

海上搜索計画手法における搜索経路間隔の決定について

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

海上保安大学校 一柳 賢伸 (Kenshin Ichiyanagi) ^{††}

海上保安大学校 廣澤 拓磨 (Takuma Hirose) ^{††}

海上保安大学校 山本 航世 (Kousei Yamamoto) ^{††}

^{††} Japan Coast Guard Academy

1 はじめに

四方を海に囲まれた島国である日本は、海と密接な関係を持ちつつ発展を遂げてきた。我々の生活を支える様々な貿易も、重量ベースで言えば、その99%が船により実施されているものであり、現在の豊かな生活の基礎は、海運によりもたらされているとも言える。日本人にとって身近に存在する海は、このような多大な恵みを与えてくれつつも、時として我々に大きな被害を与える存在でもある。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3年度のみで累計1559隻、延べ人数4450名に達し、その数は減少傾向ではあるものの決して少なくない[3]。海難の種類は様々あるが、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、誰にも知られることなく海難が発生し、人や船が遭難するといった事案は後を絶たない。そのような場合に、搜索者が搜索目標を探しあて、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。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)の利用を提唱している[2]。

搜索計画手法の基礎となる搜索理論は、1946年にKoopman[4]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。その後も長い間、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効率良く搜索を実施する必要のある搜索機関に広く受け入れられ、世界中に浸透していった。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ではなく、その後も様々な方面で研究が進んでいく。Kratzkeら[5]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が与えられ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。また、Gaoら[1]は、複数の搜索救助機関が共同で搜索を実施する場合において、モンテカルロシミュレーションに基づく搜索目標の漂流予測モデルを用いて、各搜索区域をどのようにカバーしあうのが効果的であるかを明らかにした。更にWang and Meghiani[6]は、外洋における多搜索者の多搜索目標への割当問題を定式化し、搜索者が各段階において、3つの搜索手法を適宜選択し搜索を実施した場合の有効性を示した。

上述したような様々な研究成果がある一方で、世界中の搜索計画手法の基礎とされる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。ISPMは一定の理論的背景の下、搜索救助活動が最も効率的に行えるような搜索区域及び搜索経路を適切に設定する方法として誕生した。しかしながら、ISPMにより設定された搜索計画を実行に移そうとした場合、上述した2つの要素を同時に満たすような搜索活動を実施することは不可能であることが分かる。それゆえ各搜索救助機関は、独自の解釈の下で搜索区域及び搜索経路のいずれを優先するかを判断しなければならない。これに対して、本稿では搜索区域及び搜索経路を同時に満たした上で、実行可能な搜索計画手法を模索することで、より実行に適した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、搜索開始時刻における搜索目標の位置である。搜索目標が海上において遭難した場合、その後、自力で移動することは困難であり、基本的には漂流によってのみ移動するものと考えられる。海上での遭難においては、通常、手に入る情報は限られたものとなるが多く、搜索目標の正確な位置を知ることはほとんど不可能である。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開始位置を特定することから始める。漂流開始位置を特定し、その後搜索目標がどのように漂流したのかを予測して、最終的に漂流後の搜索目標の位置を推測する必要がある。この時、搜索開始時刻における漂流後の搜索目標の位置（目標の居る可能性が最も高いと思われる地点）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。ISPMには、搜索目標の漂流開始位置を特定するための情報がどの程度入手できるかに応じて、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、漂流開始位置が広範な範囲（エリア）の中である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ため、これをエリアデイタムと呼ぶ。次いで困難度合いが大きいのは、フェリー乗客の海中転落に後から気付いた場合等、漂流開始位置がある特定の航行経路（ライン）上である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として表現されるため、これをラインデイタムと呼ぶ。一方、搜索目標が漂流開始した時刻や位置がある程度の精度で判明している場合、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。ISPMでは、これをポイントデイタムと呼ぶ。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毎の細かい計算方法等には触れず、ポイントデイタムが適用可能な条件が揃っている、との仮定のもと議論を進めていく。

