解　説　論　文

自動化による安全性の向上：ヒューマンファクタの視点からの考察

Improvement of Safety Through Automation: Discussions from Human Factors Points of View

稲垣敏之 Toshiyuki INAGAKI

アブストラクト　高い知能と自律性を持つ機械は，ヒューマンマシンシステムの安全性，効率性，快適性の向上に貢献しているが，人との間に不整合をもたらすこともある．本稿では，人と機械が「自然」な形で共生できるシステムを実現するための課題を，具体例に即して考察する．

キーワード　ヒューマンマシンシステムの安全性，自動化の皮肉，状況認識，オートメーションサプライズ，人間中心の自動化，権限の所在，過失論

1. はじめに

技術の進歩は，状況を認知・解析し，今何をなすべきかを決め，更にそれを実行に移すことができる機械（自動化システム）を出現させた．このような高い知能と自律性を持つ機械が，ヒューマンマシンシステムの安全性，効率性，快適性に貢献してきたことは論を待たない．しかし同時に，これらの自動化システムと人との間には，当初予期しなかったような不整合が発生していることも事実である．早くから高度自動化を指向してきた航空分野では，(1) 多機能インタフェースによるエラーの誘発，(2) 人と機械の意図の対立，(3) 自動化システムへの不信と過信の交錯，(4) 自動化システムによる「異常の隠ぺい」，(5) 高機能システムの「分かりにくさ」などが知られている[1]．

また，航空機では「事故原因の70～80%はヒューマンエラー」[2]といわれるが，事故の背景には，人の特性を十二分に考慮しなかったデザインに問題があったのではないかと思われるケースも少なくない．

徹底的な教育・訓練を受ける航空機のパイロットでさえ上述の問題 (1) ～ (5) から完全には逃れることができないという事実は，自動化のあり方について検討しなければならない課題が多いことを示している．

本稿では，人と機械が「自然」な形で協調（共生）できるシステムを実現する上で検討していかなければならない問題や課題について，具体的な事例を取り上げながら考察する．

稲垣敏之　正員：フェロー　筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻
E-mail　inagaki@risk.tsukuba.ac.jp
Toshiyuki INAGAKI, Fellow (Department of Risk Engineering, Faculty of Systems and Information Engineering University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8573 Japan)
Fundamentals Review Vol.2 No.2 pp.00-00 2008年10月

2. 航空機における自動化

2.1　進展の歴史

1900年代初頭に登場したころの航空機は，熟練したパイロットにしてようやく操縦することができるものであった．飛行の安定性を確保することは難しく，パイロットに大きな負担がかかっていただけでなく，わずかな操作ミスでも事故に至る代物であったといわれている．

そのような中で，飛行中の機体姿勢を安定化させるためにジャイロ装置を使用することが考えられるようになった．これが，オートパイロットの始まりである．1933年には18時間49分（距離にして24,957km）に及ぶ無着陸飛行が実現されたが，それはオートパイロットの存在を抜きにして語ることはできない[3]．

第2次世界大戦中のジャイロ技術の進歩は，パイロットに方位及び姿勢に関する正確な情報を提供することを可能にした．これは，パイロットにとって，疲労と手動操縦の負担を大きく軽減するものであったといわれている．ただし，このころのオートパイロットが果たしていた機能は，飛行姿勢に「ずれ」が生じたとき，補助翼，昇降舵，方向舵などを自動的に操作して元の姿勢に戻すという空間軸に対する機体姿勢維持，すなわちインナーループコントロールにとどまっていた．

しかし，第2次世界大戦後に大きな転機が訪れる．それをもたらしたものは電子技術の進展である．1950年代には，地上の無線標識施設からの信号を取り込んで精密な操縦を行えるようになり，空港との位置関係を把握しながらの飛行や，一定の角度を維持しながらの滑走路へ向けての進入降下が可能になった[4],[5]．アウターループコントロールの実現である．

一方，航空機の機能向上とともに，インナーループコントロールにも高い精度が要求されるようになる．一例を挙げよう．航空機は速度が増すと揚力が増加する．そのため，水平飛行を保つには操縦輪を前に押さなければならない．しかし，

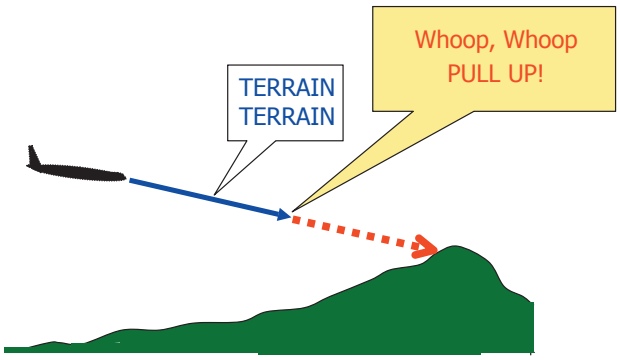

図1　対地接近警報装置

速度が臨界マッハ数を超えると，機首下げモーメントが発生するため，今度は逆に操縦輪を引かなければならない．あるところを境にして操作が全く逆になることは，パイロットにとって大いなる脅威であった．その不安と負担を軽減したのが，ピッチトリムコンペンセータ（あるいは，マックトリマー）である．この装置は，パイロットの指示を待たずに自動的に昇降舵の操舵力を補正し，人工的に機体の安定性を正にするものである．

1960年代になると，半導体技術の進歩のもとで，オートパイロットをはじめとする自動化システムの機能が向上した．例えば，オートパイロットは経路制御だけでなく，指定速度に応じて推力を自動的に調整するオートスロットルを利用した制御が実現できるようになった．また，オートパイロット，オートスロットルと計器着陸システム（着陸進入中の航空機に対して指向性電波を発射し，滑走路への進入を指示する地上装置）が連携すれば，進入，フレア（接地前の機首上げ），接地も自動的に行えるようになった．ここまでに見てきたものは，「制御」の側面からの自動化技術の進展である．

1980年代後半に登場したグラスコクピット機と称される航空機では，主要計器情報がディスプレイに統合表示されるヒューマンインタフェース技術の採用に特徴があるが，自動化についても一層の進展が見られ，「飛行管理・性能管理」に関する多彩な機能が実現されている．すなわち，機上の自動化システム（コンピュータ）は，飛行ルート，飛行性能，エンジン性能に関するデータベースを持ち，機体重量，外気温度，気圧，風などの情報をもとに，離陸速度，上昇速度，巡航速度，高度，降下開始地点などを計算し，オートパイロットやオートスロットルを介して航空機を制御することができる．自律的な情報収集・解析，意思決定，制御実行能力を備えた自動化システムは，もはやパイロットの助手というより，パイロットと同格の存在であるといってよい．

