

安全運航のための計測・制御

長谷川 和 彦*

*大阪大学大学院 工学研究科 大阪府吹田市山田丘 2-1
*Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadagaoka, Suita, Osaka, Japan
E-mail: hase@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

キーワード：安全運航 (safety navigation), 航海援助処置 (navigational aids), 衝突防止 (collision avoidance), 自動離着岸 (automatic berthing/deberthing), シーマシンシップ (seamachine-ship)

JL 0011/98/3711-0762 © 1998 SICE

1. はじめに

1997 年 1 月 2 日, 正月気分が続くなか, ナホトカ号事故が日本海で起こった。日本では新潟港外でのタンカーの座礁事故 (1971 年), 水島港での重油タンクの破損による大量油流出事故 (1974 年) 以来の大量油流出事故であった。ナホトカ号事故は日本の領海外で起こった事故であること, 悪天候の中従来方式の油回収船がほとんど役立たなかったこと, 大量のボランティアが動員されたことなど新たな問題を提起した事故でもあった。

その事故からちょうど半年後の 1997 年 7 月 2 日, 今度は東京湾で 147,000 トンのタンカー「ダイヤモンド・グレース」が座礁し, 大量の重油が流出, 一時は流出量が 15,000 キロリットルと報道され, われわれがもっとも恐れていたことが起こったかと, 一瞬血の気が引いた。実際の流出量はその 10 分の 1 であったが, 一時は周辺に異臭が立ちこめ, 気分の悪くなった小学生もいた。

この事故はナホトカ号事故の直後であったこと, しかも東京湾で起こったことからやはり社会的に大きな問題となったが, 時間の経過とともにほとんどの人の記憶から消えつつある。しかし, 船舶の安全運航に少なからず携わっているものとしては非常に教訓的な事故であった。しかもナホトカ号が老朽化した船体の波浪による損傷 (日本側事故調査委員会の結論) という, いわば起こるべくして起こった事故とは対照的に, 世界的にも屈指の船会社が保有する最新 (とはいっても最近義務づけられている二重船殻船になる前の最後の) 船であり, 優秀な船長以下乗組員と東京湾を知り尽くしたパイロットが乗船中, とあっては, いったい, 何が原因か。

東京湾は 1 日に 700 隻 (うちタンカーが 120 隻, 1995 年調べ) の船舶が航行する世界でも有数の超過密航路である。もし, 今回のような事故が不可抗力で起こるとしたらそれは航路そのものの欠陥なのか, 船舶に装備する種々の安全運航装置で防ぐことができるのか, さらに乗組員の再教育が必要なのか, 運輸省を始め, 海上保安庁, 船会社を中心に対策が検討されている。

本稿はこうした背景の船舶の運航に対して, 制御技術および計測技術がどのように貢献できるかを紹介するものである。しかし, もっとも大事なものは単にその制御結果や計

測精度ではなく, 安全に対して最終的な責任を負う人間にいかにもミスを起こさせない技術であるかを自問することであり, いわば制御計測技術者に与えられた社会的責務として他の応用分野にも共通することである。

2. 船舶の運航上の特徴

制御の基本はまず制御対象を知ることである。一般の読者には, あまりなじみのない船舶の特徴を運動, 機能, 交通管制そして航行環境の観点からまず紹介する¹⁾。

2.1 運動性能の特徴

船舶は重量が大きく, したがって慣性力や運動の時定数が大き。タンカーなどはその経済効率上, 肥大船となり, 旋回方向に対してもともと安定性が悪く, 限界安定か不安定であることも多い (水を入れた洗面器を水面に浮かべ指で押すことを想起すればよい)。また, 船舶を旋回させる目的の舵はプロペラ後流による揚力を利用しているので停止時でもプロペラ後流が大きいときはよく効くが反対に減速中は効きにくい。まして, 後進中はほとんど効かない。

減速は通常プロペラ回転のギアダウンにより行うが緊急時などで逆転停止を行うと, 船体が横滑りして方向制御が効かない (スキーやアイスバーン状態の自動車を想起すればよい)。

最後に, ビルや家と同じ単品生産品であり, 同時連続建造でもない限り同じ運動性能のものはない。

2.2 機能面の特徴

船舶には方向指示器などの近代的意志表示装置がない。したがって, 相手船の運動意志 (特に旋回) を確認するのは相手船の動きであり, 目視とレーダによる。さらに, 能動的ブレーキもない。特に大型船では, 速力の変更には時間がかかるので, あらかじめ, 決められた航海計画に沿った減速以外は実質的に速度の変更は急にはできない。

