

10. ハザード解析における事前確率の効率的な推定方法について

航空交通管理領域 ※天井 治, 住谷 美登里, 松岡 猛

1 はじめに

幸いにもインシデントで止まるものも含めて、残念ながら航空機事故は絶えない。国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization : ICAO）では、国際民間航空条約の第 11 附属書「航空交通業務」に「新方式の導入など航空交通管制（Air Traffic Control : ATC）システムのリスクを伴う変更の際し、事前／事後のリスク評価を行い、そのリスクを許容できる範囲内に抑え続けなさい」（Annex 11 2-26）^[1]という趣旨の記述が 2000 年に追加され、このような場合のリスク評価が義務化された。以来、日本でも ATC 関連のリスク評価が頻繁に行われている。例えば、RNP AR（Required Navigation Performance - Authorization Required : 特別許可を要する航法性能要件）進入方式^[2]の導入時には飛行運用安全性評価（Flight Operational Safety Assessment : FOSA）と呼ばれるハザード解析のための会議が実施されている。

国際民間航空機関の安全性管理マニュアル（Safety Management Manual : SMM）^[3]では図 1 に示すような縦軸に重大さ（Severity）、横軸に発生頻度（Frequency）をとったリスクマトリクスと呼ばれる表を使用してリスク評価を行うことを推奨している。上述の FOSA 会議でも、このようなリスクマトリクスが使用されている。

しかし、リスクマトリクスは発生頻度や重大さを推定する時点で評価者の主観が入った定性的なものになっていると考える。更に、リスクが数値として得られないため、残留リスクに関する定量的な検討ができない。尚、本稿では、そのままでは許容可能基準値を満たさないため、リスク軽減策を講じてリスクを許容可能基準以下に抑えても残ってしまうリスクを残留リスクと呼ぶ。許

容可能基準を元々下回っているハザードのリスクも、残留リスクと考える。

	発生頻度					
	殆どあり得ない	極めて起こりにくい	起こりにくい	やや多い	頻繁	
重大さ	壊滅的	要軽減策	要軽減策	許容不可	許容不可	許容不可
	危険	許容可能	要軽減策	要軽減策	許容不可	許容不可
	高い	許容可能	要軽減策	要軽減策	要軽減策	許容不可
	低い	許容可能	許容可能	要軽減策	要軽減策	要軽減策
	極小	許容可能	許容可能	許容可能	要軽減策	要軽減策

図 1 リスクマトリクスの例

リスクを定量的に評価しようとする試みは他にも行われており、産業界の検討グループである ARMS（Aviation Risk Management Solutions）による提案^[4]や最近では無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle : UAV）のリスク評価において重量や速度を基に衝突時のエネルギーを考えた重大さの定量的推定^[5]などがある。

我々はハザードの定量的評価手法について 5 年程前から研究を続け、提案^{[6]-[13]}している。提案手法ではハザードの発生頻度は人的過誤確率（Human Error Probability : HEP）^[14]や Performance Shaping Factor（PSF）^[15]などを用いて数値化し、重大さについては 5 段階評価したものを数値化する。得られたハザードのリスク値は足し合わせることができ、これを用いて残留リスクの合計を計算できるようにする。ハザードは詳細に分けるほど推定精度が向上し、漏れが少なくなることでリスクの過小評価も抑えられる。

本稿では、上記の残留リスクの合計の推定を目

標とした開発中の提案手法に関して概説する。特に「事象」と「出来事」の概念を取り入れて、「事前確率」を推定する方法について報告する。

2 安全性評価

2.1 国際民間航空機関の動向

国際民間航空機関（ICAO）では、2006年に安全性管理マニュアル（SMM）^[3]の第1版が発行された。その後、第2版（2009年）、第3版（2013年）と改訂が続けられ、昨年（2018年）に最新版である第4版が発行された。

SMMの中には、2000年にAnnex 11^[1]に加えられたリスク評価の具体的な推奨実施方法が記載されている。版により内容が異なり、第1版に記載されていた定量的な評価手法が第2版からは抜けて、リスクマトリクス等を用いたハザード解析に重点が置かれるようになっている。

また、2013年11月に第19附属書「安全管理(Safety Management)」^[16]が新たに発行された。附属書のひとつとして作成されたことは、ICAOにおける安全管理への関心の高さが伺える。2016年に改訂され最新版は第2版となっている。

