

# ニューロパフォーマンスモデルを用いた プロジェクト型舗装管理システム

堀木賢一<sup>1</sup>・福田 正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生員 東北大学大学院情報科学研究科博士課程前期 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

<sup>2</sup>正会員 工博 東北大学大学院情報科学研究科教授

東北地方におけるアスファルト舗装のデータを用いて、 $T_A$ 、大型車交通量、設計 CBR、表層材料の 4 つの入力ユニットで MCI を出力するニューロパフォーマンスモデルを開発した。そしてこのモデルを用いて、プロジェクト型舗装管理システムを構築した。ニューロパフォーマンスモデルは、観測データによって容易に修正を行うことができるので、舗装管理システムに適している。

**Key Words:** neural network, performance model, pavement management system, dynamic programming

## 1. はじめに

プロジェクト型舗装管理システム (Project Level Pavement Management System) は、1 つの工事区間 (Project) における舗装の初期設計、維持、修繕などの経営行動の最適化を対象としている。このような舗装管理システムに組み込まれる舗装のパフォーマンスモデルは、システムの中核機能をなすもので、従来は決定論的モデル、確率論的モデルなどが一般に用いられている。例えば、前者は舗装の観測データの回帰分析によって作成され、また後者の場合には、これらのデータについてマルコフ遷移確率を用いたモデルなどが試みられている<sup>1)2)</sup>。いずれにせよ、これらのパフォーマンスモデルの場合、その構築ならびに修正作業は複雑であるという欠点がある。

著者らは、東北地方におけるアスファルト舗装の観測データを用いた、ニューラルネットワークによるパフォーマンスモデル (以下、本論文ではニューロパフォーマンスモデルと呼ぶ) に関する研究を既に報告した<sup>3)</sup>。その際のパフォーマンスモデルでは単純な 3 入力ユニット構造としたが、本研究においては、舗装管理システムに組み込む実用的なアスファルト舗装のパフォーマンスモデルとして、 $T_A$ 、設計 CBR、累積大型車交通量、表層材料の種類に関する 4 ユニット入力構造とし、MCI を出力させるニューロパフォーマンスモデルを開発した。

本研究における舗装管理システムにニューロパフォーマンスモデルを適用する理由は、このモデルはその地域の舗装の観測データを用いて容易に作成できること、ま

た新しいデータによって、その修正作業が極めて容易な可塑性を有することである。本論文においては、このニューロパフォーマンスモデルを組み込んだプロジェクト型舗装管理システムとその有用性についての検討結果を報告する。

## 2. ニューロパフォーマンスモデル

### (1) 概要

本研究で用いるニューラルネットワークは階層型ネットワークで、このバックプロパゲーション法は次のとおりである<sup>3)4)5)</sup>。まず、図-1 に示すような  $n$  層からなるネットワークを考える。入力層に入力された各ユニットの情報は、結合ウェイトと呼ばれる重みをつけられて次の層に伝わる。最終層で出力された情報は望ましい出力 (教師信号) と比較され、両者の差の 2 乗よりなる評価関数  $E$  が小さくなるように結合ウェイトは修正される。

すなわち、パターン  $p$  を提示したときの第  $k$  層 ( $k=2, 3, \dots, n$ ) の各ユニットの入出力関数を次のように表す。

$$o_{pj}^k = f_j^k(i_{pj}^k) \quad (1)$$

$$i_{pj}^k = \sum_{i=1}^{N_{k-1}} w_{ij}^{k-1,k} o_{pi}^{k-1} + \theta_j^k \quad (2)$$

