土木学会論文集 No.550／V-33，155-161，1996.11

路面状態量をネットワークとした 舗装修繕計画の最適化

大塚　勝[1]・武山　泰[2]・福田　正[3]

[1]学生員　東北大学大学院情報科学研究科博士課程前期　(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)
[2]正会員　工博　東北大学大学院情報科学研究科講師　(同上)
[3]フェロー会員　工博　東北大学大学院情報科学研究科教授　(同上)

ネットワーク型舗装管理システムについて，個々の道路区間を対象にするのではなく，交通条件と路面状態によってグループ化し，これらをネットワークとして取り扱うことによって，実用的な舗装管理システムを構築した．本システムにおいては，最適化手法として線形計画問題の一つの解法である最小費用流に基づくアルゴリズムを適用することによって，計算の効率化を図った．

Key Words : *pavement management system, Markov probability, life cycle cost, minimum cost flow*

1. はじめに

ネットワーク型舗装管理システムは，管理する道路区間群全体のライフサイクルコストが最小になるように，個々の道路区間の修繕計画を決定するものである．ここで道路区間とは，一般に同一の舗装構造，交通条件にある連続した道路区間とされている．

しかし，このように個々の道路区間をネットワーク型として舗装管理システムを取り扱う場合，最適化のための計算量が膨大になる．またこのような固定的な道路区間の場合，舗装の破損遷移の不規則性を考慮することが困難である．

そのようなことから，D. A. Grivas ら[1)]，K. C. P. Wang ら[2)]は，舗装の破損遷移を確率論的に取扱い，その路面状態をいくつかのグループに分けた舗装群をネットワーク型として取り扱っている．本研究においてもこのような手法を採用することを試みた．そして舗装の破損遷移には，本研究においてはマルコフ確率[3)]を適用することにした．

ネットワーク型舗装管理システムにおける修繕計画の最適化手法には，線形計画法，整数計画法が用いられ，一般に列挙法による計算が行われるので，コンピュータの使用時間が膨大になる．従って舗装管理システムの実用化のためには，効率の良い最適化アルゴリズムが必要である．

本研究においては，輸送問題の解法として知られる最小費用流に基づくアルゴリズム[4)]を利用することを試みた．これは各リンクが容量と単位流量あたりの費用係数をもつネットワークにおいて，いくつかの流出点からいくつかの流入点へ，指定された流量を最小費用で流す問題の解を与えるものである．

表―1　路面状態のランクとPSI

路面状態	PSI	平均PSI	備考
ランク1	2.5～	3.5	良好
ランク2	1.5～2.5	2.0	劣化進む
ランク3	～1.5	1.0	要修繕

2. システムの構成

(1) 路面状態の遷移

本研究では，管理の対象となる舗装全体を，交通条件と舗装の路面状態が等しいいくつかのグループに分割した舗装群として捉え，これらをネットワークとした舗装管理システムを構築する．交通条件はアスファルト舗装要綱[5)]の分類によるB,C,D交通の3種類とした．舗装の路面状態については，簡潔のために本研究では表―1に示す3ランクとした．

路面状態の年間遷移は，次のマルコフ確率によって表す．例えば，ランク2にある路面状態が次年度もランク2である確率はp_{22}，ランク3に遷移する確率はp_{23}である．なお，各行の和は，1.0である．

$$\mathbf{p}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \tag{1}$$

修繕によって，路面状態はランク1に回復するとした．また，修繕を考慮した年度間の路面状態の遷移の関係は次のように表される．

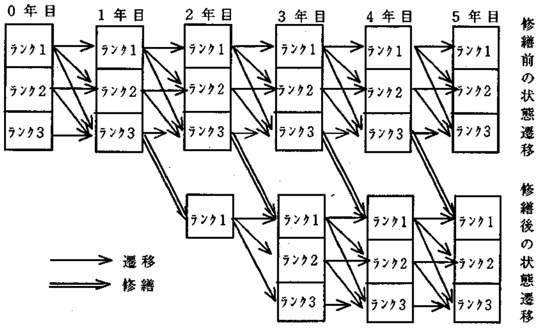


図-1　路面状態の遷移

i′ =1 の場合

$$X_{i'j}(m)=\sum_{i=1}^{3}\left\{X_{ij}(m-1)-Y_{ij}(m-1)\right\}\cdot p_{ii'}^{j}+\sum_{i=1}^{3}Y_{ij}(m-1) \quad (2)$$

i′ =2, 3 の場合

$$X_{i'j}(m)=\sum_{i=1}^{3}\left\{X_{ij}(m-1)-Y_{ij}(m-1)\right\}\cdot p_{ii'}^{j} \quad (3)$$

