

通信ネットワークにおける伝送網の 選択問題への AHP の適用

大屋 隆生

1. はじめに

IP (Internet Protocol) 技術の普及, インターネットトラフィックの増加により, IP 技術によるネットワークの統合化の流れがある。一方, ネットワークの統合化で重要な QoS (Quality of Service) 制御は ATM (Asynchronous Transfer Mode) 網では, 既に実現されている。電気事業の通信において, QoS 制御は必須であり, 一方コストダウンも必要である。QoS 制御の観点からは ATM 網が現状では優れている。一方 IP は経済性と伝送効率に優れている。また, ATM と IP を共存させる技術として MPLS (Multi-Protocol Label Switching) [1, 2] が注目を集めている。MPLS では, 物理的に一つのネットワークを論理的に複数の個別ネットワークのように扱う VPN (Virtual Private Network) が容易に行える。また, IP, ATM のネットワークと並存する場合に MPLS ではトラフィックエンジニアリングによる高信頼化ができる。情報通信ネットワークの設計における伝送網の組合せ問題は, その組合せについてネットワークとしての信頼性, 経済性, 戦略性などの多様な効果を考慮する必要がある。また, その効果の多くは定性的な効果であり, 技術選択をする上での評価値は容易には得られない。

これまで, 通信システムの設計手法[3]では, 定量的, 定性的な効果をいくつかの項目に分け評価基準に基づき 3 段階の点数として評価し, 経営方針に従いそれらに重み付けを行い, 重みを各評点に掛けた合計により総合評価し, その上位のものから採用する方法がある。ある効果項目で 2 点の候補が 1 点の候補に対して 2 倍の効果があるかは疑問があり, 点数に対する利用部門の合意も得にくい。また, 最終的に各効果項目に重み付けをして合計しているが, 重要だと考える評

価項目も重要でない評価項目の 3 倍の重み付けになるだけであり, 重要な評価項目ではるかに優れた候補より, 普通の重要度の評価項目二つで優れた候補が総合評価で高い評価を受けるが ($3 \times 3 + 2 \times 2 < 3 \times 1 + 2 \times 3$), 実際はそのような結果が望ましいかどうかは不明である。

本報告では, 情報通信ネットワークの伝送網の選択問題において, AHP を応用することにより情報通信ネットワークにおいて定性的な効果も含んだ多様な効果を考慮した選択を可能にした事例を紹介する。

本報告で, 説明を簡明にするためにサンプルネットワークを用いて, IP 網, ATM 網, MPLS 網を組み合わせた候補の中から, どれを採用するかを決定する問題を扱う。サンプルネットワークと, そのネットワークにおける選択候補については 2 節で紹介する。

評価項目の階層分けと最下層のレベルでの各評価項目の評価については, 3 節で説明する。評価項目間の重み付けと総合評価については, 4 節で説明する。

2. サンプルネットワークの形態と伝送網の選択候補

2.1 サンプルネットワークの形態

例題として考えるサンプルネットワークの形態としては, 現状の電力会社のネットワーク形態を参考にして, 図 1 に示すように, 本店, 支店による基幹ネットワーク, 支店と営業所等の一般事務を実施する事業所を結ぶ一般業務系のネットワーク, 支店と発電所, 制御所, 電力所, 変電所等の設備の運転・制御に関連する事業所を結ぶ制御系のネットワークの, 3 種類のループネットワークにより構成されるとする。ここで支店は 10, 各支店からつながる制御系と一般業務系のネットワークには, それぞれ 5~10 の事業所があると

2.2 伝送網の選択候補

サンプルネットワークにおいて, 基幹系, 一般業務系, 制御系のネットワークにおいて, ATM 網,

おおや たかお
財電力中央研究所 情報研究所
〒 201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1

表1 伝送網の候補

基幹網	一般業務	制御系
ATM網	ATM網	ATM網
ATM網	MPLS網	ATM網
ATM網	MPLS網	MPLS網
ATM網	IP網	ATM網
ATM網	IP網	MPLS網
ATM網	IP網	IP網
MPLS網	MPLS網	ATM網
MPLS網	MPLS網	MPLS網
MPLS網	IP網	ATM網
MPLS網	IP網	MPLS網
MPLS網	IP網	IP網
IP網	IP網	IP網

