
人間・機械系の安全評価の基礎的研究

A study on safety evaluation of man-machine systems

代表研究者	法政大学工学部教授 Prof., Faculty of Eng., Hosei Univ. Toshiro TERANO	寺野 寿郎
協同研究者	法政大学工学部講師 Lecturer, Faculty of Eng., Hosei Univ. Shigehiro MASUI	増井 重弘
	船舶技術研究所システム研究室長 System Project Manager, Ship Research Institute Yujiro MURAYAMA	村山 雄二郎
	電気通信大学情報数理学科助手 Research Assist. Electro-Communication Univ. Noboru AKIYAMA	秋山 登

Until now, probabilistic model is only one which is applicable to the safety evaluation of man-machine systems. However, more precise model is required recently, because probability is not suitable to express the operator's mistake in cognitive or judgemental jobs. In this paper, we aggregate many factors, on which human reliability depends, into the following four parameters, "job load", "personnel ability", "mental stress" and "allocation of attention". These parameters include both the physical and the mental factors in human operation. Considering the relations among these parameters, a structural model is composed. We characterize the major element of this model with fuzzy set. Usually structural model and fuzzy set model are so conceptual and qualitative that they are inadequate for engineering use, but, in this paper, we verify the exactness of the structure and also identify the characteristics of the elements quantitatively through the experiments in many cases. Therefore, the model suggested here is sufficiently objective and conveniently applicable for the analysis and the evaluation of man-machine systems.

研究目的

プラントや輸送機関の事故の30%にはなんらかの形で人間の過失が関係しているといわれる。安全の維持には機械の信頼性を高めるだけでなく、人間の信頼性がどのようなものかを基礎から研究し、人間-機械系として全体の信頼性を高める工夫が必要である^{1)~3)}。ただし、人間の作業能力は個人差が大きく、そのうえ、作業の種類や作業環境などの物理的条件、および疲労や学習効果などの生理的条件、さらに精神的緊張や対人環境などの心理的条件によっても影響されるので、そ

のモデリングは非常にむずかしい。人間の信頼性についての従来の研究は二つの方法に分かれる。その一つは人間の過失を機械要素の故障と同様に考えて、確率論で扱うものである⁴⁾。これは比較的単純なスキル・レベルの作業（思考を必要としない作業）ではよく当てはまるが、現在では人間の作業は行動的なものより思考や判断を要する管理的なものが増えているので、確率だけで人間の信頼性を表すのは困難である。もう一つの方法は心理学的なもので、ここでは過失の事例を分析して人間の特性を総合的に把握する。そしてそれを文

章記述か、または、情報処理過程の構造図の形で表現する^{5),6)}。この方法は複雑な人間の特性をかなり一般的に表すことができる。しかし、どちらかといえば定性的、かつ、主観的な議論なので、システムの設計や評価にそのまま利用することはできない。本研究は両方の方法論の長所を併せ持つような人間信頼性の基本的なモデルを開発することを目標とする。すなわち、人間の信頼性を生理面だけでなく、ある程度、心理的影響までふくめて表現できる一般的な構造モデルを構築し、かつ、それを多くの実験によって客観的に証明し、工学的な利用に耐え得るものとする。

研究の方法

筆者らは前の報告⁷⁾で、複数の人間の協同作業における信頼性の研究を行なった。また、別の報告⁸⁾では、1人で複数の作業を同時に実行する際の信頼性実験を行ない、人間の過失は機械の故障のように単純な確率モデルで表せないことを示した。本研究では、さらに多くの実験を重ねて、構造モデルとファジイ集合モデルの組合せが人間の信頼性を表すのに最適であることを示し、さらにモデルのパラメータを具体的に決定する方法を述べる。

構造モデルもファジイ集合も主観的に作られるのがふつうで、客観性に乏しいきらいがあるが、本研究では実験によってこれらの欠点を補い、多人数-多作業時の人間信頼性のモデルを確立したもので、いわば筆者らのこれまでの研究の集大成である。

