

新幹線運転管理システム (コムトラック) の信頼性について*

稲田伸一**, 横田重雄**

1. まえがき

昭和50年3月10日に新幹線は西へ博多まで延長され、1069 kmの西の動脈が動き出した。開業までには騒音公害の問題、又昭和49年に多発した事故や運転阻害のため種々の話題を提供したが、開業以来空前の営業成績をあげ、また安定した運行を行っている。このような大量輸送を円滑に行うため、新幹線ではコンピュータを利用した運転管理システム—通称 COMTRAC (COMputer aided TRAffic Control system)—を開発した。

このシステムは、昭和47年3月に新幹線が岡山へ延長されたとき、第1期のシステムを開発し使用した。第1期システムは、運転管理の中で全体機能の一部ではあるが重要な部分である進路制御機能を中心に開発したもので、その経験を生かし、さらに運転整理と計画の機能を追加して今回第2期システムの開発を行った。

システムが大きくなり複雑になればなる程、一部の故障が全体の運営に及ぼす影響が大きくなるので、信頼性に対する要求はいつそうきびしくなる。そういう意味で今後幹線が延長されていくと、それに応じたシステムの高信頼性の要求に合わせて、システムを再構成してゆかねばならない。ただ、よく信頼性と安全性と誤解されてうんぬんされる向きもあるので、この小文では新幹線の安全性とコムトラックとの関連に若干ふれ、コムトラックの概要を説明したのち、システムの信頼度、とくにマンマシンシステムとしての人間も含めた信頼度についての設計上の考え方、実績などについて述べ、諸賢のご批判をあおぎたいと思っている。

2. 新幹線の安全性とコムトラックとの関連

コムトラックは、コンピュータによる能率的な列車

* 原稿受付 昭和50年5月6日。

** 日本国鉄 (東京都千代田区丸の内1-6-5)。

(注1) ATC: Automatic Train Controller.

(注2) CTC: Centralized Traffic Controller.

の運転管理を行うものであり、列車の保安には直接関係してはいない。コンピュータ制御されているプロセス工場や、原子炉の運転にたとえると、対象プロセスがある危険臨界状態に達したということ、つまり鉄道の場合にあてはめると列車が衝突したり、脱線したりするような事態に対してはコムトラックとは全然別系の設備で管理されている。

これらの設備としては、信頼度が極端に高くしかもフェールセーフの考え方で設計されている連動装置や自動列車制御装置(ATC)(注1)がある。そこで、上記のような危険状態を検知するとコンピュータの運転管理システムの動作いかににかかわらず、系の運転(列車の走行)を強制的に止めるようなシステムになっている。連動装置は各駅に設備されており、衝突するような競合進路のポイントは転換しないように、又駅入出場に際し進路と関連するポイントの条件、線路の状態などを照査し脱線などのないよう設計されている装置であり、万一連動装置に故障が生じて安全側、つまり列車を止める方向に装置が働くよう設計されている保安装置である。又、ATC装置は、列車の速度を制御する装置であり、常時レールに流してある走行可能速度信号情報を車上の装置で受信し、その信号に従って列車を走行させる装置であり、エレクトロニクス回路による三重系の高信頼度設計となっている。速度信号そのものはレールを導体として流れ、前方の列車と接近した場合や万一レールの破損など生じた場合には、速度信号が無くなり車上装置がこれを検知しブレーキを自動的にかけるようになっている。

これらの保安装置を基礎として、列車の運行状況、沿線の状況などを中央で集中監視し、列車の運転能力を向上する設備として列車集中制御装置(CTC)(注2)がある。CTC装置を入出力装置としてコムトラックは、従来にも増していつそう能率のよい列車運転管理(プロセスの場合でいえば、収量をいかに上げるかの管理)をするためのTraffic制御を分担している。

以上、連動装置、ATC装置、CTC装置、コムトラックなどの相互関連図を図1に示す。

3. コムトラックシステムの目的

新幹線の運転管理の手法として、開業当初から CTC 装置を導入し、列車の運転状況のはあくが、中央ですべて行えるようになってきている。例えば、走行中の列車の番号の表示、列車位置の表示、進路開通表示、各種沿線情報、駅設備の異常警報などの情報が中央指令センターに集中化され、異常時においても迅速な列車運転管理を可能にし、又旅客サービスの向上に大きな効果をあげている。