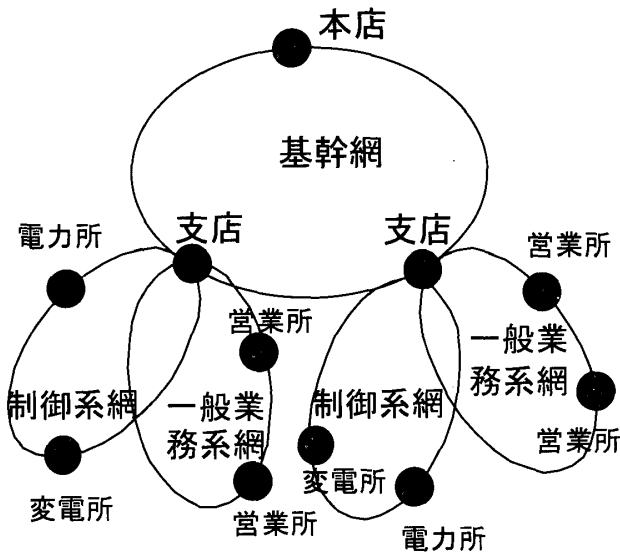


図1 サンプルネットワークの形態

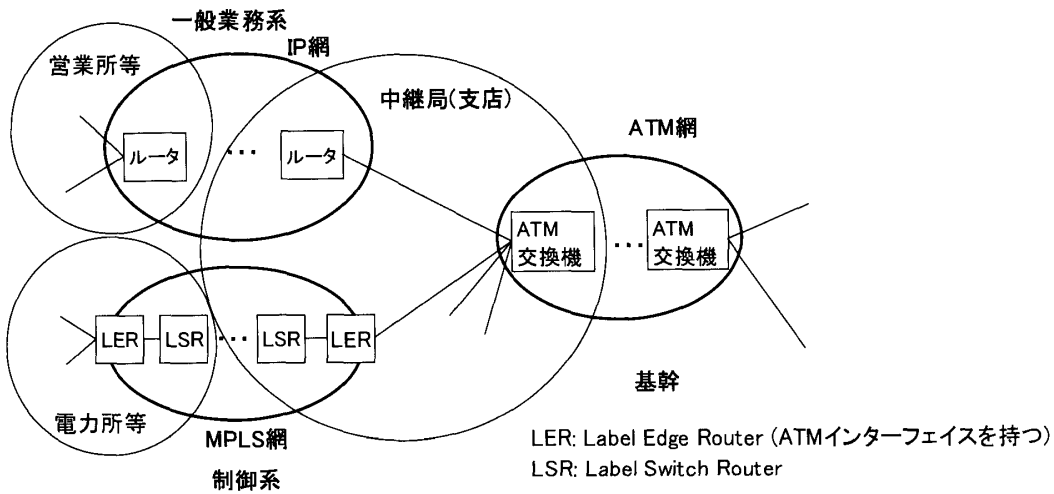


図2 基幹にATM、一般業務系にIP、制御系にMPLSを用いたネットワーク構成

MPLS網、IP網のどれを用いるかにより、 $3^3=27$ 通りの組合せがある。

このうち、基幹ネットワークにIP網を用いた場合は、一般業務系や制御系のネットワークにATM網やMPLS網を用いても、IP網で統一した場合に比べて費用が多くかかるだけで他の効果（信頼性や性能）も良くならないので、IP網に統一したほうがよい。したがって、基幹ネットワークにIP網を用いる場合は、IP網に統一する以外の組合せは候補として検討する意味がない。

また、制御系ネットワークのほうが一般業務系ネットワークよりも信頼性の要求が高いので、制御系ネットワークにIP網またはMPLS網を用いて一般業務系ネットワークにATM網を用いる組合せや、制御系ネットワークにIP網を用いて一般業務系ネットワ

