

第4章 意思決定支援情報の時間的脆弱性の検討

4.1 はじめに

第3章の結果から「GO/ABORT」メッセージの提供は、エンジン故障に対する人間の意思決定を支援する効果があることが確かめられた。しかしこの意思決定支援情報は V_1 付近の速度域における意思決定の時間的制約性から、支援情報の妥当性が短時間しか保持できない。これは Phase 2においてエンジン故障が発生した場合に認知や操作の遅れが生じると、その間も機体は增速を続け滑走路の残りが少なくなるため、RTO すると滑走路で機体を停止できなくなるからである。そこで意思決定支援システムは「ABORT」のメッセージを「GO」に切り替えるが、このメッセージの変化が人間を混乱させることが分かった。そこでこの支援情報の時間的制約性に起因した性質を支援情報の「時間的脆弱性 (Time-Fragile Characteristics)」^[68] と呼ぶ。第3章で述べられた実験終了後に行なった被験者へのインタビューで支援情報の時間的脆弱性に関して次のようなコメントが得られた。

「「ABORT」と出たとき、反応が遅れてオーバーランしてしまい、自信が無くなった。メッセージが切り替わると何の操作をしていいのか分からなくなる。」（被験者 A）

「「ABORT」から「GO」へのメッセージが変化したのに RTO してしまい、オーバーランしてしまった。離陸を続けた方が良かったと思った。」（被験者 B）

「意思決定支援メッセージの変化に混乱した。メッセージに従うことには不安を感じ、自分の判断を優先するようにした。」（被験者 C）

「「ABORT」から「GO」へのメッセージの変化は混乱した。自分の判断が遅れたと感じ、自信を無くした。メッセージの切り替わりが早すぎると思う。」（被験者 D）

「「ABORT」と出た後「GO」になると不安を感じた。RTO できると分かっていたのにできないことに自信を無くした。」（被験者 E）

「「ABORT」という支援メッセージに従い、RTO を行おうとしたところメッセージが急に「GO」に切り替わり、そのまま RTO してオーバーランになってしまった。しばらく支援メッセージに従

う気になれなかった.」(被験者 F)

「「ABORT」と出たのに「GO」と支援メッセージが切り替わることが何度かあった。あとどの位で支援メッセージが変化するのか分かったらよいと思った。このように急に支援メッセージが変化してしまうと何をしていいか分からなくなってしまう.」(被験者 G)

「「ABORT」から「GO」へ切り替わることに混乱してしまった。支援メッセージを出さない方が混乱はしなくて済むのではないか.」(被験者 H)

「支援メッセージが「ABORT」から「GO」に切り替わると、反射的に RTO してオーバーランしてしまうことが多かった。これには混乱した、むしろ「GO」だけの方が躊躇せずに離陸を継続できるのではないかと思う。間に合うつもりで RTO したのにメッセージが切り替わってオーバーランになった時は意思決定支援システムに不信感を感じた.」(被験者 I)

インタビューの結果から、意思決定支援情報の時間的脆弱性が意思決定支援システムに対する人間の信頼感に悪影響を及ぼしていることがわかる。そこで意思決定支援情報の提示方法を改善することで混乱を緩和する方策を考える。

ここで意思決定支援情報に対する人間の情報処理のプロセスを考えてみる。

エンジン故障が発生し、「ABORT/GO」のメッセージが提示されると、人間はそれを視覚刺激として注意 (Attention) をメッセージに割り当てる。これが支援情報に対する気づきとなる。

もしこの支援メッセージがあまり馴染のないものであれば、そのメッセージを読み取り解釈する必要がある。十分に訓練された被験者であれば、メッセージの色彩、幾何学的形状、出現位置などにより意思決定支援メッセージに対して、文字の解釈を行わずともその意味を認識できるようになる。この段階が支援メッセージの意味の理解である。

意思決定支援情報の内容と現在の状況を踏まえて人間は意思決定を行い、必要であれば行動を起こす。また支援メッセージの提示に慣れると、RTO 操作開始までの反応時間は短くなることが以前の予備的な実験から分かっている。

Rasmussen は人間の行動はスキル (Skill), ルール (Rule), 知識 (Knowledge) の 3 つのレベルの認知活動によって実現されているとする SRK モデルを提唱している [95]。意思決定支援メッセージに対する素早い応答は SRK モデルにおけるスキル・ベースに近い行動と思われる。しかし行為が素早く自動化されると、その行為の中止は困難になることは、インタビューの被験者 A, B, F のコメントに現れている。このような行為の予期せぬ中断がなされた場合、人間の心的ショックは大きいものと思われる。第 3 章で述べられた実験においては意思決定支援システムに対する信

頼感は計測されなかったが、実験後のインタビューから意思決定支援システムに対する不信感が読み取れる。もしこのような不信感が強くなった場合、被験者 C, F のコメントが示唆するように、人間が支援を受け付けなくなる可能性さえ考えられる。このような人間の不信感は地面接近警報装置（GPWS）への不信に関連した CFIT 事故などの例を挙げるまでもなく、人間一機械系の不整合を誘発し、システムに潜在的な危険を内包することになる。

そこで支援情報の時間的脆弱性を人間が陽に理解することで、意思決定支援システムに対する信頼感を高め、支援情報の脆弱性に起因した混乱を緩和することを考える。具体的には意思決定支援情報が提示された場合、その支援情報のもつ有効時間を示すことで、支援情報の時間的脆弱性に対する認識を高める。本章では、意思決定支援システムに変更を加え、認知工学的実験を通じて意思決定支援システムに対する信頼感や自己技量への自信を評価し、支援情報の時間的脆弱性に対する対策を議論する。

