特集
Cover Story

故障の定量化で事故を防げ！

新信頼性解析技法「GO-FLOW」を紹介

故障率ゼロ――。事故の可能性が全くない設計は理想だが，現実には難しい。「信頼性には自信がある」とメーカーは自己宣伝することが多い。しかし，その根拠をきちんと示せるだろうか。米国や英国では故障や事故発生のリスクを抽出し安全性を客観的に判断する定量データが求められている。故障や事故などの危険性を数字として把握することはまた，とかくコストがかかる安全設計のムダを省くことにもつながる。

本特集では，パート1で独ICEの事故を取り上げ，故障の定量化の意味を考える。続くパート2とパート3では，故障率や事故発生率を算出するために最適な新ツール「GO-FLOW」を紹介する。（近岡　裕）

＊高速鉄道史上2番目　死者数からみてドイツ鉄道史上最大の事故は1939年12月22日にゲンティン駅で発生した，急行列車「D180」と「D10」との衝突事故。186名が死亡した。

＊14両編成　8号車と13号車はない。

＊圧縮型弾性車輪　ほかにせん断型弾性車輪がある。国内で住友金属工業が製造し，名古屋地下鉄が採用している。車輪の軸方向にタイヤと止め座金とで輪心をサンドイッチする。タイヤと輪心，輪心と止め座金の間にゴムを挟み，ボルトで締結している。従って，ゴムには半径方向にせん断力が加わる。

Part 1 [総論]

ICE事故に学ぶ故障の定量化の重要性

昨年ドイツ鉄道の誇る高速鉄道車両ICE（インターシティー・エクスプレス）で大事故が発生。世界中を震撼させたのは記憶に新しい。
事故原因についてドイツ鉄道は一切コメントを控えているが，関係筋によれば，最大の問題は，事故の危険に気づきながらも改善せずにICEを運行し続けたことにある。
パート1ではまず同事故調査委員会の報告をまとめた「Eschede,10 Uhr 59」を基に，事故の真相に迫る。

死者101名，重傷者88名――。損害賠償金額約1億5000万マルク（約120億円）――。死傷者数はドイツの高速鉄道史上2番目＊，損害賠償金額はドイツ鉄道史上最高。事故の深刻さを如実に示す数字が並ぶ。

大惨事は，1998年6月3日午前10時59分，ドイツ北部のニーダーザクセン州エシェーデ地区で起きた（**図1**）。問題のICEは「ヴィルヘルム・コンラッド・レントゲン号」。全長385m，質量850tの14両編成＊で，機関車である先頭車両と最後尾車両の間に客車（1～7，11，12，14号車）と食堂車（10号車）を配置した。最高時速280km。ドイツ南部の経済文化の中心ミュンヘンから北部の大貿易港であるハンブルクまでを駆け抜けるはずだった。

【図1】ドイツ高速鉄道車両ICEの転覆事故。脱線して転覆した後，橋脚を倒して車両の一部が橋板の下敷きになった。後続車両はアコーディオン状につぶれた

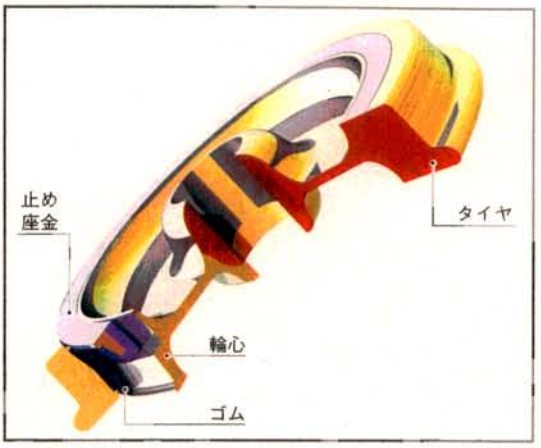
圧縮型弾性車輪が事故の発端

レントゲン号がハンブルクまで残り100km強，ニーダーザクセン州の州都ハノーバーを出て50kmほど走った地点にさしかかったころだ。異常な音と振動が車内に響いた。後の事故調査で明らかになった，音と振動の発生源は，レントゲン号に搭載された「ボッフム84型車輪」のうち，1号車後方に設けた台車の右側の車輪。**図2**[1]は，先頭車両側から見たその断面構造である。

この車輪は事故後「弾性車輪」として話題になったが，正しくは「圧縮型弾性車輪」＊と言う。「V」字形のゴムを中間に挟みながら，車軸に連結する輪心の外周とタイヤと呼ぶ外輪の内周を，左側から止め座金を差し込んでボルトで固定している。「圧縮」の所以（ゆえん）は，ゴムが圧縮荷重を受けることにある。

実は，ICEの営業を開始した91年当初，ドイツ鉄道はこの弾性車輪を採用せず，車輪が分解できない一体成形車輪を選択した。細かい仕様に差はあるものの，新幹線をはじめ日本の車両ではごく一般的な車輪のタイプで，ほとんどの車両が採用している。だが，一体成形車輪による時速200km超の高速走行を重ねるうちに不快な振動や騒音が生じた。振動を吸収する空気ばねは使っていなかった。さらに，車輪がレールでこすれ，その一部が平らに欠けるフラットと呼ぶ現象が発生，より厳しい振動と騒音が問題となった。ドイツの乗客はとりわけ振動にうるさい。「コーヒーカップがガタガタと音を立てるだけで不満を口にする」（ある台車メーカー）ほどだ。こうした背景からドイツ鉄道は一体成形車輪をやめ，乗客に快適な乗り心地を提供する切り札として路面電車が利用していた弾性車輪に白羽の矢を立てたのである。

当然，ドイツ鉄道の中では弾性車輪の信頼性が議論された。「いくら路面電車で使っているからといって，そのまま高速車両に搭載できるとは判断できない」（ある台車メーカー）からだ。しかし結局は，50年代から使われ続けている（路面電車の車輪としての）実績に加え，ドイツの台車メーカーの技術力を信頼。快適な乗り心地の早期実現のために，信頼性を十分に確認しないまま採用に踏み切った――。



【図2】事故車両となったICEに採用されていた圧縮型弾性車輪の構造。輪心，ゴム，タイヤ，止め座金から成る。輪心と止め座金の外周にタイヤをかぶせ，これら三つの部品の内部に生じるV字形のすき間にゴムを配した。止め座金は側面からボルトで締結する。欠陥は，輪心，タイヤ，ゴムの剛性に大きな違いがあったこと。その結果，繰り返し応力がかかってタイヤの内周部に亀裂が発生，進展して破断した

疲労破壊でタイヤが破断

一体成形車輪から弾性車輪に代えたことで，ICEの不快な振動や騒音は確かになくなった。だが，レントゲン号の走行距離が180万kmに達したとき，先述した1号車後方台車の右側車輪のタイヤがついに限界に達した。その原因は疲労破壊。タイヤ内周部に発生し進展していたき裂がとうとう同外周部にまで届いてしまったと推測できる。

もともと弾性車輪には，輪心，ゴム，タイヤの三つの部品で剛性の差が大き過ぎるという“弱点”がある。具体的には，剛性は円板の輪心が最も高く，リング状であるタイヤが次に続き，ゴムが最も低い。弾性車輪を時計に見立てると，車両の大きな荷重を受けて12時と6時をつないだ線上は縦につぶれ，3時と9時を結んだ線上は横に広がる。極端に言えば，進行方向に伸びた“楕円車輪”だ。

この結果，輪心との間に柔らかいゴムを挟んだタイヤに対して疲労条件を作り出す。タイヤ内周部は12時―6時の線上で引っ張り応力を，3時―9時の線上では圧縮応力を受ける。車輪の直径は90cmだから，車輪が1回転して進む距離は約2.8m。つまり，1回転（走行距離2.8m）当たり，繰り返し数は2回となる。

事故前のレントゲン号の走行距離は約180万kmだから，タイヤが破断するまでの繰り返し数は10^9回オーダーに達する。しかし通常，疲労破壊に至る繰り返し数は10^6～10^7回。普通の疲労破壊なら，走行距離はずっと短かったはずだ。従って，ごくごく単純な疲労破壊と決めつけるわけにはいかない。

想定できる三つの破断原因

ドイツ鉄道が一切公表を控えていることから推測の域は出ないが，ここでは三つのケースを想定してみた。

第一は，タイヤが明確な疲労限を示さないケース。**図3**のS-N（応力振幅-繰り返し数）線図から明らかなように，疲労限がなければいつかは必ず壊れる。仮にこのケースだとすれば，疲労限が特定できるという思い込みが事故を招いた恐れがある。

第二のケースは，走行中の予期せぬトラブル。例えば，ICEの高速走行条件が予想以上に激しく，ゴムが熱劣化し，その影響でボルトの軸力低下を招くというような事態だ。こうなるとある時点（例えば繰り返し数10^2～10^3回）で，設計当初疲労限以下だった応力振幅がそれを超えて疲労破壊を起こしてしまう。

以上の二つのケースは，壊れた車輪以外にも当てはまる。つまりほかの車

輪が早晩，問題の車輪と同様に破壊しても全く不思議ではない。

これに対して第三のケースは，壊れた車輪固有の問題。要はこの車輪に限って何らかの理由で致命的な欠陥があった，ボルトの初期締め付け力が適正ではなかった――といった原因を抱えていた。その結果，ある時点で応力振幅が疲労限を超えてしまったという考え方だ。