ここで、

$o_{pj}^k$ : パターン  $p$  における第  $k$  層の  $j$  番目のユニットの出力値

$i_{pj}^k$ : パターン  $p$  における第  $k$  層の  $j$  番目のユニットの入力値

$w_{ij}^{k-1,k}$ : 第  $k-1$  層の  $i$  番目のユニットと第  $k$  層の第  $j$

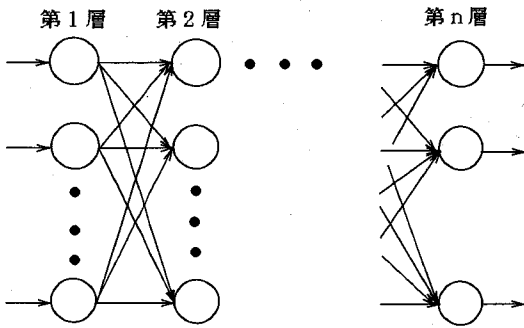


図-1 ニューラルネットワークモデル

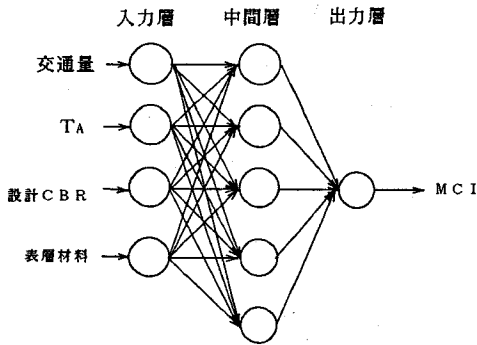


図-2 本研究で用いるニューラルネットワークモデル

番目のユニットとの結合ウェイト

$f_j^k$ : 第  $k$  層の  $j$  番目のユニット入出力関数

$\theta_j^k$ : 第  $k$  層の  $j$  番目のユニットのしきい値

$N_k$ : 第  $k$  層のユニット数

教師信号と出力値の 2 乗誤差  $E_p$  および評価関数  $E$  を次のように表す。

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_p} (t_{pi}^p - o_{pi}^p)^2 \quad (3)$$

$$E = \sum_p E_p \quad (4)$$

ここで

$t_{pi}^p$ : パターン  $p$  における最終層  $n$  層のユニット  $i$  の教師信号値

## (2) 入力と出力

アスファルト舗装のパフォーマンスモデルとして図-2に示すように、入力層4ユニット、中間層5ユニット、出力層1ユニットとして学習を行った。

入力は、 $T_A$ 、累積大型車交通量、表層材料の種類、設計CBRの4ユニットとし、出力ユニットはMCIとした。学習の対象としたのは東北地方の2車線道路15箇所103個のデータである<sup>3),9)</sup>。なおニューラルネットワークの場合、表層材料のような質的データは、それぞれの種

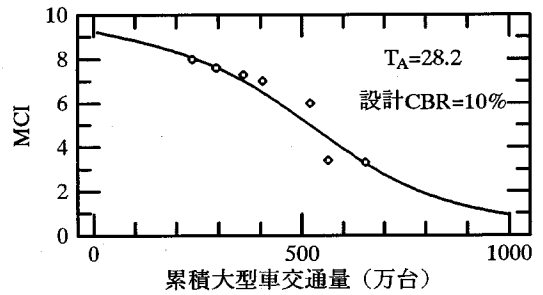


図-3 実測値と予測パフォーマンスの例

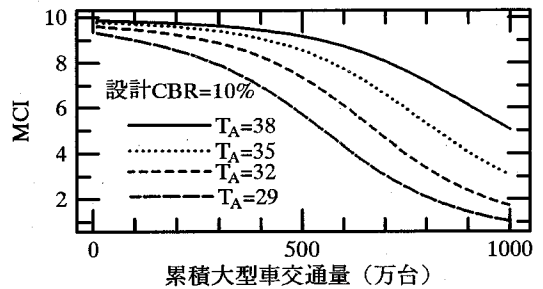


図-4  $T_A$  によるパフォーマンスの違い

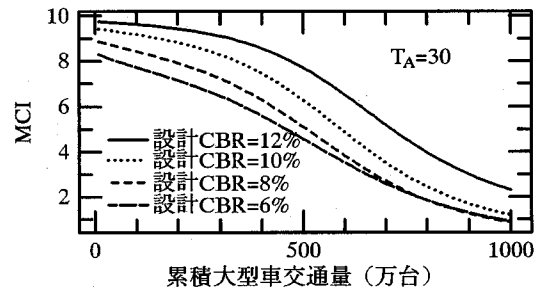


図-5 設計CBRによるパフォーマンスの違い

類ごとに仮の数値を与えることによって入力することができる。

## (3) 出力結果

以上のデータを30000回入力学習させたところ評価関数  $E$  は0.0822となった。このときの出力値と実測値の相関係数は0.80であり、入力層3ユニット構造の場合<sup>9)</sup>より若干小さな値になった。

