

信頼性とコスト

— ライフ・サイクル計画の立場から —

1. はじめに

一般的にあって、現時点でのステート・オブ・アーツでは構成部品数が大きくて複雑な構成をもつ機器、システムにとって耐用寿命内において構成部品のどれかに偶発故障が発生することは不可避であって、故障が発生すれば機器、システム自体の機能が果たせなくなる。しかし、安価で比較的単純な部品などとは異なり、故障したからといって高価な機器、システムを捨ててしまわないで修理して再び使用する。故障が頻発するとか重傷の故障が起きたため修理代が高くて経済的に引き合わなくなれば、修理せずに廃棄してしまう。工学的観点からは、新製品を開発する際には、こわれ難くものを設計すると同時に、修理しやすく設計する必要がある。信頼度はものこわれ難さをあらわすものであり、修理しやすさを示すものを保全度といている。平均的にあって取得価格を大きくすることによりなるべく信頼度を高くして、修理の機会を少なくするのが得策と考えられるが、取得価格を下げれば信頼度はあまり高くできなく、かえって保全の費用が高み全体的に見て不得策となることが多い。そこで、コストの観点から信頼度と保全度をいかにトレード・オフするかが問題となる。そこで、以下では機器、システムのライフ・サイクル全般にわたって生ずる費用、すなわちライフ・サイクル・コスト (LCC) の経済性について紹介しよう。

2. LCCの歴史

高信頼性製品は一朝一夕にして得られるもので

はなく、とくに現在のように高度の技術を駆使して高性能の製品を開発する場合、要求性能も単純でなくなり、そのため機能上の構成もより複雑なものとなってくる。このように開発対象品目の複雑性が增大するにつれて、特性パラメータとしての信頼度もとらえ難くなり、企図された使用条件下での動作特性として保証することはさらに困難となってくる。このため、もはや設計図どおりつくればよいという考え方は成立しなくなっており製品の企図、設計、開発、生産、使用、廃棄に至るライフ・サイクル全般にわたって周到に用意された計画管理方式の必要性が指摘された。

ライフ・サイクルの概念がより明確にされたのは1964年に発行された米空軍の AFSC-M-375 シリーズのマニュアルであると思われる。この文書は目的指向型のものであって、構想、定義、取得運用の4つの段階に分けて、目的遂行のためシステム全体の有効性を逐次フィード・バック・ループによって再評価しながら、システム開発の初期の段階から実用化の段階を経て廃棄に至るまでのライフ・サイクルにわたって開発・取得費および運用維持費の総合計を最小とするライフ・サイクル・コストングを行なうと同時に、開発期間の短縮をはかる方式が規定されたが、この方式はアポロ計画にも適用されて、着実な成功を取めたものであり、この AFSC-M-375 は MIL-STD-499 へと発展してきている。

もともと、アメリカではベトナム戦争の遂行にともなって莫大な軍事費の支出が行なわれ、インフレーションに悩まされた。この時代において、1会計年度の収支をバランスさせた適正な予算の

執行をはかっても、その年度の予算によって取得された機器、システムはその後の数年間使用されるため、それらの機器、システムの運用、維持費を次年度以降に計上しなければならない。この際、取得価格が10万ドルのシステムをその全実用寿命期間にわたって運用維持するのに100万ドルも要していることが指摘された。ちなみに、1961年度のアメリカ国防予算の少なくとも1/4が保全費に食われていたそうである。仮りに、取得価格が倍の20万ドルであっても、高信頼化のために故障発生機会が少なくできて運用保全費用が半分の50万ドルで済みますことができれば、前者の総和10+100=110万ドルに比べて、後者の和20+50=70万ドルのほうが得策であることは自明である。

このように取得価格と運用・維持費の総合計に着目することの必要性が指摘されたが、取得価格には開発、設計、製造、試験、試運転、据付などの費用が含まれるし、運用・維持のためには保全、改造、支援の費用および直接の運転費用だけでなく、運転要員、保全要員などに対する人件費や減価償却費、固定資産税、火災保険料などの一切の所有費用を見込むべきものである。

そこで、1961年にアメリカ政府は多年度にわたる予算の収支をバランスさせることを目的として予算編成にPPBS (Planning, Programming and Budgeting System) を導入した。PPBSは本来長期的計画と短期的予算とをプログラムを仲介として、政府の公共行政における予算配分に関する意思決定とその実施の管理のために開発されたシステムであって計画策定の段階ではシステムの目的の明確な設定と、それを達成するための代替計画の評価、選択を行なうのである。プログラム作成の段階では、計画策定において選択されたプログラムを実行するための具体的な活動を決定するのであるが、通常は5箇年に期間を限って各プログラムの活動水準とそれを実現するのに必要な資金を明細化し、それが実行可能かどうかを検討する。予算編成の段階では、作成された多年度

