

## 陸域を伴う風圧流分離デイトムに基づく海上搜索計画手法

海上保安大学校海上安全学講座 齋藤 靖洋 (Yasuhiro Saito)

Department of Maritime Safety Technology, Japan Coast Guard Academy

### 1 はじめに

日本は周囲を海に囲まれた海洋国家であり、海上活動とともに発展してきた歴史がある。1人1人が意識するしないに関わらず、多くの人々が海からの恵みを様々な形で受けつつ、生活を営んでいる。家庭の食卓に並ぶ種々の魚の多くは、海洋における漁業の結果として提供されているものであり、夏になれば多くの人々が海水浴などのレクリエーションを通じて、海と関わりを持っている。そんな人々の身近に存在する海であるが、必ずしも恩恵だけを与え続けてくれるとは限らない。日本近海における救助を必要とする海難の発生状況は、令和2年度のみで累計1588隻、延べ人数4821名に達し、その数は決して少ないとは言えない[6]。海難の種類は数多くあれど、海難救助活動の中でも特に困難を極めるものの1つが、搜索救助活動である。陸上と異なり人の目が極端に減る海上においては、居るはずであった人が見えなくなり、戻らざるはずであった船が帰ってこなくなる、といった事案は後を絶たない。この場合、船舶あるいは人が何かしらの海難に巻き込まれたことをきっかけに、窮地に陥っている蓋然性は高いと言える。そのような場合に、搜索者が搜索目標を探しあて、搜索目標を危険な状態から脱出させることこそが、搜索救助活動の目的となる。海上における搜索救助活動にあたっては、海という特殊な環境を考慮した搜索計画を適切に策定することが何よりも重要である。搜索計画立案者が作成した適切な搜索計画に則り、搜索者が実際の搜索勢力を駆使して搜索活動を実施することで、行方不明となっている搜索目標を救助出来る可能性が増すのである。そこで、海事に関する全世界的な統一ルールを作成する立場にある国際海事機関(IMO)は現在、搜索計画立案者が適切な搜索計画を策定できるように、世界基準の搜索計画手法として改善搜索計画手法(ISPM)の利用を推奨している[4]。

搜索計画手法の基礎となる搜索理論は、第二次世界大戦中に米海軍が行った対潜水艦を想定した搜索問題の研究が起源とされ、戦後間もない1946年、Koopman[7]がその研究成果を体系化した著書を発表したことに端を発する。この本は搜索センサーの探知モデル、搜索パターンの評価モデル、最適搜索努力配分問題等を記述しており、現代においても通用する搜索理論の礎を記した名著と言われる。Koopmanによる搜索理論が提唱された後、これに基づいた搜索活動の実行が試みられるようになったが、当時はその理論を忠実に再現することに限界があった。その後も長い間、米国を中心とした搜索理論の研究は発展を続け、その集大成として1998年に、現在のISPMが記述された「国際航空海上搜索救助マニュアル(IAMSAR マニュアル)」がIMOにて採択された。ISPMはその後、限られた搜索勢力の中で如何に効率良く搜索を実施するかを模索する搜索計画立案者に受け入れられ、世界中の搜索救助機関で広く使われる様になった。

一方ISPM誕生後も、人々の搜索救助活動の成果向上に対する熱意が低下することはなく、その後も様々な方面で研究が進んでいく。Kratzkeら[8]は、米国沿岸警備隊が開発したSAROPS(搜索救助最適計画システム)により、搜索計画手法に大きな進歩を与えたことを明らかにした。SAROPSでは、搜索目標の位置の推定手法としてベイズ理論が用いられている。Breivik and Allen[3]は、ノルウェー気象研究所の海洋及び大気予測システムデータに基づき、搜索目標の動きを予測する搜索救助モデルを提案した。彼らの研究では、特にノルウェー海及び北海における風圧流の予測精度を向上させることに成功した。また、Akbariら[1]は、搜索計画の中でも特に搜索勢力の配置問題に着目し、複数の評価基準を持つモデルを考案した。同様にAkbari and Tural[2]はより広い観点から、世界の搜索救助エリアをカバーするために搜索救助基地に適切に搜索救助勢力を割り振ることを目的とした新しいアプローチを提案した。更にJieら[5]は、モンテカルロシミュレーションに基づいた海上における搜索救助の意思決定支援システムを提案し、その有効

性を示した。こうした様々な研究成果を基に、ISPM を利用していた各国の搜索計画手法は、自国が持つ搜索救助機関の能力等に合わせて、それぞれに独自の発展を遂げている面がある。

上述したような様々な研究成果がある中で、驚くべきことに、世界中の搜索計画手法の基準とされる ISPM そのものの直接的な改良について議論されているものはほとんど見受けられない。元来、ISPM における搜索事案は陸から遠く離れた海上で発生することが想定されており、そこには一切の陸域が存在しないものと考えられている。この前提に立てば、ISPM により得られた搜索区域内に陸域が含まれる場合、必ずしも最適な搜索行動を取れるとは言い難い。しかしながら、実際には沿岸近くにおける搜索事案であっても、他に抛り所とするものがない場合、本来陸域の存在を考慮していない ISPM の考え方をうたいたいとするニーズがあるのも事実である。これに対して、本稿では陸域の存在を考慮した新たな搜索計画手法を模索することで、ISPM の延長上にあるより最適な搜索計画手法を提案することを目的とする。

