

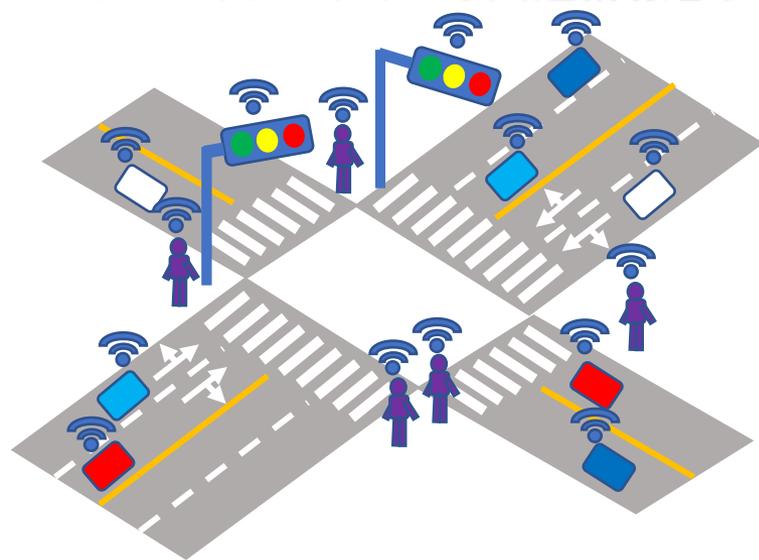
2020年9月16日まちべん資料

リアルタイム情報に基づく平面交差点信号制御 システム最適化に関する研究——平均遅延最小化を 目指す信号制御最適化の非線形計画モデルの構築方法と その検証

(公財)豊田都市交通研究所
主任研究員 ムルイ 穆蕊

背景

- ◆ これまでは、交通量データあるいは交通管理と制御の経験則に基づいて、信号制御システムの設計が行われてきた
- ◆ 日本では、光ビーコンが数多く設置されており、光ビーコンから取得した情報を活用した信号制御が行われている(MODERATO(Management by Origin-DEstination Related Adaptation for Traffic Optimization))
- ◆ ただし、この方法ではサイクル長と現示スプリットの更新時間は最短で150sで、150sより短い時間内交通流の変化を対応できない。さらに、サイクル長の値は1s単位で変更できず、5sあるいは10sとなっている。交通遅延が大きくなり、交通渋滞が引き起こされやすい
- ◆ 近年、先進通信技術の発展に伴って、カメラやレーダーによってリアルタイムな交通情報を取得できるようになっている
- ◆ それらのリアルタイム情報を利用して、信号制御システムの技術開発が期待される。それは、将来のスマートシティの一部を構成すると予想される
- ◆ 最近では、V2V(Vehicle to Vehicle)、V2I(Vehicle to Infrastructure)など通信可能な領域が拡大している。CASE時代が到来する将来に、こうした通信機能がクルマの標準装備になる可能性がある。また、人工知能とセンサーの発展とともに交差点で正確な車群情報(交通量、車速)を取得できる可能性がある



未来コネクティブな平面交差点
のイメージ

背景



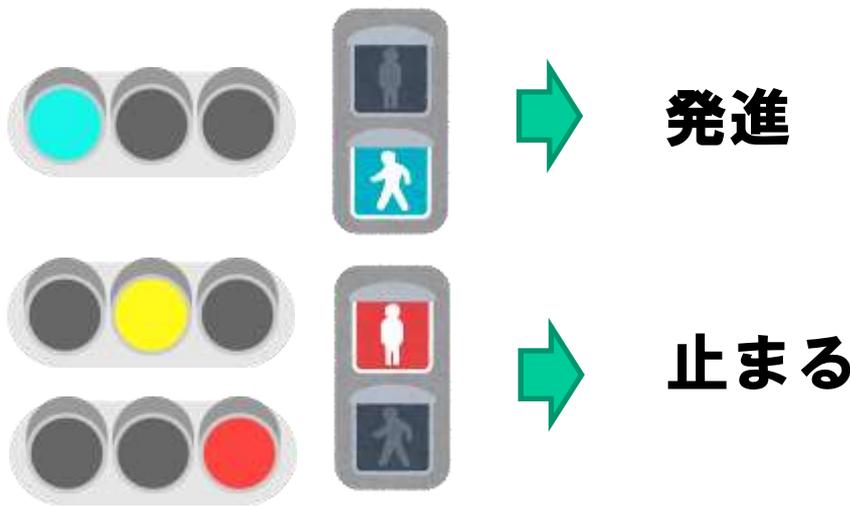
- どのような方法で 獲得できる情報（カメラ、レーダー、光ビーコン、... から） を処理する？
- さらに、どのような方法で上述の処理した情報を利用して、信号制御最適化 を実現する？

本日の話題

- 信号制御とは
- 世界の先進信号制御
- 平均遅延最小化を目指す信号制御最適化
の非線形計画モデルの構築方法とその検証

信号制御とは

運転者と歩行者の視点:



信号機設置の条件と限界

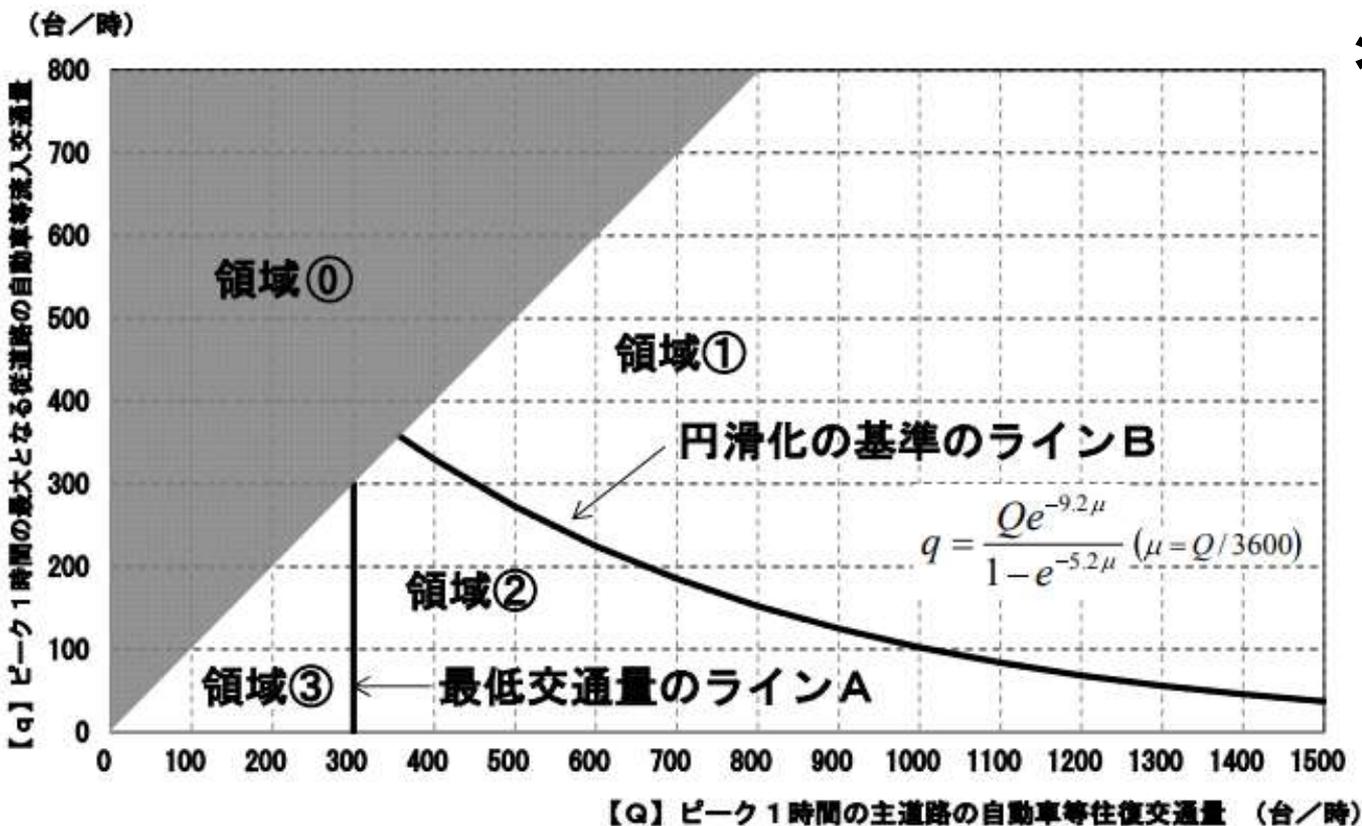
- 交通安全の確保
- 交通の円滑の確保

交通管理者の視点

信号機設置の仕組み



信号機設置の条件と限界



(図)信号機の設置及び撤去における自動車等交通量の条件

領域①：対象外領域

領域②：交通の円滑の確保の観点から、信号機の設置が可能な場所

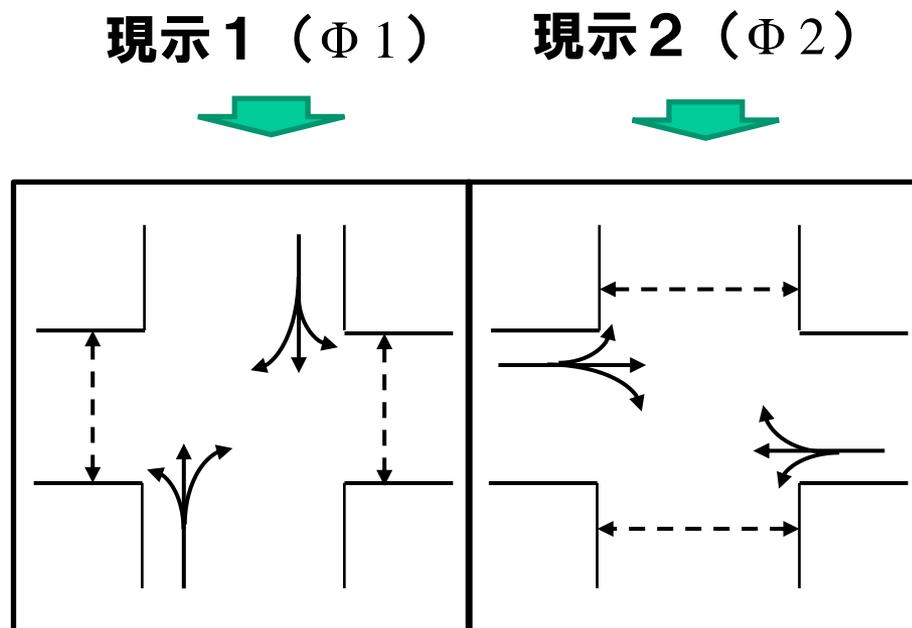
領域③：交通の円滑の確保の観点から、信号機の設置を要しないが、交通の安全の確保の観点から信号機の設置について検討できる場所

