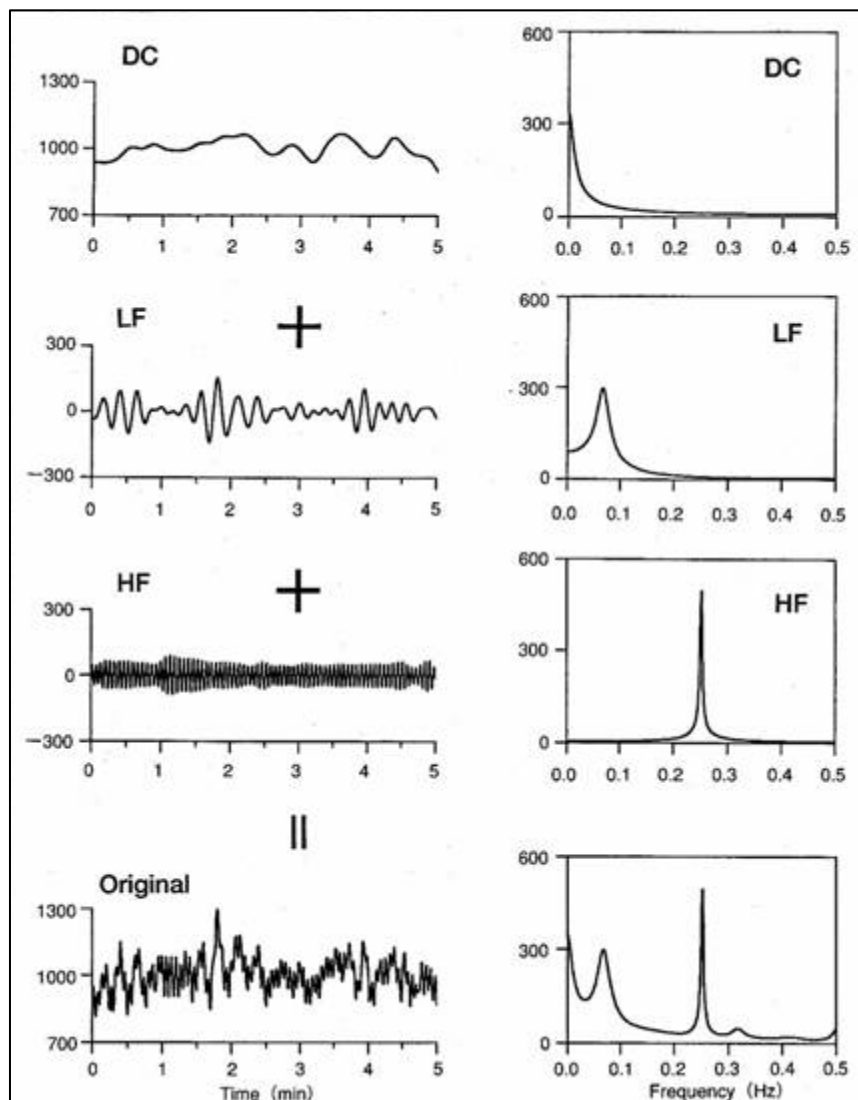


図6-5 RRIの変化とそのスペクトル成分（早野（2001）より抜粋）

行くと、心拍変動を図 6-5に示すように0.01Hz程度の超低周波成分(非調振動和成分)、0.04-0.15Hzの低周波成分 LF(Low Frequency)、0.15-0.45Hzの高周波成分 HF(High Frequency)とに分離することができる。ここで、LF は交感神経と副交感神経の双方の影響を伝達する成分であるが、HF は副交感神経の影響のみを伝達する成分とされている。交感神経は0.15Hz以上の心拍変動を伝達し得ないのに対し、副交感神経は1Hzの変動まで伝達できるとされているため、0.15Hz以上に現れる成分を計測すれば副交感神経の影響のみを見ることができるのである。ここで、心臓迷走神経のみの影響を受ける HF の増大は神経がリラックスしていることを意味し、HF の減少は精神負担の増大を意味することが分かっている。実際、本多（1998）は電子音の与える精神負担を、鈴木・水野・横山・高田（1999）は二輪車で的高速走行時の精神負担を、栗谷川・景山（2000）は機械操作時の精神負担を HF によってそれぞれ計測している。一方、LF 或いはそれに類する指標を利用した研究も存在し、暗算時の蓄積疲労を計測した林・南谷・申（1997）の研究や、ヴァー

チャル環境での酔いの現象を計測した中川・大須賀・竹田（1999 及び 2000）などが挙げられている。また、最近では RRI データそのものの変化量を解析することで精神負担を評価しようとする研究も報告されてきている（栗谷川・景山、2003）。しかしながら、交感神経と副交感神経の影響をどのように考えるかなど、これらについては未だ統一的理解が得られているとはいえない。そのため、本研究では心拍変動をスペクトル解析し、HF を求めることで信号待ちをしている際の精神負担を計測することができるものと考えたことにした。

なお、スペクトル解析を行う際には、まず最小二乗推定法を用いることによって、データのトレンド除去を行う必要がある。また、心拍変動の HF 成分は、呼吸の周波数と等しい値で観測されることがわかっているため、呼吸の周波数が 0.15Hz 以下になると交感神経による影響が HF に混入する可能性がある。従って、実験時には被験者に対して「呼吸を遅くしすぎないように」と呼吸統制を教示する必要もある。但し、実際に呼吸を一定の周波数に保つことは困難であるため、観測結果として 1 本の HF がピークとして現れてくることは少ないのが実情である。そのため、実際には HF の周波数帯である 0.20～0.40Hz のスペクトル値を積分した値を計測項目として用いることが多い。本研究でも積分値を HF 成分として計測することにした。

### 6. 2. 2 主観的指標

前述のとおり、潜在的な心理量で人の態度を指標化する方法として、アンケートによって反応を計測するという質問紙法が多く用いられる。そしてそれらの心理量は、「尺度」(scale)を用いて計測される。本研究では、「交差点での情動は『苛立ち』『慌しさ』『不安』の3つの尺度により説明できる」としている家田・鳩山（2002）の先行研究に基づき、特に「苛立ち」の尺度として使用されたものを用いることにした。このような心理量の尺度の構成方法には、両端に相対する表現の書かれた線分をいくつかの区切り、当てはまる目盛に印をしてもらう SD 法に用いられるものや、区切りを入れずに線分の任意の点に印を打ってもらうビジュアルアナログスケール方式（鈴木・平尾・寺下・織田・八木、1999）のものなどが挙げられるが、本研究では先行研究との整合性の観点から、SD 法の尺度に基づいて、図 6-6 に示すとおり「非常にいらいらした」と「全くいらいらしなかった」を物指の両端とする 11 段階の主観評価尺度によって、赤信号の待ち時間時の「苛立ち」を計測することにした。

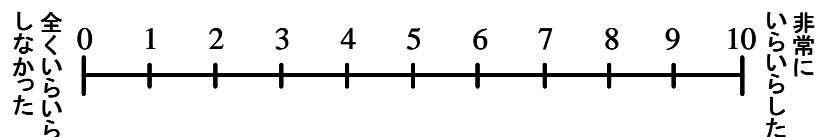


図 6-6 「苛立ち」に関する主観評価尺度

以上のように、生理的指標として心拍変動を、主観的指標として苛立ちに関する主観評価尺度をこの実験における計測指標とすることにした。

### 6. 3 実験の方法

次に、以上の計測指標を用いて行った、信号待ち時間における不快感計測を目的とした実験の詳細の手順を説明する。

#### 6. 3. 1 被験者

被験者は非高齢者 91 名（うち女性 32 名）、高齢者（60 歳以上の方）45 名（うち女性 27 名）の計 136 名とした。非高齢者は東京大学の学生を中心とし、高齢者については文京区根津寿会館のご協力を得て文京区在住の方々をお願いした。

#### 6. 3. 2 日時及び場所

実験は 2002 年 7 月 15 日から 30 日のうち 12 日間に渡って行った。被験者一人につき約 30 分の実験時間を要している。実験場所としては、25m 程度以上の横断歩道空間をシミュレーションする必要性から、東京大学工学部 1 号館 2 階通路を選定した。なお、歩行シミュレータ PedECS に用いられている磁場トランスミッタは、金属柱などが存在すると磁場が歪められ、正確なトラッキングができなくなる。そのため、実験場所にそのような柱類がないかを確認、事前に動作確認を充分に行った上で実験に臨んだ。また、実験中は通行規制を行い被験者の安全に配慮した。

#### 6. 3. 3 実験器材

実験には、シミュレータ PedECS の他に以下の器材を用いた。

##### ① 生理反応計測用器材

心電図測定器材一式（無線データトランスミッタ、データ受信記録装置及びアナログ出力装置）、心電図測定用のディスプレイ電極及びケーブル、電極固定用のメディカルテープ及び消毒用アルコールを心拍変動計測用に用意した。また、データ保存用のコンピュータも別途用意した。なお、電極とトランスミッタを接続するためのケーブル及び心電図測定器材一式は日本大学機械工学科景山研究室から借用した。

##### ② 実験説明用カード

実験を開始する際に被験者に円滑に実験装置や実験方法を説明するため、説明用のカードを作成した。これにより、被験者によらず統一的な説明を行うことができる。

##### ③ 横断歩道属性カード

各実験ケースの試行に入る前に被験者にこれから試行するケースの横断歩道属性を認識してもらうため、図 6-7 に示すようなカードを作成し、横断歩道属性の説明に用いた。

##### ④ 質問カード

被験者に対して試行ごとに苛立ちの主観評価を質問するため、図 6-8 の質問カードを作成した。実験者が質問を読み上げ、被験者は回答を指で差し示す形式のものである。実験者は、被験者の示した回答を別途控えることになる。

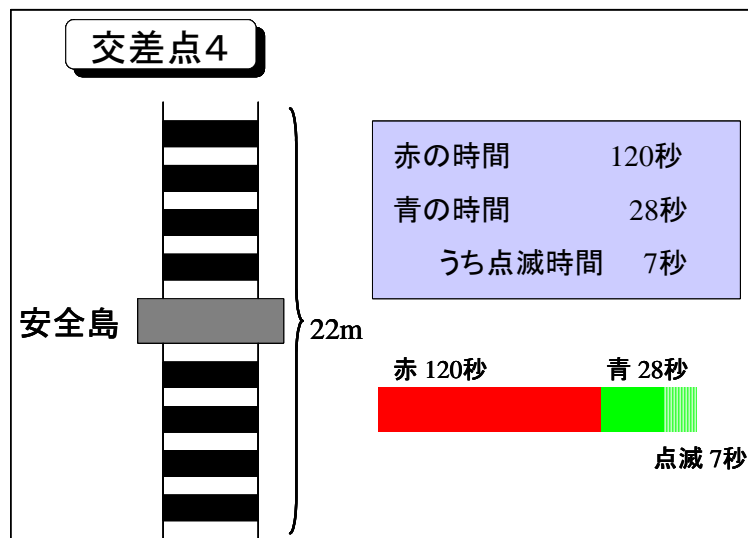


図6-7 横断歩道属性カード（例）

赤信号で待っている間、  
どのくらいいらいましたか？

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

全くいらなかった      非常にいらした

図6-8 信号待ち時の苛立ちに関する質問カード

#### ⑤ 事後アンケート票

実験の試行が全て終了した段階で、PedECS の現実感や被験者属性などに関する簡単な事後アンケートも行った。

#### 6. 3. 4 実験の手順

実験は、次の手順に従って行った。なお、実験者は4人を必要とした。

##### ① 被験者への電極の取り付け

被験者を控え室に連れて行き、心電図計測のためのディスポーザブル電極3個を取り付ける。電極は右胸上部と右腹部及び左腹部に、心臓を囲むように貼付し、ケーブルの端子を電極に接続してメディカルテープでしっかり固定する。そして、無線トランスミッタを被験者の腰部にベルトで取り付け、ケーブルを接続する。

## ② 実験の説明

次に、実験概要の説明を実験説明用カードを用いて行う。なお、実験では横断歩道を渡るインセンティブを被験者に持ってもらうために、「横断歩道の向こう側でお友達と待ち合わせをしているつもりで歩いてください」と教示することにした。また、生理反応計測に支障を来たさないよう、呼吸を遅くしたり深呼吸したりしないことも合わせて教示する。

## ③ 予備試行

まず最初に、被験者に VR 空間の歩行に慣れてもらうために、実際に PedECS を用いて VR 空間を歩いてもらう。これにより、本試行における VR 空間への違和感の軽減が図れる。

## ④ 本試行

引き続き、これから試行する横断歩道の属性を横断歩道属性カードによって説明した後、実験を開始する。実験では、まず最初に歩行者信号が青の状態では画像が映し出され、被験者に歩行者現示時間の長さを認識してもらう。その後、信号が赤になると同時に実験者が「はい、今交差点につきました」と合図を行い、被験者にはその時交差点に着いたつもりで実験を開始してもらう。心拍変動の計測は、この時点から始める。被験者が歩き出したら、実験者は PedECS の HMD と PC を結ぶケーブルを持ち、トラッキングワゴンがケーブルを巻き込まないように注意するようにする。被験者が横断歩道を渡り終えたところで、心拍変動の計測も終了し、データを保存用コンピュータに移す。また、PedECS の HMD を被験者から取り外して、苛立ちに関する主観評価を行ってもらう。評価は、実験者が質問カードを読み上げ、被験者に指で差して答えてもらうという形式であり、実験者はその回答を別途記録しておく。以上の行程を、一人の被験者に対して 3~4 回行ってもらった。試行の順番に関しては、赤時間 30 秒のケース（表 6-2 のケース 0）をまず体験してもらった後に、残り 9 つのケースをランダムに体験してもらうことで、実験順序によるバイアスの均等化を図った。

## ⑤ 事後アンケート

以上の全行程を終了した後、被験者には PedECS の現実感に関する感想や、被験者属性を聞くための事後アンケートを行ってもらうことにした。時間を短縮するため、この時間に次の被験者に対する電極の取り付けを行うようにした。

## ⑥ 電極の取り外し

最後に、ディスプレイ電極及び計測用ケーブルを取り外して、当該箇所をアルコールを染み込ませた脱脂綿で消毒する。以上で 1 人の被験者の実験が終了する。

## 6. 4 実験の結果と考察

次に、実験結果の説明及び考察を行う。この実験において検討を試みたのは以下の項目である。

- ① 苛立ちの感じ方は非高齢者と高齢者によってどう異なるのか。
- ② 苛立ちの感じ方が横断歩道の距離によって変化するのか。
- ③ 心拍変動解析によって苛立ちはどう表現されるのか。

なお、この実験においては、サイクル長を短縮したケースも対象としていることから、中央帯を設けており、二段階横断を認めている。しかし、分析においては、赤信号の待ち時間の長さを正確に扱うため、二段階横断をした場合のデータは考慮せず、一回で横断を完了した被験者のみを解析の対象としていることを先に述べておく。

#### 6. 4. 1 非高齢者と高齢者の苛立ちの主観的評価の差異

第一に被験者の苛立ちに関する主観評価が、年齢層によって異なるかどうかを調べることにした。徳田（1994）によると、加齢に伴ってその感受性の低下から、心理的によりおおらかな状態になるとされている。この事実を考慮すると、高齢者の方が非高齢者よりも苛立ちを感じないのではないかと考えることができる。従ってまずはこれを検証し、更に非高齢者と高齢者でどのように感じ方が異なるのかを分析することにする。表 6-3 に、それぞれの赤時間に対する非高齢者、高齢者の苛立ちに関する主観評価値の平均値とその差異を示した。赤時間が十分に短い状態では特に差異は生じていないが、赤時間が長くなるにつれて、その差異が生じてくる様子を見ることができる。なお、高齢者の赤時間 60 秒における平均評価値が 30 秒のものより低くなっているが、これは観測数が非常に限定的であることが原因と考えるのが妥当であろう。

表 6-3 非高齢者と高齢者の苛立ちの主観評価（平均値）

赤時間 (秒)	非高齢者		高齢者		t値
	観測数	評価値	観測数	評価値	
30	89	2.30	28	1.89	1.05
60	64	4.09	8	1.63	5.81**
90	86	5.42	13	3.69	2.11*
120	86	6.83	24	4.63	3.64**

\*\*：1%の有意水準で有意な差異があるもの

\*：5%の有意水準で有意な差異があるもの

また、非高齢者と高齢者双方について、その評価値がどのように推移していくかを示したものが、図 6-9 である。図 6-6 に示した尺度を用いているため、評価値 10 が最も苛立っているこ

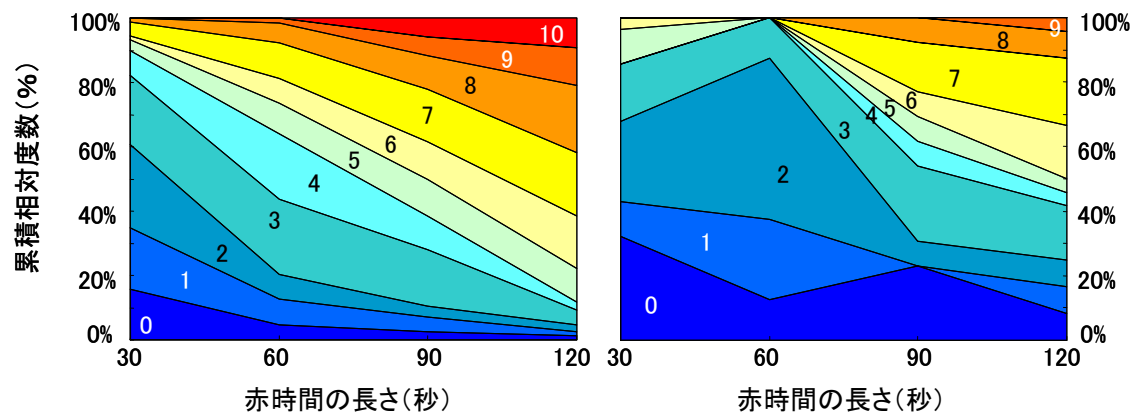


図 6-9 非高齢者（左）及び高齢者（右）の苛立ちの主観評価値の分布

とになり、0が最も苛立っていない状態である。これにより、赤時間による信号待ち時間が長くなるにつれて、非高齢者も高齢者も苛立ちに関する主観評価値を増大させていく様子がわかる。例えば、評価値4以上の被験者の割合を「実際に苛立ちを感じている人の割合」と考えるならば、120秒間の待ち時間を経験した非高齢者は90%程度が苛立ちを感じるのに対し、高齢者は60%程度しか苛立ちを感じない、ということになる。これを30秒間の待ち時間まで短縮すると、非高齢者は20%、高齢者は10%程度が苛立つことになるのである。

このように、まず11段階の主観評価でどの程度以上の人を「苛立ちを感じる人」と定義するかを決定し、図の該当する折線に当てはまる曲線を推定すれば、任意の待ち時間において人が苛立つ確率を定義することができることになる。

#### 6. 4. 2 苛立ちの主観評価と横断距離の関係

第二に、被験者の苛立ちに関する主観評価が横断距離に依存するのかを調べることにした。同じ時間待たされるのでも、横断距離が短い方が残り距離に対する時間がかかりすぎることになるため、苛立ちは相対的に大きくなるのではないかと考えられたためである。そこで、非高齢者を対象として各赤時間の長さにおける横断距離と苛立ちの主観評価値の平均値と、各赤時間において観測された全サンプルの平均評価値とを比較し、有意差が存在するかどうか、またその大小関係に統一的な関係性があるかを調べた。その結果、表6-4のように全体の平均評価値に対する有意差は確認されず、またその大小関係にも統一的な関係性は見当たらなかった。また、表6-5に示すように、横断距離16m、25mの両ケースについて主観評価値の有意差を検定したところ、

表6-4 赤時間の長さと横断距離による苛立ちの主観評価（非高齢者のみ）

赤時間 (秒)	観測 総数	平均 評価値	横断 距離	観測数	平均 評価値	t値	p値 (両側)
60	64	4.09	16m	25	4.72	1.23	0.221
			22m	21	3.43	-1.20	0.235
			25m	18	4.00	-0.16	0.874
90	86	5.42	16m	29	5.03	-0.71	0.476
			22m	30	5.90	0.90	0.369
			25m	27	5.30	-0.21	0.831
120	86	6.83	16m	30	7.17	0.76	0.447
			22m	27	7.19	0.75	0.454
			25m	29	6.14	-1.48	0.141

表6-5 横断距離16mと25mにおける苛立ちの主観評価の差異（非高齢者のみ）

赤時間 (秒)	平均評価値		t値	p値 (両側)
	16m	25m		
60	4.72	4.00	1.08	0.289
90	5.03	5.30	-0.38	0.708
120	7.17	6.14	1.90*	0.063

\* : 10%の有意水準で有意な差異があるもの

赤時間が 120 秒のケースで 10%の有意水準で差異が認められたに過ぎなかった。以上の結果から、苛立ちの主観評価は横断距離に依存することはないといつてよいと考える。

#### 6. 4. 3 心拍変動解析による苛立ちの計測

最後に、実験によって得られた RRI を用いた分析について述べることにする。前述の通り、心拍変動解析では、得られた RRI データを最小二乗推定法によりトレンド除去した上で、フーリエ解析を行う。図 6-10 に結果として得られた心拍変動のスペクトルの典型例を示す。図は左が赤時間が 90 秒のケースであり、右が 120 秒のケースである。

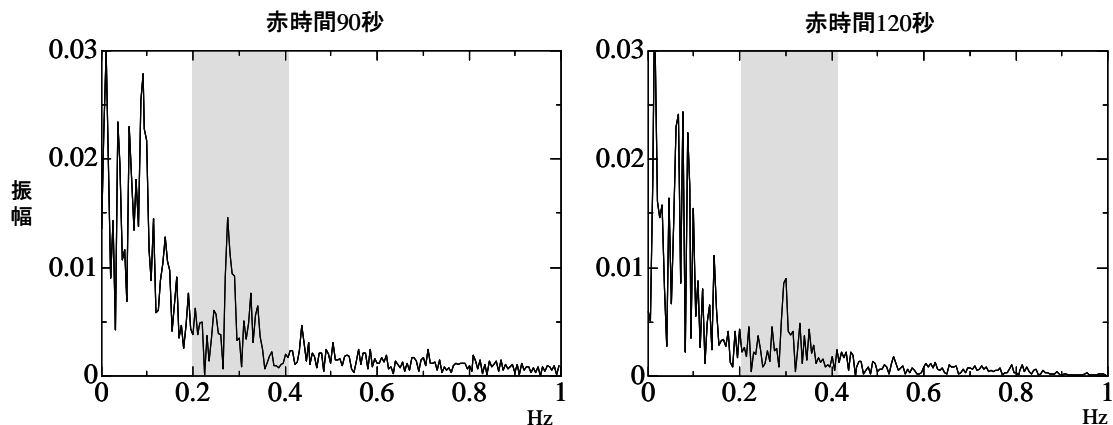


図6-10 心拍変動のスペクトルとHF成分

これにより、0.20Hz～0.40Hzの周波数帯に確かにHF成分のピークが観測されることが分かると同時に、赤時間が長くなった場合にその成分が顕著に小さくなっている様子が見て取れる。心拍変動のHF成分の減少は被験者の精神負担を表すといわれているため、これによって赤時間の長さによる苛立ちが精神負担となっている様子を伺い知ることができるのである。なお、図 6-10 のスペクトルは、0.005Hz毎にプロットがなされているため、実際にHFの周波数帯0.20Hz～0.40Hzに渡って0.005Hz毎の振幅(Amplitude)を足し合わせたものによってHFの大きさを定義することによると<sup>1</sup>、90秒のケースでは0.167、120秒のケースでは0.110という値となり、確かに後者の方の値が小さくなっていることが分かる。以上により、赤時間で信号待ちをしているときの「苛立ち」を心拍変動による生理的指標HFによっても捉えることができることがわかった。

但し、PedECSの磁場によるノイズの影響などにより、全試行を通して解析可能な心拍変動データを抽出することができる被験者の数は限定的なものになってしまう点には注意が必要である。また、特に高齢者は心電図の波形がはっきりと確認できない場合が殆どであり、技術上の発展が望まれるところであろう。

本研究では更に、解析が可能であった非高齢被験者 13 名について、同様の計算方法によって

<sup>1</sup> 実際には積分値を用いることもあるが、本研究のように周波数帯を最初に定義して解析を行う場合は、積分区間の幅が一定なので、単純にプロット毎に足し合わせたものを指標としても差し支えない。

HF 指標を算出し、赤時間の長さとの関係を見てみたところ、図 6-11 が得られた。

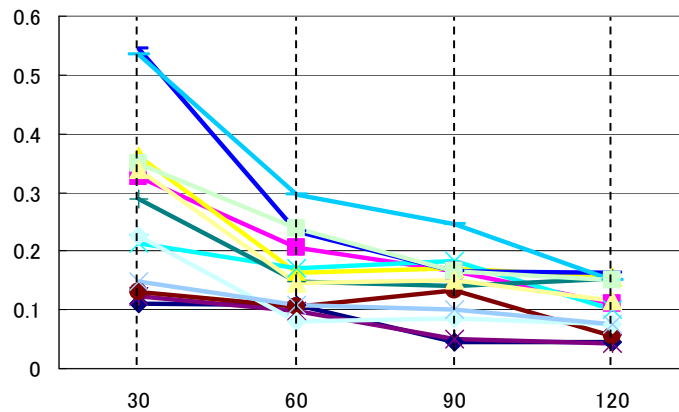


図 6-11 赤時間の長さと HF 指標の関係

また、HF 指標の値は個人差が極めて大きいため、その影響を取り除くために、赤時間が 30 秒のケースにおける被験者の HF 指標を 1 としたときのその他のケースにおける HF 指標の割合を相対 HF 指標として百分率で表したものが図 6-12 である。いずれの場合においても赤時間の増加に伴って HF 指標の値が減少していく傾向にあることが分かる。特に後者については、その差について有意性検定を試みたところ、赤時間 30 秒と 60 秒 ( $t_{(12)}=7.04$ ,  $p < 0.01$ )、90 秒と 120 秒 ( $t_{(12)}=2.70$ ,  $p < 0.01$ ) の間では 1% の有意水準で、60 秒と 90 秒 ( $t_{(12)}=1.73$ ,  $p < 0.1$ ) の間では 10% の有意水準で差異が見受けられることがわかった。

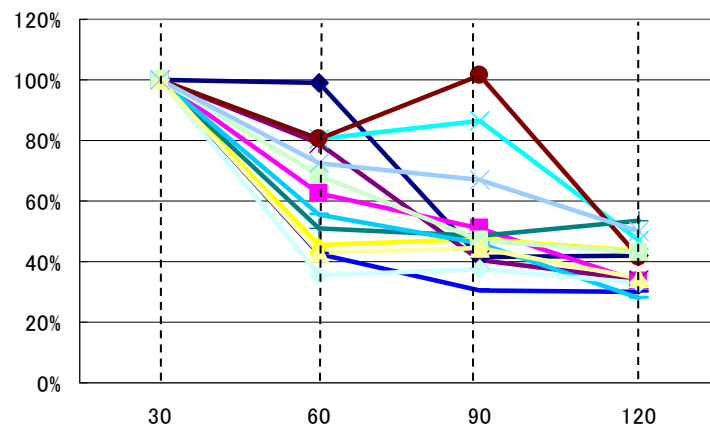


図 6-12 赤時間の長さと相対 HF 指標の関係

以上により、HF 指標で被験者の苛立ちの精神負担を生理的指標の観点からもある程度計測が可能であることが示されたといつてよい。この結果と主観的指標の結果とを合わせることによって、赤時間における信号待ちの際には歩行者は苛立ちの不快感を感じているということが確かめられたことになる。今後、交差点シミュレータへどのようにして歩行者の不快感を導入していくかを考えた場合、生理的指標は個人差が大きく、また様々なアーティファクトによって値が影響を受ける指標であるため、統一的な指標としてまとめることが非常に困難である。そのため、苛立

ちの不快感の指標としては、この実験で用いたような主観的指標を用いることが妥当だということができよう。生理的指標は、主観的指標だけでは真に被験者がどのような心理を抱いているかの確証が持てないときに、更に物理的な証拠として主観的指標の結果のサポートを行うために用いるのが、最も適切な利用方法であると考えるところである。

## 6. 5 現実空間との差異の検証

最後に、PedECS を用いた VR 空間での実験による被験者の反応と、実際の交差点における被験者の反応との差異を分析しておくことにより、PedECS の有効性を確認した。

### 6. 5. 1 被験者

被験者としては、VR での実験との比較を行うため、VR による実験に参加した被験者の中から非高齢者の男性6名、女性7名の計13名とした。

### 6. 5. 2 日時及び場所

実験場所はVR空間のモデルとした湯島一丁目交差点、日時は2003年1月15日の14:00～16:00及び1月17日の13:00～15:00であった。

### 6. 5. 3 実験器材

実際の交差点における実験のため、特別な器材を用意することはせず、ビデオカメラにより記録を取っておいた程度に止めた。生理反応計測用器材も、屋外での利用には適していなかったため使用はしないことにした。調査用紙としては、苛立ちの主観評価を計測するものを準備した。

### 6. 5. 4 実験の手順

手順としては、まず湯島一丁目交差点に被験者を連れて行き、実験の説明をする。この時被験者には信号が見えない位置に立ってもらふ。VRにおける実験と等しい赤時間を経験してもらふ必要性から、被験者には赤時間が60秒となるタイミングで合図を出し、横断歩道の手前1.5mの位置から横断行動を開始してもらふことにした。被験者が渡り終えた段階で、実験者は調査票を渡し、各被験者に記入をしてもらふ。今回は数名ずつ一度に実験を行うことにした。また、VR実験の際と同様に交差点を渡るインセンティブを持ってもらふよう、教示した。

### 6. 5. 5 検証の結果

検証実験によって得られた赤時間の苛立ちの主観評価と、PedECSによるVR実験で赤時間を60秒としたケース（表6-2、ケース3、6、9）における主観評価とを比較し、その平均値及び分布の有意性検定を行ったところ、表6-6を得た。

表 6-6 現実空間とVR空間における苛立ちの主観評価値の差異

現実空間			VR空間			t 値	p値 (両側)
観測数	平均 評価値	分散	観測数	平均 評価値	分散		
13	3.00	5.17	64	4.09	4.85	-1.62	0.109

結果として、赤時間 60 秒における苛立ちの主観評価値には有意な差異はなく、現実空間と VR 空間では概ね同等の評価を得られているといえる。若干 VR 空間における評価値の方がより苛立つ結果となっているが、その要因としては、機械の取り付けなどにより、信号待ちをしている際の不快感がわずかに増加していることなどが原因と考えることはできる。

以上により、PedECS の VR 空間における実験の結果を実際の交差点の評価に用いても問題はない、といえる。なお、本章における実験は、Hatoyama, Shimomura, Ieda (2003) 及び鳩山・家田 (2003) に既に報告されているものである。

## 第7章

### 中央帯滞留時における不快感の計測

二段階横断を想定したサイクル長の短縮を実現するためには、中央帯滞留時に歩行者がどのような不快を感じるかに関する知見が必要となる。本章では、歩行シミュレータ PedECS を用いた実験により、歩行者の中央帯滞留時の不快感を計測し、中央帯設計時の留意点や工夫に関する示唆を得ることとした。前章と同様、まずどのような実験環境を整備したのかについて触れた後、不快感の計測指標に関して述べ、実験の詳細説明と実験結果の考察を行う。また、この実験においても実際の交差点における反応との差異をみる検証を行う。

## 7. 1 実験環境の整備

ここでもまず、どのような VR 環境を実験環境として整備したのかについて述べておく。

### 7. 1. 1 サンプル交差点とその特徴

本研究では、中央帯を活用した二段階横断方式の導入を目指しており、その効率的利用方法の一つに、「歩行者現示を切り分けられること」が挙げられることは前に述べたとおりである。前章における実験は、横断歩道の直前で赤時間を待っている際の苛立ちを計測することに重点を置いていたため、特に現示の切り分けを重視してモデルとする交差点を選定する必要はなかった。しかし、この実験では中央帯を積極的に活用した場合に、歩行者が中央帯に不安なく滞留できる工夫を探るのが目的の一つであるため、現示の切り分けも視野に入れた実験空間を再度構築する必要がある。この実験では、中央帯を設置できるスペースがあり、かつ現示を切り分けられる可能性を持つ交差点として、図 7-1 に示す東京都内の霞ヶ関二丁目交差点をモデルに、VR 実験空間を再度構築することにした。ただし実際のこの交差点には中央帯が存在しないので、実験に使用する横断歩道にだけ中央帯を設置することにした。



図 7-1 霞ヶ関二丁目交差点の地図及び風景（★から矢印方向へ横断）

作成した VR 空間の信号交差点のイメージを図 7-2 に示す。実験においては、図の A 地点から矢印方向に歩行し、B 地点にある中央帯で信号待ちをするという設定にした。また、被験者を確実に中央帯で立ち止まらせるために、歩行者用信号灯器を図の B 地点と C 地点の二箇所に設け

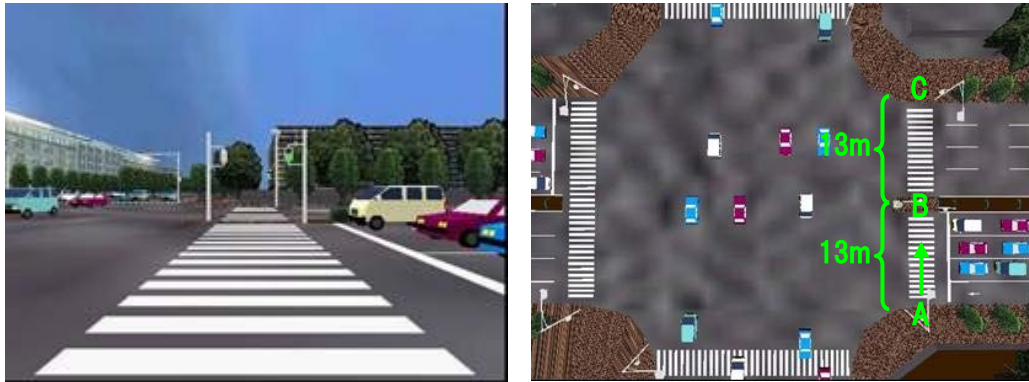


図7-2 作成した信号交差点のイメージ及び俯瞰図

ることで現示を切り分けることにした。具体的には、まず被験者が A 地点から歩き始めて 2m 程度進んだ時点で C 地点の信号を青点滅→赤へと切り替え、そこからさらに被験者が中央帯に至る直前に B 地点の信号も切り替えるという設定にした。

また、中央帯における不安感の計測に主眼を置いているため、実験空間への自動車の導入は必須であると考えられる。この実験においては、表 7-1 に示すような制御方法で自動車を導入することにした。中央帯に最も近い車線における車両は、中央帯の境界線から 50cm の位置を走行することに設定した。また、左折や右折の動きは再現が難しく、被験者に違和感を与える可能性があるため、すべて直進車のみを設定とした。

表 7-1 VR空間内の自動車の制御諸元

走行位置	中央帯の境目から50cm（最内車線）
最高速度	50km/h
交通量	30台/分/車線

更に環境音としては、図 7-2 の A 地点と B 地点に対応するものをサンプル交差点において実際に録音しておき、実験中は歩行開始時には A 地点に対応する環境音を、歩行者が中央帯に至ったら B 地点に対応するものをそれぞれ用いることにした。

### 7. 1. 2 実験ケースの設計

前述のとおり、この実験の目的は歩行者の中央帯滞留時の不快感を計測し、中央帯設計時の留意点や工夫に関する示唆を得ることである。従って、実験環境の制御変数としては、中央帯の幅員と歩行者赤時間の長さ、そして防護設備の形状の 3 つを制御変数として扱うことにした。各制御変数の内容は表 7-2 に示した。まず中央帯の幅員に関しては、現状で約 2.5m が確保可能な幅員であるためこれを設定し、自転車や介添人付きの車椅子が滞留するのに最低限必要な幅員として 1.5m を用意、更に前掲の高宮（1996）の研究を参考に 3.5m の幅員も設定することにした。歩行者赤時間については、現状が約 80 秒であるためこれを設定し、これに対してサイクル長が

表 7-2 制御変数の設定

制御変数	設定値
中央帯の幅員	1.5m・2.5m・3.5m
歩行者赤時間の長さ	40秒・60秒・80秒
防護設備の形状	柵無し・コの字型柵・クランク型柵

半分になったと仮定して赤時間も半分の 40 秒にしたものと、それらの中間値 60 秒を設定した。

また防護柵を設置する際は、コの字型に設置することを基本とするが、英国などでよく見られるクランク型の防護柵についても設けることにした。図 7-3 にコの字型・クランク型それぞれの柵の様子を示した。いずれも高さ 1.2m の柵である。なお、クランク型の防護柵を設ける際には、横断歩道の位置を柵に合わせてずらすことにしている。



(a) コの字型防護柵



(b) クランク型防護柵

図 7-3 2種類の防護柵の形状

これらの制御変数の組み合わせで実験ケースを作成すると全部で 27 通りになるが、それらすべてのケースに被験者を割り振るためには、被験者を長時間拘束するか、1 ケースあたりの実験回数を少なくすることになるため、この実験では実験計画法の直交表を用いて、ケース数を 27 通りから 9 通りに減らすことにした。設定した実験ケースを表 7-3 に示す。

表 7-3 実験ケースの設計と用いた制御変数

ケース	中央帯の幅員	歩行者赤時間	中央帯の構造
1	1.5m	40秒	無し
2	1.5m	60秒	コの字型
3	1.5m	80秒	クランク型
4	2.5m	60秒	無し
5	2.5m	80秒	コの字型
6	2.5m	40秒	クランク型
7	3.5m	80秒	無し
8	3.5m	40秒	コの字型
9	3.5m	60秒	クランク型

またこれらのケースに加えて、防護柵ではなく図7-4に示したように高さ1.2mの「防護壁」や「クッションドラム」を設けた特殊なケースについても加えた。これにより、歩行者が中央帯にどのような安全性を求めるかを分析することができるものと考えた。即ち、防護壁のような頑丈さが重要なのか、クッションドラムのような見通しのよさが重要なのか、など多様なコンセプトを抽出することが可能と思われるのである。表7-4に作成した特殊ケースを示した。

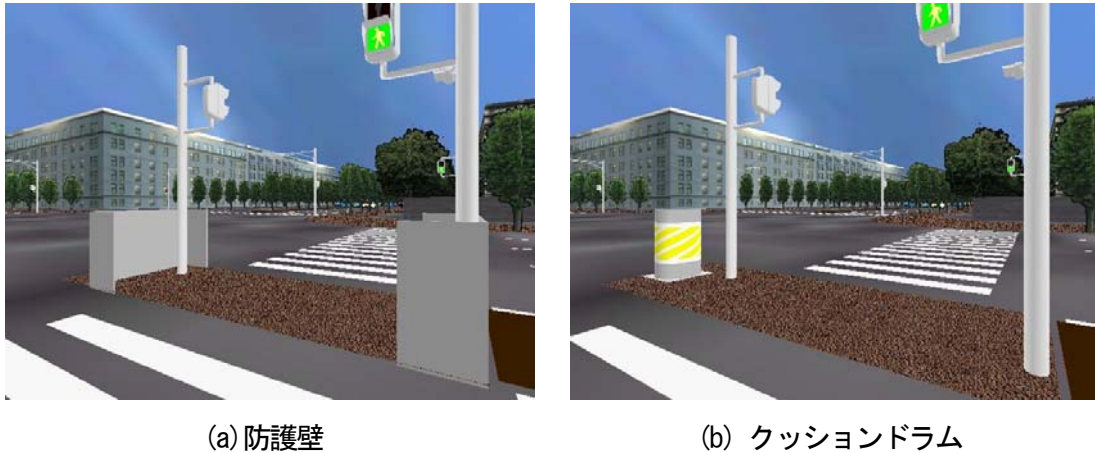


図7-4 2種類の特種な中央帯の形状

表7-4 特殊ケースとその制御変数

ケース	中央帯の幅員	歩行者赤時間	防護設備の形状
a	1.5m	60秒	防護壁
b	2.5m	60秒	防護壁
c	1.5m	60秒	クッションドラム
d	2.5m	60秒	クッションドラム

以上の13通りの実験ケースを作成した。実験においては、一人の被験者にはケース1～9の中から3つと特殊ケースa～dの中から1つの計4ケースを経験してもらうことにした。

## 7. 2 計測指標の設定

次に、計測指標に関して述べる。この実験は、中央帯で滞留している際の歩行者の「不安」の不快感に着目している。そのため、主観的反応を主な計測指標として用いることにし、「不安」を感じる心理要素に関して詳細に分析することにする。更に、「不安」も「苛立ち」と同様に精神負担と考えられるため、生理的指標に関しても取り扱うことにした。

### 7. 2. 1 生理的指標

この実験においても、生理的指標としては心拍変動の高周波成分HFを用いることにした。測定方法及び解析方法は前章と同様であるが、被験者が中央帯に至って滞留している間のデータを

用いて解析を時系列的に行うことにした点が前章の実験とは異なる点である。苛立ちの不快感も不安の不快感もともに精神負担であるから、この両者の影響がHF指標には現れるはずだが、もし不安と苛立ちを感じる時点が時系列的に異なることが分かれば、不安も生理指標によって測ることができると考えられるためである。

### 7. 2. 2 主観的指標

次に、主観的指標としては、「不安」と「苛立ち」の不快感の計測と、SD法による中央帯の安全性に関する詳細な意識計測という2つの着眼点をもって行う。前者に関しては、前章における実験との整合も考慮し、図7-5に示した11段階の主観評価尺度を用いることにした。

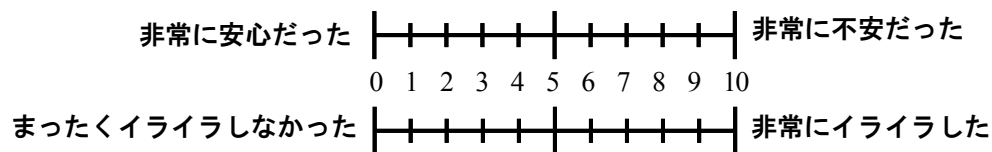


図7-5 実験に用いた主観評価尺度

後者のSD法とは、ある対象（広くコンセプトと呼ばれる）の心理的な特性を調べ、意味構造を明らかにするという心理学的想定法の1つであり（岩下、1983）、相反する意味を持つ複数の形容詞対を尺度とし、複数の被験者が対象を定量的に評定することで、その対象が持つ内包的意味に対して軸を与え意味空間を明らかにすることができる。しかし、調査に用いる形容詞対の選定の際には、使用しようとする形容詞対が真に対極なものといえることを確認する必要がある。そのため、ここでは対極性の確認の行程を省くため、SD法を用いた過去の研究で使用された尺度を集め、そこから中央帯に対する意識としてふさわしいと思われる尺度を抽出し採用した。実際に参考としたのは、環境心理学の分野において主に街の景観や環境の評価を行った研究である（大西・瀬尾・高木、奥平・船越・洋・恒松・菊田・松沢・堀川、木下・山口、工藤・三橋、2001）。選定した評定尺度を表7-5に示す。

表7-5 SD法に用いた評定尺度

尺 度										尺 度												
1	無	防	備	な	-	守	ら	れ	た	12	危	険	な	-	安	全	な					
2	開	放	感	の	あ	る	-	圧	迫	感	の	あ	る	13	不	快	な	-	快	適	な	
3	静	か	な	-	騒	が	し	い		14	ゆ	っ	た	り	し	た	-	緊	張	し	た	
4	広	々	と	し	た	-	窮	屈	な	15	明	快	な	-	曖	昧	な					
5	平	凡	な	-	独	特	な			16	調	和	の	な	い	-	調	和	の	取	れ	
6	貧	弱	な	-	頑	丈	な			17	親	し	み	や	す	い	-	親	し	み	に	
7	良		い	-	悪		い			18	地	味	な	-	派	手	な					
8	落	ち	着	か	な	い	-	落	ち	着	い	た	19	安	ら	ぎ	の	あ	る	-	安	ら
9	分	か	り	や	す	い	-	分	か	り	に	く	い	20	嫌	い	な	-	好	き	な	
10	強			い	-	弱		い		21	人	目	に	さ	ら	さ	れ	た	-	人	目	
11	つ	ま	ら	な	い	-	楽	し	い	22	ふ	さ	わ	し	い	-	ふ	さ	わ	し	く	な

これらの評定尺度には図 7-6 に示すような 7 段階評定を用いた。なお、得られたデータは「どちらともいえない」を 0 とし、左をマイナス、右をプラスとして -3～3 の範囲に数値化した。

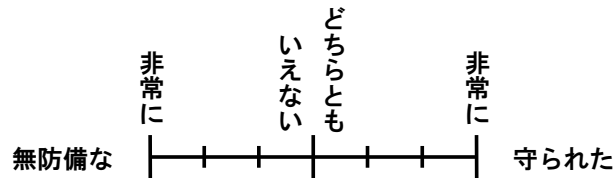


図 7-6 SD 法の評価尺度の例

### 7. 3 実験の方法

次に、実験の詳細な方法について説明する。

#### 7. 3. 1 被験者

被験者としては、東京大学の学生を中心とする非高齢者 42 名（うち女性 12 名）と、文京区在住の高齢者 6 名（うち女性 5 名）の計 48 名とした。

#### 7. 3. 2 日時及び場所

実験は 2004 年 12 月 1 日（水）～4 日（土）の計 4 日間に渡って行った。また、この実験も横断歩道を中央帯まで渡る歩行シミュレーションを行う必要があり、前章の実験と同様、実験場所には 30m 程度の長さを有する空間が必要であった。そのため、実験場所には東京大学工学部 1 号館内の 2 階通路を選定した。

#### 7. 3. 3 実験器材

実験には、歩行シミュレータ PedECS の他に以下の器材を用いた。

##### ① 心拍変動計測用器材

この実験では、心拍変動の計測装置として、アームエレクトロニクス社製のアクティブトレーサー AC-301（図 7-7）を用いた。この装置は非常に軽量であるため、被験者に容易に装



図 7-7 アクティブトレーサー AC-301

着してもらうことが可能な装置である。また、メモリを搭載しているため RRI データを直接装置が記録することができるため、前章の実験で使った器材のように磁場によるノイズの影響などを気にすることなくデータの収集を行うことが可能となる。

また、アクティブトレーサーのデータ記録方式上、被験者ごとにその測定経過時間を計測する必要が生じたため、ストップウォッチを用意した。その他、データ保存用のコンピュータ、ディスポーザル電極及び消毒用ウェットティッシュも用意した。

## ② 電極取付け説明書

この実験から電極を被験者本人に付けてもらうため、どの電極をどこに取り付けるかを記した説明書を作成した。

## ② 中央帯属性カード

各ケースの試行を始める前に中央帯の属性（中央帯の幅員、赤時間の長さ、防護設備の形状）を被験者に教示しておくために、図 7-8 に示すような属性カードを作成した。

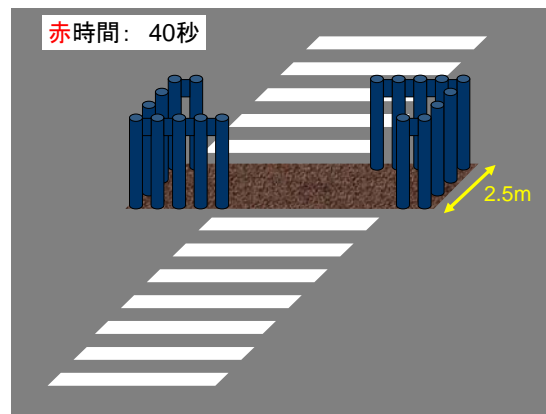


図 7-8 中央帯属性カードの例

## ③ 心理計測用アンケート用紙

各ケースの試行が終わる度に中央帯滞留時の不快感及び中央帯に関する主観的評定を計測するために、図 7-9 に示すような心理計測用アンケート用紙を作成した。アンケートは 3 つの部分に分かれ、上部で「不安」と「苛立ち」の不快感に関する主観評価尺度、中部で SD 法による分析のための評定尺度、そして下部では中央帯の選好として、前回の試行で経験した中央帯と今回の試行において経験した中央帯のどちらを「より望ましい」と思うかに関する質問を配置している。中央帯の選好に関する質問を設けたのは、歩行者は「不安」と「苛立ち」の不快感のどちらをより重要視しているのか、どちらを軽減することが横断歩道の改善上優先すべきなのかを検討するためである。なお、今回は質問項目が多いため、口頭で質問することは避け、各尺度の目盛に被験者自身が○をつける形で行うものとした。

## ④ 事後アンケート票

実験後に被験者の性別・年齢の属性や、PedECS による VR 空間に対して抱いた現実感について調べておくため、事後アンケートも実施した。

PedECS中央帯実験  
04/12/01-04

被験者番号

A1-3

中央帯で信号を待っていたときの心理状態に関する  
アンケート

※直感で○をお付けください

中央帯で信号を待っていたとき どの程度不安になりましたか？	中央帯で信号を待っていたとき どの程度イライラしましたか？
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>非常に安心だった</span> <span>非常に不安だった</span> </div> <div style="text-align: center;">                     </div>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>まったくイライラ しなかった</span> <span>非常に イライラした</span> </div> <div style="text-align: center;">                     </div>

