



舶用機関事故における人的要因の多次元的分析

中村, 真澄

(Degree)

博士 (海事科学)

(Date of Degree)

2016-09-25

(Date of Publication)

2017-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6759号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006759>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

船用機関事故における
人的要因の多次元的分析

(Analysis of Multi-Dimensional Approach for Human Factors
concerning Marine Engine Accident)

平成 28 年 8 月

神戸大学大学院 海事科学研究科

中村 真澄

目次

第1章 序論	4
1.1 研究背景.....	4
1.2 研究の目的.....	6
1.3 本論文の構成	7
第2章 機関事故の現状及び人的要因を考慮した機関事故防止への取組み	9
2.1 本章の目的.....	9
2.2 海難審判所の現状.....	9
2.2.1 海難発生状況.....	9
2.2.2 機関事故海難の原因分析.....	10
2.3 船用機関故障事例集	11
2.3.1 船用機関故障事例集の原因分析.....	12
2.4 人的要因を考慮した機関事故防止の取組み.....	13
2.4.1 IMOにおける取組み.....	14
2.4.2 海難審判所の取組み.....	15
2.5 結語.....	15
第3章 海難審判における機関事故の分類と機関事故分析への適応.....	17
3.1 本章の目的.....	17
3.2 機関士エラーと人的要因.....	17
3.2.1 人的要因の定義	17
3.2.2 機関士エラーの定義.....	18
3.3 機関士の情報処理システムとエラーの発生過程	19
3.3.1 機関士のエラーメカニズム	19
3.3.2 機関士エラーに至った内的要因.....	21
3.3.3 機関士エラーの発生過程.....	22
3.4 機関士エラー発生過程要素細目分類.....	22
3.4.1 分類法の構成.....	22
3.4.2 分類法の各要素及び細目.....	23
3.5 分析対象データ	27
3.6 機関士エラー発生過程分類事例.....	27
3.7 分析結果に基づく機関士エラー.....	28
3.7.1 機関士エラーをもたらした原因.....	30
3.7.2 機関士エラーメカニズム.....	30

3.7.3 機関士エラーに至った内的要因.....	30
3.7.4 外観的エラーモード.....	30
3.7.5 行動に影響する因子.....	30
3.7.6 作業状況の因子.....	31
3.8 結言.....	31
第4章 船用機関事故特徴分析における新たな手法.....	33
4.1 本章の目的.....	33
4.2 機関士情報処理システムの特徴分析手法.....	33
4.2.1 研究対象.....	33
4.2.2 数量化Ⅲ類によるエラー分析.....	35
4.3 数量化Ⅲ類の概念.....	36
4.4 数量化Ⅲ類による機関士エラーの傾向.....	36
4.4.1 各成分の解釈.....	38
4.5 クラスタ分析について.....	38
4.6 クラスタ分析による機関士エラーのグループ化.....	41
4.6.1 各クラスタの傾向.....	43
4.6.2 クラスタ分析による考察.....	44
4.7 結語.....	44
第5章 各事象における機関士エラーの検証.....	46
5.1 本章の目的.....	46
5.2 分析対象データ.....	46
5.3 顕在事象と潜在事象の情報特徴.....	46
5.4 各事象における機関士情報処理システムの特徴分析.....	47
5.4.1 機関士エラーメカニズム.....	47
5.4.2 機関士エラーに至った内的要因.....	49
5.5 各事象における機関士エラーの特徴分析の比較.....	50
5.5.1 数量化Ⅲ類における機関士エラー分析の比較.....	50
5.5.2 クラスタ分析における機関士エラー分析の比較.....	52
5.6 結語.....	53
第6章 機関事故要因分析による根本原因の検証.....	55
6.1 本章の目的.....	55
6.2 分析対象データ.....	55
6.3 分析方法.....	55
6.4 探索的因子分析による因子抽出.....	56
6.5 確認的因子分析による因子構造の検証.....	57
6.6 結語.....	59

第7章 機関士と陸上管理部門の支援バランスに関するシミュレート	60
7.1 本章の目的.....	60
7.2 事故発生推移及び実態調査	60
7.3 システムダイナミクスの概要.....	61
7.4 基本モデルの検討.....	63
7.4.1 基本モデルの概要.....	63
7.4.2 基本モデルの構築.....	64
7.4.3 SDモデルによる試算.....	67
7.5 結語.....	73
第8章 総括.....	74
8.1 本研究の成果	74
8.2 今後の展望.....	76
8.2.1 インシデント情報の活用方法	76
8.2.2 シミュレータ訓練シナリオについて	77
8.2.3 海陸間に必要な関係要素の精査.....	77
8.3 結言	78
謝辞.....	80
付録.....	81
A. 数量化Ⅲ類.....	81
B. 因子分析	85
B-1.共通性の性質	86
B-2.推定	86
B-3.回転.....	86
B-4. 因子得点の推定.....	87
C 分散構造分析.....	87
C-1.未知パラメータの設定とモデル評価の基準.....	88
(1) χ^2 検定	88
(2) 適合度指標(GFI : goodness of fit index)	88
(3) 修正適合度指標 (AGFI : adjusted GFI)	88
D 重回帰分析	89
D-1 残差ベクトル	89
D-2 偏回帰係数	90
D-3 重相関係数	90
参考文献	91

第1章 序論

1.1 研究背景

今日の船舶の経営・管理体制は、国際化にともないその度に分業化が増加しつつある。さらに、国際競争力を高める為に、建造費の低減、外国人船員の採用、仕組船の採用、低質重油の使用、運航コストの削減が実施されてきた。船用機関システムにとっては、建造時の良さ、信頼性技術、その後の運航は保全技術に依存し、陸上からの支援技術が相互に有機的に作用することが不可欠である⁽¹⁾。そこで、海運業界や関連会社は、船用機関システムの信頼性・保全性、支援性の向上を目指してきた。近年、船用機器の信頼性は向上しているが、90年代から修復処置工数の増加傾向が顕著であり、搭載機器の変化や少人数化、あるいは混乗化によるヒューマンエラーの影響が考えられる⁽²⁾。システムの複雑化や組織の巨大化に伴い、ヒューマンエラーの発生がシステムに多大な影響をもたらすことが多くなっている⁽³⁾。ヒューマンエラーは、その時に潜在していた問題が複雑に絡みあった結果として、顕在化していることが多く機関士単一の原因に起因することは稀である。鉄道分野では、「どのような場面」における「どのようなエラー」が「どのような頻度」で「どのような被害」の事故に繋がる可能性があるのかのリスク評価方法の開発、さらに、その処置の優先度を把握するためのリスク管理支援方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾が研究されている。航空分野では、運航乗務員、航空管制官、整備員を対象に人的要因に関わる自由記述式のインシデント・レポートより人的要因インシデントの分析手法が開発され、危険要因の相関性、危険の程度、連鎖切断の事由等を総合的かつ客観的に把握し、改善策を検討する実証的研究が行われている⁽⁷⁾。また、航海分野では、「見張り不十分」「操船不適切」という、操船者のヒューマンエラーが事故全体の8割を占めることから、事故防止対策構築の為に、衝突海難事故におけるエラーの発生形態の分析が行われている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらの分野より、人的要因に関わる事故分析はトラブルを発生させた本人の責任追及のためではなく、当事者の過誤に導いた背景、すなわち、潜在的危険要因を探り、この要因を除去・回避するための改善策の検討が行われている。

本研究では、船用機関分野における人的要因における事故分析から機関士が過誤に陥る背景要因を総合的に探りだし、危険の程度の高い要因を把握することである。危機管理やリスク・マネジメントの領域で典型的な事例として2001年に発生した旅客船スターダイヤモンド機関損傷事事件⁽¹⁰⁾がある。この機関損傷事件は、機関士、船舶管理会社及び機関製造業者が機関損傷に影響を与えた事件である。

この機関損傷は、オイルミスト警報が発生し、同警報が誤報で無いことを確認した際、機関室当直者の措置が不適切で、主機のピストンとシリンダライナが焼付いて割損したことによって発生したものである。また、運航管理会社が、機関士に対し緊急を要する機関不調時の対応方法を十分に指導・教育していなかったこと及び、機関製造業者が、他社で発生したシリンダライナ損傷事故の情報を同型機関搭載船の運航管理会社に通知して注意喚起を怠った等、複数の要因が関連して発生した事例である。なお、本船は、2機2軸の多層甲板型カーフェリーであり、異音を認めた機関士が直ちに両舷主機を停止させた為、瞬間的に船内電源は喪失したが、惰力で進行し投錨できた。その後、片舷主機

のみ始動が可能となり港に向かい、同港で旅客と車両を降ろし修理を行った為、乗客には怪我はなかった。

当直機関士は、シリンダにオイルミスト警報が発生し、同警報が誤警報でないことを確認した場合、同警報が主機の減速要求を伴う重要な警報でブローバイや軸受過熱等の緊急事態が発生しているおそれがあったから、直ちに状況を機関長に報告して他の機関部乗組員の招集を求めるとともに、いつでも主機が停止できるよう軸発電機から補機駆動発電機に切り替えて船内電源を確保したのち、速やかに主機を減速あるいは停止するなど適切な措置を取る必要があった。

このように機器の異常を認識し、その状況を確認、機関損傷に至ってしまう動作を取るという一連の行動はその時の状況で常に変化しその過程も様々である。その原因について、船用機関に関する海難事故の分析研究では、損傷・事故の発生要因の約70%がヒューマンエラーによるものであると判断されており⁽¹²⁾、機関損傷による海難は、「機関士の犯すヒューマンエラー（以下、機関士エラー）」により発生している。近年、ヒューマンエラーに主眼を置いた海難防止への取組みが行われるようになり、なかでもエンジンルームリソースマネジメント（Engine-room Resource Management：以下「ERM」）は積極的に導入されている。また、国際海事機関（International Maritime Organization:以下「IMO」）でSTCW条約（船員の訓練及び資格証明並びに当直の基準に関する国際条約）の付属書が包括的に見直され、2017年1月より完全実施となる。この改正によりERMが強制要件化され、資源管理におけるリーダーシップ、チームワーク、明確な意思表示、状況認識力、チーム構成員の経験といった非技術的スキルを含む資格要件が明記され、船舶機関の運転管理に関わる人的資源の能力確保が求められるようになる。このSTCW改正条約では、ERMが強制要件となり、「承認されたシミュレータ訓練」が能力証明の一つとなる。ERMが導入されることで船舶機関士におけるヒューマン・リソースの活用が安全運航に有効かつ不可欠として求められ、今後は、シミュレータ訓練プログラムを構築して遂行し能力証明を行う具体的過程を検討する必要がある。

近年は、船用機関事故におけるヒューマンファクター及び、人間—機械システムに関する議論が頻繁にされている⁽¹¹⁾。その中で、椎原ら⁽¹²⁾は、日本海事協会で得られた事故不能及び減速航行を対象に、個々の損傷情報からヒューマンファクターの各要因がどのように損傷へ影響したか検討している。三友ら⁽¹³⁾は、船舶航行時の事故や船舶等大規模システムのトラブルに関するリスク評価手順についての流れと必要な手法について述べられている。有馬ら⁽¹⁴⁾は、海難発生後に視点を置き、海難発生を始点とし状況の変化によってどの程度の被害が発生するかというモデルを組み、モデルに基づいてシミュレーションを行い発生する事象とその因果関係について検討している。最近の海難審判所の裁決には機関士エラーやヒューマンファクターに関する記述がみられるようになり、海難審判所の「海難レポート」といった海難分析事例にも取り入れられているが、多数の事例研究の結果としてエラーとその結びつきを考慮した機関士エラーの特徴については論じられておらず、具体的な海難防止対策については触れられていない。これらの研究のように個々の損傷情報からヒューマンファクターの各要因がどのように損傷へ影響、あるいは確率論的な分析が主であり、機関損傷に関して潜在する危険要因を総合的・多角的に考察して機関士の過誤の態様と機関士として過誤に陥らせる背景要因との相関、かつ、マクロな視点から危険の要因は何か、事故への発展を阻止する回復事由の客観的

見極めに基づく適切な改善措置の検討及び、陸上支援側が機関士にどのような影響を与えるか検討したものがない。

機関士の機関事故防止行動を適切に実行する場合、まず異常を認識した後、機器の状況を識別し、機関トラブルが発生するおそれの有無を検出する。その結果、トラブルのおそれの発生を確認できれば適切な処置を決定し、実行に移す。このように機関事故防止行動は機関士の一連の情報処理システムに基づく行動と捉えることができる。本研究では、この「機関士の認知行動が情報処理過程に作用して機関事故防止行動を実行する情報処理の系統」を「機関士の情報処理システム」と定義した。

機関士エラーによる機関事故を防止するには、まず、実際に事故に関して機関士の情報処理システムに基づく事故分析を行い、機関士はどのような状況でエラーを犯すのか、エラーがどのように結びついて機関事故へと発展したのかを探る必要がある。

本研究では、機関事故発生までの機関士行動を機関士の情報処理システムとして捉え、発生した機関事故を分析し機関士エラーの特徴を抽出することが、大事故への発展を阻止する近道と考え検討する。また、船舶機関の安全管理における船上管理現場と陸上支援組織双方の人的要因分析を行い、事故の顕在化未然防止の為のシミュレータ活用の可能性と教育訓練機関ならびに船舶運航管理現場双方において、安全管理技術の向上を図ろうとするものである。

1.2 研究の目的

本研究では、2017年の改正STCW条約発効を控え、ERMを訓練ツールとして明確に捉え、展開するには、過去の事故分析から共通する根本原因を把握して反映させることが効率的な訓練プログラム構築を探る方法であると考えた。その第一歩として、機関事故の発生過程における機関士エラーを特定し、機関士の情報処理システム及びシステムに直接的、間接的に作用する人的要因との関連を調査する為に機関士エラー発生過程要素分類法を構築した。次に、構築した分類法を適用して海難審判裁決事例及び船用機関故障事例集から機関事故を分類、分析し機関士エラーの発生形態、機関士エラーの結びつき、運航環境が機関士エラーに及ぼす影響といった機関士エラーの特徴を解明し、機関損傷に関係する全ての要因がどの様に相互に関連しているか全体像から危険の程度の高い要因を把握する。その後、機関士エラーの因果関係を把握し、根本原因となる潜在因子を探り出す為に、人間エラーの発生過程路の定義を基に機関士エラーの潜在因子を因子分析によって抽出した。因子分析の結果を用いて因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析により検討した。その上で安全対策の実施方法について検討する為、著者らは複雑系シミュレーションツールのSD(System Dynamics)を活用して、船舶機関士と陸上管理部門との間における支援の需給バランスと機関士潜在因子の影響力の変動を分析する。SDは種々の要因が相互に影響し合うような複雑なシステムに対して利用されているシミュレーション分析ツールである。本研究では、陸上管理部門の支援が機関士の潜在因子にどのような影響を与えるか把握した上で、船舶機関士をスキルアップされるための効果的な支援方法を探ることを目的とし教育訓練モデルの基本構造を検討する。

1.3 本論文の構成

本論文では、海難審判裁決録及び船用機関故障事例集の事例を基に、機関損傷に関して潜在する危険要因を総合的・多次的に考察して機関士の過誤の態様と機関士として過誤に陥らせる背景要因との相関、かつ、マクロな視点から危険の要因は何か、事故への発展を阻止する回復事由の客観的見極めに基づく適切な改善措置と訓練プログラム構築の一方策の検討及び、陸上支援側の支援が機関士の潜在因子にどのような影響を与えるか検討する。

本論文は第1章から第8章で構成される。本論文の流れを Fig.1.1 に示す。

第1章では、近年の船舶の管理体制の変化とそれに伴う不安全要素と機関士エラーの実例を示す。また、ヒューマンエラーに主眼を置いた事故防止への取組みについて、国際海事機関が見直したSTCW条約内容を示し、これらが求める訓練プログラム及び能力証明の具体的過程について述べる。

第2章では、機関士エラーの総合的な機関事故防止の施策を構築するための端緒として、海難審判裁決録と船用機関士協会編集船用故障事例集から機関故障の現状を分析する。さらに、ヒューマンファクターを考慮した海難防止への国内外の取組みについて調べた。

第3章では、機関士エラー及び人的要因について、本研究での考え方を整理するとともに、機関士エラーによる機関トラブルの発生過程を把握するため、機関士エラー発生過程細目を構築する。

第4章では、海難審判裁決録から機関事故におけるエラーの発生形態を分類するとともに、数量化Ⅲ類による分析及び、クラスター分析を行い、機関士エラーの全体像とその特徴を抽出することでエラー発生過程におけるそれぞれの要素間の繋がりを解明する一方策を検討する。

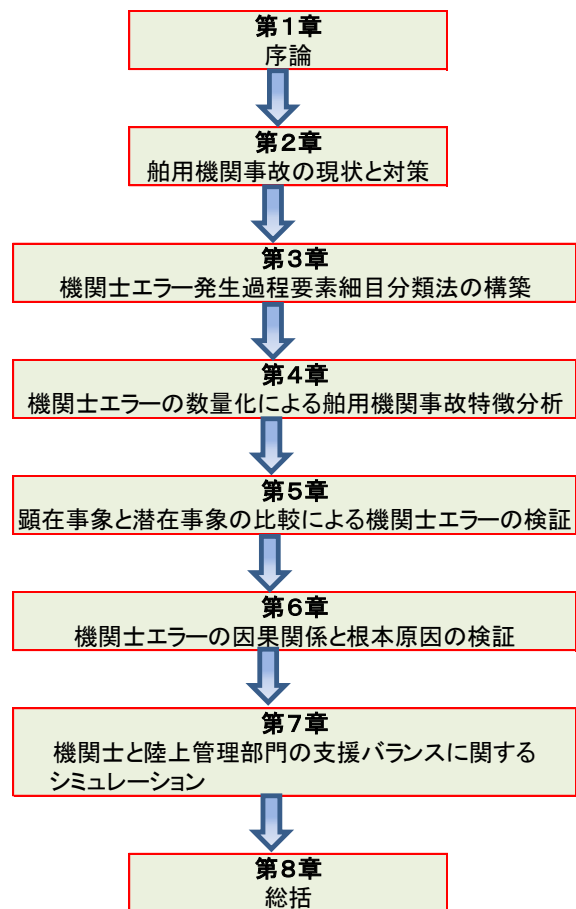


Fig.1.1.Configuration of this thesis

第 5 章では、これまでに起きた機関損傷事故を海難審判裁判録と船用機関故障事例集からそれぞれ事故の発生（顕在事象）と不具合の発見（潜在事象）として評価し、両者の性質・特徴をまとめる。さらに、数量化Ⅲ類による分析とクラスター分析を用いて機関士エラーにつながる人的要因に関する特性分析を行い、過誤に繋がる要因を検討する。

第 6 章では、人的要因を考慮した安全対策や ERM の具体的な評価手法を検討する一方策として、因子分析によって根本原因となる潜在因子を抽出し、因子分析の結果を用いて因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析によって検証する。

第 7 章では、船舶管理会社へのヒアリングから現状について調査した。また、海難審判裁判決事例を基に機関士エラーの因果関係の把握を試みる為、潜在因子間の影響を重回帰分析で検討する。その後、SD を用いて陸上側の支援バランスがこれらの因子間に与える影響を把握する為に、因果ループを構築してシミュレーションの基本モデルを構築する。

また、本研究でのヒューマンファクターと人的要因の意義は以下の通りに区分した。

ヒューマンファクター：人間や組織がシステムの運航に関与して広い範囲を包含するもの。

人的要因：システムの中で発生する機関士の思考・判断・行動に直接影響するもの。

第2章 機関事故の現状及び人的要因を考慮した

機関事故防止への取組み

2.1 本章の目的

機関士エラーは、機関システムの中で働く機関士がシステムの要求に応えられない時に発生する判断や行動の失敗である。そこで、「なぜ機関士がエラーを犯したのか」を把握しなければ、エラーによる事故の適切な改善措置をとることができない。そこで、エラーを引き起こした機関士の人的要因を考慮した事故分析が重要となる。

本章では、事故の現状及びヒューマンファクターを考慮した事故防止の取組みについて事例を紹介する。

2.2 海難審判所の現状

海難審判の現状⁽¹⁵⁾は、旧海難審判庁の時代から海難原因に関わる船員等の行為を認定、及びそれらの者の故意又は過失を特定、懲戒の量定判断がいずれも容易ではないことから、海難知識・経験を有する公正中立な立場の審判官が当事者の過失を認定するという裁判類似の厳正な手続きが取られていた。このため、平成20年10月に発足した海難審判所においても、引き続き、従来の海難審判と同様に、理事官による調査・審判開始の申し立てと、対審形式による審判により、海難を発生させた海技者の職務上の過失を認定し、懲戒を行っている。平成20年の海難審判法改正により、海難審判の目的は、海難究明を目的及び、海難を発生させた海技士等への懲戒を行うものから、「懲戒」のみを行うものへと変更になった。(海難原因究明は運輸安全委員会が実施)

本研究では、理事官が認知した海難事故に着目し、海難原因を究明する過程が明記されている海難審判裁決録を基に人的要因による事故分析を行う。

2.2.1 海難発生状況

Fig.2.1は、平成26年に裁決⁽¹⁶⁾が言い渡された海難種類別裁決件数であり、339件であった。その中で機関事故に影響する要因は、11件(3%)である。Fig.2.2は、海難審判裁決録を基に機関士による機関トラブルの合計をまとめたものである。平成7年から平成20年に理事官が認知した海難において、機関管理に関する事故要因は、6割以上が人的要因の影響による事故であった。船用機関システムの信頼性・安全性が向上している今日、保守・運転・管理など人間側の信頼性が相対的に重要な要因になっている。

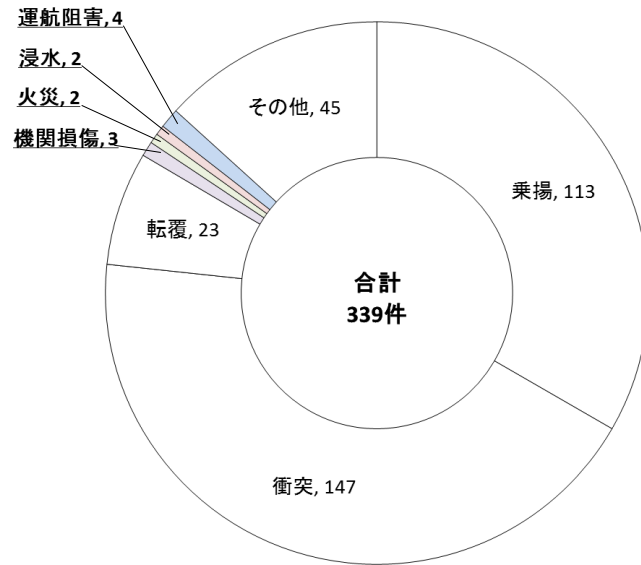


Fig.2.1.Number of marine accident inquire case by risk category

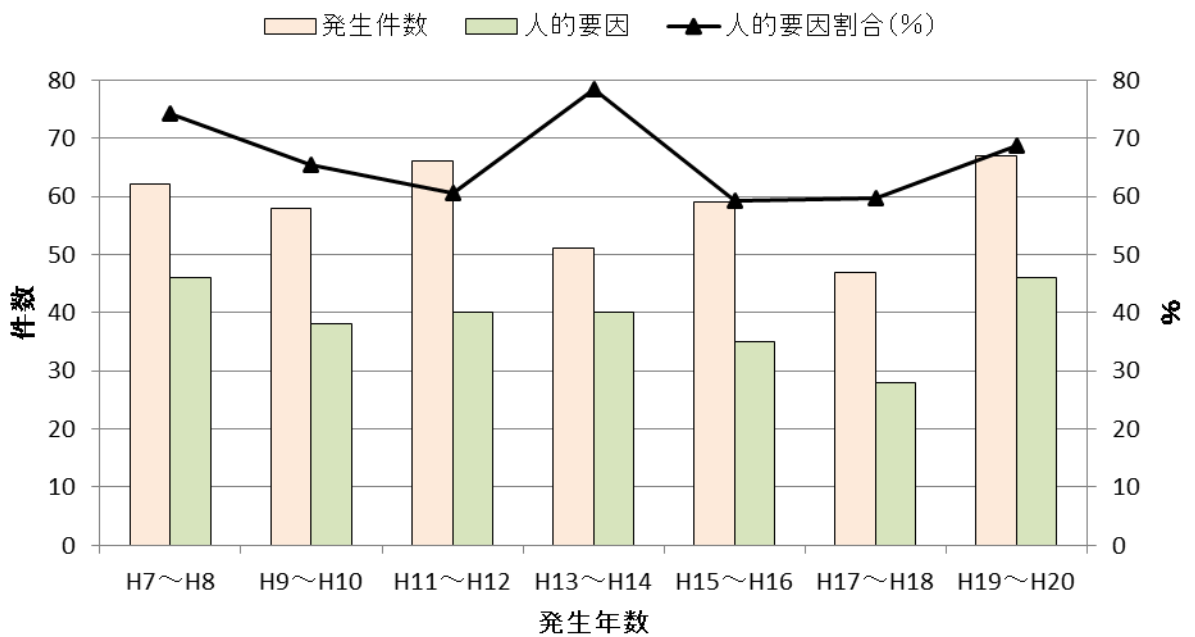


Fig.2.2. Total of Engine accident and Ration of Engineer error

2.2.2 機関事故海難の原因分析

海難審判所は、「海難レポート 2015」⁽¹⁶⁾で海難原因について詳細な分析を行っている。Fig.2.3は、平成26年度に発生した海難事故原因を示したものである。「服務に関する指揮・監督の不適切」及び「整備・点検・取扱い不良」が事故原因に大きく起因していることが分かる。事故原因には、機関士・船舶管理者等の不適切な判断・行動・教育といった人的要因に起因するエラーであることが分かる。

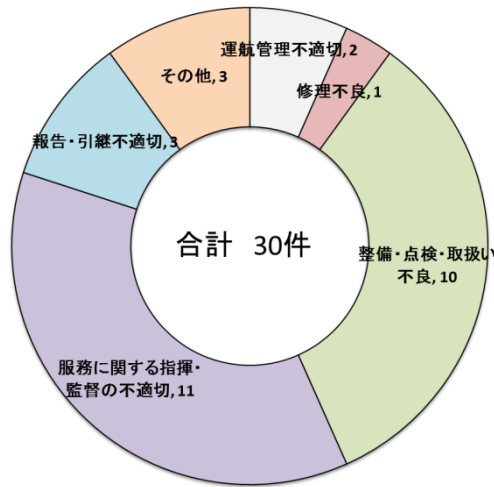


Fig.2.3. Number of cause by marine accident inquire case

Fig.2.4 は、海難審判裁決録を基に機関士による機関損傷箇所と損傷箇所をまとめたものである。各損傷箇所が多い原因順は、点検不足、取扱い不適切、対応処置不適切、検出不足、管理不足、始動準備不適切であった。これらの原因分析から、機器を安全に機能させるために必要される人間の能力や限界、特性について要因分析が必要であることが分かる。

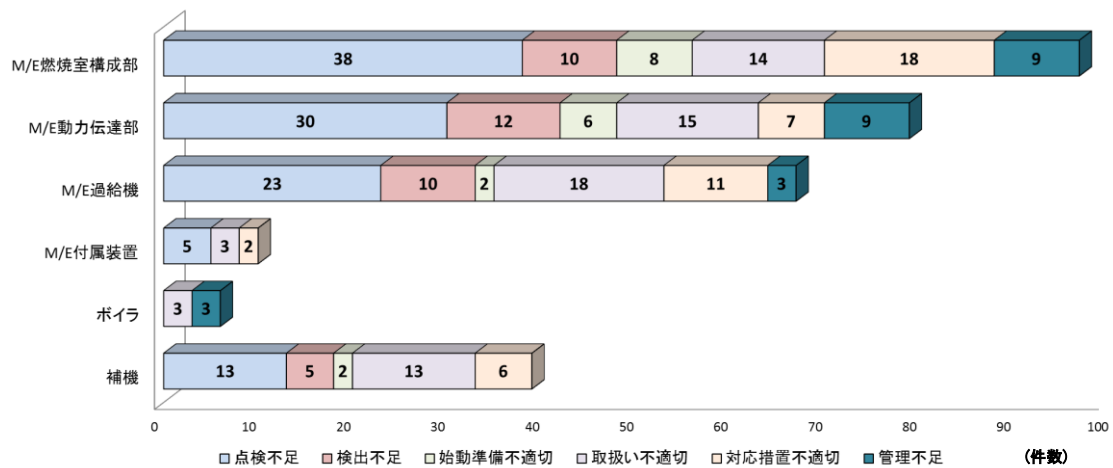


Fig.2.4. Number of accident by machinery type

2.3 船用機関故障事例集

船用機関士協会編集船用機関事故事例集は、故障情報に関する調査研究事業において故障情報の共有化、データの有効活用が推進され、故障の原因及び対策が適切に明記されている。当該報告書には、事故等の事実、事故等原因・被害の原因、再発防止策など

詳細にわたり記載されており、これら個々の報告書を系統的にとらえて分析し、事故原因の傾向や問題点を浮き彫りにすることにより、事故等の再発防止に寄与している。

また、故障事例を調査しそれを公開し、多くの故障事例を共有することにより、会員所属の船社で発生した事例を収集して故障件数をデータベースに収録し利用できるようなっている。

2.3.1 船用機関故障事例集の原因分析

Fig.2.5 は、機関損傷に至る前に対応をした組織について、本船側・陸上側・処置無しの3つに分類した。7割は、機関士による不適切な対応による機関トラブルであるが、3割は、陸上支援側による支援の不適切による機関トラブルであった。船用機関管理システムは、システムを安全かつ効率よく機能させるために、現場における乗組員相互間とSI(Superintendent 船舶管理監督)を中心とした管理システムにかかわる要員全体との海陸間のコミュニケーション及びチームマネージメントで安全運航が支えられてきている。船用動力機関システムは、機関士のエラーを含め安全に運転するために人間が行った意思決定および行動の結果と機械の動作を一連のシステムとしてとらえる必要があることが分かる。

Fig.2.6 は、機関故障事例集を基に機関士による機関損傷箇所と損傷箇所をまとめたものである。各損傷箇所が多い原因順は、点検不足、取扱い不適切、検出不足、対応処置不適切、始動準備不適切であった。海難事例の損傷原因と同様な結果となった。船用機関プラントは、船舶が巨大化、複雑化するに従って、そこに人間が介在して自律的に完結する大規模プラントそのものであり、乗組員とプラントを構成する機器とは、人間の行動および構成要素の動作として相互作用によって成立していることが分かる。

