

南山大学大学院
博士（数理科学）論文

成熟社会を背景とした
交通信号制御の高度化に関する研究

平成 29 年 1 月 26 日
岩岡 浩一郎

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 研究目的と概要	3
1.3 先行研究	5
1.4 論文構成	6
第2章 交通信号制御の基礎事項	8
2.1 交通管制システム	8
2.2 基本要素	15
2.3 制御方式の分類	21
2.4 設計手順と考え方	22
2.5 一般的な交通信号制御方式	39
第3章 流入路別信号現示の導入	48
3.1 はじめに	48
3.2 信号現示	48
3.3 適用事例1	51
3.4 適用事例2	56
3.5 まとめ	60
第4章 一括最適化制御の展開と応用	62
4.1 はじめに	62
4.2 制御方式の概要と実運用化	62
4.3 アプリック活用	72
4.4 車両感知器の低減	85
4.5 まとめ	92
第5章 車両感知器の故障検知	93
5.1 はじめに	93
5.2 車両感知器の故障検出手法	93
5.3 一般道における車両感知器の類型化	94
5.4 一般道における故障検出手法	98
5.5 まとめ	102
第6章 オフライン信号制御の改善	103
6.1 はじめに	103
6.2 オフライン信号制御	103
6.3 プローブデータを用いた制御パラメータ算出	104
6.4 フィールド実験	106
6.5 まとめ	110
第7章 結論と将来展望	111
7.1 本研究の結論	111
7.2 本研究の課題と展望	112

目次

1.1 交通信号制御における課題と研究内容	3
1.2 本研究の構成	7
2.1 交通管制センターのネットワーク構成	8
2.2 交通管制システムの構成	9
2.3 超音波式感知器の概要	10
2.4 速度算出の概要	11
2.5 交通情報板の例	13
2.6 プロブデータ活用のシステムイメージ	14
2.7 光ビーコンから取得されるプロブデータ	15
2.8 信号現示の例	16
2.9 一般的な信号灯器配置と現示階梯図	16
2.10 サイクル長とスプリット	17
2.11 相対オフセットの例	17
2.12 現示と需要率の例	18
2.13 信号による待ち行列と遅れ時間	19
2.14 信号表示案の設計手順	23
2.15 時差式信号現示の例	27
2.16 右折専用現示の例	27
2.17 スクランブル現示の例	28
2.18 歩車分離式信号制御の例	29
2.19 サイクル長と系統リンクの遅れとの関係	37
2.20 スルーバンド（通過帯幅）の例	39
2.21 交通順応制御の概要	39
2.22 サブエリアの構成例	40
2.23 交通状態量の算出イメージ	41
2.24 パターン制御の制御パラメータ決定フロー	41
2.25 サイクル長選択対応図	42
2.26 スプリット選択対応図	43
2.27 オフセット選択対応図	44
2.28 負荷率算出イメージと車両感知器配置	45
2.29 MODERATO 制御の制御パラメータ決定フロー	46
3.1 DR 動作メカニズム	49
3.2 DR における階梯図イメージ	49
3.3 流入路別信号現示の例（全流入路適用）	50
3.4 流入路別信号現示の例（一部流入路適用）	50
3.5 流入路内の車線運用例	50
3.6 対象交差点	51
3.7 信号現示（現状）	51
3.8 車線構成（現状）	52
3.9 信号現示変更案	52
3.10 車線構成変更案	53
3.11 渋滞長時間比較（終日）	54
3.12 渋滞長時間比較（時間帯）	54
3.13 人身事故件数	55
3.14 対象交差点	56
3.15 車線構成（現状）	56

3.16	信号現示（現状）	57
3.17	信号現示変更案	58
3.18	渋滞長時間比較（終日）	59
3.19	渋滞長時間比較（時間帯）	59
3.20	人身事故件数	60
4.1	数値列モデルイメージ	63
4.2	実システムでの処理概要	63
4.3	交通流算出イメージ	64
4.4	過飽和時の処理イメージ	65
4.5	各手法の計算結果および平均値比較	67
4.6	変異点数推計概要	69
4.7	変異点数が固定値(10)の場合における収束状況	69
4.8	変異点数が $M_{est}(k)$ の場合における収束状況	70
4.9	評価値の分布	70
4.10	対象路線	71
4.11	旅行時間比較	71
4.12	曜日別アップリンク収集状況	73
4.13	アップリンク率分布	73
4.14	対象交差点および交差点分岐率	74
4.15	プローブ車両台数の分布	74
4.16	プローブデータによる交差点分岐率推計	75
4.17	対象交差点概要および交差点分岐率推計結果	76
4.18	対象路線	77
4.19	サブエリア構成	77
4.20	荏田高校入口交差点分岐率	78
4.21	平台交差点分岐率	79
4.22	大塚原交差点分岐率	79
4.23	向原交差点分岐率	80
4.24	交差点分岐率相関図	80
4.25	評価対象（リンク・車両感知器）	81
4.26	渋滞長時間の評価（方向別・時間帯別）	82
4.27	交通量比較	82
4.28	制御パラメータ比較（葛ヶ谷公園西）	83
4.29	制御パラメータ比較（平台）	83
4.30	制御パラメータ比較（平台中央）	83
4.31	サブエリア構成（事前・事後1）	84
4.32	サブエリア構成（事後2）	84
4.33	車両感知器数評価用ネットワーク	85
4.34	パターン制御方式における車両感知器配置	86
4.35	MODERATO 制御における車両感知器配置	87
4.36	一括最適化制御における車両感知器配置	87
4.37	シミュレーション対象ネットワーク	88
4.38	再現性検証地点	89
4.39	再現性検証結果(1)	89
4.40	再現性検証結果(2)	90
4.41	信号制御実験システム	90
4.42	シミュレーション結果(1)	91
4.43	シミュレーション結果(2)	91
5.1	車両感知器データ（5分間隔）の例	94

5.2 単位時間データの例（1日分，288時点）	95
5.3 集約車両感知器情報の例（1日分，5時点）	95
5.4 集約車両感知器情報の例（1ヵ月分，155時点）	95
5.5 調査対象箇所	96
5.6 対象箇所における集約感知器情報	97
5.7 故障検出領域の定義	98
5.8 処理フロー（方式1）	99
5.9 故障が想定される地点の集約感知器情報	101
5.10 保守対応後の集約車両感知情報	102
6.1 系統多段のグループ	103
6.2 グループにおける総遅れ時間算出例	104
6.3 スプリット指標およびオフセット指標の算出例	105
6.4 データセット構造およびクラスタリングイメージ	106
6.5 制御パラメータおよび時限表の計算例	106
6.6 対象路線図	107
6.7 再現性検証結果	107
6.8 サイクル長指標の算出結果	108
6.9 スプリット指標とオフセット指標の算出結果（グループ1）	108
6.10 スプリット指標とオフセット指標の算出結果（グループ2）	108
6.11 算出された制御パラメータの例	109
6.12 制御効果の比較	110

表目次

2.1	交通管制センターの種類	8
2.2	光学式車両感知器の通信諸元	12
2.3	信号交差点の飽和交通流率の基本値	31
2.4	飽和交通流率に影響を及ぼす要因	31
2.5	左折車混入による補正率 α_{LT}	34
2.6	平等オフセット方式における基本オフセット	38
2.7	サイクル選択の判定表	42
2.8	スプリット選択の判定表	43
2.9	オフセット選択の判定表	44
3.1	交通状況	52
3.2	交差点需要率の比較	53
3.3	制御パラメータの比較	55
3.4	交通状況	57
3.5	交差点需要率の比較	58
3.6	信号制御パラメータの比較	59
4.1	データ数の比較	78
4.2	調整後データとの比較	81
4.3	パターン制御方式の車両感知器配置基準	86
4.4	MODERATO 制御の車両感知器配置基準	86
4.5	一括最適化制御の車両感知器配置基準	87
4.6	必要な感知器数	88
5.1	集約時間帯	94
5.2	分類条件	96
5.3	方式 2-A における設定	99
5.4	方式 2-B における設定	100
5.5	判別結果の精度	100
5.6	最良結果算出時の各手法の設定	101
6.1	時限表の算出結果	109

第1章 序論

1.1 背景

我が国を含めた先進各国は戦後 70 年が経過し、高度の成熟社会を迎えようとしている。特に我が国では、戦後の急速な復興とその後の高度経済成長期により社会は爆発的に発展してきた。しかし、1990 年代前半のバブル崩壊後、マイナス成長からの脱却に迫られた「失われた 20 年」が経過し、成長を前提にしていた様々な社会の仕組みに歪みが生じている。特に、人口構成の高齢化は急速に進行していくことが確実視されている。これは就労人口の低下に直結して国全体の活力低下につながり兼ねないため、国の方策を含めて社会全体での対応が必要である。このような情勢のもと、社会活動を下支えする社会インフラは多くのもが公共事業として整備および運用されているが、社会情勢の影響を直接的に受けるために、水道や道路といったハードウェアだけでなく交通管制システムをはじめとして各種システムも難しい局面を迎えている。戦後の高度成長期における社会の発展とともに社会インフラは急速な拡大を続けてきた。バブル崩壊後も経済対策として公共事業費は拡大し、その受け皿として社会インフラシステムへの投資も継続された。しかし、2001 年に発足した小泉内閣以降は大幅な公共事業費の削減が実施されるようになり、現在は 2000 年における予算の半額程度となっている。このように、社会インフラシステムは拡大から抑制に転換した時点から約 15 年が経過し、拡大期に整備したものが更新時期を迎えているが、国や都道府県での予算逼迫により当時と同じ規模での更新が不可能な状態となっている。サービスレベルを維持したままシステムの規模を縮小化できないのか、それができない場合はどこまでサービスレベルを低下させることが許容できるのか等、現在の予算状況でのサステナビリティを確立することが急務となっている。

交通管制システムは 1970 年代前半より整備が開始され、社会インフラシステムとして重要な役割を担ってきた。その役割は過密化した道路交通を適切に配分・誘導することであり、交通流動を適正化する「信号制御」と交通量の平準化を促す「情報提供」という二つの機能により構成されている[1]。1990 年代以降は、情報通信技術を活用した ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) を積極的に導入することで高度化を図ってきた。国(警察庁)の整備方針に基づき、各都道府県(警視庁および道府県警察)にて整備・運用を実施することで「安全・快適で環境にやさしい交通社会」の実現に寄与してきた。特に、安全面については、システム導入当初の交通事故死亡者数が年間 1 万人以上であったものが、2010 年には 5 千人以下まで低減し、大きな成果を上げている[2]。このような交通管制システムにおいても、整備開始より 40 年以上が経過して規模も拡大し、その維持管理に困窮している状況である。交通管制システムは、都道府県警察本部に設置された交通管制センター内のコンピュータと信号制御機や車両感知器等の路上設置装置(以下、端末装置と呼ぶ)を専用回線で接続して運用している。政令指定都市を持つ大規模な都道府県では、2,000~3,000 基程度の信号制御機や 7,000~8,000 基近い車両感知器を使用している。また、交通管制センターと接続していない信号制御機はオフライン信号制御機と呼ばれているが、その整備数は交通管制センターと接続する信号制御機の 2~3 倍程度となっている。前述したように地方自治体等においては厳しい予算状況にあるため、さらなる機器の追加整備が難しいだけでなく、これまで整備されたものの

更新も負担となりつつある。特に、「信号制御」「情報提供」双方の入力情報の計測を司る車両感知器は、システムの「目」として重要な役割を果たしているが、整備数がシステム内で最も多いこともあり、機器劣化の進行に維持管理業務が追従できていないケースも生じている。車両感知器の故障判定は計測データだけでは困難で、システム内で取得されたデータと車両感知器周辺の車両走行状況を目視等で比較する方法により実施している。特に、整備数の最も多い超音波式車両感知器はデータ精度の低下を伴いながら少しずつ劣化故障するケースが多いため、効率的な維持管理業務には熟練技術者の判断が必要である。しかし、近年システムを管理する官側も保守実務を受託する民間側も一定の技術レベルを保有する人材の確保に苦慮しており、維持管理が遅滞する一因となっている。

交通管制システムにおける主要機能の信号制御は、車両感知器の計測情報を通じて交通状況を把握し、その状況に応じて適切な制御パラメータを算出し、それにもとづき信号制御機を動作させることで交通流動の円滑化に貢献してきた。システム整備の初期より継続的に信号制御方式の高度化が実施され、一定の効果を実現してきたためである。しかし、長年地域のボトルネック箇所として渋滞低減が望まれながら、現行の信号設計では十分な効果が導けない交差点が多々存在することも確かである。欧米のように信号現示の可変運用が難しい日本では信号現示設計が形骸化する傾向にあり、方向別交通量を用いた詳細な信号現示設計を実施していないために混雑状況の改善が可能な箇所が見落とされている可能性がある。また、現行システムで活用されている信号制御方式においては、次に述べる二つの懸案が長年解消されていない。一つ目の懸案は、幹線道路同士が交差する重要交差点の交通状況により制御パラメータを決定しているため、その制御パラメータは対象道路網における全体最適を保証するものではないということである。二つ目は、制御パラメータを決定する手順に関してであり、サイクル長、スプリット、オフセットの順に異なる処理で実施されるために制御パラメータ全体としての最適性も保証されていないという点である。

ここまでは、信号制御における機能面に関する課題を述べてきたが、前述した社会システムおよび交通管制システムの実情が示すように運用面に関しても課題が生じている。信号制御方式は交通管制システムの発展とともに高度化されていることは前述した通りであるが、それに伴って必要となる入力情報が空間的かつ時間的に高分解能なものとなる傾向がある。これは、対象となる交差点ネットワークにおいて車両感知器の設置密度が高くなることを意味する。社会情勢により車両感知器を中心とした路上機器の更新および拡充が滞りつつあるなか、高度な信号制御手法ほど車両感知器整備の制約から適用ができなくなることが危惧される。制御レベルを維持しつつ使用する車両感知器を低減できる制御方式の導入が求められている。また、信号制御パラメータ自体の運用という点に着目すると、交通管制センターと接続されていない信号制御機やパターン制御と呼ばれる方式の制御パラメータは交通状況を設計者が類型化し、その類型化パターン毎に最適な制御パラメータの値を机上で決定し、システムに設定している。このため、適用している制御パラメータが交通状況の経年変化で適切なものとなっていない場合は、交通状況の類型化や制御パラメータ値の決定を実施し直す必要がある。しかし、車両感知器の維持管理同様、この制御パラメータの見直しに関しても熟練技術者による対応が必要であるため、システム内における制御パラメータの最適性が維持できなくなっている[3]。

これまで述べてきた成熟社会における交通信号制御が解決すべき課題を以下に整理する。

【機能・設計における課題】

- ・制御パラメータ決定における論理性（ネットワーク最適，パラメータ全体最適）
- ・固定化した信号制御設計
- ・長年ボトルネックである交差点の存在

【運用における課題】

- ・維持管理業務の遅滞（機器故障判別，制御パラメータ見直し）
- ・機能レベルを維持した上でのシステム規模低減

1.2 研究目的と概要

本研究では，成熟社会を背景に，オペレーションズリサーチ（OR）の考え方や数理技術を活用してサステナブルな交通管制システム実現に寄与する交通信号制御高度化を目的とする。

本研究では，大きく2つの課題に取り組む。図 1.1 に，交通信号制御における課題と本研究のテーマおよび実施内容の関係を示す。

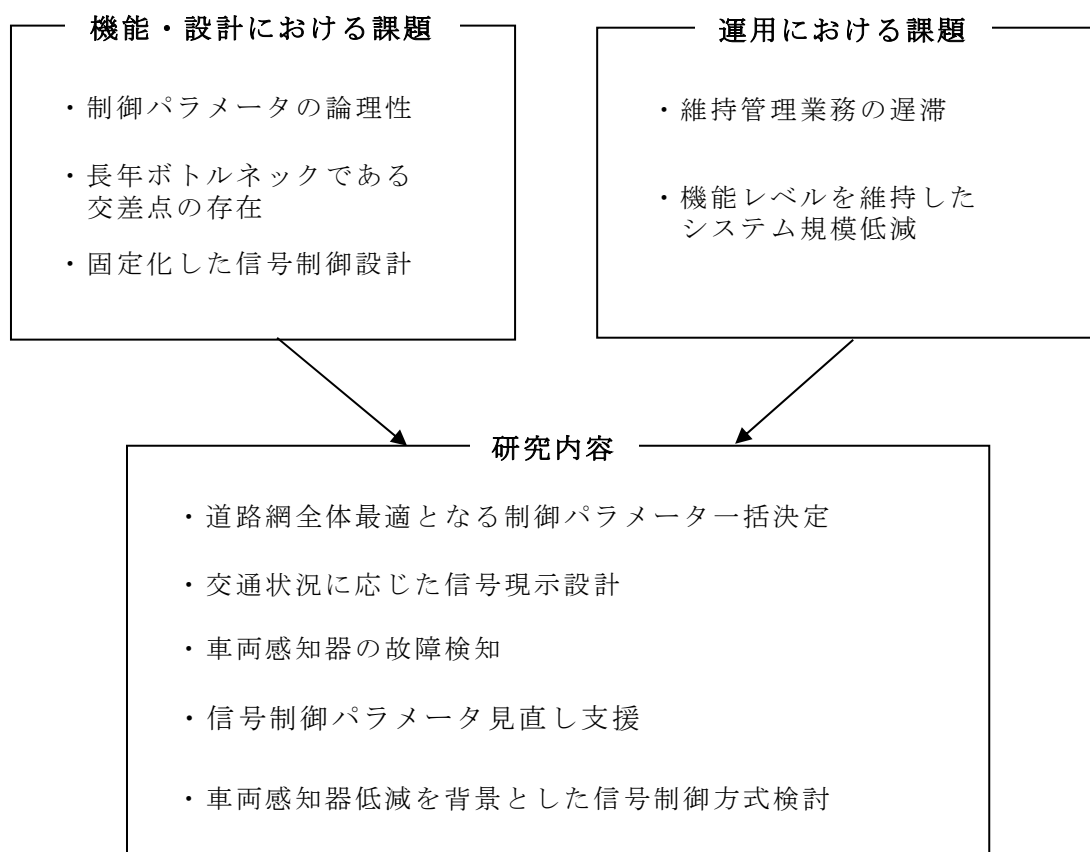


図 1.1 交通信号制御における課題と研究内容

まずは，機能・設計に関する課題である。交通管制システム導入から40年以上経過している

が、制御パラメータ決定手順は導入当初より大きくは変化しておらず、その論理性の確立という課題は残ったままである。また、実際の制御状況を鑑みると、長年ボトルネックとなっている交差点も多数あり、現状の設計に関する前提から見直す必要があると考えている。よって、制御パラメータの論理性確保のため、一括最適化制御という新たな方式の展開に取り組む。ボトルネック交差点の解消に向けては、信号制御設計の基礎である信号現示の設計に関する新たなアプローチを提案する。次に取り組むのは、運用面に関する課題である。高度成長期に急拡大した交通管制システムの各設備が現在更新時期を迎えたものの国や自治体の財政状況により維持管理が厳しくなっている。あわせて、就労人口の低下に伴って熟練技術者の減少が始まっており、更新時期を迎えたまま稼働している機器の故障判断および設計時から長年経過した制御パラメータの見直しが遅滞している。そこで、運用者を支援するために、車両感知器の故障検知およびプローブデータによる信号制御パラメータ見直し支援を検討する。さらに、抜本的な改善策として、一括最適化制御を応用して車両感知器低減を背景とした信号制御方式を検討し、使用する車両感知器数を低減しつつ制御レベルを維持することに取り組む。

次に、これらの研究内容について概要を記述する。

1.2.1 対象道路網全体最適となる制御パラメータ一括決定

制御パラメータ決定に関する研究は長年実施されているが、主要な制御パラメータであるサイクル長、スプリット、オフセットを一括して決定する手法の実適用はほとんどなかった。制御パラメータの全項目（サイクル長、スプリット、オフセット）を一括最適化する手法は織田ら[4]によって1990年代に提案されたが、計算結果の安定性等により実運用までは至らなかった。ここでは、リアルタイムなパラメータ決定が可能となるようにメタヒューリスティクスの計算手法を検討することで実運用を実現する。

1.2.2 交通状況に応じた信号現示設計

信号現示設計の実務においては、右折車両が多く右折専用現示を付加するか、対向方向の交通量に差があり時差現示を付加するか、などの検討しか実施していないのが実態である。現在、実運用において、信号現示は幾つかの典型的なパターンを使用することが多い。しかし、対向する流入路で交通需要に差がある場合は、流入路別現示を導入することで大幅に交差点容量を拡大することが可能である。オペレーションズリサーチ（OR）の考え方を導入し、信号現示設計案が有効であるかを事前に評価するにあたり、交差点需要率という定量的な指標値にもとづく流入路別現示の適用可否決定手順を提案する。

1.2.3 車両感知器の故障検知

一般道における車両感知器の計測データは、信号制御機の影響で短期間変動を含むという特徴がある。この影響を回避するため、計測データを集約した上で故障判別を行うというアプローチを検討する。故障判別の手段としては、交通流モデルによる手法および SVM（Support Vector Machine）やニューラルネットワークといった数理技術による手法を試み、実データで精度評価を行う。

1.2.4 信号制御パラメータ見直し支援

これまで熟練技術者自らが、交通量等の調査結果から交通状況を類型化し、その類型化した交通状況毎に最適な制御パラメータを設計してきた。しかし、このような技術者が少なくなるなか、体系的な支援の構築が急務となっている。ここでは、プローブデータが車両感知器設置位置以外の交通状況も保持していることに着目し、オフライン制御路線におけるプローブデータをクラスタリングすることで交通状況を類型化し、見直しが必要な制御パラメータを明確化することを検討する。

1.2.5 車両感知器低減を背景とした信号制御方式検討

車両感知器の維持管理が厳しい局面を迎えるなか、制御レベルを維持した上で使用する感知器を低減できるような制御方式が求められている。前述した一括最適化制御は、その手法内に交通流モデルを内包しているため、対象道路網に流入する交通需要さえ分かれば制御パラメータを決定できる。対象道路網外縁部の車両感知器のみで制御レベルを維持可能か、交通流シミュレーションを活用した実験システムでその有効性を検証する。

1.3 先行研究

前項で述べた研究内容それぞれに関する先行研究を概説する。

1.3.1 対象道路網全体最適となる制御パラメータ一括決定

制御パラメータ決定に関する研究は長年実施されており、複数のパラメータを一括して決定するものは1960年代後半から散見される。例えば、世界的に有名なオフライン制御設計支援ツールTRANSYT[5]はサイクル長を所与とし、スプリットとオフセットを最適化するものである。また、日本だけで導入されているサブエリア（共通のサイクル長で運用する最小限の隣接交差点群）の構成決定に関する研究[6]、[7]や一部の制御パラメータ（サイクル長とオフセット等）を同時に算出する方式の研究[8]–[11]が、継続的に検討されてきた。しかし、サブエリア構成および制御パラメータの全項目（サイクル長、スプリット、オフセット）を一括最適化する手法はほとんどなく、織田ら[12]によって1990年代に提案された手法はあるものの計算結果の安定性等により実運用までは至っていなかった。

1.3.2 交通状況に応じた信号現示設計

我が国においては欧米や新興国と比較し地価が高いため、交差点通過方向別に車線を割り当てるのが難しい。このため、海外で見られるような柔軟な信号現示での運用は難しく、右折車両が多く右折専用現示を付加するか、対向方向の交通量に差があり時差現示を付加するか、などの検討しか実施していないのが実態である。また、日本における現示運用の特徴として、安全面の配慮から固定的な信号現示にて運用することが大前提となっている。このような問題に対して、多車線交差点信号制御に関する研究[13]や動線分離制御に関する研究[14]がある。前者は信号灯器配置や損失時間に関する検討に留まり、後者は一般的な現示と動線完全分離現示の交通処理能力を調査したに過ぎず、いずれも具体的な現示設計を提案するものではない。このような状況から、制御方式の高度化という観点でムーブメント制御というサイクル毎に信号現示を状況に応じて変化させる制御方式の実証実験が行われた[15]–[17]。しかしながら、滋

賀県内で実施された実証実験で制御効果を確認することができず最終的には実運用が見送られたことや、信号灯器表示の複雑さや可変的な現示運用に対する安全性への懸念から周辺地域での社会的な合意形成確立が必要であることから、普及が進んでいない。

1.3.3 車両感知器の故障検知

車両感知器のデータ活用として、特異なデータを検出して突発事象を検知するような取り組み[18]–[21]は長年研究されてきた。しかし、検出対象としては車両感知器自体の故障ではなく突発的な交通状況であるため、そのまま適用することは難しい。車両感知器の故障検知に関する先行研究としては、自動車専用道における取り組みがあり、遠藤らが交通量の連続性を前提にエラーフラグ情報と交通量の精度低下からメンテナンスに必要な情報を生成する取り組み[22]を行っている。この手法は、自動車専用道において故障が疑われる車両感知器の計測情報とその上下流に設置された複数の車両感知器の計測情報を比較することが前提となっている。一般道における街路網では交差点による交通流動の分岐があるため、この研究成果の適用は困難と考えられる。

1.3.4 信号制御パラメータ見直し支援

パターン制御やオフライン制御における信号制御パラメータ見直しの効果については、交通管制システムの整備や運用を担う交通管理者の取り組みについては報告されている[23]–[25]。特に、警視庁におけるオフライン制御パラメータ見直し[25]については、プローブデータという車両から交通管制システムへ送信される走行状況（通過地点の緯度経度、通過時刻）を示すデータが活用されている。しかし、プローブデータは、交通状況と制御パラメータの不整合が発生している交差点の検知に主に使用されており、データ解析結果から推奨制御設定を生成するような制御設計支援を行うものではない。また、プローブデータの統計処理結果がこのような交通管理業務への活用可能であろうという報告[26], [27]がなされているが、データ解析や交通流シミュレーションによる検討に留まっている。

1.3.5 車両感知器低減を背景とした信号制御方式検討

車両感知器の維持管理が厳しい局面を迎えるなか、車両感知器の代替案としてプローブデータを活用するという研究[28]が行われている。しかし、車両感知器の代替となるためには、プローブデータを送信する車両の普及率を格段に上昇させる必要がある。このため、社会全体で普及率増加のための方法論を検討する必要がある。実用のレベルに到達するまでには時間を要するものと考えられる。一方で、現行の制御方式における最低限必要な車両感知器数の明確化することや今後配置される車両感知器が大幅に減少する懸念がある中で、車両感知器設置密度が低下しても現行レベルの制御が可能な方式の検討などを実施した取り組みは見当たらない。

1.4 論文構成

本研究は、本章第1章を含めて7章から構成される。第7章は、本研究の結論と今後の展望をまとめたものである。以下に、第2章から第6章に関して、前述した研究内容との関係を記すとともに、図1.2に、各章と課題との対応を示す。

第 2 章では、交通信号制御に関する基礎事項について説明する。第 3 章では、「交通状況に応じた信号現示設計」を検討する。第 4 章では、一括最適化制御という制御手法により「道路網全体最適となる制御パラメータ一括決定の実運用化と適用効率化」と「車両感知器低減を背景とした信号制御方式検討」に取り組む。第 5 章では、「車両感知器の故障検知」について検討する。第 6 章では、「信号制御パラメータ見直し支援」として「オフライン信号制御の改善」に取り組む。

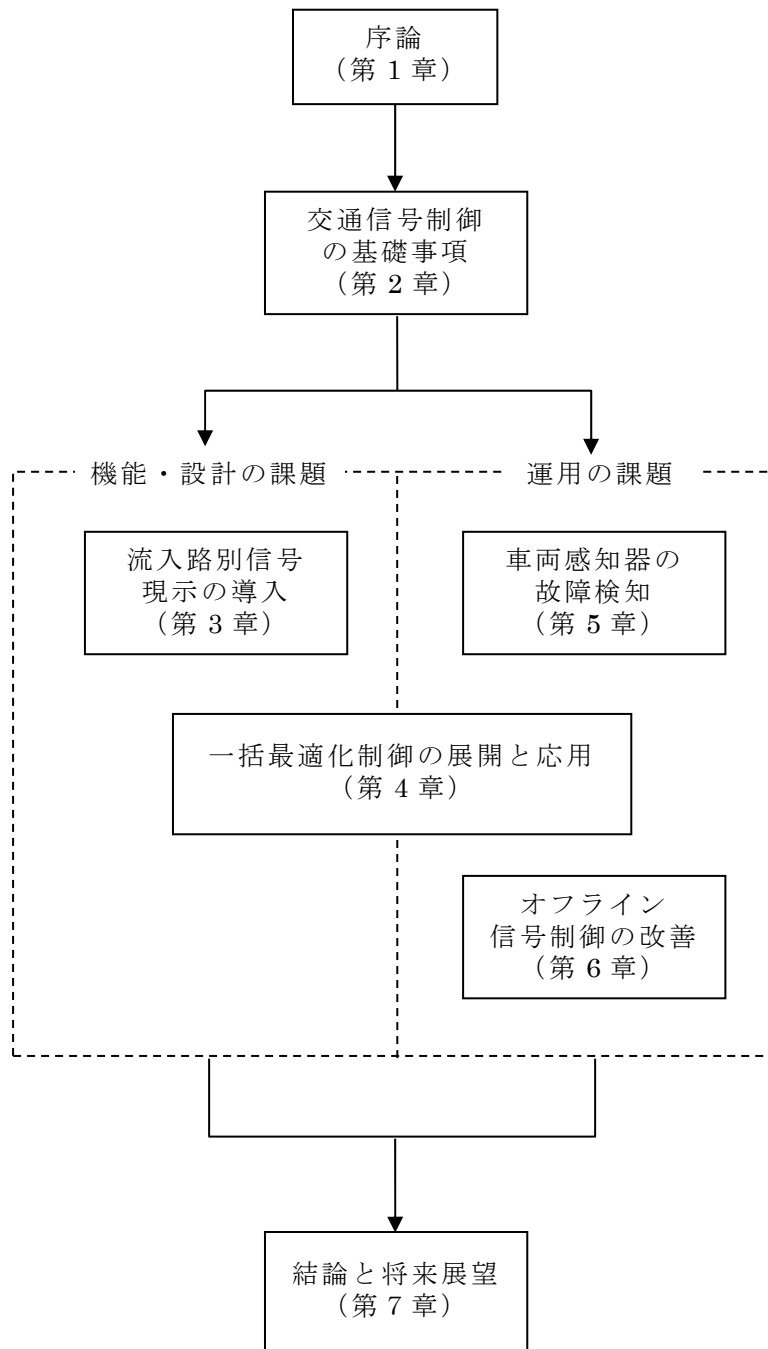


図 1.2 本研究の構成

第2章 交通信号制御の基礎事項

2.1 交通管制システム

交通管制システムの発展経緯や概要について説明する[1].

2.1.1 発展経緯とネットワーク構成

交通管制システムは、東京都内を対象に異なる経緯で開発されてきた信号制御システムと交通情報システムセンターが 1970 年に統合されて誕生した。一般道における交通状況の収集・分析、交通信号制御機などの路上機器に対する指令・管理を統括的に実施するシステムであり、都市部を中心とした街路交通を管理する社会インフラシステムとして発展していった。現在の交通管制システムは、表 2.1 のように都道府県ごとに設置されている。

表 2.1 交通管制センターの種類

センター	設置都市
本部センター	各都道府県警察本部の所在都市
都市センター	遠隔地の主要都市
サブセンター	遠隔地の中小都市

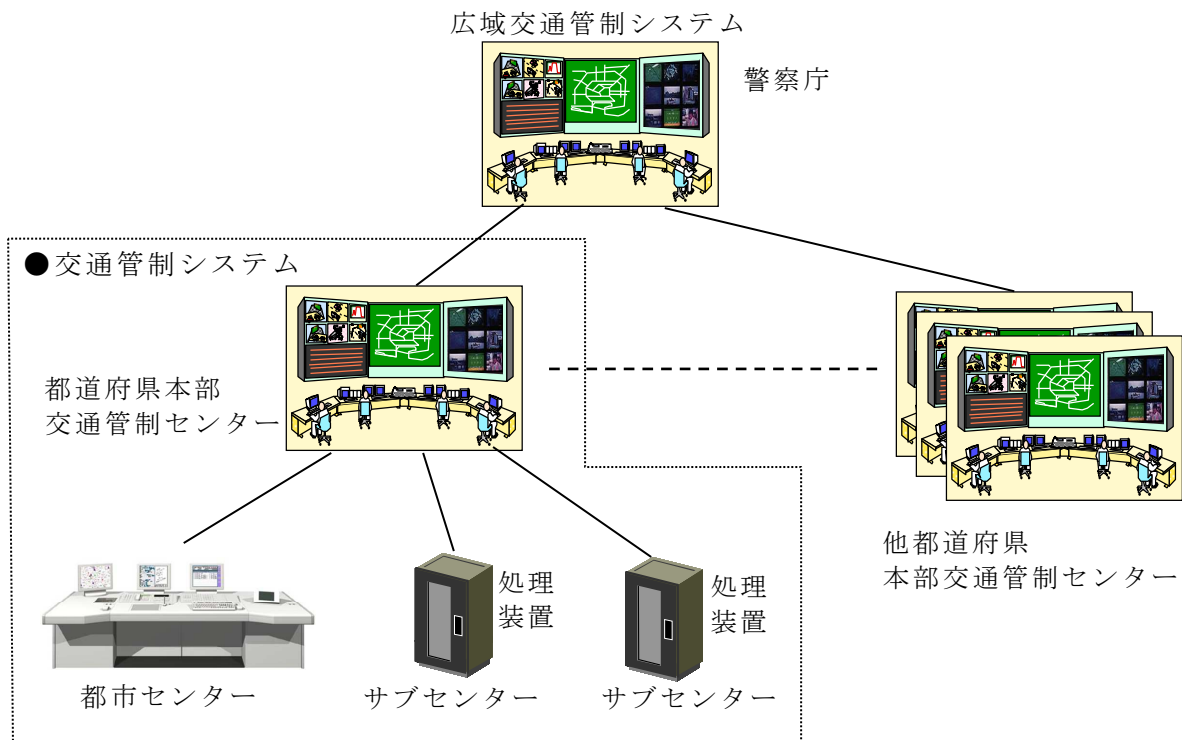


図 2.1 交通管制センターのネットワーク構成

図 2.1 に示すように本部センターを核として、都市センターやサブセンターとスター形のネットワーク構成となっている。

2.1.2 システム構成

交通管制システムは、図 2.2 に示すように処理の効率性・フェールセーフ・拡張性などを考慮して階層化されたシステム構成となっている。

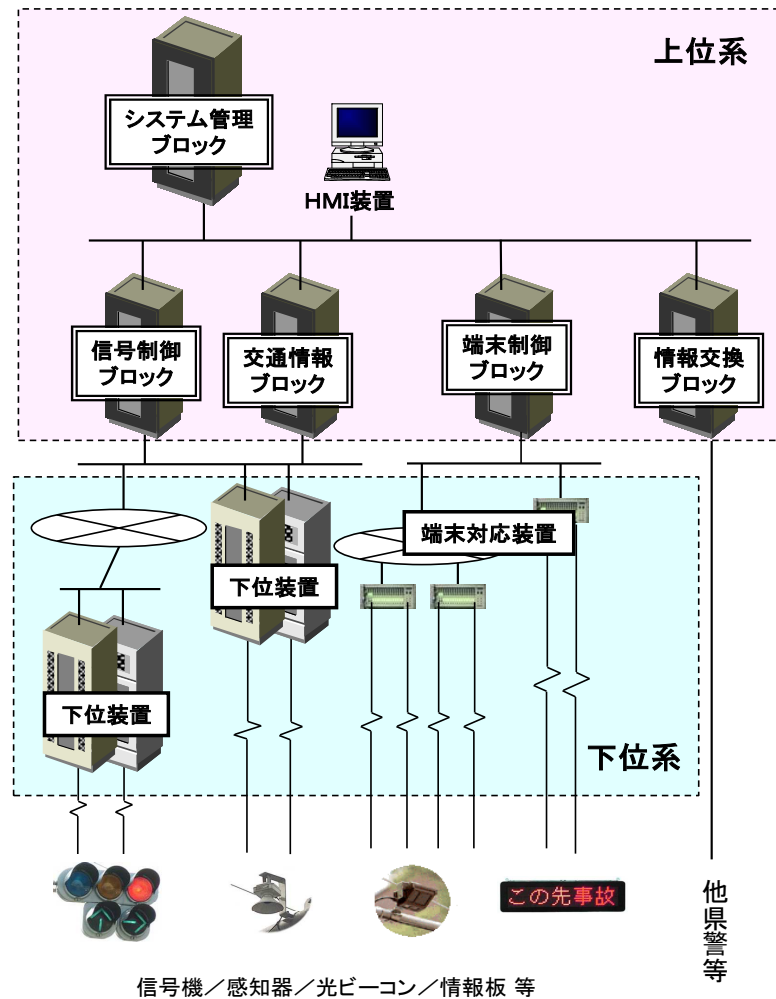


図 2.2 交通管制システムの構成

この構成の特長は、リアルタイム処理を行う下位レベルの処理装置（下位系）を、その一つ上のレベルで統計や意思決定等の高度な情報処理を行う装置が統合しているところにある。交通管制の機能を大別すると、次の三つの層に分けられる。

- (1) 短周期（数秒単位）で実施される簡易な機能（車両感知器より送付されるデータなど）
- (2) 短周期で実施され、しかも比較的高速な処理が必要な機能（信号制御機の灯色表示を計時して切り替えていく処理など）

- (3) 実行頻度は高くないが（5分間隔以上）、高度な情報処理を必要とする機能（信号制御パラメータ決定、日報・月報などの作成など）

下位系では、信号制御機、車両感知器や情報板などの路上に設置された装置（端末装置）を直接制御している。2000年以降の計算機性能の向上により、下位装置は端末装置の制御だけでなく比較的高度な情報処理も実施していた。一方で、計算機の製造元により保守部品提供可能期間が年々短期間になる等の保守面の問題から、2015年度より下位装置における情報処理機能は上位系の端末制御ブロックに、端末装置の制御機能は端末対応装置に、それぞれ分担されることとなった。上位系は下位系を統合して端末装置から送信される情報を集約するとともに、交通管理を実現するために交通情報ブロック、信号制御ブロック、情報交換ブロック、システム管理ブロック、端末制御ブロックから構成されている。なお、上位系と下位系を併せた交通管理センターに設定されている装置を中央装置と呼ぶこともある。

2.1.3 交通情報収集装置

信号制御や交通情報提供などの交通管理を適切に実施するためには、交通状況を定量的に正確に把握することが重要である。この意味で、交通情報収集装置である各種車両感知器は交通管理システムの全ての機能の基礎となっている。システム内では、車両感知器から収集される情報は、交通量、占有率および平均速度が基本情報となっている。ここでは、代表的な感知器である超音波式車両感知器および光学式車両感知器について述べる。

(1) 超音波式車両感知器

超音波車両感知器は、超音波送受器と本体から構成される。超音波送受器は、車線中央の高さ約5.5mの位置に路面に垂直に取り付けられる。図2.3に、その仕組みおよび設置例を示す。

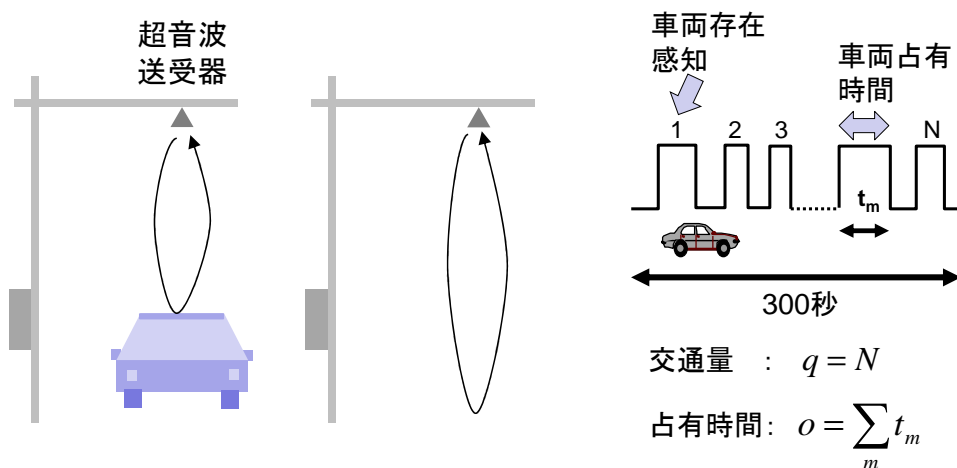


図 2.3 超音波式感知器の概要

車両検出方法について概説する。超音波送受器から極めて短時間のみ一定周波数の超音波を間欠的に路面に向け発信する。この超音波が、路面または車両により反射され超音波送受器で受信される。この超音波発信と受信の時間差により車両の存在を検出する。車両占有時間の最小

単位は 50ms であり，車両感知器本体では個々の車両の占有時間が 50ms のパルスが何回分に相当するかカウントしており，その結果を累積カウンター値として保有している．交通量に関しても，同様にパルスの数をカウントして累積カウンター値を保有している．交通管制センターの下位装置および端末対応装置は車両感知器に情報送信要求を送信し，車両感知器は要求受信時点での交通量および占有時間の累積カウンター値を送信する．センター側装置では，車両感知器から送信された最新の累積カウンター値と前回の値を用いて一定期間の交通量および占有時間を算出している．速度算出については，図 2.4 にあるように平均車長（システム内の設定値）を用いる．これは，一般道においては超音波送受器 1 基での計測となっているためである．

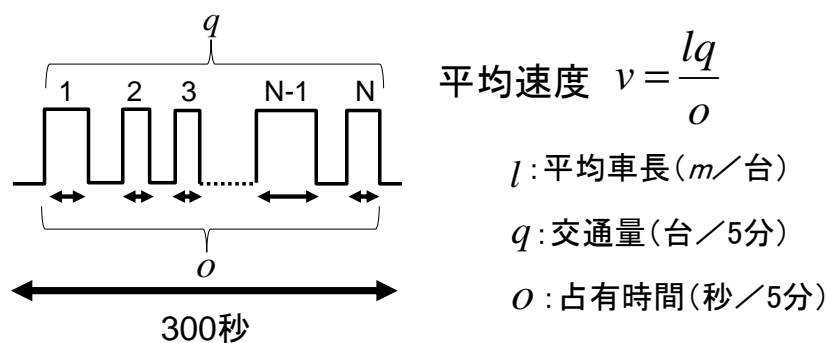


図 2.4 速度算出の概要

(2) 光学式車両感知器

光学式車両感知器は，通称光ビーコンとも呼ばれ，近赤外線を用いて路車間での双方向通信機能と走行車両の存在を感知する機能を併せ持っている．地上約 5.5m の高さに設置された投受光器により双方向通信および車両検知が実施される．その通信における仕様諸元は表 2.2 の通りである．双方向通信により交通管制センターで収集される情報はアップリンク情報と総称されており，その具体的な内容は車両 ID や通過した光ビーコン間の旅行時間のほか，公共車両優先システム (PTPS)，現場急行支援システム (FAST) などの新交通管理システム (UTMS: Universal Traffic Management Systems) [29] を構成するサブシステムに必要な情報などがある．一方，ダウンリンク情報と呼ばれる車載機への送信情報は，車両進行方向を中心に半径 30km 以内の精細な渋滞や旅行時間および交通情報を包含したデフォルメ図形表示用情報などから構成されており，車両のナビゲーションシステムでは受信した情報をデジタル地図上に交通情報を重畳表示したり，光ビーコンからの情報によるデフォルメ図形 (簡易図形) や文字メッセージを表示している．これは，VICS (Vehicle Information and Communication System: 道路交通情報通信システム) の主要機能の一つとして，国道 16 号に囲まれたエリアの幹線道路を中心として 1996 年に運用開始され，以降全国の主要都市で整備されている．

表 2.2 光学式車両感知器の通信諸元

項 目		諸 元
発行波長	アップ	900～1000nm
	ダウン	800～900nm
通信エリア	アップ	横 3.5m×奥行 1.6m
	ダウン	横 3.5m×奥行 3.7m
伝送速度	アップ	256Kpbs
	ダウン	1024Kbps
伝送容量	アップ	1104B (70km/h)
	ダウン	10KB (70km/h)

