

負荷－強度モデルを用いた機器故障率の検討

Rev.1, 2017(平成29)年2月03日 (式1の修正)

2014(平成26)年8月23日

菅原政治郎

1. 本資料の目的

機器を日常の生活で支障無く使用するには、冗長設計による稼働停止の防止や適切な点検・修復・交換等が必要となります。機器の交換周期を知るには、機器がどのくらいの故障率を持っているかを知る必要が有ります。

本資料では、負荷—強度モデルを用いて、機器の交換間隔の影響が故障率にどのように影響を与えるかを検討するものです。

1.1 機器故障率の概要

一般に、故障率は図1に示す様に、バスタブ曲線と呼ばれ3つの故障期間に分類されます。即ち、

- (1)初期故障期間:設計・製造の不備により、初期に故障が多発する期間。改良により故障を低減することが可能です。故障率は右肩下がりとなります。
- (2)偶発故障期間:故障率が時間に対して一定で、偶発的に故障が発生する期間。通常、機器が運用される期間です。
- (3)摩耗故障期間:摩耗等の経年劣化により、故障が多発する期間で、交換が必要となります。故障率は右肩上がりとなります。

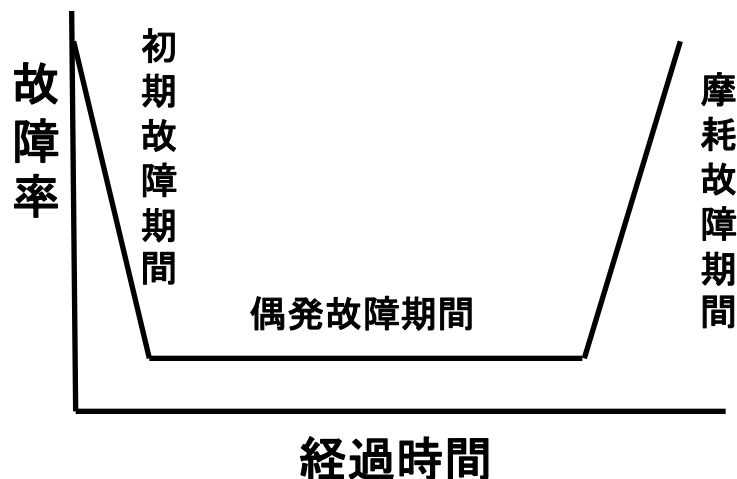


図1 機器故障率曲線

上図は、故障率の経時変化を理想的に図示したのですが、実際のデータでは上図を支持するものは殆んど見当たりません。

2. 負荷—強度モデル

2.1 負荷—強度モデルの概要

負荷—強度モデルは、一例として、鎖がどのくらいの錘の重さに耐えられるかを判別するモデルで、鎖の強度が負荷(錘の重さ)より小さければ、鎖は故障状態であるとするものです。

実際には鎖の強度や要求強度には確率的なバラツキが有るために、式(1)及び図2に示す様に、鎖の強度が要求強度を下回る確率で故障確率を求めます。(鎖強度及び要求強度の分布は、正規分布を仮定しています。)

故障は負荷が掛かっている鎖の強度 x_s が要求強度 x_r を下回った時に発生します。これを定式化したものが式(1)です。

$$P_f = \Pr(x_s < x_r) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{x_s}^{+\infty} pdf_2(dx_r) dx_r \right) pdf_1(x_s) dx_s \quad \dots(1)$$

ここに、 $P_f(t)$: 時刻 t における故障確率、 $\Pr(x_s < x_r)$: 鎖強度 x_s が要求強度 x_r を下回る確率、
 $x_s(t)$: 時刻 t における鎖の強度(平均値)、 x_r : 鎖の強度が x_s の時に、鎖が健全であるための要求強度
 $pdf_1(x_s)$: 鎖の強度 x_s の確率密度関数、 $pdf_2(x_r)$: 要求強度 x_r の確率密度関数

2.1 負荷—強度モデルの概要 (続き)

