

SVMによる橋梁劣化の総合的評価と順位付けに関する基礎的研究

Basic research on evaluation of bridge deterioration and their ranking by SVM

北海学園大学工学部社会環境工学科
 北海学園大学大学院工学研究科修士課程
 北海学園大学大学院工学研究科博士課程
 山口大学工学部社会建設工学科

正会員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)
 ○ 学生員 一問恵伍 (Keigo Ichima)
 学生員 阿部淳一 (Jyun-ichi Abe)
 フェロー 古川浩平 (Kouhei Furukawa)

1. まえがき

北海道建設部（以下北海道と略する）が所管する橋梁の維持管理については、公共土木施設長寿命化検討委員会に諮問され、報告書¹⁾は平成18年3月に提出された。それによると、補修の順位付けは以下のような考え方でなされる。まず、5年に一度行われる目視点検の結果を用いて、各部材を点検結果の1（最も悪い状態）から5（健全な状態）の順に並べる。次に同じ評価の部材は、その橋梁がある路線の重要度の順に並べられる。各路線の重要度は北海道において定められている。さらに3番目の基準として、該当する部材が属する橋梁のBHI（橋梁健全度指標）^{2),3)}の順に並べられ、予算との兼ね合いで補修順位が決められることになる。基本的に部材単位で考えるが、実務への展開を一部試みた結果では、同じ橋梁に属する部材の補修であれば、同時に行った方が良いなどの橋梁単位の判断も入らざるを得ない。

BHIは、部材の点検結果からのみのデータで橋梁の健全度を評価する方法で、実務上簡便な手法であり評価される。一方で、部材に与えられる重み係数、あるいは点検健全度に応じて低減する健全度係数の設定に客観性が乏しく、説明性に欠けることが指摘される。

サポートベクターマシン（Support Vector Machine、以下SVM）^{4),5)}は、学習機能を有するパターン分類法の一つとして注目されている。SVMはVapnikらが、1960年代に提案した超平面を用いてパターンを分離する手法であり、線形分離可能な場合には高い識別能力を示した。しかし、線形分離可能な場合は現実にはほとんど存在せず、実用上必ずしも有効な手法ではなかった。しかし、1990年代になってVapnik自身によって再発見され、カーネルトリック（kernel trick）を組み合わせることで、非線形識別可能な手法に拡張され、SVMは飛躍的に識別能力を向上させた。このSVMの2値の識別能力は優れており、現在種々の工学分野で応用されている。またSVMは、識別面からの距離が識別関数の計算により容易に得られるのも特徴の一つである。これにより、一つの設計点が識別面の近傍にあるいは遠いかの判断が可能となる。

この種の手法を構造物の健全度の判定に用いるためには、何らかの教師値が必要である。例えば、一般的な点検結果に対する専門家による点検結果、あるいは予め欠陥を与えた実験結果などである。

本研究は、現在北海道で行われている目視点検結果より、各橋梁の総合的な健全度をSVMにより求めること

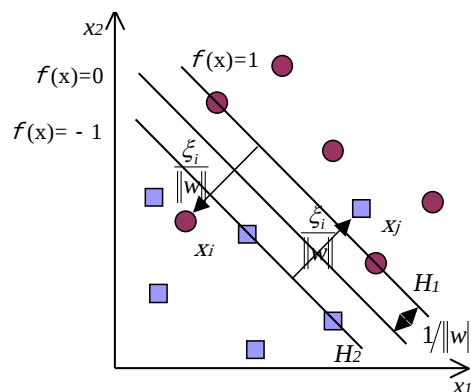


図-1 SVMの概念図

を目的としているが、そこには教師値に該当するデータは存在しない。そこで、各橋梁の供用年数を教師値として用いることを試みた。つまり、7部材の点検結果と構造の材料（鋼、コンクリート）を成分として、ある年数以上か以下かを教師値としてSVM（ソフトマージン）により解析を試みた。その結果、供用年数が多くても若い橋梁と判定される場合や、逆に供用年数が少なくても古い橋梁と判定される場合があった。後者の橋梁は総合的に劣化が早く進んでいることを意味する。また上記のように、各橋梁の識別面からの距離が出力されるので、補修、補強の順位付けにも参考になるとと思われる。

