

液体荷役の自動化のための機能配分と過誤防止効果について

正員 福地 信義^{*} 正員 田中 太氏^{*}
正員 古賀 幹生^{**} 正員 村田 理^{***}

Functional Consideration for Safety and Reliability with the aim of Establishing the Handling Support System of Liquid Cargo

by Nobuyoshi Fukuchi, *Member* Takashi Tanaka, *Member*
Mikio Koga, *Member* Satoshi Murata, *Member*

Summary

The thinking faculty and operating ability of cargo operators tend to be affected by their mental task loads under the pressure from liquid cargo loading/unloading environment. The suitable cargo handling support system has to be taken to cope with the relation between tensional stress degrees and human errors of operators during cargo handling.

This paper, on the subject of mental stress and task loads of a liquid cargo control operator, consists of the quantitative analysis of the tensional stresses by measuring the fractal nature of heart rate variability under mental work-load during cargo handling on two domestic oil tankers that are respectively equipped with/without the automatic cargo control system. And the way of supporting cargo handling in order to reduce the work-load and human errors is predicted for the task with high-tension under complicated condition of cargo handling.

Furthermore, the specific method to search for almost all of the human error factors, that could be taken measures by the automatic handling system, is proposed. And the evaluation method of the quantitative degree of the improved safety on the basis of probability of human error in the functional system is carried out using apprehensive degree that is defined as similar to the sense scale based on the experience of skilled ship cargo operators. The quantitative evaluation for the improvement of safety is predicted respectively to the conventional site operation, the simple remote operation with monitoring and the operation by full automatic system for comparison.

1. はじめに

液体荷役システム等の人間－機械系システムでは、人間に一定レベル以上の判断・操作能力を期待して機械との機能配分を行っているが、人間の思考・行動能力は環境負荷や仕事内容等の外部環境によって大きな影響を受ける。特に、内航タンカーでは運航サイクルの中で、荷役作業ではその頻度、多様性において乗組員のスキルおよび作業の量的負担が要求されるために、荷役時の緊張ストレスの発生状態を把握して、これを軽減する自動荷役システムの設計が必要である。また、このことは人的過誤に起因する混油、漏油、荷役機器

の損傷等の重大事故の防止および乗組員の節労化・省人化に有効である¹⁾。

緊張ストレス環境下において作業負荷の軽減と人的過誤生起の減少を目的とする液体荷役操作支援システムを構築するために、本研究では、内航タンカーの荷役時における荷役責任者の心拍変動を計測し、スペクトル解析により緊張ストレスを算定し、これに基づきタスク分析を行った。また、信頼性評価のための感覚尺度としての危惧度を用いた Fault Tree 解析により、荷役操作を機側手動で行う従来型荷役、集中監視・遠隔手動操作を主体とした荷役および荷役自動化システムの場合について安全性・信頼性の程度を調べた。

2. 液体荷役の作業過程と緊張度

2.1 荷役作業の過程

内航タンカーの運航サイクルの中で、液体荷役操作はその作業の多様性において乗組員の高いスキルと作業の量的負担が要求される部分であり、船種や取扱油種に関わりなく通常は、1) 積荷役、2) タンクヒーティング、3) 揚げ荷役、

* 九州大学大学院工学研究院

** MHI マリンエンジニアリング (株)

*** 福岡市役所

原稿受理 平成 18 年 3 月 7 日

4) タンク洗浄またはガスフリーの繰り返しとなる。荷役作業の過程と要配慮事項は以下の通りであり²⁾、インタビュー等で調べた各作業項目の心的負荷を[A]:少ない、[B]:普通、[C]:多い、に分別して示す。

(1) 荷役準備作業

カーゴタンクおよびポンプルーム内の各機器、関係用具の点検整備を行った後に、カーゴタンクとラインアップの状態を点検する[B]。

重質油等の揚荷役の場合は流動を容易にするためにヒーティングするが、揚地との事前の打合せにより、品質管理上ヒーティングの要否や温度限界を決める[B]。

(2) 荷役打合せ・確認

- 1) 積荷書類の確認と送油量等の打合せ：積荷役の場合は積荷指示書、揚荷の場合は送り状により自船と陸側とで相互に確認し、荷役順序、送油（液）の流速または圧力、特に初期および末期における送油（液）量について、打合せと荷役品種名の確認を行う[C]。
- 2) 積荷役の場合の検査：積荷役を行う場合、積地で定められている安全規則により、カーゴタンク内の検査を、陸側と船側責任者が立会いで行う[C]。
- 3) 揚荷役の場合の検査：揚荷役を行う場合は、カーゴタンク各開口部の封印の検査と取外しを陸側と船側責任者立会いで行い[B]、この検査が終了後、必要に応じてオイルタイトハッチ等の開口部を開いてサンプルを採取するほか、検尺、検水、検温、密度測定を行い、積荷に異常がないことを確認した上で揚荷役を開始する[C]。
- 4) 内航タンカー設備点検簿と船舶荷役安全確認表を提出する[B]。

(3) 積荷役・揚荷役

各種の立会検査、積荷役関係の書類受渡し[A]、作業員の配置の確認[B]、荷役開始の船内周知[B]等がなされ、陸側荷役関係者と緊密な連絡の後、荷役が開始される。

- 1) ローディングアーム・カーゴホースを取り付ける[C]。
- 2) 荷役関係バルブの開閉：ポンプルームを含むカーゴラインのバルブのすべては常時正しく閉鎖しておき、作業計画に基づいて順次必要なバルブから開放する[B]。
- 3) 荷役の開始：陸側責任者に受入・送込み準備完了を連絡してから、相互に荷役作業開始を確認し[B]、陸側関係者が所要のバルブを開放して積込み・揚荷役を開始する[B]。
- 4) 陸側タンクの切り替え：バルブ開閉の時点に誤操作が無いように陸側責任者と緊密に連絡する[C]。

引火点が 61℃以下の危険物の荷役中は、機関室または船内喫煙室等のガス検知を一定時間毎（安全規則では 30 分毎）に行い安全を確認する[B]。

(4) 荷役完了作業

検尺を陸側と船側責任者が立会いで行い、相互で数量を確認する[B]。

積揚地での船側マニフォールドと、陸側配管との接続部の陸側ローディングアームの立上り部分、あるいはカーゴホースの中の残油（液）払いをするためにエヤー押し（ライン払い）を行う[C]。積荷役の場合は、陸側より窒素押し等でライン払いを行う[B]。

最後に、荷役関係の全バルブの閉鎖を確認し、ローディングアーム・カーゴホースの取外しを行い[C]、その後ボンディングケーブルを外す[B]。さらに開口部の蓋を締める。

以上のように、機側手動による従来型荷役では各作業段階において心的負担が変わるが、その全般に亘るストレス要因の階層構造（樹木図）は Fig.1 のようになる。

一方、自動荷役システムのストレス要因は機側手動の場合のストレス要因（Fig.1 参照）から自動化システムが作業支援している要因（図中(X)印の要因）を除いた範囲に縮減されることになる。つまり、乗組員の心的負担の高い作業に対する支援という第一の設備目標が、自動荷役システムの主たる機能要件を決める第一の観点となる。

2.2 荷役自動化の照準とシステム機能

前項で述べた、荷役作業の安全性確保のために自動荷役システムの機能要件を決める考え方は、あくまで想定内作業への心的負担のレベルの軽減を目標としている。

ここでは、荷役作業中の想定外の事態の発生によって乗組

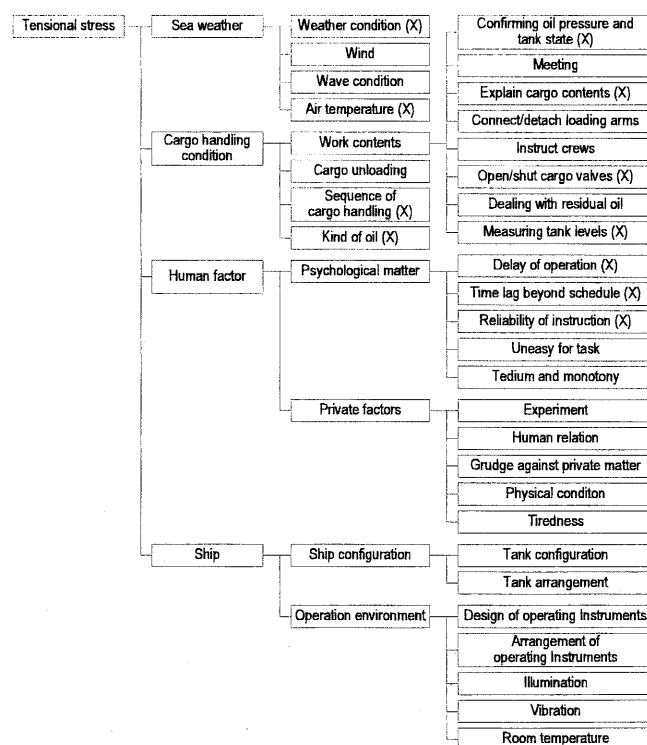


Fig.1 Hierarchical structure of tensional stress during cargo handling work

員に過剰な心的負担の発生の防止を第二の設備目標とし、自動荷役システムの主たる機能要件決定のための第二の観点について述べる。

機側手動による従来型荷役においても、想定外の事態の生起を未然に防止するためには、実際の荷役操作に入る前段階における、荷役責任者による最適な荷役計画の策定と乗組員への周知が不可欠となる。