2.1.4 信号制御機

信号灯器を制御するための信号制御機は防雨・防塵構造を持ち、振動・衝撃・温湿度・電源電圧などの各種環境条件に対して長期的に機能低下を生ずることなく動作するとともに、安全性の観点から交差する方向の交通に同時に青表示することの防止や現示停止の監視等を行うように考慮されている。信号制御機は、要求機能に対応して機種が変更となってきた。現行は、平成 10 年に開発された仕様を基礎とした機種となっており、U 形交通信号制御機、UC 形交通信号制御機、および UC 形押ボタン式交通信号機の 3 種類となっている。

(1) 集中制御（オンライン制御）

信号制御機が交通管制センターの中央装置と回線接続され、集中的に制御される場合を集中制御もしくはオンライン制御と呼ぶ。一方、交通管制センターと接続されず孤立交差点（群）で運用される場合を地点制御もしくはオフライン制御という。従来は、集中制御と地点制御は別々の機種として整備が行われていたが、平成 10 年以降は同一機種として整備が実施されている。また、集中制御には中央装置側の指令方法の違いにより「歩進制御」と「テーブル制御」の 2 種類がある。

(a) 歩進制御

歩進制御方式は、1960 年代の後半に開発された方式である。この方式は、中央装置から制御情報の指令にもとづいて動作（灯器表示）を進める方式である。信号制御機の動作を進める信号を「歩進信号」と呼ぶことから「歩進制御」と言う。なお、この方式での運用中は、中央装置の歩進信号で動作を進めるため、制御パラメータの決定と実行は中央装置側で実施する。

(b) テーブル制御

テーブル制御方式は、1990 年代に開発された方式である。この方式は、中央装置から定期的または不定期に送信される信号制御指令にもとづいて、信号制御機自身が各灯器表示の時間を決定し、動作を進める方式である。各灯器表示の時間を一覧表（テーブル）として伝送することから「テーブル制御」と言う。また、この制御方式では、制御パラメータの決定

は中央装置側で行い、実行は信号制御機側で行うことになる。

(2) 地点制御（オフライン制御）

地点制御は、交通管制センターと接続されず孤立交差点もしくは小規模な交差点群で運用される方式である。制御パターンとして 10 種類、閃光動作や各種感応機能の動作切替は日種別（平日、土曜、日祝）に 4 [回/日] まで設定可能である。

(3) 押ボタン式交通信号制御機

押ボタン式交通信号制御機は単路の横断歩道に設置され、車両側の信号灯器を常時青表示の状態にしておき、横断しようとする歩行者が押ボタンを押下することにより車両側の交通を止め、歩行者側に通行権を与えるものである。

2.1.5 交通情報板

交通情報板は交通情報提供装置に分類され、ドライバーに対して渋滞情報、旅行時間情報、規制情報およびイベント情報などの交通情報を文字、イラスト、地図などの図柄で提供する装置である。情報板の種類には、フリーパターン、マルチパターン、セミフリーパターン、小型文字情報板、小型旅行時間情報板などがある。例を図 2.5 に示す。



フリーパターン式情報板



マルチパターン式情報板



小型文字情報板



小型旅行時間情報板

図 2.5 交通情報板の例

2.1.6 プローブデータ

交通管制システムは、前述したように車両感知器の情報を通じて交通状況を把握し、その状況に応じて情報提供や信号制御を実施するものであり、車両感知器で計測される情報は交通管理機能の全ての基礎となっている。特に、主要機能の一つである情報提供は、都市街路を中心として渋滞および旅行時間情報（以下、交通情報）をコアコンテンツとして位置づけ、VICsを通じた提供により利用者（ドライバー）の利便性に大きく貢献してきた。カーナビゲーション車載機の普及により、交通情報生成の対象エリアの更なる広範化、精度向上が求められているが、これに対応するためには一層の車両感知器整備が必要である。しかし、第1章でも述べたように昨今の社会情勢では潤沢な車両感知器の整備は難しいだけでなく、これまで整備された膨大な車両感知器の運用維持も負担となるため、現在の提供レベル維持さえも窮する事態となりつつあり、現行の仕組みのままでは広範化や精度向上のニーズに応えていくことは極めて難しい。

一方、交通状況を把握するための技術に着目すると、近年車両の走行状況を用いるアプローチが活発化している。具体的には、緯度経度等の走行状況が蓄積可能な車載機を搭載したプローブカーを走行させ、その蓄積データ（以下、プローブデータ）を収集するというものである。プローブデータ活用のシステムイメージを図 2.6 に示す。

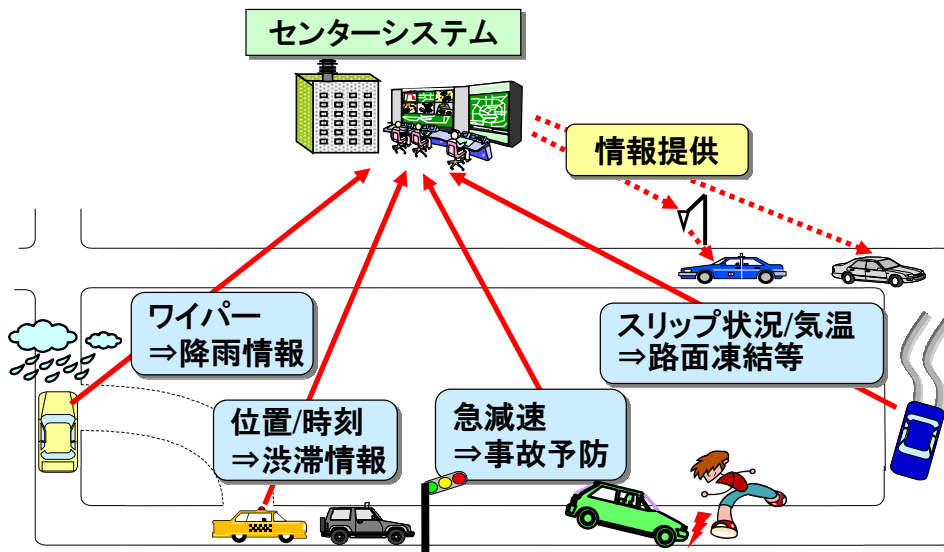


図 2.6 プローブデータ活用のシステムイメージ

この仕組みを用いることで、自動車メーカーを中心とした民間企業による交通情報センター（テレマティクスセンター）による交通情報提供サービスも運用されている[30]–[33]。これらは、日常的な状況に関する提供サービスであるが、東日本大震災による被災直後においては、複数の民間交通情報センターのプローブデータを集約し、その情報から通過可能な道路を判断し提供することで災害復旧支援活動等に大きく貢献し、プローブデータの有用性を知らしめることとなった。都道府県警察で整備する交通管制システムにおいても、2009年度より光ビーコンから収集したプローブデータを活用したモデル事業を実施し、車両感知器の整備されていない地域への対策を中心として有効な活用方法を策定および検証してきた。さらに、2013年

度からプローブデータ受信を標準実装した光ビーコンの整備が開始され、プローブデータを格納するアップリンクのデータ容量が倍増されるとともに、収集状況の大幅な向上が期待されている。光ビーコンから取得されるプローブデータの概要を図 2.7 に示す[34]。

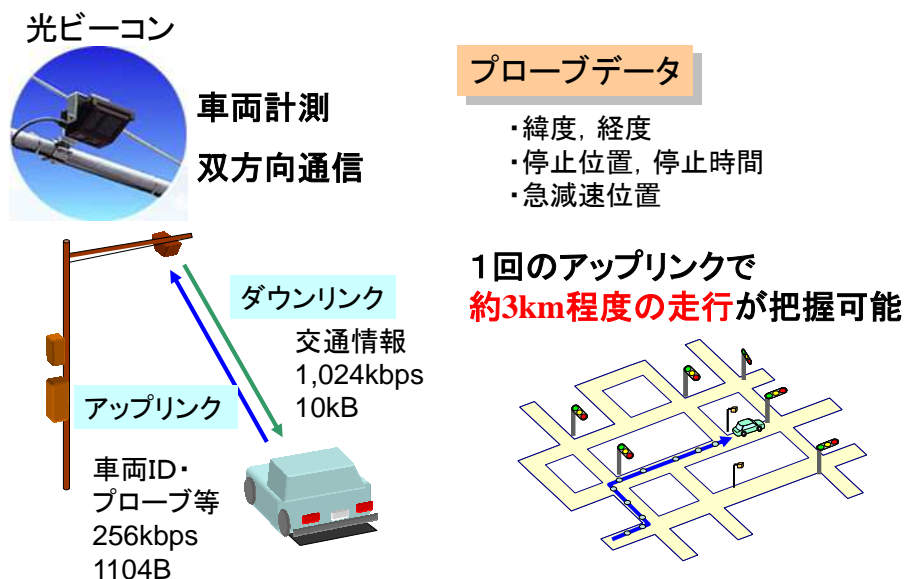


図 2.7 光ビーコンから取得されるプローブデータ

2.2 基本要素

本項では、交通信号表示、制御パラメータなど、交通信号制御を表現するための基本的な用語の定義を示す[35]。なお、本章の以降の部分においては、交通信号における各種事項について、その定義や考え方を読者に正しく伝えるため、文献[36]における本研究に関する箇所を再掲する。

2.2.1 交通信号表示

交通信号表示のタイミングは、信号現示およびステップ（階梯）により決定される。

(1) 信号現示

信号現示とは、1つの交差点において、ある一組の交通流に対して同時に割り当てられている通行権、またはその通行権が与えられている時間帯のことをいう。図 2.8 は、四枝交差点（標準的な十字交差点）における現示の例を示す。実線矢印は通行権が付与された車両の動線、破線矢印は通行権が与えられた歩行者の動線を表す。この例では、主道路の右折車のために右折専用の現示 2 が付加されているが、一般には現示 1 と現示 3 を交互に表示する 2 現示が標準的である。

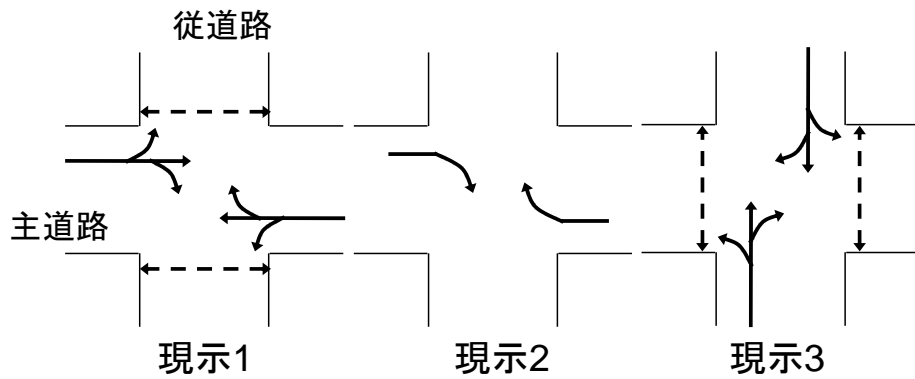


図 2.8 信号現示の例

(2) ステップ (階梯)

ステップ (階梯) とは、一つの交差点における信号表示の切り替え最小単位であり、全灯器の表示状態の組合せを規定したものである。歩行者と車両の両方に対して同時に通行権を割り当てる一般的な信号現示では、1つの信号現示は歩行者青 (PG)、歩行者点滅 (PF)、歩行者赤・車両青 (PR)、黄 (Y)、全赤 (AR) の 5 ステップで構成される。また、信号制御パラメータの変動と関連して、ステップには割り当てられる時間が変動する可変ステップ (主に青時間) と、黄や赤のように常時一定の時間が割り当てられる固定ステップがある。図 2.9 に標準的な 2 現示の現示階梯図および信号灯器配置を示す。

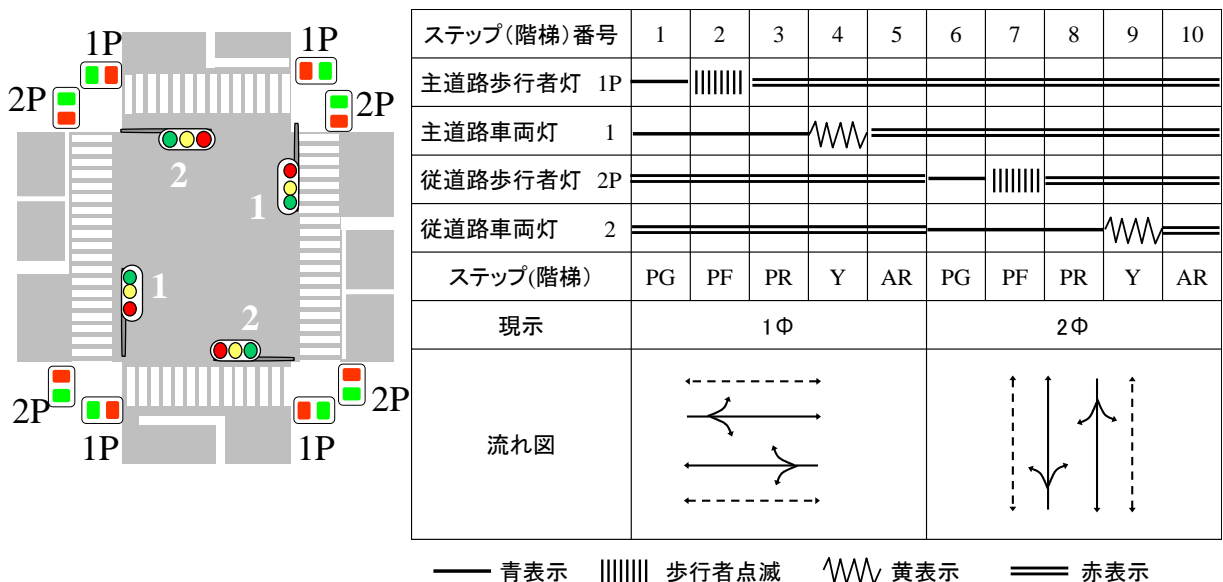


図 2.9 一般的な信号灯器配置と現示階梯図

(出典：文献[36] 図 4.1.1)

2.2.2 制御パラメータ

信号制御パラメータには、サイクル長、スプリット、オフセットがある。

(1) サイクル長

信号表示が一巡する時間をサイクル長という。具体的には、ある青の表示開始から、同じ青が再び表示されるまでの時間で、通常 [秒] で表す。交通需要が多いときはサイクル長は大きい値を、少ないときは小さい値を使用する。

(2) スプリット

スプリットとは、各現示に割り当てられる時間の長さのサイクル長に対する割合である。一般には、百分率あるいは割合で表す。通常は、信号の実際の青時間ではなく、有効に使われる青時間の長さである「有効青時間」をサイクル長で割った値を用いる。各現示の有効青時間の総和は、サイクル長から各現示切り替り時の損失時間の総和は1よりも小さくなる。このスプリットを青時間スプリットという場合もある。また、青時間と損失時間の和のサイクル長に対する割合を現示スプリットという。これらのスプリットの総和は常に1になる。交通管制システムでは現示スプリットが使用されている。図 2.10 に図 2.8 で示される 3 現示交差点を例にしたサイクル長とスプリットを示す。

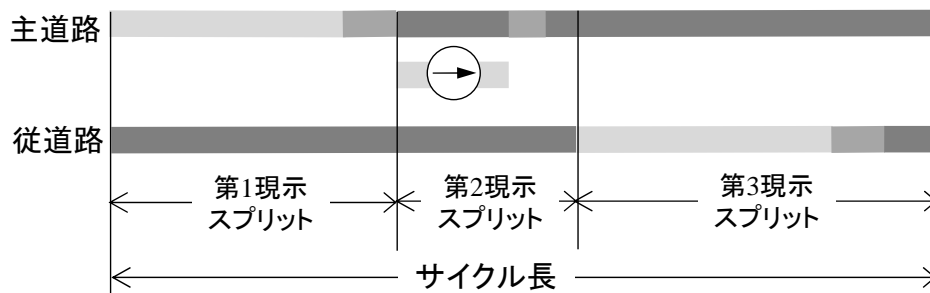


図 2.10 サイクル長とスプリット

(3) オフセット

隣接する交差点を相互に連動させて制御（系統制御）するために、信号表示のタイミングをずらすためのパラメータである。この表示タイミングのずれをオフセットという。

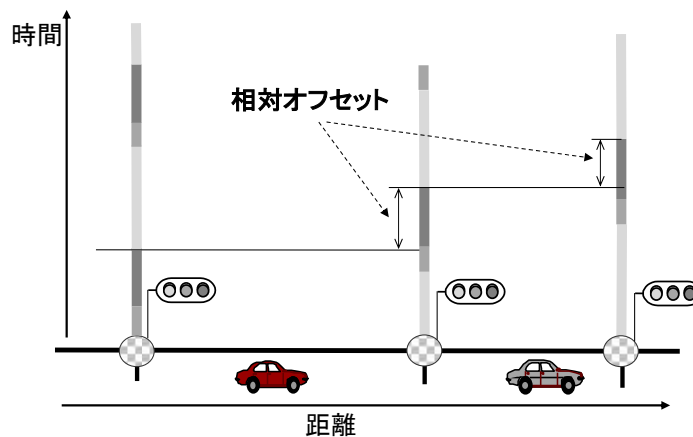


図 2.11 相対オフセットの例

複数の信号制御機群に対して共通な基準点から主道路青表示の開始点までのずれを絶対オフセットという。また、隣接交差点間の同一方向の青表示開始点のずれを相対オフセットといい、いずれも時間（秒）またはサイクル長に対する百分率で表す。図 2.11 に相対オフセットの例を示す。

2.2.3 飽和交通流率

飽和交通流率とは、交差点流入部において、交通需要が十分に存在する状態で、単位時間・一車線当りに停止線を通り得る最大の車両数である。通常は青 1 時間当たりの通過台数で表される [台/青 1 時間]。直進車線、右折専用車線など、交通流の動線が異なると飽和交通流率の値は異なり、また車線幅員や大型車混入率など道路・交通状況によっても異なってくる。

2.2.4 需要率

需要率とは、設計交通量（交差点や信号制御の設計条件として与えられる交通需要の交通流率）を飽和交通流率で除した値である。その交通量を非飽和状態で捌くためには、需要率と等しいスプリットが最小限必要である。

需要率はさまざまな単位に対して定義され、信号制御設計時に活用されている。各現示に対しては「現示の需要率」を定義でき、これは各現示において通行権を付与された各流入路の需要率のうち最大の需要率を「現示の需要率」とする。すなわち、同時に流れる交通のうちで最も長い有効青時間を必要とする流入路の需要率である。「交差点の需要率」とは、各現示の需要率の合計値で、これが 1 を超えるとどのように信号制御しても設計交通量を捌くことができず捌け残りが生じる。この状況を過飽和状態と呼んでいる。

図 2.12 は、2 現示の四枝交差点の例で、流入部 i の交通量を q_i 、飽和交通流率を s_i として、現示 j の需要率 λ_j と交差点の需要率 λ を求めた例である。

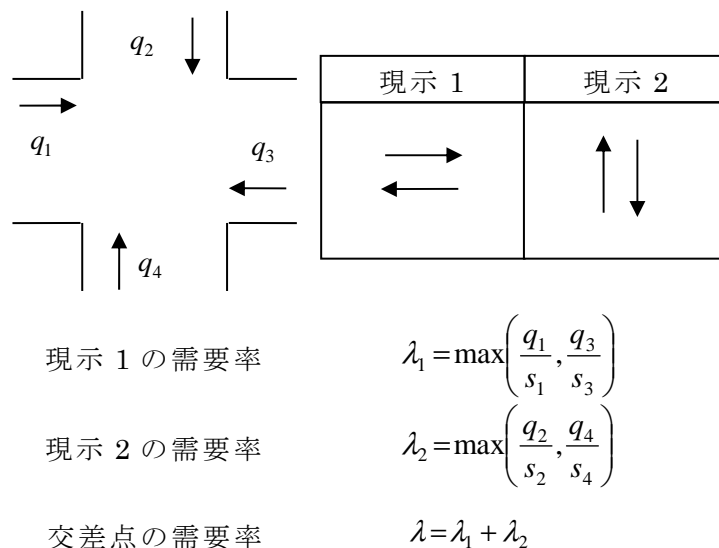


図 2.12 現示と需要率の例

(出典：文献[36] 図 2.1.6)

2.2.5 信号制御の評価指標

交通信号制御は、導入当初は安全を目的として全国展開されたが、高度成長により交通需要が急激に増加すると交通処理の効率性も重要な要素となった。このような観点から交通処理能力を定量的に評価する必要がある。以下に、代表的な評価指標について概説する。

(1) 遅れ時間

信号による遅れ時間とは、信号がなかったと仮定した場合の対象とする区間の旅行時間と実際の旅行時間との差である。交通需要が交通容量より小さい場合でも、赤時間中に交通が到着するかぎり「遅れ」は生じる。

図 2.13 は、交差点の一つの流入路の停止線における到着する累積交通量（交通需要） A と流出する累積交通量 D の時間変化を単純化および模式化した例である。赤時間では、流出交通流率が 0 なので、曲線（折線） D は横軸に平行となる。 A と D の縦軸における差は、その時点での信号待ち行列台数を表し、 A と D の横軸における差は個々の車両がこの信号待ちによって被る遅れ時間の長さを表している。青開始後に、信号待ち車両は飽和交通流率 s （曲線 D の傾き）で流れ始めるものとする。ここで青時間中に A と D が交わると、以降の流出累積交通量 D は A に一致して重なった曲線となる。一方、青表示終了までに曲線 A と D が交わらない場合は、青表示終了時に信号待ち行列の捌け残りが生じる。この時、交通需要は交通容量を超過しており、これを過飽和状態（交通渋滞）という。逆に交通需要が交通容量以下の状態を非飽和状態という。曲線 A と D が囲む面積は、個々の車両の遅れ時間の和を取ったものを意味し、これを「総遅れ時間」という。

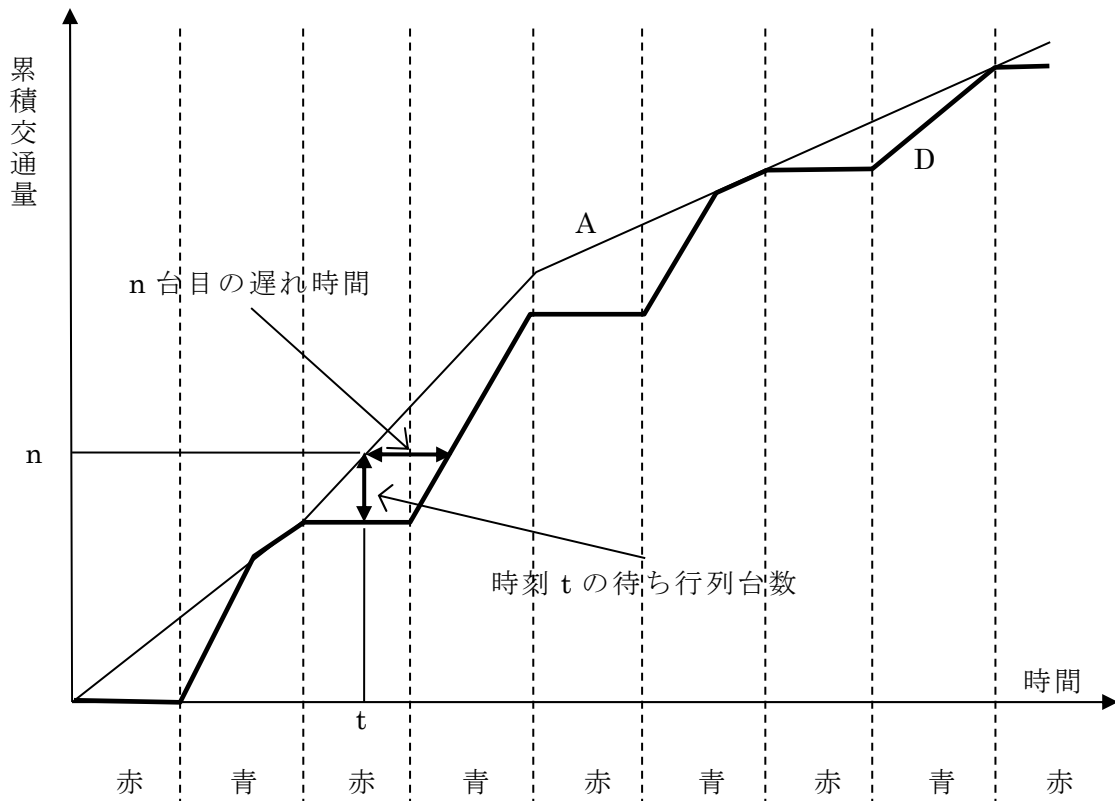


図 2.13 信号による待ち行列と遅れ時間

(出典：文献[36] 図 2.1.3)

遅れ時間は、道路利用者にとって交通による（負の）便益を表す直接的指標として最も普遍的なものである。そのため、信号制御の目的関数として、また1交差点の信号制御や路線系統制御／面制御の効率性を表す尺度として広く用いられている。遅れ時間には、総遅れ時間の他に1台当たりの平均遅れ時間もあり、これは個々の車両に対するサービス水準の評価指標としての意味がある。たとえば、1交差点の異なる流入路間のサービス水準の公平性の評価には、平均遅れ時間の格差を用いることができる。一方、信号制御による交通運用状態を社会的に評価するには、総遅れ時間を用いる必要がある。

これまで述べてきたように、遅れ時間は信号制御評価の理想的な指標と考えられているが、遅れを全くなしに走行した場合を推定することは困難であり、遅れ時間を直接的かつ正確に実測することは難しい。このため、代替指標として旅行時間を活用する場合も多い。旅行時間は、ある区間を移動するのに要した時間で、停止等の遅れ時間を含むものであり、試験車走行法などにより直接計測が容易である。旅行時間は、路線全体または比較的長い区間の交通状況を把握することに適している。信号制御の評価においては、ある制御の導入前後の旅行時間の差、すなわち遅れ時間の差を時間価値で貨幣換算することで、その制御の導入の便益評価をすることができる。

(2) 停止回数

停止回数は、特定区間を走行した時、信号により停止した回数をいう。遅れ時間は直接的な時間便益の評価指標であるが、大気環境影響を考慮すれば自動車排出ガス量は停止回数に大きく依存する。また、停止回数はオフセットの適否によって変化するので、路線系統制御効果の尺度となり得る。こうした観点から、停止回数についても信号制御の評価指標として考慮する必要がある。

(3) 交通処理量

交通処理量は、実際の道路条件（流入路の形状、幅員、勾配等）、交通条件（車種構成、右左折車混入率、バス停の位置、駐車車両等）および制御条件のもとで、一定時間内に流入路の停止線を通り過ぎることができる車両数であり、その最大値は過飽和交差点における交通運用状態の評価指標として有用である。交通処理量を考える場合は、交差点全体よりも流入路毎あるいは交通の方向別に算定することが多い。

(4) 渋滞長と渋滞長時間

渋滞長とは、交通容量上のボトルネック（過飽和状態の流入部を持つ交差点または地点）の流入路に、過飽和状態で滞留している車列の長さである。信号交差点では、非飽和状態でも信号待ち行列は形成されるので、その場合の待ち行列とは区別する必要がある。

一定時間（通常は5分）ごとに集計された車両感知器の情報（占有率・速度）にもとづいて、過飽和状態とその時の渋滞長が推定される。また、渋滞長時間とは、ある時間範囲（12時間、1日等）における渋滞長の時間積分値であり、次式で表される。

$$LT = \sum_t l_t \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

ここに、 LT は渋滞長時間[km・時間]、 l_t は時刻 t における渋滞長[km]、 ΔT は計測時間間隔[時間]である。渋滞対策の事前・事後評価等において、渋滞の総量を表す指標には対象時間全体

の総遅れ時間を評価すべきであるが、前述したように遅れ時間は直接計測が難しいため、その代替として渋滞長時間もよく用いられる。本指標は、ボトルネック交差点、路線、地域などで集計されることがある。

2.3 制御方式の分類

信号制御方式を概念的に区分すると、制御対象の信号交差点間の関連性と制御パラメータの設定方式の2つの視点から分類できる[35]。

2.3.1 制御対象範囲による分類

制御対象における交差点数および空間的な構成から、地点制御、路線系統制御、面制御の3種類がある。

(1) 地点制御

信号交差点を単独で制御する方式である。

(2) 路線系統制御

一連の隣接する交差点を相互に連動させて制御する方式である。この方式の特徴は、系統制御する複数の信号に対して共通のサイクル長（系統の共通サイクル長）とオフセットを定めることである。

(3) 面制御

面的に広がる道路網に設置された多数の信号機を一括して制御する方式であり、路線系統制御を面的に拡大したものである。

2.3.2 制御パラメータ設定方式による分類

車両感知器の要否や制御パラメータの決定タイミングなどにより、制御パラメータ設定方式は、定周期制御（pre-timed control）、交通感应制御（actuated control）、交通順応制御（adaptive/responsive control）の3種類がある。

(1) 定周期制御

時間帯に応じてあらかじめ信号制御パラメータが設定される方式である。時間帯や曜日（平日、土曜、日祝）等に応じてあらかじめ作成、設定した信号制御パラメータの組合せ（プログラムと呼ぶ）の中から一つを選んで実施するものである。

(2) 交通感应制御

車両感知器を用いる制御で、信号制御機ごとに実行される方式である。短時間の交通需要の変化に対応して青表示の開始や終了時点を決め、その結果青の長さやサイクル長を変化させる。全現示をこのような感应式にしたものを全感应制御、一部の現示のみを対象にしたものを半感应制御と呼ぶ。

交通感应制御は、制御対象のステップにおいて最小青時間、最大青時間、および単位延長青

時間がそれぞれ設定される。一般的な設定では、青が表示されると最小青時間だけ無条件に表示され、その後は車両の感知があるごとに単位延長青時間（通常 3 秒程度）だけ青表示を継続していく。最大青時間経過後は、次のステップの灯器表示に移行する。

全感応制御は、全流入路を対象にしており、交通量があまり多くなくその変動が不規則な交差点、または時間帯に適している。

半感応制御は、従交通（相対的に交通量が少ない方向の交通）のみを対象とする方式である。この典型的なものとして、「簡易半感応」と呼ばれるものがある。これは、従道路（相対的に交通量が少ない道路）側を感応対象とし、車両感知器からの交通量に応じた最小限の青時間を従道路側へ与え、それ以外の時間は主道路側の青表示とするものである。

(3) 交通順応制御

路線系統制御／面制御される複数の交差点を対象に、制御パラメータ（サイクル長、スプリット、オフセット）を変化させる制御方式である。交通流の変動に対応した高度な路線系統制御／面制御ができるため、交通量の時間変動が大きく、かつ交通量も多く、高い交通処理効率が要求される道路に適用される。この方式には、プログラム選択制御とプログラム形成制御の 2 つの種類がある。

プログラム選択制御は、あらかじめ設定された複数の組合せ（プログラム）の中から、車両感知器の情報にもとづいてそのときの交通状況に最も適したものを選択するという方式である。

プログラム形成制御は、あらかじめ有限個の制御パラメータの組合せを設定するのではなく、車両感知器の情報にもとづいて、即時に制御パラメータあるいは信号表示の切替タイミングが決定される方式である。交通感応制御において感応対象となる現示の青時間は、一種のプログラム形成制御と捉えることもできる。

2.4 設計手順と考え方

交通信号制御における信号表示案の設計手順および制御表示を規定する各項目に関する基本的な考え方を示す[37]。

2.4.1 信号表示案の設計手順

信号制御機により交差する道路に対して適切な信号表示を実施するためには、交差点での交通需要の推計、現示案の作成、交通状況に適合する制御パラメータの設定を行うという一連の作業が必要になる。図 2.14 は、この一連の作業を示したものである。以下、それぞれの作業について概略を述べていく。

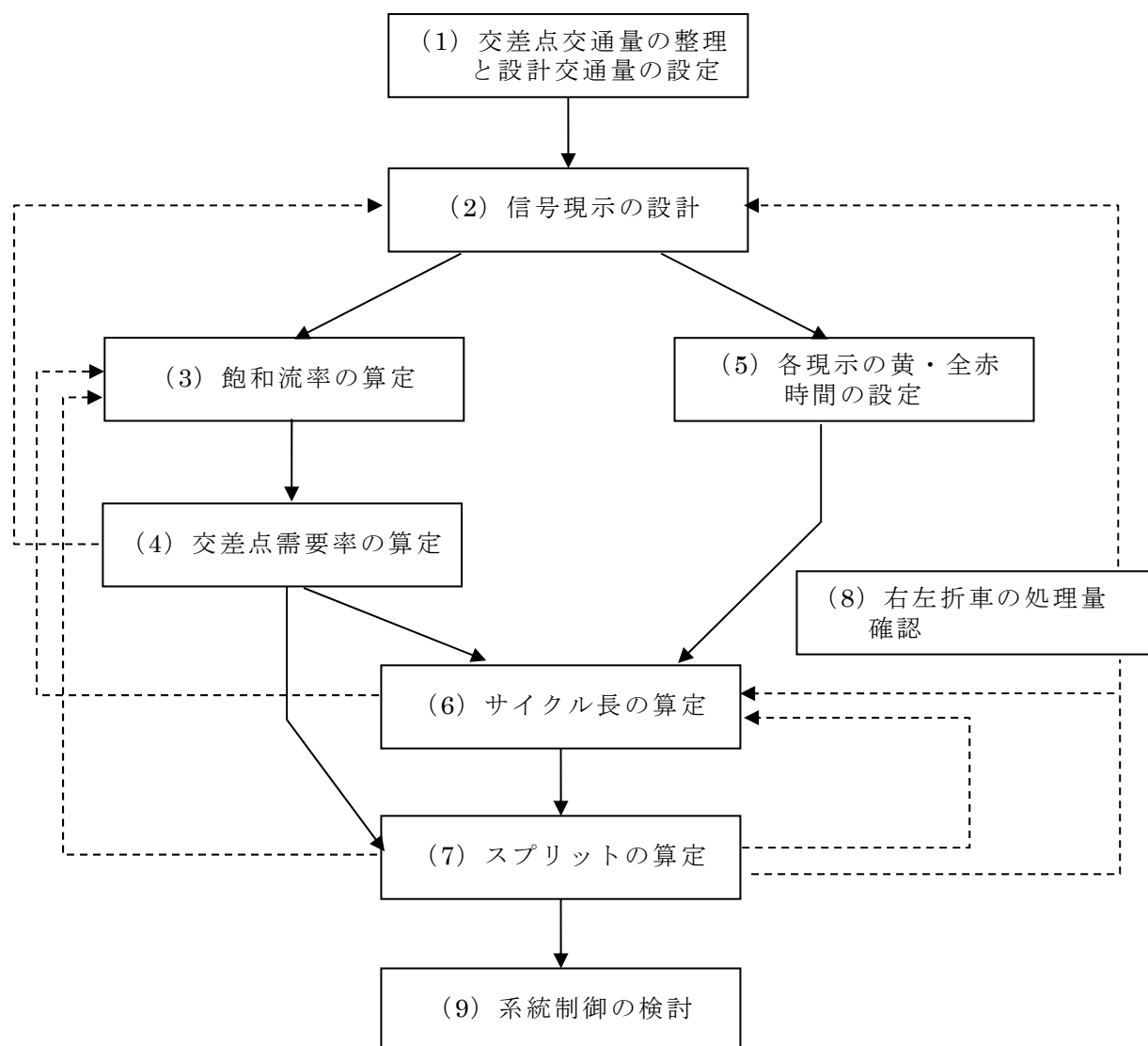


図 2.14 信号表示案の設計手順

(出典：文献[36] 図 3.1.1)

(1) 交差点交通量の整理と設計交通量の設定

交差点で処理すべき交通需要を把握するために、各流入路での交通需要量として設計交通量を推計する。

(2) 信号現示の設計

交通需要を処理するために信号現示を設計する。信号現示の設計では安全性と円滑性を配慮する必要があり、制御の性能を左右する重要な事項である。

(3) 飽和交通流率の算定

飽和交通流率は前述したように、単位時間あたりに処理することができる交通量の最大値である。信号現示案に従って、各流入路の飽和交通流率を推定する。

(4) 交差点の需要率の算定

需要率は交通需要を飽和交通流率で除したものである。需要率の計算では、まず流入路ごと

に行い、同一現示で通行権が付与された流入路の中で、最も需要率の大きい流入路における需要率をその現示の需要率とする。そして各現示の需要率の合計を交差点の需要率とする。

現示の切替時には、どの流入路にも通行権を付与しない全赤時間を設けたり、車両の発進遅れによる交通流率の低下を考慮する必要があるため、実務上は交差点の需要率が 0.9 を超える場合は設計された現示では交通需要を処理できない可能性が高い。このような場合は、現示設計をやり直す必要がある。

(5) 各現示の黄・全赤時間の設定

黄時間と全赤時間は、各流入路の停止線付近での車両の接近速度やクリアランス距離と呼ばれる交差点内の他の車両との交錯点を通過するために必要な距離に応じて、現示ごとに適切に設定しなくてはならない。

(6) サイクル長の算定

サイクル長は、交差点の需要率および各現示の黄・全赤時間の合計より算出される。

(7) スプリットの算定

スプリットは、交差点の需要率に対する各現示の需要率の比率を基礎値として算出される。なお、算出したスプリットから導出される青時間において歩行者の横断時間の確保がなされているか、という観点から確認を行い、横断時間として充分ではない場合はスプリットを見直す必要がある。

(8) 右左折車の処理量確認

サイクル長とスプリットなどにもとづき、右左折車の処理量が設計交通量を下回っていないか確認する。特に、右左折用付加車線を設置しながら、直進車と同一現示でのみ処理する場合は、需要率とは異なる観点での確認が必要である。

(9) 系統制御の検討

路線における車両の流動を円滑にするため、オフセットを適切に設定する。

このように 9 つの手順があるが、本研究で関連する幾つかの手順に関して詳細な説明を行う。

2.4.2 交差点交通量の整理と設計交通量の設定

(1) 交通量の整理

信号制御機の新設、更新に伴う信号表示案の検討においては、その交差点の交通量を把握しておく必要がある。自動車交通に関しては、昼 12 時間帯 (7:00~19:00) において、流入路毎に方向別 (直進、左折、右折)、車種別 (「大型車」と「その他」等) に一定時間毎 (たとえば 5 分間や 15 分間) に調査、もしくは推計 (新設道路など) して、整理する。なお、調査において留意したいのは交通渋滞が発生している場合である。信号表示案の検討においては、単なる通過交通量ではなく交通需要、すなわち通過しようとする交通量が必要である。よって、待ち行列の変化を計測しておき、平均車頭距離から待ち行列の変化台数を推計し、その台数と捌け交通量と合算した値を交通需要とする必要がある。

(2) 設計交通量の設定

交通量は、時間帯、日種 (平日、土曜、日祝) などによって異なるため、信号設定はそれぞれで異なった値にする必要がある。そのため、時間帯や日種に対応した設計交通量を用いて表示案を検討しなくてはならない。歩行者交通量についても、当然のことながら自動車交通量の時間帯と同一時間帯の値を用いる必要がある。

2.4.3 信号現示の設計

(1) 現示と現示方式

現示とは、前述したように一組の交通流に与える通行権であり、一つの青表示の組合せである。一方、現示方式とは、現示の組み方のことであり、交通状況に合わせて最も効率的な方式を選定する必要がある。

五差路交差点など、交差点形状が複雑になれば現示方式も複雑になり、現示数が増加する。現示数が増加すれば、現示切替時の損失時間が増加し、交差点全体の交通処理能力は低下する。よって、現示方式の決定は円滑化という観点からも重要であり、安全面とともに慎重に検討する必要がある。

(2) 現示設計の原則

(a) 設計手順

現示方式は、与えられた交差点の構造（幅員、車線数、交差角等）、交通条件（交通量、右左折率、大型車混入率等）、交差点の立地条件（周辺の交通関連施設等）を十分配慮したうえで、次の手順で設計する。

- i) 交通流線（各流入路からの流れの方向）を描き、互いに交差あるいは合流しない流線の組合せをつくり、それぞれを一つの現示の対象とする。
- ii) 上記の流線の組合せのうち、交差あるいは合流が許容できるものは、まとめて一つの現示を割り当てる。
- iii) 一つの交通流線に対して 2 つ以上の現示を与える場合には、それらの現示は時間的に連続していることが望ましい。
- iv) 主道路、従道路の順に現示の順序を決める。
- v) 総合的に再検討して、必要な修正を行う。

なお、個々の信号表示については、次に示す原則に従って、安全面の考慮を必要がある。

(b) 車両用信号の表示

- i) 同一流線に対して、青、黄、赤、黄点滅、赤点滅のうち 2 つ以上を同時に表示しないこと。ただし、青矢印表示の場合は赤と同時に表示すること。
- ii) 青信号から赤信号への切替時には黄信号を挿入すること。
- iii) 青矢印信号から赤信号への切替時には原則として黄信号を挿入すること。
- iv) 赤信号から青信号、または赤信号から青矢印信号への切替時には黄信号を挿入しないこと。
- v) 青矢印信号によって通行権を与える場合には、原則として他の交通流線との交差が生じないようにすること。
- vi) 青矢印信号を他の流線に対する赤点滅または黄色点滅と同時に表示しないこと。
- vii) 交差する 2 つ以上の交通流線に対して同時に青信号または黄信号、黄点滅信号の表示をしないこと。

(c) 歩行者用信号の表示

- i) 同一横断歩道に対して、青信号または青点滅信号と赤信号を同時に表示しないこと。
- ii) 青信号から赤信号への切替時に青点滅信号を挿入すること。
- iii) 赤信号から青信号への切替時に青点滅信号を挿入しないこと。
- iv) 車両信号が故障等で点滅制御を行っている場合には滅灯にすること。

(d) 路面電車信号の表示

黄矢印信号によって通行権を与えられる路面電車は他の交通と交錯することがないこと。

(3) 標準二現示方式

標準的な三枝または十字交差点では、主に歩行者と右折交通の処理方法によって現示の組合せが決まる。歩行者や右折交通量が少なく、交差点需要率が小さい場合には二現示で運用することが一般的である。

(4) 多現示方式

(a) 多現示方式の必要性

多現示方式とは3つ以上の現示による制御方式をいう。交通流線が交錯する場合、互いの交通需要が多いと同一現示で通行権を与えることが交通処理のうえで困難になるので、現示数を増やすことが必要になる。特に、流入路に右折や左折など進行方向ごとに専用車線を付加できる場合には、青矢印信号による方向別の信号表示が可能となる。これにより、現示設計の自由度が広がり、交通流に応じた信号現示の検討が可能となる。以下では、具体的な幾つかの多現示方式について、設計の考え方を示す。

(b) 時差式信号現示方式

時差式信号現示とは、右折交通流の多い交差点において、同一現示に含まれる交通流の一部に対して、他の部分の交通流よりも早く、または遅く青信号を表示する（青丸表示）方式である。時差式信号現示方式は、右折専用車線が設定できない交差点や右折専用車線の有無にかかわらず右折および直進の交通需要がともに多い交差点への適用が有効である。

図 2.15 に示すように、時差式信号現示を適用する場合については、以下の事項について配慮する。

1) 青丸表示による早出し方式の禁止

図 2.15 の例では、A 方向からの右折が多く、同図 a)は、対向する A および B の交通流に対する青信号の開始時刻を一致させているので適切であるが、同図 b)では、1Φの A 方向からの右折車が 2Φの開始時点で B 方向からの対向直進車と錯綜する可能性があること、1Φの開始時点で、B 方向からの交通が信号無視となるフライングをする可能性があること、2Φにおいて A 方向からの右折交通には通行権を与えないことにしても、A 方向からの右折車が 1Φから継続して 2Φを利用する可能性が高いこと、などのため好ましくない。

2) 歩行者専用信号灯の設置

歩行者専用信号灯を必ず設置することとなっている。これは安全上、2Φで車両交通と歩行者交通とを完全に分離する必要があるためである。

3) その他実施上の留意事項

時差式信号現示で運用する場合には、青信号を短くする方向の流入交通に対して、終日の右折禁止実施をする。これは、右折時の運転者の一般的な習性として、1Φ終了後に B 方向から流入する信号が赤になれば、対向交通に対する青表示も変わったものとして右折発進してしまうためである。その結果、2Φで青丸表示がでる A 方向から直進進入す