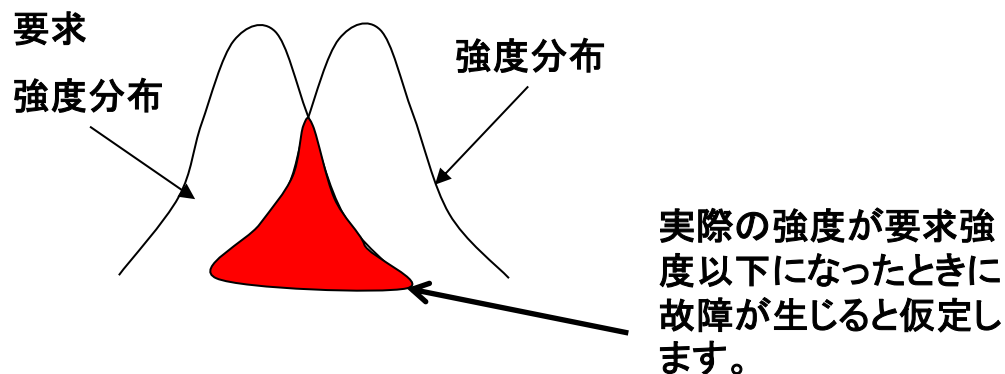


図2 故障モデル(イメージ)

図2は故障のイメージ図として良く用いられていますが、これはイメージ図で、赤の部分に故障確率を示している訳ではありません。

前述の様に、故障確率は、強度 X_s が要求強度 x_r を下回った時の確率で、強度 X_s を0から $+\infty$ まで積分する事により得られます。(実際の問題では、強度は0以上ですので、 $-\infty$ から0までの確率は0となります。)

2.2 故障確率算出への適用

鎖の強度は経時的に劣化します。その劣化速度は直線的なのか2次曲線的に劣化するのかわりで故障確率の挙動が変わります。このため、本検討では、以下の式(2)の様に2次曲線を取り扱えるようにしました。

$$x_s(t) = x_{\text{int}} - c_0 t - c_1 (t^2 - t_{\text{rplc}}^2) \quad \dots(2)$$

ここに

$X_s(t)$: 時刻 t における実際の強度(平均値)