ここで，

i：舗装の路面状態で，1=ランク 1，2=ランク 2，3=ランク 3 とした（表ー1）．

j：1=B 交通，2=C 交通，3=D 交通，なお交通区分は大型車交通量によって区分されている．

$p_{ii'}^{j}$：j 交通において，ランク i の舗装が，次年度にランク i′ に遷移する確率

$X_{ij}(m)$：m 年度における，j 交通，ランク i に分類される道路延長(km)

$Y_{ij}(m)$：m 年度における，j 交通，ランク i において，修繕される道路延長(km)

m：解析年度

修繕前の路面状態の遷移と，修繕後の路面状態の遷移の関係を，図ー1 に示す．ここでは，路面状態はランク 3 において修繕を行うものとしたが，年度予算の制約によりランク 3 の路面状態が全て修繕されるわけではない．

(2) 定式化

解析期間におけるネットワーク全体のライフサイクルコストを最小にするように，修繕計画を決定する．このことを定式化すると，式(4)のようになる．ここで，ライフサイクルコストは，解析期間における修繕費用，利用者費用，管理費用の合計と定義する．なお解析期間は，線形計画法に基づく舗装管理システムの多くの事例 [1),2),6)] と同様に，ここでは 5 年とした．

$$z=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\sum_{m=1}^{5}\left\{\left[MC_{ij}(m)+UC_{ij}(m)\right]X_{ij}(m)+RC(m)Y_{ij}(m)\right\} \quad (4)$$

表ー2　利用者費用，管理費用

路面状態	利用者費用 (円/(km·台))	管理費用 (円/(m²·年))
ランク 1	0.25	60.2
ランク 2	2.20	103.2
ランク 3	4.34	129.0

ここで，

Z：ライフサイクルコスト

$MC_{ij}(m)$：m 年度における j 交通，ランク i の管理費用

$UC_{ij}(m)$：m 年度における j 交通，ランク i の利用者費用

$RC(m)$：m 年度の修繕費用

(3) 制約条件

解析期間の m 年度における修繕予算を RB(m) とすると，次の制約条件を付けるものとした．

$$\sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{3}RC(m)\cdot Y_{ij}(m)=RB(m) \quad (5)$$

ここで

$RB(m)$：解析期間の m 年度に交付される修繕予算の総和

与えられた年度予算はすべて年度内に使用することとし，次年度への繰越しは行わないとした．さらに，路面状態がランク 1，2 の舗装は修繕を行わない．また解析期間が比較的短いことから，修繕を行った舗装箇所の再修繕は行わないこととした．

(4) 費用評価

修繕工法は，ここではオーバーレイのみを対象とする．修繕費用はその費用である．利用者費用，管理費用については，舗装の路面状態を示す供用性指数 PSI の関数として表した安崎らの研究 [7)] をもとに，表ー1 に示した各ランクの平均 PSI を考慮し路面状態の各ランクに対し表-2 の値を用いることとした．

