

多元的集計化に基づく社会基盤整備の 評価手法に関する研究

中日本高速道路株式会社 山本浩司*

東京工業大学大学院 羽鳥剛史*2

株式会社パスコ 岡田貢一*3

株式会社パスコ 青木一也*4

京都大学経営管理大学院 小林潔司*5

By Kouji YAMAMOTO, Tsuyoshi HATORI, Koichi OKADA,

Kazuya AOKI and Kiyoshi KOBAYASHI

社会基盤施設は多面的な機能を有しており、国民生活に多様な効果をもたらす。社会基盤整備に関わる政策調整や国民に対するアカウンタビリティを果たす上では、社会基盤整備の多面的な機能や関係主体の意見の相違を適切に判断し、その結果を分かりやすく提示することが重要である。この認識の下、本研究では、社会基盤整備の評価手法として、多元的集計化手法を提案した。本研究で提案する方法論は、社会基盤整備に関わる多様な評価情報を多次元空間上に集約して表現することによって、関係主体間の意見や視点の対立軸を明確化し、事業の相対的な序列化を行うことを目的とする。本稿では、本研究の多元的集計化手法を、高速道路付帯施設の整備計画に適用し、分析手法の適用可能性と有効性を実証的に検証した。その結果、多元的集計化手法を用いることにより、社会基盤整備事業の多様な効果や評価者の立場や考え方の相違を体系的に明示化できることが確認された。さらに、本手法は、評価項目の設定方法の妥当性を検証する上で、有用な示唆を与えることが示された。

【キーワード】多元的集計化、費用・便益分析、多次元尺度法、高速道路付帯施設

1. はじめに

社会基盤整備は国民生活に長期的・広域的な影響を与える。社会基盤の広域的整備効果は、住民の生活環境改善、地域経済の活性化、地域間交流の促進等、極めて多岐に渉る。さらに、国民の社会経済活動が多様化・複雑化する中で、国民が社会基盤施設に求める機能や効果もますます多種多様となっている。社会基盤整備に関わる意思決定者は、当該事業に関わる様々な利害関係者の意見を踏まえながら、社会基盤整備の多面的な機能や多様な効果を適切に把握することが必要である。

これまで、社会基盤整備の評価手法として様々な方法論が検討されてきた。しかし、社会基盤整備の

持つ多面的な効果や多様な利害関係者の意識や考え方の相違を適切に把握するための方法論が十分に確立しているとは言い難い。社会基盤整備に関する行政計画の調整や国民に対するアカウンタビリティ向上を図る上でも、社会基盤整備の多面的機能や評価主体の多様な考え方を体系的に明示化する手法を検討し、社会基盤整備の評価技術や評価体系を高度化することが必要である。

この問題意識の下、本研究では、社会基盤整備の評価手法として、多元的集計化手法を提案する。本手法は、社会基盤整備に関わる多様な評価情報を多次元空間上に集約して表現することによって、評価者間の意見や視点の対立軸を明確化し、事業の相対的な優先度を明らかにすることを目的とする。本手

*1 横浜支社保全サービス事業部 045-475-9239, k.yamamoto.af@c-nexco.co.jp

*2 理工学研究科 助教 03-5734-2590, hatori@plan.cv.titech.ac.jp

*3 u-アセット推進室道路マネジメントグループ 03-6412-3880, koichiokada@pasco.co.jp

*4 研究開発センター応用技術開発課 03-3715-4011, kazuyaaoki@pasco.co.jp

*5 経営管理講座 教授 075-383-3223, kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

法を用いることによって、社会基盤整備に関わるコンフリクト構造や事業の相対的な序列を明らかにすることが可能である。本稿では、多元的集計化手法の適用事例として、高速道路付帯施設の整備計画を取り上げ、本研究で提案する分析手法の適用可能性を検証する。

以下、2. では本研究の基本的な考え方を説明する。3. では本研究で提案する多元的集計化手法について説明する。4. では、本手法の適用事例について述べる。

2. 本研究の基本的考え方

(1) 社会資本整備の評価手法

社会基盤整備の評価は、施策・事業とその社会的効果との間の一連の関連性を整理・検証し、社会基盤整備に関わる決定問題の論理構造を明らかにするものである^{1),2)}。社会基盤整備の評価手法は、大きく1)費用便益分析と2)多基準分析の2つに大別される^{1),3)}。費用便益分析は、施策・事業の実施によって生じる便益と費用を貨幣換算し、施策・事業の経済的妥当性を評価する手法であり、実際の行政決定において広範に検討されてきた。しかし、施策・事業の効果を貨幣的単一次元に集約するため、貨幣換算が困難な効果を考慮できないという問題が指摘されている。

一方、多基準分析は、施策・事業の効果を貨幣換算することに固執せず、非貨幣的基準を含んだ複数の評価基準を基にして施策・事業の相対的重要度を評価する手法である。多基準分析は大きく、1)各評価項目に重み（ウェイト）を付けて、総合得点化する方法（以下、総合得点化手法という）、2)多様な評価尺度に基づく評価結果をわかりやすく整理し、最終的には意思決定者の判断に委ねる方法（以下、整理手法という）の2つに分類される⁴⁾。第1に、総合得点化手法は、それぞれの評価項目に重みを付けることによって、施策・事業の総合得点を算出するものであり、AHP（Analytic Hierarchy Process）手法⁵⁾やコンコーダンス分析⁶⁾等が提案されている。総合得点化手法は、施策・事業が持つ多様な効果を一元的な評価値に還元でき、明確な評価結果を導出できる点で有効な手法である。その一方で、評価者に

よって重み付けが異なるため、重み付けの妥当性をいかにして判断するかが大きな課題である。施策・事業の総合得点を算出するだけでは、重み付けの妥当性を判断するために必要な情報が検知できない可能性がある。

第2に、整理手法は、施策・事業の効果や評価者の選好等、社会基盤整備に関わる多様な情報を体系的に整理するものであり、例えば、目標達成法やファクター・プロフィール法等が提案されている⁷⁾。ただし、多数の施策・事業や評価者を対象とする場合、ただ単に評価結果を列挙するだけでは、様々な情報が錯綜し、その評価内容を直感的に把握することは難しい。

本研究で提案する多元的集計化手法は、施策・事業の効果を一元的な評価値に還元するのではなく、評価者の視点の対立軸を明確化し、それぞれの個別軸に対して施策・事業を序列化するものである。この点で、本手法は、多基準分析における整理手法に属する。ただし、異なる評価尺度に基づく評価結果を列挙するだけでなく、評価者間の意見や視点の対立軸を明らかにすることによって、社会基盤整備に関わるコンフリクトの構造を視覚的に明示化するとともに、事業の相対的な序列を体系的に整理することに本手法の狙いがある。

なお、多元的集計化手法は、社会基盤整備に関わる判断情報を整理するものであるが、最終的な判断は意思決定者に委ねられる。前述したように、総合得点化手法と整理手法はそれぞれ長所と短所を持っており、いずれかの手法を一義的に採用することは得策ではなく、両手法を一体的・補完的に用いることが有用である。本研究で提案する多元的集計化手法は、総合得点化手法によって得られた評価結果と相互比較することによって、評価項目の重み付けや評価体系の見直しを図り、社会基盤整備に関わる意思決定を支援することが期待できる。

(2) 多元的集計化手法による評価情報の集約化

本研究で提案する多元的集計化手法は、社会基盤整備に関わる多様な評価情報を多次元空間上に集約して表現することによって、評価者の視点の対立軸を明確化し、施策・事業の相対的な優先度を明らかにすることを目的とする。その具体的な分析手法と

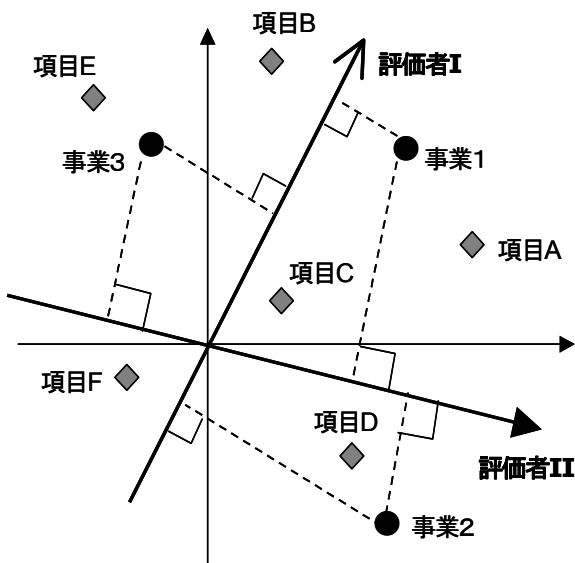


図-1 多元的集計化手法の分析例

して、多次元尺度構成法 (multidimensional scaling; MDS) を用いる⁸⁾⁻¹¹⁾。多次元尺度構成法は、1) データの中に潜んでいるパターン、すなわち構造を取り出し、2) その構造を幾何学的に表現し、視覚的に理解しやすくすることを目的としている⁸⁾。この手法は、分析対象について収集されたデータが備えている特徴を、幾何学的関係によって明示化する。多次元尺度構成法の分析手法として、様々なモデルが提案されているが、本研究では、その中でも1) クラスカルの方法、2) ベクトルモデル、3) 理想点モデルの3つを用いる。これらの手法の具体的な分析手法は次章において説明するが、以下では、これらの手法の概要を述べる。

