

近飽和、過飽和交通流における信号遅れ

A Study on Delays in Near-Saturated and Over-Saturated
Traffic Flow at Isolated Traffic Signals

李 光勲 *

池之上 慶一郎 **

安井 一彦 **

By Kwanghoon LEE

keiichoro IKENOUE

Kazuhiko YASUI

It is well recognised that methods of calculating delays in conventional steady-state models by, for example, Webster and Hutchinson do not adequately represent the delays at the near-saturated and over-saturated intersections. As the arrival rate of traffic approaches the capacity of the intersection the steady-state model predicts delays approaching infinity. This study deals with the validity of Ian Catling model which covers time-dependently variable traffic demand under near-saturated and over-saturated conditions traffic flow. In the near-saturated condition Ian Catling model was compared with the conventional models in respect of saturation degree and state of queue. Also the numbers of vehicles in queue and delays from Ian Catling model were compared with observed values for the over-saturated flow. The findings are summarized as follows. 1) Conventional models are not good for near-saturation flow with queue and varying demand. 2) Ian Catling model well fit either near-saturation or over-saturation flow with different arrival rate profiles.

1. はじめに

単独交差点流入部における遅れに関するモデルは、交通流の均衡状態を仮定しているものが大部分である。一般に車の到着は一樣ではなくランダム性が含まれているために、一樣到着の場合よりも実際の遅れは大きく、このランダム遅れは、飽和度が高くなるにつれて急激に大きくなるとされているが、均衡状態を仮定しているモデルでは、飽和度1.0において遅れが無限大になるという非現実的な特徴を持っている。

実際の現象としては、飽和度が1.0以上になってもその遅れの有限値が存在するはずである。この

ように近飽和、過飽和交通流の状態における遅れの

特性は、非飽和状態のそれとは異質なはずであるが、現在、近飽和、過飽和状態の遅れに関する研究は数少ない。本研究では、近飽和、過飽和状態を伴うピーク時の交差点における遅れのモデルとして知られているIan Catlingのモデルを取り上げて、近飽和状態において実測した遅れについて、既存モデルとの対比を行いながら検討を行い、また、過飽和状態については、実測した遅れと待ち行列台数をIan Catlingのモデルの結果と比較しながら、そのモデルの適用性についての実証的な検討を行ったものである。

*学生員 工修 日本大学大学院 理工学研究科
**正会員 工博 日本大学教授 理工学部交通土木
工学科
**正会員 日本大学助手 理工学部交通土木
工学科

(〒274千葉県船橋市習志野台7-24-1)

2. 調査概要とデータ処理

調査地点として近飽和、過飽和状態ともに東京都道、蔵前橋通り、巽橋交差点流入部を選んだ。

近飽和状態の調査は、午前10時～午後1時の間で30分ずつ4回、また過飽和状態の調査は午後1時～午後5時の間で、30分ずつ8回行った。

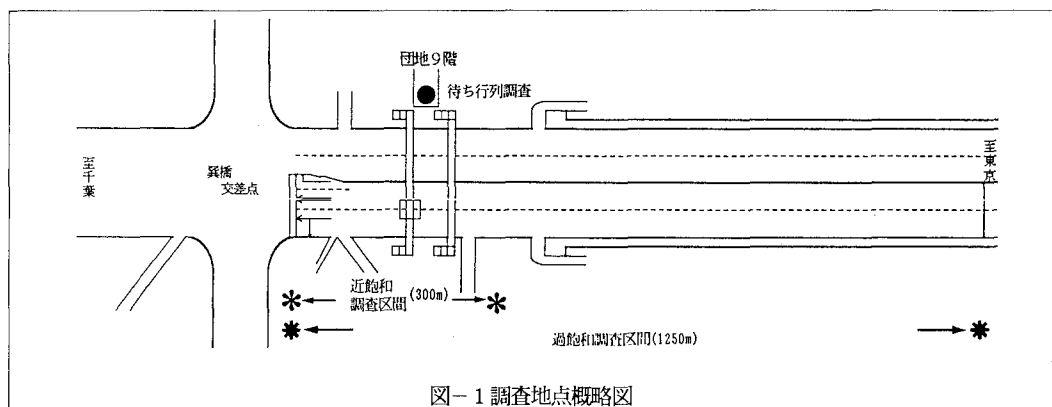


図-1 調査地点概略図

なお、調査地点の概略図を図-1に示す。

調査項目は、信号現示、各地点の交通量、プレートナンバーによる旅行時間、待ち行列調査である。

調査から得られたデータの一次処理を以下のように行った。

- ① 観測旅行時間、非停止車平均旅行時間から実測遅れを求めた。
- ② 信号現示、地点交通量から、飽和流率、到着流率、飽和度を求めた。
- ③ Websterのモデルによる、一様遅れ、ランダム遅れを求めた。
- ④ Hutchinsonのモデルの I (分散/平均) を求めた。
- ⑤ ビデオ画面から、青現示の始まりにおける待ち行列長を求めた。