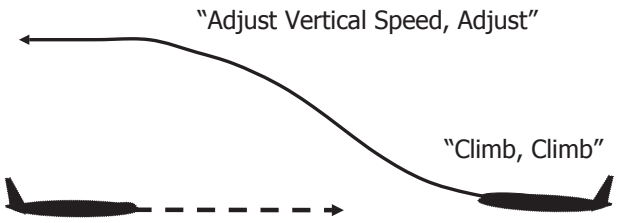

図2　航空機衝突防止装置

緊急時のパイロット支援機能にも様々なものがある．降下率が大きすぎたり，着陸しようとしているわけでもないのに航空機が地表に接近したりしている場合に警報を提示する対地接近警報装置（Ground Proximity Warning System; GPWS）（図1）や，自機と衝突の危険がある航空機の接近を検知したとき，パイロットに相手機の位置や自機との高度差を表示し，衝突を避けるための回避操作を提示する航空機衝突防止装置（Traffic alert and Collision Avoidance System ; TCAS）（図2）は，音声や視覚情報でパイロットに操縦の助言を与える緊急時支援機能の典型である[6]．

2.2　自動化の進展の背景にあったもの

これほどの自動化が進められてきた背景には何があったのだろうか．

前節の説明で述べたように，機能の自動化を可能にする基盤技術の存在あるいは開発が大きな役割を演じていることは明らかであろう．

人間を支援するという観点からは，操縦に係る困難さやパイロットのワークロードを軽減したいというものであろう[5]．当初の航空機の操縦の難しさは既に述べたとおりであるが，その後も，輸送に関するニーズの高まりの中で大型化，高速化が進む航空機を長時間・長距離にわたって操縦することは容易なものではなかった．自動化技術の導入により，できるだけパイロットの負担を軽減し，同時に，パイロットの錬度のみで操縦の困難さを克服しなければならないといった状況を打開しようとする動きは自然なものであった．

これは，ヒューマンエラーによる事故を軽減するためにも重要である．ワークロードが高すぎたり，操縦・操作が本質的に難しかったりするものであれば，ヒューマンエラーが入り込む余地がある．そのようなことを回避する一つの方法は，人が担当している機能あるいはタスクを自動化することである．ただし，自動化がワークロード軽減あるいはヒューマンエラー低減につながったかといえば，異論がないわけではない，このことについては後述する．

なお，「人の機能を機械で代替する」ことは，かつて，「いつエラーを犯すかもしれない人間はシステムから排除した方がよい」との考え方から実行されようとしたことがある．それは，技術の進歩とともに機械の信頼性が向上したことにも起因している．ただ，信頼性に欠ける人間をシステムから排除する意味での自動化の試みは失敗に終わった．システム設計においては，設計者の予想を超える状況が発生し得ることを念頭に置いておかなければならない．では，もしそのような事態が発生したときにはだれが対処できるのだろう．実は，その場でシステムの操作・操縦にあたっている人間にその役割を期待せざるを得ない．すなわち，人間はシステムにとっ

て欠くことのできない存在となる．これを「自動化の皮肉」[7]という．

自動化を進展させてきた背景には，経済的な要因もある．例えば，グラスコクピット機では，飛行ルート，飛行性能，エンジン性能に関するデータ，機体重量，外気温度，気圧，風などの情報をもとに，離陸速度，上昇速度，巡航速度，高度，降下開始地点などを最適化することができるが，これは燃料消費を最小限に抑えるためには不可欠である．また，グラスコクピット機では2名のパイロットによる乗務形態を実現しているが，乗員編成の削減も経済的側面抜きに考えることはできない．

3. 自動化の試みは成功しているか？

3.1 光の側面

人を支援して快適性や安全性を向上させると同時に，経済的にも効率化を目指してきた自動化であったが，その試みは基本的には成功しているといってよい．

航空機のエンジンは，少しでもタイミングを計り損ねると始動に失敗していた時代があったが，今ではボタン一つで各エンジンを始動させることができる．離陸の際に前縁フラップやスラットなどの操縦翼面が正しい位置にセットされていなければ警報（テイクオフ・ウォーニング）で知らせてくれる．飛行中の機体を安定させる操作のうち，人が苦手であったり人に大きな負担をかけたりするものはオートパイロットなどのシステムが対応してくれる．自動化がもたらした恩恵は，列挙の暇がないほどである．

人にできないことをやってのける「自動化システムの傑作」[4]は，自動着陸システムである．パイロットの操縦であれば代替空港へ向かわざるを得ないような気象条件（例えば，高度100フィートまで降りてきても滑走路や灯火が見えない，あるいは滑走路視程が1,200フィートを下回る状況）であっても，このシステムであれば機体を安全に着陸させることができる．予定した目的地に到着できることは，乗客にとってなによりのことであるが，運航計画を変更しなくてもよいことは，エアラインにとってもありがたいことである．

安全性を事故の観点で調べてみよう．「10万km当り」のように，基準走行距離の中での事故発生件数によって事故発生率を定義する自動車とは異なり，航空機では，「100万回離陸当り」（同じことだが，100万便当り）での事故発生件数によって「事故発生率」を定義する．これは，航空機の事故発生は時間的に一様ではないこと，すなわち，最も高速で飛行している巡航時の事故は全事故の1割程度であり，事故の約半数が離陸時あるいは着陸時に起こっていることを反映している．

さて，ボーイング社やIATAによる事故統計[2],[8]によれば，1950年末には100万便当り40便以上が全損事故を起こしていたが，60年代から70年代にかけて急速に減少した．西側で製造された最大離陸重量15t以上の民間航空ジェット機の2000年代以降の全損事故発生率は，100万便当り1便未満である（例えば，2006年の全損事故発生率は0.65）[8]．

しかし，この数字を見ても手放しで喜んでいるわけにはいかない．後に述べるように，高度な自動化と知能化が進んだグラスコクピット機では，かつての素朴な航空機では考えられなかったような事故が起こることがあるからである．

3.2 影の側面

2.1に述べた自動化の進展によって出現したのは，「人が何をなすべきかを決め，それをコンピュータに指示し，その指示に沿ってコンピュータが適切な制御を実行しているかどうかを人が監視する」というシステム制御形態である．この形態は監視制御（human supervisory control）と呼ばれ[9]，交通移動体や原子力プラントなど，現在の社会の様々な領域で見ることができる．

監視制御の形態は，制御に係る人の肉体的なワークロードを軽減するものの，心的なワークロードまで軽減できるとは限らない点に注意する必要がある．

航空機の場合であれば，パイロットは，オートパイロットなどの自動化システム（コンピュータ）が自分の指示どおりに制御を行っているか，機体や自動化システムのどこかに異常が発生していないかなど，長距離・長時間のフライトの間じゅう，気を配り続けなければならない．数十年前の航空機ならいざしらず，高い信頼性を誇る現在の機体では異常が発生するのはまれである．

一方，ひとたび異常が発生すると，迅速かつ的確な対応が求められ，緊張度もワークロードも急変する．また，異常でもないものを「異常だ」と判断して不適切な対応をとっても，それがもたらす経済的・時間的損失は小さいとは限らない．