研究成果¹⁾

1. 実験の概要と結果のまとめ

人間の信頼性のデータは現場から集めるのが理想であるが、実際には作業環境がまちまちなのでデータとしての価値が少ない。そこで本研究では実験室内で単純な作業を被験者に課し、少数のパラメータだけを変えてミスを定量的に調べた。

本研究で用いた作業は2種類あり、その一つはデジタル作業と呼び、論理的な思考を必要とするものである。まず、CRT上に3個のランダムな数字が表示され、被験者はその和を暗算で求め、その最後の桁の値をキーで答える。数字の表示時間

は一定で、その制限時間以内にキーを押さない時、また、答が間違った時はいずれも失敗として記録される。この制限時間の逆数が作業負荷と考えられる。キーを押してから次の数字が表示されるまでには若干の休止時間があるが、これはランダムにしてある。このテストを100回繰り返して、そのときの正答率をもってその被験者の信頼度と定義する。

第2の作業はアナログ作業と呼び、直観的な判断が中心になる。これはCRT上に計器の図が表示され、その指針が一定速度で右または左に振れる。被験者は針が指定された範囲から逸脱しないうちに右または左の修正キーを押さなければならない。キーの選択が正しければ針は中央にもどり、ランダムな休止時間をおいて再び動き始める。一定の作業時間の失敗回数はその人の不信頼度を表す。この実験では平均休止時間の逆数と針の変化速度が作業負荷となる。

以上の2種類の作業を組み合わせると多くの実験を行なった結果を次にまとめて示す。まず、2人で1作業(デジタル作業)を行なった場合について述べる⁷⁾。

(a) 2人が成績を競い合うような状況下(これを競争モードと呼ぶ)では一般に個人の信頼性は増すが、2人のうちどちらかが成功すれば良しとする状況下(これを協調モードと呼ぶ)では低下する。

(b) 協調モードでも2人間のコミュニケーションを禁じると単独作業に近づく。

(c) パートナーが人間でなく計算機の場合は(b)と同様である。ただし、少数の被験者は協調モードにあっても計算機と競争する姿勢を示した。

(d) 熟練してくるとパートナーの有無にかかわらず個人の信頼性は単独作業の場合に近づく。

次に、1人の作業者がデジタル作業とアナログ作業を同時に行なう1人2作業の場合について述べる⁸⁾。

(e) 一般に負荷の大きいほうの作業に対しては信頼性も低い。

(f) 被験者によっては負荷を増すとかえって

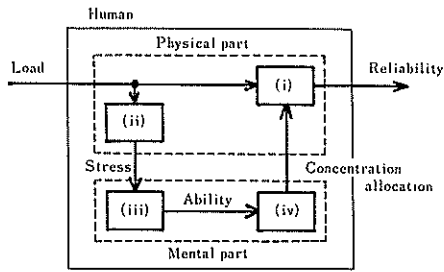


Fig. 1. Structural model of human reliability (one person-one job).

信頼性が向上する。とくに、2作業のうち一方だけ負荷を増すと、その作業だけでなく、他方の作業の信頼性まで向上する被験者がある。

(g) 一方の作業の負荷を増し、他方の負荷を減じて、全体としての負荷は変わらないようにした場合、被験者の反応は次の三つのタイプに分かれる。第1はアナログ作業の負荷を増したとき、個人の総合的信頼性が増加する。第2のタイプの人にはデジタル作業に対して同様の反応を示す。第3のタイプは負荷の大きいほうの作業の信頼性は向上し、少ないほうは逆に下る。

2. 人間の信頼性のモデリング

以上の実験結果に基づいて、作業負荷を入力とし、その作業の信頼性を出力とする人間のモデリングを試みる。これは構造モデルの作成とその要素特性の同定とから成るが、構造モデルを作るにはその構成要因をまず明らかにする必要がある。