各年度の費用は，次式による現在価値係数 PWF_m によって現在価値に換算して評価した．

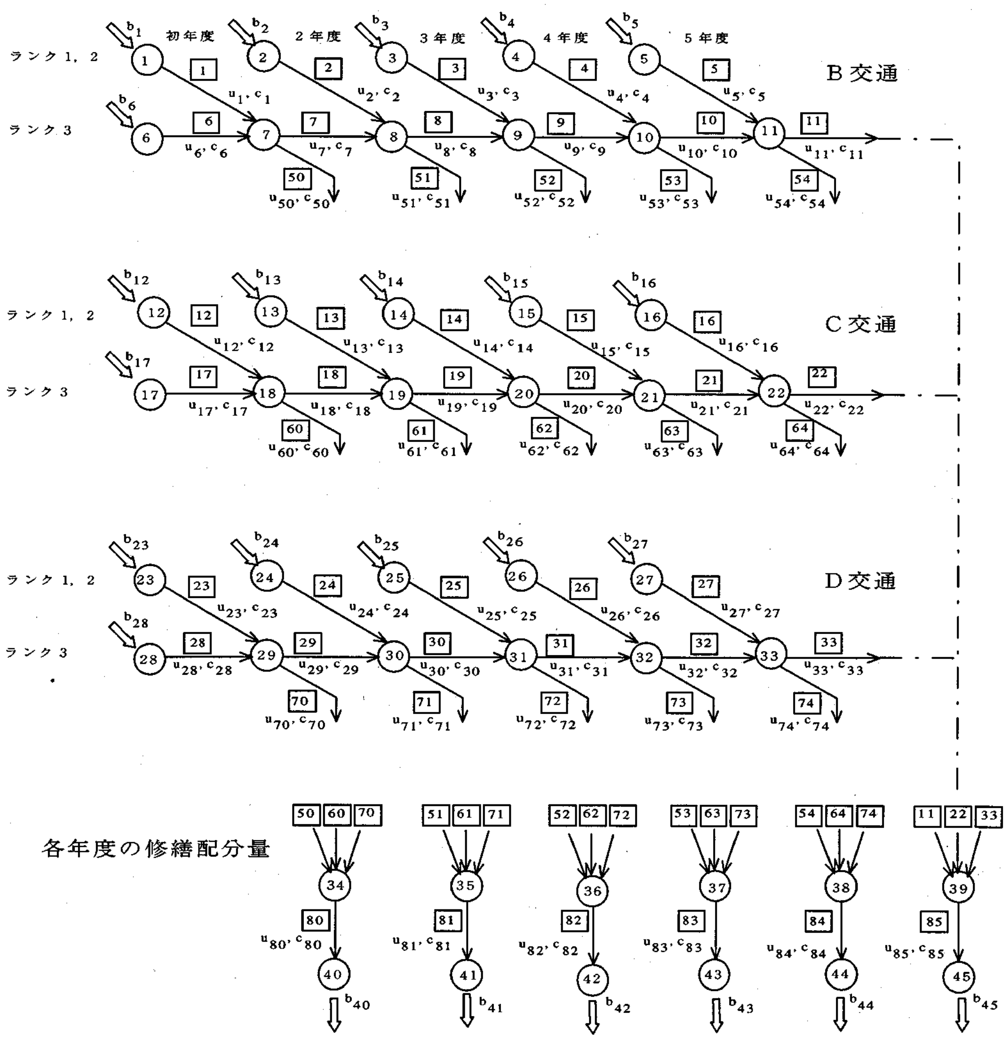
$$PWF_m=\frac{1}{(1+R)^m} \quad (6)$$

ここで，

R：割引率

3. 最小費用流による最適化

式(5)は線形計画問題であるが，決定変数が多く，通常の解法であるシンプレックス法で取り扱うことは極めて困難である．そのようなことから，線形計画法に基づく舗装修繕計画の最適解を求めるには，一般に列挙法が用いられている [1),2),6),8)]．しかし列挙



図−3　修繕計画決定のための最小費用流ネットワーク

法による場合，アルゴリズムは単純であるが膨大なコンピュータの計算時間を必要とする．そこで本研究では，線形計画問題の解法の一つである最小費用流 [4]による最適化のアルゴリズムを適用することによって，計算の効率化を試みた．

最小費用流による最適化のアルゴリズムは，容量が u_k （$k=1,2,\cdots,n$：リンク番号），単位流量あたりの費用係数 C_k をもつリンク（図−2）より構成されるネットワークにおいて，ノード i の流入出量 b_i およびリンク k の容量 u_k の制約を満たし，かつ全リンクの費用和を最小にする流量 x_k を求めるものである．

