

## A Microworld Approach to Identifying Issues of Human-Automation Systems Design for Supporting Operator's Situation Awareness

Makoto Itoh, Toshiyuki Inagaki

International Journal of Human-Computer Interaction: Vol.17, iss.1, 3-24 (2004)

### 1. 導入

- 人間中心の自動化(ヒューマンマシンシステムの安全性のために最終的な責任は人間側が負う)という考え方は、人間と機械を結合することにおいて、広く受け入れられている (Billings, 1997; Woods, 1989)
  - 安全性のために、システムの正しい状況の認識が不可欠である
  - しかし、システムが大きく複雑になれば、システム全体の把握は困難になる
    - 例) アメリカ・スリーマイル島原子力発電所の炉心融解事故(1979)
    - そのため、システムの一部を自動化し、人間のオペレータを手助けする

↓

高度な自動化システムにおいて、オペレータはその自動化が「何をしているのか、なぜそれをしているのか、次に何をするのか」といったことを理解しそこなう (Sarter & Woods, 1995a, 1995b)
- 複雑なシステムにおいて、どのようにオペレータの状況認識の手助けを出来るかという問題が重要になっている (e.g., Edwards & Lees, 1974)
  - 状況認識のモデルの開発 (e.g., Bedny & Meister, 1999; Endsley, 1995b; Smith & Hancock, 1995)
  - 新しいシステムやディスプレイがどの程度状況認識を改善するのかを評価するための方法の提案 (Adams, Tenney, & Pew, 1995; Endsley, 1995a)
    - しかし、まだ明確にオペレータの状況認識の手助けは出来ていない。そのため、何が状況認識に影響を与えているのかを明確にする必要がある。
- 本研究では、ヒューマンマシンシステムにおける状況認識、意思決定、行動の実行にかかわる障害管理行動の認知プロセスを調査する
  - マイクロワールドを用いて 2 つの実験を行う

### 2. 監視制御下における状況認識

- 現在のヒューマンマシンシステムは、人間が、断続的に使用者と制御プロセスをつなぐコンピュータから情報を受け取ったり調整をしたりする半自動システムである
  - human supervisory control model (Sheridan, 1992, 2002) で示されている (Fig.1)
  - 人間は、システムの間違ひを見つけるために監視し、必要ならば適切な処理を

しなければならない

→ そのためには正しい状況認識が必要である

- しかし、自動化システムが複雑に、高度になるにつれて制御プロセスやコンピュータの状態を理解するのは困難である
    - 状況認識の喪失は、以下の 1 つ以上の事が組み合わさることで起きる (Billings,1997)
      1. コンピュータ内の自動化機能の複雑さ
      2. 複数の自動化機能間の明確でない相互依存関係
      3. コンピュータの自己主導的な振る舞い
      4. 人間のオペレータに返される不十分なフィードバック
  - 状況認識の研究が多く行われている
    - Endsley(1995a)は状況認識の段階を以下のように定義している
      - レベル 1：何かが起きていることの知覚
      - レベル 2：何が起きているかの理解
      - レベル 3：近い将来の予測
- この定義を基に、シナリオの途中で変数の状態を尋ねることで実験内で状況認識の測定が出来る(Endsley, 1995a)

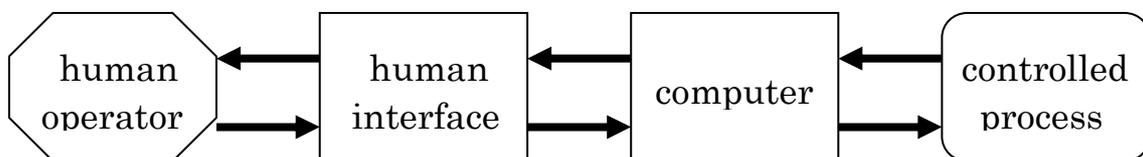


Fig.1 Supervisory control.

