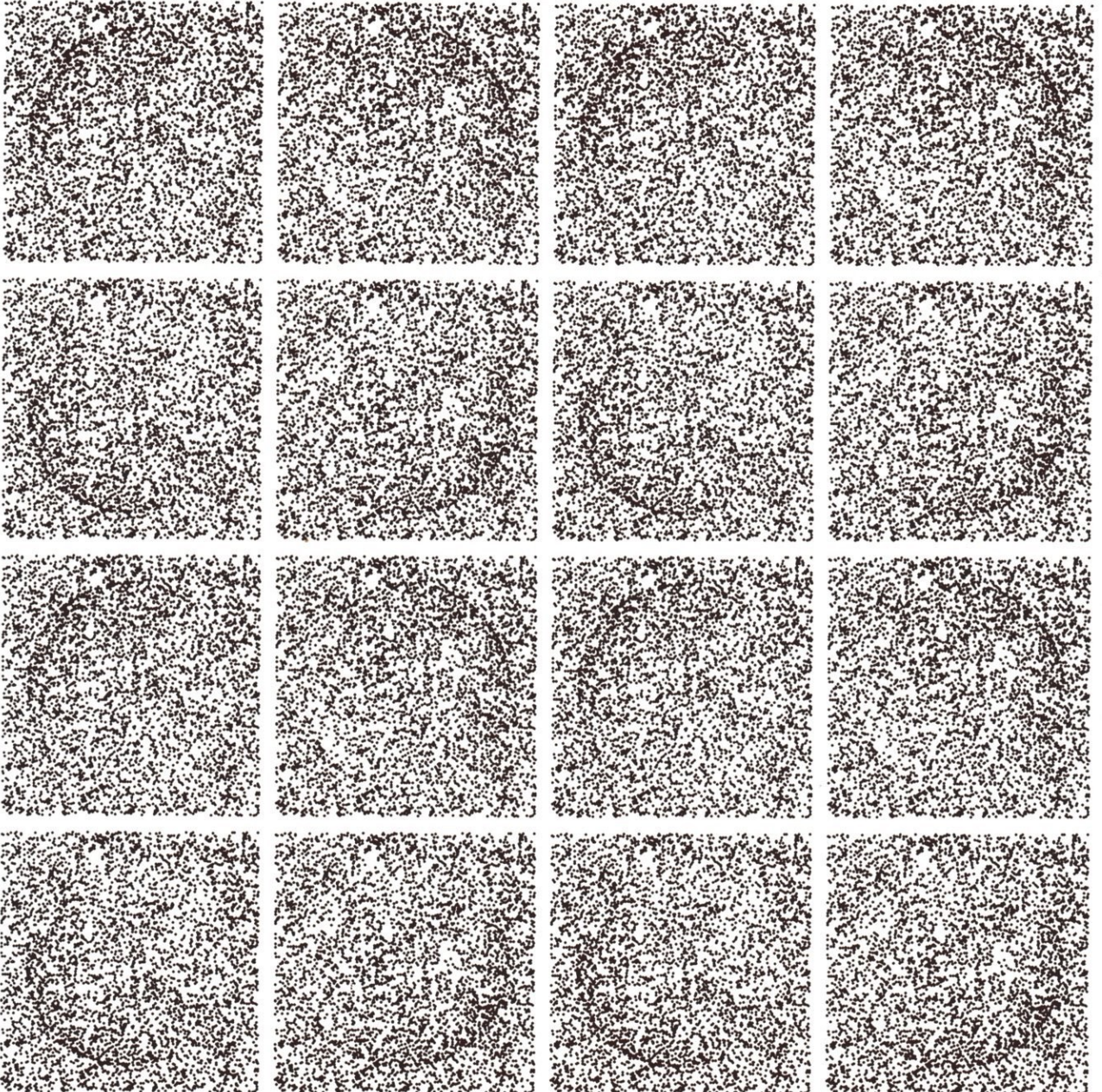


JOURNAL OF THE INSTITUTE FOR ADVANCED SPACE ACTIVITIES

宇 / 宙 / 先 / 端

宇宙先端活動研究会誌
JAN. 1995 VOL. 11-NO.

IAA 1



宇宙先端 1995年1月号 (第11巻第1号) 目次

1. 信頼性の意味するもの
原 宣一 . . . 1

2. <シンポジウム・ふたたび月へ —日本の月・惑星探査—
(1994年9月)における講演より (その2)>
基調講演
秋葉 鏝二郎氏 . . . 14

宇宙先端活動研究会

代表世話人
五代 富文

世話人

石澤 禎弘	伊藤 雄一	湯沢 克宜	岩田 勉	上原 利数
大仲 末雄	川島 鋭司	菊池 博	櫻場 宏一	笹原 真文
佐藤 雅彦	茂原 正道	柴藤 羊二	鈴木 和弘	竹中 幸彦
鳥居 啓之	中井 豊	長嶋 隆一	長谷川秀夫	樋口 清司
福田 徹	松原 彰士	森 雅裕	森本 盛	岩本 裕之

事務局連絡先

〒105 港区芝大門1丁目3-10 コスモタワービル7F
(財) 科学技術広報財団 宇宙プロジェクト室
櫻場 宏一 (事務局長)

TEL 03-3459-8115 FAX 03-3459-8116

入会案内

本会に入会を希望される方は、本誌添付の連絡用葉書に所定の事項を記入して本会まで送付するとともに、本年度の年会費を支払って下さい。なお、会費は主に会誌の発行にあてられます。

年会費： 3,000円 (1994年7月～1995年5月)
会誌 (年6冊) は無料で配布します。

(年会費の支払方法)

1. 財務担当に直接払う
財務担当：岩本 裕之 [宇宙開発事業団経理部経理課]
2. 郵便振替
口座番号：00120-0-21144
加入者名：宇宙先端活動研究会
3. 銀行振込
富士銀行浜松町支店 普通3167046

信頼度の意味するもの

原 宣 一

1. はじめに

もう四半世紀以上も昔のことであるが「後悔をしない決断をするには如何にすべきか」について漠然と考えていた時期があった。人生はやり直しが効かないし、適切な判断を下すよりどころとなる数学的論拠があるものならばそれを知りたいと思ったのである。これは数学を駆使して最適戦略を求めるオペレーションズ・リサーチ(OR)が目的とするところでもある。数年後、幸いなことに留学のチャンスを与えられ、フロリダ工科大学(FIT)修士課程でORを専攻し、最適値を求めるいくつかの手法についてある程度の勉強をすることが出来た。統計的意志決定もORの一つのテーマである。

意思決定を合理的にしたいと本気で考え出したそもそものきっかけは航空機の疲労寿命(Ref.1)を決める手法を再検討するように当時の上司から指示されたことである。疲労破壊はばらつきが大きいので寿命に対する安全率を大きく取り、安全に使える寿命を短めに設定せざるを得ないのであるが、その安全率があまりにも大きすぎる(Ref.2)のでもう少し何とかならないだろうかということであった。寿命を長くして商業的価値を高めたい(Ref.3)という上司の意図はもちろん理解できることである。それよりも実際に航空機を運航する人に対して明確な説明が必要だと考えたのである。例えば、着陸装置(Landing Gear)の安全寿命(Safe Life Limit)は着陸6000回と決めてしまうと、毎日整備していて見掛け上錆びたり摩耗していなくても6000回の着陸回数に達したら棄てなければならないのである。何故、この脚は今日から使ってはいけないかの論理を説明するのは設計者(会社)の義務であろう。規則により航空局の認可を得たものであるという答えだけでは理由にならない。

さて安全寿命の決め方がどうなっているか、即ち、何が仮定で、試験データのばらつきはどのようなもので、統計的に何が言えるのかを検討した。すると統計的意思決定につきものの信頼水準の設定があまりにも恣意的で根拠がないことに不満を持つに至った。さらに確率論の基礎的な考え方についていくつかの文献をあたって結果、確率統計の歴史は古典的確率論に始まり、大論争時代も経ていることが判った。結局、ベイズ流統計学と言われている方法(Ref.4,5)が