船舶を操縦するブリッジ (船橋, 操舵室ともいう) は船の船尾にあることが多く, 死角が大きい。また, 接岸時などの確認のため, 船幅一杯に広がっており, 操船者はブリッジ内を移動する。

実際の操船は, 船長または航海士が操船命令を出し, 操舵手および機関士が舵やエンジンを操作する。なお, 狭水路などパイロット (水先案内人) 乗船中は船長に代わりパイロットが指揮をとる。

2.3 交通管制面からの特徴

船舶は平面交通である。自動車や飛行機との大きな違いはここである。したがって、立体交差ができず、交通容量に限界がある。また、原則として右側通行であるが、航路が指定されている海域はごくわずかである。さらに航路が交差する場所でも信号はない。まわりを航行する船舶のようすを見ながら通過するタイミングを調整するしかない。

最後に東京湾などの幅狭（ふくそう）海域では海上交通センターがあるが、大型船に通報の義務があるだけであり、航行に対する情報提供と勧告は行いが管制の権限はない。

2.4 航行環境面からの特徴

東京湾、大阪湾、瀬戸内海などの過密海域では、大型タンカーやLNG/LPG船などの危険物運搬船と漁労船、プレジャーボートが混在している（高速道路を走るブレーキの壊れたダンプカーと畑を耕すトラクター、公園を走る三輪車が混在していると思えばよい）。

また、内海や港湾域では風や潮流の影響、外海では風浪の影響が大きい。

3. 安全運航を支える航行援助装置

3.1 オートパイロット²⁾

上で述べた特徴以外に船舶の自動化が古くから進んだ理由がある。それはその航海時間である。ジェット機はどんなに長くても1日以下であるが船舶は北米航路でも1週間、ヨーロッパ航路では3週間にわたることがある。この点は陸上のプラントと同じで長時間の労働から人間を開放するために自動化が行われたのはごく自然の成り行きである。1920年にはすでに船舶用のオートパイロットが開発されている。フィードバック制御を多数の番車で実現した代物で当時は画期的な発明である。

その後のオートパイロットは電氣的機構に変わったもののフィードバック制御が基本であることには変わりなく、ただ天候調整機構と呼ばれる一種の外乱除去にかなりの改良が加えられた。しかし、その機構はシステムに遅れを伴う非線形要素であったため、1960年代に顕著となったタンカーの大型化の過程で系を不安定化させる問題が起こった。1970年代に入るとエネルギーショックを契機に燃費向上の要求が強くなり、ちょうど現代制御理論や適応制御理論が実用化に向けてさまざまな分野で適応されはじめていたのであつという間にオートパイロットの世界に浸透していった。

その後はほとんど進展なく、現在に至っているが、むしろ、統合操船システムの一部として組み込まれつつある。しかし、オートパイロット単体の問題はなんら変わらず現在でも搭載した個々の船舶にもっともあった係数のチューニングや航行する海域に応じた外乱除去が重要な課題である。

さらに運用上の問題として、大洋航行中はもとより瀬戸

内海などの狭水路においてオートパイロットをセットしたままブリッジで十分な見張りをしていない不良船が相当あり、そうした船との衝突事故があとをたたない。周りの船が避けてくれるだろうという甘さ、あるいは船員不足から他の作業に取りかかざるをえないなどといった事情があるうが、自動制御技術を冒涇した行為である。反対にそうした自動制御装置を作るものとしては設計者の意図しない使われ方をされることを十分予測しなければいけない。

3.2 レーダ

いうまでもなく、レーダは夜間や悪天候時にはなくてはならない航海援助装置である。現在、レーダを装備していない船はほとんどない。

レーダは相手船の数や位置を確認するだけでなく、レーダプロットイングと呼ばれる作業（適当な時間間隔ごとにブラウン管上で相手船の位置にマークをつけることにより各船の相対速力と方位がわかる）により衝突の恐れを知ることができる。反面、海面反射や最近では航路上を横断する橋梁などに反射してできる偽像などの問題もある。さらに、もともと狭水路などでは島影から出てくる対航船が検知できない、ヨットなどのFRP（ガラス繊維強化プラスチック）製の小型船が認識できない（レーダリフレクタの義務装備が検討されている）、高速艇などで重大な運航障害となる流木やビニールシートが見つけれにくいなどの問題もあり、暗視カメラやレーザを利用したレーダなどの導入も検討されている。