ークにMPLS網を用いる組合せは検討対象から除外する。

制御系ネットワークと一般業務系ネットワークにATM網を用いた場合は、基幹系ネットワークにIP網またはMPLS網を用いることによりATM網の信頼性などの優れた点が活かさないので基幹系ネットワークがATM網以外の組合せは、検討する候補からはずす。

以上の議論をまとめると、検討する候補とする組合せは表1のようになる。

ネットワーク構成の1例として、基幹にATM、一般業務系にIP、制御系にMPLSを用いた候補のネットワーク構成を図2に示す。以後は候補名を、候補の後ろに用いる伝送網（ATM網、MPLS網、IP網）の頭1文字を基幹網、一般業務系網、制御系網の順に

並べる。例えば候補AMIは、基幹にATM網、一般業務系にMPLS網、制御系にIP網を用いた候補のことである。

3. 評価項目と評価方法

3.1 評価項目とその階層構造

評価項目とその階層構造を図3に示す。評価項目は大きく、経済性、性能、信頼性、戦略性に分けて考える。

経済性については、導入コスト、運用・保守コスト、移行コスト、教育コスト、コストの下落可能性（普及可能性）を検討する。また、それぞれのコストについて他のシステムとの共用部分については、その利用率に従い按分する。導入コストは、システムの新設の費用であり、耐用年数を考慮して年経費率として定量化する。運用・保守コストは、システム維持、運用、修理、点検、部品交換のコストであり、消耗品の費用、人件費・労務費、障害応動、原因究明の費用、補修部品の費用などからなる。移行コストは、実際には現状のシステムから順次移行していく際、過渡的に必要となる条件整備の費用である。教育コストは、現状のシステムから入れ替えるにあたり、新たな操作、故障対

応等が必要になる場合の教育に必要となるコストである。導入コスト、運用・保守コスト、移行コスト、教育コストについては定量的評価が得られるが、コストの下落可能性については定量化する場合は、節3.2で説明する1対比較による。

性能については、構成する評価項目が多岐にわたるので、移行・拡張性能、伝送性能、伝送品質に分けて考える。

移行・拡張性能は、移行性、継続性、拡張性よりなる。移行性は、既存システムからの移行が問題なく行え、移行作業による回線の停止をせずにすむかを検討する。継続性は、保守・管理などの作業が既存のシステムから大きな変更なくできるかなどを検討する。拡張性は、多様なトラフィックの収納可能性や、情報量・回線収容数の変化に対する対応可能性などのことである。

伝送性能は、伝送速度、遅延時間よりなる。伝送速度は、ヘッダー等のオーバーヘッドを考慮して実効値としての伝送速度を意味する。遅延時間は、許容最大遅延時間が最大リンクにおいても確保されているか、また想定できる輻輳や再送時間に対して設計に反映され目的を達成できるかを検討する。

伝送品質は遅延時間、データロス、輻輳、セキュリティよりなる。データロスは実際のトラフィックを想定してシミュレーションにより求める。輻輳は、輻輳の発生可能性と、予想外のトラフィックにより輻輳が発生した（あるいは発生しそうな）場合の制御（輻輳制御）の可能性を検討する。セキュリティは、他のシステムからの影響や外部ネットワークからの進入に対して十分なセキュリティが確保されているかを検討する。

信頼性は、データロス、輻輳、セキュリティ、稼働率、耐障害性よりなる。稼働率は、ネットワーク全体としての稼働率を計算する。また、耐障害性は、障害個所の判別が行えるか、障害時の迂回や予備ルートの設定ができるかなどを検討する。

戦略性は、拡張性、自社の施策への合致性、NCC支援よりなる。NCC支援は、VPN等によりNCCを支援できるかどうかを意味する。自社の施策への合致性は、環境行動など自社の施策に合致しているかどうかを検討する。