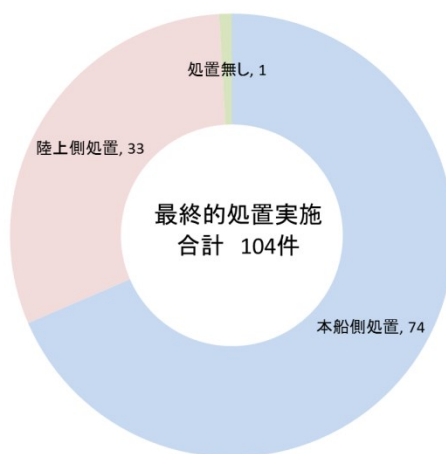


Fig.2.5. Numbers of final operate side before accident

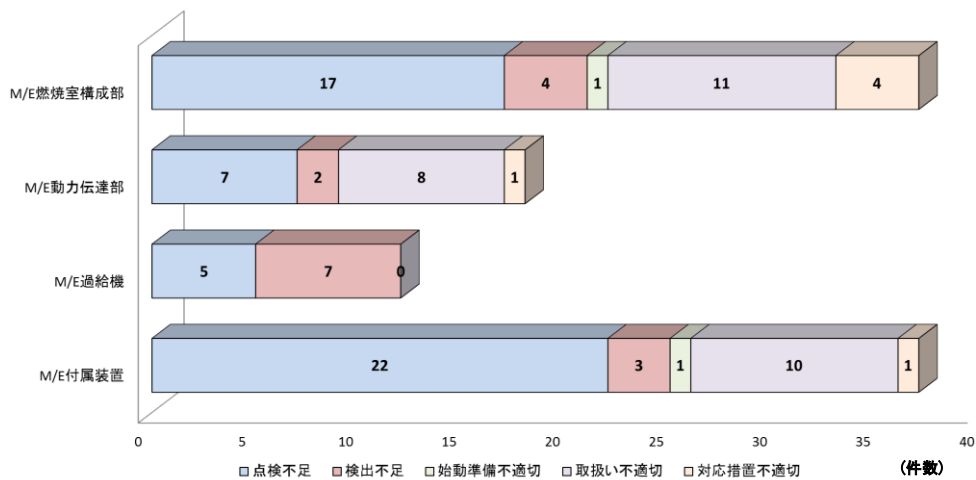


Fig.2.6. Number of accident by machinery type

2.4 ヒューマンファクターを考慮した機関事故防止の取組み

近年の海難の6割以上は、機関士の行動とともに陸上管理部門の不適切な判断・行動といったヒューマンファクターに起因する機関士エラーで発生している。IMO⁽¹⁷⁾は、国際貿易に従事する海運に影響のあるすべての種類の技術的事項に関する政府の規則及び慣行について、海上の安全、能率的な船舶の運航、海洋汚染の防止に関し最も有効な措置の勧告等を行っている。しかし、技術面のみではヒューマンファクターという安全対策に対応できない為、人的要因による船舶の安全管理の強化が求められISM Cord(International Safety Management Cord : 国際安全管理コード)がSOLAS条約(The International Convention for the Safety of Life at Sea)の6章に取り入れられた。これにより、2002年7月以降、国際航海に従事する500総トン以上の全ての船舶が強制適用となった。具体的には、船舶管理会社がISMコードに則った安全管理システム(SMS)を構築し、文書化し、実施、維持した上で、旗国政府の審査を受け、適合証書を取得し、船舶には安全管理証書(SMC)を備え置かなければ、外航運輸事業に従事できないことを義務付けた。ISMコードの強制化によって、人的要因というソフト面からの安全対策の必要性が世界的に認識され、海難防止のための安全管理体制が整備され、海難の減少に寄与していることは間違いない。しかし、一方で重大事故は減少傾向ではないとの報告もある。

Fig.2.7は、海上保険を扱うJAPAN P&I CLUB⁽¹⁸⁾の2007年から2013年の海難事故に関する統計である。Fig2.7より事故が多発すると事故対策を立案し事故防止を図る船主が多く、一時的に事故が減少傾向にあり、その対策が功を奏していると推察できるが、海難件数は平均で170件以上と長期的対策の効果が少ないことが分かる。このような状況から、ヒューマンファクターを考慮した事故防止への様々な取り組みが国内外で行われており、その概要を紹介する。

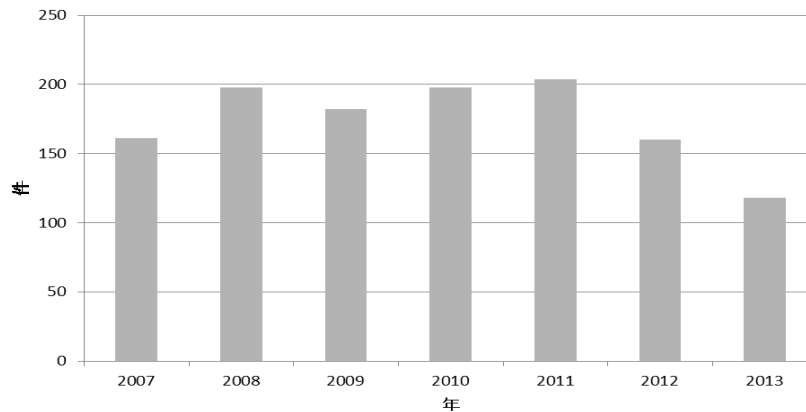


Fig.2.7. Numbers of ocean-going vessel accidents

2.4.1 IMOにおける取組み^{(19) (20) (21) (22)}

近年の国際社会において、海難調査に際し国際協力が必要であるという認識が高まり、IMO は、1997 年に「海難及び海上インシデントの調査のためのコード」(IMO 決議 A.849(20) 海難調査コード)を採択され、海難調査における新たな国際協力体制の構築と、その為の共通手法に関する検討が進められている。さらに、1999 年には、同コードに「海難及び海上インシデントにおけるヒューマンファクター調査のための指針」(IMO 決議 A.849(21) 海難事故調査コード指針)が追加された。

コードは、発生した海難について、利害関係を有する各国調査官が平等な立場で調査を行うという、いわゆる航空機事故調査の考え方をモデルとしており、各国が協力して海難調査を行うことを想定して、調査の手法から報告書の記載事項まで統一することを理想としている。また、同指針ではヒューマンファクターの調査のための系統的アプローチを Fig.2.8 のように定めている。

なお、2008 年 5 月に第 84 回海上安全委員会 (MSC84) で採択、2010 年 1 月 1 日発効した SOLAS 条約第 XI-1 章第 6 規則: 海難事故調査コードの強制化は、「海難時の船員の公正な取り扱いについての IMO/ILO ガイドライン」で定め

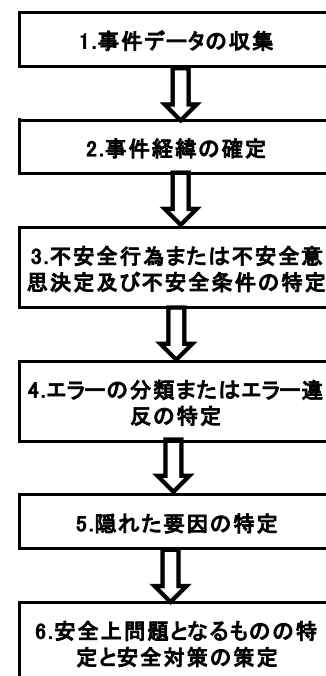


Fig.2.8. Statistical approach for investigations into a human factor

る船員の人権保護に関連し、主管庁が「海上事故及び海上インシデントの安全調査のための国際標準と勧告方式のコード（海難事故調査コード）」に基づき海難事故調査及びインシデントの調査及び IMO への報告が義務づけとなった。

2.4.2 海難審判所の取組み⁽¹⁵⁾

海難調査については、IMO において、責任追及の手續から分離した、再発防止のための「原因究明型」の海難調査が求められ、平成 20 年 5 月に開催された第 84 回海上安全委員会（MSC84）において、「海上事故又は海上インシデントの安全調査のための国際基準及び勧告される方式に関するコード（事故調査コード）」及び同コードを強制化する SOLAS 条約改正案が採択され、平成 22 年 1 月 1 日に発効した。SOLAS 条約への対応を行い、海難の原因究明、再発防止に万全を期することが必要であり、また、陸・海・空各交通モードのいずれの分野においても、ヒューマンファクター、材料工学等様々な分野の専門家を集め、原因の多様化、複雑化に対応して、事故原因究明機能を高度化する必要性が指摘されてきていた。そこで、体制・機能の強化、陸・海・空にわたる業務範囲の拡大の為、陸・海・空の事故原因究明機能の強化・総合化を図るため、平成 20 年 10 月、国土交通省の外局として運輸安全委員会を設立し、併せて旧海難審判庁が行ってきた海難審判による懲戒機能を行う海難審判所を、国土交通省の特別の機関として設立することになった。

また、「ヒューマンファクターの概念に基づく海難・危険情報の調査活用等に関する調査」報告⁽²³⁾を受けて、このヒューマンエラーを誘発した要因を科学的に分析、抽出することが最も有効であるという考え方（ヒューマンファクター概念）から、旧海難審判庁では、このヒューマンファクター概念を取り入れ、直接の原因のみならず、その背後にある要因についても裁決に盛り込むよう、高等海難審判庁は、平成 16 年 4 月から、地方海難審判庁は、平成 16 年 9 月から裁決書の記載内容を改めている。

2.5 結語

機関士エラーの総合的な機関故障防止の施策を構築するための端緒として海難審判裁決録及び、船用機関士協会編集船用機関故障事例集から機関故障の現状及び各事例より機関事故の原因分析をした。加えて、ヒューマンファクターを考慮した海難防止への国内外の取組みについて調査した。

- (1) 海難審判裁決録は、海難原因究明を目的に理事官が認知した重大事故において直接原因や背景要因についてまとめられている。一方、船用機関故障事例集は、会員所属の船社で発生した事例について、機関トラブルの事実、原因、再発防止策を記載されている。事故の損傷度合いに差異はあるが、両事象は、事故原因究明を目的としている。
- (2) 平成 26 年度に発生した海難事故において、機関による海難は 3%程度であるが、

その内、機関士が関与する事故は 6 割以上であることが分かった。

- (3) 船用機関故障事例より、機関士が関与したトラブルは 7 割であったが、陸上支援側の指示、判断によるトラブルは 3 割であった。海陸間のコミュニケーション及びチームマネジメントの必要性があった。
- (4) 両事例より機関士による機関損傷原因は、点検不足、取扱い不適切、対応処置不適切、検出不足、始動準備不適切といった結果となった。船用機関プラントで人間の能力や限界特性を十分に把握する必要があることが分かった。
- (5) 海上保険データより、大事故の後は、事故件数が減少していることから何らかの対策を立案し、多くの船主が実施していると推察できるが、長期的対策が不十分であることが分かった。
- (6) 近年の国際社会において、海難調査に際して国際協力が必要であるという認識から「海上事故又は海上インシデントの安全調査のための国際基準及び勧告される方式に関するコード（事故調査コード）」及び同コードを強制化が採択され、各国に対して 2010 年 1 月から同コードに基づく海難及びインシデントの調査及び IMO への報告が義務づけられた。
- (7) 我が国においても旧海難審判庁が、ヒューマンファクター概念を取り入れ、直接の原因のみならず、その背後にある要因についても裁決に盛り込み裁決書の記載内容を改めた。

第3章 海難審判における機関事故の分類と機関事故分析へ

の適応

3.1 本章の目的

第2章で述べた通り、機関事故の7割が人的要因に起因した機関士エラーにより発生している。機関士エラーが注目されるようになった理由の一つは、近年の船用機関の信頼性向上があげられる⁽²⁾。機器部品があまり故障しなくなったが、国際競争力を高める為に、少人数化あるいは、混乗化等といった要因から事故原因全体に占める機関士の操作ミスの割合が増えてきたと推察した。

そこで、本章では船用機関事故における機関士エラーの特徴を把握する為に、まず船用機関事故に関連する機関士エラー及び関連する人的要因についてその定義を整理した。そしてその結果に基づき、機関士エラーの特徴を把握するための基礎となる機関事故分類表を構築した。さらに機関事故事例から機関事故データベースを構築し、分類法の各要素について機関士エラーを抽出した。

3.2 機関士エラーと人的要因

3.2.1 人的要因の定義

ヒューマンエラーは非常に広義に用いられ、その定義も研究の進歩と共に変化しているが、G.Salvendiは「システムによって定められた許容限界を超える人間行動の集合の任意の一要素」と定義している⁽²⁴⁾。この定義を基に芳賀は、ヒューマンエラーはシステムの中で働く人間が、システムの要求に答えられないときにおこるものであり、対策は設備を含めたシステム全体で考えるべきであると提言している⁽²⁵⁾。すなわち、ヒューマンエラーはシステムの中で発生し、人間の判断や行動の失敗である。

ここでのシステムとは、多数の構成要素が目的の為に結合し、互いに協調して働く存在である。事故原因の人的要因は、状況に応じた適切な対策を難しくした設備や情報など、いろいろなことが相互に関係しあっている。作業場の問題点を明らかにするには、環境、装置、情報、人の領域での状態と相互の関係を知る必要がある⁽²⁶⁾。Fig.3.1に示す通り、システムの構成要素には、Hawkinsが提唱したSHELLモデルが利用される⁽²⁷⁾。このモデルは、Software(ソフトウェア)、Hardware(ハードウェア)、Environment(環境)、Live ware(人)に分類され、Lのパフォーマンスが他のシステム要素との関係の善し悪しに依存することを示したものである。また河野⁽²⁸⁾はSHELLモデルにManagementを追加したm-SHELLを提案している。このモデルは、人を表わす中央のLが、他のシステムの要素と周りのL(他の人間、共同作業等)をコーディネートするようにマネジメントするようにmが周回している。

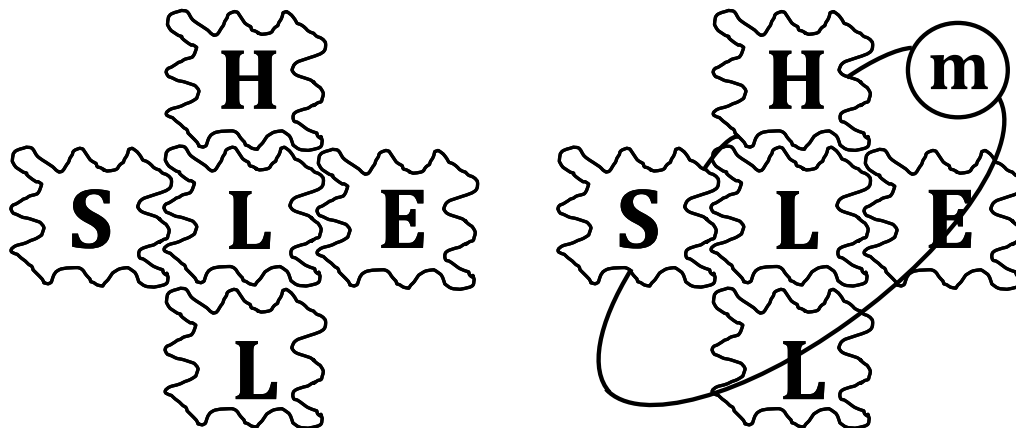


Fig.3.1. SHELL model and m-SHELL model

船用機関の安全運航には、船主、船舶管理会社、オペレーター、メーカー等が協力して運航に携わっている。このモデルが示すように、運航には、運航環境、作業環境、機関士の管理状況といった機関士以外の要素がシステムに多く関わり、これらの要素を考慮したヒューマンエラー分析をする必要があると考えた。

本研究では、Fig.3.2 に示す人間エラー発生過程の「人間エラーをもたらした原因」、 「人的エラーのメカニズム」、及び「エラーに至った内的要因」で構成される人間の情報処理システムに作用する様々な「外部環境」を考慮した人的要因について検討する。

3.2.2 機関士エラーの定義

Fig.3.2 に示す機関士エラーの発生過程は、J.Rasmussen の提唱する人間エラーの発生過程⁽³⁰⁾⁽³¹⁾を機関士に置換えて検討した。機関士エラーは、「機関士エラーをもたらした原因」すなわち「機関士エラーのきっかけ」が人的要因として直接的に機関士の情報処理システムに作用する。また、「機関士の行動に影響する因子」や「作業状況の因子」

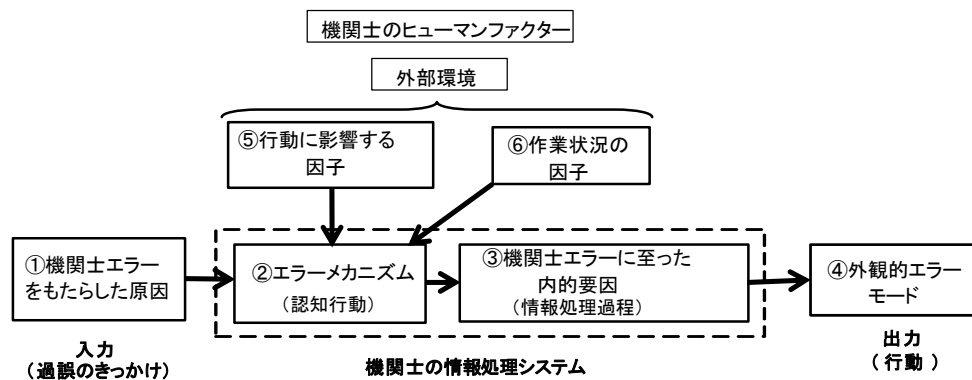


Fig.3.2. Multifaceted taxonomy for description and analysis of events involving engineer

といった「外部環境」がヒューマンファクターとして間接的に作用することで、最終的に機器の損傷が顕在化することを示す。機関士の情報処理システムに発生するエラーは、機関士の認知行動におけるエラーである「機関士過誤のメカニズム」及び、認知行動に引き続く機関士の情報処理過程で発生するエラー「過誤に至った機関士の内的要因」で構成されている。

本研究では、機関士エラーの特徴を把握する為、人的エラーのメカニズムと人的エラーに至った内的要因、すなわち、機関士の情報処理システムに着目し、機関士過誤の発生過程の各要素の特徴を調査した。また、機関士が適正に処理しなければならない判断・行動と実際に実施したことの差を「機関士エラー」と定義した。

3.3 機関士の情報処理システムとエラーの発生過程

本項では Fig.3.2 に示す機関士エラー発生過程の主要な要素である機関士の情報処理システムに発生するエラーについて述べる。

機関士が機関トラブルを回避する場合⁽³⁰⁾、その中から必要性のある情報を取捨選択して、自らのもつ知識、経験、過去の記憶からその意味を理解し自分のとるべき行動を決断・決心し、それに基づいて操作・作業・指示する。そして、その結果を認識し、機器の状態を識別した結果と新たな情報とが次の情報源となって、情報受容、判断、操作・作業・指示が繰り返されている。このような機関トラブル回避行動は、一連の情報処理システムに基づく行動と捉えた。機関士によるトラブルは、このような情報処理過程において、処理の流れが閉ざされ、あるいは、歪みを生じ、またあるいは、本来的には無関係なことによって影響されて生ずるが、その反対に、情報処理の流れのいずれかの段階においても自分自身の確認行為や警報装置の作動、他の者からの助言によって、処置の流れが正常に戻り、事故への発展を阻止することが可能と考える。

そこで本研究では、この「機関士の認知行動が情報処理過程に作用して回避行動を実行する情報処理の系統」を情報処理システムと定義した。機関士の認知行動に発生するエラーを「機関士のエラーメカニズム」、情報処理過程に発生するエラーを「機関士エラーに至った内的要因」と表した。

3.3.1 機関士のエラーメカニズム

本研究では、機関士のエラーメカニズムを機関士の認知行動に基づくものとして、J.Rasmussen の SRK モデル⁽³¹⁾⁽³²⁾と J.Reason の GEMS ダイナミックモデル⁽³⁴⁾を不可分なものと考えた。

Fig.3.3 に示すように、SRK モデルは、機関士行動を知覚のパターンに応じたスキルベース行動、ルールベース行動、知識ベース行動に分類し、それぞれに発生するエラーを定めたものである。スキルベース行動は、機関士が慣れによる条件反射的な行動であり、ルールベース行動は、少し状況が複雑になると規則に基づく行動をすることである。知識ベース行動は、さらに複雑な状況になると、今までの経験、知識に基づいて行動をしなければならない場合が起こる。

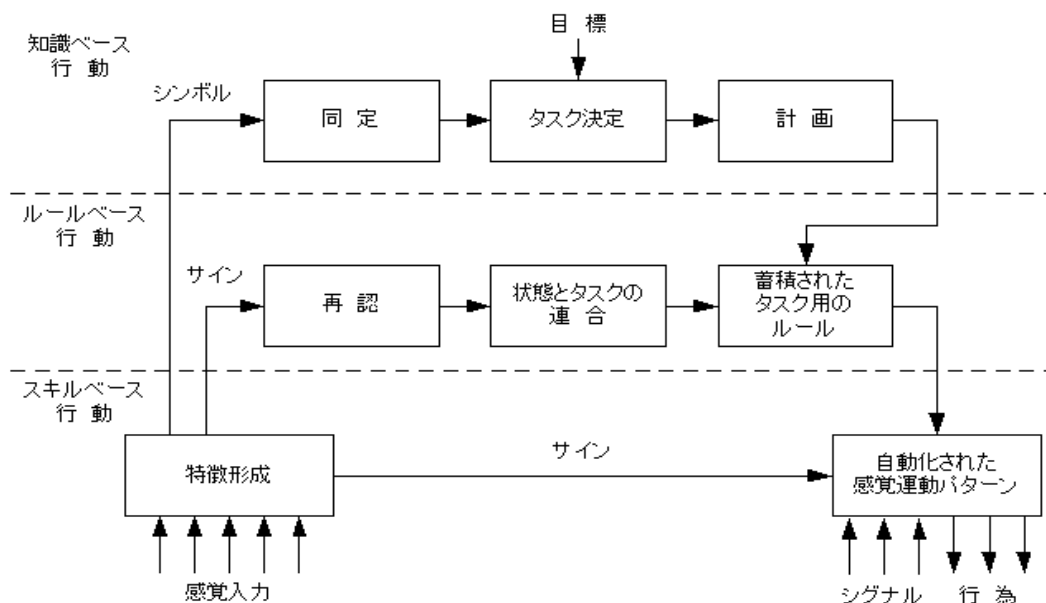


Fig.3.3. Model of human data processes and typical malfunctions (SRK model)

また、GEMS モデル⁽³⁴⁾は、人間の基本的なエラーの形式がどの様にして起こるかを説明できる概念的な枠組みである。Fig.3.4 に示すように、4 つに区分される。

- スリップ：意図しない行動における、行動が正しい場合のエラー（注意不足）
- ラプス：意図しない行動における、行動が誤っている場合のエラー（記憶違い）
- ミステイク：意図した行動において、行動が誤っている場合のエラー（慎重の欠落）
- バイオレーション：規則を破ったエラー（ルール違反）

本研究では、人間行動とエラー及び機関士のエラーメカニズムを関連付けながら Fig.3.5 に示すように細目へ分類⁽³⁵⁾した。

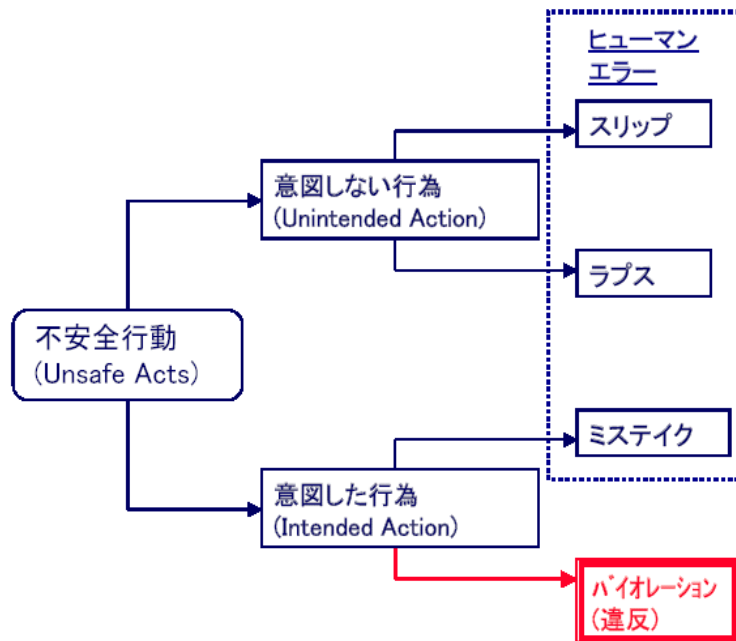


Fig.3.4. Summary of the Generic Error-Modeling System (GEMS model)

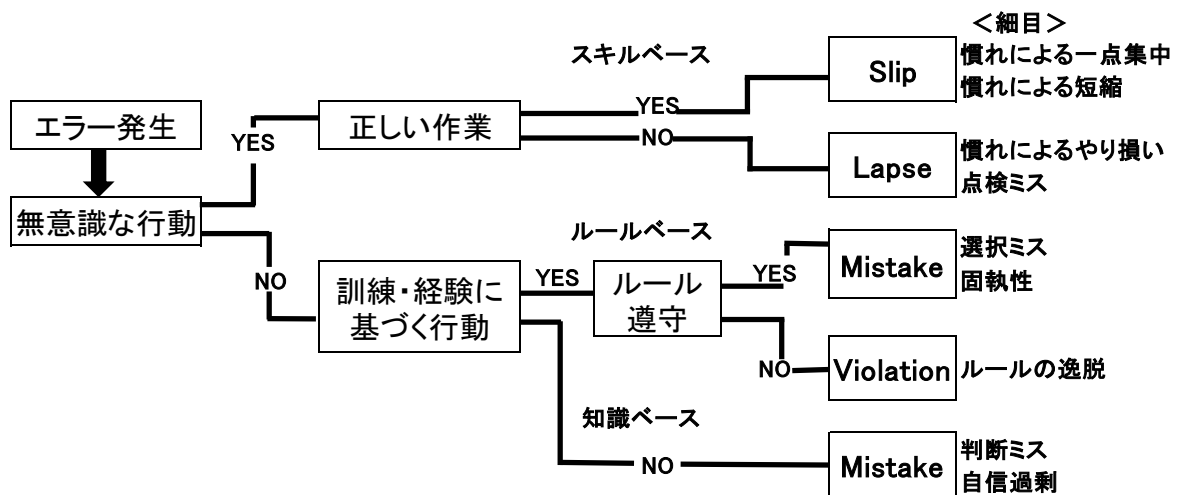


Fig.3.5. Combination of SRK model and GEMS model

3.3.2 機関士エラーに至った内的要因

過誤に至った機関士の内的要因とは、機関士の情報処理過程に発生するエラーを定めたものである。認知行動に引き続き機関士の情報処理過程は、「検出」「確認」「決定」「行動」の順に行われる⁽³⁰⁾とされている。同様の考え方で、宮城⁽³⁶⁾は航空パイロットや管制官の情報処理過程を「情報源」、「情報受容」、「作業（操作）の指示」の4つのフェーズ

(段階)に区分して「作業(操作)の指示」の結果の確認と新しい情報とが次の情報源となって繰り返されるとしている。機関士の情報処理過程もこの4つのフェイズの繰り返しであり、機関士エラーに至った内的要因とは各フェイズに発生する機関士エラーを定める。

- ① 機器の異常を検出(情報源)に目を向ける
- ② 検出した情報から機器トラブルのおそれを確認(情報受容)
- ③ 機器トラブル回避の決断(判断)
- ④ 決定した回避方法に基づいて行動(作業(操作)の指示)

3.3.3 機関士エラーの発生過程

機関事故における機関士エラー発生過程を Rasmussen が提唱した人的エラーの発生過程を用いて説明すると次の通りとなる。

- ① 機関士エラーは「機関士エラーをもたらした原因」が直接的に、「外部環境」が間接的に人的要因として機関士の情報処理システムに作用して発生する。
- ② 機関士の情報処理システムに発生するエラーは、機関士の認知行動におけるエラーである「機関士のエラーメカニズム」及び認知行動に引き続く機関士の情報処理システムに発生するエラー「機関士エラーに至った内的要因」で構成される。
- ③ 機関事故に至った機関士エラーは機関士の情報処理システムに発生する個々のエラーのみでなく、それらの連鎖と複合で構成される「外観的エラーモード」として出力される。

3.4 機関士エラー発生過程要素細目分類

人的要因に関わる機関事故情報の収集は、当事者の過去に導いた背景、すなわち潜在的危険要因を探りだし、その潜在的危険要因を除去・回避する為の事故の未然防止のためである。これまで述べた通り機関士エラーは多岐にわたり、機関士エラー及び人的要因がどのような時に発生し、どのように結びついて事故に至ったのかを把握するには、機関士エラーの発生過程に基づいて事故を分類する必要がある。そこで本研究では、機関事故における機関士エラーの特徴を把握するための基礎となる「機関士エラー発生過程要素細目分類」を構築した。

3.4.1 分類法の構成

分類法は機関トラブルに至った機関士エラーの発生過程を入力(エラーのきっかけ)と出力(行動)という観点から、1.「機関士エラーをもたらした原因」、2.「エラーメカニズム(機関士の認知行動パターン)」、3.「機関士エラーに至った内的要

因（機関士の情報処理過程でのエラー）」、4.「外観的エラーモード（最終的な事故原因）」、5.「行動に影響する因子（個人要因）」、6.「作業状況の因子（背後要因）」の6つの要素に分類し、それぞれの要素について機関トラブルにおける具体的な詳細を決定し、構成している。その概念図を Fig.3.6 に示す。

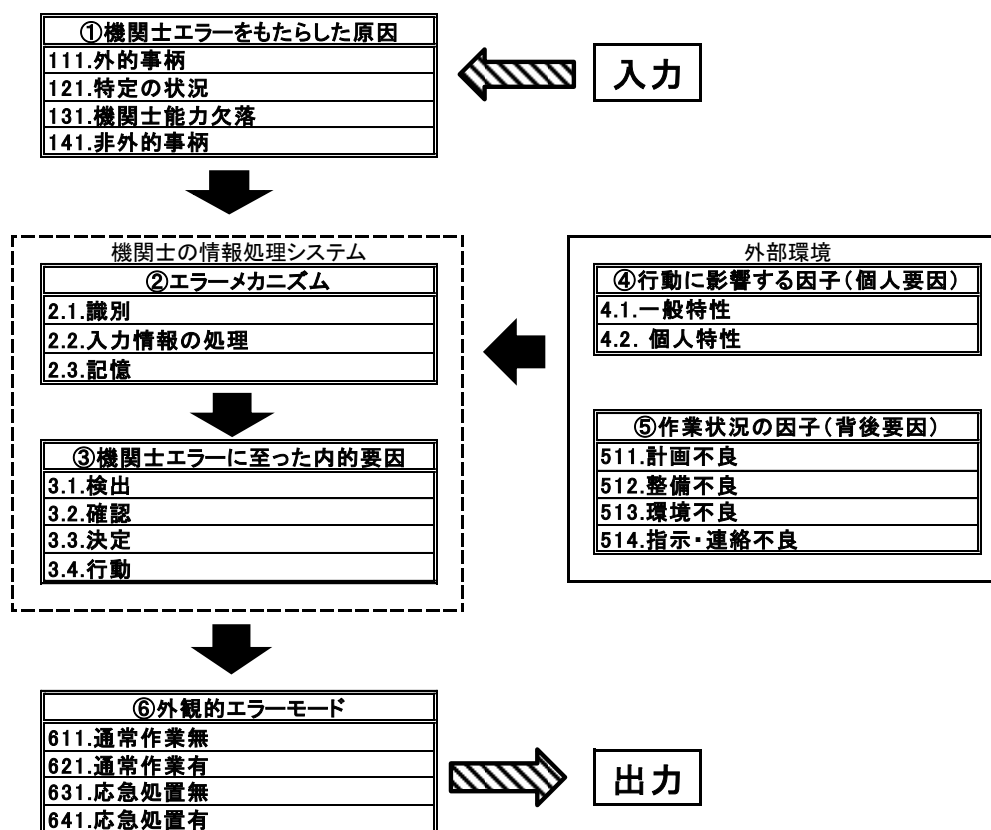


Fig.3.6. Detailed taxonomy for description and analysis of events involving engineer malfunction

3.4.2 分類法の各要素及び細目

(1) 機関士エラーをもたらした原因

機関士エラーをもたらした原因は、エラーのきっかけとなったもので、機関士の情報処理システムに直接作用する人的要因である。機器の故障や第三者による混乱（第三者による機関士に対する業務妨害等）といった「外的事柄」、運航環境や特殊な作業の必要性、経済的要因が影響する「特定の状況」、機関士の特性による「機関士能力欠如」、無意識の行動、意識的行動といった「非外的事柄」の4つに分離できる。細目を Table3-1 に示す。