## 中央帯で信号を待っていたとき、中央帯についてどう感じましたか？

非常に いえない どちらとも	非常に
無防備な	守られた
開放感のある	圧迫感のある
静かな	騒がしい
広々とした	窮屈な
平凡な	独特な
貧弱な	頑丈な
良い	悪い
落ち着かない	落ち着いた
分かりやすい	分かりにくい
強い	弱い
つまらない	楽しい

非常に	非常に いえない どちらとも
危険な	安全な
不快な	快適な
ゆったりした	緊張した
明快な	曖昧な
調和のない	調和の取れた
親しみやすい	親しみにくい
地味な	派手な
安らぎのある	安らぎのない
嫌いな	好きな
人目に さらされた	人目の 気にならない
ふさわしい	ふさわしくない

ここまでの3回のケースの中で、  
どの中央帯がより望ましかったですか？  
望ましかった順に番号(1, 2, 3)を記入してください。

1回目 2回目 3回目

図7-9 心理計測用アンケート用紙の例

#### 7. 3. 4 実験の手順

実験は、以下の手順に従って行った。実験者は4名を要した。

##### ① 被験者への心拍計測器材の取り付け

まず心拍計測用の電極を取り付けるため、電極取付け説明書と接続コード付きの電極3個を被験者に渡し、別室で被験者自身に取り付けてもらう。以前の実験では被験者本人ではなく実験者が取付け作業を行っていたが、この実験では計測装置の変更に伴い接続方法が簡素化できたため、このような形式を取ることにした。そして、接続コードをアクティブトレーサーに接続して電源を入れ、計測値が正常値を示しているか確認した後、被験者の腰に専用のベルトで巻きつけ固定する。なお、計測データと歩行データの同期をとる必要があるため、電源を入れた瞬間を0として、ストップウォッチで経過時間を測定し始める。

##### ② 実験概要の説明

次に、実験の概要として実験全体の流れ、中央帯に関する説明、歩行方法とアンケートについて説明する。今回は、不安感の計測に主眼を置いているため、早く交差点を渡るためのインセンティブを積極的に与えることはしなかった。

##### ③ 予備試行

説明が終了したら、PedECSを用いたVR空間内での歩行に慣れてもらうことを目的として、実際にHMDを装着して1度歩行を体験してもらう。

##### ④ 本試行

予備試行が終わったら本試行に移る。まず、当該ケースの中央帯属性カードを示し、中央帯の特徴についての説明を行った後、被験者にHMDを装着した上でVR空間の画像を表示し、被験者に歩行開始の合図を行う。このとき、心拍データと歩行データの同期をとるため、画像が映った瞬間のストップウォッチの時刻を記録しておく。被験者が歩行を開始したら、実験者はPedECSのHMDとPCを結ぶケーブルを持ち、トラッキングワゴンがケーブルを巻き込まないように注意しながら被験者に付いていくようにする。そして歩行者赤現示が終了して、被験者が中央帯から再度2~3m程度横断をしたら歩行終了の合図を行う。そしてHMDを被験者から外し、心理計測用アンケートへの記入をしてもらう。このプロセスを各被験者につき4回（高齢者の場合は3回）繰り返す。

##### ⑤ 心拍計測器材の取り外し

全試行終了後、被験者からアクティブトレーサーを取り外し、データを保存用コンピュータに移動する。また、被験者には別室で電極を取り外してもらい、ウェットティッシュで電極の貼付箇所の肌を拭いてもらう。

##### ⑥ 事後アンケート

最後に、被験者の属性とPedECSの現実感などを調べる事後アンケートに回答してもらう。効率化を図るため、被験者に事後アンケートに回答してもらっている間に、次の被験者への心拍計測器材の取り付け及び実験説明を開始することにした。

#### 7. 4 実験の結果と考察

それでは、実験結果の説明及び考察を行う。この実験で検討を試みたのは以下の項目である。

- ① 中央帯の幅員や防護柵によって不安感はどうのように変わるのか。
- ② 歩行者は中央帯にどのような安全性の視点を持っているのか。
- ③ 中央帯の幅員は苛立ちの感じ方に影響を与えているのかどうか。
- ④ 心拍変動解析に不安と苛立ちはどのように現れてくるのか。
- ⑤ 中央帯滞留時には不安と苛立ちのどちらがより重視されるのか。

これらの項目について、順に分析と考察を行っていく。

##### 7. 4. 1 中央帯の構造が不安感に与える影響

まず、中央帯の幅員や防護柵などによって、全被験者の不安感がどのように変化していくかを分析した。図 7-10 はそれぞれの幅員における不安感の主観評価値の分布を示したものである。

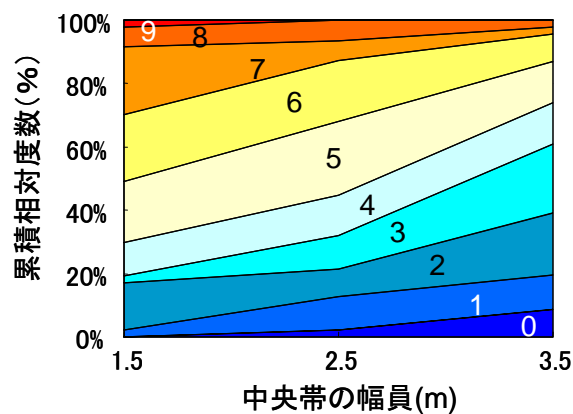


図 7-10 中央帯の幅員による不安感の主観評価値の分布

図より、中央帯の幅員が減少するに従って被験者の不安感が増加していく様子が見て取れる。実際、平均値の差異についても比較してみると、表 7-6 に示すとおり、いずれの幅員間の不安感にも 5% の有意水準で有意な差異が認められた。

表 7-6 中央帯の幅員と不安感の平均評価値の差異

中央帯の幅員	観測数	平均評価値	t値	p値
1.5m	47	5.23	2.04	0.022
2.5m	47	4.38		
3.5m	46	3.17	2.90	0.002

これにより、例えば評価値が 4 以上の被験者の割合を「実際に不安を感じている割合」と考えるならば、幅員 1.5m では 80% もの被験者が不安を感じているのに対して、幅員を 3.5m まで増

加させることでその割合は40%程度まで減少することになる。

次に、防護柵の効果について見てみることにする。表7-7は、防護柵の設置されていないケースと、設置しているケースとの間で不安感の主観評価値を比較したものである。表から、防護柵が設置されているケースと、防護柵は設けられていないが中央帯の幅員が1.0m 広がっているケースとの間に有意な評価値の差異が見られないことがわかる。従って、幅員1.5m～3.5m の中央帯において、防護柵の設置には1.0m 程度の中央帯拡張と同程度の効果があることがわかる。

表7-7 中央帯の幅員と防護柵の設置効果

中央帯の幅員	防護柵	観測数	平均評価値	t値	p値
2.5m	無し	16	5.38		
1.5m	コの字型	16	5.44	0.099	0.922
	クランク型	16	5.69	0.486	0.630
3.5m	無し	16	4.00		
2.5m	コの字型	15	3.87	-0.171	0.865
	クランク型	16	3.88	-0.196	0.846

以上より、不安感を半数以上の歩行者に与えないためには、中央帯の幅員としては3.5m 程度以上のものを設置すべきであり、2.5m 程度の幅員しか確保できない場合には防護柵を設置すべきだといってよいことがわかった。

#### 7. 4. 2 中央帯の安全性に関する評価軸の分析

次に、被験者が中央帯の安全性をどのような評価軸によって捕らえているということができるのかを分析する。この実験では、防護壁とクッションドラムによる特殊ケースを含め、それぞれの実験ケースを被験者に表7-5に示した評定尺度を用いて評定してもらったため、これを用いて分析を行う。

手順としては、全被験者の全評定結果に対して因子分析を行い、因子軸をバリマックス法による直交回転を行って解釈しやすいものへと変換することになる。結果として5つの因子軸が抽出され、表7-8に示す因子負荷量行列が得られた。

そこで次に、この因子軸それぞれに命名を行っていく。まず第Ⅰ因子は、「親しみやすいー親しみにくい」、「嫌いなー好きな」、「安らぎのあるー安らぎのない」など、中央帯に対して身近なものと親近感を感じるか、或いは馴染みやすいと感じるかどうかなどに関係する尺度が大きな負荷量を示しているため、この因子軸を「親近性」因子と命名することにした。続いて第Ⅱ因子は、「無防備なー守られた」、「貧弱なー頑丈な」、「人目にさらされたー人目の気にならない」など、中央帯において周りから囲まれ守られていると感じるかどうかに関わる尺度が大きな負荷量を持っているため、この因子軸を「囲繞（いじょう）性」因子と命名した。同様に、第Ⅲ因子は、「広々としたー窮屈な」、「開放感のあるー圧迫感のある」、「ゆったりしたー緊張した」など、中央帯の構造や周辺空間などの外的環境に対して開かれていると感じるかどうかに関

表 7-8 中央帯の安全性の評価軸

-	+	第Ⅰ因子 親近性	第Ⅱ因子 囲繞性	第Ⅲ因子 開放性	第Ⅳ因子 意匠性	第Ⅴ因子 明快性
親しみやすい	親しみにくい	0.745	-0.137	0.336	0.006	0.131
嫌いな	好きな	-0.722	0.227	-0.305	0.186	-0.080
安らぎのある	安らぎのない	0.669	-0.343	0.283	-0.172	0.224
ふさわしい	ふさわしくない	0.597	-0.357	0.254	0.031	0.127
調和のない	調和の取れた	-0.563	-0.043	-0.058	-0.072	-0.227
不快な	快適な	-0.562	0.393	-0.451	0.210	-0.187
無防備な	守られた	-0.245	0.757	-0.170	0.306	-0.175
貧弱な	頑丈な	-0.216	0.707	-0.007	0.343	-0.290
危険な	安全な	-0.362	0.681	-0.308	0.221	-0.230
人目にさらされた	人目の気にならない	0.022	0.531	0.011	0.029	-0.030
強い	弱い	0.086	-0.530	0.099	-0.299	0.412
静かな	騒がしい	0.302	-0.463	0.140	-0.090	0.027
広々とした	窮屈な	0.199	-0.166	0.734	0.040	0.137
開放感のある	圧迫感のある	0.227	0.183	0.716	0.144	0.147
良い	悪い	0.491	-0.397	0.567	-0.078	0.023
ゆったりした	緊張した	0.367	-0.235	0.558	-0.083	0.243
落ち着かない	落ち着いた	-0.452	0.457	-0.540	0.125	-0.074
地味な	派手な	-0.113	0.245	0.040	0.630	-0.103
平凡な	独特な	0.117	0.218	0.100	0.622	0.104
つまらない	楽しい	-0.459	-0.035	-0.331	0.509	-0.093
分かりやすい	分かりにくい	0.146	-0.194	0.277	0.076	0.640
明快な	曖昧な	0.318	-0.176	0.104	-0.083	0.640
寄与率		17.6%	15.7%	13.2%	7.2%	6.7%
累積寄与率		17.6%	33.3%	46.5%	53.6%	60.3%
% of Community		29.3	26.0	21.8	11.9	11.1

する尺度が大きな負荷量を示すため、この因子軸を「開放性」因子とし、さらに第Ⅳ因子は「地味な－派手な」、「平凡な－独特な」、「つまらない－楽しい」など、中央帯のデザインに関する尺度が大きな負荷量を示しているため、この因子軸を「意匠性」因子と命名することにした。第Ⅴ因子は「分かりやすい－分かりにくい」、「明快な－曖昧な」など、中央帯の分かりやすさに関する尺度が大きな負荷量を示しているため、「明快性」因子とすることにした。但しここで、親近性因子は親しみにくいほど、開放性因子は窮屈なほど、明快性因子は分かりにくいほど正の因子負荷量を示している点に注意が必要である。

さて、この分析において用いた評定尺度は、既往の研究から中央帯に対する意識としてふさわしいと思われる尺度を抽出したものである。従って、これらの因子軸が安全性の評価軸であると結論づけることはできない。そのため、これらの因子軸のうちで中央帯の安全性評価軸と呼べるものはいずれかを調べることにした。

まず、それぞれの因子軸における各被験者の因子得点と、不安感の主観評価値との相関関係を調べたところ、図 7-11 のような結果となった。これにより、特に親近性、囲繞性、開放性の因子得点が不安感の主観評価値とある程度相関を持っており、明快性の因子得点にわずかながら相関があることがわかった。意匠性に関しては相関係数が 0.008 と相関は見られなかった。そこで、

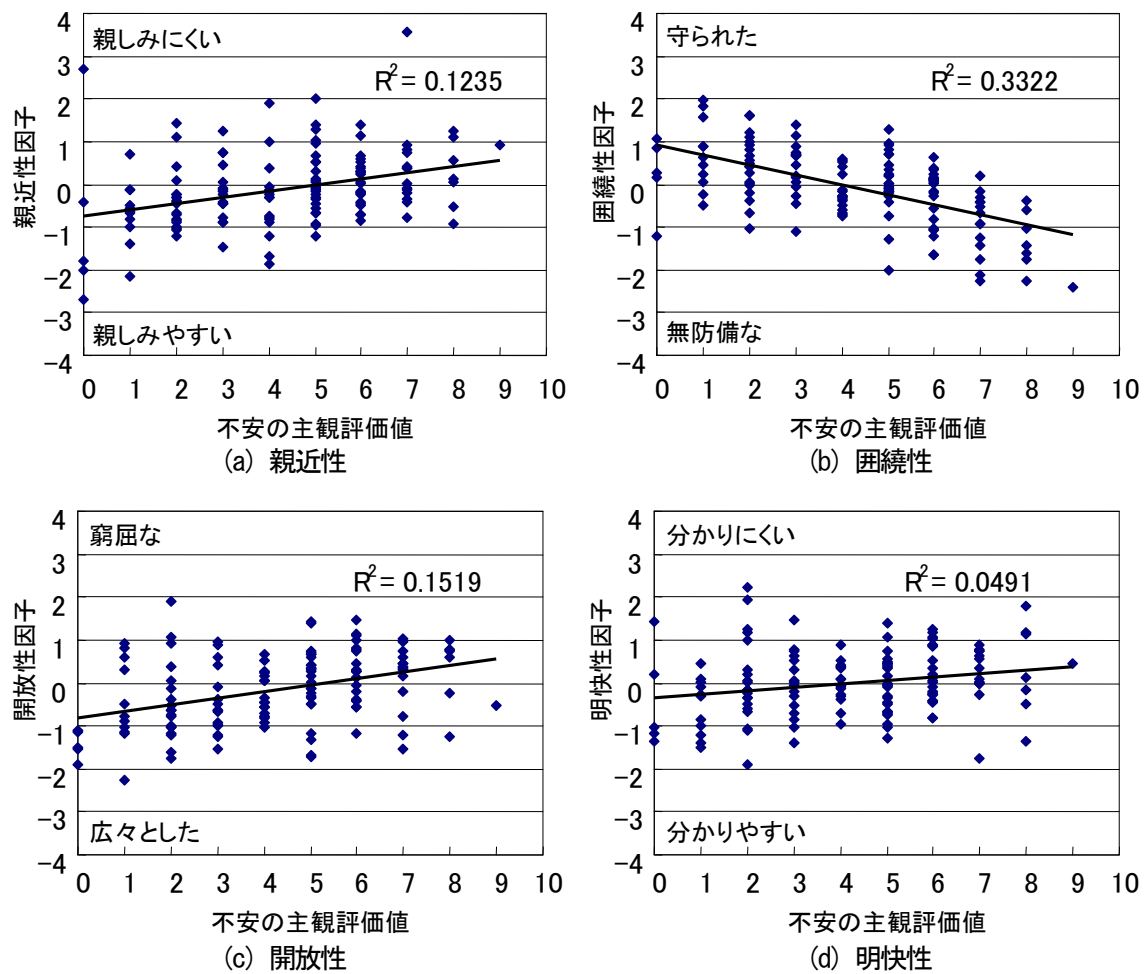


図 7-11 因子得点と不安感の主観評価値との相関関係

これらの影響度を比較するため、不安感の主観評価値を被説明関数、各因子得点を説明変数として重回帰分析を行ったところ、表 7-9 に示す結果となった。これにより、不安感の主観評価値には特に囲繞性、開放性、親近性が大きく影響していることがわかる。

表 7-9 各因子軸と不安感の重回帰分析結果

観測数	140
重決定係数 $R^2$	0.509

説明変数	係数	t値
定数項	-0.63	-4.69 **
囲繞性因子	-1.22	-7.90 **
開放性因子	0.769	4.91 **
親近性因子	0.549	3.69 **
明快性因子	0.383	2.25 *

\*\* : 1%の有意水準で有意な差異があるもの

\* : 5%の有意水準で有意な差異があるもの

## 第8章

### 情報提供下における歩行行動分析

本章では、更に横断歩道において信号の残り時間に関する情報提供を行った際に、歩行者の歩行行動にはどのような影響が生じるか、また第4章で論じたような横断歩道の手前空間を考慮した歩行者の横断行動原理が妥当といえるのか、特に「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」と呼べるような心理的時空間領域を考える妥当性と、焦燥領域における慌しさの感じ方について、VR歩行シミュレータ PedECS を用いた実験によって明らかにする。ここでもまず、設定した実験環境と計測指標について述べた後、実験の詳細と結果の考察を行っていく。

## 8. 1 実験環境の整備

まず、実験環境をどのように整備したかについて述べる。

### 8. 1. 1 サンプル交差点とその特徴

この実験では、特に交差点に至る手前から歩行者は歩行速度を調節しながら歩行をしているとする横断行動原理の妥当性を検証することと、それが情報提供によってどのように影響を受けるかについて確認することが主眼である。そのため、この実験でも大規模な交差点を実験空間とする必要があり、また交差点の手前の空間も整備する必要があった。そのため、ここでも第7章で用いた実験空間と同様に、霞ヶ関二丁目交差点をモデルとすることにした。霞ヶ関二丁目交差点のサイクル長は150秒程度であり、歩行者現示時間は55秒程度、そのうち青点滅時間が10秒程度となっている。また、この交差点には、既に図8-1に示すような目盛り式の待ち時間表示器が設置されているが、8～10秒毎に目盛りが減少するという段階的な情報提供しか行われないものである。



図8-1 霞ヶ関二丁目交差点に設置されている待ち時間表示器

### 8. 1. 2 実験ケースの設計

この実験は、情報提供によって様々なサイクル長の中で歩行者が横断行動をどう変化させるかを見るのが目的である。そのため、サイクル長と情報提供の有無、そしてサイクル長の短縮には中央帯の設置が必要であるため中央帯の有無の3つを実験空間の制御変数とすることにした。

まずサイクル長に関しては、横断歩道長さが 26m 程度であるということを考慮して、基本的なケースの歩行者現示時間を 40 秒と設定することにした。また、青点滅時間は歩行速度 1.5m/s で交差点中央にいる歩行者が渡りきるか戻ることのできる時間として 10 秒に設定した。従って歩行者青時間は 30 秒となる。また、進行方向と交差方向のスプリット配分は等しいとし、サイクル長は 120 秒とした。また、サイクル長を更に 3/4 の 90 秒に設定したケースも用意することにし、歩行者現示も 3/4 の 30 秒に設定した。なお、点滅時間は安全確保の観点から 10 秒とすることが望ましいと考え、歩行者青時間は 20 秒に設定することにした。図 8-2 に設定したサイクル長及び各現示の長さを示す。

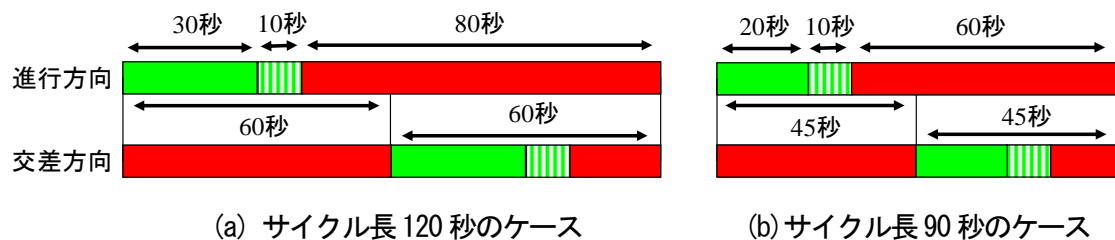


図 8-2 設定したサイクル長及び各現示時間

次に、情報提供に関しては、青点滅時間も含めた歩行者現示時間の長さを表すバーが徐々に減っていく残り時間表示器を設置することにした。目盛り式の残り時間表示器は既に導入されているが、この実験で導入することにした残り時間表示器は、目盛りではなくバーの長さが連続的に変化するものである点が従来のものと異なる点であり、これによって連続的で精度の高い情報を歩行者に提供できるものと考えた。なお、本来であれば、残り時間表示器は信号機の脇に設置するか信号機と一体化させることが多いが、この実験で用いた歩行シミュレータ PedECS の HMD には解像度に限界があるためこれを考慮して、図 8-3 に示すように HMD に描画する画像の右下部に常時表示するものとした。



図 8-3 実験に用いた残り時間表示方法

また、本研究では中央帯を活用した二段階横断方式とサイクル長の短縮の両立を目指しているが、滞留時に不安を感じるような中央帯を設置するのでは、中央帯を利用して交差点を横断しようとする歩行者自体が減少し、効率的な中央帯利用が実現できなくなる。従って、この実験にお

いても、サイクル長を短縮する際には、滞留時にできるだけ不安の感じにくい中央帯を設置する必要があると考え、図 8-4 に示す幅員 3.5m で防護柵を設けた中央帯を設置することにした。この構造の中央帯は前章の実験における表 7-3 のケース 8 に相当し、最も被験者から選好された中央帯である。

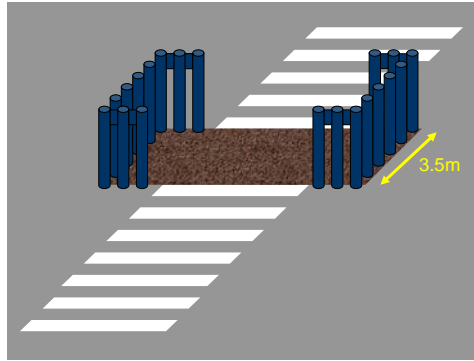


図 8-4 幅員 3.5m の防護柵付き中央帯

これらの制御変数を組み合わせることにより、表 8-1 に示す 5 種類の実験空間を作成した。

表 8-1 実験空間の設計と制御変数

実験空間	サイクル長	残り時間表示	中央帯
a	90秒	なし	あり
b	120秒	なし	なし
c	90秒	あり	あり
d	120秒	あり	なし
e	120秒	なし	あり

更に、この実験では横断歩道の手前空間における歩行者行動にも着目しているため、このそれぞれの実験空間に対し、様々な歩行開始位置を定めることによって実験ケースとすることにした。具体的には、サイクル長が短くても安心して渡りきれると考えられる距離から、サイクル長が長い場合でも一度で渡りきるには困難となる距離までを含めるため、10m 手前～45m 手前までを 5m 刻みで設定することとした。但し、出発のタイミングにずれが生じることや、歩き始めの速度が不安定になることを避けるため、各出発地点から 5m 進んだところで横断歩道の信号を赤から青に切り替わるようにした。従って、実質的には 5m 手前～40m 手前の 5m おき 8 箇所がサイクル長を考慮しながら被験者が横断行動を開始する地点ということになる。また、横断歩道を渡り終えて 2m 程度の地点に黄色いゴールラインを設け、歩行停止時の目標とすることにした。

以上 5 つの実験空間と 8 箇所の横断行動開始位置を組み合わせるが、実験空間 e は実験時間に余裕があるときのみに行うこととし、基本的には表 8-2 に示すとおり被験者 1 名あたり 4 回の試行を行うように実験ケースの組み合わせを 16 通り作成した。なお、実験の際には各被験者とも実験開始前に一度、実験空間 b の手前 20m 地点から歩行開始する条件で練習を行うこととした。

表 8-2 実験ケースの組み合わせ

実験 ケース	試行1	試行2	試行3	試行4
1	a-05m	b-35m	c-15m	d-25m
2	d-40m	c-10m	b-30m	a-20m
3	d-25m	b-15m	c-35m	a-05m
4	a-20m	c-30m	b-10m	d-40m
5	a-40m	b-10m	c-30m	d-20m
6	d-05m	c-35m	b-15m	a-25m
7	d-20m	b-30m	c-10m	a-40m
8	a-25m	c-15m	b-35m	d-05m
9	a-05m	c-35m	b-15m	d-25m
10	d-40m	b-10m	c-30m	a-20m
11	d-25m	c-15m	b-35m	a-05m
12	a-20m	b-30m	c-10m	d-40m
13	a-40m	c-10m	b-30m	d-20m
14	d-05m	b-35m	c-15m	a-25m
15	d-20m	c-30m	b-10m	a-40m
16	a-25m	b-35m	c-15m	d-05m

## 8. 2 計測指標の設定

この実験では、交差点の手前から歩くとき、被験者はどのような横断行動を取るのか、そしてそのときにはどのような心理的時空間領域にいて、どの程度の慌しさを感じていたのかを測定する必要がある。前者に関しては、実際の横断行動をトラッキングし、その平均値や分散値を比較することにより充分把握可能であるが、後者に関しては若干の工夫が必要となる。

本研究では、第4章図4-3に示したような原理で歩行者は横断行動を行うものと考えている。これは歩行者が直面する交差点のことを充分よく知っており、信号を認識した瞬間にその残り時間などに関する情報を把握できるということが前提である。しかしながら、VRによる実験空間に対して被験者を十分に慣れさせるのは困難であり、被験者が信号を認識した瞬間に情報を把握することもまた困難である。そこでこの実験では、被験者が信号の情報を得られるのは「歩行者信号が青に変わった瞬間」と考えることにし、心理的時空間領域も図8-5に示す時空間ダイアグラムへと再構成されるものと考えた。つまり、信号が青になった時点において、被験者は歩いている位置に応じて「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」を構成するというものである。基本的な考え方は変わっておらず、第4章図4-3は位置軸方向から捉えたもの、図8-5は時間軸方向から捉えたもの、ということになる。実際の交差点においては、任意の位置、任意の時点で信号に関する情報を更新していく、と考えることもできる。この実験では、以上の特徴を考慮して、被験者が歩行を開始して5m進んだところで歩行者用信号を青に変え、残り時間表示に関してもこの時点から表示を行うようにした。このような条件の中で、歩行者用信号が青に変わったことを

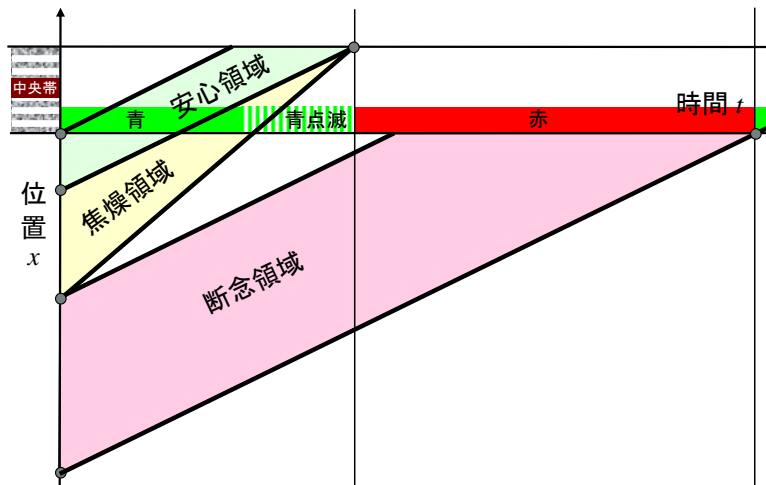



図8-5 歩行者現示開始時点からみた時空間ダイアグラム

認識した時点で、被験者はその歩いている位置に応じて、心理的時空間領域に応じた心理を感じるものと考え、図8-6に示すような質問票を用意した。



青信号が始まったとき  
どの気持ちに近かったですか？

1. このままの速さで、一度で渡りきれんだろう
2. 少し急げば、一度で渡りきれんだろう
3. 一度で渡りきれんかどうか分からない
4. 一度では渡りきれないだろう

図8-6 歩行者現示開始時の心理的時空間領域に関する質問票

「1. このままの速さで、一度で渡りきれんだろう」という選択肢は安心領域における心理を表すもの、「4. 一度では渡りきれないだろう」という選択肢は断念領域における心理を表すものである。焦燥領域については、現実の交差点であれば「2. 少し急げば、一度で渡りきれんだろう」という選択肢のみ用意すれば充分と考えられるが、VR 歩行シミュレータ PedECS を用いた実験の特性上、歩行者はあまり速い速度で歩くことは推奨しておらず、被験者にとってもHMDによって視界が塞がれているため、速く歩くことは心理的にも難しい状況になっている。そのため、走って渡りきるべきか、断念するべきかを迷う状況が発生する可能性があると考え、「3. 一度で渡りきれんかどうか分からない」という選択肢も用意することにした。従って、「2」と「3」とともに焦燥領域における心理を表すものとして取り扱うことになる。

なお、被験者が焦燥領域にいる際にどの程度の慌しさを感じているかについては、これまでの実験でも用いている11段階の主観評価尺度を用いることにした。

### 8. 3 実験の方法

次に、詳細な実験方法について説明する。

#### 8. 3. 1 被験者

被験者は全 60 名で行った。東京大学の学生を基本とするが、世田谷区北沢及び上原に在住の自治会の方々にもご参加いただいた。年齢及び性別の構成は表 8-3 の通りとなっている。

表 8-3 被験者の年齢及び性別構成

年齢区分	人数	性別	人数
18～24	39	男性	31
25～29	7	女性	29
30～39	2		
40～49	1		
50～59	3		
60～	8		
合計	60	合計	60

#### 8. 3. 2 日時及び場所

実験は、2004 年 12 月 15 日（水）より 21 日（火）までの一週間に渡り実施した。実験場所としては、屋内空間で電源が容易に確保でき、交差点手前空間も対象とするため、100m 程度直進することができる空間が必要であったため、図 8-7 に示すとおり、東京大学生産技術研究所内の地下搬入通路を選定した。



図 8-7 実験に用いた生産技術研究所内の地下搬入通路

#### 8. 3. 3 実験器材

実験には歩行シミュレータ PedECS に加え、以下の器材を用いた。

##### ① 被験者の安全確保用具

この実験では、70m 程度に渡る長距離の歩行シミュレーションを行うことにしている。実

験中は、前述の通り被験者はHMDによって視界が塞がれた状態で歩行をすることになるが、VR空間内を直進しているつもりでも、実際の空間上も直進することは非常に困難である。そのため、ある程度被験者を誘導しながら実験を行わないと、壁に衝突するなど、安全性上危険となる可能性が低くない。そこで、被験者の移動方向を誘導するものとして、ビニール製のひもを用意し、これをPedECSに取り付け、被験者にはこれを伝いながら歩行するように教示することにした。

## ② 交差点属性カード

前章における実験と同様、各ケースの試行を始める前に実験空間の属性（サイクル長、中央帯の有無、残り時間表示の有無）を被験者に教示するための属性カードを作成した。

## ③ 質問カード

図8-6に示した心理的時空間領域を質問するための質問カードを作成した。また、慌しさに関しては図8-8に示すように、特に歩行者現示時の「焦り」を問う質問カードを用意した。今回も実験者が質問を読み、被験者は回答を指で差す形式とした。

**青信号点灯中**  
どの程度「あせり」を感じましたか？

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

まったくあせりを感じなかった 非常にあせりを感じた

図8-8 歩行者現示時の慌しさに関する質問カード

## ④ その他の器具

その他、60m程度分の延長コード1巻、ガムテープ1本、カラーコーン2個及び50m巻尺1巻も、事前準備などに用いるため用意した。

### 8. 3. 4 実験の手順

実験に当たっては、まず事前の準備として以下の2点を行った。

#### ① 初期位置目標の設定

実験ケースの中で最も長い距離を要するものは、交差点の手前45mの地点から出発するものである。従って、この場合は横断歩道を含めて80m程度の歩行距離を確保しておく必要がある。そのため、図8-9に示すように、実験場所の中央に電源を確保し、その前後40mほどの地点にそれぞれガムテープによってPedECSのスタンバイ位置目標、カラーコーンによって被験者の歩行開始位置目標を設置し、各試行ともその地点から実験を開始することにした。

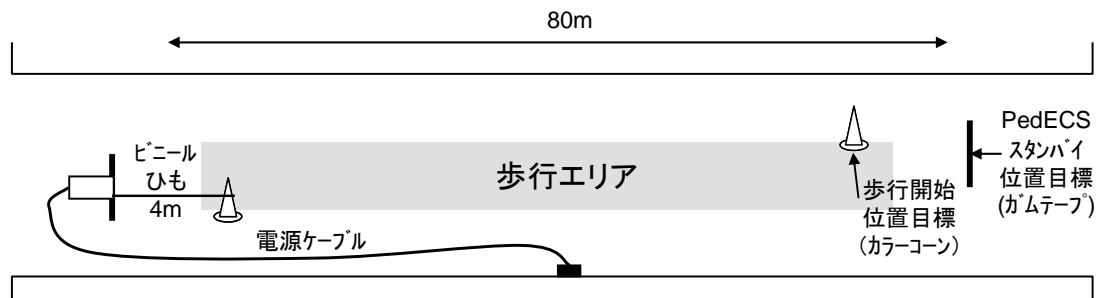


図8-9 通路内における初期位置目標などの設置方法

また、カラーコーンには、歩行者の安全確保用具であるビニールひもを掛けられるようにしておき、被験者は各試行開始時にカラーコーンの手前 1～2m の箇所のビニールひもを持ってもらうことにした。

## ② PedECS のキャリブレーション

PedECS は、車輪回転に伴うパルスの検知により進行方向に関する位置情報を得る仕組みとなっているものの、実際の走行距離と画像内の移動距離が一致しない場合がある。特に長距離のシミュレーションにおいては、この誤差の影響が大きくなる可能性があるため、事前に巻尺で正確に測定した 20m の距離を PedECS で 5 回程度走行させ、得られた測定値（VR 空間内の移動距離）との比をプログラム内に係数（1 パルスあたりの進行距離）として組み入れることで、キャリブレーションを行うことにした。

以上の事前準備を行った上で、以下の手順で実験を行った。実験者は3名を要した。

## ③ 実験概要の説明

まず、実験の概要として実験全体の流れ、歩行方法とアンケート調査内容について説明する。今回は、「横断歩道を渡りきったところにゴールがある」と教示することによって、交差点を渡るためのインセンティブを被験者に与えることにした。

## ④ 予備試行

説明が終了したら、PedECS を用いた VR 空間内での歩行に慣れてもらうことを目的として、実際に HMD を装着して 1 度歩行を体験してもらう。また、歩行後のアンケート調査に関しても、質問に慣れてもらう意図から行うことにした。

## ⑤ 本試行

予備試行が終了したら本試行に移る。まず、試行を行うケースの属性を交差点属性カードを用いて示し、被験者にカラーコーンに掛けてあるビニールひもを軽く握ってもらうように教示する。その後、被験者に HMD を装着した上で VR 空間の画像を表示し、被験者に歩行開始の合図を行う。このとき、一人の実験者がカラーコーンに掛けてあるビニールひもを外して、被験者の動きに合わせて誘導を行うようにする。また、他の実験者は PedECS の HMD と PC を結ぶケーブルを持ち、トラッキングワゴンがケーブルを巻き込まないように注意しながら被験者に付いていくようにする。被験者がゴールまで達したら歩行終了の合図を行い、HMD を被験者から外して、心理的時空間領域に関する質問カードを提示し、被験者に解答

してもらう。このプロセスを各被験者につき4回繰り返す。図8-10に実験風景を示す。



図8-10 実験風景（左：事前準備、右：本試行）

#### 8. 4 実験の結果と考察

それでは、以下で実験の結果とその考察を行う。この実験で検証したのは以下の項目である。

- ① 歩行者にとって心理的時空間領域は存在しているといってよいのか。
- ② 情報提供によって、歩行者はより効率的に歩行行動を行えるようになるのか。
- ③ 歩行者はどのような歩き方をしているときにどの程度慌しさを感じるのか。

この3点について、実験の結果から検証を行う。

##### 8. 4. 1 心理的時空間領域の存在の検証

まず、心理的時空間領域の存在を、実験中で行ったアンケート調査の結果から検討をする。

図8-11に、心理的時空間領域の質問に対する回答割合を横断行動開始位置ごとに示した。

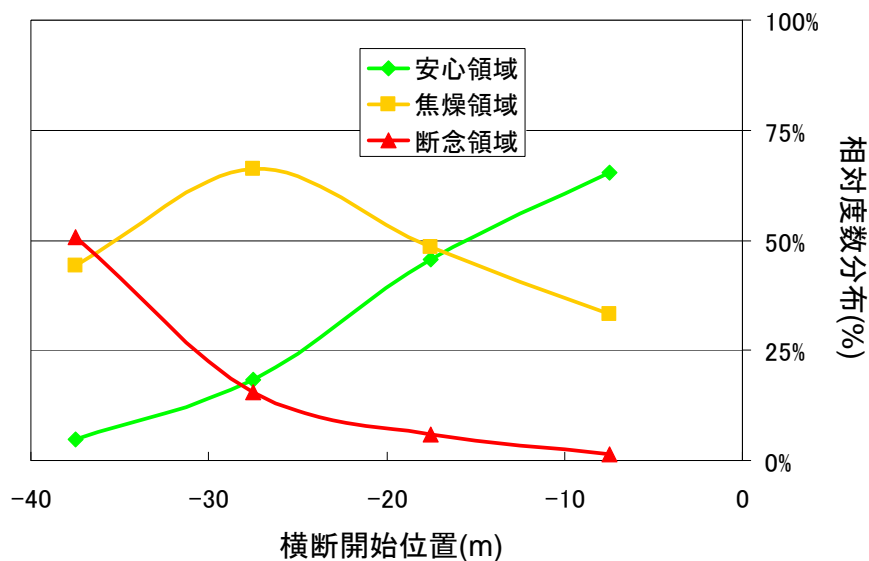


図8-11 心理的時空間領域に関する回答の相対度数分布

図の「安心領域」は図8-6の「1」、「焦燥領域」は「2」及び「3」、「断念領域」は「4」の選択肢に相当する。なお、この実験では、手前5mと10m、15mと20m、25mと30m、35mと40mは一体と考えて扱っており、実験ケースもこれらのペアの中でランダムになるように設計している。そのため、それぞれのペアごとに回答割合を算出し、その値を各ペアの中央値である7.5m、17.5m、27.5m、37.5mにおける値とすることにした。図8-11により、本研究で提案している心理的時空間領域は存在しているといつてよさそうであることがわかる。更に、サイクル長が120秒のケースと90秒ケースで分けてこれを見てみると、図8-12及び8-13が得られる。

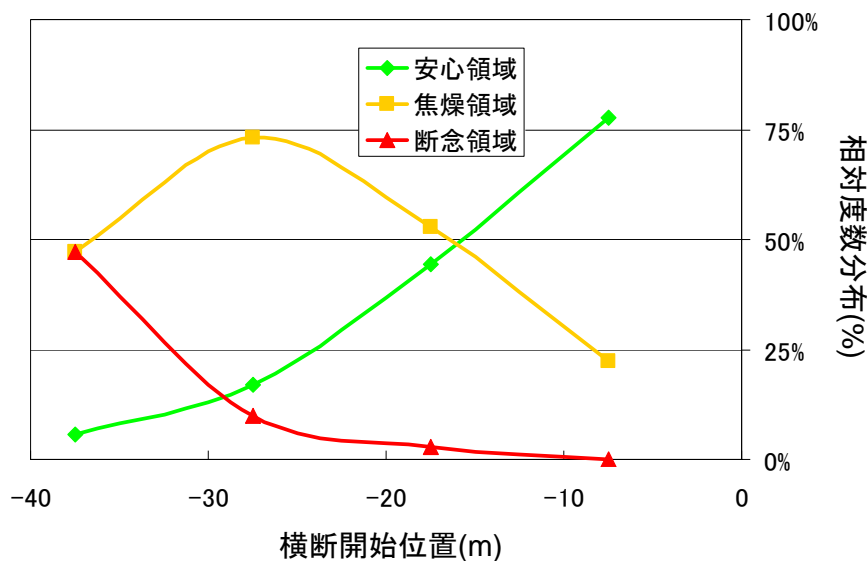


図8-12 心理的時空間領域の相対度数分布（サイクル長 120 秒のケース）

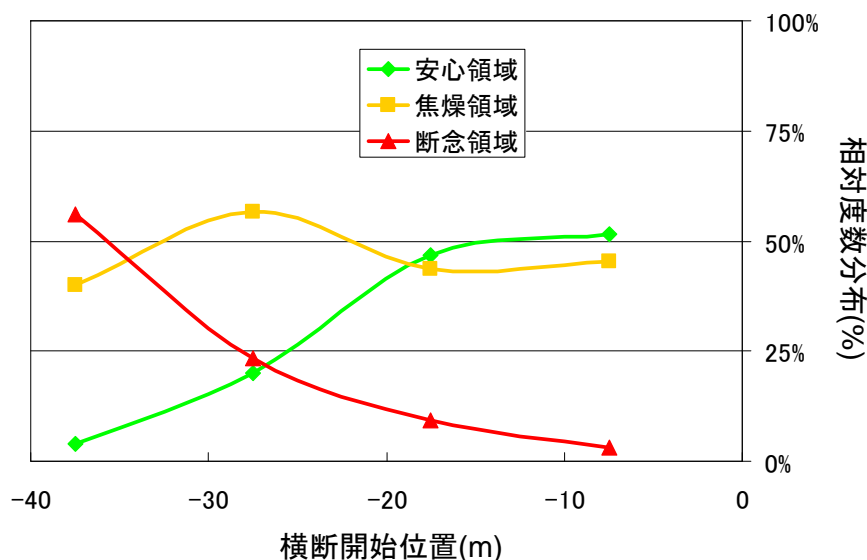


図8-13 心理的時空間領域の相対度数分布（サイクル長 90 秒のケース）

図より、横断行動開始位置が遠くなるに従って、安心領域から焦燥領域を経て断念領域へと心理的時空間領域が変化していく様子をより鮮明に理解することができる。歩行速度が被験者によ

て異なるため、それぞれの領域の境界は被験者によって異なるため、このような分布の形となると考えることができる。また、サイクルが 120 秒と 90 秒のときでは、後者の方が安心領域が狭くなるため、より近い横断行動開始位置から焦燥領域と考える被験者が多いこと、また、断念領域と被験者が考える位置も近まっていることがわかる。

なお、例えば焦燥領域に着目し、50%の被験者が初めて焦燥領域と判断する地点を平均的な焦燥領域の境界と考えると、この実験空間内における被験者の平均的な快適歩行速度を算出することができる。図 8-12 のサイクル長が 120 秒のケースにおいて初めて 50%の被験者が焦燥領域と判断するのは横断歩道の手前約 17m の位置である。横断歩道の距離は 26m であることから、図 8-5 より 40 秒の歩行者現示時間で  $17 + 26 = 43\text{ m}$  を歩く速度ということで、 $43/40 = 1.08\text{ m/s}$  が平均的な快適歩行速度ということになる。齋藤・有菌 (1986) によると一般的な歩行者の平均歩行速度は  $1.36\text{ m/s}$  とされており、これと比較するとこの実験で得られた値は小さいものとなっている。これは、VR によるシミュレーションのため、歩行者が平常通りの歩行速度で歩くことが困難なためということができよう。この事実を考慮しても、心理的時空間領域の存在自体を否定するものではない。なお、サイクル長が 90 秒のケースにおいては、安心領域と焦燥領域の境界は横断歩道の手前  $1.08 \times 30 - 26 = 6.4\text{ m}$  の位置ということになり、これは図 8-13 には明確には現れないことになる。

#### 8. 4. 2 情報提供の効果に関する分析

次に、歩行者現示時間に関する情報提供を行った効果について分析を行うことにする。まず、情報提供を行うことによって、被験者は歩行者現示時間をより正確に把握することができるため、それが歩行速度の変化として現れることがないかどうかを分析した。例えば、サイクル長が 90 秒で、情報提供がなされていない場合（実験空間 a）と情報提供がなされている場合（実験空間 c）について、代表的な被験者の歩行速度変化をプロットすると、図 8-14 が得られた。

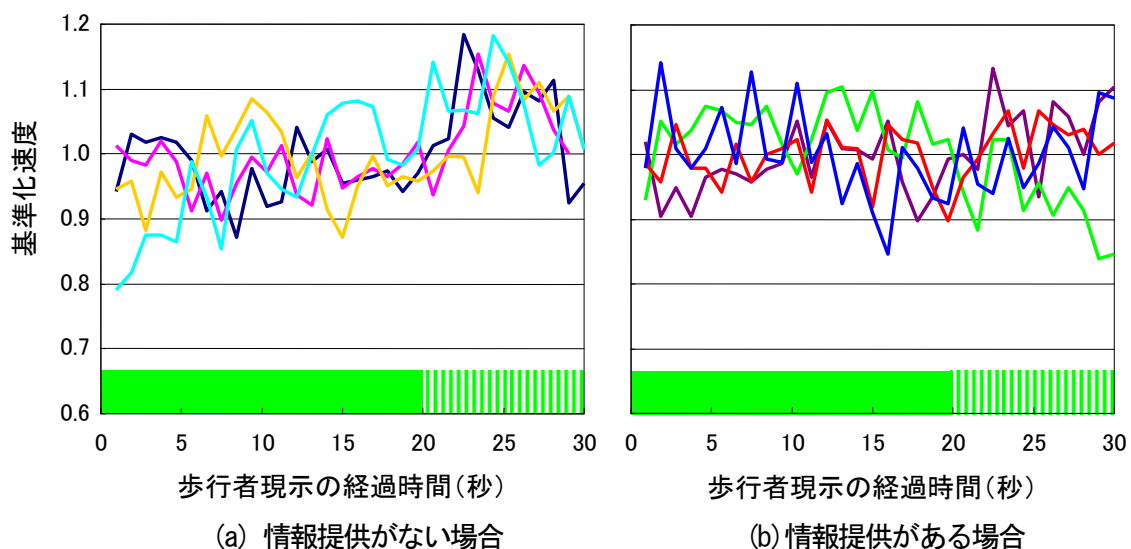


図 8-14 情報提供の有無による被験者の歩行速度変化例

図の基準化速度とは、被験者によって異なる歩行速度を統一的に扱うために、各被験者の瞬間歩行速度を、その試行における平均歩行速度で割ったものである。VR空間内の歩行速度は、必ずしも現実空間の歩行速度とは一致せず、被験者の歩行速度を正確には把握できないため、相対的な指標によってその変動傾向を捉えようと考え、このような指標を用いた。これにより、被験者の歩行速度は常にある程度は変動しているものの、とりわけ情報提供がない場合に歩行者信号が点滅をし始めた後にその変動が激しくなる様子が見て取れる。これを統計的に示すため、各被験者の歩行者現示における歩行速度の標準偏差を、点滅の前後で別々に求め、更にその平均値に有意な差があるかどうかを検定したところ、表8-4を得た。なお、この分析においては点滅前後における歩行速度の変動を見ているため、殆どの被験者が点滅開始前に歩行を完了するケースは除外した。

表8-4 点滅前後での歩行速度の変動状況の差異

実験空間	サイクル長	情報提供	標準偏差平均値		t値	p値(片側)
			点滅前	点滅後		
a	90秒	なし	0.115	0.147	-1.75 *	0.048
c	90秒	あり	0.119	0.130	-0.80	0.215
b	120秒	なし	0.111	0.137	-1.88 *	0.034
d	120秒	あり	0.134	0.148	-0.91	0.184

\*: 5%の有意水準で有意な差異があるもの

この表から、情報提供を行わない場合、5%の有意水準で信号が点滅した後に被験者は歩行速度の変動を大きくしており、逆に情報提供が行われると点滅後も歩行速度をあまり変動させずに歩行を継続しているといえることができる。以上から、情報提供を行うことによって、被験者はより歩行速度計画を行いやすくなっているようだ、といえることができる。

#### 8. 4. 3 歩行方法と慌しさの主観評価の関係

最後に、歩行者がどのような歩き方をしているときに、どの程度の慌しさを感じるものなのかについて分析を行う。まず考えられるのは、慌しさの不快感は歩行者現示開始時に歩行者がいた位置によって変化するのではないかと、ということである。そこで、サイクル長が90秒と120秒のそれぞれの場合について、特に1回も信号を待たずに横断を完了できた被験者を対象として、

表8-5 横断行動開始位置と慌しさに関する主観評価値の関係

(a) サイクル長 120 秒の場合

横断開始位置(m)	観測数	平均評価値	t値	p値(両側)
7.5	36	2.19	-2.40**	0.019
17.5	35	3.49		
27.5	36	4.44		
37.5	20	6.55		

(b) サイクル長 90 秒の場合

横断開始位置(m)	観測数	平均評価値	t値	p値(両側)
7.5	30	2.40	-2.80**	0.007
17.5	21	4.05		
27.5	9	3.56		
37.5	4	4.25		