しかし、東京—新大阪間の開業に続き、新大阪—岡山間、岡山—博多間と線区が延び、かつ列車本数の増加とともに、ますます新幹線の有する社会的影響度が増大してきている。

そこで、旅客輸送需要の波動に即応し、ダイヤ乱れのときにも即刻適時適切な輸送を提供するためにも、従来までの人手による運転管理には、情報量の増大からして限度があり、最近急速な発展を示しているマンマシン装置を主軸とするコンピュータシステムの導入が行われた。コムトラックシステムは、

- (1) 輸送需要の変動に即応した車両、乗務員運用を含めた合理的な運転計画の作成及び関係箇所への伝達
- (2) ダイヤが乱れたときの運転整理のための整理ダイヤ作成及び伝達
- (3) 作成されたダイヤに従う進路設定の自動化などを主目的としている。

4. コムトラックシステムの概要

4.1 機能概要 コムトラックシステムは次の五つのサブシステムから構成されており、各サブシステム

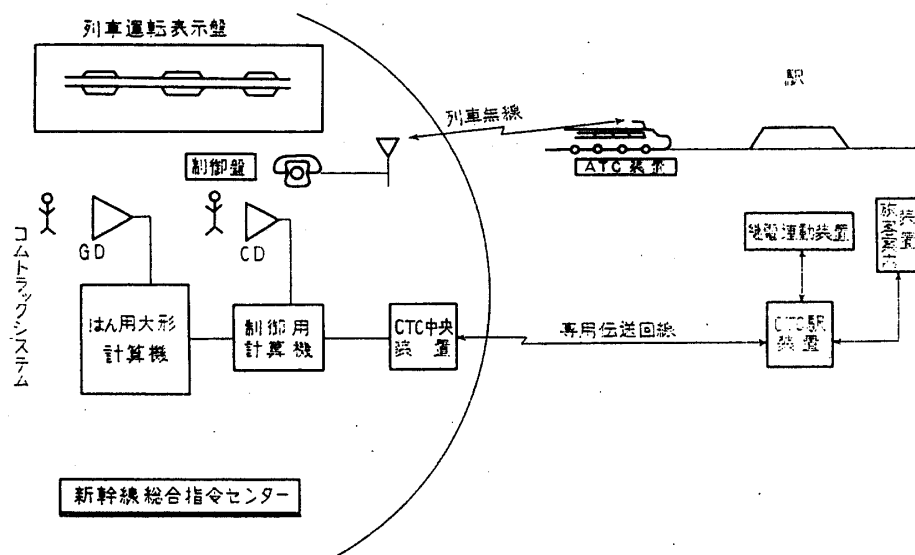


図1 コムトラックシステムと他装置との関連図

の機能は、つぎのとおりである。

4.1.1 計画システム 列車運転の基本計画及び、臨時計画に従い、列車及び車両運用の実施計画ダイヤを作成する。特に臨時計画については、グラフィックディスプレイ (GD) 装置からの入力が可能である。

4.1.2 指令システム 計画システムで作成された当日の列車運転ダイヤに従い列車が正常に運転されているかどうかを監視し、ダイヤ乱れを判断し、指令員にキャラクタディスプレイ (CD) や、GD を介して警告する。又、ダイヤが事故などで大幅に乱れたときは、各種変更 (指令手配という) を加味し、4~5 時間におわたる列車ダイヤをシミュレーション手法により予測し、以降の運転ダイヤを作成し、ダイヤ形式で GD に表示する。又、上記の場合、列車ダイヤのみならず車両の検修作業計画、車両の使用計画も乱れるため、翌日以降数日間の車両使用計画を検修作業計画を考慮して自動作成する。又、指令手配の内容は、随時必要現場 (駅、車掌所、運転所など) へ自動伝達される。

4.1.3 進路制御システム 計画システム及び指令システムで決定された列車運転ダイヤに従い、各列車を追跡し、進路設定を自動化するとともに、各駅の信号諸設備の機器異常を監視する。

4.1.4 旅客誘導案内システム 駅の案内放送及び発車標の制御を自動化する。

4.1.5 統計・解析システム 各種運転業務の実績報告書を作成する。

4.2 システム構成 4.1 節で述べた機能をシステムとして構成するために、各機能に要求される信頼度及びアベイラビリティを明確にするとともに、各機能のもつ特殊性を十分考慮に入れる必要がある。