データ処理の時間区切りは、近飽和、過飽和状態のデータともに2サイクル、4サイクルのベースで行った。

3. 独立交差点の信号遅れモデル

3-1. 到着交通量の非時間依存性による遅れモデル

この種の信号遅れモデルでは、与えられた飽和度の状態が定常状態として継続することを仮定しており、古典的に最も良く知られているWebster式が代表的なモデルとして挙げられる。

また、Webster式を修正したHutchinsonモデルがある。これらはそれぞれ(1)式、(2)式で表される

Websterのモデルでは、車両の到着にポアソン分布(すなわち分散・平均比 $I = 1.0$ の場合に対応する)を仮定しているのに対し、Hutchinsonのモデルでは、 $I < 1.0$ 、 $I > 1.0$ の場合も考えられている。

Webster式の場合、第3項はシミュレーションの結果に基づく修正項でありその値は概して小さく、遅れの5～10%の範囲である。従って実用上は、第1項と第2項の和をとることで十分とされている。

WEBSTERのモデル

$$D = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0.65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{1/3} X^{(2+5\lambda)} \quad (1)$$

HUTCHINSONのモデル

$$D = 0.9 \left[\frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{I X^2}{2q(1-X)} \right] \quad (2)$$

D : 交差点流入部の平均遅れ(秒/台)

C : サイクル長(秒)

λ : 有効青時間のサイクル長に対する割合

q : 流入交通量(台/秒)

S : 飽和交通流率(台/秒)

X : 飽和度($X = q / \lambda \cdot S$)

I : 到着分布の分散の平均に対する割合

3-2. Ian Catlingの時間依存性遅れモデル

このモデルでは到着交通流量の時間による変動、すなわち、非定常な交通流を扱うために、到着流率一定のタイム・スライスによる近似化を図っている。

対象時間帯の始点における待ち行列台数 G_0 が零の場合は、一様遅れ A 、容量 Q 、飽和度 X 、その飽和度の継続時間 t を与えることによって、遅れ $D(X, t)$ 、待ち行列台数 $G(X, t)$ は、それぞれ (3) 式、(4) 式で与えられるとしている。また飽和度が 1.0 未満の場合には、待ち行列台数は各飽和度に応じた一定の値に収束するが、その限界値 $G_1(X)$ を、(5) 式で表している。

$$D(X, t) = A + \frac{N-M}{4Q} \quad (3)$$

$$G(X, t) = \frac{(\beta^2 + 2X^2Q^2t^2\alpha\gamma)^{1/2} - \beta}{\alpha} \quad (4)$$

$$G_1(X) = \lim_{t \rightarrow \infty} G(X, t) = \frac{\gamma X^2}{1-X} \quad (5)$$

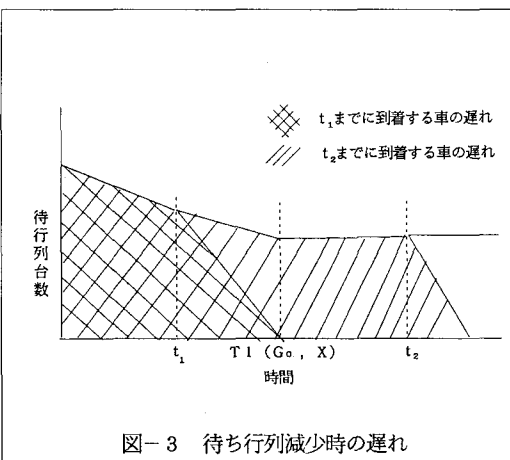
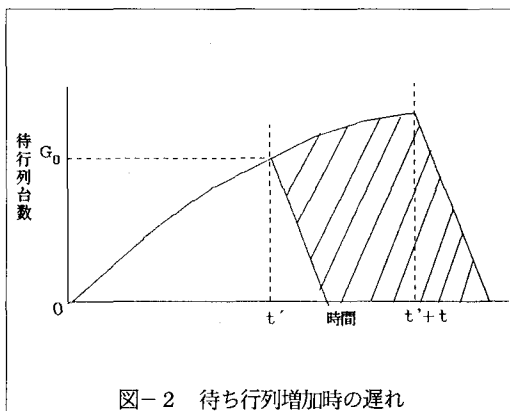
$$\gamma = 0.5 \sim 0.6$$

$$M = 2\gamma + tQ(1-X)$$

$$N = (M^2 + 8\gamma Q t X)^{1/2}$$

$$\alpha = 2(Q t - \gamma)$$

$$\beta = Q t [(1-X) Q t + 2\gamma X]$$



これらを基本として、待ち行列の初期値 G_0 が非零の場合の任意の経過時間後の待ち行列台数及び遅れを、以下の三つのケースに対して、確定的に算出するアルゴリズムが用いられる。

