

自動運航船の自動化レベルについて

福戸 淳司*

1. はじめに

現在、急速に進展したICTやセンサ技術を背景に、航行の安全性の向上と海上での労働環境の改善を目的に自動運航船の研究開発が進んでおり、日本のみならず世界各国で実用化に向けた実証実験等が行われ、数年以内に実用化される勢いである。日本においても、2019年より日本財団の助成のもと、MEGURI2040プロジェクト（無人運航船の実証実験にかかる技術開発共同プログラム）が進められており、2021年度末までに、同プロジェクトに参加した5つのコンソシアムで6隻の無人運航船の実証が行われる。

一方、こうしたシステムの実用化においては、社会に受け入れられることが重要であり、受容性を高め普及させるためには、自動運航船を知ってもらい、自動運航船を安全なものとして理解してもらふ必要がある。（一財）日本船舶技術研究協会は、無人運航船の実用化を支え、その社会における受容性を高め、普及を支援するため、2020年度より4年計画で、日本財団の助成のもと、MEGURI2040プロジェクトと連動して、「無人運航船に係わる安全性評価事業」を実施している。本事業では、MEGURI2040プロジェクトの実証実験の事前評価及び安全評価を行う安全評価環境の整備を行うとともに、無人運航船の実現時に必要となる安全上の要件を取りまとめ、自動・遠隔及び無人運航を統一して取り扱うガイドラインを策定する事となっている。

ここまで、無人運航船あるいは自動運航船といった言葉を使ってきたが、この言葉からイメージされる船舶あるいは操船のイメージは必ずしも固まっていない。例えば、無人運航船についても、無人とは何を意味しているのか？、運転時に船員の介入はあるのか？等、人により想定しているイメージが異なる。特に、人との関わりを考慮した操船の形態には、手動操船から、完全自動操船まで多様な形態があり、開発や評価の対象となる自動操船（運転）システムがどの形態であるのか等システムのイメージについて関係者間で共通の認識を持つ必要がある。

このため、本報告では、自動化システムとこれを

用いる運転員との関わりを定義する自動化レベルとその要件について報告する。

2. 制御モードと自動化レベルについて

一般に、船舶の操船等制御対象を望む状態に移行・保持するようなタスクを運転員が実施する際は、運転員は制御対象の情報を自身の五感を通じて収集し、収集した情報を基に状況を確認し、実行すべき行動を判断する。次に、制御システムを通じて実行内容を制御対象のアクチュエータに指示し制御対象の行動変化をもたらす。このループを繰り返すことによりタスクを実現する。さらに、制御対象が大きい場合あるいは遠隔にある場合は、制御対象の情報は自身の五感の他、センサで収集し表示器に統合表示して得る事となる。この制御ループは、制御対象、センサ、情報表示器（ディスプレイ）、運転員、制御器（コントローラ）及びアクチュエータから構成される。自動化はこのループの中に制御システムが入り、運転員に代わり、センサ情報の統合表示や行動判断及びその行動を実現する操作指示を行う。

この制御には、導入される制御システムと人間の関わりにより手動から完全自動までいくつかの段階がある。Sheridanは、遠隔ロボットの監視制御（Supervisory control）の研究等を通じて、図1に示す制御モード¹⁾を定義している。

図中(a)は、「手動制御モード」の状況を表す。図中(b)は、制御システムがループ中に入り情報の収

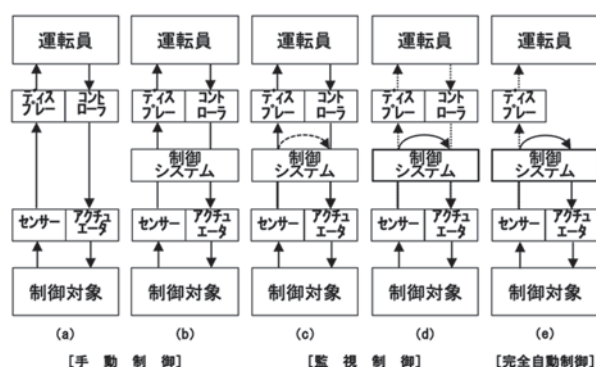


図1 制御モードの範囲¹⁾

* 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

集・表示を行うと共に運転員が設定した制御コマンドをアクチュエータに伝えるが、制御自体は運転員が行う。(c)及び(d)は制御の一部を制御システムが担うもので、制御システムで小さいループを形成しており、(c)は、運転員のループが主、制御システムのループが補助となっており、(d)では、制御システムのループが主、運転員ループが補助となっている。この制御モードは、「監視制御モード」と呼ばれており、運転員は、制御対象と制御システムの動作を監視し、必要に応じて、制御コマンドを出すことにより、制御システムの制御に介入して制御目標を実現する。最後の(e)は、「完全自動制御モード」で、運転員は、情報表示器を介して制御対象と制御システムの動作の監視はできるが、制御システムへの介入はできない。この制御モードの考えは、運転員がどのように制御に関わっているかを表す指標となる。

さらに、Sheridanは、自動制御システムと運転員の関わりを示すレベルとして、10段階の自動化レベル¹⁾を示した。この自動化レベルは、運転員が与えられる情報と取り得る操作方法を中心にまとめられている。表1にこの自動化レベルを示す。