事業に関わる評価情報を大きく1) 評価項目、2) 事業の評点、3) 評価者の重み付けの3つの要素に区分しよう。ここで、評価項目は、事業を評価するための規準を表しており、例えば、「道路事業評価手法検討委員会 (以下、検討委員会と呼ぶ)」では、「費用対効果」、「採算性」、「外部効果 (波及的影響)」の3つの大項目と6つの中項目、16の小項目から成る評価項目の体系が提案されている¹²⁾。また、事業の評点と評価者の重み付けは、それぞれ事業の各評価項目に対する評価点や貢献度、事業評価者の各評価項目に対する重み付けを表しており、アンケート調査や現地調査等を通じて得られるデータである。

図-1に、本研究の多元的集計化手法を用いて、以上の1) 評価項目、2) 事業、3) 評価者を空間上に

配置した例を示す。図中、評価項目と事業は空間上の点として配置される。まず、評価項目は、評価者の重み付けデータに基づいて配置される。ここで、近くに位置する項目同士は、評価者の間で全体的に重み付けの与えられ方が類似していることを表しており、反対に、遠くに位置する項目同士は重み付けの与えられ方が類似していないことを表している。一方、事業は評点データに基づいて配置される。事業を表す点に近い評価項目ほど、当該事業がその項目に対して相対的に高い貢献度を有していることを表している。図-1では、事業1は、項目Aや項目Bに対して他の項目に比べて相対的に高い評点を有しており、反対に項目Fに対して低い評点を有している。なお、多元的集計化手法では、空間上の点間距離とそれを基にした配置様相のみが意味を有しており、図心や座標軸そのものには実質的な意味合いはないことに留意する。

次に、評価者は空間上のベクトルとして表現される。評価者を表すベクトルは、評価者の重み付けデータに基づいて配置されており、評価者が重要視している評価項目 (高い重みを付与している項目) の方向に向いている。すなわち、評価者を表すベクトルは、その評価者が自分のベクトルの先にある項目や事業をより重要視していることを示している。厳密には、評価者を表すベクトルに向けて評価項目や事業を表す点を垂直に射影し、その射影点がベクトルの先端にあるものほど、その評価者にとって重み付けや優先度が大きいことを表している。図-1において、評価者と評価項目の関係に着目すると、評価者Iにとって最も重要視する評価項目は項目Bであり、次いで項目Aとなっており、反対に、最も重要視しない評価項目は項目Fであり、次いで項目Dとなっている。一方、評価者IIにとって最も重要視する評価項目は項目Aであり、次いで項目Dとなっており、反対に、最も重要視しない評価項目は項目Eであり、次いで項目Fとなっている。次に、評価者と事業の関係に着目すると、評価者Iにとって、事業1が最も選好されており (優先順位が高く)、次いで事業3、事業2の順である。一方、評価者IIにとっては事業2、1、3の順に選好されている。

また、図-1から、評価者の優先順位付けを、評価者の重み付けの相違、及び事業の評点の相違によっ

て説明することが出来る。すなわち、評価者Iは項目Bに高い重みを与えており、事業1がこの項目に対して高い貢献度を有しているため、評価者Iにとって事業1の優先度が高くなるものと考えられる。評価者IIについても同様である。

以上のように、多元的集計化手法を用いることによって、「どの評価者がどの評価項目に対して高い重み付けを与えているか」、「どの事業がどの評価項目に対して高い貢献度を有しているか」、「どの評価者にとって、どの事業が高い優先度を有しているか」という評価項目、評価者、事業の間に成立する関係を体系的に整理することが出来る。その結果、評価者間のコンフリクトの構造を明らかにするとともに、事業の相対的な序列化を行うことが可能である。本例では、比較的少数の評価者、評価項目、事業を取り上げたが、評価者、評価項目、事業の数が多くなるほど、事業評価を巡る複雑な問題状況を直感的に把握する本手法の有用性が高くなると期待される。

(3) 多元的集計化手法の有用性

多元的集計化手法は、社会基盤整備に関わる意思決定を直接的に行うものではないものの、多様な関係主体間の意思決定を支援するための有用な情報を提供する。本手法の有用性として、a) 論点の明確化、b) 評価体系の再構築を挙げることが出来る。

a) 論点の明確化

多元的集計化手法は、評価者の意識や考え方の相違点を明確化し、議論の論点を整理する上で有用である。本手法を適用することにより、評価者の立場や考え方の違いをベクトルの方向の違いとして表現でき、ベクトルに対する事業や評価項目の位置付けを確認することによって、議論の論点となる事業や評価項目を抽出することが出来る。その結果、的を絞った話し合いが展開され、意思決定までの過程が円滑になる効果が期待できる。

例えば、図-1のケースでは、項目Aが評価者Iと評価者IIを表すベクトルの先端部に挟まれるように位置している。このことから、両評価者の意見は項目Aを重視することに関して一致しており、両者の間でさらなる話し合いの必要性は少ないことが予想される。話し合いにおいて論点となるのは、一方の

評価者が重視し、他方の評価者が重視しないような項目であり、図-1のケースでは、項目Bや項目Dに該当する。したがって、評価者Iと評価者IIの間では、これらの項目の重要性について重点的に議論する余地があると考えられる。

さらに、以上の多元的集計化プロセスを繰り返し実施し、その結果をフィードバックすることによって、評価者の意見の収束状況を調べることが出来る。ここで、意見の収束は、評価者を表すベクトルの方向がお互いに近づくことによって表現できる。また、本手法を費用便益評価や総合得点化手法による優先度評価と補完的に活用することによって、優先度評価の結果と評価者の意見収束状況を同時に勘案しつつ、最終的な施策・事業の優先度を確定することが出来る。もちろん、評価者間の意見の違いが収斂しない場合には、何らかの方法で最終的な意思決定を行わざるを得ない。ただし、この場合においても、本手法を用いることによって、どのような点において評価者の意見が相違しているかを明確にした上で、最終判断を下すことが可能である。

b) 評価体系の再構築

前述の「検討委員会」の検討案¹²⁾に見られるように、社会基盤整備の評価体系は一般に、上位項目から下位項目までの階層的な評価項目から構成される。この時、社会基盤整備の評価結果が評価項目をどのように設定するか依存する場合が少なくなる。本研究の多元的集計化手法は、各階層の評価項目の設定が妥当であるか否かを判断する上で有用である。多元的集計化の結果、空間上でお互いに近接した評価項目は、評価者の間で類似性が高いと認識されている可能性が高い。この時、近接した下位項目が同一の上位項目に属しているか否かを調べることで、上位項目と下位項目とが適切に対応しているかどうかを確認することが出来る。さらに、どの評価者からも重要視されていないような評価項目を抽出することにより、評価体系から除外すべき項目を検討する上での判断材料を得ることが出来る。このように、多元的集計化手法を用いることによって、評価項目間の整合性を検証し、評価者の認識により近い評価項目を設定することが期待される。

図-1のケースにおいて、例えば、項目Aと項目Bが同一の上位項目に属していると考えよう。しかし、

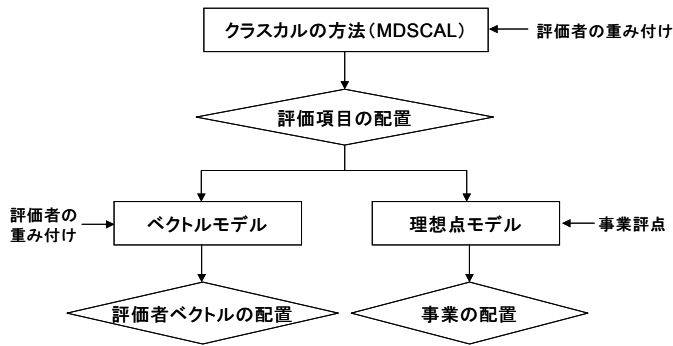


図-2 多元的集計化手法の分析手順

これらの項目の空間上の布置を見ると、両項目がお互いに遠くに位置付けられている。この結果は、上位項目と下位項目の設定が多数の評価者の認識とは乖離している可能性を示唆している。この場合、上位項目を修正し、空間上の距離が近いものを一つの上位項目として設定し直すことによって、評価者の認識により合致するように評価項目を設定することが出来る。また、評価項目 F は両評価者から重要視されておらず、評価項目からこの項目を除外すべきか否かについて議論の余地があるものと考えられる。