人間の信頼性に影響する因子は非常に多いが⁴⁾、筆者らは前記の実験結果を踏まえて、これを次の4種類にしぼった。「作業負荷」「作業能力」「多作業時の能力配分」「心理的ストレス」。これ以外の因子は上記のどれかにふくめることができる。また、この4因子は実験で測定することもある程度可能である。

さて上記、4因子の相互関係は実験結果を参照すると、次の5種類に限定できる。(i) 負荷・能力・信頼性の3者関係、(ii) 負荷とストレスの関係、(iii) ストレスと能力の関係、(iv) 能力とその配分関係、(v) 環境とストレスの関係。

上記の諸関係のうち(i)(ii)は主として生理的なものであるが、(iii)(iv)(v)は心理的な要素

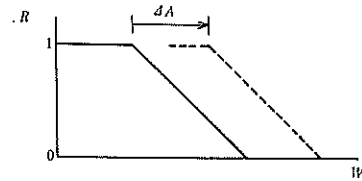


Fig. 2. Approximate membership function of (i).

を多くふくんでいる。(v)の関係は前記の(a)~(d)で述べたようにグループ作業の際に重要な役をするが、今回の報告では協調モードの場合に限ったので、構造モデルにはふくめない。以上の結果、1人1作業のときの基本的な構造モデルはFig. 1のようになる。

次にFig. 1の中の各要素特性について述べる。(i)の関係は人間の信頼性のもっとも基本的なものである。これは実験結果(e), (f), (g)にも示されているが、3者関係は非線形で個人差も大きいので、これをファジイ集合で表すことにする。すなわち、被験者に課せられた作業負荷量を集合の台とし、それに対応する信頼度をそのままメンバーシップ関数の値とすれば、(e)の結果はFig. 2の実線のような折線で近似表現できる。次に(f)(g)などの効果は最終的に個人の変化となって信頼性にきいてくるものと考えられる。これはFig. 2に示すように、能力が ΔA だけ変化したとき、メンバーシップ関数をそれだけ右または左に平行移動させるものとしてモデル化すると、実験結果をうまく説明できる。

次に(ii)の負荷とストレスの関係であるが、両者の間にはほぼ比例関係が存在するものと考えられる。したがって、変数を規準化した構造モデルでは要素として扱う必要はない。もし、1人2作業の場合には、実験結果(f), (g)などから分かるように、各作業負荷の和が被験者のストレスに比例する。

(iii)のストレス・能力の相互関係は実験結果の(a), (b), (f), (g)などに表れているようにきわめて重要である。心理学の分野ではこの問題は古くから研究されており、ストレスは少なすぎても、強すぎても人間の能力は低下する。そ

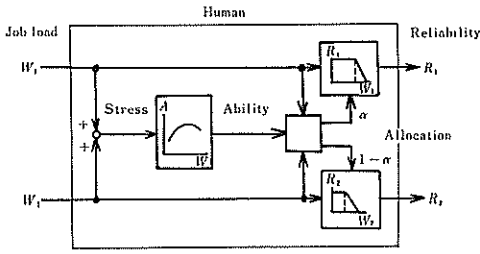


Fig. 3. Structural model (parallel jobs).

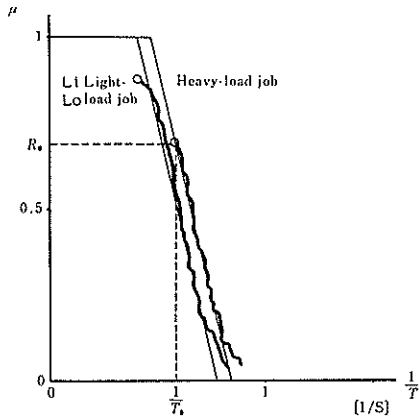


Fig. 4. Examples of membership function for physical effect.