## 2 搜索計画理論の概要

### 2.1 デイタム

搜索者が搜索活動を実施する上で最も知りたい情報は、搜索目標が搜索開始時刻においてどこに存在するか、である。海上において遭難した搜索目標は、自力で移動することが困難な状況にあり、基本的には漂流のみによって移動すると考えられる。海上での遭難においては、通常、搜索目標の位置に関する情報は非常に限られたものとなり、搜索目標がどこにいるのかを正確に知ることは不可能な場合がほとんどである。したがって、一般的には搜索を実施するにあたり、まずは搜索目標の漂流の開始位置を特定することから始める。漂流開始位置が特定された後、搜索目標がどのように漂流したのかを予測した上で、漂流後の搜索目標の位置を推測する必要がある。この時、搜索開始時刻において搜索目標の居る可能性が最も高い地点（漂流後の搜索目標の位置）のことをデイタムと呼び、搜索者はデイタムを中心として搜索を実施することを考える。このことから、搜索目標の漂流の開始位置に関する情報がどの程度正確に入手できるかに応じて、ISPM には複数のデイタムが用意されている。搜索実行が困難なケースから並べれば、最も困難度合いが高いのは、搜索開始位置が広範な範囲（エリア）のどこかとしか分からない場合である。この場合、漂流を考慮した後の搜索目標の位置も、広大なエリアとして表現されるエリアデイタムが適用される。次いで困難度合いが大きいのは、フェリーからの海中転落等、漂流開始位置がある特定の航行経路上（ライン）のどこかとしか分からない場合である。この場合、漂流後の搜索目標の位置も、ある特定のライン上として表現されるラインデイタムが用いられる。一方、多くのケースでは、搜索目標が漂流開始した自国や位置がある程度の精度で判明している場合として考えることが出来る。この場合に用いられるデイタムを、風圧流分離デイタムと呼ぶ。風圧流分離デイタムにおいては、漂流開始位置がただ 1 点で与えられ、それに応じて漂流後の搜索目標の位置であるデイタムもある点として表現されることとなる。本稿では、この点をデイタムポイントと呼ぶ。また、本稿では紙面の制約上、漂流開始位置の推定方法や漂流要素の細かい計算方法には触れず、風圧流分離デイタムが適用可能な条件が揃っている、との条件のもと議論を進めていく。

### 2.2 漂流要素

ISPM において、漂流は主に海水の移動によるものと風の作用によるものに大別されている。このうち、海水の移動による漂流は更に、海流・潮流・吹送流・その他の流れ、の 4 つに分解される。1 つ目の海流は、沿岸よりある程度離れた距離に存在する地球規模の大きな海の流れを意味する。日本近海で言えば、南側から流れてくる黒潮や対馬暖流、北側から流れてくる親潮などが有名であり、これに付随する流れが含まれる。海流は時々刻々変化するような性質のものではなく、各位置においてほぼ一定の向きや速さを持つという特徴を持つ。この場合、搜索目標の移動方向は、そのまま海流の移動方向と一致している。2 つ目の潮流

は、比較的沿岸近くに発生する流れであり、沿岸付近の潮汐の変化によって海に高低差が生まれ、低い方に流れていくとする海水の流れを指す。潮流は、ほぼ毎日2回ずつ発生する干潮・満潮に影響される流れであるため、速さについては時々刻々変化する上、方向については概ね陸から離れる方向と陸に向かう方向が交互に現れる。潮流に関しても、搜索目標の移動方向は、そのまま潮流の移動方向と一致すると言えよう。3つ目の吹送流については、海上を風が通過する際に風に押されて海面上に海水の流れが発生し、その流れに乗った物体が移動することを表す。風が強ければ強いほど海水の流れが速くなり、また、その移動方向は風下方向と一致する。したがって、吹送流による搜索目標の移動方向は、その海域に吹く風の方向から決まる性質がある。最後にその他の流れは、例えば河口付近における川の流れなどがこれにあたり、この場合、河口付近の水が流れる方向に漂流をすることとなる。これら海水の個々の流れを合算した全漂流は、各要素の速度ベクトルを合成することにより、その速度と方向を求めることが出来る。

一方、風的作用による漂流は風圧流と呼ばれ、搜索目標の海上部分が風で押されることにより引き起こされる搜索目標の移動を指す。通常、その速度は搜索目標の海上部分の風圧面積と水面下の面積の比に応じて決まり、また、風の速度が大きいほど風圧流は速くなる。ISPMでは、搜索目標の種類及び風の速度に応じた風圧流の速度グラフが用意されている。また、風圧流の特徴的な性質として、方向が一意に定まらないことが挙げられる。風圧流の方向は、単純に風下方向と一致する訳では無く、搜索目標の海上部分に対する風の相対風向に応じて、風下方向から一定程度左右に偏角を持つことが知られている。これを風圧流偏角と呼ぶ。ISPMでは、風圧流偏角についても搜索目標の種類に応じた実験結果がまとめられていることから、風下方向と偏角の大きさが分かれば、その方向を知ることは難しくない。しかしながら、実際の搜索目標が風に対してどのような姿勢を取っているかを事前に知ることは出来ないため、搜索目標が風下方向に対して左右どちらに流されているのかを断定することは困難である。したがって、いずれの方向にも流される可能性があるものとして、風圧流分離デイトムにおいては最終的なデイトムポイントを2点想定し、搜索を実施する。

## 2.3 総合確率誤差及び成功確率

デイトムポイントが正確に予測できたとすれば、搜索目標はデイトムポイント上に存在すると考えられる。しかしながら、実際には様々な要因によりデイトムポイントの位置には誤差が含まれるため、単にデイトムポイント上を搜索しただけで搜索目標が見つかることはない。ISPMでは、デイトムポイントの位置の誤差のことを総合確率誤差と呼ぶ。総合確率誤差は、デイトムポイントを中心とした円を描いた場合に、搜索目標がその円内に含まれる確率が50%となるような半径の大きさとして定義され、具体的には

$$E = \sqrt{X^2 + D_e^2 + Y^2} \quad (1)$$

で計算される。ここで、 $X$ は漂流開始位置を正確に知ることが困難なために生じる漂流開始位置の確率誤差を、 $D_e$ は漂流した距離や方向を正確に知ることが困難なために生じる漂流による確率誤差を表す。また、 $Y$ については、搜索者自身がどれだけ正確に搜索中の自身の位置を測ったとしても必ず生じてしまう搜索者の位置の確率誤差を表す。 $X$ 及び $Y$ については、漂流開始位置及び搜索者の位置をどのような手段を用いて測定したかにより、値が決められる。船の設備が高度化している現在においては、位置の測定手段として多くの場合GPSが用いられており、その場合の誤差は $X = Y = 0.1[NM]$ であるため、比較的小さな値と言える。一方、 $D_e$ については、2.2節で述べた各漂流要素の速度を推測した際に生じる漂流速度の確率誤差 $D_{ve}$ と搜索目標の漂流時間 $t_d$ の積として与えられ、総合確率誤差の大部分を占める要素となる。これより、単純に漂流時間が長ければ長いほど、総合確率誤差が大きくなり、搜索活動の困難度が増すことが分かる。

