土木学会論文集 No. 604／Ⅳ-41, 1-10, 1998.10

工事形態を考慮した工事リンクのグループ化とその優先順位

田上　博[1]・清田　勝[2]・樗木　武[3]・角　知憲[3]

[1]正会員　工博　佐賀大学教務員　理工学部都市工学科（〒840-8502　佐賀市本庄町1番地）
[2]正会員　工博　佐賀大学助教授　理工学部都市工学科（〒840-8502　佐賀市本庄町1番地）
[3]正会員　工博　九州大学教授　工学部建設都市工学科（〒812-8581　福岡市東区箱崎6-10-1）

本研究では，ＯＤ交通量，整備区間，工事期間および各期の予算が与えられている場合に，工事期間の混雑をできるだけ抑えながら整備効果を最大にするためには，工事リンクをどのようなグループに分け，どのような工事形態で，どのような順序でこれらのグループを工事するのが最も妥当かを決定する手法を動的計画法としてモデル化し提案する．さらに，その近似解法としてＧＡと比較して制御パラメータの数が少ない確率的スキーマ手法*SSE(Stochastic Schimata Exploiter)*による近似解法の適用を工夫し，モデル計算を通してその有用性を明らかにする．

Key Words : *road network , road construction pattern ,dynamic programming, stochastic schemata exploiter*

1．まえがき

慢性的な交通混雑を引き起こしている市街地の道路網を対象にして道路整備や道路工事を行う場合には，その影響が極めて大きいことからネットワーク完成時の総走行時間の短縮量を最大にするという視点に加えて，工事中に生じる総走行時間の増加量と整備による総走行時間の短縮量の和の総和を最大にするという視点が重要になってくる．したがって，道路整備計画問題は多段階決定問題として定式化される必要がある．

道路整備の優先性を考慮した研究としては，飯田らの研究[1]をはじめ多数の研究があるが[2),3),4),5)]，多段階決定問題として定式化されている例は[6),7),8),9)]少ない．これらの研究は工事形態を一様に『全面通行止め』と仮定して定式化を行っている．しかし，ネットワークの状態や交通量等によっては，『全面通行止め』で工事をするよりも『片側交互通行』や『片側一方通行』で工事をした方がよい場合があり，そうした工事が多く見受けられる．

『全面通行止め』で工事を行う場合は，工事終了後のリンク容量が大幅に増加するので整備効果は大きくなるが，反面工事の影響が大きく，激しい交通渋滞を引き起こす可能性がある．一方，『片側交互通行』や『片側一方通行』の場合は，工事の影響は『全面通行止め』の場合ほど大きくならないが，片側区間しか容量が増加しないので中間段階の整備効果はあまり期待できない．したがって，工事の影響が問題にならないほど複数の代替路が確保できる場合には，施工効率や整備効果の面から『全面通行止め』で工事するのが適当である．しかし，慢性的な交通混雑を呈している市街地の道路では，工事の影響が極めて大きいことから，全面通行止めと片側一方通行の中間的な工事形態である片側交互通行を上手く組み合わせることによって，工事の影響を軽減することが必要になる．

著者等は，これまで工事による交通混雑をできるだけ小さくするという視点から，道路区間の最適な組み合わせとその優先順位を決定する問題に取り組んできた[8),9)]．しかしながら，交通混雑の激しい市街地の道路網を対象にして工事を行う場合には，工事区間の最適な組み合わせとその優先順位を見つけるだけでは工事の影響を十分軽減することができない．したがって，市街地の道路網を対象とする場合には，工事区間の最適な組み合わせとその優先順位を決定するだけでなく，工事形態自体をも同時に決定できるようにモデルを拡張する必要がある．

しかし，これまで提案されている手法（動的計画

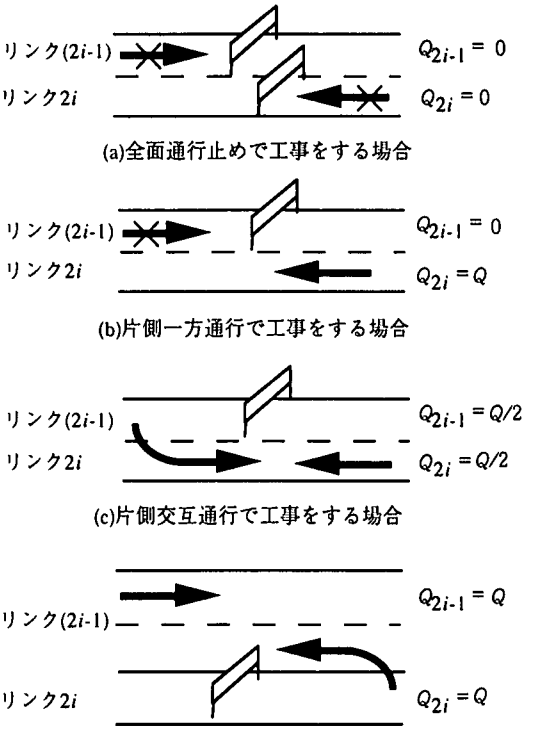
法や遺伝的アルゴリズム）では，工事の進行状況を0－1変数の組み合わせで表すが，リンク番号の線列で表しているので，工事区間を方向別の有向リンクで表現したとしても，『全面通行止め』と『片側一方通行』の２つの工事形態しか取り扱うことができない．このような表現方法では，『片側交互通行』という三番目の中間的な工事形態を考慮することができない問題が残る．そこで，本研究では，『全面通行止め』，『片側一方通行』および『片側交互通行』の３つの工事形態を表現できるように，工事の進行状況を表す変数に加えて，新たに工事形態を表す変数の導入を工夫するものである．すなわち，こうした変数を導入すれば，全面通行止めの場合と同じように定式化することができ，総走行時間の短縮量の総和を最大にする工事区間の組み合わせと優先順位および工事形態を，動的計画法を用いて同時に決定することが可能である．