### 3. マイクロワールド

#### 3.1 プラント

- 制御プラント内の流体の質の維持をする
- 制御プラントは A~C の 3 つのサブシステムからなる

##### サブシステム A

- 以下の要求を満たすために生産流体の質を調整するためのシステム
  - 温度要求：サブシステム B に送られる際の温度は 50~70℃
  - 流量要求：サブシステム B に送られる際の流量は 14~22
- それぞれの測定は tank1、2 で行われる
- Tank2 の測定で流体の質が要求通りになっていなければならない

##### サブシステム B

- 生産流体を活用するためのシステム

- 使用されることで流体の温度は室温まで落ちる(30°C)

### サブシステム C

- 流体の一部を廃棄として処分するためのシステム
- 廃棄した分はサブシステム A の main pump で補われる

### プラント内の要素の説明

- 測定器

FR1～4：流量測定器

D1、D2：水位測定器

T1、T2：温度測定器

- ポンプ

main pump：流体を足すためのポンプ(スイッチを入れてから動作するまで数秒の遅延がある)

auxiliary pump：流体を足すためのポンプ(このポンプで足される流体は温度が低い)

waste：流体を廃棄するためのポンプ

emergency pump：流体を廃棄するためのポンプ

- ヒータ

heater1、2：流体を温める

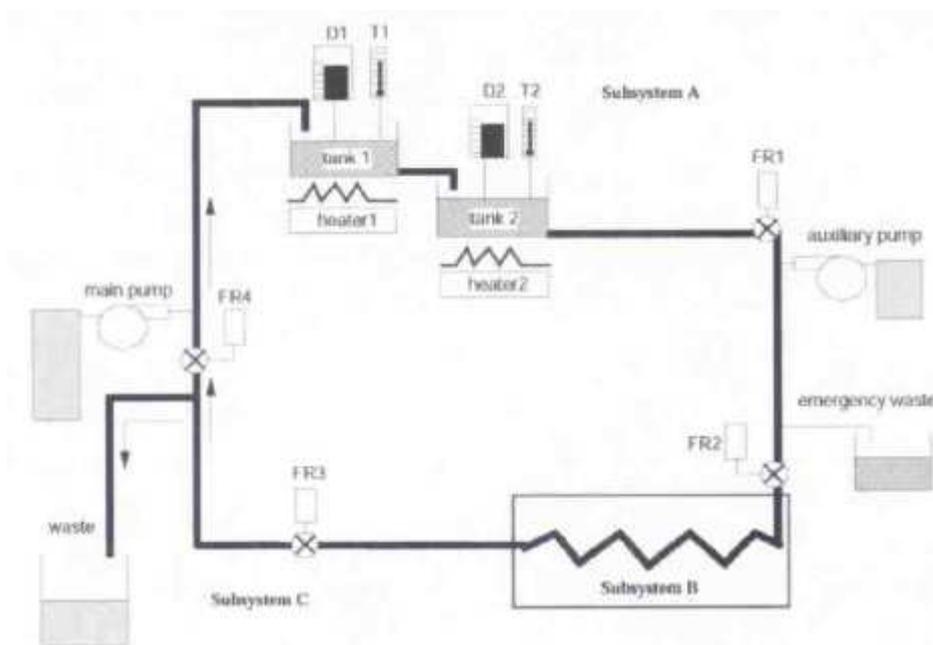


Fig.2 Fluid circulation microworld.