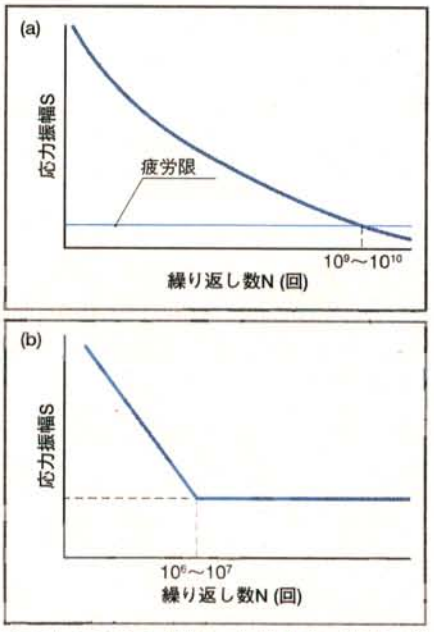
無論，この三つがすべてではないが，いずれにせよ，走行中にタイヤにき裂が発生し破断したのは事実だ。通常は，微細なき裂は保守点検時の超音波探傷試験で発見できるはず。しかし，「超音波探傷は台車に車輪をつけたまま車輪を分解せずに実施する。従って，車輪内部で，しかもゴムで覆われているタイヤ内周部のき裂を発見することはできない」（東京大学工学系研究科電機工学専攻教授の曽根悟氏）。メンテナンスの際にも，き裂を見つけ出すことは難しかったようだ。

脱線車輪がポイントを切り替えた

レントゲン号が事故現場から5kmほど手前を走行する10時57分ごろ，件（くだん）のき裂がきっかけとなってタイヤが円周方向に破断した。タイヤは輪心から車軸側に外れ，車軸上を左右に滑りながら枕木と車両の底への衝突を繰り返した。軌道の中間に設けた自動列車制御装置（ATC）の導線の切断や枕木に付いた傷がその証拠だ。

タイヤが外れた時点で“脱線”となるが，車両がすぐに転覆するとは限らない。1車輪外れても，残りの7車輪で無事に走り遂げることもある。レントゲン号も車輪の一つがレールから外れたまましばらく走り続けた。

2分後，レントゲン号はエシェーデ地区〔**図4 (a)**〕[2]の，ある一つの分岐点（ポイント1）に達した〔**図3 (b)**〕。このとき，1号車の外れたタイヤが進



【図3】S-N線図。縦軸に応力振幅S，横軸に繰り返し数Nをとる。(a)疲労限が特定できないケース。繰り返し数が10^6～10^7回を超えても応力振幅が底を打たず，10^9～10^{10}回で応力振幅が疲労限に達して破壊する。(b)通常のケース。10^6～10^7回以降，応力振幅が一定となる。従って，疲労限がこの一定値以下なら無限回繰り返し応力がかかっても壊れない

行方向左側にあるトングレールに衝突，直ちに跳ね返って同右側のガイドレールにぶつかった。その衝撃で，軌道に対して垂直だった輪軸（車軸と車輪）は右下がりに傾き，右側に続いて左側の車輪も軌道内側に脱線した。

ポイント1からわずか120m先にある分岐点（ポイント2）に1号車が進入したとき，脱線した左側車輪が進行方向左側のトングレールを軌道に向かって押し付けた〔**図3 (c)**〕。ポイントを本線から分岐線側に切り替えてしまったのである。

この結果，レントゲン号の2号車以降は，進入時の制限速度が時速60kmに抑えられている分岐線にその3倍強に相当する時速約200kmの猛スピードで突っ込んだ。

しかもポイント2のそばには橋があった。分岐線に突っ込んだ勢いで本線から右側に飛ばされた2号車は転覆して失速。2号車と高速に突っ込む4号車に挟まれた3号車は先端を中心に右に急旋回し，後端が橋脚に激突した。「ドイツでは地震がほとんど起きないため橋脚は非常に細く，しかも，橋脚と橋板とは固定していない。橋板は橋脚の上に乗せているだけだから比較的簡単に橋は壊れた」（曽根氏）。

3号車の後端は橋脚をなぎ倒し，支えを失った橋板が落下し始めた。4号車前部は免れたが，4号車後部と5号車前部が橋板の下敷きとなった。続く，6号車から最後尾の機関車までは蛇腹のように折り畳みながら停止した5号車に次々と突っ込んだ。そのうちの一部は落下した橋を飛び越えた。

後続車両をもぎ取られた先頭の機関車と1号車だけが無傷のままだった。特に機関車は現場から2km離れた本線上で停止した。

故障率が分からなかった！

以上がレントゲン号の事故をざっと再現したものである。この中でドイツ鉄道が“犯した失敗”は二つあると言われている。一つは，既に述べたように，採用前に弾性車輪が高速車両に耐

え得る品質かどうかの十分な確認を怠ったこと。もう一つは，弾性車輪の安全性（寿命）に対する判断が甘かったことだ。

ドイツ鉄道は，94年以降製造のICEに関しては，弾性車輪から一体成形車輪に戻している。気になる振動と騒音は空気ばねで抑えることにした。加えて，94年以前に製造したICEに関しては，弾性車輪の寿命が来た段階で一体成形車輪と空気ばねの組み合わせに「徐々に」切り替える計画を持っていたという。

鉄道総合技術研究所基礎研究部信頼性工学研究室長の福岡博氏は，「弾性車輪を含む台車の故障率が算出できていて，危険性が一体成形車輪と比べて何倍も高いと分かっていれば，当然，すぐに車輪を交換していただろう」と語る。もちろん車輪を切り替えるには相当の投資が必要だ。従来の定性的寿命評価では経営側は「徐々に」という程度の判断しかできなかったのだろう。もし定量的寿命評価ができていれば，「直ちに」という経営判断が下り，事故は未然に防げたかもしれない。

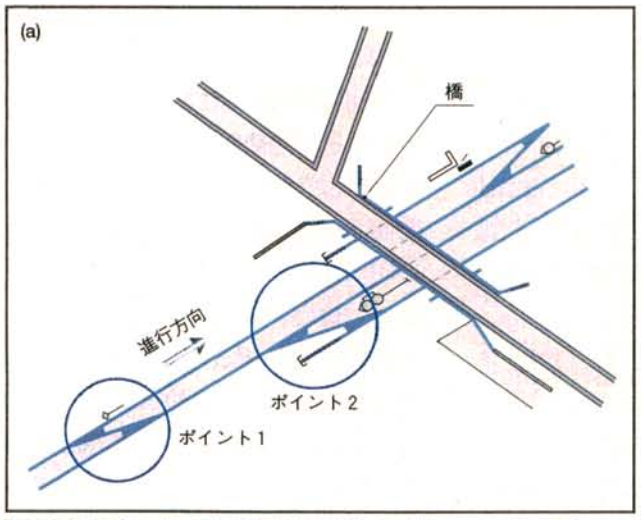
福岡氏の言う故障率や事故発生率は，信頼性解析技法であるFMEA（Failure Mode and Effect Analysis，故障モードと影響解析）やFTA（Fault Tree Analysis，故障の木解析）（p.36別掲記事参照）などを使えば求めることができる。

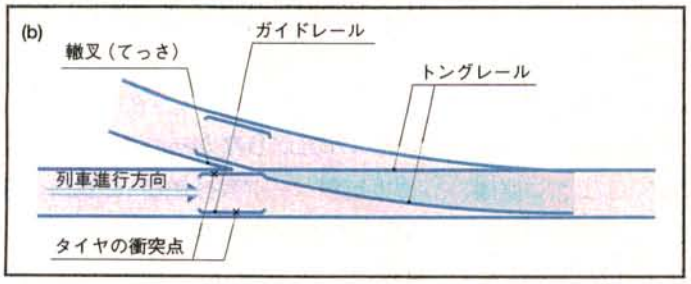
だが，こうした技法は原子力や航空機分野で積極的に使用しているものの，鉄道分野ではほとんど利用していない。ドイツだけでなく日本も同様だ。

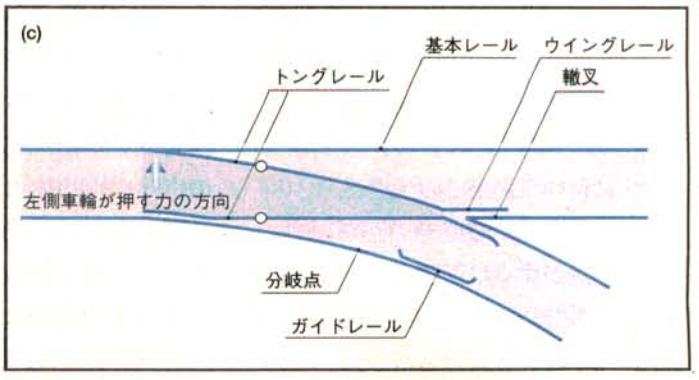
軽視される信頼性解析技法

台車を製造する川崎重工業，住友金属工業，東急車輛製造，日本車輛製造，日立製作所の5社すべてが，実際の設計段階で解析技法を利用していないという。国内の車輪のすべて，台車（図5）のおよそ半分を製造する住金は，「鉄道関係は歴史が長い。既に故障モードは想定できている」とし，また，日本車輛は「長年の経験から不具合を含めたノウハウが蓄積されている。社内の不具合事例集やJISを使うことで，疲労や配線処理，ノイズなど，想定できる故障の対策は設計段階で済ませている」としている。