また，大規模なネットワークにも対応できるように，*GA*と比較して制御パラメータの数が少なく，したがって操作が容易で，かつ最適解の達成率が高い確率的スキーマ手法（*SSE*：*Stochastic Schemata Exploiter*）による近似解法の適用を考え，その有用性を検証する．

道路整備計画案を立案するに当っては，工事の形態によって工事費用や工事期間が変化するので，工事形態と交通容量の関係だけでなく，工事費用や工事期間についても考慮することが望ましい．全面通行止めで工事をすれば，効率的な施工が可能になるので，工事費用の軽減や工事期間の短縮が図れるが，反面工事の影響が大きく激しい交通渋滞を引き起こす可能性がある．どの要因を重視すべきかについては議論の余地があるが，本研究のように交通混雑の激しい市街地の道路網を対象とする場合には，工事による交通混雑をいかに軽減するかということが最重要課題で，工事費用や工事期間は二次的な要因と考えられる．これらの要因を考慮したモデルの開発については今後の研究に待つとして，本研究では最初のステップとして工事形態と交通容量の関係に焦点を絞って，片側交互通行の導入効果について検討する．

２．工事形態とリンク容量の関係

すべての工事区間を『全面通行止め』で工事する場合は，工事により両方向の通行が完全に遮断されるので，工事区間を方向別の有向リンクで表す必要はない．しかしながら，『全面通行止め』や『片側一方通行』，『片側交互通行』等の工事形態を考慮する場合には，工事区間i（i=1,2,…,M）をペアをなす2本の有向リンク(2i－1)と2iで置き換え，これらのリンクがどのような形態で工事されるかを表現する必要がある．

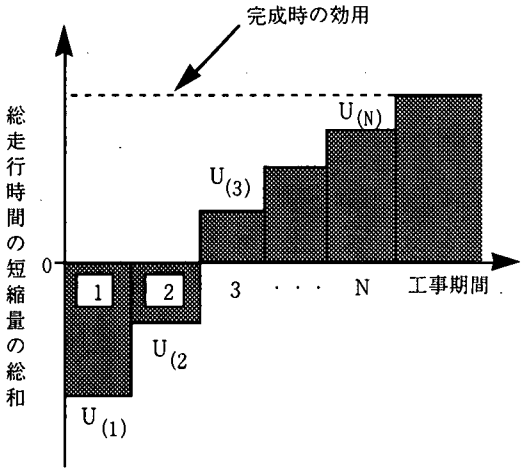


図－１　工事形態とリンク容量

工事区間iが『全面通行止め』で工事される場合は，図－1(a)に示すようにペアをなすリンク(2i－1)と2iが同時に工事されるので，両リンクのリンク容量は共に0になる．一方，片側のリンク（例えば，2i－1）だけが工事される場合は，もう一方のリンク2iは使用可能で，その時の利用形態としては『一方通行』と『交互通行』が考えられる．もし，リンク2iを一方通行で利用すれば，図－１(b)のようにリンク(2i－1)と2iの容量はそれぞれQ_{2i-1}=0，Q_{2i}=Q（工事前の容量）となる．しかし，リンク2iを交互通行で利用する場合の両リンクの容量は，青時間が方向別に半分ずつ割り当てられていると仮定すると，Q_{2i-1}=Q_{2i}=Q/2となる(図－1(c))．さらに，リンク(2i－1)が既に整備済みでリンク2iが工事される場合は，既に整備済みの2車線を1車線ずつ両方向で暫定開通させることが考えられる．そのときの両リンクの容量は図－1(d)に示すようにそれぞれQ_{2i-1}=Q，

Q_{2j}=Qとなる．

このように，実施する工事形態によってリンク容量が変化するので，総走行時間の短縮量で表される整備効果を算定する場合には，どのような形態で工事が行われたかを明確にする必要がある．ここでは，ペアをなす2つのリンクの工事形態（利用形態）を0－1変数λで表すことにする．λ=1は，リンクの一方が工事中の時，他方を交互通行で利用することを表している．λ=0は，ペアをなすリンクの一方あるいは両方が一方通行で利用される場合や共に通行止めになる場合の工事形態を表している．したがって，工事未着工の場合や両リンクとも工事が完了している場合の利用形態は，λ=0で表現されることになる．



図－2　道路整備による総走行時間の短縮量

3．動的計画法によるモデルの定式化

ＯＤ交通量と投資できる予算が与えられている場合に，有向リンクで表されたM本のリンクをN期(n=1,2,…,N)で整備する場合の定式化を考える．工事前（現状）の総走行時間を基準にした場合の第1期から第N期までの総走行時間の短縮量の総和の変化の状態は，図－2のように描かれ，この総走行時間の短縮量の総和を最大にする工事リンクの組み合わせと優先順位，および工事形態を動的計画法を用いて段階的に決めることが本研究の主要な目的である．

整備対象リンクjが工事中あるいは工事がすでに終了しているとき1，工事がまだ着工されていないとき0を取る変数x_j(j=1～M)を導入すると，ネットワークの状態はM個の0－1変数の組$(x_1,x_2,\cdots,x_M)$で表される．

いま，整備対象リンクjの工事費用をc_jとし，第1期から第n期までに投資できる予算のトータルをT_nで表すと，第n期で可能なネットワーク状態を表すベクトル$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_M)$は，次の予算制約を満足しなければならない．

$$\left.\begin{array}{ll} \sum_j c_j x_j \leqq T_1 & (n=1) \\ T_{n-1} < \sum_j c_j x_j \leqq T_n & (n=2\sim N) \end{array}\right\} \quad (1)$$

