

IV-15 都市内街路における交通流の異常検知について

北大工学部 正員 中 辻 隆
同 上 正員 加 来 照 俊

1 まえがき

都市内街路においては、側方交通や信号制御等の影響のためにその現象が複雑であり、高速道路に比べて交通特性やモデル化に関する研究は従来あまりなされてきていない。インシデントの発生に伴う渋滞についてもその特性、およびその検出手法についてもあまり検討はなされてきていない。

本研究においては、都市内街路で計測された5分間ベースの車両感知器データを用いて

1) インシデント発生時の交通特性に関して、交通量-占有率(密度)等の特性曲線上における変動経路が渋滞の発生時と解消時において異なるとともに両者の最適占有率に変化が見られること

2) 交通変量間の相関関係のみを利用することによって、インシデントの発生を判別するための閾値やパラメータを事前に設定する必要のないリアルタイム検出が可能であることなどについて報告する。

2 従来の研究

インシデントの検出に関するこれまでの研究は、大きく3つに分類することができる。

1) 占有率等の交通変量、あるいはそれらを組合せて定義した変量の変動状況から判定する。

California法(White(1)), T I法(Courage(2)), S N D法(Dudek(3)(4)) 等がある。これらの方法は、モデル自体が単純であるのでその実現が容易である。しかしながら、インシデントの発生を判別する閾値を各地点毎や時間帯毎に設定する必要がある、都市内街路のように広範囲を対象とするには事前の調査が膨大となるためその適用は困難である。また、交通量が比較的小さい状態での検知率が低下すること、あるいは重交通状態で圧縮波の発生が見られる時には誤検出率が大きくなると指摘されている。

2) 交通変量を時系列モデルを用いてモデル化し、変量の短期予測値と計測値の偏差から判別する。

時系列モデルとして指数平滑法(Cook(5)), 1階の差分が3次の移動平均過程とした積分混合(ARIMA)モデル(Ahmed(6)(7)), あるいは移動平均法(Whitson(8))などが用いられている。これらの方法は、1)の方法が過去のトレンドに依存せずその瞬時の変量の値によって識別しているのに対して過去の値からのトレンドに基づき予測を行うことに特色がある。しかしながら、平滑指数や回帰係数などのパラメータを各地点、あるいは各時間帯毎に設定しなければならないのは1)と同様である。

3) 密度、交通量、あるいは速度を関係付ける連続の式等を用いて、密度や空間平均速度などの非計測量を推定するダイナミックモデルを作成し、モデルの適合性等からインシデントの発生を判別する。

Willskyら((10)-(14))は、密度や空間平均速度を推定するためのダイナミックモデルとして流体モデルと運転者特性を考慮したPayneの交通流モデル(15)を適用し、交通状態(正常、インシデント発生、あるいは感知器故障等)毎に準備されたカルマンフィルタによる計測変量の予測誤差からその時の交通状態を特定するMM(Multiple Model)法、および正常状態を基準とし、MM法と同じように予め設定されている各交通状態の中から、尤度が最大となる状態を特定するGLR(Generalized Likelihood Ratio)法を提案している。ともに状態変動を記述するダイナミックモデルとしては拡張カルマンフィルタが用いられている。これらの方法は精度の高い判定が出来るが、モデルが複雑であるばかりではなく、パラメータの推定等多くの準備作業を要し、その適用は高速道路等サービス水準の高い道路に限られる。

本研究においては、一般街路における適用を想定し、一切の閾値、あるいはパラメータ等の事前設定を必要としないCalibration Free Algorithmの実現を指向している。

3 感知器データ

解析の対象とした感知器記録は、'85.8に函館の市街地幹線道路において、超音波式の感知器により計測され、5分間ごとに集計・平均されたものである。インシデントの記録例としては、感知器記録の中から通常の週変動状態と大きく異なるデータを目視により選んだ。Fig.-1は、感知器NO.0地点の8月の金曜日5日間における交通量、時間占有率、および地点速度の1日24時間の変動状況を示しているが、その1日(8.2 Fri)の21:00から23:00の時間帯で占有率が80%、速度が数km/hになっているのが見られる。現場調査をしてないのでその原因は不明であるが、近傍の感知器地点においても同様の交通変動状態が出現している。