更に，**2.2**で述べた「自動化の皮肉」と呼ばれる現象も，監視制御を難しいものにしている．なぜシステムを完全自動化あるいは無人化せず，人をシステム内に残したか．それは，システム設計者の予想を超えた状況が発生したとき，システムのオペレータが「システム設計の不備を補う」[10]必要があるためであった．既に述べたように，システムは自ら収集した情報に基づいて状況を判断し，「必要だ」と考える操作があれば，その操作を自律的に実行できる能力を備えている．その推論に必要な複雑な知能や仕組みを考案・実現したのはシステム設計者（人）である．システムオペレータは，ものの見方・考え方や経験が異なっていて不思議ではない他人（システム設計者）と同じようにものを見，考えることが要求されることになる．しかし，どれほど教育を受け，訓練を積んだとしても，他人の思考を完全に模擬・再現できるようになることはない．

物理学，情報工学，応用数学の分野で顕著な業績を残された高橋秀俊東大名誉教授は，かつて「人間の特性8箇条」を示されたことがある（表1）．それに照らし合わせてみれば，ほとんど起こることもない「異常」を探し求めて計器類を監視し続け，異常があれば，複雑なシステムの因果関係を的確に把握した上で，システム設計者と同じ思考形態で自動化システ

表1　人間の特性8箇条

第1条　人間は気まぐれである
第2条　人間は怠け者である
第3条　人間は不注意である
第4条　人間は根気がない
第5条　人間は単調を嫌う
第6条　人間はのろまである
第7条　人間は論理的思考力が弱い
第8条　人間は何をするか分からない

ムの行動・意図を予測し，システムの制御に介入したり，状況に即した新たな指示を自動化システムに与えたりするなどの迅速な対応が求められる監視制御は，システムを操作・操縦する人にとって厳しい制御形態といえなくもない．

4. どのような状況で事故が発生するのか

自動化の進んだ航空機がどのようにして事故に至ったかを調べてみると，人と高度な技術との間に様々な不整合があることに気付く．それらの不整合は何通りかにタイプ分けすることができるが[1]，ここでは「状況認識の失敗」の観点から考察してみることにしよう．

4.1　状況認識

状況認識（situation awareness）[11]は日常用語としても使用されていることばであるが，表2に示す三つのレベルを識別しておくと，議論の精密化を図ることができる．

何か変だということに気付くことができると，「レベル1の状況認識が獲得できた」という言い方をする．その奇妙な現象（あるいは異常）をもたらしている原因が何であるかを特定することができれば，レベル2の状況認識が獲得できたことになる．そして，今，ある行動を取ればどのような結果がもたらされるか，その行動を取らなければ，これからどのような事態に移っていくかが予測できれば，レベル3の状況認識が獲得できたといい，状況認識は完璧なものとなる．

さて，「レベル3の状況認識まで達成するのは難しい場面もあるかもしれないが，何か変なことが起こったら，それに気付く（レベル1の状況認識）ことくらいは簡単だろう」と考えたいところであるが，現実はそうではない．機体が異常な状態にあっても，人はそれに気づかないことがある．例えば，1986～1992年までに発生した航空インシデントにおける状況認識の失敗169例を調べた研究[12]によれば，169例の約80%は，「異常があるにもかかわらず，全く気が付かない」レベル1の状況認識の失敗であった．この圧倒的な割合には驚かざるを得ない．ちなみに，「異常が発生していることには気付いたものの，何が異常の原因であるかが分からない」というレベル2の状況認識の失敗は約17 %，「異常の原因は分かったが，まだ対応しなくても大丈夫だろう」といった予測の誤り（レベル3の状況認識の失敗）は約3 %にすぎなかったと報告されている[12]．

表2　状況認識の三つのレベル[11]

レベル1：何かが起こっていることに気付く
レベル2：その原因を特定できる
レベル3：これからの事態の推移が予測できる

4.2　レベル1の状況認識の失敗

異常があることに対する「気付き」が失われる様子を三つの具体例に沿って考えてみよう．

4. 2. 1　モードコンフュージョン

モードコンフュージョン（mode confusion）は，レベル1の状況認識喪失ケースの典型であり，グラスコクピット機が時折直面する問題の一つである．「モード」は，コンパクトな空間の中に多くの機能を実現しようとしたときに用いられるが，人は自動化システムに対して，「モードAのもとでの指示」を与えたつもりでいても，モード選択を誤っていることに気付かないと，自動化システムは「モードBのもとでの指示」であると解釈し，指示内容を実行することがある．例1は，モード選択の誤り以外には，どこにも問題のなかった航空機が山に激突し，乗員乗客96名中87名が死亡した事故事例である．

例1　1992年1月，ストラスブールに向かっていたエアバスA320が，空港の手前10.5マイルに位置する山に激突した．パイロットは「降下角3.3度」を自動化システムに指示したつもりでいたが，実は「降下率3,300フィート／分」を指示したことになったのではないかと考えられている[13]．

ちなみに，例1のように，本来なら健全に飛行を続けることができる航空機が地表面や水面に衝突する事故をCFIT（Controlled Flight Into Terrain）と称する．墜落すべきでない航空機の墜落ほど悲劇的なものはない．1997年から2006年までにCFITで1655名が死亡しているが，これは機体制御不能による墜落事故での死者数1643名をしのぐ数字である．

4. 2. 2　寡黙で力自慢な自動化システム

自動化システムは，時に「寡黙で，力持ち（silent and strong）」と言い表されることがある．これは，自動化システムが制御対象に生じた異常を覆い隠すほど強いフィードバック制御をかけることができるものの，その制御がどれほど骨の折れるものであっても，その苦労や困難さを人に伝えようとしないため，人がよほど注意深く監視していない限り，制御対象に発生した微小な異常に気付くことは難しいことをいう．これもレベル1の状況認識の失敗であり，例2はその典型である．

例2　1985年2月，自動操縦によってサンフランシスコ沖を巡航中のボーイング747で，右主翼外側のエンジンが不調になった．エンジンの再始動には，いったん自動操縦を解除して高度を下げる必要があった．しかし機長はオートパイロットに操縦を任せたまま，エンジンの再始動を試みていた．そのうち，速度が低下してきたため，オートパイロットのモードを変更して速度の増大を図ろうとするが，速度の低下は止まらない．手動操縦に切り替えようとオートパイロットを解除したとたん，機体は大きく傾き，ついには裏返った状態で落下していった．左右の推力不均衡による右方向への機首偏位を解消するため，オートパイロットが左主翼を下げる力を加えていたことでかろうじて水平飛行が保たれていたが，オートパイロット解除によってその力が一度に失われたためである[14]．

4．2．3　自動化システムへの過信

対地接近警報装置（GPWS）は，パイロットの状況認識を支援するための自動化システムであるが，その能力をパイロットが過信すると，迫り来る危険に気が付かないまま山に激突することが起こる．ここでいう過信とは，能力の過大評価に基づく「過度の信頼」である．