(1) 荷役計画と操作制御

主たる荷役作業に先立って、安全確保のために荷役作業の途中および荷役最終段階(出航段階)での船舶の姿勢、喫水、船体強度、スタビリティおよび各貨物油タンク積付け率等を時系列的推移を正確に予測する荷役計画が不可欠となる。かつ輸送効率の向上を追求するために、特に大型外航タンカー等では油種・品種毎のネット搭載要求数量(荷役要求)を満足した上で、貨物油タンクの空倉容量(Dead Freight)の最小化を実現する積付け計画(タンク割付計画)も重要な策定作業である。この、いわゆる荷役計画線図(シナリオ)の策定支援も自動荷役システムの主たる機能要件の一つである。

(2) 液体荷役の自動化要件

液体荷役の自動化としては、システム荷役計画・制御・操作の中で荷役作業の核となる部分は、船種と取扱い荷油により当然異なってくるが、前述の想定外の事態の発生を防止するために、タンクヒーティングを含めた荷役業務に対する荷役操作計画(シナリオ)を策定することになる。このシナリオが精緻であれば、その荷役操作シナリオに沿った操作支援・自動制御機能のシステム化およびそのシナリオからの逸脱時の適切な対案提示機能のシステム化により、想定外の事態の発生を防止するにはより有効である。つまり、基本的には荷役要求に対する最適荷役計画支援機能によって策定された時系列のシナリオに沿ってコントロール/ワーニング機能が稼働することで、荷役効率・安全性を高めることになる³⁾。

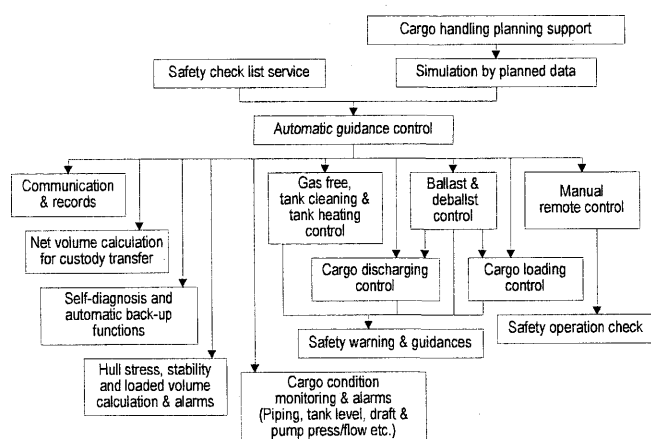


Fig.2 Functional diagram of the automatic cargo handling system

(3) 荷役自動化システムの機能

前述のように荷役計画・制御/操作支援機能の中で核となる部分は、船種や取扱い荷油により異なることを考慮し、さらに実船上での荷役実態調査、経験者へのヒアリング結果を勘案して、荷役計画、荷役準備、荷役/バラスト操作、後始末および航海中のタンク洗浄、タンクヒーティング、荒天時の緊急バラスト調整など通常の全荷役サイクルの支援を網羅した Fig.2 に示すシステム機能の装備を目標とする。

3. 荷役作業における心拍変動計測

3.1 心拍変動計測による緊張度

作業時における人間の緊張ストレスのレベルを知るために、オペレータの心電図を計測し、スペクトル解析による心拍変動の分析によって自律神経機能の活動を把握し、生理・心理的負担を算定^{4), 5), 6)}する。

(1) 緊張ストレスの推定法

人間における緊張や興奮を示す生理反応には、交感神経と副交感(心臓迷走)神経からなる自律神経が関わる。呼吸循環機能の亢進や消化機能を抑制する交感神経は緊張状態で活発であり、一方、エネルギーの保存、貯蔵に係わる副交感神経はリラックス時に活動することが知られており、自律神経によって心拍数は調整されている。また、副交感神経活動は 1Hz 前後の心拍調節まで伝達できるのに対し、交感神経による心拍調節は 0.15Hz 以上を伝達できないことから、両神経による心拍数調節活動を分離でき、さらに心拍変動の様相は心電図計により Fig.3(a), (b) のように簡単に計測できる。

そこで、心拍変動のもつ明らかな周期成分や位相の揃った広帯域信号と、フラクタル的な(位相の混った)成分とを分離するための手法である粗視化スペクトル法(CGSA)^{7), 8)}を用いて得られた周期成分のみのパワースペクトル(Fig.3(c), (d) 参照のこと)のうち、0~0.15Hz の低周波成分の積分値(L_o)と、0.15~0.8Hz の高周波成分の積分値(H_i)、さらにパワーの全周波数にわたる積分値($Total$)を求める。ここで、交感神経活動の指標 SNS (Sympathetic Nervous System)は緊張度、および副交感神経活動の指標 PNS (Parasympathetic Nervous System)はリラックス度を表し、 $SNS=H_i/L_o$ 、 $PNS=L_o/Total$ より人間が感じる精神的緊張や興奮を具体的な数値として求めることができる^{9), 10)}。

(2) 心拍変動による緊張度の特徴と有効性

心拍変動による緊張ストレス値を求める推定法の特徴は、以前行った操船時の緊張度計測⁵⁾より、以下のことが明らかになっている。

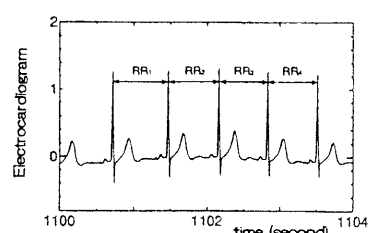
(a) 自己の意志による影響を受けにくい自律神経の働きを調べるため、比較的安定した結果が得られる。また、行動に

対する瞬間の緊張ストレスおよび離着岸時等の比較的長い時間にわたる緊張ストレスも同じ精度で求めることができる。

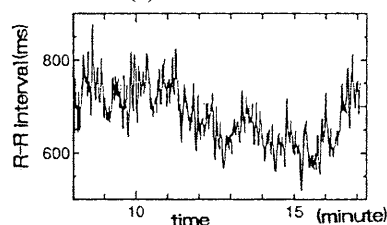
(b) 荷役担当者が受けるあらゆる要因からの緊張ストレス、さらに緊張の持続と中断等の人間の特性を全て含んで現われる。このため、緊張ストレスを引き起こす要因をすべて説明することが困難な場合もあるので、被験者の行動および周辺環境の様子等をビデオカメラ等を用いてこと細かく記録する必要がある。

(c) 同一状況における異なる被験者の結果を見ると、緊張度は同じような傾向を示す。ただ、SNS 値や PNS 値そのものには個人差があり、値の絶対値だけで緊張度を論じられない。

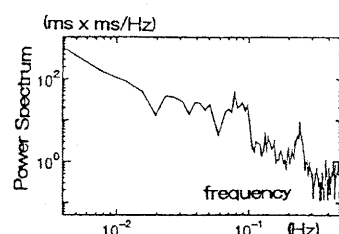
以上のような特徴から、心拍変動による緊張ストレス値は瞬時の緊張感を表現できるために、緊張度と事故生起確率の関係^{11), 12)}を応用して、強い緊張に起因する事故の防止を装備支援によって図る場合のシステム設計に役立つと考えられる。



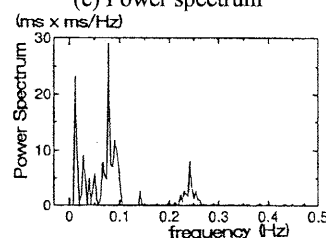
(a) Heart beat



(b) Heart rate variability



(c) Power spectrum



(d) Power spectrum excluding fractal component

Fig.3 A result of spectrum analysis for fractal nature of heart rate variability (SNS=18.68 PNS=0.00632)

3.2 機側手動のタンカー

(1) 計測対象船の荷役装置

荷役時の心電図計測を行った内航タンカー”A丸”（載荷重量 5225 トン）は、バルブ等の荷役操作は機側手動が中心であり、タンク測深データの集中表示および一部の荷役弁のみの遠隔操作機能をもつ荷油装置を備えている。荷役における送液流量は荷役制御室（Cargo Control Room、以下 CCR と記述）より循環弁での遠隔操作で調節可能となっているが、その他の弁の開閉は作業員の機側でのハンドル操作によって行っている。

