

Fuzzy 診断法

塚本 弥八郎

1. はじめに

Fuzzy理論の故障診断または医療診断への応用に関しては、後の文献に見られるように、その研究は緒についたばかりで、これこそが Fuzzy 診断法で、こんなふうに使われているというように紹介できるとは思えない。いくつかの方法とその応用の試みはあるがむしろ研究段階にあると言うべきで、最近その研究も紹介も活発に行なわれている知識ベースによる診断のように陽の目をみているわけではない。Fuzzy理論のこの分野への応用が不十分にとどまっているのにはそれなりの理由がある。まず、理論そのものが十分に完成しているとは言えず、したがって研究者の数がいちじるしく増えたとはいえ依然その主な関心が理論面に向けられていること、第2に医療診断などでは現場からの関心が低く、十分なコミュニケーションがなされていないこと、さらには少し細かいことであるが、Fuzzy集合を定義するメンバシップ関数の与え方に難点があること等があげられよう。しかしながら、現状はそのような段階としても、少し将来に目をはせると Fuzzy 診断法のデマンドは決して少なくないと思われる。特に既存の自動診断システムがある程度汎用化された時点で、Fuzzy診断法の必要性が強く認識されることにな

らう。どうしてそのように言えるのか、Fuzzy理論の診断論理への導入の必要性と可能性を探ってみたい。

2. Fuzzy 診断法の特徴と狙い

一般に医療における診断は医学的知識と患者の病態そして診断時の状況の総括的判断であろう。しかしこれらの3つの事柄にはそれぞれあいまいさがともなう。

まず、医学的知識におけるあいまいさについては、ある病名と症状との関係のあり方はしばしばあいまいである。たとえばスタンフォード大学で開発された診療のためのプログラム MYCIN では、経験的知識を“IF A THEN B”の形で表わすが、そのおのおのに確信度が付与されている。このことは“IF A THEN B”という知識そのものが **completely true** というわけではないことを示している。さらには前提となる **statement** そのものにもしばしばあいまいさがともなう。

このような例はいくらでもあげられるが、特に、頻度を表わす用語が使われているような命題がどれくらいあいまいになるかを見よう。図1はある大学の医学部のスタッフ25人に、左欄の用語を0%から100%の間で答えさせたデータを整理したものである。サンプル数は非常に少ないが、ざっと次のようなことが言える。第1に一般に **range** が広く、このような用語の受けとめ方

つかもと やはちろう 東京工業大学 制御工学科

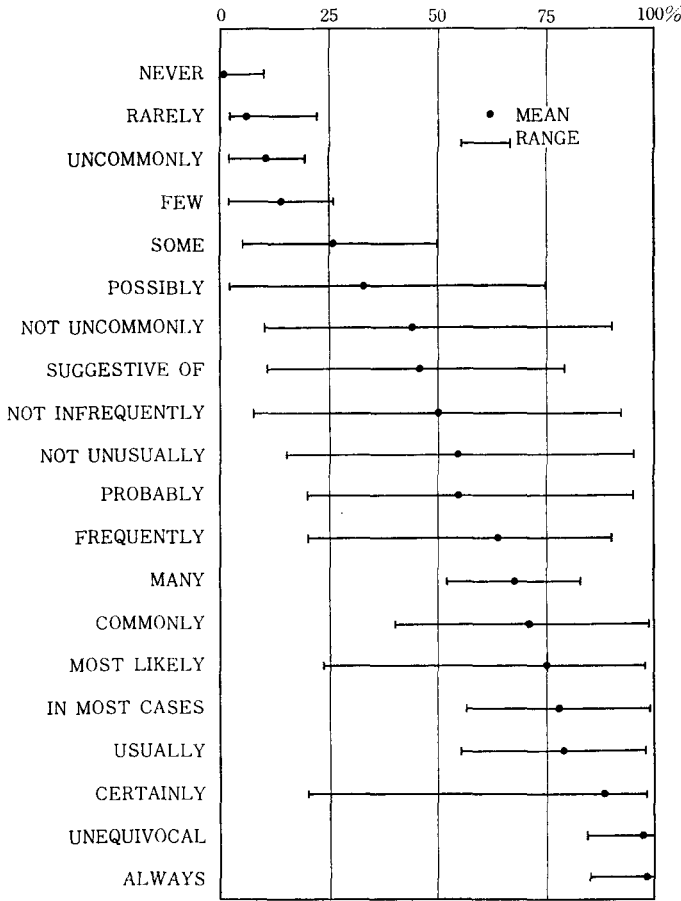


図 1 頻度を表わす用語のあいまいさ

のバラツキはきわめて大きいこと、また never と always という辞書的定義ではそれぞれ 0% と 100% を表わす用語でもそれなりの幅をもっていること、さらに合成用語で二重否定となっている用語は 80% 近くの range をもっていて、ほとんど情報伝達の役割を果さないことなどがわかる。医学部のスタッフの間でさえ用語がこのような不正確であるとする一般の患者との問診等で使う言葉があいまいさをまぬがれがたいことは明らかである。