\*\*: 5%の有意水準で有意な差異があるもの \* : 10%の有意水準で有意な差異があるもの

横断行動開始位置によって慌しさがどう変化していたかを調べてみると、表8-5のようになった。この表においても、手前5mと10m、15mと20m、25mと30m、35mと40mは一体と考えて扱っている。

この表によると、信号待ちをせずに横断した被験者については、概ね横断行動開始位置が交差点から遠ざかるにしたがって、その感じる慌しさが増大していく様子が見て取れる。但し、その傾向が顕著なのはサイクル長が長い場合であり、サイクル長が短い場合にはその傾向は弱まることになる。これは、サイクル長が短い場合に信号待ちをせずに横断する被験者の割合がこの実験ではそもそも少なく、十分に比較可能な観測数が得られていないためと考えることはできる。

しかし、そもそも前述のとおり心理的時空間領域における焦燥領域はサイクル長が短い場合には交差点により近い位置に存在することになり、慌しさは主に焦燥領域の中で感じるものであると考えられるため、次に心理的時空間領域と慌しさの関係について見てみることにする。表8-6は、被験者が各心理的時空間領域にいると感じていた場合の慌しさの主観評価値の平均を示したものである。

表8-6 各心理的時空間領域における慌しさに関する主観評価値

心理的 時空間領域	観測数	平均 評価値	t値	p値(両側)
安心領域	92	1.87	-11.65 **	0.000
焦燥領域	130	5.08		
断念領域	47	5.34	-0.660	0.510

\*\* : 5%の有意水準で有意な差異があるもの

これにより、安心領域と感じていた被験者とそれ以外の領域と感じていた被験者の主観評価値の間には有意な差異が見受けられ、焦燥領域と断念領域の間には差異は見受けられなかった。焦燥領域に比較して断念領域における慌しさは低く評価されることが予想されたが、そのようにならなかった理由について考察するため、心理的時空間領域と実際の行動が異なるケース、即ち安心領域や焦燥領域と認識していながら信号待ちをしていたり、断念領域と認識していながら信号待ちをせずに横断を完了できたりした割合を算出してみたところ、表8-7のようになった。

表8-7 各心理的時空間領域における行動変更の割合

	安心領域	焦燥領域	断念領域
観測数	92	130	47
変更数	7	30	7
変更率	8%	23%	15%

これを見ると、安心領域と認識していた被験者の殆どが行動を変更せずに横断を完了しているのに対して、焦燥領域や断念領域の被験者は変更率が高いことがわかる。特に焦燥領域の変更率が高い理由としては、心理的時空間領域に関する質問票の焦燥領域に相当する回答に「一度で

渡りきれんかどうか分からない」という項目を用意していたためと考えられるが、被験者が想定していた歩行速度と VR 空間内の速度との間にギャップがあることが主な原因と考えられる。これらの理由により焦燥領域と断念領域の明確な区分が行われず、評価値としても同程度の評価になったものとするのが妥当であろう。

更に、情報提供の有無によって慌しさはどのように変化するかについて分析を加えることにする。表 8-8 は、情報提供を行わなかった場合と行った場合それぞれにおける慌しさの主観評価値を、各心理的時空間領域ごとにまとめたものである。

表 8-8 情報提供の有無と各心理的時空間領域の慌しさの主観評価値

実験空間	サイクル長	情報提供	平均評価値		
			安心領域	焦燥領域	断念領域
a	90秒	なし	2.25	4.55	5.18
c	90秒	あり	2.11	4.93	4.43
b	120秒	なし	1.57	5.16	6.20
d	120秒	あり	1.71	5.57	6.14

表から、いずれの場合にも安心領域と焦燥領域の主観評価値の間には明確な差異があることがわかり、実際に平均値の差の検定を行っても 1%の有意水準で差異が確認できた。一方、焦燥領域と断念領域の主観評価値に着目すると、サイクル長が短い場合には心理的時空間領域の区分が情報提供によって明確になるためか、情報提供下（実験空間 c）での断念領域の主観評価値が焦燥領域に対して若干低くなっていることがわかる。しかしながら、いずれの場合も 5%の有意水準で差異は確認できなかった。この実験では、VR 空間内の歩行速度と実際の被験者の歩行速度は必ずしも一致しないため検証は困難だが、慌しさに関する主観評価は実際の歩行速度に強く依存するのではないかと考えられる。

この実験の結果の分析によって、まず歩行者には「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」という心理的時空間領域が存在することが、ある程度合理的に説明可能であることがわかった。また、慌しさに関しては、横断行動開始位置などによって差異が検証される場合があることはわかったものの、定量的な相関関係を見出すことは難しく、実際の歩行速度と強く関わるものなのではないかと考えられた。しかしながら、快適歩行速度に対してどの程度の歩行速度で、どのくらいの時間歩行したかを実験によって確認することも困難と考えられるため、主観評価尺度ではないその他の指標を用いる方がより慌しさを適切に表現できるのではないかとと思われる。なお、本章の実験に関する報告の一部は、鳩山・杉森（2004、2005）において既に報告されているものである。

## 第9章

総合交差点設計制御評価

モデルの開発

本章では、これまでの実験の結果を活用し、歩行者と自動車双方を考慮した総合的な交差点設計制御評価モデルを開発する。本研究では、歩行者と自動車双方を同時に扱うことのできる交通シミュレーションモデルを構築することによって、交差点の設計制御を考えることにした。そのため、まず既往の交通シミュレーションにはどのようなものが存在するかについて触れた後、本研究で用いることにした汎用交通シミュレーションモデル AIMSUN について詳細に紹介し、更に評価モデルとするために本研究で独自に追加した機能について解説を行う。なお、二段階横断方式及びサイクル長の短縮に関する効果を測るために交通シミュレーションを用いることにした理由は、以下による。

- ① 交差点空間は多数の車両及び歩行者が交錯する複雑なシステムであり、多数のパラメータが関係するため、解析的方法・理論的方法で取り扱うことが困難と考えられるため。
- ② 自動車や歩行者の移動速度などの確率の変動要因を含むシステムを容易に扱える。
- ③ 歩行者が歩行速度を突然変化させたり、という動学的行動原理を容易に扱える。

## 9. 1 既往の交通シミュレータ

まず、既往の交通シミュレータの現状について説明する。本研究では、歩行者と自動車の双方を扱えるシミュレーションモデルを構築することを目的としている。しかし、これまでは自動車を扱うモデルと歩行者を扱うモデルとはそれぞれ独立して開発されることが多かった。そこで、自動車に主眼を置いて開発されたものと、歩行者に主眼を置いて開発されたもののそれぞれについてここで概説することにする。

### 9. 1. 1 自動車のシミュレーション

自動車の交通流を再現するためのシミュレーションモデルの開発には、国内外を含め実に 30 年以上の歴史があり、その一部は実用化され実際の交通施策の事前評価（棚橋・北岡・馬場・森・寺田・寺本、2002）や信号制御方法の検討（羽藤・香月・貴志・矢尾谷、1994 など）などに用いられているものもある。自動車の交通流シミュレーションには、その車両の表現方法から大きくミクロモデルとマクロモデルに分けるのが通例であった（深田・川村・吉田、1991）。ミクロモデルとは車両一台一台の挙動を詳細に再現しようとするもので、各車両の特性やドライバーの特性などをインプットデータとして入力するものであり、信号制御方式の検討や大規模店舗の周辺の混雑状況の検討などといった小規模な領域の交通対策の検討を行うものである。一方マクロモデルとは、都市全体の道路ネットワークなど広域な交通流を扱うもので、車両個々を扱うことはせず、全体の流れとして扱うものであり、施策導入による都市全体の影響などを見るのに使われるものである。また、「やさしい交通シミュレーション」（（社）交通工学研究会、2000）及び「交通シミュレーション適用のススメ」（（社）交通工学研究会、2004）によると、ミクロモデルとマクロモデルの特徴は以下のように表現することができる。また、ミクロ・マクロの双方を取り扱うことのできるモデルも存在する。

- ・マイクロモデル … 進行方向への車両の移動ロジックには追従型モデルが用いられ、車線変更挙動に関してもモデル化されている。経路選択モデルが内包されているかどうかによって2種類に更に大別される。内包されているものは、小規模な道路ネットワークを扱うことができ、内包されていないものは、単独交差点や単一の路線を扱うのに適している。
- ・マクロモデル … 車両の挙動は交通流特性を考慮した簡略なモデル（流体近似モデル）によって表現され、規模の大きな道路ネットワークを対象とするため、経路選択モデルも内包されている。車線挙動の取り扱いを行うかどうかによって2種類に更に分けられ、取り扱うものは車線構成の広域的影響を、取り扱わないものは都市圏規模での交通状況を対象とするのに適している。

これまでに開発された自動車の交通シミュレーションモデルの例を表9-1に示す。

表9-1 自動車の交通シミュレーションモデルの例

モデル名	マイクロ/マクロ	経路選択	開発年	開発主体
TRANSYT	マクロ	なし	1969	TRRL(TRL)
MACSTRAN	ミクロ	あり	1975	科学警察研究所
CONTRAM	ミクロ	あり	1978	TRRL
DYTAM-I	ミクロ	あり	1978	科学警察研究所
SATURN	マクロ	あり	1978	Leeds大
INTEGRATION	ミクロ	あり	1988	Waterloo大、Queens大
HUTSIM	ミクロ	あり	1989	Helsinki工大
BOX	マクロ	あり	1991	京大
森津モデル	ミクロ	あり	1991	神戸大
TRAF-NETSIM	ミクロ	なし	1992	FHWA
AVENUE	マイクロ+マクロ	あり	1993	東大、都立大、千葉工大、東洋大、(株)熊谷組
DYNASMART	ミクロ	あり	1993	Texas大
FHWAモデル	マイクロ+マクロ	あり	1994	FHWA
Paramics	ミクロ	あり	1994	Edinburgh大
SOUND	ミクロ	あり	1995	東大
WATSim	ミクロ	あり	1996	KLD Associates
NETSTREAM I	マイクロ+マクロ	あり	1996	豊田中央研究所
AIMSUN	ミクロ	あり	1997	TSS
NETSTREAM II	ミクロ	あり	2000	豊田中央研究所

また、ここでマクロモデルとして SATURN、マイクロモデルとして SOUND を紹介しておく。

#### 1) SATURN

SATURN は英国の Leeds 大学の交通工学研究所が開発した、交通流を流体モデルによって表した交通流シミュレータであり、既に様々な国々の公共機関によって使用されているものである。経路選択モデルも内包されているため、広域ネットワークを取り扱うことができる。入

力データはOD表と道路ネットワーク（各ノードの交差点形状、各リンクの道路構造など）であり、各リンクの交通量や交差点での平均遅れや停止回数、渋滞の伸び率などを出力することができる。具体的なモデルの構成は図9-1に示すとおりである。まずOD表と道路ネットワークから交通需要量を推計したあとで、交差点での遅れを考慮したシミュレーションを繰り返し行い、交通量が安定した段階で収束と判断するのである。

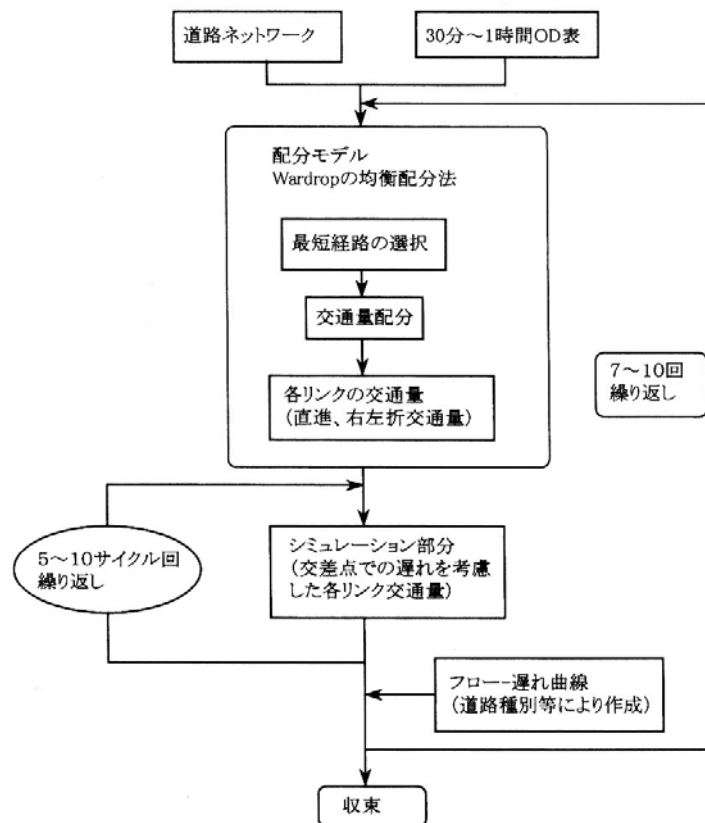


図9-1 SATURNの概要（「やさしい交通シミュレーション」より抜粋）

このように、SATURNでは各ノードや道路の構造、そしてODに関する詳細なデータを作成することができれば、広域の交通ネットワークの検討を行うことが可能なモデルであるが、交差点の信号制御方法などを詳細に検討するのには適しているとはいえない。

## 2) SOUND

SOUNDは1995年の東京大学生産技術研究所によって開発された、車両を個々に取り扱うことができるモデルである（吉井・桑原・森田、1995）。古くは道路を細ブロックに分割して、ブロックごとの車両密度で車両の動向を示すブロック密度法というマクロモデルが使われていた（平子・馬場・寺本、1996など）が、ネットワークが大きくなるとブロックの数も膨大になり計算が困難となるため、個々に車両を扱う方法が提案されることになったという経緯をもつ。このモデルは、渋滞の延伸の状況などを再現することができ、都市内高速道路網など大規模な道路ネットワークを取り扱うことができるものである。このモデルは大きく経路選択モデ

ルとシミュレーションモデルからなっている。まず個々のリングごとに交通量と交通密度の関係（Q-K 関係）を予め定義しておき、各シミュレーションステップごとに個々の車両を下流側から順次移動させていくという車両追従モデルによって車両を移動させる。そして、経路選択モデルでは、経路が予め固定されている経路固定層と経路を逐次選択する経路選択層の2種類の行動原理を取り扱うことができ、それぞれ経路の旅行時間を元に Dial 配分によって経路を選択することになる。入力データは、道路ネットワークと個々のリンクの交通容量、シミュレーションステップ、経路選択層の割合、Dial 配分パラメータなどであり、リンク交通量や旅行時間、渋滞長などを出力可能である。しかしながら、分合流、交差点などにおける車両相互のインタラクションを個々に扱うのは困難であり、やはり交差点の信号制御方法などの詳細検討には適しているとはいえない。

以上、主に自動車を対象として既に開発された交通シミュレーションモデルについて紹介することにしたが、交差点の構造や信号制御を詳細に検討するために適したモデルというのはあまり多くなく、表 9-1 においては WATSim や AIMSUN が主に自動車の詳細な行動などをミクロに取り扱うことのできるモデルのようである。また、本研究では歩行者と自動車の双方を扱うことを念頭においているが、歩行者のランダムな動きと自動車の動きをともに扱うことは困難なのが現状のようである。

### 9. 1. 2 歩行者のシミュレーション

次に、歩行者に主眼を置かれたシミュレーションモデルに関して紹介することにする。歩行者のシミュレーションも 30 年以上の歴史を有する分野である。自動車の場合と同じようにマクロな視点のモデルからミクロな視点のものまで研究はなされている。特に前者は古くから研究がなされており、Fruin（1971）が最初に歩行者の流動状況を総体的、量的に把握し、歩行者空間としてどの程度の面積が必要とされるかを算出する実用的なモデルを作成した。モデルにおいて、歩行者の行動は自動車と同じように交通量  $Q$  と速度  $V$ 、交通密度  $K$  の関係式に集約されており、この関係式から必要空間面積が算出されていた。

しかし、歩行者は前の歩行者の奇跡を追従することで自発的に群集を形成（Self-organizing）したり、ボトルネック部分を対向する群集が通ろうとする場合に通常交通容量より更に通りにくくなったりといった、歩行者の相互関係をマクロモデルで扱うことは困難である。また、空間面積自体は小さくても、歩行者流を整流する設備やルールを設けることによって、容量を増加させることができるという事実もマクロモデルでは取り扱えない。従って、各歩行者の行動をミクロに取り扱うことによって群集流を理解する必要性が生じた。このような、歩行者の群集流を再現するためのミクロモデルは、大きく以下の3つに分類することができる。

#### 1) 物理学的モデル

まず、物理法則を応用することによって歩行者流を説明しようとするものがある。Henderson

(1974) は、Maxwell-Boltzmann の理論を応用し、気体の運動に基づく流体モデルによって歩行者流の説明を試みた。彼のモデルは基本的には運動量とエネルギーの保存から成るものであった。これに対し、Helbing (1992) は流体モデルをベースに歩行者の意志と相互作用という歩行者特有の要素を加えたモデルを提案し、Helbing・Molnár・Farkas・Bolay (2001) や Helbing・Farkas・Molnár・Vicsek (2001) では更に群集流の発生やボトルネック部分での歩行流の再現、パニック時の行動シミュレーションまで拡張をするに至っている。

流体モデルの他に、岡崎 (1979) は磁気モデルと運動方程式によって歩行者の移動の表現を試み、松下 (1992) は更に磁気モデルに待ち行動モデルを加えることで、群集流と待ち行列の混ざった状況の再現モデルの構築を試みている。物理法則を応用したモデルは、計算が複雑化しがちであるのに比べて、十分な歩行者行動の再現は困難となることが多いようである。

## 2) メッシュモデル

次に紹介するマルチエージェントモデルの先駆けとしても位置づけられるものがあり、歩行空間をメッシュに分割し、各メッシュにいる人の数や密度の変化によって群集流を表現するものである。中 (1978) は主に鉄道駅の旅客流動モデルを提案しており、歩行者の歩行速度は各歩行者の移動しようとする方向に隣接するメッシュの歩行者密度によって規定されるとしている。このモデルによって、歩行者施設内のどの辺りが混雑するかを推定することが可能となるが、メッシュごとの状況しか捉えられないため、その表現できる内容には限界がある。

## 3) マルチエージェントモデル

メッシュモデルにおいては各メッシュは空間を意味していた。それに対して、マルチエージェントモデルは、各歩行者を空間の最小単位として扱うものである。マルチエージェントモデルの中には、空間を歩行者の大きさのセルに分割し、歩行者の存在をセルのオンオフで、歩行者の移動をセル間の移動確率によって表現するセルオートマトン法によるものが多い。Schadschneider (2001) は、その移動確率計算時に歩行者の仮想経路上の歩行者数の影響を考慮したモデルを提案し、Burstedde・Kirchner・Klauck・Schadschneider・Zittartz (2001) において、群集流の形成や緊急時の避難などを対象にシミュレーションを行っている。また、Kerridge・Hine・Wigan (2001) や、Haklay・O'Sullivan・Thurstain-Goodwin・Schelhorn (2001)、Dijkstra・Jessurun・Timmermans (2001) においても、同様のモデルが提案されている。セルオートマトン法は計算は容易であるが離散的な時空間しか扱うことができないという欠点を持つ。

それに対し Teknomo (2006) は、特にセルを設けずに個々の歩行者を取り扱うことのできるモデルを提案している。このモデルは、各歩行者が目的地から引力を、周囲の歩行者からは引力や斥力を受けることによって物理学的に移動するとするモデルであり、実験から観測されたデータを用いてこれらの力に関するパラメータを推定している。そして数値計算により各歩行者の移動先の座標を算定し、その位置に各歩行者を移動させることを行うのである。これらのモデルは、種々の歩行者行動モデルを具現化するのに非常に有効なものである。

マルチエージェントモデルによる歩行者シミュレーションには、既に Pedsim や Legion などソフトウェアとして実用化され、市販されているものもある。

#### 4) 経済学的モデル

最後に、上記のようなモデルに更に経路選択という要素を加えたものがある。Hoogendoorn・Bovy・Daamen (2001) は、各歩行者は歩行空間上に不効用（旅行時間）関数を定義し、それが最小となるような経路を選択して行動するとするモデルを提案し、更に Hoogendoorn・Bovy (2004) では、経路選択行動モデルを実際の空間に適応して検証を行っている。

以上のように、歩行者のシミュレーションモデルも実に多く研究開発がなされているため、独自の視点を提供できるモデルでなければ開発の意義はないといってよいのが現状である。しかし、これらのモデルでは、基本的に歩行者は希望する歩行速度で歩くか、他者との干渉などの障害がある場合には歩行速度を下げて歩くことしか考えられておらず、信号に間に合うように歩行者が走る行動、即ち希望する歩行速度が変化するという行動を考えているものは見当たらない。従って、歩行速度が変化するという歩行者行動を取り扱うことのできるモデルを開発することは、意義のあるものであるということができると考えられる。

## 9. 2 交通シミュレータ AIMSUN の概要

本研究では、自動車の交通シミュレーションモデルの紹介の際に触れた交通シミュレータ AIMSUN を用いて、歩行者と自動車の双方を取り扱う交通シミュレーションモデルを作成することにした。本節では、AIMSUN を使用することにした理由について述べることにする。

### 9. 2. 1 モデルの特徴

AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) は、TSS (Transport Simulation Systems) 社によって製作された、中・上級エンジニア向けの総合交通シミュレータである。従来の製品化された交通シミュレータは、その自動車の移動アルゴリズムやデータの取得方法などは公開されないことが多かったため、利用者のニーズに合わせてモデルを改変することは困難であった。それに対して、AIMSUN は完全なオープン・アーキテクチャを採用しており、実際にヨーロッパ、北米などを中心に世界各国の研究者・行政・民間コンサルタントがヘビーユーザーとなり、彼らの意見をフィードバックする形で次々にモデルの拡張が行われている。AIMSUN の主な特徴には、①様々な交通モードのモデリングが可能であること、②分岐率による流動と OD による流動の双方を扱えること、③3 次元的なイラストレーションを容易に行うことができることに加え、最大の特徴である④ユーザーが独自にプログラムを組むことによって、追加的なアプリケーションを作ることができること、が挙げられる。AIMSUN の主な構成を図 9-2 に示す。基本的な交通シミュレーションを行うのは“AIMSUN2D”として示されている部位である。

ユーザーが独自にプログラムを作成するには、AIMSUN API というモジュールを使用する。このモジュールによって、AIMSUN のシミュレーションモデルとユーザー独自のプログラムと

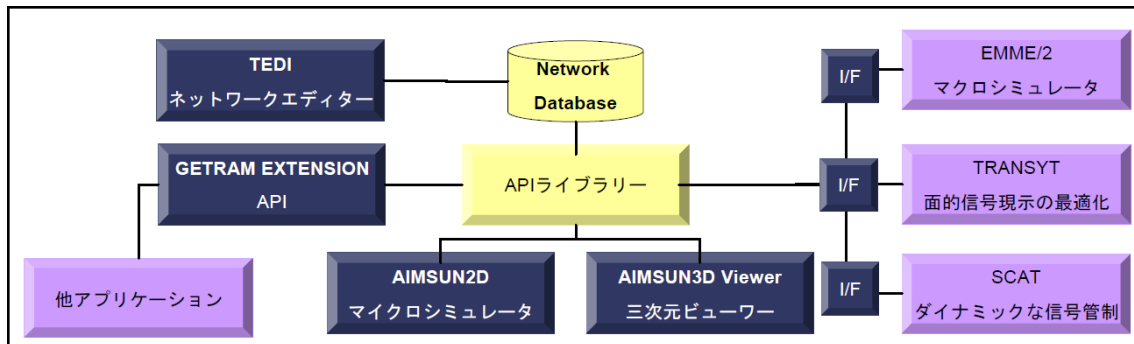


図9-2 AIMSUNの構成（「ITS時代のハイエンド 総合交通シミュレータ・AIMSUN」より）

の間でデータや交通制御方法などをやり取りすることができ、シミュレーション途中の任意のデータを抽出したり、それらのデータを恣意的に変更したりといった操作が可能となる。このモジュールを使用することによって、歩行者の挙動、特に信号の現示を予測しながら速度を調節する行動をシミュレーションすることができるようになる点が、本研究においてAIMSUNを用いるに至った最大の理由である。なお、プログラムの作成はC言語を用いることにしている。

### 9. 2. 2 シミュレーションプロセスと入力データ

AIMSUN によるシミュレーションのプロセスを図9-3に示す。図に示されているとおり、シミュレーションステップごとに交通信号の条件を更新し、追従モデルと車線変更モデルを用いることによって車両を順次動かしていくことになる。なお、このプロセスの他にODを定義して車両に経路選択させるモデルも利用が可能である。

以上のようなプロセスでシミュレーションを行うために整備すべきデータは、主に以下の4種類に分類される。

#### 1) ネットワークレイアウト

AIMSUN では、道路ネットワークは一方通行のリンクとそれらの互いに接続するノード（交差点）の集合で表される。そのため、各リンクの車線数（場合によっては専用レーンの定義）、各交差点の許容する移動（車線ごとの右左折直進の定義や車線変更できない区間の定義など）、リンクや交差点における制限速度を整備する必要がある。

#### 2) 車両属性データ

AIMSUN では、シミュレーションに用いる各車両タイプ（歩行者も含む）についてその属性を詳細に設定する必要がある。設定の必要があるのは、車両の長さ・幅（m）、希望走行速度（m/s）、通常時加速・減速度（m/s<sup>2</sup>）、緊急時最大減速度（m/s<sup>2</sup>）、制限速度超過率、最小車間距離（m）、最大譲歩時間（s）である。それぞれ平均値、標準偏差、最大値、最小値を入力すれば、正規分布によるばらつきを持たせたシミュレーションが可能となる。

#### 3) 交通需要データ

交通需要データとしては、各リンクの交通量によって定義する方法とOD表によって定義す

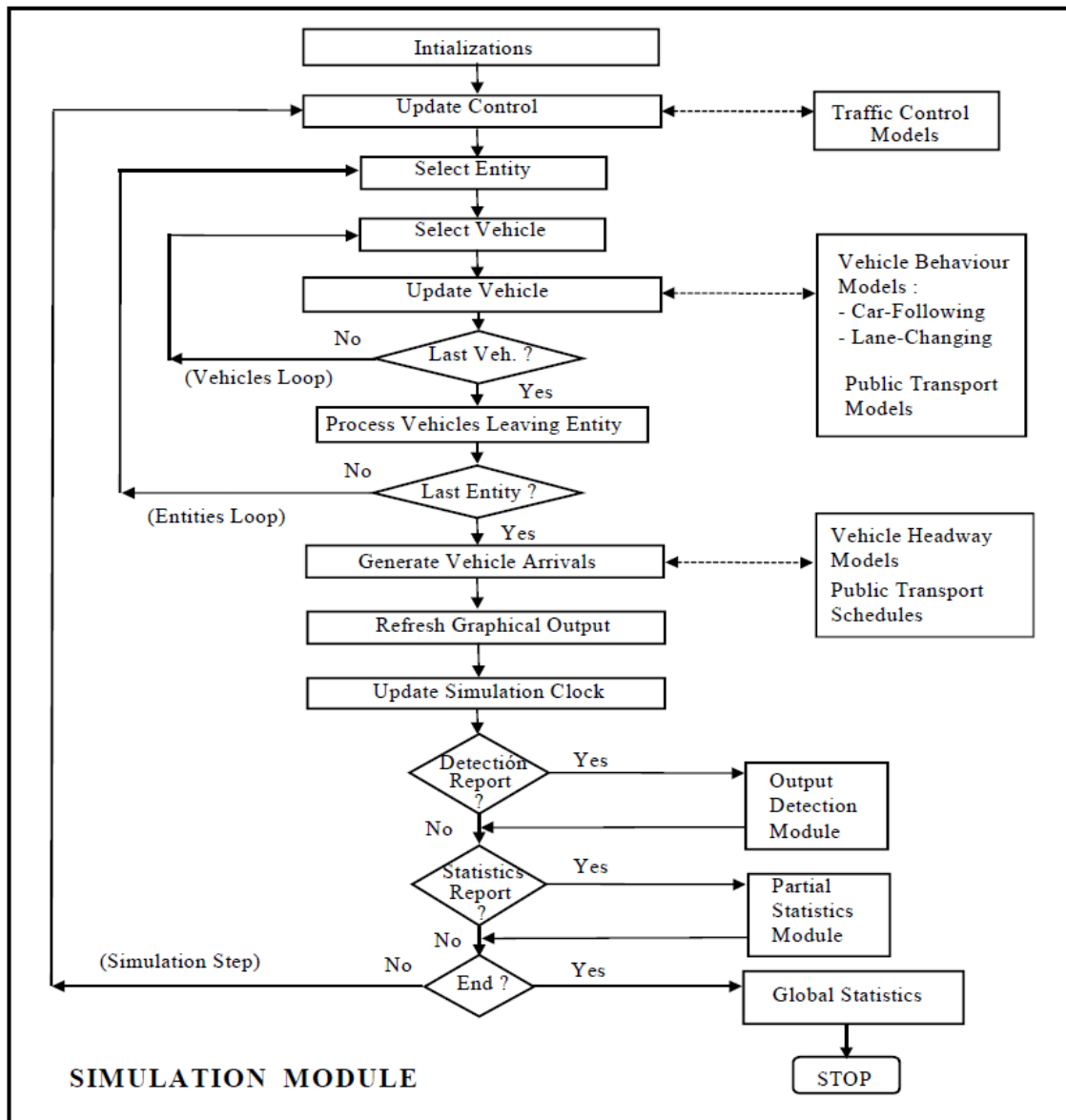


図9-3 AIMSUNのシミュレーションプロセス（「AIMSUN 5.0 User's Manual」より）

る方法がある。前者の場合、ネットワークの入り口リンクごとに各車両タイプの交通量 (veh/h) を定義するとともに、交差点ごとに各車両タイプの分岐率を定義する必要がある。後者の場合は、ネットワーク上にセントロイド（発生集中点）を設定して、それらのセントロイド間の交通量 (veh/h) を OD 表の形で定義する必要がある。なお、本研究では、大規模な交通ネットワークにおける交通量の配分ではなく、単一或いは複数の交差点における歩行者と自動車の行動に主眼しているため、OD モデルではなく分岐率モデルを用いることにした。

#### 4) 交通制御データ

設定された交通量を制御するためには、交通信号が主に用いられる。交通信号の設置のためには、信号（停止線）の設置位置、各現示で認める通行権のグループ、各現示の順序と継続時間、オフセットを定義する必要がある。

本研究では、歩行者も基本的にはサイズの小さい車両と扱うことにし、歩道も 60cm 程度の細かい車線の集合として扱うことにした。そのため、従来の歩行者シミュレータのような 2 次元的な挙動を再現できるものではなく、横断歩道を横断するという行為は基本的には直線的挙動であり、前に歩行者がいる場合にそれを避ける（車線を変更する）挙動を示すものであると考え、歩行者密度の極めて高い交差点でない限りは、このようなシミュレーション方法では大きな問題は生じないと考えられる。歩行者の歩行速度変化を AIMSUN API で扱う際には、シミュレーションステップごとに歩行者の属性データにおける希望走行（歩行）速度を調整することによって制御を行うことができる。

### 9.3 総合交差点設計制御評価モデルの構築

前述の交通シミュレータ AIMSUN を用いることで、本研究では図 9-4 に示すような歩行者と自動車の双方を扱える総合交差点設計制御評価モデルを構築することにした。まず交差点規模として歩行者や自動車の交通量、及び交差点の構造を決めた後、信号サイクル長と中央帯を設置するか否かを決定し、これらの条件から交差点の信号現示設計を行う。そして、AIMSUN によって交通シミュレーションを実施し、交差点評価指標を算出するというものである。これによって、交差点規模を固定した際に、サイクル短縮がそれぞれの指標にどう寄与するのかを調べることができ、総合的視点からサイクル短縮の有効性を検証することができるものとする。ここで、従

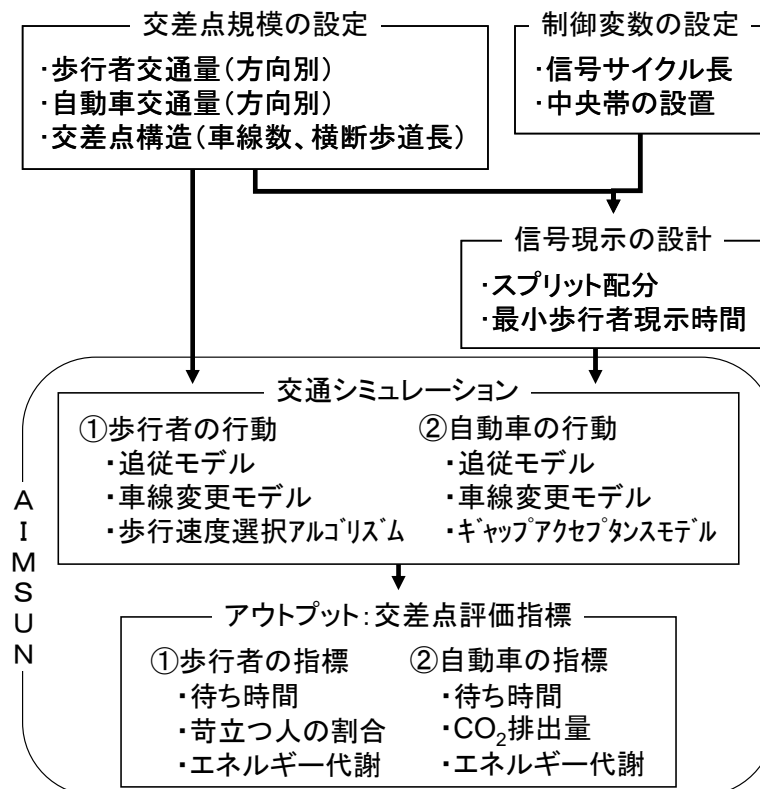


図 9-4 総合交差点設計制御評価モデルの構造

来の AIMSUN に対して本研究が拡張した点は、4.2 節において述べた歩行者の横断行動原理をアルゴリズム化して導入したことと、歩行者や自動車に関わる様々な指標を追加的に分析可能にした点である。次項からは、この2点について説明を行うとともに、その他の歩行者属性・自動車属性としてどのような数値を用いたかについても触れることによって、交通シミュレーションとそれによる交差点評価指標の算出がどのように行われるかを示すことにする。

### 9.3.1 歩行者速度選択アルゴリズムの導入

歩行者が信号の現示を予測しながら速度を調節する行動を AIMSUN で行うために、歩行者速度選択アルゴリズム (Pedestrian Speed Decision Algorithm、以下 PSD アルゴリズム) と称するプログラムを、現示の切り分けが行われるかどうかに応じて3種類作成した。

まず、現示の切り分けが行われない場合の PSD アルゴリズムについて述べる。図 9-5 に示すように、ある時刻  $t$  において歩行者は横断歩道手前の位置  $x$  にいるとする。このとき歩行者は、歩行者現示の残り時間  $RT$ 、横断完了までの横断距離の残り  $RD$ 、そして中央帯までの距離の残り  $RD_m$  をそれぞれ知覚する。このとき、4.2 節にて示した横断行動原理を踏まえると、歩行者は図 9-6 のアルゴリズムに従って歩行速度  $v$  を逐次決定するものと考えられる。ここで、 $v_c$  は快適歩行速度を、 $v_{max}$  は限界歩行速度をそれぞれ表している。なお、本研究では快適歩行速度と限界歩行速度の比  $\alpha = v_{max} / v_c$  を既往研究から算出し、この比を全歩行者に対して当てはめることによって、各歩行者の限界歩行速度とすることになっている。 $\alpha$  は齊藤・有菌 (1986) が歩行速度、走行時速度の 50 パーセンタイル値を 1.35m/s、2.60m/s としているため、1.93 とした。

ここで、図 9-6 には中央帯までの残り距離  $RD_m$  が現れないが、現示の切り分けがなされない場合、歩行者は敢えて走って中央帯まで行って待つことはしないものと考えられるため、断念領域と判断され快適歩行速度を選択した歩行者で、更に快適歩行速度で中央帯まで至ることができる歩行者だけが中央帯を利用するものと考えることができ、歩行速度選択の場合分けとして  $RD_m$  を用いた条件式を加える必要がなかったためである。

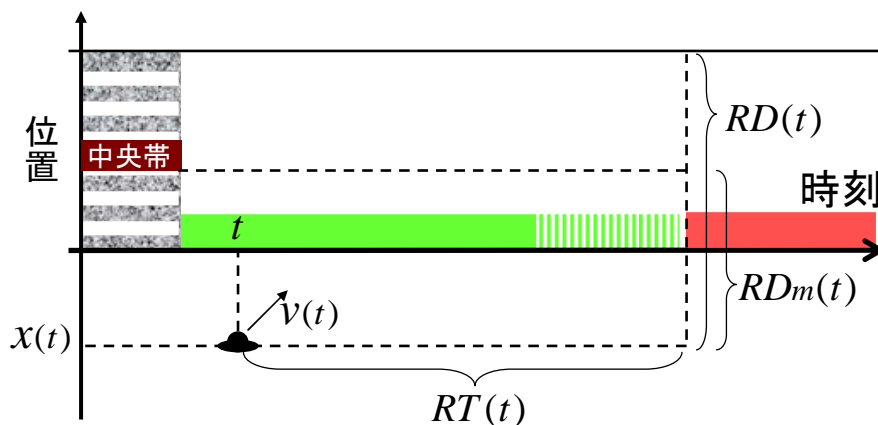


図 9-5 時刻  $t$  において歩行者が知覚する残り時間と距離

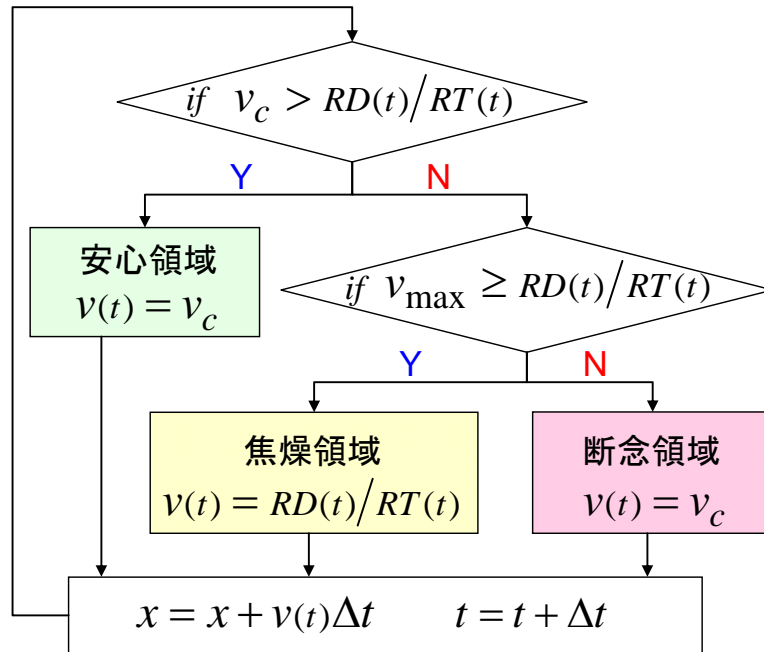


図9-6 現示の切り分けが行われない場合のPSDアルゴリズム

現示の切り分けが行われる場合も、図9-6のPSDアルゴリズムによって説明づけられることが多いが、4.2節の図4.8、4.9からも明らかなように、方向によって若干修正をする必要がある。図9-7は積極的に現示を切り分けた場合の方向別のPSDアルゴリズムである。現示を切り分けた場合、中央帯までの歩行者現示とそれ以後の歩行者現示が異なることになるため、ここでは特に中央帯までの歩行者現示時間を  $RT_m$  として歩行者が知覚するものと定義した。これら3種類のPSDアルゴリズムを、歩行者の横断行動としてAIMSUNに組み込むことにした。

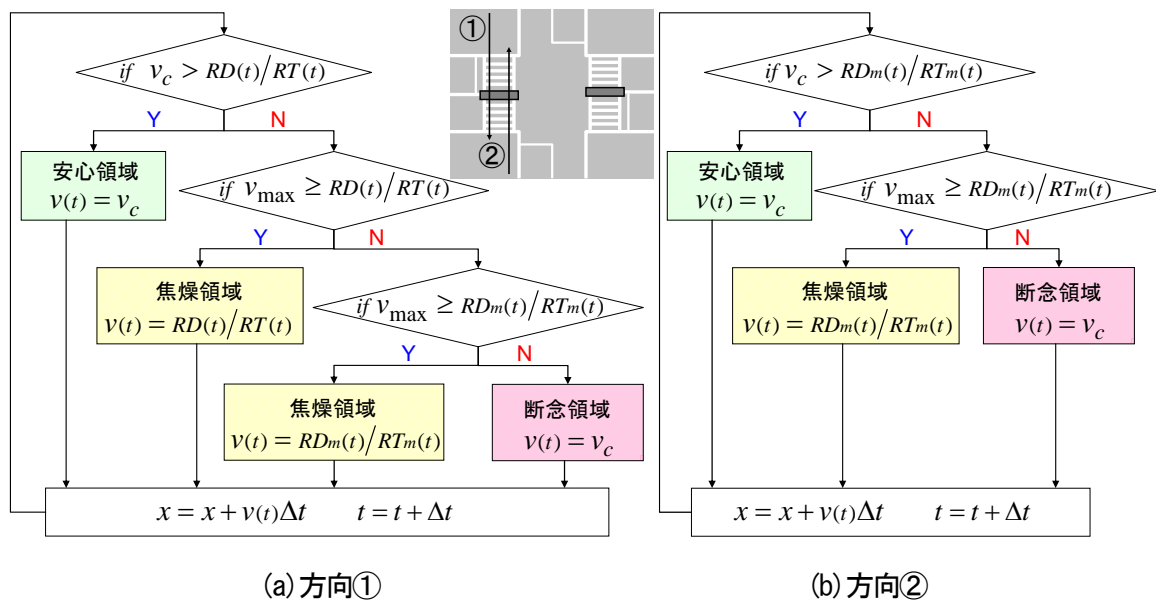


図9-7 歩行者現示を積極的に切り分けた場合のPSDアルゴリズム

さて、ここで歩行者が知覚するという歩行者現示の残り時間  $RT$  にどのような値を用いるかを述べておく。残り時間表示装置などの情報提供の工夫、或いは交差点に対する慣れなどによって、直面する交差点の歩行者現示時間の情報を十分に持っている（完全情報）とき、歩行者はその残り時間を正確に知覚することができるだろう。しかし、歩行者が交差点の情報をあまり知らない場合も当然存在する。横断歩道の歩行者現示時間に関する情報を持たない場合（不完全情報）は、歩行者は自分の経験や周辺の交通状況などから歩行者現示の残り時間をやはり予測しながら歩行速度を選択することになる。しかし、その情報が正確ではないため、歩行者の知覚した残り時間は極めて曖昧なものとなる。本研究ではこの場合、歩行者は歩行者現示の残り時間  $RT$  を、真の値を平均値とした標準偏差  $\sigma$  の正規分布によって確率的に表されるものとする。この標準偏差の値は、青信号が点滅し始めるなどの手がかりの存在によって小さくなり、より正確な行動を行えるようになるのである。以上をまとめると、歩行者現示の残り時間  $RT$  は真の残り時間を  $RT^*$  として以下の2式 (9.1) (9.2) で表されることになる。

$$\text{【完全情報下】} \quad RT(t) = RT^*(t) \quad (9.1)$$

$$\text{【不完全情報下】} \quad RT(t) \sim N(RT^*(t), \sigma^2) \quad (9.2)$$

### 9. 3. 2 歩行者属性データ

次に、歩行者の属性データとしてどのような数値を用いることにしたかを示す。本研究では、サイクル長の短縮の効果が非高齢者と高齢者で不公平にならないことを確かめる必要があるため、非高齢者と高齢者それぞれをシミュレートすることができるよう、属性を分けて定義をすることにした。それぞれの属性値を表9-2に示す。なお、高齢者のシミュレーションを行う際には、高齢者は速度変化を行わないものと考え、PSD アルゴリズムに従わないということにした。歩行者も自動車と同様、車線による制御となるので、長さや幅などの属性はシミュレーション結果に殆ど影響を与えない。また、加速度・減速度については、歩行者は歩行開始直後に希望歩行速度まで加速できるのに対し、減速は時間をかけて行う傾向があると考えられたことから、以下のような設定とした。シミュレーション結果に最も影響を与えるのは希望歩行速度であり、この値としては斉藤・有菌（1986）の示した年齢層別の歩行速度の分布を参考にすることにした。

表9-2 シミュレーションに用いた歩行者の属性データ

(a) 非高齢者

(b) 高齢者

属性	単位	平均	標準偏差	最小	最大	属性	単位	平均	標準偏差	最小	最大
長さ	m	0.34	0	0.34	0.34	長さ	m	0.34	0	0.34	0.34
幅	m	1	0	1	1	幅	m	1	0	1	1
希望歩行速度	km/h	4.86	0.83	3.60	7.00	希望歩行速度	km/h	3.82	0.86	1.80	5.40
通常時加速度	m/s <sup>2</sup>	5.0	0.5	4.5	5.5	通常時加速度	m/s <sup>2</sup>	5.0	0.5	4.5	5.5
通常時減速度	m/s <sup>2</sup>	1.2	0.2	0.2	1.6	通常時減速度	m/s <sup>2</sup>	1.2	0.2	0.2	1.6
緊急時最大減速度	m/s <sup>2</sup>	1.5	0.2	1.0	2.0	緊急時最大減速度	m/s <sup>2</sup>	1.5	0.2	1.0	2.0
制限速度超過率		1	0.75	0.25	1.50	制限速度超過率		1	0.75	0.25	1.50
最小車間距離	m	0.20	0.15	0.05	0.35	最小車間距離	m	0.20	0.15	0.05	0.35
最大譲歩時間	s	20	5	10	30	最大譲歩時間	s	20	5	10	30

### 9. 3. 3 自動車属性データ

自動車としては、乗用車と大型車を導入することにした。表 9-3 に自動車の属性値を示す。数値としては AIMSUN で設定されている既成値を利用している。希望走行速度が高く設定されているが、実際の走行にあたっては自動車の速度は道路の制限速度の制約を受けることになっている（正確には制限速度に制限速度超過率を乗じたもの）ため、制限速度を適正な値にしておけばシミュレーション上問題となることはない。

表 9-3 シミュレーションに用いた自動車の属性データ

(a) 乗用車

(b) 大型車

属性	単位	平均	標準偏差	最小	最大	属性	単位	平均	標準偏差	最小	最大
長さ	m	4	0.5	3.4	4.6	長さ	m	7.5	2	6	10
幅	m	2	0	2	2	幅	m	2.3	0.5	1.9	3.0
希望走行速度	km/h	110	10	80	150	希望走行速度	km/h	85	10	70	100
通常時加速度	m/s <sup>2</sup>	3.0	0.2	2.6	3.4	通常時加速度	m/s <sup>2</sup>	1.0	0.5	0.6	1.8
通常時減速度	m/s <sup>2</sup>	4.0	0.25	3.5	4.5	通常時減速度	m/s <sup>2</sup>	3.5	1	2.5	4.8
緊急時最大減速度	m/s <sup>2</sup>	6	0.5	5	7	緊急時最大減速度	m/s <sup>2</sup>	5	0.5	4	6
制限速度超過率		1.1	0.1	0.9	1.3	制限速度超過率		1	0	1	1
最小車間距離	m	1.0	0.3	0.5	1.5	最小車間距離	m	1.5	0.5	1	2.5
最大譲歩時間	s	10	2.5	5	15	最大譲歩時間	s	50	20	30	80

### 9. 3. 4 交差点評価指標

以上のアルゴリズムや属性値を用いてシミュレーションを行った結果としてどのような指標をアウトプットとするかを最後に説明しておく。本研究では、特に歩行者の苛立ちと慌しさ、不安などの不快感に着目しているため、これらに関する指標を考える必要がある。中でも、苛立ちに関する不快感は、実験の結果から歩行者の苛立ちの感じ方に関する統一的な知見が得られているため、これを用いることとする。不安に関する不快感は、中央帯の構造によって決定される性格を持っていることが実験の結果からわかっているため、交差点規模の決定の際に既に決まっているものと考え、シミュレーションのアウトプットとしては算出しないことにした。また、本研究ではサイクル長の短縮が自動車の環境負荷軽減にもつながる可能性を考えているため、環境に関する指標についてもアウトプットとすることにした。

#### 1) 待ち時間

まず、歩行者・自動車の苛立ちに関わる客観的指標として、交差点における待ち時間を各歩行者、各自動車について算出する。ここで、待ち時間の定義は、歩行者については速度が 1.8km/h 未満になってから再び 1.8km/h を超えるまでの時間、自動車については速度が 3.6km/h 未満になってから、14.4km/h を超えるまでの時間としている。

#### 2) 苛立つ人の割合

次に、特に歩行者については信号待ちによって苛立つ確率を算出する。本研究では、6.4 節において示された、赤信号の待ち時間の増大に伴う苛立ちの主観評価値の増大を表した図 6-9 をもとに、0 から 10 の 11 段階評価で 4 以上を選択した被験者を「苛立ちを覚えた被験者」と