図-3は実測値と予測パフォーマンスの比較の1例である。予測パフォーマンスは $T_A$ 、設計CBR、表層材料を指定して、累積大型車交通量を入力した場合のMCIの変化を表している。図-4、図-5は、それぞれ $T_A$ 、設計CBRに関するパフォーマンスの例を表している。

前述のように、本研究においては、アスファルト舗装のパフォーマンスモデルの実用性を考慮して4ユニット

構造とし、特に表層材料を設計条件として入力できるようにした。これはわが国におけるアスファルト舗装の破損原因に、構造条件以外に表層の磨耗、流動など表層材料に原因する破損現象があることを考慮したものである。しかしながら、本研究で適用した東北地方のデータの場合では、表層材料の種類によるパフォーマンスの明確な相違を見いだせなかった。これは使用したデータが表層材料の種類について、地域的偏りがあったことによるものと思われる。したがって、本研究における解析事例では、データ数が最も多く信頼性の高いと考えられる細粒度アスファルト混合物(13)の場合のパフォーマンスを用いることにする。

### 3. プロジェクト型舗装管理システム

#### (1) 動的計画法による最適化

本研究では多段階意志決定に関する最適化手法として、動的計画法 (Dynamic Programming) を用い、対象となる舗装の解析期間を設定して最適修繕計画を決定することにする。ここでは修繕工法はオーバーレイのみとする。

経済評価は現在価値法で行う。これを定式化すると次のようになる<sup>7)</sup>。

$$f_n(i) = \min \begin{cases} c(i) \frac{1}{(1+r)^n} + f_{n+1}(i+1) & \text{修繕する場合} \\ (R+c(1)) \frac{1}{(1+r)^n} + f_{n+1}(2) & \text{修繕しない場合} \end{cases} \quad (5)$$

ここで

$f_n(i)$ :  $i$  年目の舗装を  $n$  年以降最適に管理するための費用

$c(i)$ :  $i$  年目の舗装の維持管理費用と利用者費用の和

$R$ : 修繕費用

$r$ : 割引率

#### (2) 解析事例

##### a) ライフサイクルコスト

舗装の費用解析の対象となる期間を解析期間という。本研究ではこの解析期間を舗装のライフサイクルとみて、この解析期間による総費用、すなわち道路管理者費用と利用者費用の合計を、その舗装のライフサイクルコストとした。

道路管理者費用として、初期建設費用、修繕費用、日常の維持管理費用の3つを考える。また、利用者費用としては車両走行費用(燃費)を考える。このうち日常の維持管理費用と車両走行費用については、建設省で行われた研究<sup>8)</sup>を基に、図-6、図-7のような回帰を行っ