3. 多元的集計化手法

(1) 多元的集計化手法の手順

本章では、多元的集計化手法の具体的な分析手法として、1) クラスカルの方法 (MDSCAL)、2) ベクトルモデル、3) 理想点モデルの3つの手法について説明する。

複数事業の評価問題を考えよう。当該事業に関わる評価情報は、1) 評価項目、2) 評価者の重み付け、3) 事業評点に分けられる。事業の効果を測る基準は、 K 個の評価項目から構成されると考える。評価者は N 人であり、評価者 i ($i = 1, \dots, N$) が評価項目 j ($j = 1, \dots, K$) に付与する重み付けを σ_{ij} で表現する。また、評価対象となる事業の数は R であり、事業 r ($r = 1, \dots, R$) の評価項目 j ($j = 1, \dots, K$) に対する評点を γ_{rj} で表現する。

本研究では、図-2に示す手順に従って、多元的集計手法を実施する。まず、クラスカルの方法により、評価者の重み付けデータ σ_{ij} を用いて、評価項目を空間上に配置する。次に、ベクトルモデルを用いて、

空間上に評価者の選好を表すベクトルを配置し、評価項目とそれに対する評価者の重み付けとの関係を明確化する。最後に、理想点モデルにより、事業の評点データ γ_{rj} を用いて、空間上に事業を配置し、評価項目とそれに対する事業の貢献度 (評点) との関係、及び、評価者とその事業に対する優先度との関係を明確化する。以下では、それぞれの手法の具体的な分析方法について述べる。

(2) 評価項目の配置：Kruskalの方法 (MDSCAL)

評価項目の配置には、KruskalのMDSCAL手法を用いる^{13)–15)}。MDSCALは、非計量多次元尺度構成法の1つであり、評価項目間の類似度及び非類似度の順序情報に基づいて各項目の配置を決定する。

本研究では、評価項目に対する評価者の重み付けデータを用いて、評価項目間の非類似度を算出する。項目 j と項目 k 間の非類似度 δ_{jk} は、重み付けに関する相関係数を用いて、以下のように定義される。

$$\delta_{jk} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{ij} - \bar{\sigma}_j)(\sigma_{ik} - \bar{\sigma}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{ij} - \bar{\sigma}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{ik} - \bar{\sigma}_k)^2}} \quad (1)$$

ただし、 $\bar{\sigma}_j$ は、項目 j に対する全評価者の重み付けの平均を表しており

$$\bar{\sigma}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{ij} \quad (2)$$

で表現される。

MDSCALは、上記の非類似度データを用いて、異なる項目間の非類似度が大きいほど、その項目間の空間上の距離も大きくなるように (単調性の条件)、各項目を p 次元空間に配置する。今、評価項目 j を表現する空間上の座標を $\mathbf{x}_j = (x_{j1}, \dots, x_{jp})$ と表現しよう。このとき、項目 j と項目 k を表現する点の多次元空間上の距離 d_{jk} は

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{r=1}^p (x_{jr} - x_{kr})^2} \quad (3)$$

と定義される。MDSCALは、非類似度 δ_{jk} と距離 d_{jk} との間に弱単調関係

$$\delta_{jk} > \delta_{lm} \quad \text{ならば} \quad d_{jk} \geq d_{lm} \quad (4)$$

が成立するように各項目の配置を決定する。ただし、一般に、全ての評価項目の組み合わせについて、上

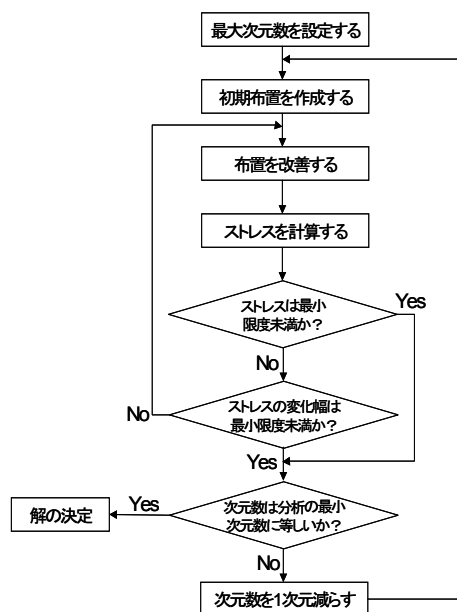


図-3 MDSCALの計算アルゴリズム

記の単調性の条件を満たすように各項目を空間上に配置することは、限られた空間次元では不可能である。Kruskalは、空間布置がこの単調性の条件をどの程度満たしているかを測る尺度として、類似度と点間距離の不適合度を表すストレス

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k=2, k>j}^K (d_{jk} - \hat{d}_{jk})^2}{\sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k=2, k>j}^K (d_{jk} - \bar{d})^2}} \quad (5)$$

を定義している。ここで、 \bar{d} は点間距離の平均値を表し

$$\bar{d} = \frac{\sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k=2, k>j}^K d_{jk}}{KC_2} \quad (6)$$

で表現される。また、 \hat{d}_{jk} はディスパリティと呼ばれ、非類似度 δ_{jk} と単調関係を満足する変数である。すなわち、

$$\delta_{jk} > \delta_{lm} \text{ ならば } \hat{d}_{jk} \geq \hat{d}_{lm} \quad (7)$$

が成立する。

MDSCALは、上記で定義したストレス S を最小化する配置を求めるため、最急降下法による繰り返し計算を行う(付録1参照)。図-3に、MDSCALの計算アルゴリズムを示す¹⁵⁾。MDSCALでは、多次元空間上の各点の位置を少しずつ改善し、反復的にストレスを減少させる。このステップをストレスが収束するまで繰り返すことにより最適な布置を求めることができる。以上の作業を、次元数を変えながら

実施し、最小化されたストレスを吟味して、最適な次元数と配置を決定する。

なお、評価項目間の相対的類似度データをより精密に空間上に再現するためには、高次元の空間を設定する必要がある。ただし、次元数が3以上の場合、空間上の配置を視覚的に把握し難いため、通常は、2次元空間を想定する。以下の適用事例でも、2次元空間を仮定する。

(3) 評価者の配置：ベクトルモデル

評価者の配置には、選好の写像分析法(PREFMAP手法)のベクトルモデルを用いる^{10),15),16)}。ベクトルモデルは、前述した評価項目の空間布置が与えられている時、各評価者を空間内のベクトルとして表現する。その際、各評価項目に対する評価者の重み付けが、その評価者を表現するベクトルに対する各項目からの射影に対応するように、各評価者のベクトルを配置する。

p 次元空間において、評価者 i を表すベクトルを $\mathbf{y}_i = (y_{i1}, \dots, y_{ip})'$ で表そう。また、各評価項目を表す座標を行列 X

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{K1} & \cdots & x_{Kp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

で表現する。この時、評価者のベクトル \mathbf{y}_i に対する評価項目の射影は、

$$\boldsymbol{\rho}_i = X\mathbf{y}_i \quad (9)$$

で表される。ベクトルモデルは、射影ベクトル $\boldsymbol{\rho}_i$ と評価者 i の重み付けベクトル $\boldsymbol{\sigma}_i = (\sigma_{i1}, \dots, \sigma_{iK})'$ との間に、線形関係が成立するものと仮定する。すなわち、以下の回帰モデルが成立すると考える。

$$\boldsymbol{\sigma}_i = \boldsymbol{\rho}_i + \beta_i \mathbf{1}_p + \boldsymbol{\epsilon}_i \quad (10a)$$

$$= [X, \mathbf{1}_p] \begin{pmatrix} \mathbf{y}_i \\ \beta_i \end{pmatrix} + \boldsymbol{\epsilon}_i \quad (10b)$$

$$= Y\boldsymbol{\beta}_i + \boldsymbol{\epsilon}_i \quad (10c)$$

上式(10a)の第二項 $\beta_i \mathbf{1}_p$ は定数項を、第三項 $\boldsymbol{\epsilon}_i$ は誤差項を表す。ここで、ベクトル $\mathbf{1}_p$ はすべての要素が1の p 次元ベクトルを表している。また、 $Y = [X, \mathbf{1}_p]$ 、 $\boldsymbol{\beta}_i = (\mathbf{y}_i, \beta_i)'$ である。

ベクトルモデルでは、最小二乗法を用いて、上式の誤差項が最小になるように評価者ベクトル \mathbf{y}_i の推定値を決定する。すなわち、評価者の重み付けベクトルと射影ベクトルとの誤差の二乗和を

$$\xi = (\boldsymbol{\sigma}_i - Y\boldsymbol{\beta}_i)'(\boldsymbol{\sigma}_i - Y\boldsymbol{\beta}_i) \quad (11)$$

