

主成分分析法を用いたトラス橋設計評価の試み

米 長 泰

A Fundamental Research concerning Design Assessment of Truss Bridges by Matrices Date Analytical Method

Yasushi YONENAGA

(1993年10月12日受理)

Matrices date analytical method is known as a tool by which we understand the peculiarity of the phenomenon theoretically.

The author now attempted to apply this tool to Design Assessment of Truss Bridges those are typical civic structures, and could get the conclusion that this method is very useful for solving the problems.

1. 本文の趣旨

環境都市構造物の設計は昨今のコンピュータ技術の進歩により基本的な解析手法はソフトフロッピーに集約される段階に到達した。従って基礎研究課題は構造解析から次第に異分野へと進展しているが、設計評価も現在強い関心を寄せられているテーマのひとつと言える。

設計評価では一時意匠を主体としたいいわゆるデザイン評価がもてはやされた時期があったが、設計経験の浅い者だけで行くと、結局パソコン遊びに終わってしまうおそれがある(東京大学工学部土木工学科・篠原修教授談)筆者は幸い企業で十余年の実務設計経験があるが、解析の主体を構造物の変位や応力分布等工学的なものとし、「工学的評価」を新機軸として打出した。本文は過去4年間卒業研究生を指導しトラス橋を具体例としてひとつおりの結論を得たので、ここにとりまとめ報告する。

2. 手法の適性評価

産業界には技術者のデスクワークを効率化するために七個の手法を品揃えしたN7手法がある。その手法名と利用目的を整理したものを表1に示す。表1より七手法の中では本文の目的に合う手法は5番目の主成分分析法だけであることがわかる。次に何個かの多変量解析手法を取り上げ表2に示す。やはりデータ間の特性把握という本文の目的に合うには主成分分析法が一番ピッタリしているものと思われる。表2で◎印は設計評価に有用なことを示し、本

文の中心となる手法として主成分分析は一応もっとも妥当なものであると認識される

3. 設計評価の方法

3.1 対象となるトラス橋

解析の対象としてトラス橋を取上げた。トラス橋は環境都市関連構造物の中で最も基本的なもののひとつであり、形態が変化に富み、計算は一面で易しく且つ一面では複雑なところがあり、設計比較の好材料といえる。トラス橋はすべて三角形に組み上げた細長い組骨構造で、秋田県には各所に建造されている。特に雄物川流域はトラス橋の宝庫ともいべきであるが、国道7号線秋田大橋は支間60m程度の単純支持トラス橋が6連あり、昭和9年に建造され、現在老朽化がひどい状態にある。

そこで本文ではいずれも同程度支間のトラス橋を取上げ、同橋架替を想定した設計コンペにも取組んでみた。解析に利用したモデルは、まず基本タイプということで図2に、また設計コンペ関連として図4に、特定研究として図7にそれぞれ段階を追って各種のタイプを登場させている。

3.2 荷重パターン

各種トラス橋の工学的特性を比較するため、各橋に同一条件の荷重を載荷する。それを図1に示す。ここに「フラット」とは同じような乗用車が橋上に平均的に分布する状態を想定したものである。また、「中央大」とは重量トラックが中央を走っている状態、「端部大」とは同じくトラックが端部に

表1 N7手法とその利用目的

N7手法	利用目的
1. 連関図法	ゴタゴタした因果関係の整理
2. 親和図法	渾沌とした事象の区分け
3. 系統図法	多くの手段と論理的に樹木状に整理
4. マトリックス図法	2個の情報要素の強弱関係
5. MD解析法 (主成分分析)	多数のデータ間の特長を識別し散布図に示す
6. P D P C法	近未来の事態の進展を予測
7. アロー・ダイアグラム	簡単な日程計画を立てる

表2 多変量解析手法とその効果比較

手法名	目的	特性評価
主成分分析法	データ相互の特性評価	◎
クラスタ分析法	似たもの同志を集める	△
重回帰分析法	目的と変数の相関と予想	△
因子分析法	目的に敏感な要因を探る	×
判別分析法	データの質的良否と判定	×