4.2 実験装置

4.2.1 実験装置の変更点

実験装置は第 3 章で用いられた機材に変更を加える。変更点として、実験装置の計算機をグラフィック・ワークステーション O2(Silicon Graphics, Inc.) から OCTANE(Silicon Graphics, Inc.) に移行する。この変更により計算機の処理が若干高速になる。またコントロール・パネルに意思決定支援情報の時間的脆弱情報を表示する。これに関しては次の項で説明する。

4.2.2 意思決定支援情報の時間的脆弱性の表示

意思決定支援情報の時間的脆弱性を示す情報表示機能を組み込んだコントロール・パネルの図を Fig.4.1 に示す。またこの付け加えられた部分の拡大図を Fig.4.2 に示す。これは視界画面の下に支援メッセージの時間的脆弱性を時間軸で表示するものである。時間軸で表示する理由は、離陸毎に機体重量が変化することやエンジン故障でスラストロスが発生した場合は機体加速度が変化するために、滑走路の長さや速度の次元で意思決定支援情報の有効量を示すと、その減少率が変化するので、意思決定のスケジューリングを行いにくくなるのではないかと考えたことによる。

計器内の棒状のオブジェクトが RTO / 離陸継続の意思決定支援情報の有効時間を示す。この棒状オブジェクトを Bar と呼ぶことにする。Bar は機械が滑走を始めて機体の速度が 80 kt を越えると出現する。これは 80 kt 以下の速度でエンジン故障が発生しても対応する時間が多く残され

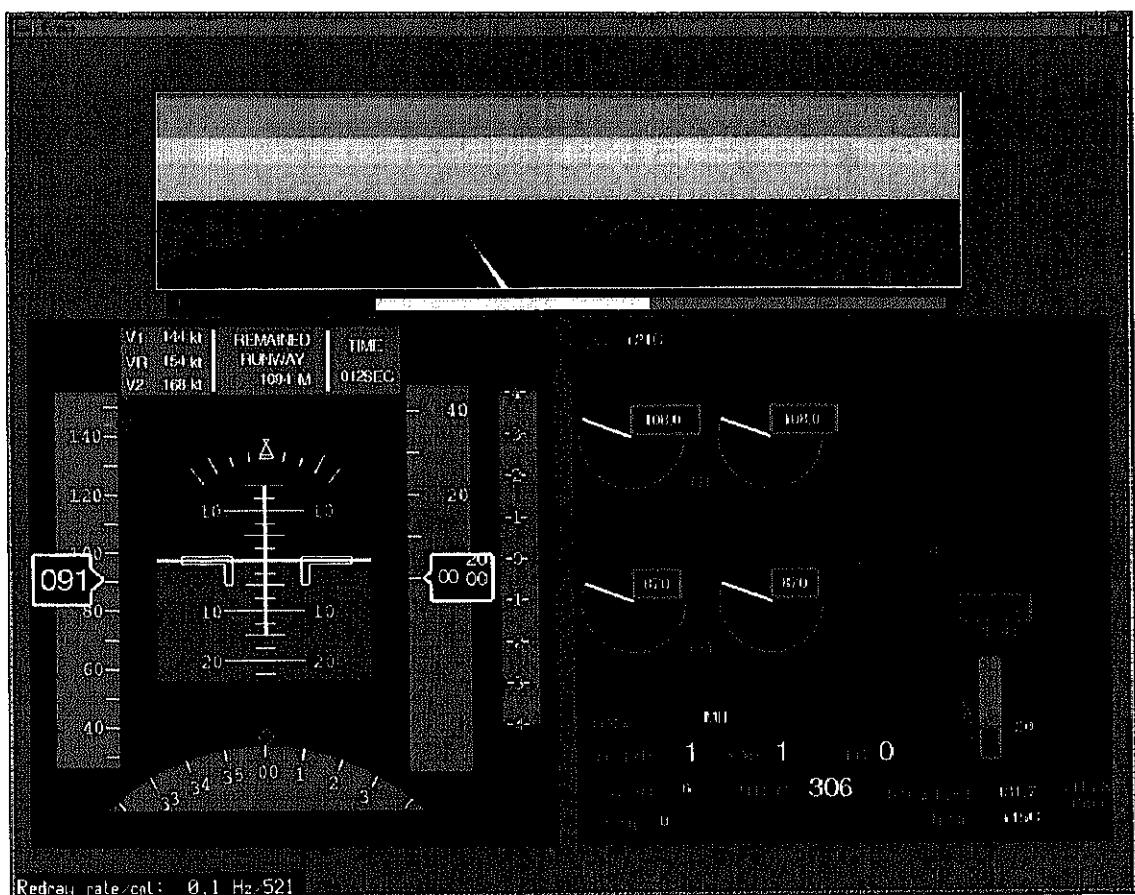


Fig. 4.1: 意思決定支援情報の時間的脆弱性を時間表示する情報を加えたコントロール・パネル



Fig. 4.2: Fig.4.1 の一部拡大図（正常滑走時の状態）

ているため、意思決定支援情報は不要であり、従ってその脆弱情報も不要であると考えられるからである。Bar は出現直後は2色に色分けされている。左側の黄色の部分の長さが RTO 可能限界速度に機速が到達するまでの残りの時間を示しており、この領域内であれば RTO した場合に滑走路内で機体を停止させることができる。右側の緑色の部分は離陸継続の領域を示している。機体が加速を続け、もはや機体を滑走路内で停止させることができなくなったとき Bar の黄色い部分が無くなり緑の領域が減少し始める。この状態は Fig.4.3 のようになる。Bar 全体の長さは機体が