と定義すると、この ξ を最小化する $\boldsymbol{\beta}_i$ の推定値は、

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_i = (Y'Y)^{-1}Y'\boldsymbol{\sigma}_i \quad (12)$$

で与えられる。以上の推定値から、関係式 $\boldsymbol{\beta}_i = (\mathbf{y}_i, \beta_i)'$ より評価者 i のベクトル \mathbf{y}_i が算定される。

(4) 事業の配置：理想点モデル

事業の配置には、PREFMAP手法のうちの理想点モデルを用いる^{10),15),17)}。理想点モデルは、評価項目の空間布置が与えられている時、事業の評点データを用いて、各事業を空間内の点（理想点）として表現する。その際、事業の各評価項目に対する評点が、その事業を表現する点と各項目の点との距離に対応するように、各事業を配置する。

事業 r を表す点を座標 $\mathbf{z}_r = (z_{r1}, \dots, z_{rp})$ と表現しよう ($r = 1, \dots, R$)。事業 r の評価項目 j に対する評点 γ_{rj} にマイナスを乗ずることによって、評価項目 j に対する事業 r の非貢献度 $\omega_{rj} = -\gamma_{rj}$ が求められる。ここで、事業 r の非貢献度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}_r = (\omega_{r1}, \dots, \omega_{rK})'$ で表現する。理想点モデルでは、事業の非貢献度が評価項目と事業を表す点との間の距離の二乗と線形関係を持つものと仮定する。すなわち、以下の回帰モデルが成立すると考える。

$$\boldsymbol{\omega}_r = a_r \mathbf{d}_r^2 + b_r \mathbf{1}_p + \boldsymbol{\epsilon}_r \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{d}_r = (d_{r1}, \dots, d_{rK})'$ は、事業 r を表す点から項目 j を表す点までの距離を第 j 要素とするベクトルを表している。距離ベクトル \mathbf{d}_r は

$$\mathbf{d}_r^2 = \text{diag}(XX')\mathbf{1}_p - 2X\mathbf{z}_r + \mathbf{z}_r'\mathbf{z}_r\mathbf{1}_p \quad (14)$$

で表現される。ここで、 $\text{diag}(XX')$ は行列 XX' の対角要素をその対角要素とする対角行列であり

$$\text{diag}(XX') = \begin{bmatrix} \sum_{h=1}^{h=p} x_{1h}^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sum_{h=1}^{h=p} x_{Kh}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

で表現される。式(13)に上式(14)を代入すると、上記の回帰モデルは

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_r &= a_r \mathbf{u} + X(-2a_r \mathbf{z}_r) + f_r \mathbf{1}_p + \boldsymbol{\epsilon}_r \\ &= [\mathbf{u}, X, \mathbf{1}_p] \begin{pmatrix} a_r \\ -2a_r \mathbf{z}_r \\ f_r \end{pmatrix} + \boldsymbol{\epsilon}_r \\ &= U\mathbf{c}_r + \boldsymbol{\epsilon}_r \end{aligned} \quad (16)$$

で表現される。ただし、

$$\mathbf{u} = \text{diag}(XX')\mathbf{1}_p \quad (17a)$$

$$f_r = b_r + a_r \mathbf{z}_r' \mathbf{z}_r \quad (17b)$$

である。また、 $U = [\mathbf{u}, X, \mathbf{1}_p]$ 、 $\mathbf{c}_r = (a_r, \mathbf{z}_r', f_r)'$ である。

理想点モデルでは、前述のベクトルモデルと同様に、最小二乗法を用いて、上式の誤差項が最小になるように事業 \mathbf{z}_r の推定値を決定する。すなわち

$$\lambda = (\boldsymbol{\omega}_r - U\mathbf{c}_r)'(\boldsymbol{\omega}_r - U\mathbf{c}_r) \quad (18)$$

と定義すると、この λ を最小化する \mathbf{c}_r の推定値は、

$$\hat{\mathbf{c}}_r = (U'U)^{-1}U'\boldsymbol{\omega}_r \quad (19)$$

で与えられる。以上の推定値から、関係式 $\mathbf{c}_r = (a_r, \mathbf{z}_r', f_r)'$ より、事業 r の布置 \mathbf{z}_r が算定される。

4. 適用事例：高速道路付帯施設の整備計画

(1) 対象事例と評価体系

本研究では、以上で述べた多元的集計化手法を実際の社会基盤整備の事業評価に適用する。適用事例は、NEXCO中日本横浜支社管轄内の高速道路付帯施設の改善事業である。NEXCO中日本横浜支社では、高速道路付帯施設の整備計画を立案するに当たって、表-1に示すような合計16個の改善事業案を検討している。

本研究では、これらの事業の効果を計測する上で、独自の評価指標を検討し、最終的に表-2に示すような評価指標を設定した。この評価体系は「大項目」、「中項目」、「小項目」から構成される。まず、大項目について、「費用対便益」と「波及的影響」の2つの指標を設定した。次に、中項目の「費用対便益」について、「走行時間短縮便益」と「走行経費減少便益」

表-1 改善事業案

対象施設		概要	長所
1	可変式道路情報板設備 (表示板)	LED の採用により情報掲示板を 8 色のマルチカラーが表示可能なモニタ化	長寿命の LED の採用、8 色のマルチカラーが表示可能なモニタを使用することにより、カラー画像による情報提供、道路利用者の視認性向上が図れる
2	可変式道路情報板設備 (表示板)	端末設備を IP 化することにより、故障監視や施設管理者によるリモート操作でのリセット復旧による自動復帰を可能、リモートでの応急対応機能の追加	リセット復旧により、緊急対応に要する規制回数を削減でき、故障発生時に暫定的に復旧させる OFF/ON のリモート操作ができる
3	可変式速度規制標識設備	端末設備を IP 化することにより、故障監視や自動復帰を可能	リセット復旧により、緊急対応に要する規制回数を削減できる
4	交通量計測設備 (検出部)	画像式トラカンの採用により、画像処理装置による交通量計測精度の向上を図り、代表トラカンへの採用を検討	センサー部の埋設が不要 交通量データの精度向上
5	トンネル内非常用設備 (火災検知器)	光ファイバ型温度感知器(電子ケーブル含む)等の導入	長距離にわたり温度監視が可能であり、電磁誘導の影響を受けない
6	トンネル内非常用設備 (火災検知器)	50m型火災検知器を 50m ピッチで設置	火災検知器の設置個数を半分にし、保守点検時間を削減
7	トンネル内非常用設備 A 案 (水噴霧設備)	水噴霧ヘッドを低位置に布設	水噴霧放水ヘッドの設置位置を低位置に設置することで高所作業車が不要になる
8	トンネル内非常用設備 B 案 (水噴霧設備)	水噴霧ヘッドの取り付けピッチを、現行の 5m から 25m にする	水噴霧ヘッドの取り付けピッチを、現行の 5m から 25m にすることにより、ヘッドの数の低減効果
9	トンネル内非常用設備 (水噴霧設備)	トンネル側壁部 (低位置) より、火災箇所へ放水する「放水銃設備」を導入	水噴霧に代わる設備として「放水銃」を整備することにより、消化効率向上が図れる
10	トンネル内非常用設備 (水噴霧設備)	メンテ弁機構付き自動弁を採用	自動弁開放試験を省力化
11	トンネル内換気設備 (ジェットファン)	小型ジェットファンを監査路上に設置し、ジェットファンの清掃点検に関する交通規制を削減	ジェットファンの小型化による費用削減、清掃点検に伴う交通規制削減効果
12	トンネル内標識照明設備 (誘導表示灯)	N 夜光を用いた標識の導入	電源を必要としない 耐光性、耐候性に優れ、暗闇で長時間発光
13	トンネル照明設備 (トンネル照明灯具)	蛍光灯に代わる長寿命セラミックメタルはライドランプを採用した基本照明	ランプの長寿命化に伴いランプ交換に伴う規制削減
14	トンネル照明設備 (トンネル照明灯具)	2 灯用 (器具 1 台にランプを 2 本収納) にすることにより設置台数を従来の約 1/2 に削減	入口照明器具の設置台数を 1/2 に減らすことでコスト削減
15	トンネル照明設備 (トンネル照明灯具)	トンネル照明器具と分岐ケーブルのコネクタ接続化する	トンネル照明器具のケーブル改良により頭具更新のときに作業時間短縮
16	道路照明設備 (道路照明灯具)	LED の採用によりランプの長寿命化	長寿命であるが高価格、価格に見合うだけの寿命があれば採用されるであろう、また製品として流通量が増加すれば価格低下も望まれる