デイトムポイントの位置に誤差が含まれている以上、デイトムポイントのみの搜索で搜索目標を発見することは期待できない。そのため、デイトムポイントを中心としてある程度の広さを持つ搜索範囲を決定し、効率的に搜索を実施することを考える。具体的にISPMでは、次の式で表される搜索目標の発見に成

功する確率 (成功確率  $POS$ ) を最大化するような搜索を実施することを目的とする。

$$POS = POC \times POD. \quad (2)$$

ここで、 $POC$  は搜索目標が設定した搜索区域内に存在する確率 (存在確率) を表し、 $POD$  は搜索目標が搜索区域内に存在するという条件の下で、搜索者が搜索目標を探知する条件付き確率 (探知確率) を意味する。

### 3 既存の風圧流分離デイトム

2 節の内容を踏まえ、ここで既存の風圧流分離デイトムについて整理する。上で述べたように、風圧流分離デイトムにおいてはデイトムポイントが 2 点存在し、それらを中心に搜索範囲を決めた上で搜索を実施する。式 (2) で示した  $POS$  を最大化する搜索区域を決定するにあたって、風圧流分離デイトムにおける  $POC$  及び  $POD$  の算出については以下の通りである。

#### 3.1 存在確率 $POC$

漂流が正確に予測できたとすれば、搜索目標の居る可能性はデイトムポイントで最も高く、デイトムポイントから離れる程低くなると考えられる。このため、搜索目標の存在確率密度は、デイトムポイントを中心として等高線が真円となるような二次元正規分布で表現されたと考えるのが自然である。したがって、風圧流分離デイトムにおける存在確率  $POC$  は、2 つのデイトムポイント周辺の存在確率密度が二次元正規分布で表現されることを利用して計算する。デイトムポイントを通るような垂直な平面で二次元正規分布を切断した場合、その断面は必ず正規分布の形状を持つ。2.3 節で紹介した総合確率誤差の定義から、この正規分布の標準偏差  $\sigma$  と総合確率誤差  $E$  の間には  $E = 1.1774\sigma$  の関係が成り立つ。今、図 1 のように搜索区域を設定することを考え、デイトムポイント同士 (DP1 及び DP2) の距離を  $\delta E$ 、デイトムポイントから搜索区域の端までの距離を  $\alpha E$  とおく。ここで、 $\delta$  は漂流速度、漂流方向、漂流時間に応じて事案毎に一意に定まるものであるのに対し、搜索者は  $\alpha$  の大きさを任意に変更することで搜索区域の大きさを変更することが出来る。本稿ではこれを搜索係数と呼ぶ。ここで、二次元正規分布及び総合確率誤差  $E$  の性質から、搜索係数  $\alpha = 3$  とした搜索区域を考えた場合、その中の  $POC$  はほぼ 100% となることが知られている。つまり、搜索活動を実施するにあたっては、デイトムポイントから搜索区域の端までの距離を大きく見積もっても  $3E$  に留めることが出来る。

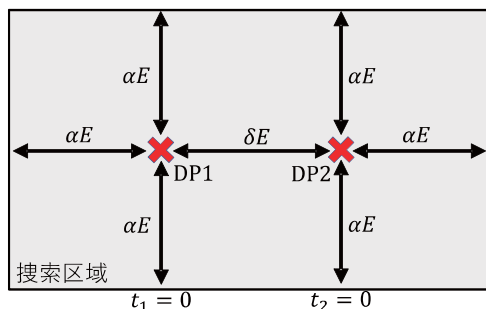


図 1: 既存の風圧流分離デイトム。

この場合、2つのデイトムポイントを中心にした二次元正規分布をそれぞれ単体で考えた場合の存在確率  $POC_i$  ( $i = 1, 2$ ) は次のように計算できる。

$$POC_1 = \int_{-\alpha E}^{(\delta+\alpha)E} \left\{ \int_{-\alpha E}^{\alpha E} f(x) dx \right\} f(t_1) dt_1, \quad (3)$$

$$POC_2 = \int_{-(\alpha+\delta)E}^{\alpha E} \left\{ \int_{-\alpha E}^{\alpha E} f(x) dx \right\} f(t_2) dt_2. \quad (4)$$

ここで、 $f(\cdot)$  は期待値 0、標準偏差  $\sigma$  の正規分布の確率密度関数を表し、 $E = 1.1774\sigma$  である。更に、 $t_1$  及び  $t_2$  はそれぞれ、デイトムポイント 1(DP1) 及び 2(DP2) を基準とした場合の左右方向の位置を表し、右方向を正、左方向を負とする。それぞれのデイトムポイントに対して、風圧流の影響を受けた目標が向かう確率は等しいと考えられることから、上記の式 (3) 及び式 (4) を用いて搜索区域全体の  $POC$  は

$$POC = \frac{1}{2}POC_1 + \frac{1}{2}POC_2 \quad (5)$$

で計算される。 $POC_1$  及び  $POC_2$  は共に係数  $\alpha$  の関数となっていることから、 $POC$  も係数  $\alpha$  の大きさに応じて値が求められることは自明である。この場合、搜索区域全体の大きさ  $A$  は、

$$A = \int_{-\alpha E}^{(\delta+\alpha)E} \{\alpha - (-\alpha)\} E dt_1 = 2\alpha(2\alpha + \delta)E^2 \quad (6)$$

で計算される。

### 3.2 探知確率 $POD$

探知確率  $POD$  は、搜索区域の大きさ  $A$  のみならず搜索者の搜索能力及び搜索の実施方法にも依存して決まる。ISPM においては、搜索者の能力は搜索努力量  $Z$  と呼ばれる指標で表され、

$$Z = V \times T \times W \quad (7)$$

で計算される。ここで、 $V$  は搜索時の速力を、 $T$  は搜索時間を、 $W$  は搜索実施時のセンサー能力を示す有効搜索幅を表す。有効搜索幅は、搜索時の気象海象や搜索目標の種類、航空機の高度等に応じて値が決定されるものであり、ISPM 上で一覧表が用意されている。そのため、搜索計画を立てる時点において、予めこれらの情報を集めていくことで、搜索努力量  $Z$  は一意の値として計算することが出来る。