患者の病態観測においては、たとえば同じサンプルを別々の所で検査して違った結果が報告されたとき、あるいは患者の主訴に言葉が使われるときなど、あいまいさを避けがたい。不快感、痛み

の種類と強度などその典型的例であろう。Fuzzy 診断法は、こうした知識や病態観測にもなるあいまいさを、確率論にもとづく計量診断学における方法とまったく違ったやり方で扱おうとする。

最後に本節のはじめにのべた診断時の状況ということについて説明を加える。たとえば、定期診断と手術前の検査結果の診断について考えてみよう。前者で重要なことは可能性があると思われる病名の指摘または再検査の指示であろう。後者では可能性よりむしろ確実性という観点が大事である。そこに患部が確実に存在するという確証なしに可能性だけで手術するわけにはいかないのが常であろう。こうした診断時の状況を別にしても、しばしば可能的観点と必然的観点の両者からの診断を考慮することは有用である。

次にプラント等の故障診断と関連した Fuzzy 理論の特徴について考えてみよう。信頼性の理論では、システムがうまく作動しているかないかに状態を分けたりえて、確率や回路網の理論が応用される。データさえ十分あれば、たとえば、結論として 1 年の間に何日くらい故障状態にあるかというように信頼性を表わすことができる。Fuzzy 理論では、これに対して、システムがどの程度うまく動いているか、いい換えるとシステムの Reliability というよりはその Performance Level に言及しようとする。たとえば「車の Universal Joint がかなり摩耗しているので早目にとり代えたほうが良い」と言うとき、かなりの摩耗とか早目とかは確率による捉え方よりも Fuzzy 集合によるほうが自然である。実際、Fuzzy 推論では、IF A THEN B における命題 A, B は Fuzzy 命題でもかまわない。

さらに、故障診断の特徴として、一般に原因と結果の関係を指定したうえで、あるいは Fault Tree の如き因果連鎖を利用して、結果に関する情報から故障要因を推論する方法があげられる。Fuzzy 論理ではあいまいな因果関係は Fuzzy 関係式によって表わされるが、その逆問題の解法がこの場合の診断過程となる。これに対し、医療診断での病名は、しばしば、ある症状群の総称であって必ずしも因果連鎖で結ばれているわけではない。この場合には、ある病名に対応する症状が医学的知識として与えられていて、それらと個々の患者の症状との整合度の判別が診断の基準となる。

上にのべた流れに対し、言語的真理値を用いる Fuzzy 論理の診断への適用がすでにいくつか提案されている。Fuzzy 集合の概念が登場した頃の和・積・補集合等の演算則は、ちょっと見方を変えると、無限値論理系の演算則に還元されるので、あえて Fuzzy Logic と称する根拠をもたない。たとえば、“若い”の Fuzzy 集合を規定するメンバシップ関数の値、 $\mu_{\text{young}}(x)$ を“ x 才は若い”という F 命題の真理値と見なせばよい。したがって、このような Fuzzy 集合論と無限値論理との関係は、ちょうど通常の集合論と 2 値論理との関係と大差ない。しかもたとえば Lukasiewicz の無限値論理などはかなり古くからあったわけで、Fuzzy 集合論はそれらの論理系を補完する役割を果していると言える。ところが真理値の値域 $[0, 1]$ を全体集合とする Fuzzy 集合すなわち言語的真理値による Fuzzy 論理と、真理値限定の手法と結びついた Fuzzy 推論法は自然言語を用いる Brain-Like な推論の数学モデルとして非常に有力であると思われる。かかる Fuzzy 推論については本特集の別稿に書かれるはずなので説明を省略するが、最近、鬼沢¹²⁾らは歯科疾患の臨床データを使ってこの Fuzzy 推論法にもとづく診断アルゴリズムを作成し、興味のある結果を得ている[12]。ちなみに、MYCIN に見られる C. F.