の2つの指標を設定した。また、「波及的影響」については、高速道路の事業評価で通常検討される「経済性」、「走行快適性の向上」、「環境」に加えて、維持管理業務の短縮効果を表す「保全性の向上」と工事規制の削減による安全性の向上を表す「安全性」の合計5つの指標を設定した。最後に、小項目については、中項目で示された5つの項目を細分化し、合計10個の評価指標を設定した。その上で、各対象事業について、それぞれの指標の評価値を算定した。

本研究では、平成19年9月に、道路施設管理の企画立案に従事する者5名、道路施設管理の実務に従事する者5名、技術開発に従事する者3名の合計13名を対象として、アンケート調査を実施し（以下、

第1回アンケート調査と呼ぶ）、各評価指標に対する重み付けを尋ねた。その際、1)大項目の2つの指標の合計が100、2)「費用対便益」を構成する中項目の2つの指標の合計が100、3)「波及的影響」を構成する中項目の5つの指標の合計が100、さらに3)同一の中項目に属する小項目の指標の合計がその中項目指標に配分された重みと等しくなるように、重み付けを回答してもらった。その回答結果を表-3に示す。表中、N1からN5は道路施設管理の企画立案に従事する者、J1からJ5は道路施設管理の実務に従事する者、E1からE3は技術開発に従事する者を表している。

さらに、上記のアンケート調査の分析結果を受け

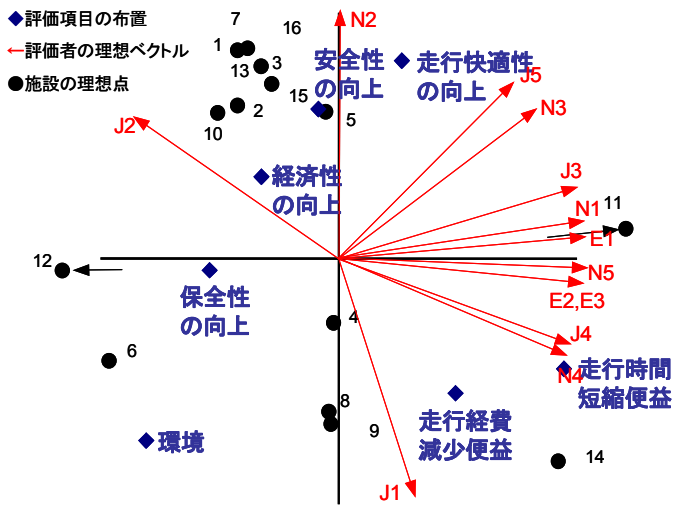


図-4 多元的集計化手法の結果（第1回アンケート調査）

て、評価項目の設定方法を変えた上で、平成19年11月に、再度アンケート調査を実施した（以下、第2回アンケート調査と呼ぶ）。このアンケート調査では、道路施設の整備・管理計画に直接的に携わっている企画立案者4名を対象として、評価項目の設定方法、及び、多元的集計化手法のフィードバック情報（第1回アンケート調査結果）が調査対象者の重み付けに及ぼす影響について検討した。新しい評価項目の設定とその評価結果に関しては後述する。なお、評価項目の設定方法やフィードバック情報が事業評価に及ぼす影響についてより厳密に調べるためには、今後、より広範なサンプルを用いた調査検討が必要である。本調査はそうした検討の第1歩と位置づけられる。

(2) 第1回アンケート調査の結果

a) 多元的集計化手法の評価結果

第1回アンケート調査によって得られた重み付けデータと事業の評点データを用いて、多元的集計化手法を適用し、評価項目、評価者、事業を2次元空間上に配置した結果を図-4に示す。ここで、事業11と事業12は、原点から離れた位置にあり、図中に配置できなかったため、矢印を用いてその方向を示している。また、評価項目は、中項目を構成する合計7つの評価指標を示している。ただし、アンケート調査では、費用対便益に属する2つの指標と波及的影響に属する5つの指標のそれぞれについて、その合計が100となるように重み付けを回答してもらっ

たため、そのままの形では、異なる形式で回答してもらった重み付けを互いに比較することは出来ない。本研究では、アンケート調査において、これらの評価指標に付与された重み付けに対して、その評価指標を構成する大項目に対する重み付けを乗ずることによって、7つの指標の重み付けを互いに比較可能な形に変換した。例えば、表-3において、評価者N1が「走行時間短縮便益」に付与した重み付けは「80」であるが、それを構成する大項目「費用対便益」に対する重み付けが「60」であるため、「走行時間短縮便益」に対する重み付けを「 $80 \times 60 / 100$ 」によって算定し直した。この結果、中項目の7つの指標に対する重み付けの合計は100となる。

i) 評価者の類型化

図-4において、評価者を表すベクトルに着目すると、評価者をそのベクトルの向きによっていくつかのタイプに類型化することが出来る。図-4より、多数の評価者が近接しており、評価者N2, J1, J2のみ、他の評価者と異なる方向を向いている。この結果から、評価者を概ね4つのタイプに類型化できると考えられる。各タイプの評価者ベクトルと評価項目との関係を見ると、第1に、多数の評価者のベクトルの先端に位置する評価項目は、「費用対便益」に属する「走行時間短縮便益」と「走行経費減少便益」、及び「波及的影響」における「走行快適性の向上」であり、評価者の多くがこれらの項目を重要視しているものと考えられる。第2に、評価者J1も、そのベクトルの向きから、「費用対便益」を重視しているが、それと同時に「波及的影響」の「環境」を重視していると考えられる。第3に、評価者N2は、「費用対便益」をそれほど重視しておらず、「波及的影響」における「走行快適性の向上」や「安全性の向上」を重視していると考えられる。第4に、評価者J2も同様に「費用対便益」を重視しておらず、「波及的影響」における「経済性の向上」や「保安性の向上」を重視していると考えられる。実際、表-3に示した重み付け結果を見ると、おおむね以上に述べた傾向と整合していると考えられる。これらのベクトルの向きの相違は、評価者の意見や視点の対立軸を表している。

ii) 事業の類型化

また、図-4において、事業に着目すると、事業をそ

表-2 評価項目の体系

項目	評価の指標		評価の視点	評価指標
大項目	費用対便益		工事規制等の削減に伴い、社会的便益（走行時間短縮、走行経費減少）が費用（建設費、維持管理費の計）を上回るか。【事業の必要性】	（中項目から算定）
	波及的影響		費用対便益の計算が困難な効果・影響があるか。	（中項目から算定）
中項目	費用対便益	走行時間短縮便益	工事規制時間減少に伴う走行時間減少便益を評価する。	費用便益費（B/C）
		走行経費減少便益	工事規制時間減少に伴う走行経費減少便益を評価する。	費用便益費（B/C）
	波及的影響	安全性の向上	設備の機能向上等により安全性の向上（故障修理時間の短縮）を評価する。	（小項目から算定）
		経済性の向上	設備の機能向上等による経済性の向上を評価する。	（小項目から算定）
		安全性の向上	工事規制等（路上作業含む）の削減による道路利用者及び管理者の安全性向上を評価する。	（小項目から算定）
		走行快適性の向上	工事規制の削減、情報提供設備の機能向上、故障修理時間の短縮等の削減による走行快適性の向上を評価する。	（小項目から算定）
環境	工事規制等の削減に伴う自動車走行測度向上による生活環境の保全・改善への寄与、地球温暖化対策への寄与を評価する。	（小項目から算定）		
小項目	安全性	時間短縮	設備の機能向上等により安全性の向上（故障修理時間の短縮）を評価。清掃・点検、補修、設備更新に要する時間が短縮される。	道路管理者が設備の管理に要する時間（分）
	経済性	費用削減	設備の機能向上等による経済性の向上を評価。清掃・点検費用、補修費用、設備更新費用が削減される。	設備の維持管理に係る費用（円）
		電気料金	電気料金が削減される。	省エネ、効率化に伴う電気料金（円）
	安全性	道路利用者	工事規制等の削減により道路利用者の安全性が向上する。	事故件数（件）
		道路管理者	工事規制等の削減により道路管理者（社員、請負人等）の安全性が向上する。	事故件数（件）
	走行快適性	工事削減	工事規制の削減、情報提供設備の機能向上、故障修理時間の短縮等の削減による走行快適性の向上する。	平均旅行速度（km/h）
		機能向上	情報提供設備の機能向上に伴い、走行快適性が向上する。	渋滞時間（分）
	環境	NOx, SPM	工事規制等の削減による一定速度での走行が可能となりNOx, SPM排出量が削減される。	NOx, SPM排出量（kg）
		効率的	効率的なエネルギーの利用が可能となる。	エネルギー使用量
CO2		工事規制等の削減による一定速度での走行が可能となりCO2排出量が削減される。	CO2排出量（kg）	