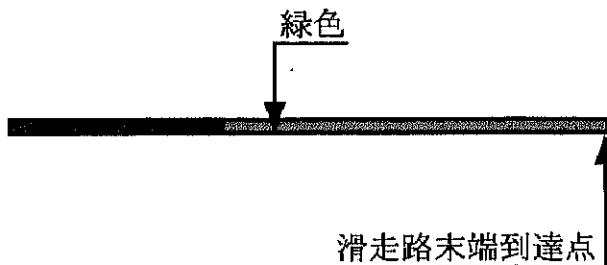


Fig. 4.3: 機速が離陸継続領域に入った状況での Bar の様子



Fig. 4.4: RTO 可能領域でエンジン故障が発生した場合の Bar の様子

現在の加速度を維持したまま機体が滑走路末端に到達する時間を示している。従って Bar の緑の領域が無くなった瞬間、機体は滑走路の外に飛び出しオーバーランする。そこで被験者はオーバーランを防ぐために緑の領域が残っている間に機体をリフト・オフさせなければならない。

もし 80 kt 以上の RTO 可能な速度で意思決定支援システムがエンジン故障を検知すると、意思決定支援システムは「ABORT」のメッセージを提示する。それと同時に Bar の黄色い部分が赤色になる。この様子を Fig.4.4 に示す。機体が加速を続けている限りこの赤い領域が減少していく。しかし赤い領域が残っている状態で RTO 操作を即時に開始すれば機体を滑走内で停止させることができる。

時間の目盛りは付加していない。目盛りを付けると見づらくなることと、オブジェクトの長さの変化率は常に一定であるため感覚的に時間を認識可能であると考えたからである。

4.2.3 被験者のタスク

第 2, 3 章の実験と同様、被験者のタスクは航空機の離陸滑走において、状況に応じた安全な判断・操作を行うことである。即ち離陸滑走中に横風を受け Yawing が生じた場合、被験者はコントロール・スティックを用いて補正操作を行わなければならない。また、エンジンが故障した場合には RTO / 離陸継続の判断・操作を行う。

4.3 実験の方法

4.3.1 実験計画

実験は以下の 3 要因で計画する。

1. エンジン故障の発生時刻 (Phase)

意思決定支援情報の時間的脆弱性に関する評価を行うことから Phase 2, 3 に着目する。ここでは特に意思決定支援メッセージが切り替わる状況での被験者の反応を観察したいので、Phase 2 を 2 つに分け、 V_1 到達時刻を T_{V_1} としたとき、 $T_{V_1} - 1.68$ 秒から $T_{V_1} - 1.26$ 秒の間を Phase 2a、 $T_{V_1} - 1.26$ 秒から $T_{V_1} - 0.84$ の間を Phase 2b として定義する。Phase 3 については $T_{V_1} - 0.84$ 秒から T_{V_1} の間として定義した (Fig.4.5)。

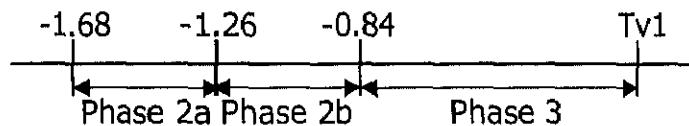


Fig. 4.5: Phase 2a, 2b, 3 の領域

2. 意思決定支援メッセージの時間的脆弱性の表示 (Availability of Time-Fragility Information)

第 3 章で述べられた G/A 型インターフェースに支援情報の時間的脆弱性を示す Bar を付加した Bar 型インターフェースの 2 種類を実験で使用し、脆弱情報提示の効果を評価する。

3. インタフェース体験順序 (Order of Presentation)

被験者の内半分は先に時間脆弱情報のない G/A 型インターフェースで実験を行い、次に時間脆弱情報のある Bar 型インターフェースで実験を行う ($\text{Bar} \rightarrow \text{G/A}$)。残りの被験者は逆のインターフェース体験順序 ($\text{G/A} \rightarrow \text{Bar}$) で実験を行った。

4.3.2 被験者

実験に参加する被験者は学部学生と大学院生の計 10 人である。全ての被験者は第 2, 3 章で述べられたシミュレータ、及び実験に参加した経験はない。各被験者には報酬として 1,500 円を実験終了後に支払った。また実験において 1. RTO を成功させる、2. 安全離陸を行う、3. Yawing を巧みに制御する、これらの点について高い成績を挙げた者には、成績に応じて 200 円、500 円のボーナスを支払った。

4.3.3 手順

実験は一人の被験者につき約2時間半にわたって行われた。実験の実施手順を以下に示す。

1. 教示

実験の目的、シミュレータの使用方法、コントロール・パネルの読み方、意思決定支援情報の表示法、離陸任務、謝金について書面で説明する。

2. トレーニング

安全離陸の遂行や Yawing の制御法を習得するため 4 回の正常運航の試行を体験させる。次にエンジン故障発生時の対処法を取得するために、Phase 1 から 4 までのエンジン故障発生の試行を最低 25 回体験させる。Bar 型インターフェースの実験前には Bar が示す情報の説明を書面で説明し、Bar が表示される状態で 3 回の正常運航の試行、14 回の Phase 1 から 4 までのエンジン故障発生の試行を体験させる。

3. データ収集

被験者に割り当てたインターフェース体験順序に応じて、G/A 型、Bar 型いずれかのインターフェースで 40 回の試行を実施した。エンジン故障はランダムに発生する。

4. インタビュー

実験終了後に、被験者の異常診断や意思決定支援システムへの心象を分析するためにインタビューを行う。

4.3.4 評価指標

本実験は次のような評価指標に対してデータを収集した。

1. エンジン故障発生時刻
2. 発生したエンジン故障に対する対処
3. RTO 操作を開始するまでに要する時間
4. 機軸とセンター・ラインとの 2 乗平均誤差 (RMSE)
5. 試行の正否
6. 被験者自身の判断・操作に対する自信 (Self-Confidence: SC)