さらに，各期の予算内でできる工事はその期間内ですべて終了させる，すなわち各期の予算内でできる工事区間を恣意的に次期に回すことはないと仮定すると，整備の対象となる組み合わせはさらに限定され，最大組み合わせベクトルだけが工事の対象となる．したがって，これらのベクトル$\boldsymbol{x}$よりも小さい組み合わせベクトルは工事の対象から外れることになる．なお，ここでは，予算制約式(1)を満足する組み合わせベクトルの集合の中に，ベクトル$\boldsymbol{x}$より大きいベクトルが存在しないとき，ベクトル$\boldsymbol{x}$を最大組み合わせベクトルと定義する．また，ベクトル$\boldsymbol{x}$と$\boldsymbol{y}$のj番目の要素x_jとy_jに対して$y_j \leqq x_j$ (j=1～Mの全て)が成立するとき，ベクトル$\boldsymbol{x}$はベクトル$\boldsymbol{y}$よりも大きいと定義し，$\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{x}$で表す．

いま，予算制約式(1)を満足する最大組み合わせベクトル$\boldsymbol{x}$の集合をX_nで表すと($\boldsymbol{x} \in X_n$)，第n期までの総走行時間の短縮量の総和の最大値$V_n(\boldsymbol{x})$は，ベルマンの最適性の原理から『第n期の総走行時間の短縮量』と『第(n－1)期までの総走行時間の短縮量の総和の最大値』の和の最大値として表される[10]．これを式で表すと以下のようになる．

$$V_n(\boldsymbol{x}) = \max_{\boldsymbol{y} \in Y_{n-1}} \{V_{n-1}(\boldsymbol{y}) + U_n(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{\lambda})\} \quad (n=2\sim N) \quad (2)$$

$$V_1(\boldsymbol{x}) = U_1(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{\lambda}) \quad (n=1) \quad (3)$$

ここで，ベクトル$\boldsymbol{y}$は第(n－1)期のネットワークの状態を表すベクトルで，第n期のネットワーク状態を表すベクトル$\boldsymbol{x}$よりも小さく，なおかつ第(n－1)期までに投資できる予算の制約を満たす最大組み合わせベクトルの集合X_{n-1}に含まれていなければならない．このようなベクトル$\boldsymbol{y}$の集合Y_{n-1}は以下のように表される．

$$Y_{n-1} = \left\{ \boldsymbol{y} \mid \boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{x},\ \boldsymbol{y} \in X_{n-1} \right\} \quad (4)$$

ベクトル$\boldsymbol{z}$と$\boldsymbol{\lambda}$は，第n期での工事の進行状態と工事形態を表すベクトルで，第n期の総走行時間の短縮量を計算するのに必要なベクトルである．いま識別ベクトル$\boldsymbol{z}$を$\boldsymbol{z}=2\boldsymbol{y}-\boldsymbol{x}$で表すと，$\boldsymbol{x}$と$\boldsymbol{y}$の要

素 x_j, y_j (j=1 ～M)が共に0－1変数で，$y \leqq x$ なので，z_j (j=1 ～M)は，－1，0，1の3つの値だけをとることになり，この値を用いて工事の進行状態を識別することができる．すなわち，

① $z_j = -1$ ($y_j = 0, x_j = 1$) ：リンクjが第n期で工事中であることを表している．

② $z_j = 0$ ($y_j = x_j = 0$) ：工事がまだ着工されていないことを表している．

③ $z_j = 1$ ($y_j = x_j = 1$) ：第(n－1)期までに工事が終了していることを表している．

他方，2章で示したように，工事形態に依存してリンク容量が変化するので，第n期の総走行時間の短縮量を計算するには，工事の進行状態を表すベクトル z の他に工事形態を表すベクトル λ を導入する必要がある．

理解を容易にするうえから，一例として図－3に示すようなネットワークを対象にして，ペアをなす6本の工事対象リンク（1車線）を2本ずつ3期で2車線に整備拡幅する問題を考えることにする．

STEP1：第1期の総走行時間の短縮量の計算

第1期の予算制約を満たす最大組み合わせベクトルの集合X_1は，以下のように表される．

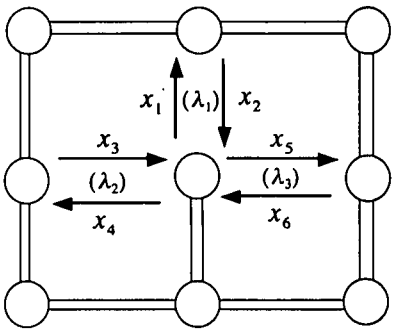
$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

そこで，例えばネットワークの状態が x=(1 0 1 0 0 0)で表される場合，工事の進行状況を表すベクトル z は，$z = 2y - x$ =(－1 0 －1 0 0 0)と表されるので，リンク1とリンク3が第1期で工事されることがわかる．このとき，リンク1，3とペアをなすリンク2，4をどのように利用するかによって，総走行時間の短縮量が変化する．したがって，総走行時間の短縮量を最大にする工事形態を決定するためには，考えられる工事形態をピックアップし，これらの工事形態ごとに総走行時間の短縮量を計算しなければならない．いま，片側交互通行で工事されるとき1，それ以外のとき0を取る変数ベクトル $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ を導入すれば，ベクトル z で表される工事案に関連するすべての工事形態を表現することができる．