差し掛かった状態と、日常よく見かける3種類の状態に類似させたものである。

なおこの荷重条件は構造特性評価のインプット・データを得るためのものであって、各トラス橋は鋼道路橋設計示方書に基づき、簡易ではあるが、一等橋として設計されている。

3.3 評価項目

各トラス橋より設計結果として、部材応力、断面積、節点変位等が共通に明らかにされる。本文の目的はその特性比較であり、データの差別化である。そこで第1段階としては直接的な設計結果の比較とし、次に例えば端部の部材応力と中央部の部材応力の比較から各部材の応力分担状況も比較項目に加えることにする。しかしこれもこれも総花的にインプットすると、かえって解析が発散してしまうおそれがあるから注意したい。実際に取上げた評価項目

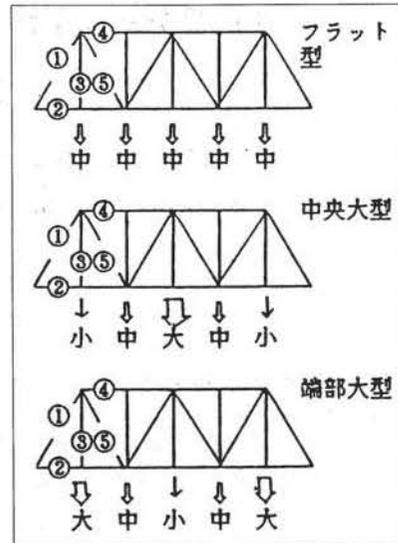


図1 荷重のパターン

はそれぞれ表3、5、6に示される。

4. 最も基礎的な設計評価

本章は筆者が本研究を最初に手がけた年に卒業研究生大野博行・阿部智彦両君を指導して得られた成果である。

解析の対象として最も基本的なワーレン・プラット・ハウ・曲弦ワーレンの4種類を取上げた。その側面図及び着目した部材番号等を図2に示す。

次に解析条件であるが、これは雄物川の実状にこだわらず、 $\lambda = 6\text{ m}$ 、 $l = 36\text{ m}$ 、 $h = 8\text{ m}$ 、また集中荷重大中小を20t、15t、10tとした。その解析結果が主成分分析のインプット・データとなるわけであるが、表3に示す。ここに対象トラスの①②③は図1に示す荷重パターンのうち、中央大型・フラット型、端部大型の順である。なお表3の横軸にあるのが評価項目で、縦軸のデータ数より多くない方が望ましいといわれている。

まず主成分分析で得られる固有値と寄与率を表4に示す。本文では6パネルのみ取上げたが、8パネルの結果も合わせて示してある。固有値の大きさは重要度を示すから、ここでは第1・第2の2個の主成分を取上げ、第3主成分以下を切捨てることにした。累積寄与率から、約80%の信頼度であることがわかる。

次に因子負荷量を表5に示す。これに基づいて各

主成分分析法を用いたトラス端設計評価の試み

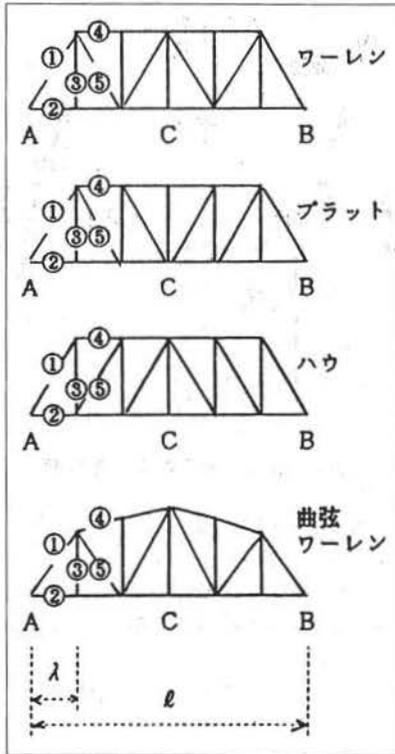


図2 各種トラス橋側面図

主成分の意味合いを解説しなければならない。それは表5に示す○印の評価項目を総合して判定される。第1主成分は中央C点、ローラー支点Bの変位が大きく、第1垂直材③に妙に大きな負荷がかかり、従って部材総和即ち総重量が大きいという、不経済な設計を示す。主成分スコアには必ず正負があるか

表4 固有値と寄与率

主成分	6パネル		8パネル		採否
	固有値	寄与率	固有値	寄与率	
第1	4.747	52.7%	5.271	58.6%	○
第2	2.706	30.0%	1.879	20.9%	○
第3	1.036	11.5%	0.980	10.9%	×
第4	0.219	2.7%	0.419	4.7%	×
第5	0.191	2.1%	0.341	3.8%	×