Table 3-1 Causes of human malfunction

分類記号	細目
111	外的事柄
	①新造船・機器の取替・改良品②更新情報無③他の作業による混乱④第三者の混乱
121	特定の状況
	①厳しい航海条件②特殊な作業③特殊な作業方法④経費削減⑤粗悪油
131	機関士能力欠落
	①初めての機器②病気
141	非外的事柄
	①無意識行動②意識的行動③破壊的行動

(2) 機関士エラーメカニズム

機関士の認知行動パターンに発生するエラーをエラーメカニズムとして「識別」、「入力情報の処理」、「記憶」に分類したものである。この中で「慣れに基づく」とは機関士の認知行動モデルにおける無意識な行動から発生するスキルベース行動のことである。回避行動における機関士の情報処理システムの第1段階として、機器の異常を認識し、現状を識別し、異常のおそれが発生するか判断するステップに発生するエラーである。細目及び具体例を Table3-2 に示す。

Table 3-2 Mechanisms of human malfunction

分類記号	細目
2.1	識別
211	慣れによる一点集中
	慣れに基づいて(スキルベース)行動し、注意すべき現状を認識しない。
212	慣れによる短縮
	注意して見極めるべき状況を、慣れている兆候、合図と結びつけ、誤った意図や作業に走ってしまう行動。知識に基づく(知識ベース)評価ではない。
213	慣れによるやり損い
	作業・意図することは正しいが、実行する際「うっかり」して、異なる内容をもつ慣れた行動。
214	点検不足
	確認すべき箇所を見落とし、間違った判断をする。
2.2	入力情報の処理
221	選択ミス
	現状を把握することが無いまま、規定された手順を判断する。
222	固執性
	異常状態とは関係なく、過去の経験や規定された手順を判断する。
223	ルールの逸脱
	規定されたルールを逸脱する。
2.3	記憶
231	判断ミス
	注意が誤った方向に向けられ判断を誤る。
232	自信過剰
	持っている知識を過大評価するあまり判断を誤る。

(3) 機関士エラーに至った内的要因

エラーに至った機関士の内的要因を機関士の情報処理過程における「検出」、「確認」、「決定」及び「行動」の段階ごとに分類したものである。機関士の情報処理システムの第2段階で、機器の異常のおそれを検出、確認し、回避行動を決定し、計画した回避行動を実行する各段階に発生するエラーである。最終的には、この内的要因に影響されて外観的エラーモードが出力される。細目及び具体例を Table 3-3 に示す。

Table 3-3 Internal human malfunction

分類記号	細目	
3.1	検出	
311	注意不足	トラブルの恐れは無いと思い注意を払わない。
312	見落とし	トラブルをアラーム前に気が付かない。
313	勘違い	識別したトラブルを勘違いしてトラブルの発生はないと思う。
3.2	確認	
321	先入観	トラブルの恐れは確認したがトラブルの発生は無いと先入観で判断する。
322	過小評価	トラブルの発生を確認しなければならない状況でも大丈夫だと判断する。
323	確認ミス	トラブルの恐れを確認したがその状況を誤解する。
3.3	決定	
331	決定ミス	トラブルの恐れを確認したが間違った方針を選ぶ。
3.4	行動	
341	整備ミス	適切に判断した整備方法を間違える又は、中途半端な作業を実施する。

(4) 外観的エラーモード

外観的エラーモードとは最終的な機関トラブル原因とされるもので、具体的には、通常作業の有無及び、応急処置の有無の4つに大きく分類できる。機関トラブルは様々な機関士エラーが関連して発生しているが、外観的エラーモードとは、最終的に機関トラブルに至った機関士エラーのことを示している。細目及び具体例を Table3-4 に示す。

Table 3-4 External mode human malfunction

分類記号	細目
611	通常作業無 ①点検なし②不適当なタイミング③管理不足
621	通常作業有 ①操作方法の理解不足・開放整備不十分②気象状況理解なし
631	応急処置無 ①監視不十分②行動なし③不適切な行動
641	応急処置有 ①他の影響(予備品の管理不足・整備ミス)

(5) 行動に影響する因子

機関士の情報処理に影響を及ぼす因子を J.Reason の分類法⁽³⁷⁾を用いて区分した。これは、認知過程である「認知領域」と個人要因である「人間の基本的なエラー傾向」で構成されている。「人間の基本的なエラー傾向」は、個人要因のうち、いつでも誰でも持っている人間の一般的な特性、すなわち人間が生きるために身につけた人間の高度な情報処理能力を助ける特性であって、これが反対に作用した場合はエラーに繋がりがやすい特性と考えることができる。これが一般特性であり、本研究では「慣れ・習慣」と「経験的勘」に分類した。個人特性とは、特定の個人、あるいは特定の状況下の特性が要因となる場合とし、「知識・経験不足」及び「注意力・焦り」に分類した。個人要因を一般特性と

個人要因に区分する考え方を整理し図示すると Fig.3.7 のようになる。行動に影響する因子は、機関士の情報処理システムに間接的に作用する機関士の人的要因である。この因子が外部環境としてエラーメカニズムに作用する。細目を Table3-5 に示す。

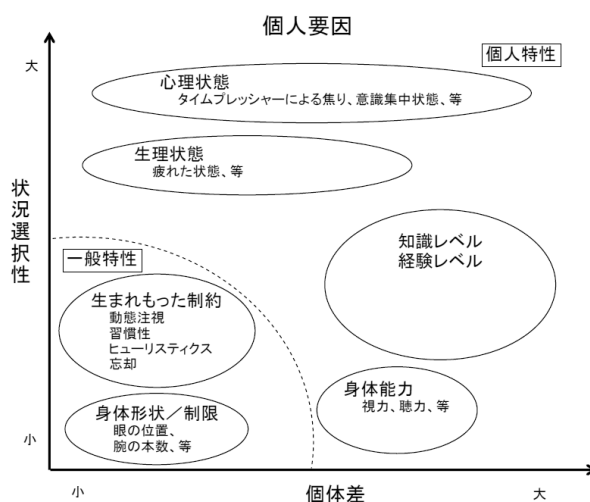


Fig.3.7. Relations of the personal factor

Table 3-5 Performance shaping factors

分類記号	細目
4.1	一般特性
411	慣れ・習慣
412	経験的勤
4.2	個人特性
421	知識・経験不足
422	注意力・焦り

(6) 作業状況の因子

人的過誤は個人要因だけではなく当事者の周辺の背後要因の影響も受けるので、Fig.3.1 に示す F.H.Hawkins の SHELL モデル⁽²⁷⁾を参考に背後要因を計画不良(S), 設備・工具不良(H), 環境不備(E), 指示・連絡不備(L)に4つに分けた。Table3.6 に示す通り、細目及び具体例を定め、人的過誤に影響した要因を簡便に選定できるようにした。特に、要因内容の表現は心理学的専門用語を避け、日常で使用されている用語を用いた。作業状況の因子は、行動に影響する因子のように機関士の情報処理システムに間接的に作用する機関士の人的要因である。

Table 3-6 Situation factors

分類記号	細目
511	計画不良
	①規則・手順書類記載なし②規則・手順書の記載間違い
512	整備不良
	①設備・工具類不備②機器の表示が曖昧
513	環境不良
	①作業環境の不備
514	指示・連絡不良
	①作業内容の指示の誤り②作業内容の伝達・連絡不足

3.5 分析対象データ

機関士エラーの特徴を把握するための基礎データとして海難審判裁決録と船用機関故障事例集を用いて分類法を用いて機関トラブル要因の分類を実施した。分類に使用したデータは、平成7年から平成23年までに言い渡された海難審判裁決録事例より、機関管理に関わる事件全1397件から漁船、プレジャーボートを除く298件の事例及び、平成元年から平成19年の日本船用機関士協会編集船用機関事故事例集に掲載された機関管理に関わる故障198件を調査し、このうち人的要因に関する情報全104件を抽出した。

3.6 機関士エラー発生過程分類事例

各事例集から人的要因における機関事故データベースを構成するデータを抽出する場合、海難審判裁決事例では裁決の「理由」、船用機関故障事例集では、「概要」と「推定原因」の記載事項から選ぶことができる。一方、機関トラブルに至る機関士行動は機関士エラー発生過程に基づく内容で記述されていないので、記述内容を詳細に検討して、機関士エラー発生過程の各要素細目の該当する項目を当てはめていく作業が必要になる。機関士の行動及びその判断理由に使用される裁決の用語は厳格に定義され、証拠に基づき時系列に記載されていることから、機関士エラーの細目データを解析者の主観的な判断を含めずに抽出することができる。具体的な機関士エラー発生過程分類例をTable3-7に示す。このような分類法を用いることで機関トラブルにおける機関士エラーの発生過程ごとの特徴を分析することができる。

Table 3-7 Example of classification

		事例 1	事例 2	事例 3
海難発生状況	出力 (kW)	7,502	735	2,353
	船舶種類	貨物船	貨物船	押船
	損傷箇所	主機、過給機のプロワ側軸受焼損、タービン側軸受摩損、ローター軸熱変形、摩損、送風機羽根車等擦過傷	過給機のノズルリング、ローター、玉軸受を損傷	クランク軸及び全クランクピンメタルが焼損、ピストン及びシリンダライナー組が焼き付き、全主軸受が焼損
	海難状況	主機手動式逆洗型潤滑油こし器の出入口の圧力差に異状が生じた際、同こし器の開放点検が不十分で、こし筒金網が破口したまま運転が続けられ、しけのため船体が激しく動揺したとき、サンプタンク内に沈殿していたスラッジ等の異物が同こし器を通過し、異物が主機過給機のプロワ側軸受に侵入して、同軸受の潤滑が阻害されたこと因って発生。	主機の排気弁取替えにあたり、シリンダヘッド上部の清掃やシリンダ内部の確認などの措置が不十分で、シリンダヘッドの排気弁挿入口からシリンダ内に金属性の異物が落下したまま同弁が取替えられ、主機始動後、同異物が排気ガスとともに過給機に侵入したこと因って発生。	主機潤滑油配管系統の各弁について、誤操作防止の措置が十分でなかったこと、主機を運転中、予備潤滑油ポンプの両吸入弁が開弁されているか確かめる際、弁位置の確認が不十分で、両舷主機の直結潤滑油ポンプ吸入弁が誤って閉じられたこと因って発生。運転中の主機潤滑油ポンプ吸入弁が誤操作されたのは、機関長が、弁の誤操作防止措置をとっていなかったこと、一等機関士が、弁位置を十分確認しないまま、弁操作を行ったことである。
海難分類	機関士エラーをもたらした原因	故障発生時、台風により海上がしけていた。(121: 特定の状況)	トラブルが発生するまで異物混入に気が付かなかった(141: 非外的事柄)	無意識的行動により発生(141: 非外的事柄)
	エラーメカニズム	ストレーナの差圧が立たなくなった時、ストレーナに穴があいている可能性を考えず、潤滑油が綺麗だからと判断してしまった。(231: 判断ミス)	習熟した作業であった為、シリンダ内に異物を落とすことを認識しなかった。(211: 慣れによる一点集中)	弁位置を十分確認することなく慌てて操作した。(231: やり損い)
	機関士エラーに至った内的要因	潤滑油が綺麗だからと判断してしまった為、確認をしなかった。(311: 確認をしない)	排気弁取り替え作業は習熟していた為、トラブルは発生しないと思って作業に従事していた為。(322: 過小評価)	通常使用しない弁に対して誤操作防止措置を設けていなかった。(341: 整備ミス)
	行動に影響する因子	規定通り定常作業を実施しており、問題が無かった為。(412: 経験的勘)	習熟作業であった。(411: 慣れ・習慣)	状況が分からず、慌てていた。(422: 注意不足・焦り)
	パフォーマンスに影響する因子	十分に開放掃除を実施しなかった。(512: 整備不良)	ナットや座金を置き忘れる環境があった。(513: 環境不良)	弁の誤操作防止措置をとっていなかった。(512: 整備不良)
	外観的エラーモード	潤滑油こし器の出入口の圧力差に異状が生じた際、同こし器の開放点検が不十分(611: 通常作業無)	作業終了後の点検をしなかった。(611: 通常点検無)	現状を把握できず、応急処置を怠った。(631: 応急処置を怠った)

3.7 分析結果に基づく機関士エラー

機関士エラーによる機関トラブルの発生過程を把握する為、本項では、海難審判裁判事例集に記載された機関管理に関わる事件全 1397 件からプレジャーボートの事件を除く 298 件の分析を行った。

298 件の海難事故について、機関士エラー発生過程における各要素細目の分類結果を Table3-8 に示す。1 隻の海難事故に対して複数の細目が該当または、該当する細目がない場合もある為、各要素の細目件数の合計は海難隻数 298 件とは一致しない。また割合 (%) は、海難事故件数 298 件に対するパーセントである。

分類法を使用し、Table3-7 を基に集約した結果が Table3-8 である。この結果より、機関士エラー発生過程細目におけるエラーの特徴が抽出できた。このことにより分類法を使用した機関士エラーの分類は、海難事故のエラー特徴の全体像を把握することができた。

Table 3-8 Ratios of analysis of events involving engineer malfunction

	①機関士エラーをもたらした原因	隻数	%
111	外的事柄	76	25.5
121	特定の状況	35	11.7
131	機関士能力欠落	15	5.0
141	非外的事柄	172	57.7
	②機関士エラーメカニズム	隻数	%
211	慣れによる一点集中	14	4.7
212	慣れによる短縮	13	4.4
213	慣れによるやり損い	20	6.7
214	点検不足	30	10.1
221	選択ミス	20	6.7
222	固執性	26	8.7
223	ルールの逸脱	113	37.9
231	判断ミス	54	18.1
232	自信過剰	8	2.7
	③機関士エラーに至った内的要因	隻数	%
311	注意不足	73	24.5
312	見落とし	14	4.7
313	勘違い	9	3.0
321	先入観	55	18.5
222	過小評価	70	23.5
232	確認ミス	9	3.0
331	決定ミス	35	11.7
341	整備ミス	33	11.1
	④外観的エラーモード	隻数	%
611	通常作業無	169	56.7
621	通常作業有	60	20.1
631	応急処置無	40	13.4
641	応急処置有	29	9.7
	⑤行動に影響する因子	隻数	%
411	慣れ・習慣	95	31.9
412	経験的勘	75	25.2
421	知識・経験不足	21	7.0
422	注意力・焦り	106	35.6
	⑥作業状況の因子	隻数	%
511	計画不良	162	54.4
512	整備不良	30	10.1
513	環境不良	30	10.1
514	指示・連絡不良	96	32.2

3.7.1 機関士エラーをもたらした原因

「機関士エラーをもたらした原因」における主な要因は、「非外的事柄」(172 隻 57.7%) といった無意識行動等といった要因が最も多く、次に「外的事柄」(76 隻 25.5%) といった第3者による混乱といった因子エラーである。「機関士エラーをもたらした原因」は、機関士の情報処理システムに直接的に作用する人的要因である。よって、無意識な行動や第三者の混乱は機関士エラーを発生させる大きな要因である。

3.7.2 機関士エラーメカニズム

「機関士エラーメカニズム」における主な要因は、「ルールの逸脱」(113 件 37.9%) である規定されたルールの逸脱が最も多く、次に、注意は誤った方向にむけられる「判断ミス」(54 件 18.1%) が多い。

現状を「識別」しているにも関わらず事故に至る「入力情報の処理エラー」「記憶」といった要因が大きく影響していることから、これらの要因には、機関士が状況に応じた適切な対処を難しくした設備や環境・情報などがいろいろと相互に影響しあっていることが推察できる。

3.7.3 機関士エラーに至った内的要因

「機関士エラーに至った内的要因」における主な要因は、「検出エラー」であるトラブルの恐れはないと思い注意を払わない「注意不足」(73 件 24.5%) 及び、「確認エラー」であるトラブルの発生を確認しなければならない状況でも大丈夫と判断する「過小評価」(70 隻 23.5%)、トラブルのおそれは確認したがトラブルの発生はないと先入観で判断する「先入観」(55 件 18.5%) が多いことが分かった。

「検出エラー」96 件 (32.2%) と「確認エラー」134 件 (45%) に対し「決定エラー」と「行動エラー」の合計は、68 件 (22.8%) であった。機関トラブルにおいて「検出エラー」「確認エラー」の段階でエラーを犯し、機関トラブルに至る場合が多いことに注意をしなければならないことが分かった。

3.7.4 外観的エラーモード

最終的に機関士トラブルに至った要因は、点検不足や管理不足といった通常作業を実施しなかった「通常作業無」(169 件 56.7%) が最も多く、次に、開放整備の不十分といった通常作業を実施したものの、作業が十分でなかった「通常作業有」(60 件 20.1%) が多いことが判明した。通常作業を実施なしが多いことから、陸上側からの効果的支援及び管理の必要性があることが分かった。

3.7.5 行動に影響する因子

疲労やタイムプレッシャーからなる個人特性に影響する「注意力・焦り」(106 件

35.6%)が多く、次に、人間が生きてするために身につけた高度な情報処理能力を助ける特性の1つである「慣れ・習慣」(95件 31.9%)が、多いことが判明した。これらの行動は、外部環境として機関士の情報処理システムに間接的に影響を与え、機関トラブルに大きく影響を与えるエラーであることが分かった。

3.7.6 作業状況の因子

機関トラブルに至った背景要因は、規則・手順の不備による「計画不良」(162件 54.4%)が最も多く、次に、作業内容の指示・伝達が不十分であることが原因の「指示・連絡不足」(96件 32.2%)が多いことが判明した。間接的に人的過誤に影響を与える作業状況の因子を把握することで、現場における環境・設備・情報をまとめることができた。

3.8 結言

機関士エラー及び人的要因についてその考え方を整理すると共に、機関士エラーによる機関トラブルの発生過程を把握する為に機関士エラー発生過程要素細目の分類表を構築し、海難審判裁決事例集に記載された機関管理に関わる事件全 1397 件からプレジャーボートの事件を除く 298 件の分析を行った。

- (1) 機関士エラーは「機関士エラーをもたらした原因」すなわち「機関士エラーをもたらしたきっかけ」が人的要因として直接的に機関士の情報処理システムに作用し、加えて「行動に影響する因子」や「作業状況の因子」といった外部環境が人的要因として間接的に作用して発生していると表現できる。
- (2) 機関士エラーは、機関士が適正に処理しなければならない判断・行動と実際に実施した差と定義した。これらのエラーは、機関士の情報処理システムで発生し、さらにその複合と連鎖により最終的に機関トラブルを機関士エラーという形で出力される。
- (3) 安全対策を行うには、なぜ機関トラブルが発生したかの原因及び因果関係を把握しなければならない為、機関士エラー及び人的要因がどのような時に発生し、どのように結びついて機関事故に至ったのかを把握する必要がある。その為には、機関士エラーの発生過程に基づく事故を分類する必要があり、機関士エラーの特徴を把握するための基礎となる「機関士エラー発生過程細目」を構築した。
- (4) 機関士エラー発生過程細目を使用して機関事故における機関トラブルの状況及び、機関士エラーの分類を実施し、機関士エラー発生過程の各要素における次の特徴を把握した。
 - ① 機関トラブルの約 6 割が機関士の通常作業を実施しない「通常作業無」が原因であり、これらの機関士エラーは、機関士の無意識な行動あるいは、第三者による

混乱が人的要因として機関士の情報処理システムに作用して発生している。

- ② 海難事故に至る最も大きな要因は、規定されたルールを逸脱する「ルールの逸脱」であった。
- ③ 機関士は、7割以上が機関の異常のおそれを「検出」し、「確認」する段階でエラーを犯していた。
- ④ 規則・手順が不十分である「計画不足」が5割以上あり、機関士と陸上支援側との指示・連絡不足が3割以上も影響を与え、人的要因として機関士の情報処理システムに作用している。

第4章 船用機関事故特徴分析における新たな手法

4.1 本章の目的

本章では、海難審判裁決録から機関事故におけるエラーの発生形態を分析するとともに、エラーの背後にある潜在的な危険要因を明らかにする為、多変量解析の一手法である数量化Ⅲ類を用いたエラー分析を行い、機関士エラーの全体像とその特徴を抽出することでエラー発生過程におけるそれぞれの要素間の繋がりを解明する一方策を検討する。近年の機関に関する海難事故の分析研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾は、機関トラブルの現状把握及び確率的安全性評価の観点から個々のインシデント事例を分析し、類似・同種の不安全事象の未然防止策を検討している。個々のインシデント分析結果のフィードバックも、類似の危険に遭遇したときの回避を容易にする上で重要である。しかし、一方で個々ではなく、インシデントの発生に関係した全ての要因がどのように相互に関連しているかを分析し、全体像の中から特徴を把握することは、事故への発展を阻止する回復事由の抽出と客観的な見極めが可能になり、適切な改善措置をとることができると考えた。

本章では、機関士エラー発生過程におけるそれぞれの要素間の繋がりを分析する為、「機関士エラー発生過程細目」を活用する。この項目を基に各機関士エラーが「機関士エラー発生過程」の各要因に影響が「ある」「ない」の2カテゴリーに区分し、それぞれに1,0の得点を与えて分析をした。

4.2 機関士情報処理システムの特徴分析手法

4.2.1 研究対象

本項では、海難審判裁決録から知覚・選択・判断・決定・操作の順で行われる機関士の情報処理システムに着目し、どこの過程でエラーが発生するのかを定量的に推定する為、まず Fig.4.1 に示す要因間の連鎖をまとめた。

機関士の情報処理システムでは、エラーメカニズム項目の規定された手順を逸脱する「ルールの逸脱」と機関士エラーに至った内的要因項目のトラブルの発生を確認しなければならない状況でも大丈夫だと判断する「過小評価」が多く発生している。

次に、エラーメカニズム項目の注意が誤った方向に向けられ判断を誤る「判断ミス」と機関士エラーに至った内的要因項目の行動によるエラーの「整備ミス」が多いことが分かった。機関士の情報処理システムに着目した結果、それぞれの要素間に繋がりがああり、これらが、直接原因を誘発して連鎖的に異常状態を起こすことが分かる。

次に、Fig.4.2 に示す海難審判裁決録と船用故障事例集の比較結果より、両事例から顕著な差異があまり認められない「機関士エラーに至った内的要因」に着目して数量化Ⅲ類を用いて人的要因に陥る背景要因を総合的に探りだし、危険の程度の高い要因を把握する。

Fig.4.2の結果より、「注意不足」に機関トラブルが多く発生していることが分かった。本研究では、「注意不足」に着目して、「機関士がどのような時に機関士エラーを犯すのか」といったエラーの発生形態を検討するため Fig.4.3 に示す数量化による分析フロー図に沿って分析をした。

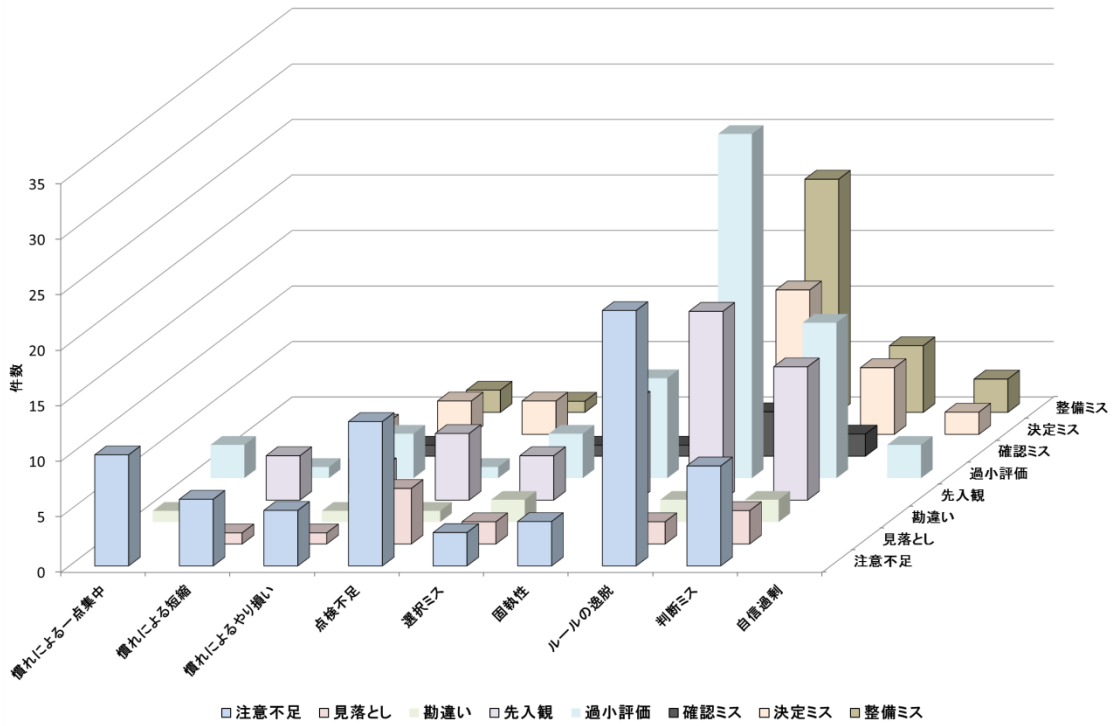


Fig.4.1 Relationship between mechanisms of human malfunction and internal human malfunction

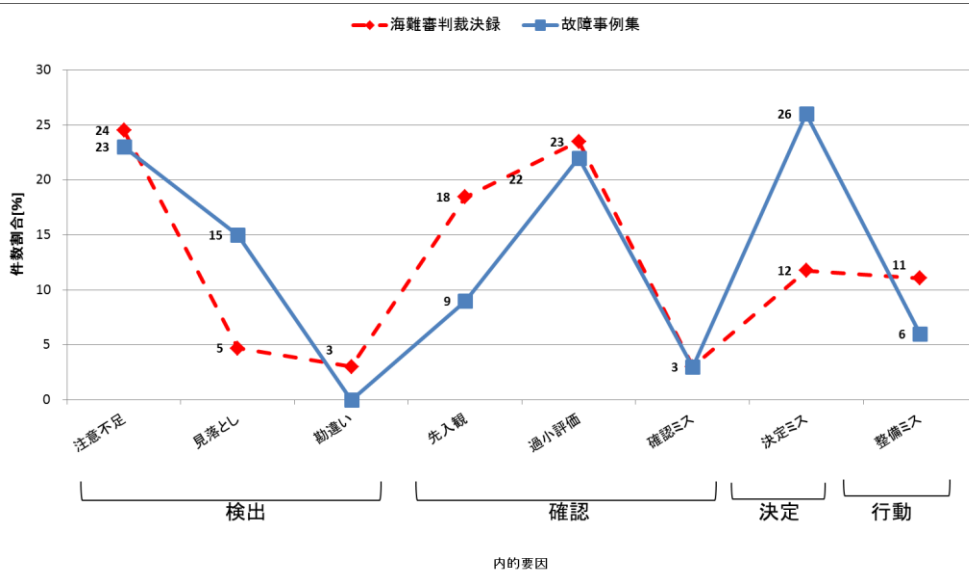


Fig.4.2. Comparison internal human malfunction

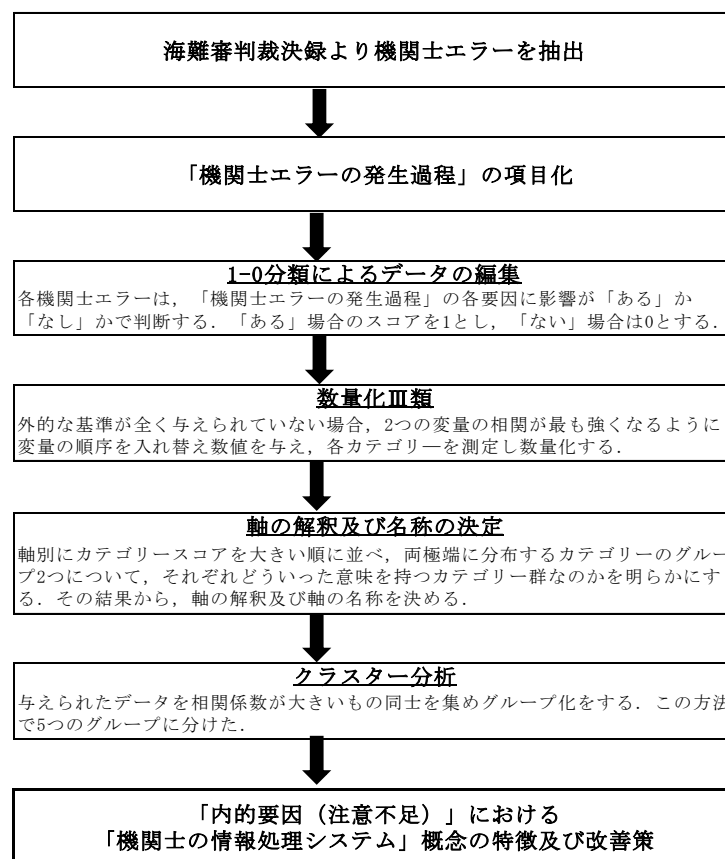


Fig.4.3. Configuration of the analysis by the quantification theory type III

4.2.2 数量化Ⅲ類によるエラー分析

数量化Ⅲ類⁽³⁶⁾は、質的な要因を相関係数の概念を用いて数量化し、各要因の相関関係を明らかにする方法である。多次元解析の手法の1つで、数量化Ⅲ類⁽³⁸⁾は、変数相互の関連を調べることで、いくつかの新しいファクターを発見し、そのファクターをものさしとして、カテゴリーあるいはサンプルの類似性やポジショニングを明らかにする手法である。諸要因の総合的解析結果は三次元の立体グラフに位置づけ、要因相互間の相関性の強さを示すことができる。解析結果より三次元の立体グラフをX軸とY軸について正面から見たとき、近い位置にある要因相互間がもっともかかわりが強く、距離がもっとも遠い関係にある要因同士がもっともかかわりが弱い。従って、X軸の両極に分布している要因群は違った性格をもっているという事ができ、その性質の違いを見極めれば、危険要因の二大特性を把握することができる。X,Y,Zの各軸はそれ自体に数量的意味はなく、数量化Ⅲ類の計算の結果算出された各要因の関わり方を見るための尺度の役割を果たすにすぎないものである。⁽³⁶⁾

4.3 数量化Ⅲ類の概念

数量化Ⅲ類^{(39)(40)(付録A)}は、Table4-1のような反応パターンが与えられることにより始まる。Table4-1に示す5つの反応点を相関係数が最大となる並び替えの方法を示す。5つの反応点の座標はそれぞれ $(X_1, Y_2), (X_2, Y_1), (X_2, Y_3), (X_3, Y_2), (X_3, Y_3)$ となる。この相関係数は次式で表される。

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Table 4-1 Pattern of response

	Y_1	Y_2	Y_3
X_1		✓	
X_2	✓		✓
X_3		✓	✓

r が最大となる X_i と Y_i の組合せを見つける。ここで、相関係数はデータの標準化をしても変わらないので、平均、分散は以下の通りとなる。

$$\text{平均 } \bar{X} = \bar{Y} = 0$$

$$\text{分散 } (X_i - \bar{X})^2 = 1$$

$$(Y_i - \bar{Y})^2 = 1$$

データ数は5つなので、相関係数 r は

$$r = \frac{X_1 Y_2 + X_2 Y_1 + X_2 Y_3 + X_3 Y_2 + X_3 Y_3}{5}$$

となる。

この相関係数 r を最大とする X と Y の値を求めることが数量化Ⅲ類であり、 r の最大値に対する X と Y の値が成分1に対するカテゴリースコア及びサンプルスコアとなる。成分2は、Table4-1に示した反応点に再度 $(X'_1, Y'_2), (X'_2, Y'_1), (X'_2, Y'_3), (X'_3, Y'_2), (X'_3, Y'_3)$ の座標を与え X と X' , Y と Y' が無相関となるような相関係数のうち、最大となるような相関係数を求める。この時の相関係数に対する X' と Y' が成分2に対するカテゴリースコア及びサンプルスコアとなり、成分1と成分2のスコアを用いて散布図を描くことが可能となる。数量化Ⅲ類では、カテゴリー数とサンプル数の少ない方を m とすると $(m-1)$ 個の相関係数が求まる。