被験者はどの程度の自信を持って RTO あるいは離陸継続の判断・操作を行えるか

7. 意思決定支援システムに対する信頼感 (Trust; T)

意思決定支援システムに対する被験者の信頼感はどの程度か

6, 7 は被験者の主観的な尺度で、0 から 10 までの 11 段階での評価をさせた。

4.4 実験結果と考察

4.4.1 離陸の安全性

意思決定支援メッセージに対する時間的脆弱情報表示の有無における離陸の安全性に違いがみられるか調べた。その結果、本実験においては時間的脆弱情報の有無に関わらず被験者は高いパフォーマンスを示していた。具体的には Phase 2 においては的確に RTO を行い、Phase 3 においては離陸継続を選択していた。このため時間的脆弱情報の有無に関わらず被験者はほぼ正確な判断・操作を行っていたことになる。

4.4.2 Trust, Self-Confidence の統計的評価

試行全体を通じて培われた被験者の自己の操縦技量に対する Self-Confidence、意思決定支援システムに対する Trust と時間的脆弱情報の関係を調べた。分散分析の結果、Trust, Self-Confidence とも時間的脆弱情報の有無では違いが認められなかった。

より詳細に分析すべく各 Phase 毎に Trust, Self-Confidence の性質に違いがみられるか分散分析を試みた。Phase 2a について Trust, Self-Confidence それぞれ有意差は検出されなかった ($F(1, 194) = 0.575, p < 0.45; F(1, 194) = 0.00275, p < 0.958$)。Phase 2b についても Trust, Self-Confidence それぞれ有意差は検出されなかった ($F(1, 196) = 0.145, p < 0.704; F(1, 196) = 1.524, p < 0.219$)。Phase 3 についても同様にそれぞれ有意差は検出されなかった ($F(1, 201) = 0.101, p < 0.752; F(1, 201) = 0.933, p < 0.335$)。

この理由について考えてみる。本実験においては G/A 型インターフェースを基本に実験を行った。G/A 型インターフェースは第 3 章実験で示されたように人間のエンジン故障に対する正しい意思決定に寄与する効果が確かめられており、G/A 型インターフェースだけでも高いパフォーマンスを達成できる。このため RTO / 離陸継続の判断も高い正確性で行いうることから Trust, Self-Confidence は元々高いレベルを維持しており、時間的脆弱性の情報を提示する事によるパフォーマンスの向上は顕在化しなかったものと思われる。トレーニング回数は第 3 章で述べられた実験では最低 10 回だったが、実験 2 では最低約 50 回のトレーニングを行っており、トレーニング終了の時点で既

に被験者の意思決定・操作は高い水準のスキル・ベース・レベルに達していた可能性が高い。また実験中において試行中に頻繁にエンジン故障が発生したため（全試行の75%），エンジン故障を被験者は予測できていたことが考えられる。実際には一人のパイロットが一生にそう何度も経験しない離陸中のエンジン故障^[53, 62]を短時間で頻繁に経験したことから、エンジン故障に対する意思決定や操作がスキル・ベース・レベルまで高められたため、このような結果が得られたものと思われる。また計器情報、エンジン故障警報、意思決定支援メッセージとも誤った情報を提示することがなかったため被験者は完全にそれらの情報に依存した状態となり、画面に現れる意思決定の引き金となる情報に自動的に反応して操作したことと考えられる。

4.4.3 反応時間

反応時間の平均値は時間脆弱情報無しが0.57秒、有りが0.55秒で分散分析の結果両者に有意差は見られなかった。第3章で述べられた実験で得られた反応時間よりも小さな値が得られており、前小節の結果とあわせて考えると、被験者の高い判断力が反応時間の短縮に影響を及ぼしたものと思われる。

4.4.4 意思決定支援情報変化の影響

第3章で述べられた実験から意思決定支援システムがメッセージを変更する場合、被験者の混乱を招くことが分かっている。本実験においてはこのような意思決定支援メッセージの変化は実験全体で7回みられた。これは第3章で述べられた実験に比べて少なく、統計的な評価は行えない。従って本実験結果の解析は定量的な評価より定性的な評価が適していると思われる。

4.4.5 Trust, Self-Confidence の動的な性質

被験者のTrust, Self-Confidenceの動的な性質について分析を試みる。Trust, Self-Confidenceが試行を重ねるに伴う変化を観察すると興味深い結果が得られた。ここでは特に興味深いと思われた被験者LのTrust, Self-Confidenceの動的な変化について詳細な分析を行った。

被験者 L

G/A 型インターフェース実験 被験者 L の G/A 型インターフェース実験での Trust, Self-Confidence の変化を Fig.4.6 に示す。エンジン故障が発生した場合、Phase 2a では時間的な余裕があり、RTO することが明確に認識できる。しかし Phase 2b では V_1 により近い速度で、判断時間の余裕のなさや被験者は機体を滑走路内で停止できるかどうかに対する不安や躊躇が発生するものと思われる。そこで Phase 2b に特に着目してみる。Phase 2b のエンジン故障の試行は Trial 5, 10, 11, 14, 26, 30, 34, 36, 40において生じた。被験者 L は Trial 34においては反応が遅れ、支援メッセージが「ABORT」から「GO」に変化した。そこで被験者 L は RTO を断念し離陸継続を行ったが、機体は滑走路末端において安全離陸条件を達成できず、かろうじて離陸に成功した。この時 Trust, Self-Confidence がそれまでの安定状態から落ち込む様子が Fig.4.6 で見られる。また Trial 10においては滑走路内で停止することができたが、残りの滑走路長はほとんど無かった。このことが Trust, Self-Confidence の落ち込む原因と思われる。Trial 5, 11, 14, 26, 40においては RTO に成功したものと Trust, Self-Confidence 共に低下が見られる。支援メッセージの時間的脆弱情報が無い状態では、被験者は RTO 操作に許される時間があとどの位かを知ることはできない。判断余裕のない Phase 2b においてはこれは被験者 L の Trust, Self-Confidence を引き下げる要因になったと思われる。