ら、その反対サイドは逆に経済的な設計を意味することになる。よって第1主成分は「経済軸」とした。負方向がむしろ良好である点に留意したい。

次に第2主成分は下弦材の端部の応力が適当に大きく、中央部下弦材との応力分担がうまく出来ているということで「バランス軸」と命名した。次に主成分スコアの散布図を図3に示す。横軸に第1主成分、縦軸に第2主成分を示す。各トラスとも3個ずつあるのでそれを結びつけると散布の特徴が一層鮮明になる。図3から明らかのように、曲弦ワーレントラスが経済的・バランス性にもっとも優れ、反対にハウトラスがもっとも劣ることがわかる。

この結論は従来からの常識とされてきたものであるが、はからずも理路整然と証明することが出来た。やはり本手法は有効に活用できるとの見通しがついた。ただしこれらは単純支持の場合であって、中央径間が長く側径間に負の曲げモーメントを生じ易い3径間連続トラス橋では、ハウ形式が採用されることがある。

表3 基本6パネルトラスとインプットデータ (応力ton、変位mm)

対象トラス	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	C点変位	B点変位	応力⑤	応力②	応力③	応力④	上弦橋央	下弦橋央	部材総和	上弦材比	下弦材比
ワーレン①	7.18	3.21	31.3	26.3	10.0	-45.	-45.	52.5	4.41	1.00	0.50
ワーレン②	6.84	3.30	28.1	28.1	15.0	-45.	-45.	50.6	4.41	1.00	0.56
ワーレン③	6.49	3.39	25.0	30.0	20.0	-45.	-45.	48.8	4.41	1.00	0.62
ハウ①	9.68	3.80	-31.3	26.3	35.0	-26.	-45.	52.5	5.21	0.58	0.50
ハウ②	9.33	3.83	-28.1	28.1	37.5	-28.	-45.	50.6	5.13	0.63	0.56
ハウ③	8.98	3.86	-25.0	30.1	40.0	-30.	-45.	48.8	5.05	0.67	0.62
プラット①	6.75	3.02	31.3	26.3	10.0	-45.	-52.	45.0	4.41	0.86	0.58
プラット②	6.51	3.16	28.1	28.1	15.0	-45.	-50.	45.0	4.41	0.89	0.63
プラット③	6.26	3.30	25.0	30.0	20.0	-45.	-48.	45.0	4.41	0.92	0.67
曲弦①	6.30	3.34	19.8	30.0	10.0	-44.	-43.	46.7	4.12	1.02	0.64
曲弦②	6.01	3.45	16.5	32.1	15.0	-44.	-43.	45.0	4.11	1.02	0.71
曲弦③	5.72	3.56	13.2	34.3	20.0	-44.	-43.	43.3	4.10	1.02	0.79

表5 因子負荷量 (基礎評価)

評価項目 (変数)	第1 主成分	第2 主成分
1. C点変位	0.989○	-0.126
2. B点変位	0.806○	0.583
3. 応力⑤	-0.926○	-0.349
4. 応力②	-0.394	0.913○
5. 応力③	0.892○	0.361
6. 応力④	0.975○	0.171
7. 上弦橋央	0.158	0.636
8. 下弦橋央	0.674	-0.406
9. 材部総和	0.976○	-0.218
10. 上弦材比	-0.932○	0.066
11. 下弦材比	-0.566	0.776○



図3 散布図第1 VS第2主成分

5. デザインコンペ模擬評価

5.1 現橋を含む評価

国道7号線雄物川に架橋されている秋田大橋は前述のとおり支間64m程度の曲弦ワーレントラス6連が主体であるが、昭和9年に建されたもので、形式が古典である。老朽化が進んでおり近い将来架替が予想されている。そこで当研究室では4人の研究生を2人ずつ2組に分け、斜張橋案とトラス橋の2案に関し、簡略模擬のデザインコンペを実施した。そのうちトラス橋の関係は川村仁志・渡辺靖両君が支持した。

秋田大橋近辺の雄物川の情景を写真1に示す。現地の詳細は研究生らと測量を実施している。これらをもとに、支間が同一で高さもなるべく同等になるよう考慮したうえで、近代感覚に沿うよう6タイプの候補を挙げてみた。それらを図4に示す。1が秋田大橋で2以下は垂直材のあるトラスとないトラスを混用した。またハウトラスは前章の評価結果により見劣りすることがわかったので、はじめから除外



