

[論文]

プローブ情報を活用した信号制御定数パターン 見直し支援システムの構築

A Management Support System which Reviews the Pattern Table of Traffic Signal Control Parameters using Probe Information

塚田 悟之[†]

Noriyuki TSUKADA

[†]株式会社 SUBARU 先進安全設計部

[†] SUBARU CORPORATION, Advanced Safety Design Dept.

要旨

交通信号制御機は、信号灯器の点灯制御を担っている。特に、交差点上流に設置された車両感知器が計測した交通量情報に基づき、サイクル、スプリット、オフセットの各信号制御パラメータをリアルタイムに計算するタイプの交通信号制御技術がこれまで積極的に導入されてきた。しかし実際は、それ以前から長く運用され、信号制御パラメータを曜日や時間帯毎に組み合わせたパターンテーブルに従って制御するタイプの信号制御機は数多く存在し、これらの信号制御パラメータの見直しがなされず、信号機設置時のパラメータのまま運用されている。本研究は、このパターンテーブルを交通の流れに見合った形に修正するための支援システムをプローブ情報の活用から提案し、実現可能性を検証した。

Abstract

Traffic signal controllers plays a key role in control and prevention of traffic optical units. Most notably, installation of new traffic controller technology that calculates signal control parameters such as Cycle length, Split and Offset in real time based on traffic volume counted by traffic detector is actively promoted. However, this type controller wasn't actually popularized by its high cost. On the other hand, a traditional traffic controller remains general used which controls optical units in accordance with the pattern table that combines signal control parameters for a long time. At this moment, this traditional type continues to use signal control parameters at time that traffic signals were installed. In this paper, an management support system which fits in the pattern table of signal control parameters with the traffic flow was proposed using probe information and proved this feasibility.

1. はじめに

本論文は、プローブ情報を活用し、信号制御の運用改善を支援するシステムを構築しようとするものである。交通信号機(以下、信号機)の数は今日、全国で20万基以上を超えている[1]。これに合わせ、信号灯器の点灯を制御する交通信号制御(以下、信号制御)も様々な方式が整備されてきた。とりわけ、車両感知器の計測した交通量情報に基づき、サイクル、スプリット、オフセットの信号制御パラメータをリアルタイムに計算する高度な交通応答制御方式の積極的な導入が進められてきた。しかし近年では、老朽化インフラの大量更新時期を迎え、その対応から信号機の高度化整備が順調に進まず、比較的維持経費が安価なプログラム多段制御方式(以下、多段定周期制御)による信号機が依然、広く導入かつ運用されている[2]。この多段定周期制御方式は、車両感知器に頼らず、予め決められた信号制御パラメータを曜日や時間帯毎に組み合わせたパターンテーブル(以下、信号制御定数パターン)に従って運用するものである。しかしながら、実態は、導入時に設定した信号制御定数パターンを見直しされることが少なく、そのまま運用され続け、必ずしも交通の流れに適合していない状況をもたらしている[3]。

なお、ここで改めて、サイクル、スプリット、オフセットの意味を整理してみると、サイクルは、信号現示(青、黄、赤)の一巡する時間であり、それぞれの現示時間の和を秒数で示したものである。また、スプリットは、信号周期、すなわちサイクルに対する各現示の時間比率のことであり、オフセットは、隣接信号機間の同一方向の青信号開始時点のズレのことであり[4]。

このような状況を踏まえ、本研究では、多段定周期制御下にある信号機の運用改善、特に、これらの信号機を交通実態に合致した形で運用するために、その根幹をなす信号制御定数パターンをプローブ情報の活用から効率的に見直し支援システムを検討した。

[論文] 2018年7月21日受付, 2018年12月16日受理

© 情報システム学会

2. 関連研究と本研究の位置付け

本研究で取り上げる『多段定周期制御』は、1980年代頃から全国で導入が進み、今なお多くの交差点で運用されている[5]。しかし、本制御方式の活用による最適な制御化を扱った研究は少ない。その理由は、多段定周期制御の①交通需要がパターン化されない交差点については、十分な制御効果が期待できない。②信号制御パラメータやそのプログラムの設定にあたっては、交通需要を把握するための調査が必要であり、制御の効果が設定されたプログラムにより大きく左右される。③一度設定した信号制御パラメータは自動更新されないため、運用開始後、交通需要そのものが変化した場合には、適宜信号制御パラメータを見直す必要が生じる、といった課題[6]を克服する観点から、車両の有無だけを検知する簡易的な車両感知器の情報に基づき、信号制御パラメータをミクロ的に決定する「交通感応制御」が提案され、その実用化と改良、さらなる高度化を目指した研究[7]が先行されてきたからである。しかしながら、多段定周期制御が全て交通感応制御に置き換えられたわけではなく、未だに多くの信号機を多段定周期制御で運用されている[1]。そのうえ、老朽インフラの更新や維持メンテナンスなど人材、予算の確保が難しい昨今、交通流率や占有時間など車両感知器の計測データを必要とする交通感応制御の整備は容易に進まず、今後も多段定周期制御の運用が継続されやすい傾向にある。そうであるならば、多段定周期制御を扱った研究がなおさら取り組まれて然るべきである。そこで、本研究では、車両生成プローブ情報の活用から信号制御定数パターンを見直しし、多段定周期制御の運用改善の可能性を検討した。

近年、『プローブ情報』を扱った研究が数多く取り組まれ、信号制御を扱った研究も蓄積されてきた。この中には、本研究のように、プローブ情報の活用から信号制御パラメータの見直しを検討した研究も存在する。例えば、吉田ら[8]は、プローブ情報による信号制御パラメータの更新には、十分な量のプローブ情報の確保が必要であることを理論的に導き、織田ら[9]は、信号制御パラメータ更新の際、路上の光ビーコンで収集した旅行時間情報から遅れ時間を算出し、これを車両感知器情報の補完に活用できることを実験的に導いている。また、花房ら[10]は、リアルタイムな信号制御の実現にプローブ情報から算出した遅れ時間の有用性を指摘し、限られたプローブ情報からシミュレーションで遅れ時間を算出する方法を検討している。つまり、これらの研究は、信号制御パラメータの見直しに、プローブ情報から算出した遅れ時間の活用可能性を示している。本研究は、これらの成果を踏まえ、公道走行実験で得た延べ686のプローブ情報の解析を通じ、その特徴を考慮しながら、多段定周期制御の信号制御定数パターン見直し支援システムを提案し、実験路線への適用からその妥当性を検証した。したがって、本研究は、信号機を交通の流れに合致した形で将来にわたって運用する方法を実証した研究と位置付けられる。

3. 走行実験にみるプローブ情報の特長とその活用可能性

3.1. 実験仮説

プローブ情報からある一定の間隔で車両の位置情報が得られれば、車両の走行状態を把握でき、さらに、これをある一定の期間集められれば、ある路線の①赤信号で停止する確率の高い交差点の抽出、②その交差点での停止頻度、③その交差点を通過するのに要する時間、④その時間的な変動傾向、などの交通状況を明らかにできるはずであり、信号制御定数パターンを見直しする際の有益な情報になるはずである。この仮説を検証すべく、プローブ情報を収集するための走行実験を多段定周期制御の導入路線にて実施した。