領域④：原則として信号機の設置を要しない場所

信号制御の基本要素—信号現示と信号現示方式

信号現示とは、1つの交差点において（歩行者も含む）ある**一組の交通流**に対して同時に与えられている**通行権**、またはその通行権が割り当てられている時間帯のことをいう。省略して「**現示**」という。

信号現示方式とは、1つの交差点において**全ての交通流**に対して通行権を与えるために設定される複数の現示の組み合わせ方。省略して「**現示方式**」という。



実線は車の進行方向；破線は歩行者と自転車の進行方向

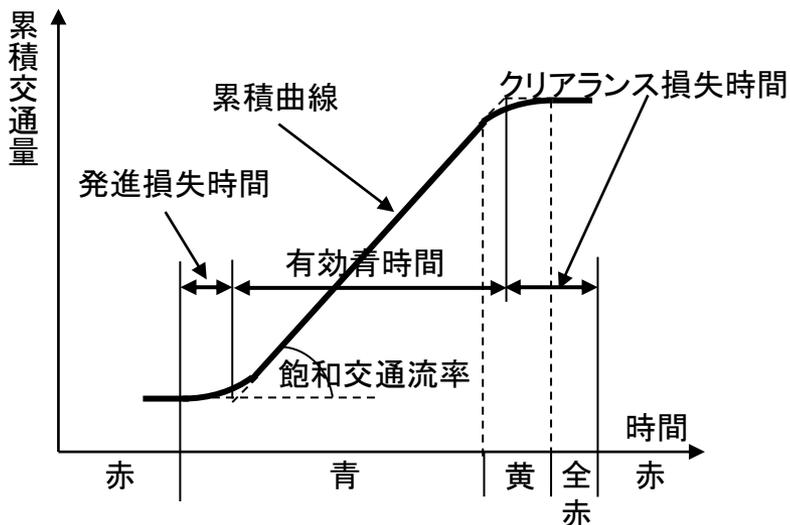
信号制御の基本要素—信号制御パラメータ

① サイクル長

信号表示が一巡する時間。ある青の表示時間から、同じ青が再び表示されるまでの時間。



② スプリット（「青時間スプリット」・「現示スプリット」）



「青時間スプリット」は、有効青時間をサイクル長で割った値；

「現示スプリット」は、現示開始から次現示が始まるまでの時間（現示時間）をサイクル長で割った値。

現示時間 = 表示青時間 + 黄時間 + 全赤時間

現示時間 = 有効青時間 + 損失時間

損失時間 = 発進損失時間 + クリアランス損失時間

③ オフセット（今までの研究に関係しないため、詳しい説明がない）

信号制御の基本要素

飽和交通流率

交差点流入部において、車線別に単位時間あたりに停止線を通過し得る最大の車両数。有効青時間1時間あたりの通過台数[台/有効青1時間]

交差点の交通処理能力（交通容量）を考えるうえで、最も基本的な要素の一つ

黄信号・全赤信号

全赤信号は、赤信号表示の開始より後に、次の現示は青信号になる。その時間差は全赤時間。その時、交差点内の信号機は全部赤信号

黄信号設定の理由：赤信号表示に変わってから停止線を超えてはならない

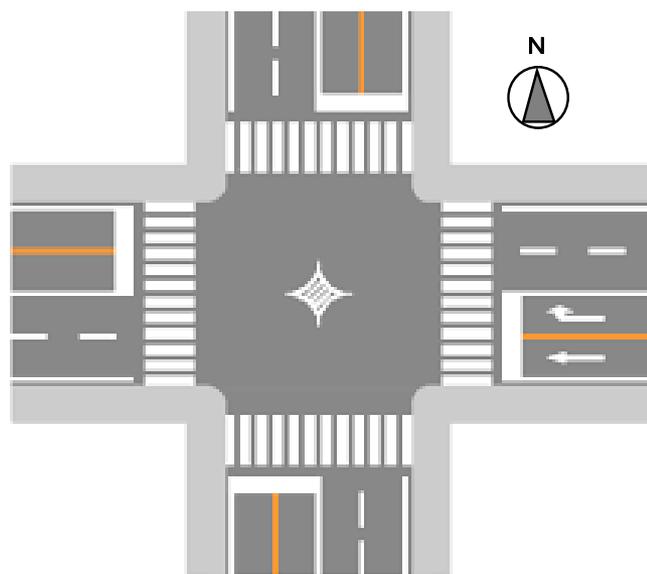
全赤信号設定の理由：赤信号表示開始の直前に停止線を通過した車両が、次の現示の青信号表示において進入してくる車両と交錯しない

交通容量 = 飽和交通流率 × 青時間スプリット

遅れ時間

赤信号待ち行列の影響がない十分上流の地点から交差点流出地点の間を対象区間として、交通信号がなかったと仮定した場合のこの区間の旅行時間と実際に信号がある場合の旅行時間の差。

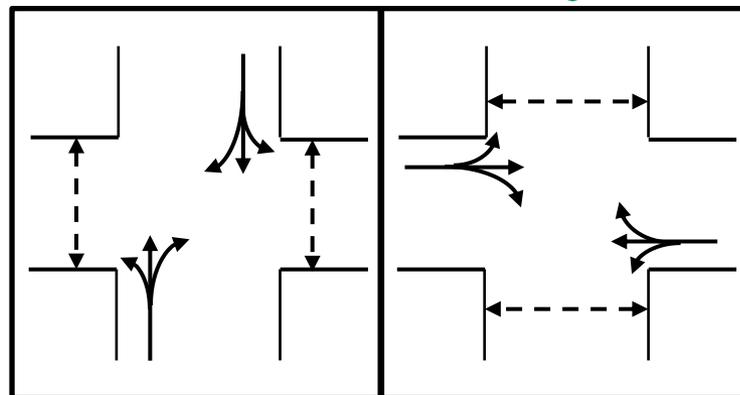
信号制御の例一十字平面交差点



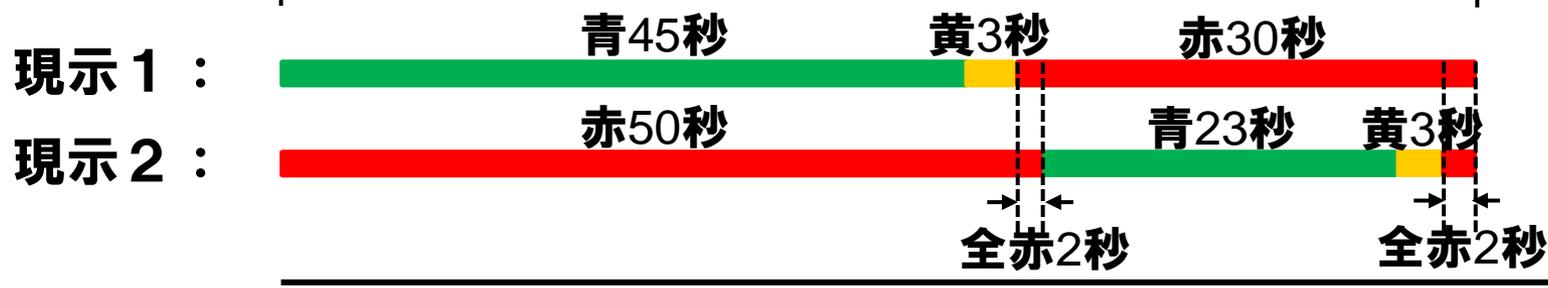
2 現示の信号制御 :

現示 1 (Φ 1)

現示 2 (Φ 2)



1 サイクル 78 秒

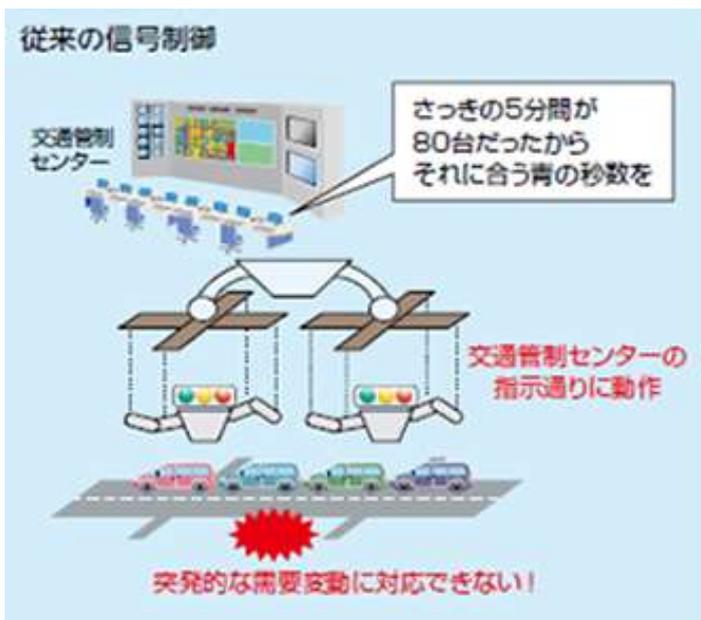


現示 1 の時間 : 青 45 秒 + 黄 3 秒 + 全赤 2 秒 = 50 秒 ; 現示 1 のスプリット = $50/78 = 0.64$

現示 2 の時間 : 青 23 秒 + 黄 3 秒 + 全赤 2 秒 = 28 秒 ; 現示 2 のスプリット = $28/78 = 0.36$

世界の先進信号制御製品

- ◆ 1. 日本一京三製作所の自律分散信号制御製品「ARTEMIS」:
 - (1) 交通渋滞を削減し、CO2や窒素酸化物などの排出を削減することで環境にも優しい
 - (2) 交差点間の信号同士が情報交換をする事で、信号自身がリアルタイムに最適な青時間を決定
 - (3) 日本国内で五つの市に導入された; 国際的に、ロシアで数都市に導入された
 - (4) 2010年に静岡県磐田市30交差点に導入した事例で、従前に最大35%渋滞緩和。



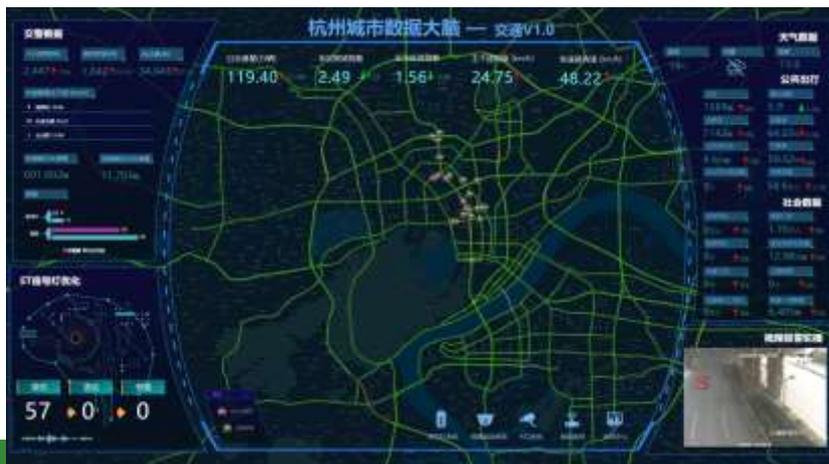
◆ 2. 中国—アリババの「都市ブレイン」:

(1) 道路にセンサーとカメラを設置する。毎2分を取得したリアルタイム交通流量が過去の交通流量の限界値を超える場合に、システムは警報を報告する。操作員が推薦方案と技術経験により信号制御を調整する

(2) 対象の交差点はAIを通じて、自動的な信号制御の調整が実現される

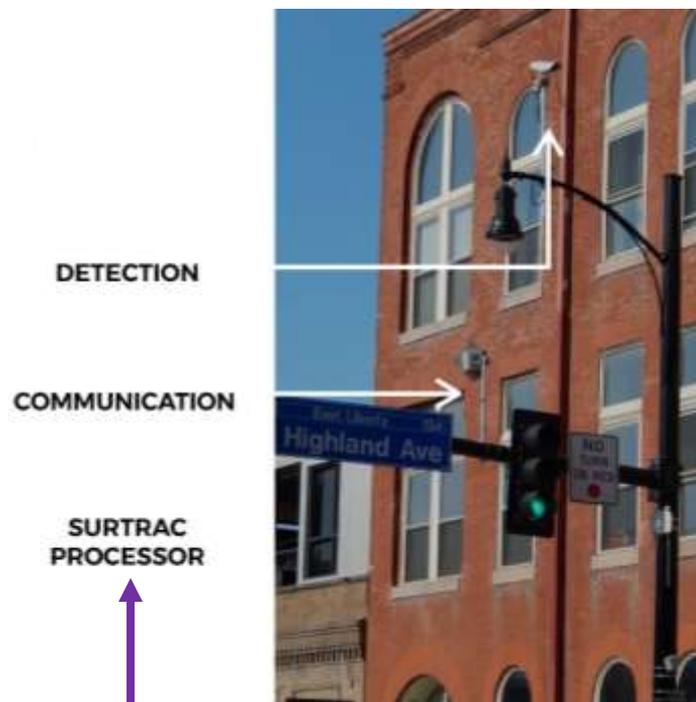
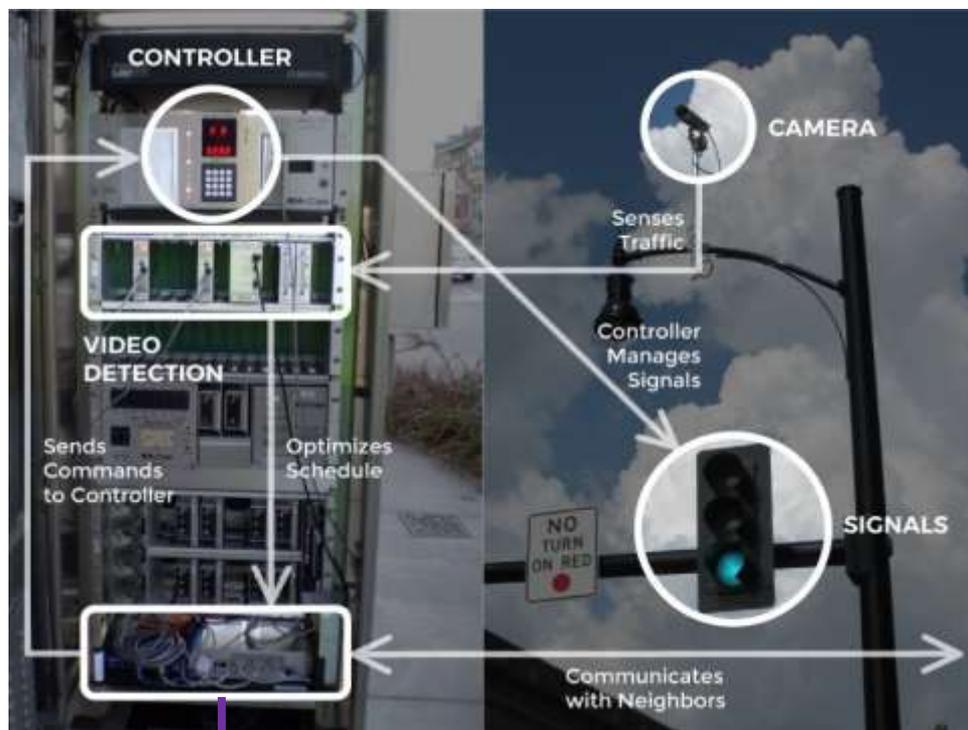
(3) 20以上の国内外の都市に導入された

(4) 杭州、平均速度は3%~5%アップ、一部の道路の平均速度が11%アップ; 全国都市渋滞ランキングの3位(2015年)→48位(2017年)



◆ 3. アメリカーRapid Flow Technologies LLCの「Surtrac」

- (1)リアルタイム情報を取得して(レーダー、カメラ、誘導ループでも。1秒単位)、信号制御最適化を目指す
- (2)近隣の交差点、他のコネクテッド車両に制御情報を発信して、円滑な移動を支援する。
- (3)アメリカ国内で、いくつかの都市に導入された
- (4)旅行時間25%オフ、信号の前に待ち時間40%オフ、停止回数30%オフ、有害ガスの排出量20%オフ



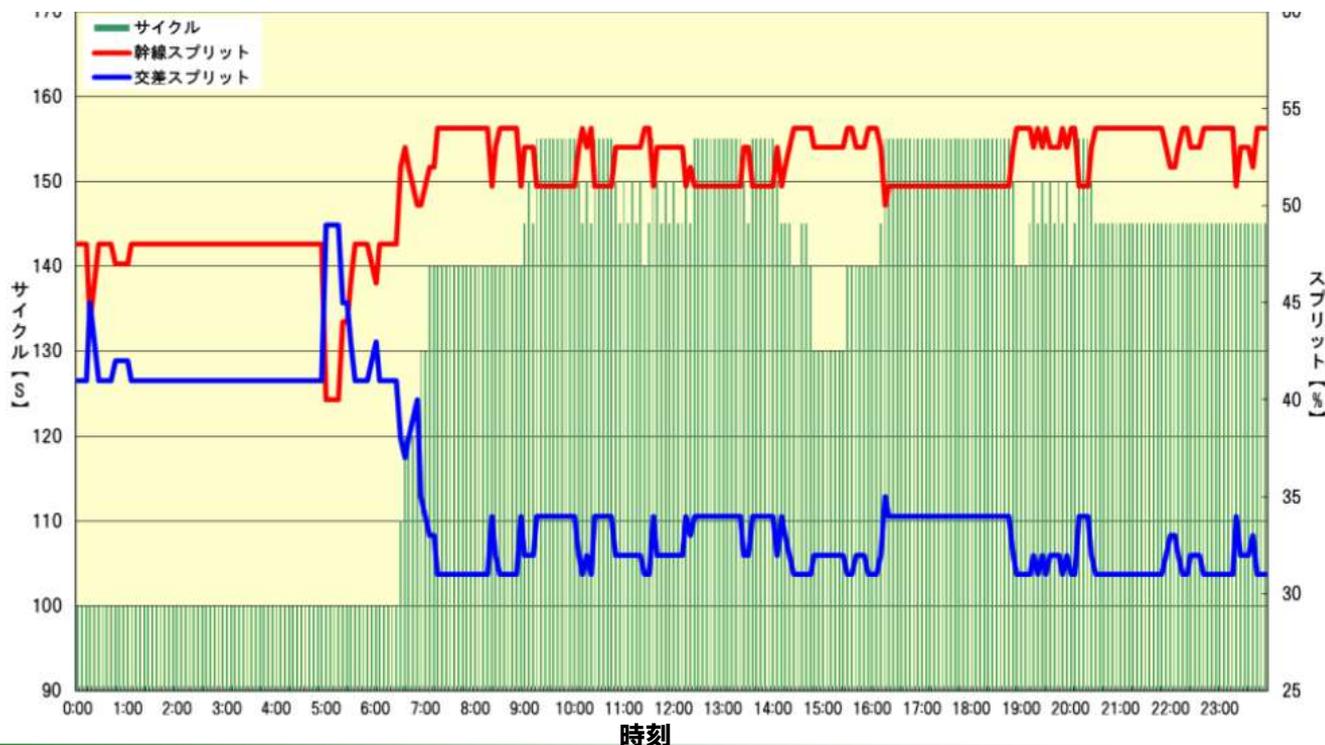
◆ 4. 日本一「MODERATO」

(1) 超音波車両感知器、光ビーコン送受信機(兼車両感知器)から取得した情報を活用した信号制御

(2) サイクル長は、15分または5分ごとに増加時は算出値(5秒、10秒単位)、減少時は設定値に更新する。スプリットは、5分または2.5分ごとに1%単位の算出値(現示ごと)に変更する。また、オフセットも調整できる。

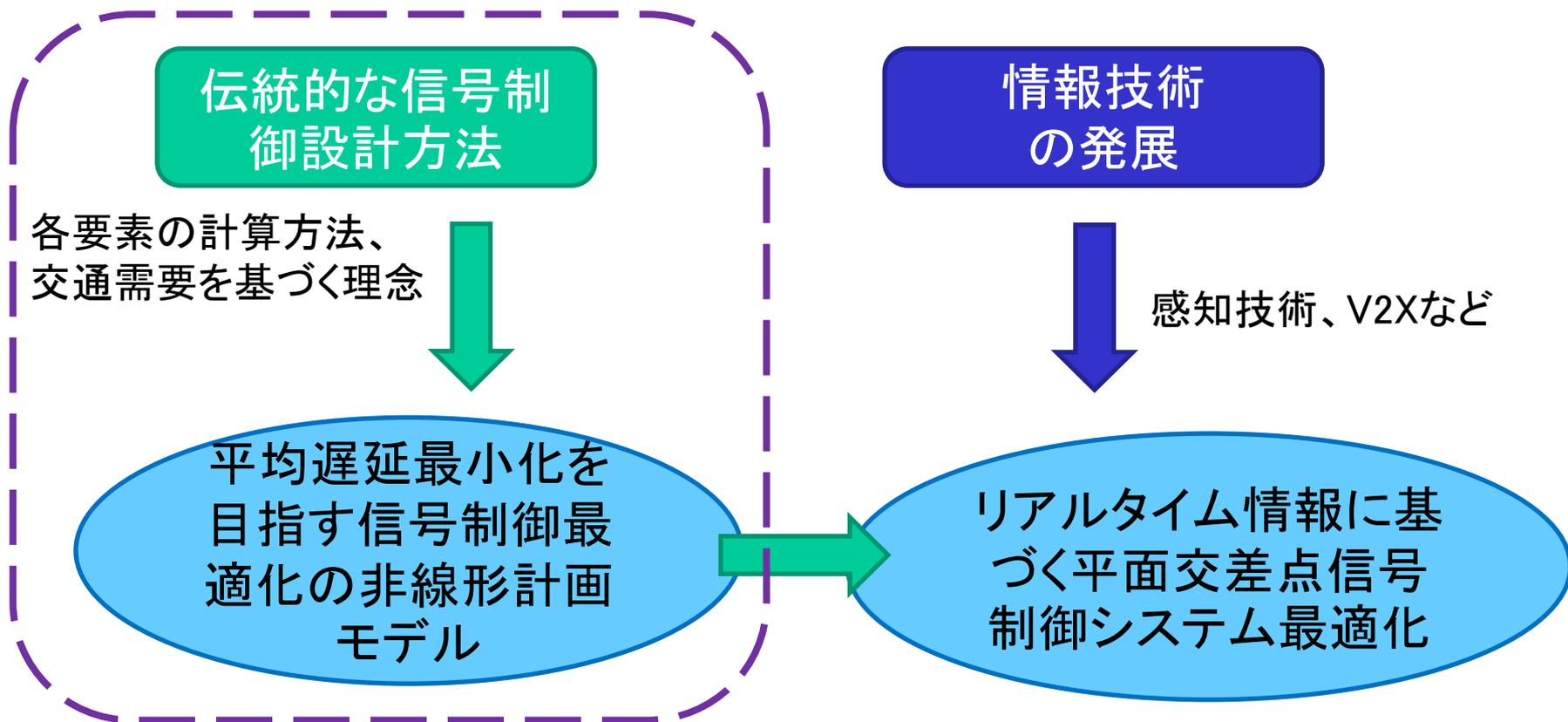
(3) 全国一般的に使用されている。

MODERATEを使用する交差点信号制御の例：



平均遅延最小化を目指す信号制御最適化の非線形計画モデルの構築方法とその検証

本研究の仕組み：



伝統的な信号制御の設計方法(モデル1)