2.2 漂流

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、吹送流及びその他の流れの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、ある程度の期間、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、搜索目標の移動速度及び方向は、そのまま海流の移動速度及び方向と一致する。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、低い方に流れていこう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及び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、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海面流は、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、風の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、風の速度が大きいかほど風圧流は速くなる。ISPMには、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の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ての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。

上記2つの要素（全海面流及び風圧流）の速度ベクトルが分かれば、それを合成することにより、全漂流の速度ベクトルを得ることが出来る。加えて、搜索者の搜索海域への移動時間を考慮して、搜索開始時刻を設定すれば、搜索目標の漂流時間も決まることとなる。最終的に、以上の情報を用いて漂流開始位置を中心に漂流ベクトルを描くことで、漂流後の位置であるデイトムを求めることが出来る。このように1点で与えられるデイトムのことを、デイトムポイントと呼ぶ。

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、搜索者がデイトムポイントを探した場合に、搜索目標は必ず見つかると考えられる。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て円を描いた場合、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に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と搜索目標の漂流時間の積として与えられ、総合確率誤差の多く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 従来手法における搜索経路間隔

2節の内容を踏まえ、ここで従来の搜索計画手法における搜索区域及び搜索経路間隔の決定方法について整理する。上述したように本稿では、搜索計画手法の中でも最も基本的なデイトムであるポイントデイトムを対象とする。

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、ポイントデイトムにおける POC 及び POD の算出について整理する。

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ると考えるのが自然である。

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となる。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 σ 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、デイトムポイントを中心に正方形の搜索区域を設定することを考え、デイトムポイントから搜索区域の端までの距離を αE とおく。搜索者は α の大きさを任意に変更することにより、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、搜索係数を $\alpha = 3$ 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。

この場合、デイトムポイントを中心にした二次元正規分布を考えた際の存在確率 POC は次のように計算できる。

$$POC = \int_{-X}^X f(x)dx \times \int_{-Y}^Y f(y)dy. \quad (3)$$

ここで、

$$X = Y = \alpha E \quad (4)$$

である。また、 $f(\cdot)$ は期待値 0、標準偏差 σ の正規分布の確率密度関数を表し、 $E = 1.1774\sigma$ である。このことから、 POC が係数 α の大きさに応じて値が求められることは自明である。また、この場合の搜索区域の大きさ（搜索面積） A は、

$$A = 4\alpha^2 E^2 \quad (5)$$

で計算される。

3.2 探知確率 POD

探知確率 POD は、搜索面積 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、

$$Z = W \times V \times T \quad (6)$$

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が持つ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、IAMSAR マニュアル上に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、

搜索区域の長辺と並行な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。搜索者は、可能な限り、効率的に搜索が実施できる並行搜索の実施に努める。ただし、実際の搜索活動は荒天下で行われることが多く、その場合、搜索者が必ずしも搜索経路の間隔を適切に保って搜索を実施できるとは限らない。そのため、このような場合には、ランダム搜索と呼ばれる搜索手法が用いられる。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、

$$POD = erf\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2}C\right) \quad (7)$$

となり、ランダム搜索を行う場合の POD は、

$$POD = 1 - \exp(-C) \quad (8)$$

と表される。ここで、 C は搜索努力量 Z と搜索面積 A の比 ($C = Z/A$) を表し、搜索密度と呼ばれる。式 (7) 及び式 (8) 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。これらの式は実務上、搜索環境によって使い分けの必要があり、搜索環境が良好な場合には式 (7) を、通常の場合には式 (8) を利用することとされている。一般的に、搜索を実施するにあたって搜索者が用意出来る搜索努力量 Z には限りがある。一定の搜索努力量 Z を仮定した場合、探知確率 POD は存在確率 POC と同様に、搜索面積 A に応じて値が決まる。このことから、 POD も係数 α の関数とみることが出来る。

3.3 最適搜索面積及び最適搜索経路間隔

3.1 節及び 3.2 節で説明した通り、 POC 及び POD は共に係数 α の関数とみなせるため、一定の搜索努力量 Z の下で

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha} POS(\alpha) = \arg \max_{\alpha} \{POC(\alpha) \times POD(\alpha)\} \quad (9)$$