X_{int} : 初期($t=0$)の強度、 C_0 : 強度の一次経年劣化係数、 C_1 : 強度の二次経年劣化係数

t : 初期からの経過時間、 t_{rplc} : 機器最新交換時

ここで、初期強度 X_{int} は、機器強度の標準偏差 σ を用い、以下の様に要求強度 X_r からの離れとして表します。

$$x_{\text{int}} = x_r + N\sigma_{st} \quad \dots(3)$$

ここに

σ_{st} : 機器強度の標準偏差、 N : 機器に依存する強度係数

さて、機器故障率を算出するに当たり、上記の鎖の強度を当該機器の機能と読替え、要求強度を要求機能と読替えます。

以上を図式化したものが、図3です。

2.3 故障確率算出のイメージ

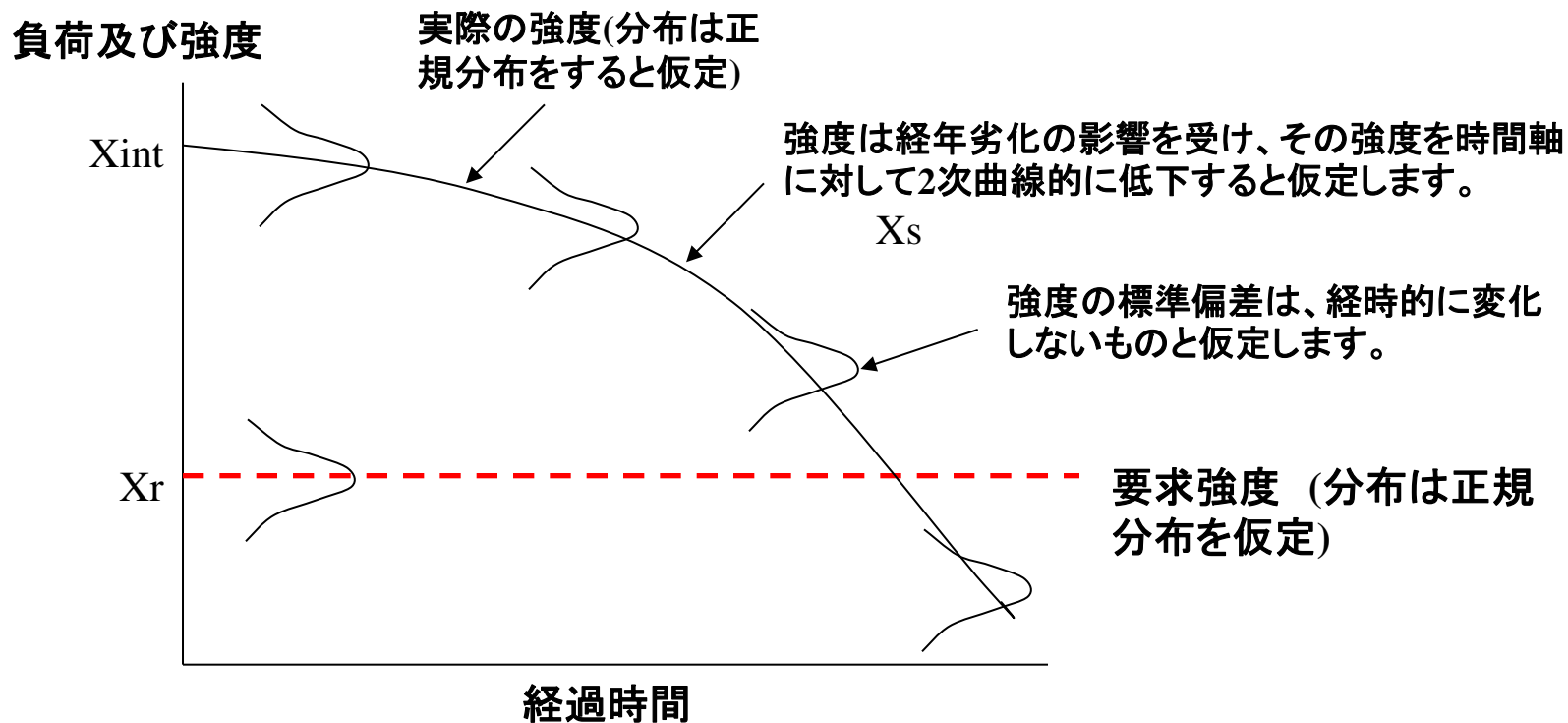


図3 故障の概念 (負荷—強度モデルを使用)