◆ Webster(1957)

平均遅延時間最小化を目標とする最適なサイクル時間の計算方法を開発した。現在も利用することが多い(日本でも利用している(平面交差の計画と設計基礎編—計画・設計・交通信号制御の手引, 2018))

1台当たり平均遅延時間の定式化:

$$d_n = \frac{C(1-g_n)^2}{2(1-\beta_n)} + \frac{x_n^2}{2q_n(1-x_n)} - 0.65\left(\frac{C}{q_n^2}\right)^{1/3}x_n^{(2+5g_n)} \quad (1)$$

d_n : 進行方向 n に、1台当たり平均遅延時間

C : サイクル長

g_n : 進行方向 n の青時間率, $g_n = G_n/C$

G_n : 進行方向 n の有効青時間

β_n : 進行方向 n の需要率 = q_n/s_n ,

q_n : 進行方向 n の流入交通流率

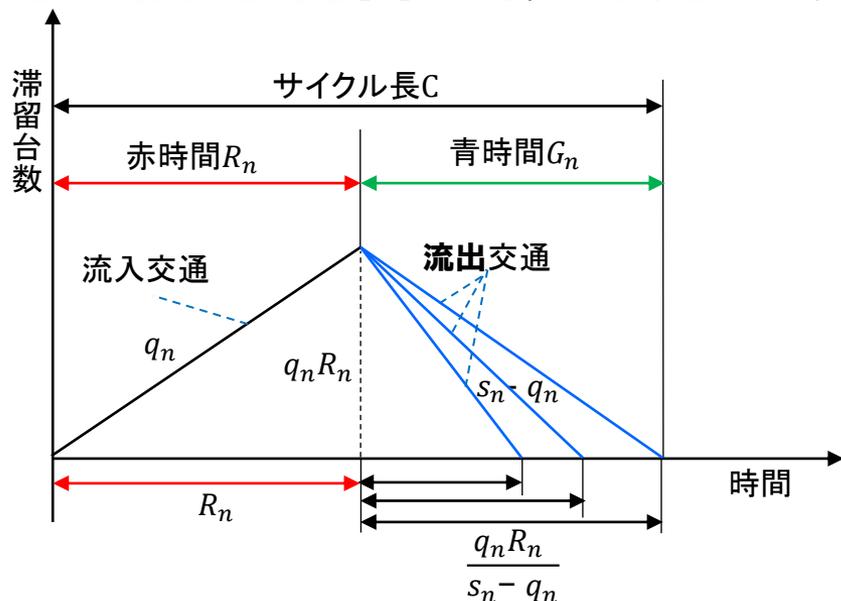
s_n : 進行方向 n の飽和交通流率

$x_n = \frac{q_n C}{s_n G_n}$ 、過飽和でない場合に $x_n \leq 1$

- ① は車両が一定の車頭間隔で到着すると仮定すると、進行方向 n に、過飽和でない場合の1サイクルあたりの車両の平均遅延時間。
- ② は車両がランダムで到着の影響を表す。
- ③ はシミュレーション実験により得られた修正項。

伝統的な信号制御の設計方法(モデル1)

1



1サイクルあたり進行方向 n に車両の総遅延時間 D_n は左の図の三角形の面積に相当

$$D_n = \frac{s_n q_n R_n^2}{2(s_n - q_n)} = \frac{q_n R_n^2}{2(1 - \beta_n)} \quad (2)$$

q_n : 流入交通流率
 s_n : 飽和交通流率
 τ_n : 飽和交通流時間

1サイクルごと1台当たり平均遅延時間 d_n は:

$$d_n = \frac{D_n}{q_n C} = \frac{q_n R_n^2}{2(1 - \beta_n) q_n C} = \frac{R_n^2}{2C(1 - \beta_n)} = \frac{(C - C g_n)^2}{2C(1 - \beta_n)} = \frac{(1 - g_n)^2}{2(1 - \beta_n)} C \quad (3)$$

そして、交通流のランダム到着を仮定した場合でに、総遅延時間を最小にするサイクル長の近似値 C_{op} は:

$$C_{op} = \frac{1.5L + 5}{1 - \lambda} \quad (4)$$

L : 交差点の総損失時間 λ : 交差点の需要率(詳しく定義は次のページにある)

伝統的な信号制御の設計方法(モデル1)

◆ Akcelik(1981)

各現示に渋滞を引き起こさない(各現示に最大交通量を持つ進行方向の車両も円滑に通過できる)を目標とする最小サイクル時間の計算方法を提案した。(日本でも利用している(平面交差の計画と設計基礎編—計画・設計・交通信号制御の手引, 2018))

交差点に全部の車両通過需要を処理する条件は:

$$\lambda \leq \frac{C-L}{C} \quad (5)$$

ここに、 λ は交差点の需要率で、 $\lambda = \sum_i \lambda_i$ 、 λ_i は現示 i に各進行方向の最大需要率式(5)を変換し、式(6)になる:

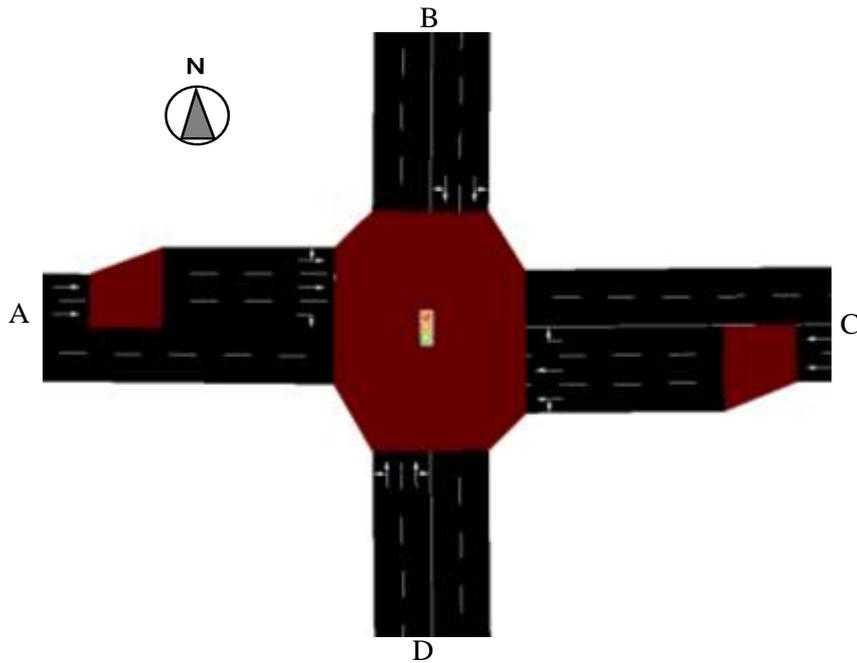
$$C \geq \frac{L}{1-\lambda} \Rightarrow C_{min} = \frac{L}{1-\lambda} \quad (6)$$

◆ 共通な各現示有効青時間計算方法:

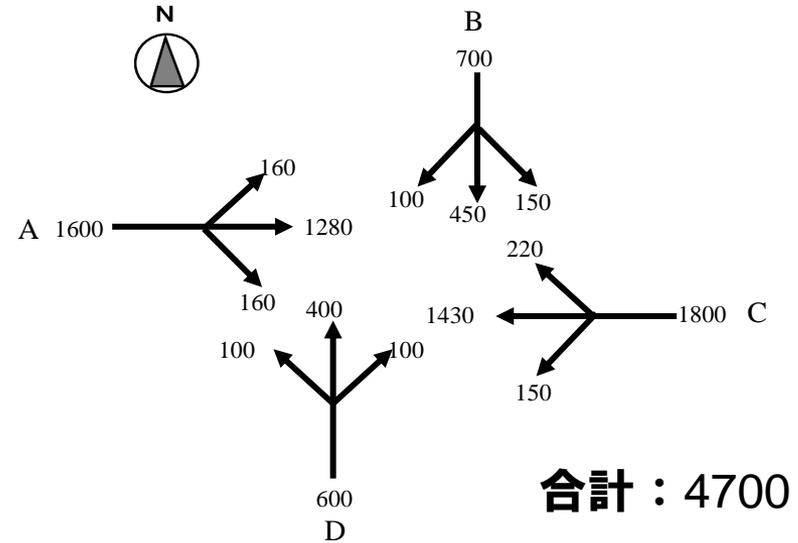
$$G_i = (C - L) \frac{\lambda_i}{\lambda} \quad (7)$$

ここに、 G_i は現示 i の有効青時間

参考文献*の計算例



各進行方向の交通流量:

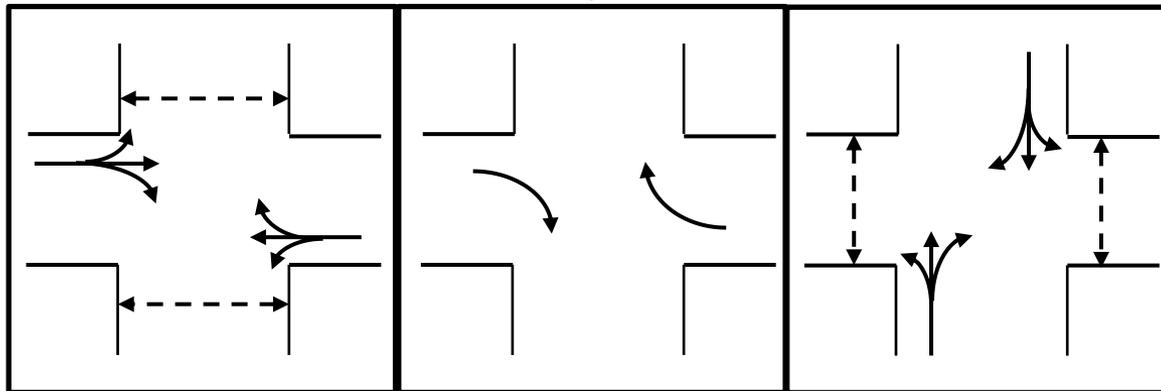


合計：4700

現示 1 (Φ 1)

