

# 搜索救難における探索理論の役割

宝崎 隆祐

3月11日に発生した東日本大震災は未曾有の数の被災者を生み、懸命な搜索活動にもかかわらず、8月22日現在なお4,615名の行方不明者を数えている。そこで重要な働きを見せている消防、警察、海上保安庁や自衛隊は、その任務の中に搜索救難活動を持っており、効果的な活動の実施が期待されている。オペレーションズ・リサーチの一研究分野である探索理論はその適用分野として搜索救難をもち、効率的な搜索活動の計画・実施に寄与することができる。今回の報告では、搜索救難の観点から探索理論を解説し、大規模災害への対策の一助としての探索理論の役割と課題について考えてみる。

キーワード：東日本大震災、搜索救難、探索理論、最適資源配分問題

## 1. はじめに

3月11日の東日本大震災の発災以降、8月22日現在の死者は15,721名、行方不明者はなお4,615名を数えている。被災者の救難や災害復興をめざし3月14日に発足した自衛隊の統合任務部隊は10万人態勢をもって、行方不明の被災者搜索のため、4月1～3日に日米の出動人員2万5千名、航空機120機、艦艇船舶60隻による集中搜索を行い、その後の4月10日お

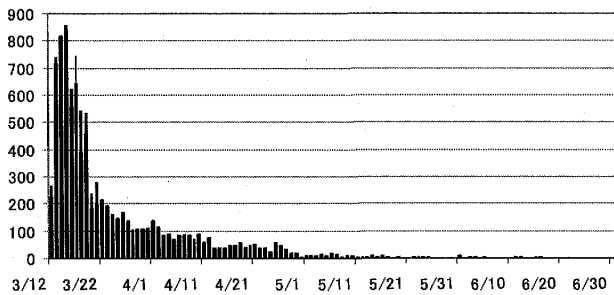


図1 陸上内陸部遺体収容数

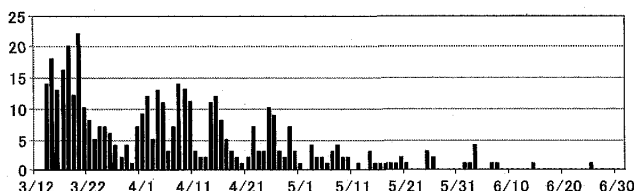


図2 洋上沿岸部遺体収容数

よび4月25～26日にも同様な集中搜索を行っている。このような国をあげて続けられた大搜索により、発災直後の3月12日から統合任務部隊が解散した7月1日の間に収容された遺体数を陸上内陸部と洋上沿岸部に区分して記したものが図1と2である。

多くの遺体が陸上部で見つかり、その数が順調に減少しているのに対し、津波により多くの行方不明者が流されたであろうと推測できる海上での搜索がいかに困難であるかを図2から推し量ることができる。それは、搜索部隊の搜索地域への接近と集中の容易性、視認による発見の容易性、対象目標の存在分布推定の容易性、といった搜索におけるほとんどの要因において、陸上より海上搜索の方が困難であるからである。

主として海上、海中における搜索活動の実学を起源とする探索理論は、その適用分野として搜索救難(Search and Rescue; SAR)をもち、船舶や航空機の安全運行を必要とする今やほとんどの国におけるSAR活動の科学的根拠を与えている。しかし、今般のような大災害での救難搜索は通常のSAR活動で想定している状況とは多くの点で異なっている。探索理論を大規模な災害救難において役立つものとするにはどのような視点が必要であるかについて、以下で考えてみたい。

## 2. 東日本大震災における海上搜索の困難性

統合任務部隊は、陸、海、空の自衛隊による災害派遣部隊から成る。各自衛隊は従前の固有の編成を用いることで、指揮上の違和感無く救難搜索活動を実施した。例えば、第1回の集中搜索における陸上自衛隊の