## 3.2 不具合と事故

実験で使用するプラント(Fig.2)は次の3つの不具合を起こす

- ① 水位測定器の不具合

- 測定値の読み間違いをすることがある  
読み間違いの大きさは時間とともに線形的に大きくなる
  - 測定値の読み間違い自体は流体の質に影響を与えない
  - “reset Button”を押すことで標準に戻り、読み間違いは消える
- ② ヒータの不具合
- Heater1、2ともに流体を温められなくなることがある
  - “restart button”を押すことで通常の状態に戻る
  - ※ 流体の温度は main pump 付近でおよそ 30°Cであるが、Tank1 でおよそ 50°Cに温められ、さらに Tank2 でおよそ 70°Cに温められる
- ③ パイプの破裂
- パイプの破裂は以下の3段階に分けられる
    - (a) 初期段階：流体の10パーセントが失われる
    - (b) 第二段階：指数関数的に流体が失われる(初期段階から80秒後に以降)
    - (c) 第三段階：すべての流体が失われる(第二段階から30秒後に以降)
  - ※ もし Tank2 とサブシステム B の間で第三段階に入り、7秒間何も行われなかった場合、事故が発生する
  - 初期段階の場合、“repair button”を押すと直すことができる
  - 第二段階の場合、auxiliary pump も起動しなければならない
  - 第三段階の場合、事故を防ぐために、“repair button”を押してから7秒間はプラントを停止しなければならない

### 3.3 自動制御システム

- 3つの自動制御システムを使用することが出来る
  - (a) main pump を制御する自動供給システム
  - (b) emergency pump を制御する自動供給システム
  - (c) 事故を防ぐためにプラント全体を停止する自動シャットダウンシステム
- Fig.3はFR1を基にして、各システムが起動する or しないの閾値を表している

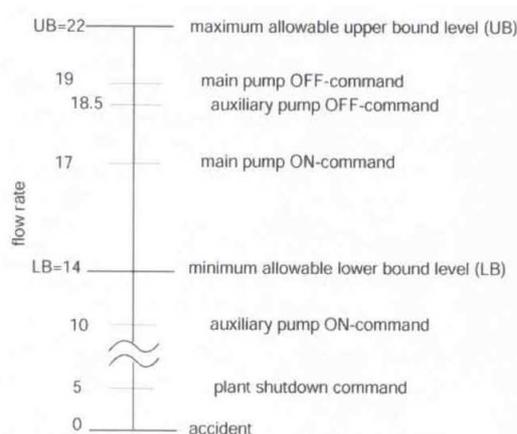


Fig.3 Activation and deactivation thresholds for automatic control systems.

## 4. 実験 1

- 目的  
自動制御システムを使ったオペレータがどのように状況認識を失敗するかを見る
- 参加者
  - 大学院の学生と学部の学生合わせて 7 人
  - 謝礼金あり(成績のよかった上位 2 名にはボーナス)
- タスク
  - メインタスク  
プラント(Fig.1)を出来る限り要求を満たすように操作  
プラントの不具合の対処  
※ 事故(サブシステム B への流量が 0)を起こした場合、タスクの失敗とする
  - サブタスク  
次の 2 つのいずれかのタスクを行う  
(a) 紙に書かれた英単語、英文の書き写し  
(b) 推論を必要とする課題(例 : Fig.4)
- ヒューマンインターフェース  
プラントの状態の表示(流量、温度など)とポンプなどの操作(Fig.5)

There are seven propositions, A through G. Three students, Rhea, Sarah, and Tiffany have investigated the propositions.

(1) Assuming Propositions D, Rhea proved Proposition C. Based on that, she proved Proposition G.

(2) Assuming Proposition F, Sarah proved Proposition C. Based on that, she proved Proposition B.

(3) Assuming Proposition A, Tiffany proved Proposition G. Based on that, she proved Proposition D, and she further proved Proposition F.

The students have confirmed that every proof given in (1) through (3) is correct. They are now investigating propositions which are equivalent to Proposition C. How many propositions can they find, excluding Proposition C itself?

Fig.4 An example of a problem-solving subtask.