まず、進路制御システムは、直接列車の運転と関連

する部分であり、CTC 装置で中央に集められた情報と、列車運転ダイヤに従い、進路設定を行う完全なプロセスコントロールシステムである。又、進路制御システムはコムトラックシステムの最終段の出力部でもあり、システム構成上のベースとなる部分で、オンラインリアルタイムシステムとして高信頼度が要求される。

つぎの指令システムは、進路制御システムをベース

として列車追跡から列車ダイヤの乱れを検知し、乱れを検知した時点からシステムが起動することになり、直接進路制御とは関係しない。ただし、この指令システムは主体が指令員とコンピュータとのマンマシンシステムであり、アベイラビリティとしては、相当高いものが要求される。又、マンマシンシステムとしての特殊性を十分生かすよう、レスポンスタイムの短縮及び人間工学的観点からの操作性の向上などが必要な分野である。

又、指令システムの中でも、機能的に列車ダイヤをシミュレーションし4~5時間の整理ダイヤを作成する部分と、高々5~10分を範囲としての列車ダイヤの修正機能とは自ずと使用目的も異なり、後者は、局所的運転整理として一部列車運転状況の監視機能に近いものと思われシステム構成上、進路制御システムに直結させる必要がある。

そこで、進路制御システムと指令システムのなかの局所運転整理の機能をプロセスコントロール専用のコンピュータで実施し、既存のCTC装置と同等以上の信頼度を確保するために、常時並列運転を定位とする二重化3台系のハードウェアシステムとしている(MTBF 20 000 h, アベイラビリティ 99.99% を目標としている)。又、指令システムは現場への情報伝達を行う必要があり、指令手配が決定され現場がその情報を受領確認するまでに許される時間は、おおよそ10~15分と考えられ、長時間にわたるシステムダウンは現場作業の混乱を生じさせるものと思われる。そこで大形はん用計算機による相互予備のDuplex 運転方式とし、切替え時分を10分以内としている。

図2にコムトラックシステムのハードウェア構成を、図3にソフトウェア構成を示す。

5. コムトラックシステムでの信頼性の考え方

鉄道輸送の最終目的は、安全、確実にかつ経済性を確保して、多量の旅客、貨物を輸送することにあるが、特に新幹線においては高速性、大量輸送からして、安全性及び信頼性の要求が在来の鉄道とは比較にならない程大きい。

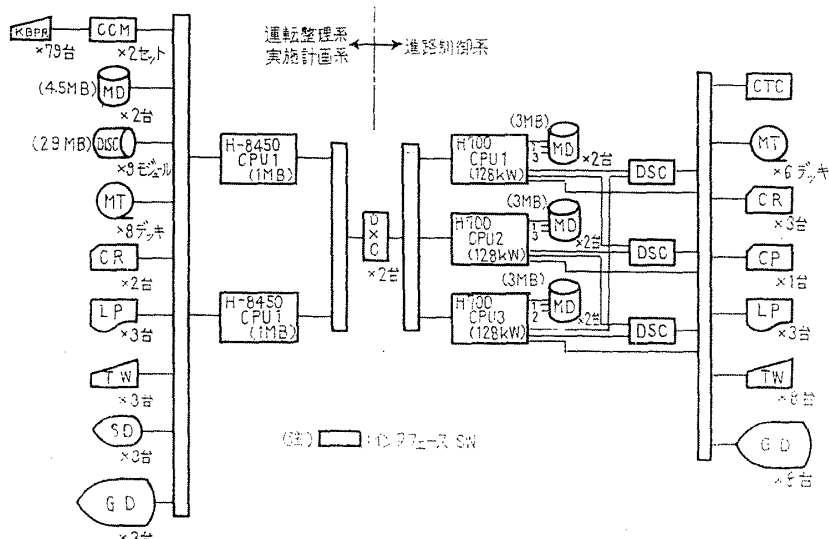
そこで比較的小規模な情報システム、制御システム、管理システムに

対しては、個々のシステムとしてその信頼性について種々対応策が講じられてきているが、コムトラックのように情報システム、信号、通信、車両、運転など地域的にも極めて広範にわたる多数のシステム、機器、設備、組織と有機的に関連する総合システムに対しては、その信頼度をどのような形で取扱い、更にその確保と向上策をいかにしたらよいか、重要な課題である。