例3　10年ほど前までのGPWSは，地表面からの高度の急激な減少を検知すると「降下率が過大である」と判断して「Pull Up（操縦輪を引け）」などの音声警報を発するものであった．このタイプのGPWSは，高度が変化する様子に基づいて警報を生成する仕組み上，機体針路前方に突如として切り立った山や崖が現れるような地形にはほとんど無力である．しかし，パイロットが，「危険な地形があればGPWSが教えてくれるはず」との期待を抱き，十分な警戒心を持たないまま飛行を続けていると，CFITに至ることがある．

ちなみに，人が自動化システムに対して「信頼（trust）」を抱くためには，表3に示す四つの次元のすべてが満足される必要があると考えられている[15]．すなわち，四つの要件のうちに満足されないものがあれば，そのシステムへの信頼は磐石なものとはいえない．

表3の要件が客観的には満足されているにもかかわらず，「満足されていない」と誤った判断をする場合を「不信」（distrust）と称する．一方，客観的には満足されていないはずの要件に対して「満足されているはずだ」との判断を下す場合が「過信」（over-trust）である．いずれも，「不適切な信頼」（mistrust）の例である．

表3　信頼の四つの次元[15]

基礎：	自然界の法則や社会の秩序に合致している
能力：	常に安定的かつ望ましい行動や性能 が期待できる
方法：	行動を実現するための方法，アルゴリズム，ルールが理解できる
目的：	上記の 背後にある意図・動機　が納得できる

なお，「依存」（reliance）という用語は，時に「システムに依存するようなことがあってはならない」というように否定的な意味合いで用いられることがあるが，この用法は必ずしも正しくない．「信頼に値するものに対する依存」は当然の行為あるいは判断であり，ワークロード軽減の観点からも正当なものである．あってはならないものは，「信頼に値しないものに対する依存」，あるいは「適正レベルを超えた過度の依存」である．まさに例3は，針路前方の急峻な地形の検出能力を持っていない古典的なGPWSの能力を過大評価した結果，「危険な地形が出現すれば，警報を発して知らせてくれるはず」として，十分な能力を持たない警報システムに危険検知をゆだねてしまった点で，過度の依存が見られる．

4.3　レベル2の状況認識の失敗

異常（あるいは眼の前で起こっている現象）がどのような原因によるものかを特定できないという「原因特定の失敗」について，自動化システムが関連した具体例を見てみよう．

4．3．1　自動化システムの分かりにくさ

自動化システムには，自律的に判断・行動できるものがあるが，判断が高度であればあるほど，その行動はユーザであるオペレータには分かりにくいものとなる．

例えば，人が自動化システムに「タスク1」の実行を指示したとしよう．自動化システムは，「タスク1をするなら，タスク2も同時にした方がよかろう」と気を利かせることができるが，そのようなことを予想もしていない人は，いったい何が起こっているのか，状況が把握できないことにもなりかねない．人が自動化システムの行動に驚かされる現象は，オートメーションサプライズ（automation surprise）と呼ばれる[16]．次の例はその一つである．

例4　1994年6月，エアバスA330がトゥールーズにおいて離陸直後のエンジン故障を模擬したテスト飛行を行っている中，離陸6秒後（毎分6,000フィートで上昇中）にオートパイロットがエンゲージされた．あらかじめオートパイロットには高度2,000フィートでのレベルオフ（水平飛行への移行）がセットされていたため，オートパイロットは，「滑らかなレベルオフのためには，高度950フィートで操作を開始する必要がある」と計算し，離陸8秒後にレベルオフを開始するモードに入った．しかし，乗員はこのことに気付かないまま，エンジン故障を模擬すべく，一つのエンジンを停止させた．これによって推力が減少し，上昇率は毎分2,000フィートに低下した．しかし，オートパイロットは当初の予定を達成しようと

機首を上げた．ピッチを増しながらの上昇で速度は下がり続ける中，パイロットは，「いったい何が起こっているのだ!」と叫んでいる．ピッチ角が31度を超えたとき，パイロットは手動操縦に切り替えたが，もはや姿勢回復はできず，失速し，墜落した[17]．

4．3．2　自動化システムへの不信

たとえ「奇妙な現象」が起こっても，それに対して「合理的」な説明を付けることができれば，それで納得する．それは人間が共通に持つ性質の一つであり，プロフェッショナルの世界でも起こり得る．仮に，自動化システムに対する不信感があると，正しい警報が出ていても，自分の都合に合わせて解釈してしまうことが起こる．実際，CFITの中には，GPWSが警報を発しているにもかかわらず，「このようなところで警報が鳴るはずがない」といいつつ，何の回避操作もとらないまま墜落した例がある．

4.4　レベル3の状況認識の失敗

眼前で起こっている異常に気付き，その原因がどこにあるかも分かったとしても，これから自分が取ろうとする行動がどのような事態をもたらす可能性があるのかまで的確に予測できるとは限らない．自動化システムが関連するものとしては，次のような事例がある．

例5　1994年4月，名古屋でエアバス A300-600R が墜落した．滑走路へ向けて降下を続けているうち，パイロットがゴーレバーを指に引っ掛けてしまったため，オートパイロットは着陸復行を開始した．パイロットは，オートパイロットが着陸復行モードになっており，それが自分の意図に合わないものであることを知りつつも，そのモードを解除せず，ただ，機体を着陸させようと操縦輪を抑えつけるだけであった．すなわち，着陸復行モードを解除しないことが何をもたらすのかを十分に理解・予測することができなかった．「降下させよう」とするパイロットの昇降舵への制御入力と，「上昇させよう」とするオートパイロットの水平安定板への制御入力を同時に受ける形になった機体は，やがて失速し，墜落した[18]．

5．問題解決への手がかり

積極的に自動化を進めてきた航空分野ではあったが，不適切な自動化は乗員のモチベーションや技量を損ない，ひいては安全性も低下させる要因ともなり得ることは，早く指摘されていた．実際，1980年代半ばごろには，既にコクピットの自動化のあり方に関する研究が現れている．そのような数多くの研究による「結論」の一つが，表4に示す「人間中心の自動化」である[5]，[19]，[20]．

ここで示された「人間中心の自動化」の根幹をなすものが，「人に指揮権を与える」との考え方である．「最終決定権は人に与える」と表現されることもあるが，これは，「人は，航空システムの安全のため，最終の責任を負う」ことからの帰結であるといえる．

表4　航空における「人間中心の自動化」[5]

人は，航空システムの安全のため，最終の責任を負う．
それゆえ，
- 人に指揮権がなければならない．
- 指揮を効果的に行うために，人は直接的に関与できなければならない．
- 人が直接関与するには，人に情報が提供されねばならない．
- 機能を自動化してよいのは，適切な理由がある場合に限る．
- 人は自動化システムをモニタできるようになっていなければならない．
- それゆえ，自動化システムは予測可能でなければならない．
- 自動化システムはオペレータ（人）をモニタできるようになっていなければならない．
- システムを構成する各要素は，他の要素の意図に関する知識を持っていなければならない．
- 自動化は，簡単に学べ，簡単に使えるようにデザインされていなければならない．