2.2 ハザード

米国航空局（Federal Aviation Administration : FAA）が1998年に発行した文書 Safety Risk Management (FAA ORDER 8040.4)^[17]では、ハザード (Hazard) は、「予期しない、または期待しない出来事を導いたり、その原因となったりする状態、事象、状況」と定義されている。この文書は、2012年と2017年に改訂され、2017年版である8040.4B^[18]では、旧版で「事故」とされていた対象が具体的に「航空機事故」となっている。

本稿では、これに倣い「航空機事故等の期待しない出来事の原因となる状態、事象、状況」をハザードと呼ぶことにする。ここで主対象とする航空機は、航空管制の対象となる航空機とし、軍用

機やUAVは含めないことにする。

2.3 ハザード解析

ハザード解析はハザード同定（Hazard Identification）とリスク評価（Risk Assessment）に分けられる。ハザード同定はハザードを見つける（洗い出す）ことで、リスク評価は、そのハザードに対するリスクを定性的または定量的に推定し、評価することである。図2に概念を示す。

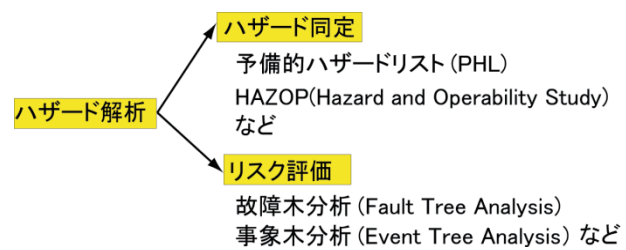


図2 ハザード解析

ハザード同定をし易くする方法として予備的ハザードリスト（Preliminary Hazard List）^[19]やHAZOP (Hazard and Operability Study)^[20]がある。HAZOPでは、あるプロセス（例えば、ランディングギアの操作）に対し、「早い」、「遅い」、「ない」などの当該プロセスからのズレを考慮してハザード同定をし易くする。

リスク評価の手法としては、故障木分析（Fault Tree Analysis : FTA）^[21]や事象木分析（Event Tree Analysis : ETA）^[22]、原因結果解析（Cause-Consequence Analysis : CCA）^[23]等がある。

3 提案する定量的リスク評価手法

3.1 概要

本稿では事前確率を「あるハザードを考えると、直接の原因となる人的過誤が起こる条件が揃う確率」と定義する。直接の原因となる人的過誤確率や心理・環境等の状況を考慮するための値（PSF^[15]値）を含めない値である。

ハザードのリスク値 R_H は次式で推定する。

$$R_H = P_c \times HEP \times PSF \times S \quad (1)$$

ここで、 P_c は当該ハザードが起こる事前確率、HEPは人的過誤（ヒューマンエラー）確率、PSFはPSF値、Sは結果の重大さの値を表す。尚、本稿で取り扱うハザードは、最終的には人的過誤が原因で起こるものとしている。複数の人的過誤が重なって起こるハザードも考慮している。

推定された R_H が許容可能基準値THに対して次式を満たさない場合には、(2)式の通りリスク軽減策によりリスクを軽減し、TH未満に抑える。

$$R_H < TH \quad (2)$$

3.2 人的過誤確率（HEP）

人的過誤を起こす確率は文献調査により収集した。人的過誤には様々な種類があり、それらが起こる確率はそれぞれ異なると考える。調査当初は原子力関係のものが多かったが、航空管制に関連するHEPに関する文献を多数探し当てた。それらを用いてHEPのリストを更新した。リスト中のHEPの数は100個を超えている。リストの一部を表1に示す。尚、HEPの項目内の括弧書きは、確率の範囲を示す。

表1 人的過誤確率のリストの一部

項目	一般的記述	具体的動作	人的過誤確率 (HEP)	参考文献
簡単な日常的作業	うっかり間違い	物理的間違い(二択)	2×10^{-3} (8×10^{-4} ~ 4×10^{-3})	(Gibson & Kirwan, 2008) ^[24]
		意図しないキー制御	9.8×10^{-4} (1.5×10^{-4} ~ 3.3×10^{-3})	(Preischl & Hellmich, 2013) ^[25]
		意図しない押しボタンの押下	1.18×10^{-3} (1×10^{-4} ~ 3.9×10^{-3})	(Preischl & Hellmich, 2016) ^[26]