両社とも現時点では故障率・事故発生率は求めていないが，代わりに「台上試験や実走行試験に念を入れている」（住金）。つまり，台車メーカーは経験から想定できる故障モードを踏まえながら台車を設計・製造し，評価試験を経て品質を保証しているのである。







【図4】事故現場付近の様子。(a)鳥瞰図。ポイントが二つ（手前からポイント1，ポイント2）あり，ポイント2のすぐ後ろには上に橋が架かっている。(b)ポイント1。輪心から外れたタイヤがまず，軌道左側にあるトングレールに衝突。その反動で右側のガイドレールにぶつかり，車軸の右側が後退して台車左側の車輪も脱線した。(c)ポイント2。脱線した左側の車輪がトングレールを基本レールに向かって押し，ポイントが切り替わった。その結果，後続車両が分岐線に進入して転覆した

一方で,「システム全体を把握しているのはユーザーだから,信頼性解析技法はユーザーの担当」「製品の故障率は使用中のメンテナンスまで含めないと意味がない。従って故障率はユーザーが計算すべきだ」と指摘する車両メーカーもある。

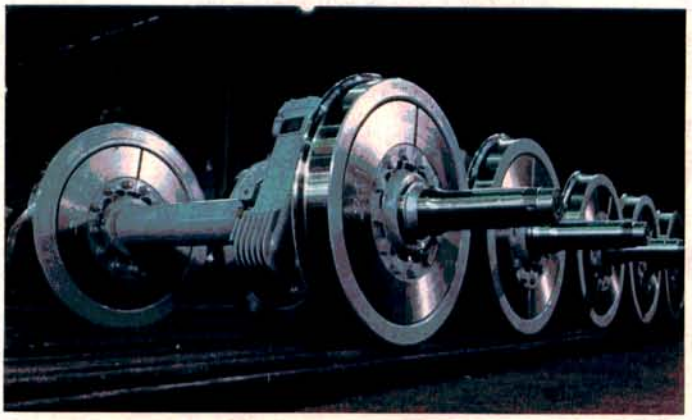
これに対してユーザーの代表格であるJR3社は次のようにコメントしている。「FMEAやFTAはまだ使っていないが,安全を高める手法として勉強を進めている」(JR東日本)。「信頼性解析技法は,メーカーが使っているはずだ。JRでは検査の充実で品質を確認している」(JR西日本)。「FMEAやFTAは車両を構成する部品に対して使うから,メーカー側の話。JRは個々の部品ではなくシステム全体として信頼性を考えている。例えば,何か故障すれば安全装置が働く,あるいは車両が止まるといった『安全系』の工夫だ」(JR東海)。

詰まるところ,メーカーもユーザーも信頼性解析技法の重要性は認識しつつも,その運用方法に対して相手側に押し付け合うなど導入にはまだ障害があるようだ。だが,21世紀を目前にした今,そう悠長に構えてはいられないのではないか。

無視できない故障率・事故発生率

京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻教授の熊本博光氏は,「21世紀は故障率や事故発生率の時代だ。製品のリスクを定量化して安全性を測ることが,特に米国や英国で要求されている。しばらくすれば,定量的な安全目標が国際的に標準化されるだろう。このとき故障率や事故発生率は常識となる」。

同様に,JR総研の福岡氏は,「安全性を考えるときはリスクを定量化して判断することが主に米国で広まってきたが,日本は遅れている。リスクの値が小さくてはじめて安全性が高いと主張できる。故障率や事故発生率は数字をベースに議論できるという意味で,安全性を客観的に判断できる最適な方法だ」と語る。



【図5】新幹線向け車輪と車軸(住友金属)。車輪と車軸だけでなく台車を含めて,長年の経験と台上試験などで国内メーカーは品質を保証する。だが,信頼性解析技法を利用したり,故障率などを計算することはない

日本が遅れている理由について熊本氏は,「ロシアや米国,英国では,金融界や航空,防衛分野において,リスクを計算して管理する文化・土壌があった。一方,日本では危険を直視する考えそのものが忌み嫌われてきたため,故障率や事故発生率の概念が生まれなかった」とみる。

確かに,国内の鉄道関係者が経験を重視してきた姿勢は正しい。だが,これからはさらに進んで定量化した信頼性,つまり故障率や事故発生率が必要になるのは間違いなさそうだ。実際にリスクアセスメントを柱とする規格や,許容されるべき危険側故障発生率を規定する規格などが現在議論されており,熊本・福岡両氏の指摘通り,リスクの定量化は避けて通れない国際的潮流と言える。

恩恵の多いリスクの定量化

故障率や事故発生率の計算は,製品の安全性を客観的に示すことができる以外にも,次のようなメリットがある。

第一は,新しい製品の故障率・事故発生率を試作品を作る前に求めることができる点。ムダな試作を省ける。第二には,複数の設計案の中から,安全性が最適なものを選べる。必要以上のコストをかけずに済む。第三に,寿命を判定する基準とし,むだな改良を避けてコストを削減できる。

ただ,これまで故障率・事故発生率の算出が面倒だったのは事実だ。前述のように,従来の信頼性解析技法であるFMEAやFTAを使えば計算できるが,「複雑になるので,設計者に嫌われる傾向にある」と松下電器産業で長年品質管理を担当してきた関西経営管理協会顧問の和田浩氏は言う。

そこで登場したのが,運輸省船舶技術研究所が開発した新しい信頼性解析

技法「GO-FLOW」である。詳細はパート2と3に譲るが，従来の解析技法では難しかったケースにも十分利用できる。例えば上述のレントゲン号のタイヤが破断した三つのケースがそれだ。

疲労限を示さない第一のケース，また，第三の，初期不良やボルトの締め付け管理のミスなどは時間経過を考慮しなければならない。だが，従来の技法は時間経過を断片的にとらえるだけだから，寿命まで求めるには手間と時間がかかり過ぎる。新技法は，時間経過を連続的にとらえる概念を利用した。従って時間経過を考慮した信頼性が比較的簡単に求められる。

ゴムの熱劣化やボルトの軸力低下などが関連する第二のケースでは，時間経過はもちろん，要因が複雑に絡み合っている。従来の技法は要因の数に応じて複雑化してしまうが，新技法はシンプルだからその心配はない。

パート2では「GO-FLOW」の考え方を解読し，パート3では新幹線のATCを取り上げ，その有効性を確認する。

参考文献
(1) Erich Pruß『Eschede,10 Uhr 59』GeraMond，p.76，1998年.
(2) 同上，p.14.

定量化には不向きなFMEA,FTA

FMEAは故障率算出の“序曲”

「FMEA(A)はリスクの定量化には向かない」。識者の意見は完全にこう一致する。例えば「複数の要因から成る原因（複合原因）で機器が壊れる場合の正しい確率を求めることはできない」（熊本氏）など，信頼できる計算値を期待できない場合が圧倒的に多いからだ。FMEAの役割は，対象とするシステムで発生し得る故障をすべて洗い出し，シートにまとめることである。そのため，故障率の算出にはこれまでもっぱらFTA(B)が使われてきた。ただし，FTAには事前にETA（Event Tree Analysis：事象の木解析）(C)を使う必要がある。ETAを“マクロ分析”，FTAを“ミクロ分析”としてとらえるのだ。ところが現実には，「ETAをFTAと組み合わせて使用することを把握している技術者は少ない」と熊本氏は指摘する。これも故障率の評価に発展しにくかった原因の一つだ。

ETAは故障の“シナリオ”

ETAは，システムを構成する部品や機器の機能を分解し，故障に至るまでの過程を枝分かれ図で示す技法。故障率や事故発生率は，この分岐点の確率を掛け合わせれば計算できる。ただ，分岐点を多くすると当然作成図が大きくなる。通常はシステムが複雑だから，分岐の数をそれほど増やせない。従って，分岐点を減らし，その各分岐点をFTAで補う。ETAで大まかに故障過程をとらえ，詳細をFTAで記述するという形をとる。

時間変化,樹木図がFTAの弱点

FTAは，システムが故障する原因を追い求め，事故の引き金になる事象（起因事象）まで展開する技法だ。下に向かって枝分かれの樹木図を作成する。故障率算出の主役だ。

だが，FTAには大きな弱点がある。時間変化に追従できないことだ。FTAを利用したある瞬間の故障率しか求められない。従って，求める時間ごとにFTAを作成する必要がある。勉強机大の紙何枚にも展開されるFTAを時間変化ごとに作製して無数のデータを記入し，確率を計算するのは人間技ではほとんど不可能だ。実際，原子力分野ではFTAの作成に1年以上掛けることも多い。

加えて，樹木図（FT図）の書き方に規則がないこともウイークポイントの一つだ。そのため，作成者によりFT図は違う形となり得る。電気回路の「等価回路」のように整理すれば確かに構成は同じだが，人によって枝分かれの展開が左右反転し得るので作成者以外にはFT図が理解できない可能性がある。FT図は大抵複雑だから，最悪の場合，作成者本人さえも忘れてしまう。

従って，対象とするシステムの構成とFT図の形とは全く違うから，FT図からシステム構成を把握することは難しい。例えば，設計を少し変えただけで，FT図とシステムとの対応が分からなくなる恐れがある。それでもFTAを使うのはほかに方法がなかったからだ。

別掲参考文献
(A) 林「トラブルの芽は設計で摘め」，『日経メカニカル』96年6月10日号，no.482，pp.24-47.
(B) 和田「適正範囲や用途に合わせて解析技法を選ぶ」，『日経メカニカル』98年3月号，no.522，pp.127-130.
(C) 同上，pp.127-129.