飛行中の航空機にトラブルが発生したとしよう．地上からの支援・助言も得られるであろうが，異常を抱えた機体を無事に着陸させるまで，あらゆる手段を講じて戦い続けなければならないのはパイロットである．それまでにだれも経験したことがないような異常であれば，対応する緊急時の操作手順が定まっているはずはなく，パイロットは，自らの知識と技量を総動員して事態に対処しなければならない．そのようなときに，パイロットの判断・行動が機械によって妨げられることがあってはならないという考え方が，最終決定権を人に与えることの背景にある．

表4に記された「人は自動化システムをモニタできるようになっていなければならない」，「自動化システムは予測可能でなければならない」といった要件からも，**4．**に述べたような自動化システムにかかわる問題を解消したいとの企図が読み取れるであろう．

6．自動車の分野では

人と自動化技術のかかわりが重要な問題となるのは，航空機に限ったことではない．自動車分野でも，国土交通省の先進安全自動車（Advanced Safety Vehicle;ASV）推進計画[21]等を通じて，様々な先端技術[22]の導入が進展しているが，安全と快適を確保するために，人の特性を踏まえた上で，どこまで自動化を進めるかが重要なポイントとなっている．

自動車に搭載されている自動化システムの例として，アダプティブクルーズコントロール（ACC）やレーンキーピングアシスト（LKA）を考えてみよう．

ACCは，ドライバーによって希望車速が設定されると，その車速を維持するような制御を行う高速道路走行用のシステムである．設定車速よりも遅い速度で走っている先行車を検出したとき，ACCはドライバーが希望する車間距離を保ちながらの追従制御を行えるよう，速度を自動的に調整する機能を持っている．

LKAは，カメラで車線を示す白線を感知し，ドライバーが

レーンの中央を走行しやすいように（具体的には，現在の地点から30メートルほど先でレーン中央を走っているように）ステアリング制御を行う機能を持っている．

ACCやLKAは，運転にかかわるドライバーのワークロードを軽減しようとするものであり，人にできないことができるといったたぐいのシステムではない．

人にはできないことを見事にやってのける自動化システムの代表は，横滑り防止装置（Electronic Stability Control；ESC）であろう．これは，急なステアリング操作を行ったとき，あるいは滑りやすい路面を走行しているときにセンサが車の横滑りを検知すると，四つの車輪の各々に対するブレーキ力を適切に制御したりエンジン出力を制御したりして，車のスピンやレーンからの逸脱を防止する機能を持っている．車輪ごとに異なる制動力を加えることなど，ブレーキペダルを一つしか与えられていないドライバーにはできることではない．

このようなESCが安全に貢献していることは直感的にも想像ができることであろうが，定量的には次のようなデータがある．すなわち，ESCの搭載により，単独事故は35%，正面衝突事故は30%低減できているとのことである．また，ESCは，一般道において32%，高速道路では53%の事故を削減しているとの報告[23]もある．

人にできない能力を持つという意味では，夜間走行時に肉眼では検出しにくい（あるいはできない）ところにいる歩行者を，人が発する熱を検知したり，近赤外光を照射したりすることで見つけ出すシステムもある．

7.「人間中心の自動化」の枠組みでの支援

航空機や自動車などの交通移動体に限らず，工学的なシステムの操縦・運転は，認知，判断，操作の繰り返しである．その中で最も基本となるのが認知である．すなわち，認知が正しくないときに，正しい判断や操作を期待することはできない．しかし，人の認知はいつも正しいとは限らない．例えば自動車運転の場合に認知の対象となるものは，道路形状，路面状態，車の混み具合，他車両，歩行者，ハードウェア（自分の車），自動化システムの動作状況など多岐にわたるが，これらすべてに同時に注意を向けることは不可能である．しかも注意力を持続させることは，人の不得意とするところである．

そのような特性を持つ人（オペレータ）に対して，「人間中心の自動化」の視点に即して支援することを考えてみよう．オペレータへの支援レベルは，「情報提供」，「注意喚起」，「警報提示」，「制御介入」の4種に大別することができる[21]，[24]．

7.1　情報提供

「情報提供」とは，オペレータの求めなどに応じて，状況の理解あるいは意思決定に資する情報をコンピュータがオペレータに提示することをいう．例えばオペレータが車のドライバーであるケースなら，目的地までの経路情報を提示することなどが該当する．

7.2　注意喚起

「注意喚起」とは，コンピュータが収集した情報・データをもとに状況を解析し，その状況の中でオペレータが留意しておくべきことを知らせるものである．例えば，「暗闇の中，100m先にいる歩行者」を検出したとき，ディスプレイ上に「枠」などを表示して歩行者の位置を示すものが典型例である．ただし，ドライバーに，「減速せよ」あるいは「ステアリングを切れ」といった具体的な操作を指示することはしないのが，「注意喚起」レベルの特徴である．

7.3　警報提供

これに対し，「警報提示」レベルになると，危険回避に必要な具体的行動がオペレータに指示される．航空機でいえば，空中衝突あるいはニアミスの可能性があるとTCASが判断したときに発せられる「Climb，Climb!（上昇せよ!）」という回避アドバイザリ（Resolution Advisory;RA）や，地表面への異常な接近を検出したときにGPWSが発する「Pull Up!（操縦輪を引け!）」などがここでいう警報である．自動車では，先行車への急接近が検出されたときに，「ブレーキをかけよ!」という意味で発せられる音声などが該当する．

7.4　それらの支援だけで万全か

ここまでの三つのレベルでは，最終決定権は人が持っており，その意味で，「人間中心の自動化」の枠組みに完全に合致したものといえる．例えば，TCASが「Climb，Climb!」と指示しても，「上昇するのは危険である」とパイロットが判断すれば，パイロットはTCASのRAに従わなくてもよいことになっている．これは，わずかではあるものの，TCASの判断能力に限界があることを反映している．ただし，2001年1月に発生した焼津上空でのニアミス事故以降は，基本的にはTCASの指示に従うこととされている．

さて，ここで考えてみるべきことは，「最終決定権は，いついかなる場合でも，人に与えておくのが適切か」ということである[25]．「状況の認識が的確であれば，その状況の中で何をなすべきかはおのずと分かる」とされる．しかし，状況が理解できても，あるいはなすべきことが分かっていても，それをタイムリーかつ確実に実行できるとは限らない．

自動車の正面衝突と追突事故359件において，ドライバーがどのようにして衝突を回避しようとしたかを調べた研究が

あるが，ブレーキによる回避行動もステアリングによる回避行動もできないまま事故に至ってしまったケースが40%近くあったことが報告されている[26]．この例は，緊急性の高い状況に置かれた人を救うには，更に踏み込んだ支援が必要であること物語っている．

7.5 制御介入

第4の支援レベルとしての「制御介入」は，人に要求するには無理がある場合に発動される機械による支援である．すなわち，制御介入が適当であるかどうかは，機械の判断によって行われる．その意味で，「制御介入」による支援は，普通の意味での「人間中心の自動化」からは外れたものであるといえる．