4.4 数量化Ⅲ類による機関士エラーの傾向

「注意不足」による機関トラブルとは、トラブルの恐れはないと思い注意を払わず、そのために適切な操作を行わず機関トラブルが発生した場合である。

「注意不足」による事故を数量化Ⅲ類によって分析し、成分1から成分3までのカテゴリプロットをFig.4.4に示す。また、各成分のカテゴリースコアをTable4-2に示し、結果は以下の通りである。

Table4-3より、「注意不足」における成分3までの累積寄与率は28.9%である。当然

分析する成分を増やせば累積寄与率は上昇するが、累積寄与率を 80%以上あげるには成分 11 以上を対象とする必要がある。しかし、成分 11 の寄与率は 6%を満たさず、その分析対象を増やしても、いたずらに相関の低いエラーグループを抽出することになり、その分析結果の妥当性に疑問を生じる為、本研究では、成分 3 までを分析対象とした。

Table 4-2 Category score

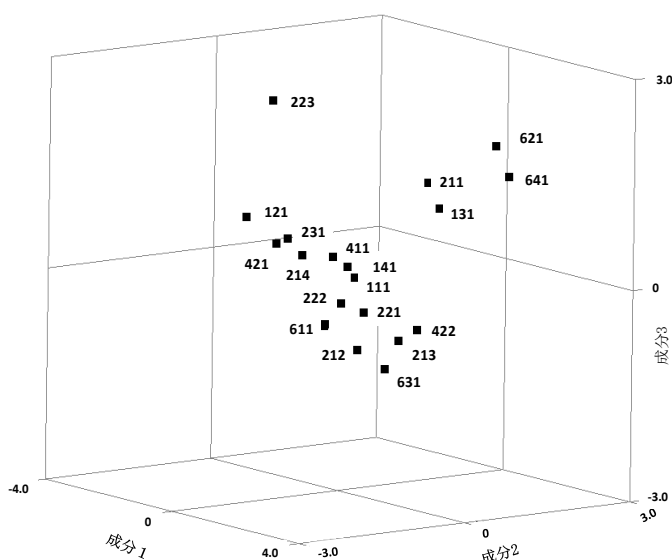


Fig.4.4. Results of quantification theory type III

変数名	成分1	変数名	成分2	変数名	成分3
131	3.829	641	2.920	223	2.392
231	1.796	621	1.985	621	1.846
621	1.375	211	1.520	131	1.491
422	1.284	221	1.394	211	1.226
213	0.868	631	0.745	641	1.194
641	0.186	213	0.559	121	0.903
111	0.154	212	0.434	231	0.645
631	0.139	411	0.358	412	0.597
211	0.088	141	0.265	214	0.552
221	0.029	111	-0.074	421	0.287
141	-0.023	611	-0.141	411	0.095
222	-0.086	222	-0.218	141	-0.010
412	-0.177	421	-0.273	422	-0.292
212	-0.207	422	-0.318	111	-0.320
611	-0.265	223	-0.327	222	-0.628
411	-0.407	131	-0.431	611	-0.677
214	-0.742	214	-0.548	213	-0.825
421	-0.754	412	-1.067	221	-0.855
121	-0.895	231	-1.185	212	-1.071
223	-1.638	121	-1.214	631	-1.341

Table 4-3 Results of quantification theory type III

	固有値	寄与率	累積寄与率
成分1	0.510	0.108	0.108
成分2	0.453	0.096	0.203
成分3	0.409	0.086	0.289

4.4.1 各成分の解釈

Table4-2 のカテゴリースコアに対応した変数名を Fig.4.4 の細目分対と比較することにより、成分の解釈を実施した結果、Fig.4.5 の通りになった。

第1成分は、上位の項目に「131: 機関士の能力欠落」、知識ベースの「231:判断ミス」、「621:通常操作有」とあり、下位の項目には、経験を重視して規定に逸脱したルールベースの「223:ルールの逸脱」、「121:特定の状況」、「214:点検不足」、「411: 慣れ・習慣」となっている。この軸は、「訓練・経験に基づく行動の有無」とすることができる。

第2成分は、上位項目に「641:応急処置有」、「621:通常操作有」、スキルベースの「211:慣れによる一点集中」、「213: 慣れによるやり損い」及び「212: 慣れによる短縮」と慣れによる行動があり、下位の項目には、「121:特定の状況」、知識ベースの「231:判断ミス」、「412:経験的勘」及び「223: ルールの逸脱」となっている。この軸は、「意識的行動レベル」とすることができる。

第3成分は、上位項目に「223:ルールの逸脱」、「621:通常操作有」、「641:応急処置有」とあり、下位項目には、「631:応急処置無」、「212:慣れによる短縮」、「611:通常作業無」となっている。この軸は、「作業・応急処置の実施の有無」とすることができる。

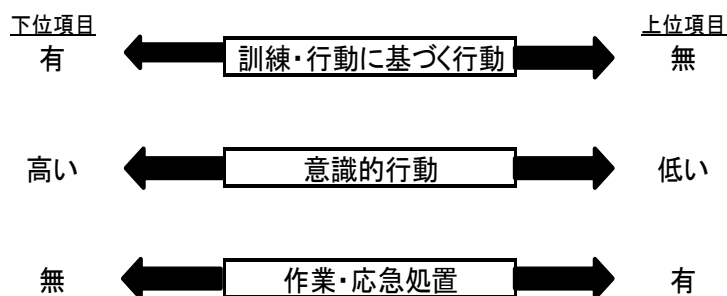


Fig.4.5 Construction of element

4.5 クラスタ分析について

クラスタ分析⁽⁴¹⁾は、サンプル（あるいは変数）間の類似度あるいは非類似度に基づき、サンプル（あるいは変数）の分類を行う手法である。類似度あるいは非類似度とは、その名のとおり、サンプル（あるいは変数）どうしがどれだけ類似しているか、あるいはどれだけ類似していないかを数値として表したものである。

クラスタ分析⁽⁴¹⁾を扱うデータは、Table4-4 に示すような多変量データである。Table4-5 は、非類似度行列を示したものである。同じサンプルどうしの非類似度は0、または、 i 番目のサンプルと i' 番目のサンプルの非類似度と、 i' 番目のサンプルと i 番目のサンプルの非類似度は等しいと考える。

$$\begin{cases} d_{ii} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ d_{ii'} = d_{i'i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

Table 4-4 Multivariate data

		変数					
		x_1	x_2	...	x_j	...	x_p
サ ン プ ル	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1p}
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2p}
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}	...	x_{ip}
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	i'	$x_{i'1}$	$x_{i'2}$	...	$x_{i'j}$	...	$x_{i'p}$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nj}	...	x_{np}

Table 4-5 Matrix of dissimilarity

		サンプル							
		1	2	...	i	...	i'	...	n
サ ン プ ル	1	d_{11}	d_{12}	...	d_{1j}	...	d_{1p}	...	d_{1n}
	2	d_{21}	d_{22}	...	d_{2j}	...	d_{2p}	...	d_{2n}
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
	i	d_{i1}	d_{i2}	...	d_{ij}	...	d_{ip}	...	d_{in}
	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	...	⋮
	i'	$d_{i'1}$	$d_{i'2}$	...	$d_{i'j}$	...	$d_{i'p}$	...	$d_{i'n}$
	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	n	d_{n1}	d_{n2}	...	d_{nj}	...	d_{np}	...	d_{nn}

次に、クラスター分析を行うためには、全てのサンプル間の距離を求めなければならない。本研究では、 i 番目のサンプルと i' 番目のサンプルの距離は、以下の式で示す、標準ユークリット距離を用いた。

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^p \left(\frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} - \frac{x_{i'j} - \bar{x}_j}{S_j} \right)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^p \left(\frac{x_{ij} - x_{i'j}}{S_j} \right)^2}$$

S = 標準偏差

クラスター間の距離の求め方は以下の通りである。

- ① サンプル 1 つ 1 つが個々にクラスターを形成していると考え、すべてのクラスター間の距離をもとめる。
- ② クラスター間の距離に基づき、最短距離の 2 つのクラスターを結合する。
- ③ すべてのサンプルを含んだ 1 つのクラスターができていれば終了し、そうでなければ、④に進む。
- ④ ②で新しくできたクラスターと既存のクラスターとの距離は群平均法を用いて計算し、全てのクラスター間の距離を求め、②に戻る。

本研究では、JUST 統計パッケージ Stat Master を使用して、共通カテゴリーのクラスター化は群平均法、類似係数は標準ユークリッド距離を使用し、デンドログラムを作成した。



Fig.4.6. Example of the dendrogram

Fig.4.6 に示すデンドログラムの横軸はサンプル、縦軸は結合したときのクラスター間の距離（結合レベル）である。結合レベル 0 では各サンプルがそれぞれクラスターを構成し、ここでは、サンプル B とサンプル C が最短距離で結合していることが分かる。デンドログラム上では、結合レベルが低いサンプル程結びつきが強いことが分かる。

デンドログラムが描ければ、結合レベルのどの水準で切断するかによって、サンプルを任意のクラスターの数に分けることができる。

4.6 クラスター分析による機関士エラーのグループ化

前節では、数量化Ⅲ類によって機関トラブルにおける「注意不足」要因を定置した。つぎに、機関トラブルのグループ化をおこなう。Fig.4.7に示す通り、共通カテゴリーのカテゴリースコアを使用して階層的クラスター分析をすることでグループ化を図り、デンドログラムの結合レベルに応じて共通カテゴリーの組み合わせを求めた。デンドログラムの横軸は変数、縦軸は結合した時のクラスター間の距離（結合レベル）である。

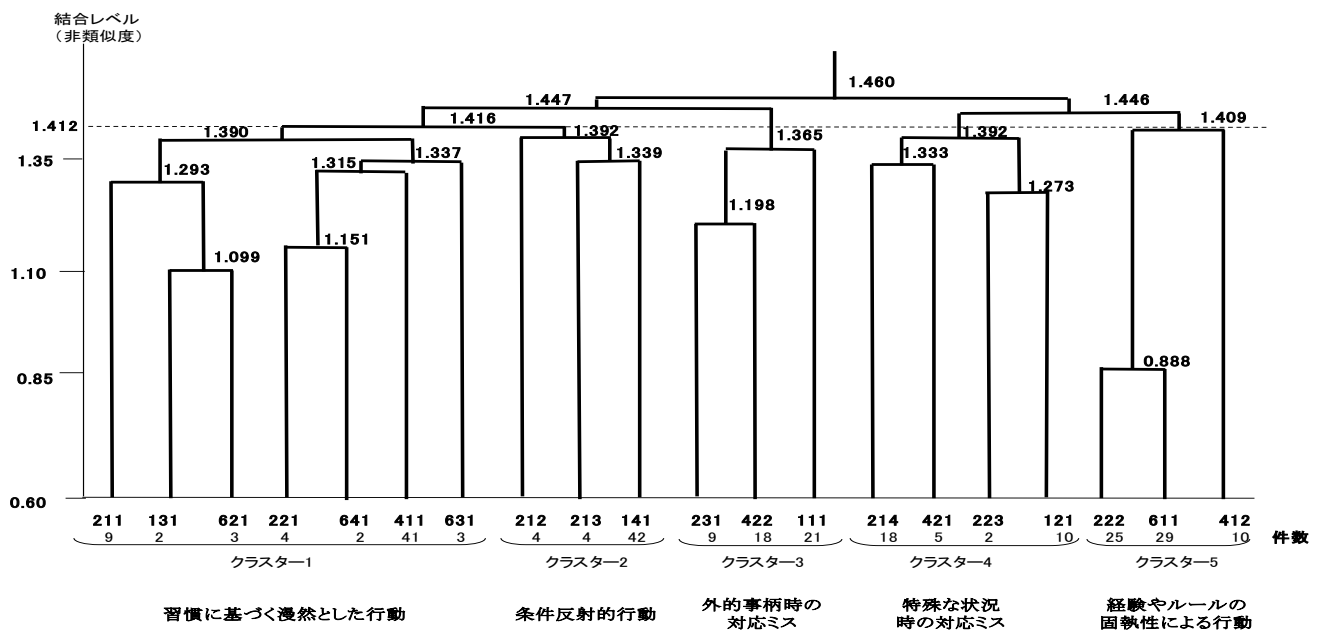


Fig.4.7. Dendrogram

Table 4-6 Number of clusters

切断レベル	1.447	1.412	1.392
クラスター数	3	5	7
クラスター数 毎の件数	114	64	64
	48	50	50
	99	48	48
		35	23
		64	12
		54	10

本研究において、クラスター数の決定は、「注意不足」要因に属する件数の均等及び機関士エラーの特徴が読み取れることを主眼に切断レベルのしきい値を Table4-6 の通り検討した。両観点からデンドログラムの切断レベルを 1.412 にとし、クラスター数を 5 とした。

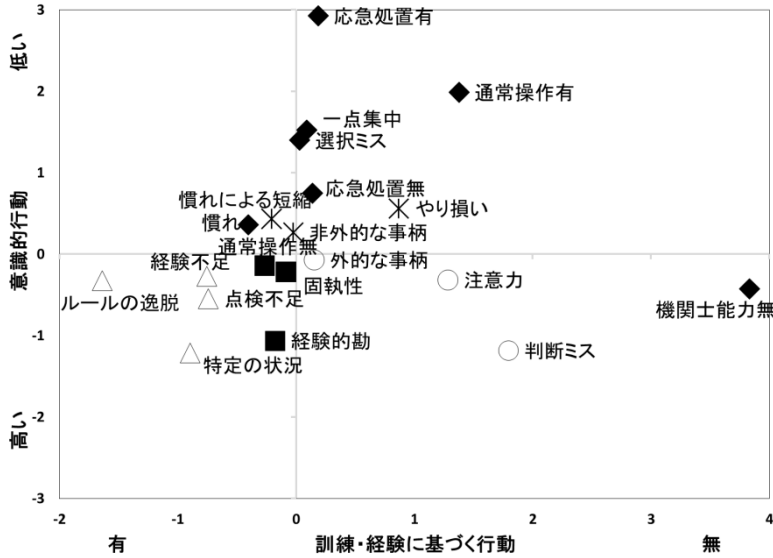


Fig.4.8 Scatter diagram (Factor 1-2)

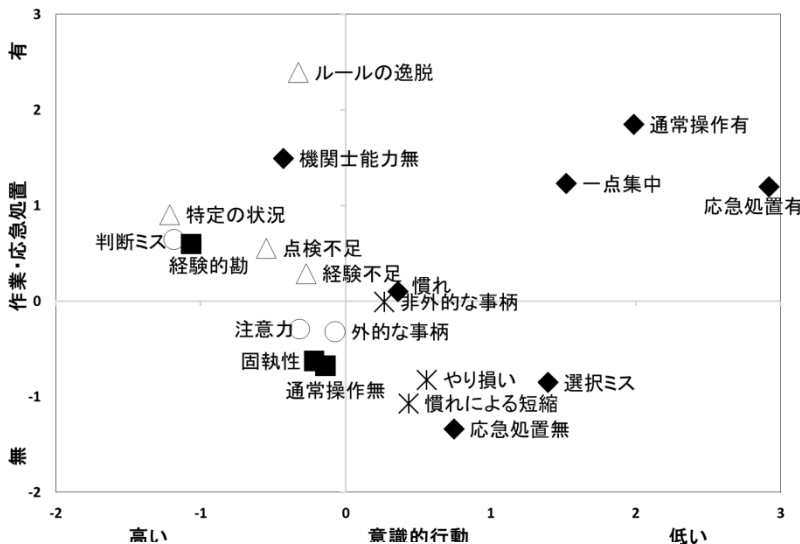


Fig.4.9 Scatter diagram (Factor 2-3)

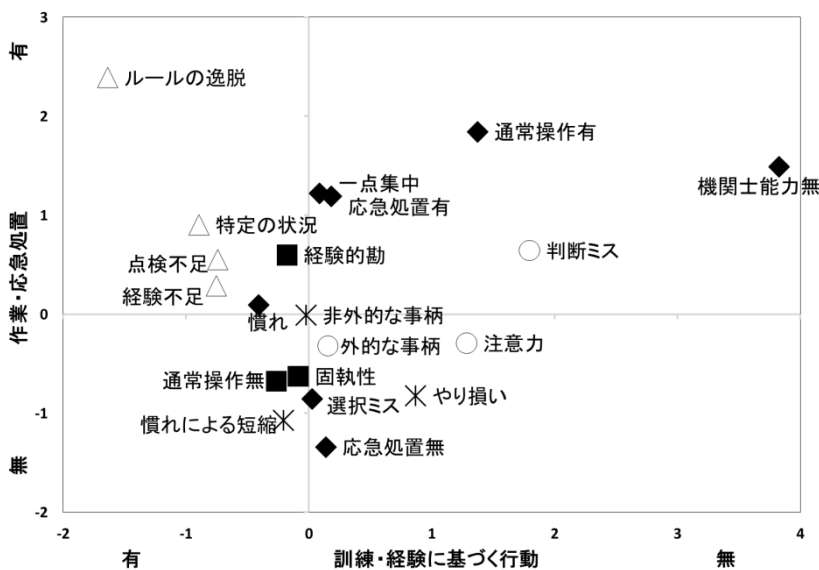


Fig.4.10 Scatter diagram (Factor 1-3)

「注意不足」による機関トラブルに関して、機関トラブルと強いカテゴリグループを求めた結果、次に示す機関士エラーの特徴を明らかにした。

(Fig.4.8, Fig.4.9, Fig.4.10)

クラスター1: ◆

慣れによる一点集中 [211]及び、選択ミス [221]等は、慣れに基づく行動及び経験的行動が注意を払わないことに大きく影響していると考えられる為、慣れに基づく漫然の行動と解釈できる。

クラスター2: *

無意識行動が影響するスキルベース行動の慣れによる短縮 [212], 慣れによるやり損い [213]等が、現状に注意を払えず機関トラブルに影響したと考え、条件反射的行動と解釈できる。

クラスター3: ○

新造時や乗組員交代等の外的事柄 [111]時、他のことに注意を奪われ [422], 誤った方向に注意 [231]が向けられ現状に注意を払わず機関トラブルに至ったと考え、外的事柄時の対応ミスと解釈できる。

クラスター4：△

厳しい航海条件や通常と異なる運航条件[121]は、注意すべき現状の見落とし[214]や、規定された手順の逸脱[223]により機関トラブルに至ったと考え、特定の状況時の対応ミスと解釈できる。

クラスター5：■

異常状態とは関係なく、過去の経験や規定された手順で判断[222]することで、通常操作を実施せず[611]機関トラブルに至ったと考え、経験やルールの固執性による行動と解釈できる。

5つに分類されたカテゴリーに対して、数量化Ⅲ類に用いた20項目を参考にして各カテゴリーを解釈した結果、Table4-7の通りになった。

Table 4-7 Construction of element

クラスター1	習慣に基づく漫然とした行動
クラスター2	条件反射的行動
クラスター3	外的事柄時の対応ミス
クラスター4	特定の状況時の対応ミス
クラスター5	経験やルールの固執性による行動

4.6.1 各クラスターの傾向

5つのクラスターを数量化Ⅲ類によるカテゴリー得点の散布図をもとに、これらに所属する要因ごとに分類した。3軸平面における散布状況の結果はFig.4.8, Fig.4.9, Fig.4.10のとおりである。

クラスター1：習慣に基づく漫然とした行動

成分1-2よりクラスター1は、意識行動が低い場合に「注意不足」行動が影響している。

クラスター2：条件反射的行動

成分1-2より、非外的事柄[141]が軸の中心に位置することで条件反射的行動に最も影響している。非外的事柄は、周囲の影響ではなく、機関士自身による要因である。また、相互に類似性があるカテゴリーは互いに近い距離にあることから、クラスター1の習慣に基づく漫然とした行動と類似性があることが分かる。

クラスター3：外的事柄時の対応ミス

成分1-2よりクラスター3は、訓練・経験に基づかない行動が大きく影響していることが分かる。また、軸の中心位置には外的事柄[111]がある。外的事柄は、通常と異なる環境時、「注意不足」に至ることが分かる。

クラスター4：特定の状況時の対応ミス

成分1-2よりクラスター4は、訓練・経験による行動が大きく影響して、異常状態に「注意不足」になり、機関トラブルに至ることが分かる。

クラスター5：経験やルールの固執性による行動

成分 1—2 よりクラスター5 は、点検管理の欠落が影響する通常作業無[611]が軸の中心に位置し、経験やルールの固執性による行動に最も影響した。また、クラスター5 は、意識的行動及び訓練・経験に基づく行動等がクラスター4 の特定の状況時の対応ミスと類似性がある。

4.6.2 クラスター分析による考察

各クラスターの散布図を比較して Fig.4.11 のようにまとめることができた。デンドログラムより各カテゴリーに記述された数で影響が大きかった「習慣による漫然とした行動」と「経験やルールの固執性による行動」がクラスターの中心であると考えられる。これに条件反射的行動、外的事柄時や特定の状況での対応ミスといったクラスターが副次的に存在していると考えられる。

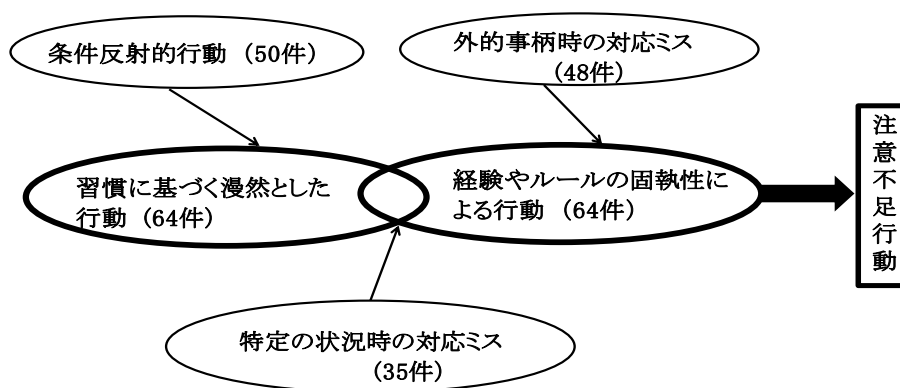


Fig.4.11 Consideration result by the cluster analysis

4.7 結語

機関士エラー発生過程における要素細目を基に、海難審判裁決録から機関事故における機関士エラーを定量的に捉え、機関士の情報処理システムにおける発生形態を分析するとともに、数量化Ⅲ類による機関士エラーの総合的分析及び、クラスター分析による機関士エラーの特徴を抽出した。発生形態の分析では、どこの過程で機関士エラーが発生するのかを定量的に把握する為に、機関士の情報処理システムに着目し、危険の程度の高い要因を抽出した。

- (1) 機関士の情報処理システムに着目することで、エラーメカニズムの「ルール逸脱」と機関士エラーに行った内的要因の「過小評価」が多い結果となった。この結果から、規定された規則を逸脱しなければならない状況とトラブルの恐れがないと

過小評価し確認を怠ってしまう現状があることを把握した。

- (2) 「機関士エラーに至った内的要因」は、海難審判裁決録と船用故障事例集の比較から両事例に顕著な差異が認められなかった。
- (3) 両事象で機関トラブルの要因で多かった項目は、「注意不足」であった。
- (4) 機関士エラー発生分類の 20 項目による数量化Ⅲ類の結果より、機関士エラーに至った内的要因の「注意不足」における機関士エラーの概念は、「訓練・経験に基づく行動の有無」、「意識的行動レベル」、「通常作業・応急処置の有無」の 3 つの関係に定置することができた。
- (5) クラスタ分析によって、「習慣に基づく漫然とした行動」、「経験やルールの固執性による行動」、「条件反射的行動」「外的事柄時の対応ミス」、「特定の状況時の対応ミス」という 5 つの主要なクラスターに分類できた。
- (6) 「注意不足」による機関士エラーの発生要因は、通常と異なる状態に陥った時、突発的に普段の行動が現われ、現状把握をしないまま誤った行動に移ることであった。
- (7) 機関士エラー発生過程の項目を定量的に評価することは、機関士エラーの特徴を抽出し把握することが機関事故防止対策に重要であると考えられる。

第5章 各事象における機関士エラーの検証

5.1 本章の目的

本研究では、機関トラブルに至った機関士エラーが、知覚・判断・操作の各段階にわたって起こりうるために非常に多岐にわたっており、普遍的な性質を見出すことが重要であると考え、機関士の情報処理システムに着目する。

前章では、個々の事例ではなく、機関損傷に係る全ての要因がどのように相互に関連しているかを分析し、全体像から特徴を把握する必要があると考え、顕在化された海難審判裁決録の機関事故を基に、エラー発生過程におけるそれぞれの要素間の繋がりを分析し、人的要因を包括的に評価した。

本章ではこれまでに起きた機関損傷事故を海難審判裁決録と船用機関故障事例集から機関士エラーにつながる人的要因に関する特性分析を行い、過誤に繋がる要因を検討する。ここでは、ハインリッヒの法則における重大損傷事例として海難審判裁決事例を顕在事象、軽微損傷事例として船用機関故障事例を潜在事象として扱うことにする。なお、本研究では、損傷に至らなかったヒヤリハット情報に関しては対象外とする。その上で、顕在事象と潜在事象の機関損傷情報の相違を多変量解析の一手法である数量化Ⅲ類を用いてエラー分析を行い、各情報の特徴分析から機関士エラーの総合的把握を試みる。

5.2 分析対象データ

平成元年1月から平成19年9月の日本船用機関士協会編集船用機関故障事例集に掲載された機関管理に関わる故障198件を調査し、このうち人的要因に関する情報全104件を抽出して分析対象とする。この船用機関故障事例集は、日本船用機関士協会に所属する船社で発生した事例を収集し、データベースとして報告されているものである。また、平成7年から平成23年までに言い渡された海難審判裁決事例より、機関管理に関わる事件全1397件からプレジャーボートの事件を除く298件を分析対象とする。なお、本研究は人的要因の根本原因の把握を目的としている。乗組員のライセンスや機関出力の大小等に関わらず、298件の事例について同等に取り扱い分析を進めることにした。

5.3 顕在事象と潜在事象の情報特徴

本研究で対象とした機関事故に関する報告書は、海難審判裁決録と船用機関故障事例集であり、両報告書の特徴をまとめるとTable5-1の通りである。

- ① 海難審判裁決録（顕在事象）は、機関プラントの通常運転および整備中に発生した事故の内容ならびに機関士の過誤の内容および背景要因を含む作業時の状況が記されており、事件の発生内容を示している。また、海難審判裁決録は、海難事故防止に寄与することが目的である為、どのような過誤になぜ陥ったのか、つまり過誤の

態様と背景要因の相関，機関損傷発生のプロセスを解明するための事実情報が詳細かつ明確に記されている。したがって，海難審判裁決録は，船用機関分野における危険要因の実情を示しているといえる。

- ② 故障事例集（潜在事象）は，軽微な事象・現象の発見内容及び，経年劣化による不具合について記されており，事例の発見内容を示している。また，故障事例集は機器類の故障を紹介することが目的である為，不具合事象に関与した作業者の人的な背景要因に関する情報は多く記されていない。したがって，故障事例集は，船用機関分野に共通する認識の提供であるといえる。

安全確保と事故防止の観点から機関士エラー発生過程における各要因の中で，発生と発見⁽³³⁾，すなわち実情と認識に共通する危険要因を見つけ出すことは，未然に事故を防止するための一方策の検討材料になるのではないかと考える。

Table 5-1 Characteristic of each event

	顕在事象	潜在事象
目的	海難事故防止に寄与	故障事例を紹介
記載事項	<発生項目> ・通常運転・整備中に発生した内容 ・機関士の過誤内容 ・作業時の内容	<発見内容> ・軽微な事象・現象 ・経年劣化による不具合
記載内容	機関損傷発生のプロセスが明確に明記していることから，危険要因の <u>実情</u> を提供している。	主な機関損傷トラブルを共有することで，船用機関分野に共通する <u>認識</u> を提供している。

5.4 各事象における機関士情報処理システムの特徴分析

5.4.1 機関士エラーメカニズム

両事象で顕著な相違が見えた機関士過誤のエラーメカニズムについて分析をする。Fig.5.1は，分析対象とした顕在事象 298 件と潜在事象 104 件との合計 402 件の機関損傷事例において，それぞれの事象の機関士エラーメカニズムの分析結果である。図中の破線は顕在事象の結果を表わし，潜在事象の結果は実線で表した。

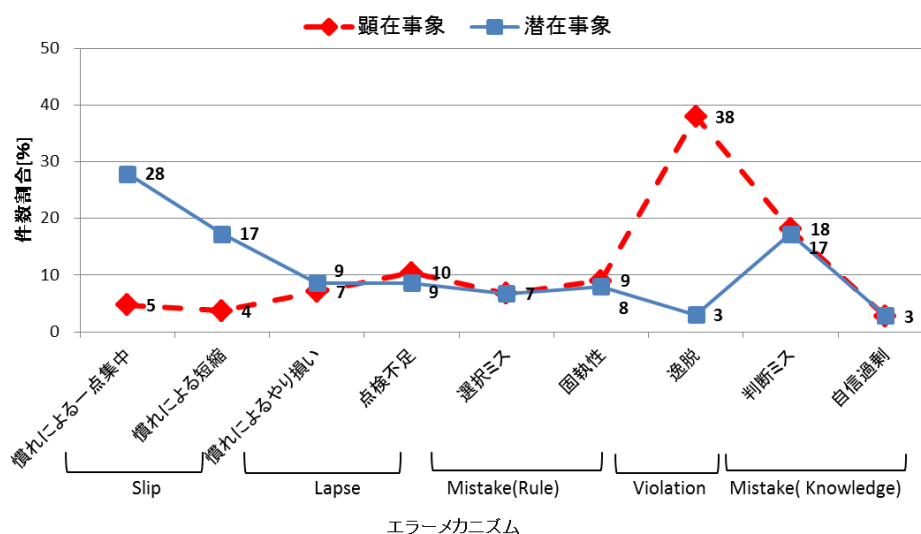


Fig.5.1. Comparison mechanisms of human malfunction

潜在事象では、「慣れによる一点集中」や「慣れによる短縮」(Slip)の合計が45%を占め、軽微な事象に大きく影響を与えている一方、顕在事象では、基本的手順や規則、基準を遵守しない「ルールの逸脱」(Violation)が全体の38%を占める結果となった。顕在事象、潜在事象共に件数割合の多いエラーメカニズム細目は、初めて経験する故障や異常対応能力の欠如がうかがえる「判断ミス」(Mistake(Knowledge))である。次に多いのは、異常対応時に行われる機器取扱いが通常時と異なるにもかかわらず、つい通常時と同様な行動をする「慣れによるやり損い」・「点検不足」(Lapse)である。Lapseというスキルベースの行動形態にて発生するエラーは、機関士の勘違いや記憶違いを含んでいる。顕在事象の要因で機関損傷に大きな影響を与えたルールベースのViolationは、規定された手順を逸脱するエラーである。事象の背景要因を検証した結果、認識しながらルール逸脱に至るエラーメカニズムは、初心者ではなく経験豊富な機関士ほど、規定された手順から逸脱して行動していることが分かった。事故の未然防止対策として、機関士の判断や行動をまとめ、手順・規則が現場に則したものであるように改善を検討する必要がある。

Fig.5.2 に示す様に顕在事象と潜在事象のエラーメカニズム毎の件数割合を比較すると、SlipとViolation以外はほぼ同じであることが分かる。このことから顕在事象に発展する大きな要因は、ルールの逸脱(Violation)が大きく影響していたことが分かる。以上の結果から、顕在事象が発生する過程及び、顕在事象と潜在事象の類似性と相違性を把握することができた。

