

交差点改良エキスパート・システムの開発

AN EXPERT SYSTEM FOR SIGNALIZED INTERSECTION IMPROVEMENT ASSISTANCE

尾崎 晴男^{*}

By OZAKI Haruo

An expert system was developed to suggest suitable improvement plans for a bottleneck signalized intersection. The system provides improvement design alternatives by evaluating the conditions on number of approach lanes and their allocations, demand volume, and signal phase arrangements. The system incorporates expert knowledges based on the Japanese traffic management practices and was developed using familiar BASIC language on microcomputers.

1. はじめに

道路交通の円滑性を妨げている原因として、ボトルネックと言われる箇所があげられる。街路においては、多くの場合信号交差点がボトルネックとなっている。全国12万基にも及ぶ信号機の内には、数百のボトルネック交差点があると思われ、これら信号交差点の改良事業を実施するにも、この数に比して有効な対策を検討できる熟練した専門家¹⁾は残念ながら少ないようである。現場担当者の右腕となつてはたらし、意思決定を支援するツール、熟練した専門家と同じように判断を下すエキスパート・システムの必要性がここにある。

本稿では街路網のボトルネックである、信号交差点の改良方法を提案するエキスパート・システムをテーマに論をすすめることにする。

なお本稿は文献2)を発展させたものである。

2. 道路交通運用への応用

道路交通運用の分野ではこれまでも経験的に得られた知識を様々に応用してきている。高速道路における障害等の検出方法や、街路における信号の交通応答制御に用いる交通状況指標の選択方法がその典型的なものである。車両感知器のいかなるデータをどのように利用すれば、交通流のランダム変動や感知エラー等に影響されない結果を得られるのか、という問題に対しては経験的な答えで現実に運用されており、なお検討が継続中である。

しかし、エキスパート・システムの名を冠した経験的知識の適用例はこれまでのところ非常に少ないようである。わが国では秋山ら³⁾が阪神高速道路の交通管制への適用を検討し、プロダクション・システムによる料金所のブース開閉モデルの例を示している。諸外国をみると、Hanら⁴⁾はロサンゼルス⁵⁾のATCシステムへの応用を試み、車両感知器によって観測される交通流状況の変化をとらえて、混雑状況を的確に判断しようとしている。Foraste

^{*} 正会員 工修 東京大学助手 生産技術研究所
(〒106 港区六本木7-22-1)

ら⁵⁾はバリのATCシステムを例に混雑したネットワークの交通管制に利用するエキスパート・システムの研究を行っている。このように、エキスパート・システムの応用はまだ緒についたばかりであり、研究の一層の進捗が期待されている。

3. 信号交差点改良問題

(1) 問題の概要

街路交通の円滑性を妨げている原因が信号交差点である場合は多い。信号制御パラメタの設定が不適切な場合のほかにも、幹線道路同士が交差するような交差点が容量不足でボトルネックになっていることはしばしば見受けられる。このボトルネック交差点を改良するだけで、道路網全体の機能が向上しうるのであり、交差点改良事業の実施効果は大きい。改良項目は大きく分けて、交差点幾何構造と信号制御方法の2項目であり、各項目の要素の適切な組合せで円滑性を回復させることが解答となる。

(2) 問題の特徴と解決方針

信号交差点改良問題は取り扱う変数や、これらの変数に関する制約条件が非常に多いことに特徴がある。また問題解決の過程で従うべき知識も様々な形で存在する。これに加えて、この問題の一般的解決方法には、方程式を解くような一連の定型的プロセスがない。

信号交差点の設計問題に関わる変数は、①交差点幾何構造、②信号制御方法、③計画需要交通量に3分類ができる。これらの主要な変数でさえその数が多量であり、なおかつ互いの関係・制約条件も複雑に交錯している。従って、これらの変数の組合せを総当たりにチェックして最適解を見いだすのは実用上困難である。

一方この問題に関して従うべき知識としては、道路構造や信号制御手法に関する教科書的な知識と、わが国の交通運用の現場経験から得られている知識が多数存在する。

このように変数と知識が複雑にからみあっているため、熟練した専門家は工学的・経験的判断をもとにいくつかの有望な代替案を抽出し、試行錯誤を経ながら最終案に到達しているのが通例である。この熟練者の思考プロセスを模擬したエキスパート・システムを開発することにより、現場担当者が短時