<ケース a>

待ち行列台数が、対象時間始点における待ち行列台数と変わらないかまたはこれよりも増加する場合 (図-2)、すなわち、 $X \geq 1$ の場合、又は $X < 1$ で且つ $G_0 \leq G_1(X)$ の場合。

表-1 Ian Catlingのモデルによる理論式

ケース	$d(X, t, G_0)$	$g(X, t, G_0)$
$X \geq 1$ $X < 1$ and $G_0 < G_1(X)$ $X < 1$ $G_0 > G_1(X)$ and $t \leq \frac{G_0 - G_1(X)}{(1-X)Q}$ $X < 1$ $G_0 > G_1(X)$ and $t > \frac{G_0 - G_1(X)}{(1-X)Q}$	$\frac{1}{t} [(t+t') D(X, t+t') - t' D(X, t')]$ ここで t' は $G(X, t') = G_0$ $A - \frac{t}{2} (1-X) + \frac{G_0}{Q}$ $A + \frac{G_1(X)}{XQ} + \frac{(G_0 - G_1(X))(X(G_0 - G_1(X)) - 2G_1(X))}{2XQ^2t(1-X)}$	$G(X, t+t')$ $G_0 - (1-X)Qt$ $G_1(X)$

表－2 近飽和状態の交通諸量と遅れ値

	サイクル (秒)	交通量 (台/秒)	飽和度	スプリット (%)	飽和流率 (台/秒)	一様遅れ (秒/台)	ランダム遅れ (秒/台)	I 分散/平均	行列長 (m)	Webster モデル	Hutchin sonモデル	Ian.C モデル	実測値 (秒/台)
1 回目	129.0	0.13	0.69	48.0	0.39	25.70	6.00	1.53	75	31.7	31.3	43.2	48.5
	128.5	0.16	0.78	49.0	0.40	26.80	8.70	1.44	40	35.5	35.7	35.7	36.3
	133.0	0.13	0.73	48.0	0.38	28.20	7.60	1.64	35	35.8	36.3	28.3	30.7
	127.0	0.17	0.94	46.0	0.38	32.90	43.30	1.52	35	76.2	90.7	45.9	25.4
	133.5	0.14	0.83	41.0	0.40	35.20	14.50	1.74	60	49.7	54.7	35.3	34.6
2 回目	97.0	0.15	0.91	46.0	0.35	24.30	30.70	1.55	60	55.0	59.3	49.3	23.1
	110.5	0.15	0.90	45.0	0.37	28.10	27.00	1.62	80	55.1	58.6	53.4	35.3
	109.0	0.17	0.89	45.0	0.42	27.70	21.20	1.36	85	48.9	56.6	50.4	43.4
	111.0	0.17	0.81	53.0	0.40	21.50	10.20	1.35	45	31.7	40.6	22.6	20.5
	107.0	0.11	0.72	49.0	0.32	21.60	8.40	1.91	45	30.0	43.7	21.8	26.8
3 回目	113.5	0.13	0.74	48.0	0.38	24.10	8.10	1.97	45	32.2	42.9	26.6	31.3
	106.5	0.18	1.04	46.0	0.38	29.60	—	1.59	80	—	—	44.4	30.0
	113.5	0.15	0.84	44.0	0.42	28.40	14.70	1.43	130	43.1	43.6	30.1	59.1
	110.5	0.13	0.69	41.0	0.47	26.70	7.00	1.83	55	33.7	33.4	27.7	37.6
	105.0	0.16	0.89	44.0	0.41	27.10	22.50	0.93	85	49.6	43.6	37.5	41.3
4 回目	115.0	0.15	0.86	49.0	0.35	26.10	17.60	1.39	80	43.7	45.5	26.1	41.6
	108.5	0.18	0.83	43.0	0.49	27.20	11.30	1.18	195	38.5	36.7	97.9	75.4
	107.5	0.16	0.74	47.0	0.47	23.10	6.70	1.36	185	29.8	28.6	75.2	68.2
	109.5	0.16	0.81	52.0	0.39	22.10	10.80	1.26	145	32.9	31.4	48.9	61.0
	110.0	0.24	0.99	53.0	0.45	25.60	∞	0.67	165	∞	∞	42.4	57.6
	124.0	0.20	0.85	52.0	0.45	25.30	12.00	0.69	166	37.3	30.3	27.7	68.4
	140.5	0.20	0.95	46.0	0.46	36.50	45.10	1.73	220	81.6	103.3	53.9	86.0