3.2. 実験路線の概要

走行実験は、プローブ情報を生成かつ収集できる装置（以下、プローブ収集装置）を搭載した車両2台を予め規定した実験路線で走行させ、当該路線のプローブ情報をある一定期間分集めることを目的に実施した。本実験は、2013年12月5日から2014年3月19日まで断続的に実施し、プローブ情報を日曜日から土曜日までの1週間分、各曜日午前7時から午後9時までの各時間帯当たり7回分、上り下りの合計1,372回分を集めた。実験路線は、図1に示した神奈川県厚木市南毛利地区の「毛利台南入口交差点」から「南毛利中学入口交差点」に至る全長2.3kmの区間であり、途中6つの信号交差点が存在している。同区間は、規制速度40km/h、片側1車線の2車線道路である。また、著者らが2013年12月9日（月）の12時間交通量調査(7:00~19:00)では、図1のA地点の上り平均交通量は134台/h、ピーク時間帯の19時台で483台/h、B地点では、152台/h、ピーク時間帯469台/hだった。また、同日実施した、信号機および横断歩道による車速への影響を受けない計測区間10mでの速度調査によれば、本区間を通過する車両の通過時間をストップウォッチで計測して得た地点速度は、C地点で上り42.2km/h、D地点で下り40.8km/hであった。

3.3. 実験に用いたプローブ収集装置

図2は、実験に用いたプローブ収集装置である。本装置は、プローブ情報を生成するカーナビゲーション（以下、ナビ）2台とその収集を担うノートパソコン1台から構成される。ナビAとBの2台を使用したのは、後述の規格の下、異なるメーカーのナビでそれぞれ生成したプローブ情報の差異を確認するためである。生成するプローブ情報は、一般社団法人UTMS協会の「高度化光ビーコン近赤外線式AMIS用通信アプリケーション規格」[11]に従って、ナビにて6秒毎の車両位置と車速10km/h以下のときの車両位置を1秒毎に抽出し、ノートパソコンに蓄積した。なお、この規格は、警察庁が推進するプローブ信号制御構想、すなわち路上の通信インフラ「光ビーコン」で車載の「光ビーコンアンテナ」から送信されるプローブ情報を収集し、これを信号制御に活用する構想[12]を実現するために用意されたものである。また、車両位置は、GPSアンテナと車速パルスから算出した自車位置をナビの地図上にマッチングさせた緯度、経度の座標情報である。さらに、プローブ情報の収集は、助手席の調査員がノートパソコンを操作し、実験路線の最初の停止線を実験車の前輪が通過する瞬間から最後の停止線を通過する瞬間までを収集した。

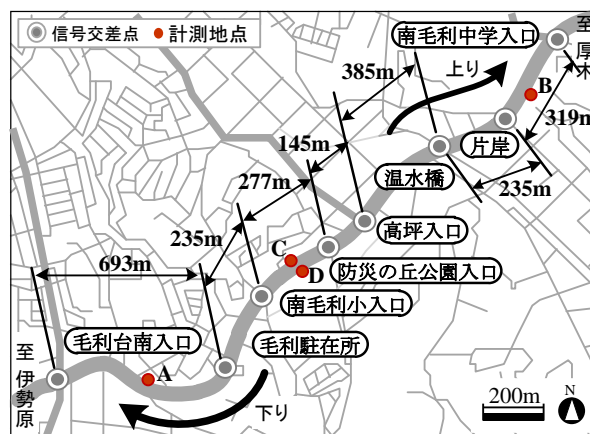


図1 実験路線



図2 プローブ収集装置の構成

3.4. 走行実験に付随して実施した交通調査

表1は、プローブ収集走行実験と併せて実施した各調査の概要である。

表1 交通調査

調査名	信号停止位置調査	旅行時間調査	交差点需要調査
場所	高坪入口交差点	実験路線	実験路線の全交差点
項目	赤信号で停止した際の停止位置から停止線までの距離	旅行時間、停止時間とその要因	交差点に流入しようとする単位時間当たりの車両台数
方法	信号停止した際、実験車の前輪タイヤ周辺目印を写真撮影しておき、後日、写真をもとに停止位置を特定し、停止線からの距離を測測する。	実験区間において、ドライバーが実験車を全交通の平均流速に近いと判断する速度で走行する。	実験車の通過したサイクルとこの前後のサイクルを合わせた3サイクルについて、実験車と同一進行方向から交差点に流入した台数と捌け残り台数を計測し、1サイクル当たりの平均値を算出する。
日時	プローブ情報収集実験と同時に実施		2014年1月30日、2月8、13、21、23日、3月4、6、7、12、14日の全10日間。いずれも午前7時から午後9時まで実施
実績	上り：194回 下り：181回	上り：686回 下り：686回	上り：980回 下り：980回

3.5. 実験結果

(1) 停止位置の特定

図3は、高坪入口交差点を一例に、信号停止した際の位置をナビAのプローブ情報と実測値からそれぞれ読み取り、停止線までの距離で比較した結果である。プローブ情報は、読み取った停止位置の座標と予め用意した停止線の座標から算出した値であり、実測値は、プローブ車両の停止位置を停止線から実測した値である。プローブ情報から算出した距離と実測値には乖離がみられ、算出値が実測値よりも総じて長くなっている。実際、実測値と算出値の相関係数は0.674に留まり、プローブ情報は誤差を含み、停止位置を正しく算出できていないことがわかる。また、他の交差点も最も小さな相関係数で片岸交差点の0.648、最も大きな相関係数で毛利駐在所交差点の0.691となり、実測値との乖離もみられる。ただし、この乖離は、ナビAとB各々のプローブ情報から算出した距離の相関係数が0.976となり、ナビメーカーの違いによる算出値の差異がないと判断でき、単純に、GPSの検出精度による影響のみがあると考えられる。なお、次項以降、ナビAとBのプローブ情報を区別せず、考察を進めることとする。

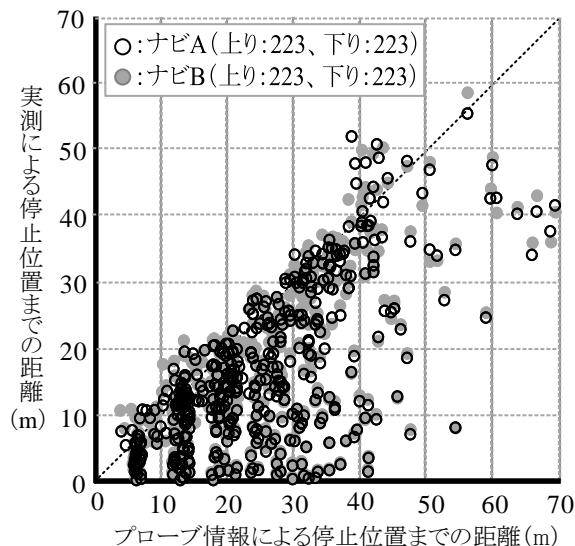


図3 プローブ情報と実測値の停止位置比較

(2) 信号交差点の特定

図4は、ピーク時間帯である平日18時台のプローブ情報から作成した上りと下りの時間距離線図である。横軸の距離は、プローブ情報から読み取った停止位置とスタート地点の座標をもとに算出した値である。一部の交差点での停止位置が交差点通過後になっていることが読み取れるものの、総じて、プローブ情報から算出した走行距離と実際の距離に極端な差がみられないことから、距離から交差点を特定できそうである。また、この図を通じ、信号機による停止回数が上り路線で平均4.8回、時間にして平均4分43秒発生し、下り路線でもそれぞれ平均4.5回、平均4分17秒発生していることが読み取れ、信号機による停止状況を把握できる。したがって、プローブ情報から距離による停止位置の厳密な算出は難しいものの、赤信号で停止した交差点を特定することが可能である。