Part 2 [新解析技法「GO-FLOW」……入門編]

作成図の簡素化・時間変化を考慮

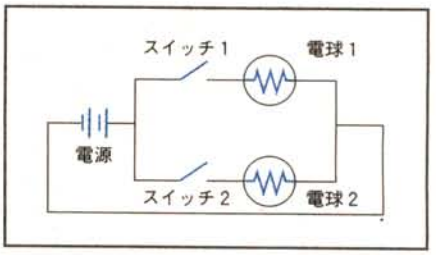
パート2と3は入門編と応用編に分け，故障や事故が発生する確率を定量的に求める，新しい信頼性解析技法「GO-FLOW」を紹介する。
①システムの構成が分かりにくい
②システムの時間変化に対応できない——という従来の技法の弱点を克服したものだ。
基礎からきちんと理解したい方はパート2から，
とりあえずパフォーマンスを知りたい方はパート3から読むことをお薦めする。

システムの構成が分かりやすく，かつ，時間変化に対応するものはできないか——。運輸省船舶技術研究所システム技術部システム設計研究室長の松岡猛氏は，自らが考案した新しい信頼性解析技法「GO-FLOW」の開発動機をこう語る。

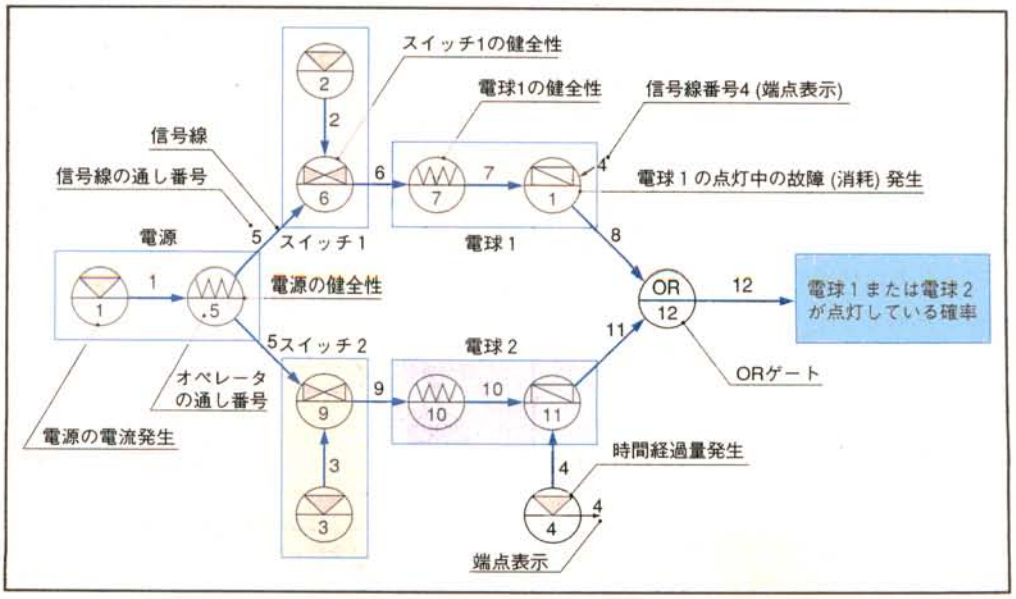
従来の解析技法であるFMEA（Failure Mode and Effect Analysis，故障モードと影響解析）やFTA（Fault Tree Analysis，故障の木解析）（p.36別掲記事参照）が注目を浴びて以来，様々な技法が生み出されてきた。だが，冒頭の動機を満たす技法は，現在のところGO-FLOWだけだ。

システム構成そのものを示すチャート

システムの構成が理解しやすいとはどういうことか。まずは，**図1**をご覧頂こう。システムの故障率を求める際に作成する「GO-FLOWチャート」だ。「○」と「→」から成り，「○」をオペレータ，「→」を信号線と呼ぶ。この図は，1個の「電源」，2個の「スイッチ」（スイッチ1，スイッチ2），2個の「電球」（電球1，電球2）からなる，簡単



【図2】簡単な電気回路。スイッチと電球とを直列につないだものを並列にして電源につないだ。電源を接続した直後にスイッチ1を閉じ，10時間経過してスイッチ2を閉じた。この状態で20時間後に光を放っているかどうかを回路に要求する



【図1】電気回路にGO-FLOWを使った例。オペレータと信号線とでGO-FLOWチャートを作成する。部品や機器の構成をほぼそのままGO-FLOWチャートで置き換えたように見える。従って，設計を変えた場合でもすぐにGO-FLOWチャートを修正できる。また，時間変化にも対応できるので，評価する時間ごとにGO-FLOWチャートを書き直す必要がない

な並列電気回路をシステムとして選んだものだ（図2）。

一見しただけで，それぞれの部品の位置からつながり方まですべて並列回路と同じであることが分かる。GO-FLOWチャートはつまり，実物オペレータの中に記入された数字（オペレータの通し番号）に注目すれば，①と⑤で並列回路の電源を，②と⑥でスイッチ1を，⑦と⑧で電球1を，③と⑨でスイッチ2を，⑩と⑪で電球2を構成する。

このように，GO-FLOWチャートは，システムの構成と整合しているため，作成者によって違う形となったり複雑になってしまうことはない。

信号線の強度がシステムの動作成功率

GO-FLOWチャートで故障率を求めるにはまず，信号線とオペレータの意味を明らかにする必要がある。

信号線は，文字通り信号の流れる道筋だ。信号としては，電気回路の電流，水や油などの液体，力，情報や指令，時間経過量などがある。信号線に信号がどの程度存在するかを「信号線の強度」と定義し，最大を1.0とする。つまり信号が存在する確率は，信号線の強度が1.0で100％，0.45であれば45％となる。

こうした信号線の強度がシステムの動作成功率を表す。例えば図2の並列回路では，信号線番号12（信号線12）に電流が流れていれば電球が光るから，信号線12の強度が電球の点灯する確率を示す。いま仮に信号線12の強度が0.57であるとすれば，回路が正しく作動する（電球が点灯する）確率は57％になる。

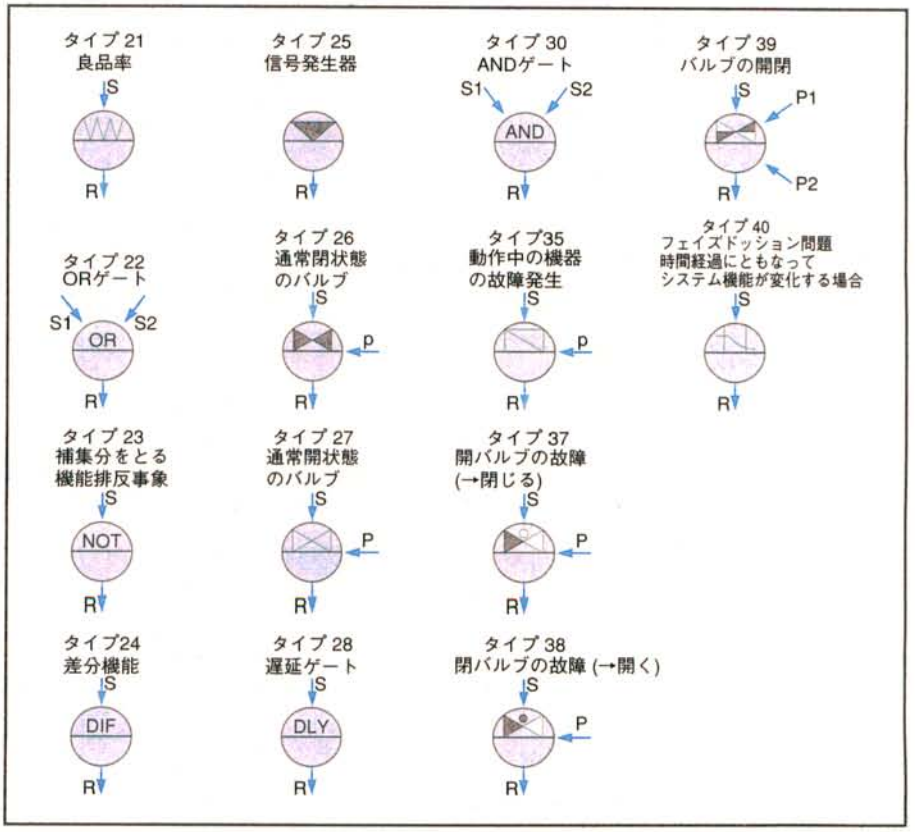
ここで，GO-FLOWでは故障率ではなくシステムの「動作成功率」を算出することを覚えておいて頂きたい。従って，システム全体の故障率は最後に1.0から動作成功率を引いたものとなる。この場合は，1.0から0.57を引いた0.43，すなわち43％が並列回路の故障率になる。

ただし，後述するように，信号が時間経過量を表す場合に限っては1.0以下である必要はない。例えば，10時間待つ場合は10.0，25時間やり過ごすときは25.0という具合に，経過させる時間の量そのものが強度を表すことになる。

14種類のオペレータで機能を網羅

こうした信号の存在確率や時間経過量を表す信号線が入ったり出たりするオペレータは，システムを構成する部品や機器の動作・機能を記号で示した演算子。矢先がオペレータに向かう信号線の信号「主入力信号S（t）」または「副入力信号P（t）」を受けて四則演算し，その結果は「出力信号R（t）」として信号線に乗せて次のオペレータに伝える。