表1 Sheridanの自動化レベル^{1) 2)}

自動化レベル	定義
1	システムの支援なしに、全てを人が実行。
2	システムは全ての選択肢を提示し、人はその内の1つを選択して実行。
3	システムは有効な少数の選択肢を提示。それらのいずれかを実行するか否かは人が決定し、全てを人が実行。
4	システムは可能な選択肢の中から1つを選びこれを人に提案。それを実行するか否かは人が決定し、全てを人が実行。
5	システムは1つの案を人に提示。人が了承すれば、システムが実行。
6	システムは1つの案を人に提示。人が一定時間内に実行中止を指令しない限り、システムはその案を実行。
6.5	システムは1つの案を提示すると同時に、その案を実行。
7	システムが全てを行い、何を実行したかを人に報告。
8	システムが全てを決定・実行。人による問い合わせがあれば、何を実行したかを報告。
9	システムが全てを決定・実行。何を実行したかを人に報告するのは、報告の必要性をシステムが認めた時のみ。
10	システムが全てを決定・実行。

なお、表1には、自動化により引き起こされる驚きを緩和する目的で追加したレベル6.5を加えた11段階の自動化レベル²⁾を示す。

ここで、人との関わりで大きく変わる段階としては、以下がある。

- (1) レベル1と2の間で、制御の方針決定の参考となる支援情報の提供の有無。
- (2) レベル4と5の間で、人による制御の実行から、システムによる制御に移行。
- (3) レベル6と7の間で、人による介入手段がなくなると共に、システムは制御結果の報告のみを行う。
- (4) レベル9とレベル10の間では、人への報告さえも行わなくなる。

制御モードの観点から見ると、レベル1からレベル4までが手動制御モード、レベル5からレベル6までが監視制御モード、レベル6.5以降が完全自動制御モードとなる。

このSheridanの自動化のレベルは、航空機や原子力プラントの運転の自動化についてのヒューマンファクタの検討に利用されている他、米国NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) の自動化レベル2および3の自動運転概念のヒューマンファクタの検討³⁾においても、最も広く使用されている自動化システムの分類法として紹介されている。このように、Sheridanの自動化のレベルは、手動制御から完全自動制御までをカバーし、経験の少ない無人運航船の自動化レベルの設定に際し、その定義および定義の設定時に考慮すべき事項の検討に資すると考えられる。

3. 他の輸送機関の自動化レベル

ここでは、船舶以外の自動化レベルとして、自動車の運転自動化レベルおよびドローンの飛行レベルについて報告する。

3.1 自動車の運転自動化レベル

自動車の運転自動化レベルは、2010年代の初めから2015年頃まで、German Federal Highway Research Institute (BASt)⁴⁾、National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)⁵⁾、Society of Automotive Engineers (SAE)⁶⁾等の機関で独自に作成されていた。

2016年になると、NHTSAおよびEuropean Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC) は、SAEの文書 SAE J3016で定義された運転自動化レベル (LoDA : Level of Driving Automation) を採用するとの判断があり、以降、自動運転システ

ムの運転自動化レベルは、世界的にSAEのレベルが採用されるようになった。

3.1.1 SAEの運転自動化レベル

SAEの最初の運転自動化レベルは、2014年にSAE J3016 (2014) ⁶⁾として、陸上の自動車を対象に発表された。

運転自動化レベルは、運転自動化システムの分類法で、運転員と運転自動化システムの相互の役割の違いで、レベルを分類しており、SAE J3016 (2014) ⁶⁾では、表2の6つの分類になっている。

表2 SAEの2014年度版運転自動化レベルの概要

運転自動化レベル	定義
運転員が環境監視	
LoDA 1 手動	運転員が、全ての動的運転タスクを行う。
LoDA 2 運転員支援	システムが操舵操作か加減速のどちらかを運転支援し、残りの動的運転タスクを運転員が実施する。
LoDA 3 部分自動	システムが操舵操作と加減速のどちらも運転支援し、残りの動的運転タスクを運転員が実施する。
自動運転システムが環境監視	
LoDA 4 条件付き自動	いくつかの運転モードでシステムが全ての動的運転タスクを行う。緊急時は運転員が介入。
LoDA 5 高度自動	運転員が介入要求に応答しない場合でも、いくつかの運転モードで全ての動的運転タスクを行う。
LoDA 6 完全自動	全ての運転モードで、全ての動的運転タスクをシステムが全て操作。

表中の「運転モード」とは、運転シナリオのタイプを表し、高速道路走行や渋滞運転等が挙げられる。また、「動的運転タスク」(DDT: Dynamic Driving Task)は、自動車を運転するために必要な機能を表し、例として加減速、レーン保持等が挙げられる。

なお、SAE J3016は、過去2回の改訂があり、第3版が2021年4月に公開された。これまでの主な追加事項としては、以下が挙げられる。

- ・ LoDA へのフォールバック機能 (DDT Fallback) の関連付け
- ・ 自動化システムである自動運転システム (ADS: Automated Driving System) の遠隔制御を含む機能の明確化
- ・ 自動化システムの限界と限界を超えた時の対応を自動化レベルに組み込むための、運用設計ドメイン (ODD: Operational Design Domain) の概念の導入

- ・ 障害物およびイベント検出・対応 (OEDR: Object and Event Detection and Response) サブタスクの概念の導入
- ・ 運転における3つの主要な役割であるユーザー、運転自動化システム、およびその他の車両システムとコンポーネントについての詳細記述の追加

LoDAを分けるファクタは、追加した項目をもとに、下記のようにまとめることができ、表3に示す2021年に改定されたSAEの運転自動化レベルの定義⁷⁾には取り込まれている。

- 運転自動化システムが、DDTの縦方向または横方向の車両運動制御サブタスクを実行するかどうか。
- 運転自動化システムが、DDTの縦方向と横方向の両方の車両運動制御サブタスクを同時に実行するかどうか。
- 運転自動化システムがDDTのOEDRサブタスクも実行するかどうか。
- 運転自動化システムがDDTフォールバックも実行するかどうか。
- 運転自動化システムがODDによって制限されているかどうか。