災害派遣部隊では、3,000~3,500名の隊員をもつ師団、およびその半分程度の規模の旅団ごとに大きな搜索区域が割り当てられ、それぞれの部隊固有の指揮系統を用いて詳細な搜索指揮がとられた。一方、海の災害派遣部隊では、約10隻の艦艇と約5機のヘリコプターの兵力を有する護衛隊群2個群と、掃海艇約15隻と潜水員約80名を有する掃海隊群の1個群が、北は岩手県種市付近から南は福島・茨城県境までの間を緯度線で区割りされた3つの海域を受け持った。災害救難の常として、発災後数日間は生存者の救助に全力が注がれ、その後は行方不明者の搜索や遺体収容に力点が置かれるというように、活動の評価基準が変化する。

陸上での搜索では、さまざまな関係者からの情報を基に設定された搜索区域に対し、隊員を列線上に並べて行うローラー作戦によるしらみ潰しの搜索が基本である。まずは瓦礫を撤去せずに第1回目の搜索を行い、それが不十分であれば自治体を含めた地元の理解を得つつ、瓦礫を撤去しての搜索となる。このようなやり方により、着実に収容者数を減少させ、5月中旬には発見の報告もまれになる状況に至ったことが図1から分かる。陸上では自治体やボランティアをはじめさまざまな組織が活動を行っており、災害派遣部隊にとっては、その固有の指揮系統を守りつつも異種組織間の調整や情報交換が重要となる。

一方の海上における搜索には、陸上搜索には見られない次のような特殊事情がある。

- (1) 水面にある遺体であっても瓦礫や漂流物に隠れ、あるいは水中に確保され海上からは見えない状態にあることも多い。したがって、大きな余震や時化等の後では収容数が増す傾向にある。また、部隊に対する搜索海域の割当ては平面的であるものの、実際の搜索空間は水中も含めた3次元となる。
- (2) 津波により衣服等もその多くが脱げ落ちているため色彩を目安にした発見は期待できず、また浮遊する瓦礫により、海難救助における通常の搜索より発見が困難である。
- (3) 水温により水中での遺体の浮遊状況が異なる。したがって、発災時の3月から春先に向かい、発見数に影響を及ぼすのは、投入する搜索兵力以上に水温の方が大きく、気象の把握や予報が重要である。
- (4) 繰り返される搜索活動にとって、搜索の重点海域を示唆するものがある。それは、過去に高い

存在分布を示している場所、漂流物の堆積しやすい場所および潮目である。潮目の推測には、間接的に植物プランクトンの分布を示すクロロフィル濃度が重要であり、JAXAが提供する水質リモートセンシングの衛星情報が活用できる。

- (5) 海上保安庁だけでなく、海上自衛隊も潮流や水温データを保有しており、行方不明者の分布推定に役立つ。今回の搜索では、分析担当者が潮流予測モデルを用いて初期の存在分布推定を行っている。
- (6) 海潮流の他、河口付近や湾内では特有の海水循環が発生する場合がある。例えば、岩手と宮城の県境に位置する広田湾湾口部では、河川水と潮との相互作用により、表層と底層では逆向きの流れの2枚潮が存在する。

沿岸部や海洋では、上記のような固有の、あるいは局地的な特性を考慮して効果的に搜索を行いつつも、一度搜索したエリアであっても繰り返し搜索を実施する必要がある。何より、沿岸部に漂着ないしは海上に漂っている相当数の瓦礫は搜索の障害となり、喫水の浅い小型船舶をフル活用しなければならなかったことや、2次災害を懸念して潜水員を十分に活用できなかったことは、通常の高難搜索には見られないものであった。以上のような搜索環境の特殊性があるからこそ、今回の震災で得られた結果は将来において貴重なデータベースを提供することは確実であり、またそうしなくてはならないことを多くの自衛隊員が自覚している。