最も合理的であると確信を抱くに至り、この考え方に沿って疲労寿命の決め方をよりすっきりした形で提案することができた(Ref.6)。破壊確率の許容値や他の仮定は同じにしたままで論理的に安全寿命は伸ばせることが分かった。後に、問題の本質をより明確にするために属性試験結果から信頼度を決める方法も提案した(Ref.7)。

しかし、「・・・流」という形容詞がつく間は学問としては主流でない響きを持つらしく、学会誌への投稿も採用されるところとならず、シンポジウムでの発表も何ら関心を引くことは出来なかった。大学に残り純粋数学を専攻している友人は「確率論に問題があるなら面白い」と言って喜んで頭を突っ込んでくれた。彼は集合論との関係、変数変換と分布の対応関係をすぐ説明してくれたが、「応用分野で確率にどのような意味を持たせるかは数学として何の興味もないよ」とのことで、「工学分野での確率統計論の応用はおかしいところがある」という私の主張に引き込むことは出来なかった。数学的には確率は公理で定義される抽象的な数値であり、公理から出発して導かれる演繹的な定理群にはいささかも欠陥がないし、その公理についても測度論により揺るぎないものになっているのもう研究テーマにならないということであった。

このような状況のまま転勤等で仕事の内容が変わり20年近くこの話題を放置してしまった。この間、信頼度に関する状況は殆ど進歩がなかったように思われる。そして3年程前に信頼性管理部に配属されると、信頼性管理の理論的背景として信頼度の定義に使われている確率の捉え方が気になり出した。信頼性管理部での業務上、最も基本的な信頼度に係わる数学的考え方をはっきりさせておきたいのである。統計的意思決定方法として現在一般的に行われていることの何が不合理であるか、また、その打開策はどうあるべきかについてもう一度、ここに示したい。

2. 属性試験による信頼度の決め方とその問題点

論点を出来るだけ明確にするため簡単な例として属性試験結果から信頼度を決める方法について考える。属性試験(Inspection by Attribute)とは試験結果が合格か不合格か、あるいは○か×かで表されるような試験を言う。試験結果が数値で表される測定値のようなものでも合格ラインを設定しておき、それ以上か以下かのみを着目すれば、属性試験となる。属性試験としては、例えば分離ボルト等の火工品がある。これらは作動、不作動の結果がはっきりしている。

このような試験において、1個ずつ試験をしていき n 個の試験したとしてその結果の全体を $\{X_i : i = 1 \text{ から } n\}$ 、またはベクトル表記で X と書く。合格の場合は $X_i = 1$ 、不合格の場合は $X_i = 0$ とすると約束する。このように決めた X は 0 か 1 の値を取るが試験をしてみないと分からない。そして、ある確率 p で $X = 1$ を取ると考えられる。このような X は確率変数(random variable)と呼ばれるものの最も簡単な例である。

確率統計論では、上記のように確率 p で 1 を取り、従って、確率 $1 - p$ で 0 を取るような確率変数 X は n 個試験すると結果が確率的にどうなるかが分かっている。例えば、5 個試験して 5 個とも 1 が得られる確率、5 個の内、4 個が 1 になる確率、等が計算できるということである。これを確率変数 X はパラメータを n, p とする 2 項分布(Binomial Distribution)に従うと言い、習慣的に $B(n, p)$ と表記する。

さて、ある A という会社が新しく分離ボルトを開発したので使ってみたいが、重要な場所に使う部品なのでその分離ボルトが確かに作動するものであるかどうかを知りたいという状況にあるとする。実際は、その会社から開発状況や会社の過去の実績等の関連情報が大きく信頼感に作用するのであるが、これらの情報に頼らず何個かの試験結果からのみで判断しなければならないとする。即ち、属性試験結果からその分離ボルトの信頼度について客観的にどのようなことが言えるのかを問題とする。

今、20 個の分離ボルトを試験したところすべて合格であったとする。すなわち、 $\{X_i = 1 : i = 1 \text{ から } 20\}$ のデータを得たわけである。つまり A 社の分離ボルトは合格確率 p であると考えられる。しかし、 p の真の値は永久に未知なパラメータであるものの、試験結果からある程度の推定ができるのである。この p が分離ボルトの信頼度に他ならない。 p が 0.5 ぐらいであれば 20 個連続して合格するようなことはめったに起こり得ないことは丁半賭博で丁が 20 回も続くようなことが殆ど起こり得ないことを想起すればすぐ納得できる。もし、そのようなことが起これば 100 万回に 1 回程の極めて稀なことが起こったとは考えずに「いかさま」があったに違いないと推察することになる。それでは p が 0.8 とか 0.9 ならば 20 回も続けて成功することが普通に起こることかどうかということが知りたいところである。

前述のように 2 項分布の知識から p がどんな値であろうと n 個取った場合の

結果がどうなるの確率は計算できるのである。計算すると p が 0.861 であったとしても 5% はこのようなことが起こり得ることがわかる。つまり p が 0.861 であったとしても、20 個試験するという試行を 100 回行ったとして平均として 5 回の試行で 20 個とも合格するという結論が得られる。

(信頼水準の取り方に決めようがない)

そこで現在の確率統計論では「信頼水準を 95% に取ると p は 0.861 以上であると言える」という表現になるのである。このことから、技術者は「安全側に」 $p = 0.861$ と推定することになる。

この信頼水準 (Confidence Level) とは歴史がある割に全く恣意的で根拠が無いものである。20 個とも合格したというデータはさらに「信頼水準を 90% に取れば 0.891 以上である」とも言えるし「信頼水準を 99% に取れば 0.795 以上である」とも言える。一般に信頼水準としての数値は 90%、95%、99% の 3 種類をよく見かけるが、文書によっては信頼水準 60% という数値も用いられている。信頼水準を何% に取るとの必然性を明確に示した文献は皆無である。 p の値と信頼水準の値とは性格が異なるのでこのような表現で表すしか方法がないのだとされている。

ある決断を下すに際して、その決断に係わる多くの要素があろうとも、即ち多次元で考えなくてはならない状況であろうとも、常に一次元に変換して何らかのしきい値を越えているかどうかで決断を下すことになる。実際問題の多くは多次元から一次元への変換式も分からないし、しきい値もふらふら定まらない場合が多いことであろう。しかし、状況が同じであれば同じ決断を下す、即ち、首尾一貫した決断を下すためにはこれらを明確に定める必要がある。

「A 社の分離ボルトを採用する」という決断を下すためにデータを取ったら信頼度と信頼水準という二つの要素を考慮する必要に迫られたわけである。現在の統計的意思決定では、しきい値の定め方を教えてくれないわけである。「信頼水準を 90% に取る」という根拠が全くないことに不満を抱かざるを得ない理由である。

実は同じようなことを考えた人はいたのである。これら信頼水準と信頼度の二つの数値を組み合わせて一つにすることを試みたマクダネル・ダグラスの技術者が書いた文献 (Ref.8) があったが大方の賛同を得ていない。

(信頼水準付きの信頼度は比較が出来ない)

さらにB社が同じ分離ボルトを開発していることが分かって80個の試験を行ったとする。そしてその結果、75個合格したが5個不合格であったとしよう。すると20個とも合格であったA社の分離ボルトとどちらの物を採用すべきであろうか。もちろん問題を簡単にするために、コスト比較等の考慮事項を一切省いて試験結果だけから判断するとの前提である。