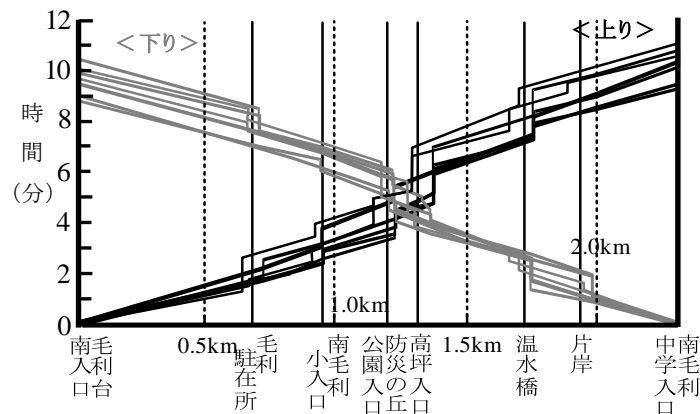


図4 プローブ情報から作った時間距離線図

(3) 信号停止回数と信号待ち時間の算出

図5は、実験路線の上りに着目し、各交差点の信号停止回数をプローブ情報から読み取り、その変動を時間帯別に示している。なお、プローブ情報は、実験区間最初の交差点の停止線を通過するタイミングで収集を開始しており、最初の交差点の停止回数を含んでいない。この図からは、高坪入口交差点の信号停止回数が時間帯を問わず多く、どこの信号交差点での停止頻度が高いかを横並びで比較できる。また、同交差点を例に取り上げ、赤信号で停止してから停止線を通過するまでの所要時間を算出すると、平日の朝7時から9時の時間帯で平均73秒、10時から16時で平均28秒、それ以降の時間帯で平均53秒となり、信号待ち時間も把握できる。なお、信号待ち回数と信号待ち時間を旅行時間調査結果と比較すると、相関係数は、上りの信号待ち回数で0.963、信号待ち時間で0.952、下りでそれぞれ0.971、0.955となり、プローブ情報からの算出値と実測値と間に差がないことを読み取れる。

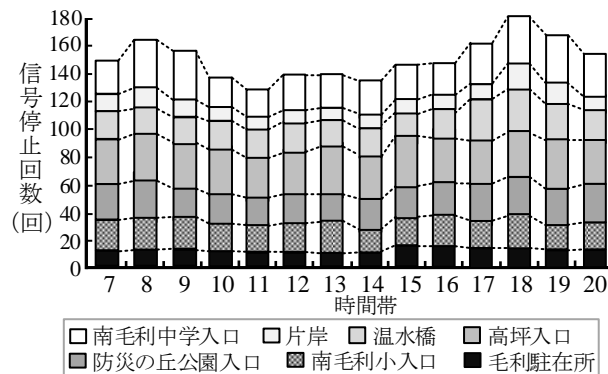


図5 時間帯別の信号停止回数

(4) 旅行時間の算出

図6は、実験路線の上りを例に、プローブ情報から読み取った各時間帯の平均旅行時間を各交差点間のリンク旅行時間の和で表現した結果である。ここで言うリンク旅行時間とは、対象交差点の一つ手前の交差点を通過した直後から対象交差点を通過し終えるまでの区間(以下、リンク)の所要時間、すなわち交差点間の所要時間である。なお、ここで言う交差点通過は、対向車線の停止線を目印とした。実際、高坪入口交差点や防災の丘公園入口交差点を含むリンクの旅行時間は、時間帯を問わず総じて長くなっている。つまり、リンク旅行時間は、交差点を含む各リンクの通過に要する時間を意味し、リンク単位の交通状況の把握に活用できそうである。なお、プローブ情報から算出したリンク旅行時間と旅行時間調査の実測値を比較すると、相関係数は上りで0.956、下りで0.967と共に強い相関を示し、プローブ情報から算出した値が実測値に遜色ない精度を有していることがわかる。

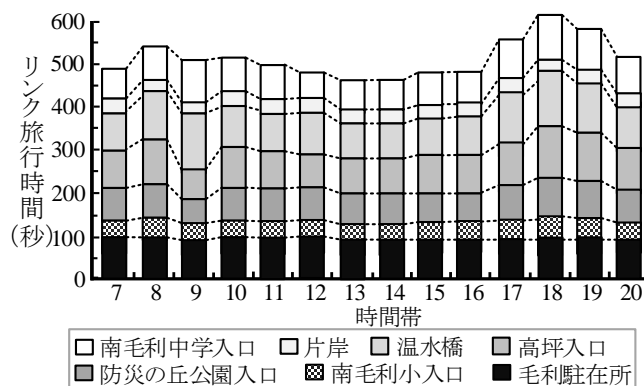


図6 算出したリンク旅行時間

(5) 遅れ時間の算出

信号制御パラメータの一つであるサイクルの設定値が妥当であるか否かを判断するために、従来から遅れ時間という目安が使われてきた[5]。この遅れ時間とは、ドライバーの制御できない事情によってその進行を妨げられる時間のことである[4]。図7は、各交差点で実施した交差点需要調査の計測データ、いわゆる単位時間当たりの交差点流入台数(以下、交差点需要)と、プローブ情報から算出したリンク遅

れ時間の関係を示している．ここで言うリンク遅れ時間とは，上述したリンク旅行時間から同リンクを規制速度で走行した場合の旅行時間(以下，基準旅行時間)を減じた値であり，このリンク遅れ時間を対象路線の全てのリンクについて足し合わせたものを総リンク遅れ時間とした．なお，上述の12時間交通調査によれば，地点速度がほぼ規制速度であったことから，基準旅行時間は，規制速度40km/hを用いた．この図によれば，両値の相関係数は，上りで0.910，下りで0.906となり，交差点需要とリンク遅れ時間に強い相関をみて取れる．また，交差点毎の相関係数を表2にみると，最も大きな相関係数で毛利台南入口交差点上りの0.917となり，最も小さな相関係数でも片岸交差点下りの0.885となり，遅れ時間と交通需要との間に高い相関関係のあることがわかる．

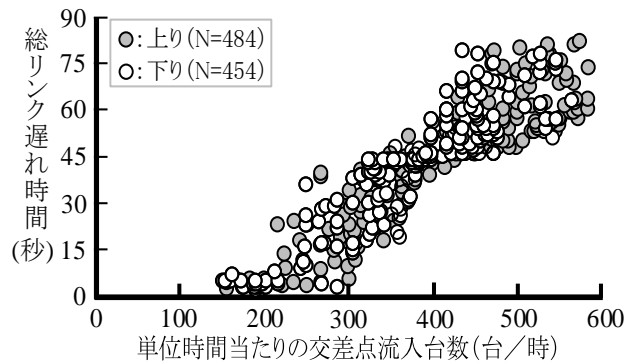


図6 算出したリンク旅行時間

表2 交通需要と遅れ時間の相関係数

	毛利台南入口	毛利駐在所	南毛利小入口	防災の丘公園入口	高坪入口	温水橋	片岸
上り	0.917 (N=63)	0.903 (N=57)	0.904 (N=70)	0.892 (N=78)	0.912 (N=84)	0.889 (N=71)	0.913 (N=61)
下り	0.914 (N=67)	0.893 (N=60)	0.884 (N=57)	0.902 (N=75)	0.894 (N=78)	0.906 (N=64)	0.885 (N=53)