ここで四則演算の内容は，構成部品や機器の動作・機能に応じてあらかじめ定義されている。電源やスイッチ，電球を丸ごとオペレータに置き換えることができたのはこのためだ。これほ



【図3】オペレータ。全部で14種類。Sが主入力信号，Rが出力信号，Pが副入力信号。入力信号を受けて演算し，その結果を出力信号として次のオペレータに渡す

＊GO手法　信頼性解析技法の一つ。60年代に電気回路の解析のために開発された。GO-FLOWと同じようにシステム構成をGOチャートと名付けた記号で表現する。GO-FLOWチャートと同じく，システム構成との対応がすぐに分かることが利点。半面，時間変化には対応できない。

ど簡単に置き換えられるとオペレータの数を多くそろえる必要があると推測するかもしれない。だが，そうではない。

図3[1]に示すように，オペレータの種類はわずか14個。これだけのオペレータの組み合わせで，「ほとんどすべての構成部品や機器を置き換えることができる」（松岡氏）。

それぞれ「タイプ○オペレータ」（○は数字：以下タイプ○と示す）と呼び，タイプ21～28，30，35，37～40オペレータがある。20から始まるのは，GO-FLOWのたたき台となったGO手法*との混同を避けるため。手法が違うので同じ番号でも全く影響はないのだが，GOでタイプ17まで使っていたため，あえて重複を避けた。また，29や31～34，36が欠けていることに他意はない。たまたま開発の過程で抜けただけという。各タイプの演算の中身は**表1**[2]の通り。細かい説明は省くが，要するに確率論に従う。

部品の機能に応じてオペレータを選ぶ

図1のGO-FLOWチャートに戻って，各オペレータの役割を簡単に見ていこう。

まず，①，②，③，④はすべてタイプ25。うち，①～③は対象部品に動作・停止の指令を与える「信号発生器」，④は一定時間待機あるいは稼働させる命令を出す「時間発生器（タイマ）」だ。このシステムにおける④の役割は，「電球1をつけてから10時間後に，電球2を点灯する」というもの。信号強度はそれぞれ，①～③から出る信号が1.0，④から出る信号が10.0である。

①から出た信号は⑤に入る。これは⑦と⑩と同様，良品率（製造時の不良率の逆）を示すタイプ21。この良品率と入力信号（1.0）を掛ければ，出力信号の強度が出る。

続いて信号は，⑥と⑨に入る。閉じた状態のスイッチや弁をモデル化したタイプ26だ。②と③の信号発生器から副入力信号を受けて弁が開く。スイッ

【表1】 オペレータの演算の中身。いわゆる確率論に従う。FTAでの計算と同じだから，当然GO-FLOWでも同じ確率が算出される。つまり，結果は同じ。普通ソフトを利用するので，数式を覚える必要はない

オペレータタイプ	主入力信号強度	副入力信号強度	出力信号強度
21	$S(t)$	——	$R(t)=S(t)\cdot P_g$
22	$S_1(t)$，$S_2(t)$，……$S_n(t)$	——	少なくとも1つの入力信号が存在する確率
23	$S(t)$	——	$R(t)=1.0-S(t)$
24	$S(t)$	——	$R(t)=S(t)-S(t')$，$R(t_1)=0.0$
25	——	——	動作要求確率または時間経過量
26	$S(t)$	$P(t)$	$R(t)=S(t)\cdot O(t)$，$O(t_1)=P_o$ $O(t)=O(t')+[1.0-O(t')]\cdot P(t)\cdot P_g$
27	$S(t)$	$P(t)$	$R(t)=S(t)\cdot O(t)$，$O(t_1)=1.0-P_o$ $O(t)=O(t')\cdot[1.0-P(t)P_g]$
28	$S(t)$	——	$R(t)=S(t-k)(t-k>0)$，$R(t)=S(t_1)(t-k\leqq 0)$
30	$S_1(t)$，$S_2(t)$，……$S_n(t)$	——	全ての入力信号が存在する確率
35	$S(t_1)$，$S(t_2)$，……$S(t_n)$	$P_1(t_1)$，……$P_1(t_n)$ $P_2(t_1)$，……$P_2(t_n)$ ……	$R(t)=S(t)\cdot\exp\left[-\lambda\sum_{i}\sum_{t_k\geqq 1}P_i(t_k)\min\left[1.0,\ S(t_k)/S(t)\right]\right]$
37	$S(t)$	$P_1(t_1)$，……$P_1(t_n)$ $P_2(t_1)$，……$P_2(t_n)$ ……	$R(t)=S(t)\cdot\exp\left[-\lambda\sum_{i}\sum_{t_k\geqq 1}P_i(t_k)\right]$
38	$S(t)$	$P_1(t_1)$，……$P_1(t_n)$ $P_2(t_1)$，……$P_2(t_n)$ ……	$R(t)=S(t)\cdot\left[1.0-\exp\left[-\lambda\sum_{i}\sum_{t_k\geqq 1}P_i(t_k)\right]\right]$
39	$S(t)$	$P_1(t)$ $P_2(t)$	$R(t)=Sv\cdot O(t)$，$O(t_1)=P_o$ $O(t)=O(t')\cdot[1.0-O(t')]\cdot P_1(t)\cdot P_o$ $O(t)=O(t')+[1.0-P_2(t)\cdot P_o]$
40	$S(t)$	——	$R(t)=1.0\quad(t<t_i)$ $R(t)=S(t)\quad(t_i\leqq t\leqq t_j)$ $R(t)=S(t_j)\quad(t>t_j)$

P_g＝機器が早まって動作する確率
P_s＝機器が正常に動作する確率
$t'=t-1$
k＝遅延タイムポイント数
P_o＝バルブが正しく開く確率
P_c＝バルブが正しく閉じる確率
$O(t)$＝バルブが開いている確率

チが正常に開く確率をP_gと定義，既に壊れていて副入力信号に関係なく常に開いている確率をP_pとして**表1**に従えば計算できる。

⑥から出た信号は⑦に，⑨から出た信号は⑫に行く。それぞれ電球1，2の良品率を考慮してから，⑧と⑪に入る。これは，電球のフィラメントの消耗など部品や機器の動作中の故障を配慮したタイプ35である。

最後に，⑧と⑪から出た信号は⑫のORゲートに入る。どちらか一方でも入力信号が存在する確率がORゲート，つまり⑫の出力信号の強度。すなわち，この回路システムにおいて「電球が少なくとも1個以上点灯する確率」となる。

なお，④の右横から出た小さな矢印は「端点表示」と呼び，同じオペレータの表記を省略する役割を果たす。GO-FLOWチャートをよく見ると，⑧にも斜め左下に向かって小さな矢印（「←4」）が刺さっている。つまり，⑧にも④が接続し，⑪と同じく④から入力信号を受けている。

システムの時間変化に対応

通常，システムはずっと同じ状態で稼働することはなく，時間経過とともに個々の部品や機器が様々に動作を変える。従って，時間変化に応じてシステムの故障率も変動する。一見システムが同じ動作を保つようでも，例えば電球の消耗のような使用中の劣化などを考えれば，やはりシステムの故障率は時間によって変わる。

こうした時間の影響に対して，従来の技法はちょうど“写真”のように，ある瞬間の故障率しか求められない。故障率の時間変動を確かめるには，例えば10時間後，20時間後，30時間後・・・というように，求める時間ごとにそれぞれ作成図を書き直し，一から計算しなければならなかった。システムは大抵複雑だから，膨大な時間と労力がかかることは言うまでもない。

GO-FLOWでは，こうした煩わしさを解決する優れたアイデアを採用した。「タイム・ポイント」と呼ぶ概念だ。システムを構成する部品や機器が動作を変える時間的区切りに対して番号を付け，その番号ごとにオペレータに与える入力信号を変える。この結果，GO-FLOWチャートを書き換えることなく，時間に応じたシステムの故障率が計算できるのである。

番号は，システムが動作する前の番号を1（タイム・ポイント1）とし，以下整数で表していく。**図2**の並列回路では，「電源を接続してスイッチ1を閉じた後，10時間経過してスイッチ2を入れる。その後20時間まで回路を使用する」から，設定するタイム・ポイントは，**表2**のように，

1：初期状態の時刻
2：電源接続
3：スイッチ1を閉じる
4：10時間経過
5：スイッチ2を閉じる
6：20時間経過

となる。主入力信号S（t），副入力信号P（t），出力信号R（t）のtは，このタイム・ポイントの数字を当てはめる。

以上でGO-FLOWの概要は理解頂けただろう。そこでいよいよオペレータに入力するデータを用意し，各タイム・ポイントごとの故障率を計算してみよう。

【表2】タイム・ポイント。動作手順の数だけ設定する。初期状態を1とし，2で電源を接続，その直後にスイッチ1を閉じて3とする。10時間経過させるのを4にし，そのすぐ後にスイッチ2を閉じて5とする。最後に再び10時間をやり過ごして6とする

タイム・ポイント	意味
1	初期状態の時刻
2	電源接続　(2，3は同一時刻)
3	スイッチ1を閉じる
4	10時間経過　(4，5は同一時刻)
5	スイッチ2を閉じる
6	20時間経過