定義することにした（或いは3以下を選択した被験者を「苛立たなかった被験者」と捉えても良い）。そして、それぞれの待ち時間において苛立ちを覚えた被験者の割合を、その待ち時間において歩行者が苛立つ確率と考えた。そして、実測された確率をロジット曲線で回帰することによって、非高齢者・高齢者の苛立ち曲線として以下の2式(9.3)(9.4)を得た。

$$\text{【非高齢者】 } P_{\text{young}}(t) = 1/[1 + \exp\{-0.040 \times (t - 63)\}], r = 0.982 \quad (9.3)$$

$$\text{【高 齢 者】 } P_{\text{elder}}(t) = 1/[1 + \exp\{-0.027 \times (t - 107)\}], r = 0.885 \quad (9.4)$$

図9-8は実測値と苛立ち曲線を比較したものである。ロジット曲線回帰の性質上、切片が0となっていないが、待ち時間が少しでも生じれば不快感を感じる人は存在するものと考えられるため、待ち時間が0の歩行者は苛立つ確率も0とするが、待ち時間が0より大きい歩行者はこの苛立ち曲線に基づいて苛立ちを感じるものと考えすることにした。実際の計算としては、各歩行者の待ち時間  $t$  がシミュレーションにより算出されるため、それを上記の式に代入することによって、各歩行者が苛立つ確率が算出されることになる。なお、待ち時間60秒の高齢者の実測値が0となっているが、これは被験者数が他に比べて少ないために生じた異常値である。

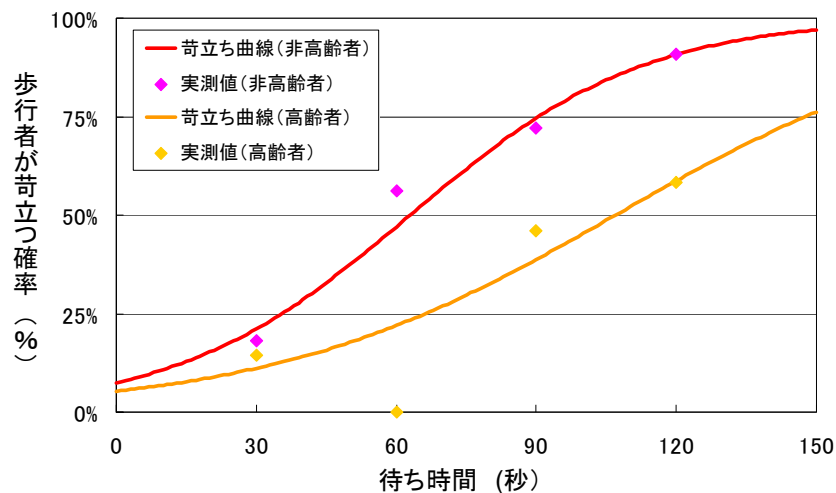


図9-8 苛立ち曲線と実測値の比較

### 3) 慌しさに関する指標

慌しさに関しては、実験の結果からその大小関係を明示的に示す指標を選定することはできなかった。そのため、慌しさを代替する指標として、本研究では人のエネルギー代謝を用いることにした。エネルギー代謝とは、体内に化学的エネルギーを蓄え、それを生命の維持、活動のエネルギーに変換していくことである。エネルギー代謝には、快適な温度で肉体・精神ともに安静、空腹かつ横臥時のエネルギー発生量である基礎代謝に加え、様々な活動を行っている際のエネルギー代謝があり、これは活動のエネルギー代謝と呼ばれている（沼尻、1974）。測定はいずれも酸素需要量などによって測定される。エネルギー代謝は一般に筋活動、環境温度、体重などに大きく依存するため、単位としては  $\text{kcal/kg/hr}$  や  $\text{kcal/m}^2/\text{hr}$  などが用いられる。活動のエネルギー代謝量は、一般的に基礎代謝量に活動強度を乗じることによって表現される。こ

の活動強度としては、基礎代謝時の酸素消費量に対する作業時と安静時の酸素消費量の差であるエネルギー代謝率 (RMR : Relative Metabolic Rate) を用いたり (吉野・高野・重田、1985)、安静時の代謝量に対する作業時の代謝量 *Mets* を用いることが多い。特に後者については、Ainsworth・Haskell・Whitt・Irwin・Swartz・Strath・O'Brien・Bassett・Schmitz・Emplainscourt・Jacobs・Leon (2000) によって、様々な作業における *Mets* が計測されている。

基礎代謝は環境温度によっても変化する。実際、Kashiwazaki (1990) は季節によって基礎代謝は変動するとしており、また、Ohnaka・Tochihara・Yamazaki・Tanaka・Yoshida・Ogawa・Osada (1982) によると、環境温度とエネルギー代謝の間には 25°C 付近を最小値とする二次関数的な相関関係があることが示されている。温度が下がると体温維持のために主に化学的な熱産生により人は代謝量を上げ、温度が上がった場合は今度は熱を放散するために代謝を上げることになるからである<sup>1</sup>。なお、人間の感じる温度としては、気温や湿度に加え、気流や人の着衣量なども考慮にいたした標準新有効温度 (SET\* : Standard New Effective Temperature) という指標が使われることもある (深井・伊藤・斎藤・後藤、1994)。

本研究では、交差点における歩行者・自動車の行動を対象としているため、歩行行動や自動車の運転行動及び環境温度による活動のエネルギー代謝量を表現できればよいことになる。そこで、本研究では既往研究の知見を組み合わせ、以下の式 (9.5) ～ (9.10) によってそれぞれのエネルギー代謝量を表すことにした。いずれも、175cm、64kg の成人男性の場合としている。環境温度による基礎代謝は Ohnaka ら (1982)、荷物重量によるエネルギー代謝の増分は Ainsworth ら (2000) の研究を、歩行速度による増分は沼尻 (1974) の著書を参考にしている。シミュレーションにおいては、それぞれの歩行者や自動車について算出された歩行者の平均速度、自動車の停止時間と走行時間からエネルギー代謝量をそれぞれ計算する。また、荷物重量や環境温度は外生的に指定する。歩行中のエネルギー代謝には、風の影響なども本来は無視できない (山崎・佐藤、1990) が、本研究では様々な条件下でのエネルギー代謝の変化の方向を調べるのが主な目的であるので、あまり複雑な計算式ではなく単純な式を用いることとした。

$$\text{【歩行者のエネルギー代謝量】 } E(\text{kcal/min}) = E_{\text{temperature}} + E_{\text{walk}} + E_{\text{burden}} \quad (9.5)$$

$$E_{\text{temperature}} = 3.2 - 0.15T + 0.0029T^2 \quad (9.6)$$

$$E_{\text{walk}} = 0.035V \quad (9.7)$$

$$E_{\text{burden}} = 0.23X \quad (9.8)$$

$T$  : 環境温度 (°C)

$V$  : 歩行速度 (m/min)

$X$  : 荷物重量 (kg)

$$\text{【自動車のエネルギー代謝量】 } E(\text{kcal/min}) = \begin{cases} 2.327(\text{kcal/min}) & (\text{運転時}) \quad (9.9) \\ 1.260(\text{kcal/min}) & (\text{停車時}) \quad (9.10) \end{cases}$$

<sup>1</sup> 熱放散には、血管反応による非蒸発性熱放散と発汗や呼吸による蒸発性熱放散がある。後者はより高温下での熱放散反応である (中山・入来、1987)。

## 4) 環境に関する指標

最後に、サイクル長を短縮することが自動車の環境負荷の軽減効果があるかどうかを調べるため、CO<sub>2</sub>排出量を算定することにした。大口・片倉・谷口（2002）によると、乗用車がある距離・時間を走行した際の燃料消費量は (9.11) 式で表されるとされている。

$$F = 0.3T + 0.028D + 0.056 \sum_{k=1}^K \delta_k (v_k^2 - v_{k-1}^2) \quad (9.11)$$

$F$  : 燃料消費量 (cc)

$T$  : 走行時間 (s)

$D$  : 走行距離 (m)

$k$  : シミュレーションステップの通し番号 (全  $K$  ステップ)

$\delta_k$  : 加速ダミー (ステップ  $k$  が加速モードであれば 1)

$v_k$  : ステップ  $k$  での走行速度 (m/s)

これにより算出された燃料消費量に変換係数を乗じることにより、CO<sub>2</sub>排出量が得られる。

$$E = K_C \times F, \quad K_C : \text{換算係数 (g-CO}_2\text{/cc)} \quad (9.12)$$

換算係数としては、環境省（2006）が公表している以下の排出係数を用いることにした。

$$K_C = 0.0183(tC/GJ) \times 34.6(GJ/k\ell) \times 44/12 = 2.31 \text{ (g-CO}_2\text{/cc)} \quad (9.13)$$

以上が、本研究で構築する総合交差点設計制御評価モデルのアウトプットである。次章以降では、このようなモデルを用いて、様々な規模の交差点を対象として、サイクル長を変化させた場合の各アウトプットの変化を算出・比較し、どの程度のサイクル長が歩行者・自動車双方を考慮した場合に適切といえるのかを検討する。

なお、ここで開発した総合的交差点設計制御評価モデルを、Comprehensive Evaluation Model for Intersection Designing (CEMID)と呼ぶことにする。

## 第10章

### 様々な交差点のシミュレーション分析

前章において開発した総合的交差点設計制御評価モデル CEMID を用いて、本章では様々な交差点のシミュレーション分析を行う。ここではまず、歩行者の挙動を規定する PSD アルゴリズムの有効性を確認するために、実際の交差点における歩行者の挙動との比較を行う。次に、ガイドラインを作成するにあたって、単一の交差点における効果分析を行うべきか、連続する交差点群を扱うべきかを検討するための比較分析を行う。結果として、単一の交差点を扱っても連続交差点群を扱っても傾向は類似していることから、様々な単一の交差点における効果分析を大規模な交差点から比較的小規模な交差点に至るまで行っていく。

### 10. 1 歩行者速度選択アルゴリズムの有効性の検証

まず、前章において提案した PSD アルゴリズムをシミュレーションに用いることが、適切といえるのかどうかを判断しておく必要がある。ここでは、実際の交差点における歩行者の速度データと、シミュレーションによる結果とを比較し、その有効性を検証することにする。

#### 10. 1. 1 サンプルとする交差点

初めに、検証にどのような交差点を用いることにしたかについて触れておく。交差点の選定においては、歩行者が走って横断する状態も抽出される必要があるため、ある程度以上の長さを持つ横断歩道を対象とするのが望ましい。本研究では、広島市内の国道2号内にある平野橋東詰交差点（図10-1）を用いることにした。この交差点には30m程度の横断歩道が設けられており、多くの歩行者が利用する地点となっている。また、橋詰交差点ということで追突事故や歩行者に関連する事故も多く、事故多発地点に指定されている交差点でもある。既に中国地方整備局広島国道事務所が2005年9月13日（火）に交差点のビデオ撮影調査を行っているため、このデータ

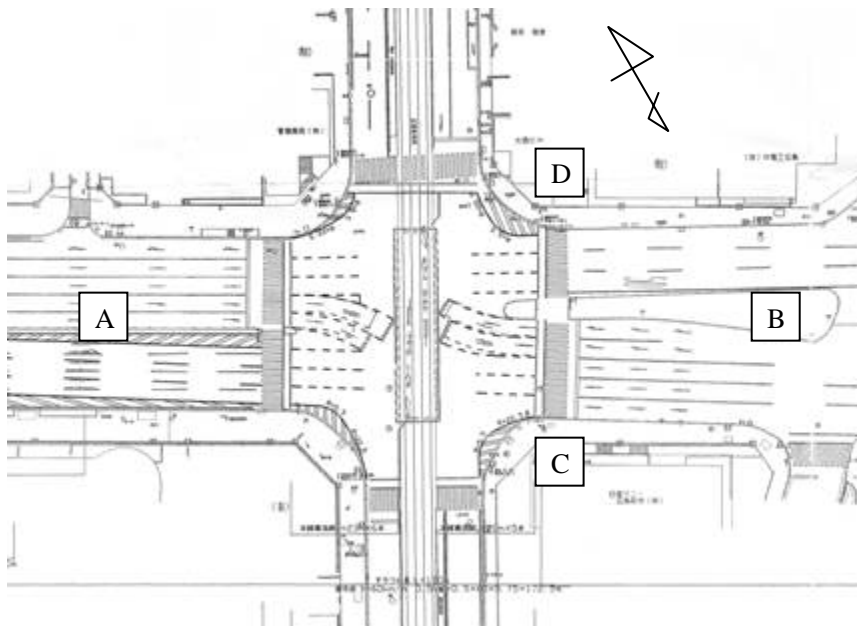


図10-1 平野橋東詰交差点の構造

をお借りして歩行者のデータを抽出することにした。横断歩道としては、中央帯が設けられており、横断距離も長い交差点東側の横断歩道（図10-1のCD間）に着目することにした。対象とした横断歩道及びその周辺の状況を図10-2に示す。なお、調査によると、当該の交差点のピーク時（7:00～8:00）の1時間交通量は自動車が約2000台/h/方向であり、歩行者は130人/h/方向程度（自転車を含む）であった。また、サイクル長は160秒程度で運用されていた。



図10-2 対象とした横断歩道と周辺の状況

#### 10. 1. 2 シミュレーションの設定

次に、PSD アルゴリズムを用いない場合と用いた場合でシミュレーションを行うため、まずは実測データから歩行速度の分布を求めると図10-3を得た。ここでの歩行速度とは、横断歩道の一部の区間における平均歩行速度を示している。分布から読み取れるように、歩行速度7.0km/h程度までは正規分布的な分布をしている。しかし、走る歩行者の存在により、7.0km/h以上の歩行速度になるとその分布は歪むという性質があるようである。そこで7.0km/h以下における歩行

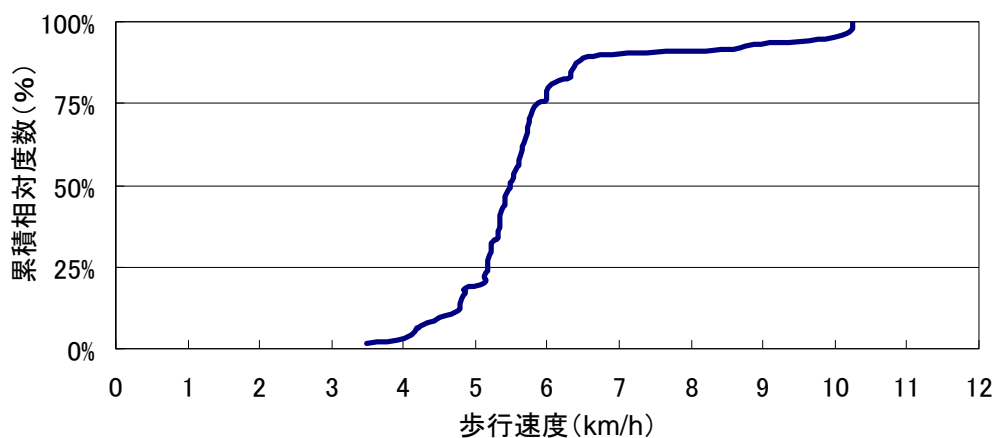


図10-3 実測に基づく歩行速度分布

速度の平均値と標準偏差を求めるとそれぞれ 5.39km/h（約 1.5m/s）、0.62km/h であり、7.0km/h

以上において歩行速度の平均値を求めると 9.67km/h であった。この結果に基づき、PSD アルゴリズムを用いるケースと用いないケースの設定を以下のように設定することにした。

- ア) PSD アルゴリズムを用いないケース：歩行者の快適歩行速度は平均値が 5.39km/h、標準偏差が 0.62km/h の正規分布に従うものとする。
- イ) 不完全情報下での PSD アルゴリズムを用いるケース：歩行者の快適歩行速度分布はアと同様とし、更に限界歩行速度と快適歩行速度の比 $\alpha$ をこのでの検討に限り  $9.67/5.39=1.80$  とする。また、信号が青の間は歩行者は残り時間を曖昧に知覚（真の値に対して標準偏差 5 秒とした）するものとし、青点滅が開始すると同時に知覚が正確になるものとした。
- ウ) 完全情報下での PSD アルゴリズムを用いるケース：歩行者の快適歩行速度分布及び $\alpha$ はイと同様とし、残り時間の知覚は常に正確なものとした。

これらの設定は、9.3.1 節及び9.3.2 節において設定した非高齢者や高齢者の属性データとは異なるものであるが、ここで行った作業は実測値とシミュレーション結果との差異の程度を見るためのキャリブレーションである。なお、自動車の交通量については、広島国道事務所による調査データをそのまま用いることにし、その属性データは9.3.2 節に示したとおりのものとした。また、シミュレーションステップは0.75 秒とし、0.75 秒毎の状態をシミュレートすることにした。

### 10. 1. 3 シミュレーションの実施と比較

シミュレーションの様子を図 10-4 に示す。ベースに図 10-1 に示した交差点の構造図を縮尺を合わせて貼り、その上に現況に合わせるように車線や交差点などを記述していったものである。横断歩道を渡る歩行者は、70m 程度手前から横断行動を取るものとして設定されている。

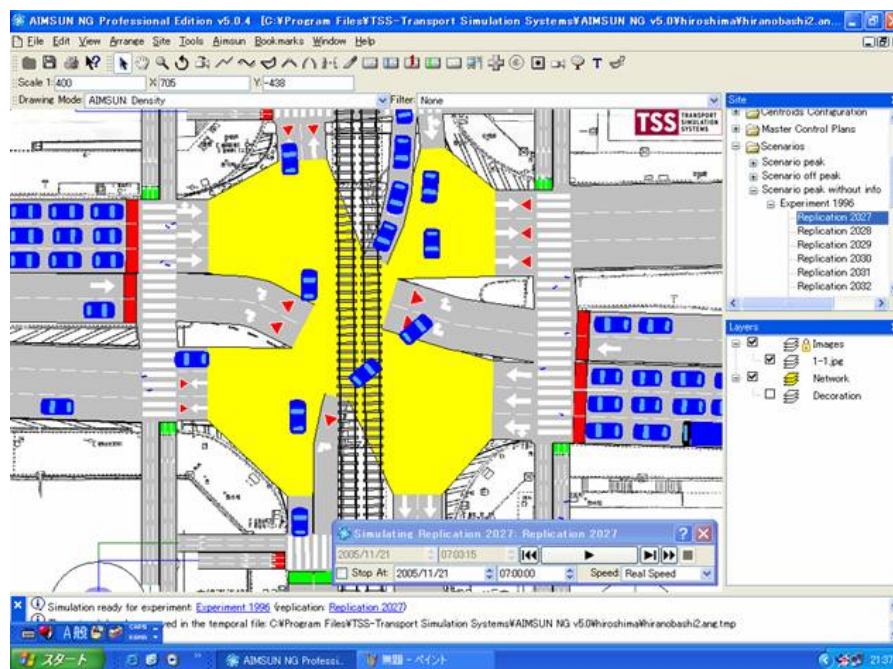


図 10-4 シミュレーションの様子

このシミュレーションにおいて、2種類のPSDアルゴリズムを用いるケースと用いないケースをそれぞれ作成し、250人h程度の交通量で歩行者を流入させた。また、各歩行者の速度については、横断歩道に流入してから10mの距離を歩いた時点での瞬間歩行速度とし、その分布を比較すると図10-5のようになった。

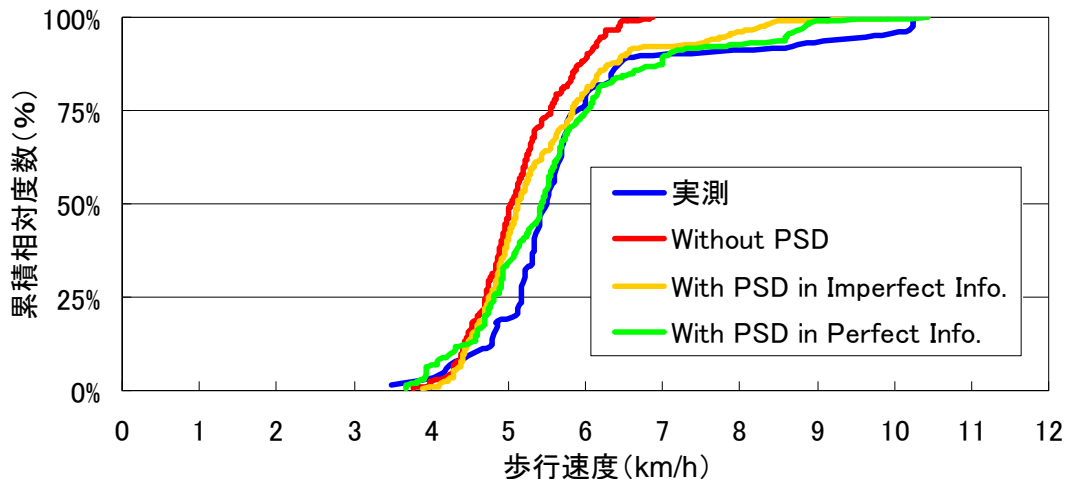


図10-5 歩行者の速度分布の比較

図より、PSDアルゴリズムを用いたケースの方が、特に高速域に関する歩行速度分布をより良く再現できていることがわかる。実際の交差点は情報提供はなされてはいないため、条件としては不完全情報下ということになるが、図によると完全情報下のもの最も当てはまっているといえる。この理由としては、交差点のサイクル長はほぼ一定であり、歩行者は手前からよく信号が見渡せたため、残り時間の予測が付きやすかったものと考えられる。なお、歩行速度の実測値の平均値を用いているにもかかわらず、シミュレーション結果は全体的に速度が小さくなっているが、これはシミュレータの特性上、交差点内では追越しができないことになっており、前を歩く遅い歩行者の影響が後続の歩行者の速度を遅めている結果と見ることができる。以上から、歩行者の横断行動を扱うのにPSDアルゴリズムを用いることは、概ね有効といえることができる。

## 10.2 単一交差点と複数交差点群におけるシミュレーションの比較検討

横断歩道の二段階横断方式の導入とサイクル長の短縮を行った際に生じる効果の程度を知るためには、単一の交差点を対象に検討を行う方法と、特に自動車の円滑性の観点から複数の交差点群ネットワークを対象に検討を行う方法の二種類のアプローチが考えられる。前者は制御変数が限定的であり扱いやすいというメリットがあるが、実際の自動車の流れとは異なる流れを取り扱うことになるというデメリットがある。後者は本来の自動車の流れに近い流れの取り扱いが可能となるメリットがあるが、各交差点の規模、交差点間の距離、更にはオフセット設計までを行う必要が生じるため、扱うべき制御変数が膨大な数になる。そこで本節では、特に自動車の観点から、単一の交差点を扱った場合と複数交差点群を扱った場合にどのような効果の差異が出るかを、

前節でもサンプルとした平野橋東詰交差点前後の交差点ネットワークを対象に調べることにした。特にオフセットについては、サイクル長に応じて状況が異なる可能性があるため、注意を要する。

### 10. 2. 1 サンプルとする交差点群

まず、ここで対象とすることにした交差点群について触れておく。ここでは、平野橋東詰交差点とその東西にそれぞれ存在する大規模な交差点（産業会館前交差点、南竹屋町交差点）を対象とすることにした。図10-6はシミュレーション用に作成した対象交差点群のネットワークを示している。2005年9月広島国道事務所による調査はこれらの交差点についても対象としていたため、そのデータを利用して信号現示設計や自動車交通量などを決定することができる。また、自動車の指標としては、待ち時間を計測することとし、図に示すとおり、平野橋東詰交差点の上流それぞれ200m程度を単一交差点との比較対象区間とすることにし、単一交差点における検討際にはこれと等しい距離だけ上流から交差点を扱うものとした。

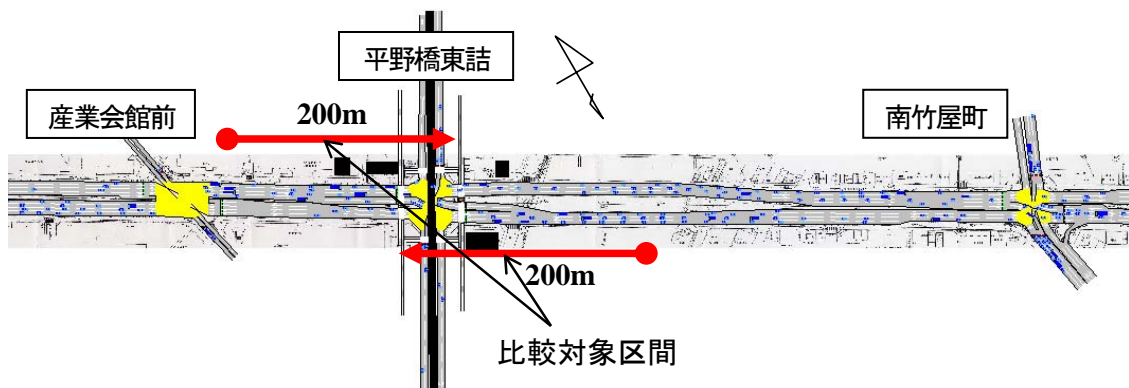


図10-6 サンプルとする交差点群と比較対象区間



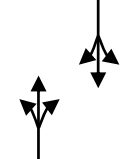
### 10. 2. 2 シミュレーションの設計

次に、どのようなシミュレーションケースを作成したかについて説明する。ここで行う複数交差点群と単一交差点との比較は、主に自動車への影響を考えるものであるから、歩行者のPSDアルゴリズムなどを導入することは特にせず、また南竹屋町交差点と産業会館前交差点においては歩行者自体を導入しないこととした。信号サイクル長は、実測のデータをもとに3つの交差点ですべて等しいものとするにせし、現状が160秒であることから、その半分である80秒まで20秒ごとにサイクル長を設定することにした。スプリット配分はいずれも一定に保っている。実際に用いたサイクル長及び信号現示は、実測データに基づき表10-1の通りである。




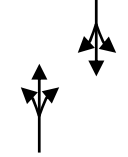
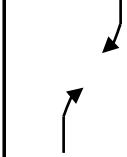
オフセットについては、サイクル長ごとに東西に流れる自動車の旅行時間が最小となるよう設計する。越(1975)によると、対向する2方向の交通流がともに等価な場合、オフセットは2つの交差点間の距離とサイクル長に応じて100%（同時式）と50%（交互式）のいずれかに定めるとされている。対象とする交差点群にピーク時に流入する交通量は、前述の通り方向によらず

表 10-1 シミュレーションに用いた各交差点の車両用の信号現示 (単位: 秒)

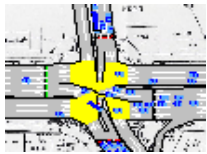
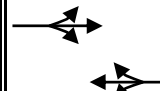
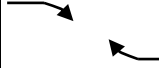
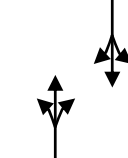
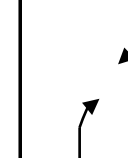
(a) 産業会館前

産業会館前交差点		1φ			2φ		
							
サイクル長	オフセット	G	Y	R	G	Y	R
160	-15	106	3	5	39	3	4
140	-12	91	3	5	34	3	4
120	-10	77	3	5	28	3	4
100	-8	62	3	5	23	3	4
80	-6	48	3	5	17	3	4

(b) 平野橋東詰交差点

平野橋東詰交差点		1φ		2φ			3φ		4φ		
											
サイクル長	オフセット	G	Y	G	Y	R	G	Y	G	Y	R
160	0	77	2	15	2	3	44	2	10	2	3
140	0	67	2	13	2	3	38	2	8	2	3
120	0	56	2	11	2	3	32	2	7	2	3
100	0	46	2	9	2	3	25	2	6	2	3
80	0	36	2	7	2	3	19	2	4	2	3

(c) 南竹屋町交差点

南竹屋町交差点		1φ		2φ			3φ		4φ		
											
サイクル長	オフセット	G	Y	G	Y	R	G	Y	G	Y	R
160	0	81	2	9	2	3	43	2	13	2	3
140	0	70	2	8	2	3	37	2	11	2	3
120	0	59	2	7	2	3	31	2	9	2	3
100	0	48	2	5	2	3	25	2	8	2	3
80	0	36	2	4	2	3	20	2	6	2	3

※オフセットはいずれも平野橋東詰交差点に対するもの。

約 2,000 台/h であったことから、この時間帯では 2 方向 (図 10-1 の A→B 方向及び B→A 方向) の交通流は等価と考え、3 つの交差点は表 10-2 に示すように同時式か交互式のいずれかのオフ

セットを取るものと考えことにした。オフセットに交互式を用いる場合は、南竹屋町交差点と産業会館前交差点の少なくとも一方に対して、サイクル長の50%を更に加えることになる。

ところで表 10-1 によると、南竹屋町交差点は平野橋東詰交差点に対してオフセットが設けられていないのに対し、産業会館前交差点については、現状でもオフセットが設けられている。これは平野橋東詰交差点から右左折によって流入してきた交通を早めに発進させつつ、産業会館前交差点で滞留する自動車が効率的に平野橋東詰交差点を通過できるようにするためである。平野橋東詰交差点と南竹屋町交差点は現状では同時式制御がなされているので、産業会館前交差点との間のオフセットは、同時式制御の一環と考えることができる。

表 10-2 交差点のオフセット設計方式の組み合わせ

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
産業会館前交差点	同時式	同時式	交互式	交互式
平野橋東詰交差点	同時式	交互式	同時式	交互式
南竹屋町交差点	同時式	交互式	同時式	交互式

シミュレーションにおいては、まず各サイクル長に対して上記4つのケースを試行し、東西の自動車の旅行時間が最小となるようなオフセットの組み合わせを明らかにする。そして、その組み合わせを用いて、更に比較対象区間における自動車の待ち時間を計測する。また、平野橋東詰交差点のみのシミュレーションも別途実施して待ち時間を計測しておき、その結果を比較する。

### 10. 2. 3 最適オフセットの選定

まず、各サイクル長について表 10-2 に示す4つのオフセットの組み合わせを設定してシミュレーションを行い、産業会館前交差点から平野橋東詰交差点に向かう方向（A→B 方向）と南竹屋町交差点から平野橋東詰交差点に向かう方向（B→A 方向）における自動車の平均旅行時間を算出したところ、図 10-7 を得た。

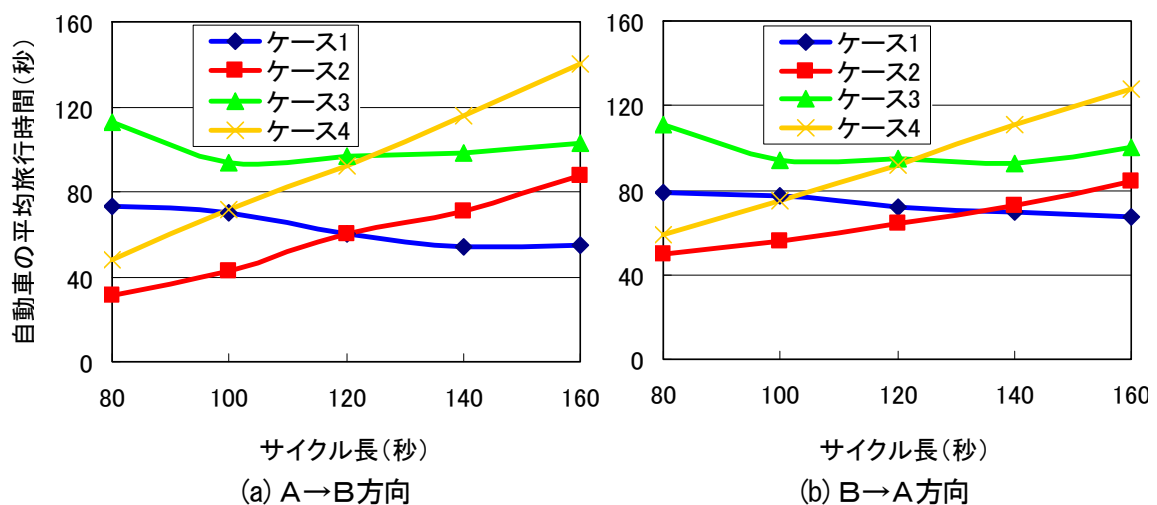


図 10-7 オフセットの組み合わせと自動車の平均旅行時間の関係

これにより、用いるべきオフセットの組み合わせとしては、サイクル長が80秒～120秒のときは南竹屋町交差点のみオフセットを交互式にするケース2を、サイクル長が140秒～160秒のときは全交差点でオフセットを同時式にするケース1をそれぞれ選ぶことにした。

#### 10. 2. 4 シミュレーション結果の比較

前項において選定されたオフセット設計を用いて、特に図10-6における比較対象区間についての自動車の平均待ち時間を算出し、これと平野橋交差点単一でのシミュレーションから別途算出した平均待ち時間とを比較することにする。図10-8はそれぞれの方向別にサイクル長と自動車の平均待ち時間の関係を示したものである。

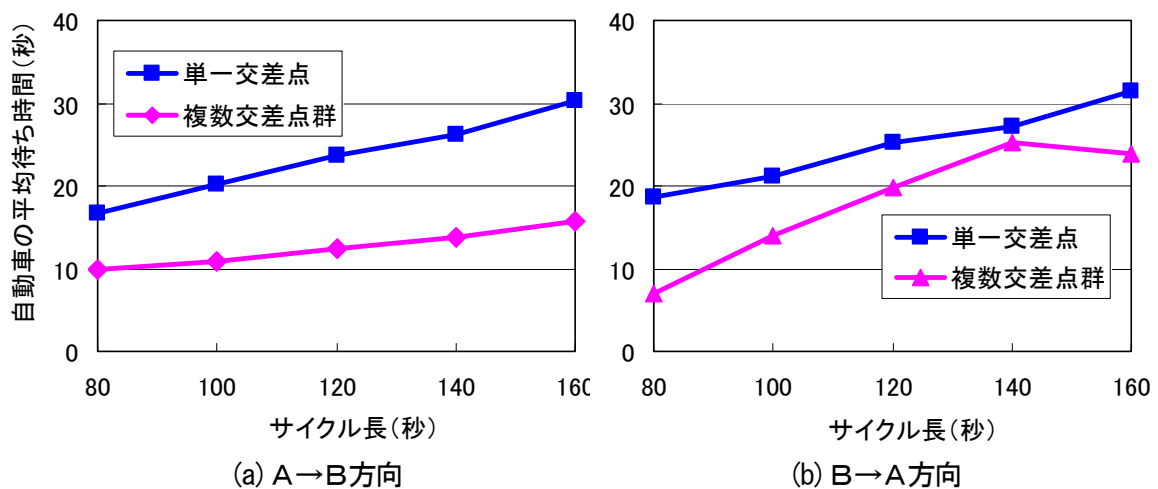


図10-8 単一交差点と複数交差点群における自動車の平均待ち時間の比較

これにより、自動車はある程度まとまって流入する複数交差点群での検討に対して、自動車がランダムにネットワークに流入してくる単一交差点での検討結果の方が大きな値となっていることが分かるが、特にサイクル長の短縮による効果のみに着目すると、単一交差点での効果の0.5～2倍の幅の中に複数交差点群での効果が存在していると言え、その傾向は似通っていることがわかる。この場合、オフセット設計もなされているため、まとまって流入してきた自動車は比較的円滑に交差点を通過することができるようになる。

ここで、A→B方向とB→A方向で自動車の平均待ち時間が異なる傾向を示している点について詳しく述べる。越(1975)によると、一般に2つの交差点間のオフセットに同時式と交互式のいずれを用いるかは、2つの交差点間距離と自動車が1サイクル間に進める距離とによって決まるとしている。具体的には、1サイクルに進める距離に対する交差点間距離の比率が充分小さい場合は同時式オフセットが望ましく、その比率が大きくなるに従って交互式と同時式のオフセットが交互に望ましくなるとされている。交互式と同時式が交互に望ましくなる状況では、自動車の平均待ち時間も周期的な変動を示すことになる。ここで、A→B方向については比較対象区間前後の交差点間距離が充分に短く、常に同時式が用いられているが、B→A方向では交差点間距離が長いと、140秒を境に同時式と交互式が切り替わっていると予想され、切り替わる点にお

いては自動車の平均待ち時間がその前後より大きくなる可能性があるのである。

このように実際の交差点群を考えた場合は、オフセット設計と合わせてサイクル長の短縮の効果を実測する必要があり、その結果は交差点間の距離の組み合わせによって様々である。しかしながら、サイクル長の短縮が自動車の待ち時間減少効果を持つことは以上のシミュレーションからも明らかであり、その効果の程度に関して単一交差点で検討した結果が著しく過大推計となることもないと考えることができる。以上の理由により、本研究では単一の様々な規模の交差点において、どのようなサイクル長が適切かを総合的交差点設計制御評価モデル CEMID により検討し、ガイドラインとすることにする。

### 10.3 単一交差点におけるシミュレーション分析

ここでは、総合的交差点設計制御評価モデル CEMID を用いて、様々な単一の交差点におけるシミュレーション分析を行うことにする。シミュレーションを行う交差点の規模としては、最も歩行者への影響が深刻だと思われる幅員25m～30m程度を有する8車線道路同士の交差点から、歩行者の観点からも比較的容易にサイクル長を短縮できると考えられる4車線道路と2車線道路の交差点までを対象とすることにする。また、交通需要の程度によってサイクル長の短縮の効果が異なることが予想されたため、これを計測するシミュレーションをまず行うことにした。

#### 10.3.1 交通需要とサイクル長の短縮効果

まず、サイクル長の短縮がどのような自動車交通需要の場合に可能なのかを知るため、異なる交通需要下でのサイクル長の短縮効果を測るシミュレーションを行う。シミュレーションに用いたのは、図10-9に示すような片側4車線の計8車線の道路同士が交差する交差点であり、横断歩道には2.5m程度の中央帯を設け、交差点手前には右折専用車線を50m程度付加した。またA～Bを主道路、C～Dを従道路と考え、主道路を直進する自動車を比較の対象とすることにした。

道路構造令第三条によると、都市部における自動車専用道ではない幹線道路は「第四種」と

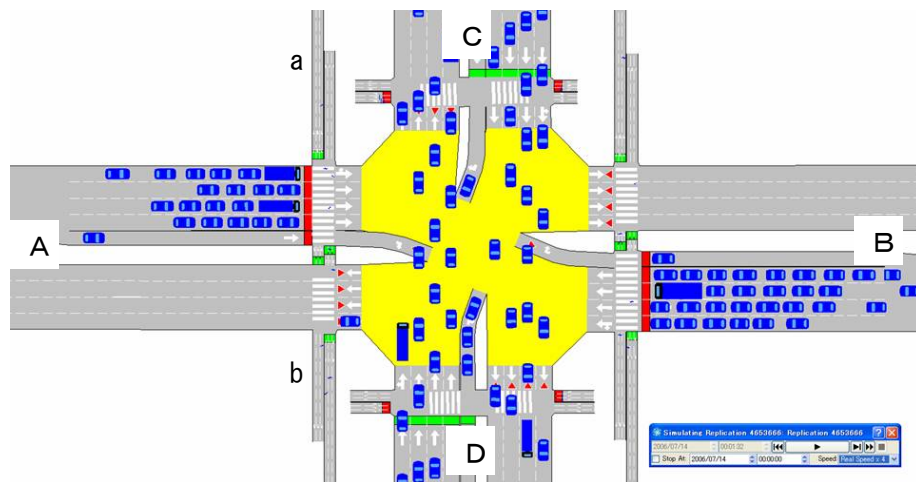


図10-9 シミュレーションに用いた交差点の構造① ～8車線道路同士の交差点

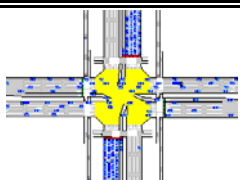

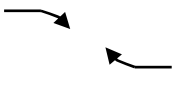
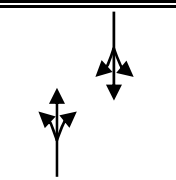
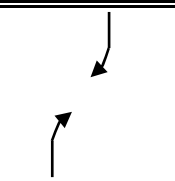
呼ばれる道路のカテゴリに属することになる。第四種の道路は更にその計画交通量に応じて第一級（日交通量 10,000 台以上）から第四級（日交通量 500 台以下）に分類されることになる。本研究で対象としているのは、明らかに道路構造令における第四種第一級の道路である。このとき、車線数については、同政令第五条において設計基準交通量 12,000 台/day ごとに 1 車線を設けるものとされている。そのためここで用いる交通需要としても、この値を基準値として用いることにした。なお、本研究ではシミュレーション期間を 1 時間とすることにするため、設計基準交通量を 1 時間交通量に変換する必要がある。「平面交差の計画と設計基礎編第 2 版（交通工学研究会、2004）」によると、ピーク時間交通量の日交通量に対する割合（ピーク率）は 6%～13% の範囲にあるとされている。ここで設計基準交通量は最大許容交通量を表しているため、値が大きめに設けられていると考えることにし、設計基準交通量の 6%（高負荷）、5%（標準）、4%（低負荷）の 3 種類の交通需要を導入することにした。従って、8 車線同士の道路が交差する場合は、各レッグから 2880 台（高負荷）、2400 台（標準）、1920 台（低負荷）の自動車が 1 時間で流入することになる。また、右折車、左折車の割合をそれぞれ 5% とし、また大型車の混入率も 5% とすることにした。表 10-3 はこれらの条件を用いて、この交差点における交差点飽和度を検討したものである。流入量などの条件は対称なものと考えているため、飽和度の検討の際に考慮すべき流入部は主道路と従道路から 1 つずつで十分である。表より、高負荷時の交差点の飽和度は 0.880 に達しており、クリアランス時間によっては渋滞が発生する可能性があることがわかる。

表 10-3 8 車線道路同士の交差点における交差点飽和度の検討

流 入 部		主道路(A)			従道路(C)		
車 線		左折・直進	直 進	右 折	左折・直進	直 進	右 折
車 線 数		1	3	1	1	3	1
飽和交通流率の基本値		2000	2000	1800	2000	2000	1800
車道幅員による補正率		1	1	0.95	1	1	0.95
大型車混入による補正率		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
左折車混入による補正率		0.97			0.97		
飽 和 交 通 流 率		1880	5820	1660	1880	5820	1660
高負荷	設 計 交 通 量	2740		140	2740		140
	現 示 の 飽 和 度	0.356		0.084	0.356		0.084
	交 差 点 の 飽 和 度	0.880					
標準	設 計 交 通 量	2280		120	2280		120
	現 示 の 飽 和 度	0.296		0.072	0.296		0.072
	交 差 点 の 飽 和 度	0.737					
低負荷	設 計 交 通 量	1820		100	1820		100
	現 示 の 飽 和 度	0.236		0.060	0.236		0.060
	交 差 点 の 飽 和 度	0.593					

次に、必要現示率を用いて各サイクル長に対する有効現示時間を決定し、信号現示を設計する必要がある。有効青時間は通常現示の飽和度に対して比例配分することで求められるが、現示の飽和度の比率は負荷によらず一定であるから、ここでは各サイクル長につき 1 つの信号現示設計をすれば十分であることになる。表 10-4 にシミュレーションに用いた信号現示設計を示す。

表10-4 8車線道路同士の交差点における車両用の信号現示設計

8車×8車	1φ		2φ			3φ		4φ		
										
サイクル長	G	Y	G	Y	R	G	Y	G	Y	R
160	57	4	14	3	2	57	4	14	3	2
140	49	4	12	3	2	49	4	12	3	2
120	41	4	10	3	2	41	4	10	3	2
100	33	4	8	3	2	33	4	8	3	2
90	29	4	7	3	2	29	4	7	3	2
80	25	4	6	3	2	25	4	6	3	2
70	21	4	5	3	2	21	4	5	3	2

実際のシミュレーションでは歩行者も各方向に150人hを発生させており、歩行者の信号制御も行っているが、ここでは自動車に対する影響のみに着目しているため、詳述は後に譲る。なお、シミュレーション回数は一つのサイクル長につき10回ずつ行い、結果の分析には10回分の平均値を用いることにした。図10-10は自動車に関する指標である待ち時間とCO<sub>2</sub>排出量、そしてドライバーのエネルギー代謝量（環境温度26℃）の平均値を比較したものである。

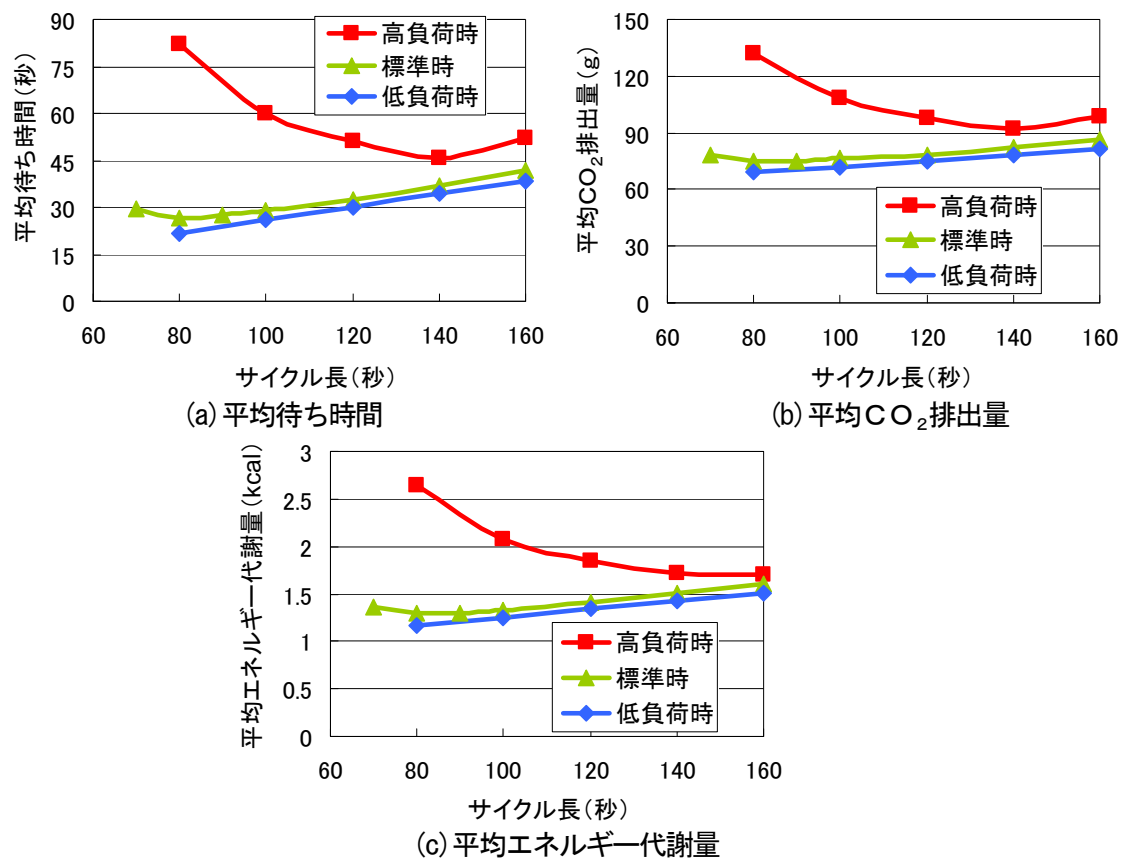


図10-10 8車線同士の交差点における自動車交通需要とサイクル長の短縮効果

これにより、交通需要が容量に対して高負荷な状況では、サイクル長の短縮とともに待ち時間、CO<sub>2</sub>排出量及びエネルギー代謝量が増加していく傾向が見てとれる。これは、現示間に確保しているクリアランス時間（ここでは合計18秒）によって、高負荷時の交差点の飽和度を満たす有効青時間が確保できず、交通の処理が追いつかなくなるためである。同様の現象は標準時の交通需要でサイクル長を70秒とした際にも現れていることがわかる。以上からサイクル長の短縮は、交差点の飽和度が0.8を超えるようなピーク時の高負荷な状況においては、渋滞を却って助長するため効果があるとはいえないが、交差点の飽和度が0.75程度以下であるような状況下であればサイクル短縮は効果があるといえることができる。例えば、140秒のサイクル長を80秒まで短縮することは、自動車の平均待ち時間を約28%、CO<sub>2</sub>排出量を約9%、そしてドライバーのエネルギー代謝量を14%軽減することに繋がることになる。なお、以後の検討においては、設計基準交通量の5%を自動車の基本的な交通需要としてシミュレーションを行うことにする。

### 10.3.2 8車線道路を主道路とする交差点のシミュレーション

自動車の視点から見た場合のサイクル長の短縮のための条件は明らかとなったので、次にサイクル長の短縮が歩行者に与える影響についても合わせて見ていくことにする。まずは8車線道路を主道路とするような交差点のシミュレーションを行う。

#### 10.3.2.1 8車線道路同士の交差点

まず、8車線道路同士の交差点を考える。この場合に用いる交差点構造は、図10-9に示したものと同様であり、横断歩道の長さは32mである。ただし、歩行者に関しては交差点の70m程度手前から横断を開始するものとし、PSDアルゴリズム（不完全情報下、完全情報下）を用いる場合と、高齢者のみを歩行者として導入した場合の効果をそれぞれ分析する。9.3節にも述べたように、高齢者はPSDアルゴリズムには従わず、残り時間を知覚して走ることはしないものと考えている。また、横断行動としては主道路を横断する行動に着目しており、また交差点構造は交差点の中心に対して対称となっていることから、図10-9のa～b間の歩行者のみを分析対象としても十分であると考え、この区間の歩行者に関するデータを採取することにした。