表3 SAEの2021年版運転自動化レベルの概要

運転自動化レベル	定義
LoDA 0 運転の自動化なし	アクティブセーフティシステムによる支援も含めた、DDT全体の運転員による運転。
LoDA 1 運転支援	運転自動化システムが動的運転タスクの内の横方向または縦方向の車両運動制御サブタスクをODD範囲内で実施し、その他のタスクを運転員が実施することによる持続的な運転。
LoDA 2 部分的な運転自動化	運転自動化システムが動的運転タスクの横方向および縦方向の車両運動制御サブタスクをODD範囲内で実施し、運転員が障害物検出タスクを実施するとともに運転自動化システムを監視制御する持続的な運転。
LoDA 3 条件付き運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクをODD内で実施し、フォールバック要員が運転自動化システムの介入要求の他、他のシステムの不具合にも対応することによる持続的な運転。
LoDA 4 高度な運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクとフォールバックをODD内で実施することによる持続的な運転。
LoDA 5 完全な運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクとフォールバックを実施することによる持続的な運転。

こうした分類の考え方は、a)やb)等自動車特有の項目もあるが、自動運航船の自動化レベルを検討する上で、重要であり、一部の船級のガイドラインには取り込まれている。

3.2 無人航空機の飛行レベル

現在、無人航空機（人を乗せない航空機・回転翼飛行機の内、遠隔操縦または自動操縦により飛行させることができる物）の低価格化と高性能下に伴い、回転翼飛行機である「ドローン」の普及が進んでおり、無人での貨物輸送の担い手として、大きな期待がかけられている。

このドローンの利用促進と安全確保の観点から、ドローンの自動化レベルにあたる飛行レベル⁸⁾が、平成28年4月に開催された「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」で設定された。

図2に、無人航空機の飛行レベルを示す。この飛行レベルを決めるファクタとしては、以下の3つが挙げられている。

- (1) 操縦方法：遠隔操縦か？、あるいは自動・自律操縦か？
- (2) 目視範囲：飛行領域が目視範囲内（範囲外であっても補助者がいる場合は範囲内となる。）か？、あるいは目視範囲外か？
- (3) 有人地帯：飛行区域が有人地帯か？、あるいは無人地帯（第三者が立ち入る可能性の低い山、海水域、河川、湖沼、森林等）か？

飛行レベルはこの3つのファクタの組み合わせにより、以下の4つの飛行レベルが設定されている。

- レベル1：目視視界内の操縦飛行
- レベル2：目視視界内の自動・自律飛行
- レベル3：無人地帯での目視外飛行（補助者配置無し）
- レベル4：有人地帯（第三者上空）での目視外飛行（補助者配置無し）

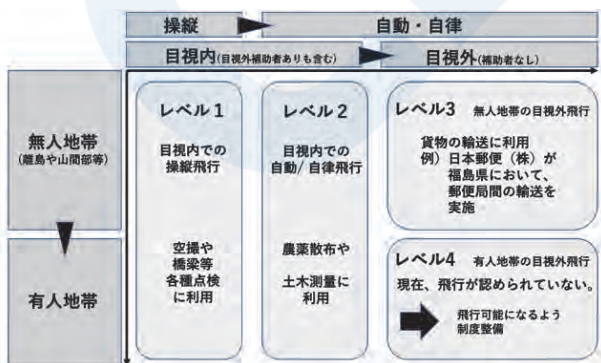


図2 無人航空機の飛行レベル⁹⁾

2021年現在、日本の航空法は、以下の空域でドローンを飛行させる場合、安全措置を講じて国土交通省の許可を得る必要がある。

- 空域A 空港等の周辺の上空の空域
- 空域B 地表又は水面から150m以上の高さの空域
- 空域C 国勢調査の結果を受け設定されている人口集中地区の上空

現在、飛行レベル4は、空域Cにあたり飛行を認めていないが、今後のドローンの有効活用が望まれている。このため、飛行レベル4をリスクの高い飛行カテゴリーとして設定し、現行の飛行の許可・承認制度を合理化・簡略化してドローンの利用促進を進めるとともに、必要な安全性を確保するため、機体認証及び操縦者の操縦ライセンス制度の創設、操縦者が遵守すべき共通的な運航ルールの確立が進められている⁹⁾。

この無人航空機の飛行レベルの特徴としては、操縦方法として、遠隔操縦と自動・自律操縦を区別するとともに、目視の範囲であるかどうかを区別していることが挙げられる。こうした考え方は、今後、自動運航船の自動化レベルを考える際に、遠隔操縦をどのように扱うかについての示唆を与える。

4. 船舶の自動化レベル

ここでは、いくつかの組織で検討されている船舶および各種舶用機器の自動化レベルについて、その概要を示す。

4.1 IMO

国際海事機構（IMO）は、安全性および経済性を向上すると期待される自動運航船（MASS：Maritime Autonomous Surface Ship）の開発プロジェクトの増加を考慮して、自動運航船の設計者や所有者等に、明確で一貫性のある規制の枠組みを提供する準備として、2018年より自動運航船に関するIMOの諸基準の論点整理（RSE：Regulatory Scoping Exercise）が行われ、その結果¹⁰⁾は、2021年開催の第103回海上安全委員会に報告され承認された。この活動の中でいくつかの自動化のレベルが示された。

4.1.1 IMOの諸基準の論点整理のための自動化の程度

自動運航船に関するIMOの諸基準の論点整理に先立ち、この論点整理を各機関で整合性を持って実施するため、暫定的に自動運航船の定義と自動化の程度（Degree of Automation）が設定された。以下に、自動運航船（MASS）の定義と自動化の程度の暫定案を示す。

自動運航船の暫定定義：

Maritime Autonomous Surface Ship (MASS) is defined as a ship which, to a varying degree, can operate independent of human interaction.