B社の分離ボルトは「信頼水準を95%に取れば0.873以上である」と言え、「信頼水準を90%に取れば0.887以上である」と言えるわけである。従って、この下限値を取って信頼度と推定する方法では、信頼水準を95%に取ることにすればB社の製品の方がA社の製品より信頼度が高いという結論になるが、信頼水準を90%に取ればA社の製品の方が信頼度が高いことになる。この関係をFig.1に示す。果たして人は直感的にはどちらを採用したいと考えるのであろうか。

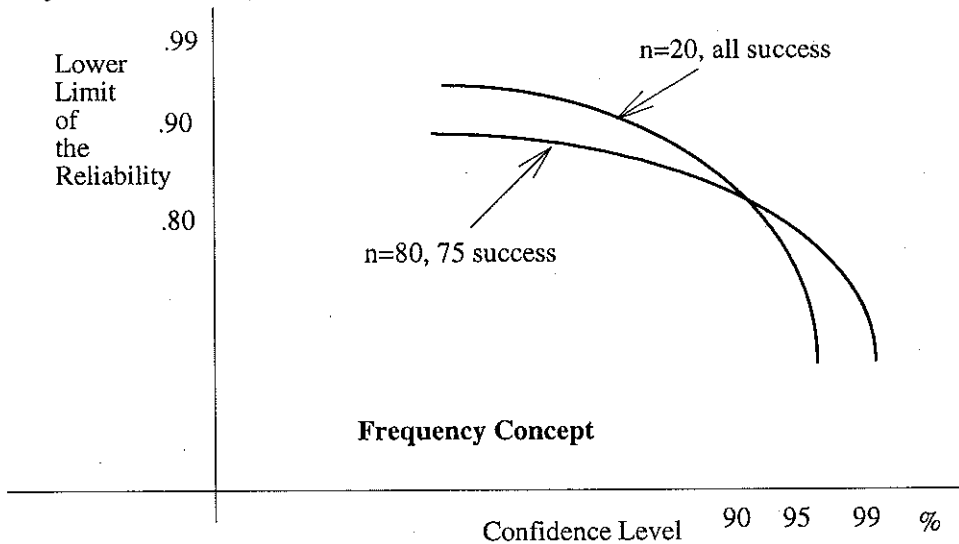


Fig.1 the Reliability (Frequency Concept) depended on the Inspection by Attribute

(信頼水準付きの信頼度は合成が出来ない)

最も簡単なシステム(S)は二つのコンポーネント(A), (B)から構成されているシステムである。そのシステムブロック図(Fig.2)がシリーズになっているとするとシステムの信頼度 R_S は二つのコンポーネントの信頼度 R_A と R_B の積で表される。このとき、 R_A と R_B が信頼水準90%や95%で推定されたものであるならば積 $R_A \cdot R_B$ は信頼水準何%であると言えるのか答えようがな

い。仮に両方とも90%であるとしても積 $R_A \cdot R_B$ はもはや信頼水準90%ではない。



Fig.2 System Reliability

もとの試験データに戻って、2次元の同時分布を考えて計算すれば求められなくもないが、多数のコンポーネントの場合はすぐお手上げになる。システムの信頼度をブロック図を通じて計算するメリットは無くなる。実際は、信頼度計算を行う時に信頼水準は無視されているので問題にならないだけである。信頼度計算に伴う多くの仮定の一つに過ぎないと考えられる。一般に、信頼度計算とは、数字の桁数が多いのに反してその程度のものなのである。

データを見て客観的に判断したいということから確率統計論の知識を活用した筈であるのに、信頼水準の取り方が確定していないために客観的な結論が出せないのである。B社の方に味方したいと思えば信頼水準は95%必要ですというであろうし逆の場合は信頼水準は90%で良いと主張することになる。これでは合理的に決めようとしたのに不合理な決め方しか出来ないわけで一つのパラドックスである。まして、供試体の数が違うので判断出来ないという結論では確率統計論の知識を持ちだした意味がない。しかし、これまでのところ判断の基準としての信頼水準は90%で良いのだというような見解で済まされてきていること自体が驚くべきことではなからうか。高い信頼度を求めなければいけないような宇宙技術でそれでも良いのであろうか。これまで信頼水準は90%とすることで良かったからということであれば、少なくとも何故90%で良かったかの説明が欲しいものである。

3. 確率の定義

上述のように「信頼水準C%で信頼度はR以上である」という控えめな表現しか出来ない理由は確率の定義に問題があるのである。前節で信頼水準を付けた厳密な表現をしてみても3つの問題があることを指摘した。「信頼度は0.999」とか「信頼度は0.95」とかの一つの数値でないとなんか役に立

たないのである。

さて、信頼度(Reliability)の定義はJ I Sによると「アイテムが与えられた期間与えられた条件下で機能を発揮する確率」となっている。J I Sでは信頼性(Reliability)も定義されていて「アイテムが与えられた期間与えられた条件下で機能を発揮する性質」となっている。N A S A文書ではReliabilityの定義としてJ I Sの二つの定義を合わせたようなものになっている。むしろ、J I Sの定義では定量的な信頼度と定性的な信頼性という二つの用語を使い分けるために米国の定義を分けたものと思われる。信頼度の定義はどの文書でも同じように使われており特に問題とするところはない。

N A S Aの定義(SSP 30000 S.9)では、

Reliability: A characteristic of a system or an element thereof expressed as a probability that it will perform its required function under condition at designated times for specified operating periods.

ところが確率の定義には問題もあり論争の歴史もある。大きく見ると4種類の定義がある。まず数学者が不確定の事象を取り扱うことを始めたのはラプラス(Laplace)が賭けの問題を相談されてからだとされている。ラプラスは取り得る状態(事象)がどれも同じような(equally likely)場合にはそれぞれの事象に全事象の数の逆数を先見的に(a priori)割り当てることを基礎にして求める条件に合うものの割合を確率と定義した。物理学の世界ではラプラスの定義で議論されおり、取り得る状態の数を数えることが重要な課題である。

ラプラスの定義で最も批判をされたのは equally likely という表現であって何を持って同様に確からしいと見るかであった。もっと客観的な確率の定義が望まれたわけである。フォン・ミーゼス(von Mises)は n 回の試行で条件に合う場合が n_A 回あったとした場合に、相対頻度 n_A / n の n を大きくしたときの極限値を確率の定義とした。英語の表現では次のようになる。

Probability is a limit value of the relative frequency, which is assumed to exist.

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n}$$

確かにこれで客観的な確率を議論出来るように見えるし、 n が十分大きいとき、即ち大数の法則が成り立つような場合は実用上の問題はなく使われてきた。選挙のとき等、無作為抽出により標本(sample)調査で十分全体の結果を早期に予測することに成功している。R. A. フィッシャー等の統計学の大家やネイマ

ン・ピアソンの仮説検定理論等が出され、実務の確率の定義として確立しているかのように見えるのである。

しかし、このような極限值が一定の値に近づくことが数学的に保証されているわけではないし、この定義の確率を知るすべはなく前述のように信頼水準を設定して推定するしかない。また、例えば大量生産される電球等の信頼度ならまだしも、人工衛星やステーション等のように通常1機しかないものに無限に多くの同一の衛星を想定して相対頻度の極限值を持って定義することにかんがりの無理があるように思われる。

純粋数学者は確率の定義として実世界で何を意味しようとは関係ないという立場を取って理論の世界だけ完べきなものにした。これを確立したコルモゴロフ(Kolmogoroff)は3つの公理を満足する数 $P(A)$ を事象Aの確率と定義した。それは、

- I. $P(A)$ は非負の数である。 $P(A) \geq 0$
- II. 確実に生起する事象の確率は1である。 $P(S) = 1$
- III. もし、事象AとBが相互に背反であるならば、
$$P(A + B) = P(A) + P(B)$$

確率の公理を満たすものはラプラスの定義であっても、フォン・ミーゼスの定義を取ろうとも全て確率論の結果を応用出来るのである。この公理の基礎を固めている数学のキーワードは次のようなものである。