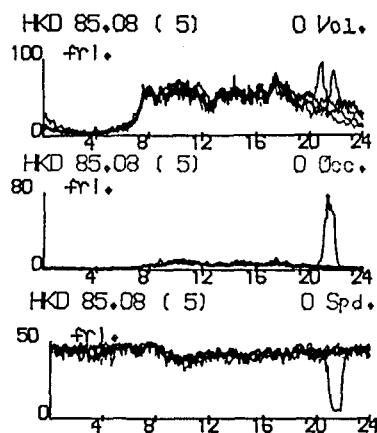


Fig.-1 感知器記録にみるインシデント発生例

4 インシデント時の交通特性

交通量、密度、および速度の間の特性についてはこれまで多くの議論がなされてきている。密度と交通量($k-Q$)曲線に関しても、最大交通量において不連続になること(Edie(17))、自由流と渋滞流とは $q=uk$ 直線を境に不連続な分布特性になること(Hillegas(18)、越(18)(19))、あるいは自由流に戻る時には一定な交通量となること(Hall(21)-(23))などが指摘されている。しかしながら、インシデントの発生によって、自由流から渋滞流になる時と反対に渋滞が解放され自由流に戻る時の最適密度の変化についてはこれまでほとんど論究されていない。ここでは、5分間感知器記録を用いて $k-Q$ 曲線における遷移例を実証的に示す。なお、密度と占有率の間にほぼ線形に近い関係があることを考慮し、ここでは密度の代わりに占有率を用いるものとする。

Fig.-2は、Fig.-1に示したNO.0地点における各変量の20:00-23:00の拡大図とその間の占有率-速度(O_c-V)、占有率-交通量(O_c-Q)、および交通量-速度($Q-V$)平面における変動軌跡(Trajectory)を表している。なお、波線の直線や放物線は最小二乗近似曲線である。また、Fig.-3は、この間を占有率がピークを示す21:25を境に分けて、各々の時間帯における軌跡を描いたものである。占有率-交通量(O_c-Q)においては、渋滞状態に向かう時(左側)には低占有率側に遷移し、逆に自由流に向かう時(右側)には高占有率側に遷移しているのが見られる。