る交通と B 方向から右折流入する交通とが衝突する危険が高くなってしまふ。右折禁止規制が困難で右折専用車線が確保できる場合は、右折専用現示（対象流入路の右折交通だけに通行権が付与される現示）で対応し、時差式信号現示方式は用いるべきではない。

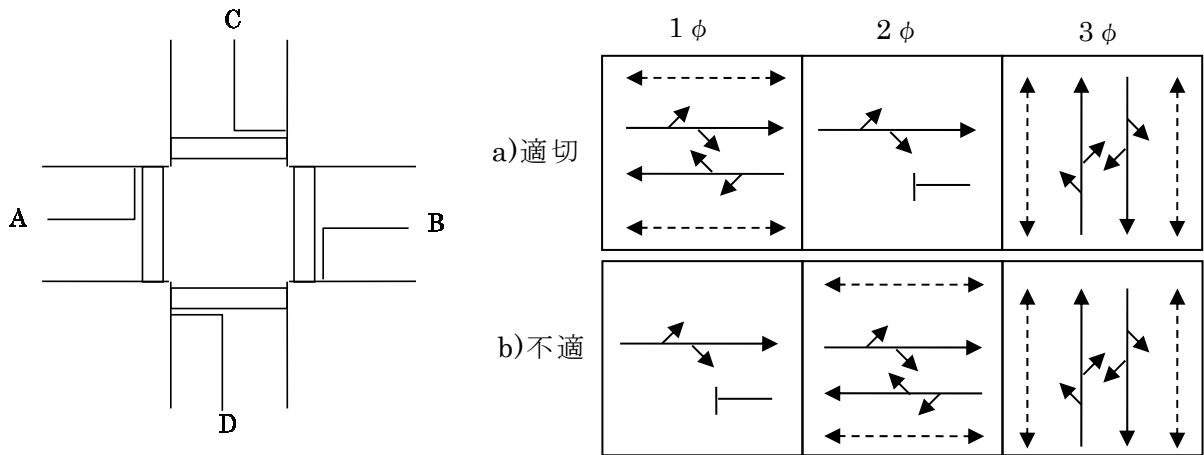


図 2.15 時差式信号現示の例
(出典：文献[36] 図 3.3.2)

(c) 右折専用現示方式

右折方向の青矢印表示等による右折専用現示は、右折者の安全かつ円滑な処理のために必要であるが、これを用いると現示数が増え、交差点全体での交通処理能力は低下する可能性がある。そのため、右折専用現示の適用可否は、右折交通量と対向直進交通量および両者の関係によって決められる。右折専用現示の設置基準として確立されたものはないが、目安として、対向直進交通量にかかわらず右折交通量が信号現示の切替時に処理できる台数以下の場合には右折専用現示を設ける必要はない。なお、右折専用現示を設定する必要がある場合には右折専用車線が付加できることが前提条件となる。流入路が 1 車線で右折専用車線が付加できない場合は、前述したように対向交通を右折禁止規制とし、時差式信号現示方式を検討する。図 2.16 に、右折専用現示の例を示す。

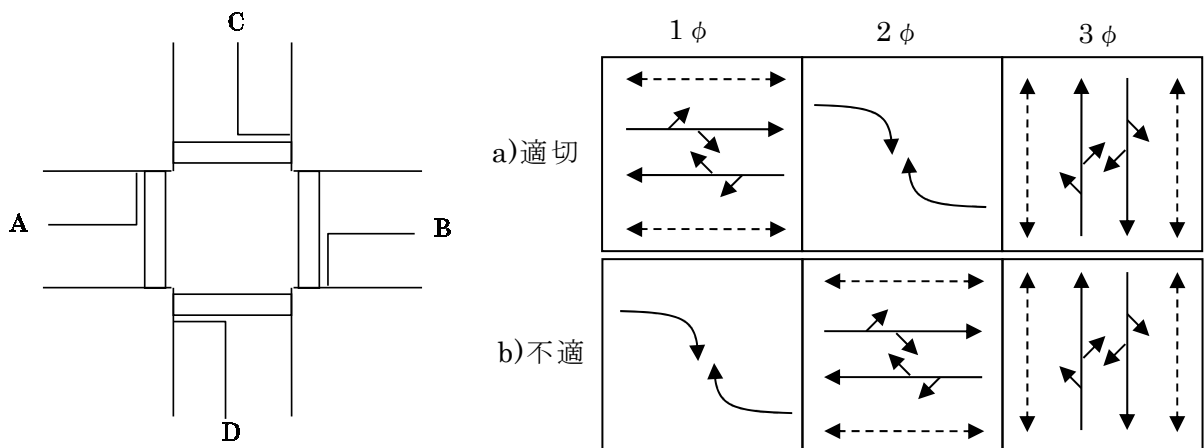


図 2.16 右折専用現示の例
(出典：文献[36] 図 3.3.4)

(d) 歩行者に配慮した現示方式

1) 歩行者用現示の基本的な条件

横断歩道が設置されている場合には、歩行者横断のための現示を確保しなければならない。横断歩行者に対する現示時間は、歩行速度を 1[m/秒]として横断歩道を完全に渡り切るのに必要な時間、すなわち横断歩道の長さ[m]と同じ秒数以上が必要である。

歩行者交通流は、これと交差する自動車交通流が低速の場合にのみ両者を同一現示で処理してもよい。よって、歩行者に関連する現示を設計する場合、交差点の形状などを考慮し、歩行者と自動車交通流の速度を十分に調査および検討する必要がある。なお、右左折車との錯綜が顕著で事故の危険性が高いなどの場合、歩行者専用現示を設ける必要がある。

特に、横断歩行者が多く、左折車両を十分に処理できない場合や右左折車との交錯で事故の危険性がある場合は、歩行者と車両とで通行権を付与する現示を分離することを検討する。以下に、こうした現示方式の例示する。

2) スクランブル現示

斜め横断の歩行者需要が多い交差点で、交差点全体の需要率が低く、交差点隅の歩行者滞留スペースに十分な余裕がある場合は、図 2.17 の 2Φ に示すスクランブル現示が有効である。

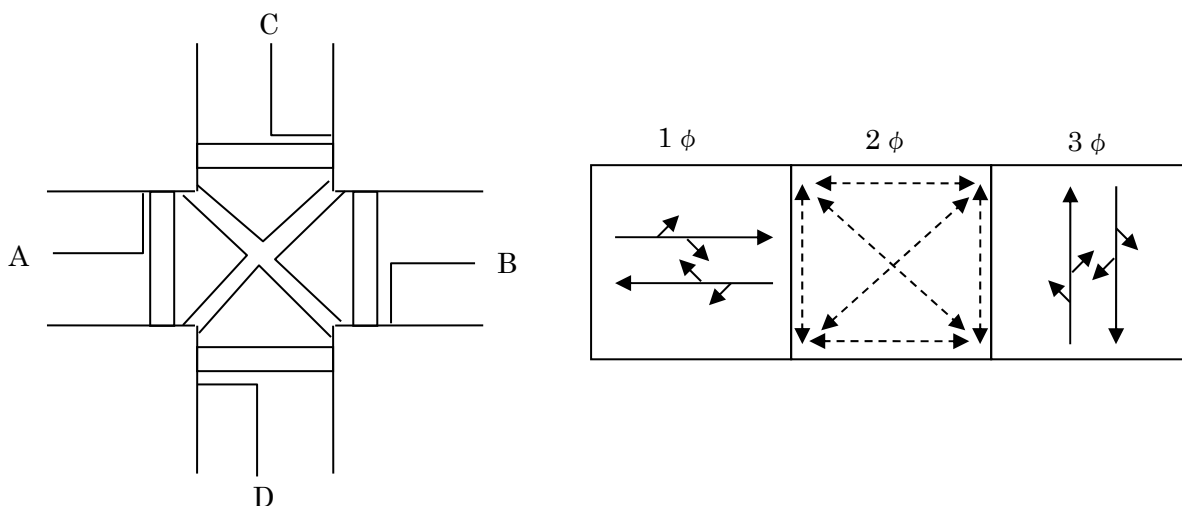


図 2.17 スクランブル現示の例

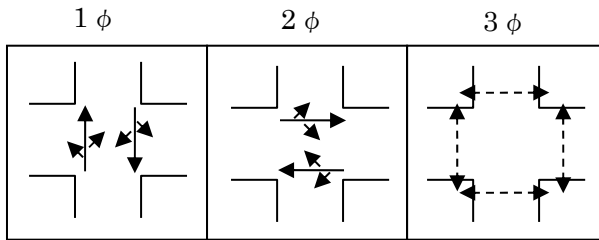
(出典：文献[36] 図 3.3.5)

3) 歩車分離式信号制御の例

歩車分離式信号制御とは、歩行者と車両の錯綜が全く生じない信号表示または歩行者と車両の交錯が少ない信号表示または現示方式をいい、分離形態により複数の方式がある。

交差点の右左折交通量および歩行者交通量が多く、右左折流出部における歩行者横断時の安全性向上および右左折車の交差点処理能力の改善のいずれかを図ることができる場合は導入を検討する。図 2.18 にその方式の幾つかを例示する。

歩行者専用現示方式



右左折車両分離方式

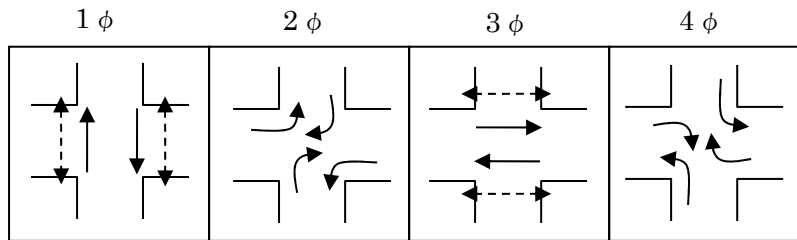


図 2.18 歩車分離式信号制御の例

4) 歩車分離にあたり考慮すべき条件

対象交差点が次のいずれかに該当する場合は、歩車分離式信号制御による効果と悪影響とを総合的に考慮することが必要である。

- i) 歩車分離式信号制御の導入により渋滞が悪化したり、または新たに渋滞が発生したりすることにより、交通の円滑性に著しい悪影響が生じる可能性がある場合
- ii) 歩車分離式信号制御の導入による信号待ち時間の増加で、歩行者や車両の信号無視を誘発する可能性がある場合

5) 歩車分離方式選定の考え方

歩車分離方式の選定にあたっては、次により最も適切な方式を選択すべきである。

- i) 横断歩道の位置ごとに、事故の発生またはその危険性が高い車両と歩行者の錯綜形態を分析し、危険性の高い歩行者と車両の交通流線を特定することにより当該流線の錯綜が生じない方式を選択する。たとえば、横断歩道において車両の右折時事故の危険性が高い場合には右折車両分離方式を採用する、などである。
- ii) 右左折車両分離方式では、右折および左折専用車線が必要になるなど、矢印信号に対応した専用車線が必要であるため、検討対象となる交差点の形状に応じた方式を用いる必要がある。

2.4.4 飽和交通流率の設定

現示方式案の設計が完了した後は、それぞれの現示の表示時間を決める必要がある。つまり、想定される交通状況に応じて適切な青時間および赤時間をバランス良く決める必要がある。

その際に重要になるのが、信号赤表示で待たされた車両が、青表示で流れる時の効率である。つまり、青表示中の単位時間にどれだけの台数の車両が処理されるかを適切に見積もらなければ

ばならない。この青表示単位時間の車両処理台数を前述したように飽和交通流率〔台／青 1 時間〕という。この飽和交通流率の値は、交通条件、道路条件などによって異なるほか、車両の大きさや地域特性によっても異なる。よって、飽和交通流率を推定するにあたって、可能な限り実測による調査にもとづくことが望ましい。

(1) 実測による飽和交通流率の推計方法

(a) 実測時の留意点

飽和交通流率の実測にあたり留意すべきことは、定義を満足するような「青表示の単位時間当たりの車両の通過台数」を正しく把握することである。通常、青表示に絶え間なく車両が到着して通過していく場合に、その通過した車両の台数を計測し、その台数をこの青時間で除すことで求められる。

車両の通過とは、流入部の停止線の通過を意味する。観測時に車両の停止線通過を捕捉するには、車両のどの部分が停止線を過ぎた時に通過とするか決めておく必要がある。一般的には、車両の先頭部を基準とすることが多い。

観測時間については、条件が良ければ信号 10 サイクル程度の観測で大きな変動がなく平均的な値が得られることもある。以下では、幾つか注意すべき点を述べる。

(b) 車線別に測定する

同じ信号現示で通行権が与えられる流入路に複数の車線がある場合は、車線別に飽和交通流率を求める。これは、一般に多車線で構成される流入路は、車線によって走行区分（右折、左折、直進）が異なるためである。進行方向によって車両の走行状況は異なるので、車線別に通過する交通処理台数を整理することで、流入路全体の交通処理効率を詳細に把握できる。

(c) 右左折車の取扱い

進行方向が異なる車が存在する車線では、各進行方向の車両台数の割合を記録しておく必要がある。右左折車両は直進車よりも走行速度が低下しやすいため、こうした車両が多く含まれると交通流率が低下するためである。

(d) 大型車の取扱い

大型車は普通乗用車と比較すると発進加速性能が低く、さらに車体の大きさに起因して、車両通過効率が悪い。よって、通過交通に大型車の占める割合を併せて記録しておくこと、飽和交通流率への影響を把握する上で有効である。

(2) 実測によらない飽和交通流率の推定方法

(a) 適用する場面

新設道路であるために飽和交通流率を実測できない場合、道路条件等が比較的似ている信号交差点を選出し、そこでの実測結果を参考にすることができる。もしくは、飽和交通流率の標準的な値から計算によって推定することもできる。以下では、計算により推計する方法を示す。なお、この算定方法は、暫定的な値を得るための方法である。したがって、道路の共用開始後に渋滞が常態化したような場合は、改めて実測により飽和交通流率を推定し、それにもとづいて速やかに信号パラメータの調整を図るべきである。

(b) 飽和交通流率の基本値の設定

飽和交通流率の基本値は、右折専用車線、左折専用車線、直進専用車線で異なり、それぞれ

れの値は表 2.3 に示すとおりとする。

飽和交通流率の基本値は、道路、交通条件が理想的な場合、すなわち、平坦で標準的な道路幅員で、横断歩行者等による進行の妨げがない場合において、同一方向の普通自動車 が 1 車線当たり青 1 時間当たり に通過し得る最大の車両台数を意味する。その単位は [pcu/青時間] である (pcu は Passenger Car Unit の略)。

表 2.3 信号交差点の飽和交通流率の基本値

(出典：文献[36] 表 3.4.1)

車線の種類	飽和交通流率 (pcu/青 1 時間)
直進車線	2,000
左折車線	1,800
右折車線	1,800

(c) 飽和交通流率算定の考え方

飽和交通流率は、表 2.3 で設定された基本値を諸要因により補正して求める。各種要因は、表 2.4 に示すように道路要因、交通要因、周辺要因の 3 つに大別される。各要因の影響は、基本値に対しての補正率で表現されている。これらの要因は、これまでの調査分析より、基本的には独立であるものとされる。このため、それぞれの要因が複合された影響は、各要因による補正率を相乗することで得られる。

$$\alpha = \alpha_w \times \alpha_G \times \alpha_T \times \dots$$

ここで、

α : 基本値に対する総合的な補正值

α_w : 車線幅員による補正值

α_G : 縦断勾配による補正值

α_T : 大型車混入率による補正值

である。

表 2.4 飽和交通流率に影響を及ぼす要因

(出典：文献[36] 表 3.4.2)

道路要因	流入部幅員 (車線幅員) 縦断勾配 交差点形状(交差角, 視認性)
交通要因	車種構成 (大型車, 二輪車等) 右折車, 左折車 対向直進車 横断歩行者
周辺要因	地域特性 (都市部, 地方部) 駐停車, バス停留所

(d) 各種要因の例

前述したように飽和交通流率へ影響を与える要因は多岐に渡るが、ここでは本研究と関連

するものを例として概説する.

1) 右折車混入

直進車だけでなく右折車も混入して利用する車線の飽和交通流率を求める補正率は、次式により与えられる.

$$\alpha_{RT} = \frac{100}{(100 - P_R) + P_R E_{RT}} \quad (2.2)$$

ここで,

α_{RT} : 右折車の混入による補正值

E_{RT} : 右折車の直進乗用車換算係数

P_R : 右折車混入率[%]

である.

式(2.2)の右折車の直進乗用車換算係数 E_{RT} は、右折する乗用車 1 台の通過に相当する直進乗用車の通過台数であり、この値は対向直進車の影響がある場合とない場合とで異なる.

対向直進車がない場合とは、対向する流入路が一方通行の入口である場合などに生じる. この条件下の換算係数 E_{RT} は、直進車線の飽和交通流率の基本値と右折車線の飽和交通流率の比で与えられ、次式となる.

$$E_{RT} = s_{SO} / s_{RO} = 2000 / 1800 \doteq 1.1 \quad (2.3)$$

ここで,

s_{SO} : 直進車線飽和交通流率基本値[pcu/青1時間]

s_{RO} : 右折車線飽和交通流率基本値[pcu/青1時間]

である.

一方、対向直進車の影響がある場合には、右折車は対向直進車の間隙（ギャップ）を利用して右折しなければならない. こうした右折車が混入すると、その車線の飽和交通流率は式(2.3)よりも低下する.

2) 左折車混入

直進車だけでなく左折車も混入して利用する車線の飽和交通流率を求める補正率は、右折車と同様に次式で与えられる.

$$\alpha_{LT} = \frac{100}{(100 - P_L) + P_L E_{LT}} \quad (2.4)$$

ここで,

α_{LT} : 左折車の混入による補正值

E_{LT} : 左折車の直進乗用車換算係数

P_L : 左折車混入率[%]

である.

左折の直進車乗用車換算係数 E_{LT} は、左折する乗用車 1 台の通過に相当する直進乗用車の通過台数であり、この値は、横断歩行者の影響がある場合とない場合で異なる.

横断歩行者の影響ない場合は、歩道橋が設定されて横断歩道がない場合などが考えられる. この条件下の E_{LT} は、直進車線の飽和交通流率の基本値と左折車線の飽和交通流率の基本値の比で与えられ、次式となる.

$$E_{LT} = s_{SO} / s_{LO} = 2000 / 1800 \doteq 1.1 \quad (2.5)$$

ここで,

s_{LO} : 左折車線飽和交通流率基本値[pcu/青1時間]

である。

一方、横断歩行者の影響がある場合には、左折車は横断歩行者の間隙を利用して左折しなければならない。このような左折車が存在すると、その車線の飽和交通流率は式(2.5)よりは低下する。

3) 横断歩行者の影響がある場合の左折車の直進乗用車換算係数

左折車は、横断歩行者の間隙を利用して通過するために通過流率が低下する。横断歩行者の間隙を利用して左折車が左折できる確率（左折確率）を f_L とすると、横断歩行者の影響がある場合の1時間当たりの左折車の交通処理量 c_L は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} c_L &= s_{LO} \times \frac{G_p}{C} \times f_L + s_{LO} \times \frac{G - G_p}{C} \\ &= s_{LO} \times \frac{G - G_p(1 - f_L)}{C} \text{ [台/時]} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、

C : サイクル長 [秒]

G : 対象現示の青時間 [秒]

G_p : 歩行者青+青点減時間 [秒]

である。

横断歩行者の影響がある場合の左折車の直進乗用車換算係数 E_{LT} は、1時間当たりの直進車乗用車の交通処理量 ($s_{SO} \times (G/C)$) と、式(2.6)から算出される c_L との比として次式で与えられる。

$$\begin{aligned} E_{LT} &= \frac{s_{SO} \times \frac{G}{C}}{s_{LO} \times \frac{G - G_p(1 - f_L)}{C}} \\ &= \frac{2000 \times \frac{G}{C}}{1800 \times \frac{G - G_p(1 - f_L)}{C}} \\ &= 1.1 \times \frac{G}{G - G_p(1 - f_L)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

左折確率 f_L は、既存研究により横断歩行者数、サイクル長、横断歩道長などに依存することがわかっている。ここで、表 2.5 に左折車混入による補正率 α_{LT} を示す。本表の歩行者の少ない場合の値は、横断歩行者の影響がほとんど無視できる状況下での観測結果から得られたものである。一方、歩行者が多い場合の値は、左折確率 f_L を 0.5、 $G - G_p$ を 5[秒] と設定して、式(2.4)および式(2.5)より算出したものである。

表 2.5 左折車混入による補正率 α_{LT}
 (出典：文献[36] 表 3.4.7)

左折車混入率 (%)	歩行者が 少ない場合	歩行者が多い場合				
		青時間[秒]				
		20	30	40	50	60
5	0.99	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95
10	0.97	0.93	0.92	0.91	0.91	0.91
15	0.96	0.90	0.88	0.87	0.87	0.87
20	0.94	0.87	0.85	0.84	0.83	0.83
25	0.93	0.84	0.82	0.81	0.80	0.80
30	0.91	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76
35	0.90	0.79	0.76	0.75	0.74	0.73
40	0.88	0.77	0.74	0.72	0.71	0.71
45	0.87	0.75	0.72	0.70	0.69	0.68
50	0.85	0.72	0.69	0.68	0.67	0.66

2.4.5 サイクル長の設定

(1) 交通容量の条件から制約されるサイクル長の最小値

現示方式が設定され、交差点の需要率と損失時間が計算されたら、これにもとづいて、その現示方式に対するサイクル長を設定する。

サイクル長を決定する上で、まず交通需要（設計交通量）が交通容量を超えてはならないという基本条件から、最小限必要となるサイクル長の最小値がある。その考え方を次に述べる。

前述した需要率の説明において、交差点需要率 λ が 1 を超えると設計交通量を処理することは不可能であることを示した。さらに詳細に検討すると、実際の信号表示の運用では車両の通行に有効に利用されない損失時間が存在するため、 λ は 1 を超えていなくても設計交通量を処理できない場合がある。車両の通行に有効に使える時間の割合は次式で与えられる。

$$U = \frac{C - L}{C} \quad (2.8)$$

ここで、

U : 青時間比率

C : サイクル長 [秒]

L : 損失時間 [秒]

である。

一方、交差点の需要率は、各現示に最小限必要な青時間比率を算出した後、その現示ごとの数値を合計したものを意味する。よって、需要率 λ が青時間比率 U よりも大きい場合には設計交通量を処理することができない。 U と λ の間には、次式の関係が成立しなければならない。

$$U \geq \lambda \quad (2.9)$$

式(2.8)と式(2.9)より、サイクル長が満たすべき条件として、次式が得られる。

$$C \geq \frac{L}{1 - \lambda} = C_{\min} \quad (2.10)$$

ここで、

C_{\min} : サイクル長の最小値 [秒]

である。

サイクル長を C_{\min} にすると、交差点需要率と青時間比率の総和が等しい状況で信号制御を行うことになる。これは、交通を処理するという観点からは余裕が全くない状況であり、各流入路へ到着する交通需要が少しでも変動があると、設計交通量よりも増えた分については捌け残りが生じて滞留が生じることになる。実際の交通流には、常に変動が生じているため、 C_{\min} は実用上の最小サイクルにはなり得ない。以降では、交通流到着のランダム性を考慮した実用的なサイクル長に関する考え方を 2 つ概説する。

(2) Webster の実験式

英国道路研究所の Webster の研究によると、交通流のランダム到着を仮定した場合に、総遅れを最小にするサイクル長 C_{opt} は、次式で与えられるものとしている。

$$C_{opt} = \frac{1.5L + 5}{1 - \lambda} \quad (2.11)$$

具体的には、Webster は交差点の総遅れを、まず一様到着と仮定した場合を定式化し、その式に待ち行列理論における M/G/1 のランダム性を仮定した遅れ時間の標準偏差を加え、さらには実験等でこれらの値を補正する項を加え、最終的には 3 つの項で表現している。この式は、サイクル長に関して凸であるため、総遅れ式のサイクル長に関する偏微分が 0 となるサイクル長を総遅れ最小となる最適サイクル長としている。式(2.11)は、現在の交通管制システムでも基本となる算出式であるが、導出時に孤立交差点を仮定していることもあり、信号交差点間隔が短い路線においては C_{opt} よりも短いサイクル長となる場合もあることに留意したい。

(3) 実用的なサイクル長

式(2.10)の C_{\min} よりも少し長い値となるサイクル長の実用値 C'_{\min} として、次式が提案されている。

$$C \geq \frac{L}{1 - (\lambda/0.9)} = C'_{\min} \quad (2.12)$$

式(2.12)におけるパラメータ値 ($=0.9$) は、文献[38], [39]の改訂前の版で初めて示されたものである。

(4) 実務上の決定プロセス

交差点においては交差点幾何構造や歩行者などの様々な要因があるが、実務上のサイクル長の決定プロセスとしては、式(2.11)および式(2.12)の算定値を目安に、右折車線の滞留台数や歩行者の横断歩行秒数の制約を考慮して最終的なサイクル長を決定している。特に、現示数が多い場合には、必要なサイクル長が長くなりやすい。こうした場合には、車線運用の見直しや交差点幾何構造の見直しなどの総合的な対策が必要となる場合もあることに留意したい。

2.4.6 スプリットの算定

(1) スプリット算定におけるクリアランス時間の取扱い

サイクル長にもとづいて、各現示の有効青時間長、すなわちスプリットを設定する。スプリットの定義は、青時間表示（厳密には有効青時間）のサイクル長に対する割合である。

(2) 需要率による比例配分

現示の有効青時間は、サイクル長から損失時間を差し引いたものを現示の需要率で比例配分して次式にもとづいて算出する。

$$G_i = (C - L)(\lambda_i / \lambda) \quad (2.13)$$

ここで、

G_i : 現示*i*の有効青時間長 [秒]

λ_i : 現示*i*の需要率

λ : 交差点の需要率 ($= \sum \lambda_i$)

C : サイクル長 [秒]

L : 損失時間 [秒]

である。ただし、実際には式(2.13)の計算結果を1秒単位に丸めたものを有効青時間 G_i とする。各現示のスプリット g_i は、有効青時間 G_i のサイクル長 C の比として次式により定義される。

$$g_i = G_i / C \quad (2.14)$$

また、各現示のスプリットの総和は、前述した青時間比率に等しいため、次式が成立する。

$$\sum g_i + L/C = 1 \quad (2.15)$$

(3) 需要率による比例配分の意義

ここでは、式(2.13)により現示の有効青時間長を、各現示の重要率に比例配分することの意義を説明する。簡単のため、標準2現示を例とする。式(2.13)より、現示1、現示2の有効青時間はそれぞれ次のように表現できる。

$$\begin{aligned} G_1 &= (C - L)(\lambda_1 / \lambda) \\ G_2 &= (C - L)(\lambda_2 / \lambda) \end{aligned} \quad (2.16)$$

これを、式(2.14)に代入し、各現示のスプリットを計算すると次の結果が得られる。

$$\begin{aligned} g_1 &= (1 - L/C)(\lambda_1 / \lambda) \\ g_2 &= (1 - L/C)(\lambda_2 / \lambda) \end{aligned} \quad (2.17)$$

式(2.17)を変形すると、次のようになる。

$$\lambda / (1 - L/C) = \lambda_1 / g_1 = \lambda_2 / g_2 \quad (2.18)$$

ここで、式(2.18)の左辺は現示によらず一定であり、このことは現示数によらず、任意の現示*i*に対して、 (λ_i / g_i) が常に一定 ($\lambda / (1 - L/C)$) となることを意味する。ここで、現示*i*の代表流入路（その現示で通行権の与えられる流入路の需要率の最大値を与える流入路）の交通需要を q_i 、飽和交通流率を s_i とすると、現示*i*の需要率は次式を満足する。

$$\lambda_i / g_i = q_i / (g_i \times s_i) \quad (2.19)$$

式(2.19)の右辺は、その現示の交通需要 q_i と交通容量 ($g_i \times s_i$) の比（需要容量比）を意味している。よって、式(2.13)で算出されたスプリットは、各現示の代表流入路の需要容量比を等しくするように通行権を配分していることに他ならない。

2.4.7 系統制御における基礎事項

(1) 系統制御の必要性

都市部においては、交通が集中するとともに道路網自体も密集化しているため、信号交差点の間隔が短く、かつ、そのような領域が面的な広がっている。これらの信号制御機を隣接する交差点と関連なく制御しても信号待ちによる時間損失等の望ましくない状況が生じる。このような事態を避けるため、隣接する信号制御機群を互いに関連付けて制御する系統制御を実施し、信号交差点に対して連続した流動を形成させることが求められる。

系統制御の設計では、前述した制御パラメータ設定の考え方のほかに、その系統制御としての設定に関する考え方が必要となる。その基礎事項について述べていく。

(2) 系統制御に必要な制御パラメータ

前述したように、系統制御特有の制御パラメータとしてオフセットがあり、系統制御の効果に大きな影響を及ぼす。このオフセットを確立するためには、1つの系統制御系（路線等）を構成する信号制御機群には共通のサイクル長を与える必要がある。

(3) オフセットとリンク遅れの関係

一般に、隣り合う2つの信号交差点間のリンクに生ずる遅れは、相対オフセットとサイクル長およびリンク間の往復旅行時間によって決まるとする研究成果があり、オフセット設定の考え方の基礎となっている。

いま、系統制御を確立する対象を路線とし、その路線は両方向通行で、かつ、その両方向の交通量が均衡しているものとする。このとき、往復所要旅行時間 T が共通サイクル長 C の整数倍($T = nC$)のとき、相対オフセットによってリンクの上下両方向合計の総遅れを最小化でき、系統効果を最も高めることができる。逆に、往復旅行時間がサイクル長の奇数倍の $1/2$ のとき、すなわち、 $T = (2n-1)C/2$ のとき、どのようなオフセットを確立してもリンクの総遅れはあまり変わらず、系統効果は最も低くなる。また、往復旅行時間がサイクル長 C の整数倍($T = nC$)のとき、リンクにおける遅れを最小にするオフセットは、 n が偶数であれば0%、 n が奇数のときは50%である。図2.19は、この結果を例解したものである。

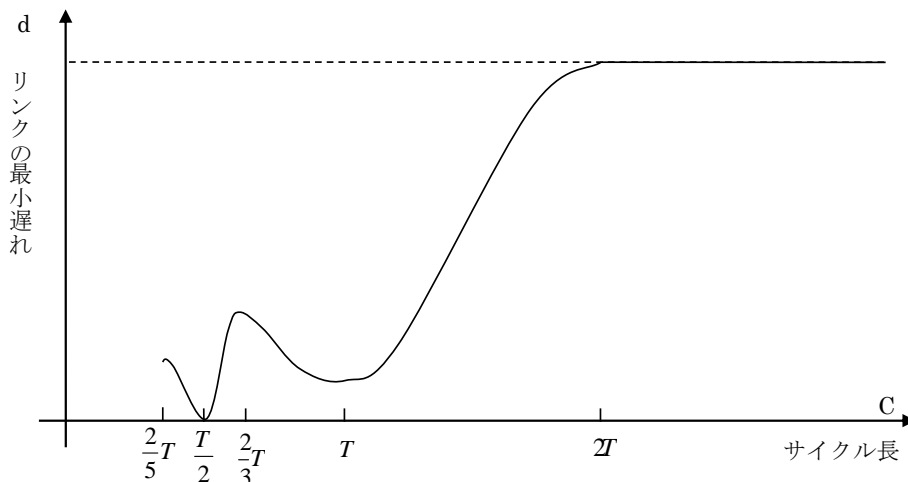


図 2.19 サイクル長と系統リンクの遅れとの関係

(出典：文献[36] 図 3.11.2)

(4) オフセットに関する基礎事項

(a) 基本オフセット

基本オフセットとは、一つのリンクについて交差点が飽和することなく一様な流れからなる単純な直進交通流を仮定した場合に、リンクの遅れを最小にする相対オフセットのことをいう。

(b) 平等オフセット方式と優先オフセット方式

上り、下りの両方向の交通に対してほぼ同等の系統効果を与えるようにオフセットを設定する方式を平等オフセットという。

一方、上り、下りの方向別の交通需要に差がある場合などにおいて、いずれか一方に対して優先的に高い系統効果を与えるようにオフセットを設定する方式を優先オフセット方式という。

完全優先オフセット方式は、一方向のみの系統効果を最大にし、対向方向の効果を完全に無視する方式である。これは一方通行道路の系統と同じであり、リンク長を系統速度で除した値をリンクの相対オフセットとすることにより導出される。

(c) 同時式オフセットと交互式オフセット

(3)で述べた結果から、平等オフセット方式の場合、基本オフセットは同時式オフセットあるいは交互式オフセットのいずれかとなる。同時式オフセットとは、相対オフセットがほぼ0、つまりリンク両端の信号がほぼ同時に青になるようなオフセットのことをいい、交互式オフセットとは、相対オフセットがほぼ50%、つまりリンク両端の信号がほぼ半周期ずれて青になるオフセットのことをいう。具体的には、往復旅行時間 T がサイクル長 C を用いて、表2.6のようにオフセットが設定される。

表 2.6 平等オフセット方式における基本オフセット

旅行時間とサイクル長の関係	適用オフセット
$0 < T \leq C/2$	同時式
$C/2 < T \leq 3C/2$	交互式
$3C/2 < T \leq 5C/2$	同時式

(d) 実務での設定検討

オフセットは系統制御における主要なパラメータであり、その系統制御の目的は、対象路線の遅れや停止回数を減らすことである。学術研究においては遅れや停止回数で評価を実施されているが、実測に多大な労力を要するために実務において遅れや停止回数の評価を実施するのは困難である。そこで、オフセットを実際に設定する際、スルーバンド幅を最大にするという考え方が用いられている。

スルーバンドとは、時間－距離図上において表現される車両の走行軌跡を描いた時、すべての交差点を青信号で通すことのできる時間の幅で、通過帯幅とも呼ばれている。スルーバンドが大きければ、直感的に車両が通過しやすいと考えられるため、オフセットの設計においてはスルーバンドを評価することで実施されており、今なお中心的な評価項目となっている。その例を図2.20に示す

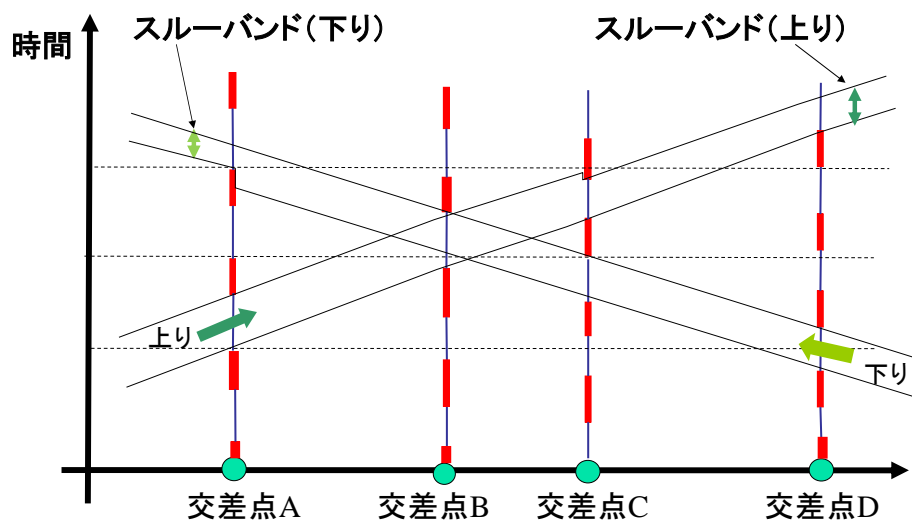


図 2.20 スルーバンド（通過帯幅）の例

2.5 一般的な交通信号制御方式

ここでは、交通管制システムで一般的に用いられている交通順応制御について説明する[40]. 図 2.21 に、処理手順の概要およびそのイメージを示す.

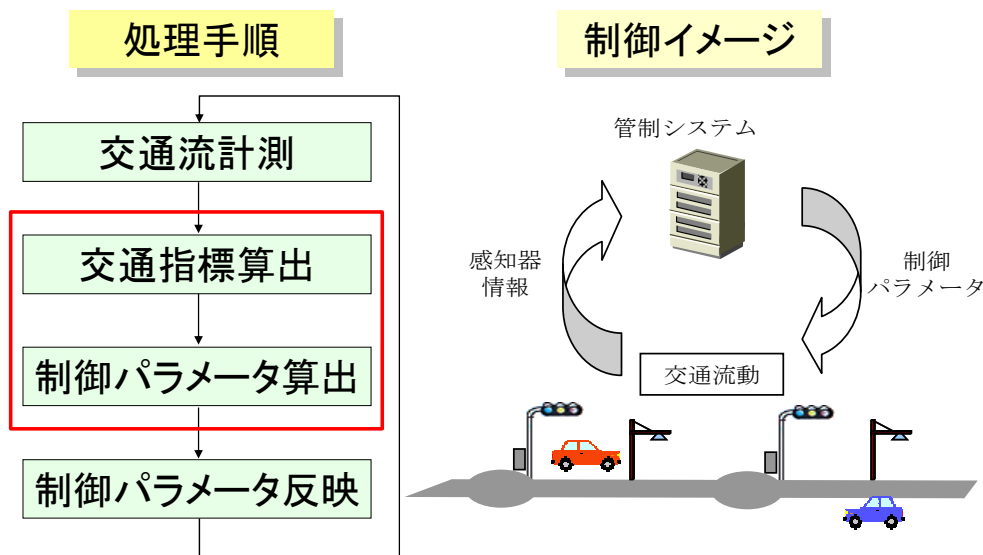


図 2.21 交通順応制御の概要

交通順応制御は、前述したようにプログラム選択制御およびプログラム形成制御に分類されるが、交通管制システムにおいては、それぞれで代表的な手順が知られている。まず 2 つの方式で共通な事項であるサブエリアという我が国特有の概念について説明する。その後、実際の制御方式に関する手順を述べる。交通管制システムにおける交通順応制御の機能は、図 2.21 の枠線部分の処理で構成されているため、本稿においても、交通指標算出および制御パラメータ

算出という順で説明を行う。

2.5.1 サブエリア

系統制御は、前述したようにオフセットを確立するため、対象路線内の信号機群を共通サイクル長で制御する必要がある。この同一サイクル長で制御する交差点群をサブエリアと呼んでいる。サブエリアは、どのような交通状況においても常に同一サイクル長で制御すべきである交差点群である。サブエリアには、必ず1つ以上の重要交差点が指定され、この周辺に設置された車両感知器の計測情報をもとに制御パラメータが算出される。重要交差点ではない交差点を一般交差点という。図 2.22 にサブエリアの構成例を示す。サブエリアは、交通管制システムにおいては静的な設定であり、サイクル長算出における最小単位である。サブエリアごとにサイクル長を算出した後、隣接するサブエリア間でそのサイクル長を比較し、その差が設定された閾値より小さい場合、これらは一つのサブエリアとして統合され、大きい方のサイクル長で制御される。統合後のサブエリアは、制御エリアと呼ばれることもある。

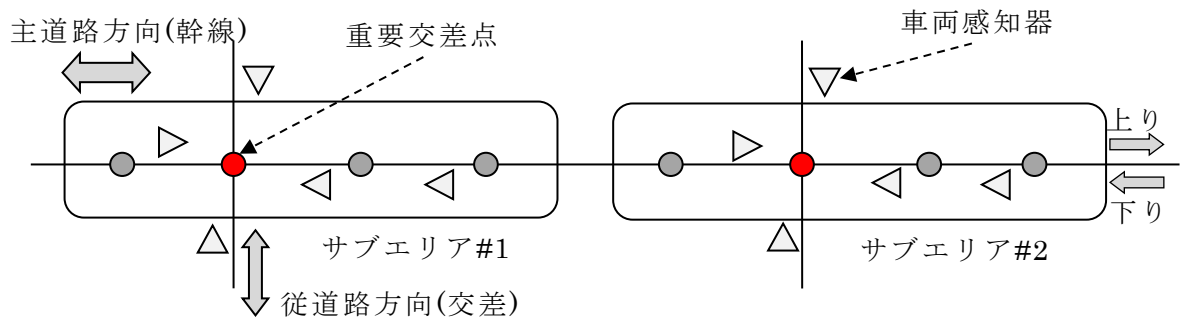


図 2.22 サブエリアの構成例

2.5.2 プログラム選択制御

交通流動を類型化し、それぞれに適した制御パラメータをあらかじめ設計しておき、車両感知器の計測情報をもとに類型化した交通流動の中から合致するものを選び出すことで制御パラメータを決定するという制御方式である。交通管制システムの全国展開が図られた 1970 年代以降、いまなお活用されている方式であり、パターン制御方式と呼ばれることもある。

(1) 交通指標算出

本方式では、交通状態量と呼ばれる指標値を制御パラメータ選択に用いている。式(2.20)に示すような交通量と占有率の加重和もしくは式(2.21)に示す交通量と占有率をそれぞれ基準値で正規化した値の大きい方で定義される。

$$TI_1 = \alpha \cdot Q + \beta \cdot O \quad (2.20)$$

$$TI_2 = \max(Q/Q', O/O') \quad (2.21)$$

ここで、

Q : 計測交通量, Q' : 基準交通量 (定数)

O : 計測占有率, O' : 基準占有率 (定数)

α, β : $\alpha + \beta = 1$ を満たす正の定数

である。

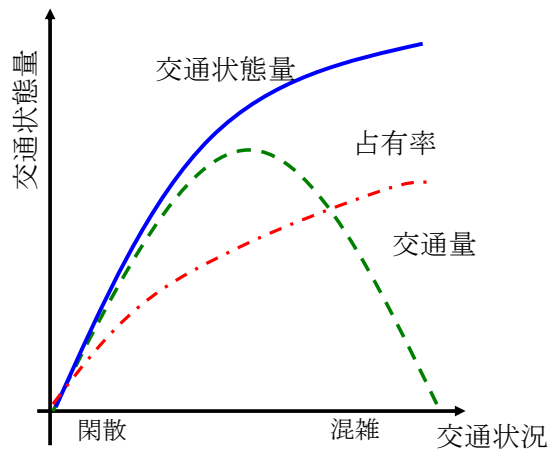


図 2.23 交通状態量の算出イメージ

これらの指標では、交通量は交通容量以上には増えないが、混雑が進展するにつれて占有率が増加するという特性を利用して閑散から混雑そして最終的には渋滞という状況を単調増加で表現できる指標となっている。そのイメージを図 2.23 に示す。

(2) 制御パラメータ算出

交通状態量を算出した後、図 2.24 に示す手順で制御パラメータ算出が実施される。

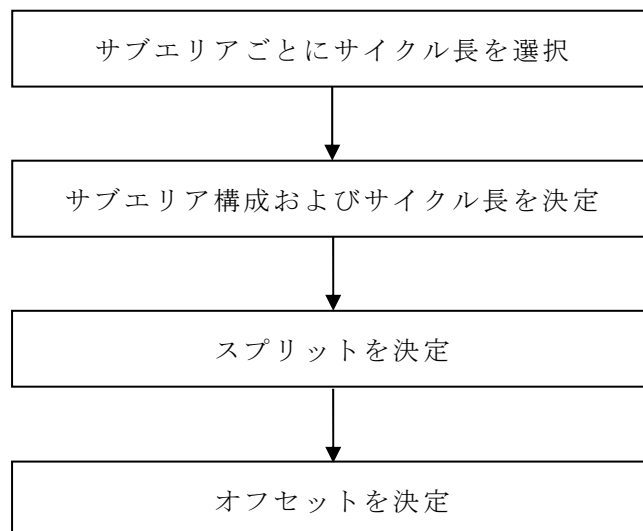


図 2.24 パターン制御の制御パラメータ決定フロー

以下、各手順について説明する。

(a) サイクル長の選択 (サブエリア)

サブエリア内の車両感知器それぞれの交通状態量を算出し、その最大値をサイクル長決定用交通状態量とし、あらかじめ設計しておいた判定表 (表 2.7) および対応図 (図 2.25) から適するサイクル長パターンを選択する。

表 2.7 サイクル選択の判定表

判定条件	選択パターン
$T \leq TI_1$	C1
$TI_1 < T \leq TI_2$	C2
$TI_2 < T \leq TI_3$	C3
$TI_3 < T \leq TI_4$	C4
$TI_4 < T \leq TI_5$	C5
$TI_5 < T \leq TI_6$	C6
$TI_6 < T \leq TI_7$	C7
$TI_7 < T$	C8

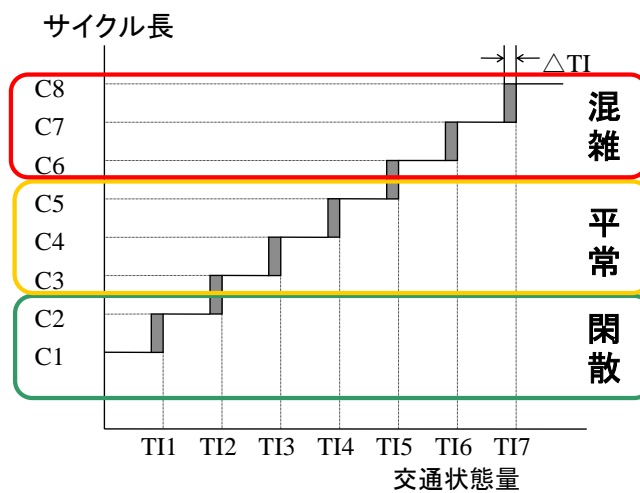


図 2.25 サイクル長選択対応図

ここで,

T : サイクル長決定用交通状態量

TI_1, \dots, TI_7 : パターン選択判定値

である.