以下に、理論といくつかの数値計算結果を説明する。

2. SVMについて

SVMの概念図を図-1に示した。データ群□と○を分離する識別関数 $f(x)$ を求める問題になるが、そのときデータの存在する領域の限界面 H_1, H_2 間の距離 $1/\|w\|$ を出来るだけ大きくするように求める。識別関数 $f(x)$ は次式で定義される。

$$f(x) = \sum_{i=1}^N w_i x_i + b \quad (1)$$

ここで、 N は変数 x に含まれる成分の数である。

SVMにおいて、2種類のデータを完全に分離できる場合をハードマージン、一部分離できない場合をソフトマージン（図-1）という。いずれも制約条件のある2次関数の最大化問題に変換される。

まず、トレーニングデータの集合を

$$S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_\ell, y_\ell)\}, \quad x_i \in R^N \\ y_i \in \{-1, 1\} \quad (2)$$

と表す．つまり，それぞれのデータは N 個の成分（入力）を持つ x_i ($i=1 \sim \ell$) と，クラス分けのための指標 y_i ($i=1 \sim \ell$) { -1 あるいは 1 }（出力）から成っている．

いま，ソフトマージン最適化の問題は，以下のように定義される． w は線形識別関数の係数ベクトルである．

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^{\ell} \xi_i &\rightarrow \min \\ w \in R^N, b \in R, \xi_i \in R^{\ell} \\ y_i(w \cdot x_i + b) &\geq 1 - \xi_i \\ \xi_i &\geq 0 \quad (i=1, \dots, \ell) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)の主問題の解は，結局以下の双対問題の解として誘導される．

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^{\ell} \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{\ell} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \rightarrow \max$$

$$\alpha \in R^{\ell} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } \sum_{i=1}^{\ell} \alpha_i y_i &= 0 \\ 0 \leq \alpha_i &\leq C \quad (i=1, \dots, \ell) \end{aligned} \quad (5)$$

この問題の最適解 α_i^* が得られると，識別関数 $f(x)$ (discriminant function) は，次式となる．

$$f(x) = w^{*T} x + b^* = \sum_{j \in Sv} \alpha_j^* y_j K(x_j, x) + b^* \quad (6)$$

なお， $K(x_i, x_j)$ は次式の RBF (Gauss) カーネルである．

$$K(x_i, x_j) = \exp \left[\frac{-\|x_i - x_j\|^2}{2r^2} \right] \quad (i, j = 1, \dots, \ell) \quad (7)$$

ここで r は半径である．後記の計算例では，上式中の C と共に重要なパラメータとして扱われる．

なお，理論の詳細は文献⁵⁾に詳しい．

3. 北海道の橋梁における分析例

北海道の橋梁点検データは約 5000 橋存在し，その内部材を，主桁，副部材，床版，躯体，基礎，支承，および橋面工の 7 部材を選定し，コンクリート橋 (C 橋) と鋼橋 (S 橋) に分類した．その結果これらの点検データが全て揃っている 3050 橋を用いた．つまり 7 部材の点検データと構造材料種別の 8 成分とした．供用年数 k 年を境にして k 年以下橋梁 (教師値 $y_i = -1$) と， k 年以上橋梁 (教師値 $y_i = +1$) の 2 クラスの識別問題として学習させた．SVM に学習させるデータの例を表 - 1 に示す．ここでは $k=20$ とした．表中の橋梁は供用 2 年で 20 年以下なので教師値は -1 となる．

SVM による橋梁劣化の評価の概念を図 - 2 に示す．簡単に説明するため 8 成分の内 2 成分を取り出して説明する．図中の赤線が分離面を示し，分離面より右上が識別関数 $f(x)$ が正の領域，つまり 20 年以上橋梁と判定した橋梁であり，分離面から正側に離れるほど劣化している橋梁と考えられる．分離面より左下が識別関数 $f(x)$ が負の領域，つまり 20 年以下橋梁と判定した橋梁であり，分離面から負側に離れるほど健全な橋梁と考えられる．