最下層のレベル（レベル3）の評価は、定量的に評価できるものについてはその定量評価を用い、質的な評価項目については3.2節で説明する。

最下層以外のレベル（レベル0～2）の各評価項目

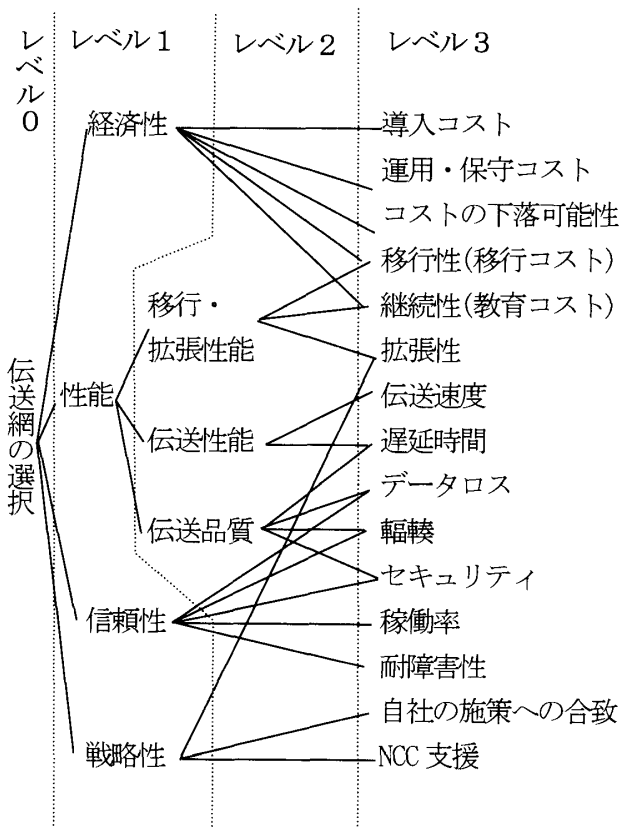


図3 評価項目とその階層構造

信頼性について候補pと候補qを比較して

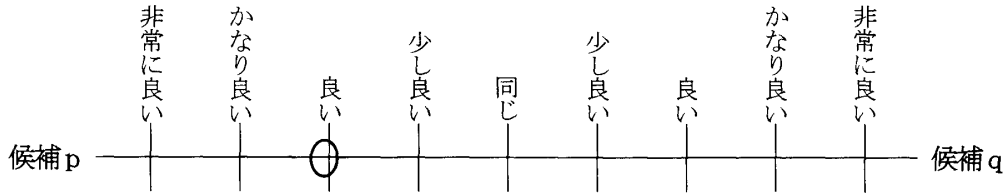


図4 一対比較の質問票と記入例

について4.1節で説明するように重要度の一対比較により各評価項目の重みを決定し、その重み付けして足し合わせるにより上のレベルでの評価項目の評価値とする。例えば、移行・拡張性能、伝送性能、伝送品質についてその重要度の一対比較により重み付けをし、その重みを各評価値に掛けたものを足し合わせ総合評価値とする。

3.2 各評価項目での候補の評価方法

ここではAHPの一対比較により、各候補間の一対比較による定性的評価項目の評価方法について述べる。

候補pと候補qの一対比較は、図4に示す質問票で該当する場所に○を付ける。その○の位置にしたがって表2に示す一対比較値 m_{pq} を割り付ける。例えば図4では $m_{pq}=2$ となる。その結果得られた一対比較行列 $M=(m_{pq})$ の最大固有値 λ と最大固有値に対応する固有ベクトル $r=(r_p)$ (ただし、 r_p の最大のものを1とする) を求める。 r_p を候補pの導入効果評価値とする。

整合度 $(CI)=(\lambda-n)/(n-1)$ を計算し、CIが0.1を超えた場合は一対比較の整合性に問題があると考えられるので、一対比較を再検討する。

なお、候補pを候補qと比較した場合は、 $m_{qp}=1/m_{pq}$ とし、候補qの候補pに対する比較はしない。また一対比較行列の対角成分 $m_{pp}=1$ とする。

比較する候補の数が3のときには、比較の回数が3回と少ないので、各比較でもう少し精密な比較が必要となる。そこでその場合は、表2の中間も選べるようにし、それぞれ8, 4, 2, 1.5, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8の値を割り付けるようにする。比較する候補の数が2の場合は、比較は1回しかないので、直接その二つの効果の比率を答える。