3 解析

本資料の目的である機器の交換間隔、及び経年劣化係数をパラメータとして、期待故障数を推定します。

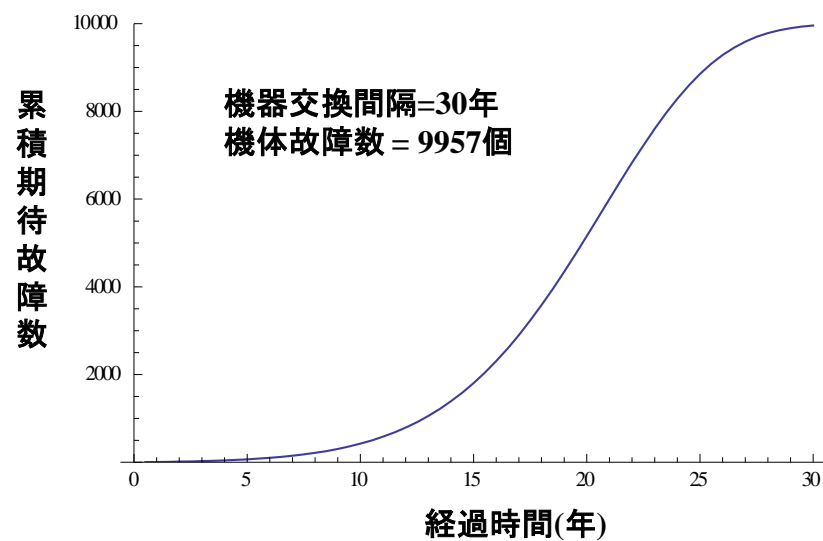
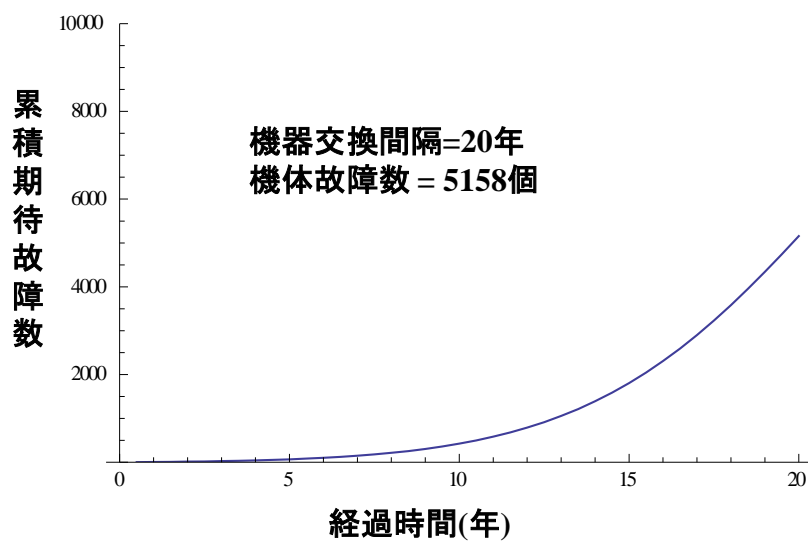
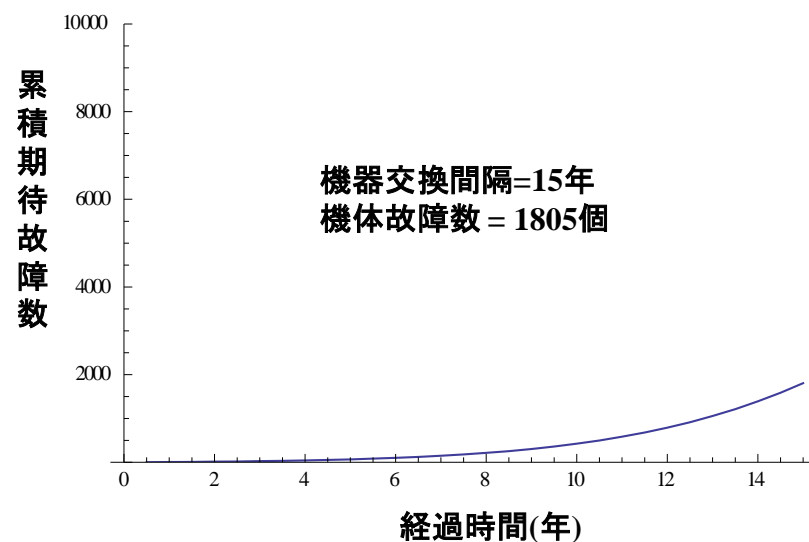
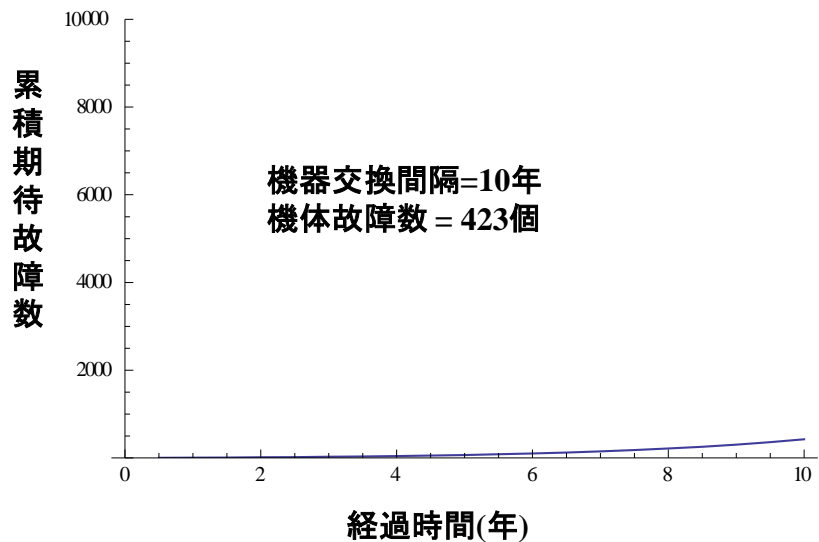
3.1 解析条件

- (1) 機器は一定時間で交換され、新品になるものとします。
- (2) 初期サンプル数は10000個存在し、一斉に運用に供されるものとします。
- (3) 機器に依存する強度係数 N は、計算上 $N=5$ と設定し、一次経年係数 $C0=0.15$ σ /年、二次経年係数 $C1=0.0009$ σ /年²と設定します。