Phase 3 におけるエンジン故障発生もまた被験者に困難な判断を要求する。本来 V_1 到達時点で被験者は RTO か離陸継続かの判断を既に決していかなければならぬ [53]。これは V_1 の定義がエンジン故障を認知する速度ではなく RTO 操作を開始する速度であることによる。Phase 3 におけるエンジン故障の場合、機速は V_1 より小さいにも関わらず被験者は離陸を継続しなくてはならない。この定義は直感的ではなく被験者の適正な意思決定を阻害する要因となる。Fig.4.6において、Trial 1, 7, 21, 27, 39 で Phase 3 のエンジン故障が発生している。被験者 L はいずれの試行においても離陸継続を行っており全て正しい判断である。しかし被験者 L は正しい判断を行っているにもかかわらず Trust, Self-Confidence が低下する様子が見られる。このことは被験者の意思決定の自信や、意思決定支援システムへの不信感を示すものであると考えられる。

Bar 型インターフェース実験 時間的脆弱情報を付加した Bar 型インターフェース実験での被験者 L の Trust, Self-Confidence の変動を Fig.4.7 に示す。

Trial 8, 11, 13, 16, 17, 18, 25, 28, 38において Phase 2b のエンジン故障が発生している。G/A 型インターフェース実験結果 Fig.4.6 と比較してみると、Trust, Self-Confidence 共に低下は認めら

れず、安定している。これは意思決定支援メッセージの時間的脆弱性が陽に示されることで支援メッセージの変化を予測可能となることから、意思決定の確信を高める働きがあるものと思われる。また Trial 5, 7, 12, 20, 26, 37 で Phase 3 のエンジン故障が発生しているが、こちらにおいても Trust, Self-Confidence の低下は認められない。このことから時間脆弱情報が付加されることにより、機体が離陸継続をしなければならない状況にあることを、それまでの Bar の履歴から知っている被験者は機体の速度が V_1 以下であっても、確信を持って離陸継続の意思決定が行えたものと思われる。

Trust と Self-Confidence の関係について見てみると、時間的脆弱情報の付加されていない Fig.4.6 と付加されている Fig.4.7 を比較してみると、前者では Trust は Self-Confidence を下回る傾向にある。このことは意思決定支援情報を信頼するよりも、むしろ自分の判断力の方を信じていると考えられる。一方後者は Trust は Self-Confidence を上回る傾向にある。これは自分の判断力よりも意思決定支援システムを信頼していると考えられる。時間的脆弱情報を示すことは支援情報の妥当性を被験者に明確に知らせることになるので、支援情報に対する確信が高まるためにこのような結果になったものと思われる。

被験者 L は最も特徴的な Trust, Self-Confidence の変化を示していたが、他の被験者も類似の特徴を示すものがいた。

被験者 M

被験者 M の実験結果の G/A 型, Bar 型実験の Trust, Self-Confidence の変化をそれぞれ Fig.4.8, 4.9 に示す。この被験者はもともと Trust, Self-Confidence が高い水準にある。脆弱情報が加わる Bar 型では Trust, Self-Confidence が安定する傾向が見られる。実験後のインタビューで被験者 M の「Bar がないと Phase 2 のエンジン故障に対して、本当に止まれるのか不安になる。」とのコメントが、Trust, Self-Confidence の安定性を裏付けるものと思われる。

被験者 N

被験者 N の実験結果の G/A 型, Bar 型実験の Trust, Self-Confidence の変化をそれぞれ Fig.4.10, 4.11 に示す。この被験者 N は脆弱情報の有無にかかわらず Trust, Self-Confidence が不安定である。しかし Self-Confidence が Trust を上回る回数は G/A 型実験が 8 回、Bar 型実験が 2 回であり、支援情報の脆弱性を表示することがメッセージに対する確信を高めているものと思われる。