- ・完全加法族 completely additive class
- ・測度空間 measure space
- ・有限加法的測度 finitely additive measure
- ・可測集合 measurable set

フィッシャー達と大論争があったとされている一派はベイズ流統計学派と呼ばれている人達である。人により少し趣が異なるが、サベジ(Savage)による定義は「命題の真偽に関する確信の度合い(degree of belief)に対して割り当てる数値」とするものである。同じ命題、例えば「A社の分離ボルトは作動する」に対して、試験データを見た人と何もデータを見ていない人とで割り当てる数値は異なってくる。このことから、主観確率(subjective probability)と呼ばれることがある。この派の人はすべての確率とは主観的なものであるという立場を取っていることもあって主観確率であることを否定しない。このことが「主観的なものは学問的でない」という風潮によって不当に評価されてきたきらいがある。

データを見てどのように確率を割り当てるかの割り当て方が数学の定理であるトーマス・ベイズの定理を使うという意味で規定されているのでむしろ客観的な方法なのである。情報が無いときにどのように事前分布を考えるか、定性的な情報をどのように組み入れるか等数式に乗りにくい情報の生かし方には研究の余地があるし、数学的でないと批判される余地がある。全く情報が無い状態についてはラプラスの定義のように一様分布を仮定することが合理的であると考えられている。意志決定を合理的に行うことを目的とする分野、例えば経済分野では殆どベイズ流統計学が使われている。

4. 確信の度合い

2節で客観的な確率を推定するというアプローチではパラドックスに陥ることを示した。これと同じ例を使って主観確率、即ち、確信の度合いとしての確率ならどのように決定を下せるかを示す。

「A社の分離ボルトは作動する」という命題が真である確信の度合い（確率）を p とする。

(1) A社の製品を試験する前の信頼度、即ち成功確率 p に関する事前情報が何も無い状態として0から1までの一様分布を仮定する。即ち、 p は0から1までのどの数値になるか分からないのでどの数値になるかは同じ割合であると見込むことが合理的であると考えるのである。事前分布は仮定により既知となる。

(2) 次に20個の試験結果が全て成功であったというデータを考慮するとベイズの定理により p に関する事後分布を求める事が出来る。ベイズの定理は事後分布は事前分布とデータの p に対する尤度の積に比例するというものである。

(3) p に関する知識が分布の形でよりはっきりしたわけであるが、分布を代表させる一つの数値は期待値である。事後分布は2項分布になるのでその期待

値は $\frac{r+1}{n+2}$ となる。ここで n は試験個数、 r は成功数である。

従って、20個の成功を見た後では確信の度合いとしての確率は $21/22 = 0.955$ となる。80個試験して7.5個合格であったB社の製品の信頼度は 0.927 となる。

20個の成功データを見ただけでは信頼度は0.955に過ぎないのである。もし、信頼度は0.999即ち千に一つしか失敗が許されないような部品が要求されており、1000個も試験する余裕はないような場合には、開発を管理して十分審査する以外に成功の確信を高める、即ち、信頼度を確保する手立てはないのである。これが信頼性管理活動が必要な理由でもある。

因に試験データが何も無いときには成功か不成功かの2つの状態が等しく起こりうると考えることが合理的であり確率はどちらも0.5である。これは一様分布を仮定した事前分布(Fig.3)の期待値でもある。確率を確率分布で表現したとき、その確率分布から求められる期待値が確率に他ならないのである。コイン投げで表が出るか裏が出るかという試行で「表が出る」という命題に対しても確信の度合いは0.5であるが、この場合の事前分布としてはディラックのデルタ関数を借用して表現出来る。このような分布は強い確信の分布(Fig.4)であり、データがどのようなものであっても事後分布は事前分布と同じになる。

弱い $p = 0.5$ の確信

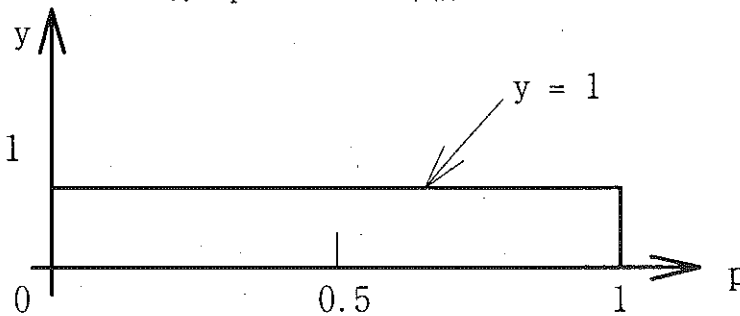


Fig.3 Density of Weak Belief

強い $p = 0.5$ の確信

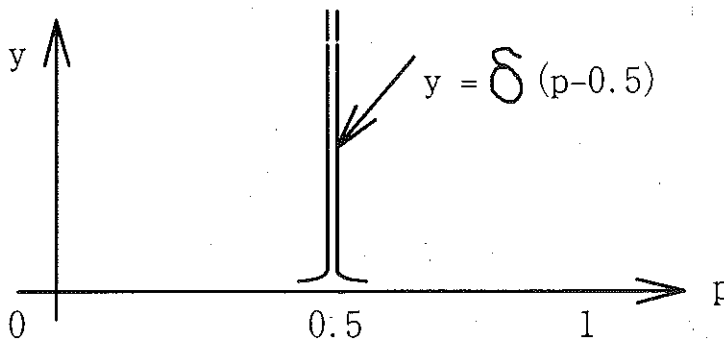


Fig.4 Density of Strong Belief

5. あとがき

私が実世界における確率の定義は変えるべきであるとの信念を抱いてから、あるいは取りつかれてから、ざっと20年間経ってしまった。要約すると、確率の定義は本質的に異なるものが4種類あり、このうち公理に基づくものは数学の世界でありなにも問題はない。実世界の現象を説明するために客観的な確率を想定した相対頻度の極限值という解釈は成功を納めたといって良い程の実績があり世の中に広く使われている解釈であるが、データが十分多い時にだけ使えるもので、よく考えると矛盾を含むものである。データが少なくても、少ないなりに何が言えるかを厳密にするためには、確率の解釈として確信の度合いを採用すべきである。この解釈は確率の古典的解釈である等確率の原理を含むより統一した立場の解釈である。

このような話を議論するならどこかのシンポジウムが適切であるとの上司のご意見は正当であることを承知の上で無理矢理お願いし、年に一度のNASA/NASDAの会議の場でNASAに対して問題提起をさせて頂いた。日本のシンポジウムでは、現行の方式をいささかでも否定する話は極めて受け入れられ難いことを思い知らされていたし、ベイジアン学派は米国に多い(Ref.14)と聞いていたからである。影響力の大きいNASAが問題点に気がついてくれさえすれば定義の見直しは簡単に実現するであろう。

今回の会議のNASA側の出席者は3名で、その団長はNASA本部のミッション・サクセス保証局の局次長 (Deputy Associate Administrator)のDr. Greenfieldであった。彼は自らNASAのアクション・アイテムとして設定し、持ち帰って検討することを約束してくれた。このような会議の宿題は次回にまで持ち越されるものだが2カ月足らずで返事がきた。Dr. Greenfield 自身の手紙と共に、彼の部下である Mr. Bob Weinstock が検討結果の第一報を書いてくれた。

Mr. Weinstock の手紙を要約すると、

(1) 信頼水準を設定する現行方式には制約があり、信頼水準を設定する方策は何もないものである、従って、この点で原が言っていることに同意する、

(2) NASAでは "uncertainty distribution" なる概念が state of the arts の方法として使われ出しているが、原が提案している内容はこのことではないか。これに関して2、3の資料から抜粋した部分を同封するので検討してみると良い、というものであった。