を解くことで、成功確率 POS を最大化する最適な搜索係数 α^* を求めることが出来る。これより、式 (5) を用いて最適な搜索区域の大きさ (最適搜索面積) A^* を容易に求めることが出来る。

また、実際に搜索活動を実施するにあたっては、どの様な搜索環境であったとしても、出来る限り搜索経路間隔を維持することが非常に重要となる。今、並行搜索を実施する場合においては、搜索面積 A 及び搜索経路間隔 S に $A = SVT$ の関係が成り立つことから、搜索密度は

$$C = \frac{Z}{A} = \frac{W}{S} \quad (10)$$

と表すことも出来る。このことから、最適な搜索経路間隔 S^* は最適な搜索密度 C^* 及び有効搜索幅 W を用いて、 $S^* = W/C^*$ で求めることが出来る。

3.4 従来手法における問題点

これまで紹介してきた通り、ISPMに基づいて作成された搜索計画は、一見すると矛盾なく利用可能なものに思える。しかしながら、搜索活動を行うために、搜索計画を実海域上で再現しようとした場合、最適搜索面積 A^* 及び最適搜索経路間隔 S^* を同時に再現することが出来ないことに気づく。実際に、得られた搜索区域 A^* に対して、搜索経路を経路間隔 S^* で引いていったとすると、図 1 の様に上手く正方形に当てはまらないことが生じる。図 1 においては、搜索区域内の点線の領域 B は搜索が実施されない箇所となる一方で、搜索区域外の点線の領域 C は搜索が実施される箇所となり、両者の面積は一致している。つまり、経路間隔 S^* で搜索した場合、搜索面積としては A^* を保っているが、その形状は正方形とは限らないので

ある。これは、POCの算出においては、正方形の搜索区域を仮定し、POSを最大化する最適な搜索面積を求めたのに対し、搜索経路間隔の導出においては、搜索面積 $A = SVT$ のみを利用して正方形と言う情報を用いていないためである。このことから、実際に搜索活動を実施するにあたっては、正方形の搜索海域を優先して経路間隔を調整するか、逆に経路間隔を優先して搜索区域の形状を変更する、といった対策を取る必要がある。

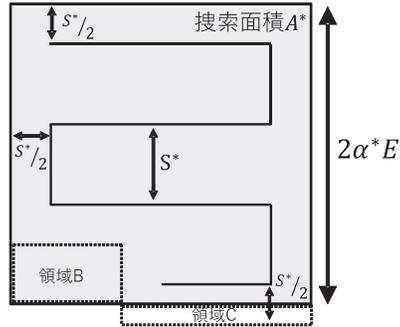


図 1: 従来手法における搜索区域と経路の関係。

4 提案手法による搜索計画の改良

3.4節で述べた様に、従来手法には最適搜索面積及び最適搜索経路間隔を共に満たすような搜索を実施することは不可能であるという問題がある。これを踏まえ、本節では従来手法の持つ欠点を克服するための新たな搜索計画手法を3つ提案する。

4.1 提案手法 1

一つ目は、従来手法の最適搜索面積及び正方形の形状を維持したまま、搜索経路間隔を変更させることによって、適切な搜索計画とする方法である。本手法では、従来手法の計算結果を利用することで、追加の計算コストがほとんど掛からないメリットがある一方で、搜索努力量 Z の一部を削除することによって適切な搜索経路に変更することとなるため、他の手法と比べて POS が低くなる可能性を持つ。

従来手法の適用の結果、最適搜索係数 α^* 及び最適搜索経路間隔 S^* が求められたとする。この場合、図1で示したように、一辺 $2\alpha^*E$ の正方形に対して、経路の間隔 S^* で搜索経路を配置したとしても、きれいに収まるとは限らない。これを回避するため、搜索区域内に収まる経路の本数 n をガウス記号を用いて、

$$n = \left\lfloor \frac{2\alpha^*E}{S^*} \right\rfloor \quad (11)$$

により求め、これを用いて新たな搜索経路間隔 S' を

$$S' = \frac{2\alpha^*E}{n} \quad (12)$$

により算出する (図2)。

これより最適な搜索面積 A^* 及び搜索区域の形状に変化はないため、POCは従来手法と一致する一方で、 $S' \geq S^*$ となることから PODには変化が生じる。