この船の貨油タンクは 6 列の左右舷タンクであり、荷役責任者はほぼ 2.1 で述べた液体荷役作業過程に従って操作・命令等を行っている。

(2) 機側手動による荷役作業

荷役責任者である 一等航海士（Chief Officer、以下 C/O と記述）の心理・生理的負担を把握するために、揚荷役・積荷役時の C/O の心拍変動を計測した。C/O は、CCR とトランシーバーで指示・応答等を行いながら、作業員に随時指示を出して荷役作業を統括するのが主任務である。また、目視によるタンク内液面の確認も C/O 自らが行っており、さらに離岸時にはパイプ・ホースの受け渡し作業等を他の作業員と共同で行っている。ただし、C/O は荷役作業が定常的な状態に入ると任務を交代し、自室にて休息をとることがある。

(3) 作業過程における緊張度

揚荷役時における荷役責任者 C/O の心電図を計測し、これより算出した SNS と PNS 値を主なイベント項目と合わせて Fig.4(a)に示す。なお、計測は緊張度が高い積みきり操作を含む後半の 45 分について行った。

積荷役時について、着桟から積荷役作業、荷役完了（後仕舞）作業に至る全サイクル約 5.5 時間の計測を行い Fig.4(b)のようになるが、荷役開始時に高緊張状態が見られる。

これらの SNS、PNS 値を比較したグラフより以下のことがわかる。

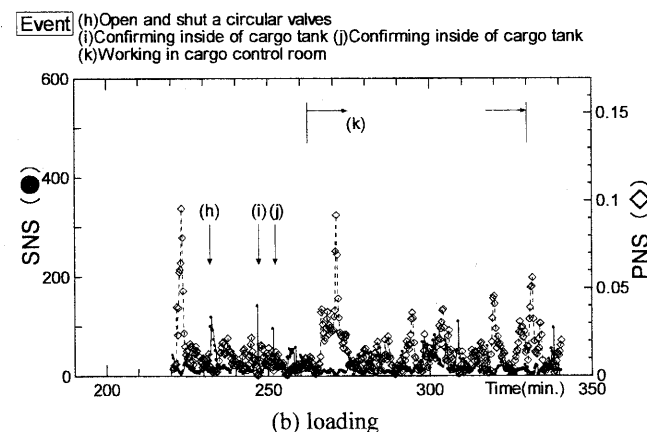
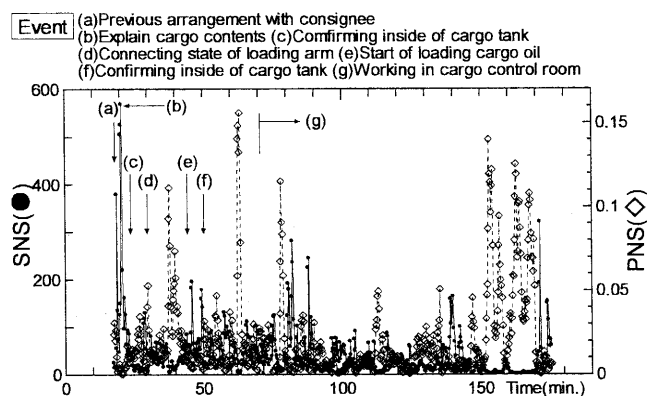
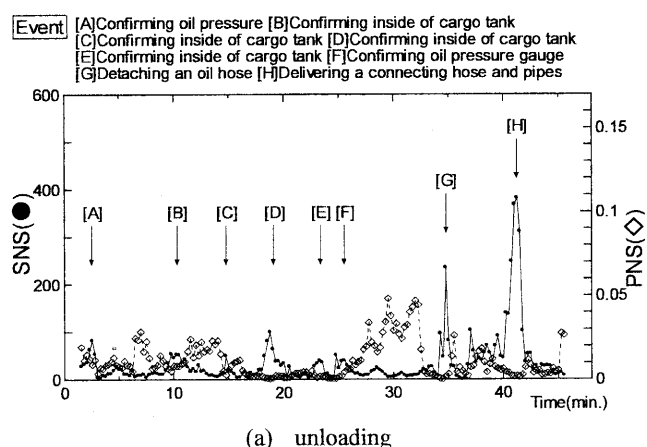
1) 揚荷役時には、ハッチよりタンク内の確認時（Event[B], [C], [D], [E]）、または油圧計のチェック認時（Event[A], [F]）に SNS 値が上昇している。これは、C/O 自らによるタンク内状態を知覚・確認する重要性より高い緊張状態であることを示している。

2) 荷役作業終了時におけるホースの切離し（Event[G]）、ホース・パイプの受け渡しの段階（Event[H]）では、非常に高い SNS 値を示している。これらの作業では、残油漏れに対する注意、重いホース移動等の力作業という起因に加えて、終了後すぐに出航という時間的な制約や天候（計測時は非常に強い雨）によって緊張度が増したものと考えられる。

3) 積荷役時においては、荷役作業前の船陸ミーティング (Event(a))、荷役内容の説明時 (Event(b)) に非常に高いストレスを感じている。荷役作業を安全かつ円滑に行うために、作業員に荷役作業情報を的確に伝えることが非常に重要な緊張を要する仕事であるといえる。

4) その他、ローディングアームの接続 (Event(d)) やタンク受入準備のバルブ操作 (Event(h)) 等、作業初期段階での作業に SNS 値の上昇が目立っている。

以上より、荷役作業においては初期の準備段階と後半の後仕舞段階において緊張度が高くなり、作業が安定した荷役の定常状態に入ると比較的ストレスを感じる事が少ないことがわかった。



(4) 各作業におけるタスク負荷

荷役作業の各作業項目についての SNS 値を示したものが Fig.5 であり、ここでは各作業の RMS 値、最高値、最低値⁴⁾を示している。これらのグラフから以下のことがわかる。

1) 揚荷役時においては、「ホース切離し作業」、「残油処理」、「ホースの受け渡し」の作業は全体的に SNS 値が高い傾向にあり、RMS (自乗平均平方根) 値も他の作業に比べて高い値になっている。荷役終了後の後片付け作業は手作業で行わなければならない、また時間的な制約もあり、高緊張状態が続くことがわかる。

「油圧計確認」、「トランシーバーでの応答・確認」、「作業員に対する指示」、「タンク内確認」、における SNS 値は高い値から低い値まで幅広く分布している。特に、「トランシーバーでの応答・確認」時においてはその時々通話内容により緊張状態が変わってバラつきが顕著であり、比較的重要度の低い応答確認では SNS 値は低い値となるが、タンク積切等のタイミングが重要な応答では緊張度が高くなっている。これらの作業では、一部の時点においてのみ非常に高いストレスを感じているが、RMS 値は低い。

2) 積荷役時においては、「船陸ミーティング」、「荷役内容の説明」の SNS 値が全体的に高く、RMS 値も高くなっている。このことから、荷役前における打ち合わせ作業は非常にストレスのかかる重要事であることがわかる。「トランシーバーでの応答・確認」、「腕時計による時間確認」、「タンク検尺・記録」における SNS 値は幅広く分布している。理由は揚荷役時の作業項目と同様に、その時点での状態によって左右されるためである。

3) 揚荷役と積荷役の作業を比較すると、何れの作業も積荷役時のほうが高い SNS 値を示しており、RMS 値も「作業員に指示」以外は高い値となっている。このことから全体的に積荷役の作業は緊張度が高いことがわかる。

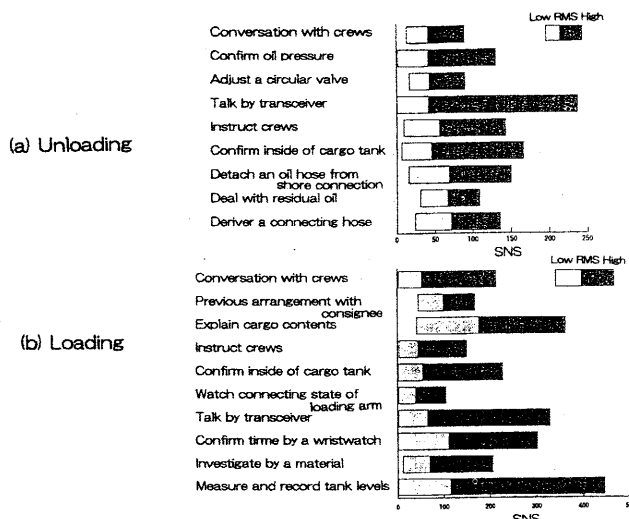


Fig.5 The relation between each task and tensional stress(RMS)

Fig.4 Mental stress based on heart rate variability during unloading and loading on Ship "A"

3.3 自動化システム搭載タンカー

(1) 計測対象船の荷役システム

荷役自動化システム¹⁾搭載の内航タンカー”B丸”(載重量 4999 トン)は 2001 年の新造船で貨油タンクが 5 列の左右舷タンクであり、荷役責任者は A 丸の C/O と同一人物である。この人を被検者として荷役時の心電図計測を行った。