3.3 Performance Shaping Factor (PSF)

PSF値についても同様に文献調査を行い、リストを作成した。この値は、心理状態や環境、作業

の困難度等により人的過誤確率が変わるという仮定の下でその状況に対する重みとして用いる。例えば、緊張感が高い場合には2倍^[27]、動的な困難作業の場合には5倍^[12]などである。

3.4 重大さの数値化

重大さ（Severity）も論理的検討にて数値化を行った^[13]。表2にその値を示す。5段階評価を数値化したものである。英国安全衛生庁（Health and Safety Executive : HSE）の統計値^[28]と照らし合わせて数値の妥当性を確認している。

表2 重大さの値

重大さ	値	状況
極大	1	100人程度の死亡事故
大	1.5×10^{-3}	1人程度以上死亡+傷害発生
中	3.0×10^{-5}	傷害発生, 経済的損失大
小	6.0×10^{-7}	軽度傷害発生, 遅延, 乗客に不都合発生
極小	1.2×10^{-8}	カスリ傷程度発生, 何らかの影響発生

3.5 事前確率

本稿では、ハザードはスレット（Threat: 脅威）が重なった場合に起こると考える。ハザード同定について、当初は基本的に航空管制リアルタイムシミュレーション実験^{[29], [30]}の観察から得られたハザードのみを考えており、事前確率も実験の総試行回数中、何回その状況があったか等から推定していた。

しかし、この場合にはスレットは実験で観測された危険な状況そのものとなり、そのスレットがハザードに直結していたため、複数のスレットが連続して起こった場合などには対応できていなかった。これを解決するため、下記の「事象」と「出来事」を考えて対応することにした。

3.5.1 事象

まずスレットの原因となりそうな状況を「事象」

として列挙することにした。これらの洗い出しには、航空管制業務経験者にも議論に参加してもらい、多くの貴重なご意見を頂いた。[付録]に現在までに洗い出された全ての事象の一覧表を添付する。大分類は現在9種類で、細分類の数は現在137個ある。

人的過誤と考えられる事象についても、ハザードを同定し易くするために事象一覧の中に入れることにした。人的過誤は現在ほんの一部しか取り込んでいないが、既に100以上の人的過誤確率のリストがある。これらをどのように取り込むかも検討する必要がある。

表3に事象一覧の一部を示す。自衛隊及び米軍の訓練空域等を考える場合、空域環境—エリア—制限空域—Militaryとなる。これは回避のみでなく、空域管理（ASM）での調整の結果、制限空域内の飛行が可能となった場合も含む。

表3 事象の例

大分類	中分類	小分類	細分類
空域環境	エリア	制限空域	Military 騒音回避
...			
気象			積乱雲
...			
通常業務からの逸脱	緊急事態		エンジントラブル
	...		
	異常事態		ドローンが空域に侵入

3.5.2 出来事

ある事柄が起こるが、それは脅威とは考えられないという場合もあるため、本稿ではスレットの代わりに以後「出来事」という言葉を使用する。

表4に事象および出来事を用いたハザード同定の例を示した。横軸に事象1～n, 出来事1～m, PSF, 人的過誤, ハザードを取ってある。事象は付録に示したような事象一覧の中から選択する。大分類—中分類—小分類—細分類とハイフンで

繋げて示す。0出来事はその事象から思いつく出来事を記載する。出来事に対し、それが人的過誤が原因で起こると考える場合、それを人的過誤（確率）のリストから選択する。必要に応じてPSFもリストから選択する。ハザードはその人的過誤により発生すると思われるものを記載する。

例では、事象の背景色を緑色に、人的過誤のそれを桃色に、ハザードのそれを黄色にした。この例ではハザードは三つある。同定されたハザードに対し、どの事象が係わっているかを分かり易くするため、事象から橙色の点線の矢印を延ばした。一番下のハザードでは四つの事象が係わっている。出来事には、ハザードに係わる出来事について青矢印で示した。人的過誤も幾つの人的過誤が関係しているかを桃色の矢印で示した。