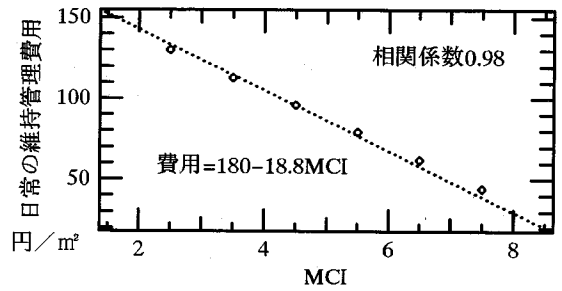


図-6 維持管理費用とMCIの関係

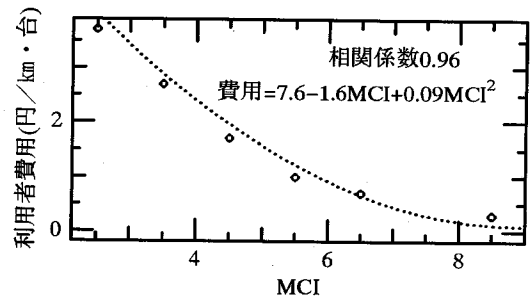


図-7 利用者費用とMCIの関係

た。なお利用者費用については舗装の状態が最も良好な場合を基準とした。

また、初期建設費用  $IC$  (円/㎡) と  $T_A$  については次の関係を用いる<sup>7)</sup>。

$$IC = 356.64 T_A - 382.20 \quad (6)$$

オーバーレイは厚さ 5 cm とし、修繕費用は 5000 (円/㎡) とし解析を行った。

##### b) 解析期間

本研究では解析期間を 15 年、20 年、30 年としてライフサイクルコスト解析を行った。

##### c) 割引率

これは将来の投資を現在の価値に割り引くための値であり、金利および維持修繕計画の不確実性を考慮して政策的に決められる。ここでは 4、6、8、10% とし解析を行った。

##### d) オーバーレイ後のパフォーマンス

同じ交通条件下では、オーバーレイ後の舗装は新設のものに比べて破損の進行が早いことからオーバーレイ後の  $T_A$  と新設時の舗装の  $T_{A0}$  との関係は、次のように表されるものとした<sup>7)</sup>。

$$T_A = 0.8 T_{A0} + d_0 \quad (7)$$

ここで

$d_0$ : オーバーレイの厚さ (cm)

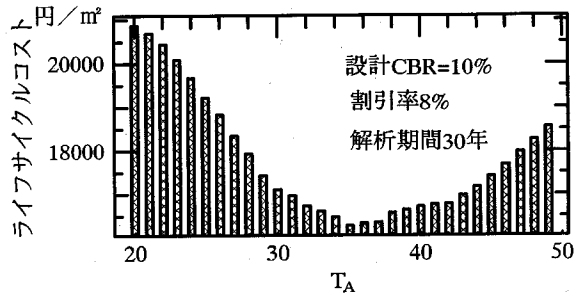
##### e) 解析条件

設計 CBR: 6, 8, 10, 12 (%)

対象交通区分: B 交通, C 交通, D 交通とし、それぞれの

表一 交通条件

交通区分	全交通量 (台/日)	大型車交通量 (台/日)
B交通	5000	600
C交通	9000	2000
D交通	13000	3000



図一 T<sub>A</sub>とライフサイクルコストとの関係

表二 設計CBRによる設計T<sub>A</sub>, 最適T<sub>A</sub> (C交通の場合)

CBR (%)	設計T <sub>A</sub>	最適T <sub>A</sub>
6	36	41
8	34	38
10	31	35
12	29	32

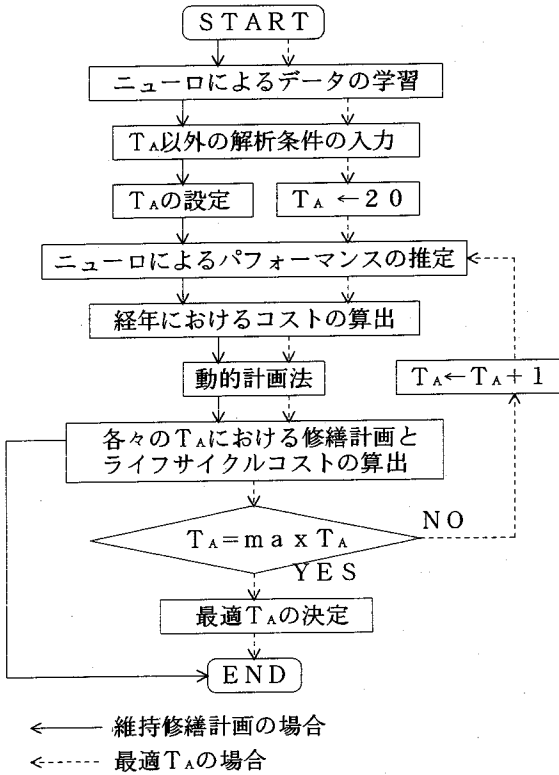
ちライフサイクルコストを最小とするT<sub>A</sub>を最適T<sub>A</sub>と定義すれば、これは次のように求められる<sup>7)</sup>。図一8のフローチャートに従って新設時の舗装のT<sub>A</sub>=20~49におけるそれぞれの修繕計画の最適化を行い、最小ライフサイクルコストにおけるT<sub>A</sub>を求める。C交通、解析期間30年、割引率8%の場合について示したものが図一9である。この場合の最適T<sub>A</sub>は35である。

