宇宙機の安全と確信度

原　宣一

１．　伏線

ロサンジェルス駐在中は年に何度か米国内の他の地域に出張することがあった。米国は広いのでビジネス・トリップの場合、交通機関は事実上航空機に限られる。空港には無人の旅行保険販売機がおいてある。　旅行の目的地や住所氏名などを申し込み用紙に記入し、お金をいれると受取りが葉書の様式で自動的に返され、これに切手を貼って家族宛てに投函するだけで手続き完了である。　１回のラウンド・トリップの期間、万一の場合には１ドルの掛け金に対し１万ドルの保険金が支払われる割合になっていた。　過去の統計から旅客機の致命的な事故率は１００万回のフライトに１回と言われているから、１回のラウンド・トリップが平均４回のフライトとして、随分旅客に不利なゲームに違いない。　しかし、出張で留守の間にハガキが着く事に利用価値を認め、待ち時間が充分ある場合は必ず利用した。

さて、仮に航空機の安全度がもっと低くて１０００回に１回ぐらいであったとしたらどうであろうか。　航空機による旅客輸送という事業は成り立たないかも知れない。航空機という物は危険な乗り物という事になり大衆の人の乗り物ではなくなることは明らかだ。　それでも飛行機に乗るであろうか。　それは人により、かつ時と場合により違う。　君子危きに近寄らずをモットーとし、いかなる危険も冒したくないという人もいれば、空を飛ぶことが好きで１０回に１回の危険でも厭わないという人もいるであろう。　一般的には飛行機を利用する事によって得られる便益に比べ危険度が充分低ければその飛行機は利用される。

日本でもようやく国産有人宇宙機の議論が活発になってきたが、乗り物としての宇宙機もこの比較において安全度が充分高い事を示さなければ正常な人は乗ってくれない。　人類最初の宇宙飛行は既に一昔前の出来事となった今、これから開発する宇宙機に人を乗せようとするならばその安全度はかなり高いという確信を与える物でなければならない。

２．　確信の度合

ある命題の真偽に対する知識が何も無い時、人はその真偽について５０－５０であると言う。　例えば、「皮袋に入っている碁石を１個取り出したときそれは白石である。」という命題を与えられたとする。　この時、「皮袋には白石と黒石が同数入っている。」という情報があっても、「皮袋に入っている白石と黒石の割合は分からない。」という状況でも確信の度合いは同じであって、上記命題「・・・は白石である。」が真である確信の度合いは１／２であると表現出来る。　「皮袋」は中を見ないでという意味である。　出る石は白石と黒石という二つの状態があってそれに関する情報が何も無いとき確信の度合いはそれぞれに同じ数値１／２を割当てるのが合理的であるという事であって、これは証明のしようがない原理である。

次に６連発のピストルでロシアン・ルーレットを行なう場合を例に取る。　弾は１発しか入れないから、「最初に引き金を引く人に弾が出る。」という確信の度合いも「２番目に引き金を引く人に弾が出る。」という確信の度合いも同じ１／６である。しかし、最初の人は弾が出なかったという事実を知った後では「２番目に引き金を引く人に弾が出る。」に対する確信の度合いは１／５に変わる。　即ち、命題の真偽に関する情報が与えられると確信の度合いは変化する。

さて、無限に多くの白石と黒石の入った皮袋から１個取りだす場合を考える。　白石と黒石の割合に関する情報は皆無であるとする。　この時最初に取りだす石が「白石である。」確信の度合いは前述のとうり１／２である。　１個目は白石であったという事実を知った後の２個目に取りだす石が「白である。」確信の度合いはどう変わるであろうか。　　３個取り出した結果を見た後の４個目に対する確信の度合いは同であろうか。　この問いに対して著者の導いた結果は次のような簡単な式で表現出来る。

『ｎ個の石を取り出したところ白石がｒ個あったという事実を見た後で
次に取り出す石が「白石である。」確信の度合いＲは，
Ｒ＝（ｒ＋１）／（ｎ＋２）となる。』

最初の例で５０－５０を合理的と見なす人はこの式で計算されるＲを確信の度合いとしないと、首尾１貫している人とは言えない。　取り出した石が全部白であった場合確信の度合いは５０％、６７％、７５％、・・・と高く成り、９個目でやっと９０

％となる。　９個目が黒であったとすると１０個目の確信の度合いは８２％に下がってしまいもう一度９０％の確信を得るためには１０個目から続けて９個の白石を取り出した後になる。

上記の例において命題を「ＮＡＳＤＡの打ち上げるロケットが成功する。」と置き変え、白石を成功、黒石を失敗と見なしても同じことが言える。　ＮＡＳＤＡはどのような開発をしているか等の情報を全く持ちあわせていない人に対しては８回の成功を示してやっと９０％の確信を与える事が出来るにすぎない。　１度失敗してしまうと再び高い確信を取りもどすのが大変だという事も分かる。