の空間上の布置によっていくつかのタイプに類型化することが出来る。図-4では、まず、多数の事業が「波及的影響」における項目「安全性の向上」、「経済性の向上」、「走行快適性の向上」付近に位置しており、多くの事業がこれらの評価指標に対して高い評点を有しているものと考えられる。その他、「安全性の向上」と「環境」に近いグループ（例えば、事業6）、「走行経費減少便益」と「環境」に近いグループ（事業8）、「走行時間減少便益」と「走行経費減少便益」に近いグループ（事業14）が存在しており、それぞれその理想点に近い評価指標に対して高い評点を有していると考えられる。

iii) 事業の優先度順位

次に、評価者と事業との関係に着目し、上述した評価者の4つのタイプのそれぞれについて、事業の優先度順位を導出する。ここで、お互いに近接する多数の評価者から成る第1のタイプの中から代表的サンプルとして評価者N1を抽出した。その結果を表-4に示す。ただし、優先度順位は、各事業の評点(γ_{rj})に評価者の重み付け(σ_{ij})を乗じた総合得点

$$\sum_{j=1}^K \sigma_{ij}^q \gamma_{rj} \quad (20)$$

によって算定した。ここで、重み付けを評点に掛けるだけでは、重み付けの大小よりも、評点の大小の方が総合得点に反映され易い可能性がある。そのため、上式において、非線形の重み付け($q = 3$)を仮

表-4 事業の優先度評価（第1回アンケート調査）

評価者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N1	14	4	9	8	11	6	7	12	10	1	16	2	13	3	15	5
N2	5	8	9	14	1	16	12	4	6	10	2	7	13	3	15	11
J1	14	4	9	8	6	12	7	10	1	16	2	13	3	15	11	5
J2	9	8	4	12	6	14	10	2	1	7	16	13	3	15	5	11

定し、評価者の重み付けの相違が総合得点に反映され易いようにした。そのため、表-4の優先度順位の結果は、あくまでも事業優先度と図-4における布置との対応関係を確認するためのものであり、実際の優先度評価の結果と必ずしも一致するとは限らない点に留意する。実際の優先度評価において、事業の総合得点を算出する上では、重み付けをどのように乗ずるかについて、慎重に検討する必要がある。

さて、表-4において、評価者間の順位変動が大きい事業は（例えば、事業5や事業14）、重み付けの仕方によって優先度順位が大きく変わるものと考えられる。そこで、これらの事業が評価者や評価項目とどのような関係にあるかを調べるため、再度図-4を見てみよう。図中、これらの事業の布置を見ると、評価者の優先度順位において相対的に高く位置付けられる事業は、その評価者のベクトルに近い傾向にあることが分かる。ここで、評価者と事業の近くに位置する評価項目を見ることによって、何故その事業がその評価者によって優先順位が高いかについて検討することが可能である。例えば、事業14は、評価者N1とJ1のベクトルから近い位置に存在している。これは、事業14が「費用対便益」に対する貢献度が比較的大きく、評価者N1とJ1もこの項目に対する重み付けが高いためであると考えられる。

このように、多元的集計化手法を用いることによって、「どの評価者がどの評価項目に対して高い重み付けを与えているか」、「どの事業がどの評価項目に対して高い評点を有しているか」、「どの評価者がどの事業に対して相対的に高い優先度を有しているか」という評価要素間に成立する関係を体系的に把握することが可能である。その結果、評価者と事業をいくつかのタイプに類型化でき、評価者間の視点の対立軸、及び事業の評点の相違を体系的に明示化することが出来る。さらに、各評価者の優先度評価の相違を、評価者の重み付けや事業の評点の違いによって把握することが出来る。この結果、前述したように、異なるグループ間で優先度評価に関する意見が対立した場合に、対立の原因が何かを同定し、

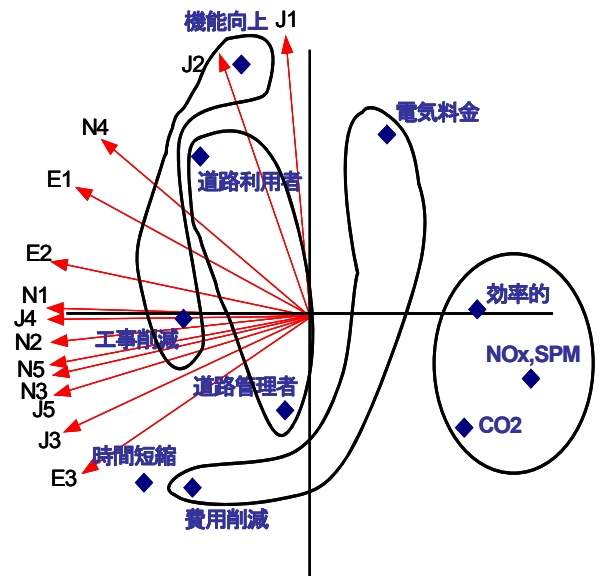


図-5 小項目の布置（第1回アンケート調査）

論点を明確化することが可能である。

b) 評価体系の再構築

小項目における10個の評価指標に対する重み付けデータを基にして、評価指標と評価者を空間上に配置した結果を図-5に示す。図中、個々の小項目を上位の中項目によって括ると、同一の中項目に属する小項目がお互いに乖離していることが分かる。すなわち、中項目「経済性の向上」に属する「費用削減」と「電気料金」がお互いに離れた位置に配置されている。同様に、中項目「安全性の向上」に属する「道路利用者」と「道路管理者」、中項目「走行快適性」に属する「機能向上」と「工事削減」もまた、お互いに離れた位置に配置されている。これらの結果は、中項目と小項目との間の対応関係が評価者の認識と異なっている可能性を示唆している。

本研究では、以上の結果を受けて、「波及的影響」を構成する評価項目を再検討し、新しく評価項目を設定した。新しい評価項目を表-5に示す。この評価項目は、図-5の結果を受けて、空間上で近接した評価項目を、可能な限り1つの中項目として括ることによって求めた。まず、旧評価項目において中項目「保全性」を構成していた「時間短縮」と中項目「経済性」を構成していた「費用削減」とが、図-5においてお互いに近接していることから、お互いに類似した事項として認識されているものと考え、これらをまとめて「保全性・経済性」の中項目に括った。一方、中項目「経済性」に属していた「電気料

表-3 第1回アンケート調査結果

項目	評価指標	N1	N2	N3	N4	N5	E1	E2	E3	J1	J2	J3	J4	J5	
大項目	費用対便益	60	20	35	70	50	60	50	70	40	10	40	40	30	
	波及的影響	40	80	65	30	50	40	50	30	60	90	60	60	70	
中項目	費用対便益	走行時間短縮便益	80	50	70	80	90	80	40	70	60	50	60	50	50
		走行経費減少便益	20	50	30	20	10	20	60	30	40	50	40	50	50
	波及的影響	安全性の向上	15	15	20	15	30	10	20	10	20	20	10	30	10
		経済性の向上	20	25	20	25	30	10	25	10	15	20	10	20	20
		安全性の向上	35	25	20	15	30	20	23	30	20	20	20	10	25
		走行快適性の向上	20	25	30	25	5	50	22	40	15	20	50	30	40
		環境	10	10	10	20	5	10	10	10	30	20	10	10	5
小項目	安全性	時間短縮	15	15	20	15	30	10	20	10	20	10	30	10	
	経済性	費用削減	15	20	15	20	14	9	20	5	10	20	5	15	15
		電気料金	5	5	5	5	16	1	5	5	5	0	5	5	5
	安全性	道路利用者	25	20	15	5	16	10	12	20	10	0	10	5	15
		道路管理者	10	5	5	10	14	10	11	10	10	20	10	5	10
	走行快適性	工事削減	15	10	10	15	2	50	12	10	8	15	30	15	25
		機能向上	5	15	20	10	3	0	10	30	7	5	20	15	15
	環境	NOx, SPM	4	2	3	5	1	0.5	3	2	10	7	2	3	2
		効率的	2	2	3	5	2	1.5	4	5	10	6	5	4	2
		CO2	4	6	4	10	2	8	3	3	10	7	3	3	1

金」はどの評価者ベクトルからも離れており、この指標は評価者の間で重視されていないものと考え、評価項目から除外した。また、中項目「安全性」を構成していた「道路利用者」、中項目「走行快適性」を構成していた「工事削減」と「機能向上」がお互いに近接しており、これらはすべて道路利用者に関わるものであることから、新たに「道路利用者の安全性」の中項目に括ることとした。そして、中項目「安全性」を構成していた「道路管理者」については、「道路管理者の安全性」として独立した項目を設けた。また、中項目「環境」を構成する評価指標は、お互いに近接していたため、元のままの項目を設定した。

(3) 第2回アンケート調査の結果

第2回アンケート調査では、以上に述べた新しい評価項目に対する重み付けを回答してもらった。その結果を表-6に示す。このデータを用いて、再度多元的集計化を施した結果を図-6に示す。評価者を表すベクトルに着目すると、4人の評価者が評価者