h) 設計T<sub>A</sub>と最適T<sub>A</sub>

提案したニューロパフォーマンスモデルを用いることによって、設計条件(終局MCI値、大型車交通量、設計CBR、表層アスファルト混合物の種類)に必要なT<sub>A</sub>を求めることができる。これは終局MCI値に対応する大型車交通量すなわち設計寿命を保証するT<sub>A</sub>であり、これを設計T<sub>A</sub>と呼ぶことにする。表二は、C交通の場合で表層材料が細粒度アスファルト混合物(13)、設計期間10年、終局MCIが4.0の場合の設計T<sub>A</sub>とg)で述べた最適T<sub>A</sub>を設計CBRに関して求めたものである。設計T<sub>A</sub>の数値はアスファルト舗装要綱<sup>9)</sup>による設計T<sub>A</sub>よりも大きい。その理由は、ここで用いた東北地方のデータは、スパイクタイヤによる摩耗の影響が大きいことによる。

表二の最適T<sub>A</sub>は、解析期間30年、オーバーレイ修繕費用5000円/m<sup>2</sup>の場合の値である。これを設計T<sub>A</sub>と比較すると最適T<sub>A</sub>は設計T<sub>A</sub>より4~5大きいことが分かる。

次にg)の事例において、設計T<sub>A</sub>と最適T<sub>A</sub>で初期設計を行った場合にどのような修繕計画の相違が見られるかを、MCIの推移で示したものが図一10である。この図においてMCIの上昇はその時期に修繕(オーバーレイ)を行うべきであることを示している。解析期間内におい



図一8 フローチャート

交通区分の1日あたりの交通量については表一の値を用いた。ここでは将来交通量の伸びは考慮しない。

T<sub>A</sub>: 20~49

オーバーレイ厚: 5 cm

表層材料: 細粒度アスファルト混合物(13)

f) 解析のフローチャート

図一8に本システムのフローチャートを示す。またニューラルネットワークによる舗装路面性状データの学習を行う。そして設計条件を入力し、T<sub>A</sub>に関して修繕計画の最適化を行い、その場合のライフサイクルコストを計算する。その際に舗装路面の評価値はニューロパフォーマンスモデルによって行う。