このアルゴリズムを舗装の修繕計画に適用する場合，行(row)を路面状態，列(column)を年度推移としたネットワークとし，リンク容量 u_k を予算制約（修繕量）に，費用係数 C_k を費用の合計（=利用者費用+管理費用+修繕費用）とすればよい．

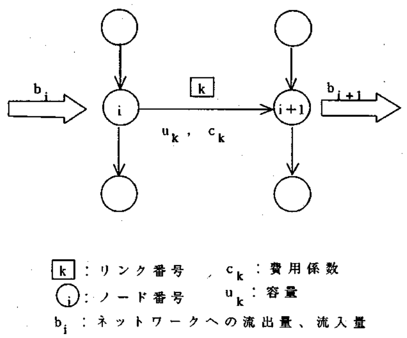


図-2　最小費用流ネットワークの構成リンク

図―3はこのようにして構成された，修繕計画決定のための最小費用流ネットワークである．ここで，図―3の費用係数 c_k，容量 u_k，流出入量 b_i について以下に説明する．

a）費用係数 c_k

c_1～c_5：B交通においてランク1,2に属する舗装のうち，1～5年目にランク3へ遷移する舗装の利用者+管理費用

c_{12}～c_{16}：C交通においてランク1,2に属する舗装のうち，1～5年目にランク3へ遷移する舗装の利用者+管理費用

c_{23}～c_{27}：D交通においてランク1,2に属する舗装のうち，1～5年目にランク3へ遷移する舗装の利用者+管理費用

c_6～c_{11}：B交通において，修繕されずその年からランク3のまま次年度に繰り越しされる舗装の利用者+管理費用

c_{17}～c_{22}：C交通において，修繕されずその年からランク3のまま次年度に繰り越しされる舗装の利用者+管理費用

c_{29}～c_{33}：D交通において，修繕されずその年からランク3のまま次年度に繰り越しされる舗装の利用者+管理費用

c_{50}～c_{54}：B交通において，各年度の修繕費用+利用者+管理費用（なお計算上，それ以降の解析期間終了までの利用者+管理費用も含まれる．）

c_{60}～c_{64}：C交通において，各年度の修繕費用+利用者+管理費用（なお計算上，それ以降の解析期間終了までの利用者+管理費用も含まれる．）

c_{70}～c_{74}：D交通において，各年度の修繕費用+利用者+管理費用（なお計算上，それ以降の解析期間終了までの利用者+管理費用も含まれる．）

c_{80}～c_{85}：ダミーリンク

b）容量 u_k

u_{50}～u_{54}, u_{60}～u_{64}, u_{70}～u_{74}：各年度の修繕予算より配分決定される修繕量

u_{80}～u_{85}：各年度の修繕予算

本解析事例の場合，その他の u_k については容量制約を与えない．

c）流入出量 b_i

b_1～b_5：B交通においてランク1,2に属する舗装のうち，1～5年目にランク3へ遷移する舗装量

b_{12}～b_{16}：C交通においてランク1,2に属する舗装のうち，1～5年目にランク3へ遷移する舗装量

b_{23}～b_{27}：D交通においてランク1,2に属する舗装のうち，1～5年目にランク3へ遷移する舗装量

b_6：B交通で初期状態にランク3に属する舗装量

b_{17}：C交通で初期状態にランク3に属する舗装量

b_{28}：D交通で初期状態にランク3に属する舗装量

b_{40}～b_{44}：各年度における各交通区分への配分予算の合計，すなわち修繕予算に等しい．

b_{45}：解析期間終了まで修繕されない舗装量

表―5　対象とする舗装の初期状態

交通区分	ランク1	ランク2	ランク3	合計
B交通	70km	35km	15km	120km
C交通	30km	40km	10km	80km
D交通	10km	15km	5km	30km

表―6　全交通量

B交通	C交通	D交通
5000	9000	13000

単位（1台／1方向・1車線・1日）

各交通区分において，路面状態はマルコフ確率に従った路面状態に遷移する．そして各交通区分においてランク3の路面状態が修繕計画の対象になる．各交通区分において，修繕すべき路面状態は，年度予算の制約のもとで費用の合計を最小にするリンクの経路が図―3のネットワーク域で決定される．