サイクル長は 8 つのパターンまで選択可能であり, そのパターン選択時のサイクル長自体の値 ($C_1 = 80[s]$ 等) や選択のための交通状態量の閾値などを設計しておく必要がある.

(b) サブエリア構成およびサイクル長の決定

サブエリアごとに選択したサイクル長を隣接サブエリア間で比較し, その差が指定された閾値より小さい場合はそのサブエリアを結合して, ひとつのサブエリアとする. このとき, 最終的に決定されるサイクル長は大きい方の値とする.

(c) スプリットの決定

重要交差点周辺の車両感知器から, 幹線側の交通状態量および交差側の交通状態量を算出する. これらの値と決定されたサイクル長を用いて, 判定表(表 2.8)および対応図(図 2.26)から適するスプリットパターンを選択する.

表 2.8 スプリット選択の判定表

判定条件			選択パターン
交通状況	サイクル長	交通状態量比	
閑散	$C < CA_s$	—	S1
平常	$CA_s \leq C < CB_s$	$b_s \leq SI$	S3
		$a_s \leq SI < b_s$	S2
		$SI < a_s$	S4
混雑	$CB_s \leq C$	$d_s \leq SI$	S6
		$c_s \leq SI < d_s$	S5
		$SI < c_s$	S7

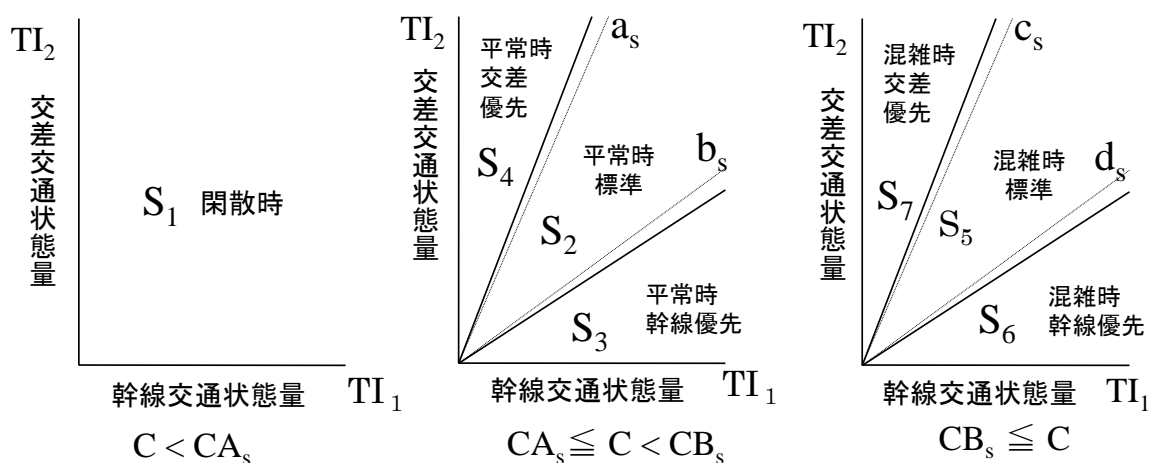


図 2.26 スプリット選択対応図

ここで、

C : 決定サイクル長

TI_1 : 幹線側交通状態量

TI_2 : 交差側交通状態量

SI : 交通状態量比 ($SI = TI_1/TI_2$)

CA_s, CB_s : 交通状況 (閑散, 平常, 混雑) 決定サイクル長判定値

a_s, b_s, c_s, d_s : 交通状態量比の判定値

である。

決定されたサイクル長で閑散、平常、混雑が決まるため、スプリット選択時に適用される図もそれに対応したものとなることに留意されたい。スプリット選択においても、スプリットパターン選択時のスプリット値 (80:20 等)、パターン選択基準となる幹線と交差の交通状態量比をあらかじめ設計しておく必要がある。なお、一般交差点においては、閑散、平常、混雑それぞれで一つのスプリットパターンしか設定できない。

(d) オフセットの決定

サブエリア内の車両感知器から，上り方向の交通状態量および下り方向の交通状態量を算出する（図 2.22 参照）．各方向の交通状態量および決定サイクル長を用いて，判定表（表 2.9）および対応図（図 2.27）から適するオフセットパターンを選択する．オフセットにおいても，他のパラメータと同様に，オフセットパターン選択時のサブエリア内の各交差点間における相対オフセット値（50%等），パターン選択基準となる上り方向と下り方向の交通状態量比をあらかじめ設計しておく必要がある．

表 2.9 オフセット選択の判定表

判定条件			選択パターン
交通状況	サイクル長	交通状態量比	
閑散	$C < CA_o$	—	O1
平常	$CA_o \leq C < CB_o$	$b_o \leq OI$	O3
		$a_o \leq OI < b_o$	O2
		$OI < a_o$	O4
混雑	$CB_o \leq C$	$d_o \leq OI$	O6
		$c_o \leq OI < d_o$	O5
		$OI < c_o$	O7

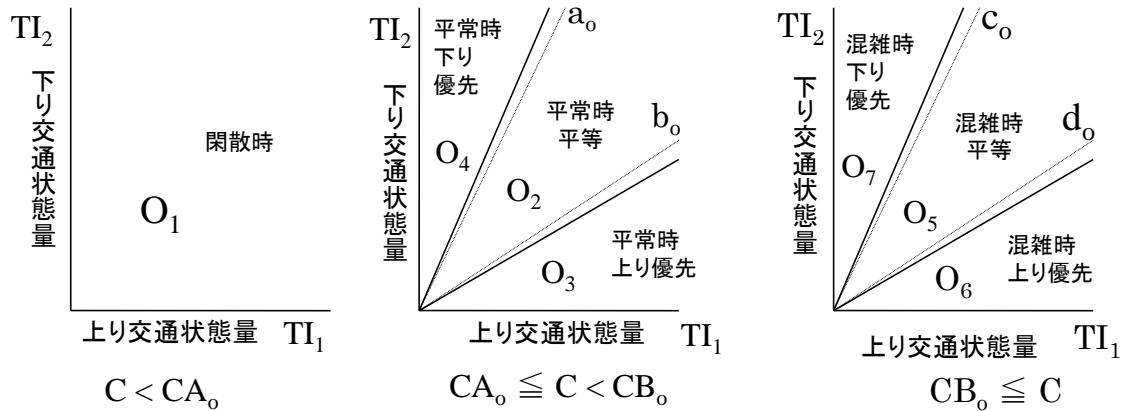


図 2.27 オフセット選択対応図

ここで，

C : 決定サイクル長

TI_1 : 上り交通状態量

TI_2 : 下り交通状態量

OI : 交通状態量比 ($OI = TI_1/TI_2$)

CA_o, CB_o : 交通状況（混雑, 平常, 混雑）決定サイクル長 判定値

a_o, b_o, c_o, d_o : 交通状態量比の判定値

である．

2.5.3 プログラム形成制御

プログラム形成制御は、我が国においては 1990 年代の研究開発活動の後に警察庁主導で仕様化され、2000 年頃より全国で広く普及推進が行われている。この全国展開している制御方式を MODERATO (Management by Origin-Destination by Related Adaptation for Traffic Optimization) 制御と総称している。

(1) 交通指標算出

本制御方式では、需要率を過飽和時でも状態を表現できるように拡張した負荷率という指標を用いる。具体的には、負荷率 ρ は、流入台数 Q_{in} 、捌け残り台数（待ち行列台数） E 、飽和交通流率 s を用いて式(2.22)で表される。

$$\rho = (Q_{in} + E) / s \quad (2.22)$$

捌け残り台数は直接計測が困難であり、実際には車両感知器情報から推計される待ち行列台数を用いることが多い。計算イメージと車両感知器配置例を図 2.28 に示す。

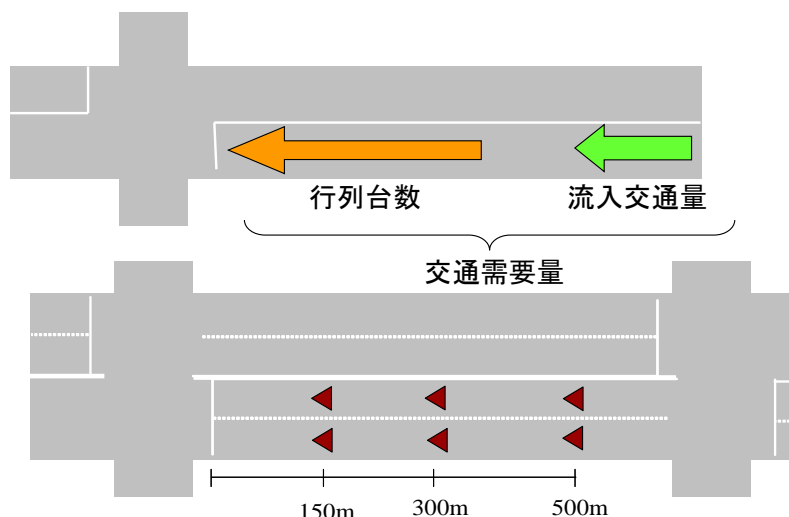


図 2.28 負荷率算出イメージと車両感知器配置

流入台数についても、車両感知器配置などから計測が困難な場合は、便宜的に流出台数とすることもある。制御設計においては、現示ごとの需要率および交差点需要率を用いていた。ここでも、現示負荷率および交差点負荷率を算出し、制御パラメータ算出に用いる。図 2.12 のような一般的な四枝かつ二現示方式で運用されている交差点における現示負荷率 ρ_1 、 ρ_2 および交差点負荷率 ρ は、次式で表される。

$$\rho_1 = \max(\rho_{11}, \rho_{13}) \quad (2.23)$$

$$\rho_2 = \max(\rho_{22}, \rho_{24})$$

$$\rho = \sum_{i=1}^2 \rho_i \quad (2.24)$$

ここで、
 ρ_{ij} : 現示 i 、流入路 j の負荷率
 である。

(2) 制御パラメータ算出

負荷率を算出した後、図 2.29 に示す手順で制御パラメータ算出が実施される。

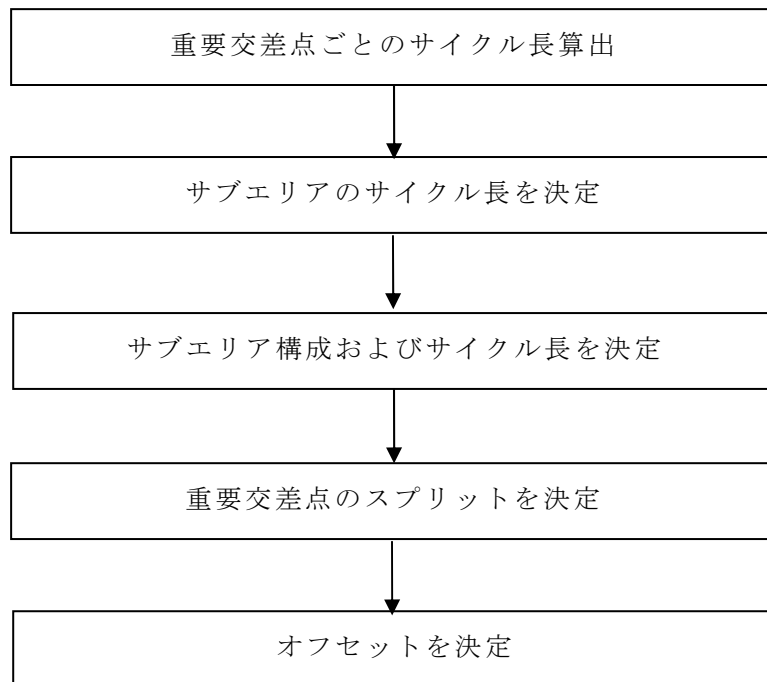


図 2.29 MODERATO 制御の制御パラメータ決定フロー

以下、各手順について説明する。

(a) サイクル長算出（重要交差点）

重要交差点ごとに算出された交差点負荷率を式(2.11)で表現される Webster の実験式に適用して、その交差点のサイクル長を算出する。

(b) サイクル長決定（サブエリア）

サブエリア内に重要交差点が複数存在する場合、最も大きい値をサブエリアのサイクル長とする。

(c) サブエリア構成およびサイクル長の決定

パターン制御と同様に、サブエリアごとに決定されたサイクル長を隣接サブエリア間で比較し、その差が指定された閾値より小さい場合はそのサブエリアを結合して、ひとつのサブエリアとする。このとき、最終的に決定されるサイクル長は大きい方の値とする。

(d) スプリットの決定

重要交差点のスプリットは、交差点負荷率および現示負荷率を用いて、下式より算出される。

$$g_i = \rho_i / \rho \quad (2.25)$$

ここで、

g_i : 現示 i のスプリット

である。

一般交差点のスプリットに関しては、パターン制御により決定される。

(e) オフセットの決定

通常は、オフセットはパターン制御により決定される。実施事例は多くはないが、スループット最大化や交通流シミュレーション応用による遅れや停止回数の最小化によりオフセットを決定しているものもある。

第3章 流入路別信号現示の導入

3.1 はじめに

信号制御における現示運用を大別すると、現示（ステージ）を固定化した現示制御（stage-based control）と車両・歩行者の動線（ムーブメント）を独立して制御する信号グループ制御（group-based control）とに分類される[15]。わが国では信号現示を設計する場合、安全面の配慮から現示制御を前提とした上で、円滑化の観点から対向する流入路の通行権を同一現示で付与することが一般的である。このような設計および運用では交差点容量拡大には限界があるため、近年柔軟な現示運用が検討されており、デュアルリングを活用したムーブメント制御もその取組みの一つである。この制御は動線需要に応じてサイクル毎に信号現示を変化させることが可能である。しかしながら、信号灯器表示の複雑さや可変的な現示運用に対する安全性への懸念から周辺地域での社会的な合意形成が必要であり普及が進んでいない。また、適用可能な交通条件も明確化されていないという課題もある。

本章では、現示制御での運用を前提とした流入路毎に一つの現示を割り当てるという信号現示の設計方法（以下、流入路別信号現示）を提案する[41]。流入路別信号現示の適用およびそれに伴う柔軟な車線運用を同時に検討することで通例的な現示設計では実現できなかった制御運用が可能となることを示す。次に、流入路毎に交通流動が大きく異なる場合には提案現示適用と車線運用変更により、通例的な現示と比較して大幅な交差点容量の拡大が可能であることを神奈川県内のボトルネック交差点への適用を通じて示す。まず、一般的な信号現示の運用形態を説明した後に流入路別信号現示を提案する。次に、対象交差点に対する信号現示変更を含めた施策を立案した後、オペレーションブリスサーチの考え方を導入し、設計交通量にもとづいた交差点需要率を評価指標として用いた通例的な信号現示と提案信号現示との比較評価を実施することで提案現示の適用可否を意思決定する。最後に、提案信号現示の適用を含めた施策を適用した際の効果について、交通管制システム等のデータや交通事故件数を用いて検証する。

3.2 信号現示

信号現示は、前述したように交通流動を整流するための重要な要素であり、信号制御の基礎設計事項の一つである。前章では、実際に運用されている一般的な信号現示について述べた。ここでは、信号グループ制御の実現手段の一つであるデュアルリング方式を説明した後、流入路毎に一つの現示を割り当てるという信号現示設計方法を提案する。

3.2.1 デュアルリング方式

デュアルリング（DR）とは、交錯しない動線同士の通行権を出すタイミングを独立に設定する感応制御である。信号グループ制御の実現方法の一つとして欧米を中心に運用されている[15], [40]。わが国においてはムーブメント制御と呼ばれ、2007年より実証実験が実施されて一定の効果が確認されている[16], [17], [42]。図 3.1 は四枝交差点での動作メカニズムを示したものである。デュアルリングにより実現可能な現示の組合せを、階梯図のイメージで示した

ものが図 3.2 である。

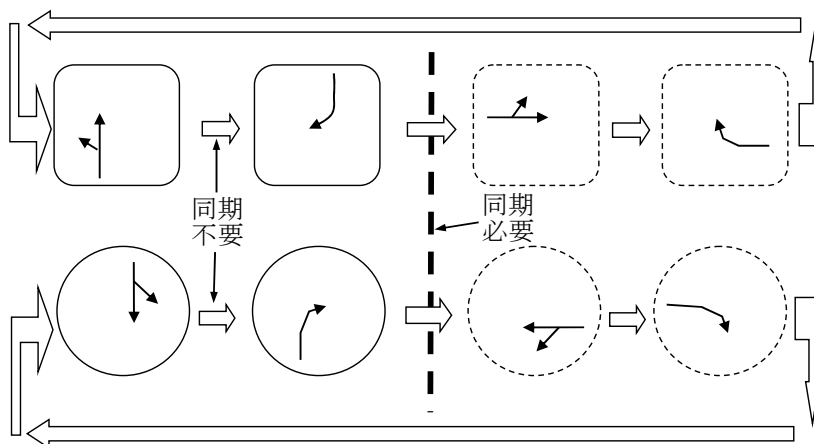


図 3.1 DR 動作メカニズム

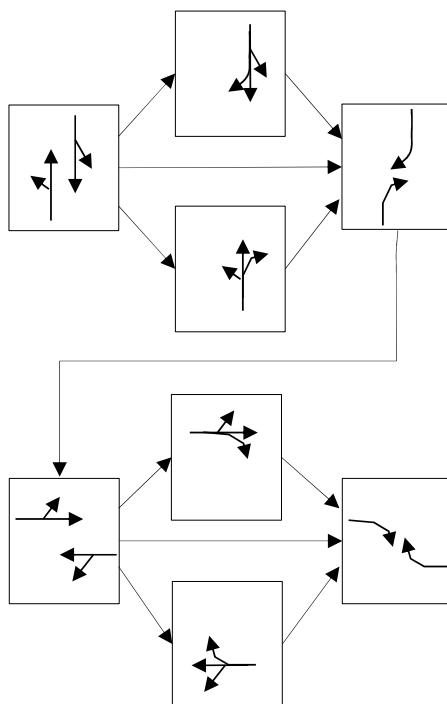


図 3.2 DR における階段図イメージ

この制御方式は、結果的に実行される現示が多様でサイクルごとに異なる可能性もあり、運用においては周辺地域への周知徹底が必要となることから普及が進んでいない。

3.2.2 流入路別信号現示

四枝交差点において流入路毎に一つの現示を割り当てる信号現示の例を図 3.3 に示す。交通状況によって、図 3.3 のように全ての流入路に対して個別に現示を割り当てるのが難しい場合は、図 3.4 のような部分的な適用も可能である。

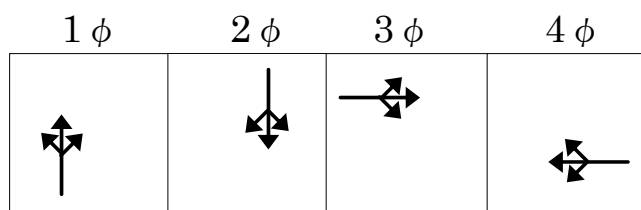


図 3.3 流入路別信号現示の例（全流入路適用）

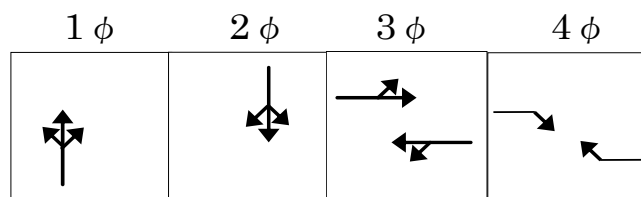


図 3.4 流入路別信号現示の例（一部流入路適用）

提案する信号現示には、他の流入路からの交通との錯綜がないという特徴がある。このため、対象となる流入路において各車線への通行方向指定を柔軟に実施することが可能となる。

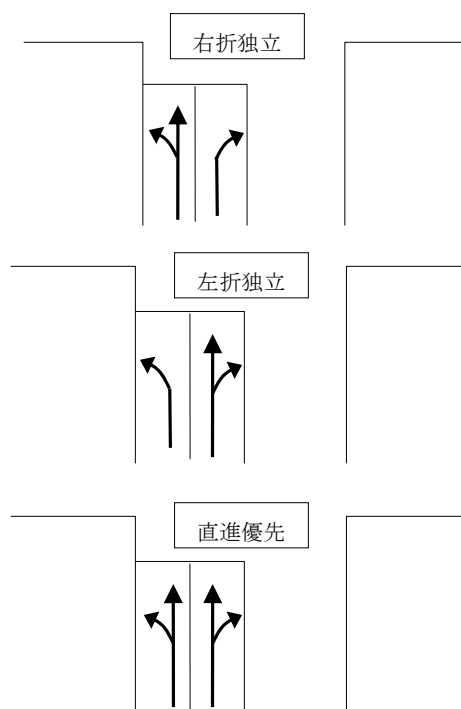


図 3.5 流入路内の車線運用例

対象流入路の方向別交通需要に対して適切な通行方向指定を行うことで、車線幅等の多大な費用を要する施策を行わずとも交差点需要率の低減が期待できる。また、本現示においては矢印灯器での表示が不要であるため、誤認の可能性が低減し、事故防止への寄与も期待される。図 3.5 に通行方向指定の例を示す。

3.3 適用事例 1

対象交差点の幾何構造および交通状況を示すとともに、その改善施策についても立案する。対象交差点は、図 3.6 に示す神奈川県川崎市多摩区内の清水台である。



図 3.6 対象交差点

東名高速川崎 IC への流動および周辺住民の活動の要衝で渋滞が頻発している。顕著な渋滞発生箇所としては、朝ピークでは稗原側と川崎 IC 側の流入路，夕ピークでは稗原側と蔵敷交番側の流入路となっている。信号現示構成，車線構成および平日の各流入路における方向別交通量を図 3.7，図 3.8 および表 3.1 に示す。なお，本交差点は MODERATO 制御が適用されている。

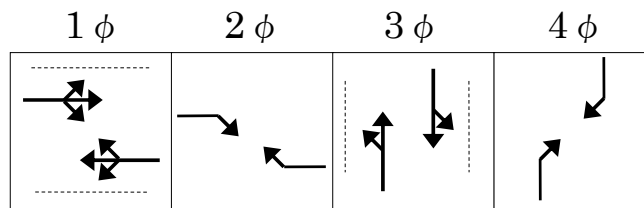


図 3.7 信号現示（現状）

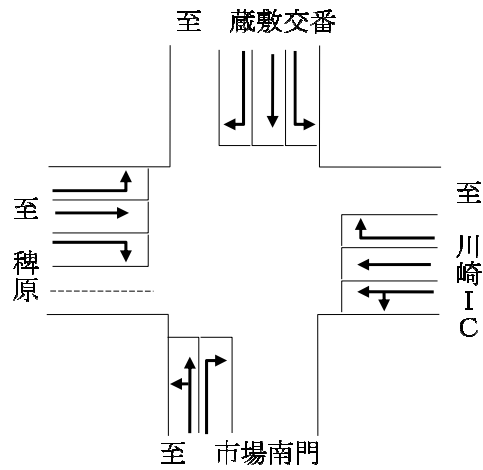


図 3.8 車線構成（現状）

表 3.1 交通状況

流入路	時間帯	交通量[台/h]		
		左折	直進	右折
川崎 IC	朝ピーク	84	608	270
	日中	124	619	276
	夕ピーク	180	585	304
稗原	朝ピーク	62	641	12
	日中	96	512	28
	夕ピーク	45	647	39
蔵敷交番	朝ピーク	326	248	101
	日中	270	343	28
	夕ピーク	270	343	28
市場南門	朝ピーク	6	309	124
	日中	11	281	129
	夕ピーク	68	298	84

3.3.1 改善施策

慢性的に渋滞が発生する交差点においては、交差点幾何構造と信号制御を総合的に見直すことが肝要である。交通状況をもとに策定した信号現示および車線構成の改善案を図 3.9 および図 3.10 にそれぞれに示す。

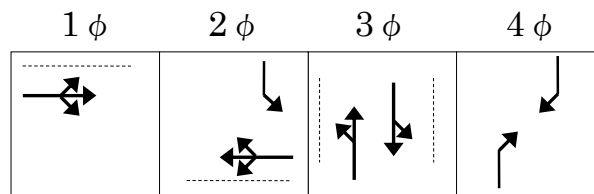


図 3.9 信号現示変更案

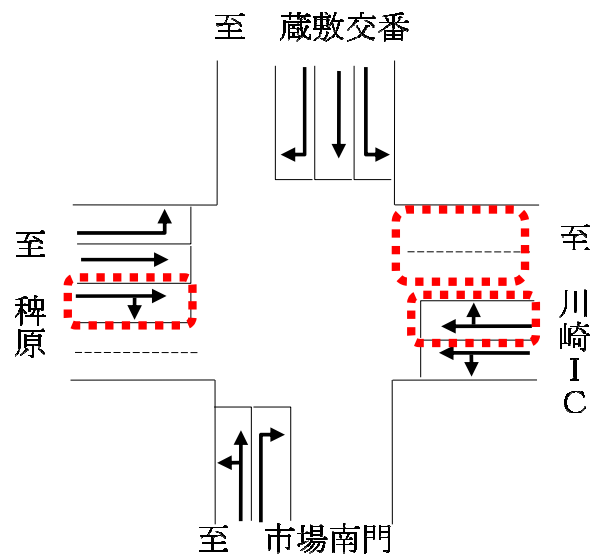


図 3.10 車線構成変更案

稗原側流入路の右折交通量に対して川崎 I C 側流入路の右折交通量が非常に多いことから、この 2 つの流入路に対して提案信号現示を適用する。また、稗原側流入路の直進交通量に対して直進車両の走行車線数が少ないため、川崎 I C 側流入路および稗原側流入路の車線構成を変更する。

3.3.2 需要率による事前分析

オペレーションズリサーチ (OR) は、検討した複数の施策案を「科学的」、つまり「筋の通った方法」で評価して意思決定する手法である [43]。信号制御を含む平面交差における計画や設計を実施する場合、設計交通量をもとに交差点需要率を算出することで施策の事前検討を行っており [38], [39], OR の考え方を導入した手順と言えるだろう。ここでも、その考え方を適用し、表 3.1 を設計交通量として現状および提案施策の交差点需要率の評価を行う。交差点需要率の比較を表 3.2 に示す。

表 3.2 交差点需要率の比較

時間帯	施策	需要率				
		交差点	1φ	2φ	3φ	4φ
朝	事前	0.89	0.38	0.20	0.24	0.074
	事後	0.77	0.20	0.32	0.18	0.074
日中	事前	0.80	0.31	0.22	0.19	0.077
	事後	0.76	0.16	0.34	0.18	0.077
夕	事前	0.88	0.39	0.22	0.22	0.050
	事後	0.83	0.20	0.36	0.22	0.050

全ての時間帯において需要率の改善が見られるが、なかでも朝ピークにおける低減が大きく洪

滞改善の効果が期待できる。流入路別信号現示により川崎 IC 側流入路の車線構成および通行方向指定を変更して車線数を減少させることが可能となった。これにより稗原側流入路の直進 2 車線を実現することで第 1 現示の需要率を大幅に削減できたことに留意したい。

3.3.3 施策実施後の評価

施策実施前後での制御効果を交通管制システムで算出している渋滞情報を用いて評価した。実施前と実施後それぞれ 1 週間程度のデータから各時点の平均渋滞長を算出して渋滞長時間を集計した。

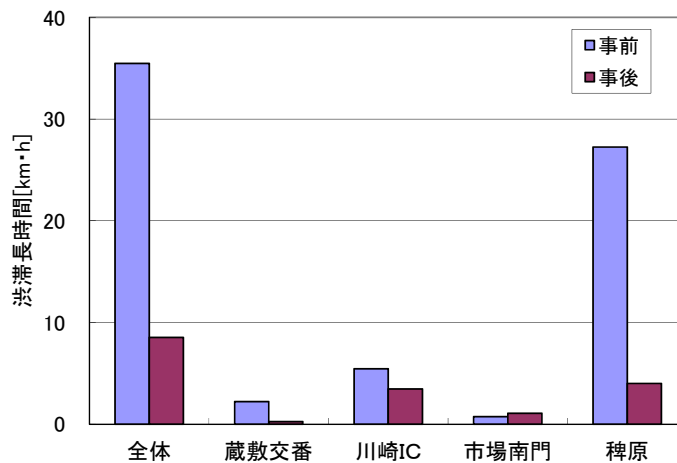


図 3.11 渋滞長時間比較 (終日)

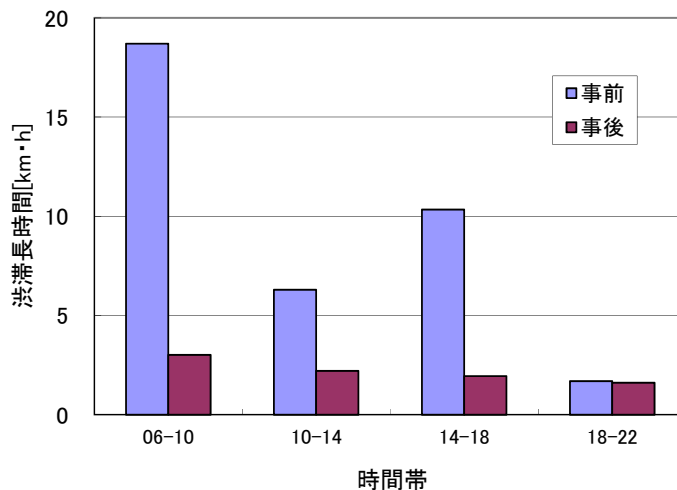


図 3.12 渋滞長時間比較 (時間帯)

図 3.11 に全時間帯 (6時から 22時まで) の比較を、図 3.12 に時間帯毎の比較を示す。交差点全体では、施策実施により渋滞長時間を約 75%削減できていることが分かる。流入路毎の比較では、川崎 IC 側流入路で 36%、稗原側流入路で 85%の削減となっており、川崎 IC 側流入路と稗原側流入路で渋滞が平準化されている。次に、時間帯毎の制御効果を確認する。施策実施前は、朝ピーク、日中、夕ピークに渋滞が多発していたが、6時から 10時、10時から 14時、14時から 18時、18時から 22時で、それぞれ 83%、64%、81%、4%の渋滞削減を実現してい

る。なお、適用した信号制御方式は施策実施前と同様に MODERATO 制御を実施した。時間帯毎の代表的な制御パラメータを表 3.3 に示す。

表 3.3 制御パラメータの比較

時間帯	施策	制御パラメータ				
		サイクル長[s]	スプリット[%]			
			1φ	2φ	3φ	4φ
朝	事前	160	41	19	31	9
	事後	140	22	45	22	11
日中	事前	160	41	19	31	9
	事後	140	22	45	22	11
夕	事前	160	41	19	31	9
	事後	150	22	46	21	11

施策により交差点需要率を低減できることから、MODERATO 制御において事前より 10 秒から 20 秒短いサイクル長が算出された。スプリットについても、交通需要の多い稗原側流入路に関する第 2 現示が最も大きい値となっており、交通状況に適した結果となっている。次に、施策実施前後の人身事故件数を図 3.13 に示す。図中の点線は施策を実施した時期を示している。また、「周辺」とは交差点から約 200m までの地点で発生した事故を集計したものである。

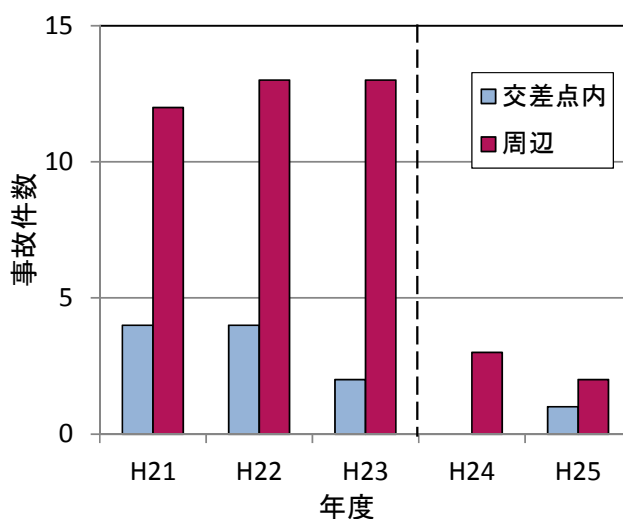


図 3.13 人身事故件数

図からわかるように、周辺部の事故は、施策実施後に大幅に減少した。交差点内の事故は平成 23 年度から減少しているが、これはレーン変更を実施する前に現示変更のみを前倒しで実施したことの影響と推察される。

3.4 適用事例 2

対象となる谷戸橋交差点を図 3.14 に示す。この交差点は著名な観光地である山下公園と中華街の中間に位置し、山下橋側流入路および石川町側流入路で頻繁に渋滞が発生している。



図 3.14 対象交差点

車線構成、信号現示構成および平日の各流入路における方向別交通量をそれぞれ図 3.15、図 3.16 および表 3.4 に示す。

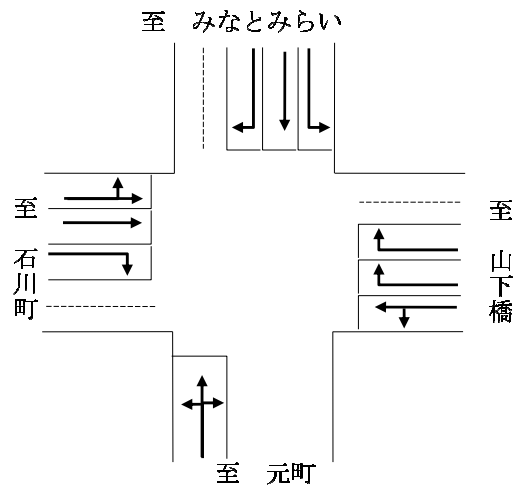


図 3.15 車線構成 (現状)

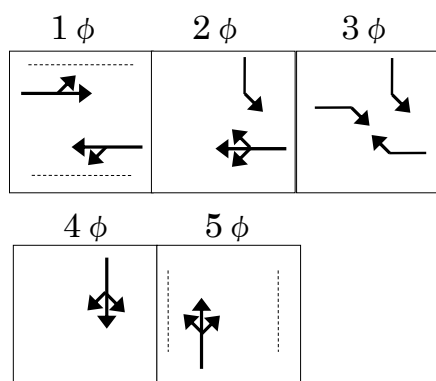


図 3.16 信号現示（現状）

表 3.4 交通状況

流入路	時間帯	交通量[台/h]		
		左折	直進	右折
山下橋	朝	39	220	237
	日中	28	205	205
	夕	33	454	325
石川町	朝	23	497	23
	日中	67	244	28
	夕	28	258	22
みなとみらい (MM)	朝	480	124	23
	日中	310	135	90
	夕	242	130	96
元町	朝	28	124	23
	日中	28	144	33
	夕	45	174	11

なお，本交差点でも MODERATO 制御が適用されている。

3.4.1 改善施策

石川町側流入路の右折交通量に比べて山下橋側流入路の右折交通量が非常に多く，現状では時差現示を適用している。しかし，山下橋側の直進交通量があまり多くなく右折交通量と同程度であることから，この2つの流入路に対して図 3.17 に示す信号現示を提案する。レーン構成については，区分したい流動は現状でも独立した通行権となっていることや流出側のレーン構成を変更することが困難であることから，現状のままとした。

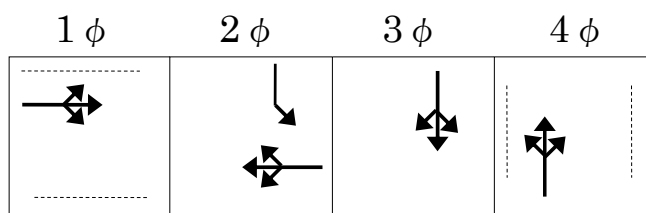


図 3.17 信号現示変更案

3.4.2 需要率による事前分析

最初の事例と同様に、表 3.4 を設計交通量として用いて現状および提案施策の交差点需要率の評価を行う。施策実施前と実施後の交差点需要率の比較を表 3.5 に示す。なお、複数現示にまたがって通行権が付与されている流動に関する需要率は、交差点需要率が最小となるように各現示に配分した。朝ピーク、日中では提案信号現示の適用により交差点需要率の改善があり、特に朝ピークの改善率が高く効果が期待できる。一方で、夕ピークでは交差点需要率が増加している。これは、山下橋側流入路における夕ピークの直進交通量が他の時間帯よりも大幅に大きい値となっており、提案信号現示の効力を発揮しにくい状況となっているためである。

表 3.5 交差点需要率の比較

時間帯	施策	需要率					
		交差点	1φ	2φ	3φ	4φ	5φ
朝	事前	0.71	0.15	0.008	0.14	0.29	0.12
	事後	0.56	0.15	0.15	0.14	0.12	—
日中	事前	0.51	0.09	0.045	0.082	0.15	0.14
	事後	0.45	0.09	0.14	0.075	0.14	—
夕	事前	0.52	0.081	0.2	0.014	0.072	0.15
	事後	0.58	0.081	0.28	0.072	0.15	—

3.4.3 施策実施後の評価

清水台交差点と同様に、施策実施前後での制御効果を、交通管制システムで算出している渋滞情報を用いて評価した。実施前と実施後それぞれ1週間程度のデータから各時点の平均渋滞長を算出して渋滞長時間を集計した。図 3.18 に全時間帯の比較を、図 3.19 に時間帯毎の比較を示す。交差点全体では、施策実施により渋滞長時間を約 20%削減できていることが分かる。流入路毎の比較では、石川町側流入路、みなとみらい側流入路、山下橋側流入路それぞれで、29.5%、4.9%、98%の削減となっている。次に時間帯毎の制御効果について確認する。6時から10時、10時から14時、14時から18時で、それぞれ62%、1.5%、16%の渋滞削減を実現している。特に、6時から10時および14時から18時では渋滞を効果的に削減できた。18時から22時の時間帯では、石川町側流入路での渋滞が発生したため少ない値ではあるが、逆に渋滞が発生する結果となった。事前に実施した交差点需要率の評価に準じるものとなった。

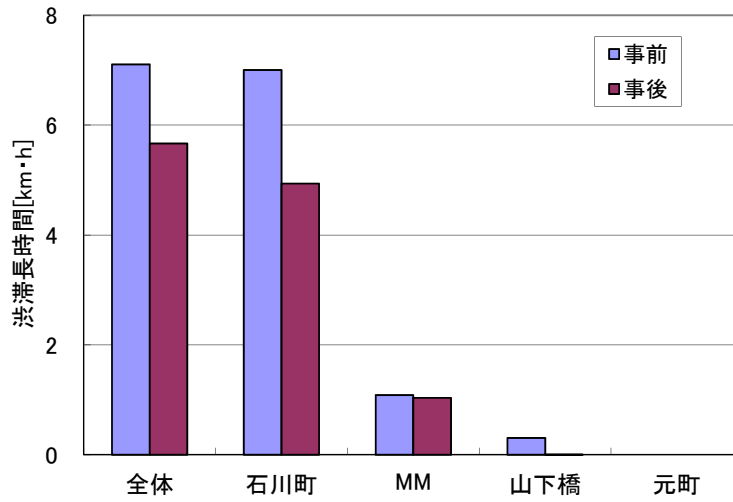


図 3.18 渋滞長時間比較 (終日)

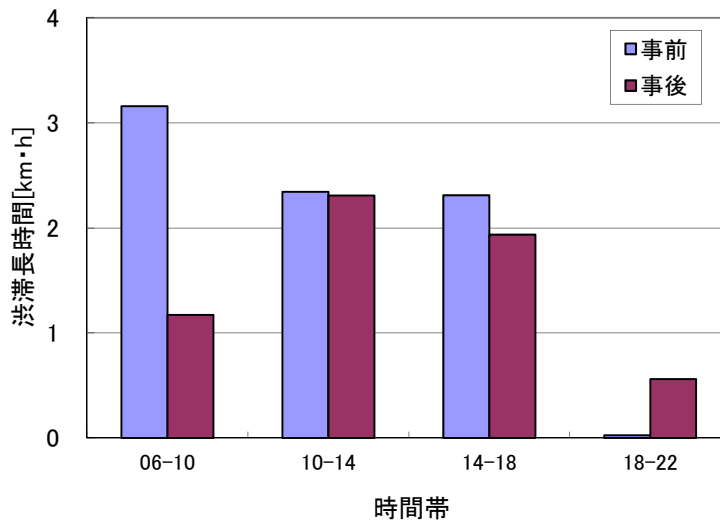


図 3.19 渋滞長時間比較 (時間帯)

表 3.6 信号制御パラメータの比較

時間帯	施策	信号制御パラメータ					
		サイクル長[s]	スプリット[%]				
			1φ	2φ	3φ	4φ	5φ
朝	事前	160	23	27	9	18	23
	事後	150	27	35	13	25	—
日中	事前	160	23	27	9	18	23
	事後	150	28	32	15	25	—
夕	事前	160	23	27	9	18	23
	事後	150	26	35	14	25	—

表 3.6 に時間帯毎の代表的な制御パラメータ値を示す。提案信号現示の適用による現示数削減や交差点需要率の低減により、施策実施前よりサイクル長を 10 秒下げることができた。本交差点に対しても、施策実施前後の交差点内および周辺部の人身事故件数を図 3.20 に示す。

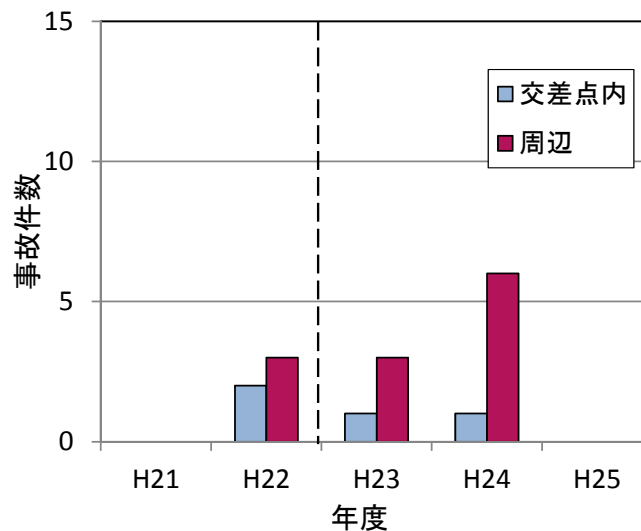


図 3.20 人身事故件数

交差点内の事故は減少しているが、周辺部は平成 24 年に増加した後に平成 25 年度は発生していない。交差点付近の状況では現示簡素化が安全面に寄与しているようであるが、周辺部を含めた総合的な評価を決定するには観察を継続する必要があると考える。