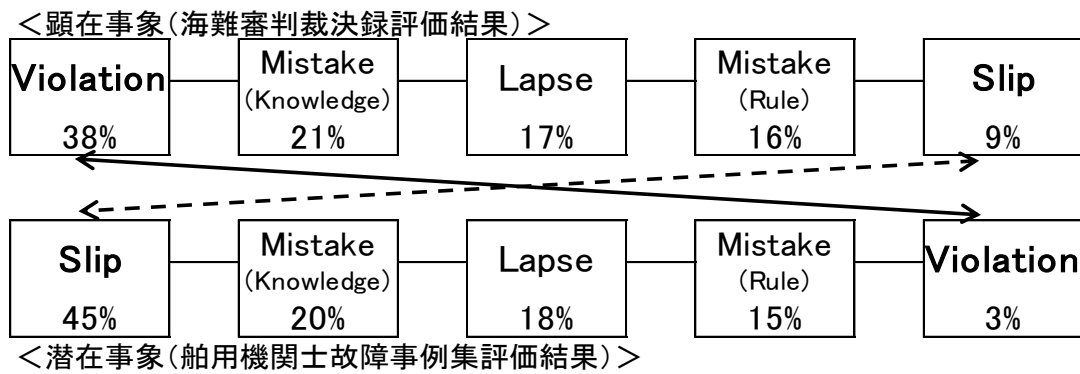


Fig.5.2. Comparison of actualized and latent events

5.4.2 機関士エラーに至った内的要因

分析対象とした合計 402 件の機関に関わる機関損傷において、潜在事象と顕在事象の機関士エラーに至った内的要因を分析した結果を Fig.5.3 に示す。図は横軸に内的要因を示し、縦軸に件数割合を示している。図中の破線は顕在事象の結果を表わし、潜在事象の結果は実線で表した。

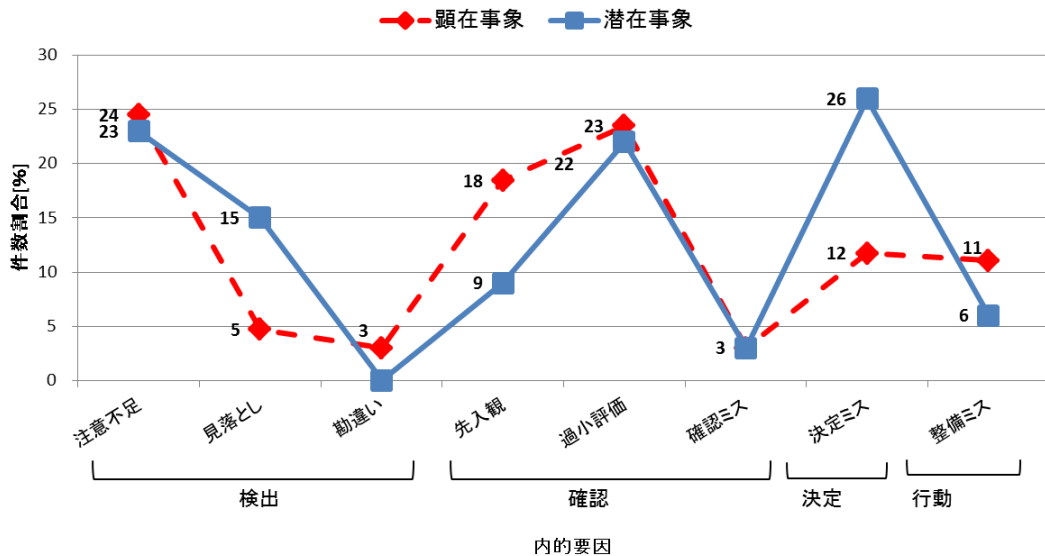


Fig.5.3. Comparison internal human malfunction

Fig.5.3 の「決定ミス」項目は、顕在事象と潜在事象において大きな差異が認められるが、事象の背景を検証した結果、顕在事象の主要因は、コミュニケーション不足によるアラーム発生や異常確認後の決定ミスである一方、潜在事象は、異常確認後の整備のタイミング決定によるミスが多数であった。すなわち、「決定ミス」には、個人要因以外の要因も含んでいることが分かった。

顕在事象、潜在事象ともに「確認」の段階で多くのエラーが発生している点が共通している。特に、トラブルの恐れを確認しなければならない状況下において大丈夫と判断

する「過小評価」が、事故に大きく影響している。次いで両事象ともに「検出」の件数割合が多い。トラブルの恐れはないと思い注意を怠る「注意不足」が両事象に共通していることが分かる。機関士エラーの7割以上が「検出」・「確認」の段階でエラーを発生しており、両事象に共通性がある。

5.5 各事象における機関士エラーの特徴分析の比較

5.5.1 数量化Ⅲ類における機関士エラー分析の比較

顕在事象と潜在事象には、前章で明記した機関士エラー発生過程要素細目カテゴリーが33項目ある。本章では、人的要因による危険要因の全体像を把握し、カテゴリー相互の関連を見極めるために統計的解析手法の数量化Ⅲ類を用いて分析を進めることにした。そこで、両報告書を用いて共通の分類項目で分類した上で、これらを定量化する。定量化は、分析ソフト（JUSE 統計パッケージ Stat Master）を使用して、数量化Ⅲ類により行い、各カテゴリーの成分ごとのスコアを主成分第3まで求めた。なお、顕在事象と潜在事象の相関性、類似性把握に主眼をおく為、分析結果に基づく各成分の解釈は言及しない。数量化Ⅲ類の結果を Table5-1 に示す。

情報要約を表す累積寄与率は、顕在事象の成分3までが18.0%、潜在事象の成分3までが30.9%を示した。顕在事象と潜在事象のカテゴリースコアは、Table5-2, Table5-3 に表す。Table5-2 の顕在事象のカテゴリー名33件は、過誤の態様や背景要因等が明記されていることから、本研究が対象としたエラー発生過程要素細目の33項目と一致した。

Table 5-1 Results of quantification theory type III

	顕在事象			潜在事象		
	固有値	寄与率	累積寄与率	固有値	寄与率	累積寄与率
成分1	0.327	0.071	0.071	0.769	0.111	0.111
成分2	0.259	0.056	0.127	0.747	0.107	0.218
成分3	0.248	0.053	0.180	0.636	0.091	0.309

一方、Table5-3 の潜在事象は、故障情報を提供することが目的であることから、両者に共通する項目が16カテゴリーであった。

次に、カテゴリースコアの結果を3次元散布図として示す。顕在事象のカテゴリースコアを Fig.5.4 に、潜在事象のカテゴリースコアを Fig.5.5 に示す。

まず、顕在事象と潜在事象の相違に着目する。Fig.5.4 では、顕在事象は、ルールベース要因（選択ミス、固執性、ルールの逸脱）のカテゴリーが、スキルベース要因（慣れによる一点集中、慣れによる短縮、慣れによるやり損い、点検不足）のカテゴリーより相対的に軸の原点位置で近接する結果となった。一方、Fig.5.5 から読み取れるように、潜在事象は、顕在事象とは逆にスキルベース要因がルールベース要因より相対的に軸の原

Table 5-2 Category score
(Actualized events)

カテゴリ名	成分1	成分2	成分3
自信過剰	1.981	2.264	0.198
特定状況	1.143	0.265	0.563
知識不足	1.045	1.848	0.611
応急処置無	1.028	0.253	0.424
決定ミス	0.763	0.436	0.068
過小評価	0.643	-0.529	0.489
機関士能力欠落	0.612	0.198	-0.810
整備ミス	0.529	1.120	-0.217
指示不良	0.437	0.032	0.091
知識不足	0.321	-0.721	0.079
ルールの逸脱	0.309	0.084	0.373
注意力	0.265	0.047	-0.634
応急処置有	0.237	-1.077	-0.349
判断ミス	0.211	-0.194	-0.753
計画不良	0.104	0.066	-0.121
選択ミス	0.096	-0.665	0.023
固執性	0.093	-1.340	0.259
通常操作無	-0.005	-0.021	0.162
環境不良	-0.074	-0.516	0.485
先入観	-0.105	-0.777	-1.147
外的事柄	-0.151	0.469	-0.752
確認ミス	-0.188	-1.426	1.073
慣れによるやり損い	-0.205	0.379	-0.707
非外的事柄	-0.223	-0.286	0.286
勘違い	-0.544	0.635	-0.681
見落とし	-0.619	0.545	-1.042
通常操作有	-0.771	0.404	-0.576
慣れ	-0.793	0.105	0.507
点検不足	-0.844	0.510	-0.225
注意不足	-0.956	0.343	0.634
慣れによる短縮	-1.022	-0.112	-0.634
整備不良	-1.455	0.210	0.040
慣れによる一点集中	-1.782	0.590	1.226

Table 5-3 Category score
(Latent Event)

カテゴリ名	成分1	成分2	成分3
自信過剰	1.585	-0.505	-1.895
ルールの逸脱	1.522	1.098	3.106
整備ミス	1.037	-0.064	1.414
判断ミス	0.971	-0.950	-0.573
過小評価	0.925	-0.797	-1.055
決定ミス	0.710	0.846	0.562
点検不足	0.564	0.777	0.021
慣れによる短縮	0.453	0.146	0.435
慣れによるやり損い	0.100	1.032	-0.155
確認ミス	-0.475	-1.761	0.778
固執性	-0.565	1.816	-0.779
選択ミス	-0.606	-1.353	1.313
見落とし	-0.797	-1.037	0.825
先入観	-0.820	1.455	-0.958
注意不足	-1.051	0.140	-0.254
慣れによる一点集中	-1.132	-0.310	-0.104

- …スキルベース
- …ルールベース
- …知識ベース

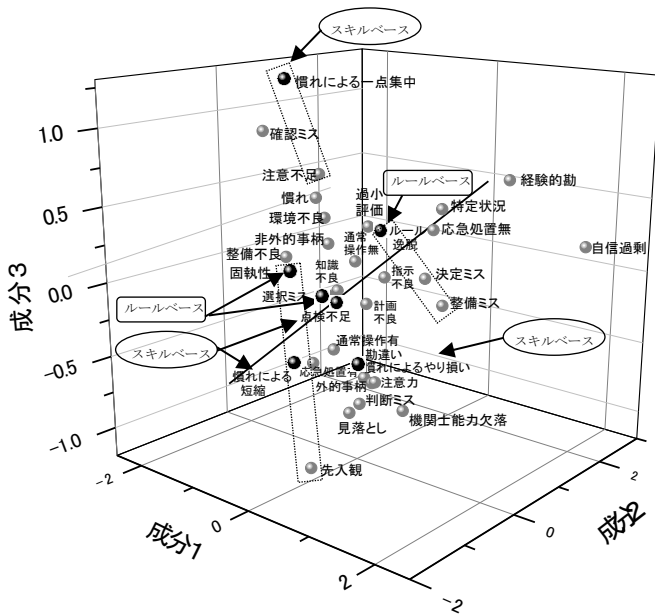


Fig.5.4. Scatter diagram (Actualized events)

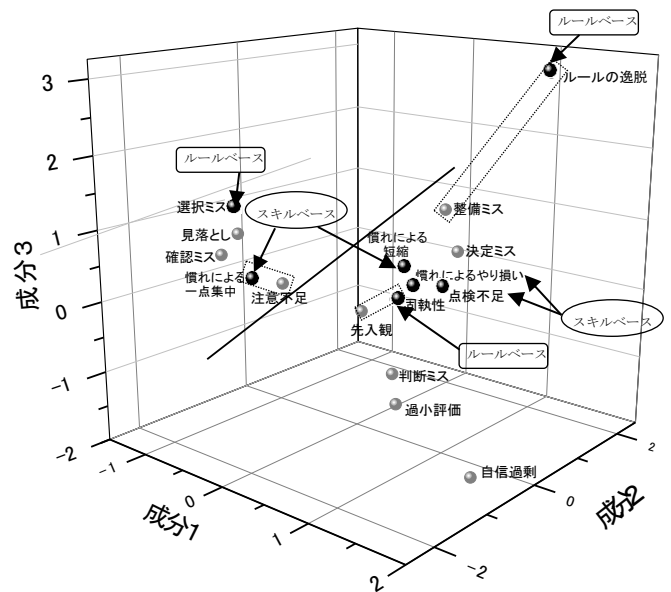


Fig.5.5. Scatter diagram (Latent events)

点位置で近接する結果となった。あらゆる事象にある特定のエラー発生過程細目のカテゴリが多く的事象に含まれる場合、当該カテゴリは、散布図の原点に集中する。すなわち、軸の原点に位置するほど、人的要因に対して普遍的な影響をもっていると言える。以上のことから、顕在事象（発生）では、スキルベース要因よりルールベース要因の方が普遍的な要因であり、潜在事象（発見）では、スキルベース要因が普遍的な要因であるところに両者の相違点がある。

5.5.2 クラスタ分析における機関士エラー分析の比較

クラスタ分析から顕在事象と潜在事象の類似性に着目した。分析結果を Fig.5.6, Fig.5.7 の各デンドログラムに示す。クラスタ分析には、群平均法と平均ユークリット距離を使用して分析した。

顕在事象と潜在事象共に近接しているカテゴリに注目する。両事象で近接したカテゴリは3組あり、デンドログラム中に太線で示し、散布図中の破線の四角枠（□ 枠）に示す。デンドログラムから類似性をみると、近接距離に違いはあるが、空間・位置において類似性がみられる。

以上の結果より、海難審判裁判録と船用機関故障事例は、性質の異なる情報源であるが、それらは相違するだけでなく類似する部分を含むことがわかった。船用機関故障事例が、顕在化していない海難事例であると考えれば、両報告書の類似点に着目することで、一部の潜在事象の顕在化を防ぐ対策が検討できると考える。例えば、類似点の1つに Mistake(先入観や固執性)による海難事例や故障事例がある。顕在化するか否かの境目の深層には、それを左右する分岐因子が存在すると推察する。因子詳細の解明を進める過程を経て顕在化防止策の検討が可能と考えられる。一方、相違点に着目すると、海難事故の実情には船用機関分野の認識による推理があてはまらない特異な要因が含まれているという事がわかる。

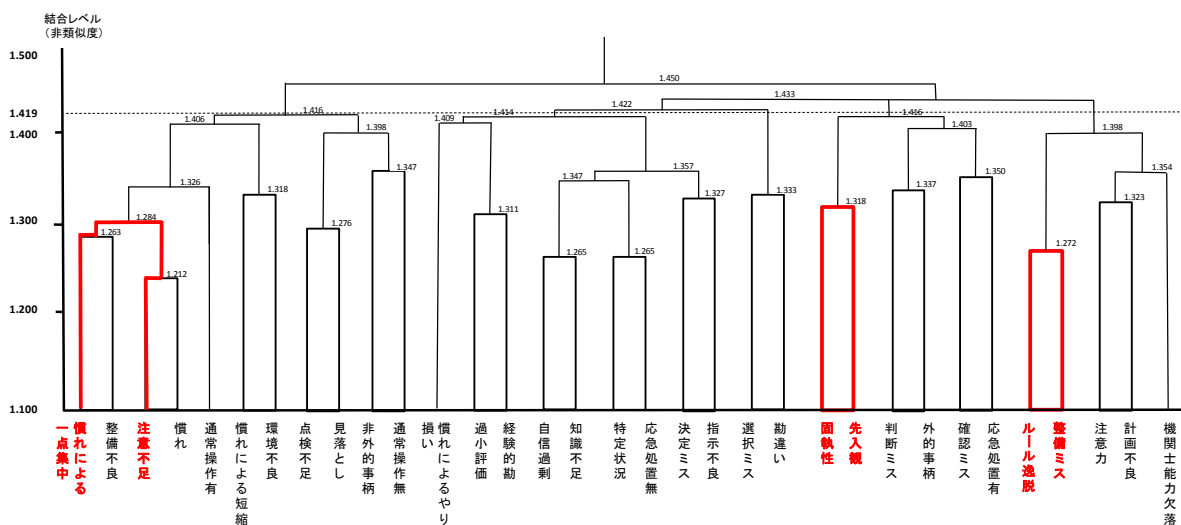


Fig.5.6.Dendrogram (Actualized events)

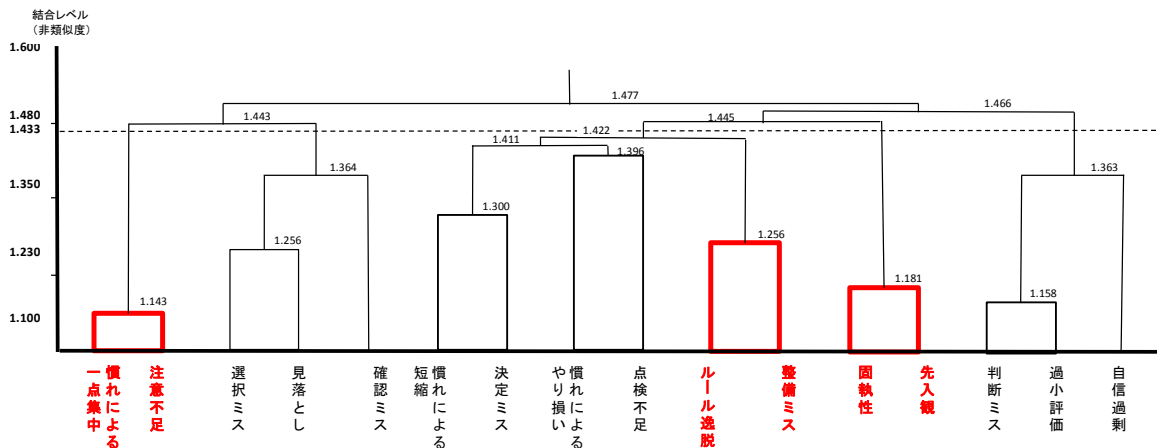


Fig.5.6.Dendrogram (Latent events)

5.6 結語

本章では、機関士の情報処理システムに着目して、海難審判裁決録と船用機関故障事例集の性質を把握した上で、両報告書の類似点・相違点を数量化Ⅲ類とクラスター分析を用いて特性分析を行い、機関士エラーに繋がる各情報の特徴を総合的に把握した。また、各報告書は、重大損傷事例として海難審判裁決録事例を顕在事象、軽微損傷事例として船用機関故障事例を潜在事象として扱った。

- (1) 海難審判裁決録（顕在事象）は、海難事故防止に寄与することが目的である為、機関損傷発生のプロセスを解明するための事実情報が詳細かつ明確に記されていることから、発生内容が明記され、かつ、危険要因の実情が示されていた。一方、船用機関故障事例集（潜在事象）は、事象・現象の発見内容が明記され、かつ、船用機関分野における認識が示されていた。
- (2) 機関士エラーにつながる人的要因に関する特性分析を行った結果、顕在事象と潜在事象には、Violation（規則を破ったエラー）とSlip（意図しない行動における、行動が正しい場合のエラー）のエラー発生割合に相違が見られたと同時に、Mistake（Knowledge）（過去の経験やルールが存在せず、試行錯誤の結果行動が誤ったエラー）とLapse（意図しない行動における、行動が誤っている場合のエラー）及び、Mistake(Rule)（意図した行動において、行動が誤っている場合のエラー）には、発生割合に類似点があることが分かった。
- (3) 海難審判裁決録と船用機関故障事例集をそれぞれ事故の発生（顕在事象）と不具合の発見（潜在事象）として評価し、両者の性質・特徴の違いにおいて、数量化Ⅲ類より両者のカテゴリーを定量化して対比した結果、発見すなわち船用機関分野の認識では、スキルベース要因が人的要因に普遍的な影響を与えるが、発生すなわ

ち海難審判裁決録の実情では，比較的影響の少ない要因であることが分かった．

- (4) クラスター分析により，顕在事象と潜在事象の要因カテゴリーを分析した結果，情報源の性質に違いはあるが，両者の類似性と相違性が明らかとなった．

このような機関士エラーの特徴を総合に把握することで，潜在事象の原因を究明し，顕在事象の背景を探るきっかけが生まれ，海難事故防止のための検討材料が提供できるようになると考えた．

第6章 機関事故要因分析による根本原因の検証

6.1 本章の目的

本章では、機関士エラーに共通する因子を抽出することで、具体的安全対策に寄与できると考え、海難審判裁決録の事故分析から共通する根本原因を検討する。このような分析は、人的要因を考慮した対策の1つであるERMの具体的な統一的評価手法を検討する一方策になると共に安全対策を探るきっかけになると考えた。

そこで本研究では、機関士エラーの因果関係を把握し、根本原因となる潜在因子を探りだす為に、人間エラーの発生過程路の定義を基に機関士エラーの潜在因子を因子分析によって抽出した。因子分析の結果を用いて因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析により検討した。

6.2 分析対象データ

平成7年から平成23年までに海難審判所にて言い渡された海難審判裁決事例より、機関管理に関わる全1397件の事件のうち対象船からプレジャーボートを除いた298件を分析対象とする。なお、本研究は人的要因の根本原因の把握を目的としているため、乗組員のライセンスや機関出力の大小等による区別は行わず、298件の事例は、すべて同等に取り扱い分析を進める。

6.3 分析方法

Fig.6.1は人間エラーの発生過程⁽²⁹⁾を模式的にあらわした人間エラーの発生過程路⁽³⁰⁾である。本章では、Fig.6.1の行動パターン⁽³⁰⁾の8項目に着目し、298件の海難審判裁決事例を記載事項に基づき、著者らが機関士の思考特性を考慮して「該当項目が明記されている」、「該当項目に関する情報を十分に読み取ることができる」、「該当項目が明記されていない」の3カテゴリーに区分し、それぞれに、2,1,0の得点を与えて分析をした。

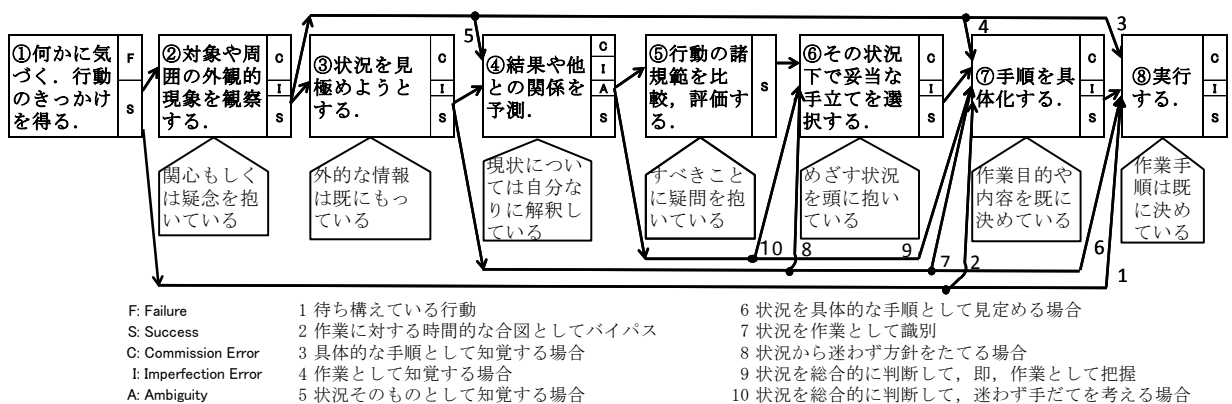


Fig.6.1. Human error occurrence process path

6.4 探索的因子分析による因子抽出

前章では、海難審判裁決録と日本船用機関士協会編集船用機関故障事例集を基に機関士エラーについて定量的な分析をしているが主要要因間の相互関係は論じていない。そこで本研究では、あらゆる事故要因の中から重要度の高い潜在因子を抽出し、その因子間関係を観察することで機関士エラーに関する行動パターンを明らかにすることを試みる。本章では、まず人間エラーの発生過程路を基に、探索的因子分析(付録 B) (43)をすることで機関士エラーに影響する因子を抽出し、確認的因子分析によってその因子構造を検証した。探索的因子分析には、統計処理ソフト SPSS Ver.22 を用い、確認的因子分析には統計処理ソフト AMOS Ver.22 (IBM 社)を用いた。Table6-1 は因子毎の固有値と寄与率を示す。固有値 1 以上の基準で因子を抽出したところ 2 因子が得られ累積因子寄与率は 70.54%と良好な値を示した。

Table 6-1 Total variance explained

因子	固有値		
	合計	分散の %	累積 %
1	4.47	55.82	55.82
2	1.18	14.72	70.54
3	0.81	10.11	80.65
4	0.64	7.97	88.62
5	0.35	4.35	92.97
6	0.29	3.67	96.63
7	0.17	2.18	98.81
8	0.10	1.19	100.00

Fig.6.1 に示す 8 項目の行動パターンの特徴を明らかにする為、累積因子寄与率の高い 2 因子に着目してプロマックス回転による因子分析を行った。機関士エラーは、人間エラーの発生過程のように複数の要因が絡みあっているエラーである為、因子間の相関の存在が考えられることからプロマックス回転(45)を用いた。Table6-2 に分析結果を示す。

Table 6-2 Factor loadings by two factors

因子	変数番号	変数名	因子負荷量		共通性
			1	2	
1	⑥	現状での妥当な方向を決定	0.907	-0.026	0.795
	⑦	手順の具体化	0.906	-0.145	0.689
	④	結果や他との関係を予測	0.679	0.213	0.673
	③	状況の見極め	0.589	0.244	0.573
	⑧	実行する	0.500	0.040	0.275
2	②	外的状況を観察	-0.060	1.010	0.840
	①	何かに気付く	-0.011	0.923	0.953
	⑤	行動と諸規範を比較、評価する	0.222	0.391	0.302

Table 6-3 Reliability statistic

因子	変数番号	変数名	α 係数	修正済み項	項目が削除された
				目合計相関	場合の α 係数
1	⑥	現状での妥当な方向を決定	0.863	0.691	0.840
	⑦	手順の具体化		0.750	0.816
	④	結果や他との関係を予測		0.817	0.799
	③	状況の見極め		0.736	0.824
	⑧	実行する		0.469	0.879
2	②	外的状況を観察	0.832	0.855	0.588
	①	何かに気付く		0.833	0.613
	⑤	行動と諸規範を比較、評価する		0.477	0.948

その結果、2項目（「⑤行動の諸規範を比較・評価」、「⑧実行」）は0.5以下と低い因子負荷量を示した。また、各測定値に対して共通因子で説明される部分がどの程度であるかを示す共通性においても「⑤行動の諸規範を比較・評価」、「⑧実行」は他に比較して小さい値を示した。第2因子の中に変数番号⑤の項目が含まれた要因においては、状況把握及び作業の理解度が不十分で判断、評価に迷う行動が影響したと推察する。そこで尺度の信頼性を検討するためにTable6-3に示すように各下位尺度の α 係数を算出した結果、「⑤行動の諸規範を比較・評価」と、「⑧実行」の項目を削除した場合、「⑤行動の諸規範を比較・評価」で $\alpha=0.95$ 、「⑧実行」で $\alpha=0.88$ と削除前より上昇し、尺度の内的整合性が高くなった。この2項目を分析から除外し、再度、同様な手法にて因子分析を行った。分析結果をTable6-4に示す。また、Table6-5に示す通り、2因子による累積因子寄与率は75.54%と良好な値を示した。第1因子は「⑥方向性決定」、「⑦手順の具体化」、「④結果や他との関係を予測」、「③状況の見極め」の4項目で構成されており、見極め・行動が高い負荷を示している。従って、第1因子を「解決策の理解度」と命名する。第2因子は「②外的状況を観察」「①何かに気付く」の2項目で構成されており、現状を把握する因子負荷を示していることから、「現状把握力」と命名する。

Table 6-4 Factor loadings after excluding two factors

因子	変数番号	変数名	因子負荷量	
			1	2
1	⑥	現状での妥当な方向を決定	0.996	-0.100
	⑦	手順の具体化	0.774	-0.075
	④	結果や他との関係を予測	0.748	0.145
	③	状況の見極め	0.637	0.208
2	②	外的状況を観察	-0.010	0.957
	①	何かに気付く	-0.050	0.950
因子間相関		因子1	1.000	0.569
		因子2	0.569	1.000

Table 6-5 Total of eigenvalue

因子	抽出後の負荷量平方和			回転後の負荷量平方和
	合計	分散の%	累積%	合計
	1	3.629	60.485		60.485	3.249
2	0.903	15.057	75.541	2.804

6.5 確認的因子分析による因子構造の検証

探索的因子分析から得られた結果を基にして因果モデルを作成し、そのモデルの妥当性について共分散構造モデルを用いて確認的因子分析を行った。共分散構造分析(付録C)(43)

は、多変量データ解析のひとつの方法であり、多変量間の分散共分散行列 Σ を構成する各パラメータ θ に仮説構造 $\Sigma=\Sigma(\theta)$ を与えることにより、データから θ を推定し、母数 θ の推定値 $\hat{\theta}$ を代入して得られた $\Sigma(\hat{\theta})$ と標本共分散構造分析行列の各成分の差を評価することによって、仮説構造が支持されるか否かを検証する統計的手法の総称である⁽⁴²⁾。この共分散構造分析において、因果モデルの妥当性を検討する際のモデル評価基準は「GFI(Goodness of Fit Index), 適合度指標」と呼ばれる指標である。GFIは通常は0から1までの値をとり、0.9以上であれば説明力の高いモデルと判断される。しかし統計モデルは、母数の数を増やして複雑なモデルを構成すると、モデルの見かけ上の説明力が上昇するという一般的な傾向があるため、GFIの値が単に高いだけでは、良いモデルとは判断できない。そこで、単純なモデルと比較して母数の推定値の安定性が悪い複雑なモデルにおいて、その妥当性を検討するための指標として[AGFI(Adjusted Goodness of Fit Index),修正済み適合度指標]が用いられる。これは、GFIの説明力から不安定度をひいたもので、AGFIもGFIと同様に値が1へ近づくほど、データへの当てはまりが良いモデルと判断される。またGFIとAGFIの間には $GFI \geq AGFI$ という関係があり、両者の差が著しく大きい場合は好ましいモデルではないとされている⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾。本研究の適合度指標は $GFI=0.94, AGFI=0.85, \chi^2=52.53, \text{自由度}=8, p<0.01$ であった。以上より、本研究で示す因果モデルは妥当と言える。本報で提案するモデルを Fig.6.2 に示す。

各潜在因子から観測変数へのパス係数の大きさから、各潜在因子は「現状把握力」、「解決策の理解度」と解釈され、機関士エラーに影響する潜在要因はこれら2因子構造分析で表現することが示された。Fig6.2より、「解決策の理解度」のパス係数は「⑥その状況下で妥当な手立てを選択」や「④結果や他との関係を予測」が大きな要因を与えていることが示されている。また、潜在変数間の相関係数は、「現状把握力」と「解決策の理解度」が0.59と有意な正の相関を示した。

以上より、機関士エラーの要因分析結果として潜在因子の抽出及び相関をモデルと共に示すことができた。

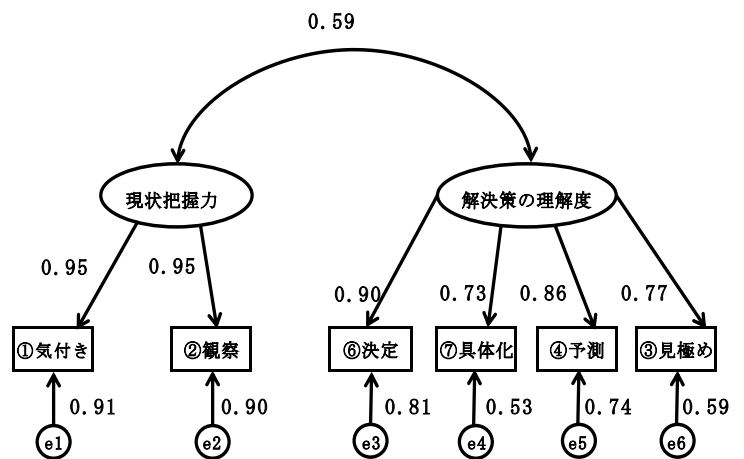


Fig.6.2 Causal model relating to engineer error behaviors

6.6 結語

本章では、機関士エラーに共通する潜在因子を抽出する為に、人間エラーの発生過程路を用いて海難審判裁決録の記載事項を基に3カテゴリーに区分し、共分散構造分析によって機関士エラーの根本原因を把握した。