4. 解析事例

次に，本システムを解析事例によって説明する．

解析期間:5年

総延長:230km（内訳は表―5のとおり）

車線数:2（片側1車線）

車線幅員:3.5m

修繕工法：オーバーレイ（厚さ5cm）

修繕費用：4000円/m^2

割引率：8%（R=0.08）

利用用者費用，管理費用：表―2のとおりとする．

修繕予算の交付：毎年度に一定予算を交付する．

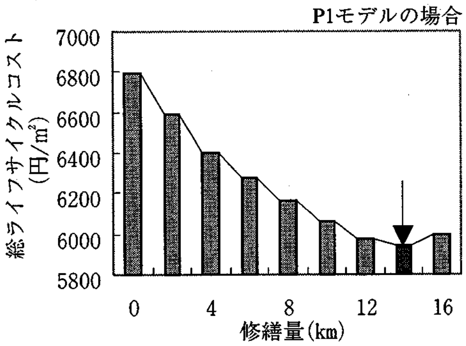
初年度における舗装の初期状態：表―5のとおりとする．

各交通区分における全交通量：表―6のとおりとする．なお，交通伸び率は0とした．

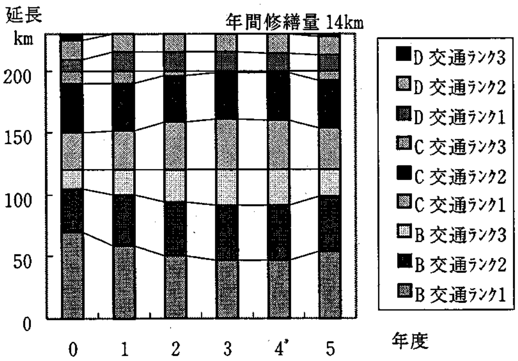
路面状態の年間遷移を表すマルコフ確率について著者らの研究[3)]を参考に，次の3種類のモデルを設定した．

モデル1
$$P1=\begin{bmatrix}0.85 & 0.15 & 0.00\\ 0.00 & 0.85 & 0.15\\ 0.00 & 0.00 & 1.00\end{bmatrix}$$

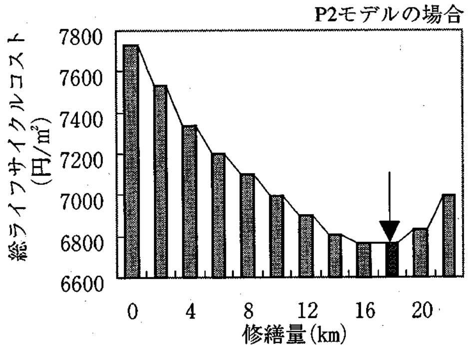
モデル2
$$P2=\begin{bmatrix}0.80 & 0.20 & 0.00\\ 0.00 & 0.80 & 0.20\\ 0.00 & 0.00 & 1.00\end{bmatrix}$$



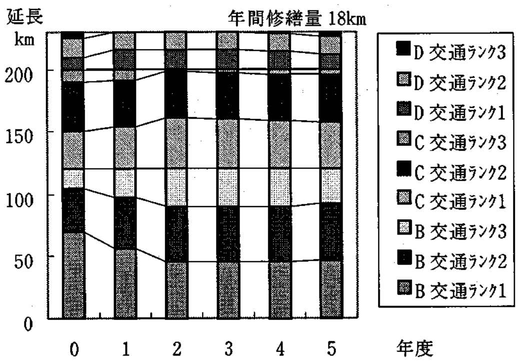
図―4　最適修繕量と総ライフサイクルコスト(P1)