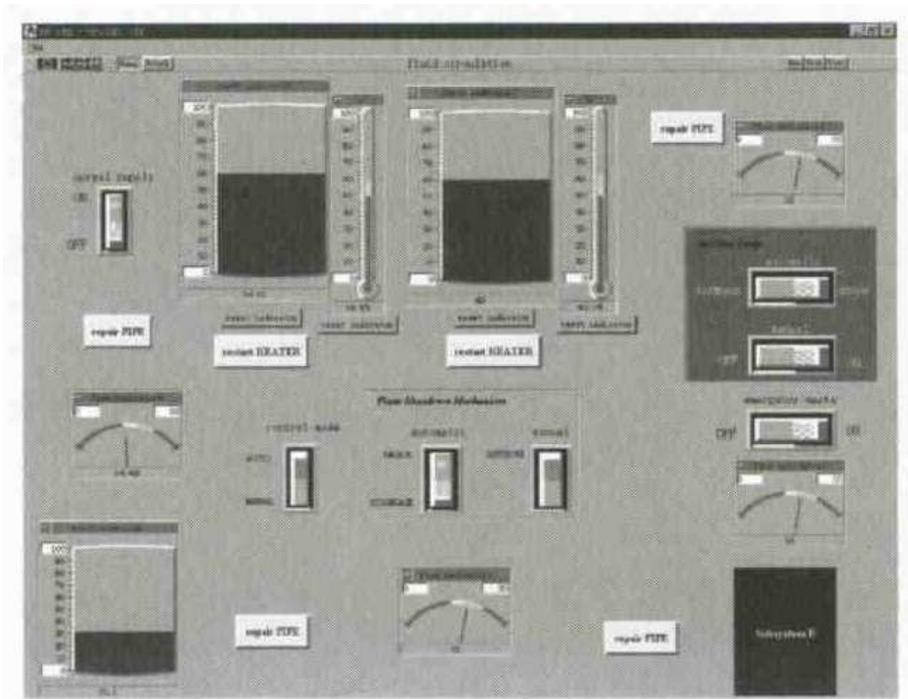


Fig.5 Control panel.

### 実験計画

- 5日間にわたって実施(1h/日)
- 以下のシナリオで行う(Table 1)
  - (a) 不具合は起こらない
  - (b) 1回だけ不具合が起こる
  - (c) 2回不具合が起きる(間隔は70秒以上おく)
  - (d) 2回以上の不具合が起きる(間隔は70秒以内)
- サブタスク
  - 2日目と4日目：英語の書き写し
  - 3日目と5日目：推論を必要とする課題
- 操作の権限
  - 実験参加者は自動制御システムを好きなときに使ってよい

### 手続き

- 1日目の最初に口頭で実験の目的、プラントの概要、不具合への対処などを説明
- 1日目のすべての試行と2~5日目の最初の試行で、手動での操作方法と不具合が起きたときに何が起きているかを説明した(このトレーニングフェーズではサブタスクは行わない)

Table 1 : Schedule for Experiment 1

Day	Trial					
	1	2	3	4	5	6
1	n	p(60)	h1(90)	p(60)	p(60)	—
2	p(150)	n	h1(100)	n	p(40)	—
3	h1(250)	p(130)	n	n	h2(180)	l(100) $\omega = +0.2$
4	h1(120), l(200), $\omega = +0.2$	h2(120), p(180)	l(70) $\omega = -0.2$ , p(100)	n	—	—
5	p stage 2 (80), l(150) $\omega = +0.2$	h1(110), p(180)	l(70) $\omega = -0.1$ , p(110)	n	l(130) $\omega = -0.2$ , p(150), h2(180)	—

*Note.* n = no failure; p = pipe rupture; hi = heater i failure; l = level indicator failure. x(y) denotes the Event x occurs at time point y.  $\omega$  denotes coefficient for linear growth of error in the reading of the level indicator.