にわたるプログラム・プランの初年度における活動に対して、必要な資金を組織的に裏づけてゆくのである。

3. システム分析とシステム有効性

PPBSはシステムの評価を行なっているのであるが、旧来からシステムの評価、選択に費用・便宜分析 (Cost-Benefit Analysis) が用いられてきたが、PPBSではシステム分析 (Systems Analysis) を用いている。システム分析のプロセスは、第1段階として問題の明確化、第2段階として調査、第3段階として分析、第4段階として解釈と評価に分けられているが、このプロセスを通じて、問題の定義、目的の選択、データの収集、代替案の設計、モデルの作成、費用と効果の比較、仮定や目的の再吟味、問題の再定義、新しい代替案の開発……というように循環的なプロセスを通じて意思決定が行なわれるが、システム分析の中心は、企画段階においてシステムの費用対効果を考慮してシステムの開発を進めようとすることにある。

ところで、対象としているシステムの有用性 (Usefulness) を明確にしておく必要があるが、有用性とはそのシステムに課せられた所期の使命 (目的) に対するそのシステムの有効性 (Effectiveness) で測られるのであるが、有効性を何で測るのかについてはいろいろな考え方がある。たとえば、そのシステムが成功裡に達成した任務の全任務に対する割合とか、1年間の平均生産量とか、ある期間内にある量を生産する確率とか、付加価値の大きさとか、限界収入とかが考えられるが、何を評価要素に選ぶのか、評価要素をどのように定量化するのか、いくつかある評価要素をどのように総合的に判断するのかなど、具体的に解決しなければならない問題点も多い。

軍用システムの場合には、残存確率、信頼度、アベイラビリティ、保全度、戦闘能力、重量、容積などの諸ファクタを考慮に入れているようであ

る。ここではアベイラビリティ (availability), ディペンダビリティ (dependability) およびケイパビリティ (capability) の3要素からなる有効性の定義を紹介しよう。

例としてヘリコプターによる救援システムを考えよう。このシステムの任務は救援の要請があれば速やかに出動して、救援物資を投下することであるとしておく。ここでヘリコプターは現地と無線連絡を取りつつ飛行し、目標の地域に到着するものとし、救援物資の投下地点を決めることが可能となるので、通信装置は不可欠なシステムの構成要素となっている。

この場合、アベイラビリティというのは救援の要請があったとき、ただちにヘリコプターが出動できる確率として定義される。ヘリコプターが常時出動できる状態に保たれているためには通常は保全が必要であるが、待機中にトラブルを発生して保全を受けている、すなわち飛行可能な状態になく任務を開始できないことが起こりうる。ディペンダビリティというのは、わが国ではあまり聞かれない用語のようである。depend という単語は英英辞書によると **get help and support from** とあり原義どおりに考えるとよいのではないかと思う。たとえば任務達成するまでに時間的な余裕がある場合ただちに出動する必要は必ずしもなくて、通信装置の故障はすでに開始していた保全作業によって修復されるかも知れないし、ヘリコプターも飛行可能な状態にもどれるかも知れない。一方、現地へ飛行中のヘリコプターは通信装置が故障するかも知れないし、ヘリコプター自体が飛べなくなってしまいかも知れなく、このシステムそれ自体の信頼性に関する問題と、ヘリコプターが突風によって墜落してしまうといった外的要因による問題も含まれている。したがって、ディペンダビリティとは、ヘリコプターが飛び立ってから救援現地に到着した時点で救援可能な状態にある確率であると定義される。もし機上で通信装置の故障が修復できるとすれば、通信装置が故障

しているにもかかわらず飛び立って、現地につくまでにそれが直るという場合も上の確率に含めて考えるべきである。

さて、最後に救援現場上空に到達できた場合を考えてみよう。ヘリコプターも通信装置も正常であった時は救援物資を確実にとどけることができる確率は95%であるが、通信装置が故障の場合は目視によって投下地点を推定するため物資の引渡せる確率は75%に下がるといったことがある。ケイパビリティとは、このようにヘリコプターが目標上空に到達できた時点で任務を達成できる確率と定義される。