自動化の程度の暫定定義：

Degree One：自動化されたプロセス処理機能と意思決定支援機能を持った船舶
船員が、船上システムおよび機能を操作・制御するために乗船する。

Degree Two：船員が乗船する遠隔制御船
船舶は、船外から操作・制御される。船員を船内システムや機能の操作に使用できる。

Degree Three：船員が乗船しない遠隔制御船
船舶は、船外から操作・制御される。船員は船内にはいない。

Degree Four：完全自律船
船上システムが意思決定と行動判断ができる。

この自動化の程度を決めるファクタとしては、以下の2つが挙げられた。

- (1) 操船形態：手動操船、遠隔操船、自動操船の別
- (2) 船員搭乗の有無：船上に船員が搭乗しているか？

なお、この自動化の程度については、諸基準の論点整理をする際、安全な運用と規制を検討するためには、より詳細な自動化の程度に改善すべきとの意見もあったが、この議論の結論を得るには時間がかかるため、論点の整理の議論においてはこの自動化の程度をこのまま使用し、論点の整理が終了した後で、改めて、検討することとなった。

4.1.2 その他の提案された自動化レベル

前の項の自動化の程度その他、IMOの諸基準の論点整理の議論の中で、いくつか自動化レベルが提案された。

1つは、オーストラリア他4カ国からの共同提案で、諸基準の論点整理のための自動化の程度の補強を目的とした提案¹¹⁾であった。この提案では、自動運航が、社会的、倫理的に受け入れられるためには、自動運航船といえども人間に最終的な制御と責任があるべきとの考えをベースにしており、自律システムは適切な資格を持つ人間の監督と責任の下にとどまる監視制御 (Supervisory Control) であるべきと主張している。

自動化のレベルを決定するファクタとして、技術的な自動化のレベルと人間による運用管理が挙げられ、これをベースとして、自律化と制御のレベルを

設定した。具体的には、以下に示す技術的な自動化レベルを4段階に、運用管理を2段階に設定し、この組み合わせで自律化と制御のレベルを定義している。

技術的自動化レベル**A0**：手動

単純なタスクと機能のための個別システムレベルの自動化を含む、船舶のシステムと機能の手動操作と制御。

A1：委任

各種機能、判断、行動には、運転員の許可が必要。運転員は、どの段階でもシステムへの介入が可能。

A2：監視

各種機能、判断、行動に、運転員の許可は不要。運転員には、システムが行った全ての決定が常に通知されると共に、どの段階でもシステムへの介入が可能。

A3：自律

緊急時または船舶システムがODD外にある場合、システムが運転員に通知。各種機能、判断、行動に、運転員の許可は不要。どの段階でもシステムへの介入が可能。

運用管理**B0**：資格のある船員は船上に不在

人による意味ある監視および制御は、遠隔から実施。

B1：資格のある船員が乗船

人による意味ある監視および制御を行う船員が乗船。

自律化と制御のレベル (Levels of Autonomy and Control) は、表4に示すように技術的自動化レベルと運用管理レベルのマトリックスとして整理される。例えば、表中のA2-B0は、船舶は監視レベルA2で動いており、資格のある船員が遠隔地から操船し

表4 自律性と制御のレベル

		運用管理	
		B0：資格のある船員不在	B1：資格のある船員乗船
自 技 術 的 自 動 化 の レ ベル	A0：手動		A0-B1
	A1：委任	A1-B0	A1-B1
	A2：監視	A2-B0	A2-B1
	A3：自律	A3-B0	A3-B1

ている状況B0であることを示す。

この自律化と制御のレベルは、2020年に欧州海上保安機関（EMSA）で実施された「自動運航船のリスクと規制の問題点に関する研究」¹²⁾でも検討対象の設定に使用されており、同研究では、A3-B1（船上の船員が自律レベルのシステムで運航）と、A2-B0（遠隔から監視レベルのシステムで運航）の自律化と制御のレベルの船舶を対象に、新しく生まれるリスクと規制の問題点の検討を行った。

もう1件はISOの活動で、現在、自動運航船の概念等をより適切で曖昧さの少ない伝え方を提供するため、基本的な用語と概念の国際標準の策定を計画しており、IMOの第100回海上安全委員会（MSC100）において、自律化の度合（Degree of Autonomy）のさまざまな定義を比較するために使用できる一般的なフレームワークを提案¹³⁾している。この提案では、自律化のレベルを特定する3つのファクタとして、操作の複雑さ、自動化レベル、人間の存在をあげており、これに加えて人間の責任、タイミングの遅れが加えられている。

ここでは、詳細は割愛するが、基本的な考え方は、最新の自動車の運転自動化レベルの考え方であるSAE J3016⁷⁾を踏襲していると思われる。

4.2 ロイド船級協会の自動化レベル

ロイド船級協会は、他の船級に先駆けて2016年に自動運航船のガイドライン¹⁴⁾を発表し、この中で自動化レベルが定義された。ロイド船級協会では、自動運航船のガイドラインに先立ち、ICTやサイバーシステムを装備したサイバー対応船のガイドラインを発表し、安全性・品質・信頼性を確保する包括的な認証手順を提供した。自動運航船は、このサイバー対応船の1つと位置付けられている。また、自動化レベルは、自動運航船に対して作成されており、航海のみならず、機関運用、各種情報サービスについても適用される。