リンク1とリンク3を工事する場合の工事形態としては，次の4つが考えられる．

① λ =(0 0 0)：リンク2，4を共に一方通行で利用しながら，リンク1，3を工事する．

② λ =(1 0 0)：リンク2を交互通行で，リンク4を一方通行で利用しながら，リンク1，3を工事する．



図－3　モデルネットワーク

③ λ =(0 1 0)：リンク2を一方通行で，リンク4を交互通行で利用しながら，リンク1，3を工事する．

④ λ =(1 1 0)：リンク2，4を共に交互通行で利用しながら，リンク1，3を工事する．

なお，リンク5，6の工事形態λ_3は，両リンクとも工事が行われないので，4つのケースともλ_3=0となる．

以上の4つの工事形態について総走行時間の短縮量を計算し，その最大値を求めれば，これがリンク1，3を最適な工事形態で工事した場合の総走行時間の短縮量となる．これを再帰方程式で表せば次式のようになる．

$$V_1(1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0) = max \begin{bmatrix} U_1\ (-1\ 0\ -1\ 0\ 0\ 0 : 0\ 0\ 0) \\ U_1\ (-1\ 0\ -1\ 0\ 0\ 0 : 1\ 0\ 0) \\ U_1\ (-1\ 0\ -1\ 0\ 0\ 0 : 0\ 1\ 0) \\ U_1\ (-1\ 0\ -1\ 0\ 0\ 0 : 1\ 1\ 0) \end{bmatrix}$$

もし，V_1(1 0 1 0 0 0)=U_1(－1 0 －1 0 0 0 : 1 1 0)ならば，第1期でリンク1と3を片側交互通行で工事するのが最適な工事形態ということになる．

第1期の予算制約式(1)を満足するすべてのベクトル $x(\in X_1)$に対して $V_1(x)$を計算し，ベクトル x，λ および $V_1(x)$を格納する．

STEP2：第2期の総走行時間の短縮量の計算

第2期の予算制約を満たす最大組み合わせベクトルの集合X_2は，第2期までに4本のリンクが工事されなければならないので次式のように表される．

$$X_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

いま，第2期の状態ベクトルが x=(1 1 1 0 1 0)で

表される場合を考える．この場合は，ベクトル$\boldsymbol{x}$が第1期のどのようなネットワーク状態$\boldsymbol{y}$から形成されたかを検討すると同時に，第2期の工事をどのような工事形態で実施するのが最も効果的かを考慮する必要がある．第1期で2本，第2期でさらに2本工事されるので，第2期の再帰方程式は次式のように表現される．

$$
V_2(1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0) = max \begin{bmatrix} V_1(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) + U_2(1\ 1\ -1\ 0\ -1\ 0 : 0\ 0\ 0) \\ V_1(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) + U_2(1\ 1\ -1\ 0\ -1\ 0 : 0\ 1\ 0) \\ V_1(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) + U_2(1\ 1\ -1\ 0\ -1\ 0 : 0\ 0\ 1) \\ V_1(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) + U_2(1\ 1\ -1\ 0\ -1\ 0 : 0\ 1\ 1) \\ V_1(1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0) + U_2(1\ -1\ 1\ 0\ -1\ 0 : 1\ 0\ 0) \\ V_1(1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0) + U_2(1\ -1\ 1\ 0\ -1\ 0 : 1\ 0\ 1) \\ \cdots\cdots \\ V_1(0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0) + U_2(-1\ -1\ 1\ 0\ 1\ 0 : 0\ 0\ 0) \end{bmatrix}
$$

ここで，考慮すべき第1期の状態ベクトル$\boldsymbol{y}$は，2つの条件($\boldsymbol{y} \leqq \boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y} \in X_1$)を満足しなければならないので，6通り($={}_4C_2$)存在する．いま，$\boldsymbol{y}=(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$の場合は，$\boldsymbol{z}=2\boldsymbol{y}-\boldsymbol{x}=(1\ 1\ -1\ 0\ -1\ 0)$となるので，第2期でリンク3と5が工事されることになる．したがって，この場合もリンク4，6について4つの利用形態が考えられることになる．一方，状態ベクトルが$\boldsymbol{y}=(1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0)$の場合は，$\boldsymbol{z}=(1\ -1\ 1\ 0\ -1\ 0)$となるので，リンク2と5が第2期で工事されることがわかる．ただし，この場合は第1期でリンク1の工事が完了し，2車線に拡幅整備されているので，ここではこのリンクを一方通行で利用する形態は考えないことにし，交互に利用する形態だけを考慮することにする．このときの工事形態としては次の2つが考えられる．

$\boldsymbol{\lambda}=(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(1\ 0\ 0)$，$(1\ 0\ 1)$

もし，$V_2(1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0)=V_1(1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)+U_2(1\ 1\ -1\ 0\ -1\ 0 : 0\ 1\ 0)$ならば，第1期でリンク1と2の工事を最適な工事形態(全面通行止め)で完了し，第2期でリンク3と5をそれぞれ片側交互通行と片側一方通行で工事すべきであることがわかる．

第2期の予算制約式(1)を満足するすべてのベクトル$\boldsymbol{x}(\in X_2)$に対して$V(\boldsymbol{x})$を計算し，ベクトル$\boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{y}$，$\boldsymbol{\lambda}$および$V_2(\boldsymbol{x})$を格納する．

STEP3：第3期の総走行時間の短縮量の計算

本計算例では第3期で工事が終了すると仮定しているので，第3期の予算制約を満たすベクトル$\boldsymbol{x}$の要素はすべて1になっていなければならない．したがって，第3期の再帰方程式は次式のように表される．

$$
V_3(1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1) = max \begin{bmatrix} V_2(1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0) + U_3(1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1 : 0\ 0\ 0) \\ V_2(1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0) + U_3(1\ 1\ 1\ -1\ 1\ -1 : 0\ 1\ 1) \\ V_2(1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0) + U_3(1\ 1\ -1\ 1\ 1\ -1 : 0\ 1\ 1) \\ \cdots\cdots \\ V_2(0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1) + U_3(-1\ -1\ 1\ 1\ 1\ 1 : 0\ 0\ 0) \end{bmatrix}
$$