表 - 1 SVM 学習データ例

NO.	主桁	副部材	床版	躯体	基礎	支承	橋面工	構造材料	供用年数	教師値 Y
1	5	5	4	4	5	5	4	S	2	-1

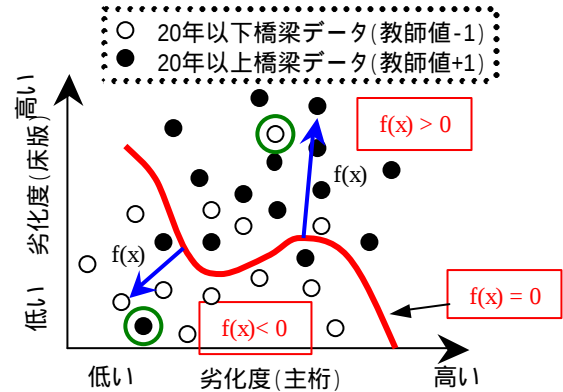


図 - 2 SVM による橋梁劣化の評価の概念図

中には図中の緑の○で囲った橋梁のように，逆判定されるデータ (橋梁) もある．20 年以下の橋梁が 20 年以上と判定された場合は，他の橋梁より劣化の進行度合いが早いと考えられる．また一方，20 年以上の橋梁が 20 年以下と判定された場合は，他の橋梁より劣化の進行度合いが遅いと考えられる．また，解析の結果得られるそれぞれの橋梁の F 値 (式 (6) の値) は識別面からの距離を表し，橋梁としての健全，あるいは劣化の程度を表していると考えることができ，順位付けに利用できる．

SVM の解析の前に，供用年数で並べた場合の劣化の程度を占めず．図 - 3 は 3050 橋の供用年数 (横軸) と劣化度数 (縦軸左)，および平均劣化度 (縦軸右) の関係である．劣化度数とは，各供用年数に対応する橋梁群の部材評価の数を表している．■ が 5 の評価の部材数，以下同様に，□ が 4，□ が 3，□ が 2，■ が 1 の評価の部材数である．平均劣化度の推移は，最大値で 4.7，最小値で 3 と供用年が経つにしたがって劣化している傾向が見られるが，傾きは比較的平坦でかつ平均値のばらつきが多くその傾向は顕著に現れていない．

以下，SVM の解析の結果を示す．パラメータがいくつかあるが，ここでは $r=3.0$ ， $r=5.0$ と $C=10$ ， $C=100$ ， $C=1,000$ を組み合わせた全 6 パターンの計算を行った．

まず逆判定の数であるが，上記の 6 パターンの計算の逆判定数は 856 ~ 959 であり全橋梁の約 3 割であった．各計算パターン間には大きな差が見られなかった．その逆判定の内容を図 - 4 に示した．図 - 4 はパラメータ $r=5.0$ ， $C=10$ の場合の F 値と橋梁数の関係図に，他のパラメータの場合の逆判定数を重ねた図である．図の白い領域が 6 計算全て同じ判定結果，黒い領域が 6 計算どれか 1 つでも判定結果が異なった橋梁を示す．異なる判定が起きた橋梁は F 値が 0 近傍に集中している傾向が見られたが，0 近傍以外の場所では同じ判定結果が得られた．SVM はパラメータ依存性があるが，劣化が進行している橋梁の判定に関係なかったことは重要な結果である．