これまでの説明で分かるように、東日本大震災における搜索救難の現場海域は文字通り雑然としており、考慮すべき特殊事情も多く、従来の搜索理論が素直に適用できるといったものではない。また陸上搜索と同様に、海上でも搜索洩れの無い計画が要請されたため、搜索兵力の効率的運用を特に意識して搜索の最適化を行う探索理論的手法の出番は少なく、潮流等を考慮した行方不明者の初期分布、あるいは後日地元からの要請で始まった修理可能な漂流船舶搜索のための初期分布の見積もりに、その適用は限定されている。ただし、現在進行形で進む災害や戦闘状況とは異なり、被災後しばらく時間をおいた後に始まった今回の搜索救難活動では、各部の情報交換や指揮系統における大きな混乱はなかったようである。

### 3. 探索理論

オペレーションズ・リサーチ (OR) の研究者なら

ば、モース&キンボールの『オペレーションズ・リサーチの方法』[14]が第2次世界大戦における米軍の軍事作戦研究の成果であることは周知のことかと思うが、同じ米海軍 OEG (Operations Evaluation Group) 編纂のクープマン著『搜索と直衛の理論』[12]やスターンヘル&ソーンダイク著『第2次大戦中の対潜水艦戦(対潜戦)』[17]が同じ1946年に出版されたことは余り知られていない。ちなみに“直衛”とは潜水艦に対する船団護衛を意味する。英、独間のバトル・オブ・ブリテンの戦いで効果的なレーダー網の運用によってイギリスに勝利をもたらした OR 技術は米国に渡り、当時大西洋で猛威を振るっていた独軍の U ボートによる通商航路破壊を阻止するのに大いに役立った。その活動成果の記念碑的著作が上記の2編であった。最初のモース&キンボールの著書が戦後日本の工業生産の復興に大いに役立てられたのに比べ、後の2編によってもたらされた『探索理論』は、日本においては主に海上自衛隊において研究され、今度は日本の高度成長を裏で支える通商海運路の安全確保に一役買うことになる。対潜戦という実学を起源にもつ『探索理論』は、米、英を主体に戦後は学界においても研究され始め、多くの人の目に触れるようになる。

第2次大戦後にも探索理論の学問研究[13]にいそしんだのがクープマンであるが、その原点ともいべき問題が、クープマン問題と呼ばれる次の問題である。実数の一次元空間  $R$  上において1つの探索対象物(以後、目標と呼ぶ)の位置  $x \in R$  が、確率密度関数  $p(x) \geq 0$  ( $\int_R p(x) dx = 1$ ) の分布をもっている。一方、探索者は目標探知に役立つ全量  $\Phi$  の探索資源をもち、これを搜索空間  $R$  に投入することにより目標探知を目指す。位置  $x$  にいる目標に対し、密度  $\varphi(x)$  の探索資源を投入して得られる目標に対する探知確率は、 $f_x(\varphi(x)) \equiv 1 - \exp(-\varphi(x))$  であるものとする。クープマン問題は、全体の探知確率を最大にする手持ち資源量  $\Phi$  の最適投入計画  $\varphi \equiv \{\varphi(x), x \in R\}$  を問う次の変分問題 ( $P_K$ ) に定式化される。

$$(P_K) \max_{\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} p(x) f_x(\varphi(x)) dx$$

$$\text{s.t. } \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) dx = \Phi, \varphi(x) \geq 0, x \in R.$$

目標存在分布  $p(x)$  に時間変数が含まれていないことから分かるように、この問題は静止目標に対する最適探索の最適化問題である。当然のことであるが、これ以降、時間とともに位置を変える移動目標に対す

る最適探索問題へと研究は進展し[2]、さらには目標や探索者すべてを意思決定者として含む探索ゲーム[4]へと探索理論は発展してゆく。ちなみに、1946年に発表された『オペレーションズ・リサーチの方法』には潜水艦の海峡通峡阻止問題にすでにゲーム理論が使われていて、当時としては新しいフォン・ノイマンの研究を OR の研究者達が十分に熟知していたことが分かる。