システムの有効性は以上に定義した三つの確率を用いて計算されるのであるが、この例では、システムの状態を簡単のためにつきのように定義しておくことにする。すなわち、

状態1: 「ヘリコプターは飛行できる」かつ
「通信装置は正常に動作している」

状態2: 「ヘリコプターは飛行できる」が「通信装置は故障している」

状態3: 「ヘリコプターは飛行できない」

まず、ヘリコプターが救援要請のため待機している場合に、これらの三つの状態の確率を計算してそれらが a_1, a_2, a_3 であったとする。これを要素とするベクトル A

$$A = (a_1, a_2, a_3)$$

をアベイラビリティ・ベクトルと名づける。つぎに、救援要請があった時点でシステムの状態が i であったという条件のもとで、現地到着予想時刻でのシステムの状態が j である確率 d_{ij} を計算する。たとえば、 $d_{31} = d_{32} = 0, d_{31} = 0$ である。 d_{ij} を要素とする 3×3 の条件確率行列

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}$$

をディペンダビリティ行列と名づける。最後に、現地到着したときの状態のもとで任務が達成できる確率をそれぞれ C_1, C_2, C_3 とする。これらを

表1 ライフ・サイクル・コストの比較
単位 千円

桁番	費目	A型システム	B型システム	計算番号	備考
C	機器購入費	30000	60000	(1)	初期購入費 人件費 維持購入費
D	予備機購入費	2700	7200	(2)~(6)	
E	予備ユニット購入費	3600	0	(7)~(11)	
F	現地保全費	123060	360	(12)~(15)	
G	補給処保全費	45900	0	(16)~(17)	
H	メーカー修理費	55080	9000	(18)	
I	寿命更新費	60000	0	(19)~(22)	
J	LCC総計	290340	76560		

要素とするベクトル

$$C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}$$

をケイパビリティ・ベクトルと名づける。このとき、システムの有効性 E は、ベクトルと行列の積として、 $E = ADC$ と計算できる。

システムの有効性は、先にも指摘したように、これ以外にもいろいろと定義されているが、輸送機の場合、1機の航空機がその耐用寿命期間中に輸送できる荷物の量として有効屯料 (Available-ton・Kilometer) を採用する考え方が提案されている。あるいは、年間の総飛行時間、1日の平均稼働時間を考えてもよい。問題はそれぞれのシステムの使命(任務)によって考えるべきであろう。

さて、このようにして定められたシステム有効性のライフ・サイクル・コストに対する比をそのシステムのコスト有効性 (Cost Effectiveness) といっている。すなわち、

$$\text{コスト有効性} = \frac{\text{システム有効性}}{\text{ライフ・サイクル・コスト}}$$

であって、一般的にはコスト有効性の最も大きいシステムを選ぶのが最適方策となるのである。

4. ライフ・サイクル・コスト

コスト有効性を考える場合に、システム有効性

表2 前提条件

No.	項目	A型機	B型機
a	機器形式	電子管式	半導体式
b	機器構成	5個のユニットで構成	4個のユニットで構成
c	機器単価	300千円	600千円
d	機器MTBF	1000hr	5000hr
e	予備機交換時間/台	0.5hr	0.3hr
f	ユニット単価(各)	60千円	120千円
g	ユニットMTBF(各)	5000hr	20000hr
h	ユニット交換MTTR/台	5hr	なし(m参照)
i	メーカーMTTR/台	6hr	5hr
j	現地稼働時間/日	10hr	同左
k	予防保全 hr/台/日	0.2hr/台/日の予防保全	不要 メンテナンスフリー
l	保全体制	整備段階1	現地では客先の手により予備機との交換を行なう(e)
m		整備段階2	壊れた現用機は客先の手になる補給処で予備ユニット交換の修理を行なう(h)
n		整備段階3	ユニット交換より下位の複雑な修理はメーカーで行なう(i)
o	移動時間	現地 補給処(往復)	4日
p		補給処メーカー(往)	30日
q		現地 メーカー(往)	30日
r	期待寿命	15000hr	30000hr

この表でB型機は a, b, d, e, g, h, i, k, m, r などの項目が改善されていることがわかる。が一定と見なせるときには、分母のライフ・サイクル・コスト最小という判定基準が用いられる。そこで、本節ではライフ・サイクル・コストに注目することにしよう。以下に紹介する例は三菱電機の高東啓吾氏によって導入されたものであって、故障が多くしかも保全性の悪い電子管式のA型システムから、メンテナンスフリーに近い半導体化、IC化されたB型システムの移行にともなう行なわれた考察である。例示のため、経済性や省力化の観点が強調されるように保全体制についてはやや極端な仮定を設けてある。また、この例では100台の機器を今後10年間にわたって、毎日10時間使用するものと想定されている。ただし簡単のために、人件費の上昇や、金利、貨幣価値