現示 2 (Φ 2)

現示 3 (Φ 3)



* 改訂平面交差の計画と設計基礎編, 一般社団法人交通工学研究会, 丸善出版株式会社, 2002年7月

各流入レーン交通流量シナリオ設定

➤ 多様のシナリオ設定の理由：異なる交通状況への適用を検証

➤ シナリオ設定の根拠：

東西方向と南北方向の交通量の増加あるいは減少の組合せは全部四つ。ただし、東西方向の交通量が増加すれば、交差点の需要率が0.9以下を確保するために、総交通量南北方向の交通量の増加が困難になる。そこで、計算例と接近(シナリオ1)と上述の組合せの三つになる(シナリオ2~4)

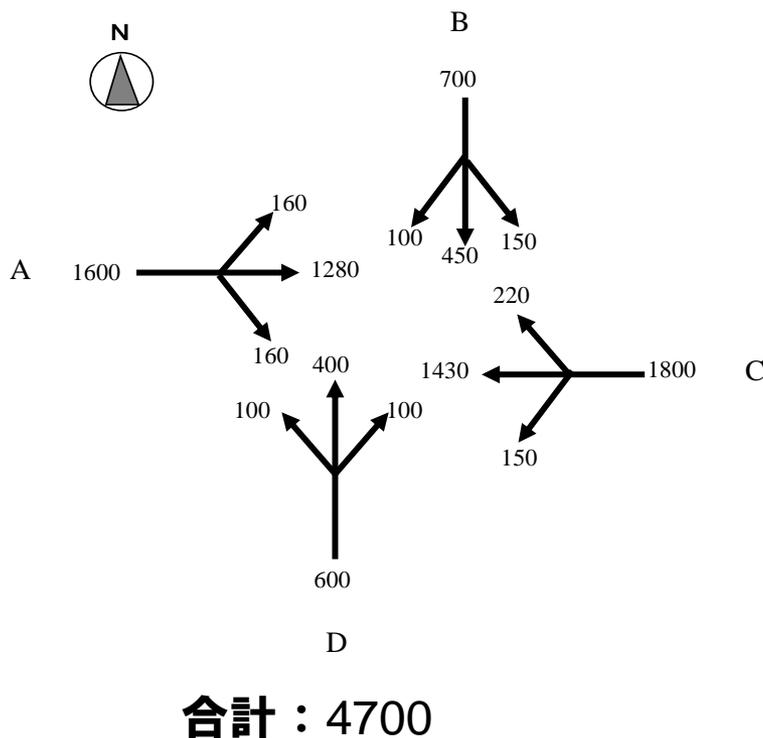
➤ 各シナリオ：

- シナリオ1: 参考文献の計算例と接近
- シナリオ2: 東西方向に交通量増加、南北方向に交通量減少
- シナリオ3: 東西方向に交通量減少、南北方向に交通量増加
- シナリオ4: 東西方向に交通量減少、南北方向に交通量減少
- ~~● シナリオ5: 東西方向に交通量増加、南北方向に交通量増加~~

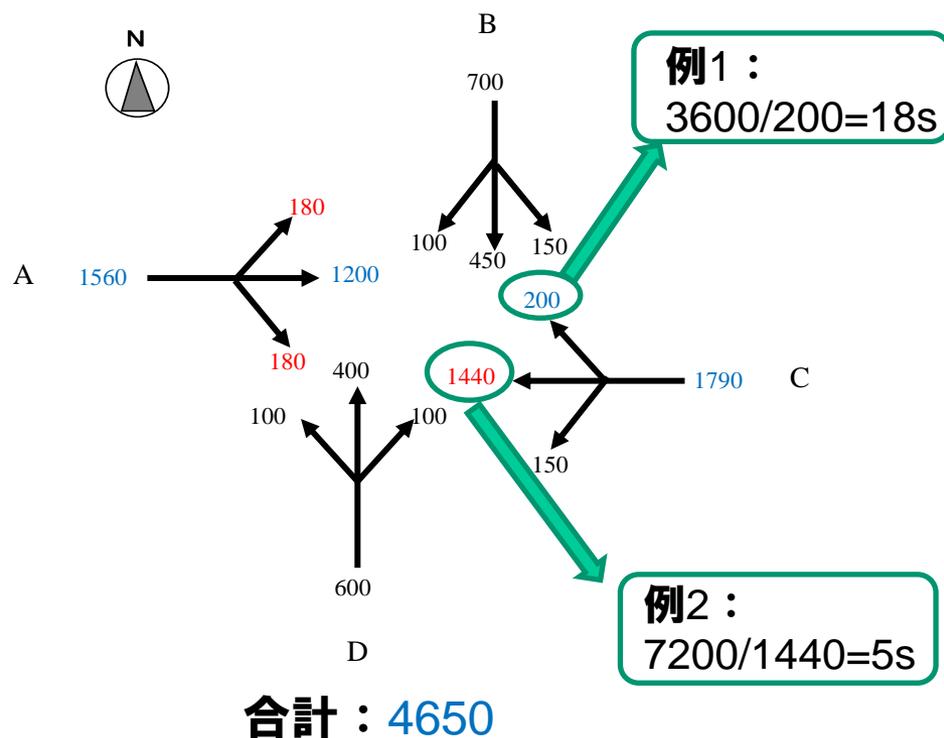
シナリオ1 各流入レーン交通流量計算例と接近

完全同様の条件にモデルの計算結果を比較するため、各交通流発生部に車両が同じな間隔でリンクに進入。最小進入間隔が1sなので、3600sあるいは7200sが交通流量で割り切れるように交通流量を調整