さて、このクープマン問題は、これ以降次々に提起された最適資源配分問題と呼ばれる一連の最適化問題群の嚆矢となった[5][6]。この問題が、例えば遭難した航空機に対する搜索部隊の効果的な搜索計画立案に応用できることは容易に想像できるであろう。探索理論におけるクープマン問題の位置づけを説明するために、探索理論の目的と研究分野を述べよう[8]。探索理論とは「探索の対象目標を効率的に見つけるにはどうすればよいか」に答える科学的、OR 的な理論であり、現在における主要なテーマは、研究の先行順序をもつ次の4つの研究分野に分類される。(1)搜索空間上の目標の存在分布を推定する問題、(2)使用する探知センサーの探知理論と探知能力の定量化問題、(3)具体的な搜索活動によって得られる評価尺度の定量化問題とその分析、および(4)探索計画の最適化問題、である。クープマン問題そのものは(4)の分野に属するが、問題 ( $P_K$ ) が含む目標分布  $p(x)$  の同定は(1)のテーマであるし、具体的な搜索行動に対する探知関数  $f_x(\varphi(x))$  の評価は(3)のテーマに属し、いずれも理論だけに終わらない実データに裏付けされた蓄積がこれまでにある。この中でも、SAR 活動の成功の鍵を握っているのは(1)の問題だといってよい。遭難した航空機の遭難場所が正確に推定できれば、短時間に遭難者の救出が可能となるかもしれない。逆に推定の精度が悪ければ、救難作業を始める前に多くの時間が無駄に費やされることになる。

#### 4. 目標存在確率分布の推定

歴史的に見ると、現実的な救難活動の観点から目標分布の推定手法が進歩をみたのは、またしても軍事的な出来事であった[9]。1つは米戦略爆撃機が飛行中の事故により地中海の沿岸に墜落し、水爆1個が行方不明になった事故、いま一つは米海軍の原子力潜水艦スコープオン号の遭難沈没事故[15]である。2年の間を経て連続して起こった2つの事故の特に後者の遭難事故では、前者で水爆搜索のための分析チームを率い

たクレイブン博士が、その経験を生かして、技術顧問団の長として効果的な搜索計画の進言と分析を担当した。地中海とは違い、今回は大西洋における3,000メートルもの水深をもち、かつ広大な海域での困難な搜索活動であったが、その概要と顛末は次のようなものであった。

地中海から米国東海岸ノーフォークに向け帰投中のスコーピオン号が交信を絶った1968年5月22日以降の搜索は、カナダ東部のニューファンドランド島沖とアフリカ西方のカナリア諸島沖に設置された2つの音響監視システム局が、スコーピオン号のものとみられる水中爆発音を聴音したことに始まる。この情報源から設定されたスコーピオン号の搜索海域は、アゾレス諸島南西海域で水深約3,000メートル、広さ400平方海里（一辺約37キロメートル四方）の海域であり、ここを調査船マイザーが、磁気探知機、音響センサーおよび光学カメラを装備した水中橈を最微速で曳き回して搜索を行った。センサーのトータルの能力としても船から高々250メートルしか有効探知距離をもたないとされた状況での搜索は、極めて困難なことが予想された。マイザーによる搜索が開始された後の7月18日に招集され、原子力潜水艦艦長、スコーピオン号勤務経験者および造艦・造機・武器、海洋音響とORの専門家から成る技術顧問団がまず行ったことは、原潜の操艦訓練用シミュレータを活用して音響データと整合性をもつ事故に至るまでの9つのシナリオ作りであった。その後そのシナリオに沿ったモンテカルロ・シミュレーションが計算機を使って行われ、全海域を1.3キロ×1.8キロの四角形のセルに分割したマップ上にスコーピオン号の存在確率分布を得た。その作業および搜索日程計画の策定がわずか1週間ほどで行われた後、マイザーに届けられた。マイザーにはOR分析担当者が数名乗り込んでおり、日々の搜索結果をフィードバックして存在確率の事後分布を計算し、現に行われている小海域での搜索終了と次の搜索海域を助言した。

