

信頼度の基礎について

平成 11 年 5 月 6 日
安全・信頼性管理部 原

概要

NASDA が開発を行う品目が所定の性能を発揮することについて、これまでどのように確信を得てきたかを概観し、より合理的な開発の費用配分のためにはこの確信の度合いに数値を付与することの必要性を述べる。また、従来この目的のための数字であった筈の信頼度が役に立たなかったか理由を示し、代わりにどうすべきかを提案する。

1. NASDA の開発品における確信の生成

衛星であってもロケットであっても、その構成要素としてあるコンポーネントを新規に開発したとき、そのコンポーネントが「所定の期間、所定の環境下で所定の性能を発揮する」ということについて、その開発担当者はどのように確信を得てきたのであろうか。これには大きく次の 3 要素が考えられる。

1) 設計結果が満足できること

設計値が所定の性能を示すことが第一に必要なことは言うまでも無い。つまり、計算で（それが複雑であれ、簡単であっても）所定の性能が出ていなければならない。例えば、重量は 10Kg 以内であることが性能要求の一つであるならば、図面（計算による積算）重量は 10Kg 以内にあることを示していることが必要である。また、推力が 10 トン以上であることも性能要求の一つであるならば、計算推力も 10 トン以上を示すことが必要である。計算推力は 8 トンしか示していないが実験して見ようというレベルではおぼつかない。即ち、設計解析値が必要条件をすべて満たしていることで、始めてそのコンポーネントが所定の性能を発揮するとの確信が生まれてくる。これは確信を得るための必要条件のようなものである。

2) 開発試験結果が満足できること

設計結果は良好であっても、設計解析ではいくつかの仮定を置いたり、推定値が入ってきたりするので 100% に近い確信を持って所定の性能を発揮するとは、よほどの楽観主義者でなければ、誰も考えない。そこで開発試験を行われることになる。EM 試験や認定試験ですべて所期の性能を発揮するとかなりの確信が生まれてくる。

3) 製造に信頼感があること

設計も良好、確認試験もすべて順調にいったとしても、製造工程のばらつき、試験供試体とフライト品との製造ロットの違いなどの個体差、等に考えが及ぶと、認定試験で合格したとことだけでは、必ずしも 100%に近い確信とはならない。認定試験が実環境より厳しい側の環境を負荷しているとの設定であったとしても、完全に模擬出来無い部分もあるのでなかなか 100%の確信を生むものではない。製造の確かさについては厳しい品質管理の工程で製造できるメーカーの品質管理システムに頼ることにならざるを得ない。

一般に設計が要求を満たしていることを検証する手段として解析、点検、試験、デモンストレーションの一つまたは組み合わせで行うが、全部実施しても 100%近い確信が得られるとは限らない。設計要求自体が適切であるかを含めて上記 1)、2)、3) には不確かさがつきまとうからである。なお、NASDA が開発移行後の製造請負契約を実施するに先立ち、すべての品目は「所定の期間、所定の環境下で、所定の性能を発揮する」との見こみの元に、設計要求及び製造工程、と確認試験の全体を定めて契約する建前にはなっている。

2. 従来信頼度要求

さて、「所定の期間、所定の環境下で所定の性能を発揮する」性質を信頼性と称し、その度合いを数値で示したものを信頼度と言い分けている。英語では信頼性も信頼度も区別はなく Reliability という用語が使われている。信頼性工学では「所定の期間、所定の環境下で、所定の性能を発揮する確率を信頼度という。」であり、JIS の定義にも採用されている。