(信頼度)の演算則は Fuzzy 推論の立場から直観的に眺めると、実にうまく定められてはいるが、AND に対しては Minimum を、OR に対しては確率論理を、さらに Modus Ponens に対しては Fuzzy 理論の流れで Gouguen の定義にもとづく推論式を適用するといったように、論理的基礎づけは必ずしも明確ではない。なぜそのように演算則を定めたのかという疑問に対し、それでうまくいくからという答えに反論すべくもないが、不確実性の世界のまっただ中に働く合理性ないし論理性を追求することは無益とは思われない。このようにのべたからといって、Fuzzy 論理の分野で、こうした推論方法についてすでにはっきりかたがついているというわけではない。むしろここで、6年にわたって議論百出というべきであるが、ただ最近、Fuzzy 推論がどんな基準を満足しなければならないかという観点からの公理的接近がなされており、このあたりの議論もまとまりかけているというのが筆者の感じである。

本節の最後に、Fuzzy 診断法の狙いについてふれておこう。もともと Fuzzy 集合論は人間の情報受容力の評価と密接に結びついて登場してきた。たとえば自動車の運転を教えるとき、ハンドル操作で右に30度きれというよりは、大きくきれと言ったほうが生徒にとってかえってわかりやすい。車の位置、速度、さらに道路の曲り具合を総合的に判断する能力に訴えることなしに、教師は何も教えることはできないだろう。他方、車などの故障の場合のように、異常な音や振動、こげる匂いあるいは力がない感じ等々、人間の感覚による検知が診断にとって依然として重要な情報となっている。かかる人間のすぐれた異常検知能力および総合的判断力を生かし、利用できるような工夫が要請される。医療診断でも、医者知識やセンスを自在に発揮できるような場を保持することが診断システムの設計で重要である。つまり、システム設計の際に計算機にあくまでも医者やオペレータの相談相手という役割を付与することであ

る。そのような Man-Machine 系の設計、これが Fuzzy 診断法の終局的狙いと言える。

3. Fuzzy 診断法の概要

Dubois & Prade の近著 [15] (1981) の第 7 章に Fuzzy Diagnosis の簡単なサーベイが与えられているが、小稿では最近の Fuzzy 診断法の研究から基本的な事柄を抜き出してのべたい。

医学的知識を Fuzzy 関係で最初に表現しようとしたのは Sanchez である。いま $\{Y_j, j=1, \dots, n\}$ をそれぞれの症状に関連する属性の名前の集まりとしよう。たとえばある物質の“濃度”とか“温度”がこれにあたる。 P_j で次の F 命題を表わす。

$$P_j = "Y_j \text{ is } R_j", j=1, \dots, n \quad (1)$$

ただし、 R_j はメンバシップ関数 $\mu_{R_j}: U_j \rightarrow [0, 1]$ により特徴づけられる Fuzzy 集合で、ある病気がおこっているときの j -症状の現われやすさを意味するものとする。次の合成命題

$$P = "Y_1 \text{ is } R_1" \text{ and } "Y_2 \text{ is } R_2" \text{ and } \dots \text{ and } "Y_n \text{ is } R_n" \quad (2)$$

を簡単に

$$P = "Y \text{ is } R" \quad (3)$$

のように書く。ただし

$$Y \equiv (Y_1, \dots, Y_n), R \equiv R_1 \times \dots \times R_n \quad (4)$$

ここでさっそく問題が生ずる。すなわち Fuzzy 集合の直積をどう定義するかという問題である。しかしほんのしばらくの間これを見すごして、単純に

$$\mu_{R_1 \times \dots \times R_n}(u_1, \dots, u_n) = \text{Min}\{\mu_{R_1}(u_1), \dots, \mu_{R_n}(u_n)\}, \forall (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n \quad (5)$$

として考え、これが問題としている病気に対して与えられていたとする。患者の病態観測が Q_j を U_j の Fuzzy 集合として、同様に

$$O = "Y \text{ is } Q" \quad (6)$$

のように与えられたとする。ただし

$$Q \equiv Q_1 \times \dots \times Q_n \quad (7)$$

いま問題にしている病気の診断を次のような命題

P と O の整合度を表わす γ によって判定することにする。

$$\gamma = \text{Sup}_{u \in U} (R \cap Q) \quad (8)$$

ただし、 $u \equiv (u_1, \dots, u_n), U \equiv U_1 \times \dots \times U_n$ 。(5) 式の定義により

$$\gamma_j \equiv \text{Sup}_{u_j \in U_j} (R_j \cap Q_j), j=1, \dots, n \quad (9)$$