間に解決することが可能である。

4. 信号交差点改良エキスパート・システム

(1) 開発コンセプト

現行の信号交差点運用を改良し、円滑性を向上させる道路構造・信号制御方法の代替案を提案し、現場担当者の意思決定を支援することを目的とする。

信号交差点の改良方法としては、立体化のような大規模改良も含まれるが、本稿の検討するエキスパート・システムはそれよりも小規模の改良を対象とする。すなわち、車線区分や割当マークの引き直しや、現示の再構成、スプリットの再配分、中央帯の削減、若干の拡幅等といった小規模な改良代替案を提案するものである。

問題の対象は、単一の4枝交差点とし、歩行者の横断を配慮すべきものとする。システムはパソコン上で開発する方針とする。その他の仕様は以下のとおりとする。

① 条件データ入力

交差点の幾何構造データは道路幅、中央帯幅をユーザが入力する。計画需要交通量データについても同様である。歩行者横断交通量は、「小・大・巨」の3段階で入力する。現行の信号制御データについては必ずしも入力を要しないものとする。

② 結果出力

ユーザの意思決定を有効に支援できるシステムとして、理解の容易な図形情報による出力形式とする。

③ 知識データ

エキスパート・システムは、現場指向の強いものであるべきと考えられるので、知識データを独立させ、その改良が容易な形とする。

(2) システム開発環境

a) 知識表現・推論機構

知識表現としては、プロダクション・システムを採用する。これは、現場のエキスパートの思考過程が、ある場合にはある対処をする、というような条件・行動対の積み重ねで成り立っていると考えた立場をとったからである。これらのIF-THENルールで記述される条件・行動対（プロダクション規則）群であるルール・ベースと、問題の対象の信号交差点に関するデータ群であるデータベースとをつなぎ、知識を解釈し推論を進める部分が、推論

エンジンと呼ばれるものである。

b) 記述言語

記述言語として、本システムではパソコンの標準言語であるBASICを採用した。いわゆるAI言語としては、LISP、PROLOG等が一般に有名である。これらの言語の利点は、主として推論機構の柔軟で複雑な表現が容易な点にあると思われる。しかし、BASICのような手続き型言語によっても推論エンジンの動作をシミュレートすることにより、基本的な推論機構をもたせることが可能である。⁸⁾ また、BASIC言語では数値演算が手軽に実行できるほか、かな漢字が容易に扱え、多彩なグラフィック機能があるため、ユーザにとって使いやすいシステムが比較的簡単に開発できる。

そこで本システムは、一般的に慣れ親しまれている言語であることも考慮してBASIC（日本語N88BASIC）を選択した。

(3) システムの構成

システムは推論部、飽和度計算部、サービスレベル判断部の3部門で構成されている。推論部はデータベースとルールベースを基に推論エンジンを駆動し、車線の数やその方向別割当、信号制御データの改善を行う。飽和度計算部はデータベースを基に、現示、交差点の飽和度、青時間を算出し、円滑

性の評価指標とする。サービスレベル判断部は、ユーザ介入が可能で、対象交差点に与えるべきサービスレベルを判断・指示する。

(4) サービスレベル

サービスレベルとして、道路幾何構造の車線幅、中央帯幅を対象とする。あるサービスレベルにおいては表1に記された数値以上の幅員を確保するものである。このサービスレベルは各流入路毎に適用する。サービスレベルはレベル1から適用し、適切な円滑性が得られるまでレベル数を上げる。レベル5に至っても円滑性が得られない場合は、必要な拡幅量を提案し、実行を継続する。この時は逆にレベル数を下げていくことができる。なお、表1の数値は文献1)等を参考に設定している。

表1 サービスレベル表

サービスレベル	1	2	3	4	5
直進車線幅	現状	3.5	3.25	3.0	2.75
左折車線幅	現状	3.25	3.0	2.75	2.5
混用車線幅	現状	削減	削減	削減	削減
右折車線幅	現状	削減	削減	削減	削減
中央帯幅	現状	削減	削減	削減	削減

数値の単位はm。

(5) 推論方針

a) 車線の数、方向別割当に関するルール

交差点流入・流出路の設置可能車線数は道路幅、中央帯幅、各車線幅で決めるものとする。

流入路各車線の方向別割当については、① 直進左折右折混用車線、② 直進左折混用車線、③ 直進右折混用車線、④ 直進専用車線、⑤ 左折専用車線、⑥ 右折専用車線の6種類がある。