計算例に各進行方向の交通流量：

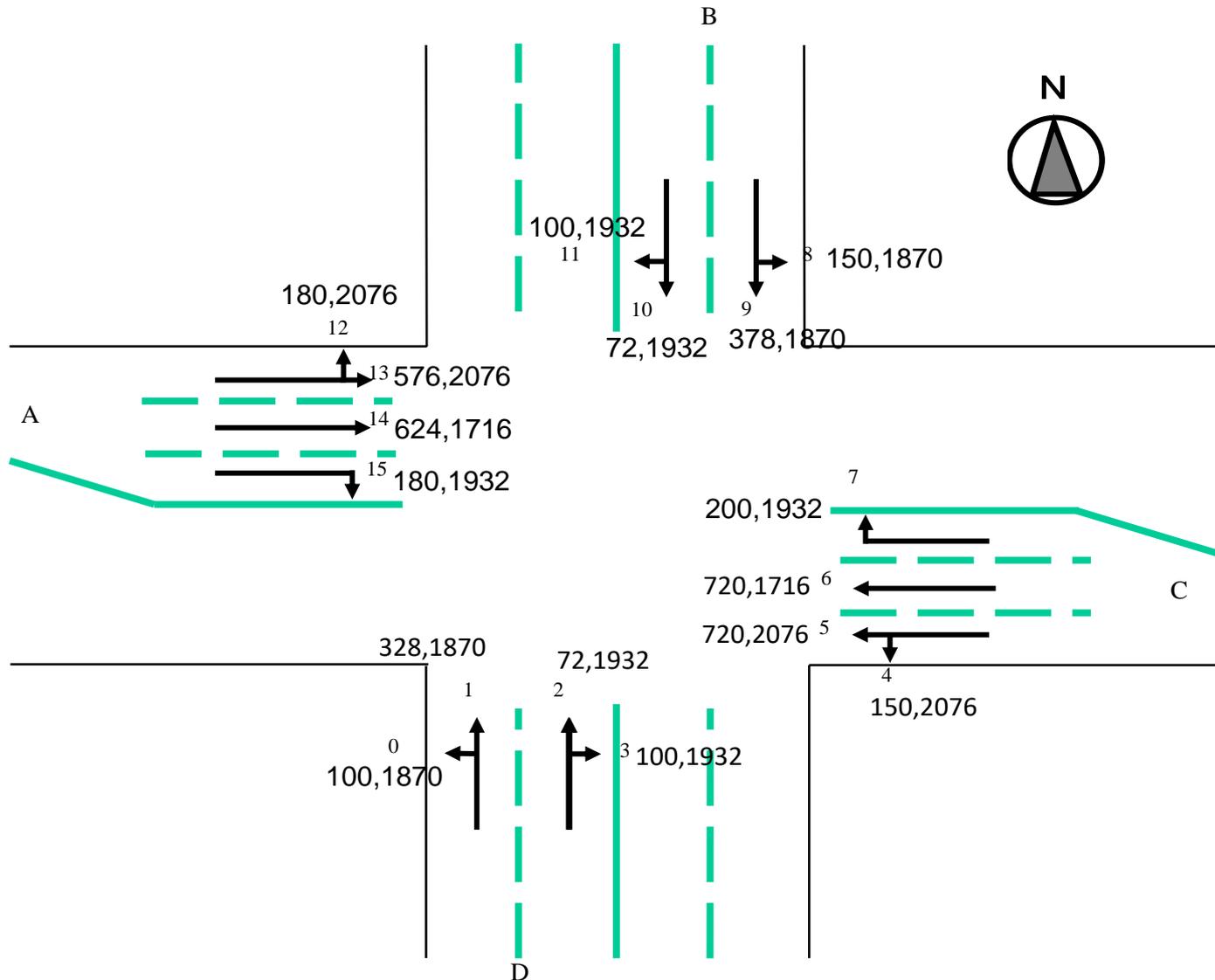


シナリオ1各進行方向の交通流量：



赤い数字は増加、青い数字は減少

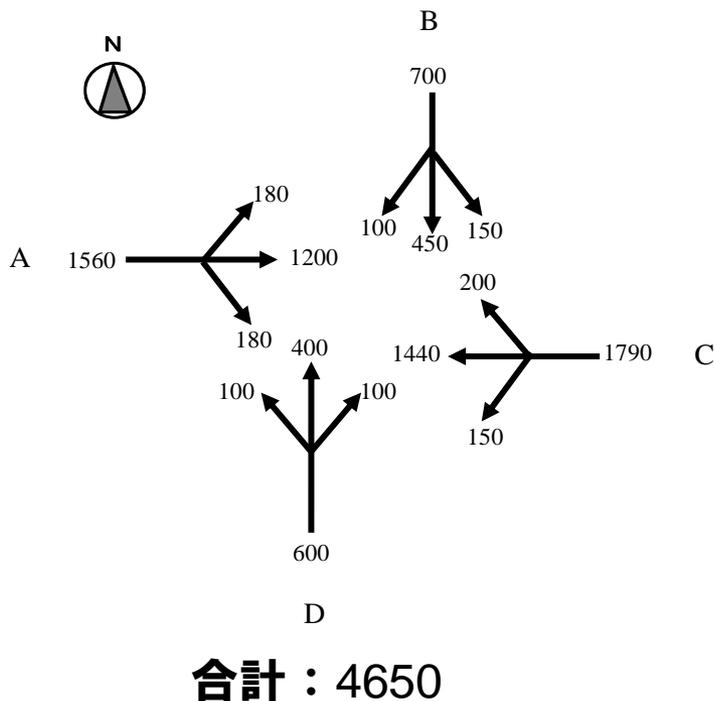
シナリオ 1 各流入レーンの飽和交通流率と交通流量



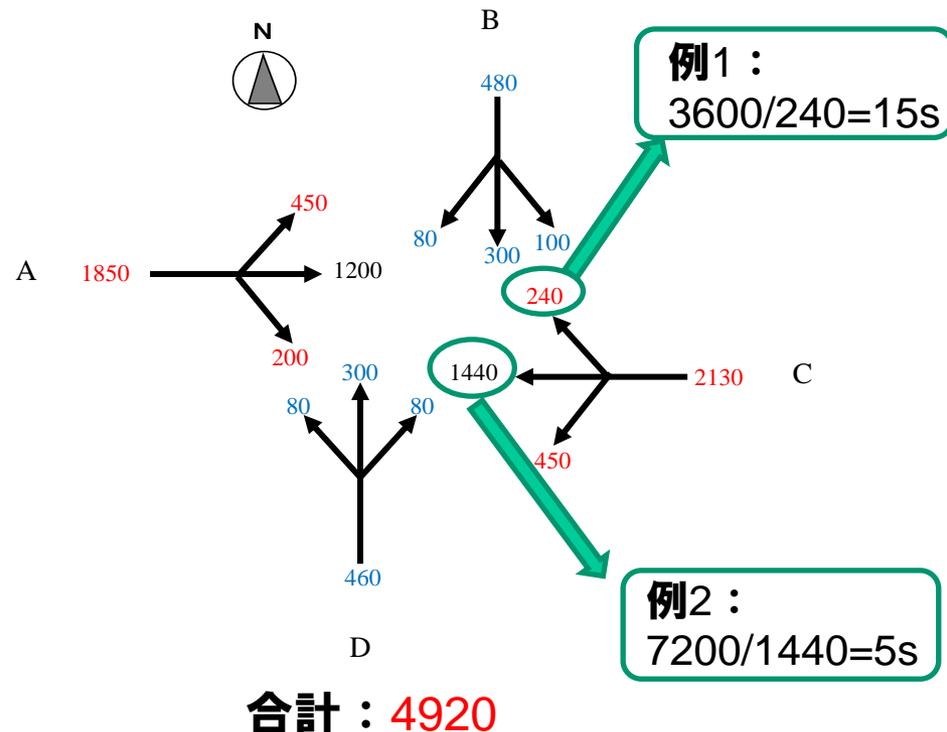
シナリオ2 各流入レーン交通流量 東西方向↑、南北方向↓

完全同様の条件にモデルの計算結果を比較するため、各交通流発生部に車両が同じな間隔でリンクに進入。最小進入間隔が1sなので、3600sあるいは7200sが交通流量で割り切れるように交通流量を調整

シナリオ1各進行方向の交通流量：

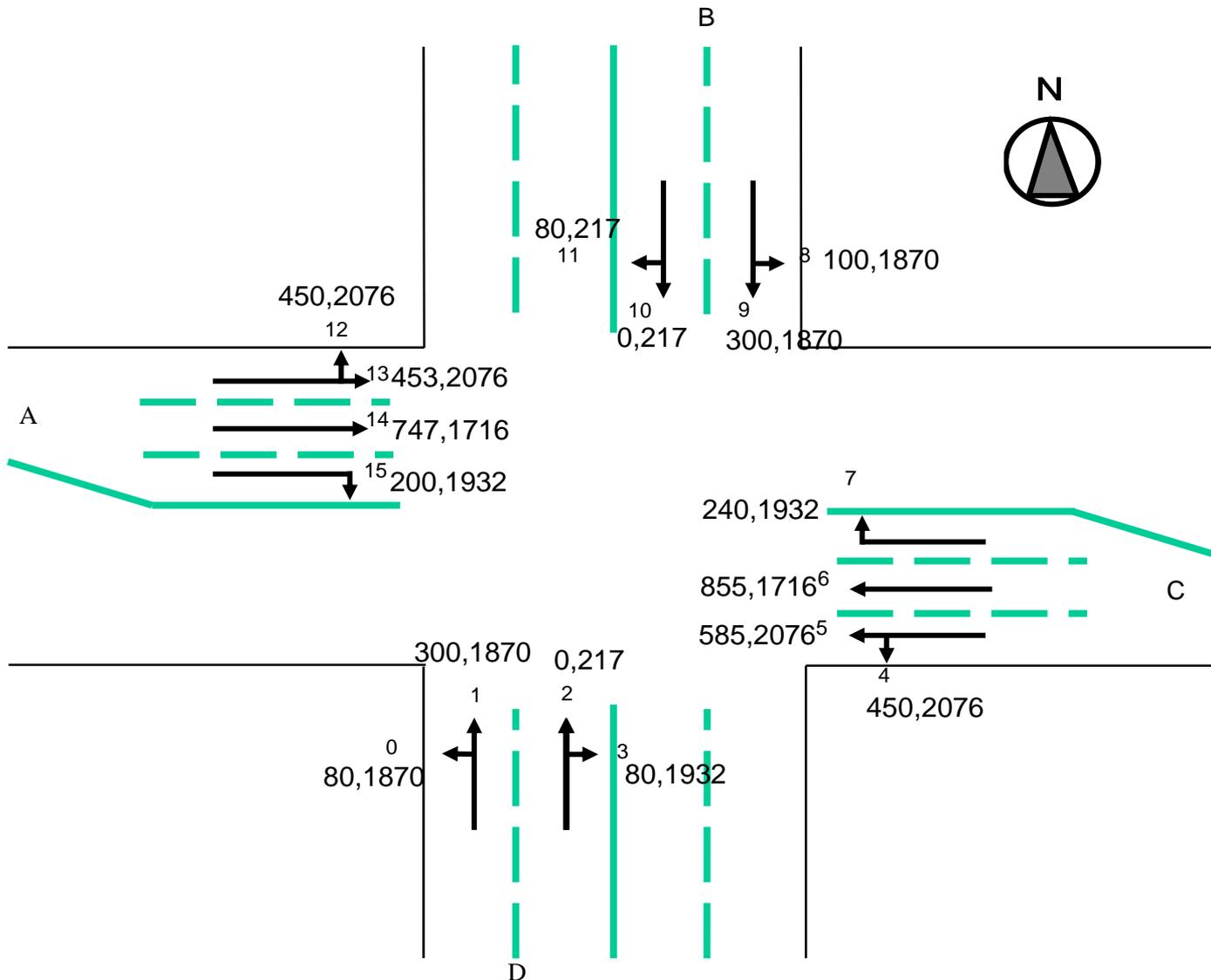


シナリオ2各進行方向の交通流量：



赤い数字は増加、青い数字は減少

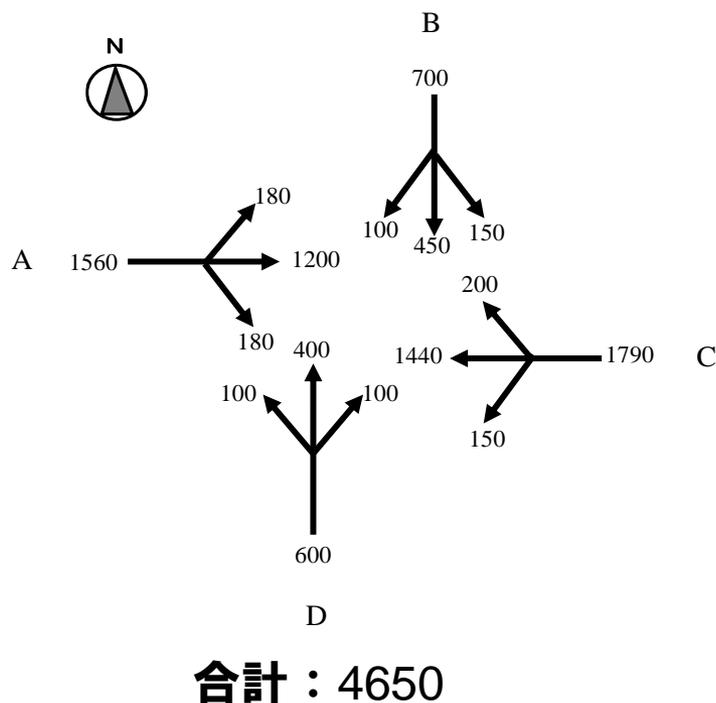
シナリオ 2 各流入レーンの飽和交通流率と交通流量



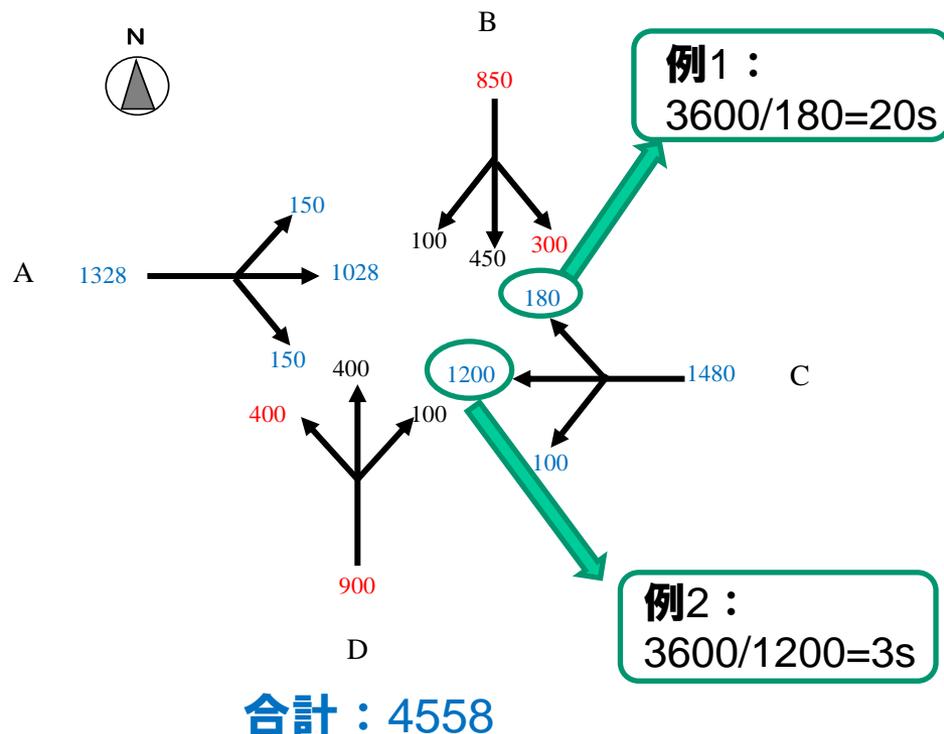
シナリオ3 各流入レーン交通流量 東西方向↓、南北方向↑

完全同様の条件にモデルの計算結果を比較するため、各交通流発生部に車両が同じな間隔でリンクに進入。最小進入間隔が1sなので、3600sあるいは7200sが交通流量で割り切れるように交通流量を調整