4. プローブ情報による信号制御定数パターンの見直し方

4.1. 走行実験結果の整理

前章では，プローブ情報の解析を通じ，実験路線の交通状況を明らかにしながら，①プローブ情報の緯度経度情報から直接算出した交差点停止位置や信号待ち行列長には，誤差が含まれ，実測値との乖離もみられる，②一方で，赤信号で停止した交差点が特定でき，その停止頻度や信号待ち時間も高い精度で算出できる，③対象路線の全体および交差点間のリンク単位の旅行時間を高い精度で算出できる，④この旅行時間から算出したリンク単位の遅れ時間は，交差点需要を反映した値となっている，⑤一定期間分のプローブ情報から統計的に扱うことで，②，③，④の時間変動傾向を把握できる，といったプローブ情報の特長を改めて示し，前章冒頭に掲げた実験仮説がいずれも実現しうることを実証した．そこで，本章では，特に，④のプローブ情報から得た「遅れ時間」が交通需要とみなせる特長を活かし，車両感知器の設置が難しく，交通量の把握が容易でない多段定周期制御路線において，簡単に信号制御定数パターンを見直しできる方法を追及することにした．より具体的には，プローブ情報から算出した遅れ時間設定中のサイクル，スプリット，オフセットの各信号制御定数パターンの妥当性を評価しながら，見直しの必要な時間帯や曜日抽出する方法を検討した．

4.2. 遅れ時間を用いた信号制御パラメータ評価

(1) サイクルの評価

図8は，高坪入口交差点の上り方面に着目し，現在設定されているサイクルにおける青時間の比率とプローブ情報から算出したリンク遅れ時間の平均値を時間帯別に比較した結果である．図中の点線は，青時間の比率を示し，同交差点の一番短い青時間の比率を1としたときに換算し直したものである．同じ青時間比に対し，例えば，9時台のような遅れ時間の突出した時間帯もあれば，12時台のような短い時間帯もあり，実際の交通需要に対する青時間の比率，すなわち青時間長の妥当性をみることができよ

う。したがって、交通需要を反映するリンク遅れ時間とサイクルの比較を通じ、どの時間帯のサイクルを見直すべきか、あるいは、見直しが必要でないかの見極めができそうである。

(2) スプリットの評価

図9は、四枝交差点の温水橋交差点を例に、主道路と従道路の遅れ時間の割合を百分率で算出した結果である。ここでいう主道路とは、実験路線の上りと下りの2方路であり、従道路とは、主道路に交差する道路の上りと下りの2方路である。従道路の遅れ時間算出には、図10の走行実験路線を設定し、主道路と同じ要領で実施したプローブ収集実験の結果を用いた。なお、この従道路における実験は、従道路の上り（温水交差点方面）と下り（文化会館前交差点方面）の両方向で実施した。また、主道路と従道路の走行は、当該交差点をほぼ同じ時刻で通過できるように、出発タイミングを調整した。そして、図9を通じ、主従の両道路における遅れ時間の発生割合とその時間変動を読み取れることから、設定中のスプリットを重ね合わせることにより、その設定値の妥当性を判断できよう。

実際、図11は、その一例として、温水橋交差点における主従道路の遅れ時間の割合を主道路のスプリットと比較した結果である。ここで言う主従道路の遅れ時間の割合とは、主道路と従道路の遅れ時間の総和に占める主道路の遅れ時間の割合であり、50%を1と置いたときの比率(以下、遅れ時間比率)に換算したものである。この図によれば、同じスプリットが設定されていながら、遅れ時間比率の異なる時間帯があったり、逆に、9時台や20時台のような同程度の遅れ時間比率でありながら、異なるスプリットが設定されていたり、交通需要と乖離したスプリットの設定されていることがわかる。したがって、スプリットと遅れ時間の比較を通じ、見直すべきスプリット候補を列挙できそうである。

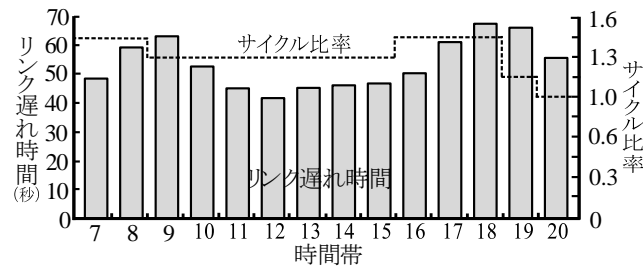


図8 サイクルと遅れ時間の比較

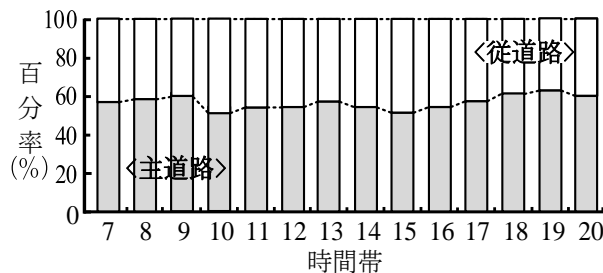


図9 温水橋交差点の主道路従道路遅れ時間



図10 従道路プローブ情報収集の走行路線

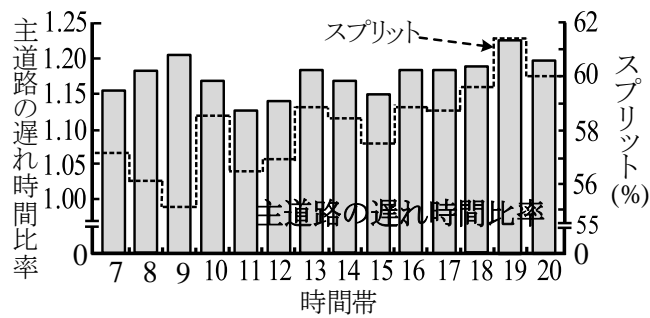


図 11 スプリットと遅れ時間の比較

(3) オフセットの評価

図 12 は、実験路線のうち、オフセットの設定されている南毛利小入口、防災の丘公園入口、高坪入口、温水橋の 4 交差点に着目し、各リンク遅れ時間の割合を上り下り別に算出した結果である。この図からは、上りのリンク遅れ時間の割合が下りのそれをいずれの時間帯でわずかに上回り、上りの交通需要が下りを上回っていることが読み取れる。図 13 は、上りと下りのリンク遅れ時間のギャップの大きな温水橋交差点に着目し、上りの遅れ時間の割合とオフセットの設定状況を照合した結果である。左軸の上りの遅れ時間比率とは、上りと下りのリンク遅れ時間の総和に占める上りのリンク遅れ時間の割合を 50%を 1 と置いたときの比率であり、右軸のオフセットとは、温水橋交差点の上り方面にある片岸交差点との青信号開始時間の差である。この図を通じ、上りの遅れ時間比率の大きな時間帯でオフセット未設定であり、逆に、オフセット設定されているながら、上りの遅れ時間比率が依然大きいことがわかる。一般に、遅れ時間や停止時間を最小にするオフセットを解析的に求めることは難しいと言われてきた[6]。しかし、これらの解析結果を見る限り、対象路線における上りや下りの遅れ時間を活用することにより、交通需要に対するオフセットの妥当性程度は把握できそうである。

このように、プローブ情報から算出したリンク遅れ時間を利用することで、現在設定されている信号制御定数パターンが交差点需要に見合ったものになっているか否かを簡単に判断でき、交通需要と乖離している場合には、どこを見直すべきかを抽出することができる。そこで、こうした利点を活かし、信号制御定数パターンの見直し支援システム『フィードバック信号制御』を提案したい。