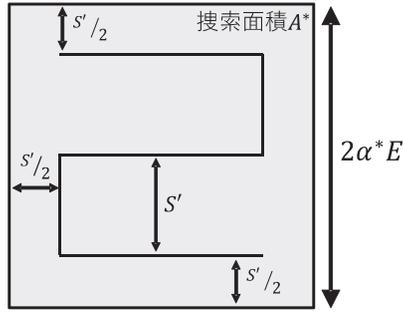


図 2: 提案手法 1 における搜索区域と経路の関係.

したがって、POC については、従来手法の結果をそのまま利用することが出来る。一方で、POD については、経路間隔変更後の搜索密度を用いて計算する必要がある。今、搜索経路の一部を捨てたことにより減少した後の搜索努力量を Z^- とおけば、この時の搜索密度 C は、

$$C = \frac{Z^-}{A} = \frac{W}{S'} = \frac{Wn}{2\alpha^*E} \quad (13)$$

によって与えられる。これはつまり、搜索努力量が削られた分だけ経路間隔が増加することによって、搜索密度が保たれることを意味する。これらの結果から、式 (7)、式 (8) 及び式 (13) を用いて POD を算出した上で、式 (2) により提案手法 1 における POS を容易に求めることが出来る。

4.2 提案手法 2

二つ目は、搜索努力量 Z 及び従来手法の最適搜索面積 A^* を維持したまま、搜索区域の形状を変更することによって、適切な搜索計画とする方法である。本手法も提案手法 1 と同様に、従来手法の計算結果を利用することで、追加の計算コストはほとんど掛からない。また、搜索努力量及び最適搜索面積の双方を維持することから、同時に最適搜索経路間隔 S^* も保ったまま搜索を実施することとなる。

本手法では、図 3 のように、本来搜索するはずであった点線内の搜索区域に対して、その一部の搜索面積を搜索区域の左右に移動させることにより、最適搜索経路間隔 S^* を保った搜索を実施することを考える。提案手法 1 と同様に、搜索区域内に収まる経路の本数 n を式 (11) により求め、新たな搜索区域の一辺の長さを S^*n とする。搜索区域全体の面積は $A^* = S^*VT$ であることから、搜索区域のもう一辺の長さは VT/n に決まる。この時、新たに設定した搜索区域の中心がデイトムポイントとなる様に搜索区域全体の位置の調整を実施する。

これにより、搜索努力量及び最適な搜索面積は保つことから、従来手法と比べて POD には変化がない一方で、搜索区域の形状が変化することから POC に変化が生じる。

したがって、POD については、従来手法の結果をそのまま利用することが出来る。一方で、POC については、形状変更後のデイトムポイントから区域の端までの距離を用いて式 (3) にて計算する必要がある。ここで、

$$X = \frac{VT}{2n}, \quad (14)$$

$$Y = \frac{S^*n}{2} \quad (15)$$

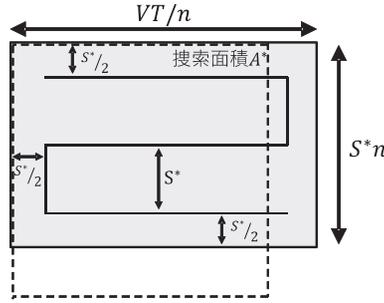


図 3: 提案手法 2 における搜索区域と経路の関係.