以下に、7つの自律化レベル（AL：Autonomy Level）を示す。

自律化レベル

AL0：手動-自律機能はなし

- 全ての行動と意思決定を運転員が実行。

AL1：船内の意思決定支援

- 全ての行動を船内の運転員が実行。
- 意思決定支援ツールは、運転員にオプションの提示等を行い、行動の選択に影響を与えることができる。

AL2：船内および船外の意思決定支援

- 船内レベルの全ての行動は船内の運転員が実行。

- 意思決定支援ツールは、運転員にオプションの提示等を行い、行動の選択に影響を与えることができる。
- 情報は、船内または船外から提供される場合がある。

AL3：活動的な人間参加型自動化（‘Active’ human in the loop）

- 船内レベルの意思決定と行動は、人間の監視下でシステムが自律的に実施。
- 影響の大きい行動決定については、運転員による介入が可能。
- 情報は、船内または船外から提供される場合がある。

AL4：人間参加型自動化 監視制御による

- 意思決定と行動は、人間の監視下でシステムが自律的に実施。
- 影響の大きい行動決定については、運転員による介入が可能。

AL5：完全自律（アクセス可）

- ほとんど監視されずシステムにより意思決定と行動が行われる運転。

AL6：完全自律（アクセス不可）

- 全く監視されずシステムにより意思決定と行動が行われる運転。

この自律化レベルを分けるファクタとしては、

AL0とAL1を分ける意思決定支援システムの有無、

AL1とAL2を分ける船外からの情報の有無、

AL2とAL3を分ける行動の実施主体の人間からシステムへの移行、

AL4とAL5を分ける人間の介入の可否および

AL5とAL6を分ける人間によるシステムへのアクセスの可否

が挙げられる。

また、制御モードとしては、AL0からAL2までが手動制御モード、AL3とAL4が監視制御モード、AL5とAL6が完全自動制御モードとなる。

4.3 DNVの自動化レベル

DNVでは、2018年に、自動運航船および遠隔操縦船のガイドライン¹⁵⁾を発表し、この中で自動化レベルを定義している。DNVでは、自動化レベルはそれが使用されるコンテキストにより異なると考え、高度な観察、分析、判断が必要となる航海作業の自動化レベルと、自動支援と自動操作の機能に分かれる機関運用作業の自動化レベルをこのガイドラインでは示している。ここでは、航海作業の自動化レベルを紹介する。

DNVでは、CONOPS / HAZIDの一部として設定

された航海の運用要件と危険性に基づいて、人間がやるべきタスクとタスク等を実施する場所の特定を行い、以下の航海機能の自動化のレベルを定義した。

航海機能の自動化のレベル

M：手動操作機能

DS：意思決定支援機能

DSE：条件付きシステム実行機能を備えた意思決定機能

- ・システムによる行動の実行前に人間の許可が必要。
- ・Human in the Loopと呼ばれる。

SC：自己制御機能 (Self-controlled function)

- ・システムが操作を実行。
- ・運転員による行動のオーバーライドが可能。
- ・Human on the Loopと呼ばれる。

A：自律機能

- ・人間の介入なしに、システムが行動を実行。

この自律化レベルを分けるファクタとしては、

Mと**DS**を分ける意思決定支援システムの有無

DSと**DSE**を分ける行動実行の主体の人からシステムへの移行と行動実行前の人間の許可の要否

DSEと**SC**を分ける行動実行前の人間の許可からオーバーライドへの移行

SCと**A**を分ける人間の介入の可否

が挙げられる。この内容は、ロイド船級協会のファクタと重なるものが多かった。

また、上述の航海を対象にした自動化レベルの例は、自動運転車のガイドライン⁷⁾の内容に沿って作成されたとのことで、船舶と自動車の特性の違いによる影響は検討する必要があるものの自動運転車のガイドライン⁷⁾の内容を、自動運航船のガイドラインに取り込む検討をすることは、重要である。

4.4 Bureau Veritasの自動化レベル

Bureau Veritasは、2019年に自律型輸送のガイドライン¹⁶⁾を発表した。このガイドラインは、輸送の自動化を強化するシステムやさまざまな程度の意思決定と行動を実行できる自動化システムを備えた船舶、関連する遠隔制御センタおよび海上推進システムを対象としている。こうした機器やシステムが動作する環境を人間の関与を含めて表現するため、「自動化の程度」、自動化システムに対する「直接制御の程度」および「遠隔制御の程度」の3つを定義し、この3つの程度の組み合わせで、自動化システムの状況を表現した。

以下に、3つの内容を示す。

自動化の程度

A0：人間が操作

- ・人間が全ての意思決定をし、機能を制御。
- ・乗組員は乗船している。
- ・システムあるいは船舶は情報の収集はできるが、人間に代わって情報の分析、意思決定および操作の実行はできない。

A1：人間主導

- ・人間が意思決定と行動を実施。
- ・システムまたは船舶は、情報の取得、情報の分析、および行動の提案を実行できるが、人間に代わって意思決定し、操作を実行することは不可。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

A2：人間に委任

- ・人間はシステムが下した決定を拒否できる。
- ・システムまたは船舶は、情報の取得、情報の分析、および行動の開始はできるが、人間による確認が必要。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

A3：人間の監視制御

- ・人間は常に意思決定と行動について知らされており、いつでもコントロールすることができる。
- ・システムまたは船舶は、人間の監督下で情報の取得、情報の分析、および行動の開始はできる。人間による確認が不要。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