(2) に関して同封してくれた資料はミサイルを含む固体ロケットの失敗例の統計データを検討したもので非公開資料の一部らしきものであった。この中に、横軸に頻度(frequency)縦軸に(probability density)を取った図があり、考え方に近いものが有るようであるように思われるものの、まだこれまでの確率の定義に引きずられているようにも見受けられる。明確に確率の定義を変えることには抵抗があるのか、その意義に気がついていないかのどちらかである。

確率は命題の真偽に対する確信の度合い(degree of belief)に対して割り当てる数値であるとするサベジ流定義を受け入れた時、確率は絶対的未来予測が出来ない人間の知識の程度を表現する道具に他ならないことがわかる。

6. 文献

- (1) 軽構造理論とその応用、下、林毅編、日科技連、1966
- (2) 航空機構造の疲れ寿命の安全率、上山忠夫、日本航空宇宙学会誌、Vol.9 No.88, 1961.5
- (3) Y S 1 1 の悲劇、山村堯、日本評論社、1995.4
- (4) Introduction To Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint, D.V.Lindley, 1965
- (5) 確率統計入門 1 及び 2、竹内啓・新家健精、培風館、1969
- (6) ベイズの方法による疲労寿命とばらつき係数、原宣一、第 1 4 回構造強度に関する講演会、福岡市、1972
- (7) 属性試験と信頼度、原宣一、宇宙開発事業団第 5 回社内技術成果発表会、11/15/1978
- (8) L.F. Impellizzeri, ASTM CTP404, p.136, 1966
- (9) Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, Papoulis, 1965, McGraw-Hill

- (10) Mathematical Methods of Statistics, Harold Cramer, 1966, Asian Text Edition, Overseas Publication, First Published in Sweden, 1945
- (11) Introduction to Mathematical Statistics, Hogg, et al, Third Edition 1970
- (12) Quantity Control and Industrial Statistics, Duncan, Forth Edition 1974
- (13) Journal of American Statistical Association, Vol. 59,1964, p353 J.W. Pratt, H.Raffia and R. Schlaifer
- (14) Quantitative Analysis for Business Decisions, Bierman, et al, Forth Edition 1973

基調講演

宇宙科学研究所所長 秋葉 鏡二郎 氏

宇宙科学研究所の秋葉でございます。ただいまは宇宙開発事業団の山野理事長から、たいへん立派な挨拶をいただきまして、私の役目は基調講演ということでございますが、山野理事長のご挨拶はまさにその基調講演の最初の部分であり、私はこれからあとへ話つなぐという意味でのお話を続けたいと思います。

ここにありますのはアポロ宇宙船で初めて人類が月面に足跡を残して以来25年ということのを記念いたしまして、アメリカで作られました記念切手を背景に書いたタイトルでございますが、アメリカは25年前に月へ既に有人活動を展開したわけでありまして、それ以来、長らく我々人類は月へ近づいていないという状況が続いております。このようなことは、やはり異常であると取れますが、例えば南極探検といったものが行われてから、実際南極の科学探査が行われるということになるまでには、50年くらいの時間がかかっておるというわけでありまして、やはり最初にこういう僻地へ、離れた場所へ人間が行くということは、いろんな意味で無理をして行われる事業でありまして、永續性を持ってそこで人間が活動していくには、いろんな意味での進歩がそこに積み重ねられなければいけないという背景はあろうかと思えます。しかしながら既に25年というのは、我々いろんな意味での技術というはずいぶん進歩いたしまして、これからのさらに25年、30年を考えると、そこで究められる技術を前提とすれば、ふたたび月へ人間の活動を展開していくというのは当然の流れではなかろうかというわけでありまして。

そういうことから長期ヴィジョン懇談会におきまして、ぜひ月の有人活動というのを見通した形の議論を報告したいものだという希望がございまして、宇宙開発委員会のお世話で月惑星協会にお話を持っていきまして、この長期ヴィジョン懇談会に資料を出していただき、それが長期ヴィジョン懇談会の報告に反映されることになったわけでございます。

その次のスライドは、長期ビジョン懇談会にどのように書かれているか、要点だけを抜き書きしてまいりました。月の重点開発対象といたしまして、月の探査を一過性の取組みでなく計画的・段階的に進めていくと、このへんが大きくうたわれることになりました。その次のスライドはもう少し詳しい個別分野の開発について書かれていることをごさいます、ここには2000年代初頭以降、科学探査および月の利用可能性調査を目的として月周回観測や月面着陸探査をはじめとした体系的な無人月探査計画を実施すべき云々と書いてございまして、将来は国際協力により月面天文台等に発展していくということを見通していきたいということが、ここにうたわれることになりました。

次のビューグラフを見ていただきます。私は、南極とのアナロジーを申し上げましたが、なぜ月かという話は今日のパネル等を通じて、いろんな観点から議論がなされるかと思えます。まだそこに触れたくはございませんが、とにかく人間が活動の場を広げていくというその場所として広さをだいたいどんなものかというのを比較するのにいい絵でございます。これは亡くなられた南極の科学探査で有名な永田 武先生がお作りになったスライドをお借りしたわけでございませうけれども、永田 武先生が南極の大きさと月の大きさを比較したものでございませう。月は球面ですから、投影の4倍の面積を持つわけでありまして、投影面積は南極大陸と同じくらいだというわけですが、面積としてはアフリカ大陸とオーストラリア大陸を合わせたくらいの広さをもっております。これを大きいと見るか小さいと見るか、これは感じ方の問題ではございませうが、いずれにしても未知の空間という意味で、たいへん南極との類似性があるわけでございませう。南極も、人間が近づきやすい場所でないとしても、現在は有人活動で探査、科学的研究が行われる場になっております。ロボティックス、無人探査というものがずいぶん進歩はしてきましたが、人が行けるという状況さえ作れば、月もいずれ同じような状況になるというのは間違いないことであろうかと思っております。

宇宙における有人活動、これは地球周辺で既に行われております。有人活動という観点からいきますと、やはり重力がないという空間におけるひとつの特徴を生かすという反面、人が活動するにはなかなか不便な面もあるということであります。6分の1Gというのが月にはあるというのは、

そのような、人間がそこで活動するという観点からいいますと、ひとつのメリットであるということも言えるのではないかと考えております。

いずれにしても、ここに対比して書きましたように、月における有人活動、最初は何といても科学探査、これに重点が置かれるのではないかと考えております。しかしこれが将来、もっといろいろな形で我々の地上における生活に直結するような活動がここで行われていくということも当然考えられるわけであります。しかしそれには、ずいぶんいろいろな困難というものもあわせて考えなければなりません。次のスライドをお願いいたします。

月面活動というのは、ここに書いてありますけれども、何といてもいちばん最初には資金というものがどういう形で調達できるかということが可能性を左右いたします。先ほど山野理事長のお話にありましたように、国内の支持、それから国際的な支持というものがあって初めて、そのような資金が生み出されていくというわけであります。

それから資材の輸送、これも月面へ輸送するというのはたいへんなことであります。地球周辺というのは比較的簡単にいくわけでありますけれども、それにしてもかなり大きなロケットが要ります。その地球の周辺の軌道からさらに月へ、月の表面へ荷物を降ろすということになりますと、普通のやり方ですと地球周辺の10分の1の重さの物しか月へ届けられないということになります。少し凝った推進系を使いますと、5分の1くらいのところまでは運べるわけではありますけれども、いずれにしても大幅に輸送にはコストがかかるようになるわけでございまして、このへんにも、今後、有人活動を展開していくうえにおきまして、大きな技術進歩を前提としなければならないわけであります。

月面活動、先ほど申しましたように科学というひとくくりのものが当面中心課題であろうかと思っておりますが、科学の中としては、月を科学する月の科学。それから月から科学する、例えば遠い天体を観測するという天文的なものは月からの科学になります。それから月における科学、月の表面・月の環境を利用するという形での科学がございます。このへんは今日のパネルの方でいろいろ科学者の方がお話になりますので、そういったものをお聞きいただきたいと思っておりますが、このようなものは、大部分が無人でできるのではないだろうか、というのが、いま科学者の中ではかなり大勢を占めております。しかしながら人が行った場合にできることという