＜ケース b＞

待ち行列台数が、対象時間始点における待ち行列台数 G_0 より減少する場合（図－3）

$X < 1$ 及び $G_0 > G_1(X)$ で、且つ $t \leq [G_0 - G_1(X)] / [(1 - X)Q]$ の場合。

＜ケース c＞

$t > [G_0 - G_1(X)] / [(1 - X)Q]$ の場合

以上、三つのケースでの遅れ、待ち行列台数、 $d(X, t, G_0)$ 、 $g(X, t, G_0)$ をまとめて表－1 に示す。

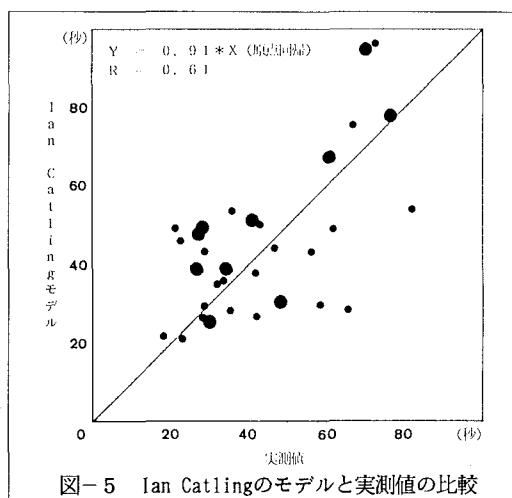
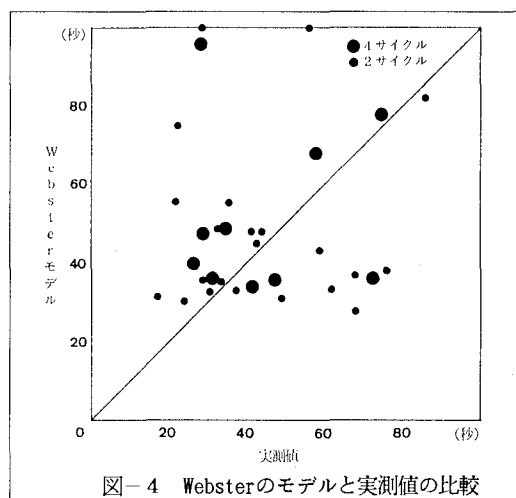
4. 近飽和交通流の信号遅れ

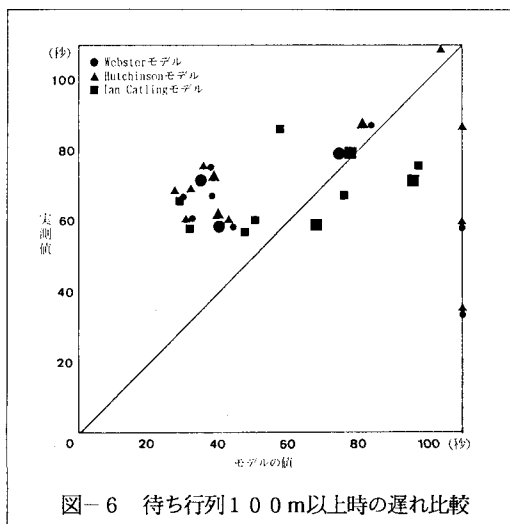
4－1. 実測遅れとモデル遅れの比較

表－2 は、近飽和状態において実測した交通諸量とそれによる各モデルの遅れの計算結果を2サイクル・ベースでまとめたものである。

図－4、5 は Webster のモデルと、Ian Catling のモデルを各々実測値と比較した結果で、飽和状態に近い状態を含めている近飽和交通流においてはややばらつきがあるものの、Ian Catling のモデルによる遅れが実測遅れに近い結果を示している。

また、このような現象を実証するため、待ち行列





が100m以上あった場合（信号1サイクルでさばけない行列）の各モデルの遅れと実測値を比較した。図-6はその結果を表したもので初期行列が100m以上延びている場合、Websterのモデルが非常に低い値を表している半面、Ian Catlingのモデルは初期行列による遅れの分をモデルで反映し、実測値に近い結果を示している。