この場合は，第2期までに4本の工事が完了しているので，第3期の工事形態はベクトル$\boldsymbol{z}$で表される工事案について1通りしか存在しないことになる．

もし，$V_3(1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1)=V_2(1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0)+U_3(1\ 1\ 1\ -1\ 1\ -1 : 0\ 1\ 1)$ならば，第2期までに最適な工事形態でリンク1，2，3，5の工事を完了し，第3期で残りのリンク4，6をそれぞれ片側交互通行で工事すべきであることがわかる．

なお，工事前の総走行時間に対する短縮量を計算するには，与えられたネットワーク上で実際の交通の流れが的確に再現されていなければならない．そこで，ここでは『利用者は交通ネットワーク上で自由な経路を選択する』という行動規範に基づいて，すなわち予め与えられたＯＤ交通量を等時間配分し，そのときのフローから総走行時間の短縮量を求めることにする．

また，工事中のリンク容量の算定には，次式を用いる．

（ｉ）一方のリンクは現状のままで，他方のリンクだけが工事される場合($z_{2i-1}=-1$，$z_{2i}=0$または$z_{2i-1}=0$，$z_{2i}=-1$)

$$
\begin{aligned} Q_{2i-1} &= (z_{2i-1}+1)\,Q-(-1)^{z_{2i-1}}\lambda_i Q/2 \\ Q_{2i} &= (z_{2i}+1)\,Q-(-1)^{z_{2i}}\lambda_i Q/2 \end{aligned} \qquad (5)
$$

例えば，$z_{2i-1}=-1$，$z_{2i}=0$，$\lambda_i=1$のとき，すなわち

リンク$2i$を片側交互通行で利用しながらリンク$(2i-1)$を工事する場合のリンク容量は，$Q_{2i-1}=Q_{2i}=Q/2$となり，2．の結果と一致する．

（ii）既に完成したリンクを暫定開業して両方向通行で利用しながら，他方のリンクを工事する場合

$$\begin{aligned} Q_{2i-1} &= (z_{2i-1}+1)\,Q - z_{2i-1}\,\lambda_i\,Q \\ Q_{2i} &= (z_{2i}+1)\,Q - z_{2i}\,\lambda_i\,Q \end{aligned} \tag{6}$$

例えば，$z_{2i-1}=-1$，$z_{2i}=1$，$\lambda_i=1$のとき，すなわち拡幅されたリンク$2i$を暫定開業して両方向通行で利用しながらリンク$(2i-1)$を工事する場合のリンク容量は，$Q_{2i-1}=Q$，$Q_{2i}=Q$となる．

いま，第1期から第N期までの総走行時間の短縮量の総和の最大値$V_N(\boldsymbol{x})$が求まると，$V_N(\boldsymbol{x})=V_{N-1}(\boldsymbol{y})+U_N(\boldsymbol{z},\boldsymbol{y})$を満足するベクトル$\boldsymbol{y}$を探索することによって，第$(N-1)$期のネットワーク状態$(\boldsymbol{x})$を求めることができる．同様にして，第$(N-1)$期のベクトル$\boldsymbol{x}$（第N期のベクトル$\boldsymbol{y}$）を用いて，$V_{N-1}(\boldsymbol{x})=V_{N-2}(\boldsymbol{y})+U_{N-1}(\boldsymbol{z},\boldsymbol{\lambda})$を満足するベクトル$\boldsymbol{y}$を探索し，第$(N-2)$期のネットワーク状態$(\boldsymbol{x})$を求める．この探索を第1期まで遡ることによって，各期間で整備すべきリンクのグループ化と優先順位および工事形態を決定することができる．

4．計算例と考察

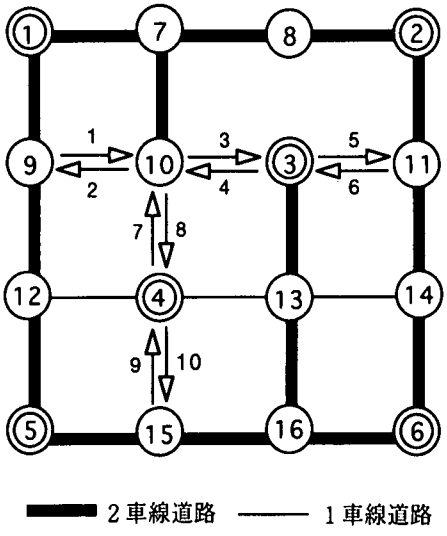
本研究では，図－4に示すような格子型のネットワークを対象にして，片側1車線の道路を段階的に2車線道路に拡幅整備する問題を考えることにする．図中太線は2車線道路を，細線は1車線道路を示している．また，①～⑯はノード番号を，二重丸（ノード番号①～⑥）は発着ノードを表している．すべてのリンクはペアとなる2本の有効リンクで表現しなければならないが，分かりやすくするために整備対象リンクだけを有効リンクで示すことにする．1車線のリンク16本のうち，リンク番号1～10の10本のリンクを整備対象リンクとする．ここでは，一例として工事期間を3期とし，各期までに使用できる予算の累積値を4，8，10単位コストとする．各リンクの整備費用（c_j：j=1～10）はすべて単位コストであると仮定する．OD交通量については表－1の値を，また各リンクの走行時間関数については，次式で表される修正BPR関数を用いることにした．

$$t_a(q) = t_a^0\left\{1+\beta\left(\frac{q_a}{Q_a}\right)^{\gamma}\right\} \tag{7}$$