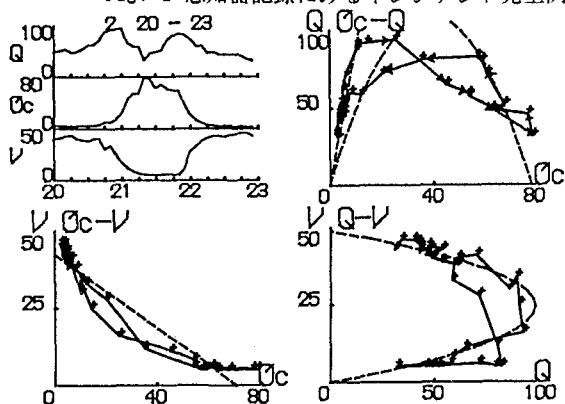


Fig.-2 渋滞時における交通変量特性曲線

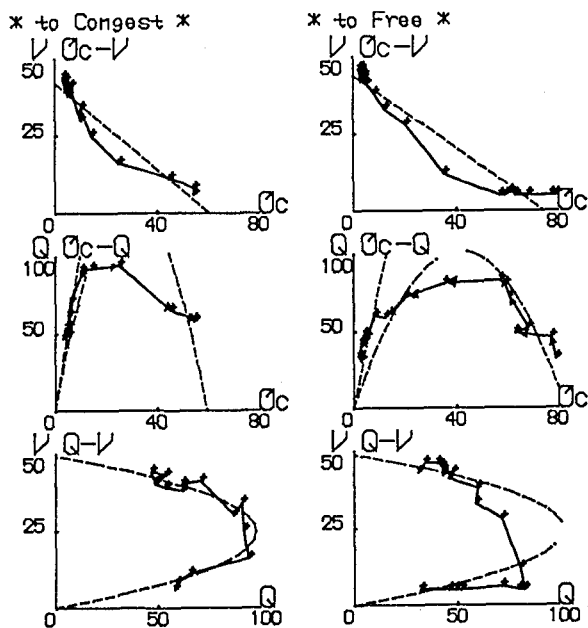


Fig.-3 渋滞の発生時(左)と解消時(右)の特性曲線

Fig.-4は、同じ日時における他の近傍地点NO.1とNO.15 におけるOc-Q曲線である。NO.0地点ほど明確な相連は見られないが、渋滞発生時と解消時とはその経路が異なることが推察される。

インシデント発生時の記録はその数が限られているので、上で述べた傾向が日常の渋滞発生時にも観測されるかを調べた。渋滞に向かう午前のピーク時間帯と渋滞が解消される夕方のピーク時間帯において同程度の占有率が観測されているNO.17, NO.84, NO.87, およびNO.92 地点のデータを用いて両時間帯の最適占有率の比較を行った。ここでOc-Q曲線における最適占有率は、両変量間に以下の非線形関数近似を行い求めた。

$$y = A * (B - x) * x^C \tag{1}$$

ここで、A,B,Cの各パラメータは最小二乗的に決定する。最大交通量を与える最適占有率は、

$$x = B * C / (1 + C) \tag{2}$$

として与えられる。Fig.-5にパラメータCの値をいくつか変化させた時の関数形状を示す。また、Fig.-6は No.84における午前（左）と夕方（右）における近似状態の例を示している。

Fig.-7は、横軸に午前の、縦軸に夕方の最適占有率値をプロットしたものである。ピーク特性が見られない日曜日を除く27*4ケのデータの中から回帰の悪いものを除いた93例のうち64例において、渋滞の解消時（夕方）における最適占有率の増加が観測されている。また、Fig.-7は最適占有率が10数%から40数%までの広い範囲にあり、占有率の値だけから交通状態を特定したりインシデントの発生を検出することは難しいことも表している。