と定めると、(8) 式は次のように書ける。

$$\gamma = \text{Min}_j \{\gamma_j\} \quad (10)$$

すなわちおのおのの R_j と Q_j との整合性の中の最小値になる。すぐわかるようにこのやり方では、どれか 1 つでも合わない属性があるとたちまち低い値になる。実際、Sanchez らの実験的研究でもそのような例が報告されている。問題は前述したように (5) 式の中の“and”の解釈に関連する。日常用語で語られたり書かれたりする“and”には“logical and”よりむしろ“compensatory and”とでも言うべき使われ方が圧倒的に多いことは Zimmermann ら [6] によって指摘されている。この場合で言うと、たとえば、2 つの症状の間に、片方が現われていて他方が現われないことがあり得ないときと、必ずしもそうは言えないときがある。このような症状の間の関係は医学的知識そのものであって、 n 個の項目が考えられるときには、 2^n の組合せについての医学的評価があり得る。最近、筆者らはこのことに注目し、前述した Sanchez の方法をふまえた新しい診断アルゴリズムを提案したが [14]、これについて簡単にふれておきたい。まず、 2^n 個の組合せに対する評価が、関数

$$\mu_H: 2^K \rightarrow [0, 1], K \equiv \{1, \dots, n\} \quad (11)$$

によって与えられているとする。この関数の Fuzzy 期待値を Fuzzy 積分で定義し、これを診断の日安にしようというのがその骨子である。Fuzzy 積分を行なう際の Fuzzy 測度は次のようにして得られる。(9) 式で定義される γ_j は Q_j の R_j に対する可能的整合度であるが、この不確実性はむしろ Q_j の R_j と \bar{R}_j の 2 つの可能的整合度の分布として与えておく。ただし \bar{R}_j は R_j の補集合

で

$$\mu_{R_j}(u_j) = 1 - \mu_{\bar{R}_j}(u_j), \quad \forall u_j \in U_j \quad (12)$$

で定められる。すなわち F 命題 “ Y_j is Q_j ” の F 命題 P_j と $\neg P_j$ に対する 2 つの整合度を考えているわけで、両者が同程度に成立するとき、これを **unknown** に近い状況と解するのである。

いま、次のような合成命題を考える。

$$P_k = “Y_1 \text{ is } \delta_1” \text{ AND} \cdots \text{ AND} “Y_n \text{ is } \delta_n” \quad (13)$$

ここで δ_j は R_j か \bar{R}_j のどちらかであり、また **AND** は “logical and” を意味する。(3)式と同じように

$$P_k = “Y \text{ is } \mathcal{P}_k”, \quad k=1, \dots, N (=2^n) \quad (14)$$

で(13)式を簡単に表わすことにする。これらの N 個の基準命題のおのおのに対して、“ Y is Q ” の可能的整合度をとると

$$\gamma_k = \sup(\mathcal{P}_k \cap Q), \quad k=1, \dots, N \quad (15)$$

したがって、ある $(\delta_1, \dots, \delta_n)$ の組に対して

$$\gamma_k = \text{Min}_j (\text{Sup}(\delta_j \cap Q_j)) \quad (16)$$

と書ける。ある 1 つの病名に対して、これだけの組合せの考慮は十分すぎるくらいで、(14)式の N 個の **Fuzzy** 命題があらゆる場合を覆いつくすと考えてよいであろう。そこで、 $\{\gamma_k, k=1, \dots, N\}$ を

$$\Gamma_k = \gamma_k / \left(\sum_{k=1}^N \gamma_k \right), \quad k=1, \dots, N \quad (17)$$

のように規格化すると、これは離散的な確率測度

$$\Gamma : 2^K \rightarrow [0, 1] \quad (18)$$

となる。

いま、次のような変換を考えよう、

$$G_s(\cdot) = \frac{s^{\Gamma(\cdot)} - 1}{s - 1}, \quad s \in [0, \infty] \quad (19)$$