システムは信号制御の現示ボタン、需要交通量の方向別の大きさによって、各流入路の車線数や方向別割当の構成をルールベースに基づき改良する方針とする。

以下は考慮するルールのリストである。

- ・道路幅に余裕があれば、交差点流入路の車線数は多い方がよい。
- ・各方向別の流出部車線数は流入部車線数より不足してはならない。
- ・需要交通量が偏在している場合、流出路の車線数

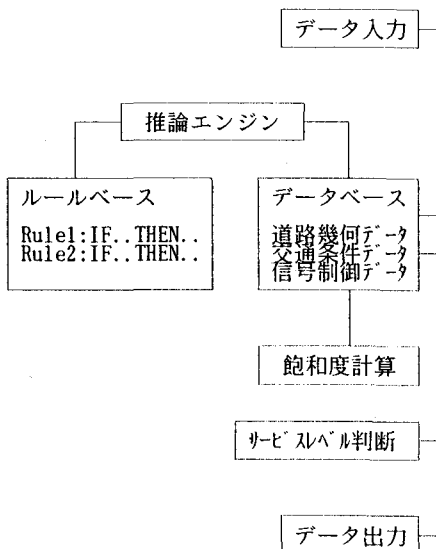


図1 システム構成

を増加する方が円滑性が向上する場合もある。

- ・車線等の幅はサービスレベルを満足するように、必要な幅を確保すべきである。
- ・右折車線幅がどうしても確保できないときは、広幅車線で対処することもできる。
- ・流入路の外側車線幅は二輪車等のために大きめがよい。
- ・駐停車車両が多い場合など、外側車線は利用されにくいことを考慮すべきである。
- ・流出路の車線幅は充分確保した方がよい。
- ・右折を許すときは、原則として右折車線を設置すべきである。

b) 信号制御に関するルール

現示の設定に関する知識として、本システムでは、わが国の信号制御手法の現状を考慮し、同時に青を与える流線の組合せ（ステージ）を固定し、その順番（シーケンス）も固定する考え方を踏襲した。

現示の基本的な設定方法としては、円滑性や車両と横断歩行者の交錯に関する安全性を配慮して、わが国の専門家が経験的に検討候補に採用すると判断される現示ボタンを抽出（モデル化）する方法をとった。この抽出の際に配慮したルールの一覧は次の通りである。これらのルールは推論時にも使用される。

- ・現示の数は少ない方がよい。
- ・特殊な条件がないときは、標準2現示がよい。
- ・交差する流入路に対して、交錯する流線に同時に青を出してはならない。
- ・いわゆる「先出し」はフラッシングを誘う等の安全上の理由から行わない方がよい。
- ・専用現示は専用車線があるとき用いた方がよい。
- ・左折専用現示の後に交錯する歩行者青を始めない方がよい。
- ・合流する交通流に同時に青を出すときは、車線数を出入整合すべきである。
- ・一つの交通流線に対して2つ以上の現示を与える時は、現示を連続させなければならない。
- ・高速走行となる右折自動車流と歩行者横断流とはなるべく交錯させない方がよい。