3.5 まとめ

本章では、流入路毎に一つの現示を割り当てる流入路別信号現示と呼ばれる信号現示の設計方法を提案した。次に、神奈川県内でボトルネック交差点に着目し、提案現示の適用だけでなく車線毎の走行方向指定の変更も含めた総合的な施策を立案するとともに、OR の考え方にもとづいた設計交通量による交差点需要率を用いた評価を行い、その円滑化実現の可能性を実施前に確認した。さらに、立案施策を実際に適用し、その効果を交通管制システムデータおよび施策適用前後の事故件数を用いて検証した。その結果、対象とした 2 つの交差点ともに渋滞低減および事故減少を確認できた。一般的な信号現示設計では渋滞を低減できなかった交差点において、流入路毎で交通状況が大きく偏りがある場合は車線毎の走行方向指定見直しを含めた提案現示の適用が渋滞低減に寄与する可能性があることを示している。事故減少という観点では、提案現示の簡素化された信号表示が奏功したと推察される。信号グループ制御の適用が難しい日本の環境において、交通状況や交差点幾何構造によっては、現示制御に分類される流入路別現示の適用で渋滞および事故の低減が可能であることを確認できた。なお、適用効果の事前評価では方向別交通量が必要であるが、現在の交通管制システムではこのデータを取得できる箇所は限定され、人手による調査を実施せざるを得ないのが実情である。交差点における流動が把握可能なプローブデータの活用を検討していきたい。

今後は、提案現示の特徴である車線への柔軟な通行方向指定を活かして、右折帯のような専用車線の確保が困難で渋滞改善に苦慮している交差点に対して改善が可能かどうか、需要の少ない右折帯を歩行者島に変更し横断歩行者の安全確保と横断時間の短縮を実現できないか、など様々な検討を進めていきたい。

第4章 一括最適化制御の展開と応用

4.1 はじめに

我が国の交通管制システムにおいては、交通需要の大きい幹線道路が交差する箇所を重要交差点とし、その交差点を中心として交通状況が類似する周辺の交差点群をあらかじめサブエリアと定め、サブエリア単位で制御パラメータの決定処理を実施している。第2章で述べた現行制御方式（パターン制御および MODERATO 制御）においては、重要交差点の交通状況を入力情報として制御パラメータを決定している。このため、決定された制御パラメータに関してネットワーク全体の最適性や遅れ時間や停止回数といった直接的な指標に関する最適性が保証されていないと長年指摘されており、幾つかの制御手法が提案されているが実運用までには至っていない[44], [45]。さらに、サブエリア構成については、サブエリア毎に算出されたサイクル長を隣接サブエリア間で比較し、その差が一定値より小さい場合に同一の制御エリアとして結合し、その制御エリア全体の共通サイクル長として大きい方のサイクル長が用いられる。この決定過程においては交通指標が使われないため、前述したサブエリア自体のパラメータ決定とともに長年の課題となっている。また、制御パラメータを決定する際にサイクル長、スプリット、オフセットの順に異なる処理で実施されており、制御パラメータ全体としての最適性も保証されていないとの指摘もある[4]。著者ら[46]はこのような現行制御方式の難点を解消するため、一括最適化制御を提案した。この方式は制御対象エリアをあらかじめ規定しておき、そのエリア内の信号交差点のサブエリア構成、サイクル長、スプリット、オフセットを一括最適化するものである。

本章では、一括最適化制御の実運用化に向けた対応とその適用事例を示す[47]–[49]。次に、適用事例を通じて顕在化した課題である導入工数の削減について、プローブ情報の活用による解決を試みる[50]。また、第1章で言及した維持管理の課題に対する施策として、車両感知器低減を背景とした一括最適化制御活用を提案する[51], [52]。

4.2 制御方式の概要と実運用化

4.2.1 制御方式概要

一括最適化制御の特長は、方式内に内包された TRANSYT を改良した交通流モデルにより遅れ時間と停止回数の線形和であるパフォーマンスインデック（PI）を推計し、メタヒューリスティクス（最適化手法）により道路網全体の PI 値を最小化する制御パラメータを算出することである[4], [5], [46]。まず、サブエリア構成と制御パラメータを図 4.1 のような数値列で表現したモデルを導入する。

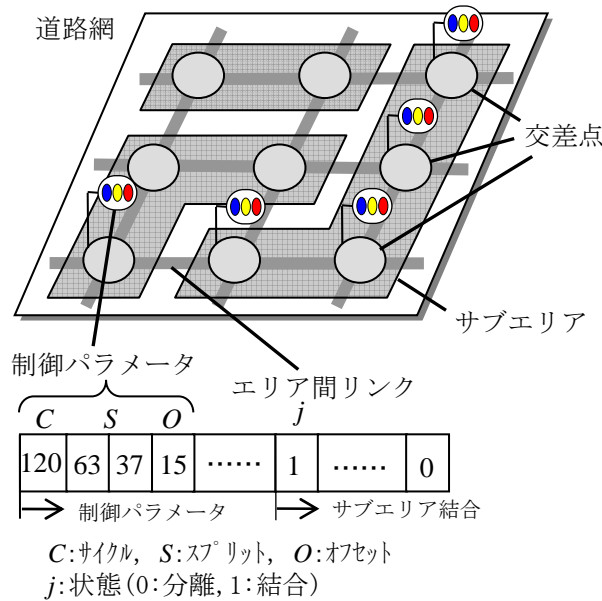


図 4.1 数値列モデルイメージ

この数値列モデルにより遅れ時間や停止回数を直接的かつ解析的に表現できるわけではないが、各変数を同等に扱うことが可能となり、交通流モデルによる PI 値推計とメタヒューリスティックスを組み合わせることで制御パラメータとサブエリア構成の同時最適化が可能となる。実際の交通管制システムにおける処理を示したものが図 4.2 である。

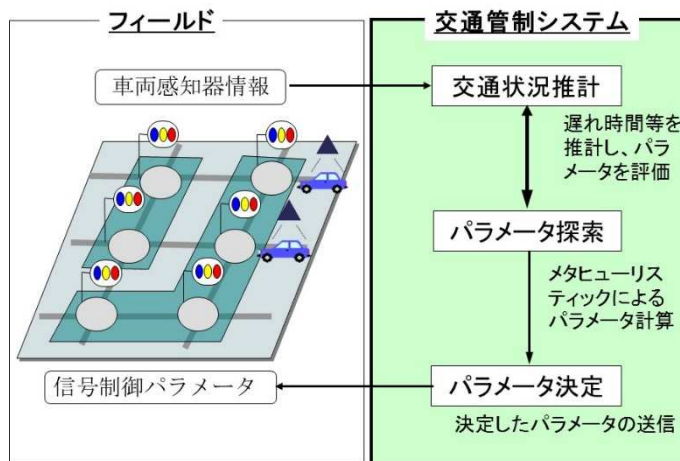


図 4.2 実システムでの処理概要

車両感知器情報（交通量）および制御パラメータおよびサブエリア構成の初期値をもとに交通流モデルにより PI 値を推計する。その PI 値をもとにメタヒューリスティックスにより数値列モデルの探索を行って新たな制御パラメータおよびサブエリア構成の候補を導出する。さらに、その候補での PI 値を交通流モデルで推計する。この PI 値推計と数値列モデル探索を繰り返す

ことで最適な制御パラメータおよびサブエリア構成を決定する。なお、本処理はあらかじめ定められた計算時間のあいだ繰り返され、その計算時間が終了した時点で最も低い PI 値を与えた制御パラメータとサブエリア構成が最適値として信号制御機へと送信される。

(1) 交通流モデル

TRANSYT は、実際の交通流を近似したマクロモデルを用いて車群（車両プロファイル）で表現される。具体的には、各車群は信号交差点で制御された後に、新たな車群を形成し下流リンクに流入し、次の交差点に到着するまでに車速の違い等により次第に拡散するものとしている。拡散の影響は下式のように表現される。

$$q(t+T) = F \cdot i(t) + (1-F) \cdot q(t+T-1) \quad (4.1)$$

ここで、

T : 対象リンクの平均走行時間×0.8

F : 平滑化係数 $1/(1+T \cdot \alpha)$

α : 車群拡散係数

$i(t)$: 流入車群の第 t ステップにおける流入量

$q(t)$: 下流における第 t ステップにおける推定流量数

である。

拡散式 (4.1) より流入してきた車群パターンから下流交差点への到着パターンを求め、その交差点で下流リンクに対して新たに形成される流出パターンを求めるという一連の演算を行いながら、交通状況を再現していく。算出イメージを図 4.3 に示す。

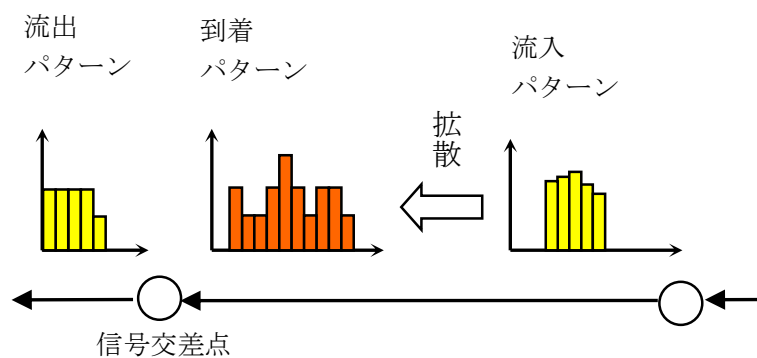


図 4.3 交通流算出イメージ

TRANSYT 自体は過飽和状態を扱うことができないが、日本の交通事情を鑑みると過飽和流への対応は必須であり、モデルを次のように拡張する。第 l リンクについて、交通容量を Q'_l 、時点 t での行列台数を $Q_l(t)$ 、上流交差点からの流入交通量を $q_l(t)$ として

- 1) $Q_l(t) + q_l(t) \leq Q'_l$ ならば、第 l リンクに流入可
- 2) $Q_l(t) + q_l(t) > Q'_l$ ならば、第 l リンクに流入不可

とする。これにより、閑散交通から渋滞発生時に至るまで全ての交通状態を表現することができる。処理イメージを図 4.4 に示す。

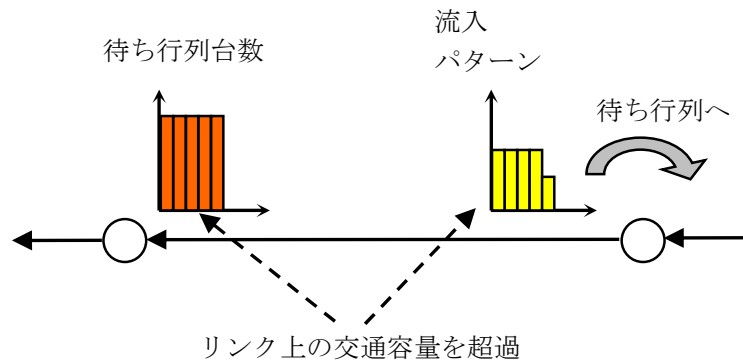


図 4.4 過飽和時の処理イメージ

(2) 最適化モデル

組合せ最適化問題としての変数表現は図 4.1 に示した通りである。ここでは、PI 値を目的関数として表現することは困難なため、交通流モデルで導出した PI 値を目的関数値とみなし、メタヒューリスティクスにおける解候補評価および解候補探索に用いる。解候補探索に用いることが可能な手法を次に示す。なお、TRANSYT では、最適化手法として山登り法 (H.C.: ヒルクライミング) を採用しているが、目的関数の降下方向探索が試行錯誤的であることや局所最適解に陥りやすいこと等の指摘があることに留意したい。 k を反復回数、 $X(k)$ を現在の解候補ベクトル、 f を PI 値、 ΔE は PI 値の増分、 E はランダムベクトルを表す。

(a) ランダム探索法 (RS)

ランダム探索法は、目的関数値と乱数を用いた直接的かつ確率的な探索手法である。次式に示すように、ランダムベクトルを用いて生成した新しい点において PI 値が改善される場合、その新しい点を解候補として採用し、これを繰り返して最小化を試みる。

$$\Delta E = f(X(k) + E(k)) - f(X(k)) \quad (4.2)$$

$$X(k+1) = X(k) + E(k) \quad \text{if } \Delta E < 0 \quad (4.3)$$

$$X(k+1) = X(k) \quad \text{otherwise} \quad (4.4)$$

一様乱数を用いて数値列上の変数を選択し、さらに変数の取り得る値に一様乱数を均等に割り当てた正規化乱数によるランダムベクトルを生成し、新しい点とする。このときの PI 値が改善される場合、その点を解候補とする。なお、変更する変数の個数 M は、対象とする道路網の規模等で適する値が異なるため、予備的な数値実験にて決めておく。

(b) 遺伝的アルゴリズム (GA)

遺伝的アルゴリズムは、生体における遺伝子の動作を模擬することによって解候補を生成する方式であり、確率的探索手法の一つである。また、評価、選択、交叉、突然変異という過程を解候補の集団を用いて繰り返し実施し、解の改善を図るものである。乱数で生成した

100 個体について、選択（3 個体トーナメント戦略，1 個体エリート戦略），交叉（50%の個体，一様交叉），突然変異（100%の個体， M 点変異）という操作を繰り返す．ここでも，変異させる点数 M は，RS と同様に予備的な数値実験で決めておく．

(c) シミュレーティッド・アニーリング法（SA）

シミュレーティッド・アニーリング法は統計力学における焼きなまし過程を応用した最適化手法である．PI 値 f と温度パラメータ T によって変化する確率 P を用いて新たな解候補への推移を決定しながら探索を行う．

具体的には，以下に示す $X(k+1)=X(k)+E(k)$ にもとづいて次の状態へ移行する．

$$P=1 \quad \text{if } \Delta E < 0 \quad (4.5)$$

$$P = \exp(-\Delta E/T(k)) \quad \text{otherwise} \quad (4.6)$$

RS と同様の方法によって解候補を生成し，上記の確率 P にしたがって，状態の遷移を決める．アニーリングは指数型を用い，

$$T(k+1) = \gamma T(k) \quad (4.7)$$

により，反復が進行するにつれて温度パラメータ T の値を減少させている．

(d) 進化戦略（ES）

進化戦略は，生物の進化過程を模擬した方式であり，確率的探索手法の一つである．GA と異なる点は，交叉過程が省略されていることである．選択過程として，100 個体のうち，任意の 5 個体をランダムに取り出し，この選択個体を生成する．さらに，変異として M 個の変数に対して乱数で変更を加える．この一連の処理を繰り返す．

(e) タブー探索（TS）

TS はヒルクライミング法を拡張した探索手法である．タブーリストと呼ばれる解候補群をもとに，同じような性質を持つ解候補を何回も探索する無駄を省こうとする方法である．他の手法同様に，乱数によって M 個の変数を選択するとともに，変更を加える処理を一つの状態を示す数値列に対して 20 回試行し，得られた解のうち，タブーリストになく，かつ，最良の PI 値をもつ数値列を次の解候補とする．

4.2.2 実運用化に向けた対応

(1) 最適化手法選択

一括最適化制御をシステムに実装するにあたって実際に使用する最適化手法を決めるため，数値実験により各手法の計算結果を比較評価した．各手法とも 40 回計算を行った．その際，適用したネットワークは，ノード数 29・リンク数 54 の規模を持つものとした．図 4.5 に，各手法の計算結果および手法ごとの PI 値の平均値を示す．各手法のグラフの横軸は反復回数，

縦軸は PI 値を表している。また、手法間比較のグラフの横軸は最適化手法、縦軸は PI 値の平均である。

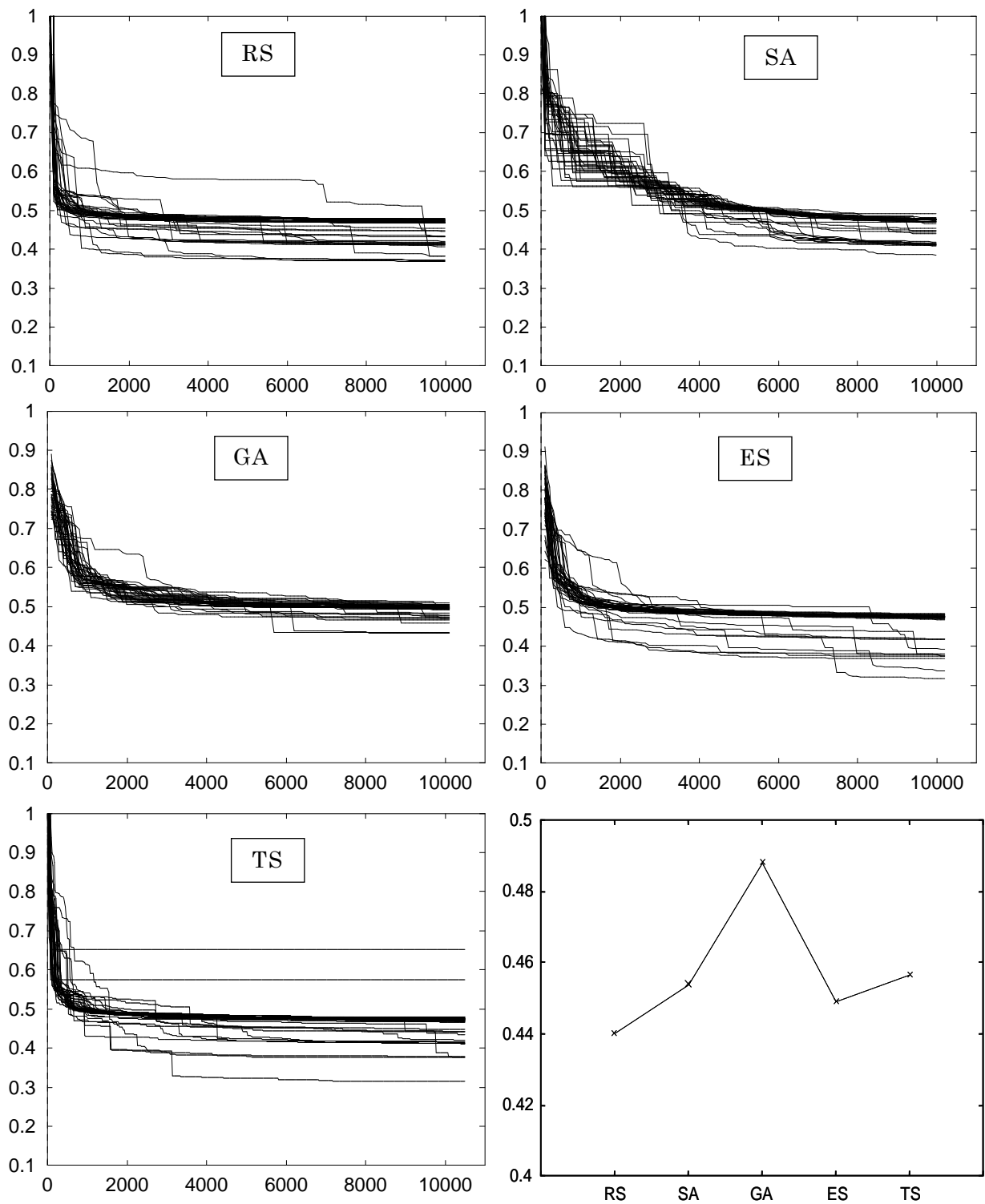


図 4.5 各手法の計算結果および平均値比較

手法間に大差はなかったが，最も PI 値の平均が低く，GA や SA の基礎となる RS を用いるものとする．

(2) 導出結果の安定化

RS は確率的最適化手法の一種であり，図 4.5 にあるように同じ処理を実施しても最適化される過程および最終的に導出される結果にはばらつきが生じる．交通信号制御というリアルタイムインフラシステムにおいて本手法を活用する場合には，導出結果を安定化させる必要がある．そこで，最適化処理における新しい点を導出する際，値を変更する変数の数に着目し，適切な変更対象数を推計することを検討した．なお，本研究では，この変更対象数を GA にならない変異点数と呼ぶ．

(a) 変異点数推計

変異点数は小さいと収束速度が遅くなり，大きいと計算負荷が高くなってしまふ．よって，これまで変異点数は予備的な計算実験から定数（15 程度）として設定していた．本研究では，予備的にさまざまな変異点数での最適化処理の反復を実施しサンプルデータを取得し，そのデータから適切な変異点数を推計する方法を検討する．具体的には，変異点数のランダム生成，交通流モデルによる PI 値計算，最適化モデルによる数値列変更という一連の処理を反復し，反復数 k ，変異点数 $M(k)$ ，PI 値の差分 $\Delta E(k, M(k))$ のデータセットを収集し，このデータ群から適切な変異点数 $M_{est}(k)$ を推計するというものである．この手順を次に示す．

i) データ収集

1 回の最適化処理において，変異点数を適宜変更し PI 値等を収集する．つまり，反復回数 k における変異点数 $M(k)$ をランダムに変更し，そのときの評価値の差分 $\Delta E(k, M(k))$ をサンプリングする．この手順を繰り返し，データセットを収集する．

ii) 変異点数推計

サンプリングしたデータセットにもとづいて，適切な変異点数 $M_{est}(k)$ の推計を行う．効果的な反復のみを考慮するため， $\Delta E < 0$ のデータを対象に導出する．変異点数については，最適化が進むにつれて広い範囲の探索は不要となり，解候補近傍での局所探索が必要と考えられるため，推定する対象を次式で表される線形モデルとする．

$$M_{est}(k) = ak + b \quad (a, b: \text{係数}) \quad (4.8)$$

また，係数の推計においては，重み付き最小自乗法を用いる．図 4.6 は変異点数推計概要を示したものである．

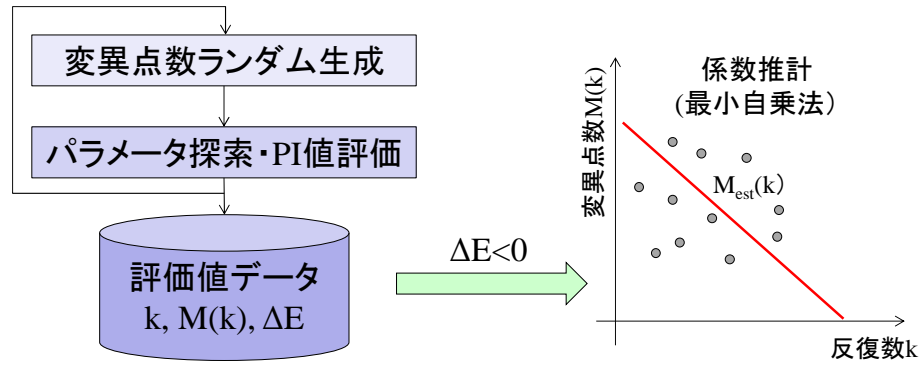


図 4.6 変異点数推計概要

(b) 検証実験

本手法について、実際のデータ（交通量、信号制御パラメータ）を用いて検証実験を行った。対象道路網は、リンク数約 150、ノード数 55 という規模である。1 回の最適化処理にあたり、乱数によって変異点数を $1 \leq M_{est}(k) \leq 20$ の範囲で発生させながら 1,000 回の反復を行ってサンプルデータを抽出、これを 5 回繰り返して計 5,000 個のデータセットを推計用に準備した。これらのデータに対して重み付き最小自乗法を用いた。求めた $M_{est}(k)$ の効果を検証するため、前述した道路網に対する最適化処理を変異点数が反復数によらず固定値の場合と $M_{est}(k)$ を用いた場合をそれぞれ実施し、その状況を比較評価した。最適化処理においては 1,000 回の反復を 10 回実施した。また、変異点数の固定値は、 $\{1,3,5,7,10,15,20\}$ として 1,000 回の反復を各 5 回という予備実験を実施し、PI 値の平均値が最も小さいものを採用した。図 4.7 および図 4.8 に収束状況を、図 4.9 に評価値の分布を示す。

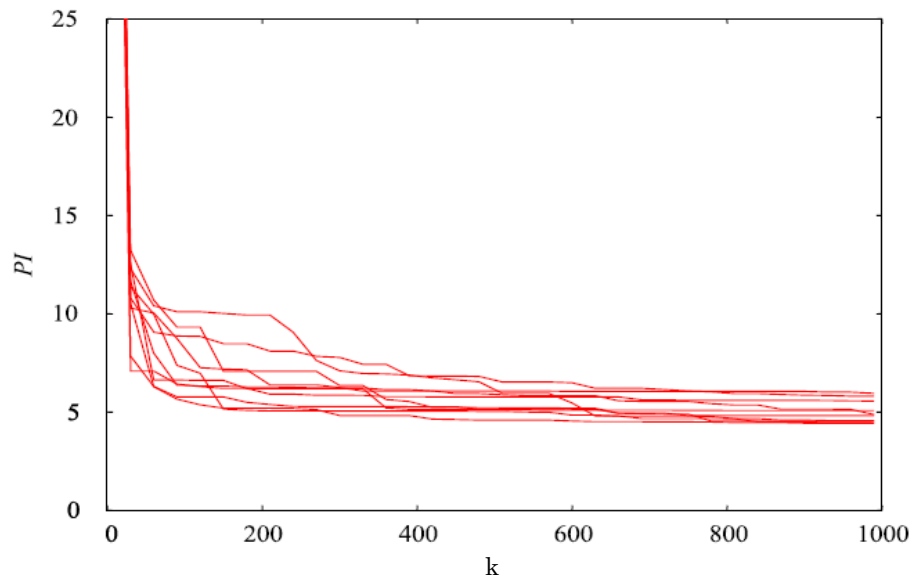


図 4.7 変異点数が固定値(10)の場合における収束状況

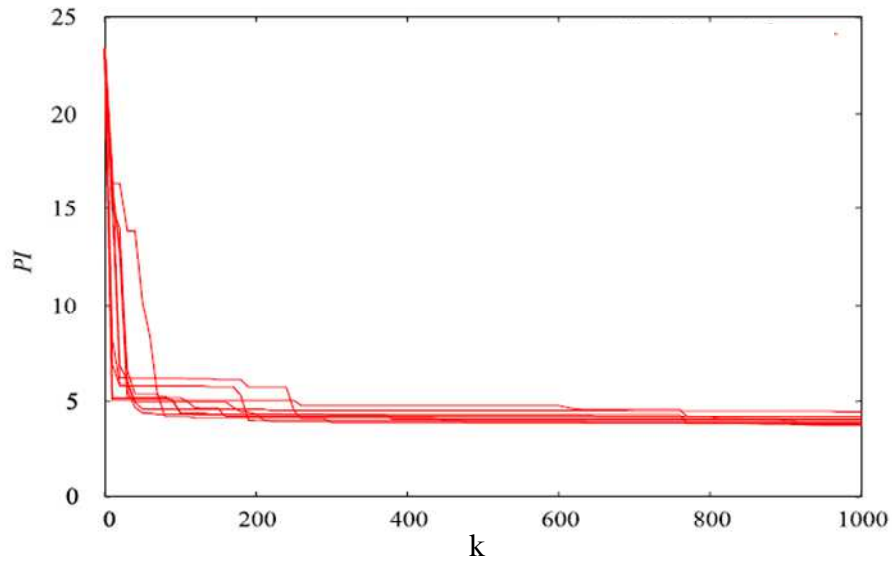


図 4.8 変異点数が $M_{est}(k)$ の場合における収束状況

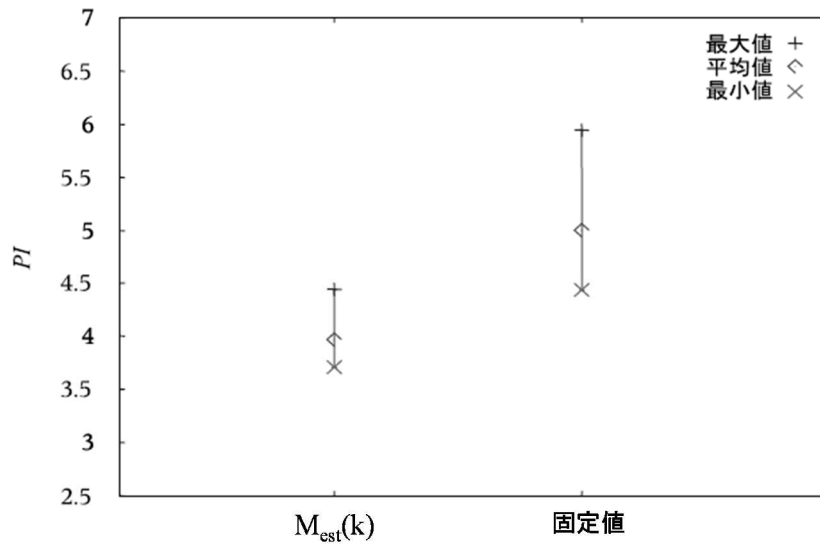


図 4.9 評価値の分布

推計結果は、 $M_{est}(k) = -0.006400k + 15.2364$ となった。数値実験の結果から、 $M_{est}(k)$ を用いた方が少ない反復で PI 値を減少させるとともに、最終的に算出される PI 値の平均値も小さく、最大値と最小値の差も小さいことが分かった。算出される結果においてばらつきが小さいことは実用化においては重要な要素である。よって、推計された $M_{est}(k)$ を用いて最適化処理が可能となるように、交通管制システムを改良して一括最適化制御を実装した。

4.2.3 適用事例

2002 年度より 3 ヶ年で実施された環境対応型交通管制システムモデル事業において一括最適化制御を最初にフィールド適用し、そのまま実運用化している [48]。対象路線は、神奈川県川崎市の産業道路上の 12 交差点である。



図 4.10 対象路線

適用時間帯は平日 6:00~18:00 であり，本方式を適用する前はパターン制御で運用していた．制御効果を見るため，旅行時間計測装置による旅行時間データ 5 日分の平均値を比較した（図 4.11）．

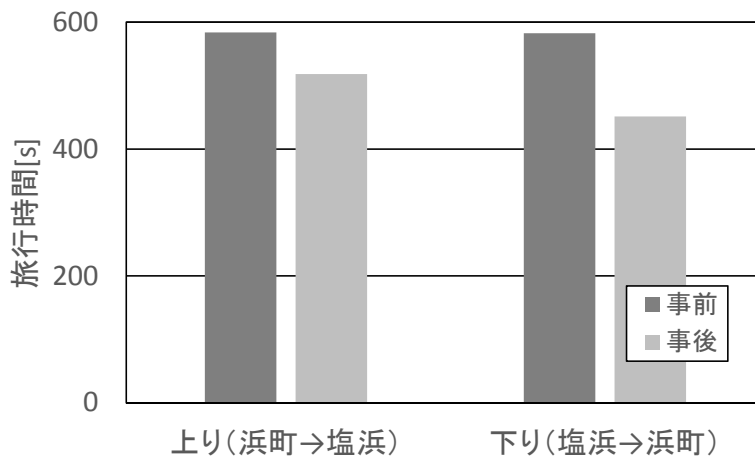


図 4.11 旅行時間比較

上り，下りでの旅行時間低減効果は，それぞれ 11.2%と 22.5%であった．対象路線に対して，一括最適化制御による制御パラメータが有効であったと考えている．

4.3 アップリンク活用

4.3.1 序言

前節で述べたように対象道路網全体の遅れ時間および停止回数を評価指標とする一括最適化制御を実運用化し、その効果を確認した。この制御方式には、対象道路網に含まれるサブエリア構成および全ての交差点のサイクル長、スプリット、オフセットを一括して最適化するという特長がある。最適化の評価指標 PI 値のもととなる遅れ時間および停止回数を交通流モデルにより推計しているため、交差点分岐率等の交通流動を表すデータを設定する必要がある。しかし、これらのデータは交通管制システムではほとんど計測しておらず、人手による調査を要することから、一括最適化制御に関する実運用は進展していなかった。

一方、交通状況を把握するための技術に着目すると、近年車両の走行状況を用いるアプローチが活発化している。具体的には、光ビーコン導入当初から収集されている車両 ID に加えて、緯度経度等の走行状況が蓄積可能な車載機を搭載したプローブカーを走行させ、その蓄積データ（以下プローブデータ）を収集するというものである。しかしながら、交通管制システムでの実利用という観点からすると、旧来から収集している車両 ID より算出した旅行時間を交通情報として用いるだけに留まっているのが実情である。そこで、アップリンク（車両 ID およびプローブデータ）が交通流動を把握できることに着目し、一括最適化制御における交通流モデル用パラメータ設定においてこのデータを活用することとした。

以下では、このアプローチに基づき近年実施してきた一括最適化制御に関する実運用事例を示すことで、取り組みの有用性を示す[50]。

4.3.2 課題認識

一括最適化制御では、最適化の評価指標である遅れ時間および停止回数を交通流モデルにより推計しているため、交差点分岐率等の交通流動を表すデータを設定する必要がある。これらのデータは一部の画像感知器では収集可能であるが、設置位置の制約等から交通管制システムにおいてはほぼ収集不可能なデータであり、人手による調査を実施することで設定をしていた。このため、一括最適化制御に関する実運用は進展していないのが実情であった。

4.3.3 アップリンク活用

光ビーコンは、1990 年代中頃から新交通管理システム(UTMS)構想のキーインフラとして導入が開始され、現在では約 55,000 基が国道等を中心に主要な幹線道路に配備されている[29]。光ビーコンの特長は、車両との双方向通信によりアップリンクと呼ばれる車両 ID 等の車両からの情報を受信しつつ渋滞等の交通情報を車両内のナビゲーションシステムに送信する機能である[1]。近年は実証実験などの取り組みにより車両 ID だけでなくプローブデータの収集も試行的に運用されており、2013 年より整備が開始された高度化光ビーコンでは従来の 4 倍のアップリンクが受信可能となっている[34]。将来的にはこれらのビーコンによるプローブデータ収集状況の大幅な拡充が期待されている。ここでは、神奈川県内における車両 ID およびプローブデータの収集状況を示して、その活用可能性を示す。

(1) 車両 ID

神奈川県内には、幹線道路を中心に約 4,300 基の光ビーコンが設定されている。このビーコ

ンからの情報の 1 年分に対して収集実態を調査した[53]. 収集状況を分析する指標として, 光ビーコンとの双方向通信を実施した車両の台数を示す車両 ID 数とその車両 ID 数が全体の交通量に占める割合を示すアップリンク率を用いる. 下式にアップリンク率の算出式を示す.

$$r_{ul} = 100 \frac{Q_u}{Q_A} \quad (4.9)$$

ここで, r_{ul} はアップリンク率を, Q_u は対象となる光ビーコンから計測された車両 ID 数を, Q_A はその光ビーコンの車両感知機能にて計測された交通量を表す. 図 4.12 は, 神奈川県全域の光ビーコンにおける 1 日の平均車両 ID 数とアップリンク率を曜日別に示したものである.

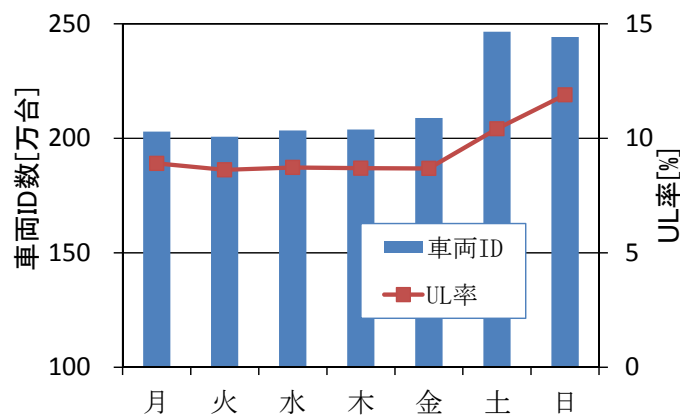


図 4.12 曜日別アップリンク収集状況

神奈川県警で調査した全国的なアップリンク率の平均は 5%程度であるが, 図 4.12 の結果は全国平均と比較すると高い収集状況であることが分かった. 次に, ビーコン毎のアップリンク率分布を図 4.13 に示す. アップリンク率 5%以上となるビーコンは全体のほぼ 9 割となっており, ビーコン単体を対象としても県内全域でアップリンク率が高いレベルであることが分かる.

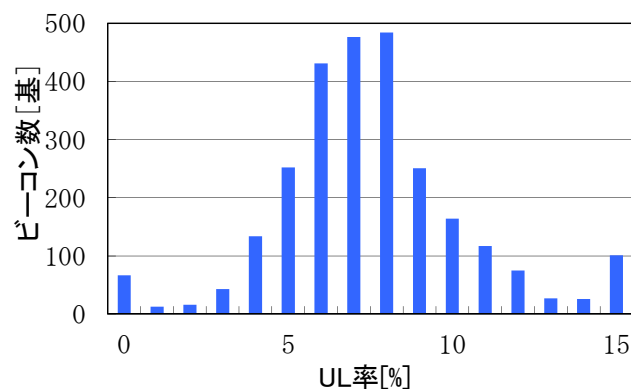


図 4.13 アップリンク率分布

さらに, 約 2 ヶ月間の車両 ID を交差点上下流でマッチングすることで交差点分岐率を算出した. 対象交差点および交差点分岐率を図 4.14 に示す.

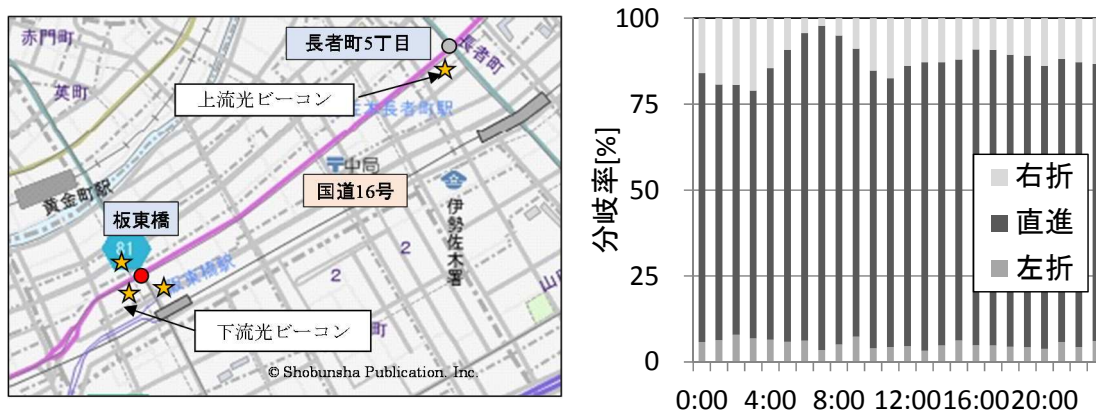


図 4.14 対象交差点および交差点分岐率

深夜や早朝以外では 1 時間あたり流入路全体で 30 台程度の車両 ID を取得できており、数ヶ月のアップリンクデータを統計的に処理することで図 4.14 のような交差点分岐率を算出可能であることが分かった。

(2) プローブデータ

神奈川県警察本部交通管制センターでは、2009 年のモデル事業により光ビーコンによるプローブデータ収集システムが設置された。まず、交通管制システムで収集されているプローブデータについて説明する。車載機ではプローブ車両が走行している位置（緯度、経度）およびその通過時刻を、時刻が 1 秒経過するか、あるいは 15 メートル走行するか、どちらかが発生した際に蓄積し、データ圧縮を行った後、そのデータをアップリンクに付加して光ビーコンに送信する[54]。交通管制センターでは光ビーコンを通じて受信した圧縮データを復元し、各車両の走行軌跡データとして保存する。さらに、そのデータにもとづいて走行速度、停止位置、旅行時間などの情報を得ることができる。神奈川県横浜市内では、試行的に一部のタクシーからプローブデータを収集し、交通管理活用に向けた検討を行っている。このシステムで 2012 年 6 月から 11 月までに収集されたタクシーのプローブデータを用いて、横浜市中心部における走行状況（時間帯毎の平均走行台数）を集計した結果を図 4.15 に示す。深夜から早朝（2:00～5:00）以外の時間帯では概ね 40 台以上の車両からデータを取得できている。

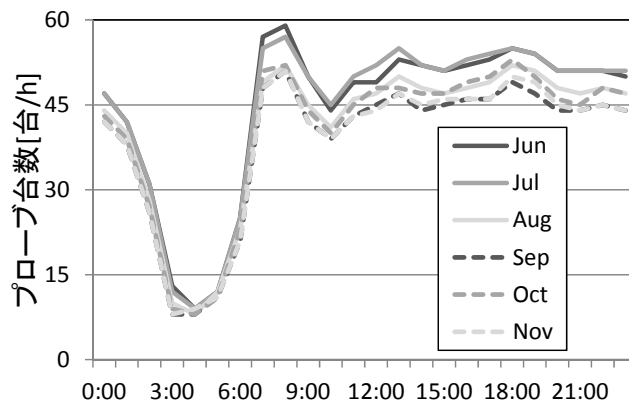


図 4.15 プローブ車両台数の分布

車両 ID と同様に阪東橋内回りの交差点分岐率をプローブデータより推計した。その結果を図

4.16 に示す。

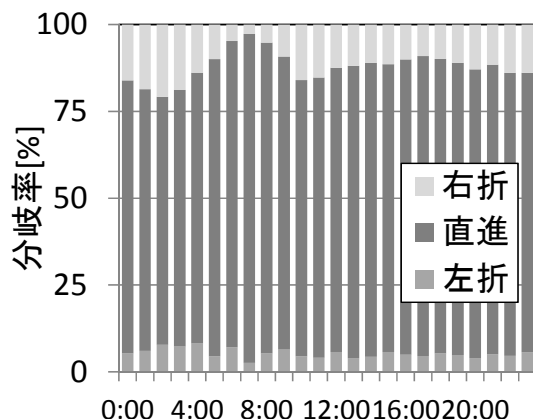


図 4.16 プローブデータによる交差点分岐率推計

図 4.16 の推計結果と図 4.14 を比較すると、非常に近い結果となっている。車両 ID と比較して走行頻度が非常に低いプローブデータでも長期間データの統計処理により車両 ID と同じようなレベルの推計結果が得られることが分かる。

(3) アプリリンクの活用可能性

車両 ID の活用可能性に関しては、神奈川県内の幾つかの路線に対して旅行時間計測装置で実装された旅行時間と車両 ID マッチングから 5 分間隔で算出した旅行時間を比較した結果により確認されている[55]。より高い収集要件が必要と考えられるリアルタイム処理で算出された旅行時間においても、その活用可能性が確認されたため、統計的な処理で算出された交差点分岐率でも十分に活用可能であると考えられる。つぎに、プローブデータの利用可能性を検証するため、タクシーによるデータが交通状況を代表し得るかという観点で図 4.14 と図 4.16 のデータを定量的に評価した。図 4.14 は一般車からの車両 ID から生成したものであり概ね交通状況を代表していると考えられる。よって、図 4.14 のデータを基準とし図 4.16 のデータに対して相関係数および平均二乗誤差を算出した。その結果、相関係数は 0.99、平均二乗誤差は 1.1 であり一般車から算出したデータと高い相関があることが分かる。さらに、この解析対象となった逆側の流入路、つまり板東橋交差点の国道 16 号の東向き流入路で同様の推計および比較を行ったところ、相関係数は 0.96、平均二乗誤差は 12 となった。これらの結果から、タクシーのプローブデータから推計した分岐率でも交通状況を代表できる可能性があることを示唆するものと考えられる。

さらに、アプリリンクの活用可能性を示すため、横浜市中心部だけでなく県内の他地域での推計を試みた。

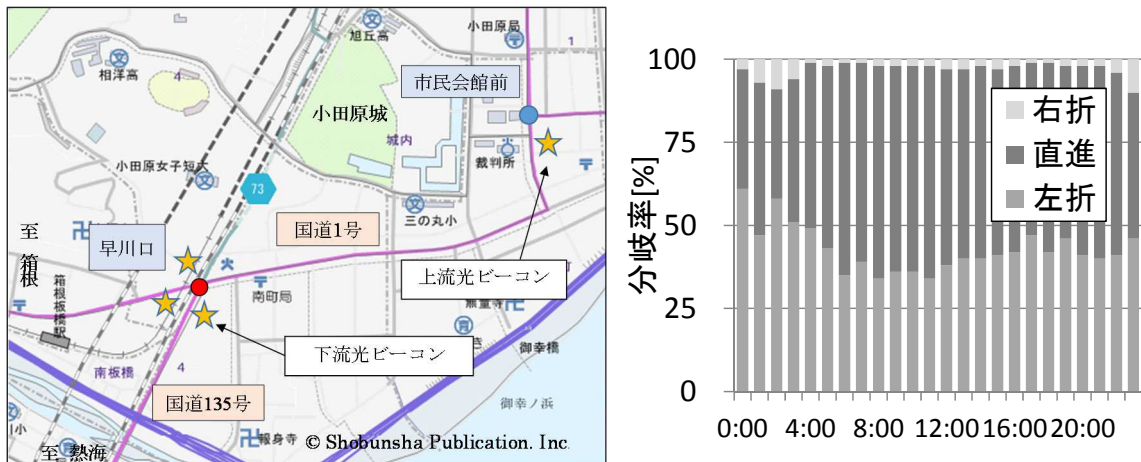


図 4.17 対象交差点概要および交差点分岐率推計結果

図 4.17 は対象とした小田原市内国道 1 号上の早川口交差点の下り方向流入路におけるビーコン配置，および交差点分岐率を平日 23 日分のデータで推計した結果である．深夜から早朝では 1 時間あたり 50 台程度，日中では 200 台以上のデータから得られた値である．これらの結果から，様々な場所での推計が可能であると考えられる．これまで述べてきたようにアップリンクから交差点分岐率を推計し活用できる可能性を確認することができた．類似した取組みも散見され，今後に向けて様々な交通管理機能への活発な活用が期待される[56], [57].