このように目標行動のシナリオを予測し、シミュレーションにより目標分布を計算する手法は重み付けシナリオ法と呼ばれ、その後の米国沿岸警備隊の救難搜索支援システム(CASP) [3]にも導入された。以上のような幾つかの困難を乗り越え、計5回にわたるマイザー号の航海は、圧壊して海底に鎮座するスコーピオン号を写真撮影して11月2日に完了した。その位置は、初期の目標存在分布推定で最も存在確率が高い

と推定されたセルから南東わずか240メートルの位置にあった。一年後のスコーピオン号に関する事故調査委員会では、搭載していた魚雷事故による沈没の可能性が大であると報告されている。

その予想された困難さを考えれば、スコーピオン号に対する搜索活動は成功例に数えられるとされるが、飯田[9]は次の点に成功の要因を見いだしている。

- (1) 専門家による目標の初期存在確率分布見積りが、矛盾と偏見の無い論理的な積み上げにより行われた。
- (2) 事故に至るシナリオ見積りに対し、モンテカルロ・シミュレーションを援用して定量的な目標存在分布のマップを得ることができ、それ以降継続される定量的な分布更新の基礎となった。
- (3) 技術顧問団とOR関係者による分析作業が素速く行われており、分析者が高い即応能力を備えていた。
- (4) 分析者の資料に基づいて遅滞無く搜索活動を行うことができるほど、現場指揮官がOR分析に対して理解力と信頼感を持っていた。

以上が、その後のSAR活動にさまざまな教訓を与え、役立つ手法開発への動機を与えたスコーピオン号の搜索活動の概要である。同時に、この搜索活動を支援した分析会社、D.H. ワグナー・アソシエイト社にも搜索に関するノウハウを涵養させ、同社の研究者であったストーンが著した『最適探索の理論』[18]は主として静止目標の最適探索問題を論じた質の高い学術著書として、1975年に米OR学会のランチェスター賞を得ている。余談になるが、上記の指摘(4)は、2000年に米海軍大学院大学(NPS)に滞在した際に筆者が強く感じたことにも重なるものがある。国防高等研究局(DARPA)が必要性感じて開発したインターネットは、そのお膝元であるNPSでは現場との意見交換やデータ交換に頻繁に使用され、それでも不十分なきにはわざわざ現場指揮官が大学を訪れ、OR関係者と意見交換をするのをよく目撃した。同大学教授のオッシュバーン氏は解説記事[19]の中で、ORに関する現場(軍事)と科学のカルチャーの衝突はモースとキンボールが警告したとおりであり、『両者の間でパートナーシップが成立することを両者に理解させるには、多くの相互理解と相互の信頼が必要である』との彼らの言葉を引用しているが、“Lesson to learn”のプラグマティズムの精神は、現場での相互の衝突と交流により培われるものであるとの実証を、上記の搜索活動

が物語っている。

## 5. SAR 活動に関する国際基準と探索理論

民間航空機の安全で健全な発展を目的として、航空運行に関する原則と技術を制定・開発するために1946年に設立された国際連合下の専門機関が、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization; ICAO [7]) であり、船舶輸送に関する同種の目的を持って1948年に設立されたのが国際連合海事会議 (Inter-governmental Maritime Consultative Organization; IMCO) およびその後改称された国際海事機関 (International Maritime Organization; IMO [10]) である。それまで両機関が別々に作成していた SAR マニュアルを統一したものが、1998年に策定された IAMSAR (International Aeronautical and Maritime Search and Rescue) マニュアルである [11]。同マニュアルは全3巻から成り、特にII巻の4章、5章には、3節と4節で前述した探索理論の基礎的な分析手法が、多数の実務的なデータを付録として随所に取り入れられている。