以上の知識をもとに、基本現示ボタンとして東西

・南北方向をペアに、図2のようにそれぞれ15個を抽出した。この基本現示ボタンは最大2現示と

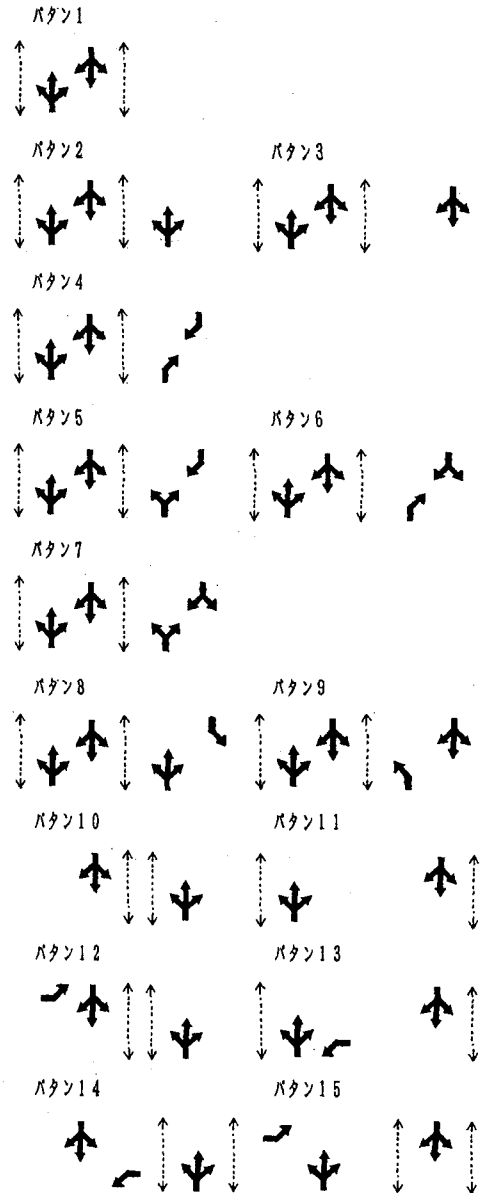


図2 基本現示ボタン

した。そして対象交差点の道路幾何条件・交通条件であるデータベースと、システムの有するルールベースから、推論エンジンの駆動により、2方向それぞれに15個のいずれかの基本現示ボタンを選択する方針とした。従って全体では約200通りの組合せが存在することになる。

特に指定がなければ、標準2現示と言われるボタン1がまず適用される。推論エンジンは、データ

ベースとルールベースを基に現示ボタンを順次改善してゆくわけである。以下にルールの典型例の流れ図で示してみよう。

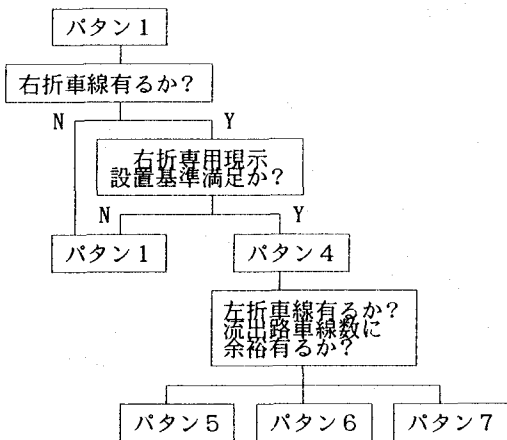


図3 信号制御に関するルールの例

(5) 飽和度の計算

a) 評価フロー

現示、交差点の飽和度の評価は次のルールを考慮し、図4のフローで行う。

- ・交差点の飽和度は0.9程度より小さくすべきである。
- ・スプリットは現示の飽和度に比例して与えた方がよい。
- ・歩行車青は歩行速度1m/s程度で渡りきれる長さを出さなくてはいけない。
- ・車両用青は主流交通に8秒以上、従交通に5秒以上与える方がよい。
- ・余り長いサイクル長は、待行列が長くなるから使わない方がよい。

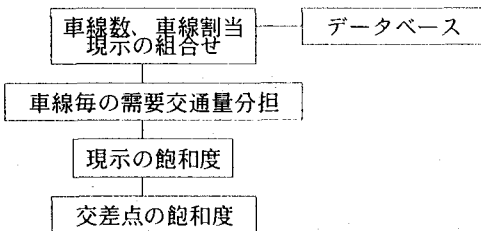


図4 飽和度の計算

b) 車線毎の需要交通量分担

車線毎の需要交通量分担は、流入交通の方向別需要量、流入路車線数と方向別割り当て、現示の組合せから、文献7)により行っている。

c) 飽和度の計算

飽和度は「需要交通量／飽和交通流率」（共に1時間量）によって計算する。この計算のため、車線毎の飽和交通流率を推定する。基本値として、直進専用車線は2000（台／時）、左折・右折専用車線は1800（台／時）を設定した。

道路条件の補正としては、車線幅を適用している。

交通条件の補正としては、右折、左折交通の専用現示の以外の飽和流率について、対向直進車交通量、交錯する歩行者交通量の大きさにより考慮している。

補正の方法は、文献7)によって行っているが、右左折車を直進車換算する方法であるため、飽和度の定義からは現示の変わり目に捌ける右折車の混雑度を評価することが難しい。ここでは右折車が捌けない場合、飽和度に対応する値として「需要交通量／1時間容量」で評価する方法をとった。