- (1) 人間エラーの発生過程路を用いて機関士の行動パターンに関する特性分析を行った結果、海難審判裁決事例より共通する潜在要因として、「現状把握力」と「解決策の理解度」を抽出することができた。
- (2) 「現状把握力」は、「①何かに気付く」「②外的状況を観察」から構成された結果となった。
- (3) 「解決策の理解度」は、「③状況見極め」「④結果と他との関係を予測」「⑥現状での妥当な方向性の決定」「⑦手順の具体化」から構成された結果となった。
- (4) 「現状把握力」と「解決策の理解度」は、正の相関があり、相関モデルを示すことができた。

第7章 機関士と陸上管理部門の支援バランスに関する

シミュレート

7.1 本章の目的

本章では、機関士と船舶運航管理現場双方における安全管理技術向上の為、まず、ヒアリング調査から運航管理現場の現状を把握し、その後、陸上管理部門の支援が機関士の潜在因子にどのような影響を与えるか、船舶機関士への教育支援方法の基本モデルを検討する

前章では、機関士エラーの因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析により検討した。そこで、本研究では複雑系シミュレーションツールのSD(System Dynamics)を活用して、船舶機関士と陸上管理部門との間における支援の需給バランスと機関士潜在因子の影響力の変動を分析する。SDは種々の要因が相互に影響し合うような複雑なシステムに対して利用されているシミュレーション分析ツールである。

7.2 事故発生推移及び実態調査

Fig.7.1⁽¹⁸⁾は、2007年度から2013年度に発生した外航船の事故件数及び1隻当たりの事故発生件数を示したものである。7年間の外航船の事故件数は25,071件であった。Fig.7.1の通り、事故件数は2010年度をピークに減少している。加入船の1隻あたりの事故発生率（事故件数/期初加入隻数）は2010年度が1.50であり、2013年度は1.28ま

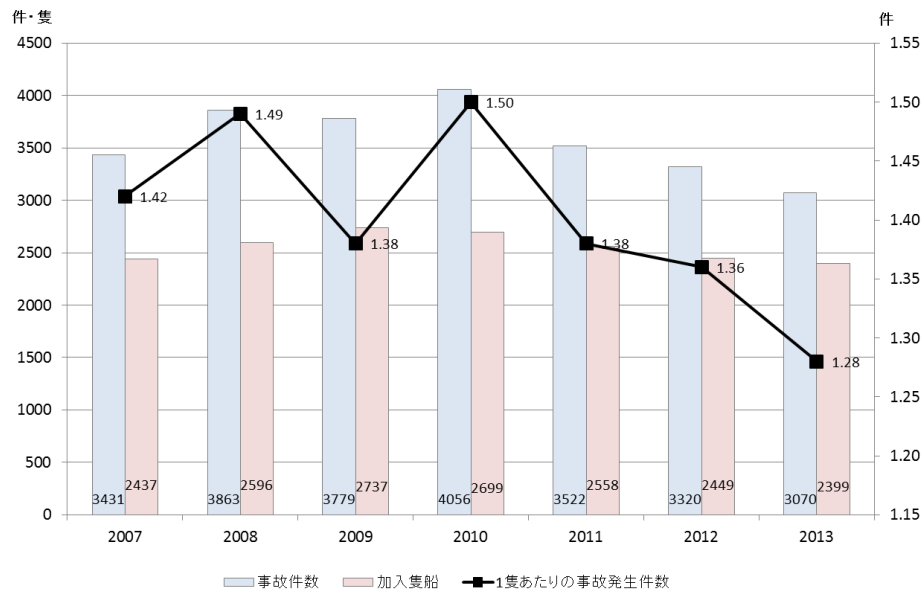


Fig.7.1. Numbers of ocean-going vessel accidents, entered vessels, and accident rates per entered vessel between 2007PY and 2013PY

で減少しており、約 15%の削減になっている。

以上の結果より、事故が多発すると事故対策を立案して事故防止を図る船主が多く、その対策が功を奏していると考えられるが、その対策が形骸化してくると事故率は上昇に転じていると推察した。この事故発生推移は、運航管理現場の支援の在り方が大きく影響している結果であると考えた。

Table7-1 は、船舶運航管理会社 4 社より安全運航の実情を調査した結果を示す。各社の支援方法に関して、インシデント情報は独自に収集されているが、インシデント情報を十分に吟味することはできず、これらを活用した訓練及び訓練評価がなされていないことが分かった。また、研修施設を持たない会社においては、シミュレータ訓練等で、実際に自社で発生した事故について、オリジナルの訓練シナリオを作成し、訓練を実施し、機関士のモチベーションを上げたいという意見があった。さらに、スキルアップを目指す為には、船機長が評価した内容に即した訓練プログラムを作成し、実施できる環境の支援が必要であると指摘された。

そこで、本研究では、事故分析で得た対策項目以外に機関士への支援の必要性についてモデルを作成し、シミュレートすることで支援対策活動の効果を視覚化し、長期的安全対策の一方策を検討したいと考え、基本モデルを作成する。

Table 7-1 Result of hearing survey

	A社	B社	C社	D社
①自社でインシデント情報を収集しているか。	YES	YES	YES	YES
②年間何件インシデント情報を収集しているか。	約1500	約145	約5	約100
③インシデント情報は匿名ですか。	NO (船名のみ)	YES	NO	NO
④インシデント情報で工夫していることはあるか。	強化キャンペーン実施(賞金等)	YES	NO	・報告書の書き方 ・勉強会を開催
⑤ヒューマンエラーに関する改善策は独自にあるか。	NO 統計のみ	YES	YES 再雇用しない	YES 研修施設設立
⑥インシデント情報は本船にどのような形で周知するのか。	自社オリジナルカレンダーを作成して周知	・情報は本社がコメントして返信 ・統計処理後、全船に報告	全船にメールにて通知	・乗船前ブリーフィング時に報告 ・乗船前の試験に出題
⑦ERMIに関する教育は実施しているか。	NO	NO	YES (比人のみ)	YES 研修プログラム有
⑧ERS訓練は実施しているか	NO	YES (比人のみ)	YES (比人のみ)	YES
⑨ERS訓練の証明方法	—	特になし	受講証書のみ	受講証書のみ

7.3 システムダイナミクスの概要

本研究では、船用機関士をスキルアップさせるための教育支援方法の基本モデルを検討する為に SD を用いたモデリングを行う。システムダイナミクスでは、企業や自然と

いった従来のシステム概念として捉えやすいものだけでなく、人間自身も一つの要素となりながら、時間とともに推移するダイナミックな形を定量的に表現することが可能である(46)。

SDは、1956年に米国マサチューセッツ工科大学(MIT)のForrester教授により創案された。企業の時間と共に変わる性質を研究するために考えられたもので初めインダストリアルダイナミクスと呼ばれた。これは、システム内のフィードバックループを解析するのに好適である、非線形方程式を扱うことができる等数々の特徴をもち注目を集めた。その後、Forresterがインダストリアルダイナミクスと同じ手法で都市や地域問題をUrban Dynamicsで、世界モデルをWorld Dynamicsとして取組むうちに、本手法は広く汎用性をもつと考えられるようになった。これらからこの手法を総称したシステムダイナミクスは「変動するシステムのシミュレーションモデルによって、そのシステムの動特性を明らかにしようとする方法」という定義に結びつけられるようになった。(47)

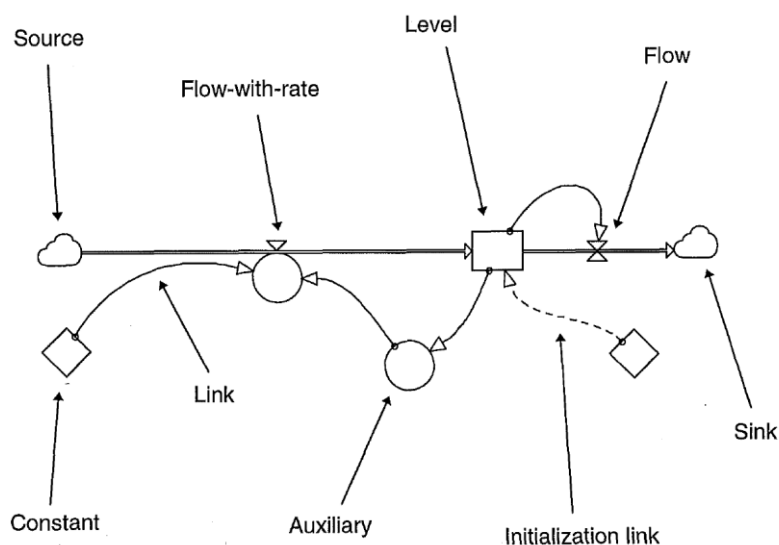


Fig.7.2. The most common symbols in Powersim

本研究では、一般に公開されているシステムダイナミクスシミュレーションソフトのうち Powersim 社（ノルウェー製）の Powersim Studio 9 を使用した。

システムダイナミクスの要素は、レベル、フローレート、コンバータ、矢印で表現され、正と負の二つのフィードバックループに組み込まれて機能することが特徴である。

(Fig.7.2)

- ・ Level:蓄積される量のこと。資源・情報などがある。
- ・ Flow:単位期間内あたりのストックの変化量がフローである。
- ・ Auxiliary:情報の変換（関数）などを定義する。
- ・ Constant:システムに必要な数値（定数）を定義する。
- ・ Link:システムダイナミクスでは物、発注、金（資源）、人（労働量）、資本設備、情

報のネットワークが存在すると考える。

7.4 基本モデルの検討

7.4.1 基本モデルの概要

基本モデルは、Gerald,J,S, Wilde によるリスク・ホメオスタシス論⁽⁴⁹⁾の考えに則る。「ホメオスタシス」という言葉は、たえまない変化のなかで平衡状態を保つことを意味する。

環境・装置に内在するリスク，技術的対策によって低下することのできるリスクを「イントリシク・リスク」という。安全装置や警報装設備の強化や機器の改良等，イントリシク・リスクが低下し，機関士は船用機関の運用においてリスクが低下したと認識することで，機器の操作に安心し機器への注意力が低下する可能性がある。このような行動を Fig.7.3 に示す「リスク補償行動」と呼ぶ。

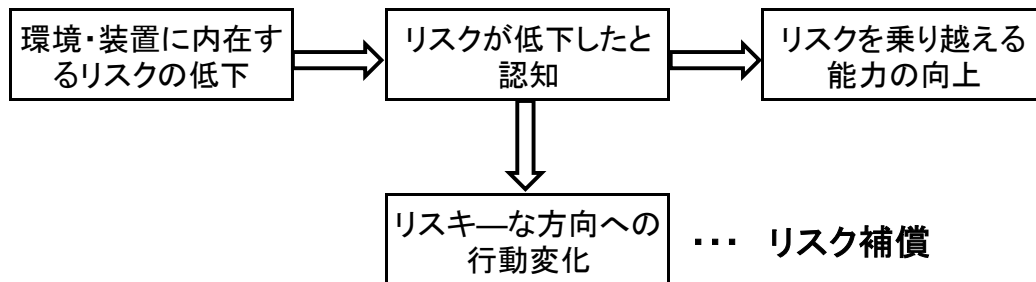


Fig.7.3. Factor of risk compensation behavior

リスク補償行動が起きるメカニズムを説明したものが，リスク・ホメオスタシス論である。Fig.7.4 に示す通り，機関士は，自らが持つリスクの目標水準と知覚された状況のリスクを比較し，両者が等しくなるように行動を調整する。Fig.7.4 は，一人の機関士ではなく，ある地域の全海域運航中の機関士の行動を集散的に考えたモデルであり，ある海域で事故発生，あるいは多発すると知覚されたリスクが上昇し，安全対策が功を奏して事故が減ると知覚されたリスクが低下する。リスクの目標水準はおもに運用の利得と事故の損失の差，すなわち期待される効用を最大化するように設定されると説明されている⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾。

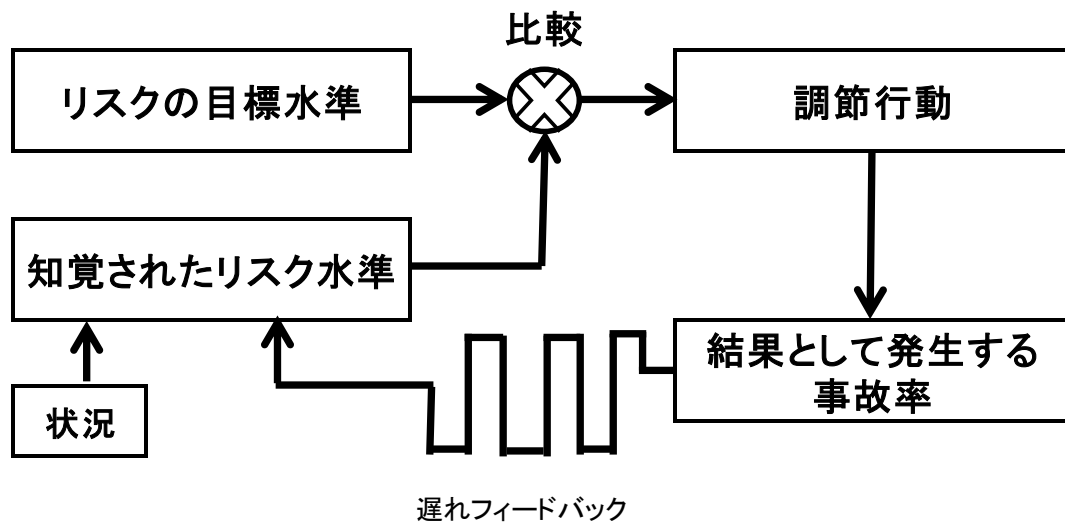


Fig.7.4 Model of Risk Homeostasis

すなわち、リスク・ホメオスタシス論によれば、人びとは安全対策の施行に反応して行動を変えるが、その対策によって人びとが自発的に引き受けるリスク量を変えたいと思わせることができない限り、行動の危険度は変化しない。人間はリスクを最小化するのではなく、最適化するという目標をもって行動をすると考えられている。ホメオスタシス論の基本プロセスは、リスク低減策による実質の対応行動の変化が一定のリスク量を保つという閉回路で表現できる⁽⁶¹⁾。

本研究で目標とする船用機関の運転管理の安全向上には、機関士の行動と共に陸上管理部門からの支援及び対策が大きく寄与している。

本章では、機関士エラー要因の「現状把握力」及び「解決策の理解度」の2つに注目する。そこで、機関士に対する陸上管理部門の支援や対策がどの様に影響するのか検討する。基本モデルの構築にあたっては、変化する環境条件下で発揮する柔軟性、適応力、知識のバランス維持を支援する陸上側の支援の実績の均衡を「支援バランス」とした。これは、本船側が求める助言や指導などの支援需要に対する陸上側の支援供給の過不足の程度をあらわしている。本章では、「支援バランス」及び相関関係のある2つの潜在因子の「現状把握力」、「解決策の理解度」の影響性について着目しリスク・ホメオスタシス論に準じて効果的な支援方法を検討する。

7.4.2 基本モデルの構築

本項では、人間の行動としての要因「一点集中」、「慣れによる行動」をリスク・ホメオスタシス論に準じ、陸上管理部門による「支援バランス」の要因が潜在因子に与える影響を把握した上で教育訓練モデルの基本構造を検討する。潜在因子に負荷が高まる要因として、常態化した環境によって周囲への配慮を喪失する「一点集中」と、常態化した行動によって作業を省略化する「慣れによる行動」を加えた。不安全要素に影響する

「一点集中」とは、ラスムッセンの人間エラーの発生過程モデル⁽²⁹⁾における「人的エラーメカニズム」を構成する項目（識別，入力情報の処理，記憶）の内，識別の段階で発生する因子とした。「慣れによる行動」は，人間エラーの発生過程の「作業状況の因子」に影響を与える要因とした。作業状況の因子は，作業計画，環境，指示・連絡といった作業特性に変化をもたらす。潜在因子の「現状把握力」は，「①何か気付く」「②外的状況を観察」といった要因に影響を与えている因子であり識別に類似すると共に「慣れによる行動」にも影響を与える因子とし，本モデルでは，「現状把握力」を「一点集中」と「慣れによる行動」に影響を与える因子とした。「解決策の理解度」は，「慣れによる行動」に影響を与える因子とした。また，「一点集中」と「慣れによる行動」は，支援バランスに対して負のフィードバックになっているので，これが増加すると「支援バランス」は悪化することになる。モデルの中に負のフィードバックが含まれている為，「支援バランス」「現状把握力」「解決策の理解度」は，同じ方向に変化するとは限らない。基本モデルの因果ループを Fig.7.5 に示す。

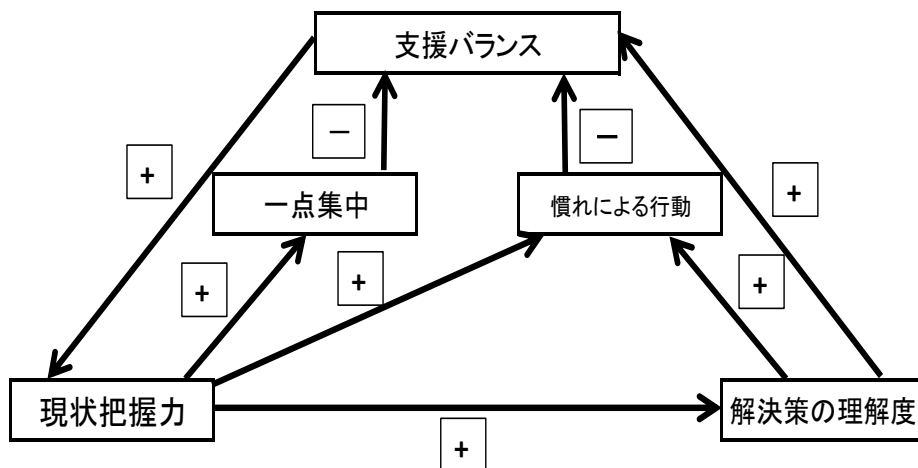


Fig.7.5 Causal loop of basic model

Fig.7.5 の中で，矢印の「+」の記号は両者の間に正のフィードバックが存在していることを表わし，「-」の記号は，負のフィードバックが存在していることを表わしている。因果ループの各要因間において，技能を要する複雑なプラントの運用は心的努力を多くつぎ込むほど正確さは向上するが，それに応じて急速に精神的疲労が蓄積し，結果としてエラーを起こすリスクが高まることになる⁽⁵¹⁾。「支援バランス」は，「現状把握力」に影響を与えると考えた。「解決策の理解度」と「支援バランス」の関係は，Fig.6.1 の人間エラーの発生過程路が成功方向へ向かった場合，安全意識が維持されているとみなし，支援バランスに影響を与えることとした。

次に、「現状把握力」と「解決策の理解度」の影響は重回帰分析（付録 D）で試算して決定する。「現状把握力」は、共分散構造分析より、「①何かに気付く」と「②外的状況を観察」より構成された。これらの要因がどのように人的要因によるエラーに影響を及ぼしたかを把握する為、「①何かに気付く」と「②外的状況を観察」のそれぞれを従属変数、人間エラーの発生過程路のそれ以外の要因を独立変数として重回帰分析を行った。結果を Table7-2 に示す。なお、変数選択の方法は、変数増減法⁽⁵²⁾を用いた。変数増減法は、従属変数と最も関係の強い独立変数を 1 つ選択し、その変数と組み合わせた時に最も寄与率が高くなる変数を選択し、これを順次繰り返す。この過程で、一度選択した変数の中に有意でない変数が出た時には、その変数を除去するという方法である。

Table7-2 において、各独立変数が従属変数に及ぼす影響の向きと大きさを表す標準偏回帰係数に着目する。「①何かに気付く」及び「②外的状況を観察」から「③状況見極め」「④結果と他との関係を予測」「⑥現状での妥当な方向を決定」「⑦手順の具体化」に対する正の標準偏回帰係数は有意であった。これらの関係は、「①何かに気付く」及び「②外的状況を観察」が、外的な情報を把握し（③状況見極め）、状況を自分なりに解釈（④結果と他との関係を予測）、かつ妥当な手立てを選択後（⑥決定）作業内容の具体化（⑦手順の具体化）をすることに影響を与えていることを説明できる。したがって、「現状把握力」が「解決策の理解度」へ正の影響を及ぼすモデルとした。

Table 7-2 Results of multiple regression analysis

③状況の見極め			
	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数
①何かに気付く	0.182	0.090	0.229 *
②外的状況を観察	0.280	0.095	0.334 *
決定係数	0.320	***	
④結果や他との関係を予測			
	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数
①何かに気付く	0.235	0.078	0.339 *
②外的状況を観察	0.162	0.082	0.223 *
決定係数	0.301	***	
⑥現状での妥当な方向を決定			
	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数
①何かに気付く	0.145	0.078	0.226 *
②外的状況を観察	0.160	0.082	0.237 *
決定係数	0.204	***	
⑦手順の具体化			
	偏回帰係数	標準誤差	標準偏回帰係数
①何かに気付く	0.114	0.072	0.202 *
②外的状況を観察	0.095	0.075	0.161 *
決定係数	0.125	***	

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

7.4.3 SDモデルによる試算

本項では、SDを活用して基本モデルの数値シミュレーションを行う。SDは、ストック、フローレイト、コンバータ（補助変数）、矢印の4種の要素の組み合わせで表現され、正と負の2つのフィードバックループに組み込まれて機能することが特徴である。

Fig.7.5の因果ループをSDで表現したモデルをFig.7.6に示す。これまで陸上管理部門の支援が機関士の行動エラーの潜在因子（「現状把握力」・「解決策の理解度」）にどのような影響を与えているか定性的な関係を示した。また、陸上側支援及び対策のレベルとして、「支援強化係数」と「対策強化係数」を加え、これらの影響が機関士にどのような影響を与えているかを検討する。「支援強化係数」とは、支援の維持・強化させるための何らかの支援努力を行うことを想定した。「対策強化係数」は、慣れによる行動が、作業の効率化や時間の短縮、作業の省力等、精通した作業の対策を想定した。なお、試算対象とする機関士の経験レベルを「習熟係数」として、初期設定に加えた。ここでは安全向上とコストの複雑な構造を再現するのではなく、あくまで陸上側の支援と行動エラーの潜在因子の要因のみの関係を試算することで、安全向上に対する適切な判断材料のきっかけを探る。したがって今回はコストについては対象外とした。

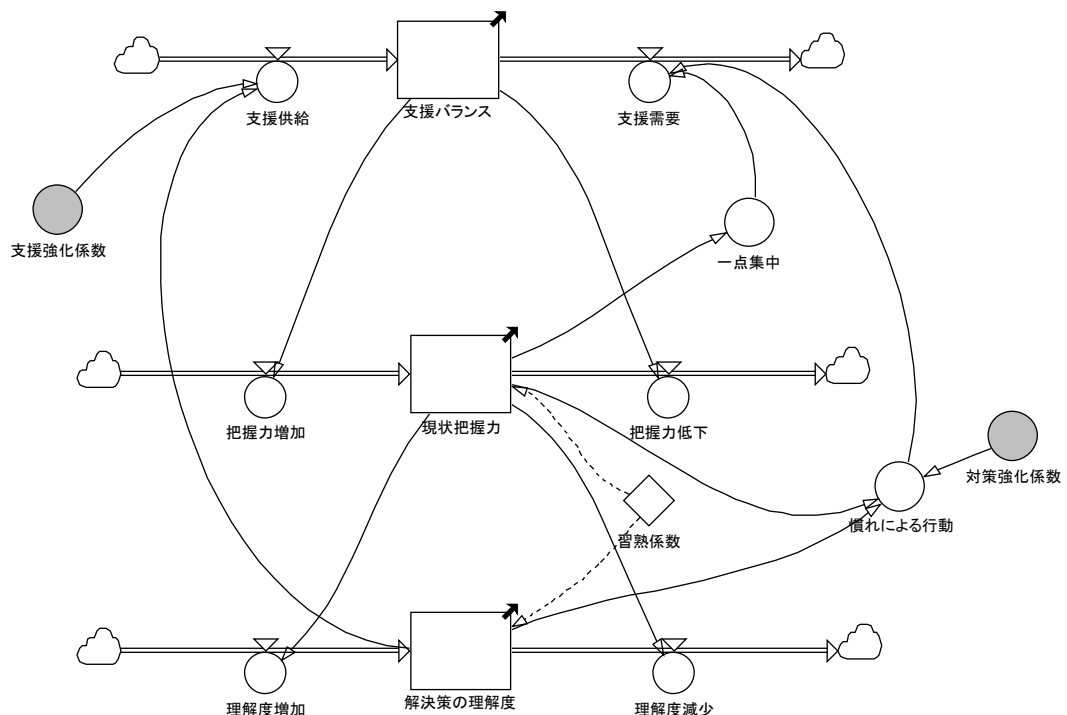


Fig.7.6. SD model

SDモデルにおいて「支援バランス」、「現状把握力」、「解決策の理解度」は、いずれも抽象的要因なので数値レベルの単位を[unit]、経過時間の単位を[STEP]とした。シミュレーション開始時の初期値をいずれも0[unit]とした。0[unit]より値が増加した場合

は、各要因がそれぞれ望ましい状況になることを表わす。次に、各要素の設定を簡単に示す。

①支援

支援供給のフローレイトは、「解決策の理解度」で定まり、支援需要のフローレイトは、「一点集中」と「慣れによる行動」で定まる。ただ、「一点集中」は、「現状把握力」で定まり、「慣れによる行動」は、「現状把握力」と「解決策の理解度」で定まる。なお、支援供給と支援需要の最大値は、支援需要の方が大きいとする。

②現状把握力

把握力増加と把握力低下は共に、「支援バランス」のストックで定まる。把握力低下のフローレイトは、把握力増加のフローレイトより大きいとする。

③解決策の理解度

理解度増加と理解度減少は、「現状把握力」のストックで定まる。理解度増加と理解度減少のフローレイトは同じとする。

試算結果を Fig. 7.7, Fig. 7.8, Fig. 7.9, Fig. 7.10 に示す。

Fig. 7.7において13[STEP]に着目すると、「現状把握力」と「解決策の理解度」が共に0以上である為、「一点集中」と「慣れによる行動」が影響し、「支援供給」<「支援需要」となり「支援バランス」は低下する。この間「一点集中」と「慣れによる行動」の値は上昇する。しかし、14[STEP]では、「現状把握力」が、負の値、すなわち、望ましくない状況へ転じることで、「一点集中」と「慣れによる行動」の影響が小さくなり、「支援バランス」が上昇を始める。また、23[STEP]に着目すると、「現状把握力」は、望ましい状況に転じる。「解決策の理解度」は増加傾向に転じているが「支援バランス」は増加傾向から減少傾向に転ずる。10, 37[STEP]は「支援バランス」が、望ましい状態から望ましくない状態に転じた時、「現状把握力」は変曲点となって、増加傾向から減少傾向に転ずる。本モデルにおいて、「解決策の理解度」は、「理解度増加」と「理解度減少」のフローレイトが同じであるが、「現状把握力」は、「把握力増加」より「把握力低下」の方がフローレイトは大きい。したがって、「支援バランス」の需要による影響は、供給による影響より大きい為、「現状把握力」に比べて、「解決策の理解度」の方が「支援バランス」の影響に早く反応する。すなわち、「現状把握力」より「解決策の理解度」の方が、「支援バランス」に大きな影響を与えるモデルである。

Fig. 7.8は、支援強化係数のみを加えた結果である。「支援バランス」、「現状把握力」、「解決策の理解度」の周期は大きく、一旦低下しだすと、「望ましい状態」へ戻るまでに時間がかかるモデルとなった。

Fig. 7.9は、対策強化係数のみを加えた結果である。16[STEP]では、「解決策の理解度」が望ましい状態から望ましくない状態へ転じる。27[STEP]では、「現状把握力」

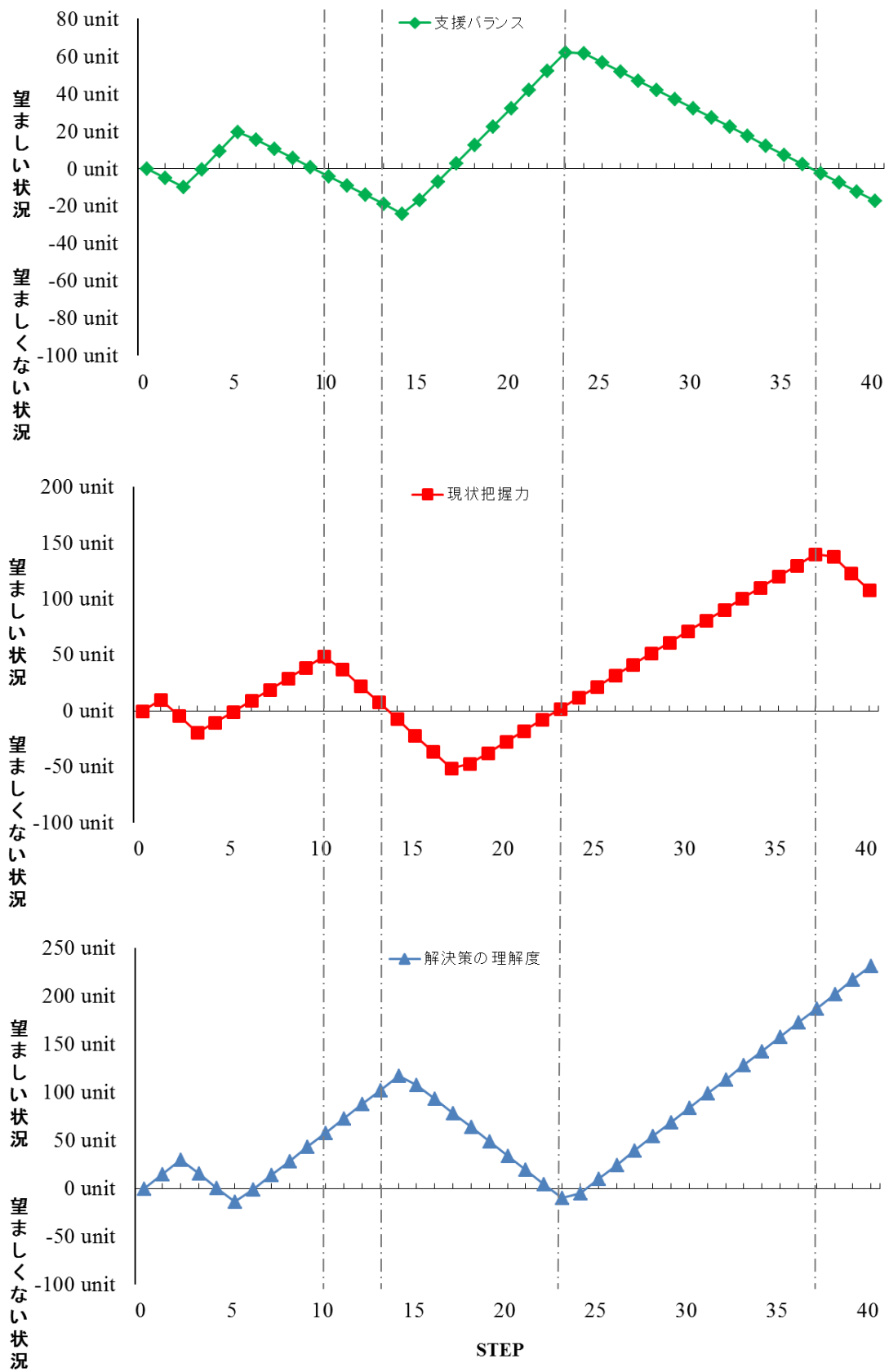


Fig.7.7. Support strengthening coefficient =0,
Measure strengthening coefficient=0