このような結果から、WebsterのモデルとHutchinsonのモデルは、待ち行列が存在する状態では適切でないことが判る。

4-2. 飽和度による遅れモデルの比較

飽和度による遅れの特性を調べるために、飽和度を0.60～0.85と0.85以上の二つに分けて分析した。

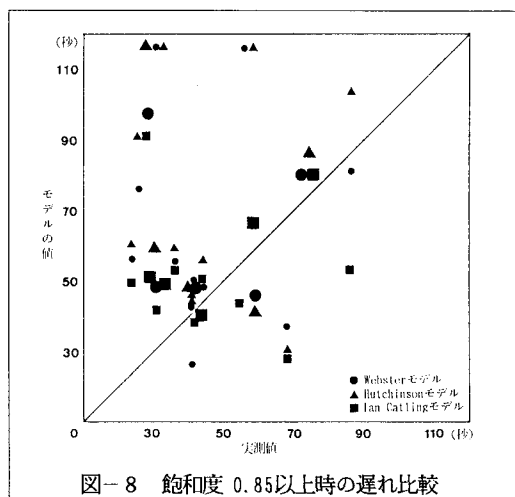
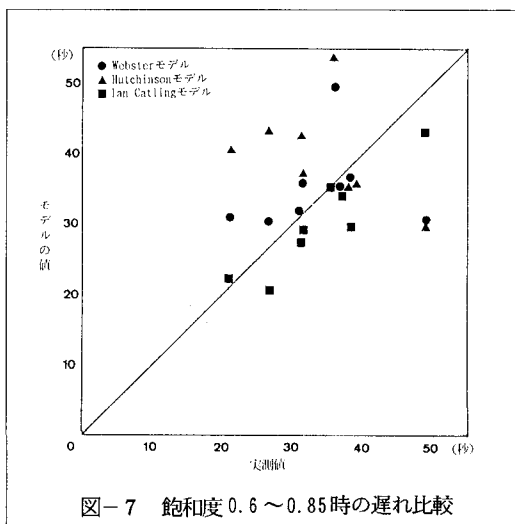
図-7は飽和度が0.60～0.85の場合の各モデルの遅れ値と実測遅れ値を表したものである（待ち行列100m以上のケースは除外）。

Hutchinsonのモデルが実測値よりもやや高い傾向をみせているが、三つのモデルはそれぞれ概ね安定した結果を示している。

飽和度が0.85～1.0の場合には、これらのモデルでは到着交通流のランダム性による遅れが高く、実現象との乖離が著しい。

図-8は飽和度0.85以上の場合の各モデルの遅れ値と実測遅れ値を表したものである。

WebsterのモデルとHutchinsonのモデルは2サイクル・ベース、4サイクル・ベースともに実測値よ



りも高い傾向をみせている。なお、Ian Catlingのモデルも2サイクル・ベースでは、ばらつきがあるが4サイクルベースでは実測値に近い結果をみせている。

5. 過飽和交通流の信号遅れ

5-1. Branstonの処理式による交通諸量と待ち行列台数の変換

Ian Catlingのモデルでは、図-9のように需要としての車の到着は、停止線の位置で考えられ、待ち行列は停止線からその上流の道路にそって貯溜されるのではなく、停止線上に鉛直に積み重なる形で扱われている。そのため、理論モデルによる需要到着台数に実測データを適用するに当たっては、そのデ