この船は、荷役計画、荷役準備、荷役/バラスト操作、後始末および航海中のタンク洗浄、タンクヒーティング、荒天時の緊急バラスト調整等の通常の全荷役サイクルの支援を網羅した、Fig.2 に示すシステム機能構成の荷役自動化システムを搭載している。

このシステムの支援機能は、緻密な荷役計画とこの計画に沿った各荷役操作の遂行支援および計画に基づく荷役関連操作の進捗に対する阻害要因への効果的な対応にあり、1) 操作シナリオ策定・検証の自動化、2) シナリオに沿った荷役操作進捗の自動化、および 3) シナリオに沿った進捗への阻害要因への自動的な対処、または 4) オペレータへの告知・対処方法の提示等、の機能がもられている。

一方、システムを構成するハードウェアユニットの単体故障によるオペレータの混乱を防止して荷役の継続性を担保するために、システムハードウェア構成は、1) 貨物油タンク液面計、マニフォールド圧力計、喫水計、傾斜計等の重要センサー二重化あるいは 2) ソフト演算機能によるバックアップ処理により主系データ異常時の待機系データへの自動切替を実行し、また 3) 1 台でシステムの全機能を担保可能なホストコンピュータと CRT の 3 セットを二重化されたネットワークで統合し、高い稼働率を確保する。加えて、4) 船内電源喪失時におけるポンプ類の自動停止、弁類の現状ポジション維持機能を有し、さらに 5) UPS によるホストコンピュータ/CRT および貨物油タンク液面計の電源バックアップを可能とし、余計な混乱による事故の防止を図っている。

(2) 自動化システムの荷役作業

C/O (A 船と同一人物) は、主に荷役制御室 (CCR) で作業を行い、甲板上の作業員とトランシーバーにて指示・応答・確認を行っている。CRT に表示されたガイダンスを荷役責任者 (C/O) が確認していくことにより、荷役作業の制御が自動的に進捗する。ただし、C/O は荷役作業が定常段階に入ると任務を交代し、自室にて休息をとる。また、離岸時においては、パイプ・ホースの受け渡し作業等を他の作業員と共同で行っている。

(3) 作業過程における緊張度とタスク負荷

積荷役時の全荷役サイクル約 6 時間について C/O の心電図計測を行い、その SNS と PNS 値を主なイベント項目と合わせて Fig.6 に示す。なお、自動制御による荷役作業のために、荷役操作は機側手動が中心である A 丸の場合と作業内容

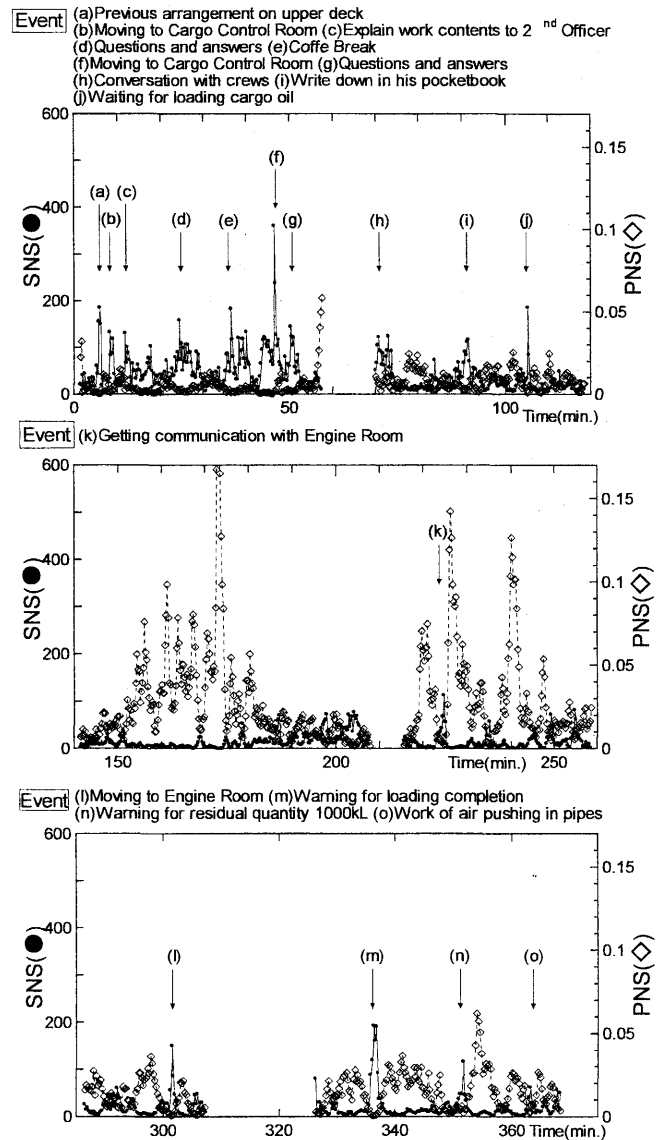


Fig.6 Mental stress based on heart rate variability during loading on Ship "B"

がかなり異なっている。

これらの SNS、PNS 値を比較したグラフより以下のことがわかった。

- 1) 積荷役時においては、デッキ上での打ち合わせ (Event (a)) やデッキから CCR への移動中 (Event (b)) に、SNS は高い値を示している。また荷役準備 (ホースの移動・接続を含む) (Event (a)) やスタッフ・ミーティング時 (Event (c), (d)) が高い SNS 値となっており、このことは揚荷役時と同じ傾向にある。自動化システムにより、荷役計画や事前準備支援が行われているために、機側手動での荷役ほど高緊張状態になることは少ないものの、荷役準備作業や作業員への情報伝達を行う際 (Event (c), (h)) の緊張度は機側手動でのタンカー荷役時と同じく比較的高い SNS 値を示している。
- 2) 荷役操作が安定した通液状態に入り、CCR 内だけで作業を進めることができる段階になると、緊張を感じることは少

なく、SNS 値から非常に安定した精神状態で作業を進めていることがわかる。ただし、積切直前等の重要な時点では、システムからの指示により緊張を喚起される (Event (m), (n)) ために、その都度 SNS は高い値となっている。

3) 計測結果によると、荷役サイクル全体に渡り SNS 値が非常に高くなることは稀であり、安定した緊張度で作業を行っていることがわかる。また、積み切り直前などの重要な操作段階では、システムからの状況報告や警告による注意の喚起により、低緊張状態で起こり易いミス防止に有効に働いていると考えられる。

以上より、自動荷役時におけるストレス要因は、機側手動の場合の要因から“油圧とタンク状態の確認”、“油種の説明”、“荷役弁の開閉”、“タンクレベルの計測”、“荷役手順の誤り”、“操作の遅れ”および“荷役手順書の信頼性”を除いたものと考えられ、自動化システムが作業支援をしたものとなっている。

4. 緊張低減に対する荷役自動化の必要項目と効果

4.1 荷役作業の緊張度比較

前述のように、機側手動方式と自動化システムでは荷役操作の作業内容がかなり異なっていて作業項目ごとの両者の比較が困難なため、積荷役時における着岸後から荷役準備、定常通液に至る 120 分間における 10 分ごとの平均 SNS 値を求め、Fig.7 に示す。10 分平均 SNS 値をみると、機側手動方式は最初の 10 分間は極めて SNS 値が高い。一方、自動化システムは 20 分から 60 分にかけて比較的高い値を示しているが、その後は低い値となっている。このことから、自動化システム方式では着岸後 1 時間内の船陸ミーティングを含む打ち合わせ荷役準備段階において、荷役責任者はある程度緊張感を持った状態にあることがわかる。

4.2 荷役自動化の緊張度低減への寄与

機側操作方式と自動化システムによる荷役作業において発生する緊張ストレスの比較により、荷役自動化システムがある程度緊張度の低減に寄与していることがわかる。さらに、

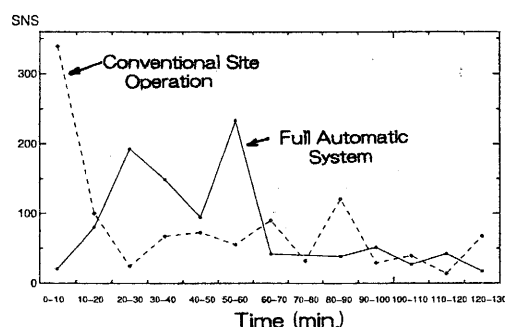


Fig.7 Tensional stress for each condition after getting to the shore (10 minutes average)