ここで、歩行者の挙動も対象とするため、歩行者信号現示の設計方法についても触れておく必要がある。信号現示の設計方法は基本的には従来の設計方法に準拠することにし、まずは歩行速度1.0m/sで歩行者が横断完了できる時間を第一の最小歩行者現示時間とする。また、歩行速度1.0m/sで歩行者が中央帯まで渡るのにかかる時間を第二の最小歩行者現示時間とする。歩行者現示時間は、原則として車両用現示よりも5秒短いものとし、この時間が第一の最小歩行者現示時間より長ければ、次に歩行者の青点滅時間を、歩行速度1.5m/sの歩行者が横断歩道の半分を渡り切れる時間として設定する。歩行者現示時間が第一の最小歩行者現示時間より短く、かつ第二の最小歩行者現示時間より長ければ、歩行者の青点滅時間を歩行速度1.5m/sの歩行者が中央帯までの横断距離の半分を渡り切れる時間として設定する。即ち、サイクル長が長ければ第一、短ければ第二の最小歩行者現示時間が基準となる。実際に用いた信号現示設計を表10-5に示す。

表10-5 8車線道路同士の交差点における車両・歩行者用の信号現示設計

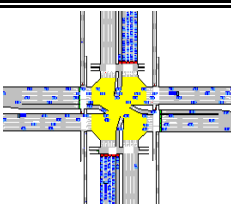
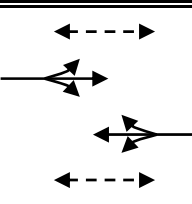
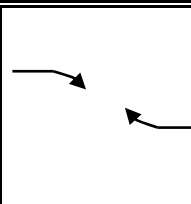
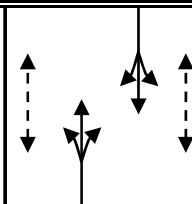
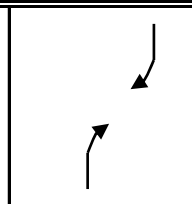
8車×8車		1φ			2φ			3φ			4φ		
													
サイクル長	車	G			G			G			G		
	歩	PG	PF	PR	PR			PG	PF	PR	PR		
160	車	57			14	3	2	57			14	3	2
	歩	41	11	9	19			41	11	9	19		
140	車	49			12	3	2	49			12	3	2
	歩	33	11	9	17			33	11	9	17		
120	車	41			10	3	2	41			10	3	2
	歩	25	11	9	15			25	11	9	15		
100	車	33			8	3	2	33			8	3	2
	歩	22	6	9	13			22	6	9	13		
90	車	29			7	3	2	29			7	3	2
	歩	18	6	9	12			18	6	9	12		
80	車	25			6	3	2	25			6	3	2
	歩	14	6	9	11			14	6	9	11		
70	車	21			5	3	2	21			5	3	2
	歩	10	6	9	10			10	6	9	10		

図10-11は完全情報下と不完全情報下でのPSDアルゴリズムを用いたシミュレーションの結果として得られた歩行者の平均待ち時間、苛立つ人の割合及び平均エネルギー代謝量<sup>1</sup>を、図10-9のaからbに向かう方向と、bからaに向かう方向とに分けて示したものである。aからbに向かう場合、横断歩道の前半では自動車との交錯はなく、後半で交錯を生じるのに対し、bからaに向かう場合はそれと逆の順番で自動車との交錯を体験すると考えられるからである。なお、図10-11に示したケースでは殆どそれら方向による差は見られていない。

これにより、歩行者が信号現示の残り時間を知覚して速度調節を行う状態であれば、その知覚の程度や横断方向によらず、サイクル長の短縮は歩行者にも良い影響を及ぼすといえることができる。例えば、140秒のサイクル長を100秒にまで短縮することは、10%程度の歩行者が苛立ちを感じなくなる効果を持つと考えることができる。また、完全情報を得ながら横断する方が、不完全情報下で行動を行うよりも常に効率的に行動をすることができるだけでなく、待ち時間や苛立つ人の割合、エネルギー代謝量の極小値を与えるサイクル長もより短くなることが分かる。従って、8車線道路同士の交差する交差点では、速度調節を行うことのできる歩行者にとっては、特に信号機以外に何の情報も提供しない不完全情報下においては100秒、残り時間表示などを行うことで情報を提供すれば80～90秒までサイクル長を短縮することが可能といえることができる。

それでは、次に歩行速度を調節しない高齢者がこの交差点に至った場合にはどのような状況になるかを見てみることにする。図10-12は高齢者のシミュレーション結果である。平均歩行速度

<sup>1</sup> エネルギー代謝量を算定する際の環境温度は30℃、荷物は3kgと設計した。

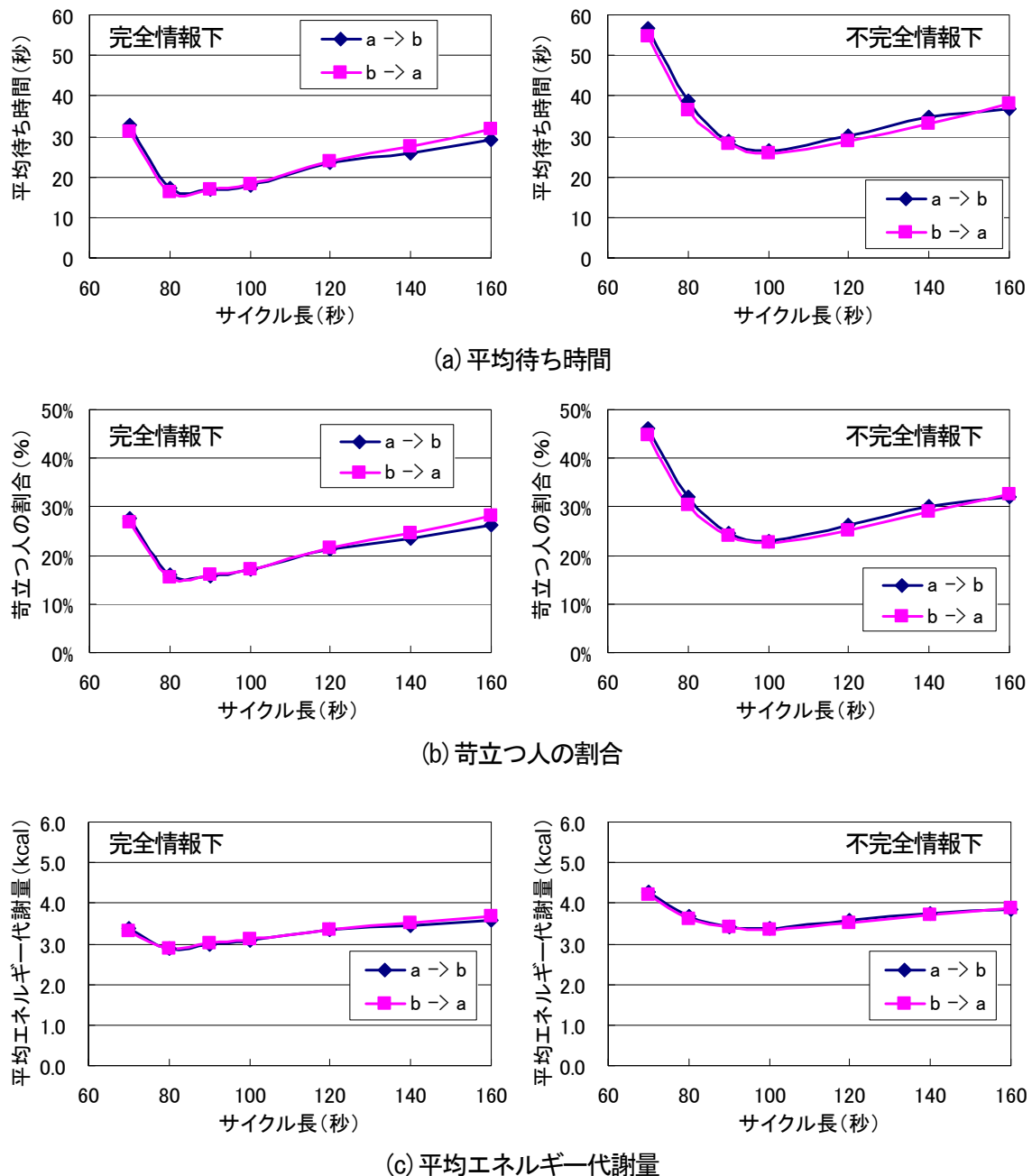


図10-11 8車線同士の交差点における歩行者に対するサイクル長の短縮効果

が前ケースに比べて遅く、また歩行速度も変化させないため、待ち時間とエネルギー代謝量はともに高齢者の方が前ケースよりも増大している。また、a から b に向かう方が中央帯までの距離が長いので、歩行者用信号現示の後半に交差点に進入した高齢者は中央帯で立ち止まる確率が高くなり、相対的に全指標とも逆の方向よりも大きな値を取ることになっている。しかしながら、ここにおいてもサイクル長の短縮効果は見受けられ、100 秒程度まではサイクル長を短縮することができるといえる。なお、前ケースで測定した不完全情報下での歩行者への影響と、ここで行った高齢者への影響を比較すると、指標の極小値を与えるサイクル長は殆ど等しく、苛立ちを感じ

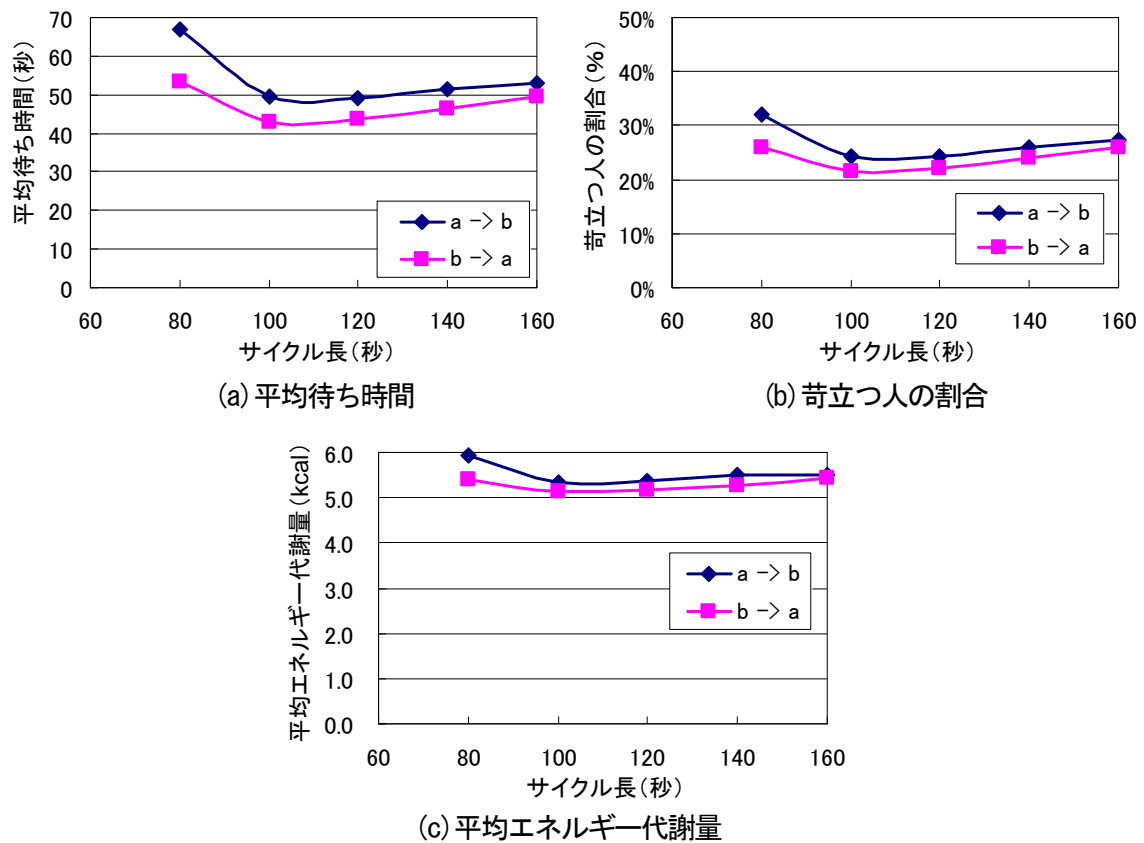


図10-12 8車線同士の交差点における高齢者に対するサイクル長の短縮効果

る人の割合も似通っていることに気づく。従って、以後の検討では不完全情報下での歩行者の検討は行わず、完全情報下での歩行者と、高齢者のみを検討対象とすることにする。

さて、8車線道路同士の交差点において、サイクル長の短縮には効果があることがわかったが、特に高齢者を考えたとき、苛立つ人の割合などが大きくは変化しないことなどから、その効果は極めて限定的である。そこで次に、より歩行者を効率的に捌くことのできる手段として、歩行者用信号現示を切り分けた場合に、サイクル長の短縮がどのような効果をもたらすかを見てみることにする。切り分けた信号現示設計を表10-6に示す。ここでは主道路の横断のみに着眼しているため、従道路の横断に対する現示の切り分けは考えないものとする。安全性を考慮すると2φにおけるPG'の開始は2〜3秒程度遅らせるべきであるが、ここでは同時とした。

表10-6 現示の切り分けを行った場合の信号現示設計

	1φ			2φ			3φ			4φ		
車	G	Y		G	Y	R	G	Y		G	Y	R
歩	PG	PF	PR	PG'			PG	PF	PR	PG''		

このような信号制御を行った場合に、完全情報下での歩行者と高齢者にはどのような影響が生じるかをシミュレーションしたところ、図10-13のようになった。

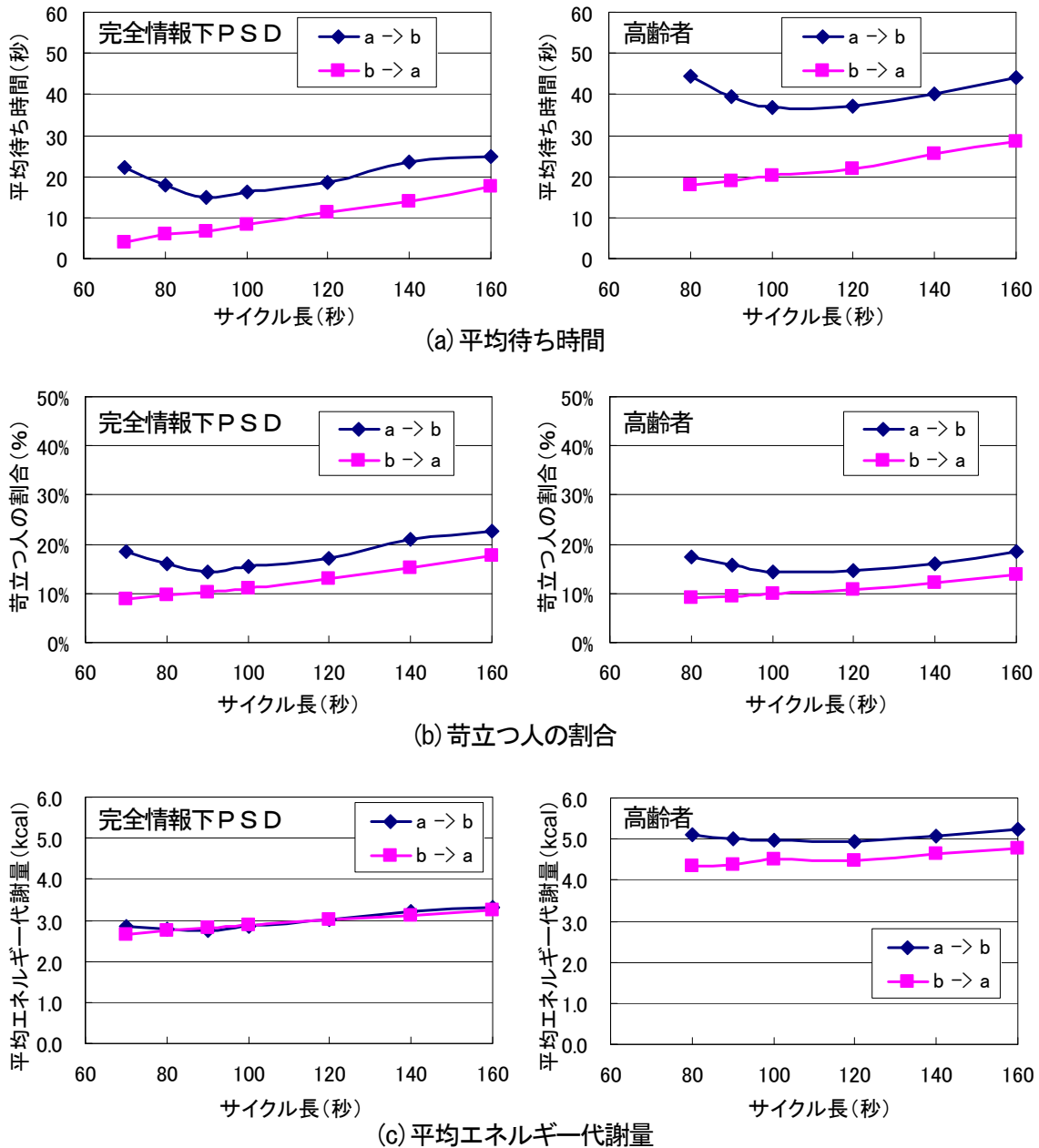


図10-13 8車線同士の交差点における現示切り分け時のサイクル長の短縮効果

これにより、現示の切り分けは、特に現示が先出しされるbからaに向かう方向に大きな効果をもたらすこと、高齢者でも苛立ちを感じる人の割合が20%以下を実現できること、そして、サイクル長の短縮はここにおいても効果があるということがわかる。

以上より、8車線道路同士の交差点では、十分に情報提供を行い、高齢者が多く見受けられる場合には現示の切り分けを行えば、90秒程度のサイクル長を実現することができるといえる。

### 10.3.2.2 8車線道路と4車線道路との交差点

次に、8車線道路の主道路と片側2車線の4車線の従道路との交差点について検討することにする。8車線道路の自動車と歩行者の交通量、そして大型車混入率や右左折率は前ケースと同様のものを使用し、また、4車線道路については12,000台/車線/dayの設計基準交通量の5%である1200台/hがそれぞれの方向から流入するものとした。交差点の飽和度は0.703であった。シミュレーションに用いた交差点の構造を図10-14に、使用した信号現示設計を表10-7に示す。

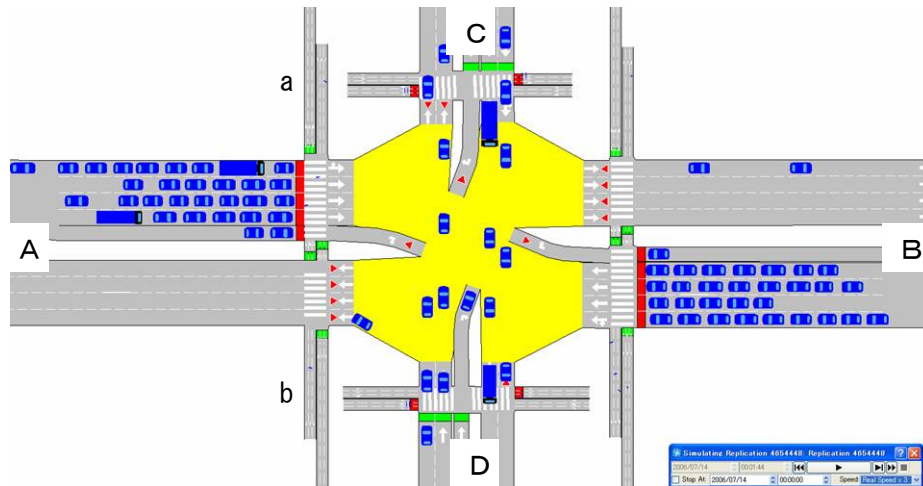


図10-14 シミュレーションに用いた交差点の構造② ～8車線と4車線の交差点

表10-7 8車線と4車線との交差点における信号現示設計

8車×4車		1φ			2φ			3φ			4φ		
		G	Y		G	Y	R	G	Y		G	Y	R
サイクル長	車歩	PG	PF	PR	PG	PF	PR	PG	PF	PR	PG	PF	PR
160	車	60		4	15	3	1	61		4	7	3	2
	歩	49	6	9			19	45	11	9			12
140	車	52		4	13	3	1	52		4	6	3	2
	歩	41	6	9			17	36	11	9			11
120	車	43		4	11	3	1	44		4	5	3	2
	歩	32	6	9			15	28	11	9			9
100	車	35		4	9	3	1	35		4	4	3	2
	歩	27	3	9			13	24	6	9			9
90	車	31		4	7	3	1	31		4	4	3	2
	歩	23	3	9			11	20	6	9			9
80	車	27		4	6	3	1	27		4	3	3	2
	歩	19	3	9			10	16	6	9			8
70	車	22		4	5	3	1	23		4	3	3	2
	歩	14	3	9			9	12	6	9			8
60	車	18		4	5	3	1	18		4	2	3	2
	歩	10	3	9			9	7	6	9			7

図10-15は、まず自動車に対するサイクル長の短縮効果を示したものである。結果として8車線同士の交差点の場合と同様にサイクル長の短縮効果は認められ、80秒程度にまでサイクル長を短縮できる可能性が示されている。ここで信号現示に関して見てみると、4φの長さが交通需要に応じて減少しているために1φと3φの秒数が若干増加している。そのため、8車線道路同士の交差点の場合と比較すると、極小値を与えるサイクル長は変化しないが、サイクル長の短縮効果はより大きいものとなっている。例えば、140秒のサイクル長を80秒まで短縮すると、自動車の平均待ち時間を約36%、CO<sub>2</sub>排出量を約11%、そしてドライバーのエネルギー代謝量を約18%軽減することができることになり、いずれも8車線道路同士の交差点のものより大きな値となっている。従って、指標の極小値を与えるサイクル長は、主道路の交通需要が同じであれば、交差点の飽和度のみに依存していることがわかる。これは交通工学上も自明の結果である。

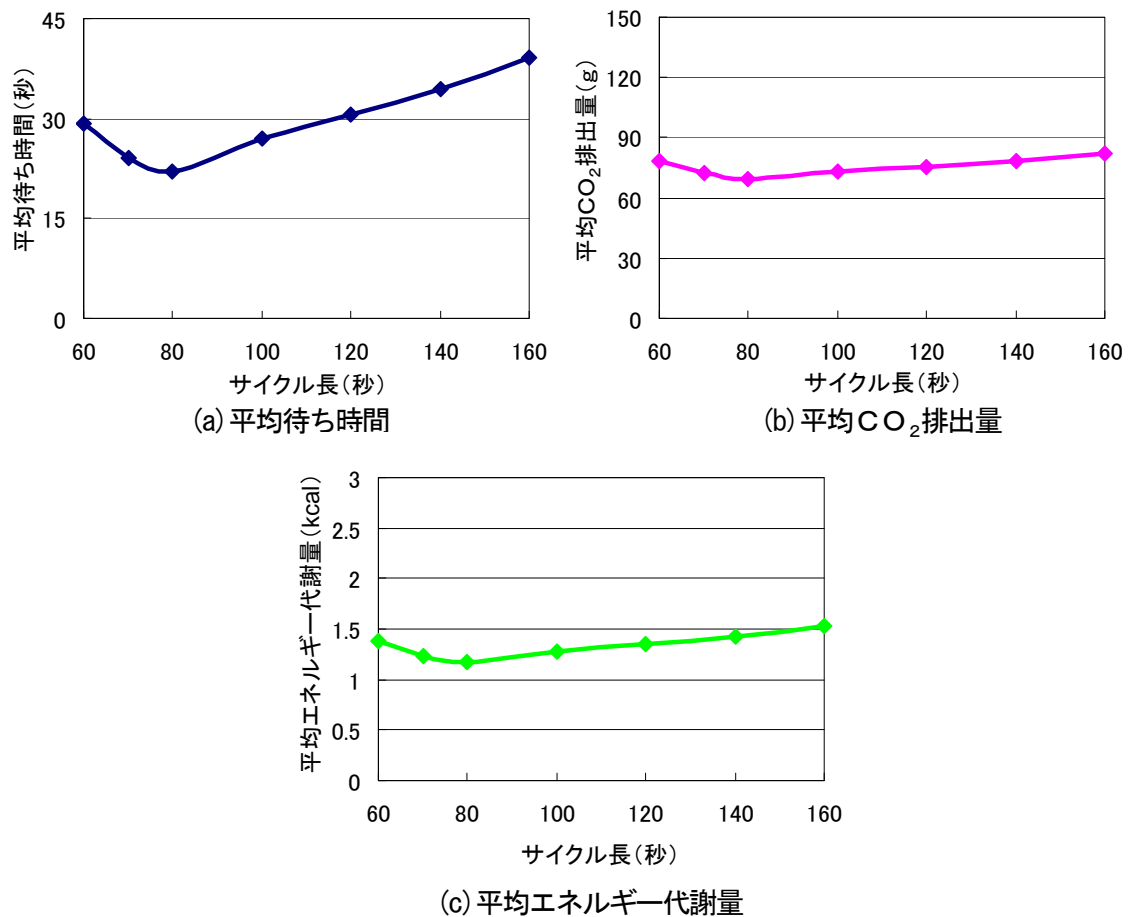


図10-15 8車線と4車線の交差点における自動車に対するサイクル長の短縮効果

次に、完全情報下における歩行者と歩行速度を変化させない高齢者に対するサイクル長の短縮効果を図10-16で見てみることにする。4φの時間の減少に伴って歩行者現示時間が伸びたため、完全情報下における歩行者も高齢者も双方とも待ち時間や苛立つ人の割合などが微減していることがわかる。また、それらの指標の極小値を与えるサイクル長は、8車線道路同士の交差点の場合と同じように、完全情報下では80秒、高齢者では100秒程度ということができそうである。

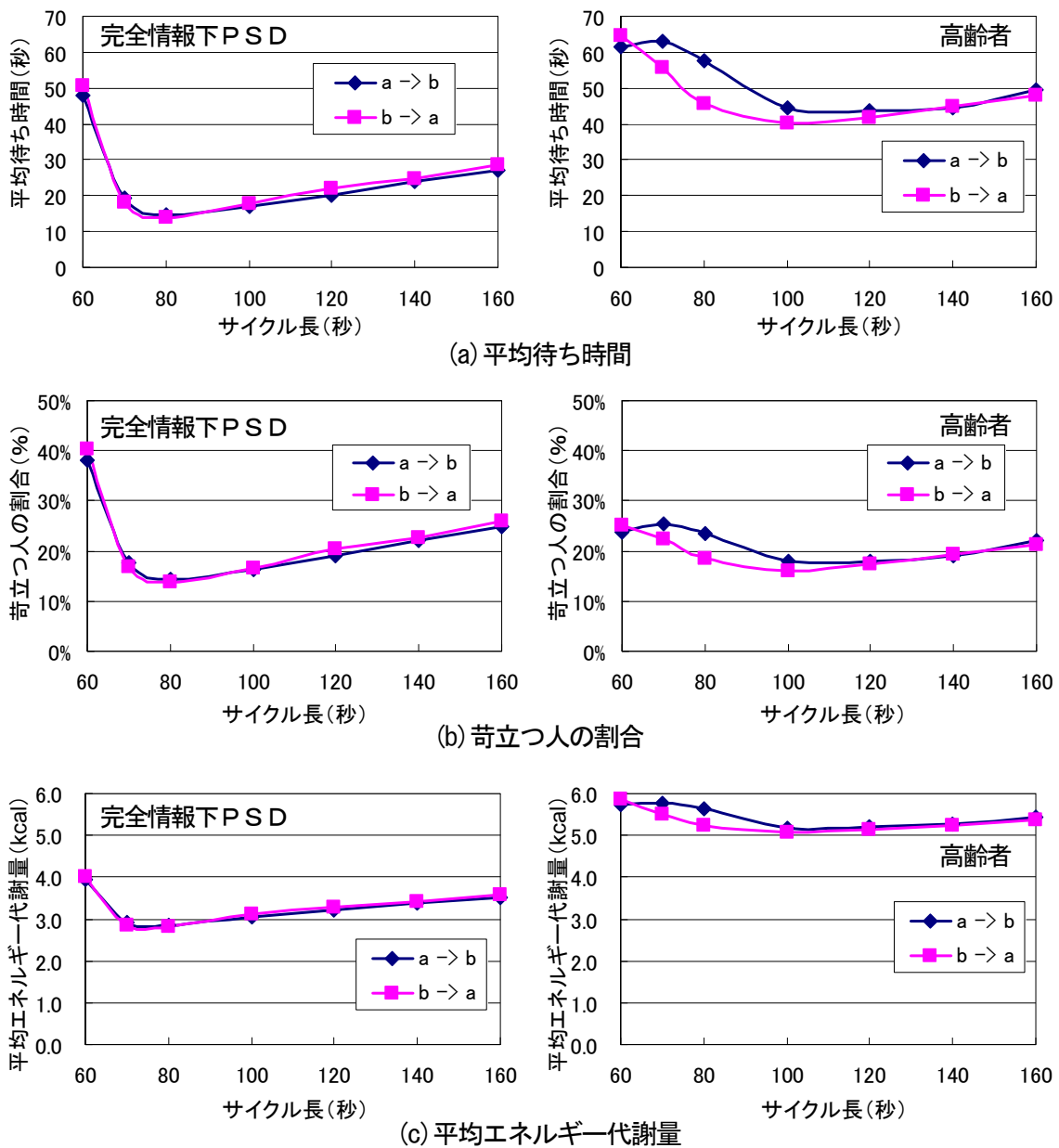


図10-16 8車線と4車線の交差点における歩行者に対するサイクル長の短縮効果

この結果から、歩行者の指標が極小値となるサイクル長の値は、歩行者現示時間として割り振られる秒数のみに依存しており、その秒数で平均的な歩行速度を持つ歩行者が横断を完了することができるうちはサイクル長の減少とともに指標も減少し、横断を完了できなくなると指標は増加することがわかる。なお、高齢者の場合、サイクル長70秒付近から再び指標が減少するが、この状況では殆どの歩行者が歩行者現示時間内には横断が完了できず、赤時間も利用して横断する比率が大きくなるためである。その比率の増加は、中央帯の位置が相対的に遠いaからbに向かう方向がより顕著に現れることになる。

また、現示の切り分けを行った場合のシミュレーション結果を図10-17に示す。その効果は、

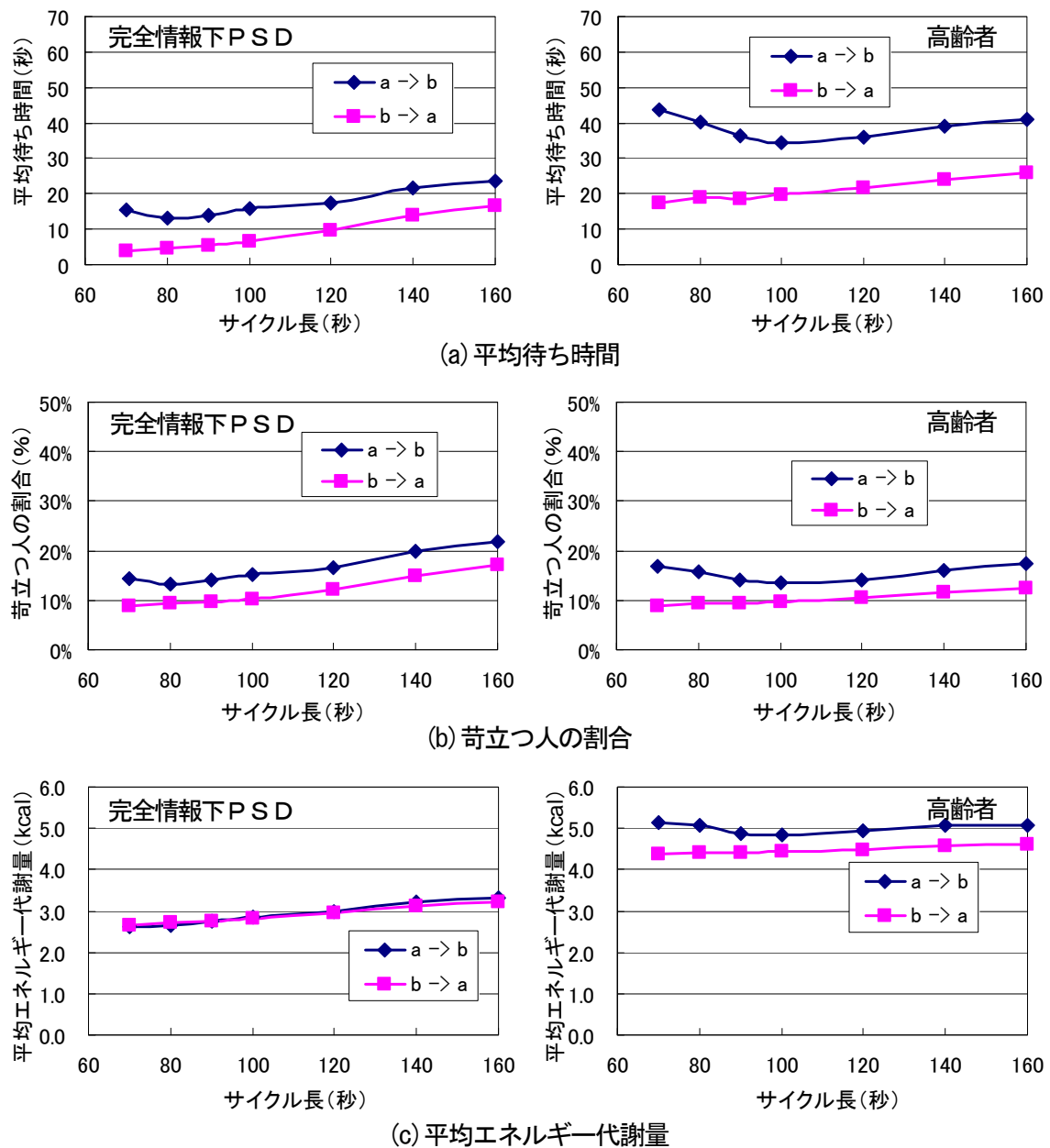


図10-17 8車線と4車線の交差点における現示切り分け時のサイクル長の短縮効果

8車線道路同士の交差点における結果と同様であり、ここでもサイクル長の短縮効果はあるといえることができる。また、常に高齢者で苛立つ人の割合を20%以下に押さえることができるのも現示の切り分けの持つ大きな特徴といえることができるだろう。

以上より、8車線道路と4車線道路の交差点においても、十分に情報提供を行い、高齢者が多く見受けられる場合には現示の切り分けを行えば、80～90秒程度のサイクル長を実現することができるといえる。

### 10.3.2.3 8車線道路と2車線道路との交差点

次に、8車線道路の主道路と片側1車線の2車線道路の従道路との交差点について検討することにする。8車線道路の交通量に関する条件は前ケースと同様のものを使用する。しかし、交差点の飽和度に関しては同程度のものを与えても歩行者・自動車ともに同様の結果となることが考えられるため、2車線道路については異なる自動車の交通需要を与え、交差点の飽和度を変化させることにした。具体的には、計画交通量を6,000台/day（ピーク率5%で300台/h）とした場合と、4,000台/day（ピーク率5%で200台/h）とした場合とを検討することにした。前者を $Q=300$ のケース、後者を $Q=200$ のケースと呼ぶ。いずれも道路構造令によると第四種第二級に属する道路となる。また、交差点の飽和度はそれぞれ、0.601、0.523であった。用いた交差点の構造と信号現示設計を図10-18、表10-8及び10-9に示す。このケースでは、1サイクル当たりの右折車数が1台未満となるため、従道路からの流入に対して右折専用現示は設けないものとする。

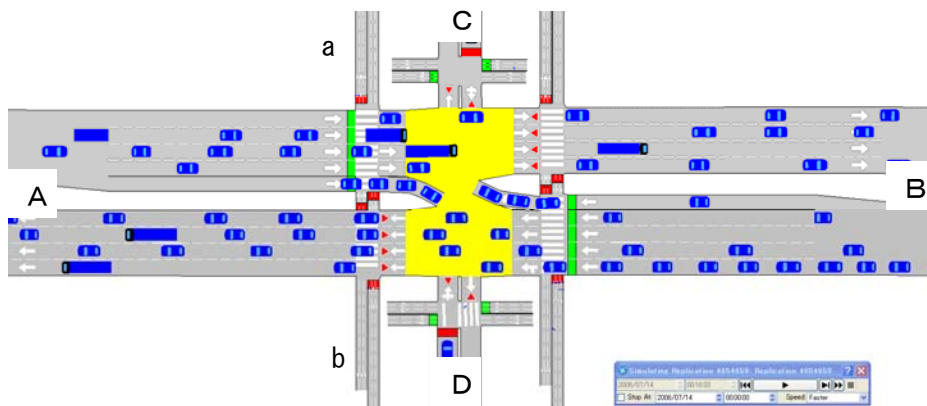


図10-18 シミュレーションに用いた交差点の構造③ ～8車線と2車線の交差点

表10-8 8車線と2車線との交差点における信号現示設計（ $Q=300$ のケース）

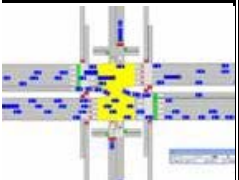
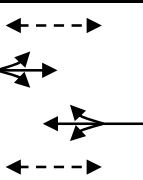
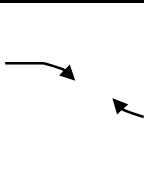
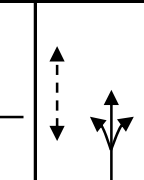

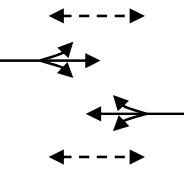
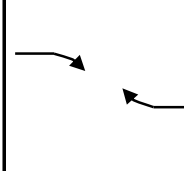
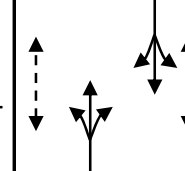
8車×2車( $Q=300$ )		1φ			2φ			3φ		
										
		G	Y	R	G	Y	R	G	Y	R
サイクル長	車歩	PG	PF	PR	PR			PG	PF	PR
160	車	72		4	17	3	2	56	4	2
	歩	64	3	9			22	40	11	11
140	車	62		4	15	3	2	48	4	2
	歩	54	3	9			20	32	11	11
120	車	52		4	12	3	2	41	4	2
	歩	44	3	9			17	25	11	11
100	車	42		4	10	3	2	33	4	2
	歩	34	3	9			15	22	6	11
80	車	32		4	8	3	2	25	4	2
	歩	24	3	9			13	14	6	11
70	車	27		4	7	3	2	21	4	2
	歩	19	3	9			12	10	6	11

表10-9 8車線と2車線との交差点における信号現示設計 (Q=200 のケース)

8車×2車(Q=200)		1φ			2φ			3φ			
											
サイクル長	車歩	G Y			G Y R			G Y R			
		PG	PF	PR			PR	PG	PF	PR	
160	車	82		4	20	3	2	43		4	2
	歩	74	3	9		25		27	11		11
140	車	71		4	17	3	2	37		4	2
	歩	63	3	9		22		21	11		11
120	車	59		4	15	3	2	31		4	2
	歩	51	3	9		20		20	6		11
100	車	48		4	12	3	2	25		4	2
	歩	40	3	9		17		14	6		11
90	車	43		4	10	3	2	22		4	2
	歩	35	3	9		15		11	6		11

まず、Q=300 のケースと Q=200 のケースとの双方について、シミュレーションによって得られた自動車に対するサイクル長の短縮効果を、図10-19に示す。この結果から、ここでもサイク

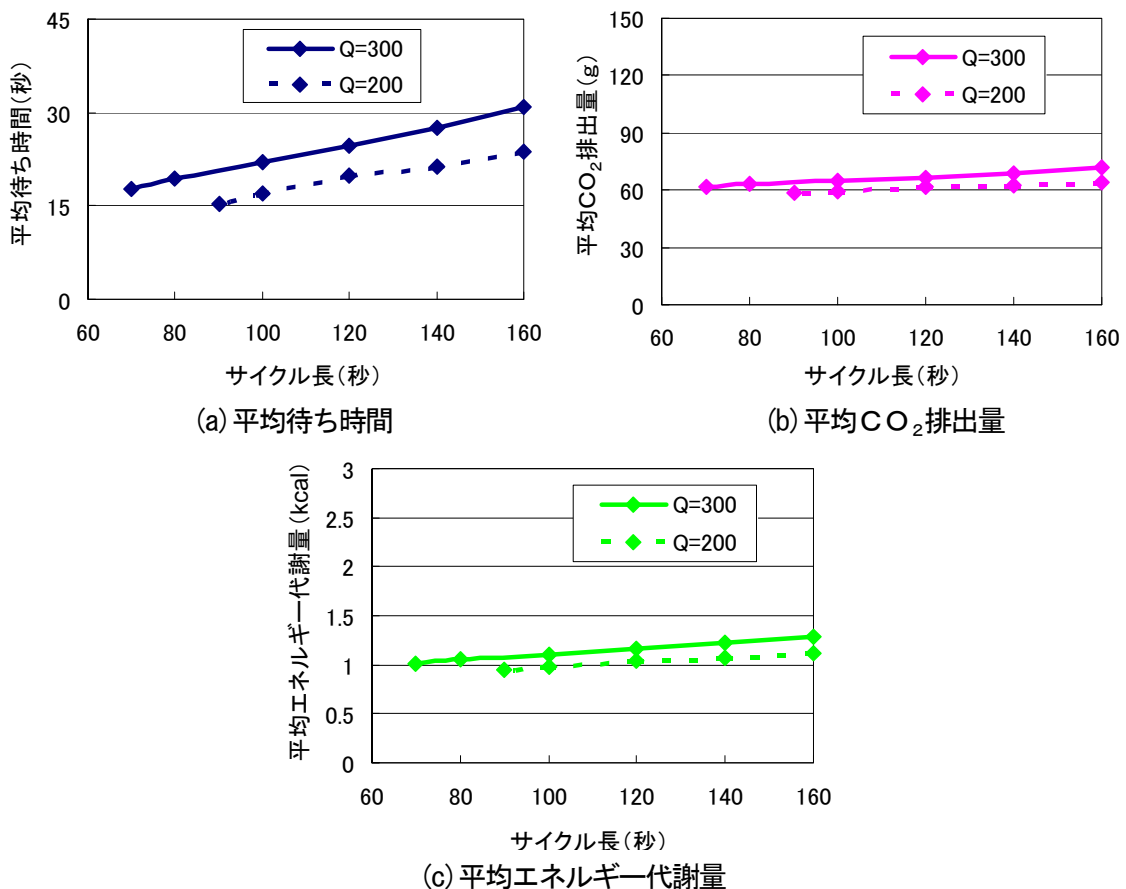


図10-19 8車線と2車線の交差点における自動車に対するサイクル長の短縮効果

ル長の短縮は自動車にとって良い影響をもたらすことが示唆される。同時に、交差点の飽和度が小さくなるにつれて、従道路に割り振られる青時間が短くなり、主道路に割り振られる青時間が長くなるため、主道路を通行する自動車の平均待ち時間は小さくなっていくこともわかる。自動車の指標の極小値を与えるサイクル長についても、特に  $Q=300$  のケースと前項までの検討を比較すれば、交差点の飽和度が小さくなるに従って小さくなっていく様子が推測される。

次に歩行者の指標に関して、まず完全情報下における歩行者と高齢者に対するサイクル長の短縮効果を図 10-20 に示す。これにより、サイクル長の短縮は情報が十分にある環境では有効で

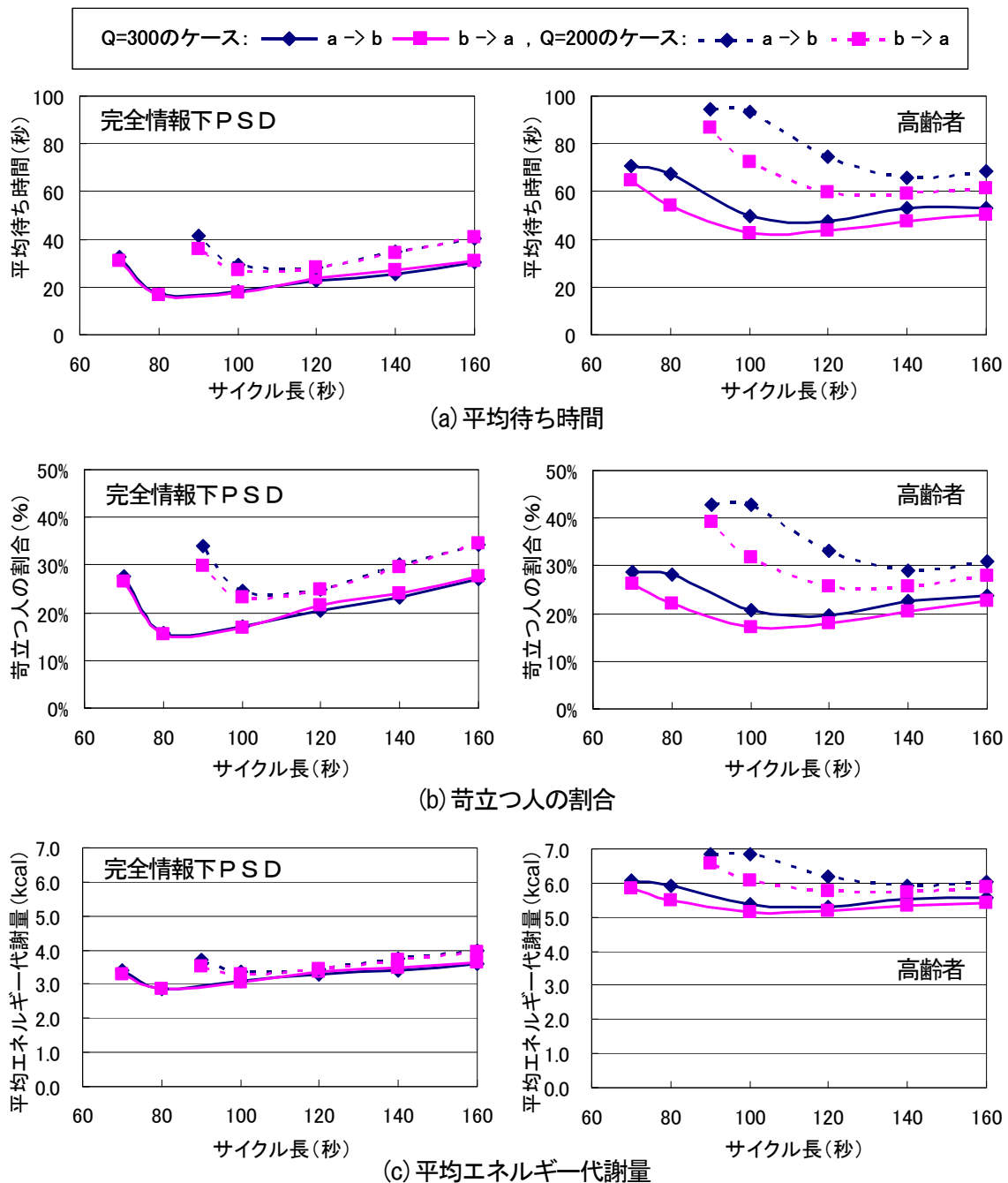


図 10-20 8車線と2車線の交差点における歩行者に対するサイクル長の短縮効果

あるということがいえる一方で、交差点の飽和度が従道路の自動車の交通需要の減少に伴い減少していくと、即ち歩行者の横断時間が相対的に減っていくにつれて、指標の極小値を与えるサイクル長は長くなることがわかる。例えば完全情報下では  $Q=300$  のケースで 80 秒程度、 $Q=200$  のケースでは 100 秒程度となり、高齢者に対しては  $Q=300$  のケースで 100 秒程度、 $Q=200$  のケースでは 140 秒程度となっている。