4.3.4 取組み内容とその事例

交通流モデルへの設定が負担となって，一括最適化制御は，2005 年の初運用から他の地域への展開が進んでいなかった．しかし，前述したようにアップリンクから交通挙動が推計できる点に着目し，アップリンクを活用することで着実に当該制御方式の実運用を展開してきた．その取組み内容と評価結果を示す．

(1) アップリンク活用の取組み

一括最適化制御は，内包する交通流モデルに交差点分岐率等を設定する必要がある．現行の交通管制システムではほとんど計測していない情報であり，人手による調査をもとに交差点分岐率を設定していた．この調査が一括最適化制御の適用への負担となっていたため，アップリンクにより交差点分岐率を推計し，そのデータを設定して活用することを試みた．その際，前述した車両 ID およびプローブデータの調査結果から計測データをリアルタイムに活用することは困難と判断し，長期間のデータを対象として統計的な処理を行うこととした．具体的には，時間帯毎に方向別交通量を積算した後，その方向別交通量から交差点分岐率を算出する．

(2) 適用事例

図 4.18 が対象地域を，図 4.19 が対象地域内のサブエリア構成を示したものである．



図 4.18 対象路線

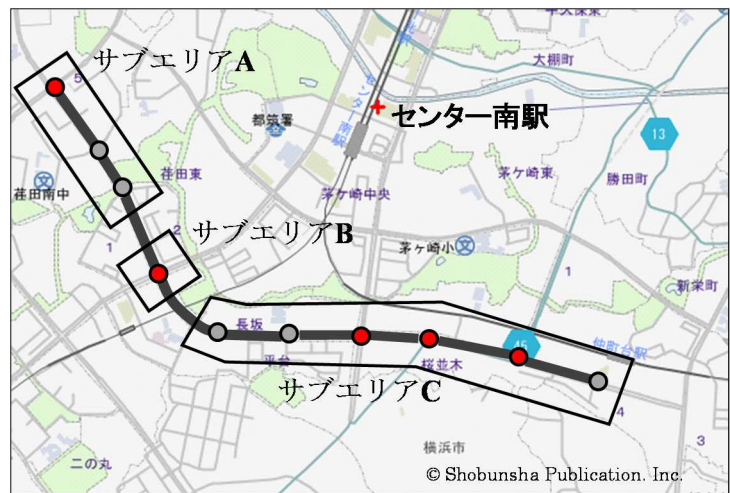


図 4.19 サブエリア構成

この地域は港北ニュータウンと呼ばれ、従来からアップリンクの積極活用が実施されており、光ビーコン設置密度が高い地域である。付近には大型商業施設が点在し、平日の日中でも比較的交通需要が多いという特徴がある。対象路線長は約 3km で、10 交差点で構成されている。図 4.18 において名称が記載されている交差点は重要交差点である。朝夕の交通状況を考慮し、平日 7 時から 19 時までを適用対象時間帯とした。

(a) 交差点分岐率の推計

重要交差点である荏田高校入口、葛ヶ谷公園西、平台、大塚原、向原の 5 交差点に関して推計を行った。車両 ID は 30 日間、プローブデータは 240 日間のデータを使用した。表 4.1 にそのデータ数を示す。

表 4.1 データ数の比較

交差点	車両 ID	プローブ
荏田高校入口	44,469	859
葛ヶ谷公園西	64,599	720
平台	82,400	710
大塚原	0	597
向原	62,918	453

大塚原交差点の流出部には光ビーコンが設置されておらずプローブデータのみの計測となっている。なお、プローブデータを光ビーコンに送信する際、車両 ID も同時に送信しており、大塚原交差点以外ではプローブデータの数は車両 ID 数にも包含されている。よって、大塚原交差点はプローブデータを、それ以外では車両 ID を用いて推計を行った。図 4.20 から図 4.23 に推計した交差点分岐率の結果を示す。

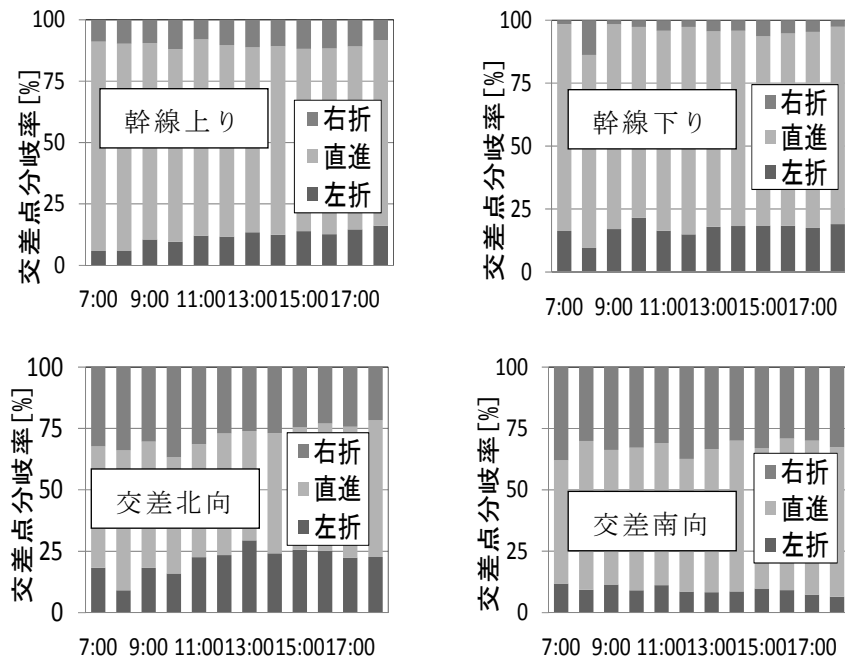


図 4.20 荏田高校入口交差点分岐率

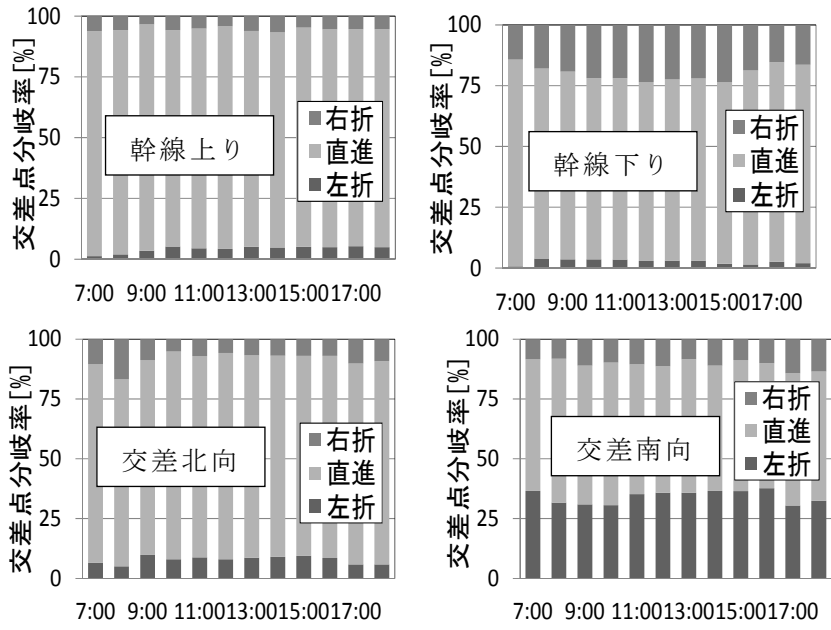


图 4.21 平台交差点分岐率

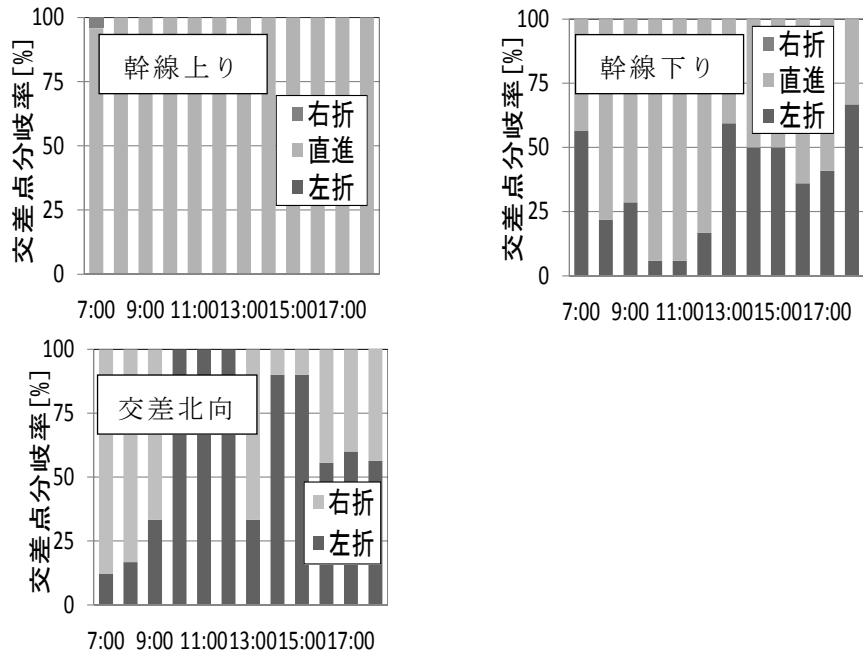


图 4.22 大塚原交差点分岐率

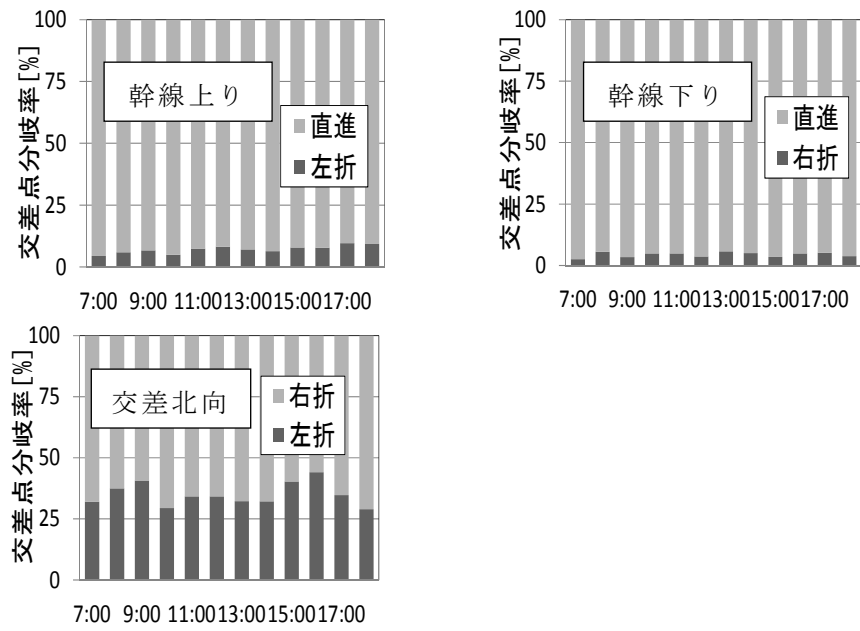


図 4.23 向原交差点分岐率

幹線方向では直進が主要な流動で、交差側からは幹線に流入する流動が主体となっている。大塚原交差点の交差南向流入出路は細街路で交通管制システム管理外であり、推計対象方向が限定されている。次に、この推計値と交通流モデル調整後の交差点分岐率とを比較した結果を図 4.24 および表 4.2 に示す。

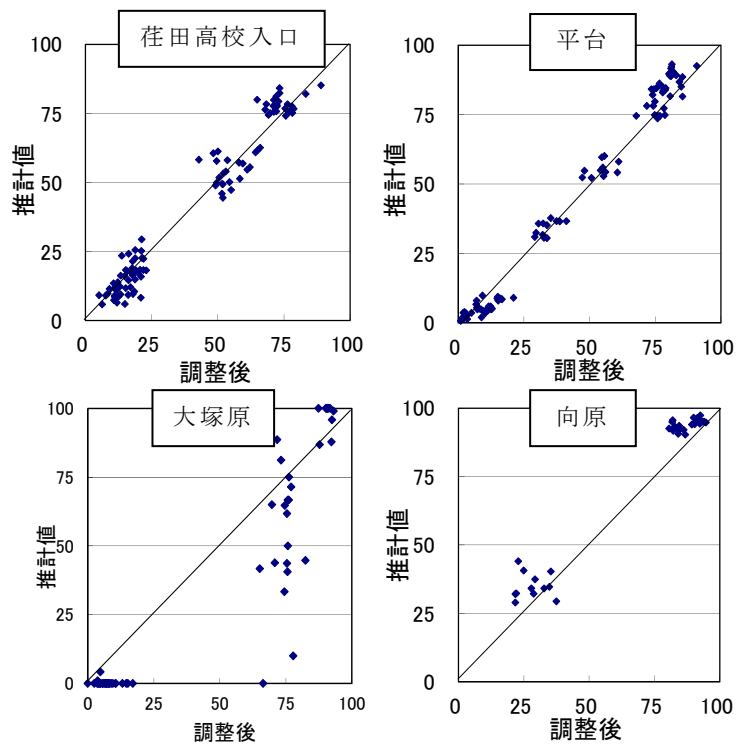


図 4.24 交差点分岐率相関図

表 4.2 調整後データとの比較

交差点	相関係数	平均自乗誤差
荳田高校入口	0.97	6.1
葛ヶ谷公園西	0.95	7.5
平台	0.99	4.4
大塚原	0.78	15.7
向原	0.86	9.5

推計結果は、概ね調整後の交差点分岐率に近い数値となっていることが確認できた。なお、大塚原交差点は交差南向流入路が細街路であることや収集データ数が少なかったため、乖離が大きくなったと思われる。

(b) 効果の評価

一括最適化制御を適用する前後の平日5日間における交通管制システムで算出する渋滞情報を用いて制御効果の評価した。本来は遅れ時間や停止回数を実測して評価することが望ましいが、これらを取得して評価することは実務上難しい。制御方式内の交通流モデルの推計値を用いることも考えられるが、モデルでは車線やリンク中間部を表現していないため、実運用としての評価は適切ではないと判断した。本制御の特長はネットワーク全体での最適化であり、対象ネットワーク全体を一定期間効率的に確認することが重要であるため、交通管制システムで算出している渋滞情報を用いた。図 4.25 の矢印は渋滞評価対象のリンクを示しており、管制システムにおける渋滞情報生成の対象となっている。なお、実線矢印は幹線側リンク、点線矢印のリンクは交差側リンクをそれぞれ表している。

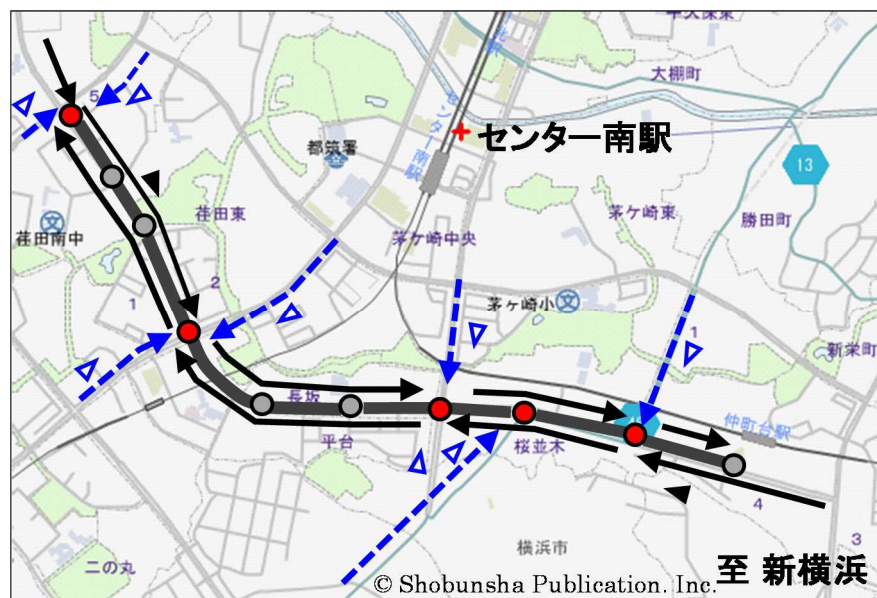


図 4.25 評価対象（リンク・車両感知器）

渋滞長の評価結果および交通量比較を図 4.26 および図 4.27 に示す。図 4.26 は事前と事後

それぞれの期間における渋滞長を生成時点毎に平均し、その値を用いて集計したものである。図 4.27 の交通量は制御を適用した 12 時間の幹線上り下りの車両感知器（図 4.25 の黒色三角形）で計測した交通量の合計および交差側の流入路における感知器（白抜き三角形）での交通量の合計を事前期間と事後期間でそれぞれ平均したものである。

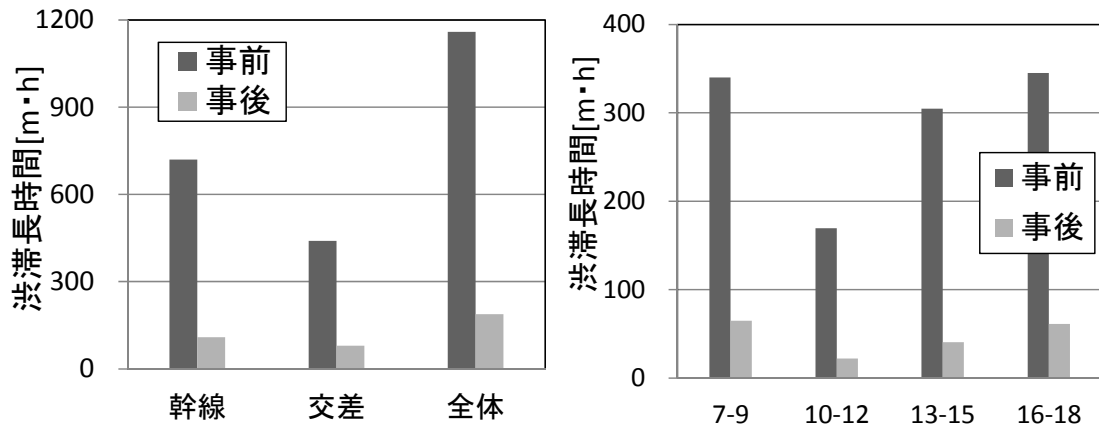


図 4.26 渋滞長時間の評価（方向別・時間帯別）

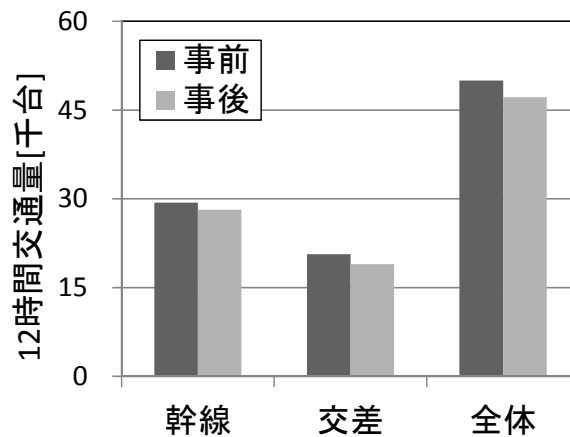


図 4.27 交通量比較

事後の交通量が約 5%程度少ない状況で単純な比較は難しい面もあるが、幹線、交差、ネットワーク全体の渋滞長時間削減効果は、それぞれ 84%、81%、83%であった。次に、時間帯毎の制御効果について確認する。7 時台から 9 時台、10 時台から 12 時台、13 時台から 15 時台、16 時台から 18 時台の渋滞長時間削減効果は、それぞれ 80%、86%、86%、82%となった。なお、一括最適化制御を適用する前は、MODERATO 制御を実施していた。図 4.28 および図 4.29 は、重要交差点における制御パラメータの比較を示す。

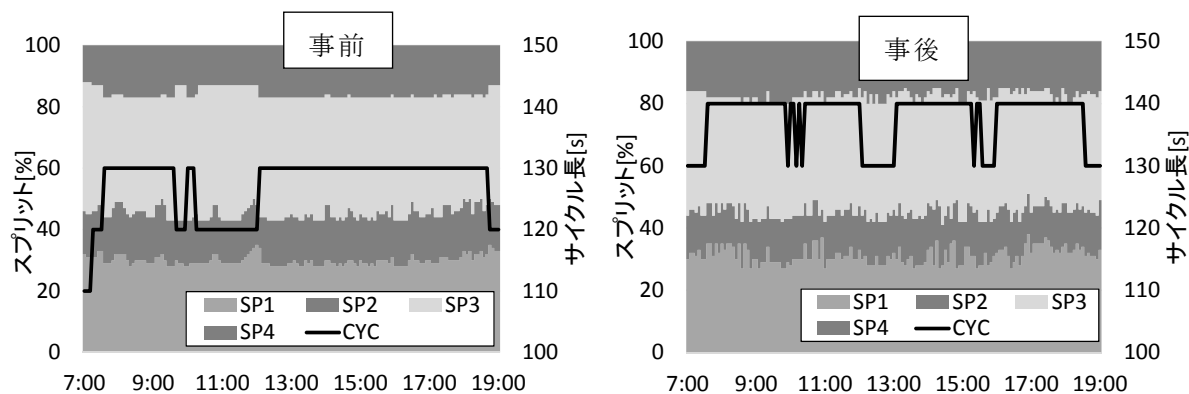


図 4.28 制御パラメータ比較（葛ヶ谷公園西）

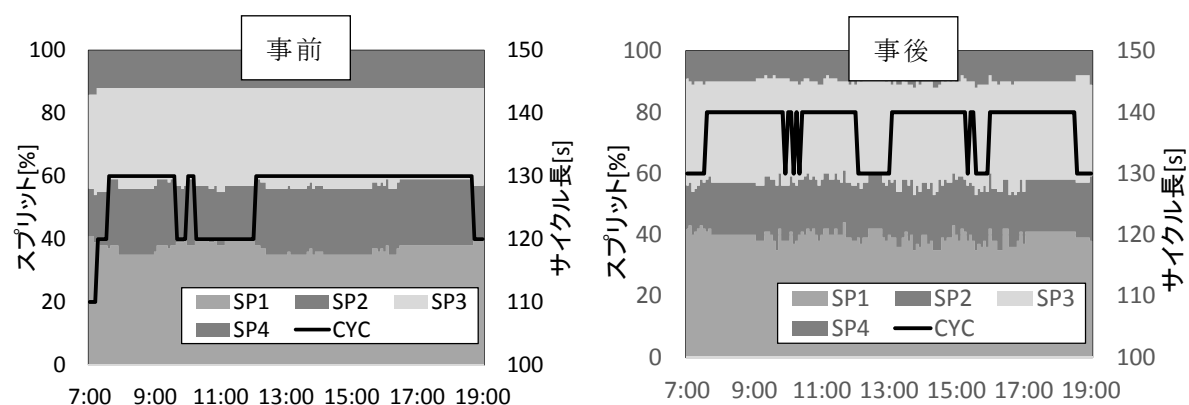


図 4.29 制御パラメータ比較（平台）

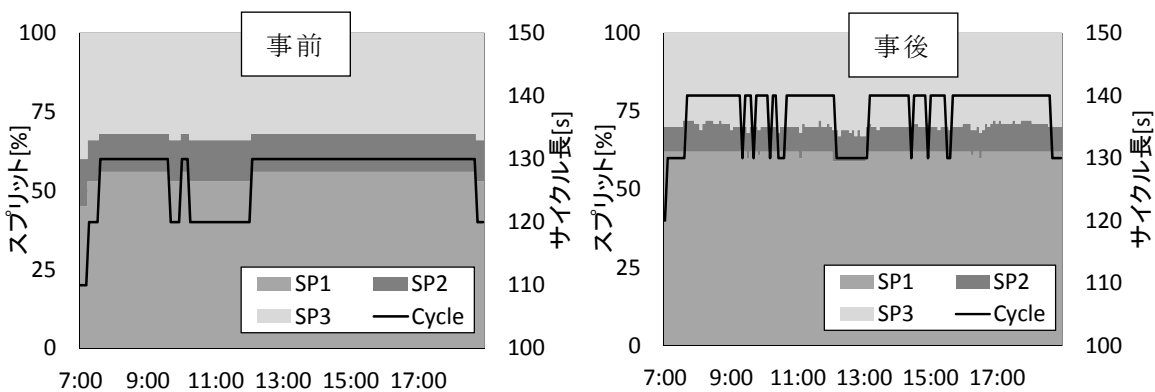


図 4.30 制御パラメータ比較（平台中央）

図 4.30 は、平台の西側にある一般交差点平台中央における制御パラメータ比較（サイクル長およびスプリット）である。図 4.28 および図 4.29 における SP1 は幹線流入路の直進左折に関する現示のスプリット，SP2 は幹線流入路の右折現示のスプリット，SP3 は交差側直進左折車両に関する現示のスプリット，SP4 は交差側右折現示のスプリットを示す。図 4.30 における SP1 は幹線側流入路の直進左折車両に関する現示のスプリット，SP2 は幹線側右折現示のスプリット，SP3 は交差側現示のスプリットを示す。なお、いずれのスプリット値も黄時間、全赤時間を含んだものである。

全体的な傾向としては、事前と比較してサイクル長を大きくし、交通状況に応じてスプリ

ットをきめ細かく変更することが渋滞削減につながったと推察される。一般交差点における制御パラメータは現行制御ではきめ細かく制御パラメータを変化させることができないが、一括最適化制御では交通流動に応じたパラメータ生成ができていていることが分かる。

次に、サブエリア構成についての比較を行った。事前では対象時間帯全てで図 4.31 のように 3つのサブエリアが結合して一つの制御エリアを形成していた。事後においても、概ね図 26のようなサブエリア構成となっていたが、13時から14時にかけて頻度は多くないが、図 4.32の構成となる場合もあった。需要が低下する正午周辺はサイクル長 130秒で一つの制御エリアでの運用となっているが、その後交通需要が増加してサイクル長 140秒で一つの制御エリアとなっていく前の過渡的な状態を反映した結果と考えられる。



図 4.31 サブエリア構成（事前・事後 1）

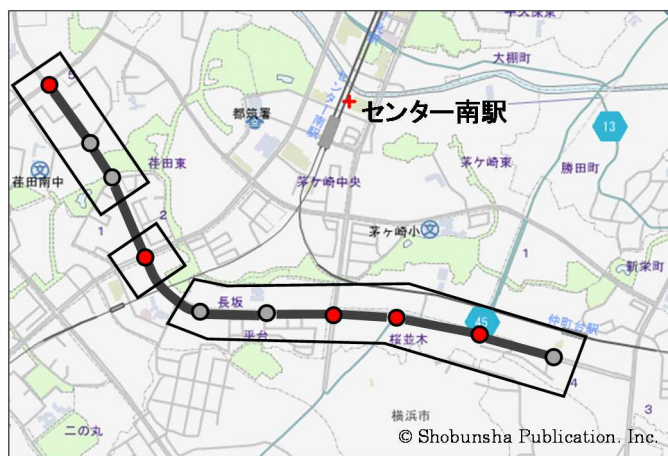


図 4.32 サブエリア構成（事後 2）

4.3.5 むすび

光ビーコンにより収集されるアップリンクに着目し、それらを一括最適化制御における交通流モデル設定に活用する取り組みの有用性を、制御の実運用事例により示した。これ以外に、同様の取り組みにより神奈川県横浜市内の国道 16号杉田周辺および国道 246号荏田周辺への効率的な制御適用を実施し、渋滞長時間に関して一定の効果をj確認している。これにより、提案した取り組みが広く展開可能であることが確認できた。

今後は、面的な広がりを持つ道路網を対象とした適用に取り組むとともに、光ビーコンからの

アップリンクと異なる情報源のプローブデータを融合して活用することも検討して適用地域を拡大していきたい。

4.4 車両感知器の低減

4.4.1 序言

交通管制システムは、車両感知器の情報を通じて交通状況を把握し、その状況に応じて情報提供や信号制御を実施するものであり、車両感知器で計測される情報は交通管理機能の全ての基礎となっている[1]。特に、主要機能の一つである信号制御は、交差点流入部等に設置された車両感知器から交通需要を把握することで、適切な信号制御パラメータを算出している。信号制御方式は、交通管制システムの発展とともに高度化されており、それに伴って必要となる入力情報が空間的かつ時間的に高分解能なものとなる傾向がある。これは、対象となる交差点ネットワークにおいて車両感知器の設置密度が高くなることを意味する。現在、厳しい予算状況にあるため、潤沢な車両感知器の整備は難しいだけでなく、これまで整備された膨大な車両感知器の運用維持という課題も深刻となりつつある。このような情勢のもと、少ない車両感知器でも現行と同等かそれ以上の効果を発揮できる信号制御方式の実現が求められている。

ここでは、このような背景のもと、運用実績のある複数の信号制御方式および一括最適化制御に対して、その特性から効果的な運用に最低限必要な車両感知器の配置基準を策定する。この配置基準をもとに仮想的な信号交差点ネットワークに対して、基準に則った車両感知器数を導出し、方式間での比較を通じて一括最適化制御の適時性を示す。さらに、実際の信号交差点ネットワークに対して、それぞれの方式について必要最低限の車両感知器で適用した場合を交通流シミュレーションにて評価する。シミュレーション結果より車両感知器整備低減と実現できる制御レベルの両面での一括最適化制御の有効性について明らかにする[51], [52]。

4.4.2 必要な車両感知器数

第2章で示した一般的な信号制御方式および一括最適化制御について、制御方式の特性から効果的な運用ができる最低限必要な車両感知器の配置基準を規定する。さらに、図4.33に示すような仮想的な信号交差点ネットワークに対して車両感知器を配置し、必要な車両感知器整備数という観点で方式間の比較評価を行う。なお、交差点間リンク長を400m、左右方向を幹線とし、サブエリアのサイクル長、スプリットを決定する重要交差点を1箇所ずつ設定した。

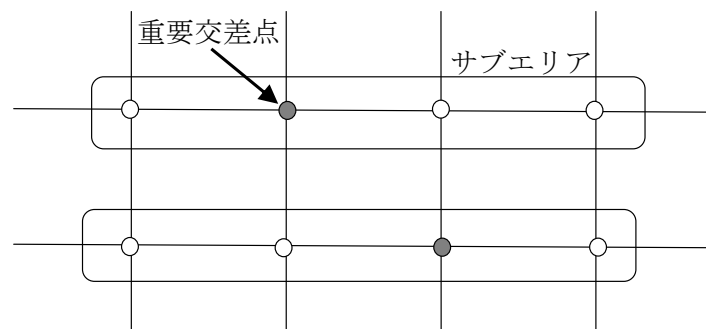


図 4.33 車両感知器数評価用ネットワーク

(1) パターン制御方式

パターン制御方式は、重要交差点における全流入路の交通状況、および幹線の上り下りといった系統状況を車両感知器で把握することで制御パラメータを選択する[58]。この特長から、感知器配置基準を表 4.3 に規定した。

表 4.3 パターン制御方式の車両感知器配置基準

用途	基準
サイクル・スプリット選択	重要交差点流入路それぞれに停止線より 150m 上流に設置
オフセット選択	重要交差点の幹線側下流部に設置

この基準を図 4.33 のネットワークに適用すると図 4.34 に示すような配置となり、16 基の感知器が必要であることがわかる。

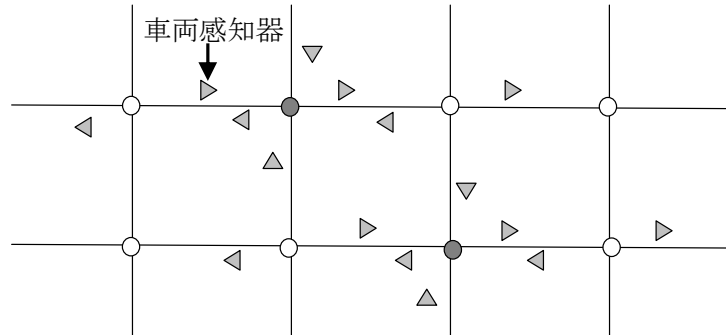


図 4.34 パターン制御方式における車両感知器配置

(2) MODERATO 制御

MODERATO 制御では車両感知器で計測された交通量だけでなく占有率等から待ち行列台数を推計して交通需要を把握することが必要となる[58]。このような観点から、MODERATO 制御における感知器配置基準を表 4.4 に規定した。

表 4.4 MODERATO 制御の車両感知器配置基準

用途	基準
サイクル・スプリット算出	重要交差点流入路の幹線側に停止線より 150m および 300m 上流、交差側では停止線より 150m 上流に設置 また、重要交差点の全流出部直近にも配置
オフセット選択	重要交差点の幹線側下流部に設置

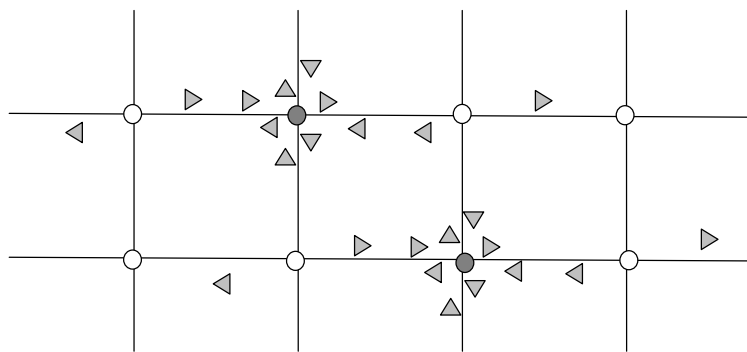


図 4.35 MODERATO 制御における車両感知器配置

図 4.33 のネットワークに対して，この基準を適用すると，図 4.35 に示すように 24 基が必要であることが分かる．

(3) 一括最適化制御

本方式は，内包された交通流モデルにより遅れ時間や停止回数を推計することで制御パラメータを最適化している．推計処理の実行には制御対象ネットワークに流入する交通需要を正確に把握する必要があるが，ネットワーク内部における交通状況は不要である．このような性質から，表 4.5 に示すような配置基準を規定した．

表 4.5 一括最適化制御の車両感知器配置基準

用途	基準
交通需要計測	対象ネットワークへの流入リンクの停止線より上流 300m に設置

この基準を図 4.33 のネットワークに適用すると，図 4.36 に示すように 12 基の車両感知器で制御可能であることがわかる．

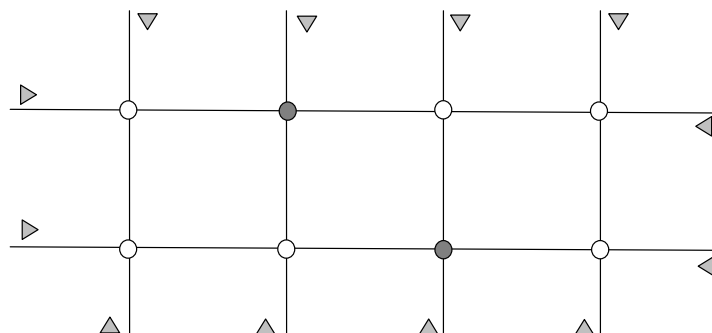


図 4.36 一括最適化制御における車両感知器配置

(4) 制御方式間の比較

仮想的な信号交差点ネットワークに対し方式ごとに策定した配置基準を適用することで，必要な感知器数を導出した．一括最適化制御，プログラム選択方式，MODERATO 制御の順で車

両感知器整備数が少なく済むことが分かった。一括最適化制御は、交通流モデルによりネットワーク全体の交通状況推計を行っている。この特長から車両感知器をネットワーク内部に設置する必要がないため、このような結果となったと考えられる。

4.4.3 交通流シミュレーション実験

実際の信号交差点ネットワークから前章の評価で用いたネットワークに近い構成のものを取り上げる。図 4.37 に、本実験で取り上げた路線を示す。神奈川県横浜市港北ニュータウン地域の路線で、24 の信号交差点で構成されている。このネットワークに対して、前述した制御方式ごとの配置基準に準じた車両感知器を用いて制御した場合を交通流シミュレーションにて評価する。



図 4.37 シミュレーション対象ネットワーク

表 4.6 は、この地域を制御対象とした場合の制御方式ごとに必要な車両感知器数を示したものである。

表 4.6 必要な感知器数

制御方式	車両感知器数
プログラム選択	42
MODERATO 制御	75
一括最適化制御	24

(1) 交通状況再現

平日の 7:00 から 12 時間の交通状況を調査し、その結果を交通流シミュレーション (AVENUE モデル) に入力した [59]。図 4.38 に示す地点において交通流シミュレーションから出力される交通量とフィールドにて計測された交通量を比較し、再現性の確認を行った。

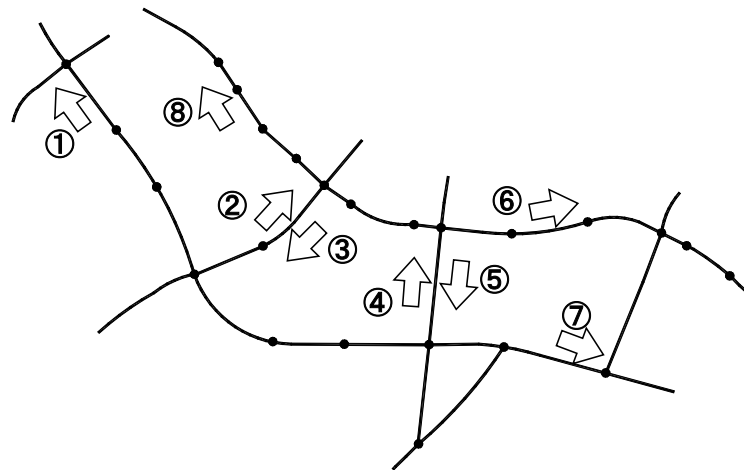


図 4.38 再現性検証地点

図 4.39 および図 4.40 が，その比較結果であるが，全体として相関係数 0.97 および平均自乗誤差率 8.2%という結果となり，制御実験を行う上での十分な再現性を確保できたと考える。

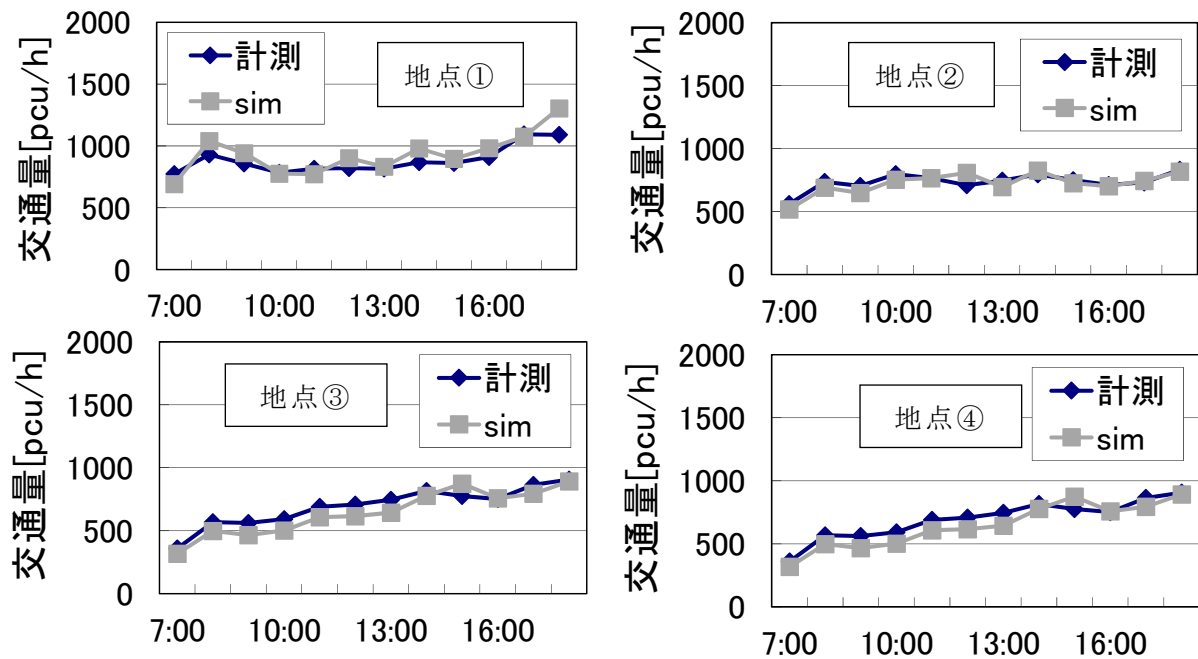


図 4.39 再現性検証結果(1)

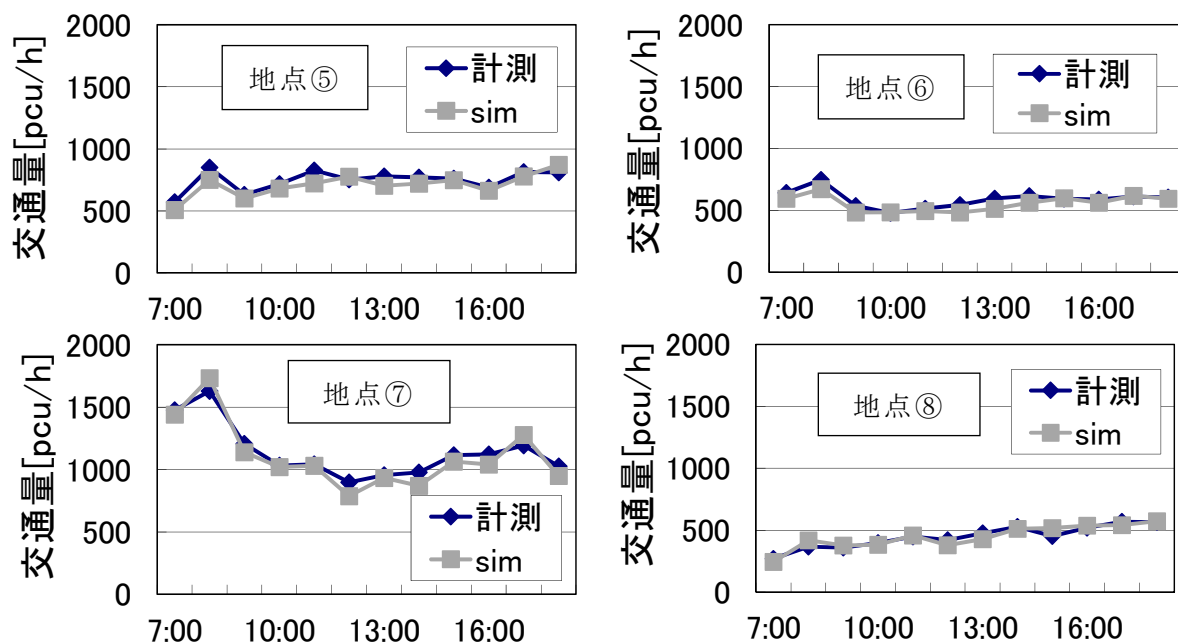


図 4.40 再現性検証結果(2)

(2) 信号制御実験

信号制御方式の効果を検証する際、制御パラメータが交通流動を形成し、その交通流動が制御パラメータの入力となる車両感知器情報を形成するというフィードバックループを実現することが肝要である。本実験で使用した交通流シミュレーションは、実際の車両感知器や信号制御機の動作をシミュレーション内部で再現することが可能であり、具備された交通管制システムとの接続インターフェイスを用いることで、図 4.41 に示す信号制御実験システムを構築した。