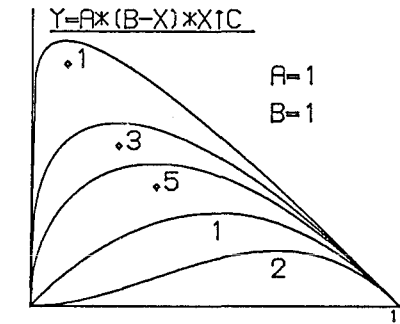


Fig.-5 占有率－交通量非線形関数近似

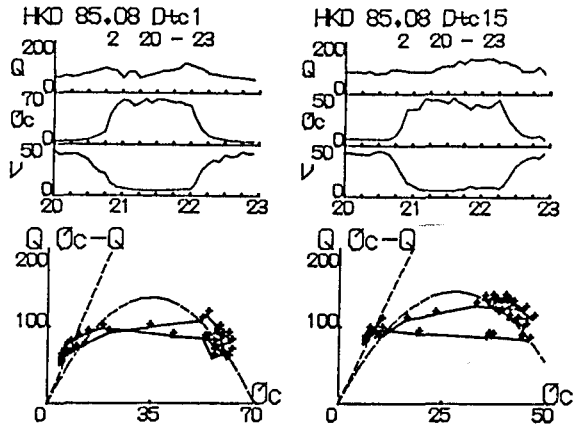


Fig.-4 下流近傍地点における占有率－交通量特性曲線

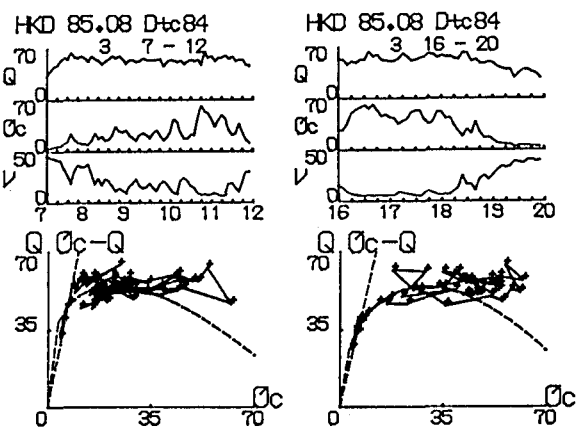


Fig.-6 午前（左）夕方（右）の渋滞時特性曲線の例

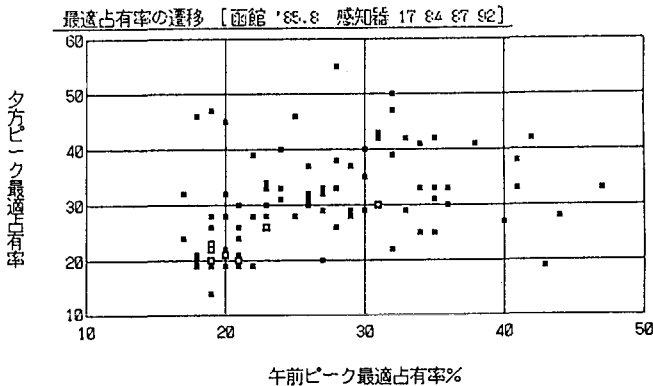


Fig.-7 午前と夕方渋滞時における最適占有率

5 都市内街路におけるインシデントの検出

都市内街路では、高速自動車道とはサービス水準が異なるので必ずしも全てのインシデントを検出することが望ましいとは限らない。都市内街路の対象領域が広範囲であることから、検出手法を複雑にして検出率を高めるよりも、インシデントの影響が少ない軽交通の場合における検出感度を犠牲にしても、検出手法が単純であり、その実現が容易であることの方が望ましい。従来の研究の所で述べたように、これまで手法はすべて高速自動車道におけるインシデントの検出であり、対象地点の道路・交通条件に依存する閾値や各種パラメータなどを事前に調査設定する必要がある。

ここでは、交通量、密度（占有率）、および速度の間に成立する自明的な相関関係を利用することによってインシデントの発生に伴う渋滞領域への移行を検知する手法の提案を行う。よく知られているように、交通量、密度（占有率）、および速度の間には交通状態に応じて、

- 1) 密度と速度は負の相関を有する。
- 2) 自由流では交通量と密度は正の相関を示すが、渋滞時には負の相関となる。
- 3) 交通量－速度曲線においては、自由流で負の、渋滞流で正の相関を示す。

さらにここでは、車両感知器で得られた情報を最も効率よく利用するために交通変量の主軸分析を行うとともに、主軸に関する主値（固有値）、あるいは主軸方向が、各変量間の相関係数に対応して変動することを利用して、主軸分析に基づくインシデントの検出を試みるものとする。

5.1 相関係数の時間変動

時刻 k から N ステップ過去の交通変量 x_i と x_j の値を用いて求めた相互相関係数を時刻 k における相互相関係数 $R_{ij}(k)$ と定義する。Fig.-8は、先のFig.-2に示したN0.0地点に対して、占有率－速度（Oc-V）、占有率－交通量（Oc-Q）、および交通量－速度（Q-V）における相互相関係数 R_{23} 、 R_{12} 、および R_{31} の時間変動状態を示したものである。21:00から22:00の間で R_{12} が負、 R_{31} が正の値となっているので、Oc-Q平面とQ-V平面ともに渋滞領域になっていることが予想される。