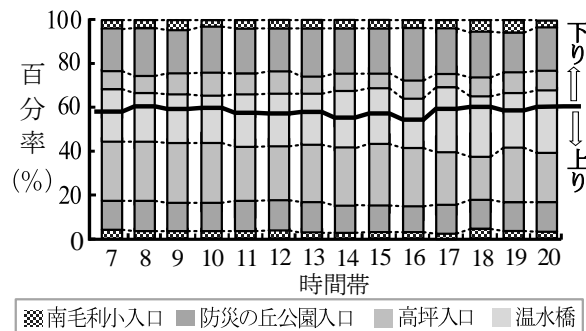


図 12 リンク遅れ時間比率

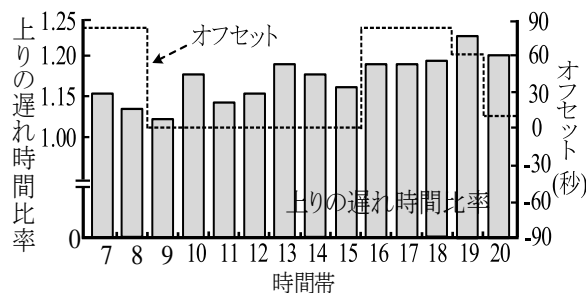


図 13 オフセットと遅れ時間の比較

5. プローブ情報を活用したフィードバック信号制御の提案

5.1. フィードバック信号制御の概念

フィードバック信号制御とは、プローブ情報から算出した遅れ時間を評価指標として、多段定周期制御の根幹をなす信号制御定数パターンが交通実態に適合しているか否かを定期的に診断し、適合していなければ、どこをどう見直すべきか、これに必要な参考情報を抽出しながら、最適な信号制御定数パターンを設定しようとするものである。すなわち信号制御定数パターンを将来にわたって継続的に更新し、多段定周期制御下にある信号機の運用改善を恒久的に図ろうとする仕組みを支援するものである。従来、信号制御定数パターンの更新は、交通調査の解析結果から信号制御定数パターンを評価し、見直しが必要であれば、信号制御機内に格納された信号制御定数パターンを設定し直す、というプロセスを回してきた。したがって、フィードバック信号制御には、この更新プロセスをプローブ情報の活用からもっと効率的に実行させ、時間とコストの要する信号制御定数設計の負担を軽減する狙いがある。

5.2. フィードバック信号制御の実現構成

図 14 は、フィードバック信号制御の実現構成である。車載装置は、前掲図 2 同様に、車速パルスおよび GPS からプローブ情報を生成するナビなどの「ヘッドユニット部」、生成したプローブ情報を光ビーコンの通信エリア内で送信する「光ビーコンアンテナ」から成る。なお、この光ビーコンアンテナの普及率は、市販開始から 20 年以上たちながら、現在 10% 未満であり、今後も飛躍的に高まると期待できないことから、民需製品というよりも渋滞改善製品と位置付け、行政主導の下に、パトカー、郵便回収車や宅配便など地域に密着した車両への装着を積極的に進めるといった対応が必要であろう。また、ヘッドユニット部は、ナビだけでなく、スマートホンなどでの代用を検討する必要もあろう。

一方、路側装置は、「信号制御機」と「信号灯器」の他、車載の光ビーコンアンテナから送信されたプローブ情報を受信し、これを蓄積する路上の既存「光ビーコン」、光ビーコンから取り出したプローブ情報を読み込み、信号制御定数パターンを診断する「プローブ処理端末」から構成される。このうちのプローブ処理端末は、2 つの形態を有している。一つは、都道府県警察の交通管制センター内に設置されるオンラインタイプのものであり、有線回線で現地からプローブ情報を取り込む方法である。もう一つは、オフラインタイプのものであり、担当者が専用アプリケーションのインストールされたノートパソコンを携え、現地にてプローブ情報を取り込む方法である。いずれもプローブ処理端末は、回収したプローブ情報を読み込ませ、予め登録しておいた対象信号機の信号制御定数パターンの診断を開始する。そして、この結果から見直すべき時間帯や曜日の信号制御定数パターンを抽出し、他の時間帯や曜日の信号制御定数パターンを選択し直したり、サイクル、スプリット、オフセットの各信号制御パラメータを見直し、新たな信号制御定数パターンをつくらしたりすることが可能となる。

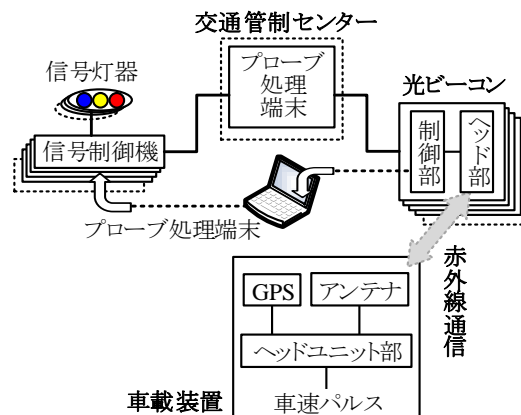


図 14 フィードバック信号制御の機器構成

5.3. 信号制御定数パターン診断の流れ

図 15 は、プローブ処理端末による信号制御定数パターンの診断プロセスである。各処理は、次のようにまとめられる。

(1) プローブ情報の抽出

診断対象路線における停止線の緯度、経度情報を登録し、当該路線を通過した車両のプローブ情報を

抽出する。

(2) リンク距離の算出

各停止線の緯度、経度情報に基づき、各交差点間のリンク距離(l_n)を算出する。

(3) 基準旅行時間の算出

各リンク距離(l_n)を各リンクの当該規制速度(V_r)で除し、基準となる旅行時間(t_{bn})を算出する。なお、この V_r は、任意な設定が可能であり、当該路線の目標設計速度となる。

(4) 旅行時間の算出

各停止線の緯度、経度情報をもとに、抽出したプローブ情報から各停止線の通過時刻を車両毎に算出したうえで、各リンク旅行時間(t_{ln})と総リンク旅行時間(T)を車両毎に曜日別時間帯別方路別に算出する。

(5) 遅れ時間の算出

算出した各リンク旅行時間(t_{ln})から基準旅行時間(t_{bn})を減じ、各リンクの遅れ時間(d_{ln})を算出する。

(6) 信号制御定数パターンへの入力

プローブ情報と共に信号制御機から取り込んだ信号制御定数パターンを読み込む。

(7) 見直し対象信号制御定数パターンの抽出

各交差点の上り方路において、読み込んだ信号制御定数パターンのうち、最もサイクル長の短いパターンを 1 とする比率に換算する。その一方で、算出した各交差点上りのリンク遅れ時間についても最小値を 1 とする比率に換算する。そして、これらの比率を使って、信号制御定数パターンの比率に対するリンク遅れ時間の比率の割合(E)を算出し、この割合が 1.5 以上もしくは 0.5 未満の曜日もしくは時間帯を抽出する。この 1.5 以上もしくは 0.5 未満という値は、評価基準閾値として、任意に設定できるものである。なお、ここでは、遅れ時間が信号制御定数パターンに対し、極端に大きな、もしくは、極端に小さな曜日や時間帯を抽出するために、1.5 および 0.5 という値を採用した。そして、このプロセスを通じ、見直すべき曜日や時間帯を抽出し、以下のプロセスで見直しを進める。

(8) 見直し対象サイクルの評価

各交差点上りのリンク遅れ時間と設定中サイクルに占める青時間の割合を各々最小値を 1 とする比率に換算する。次に、両比率から青時間比率に対する遅れ時間比率の割合(α)を算出し、これが 1.5 以上もしくは 0.5 未満となっている曜日もしくは時間帯を抽出する。なお、この 1.5 以上もしくは 0.5 未満という値は、任意に設定できる評価基準閾値であり、青時間の割合に対し、遅れ時間が平均 2 倍以上の極端に大きい、もしくは、半分未満の極端に小さい曜日もしくは時間帯を抽出するためのものである。