高い緊張から適度の緊張に近づくに従い人的過誤の生起確率が低下する傾向¹³⁾により、荷役自動化システムの採用は事故生起の頻度低下に繋がることが期待される。

この荷役自動化システムによる緊張度低減の効果は以下の事項より、荷役責任者や操作員の大幅な負担軽減から生じているものと考えられる。

- 1) 荷役計画時には、自己学習型荷役計画支援機能、計画内容の事前シミュレーションによる確認機能、および荷役準備段階の点検チェックリスト提供など
- 2) 荷役中では、積荷計画に基づく荷役制御、油面計による監視、システムによる監視・警報等の有効な作用
- 3) 荷役終了時には、状態確認機能の作動

ただし、Fig.7 から明らかなように、着岸後から荷役準備、定常通液に至る約 1 時間では比較的高い緊張度を示している。このことから、着岸後 1 時間内の船陸ミーティングを含む打ち合わせ荷役準備段階において、荷役責任者はある程度緊張感を持った状態にあり、自動化システムでは補完できない作業種に対する支援機器が必要である。

4.3 QFD による自動化項目の検討

品質機能展開 (Quality Function Deployment, QFD)¹⁴⁾は、本来、開発・設計の源流から始まる全てのプロセスで品質を確保する「新製品開発の品質保証(Quality Assurance, QA)」のための具体的方法を提供する手法である。ここでは QFD の手法に倣って、荷役自動化システムにおける自動化の効果を最大化するために、この手法を用いて自動化項目毎に重要度の推定を行うことにより、人間または機械への機能の配分を検討する。

(1) 展開要素の設定

最初に荷役支援システムについて展開する要素を決定する。ここでは、液体荷役における作業を展開要素として設定し、要素の項目毎に重要度の違いを合計 100 としたウェイトの配分で表し、要素とウェイトを Table1 に示す。なお、作業の心的負荷のウェイトに関しては、3.2 (4) “各作業におけるタスク負荷” で示したタスク毎の SNS の RSM (Fig.5) を参考にした。

(2) 被展開項目の抽出

次に(1)で設定した要素を展開する項目を決める。ここでは、荷役支援システムの自動化された機能を展開項目として選択し、Table1 に示す。それら展開項目の中で何が重要であるかを明らかにすることによって設計時の機能の適正配分に役立てることができる。

(3) 機能関係度表の作成

(1)、(2)で選択した展開要素で被展開項目で構成されるマトリクスを機能関係度表 (QFD では品質表に相当) と呼び、ユーザーの要求を技術要素に展開できる。Table1 に自動化シ

システムの品質表を示す。

機能関係度表では各要素と項目の対応関係をその強度に応じて次の記号で表す。

◎：強い対応関係がある。

○：対応関係がある。

△：対応関係が予想される。

次に展開要素のウェイトを項目へ対応関係に応じて分配するが、経験則に応じて、各記号の対応強度は◎：○：△＝1：3：5の値が一般的に用いられるので、ここでもこの比を用いた。分配された要素のウェイトは項目毎に合計され、項目のウェイトへ展開される。

自動化システムにおけるタスクのウェイト配分から自動化機能へ展開したものを Table1 および Fig.8 に示す。これらから、荷役自動化システムでは“安全操作点検”および“安全点検リスト処理”の作業の安全確認に関する2つの機能、“荷役計画処理”と“シミュレーション処理”の荷役作業前の計画段階の機能、さらには“通信制御(Communications and records)”に高いウェイトを置いて設計する必要があることがわかる。ただし、“通信制御”は自動化システムの機器間のネットワーク及び乗員間の伝達の二重化・冗長化を意味しており、安全性には特に関係がないが、自動化システムの基本機能である。

Table1 Functional relationship matrix of the automatic cargo handling system

Weight	Tasks	Functions																
		Cargo handling planning support	Safety check list service	Simulation by planned data	Automatic guidance control	Communications & records	Net volume calculation for custody transfer	Self-diagnosis and automatic back-up functions	Hull stress, stability and automatic volume calculation & alarms	Cargo condition monitoring & alarms	Gas free, tank cleaning & ballast heating control	Ballast & deballast control	Cargo discharging control	Cargo loading control	Safety warning & guidance	Manual remote control	Safety operation check	
5	Conversation with crews				△													1
5	Confirm oil pressure		◎					◎		◎	○		○	○	◎	○	△	33
5	Adjust a circular valve		○															3
5	Talk by transceiver				○													3
3	Instruct crews	△	○		◎	○						○						15
3	Confirm inside of cargo tank		◎		○		◎	○	◎	◎	○		○	○	◎	○		43
8	Detach an oil hose from shore connection		△		△										○		○	8
8	Deal with residual oil															○		3
8	Deriver a connecting hose		○		△											○		7
8	Previous arrangement with consignee	◎		◎		○												13
14	Explain cargo contents	◎		◎														10
3	Watch connecting state of loading arm		○						◎						△		○	12
10	Confirm time by a wristwatch				○		◎	△	○			○	○	○	○			24
5	Investigate by a material	○	○							◎		○	○	○	◎	○	△	11
10	Measure and record tank		◎		◎		◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	◎	○		51
100	Total	11.6	14.2	10.1	5.6	10.6	5.3	2.4	2.6	3.3	3.5	2.4	2.5	2.5	6.6	1.3	15.5	

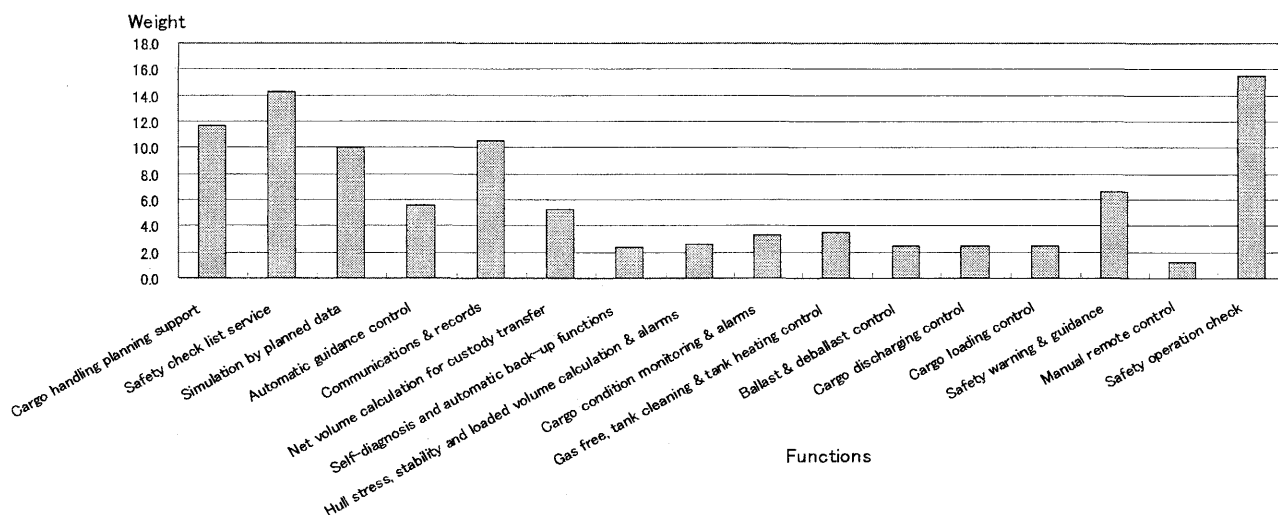


Fig.8 Functional weight of the automatic cargo handling system

5. 荷役システムの安全性評価

5.1 信頼性評価法

(1) 漏油事故に関する FTA

ここでは漏油・混油事故を例として、a) 荷役操作を機側手動操作で行う従来型荷役、b) 遠隔操作・集中監視(リモコン)方式を採用した荷役、および c) 荷役自動化システムによる荷役の場合について、Fault Tree 解析(FTA)を用いた荷役作業の定量的な信頼性評価を行う。

ただし、信頼性解析はその問題に対する認知の度合いにより、問題の意味合いが異なることがある¹⁵⁾。特に FTA では、Fault Tree(FT)は解析者の経験や勘に依存することがあり、また事故解析データの累積が少ない場合には基本事象の生起確率として頻度確率を用いることができないために、類似データを用いるなどの仮定が含まれることになる。従って、以下に示す評価結果は後述の幾つかの仮定が成り立つ場合に

限られる。

FTA では頂上事象を解析対象とし、事故の要因となる独立した因子を選んで基本事象として、各基本事象から頂上事象に到るまでの因果関係を And 結合（論理積）と OR 結合（論理和）で結んだ階層構造 Fault Tree により表し、頂上事象の生起確率 x_i を論理演算の AND 結合と OR 結合を次の四則演算に変換して計算する¹¹⁾。

$$\begin{aligned} x_i \bullet x_j &= x_i x_j \\ x_i \vee x_j &= 1 - (1 - x_i)(1 - x_j) \end{aligned} \quad (1)$$