ここで，β，γはパラメータで，β=2.62，γ=5.0を用いる．なお，q_aはリンクaの交通量，Q_aはリンクaの可能交通容量，t_a^0はリンクaを自由走行速度で走行した時の所要時間を表している．

表－1　計算に用いたOD表

O＼D	1	2	3	4	5	6
1	0	500	400	400	500	700
2	400	0	300	300	250	500
3	300	500	0	200	300	450
4	400	200	150	0	300	400
5	600	200	250	300	0	550
6	650	500	400	450	600	0



図－4　計算に用いたネットワーク

各リンクの可能交通容量と自由走行速度については，それぞれ2車線の場合には2000台/hr，60km/hr，1車線の場合には500台/hr，55km/hrと仮定した．

（1）片側交互通行を考慮する場合と考慮しない場合の総走行時間の短縮量の総和の比較

表－2と図－5は片側交互通行を考慮する場合としない場合（全面通行止めで工事する場合）の各工事期間で実施すべきリンクの組み合わせと総走行時間の短縮量の総和を示したものである．ここでいう短縮量とは，各期のネットワーク状態で求めた総走行時間が，工事を行っていない場合（現状）の総走

行時間に比較してどれだけ短縮したかをパーセントで表したものである．

第１期で工事を実施すべきリンクの組み合わせは，片側交互通行を考慮しない場合はリンク番号5，6，7，8で，そのときの総走行時間の短縮量の総和が－31.7％と極端に大きいことから，大きな交通渋滞の発生が予想される．一方，片側交互通行を考慮する場合の工事リンクの組み合わせはリンク1，4，6，7で，リンク1，4，6，7を工事しながら，ペアをなすリンク2，3，5，8を片側交互通行で利用するという案になっている．そのときの総走行時間の短縮量の総和は，片側交互通行を考慮しない場合に比べて13.7％大きくなっており，工事の影響が大幅に軽減されている．当然のことながら，第1期ではリンク容量は増加せず工事だけが実施されるので，現状より総走行時間が大幅に増加し，両ケースとも総走行時間の短縮量の総和が負になっている．

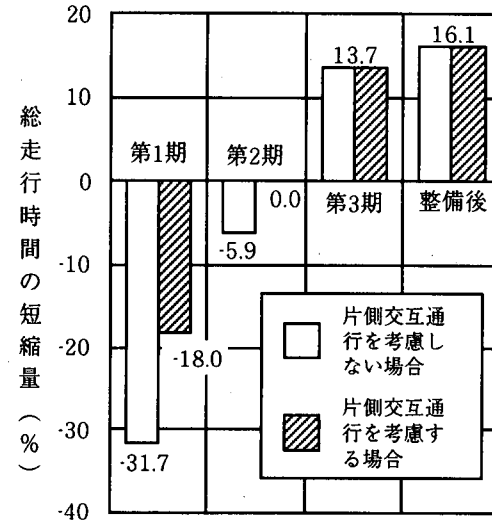
第2期では，第1期の工事リンクが完成し，リンク容量と自由走行速度が増加しているので，工事の影響は第1期ほど大きく出ていない．総走行時間の短縮量の総和は，片側交互通行を考慮しない場合は－5.9％で，現状のサービスレベルよりも低下している．しかし，片側交互通行を考慮すれば，現状のサービスレベルを維持することが可能である．片側交互通行を考慮しない場合の工事リンクの組み合わせはリンク1，2，3，4となっている．一方，片側交互通行を考慮した場合の工事リンクの組み合わせはリンク2，3，5，8で，第1期で工事が完了しているリンク1，4，6，7を交互通行で利用しながらリンク2，3，5，8を工事するという工事案になっている．

第3期では８本のリンクがすでに完成しているので，残り2本のリンクが通行止めになってもその影響をほとんど受けず，両ケースとも総走行時間が現状より13.7％短縮している．なお，第3期で工事が終了するので，第3期以降に総走行時間の短縮量の総和の最大値(16.1％)が現れ，OD交通量が現状と変わらなければその値が次の工事が実施されるまで継続することになる．

本計算例から明らかなように，道路工事の影響は極めて大きいことがわかる．特に，第1期でその影響が顕著に出ている．道路工事の影響を完全に取り除くことは出来ないが，片側交互通行を考慮することによって，工事の影響を軽減させることが可能である．したがって，慢性的な交通混雑が発生している市街地の道路網を対象にして道路工事や道路整備を行う場合には，整備すべきリンクの最適な組み合わせとその優先順位を決定すると同時に，最適な工事形態を選択し，工事中に生じる混雑をできるだけ抑える努力が必要である．

表－２　片側交互通行を考慮する場合と考慮しない場合の工事リンクの組み合わせと総走行時間の短縮量の総和

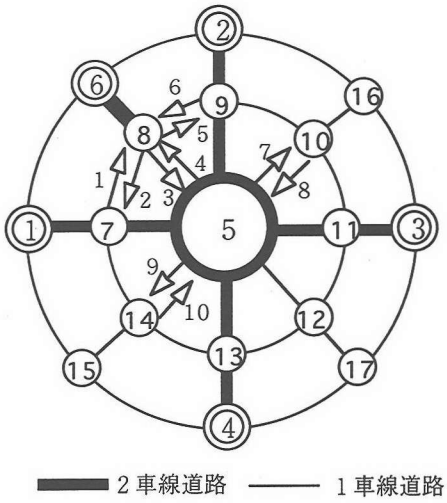
項目	工期	工事形態			総走行時間の短縮量の総和（%）
		片側一方通行	片側交互通行	全面通行止め	
片側交互通行を考慮しない場合	1			5,6,7,8	－31.7
	2			1,2,3,4	－5.9
	3			9,10	13.7
	整備後				16.1
片側交互通行を考慮する場合	1		1,4,6,7		－18.1
	2		2,3,5,8		0.0
	3			9,10	13.8
	整備後				16.1