3.3 ARPA

ARPAとはAutomatic Radar Plotting Aidsすなわち、レーダの項で述べたレーダプロットイングを自動的に複数の相手船(Target)に対して行う装置で、あいつぐタンカー事故を契機に、1981年1万トン以上の全船舶に装備が義務づけられた。いままで、マーカーで人間が行っていた作業を自動的に行ってくれるわけであり、航行の安全に寄与するところが大きい。しかし、その利用実態を見ると³⁾、過密航路では警報が鳴りっぱなしで結局警報を鳴らさないようにしているなど、その問題点も多い。

3.4 ECDIS⁴⁾

ECDISとはElectronic Chart Display and Information Systemの略であり、日本語では電子チャートまたは電子海図装置と略される。本来はチャートテーブルにおいたチャート上にレーダやコンパスなどにより測距した現在位置を記入しながらつぎのコースなどを決めていた作業がブラウン管上でできるため非常に有用と考えられている。しかし、現在はその標準化の作業中であり、チャートの代用としては認められているもののやはり将来的にはレーダやARPAとの一体化が望まれる。もっともレーダやARPAが自船を中心とした相対表示であるのに対してECDISは絶対表示であり、切り替えなどの工夫が必要であろう。

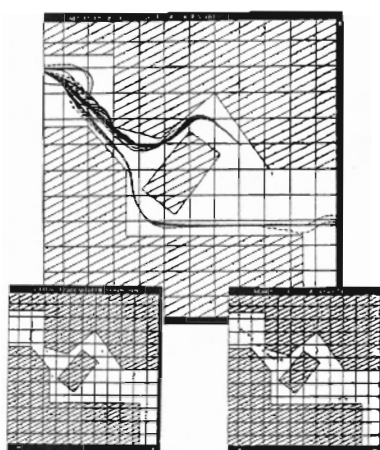


図4 海上交通流シミュレーションによる航路計画の安全性アセスメントの一例¹³⁾

代替案の分離通航方式を評価したもの。上の図は5時間後の全航跡、左下の図が現時点での全船舶の位置、右下の図はニアミスや座礁など事故に結びつく危険状態になった箇所を示す。現状航路との比較をすることにより航路の定量的評価ができる

さらに、こうした過程で開発された自動航行のシミュレーションシステムの応用分野として航行安全アセスメントのための海上交通流シミュレーションシステム¹³⁾やインテリジェント操船シミュレータ¹⁴⁾などの提案もなされている。図4は航路計画を代替案との比較により評価した結果の一例¹³⁾である。

4.2 自動離着岸

飛行機や自動車と同様、船舶の運航の中で船長がもっとも緊張する場面が離着岸である。しかし、飛行機ではほとんどフィードフォワード的、いいかえたら手続き的、また、自動車では危なければいったん止まればよいのと比べて、船舶では事態はより複雑である。冒頭で述べたように低速航行時、運動の加速度は小さいが慣性力は大きく、また、方向は不安定であり、相対的に外乱の影響を受けやすい。最後は数 cm/秒といった精度で着岸しないと船体もしくは岸壁の緩衝材を破損する。大型船などではとうてい自力で巨大な慣性力を制御することは不可能で、適当な場所で微速くらいまで減速した後、数隻のタグボートを使う。船長はブリッジから船幅一杯に張り出したウィングと呼ばれる場所に移り、棧橋との接岸速度を見ながらトランシーバで個々のタグボートに指示をして巧みに着岸させるが、その様はまさに神業である。ただし、人間の記憶には限界があり、特に緊張した場面で往々にして自分が過去に発令した命令を忘れてしまい、それを潮流や風の影響と誤認して別のタグボートに反対の指令を出す、といったミスも報告されており¹⁵⁾、その支援ないし自動化が望まれている。また、カーフェリーなどではバウ（船首）スラスターやスタン（船尾）スラストと呼ばれる船の横方向に軸のある補助推進器を装備していることが多く、この場合、船長はリモコンでそれらを自ら操作しながら離着岸する。特に