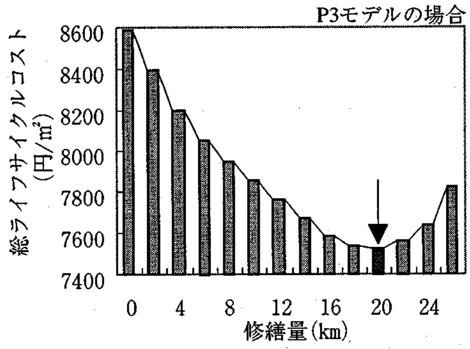
図―7　路面状態の遷移（モデル P1 の場合）



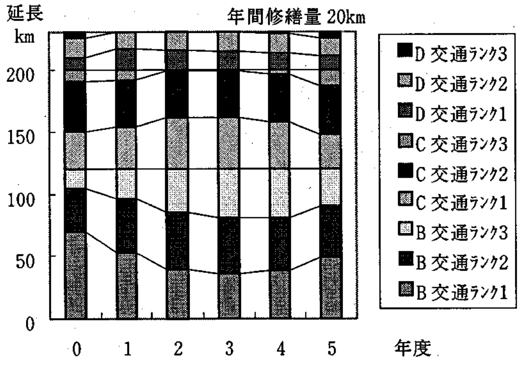
図―5　最適修繕量と総ライフサイクルコスト(P2)



図―8　路面状態の遷移（モデル P2 の場合）



図―6　最適修繕量と総ライフサイクルコスト(P3)



図―9　路面状態の遷移（モデル P3 の場合）

モデル 3

$$P3=\begin{bmatrix}0.75 & 0.25 & 0.00\\ 0.00 & 0.75 & 0.25\\ 0.00 & 0.00 & 1.00\end{bmatrix}$$

(1)　最適修繕量

解析結果を図―4,5,6 に示す．年度予算，すなわちその年度内に修繕が可能な修繕量が少なければ，路面状態の悪い舗装が多くなり，一方，利用者費用+管理費用が増えることになる．また修繕量が多ければ，修繕費用そのものが増加することになる．したがって，総ライフサイクルコストを最小にする最適修繕量（最適修繕予算）が存在する．

すなわち，最も総ライフサイクルコストが小さいのは，年度予算を修繕すべき道路延長で表すと，14～20km の間に存在する．また，P1→P2→P3 と劣化進行が早いモデルの場合ほど最適修繕量（最適修繕予算）は増加する．

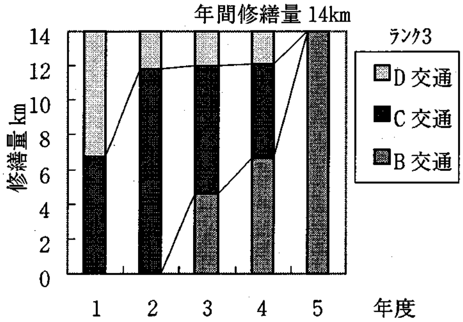


図-10　各交通区分への修繕量の配分　（モデル P1）

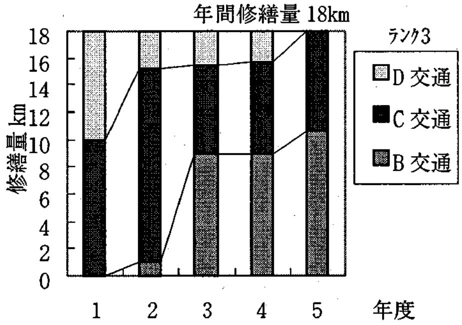


図-11　各交通区分への修繕量の配分　（モデル P2）

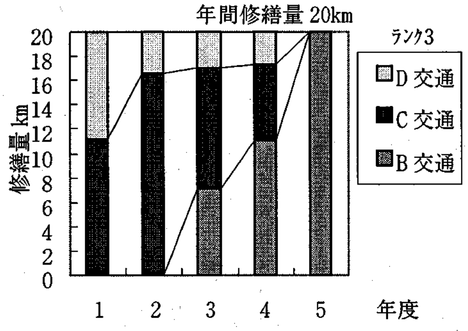


図-12　各交通区分への修繕量の配分　（モデル P3）

(2)　**路面状態の遷移**

最適修繕量における，ネットワーク全体の路面状態の遷移状況を，図一7,8,9 に示した．ここでは，劣化の進行に若干の差があるが，おおむね舗装の路面状態は劣化と修繕の均衡が保たれている．

図一10,11,12は最適修繕量として与えられた年間修繕予算（修繕量）を各年度においてどの交通区分に配分すべきかを示している．予算配分は全てランク 3 の路面状態を対象としているが，交通条件は必ずしも通行量の多い D 交通の舗装から優先的に投入するのではなく，B 交通，C 交通においても予算を投入すべきことを示している．