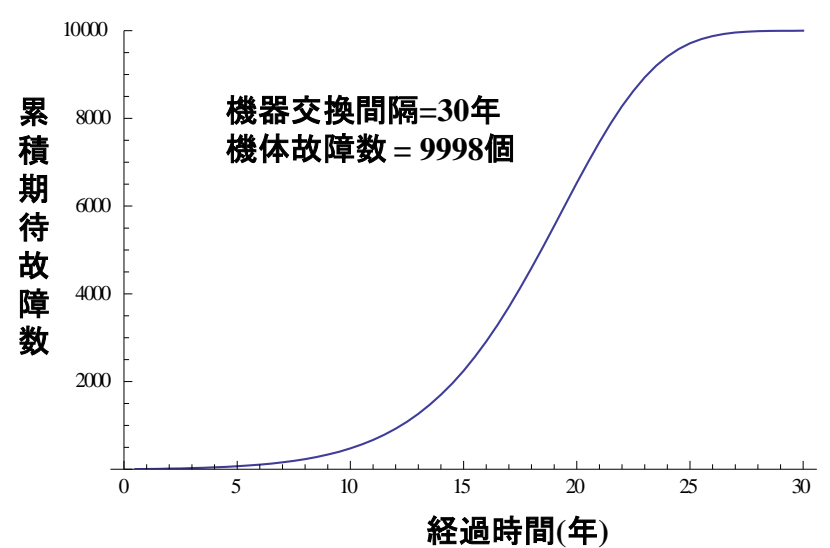
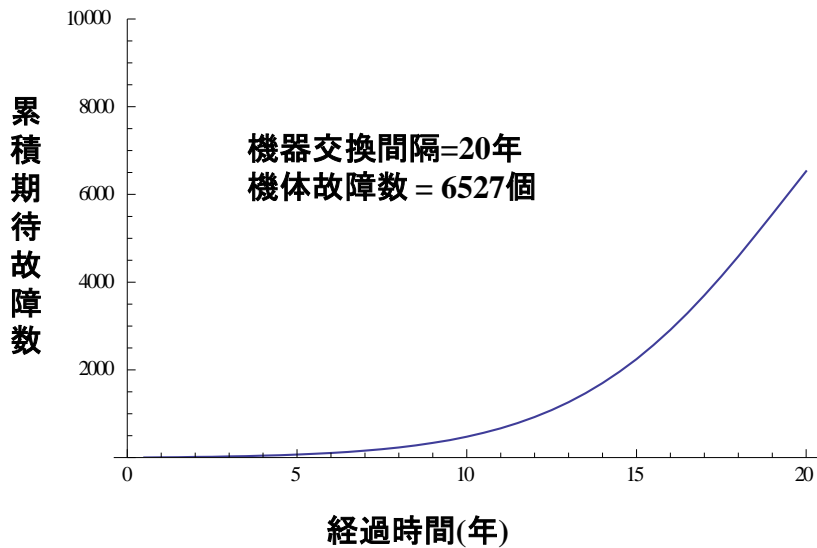
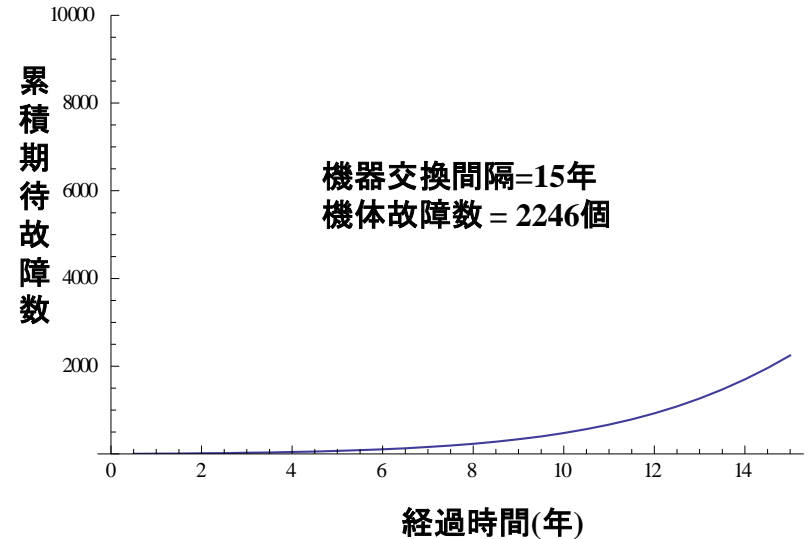
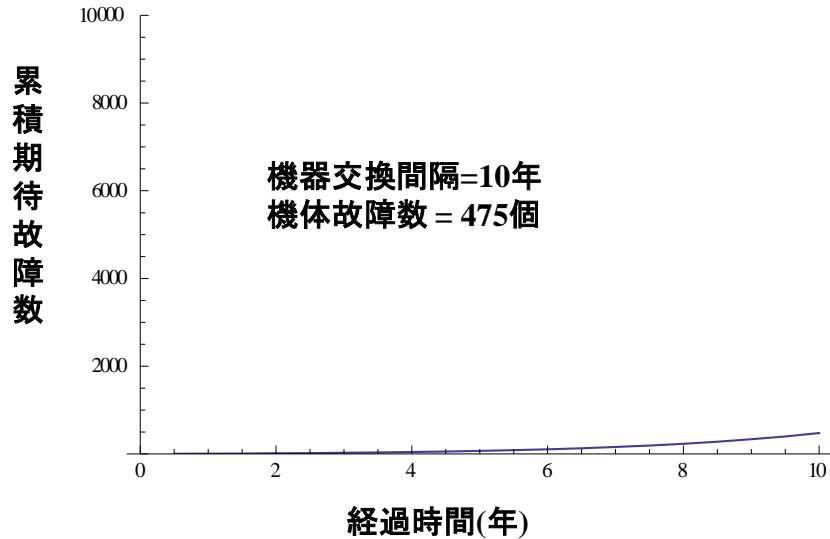
3.2 解析結果