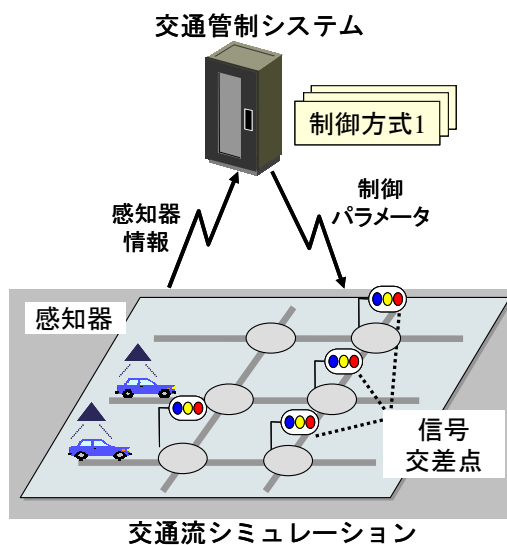


図 4.41 信号制御実験システム

これにより、交通流シミュレーションを仮想社会とみなすことで各制御方式のフィールド適用時の制御効果が比較評価可能となる。なお、いずれの制御方式でも制御パラメータ更新の周期は5分とした。

(3) 実験結果

対象ネットワーク全体での遅れ時間、停止回数、CO₂排出量を制御方式間で比較した結果を図4.42と図4.43に示す。

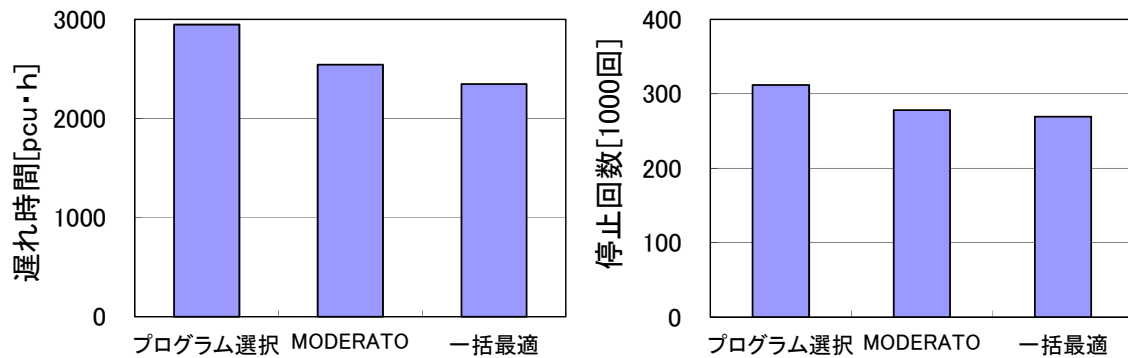


図 4.42 シミュレーション結果(1)

プログラム選択方式と比較して、MODERATO制御は遅れ時間、停止回数、CO₂排出量の低減効果はそれぞれ13.8%、10.8%、4.4%であった。一括最適化制御に関しては、同じ項目に対して、20.4%、13.7%、6.3%という効果が得られた。

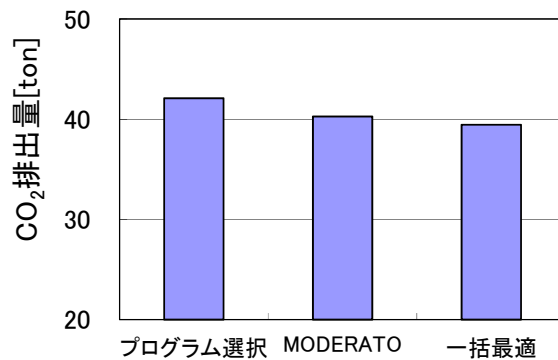


図 4.43 シミュレーション結果(2)

一括最適化制御は必要な車両感知器数が最も少ないにも関わらず、制御効果では最も効率的であることが分かる。これは、一括最適化制御は対象ネットワークへ到着する交通需要さえ把握できれば適用可能であること、および、制御パラメータ決定に際してサイクル長、スプリット、オフセット等を同時に考慮して全体最適を図っていることが要因であると考えられる。

4.4.4 むすび

交通管制システムで運用される信号制御方式および一括最適化制御それぞれに対して、車両感知器配置基準を規定することで仮想的なネットワークにおける感知器整備数を比較した。さ

らに、実際の交差点ネットワークに対しても、規定した配置基準を適用した場合の制御効果を交通流シミュレーションにより評価した。その結果、一括最適化制御は、プログラム選択方式と比べて 42%、MODERATO 制御と比べて 68%少ない車両感知器数で運用可能で、制御効果も最も高いことが分かった。一括最適化制御へ運用を変更することで、制御効果を向上させつつ車両感知器の整備数を大幅に削減することが期待できる。近年の社会情勢から車両感知器整備数低減はシステム整備および維持管理の効率的な推進を実現する上で喫緊の課題であり、一括最適化制御の展開はその解決に広く貢献する施策と期待できる。

4.5 まとめ

長年の懸案であった主要な制御パラメータの論理性確保については、サブエリア構成、サイクル長、スプリット、オフセットを一括して決定する一括最適化制御においてリアルタイムなパラメータ決定が可能となるようにメタヒューリスティクスの計算手法を改良することで実運用を実現し、その論理性は確保されるようになった。

しかしながら、一括最適化制御においては交通流モデルにより制御パラメータ決定における評価指標を推計しているため、交差点分岐率等の交通流動を表すデータを設定する必要があり、これらのデータは交通管制システムではほとんど計測しておらず人手による調査を要することから一括最適化制御に関する実運用は進展していなかった。そこで、アップリンク（車両 ID およびプローブデータ）が交通流動を把握できることに着目し、一括最適化制御における交通流モデル用パラメータ設定においてアップリンクを活用することとした。その取組みにより神奈川県横浜市内の港北ニュータウン周辺への効率的な制御適用を実施し、渋滞長時間に関して一定の効果を確認した。

一方、交通管制システムの運用事情を鑑みると、厳しい予算状況にあるため、潤沢な車両感知器の整備は難しいだけでなく、これまで整備された膨大な車両感知器の運用維持という課題も深刻となりつつある。このような情勢のもと、少ない車両感知器でも現行と同等かそれ以上の効果を発揮できる信号制御方式の実現が求められている。一括最適化制御の対象ネットワーク内の遅れ時間および停止回数を推計する処理に着目し、必要最小限の車両感知器配置を提案し、交通流シミュレーション実験で他の制御方式との比較評価を行った。その結果、一括最適化制御は制御効果を向上させつつ、車両感知器整備数の大幅な削減が期待できることが分かった。

第5章 車両感知器の故障検知

5.1 はじめに

社会インフラの一端を担う交通管制システムは、交通情報の収集提供を行うだけでなく、都市部を中心に過度に集中する車両等を効率よく流動させる交通信号制御を行っている[1], [35]. 道路の混雑状況を的確に把握し、その状況に応じた適切な交通信号制御を行うためには、都市部に縦横に広がる道路網に車両感知器と呼ぶ車の通過状況を検知する装置を数多く配置する必要がある. 実際、車両感知器総数の3分の2を占める超音波式車両感知器は全国都市部を中心に13万基以上設置されている. これらの車両感知器から精度の高いデータ収集を行うため、保守点検業務を定期的に行いその機能の保全を行っている. しかし、老朽化した車両感知器も数多くあり、頻繁に保全作業を必要とする状況であり、既に故障となっている車両感知器の存在も見逃せない. 交通管制システムにおける車両感知器の故障判別では、車両感知器自体から常に異常情報が送信されることは少なく、収集したデータの内容と実際の車両走行の状況を比較評価する方法で故障かどうかを判断し、維持管理を行っている. また、超音波式車両感知器はデータ精度の低下を伴いながら少しずつ劣化故障するケースが多いため、早期に故障を検出する手法は確立されているとは言い難い. 超音波式車両感知器を対象に上述のような故障を早期検出できる効率的かつ効果的な手法の開発が期待される. 本章では、交通量、占有時間を集約し、統計的な数値から、故障を検出する手法の検討を行う[60], [61].

5.2 車両感知器の故障検出手法

現在、交通管制システムにおいては、交通量、占有時間、パルス異常回数に関して、閾値を設定しそれ以上もしくはそれ以下であれば異常と判定している. 一般道に設置されている車両感知器は駐車車両や信号待ちの影響等を受ける. よって、一意に設定した値では一時的に異常となってしまうことも少なくない.

先行研究としては、高速道路における取組みがあり、遠藤ら[22]が交通量の連続性を前提にエラーフラグ情報と交通量の精度低下からメンテナンスに必要な情報を生成する取り組みを行っている. しかし、一般道においては、感知器がシングルヘッドであることに加え、駐車車両や信号交差点での整流、車両感知器間の交差点における車両の流入が発生するため、交通量の連続性の前提が大きく崩れてしまい、適用が難しい. また、超音波車両感知器のデータから特異なデータを検出し、突発事象を検知するような取組みもあるが[18], [19], 検出対象としては特異な交通流であるため、そのまま適用することは難しい. また、留意すべき点に一般道における車両感知器の計測特性がある. これは計測期間内に含まれる信号制御機の青時間の違いによるもので、計測データを時系列的にみると図5.1に示すように短周期での変動を含むものとなっている. このため、短時間周期での計測データに基づく故障の判定は困難である. なお、図5.1のDetAとDetBは、それぞれ同一地点の第一車線（歩道側）と第二車線（中央分離帯側）で計測されたデータである.

そこで、交通状況を代表する時間帯での平均交通量、平均占有時間に着目し、その値を使用することで、短期間変動に影響されにくい故障の検出を行うことができると考えられる. さら

に、その値を 2 次的に可視化することで視覚的に超音波車両感知器の状況を捉えられると考
える。本研究では、計測期間の最小単位（通常 5 分間で単位時間と呼ぶ）の交通量、占有時間
を集約し、一般道における超音波車両感知器の類型化ならびにそれを用いた故障検出手法を提
案する。故障検出手法については、交通流モデル（Q-k 曲線）を考慮したものと数理技術を応
用した手法を提案し、実際のデータによる判定結果の比較評価を行う。

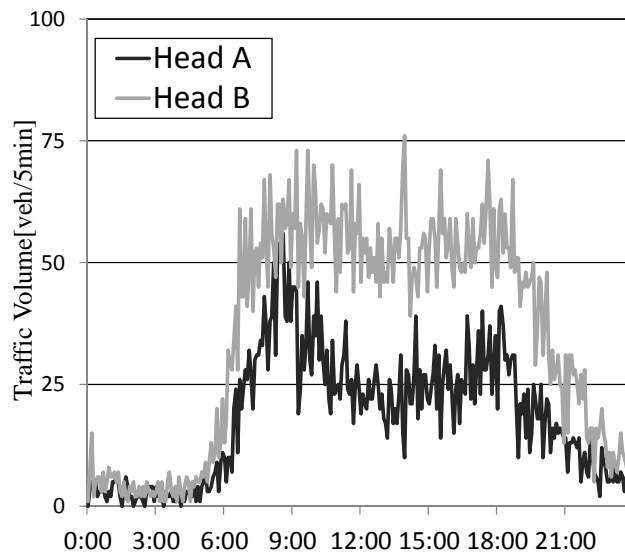


図 5.1 車両感知器データ（5 分間隔）の例

5.3 一般道における車両感知器の類型化

5.3.1 集約車両感知器情報による情報の可視化

交通需要の 1 日の時間変動の観点から深夜、朝、日中、夕方、夜の 5 つ時間帯に分割し、単
位時間の感知器データを各時間帯で平均し、集約車両感知器情報とする。各時間帯の定義を表
5.1 に示す。

表 5.1 集約時間帯

No.	名称	時間帯
1	深夜	0:00～5:59
2	朝	6:00～9:59
3	日中	10:00～15:59
4	夕方	16:00～19:59
5	夜	20:00～23:59

この情報を用いることで、一般道の車両感知器に関してその感知器の基礎的な属性が分かる。

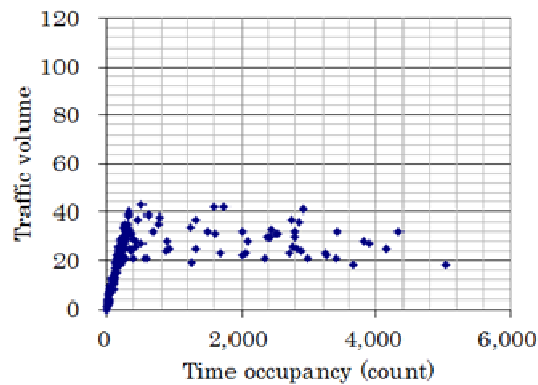


図 5.2 単位時間データの例（1 日分，288 時点）

ある 1 日分データを単位時間毎にプロットしたものが図 5.2 である．占有時間が 0 [回] から 500 [回] においては直線上に分布し，占有時間 500 [回] 以上では，交通量 20 [台] から 40 [台] の範囲で，占有時間は 500 [回] から 5,000 [回] 程度までのあいだで散布しているのが分かる．なお，占有時間計測は 50ms の超音波パルス数を積算することで実施しているため，ここでは占有時間の単位を [回] とした．1 日の 288 時点を集約車両感知器情報で表現すると図 5.3 のようになる．

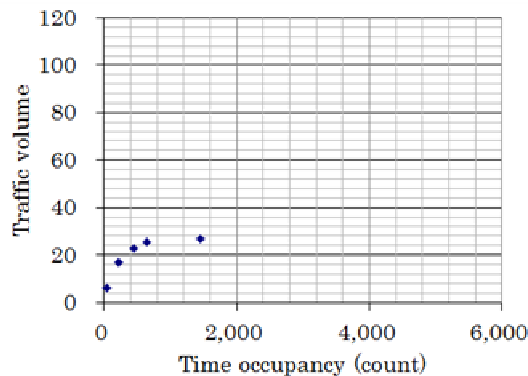


図 5.3 集約車両感知器情報の例（1 日分，5 時点）

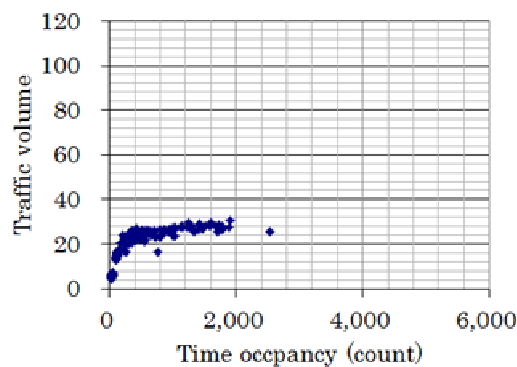


図 5.4 集約車両感知器情報の例（1 ヲ月分，155 時点）

さらに、1ヶ月分の集約情報を重ね合わせたのが図5.4である。この図ではデータのばらつきが減り、この地点の感知器として大まかな傾向を表現できていると考えられる。以降、集約車両感知器情報を1ヶ月分集計し、交通量と占有時間の散布図に可視化しデータを評価するものとする。

5.3.2 集約車両感知器情報による情報の類型化

交通量と交通密度の関係に関する調査は自動車専用道におけるものが多い。それらの調査結果から、自動車専用道においては自由流の場合には交通量と密度の関係は正比例であるのに対して、渋滞流では大きな散らばりを持っていることが知られている[62]。しかし、一般道における同様の研究事例は少ない。そこで、集約車両感知器情報を用いて類型化可能かを確認する。一般道の車両感知器は信号交差点の影響を大きく受けるため、ここでは、表5.2に示す信号交差点からの距離、設置レーン、渋滞発生の有無に着目し、6つの条件で確認を行う。

表 5.2 分類条件

分類	条件
A	本線，停止線上流 150m，渋滞なし
B	本線，停止線上流 150m，渋滞あり
C	本線，停止線上流 300m，渋滞なし
D	本線，停止線上流 300m，渋滞あり
E	右折専用付加車線，渋滞なし
F	右折専用付加車線，渋滞あり

車両感知器を抽出する際には、車両感知器がシステム上異常でないこと、目視による一定期間のカウント値と車両感知器の計測値の比較を行い誤差が一定範囲以内であることを確認することで、生成されるデータの質に関して一定の条件を満たしたものを選定する。地域としては、車両感知器が密に設置されている市街区域から選出するものとする。対象箇所は図5.5に示す横浜市北部の一般道とした。



図 5.5 調査対象箇所

各地点における1ヶ月分の集約車両感知器情報の結果を図5.6に示す。

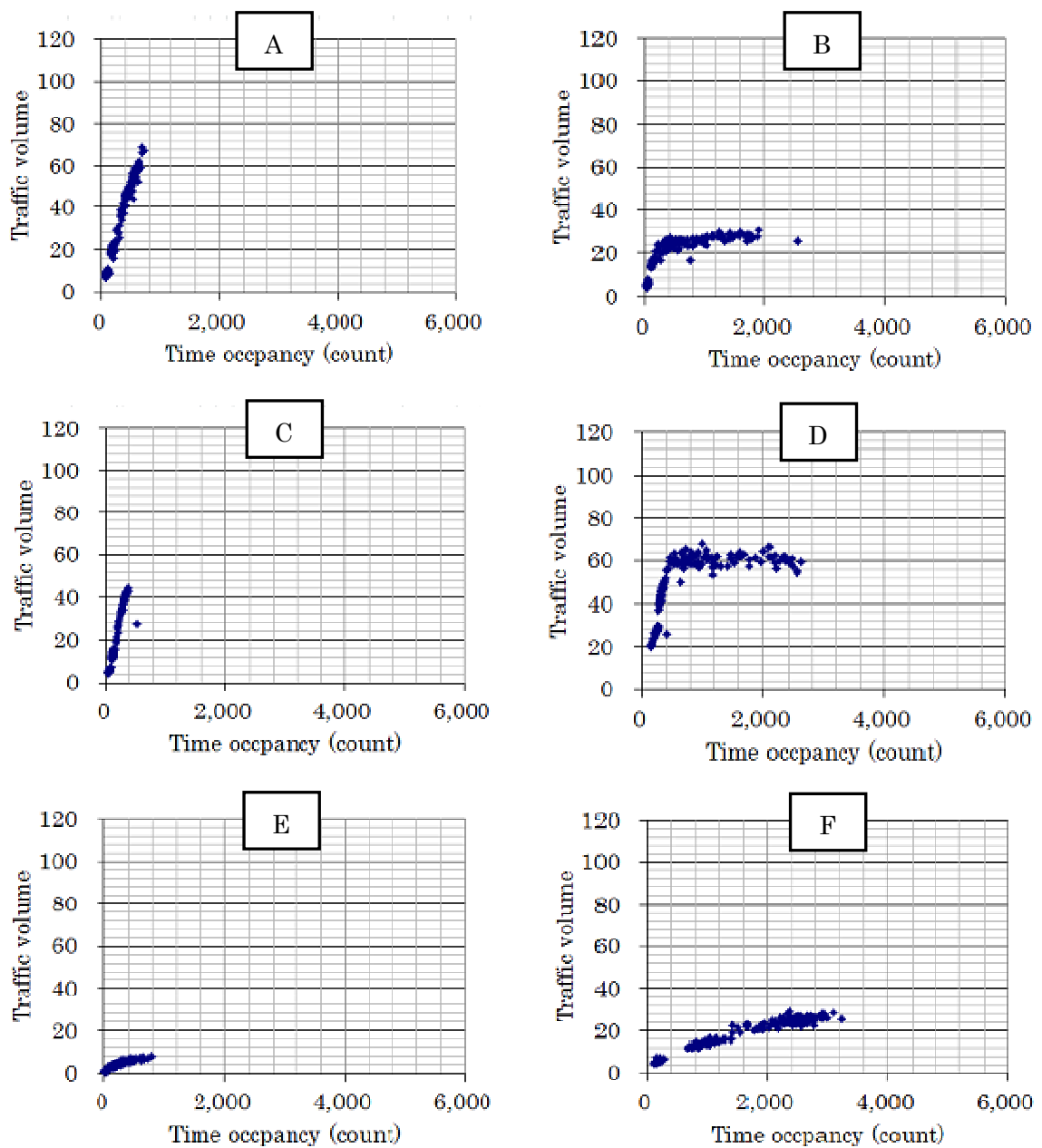


図 5.6 対象箇所における集約感知器情報

これらの結果から、渋滞発生頻度が少ない場合の本線感知器は 150m と 300m では距離による影響はなく、自由流を示す傾きが大きい直線となった。次に、右折車線上の感知器は渋滞発生の有無の影響を受け難く、傾きが小さい直線となった。また、渋滞発生頻度が多い場合の本線感知器は、青信号時間による影響が見られる。自由流を示す傾きの大きい直線と青信号時間と渋滞の影響により交通量は同等もしくは微減で占有時間が高くなる直線となった。このように、集約車両感知器情報を用いることで、設置状況の類型化が図ることが可能であるとことが分かった。

5.4 一般道における故障検出手法

5.4.1 交通流モデルによる手法

本線上の感知器は集約車両感知器情報を使うことで自由流と渋滞流に分けることが可能であることが分かった。そこで、本線上の感知器を対象とした交通流モデルを考慮した故障検出手法を提案する。図 5.7 に示すように自由流と渋滞流について異なる直線を用いて故障となる領域を定義し、その領域に集約したデータが幾つか存在した場合に故障と判定する手法を提案する（手法 1）。

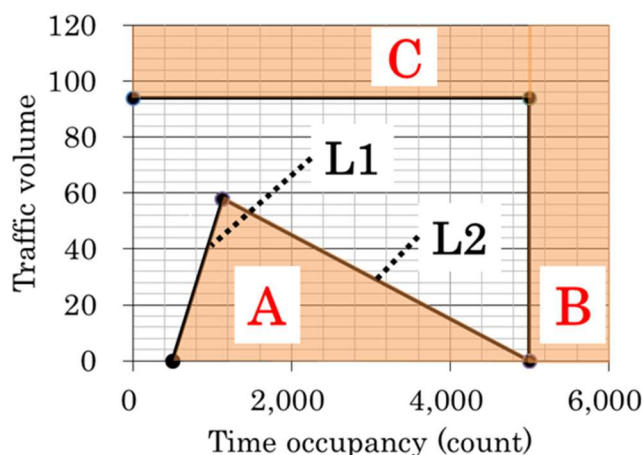


図 5.7 故障検出領域の定義

判定を簡略化するために、交通状態が比較的安定しており、異なる状況を示す昼時間帯（時間帯 3）または夜時間帯（時間帯 5）のデータを使用し判定を実施するものとした。各故障領域の定義を説明する。L1 は車長 4.5 [m] の車両が 30 [km/h] で感知器を通過したときの傾きで、ノイズを考慮し占有時間 500 [回] 分ずらした直線である。L2 は、L1 の交通量が 60 [台] である点から 0 [台]、5,000 [回] を結ぶ直線である。領域 A は車両感知器の故障の 1 つである占有率が高止まる事象に焦点を合わせて設定した。次に集約された情報として 5,000 [回] を平均的に出している場合は故障である可能性が高いことから、領域 B を定義した。領域 C は、交通量が実態と乖離して非常に高い数値となる事象を検出するために設定した。これは、比較的大きいとされるサイクル長 150 [s]、運用上の上限に近いスプリット値 78%および制御調整等の実務上で使用される飽和交通流率 1,440 [台/時] から観測され得る最大交通量 94 [台/5 分] を閾値とした。具体的な判定処理のフローを図 5.8 に示す。

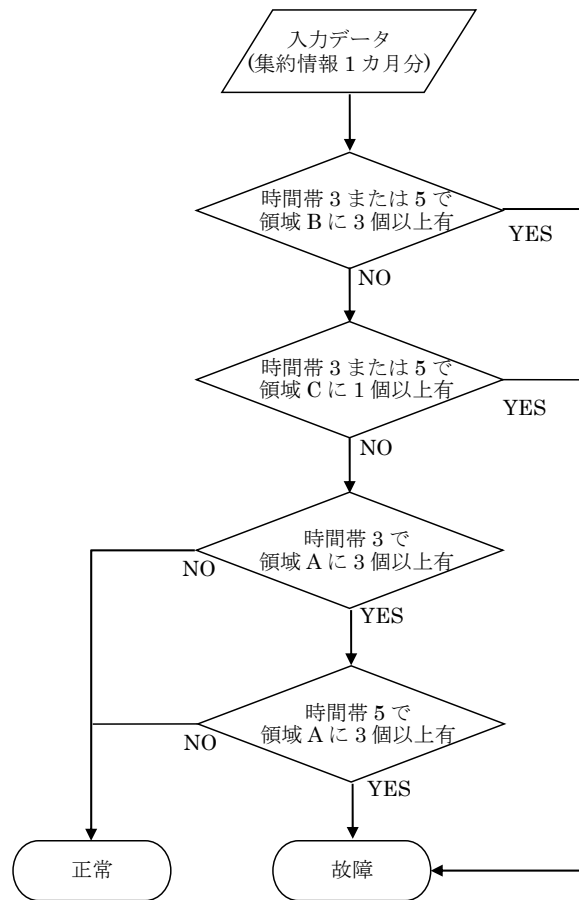


図 5.8 処理フロー（方式 1）

5.4.2 数理技術による手法

近年，様々な分野において 2 クラスのパターン認識を行う数理技術が研究されている．ここでは SVM(手法 2-A)とニューラルネットワーク(手法 2-B)を適用する．SVM(Support Vector Machine)は，最適超平面法とカーネル法を組み合わせた手法であるが，その高い識別能力や識別器構築に理論的なサポートがあること等から応用事例も多い．ニューラルネットワークは，パターン認識技術として長年活用されているが，近年のビックデータ分析における深層学習の基礎技術として再び脚光を浴びている．ここでは，一般的に使用される入力層，出力層，隠れ層から構成される階層型ネットワークを用いる．この 2 つの手法に対しても，交通流モデルによる手法と同じ 1 ヶ月間の集約情報を入力とするが，学習処理を安定させるために集約情報に対して主成分分析を施し，さらにデータを集約したもので識別処理の入力とする．

表 5.3 方式 2-A における設定

カーネル関数	パラメータ
線形	—
ガウス関数	0.1, 1.0, 10, 100
多項式関数	2, 3

表 5.4 方式 2-B における設定

隠れ層の数	活性化関数	誤差関数
1	シグモイド	バイノミナル
	ソフトマックス	バイノミナル
	ソフトマックス	マルチノミナル
2	シグモイド	バイノミナル
	ソフトマックス	バイノミナル
	ソフトマックス	マルチノミナル

手法 2-A ではカーネル関数の種類とそのパラメータを, 手法 2-B では出力層の活性化関数と誤差関数の種類を設定する必要がある. 数値実験に用いた設定を表 5.3 と表 5.4 に示す.

5.4.3 数値実験

提案手法による故障感知器の検出状況を確認するため, 数値実験を行う. 横浜市青葉区・都筑区を中心とした 840 基の感知器から, 前述した調査により予め正常と判明している感知器と保守記録より故障として対応した記録の分かるものを対象に実施する. 検証に使用するデータは, 2014 年 8 月とし, 保守記録で故障の発生が 2014 年 8 月 1 日~31 日のもので, かつ, 8 月 1 日時点で故障が残っていたものとして抽出した. このデータの感知器状態の内訳は, 正常感知器は 10 基, 故障感知器 6 基である. 手法 2-A と手法 2-B は, 学習データが必要であるが, 上記の検証データと異なる感知器を抽出し, 期間としても異なる日程 (2014 年 6 月 7 日~2014 年 7 月 31 日) のデータを使用した. 学習データにおける感知器状態の内訳は, 正常感知器 12 基, 故障感知器 28 基である. 検証データによる識別結果で最も良い結果となったのは表 5.5 で, 3 つの手法それぞれで同一結果となった. ただし, 手法 2-A と手法 2-B では一部の設定のみ表 5.5 の結果となった. その際の設定を表 5.6 に示す.

表 5.5 判別結果の精度

実際の状態 \ 判別結果	正常	異常
	正常 (10 基)	10 (100%)
異常 (6 基)	1 (17%)	5 (83%)

正常感知器の正答率は 100%であった. 次に, 故障感知器に関しては 83%の正答率であった. 感知器が無反応となる状況 (交通量 0 [台]・占有時間 0 [回]) は検出することができなかったが, これは現行システムにより検出可能なものである. よって, 全般的に比較的良好な結果となった. 手法 2-A では, 複雑な処理をしない設定のものが良い結果を算出した. 本手法は前述したように最適超平面法とカーネル法の組合せである. 表 5.6 にはカーネル関数を線形とした場合が含まれており, これは最適超平面法のみ実施したことと等価である. 入力情報として利用されている集約情報自体が線形空間で分離可能な状態となっている事を示唆している. カーネル関数を多項式とした場合も, 3 次ではなく 2 次が表 5.6 に含まれている. 手法 2-B に関

しては、隠れ層の数が1で、活性化関数がソフトマックスのとき最良の結果となった。これは、前述したように入力情報は性質が良いため、隠れ層は少ない方が良いが、誤差逆伝搬法により最適なパラメータを導出する際にソフトマックスを活性化関数とすると探索空間が広くなり、より良いパラメータを得られる可能性が高いためと考えられる。3つの手法のいずれでも良好な結果を得ることができたが、社会インフラシステムにおいては故障時における機器の運用状況を提示できることが求められているため、同程度の識別性能ならば説明可能性の点から手法1の方が望ましいと考えられる。

表 5.6 最良結果算出時の各手法の設定

方式	パラメータ
1	—
2-A	線形
	多項式: 2
2-B	隠れ層の数: 1 活性化関数: ソフトマックス 誤差関数 : バイノミナル
	隠れ層の数: 1 活性化関数: ソフトマックス 誤差関数 : バイノミナル

次に、多数の感知器に適用しその検出状況等を確認するため、前述の全 840 基の感知器に関して手法 1 を試行した。故障判定されたものは 65 端末で全体の 7.7%であった。検出された感知器の状況に関して優先度を付けて確認するため、車両感知器内部で検出して交通管制センターへ送信されるパルス異常回数による並び替えを行い、そのうち上位 5 端末について調査を行った。これは端末数の 0.6%であり、そのなかで 3つの車両感知器は保守記録で故障として記載があった。残る 2つの車両感知器を地点 G と地点 H として、図 5.9 に故障判定に使用した日中（時間帯 3）および夜（時間帯 5）における集約車両感知器情報の状況を示す。

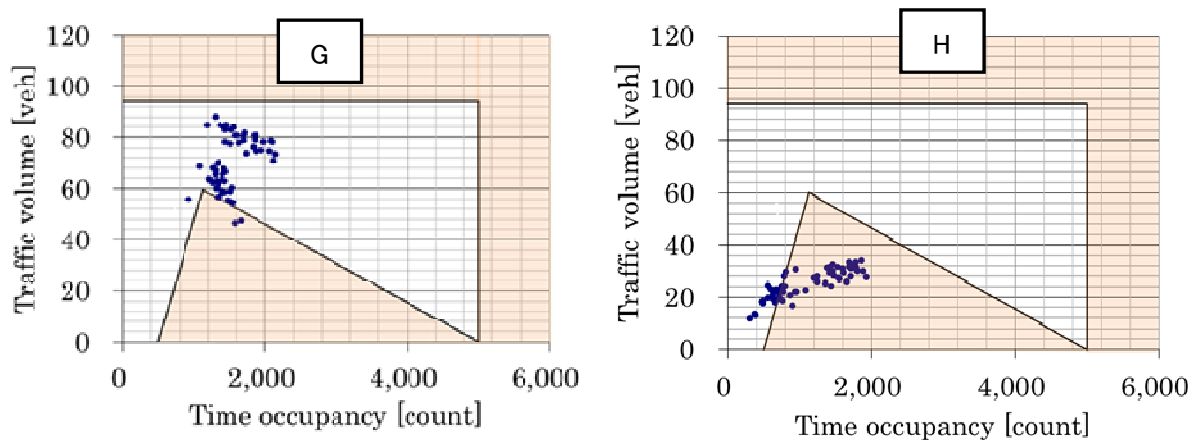


図 5.9 故障が想定される地点の集約感知器情報

図 5.9 から分かるように地点 G の感知器は占有時間が深夜、夜間を含め 1,000 [回] を下回る
 ことが少なく、台数も 30 台以上となっていることから、何らかの異常を示していると考えら
 れる。地点 H に関しては、データが交通流モデルから逸脱する領域にあり、故障が疑われる
 状況であった。このようなデータを示す地点 G と H について、現場で動作状況を確認した。
 地点 G に関しては動作不良があり、感知器の電源電圧調整を行い復旧した。また地点 H につ
 いては、3 車線構成の感知器であり、超音波送受器（ヘッド）間の干渉が疑われたため、ヘッ
 ド向きを修正した。両地点共に保守作業後のデータを図 5.10 に示す。

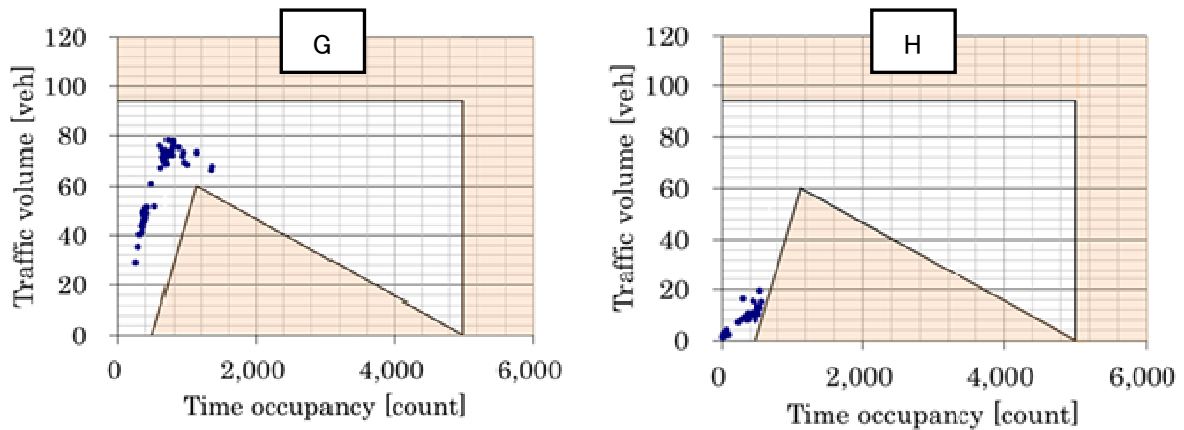


図 5.10 保守対応後の集約車両感知情報

地点 G と地点 H の感知器ともに保守作業後のデータは、原点に近づき、ばらつきが少ないこ
 とが分かる。また、再度方式 1 を試行したところ正常な感知器として判別されることが確認で
 きた。

5.5 まとめ

集約車両感知器情報を用いて、一般道の車両感知器情報の可視化を図り、設置状況の類型化
 が可能であることが示唆された。渋滞発生頻度が高い本線上、渋滞発生頻度が低い本線上、右
 折レーン上と大きく 3 つに分けることができた。次に、交通流モデルによる交通量と占有時間
 の関係性を用いて故障領域を設定し、集約車両感知器情報を用いて故障を検出する手法を提案
 するとともに、近年活用が進んでいる数理技術による識別手法の応用も試みた。いずれの手法
 でも、正常感知器の正答率は 100%，故障の正答率 83%となり、比較的良好な結果となった。
 さらに、840 基の感知器に対して交通流モデルによる手法を試行し、全体の 7.7%が故障とし
 て抽出された。さらに優先度の高い 5 端末抽出について確認したところ、故障の記録済みも
 しくは実機確認で故障状態であったことから、提案手法の有効性が確認できた。今後は、さら
 なる数値実験を重ねることで、実用化に向けた改良を図っていきたい。

第6章 オフライン信号制御の改善

6.1 はじめに

前述したように、信号制御は、運用形態における分類としてオンライン信号制御とオフライン信号制御に分けられる。オンライン信号制御の特徴は、信号制御機と交通管制センターに設置された中央装置と専用回線で接続され、車両感知器の計測情報をもとに交通状況に応じた制御パラメータを用いて制御が実行されることである。一方、オフライン信号制御は、交通管制センターと接続されず、ほとんどの信号制御機が時限表と呼ばれる日種（平日、土曜、日祝）および時間帯と実行する制御パラメータの対応表をもとに信号制御を実施している。オフライン信号制御の制御設計においては、調査員による交通状況調査にもとに技術者が交通状況を類型化し、その類型化した状況ごとに最適な制御パラメータを算出している。この作業の結果として時限表が完成し、信号制御機それぞれに反映される。作成された時限表および制御パラメータは設計直後においては適切なものであるが、適用から長い年月が経過すると周囲の交通状況が変化している可能性もあり、信号制御設定の見直しが必要である。しかしながら、第1章で述べたように、予算における課題および熟練技術者の減少のため、十分な時間間隔で見直しが行われていない状況である。

第2章で述べたように、近年プローブデータを交通管理に活用することを目指し、積極的に研究開発が実施されている[27], [63], [64]。本章においても、プローブデータが車両感知器設置位置以外の交通状況も保持していることに着目し、このデータを用いて信号制御設定（制御パラメータや時限表）を算出する手法を提案する[26]。また、提案手法の有効性を確認するため、算出した信号制御設定を実際の信号制御機に適用するフィールド実験を実施する[65]。

6.2 オフライン信号制御

オフライン信号制御は、前述したように地点制御とも呼ばれており、孤立交差点もしくは小規模な交差点群を対象に運用される。制御パターンとして10種類、閃光動作や各種感応機能の動作切替は日種別（平日、土曜、日祝）に4[回/日]まで設定可能である。小規模な交差点群で運用される場合は、系統制御が適用され共通サイクル長およびオフセットの設定が必要となる。このような制御運用を系統多段という。図6.1に、その例を示す。

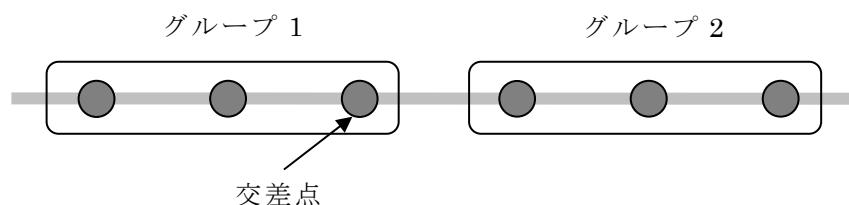


図 6.1 系統多段のグループ

6.3 プロブデータを用いた制御パラメータ算出

オフライン信号制御の路線における交通状況を把握するために、プローブデータを活用する。オフライン信号制御で運用されている路線は、オンライン信号制御が適用された箇所と比較して交通量はかなり少ない。このため、プローブデータを利用するにあたり、数ヵ月から1年という長期間の統計データを用いることとする。

6.3.1 信号制御設計のための交通指標算出

プローブデータから交差点の各流入路における総遅れ時間を推計し、その推計値から制御設計に寄与する交通指標を算出する。以下に具体的な手順を述べる。交差点 k ，現示 i ，流入路 j における総遅れ時間 d_{ij}^k は、プローブ交通量 q_{ij}^k と、その旅行時間 τ_{ij}^k を用い、下式にもとづいて算出する。

$$d_{ij}^k = q_{ij}^k (\tau_{ij}^k - \bar{\tau}_{ij}^k) \quad (6.1)$$

ここで、基準旅行時間 $\bar{\tau}_{ij}^k$ は規制速度による旅行時間であり、 $\tau_{ij}^k \geq \bar{\tau}_{ij}^k$ となる場合には $d_{ij}^k = 0$ とする。この d_{ij}^k を用いて、下式によりグループ全体の総遅れ時間を求める。

$$D = \sum_k \sum_i \sum_j d_{ij}^k \quad (6.2)$$

図 6.2 に算出例を示す。本指標値は、サイクル長設定の類型化に用いる。

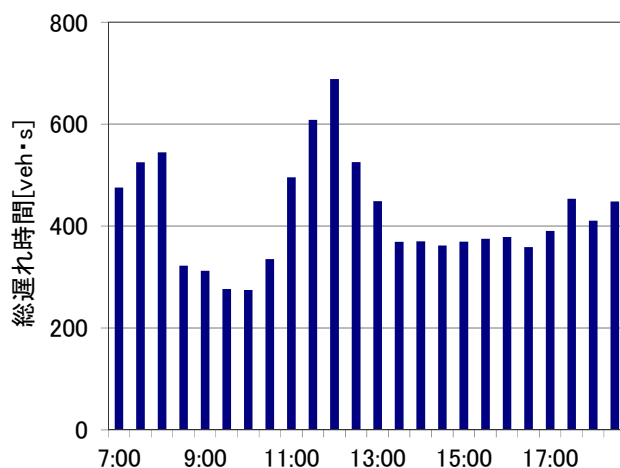


図 6.2 グループにおける総遅れ時間算出例

次に、現示 i に対するスプリット λ_i^k を算出するために MODERATO 制御における算出方法を導入する。ただし、使用する交通指標として負荷率のかわりに遅れ時間 d_{ij}^k を用いることとする。算出式を以下に示す。

$$\lambda_i^k = \frac{\max_j d_{ij}^k}{\sum_i \max_j d_{ij}^k} \quad (6.3)$$

$$\sum_i \lambda_i^k = 1 \quad (6.4)$$

さらに、オフセットに関する指標値を算出する。各グループに対して、系統路線における方向 r の対象となる現示および流入路は交差点ごとに一つ定まる。それらを i^* と j^* として、その総遅れ時間を δ_r とすると、系統方向における総遅れ時間は下式で求めることができる。

$$\delta_r = \sum_k d_{i^* j^*}^k \quad (6.5)$$

この δ_r を用いて、オフセットに関する指標値 ρ_r を下式より求める。

$$\rho_r = \frac{\delta_r}{\sum_r \delta_r} \quad (6.6)$$

$$\sum_r \rho_r = 1 \quad (6.7)$$

図 6.3 に、スプリットに関する指標値およびオフセットに関する指標値の算出例を示す。

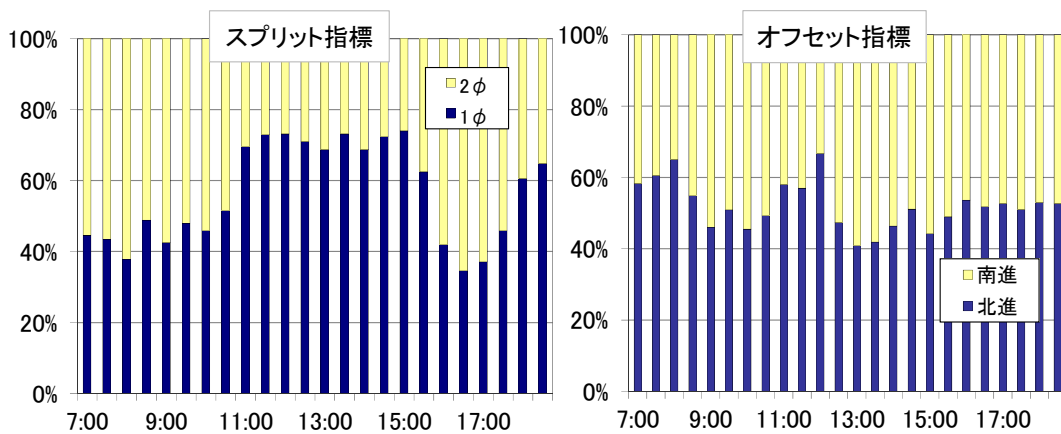


図 6.3 スプリット指標およびオフセット指標の算出例

6.3.2 制御パラメータおよび時限表の設計

プローブデータから生成された3つの指標値に対して時間帯を軸として1つのデータセットとして扱い、このデータセットをクラスタリングすることにより時限表および制御パラメータパターンを導出する。クラスタリング手法には、さまざまなソルバーに実装されている `kmeans` 法を用いることとした。データセット構造とクラスタリングイメージおよび制御パラメータおよび時限表の導出例を図 6.4 と図 6.5 に示す。