(9) 見直し対象スプリットの評価

交差点毎に全方路のリンク遅れ時間の総和に占める主道路のリンク遅れ時間の割合を算出する。そして、スプリットに対するリンク遅れ時間比率の割合(β)を算出し、これが 1.5 以上もしくは 0.5 未満、すなわち、遅れ時間が平均の 2 倍以上、もしくは、半分未満となる極端なスプリットの設定されている曜日もしくは時間帯を抽出する。なお、1.5 および 0.5 という値は、任意に設定できる評価基準閾値である。

(10) 見直し対象オフセットの評価

交差点毎に、上りと下りの総リンク遅れ時間の和に占める上りの総リンク遅れ時間の割合を算出し、50%を 1 とする比率に換算する。その一方で、オフセットの設定状況を簡単に把握できるように、オフセット未設定の場合を 1、オフセット設定の場合を 2、にそれぞれを置き換える。そして、両値からオフセットに対する遅れ時間比率の割合(γ)を算出し、これが 1.5 以上もしくは 0.5 未満、すなわち、遅れ時間が平均の 2 倍以上もしくは半分未満の極端な長さになっている曜日もしくは時間帯を見つけ、オフセット設定有無の妥当性を判断する。なお、1.5 および 0.5 という値は、任意に設定できる評価基準閾値である。

(11) 信号制御定数パターンの再設定

以上の診断プロセスを通じ、現在設定中の信号制御定数パターンにおけるサイクル、スプリット、オフセットのどれを見直すべきかを把握でき、これらの評価結果を踏まえながら、新しい信号制御定数パ

ターンを選定する。この際、予め登録されている信号制御定数パターンの中に相応しいものがある場合は、それを選び直し、そうでない場合は、 α 、 β 、 γ の各割合が0.5以上1.5未満となるように、新規に信号制御定数パターンを作り直したり、既に登録済み信号制御定数パターンの登録内容の一部を修正したりする。特に、多段定周期制御下の信号制御機は、一般に、信号制御定数パターンを9つ以上設定できない仕様のため、他の時間帯で既に設定している信号制御パラメータを極力割り当て、この数を越えないようにすることが望ましい。また、オフセットが未設定の交差点の場合は、見直し対象時間帯以外の時間帯と隣接交差点の各信号制御定数を踏まえ、スプリットのみ、サイクルのみ、スプリットとサイクルの両方、のいずれか最も効果の期待できるものを見直しする。その一方で、オフセットの設定された交差点の場合は、オフセット設定値の見直しを極力せず、スプリットのみを見直ししたり、隣接交差点と共に、共通サイクル長を決定しながら、サイクルを見直ししたりする。

なお、上述の(7)から(11)までにおける閾値は、見直し対象を端的に抽出するために、便宜的に1.5以上と0.5未満という値を用いているが、これらは可変値であるため、経験や路線特徴に応じて変更されるべき値であると考えている。

(12) 信号制御定数パターンの再登録

最後に、見直しした信号制御パラメータを信号制御機に登録して完了となる。

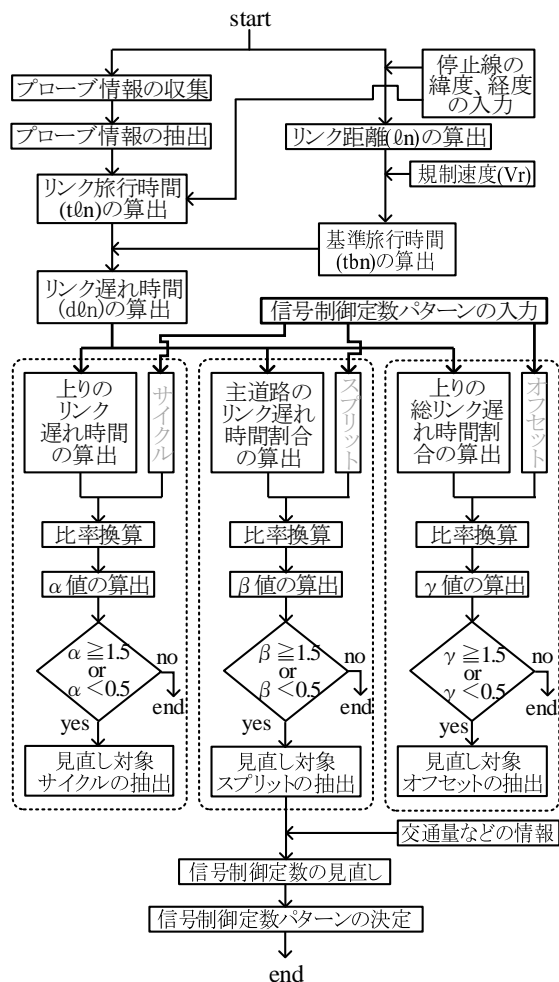


図 15 信号制御定数パターンの診断フロー

6. フィードバック信号制御の実験路線への適用

6.1. 信号制御定数パターンの見直し

フィードバック信号制御の実現可能性を検証すべく、ここでは、前掲図 15 に従いながら、上述のプローブ収集実験路線における信号制御定数パターンの見直しを実施した。特に、本路線は、当該路線の道路種別や交通量を考慮すると、将来にわたって交通感応制御のような高度な信号制御を導入したり、従来からの交通調査業者への委託を通じて、信号制御定数パターン見直しをかけたたりする優先順位は必

ずしも高くなく、本研究提案のフィードバック信号制御の適用する余地が十分にあると考えた。なお、見直し対象時間帯は、プローブ収集実験と同じ、平日の朝7時から夜8時までとした。また、見直しに際し、前掲表1と共に、表3の調査結果を用いた。

表4は、信号制御定数パターンの見直しの必要な交差点の代表例として、温水橋交差点を取り上げ、サイクル、スプリット、オフセットの各信号制御定数に対する遅れ時間の各比率 α 、 β 、 γ を算出した結果である。表中の太字下線は、 α 、 β 、 γ の各割合が0.5未満もしくは1.5以上となったことを意味している。特に、朝夕の時間帯におけるサイクルの α は、1.5を大きく上回り、設定されているサイクルが交通需要に大きく乖離していることが読み取れ、これらの時間帯を中心に、見直しを実施することにした。

表5は、実際に、温水橋交差点の信号制御パラメータ見直し結果である。表左側のケースAは、 α 、 β 、 γ の各値がいずれも0.5以上1.5未満とすることだけを目指し、各パラメータを選び直した結果である。9時台のサイクルとスプリットは、8時台の設定値をそれぞれ当てはめた。また、7時、8時、17時、18時の各時間帯のサイクルは、他の時間帯の設定値を当てはめても α が0.5以上1.5未満とならず、共通サイクル長を10秒延長し、100秒に設定し直した。さらに、オフセットは、7時台と20時台を0秒、12時台と15時台を20時台に設定している10秒とした。

一方、表右側のケースBは、ケースAと異なり、 α 、 β 、 γ が0.5未満もしくは1.5以上となる時間帯のうち、リンク遅れ時間や隣接交差点の設定状況を加味し、必ずしも α 、 β 、 γ を0.5以上1.5未満にすることに固執せずに見直しすることにした。ケースAでサイクルを見直した7時台は、16時台

表3 見直しのために実施した交通調査

調査名	遅れ時間計測調査	交通量調査
場所	実験路線の全交差点	実験路線の全交差点
項目	各交差点における従道路側方路のリンク遅れ時間	交差点に流入する単位時間当たりの車両台数
方法	各対象交差点の二、三手前の交差点から対象交差点通過後の二、三先の交差点までの区間をプローブ収集装置を搭載した車両で走行し、収集したプローブ情報からリンク遅れ時間を算出する。	対象交差点における全方路の流入時間交通量を計測する。
日時	プローブ情報収集実験と同時に実施	2014年2月19日(水)の午前7時から午後9時まで
実績	各交差点従道路の上りと下り共に42回	上り：980回、下り：980回