本決定方法には以下のようなメリットがある。

- ・一般に困難な定量化を、具体的な候補間の一対比較により行えるので、評価がしやすい。
- ・比較の作業を通じて(具体的な候補間での効果の比

表2 一対比較値

選択肢	一対評価値 m_{pq}
pが非常に良い	8
pがかなり良い	4
pが良い	2
pがやや良い	1.5
同じくらいである	1
qがやや良い	2/3
qが良い	1/2
qがかなり良い	1/4
qが非常に良い	1/8

較に関する)話し合いが行われるので、結果に対する理解が得られやすい。

一般にAHPでは比較する候補の数がn個あると $n(n-1)/2$ 回の比較を行わなければならない。候補の数が多いと、その一対比較するのは多大な労力を必要とし、適切ではない[4~6]。そこで、似た候補をグループ化し、そのグループ中で最高の評価のものを代表として(予選)、その代表について詳細に評価する(決勝)ようにする。最高の評価のものを選ぶので、このグループ分けにより最終的に選択される候補が変化することはない。評価を行いやすくするため、似た候補をグループ化するほうがよい。

表1で示したように、今回の例では、候補は12ある。そこで、基幹、一般業務系、制御系のネットワークすべてでATM網(候補AAA)またはIP網(候補III)を用いる候補と、それ以外で基幹ネットワークにATM網を用いる候補のグループ(グループA;表3)と、MPLS網を用いる候補のグループ(グループM;表4)の4グループに分ける。

図3の評価項目について一番下のレベルの評価項目(例えば、移行性、継続性など)について定量的評価

表3 グループ A の候補

候補名	基幹	一般業務	制御系
候補AMA	ATM網	MPLS網	ATM網
候補AMM	ATM網	MPLS網	MPLS網
候補AIA	ATM網	IP網	ATM網
候補AIM	ATM網	IP網	MPLS網
候補AII	ATM網	IP網	IP網

表4 グループ M の候補

候補名	基幹	一般業務	制御系
候補MMA	MPLS網	MPLS網	ATM網
候補MMM	MPLS網	MPLS網	MPLS網
候補MIA	MPLS網	IP網	ATM網
候補MIM	MPLS網	IP網	MPLS網
候補MII	MPLS網	IP網	IP網

	候補AMA	候補AMM	候補AIA	候補AIM	候補AII
候補AMA	1	1.5	2	2/3	2
候補AMM	2/3	1	2/3	1.5	1.5
候補AIA	1/2	1.5	1	1.5	2
候補AIM	1.5	2/3	2/3	1	1.5
候補AII	1/2	2/3	1/2	2/3	1

図5 信頼性に関するグループ A の一対比較行列

が簡単に求まらないものについては一対比較を実施し評価値を求め、4節で説明する重み付けにより1レベル上の評価項目の評価値とする方法もあるが、ここでは一番下のレベル(レベル3)の評価記述を見ながら、下から2段目のレベル2の評価項目(経済性、移行拡張性能、伝送品質、伝送性能、信頼性、戦略性)について一対比較を行い、評価値を決定した。

図5に信頼性についての一対比較行列を示す。この行列の固有ベクトルは、

$$(1.000 \quad 0.726 \quad 0.862 \quad 0.766 \quad 0.455)^t$$

で、固有値は5.23である。したがって、各候補の評価値は表5の信頼性の列に示す通りであり、この一対比較行列の整合性(CI)は、

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1) = (5.23 - 5) / 4 = 0.058 < 0.1$$

であり、十分な整合性がある。

他の評価項目についても、一対比較により得られた評価値を表5に示す。また、グループMについて一対比較により得られた評価値を表6に示す。

表5 グループ A の評価値

	経済性	移行拡張性能	伝送品質	伝送性能	信頼性	戦略性
候補AMA	0.546	0.524	1.000	0.374	1.000	0.724
候補AMM	0.670	1.000	0.603	0.496	0.726	1.000
候補AIA	0.632	0.443	0.843	1.000	0.862	0.868
候補AIM	0.801	0.841	0.518	0.725	0.766	0.905
候補AII	1.000	0.552	0.410	0.851	0.455	0.732