## 結果と考察

### ● Mode confusion

— 自動制御システムの状態の誤認識があった

例) 2日目の2試行目の実験参加者 TO の場合

auto-supply system を使った

→ 本当は auto-shutdown system を使うつもりであった

時々スイッチをさわっていたが、意味のない動作

◇ ヒューマンインターフェースのデザインの観点からの問題

- ・ スwitchの状態と実際の main pump の状態が一致しない(スitch操作によって main pump が起動したのかどうか分からない)
- ・ 自動制御システムが現在何をしているかの明確な情報がない(Fig. 6)

⇒ システム内で行っていることに関しても、明確なフィードバックは必要

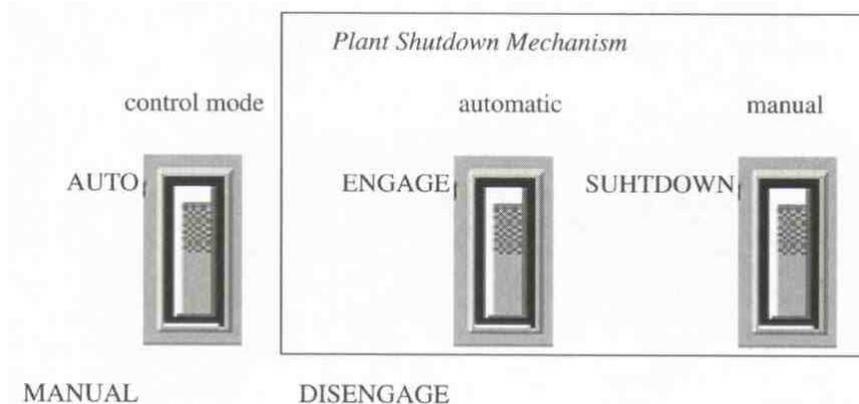


Fig.6 Location of switches for mode selection of the auto-supply system and the auto-shutdown system.

- Automatic feedback control hides a failure

Table 2 はパイプの破裂が起きたときに対処が行われた段階と main pump の制御モード(自動 or 手動)の関係を表している

1. 自動化システムは異常を隠すことがある

Manual : パイプの破裂の 18 件中 14 件(77.8%)は初期段階で修理が行われている

Automatic : パイプの破裂の 31 件中 6 件(19.4%)しか初期段階で修理が行われていない

→ Automatic の場合、初期段階までは減ってきた流量を自動的に補ってくれるため

2. システムの自動化はオペレータの状況認識が欠如している時、効果がある

— 第二段階で、22 件中 6 件は事故が起きる前にプラントが自動制御システムによってシャットダウンされている

→ オペレータが状況認識を行えていない時(パイプの破裂に気づいていない)、自動制御システムによって数件は事故が防がれた

3. システムの自動化は時間的にさしせまった状況において効果がある

— 49 件中 3 件は事故が起きているが、いずれの場合も初期段階までは自動化システムは動作していた

→ プラントを停止させないために auto-shutdown system を止めて手動で問題に対処しようとしたが、時間が足りなく事故が発生してしまった

Table 2 : Awareness of Pipe Rupture and Control Mode of the Main Pump

Pipe Rupture	Control Mode of the Main Pump	
	Automatic	Manual
Repaired in the first stage	6	14
Repaired in the second stage	22(6 <sup>a</sup> )	4
Accident occurred	3	0

<sup>a</sup>The plant was shut down by auto-shutdown system six times in 22 cases.

## 5. 実験 2

- 目的

ヒューマンインターフェースがどのように状況認識に影響を与えるか調査する

- 参加者

— 学院の学生と学部の学生合わせて 16 人

— 謝礼金あり(各試行で最大スコアの 90%を獲得すればボーナス)

- タスク
    - 実験 1 のメインタスクのみ
    - 要求を満たした流体を生産すると得点加算される(最大 6000)
  - ヒューマンインターフェース
    - グループ A : Interface A を使用(Fig.7)
    - グループ B : Interface B を使用(Fig.8)
- ※ Interface A、B はスイッチ、測定器などの配置が違うだけで同じ内容