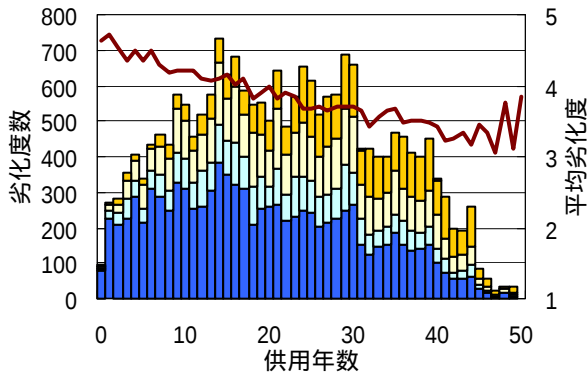


図 - 3 供用年に対する劣化度数と平均劣化度推移

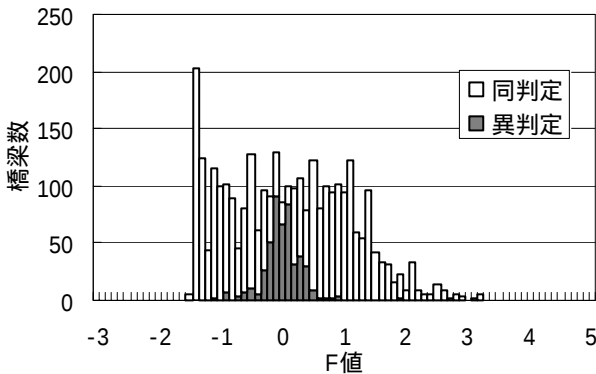


図 - 4 パラメータ変更による判定結果の比較

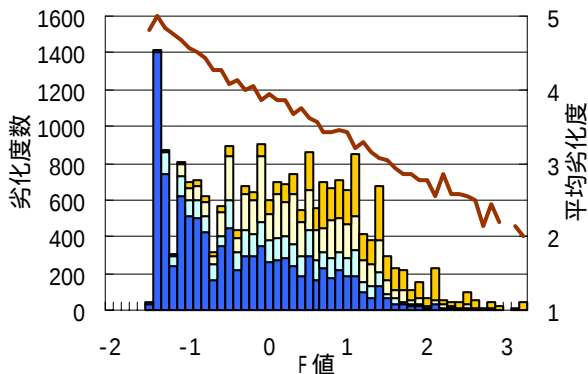


図 - 5 F 値に対する劣化度数と平均劣化度推移
(パラメータ $r=5.0$ $C=10$)

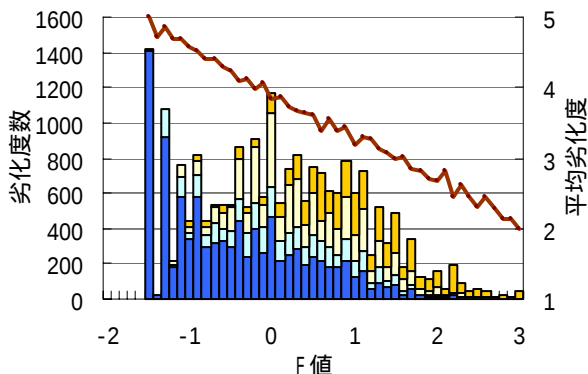


図 - 6 F 値に対する劣化度数と平均劣化度推移
(パラメータ $r=10.0$ $C=10$)

表 - 2 F 値の小さい橋梁の点検データ
(パラメータ $r=5.0$ $C=10$)

NO.	主桁	副部材	床版	躯体	基礎	支承	橋面工	構造材料	供用年数	教師値 Y	F値
1994	3	5	5	5	5	5	5	S	2	-1	-1.5941
2809	3	5	5	5	5	5	5	S	3	-1	-1.5941
546	4	5	5	5	5	5	5	S	6	-1	-1.5273
2349	4	5	5	5	5	5	5	S	9	-1	-1.5273
2357	4	5	5	5	5	5	5	S	10	-1	-1.5273
2460	4	5	5	5	5	5	5	S	27	1	-1.5273
1633	3	5	5	5	5	5	5	C	9	-1	-1.4923
122	5	5	5	5	5	5	5	C	0	-1	-1.4598
123	5	5	5	5	5	5	5	C	1	-1	-1.4598
125	5	5	5	5	5	5	5	C	1	-1	-1.4598
128	5	5	5	5	5	5	5	C	2	-1	-1.4598
131	5	5	5	5	5	5	5	C	3	-1	-1.4598
140	5	5	5	5	5	5	5	C	4	-1	-1.4598
142	5	5	5	5	5	5	5	C	5	-1	-1.4598
143	5	5	5	5	5	5	5	C	6	-1	-1.4598
232	5	5	5	5	5	5	5	C	21	1	-1.4598
234	5	5	5	5	5	5	5	C	22	1	-1.4598
239	5	5	5	5	5	5	5	C	23	1	-1.4598
257	5	5	5	5	5	5	5	C	25	1	-1.4598
289	5	5	5	5	5	5	5	C	33	1	-1.4598

表 - 3 F 値の大きい橋梁の点検データ
(パラメータ $r=5.0$ $C=10$)

NO.	主桁	副部材	床版	躯体	基礎	支承	橋面工	構造材料	供用年数	教師値 Y	F値
299	2	2	2	2	2	2	2	C	36	1	3.1494
310	2	2	2	2	2	2	2	C	38	1	3.1494
759	2	2	2	2	2	2	2	C	36	1	3.1494
1799	2	2	2	2	2	2	2	C	41	1	3.1494
2282	2	2	2	2	2	2	2	C	37	1	3.1494
2295	2	2	2	2	2	2	2	C	41	1	3.1494
527	2	2	2	2	2	2	3	C	44	1	3.0051
1114	2	2	2	2	2	2	4	C	26	1	2.8559
521	2	2	2	2	1	4	2	C	36	1	2.8192
1380	2	2	2	2	3	2	2	C	39	1	2.8066
788	3	2	3	2	2	2	3	C	45	1	2.7699
767	3	4	2	2	2	2	2	C	39	1	2.7377
1362	4	4	2	2	2	2	2	C	34	1	2.7354
1370	4	4	2	2	2	2	2	C	36	1	2.7354
499	2	3	3	2	2	2	2	C	25	1	2.7267
786	3	3	3	2	2	2	2	C	44	1	2.7174
113	2	3	2	2	2	2	2	C	39	1	2.6998
963	2	2	2	3	2	2	2	C	39	1	2.6959
203	2	3	2	2	2	3	2	C	16	-1	2.592
2552	3	4	2	2	2	2	2	S	46	1	2.582