表-3 Branstonの処理式によるデータ変換とlan Catlingモデルの計算結果

	サイクル (秒)	交通量 (台/秒)	飽和度	スプリット (%)	飽和流率 (台/秒)	一樣遅れ (秒/台)	実測待ち 台数(m)	Branston 待ち台数	lan.C 待ち台数	lan.C 遅れ	実測遅れ (秒/台)
1	109.1	0.21	0.99	46.0	0.47	29.82	6.7	5.1	—	—	27.7
回	111.2	0.22	1.09	42.0	0.48	34.42	11.8	9.5	8.2	67.1	45.9
目	110.0	0.21	1.01	42.0	0.50	32.09	11.7	9.4	9.0	74.4	57.4
	110.0	0.24	1.02	47.0	0.51	29.96	7.4	5.8	10.1	72.6	57.7
2	128.8	0.25	1.26	42.0	0.48	46.38	30.9	24.0	—	—	100.4
回	130.0	0.23	1.16	42.0	0.48	42.74	53.3	42.3	28.9	158.6	159.5
目	129.0	0.22	1.01	45.0	0.49	36.14	71.6	57.4	29.3	175.5	200.2
3	130.0	0.23	1.14	43.0	0.47	41.53	85.7	68.0	—	—	280.5
回	129.5	0.24	1.15	43.0	0.49	42.26	111.9	87.7	72.7	335.9	320.4
目	129.0	0.21	1.06	44.0	0.46	38.76	120.0	97.3	74.3	391.2	335.6
4	107.8	0.15	0.74	44.0	0.47	25.41	3.2	2.6	—	—	33.0
回	110.5	0.19	0.88	47.0	0.47	26.84	4.3	3.5	2.7	44.3	34.0
目	110.3	0.23	1.09	46.0	0.47	33.13	4.4	3.5	6.0	53.9	33.8
	110.0	0.23	1.01	48.0	0.47	29.17	11.8	9.4	7.1	60.3	38.0
5	129.0	0.21	0.93	50.0	0.46	30.50	8.1	6.1	—	—	49.6
回	122.3	0.25	1.12	49.0	0.46	35.64	4.9	3.8	10.7	71.8	51.3
目	111.8	0.22	1.05	43.0	0.49	34.36	9.5	7.6	12.3	89.2	54.0
6	129.9	0.24	0.97	51.0	0.49	31.29	5.6	4.2	—	—	45.1
回	129.8	0.25	1.21	47.0	0.45	42.55	16.1	12.5	11.7	75.8	52.6
目	128.8	0.21	1.15	38.0	0.50	44.15	37.7	30.6	16.7	115.0	83.7
7	130.3	0.23	0.94	51.0	0.49	30.26	45.6	35.5	—	—	250.7
回	131.0	0.23	0.94	50.0	0.49	30.75	25.0	19.8	34.2	172.0	191.2
目	129.0	0.24	1.05	47.0	0.49	35.96	11.5	9.0	36.0	184.7	151.2
8	130.0	0.24	1.02	50.0	0.48	33.26	31.2	24.0	—	—	163.6
回	130.0	0.19	0.90	46.0	0.46	32.31	43.2	35.8	22.0	135.1	171.4

ータをlan Catlingモデルによる定義に合致するように変換する必要があるので、以下の式による処理を行った。

$$Q_j = Y_j + K_{j-1} d_{j-1} - K_j d_j$$

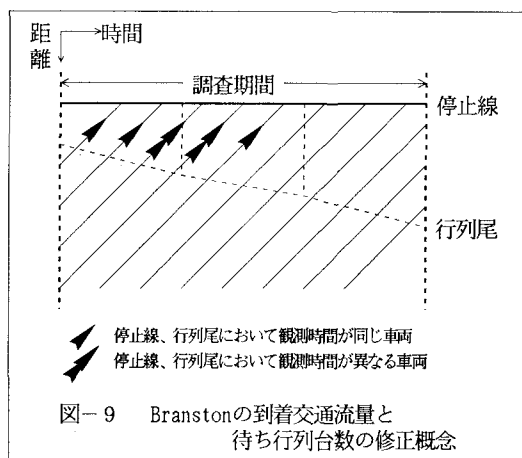
$$= \frac{(Y_j + Q_{j-1} d_{j-1} / V)}{(1 + d_j / V)} \quad (6)$$

$$S_i = R_i - K_j d_i \quad (7)$$

Q: モデルの定義による停止線での到着台数
d: 到着観測地点と停止線との間の距離
Y: 待ち行列後尾上流での観測による到着台数
V: 平均走行速度
K: ($Q/V = K\mu$)、定義による平均交通密度
S: モデルに対応させるための待ち行列台数
R: 実際に観測された待ち行列台数
j: ピーク時間帯のタイム・スライス番号
i: 推定計算タイム・スライス番号