用意するデータは各機器に2個まで

各オペレータの演算を実行するために，用意するデータは良品率（P_pやP_g）と故障率（λ：寿命の逆数）だけ。オペレータで言えば，⑤，⑦，⑩のタイプ21と⑥，⑨のタイプ26，⑧，⑪のタイプ35の演算で必要となる。ほとんどは部品メーカーから聞き出せるが，統計データから算出することもある。残るは，①，②，③，④のタイプ25の出力値（強度）Rが，記述した通り，①～③は1.0，④は10.0となる。

実際に，**図1**のオペレータに与えるデータをまとめたのが**表3**だ。

例えば，①はタイム・ポイント1では電流を流さない。つまりR（1）は0.0。その後，電流を流すから，R（2）～R（6）は1.0。②はタイム・ポイント2のときだけ，③はタイム・ポイント5のときだけ信号を送る。従って②ではR（2）だけが1.0，③ではR（5）だけが1.0で，その他が0.0となっている。

また時間発生器である④は，タイ

＊ソフトウエア　「GO-FLOW」。販売元はCRC総合研究所。

【表3】GO-FLOWチャートの各オペレータの通し番号とその意味，与えるデータ。信号や指令の発生は，表3で示したタイム・ポイントに従って出力信号1.0を出す。時間経過量発生は待ち時間10を出力として与える。ほかのオペレータは，良品率や寿命の逆数である故障率を用意する。ほぼ部品メーカーから入手できる

オペレータ通し番号	意味	データ
1	電源の接続信号発生	R(1)＝0.0，R(2)～R(6)＝1.0
2	スイッチ1閉指令発生	R(2)＝1.0，その他＝0.0
3	スイッチ2閉指令発生	R(5)＝1.0，その他＝0.0
4	時間経過量生成	R(4)＝10.0，R(6)＝10.0，その他＝0.0
5	バッテリーの機能正常確率	P_9＝0.9
6	スイッチ1の正常動作確率	P_D＝0.1，P_9＝0.7
7	ランプ1の点灯時の正常確率	P_9＝0.8
8	ランプ1の点灯中の故障発生	λ＝0.001/時
9	スイッチ2の正常動作確率	P_D＝0.1，P_9＝0.7
10	ランプ2の点灯時の正常確率	P_9＝0.8
11	ランプ2の点灯中の故障発生	λ＝0.001/時
12	ORゲート	なし

ム・ポイント4と6で10時間経過したことをそれぞれ知らせる。この結果，R（4）とR（6）が10.0で，その他が0.0である。

ほかのオペレータについては時間経過（タイム・ポイント）に関係ない良品率や故障率だから，上述した通り，部品メーカーなどの意見を参考に表のように埋めればよい。

これらのデータを用意した後は，**表2**の計算式に従って，すべてのオペレータについてS（1）とR（1），S（2）とR（2），・・・S（6）とR（6）までを計算していく。実際，電球が少なくとも1個光る確率，つまり信号線12の強度は，タイム・ポイント1～6ごとに

1：0.0
2：0.1382400
3：0.5555520
4：0.5504383
5：0.7417704
6：0.7373795

と変化する。要求された20時間後に電球が点灯している確率はタイム・ポイント6の0.7373795。従って，同回路の故障率は，1.0から0.7373795を引いた0.2626205（2.6×10^{-1}/20時間）となる。

＊　　＊　　＊

ここで途中の計算を省いてきたのはソフトウエア＊があるためだ。GO-FLOWチャートを作成して必要なデータを与えれば，システムの故障の確率は自動的に出てくる。中身の計算式はブラックボックスで構わない。

改善点が見つかったり，コストダウンのために途中で設計を変更し，システム構成が変わってしまった場合でも，ほかのオペレータをそのままに，変更部分のオペレータを書き直すだけでチャートは完成する。通し番号の書き換えも自動的だ。従って，使い勝手の面からも実用向けの技法と言えよう。

参考文献

(1) 松岡『確率論的安全評価のためのシステム信頼性解析手法GO-FLOW』，CRC総合研究所，p36，1996年.
(2) 同上，p.37.

機械装着用 超精密
ブラシレスモーター&スピンドル
アストロE 250
《電動式》
小径
φ30+φ22.2mm
で
軽量
695g
で
高出力
105W
さらに
抜群な
耐久性
モーター耐久5,000H
だから
経済的！
¥169,000
φ22.8 0 -0.01
76.5
スピンドル NR-302
φ22.8 0 -0.02
41.9
減速機(1/4) ARG-01
φ30 0 -0.03
118
ブラシレスモーターEM-250
高出力105W・
500～25,000回転／分
減速器使用
【コントロールユニット付】
●シーケンス制御による自動化が可能
●特に小型ロボット等に装着できる様に軽量化を計りました
NSK 株式会社ナカニシ
●本社・工場／〒322-8666 栃木県鹿沼市上日向340
TEL0289(64)3380　FAX0289(62)5636
●東京事務所／〒110-0005 台東区上野3-19-4サカイビル3F
TEL03(3835)2891　FAX03(3835)4332
●大阪営業所／TEL06(6575)1134(本社へ転送されます)
〈資料請求番号41〉

Part 3 [新解析技法「GO-FLOW」……応用編]

新幹線のATC故障率，4.0×10⁻⁵/日

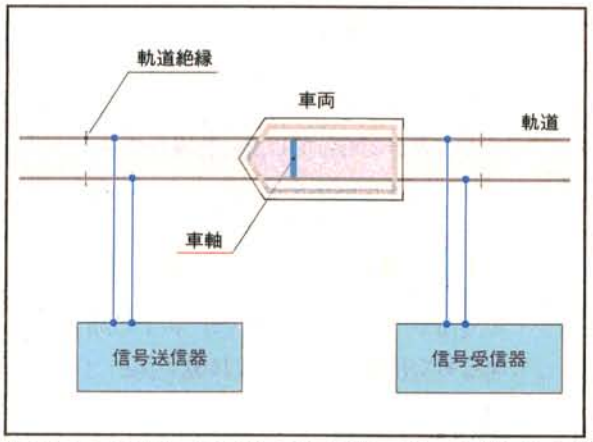
自動列車制御装置（ATC）は鉄道の安全を守る“心臓部”。危険を感知すれば直ちに車両の速度を緩める，止めるなどの指令を出す。信頼性を上げるためATCの中身は当然複雑だ。GO-FLOWを使えば，こうした複雑なシステムであっても故障率や事故発生率を簡単に算出できる。新幹線のATCの故障率を求めてみよう。

「4.0×10⁻⁵/日」。GO-FLOWがはじき出した，ブレーキを含む新幹線のATC（**図1**）の故障率だ。新幹線はICEに匹敵する速さで走行するうえに，それ以上の過密ダイヤで運行している。安全走行にはATCの信頼性の高さが絶対条件。その信頼性を定量化すると冒頭の数値となる。24時間使い続けても10万個のうち4個しか壊れないという数字は，高い安全性を客観的に示す。このように，GO-FLOWを使えばATCのような複雑なシステムの故障率や事故発生率でも比較的容易に求めることができる。

GO-FLOWを開発し，リスクの定量化に取り組むのは運輸省船舶技術研究所システム技術部システム設計研究室長松岡猛氏だ。ATCの詳細やオペレータに入力するデータの入手にはJR西日本の協力を得た。

チャートの分かりやすさは不変

図2が作成したGO-FLOWチャート。これに対するATCの制御回路，つまりシステム構成は**図3**[1]だ。パート2で紹介した並列回路よりもずっと複雑だが，GO-FLOWチャートの持つシステム構成の分かりやすさは変わらない。基本的にATCを構成する各機器をそのままオペレータで置き換えればよい。従って一見難しそうでも「システム構成を把握している技術者にとってGO-FLOWチャートを作成することはそう難しくない」（松岡氏）。二つの図を見比べながら，ATCの仕組みを見ていこう。なお，ATCの構成機器のすぐ後にオペレータ番号（例えばオペレータ番号1は①）を示す。