事象として「気象—積乱雲」を考えた場合、出来事として「パイロットからの積乱雲回避要求」が思いつく。これに対し、その要求への管制官の許可の有無が考えられる。基本的に許可するという話を聞いているが、ここでは周辺のトラフィックとの関係や管制官の積乱雲の強さの見積もりの甘さ等により、許可しない場合も考える。

許可しなかった場合、タービュランス等により客室乗務員が負傷する状況をハザードと考える。人的過誤は「誤判断」と考える。許可した場合にも、近くのトラフィックの見誤りによって、二つのハザードが考えられる。詳しい説明は省くが、表4の最後のハザードでは、間接的な原因となる人的過誤は「見誤り」で、直接原因となる人的過誤は「言い間違い」である。言い間違いの要因となる「焦り」はPSFとして加えた。

3.5.3 事前確率の計算方法

事前確率の計算には、各事象に対し、その発生確率の推定が必要となる。例えば、空域環境—フェーズ—下降中では、当該ターミナルエリアにおける下降中の平均飛行時間等を求める必要があ

る。但し、これは対象空港によっても異なるため、各空港での下降中の平均飛行時間を見積もっておく必要がある。付録の事象一覧は細分類までであるが、更なる分類も必要になる可能性がある。また、出来事の繋がりが並列で無い場合には、条件付き確率で計算できるように検討している。

4 課題

提案手法には、現在、以下の課題が考えられる。本手法では可能な限り定量的に評価できることを目指しているが、現在は重大さの評価の段階で主観が入ってしまっている。第1章で示したUAVでの衝突エネルギーを考える方法^[5]等の考え方を上手く取り込むことが望ましい。

事象について、航空管制経験者の方々のご意見を伺ったが、パイロット等航空機側の意見が反映されていないと考える。パイロット等航空機側の

関係者のご意見も伺うことが必要である。

5 まとめ

同定されたハザードに対し、定量的な値を算出できるハザード解析手法を検討している。今回、「事前確率」を求めるために「事象」と「出来事」を考えることを提案した。そして提案手法で使用している概念やその数値及び「出来事」を考えたハザード同定手法について説明した。

今後は、事前確率の推定方法を丁寧に検討して行きたい。また、事象一覧についても更に修正を重ねて項目を充実して行く予定である。

謝 辞

ハザード解析手法の議論にご協力頂きました航空管制経験者の方々および山 康博客員研究員に深く感謝申し上げます。

表 4 出来事を用いたハザード同定例

事象1	事象2	事象3	事象4	出来事1	出来事2	出来事3	出来事4	出来事5	出来事6	PSF	人的過誤	ハザード
気象 —積乱雲				航空機Aからの積乱雲回避要求	管制官が回避要求を許可しない 管制官が回避要求を許可する						誤判断	客室乗務員の負傷
	交通状況 —近くにトラフィックあり				管制官が近くのトラフィック(航空機B)を見誤る						見誤り	航空機AとBとの異常接近
		行動— 管制官— 通信— 通信の 割り込み 対応				管制官は航空機Bに終始気付かない。 航空機Bに気づき、航空機Bに回避指示を出そうとしたが、通信の割り込みにより、対応が遅れる。						見誤って、更に言い間違える。
			行動— 管制官— 通信— 通信の 言い間違い(存在しないコールサイン)				焦って存在しないコールサインを言う				焦り 言い間違い	航空機AとBとの異常接近
								航空機Bは無反応				航空機AとBとの異常接近