荷役作業の安全性阻害要因を①知覚、②判断、③操作のカテゴリーに分け示すと Table2 のようになる。この表により、例えば「識別」に対して 1) 慣れによる一点集中、2) 慣れていることへの短縮、3) 慣れによるやり損ない等、また「入力情報の処理」項に対しては“情報を探索・受理しない”等に対し、液体荷役作業遂行上で生起すると考えられる相当不具合例を具体的に逆想定することになる。

Table2 Expected example of typical human error factors through the operation of cargo handling system

	I) Perception	II) Judgement	III) Operation
1. Recognition	(1) fixation: (T1)	(2) short-cut: (A1), (A2), (A3), (A4), (B1), (C1), (C20), (C22), (D2), (E1), (E2), (E3), (E4), (F1), (F3), (F5), (F10), (C12), (H1), (L1), (L2), (L3) (3) stereo-type takeover: (T2) (4) overlook of repeated pattern: (T3)	
2. Dealing with input information	(1) not scrutinized or not received: (C1), (C6), (C12), (F2)	(2) misunderstand: (B6), (C4), (C8), (C10), (C13), (C14), (C15), (F5), (F10), (G1), (G6), (G7), (G8), (L1) (3) misjudge caused by hypothesis: (T4)	
3. Memory/Detection	(1) oblivion of isolated work or function: (T5), (B2), (B5), (D1), (D3), (F4), (F7), (F8), (L4) (2) illegal memory selection: (C15), (C20), (D2), (I1) (3) no acknowledge or neglect of alarms and/or guidance: (C2), (C3), (C11), (D13)		
..	..	..	..
8. External circumstances	(1) confusion caused by system or equipment: (C2), (C3), (C5), (C9), (C11), (C16), (C17), (C18), (C19) (2) confusion caused by another personnel: (T11) (3) confusion caused by external circumstances: (D19), (T12)		(4) confusion caused by fluctuation of vessel: (T2)
..	..	..	..
17. Work characteristics	(1) continuous physical stress for operator: (Y0) (2) judge and action according to complicated conditions: (A2), (A3), (A4), (B1), (C12), (D2) (3) situations with difficulty of acknowledge under-goings and/or expectation: (B3), (C6), (C8), (C10) (4) little self-controllability and stability: (T19), (T20) (5) Confusing signal scrutinizing and detection: (T21), (T22)		(6) work without answer-back: (C12), (C21), (H1), (L2) (7) cooperative work a) works among plural operators: (Y3) b) manual operation for separated operation panels: (Nep3) c) stereo-type work sharing: (Y3)

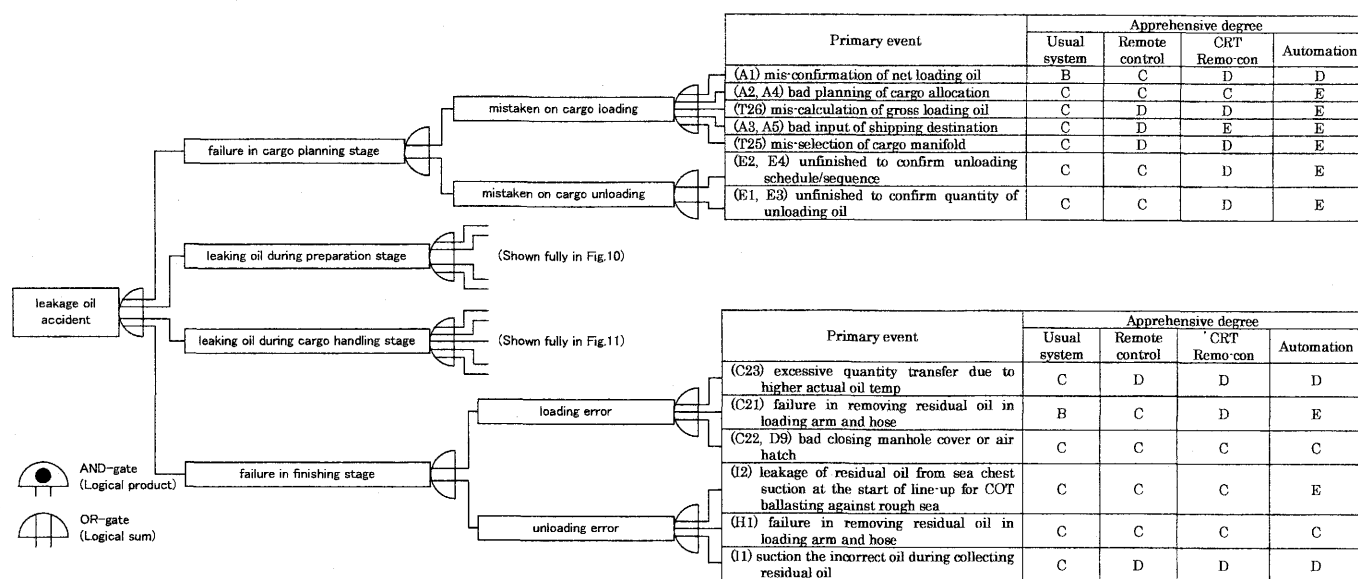


Fig.9 Fault tree on oil leakage or mixing accident through whole cargo handling stage

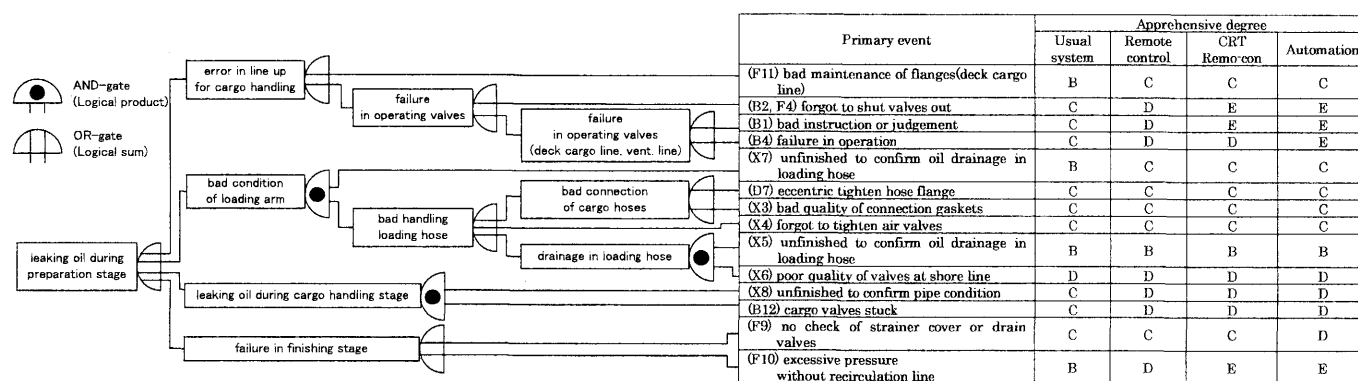


Fig.10 Fault tree on oil leakage or mixing accident during preparation stage

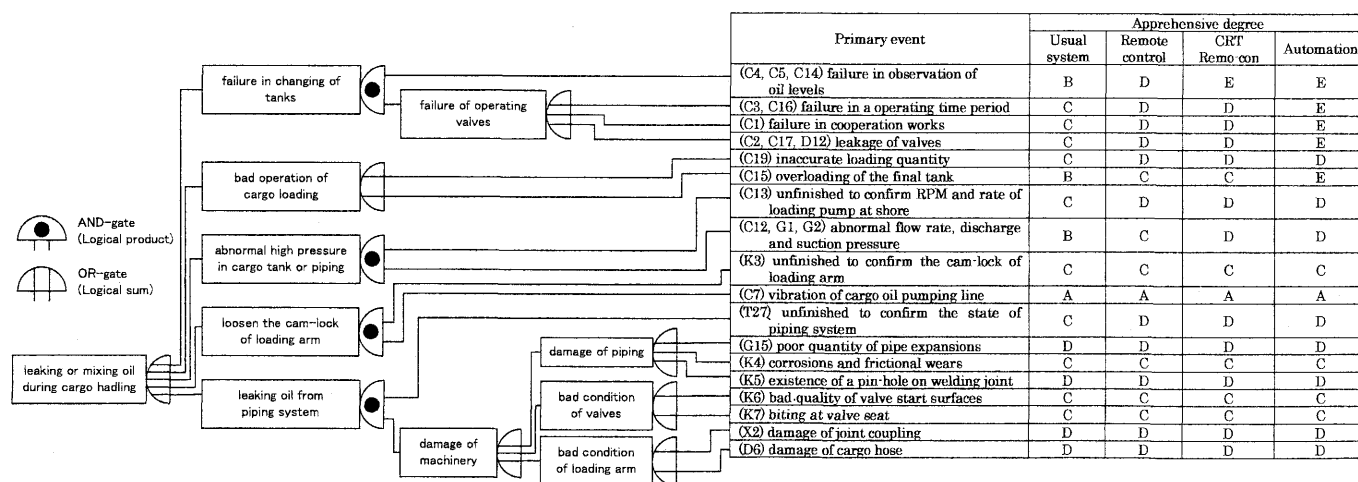


Fig.11 Fault tree on oil leakage or mixing accident during cargo handling stage

荷役に関わる漏油等の事故は、a) 荷役計画時、b) 荷役準備作業、c) 荷役（揚油・積油）作業、d) 荷役終了（後仕舞）作業の各作業段階において起因する¹⁶⁾。荷役作業全体の事故に関する Fault Tree (FT)を Fig.9 に示し、さらに荷役準備作業と荷役中の作業における FT を Fig.10 および Fig.11 に示す。これらには Table1 に記載された荷役時の人的過誤要因のコードを付して示し、基本事象（事故の素要因）と頂上事象（事故）との定性的な因果関係を整理している。