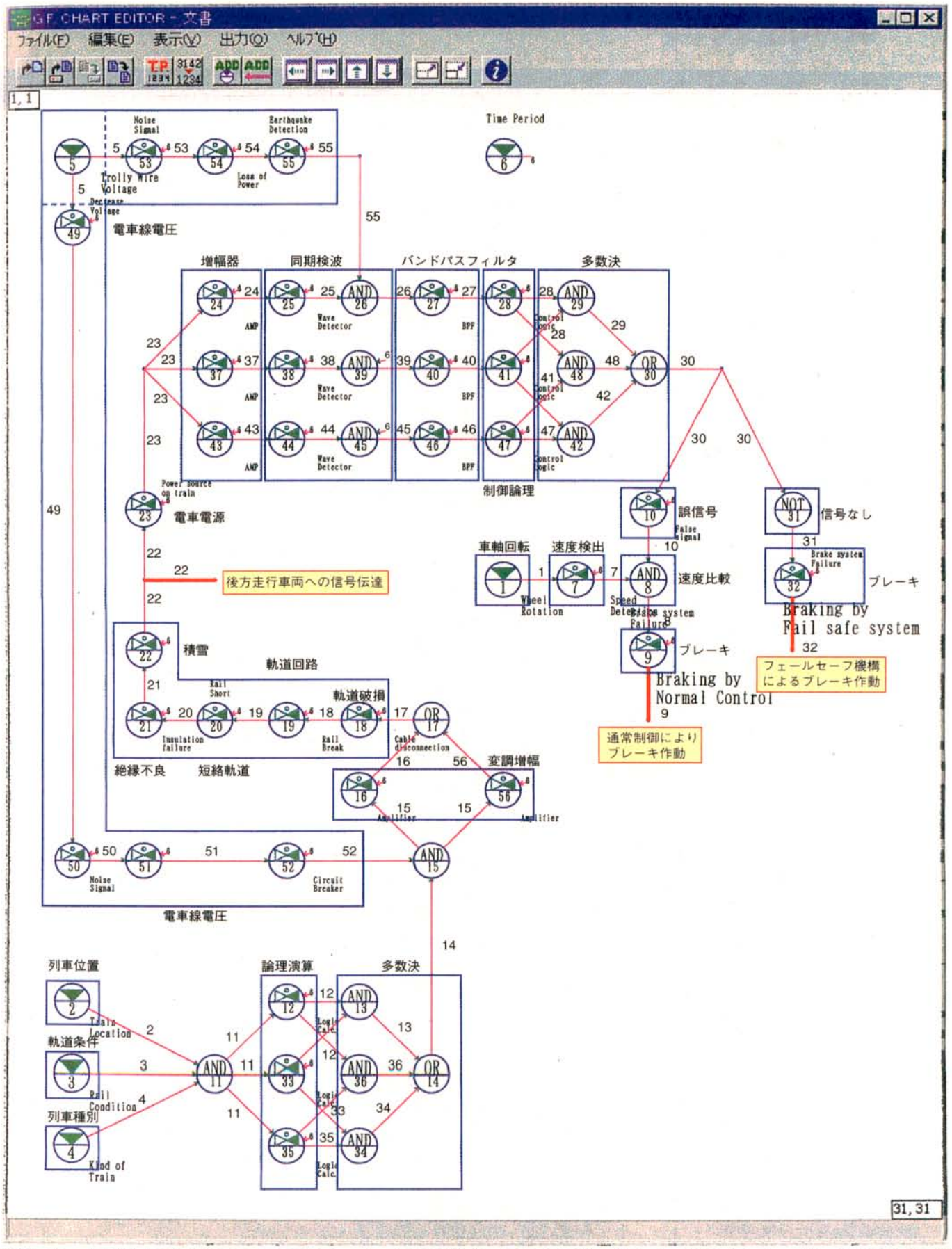


【図1】ATCの原理。ある距離ごとに軌道を区切って軌道回路を形成し，信号送信器から電流を流す。軌道回路上に車両が存在すれば，車軸に流れる電流の分，信号受信器が受ける電流が経る。この変化を利用して車両の速度を設定する

まず地上設備では，(1) 前方を走る車両の位置を表す「列車位置」(②)，(2) カーブや分岐，駅などがあることを示す「軌道条件」(③)，(3) 車両の種類「列車種別」(④) ——の三つの情報を基に，プログラムで「論理演算」(⑫㉝㉟) し対象とする車両の許容制限速度を決定する。論理演算は3重系になっており，導き出す三つの許容制限速度を「多数決」(⑬㊱㉞⑭) して二つ以上が一致すれば正しい出力とみなす。

こうして求めた許容制限速度の信号は2重系の「変調増幅器」(⑯㊻) に入り，軌道側に電流を送る。変調増幅器は「電車線電圧」(⑤㊾㊿51㊷) を供給することで動き，軌道に破損や短絡，絶縁不良などがない場合に「軌道回路」(⑱⑲⑳㉑㉒) に電流が流れる。

軌道回路内を車両が走行して



【図2】ブレーキを含めた新幹線用ATCのGO-FLOWチャート。ATCの制御回路（図3）と形がよく似ている。使用したオペレータは，タイプ22，23，25，30，37の5種類。慣れれば誰でも作成できる

＊バンドパスフィルタ　ある周波数の範囲の信号だけを通過させるフィルタ。

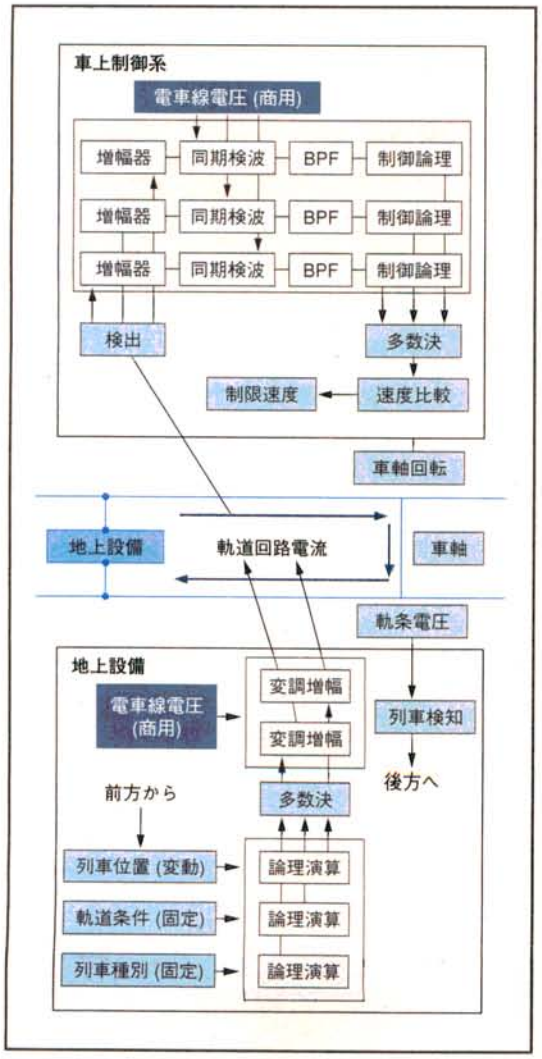
いれば，地上に設けた信号受信器に入る電流が小さくなり，同時に電圧（軌条電圧）が下がる。これを検出して，軌道回路内を走行する車両の位置を後方を走る車両に知らせる。GO-FLOWチャートでは信号線番号22（以下信号線22）が「後方走行車両への信号伝達」に相当する。

計算値と実測値を比較する

車両側は，軌道回路電流を検出して「増幅器」(㉔㊲㊸) を通した後，その周波数を電車線電圧のそれと比較，一致（同期）したら正しい信号と判断する。これを「同期検波」(㉕㉖㊳㊴㊹㊺) と呼び，「電車線電圧」(⑤㊸㊹㊺) の供給を受けながら稼働する。同期検波から出た信号はバンドパスフィルタ「BPF」* (㉗㊵㊻) へ送り，「制御論理」(㉘㊶㊼) で速度信号を計算した後，再び「多数決」(㉙㊽㊷㉚) で速度を決定する。地上設備と同じく車両上の制御も3重系だ。

こうして決定した速度は，「車軸回転」(①) から「速度検出」(⑦) した本当の車両速度と「速度比較」(⑧) し，両者が一致したらそのまま走行する。決定した速度の方が小さい場合はブレーキをかけ，大きいときは緩めて「制限速度」(⑨) を決定する。これを「通常制御によるブレーキ作動」と呼び，信号線9にその出力が流れる。

もしも決定した速度の信号が「速度比較」部に届かない「信号なし」(㉛) の場合は，ブレーキを使って車両を完全に止めるように「制限速度」(㉜) を設定する。こちらは「フェールセーフ機構によるブレーキ作動」で，信号線32に信号が出力される。



【図3】ATCの制御回路。GO-FLOWチャートの下図となる。列車位置や軌道条件，列車種別の三つの入力から許容制限速度を多数決で決め，増幅して軌道回路に電流を流す。回路軌道電流は車軸に設けた検出器でとらえ，増幅，同期検波，バンドパスフィルタを通じて再び多数決で速度を算出する。一方で車軸の回転数から速度を割り出すので，両速度を比較してブレーキの操作を決定する。信号がない場合フェールセーフとして車両を止める

以上，**図3**の回路図は電流の流れを示す。**図2**のGO-FLOWチャートは信号の流れを追ったものだ。従って構成機器をそのままオペレータに，導線を信号線に置き換えれば，両者の構成が似てくるのは当然だろう。

なお，**図2**はあくまで一つの解析例。部品を細かく分解し，オペレータの数を増やすことでより詳しいGO-FLOWチャートを作成すれば故障率の精度をさらに高めることができるし，逆にさらにシンプルなGO-FLOWチャートとすることで故障率を“大雑把に”求めることも可能だ。

使用したオペレータはわずか5種類

このように全体の構成が分かったところで細部，つまりGO-FLOWチャートに使われたオペレータを見てみよう。

図2をよく見ると，オペレータの種類は以下の五つ，(1) タイプ22のORゲート (2) タイプ23のNOTゲート (3) タイプ25の信号発生器 (4) タイプ30のANDゲート (5) タイプ37の時間経過による断線のモデル（時間経過に伴い電流が遮断される）――であることが分かる（**p.38図3参照**）。これらのうちパート2の本文で登場しなかった (2)，(4)，(5) をここで説明しておく。

まず (2) のタイプ23は，入力信号がある場合は出力信号を出さず，逆に入力信号がないときに出力信号を送り出す。つまりATC回路では，途中の回路の断線などが原因で信号が伝わらないことを示す。

続いて（4）のタイプ30は，すべての入力信号がそろったときに出力信号を出す。例えば⑧の速度比較のように，複数の信号を取り入れなければならない部品や機器に使う。

最後に（5）のタイプ37は，時間が経つと故障し，開いていた弁が閉じて流体の流れが止まることを示す。ATCでは時間が経つことで回路が断線し，電流が流れなくなることを表す。時間とともに出力信号の強度が小さくなる。単位時間当たりの断線率λを用意し，p.39表1の数式に従って計算する。