のは、自ずからやれることが質的に変わってくるわけでございまして、無人でできることから始めるというのはひとつの手ではありますが、無人に適したものは無人でやり、有人に適した話は有人でやるという、そういう形で進めていくのが将来の月探査のあり方として当然のことであろうかと思えます。ただし有人は先ほどから申しておりますように、まだ簡単にできるという事情、状況にはございませぬ。そういうところから、これはかなり長期計画として人が進める状態を作っていくというところから始めるべきではなかろうかと考えておりまして、そのような形でシナリオを作っていくといたゞくようなお願いを、月惑星協会にしたわけでございます。

例えばお金にしましても、月へ日本の国家予算と等規模くらいのもの、あるいはその何十%という規模を一挙に投入するような計画を立てることは非現実的であります。けれども、いまの予算、だいたい年間2000億円くらいの国家予算がございます。ここにさらに1000億円は1兆円になるわけでございますし30年続ければ3兆円になるわけでございます。そのような長期的に時間をかけるというのは単に資金面だけではなく、その間に十分に技術開発にじっくりと取り組んでいけるといふメリットもあるわけでありまして、時間をかけて無人で有人がつける環境を作っていくというシナリオを書いていただきたいというのが私からのお願いであったわけでございます。

いま言いましたお金の話でございます、年間1000億円という我々の現在の予算を5割増しするようなお話が、そんな無理な話ではないということがこれを見てもおわかりになるように、国民総生産から見まして宇宙開発に携わっている国の中で我々日本というのはたいへんささやかな投資をしているに過ぎないというのをおわかりいただけると思えます。ドイツぐらいの頑張り方をすれば、いまの5割増しという予算は出るはずでありまして、他のフランス、アメリカというところまで望めば、もっと大きなことができる可能性を含んでいると我々は理解しているところであります。

このようなことから、将来、たぶん30年後に有人で月活動ができるようにするということを無人でやっていくということは、我々が実現可能なやり方であろうかという風に考えます。このような手順で行ったらどうかと月惑星協会の方で回答を出していただきました。まず最初は、月の表面が、どういうところがどういう状況であるかという調査を十分に行うということ。それからそこで動植物がどのように生育できるか、それは将来人間が

そこへ行って、人間自身がどういう影響を受けるかということと同時に、人間の食料としての動植物、そういう風なものが月面で育ち得るか、という実験をやる必要があるわけでございます。それからいちばん大事な話は、月面で十分にエネルギーが確保できなきゃいけない。エネルギープラントをなるべく早い時期に持って行って、そこでいろいろな活動の支援ができるようにしなくちゃいかんということでもあります。月面はご存知のように半月の間、夜があります。その夜の間のエネルギーをどういう風に貯えるかということはいへん大きな問題であります。その他、人間が月へ行きまして、とにかく生き延びていかななくてはいけない、そのためには酸素を作ることが大事であります。月惑星協会のスタディでは、それと同時に人間が生きていくうえに必要な水というのは月面においても得られるはずだというわけで、酸素と水の製造プラントを作るといふ試みが人間が月へ行く前にどうしてもやらなければいけないことです。そのような鑄型ができたところで食料生産モジュールができあがって、人間がそこで生活していくレベルとして基本的な生産ができるようになりましたならば、そこで居住モジュールまでを無人で作る、それから初めて月へ人が行くという手順になるのではないかと思います。

地球周辺の軌道では、このように資源がございませんから、人が行けば、その人を養っていただくだけの荷物を運ばなくてははいけません。だいたい年間ひとりあたり1トンくらいのを運ばないと、人間が軌道上で生活していけないわけですが、月へ行けば、基本的にはかなりの物資が揃うわけでございますので、確かに低軌道上から10分の1くらいの輸送しかできないという欠点はございますけれども、その欠点を長期滞在においては十分にカバーできるのではないかと思います。

最後に、このように大きな計画、これはまさに世界的な取組みとして行われなければいけないものであります。国際的でなければいけないというのは当然でありますけれども、最後のスライドを見せていただきたいんですが、国際的な取組みと申しますと、たいへん耳障りはよろしいわけですが、パートナーとして非常にしっかりした相手でありませんと、そのパートナーひとつが、特に大きなパートナーのひとつが、挫折いたしますと全体の計画ができなくなってしまうてはいけないわけでありまして、これは新しい国際協力の形を踏まえて実行されるべきではなかろうかということで、ここに掲げてある原則というものを考えてみました。

後ほどのパネル等で、このようなやり方につきまして討議を戦わせていただければ幸いと思っております。基本的には計画を途中で放棄するような場合には、他の主要国に内容をすべて、それまでの実績をすべて引き継ぐようにしてくれということです。そうすれば時期的には多少遅れても、実現に向けて必ず動き出すだろうというのが基本であります。

私の持ち時間、だいたい終わりになったようです。ご清聴ありがとうございました。

(編集より)

本記事は、宇宙科学研究所と宇宙開発事業団の共催により1994年9月に開催された「シンポジウム・ふたたび月へ -日本の月・惑星探査-」の講演録を主催者の了解を得て転載したものです。