この $G_s(\cdot)$ が $s=0$ に対しては 0-1 可能性測度、 $s=\infty$ のときには 0-1 必然性測度、さらに $\forall s \in (0, \infty)$ に対して λ -**Fuzzy** 測度 [13] になることが知られている。また、 μ_H ((11)式) と $G_s(\cdot)$ が与えられたときの **Fuzzy** 積分を

$$\eta_H(s) = \int \mu_H \circ G_s(\cdot) \quad (20)$$

と書くと、 η_H は s に関して非増加の関数である

ことがわかる。このことからパラメータ s が 0 に近いほど、可能性を重視した期待値が、また s が大きいほど必然性ないし確実性に重きをおいた期待値が得られることになる。このことは前述した診断時の状況あるいは推論の立場ということに関連して重要である。さらに上のパラメータ s を **fuzzification** すると期待値の言語的表現が可能となる。このような方法の心臓病の診断への応用 [14] が最近試みられてはいるが、そこでは R と H で表わされた 2 つの異なった医学的知識が与えられていなければならない。特に N 個の命題 ((14)式) のおのおのに対して、考えている病気がおこっている程度を **scoring** することは、症状項目の多いときには困難となる。しかしそのようなときは、まさに **MYCIN** のようなシステムを使えば、 N 個のパターンを入力して、 H を得ることもできる。

以上にのべた接近法は、 R_j が濃度、温度あるいは距離を **universe** とする **Fuzzy** 集合として定められる場合であるが、これに対して、そのような物理的尺度を考えることが、もともと困難な場合がある。この場合、症状と病気の関係の度合を直接的に言語的真理値で与え、さらに患者の病態もその症状が見られるという命題の言語的真理値で与えて、これに **Fuzzy** 推論法を適用した診断法がすでに提案されている。寺野ら [7] (1978) による船用エンジンの故障診断 (故障要因 10, 症状項目 21)、田辺 [11] (1979) による消化器系疾患診断 (病名 30, 症状 40) さらに鬼沢ら [12] (1981) が歯科医師と協同して開発した研究 (病名 5, 症状 13) 等はその代表的例である。これらの研究で最も興味深いことは、いずれも対話型の診断システムを目ざしていることである。たとえば、寺野らの研究ではある症状項目を入力すると、図 2 のような出力が得られる。この指示によりオペレータが再観測を実行し、次第に信頼度の高い診断を得ることが可能となる。田辺や鬼沢らの診断アルゴリズムもまた未検査項目の検査指示の手法をそな

***KIND OF FAILURE :**

○ PERHAPS "CRACK ON PISTON CROWN"

***EXAMINE FOLLOWING POINT :**

○ "PISTON COOLING WATER TANK LEVEL"

○ "WATER LEAKAGE AT CYLINDER LOWER SPACE"

○ "CYLINDER MAXIMUM PRESSURE"

図 2 進化的故障診断法

えている。特にプラントの故障診断などでは、現われると期待される症状のうちほんのわずかの症状にしかオペレータは感知しないのが通常であることが、実際の故障の報告例(船用エンジンの500件の場合)からうかがい知ることができる。このことは再観測を指示できるアルゴリズムが付与された診断システムの設計の重要性をものがたっている。そのようなシステムは一般的に進化的診断法[8]とよばれ当然、対話型の Man-Machine 系となるが、その I/O のデザインは高度の操作性、汎用性をもつように対象ごとに十分工夫されるべきであろう。

4. おわりに

小稿では、Fuzzy 診断法の概要を紹介したが、1つの診断モデルを詳説したほうが具体的でわかりやすかったかも知れない。ただ、そうするには、前提とする数学的準備が大変でそれがかえって興味を削ぐのではないかと危惧から定性的表現にとどめた。不足のところは直接文献にあたっただけならば幸である。Fuzzy 診断法においても、他の計量診断学と同様に、目標は診断を定めることにあるとしても、その研究の重点は、むしろ診断にまつわる種々なあいまいさをどう扱うかにある。あいまいさの正当な評価と、正当な表示はしばしば正当な品質表示と同じ意味で重要と思われる。

確率・統計論が長年かけて完成されてきたこと

にくらべて、Fuzzy理論はまだ産みの段階にあると言える。Randomness と Fuzziness との相違点などは、Fuzzy集合の概念が登場して以来、常に議論の対象であったが、こうした中で、Fuzzy理論を研究する学者たちが不確実性の諸問題に対してきわめて敏感になってきている。あいまいさを直ちに確率・統計に短絡させる人々より、はるかに敏感になっていると思われる。筆者はむしろ不確実性に対するこの異常な敏感さの中に、その将来性を期待するものである。それなくして、Fuzzy理論の応用可能性をさらに高めることはできないと思うからである。