5.1 コムトラックのハードウェア信頼性の考え方

コムトラックのハードウェア信頼性を議論する場合、システム構成として、中央処理装置、線区内の3~4 駅を包含する CTC 中央装置、中央と各駅を結ぶ CTC 伝送回線、及び各駅の CTC 駅装置、連動装置などを考慮する必要がある。

一方、コムトラックのハードウェアの使命は、中央処理装置からの進路出力データを正確に駅連動装置に伝達することであるが、最終的にはコムトラックの管理範囲内にあるすべての列車に対し、支障なく進路設定を行うことにある。そこで単純なハードウェアの直列系での信頼度評価も必要ではあるが、中央装置の故障の影響は全駅にわたり、その支障の割合については自ずとハード系の末端装置との間に大きな差異が生じてくる。このような考えにたつと、従来までの直列モデルによる信頼度評価のほか、システムがいかに所期の使命を達成できるか、すなわち、駅の進路制御が一定時分内にどれくらいまで完全に行われるかを、装置



- | | |
|-----------------|------------------|
| KBPR: キーボードプリンタ | TW: タイプライタ |
| CCM: 通信制御装置 | SD: サブディスプレイ |
| MD: 磁気ドラム | GD: グラフィックディスプレイ |
| DISC: 磁気ディスク | CPU: 中央処理装置 |
| MT: 磁気テープ | DXC: データ交換装置 |
| CR: カードリーダー | DSC: 二重系制御装置 |
| LP: ラインプリンタ | CD: キャラクタディスプレイ |

図2 コムトラックのハードウェア構成

ごとの重み付けを加味して評価する必要がある。そこで、各装置に対し列車運転に影響を与える度合（装置が故障したときに所定の進路制御が行えない列車数）を割り当て、この影響度によりハードウェアシステムの信頼性の評価を行うことにしている。

つまり、同一の装置でも使用される外部条件、例えば東京駅や大阪駅のように、非常に取扱い列車本数の多い箇所に設置された装置と、岐阜羽島など中間駅に設置された装置とでは、その装置の使命には大きな差があるため、評価関数としては全く異なった値が適用される。

特に、新幹線のように、地域的にも広範であり、かつ31駅（運転所も含む）をも含むコムトラックでは、上記のような重み付けによる信頼度評価のほうが妥当と思える。事実、信頼度モデルでの直列系の信頼度計算値は、0.9919であるが、重み付けでの使命達成度が、0.9958となっている（図4参照）。

ただし、直列系信頼度モデルのうち、中央に設備されている入出力部の信頼度が相当低いようであるが、当初想定した以上に部品回路数が増えたこと及び多数決論理の三重系運転モードの装置であることが、主な理由であるが、設備使用開始後の改修で、三重系運転、二重系運転、一重系運転を可能としたため、MTBFは 10^4 オーダに向上した。

5.2 コムトラックのソフトウェア信頼性の考え方

情報システムを構成する要素は、大きくわけてハードウェア、ソフトウェア及び人間であり、その信頼性をそこなう因子は各要素独自のものと、各要素間及

び、システムの働く環境とのインタフェースに存在するものと考えられる。そこでシステムのライフサイクル、すなわち、システムの計画、設計、製作、テスト、運用のすべてのステップにわたって信頼性向上のための技術的、管理運営的な手段が十分つくされねばならない。特に、最近問題となっているソフトウェアの信頼性について考えてみると、まず、システムの計画、設計時点におけるプロジェクトマネジメントとして、技術的問題点の検討、仕様決定を行う技術部会の設置、運用上の問題点の検討、仕様決定を行う運用部会の設置により、広く技術的矛盾の抽出、運用上の機能の詳細の検討など、十分行える体制となっている。又、仕様決定に伴う議事録の確認、仕様書の作成など、ドキュメント管理の徹底を行っている。

つぎに、製作面では特にプログラムの標準化、マクロ化などをベースに、徹底的に処理の細分化を行い、細分化されたモジュールを積み上げてゆく、いわゆるBottom up方式を採用し、定例的なサブシステムリーダ会議を中心に、プログラムインタフェースの検討、仕様変更の連絡の徹底を行ってきている。