なお、この時の平均交通密度を求める際の走行速度は、非停止車の旅行時間から求めた走行速度 51 Km/h の 90% をとって 45 Km/h とした。

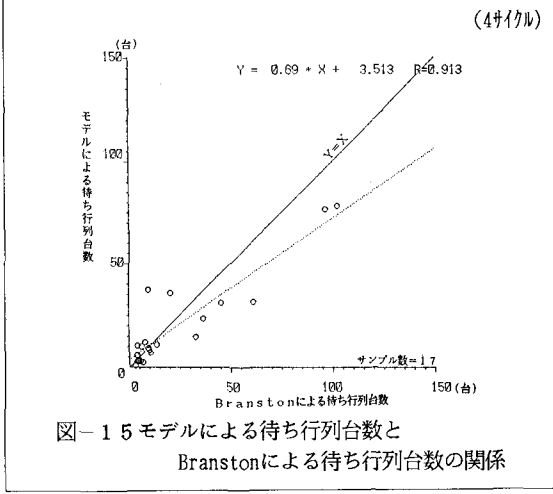
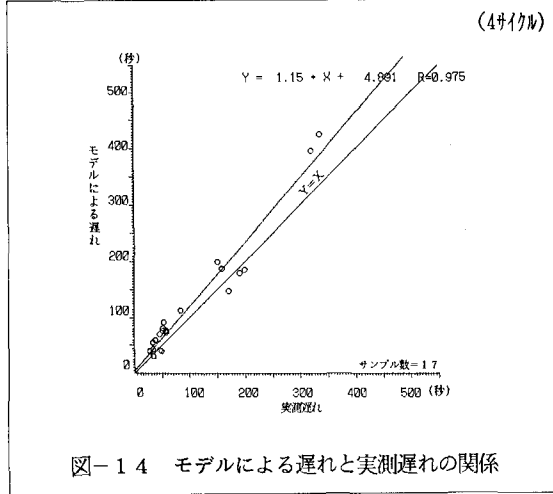
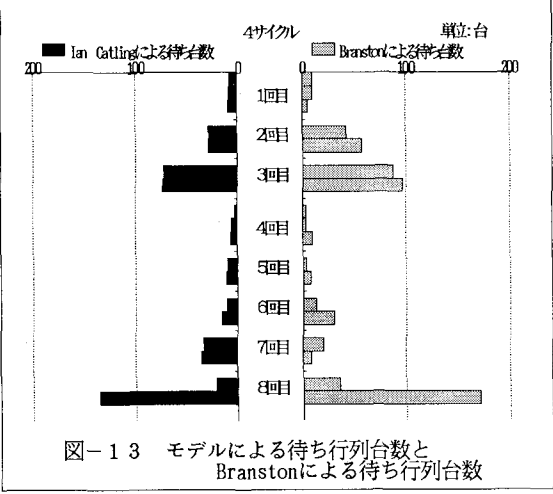
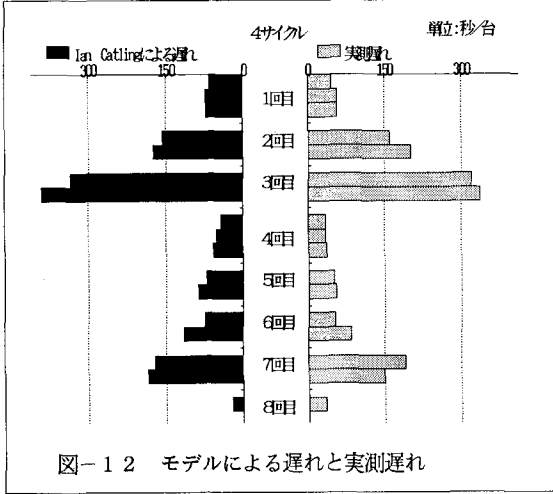
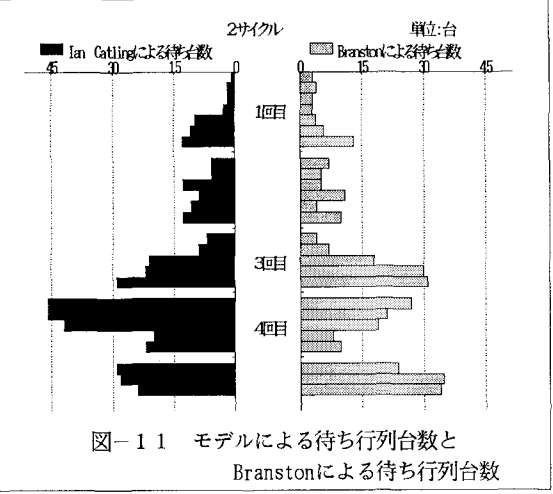
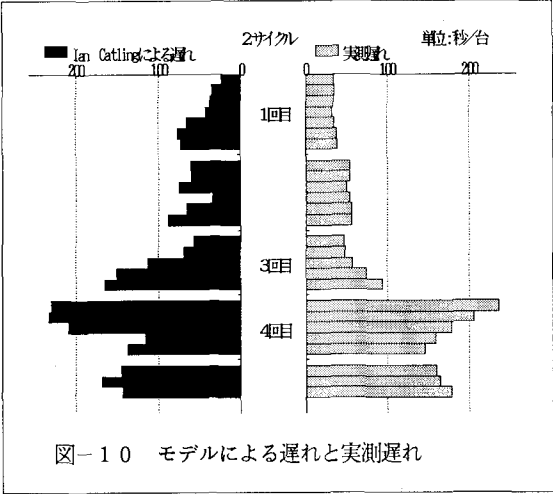
ここで式(6)は、初期行列がほぼないものとして行っているので、初期行列が長い場合、 Q_1 を求めるた