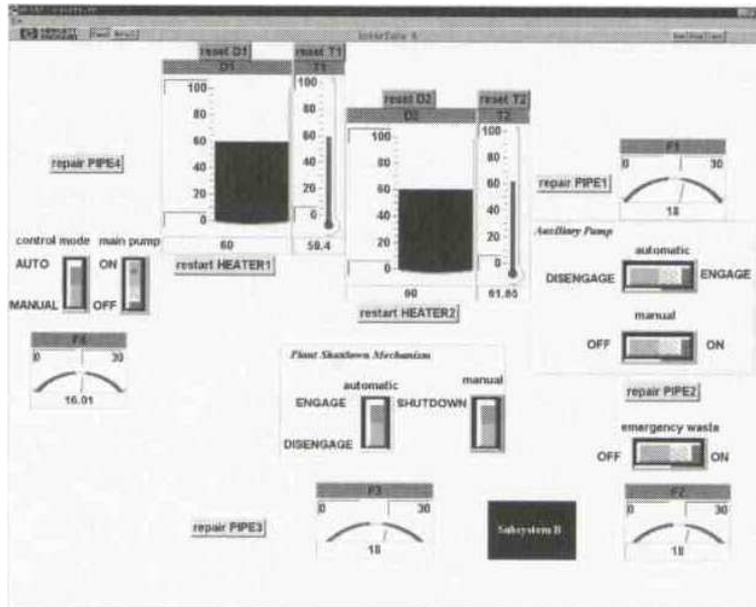


Fig.7 Interface A

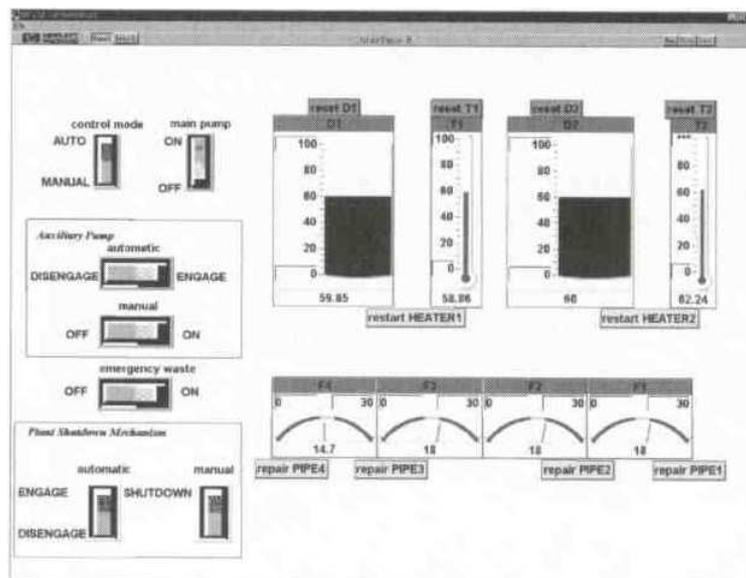


Fig.8 Interface B

## 実験計画

- 3 日間にわたって実施(1h/日)
- トレーニングフェーズ(手動での操作方法を学ぶため)
  - 最低 5 試行行う
  - いくつかプラントについての質問がされる
  - 最後の 3 試行のうち 1 回でも最高スコアの 80%(4800)を獲得し、プラントについての質問に答えられたら本番に移行
- データ収集フェーズ(本番)
  - 以下の 6 試行+4 試行(不具合が起きない試行)を実施
    - F1: Level indicator of Tank 1 (D1) started to give an erroneous reading when 286 sec elapsed from the beginning of a trial. The coefficient,  $\omega$ , of the error growth with time in the reading of D1 is +0.2.
    - F2: Level indicator of Tank 2 (D2) gave an erroneous reading when 169 sec elapsed. The coefficient  $\omega$  is -0.2.
    - F3: The fluid began to leak at a site between Tank 2 and FR1 when 39 sec elapsed.
    - F4: Heater 1 failed when 286 sec elapsed.
    - F5: Heater 1 failed when 234 sec elapsed.
    - F6: Heater 2 failed when 169 sec elapsed.
  - スケジュールは Table 3