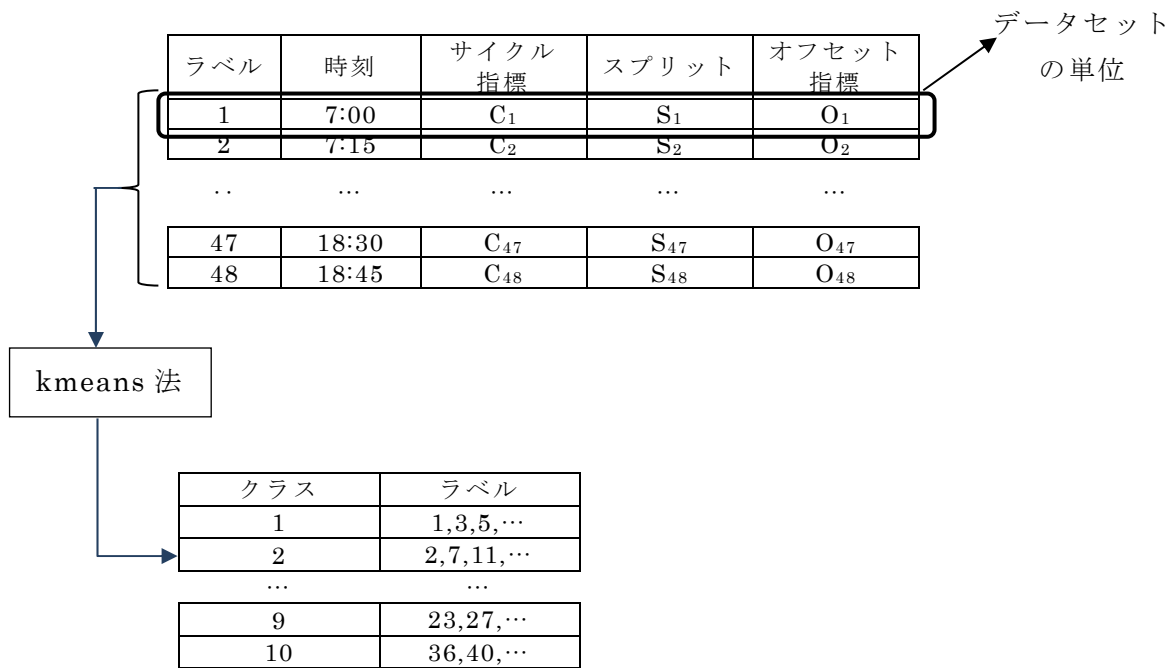


図 6.4 データセット構造およびクラスタリングイメージ

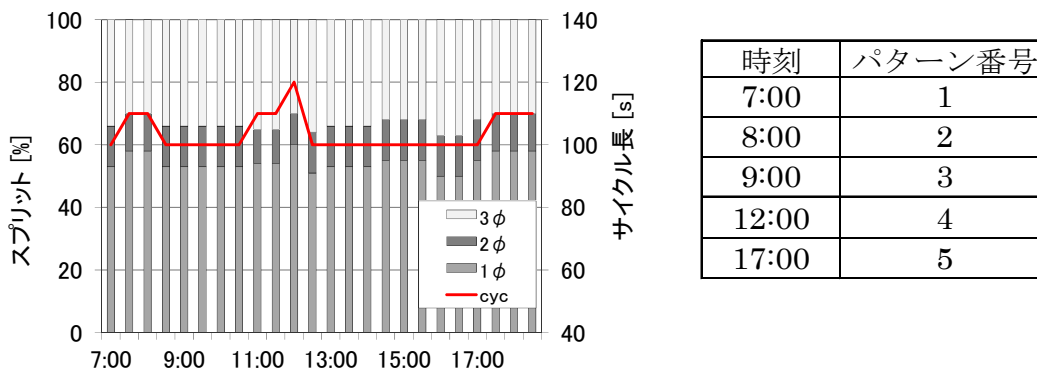


図 6.5 制御パラメータおよび時限表の計算例

6.4 フィールド実験

図 6.6 に実験対象路線を示す。この路線は神奈川県横浜市瀬谷区にあり、典型的な都市郊外部に位置する。図 6.6 から分かるように、2つの交差点グループから構成されているが、信号制御機設置から 10 年以上が経過し、日中を中心に制御パラメータ設定と交通状況が適合せず、混雑が散見されている。まず、実験の手順について概説する。対象地域は、プローブ車両等の走行が見込めない地域であったため、プローブ車両混入率 0.05% で 150 日間分のデータとなるような頻度で平日 7 時から 19 時までプローブデータ搭載機を搭載した車両の走行を 2 か月程度行い、搭載機内に蓄積されたプローブ情報を収集する。また、信号制御の効果評価のために、対象道路網における交通量および待ち行列を人手による調査を実施して取得する。交通量につ

いては交通流シミュレーションを設定し、再現性確保のために各種パラメータの調整を行う。次に、プローブデータを前述した方式で処理し、その結果をもとに現状に適した制御パラメータおよび時限表を策定する。最後に、新しい制御設定で実際の信号制御機を運用し、その効果を実測調査で取得した待ち行列や交通流シミュレーションで推計した CO₂ 排出量によって評価する。

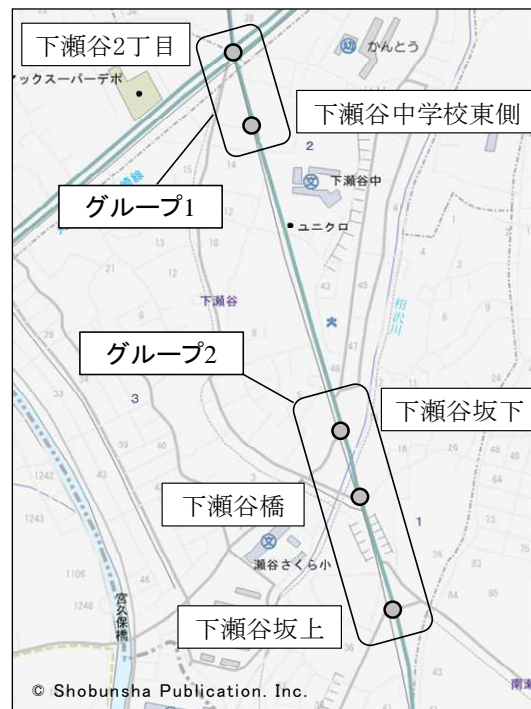


図 6.6 対象路線図

6.4.1 シミュレーション設定

取得したデータは、交通流シミュレーションに反映して再現性の確認を行った。

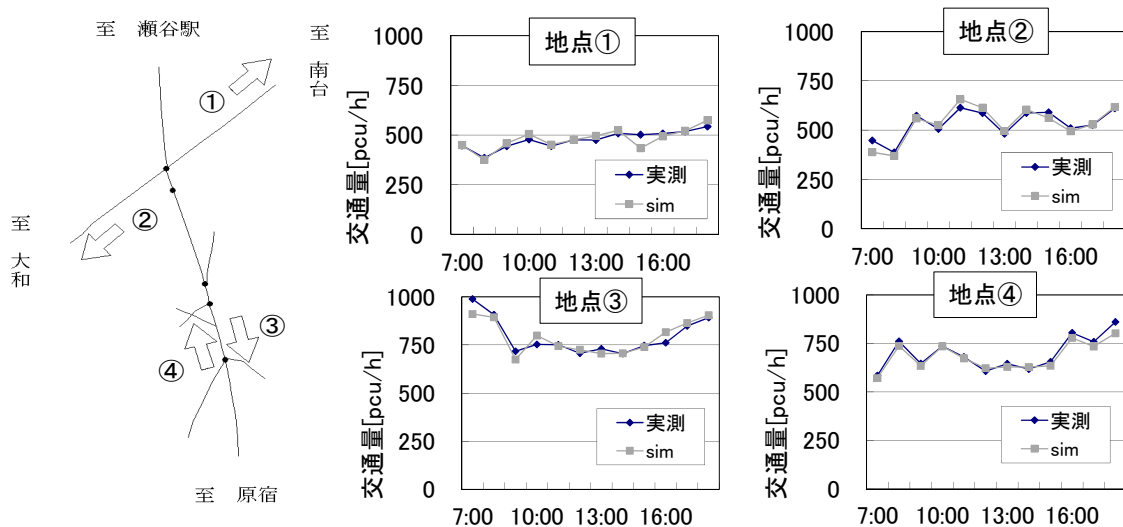


図 6.7 再現性検証結果

実測した交通量とシミュレーション内の交通量を比較評価した。

図 6.7 は、交通量比較地点と比較結果である。比較地点すべてで相関係数 0.9 程度という概ね良好な結果が得られた。シミュレーション上に仮想的なフィールドを構築できたものとする。

6.4.2 制御設定の策定

対象路線のプローブデータを用いて各リンクにおける総遅れ時間を算出し、そのデータをさらに制御パラメータ設定用の指標値に変換した。サイクル長に関する指標値の結果を図 6.8 に示す。さらに、スプリット指標およびオフセット指標の算出結果を図 6.9 と図 6.10 に示す。

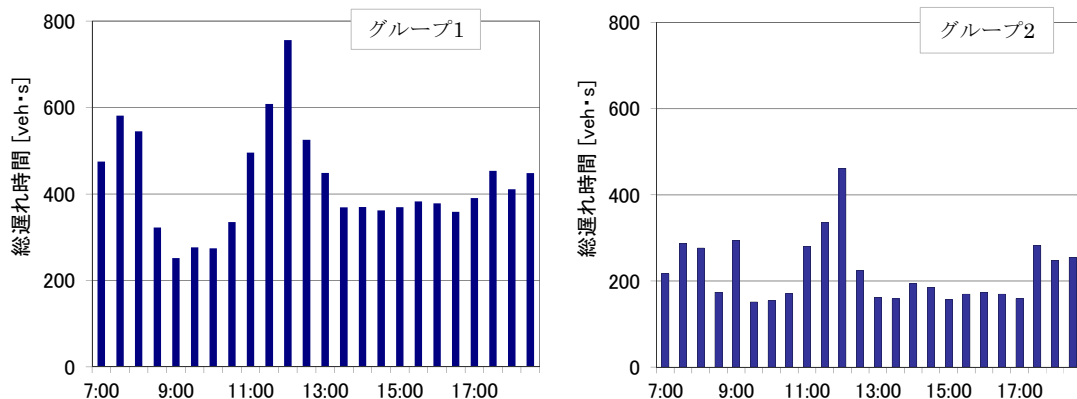


図 6.8 サイクル長指標の算出結果

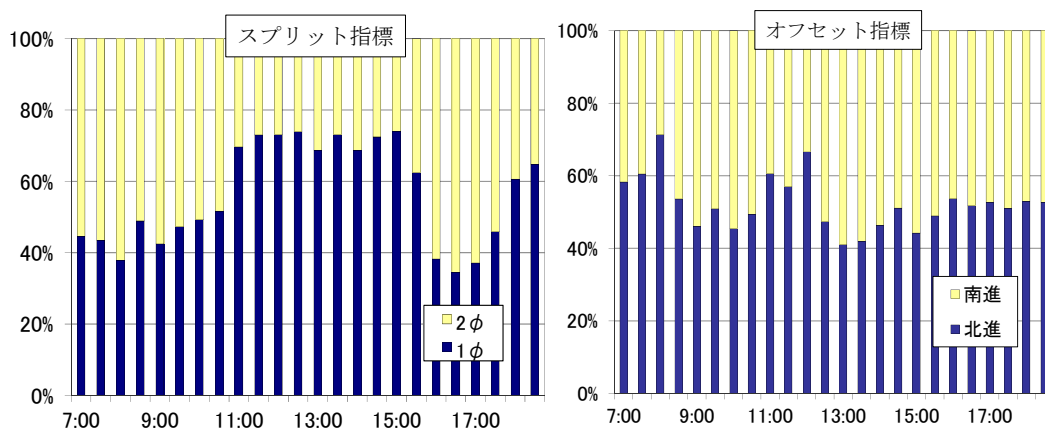


図 6.9 スプリット指標とオフセット指標の算出結果（グループ 1）

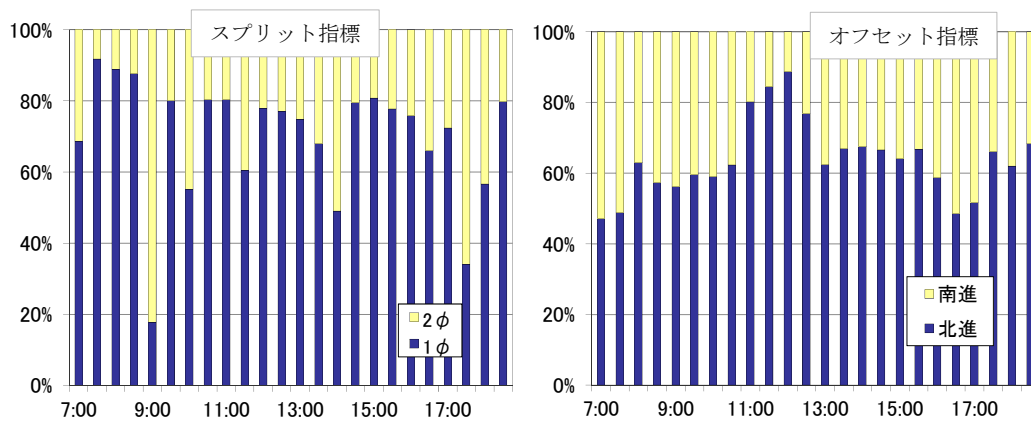


図 6.10 スプリット指標とオフセット指標の算出結果（グループ 2）

なお、スプリット指標はグループ内の代表的な交差点での算出結果である。グループ毎にデータセットを作成し、クラスタリングによる類型化結果から時限表および制御パラメータを策定する。その結果を表 6.1 および図 6.11 に示す。

表 6.1 時限表の算出結果

グループ 1		グループ 2	
開始時刻	パターン番号	開始時刻	パターン番号
7:00	1	7:00	1
8:00	2	7:30	2
8:30	3	8:30	3
11:00	4	9:00	4
12:00	5	9:30	3
12:30	6	11:00	2
16:00	7	12:00	5
18:00	6	17:30	3
		18:00	6

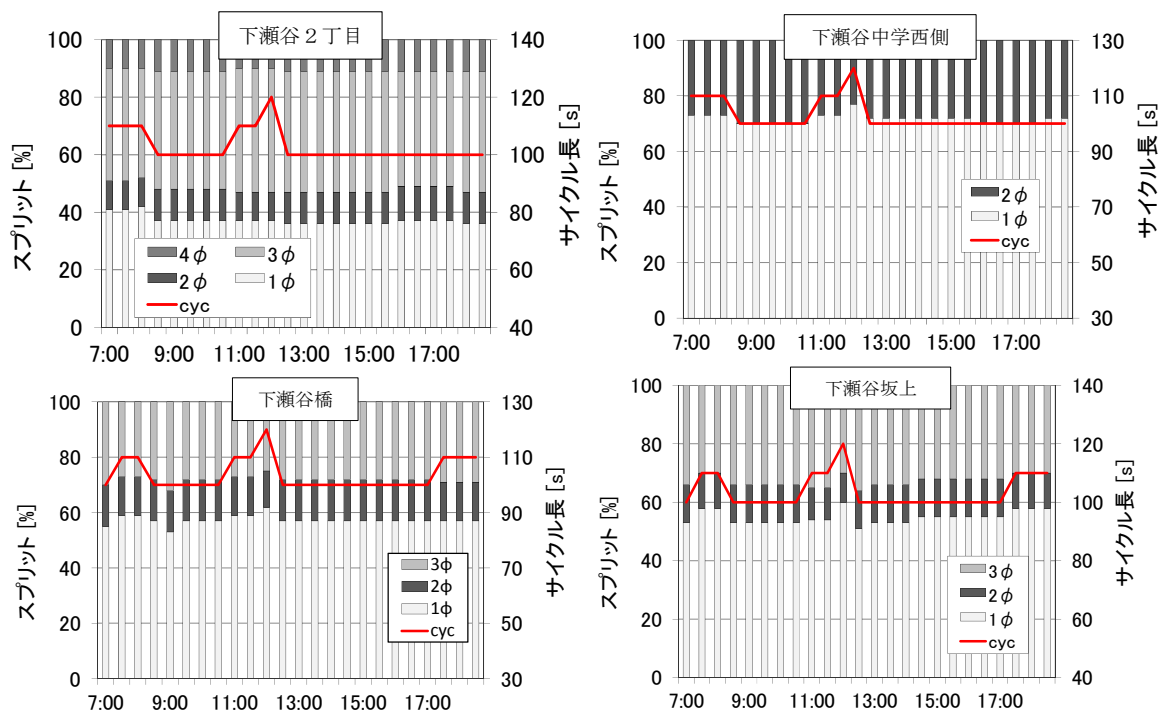


図 6.11 算出された制御パラメータの例

6.4.3 制御効果検証

策定した時限表および制御パラメータを実際の信号制御機へ適用した。設定変更の前後において実測した待ち行列長とシミュレータにて推計した CO₂ 排出量について比較を行った。事前を設定変更前、事後を設定変更後として比較した。図 6.12 に、待ち行列長、CO₂ 排出量の比較結果を示す。

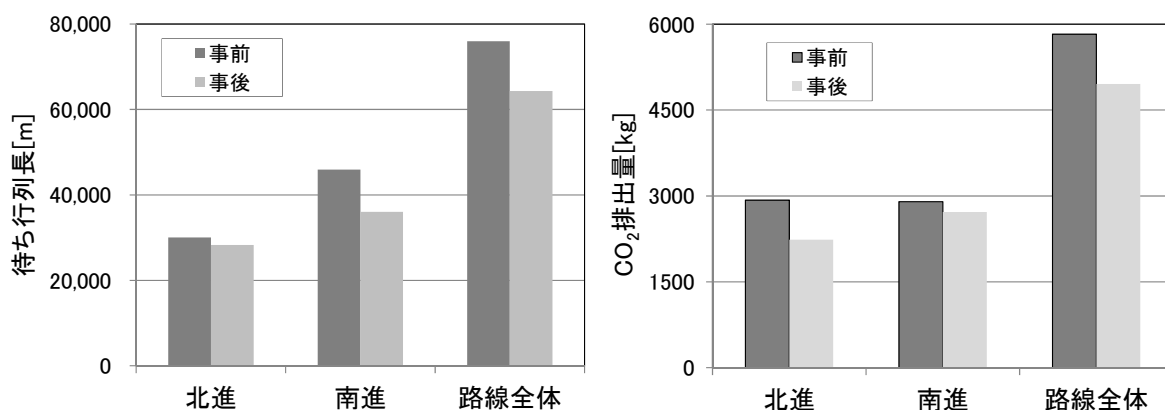


図 6.12 制御効果の比較

待ち行列長の低減効果は北進，南進，路線全体それぞれで，5.7%，21%，15%であった．CO₂排出量の低減効果は北進，南進，路線全体それぞれで，26%，6%，14%であった．待ち行列長としての効果は南進の方が大きいですが，CO₂排出量は北進の方が大きい．これは，北進の交通量の方が大きいためと推察される．

6.5 まとめ

長期的に収集したプローブデータを統計的に処理して制御パラメータごとの指標値を算出し，その指標値から信号制御設定を導出した．その設定を実際の信号制御機を反映した結果，路線全体で待ち行列およびCO₂排出量低減が可能であることが分かった．本章で提案した手法がプローブデータの信号制御への活用方策の一つとして有用であると示すことができた．今後はこれらの成果にもとづき，引き続きデータ検証を行いながら，プローブデータのさらなる有用性を見出して交通管制への活用に結び付けていく．

第7章 結論と将来展望

7.1 本研究の結論

本研究では、我が国を含めた先進各国が直面する高度の成熟社会を背景として交通管制システムの基幹機能である交通信号制御における課題を明らかにし、その解決に向けた検討を行った。交通管制システムは、他の社会インフラと同様に戦後の高度成長期における社会の発展とともに急速な拡大を続けたが、現在は国や都道府県の予算逼迫により既存機器の維持管理さえも困難な状態となっている。このような背景から、交通信号制御における課題を機能・設計面に関するものと運用面に関するものに大別して抽出した。機能・設計面に関する課題としては、システム導入から40年以上経過しても確立されない制御パラメータ生成の論理性である。また、長年渋滞頻発地点として渋滞状況を解消できないボトルネック交差点が存在しており制御設計手順の見直しも課題である。運用面の課題としては、熟練技術者不足による維持管理業務の遅滞および維持管理費の圧迫によるシステムの機能レベル低下が挙げられる。制御パラメータ生成の論理性に関しては、メタヒューリスティクスおよび交通流モデルを活用した制御パラメータ一括決定手法の実用化と展開を検討した。長年改善されないボトルネック交差点に関しては交差点需要率を評価指標とした交通状況に応じた信号現示設計手法を検討した。次に、維持管理業務の支援として交通流モデルや数理技術を応用した車両感知器故障検知やプローブデータのクラスタリングによる信号制御設定の見直しの検討を実施した。維持管理遅滞から生じるシステム機能低下に対しては、一括最適化制御による使用感知器数低減を検討した。

以下、各章ごとに、研究内容および結果について述べる。

第1章は、本研究の背景、目的、内容について述べるとともに、研究内容の先行研究との関係についても言及した。社会全体が高度の成熟社会を迎えるにあたって課題に直面しているが、交通信号制御も多くの課題を抱えている。さらに、サステイナブルな交通管制システムを実現するという観点から、本研究の意義を示した。

第2章では、まず我が国における交通管制システムの概要について述べるとともに、交通信号制御の基本事項を概説した。次に、信号制御方式の分類や設計手順を説明した後、現行の交通管制システムに実装されている交通順応制御方式を説明した。

第3章では、流入路毎に一つの現示を割り当てるという流入路別信号現示の設計方法を提案した。さらに、この現示案の適用可否を決定するための事前評価方法として、交差点需要率を基準とする手順も提案した。次に、神奈川県内でボトルネック交差点を取り上げ、提案信号現示の策定および事前評価を実施した。さらに、立案施策を実際に適用し、その効果に関して交通管制システムデータ等を用いて検証を行った。その結果、対象とした2つの交差点ともに渋滞低減および事故減少を確認できた。一般的な信号現示設計では渋滞を低減できなかった交差点においても、流入路毎で交通状況が大きく偏りがある場合は、車線毎の走行方向指定見直しを含めた提案信号現示の適用が渋滞低減に寄与する可能性があることを示している。

第4章においては、まず長年の懸案であった主要な制御パラメータの論理性確保について検討した。サブエリア構成、サイクル長、スプリット、オフセットを一括して決定する一括最適化制御についてリアルタイムなパラメータ決定が可能となるようにメタヒューリスティクス

の計算手法を改良することで実運用を実現し、その論理性は確保されるようになった。また、一括最適化制御においては交通流モデルの設定である交差点分岐率等の交通流動を表すデータが必要であるが、これらのデータは人手による調査を要するため、本制御の実運用が進展していないという課題があった。そこで、アップリンク（車両 ID およびプローブデータ）が交通流動を把握できることに着目し、一括最適化制御における交通流モデル用パラメータ設定においてアップリンクを活用する制御適用方法を提案した。提案した適用方法を神奈川県横浜市内の港北ニュータウン周辺の路線に対して実施し、渋滞長時間に関して一定の効果を確認した。最後に、少ない車両感知器でも現行と同等かそれ以上の効果を発揮できる信号制御方式の実現が求められているという背景のもと、一括最適化制御の対象ネットワーク内の遅れ時間および停止回数を推計する処理に着目し、必要最小限の車両感知器配置を提案した。交通流シミュレーション実験で他の制御方式との比較評価を実施した結果、一括最適化制御は制御効果を向上させつつ車両感知器整備数の大幅な削減が期待できることが分かった。

第 5 章では、予算削減や熟練技術者の減少により遅滞している車両感知器の維持管理業務を支援することを目的に集約車両感知器情報を入力とした交通流モデルによる手法および数理技術による手法を提案した。まず車両感知器情報の高周波成分を除去するために、あらかじめ規定した 5 つの時間帯で平均化する集約車両感知器情報を提案した。これを用いて、車両感知器情報の可視化を図り、設置状況の類型化が可能であることが示唆された。次に、交通流モデルによる交通量と占有時間の関係性を用いて故障領域を設定し、集約車両感知器情報を用いて故障を検出する手法を提案するとともに、近年活用が進んでいる数理技術による識別手法の応用も試みた。いずれの手法でも、正常感知器の正答率は 100%、故障の正答率 83%となり、比較的良好な結果が得られた。さらに、840 基の感知器に対して交通流モデルによる手法を試行し、全体の 7.7%が抽出された。さらに優先度の高い 5 端末抽出について確認したところ、すべて故障の記録済みもしくは実機確認で故障状態であったことから、提案手法の有効性が確認できた。

第 6 章では、予算削減および熟練技術者の減少で見直しが滞っているオフライン信号制御設定の効率化および平易化を実現するため、プローブデータとクラスタリング手法を応用した制御設定見直しの支援方法を提案した。具体的には、長期間で収集したプローブデータを活用して流入路毎の総遅れ時間を推計し、その遅れ時間から導出される各種制御パラメータに関する指標値をクラスタリングすることでオフライン信号制御における信号制御設定の設計を支援するものである。神奈川県内のオフライン制御路線で実験的に収集したプローブデータに対して提案手法を適用し、信号制御設定の見直し案を策定した。この設定を実際の信号制御機に適用し、路線全体での待ち行列および CO₂ 排出量が低減されたことを確認した。本研究で提案した手法がプローブデータの信号制御への活用方策の一つとして有用であることが示せた。

7.2 本研究の課題と展望

本研究では、OR の考え方や数理システム技術を活用してサステナブルな交通管制システム実現に寄与する交通信号制御高度化を検討した。それぞれの内容について、課題と今後の展望について言及する。

流入路別現示については、長年ボトルネック交差点であった箇所に対して渋滞削減を実現で

きた。本研究での成果をもとにさらにケーススタディを重ねていくことで、適用の拡大を推進するとともに、右折専用車線が設置できない箇所での適用にも取り組んでいきたい。

一括最適化制御については、アップリンクの活用により効率的な制御適用が可能となった。しかし、システムの実装という観点では本制御を実施するには専用サーバを付加設置する必要があり、展開が限定的なものとなっている。交通流モデルによる PI 値推計処理やメタヒューリスティックスを用いた制御パラメータ最適化処理の効率化によるサーバの統合化を検討していきたい。また、感知器整備数削減の実運用については、交通管制システムのもう一つの主要機能である交通情報生成が同じ車両感知器配置で実施できる必要がある。一括最適化制御を適用するための車両感知器配置と同じ配置で、対象道路網内の交通情報を生成する処理方式の開発を行っていきたい。

車両感知器の故障検知では、保守作業を伴った評価分析は限られたものとなっている。今後は、本機能のシステムへの実装後、システムでの月次処理などによる保守業務との連携を通じて提案方式の継続的な評価を行い、方式の高度化を図っていきたい。さらには、重要な幹線道路等に設置された車両感知器を対象として、前月と今月のデータ比較による故障予兆についても検討し、故障による制御レベルの低下を一層短期間にするように努めていきたい。

プローブデータによるオフライン制御設定の見直しについては、走行調査による仮想的なプローブデータを用いて実験を行った。本年度から光ビーコンに対してプローブデータを送信する車載機を搭載する車両が販売開始となり、今後のプローブデータ収集レベルの向上が期待される。しかしながら、当面はその活用が難しい状況が継続すると思われるため、民間事業者で収集しているプローブデータの活用など、交通管理者以外のデータソースの活用も提案していきたい。また、本研究では、オフライン制御の制御設定について見直し手法を提案したが、交通順応制御におけるパターン制御に関しての見直し手法についても今後の研究課題としていきたい。

ここまで、本研究の成果に対する今後の展望について述べてきた。どの取り組みも、我々が日々生活していく日常的な活動を下支えするものである。一方で、我が国は大陸プレートと海洋プレートの境界近くに位置するために南海トラフ地震などの巨大地震発生のリスクを抱えており、大規模地震発生時の交通対策を確立することが急務となっている。しかしながら、発生する交通状況が日常とは全く異なるために大規模災害時における独自の対策が必要となっている。例えば、東日本大震災発生直後、東京都内では半日以上激しい渋滞が継続し未曾有の混乱状態となった。首都高速道路が通行止めになり通行中の車両が一般道路へ最寄りの出口から流出して車両の需要が急激に増加するとともに、歩行者も急激に増えたことで一時的に交差点容量が低下したことが要因と考えられる。特に、都心における信号交差点密度の高いネットワークではグリッドロック現象と呼ばれる事象が発生し、その影響が広範囲に伝搬していった可能性があるとの指摘[66], [67]がある。グリッドロック現象の発生メカニズムに関する研究事例は少なく、その発生条件について大島ら[68], [69]はグリッドロック現象の発生条件や形成過程をシングルグリッドネットワークと呼ばれるネットワークに対して交差点での分岐を考慮した交通需要および渋滞状態におけるネットワーク内への交通合流比を用いて定式化している。しかし、提案された定式化表現では信号制御パラメータなどの交通信号制御に関する要素を陽に含んでいないため、一般道路におけるグリッドロック現象抑制に活用することは難しい。筆者[70]は、この発生条件に関して青時間比率を用いた表現に拡張したが、グリッドロック現

象を抑制する有効な信号制御方式の策定には至っていない。南海トラフ沿いの地域での地震について 30 年以内での発生確率は 70%程度との評価報告もあり、有効な信号制御方式の確立を急務としていきたい。

参考文献

- [1] 日本交通管理技術協会編, 交通管理システムの技術と実際. オーム社, 2004.
- [2] “警察庁交通局HP,” <https://www.npa.go.jp/koutsuu/index.htm>.
- [3] 吉崎昭彦, “なぜ、信号制御の見直しか,” 月刊交通, vol. 10, pp. 1–5, 2010.
- [4] 織田利彦, 音喜多亨, 津久家智光, 橋場加奈, “メタ戦略によるTRANSYT交通流モデルにおける交通信号制御最適化,” システム制御情報学会論文誌, vol. 10, no. 10, pp. 547–555, 1997.
- [5] D. I. Robertson, “A traffic network study tool,” *RRL Rep.*, vol. 253, 1969.
- [6] M. Hisai and T. Usami, “OPTIMAL DIVISION OF SIGNAL-COORDINATED ARTERIAL STREET INTO SUBAREAS,” 山口大学工学部研究報告, vol. 56, no. 2, 2006.
- [7] 西村茂樹, 宇佐美勤, 小林雅文, 大田利文, “ネットワーク全体を最適化するサブエリア構成方式,” 土木計画学研究・講演集, vol. 29, 2004.
- [8] 河村圭, 久井守, 高橋昌之, “G Aの系統信号制御最適化への適用性,” 第15回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 89–92, 1995.
- [9] 新川力, 岡田亘平, 久井守, “信号制御の最適化におけるメタ戦略の比較と制御パラメータの連続自動調整への適用,” 山口大学工学部研究報告, vol. 57, no. 1, pp. 1–4, 2006.
- [10] 風間洋, 中村英夫, 高橋聖, “交通状態変化時におけるオフセット制御の最適化に関する研究,” 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 69–72, 2002.
- [11] 小田原正和, 久井守, “G Aによる系統交通信号の共通サイクル長に関する研究,” 土木計画学研究・講演集, vol. 20, pp. 815–818, 1997.
- [12] 織田利彦, 音喜多亨, 津久家智光, 橋場加奈, “メタヒューリスティクスによる都市街路網におけるサブエリア構成最適化,” システム制御情報学会論文誌, vol. 11, no. 8, pp. 466–476, 1998.
- [13] 大口敬, “多車線交差点における信号制御技術,” 交通工学, vol. 44, no. 3, pp. 4–9, 2009.
- [14] 小出啓明, 大口敬, 洪性俊, “交通信号現示設計方式の違いによる交通処理性能比較分析,” 土木計画学研究・講演集, vol. 46, 2012.
- [15] 唐克双, “ムーブメント制御,” 交通工学, vol. 44, no. 3, p. 78, 2009.
- [16] 板倉誠司, 斉藤 威, 安井 一彦, “ムーブメント制御に基づいた新しい信号制御方式の安全性, 円滑性に関する評価,” 第15回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 93–96, 1995.
- [17] 岩崎茂久, 瀬戸昌忠, 川元広良, “ムーブメント制御実証実験報告,” 第28回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 101–104, 2008.
- [18] 岩岡浩一郎, 新倉聡, “旅行時間予測精度向上を目的とした車両感知器情報の異常判別手法の検討,” 第10回ITSシンポジウム, pp. 379–383, 2011.
- [19] 小篠耕平, 井料隆雅, 上田大樹, “検知器データを用いた突発事象発生時の流入交通量変動の可視化技術,” 第32回交通工学研究発表会論文集, pp. 43–48, 2012.
- [20] 賓美宮, 倉内文孝, 飯田恭敬, “車両検知器データを用いた都市高速道路における突発事象のオンライン検知に関する研究,” 交通工学研究発表会論文報告集, vol. 21, pp.

- 177–180, 2001.
- [21] チャンエドワード, 桑原雅夫, 吉井稔雄, “車両感知器データを用いた異常事象自動検出手法の比較分析,” 生産研究, vol. 50, no. 9, pp. 329–332, 1998.
- [22] 遠藤学史, 佐藤克寿, 平生整, 山口孝, “首都高速道路における交通管制データ精度向上への取組み,” 第32回交通工学研究発表会論文集, pp. 305–308, 2012.
- [23] 工藤鉄雄, “信号制御の見直しに伴う仙台市の慢性的な交通渋滞の解消について,” 月刊交通, vol. 10, pp. 15–25, 2010.
- [24] 平川雄一郎, “信号制御見直しに関する施策と推進状況について,” 月刊交通, vol. 10, pp. 6–14, 2010.
- [25] 野田素良, “信号制御の見直しに関する取組について,” 月刊交通, vol. 10, pp. 26–38, 2010.
- [26] 織田利彦, 新倉聡, 鎌田邦廣, “光ビーコンから収集されるプローブデータのオフライン信号制御への適用,” 電気学会ITS研究会資料, pp. 33–37, 2011.
- [27] 織田利彦, 新倉聡, 鎌田邦廣, “光ビーコンから収集されるプローブデータの交通管理への適用に関する検討,” 電気学会ITS研究会, pp. 25–30, 2009.
- [28] 長島靖, 服部理, 小林雅文, “プローブ情報の活用による信号制御高度化,” SEIテクニカルレビュー, vol. 184, pp. 40–43, 2014.
- [29] “UTMS協会ホームページ,” <http://www.utms.or.jp/>.
- [30] “日産カーウイングスHP,” <http://drive.nissan-carwings.com/WEB/>.
- [31] “G-BOOKホームページ,” <http://g-book.com/pc/default.asp>.
- [32] “ホンダ・インターナビHP,” <http://www.honda.co.jp/internavi/index.html>.
- [33] “パイオニア・スマートループHP,” <https://www.smartloop.jp/smartloop/index.html>.
- [34] 道路交通研究会, “光ビーコンの更新について,” 月刊交通, vol. 44, no. 9, pp. 14–16, 2013.
- [35] (財)交通工学研究会編, “信号制御の基礎的事項,” 改訂 交通信号の手引き, pp. 12–19, 2006.
- [36] 交通工学研究会編, 改訂 交通信号の手引き. 丸善, 2006.
- [37] (財)交通工学研究会編, “信号制御の設計,” 改訂 交通信号の手引き, pp. 22–66, 2006.
- [38] 交通工学研究会編, 平面交差の計画と設計 基礎編. 丸善, 2007.
- [39] 交通工学研究会編, 平面交差の計画と設計 応用編. 丸善, 2007.
- [40] (財)交通工学研究会編, “信号制御の方式,” 改訂 交通信号の手引き, pp. 68–90, 2006.
- [41] 岩岡浩一郎, 新倉聡, “流入路別現示の適用とその考察,” 交通工学論文集, vol. 第1巻, no. 第2号 (特集号B), p. B_53-B_59, 2015.
- [42] K. Tang and H. Nakamura, “Investigating Operational Benefits of Group-based Signal Control in Japan Through a Stochastic Approach,” *Int. J. ITS Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 71–81, 2011.
- [43] “日本オペレーションズ・リサーチ学会ホームページ,” <http://www.orsj.or.jp/index.html>.
- [44] 織田利彦, “重要交差点における信号制御最適化手法,” システム制御情報学会論文誌, vol. 9, no. 11, pp. 520–530, 1996.

- [45] 織田利彦, “都市街路における総遅れ時間最小化によるサイクル長決定方法,” システム制御情報学会論文誌, vol. 10, no. 9, pp. 493–501, 1997.
- [46] 岩岡浩一郎織田利彦, “リアルタイム交通信号最適化制御,” 第25回土木計画学研究発表会・講演集, 2002.
- [47] 音喜多亨, 藤原整, 織田利彦, 岩岡浩一郎, “信号制御に対する最適化手法適用時の収束性向上の取組み,” 電気学会ITS研究会, pp. 63–68, 2002.
- [48] 三村和也, “環境対応型交通管制モデル事業の実施結果について～環境負荷を軽減するための新たな交通管制手法を開発～,” 交通工学, vol. 40, no. 4, pp. 28–31, 2005.
- [49] 織田利彦, 音喜多亨, 新倉聡, “自動車交通からの二酸化炭素排出量低減に向けたオンライン交通信号制御,” 電気学会論文誌D, vol. 126, no. 11, pp. 1522–1530, 2006.
- [50] 岩岡浩一郎, 弘津雄三, 新倉聡, “光ビーコンから収集されるアップリンクを活用した一括最適化制御の適用,” 交通工学論文集, vol. 2, no. 2(B), p. B_1-B_9, 2016.
- [51] 岩岡浩一郎, 新倉聡, “車両感知器整備減少を背景とし信号制御 減少を背景とした信号制御方式の評価,” 第11回ITSシンポジウム, pp. 49–54, 2012.
- [52] K. Iwaoka, Y. Hirotsu, and S. Niikura, “Application of Simultaneous Optimization Control for Reductions of Numbers of Detectors,” *Proc. 23rd World Congr. ITS*, CD-ROM, 2016.
- [53] 岩岡浩一郎, 新倉聡, “光ビーコンから収集されるアップリンクデータの活用に向けた検討,” 第32回交通工学研究発表会論文集, pp. 301–304, 2012.
- [54] 足立晋也, 新倉聡, 田島昭幸, “プローブデータの圧縮方式の研究-プローブデータロッシー圧縮アルゴリズム-,” 電気学会ITS研究会資料, pp. 13–18, 2005.
- [55] 岩岡浩一郎, 山根利勝, 新倉聡, “光ビーコンから収集されるアップリンクデータの交通管理への活用に関する検討,” 第11回ITSシンポジウム, p. 301–306, 2012.
- [56] 織田利彦, 古賀光彦, 新倉聡, 佐々木俊久, 岩岡浩一郎, “街路交通流監視機能拡充に向けたプローブ情報の交通管理への適用,” 電気学会産業応用部門大会論文集, pp. 23–28, 2013.
- [57] 岩岡浩一郎, 弘津雄三, 鶴澤政幸, “プローブデータを用いた右折交通流に対する交通順応制御の検討,” 電気学会ITS研究会, pp. 5–9, 2013.
- [58] (財)交通工学研究会編, “信号制御方式,” 改定 交通信号の手引き, pp. 100–150, 2006.
- [59] 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫, “都市街路網の交通流シミュレータ-AVENUE-の開発,” 第13回交通工学研究発表会論文集, pp. 33–36, 1993.
- [60] 弘津雄三, 岩岡浩一郎, 新倉聡, “集約車両感知器情報による異常検出手法の検討,” 電気学会ITS研究会, pp. 37–41, 2015.
- [61] 岩岡浩一郎, 弘津雄三, “集約車両感知器情報による故障検出手法の検討,” 電気学会論文誌D, vol. 137, no. 4, 2017(掲載予定).
- [62] (財)交通工学研究会編, 道路交通技術必携. (社)交通工学研究会, 2004.
- [63] T. Oda, K. Iwaoka, S. Niikura, and K. Kamata, “Application of Probe Data Collected Via Infrared Beacons to Traffic Manegement,” *Proceedings 17th World Congress ITS*, CD-ROM, 2010.
- [64] 織田利彦, 新倉聡, 鎌田邦廣, “光ビーコンから収集されるプローブデータにもとづく自

- 動車のCO2排出量推計に関する検討,” *電気学会ITS研究会資料*, pp. 69–74, 2010.
- [65] K. Iwaoka, S. Asada, S. Niikura, and K. Kamata, “Field Experiment of Offline Traffic Signal Control Using Probe Data Collected via Infrared Beacons,” *Proceedings 20th World Congress ITS*, CD-ROM, 2013.
- [66] 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘, “東日本大震災時の都区内道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察,” *土木計画学研究・講演集*, vol. 46, 2012.
- [67] 清田裕太郎, 野中康弘, 岩倉成志, “東日本大震災時のグリッドロック現象における首都高速流入入交通の一般道への影響分析,” *土木計画学研究・講演集*, vol. 48, 2013.
- [68] 大島大輔, 大口敬, “シングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の発生条件,” *土木計画学研究・講演集*, vol. 48, 2013.
- [69] 大島大輔, 大口敬, “グリッドロック現象の発生とネットワーク交通容量の低下に関する考察,” *交通工学研究会発表論文集*, vol. 34, pp. 187–193, 2014.
- [70] 岩岡浩一郎, “信号交差点で構成されるシングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の分析,” *交通工学研究発表会論文集*, vol. 36, pp. 15–19, 2016.

謝辞

本論文を作成するにあたって、京都大学における学生時代だけでなく社会人になってからの研究活動と併せて 25 年以上もの間、南山大学工学部システム数理学科 福嶋雅夫 教授から、研究内容のみならず研究者としての心構えなど、多くのことを懇篤にご指導いただきました。また、元上司で社会人博士の先輩である 一般財団法人 道路交通情報通信システムセンター 織田利彦 部長からは、社会インフラシステム事業に携わる実務者の研究のあり方や事業部門における研究活動の基本姿勢について、時には厳しく時には暖かく懇切なご指導をいただきました。学位を志して研究活動を開始したものの長年成果を出せずにいた筆者でしたが、ようやく本研究をまとめることができたのはご両名から頂いたご指導、ご鞭撻の賜物に他なりません。ここに謹んで深厚な感謝の意を表します。

南山大学の OR 研究会や博士論文の審査発表では、南山大学工学部システム数理学科 鈴木敦夫教授、佐々木美裕 教授、三浦英俊 教授、南山大学工学部機械電子制御工学科 高見勲 教授、河野浩之 教授、名古屋大学大学院情報科学研究科 柳浦睦憲 教授から、本研究に対して貴重なご指摘やご意見を頂戴しました。特に、上述 佐々木美裕 教授 には、ご多忙のなか、研究へのご助言だけでなく、学内の規定や事務的な手続きの案内など南山大学での活動自体に慣れていない筆者へのご支援をいただきました。また、南山大学工学部ソフトウェア工学科 佐々木克巳 教授からは、遠隔地より通学する社会人学生である筆者の学習カリキュラムに関して多大なご配慮をいただきました。ここに心から謝意を表します。

本研究は、パナソニックシステムネットワークス株式会社システムソリューションズジャパンカンパニー公共システムセンター 盛岡祐一 課長、花崎禎人 係長をはじめ筆者の職場の皆様のご理解とご支援によって進めることができました。特に、弘津雄三氏には、共同研究者としてデータ解析やシステム開発など実務面から絶大なご協力をいただきました。元神奈川県警察本部交通部交通規制課 公益財団法人日本道路交通情報センター 新倉聡 専門役には、交通管理者としての貴重な知見や示唆をいただくとともに、共同研究者としての立場からも有益なアイデアを賜りました。東京大学生産技術研究所 大口敬 教授からは、交通工学における学術的な見地からの意義深いご助言やご意見を頂戴しました。数理工術の応用については、株式会社応用数理研究所 佐々木俊久 代表取締役社長、ならびに株式会社 NTT データ数理システム 箭田昌美氏から多大なるご助力をいただきました。制御適用などの実証実験では、株式会社フィディック 葛城次夫 代表取締役社長、ならびに川崎恒夫 部長より、格別のご支援をいただきました。ここに、本研究の推進にご理解、ご協力をいただいた全ての皆様に対して、深く感謝致します。

久方ぶりの研究室での学生活動を楽しく充実して過ごせたのは、研究室内の同級生や後輩の皆様が倍以上の年齢の筆者にも親しく接してくれたおかげです。この場を借りて感謝の意を表します。

普段から筆者の職務や研究を理解し、思い通りに活動させてくれた家族には、心から深謝します。最後に、不意の転居や大学院入学にもかかわらず筆者を支え、研究活動に快く集中させてくれた妻に本論文を捧げます。