しかし，制御介入は安全性の向上に重要な役割を果たす．**6.** で述べた横滑り防止装置（ESC）[22]は典型である．更に，先行車への衝突の危険性を警報で知らせたにもかかわらずドライバーがブレーキ操作を行わないときは，自動的に制動をかけ，衝突による被害を可能な限り低減しようとする自動化システムもある．プリクラッシュセイフティシステム（PCS）[22]と呼ばれるものである．衝突の危険性が検知されてから，回避操作を行うまでにドライバーに与えられる時間がほんの数秒であるというケースがあり得る自動車では，自動化システムによる制御介入は，なくてはならないものである．ただし，そのような自動化システムの機能を過信したり，過度に依存したりすることがあっては困るという考え方もある．

「最終決定権をパイロットに与える」ことを前提とする航空機の場合でも，実は，機械の判断による制御介入は安全性の確保に用いられている．既に述べたマック・トリマーもそうであるが，ボーイング777に装備された推力非対称補償（Thrust Asymmetry Compensation；TAC）も機械の判断によって制御介入を行うシステムである．双発機でありながら，ジャンボと称されるボーイング747に匹敵する，あるいは時にそれをしのぐ大型機であるボーイング777のエンジンは巨大である．そのため，離陸滑走中に片方のエンジンが故障したなら，推力のアンバランスによって生じるヨー・モーメントはパイロットの手に余るほど大きいといわれる．TACは，左右エンジンの推力の差が定格推力の約10%を超えたとき，自動的にラダー（方向舵）を制御する機能を持っており，滑走路逸脱を防ぐ上で重要な役割を果たしている[6]．

7.6 「人間中心の自動化」の精密化

今までの議論で明らかなように，「人間中心の自動化」は，精緻な理論のレベルには到達していない．解釈次第では，表4に示された「人間中心の自動化」を実現するための各要件間に矛盾や不整合が生じることがある．また，どのような応用分野を対象としているかによって，その分野にふさわしい「人間中心の自動化」は異なり得ることにも注意が必要である．例えば，自動車のための「人間中心の自動化」は，航空機のための「人間中心の自動化」と同じものである必要はない．これらのことについては，既に別のところ[25]，[26]で論じているので参照されたい．

8. 人と機械を調和させる

8.1 機能配分

人と機械の間での役割分担を定めることを「機能配分」と呼ぶ．ヒューマンマシンシステム設計における重要な課題の一つである．古典的な機能配分は，次の3通りに分類できる[28]．

(1) 考察の対象となる機能ごとに人間と機械の能力を比較し，優れた能力を持つ方に当該機能を割り当てる方式（comparison allocation）
(2) 自動化できる機能はすべて自動化し，それ以外のものを人間に割り当てる方式（left-over allocation）
(3) システム開発コストを最小化できるように人と機械に機能を割り当てる方式（economic allocation）

いずれも「だれが，何をするのか」を決めるものであるが，ひとたび定めた配分は未来永劫変更されることはないため，静的機能配分と呼ばれる．

このうち，(2) または (3) では，人の特性を考慮することなく機能配分が定められることから，人は自分に割り当てられた役割を快く感じなかったり，割り当てられた機能すべてを正確に認識・記憶しておくことが困難になったりすることがある．

また，(1) にも欠点がある．個々には人が優れているタスクであっても，そのようなタスクを複数個同時に担当しなければならない状況では必ずしも人の優位性が保証できないこと，タスク担当が長時間に及ぶときは，様々な要因によって作業の質や効率が低下し得ることなどである．

このことは，単に「だれが，何をするのか」を決めるのではなく，「だれが，何を，いつするのか」を決める動的な機能配分の考え方が重要であることを示している．

そのような動的な機能配分の中でとりわけ重要なものは，人のワークロードは適正であるか，パフォーマンスは適切に維持されているか，人やシステムを取り巻く周囲の環境変化，人の能力限界などを考慮に入れて機能配分を変化させるもの，すなわち適応的機能配分（アダプティブオートメーション）[29]，[30]である．

8.2 権限

ミクロ的に見れば，アダプティブオートメーションでは，時に人が担当していたタスクを機械に移す，あるいはその逆向きの受け渡しが行われる．このように，一方の主体が行っていたタスクを，ある時点で他方の主体に譲り渡すことを，そのタスクに関する権限委譲という．

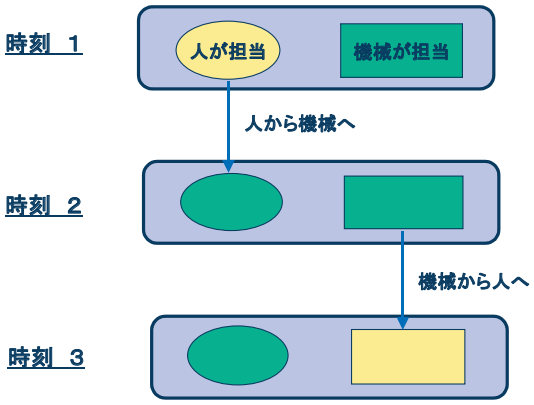

図3　権限委譲

さて，人と機械が担当している各タスクについて，「当該タスクの権限委譲を行う必要はあるか．行うとすれば，それはいつか」を決める権限は，いったいだれが持つのだろうか．人でなければならないのだろうか，それともコンピュータであってもよいのだろうか．

基本的には，権限委譲ロジックはプロダクションルールの形式で表現することができる．このことは，「権限委譲の要否の判断とその実行はコンピュータに任せる」(machine-initiated trading of authority) といってもよいように思えるが，実はそれほど単純な問題ではない[30]．

その理由の第1は，信頼性である．コンピュータが決して故障しないという保証はなく，センサからのデータが常に正確な情報であるという保証もない．それでもあえてコンピュータに権限を与えるならば，人はコンピュータの動作が正しく行われるか否かを常に監視していなくてはならない．すなわち，本来なすべきタスクに加えて，人はコンピュータを監視するために新たなワークロードを課されることになる．

第2の理由は，思想あるいは信条的なものである．「最終決定権を人間に与えることはヒューマンマシンシステム設計における大前提」と考える人たちにとっては，コンピュータに決定権を与えることなど，到底認められるところではない．

一方，権限委譲をいつ行うべきかを人に決定させる (human-initiated trading of authority) ことにも問題がないわけではない．「課せられたワークロードが過大である，あるいはタスク遂行に許される時間的余裕が十分ではない状況は，人にとって過酷な環境である．パフォーマンスが低下するだけでなく，ヒューマンエラーも誘発しかねないことから，システムの安全性が損なわれる可能性もある」といった理由から，権限委譲のアイデアが生まれてきたのであった．しかるに，本来のタスクに加えて，「自らのワークロードは過大であるか」，「機械に自分が担当しているタスクのうちの幾つかを渡すべきか」，「渡すとすれば，いつ，どのタスクを渡すべきか」の判断を人間に要求することは，その人のワークロードを軽減したいという，権限委譲の趣旨に反することになる．