5.2 2次元主軸分析

Oc-Q曲線において交通量と占有率の相関係数を R_{12} とする時、固有値を与える特性方程式の1つの解として

$$z_1 = 1 - R_{12} \quad (3)$$

が得られる。同様にして、Q-V曲線において交通量と速度の相関係数を R_{31} とすると、1つの固有値解は次のように表すことが出来る。

$$z_2 = 1 + R_{31} \quad (4)$$

交通量と占有率、および交通量と速度の相関関係に応じて z_1 と z_2 は

自由流では、 $R_{12} > 0$ 、 $R_{31} < 0$ 従って $0 < z_1, z_2 < 1$

渋滞流では、 $R_{12} < 0$ 、 $R_{31} > 0$ 従って $1 < z_1, z_2 < 2$

なる値域をとる。すなわち、交通状態が上に述べた相関関係に従って変動するならば、Fig.-9に示すように、自由流と渋滞流とが (z_1, z_2) 平面上で左下の領域で自由流、右上の領域で渋滞流と領域別に明確に分離して識別することが期待される。右下、および左上の領域はOc-Q平面、あるいはQ-V平面の一方でのみ渋滞が検知された遷移領域を表している。

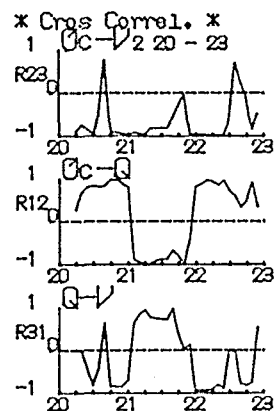


Fig.-8 交通変量間の相互相関係数の変動

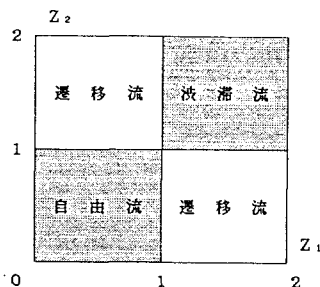


Fig.-9 固有値 (z_1, z_2) と交通状態の識別

Fig-10は、Fig.-2の例に対して主軸 z_1, z_2 の時間的変動と主軸平面上における軌跡を表している。主軸値の変化がFig.-2に示した占有率の変化に比べ鋭敏であること、およびそれに伴って主軸平面上での自由流と渋滞流の識別が明瞭であり、渋滞の検出が容易であることがわかる。

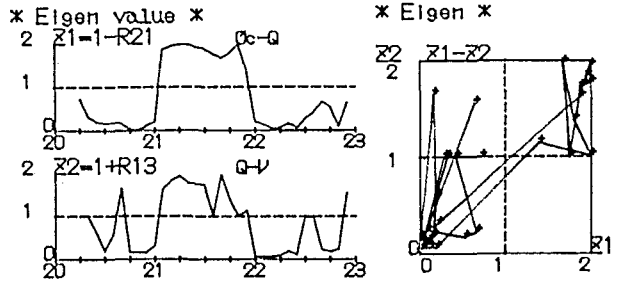


Fig.-10 渋滞時の2次元固有値の変動

5.3 3次元主軸分析

交通量を x_1 、占有率を x_2 、および速度 x_3 とし、各変量間の相互相関係数を R_{ij} とすると3つの固有値は、

$$\begin{aligned} z_1 &= 1 - 2\sqrt{p} \cos(\alpha/3) \\ z_2 &= 1 - 2\sqrt{p} \cos(\alpha/3 + 2\pi/3) \\ z_3 &= 1 - 2\sqrt{p} \cos(\alpha/3 + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= -\sqrt{4p^3 - q^2} / q \\ p &= (R_{12}^2 + R_{23}^2 + R_{31}^2) / 3 \\ q &= 2R_{12}R_{23}R_{31} \end{aligned} \quad (6)$$