また、搜索の実施方法としては、最も効率的に搜索を実施する方法である並行搜索と最も非効率に搜索を実施する方法であるランダム搜索の2種類がある。並行搜索とは、長方形の搜索区域が与えられた場合に、搜索区域の長辺方向に伸びる搜索経路を一定の間隔ごとに配置し、それらの経路間隔を保ったまま搜索を実施する搜索方法である。一方のランダム搜索は、実際には実行不可能な搜索方法だが、搜索区域内の各地点を完全にランダムに搜索する方法を意味し、探知確率  $POD$  の下限を与える性質を持つ。並行搜索を行う場合の  $POD$  は、

$$POD = \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{2} C \right) \quad (8)$$

となり、ランダム搜索を行う場合の  $POD$  は、

$$POD = 1 - \exp(-C) \quad (9)$$

と表される。ここで、 $C$  は搜索努力量  $Z$  と搜索区域の大きさ  $A$  の比 ( $C = Z/A$ ) を表し、搜索密度と呼ばれる。式 (8) 及び式 (9) のいずれの探知確率  $POD$  も搜索密度  $C$  の関数として表現されることが分かる。ま

た、並行探索においては、経路間隔を維持した探索を実施することが非常に重要な要素となる。並行探索を行う場合の経路間隔  $S$  は探索密度  $C$  及び有効探索幅  $W$  を用いて、 $S = W/C$  で求めることが出来る。

一般的に、探索を実施するにあたって探索者が用意出来る探索努力量  $Z$  には限りがある。一定の探索努力量  $Z$  を仮定した場合、探知確率  $POD$  は存在確率  $POC$  と同様に、探索区域の大きさ  $A$  に応じて値が決まる。このことから、 $POD$  も係数  $\alpha$  の関数とみることが出来るため、一定の探索努力量  $Z$  の下で

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha} POS(\alpha) = \arg \max_{\alpha} \{POC(\alpha) \times POD(\alpha)\} \quad (10)$$

を解くことで、成功確率  $POS$  を最大化する最適な探索係数  $\alpha^*$  を求めることが出来る。

## 4 陸域を考慮した風圧流分離デイトム

3節で紹介した通り、ISPMに基づく風圧流分離デイトムにおいては、設定された探索区域内に陸域が含まれることは想定されていない。つまり、得られたデイトムポイントに対して、探索目標はランダムに二次元正規分布に従って分布していると考えている。しかしながら実際の探索事案を考える場合、その多くは岸壁から海への転落を含む沿岸海域で発生しており、ISPMの考え方をそのまま適用した場合には、設定した探索区域に陸域が含まれることも珍しくはない。この場合、探索目標が陸域内にまで漂流する可能性を仮定してしまう現状のISPMの理論は破綻していると言えよう。したがって本稿では、岸壁からの海中転落者が沖に流されていき、行方不明となる事案をモデルケースとして、得られた探索区域内に陸域が含まれる場合を考える。以降は既存のISPMの理論を元に、陸域が含まれる場合の新たな存在確率  $POC$  及び探知確率  $POD$  の算出方法を模索し、陸域を考慮した上で最適な探索区域を設定することが出来るような探索計画手法を考案する。

### 4.1 陸域を考慮した存在確率 $POC$

図2のように、探索活動を実施する海域において上下に陸域が存在する場合を考える。この場合、切断分布の考え方を参考に、陸域の存在を考慮した後の探索区域内の海域部分の  $POC$  を

$$POC = \frac{\text{陸域考慮前の探索区域内の海域部分の } POC''}{\text{陸域考慮前の海域部分全体の } POC'} \quad (11)$$

で表現する。この式は、仮に与えられた探索区域の中に陸域が含まれていないとしても、ISPMにおいて存在確率  $POC$  が100%となるような海域の中に少しでも陸域が含まれている場合、探索区域内の  $POC$  が影響を受けることを意味する。

これより、まずは式(11)の分母にあたる陸域考慮前の海域部分全体の  $POC'$  を計算する。図3のように探索区域を設定することを考え、既存手法と同様にデイトムポイント同士の距離を  $\delta E$ 、デイトムポイントから探索区域の端までの距離を  $\alpha E$  とおく。また、デイトムポイントを通る直線を基準線として、各デイトムポイント(DP1及びDP2)を原点とした基準線上の左右の位置を  $t_i$  とし、基準線から見た  $t_i$  における上下の陸岸の位置をそれぞれ  $\beta_{iT}(t_i)E$  及び  $\beta_{iB}(t_i)E$  とおく。この場合、各ポイントデイトムを中心とした陸域を考慮する前の海域部分のみの存在確率  $POC'_i$  はそれぞれ、

$$POC'_1 = \int_{-3E}^{3E} \left\{ \int_{\beta_{1B}(t_1)E}^{\beta_{1T}(t_1)E} f(x)dx \right\} f(t_1)dt_1, \quad (12)$$

$$POC'_2 = \int_{-3E}^{3E} \left\{ \int_{\beta_{2B}(t_2)E}^{\beta_{2T}(t_2)E} f(x)dx \right\} f(t_2)dt_2 \quad (13)$$

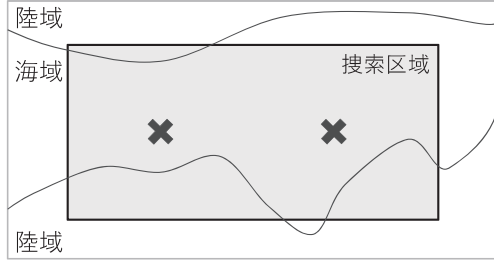


図 2: 陸域を含む搜索区域.

となる. これらの結果から, 陸域考慮前の海域部全体の  $POC'$  は

$$POC' = \frac{1}{2}POC'_1 + \frac{1}{2}POC'_2 \quad (14)$$

で計算される.