表 - 4 F 値の大きい橋梁の点検データ
(パラメータ $r=10.0$ $C=10$)

NO.	主桁	副部材	床版	躯体	基礎	支承	橋面工	構造材料	供用年数	教師値 Y	F値
9	5	5	5	5	5	5	5	S	6	-1	-1.5581
28	5	5	5	5	5	5	5	S	13	-1	-1.5581
75	5	5	5	5	5	5	5	S	26	1	-1.5581
87	5	5	5	5	5	5	5	S	28	1	-1.5581
120	5	5	5	5	5	5	5	S	44	1	-1.5581
326	5	5	5	5	5	5	5	S	1	-1	-1.5581
331	5	5	5	5	5	5	5	S	3	-1	-1.5581
335	5	5	5	5	5	5	5	S	4	-1	-1.5581
380	5	5	5	5	5	5	5	S	21	1	-1.5581
542	5	5	5	5	5	5	5	S	4	-1	-1.5581
549	5	5	5	5	5	5	5	S	8	-1	-1.5581
566	5	5	5	5	5	5	5	S	14	-1	-1.5581
569	5	5	5	5	5	5	5	S	14	-1	-1.5581
601	5	5	5	5	5	5	5	S	29	1	-1.5581
862	5	5	5	5	5	5	5	S	18	-1	-1.5581
926	5	5	5	5	5	5	5	S	31	1	-1.5581
939	5	5	5	5	5	5	5	S	35	1	-1.5581
1172	5	5	5	5	5	5	5	S	1	-1	-1.5581
1180	5	5	5	5	5	5	5	S	4	-1	-1.5581
1401	5	5	5	5	5	5	5	S	0	-1	-1.5581

表 - 5 F 値の小さい橋梁の点検データ
(パラメータ $r=10.0$ $C=10$)

NO.	主桁	副部材	床版	躯体	基礎	支承	橋面工	構造材料	供用年数	教師値 Y	F 値
2295	2	2	2	2	2	2	2	C	41	1	2.9878
2282	2	2	2	2	2	2	2	C	37	1	2.9878
1799	2	2	2	2	2	2	2	C	41	1	2.9878
759	2	2	2	2	2	2	2	C	36	1	2.9878
310	2	2	2	2	2	2	2	C	38	1	2.9878
299	2	2	2	2	2	2	2	C	36	1	2.9878
527	2	2	2	2	2	2	3	C	44	1	2.8193
963	2	2	2	3	2	2	2	S	39	1	2.7298
1380	2	2	2	2	3	2	2	C	39	1	2.7161
113	2	3	2	2	2	2	2	S	39	1	2.7065
1114	2	2	2	2	2	2	4	C	26	1	2.6465
499	2	3	3	2	2	2	2	C	25	1	2.5747
788	3	2	3	2	2	2	3	C	45	1	2.5639
767	3	4	2	2	2	2	2	C	39	1	2.5563
786	3	3	3	2	2	2	2	C	44	1	2.5357
1370	4	4	2	2	2	2	2	C	36	1	2.5187
1362	4	4	2	2	2	2	2	C	34	1	2.5187
2552	3	4	2	2	2	2	2	S	46	1	2.4803
2115	3	4	2	2	2	2	2	S	38	1	2.4803
521	2	2	2	2	2	4	2	C	36	1	2.4518

次にパラメータ $r=5.0$, $C=10$ の場合の結果を説明する。

図 - 5 は SVM を用いた計算結果を示し、F 値（横軸）により順位付けされた橋梁とその劣化度数（縦軸左）、および平均劣化度（縦軸右）の関係である。平均劣化度の推移は、最大値で 5、最小値で 2 となった。F 値が大きくなるほど劣化し、F 値が小さいほど健全な傾向が見られ、図 - 3 より勾配が急になり、かつ平均値のばらつきは少ない。しかし、平均劣化度を見ると、左端で下がっている。詳細を検討するために、F 値が低い 20 橋と高い 20 橋をそれぞれ表 - 2, 3 に示した。