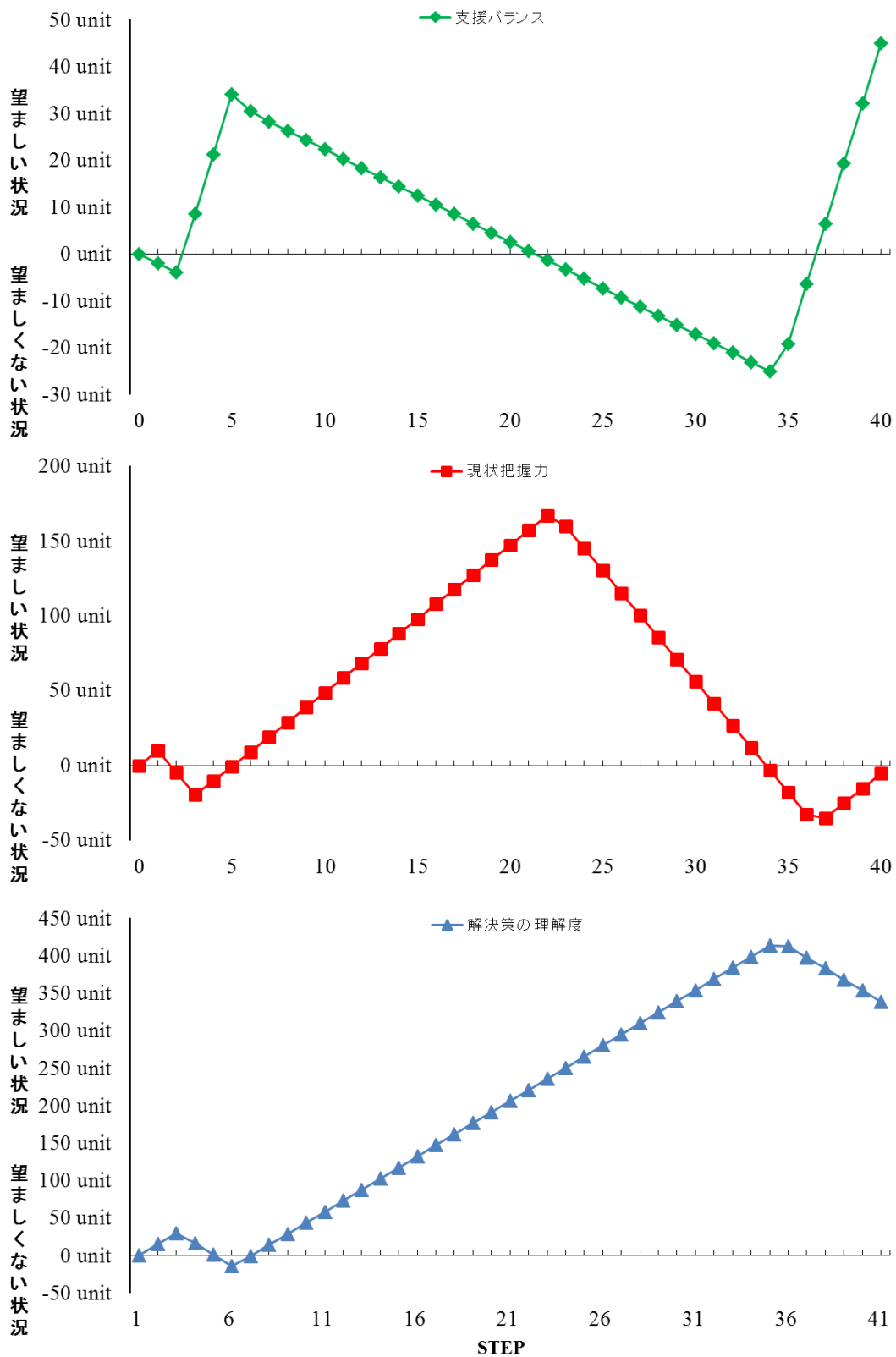


Fig.7.8. Support strengthening coefficient =3,
Measure strengthening coefficient=0

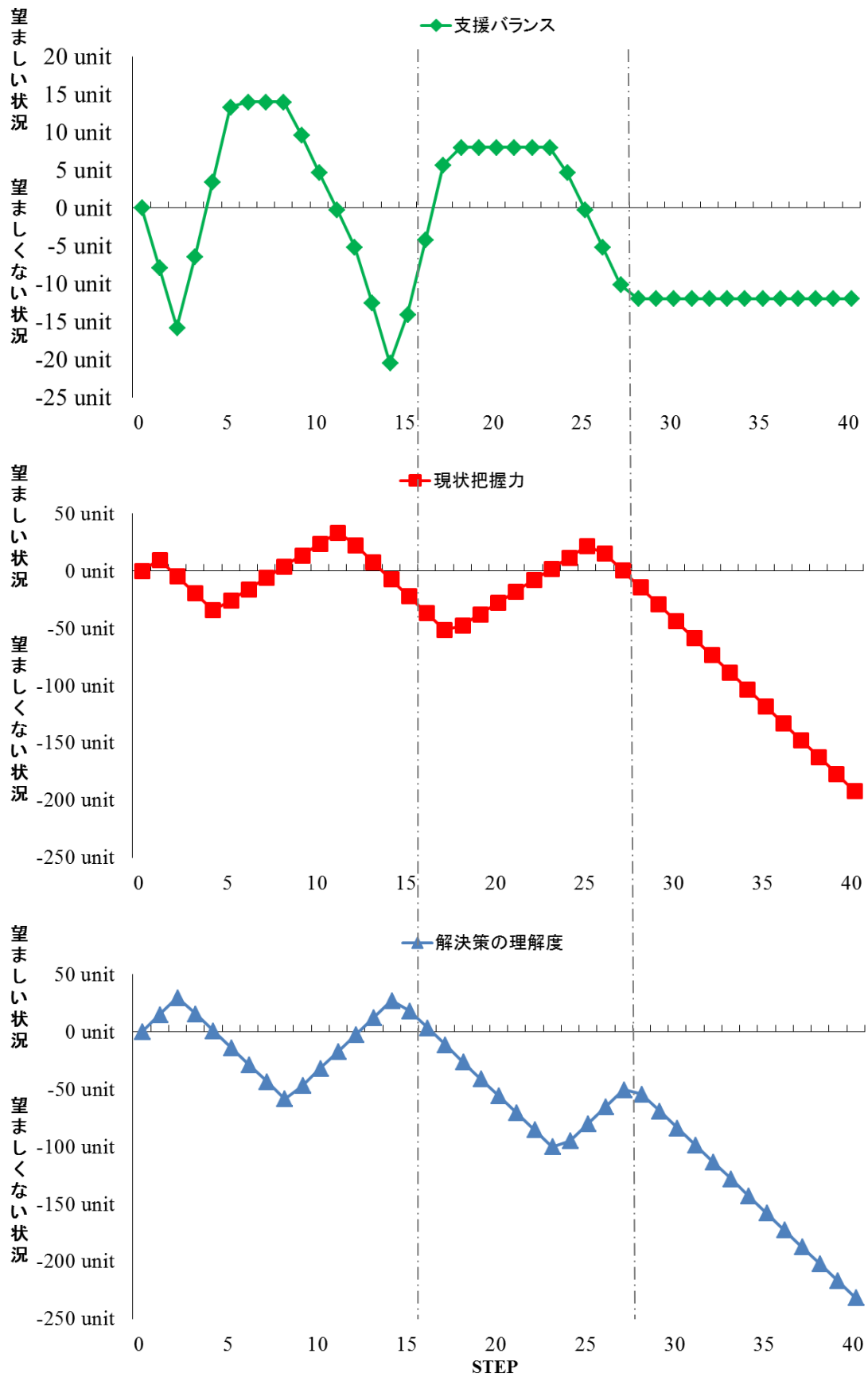


Fig.7.9. Support strengthening coefficient =0,
Measure strengthening coefficient=3

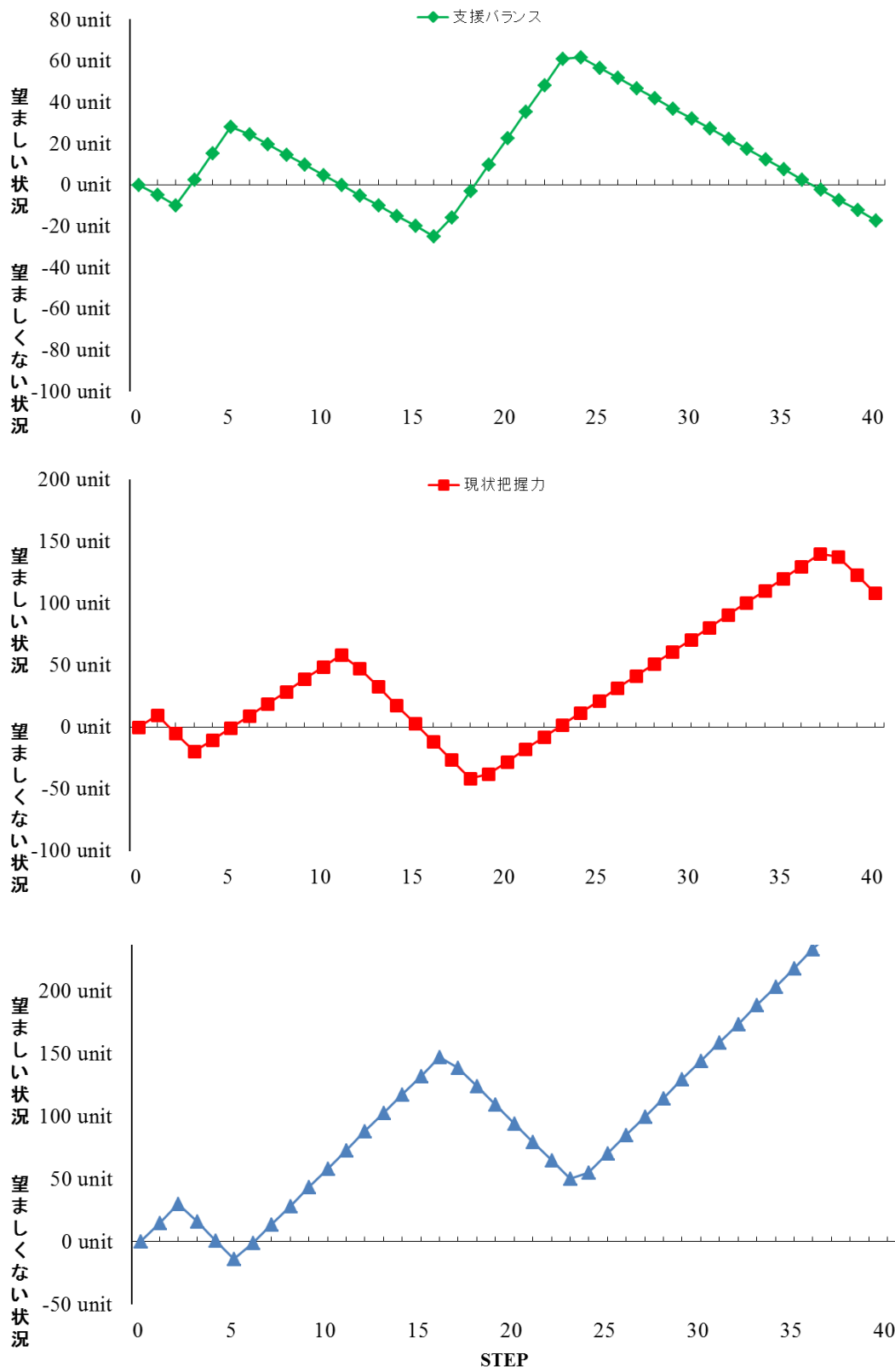


Fig.7.10. Support strengthening coefficient =3,
Measure strengthening coefficient=3

も望ましくない状態に転じ、支援バランスが崩れるモデルとなった。

次に、Fig. 7.10 は、支援強化係数と対策強化係数を共に加えたシミュレーション結果である。Fig. 7.7 よりもマイナスへの影響が少なく、プラスへの影響が大きいモデルを時系列で表現することができた。

以上より、微妙なバランスで影響し合う陸上側の支援と機関士の行動特性に関し、モデルを時系列で表現することができた。

7.5 結語

本章では、まず、近年の事故発生推移及び船舶管理会社へのヒアリング調査から長期的対策案の検討が必要であると共に、陸上支援側からの対策も必要であることが分かった。そこで、海難審判裁判決事例を基に機関士エラーの因果関係の把握を試み、潜在因子間の影響を重回帰分析で検討し、その後、SD を用いて陸上側の支援バランスがこれらの因子間に与える影響を把握する為に、因果ループを構築してシミュレーションの基本モデルを検討した。

- (1) 近年の事故発生率推移より、事故発生後から数年は、事故割合が低下していることから、陸上支援側からの対策が功を奏したと推察できたが、長期的対策にはなっていないことが示された。
- (2) ヒアリング調査より、インシデント情報の活用が十分でなく、機関士への支援が不足していることが分かった。
- (3) 「解決策の理解度」は、重回帰分析により「現状把握力」に正の影響を与えていることが分かった。これは、現場の現状を把握することで異常への対策の解決策を導きだすことに影響があると解釈できた。
- (4) 機関士エラーは、「現状把握力」と「解決策の理解度」が重なりあって1つの事故が発生していると考え、陸上側の支援バランスがこれらの因子に影響を与える因果ループを構築し、SD を用いたシミュレーションの基本構造を検討した。モデルは、海難審判裁判決事例に即して設定した部分と、仮定において設定した部分がある。
- (5) 基本モデルは、支援強化係数・対策強化係数が等しく影響しなければ支援バランスが崩れるもしくは、機関士の慣れ等により「現状把握力」及び「解決策の理解度」が望ましくない状態に影響を与えるモデルを作成した。

第8章 総括

8.1 本研究の成果

本研究では、機関損傷事故の発生過程における機関士エラーを特定し、機関士の情報処理システム及び、同システムに間接的に作用する人的要因を調査するための機関士エラー発生過程細目を構築した。次に、構築した分類法を適用して海難審判裁決録に収集された298件と船用機関故障事例集に掲載された104件の機関事故を分類し、機関損傷事故の発生に関係した全ての要因がどのように相互に関連しているのかを分析し、全体像の中から特徴を把握した。さらに、各事例の特徴を把握後、機関士エラーにつながる人的要因に関する特性分析を行い、両事例が類似又は、相違する要因を抽出することで機関士エラーの総合的把握を行った。

これらの結果を基に、機関士エラーに共通する根本原因を把握することは、人的要因を考慮した対策を検討する上で重要であると考えた。本研究では、因子分析によって機関士エラーの潜在因子を抽出し、因子分析の結果を用いて因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析により根本原因を解明した。

また、近年の事故発生推移から、事故割合が多い年の翌年は、事故割合が低下していることから運航管理現場の支援の在り方が大きく影響している結果であると推察できた。そこで、SDを用いて陸上側の支援バランスが事故分析から得た潜在因子間に与える影響について基本モデルを作成し、シミュレートすることで支援バランスの周期的変動の効果を視覚化し、長期的安全対策の一方策のきっかけを探った。

以下に本研究で得られた主要な結論と今後取り組むべき課題について述べる。

第1章では、近年の船舶の管理体制の変化とそれに伴う不安全要素と機関士エラーの実例をまとめた。また、ヒューマンエラーに主眼を置いた事故防止への取り組みについて、国際海事機関が見直したSTCW条約内容を示し、これらが求める訓練プログラム及び能力証明の具体的過程をまとめ、本研究の重要性を示した。さらに、本研究における機関損傷と機関士エラーの考え方、先行研究での機関士エラー及び、ヒューマンファクターに関する取り組みを総括的に述べるとともに、本研究の目的を述べた。

第2章では、機関士エラーの総合的な機関故障防止の施策を構築するための端緒として、海難審判裁決録と船用機関士協会編集船用機関故障事例集から機関故障の現状を分析した。さらに、ヒューマンファクターを考慮した海難防止への国内外の取り組みについて調査した。

- ① 海難審判裁決録と船用機関故障事例集は、原因究明における調査方法・調査対象に相違はあるが、事故原因究明の目的は同じであった。
- ② 海難審判所の調査では、機関士が関与した海難は6割以上、船用機関故障事例集

では、機関士が関与した機関損傷事例が7割であった。また、陸上支援側の指示・判断によるトラブルは3割もあり、海陸間のコミュニケーションの必要性を把握した。

- ③ 2010年1月1日から「海上事故及び海上インシデントの安全調査のための国際標準と報告方式のコード」の強制化により、海難及びインシデントの調査及び、IMOへの報告が義務付けられ、海難審判所は、ヒューマンファクター概念に基づく海難調査を開始している。

第3章では、機関士エラー及び人的要因について、本研究での考え方を整理するとともに、機関士エラーによる機関トラブルの発生過程を把握するため、機関士エラー発生過程細目を構築し、海難審判裁判事例集に記載された機関管理に関わる事件全1397件からプレジャーボートの事件を除く298件の分析を行った。

- ① 機関士エラーは「機関士エラーをもたらした原因」すなわち「機関士エラーをもたらしたきっかけ」が人的要因として直接的に機関士の情報処理システムに作用し、加えて「行動に影響する因子」や「作業状況の因子」といった外部環境がヒューマンファクターとして間接的に作用して発生していると表現できる。
- ② 機関士エラー発生過程細目を使用して機関事故における機関トラブルの状況及び、機関士エラーの分類を実施し、機関士エラー発生過程の各要素における特徴を把握した。

第4章では、海難審判裁判録から機関事故におけるエラーの発生形態を分類するとともに、数量化Ⅲ類による分析及び、クラスター分析を行い、機関士エラーの全体像とその特徴を抽出することでエラー発生過程におけるそれぞれの要素間の繋がりを解明する一方策を検討した。

- ① 海難審判裁判録と船用機関故障事例集の比較から、「機関士エラーに至った内的要因」は両事例に顕著な差がなかった。また、両事例で機関トラブルの要因で多かった項目は、「注意不足」であった。また、「注意不足」による機関士エラーの発生要因は、通常と異なる状態に陥った時、突発的に普段の行動が現われ、現状把握をしないまま誤った行動に移ることを示した。
- ② 機関士エラー発生過程の項目を定量的に評価することは、機関士エラーの特徴を抽出し把握することが機関事故防止対策に重要であると考察した。

第5章では、これまでに起きた機関損傷事故を海難審判裁判録と船用機関故障事例集からそれぞれ事故の発生（顕在事象）と不具合の発見（潜在事象）として評価し、両者の性質・特徴をまとめた。さらに、数量化Ⅲ類による分析とクラスター分析を用いて機関士エラーにつながる人的要因に関する特性分析を行い、過誤に繋がる要因を検討した。

このような機関士エラーの総合的な特徴把握は、潜在事象の原因を究明し、顕在事象の背景を探るきっかけが生まれ、海難事故防止のための検討材料を示した。

第 6 章では、人的要因を考慮した安全対策や ERM の具体的な評価手法を検討する一方策として、因子分析によって根本原因となる潜在因子を抽出し、因子分析の結果を用いて因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析によって検証した結果、次の結果を得た。

- ① 海難審判裁決事例より共通する潜在要因として、「現状把握力」と「解決策の理解度」を抽出することができた。
- ② 「現状把握力」と「解決策の理解度」は、正の相関があり、相関モデルを示すことができた。

第 7 章では、船舶管理会社へのヒアリング調査から海陸間のコミュニケーションの在り方を模索していることが分かった。そこで、海難審判裁決事例を基に機関士エラーの因果関係の把握を試みる為、潜在因子間の影響を重回帰分析で検討し、その後、SD を用いて陸上側の支援バランスがこれらの因子間に与える影響を把握する為に、因果ループを構築してシミュレーションの基本モデルを構築した。

- ① ヒアリング調査より、インシデント情報の活用が十分でなく、機関士への支援が不足していることが分かった。
- ② 「解決策の理解度」は、重回帰分析により「現状把握力」に正の影響を与えていることが分かった。これは、現場の現状を把握することで異常への対策の解決策を導きだすことに影響があることが示された。
- ③ 基本モデルは、支援強化係数・対策強化係数が等しく影響しなければ支援バランスが崩れるもしくは、機関士の慣れ等により「現状把握力」及び「解決策の理解度」が望ましくない状態に影響を与えるという、微妙なバランスで影響し合う陸上側の支援と機関士の行動特性モデルを時系列で表現した。

8.2 今後の展望

8.2.1 インシデント情報の活用方法

2010 年 1 月 1 日発効した「海上事故及び海上インシデントの安全調査のための国際標準と勧告方式のコード (海難事故調査コード)」に基づき海難事故調査及びインシデントの調査及び IMO への報告の義務づけにより、海難事故調査は、人的過誤と人間の過去に陥らせた背景要因のプロセスについて調査をしている。しかし、調査は、当事者以外の者がする事後の調査であり、そこに客観的妥当性がもとめられることや当事者の死亡、生存していても黙秘権の行使等によって、人的要因が絡む事故発生の実質のプロセスを

解明することは極めて困難である。また、船舶運航管理に関わるインシデント情報は、安全管理に役立つ貴重な情報が含まれている可能性が高いにもかかわらず、当事者あるいは企業等組織の不利益となる情報も含まれているためか、インシデント情報が公表されることは稀であり、海運産業界として組織的集約は、顕在事象として海難に至ったものを除いて行われていない。

大事故は、ハインリッヒの法則が示す通り、事故発生前には多くのインシデントがあると考えられている。今後は、インシデント情報の効果的活用方法を示すことで情報が共有できる環境作りの提案と適切な安全対策を検討したいと考えている。

8.2.2 シミュレータ訓練シナリオについて

現在、ERM 導入・実践および教育訓練開発の効果的な環境とされる ERS (Engine Room Simulator) の設置および活用検討が十分になされていない現状にある。ERS を用いた STCW 条約で強制要件とされた ERM の支援の有用性の把握および実践を含め、高度海技者のための実務教育訓練体系の改善策を導き、安全で安心な海上輸送の確保に貢献する必要がある。

事故の本質的構造は、ヒューマンエラーが次元を異にする様々な要因と偶発的条件で結びつき、複雑に絡み合っただけで事故に至っている⁽³⁶⁾。本研究では、海難審判裁決録と船用故障事例集の分析を基に人間の過誤に陥らせた背景要因との相関関係を総合的に明らかにし、危険の高い要因から優先的に改善策を講じることが未然防止策に繋がると考え数量化Ⅲ類分析より要因間の関係を把握した。しかし、リスク・ホメオスタシス論⁽⁵¹⁾では、安全対策によってリスクが低下したと認識すると、人間の行動がリスクを高める方向に変化する可能性があると言っている。今後は、S.Dekker⁽⁵³⁾が提唱するレジリエンス工学の考えの1つである「人間をシステムの安全性を脅かす要素と考えず、本質的に危険なシステムをなんとかやりくりしながら安全に運転している存在と捉えること」と言う考えの基、事故を起こさず上手くシステムを運用できる機関士の力はどのようなものなのかを分析し、その力をつけるにはどのように実施すればいいのかを ERS 上で検討することが長期的安全対策になると考えた。

8.2.3 海陸間に必要な関係要素の精査

船用機関プラントを安全で効率的に運転・維持・管理するためには、機関士だけでなく SI(Superintendent:船舶管理監督)を中心に機器メーカー、造船所などを含む陸上の運航支援組織・要員を含めた海陸間のコミュニケーションならびにチームマネジメントの重要性が明らかになった。

今後は、陸上側からの支援が機関士に与える影響を視覚的に表現する為、海陸間に影響する因子を抽出し、その後、SD を活用して支援バランスの挙動から支援効果を把握したい。特に、陸上支援側は、支援対象の機関士とは別の被支援側の考え・戦略・価値

観、コスト削減、効率的運航の優先といった方針の制約条件、物理的制約条件、市場の制約条件といったリスク・マネジメントを考慮する一方、機関士は、コミュニケーション、ルール遵守、リーダーシップ、状況認識力、意思表示、外部の常識の変化への順応など危機管理要因が多い。今後の研究では、これらの要因を考慮した海陸複合管理下における機関士の視点による機関安全管理技術向上と船用機関資源管理の改善に関するモデルの精緻化と定量化を進めたい。

8.3 結言

本研究の船用機関事故分析は、機関士が過誤に陥る背景要因を総合的に分析し、全ての要因がどのように相互に関連しているかを示した。

機関士エラー発生分類の20項目による数量化Ⅲ類の結果より、機関士エラーに至った内的要因の「注意不足」における機関士エラーの概念は、「訓練・経験に基づく行動の有無」、「意識的行動レベル」、「通常作業・応急処置の有無」の3つの関係に定置することができた。さらに、クラスター分析によって、「習慣に基づく漫然とした行動」、「経験やルールの固執性による行動」、「条件反射的行動」「外的事柄時の対応ミス」、「特定の状況時の対応ミス」という5つの主要なクラスターに分類できた。「注意不足」による機関士エラーの発生要因は、通常と異なる状態に陥った時、突発的に普段の行動が現われ、現状把握をしないまま誤った行動に移ることであった。定量的に評価ができない機関士エラーの発生過程を数量化することで、全体の特徴を捉えることができた。また、数量化Ⅲ類の分析は、カテゴリーの配置にも意味がある為、抽出したカテゴリーグループとその配置を考慮しながら安全運航に必要なガイドラインを検討する一方策になり、また、ERS訓練プログラムを検討する上でも有効な方法であると考えられる。

また、海難審判裁決事例と船用機関故障事例集から機関士エラーに繋がる人的要因に関する特性分析では、調査目的に差異はあるが、事故調査から明らかにされた危険要因が多く危険要因の中でどのような位置を占めているか把握することができた。このような分析は、過去の類似・同種の不安全事象の防止のみならず、潜在事象の原因を究明し、顕在事象の背景を探るきっかけを掴むことができた。

さらに、機関士エラーに繋がる根本原因となる潜在因子を把握する為、本研究では、機関士エラーの潜在因子を因子分析によって抽出し、その後、因子分析の結果を用いて因果モデルを作成し、その妥当性を共分散構造分析によって検証した。その結果、共通する潜在因子は、「現状把握力」と「解決策の理解度」を抽出することができた。これらの結果は、ERMの能力評価の方法と承認されたERS訓練の訓練プログラムの構築及び、能力証明を行う具体的過程を検討する際に有効活用できると考える。

最後に、船用機関事故分析における根本原因の把握により、安全対策に繋がる潜在因子は、SDを用いて陸上側の支援が機関士にどの様に影響を与えるかについて基本モデルを検討することができた。今後は、SDによる効果的な教育訓練モデルを構築するた

め、陸上支援側のマネジメント力の現状に加え、マネジメントの支援や対策による機関士が受ける変化の過程を把握して、モデルの構成要素の精査と検討を継続しておこなっていく必要がある。

謝辞

本研究は、人的要因による顕在事象と潜在事象の比較に基づく船用機関事故防止に関する研究について 2011 年 5 月日本マリンエンジニアリング学会学術講演会講演論文集に発表し、以降、本論文をまとめるまでの長期間に亘り、多くの方からご指導と励ましを頂いたことに感謝申し上げます。

本論文は、神戸大学大学院海事科学研究海事マネジメント科学講座教授 内田誠博士のご指導のもとに行った研究成果をまとめたものである。

本研究を遂行するにあたり、ご指導を頂いた内田誠博士から賜ったご教示、ご鞭撻ならびにご助言に対し、深甚なる感謝の意を表します。

また、大学院入学前からのご指導ならびに在学中においてもあたたかいご指導とご助言を頂いた同研究科海事マネジメント科学講座講師 三輪誠博士に厚く御礼申し上げます。

同研究科海事マネジメント科学講座准教授 藤川なつこ博士には、門外漢である著者に経済学組織論の視点から組織の事故未然防止に関する学術についての貴重なご教示、ご意見を頂き感謝に堪えません。元海技大学校 引間 俊雄教授には、研究開始当時から船用機関事故データを与えて頂き、研究の進め方についてご指導とご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

油木代一技術専門職員には、円滑な研究活動を実施するにあたりご支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。

また、同専攻 推進システム工学 研究室の Yanbin WU 氏をはじめ、同研究室の各位には有益なご助言を頂き皆様に心より感謝申し上げます。次第です。

最後に、これまで私を支えてくれた両親をはじめ家族、特に、弓削商船高等専門学校での業務に加え、妊娠・出産による精神的変化を献身的に支えてくれた上、研究生活を許し家事育児を協力してくれた夫の祐也には言葉に尽くせない感謝をしております。また、いつも無謀な挑戦をする母親を支えてくれる長女 梓乃には、たくさんの力と勇気をもらいました。娘に感謝するとともにこれからも、元気に育ってほしい次第です。

付録

A. 数量化Ⅲ類

数量化Ⅲ類⁽³⁹⁾は、TableA-1 のような反応パターンが与えられることにより始まる。このような反応パターンが得られたとき、TableA-2 のようにサンプルとカテゴリそれぞれに a_j, y_i という数量を与え、反応の似たサンプルとカテゴリの分類及び、特性を調べるものである。

数量 a_j, y_i の決め方は、サンプル i がカテゴリ j に反応したとき、 (y_i, a_j) という組を作り、この組み $\{(y_i, a_j)\}$ によって求まる相関係数が最大になるよう次式で求める。

$$\text{相関係数 } r_{ay} = \frac{\sum(a_j - \bar{a})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_j^p m_j (a_j - \bar{a})^2 \cdot \frac{1}{T} \sum_i^n q_i (y_i - \bar{y})^2}} \frac{C_{ay}}{\sqrt{\sigma_a^2 \sigma_y^2}} \quad \text{①}$$

Table A-1 Pattern of response

変数 サンプル	c_1	c_2	c_3	...	c_j	...	c_p	計
1		○						q_1
2			○					q_2
3	○		○				○	q_3
⋮								⋮
i					○			$q_i = \sum_j^p x_i(j)$
⋮								⋮
n		○	○				○	q_n
計	m_1	m_2	m_3	...	$m_j = \sum_i^n x_i(j)$	...	m_p	$T = \sum_j^p m_j = \sum_i^n q_i$

$x_i(j): x_i(j)$ は、1 または 0 の値を示す変数

Table A-2 Sample of score

カテゴリ サンプル		c_1	c_2	c_3	...	c_j	...	c_p
		a_1	a_2	a_3	...	a_j	...	a_p
1	y_1		(y_1, a_2)					
2	y_2			(y_2, a_3)				
3	y_3	(y_3, a_1)		(y_3, a_3)				(y_3, a_p)
⋮	⋮							
i	y_i					(y_i, a_j)		
⋮	⋮							
n	y_n		(y_n, a_2)	(y_n, a_3)				(y_n, a_p)

n : サンプル数

q_i : サンプル i が選択した○印の総数

$$q_i = \sum_j^p x_i(j)$$

m_j : 変数 j における○印の総数

$$m_j = \sum_i^n x_i(j)$$

T : ○印の総数

$$T = \sum_j^p m_j = \sum_i^n q_i$$

カテゴリースコア: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_j, \dots, a_p$

サンプルスコア： $y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_n$

ここで、カテゴリースコアの平均を \bar{a} 、サンプルスコアの平均を \bar{y} とする。

$$\bar{a} = 0, \quad \bar{y} = 0 \quad (2)$$

a_j と y_i との共分散を C_{ay} 、 a_j の分散を σ_a^2 、 y_i の分散を σ_y^2 とする。

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{T} \sum_j^p m_j (a_j - \bar{a})^2 = \frac{1}{T} \sum_j^p m_j a_j^2 \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{T} \sum_i^n q_i (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{T} \sum_i^n q_i y_i^2 \quad (4)$$

$$C_{ay} = \frac{1}{T} \sum_i^n \sum_j^p y_i a_j x_i(j) \quad (5)$$

相関係数 r が最大となる a_i と y_j を求めるには、 r を a_u, y_v で偏微分しそれぞれを0とおく。

$$\frac{\partial r}{\partial a_u} = 0 \quad (6) \qquad \frac{\partial r}{\partial y_v} = 0 \quad (7)$$