である。これはつまり、搜索区域の形状を長方形にしたことから、デイトムポイントから搜索区域の各辺までの距離が変化し、POC に変化が生じたことを意味する。これらの結果から、式 (2) を用いて提案手法 2 における POS を容易に求めることが出来る。

4.3 提案手法 3

提案手法 3 は提案手法 1 及び 2 とは根本的に異なり、従来手法の計算結果は利用せず、新たに正方形の搜索区域内に収まる適切な搜索経路を算出する方法を考えるものである。本手法では、搜索努力量 Z 及び搜索区域の形状を維持したまま、搜索面積 A を変化させる。その結果、POC 及び POD は共に変化することとなる。

搜索経路を正方形の搜索区域に収めることを考える場合、必ず搜索経路の長さ VT を整数倍に分割する必要がある。今、経路の分割数を n として搜索区域の一边を VT/n とおけば、搜索区域を正方形とするためには、もう一边も VT/n とする必要がある (図 4)。そのため、搜索経路間隔は搜索区域の一边を更に n 分割した幅に相当し、

$$S = \frac{VT}{n^2} \quad (16)$$

と表せる。

この場合の POC も式 (3) 及び

$$X = Y = \frac{VT}{2n} \quad (17)$$

によって計算出来る。また、POD については、

$$C = \frac{Z}{A} = \frac{W}{S} = \frac{Wn^2}{VT} \quad (18)$$

となる搜索密度 C を用いて、式 (7) 及び式 (8) により算出される。

本手法においては、POC 及び POD を共に搜索経路の分割数 n の関数とみなせるため、一定の搜索努力量 Z の下で

$$n^* = \arg \max_n POS(n) = \arg \max_n \{POC(n) \times POD(n)\} \quad (19)$$

を解くことで、成功確率 POS を最大化する最適な経路の分割数 n^* を求めることが出来る。なお、本手法は、搜索経路の長さ VT が適切に収まるような搜索区域を求めていくものであるため、必ず実行可能な搜索区域を得ることが出来る。

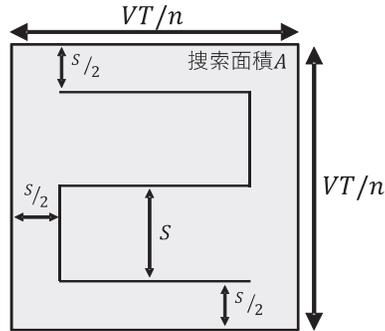


図 4: 提案手法 3 における検索区域と経路の関係。

5 数値例

本節では、3つの提案手法を用いた場合の最適検索面積 A^* 及び成功確率 POS の変化について検証する。計算を行うにあたっての前提条件は以下の通りである。まず、総合確率誤差は $E = 2.0[NM]$ と仮定した。更に、検索努力量の計算要素には2つの想定を用意した。1つ目の想定では、有効検索幅を $W = 0.02[NM]$ から $W = 0.2[NM]$ まで変化させ、検索速度及び時間はそれぞれ $V = 10[kt]$ 及び $T = 10[h]$ とした。これはつまり、検索航程 VT が比較的長めであり、有効検索幅が狭い状況を示している。一方で2つ目の想定では、有効検索幅を $W = 0.2[NM]$ から $W = 2[NM]$ まで変化させ、検索速度及び時間はそれぞれ $V = 10[kt]$ 及び $T = 1[h]$ とした。これは、検索航程 VT が比較的短めであり、有効検索幅が広い状況を示したものである。いずれの想定においても検索努力量の値は等しいため、従来手法であれば同じ A^* 及び POS を示すが、提案手法においてどのような違いが出てくるかを確認する。

5.1 想定 1：検索航程 VT が長い場合

想定 1 において、検索努力量 Z を変化させつつ従来手法及び3つの提案手法を適用した。表 1 及び表 2 はそれぞれ、並行探索及びランダム探索を実施した際の結果を表す。

どちらの表においても、全ての手法において検索努力量 Z が大きくなるにつれ、最適検索面積 A^* や成功確率 POS が大きくなるのが分かる。 POS 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、少しでも多くの検索勢力を集めることの重要性を示していると言える。逆に、並行探索の結果とランダム探索の結果を比較した場合、並行探索の POS の方が大きな値を示しており、その差は Z が大きいほど顕著なものとなっている。一方で、並行探索の方がランダム探索よりも小さな最適検索面積 A^* を示しており、並行探索時にはよりコンパクトな検索区域に対して検索勢力を集中させることで、高い POS を実現しているのが分かる。また、従来手法と提案手法を比較した場合では、どちらの表においても従来手法の POS が最も高い値を示しており、実際の探索行動としては実施不可能な従来手法の結果が、各手法の上限の値を示していることが見て取れる。