図－５　片側交互通行を考慮した場合としない場合の総走行時間の短縮量の比較

（２）*SSE*と*GA*による近似解法と*DP*による厳密解法の比較

大規模なネットワークへの厳密解法（*DP*）の適用は，複雑かつ多大の演算労力を要し，実用的といえない．そこで，これらに代わる近似解法として*GA*[7]および相澤によって提案された確率的スキーマ貪欲



図－6　ネットワーク2

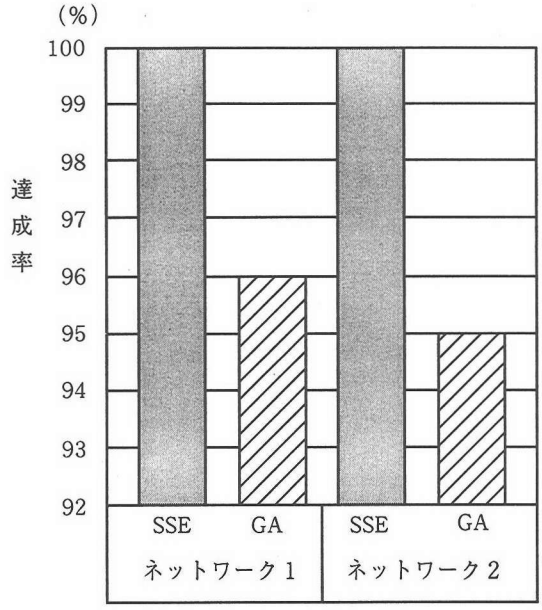
法（*SSE*）[11),12)]の適用が考えられる．

著者等は，道路整備の優先順位を決定する問題に*SSE*アルゴリズムを適用し[9)]，*GA*よりも速い収束特性を持つことを検証した．ここでは，さらに*SSE*が工事形態を考慮した問題に対しても有効であるかを検証するために，パターンの異なる2つのネットワークを対象にして，代表的な近似解法である*GA*と厳密解法である*DP*との比較検討を行う．一つは，(1)の例題で用いた格子型のネットワークで，これをネットワーク1，もう一つは図－6に示す放射型のネットワークで，ネットワーク2と呼ぶことにする．

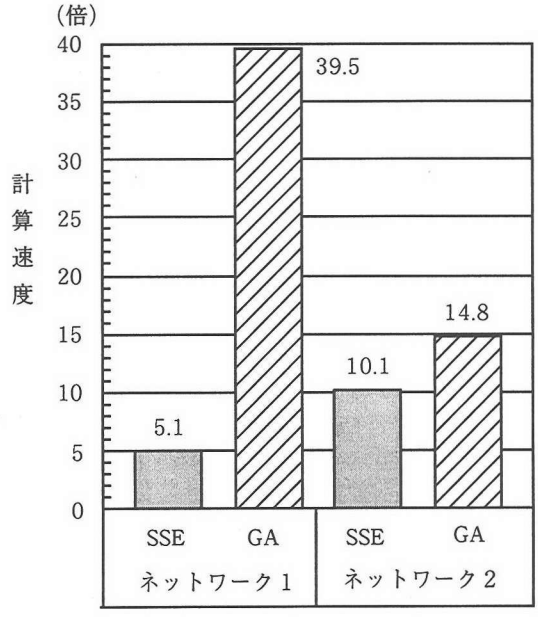
整備対象リンクの数やOD交通量等の諸量は，両ケースとも(1)の例題と同じ値を採用した．

計算で用いた諸パラメータ値は，個体数10個，突然変異生起確率(*Pm*)0.01，交叉確率(*Pc*)0.9，ウィンドウサイズ(W)5である．選択と交叉の操作方法は文献7に準じた．近似解法の収束条件に関しては，①すべての個体とも同じ内容の組み合わせが得られる，②同一解が10回続けて得られる，③世代数が50世代を超える，のいずれかの条件が満たされるとき収束したとみなすことにした．また，達成率とは，厳密解法で解いた場合の総走行時間の短縮量の総和に対する近似解法の総走行時間の短縮量の総和の比率を示している．さらに，本手法では，できるだけ誤差を小さくするために，杉田によって提案された無理数回転による乱数[13)]を採用した．

図－7は，*SSE*，*GA*で解いた最良解を示す．図－7(a)と(b)は，*DP*による厳密解を基準にした場合の達成率と計算速度の倍率を示している．本表から明らかなように，両近似解法とも*DP*に比較して計算時間が大幅に短縮されていることがわかる．両近似解法の収束特性を比べると，計算時間に関しては*GA*の方が*SSE*よりもネットワーク1で約8倍，ネットワーク2で約1.5倍速くなっている．一方，達成率に関しては，*SSE*の方が*GA*よりも優れていることが分る．



(a)達成率の比較（厳密解＝100）



(b)計算速度の比較（厳密解＝1）

図－7　近似解法の達成率と計算速度の比較

2つの異なるネットワークの計算例から明らかなように，道路整備の優先順位と工事形態を同時に決定する問題に関しては，スキーマ貪欲アルゴリズムを用いたSSEの方が，計算時間は幾分長くなるがGAよりも最適解に到達しやすいことがわかる．また，制御パラメータ値の設定に関して，GAは対象問題ごとにパラメータ値を検討する必要があるが[11]，SSEは突然変異生起確率と個体数を与えるだけでよく，GAと比較して制御パラメータ数が少なくてすむという利点を有する．