g) 最適T<sub>A</sub>

舗装の設計は初期設計費用だけではなく、供用後の維持、修繕の費用をも含めて検討する必要がある。すなわ

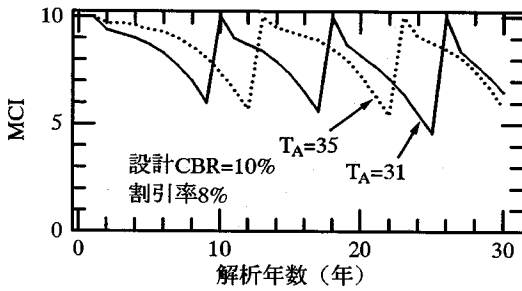


図-10 修繕計画による MCI の推移

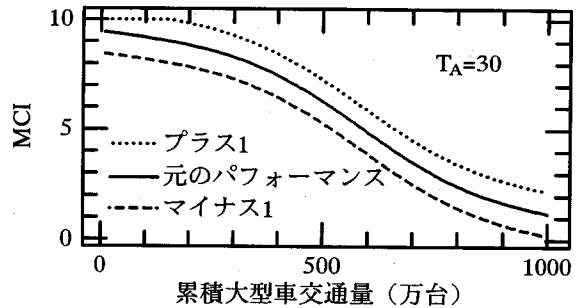


図-14 パフォーマンスモデルの変動

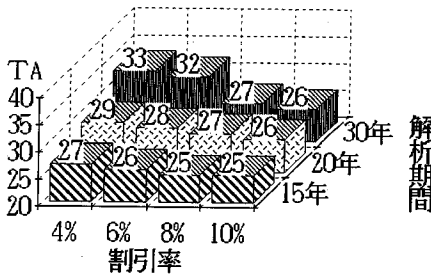


図-11 割引率による最適  $T_A$  の変化 (B 交通)

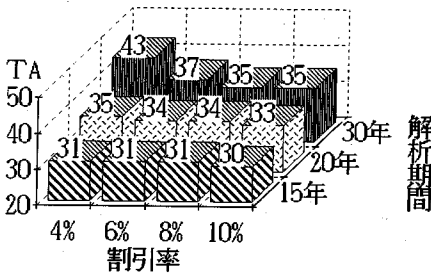


図-12 割引率による最適  $T_A$  の変化 (C 交通)

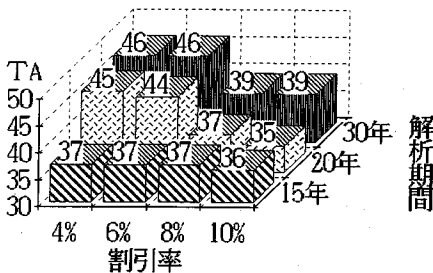


図-13 割引率による最適  $T_A$  の変化 (D 交通)

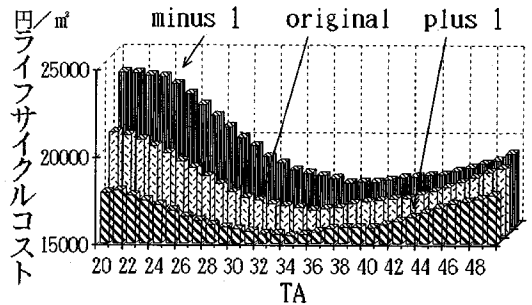


図-15 パフォーマンスの変動による感度分析

るかを、B, C, D 交通について設計 CBR=10%、修繕費用 5000 円/m<sup>2</sup> の場合について解析した。その結果は図-11～図-13 に示すとおりである。

これによると解析期間を長くすると最適  $T_A$  は大きくなる傾向があることが分かる。これは解析期間を長くすると、修繕の機会が多くなるので、ライフサイクルコストに含める修繕費用の比重が高くなるが、初期設計の  $T_A$  が大きくなる場合にはこの比重が低くなるためである。

一方、割引率が大きくなると最適  $T_A$  が小さくなる。これは割引率が大きくなると将来の修繕費用が現在価値としては小さく評価されるので、初期設計の  $T_A$  を小さくした方が有利になるためである。このような傾向は特に重交通である D 交通において解析期間が長くなるほど顕著になる。

#### j) パフォーマンスによる感度分析

既に設定されているニューロパフォーマンスモデルを実際のアスファルト舗装に適用する場合に、実際のパフォーマンスに若干の相違が生じる場合がある。このパフォーマンスの相違がライフサイクルコストに及ぼす影響について検討を行った。例えば図-14 に示すように設計 CBR=10% のパフォーマンスモデルについて、MCI 値が 1 だけ大きい場合と 1 だけ小さい場合で、ライフサイクルコストがどのように相違するかを調べたのが図-15 である。