写真1 秋田大橋周辺の状景

した。一応2~7は実力伯仲のつもりである。

研究生2人は1橋ずつ設計し、残りは平面骨組解析ソフトを用いて時間短縮を図った。これら7タイプを比較するための外的条件は図1に示す3種類の荷重パターンである。これにより21個のサンプルが得られたことになる。対する評価項目は前章の経験を参考に、表6に示す10項目とした。計算結果が主

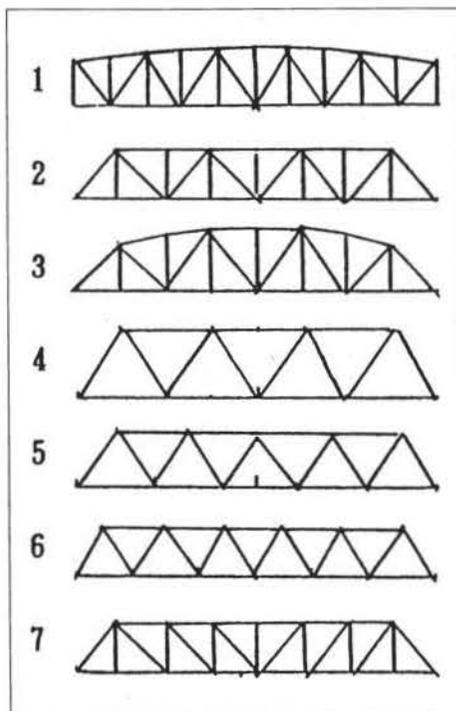


図4 コンペ対象のトラス形式

主成分分析法を用いたトラス橋設計評価計画の試み

表6 設計コンベのための評価項目

No	記号	意味
1	Xmax	ローラー支点 水平移動量
2	Ymax	下弦材中央点垂直変化
3	D ₀	端柱応力度
4	D ₁ /D ₀	第1斜材と端柱応力比
5	D _中 /D ₀	中央斜材と端柱応力比
6	Umax	中央上弦材と応力
7	U ₁ /Umax	第1上弦材と中央上弦材応力比
8	Lmax	中央下弦材の応力
9	L ₁ /Lmax	第1下弦材と中央下弦材応力比
10	ΣAL	部材総重量 (除2次部材)

成分分析のインプット・データとなるが、詳細は省略する。表3のような数表が21×10の二元マトリックスで得られるわけである。

解析結果により、第1主成分は部材の端部と中央部との応力分担のバランス性を意味し、第2主成分は総鋼重や変位量などを加味した経済性を意味することがわかった。主成分の意味あいは前章とは第1と第2で逆となったが、別に気にすることはない。こういった分析ではちょっとデータを替えるだけでありがちな現象に過ぎない。その主成分スコアの散布図を図5に示す。横軸が「バランス軸」、縦軸が「経済軸」である。図5より昭和9年建造の現橋だけがポツンと離れて経済性が著しく見劣り、残り6タイプは優劣に大差なく団子状態になっていることがわかる。

5. 2 現橋を除く評価

前節21個のサンプルより現橋分3個を除き、評価項目を同一とする18×10二元マトリックスで解析した。まず固有値と寄与率を表7に示す。参考迄に累積寄与率も示したが、これは簡単な計算で得られるからどちらでもよい。ここでは固有値の示す重要度から、第1・第2の2個の主成分だけを上げる。累積寄与率より信頼度は80%である。次に因子負荷量を表8に示す。第1主成分は○印を付した評価項

表7 固有値と寄与率 (設計コンベ)

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率	採否
第1	5.883	0.588	0.588	○
第2	2.189	0.219	0.807	○
第3	1.060	0.106	0.913	×
第4	0.516	0.052	0.965	×
第5	0.180	0.018	0.983	×

表8 因子負荷量 (設計コンベ)

評価項目 (変数)	第1主成分	第2主成分
1. Xmax	-0.670	0.315
2. Ymax	0.918○	-0.281
3. D ₀	0.574	-0.693○
4. D ₁ /D ₀	-0.689○	-0.682○
5. D _中 /D ₀	-0.470	-0.265
6. Umax	0.968○	-0.818
7. U ₁ /Umax	0.949○	0.082
8. Lmax	-0.954○	0.215
9. L ₁ /Lmax	0.874○	0.339
10. ΣAL	0.292	0.891○