表3 各費用の計算

計算番号	A システム	B システム	前提No.による計算法
(1) 機器購入費	$300 \times 100 = 30000$	$600 \times 100 = 60000$	$c \times 100$ 台
(2) 予備機台数/日	$\frac{10 \times 100 + 0.2 \times 100}{1000} \approx 1.0$ 台/日	$\frac{10 \times 100}{5000} = 0.2$ 台/日	Ⓐ $j \times 100 + k \times 100$ Ⓑ $j \times 100 / d$
(3) 同上移動時間中の引当分	$1.0 \times 4 = 4.0$ 台	$0.2 \times 30 = 6.0$ 台	Ⓐ (2) × o Ⓑ (2) × q
(4) 予備機所要台数計算値	$1.0 + 4.0 = 5.0$ 台	$0.2 + 6.0 = 6.2$ 台	(2) + (3)
(5) 同上5%品切れ補正	9 台	12 台	本文参照
(6) 予備機購入費	$300 \times 9 = 2700$	$600 \times 12 = 7200$	$c \times (5)$
(7) 予備ユニット台数(各種)	$\frac{10 \times 100 + 0.2 \times 100}{5000} \approx 0.2$ 台/日	—	Ⓐ $j \times 100 + k \times 100$ Ⓑ g Ⓒ 不要(補給処整備なし)
(8) 同上移動時間中の引当分(各種)	$0.2 \times 30 = 6.0$ 台	—	Ⓐ (7) × P Ⓑ 同上
(9) 予備ユニット所要台数計算値(各種)	$0.2 + 6.0 = 6.2$ 台	—	(7) + (8)
(10) 同上5%品切れ補正(各種)	12	—	本文参照
(11) 予備ユニット購入費(5種類合計)	$60 \times 1.2 \times 5 = 3600$ 千円	—	$f \times (9) \times b$
(12) 現地予防保全費	$0.2 \times 100 \times 25 \times 12 \times 10 \times 2.0 = 120000$ 千円	—	Ⓐ $k \times 100 \times 25 \text{日} \times 12 \text{月} \times 10 \text{年} \times 5$ Ⓑ 不要メンテナンスフリー
(13) 予備機交換回数(現地故障台数)	$(10 + 0.2) \times 100 \times 25 \times 12 \times 10 / 1000 = 3060$ 回	$10 \times 100 \times 25 \times 12 \times 10 / 5000 = 600$ 回	Ⓐ $(j + k) \times 100 \times 25 \text{日} \times 12 \text{月} \times 10 \text{年} / d$ Ⓑ $j \times 100 \times 25 \text{日} \times 12 \text{月} \times 10 \text{年} / d$
(14) 現地予備機交換費	$3060 \times 0.5 \times 2.0 = 3060$ 千円	$600 \times 0.3 \times 2.0 = 360$ 千円	(13) × e × s
(15) 現地保全費(10年間)	$120000 + 3060 = 123060$ 千円	360千円	(12) + (14)
(16) 予備ユニット交換回数(5種類計)	$(10 + 0.2) \times 100 \times 25 \times 12 \times 10 / 5000 \times 5 = 3060$ 回	—	Ⓐ $(j + k) \times 100 \times 25 \text{日} \times 12 \text{月} \times 10 \text{年} / g \times 5 \text{種}$ Ⓑ なし
(17) 補給処保全費(10年間)	$3060 \times 5 \times 3.0 = 45900$ 千円	—	Ⓐ (16) × h × t
(18) メーカー修理費(10年間)	$3060 \times 6 \times 3.0 = 55080$ 千円	$600 \times 5 \times 2.0 = 9000$ 千円	Ⓐ (16) × i × u Ⓑ (13) × i × u
(19) 機器総寿命	$10000 \times (100 + 9) = 1635000$	$30000 \times (100 + 12) = 3360000$	$r \times [100 + (5)]$
(20) 総使用時間	$(10 + 0.2) \times 100 \times 25 \times 12 \times 10 = 3060000$	$10 \times 100 \times 25 \times 12 \times 10 = 3000000$	Ⓐ $(j + k) \times 100 \times 25 \text{日} \times 12 \text{月} \times 10 \text{年}$ Ⓑ $j \times 100 \times 25 \text{日} \times 12 \text{月} \times 5 \text{年}$
(21) ライフサイクル数	$3060000 / 1635000 \approx 1.9$ 回	$3000000 / 3360000 \approx 0.9$	(20) / (19)
(22) 寿命補充台数	100台	—	(21) < 1 で不要 1 < (21) < 2 で1式更新 c × (21)
(23) 寿命更新費用	30000千円	—	実際には予備機更新も要