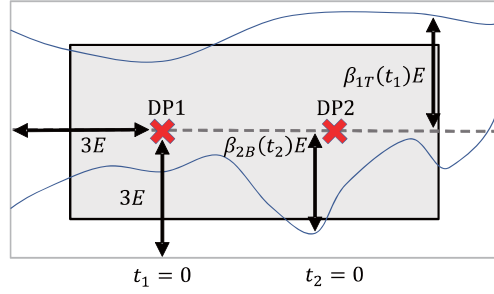


図 3: 提案手法における係数設定.

一方で, 式 (11) の分子にあたる陸域考慮前の搜索区域内の海域部分の  $POC$  を計算する. 先程と同様に, 各データポイントを中心とした陸域考慮前の搜索区域内の海域部分の存在確率はそれぞれ

$$POC''_1 = \int_{-\alpha E}^{(\delta+\alpha)E} \left\{ \int_{\gamma_{1B}(t_1)E}^{\gamma_{1T}(t_1)E} f(x)dx \right\} f(t_1)dt_1, \quad (15)$$

$$POC''_2 = \int_{-(\alpha+\delta)E}^{\alpha E} \left\{ \int_{\gamma_{2B}(t_2)E}^{\gamma_{2T}(t_2)E} f(x)dx \right\} f(t_2)dt_2 \quad (16)$$

となる. ここで,  $\gamma_{iB}(\cdot) = \max(-\alpha, \beta_{iB}(\cdot))$  かつ  $\gamma_{iT}(\cdot) = \max(\alpha, \beta_{iT}(\cdot))$  である. つまり, 係数  $\gamma_{i\cdot}(\cdot)$  は陸岸若しくは搜索区域の一辺のうち基準線に近い方の位置を示す係数である. これらの結果から, 陸域考慮前の搜索区域内の海域部分の  $POC''$  は

$$POC'' = \frac{1}{2} \cdot POC''_1 + \frac{1}{2} \cdot POC''_2 \quad (17)$$

となる.

したがって, 式 (14) 及び式 (17) の結果から, 陸域を考慮した場合の搜索区域内の海域部分の  $POC$  は,

$$POC = \frac{POC''_1 + POC''_2}{POC'_1 + POC'_2} \quad (18)$$

である。この場合でも、各事案におけるデイトムポイントの位置に応じて各種係数  $\beta_i(\cdot)$  及び  $\gamma_i(\cdot)$  が一意に定まるとすれば、式 (18) で表される  $POC$  は搜索係数  $\alpha$  のみの関数とみなせる。

## 4.2 陸域を考慮した探知確率 $POD$

設定された搜索区域に陸域が含まれる場合、陸域が搜索不可能であることは明らかである。この場合であっても、 $POD$  に関しては式 (7) で与えられる搜索努力量  $Z$  を全て搜索区域の海域部分  $A$  に投じる点に変わりはない。なお、この場合の搜索面積  $A$  は次の式で表される。

$$A = \int_{-(\alpha+\delta)E}^{\alpha E} \{\gamma_{1T}(t_1) - \gamma_{1B}(t_1)\} E dt_1 \quad (19)$$

したがって、式 (7) で計算される任意の搜索努力量  $Z$  が与えられた場合、従来の ISPM と同様に式 (8) 及び式 (9) を用いて、 $POD$  を求めることが出来る。ただし、陸岸が入り組んでいる場合、実際の搜索活動において並行搜索を実施することには困難を伴うケースが多い。この場合の搜索活動については、式 (9) で表せるランダム搜索の  $POD$  を用いて評価することが望ましいと考えられる。この結果から、 $POD$  に関しては  $POC$  と異なり、設定された搜索区域内に陸域が含まれた場合に初めて増加することとなる。

以上のことから、 $POC$  及び  $POD$  は共に搜索係数  $\alpha$  の関数として求められるため、既存手法と同様に式 (10) を解くことで、 $POS$  を最大化する最適搜索係数  $\alpha^*$  を求めることが出来る。なお、以上の結果から  $POC$  及び  $POD$  は共に、陸域が含まれる場合の方が陸域が含まれない場合と比べて大きな値を取ると考えられる。結果として、陸域が含まれることにより、既存手法よりも高い  $POS$  を期待することが出来る。ただし、並行搜索が行えなくなることで大幅な  $POD$  の減少が起きた場合、同時に成功確率  $POS$  の大幅な減少が生じる恐れも含むことに注意が必要である。

## 5 数値例

本節では、提案手法を用いた場合の最適搜索係数  $\alpha^*$  及び成功確率  $POS$  の変化について検証する。具体的には、デイトムポイント周辺に陸域が存在する場合を想定し、本稿で紹介した提案手法で最適化した搜索区域を設定した場合と既存の ISPM で計算する場合 (既存手法) の結果を比較する。更に、実際の搜索活動を考える場合、既存手法で搜索区域を設定したとしても、実際には陸域部分の扱いを工夫して何とか搜索を試みるのが自然であろう。これについても合わせて評価を行うため、想定 2 にて実働手法の結果として紹介する。なお、計算を行うにあたっての前提条件は以下の通りである。救命胴衣を着用した釣り人が港外の釣り船から海中転落し、行方不明となった状況を想定する。漂流開始地点及び搜索者の位置は GPS を利用して測定したものとし、 $X = Y = 0.1$  と仮定した。また、海流や潮流のある海域を 5 時間漂流したものとし、漂流速度の誤差及び漂流時間は、 $D_{ve} = 0.72$ ,  $t_d = 5$  と設定した。この場合の総合確率誤差は  $E = 1.9[NM]$  と計算される。

### 5.1 想定 1：直線的な海岸線が含まれる場合

想定 1 においては、海岸線を基準線上または基準線から距離  $E$  だけ離れた位置にあると仮定する。またデイトムポイント間の距離は図 4 の通りに設定した。したがって、 $\delta = 2$  であり、 $\beta_{iB}(t_i) = 0$  または  $\beta_{iB}(t_i) = -1$  である。想定 1 では、主に提案手法と既存手法の結果の比較と陸岸位置が結果に与える影響について確認する。

搜索努力量  $Z$  を変化させた場合の結果を表 1 及び表 2 に示す。どちらの表においても、全ての手法において搜索努力量  $Z$  が大きくなるにつれ、最適搜索係数  $\alpha^*$  や成功確率  $POS$  が大きくなる事が分かる。こ

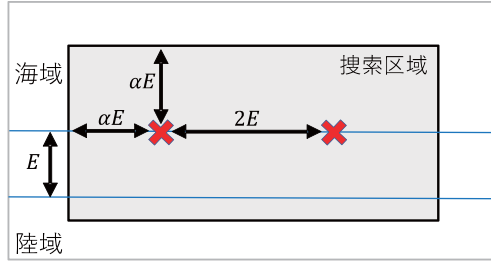


図 4: デイタムポイント及び陸域の位置関係 (想定 1).