現示の飽和度は1つの現示において、最大の飽和度を示す流入路の飽和度とし、交差点飽和度は各現示の飽和度の和として算出する。

(6) 信号制御パラメタの計算

a) スプリット

現示の飽和度を用いて、飽和度に比例した配分を原則とする。

b) 青時間への変換

青時間は原則的にサイクル長から損失時間を差し引いた値にスプリットを乗じて得るものとする。損失時間は、交差点の大きさ（道路幅）、現示の組合せに応じて与えるものとする。

孤立4枝交差点の最適サイクル長についてはポアソン到着、一様流出の条件による Webster ら⁹⁾の研究成果が知られている。しかし、彼らの前提条件は、重交通時には必ずしも現実とは当てはまらない。現状ではドライバーや歩行者の待ち時間の耐え得る限界や、行列長の制約等の条件から実的な値の範囲で設定されている。

このような研究の進捗状況を踏まえ、本システムでは最適サイクル長を与える方針はとらず、交差点の大きさ、需要交通量の大きさから、表2の4種類

のサイクル長を標準設定し、この中から選択するものとしている。

歩行者交通流を伴う現示では歩行者最小青時間も制約となるため、歩行者歩行速度 1 m/s を基準とする歩行者最小青時間以上が確保されるように、現示の青時間、スプリット、サイクル長が修正される。

表2 標準サイクル長 (単位: 秒)

	需要交通量大	需要交通量少
交差点大	120	90
交差点小	90	60

(7) 結果の出力方法

BASIC言語の特徴を生かし、システムの稼動状況を常時グラフィック表示でディスプレイに表示する形式とした。表示項目は交差点全体図、車線の分岐方向割当のマーキング、現示の組合せ、交差点の飽和度、現在のサービスレベル、最新推論状況メッセージである。これらの表示は推論過程で改良項目の提案を採用したときはその都度更新される。