表6 グループ M の評価値

	経済性	移行拡張性能	伝送品質	伝送性能	信頼性	戦略性
候補MMA	0.626	0.370	1.000	0.351	1.000	0.502
候補MMM	0.724	1.000	0.644	0.387	0.752	1.000
候補MIA	0.673	0.224	0.803	0.572	0.609	0.478
候補MIM	0.813	0.549	0.517	0.572	0.484	0.978
候補MII	1.000	0.329	0.415	1.000	0.371	0.701

4. 評価項目の重み付けによる計画案の選択

4.1 評価項目の重み付け

各レベルの評価項目の重み付けは、まずある一つのレベルでの評価項目の各ペアの重要度について、その上のレベルにある評価項目を評価基準にして、AHPの一対比較による相対評価する。一対評価をもとに各評価項目の重みを、3.2節で説明したのと同様の手順で決定する。ただし、ここでは重みの総和を1にする。

図3の階層構造に従って、既に3.2節で各候補の評価が終了している下から2段目のレベルの評価項目(経済性、移行拡張性能、伝送品質、伝送性能、信頼性、戦略性)から上のレベルの評価項目での評価値のための重み付けを決定する。

性能にとって、移行拡張性能、伝送品質、伝送性能は、同等に重要であると考えられ、重みはすべて1/3となる。

伝送網の選択にとっての経済性、性能、信頼性、戦略性は、経済性と信頼性が同程度に重要で、それに次いで性能が重要と考えるケースを基準ケースとした。

感度分析として、経済性重視、信頼性重視、戦略性重視で一対比較を行った(それぞれ、経済性重視ケース、信頼性重視ケース、戦略性重視ケースと呼ぶ)結

表7 選択のための各評価項目の重み

	基準ケース	経済性重視 ケース	信頼性重視 ケース	戦略性重視 ケース
経済性	0.315	0.421	0.190	0.200
性能	0.217	0.268	0.268	0.200
信頼性	0.315	0.190	0.421	0.200
戦略性	0.153	0.121	0.121	0.400

表8 各候補の評価値

	経済性	移行拡張性能	伝送品質	伝送性能	信頼性	戦略性
候補AAA	0.499	0.411	0.501	1.000	1.000	0.314
候補AIA	0.804	1.000	0.613	0.642	0.707	0.613
候補MMM	0.694	0.750	1.000	0.561	0.485	1.000
候補III	1.000	0.533	0.705	0.307	0.485	0.464

果得られた重みを表7に基準ケースの重みと共に示す。

経済性重視ケースは、経済性が最重要でそれに次いで性能、信頼性、戦略性の順で重要と考え一対比較を行なった結果得られた重みである。

信頼性重視ケースは、信頼性が最重要でそれに次いで性能、経済性、戦略性の順で重要と考え一対比較を行った結果得られた重みである。

戦略性重視ケースは、戦略性が最重要で、性能、経済性、戦略性は同等に重要と考え一対比較を行った結果得られた重みである。

4.2 計画案の選択

各候補の一対比較により評価値を得た評価項目よりも上のレベルにある（下から2番目以上のレベルにある）各評価項目の評価値を、下のレベルにあるものから順に、以下の手順で決定する。

- ① 下にある評価項目の評価値と（4.1節で求めた）重みを掛け合わせる。
- ② ①で求めた値を合計する。
- ③ 評価値の最大値が1になるように規格化する（評価値の最大値で割る）。

最終評価の段階（例では伝送網の選択）では、最高点が1になるように規格化せずに、重み付き総和を100倍する。これにより、すべての評価項目で最高の評価を受けた候補が100点になり、解かりやすい評価値となる。

グループA、グループMそれぞれについて、表5～7などで示した評価値と重み付けにより総合評価の結果をした結果、四つのケースすべてにおいて、グループAからは候補AIAが、グループMからは候補MMMが代表となった。