機器の強度において、二次経年係数が存在しない場合と、存在する場合の2種類を考慮しました。即ち、経年劣化が加速されない場合と、加速される場合です。

3.2.1 経年劣化が加速されない場合C1=0 の解析結果



3.2.2 経年劣化が加速される場合 $C1=0.0009\sigma/\text{年}^2$ の解析結果



3.3 考察

今回、機器の交換間隔と経年劣化加速の有無をパラメータとして期待故障数の変化を検討しました。

- (1)一次経年劣化係数($C0=0.15 \sigma/\text{年}$)に比べて、二次経年劣化係数が小さかったため ($C1=0.0009\sigma/\text{年}^2$)、二次経年劣化係数の有無による機器交換直前での期待故障数にそれ程の違いは見られません。
- (2)機器の交換間隔が長くなれば、累積故障件数は当然多くなります。
- (3)さて、機器故障率の算出として一般に用いられている下記の方法にて故障率を算出してみます。

$$\text{故障率} = \text{総故障数} / \text{総時間数} \quad \dots(4)$$

| 機器交換間隔 (年) | 一次経年劣化係数 | 二次経年劣化係数 | 総故障数 | 総時間数 | 故障率 |
|------------|------------------------|---------------------------------|------|--------|----------------------|
| 10 | 0.15 $\sigma/\text{年}$ | C1=0 | 423 | 100000 | 4.2×10^{-3} |
| 20 | | | 5158 | 200000 | 2.6×10^{-2} |
| 30 | | | 9957 | 300000 | 3.3×10^{-2} |
| 10 | | C1=0.0009 $\sigma/\text{年}^2$) | 475 | 100000 | 4.8×10^{-3} |
| 20 | | | 6527 | 200000 | 3.3×10^{-2} |
| 30 | | | 9998 | 300000 | 3.3×10^{-2} |

3.3 考察 (続)

- (4)前記表により、20年と30年の故障率には差は無いと考えられますが、10年と20年の故障率には約1桁の違いがみられます。
- (5)即ち、機器の交換間隔により故障率は異なるという事を示すものです。交換間隔が短い機器は、見掛け上の故障率が低いと言えます。
- (6)日米の機器故障率を比較した資料が有ります*1。全般に、日本の機器故障率は米国の物に比較して、1桁～2桁程低くなっていました。日本の会社では機器を計時的に交換しているのに対し、米国は機器の故障を許容した事後保全が多く、両者の機器に本質的な性能の違いは無いに関わらず、見掛け上の故障率の差が現れたものと小生は推察しています。

(*1:「PSA用故障率データに関する調査」、平成9年3月、原子力安全研究協会)

- (7)上記負荷—強度モデルを機器故障率の推定に応用してみました。実際のフィールドデータを基に、各機器の故障履歴(運用開始からの故障時間、故障間隔時間等)を丁寧に解析する必要があると思いますが、現状の機器故障率算出にはまだ反映されていません。今後の課題であると思います。