ここで、商の偏微分の公式を用いて、式⑥は、

$$\frac{\partial r}{\partial a_u} = \frac{\partial \frac{C_{ay}}{\sigma_a \sigma_y}}{\partial a_u} = \frac{C_{ay} \cdot \frac{\partial \sigma_a \sigma_y}{\partial a_u} - \sigma_a \sigma_y \cdot \frac{\partial C_{ay}}{\partial a_u}}{(\sigma_a \sigma_y)^2} = 0$$

$$(\sigma_a \sigma_y)^2 > 0 \text{ より, } C_{ay} \cdot \frac{\partial \sigma_a \sigma_y}{\partial a_u} = \sigma_a \sigma_y \cdot \frac{\partial C_{ay}}{\partial a_u}$$

$$\text{両辺を } \sigma_a \sigma_y \text{ で割ると, } \frac{C_{ay}}{\sigma_a \sigma_y} \cdot \frac{\partial \sigma_a \sigma_y}{\partial a_u} = \frac{\partial C_{ay}}{\partial a_u}$$

$$\text{これより, } \frac{\partial C_{ay}}{\partial a_u} = r \cdot \sigma_y \frac{\partial \sigma_a}{\partial a_u} \quad (8)$$

$$\text{ここで, } \frac{\partial \sigma_a^2}{\partial a_u} = 2\sigma_a \frac{\partial \sigma_a}{\partial a_u} \text{ より, } \frac{\partial \sigma_a}{\partial a_u} = \frac{1}{2\sigma_a} \cdot \frac{\partial \sigma_a^2}{\partial a_u}$$

従って、式⑧は

$$\frac{\partial C_{ay}}{\partial a_u} = r \cdot \frac{\sigma_y}{2\sigma_a} \cdot \left(\frac{\partial \sigma_a^2}{\partial a_u} \right) \quad (9)$$

同様に式⑦は

$$\frac{\partial C_{ay}}{\partial y_v} = r \cdot \frac{\sigma_a}{2\sigma_y} \cdot \left(\frac{\partial \sigma_y^2}{\partial y_v} \right) \quad (10)$$

ここで式⑨、の左辺をまとめる。

$$\frac{\partial C_{ay}}{\partial a_u} = \frac{\partial \left[\frac{1}{T} \sum_i^n \sum_j^p y_i a_j x_i(j) \right]}{\partial a_u} = \frac{1}{T} \sum_i^n y_i x_i(u) \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_{ay}}{\partial y_v} = \frac{\partial \left[\frac{1}{T} \sum_i^n \sum_j^p y_i a_j x_i(j) \right]}{\partial y_v} = \frac{1}{T} \sum_j^p a_j x_v(j) \quad (12)$$

次に、式⑨の右辺の $(\frac{\partial \sigma_a^2}{\partial a_u})$ 、式⑩の右辺 $(\frac{\partial \sigma_y^2}{\partial y_v})$ をまとめる。式③より、

$$\frac{\partial \sigma_a^2}{\partial a_u} = \frac{[\frac{1}{T} \sum_j^p m_j a_j^2]}{\partial a_u} = \frac{2}{T} m_u a_u \quad (13)$$

同様に式④より、

$$\frac{\partial \sigma_y^2}{\partial y_v} = \frac{\partial [\frac{1}{T} \sum_i^n q_i y_i^2]}{\partial y_v} = \frac{2}{T} q_v y_v \quad (14)$$

式⑪、⑬に式⑨を代入すると

$$\frac{1}{T} \sum_i^n y_i x_i(u) = r \cdot \frac{\sigma_y}{2\sigma_a} \cdot \frac{2}{T} m_u a_u$$

$$\sum_i^n y_i x_i(u) = r \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \cdot m_u a_u \quad (15)$$

式⑫、⑭に式⑩を代入すると

$$\frac{1}{T} \sum_j^p a_j x_v(j) = r \cdot \frac{\sigma_a}{2\sigma_y} \cdot \frac{2}{T} q_v y_v$$

$$\frac{1}{q_v} \sum_j^p a_j x_v(j) = r \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_y} \cdot y_v \quad (16)$$

式⑯の両辺に $x_v(u)$ を乗じ、 v について和をとる。

$$\text{右辺} = \sum_v^n r \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_y} \cdot y_v \cdot x_v(u) = r \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_y} \sum_v^n y_v \cdot x_v(u) = r \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_y} \sum_i^n y_i \cdot x_i(u)$$

これを式⑮に代入する。

$$\text{右辺} = r \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_y} \cdot r \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_y} \cdot m_u a_u = r^2 \cdot m_u a_u$$

$$\text{左辺} = \sum_v^n \frac{1}{q_v} \sum_j^p a_j x_v(j) x_v(u) = \sum_j^p a_j \sum_v^n \frac{x_v(j)x_v(u)}{q_v} = \sum_j^p a_j \sum_i^n \frac{x_i(j)x_i(u)}{q_v}$$

これらをまとめて方程式を解く。

$$\sum_j^p \sum_i^n \frac{x_i(j)x_i(u)}{q_i} a_j = r^2 m_u a_u \quad (17)$$

式⑰の解法は、一般固有値問題に帰着する。

以下のように、対称行列の固有値問題に変形して解をもとめる。

$$\text{式⑰より、} \sum_j^p \sum_i^n \frac{x_i(j)x_i(u)}{q_i \sqrt{m_j}} \cdot \sqrt{m_j} \cdot a_j = r^2 m_u a_u$$

両辺を $\sqrt{m_u}$ で割ると

$$\sum_j^p \sum_i^n \frac{x_i(j)x_i(u)}{q_i \sqrt{m_j} \sqrt{m_u}} \cdot (\sqrt{m_j} a_j) = r^2 (\sqrt{m_u} a_u)$$

ここで、 $\sqrt{m_j} a_j = a_j'$, $\sqrt{m_u} a_u = a_u'$, $h_{ju} = \sum_i^n \frac{x_i(j)x_i(u)}{q_i}$ とおくと、

$$\sum_j^p \frac{h_{ju}}{\sqrt{m_j} \sqrt{m_u}} a_j' = r^2 a_u' \quad (18)$$

ここで、 $H = \left[\frac{h_{ju}}{\sqrt{m_j} \sqrt{m_u}} \right]$ (ただし、 $j=1,2,\dots,p, u=1,2,\dots,p$) となる行列を定義する。

$$X = \begin{bmatrix} a_1' \\ \vdots \\ a_j' \\ \vdots \\ a_p' \end{bmatrix} \text{とおく}$$

$$HX = r^2 X$$

$$(H - r^2 I)X = 0 \quad (12)$$

式(18)より、 $a_j' = \sqrt{m_j} a_j$ とおいたので、求めるカテゴリースコアは以下の通りになる。

$$a_j = \frac{a_j'}{\sqrt{m_j}} \quad (13)$$

サンプルスコアをもとめる。

式(16)を変形すると

$$y_v = \frac{1}{r} \frac{\sigma_y}{\sigma_a} \left(\frac{1}{q_v} \sum_j^p a_j x_v(j) \right) \quad \text{サンプルスコア } y_v \text{ は、単位の無い値なので、相対的な位置関係}$$

さえ保てばいい為、 $\frac{1}{r} \frac{\sigma_y}{\sigma_a} = 1$ とおくことができる。

$$y_v = \frac{1}{q_v} \sum_j^p a_j x_v(j) \quad (14)$$

B. 因子分析

探索的因子分析は、因子の意味、因子と観測変数の関係について先行する仮説や制約を分析内におかず、全ての観測変数の相関をもとに計算した結果から因子を測定する。

確認的因子分析は、先行する理論に基づき、因子数やその意味、因子の変数の関係を規定した仮説をモデルとして検証する。

共通因子 f と独自因子との存在を仮定し、 $X_j (j = 1, \dots, p)$ を母平均 0 の j 番目の基準値データは、次の式によって表わされると仮定する。

$$X_j = \lambda_{j1}f_1 + \lambda_{j2}f_2 + \dots + \lambda_{jm}f_m + \varepsilon_j \quad (j = 1, \dots, p) \quad \textcircled{1}$$

$X_j (j = 1, \dots, p)$ を母平均 0 の j 番目の基準値データ

f_1, f_2, \dots, f_m : m 個の共通因子

$\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \dots, \lambda_{jm}$: 共通因子負荷量

ε_j : 独自因子

まず、 p 個の変数と m 個の共通因子を各線分とする p 次元及び m 次元ベクトルを $x' = (X_1, X_2, \dots, X_p)$, $f' = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ と定義する。

さらに、 m 個の因子と p 個の変数に対する寄与の程度を表わす因子負荷行列

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1m} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \dots & \lambda_{2m} \\ \lambda_{p1} & \lambda_{p2} & \dots & \lambda_{pm} \end{bmatrix}$$

と定義すると、①式は次式となる

$$x = \Lambda f + \varepsilon \quad \textcircled{2}$$

ここで、次の制約がおかれる。

- i. 共通因子ベクトル f の各成分と独自因子ベクトル ε の各成分は無相関、すなわち、 $Cov(f, \varepsilon) = 0$ である。
- ii. 異なる変数に対応する独自因子は互いに無相関、すなわち、 $Cov(\varepsilon, \varepsilon) = \psi$ である。ただし、 ψ は、各変数の独自性（独自因子の分散）を対角要素とする対角行列では以下のように定義される。

$$\psi = \begin{bmatrix} \varphi_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \varphi_p \end{bmatrix} \quad (\text{ただし、} \varphi_j \geq 0) \quad (j = 1, \dots, p) \quad \textcircled{3}$$

共通因子の f の分散共分散行列は、以下の通りとなる。

$$\text{Var}(f) = \Phi (\neq I_m) \quad \text{ただし、} \text{Diag}(\Phi) = I_m \quad \textcircled{4}$$

p 個の変数間の分散共分散行列は、以下の通りである。

$$\text{Var}(\chi) = \Sigma = \Lambda\Phi\Lambda' + \psi \quad (5)$$

なお、因子分析においては、 Σ として相関係数行列が用いられる。

また、 p 個の変数 χ と m 個の共通因子 f 間の分散共分散行列は、因子構造行列 Γ と呼ばれ、以下の通りである。

$$\Gamma = \text{Cov}(\chi, f) = \Lambda\Phi \quad (6)$$

B-1. 共通性の性質

共通性の推定値には、変数 X_j を基準変数、 X_j を除く $p-1$ 個の変数を説明変数とする重相関係数 ρ_j の平方がある。

$$\Sigma \text{が正則行列のとき,} \quad \rho_j^2 = 1 - (1/\sigma^{jj}) \quad (7)$$

ただし、 σ^{jj} は、 Σ^{-1} の第 j 番目の対角要素である。

B-2. 推定

因子分析にかける多変量データ行列 $X(n \times p$ 行列とする)から計算される標本分散共分散行列 $S = ((1/n)X'X)$ を用いて、因子負荷量行列 Λ は、以下の適合度関数により推定した。

$$F_{ULS}(\Lambda, \psi) = \|S - \Sigma\|^2 \quad (\text{ただし, } \Sigma = \Lambda\Lambda' + \psi) \quad (8)$$

$$\|S - \Sigma\|^2 = \|(S - \psi) - \Lambda\Lambda'\|^2 \quad (9)$$

ψ を既知とすれば、⑨式を最小にする Λ は、以下の通りである

$$(S - \psi)\Lambda = \Lambda\Lambda^2 \quad (10)$$

因子分析における主因子法を実際のデータに適用して $\Sigma - \psi = \Lambda\Lambda'$ を満たす因子負荷量行列 Λ を求めるにあたり、適切な共通因子数 m と共通性の推定値 $H = \text{Diag}(\Sigma - \Psi)$ を推定する必要がある。

ψ の推定に関しては共通性の反復推定を用いた。この方法は共通性の初期値を $H_0 = \text{Diag}(\Sigma - \psi_0)$ として定め、この値を用いて因子負荷量行列 Λ_0 を求め、次の共通性の推定値として $H_{(1)} = \text{Diag}(\Lambda_0\Lambda_0')$ を用いる。こうして計算される $H_{(j)}$ と $H_{(j+1)}$ の差が十分小さくなるまで繰り返し推定を続ける。

B-3. 回転

p 変数の因子分析により m 個の因子が抽出され、 $p \times m$ 行列 A が因子負荷行列として得られた場合、 A の回転行列を T とすれば、回転後の因子負荷行列は

$$B = AT \quad (11)$$

となる。 T に $\text{Diag}(T'T) = I_m$ という制約しかおかない場合を斜交回転となる。あらかじめ回転の目標となる行列 G を定め、制約条件 $T'T = I_m$ のもとで

$$\|G - AT\|^2 = \text{tr}[(G - AT)'(G - AT)] \quad (12)$$

⑫式を最小にする回転行列 T を定める

$$T = VU' = A'G(G'AA'G)^{-1/2} \quad (13)$$

次に同一の変数群に関して、複数個 (r とする) の異なる手段で因子分析をした場合、このとき得られた因子負荷行列を A_1, A_2, \dots, A_r , $G'G = I_m$ を満たす共通の目標行列を G とする。

$$\sum_{\kappa=1}^r \|G - A_{\kappa}T'_{\kappa}\|^2 = \sum_{\kappa=1}^r \text{tr}[(G - A_{\kappa}T'_{\kappa})'(G - A_{\kappa}T'_{\kappa})] \quad (14)$$

を最小にする G , および T_{κ} ($\kappa = 1, \dots, r$) を正準相関分析における等質性分析の原理により導くことができる。この結果, $P_{A_{\kappa}} = A_{\kappa}(A'_{\kappa}A_{\kappa})^{-1}A'_{\kappa}$ とおくことにより次の式が導かれる。

$$(\sum_{\kappa=1}^r P_{A_{\kappa}})G = G\Delta, \quad T_{\kappa} = (A'_{\kappa}A_{\kappa})'A'_{\kappa}G \quad (\kappa = 1, \dots, r) \quad (15)$$

共通の因子負荷行列 G は行列 $\sum_{\kappa=1}^m P_{A_{\kappa}}$ の最大 m 個の固有値に対応する固有ベクトルとして求められ、⑮式の第 2 式より各集団の回転行列 T_{κ} が求められる。

B-4. 因子得点の推定

それぞれの因子を個体のそれぞれがどの程度持っているかを知るために、因子得点の推定値 \hat{f} を求める必要がある。個体 i の m 個の因子に関する因子得点の推定値 \hat{f}_i は、因子分析にかけた $n \times p$ 次の多変量データ行列 X の i 番目の p 次行列ベクトルを x_i , $m \times p$ 次の重み行列を B とすれば、 $\hat{f}_i = Bx_i$ となる。⑯式の方法は、斜交モデルである。

$$B = (\Lambda'\Psi^{-1}\Lambda)^{-1}\Lambda'\Psi^{-1} \quad (16)$$

Λ : 因子負荷行列

Ψ : 独自因子行列

C 分散構造分析

共分散構造分析は、変数間の因果構造の解明につながる手法として確認的因子分析とパス解析を融合した手法である。また、共分散構造分析は、多変量データ解析のひとつのモデルであり、多変数間の分散共分散行列 Σ を構成する各パラメータ θ に仮説構造 $\Sigma = \Sigma(\theta)$ を与えることにより、データから θ を推定し、母数 θ の推定値 $\hat{\theta}$ を代入して得られる $\Sigma(\hat{\theta})$ と標本分散共分散行列 S の各成分の差を評価することによって、仮説構造が支持されるか否かを検証する統計手法の総称である。2 変数群 X, Y の母分散共分散行列 Σ に

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{XX} & \Sigma_{XY} \\ \Sigma_{YX} & \Sigma_{YY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{XX} & 0 \\ 0 & \Sigma_{YY} \end{bmatrix} \quad (17)$$

という構造を与えることは、変数群 X, Y 間の母分散共分散行列に関して、仮説 $\Sigma_{XY} = 0$ の仮説検定を行うことと同等になる。また、 X, Y に含まれる変数が、 $X=(x), Y=(y)$ とそれぞれ 1 つずつの場合、仮説構造 ($\Sigma_{XX} = \Sigma_{YY}$) の設定は、母分散 $\sigma_{X^2} = \sigma_{Y^2}$ の検定に帰着される。

p_1 個の原因変数を $x' = (X_1, X_2, \dots, X_{p_1})$, p_2 個の結果変数を $y' = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{p_2})$ のとき、 x, y

に因子分析モデルを適用することにより、以下のように x を潜在因子 ξ と誤差項 δ の線形和、同様に y を潜在因子 η とその誤差項 ε_y の線形和に分解する。

$$x = \Lambda_x \xi + \delta, \quad (E(\xi) = 0, E(\delta) = 0, Cov(\xi, \delta) = 0) \quad (18)$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon, \quad (E(\eta) = 0, E(\varepsilon) = 0, Cov(\eta, \varepsilon) = 0) \quad (19)$$

ここで、 ξ と η の間に、次のような関係式がある。

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (\text{ただし, } Cov(\eta, \zeta) = 0, Cov(\zeta, \xi) = 0) \quad (20)$$

⑳式は、 $B^\# = I - B$ とおくことにより以下の式となる。

$$\eta = (B^\#)^{-1}\Gamma\xi + (B^\#)^{-1}\zeta \quad (21)$$

η : 基準変数

ξ : 説明変数

⑱式における ξ のように一度も他の変数の結果とならない変数を外生変数、⑱式における x 、⑲式における y のように少なくとも一度は他の変数の結果になる変数のことを内生変数という。誤差変数は必ず外生変数になる。以上の結果、 $z' = (y', x')$ の分散共分散行列 Σ は、 $\Lambda_x, \Lambda_y, \Gamma, B, \Phi, \psi, \theta_\varepsilon, \theta_\delta$ の関数として次のように表現される。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Lambda_y B^\# (\Gamma \Phi \Gamma' + \psi) B^{\#'} \Lambda_y' + \theta_\varepsilon & \Lambda_y B^\# \Gamma \Phi \Lambda_x' \\ \Lambda_x \Phi \Gamma' B^{\#'} \Lambda_y' & \Lambda_x \Phi \Lambda_x' + \theta_\delta \end{bmatrix} \quad (22)$$

ただし、 $\Phi = E(\xi\xi')$ 、 $\psi = E(\zeta\zeta')$ 、 $\theta_\varepsilon = E(\varepsilon\varepsilon')$ 、 $\theta_\delta = E(\delta\delta')$ 、 $B^\# = (I - B)^{-1}$ 。

C-1. 未知パラメータの設定とモデル評価の基準

(1) χ^2 検定

未知パラメータ ($\Lambda_x, \Lambda_y, \Gamma$ 等) は $z' = (y', x')$ の標本共分散行列 S に基づき、最小 2 乗法により推定する。データとモデルの乖離の程度を評価する方法は以下の通りである。ただし、 $\Sigma(\hat{\theta})$ は推定値 $\hat{\theta}$ によって評価された Σ の推定値である。

$\chi^2 = (n-1) F_{ULS}$ が設定されたモデルが正しいという仮説の下で自由度 (⑳式) の χ^2 分布に従う。

$$df = \frac{1}{2} p(p+1) - m \quad (23)$$

m : 推定された母数の数

(2) 適合度指標 (GFI : goodness of fit index)

$$GFI = 1 - \frac{\|(\Sigma(\hat{\theta}))^{-1}(s - \Sigma(\hat{\theta}))\|^2}{\|\Sigma(\hat{\theta})^{-1}s\|^2} \quad (24)$$

(3) 修正適合度指標 (AGFI : adjusted GFI)

$$AGFI = 1 - \frac{p(p+1)}{2df} (1 - GFI) \quad (25)$$

D 重回帰分析

n 個の個体に関する p 個の説明変数 X_1, X_2, \dots, X_p および目的変数 Y の観測値が与えられている場合の重回帰分析の一般的モデルは次の通りである。

$$y_j = \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \dots + \beta_p x_{pj} + \alpha + \varepsilon_j \quad (j = 1, \dots, n) \quad \text{①}$$

ただし、確率変数とみなされる誤差項 ε_j については次のような過程がおかれる。

- (1) $E(\varepsilon_j) = 0$ (誤差項の期待値 (平均) は 0 である)
- (2) $Var(\varepsilon_j) = \sigma^2$ (誤差項の分散は個体 j に関係なく一定である。等分散の仮定と呼ばれる)
- (3) $Cov(\varepsilon_j, \varepsilon_i) = 0 \quad (i \neq j)$ (異なる個体間の誤差項の無相関である。誤差項の独立性和と呼ばれる)

これらの仮定により、 j 番目の観測値 y_j は母平均 $(\beta_1 x_{1j} + \dots + \beta_p x_{pj} + \alpha)$ 、誤差分散 σ^2 を持つ確率変数となる。

式①のモデル式における未知母数 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ は、

$$f(\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p) = \sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \alpha))^2 \quad \text{②}$$

を最小にすることによって推定する。式②を最小にする $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ の推定量は最小 2 乗推定量と呼ばれ、これらの $\alpha, b' = (b_1, b_2, \dots, b_p)$ とおく。ここで、式②を α で偏微分すると、 α の推定値 α は式③となる。

$$\alpha = \bar{y} - (b_1 \bar{x}_1 + \dots + b_p \bar{x}_p) \quad \text{③}$$

変数 Y, X_1, \dots, X_p の平均値を 0 と仮定すると、式③より、 $\alpha = 0$ となる。次に、 n 個の個体に関する観測値からそれぞれの変数の平均値を減じて得られる平均偏差得点を各成分とする n 次元ベクトルを y 、 $n \times p$ 行列を $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ によって表わす時、式①とその制約条件を行列とベクトルによって表わすと以下の通りになる。

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (\text{ただし、} E(\varepsilon) = 0, \text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2 I_n) \quad \text{④}$$

となり、式②は以下の通りになる。

$$f(\beta) = \|y - X\beta\|^2 = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad \text{⑤}$$

に帰着される。上式を β に関して最小にすることにより、 β の推定量 b (最小 2 乗推定量) が得られる。 β の最小 2 乗推定量 b は次式で満たされる。

$$b = (X'X)^{-1}X'y \quad \text{⑥}$$

D-1 残差ベクトル

実測値 y の各成分と予測値 $\hat{y} = Xb$ の各成分の差得点 $(y_j - \hat{y}_j; j = 1, \dots, n)$ を成分とする

n 次元の残差ベクトルは式⑦となる.

$$e_{y/x} = y - \hat{y} = y - Xb = y - P_X y = (I_n - P_X)y = Q_X y \quad \text{⑦}$$

D-2 偏回帰係数

p 個の説明変数 X_1, X_2, \dots, X_p 間の分散共分散行列と相関係数行列をそれぞれ

$S_{XX} = (1/n)X'X$, および $R_{XX} = (1/n)Z'Z$ とする. さらに, 目的変数 Y と $X_j (j = 1, \dots, p)$ の各変数との共分散, および相関係数を各成分とする p 次元ベクトルをそれぞれ

$$S_{Xy} = (S_{x_1y}, S_{x_2y}, \dots, S_{x_p y})' \quad r_{Xy} = (r_{x_1y}, r_{x_2y}, \dots, r_{x_p y})' \quad \text{⑧}$$

とする. 式⑥で定義される b の各成分は偏回帰係数と呼ばれ以下の通りである.

$$b = \left((1/n)(X'X) \right)^{-1} \left((1/n)X'y \right) = S_{XX}^{-1} S_{Xy} \quad \text{⑨}$$

となる. さらに, $Z_X = X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ の標準得点を各成分とする $n \times p$ 行列, および Z_y を y の標準得点を成分とする n 次元ベクトルをするとき $\|Z_X \alpha - Z_y\|^2$ を最小にする α を b_s とおくと,

$$b_s = R_{XX}^{-1} r_{Xy} \quad \text{⑩}$$

となる. 式⑨の b_s の各成分は標準偏回帰係数と呼ばれ, b と b_s の各成分の間には

$$b_j = \left(\frac{S_y}{S_{x_j}} \right) b_{sj} \quad (j = 1, \dots, p) \quad \text{⑪}$$

といった関係式が成立する.

D-3 重相関係数

実測値 y と予測値 \hat{y} の相関係数は, 以下の通りである.

$$r_{y\hat{y}} = \frac{S_{y\hat{y}}}{s_y s_{\hat{y}}} = \frac{\|P_X y\|}{\|y\|} \quad (= mc(X, y) \text{ とおく}) \quad \text{⑫}$$

この値は, 基準変数 Y に対する説明変数 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ 全体の持つ予測力の指標となる.

参考文献

1章 序論

1. 橋本武, 船用機関システムのためのデイベンダビリティ, 日本マリンエンジニアリング学会誌第 38 卷, 第 8 号,2003-8, pp488-494
2. 桐谷信夫, 船舶機器の信頼性データに基づく船舶の信頼性評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌第 39 卷, 第 2 号,2004-2, pp63-67
3. J.Reason 著, 組織事故, 1999-4, 日科技連出版社
4. 宮地由芽子, 他, 作業の階層構造に基づくヒューマンエラーの相対的リスク評価手法, 日本信頼性学会誌『信頼性』, 第 28 号, 第 7 号, 2006, pp521-533
5. 宮地由芽子, 他, 背景要因を考慮した運転作業エラーのリスク評価手法の開発, 鉄道総研報告, 第 23 号, 第 9 号, 2009-9, pp17-22
6. 羽山和紀, 他, 保線作業におけるヒューマンエラーのリスク管理支援手法, 鉄道総研報告, 第 24 卷, 第 11 号, 2010-11, pp5-10
7. 宮城雅子, 大事故の予兆をさぐる, 1998, 講談社
8. 竹中孝弘, 他, 衝突海難事故における人的エラーの発形態, 日本航海学会論文集, 第 113 号, 2004-3, pp109-116
9. 竹中孝弘, 他, 衝突海難事故における人的エラーの数量化, 日本航海学会論文集, 第 110 号, 2005-9, pp85-91
10. 海難審判・船舶事故調査協会, <http://www2.maia.or.jp/list.php> ,(2016,6.1 閲覧)
11. 船用機器におけるヒューマン・エレメントに関する研究動向調査, 2007, (社) 日本船用工業会
12. 椎原裕美, 他, 機関室内機関・機器損傷におけるヒューマンファクターの調査, 椎原裕美, 日本マリンエンジニアリング学会誌第 36 卷, 第 9 号,2001-9, pp677-685
13. 三友信夫, リスク評価について, 海上技術安全研究所報告, 第 8 卷, 第 4 号,2008,pp305-321
14. 有馬英利, 他, システムダイナミクスを用いた海難リスクの一考察, 日本船舶海洋工学論文集, 第 3 号, 2006, pp53-59

第 2 章

15. 海難審判所, 平成 24 年版レポート 海難審判, 平成 24 年 12 月
16. 海難審判所, 平成 27 年版レポート 海難審判, 平成 27 年 11 月
17. 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/kaiji/imo/gaiyou .htm> ,(2016,6.1 閲覧)
18. P&I Loss Prevention Bulletin, Vol.33, 2015
19. 阪本義治, 他, 諸外国における海難調査と英国における衝突海難の現状, 日本航海学会論文集, 第 168 号, 2008 ,pp69-76

20. 財団法人海難審判協会, ヒューマンファクター概念に基づく海難・危険情報の調査活用等に関する調査研究 中間報告書, 2003.3
21. 財団法人海難審判協会, ヒューマンファクター概念に基づく海難・危険情報の調査活用等に関する調査研究 最終報告書, 2004.3
22. 財団法人海難審判協会, IMO 決議 A.884(21)海難及び海上インシデントの調査のためのコードの改正, 2001.3
23. 社団法人日本海難防止協会, 平成 14 年度海上インシデント・データベースに関する調査研究報告書, 平成 15 年 3 月

第 3 章

24. G.Salvendy (ed.), Handbook of Human Factor, Wiley Interscience, 1987, pp220
25. 芳賀繁, 事故がなくなる理由, 株式会社 PHP 研究所, 2012,
26. 村山義夫, 船内作業インシデントのデータベース開発と応用に関する調査研究, 2003.3
27. F・H・ホーキンス, 黒田勲監修, 石川義美監訳: ヒューマン・ファクター, pp1 - 12, 1992, 成山堂
28. 河野龍太郎, 原子力発電所におけるヒューマンファクター, 高圧ガス 34[9], pp36-43,1997 年 9 月
29. J.Rasmussen, Classification System For Reporting Event Involving Human Malfunction, Riso-M-2240. 1981.3
30. 林善男, 人間信頼性工学, 昭和 63 年 7 月, 海文堂
31. J.Rasmussen, Skills, rules, knowledge: signals, signs, and symbols and other distinctions in human performance models, IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics. MSC-13, pp257-267, 1983.
32. J.Rasmussen, Information Processing and Human-Machine Interaction An Approach to Cognitive Engineering, Amsterdam, Elsevier. 海保博之,他,訳: インターフェースの認知工学, 啓学出版, 1986,
33. J.Reason 著, 林喜男 監訳: ヒューマンエラー, 2005-10, 海文堂
34. J.リーソン, ヒューマンエラー認知科学的アプローチ, 1994, 海文堂
35. 内田誠, 船用機関管理におけるヒューマンファクター, 日本マリ学会第 71 回学術講演会論文集, pp39-40,2004
36. 宮城雅子, 大事故の予兆をさぐる, 1998, 講談社,pp79-83
37. J.Reason: "A Framework for Classifying Errors."In: J.Rasmussen, K. Duncan, J.Leplat(Ed.), New Technology And Human Error:John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1987

第4章

38. 柳田邦男, 事故調査, 新潮社, 1994,
39. 菅民郎, 多変量解析の実践(下), 現代数学社, pp118-159,1999
40. 大村平, 評価と数量化のはなし, 技術評論社, pp293-316,2004
41. 有村哲, 他, 多変量解説のはなし, 東京図書株式会社, pp243-276,1987
42. JUSE-Stat Works による多変量解析入門, 日科技連出版社, pp165-180,2007

第6章

43. 柳井晴夫, 多変量解析データ解析法, 1996, 朝倉書店
44. 豊田秀樹, 共分散構造分析(入門編) 1998 朝倉書店
45. 豊田秀樹, 原因を探る統計学, 1993, 講談社

第7章

46. 堀比呂志, 資源と環境と経済成長: システム・ダイナミクス手法によるマクロ経済分析, 1974, 至誠堂
47. 島田俊郎, システムダイナミクス入門, 1994, 日科技連出版社
48. ジェラルド・J・S・ワイルド著, 芳賀繁訳, 交通事故はなぜなくなるか, 2007, 新曜社
49. Wilde, G.J.S., The Theory of Risk Homeostasis Implications for and Health, Risk Analysis, 2, pp209-225, 1982.
50. Wilde, G.J.S., Target Risk 2: A New Psychology of Safety and Health, Toronto, Ontario: PDE publications, 2001. 芳賀繁(訳), 交通事故はなぜ起きる: リスク行動の心理学, 新曜社, 2007.
51. 芳賀繁, 事故がなくなる理由, PHP 社
52. 内田治, すぐわかる SPSS によるアンケートの多変量解析, 2011, 東京図書

第8章

53. S.Dekker, 芳賀繁 訳, ヒューマンエラーは裁けるか, 東京大学出版会