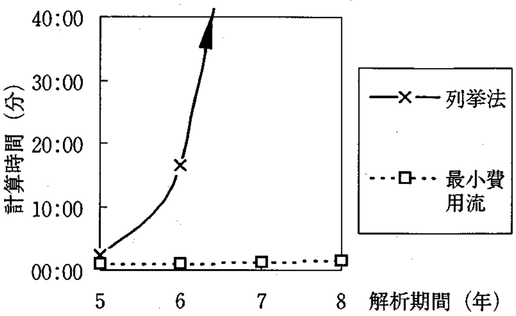


図-13　解析手法による計算時間

(3)　**コンピュータによる計算時間**

解析事例について，列挙法による場合と，最小費用流アルゴリズムを適用した場合の計算時間を比較すると，前者の場合は，約 2 分，後者の場合は約 1 分であった．さらに，同問題の解析期間を延長して計算すると，列挙法の場合は指数関数的に計算時間が増加するが，最小費用流アルゴリズムの場合では，計算時間の増加は線形的な微増であった(図一13)．なお，列挙法による計算で，解析期間 7 年の場合には，2 時間弱を要した．このことは，解析期間を拡大し，舗装の修繕回数の制限数を増やした場合においても，最小費用流アルゴリズムは極めて有効であることを示している．

5.　むすび

ネットワーク型の舗装管理システムにおいては，一般に複数の道路区間を管理の対象としているが，本研究においては，これを舗装の交通区分と路面状態量に基づいたネットワークを対象としたシステムとして構築した．このようなネットワーク化によって，特に市街地のように大量の道路区間を管理対象とする場合にも適用することができる．

本研究では最適化手法に，最小費用流によるアルゴリズムを適用した．これによって，通常用いられる列挙法の場合と比較して，コンピュータの計算時間を大幅に短縮することが可能であることを示した．

道路管理システムには，本研究で示した最適化システムのほかに，データバンクシステムの付加が必要で，これによって本システムによりマクロ的に示された最適修繕予算を，各道路区間に配分することが可能となるであろう．またここで用いたマルコフ破損遷移確率を定める際にもデータバンクが不可欠であり，データバンクシステムの今後より一層の整備が望まれる．

参考文献

1) Dimitri A.Grivas, Venkatesh Ravirala, and B. Cameron Schultz: State Increment Optimization Methodology for

Network-Level Pavement Management, *Transportation Research Record*, No.1397, pp.25～38, 1993.
2) Kelvin.C.P.Wang, John Zaniewski, and James Delton, Analysis of Arizona Department of Transportation's New Pavement Network Optimization System, *Transportation Research Record*, No.1455, pp.91～100, 1994.
3) 武山泰,嶋田洋一,福田正：マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム,土木学会論文集,NO.420/V-13, pp.135～141, 1990.
4) 茨木俊秀,福島雅夫:FORTRAN77最適化プログラミング,岩波書店, 1991.
5) 日本道路協会,アスファルト舗装要綱, 1992.
6) 建設省：舗装の管理水準と維持工法に関する総合的研究,第41回建設省技術研究会報告, 1987.
7) 安崎裕,片倉弘美,伊佐真秋：舗装の供用性と車両走行費用に関する検討,舗装,Vol.25, No.3, pp.11～15, 1990.
8) 大塚勝,武山泰,福田正：街路舗装群を対象とした舗装修繕計画の最適化システム, 第4回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.121～126, 1995.

(1996.2.1 受付)

NETWORK-LEVEL OPTIMAL PAVEMENT REPAIR SYSTEM BASED ON THE PAVEMENT CONDITION RATINGS

Masaru OTSUKA, Yasushi TAKEYAMA and Tadashi FUKUDA

A network-level pavement management system for asphalt pavement was developed. In this study, pavement sections were categorized into some groups based on their traffic conditions and surface states, then these groups were dealt as a pavement network. An optimization methodology was formulated based on the minimum cost flow algorithm. This system performs quite well even for large networks and can be applicable for practical management system.