文 献

- [1] AIR TRAFFIC SERVICES Annex 11 to the convention of International Civil Aviation, ICAO, 13th Edition, 2001.
- [2] Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual, ICAO Doc 9905, First Edition, 2009.
- [3] Safety Management Manual (SMM), ICAO Doc 9859, Third Edition, 2013.
- [4] The ARMS Methodology for Operational Risk Assessment in Aviation Organisations, ARMS Working Group, v.4.1, March 2010.
- [5] David Arterburn et al., "Final Report for the FAA UAS Center of Excellence Task A4: UAS Ground Collision Severity Evaluation Revision 2," Apr. 2017.
- [6] 藤田, 天井, "混合進入方式とその安全性解析手法の初期検討," 電子情報通信学会技術研究報告(信学技報) SSS2013-1, 2013年5月.
- [7] 天井, 藤田, 松岡, "Safety Caseの作成によるRNP AR(特別許可を要する航法性能要件)進入方式等と従来方式との混合運用に関する安全性分析について," 信学技報 SSS2014-3, 2014年4月.
- [8] 松岡, 天井, "航空管制における混合進入方式の安全性評価のためのヒューマンエラー確率の推定法," 信学技報 SSS2015-2, 2015年5月.
- [9] 天井, 松岡, "単一滑走路におけるRNP ARとILS進入方式の混合運用の安全性について," 日本信頼性学会誌「信頼性」, 37(5), pp.220-227, Sep. 2015.
- [10] 天井, 住谷, "提案するハザード解析手法と支援ソフトウェアの課題," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-13-1, 2018年9月.
- [11] 住谷, 天井, "航空管制関連ハザードの前提条件に関する一考察," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-13-3, 2019年3月.
- [12] 天井, 住谷, 松岡, "定量的ハザード解析のための前提条件等の定量化," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-13-4, 2019年3月.
- [13] T. Matsuoka and O. Amai, "Evaluating human error data for hazards in air-traffic control and deriving a quantitative safety index," Intl. J. Aviation Management, 10.1504/IJAM.2019.098384, Mar. 2019.
- [14] NUREG/CR-4639 EGG-2458 Vol.5, Revision 4, Nuclear Computerized Library for Assessing Reactor Reliability (NUCLARR) Part 2: Human Error Probability (HEP) Data, 1994.
- [15] A.D. Swain and H.E. Guttman, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications," Final report, NUREG/CR-1278, 1983.
- [16] AIR TRAFFIC SERVICES Annex 19 to the convention of International Civil Aviation, ICAO, 1st Edition, July 2013.
- [17] FAA, "Safety Risk Management," FAA ORDER 8040.4, June 1998.
- [18] FAA, "Safety Risk Management Policy," FAA ORDER 8040.4B, May 2017.
- [19] Department of Defense, "SYSTEM SAFETY," MIL-STD-882E, May 2012.
- [20] Geoff Wells, "HAZARD IDENTIFICATION AND RISK ASSESSMENT," Institution of Chemical Engineers UK, 1996.
- [21] B.E.Goldberg et al., "System Engineering "Toolbox" for Design-Oriented Engineers," NASA Reference Publication 1358, Dec. 1994.
- [22] Clemens, P.L. and Rodney J. Simmons, "System Safety and Risk Management," NIOSH Instructional Module, Mar. 1998.
- [23] D.S. Nielsen, O. Platz, B. Runge, "A Cause-Protection System," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 24, No. 1, Apr. 1975.
- [24] W. Huw Gibson and Barry Kirwan, "Application of the CARA HRA Tool to Air Traffic Management Safety Cases," EUROCONTROL report, 2008.
- [25] W. Preischl and M. Hellmich, "Human error probabilities from operational experience of German nuclear power plants," Reliability Engineering and System Safety, 109, pp. 150-159, 2013.
- [26] W. Preischl and M. Hellmich, "Human error probabilities from operational experience of German nuclear power plants Part II," Reliability Engineering and System Safety, 148, pp. 44-56, 2016.
- [27] D.I. Gertman et al., "INTENT: a method for estimating human error probabilities for decision based errors," Reliability Engineering and System Safety, 35, pp.127-136, 1992.
- [28] HSE, Costs to Britain of Workplace Fatalities and Self-Reported Injuries and Ill Health, 2013/14 [online] <http://www.hse.gov.uk/statistics/pdf/cost-to-britain.pdf> (accessed 10 July 2018).
- [29] O.Amai and T.Matsuoka, "Air Traffic Control Real-time Simulation Experiment Regarding the Mixed Operation between RNP AR and ILS Approach Procedures," 2015 IAIN World Congress, Prague, Czech Republic, Oct. 2015.
- [30] 天井, "航空管制リアルタイムシミュレーション実験のための航空交通密度の解析," 日本航空宇宙学会飛行機シンポジウム 2F04, 2017年10月.
- [31] 天井, "混合運用においてRNP AR進入方式で飛行する航空機の飛行時間の短縮効果について," 日本航空宇宙学会飛行機シンポジウム 3C09, 2018年11月.