3次元主軸分析では、式(6)から分かるように p と q の値が、相互相関係数の符号の変化に追従しないことから、固有値自体は交通状態の識別に利用することはできない。しかしながら、固有値 z_i に対する固有ベクトルの各成分 h_1, h_2, h_3 とその向き θ と ϕ は以下のように表すことができる (Fig-11参照)。

$$\begin{aligned} h_1 &= R_{12}R_{23} - R_{31}(1 - z_1) \\ h_2 &= R_{31}R_{12} - R_{23}(1 - z_1) \\ h_3 &= (1 - z_1)(1 - z_2) - R_{12}^2 \\ \theta &= \arctan(h_2/h_1) \\ \phi &= \arctan(\sqrt{(h_1^2 + h_2^2)} / h_3) \end{aligned} \quad (7)$$

これらの中で、固有値 z_2 に対する主軸方向 θ_2 が自由流と渋滞流において位相が異なり、異符号の正接値をもつことが証明される。

Fig-12は、上記のことを視覚的に理解するために R_{23} を一定(-0.6)、 R_{31} の値をパラメータとして変化させた時の、 R_{12} と θ_2 の関係を図示したものである。自由流($R_{12} > 0, R_{31} < 0$)では、 θ_2 の値が正となり、渋滞流領域($R_{12} < 0, R_{31} > 0$)では、 θ_2 が負の値となることが示されている。また、式(7)

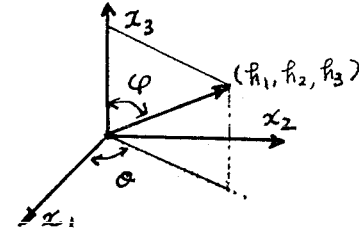


Fig.-11 3次元主軸分析における主軸方向

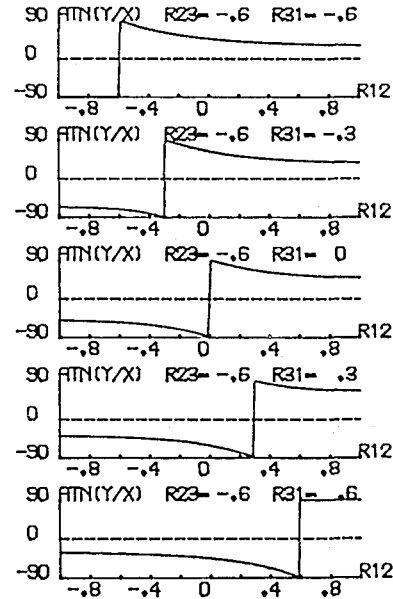


Fig.-12 交通変量間の相関と主軸方向 θ_2

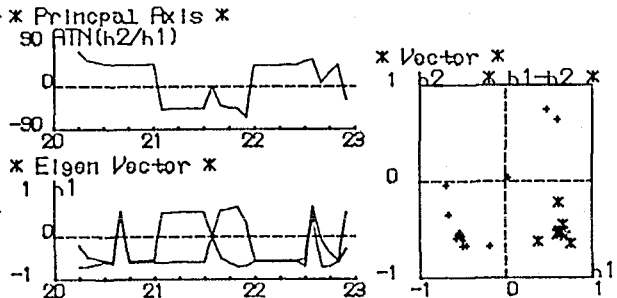


Fig.-13 渋滞時の3次元主軸方向と固有ベクトル

から θ_c が h_1, h_2 の値から定まることから(h_1, h_2)平面上で $h_1 \cdot h_2 < 0$ の領域が渋滞状態となることが分かる。

Fig-13にFig.-2のデータに対する主軸の向き θ_c と固有ベクトル h_1, h_2 の時間変動と(h_1, h_2)平面上の軌跡を表しているが、Fig-10同様に渋滞の発生が明瞭に識別されているのが分かる。