これらに、候補AAAと候補IIIを加え、一対比較評価して、その結果、計画案を選択する。

各評価項目（経済性、移行拡張性能、伝送品質、伝送性能、信頼性、戦略性）について、一対比較を行った結果、表8に示す評価値を得た。

表9 基準ケースでの総合評価

重み	経済性	性能	信頼性	戦略性	伝送網 の選択
	0.315	0.217	0.315	0.153	
候補AAA	0.499	0.828	1.000	0.314	70.0
候補AIA	0.804	0.976	0.707	0.613	78.1
候補MMM	0.694	1.000	0.485	1.000	74.1
候補III	1.000	0.668	0.485	0.464	68.4

表10 各ケースでの総合評価

ケース 候補	経済性重視 ケース	信頼性重視 ケース	戦略性重視 ケース
候補AAA	66.9	78.5	59.8
候補AIA	79.7	77.4	73.4
候補MMM	77.4	72.5	83.6
候補III	74.7	62.8	61.5

性能に関しては、移行拡張性能、伝送品質、伝送性能に均等に重み付けをして、表9の性能の列に示す結果を得た。

表9に、表7で示した基準ケースでの重み付けにより得られた総合評価の結果を示す。表9より、基準ケースでは、トラフィックが多く信頼性と性能（品質）を必要とする基幹ネットワークと制御系ネットワークにATM網を、それほど信頼性が要求されない一般業務系ネットワークに経済性のあるIP網を用いる候補AIAが選択される。

表10に、表7で示した各ケースでの重み付けにより得られた総合評価の結果を示す。

表10より、経済性を重視する場合も、制御系ネットワークと基幹ネットワークでは伝送品質と信頼性が要求されることが考慮され、信頼性、性能にもある程度重みを付けてあるので、基準ケースと同様に、ノード数の多い一般業務系ネットワークで経済性のあるIP網を用い、トラフィックが多く信頼性と性能（品

質)を必要とする基幹ネットワークと制御系ネットワークにATM網を用いる、候補AIAが選択される。

信頼性を重視する場合は、全ネットワークに信頼性の高いATM網を用いる候補AAAが計画案として採用される。

戦略性を重視する場合は、全ネットワークにVPNやトラヒックエンジニアリングが行いやすいMPLS網を用いる候補MMMが計画案として採用される。

5. おわりに

本報告では、伝送網の選択問題へのAHPの適用を取り上げた。AHPを用いることにより以下のメリットがある。

- ・質的な評価項目について評価する場合、具体的な導入形態(代替案)を示して一対比較による評価を行えばよく、評価しやすい。
- ・点数の根拠として個々の一対比較をあげることができる。
- ・個別の一対比較に多少の矛盾があっても、全体としては正しく評価できる。
- ・大きく矛盾する一対比較を特定できるので、どれを再検討すべきかわかる。
- ・直感とずれた結果になっている場合に、そのずれたものの一対比較を見なおすことにより、その原因を特定できる。

・最終段階の重み付けを意思決定者をお願いすることにより、意思決定者の意見の反映ができる。

本報告では伝送網の選択問題への適用を取り上げたが、本手法は評価項目を見なおすことにより、情報通信をアウトソーシングする範囲の決定や、どこまで自営通信網の範囲とするかを決定する問題へも適用できると考える。

参考文献

- [1] 藤川冬樹:「ラベルスイッチ技術を用いた電力通信基幹網の検討と技術課題」, 電力中央研究所調査報告, R 98022, 1999.
- [2] 藤川冬樹:「電力用通信基幹網へのMPLS技術の適用評価」, 電力中央研究所研究報告, R 99016, 2000.
- [3] (株)電気協同研究会給電情報伝送システム信頼度評価専門委員会:「給電情報伝送システムの信頼度評価とシステム設計」, 電気協同研究, 第55巻, 第1号, 1999.
- [4] 刀根薫, 眞鍋龍太郎編:「AHP事例集」, 日科技連出版, 1990.
- [5] 刀根薫:「経営効率性の測定と改善」, 日科技連出版, 1993.
- [6] Charnes, A., Cooper, W., Lewin, A. Y. and Seiford, L. M. (ed.): *Data Envelopment Analysis-Theory, Methodology and Applications*, Kluwer Academic Publishers, 1994.