表には、左から橋梁番号、7 部材の点検結果、構造材料、供用年数、20 年を境とした教師値、および SVM による解析結果の F 値を示してある。■ は逆判定された橋梁である。例えば、表 - 2 の橋梁番号 2460 は供用年数が 27 年なのにもかかわらず、かなり健全と判断されたことを意味する。表は F 値の順に並べてあるが、おおむね良好な並びと考えられる。しかし、表 - 2 に示す、今回の解析の対象とした橋梁の中で最も健全であると判定された上位 7 橋はいずれも主桁の判定が 3 あるいは 4 で、そのすぐ下の例えば橋梁番号 122 の判定結果とは明らかに矛盾する。全体的には良好な分離が出来ていると考えられるが、この部分の矛盾は、実務上好ましくない。前記のように SVM はパラメータ依存性があり、例えば半径 r の値によっては、設定している成分から構成される空間内の隅各部領域を不適切な評価をすることがある⁶⁾。

そこで、パラメータ $r=10.0$ $C=10$ として同様の検討を行った。

図 - 6 は SVM を用いた計算結果を示し、F 値（横軸）により順位付けされた橋梁とその劣化度数（縦軸左）、および平均劣化度（縦軸右）の関係である。平均劣化度の推移は、上記のパラメータの組み合わせと同様に最大値で 5、最小値で 2 となった。F 値が大きくなるほど劣化し、F 値が小さいほど健全な傾向が見られ、図 - 3 より勾配が急になり、かつ平均値のばらつきが小さい結果が見られた。また、図 - 5 で見られた、左端で下がる傾向も消えている。より詳細な検討を行うために、

上と同様に、F 値が低い 20 橋と高い 20 橋をそれぞれ表 - 4, 5 に示した。表 - 4 は、健全と判定された上位 20 橋であるが、ここでは、全ての部材の点検結果は 5 であり、合理的な結果といえる。

劣化が進行していると判定された下位 20 橋をまとめた表 - 3 も表 - 5 も、その内容に特に問題はない。

4. あとがき

本研究は SVM の特徴を利用して、部材単位で行われる橋梁点検の結果を利用して、橋梁単位での劣化の総合的評価と順位付けを行うことを目的としている。

SVM に入力する学習データを各部材の劣化度、教師値として供用年数 k 年を境目として k 年以上（教師値 + 1）、 k 年以下（教師値 - 1）とすることで SVM 解析が可能となり、分離面からの距離（F 値）により橋梁単位での評価ができた。成分としては、構造の材料も含めたが、本論文とは別に材料ごとの分析との比較も行ったが大きな変化はなかったため、必ずしも成分として考慮する必要はないと考えられる。

橋梁の順位付けと同時に、本研究はソフトマージンを用いているので、逆判定が得られる。供用年数が少ないのに、20 年以上と判定された橋梁は一般的な橋梁と比べて劣化が進んでいることを意味するので注意が必要である。

SVM は 2 値分離の手法として優れているが、一方で、F 値の利用には慎重を要する。本研究でも、 r と C の値の 2 つの組み合わせに対して数値計算を行い結果を検討した。全体的な傾向は良く分離出来ていたが、半径 r が小さい場合には部分的に矛盾が見られた。半径 r の値を大きくすることにより、矛盾は解消したが、今後検討が必要であると考えている。この手法は、橋梁以外の施設の総合的な判定に応用可能でもあるので、さらに研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 北海道建設部：公共土木施設長寿命化検討委員会報告書，2006。
- 2) 大島俊之，三上修一，山崎智之，丹波郁恵：橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.201-217，2001。
- 3) 大島俊之，三上修一，丹波郁恵，佐々木聡，池田憲二：橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.53-65，2002。
- 4) 栗田多喜男：サポートベクターマシン入門，<http://www.neurosci.aist.go.jp/~kurita/lecture/svm/node18.html>，2002。
- 5) N. Cristianini & J. Shawe-Taylor：An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods，Cambridge University Press，2000。邦訳 大北剛：サポートベクターマシン入門，共立出版，2005。
- 6) 杉本博之，阿部淳一，古川浩平：近似法支援のための SVM に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.53A，2007。