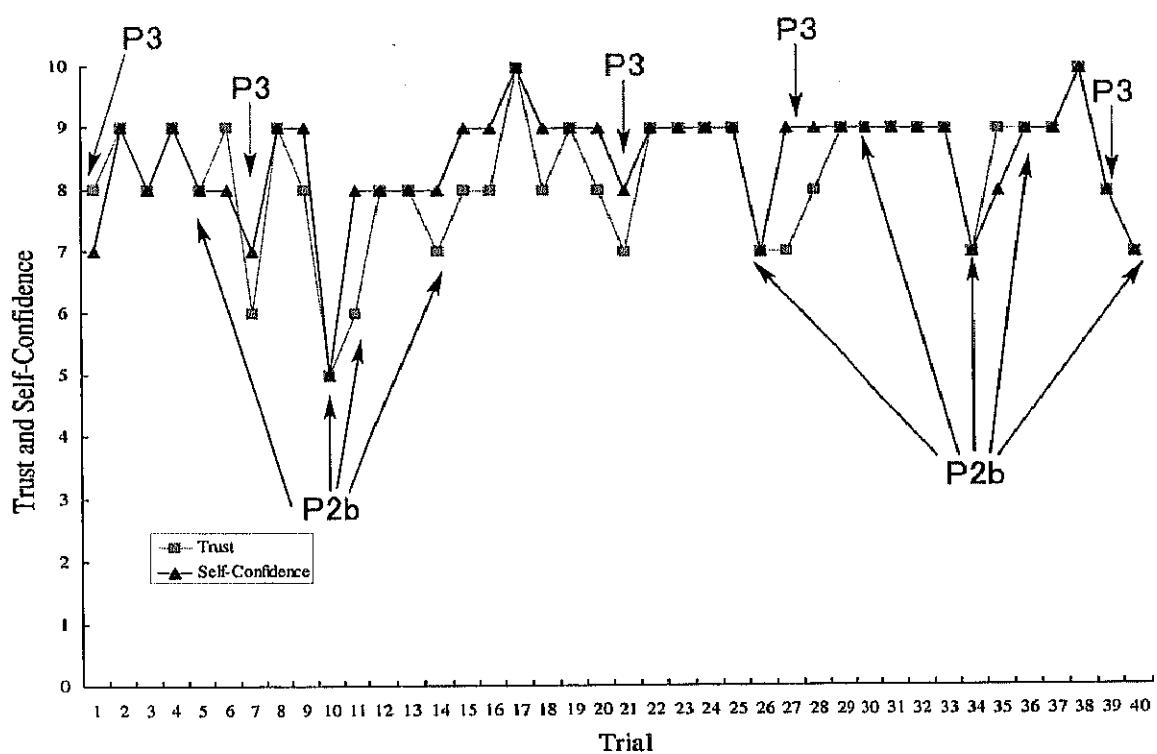


Fig. 4.6: 被験者 L G/A型インターフェース実験における Trust, Self-Confidence の変動

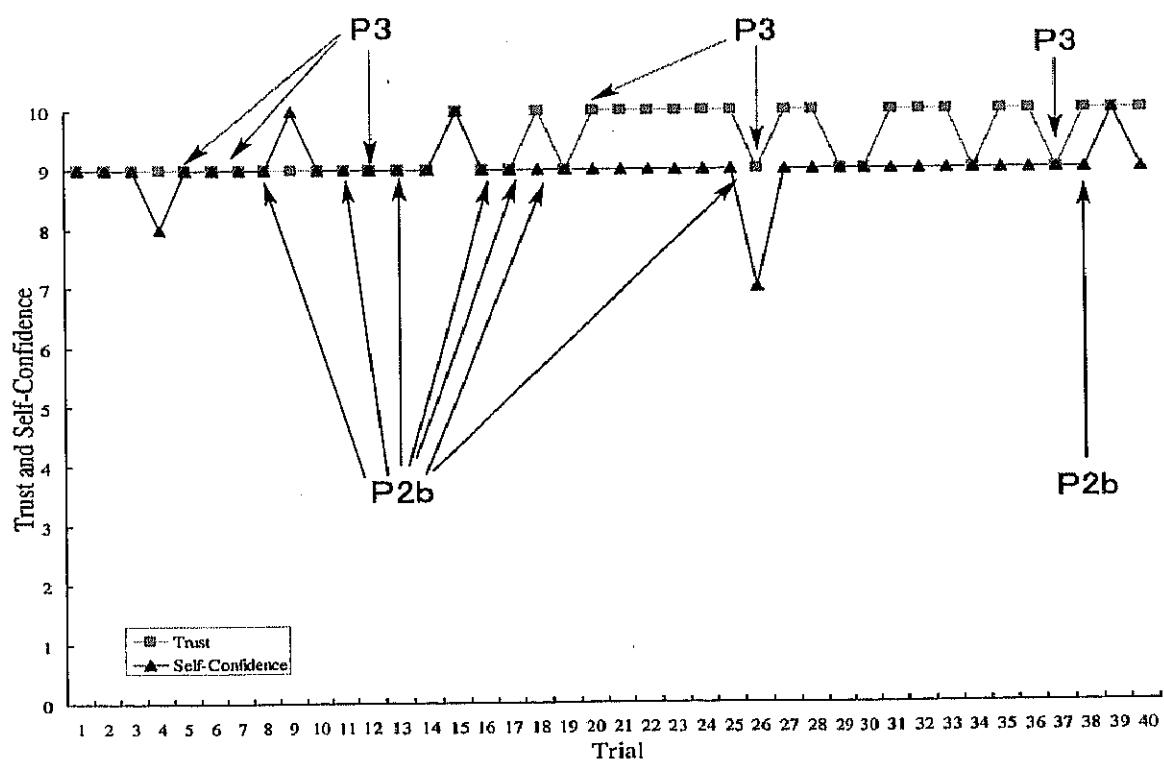


Fig. 4.7: 被験者 L Bar型インターフェース実験における Trust, Self-Confidence の変動

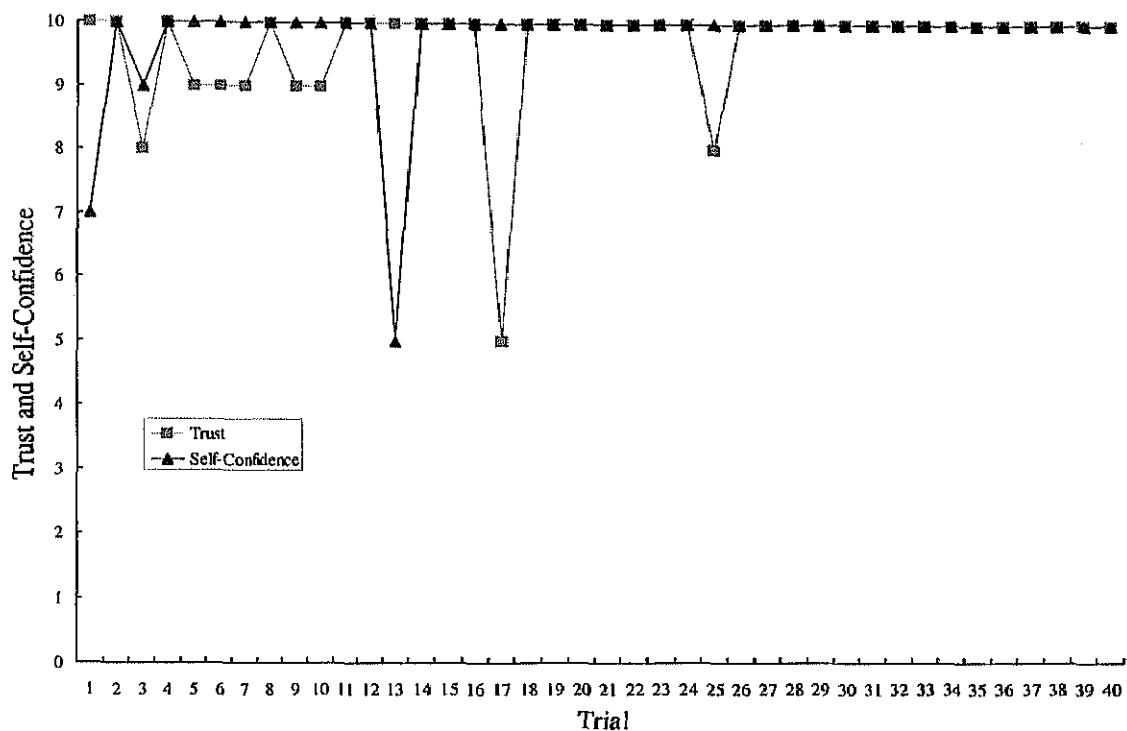


Fig. 4.8: 被験者 M G/A 型インターフェース実験における Trust, Self-Confidence の変動

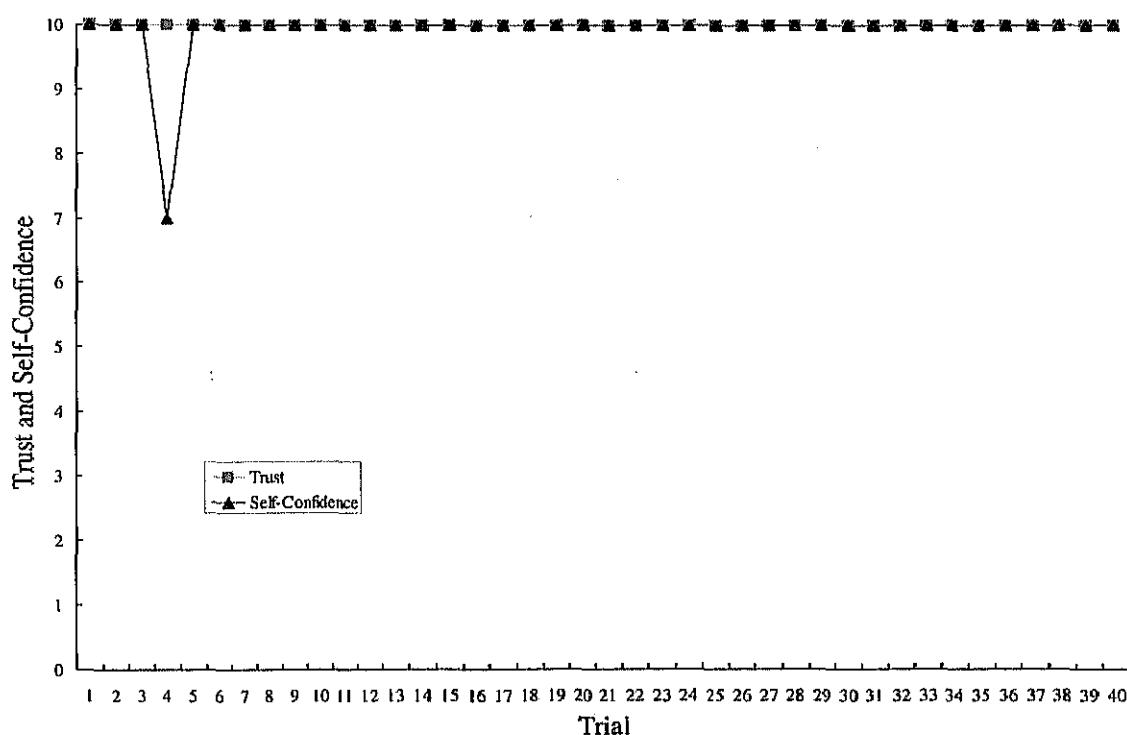