T_0 : Time limit of a trial

μ : Rate of successful trials of which working-time is shorter than T

して適度なストレスがあると人間の能力は最大になるといわれている、そこで山形の非線形曲線で両者の関係を示すことにする。

最後に (iv) の能力配分であるが、これは 1 人多作業のとき、どの作業に注意力を集中するかということである。注意力を集中すれば、その作業の能力が増し、信頼性が増す。しかし、そのため他の作業はおろそかになる。ここでは個人の総合能力に重み係数 α を乗じて各作業への能力配分比を表すことにする。

以上の考察をまとめると、1 人 2 作業のときの人間信頼性のモデルの詳細は Fig. 3 のようになる。次に、このモデルを実験により構造の正しさを検証し、かつ、要素の特性の同定を試みる。

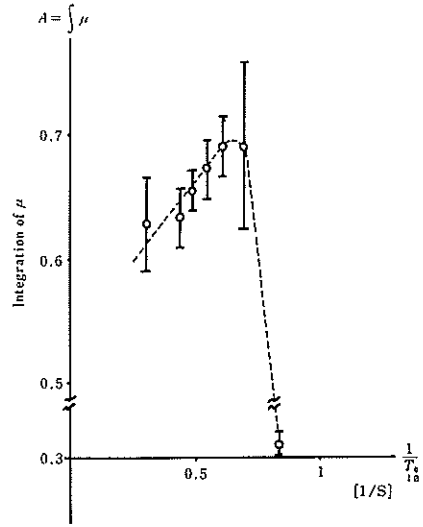


Fig. 5. Examples of mental effect.
 T_0 : Time limit of trial

3. 1 人 2 作業実験によるモデルの検証と同定

3.1 負荷-信頼性のファジイ集合

Fig. 2 のメンバーシップ関数を具体的に求めるには、同一被験者について負荷を変えて多くの実験を行なわなければならない。これは疲労や学習などの効果が加わり、正確な測定はむずかしい。そこで本研究では次の方法を用いる。

デジタル作業において、ある被験者が 100 回の試行中に制限時間以内のある時間でキーを押して、しかも成功した回数を調べる。そしてその時間の逆数と成功回数の関係をプロットすると、Fig. 4 のようにほぼ直線となる。2 本の太線は制限時間の異なる実験の結果である。

作業時間が短いということは、他の作業に追われて、この作業に十分時間がかけられなかったためと思われる。したがって、作業時間の逆数は作業負荷に相当する。また、十分長い時間をかければ成功率は 100% になると思われるので、太線を細線のように折線で近似すると、これは Fig. 2 のメンバーシップ関数に相当する。この方法によればメンバーシップ関数の同定は非常に簡単である。

制限時間を変えるとメンバーシップ関数はほぼ平行移動した形となっており、Fig. 2 で述べた仮

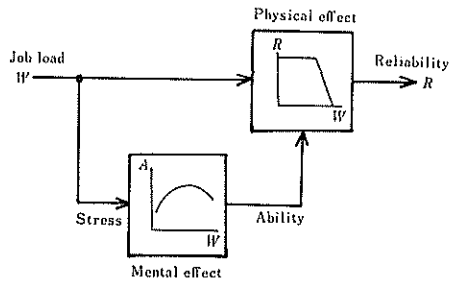


Fig. 6. Structural model (single job).

定が検証されたといえる。

3.2 ストレスと能力の関係

特定の被験者の能力の変化は上記のようにメンバーシップ関数の平行移動で表せるが、被験者が変わるとメンバーシップ関数の形が異なるので、ストレスと能力の関係を一般的に表現するために、メンバーシップ関数の面積をその人の能力と考える。一方、制限時間は短くなるほどストレスは増すと考えられる。そこで被験者全員の能力と制限時間の逆数との関係を調べると Fig. 5 のようになる。図中の白丸は全被験者の平均値で、縦の棒は標準偏差を表す。横軸をそのままストレスの強さと見ると、これは前節 (iii) で述べた心理学の研究成果とよく一致している。

以上の結果をまとめると、1人1作業のときのモデルは Fig. 6 のようになる。1人2作業のときのストレスは既述のように総負荷によって定まるから、そのところは Fig. 3 に示したように和の形となる。