又、テスト面においては、特に、列車運転を実際のプロセスを利用して長期にわたりテストすることが不可能であり（システムテスト用に試験運転列車を走らせることには、経済的に制限があるため）、列車運転をシミュレートするTTS (Train Traffic Simulator)を作成し、本番同様のスタイルでオンラインテストが可能となり、ダイナミックなプログラムテスト、タイミング的なバグの抽出、加速テストなどを行っている。

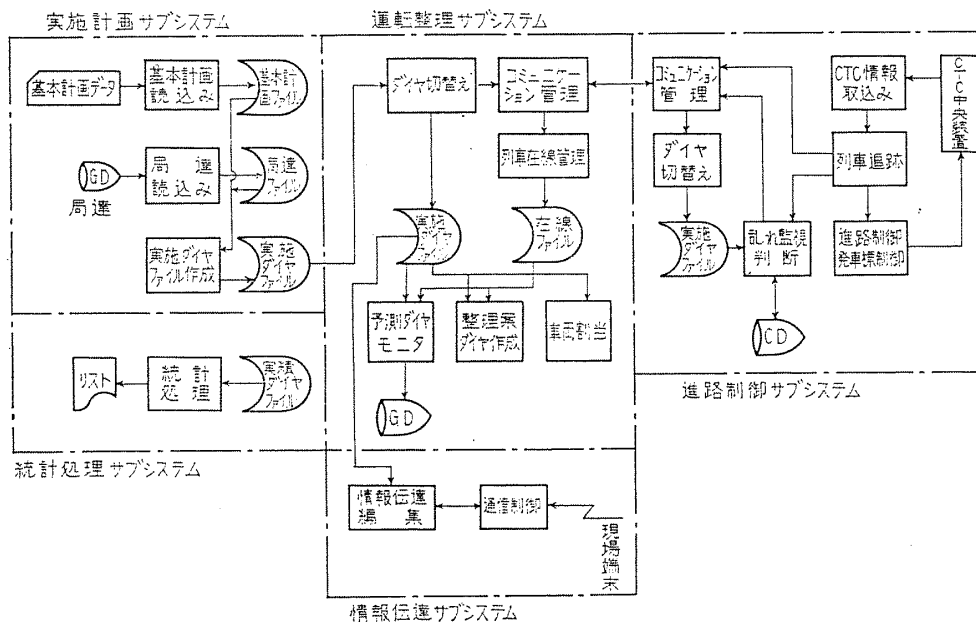


図3 コムトラックのソフトウェア構成図

以上、ソフトウェアの作成に伴って生じるバグの抽出に関する手段であるが、この他、ソフトウェアバグ検出後の処理として、フェールソフトを OS レベルで実現しており、特に、オンラインテスト (TTS テスト、本番モニタランテスト、本番コントロールランテストの3段階がある) 中でのバグ発生に伴うテスト時間の損失を少なくすることができた点に、その効果を高く評価することができる (当然、システムの使用開始以後のバグの発生に対しても有効なことはもちろんである)。

又、ソフトウェアのテスト期から使用開始にいたる時点で、バグの発生の予測を行うことも、システム管理運営上重要であり、当コムトラックでは、ロジスティック曲線にもとづき、バグの予測を行っている。

最後に、実際のコムトラックシステムの進路制御機能は、非常に高い信頼性の要求されることであり、かつ機能の停止はただちに列車運転に影響を与えるため、ソフトウェア構成的にも、駅、上り、下り単位に、その機能のみの停止、再開が可能ないように設計されており、異常時の取扱いにおいて、フェールソフトの考えが取り入れられている。

5.3 コムトラックの総合信頼性の評価 以上、ハードウェア、ソフトウェアに関する信頼性の考え方について述べたが、ここに両者及び人間 (オペレータ、保守員など) をも含めた総合的信頼度の評価が、実際にシステム運用上の問題として、クローズアップしてきている。つまり、システムを運用してゆくにあたり、コムトラックのような大規模システム (オンラインリアルタイム、マンマシン、オンラインバッジ、オフラインバッジなどシステムが複雑に融合している) においては、個々のシステムの信頼性の向上はもとより、人間系をも含めた運用上の信頼性の向上が急務と思われる。この点をややもすると見落しがちであるが、特