目を総合して解釈する。即ち上弦材、下弦材とも中央部が小さく、端部が大きめで応力バランスがよいことを意味する。Umaxは圧縮材で負の応力だからこのような解釈が成立つ。またYmaxは上方を正としているから、たわみが小さくタイトな構造がプラス方向となる。一応「バランス軸」と名付ける。一方第2主成分はΣAL即ち鋼重に特に敏感だから「経済軸」と名付ける。

次に主成分スコアの散布図を図6に示す。横軸が「バランス軸」、縦軸が「経済軸」である。2~7は図4における2~7の各タイプ、また①②③は図1における荷重パターンである。図6の右上サイドには2・3・7と垂直材を有するものが集り、左下サイドには残りの垂直材の無いものが集まっている。つまり垂直材のあるトラスは応力のバランスは良いが鋼重が余分にかかるのに対し、垂直材の無いトラスはその分経済的であるといえる。これは設計者の常識かも知れないが、図6にはそれが鮮明に浮彫りされている。このあたりが本法の効能であろう。

では少しでも安くという競争設計、入札時には必ず垂直材のないトラスの方が有利であろうか？実は本文では圧縮材に対する細長比という重要な評価項目が抜けている。そうすると特に図4のタイプ4は

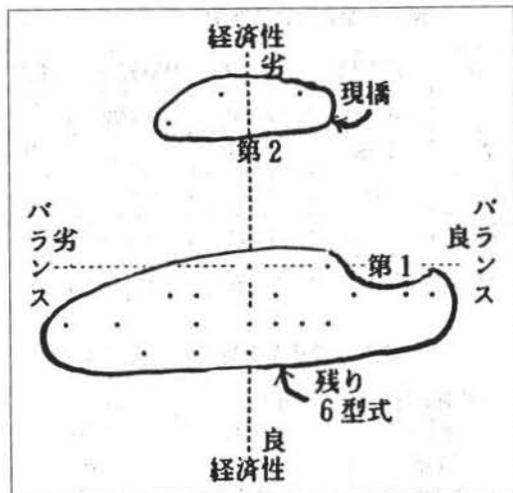


図5 散布図(第1VS第2主成分) 含現橋

評価が下落する。このことは川村仁志君の就職先である横河ブリッジ(株)設計技術者より御指摘を頂いた。また昨今は「景観」「周囲とマッチング」というファクターも重要視されているから、一本道な結論は得られない。ただ一年間の卒業研究でこのような模擬コンペが実施できたことには満足している。

6. 特定評価(過剰材トラス)

秋田県内には斜材中央部がX型の過剰トラス橋がある。図7においてBはJ R五能線米代川に、またCは国道398号線皆瀬村地区皆瀬川に架設されている。いずれも垂直材を有するので、それに類似したプラット・ワーレン・曲弦ワーレンの計5橋を比較してみた。(卒業研究生は塚本健・畠山直樹両君)

はじめこれ迄述べてきた評価項目を盛沢山に加味して分析したところ、第1主成分では5タイプとも有意差無しとの答が出た。非常に興味深い内容であるが、紙面の都合で詳細は報告を割愛する。結局数回に亘る試行の末、データ間の差別に敏感な次の5項目に集約することにした。

- (1) 中央節点垂直変位・・・剛性チェック
- (2) 端部中央部下弦材応力比・・・分担バランス
- (3) 総鋼重・・・経済性
- (4) 据付性
- (5) 景観

これらのうち(1)~(3)は工学的評価、残り2項は感性評価である。その評点を表9に示す。据付性では曲弦トラスは直弦よりやりにくいであろうとか、

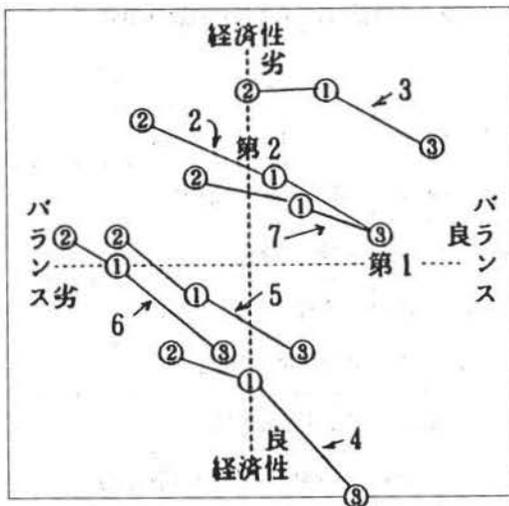


図6 散布図(第1VS第2主成分) 除現橋

景観では前者に躍動感がありX型トラスは過剰感がある等を考慮し、5点法で採点した。また载荷パターンには図1の3種類の他、第1パネルに1個集中荷重を負荷させ、4種類とした。従ってデータサイズは20×5の二元マトリックスとなる。