の増加量は  $Z$  が小さい時ほど顕著であり、特に勢力が少ない状況において、少しでも多くの搜索勢力を集めることの重要性を表していると言える。更に、提案手法と既存手法を比較した場合、どの表においても提案手法の方が高い  $POS$  を有しており、陸域が含まれることで結果としてより成功確率  $POS$  が向上していることが見て取れる。特に、その傾向は陸域が多く含まれるほど ( $\beta_{iB}(t_i) = -1$  よりも  $\beta_{iB}(t_i) = 0$  の方が) 明瞭であることが分かる。また、並行搜索の場合もランダム搜索の場合も、最適搜索係数  $a^*$  については、陸域が多く含まれる場合 ( $\beta_{iB}(t_i) = 0$ ) には提案手法の方が大きくなっているが、陸域が離れた場合 ( $\beta_{iB}(t_i) = -1$ ) には既存手法と提案手法で差がないことも分かる。それに対して、最適な搜索エリアの大きさを表す  $A^*$  については、どちらの表においても、陸域が多く含まれる場合 ( $\beta_{iB}(t_i) = 0$ ) に小さい値となっている。これらの結果をまとめれば、陸域が多く含まれる場合 ( $\beta_{iB}(t_i) = 0$ ) には、得られる搜索区域内に陸域が含まれている一方で、陸域が少ない場合 ( $\beta_{iB}(t_i) = -1$ ) には、得られる搜索区域内には陸域が含まれていないこととなる。したがって、前者は既存手法と比べて  $POC$  及び  $POD$  がともに増加するため  $POS$  が大きく増加しているのに対し、後者は  $POC$  の増加が見られるが  $POD$  には変化がないことで  $POS$  の増加が限定的になっているためと考えられる。これらの結果から、搜索区域に陸域が含まれる場合には、ISPM で表示される搜索区域よりも面積としては狭い範囲で搜索を実行するが、最適搜索係数としてはより大きい値を取ることが最適となる。最後に表 1 及び表 2 を比較した場合、全ての場合において、並行搜索 (表 1) の成功確率  $POS$  の方がランダム搜索 (表 2) の結果と比べて大きな値を取っており、その差は陸域が多く含まれる場合の提案手法においてより大きくなることが分かった。これに対して、最適搜索係数  $\alpha^*$  や対応する  $A^*$  に目を向ければ、全ての場合においてランダム搜索の方が大きな値となっている。これは、ランダム搜索で小さな値の  $POD$  を使う代わりに、より大きな  $POC$  を得ようと搜索区域を大きくするためだと考えられる。

## 5.2 想定 2：複雑な海岸線が含まれる場合

続いて、より現実に近い状況を考え、デイタム付近に複雑な海岸線が存在する場合を想定する。ただし、計算コスト削減のため、実際の海岸線を直線で近似した上で、デイタムポイント及び陸岸の位置関係を図 5 の通り設定した。想定 1 と同様に、提案手法と既存手法をそれぞれ適用したと仮定し、搜索努力量  $Z$  を変化した場合の最適搜索係数  $\alpha^*$  及び  $POS$  を導出した。また、実働時のことを考えると、仮に既存手法を適用して搜索区域を設定したとしても、実際にはその中に陸域が含まれる状況となる。この場合、搜索者にとっての代替案は、与えられた搜索区域内の海域部分のみを搜索する様に経路間隔を調整するか、または、経路間隔をそのままに陸域を搜索しなかった分の余った時間で搜索区域の外側に更に搜索するか、のいずれかであろう。本節においては、前者の選択を取った場合に搜索者が得るであろう効用についても確認するため、提案手法の計算方法を用いての結果 (実働手法) も求めた。

表 3 及び表 4 は想定 2 の事案において、それぞれ並行搜索及びランダム搜索を実行した場合の結果を表す。

表 1: 並行探索の場合 (想定 1) .

|                                 | $Z = 2$ | $Z = 4$ | $Z = 6$ | $Z = 8$ | $Z = 10$ |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 提案手法 ( $\beta_{iB}(t_i) = 0$ )  |         |         |         |         |          |
| $\alpha^*$                      | 0.44    | 0.59    | 0.70    | 0.79    | 0.87     |
| $A^*$                           | 4.57    | 6.77    | 8.59    | 10.21   | 11.75    |
| POC                             | 27.55%  | 38.75%  | 46.92%  | 53.37%  | 58.84%   |
| POD                             | 41.63%  | 54.08%  | 61.86%  | 67.39%  | 71.40%   |
| POS                             | 11.47%  | 20.96%  | 29.02%  | 35.97%  | 42.02%   |
| 提案手法 ( $\beta_{iB}(t_i) = -1$ ) |         |         |         |         |          |
| $\alpha^*$                      | 0.32    | 0.44    | 0.52    | 0.59    | 0.65     |
| $A^*$                           | 6.10    | 9.15    | 11.41   | 13.55   | 15.49    |
| POC                             | 21.48%  | 31.28%  | 38.04%  | 44.01%  | 49.09%   |
| POD                             | 31.89%  | 41.63%  | 49.00%  | 54.08%  | 58.16%   |
| POS                             | 6.85%   | 13.02%  | 18.64%  | 23.80%  | 28.55%   |
| 既存手法                            |         |         |         |         |          |
| $\alpha^*$                      | 0.32    | 0.44    | 0.52    | 0.59    | 0.65     |
| $A^*$                           | 6.10    | 9.15    | 11.41   | 13.55   | 15.49    |
| POC                             | 18.90%  | 27.52%  | 33.48%  | 38.72%  | 43.20%   |
| POD                             | 31.89%  | 41.63%  | 49.00%  | 54.08%  | 58.16%   |
| POS                             | 6.03%   | 11.46%  | 16.40%  | 20.94%  | 25.13%   |