並行探索の場合もランダム探索の場合も、3つの提案手法の中では、提案手法 1 の POS が最も低い値を示している。これは、提案手法 1 の検索努力量 Z^- が一部の検索努力量を無駄にしていることから、他の手法の検索努力量 Z より低い値となっており、その分 POS が下がったと考えられる。また、同じ最適検索面積 A^* をより少ない検索努力量 Z^- で探索する結果、提案手法 1 の検索幅 S' は従来手法や提案手法 2 と比べて、より広い値を取る必要があることが確認出来る。提案手法 1 では、従来手法における最適検索面積

表 1: 並行探索の結果 (航程 VT が長い場合).

従来手法					
Z	4	8	12	16	20
A^*	6.62	10.50	13.78	16.68	19.36
S^*	0.066	0.105	0.138	0.167	0.194
POS	16.7%	28.7%	38.2%	45.8%	52.1%
提案手法 1					
Z^-	3.9	7.8	11.6	15.7	19.4
A^*	6.62	10.50	13.78	16.68	19.36
S'	0.068	0.108	0.143	0.170	0.200
POS	16.4%	28.2%	37.3%	45.2%	51.2%
提案手法 2					
Z	4	8	12	16	20
A^*	6.62	10.50	13.78	16.68	19.36
S^*	0.066	0.105	0.138	0.167	0.194
POS	16.7%	28.7%	38.1%	45.8%	52.1%
提案手法 3					
Z	4	8	12	16	20
A^*	6.57	10.41	13.72	17.36	18.90
S^*	0.066	0.104	0.137	0.174	0.189
POS	16.7%	28.7%	38.2%	45.7%	52.1%

表 2: ランダム探索の結果 (航程 VT が長い場合).

従来手法					
Z	4	8	12	16	20
A^*	8.39	11.89	14.59	16.91	18.91
S^*	0.084	0.119	0.146	0.169	0.189
POS	13.9%	23.3%	30.6%	36.6%	41.7%
提案手法 1					
Z^-	3.9	8.0	11.9	15.8	19.1
A^*	8.39	11.89	14.59	16.91	18.91
S'	0.085	0.119	0.147	0.171	0.198
POS	13.8%	23.3%	30.5%	36.3%	40.7%
提案手法 2					
Z	4	8	12	16	20
A^*	8.39	11.89	14.59	16.91	18.91
S^*	0.084	0.119	0.146	0.169	0.189
POS	13.9%	23.3%	30.6%	36.6%	41.7%
提案手法 3					
Z	4	8	12	16	20
A^*	8.16	11.89	14.79	17.36	18.90
S^*	0.082	0.119	0.148	0.174	0.189
POS	13.9%	23.3%	30.6%	36.6%	41.7%

A^* の一辺と最適搜索経路間隔 S^* の比率によって、搜索努力量の減少量が決定されるため、 POS の減少幅について予め予測することは容易ではない。更には、従来手法の $Z = 8$ に該当する場合の様に、提案手法 1 の POS が並行搜索実施時には低下する一方で、ランダム搜索実施時には低下しないケースも見られるなど、一定の傾向を見出すことは困難であることが分かる。

提案手法 2 については、従来手法と異なる点が搜索区域の形状のみであり、並行搜索の場合もランダム搜索の場合も、従来手法とほとんど遜色のない POS の結果を示している。提案手法 3 についても同様に、最適搜索面積 A^* や最適搜索経路間隔 S^* には多少の差が見られるものの、 POS については従来手法や提案手法 2 とほとんど変わらない値を取ることが分かる。提案手法 3 については、IAMSAR マニュアルに記載のある従来手法とは異なる考え方での最適化を実施しているにも関わらず、結果として、これほど近い値を取れることは興味深い。しかしながら、提案手法 2 が従来手法の計算結果の一部を利用して、簡便な追加計算のみで成り立っている点に対して、提案手法 3 には一から最適な搜索面積を探す手間が必要である。このことから、既に世界中で広く使われている従来手法の結果を、現場サイドで簡単に補正して搜索活動に移るようなケースを考える場合には、同程度の POS を実現する手法であったとしても、提案手法 2 の方が優れていると言える。