第4章 我が国が目指すべき宇宙開発の目標と開発の進め方

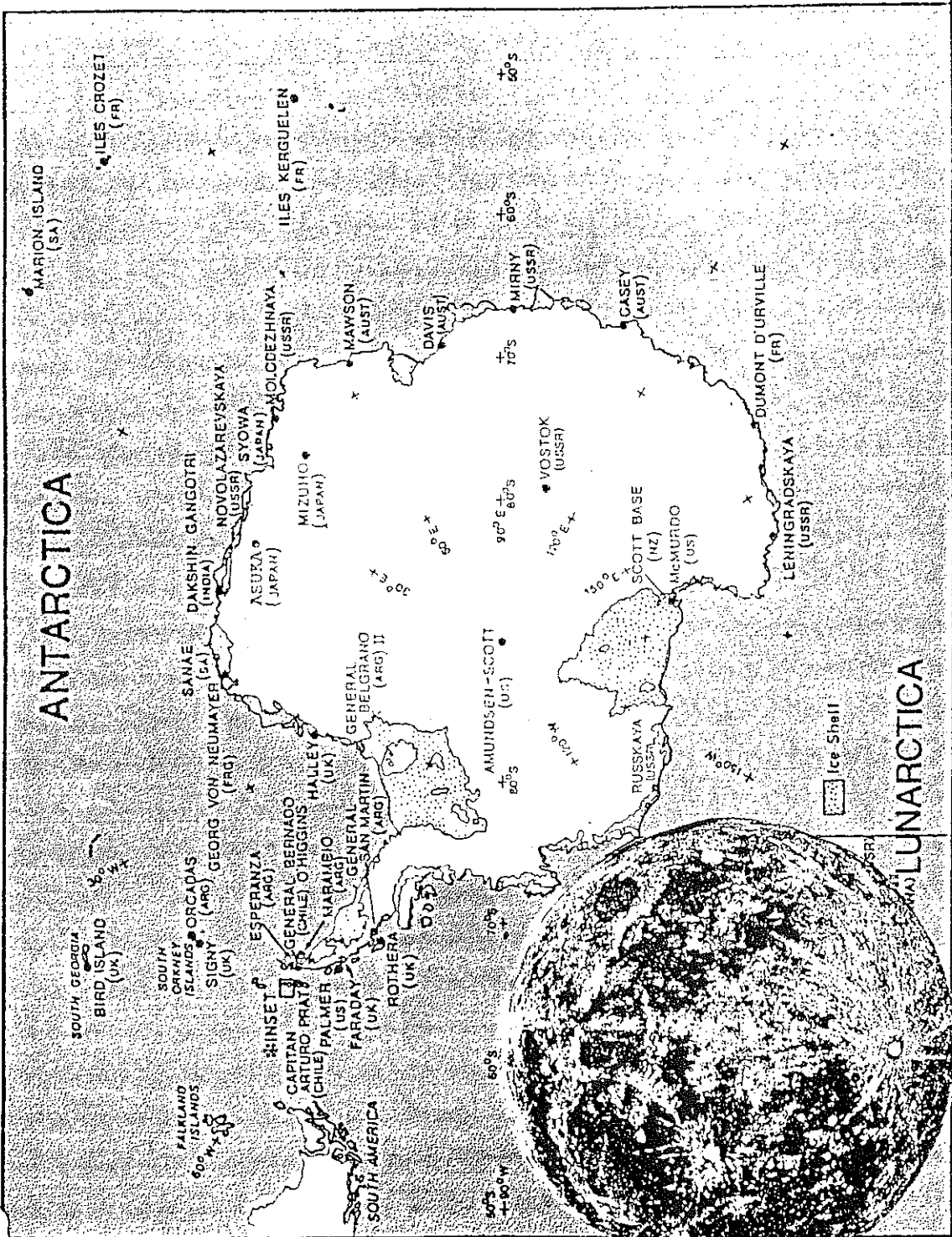
4. 1 重点開発対象（抜粋）

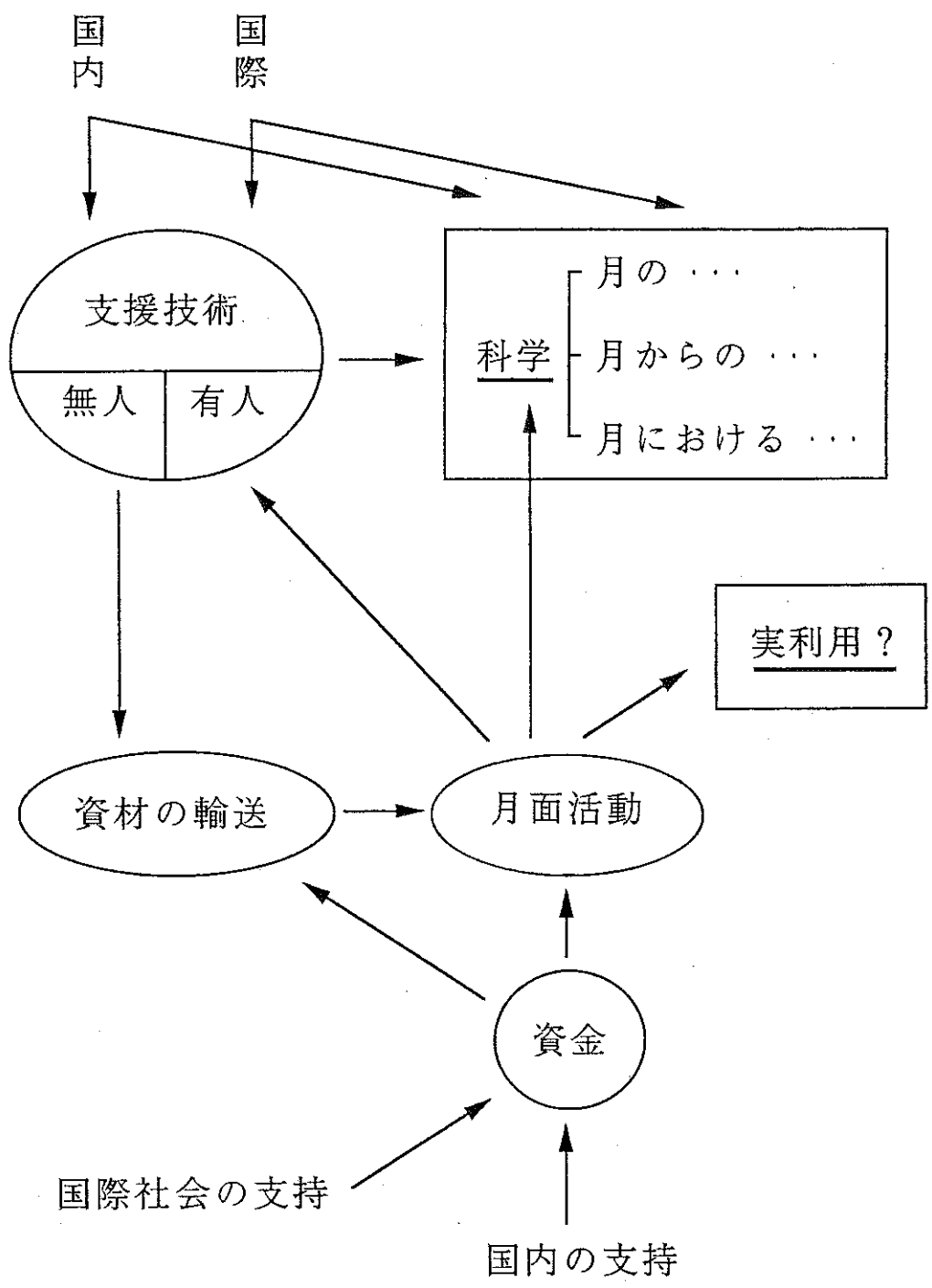
・・・月の探査はその結果や国際的動向によっては、長期的に国際協力による月面活動に発展し、人類全体に恩恵をもたらす可能性がある。このため2000年代初頭以降、関連技術の蓄積と高度化にも努力しつつ、月の探査を一過性の取り組みでなく計画的、段階的に進めて行くことが我が国の課題である。

4. 2 個別分野の開発（抜粋）

・・・我が国としては、宇宙開発事業団と宇宙科学研究所などが連携・協力し、2000年代初頭以降、科学探査及び月の利用可能性調査を目的として、月周回観測や月面着陸探査をはじめとした体系的な無人月探査計画を実施すべく、その具体的な進め方を検討する。同計画は、合理的なコストで段階的に、成果を評価しながら進める。

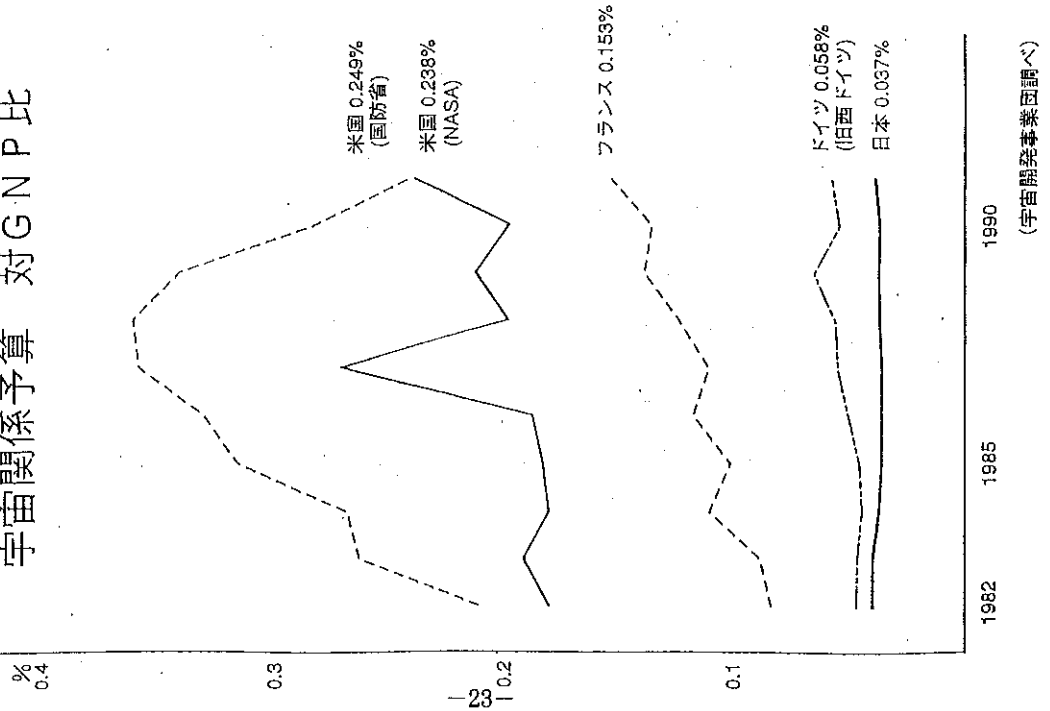
さらに、2010年以降2020年代にかけて、各国の無人月探査の成果を踏まえつつ、国際協力による月面天文台などへ発展していく可能性がある。このため、そのような状況に備えて、着実に関連技術の研究開発を進め、技術の蓄積と高度化を図る。