3.3 能力の配分

上記の能力をどのように各作業に配分するかは被験者の性格、作業の種類、負荷など、いろいろの因子が関係する。本研究では影響する因子を少なくするため、2作業ともデジタル作業とし、重要度も等しく設定した。2作業の負荷（制限時

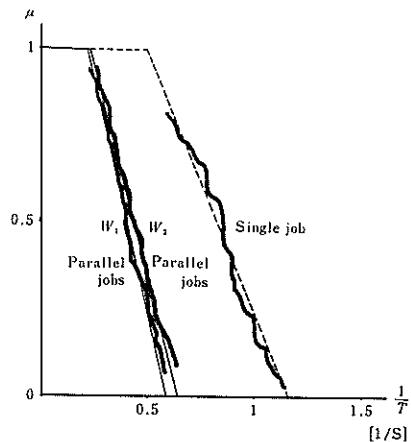


Fig. 7. Example of ability-allocation (parallel jobs).

間) が均等の場合の実験結果を Fig. 7 の W_1 , W_2 に示す。これはほとんど等しいことがわかる。次に負荷を2倍（制限時間を半分）にした1作業の実験結果を示したのが同図の右側の線である。これは $(W_1 + W_2)$ の線（同図の破線）とほとんど一致する。すなわち、2作業時の総合負荷はそれぞれの負荷の和になることと、両作業の条件が同じなら能力配分は五分五分であることが証明された。

また、一方の負荷を増し、他の負荷を減じた場合も総合のメンバーシップ関数はほとんど不変であることがわかった¹⁰⁾。これは両作業共デジタル作業であるため、被験者はまとめて一つの作業のように感じ、ストレスが変化しないためであろう。ただし、両作業への能力配分は均等ではなく、Table 1 に示すように被験者の反応は三つのタイプに分かれる。第1のタイプは忙しい作業を一生懸命やろうとするタイプで、いわば完全主義者である。第2のタイプは無理な作業は手を抜いて、全体としての成績を上げる効率主義の人間の集り

Table 1. Types of Concentration-Allocation.

	Types of subjects	Number
Types 1	Allocate concentration to heavy load job	12%
Types 2	Allocate concentration to light load job	35%
Types 3	Allocate concentration equally to both jobs	53%

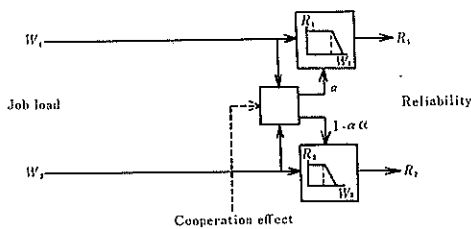


Fig. 8. Structural model ($W_1 + W_2 = \text{const.}$).

といえる。第3のタイプは作業の忙しさとは無関係に均等に能力を配分する人である。

以上の結果から1人2作業で、両作業が同種類、かつ、総負荷量一定の場合のモデルはFig. 8のようになる。これによりFig. 3の構造モデルの正しさが検証され、同時に、要素の特性も同定することができた。

4. 2人3作業への応用

前章で求めた人間の信頼性モデルを多人数多作業問題へ応用する。すなわち、2人3作業で、各人はそれぞれ一つの作業を単独で受持ち、残りの一つは両者が協調して作業する実験を行った。この協調作業はいわゆる並列冗長システムであり、2人の作業者のうちどちらかが正答すればそれを成功にカウントする。なお、三つの作業は皆デジタル作業で負荷も均等である。

実験結果をFig. 9に示す。これは作業者の1人の信頼性を記録したものである。まず、Fig. 9(a)は前章で述べた1人2作業の場合で、この2作業はほぼ均等負荷である。その結果はFig. 7と同じである。次にFig. 9(b)が2人3作業の結果である。これを見るとこの被験者は自分の受持ち作業W1のほうに能力を集中し、協調作業W2のほうは明らかに手抜きをしている。これは協調作業ではパートナーに頼っていることを示し、ごくふうに見られる現象である。本実験では協調作業の成否はすぐ表示されるので、被験者はその結果を参考にしながら自己の能力配分比を調整しているものと思われる。この効果をFig. 8で点線で示した。