解析結果の散布図のうち図8は第1(景観経済)VS第2主成分(バランス)を、また図9は第1VS第3主成分(据付性)を示す。これらより優れているもの◎印3点、普通○印2点、劣るもの△印1点として総合評価すると図10のとおりである。これよりX型過剰トラスはあまり思わしいタイプとはいえないことがわかる。本例より工学的評価と感性評

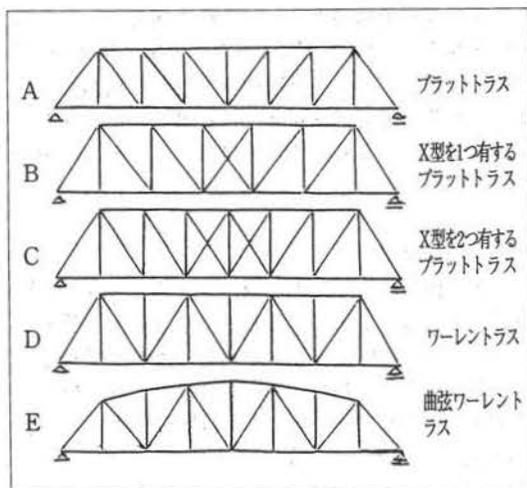


図7 過剰材トラスVS静定トラス

主成分分析法を用いたトラス橋設計評価の試み

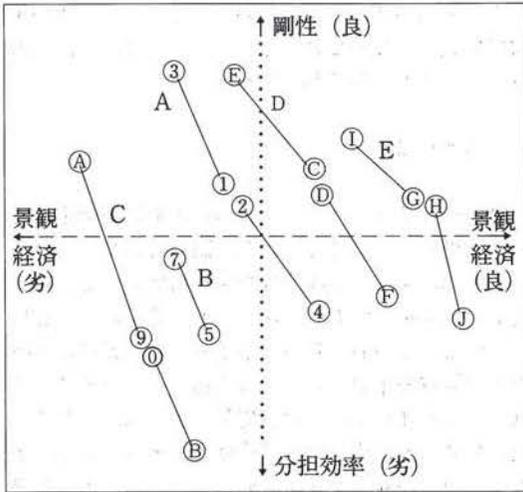


図8 散布図(第1 VS 第2主成分) 含過剰トラス

価を混用しても、解析上支障がないことが実証できた。

X型トラスの目的は橋中央部における交番応力対策にある。即ちトラス橋の構造特性として、弦材応力は端部から中央部へと大きくなり、斜材はその反対の傾向にある。従って斜材中央部は絶対値が小さいから、活荷重の位置によって、つまり車両が橋を通過する途上において引張になったり圧縮になったりする。その対策として小さな断面積の2部材をX型に配し、引張材のみが有効で他は遊び材という扱いにしたものである。それと鉄道橋の場合は急停車による制動荷重に対する配慮も考えられる。構造上は十分意味を有し、先人の努力には敬意を払うものであるが、現在では古典的な感を免れえないであろう。国内新幹線にこのタイプが皆無であることからもうなづける。

ともかく本章の一連の解析によって、従来から設計上の常識となっていたことが、無形ではなく、誰の目にも明かな、いわゆるビジブルな形で証明することができた。以上3つの視点から解析を行ってみたが、本法は十分効能を発揮したのと考えている。なおあと1人研究生菊地宗太郎君にも基礎研究の段階