また、現示を切り分けた場合にどのような結果となるかを見てみると、図10-21のようになる。

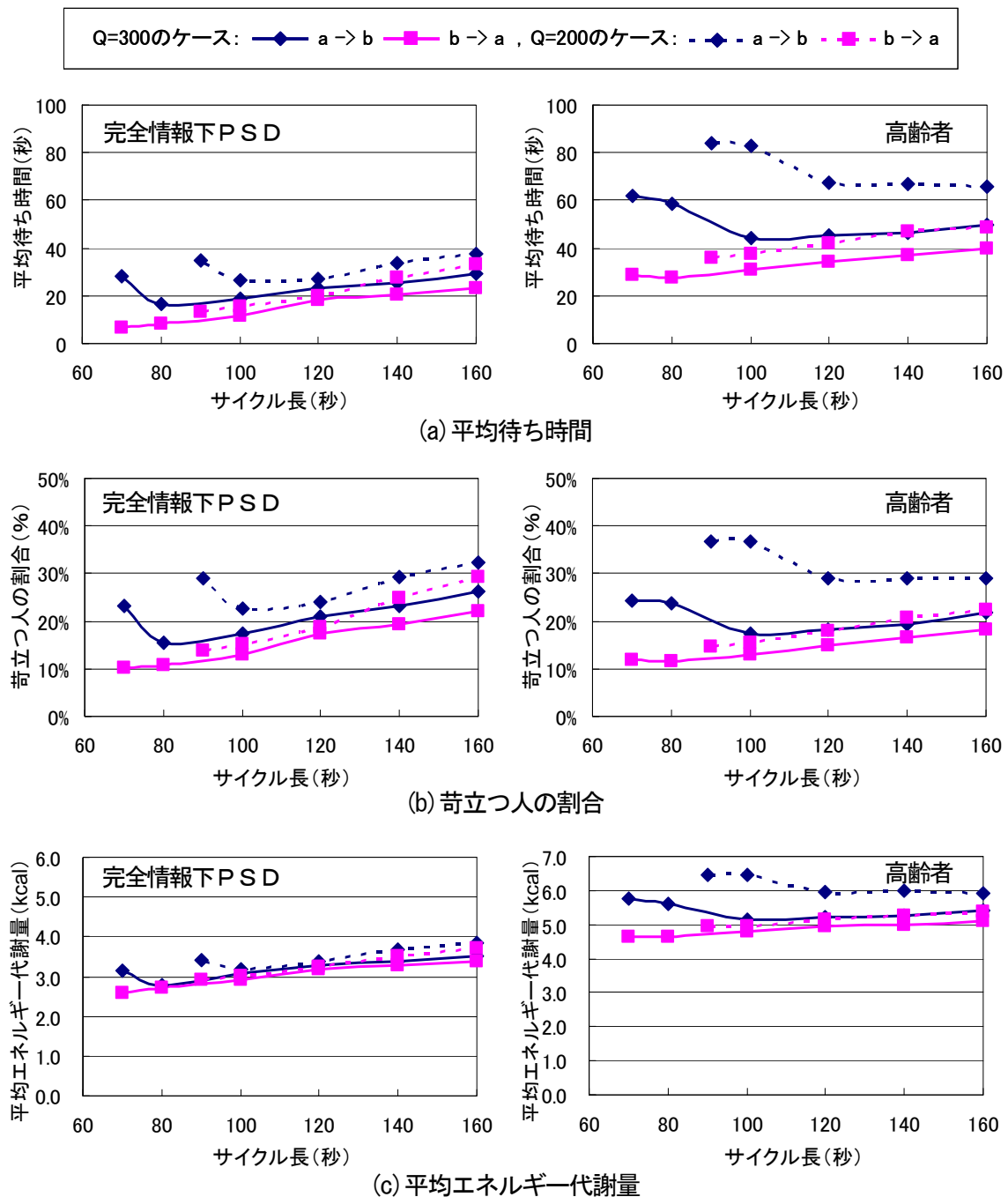


図10-21 8車線と2車線の交差点における現示切り分け時のサイクル長の短縮効果

これにより、現示の切り分けを行うことができれば、高齢者を考慮に入れても少なくとも一つの方向（ここではbからaに向かう方向）についてはサイクルを90秒程度にまで短くすることが可能ということになる。逆の方向に関しては、現示を切り分けない場合と同様の傾向が見られるが、歩道は通常道路の両端に設けられているため、常に側方を通行する自動車と同じ方向に歩くようにすれば、現示の切り分けの効果を享受することができることになる。

ところで、歩行者に関する諸指標に極小値を与えるサイクル長は、結局のところそのサイクル長のもとで確保することのできる歩行者現示時間と歩行者の平均歩行速度によって定まるに過ぎない。例えば、平均歩行速度  $3.82\text{km/h}=1.06\text{m/s}$  の高齢者は  $32\text{m}$  の横断歩道を渡るには  $30$  秒が必要である。一方、 $Q=200$  のケースではサイクル長が  $140$  秒のときに既に歩行者現示時間は  $32$  秒であり、高齢者が一回で横断するには限界の歩行者現示時間であることがわかる。このとき、苛立ちを感じる高齢者も4分の1程度以上存在することになっている。つまり、従道路の自動車の交通需要が主道路に比べて小さい場合は、主道路を横断する歩行者に対する歩行者現示時間も小さくなり、サイクル長の短縮は歩行者にとっては不利になるということになる。このような状況を改善するには、少なくとも平均的な歩行速度を持つ歩行者の横断時間は歩行者現示時間として確保するようにしながら、交差点の飽和度に負荷をかけない範囲内でスプリット配分を調整することも視野に入れておくべきであろう。これは、従道路の自動車の予測される交通需要を、歩行者の条件を満たすよう多めに調整する、ということと同値でもある。

以上、8車線道路を主道路とする様々な交差点を検討してきた。その多くの場合において情報を与えることができればサイクル長の短縮は効果があることがわかり、場合によっては現示の切り分けを行うことでその効果を増大することができることがわかった。

### 10. 3. 3 4車線道路を主道路とする交差点のシミュレーション

次に、4車線道路を主道路とし、それ以下の車線数の道路を従道路とする交差点について、シミュレーションにより検討を行うことにする。

#### 10. 3. 3. 1 4車線道路同士の交差点

まず、4車線道路同士の交差点を扱う。交差点構造は図10-22に示すとおりであり、交差点手前には右折専用車線を  $50\text{m}$  程度付加することにした。また、横断歩道の長さは  $19\text{m}$  であり、中央部に  $2.5\text{m}$  程度の中央帯を設けることにし、歩行者はやはり交差点の  $70\text{m}$  程度手前から横断を開始するものとした。このような条件のもとで、完全情報下におけるPSDアルゴリズムを用いる場合と、高齢者のみを歩行者として導入した場合の効果をそれぞれ分析する。

主道路である4車線道路に流入する自動車の交通量は、8車線道路における検討の際と同様の考え方により、 $12,000$  台/車線/day の設計基準交通量の5%である  $1200$  台/h とし、従道路の4車線道路についても同様とした。また、歩行者の交通量はここにおいても各方向  $150$  人/h とし、大型車混入率や右左折率はいずれも5%とし、右折専用現示も設けることにした。交差点の飽和度は  $0.669$  であった。表10-10に実際にシミュレーションに用いた信号現示設計を示す。

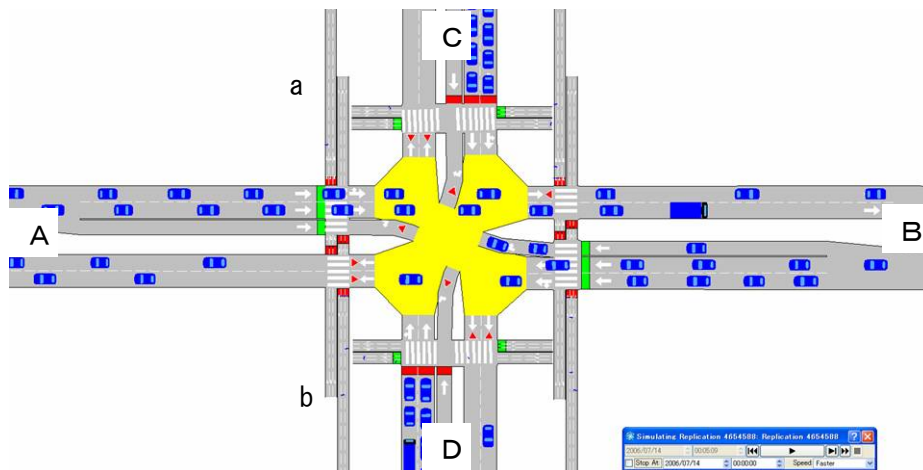


図10-22 シミュレーションに用いた交差点の構造④ ～4車線道路同士の交差点

表10-10 4車線道路同士の交差点における信号現示設計

4車×4車		1φ			2φ			3φ			4φ		
サイクル長	車歩	G	Y		G	Y	R	G	Y		G	Y	R
		PG	PF	PR			PR	PG	PF	PR			PR
140	車	55		4	7	3	1	55		4	7	3	1
	歩	44	6	9			11	44	6	9			7
120	車	46		4	6	3	1	46		4	6	3	1
	歩	35	6	9			10	35	6	9			10
100	車	37		4	5	3	1	37		4	5	3	1
	歩	26	6	9			9	26	6	9			9
80	車	29		4	3	3	1	29		4	3	3	1
	歩	18	6	9			7	18	6	9			7
70	車	24		4	3	3	1	24		4	3	3	1
	歩	13	6	9			7	13	6	9			7
60	車	19		4	3	3	1	19		4	3	3	1
	歩	11	3	9			7	11	3	9			7

シミュレーションによって得られた自動車に対するサイクル長の短縮効果を図10-23に示す。これにより、4車線道路同士の交差点においてもサイクル長の短縮には効果があることがわかる。なお、自動車に関する指標に極小値を与えるサイクル長は、前述のとおり交差点の飽和度によって定まるものであり、飽和度が小さいほど極小値を与えるサイクル長も小さくなる。そのため、0.669の交差点の飽和度を持つこの交差点は、0.703の飽和度を持つ8車線と4車線の交差点と、0.601を持つ8車線と2車線の交差点における $Q=300$ のケースとの中間の値として、70秒から80秒のサイクル長の時に指標が極小となっていることが確認できる。

次に、シミュレーションによって得られた歩行者に関する指標について分析を行う。図10-24に、この交差点における歩行者の待ち時間と苛立つ人の割合、エネルギー代謝量を示す。この結

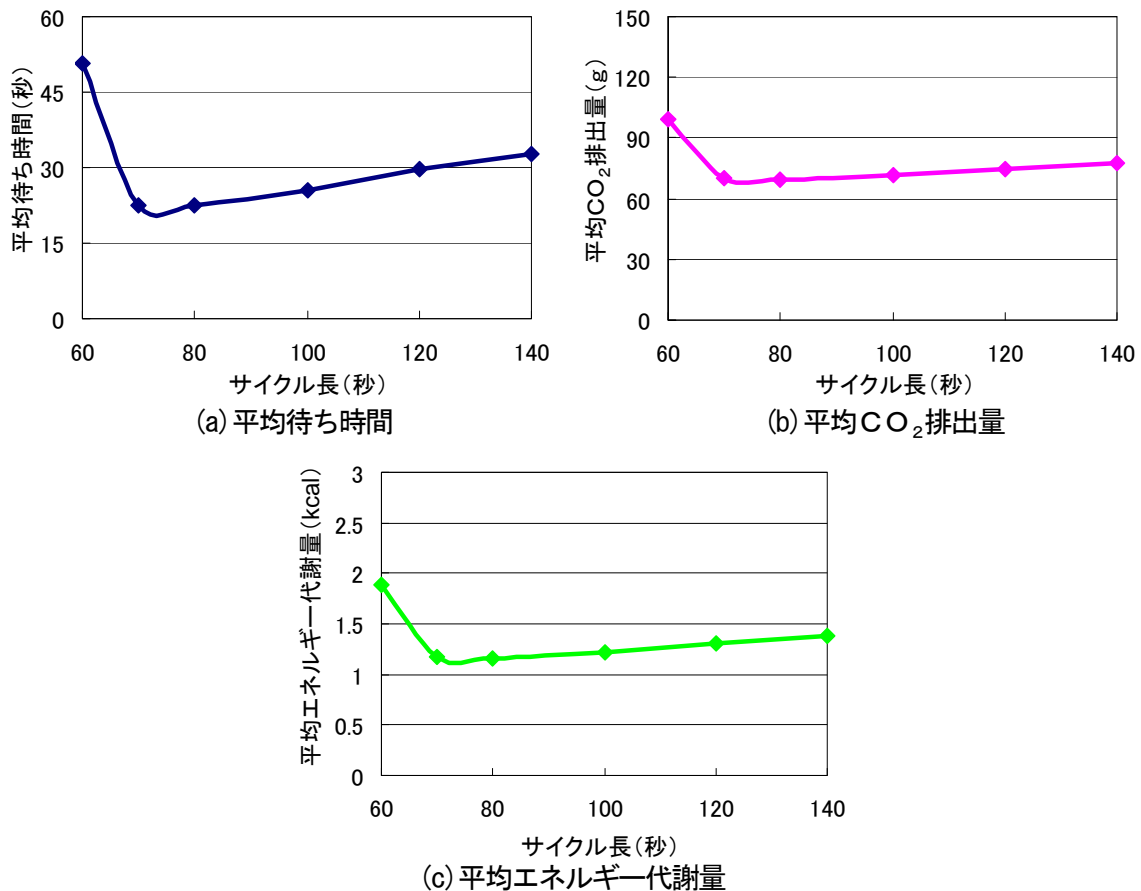


図10-23 4車線道路同士の交差点における自動車に対するサイクル長の短縮効果

果から、4車線道路同士の交差点では、完全情報下の歩行者だけでなく、高齢者にとってもサイクル長の短縮は効果があり、サイクル長を80秒程度にしても歩行者には負担がかからないことがわかる。これは、前述のとおり歩行者の指標の極小値が歩行者の平均歩行速度と横断距離の関係から定まるからである。即ち、平均歩行速度  $3.82\text{km/h}=1.06\text{m/s}$  の高齢者は19mの横断歩道を横断するのに18秒を要するが、サイクル長が80秒の場合でも歩行者現示時間として24秒が確保されていることになるため、多くの歩行者が1回で横断を完了することができることになるのである。それよりもサイクル長が短くなると、1回では横断を完了できない高齢者が横断歩道の手前や中央帯などに滞留する確率が増え、待ち時間などの指標は増大することになるのも、前述のとおりである。また、現示の切り分けに関しては、4車線道路同士の交差点では現示を切り分けずに高齢者の苛立つ確率を20%以下に常に抑えながらサイクル長を短縮することが可能となること、そして4車線道路という規模では中央帯を十分に確保することができない場合が多く、中央帯に歩行者用信号灯器を設置してその前後で異なる現示を歩行者に提示することが交通安全上困難ではないかと考えられたため、敢えてここで検討する必要はないものと考えた。

以上から、4車線道路同士の交差点では、現示の切り分けを行わなくても、高齢者にも配慮しながら80秒程度のサイクル長で運用することが可能であるということが分かった。

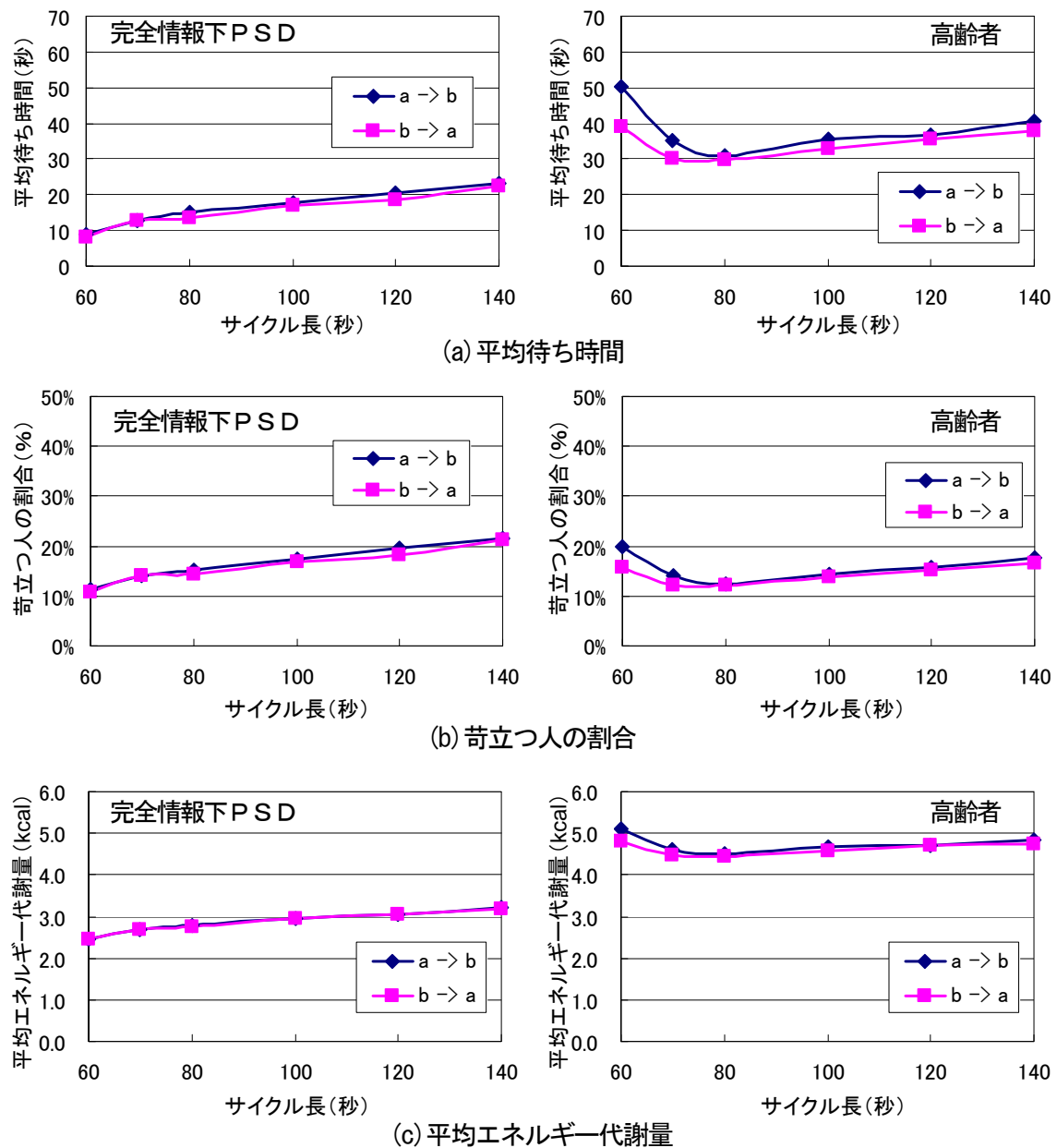


図10-24 4車線道路同士の交差点における歩行者に対するサイクル長の短縮効果

### 10.3.3.2 4車線道路と2車線道路の交差点

最後に、4車線道路の主道路と2車線道路の従道路との交差点について検討を行うことにする。ここで、4車線道路の交通量などに関する諸条件は前ケースと同様のものを使用し、2車線道路については異なる自動車の交通需要を与えることで交差点の飽和度を変化させることにした。実際に用いた計画交通量は8車線道路における検討に用いたものと同様に6,000台/day（ピーク率5%で300台/h）と4,000台/day（ピーク率5%で200台/h）であり、ここでも前者を $Q=300$ 、後者を $Q=200$ のケースと呼ぶことにする。また、交差点の飽和度はそれぞれ、0.567、0.490であった。

用いた交差点の構造と信号現示設計は図 10-25、表 10-11 及び 10-12 に示すとおりである。このケースにおいても、1 サイクル当たりの右折車数が 1 台未満となるため、従道路からの流入に対して右折専用現示は設けないものとした。

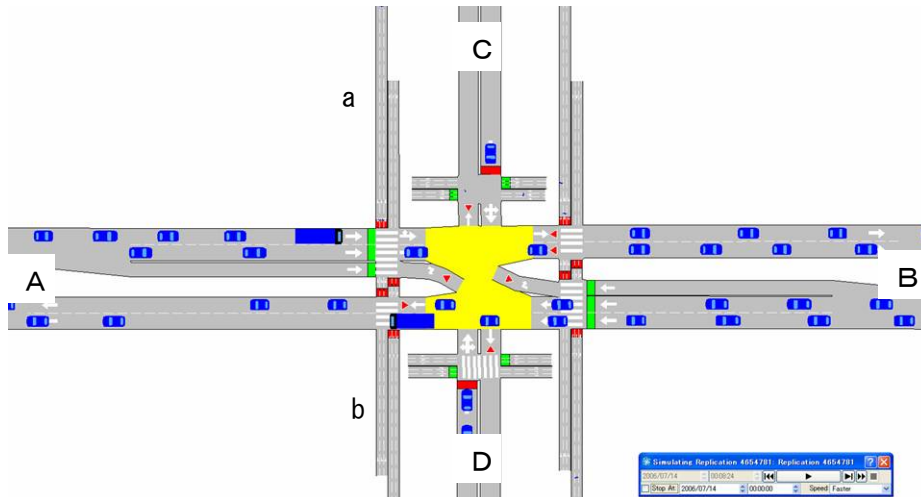


図 10-25 シミュレーションに用いた交差点の構造⑤ ～4車線と2車線の交差点

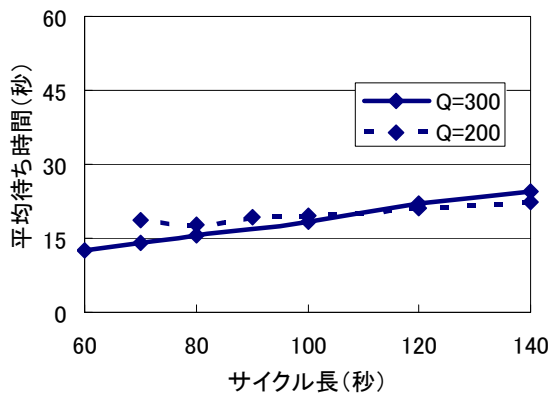
表 10-11 4車線と2車線との交差点における信号現示設計 (Q=300 のケース)

4車×2車(Q=300)		1φ			2φ			3φ		
		G	Y		G	Y	R	G	Y	R
サイクル長	車歩	PG	PF	PR				PG	PF	PR
140	車	67		4	8	3	1	52		4 1
	歩	56	6	9		12		41	6	10
120	車	56		4	7	3	1	44		4 1
	歩	45	6	9		11		33	6	10
100	車	46		4	5	3	1	36		4 1
	歩	35	6	9		9		25	6	10
80	車	35		4	4	3	1	28		4 1
	歩	24	6	9		8		17	6	10
70	車	30		4	4	3	1	23		4 1
	歩	19	6	9		8		15	3	10
60	車	25		4	3	3	1	19		4 1
	歩	14	6	9		7		11	3	10

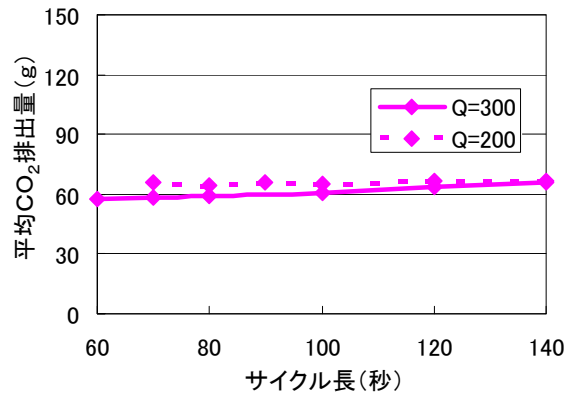
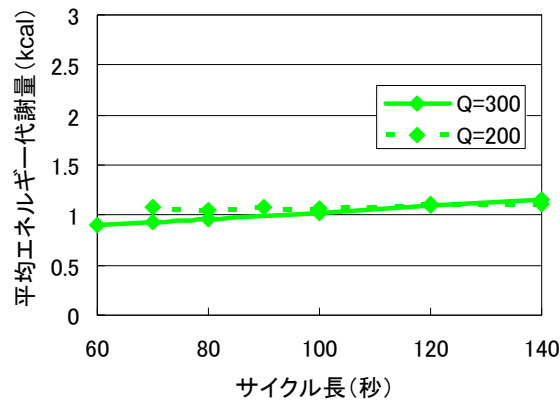
以上の交差点構造及び信号現示設計を用いてシミュレーションを行った結果として得られた、自動車に対するサイクル長の短縮効果を図 10-26 に示す。自動車に関しては、Q=300 のケースについては顕著にサイクル長の短縮効果が現れているが、Q=200 のケースの方がその効果が小さいということがわかる。この理由として考えられるのは、左折車と歩行者との錯綜状況が考えら

表10-12 4車線と2車線の交差点における信号現示設計 (Q=200 のケース)

4車×2車(Q=200)		1φ			2φ			3φ		
サイクル長	車歩	G Y			G Y R			G Y R		
		PG	PF	PR	PR			PG	PF	PR
140	車	78		4	9	3	1	40	4	1
	歩	67	6	9		13		29	6	10
120	車	65		4	8	3	1	34	4	1
	歩	54	6	9		12		23	6	10
100	車	53		4	6	3	1	28	4	1
	歩	42	6	9		10		17	6	10
90	車	47		4	6	3	1	24	4	1
	歩	36	6	9		10		13	6	10
80	車	41		4	5	3	1	21	4	1
	歩	30	6	9		9		13	3	10
70	車	35		4	4	3	1	18	4	1
	歩	24	6	9		8		10	3	10



(a) 平均待ち時間


 (b) 平均CO<sub>2</sub>排出量


(c) 平均エネルギー代謝量

図10-26 4車線と2車線の交差点における自動車に対するサイクル長の短縮効果

れる。即ち、片側2車線の4車線道路が2車線道路と交差するような交差点では、交差点が小さくなり、特に左折車両用のポケットが充分には設けられない場合がある。このとき、左折車と歩行者が錯綜して左折車が停車するだけで、主道路の車線が1車線閉塞することになり、交通容量が落ち、主道路を通行する自動車の待ち時間に影響を与えることになるのである。この状態を改善するには、2車線道路における横断歩道を少し奥に設けるなどの工夫が必要であろう。

次に、サイクル長の短縮による歩行者に関する指標の変化を図10-27に示す。これにより、情

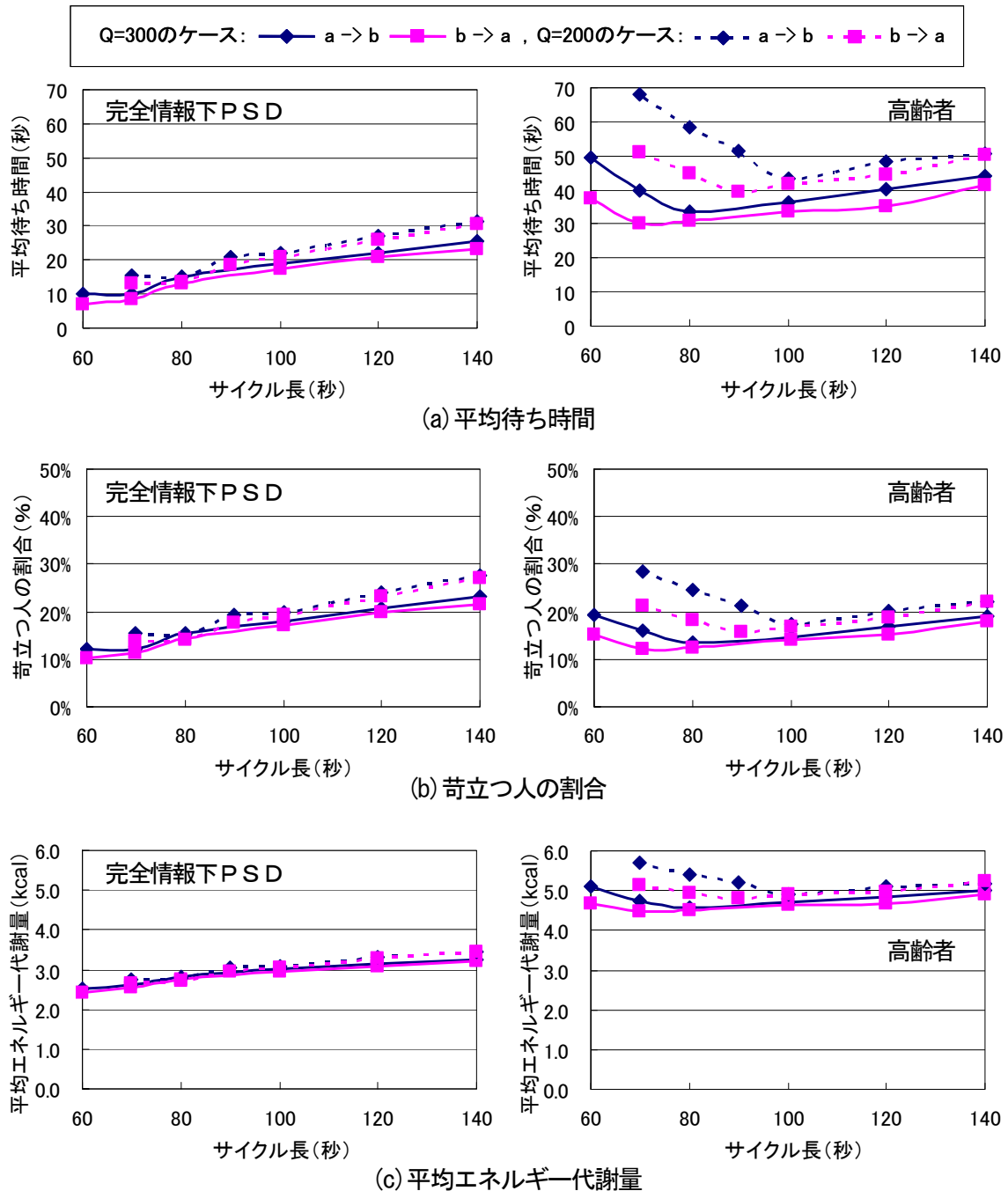


図10-27 4車線と2車線の交差点における歩行者に対するサイクル長の短縮効果

---

報提供を行った場合には、サイクル長の短縮はここにおいても効果が多いことがわかった。高齢者については、 $Q=300$  のケースにおいては 80 秒程度までサイクル長を短縮することが可能であるが、やはり  $Q=200$  のケースになるとサイクル長の短縮は 100 秒程度までが限度となるようである。これについては、8 車線道路と 2 車線道路の検討の際にも述べたとおり、現示の切り分けを行うことにすれば、サイクル長を短縮させながら自動車にとっても、少なくとも一方向の歩行者にとっても待ち時間の少ない交差点を創出することが可能なのである。

## 第11章

# 信号交差点の設計・制御ガイドライン

本章では、これまでの PedECS を用いた実験及び CEMID によるシミュレーションの結果より、実際に交差点をどのように設計・制御すればよいと考えられるか、そのガイドラインを示す。まず、これまでの結果から自動車・歩行者の指標にはどのような特徴があるかをまとめた後、基本的な設計・制御における方針を示し、更に具体的な設計・制御方法について触れていく。

### 11.1 実験及びシミュレーションの結果のまとめ

まず、これまでに行った実験及びシミュレーションの結果からわかる、自動車・歩行者の指標に関する特徴についてまとめておくことにする。

#### 11.1.1 自動車の指標にみる特徴

サイクル長の短縮により、自動車の指標である平均待ち時間、平均  $\text{CO}_2$  排出量、ドライバーの平均エネルギー消費量は、設計された信号現示内で自動車の交通需要が捌けているうちは軽減していくが、信号現示で捌けなくなると増大していくことになる。そしてその極小値は自動車にとっての最適サイクル長と考えることができるが、これを定義するものは交差点の飽和度であるといってよい。ここで、「平面交差の計画と設計基礎編第2版（交通工学研究会、2004）」によると、交差点の飽和度とサイクル長の関係を与える式としては、一様到着を前提とした最小サイクル長  $C_{\min}$  の計算式(11.1)、およびランダム到着を前提とした孤立交差点の最適サイクル長  $C_{opt}$  を求める Webster の近似式(11.2)がある。

$$C \geq \frac{L}{1-\lambda} = C_{\min} \quad (11.1)$$

$$C_{opt} = \frac{1.5L+5}{1-\lambda} \quad (11.2)$$

$C$  : サイクル長 (秒)

$L$  : 1 サイクル当たりの損失時間 (秒)

$\lambda$  : 交差点の飽和度

これに本研究における自動車にとっての最適サイクル長に関する結果を見てみると、表 11-1 のようになる。ここで損失時間は 1 サイクル当たりの黄時間と全赤時間の和として定義するが、全赤表示を伴い黄表示が 4 秒、或いは全赤字間を加えたクリアランス時間が 5 秒以上ある場合は、発進時の損失に比べて有効青時間として利用される黄表示の時間が長くなるものと考えられるので、現示切換え時の損失時間としては、クリアランス時間から 1 秒差し引いた値を用いている。また、サイクル長として検討していない範囲に最適サイクル長が存在する可能性がある場合は、「<80」などと示し、その値の存在し得る範囲を替わりに示している。この結果から、本研究によって得られた自動車にとっての最適サイクル長は、理論的に算出される最小サイクル長と、Webster によって提唱された実験式による最適サイクル長に挟まれた区間内に存在していること

表 1 1-1 交差点の飽和度と最適サイクル長の関係

交差点の飽和度	損失時間(秒)	交差点の規模	$C_{\min}$	本研究の $C_{opt}$	Webster の $C_{opt}$
0.880	16	8車×8車	133	140	242
0.737	16	8車×8車	61	80	110
0.703	16	8車×4車	54	80	98
0.669	16	4車×4車	48	75	88
0.601	13	8車×2車	33	<70	61
0.593	16	8車×8車	39	<80	71
0.567	12	4車×2車	28	<60	53
0.523	13	8車×2車	27	<90	51

がわかる。これにより、自動車にとっての最適サイクル長として算出された値は妥当なものと考えることができる。なお、交差点の飽和度が高くなるにつれて、Webster の式と本研究によって得られた自動車にとっての最適サイクル長との乖離は著しくなるが、これは Webster の式が自動車の到着をポアソン分布に従うランダム到着としているからであり、そもそも交差点の飽和度が高い状況では当てはまりにくいものだからである。

本研究では、都心部で 140 秒、地方部では 180 秒といわれているわが国のサイクル長を、欧米諸国においては一般的な 100 秒以下にまで短縮することを一つの目標としている。そのためには、どの程度の交通量の交差点であればどの程度にまでサイクル長を短縮することが可能かを検討する必要があるが、自動車にとっての最適サイクル長に関する結果から、交差点の飽和度が 0.750 程度以下であれば、あらゆる交差点において自動車にとってはサイクル長を 90 秒程度以下とすることができることがわかったということができよう。それ以上の交差点の飽和度の交差点に対して 90 秒程度にまでサイクル長を短縮することは、現示切換え時の損失時間を考慮した際に交通需要を捌ききることができず、渋滞が発生する可能性が高い、ということになる。

### 1 1. 1. 2 歩行者の指標にみる特徴

歩行者に関する指標としては、「苛立ち」「慌しさ」「不安」に関する不快感に特に注目しており、どのような交差点設計・制御を行うとこれらの不快感がどのように変化するかを実験やシミュレーションを通してみてきたことになる。

まず、不安感に関しては、特に中央帯に滞留しているときに、その待ち時間などにはあまり依存せずに中央帯の幅員によって、感じる不安感には差異が生じることがわかっている。そして、半数以上の人不安に感じない中央帯にするためには、3.5m 以上の幅員を持たせるか、防護柵を設けられるのであれば 2.5m 以上の幅員を持たせれば良い、ということも分かっている。

慌しさに関しては、実験によって計測した主観的指標と相関する交差点の物理的指標を探すことが困難であったため、本研究においては特にエネルギー代謝量に着目することにし、歩行速度を上げることによってエネルギー代謝量が増大する様子を、シミュレーションモデル CEMID で扱うことができるようにした。結果として、サイクル長を短縮することによって生じるエネルギー代謝量の変化は、結局のところ待ち時間或いはそこから算出される苛立つ人の割合と同様の変化

を持つことになった。この主な理由としては、歩行速度を上げることによって代謝量は増大するが、逆に歩行に要する時間が短縮されるため、総合としては歩行速度が低い時とあまり変化しない場合が多い、ということが挙げられる。そのため、信号待ちをしている際のエネルギー代謝のみが変化の原因となり得るものとなり、これはつまり待ち時間の変化と等しいものとなる、ということに他ならない。従って、慌しさに関しては、苛立ちと同様の変化を行うものとして特にここでは言及せず、次に示す苛立ちに関する記述で代替するものとする。

苛立ちに関しては、待ち時間に対して苛立ちを感じる程度を非高齢者と高齢者との場合を分けて定義し、CEMIDのシミュレーションによってそれぞれを算出可能にした上で、サイクル長を短縮することによって苛立つ人の割合がどのように変化するかを追うことができるようにした。その結果として、苛立ちを最小にするサイクル長はそのサイクル長のもとで確保できる歩行者現示時間と歩行者の平均的な歩行速度によって決まるということが分かった。

図11-1及び図11-2は、各シミュレーションにおける苛立つ人の割合と歩行者現示時間の関係を示したものである。ここで、歩行者現示時間とは対象とする信号現示におけるPGとPFの時間の和のこととしており、点線はその横断歩道を非高齢者または高齢者が希望歩行速度の平均値で横断するのに必要な横断時間を示している。これにより、確かに苛立つ人の割合の極小値を定義付けるものは、サイクル長そのものではなく、歩行者現示時間の長さであることがわかる。なお、非高齢者については、この基準となる横断時間よりも短い位置に極小値が現れる傾向があり、

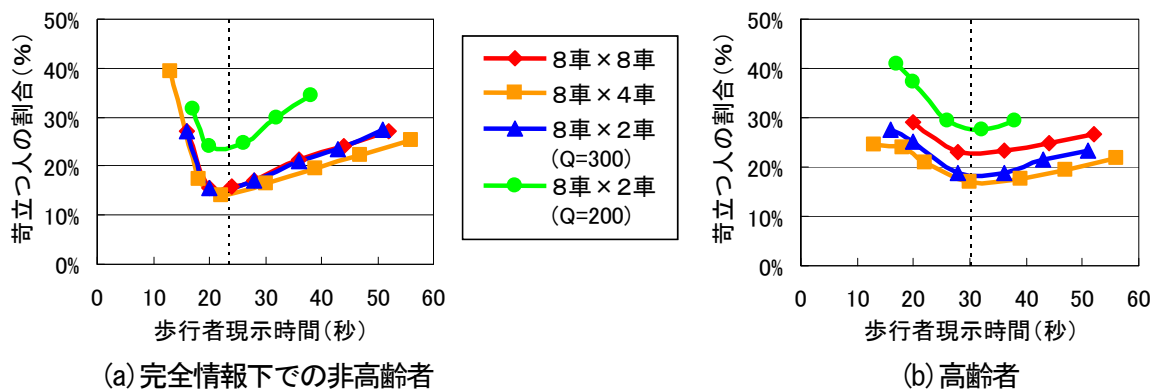


図11-1 8車線道路を主道路とする場合の苛立つ人の割合と歩行者現示時間の関係

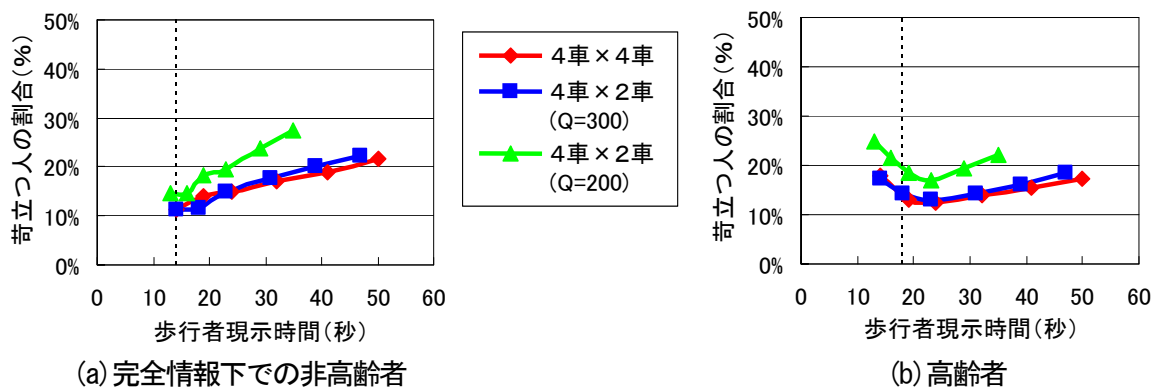


図11-2 4車線道路を主道路とする場合の苛立つ人の割合と歩行者現示時間の関係

高齢者は逆にこの横断時間よりも長い位置に極小値が現れる傾向があるが、これは自動車との相互作用の存在と歩行者が走るかどうかによって説明づけることができる。つまり、自動車との相互作用の存在により、本来基準となる横断時間よりは長い横断時間が歩行者には必要である。そのため、特に走ることにない高齢者はこの基準となる横断時間より長い歩行者現示時間のときに最も効率的な行動をとることができる。一方で、非高齢者は歩行速度を2倍近くにまで上げて歩くことができるため、自動車との相互作用を考慮しても、基準の横断時間より短い横断時間で効率的に横断行動をとることができるということである。ここで、非高齢者の場合は平均の希望歩行速度を1.11倍、高齢者の場合は平均の希望歩行速度を0.85倍した値を平均の歩行速度と再定義して計算を行うと、概ね極小値が一致することがわかった。これを調整歩行速度と呼ぶことにし、非高齢者では1.5m/s、高齢者では0.9m/sを用いることとする。なお、不完全情報下における非高齢者の調整歩行速度も同様に求めたところ1.2m/sであった。

以上より、サイクル長を短縮した上で歩行者に対する不快感を軽減するためには、まず短いサイクル長を設定した上で、歩行者現示時間として高齢者の調整歩行速度0.9m/sでの横断時間が確保できるなら、必ずしも中央帯を設置する必要はなく、確保できないならば、中央帯を付ける。設置する中央帯は2.5m以上とし、3.5m以上確保できない場合は防護柵で中央帯を囲むものとする。また、少なくとも歩行速度1.5m/sの横断時間は歩行者現示時間として確保する必要がある。

更に、どの程度の赤時間であれば苛立つ歩行者が少ないかを調べるために、歩行者赤時間と

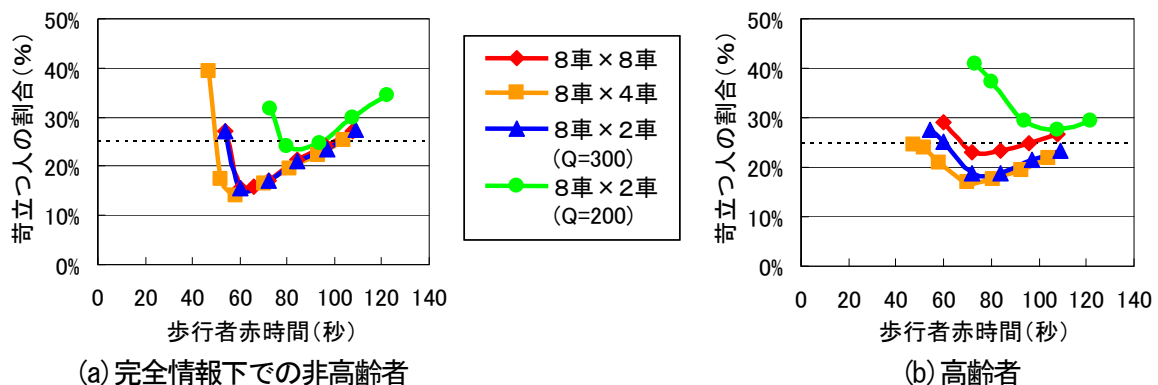


図11-3 8車線道路を主道路とする場合の苛立つ人の割合と歩行者赤時間の関係

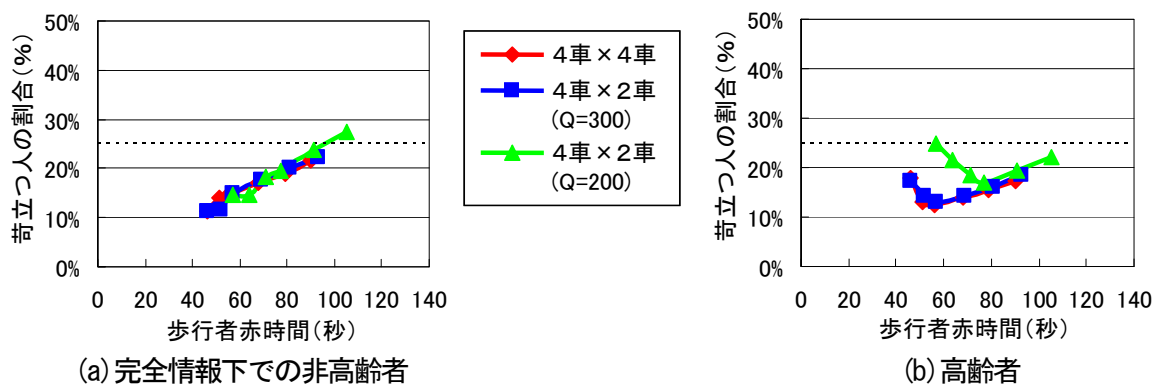


図11-4 4車線道路を主道路とする場合の苛立つ人の割合と歩行者赤時間の関係

苛立つ人の割合を調べたところ、図 11-3 及び図 11-4 を得た。ここで、歩行者赤時間とはサイクル長から歩行者現示時間を減じたものを指している。図より、長いサイクル長からサイクルを短縮していく過程では、苛立つ人の割合は極小値を迎えるまではほぼ同一の曲線上を変化していく性質が、非高齢者、高齢者ともにあることがわかる。つまり、苛立つ歩行者の割合を 25%以内に収めるのであれば、非高齢者の場合も高齢者の場合も赤時間を少なくとも 100 秒程度以下にはする必要がある、ということになる。なお、 $Q=200$  のケースに見られるように、従道路の流入に関する現示の飽和度が小さいほど、同じサイクル長でも信号待ちをする確率が増えるため、サイクル長を短縮しても、待ち時間ひいては苛立つ人の割合が増大しやすくなる。従って、実際の設計の際には、まず歩行者（非高齢者、高齢者）のどの程度以上が苛立たないような交差点を目指すかを設定し、どのようなサイクル長でもそれが満たされないような場合には、従道路の流入交通量を交差点の飽和度に負担をかけない範囲内で調整し、より長い従道路の現示時間を確保するか、広幅員道路で中央帯をとることができるのであれば、現示を切り分けを行って少なくとも一方向について十分な横断時間を確保する必要があるだろう。

### 1 1. 2 交差点設計・制御の基本方針

以上に述べたような自動車、歩行者に関する指標の特徴を踏まえ、本研究において提案する二段階横断方式とサイクル長の短縮を行ううえでの基本的な理念及び目標値を、以下の通りとする。

① 自動車へ負担がかからない地点及び時間帯を対象とする。

サイクル長を短縮した結果として、自動車の負荷が増加することは、本研究の目的とするところの安全性の向上の観点からも望ましくない。従って、交差点が過飽和となっている状態でのサイクル長の短縮は望ましくなく、シミュレーションの結果から、交差点の飽和度が 0.75 程度以下であるような地点及び時間帯でサイクル長を短縮すべきである。

② 高齢者の横断時間が確保できない場合は中央帯を設ける。

サイクル長を短縮した結果、高齢者が危険を冒さないと横断不可能な現示設計を行ってはならない。そのため、高齢者の調整歩行速度である 0.9m/s での横断時間が確保できない場合は必ず中央帯を設けるものとする。

③ 中央帯を設置する場合は滞留者が不安を感じない設計とする。

中央帯を設置しても、そこで滞留する歩行者が大きな不安を感じるようでは、結局歩行者は十分に中央帯を利用せず、事故に繋がる可能性がある。そのため、中央帯を設置する場合は、滞留者の少なくとも 50%以上が不安を感じない設計を行う必要がある。具体的には、3.5m 以上の幅員を確保するか、2.5m 以上の幅員で防護柵を設けなければならない。やむを得ず 1.5m 程度の中央帯を設置する場合には、追加的な安全対策が必要がある。

④ 非高齢者の横断時間は原則確保する。

中央帯を設置しても、非高齢者は中央帯で待たずに信号無視をする可能性が高い。そのため、非高齢者の調整歩行速度である 1.5m/s での横断時間は原則確保し、非高齢者は二段

階横断をせずに横断を完了できるような現示設計とする。

- ⑤ 横断が可能な最小の歩行速度に応じて、可能な限り残り時間表示装置を設置する。

非高齢者が短いサイクル長のもとでも適切な歩行計画を立てられるように、横断可能な最小の歩行速度が高齢者の調整歩行速度  $0.9\text{m/s}$  より大きくなるに従い、特に不完全情報下での調整歩行速度  $1.2\text{m/s}$  での横断時間を確保できない場合は、残り時間表示装置を設置して情報提供を行うようにする。

- ⑥ 苛立たない人の割合が 75% 程度以上となるような現示設計とする。

二段階横断方式を導入しても、歩行者が苛立つような現示制御では結局歩行者の信号無視や、無理な横断行動が誘発されてしまう可能性があり、安全性上の問題にも繋がる。そのため、75% 程度以上の歩行者が苛立ちを感じないようなものとする必要があるものと考ええる。場合によっては現示の切り分けを行うことも考慮すべきである。

以上の条件が満たされるのであれば、どのような交差点においてもサイクル長を 90 秒以下に設定することが望ましい。4 車線道路を主道路とする場合は特に工夫を施さずともこれは実現でき、8 車線道路を主道路とする場合も、従道路側の交通量を調整したり、現示の切り分けを行うことでこれを実現することができることがわかっている。

### 11.3 交差点の設計・制御ガイドライン

前節で述べた基本方針をもとに、交差点の設計・制御ガイドラインとしたものを図 11-5 に示す。図は制御変数を設定するパートと、現状把握や計算といった作業を行うパートに分かれており、その後は様々な場合わけによって、サイクル長の短縮を実施し得るかどうかを判断するプロセスとなっている。具体的には、以下の手順に従って交差点の設計・制御変数を定める。