かつて、NASDA の開発仕様書には信頼度要求と言う項目があった。例えば、衛星の開発仕様書には、残存確率という言葉で言い換えてあったが、「3 年後の残存確率は 70%以上のこと」というようなものであった。これはその衛星が所定の環境下としてロケットによる打上げ環境を経た後に宇宙環境下において、所定の性能を（故障する品目があっても冗長系を作動させることなどにより）、所定の期間として 3 年間にわたって、発揮する確率が 70%以上であるものを開発しなさいということを意味している。ここで確率の意味は後述するが、打上げた衛星の「コンポーネントの七割以上が作動すること」ではないのはいうまでもない。1 個のコンポーネントの故障でも全体がだめになるもの（シングル・フェイリャ・ポイント部品と言う）も多いことを想起すれば、コンポーネントの 1 割は故障することを許すが 2 割はだめというような言い方がナンセンスであることがわかる。しかし、搭載トランスポンダ数が 20 本のうち 5 本は予備であるとか、後述の確率の定義が相対頻度からきていることもあって、混同され易いことは確かである。

3. 従来の信頼度における確率の意味

信頼性工学で使う確率の意味は故障確率という言葉で象徴される意味内容であるとされてきた。つまり、すべての部品は故障する確率を持っているとするものである。故障確率は長さや重さのように部品に付属する属性であるとする考えで、その数値はわからないが、試験個数 n に対して故障数 r とすると、 n を大きくしていったときの r/n であるとするものである。これはフォン・ミーゼスの「相対頻度の極限值」とする定義である。この極限值が存在するかどうかは証明できないが、信頼性工学では古くからこの定義が採用されてきた。わかりやすい定義であることと、もともと大量生産品の歩留まりを上げる管理に応用されそれなりの成果を収めてきたからでもある。

そして、試験供試体として1個や2個であったり、衛星の残存確率のように1個のものの確率を云々する場合には、フォン・ミーゼス自身が「この定義は使えない、意味をなさない」と言っているにも拘わらず強引に同じ定義で済ませてきた。

このための矛盾や不合理性は信頼性工学上でいくつか指摘できるが、結果的に端的な例は、信頼度要求に対して示される結果を誰も信用していないことである。信頼度を計算した人でさえ、ただ数値を計算しただけで意味するところを何も考えていないのであろう。「計算では信頼度が0.99になったので要求の0.8以上を満たしています」という答え方が普通であるが、殆どの人が聞き流してきたのである。酷い例ではある会社の設計部が設計した結果について同じ会社の品質保証部の人がある信頼度を計算し、「計算の結果、信頼度は0.1でした」というような表現を設計陣は平気で聞き流していたことであった。同じ会社の人がある「設計結果は9割がた失敗する」と言っているのを気にもかけていないのである。何のために計算したかも分かっていないのではないかとと思われる。

このような事態になっている根源は上述の確率の定義にある。部品の故障確率は永久に未知であるから、例えば試験データから推定することになるが、推定の誤りを考慮すると信頼水準という数値を天下りに導入して「信頼度は0.99以上であることを信頼水準90%で言える」という形式の表現をせざるを得ないのである。ところが信頼水準が何故90%で良いのかについては何の根拠も無いのである。10回に1回は誤る推定方式で信頼度0.99以上であるということに、果たして信頼度0.99であるというわけにはいかない。暗黙に内に分布の仮定がなされることも一切不問である。

4. 信頼度は必要か

上記のような状態であったことを省みると、実際には信頼度要求は不要では

なかったのかとの疑問は生ずる。実際、宇宙ステーション計画では、保全が利くからとの理由もあるが、信頼度要求は課されていない。

しかし、開発結果がどうも不安だ、確信を持てないと言う状況に置かれたとき追加試験を考えたり、あるいは設計当初このコンポーネントは絶対上手く作動しなければならない重要品目であるという認識がある場合には確認のための試験や解析を念入りに計画することであろう。ただし、スケジュールの制約を外せたとしても開発コストが膨らむことになるので無制限にこれらを追加することは出来ない。

確認作業として、どの試験を追加し、あるいはどの試験を省略するかを合理的に決めるためには確信の程度を数値化せざるを得ないのである。例えば、その数値が一桁の精度であろうとも。心配だから追加試験が必要と出張している人の心配の度合いが1%程度のものなのか50%のものなのかを同じ「心配」と言う言葉で済ましては合理的な対処が出来ないということである。