これらの Fault Treeにおける基本事象の生起確率が把握できれば、既約化による論理演算の重複を排除した FT の構造関数から頂上事象の生起確率が推定できる。しかし、基本事象が人的過誤などの人的要因を基にする場合には基本事象が完全には独立でない事象が含まれ、さらに人的因子のため発生確率の幅がきわめて大きい事象や極めて稀に生起する事象など生起確率の算定が極めて難しい場合が多い。また、事故に繋がる基本事象の発生を頻度確率として扱えるほどデータの累積が無いために、ここでは船舶の運用者などに対するインタビューなどから得た事故生起の危惧に対する感覚的尺度（以降“危惧度”と呼ぶ）を頻度確率の代わりに用いる。なお、危惧度は事象生起の確信度を意味する。

(2) 感覚尺度——危惧度

前述のごとく、基本事象の生起確率には頻度確率が把握されていればその確率を用いる方が望ましいが、値が明らかでないことが多いために、文献¹²⁾より類似作業の過誤生起確率を参考にしたり、または荷役実務者および運航管理者の経験に基づく推定値¹⁷⁾を参考するなどの日常の業務や経験などから感覚的に、基本事象の危惧度を推定した。

なお、危惧度には事象の頻度を感覚的に表す言語変数を用いた。危惧感 Weber-Fechner の感覚法則に従うものと考え、ここでは生起確率の対数値により危惧度を関係付けている。これは、文献¹⁸⁾に示された過誤に係わる基本事象約 100 件について各々の生起確率の[下限][中央値][上限]をグループ化すると、ほぼ Fig.12 のように 8 段階（事象が「極よく起こる」：ランク X、「よく起こる」：ランク A、「たまに起こる」：ランク B、「まれに起こる」：ランク C、「極まれに起こる」：ランク D、「殆ど起らない」：ランク E）に分

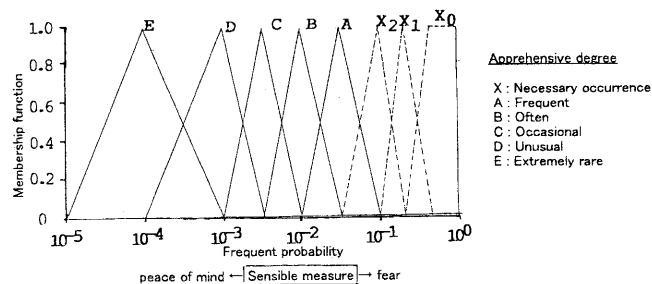


Fig.12 Linguistic variable as apprehensive degree for incidence probability

けて表すことができる。ここでは安全性評価のための危惧度のランク分けとしてこれを使用できるものと仮定した。

具体的には、類似作業の過誤生起確率より文献^{11), 12)}より類推したり、3 船社 3 人のベテラン荷役作業当事者に過誤の度合いを申告させ、これにより危惧度を推定した。例えば、申告が「年に一度位は起こる」であれば、内航タンカーは一般に年 100 航海程度であることを踏まえ、あいまい幅を見込んで $0.3 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$ 回/隻(運用)/年と見なして、B ランクとする。

一方、以上で述べた各安全性向上のための対策を対象システムで実施することを前提に、a) 従来型の機側操作方式、b) 遠隔操作(リモコン)方式、c) 集中監視(CRT リモコン)方式および d) 荷役自動化システムを採用した場合の各危惧度を Fig.9 (荷役全体)、Fig.10 (準備中) および Fig.11 (荷役中) に示すように推定する。なお b)、c) は船主から要望がある機側操作と自動化システムの中間的な方式であり、安全性の相対距離を判定するために加えた。

例えば、「C4、C5、C14.油面監視」では従来のサウンディングから液面計による監視に変わったために、危惧度はリモコン方式では 2 ランク改善され、自動化により多段階警報や積切制御機能を評価して 3 ランク改善されるものとしている。また「K4.配管系の腐食・磨耗」等の設備本体に関する項目については、実際は適用材質の変更等設備側で対策されているが、実質的に自動化が寄与する改善に当たらないため、危惧度の改善は“なし”とした。更に「C2、C17、D12・・・弁リーク」についても、リモコン方式では 1 ランク改善され、自動化による操作ミスの低減を評価して自動化により 2 ランク改善とした。同様に、“荷役計画時”、“準備作業時”および“荷役終了時”における従来作業と自動化後の各基本事象の危惧度を Fig.9、10、11 のように定めた。

前述の QFD によると重要度が大変高く、設計時に特に考慮すべき機能である、“安全操作点検”、“安全点検リスト処理”および“荷役計画処理”、さらに“シミュレーション処理”に関連する危惧度が大きく改善されていることが Fig.9、10、11 からわかる。例えば、“安全操作点検”に該当する「B2、F4：バルブ閉め忘れ」では 2 ランク、「C4、C5、C14.油面監視」では 3 ランク改善されている。

これらは、各自動化項目について達成可能な目標を設定し、それを完全に達成した場合におけるランクアップである。

(3) 直積集合による生起確率の推定^{11), 19)}

基本事象の生起確率を x_i とし、生起の状態を 1 または 0 とすると、FT より頂上事象の生起の状態は、 x_i を論理式により結合した構造関数 $\phi(x)$ により表わすことができる。例えば、Fig.9 中の“タンク切替え失敗”を頂上事象とする構造関数は次式となる。

$$\phi(x) = x_1 \bullet (x_2 \vee x_3 \vee x_4) \quad (2)$$

ここに、記号“ $\bullet$ ”はAND結合を表し、記号“ $\vee$ ”はOR結合を表す。したがって、構造関数 $\phi(x)$ の値が1か0により、頂上事象の生起の状態が分かる。

構造関数から頂上事象の生起確率を計算する過程では、重複した基本事象の影響を除くために、構造関数を同定法則 $x_i \bullet x_i = x_i$, $x_i \vee x_i = x_i$ および吸収法則 $x_i \vee x_i \bullet x_j = x_i$, $x_i \bullet (x_i \vee x_j) = x_i$ を適用して既約化し、頂上事象に寄与しない事象を排除する必要がある¹¹⁾。

危惧度があいまい量であるため、危惧度により頂上事象の生起確率を推定するには次の方法を用いる。

n 個の基本事象 x_i に対し危惧度を a_i とすると、直積集合 D およびそのメンバーシップ関数 μ_D を定義する。

$$D = a_1 \times a_2 \times \cdots \times a_n \quad (3)$$

$$\mu_D = \mu_{a_1 \times a_2 \times \cdots \times a_n} = \mu_{a_1} \wedge \mu_{a_2} \wedge \cdots \wedge \mu_{a_n} \quad (4)$$

ただし、 $\wedge$ は minimum をとるものとし、以降記号 $\sim$ はあいまい量を意味する。

ここで、各基本事象の危惧度を危惧度ベクトル $\underline{a}$ として $\underline{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ のように置く。FTの構造関数を $\phi(x)$ とし、これに $\underline{a}$ を代入し、直積集合 D 内で既約化し重複を排除すると、頂上事象のメンバーシップ関数 $\mu_{\phi(a)}$ が計算できる。なお、計算に際しては $\underline{a}$ を α -cut により離散化する。

5.2 自動化による安全性向上

「荷役計画時」、「荷役準備時」、「荷役作業中」および「荷役終了時」の各荷役段階における漏油等の事故（頂上事象）について、前項 5.1.1～5.1.3 で述べた危惧度を用いた解析法 FTA により求め、生起確率をメンバーシップ関数で表した結果を Fig.13 に示す。これには、(i) 従来の機側操作方式、(ii) ハードワイヤーロジックによる盤方式（盤リモコン方式）、(iii) コンピュータライズした CRT 方式（CRT リモコン方式）および (iv) 自動化システムの4種類における事故発生確率の計算結果を比較して記載している。