表 2: ランダム探索の場合 (想定 1) .

|                                 | $Z = 2$ | $Z = 4$ | $Z = 6$ | $Z = 8$ | $Z = 10$ |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 提案手法 ( $\beta_{iB}(t_i) = 0$ )  |         |         |         |         |          |
| $\alpha^*$                      | 0.56    | 0.69    | 0.78    | 0.85    | 0.90     |
| $A^*$                           | 6.31    | 8.42    | 10.02   | 11.35   | 12.35    |
| POC                             | 36.50%  | 46.19%  | 52.67%  | 57.50%  | 60.82%   |
| POD                             | 27.17%  | 37.82%  | 45.04%  | 50.57%  | 55.51%   |
| POS                             | 9.92%   | 17.47%  | 23.72%  | 29.08%  | 33.76%   |
| 提案手法 ( $\beta_{iB}(t_i) = -1$ ) |         |         |         |         |          |
| $\alpha^*$                      | 0.45    | 0.56    | 0.63    | 0.69    | 0.73     |
| $A^*$                           | 9.42    | 12.61   | 14.83   | 16.84   | 18.24    |
| POC                             | 32.12%  | 41.45%  | 47.40%  | 52.45%  | 55.75%   |
| POD                             | 19.13%  | 27.17%  | 33.28%  | 37.82%  | 42.21%   |
| POS                             | 6.14%   | 11.26%  | 15.77%  | 19.83%  | 23.53%   |
| 既存手法                            |         |         |         |         |          |
| $\alpha^*$                      | 0.45    | 0.56    | 0.63    | 0.69    | 0.73     |
| $A^*$                           | 9.42    | 12.61   | 14.83   | 16.84   | 18.24    |
| POC                             | 28.26%  | 36.47%  | 41.71%  | 46.15%  | 49.06%   |
| POD                             | 19.13%  | 27.17%  | 33.28%  | 37.82%  | 42.21%   |
| POS                             | 5.40%   | 9.91%   | 13.88%  | 17.45%  | 20.71%   |

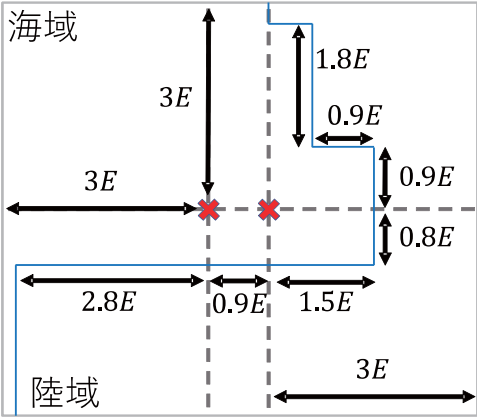


図 5: デイタムポイント及び陸域の位置関係 (想定 2).

表 3: 並行探索の場合 (想定 2) .

|            | $Z = 4$ | $Z = 8$ | $Z = 12$ | $Z = 16$ | $Z = 20$ |
|------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 提案手法       |         |         |          |          |          |
| $\alpha^*$ | 0.50    | 0.67    | 0.79     | 0.89     | 0.99     |
| $A^*$      | 6.86    | 10.84   | 14.15    | 16.35    | 18.61    |
| POC        | 36.57%  | 52.54%  | 63.53%   | 69.53%   | 74.72%   |
| POD        | 53.52%  | 64.52%  | 71.23%   | 78.00%   | 82.20%   |
| POS        | 19.57%  | 33.90%  | 45.25%   | 54.23%   | 61.42%   |
| 既存手法       |         |         |          |          |          |
| $\alpha^*$ | 0.50    | 0.67    | 0.79     | 0.89     | 0.97     |
| $A^*$      | 6.86    | 10.84   | 14.15    | 17.22    | 19.89    |
| POC        | 29.85%  | 42.89%  | 51.85%   | 58.90%   | 64.16%   |
| POD        | 53.52%  | 64.52%  | 71.23%   | 75.58%   | 79.24%   |
| POS        | 15.97%  | 27.67%  | 36.94%   | 44.52%   | 50.85%   |
| 実働手法       |         |         |          |          |          |
| $\alpha^*$ | 0.50    | 0.67    | 0.79     | 0.89     | 0.97     |
| $A^*$      | 6.86    | 10.84   | 14.15    | 16.35    | 18.15    |
| POC        | 36.57%  | 52.54%  | 63.53%   | 69.53%   | 73.72%   |
| POD        | 53.52%  | 64.52%  | 71.23%   | 78.00%   | 83.28%   |
| POS        | 19.57%  | 33.90%  | 45.25%   | 54.23%   | 61.40%   |

表 4: ランダム検索の場合 (想定 2) .

|            | $Z = 4$ | $Z = 8$ | $Z = 12$ | $Z = 16$ | $Z = 20$ |
|------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 提案手法       |         |         |          |          |          |
| $\alpha^*$ | 0.59    | 0.73    | 0.80     | 0.89     | 0.96     |
| $A^*$      | 8.86    | 12.44   | 14.44    | 16.35    | 17.92    |
| POC        | 45.02%  | 58.10%  | 64.41%   | 69.53%   | 73.22%   |
| POD        | 36.33%  | 47.44%  | 56.44%   | 62.42%   | 67.25%   |
| POS        | 16.36%  | 27.56%  | 36.36%   | 43.39%   | 49.24%   |
| 既存手法       |         |         |          |          |          |
| $\alpha^*$ | 0.59    | 0.73    | 0.82     | 0.90     | 0.96     |
| $A^*$      | 8.86    | 12.44   | 15.04    | 17.54    | 19.55    |
| POC        | 36.75%  | 47.42%  | 54.02%   | 59.58%   | 63.53%   |
| POD        | 36.33%  | 47.44%  | 54.98%   | 59.83%   | 64.06%   |
| POS        | 13.35%  | 22.50%  | 29.70%   | 35.64%   | 40.69%   |
| 実働手法       |         |         |          |          |          |
| $\alpha^*$ | 0.59    | 0.73    | 0.82     | 0.90     | 0.96     |
| $A^*$      | 8.86    | 12.44   | 14.85    | 16.57    | 17.92    |
| POC        | 45.02%  | 58.10%  | 65.58%   | 70.07%   | 73.22%   |
| POD        | 36.33%  | 47.44%  | 55.42%   | 61.92%   | 67.25%   |
| POS        | 16.36%  | 27.56%  | 36.35%   | 43.39%   | 49.24%   |