表4 信号制御パラメータの見直し検討

時間帯	サイクル		スプリット		オフセット				
	設定値(秒)	遅れ時間(秒)	α	主道路遅れ時間割合(%)	β	設定値(秒)	上り遅れ時間割合(%)	γ	
7:00	90	58	<u>1.61</u>	53.2	61.3	1.15	2	48.7	<u>0.49</u>
8:00	90	74	<u>2.06</u>	53.2	72.6	1.45	2	53.4	0.53
9:00	80	65	<u>2.03</u>	47.8	73.8	<u>1.54</u>	1	64.3	1.29
10:00	80	44	1.38	47.8	58.6	1.22	1	61.5	1.23
11:00	80	33	1.03	47.8	59.8	1.25	1	53.5	1.07
12:00	80	36	1.13	47.8	61.2	1.28	1	75.3	<u>1.51</u>
13:00	80	34	1.06	47.8	58.9	1.23	1	52.9	1.06
14:00	80	34	1.06	47.8	58.5	1.22	1	61.3	1.23
15:00	80	24	0.75	47.8	57.5	1.20	1	76.4	<u>1.53</u>
16:00	90	52	1.44	53.2	58.9	1.11	2	61.3	0.61
17:00	90	73	<u>2.03</u>	53.2	63.2	1.26	2	62.5	0.62
18:00	90	79	<u>2.19</u>	53.2	68.3	1.37	2	61.8	0.62
19:00	70	80	<u>2.86</u>	45.9	69.2	<u>1.51</u>	2	60.9	0.61
20:00	60	43	<u>1.79</u>	41.2	63.2	<u>1.53</u>	2	48.0	<u>0.48</u>

表5 見直し後の信号制御定数

時間帯	ケースA						ケースB					
	サイクル		スプリット		オフセット		サイクル		スプリット		オフセット	
	設定値(秒)	α	設定値(秒)	β	設定値(秒)	γ	設定値(秒)	α	設定値(秒)	β	設定値(秒)	γ
7:00	<u>100</u>	<u>1.45</u>	53.2	1.15	<u>1</u>	<u>1.15</u>	90	1.61	53.2	1.15	2	0.00
8:00	<u>100</u>	<u>1.85</u>	53.2	1.45	2	0.73	90	2.06	53.2	1.45	2	0.00
9:00	<u>90</u>	<u>1.81</u>	<u>53.2</u>	<u>1.39</u>	1	1.39	<u>90</u>	<u>1.81</u>	<u>53.2</u>	<u>1.39</u>	1	0.00
10:00	80	1.38	47.8	1.22	1	1.22	80	1.38	47.8	1.22	1	0.00
11:00	80	1.03	47.8	1.25	1	1.25	80	1.03	47.8	1.25	1	0.00
12:00	80	1.13	47.8	1.28	2	<u>0.64</u>	80	1.13	47.8	1.28	1	0.00
13:00	80	1.06	47.8	1.23	1	1.23	80	1.06	47.8	1.23	1	0.00
14:00	80	1.06	47.8	1.22	1	1.22	80	1.06	47.8	1.22	1	0.00
15:00	80	0.75	47.8	1.20	2	<u>0.60</u>	80	0.75	47.8	1.20	1	0.00
16:00	90	1.44	53.2	1.11	2	0.55	90	1.44	53.2	1.11	2	0.00
17:00	<u>100</u>	<u>1.83</u>	53.2	1.26	2	0.63	<u>100</u>	<u>1.83</u>	53.2	1.26	2	0.00
18:00	<u>100</u>	<u>1.98</u>	53.2	1.37	2	0.68	<u>100</u>	<u>1.98</u>	53.2	1.37	2	0.00
19:00	<u>100</u>	<u>2.00</u>	<u>47.8</u>	<u>1.45</u>	2	0.76	<u>80</u>	<u>2.50</u>	45.9	1.51	2	0.00
20:00	<u>80</u>	<u>1.79</u>	<u>45.9</u>	<u>1.38</u>	<u>1</u>	<u>1.38</u>	60	1.79	<u>45.9</u>	<u>1.38</u>	2	0.00

注) オフセットの設定欄における「1」は、「オフセット未設定」を意味し、「2」は、「上り優先」を意味している。

のリンク遅れ時間とほぼ同等のリンク遅れ時間であり、なおかつ、 α の割合が 0.5 以上 1.5 未満の範囲にあることから、設定の見直しをしないこととした。その一方で、9 時台のサイクルとスプリットは、8 時台のリンク遅れ時間と差異がないことが判明し、8 時台の設定値をそのまま当てはめた。また、17 時台と 18 時台のサイクルは、両時間帯のリンク遅れ時間が飛躍的に伸びていることから、ケース A 同様に 100 秒に延長した。さらに、19 時台のスプリットは、19 時台のリンク遅れ時間が 20 時台のそれに近いことから、20 時の設定値を適用した。なお、オフセットは、見直しの必要がないと判断した。その結果、ケース B の見直した時間帯の数は、ケース A よりも少なく、サイクルで 4 つ、スプリットで 2 つ、オフセットで 0 となった。

表 6 は、以上のプロセスを全交差点で実行し、信号制御定数パターン数を見直し前後で比較した結果である。ケース A では、38 の時間帯を見直し、見直し前よりも 24 多い合計 69 パターンに、ケース B では、25 の時間帯を見直し、見直し前よりも 7 つ多い合計 52 パターンとなった。

表 6 見直し前後の信号制御定数パターン数

交差点	見直し前のパターン数	見直し後			
		ケースA		ケースB	
		見直し時間帯数	パターン数	見直し時間帯数	パターン数
毛利台南入口	4	3	7	2	4
南毛利駐在所	6	4	8	3	6
南毛利小学校	6	4	8	3	7
防災の丘公園	6	5	9	3	7
高坪入口	6	6	10	3	7
温水橋	6	7	11	4	8
片岸	5	5	7	4	6
南毛利中学校	6	4	9	3	7
合計	45	38	69	25	52

6.2. シミュレーションによる見直し効果の検証

(1) シミュレーションの概要

前節で見直した信号制御定数パターンが交通の流れに適合したものになっているか、すなわち、信号制御定数パターンの見直しが交通流の改善につながったかをシミュレーションで検証した。本シミュレーションでは、(株)日立産業制御ソリューションズ社の交通流シミュレーション「TRAFFICSS」を使用した。そして、現状の信号制御定数パターンおよび今回見直した信号制御定数パターンをそれぞれ設定したうえで、交通量データをシミュレーションに与え、シミュレーション上で得られる総リンク旅行時間で比較を行った。具体的には、まず、シミュレーション上において、停止線や車線数などプローブ収集実験路線を再現した。次に、サイクル、スプリット、オフセットの各信号制御パラメータを見直し前後でそれぞれ設定した。そのうえで、シミュレーションを回し、上りと下りの総リンク旅行時間を各時間帯で 10 回計測し、信号制御定数パターンの見直し前後で比較した。なお、シミュレーションは、信号制御定数パターンの見直し期間と同じ、平日の朝 8 時から 21 時まで実施した。また、各交差点の交通量と右左折車両の混入割合は、前掲表 3 に示した交通調査の実測値による。