A4：完全自動

- ・人はいつでもコントロールすることができる。
- ・システムまたは船舶は、人間の介入や監督無しに、情報の取得と分析を実行し、意思決定を行い、操作を実行できる。システムは、緊急の場合を除いて、人間に通知せずに機能呼び出す。
- ・人間を、船内（乗組員）または船外の遠隔操作センタ（運転員）に配置できる。

直接制御の程度

DC0：直接制御なし

- ・システムまたは船舶を監視および制御したり、システムエラー時に対処するための乗組員不在。

DC1 : 利用可能な直接制御

- 乗組員が乗船しており、システムの警報等に対処できるが船内の制御ステーションには人がいない場合がある。

DC2 : 不連続な直接制御

- システムまたは船舶は、船内の制御ステーションの乗組員によって監視および制御される。ただし、監視と制御は短期間中断される場合がある。
- 乗組員は、システムからの警告に対応して制御を行う準備ができており、船内の制御ステーションを常に利用可能。

DC3 : 完全な直接制御

- システムまたは船舶は、船内の制御ステーションの乗組員によって、常に監視および制御される。

遠隔制御の程度**RC0** : 遠隔制御なし

- 船外の遠隔操作センタに運転員不在。

RC1 : 利用可能遠隔制御

- 船外の遠隔操作センタに運転員がおり、システムの警報等に対処できる。
- 制御ステーションに人がいない場合がある。

RC2 : 不連続な遠隔制御

- システムまたは船舶は、船外の遠隔操作センタの運転員によって監視および制御される。ただし、監視と制御は短期間中断される場合がある。
- 運転員は、システムからの警告に対応して制御を行う準備ができており、船内の制御ステーションを常に利用可能。

RC3 : 完全な遠隔制御

- システムまたは船舶は、船外の遠隔操作センタの運転員によっていつでもアクティブに監視および制御されます。

このガイドラインでは、情報収集、情報分析、意思決定、行動の実行といった内容で構成されるタスクをこなす際の人間とシステムの関わりを表現する自動化の程度と、船上および遠隔地での運転員の在・不在や2章で述べた制御モード、および常時監視の有無等を表す制御の程度で、自動化システムの形態を表現している。

この自動化の程度を分けるファクタとしては、

意思決定支援システムの有無

行動実行前の人間の許可の要否

人間の介入機能の有無

人間への報告の有無

が挙げられる。

このファクタは、ロイド船級協会のファクタと重なるものが多かった。

また、制御の程度を分けるファクタは、直接制御および遠隔制御ともに、

運転員の有無

人のいない時間帯の有無および多寡

であった。

制御の程度での常時監視については、ここで初めて明確に記述されていたが、自動車の自動運転のレベル3でも一時的な常時監視の中断が許されており、船舶の自動化レベルの検討には加えるべきと考える。

4.5 日本海事協会の自動化レベル

日本海事協会は、2020年に自動運航、自律運航に関するガイドライン Ver.1.0¹⁷⁾を発表した。このガイドラインは、船上作業における認知、判断、対応、といった人間の意思決定プロセスの一部もしくは全てが自動化あるいは遠隔制御されたシステム、並びに、これらを搭載した船舶を対象としている。

このガイドラインでは、自動化システムおよび遠隔制御システムを分類するため、以下の4つの指標を用いている。

- (1) 自動化の範囲
- (2) 遠隔制御の範囲
- (3) フォールバックの実行主体
- (4) 限定領域の内容

この内、3つの指標 (1) 自動化の範囲、(2) 遠隔制御の範囲、(3) フォールバックの実行主体 については、分類例を示されているので、以下に示す。

自動化の範囲**レベル0** :

- 人間が全てのサブタスクを実行
- サブタスクの実行主体は人間

レベルI :

- 一部の意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行
- サブタスクの実行主体はコンピュータおよび人間

レベルII :

- 全ての意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行
- サブタスクの実行主体はコンピュータシステム

遠隔制御の範囲**レベル0** :

- 船上の乗組員が全てのサブタスクを実行
- サブタスクの実行主体は船上の乗組員

レベルI :

- ・一部の意思決定サブタスクを遠隔で実行
- ・サブタスクの実行主体は船上の乗組員および遠隔制御施設の遠隔運転員

レベルII :

- ・全ての意思決定サブタスクを遠隔で実行
- ・サブタスクの実行主体は遠隔制御施設の遠隔運転員

フォールバックの実行主体**レベル0 :**

- ・フォールバックを人間が実行
- ・フォールバックの実行主体は人間

レベルI :

- ・フォールバックを人間とコンピュータシステムシステムが分担して実行
- ・フォールバックの実行主体は人間およびコンピュータシステムシステム

レベルII :

- ・フォールバックをコンピュータシステムシステムが実行
- ・フォールバックの実行主体は人間およびコンピュータシステムシステム

この分類では、各指標のシステムの性質と実行主体が定義されており、自動化システムの分類をする際に用いられている。

ただし、この分類は、各要素をわかりやすく説明するために個別に設定したもので、実際のシステムは、この3つの要素の指標の組み合わせで分類できるとしており、例えば、「一部の意思決定サブタスクをコンピュータシステムが実行し、フォールバックを人間が実施する」システムの場合、表5のような組み合わせがあることを示している。

表5 自動化システムと遠隔制御システムおよびフォールバックの組み合わせの例

分類			タスクの実行主体				フォールバックの主体	
			船内		RCC			
AC	RC	FB	Human	CS	Human	CS	Human	CS
I	0	0	○	○			◎	
I	I	0	○				◎	
I	I	0		○	○		◎	