[付録] 事象一覧（現在までに洗い出された全ての事象）

表 A-1 事象一覧

大分類	中分類	小分類	細分類			
空域環境	エリア	制限空域	Military 騒音回避 洋上 レーダ覆域内(レーダの種類を記述) ターミナル管制空域(対象空港を記述) タワー管制空域(対象空港を記述) 空港周辺			
		フェーズ		地上走行中 離陸 上昇中 エンルート 下降中 最終進入中 着陸		
			経路	交差路(交差角を記述) 一方通行 平行経路		
			運用規定	管制方式	管制間隔(数値を記述) AR経路優先 視程(カテゴリーまたは数値を記述)	
				運用時間	騒音等での禁止時間帯を記述	
			地形	地上障害物	山 建物 山岳波(気象と絡む)	
	滑走路			滑走路本数 滑走路長 滑走路変更		
	時間帯			早朝、夕方(太陽との関係) 混雑時 深夜(配置人員との関係等)		
		気象		風向風速 濃霧 積乱雲 台風 積雪(滑走路との関係) 大雪(視程) 雷雨 山岳波(地形と絡む) 砂埃		
			情報提供の欠如		緊急異常事態の伝達 被管制機の周囲の航空機の状況 滑走路面の状態	
	通常業務からの逸脱		緊急事態(優先権あり)		燃料不足 ハイジャック 機内トラブル エンジントラブル 急患	
			異常事態		ドローンが空域に侵入 VFR機の迷い込み	
			特別業務		VIP搭乗機の扱い 飛行検査機への対応(管制官側) 実機訓練 緊急発進への対応 救難フライト	
				非日常状態		ILS更新でのVORアプローチ 停電 地震 火山噴火
				突発的事象		航空機からの緊急事態等の宣告 緊急降下 予期せぬ警報
			滑走路閉鎖	インシデント		バードストライク パンク 滑走路点検 滑走路陥没 滑走路上の事故(胴体着陸、オーバーラン等)

表 A-2 事象一覧（続き）

大分類	中分類	小分類	細分類	
交通状況			航空機間の位置関係（ヘッドオン等）	
			近くにトラフィックあり	
			交通密度	
			進入復行	
管制および機上システムの状況	機器	地上機器	管制システムの故障（RDP、FDP系）	
			メンテナンスによる使用制限	
			故障による使用制限	
		豪雨による浸水		
		通信機器のトラブル（ハード）		
		整備不良		
	機上装置	FMSの故障		
		GNSS関連の不具合		
		航法関係装置の故障		
	通信			通信機器のトラブル（ハード）
				整備不良
				通信ブロック（通信機器常時ON状態）
通信の同時送信				
通信の不設定				
類似したコールサイン（システム設計）				
行動	管制官	通信	通信の頭が切れる。	
			通信の割り込み対応	
			通信のタイミングが遅れる。	
			通信の言い間違い（存在しないコールサイン）	
			通信の言い間違い（他機のコールサイン）	
			通信の言い間違い（速度）	
			通信の言い間違い（高度）	
			通信の言い間違い（針路）	
			通信の言い間違い（直行地点名）	
			通信内容の齟齬	
			通信の聞き間違い	
			通信量が無駄に多い	
		通信内容が不明瞭		
		身体状況	体調不良	
		思考	状況をうまく把握できない	
			ホワイトアウトになり思考が停止する	
			認識を誤る	
			認識が遅れる	
	判断を誤る			
	判断が遅れる			
	予測を誤る			
	パイロット	通信		規定違反
				居眠り
				語学力不足
				通信の頭が切れる。
				通信のタイミングが遅れる。
				通信内容の齟齬
		ATC通信の聞き間違い		
		ATC通信の聞き逃し		
		通信の言い間違い		
復唱間違い				
ATCの指示に対する行動遅れ				
通信量が無駄に多い				
通信内容が不明瞭				
身体状況	体調不良			
思考	状況をうまく把握できない			
	操縦席内での認識の齟齬			
	認識を誤る			
	認識が遅れる			
	判断を誤る			
	判断が遅れる			
予測を誤る				
	機器の操作ミス			
	規定違反			
	居眠り			
	語学力不足			
	FMSの設定ミス			
技能			経験	
			知識	
			技量	
			資格	