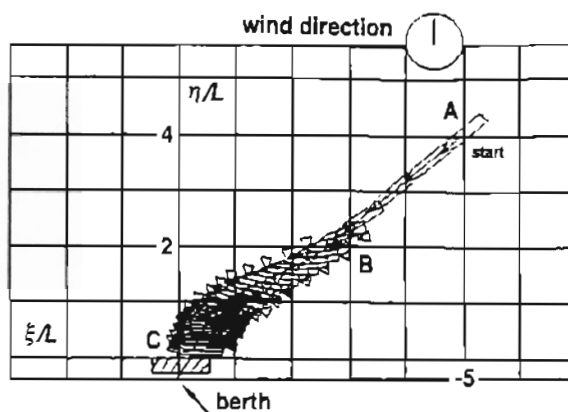


図5 ニューラルネットワークによるタグボートを用いた自動着岸シミュレーションの例²⁰⁾

風速 3 m/s, 風向北, A 点よりスタートし, B 点でタグボートがつき, C 点で着岸している。図中, △は船首右舷側のタグボートで押し, ▲は船尾側のタグボートで引きを表わす

減速¹⁶⁾は舵効きが悪いので風や潮流を考慮しながら着岸地点の前に仮想の目標を設け、そこまではほぼフィードフォワード的に減速しながら舵をうまく操作してもっていき、そこからは主にスラストを利用して着岸する。一般に離岸の場合の方が操船はいくぶん楽なようである。

こうした運航の最難関にも自動化の試みがすでにいくつある^{17), 18)}。

フィードバック・フィードフォワード併用方式^{17), 18)}

最適制御方式^{19), 20)}

予見ファジィ制御方式²¹⁾

ニューロネットワーク方式^{22), 23)}

知識ベース方式²⁴⁾

いずれの方式にも一長一短があるが、やはり、決め手は地形的制約のある海域で使えること、外乱の影響に強いこと、できれば船長の経験、知識などの知識の蓄積が可能であることではないだろうか。最後にタグボートを利用したニューラルネットワークを用いた自動着岸シミュレーションの例を図5にあげる²⁵⁾。

さらに、考慮すべき問題は制御力の確保、正確な位置情報の収集である。制御力に関しては上述したように大型船ではタグボート、小型船ではスラストであるが、内航船やフェリーを中心に港内操船に向けた新しい形式の推進器や操舵システムもあり、また、作業船などを中心として手動での操船を楽にするために従来の舵輪やエンジンテレグラフの代わりにジョイスティックを用いた操船システムなどもある¹⁶⁾。

位置情報に関しては現在 DGPS がもっとも有望であるが、専用岸壁などであれば、岸壁にポストを立て、船上からカメラでそれを追尾するシステムなども考えられる¹⁶⁾。

5. おわりに

「安全とは許容できる最小の危険である」とはよく習ったものだ。一度でも東京湾や瀬戸内海で大型船のブリッジに立ったことのある人なら実感できると思う。さきのダイヤモンド・グレース号の事故はまさにその最小の危険がちょっとした思いこみや勘違いで大事故につながることをわれわれに改めて認識させた。優秀な船に優秀な乗組員、優秀な装置に優秀な制御・計測システムだけでは安全は守れない。最後に、安全を確保するのは人間である。「自動化のレベル」や「自動化の皮肉」といったことばを想起するとき、やはり、いかに制御対象を知り、それを操作する人間を知ることが大切であるかがわかる。そういう意味で日本では船舶の制御に携わる多くのものが制御工学出身者ではなく、船舶工学なり航海学を学んだものであり、船や海を知り尽くしたものであることを誇りに思う。しかし、われわれだけではこの複雑なシステムをうまく制御することはできない。これからは制御工学を学ぶ人たちの中から少しでも多くの方が船舶や海中ロボットの制御に興味を持っただけで、参画してもらいたい。

シーマンシップということばがある。船乗り魂などと訳された頃があるが、現在では船乗りとしての技量といった意味合いが強い。しかし、確かにシップということばになんとなく精神のようなものを感じるのは事実である。著者は別の解説¹⁾で初めて「シーマンシップ」という造語を使った。これからの船舶はシーマンだけでもマシンだけでもだめであり、このことばに「人間と機械の調和のとれた技量とその精神」とでもいった意味合いを込めた。制御技術と計測技術、そして、人間をも含めた統合技術がこれからの船舶の安全運航に少しでも寄与できることを心から願う。

(1998年9月1日受付)