(2) シミュレーションの再現性

図 16 は、プローブ情報から収集した総リンク旅行時間とシミュレーションから得た総リンク旅行時

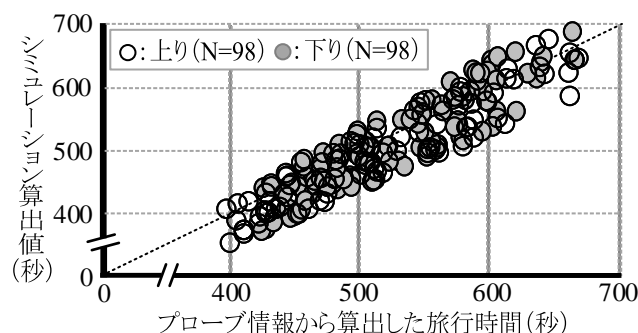


図 16 シミュレーションの再現比較結果

間を上りと下りについて時間帯別で比較し、再現性を示した結果である。各時間帯におけるシミュレーションの旅行時間の平均値とプローブ情報の旅行時間の平均値の相関をみると、相関係数は上りで0.961、下りで0.936と概ね良好な結果が得られ、再現性を確保できたと判断できよう。

(3) シミュレーション結果

図 17 は、信号制御定数パターン見直し前後の総リンク旅行時間を比較した結果である。α, β, γ をあくまでも 0.5 以上 1.5 未満にさせることに固執したケース A では、信号制御定数パターン見直し前の現状に比べ、旅行時間が長くなっている時間帯が散見されるのに対し、見直し対象外の時間帯や隣接交差点の設定状況を加味したケース B では、旅行時間が総じて短くなっていることが読み取れる。実際、パターン見直し前後の各時間帯の平均総リンク旅行時間を表 7 にみると、ケース A の総リンク旅行時間は、見直し前のそれに比べ、上りで平均 23 秒、下りで平均 34 秒長くなっている。これは、ケース A で①ピーク時のサイクルが総じて長くなったこと、②スプリットの主方路配分が大きくなったこと、③ピーク時の下り方向へのオフセット設定を増やす一方で、閑散時のオフセット 0 秒設定を増やしたこと、などに起因したためと考えられる。一方、ケース B においては、見直し前に比べ、上りで平均 21 秒、下りで平均 17 秒短くなっている。これは、見直し対象時間帯とそれ以外の時間帯の交通量を比較し、①サイクルとスプリットの極端に大きな見直しを極力避けたこと、②ピーク時の共通サイクルの延長を最小限に留めたこと、③オフセットを見直ししなかったこと、といった点が旅行時間の短縮に反映したと考えられる。つまり、ケース B は、ケース A のような 0.5 以上 1.5 未満を満たすという目標だけでなく、見直し対象外時間帯のリンク遅れ時間や設定状況を考慮した判断をくわえたことにより、交通の流れにより合致した信号制御定数パターンを実現することができたといえよう。

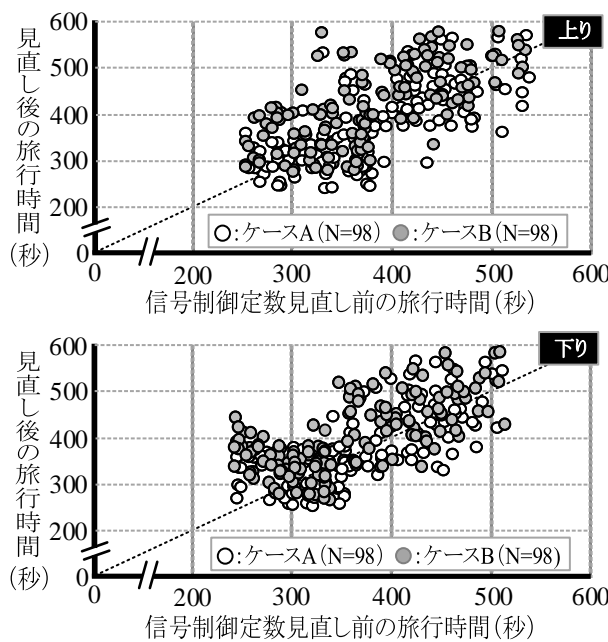


図 17 見直し前後の旅行時間変化

表 7 見直し前後の旅行時間比較

		現 状	ケースA	ケースB
上 り	平均値	8分04秒	8分15秒	7分43秒
	最小値	7分09秒	7分57秒	6分40秒
	最大値	10分50秒	11分21秒	10分07秒
	標準偏差	71秒	75秒	73秒
	N	98	98	98
下 り	平均値	7分22秒	7分40秒	7分05秒
	最小値	5分25秒	5分39秒	5分06秒
	最大値	10分12秒	10分48秒	9分54秒
	標準偏差	78.4秒	80.0秒	77.6秒
	N	98	98	98

7. まとめ

本論文では、プローブ情報から読み取った遅れ時間を活用し、多段定周期制御の信号制御定数パターン見直し支援システム『フィードバック信号制御』を提案し、その実現可能性を検証した。要するに、本システムは、実態の交通の流れに適合しなくなってしまった多段定周期制御の信号制御定数パターンを見直すために多大な設備や人材などをなるべくかけずに、見直しできないかという現場の実情を踏まえたシステム化を図ったものである。ただし、今回、フィードバック信号制御の適用検討は一路線にすぎず、本制御の効果を最大限に発揮させるためには、どのような路線への適用が望ましいかなど適用路線の検討が引き続き必要となろう。

最後に、本研究を進めるにあたり、情報提供や調査にご協力下さいました新倉聡氏(現、公益財団法人日本道路交通情報センター)をはじめとする神奈川県警察本部交通部交通規制課の関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- [1] 平川雄一朗, “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, 10月号, pp.6-14, 2013年10月.
- [2] 新倉聡, “これからの信号制御第5回: 大都市における信号制御方策の一例について(その2)”, 交通工学, No.40, Vol.6, pp.95-103, 2005年12月.
- [3] 吉崎昭彦, “なぜ, 信号制御の見直しか”, 月刊交通, 10月号, pp.1-5, 2013年10月.
- [4] 公益財団法人高速道路調査会, 一般社団法人交通工学研究会, “交通工学用語辞典”, 技術書院, 1984年6月.
- [5] 上高家耕一, “最近の交通信号制御技術 I”, 交通工学, Vol.16, No.4, pp.33-40, 1981年10月.
- [6] 交通工学研究会, “改訂交通信号の手引き”, 丸善, 2006年7月.
- [7] 鈴木俊夫, 佐藤隆, “水戸駅前における地点全感応交通信号制御”, 交通工学, Vol.4, No.2, pp.21-30, 1969年3月.
- [8] 吉田和樹, 越正毅, 安井一彦, “プローブカーを用いた交通信号のオフライン最適化に関する研究”, 第21回交通工学研究発表会論文報告集, pp.265-268, 2001年11月.
- [9] 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”, 電気学会研究会資料 (ITS, ITS研究会), Vol.16, pp.33-37, 2011年6月.
- [10] 花房比佐友, 飯島護久, 堀口良太, “リアルタイム信号制御アルゴリズムのためのプローブ情報を利用した遅れ時間評価”, 第8回 ITS シンポジウム Proceedings, 2009年12月.
- [11] UTMS 協会, “高度化光ビーコン近赤外線式 AMIS 用通信アプリケーション規格”, UTMS 協会, 2013年3月.
- [12] 福田守雄, “次世代光ビーコンの整備・更新に向けて”, UTMS ニュース, No.32, p.1, UTMS 協会, 2012年9月.

著者略歴

塚田 悟之 (つかだ のりゆき)

1997年日本無線(株)入社。2006年日産自動車(株)入社, NISSAN TECHNICAL CENTER North America を経て, 2018年同社退職。同年(株)SUBARU 入社, 先進安全設計部課長。現在に至る。