5.2 想定 2：搜索航程 VT が短い場合

続いて、想定 1 と同様の搜索努力量 Z を持つ搜索勢力ではあるが、大きな有効搜索幅 W と短い搜索航程 VT を想定した場合の結果を示す。想定 1 と同様に、従来手法と 3 つの提案手法をそれぞれ適用したと仮定し、搜索努力量 Z を変化させた場合の最適搜索面積 A^* 及び POS を算出した。想定 1 と比較して、搜索航程 VT が短くなったことによる効果がどのように表れるのかについて確認する。

表 3 及び表 4 は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。従来手法の場合、搜索航程 VT が長い場合の結果と比較すると、最適搜索面積 A^* や POS には変化がない一方で、 VT が 10 分の 1 となったことから、最適搜索経路間隔 S^* が 10 倍の値を取っていることが確認出来る。更に、全ての提案手法において、搜索航程 VT が長い時と比べ多くの場合で、従来手法との POS の差が大きくなったことが分かる。提案手法 1 においては、3 つの提案手法の中で最も低い POS を示す点に変わりはないが、搜索航程 VT が短くなった結果、搜索努力量 Z の減少量が更に大きくなることが明らかとなった。その結果、搜索航程 VT が長い場合と比べても更に効率の悪い搜索計画となってしまう、大きく POS が減少している。

提案手法 2 に関しても、搜索航程 VT が長い場合には従来手法とほぼ同等の POS を達成していたことと比べ、搜索航程 VT が短くなると、より POS が減少しやすい傾向があることが分かった。中でも大きく POS が減少するケースは、提案手法 1 において、搜索努力量 Z' が従来の搜索努力量 Z と比べて大きく減少している時と一致している。提案手法 2 では、提案手法 1 で削ってしまった搜索努力量に相当する分を、搜索海域を左右に広げることで消費している。したがって、削る搜索努力量の大きさがそのまま搜索海域の変更度合いに直結しており、その分だけ従来手法の最適解から離れた搜索計画となることから、大きな POS の減少を招いたものと考えられる。

更に、提案手法 3 については、提案手法 2 と比較すると POS の意味で勝つ場合も負ける場合もあり、一概にどちらがより優れた手法であるのかを議論することは出来ないと分かる。また、提案手法 3 のみに現れる特徴として、搜索努力量 Z を増加させたとしても、最適搜索面積 A^* や最適搜索経路間隔 S^* に変化が見られない場合があることが挙げられる。これは、本数値例における搜索努力量 Z の増加が有効搜索幅 W の増加のみによって与えられるものであり、実質的に搜索航程 VT には変化がないことから、搜索航程 VT を整数値で分割する必要のある提案手法 3 において、同じ整数値が最適であるとの結果が出たことを意味する。したがって、提案手法 3 においては、より長い搜索航程 VT を持つ搜索勢力の方がそれだけ多くの分割数の中から最適な搜索計画を策定する自由度を持っており、その分従来手法に近い POS が実現しやすくなると考えられる。以上の結果から、これらの提案手法においては、同じ搜索努力量 Z を持った搜索勢

表 3: 並行探索の結果 (航程 VT が短い場合).