8.3　安全の確保

「システムの安全を確保する」という観点から，権限委譲を機械の判断で行ってもよいかどうかを，図4に沿って考察してみよう[31]．

あるヒューマンマシンシステムにおいて，オペレータが直面している「状況」を一つ想定しよう．その状況の中でのオペレータの行為は，次の3種類のうちのいずれかである．

(H1) その状況では，必ず実行しなければならないもの
(H2) その状況では，行っても，行わなくても，いずれでもよいもの
(H3) その状況では，決して行ってはいけないもの

一方，表4の「人間中心の自動化」で述べているように，「コンピュータがオペレータをモニタできるようになっている」ものとしよう．オペレータの行為に対するコンピュータの判断は，次の2通りのうちのいずれかである．

(C1) オペレータの行為が検出された
(C2) オペレータの行為は検出されていない

図4における領域Aは，「直面している状況の中で，オペレータはなすべきことをしていない」とコンピュータが判断するケースを示している．先行車が急減速しているので，直ちにブレーキをかけなければならないのだが，ドライバーのブレーキ操作がまだ検出されないといったケースである．ドライバーはわき見をしていて，先行車の急減速に気付いていないのかもしれない．あるいは，先行車が急減速するのを見てパニック状態になり，ブレーキ操作ができないのかもしれない．このようなとき，ドライバーに指示されていないからという理由で，コンピュータはブレーキもかけずに，ただ傍観していてよいのだろうか．それとも，自らの判断で緊急ブレーキをかける (ブレーキ操作に関する権限を，人からコンピュータに委譲させる) ことが適当なのだろうか．

図4における領域Bは，「直面している状況の中で，決してやってはいけないことをオペレータがしている」とコンピュータが判断するケースである．隣のレーンを背後から高

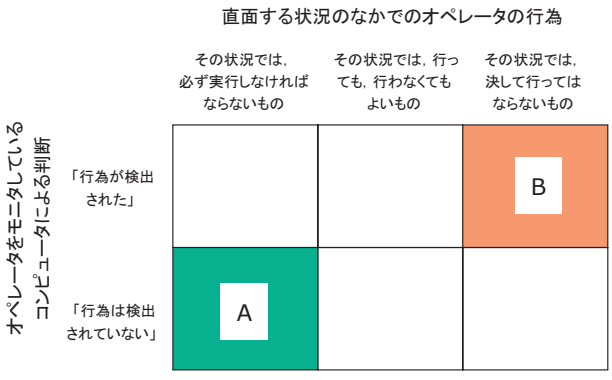

図4　機械の判断による権限委譲

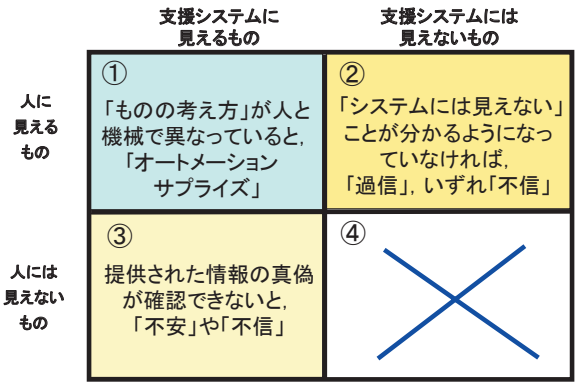

図5　限りある能力の組合せ

速で接近する車があるのに，ドライバーが車線変更をしようとしていることが検出されるといったケースである．現在の自動車技術では，ドライバーのステアリングにはかかわりなく，車輪の向きを制御することが可能であるが，「不適切な車線変更」が行われようとしたとき，コンピュータがそれを阻止する（ステアリングに関する権限を，人からコンピュータに委譲させる）ことは許されるだろうか．

9．限りある能力の組合せ

人にも，人を支援しようとする機械にも，おのずと能力には限界がある．「目」でものを見るというケースを取り上げて，人と支援システムの視認能力の組合せを示したものが図5である[24]．人にも見えず，支援システムにも見えない領域4は対象外として，その他の三つの領域について考察してみよう．

支援システムとそのユーザ（人）の能力が一致している領域1は理想的と思われるかもしれない．しかし，たとえ「同じもの」を見ても，「支援システムがどう考えるか（あるいは，支援システムの設計者が，そのシステムにどのように考えさせようと考えたか）」は，「ユーザがどう考えるか」と一致するとは限らない．特に，支援システムが自律的な判断・制御能力を持つものであれば，そこに組み込まれている「ものの考え方」が極めて複雑なものであったり，ユーザと異なっていたりした場合は，「なぜ今，こんな制御をするのだ!」とユーザが叫びたくなるようなオートメーションサプライズが起こり得る．

領域2では，「支援システムには見えていない」ことをユーザが知ることができるようになっていなければ，ユーザは，「支援システムがきちんと教えてくれる（あるいは，対応してくれる）はず」との過信に陥ることがある．しかし，期待していた機能が果たされないことを一度でも経験すると，それは，支援システムに対する不信をもたらすことになり得る．

では，領域3ではどうだろう．「人には見えないところにある危険を知らせる」という能力を売り物にする支援システムが，「危険あり!」の情報を提供してくれたとしよう．ユーザは，自らの目でその危険（すなわち，提供された情報の真偽）を確認することはできない．「本当か?」との不安を抱くこともあるであろうし，「以前も同じような状況で誤報があったが・・・」などといった不信が頭をよぎることもあるかもしれない．

10．あとがき

人を支援することを使命とする機械が高度な知能と自律性を獲得してきた過程を振り返りつつ，自動化技術の光の側面と影の側面についての考察を進めてきた．また，人と機械が「対立の構造」に陥るのではなく，互いに能力の限界を補い合いながら，長所を伸ばし合えるようなヒューマンマシンシステムを実現していくために，今，何が課題となっているかを明らかにしようとしたが，あえて結論めいたものは示さなかった．

それらの問題はいずれも深い検討を必要とするものであり，限られた紙面の中で議論し尽くすことは到底できることではない．読者諸賢とともに，更なる考察を深めていくことができるきっかけとなれば幸いである．

なお，最近，2001年1月の焼津上空でのニアミス事故について，管制官の過失責任を認定する判決が示された．ヒューマンファクタの視点からは，人に対して異様に厳しい判決ではないかとも思われるものである．

過失とは，法律が要求している注意に反するという意味での不注意（注意義務違反）であり，行為者の「結果予見義務」と「結果回避義務」とから成る．「意識を集中しておれば結果の発生を予見でき，その予見に基づいて結果の発生を回避できたはずであるが，意識の集中を欠いたために結果を予見せず，結果を回避できなかった」ならば，過失責任が問われる．しかし，過失を巡っては，「不注意で結果を予見しなかったことに過失の本質がある」とする旧過失論，「結果の予見可能性があったとしても結果回避義務を果たしている限りは過失犯が成立しない」とする新過失論，具体的な結果の予見可能性は要求せず，「何かよくないことが起こるかもしれないといった漠然とした危惧感があるなかで，その危惧感を払拭する結果回避措置をとらなかったなら過失犯が成立する」と考える新・新過失論など，視点を異にする学説があって相互に対立が見られる．