実際に、不安なときには試験を追加したり、念入りの試験を行ったり、逆に飛行実績のある購入品は試験を省略したり、何らかの確信によって取捨選択を行っている。これまで、まったく定性的な説明で不確かさに対処してきた。この決定をより合理的にするためには、確信の度合いに数値を与えなければならない。

2段式ロケットは1段も2段も成功して初めて使命を果たすことができる。今、1段は信頼度が高いが2段はかなり低いという状況にあつたら、お金をかけて信頼度を高めるのは2段が先であるという決定である。このためには1段と2段の信頼度を数値で表現しなければならない。大小を比べるためには数値表現が不可欠である。このため、信頼度は必要な数値である。そして、万一の2次被害のことまで考慮すると2段より1段の方が高い信頼度であるべきだ、とか1段はこれ以上信頼度を高めるのは大変だが、2段は比較的少ない費用で信頼度をもう少し改善できるとかの判断が入ってくることになる。

5. 信頼度の新しい意味

上述の確信の度合いに与える数値のための言葉は、信頼性工学で定義している信頼度で構わない。再び掲げると、信頼度とは「所定の期間、所定の環境下で、所定の性能を発揮する確率」である。しかし、ここで確率とはフォン・ミーゼス流でなく、確信の度合いに応じて与える数値とならなければならない。確信の度合い (degree of belief) に対して割り当てた (assign) した数値であるという定義はサベージ(Savage)等によるものであるが、このような定義の仕方でも数学としての確率論の出発点となっているコルモゴロフの三つの公理を満

たすことが出来る。

これまで、ベイズ統計学としてはそばそと生きていたのだが、サベージ流が普及していなかった理由の一つには、「確信の度合いは人によって違うから、そのような主観的な内容を定義にするわけにいかない」という批判があったからであろう。主観確率 (Subjective Probability) という用語を見ただけで「主観」は客観的であることを使命とする科学技術に合わないとする人も多い。

しかし、行動の決断をするのは人間であって主観の持ち主である。問題は決断が合理的であるためには同じ状況に置かれた場合に同じ決断が出来るようなルールがあった方が良くということである。サベージ流は主観的確率と称されるが、数値の付与の仕方が一定の法則に従っていれば、客観的であるといって差し支えないのである。

このための基礎原理はラプラス流確率の定義とも言われるもので、取り得る状態に差異がない(と判断される)場合にそれぞれの状態に取り得る状態の数の逆数を割り当てるというものである。つまりサイコロを振って6つの目が出る状態に差がない限り(いかさまサイコロでないと信じられる限り)それぞれの目が出る確率を $1/6$ と割り当ててゐるものである。いかさまサイコロかも知れないという情報が入っても、どの目が出やすいということがわからない限り $1/6$ を割り当てざるを得ない。

成功か不成功かまったく情報が無い場合には、50%-50%とせざるを得ない。情報に基づき信頼度がどのように変わっていくかをベイズの定理で計算することが出来る。このことから、ベイズ流統計学とも言われるものである。

6. 終わりに

新しい確率の定義に基づけば、少しの確認試験をしただけでは高い信頼度であると言うことは不可能になるかもしれない。お金が無い場合に、信頼度が高いものを開発することは無理な注文だということを明確に示せるだけかもしれない。しかし、開き直りではなく、アカウンタビリテイが要求される時代にあって、何故、チャレンジングば開発でかつ失敗しない開発が如何に難しいことであることを説明する論理的な方法が求められているとみるべきであろう。

NASA では無人プログラムではリスクを性能、コスト、スケジュールとトレードする考えを打ち出している。リスクの中味には確率を含んでいるが、やはり確率の定義を本論で主張している方式に改めないと、結局今までどおりのやり方と変わらないことになるだろう。

以上