AC : 自動化の範囲

RC : 遠隔制御の範囲

FB : フォールバックの実行主体

RCC : 遠隔制御施設

CS : コンピュータシステム

◎ : 全て実施

○ : 分担して実施

日本海事協会のガイドラインには、DNVと同じく自動化のレベルは、一意に決められるものではなくタスクや状況等により変わるものとの立場から、自動化の範囲、遠隔操作の範囲、フォールバックの実行主体に対して、抽象的な対象への基本的な分類法として示されていた。このため、レベルを分けるファクタは明確には規定されていなかった。

また、フォールバックの実行主体を加えたのは、海事分野の自動化レベルの表現では、新しい考えであった。

4.6 American Bureau of Shipping (ABS) の自動化レベル

ABSは、2021年に自律と遠隔制御の機能のガイドライン¹⁸⁾を発表した。このガイドラインは、全ての船舶およびオフショアユニットを対象としている。また、このガイドラインでカバーされている自律機能は、船舶およびオフショアユニットの操作を可能にする機能に焦点を当てており、無人操作を意味するものではなかった。

このガイドラインが適用される対象としては、航海 (NAV)、操船 (MNV)、係留 (MOR)、着棧 (DOC)、推進器 (PRP)、補機 (AUX)、環境保護 (ENV)、貨物操作 (CGH)、バラスト操作 (BAL)、工業プロセス (IND) の多岐にわたる機能が設定されており、自律レベルはこの全ての機能について適用される。また、各機能はコード化されており、以下で示す自律機能のノーテーションの表示時に使用される。

このガイドラインでは、自律性を「スマート」、「半自律」、「完全自律」の3つレベルで定義しており、これに基づきノーテーションも設定している。以下に自律のレベルの定義を示す。

自律性のレベル

自律レベル1 : スマート : システムによる人間の機能の拡張

- ・システムは、システムの異常の検出、診断、予測、決定/アクションの代替等の受動的な意思決定支援を提供。
- ・ノーテーション : SMART

自律レベル2 : 半自律 : 人間によるシステムの機能の拡張

- ・スマートな基盤上の構成されたシステムと人間の意思決定および行動の組み合わせによって管理。
- ・ノーテーション : AUTONOMOUS

自律レベル3 : 完全自律 : システム機能への人間の関与なし

- ・システムは意思決定を行い、自律的に行動実施。
- ・人間は監視機能のみを実行。システムに介入するオーバーライド機能あり。
- ・ノーテーション：AUTONOMOUS

また、このガイドラインでは、人の関わりを明確にするため、操作監視レベルが定義されている。操作監視レベルは、運転員の作業場所を2箇所（船内あるいは遠隔地）、運転員に要求される注意の度合いを3段階で定義し、この組み合わせで定義される。

以下、要求注意レベルを示した後、表6に操作監視レベルを示す。

要求注意レベル

要求注意レベル1：継続的な監視

- ・機能の運用全体を通じて、(中断なしの)継続的な操作員による監視。

要求注意レベル2：間欠的な監視

- ・機能の運用全体を通じて、設定された間隔で運転員による監視が必要。間隔の長さや運転員による監視を確実にする手段は、船舶運航者によって決定され、運航概念文書に記載。

要求注意レベル3：必要ベースの監視（システム通知または操作モードに対応）

- ・機能の操作全体を通して、運転員による監視は必要に応じてのみ実施。詳細は船舶運航者が決定し、運航概念文書に記載。

この要求注意レベルは、対象機能とともに、ノーテーションAUTONOMOUSの属性値となっており、例えば、AUTONOMOUS (NAV,OP1,RO1) と記述する航海関係の船上および遠隔地の運転員による

継続的な監視がいる操作であることを示している。

本ガイドラインでは、自律のレベルの他に、要求注意レベルと運転員の作業場所（船上か遠隔地か）を組み合わせる人間と機械の関わりを示していた。

自律のレベルは、比較的簡単に記述している他、要求注意レベルは、Bureau Veritasの直接・遠隔制御の程度の内容にあたり、自動運航船を考える上で、重要な検討項目である人による常時監視の有無の段階的な状況を示しており、重要な検討課題である。

5. 自動化レベルの分類のファクタ

今回示した自動化レベルを俯瞰してみると、自動化レベルの多くは、自動化システムを、情報収集、認識、判断、行動の各タスクをループして行う運操作業を支援・代行するシステムとしてとらえており、それぞれの自動化システムが支援・代行をどこまでやるかで、自動化のレベルを設定している。

また、自動化レベルには、手動制御から完全自動制御までのレベルがあり、具体的には、手動、委任、監視、完全自動の4つのレベルの制御モードをベースに多くの自動化レベルが設定されていた。このレベル分けは、Sheridanが示した制御モードの手動制御から監視制御、完全自動制御までの制御法の変遷に対応しており、比較的複雑なシステムでも、この制御モードを使用することにより、容易に説明できる。特に、人がどのような役割を担っているかあるいは制御の主体がどのレベルで変わるのかが分かりやすく表現されているので、Sheridanが示した制御モードは自動化システムの動きの概要を適切に理解するためには良い指標と考えられる。

この制御モードをベースとした自動化レベルを分類するファクタとしては、以下が挙げられる。

- ・支援情報の提供の有無
- ・行動前の人への許可
- ・制御実施主体の人からシステムへの移行
- ・介入手段の有無
- ・制御結果の人への報告の有無

次に、制御モードに関連する項目以外で自動化レベルを分けるファクタとしては、以下がある。

- ・常時監視の要否
- ・運転員の有無と所在地

常時監視の要否は、自動車の自動化レベル3では、携帯電話の利用等間欠的な監視を許容している他、ABSのガイドラインでは人による監視の度合いを常時監視、間欠監視、必要ベースの監視に分けている等、比較的後に発表された船級協会のガイドラインの中には、示されている。