て前者の場合には、後者の場合よりもオーバーレイの回数が 1 回多いことが分かる。

#### i) 設計条件による感度分析

アスファルト舗装の初期設計を示す最適  $T_A$  が、修繕費用、割引率、解析期間によってどのような影響を受け

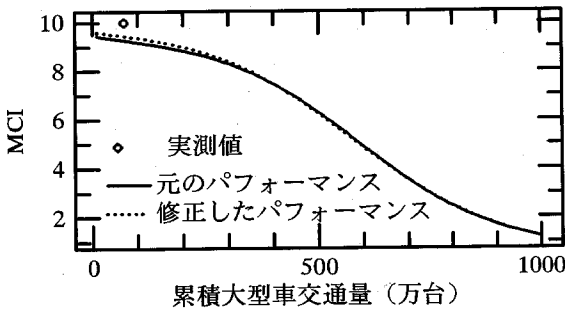


図-16 パフォーマンスの修正 (その1)

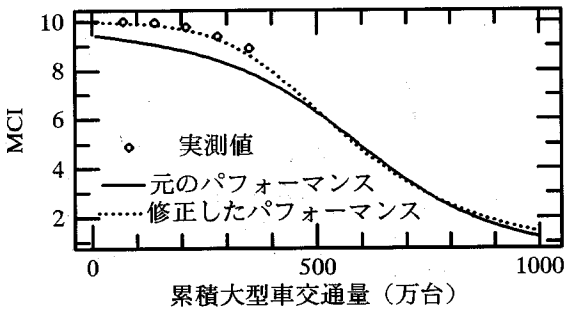


図-17 パフォーマンスの修正 (その2)

すなわち MCI が 1 だけマイナス側のパフォーマンスの場合にはライフサイクルコストは高く、1 だけプラス側のパフォーマンスの場合にはライフサイクルコストは低くなる。この傾向は  $T_A$  が小さい場合に顕著になる。最適  $T_A$  はマイナス側のパフォーマンスによる場合では大きくなる。

#### 4. 観測データによる修正

##### (1) パフォーマンスモデルの修正

ニューロパフォーマンスモデルは、新しい観測データによって容易に修正できる可塑性の性質を持っている。したがって、既に設定されているニューロパフォーマンスモデルを入手した観測データによって修正し、この修正パフォーマンスモデルを用いた舗装管理システムによって、舗装の修繕計画を修正することが可能である。

ここでは、j) の事例のパフォーマンスモデルを用いて説明を行う。このパフォーマンスモデルによって作成されたパフォーマンス曲線に対して、アスファルト舗装を交通に供用した後に MCI が 1 だけプラス側のデータが観測されるものとする。この第 1 回の観測データについては図-16 の○で示すとおりである。この場合の修正パフォーマンス曲線はこの観測データと観測時点以降の既に設定されているパフォーマンス曲線によって示されるデータを、ニューロパフォーマンスモデルに学習させ

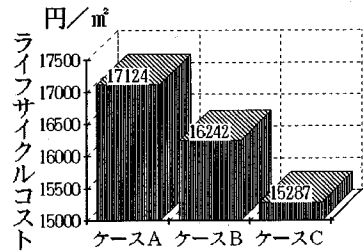


図-18 ライフサイクルコストの比較

ることによって図中の点線のように作成される。

その後、図-17 のように 5 回の観測データが補充された場合、同様にこれらの観測データと観測時点以降の設定されているパフォーマンス曲線によって得られる数値データによって、図中の点線のように修正パフォーマンス曲線が作成される。このように、利用できる観測データが少ない範囲ではパフォーマンス曲線の変化は小さいが、観測データが増えるに従ってその影響を強く受けた修正がなされる。

##### (2) 修繕計画の修正

図-17 に示すように観測データによってパフォーマンス曲線を逐次修正し、これを用いて修繕計画を修正する場合のライフサイクルコストの解析について説明する。解析条件は、解析期間 30 年、C 交通、設計 CBR = 10%、 $T_A = 30$ 、割引率 = 8% とする。既に設定されたパフォーマンス曲線を解析期間を通して用いた場合 (ケース A)、観測データによってこのパフォーマンス曲線を逐次修正する場合 (ケース B)、最初から MCI が 1 だけプラス側になると予想したパフォーマンス曲線を用いた場合 (ケース C) の 3 通りの事例について、ライフサイクルコストを解析する。