こちらは搜索努力量  $Z$  を 4 から 20 まで 4 刻みで設定した場合の最適搜索係数  $\alpha^*$  や各種確率の変化を示した。並行搜索であってもランダム搜索であっても、提案手法の POS は既存手法と比べて大きな値を取っていることから、提案手法の優位性がはっきりと確認できる結果となった。特にその優位性は、搜索努力量  $Z$  の値が大きい場合ほど、より明確であることが分かる。一方の既存手法の結果は、実行した搜索を評価する観点から考えても、信憑性の低い結果を示していると言える。これらの結果からも、デイトムの周囲に陸域が存在する場合における POS の改善効果が顕著であることは明らかである。これはつまり、搜索者にとっては搜索実行の困難度が増すはずの陸域の存在が、実際には搜索者にとって大きなアドバンテージをもたらしていることを意味する。

更に、実働手法と各種手法の結果を比較すれば、机上の計算結果である既存手法の POS と比較して、実行可能な搜索活動である実働手法の POS は大きく増加していることが確認できる。特に、経路間隔を調整することで単純に ISPM で得られた搜索区域内の海域部分のみを搜索する実働手法の POS が、提案手法で最適化した POS とも非常に近い値を示している点は興味深い。本稿の数値例においては、計算コスト削減のために海岸線を直線に近似して計算を行ったが、実際の複雑な海岸線においても同様の傾向が見られることが予想される。したがって、複雑な海岸線のために計算コストの観点から提案手法の適用が困難となる場合であっても、実際には既存手法で求めた搜索区域の中で海域部分のみの搜索を実行すれば、最適な搜索に近い一定程度の効果を得られることが期待できる。とりわけ搜索の勢力が乏しい搜索初期の段階において、計算コストの大きい提案手法の結果を待たずに、既存手法の結果から陸域部分を除いて搜索を実施する運用が取れることは、搜索者にとって魅力的な選択肢となりえる。

最後に、既存手法における並行搜索（表 3 中段）とランダム搜索における提案手法（表 4 上段）及び実働手法（表 4 下段）の結果を比較する。これは、既存手法においては陸域の存在を考慮していないために並行搜索が実施できるとして考えられたが、実際には陸域が存在しているために並行搜索が行えず、代わりにランダム搜索で評価した場合を意味する。この場合、本数値例におけるランダム搜索時の提案手法や

実働手法の  $POS$  は、並行探索時の既存手法の  $POS$  と非常に近い値を取る結果となっている。つまり、陸域が含まれることにより並行探索からランダム探索への変更を余儀なくされることで生じるデメリットが、陸域の存在が探索活動全般に与えるメリットによって打ち消されている状況が見て取れる。

## 6 まとめと今後の課題

本稿では、世界基準の探索計画手法である ISPM において、陸域の存在する沿岸区域においても最適な探索区域を策定する手法を提案した。具体的には、探索目標の漂流開始位置が正確に把握できる場合に用いられる風圧流分離デイトムを対象に、探索区域内に陸域が含まれた場合の新たな最適探索区域の算出方法を考案した。数値例を通じて、並行探索やランダム探索といった探索方法の種別に関わらず、本手法を適用することで、より大きな成功確率  $POS$  の達成が期待できることを示した。また、提案手法の適用が難しい場合においても、既存手法で得られた探索区域の海域部分のみを探索する運用方針を策定することで、提案手法で最適化した探索計画と同程度の成功確率  $POS$  に近づけることが可能であることを示した。

今後の課題として、本稿で提案した存在確率の算出方法は、暗に陸域部分に配分された存在確率を用いて、海域部分の存在確率が一律に増加することを仮定している。一方これと異なる考え方としては、陸域部分に配分された存在確率は、海岸線付近の存在確率の上昇にのみ影響するといった仮定も自然なものと思える事が出来る。現状では、どちらがより優れた結果となるかを断定することは出来ないが、後者の考え方を取り入れた存在確率の算出方法を模索する必要はあるであろう。

## 参考文献

- [1] A. Akbari, H. A. Eiselt and R. Pelot, “A maritime search and rescue location analysis considering multiple criteria, with simulated demand,” *Informaiton Systems and Operational Research*, **56**, pp.92-114, 2018.
- [2] E. Akbayrak and M. K. Tural, “Maritime Search and Rescue (MSAR) Operations: An Analysis of Optimal Asset Allocation,” *Modeling, Dynamics, Optimization and Bioeconomics II*, pp.23-33, 2017.
- [3] Ø. Breivik and A. Allen, “An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea,” *Journal of Marine Systems*, **69**(1-2), pp.99-113, 2008.
- [4] International Maritime Organization, *International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual 2016 Edition*, IMO Publication, London, 2016.
- [5] L. Jie, S. Yao and Z. Zhang, “Research on subareas division problem of maritime search and rescue based on improved Monte Carlo algorithm,” *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Mechatronice and Automation*, pp.1464-1468, 2013.
- [6] 海上保安庁, “令和 2 年版 海上保安統計年報 71 巻”, URL:<https://www.kaiho.mlit.go.jp/doc/tokei/r2tokei/tokei2020.71.pdf> (閲覧：2022-01-30) .
- [7] B. O. Koopman, *Search and Screening*, Operations Evaluations Group Report No.56, Center for Naval Analyses, Alexandria, VA, 1946.
- [8] T. M. Kratzke, L. D. Stone and J. R. Frost, “Search and rescue optimal planning system,” *Proceedings of the 2010 13th International Conference on Information Fusion*, **13**, pp.1-8, 2010.