Table 3 : Schedule for Experiment 2

Participant	Trial									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Group A										
s1	F5	F3	N	N	N	N	F2	F4	F1	F6
s2	F4	N	F2	N	F3	F6	F1	N	N	F5
s3	F3	F5	F6	F4	N	F2	N	N	F1	N
s4	F4	F2	N	N	N	F3	F1	F5	N	F6
s5	F6	F5	F1	N	N	F4	N	N	F2	F3
s6	F2	N	F4	N	F1	F6	N	F3	N	F5
s7	F2	F4	N	N	F3	F6	N	F5	F1	N
s8	F4	N	F1	N	F6	N	F3	N	F2	F5
Group B										
s9	F6	F3	F1	F5	N	F2	N	N	N	F4
s10	N	F3	F1	F2	F5	F4	N	F6	N	N
s11	N	F4	F3	F2	N	F6	N	F1	F5	N
s12	F3	N	N	F6	F4	F5	N	N	F2	F1
s13	N	N	N	F2	F5	N	F4	F3	F6	F1
s14	F3	F5	N	F6	N	N	N	F4	F1	F2
s15	F3	N	F2	N	F1	F6	F4	F5	N	N
s16	F3	F2	F4	N	N	F1	N	F6	N	F5

## 手順

- 最初に実験の目的、手順を説明
- パフォーマンスは得点で測定

## 結果と考察

- Acquiring skills for controlling the plant
  - トレーニングフェーズでの学習スピードはグループ A の方が早いように思われる(Fig.9)

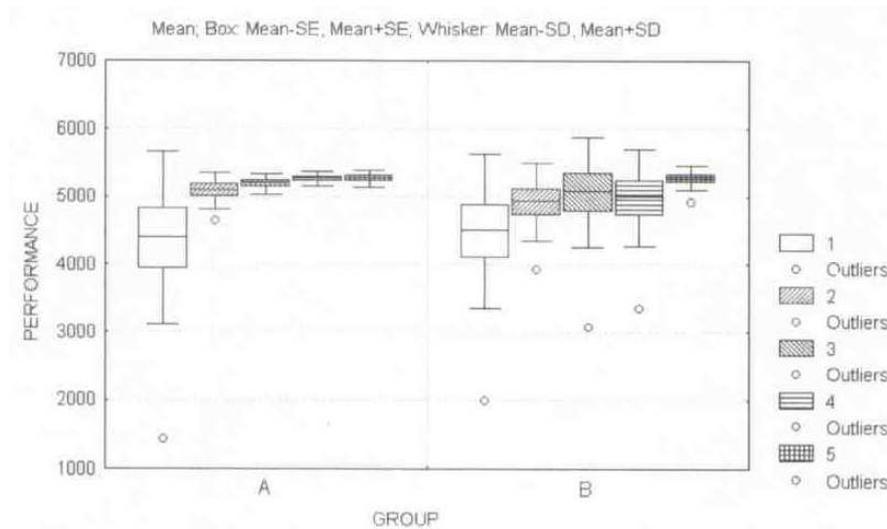


Fig.9 Learning curves for acquisition of controlling skills.

- Fault management
  - 6 試行中 4 試行(F1、F4、F5、F6)において、不具合の発見がグループ B よりグループ A の方が早かった(Fig.10)
  - time-dependent human reliability model(Dougherty & Fragola, 1988)を用いた分析結果
    - ◇ 打ち切りデータが、ログを使ったグラフのどこかに位置するとみなされる例) Fig.11 のグループ A の条件 F1 の場合
    - ◇ グラフの形状を決定する二つのパラメータ  $t.5$ (経過時間のメディアン値)と  $t.95$ (発見人数が 95%になる位置)を求める
    - ◇ 本実験での計算結果は Table 4
      - ⇒ グループ間で有意差はなかった
  - ヒューマンインターフェースのデザインが、不具合の発見に影響を与える
    - ◇ 水位測定器の不具合の発見(F1、F2) → A の方が発見は早い
    - ◇ パイプの破裂の発見(F3) → A、B で違いなし
    - ◇ ヒータの不具合の発見(F4、F5、F6) → A の方が発見が早い