の変動も考慮されていないし、修理費は人件費だけが計上されているに過ぎない。

表1にLCCとして含めるべき要素が示されているが、それらの算定の根拠となる計算が番号で示されている。これらの計算の詳細は表3に与えられているが、表2に計算の前提条件を示す。表

1に示されているC, D, E, F, G, H, Iのそれぞれの費用の詳細は、表2、表3を用いて計算されているが、その考え方の概要はつぎの通りである。

C：機器購入費は台数と単価からコストを求める。

D, E：予備機、予備ユニットの購入費はコンボ

ーネットアワー, 故障回数から MTBF を推定し, サービス場所の地理的配置を考慮してサービス移動時間を見積り, これに品切れの危険を押さえるための補正 (MTBF を品切れの確率に相当するだけ短かく見積る) をほどこして保全段階に対応したコストを求める。

F : 現地保全費は予防保全時間, コンポーネントアワー, MTBF, 予備機交換回数, MTTR を勘案して人件費として計上する。

G : 補給処保全費は上記 F のユニット交換分のコストである。

H : メーカー修理費は故障回数と MTTR から延修理時間を計算しそれに対する人件費を見積る。

I : 寿命更新費は機器総寿命, 総使用時間からライフ・サイクル回数を求め必要台数を推定して機器コストを計上する。

以上のようにして, ライフ・サイクル・コストが求められるが, その結果として表 1 からつぎのことが明らかとなっている。機器購入費の総計が 3000 万円の A 型機による通信システムの 10 年間の LCC は 2 億 9034 万円で J/C の値はほぼ 10 であるのに対して, 6000 万円の B 型機による通信システムの LCC は 7656 万円で J/C の値は 1.3 であり, このほうが小さい値を示している。すなわち, 初期購入費は A のほうが半分であるが, 逆に A のほうが B に比して LCC は 3 倍も大きくなっている。しかも, 一般的には経費的には C, D, E の購入コストと F, G, H の保全コストの費目は別となっていることが多い。A システムの LCC の中でウェイトの大きいものは人件費としての F (予防保全が主となっている) と G, H および I の期待寿命に起因する寿命更新費 (電子管式では必要のもの) である。B システムのように最近では F, G, H の 3 段階の保全の中で G は省略して F, H の 2 段階にすることが多くなっている。これは人件費の上昇に対処するための省力化の意味と, G のレベルではか

なり高度な技術が必要な場合が多いのに, 要員の質の面ではメーカー (H に相当) には追いつけず, その結果補給処, 保全局, 工務課といった G に対応するセクションでの現場作業の効率がいちじるしく悪いということなどの理由によるためである。メーカー内を考えてみても, 設備の保全は工務部門から段々と外部委託に移りつつあって, 工務部門はむしろ LCC 的評価による新規設備の設定など計画段階に重点が移りつつあるようである。

表 3 の計算では A, B 型両機とも 100 台 10 年使用としているが, 客先現地, 客先補給処, メーカーの建物, 設備などの償却, 光熱電力費, 人件費などはすべて Charged Wage Rate で回収するものと考えている。なお, 表 3 の s, t, u の費目については,

s : 現地人件費	2000 円/時間
t : 補給処人件費	3000 円/時間
u : メーカー人件費	3000 円/時間

としている。

おわりに

以上で LCC の概略について述べたが, 設備投資の観点からは OR では MAPI 方式が古くから知られている。それと同じように, 多年度にわたって発生する費用に対しては割引率を考慮して現在価値になおす必要があり, 基礎となる数値も正確に見積らなければならない。工学的観点からは, すてにつくられたシステムの信頼性を測ったり, 保全性を調べて, ライフ・サイクル・コストを求めることが問題なのでなく, 開発すべきシステムに対して信頼性設計, 保全設計を行なうのが主眼であり, 信頼性と保全性の目標特性を検討して, 経済性と完成期日の短縮を追求するものである。イギリスではこのことをテロテクノロジー (Tero-technology) とよんでいるが, 考え方はまったく同じであることを注意しておく。

みね・ひさし 1922 年生
京都大学 工学部 数理工学科