従来手法					
Z	4	8	12	16	20
A^*	6.62	10.50	13.78	16.68	19.36
S^*	0.662	1.050	1.378	1.668	1.936
POS	16.7%	28.7%	38.2%	45.8%	52.1%
提案手法 1					
Z^-	3.1	7.8	8.9	13.1	17.6
A^*	6.62	10.50	13.78	16.68	19.36
S'	0.857	1.080	1.856	2.042	2.200
POS	13.4%	28.2%	30.6%	40.0%	48.3%
提案手法 2					
Z	4	8	12	16	20
A^*	6.62	10.50	13.78	16.68	19.36
S^*	0.662	1.050	1.378	1.668	1.936
POS	16.4%	28.7%	36.3%	44.6%	51.5%
提案手法 3					
Z	4	8	12	16	20
A^*	6.25	11.11	11.11	25.00	25.00
S^*	0.625	1.111	1.111	2.500	2.500
POS	16.7%	28.7%	37.4%	42.6%	50.5%

表 4: ランダム探索の結果 (航程 VT が短い場合).

従来手法					
Z	4	8	12	16	20
A^*	8.39	11.89	14.59	16.91	18.91
S^*	0.839	1.189	1.459	1.691	1.891
POS	13.9%	23.3%	30.6%	36.6%	41.7%
提案手法 1					
Z^-	3.5	5.5	9.2	13.2	17.4
A^*	8.39	11.89	14.59	16.91	18.91
S'	0.965	1.724	1.910	2.056	2.174
POS	12.5%	17.7%	25.5%	32.4%	38.4%
提案手法 2					
Z	4	8	12	16	20
A^*	8.39	11.89	14.59	16.91	18.91
S^*	0.839	1.189	1.459	1.691	1.891
POS	13.8%	21.7%	29.4%	35.8%	41.2%
提案手法 3					
Z	4	8	12	16	20
A^*	11.11	11.11	11.11	25.00	25.00
S^*	1.111	1.111	1.111	2.500	2.500
POS	13.7%	23.3%	30.0%	34.9%	40.6%

力であったとしても，搜索努力量を構成する要素である搜索速力 V 及び搜索時間 T が可能な限り大きな勢力の方が，より高い POS を実現できると言える．

6 まとめと今後の課題

本稿では，世界基準の搜索計画手法である ISPM において，得られた最適搜索面積及び最適搜索経路間隔に基づく搜索計画が実行不可能であることに触れ，3つの代替案を提案した．具体的には，従来手法の最適解を利用し，計算コストを抑えて実行可能な計画を立てる手法と，搜索経路の分割数を最適化することで適切な搜索海域を設定する提案手法を考案した．数値例を通じて，並行搜索やランダム搜索といった搜索方法の種別に関わらず，提案手法2若しくは提案手法3を適用することで，従来手法と比較的近い POS を得ることが出来ることを示した．特に，搜索航程 VT の長い状況において，その傾向が顕著であることを確認した．

従来手法においてはラインデイトムに関しても同様に，搜索面積及び搜索経路間隔の不一致の問題が生じる可能性がある．したがって，今後の課題として，ラインデイトムに対して本稿で提案した3つの搜索計画手法の適用可能性の検証を行うことが挙げられる．また，本稿の提案手法3では経路間隔を搜索経路の分割数に応じて固定した値としていたが，経路間隔を自由に設定できる様に条件を緩和することで，従来手法を超える POS を実現する計画が立てられないかを模索する必要がある．

参考文献

- [1] Y. Gao, G. Jin, Y. Guo, G. Zhu, Q. Yang and K. Yang, “Weighted area coverage of maritime joint search and rescue based on multi-agent reinforcement learning,” *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, pp.593-597, 2019.
- [2] International Maritime Organization, *International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual 2022 Edition, vol. II*, IMO Publication, London, 2022.
- [3] 海上保安庁, “令和3年版 海上保安統計年報 72巻”, URL:https://www.kaiho.mlit.go.jp/doc/tokei/r3tokei/toukei2021_72.pdf (閲覧: 2022-10-15) .
- [4] B. O. Koopman, *Search and Screening*, Operations Evaluations Group Report No.56, Center for Naval Analyses, Alexandria, VA, 1946.
- [5] 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.
- [6] P. Wang and M. Meghjani, “Lost at Sea: Multi-Searcher Multi-Target Search,” *Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast*, pp.1-8, 2020.