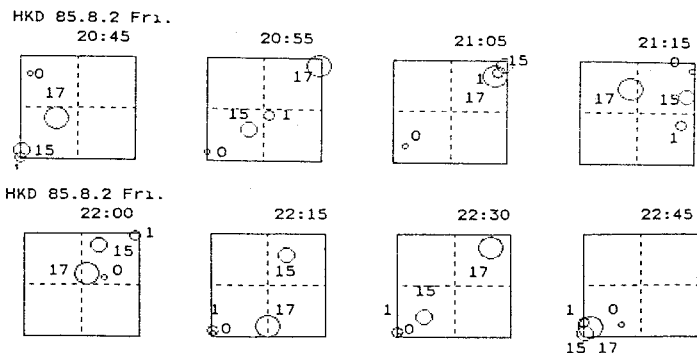


Fig.-14 街路上4地点における渋滞の発生と解消

Fig-14は、主軸分析による渋滞の検出の応用を示したものである。これまでに例としてきたNO.0地点の下流地点 NO.1, NO.15, NO.17 の各地点に対して渋滞の開始時(20:45-21:15)と解消時(22:00-22:45)における各地点の状況を示している。各地点における渋滞の発生と解消の状況を把握することができる。

最後に、車両感知器データの利用に便宜をお計り下さいました道警函館管制センターの山本所長を始め関係各位に感謝致します。なお、本研究は文部省科学研究費奨励(A501560123949)によって実施された。

参考文献

- (1)West, J.T.: Traffic Eng. Vol.41, No.4, ppl2-18, 1971
- (2)K.G. Courage and M. Levin: Research Report 488-8, Texas Transportation Institute, 1968
- (3)C.L. Dudek and C.J. Messer: HRR 469, PP1-15
- (4)C.L. Dudek and C.J. Messer: TRR 495, ppl2-24, 1974
- (5)A.R. Cook, D.E. Cleveland: TRR 495, ppl-11, 1974
- (6)S.A. Ahmed and A.R. Cook: Proc. ASCE, TE Div., pp731-745, 1980
- (7)S.A. Ahmed and A.R. Cook: Transportation Planning and Technology, Vol.7, PP231-242, 1982
- (8)Whitson, R.H., Buhr, J.H., Drew, D.R., and McCasland, W.R.: HRR 289, pp38-50, 1969
- (9)M. Sakashita and A. D. May: TRR 533, pp48-63, 1975
- (10)A.S. Willsky, et al: IEEE Trans. Vol.AC-25 No.3, pp347-360, 1980
- (11)E.Y. Chow, et al: MIT Elec. Syst. Lab. Cambr., MA, Rep. ESL-R-765, Vol.I, ppl-27, 1977
- (12)A.L. Kurkjian, et al: MIT Elec. Syst. Lab. Cambr., MA, Rep. ESL-R-765, Vol.II, ppl-87, 1977
- (13)C.S. Greene, et al: MIT Elec. Syst. Lab. Camb, MA, Rep. ESL-R-765, Vol.III, ppl-64, 1977
- (14)E.Y. Chow, et al: MIT Elec. Syst. Lab. Camb., MA, Rep. ESL-R-765, Vol.IV, ppl-77, 1977
- (15)L. Isaksen and H.J. Payne: Proc. IEEE, Vol.61, No.5, PP526-536, 1973
- (16)A.L. Kurkjian, et al: Transport. Sci. pp231-261
- (17)Edie, L.C.: Oper. Res., Vol.9, No.1, pp66-76, 1961
- (18)B.D. Hillegas, D.G. Houghton, and P.J. Athol: TRR 495, pp53-63, 1974
- (19)越,岩崎,大蔵,西宮: 土木学会論文報告集, NO.306, PP59-70, 1981
- (20)岩崎,越,大蔵: 土木学会論文報告集, NO.330, PP121-127, 1983
- (21)B.L. Allen, F.L. Hall, and M.A. Gunter: TRR 1005, pp54-64, 1985
- (22)F.L. Hall, and M.A. Gunter: TRR 1091, ppl-9, 1986
- (23)M.A. Gunter, F.L. Hall: TRR 1091, PP18-21, 1986