5. 結論

本研究では，OD交通量，整備区間，工事期間および各期の予算が与えられている場合に，総走行時間の短縮量の総和を最大にする工事リンクの組み合わせとその優先順位，および工事形態を同時に決定する手法を提案した．さらに，大規模なネットワークにも対応できるように，GAと比較して制御パラメータの数が少なく，速い収束特性を持つ確率的スキーマ手法（SSE）近似解法の適用を試み，その有用性を検証した．本研究で得られた主な結論と検討課題を要約すると以下のとおりである．

（1）工事期間の混雑をできるだけ抑えながら，整備効果を最大にする工事リンクの組み合わせと優先順位，および工事形態を同時に決定する問題は，工事の進行状態と工事形態を表すベクトル$\boldsymbol{z}$，$\boldsymbol{\lambda}$を導入すれば，動的計画法を用いて定式化することができる．

（2）交通混雑の激しい市街地の道路網を対象にして，道路工事や道路整備を行う場合には，工事の影響をできるだけ抑えるという視点が重要で，片側交互通行を考慮すれば工事の影響を軽減することが可能である．

（3）ネットワークの構成を定める計画変数を離散変数として取り扱うことができるうえ，交通量の増加に伴うサービスレベルの低下を明示的に考慮することができる．

（4）本題の厳密解は動的計画法により求めることが出来る．しかし，大規模ネットワークになるとその適用は複雑かつ多大の演算労力を要し現実的でない．これに対処する近似解法としてGAおよびSSEが考えられるが，両方法を比較した結果，計算速度という面ではSSEの方がGAよりも劣っているが，最適解への到達性という面ではSSEの方が優れていることが分った．

（5）本研究では，工事形態と交通容量の関係だけを明示的に取り扱っているが，工事の形態によって工事費用や工事期間が変化するので，工事形態と交通容量の関係だけでなく，工事費用や工事期間をも含めたより汎用的なモデルを開発する必要がある．

（6）本来は，大規模なネットワークを対象にしてSSEの有用性を検証すべきであるが，ネットワークの規模が大きくなると厳密解を求めることが困難になるため（計算時間が膨大になる），今回はとりあえず例題で示したような比較的規模の小さいネットワーク（格子型と放射型）を対象にして，計算効率と収束率という面からSSEの有用性を検証した．大規模ネットワーク上におけるSSEの有用性については，今後の課題にしたい．

謝　辞：本研究を遂行するに当り，ウエスコ土木技術振興基金の助成を受けた．また，国際航業株式会社の沖本洋人氏にはプログラムの開発等において多大の協力を得た．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 飯田恭敬：最適ネットワークの構成手法，土木学会論文報告集，No.241，pp.135～144，1975.
2) 西村昂，日野泰雄：最適ネットワークに関する一考察，土木学会論文報告集，No.250，pp. 85～97，1976.
3) 枝村俊郎，森津秀夫：最適交通ネットワーク問題の厳密解法と近似解法，土木学会論文報告集，No.262，pp.113～127，1977.
4) 朝倉康夫：交通混雑を考慮した最適道路網計画モデルとその適用，土木計画学研究・論文集，No.2，pp.157～164，1985.
5) 土木学会土木計画学研究委員会編：交通ネットワークの分析と計画；最新の理論と応用，土木計画学講習会テキスト，No.18，1985.
6) 吉崎収：道路整備優先順位決定手法の検討，オペレーションズ・リサーチ，No.3，pp.223～225，1985.
7) 田村亨，杉本博之，上前孝之：遺伝的アルゴリズムの道路整備優先順位決定問題への適用，土木学会論文集，No.482/Ⅳ－22，pp.37～46，1994.
8) 清田勝，田上博，角知憲，出口近士：工事による混雑を考慮した道路整備のグループ化とその優先順位に関する研究，土木学会論文集，No.494/Ⅳ－24，pp.63～70，1994.
9) 田上博，清田勝，樗木武：グループ内の施工パターンを内生化した道路整備の優先順位決定手法に関する研究，土木計画学研究・論文集13，PP.703～710，1996.
10) Stuart, B. B and Averill, M. L：*The Art and Theory of*

Dynamic Programming, Academic Press,1977.
11) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム(2)，産業図書，1995.
12) 相澤彰子：スキーマ貪欲な遺伝的探索アルゴリズムの構成，電子情報通信学会論文誌，Vol. J78 DII No.1，PP.94～104，1995.
13) 杉田洋：無理数回転による疑似乱数生成，京都大学数理解析研究所講究録915，数理計算アルゴリズムの現状と展望Ⅱ，pp.146～156，1995.

(1996.11.28受付)

A METHOD FOR DETERMINING THE GROUPS OF ROAD SEGMENTS TO BE SIMULTANEOUSLY CONSTRUCTED, THE PRIORITY BETWEEN THEM AND CONSTRUCTION PATTERN CONSIDERING THE DISUTILITY UNDER CONSTRUCTION

Hiroshi TANOUE, Masaru KIYOTA,Takeshi CHISYAKI and Tomonori SUMI

This paper describes a method to determine the groups of road segments to be simultaneously constructed, the priority between them and the construction pattern considering the disutility under construction. The dynamic programming and the stochastic schimata exploiter are utilized for an optimization procedure. The mathematical modeling of the problem and its solution technique are emphsized. An example problem is included and illustrated for showing the applicability of these models. The results indicate that the proposed methods are useful for the multi-stage determination problem such as the road network planning.