- ① 実際に設計・制御を行う交差点を対象に、既設のものであればどのような道路構造をしており、ピーク時がいつかを含めどの程度の交通量が生じているかを把握する。道路を新設する場合は、どのような道路構造とするか、交差点としてどの程度のスペースがあるか、どの程度の交通量を見込んでいるかを把握する。
- ② 自動車の交通量や右左折車の割合などを考慮して、車線構成を仮設定する。
- ③ 道路の状態や右左折率、大型車混入率などの交通状況を参考に、交差点の各レッグの飽和交通流率を算定する。
- ④ 自動車の交通量を考慮し、交差点の信号現示方式（2 現示、4 現示など）と現示切換え時のクリアランス時間を仮設定する。
- ⑤ 自動車の交通量と飽和交通流率、そして仮設定した信号現示方式から交差点の飽和度  $\lambda$  を算出する。ここまでは、従来の交差点の設計手法と同様の手続きである。
- ⑥ 対象とする時間帯において交差点の飽和度  $\lambda$  が 0.75 以下となっているかを確認し、なっている場合にはサイクル長を 90 秒程度以下の値に仮設定する。この際、式(11.1)による最

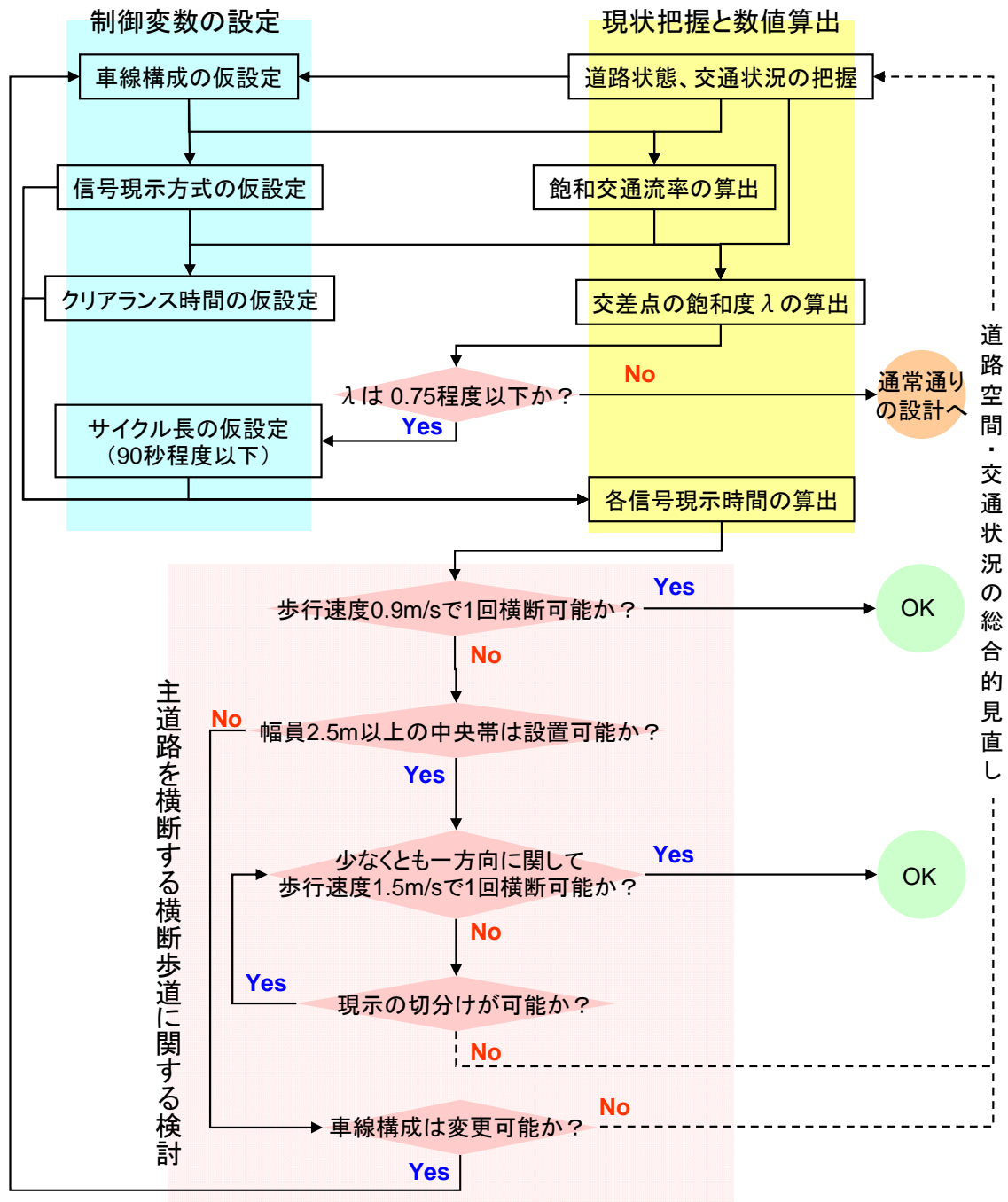


図11-5 歩行者・自動車双方を考慮した交差点の設計・制御ガイドライン

小サイクル長  $C_{\min}$  及び Webster の式(11.2)による最適サイクル長  $C_{opt}$  を参考にするとよい。  
 なお、8車線道路を主道路とする場合は90秒程度、4車線道路を主道路とする場合には80秒を目安とする。

- ⑦ 仮設定したサイクル長と信号現示方式、クリアランス時間から歩行者現示時間を含め、各

信号現示時間を算出する。歩行者現示時間の設定方法は、従来の方法に準拠する。

- ⑧ 以降は、主道路を横断する横断歩道に関して検討を行う。
  - (ア) 割り当てられた歩行者現示時間で高齢者の必要とする横断時間を満たすかを調べる。  
高齢者の歩行速度としては調整歩行速度  $0.9\text{m/s}$  を用いる。これが満たされていれば、仮設定したサイクル長で実施してよい。
  - (イ) (ア) が満たされなければ、次に  $2.5\text{m}$  以上の幅員の中央帯を設置可能かを検討する。  
設置できない場合は更に車線構成の変更可能性を検討し、できる場合は車線構成を再度仮設定し、飽和交通流率などの諸元を再度算出する。なお、設置可能な中央帯の幅員が  $3.5\text{m}$  以下の場合は、防護柵を設ける。
  - (ウ) (イ) で中央帯が設置可能であれば、次に非高齢者が必要とする横断時間が確保されているかを、調整歩行速度  $1.5\text{m/s}$  を用いて調べる。確保されていれば仮設定したサイクル長で実施してよい。なお、調整歩行速度  $1.2\text{m/s}$  の歩行者の横断時間が確保できない場合は、残り時間表示装置などにより歩行者に情報提供するのが望ましい。
  - (エ) (ウ) で非高齢者の横断時間が確保されていない場合は、次に中央帯前後において現示の切り分けが可能かを検討し、可能であれば仮設定したサイクル長で実施してよい。  
特に、自動車と交錯しない中央帯までの区間の歩行者現示を先出しするだけでも、少なくとも一方向に十分な歩行者現示時間を与えることができ、有用である。
  - (オ) (エ) で現示の切り分けができない場合、或いは(イ)で車線構成を変更できない場合は、道路空間・交通状況の総合的な見直しを行う必要がある。

以上を交差点の設計制御ガイドラインとする。これにより、オフピーク時には殆ど全ての交差点において、90 秒程度以下のサイクル長を実現することができるものと考えられる。なお、ここでは現示の切り分けや残り時間表示装置の設置の条件を提示しているが、いずれも可能である限り導入することが望ましいことは言うまでもない。

#### 11.4 ガイドラインに基づく交差点の設計例

本節では、上記のガイドラインに基づいて実際の交差点を設計することができるかどうかを検討してみることにする。ここでは、第7章、第8章においても検討した霞ヶ関2丁目交差点を例に取り上げてみる。霞ヶ関2丁目交差点の道路構造とピーク時(14:00~15:00)の方向別交通量を示したものが、図 11-6 である。当該交差点は、8 車線道路同士が交差する大規模な交差点であり、現況のサイクル長は 140 秒に設定されている。また、横断距離はそれぞれ  $33\text{m}$  となっており、車道に  $3.0\text{m}$ ~ $6.0\text{m}$  の中央帯が設けられているが、横断歩道上に中央帯は設けられていない。これに対し、車線構成は変更せず、右折専用現示を設けた 4 現示の信号制御方式を用いて 90 秒のサイクル長での運用を考えることにする。各信号現示時間の検討結果を表 11-2 に示す。これにより、自動車に関する交通処理上は問題なくサイクル長の短縮は行えることになるため、これを前提条件として、次に歩行者の観点からの検討を行う。表 11-3 に検討の詳細を示す。歩

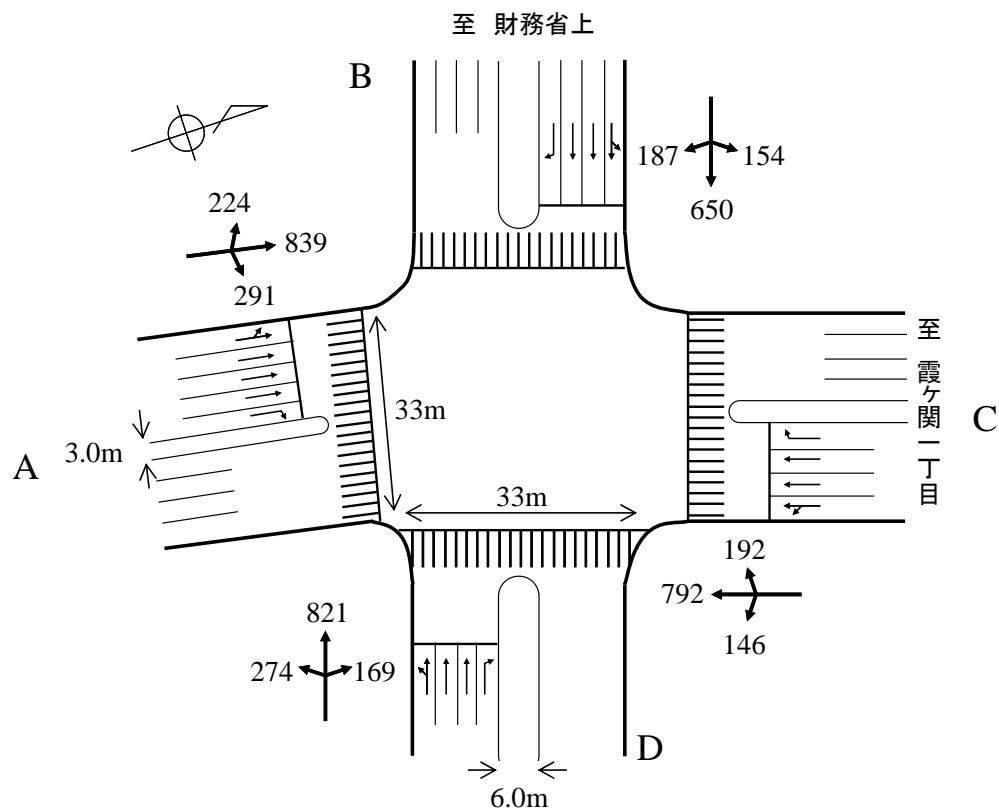


図 1 1-6 霞ヶ関二丁目交差点の道路構造と交通状況

表 1 1-2 霞ヶ関二丁目交差点における交差点の飽和度に関する検討結果

流入部		A			B			C			D		
車線		左折・直進	直進	右折	左折・直進	直進	右折	左折・直進	直進	右折	左折・直進	直進	右折
車線数		1	3	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1
飽和交通流率の基本値		2000	2000	1800	2000	2000	1800	2000	2000	1800	2000	2000	1800
幅員の補正率		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
大型車補正率		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
左折車補正率		0.96			0.96			0.96			0.94		
右折車補正率				1			1			1			1
飽和交通流率		1860	5820	1750	1860	3880	1750	1860	3880	1750	1820	3880	1750
設計交通量		1100		300	850		200	950		200	1100		200
正規化交通量		0.143		0.126	0.148		0.069	0.166		0.069	0.193		0.069
必要 現示率	1 φ	0.143						0.166					
	2 φ			0.126						0.069			
	3 φ			0.148						0.193			
	4 φ					0.069						0.069	
交差点の飽和度		0.553											
サイクル長(秒)		90											
有効 青時間 (秒)	1 φ	22						22					
	2 φ			16						16			
	3 φ					25						25	
	4 φ					9						9	
クリアランス時間(秒)		黄:4		黄:3 赤:2		黄:4		黄:3 赤:2		黄:4		黄:3 赤:2	
可能交通量		1877		471		1594		335		1403		471	
交通処理の可否		OK		OK		OK		OK		OK		OK	

行者現示時間は一様に自動車の有効青時間より 5 秒短いものとする、この条件下で歩行者現示時間として確保できるのはそれぞれ 17 秒、20 秒ということになり、このままでは高齢者の調整歩行速度 0.9m/s での横断時間は確保できないため、中央帯の設置を検討する。当該交差点には、幅員 2.5m 以上の中央帯を作るための十分なスペースが確認できるため、中央帯は設置可能と判断する。ここで、幅員が 3.5m に満たない BD 間の横断歩道については、防護柵を設けるようにする。このようにすることで、高齢者の安全性が確保される。しかしながら、依然として非高齢者の調整歩行速度 1.5m/s での横断時間が確保されていないため、少なくとも一方向の横断時間を確保するため、現示の切り分けが可能かどうかを検討する。当該交差点では、十分な幅員の中央帯を設置できるため、中央帯に歩行者用信号灯器を設置することで現示の切り分けは可能と判断する。そして、自動車の右折専用現示時に合わせて、次の現示で横断が許される横断歩道の一部に青を先出しすることができれば、それぞれ 26 秒、36 秒と、非高齢者の調整歩行速度 1.5m/s での横断時間が少なくとも一方向について確保できることになり、このように設計すれば歩行者と自動車の双方を考慮した信号交差点の設計が可能となるのである。なお、調整歩行速度 1.2m/s での横断時間は確保されていないので、残り時間表示装置の設置が望ましい。

表 1 1-3 霞ヶ関二丁目交差点における歩行者に関する検討結果

横断方向	A<->C	B<->D
横断幅員	33	33
設計歩行者現示時間(通常時)	17	20
必要青点滅時間	11	11
高齢者の横断時間(0.9m/s)	37	37
幅員2.5m以上の中央帯設置の可否	可	可
不完全情報下の横断時間(1.2m/s)	28	28
非高齢者の横断時間(1.5m/s)	22	22
現示の切り分けの可否	可	可
設計歩行者現示時間(現示切換え時)	26	36
1.5m/sでの一方向横断時間確保	OK	OK

最終的な信号現示設計を図 11-7 に、交差点構造を図 11-8 に示す。自動車の右折専用現示時に歩行者現示を先出しすることによって、少なくとも一方向についての十分な横断時間を確保している。また、中央帯を 3.0m 程度しか確保できない箇所には防護柵を設けている。

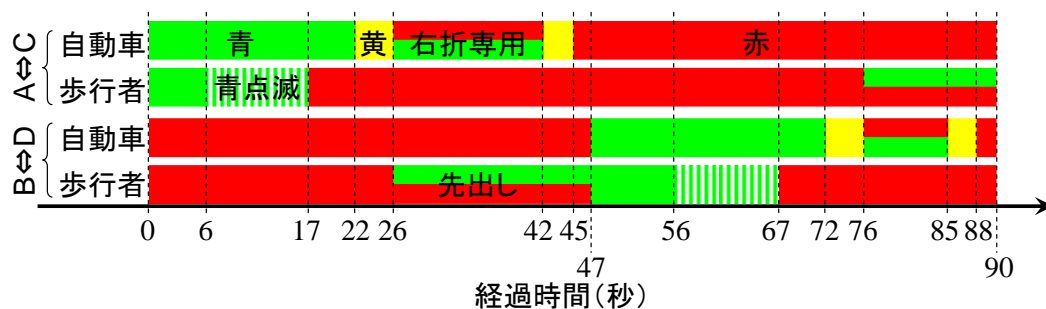


図 1 1-7 霞ヶ関二丁目交差点の信号現示計画

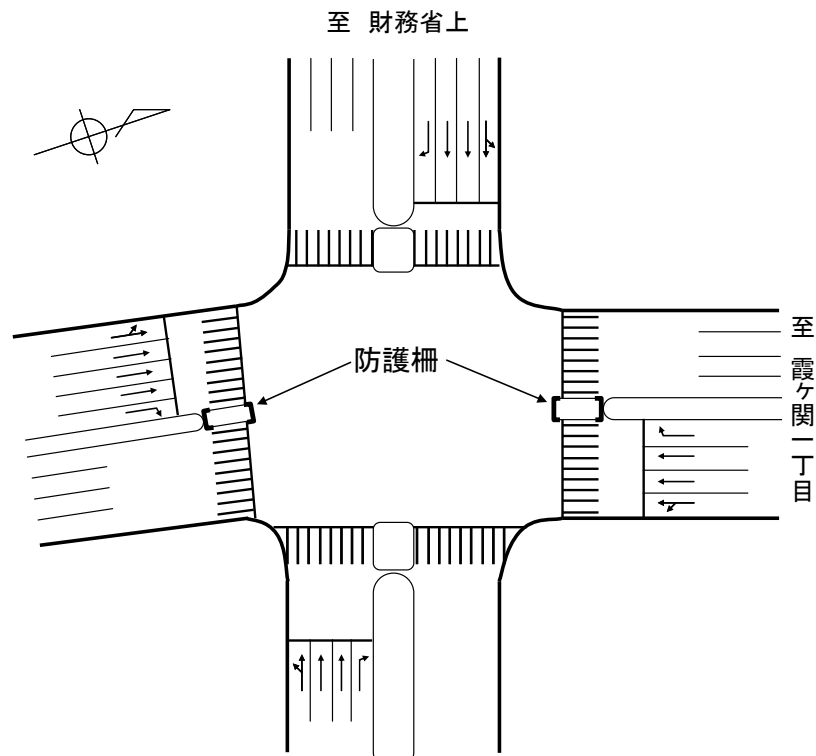


図1 1-8 霞ヶ関二丁目の交差点構造設計

このように、本研究によって提案したガイドラインに沿って実際の交差点の構造及び信号制御方法を設計可能であるということが示された。都市部における交差点の多くは本節で検討した交差点よりも小規模なものが多いため、より容易にサイクル長の短縮を行うことができる可能性が高い。また、現状では中央帯を設ける余裕がないような場合でも、交差点近傍の路肩部を縮小したり、車線幅員が広い場合には3.0mにまで縮小するなどの方法によって、2.5mの中央帯を確保できることが多いものと考えられる。

### 11.5 ガイドラインの簡易対照表

前節までにおいては、実際の道路状態や交通状況に応じてどのようにサイクル長を設計していけばよいかをフロー図で示し、それに基づいて実際の交差点の設計制御を計画することを試みた。ここで、これらの結果と第10章において検討した様々な交差点におけるシミュレーション分析の結果を考え合わせるにより、適切と思われるサイクル長と求められる交差点の設計制御項目を、交差点の規模ごとに定義することができる。これをガイドラインの簡易対照表と呼び、今後実際の交差点において改善を行っていく上での実用的な基準とすることを目指すものとする。なお、簡易対照表の作成に際しては、国土交通省が作成している道路統計年報において用いられている車道幅員の範囲を参考にすることにした。また、前章の8車線道路と2車線道路の交差点などにみられた、従道路の交通需要が著しく小さい場合を扱うことができるように、交差点の飽和度に対する従道路の飽和度の割合として「従道路飽和度比」なる指標を定義し、信号現示の切

り分けを行うべきかを判定するために使用することにした。表 11-4 にガイドラインの簡易対照表を示す。いずれも、表示された道路幅員の道路を交差する横断歩道に関する設計方法を示したものである。まず、8 車線 (28.0m) 以上の道路幅員においては、残り時間表示装置を設けることで歩行者に完全情報を提供することができれば、90 秒のサイクル長でも非高齢者は問題なく横断が可能となる。残り時間表示装置を設けないならば、サイクル長としては 100 秒が適当である。この場合はいずれも 3.5m 以上の幅員を有する中央帯を確保できると考えられるため、中央帯に防護柵は必要としない。また、従道路の交通需要が少ない場合は、横断歩道に十分なスプリットを配分できないため、現示の切り分けを必要とすることになるが、ここではその基準を従道路飽和度比が 0.3 としている。これは、前章の 8 車線道路と 2 車線道路の交差点における  $Q=200$  のケースにおける従道路飽和度比が 0.296 であったことに依る。同様に、6 車線 (19.5m) 以上の道路の場合も、本研究では直接は検討していないが、90 秒のサイクル長は可能と考えている。これは 4 車線の場合に 80 秒までサイクル長の短縮が可能と考えられることに依っている。この場合は残り時間表示を用いなくても非高齢者は横断完了できる時間を提供することができるが、防護柵付きの中央帯を必要とする。更に、4 車線 (15.0m) 以上の道路の場合は、1.5m 程度でも防護柵を設けた中央帯を設置した上でサイクル長を 80 秒にまで短縮ができ、それ以下の道路については特に手立てを講じずとも同様のサイクル長を実現できると考えている。

表 1 1-4 ガイドラインの簡易対照表

道路幅員	推奨する サイクル長	推奨する 中央帯の構造	残り時間 表示装置	従道路 飽和度比	現示の 切り分け	備考
28.0m以上 または 8車線以上	90秒 (100秒 <sup>※1</sup> )	3.5m以上の幅員 を有するもの	設置が 望ましい	0.3以上	不要	※1 残り時間表示装置を 設置しない場合
				0.3未満	必要	
19.5m以上 または 6車線以上	90秒	2.5m以上の幅員 を有し防護柵を 設置したもの	設置しな くてもよい	0.3以上	不要	
				0.3未満	必要	
15.0m以上 または 4車線以上	80秒	1.5m以上 <sup>※2</sup> の 幅員を有し防護柵 を設置したもの	設置しな くてもよい	0.3以上	不要	※2 防護柵の他にも安心 感向上策を行う必要
				0.3未満	不要	
5.5m以上 または 2車線以上	80秒	設置不要	-	-	-	

### 1 1. 6 ケーススタディ～甲州街道を事例に

上記のような簡易対照表を用いて実際に交差点の改良を行った場合に、どの程度の費用がかかり、どの程度の効果が生じるかを概算するため、最後に実際の道路を対象にケーススタディをすることにした。本研究では、東京都内に存在する国道のうち、様々な幅員構成を有するものとして国道 20 号 (甲州街道) の東京都内の区間 (千代田区三宅坂交差点～八王子市高尾下駐在所前の 60km) を対象とすることにした。

## 11.6.1 交差点改善費用の検討

歩行者の二段階横断方式の導入とサイクル長の短縮を行っていくには、表 11-4 に示したとおり、それぞれの幅員ごとに交差点の改善が必要となる。ここでは、その改善に関わる費用に関して概算しておきたい。本研究では、改善に関わる費用項目とその単価を表 11-5 のように考える。

表 11-5 交差点改善に関わる費用項目とその単価

費用項目	単価
歩行者用信号灯器 <sup>※1</sup>	150,000 円/基
残り時間表示装置 <sup>※1</sup>	400,000 円/基
柱＋工事費 <sup>※1</sup>	150,000 円/基
中央帯工事費(縁石のみ) <sup>※2</sup>	6,000 円/m
防護柵工事費 <sup>※2</sup>	32,000 円/m
信号調整費 <sup>※3</sup>	5,000 円/交差点

※1 信号機メーカーに問い合わせることにより入手

※2 広島国道事務所問い合わせることにより入手

※3 警視庁へのインタビューから推定

また、それぞれの交差点規模に応じて、表 11-6 に示すような整備が必要と考えられる。なお、1 つの交差点について、それと交差する 2 本の横断歩道を改善するものとして算出している。

表 11-6 交差点規模に応じた改良費用の概算

道路幅員	歩行者用 信号灯器	残り時間 表示装置	柱	中央帯	防護柵	信号調整	計
28.0m以上 または 8車線以上	4基	8基	4基	(3.5m+4.0m) × 4	—	あり	¥4,585,000
19.5m以上 または 6車線以上	4基	—	4基	(2.5m+4.0m) × 4	(2.5m+1.0m) × 4	あり	¥1,809,000
15.0m以上 または 4車線以上	4基	—	4基	(1.5m+4.0m) × 4	(1.5m+1.0m) × 4	あり	¥1,657,000
5.5m以上 または 2車線以上	—	—	—	—	—	あり	¥5,000

## 11.6.2 交差点改善の効果の検討

次に、交差点改善の効果を考える。第 10 章における種々の検討結果から、現状で多く用いられている 140 秒から 80 秒～90 秒にまでサイクル長を短縮したとすると、主に自動車への影響としては 1 つの交差点あたり 10 秒の時間短縮効果と 7g の CO<sub>2</sub> 排出削減効果があるものとする。但し、交差点をネットワークとして捉えた場合、その影響は単一交差点における検討結果の 0.5～2 倍までの幅で変動する可能性がある。従って、ここでは効果が少なく生じるシ

ナリオとしてそれぞれの効果に対して0.5を乗じることとし、少なくともどの程度の影響が生じ得るかを検討する。なお、歩行者に関しては、対象とする道路においては歩行者交通量に関するデータが存在しないため特に効果を検討することはしないが、80秒～90秒のサイクル長が実現されれば、各交差点で苛立つ歩行者の割合は少なくとも10%程度減少することが予想される。これに関しては、交差点をネットワークと考え、更にあらゆる交差点で歩行者が効率的に速度調整ができるものとする、更に効果が拡大される可能性があるものと考えられる。

### 11.6.3 対象道路における費用と効果

以上をもとに、対象道路である甲州街道（東京都内の区間）における費用と効果を概算する。概算にあたっては、対象とする全信号交差点を、警視庁の保管する交差点設計図面を参考にし、特に横断歩道の長さを表11-4における道路幅員と考えることにより、分類することにした（各交差点の詳細データは付録にて掲載する）。まず、交差点改善費用に関して、表11-7に示す。

表11-7 甲州街道における交差点の改善費用

道路幅員	箇所数	整備費用総額
28.0m以上または8車線以上	29	132,965,000 円
19.5m以上または6車線以上	13	23,517,000 円
15.0m以上または4車線以上	37	61,309,000 円
5.5m以上または2車線以上	112	560,000 円
合計	191	218,351,000 円

これにより、交差点の改善費用は2.2億円程度と考えることができる。これを、キロ当たり単価に変換すると、1kmあたり350万円の投資で交差点は改善されることになる。次に、効果に関してであるが、平成11年における道路交通センサスによると、甲州街道の東京都内の区間における平均的な交通量は約45,000台/24時間となっている。ピーク時にはサイクル長の短縮は行わないものと考え、ピーク率を13%とすると、サイクル長の短縮の影響を被るのは約39,000台となる。これらの車両に対して前節にて示した効果が発生すると考えると、表11-8を得る。

表11-8 甲州街道における交差点の改善効果

自動車に対する効果項目	原単位	1日あたり	年間(300日)
時間短縮効果	10秒	54.2時間	16250時間
CO <sub>2</sub> 排出削減効果	7g	137kg	41t

ここで、時間価値を3000円/時間とし、炭素税額を30,000円/tとして貨幣換算できるものと考え、一年間に5000万円の効果を生ずるものと考えることができる。従って、このケーススタディから、サイクル長の短縮と二段階横断方式の導入には、相応しい効果が伴うものと推測できたことになる。以上が実際の道路を対象としたケーススタディである。

# 第12章

## 結 論

最後に本章では、本研究の成果をまとめた後、今後の展開に向けて必要とされるものは何かを考察していくことにする。

## 12.1 本研究の成果のまとめ

本研究は、歩行者、自動車双方にとって安全かつ円滑な交差点設計を追求し、そのための一つの実現可能な対応策として、横断歩道への中央帯の設置と信号サイクル長の短縮を同時に行う方策に着目した。そして、その実現のために特に把握する必要がある歩行者の特性を、種々の実験を行うことによって把握した上で、歩行者と自動車の双方を見ることのできる交通シミュレータによって、どのように中央帯の設置と信号サイクル長の短縮を行うべきかを詳細に検討した。ここにその主な成果をまとめておく。

### 1) 歩行者横断行動原理の提案（第4章）

歩行者は交差点に至る前から、残っている歩行者現示時間と距離を推測しながら、ある程度の速度の範囲内で歩行速度を調節しながら歩いているということが、観察実験から示唆された。そのため、本研究では以下を「歩行者横断行動原理」として提案し、実験によってこれを立証することを試みた。結果として、この原理は歩行者の行動を説明するものとして適当なものであることが種々の実験から説明されたことになる。

- ① 歩行者には、それぞれ自分が快適に歩くことのできる速度（快適歩行速度 $v_c$ ）がある。
- ② 歩行者には、それぞれ自分が歩いてよいと思う最大速度（限界歩行速度 $v_{max}$ ）がある。
- ③ 歩行者は、渡らなければならない距離と残っている歩行者現示時間（残存時間）を推測しながら速度を $v_c$ と $v_{max}$ との間で調節する。速度が $v_c$ 以上の場合には不快（慌しさ）を感じる。
- ④ 赤信号などで横断を妨げられた場合、歩行者は不快（苛立ち）を感じる。
- ⑤ やむを得ず中央帯で滞留した場合、歩行者は不快（不安）を感じる。

また、この原理に基づくと、歩行者の時空間ダイアグラム上には「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」の3種類の心理的時空間領域が形成されることになり、歩行者がこのうちのどの領域に存在するかによって、その行動様式を変化させることになる。この考え方は、交通シミュレーションを作成する際の歩行者の制御プログラムに反映されている。

### 2) ヴァーチャル歩行シミュレータ PedECS の開発（第5章）

歩行者横断行動原理を立証するにあたってはサイクル長や中央帯などの様々な制御変数下での実験が必要となるが、これを実空間において設計することは困難であった。そのため、本研究では、歩行者がVR実験空間内を実際に歩くことのできる歩行シミュレータ PedECS を独自に開発した。PedECS は、HMD を着用した歩行者の後ろを、磁気センサーとパルスカウンターの2種類のセンサーを搭載したトラッキングワゴンが追跡するという追従式の歩行シ

ミュレータであり、これによって横断歩道や中央帯、或いは横断歩道の手前の領域から被験者の歩行行動に合わせた画像を、HMDを通して被験者へリアルタイムに提示することができる。本研究における歩行者横断行動原理の検証実験では、このシステムを使用することにした。

### 3) 非高齢者・高齢者の信号待ち時間における苛立ちの計測（第6章）

まず、様々な赤時間（30秒～120秒）を経験した際に歩行者がどの程度苛立つかを生理心理的指標によって計測するために、PedECSを用いて非高齢者・高齢者を被験者として実験を行った。その結果、以下が明らかとなった。

- ① 非高齢者・高齢者ともに、待ち時間が長くなるにつれて苛立ちを感じるようになる。
- ② 高齢者よりも非高齢者の方が、待ち時間に対する感覚が高く、苛立ちを感じやすい。
- ③ 苛立ちの感じ方は、横断歩道の距離には依存しない。

この結果から、歩行者の苛立ちは非高齢者、高齢者それぞれについて、待ち時間のみの関数として定義可能であることが示されたことになる。なお、現実空間における実験も同時に行い、現実空間と PedECS による VR 空間では概ね同等の評価を得られることが確認できている。

### 4) 中央帯滞留時における不安感の計測（第7章）

次に、様々な中央帯（幅員 1.5m～3.5m、防護柵の有無など）において歩行者が滞留した際にどの程度不安感を感じるかを生理心理的指標によって計測するために、PedECSを用いて実験を行った。その結果、主に以下が明らかとなった。

- ① 中央帯の幅員が広くなるにつれて歩行者の感じる不安感は軽減される。
- ② 防護柵の設置には、1.0m 程度の中央帯幅員の拡張効果が認められる。
- ③ 中央帯としては、頑丈だけでなく他者から視認されやすくするという工夫や、親しめるものであることが歩行者の不安感を軽減するのに重要である。
- ④ 中央帯の幅員は、苛立ちの感じ方にはあまり影響を与えない。

この実験の結果から、例えば 50%以上の歩行者が不安感を感じないような中央帯を設置するためには、3.5m 以上の幅員を確保するか、2.5m 以上確保できるなら防護柵を設けることによって、この条件を満たすことができることが明らかとなっている。

### 5) 残り時間に関する情報提供効果の計測（第8章）

更に、残り時間表示器を設置した場合に歩行者はより効率的に歩行行動をとることができるようになるのか、そして歩行者横断行動原理から導出される「安心領域」「焦燥領域」「断念領域」の3種類の心理的時空間領域は存在しているといえるのかどうかを検証するために、PedECSを用いて実験を行った。その結果、次が明らかとなった。

- ① 歩行者の行動は、心理的時空間領域の概念を導入することで説明することができる。
- ② 情報提供により、歩行者は横断中にあまり歩行速度を変動せずに歩行するようになる。
- ③ 歩行者の慌しさを VR 空間内の実験から主観的尺度を用いて説明するのは難しく、実際の歩行速度に強く依存する可能性がある。

この実験の結果から、交通シミュレーションを作成する際には歩行者の心理的時空間領域の概念を考慮することによって、歩行者の行動をより再現しやすくなること、そして歩行者の慌しさを実際の交差点の制御変数から説明することは困難であり、その他の指標を考慮する必要があることがわかったことになる。

#### 6) 総合交差点設計制御評価モデル CEMID の開発 (第9章)

以上の実験結果を活用し、オープン・アーキテクチャを採用している交通シミュレーションモデル AIMSUN を用いて歩行者と自動車双方を考慮した総合的な交差点設計制御評価モデル CEMID を作成した。具体的には、歩行者及び自動車の交通量及び交差点構造によって交差点規模を設定し、更に信号サイクル長と中央帯設置の有無から最小の歩行者現示時間とスプリット配分を算出すれば、シミュレーションを通じた計算によって歩行者に関する指標(待ち時間、苛立つ人の割合、エネルギー代謝量)と自動車に関する指標(待ち時間、CO<sub>2</sub>排出量、エネルギー代謝量)が得られるものとなっている。自動車のシミュレーションには従来通りのものを使用するが、歩行者のシミュレーションには更に心理的時空間領域を考慮した歩行者横断行動原理に基づく PSD アルゴリズムを導入した。なお、苛立つ人の割合は、実験より得られた非高齢者と高齢者のデータから曲線を推定して導入することとし、エネルギー代謝量は歩行者の慌しさを表現する代替的な指標として、既往の研究をまとめることで妥当と考えられる算定式を定義し、導入した。

#### 7) 様々な交差点におけるシミュレーションの実施 (第10章)

そして、総合交差点設計制御評価モデル CEMID を用いて、様々な交差点におけるシミュレーションを実施した。まず、現実の交差点を対象として、CEMID を用いたシミュレーションと実際のデータから得られた歩行者速度分布を比較し、大きな差異はなく現況が再現されていることを確認した。そして、単一の交差点のみを検討した場合とオフセットも考慮して複数の交差点において検証を行った場合とを比較し、得られるデータの傾向に明らかな差はないことを確認した。その上で、更に様々な仮想的な単一の交差点空間を作成してシミュレーションを行い、以下の結果を得るに至った。

- ① サイクル長の短縮は、ピーク時など交差点に負担がかかる時間帯には適当ではない。
- ② 交差点に負担がかからない限り、サイクル長の短縮は自動車にとって大きな効果がある。
- ③ 歩行者の観点からは、非高齢者・高齢者によって反応は異なるが、交通量の微調整や現示の切り分けなどの工夫を行うことで、サイクル長の短縮は実現可能である。

### 8) 信号交差点の設計・制御ガイドラインの提案 (第11章)

最後に、信号交差点におけるサイクル長の短縮を行っていくためのガイドラインを作成した。まず、シミュレーションの結果から、歩行者現示時間の設計時に有効な概念として、歩行者が走ったり自動車と錯綜したりする影響を考慮した『調整歩行速度』という概念を定義したうえで、これを用いて以下の条件下ではサイクル長の短縮が可能とした。

- ① 交差点飽和度が0.75程度以下であり、自動車への負荷がかからないこと。
- ② 調整歩行速度0.9m/sでの横断時間が確保できない場合に中央帯を設置可能なこと。
- ③ 中央帯を設ける場合は幅員を3.5m以上とするか、2.5m以上で防護柵を設置可能なこと。
- ④ 非高齢者の調整歩行速度1.5m/sでの横断時間を確保できること。確保できない場合には、現示の切り分けを行うか、従道路の交通量を調整できること。

なお、歩行速度1.2m/sでの横断時間が確保不能の場合は可能な限り残り時間表示装置を設けることが望ましい、ということを別途記述している。そして、これらの条件に沿って、実際の交差点を設計する際に制御変数をどのように設定していけばサイクル長の短縮が可能かを、実際の設計・制御方法のプロセスと合わせて記述することで、交差点の設計・制御ガイドラインとして提案した。更に、ガイドラインの実用化に向けて、道路幅員ごとに必要な交差点改善項目を簡潔にまとめたガイドライン簡易対照表を作成した。そして、このガイドラインに基づいて実際の大規模な交差点において道路構造及び信号現示の設計を試みるとともに、国道20号を対象に交差点改善を行った場合の費用と効果を概算することで、その妥当性を検証した。

本研究により、既存の交差点に対してサイクル長の短縮を実施する場合、或いは道路を新設してサイクル長の短い交差点を設ける場合に、それぞれどのように交差点を設計・制御すべきか、その方法論が提案されたことになる。都市部に存在する多くの交差点は、本研究で扱った交差点の中で最大のものである8車線道路同士の交差点(30m\*30mの交差点サイズを有するもの)よりは小さいと考えられるため、このガイドラインによって殆どの交差点においてサイクル長の短縮が実現できるものと確信している。

## 12.2 今後の展開へ向けて

本研究によって得られた成果を実際の交差点設計・制御に活用していくためには、様々なステップが更に必要となる。そこで、実際の適用にあたって考えるべきことを明らかにすることで、本論文の締めくくりとしたい。

まず第一に、本研究は基本的にはVRを用いた室内実験とシミュレーションに基づいている。そのため、本研究のガイドラインに基づいた交差点の設計・制御を本格的に行っていくためには、実際の交差点において試行を行い、歩行者や自動車への影響が本研究において述べられたものと相違ないものかどうかを検証していく必要がある。その際、本研究では単一交差点における検討

しか行っていないが、複数の交差点のネットワークを考慮し、面的にサイクル長の短縮を行っても問題を生じないことを確認する必要があることは自明である。

第二に、法令上の課題も存在する。現在の道路交通法及びその施行令には、中央帯<sup>1</sup>に関してあまり明確には表記がなされておらず、本研究で前提としているように、歩行者が横断を中断することのできる場所として中央帯が明確に定義されているわけではない。そのため、中央帯の積極的な利用を前提とする本研究のガイドラインに基づいて交差点設計を行うのであれば、道路交通法の第二条第六項及び、道路交通法施行令第二条の信号の意味に関する記述を改める必要がある。特に後者に関しては、歩行者の青点滅信号の意味について、「歩行者は、道路の横断を始めてはならず、また、道路を横断している歩行者は、すみやかに、その横断を終わるか、又は横断をやめて引き返さなければならないこと。」と記述されている程度であり、「中央帯がある場合は中央帯で停止すること。」という明確な記述はされていない。そのため、これに関して改める必要があるものと考えられる。

第三に、情報提供方法に関する課題があげられる。本研究では、信号現示に関する情報を歩行者が十分に認識できる状況を想定し、その場合における歩行者の調整歩行速度を設計基準値として用いることをしている。この状況の実現のためには、正確な情報を歩行者に伝えることのできる装置が必要となる。そのための最も有効な方法と考えられるのは、近年他のアジア諸国や欧米諸国に見られるようになったカウントダウン式の残り時間表示装置である。しかし、今のところわが国では主に目盛り式の残り時間表示装置のみが実用化され、様々な交差点に設置されているに過ぎず、この方式では歩行者に提供できる情報の解像度には限界がある。これには以下のような技術上の理由がある。通常、わが国の残り時間表示装置は、表示の対象となる歩行者信号に直接接続され、赤・青それぞれの電灯に電流が流れている時間を直接計測し、そのデータを用いて次の赤・青の時間に関する情報を出す仕組みになっている。従って、歩行者が実際に目にする情報は1つ前のサイクルにおける現示情報であり、リアルタイムの情報ではない。これは交差点の現示時間が常に一定ならば有用である。しかし、信号のサイクル長、特にスプリット配分は、交通量に応じて変化するように制御されることが多い。そのため、提示されている現示情報は必ずしも正確なものとならない可能性がある。この状況を改善するためには、従来のように信号から直接データを取得する方式ではなく、信号現示の制御プログラムなどとも連携することで、正確な情報を出すことのできる表示装置が望まれることになる。特に青信号の残り時間表示が誤っていることは、歩行者の交通事故の危険性にも繋がりがねず、危険である。また、わが国の大抵の残り時間表示装置は、歩行者信号灯器が青点滅表示になるまでの時間を残り時間として表示しているため、歩行者はその後の青点滅に関する残り時間を把握することができなくなっている。言うまでもなく、歩行者は青点滅時間までを考慮して横断行動を行っており、設計上も青表示と青点滅表示を合わせて歩行者現示時間として定義しており、歩行者の横断時間として確保すべきなのは歩行者現示時間と考えられることが多い。従って、残り時間表示を行う際には青点滅時間に関

<sup>1</sup>路面電車の乗降できる場所と本研究で扱った中央帯を合わせて、道路交通法第二条第六項においては『安全地帯』と表記されている。

する情報も同時に提供することができるようにする必要がある。

第四に、管理体制上の課題である。通常、道路空間には道路管理者（国道の場合は国土交通省）と交通管理者（警察）との2種類の管理主体が存在しており、道路構造の設計や舗装の維持管理などは前者が、信号制御などは後者が担っている。本研究で提唱した二段階横断方式とサイクル長の短縮の導入のためには、中央帯の整備という道路管理サイドの施策と、信号制御の改変及び残り時間表示装置の導入という交通管理サイドの施策の双方が含まれているため、財源の統合化など、両者のより一層の協力体制の確立が求められるものと思われる。

第五に、やむを得ず十分な幅員の中央帯を設けることができない場合にどのような工夫を施すかについても、十分な検討が必要である。本研究では歩行者が不安を感じない中央帯としては幅員 2.5m 以上のものを推奨としているが、4 車線以上の道路で交通量も多い道路空間でサイクル長を短縮するためには、簡易対照表にも示したとおり、1.5m 程度の幅員を考えなければならぬケースは存在する。この場合、防護柵だけでは 50%以上の歩行者が不安を感じるようになるため、第7章の因子分析の結果においても言及したとおり、囲繞性や開放性を考慮したその他の追加的な防護設備が必要となる。これに関しては本研究では十分に扱っていないため、今後の展開にあたっては検討を行う必要がある。

以上が、今後の展開に向けて考慮すべきことである。本研究は、安全と効率はトレードオフ関係にあると捉えられてきた従来の交差点の設計・制御の思想に対して、新たな切り口を提案するものである。本研究が、わが国の抱える多くの交通問題の解決の糸口となることができれば幸いである。

## 参考文献

本研究において参考とした文献は以下のとおりである。

## 1) 論文・書籍

- Ainsworth, B. E., W. L. Haskell, M. C. Whitt, M. L. Irwin, A. M. Swartz, S. J. Strath, W. L. O'Brien, D. R. Bassett, Jr., K. H. Schmitz, P. O. Emplainscourt, D. R. Jacobs, Jr. and A. S. Leon (2000). Compendium of Physical Activities: an update of activity codes and MET intensities. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **Vol.32, No.9, Suppl.**, pp.S498–S516.
- Bacquie, P., D. Egan, and L. Ing (2001). Pedestrian Refuge Island Safety Audit Compendium of Papers. *ITE Spring Conference*, USA.
- Burstedde, C., A. Kirchner, K. Klauck, A. Sheadschneider and J. Zittartz (2001). Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics – Application. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp.87-97.
- Cruz-Neira, C., D.J. Sandin and T. A. DeFanti (1993). Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. *Computer graphics (SIGGRAPH '93 Conference proceedings)*, pp.135-142.
- Dijkstra, J., J. Jessurun and H. Timmermans (2001). A Multi-Agent Cellular Automata Model of Pedestrian Movement. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp.173-179.
- Haklay, M., D. O'Sullivan, M. Thurstain-Goodwin and T. Schelhorn (2001). “So go downtown”: simulating pedestrian movement in town centers. *Environment and Planning B: Planning and Design*, **Vol.28, No.3**, pp.343-359.
- Hamed, M. M. (2001). Analysis of pedestrians' behavior at pedestrian crossings. *Safety Science*, **38**, pp.63-82.
- Hatoyama, K., S. Shimomura and H. Ieda (2003). Pedestrian-Oriented Intersection Design by the Concept of Spacio-Temporal Informativity toward Effective Cycle Time Shortening. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **Vol.5**, pp.2565- 2580.
- Helbing, D. (1992). A Fluid-Dynamic Model for the Movement of Pedestrians. *Complex Systems*, **6**, pp.391-415.
- Helbing, D., I. J. Farkas, P. Molnar and T. Vicsek (2001). Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp.21-58.
- Helbing, D., P. Molnar, I. J. Farkas and K. Bolay (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, **Vol.28, No.3**, pp.361-383.
- Henderson, L. F. (1974). On the Fluid Mechanics of Human Crowd Motion. *Transportation Research*, **Vol.8**, pp.509-515.
- Hirose, M., T. Ogi, S. Ishiwata and T. Yamada (1999). Development and Evaluation of Immersive Multiscreen Display “CABIN”. *Systems and Computers in Japan, scripta Technica*, **Vol.30, No.1**, pp.13-22.
- Hoogendoorn, S. P. and P. H. L. Bovy (2004). Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, **38**, pp.169-190.
- Hoogendoorn, S. P., P. H. L. Bovy and W. Daamen (2001). Microscopic Pedestrian Wayfinding and Dynamics Modelling. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp.123-154.
- Institute of transportation engineers (1992). Traffic Engineering Handbook 4th Edition. Printice-Hall, Inc., USA.

- Kashiwazaki, H. (1990). Seasonal Fluctuation of BMR in Populations not Exposed to Limitations in Food Availability: Reality or Illusion?. *European Journal of Clinical Nutrition*, **44** (Suppl. 1), pp.85-93.
- Keegan, O. and M. O'Mahony (2003). Modifying pedestrian behavior. *Transportation Research Part A*, **37**, pp.889-901.
- Kerridge, J., J. Hine and M. Wigan (2001). Agent-based modelling of pedestrian movements: the questions that need to be asked and answered. *Environment and Planning B: Planning and Design*, **Vol.28, No.3**, pp.327-341.
- Langlois, J. A., P. M. Keyl, J. M. Guralnik, D. J. Foley, R. A. Marottoli and R. B. Wallace (1997). Characteristics of Older Pedestrians Who Have Difficulty Crossing the Street. *American Journal of Public Health*, **Vol.87, No.3**, pp.393-397.
- Martinez, K. L. H. and B. E. Porter (2004). The likelihood of becoming a pedestrian fatality and drivers knowledge of pedestrian rights and responsibilities in the Commonwealth of Virginia. *Transportation Research Part F*, **7**, pp.43-58.
- Ohnaka, T., Y. Tochihara, S. Yamazaki, M. Tanaka, K. Yoshida, S. Ogawa and Y. Osada (1982). Resting Metabolism in Conditions of Air Temperature between 20 and 28°C. *人類誌*, **90(4)**, pp.377-384.
- Oxley, J., M. Lenné and B. Corben (2006). The effect of alcohol impairment on road-crossing behaviour. *Transportation Research Part F*, **9**, pp.258-268.
- Schadschneider, A. (2001). Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics – Theory. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp.75-85.
- Simpson, G., L. Johnston and M. Richardson (2003). An investigation of road crossing in a virtual environment. *Accident Analysis & Prevention*, **35**, pp.787-796.
- Sisiopiku, V. P. and D. Akin (2003). Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities: an examination based on observation and survey data. *Transportation Research Part F*, **6**, pp.249-274.
- Teknomo, K. (2006). Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F*, **9**, pp.15-27.
- Transportation Research Board (2000). Highway Capacity Manual 2000.
- TSS-Transport Simulation Systems (2005). AIMSUN 5.0 Microsimulator User's Manual 5.0.4 Draft.
- TSS-Transport Simulation Systems (2005). AIMSUN API VERSION 5.0 User's Manual.
- Webster, F. V. (1958). Traffic Signal Settings. *Road Research Technical Paper*, **No.39**, London, HMSO.
- Yagil, D. (2000). Beliefs, motives and situational factors related to pedestrians' self-reported behavior at signal-controlled crossings. *Transportation Research Part F*, **3**, pp.1-13.
- 浅野美帆・中島章・堀口良太・小根山裕之・桑原雅夫・越正毅・赤羽弘和 (2003) 遅れ時間自己評価によるリアルタイム交通信号制御, *土木計画学研究・論文集*, **Vol.20**, pp.879-886.
- 浅野美帆・堀口良太・桑原雅夫 (2004) 交通シミュレーションを利用した信号制御アルゴリズム評価のための仮想社会実験, *交通工学*, **Vol.39, No.2**, pp.39-45.
- 家田 仁・鳩山紀一郎 (2002) 横断歩行者の視点からみた高齢化社会に向けた信号交差点の設計・制御法に関する基礎実験, *交通工学*, **Vol.37, No.6**, pp.51-60.
- 板橋真寛・鳩山紀一郎 (2005) 滞留歩行者の心理を考慮した中央帯設計に関する基礎的実験, *土木学会第60回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM)*, **IV-289**.
- 岩下豊彦 (1983) SD法によるイメージの測定, 川島書店.