めには $Q_0 = Q_1$ と置く必要がある。

また、実際に観測された待ち行列台数には、容量以上に到着した分の他に、その道路区間に待ち行列とは無関係に交通流として存在する車の台数も含まれている。従って、lan Catlingのモデルによる待ち行列台数と比較するために式(7)による変換が必要である。

表-3は、過飽和状態で実測された交通諸量をそ



デルによる交通諸量の定義に変換するために、Branstonの提案を用いて計算した交通密度、到着流率、飽和度、一様遅れ、および待ち行列台数と、これらの諸量を用いてIan Catlingのモデルによって求めた遅れ、待ち行列台数を4サイクル・ベースで示したものである。

5-2. モデルの検討

図-10、図-12は遅れに関するモデル値と実測値、図-11、図-13は待ち行列に関するモデル値とBranstonによる補正実測値を2サイクル・ベース、4サイクル・ベースで、それぞれの観測時間帯について示している。この場合、初期値として各回の一番目の待ち行列長を使っているので、実際に得られた結果は二番目からである。

なお、4サイクル・ベースのモデル値と観測値とをX、Y座標に示すと、図-14、図-15ののとおりである。

Ian Catlingのモデルによる値は全般的に観測値に近いものとなっている。

分析対象時間の区切りからみると、2サイクル・ベースのモデル値の結果が、遅れ、待ち行列台数ともに4サイクル・ベースの結果よりバラツキがやや大きい傾向が見られる。

1サイクルが平均120秒位であることを考えると、Ian Catlingの報告と一致する結果になっている。

遅れについては、モデルの値が2サイクル・ベース、4サイクル・ベースともに観測値より高い傾向が見られる。これについては、モデルの定義による到着流量とBranstonによる修正待ち行列台数は、短い時間間隔での観測待ち行列最後尾位置をそれぞれ基準としなければならないが、本研究では、その基準点を常に停止線上流1250mの位置に固定したことによる誤差が考えられる。

6. 結論と今後の課題

6-1. 近飽和交通流の遅れについて

近飽和交通流について、既存の古典的な遅れモデルとIan Catlingのモデルを、遅れを中心として比較した結果、交通流量の短時間変動が無視できないとみられる近飽和状態においては、Webster、Hutch

insonのモデルよりもIan Catlingのモデルの方が一般的に実測値と合うことが判った。また、100m以上の待ち行列が存在する時は、古典的な遅れモデルの適用ができなくなる半面、Ian Catlingのモデルは適用の可能性がみられた。

飽和度によるモデルの比較においても、Webster、Hutchinsonのモデルが飽和度1.0に近づくと遅れが無限大になる問題があるがIan Catlingのモデルはある一定の値をみせている。

今後の課題として、系統化されている信号交差点においても同様のデータ収集を行い、その発展を図る必要がある。

6-2. 過飽和交通流の信号について

時間依存性をもった到着交通流量についてIan Catlingのモデルを適用した結果、モデルによる計算値と観測値とは総じてよく合うという結果を得た。

しかし、より厳密には、モデルによる計算値の方が若干高い傾向を示すと共に、交通流の変動に対する感度も実際より高いというようなことがみられた。

今後の課題として、モデルによる計算の妥当性をさらに確かめる必要性があり、そのためには、Branstonの方法による交通諸量の修正の精度を上げるための観測方法の改善と、交通流の変化に対する遅れの感度について、その構造の、現象と理論の両面からの解明等の研究を深めなければならない。

〈参考文献〉

- 1) Ian Catling, A. : Time-dependent Approach to Junction Delay. T. E. C., Nov. 1977., pp. 520-523
- 2) Branston, D. : A Comparison of Observed and Estimated Queue Lengths at Oversaturated Traffic Signals. T. E. C., July 1978., pp. 322-327
- 3) 李光勲・池之上慶一郎・安井一彦: 過飽和交通流の信号遅れ, 土木学会第45回年次学術講演会概要集, No. 4, 1990. pp. 532-533
- 4) Webster, F. V. : Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper, No. 39, 1958
- 5) Hutchinson, T. P. : Delay at A Fixed-time Traffic Signal-II. Numerical Comparison of Some Theoretical Expression. Transpn. Sci., 6(3), 1972., pp. 286-305