シナリオ1各進行方向の交通流量:

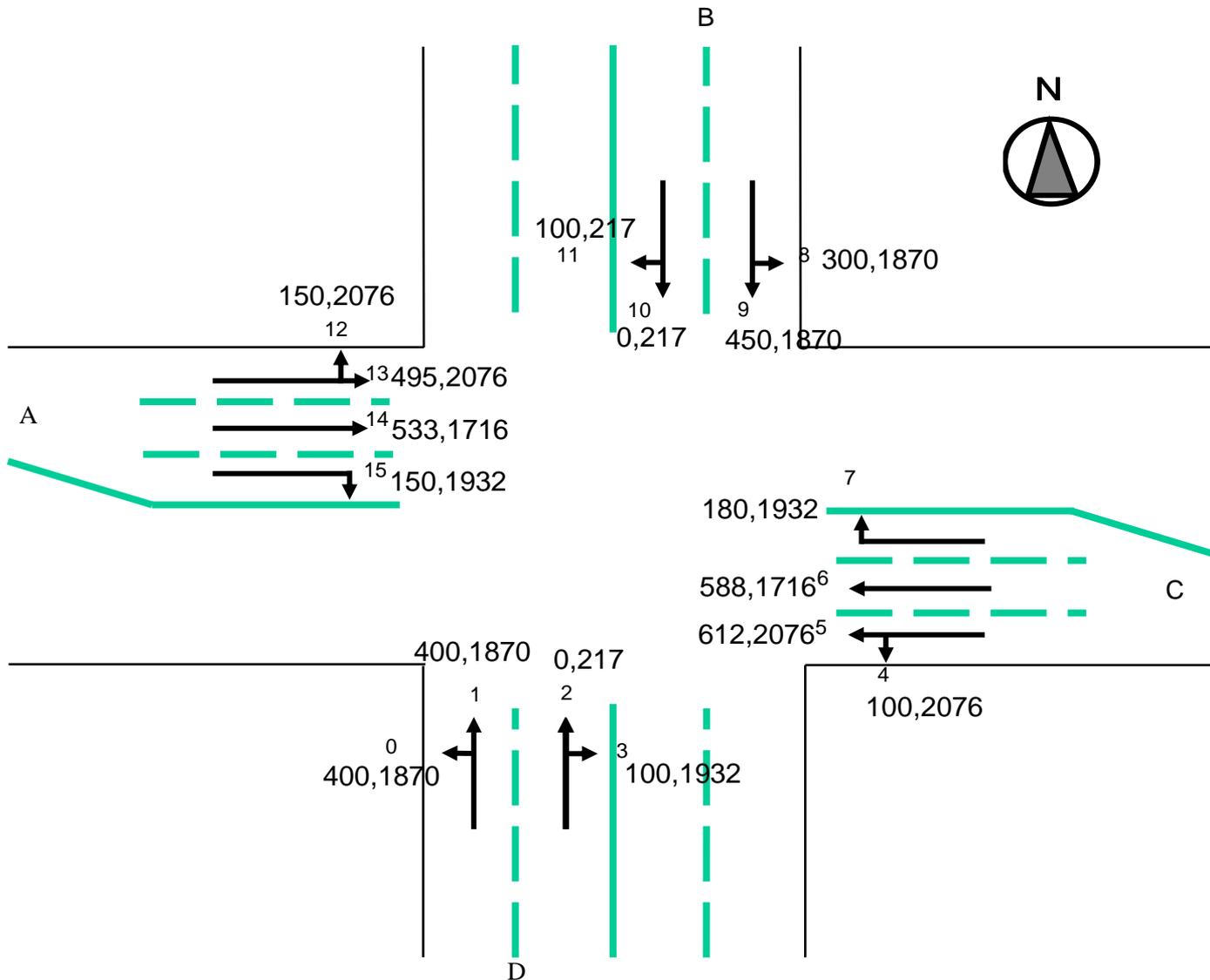


シナリオ3各進行方向の交通流量:



赤い数字は増加、青い数字は減少

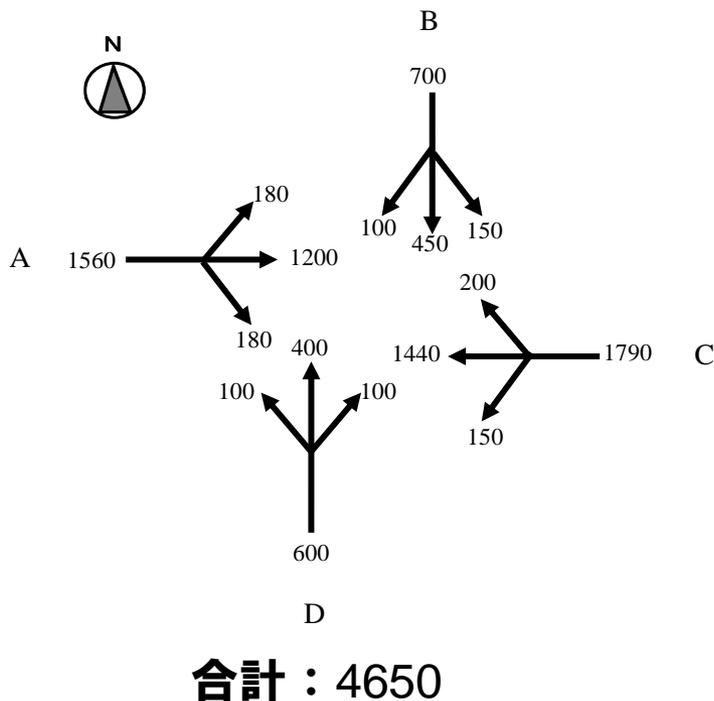
シナリオ 3 各流入レーンの飽和交通流率と交通流量



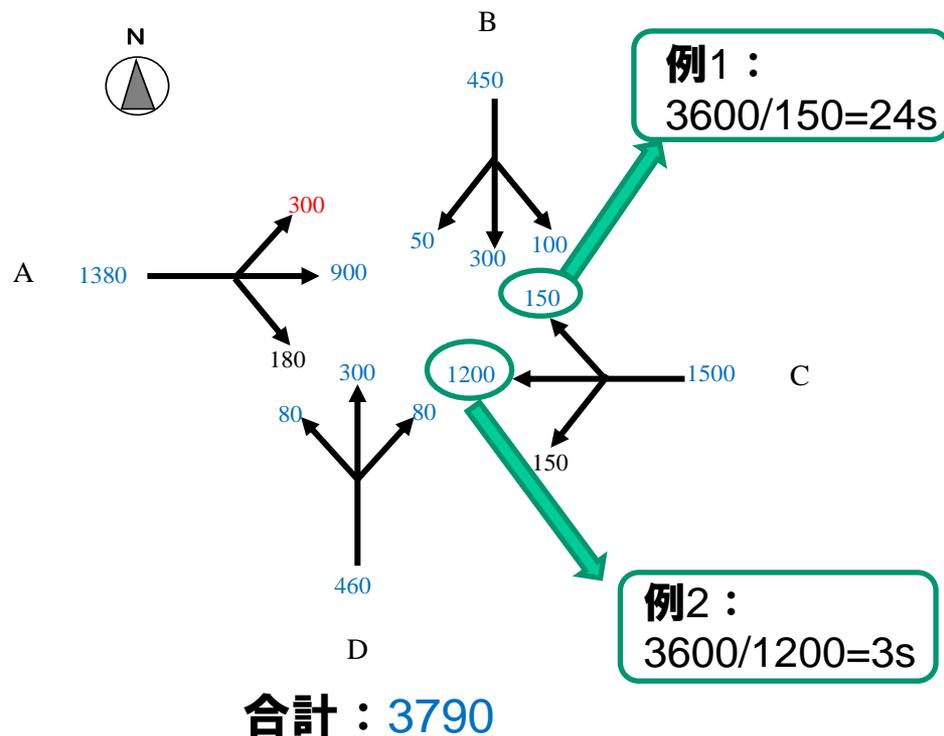
シナリオ4 各流入レーン交通流量 東西方向↓、南北方向↓

完全同様の条件にモデルの計算結果を比較するため、各交通流発生部に車両が同じな間隔でリンクに進入。最小進入間隔が1sなので、3600sあるいは7200sが交通流量で割り切れるように交通流量を調整

シナリオ1各進行方向の交通流量:

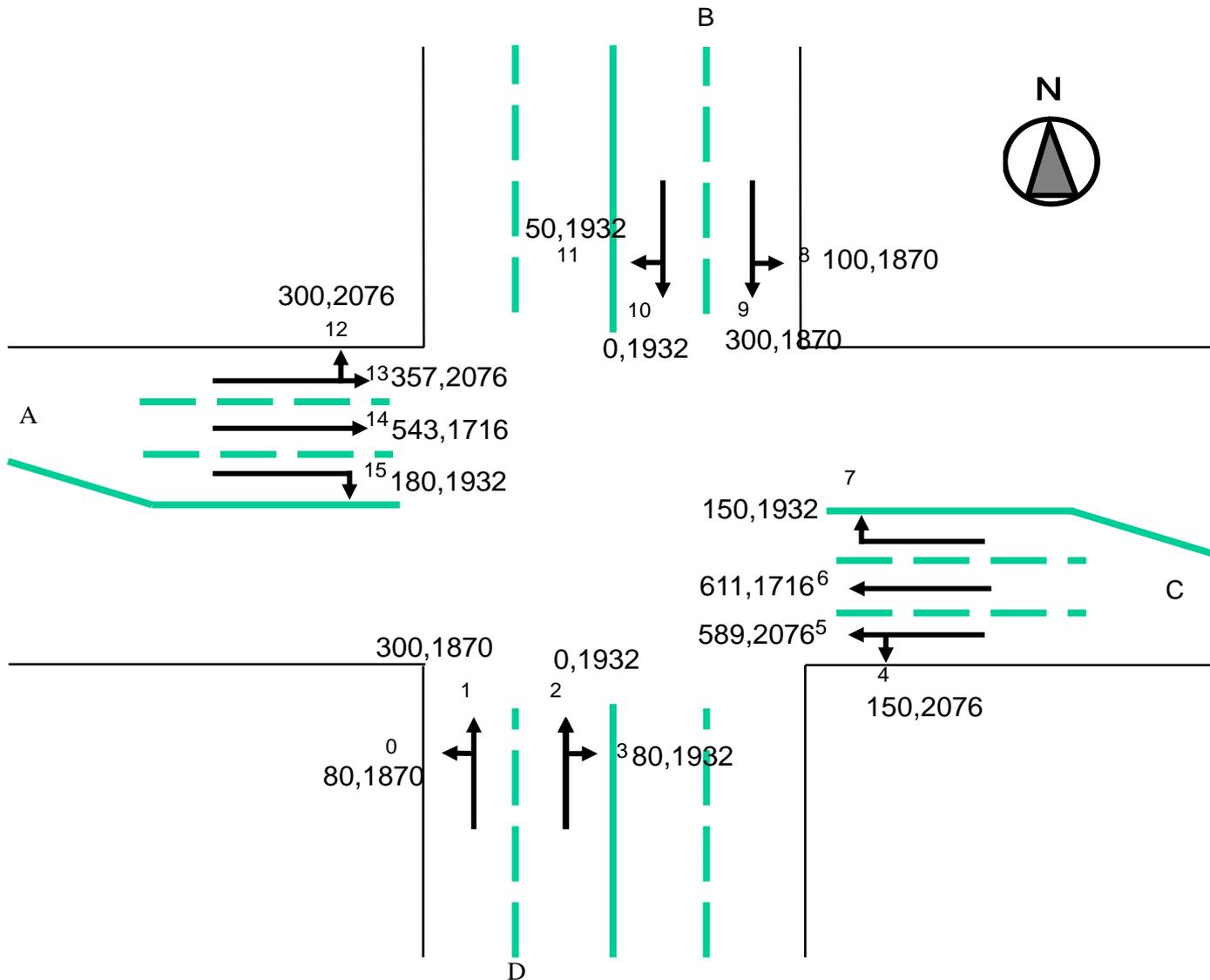


シナリオ4各進行方向の交通流量:



赤い数字は増加、青い数字は減少

各流入レーンの飽和交通流率と交通流量



結果

信号制御最適化計算結果：

二つのモデル：(1)伝統的な設計方法(モデル1)；(2)交差点1サイクルあたりの車両の平均遅延時間 D の最小化を目指す、全部の交通需要を処理するために制約条件を追加した非線形計画モデル(モデル2)

● シナリオ1：

モデル	有効青時間			総有効青時間	総損失時間	サイクル時間
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$			
(1)	66	13	52	131	12	143
(2)	67	14	57	138	12	150

● シナリオ2：

モデル	有効青時間			総有効青時間	総損失時間	サイクル時間
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$			
(1)	75	16	35	126	12	138
(2)	75	16	38	129	12	141

● シナリオ3：

モデル	有効青時間			総有効青時間	総損失時間	サイクル時間
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$			
(1)	56	12	71	139	12	151
(2)	58	13	77	148	12	160

● シナリオ4：

モデル	有効青時間			総有効青時間	総損失時間	サイクル時間
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$			
(1)	30	6	18	54	12	66
(2)	28	6	19	53	12	65

結果

信号制御最適化計算結果によるマイクロシミュレーション結果：
 (信号制御最適化計算結果の検証)

● シナリオ1:

モデル	シミュレーション時間(秒)	変化率	平均遅延時間(秒)	変化率	遅延時間の変動係数	変化率
(1)	7698	100%	111.4	100%	1.27	100%
(2)	7733	100.1%	96.6	86.7%	1.05	82.5%

● シナリオ2:

モデル	シミュレーション時間(秒)	変化率	平均遅延時間(秒)	変化率	遅延時間の変動係数	変化率
(1)	7512	100%	51.9	100%	1.99	100%
(2)	7379	98.2%	50.8	97.8%	0.99	50%

● シナリオ3:

モデル	シミュレーション時間(秒)	変化率	平均遅延時間(秒)	変化率	遅延時間の変動係数	変化率
(1)	7415	100%	60.0	100%	1.23	100%
(2)	7361	99.3%	55.7	92.8%	0.76	61.8%

● シナリオ4:

モデル	シミュレーション時間(秒)	変化率	平均遅延時間(秒)	変化率	遅延時間の変動係数	変化率
(1)	7313	100%	23.0	100%	0.66	100%
(2)	7294	99.7%	23.2	101.0%	0.63	96.1%

* 2時間(7200秒)の交通需要(起点から)を生成する。実際には車両がトリップを完成するまでを対象とするため、シミュレーション時間は必ず1時間以上となる。「シミュレーション時間」は、最初の車がリンク端点に流入したから、最後の車がリンク端点から流出したまでの時間である。

* 「平均遅延時間」は、車両が理想的な速度で走行の旅行時間と比較の遅延である。平均待ち時間は、車両の平均完全静止(速度は0.1メートル/秒以下)時間である。

結果のまとめ

信号制御最適化計算結果：

- サイクル長 ⇒ 交通需要が多い場合に伝統的な方法のは開発した非線形計画モデルより少し短い;交通需要が少ない場合に二つのモデルのはほぼ同じ
- 各現示の比率 ⇒ 交通量の増減を問わず、開発した非線形計画モデルの第1現示のスプリットは少なくなる、第3現示のスプリットは高くなる

信号制御最適化計算結果によるミクロシミュレーション結果： (信号制御最適化計算結果の検証)

- シミュレーション時間 ⇒ 変化が少ない
- 平均遅延時間 ⇒ 交通需要が多い場合に開発した非線形計画モデルの結果が生じる平均遅延時間は少なくなる、交通需要が少ない場合に二つのモデルのはほぼ同じ
- 遅延時間の変動係数 ⇒ 交通量の増減を問わず、開発した非線形計画モデルの結果が生じる遅延時間の変動係数は少なくなる。特に、交通量が多い場合に変化率が高い

ご清聴ありがとうございました。

**ご不明点などがございましたら、
以下までご連絡ください。**

 : mu@ttri.or.jp

 : 0565-31-7543

付録1：用語集と記号

d_n ： 進行方向 n に、1台当たり平均遅延時間

D_n ：1サイクルあたり進行方向 n に車両の総遅延時間

C ： サイクル長

g_n ： 進行方向 n の青時間率, $g_n = G_n/C$

G_n ： 進行方向 n の有効青時間

β_n ： 進行方向 n の需要率 = q_n/s_n ,

q_n ： 進行方向 n の流入交通流率

s_n ： 進行方向 n の飽和交通流率

$x_n = \frac{q_n C}{s_n G_n}$ 、過飽和でない場合に $x_n \leq 1$

τ_n ： 飽和交通流時間

C_{op} ： 総遅延時間を最小にするサイクル長の近似値

L ： 交差点の総損失時間

λ ： 交差点の需要率, $\lambda = \sum_i \lambda_i$

λ_i ： 現示 i に各進行方向の最大需要率

G_i ： 現示 i の有効青時間

D ： 交差点1サイクルあたりの車両の平均遅延時間

付録2:

シナリオ1 伝統的な方法によりの計算結果

Leg		A			B		C			D			
Lane		SL	S	R	SL	SR	SL	S	R	SL	SR		
No. of lane		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
S_A		2076	1716	1932	1870	217	2076	1716	1932	1870	217		
Allocated traffic flow		160-628-652-160			150-450-0-100		150-715-715-220			100-400-0-100			
Traffic flow		1380 (1200+180)		180	700 (100+450+150)		1590 (1440+150)		200	600 (100+400+100)			
Degree of saturation		0.364		0.073	0.336		0.420		0.083	0.288		ρ_i	λ
β_n	1 ϕ	0.364					0.420					0.420	0.839
	2 ϕ			0.073					0.083			0.083	
	3 ϕ				0.336					0.288		0.336	
G_i	1 ϕ	66					66					C	
	2 ϕ			13					13			143	
	3 ϕ				52					52			
Possible capacity		1734		216	763		1734		216	763			
Capacity check		O.K		O.K	O.K		O.K		O.K	O.K			

付録2:

シナリオ2 伝統的な方法によりの計算結果

Leg		A			B		C			D			
Lane		SL	S	R	SL	SR	SL	S	R	SL	SR		
No. of lane		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
S_A		2076	1716	1932	1870	217	2076	1716	1932	1870	217		
Allocated traffic flow		160-628-652-200			100-300-0-80		150-715-715-220			100-400-0-100			
Traffic flow		1650 (1200+450)		200	480 (100+300+80)		1890 (1440+450)		240	460 (80+300+80)			
Degree of saturation		0.436		0.083	0.230		0.499		0.104	0.221		ρ_i	λ
β_n	1 ϕ	0.436					0.499					0.499	0.833
	2 ϕ			0.083					0.104			0.104	
	3 ϕ				0.230					0.221		0.230	
G_i	1 ϕ	75					75					C	
	2 ϕ			16					16			138	
	3 ϕ				35					35			
Possible capacity		2060		263	529		2060		263	529			
Capacity check		O.K		O.K	O.K		O.K		O.K	O.K			

付録2:

シナリオ3 伝統的な方法によりの計算結果

Leg		A			B		C			D			
Lane		SL	S	R	SL	SR	SL	S	R	SL	SR		
No. of lane		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
S_A		2076	1716	1932	1870	217	2076	1716	1932	1870	217		
Allocated traffic flow		150-495-533-150			450-300-0-100		100-612-588-180			400-400-0-100			
Traffic flow		1178 (1028+150)		150	850 (450+300+100)		1300 (1200+100)		180	900 (150+600+100)			
Degree of saturation		0.311		0.057	0.408		0.343		0.073	0.432		ρ_i	λ
β_n	1 ϕ	0.311					0.343					0.343	0.848
	2 ϕ			0.057					0.073			0.073	
	3 ϕ				0.408					0.432		0.432	
G_i	1 ϕ	56					56					C	
	2 ϕ			12					12			151	
	3 ϕ				71					71			
Possible capacity		1406		193	981		1406		193	981			
Capacity check		O.K		O.K	O.K		O.K		O.K	O.K			

付録2:

シナリオ4 伝統的な方法によりの計算結果

Leg		A			B		C			D			
Lane		SL	S	R	SL	SR	SL	S	R	SL	SR		
No. of lane		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
S_A		2076	1716	1932	1870	217	2076	1716	1932	1870	217		
Allocated traffic flow		300-357-543-180			100-300-0-50		150-589-611-150			80-300-0-80			
Traffic flow		1200 (900+300)		180	450 (100+300+50)		1350 (1200+150)		150	460 (80+300+80)			
Degree of saturation		0.317		0.073	0.216		0.357		0.057	0.221		ρ_i	λ
β_n	1 ϕ	0.317					0.357					0.357	0.651
	2 ϕ			0.073					0.057			0.073	
	3 ϕ				0.216					0.221		0.221	
G_i	1 ϕ	30					30					C	
	2 ϕ			6					6			66	
	3 ϕ				18					18			
Possible capacity		1406		193	981		1406		193	981			
Capacity check		O.K		O.K	O.K		O.K		O.K	O.K			