表-6 第2回アンケート調査結果

項目	評価指標	N1	N2	N3	N4	
大項目	費用対便益	20	20	60	40	
	波及的影響	80	80	40	60	
中項目	費用対便益	走行時間短縮便益	80	50	50	60
		走行経費減少便益	20	50	50	40
	波及的影響	保全・経済性の向上	20	40	25	30
		道路利用者の快適性の向上	50	35	30	30
		道路管理者の安全性の向上	10	15	30	30
環境	20	10	15	10		
小項目	保全・経済性	保全時間短縮	15	15	10	10
		費用削減	5	25	15	20
	道路利用者の快適性	道路利用者安全性	35	15	12	15
		工事削減	5	5	12	5
		機能向上	10	15	6	10
	道路管理者の安全性	10	15	30	30	
	環境	NOx, SPM	5	2	6	2
		効率的	5	2	3	6
CO2		10	6	6	2	

N1, N2と評価者N3, N4の2つのグループに分かれ、評価者の間で意見の対立軸が明確化された。これらの評価者ベクトルと評価項目との関係を見ると、評価者N1, N2は「波及的影響」における「経済性の向上」と「環境」を重視しているものと考えられる。一方、評価者N3, N4は、そのベクトルが「走行時間短縮便益」と「走行経費減少便益」の方

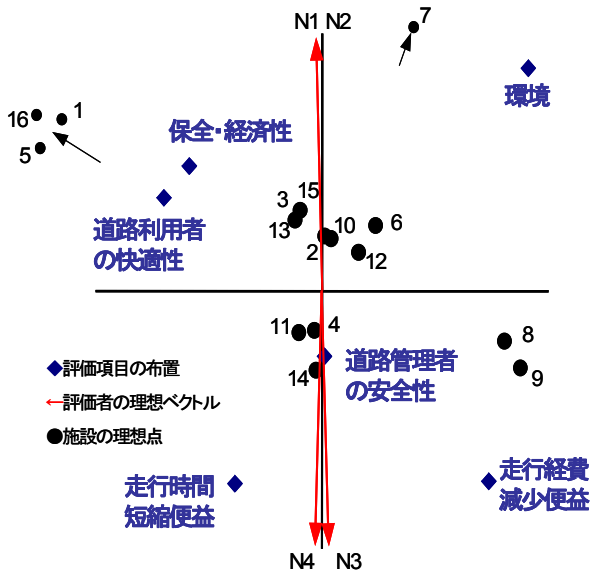


図-6 多元的集計化手法の結果（第2回アンケート調査）

向に向かっていくことから、総じて「費用対便益」を重視していると考えられる。実際、表-6に示した重み付け結果を見ると、概ね以上の傾向を確認することが出来る。

次に、各評価者の優先度順位を導出した結果を表-7に示す。ただし、前節と同様に、総合得点の算出にあたって、非線形の重み付けを仮定している ($q = 3$)。この結果と表-4の結果を比較すると、評価項目の設定方法を変えることによって、事業の優先度が大きく変動していることが分かる。表-6の中で、評価者間で順位変動が大きい事業に着目すると、評価者 N1, N2では、もう一方の評価者に比べて事業1, 16が高い位置にあり、一方、評価者 N3, N4では、事業14が高い位置にある。また、評価者 N3では事業11が高い順位に位置づけられている。そこで、図-6において、これらの事業と評価者及び評価項目との関係を見ると、事業1, 16は「波及的影響」における「経済性の向上」と「道路利用者の安全性」に対する貢献度が比較的大きく、評価者 N1, N2もこれらの指標に対する重み付けが比較的高いことが確認できる。一方、事業11, 14は「費用対便益」を構成する「走行時間短縮便益」と「走行経費減少便益」に対する貢献度が比較的大きく、評価者 N3, N4もこれらの項目に対する重み付けが高いことが確認できる。このように、第2回アンケート調査の結果についても、各評価者の優先度評価の相違を、評価者の重み付けや事業の評点の違いによって把握する

表-7 事業の優先度評価（第2回アンケート調査）

評価者	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N1	9	14	8	4	1	16	5	12	6	10	2	7	13	3	15	11
N2	9	8	1	16	12	4	6	14	5	10	2	7	13	3	15	11
N3	14	9	8	4	6	11	7	12	10	2	1	16	13	3	15	5
N4	14	9	4	8	12	6	7	10	1	16	2	13	3	15	5	11

ことが出来る。

以上のように、評価項目の設定方法が優先度評価の結果に大きく影響するため、評価者の認識と整合するような評価項目を設計することが重要である。本研究で提案した多元的集計化手法は、評価項目を設計するための手がかりを与えるものとして有効なツールである。なお、評価項目の設定は、優先度評価の結果に大きな影響を及ぼし得るため、恣意性を出来るだけ排除するとともに、慎重に検討することが必要であることは言うまでもない。本手法の分析結果に基づいて、盲目的に評価項目を変更するのではなく、評価者間で分析結果の含意を考察するとともに、評価項目について十分な議論を図ることが必要である。本手法は、このような判断を補助するための有用なツールとして重要な役割を果たし得ると考えられる。

5. おわりに

本研究では、社会基盤整備を対象として、多元的集計化に基づく相対的な評価手法を提案した。社会基盤整備に関わる多様な情報を多次元空間上に集約して表現し、評価者間の視点の対立軸と事業の相対的な序列を視覚的に明示化する分析手法を検討した。その上で、高速道路付帯施設を対象とした優先度評価に適用し、本手法の適用可能性を確認した。その結果、多元的集計化手法を用いることによって、事業の多様な効果や評価者の立場や考え方の相違を体系的に明示化できることが示された。また、本手法は、評価項目の設定方法に関しても重要な情報を提供することが確認された。

今後、社会基盤整備に関わる意思決定において、本研究で提案した多元的集計化手法を確立する上では、分析手法の更なる精緻化が必要である。特に、多元的集計化において、望ましい精度と視覚的な容易さとのバランスをとった分析を行うことが重要である。また、本手法を用いて、社会基盤整備に関わる議論を支援する上では、評価結果をフィードバック

表-5 新しい評価項目

項目	評価の指標		評価項目・評価の視点	評価指標
大項目	費用対便益		工事規制等の削減に伴い、社会的便益（走行時間短縮、走行経費減少）が費用（建設費、維持管理費の計）を上回るか、【事業の必要性】	（中項目から算定）
	波及的影響		費用対便益の計算が困難な効果・影響があるか。	（中項目から算定）
中項目	費用対便益	走行時間短縮便益	工事規制時間減少に伴う走行時間減少便益を評価する。	費用便益費（B/C）
		走行経費減少便益	工事規制時間減少に伴う走行経費減少便益を評価する。	費用便益費（B/C）
	波及的影響	保全・経済性の向上	設備の機能向上等により保全性の向上（故障修理時間の短縮）、経済性の向上を評価する。	（小項目から算定）
		道路利用者の快適性の向上	工事規制（路上作業含む）削減、情報提供設備等の機能向上、故障修理時間短縮等による道路利用者の安全性、走行快適性を評価する。	（小項目から算定）
		道路管理者の安全性の向上	工事等の路上作業削減、故障修理時間短縮等による道路管理者の安全性の向上を評価する。	（小項目から算定）
		環境	工事規制等の削減に伴う自動車走行測度向上による生活環境の保全・改善への寄与、地球温暖化対策への寄与を評価する。	（小項目から算定）
小項目	保全・経済性	保全時間短縮	設備の機能向上等により保全性の向上（故障修理時間の短縮）を評価。清掃・点検、補修、設備更新に要する時間が短縮される。	道路管理者が設備の管理に要する時間（分）
		費用削減	設備の機能向上等による経済性の向上を評価。清掃・点検費用、補修費用、設備更新費用が削減される。	設備の維持管理に係る費用（円）
	道路利用者の快適性	道路利用者安全性	工事規制等の削減により道路利用者の安全性が向上する。	事故件数（件）
		工事削減	工事規制の削減、情報提供設備の機能向上、故障修理時間の短縮等の削減による走行快適性の向上する。	平均旅行速度（km/h）
		機能向上	情報提供設備などの機能向上に伴い、走行快適性が向上する。	渋滞時間（分）
	道路管理者の安全性	道路管理者安全性	工事規制等の削減により道路管理者（社員、請負人等）の安全性が向上する。	事故件数（件）
	環境	NOx, SPM	工事規制等の削減による一定速度での走行が可能となりNOx, SPM排出量が削減される。	NOx, SPM排出量（kg）
		効率的	効率的なエネルギーの利用が可能となる。	エネルギー使用量
		CO2	工事規制等の削減による一定速度での走行が可能となりCO2排出量が削減される。	CO2排出量（kg）