一方，ヒューマンマシンシステムの分野では，事故を未然防止できなかった理由を，「状況認識が適切でなかった点」に求めることがある．状況認識に三つのレベルが定義できることは，既に述べたとおりである．

制御対象となるシステム（例えば，交通移動体）の複雑化・高速化は，状況認識に許される時間を短くしているだけでない．自動化システムの高機能化・高度自律化は，異常の知覚（レベル1の状況認識）を難しくするだけでなく，異常原因の特定（レベル2の状況認識）も困難なものにしている．このことは，必然的に，レベル3の状況認識の獲得を難しくしている．すなわち，過失責任を問うための構成要件である「結果予見」が，実は本質的に難しいものであることを示唆している．

人に対して過失責任を問うことは，時には必要かもしれな

い．しかし，現在のシステムの複雑さを考えたとき，安易に過失を問うことは適切ではない．

人が過失責任を問われかねないような状況に追い込まれたとき，その状況から救うことができるような自動化システムの実現は考えられないだろうか．

文　献

(1) 稲垣敏之, “ヒューマン・マシン・システム-高信頼性が損う安全性,” システム／制御／情報（システム制御情報学会誌）, vol. 41, no 10, pp. 403-409, 1997.
(2) Boeing Commercial Airplanes, Statistical Summary of Commercial Jet Aircraft Accidents, 2007.
(3) 渡利邦宏, “航空機操縦装置の進化と自動化,” 航空運航システム研究会雑誌,no. 20,pp. 39-48,2004.
(4) 塚原利夫, “航空機における機器の発達と操縦の安全確保—ヒューマンファクターとのかかわり,” 航空運航システム研究会雑誌,no. 20,pp. 49-57,2004.
(5) ICAO, Human factors training manual, Doc 9683-AN/950, 1998.
(6) 稲垣敏之, “絶対安全への挑戦: 人を支援する知的技術,” 人工知能誌, vol. 17, no. 6, pp. 732-737, 2002.
(7) L. Bainbridge, “Ironies of automation,” Automatica, vol. 19, no. 3, pp. 775-779, 1983.
(8) 松本理一郎, “IATA安全報告2006—世界の航空安全の状況（1）,” 安全飛行, no. 249,pp. 6-12,2007.
(9) T.B. Sheridan, Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, MIT Press, 1992.
(10) J. Rasmussen and L.P. Goodstein, “Decision support in supervisory control,” Proc. IFAC Man-Machine Systems, pp. 79-90, 1985.
(11) M.R. Endsley, “Towards a theory of situation awareness in dynamic systems,” Hum. Factors, vol. 37, no.1, pp. 32-64, 1995.
(12) D.G. Jones and M.R. Endsley, “Investigation of situation awareness errors,” Proc. 8th Int’l Symp. Aviation Psychology, pp.746-751, 1995.
(13) P. Sparaco, “Human factors cited in French A320 crash,” Aviation Week and Space Technology, pp. 30-31, Jan. 3, 1994.
(14) 岡野正治, 事故のモンタージュV, 全日空総合安全推進委員会, pp.51-82, 1993.
(15) J.D. Lee and N. Moray, “Trust, self-confidence, and operators’ adaptation to automation,” Int. J. Hum.-Comput. Stud., vol. 40, pp. 153-184.
(16) N.B. Sarter,D.D. Woods, and C.E. Billings, “Automation surprises,” in Handbook of Human Factors and Ergonomics, 2nd Ed., G. Salvendy, Ed. pp. 1926-1943, Wiley, 1997.
(17) D. Hughes and M.A. Dornheim, “Accidents direct focus on cockpit automation,” Aviation Week and Space Technology, pp. 52-54, Jan. 30, 1995.
(18) 航空事故調査報告書, 中華航空公司所属エアバス・インダストリ-式A300B4-622R型B1816, 1996.
(19) D.D. Woods, “The effects of automation on human’s role: Experience from non-aviation industries,” in Flight Deck Automation: Promises and Realities, S. Norman and H. Orlady, Eds., NASA CP-10036, pp.61-85, 1989.
(20) C.E. Billings, Aviation Automation - The Search for a Human-Centered Approach, LEA, 1997.
(21) 例えば,国土交通省自動車交通局ホームページ,第4期先進安全自動車推進計画.
(22) 例えば,（社）自動車工業会, “車両の安全性向上への技術”, http://www.jama.or.jp/safe/technique/
(23) 自動車技術会, “2030年自動車はこうなる-第2部,” 技術分野の専門家が描く『自動車技術発展シナリオ』,p. 36, 2007.
(24) 稲垣敏之, “運転支援とセンシング:支援がもたらす新たな課題,” 自動車技術, vol. 61, no. 2 , pp. 4-9, 2007.
(25) 稲垣敏之, “リスク環境における人と知能機械の協調をデザインする,” 信学誌, vol. 89, no. 12, pp. 1026-1031, Dec. 2006.
(26) 交通事故総合分析センター ,交通事故例調査・分析報告書, 2003.
(27) T. Inagaki, “Design of human-machine interactions in light of demain-dependence of human-centered automation,” Cognition Technology & Work, vol. 8, no. 3, pp. 161-167, 2006.
(28) W.B. Rouse, “Adaptive aiding for human/computer control,” Hum. Factors, vol. 30, no. 4, pp. 431-443, 1989.
(29) M.W. Scerbo, “Theoretical perspectives on adaptive automation,” in Automation and Human Performance, R. Parasuraman and M. Mouloua, Eds., pp. 37-63, LEA, 1996.
(30) T. Inagaki, “Adaptive automation: Sharing and trading of control,” in Handbook of Cognitive Task Design, E. Hollnagel, Ed., pp. 147-169, LEA, 2003.
(31) T. Inagaki and T.B. Sheridan, “Authority and responsibility in human-machine systems: Is machine-initiated trading of authority permissible in the human-centered automation framework?” Proc. Applied Human Factors and Ergonomics 2008 , 10 pages in CD-ROM, 2008.

（平成20年7月8日受付 平成20年7月11日最終受付）

稲垣　敏之（正員：フェロー）

昭49京大・工・機械卒．昭54同大学院博士課程了．同年ヒューストン大．昭55筑波大, 現在, 教授．工博．システム信頼性・安全性，人間機械共生系の研究に従事．IEEE Reliability Society Japan Chapter Chair，リスク研究ネットワーク（NOE）会長等を歴任．現在，国土交通省ASV推進検討会委員，等．平6システム制御情報学会論文賞，平10ヒューマンインタフェース学会論文賞，平16自動車技術会秋季大会優秀講演発表賞，等各受賞．