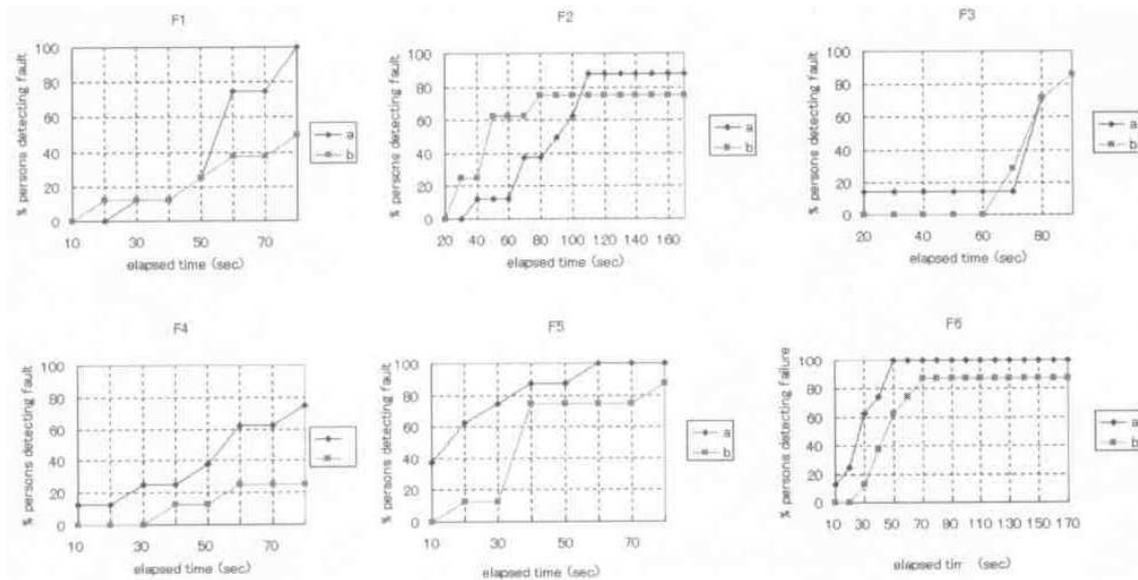


Fig.10 Cumulative plots of time to detect a failure.

Fig.11 An example of log-normal plots of time to detect a failure(Group A, F1).

Table 4 : Parameters of Log-Normal Plots

Failure	A		B	
	t.5	t.95	t.5	t.95
F1	54	88	111	1173
F2	80	223	49	153
F4	61	697	157	1300
F5	16	64	42	90
F6	26	63	45	98

## 6. まとめ

- ヒューマンインターフェースと、人間と自動化システムの責任の調整について以下の3つのことが示された
  1. たとえオペレータが制御モードを切り替えた(自動 ⇄ 手動)としても、制御状態と現在の動作状態についてのフィードバックをオペレータに与えるべきである(実験 1)
  2. 差し迫った状況では、システムの制御の権限をオペレータから自動制御システムに譲るべきだろう(実験 1)
    - 実験 1 において、オペレータのとった不具合への対処が間に合わなく事故が

発生した

- この結果は、「状況に応じて行動の権限と責任を人間と自動制御とで動的に調整する必要がある(Inagaki, 2003)」を支持するものである
- 3. ヒューマンインターフェースのデザインは、オペレータのシステムの制御過程の認知モデルに非常に影響を与える(実験 2)
- 自動化システムへの過度の依存を防ぐために、さらなる研究が必要である
  - 自動制御システムには限界がある
  - オペレータの自動化システムへの過度の依存によって起こる事故を減らすために、その限界について明確にフィードバックを返すべきである(Itoh, Inahashi, Tanaka, 2003)