事故の生起確率は従来の機側操作方式に比べ、各作業段階において、盤リモコン方式では生起確率が 1/1.6～1/2.1 程度、また CRT リモコン方式では 1/2.2～1/5.8 程度に改善されている。これに対し、自動化システムを搭載した場合には機側操作方式に比べ、「荷役計画時」において約 1/18、「準備作業時」において約 1/3、「荷役中」では約 1/32、および「荷役終了時」に約 1/17 と大幅に改善される。全作業時間の中で大部分を占める「荷役作業中」の段階で生起確率が大幅に改善される。

特に、自動化システムでは、「荷役計画時」には荷役計

画支援、事前シミュレーション等の機能充実により、また「荷役中」では積荷計画に基づく荷役制御、油面計による監視、システムによる監視・警報等が有効に作用し、さらに「荷役終了時」には状態確認機能の作動により、大幅な改善度合いが見られるのが特徴的である。特に、i) 荷役自動化システムの自己学習型荷役計画支援機能、ii) 計画内容の事前シミュレーションによる確認機能、および iii) 荷役準備段階の点検チェックリスト提供、等の直接的な荷役操作のみならず、荷役関連業務を含む船舶荷役サイクル全般の支援を目的と

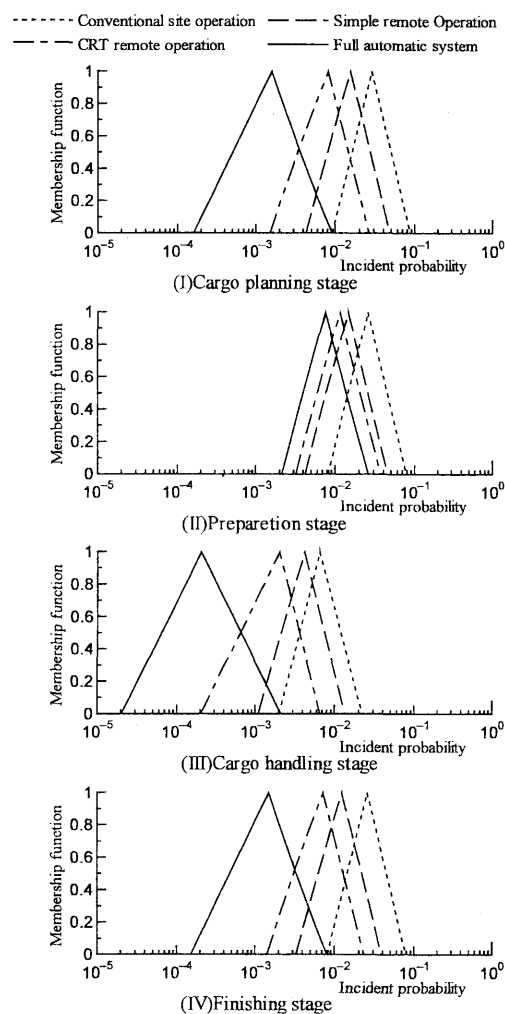


Fig.13 Membership functions of incidence probability at each cargo handling stage

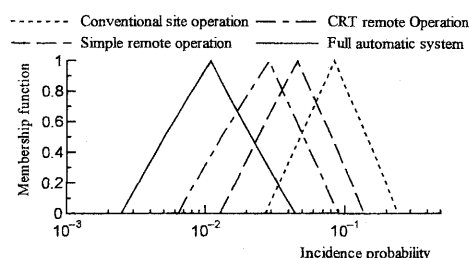


Fig.14 Membership functions of incidence probability of the whole cargo handling stage

したシステム機能基本設計の成果が数値として現れたものと言える。

さらに、以上各荷役作業段階のデータを重畳し、荷役業務全体における漏油事故の生起確率を計算して Fig.14 に示すが、機側操作方式に比べ盤リモコン方式では約 1/2、CRT リモコン方式では約 1/3.3 に改善され、自動化システムの場合には従来方式に比べ約 1/8 に減少するものと推定される。荷役業務全体では自動化システムによる改善が少ないのは、自動化が困難な作業項目が多い「準備作業時」を含むことに原因し、これらが荷役機能の安全性・信頼性向上のボトルネックとなっている。

一方、自動化システムでは「荷役準備時」を除く「荷役作業中」、「荷役計画時」、「荷役終了時」の作業段階では生起確率の改善の結果、生起確率の上限・下限の幅が他方式より広がり、荷役自動化のシステム構成内容により改善度が異なることを表している。このことから、荷役自動化システムの構成要因の適合性と機能配分の最適性が問題視されることになる。よって、前述の QFD を利用した設計段階における機能項目の重要度の推定が機能配分の最適化に必要であり、重要度の高い項目は自動化システムでは危惧度が改善されている。

6. 結言

内航タンカーにおいて機側手動方式による荷役と自動化システムを用いた荷役の場合について、荷役操作責任者の心電図計測を行い、そのスペクトル解析により各作業段階における緊張ストレスの発生状態を調べた。また SNS グラフの評価・比較のために同じ感覚的尺度をもつ騒音評価の手法を導入して荷役作業全体のタスク負荷の比較を行った。これらにより、緊張ストレスの高い作業項目を把握し、緊張緩和と荷役支援のための自動化の効果および事故防止面からの自動荷役システムのあり方について考察した。

さらに、荷役自動化システムの装備に伴う安全性改善の程度を調べるために、荷役作業中の漏油事故を例に、感覚尺度としての危惧度を用いた Fault Tree 解析により安全性を定量的に評価した。これにより、自動化システムを搭載した場合には荷役作業の信頼性・安全性は大幅に改善され、特に、荷役自動化システム荷役計画支援機能、計画内容の事前シミュレーションによる確認機能、荷役準備段階の点検チェックリスト提供等が効果的であることが分かった。

これらの結果を基に、システムの人間・機械の機能配分にさらに改善を加えることにより、本研究がタンカー液体荷役の安全性・信頼性確保のためにより効果的な荷役自動化支援システム設計に大きく寄与するものと期待できる。なお、シ

ステムの機能配分には QFD を利用した機能項目の重要度の推定が必要であると考えられる。

本研究にあたり、実船計測の実施にご協力いただきました日本タンカー(株)の関係各位に感謝の意を表すと共に厚くお礼申しあげます。

参考文献

- 1) 古賀幹生、福地信義：船舶の液体荷役の安全性と自動化システムに関する研究、(その1) 荷役制御、西部造船会会報、第103号、pp.77-89,(2002)
- 2) 全国内航タンカー海運組合：内航タンカー安全指針、成山堂、(1998)
- 3) 古賀幹生、福地信義：船舶の液体荷役の安全性と自動化システムに関する研究、(その2) 荷役作業の安全・信頼性、西部造船会会報、第104号、pp.201-213,(2002)
- 4) 福地信義、篠田岳思、村田理：航海支援システムのための緊張ストレス計測とタスク分析、西部造船会、第103号、pp.91-100,(2002)
- 5) 福地、篠田、小野：緊張ストレス環境における海洋事故の状態遷移と安全性評価(その1) 緊張ストレスと心拍変動、日本造船学会論文集、第188号、pp.465-478,(2000)
- 6) 林弘明、仙田晶一：心拍変動データによる操船者の知的負担の研究、第98号、pp.247-254,(1997)
- 7) Yamamoto Y., Hughton R.L.: Coarse-graining spectral analysis; New method for studying heart rate variability, J.App.Physiological, Vol.71, pp.1143-1150,(1991)
- 8) Yamamoto Y., Hughton R.L.: Extracting fractal components from time series, Physical-science D, Vol.68, pp.250-264,(1993)
- 9) 宮田洋(監修)：生理心理学の基礎、新生理心理学, 1巻, 北大路書房, (1998)
- 10) Akselrod, S. et al.: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation; A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control, Science, Vol.213, pp.220-222,(1981)
- 11) 林芳男：人間信頼性工学、海文堂出版、(1984)
- 12) A.D.Swain, H.E.Guttman: Handbook of Human-reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, U. S. Nuclear Regulatory Commission, (1983)
- 13) Rasmussen, J; Classification System for Reporting Events Involving Human Multifunction, Riso-M-2240, (1981)
- 14) 大藤正、小野道照、赤尾洋二：品質展開法(1),(2)、日科技連、(1990,1994)
- 15) 福地信義：船舶に係わる信頼性解析の信頼性(その1) 海洋事故のツリー型分析を中心として、日本造船学会誌、第875号、pp.342-349、(2004)
- 16) 福地、下野、古賀、篠田：船舶の近代化における安全性・信頼性確保のための安全論とシステム設計、西部造船会会報、第99号、pp.365-378,(2000)
- 17) 全国内航タンカー近代化船システム共同研究報告書、(1995)
- 18) 村山雄二郎：内航タンカー近代化船・荷役自動化システム共同研究資料、(1994)
- 19) 篠田、福地：ヒューマンエラーを考慮した機能システムの信頼性評価(その1) 事故の生起確率の推定法、日本造船学会論文集、第176号、pp.603-637,(1994)