表9 感性評価の内訳

タイプ	A	B	C	D	E
据付性	5	3	1	5	3
景観	3	2	1	4	5

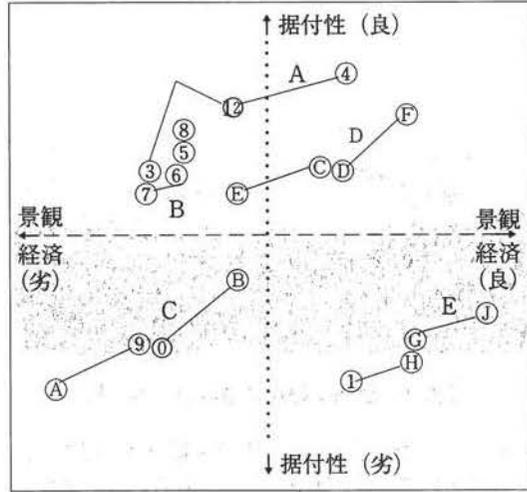


図9 散布図(第1 VS 第3主成分) 含過剰トラス

で成果をあげて頂いた。

7. 今後の展望

橋梁の架設計画は単に経済的に安いというだけでなく、景観や環境等の要因がこれと対等以上に考慮されはじめて久しい。例えば目下脚光を浴びている斜張橋はケーブル本数が多い方が観客に安心感を与えるといわれ、実際に少し費用を増して多ケーブル形式とする場合がある。

しかしこれとは全く違った発想からの社会的ニーズも考えられる。例えば地域のシンボルに何か欲しいといった考え方である。青森県では最近JR青森駅近くにPC斜張橋が建造され、地域の活性化に役だっている。その点秋田県にはモニュメントとなるような橋梁が存在していない。そこでもし秋田大橋

トラス橋 \ 評価	経済性	景観	バランス	総合点	順位
A プラット	○	○	○	9	3
B X型プラット	△	△	△	3	4
C XX型プラット	△	△	△	3	4
D ワーレン	○	○	◎	11	2
E 曲弦ワーレン	◎	◎	○	13	1

図10 過剰トラスの優劣比較

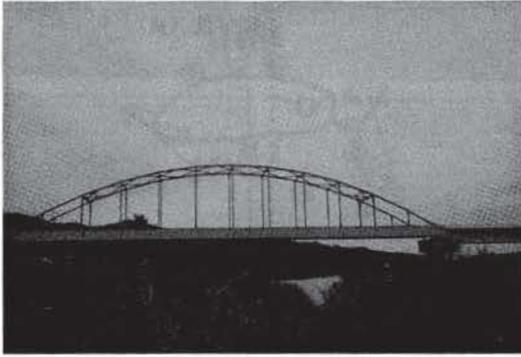


写真2 雄物川雄和町地区ランガー橋

(写真1)を架替えるなら、トラス橋だけではなく、せめてランガー橋を併用できないものかと切望している。

雄物川流域は砂質であるから大型橋梁を計画する際には地盤耐力が問題だといわれている。しかし国道7号線より相当上流ではあるが雄和町新波地区にランガー橋が建造されている。それを写真2に示す。ランガー橋はトラス橋よりもモニュメント性に富み赤系統の鮮やかな塗装を施すと、周囲の河原や背景の太平山と良好にマッチングするものと思われる。

そこで当研究室ではトラス橋だけの設計評価に一応の結論をつけ、本年度からはランガー橋を併用した場合の長所短所を中心に、かつ工学的評価とデザイン評価を併用して新視点に立った研究に着手した。従って研究生にはランガー橋の設計と設計評価の双方を手掛けてもらうことになる。東京大学篠原修教授からは単に解析だけではなく、模型を作らせ

たらとアドバイスを頂いている。それをどこかの年次では実行してみたいと考えている。まだまだやるべきことは多く残されている。

8. おわりに

筆者は日頃知人からいろいろな多変量解析手法を次々応用してみてもどうかと、勧められている。しかし1個の手法(主成分分析法)に徹底して習熟し着実に成果を積み上げてゆくのも、悪くはないと信じている。このあたりが工学系教官と情報処理系技術者の見解の相違というものであろう。一方は手法は一つしか知らないが社会現象をよく知っており、他は社会現象にうといが手法は沢山知っている。それならいつか双方が共同研究してみたら、大きな研究成果に繋がる可能性がある。今後も一步一步前進してゆきたい。

参 考 文 献

- 1) 米長泰他、マトリックス・データ解析法による土木工学科学生への進路分析 秋田高専研究紀要第25号P. 69~77 1990. 2
- 2) 米長泰他、マトリックス・データ解析法によるトラス橋の構造効率比較の試み 日本品質管理学会第20回年次大会研究発表要旨集 P. 97~100
- 3) 米長泰他、トラス橋の工学的設計評価の試み 土木学会第17回土木情報シンポジウムテキスト P. 156~162