これらの 3 通りの場合のライフサイクルコストの解析結果は図-18 に示すとおりで、ケース C の場合が最も経済的であるが、現実にはこのような将来予測は困難であるし、また信頼性に欠けた修繕計画になる。しかしながら、ニューロパフォーマンスモデルの場合には、ケース B のように観測データによってパフォーマンス曲線を逐次修正することによって、ケース C に近づけた修繕計画を行うことが可能である。

#### 5. まとめ

アスファルト舗装の路面性状調査に関するデータを用いることによって、ニューラルネットワークによるパフォーマンスモデル (ニューロパフォーマンスモデル) を開発した。さらに、このモデルを用いることによって、動的計画法に基づくプロジェクト型舗装管理システムを

構築した。

ここで用いたニューロパフォーマンスモデルは、 $T_A$ 、大型車交通量、設計 CBR、表層材料の 4 つの入力ユニットにより MCI を出力する。このモデルを用いることによって、地域の特性に合致したアスファルト舗装の設計を行うことが可能である。また、このモデルを舗装管理システムに組み込むことによって、ライフサイクルコストを最小とするアスファルト舗装の設計と、その修繕計画を決定することができる。

ニューロパフォーマンスモデルの特徴は、新しい観測データを入力することによって、モデル自体を容易に修正できる可塑性の性質にある。舗装管理システムは本来、管理技術者とシステムとの対話方式で運用されるので、可塑性のあるニューロパフォーマンスモデルは、舗装管理システムに適していると言えよう。本研究においては、補充された観測データによって、このようなパフォーマンスモデルの修正を行うことにより、より適切な舗装管理が可能であることを示した。

本研究で用いたアスファルト舗装のデータは、東北地方にいて 1969～1988 年に観測されたものであり、スパイクタイヤによる摩耗損傷の影響が大きい。したがってスパイクタイヤの規制に伴う舗装環境の変化に対応するために、今後もこの種の観測データが収集されることを望みたい。

本研究にあたり、貴重な路面性状調査のデータを使用

させていただいた建設省土木研究所、並びに東北地方建設局に厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Sue McNeil, Michael Markow, Lance Neumann, Jeffrey Ordway and Donald Uzarski: Emerging Issues in Transportation Facilities Management, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.118. No. 4, pp.477-495, 1992.
- 2) R.L. Lytton: Concepts of Pavement Performance Prediction and Modeling, *Proceedings of Second American Conference on Managing Pavements*, pp.2.3-2.19, 1987.
- 3) 堀木賢一, 福田正: ニューラルネットワークによる舗装のパフォーマンスモデル, 土木学会論文集 No. 496(和文ノート), pp.99-102, 1994.8.
- 4) 安居院猛, 長橋宏, 高橋裕樹: ニューラルプログラム, 昭晃堂, 1993.
- 5) 麻生英樹: ニューラルネットワーク情報処理, 産業図書, 1988.
- 6) 建設省土木研究所道路部舗装研究室: アスファルト舗装構造の設計に関する検討報告書, 土木研究所資料, 1991.
- 7) 孔永健, 福田正, 動的計画法に基づくアスファルト舗装の最適設計, 土木学会論文集, pp.167-170, 1994.11.
- 8) 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, 1990.
- 9) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, 1992.

(1994.9.30 受付)

## NEUROCOMPUTING PAVEMENT PERFORMANCE MODEL AND ITS APPLICATION TO PROJECT LEVEL PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM

Ken-ichi HORIKI and Tadashi FUKUDA

A neuro-computing pavement performance model equipped with 4 input units of MCI,  $T_A$ , volume of large vehicles, design CBR and surface course material and an output unit of MCI was developed. The model was applied to a project level pavement management system. Since the neuro computing performance model can be reformed easily by measured data, it is suitable for pavement management system.