表6 操作監視レベル

操作監視レベルとその符号	求められる注意レベル	運転員作業場所
OP1	要求注意レベル1：継続的な監視	船上
OP2	要求注意レベル2：間欠的な監視	船上
OP3	要求注意レベル3：必要ベースの監視	船上
RO1	要求注意レベル1：継続的な監視	遠隔地
RO2	要求注意レベル2：間欠的な監視	遠隔地
RO3	要求注意レベル3：必要ベースの監視	遠隔地

もう1つのファクタとして、運転員の有無と所在地がある。運転員の所在は、運転員が船上にいる場合といない場合、遠隔制御センタにいる場合とない場合があり、この組み合わせで4ケースある。これも多くの船級の自動化レベルで、運転員の監視の度合いと組み合わせて分類に用いられている。また、船舶の遠隔操縦については、現在目視の範囲内にあるかについての言及はないが、今後特に無人の小型船の検討をする場合加える必要がある。

最後に、自動車の自動化レベルには、表3に示す通り自動化システムを作成する上で必要となるConOps等で示された動的運転タスク（DDT：Dynamic Driving Task）、運用設計ドメイン（ODD：Operational Design Domain）の概念、障害物およびイベント検出対応（OEDR：Object and Event Detection and Response）等のサブタスクとしての概念等が含まれており、いくつかの船級協会ではこの概念を踏襲している。こうした概念を、取り込むことによるコストについては考慮が必要であるが、こうした概念は、今後自動化レベルを検討する上で重要となると考える。

6. まとめ

本報告では、自動運航船およびこれを実現する各種自動化システムの機能と人間との関わりについて、共通の理解を得ることを目的とした自動化レベルについて、過去の検討内容を調査するとともに、自動化が進んでいる自動車の自動化レベルと無人航空機（ドローン）の飛行レベル、および現在までに各種海事関係機関およびいくつかの船級協会から示された自動化レベルについて、その概要と自動化レベルを分類するファクタについて取りまとめた。このファクタは、各システムへの人間の関わり方の違いを明確にし、常時監視や非常時の介入等人間に求められるタスクも明らかにしている。

これにより、これまでの自動化レベル作成の経緯や、自動化レベルで示される自動化システムの機能が明確になり、自動化システムを表現する時に有用な分類法が整理できた。

自動車の自動化レベルに見られるように、自動化システムが進化していくにつれて、自動化レベルにも多様なファクタが追加され進化していくと考えられ、今後船舶の自動化レベルの検討の際にこの調査内容が活用されればありがたい。

謝辞

本調査は、公益財団法人日本財団の助成を受けて、一般財団法人日本船舶技術研究協会が行う「MEGURI2040に係る安全性評価」事業に資するため、2020年度事業の成果の一部に加筆する形で実施しました。このような機会をいただいたこと、公益財団法人日本財団殿に感謝いたします。

参考文献

- 1) Thomas B. Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, The MIT Press, 1992, ISBN: 9780262515474
- 2) T. Inagaki, N. Moray, and M. Itoh: Trust, Self-Confidence and Authority in Human-Machine Systems, Proceedings of 7th IFAC Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man Machine Systems (MMS'98), Kyoto, Japan, 16-18 September 1998
- 3) Trimble, T. E., Bishop, R., Morgan, J. F., & Blanco, M. (2014, July): Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Past research, state of automation technology, and emerging system concepts. (Report No. DOT HS 812 043). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration
- 4) Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J, Vogt W (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83, Bergisch Gladbach
- 5) National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA: Preliminary statement of policy concerning automated vehicles, 2013, Washington, DC
- 6) Society of Automotive Engineers - SAE international: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE J3016 (2014)

- 7) Society of Automotive Engineers - SAE international: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE J3016, 2021
- 8) 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会：利活用と技術開発のロードマップと制度設計に関する論点整理（案），2016，
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujin/ki/kanminkyougi_dai4/siryous2.pdf（参照：2021年9月3日）
- 9) 国土交通省航空局：無人航空機のレベル4の実現のための新たな制度の方向性について，2020，
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujin/ki/kanminkyougi_dai15/siryous1.pdf（参照：2021年9月3日）
- 10) IMO: MSC.1/Circ.1638 (2021), Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (Mass)
- 11) IMO: MSC 100/5/6 (2018), Comments on document MSC 100/5
- 12) European Maritime Safety Agency (EMSA): SAFEMASS Study of the risks and regulatory issues of specific cases of MASS, Summary Report, Report Part1 and Report Part2 (2020),
<http://www.emsa.europa.eu/publications/item/3892-safemass-study-of-the-risks-and-regulatory-issues-of-specific-cases-of-mass.html>（参照：2021年9月3日）
- 13) IMO: MSC 100/5/1 (2018), Proposal for a classification scheme for degrees for autonomy
- 14) Lloyd's Register: Cyber-enabled ships ShipRight procedure – autonomous ships, 2016
- 15) DNV: CLASS GUIDELINE Autonomous and remotely operated ships, DNVGL-CG-0264, 2018
- 16) BUREAU VERITAS MARINE & OFFSHORE: Guidelines for Autonomous Shipping, GUIDANCE NOTE NI 641, 2019
- 17) Class NK: Guidelines for Automated / Autonomous Operation on ships (Ver.1.0) - Design development, Installation and Operation of Automated Operation Systems / Remote Operation Systems -, 2020
- 18) American Bureau of Shipping: Guide for Autonomous and Remote Control Functions, 2021