- 岩永 陽・本多 建・田中伸治・白石智良・桑原雅夫 (2005) 複合現実感を用いた高速道路の動的レーンマーキングの走行安全性に関する研究, *土木計画学研究・講演集*, No.32(CD-ROM).
- 大口敬・片倉正彦・谷口正明 (2002) 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, *土木学会論文集*, No.695, IV-54, pp.125-136.
- 大須賀美恵子・寺下裕美・下野太海 (1993) 自律系生理指標を用いたメンタルワークロードの評価へ向けて, *計測自動制御学会論文集*, 第29巻, 第8号, pp.979-986.
- 大西竜平・瀬尾文彰・高木清江 (2001) 環境のイメージ計画支援ツールの作成, *日本建築学会学術講演梗概集*, E-1, pp.973-974.
- 岡崎甚幸 (1979) 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その1 磁気モデルの応用による歩行モデル, *日本建築学会論文報告集*, No.283, pp.111-119.
- 奥平建人・船越 徹・洋 積田・恒松良純・菊田英明・松沢英亮・堀川 猛 (2001) 「ゆらぎ」の心理量の相関分析, *日本建築学会学術講演梗概集*, E-1, pp.989-990.
- 小根山裕之 (2003) 交通の動的変化に対応した自動車からの排出ガス量推計手法の研究, 東京大学学位取得論文.
- 河合芳之・鹿田成則・片倉正彦・大口 敬 (2003) 信号交差点における左折交通に及ぼす横断歩行者及び自転車の特性と定量化について, *土木計画学研究・論文集*, Vol.20, pp.957-966.
- 北折充隆 (1999) 歩行者の交差点横断時の記述的規範が個人の意識に及ぼす影響について, *交通心理学研究*, Vol. 15(1), 36.
- 北折充隆 (2002) 歩行者の信号無視行動に及ぼす要因 急ぎ要因と記述的規範の相互作用について, *交通心理学研究*, Vol. 18, 51.
- 木下知威・山口 満 (2001) 色彩による景観の知覚特性に関する研究, *日本建築学会学術講演梗概集*, E-1, pp.999-1000.
- 清田 勝・角 知憲・田上 博 (1997) 住区内細街路において自動車とすれ違う自転車利用者の危険感知予測モデル, 第17回交通工学研究発表会論文報告集, pp.97-100.
- 日下部正宏 (1997) 血圧・心電図 R-R 間隔変動のスペクトル解析の現状と問題点 ―工学面から―, *自律神経*, 34巻, 3号, pp.219-224.
- 工藤 勲・三橋伸夫 (2001) 待ち合い・休憩空間の評価特性に関する研究, *日本建築学会学術講演梗概集*, E-1, pp.925-926.
- 栗谷川幸代・景山一郎 (2000) 機械操作時における心負担推定に用いる心拍変動モデルの構築, *日本機械学会論文集 C 編*, pp.140-146.
- 栗谷川幸代・景山一郎 (2003) 人間・自動車・環境系における精神負担評価モデルの構築に関する研究, *日本大学生産工学部研究報告A*, pp.1-9.
- 桑原雅夫 (2000) 期待される次世代信号制御ロジックの開発, *交通工学*, Vol.35, No.6, pp.3-6.
- 警察庁交通局 (2006) 平成17年中の交通事故の発生状況.
- 交通工学研究会 (1991) 改訂 路面表示設置の手引き, 丸善.
- 交通工学研究会 (1994) 交通信号の手引き, 丸善.
- 交通工学研究会 (2000) やさしい交通シミュレーション, 丸善.
- 交通工学研究会 (2004) 改訂 平面交差の計画と設計 基礎編 第2版, 丸善.
- 交通工学研究会 (2004) 交通シミュレーション適用のススメ, 丸善.
- 越 正毅 (1975) 系統交通信号におけるサイクル制御の研究, *土木学会論文報告集*, 第241号, pp.125-133.

- 越 正毅・安井一彦・山本健一・富井直人 (1998) 歩行者の二段階横断方式の適用性に関する研究, 第18回交通工学研究発表会論文報告集, pp.249-252.
- 小林直樹・木竜 徹・斉藤義明 (1999) 視覚探索課題における指尖脈波および呼吸からのストレス評価, 第14回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.381-384.
- 斉藤 威・有菌 卓 (1986) 信号交差点における横断歩行者の横断速度に関する基本的な特性, 科学警察研究所報告交通編 Vol.27, No.1, pp.15-27.
- 齋藤 威・森 健二・矢野伸裕 (1999) 交通錯綜の軽減を意図した歩行者用信号の現示方式に関する一考察, 科学警察研究所報告交通編 Vol.40, No.1, pp.1-9.
- 櫻田陽一 (2002) 孤立交差点の最適サイクル長に関する研究, 東京大学学位取得論文.
- 沢田康夫 (2003) 信号交差点における横断歩行者の交通事故分析と歩車分離式信号の試験導入評価に関する調査研究, 月刊交通 2月号, pp.45-55.
- 澤田幸展・田中豪一・山越憲一 (1998) 規準化脈波容積-光電式指尖脈波の定量化法に関する新たな試み, 第13回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.377-380.
- 下野太海・大須賀美恵子・寺下裕美 (1998) 心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単純作業ストレスの評価手法の検討, 人間工学, Vol.34, No.3, pp.107-115.
- 清水浩志郎・木村一裕・吉岡靖弘 (1991) 道路横断施設における高齢者の歩行特性に関する考察, 交通工学, Vol.26, No.2, pp.29-38.
- 清水哲夫・安藤拓也 (2005) ドライビングシミュレータを用いた合流部走行支援情報システムの効果分析, 土木計画学研究・講演集, No.32(CD-ROM).
- 清水哲夫・森地 茂・福原大介 (2003) 安全対策による交通事故削減効果の分析, 土木計画学研究・講演集, No.28 (CD-ROM).
- 下村 新・鳩山紀一郎・家田 仁 (2003) 歩行者指向型の交差点設計可能性に関する調査-欧州の諸都市に学ぶ-, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, IV-425.
- 鈴木博順・水野康文・横山清子・高田和之 (1999) 心拍変動の周波数成分時系列を用いた高速走行に対する生体反応評価, 第14回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.389-392.
- 鈴木まや・平尾直靖・寺下裕美・織田弥生・八木昭宏 (1999) 一過的な作業負荷によるストレス評価質問紙の項目と利用方法の検討, 人間工学, Vol.34, No.4, pp.259-270.
- 高宮 進・石倉丈士 (1996) 歩行者の恐怖感に基づく路肩幅員、中央帯幅員の検討, 第16回交通工学研究発表会論文報告集, pp.57-59.
- 棚橋 巖・北岡広宣・馬場美也子・森 博子・寺田重雄・寺本英二 (2002) 広域交通流シミュレータ NETSTREAM, 豊田中央研究所R&D レビュー, Vol.37, No.2, pp.47-53.
- 徳田哲男 (1994) 交通と高齢者・障害者の心身機能特性, 交通工学, Vol.29, 増刊号, pp.4-10.
- 豊田 剛・嶋田喜昭・寺内義典・本多義明 (1996) 交差点における景観性と安全性の関係に関する研究, 第16回交通工学研究発表会論文報告集, pp.145-148.
- 中 祐一郎 (1978) 交錯流動のシミュレーションモデル-鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究(2)-, 日本建築学会論文報告集, No.267, pp.103-112.
- 中川千鶴・大須賀美恵子・竹田 仰 (1999) VE酔い評価における生理指標の検討-4面CUBE型立体映像提示装置と6軸モーションを用いた場合-, 第14回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.377-380.
- 中川千鶴・大須賀美恵子・竹田 仰 (2000) VE酔い評価手法の開発に向けての基礎的検討, 人間工学, Vol.36, No.3, pp.131-138.

- 中山昭雄・入来正躬（編集）（1987） 新生理学科学大系第22巻 エネルギー代謝・体温調節の生理学, 医学書院.
- 西村雄介・岡本教佳（2001） 横断歩道の3Dモデルによる歩行者情報の解析, *電子情報通信学会技術研究報告*, **ITS2001-21**, pp.22-30.
- 西村雄介・岡本教佳（2002） 横断歩道における歩行者の行動解析, *電子情報通信学会技術研究報告*, **ITS2001-87**, pp.215-220.
- 沼尻幸吉（1974） 活動のエネルギー代謝, *労働科学叢書*, **37**, 労働科学研究所.
- 羽藤英二・香月伸一・貴志泰久・矢尾谷雄司（1994） シミュレーションによる交通制御の最適化とそれに伴う交通流の変化, *第14回交通工学研究発表会論文集*, pp.49-52.
- 鳩山紀一郎・家田 仁（2002） 歩行者追従式バーチャル歩行シミュレータ PedECS の開発, *第1回ITSシンポジウム2002 Proceedings*, pp.209-214.
- 鳩山紀一郎・家田 仁（2003） 時空間インフォーマティビティの概念による ITS 指向型交差点設計手法, *第2回ITSシンポジウム2003 Proceedings*, pp.173-178.
- 鳩山紀一郎・杉森秀司（2004） 横断歩道手前空間を考慮した歩行者交通行動に関する基礎分析, *土木計画学研究・講演集CD-ROM*, **Vol.30**, 171.
- 鳩山紀一郎・杉森秀司（2005） 信号現示変化の予測を考慮した歩行者の横断行動分析, *土木計画学研究・講演集CD-ROM*, **Vol.31**, 124.
- 林佐千男・南谷晴之・申 健洙（1997） 蓄積疲労による心拍変動の自律神経系指標の評価（第2報）, *第12回生体・生理工学シンポジウム論文集*, pp.213-216.
- 早野順一郎（1988） 心拍変動の自己回帰スペクトル分析による自律神経機能の評価—RR 間隔変動係数(CV-RR)との比較, *自律神経*, **25巻, 3号**, pp.334-344.
- 早野順一郎（2001） 心拍変動による自律神経機能解析, 井上博編, *循環器疾患と自律神経機能* 第2版, 医学書院, pp.71-109.
- 早野順一郎・岡田暁宜（1997） 心拍変動による自律神経機能評価とその応用：加齢と心臓迷走神経機能, *自律神経*, **34巻, 3号**, pp.207-213.
- 平子智明・馬場美也子・寺本英二（1996） 交通情報システム評価用広域交通流シミュレータ, *第16回交通工学研究発表会論文報告集*, pp.97-100.
- 深井一夫・伊藤 宏・斎藤純司・後藤 滋（1994） 代謝量の異なる場合の標準有効温度(SET\*)と温熱感覚の関係—歩行時と椅座安定時の比較—, *空気調和・衛生工学会論文集*, **No.55**, pp.99-109.
- 深田清明・川村隆治・吉田禎雄（1991） 交通流再現シミュレーションモデルの開発, *第11回交通工学研究発表会論文集*, pp.1-4.
- 藤田悟郎（1994） イライラのない交通環境作りを目指して, *交通工学*, **Vol.29, No.1**, pp.71-72.
- J. J. フルーイン(著)・長島正充(訳)（1974） 歩行者の空間：理論とデザイン, 鹿島出版会.
- 本多 薫（1998） ランダム発生音の暴露による負担に関する実験的検討, *人間工学*, **Vol.34, No.4**, pp.203-206.
- 本間正勝・鹿島茂（2004） 交通容量の拡大を意図した信号現示に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, **Vol.21**, pp.991-996.
- 本間正勝・鹿田成則（2002） HIGHWAY CAPACITY MANUAL 2000 : 2. 信号交差点—信号時間設計—, *交通工学*, **Vol.37, No.5**, pp.74-82.
- A.H.マズロー(著)・小口忠彦(訳)（1987） 人間性の心理学：モチベーションとパーソナリティ（改訂新版）, 産能大学出版部.

- 松下 聡 (1992) 待ち行動を含む群集歩行シミュレーションモデルの研究, *日本建築学会計画系論文報告集*, **No.432**, pp.79-88.
- 三井達郎・矢野伸裕・萩田賢司 (1998) 無信号横断歩道における高齢者の横断行動と安全対策に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, **No.15**, pp.791-802.
- 三村和也 (2003) 歩車分離式信号 (歩行者おもいやり信号) の導入状況と今後の対応, *交通工学*, **Vol.38, No.2**, pp.13-20.
- 村上利夫 (2003) 歩行者等支援情報通信システム (PICS)の実証実験, *月刊交通* **8月号**, pp.17-26.
- 矢野伸裕 (1996) 信号機付横断歩道での歩行者の横断行動—高齢者と非高齢者の比較—, *月刊交通*, **7月号**, pp.85-95.
- 矢野伸裕 (2001) 信号機付き横断歩道における歩行者の横断速度に関する研究 1. 信号表示の切り替わり前後での横断速度の比較, *科学警察研究所報告交通編*, **Vol.41, No.2**, pp.22-37.
- 矢野伸裕・森 健二 (2002) 歩行者青点滅信号の法的意味についての歩行者の理解度, *交通心理学研究*, **Vol.18**, 51.
- 矢野伸裕・森 健二 (2003) 歩行者青色点滅信号と横断行動, *交通心理学研究*, **Vol.19**, 37.
- 山崎昌廣・佐藤陽彦 (1990) ヒトの歩行—歩幅、歩調、速度およびエネルギー代謝の観点から—, *人類誌* **98(4)**, pp.385-401.
- 山田富美雄 (1998) 生体反応の見取り図, 宮田洋監修, *新生理心理学*, **1巻**, 北大路書房, pp.24-35.
- 山田 稔 (2003) 横断歩道通行時の危険感評価に関する研究—立体横断施設の整備効果の評価への適用を前提として—, *土木計画学研究・論文集*, **Vol.20**, pp.629-636.
- 山田 稔・山形耕一 (1997) 高齢歩行者を考慮した横断時間のゆとりに関する研究, *土木計画学研究・論文集*, **No.14**, pp.861-868.
- 吉井稔雄・桑原雅夫・森田純之 (1995) 都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発, *交通工学*, **Vol.30, No.1**, pp.33-41.
- 吉野賢治・高野研一・重田定義 (1985) 無拘束エネルギー代謝率リアルタイムモニタリングシステムの開発と性能評価, *産業医学*, **27巻**, pp.390-399.
- 鰐部雅保・高橋政稔・栗本 譲 (1996) 道路交通環境を考慮した心拍数と交通事故との相関に関する研究, *第16回交通工学研究発表会論文報告集*, pp.61-64.

## 2) ウェブページ

- Ascension Technology Corporation, <http://www.ascension-tech.com/products/flockofbirds.php>
- Intelligent Modelling Laboratory, <http://www.iml.u-tokyo.ac.jp/general/facilities.html>
- 環境省, 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度について, 対象となる排出活動, 算定方法一覧, [http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santei\\_keisuu/keisuu.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santei_keisuu/keisuu.pdf)
- ユーデック株式会社, ITS 時代のハイエンド総合交通シミュレータ・AIMSUN, <http://www.trp.jp/Home200406/pdf/AIMSUN.pdf>

## 3) 法令

- 道路交通法 (昭和三十五年六月二十五日法律第百五号)
- 道路交通法施行令 (昭和三十五年十月十一日政令第二百七十号)
- 道路構造令 (昭和四十五年十月二十九日政令第三百二十号)

## 謝 辞

本研究を進めるにあたっては、様々な方々にご指導、ご協力をいただいている。最後に、ここに感謝の意を表したい。

本研究に取り掛かり始めたのは2001年4月であるので、実に5年以上が経過したことになるが、その間、主査をお願いした東京大学・大学院工学系研究科・社会基盤学専攻の家田仁教授には、公私にわたるあらゆる面においてご指導をいただいた。指導教員として博士号取得にあたっての心構えを教えてくださいただでなく、2003年4月に助手として採用して下さってから、上司として研究者の仕事を直に体験させてくださりつつ、研究の進みが遅い私に常に気を配ってくださり、時には今後の進路に関するご相談にまで何度も乗ってくださった。言うまでもなく、家田教授の教えは私のこれまでの研究者としての活動の原点であり、今後の私の人生にとっても大いなる糧となるものであると確信している。大変に感謝しているとともに、今後も引き続きご指導いただきたいと願うところである。

また、東京大学・国際産学共同研究センターの桑原雅夫教授、同大学・大学院工学系研究科・都市工学専攻の原田昇教授、同大学・同研究科・社会基盤学専攻の清水英範教授及び清水哲夫助教授には、ご多忙中にも拘らず快く副査をお引き受けいただき、論文の深度化のための様々なご助言を頂戴することができた。特に桑原教授には、第8章における東京大学生産技術研究所内における実験の際、実験場所確保の諸手続きにまでご協力をいただいた。また、清水哲夫助教授には、交通・都市・国土学研究室における身近な先輩として、研究に限らず様々な局面においてアドバイスをいただいた。副査を直接お願いしてはいないが、同じ研究室の加藤浩徳助教授には、研究室内外の様々な活動や議論の場を通じて、研究に関するご指南をいただくだけでなく、様々な分野に対して興味を持つことの大切さを教わった。感謝の念に絶えない。

本研究において行った種々の実験に関しても、様々な方々にご協力いただいている。まず、歩行シミュレータ PedECS の開発の際には、東京大学・先端科学技術研究センターの廣瀬通孝教授に様々な技術的なご助言をいただいた。そして、日本大学・生産工学部・機械工学科の景山一郎教授、栗谷川幸代専任講師には、心拍変動解析に関する技術をご提供いただいた。実験の実施にあたっては、現在東海旅客鉄道株式会社勤務の下村新氏には、在学中に第3章の海外交差点調査と第6章の大規模な被験者によるVR実験の補助をしていただいた。また、第4章における観察実験の際には、財団法人国際交通安全学会（IATSS）の奈良坂伸氏及び黄金井幹夫氏にご尽力いただき、ホンダ本社ビルとご調整いただくことによって、ホンダビル9階のベランダからのビデオ撮影を行うことができた。そして、現在東日本旅客鉄道株式会社勤務の杉森秀司氏には第4章の観察実験と第8章のVR実験、現在東京大学・大学院工学系研究科・社会基盤学専攻修士課程2年の板橋慎寛氏には第7章のVR実験の補助をしていただいた。更に、根津寿会館の方々ははじめ、被験者として実験にご協力くださった方々、また、世田谷区役所の方々ははじめ、被験者の募集にご協力くださった方々に対しても、心より謝意を表したい。

更に、総合的交差点評価モデル CEMID の開発に関しても、実に多くの方々にご協力をいただ

いた。まず、広島市の平野橋東詰交差点におけるデータ取得の際には、広島大学・大学院国際協力研究科の藤原章正教授、張峻屹助教授、李百鎮助手（当時）に大変ご尽力いただいた。そして、国土交通省中国地方整備局・広島国道事務所・交通対策課、広島県警察本部・交通規制課の方々には交通量などの調査にご協力をいただいた。また、交通シミュレータ AIMSUN の導入の際には、馬場園克也氏はじめ、ユーデック株式会社の方々には、多大なる技術的サポートをいただいた。また、現在東京大学・大学院工学系研究科・社会基盤学専攻修士課程 2 年の劔崎聖生氏には、AIMSUN の習得と第 10 章における評価モデルの構築にご協力いただいた。霞ヶ関二丁目交差点における検討及び甲州街道における検討の際には、警視庁交通管制課の方々にデータをご提供いただいた。合わせてここに感謝の意を表したい。

研究室に在学していた、或いは在学中のその他の学生の皆さんにも、調査へのご協力など大変にお世話になった。一人一人のご紹介はここでは省かせていただくが、皆さんの技術的、精神的サポートがなければ本研究は決して仕上がらなかっただろう。特に、学部時代から 5 年以上の付き合いになる小野田恵一氏、4 年間の付き合いの朴乃仙博士は、本研究に関して多くの場面で議論を行ってくださった。また、久木田雅子秘書は事務その他の面で様々なサポートをしてくださった。大変に感謝している。

最後になるが、長期に渡って私の生活を支えてくれた両親、生活のサポートに加えて論文校正作業まで手伝ってくれた妻の玲子にも、心から感謝したい。

2007 年 2 月

# 付録資料

## A. AIMSUN API プログラムソース

1. 完全情報下での PSD アルゴリズム
2. 不完全情報下での PSD アルゴリズム

## B. 甲州街道(東京都内)の交差点データ

## A. AIMSUN API プログラムソース

総合的交差点設計制御評価モデル CEMID に導入した歩行者速度選択アルゴリズム (PSD アルゴリズム) には、以下のプログラムソースを用いた。これを横断方向ごとに作成し、交通シミュレータ AIMSUN の API モジュールに導入することで、歩行者の速度制御が可能となる。言語は C を用いた。プログラム中、歩行者の青点滅時間が 1~3 と分けられているが、これは AIMSUN のソフト上やむを得ず行っている分割であり、実際は合計値を歩行者現示時間と捉えて歩行者は歩行速度を選択するようになっている。なお、いずれも中央帯の前後で現示の切り分けは行わない場合のものである。

### 1. 完全情報下での PSD アルゴリズム

```
#include "AAPI.h"
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include <stdio.h>

/* 歩行者行動の制御 */
int ids1 = 1385; /* 流入セクション ID */
int ids2 = 1380; /* 流出セクション ID */
int ids15 = 1914; /* 流入セクション先端部 ID */
int ids25 = 1792; /* 中央帯セクション ID */
int idj = 1406; /* 交差点 ID */
float L1 = 102; /* 流入部からの横断距離 */
float L15 = 33.1; /* 流入セクション先端部からの横断距離 */
float L25 = 16.3; /* 中央帯セクションからの横断距離 */
float LL15 = 16.8; /* 流入セクション先端部から中央帯までの横断距離 */
float LL15 = 1.70; /* 流入セクション先端部の長さ */
float LL25 = 3.50; /* 中央帯セクションの長さ */
float C = 160; /* サイクル長 */
float G = 41; /* 歩行者の青時間の長さ */
float Y1 = 3; /* 歩行者の青点滅時間の長さ 1 */
float Y2 = 5; /* 歩行者の青点滅時間の長さ 2 */
float Y3 = 3; /* 歩行者の青点滅時間の長さ 3 */
float P9 = 28; /* 交差する自動車の青時間開始までの時間の長さ */
float P1 = 57; /* 交差する自動車の青時間の長さ */
float P2 = 4; /* 交差する自動車の右折専用現示前の黄時間の長さ */
float P3 = 14; /* 交差する自動車の右折専用現示の長さ */
float P4 = 5; /* 交差する自動車のクリアランス時間の長さ */
float a = 1.80; /* 歩行者の限界歩行速度の快適歩行速度に対する比 */

int n = 0;
float pd[1000][3]; /* pd[0]: 歩行者 ID, pd[1]: 正規乱数: 使用しない, pd[2]: 快適歩行速度 */
int j, l;

int AAPILoad()
{
    AKIPrintString("LOAD prc 88 160 e1");
    /* 車両 ID の初期化 */
    for(j = 0; j < 1000; j++){
        pd[j][0] = -1;
    }

    return 0;
}

int AAPIIInit()
{
    return 0;
}
```

```

int AAPIManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
{
    int sp = ECIGetCurrentPhase(idj); /*現示状態の読み込み*/
    float Gt, Xt, Xt15, Xt25, vc, vm;
    /* Gt:残存青時間
       Gpt:知覚残存青時間
       Xt:残存横断距離
       Xt15:流入セクション先端部までの残存距離
       Xt25:中央帯までの残存横断距離
       vc:快適歩行速度
       vm:限界歩行速度 */

    int i, k, m, np;
    StaticInfVeh staticinfveh;

    /*現示に応じた残存青時間の決定ルーチン*/
    if(sp == 5){
        Gt = (G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 6){
        Gt = (Y1 + Y2 + Y3 - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 7){
        Gt = (Y2 + Y3 - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 8){
        Gt = (Y3 - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 9){
        Gt = (P9 + P1 + P2 + P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 1){
        Gt = (P1 + P2 + P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 2){
        Gt = (P2 + P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 3){
        Gt = (P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 4){
        Gt = (P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }

    /*流入歩行者管理表*/
    np = AKIVehStateGetNbVehiclesSection(ids1,0);
    for(k = 0; k <= np; k++){
        for(m = 0; m <= n; m++){
            if(AKIVehGetVehicleStaticInfSection(ids1,k).idVeh == pd[m][0]){
                goto NEXT;
            }
        }
        pd[n + 1][0] = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(ids1,k).idVeh;
        pd[n + 1][1] = nr[n + 1];
        pd[n + 1][2] = AKIVehGetStaticInf(pd[n + 1][0]).maxDesiredSpeed;
        n++;
        NEXT;
    }

    /*歩行速度決定ルーチン*/
    for(i = 0; i <= n; i++){
        if(pd[i][0] > 0){
            vc = pd[i][2];
            vm = a * vc;
            /*流入セクション内での歩行速度決定*/
            if(AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids1){
                Xt = (L1 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
            }
        }
    }
}

```

```

/*焦燥領域内での歩行速度決定*/
if(vc < Xt / Gt && Xt / Gt <= vm){
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gt;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
}
else{
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
}
}
/*流入セクション先端部での歩行速度決定*/
if (AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids15){
    Xt = (L15 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
    /*焦燥領域内での歩行速度決定*/
    if(vc < Xt / Gt && Xt / Gt <= vm){
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gt;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
    /*断念領域における中央帯を加味した歩行速度決定*/
    }else if(Xt / Gt > vm){
        if(sp == 5 || sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){
            Xt15 = (L15 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
            if(vc >= Xt15 / Gt){
                Xt25 = (L25 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
                if(vc >= Xt25 / Gt){
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                }else if(sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.guided = 2;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                    AKIVehTrackedModifySpeed (pd[i][0],0);
                }else{
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                }
            }
        }
        }else{
            staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
            staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
            AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
        }
    }
}
else{
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
}
}
/*中央帯セクションでの歩行速度決定*/
if (AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids25){
    Xt = (L25 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
    if(vc < Xt / Gt && Xt / Gt <= vm){
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gt;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
    }else if(Xt / Gt > vm){
        if(sp == 5 || sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){
            Xt = (L25 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
            if(vc > Xt / Gt){
                if(AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos <= (L25- 1.00)){
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gt;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }else{
            staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
            staticinfveh.guided = 2;
            AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
            AKIVehTrackedModifySpeed (pd[i][0],0);
        }
    }
}
}else{
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
}
}
else{
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
}
}
/*流出セクション内での歩行速度決定ルーチンからの開放*/
if(AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids2){
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = pd[i][2];
    staticinfveh.guided = 0;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    pd[i][0] = 0;
    pd[i][1] = 0;
    pd[i][2] = 0;
}
}
}
return 0;
}

int AAPIPostManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
{
    return 0;
}

int AAPIFinish()
{
    return 0;
}

int AAPILoad()
{
    return 0;
}

```

## 2. 不完全情報下での PSD アルゴリズム

```

#include "AAPI.h"
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include <stdio.h>

/* 正規分布に基づく乱数の発生 */
/* Period parameters */
#define N 624
#define M 397
#define MATRIX_A 0x9908b0dfUL /* constant vector a */
#define UPPER_MASK 0x80000000UL /* most significant w-r bits */
#define LOWER_MASK 0x7fffffffUL /* least significant r bits */
static unsigned long mt[N]; /* the array for the state vector */
static int mti=N+1; /* mti==N+1 means mt[N] is not initialized */

/* initializes mt[N] with a seed */
void init_genrand(unsigned long s)
{
    mt[0]= s & 0xffffffffUL;
    for (mti=1; mti<N; mti++) {
        mt[mti] = (1812433253UL * (mt[mti-1] ^ (mt[mti-1] >> 30)) + mti);
        mt[mti] &= 0xffffffffUL;
        /* for >32 bit machines */
    }
}

/* initialize by an array with array-length */
/* init_key is the array for initializing keys */
/* key_length is its length */
void init_by_array(unsigned long init_key[], int key_length)
{
    int i, j, k;
    init_genrand(19650218UL);
    i=1; j=0;
    k = (N>key_length ? N : key_length);
    for (; k; k--) {
        mt[i] = (mt[i] ^ ((mt[i-1] ^ (mt[i-1] >> 30)) * 1664525UL)) + init_key[j] + j; /*non linear*/
        mt[i] &= 0xffffffffUL; /* for WORDSIZE > 32 machines */
        i++; j++;
        if (i>=N) { mt[0] = mt[N-1]; i=1; }
        if (j>=key_length) j=0;
    }
    for (k=N-1; k; k--) {
        mt[i] = (mt[i] ^ ((mt[i-1] ^ (mt[i-1] >> 30)) * 1566083941UL)) - i; /* non linear */
        mt[i] &= 0xffffffffUL; /* for WORDSIZE > 32 machines */
        i++;
        if (i>=N) { mt[0] = mt[N-1]; i=1; }
    }
    mt[0] = 0x80000000UL; /* MSB is 1; assuring non-zero initial array */
}

/* generates a random number on [0,0xffffffff]-interval */
unsigned long genrand_int32(void)
{
    unsigned long y;
    static unsigned long mag01[2]={0x0UL, MATRIX_A};
    /* mag01[x] = x * MATRIX_A for x=0,1 */
    if (mti >= N) { /* generate N words at one time */
        int kk;
        if (mti == N+1) /* if init_genrand() has not been called, */
            init_genrand(5489UL); /* a default initial seed is used */
        for (kk=0;kk<N-M;kk++) {
            y = (mt[kk]&UPPER_MASK)|(mt[kk+1]&LOWER_MASK);
            mt[kk] = mt[kk+M] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 0x1UL];
        }
    }
}

```

```

        for (;kk<N-1;kk++) {
            y = (mt[kk]&UPPER_MASK)|(mt[kk+1]&LOWER_MASK);
            mt[kk] = mt[kk+(M-N)] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 0x1UL];
        }
        y = (mt[N-1]&UPPER_MASK)|(mt[0]&LOWER_MASK);
        mt[N-1] = mt[M-1] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 0x1UL];
        mti = 0;
    }
    y = mt[mti++];
    /* Tempering */
    y ^= (y >> 11);
    y ^= (y << 7) & 0x9d2c5680UL;
    y ^= (y << 15) & 0xefc60000UL;
    y ^= (y >> 18);
    return y;
}

/* generates a random number on [0,1]-real-interval */
double genrand_reall(void)
{
    return genrand_int32()*(1.0/4294967295.0);
    /* divided by 2^32-1 */
}

/* 歩行者行動の制御 */
int ids1 = 1385; /* 流入セクション ID */
int ids2 = 1380; /* 流出セクション ID */
int ids15 = 1914; /* 流入セクション先端部 ID */
int ids25 = 1792; /* 中央帯セクション ID */
int idj = 1406; /* 交差点 ID */
float L1 = 102; /* 流入部からの横断距離 */
float L15 = 33.1; /* 流入セクション先端部からの横断距離 */
float L25 = 16.3; /* 中央帯セクションからの横断距離 */
float L125 = 16.8; /* 流入セクション先端部から中央帯までの横断距離 */
float LL15 = 1.70; /* 流入セクション先端部の長さ */
float LL25 = 3.50; /* 中央帯セクションの長さ */
float C = 160; /* サイクル長 */
float G = 41; /* 歩行者の青時間の長さ */
float Y1 = 3; /* 歩行者の青点滅時間の長さ 1 */
float Y2 = 5; /* 歩行者の青点滅時間の長さ 2 */
float Y3 = 3; /* 歩行者の青点滅時間の長さ 3 */
float P9 = 28; /* 交差する自動車の青時間開始までの時間の長さ */
float P1 = 57; /* 交差する自動車の青時間の長さ */
float P2 = 4; /* 交差する自動車の右折専用現示前の黄時間の長さ */
float P3 = 14; /* 交差する自動車の右折専用現示の長さ */
float P4 = 5; /* 交差する自動車のクリアランス時間の長さ */
float a = 1.80; /* 歩行者の限界歩行速度の快適歩行速度に対する比 */
float er = 5; /* 知覚誤差 */
int n = 0;
float pd[1000][3]; /* pd[0]:歩行者 ID, pd[1]:正規乱数, pd[2]:快適歩行速度 */
float nr[1000]; /* 正規乱数 */
int j, l;

int AAPILoad()
{
    AKIPrintString("LOAD prc 88 160");
    /* 正規乱数の生成 */
    for(j = 0; j < 1000; j++){
        for(l = 0; l < 12; l++){
            nr[j] = nr[j] + genrand_reall() - 0.5;
        }
    }

    /* 車両 ID の初期化 */
    pd[j][0] = -1;
}
return 0;
}

```

```

int AAPIIInit()
{
return 0;
}

int AAPIManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
{
    int sp = ECIGetCurrentPhase(idj); /*現示状態の読み込み*/
    float Gt, Gpt, Xt, Xt15, Xt25, vc, vm;
    /* Gt:残存青時間
       Gpt:知覚残存青時間
       Xt:残存横断距離
       Xt15:流入セクション先端部までの残存距離
       Xt25:中央帯までの残存横断距離
       vc:快適歩行速度
       vm:限界歩行速度 */

    int i, k, m, np;
    StaticInfVeh staticinfveh;

    /*現示に応じた残存青時間の決定ルーチン*/
    if(sp == 5){
        Gt = (G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 6){
        Gt = (Y1 + Y2 + Y3 - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 7){
        Gt = (Y2 + Y3 - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 8){
        Gt = (Y3 - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 9){
        Gt = (P9 + P1 + P2 + P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 1){
        Gt = (P1 + P2 + P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 2){
        Gt = (P2 + P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 3){
        Gt = (P3 + P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }
    else if(sp == 4){
        Gt = (P4 + G + Y - (time - ECIGetStartingTimePhase(idj))) / 3600;
    }

    /*流入歩行者管理表*/
    np = AKIVehStateGetNbVehiclesSection(ids1, 0);
    for(k = 0; k <= np; k++){
        for(m = 0; m <= n; m++){
            if(AKIVehGetVehicleStaticInfSection(ids1, k).idVeh == pd[m][0]){
                goto NEXT;
            }
        }
        pd[n + 1][0] = AKIVehGetVehicleStaticInfSection(ids1, k).idVeh;
        pd[n + 1][1] = nr[n + 1];
        pd[n + 1][2] = AKIVehGetStaticInf(pd[n + 1][0]).maxDesiredSpeed;
        n++;
        NEXT;
    }

    /*歩行速度決定ルーチン*/
    for(i = 0; i <= n; i++){
        if(pd[i][0] > 0){

```

```

/*知覚残存青時間の定義*/
if(sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){ /* 青点減で知覚が正確になる */
    Gpt = Gt;
}else{ /* それ以外は曖昧な知覚となる */
    Gpt = (pd[i][1] * er)/3600 + Gt;
}
vc = pd[i][2]; /*define of vc*/
vm = a * vc; /*define of vm*/
/*流入セクション内での歩行速度決定*/
if(AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids1){
    Xt = (L1 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
    if(vc < Xt / Gpt && Xt / Gpt <= vm){
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gpt;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
    else{
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
}
/*流入セクション先端部での歩行速度決定*/
if (AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids15){
    Xt = (L15 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
    /*乾燥領域内での歩行速度決定*/
    if(vc < Xt / Gpt && Xt / Gpt <= vm){
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gpt;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
    /*断念領域における中央帯を加味した歩行速度決定*/
    }else if(Xt / Gpt > vm){
        if(sp == 5 || sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){
            Xt15 = (L15 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
            if(vc >= Xt15 / Gpt){
                Xt25 = (L125 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
                if(vc >= Xt25 / Gpt){
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                }
                }else if(sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.guided = 2;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                    AKIVehTrackedModifySpeed (pd[i][0],0);
                }
                }else{
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                }
            }
        }
    }
    }else{
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
}
else{
    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
    staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
}
}
/*中央帯セクションでの歩行速度決定*/
if (AKIVehGetInf(pd[i][0]).idSection == ids25){
    Xt = (L25 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
    if(vc < Xt / Gpt && Xt / Gpt <= vm){
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);

```

```

        staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gpt;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }else if(Xt / Gpt > vm){
        if(sp == 5 || sp == 6 || sp == 7 || sp == 8){
            Xt = (LL25 - AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos) / 1000;
            if(vc > Xt / Gpt){
                if(AKIVehGetInf(pd[i][0]).CurrentPos <= (LL25- 1.00)){
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.maxDesiredSpeed = Xt/Gpt;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                }else{
                    staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
                    staticinfveh.guided = 2;
                    AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
                    AKIVehTrackedModifySpeed (pd[i][0],0);
                }
            }
        }else{
            staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
            staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
            AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
        }
    }
    else{
        staticinfveh = AKIVehGetStaticInf(pd[i][0]);
        staticinfveh.maxDesiredSpeed = vc;
        AKIVehSetStaticInf(pd[i][0],staticinfveh);
    }
}
}
return 0;
}

int AAIPostManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
{
    return 0;
}

int AAIPFinish()
{
    return 0;
}

```

## B. 甲州街道（東京都内）の交差点データ

実際の道路におけるサイクル長の短縮と二段階横断方式の導入を検討した際に用いた、国道20号（甲州街道）の東京都内区間における全交差点データを以下に示す。

No	所轄 No	地点 No	所轄 警察署	交差点名	横断歩道 幅員(m)	中央帯 (m)
1	100	23	麹町	三宅坂	30	3.0
2	100	65	麹町	国立劇場前	30	3.0
3	100	4	麹町	半蔵門	21	2.0
4	100	57	麹町	麹町警察署前	25	1.0
5	100	13	麹町	麹町一	25	1.0
6	100	54	麹町	麹町三	25	1.0
7	100	6	麹町	麹町四	26	2.0
8	100	45	麹町	参議院宿舎前	26	2.2
9	100	78	麹町	鉄道弘済会館前	26	2.0
10	100	29	麹町	麹町六	26	2.0
11	100	17	麹町	四谷駅前	28	1.8
12	438	2	四谷	四谷見附	33	1.6
13	438	33	四谷	四谷一	29	1.0
14	438	44	四谷	四谷二東	28	1.5
15	438	9	四谷	四谷二	26	2.7
16	438	21	四谷	津之守坂入口	28	1.0
17	438	5	四谷	四谷三	29	1.0
18	438	36	四谷	四谷四東	28	3.0
19	438	7	四谷	四谷四	28	1.5
20	438	4	四谷	新宿四	37	5.5
21	436	10	新宿	新宿駅南口	35	5.0
22	436	32	新宿	西新宿一	27	1.6
23	436	94	新宿	西新宿一第二	26	2.5
24	436	36	新宿	副都心八号線入口	31	1.5
25	436	80	新宿	西新宿二	-	-
26	436	46	新宿	西新宿	32	3.0
27	436	47	新宿	西新宿三	30	1.5
28	436	4	新宿	西参道口	31	4.0
29	333	7	代々木	初台	39	17.0
30	333	13	代々木	幡代	33	11.2
31	333	1	代々木	幡ヶ谷	33	12.6
32	333	56	代々木	高速道路幡ヶ谷出口	-	-
33	333	57	代々木	甲州街道幡ヶ谷二	-	-
34	333	6	代々木	牛窪	29	12.0
35	333	2	代々木	笹塚	34	3.5
36	333	70	代々木	笹塚郵便局前	33	3.5
37	326	2	北沢	大原	36	17.1
38	326	1	北沢	松原	34	17.5
39	442	70	高井戸	松原二	30	3.5
40	442	13	高井戸	下高井戸駅入口	33	5.0
41	442	9	高井戸	桜上水駅北	31	3.4
42	442	47	高井戸	上北沢駅東	33	18.5
43	442	12	高井戸	上北沢駅入口	34	13.0
44	328	1	成城	松原青果市場前	17	0.0
45	328	60	成城	上北沢四	17	0.0

No	所轄 No	地点 No	所轄 警察署	交差点名	横断歩道 幅員(m)	中央帯 (m)
46	328	5	成城	八幡山駅入口	17	0.5
47	442	1	高井戸	上高井戸一	18	0.0
48	442	98	高井戸	上高井戸一西	14	0.5
49	328	11	成城	烏山町下宿	14	0.0
50	328	153	成城	南烏山三	15	0.5
51	328	14	成城	松葉通り	14	0.0
52	328	8	成城	烏山中学校前	14	0.0
53	328	10	成城	烏山病院前	14	0.0
54	328	9	成城	給田北	14	0.0
55	894	82	調布	仙川橋	14	0.0
56	894	47	調布	仙川三差路	-	-
57	894	290	調布	仙川三差路西	13	0.0
58	894	273	調布	仙川駅東	14	1.0
59	894	7	調布	仙川駅入口	14	0.0
60	894	16	調布	滝坂上	-	-
61	894	150	調布	滝坂下	13	0.0
62	894	38	調布	つつじが丘交番前	13	0.0
63	894	11	調布	つつじが丘	13	0.0
64	894	65	調布	つつじが丘三	13	0.0
65	894	39	調布	菊野台交番前	13	0.0
66	894	13	調布	柴崎駅入口	13	0.0
67	894	51	調布	菊野台一	13	0.0
68	894	125	調布	野川馬橋西	13	0.0
69	894	274	調布	調布警察署前	13	0.0
70	894	2	調布	旧甲州街道入口	21	0.0
71	894	243	調布	調布郵便局前	13	0.0
72	894	100	調布	八雲台二	15	0.0
73	894	58	調布	八雲台一	14	0.0
74	894	6	調布	下布田	13	0.0
75	894	55	調布	東電調布支社前	13	0.0
76	894	244	調布	調布ヶ丘一	13	0.0
77	894	270	調布	調布駅入口	13	0.3
78	894	1	調布	調布小島町	14	0.0
79	894	17	調布	下石原	15	0.0
80	894	101	調布	中央高速調布出口	-	-
81	894	27	調布	富士見町一	13	0.0
82	894	195	調布	上石原東	-	-
83	894	8	調布	上石原	18	0.0
84	894	281	調布	東京スタジアム前	-	-
85	894	10	調布	関東村正門前	17	1.2
86	888	42	府中	白糸台三	13	0.0
87	888	59	府中	車返団地入口北	13	0.0
88	888	334	府中	白糸台交番東	13	1.0
89	888	8	府中	白糸台交番前	14	0.0
90	888	172	府中	白糸台出張所前	14	0.0
91	888	53	府中	府中市若松町一	13	0.0
92	888	52	府中	府中八幡神社前	14	0.7
93	888	37	府中	若松町二	14	0.0
94	888	9	府中	東府中	13	0.0
95	888	61	府中	東府中三差路	13	0.0

No	所轄 No	地点 No	所轄 警察署	交差点名	横断歩道 幅員(m)	中央帯 (m)
96	888	112	府中	府中緑町二	13	0.0
97	888	60	府中	緑町一	13	0.0
98	888	7	府中	小金井街道入口	15	0.0
99	888	80	府中	府中警察署東	15	1.6
100	888	15	府中	府中警察署	14	0.0
101	888	152	府中	府中駅北口	13	0.0
102	888	5	府中	府中寿町一	14	0.0
103	888	4	府中	府中寿町三	17	0.0
104	888	260	府中	ハローワーク府中入口	13	0.0
105	888	54	府中	府中美好町一	13	0.0
106	888	10	府中	美好町二	13	0.0
107	888	48	府中	美好町交番前	13	0.0
108	888	70	府中	本宿東	13	0.0
109	888	16	府中	本宿	13	0.0
110	888	57	府中	本宿町交番前	17	0.0
111	888	11	府中	西府町二	13	0.0
112	888	51	府中	西府橋	13	0.0
113	887	23	立川	国立インター入口	13	0.0
114	887	52	立川	谷保	12	0.0
115	887	10	立川	谷保天満宮前	12	0.0
116	887	131	立川	国立富士見台幼稚園前	12	0.0
117	887	11	立川	国立市役所入口	12	0.0
118	887	180	立川	国立農協前	12	0.0
119	887	12	立川	矢川駅入口	12	0.0
120	887	98	立川	矢川三	12	0.0
121	887	63	立川	矢川西	12	0.0
122	887	31	立川	青柳	13	0.0
123	887	230	立川	青柳福祉センター前	12	0.0
124	887	53	立川	みのわ通り入口	12	0.0
125	887	51	立川	錦町六	12	0.0
126	887	80	立川	立川至誠老人ホーム前	12	0.0
127	887	7	立川	日野橋	18	2.0
128	887	212	立川	立川市営球場前	9	0.0
129	885	5	日野	日野橋南詰	9	0.0
130	885	29	日野	日野橋駐在所北	9	0.0
131	885	206	日野	甲州街道駅入口	14	0.0
132	885	30	日野	日野橋駐在所南	9	0.0
133	885	17	日野	日野警察署前	9	0.0
134	885	71	日野	新奥多摩街道入口	10	0.0
135	885	2	日野	川崎街道入口	9	0.0
136	885	164	日野	日野本町二	-	-
137	885	58	日野	日野市役所入口	9	0.0
138	885	13	日野	日野駅前東	9	0.0
139	885	1	日野	日野駅前	10	0.0
140	885	223	日野	日野駅北	14	0.0
141	885	61	日野	日野坂上	12	0.0
142	885	12	日野	日野坂	10	0.0
143	885	152	日野	大坂上二	10	0.0
144	885	127	日野	日野大坂上	12	0.0
145	885	4	日野	日野台三	10	0.0

No	所轄 No	地点 No	所轄 警察署	交差点名	横断歩道 幅員(m)	中央帯 (m)
146	885	82	日野	大坂上西	11	0.0
147	885	25	日野	日野台住宅入口	10	0.0
148	885	3	日野	日野台	10	0.0
149	885	135	日野	日野台五東	9	0.0
150	885	134	日野	日野台五西	10	0.0
151	883	37	八王子	高倉町	15	0.0
152	883	132	八王子	高倉町三差路	15	0.0
153	883	42	八王子	大和田坂上	15	0.0
154	883	268	八王子	石川町入口東	16	0.0
155	883	18	八王子	石川町入口	21	0.0
156	883	51	八王子	大和田町	15	0.0
157	883	12	八王子	大和田町五	15	0.0
158	883	380	八王子	大和田交番前	-	-
159	883	8	八王子	大和田橋	15	1.0
160	883	270	八王子	八王子第五中学校前	14	0.0
161	883	40	八王子	八王子新町	11	0.0
162	883	100	八王子	浅川大橋南	14	0.0
163	883	176	八王子	八王子警察署前	12	0.0
164	883	14	八王子	バイパス元横山町	12	0.0
165	883	29	八王子	元横山町西	12	0.0
166	883	419	八王子	元横山交番前	13	0.0
167	883	61	八王子	八王子本町	12	0.0
168	883	9	八王子	バイパス大横町	12	0.0
169	883	49	八王子	平岡町	12	0.0
170	883	11	八王子	バイパス元本郷町	12	0.0
171	883	184	八王子	追分東	13	0.0
172	883	10	八王子	八王子追分町	-	-
173	883	68	八王子	千人町一	15	0.0
174	883	19	八王子	千人町	15	0.0
175	883	7	八王子	西八王子駅入口	15	0.0
176	883	34	八王子	西八王子駅西入口	15	0.0
177	883	339	八王子	千人町三	15	0.0
178	883	39	八王子	八王子工業高校入口	15	0.0
179	883	65	八王子	千人町四	15	0.0
180	883	86	八王子	長房団地入口	15	0.0
181	877	6	高尾	八王子並木町	16	1.0
182	877	14	高尾	散田交番前	15	0.0
183	877	7	高尾	横山出張所前	14	0.0
184	877	87	高尾	御陵東	15	0.0
185	877	10	高尾	高尾警察署前	14	0.0
186	877	8	高尾	多摩御陵入口	15	0.0
187	877	81	高尾	御陵西	15	0.5
188	877	89	高尾	御陵西第二	15	0.0
189	877	21	高尾	東浅川西	15	0.0
190	877	3	高尾	町田街道入口	15	0.0
191	877	1	高尾	高尾駅前	12	0.0
192	877	27	高尾	高尾駅前第二	9	0.0
193	877	73	高尾	高尾駅前第三	9	0.0
194	877	4	高尾	浅川郵便局前	9	0.0
195	877	23	高尾	浅川支所前	9	0.0

No	所轄 No	地点 No	所轄 警察署	交差点名	横断歩道 幅員(m)	中央帯 (m)
196	877	9	高尾	西浅川	10	0.0
197	877	98	高尾	西浅川南	8	0.0
198	877	85	高尾	高尾杉の子幼稚園前	10	0.0
199	877	161	高尾	高尾山口駅北	8	0.0
200	877	26	高尾	高尾山口駅前	8	0.0
201	877	71	高尾	高尾橋	8	0.0
202	877	41	高尾	高尾下駐在所前	7	0.0