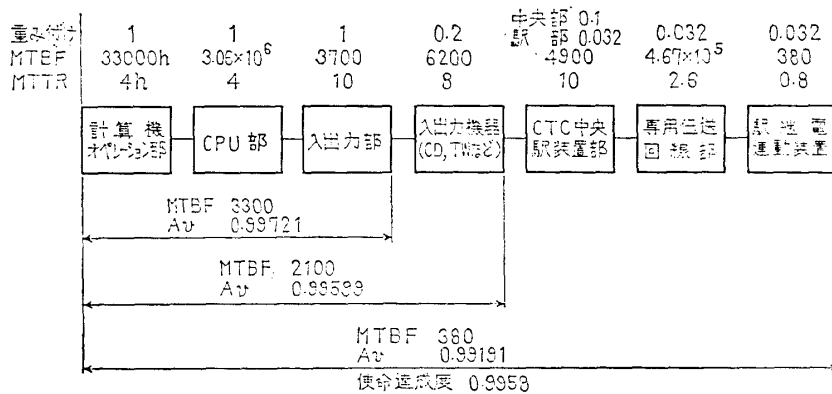
にマンマシンシステムとしてか動するシステムにおいては、時には運用拒絶反応さえ生じかねないのが実情である。

そこで、コムトラックでの総合信頼度として、「システムが通常想定されるあらゆる使用条件のもとで、システムの動作に関するあらゆる要素、例えば、ハードウェア、ソフトウェア、オペレータ、保守員などの総合的な機能発揮によって、規定の時間、規定の機能を適正に発揮する確率」と定義し、この場合、システム仕様に規定された条件を超える外乱 (列車ダイヤ乱れ) などによる機能停止も「故障」と考えている。コムトラックの総合信頼度を求め、障害要因の Criticality (最弱点箇所) を評価し、改善策を明確に得るためのシステムモデルを FTA (Fault Tree Analysis) を用いて作成し、数量的評価を行っている。

例えば、進路制御システムにおける列車追跡の中断は、駅・上下単位に進路制御不能という重故障をシステムから切り離すことであり、ただちに切り離された駅については、人間がバックアップするようになっており、コムトラックの機能はすべて当駅については停止する。この追跡中断という事象を Undesired fault と考え、FTA を作成すると、原因の主な事象としては、ハードウェアが原因の「入力情報の異常」(0.21×10^{-2} 件/h)、「マンマシン操作不良」(0.006×10^{-2} 件/h)、「運用制限事項違反」(0.01×10^{-2} 件/h)、「ソフトウェアのバグ」(0.14×10^{-2} 件/h)、「誤入力」(0.05×10^{-2} 件/h) などがあり、数量化することにより、最弱点部分が判明し、システム全体としての有効性の判定にも利用できる有効な手法である。計算の結果、駅追跡中断の発生する割合は、 0.50×10^{-2} 件/h (期待値) と想定される。又、進路制御システムのシステムダウン (全面的な機能停止) を Undesired fault と考え、FTA を構成すると 0.18×10^{-2} 件/h (期待値) が得られている。

6. 今後の検討

現在か動中の東京一博多対応の第2期コムトラックシステムは、予想どおり順調にか動しているが、これからの全幹網対応としてますます大規模化し、かつ列車運転のネットワーク化に伴い新たに生じる技術的な問題、運用上の問題が現在検討されつつある。このような中で、従来まで進めてきたコムトラッ



(注) 重み付けは $\frac{\text{装置が故障したときの影響列車本数}}{\sum_i (i \text{ 駅の列車本数})}$ による。

図 4 進路制御システムの信頼度計算モデル

クの信頼性に関する研究は、いっそうその位置を重要視し、積極的に取りくむ必要がある。

そこで、今後の検討として

(1) ハードウェアシステムの信頼性については、各装置に与える重み付けされたシステム影響度を十分精査し、環境条件の変化なども加味できるようにする。

(2) ソフトウェアの信頼性については、ソフトウェア作成時点でのバグの排除及びテスト方式の検討をふまえ、構造的プログラミングの作成、Top-Downでのソフトウェアの開発、標準化の推進など検討する。