これで作成したGO-FLOWチャートの理解に必要な知識がそろった。

車両の安全を確保する三つの機能

ブレーキシステムを含めたATCの信頼性で問題となるのは，対象とする車両が安全に運行できるかどうかだ。そのためには具体的に，

（1）通常の制御でブレーキが正しく作動する

（2）フェールセーフ機構でブレーキが正常に働くという二つの条件を満たすことが必要だ。つまり両者の動作成功率を足し合わせたものが，ブレーキシステムを含めたATCが正しく作動する最終的な確率となる。さらにここではもう一つ，

（3）後方を走行する車両への信号を正しく伝達する

ことも加えておこう。直接対象車両の安全には関係ないが，ATCが果たすべき重要な役割の一つだからだ。

これらの三つの動作成功率を調べるには信号線の強度を知ればよい。従って，GO-FLOWチャートの中でマークするのは，**図2**中に赤色の太線で強調した，信号線9，32，22の三つの強度だ。当然だがこれらの強度は時間がたつとともに変わる。時間変化といえば，そう，パート2で紹介したように「タイム・ポイント」を設定する必要がある。

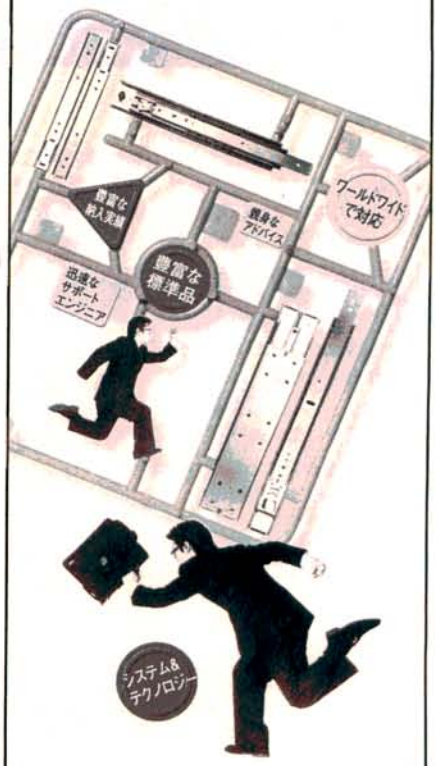
オペレータに入れるデータをそろえる

ATCでは構成機器に対してスイッチの操作や電源の管理などの指令を外から加えることはない。つまり，時間が

【表1】各故障モードの故障率。平成8年度の山陽新幹線で起きたATC関連事故やJR東日本のデータなどを利用して作成した

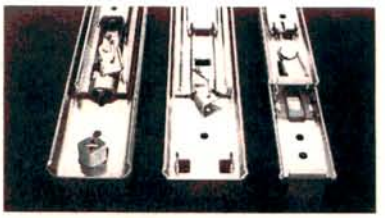
故障モード	故障率
ノイズ信号の混入	1×10^{-7}/時
電力供給失敗	6×10^{-7}/時
地震検出による停止	1.16×10^{-5}/時 (大地震年0.1回発生に相当)
増幅器故障	3×10^{-7}/時
同期検波失敗	1×10^{-8}/時
BPT故障	4×10^{-9}/時
制御論理回路故障	1×10^{-8}/時
誤信号発生	3×10^{-7}/時
車軸回転数検出失敗	3×10^{-7}/時
ブレーキ系統故障	1×10^{-6}/時
車上電源故障	7.76×10^{-8}/時
地上設置蓄電池故障	6.34×10^{-8}/時
サーキットブレーカ故障	6.34×10^{-8}/時
論理演算失敗	1×10^{-7}/時
閉そく区間ショート	8.18×10^{-8}/時
雪による絶縁不良	4.05×10^{-7}/時
ケーブル断線	1.62×10^{-7}/時
ケーブル絶縁不良	7.28×10^{-7}/時
レール破損	0.0
前方列車検出失敗	3×10^{-7}/時

Accuride
ス・ラ・イ・ド・シ・ス・テ・ム



スライドシステムをお探しなら、ACCのスライド・キットをお薦めします。

アキュライドは、プロダクト・エンジニアが必要とするシステムとテクノロジー、そしてサービスをパッケージングして、いつでもお客様のご要望にお応えできるよう備えています。スライドシステムをお探しなら、是非アキュライドのスライドパッケージをご利用下さい。



日本アキュライド株式会社
東京都新宿区西新宿6-14-1（新宿グリーンタワービル）〒160-0023
TEL.03（3345）6301 FAX.03（3345）6307
大阪市北区南森町1-3-27（南森町丸井ビル5階）〒530-0054
TEL.06（6364）6331 FAX.06（6364）1381

●スガツネ工業(株)……03（3864）1122
●丸文(株)……03（3639）9823
●摂津金属工業(株)……06（6992）2331
●住商マシネックス(株)……03（3942）6741

●アキュライドスライドは……コンピュータ、コピーマシン、計測機、精密機器など幅広い分野に利用されています。
設計に役立つ「アキュライドスライドカタログ」をご送付いたします。

〈資料請求番号45〉

【表2】ブレーキ動作を含めた新幹線のATCの故障率。継続使用時間ごとに故障率が大きくなる。1日でみるとほぼ安全が保たれていると判断できるが，もしも7日間メンテナンスをさぼれば，1／4000個程度の確率で故障するという結果が出た。30日や90日の故障率は参考。実際には1カ月も保守点検をしないことはない。

確率	継続使用時間			
	1日	7日	30日	90日
(1)通常の制御でブレーキが正しく作動する確率	0.99941	0.99589	0.98228	0.94823
(2)フェールセーフ機構でブレーキが正常に働く確率	0.00055	0.00384	0.01657	0.04837
(3)後方を走行する車両への信号を正しく伝達する確率	0.99993	0.99952	0.99793	0.99386
ブレーキ動作を含めたATCの故障率 1－｛(1)＋(2)｝	4.0×10^{-5}	2.7×10^{-4}	1.1×10^{-3}	3.4×10^{-3}

経過したことによる耐久性だけを確かめればよい。そこで，保守点検せずに1日間，7日間，30日間，90日間の四つの期間，継続して使用した場合にATCの正常動作率がそれぞれどのように変化するかを追う。従って，設定するタイム・ポイントは，

1：使用開始前
2：24時間経過
3：168時間経過
4：720時間経過
5：2160時間経過

となる。パート2で紹介した，「端点表示」（「←6」）が刺さる全オペレータがこうした時間経過の影響を受ける。

なお，JRが7日間以上保守点検しないことはないので，タイム・ポイント3以降は一つの試みとして考えて欲しい。

さあ，いよいよ各オペレータにデータを入力しよう。パート2で既に述べたように，タイプ25の信号発生器の出力値は1.0。同タイプで時間発生器を表す場合は，経過時間の24.0，168.0，720.0，2160.0の4種類がデータとなる。問題は，個々のオペレータに与える故障率だ。

松岡氏は，96年度に起きた山陽新幹線ATC関連事故の結果やJR東日本の所有する統計データなどから，統計や確率計算から**表1**[2]のように各故障モードの故障率を導き出した。いずれもJRの協力の賜物だ。これらのデータを与えれば，パソコンで自動的に計算できる。

メンテナンスの充実で安全性を確保

その結果が**表2**。ATCを1日使った場合の故障率は，(1) 通常の制御でブレーキが正しく作動する確率と (2) フェールセーフ機構でブレーキが正常に働く確率を足した0.99996となる。

従って，ブレーキを含めたATCの故障率は冒頭の4.0×10^{-5}/日となる。「これくらいの故障率ならほぼ安全と考えてよいだろう」（松岡氏）。なお，最も厳しい安全性が要求される原子力関係では，10^{-5}～10^{-6}オーダーを安全の閾値と国際原子力機構が決めている。このクラスは「事故が起きることをほとんど無視してよい確率」（京大の熊本氏）という。

1週間経つとATCの故障率は2.7×10^{-4}/7日となる。従って，「もし1週間メンテナンスしなければ，4000個に一つくらいの割合で壊れることになる」と松岡氏は語る。現在JRでは運転士が走行中に毎日ATCの動作を確認しているから，これは妥当な確認頻度と言えるだろう。

＊　＊　＊

このように，新幹線のATCでは，それ自体の信頼性と確かなメンテナンス体制の相乗効果で高い安全性を確保できていると分かった。しかし，すべてのシステムでこれほど充実した保守点検をこなしているとは限らないはずだ。

言うまでもなく，時代が進むにつれてシステムは大掛かりなものとなる。より高い機能の追求や安全装置の充実など，多くのシステムは今，より一層複雑化している。パート1のICEの脱線・転覆事故のように，システムが複雑になればなるほど事故の規模は大きく，甚大な損害は免れない。

設計段階で故障や事故などのリスクを定量化して評価すれば，被害を限りなくゼロに近づけるだけでなく，試作や製造にかかるコストも低減することができる。一方で，これまで国内では“禁句”とされてきた，故障や事故発生などのリスクを数値化する規格の策定が急速に進んでいる。

故障や事故発生の可能性を定量化して判断する効果を痛感する日は，すぐそこまで来ている。

参考文献
(1) 松岡「大規模システムの安全管理支援の高度化」，『電気学会技術報告』，第703号，p22，1998年.
(2) 同上，p.25.