もちろん打ち上げ担当者であるＮＡＳＤＡが５０％の確信しか持てずに打ち上げ作業を進めている訳ではない。　この確信を高めるために、性能、コスト、スケジュールのバランスを取って技術的検討をしっかり行ない、効率的な開発を進めることに努力しているのだと言っても良いであろう。　特に不具合があった後では成功に対する確信の度合いが下がってしまうので原因調査を行ない、しかるべき対策を講じて確信を高めなければならない。

３．　試験による確信とその費用

あるシステムが成功することの確信Ｒが９０％以上を要求された場合、そのシステムの試行結果からの情報でのみ示そうとすれば、最小限続けて８回の成功を失敗無しに見せなければならない。　１回のシステム試験に１０万円かかるとすれば最小限８０万円が必要である。　もし、このシステムが直列系１０個のサブシステムで表わすことが出来、それぞれのサブシステムの成功に対する確信をそれぞれR_1，R_2，・・・，R_{10}とすればシステム全体の確信Ｒは、$R=R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_{10}$となるので、$R=0.9$となるためには、例えば、$R_1=R_2=\cdots=R_{10} \fallingdotseq 0.99$が必要である。　一つのサブシステム $R_1 \fallingdotseq 0.99$をそのサブシステムの試験結果だけから主張するためには９８回の成功を失敗無しに続けなければならない。　１回のサブシステムの試験費用が全体の試験に比べて１／１０（実際にはもっと低いであろうが）乗１万円かかるとすれば９８万円必要である。　従って全体では更に１０倍の９８０万円が必要になる！　即ち、直列系の場合にはサブシステムで試験を行なったほうが何もかもうまく運んだとしてもずっと費用がかかる。　並列系（冗長系）の場合は逆に

サブシステムごとに確信を高めたほうが費用はかからない。

有人宇宙機の場合、その安全性に対する確信度Rはかなり高く要求され（例えば０．９９９）全体での試験はせいぜい数回しか許されぬであろう。　しかもサブシステムは冗長系が取りにくく、直列系とならざるを得ない場合が多い。　従って、試験でのみ確信を得ようとしても実行上不可能と言ってよい。　それではどうすれば良いか。

過去の経験を生かし、可能な限りの役立つ情報を集め分析し計算によるしかない。これが出来るところに技術屋の存在価値が有るとも言える。　例えば「正しく作られたＮＡＳ規格の１／２″ボルトは１tonのせん断力に耐える。」の命題に対しては試験をしなくても０．９９９９９９以上の確信を持てよう。

４．　確信の度合いと確率

これまで意図的に極めてポピュラーな二つの用語、確率と信頼度を使わないように話を進めて来た。　それは一般的に使われている（ＪＩＳの定義でもある）信頼度と確率の解釈に不合理を感じているからである。　即ち、「確率は相対頻度の極限値であるとし、その値は分からないからデータで推定する。　推定に当たってはその推定が当たっている度合いを示す信頼水準を置いて議論するのだ。」という立場を取っている点である。　問題は推定したい確率の値（例えば０．９９９とか０．０００１）に対し、試行によって得るデータの数が現実には少なすぎるのが常であるという事情にある。　データが１０個か２０個しかないため、『信頼水準５０％で信頼度は０．９９以上と言える。』という表現で満足して良いのであろうか。　このような方式で「信頼度０．９９９９９」という表現を見るたびに童話の「裸の王様」に似たものを感じざるを得ない。　数少ないデータであるが何が言えるかという立場を取るのが合理的であると思える。　つまり、データを見ることにより確信の度合いはいかに変化するかを確率論により計算すべきなのである。　現代の確率論は四つの公理から出発している。　２．項の確信の度合いは四つの公理を満たす。　従って、確信の度合いを確率の解釈とすることにより、確率論の全ての定理は確信の度合いについて成立する。　単純には計算にのせられないような場合は、同じ情報を得たならば誰もが納得するような確信度の数値を割り当てることが取り得る最善策である。　これはもう主観確率と呼ばれるほうが適切である、前述のボルトの強度の例における確信度の数値

が高過ぎるとして納得しない人がいれば、技術屋は現在の技術の現状に関する説明を行ない、容易に納得させせることが出来るであろう。

5．あとがき

4．項で述べたような事に気が付いたのは既に15年も前のことであるが調べてみるとかなり昔から統計学の一派として時に大論争もあったというベイズ流統計学の考え方そのものであることが分かった。 今だに正当派はR．A．フィッシャーを元祖とする考え方でありほとんどの統計学の本はその流れを汲んでいる。 しかし、次の本は、1985年初版で訳本ではない。

『ベイズ統計入門』繁桝算男、東京大学出版会

訳本では、少し古いが1968年初版の次の本を紹介しておく。

『確率統計入門』D．V．リンドレー著、竹内啓・新家健精共訳、培風館

2．項で紹介した式の導出については、宇宙開発事業団第5会技術成果社内発表会前刷集に要点を示してある。 最後に、保険のようなゲームでは確信の度合いとしての確率の解釈が本質的であると言いたい。

（筆者は昭和17年生まれで、宇宙開発事業団においてプラットホームの開発に従事している。）