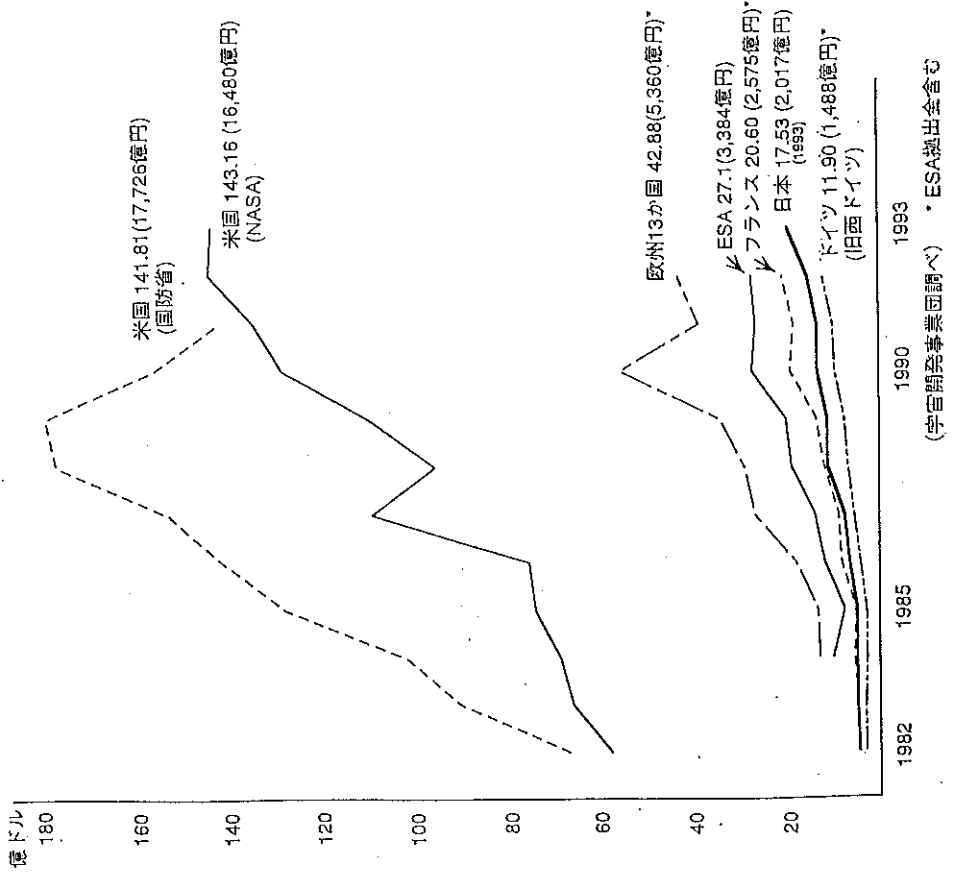


月面活動の展開

宇宙関係予算 対G N P比



宇宙関係予算の推移



有人月面基地 無人建設

1. 無人探査段階：月面観測衛星、移動探査機により施設の建設に最適な場所を選ぶ
2. 1/6 Gライフサイエンスシステムによる動植物育成の実証研究
3. 通信施設の設置：月面通信局、中継衛星の設置
4. 月面エネルギープラントの設置
5. 月面作業ロボットの運用
6. 酸素、水製造プラントの展開
7. 食料生産モジュールの設置と試運転
8. 居住モジュールの設置

国際協力の原則

1. 主要部分の経費を負担し、実行する用意のある国または機関（例えば15年以内に全計画の1/3以上の費用を負担する等）は、全計画を最後まで実行する責任をもつ。
2. 計画を途中で離脱する国、または機関はそれまでの成果を主要国の一つに引き継ぎ、計画の続行を可能とする。
3. 計画分担は参加国の合議による。
4. 分担した計画実施の責任は、その国または機関にある。
5. 完成した施設の利用は国際的に開放する。
6. 連絡調整のための国際組織を設ける。
7. 一定期間以上分担計画に遅れを生じさせた国、または機関は計画離脱に準じた扱いとする。

94年度年会費納入のお願い

宇宙先端の印刷と郵送の経費は会員の皆さんからの会費によって賄われています。(袋詰めや編集はまったくのボランティアです。)

下記のいずれかの方法により、94年度年会費(3,000円)を納入されるよう、よろしく願いいたします。

1. 財務担当に直接払う
財務担当：岩本 裕之 [宇宙開発事業団経理部経理課]
2. 郵便振替
口座番号：00120-0-21144
加入者名：宇宙先端活動研究会
3. 銀行振込
富士銀行浜松町支店 普通3167046

投稿募集

宇宙先端は会員の原稿によって成り立っています。軽重、厚薄、長短、大小を問わず奮って投稿を！(下記を参考にして下さい。)

会誌編集方針

- 1 『宇宙先端』は宇宙先端活動研究会の会誌で年6回発行される。
- 2 論文の内容は、全て著者の責任とする。
- 3 投稿資格：原則として本会会員に限る。
- 4 原稿送付：投稿する会員は、B5版横書きまたはA4版横書きでそのまま版下となるような原稿およびコピー1部を、宇宙先端研究会編集局宛送付する。原稿は返却しない。
- 5 論文は未発表の原著論文に限る。ただし、他に発表したものの要約、解説等は歓迎する。掲載論文に対する質疑、意見、提案等、誌上討論は大いに歓迎する。
- 6 A4で20ページを超えるものは掲載しないことがある。宣伝、中傷、その他本会の趣旨から極端に外れる投稿は掲載できない。編集人は会誌の整合のため、著者に改稿を求めることがある。

原稿送付先：〒105 東京都港区浜松町1丁目7番1号 平和ビル7階
(財)日本宇宙フォーラム 福田 徹

編集に関するお問い合わせは下記へ。

福田 徹 (編集局長) TEL 03-3459-1651 FAX 03-5402-7521
岩田 勉 (編集人) TEL 0298-52-2250 FAX 0298-52-2247

編集後記

宇宙先端もついにVol.11となりました。と、言うことは今年で10周年ということです。

巻頭には原さんのいささか重い論文を掲載しました。編集はどちらかというとならばギャンブル理論の方が興味があるのですが(冗談)...このような論文は大歓迎です。(福)

宇宙先端

宇宙先端活動研究会誌

編集人
岩田 勉

編集局長
福田 徹

編集顧問
久保園 晃 有人宇宙システム(株)代表取締役社長
土屋 清 帝京大学理工学部教授
山中 龍夫 横浜国立大学工学部教授

監査役
伊藤 雄一 日本電気エンジニアリング(株)

宇宙先端 第11巻 第1号	頒価 1,000円
平成 7年 1月15日発行	編集人 岩田 勉
発行 宇宙先端活動研究会	
東京都港区浜松町 世界貿易センタービル内郵便局私書箱 165号	

無断複写、転載を禁ずる。

宇/宙/先/端

宇宙先端活動研究会誌
JAN.1995 VOL.11-NO.

IA&A 1