その理論の主要部分は3節で解説したクープマン問題である。遭難目標の分布  $p(x)$  は POC (Probability of Containment) と呼ばれる。探索活動による (条件付き) 探知確率  $f_x(\varphi(x))$  は POD (Probability of Detection) と呼ばれるが、クープマン問題では、探索資源  $\varphi(x)$  を探索時間としてランダム探索と呼ばれる探索活動を行った結果得られる探知確率である  $f_x(\varphi(x)) = 1 - \exp(-\varphi(x))$  が使われていた。目標に対する探知確率を示す積  $POC \times POD$  を POS (Probability of Success) と呼び、通常はこれを最大にすることを SAR 活動の目的とすることが多い。

POC を現実性のあるものにするのは、探知センサーの能力評価にかかっている。救難捜索では依然として人間の目視による遭難者や漂流物の発見が主流であり、例えば、視程 37 キロメートル以上をもつ良好な天候で高度 150 メートルを飛行する固定翼航空機から 8 人乗り救命筏を人間が視認できる能力は、航空機が筏から距離  $R = 2.7$  キロメートル以内ですれ違えば確実に探知し、それ以遠では決して探知しないとする理想的なセンサーに置き代えることができる。この距離  $R$  の 2 倍をセンサーの“有効探索幅”と呼び、さまざまな探索ビークルと遭難目標の組合せに対して実務的なデータが得られている。それはビークルの速度、風速や波浪の大きさによっても補正される。IAMSAR マ

ニュアルでは、このセンサー能力を基にして、幾つかある標準化された探索パターンを設定し、用意されたワークシートに数値を書き入れてさえいけば、POD が計算されるようになっている。また、POS を最大にする探索領域の設定も助言してくれる。

日本海沿岸部における海難に対する通常の SAR 活動は、海上保安庁がその責務を担っている。発生海域を管轄する管区海上保安本部の警備救難部が探索海域や探索部隊の編成等を決定する。遭難者の存在分布推定は、海流、潮流等の海洋データを管理する海洋情報部が漂流予測プログラムを使って作成しているが、現場に派遣された巡視艇による海洋状況の観測によりその補正がなされる。海上保安大学校の幹部教育においては、IAMSAR マニュアルをはじめとする救難捜索の理論を理解するための教育が、探索救助論の講義や実習を通じて行われている。他国における探索救難の情報システムとしては、米国沿岸警備隊の CASP [3]、英国の SARIS [16] やカナダの SARPlan [1] といったものがある。

## 6. 大災害での SAR 活動と探索理論の課題

3~5 節で解説した探索救難の理論が、1, 2 節で触れた東日本大震災での実情と最も違和感があるのは、両者における SAR 対象となる目標数の違いである。探索理論の起源から容易に想像がつくように、これまでの探索理論では、限られた情報量の少数の探索対象を効果的に探すことを目的に、主として確率モデルを用いた探索計画立案に主眼が置かれてきた。場合によっては、意思を持って巧妙に運動するかもしれない移動目標も考え、時間要素を含んだ動的でゲーム的な状況設定での理論も組み立てられてきた。しかし、大災害で最も重要な探索救難対象となるのは多数の被災者であることを踏まえ、探索理論に対する次のような課題を提言して、本報告を締めくくりたい。

- (1) 特殊環境下での陸上捜索に関する分析手法の進展が必要である。すなわち、自然環境の中での捜索を想定する従来型の救難捜索ではなく、瓦礫や倒壊家屋その他の特殊な環境下で、視覚、聴覚その他の工学センサーを用いる人間や救助犬、場合によっては探索ロボットといったものの探索能力の基礎的な定量評価を行っておく必要がある。
- (2) 静止目標探索モデルがより重要である。仮に目標が移動するとしても、それは自律的なもので