以上の諸実験によりFig. 3のモデルは多人数多作業の問題にも十分有効であることが分かった。

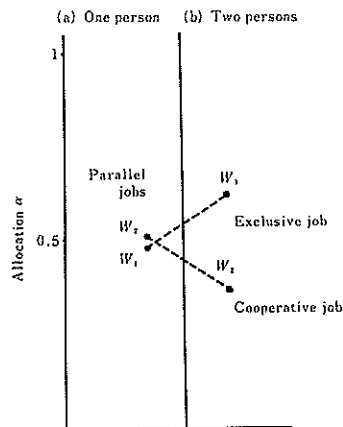


Fig. 9. An example of concentration-allocation.

総括

人間-機械系の安全評価のためには複雑な人間の信頼性を表現できるモデルを確立することが急務である。人間の犯すミスには不注意によるものと誤判断によるものがあり、前者は確率モデル、後者は構造モデルによる研究が行なわれている。確率モデルの研究はかなり進んでいるが、今後問題となるとと思われる後者については工学的な研究はほとんど行なわれていない。その理由は後者が複雑な思考プロセスを表すもので客観的な検証がむずかしいためである。本研究では論理的な思考作業を含む実験によって、構造モデルの正しさを実証し、かつ、その構成要素の特性を定量的に把握する方法を述べた。これは人間の不注意によるミスのモデル化から一歩踏み出して、心理的な誤判断のモデル化への端緒を開いたものである。とくに複雑な人間の特性を工学的にとらえるために、構造モデルやファジ集合による理論的研究と、論理的思考作業による実験的研究を併用して新しいモデルを構築した点に特色がある。

今後、この型のモデルはオペレーターの思考判断作業を含んだ人間-機械系の安全評価に重要な役割を果たすものと思う。

本研究は日産科学振興財団の助成により行なわれたものであり、同財団に深く感謝する。また、本研究の実験を担当した法政大学院生河野修一君、ならびに実験に協力された多くの被験者諸氏

にも感謝申し上げます。

文 献

- 1) Proc. IFAC Sympo. "Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems", Varese, Sept. (1985).
- 2) マン・マシン系における安全性特集, 計測と制御, 9(9), 1-69 (1980).
- 3) 原子力発電所における操作自動化によるヒューマン・ファクター, 政策科学研究所報告, CR-81-35 (1982).
- 4) A. D. Swain and H. E. Guttman: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, NRC (1980).
- 5) J. Rasmussen: Model of Mental Strategies in Process Plant Diagnosis, in "Human Detection & Diagnosis of System Failure" ed. J. Rasmussen, W. Rouse, N. Y. Plenum (1981).
- 6) 研究開発財団, 専門研究委員会: 人間の特性と近

代産業 (研究資料) (1980~1985).

- 7) T. Terano, Y. Murayama, N. Akiyama: Human Reliability and Safety Evaluation of Man-Machine Systems, *Automatica*, 19(6), 719-722 (1983).
- 8) T. Terano, S. Masui, Y. Murayama, N. Akiyama: Human Reliability in Parallel Jobs, in "The Analysis of Fuzzy Information" Vol. II ed. J. Bezdek, CRC Press (1987), 同上訳「並列作業時の人間信頼性」計測自動制御学会, ヒューマン・インターフェース部会, News & Report, 2(3), 281-288 (1987).
- 9) 寺野寿郎: システム工学入門, 34-35, 共立出版 (1985).
- 10) 河野修一: 人間の信頼性に関する研究, 法政大学卒業論文, 27-37 (1985).
- 11) 寺野, 増井, 村山, 秋山: ファジイ集合を用いた人間信頼性の構造モデル, 計測自動制御学会論文集, 23(1), 60-65 (1987).