Fig. 4.9: 被験者 M Bar 型インターフェース実験における Trust, Self-Confidence の変動

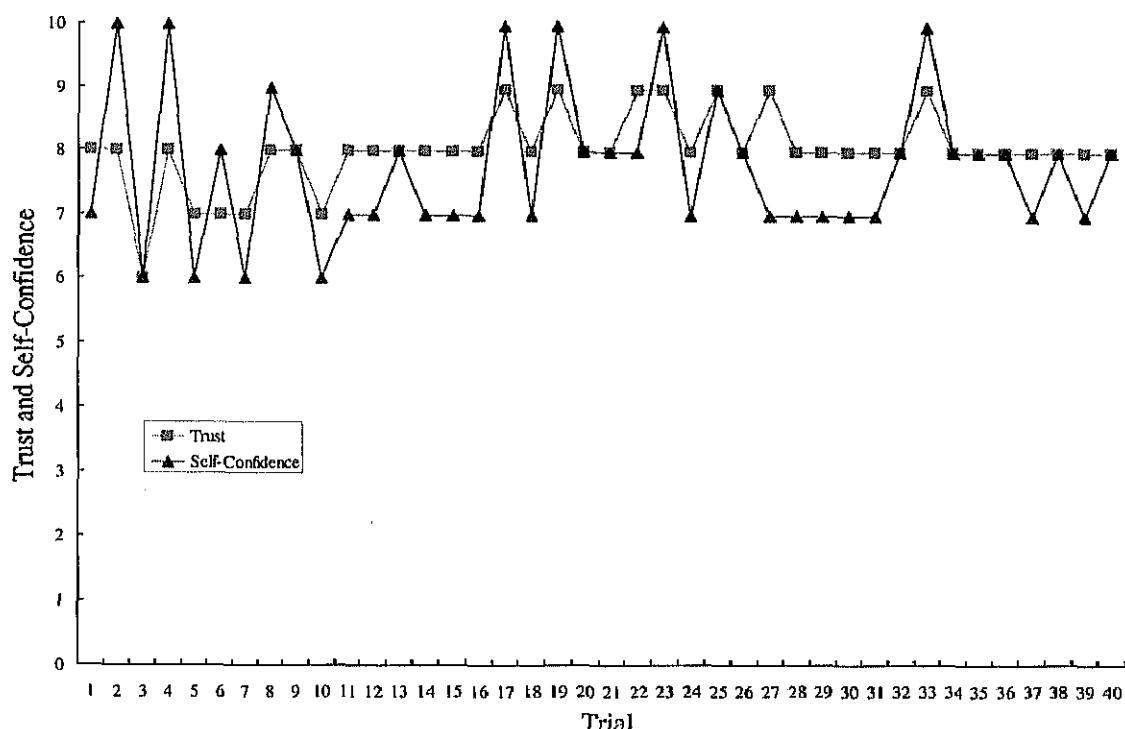


Fig. 4.10: 被験者 N G/A 型インターフェース実験における Trust, Self-Confidence の変動

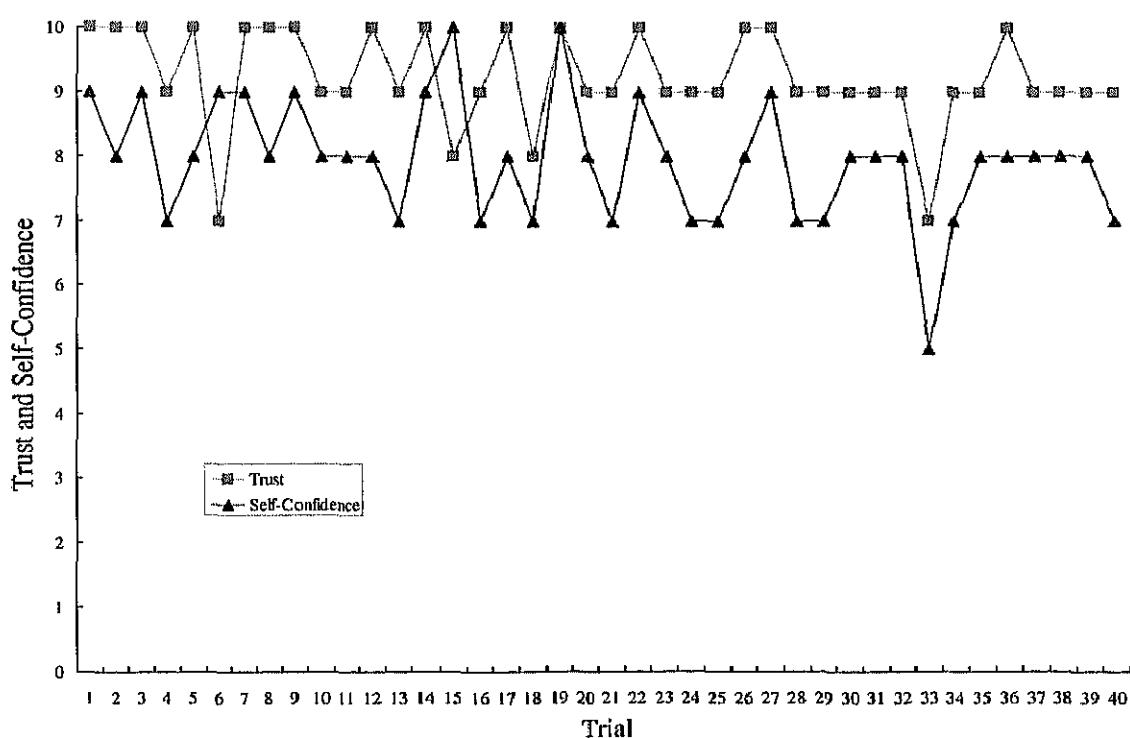


Fig. 4.11: 被験者 N Bar 型インターフェース実験における Trust, Self-Confidence の変動

4.5 むすび

人間中心の自動化を行う上で、自動化レベル5以下の自動化システムとして人間の意思決定を支援するシステムの構築を第3章で述べた。人間の意思決定を支援すべく提示した「GO/ABORT」のメッセージの有効性が実験的に確かめられたが、V₁付近における判断時間の少なさと状況変化の早さから支援情報を提示してもその有効性が維持できず、別の支援情報に切り替えねばならなかつた。支援情報は妥当であるにもかかわらず、このような短時間での支援情報の変化は人間を混乱させる。人間が常にシステムにおける最高の権限を有することを考えるのであれば、人間が混乱することはシステムにとって致命的な影響を受けかねない。従って人間の認知・判断能力の限界を考慮し、適切な認知・意思決定支援を行うインターフェース設計を考えなければならない。本章では意思決定支援情報の時間的脆弱性を陽に人間に提示することで、意思決定支援システムに対する Trust や Self-Confidence の安定性と支援情報への確信を高める結果が得られた。