参考文献

- 1) 長谷川和彦：インテリジェント・シップー超自動化船への挑戦、システム/制御/情報、38、268/275 (1994)
- 2) 大津、長谷川：オートパイロットの評価と展望、第3回操縦性シンポジウム、日本造船学会、243/279 (1981)
- 3) 長谷川、山下：船舶の衝突予防援助装置の利用実態と問題点、第17回安全工学シンポジウム講演予稿集、日本学術会議安全工学研究連絡会議、69/72 (1987)
- 4) 高田圭一：電子海図装置 (ECDIS) について、日本航海学会誌、126、46/52 (1995)
- 5) 葛西宏直：狭水域航行の自動化、運動性能研究委員会第8回シンポジウム、日本造船学会、60 (1991)
- 6) 大島 寛ほか著者多数：航行信頼度知能化船 (高度自動運転システム)、(その1)～(その13)、日本造船学会誌、721、722、723、725、726、727、728、729 (1989-1990)
- 7) 今津隼馬：避航法に関する研究、東京大学学位論文 (1986)
- 8) 長谷川、上月：Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究、関西造船協会誌、205、1/10 (1987)
- 9) 一色 浩：船舶の衝突回避のアルゴリズム、関西造船協会誌、222、117/123 (1994)

- 10) T. Koyama and Y. Jin: An Expert System Approach to Collision Avoidance, 8th Ship Control Systems Symposium, 3, 234-263 (1987)
- 11) 長谷川、上月、村松、小峰、渡部：船舶自動航行ファジィエキスパートシステム (SAFES)、日本造船学会論文集、166、445/452 (1989)
- 12) 小瀬、児島、高橋：避航エキスパートシステムと航路航行シミュレーションに関する研究、航海学会論文集、84、(1991)
- 13) 長谷川、藤田：船舶自動航行エキスパートシステムの狭水路航行アセスメントへの適用、関西造船協会誌、220、129/133 (1993)
- 14) K. Kose, K. Hasegawa, H. Iwasaki and F. Ohkawa: On an Intelligent Harbor Maneuvering Simulator and its Applications, Joint International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability, 151/158 (1990)
- 15) 小瀬、寺本、敏、日富、吉川、中川：大型船の離着岸操縦におけるパイロット支援システムに関する人間工学的研究、日本造船学会論文集、164、231-239 (1988)
- 16) 長谷川、山本、正司：港内操縦の自動化への挑戦、運動性能研究委員会第13回シンポジウム、日本造船学会、93/129 (1997)
- 17) 小瀬、福戸、菅野、赤木、原田：船の自動離着岸システムに関する研究、日本造船学会論文集、160、103/110 (1986)
- 18) 高井、大津：砂路丸による自動離着岸実験について、日本航海学会論文集、83、267/276 (1990)
- 19) 小山、金(雁)、金(奎)：船の自動離着岸のシステムの考察 (第1報)、日本造船学会論文集、162、201/210 (1987)
- 20) 正司、大津、堀田：最適制御理論による操縦の最適化と自動化について (第一～三報)、日本造船学会論文集、172、365/373、173、221/229、174、339/344 (1992-1993)
- 21) K. Takai and H. Yoshihisa: An Automatic Manoeuvring System in Berthing, 8th Ship Control Systems Symposium, 2, 209/227 (1987)
- 22) H. Yamato, H. Uetsuki and T. Koyama: Automatic Berthing by the Neural Controller, 9th Ship Control Systems Symposium, 3, 183/201 (1990)
- 23) 長谷川、本寺：ニューラルネットワークと知識ベースを併用した自動着岸システム、関西造船協会誌、220、135/143 (1993)
- 24) 大和、小山、中川：エキスパートシステムによる自動着岸制御、日本造船学会論文集、174、327/337 (1993)
- 25) K. Hasegawa and K. Fukutomi: On Harbour Manoeuvring and Neural Control System for Berthing with Tug Operation, International Conference Manoeuvring and Control of Marine Craft, 197/210 (1994)

[著者紹介]

長谷川 和彦 君 (正会員)

1976年大阪大学大学院工学研究科造船学専攻修士課程修了。同年より広島大学工学部船舶工学科助手、83年大阪大学工学部造船学科助手、87年同大学講師、89年同大学助教授、98年同大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻教授、現在に至る。91～92年オランダ・トゥエンテ大学メカトロニクス研究所客員研究員、96年連合王国・ストラスクライド大学船舶安定性研究所客員研究員、96年より海洋科学技術センター客員研究員、現在、船舶の操縦性と安定性に関する運動学的および制御学的研究などに従事 (工学博士)、80年日本造船学会賞、94年関西造船協会賞受賞、IFAC 海洋システム技術委員、国際試験水圏会議委員のほか、システム制御情報学会、日本ファジィ学会、日本航海学会、日本船舶機関学会、IEEE 海洋工学学会などの会員。