(3) 総合的信頼度の評価においては、システム設計時点で早期に評価できること、及びモデルのダイナミックなシミュレーション評価手法を確立すること。

(4) フェールソフト化の徹底をはかること。

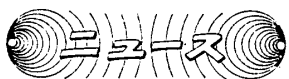
(5) マンマシンインタフェースとしてのグラフィックディスプレイ装置の人間工学的検討を行うこと。

(6) ロジスティック曲線によるバグ収束判定の規準を確立すること。

など、多くの問題点、検討事項をかかえているが、第2期コムトラックシステムが順調にか動している現在、信頼性に関するこれまでの研究、実施を、次期システムに反映すべく重要な時期にきているものと思われ、いっそうの努力を行ってゆきたいと思う。

参考文献

- (a) 信号保安協会, 運転情報総合処理システムの研究報告書, (昭50).
- (b) 電子通信学会, 新幹線の電子通信システム, (昭49), 34.
- (c) 塩見, コンピュータリライアビリティ, (昭49), 222, 昭晃堂.
- (d) 市田, 保全性工学入門, (昭46), 日本科学技術連盟.
- (e) ロッフ, P.E., コンピュータ情報システム, (昭45), 370, 日本生産性本部.
- (f) ザックマン, H., マンマシンディジタルシステム, (昭46), 259, 日本生産性本部.
- (g) 稲田, 電子通信学会誌, 56-5 (昭48-5), 678.



分科会・研究会設置のお知らせ(2)

名称 実験応力ひずみ解析研究会(1P-RG 24)
設置期間 昭和50年9月～昭和52年8月末
目的 実験応力ひずみ解析の研究は破壊力学、構造設計、塑性加工などの基礎として重要であるが、単独の研究としては重視されておらず、また、現在の測定技術ではそれぞれ一長一短があり諸要求を必ずしも満足させておらず、研究者間の連絡も十分とはいえない現状である。そこで本研究会は応力ひずみ測定法の比較検討を行い、問題点を洗い出して具体的な問題を取り上げ、ひいては研究者相互の理解を深めることを目的とする。

主査氏名・勤務先

〒980 仙台市荒巻字青葉
 東北大学工学部
 教授 島田 平八
 幹事 小幡 充男
 委員 8名

名称 混相流の摩擦機構調査研究分科会
 (2P-SC 29)

設置期間 昭和50年10月～昭和52年9月末
目的 近年、混相流の力学に関する研究について共同研究を行うべきであるとの要望が高くなりつつある。とくに東海地区は多くの研究者が混相流に関心をもっている。

主査氏名・勤務先

〒464 名古屋市千種区不老町
 名古屋大学工学部
 教授 古屋 善正
 幹事 葛原 定郎

名称 伝熱工学資料に関する調査・研究分科会(2P-SC 30)

設置期間 昭和50年9月～昭和52年8月末
目的 本会出版物「伝熱工学資料改訂第3版」は

昭和50年2月に発行されたが、同資料を諸工業と伝熱学の進歩に合わせて改善してゆくための最新の資料に関する調査・検討が継続的に行われることが望まれる。本分科会は伝熱学の各分野での最新の研究・資料に関する調査とその整理統合を行うとともに、伝熱学上の未知の事項について研究・討論を行うことを目的とする。

主査氏名・勤務先

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1
 東京工業大学工学部
 教授 片山 功蔵
 幹事 成合 英樹
 委員 14名

名称 油圧機器研究会(2P-RG 28)

設置期間 昭和50年8月～昭和52年7月末
目的 油圧工学の分野には、流体工学、制御工学、振動工学、潤滑工学の領域にまたがる多くの問題が未解決のまま残されており、これらに関して組織的に調査・研究を行うことを目的として、昭和48年8月～昭和50年7月末の期間「油圧工学研究会」の設置(設置場所:浜松)を認可された。その結果相当の成果をあげたが(内容は近く学会誌を通して報告の予定)、未解決の問題もかなり残されている。また昨今安全、ポリウレションなどの点が問題になってきているので、特にこれらについて重点を置いた調査・研究を目的とした研究会の設置を申請したしだいである。

主査氏名・勤務先

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1
 東京工業大学工学部
 教授 辻 茂
 幹事 小島 英一
 委員 8名