5. 適用例

本システムの有効性を検証するため、図5のような変形4枝交差点を例に適用を試みた。この例では中央帯幅はゼロとする。

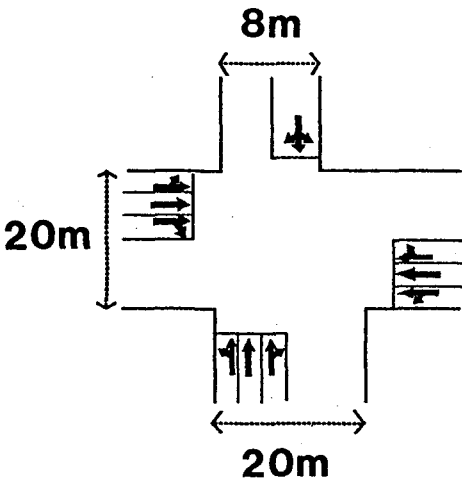


図5 適用例交差点

これは道路拡張整備が一つの流入路で立ち遅れた場合にみられるものであり、ボトルネックになりやすい。東京都内では表参道や富ヶ谷といった交差点が現実の例である。

流入需要交通量は図6のように与え、歩行者横断交通量は全ての流入路で「大」とした。

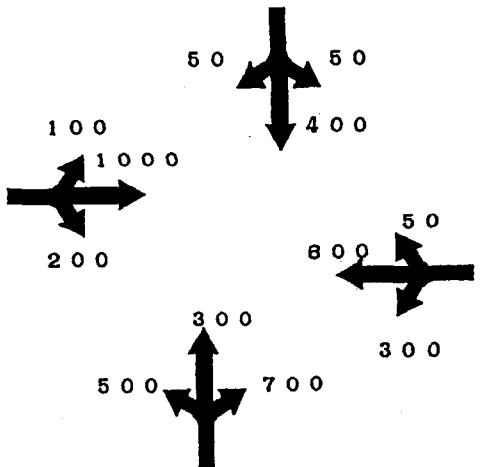


図6 流入需要交通量

システムを起動させると図7の画面を表示し、推論を開始する。

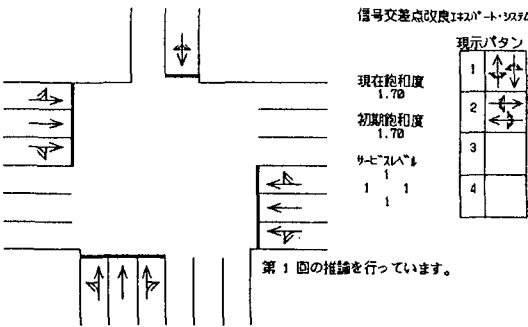


図7 初期画面

図8は10回の推論後の状態である。提案された改良点を順次挙げると次のようである。

・下からの流入路の車線割当数が直進方向について過剰であることを流出先の車線数に整合させ、3車線をそれぞれ、左折、直進、右折車線に割り当てる。

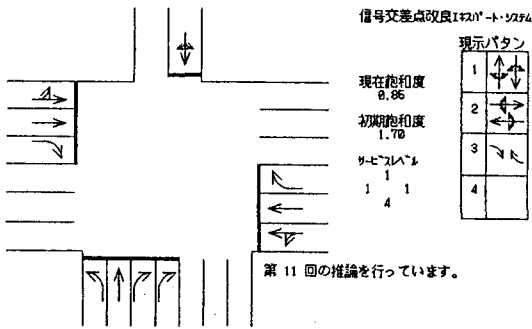


図8 10回の推論後画面

- ・左右からの流入路に対し、右折車線を配置し、右折専用現示（ボタン4）を採用する。
- ・クリティカルな下からの流入路に右折車線を増割当し、右折・直進車線に分離していたものを左折直進混用車線に割り当て変更する。
- ・下からの流入路が依然として混雑しているので、サービスレベル数を上げて車線数を増設し、直進車線と左折車線とを分離する。

以上の提案により、飽和度は0.85程度に改善されている。

6. 今後の課題

本稿は、信号交差点の改良方法を提案するエキスパート・システムについて、検討を行った。

本システムは歩行者流を配慮した基本現示ボタンとして、対向流入路をベアに15個抽出したことに特徴がある。これはわが国の交通安全を配慮する知識を重視したモデル化であるが、歩道橋などが設置された場合や欧州等でみられるムーブメント（交通流線）ベースの考え方等、現示の組合せ方に自由度が増した場合への改良が今後の課題と考えられる。

また本システムは記述言語としてBASICを採用したが、システム規模が大きくなるとプログラム領域、演算スピード、記述の柔軟性などが劣るため、今後の改良のためには他言語への翻訳も検討した方がよいようである。

エキスパート・システムの応用に関しては、問題が非常に複雑であったり、条件が不確実であったり、即答の必要がある場合などに特に有効と思われる。

例えば交通運用への応用として、不確実なセンサーである車両感知器の出力データ診断や、オンライン・リアルタイム制御のオペレータ支援ツールとして、威力を発揮できると期待される。また制御に適用するときは、ファジィ集合の概念を適用することも有望であろう。

その他稀な事象である交通事故の研究に関しても、事故多発地点診断・改良システムなどに応用が可能ではないかと考えられる。

いずれにしても、このようなシステムでは知識を収集し、常時学習していくことが重要で、知識獲得手法の開発が今後強く要求されると思われる。

研究においては、東京大学 越正毅教授、桑原雅夫助教授から多大な示唆を頂戴した。また、システムのグラフィック表示は東京大学大学院学生 岩佐昌明君の労によるものである。末筆ながら深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木敏雄：交差点の交通運用、大成出版社、1988年。
- 2) 渡辺裕：エキスパート・システムの交差点改良への応用、東京大学修士論文、1989年。
- 3) 秋山孝正、堀田徹哉：交通制御エキスパート・システムについての考察、土木計画学研究・論文集、No.5、pp91-98、1987年。
- 4) Han, L.D. and May, A.D. : Artificial Intelligence Approaches for Signalized Network Control, Working Paper UCB-ITS-WP-88-4, 1988.
- 5) Foraste, B. and Scemama, G. : An expert system approach to congestion, Recherche Transports Securite - English issue n°2, pp35-40, 1988.
- 6) M.チャドウィック・J.A.ハナー（ユニボックス訳）：パソコン推論システム、啓学出版、1988年。
- 7) 日本道路協会：道路の交通容量、1984年。
- 8) 交通工学研究会：平面交差の計画と設計（基礎編）、1984年。
- 9) Webster, F.V. and Cobbe, B.M. : Traffic Signals, Road Research Laboratory, Tech. Paper No. 56, HMSO, London, 1966.