クし、論点の整理や重み付けの調整を繰り返し実施することが求められる。このようなフィードバックプロセスを経て、関係主体の意見がどのような方向性に収束するかを検証することが必要となる。さらに、総合評価点（重み $\alpha \times$ 「費用対便益評点」+重み $\beta \times$ 「外部効果評点」）による優先度評価との補完的活用を検討することも重要である。最後に、評価項目の選び方やアンケート調査の聞き方の工夫に取り組む必要がある。本研究の分析結果が示唆するように、優先度評価の結果は、評価項目の設定方法に大きく依存している。出来る限り恣意性を排除した上で、評価者の認識と整合のとれた評価項目の設定に努める必要がある。

付録1 ストレスの最小勾配の導出

MDSCALは、最急降下法によって、ストレス S を減少させる評価項目の布置とディスプレイを反復的に導出する。ここで、評価項目の座標行列を X 、ディスプレイをベクトル \hat{d} で表現すると、ストレスの最小化問題は以下のように表される。

$$\min_{X, \hat{d}} S = \min_X (\min_{\hat{d}} S) = \min_X S(X, \hat{d}(X)) \quad (21)$$

これより、ある X について S を最小化する \hat{d} を求めることが出来るならば、 S を X のみの関数と考えると、最小化することが出来る。ここで、ある計算回数 μ

における評価項目の座標行列を X^μ , ディスパリティをベクトル $\hat{\mathbf{d}}^\mu$ で表現すると, 最急降下法により, ストレス S の値を改善するような座標布置は

$$X^{\mu+1} = X^\mu - \alpha^\mu \Delta S(X^\mu) \quad (22)$$

で更新される. ここで, α^μ は更新の大きさを表すステップサイズである. 上式の ΔS の第 (j, h) 要素は

$$\frac{\partial S}{\partial x_{jh}} = \frac{S}{W^2} \frac{\partial W^2}{\partial x_{jh}} - \frac{S}{V^2} \frac{\partial V^2}{\partial x_{jh}} \quad (23)$$

で表される. ただし, W^2, V^2 はそれぞれストレスの2乗 S^2 の分子と分母を表しており,

$$W^2 = \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k=2, k>j}^K (d_{jk} - \hat{d}_{jk})^2 \quad (24a)$$

$$V^2 = \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k=2, k>j}^K (d_{jk} - \bar{d})^2 \quad (24b)$$

で表現される. ここで,

$$\frac{\partial W^2}{\partial x_{jh}} = 2 \sum_{l, m \neq l} (d_{lm} - \hat{d}_{lm}) \left(\frac{\partial d_{lm}}{\partial x_{jh}} - \frac{\partial \hat{d}_{lm}}{\partial x_{jh}} \right) \quad (25a)$$

$$\frac{\partial V^2}{\partial x_{jh}} = 2 \sum_{l, m \neq l} (d_{lm} - \bar{d}) \left(\frac{\partial d_{lm}}{\partial x_{jh}} \right) \quad (25b)$$

が成立する. 上式 (25a) において,

$$\sum_{l, m \neq l} (d_{lm} - \hat{d}_{lm}) \frac{\partial d_{lm}}{\partial x_{jh}} = 0 \quad (26)$$

であることが証明されており¹⁸⁾, その結果, 式 (25a) は

$$\frac{\partial W^2}{\partial x_{jh}} = 2 \sum_{l \neq j} \frac{d_{lj} - \hat{d}_{lj}}{d_{lj}} (x_{jh} - x_{lh}) \quad (27)$$

となる. これより, 式 (22) を用いて, 座標布置 $X^{\mu+1}$ が求まる.

次に, 座標布置 $X^{\mu+1}$ を所与として, ストレス S の値を改善するディスパリティ $\hat{\mathbf{d}}^{\mu+1}$ を求める. この時, ストレス S の分母は一定であるため, この問題は制約 (7) の下で, 以下の式を最小化する問題に帰着する.

$$W^2 = (\mathbf{d}^{\mu+1} - \hat{\mathbf{d}}^{\mu+1})' (\mathbf{d}^{\mu+1} - \hat{\mathbf{d}}^{\mu+1}) \quad (28)$$

以上の問題の解は, Kruskal の単調回帰法^{13), 14)} により, 以下のように求められる. まず, 点間距離 $d_{jk}^{\mu+1}$

が非類似度 δ_{jk} と単調関係 (4) を満たす場合には, 式 (28) より, ディスパリティ $\hat{d}_{jk}^{\mu+1}$ を $\hat{d}_{jk}^{\mu+1} = d_{jk}^{\mu+1}$ と置くことによって, W^2 を最小化することが出来る. 一方, 単調関係 (4) を満たさない場合には, 単調減少を満たさない範囲での点間距離の平均をディスパリティと置くことによって, W^2 を最小化することが出来る. 例えば, 点間距離 $d_{jk}^{\mu+1}$ と $d_{lm}^{\mu+1}$ が類似度 δ_{jk} と δ_{jm} の間に単調減少の関係が成立しない場合,

$$\hat{d}_{jk}^{\mu+1} = \hat{d}_{lm}^{\mu+1} = \frac{d_{jk}^{\mu+1} + d_{lm}^{\mu+1}}{2} \quad (29)$$

とする.

Kruskal の方法では, 以上の方法によって, 布置 X^μ とディスパリティ \mathbf{d}^μ を逐次導出し, 探索的にストレス S を最小化する布置を求める.

【参考文献】

- 1) Van Delft, A., Nijkamp, P.: *Multi-criteria Analysis and Regional Decision-making*, Springer, 1977. (金沢哲雄, 藤岡明房訳: 多基準分析と地域的意思決定, 勁草書房, 1989.)
- 2) 坂井康人, 上塚晴彦, 小林潔司: ロジックモデル (HELM) に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化, 建設マネジメント研究論文集, Vol.14, 2007.
- 3) 田中宏樹: 公的資本形成の政策評価～パブリックマネジメントの実践に向けて～, PHP 研究所, 2001.
- 4) 中村英夫 (編集), 道路投資評価研究会 (著): 道路投資の社会経済評価, 東洋経済新報社, 1997.
- 5) Satty, T.L.: *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- 6) Nijkamp, P.: *Multidimensional Spacial Data and Decision Analysis*, New York: Wiley, 1979.
- 7) Hill, M.: *Planning for Multiple Objectives*, Monograph Series no.5, Regional Science Research Institute, Philadelphia, 1973.
- 8) Shepard, R.N., Rommey, A.K. and Nerlove, S.B. (Eds): *Multidimensional Scaling: Theory and Applications in the Behavioral Sciences, Volume I: Theory*, New York: Seminar Press, 1972.
- 9) Shepard, R.N., Rommey, A.K. and Nerlove, S.B. (Eds): *Multidimensional Scaling: Theory and*

- Applications in the Behavioral Sciences, Volume II: Applications*, New York: Seminar Press, 1972.
- 10) 高根芳雄: 多次元尺度法, 東京大学出版会, 1980.
 - 11) 鮑戸弘, 林知己夫編: 多次元尺度解釈法, サイエンス社, 1976.
 - 12) 国土交通省道路局: 高速自動車国道の総合的評価手法について, 2003.
 - 13) Kruskal, J.B. : Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis, *Psychometrika*, Vol.29, pp.1-29, 1964.
 - 14) Kruskal, J.B. : Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method, *Psychometrika*, Vol.29, pp.115-129, 1964.
 - 15) 岡太彬訓, 今泉忠: パソコン多次元尺度構成法, 共立出版株式会社, 1994.
 - 16) Tucker, L.R.: Intra-individual and inter-individual multidimensionality, in: Gulliksen, H. and Messick, S.(Eds): *Psychological Scaling: Theory and Applications*, New York: Wiley, pp. 155-167, 1960.
 - 17) Coombs, C.H.: Psychological scaling without a unit of measurement, *Psychological Review*, Vol.57, pp.148-158, 1950.
 - 18) Roskam, E.E.: *Metric Analysis of Ordinal Data in Psychology*, Voorschoten, Holland: VAM, 1968.

Evaluation Method for Infrastructural Asset Management Based on Multidimensional Scaling

By Kouji YAMAMOTO, Tsuyoshi Hatori, Koichi OKADA, Kazuya AOKI, Kiyoshi KOBAYASHI

Infrastructure facilities perform multifaceted functions and have a wide variety of effects upon our society. For coordinating management policies and being accountable to the public, a public manager must comprehend multiple functions of public facilities and various opinions expressed by a lot of stakeholders. This paper proposes the evaluation method for infrastructural asset management using multidimensional scaling. The methodology makes clear differences in people's opinion and viewpoints and shows relative ranking of projects' achievements. The methodology presented in this paper was applied to a case example of highway facility management. As a result, it was shown that this method can specify a critical conflict among stakeholders' viewpoints. In addition, the method can be utilized to verify the validity of evaluation items.