参 考 文 献

- [1] M. Albin, Fuzzy Sets and Their Application to Medical Diagnosis, Ph. D. Theses, Dept. of Mathematics, Univ. of California, Berkeley CA(1975)
- [2] E. Sanchez, Solutions in Composite Fuzzy Relation Equations. Application to Medical Diagnosis in Brouwerian Logic, 1975 6th IFAC World Cong., Boston
- [3] E. Sanchez, Inverses of Fuzzy Relations. Application to Possibility Distributions and Medical Diagnosis, Proc. 1977 IEEE Conf. Decision and Control, New Orleans
- [4] E. Sanchez et. al., Linguistic Approach in Fuzzy Logic of the WHO Classification of Dyslipoproteinemias, Proc. 1980 Int. Cong. on Applied Systems Research and Cybernetics, Acapulco
- [5] A.O. Esogbue et al. Fuzzy Sets and the Modelling of Physician Decision Processes, Part I and II, Industrial and Systems Engineering Report Series No. J-77-6, Georgia Institute of Technology 1977
- [6] H.J. Zimmermann et al. Results of Empirical Studies in Fuzzy Set Theory, in G. Klit(ed.), Applied General Systems Research

(John Wiley, New York, 1978) 303-312

- [7] T. Terano et al. Diagnosis of Engine Trouble by Fuzzy Logic, Proc. 1978 IFAC World Cong., Helsinki
- [8] T. Tashiro et al., Inverse of Fuzzy Correspondence and Evolutionary Diagnosis, Proc. 1978 Int. Conf. Cybernetics and Society, Tokyo
- [9] 塚本, 田代, Fuzzy逆問題の解法, 計測自動制御学会論文集, 15巻(1), 20~25, 1979
- [10] 塚本, Fuzzy推論について, 数理科学5月号, 28~33, 1979
- [11] 田辺, Fuzzy理論を用いた故障診断システムの研究, 東京工業大学制御工学科寺野研究室報告書, 1979
- [12] 鬼沢他, あいまい推論を用いた歯科診断, 第20回計測自動制御学会学術講演会, 1981
- [13] M. Sugeno, Fuzzy Measures and Fuzzy Integrals: A Survey, in Fuzzy Automata and Decision Processes, North Holland 1977
- [14] Y. Tsukamoto et al., An Application of Fuzzy Integral to Medical Diagnosis, (to appear) 1982 IFAC Symp. Theory and Applications of Digital Control, 1982, New Delhi
- [15] D. Dubois and H. Prade, Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press, 1980

研究部会報告

●実施理論

●4月例会 4月18日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス) 出席者:15名

OR/MS実施研究論文内容の整理および分類について根本委員(青学大)報告にもとづいて検討会を行なった。

なお分科会を4月4日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス)にてシステム開発の成功,失敗の影響要因の整理・検討を行った。(加藤委員(日本IBM)担当)

●5月例会 5月23日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス) 出席者:14名

Steven Alter の Decision Support Systems, 第1章およびケース1, Connoisseur Foods: The Introduction of Modeling and Data Retrieval Capabilities について太田委員(東工大)の担当により講演会を行なった。

なお分科会を5月2日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス)にて行なった。テーマは“情報処理パラダイムに関する実証研究結果報告”(太田委員(東工大)担当)であり,実施問題を情報処理パラダイムでの見方を適用した考え方を議論,検討した。

●6月例会 6月27日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス) 出席者:16名

S. Alter の D. S. S., 第1章のケース2, Great Eastern Bank: A Portfolio Management について

山田委員(産能大)の担当, ケース3, Gotaas-Larsen Shipping Corporation: A Corporate Planning System について野尻委員(東工大)の担当により,それぞれ講読を行なった。

なお分科会を6月6日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス)にて行なった。“システム実施の成功・失敗概念”について分科会メンバー全員によるブレインストーミングを行なった。

●7月例会 7月11日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス) 出席者:18名

S. Alter の D. S. S., 第2章 A Taxonomy of Decision Support Systems について根本委員(青学大)の担当, 第3章 Using Decision Support Systems of Increase the Effectiveness of Individuals について川瀬委員(慶応大)の担当により,それぞれ講読を行なった。

なお分科会を7月4日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス)にて行なった。6月の分科会において行なったブレインストーミングの結果を分科会メンバー各自まとめた結果を報告した。

●9月例会 9月19日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス) 出席者:15名

S. Alter の D. S. S., 第4章 Patterns of System Usage について井上委員(日本電気)の担当, 第5章 Difficulties in System Usage について前野委員(東亜燃料)の担当により,それぞれ講読を行なった。

なお分科会を9月5日(土) 13:30~16:30 東京工業大学(長津田キャンパス)にて行なった。“システム実施の成功・失敗の評価論”(山田委員(産能大)担当)について報告,検討が行なわれた。