なく、例えば海潮流その他により移動を余儀なくされる受動的なものを想定し、自然法則の把握に関して日々のデータを積み重ねておく必要がある。同時に、自然データだけでなく、津波や洪水、雪崩等の災害被害シミュレーション結果も現実のデータによる検証を経た後データベース化して、大規模災害に巻き込まれた場合の被災者に関する分布推定に使用できるようにしておく必要がある。

- (3) 少ない情報しか得られないことの多い通常の SAR 活動では情報処理に関する確率モデルが重要であるが、大災害では対象とすべき目標数は多く、種類の異なる多量の情報に対するデータ・フュージョンやデータ・マイニングが重要である。
- (4) 従来研究も数多くあるものの、時間とともに重要性が変化する目標に対する探索問題がより重要であり、問題の評価尺度についても検討が必要である。
- (5) 最後に、人的資源も含め種類や性質の異なる探索資源の活用に関し、OR 的な分析とともに、通信や指揮、統率の面からの準備や組織作りが必要である。東日本大震災での集中探索活動の状況とは異なり、発災直後の混乱した状況では、常にこの問題の重要性が問われてきた。

**謝辞** さまざまなデータとご助言をいただいた海上自衛隊横須賀地方総監部をはじめとする災害派遣部隊関係者の皆様、元防衛大学校教授飯田耕司氏、防衛省統合幕僚監部乾悦久氏および海上保安大学校稲田健二氏に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] I. Abi-Zeid and J.R. Frost, "SARPlan: A Decision Support System for Canadian Search and Rescue Operations," *European Journal of Operational Research*, **162** (2005), 630-653.
- [2] S.J. Benkoski, M.G. Monticino and J.R. Weisinger, "A Survey of the Search Theory Literature," *Naval Research Logistics*, **38** (1991), 469-494.
- [3] CASP 2.0, <http://www.wagner.com/technologies/misionplanning/search-optimization/casp2.html>, Daniel H. Wagner Associates, Inc.
- [4] R. Hohzaki, "Search Allocation Game," *European Journal of Operational Research*, **172** (2006), 101-119.
- [5] 宝崎隆祐, 探索理論と最適化手法, 電子情報通信学会論文誌, **J91-A** (2008), 997-1005.
- [6] T. Ibaraki and N. Katoh, *Resource Allocation Problems: Algorithmic Approaches*, The MIT Press, London, 1988.
- [7] ICAO, <http://www2.icao.int/en/home/>.
- [8] 飯田耕司, 宝崎隆祐, 『三訂 探索理論: 探索オペレーションの数理』, 三恵社, 2007.
- [9] 飯田耕司, 『探索の情報蓄積の理論 目標分布推定と意思決定』, 三恵社, 2007.
- [10] IMO, <http://www.imo.org/Pages/home.aspx>.
- [11] International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual: Vol. 1~3, ICAO/IMO publications, London, 2003.
- [12] B.O. Koopman, *Search and Screening*, Pergamon, 1980. (原著: OEG Report, No. 56, 1946)
- [13] B.O. Koopman, "The Theory of Search: The Optimum Distribution of Searching Effort," *Operations Research*, **5** (1957), 613-626.
- [14] P. Morse and G. Kimball, *Methods of Operations Research*, Technology Press, 1950. (原著: OEG Report, No. 54, 1946)
- [15] H.R. Richardson and L.D. Stone, "Operations Analysis During the Underwater Search for Scorpion," *Naval Research Logistics Quarterly*, **18** (1971), 141-157.
- [16] SARIS, <http://www.bmtplus.com/products/saris.asp>.
- [17] C.M. Sternhell and T.M. Thorndike, *Anti-Submarine Warfare in World War II*, OEG Report, No. 51, 1946.
- [18] L.D. Stone, *Theory of Optimal Search*, Academic Press, New York, 1975.
- [19] A.R. Washburn (宝崎隆祐抄訳), 「米国における軍事 OR」, 『オペレーションズ・リサーチ』, **53** (2008), 561-564.