

緯度経度に基づく矩形搜索区域による航空機搜索の最適化

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 研究の背景と目的

令和6年度の海上における人身事故者数は2348人であり、そのうち死亡・行方不明者数は902人との報告がある [2]。これは過去10年間において最も少ない数字であり、喜ばしい事である一方、死亡・行方不明者のうち溺水および海中転落で亡くなる人の数は過去5年間でほとんど変化が無い。この事実は、洋上における海中転落者や漂流者の早急な救助が、今なお求め続けられる状況にあることを意味する。現在世界中の多くの国では、世界標準の搜索救助マニュアルである IAMSAR マニュアル [1] に基づいた搜索活動が広く実施されている。IAMSAR マニュアルは、限られた搜索勢力で広大な海洋を搜索する必要がある搜索救助機関にとって、救助効率を可能な限り向上させるための計画手法として支持されてきた。特に洋上の搜索勢力として船だけでなく航空機を用いることで、高い搜索効率を達成することが期待されている。

搜索理論の発展は第二次世界大戦後に Koopman[3] がとりまとめた著書から始まり、これまで様々な方面での効率化が模索されてきた。Xiong[5] らは、ヘリコプターを主体とした SAR 区域と搜索目標間の相対運動を考慮して搜索区域を決定する時間領域反復計画法 (TIP 法) を提案し、TIP 法がヘリコプターによる海上搜索救助活動を有効に支援できることを示した。また、Sulaiman and Pierce[4] は、ドローンの有効搜索幅を推定することを最終目的として、海上におけるヘリコプターによる搜索時の有効搜索幅を推定するためのモデルを開発し、その精度検証を実施した。こうした様々な論文に代表される様に、航空機による搜索活動が最も人命救助の成功に結びつく可能性が高いことは周知の事実である。一方、IAMSAR マニュアルで求められる搜索区域が航空機による搜索活動の実態に合致しているかと問われれば、必ずしもそうとは言えない。具体的には、搜索区域が緯度経度に対して斜めに設定される場合、GPS の緯度経度の値を頼りに飛行せざるを得ない航空機にとって、搜索経路に忠実な飛行が困難となる恐れがある。これを踏まえ本稿では、IAMSAR マニュアルが提供する搜索理論の大枠を崩すことなく、緯度経度に対して水平若しくは直交する辺で構成される搜索区域を設定することで、航空機搜索の効率化を図ることを目的とする。緯度経度に基づく矩形搜索区域を設定する手法を複数提案し、それぞれの手法の特徴を整理した上で、IAMSAR マニュアルと同様に最適搜索区域および最適搜索経路間隔を導出する。また数値例による性能比較を通じて、それぞれの提案手法が優れた成果を発揮するための条件を明らかにし、特に従来の IAMSAR 手法と遜色ない効率を維持することが可能な手法と状況を明確に示す。

2 IAMSAR マニュアルに基づく搜索理論の概要

2.1 デイタムの定義と漂流要素

搜索活動を実施するにあたって最も難しい問題は、搜索開始時刻における搜索目標の位置を如何に特定するかにある。洋上において搜索目標が遭難する場合、基本的には自力で移動することが困難な状況にあり、目標は漂流のみによって移動する。また洋上における搜索活動実施時には通常、入手可能な情報も限定的であることが多く、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、搜索を開始するにあたっては、一般的にまず搜索目標の漂流開始地点を特定することから始める。漂流開始地点の特定後、搜索目標の漂流による移動経路を予測して、最終的に搜索開始時刻における目標位置を推定する。ここで、搜索開始時刻における搜索目標の推定位置はデイタムと呼ばれ、搜索者はデイタムを中心として搜索海域を設定することを考える。IAMSAR マニュアル上では複数のデイタムが用意されており、それぞ

れ搜索目標の漂流開始地点をどの程度正確に見積もることが出来るかによって使い分けられる [1]。中でも最も取り扱いが容易で、多くの事例が該当するのが、搜索目標の漂流開始時刻や位置がある程度の精度で1つに絞ることが出来る場合である。この場合、漂流開始地点は地図上のただ一つの点で与えられ、漂流後に辿り着くデイトムも地図上のある一点として表現される。IAMSAR マニュアルでは、これをポイントデイトムと呼ぶ。本稿では紙面の制約上、漂流開始位置の推定方法や漂流の細かい計算方法等については簡単な紹介に留め、ポイントデイトムが適用される場合に主眼を置き、議論を進める。

IAMSAR マニュアル上、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る。このうち、風の作用による漂流は風圧流と呼ばれ、搜索目標の海上露出部分が風を受けることで引き起こされる搜索目標の移動を指す。その速度は搜索目標の海上部分の風圧面積と、移動方向に対する水面下の投影面積の比によって決まり、また、風の速度に比例する。更に、風圧流の方向については、搜索目標の水面下形状の複雑性により風下方向から一定程度の偏角を持つことが知られており、これを風圧流偏角と呼ぶ。IAMSAR マニュアルには、搜索目標の種類および平均風速に応じた風圧流の速度グラフが用意されている上、同グラフ上で風圧流偏角の大きさについても容易に確認することが出来る。しかしながら、風圧流は搜索目標が風に対して向いている方向に応じ、風下から右に偏ることもあれば左に偏ることもある。更に言えば、搜索勢力が搜索目標を発見するまで、その偏りの左右の別を知ることは困難である。そこで実務上は、左右どちらに流されている可能性もあると考え、最終的に、漂流後の推定位置であるデイトムを2点求めることとなる。この場合、搜索目標の行き着く先はいずれも地図上に1つの点として示されることからデイトムポイントと呼ばれ、二つのデイトムポイントをまとめて風圧流分離デイトムと呼ぶ。風圧流分離デイトムはIAMSAR マニュアルに則り搜索計画を立案した場合に、最もよく使われるデイトムである。

2.2 総合確率誤差および成功確率の定式化

デイトムポイントが正確に予測できるとすれば、搜索目標は必ずデイトム上に存在するはずであるが、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必ず誤差が含まれる。IAMSAR マニュアルでは、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 は漂流開始位置をピンポイントに特定出来ずに生じる漂流開始位置の確率誤差を表し、 D_e は漂流速度や方向を正確に推測出来ずに生じる漂流による確率誤差を表す。また Y については、搜索者自身が搜索中の自身の位置を寸分たがわず正確に測れることは困難なことから生じてしまう搜索者の位置の確率誤差を表す。 X および Y については、漂流開始位置および搜索者の位置を特定する手段に応じて、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、多くの場合GPSに頼って位置が測定されることがほとんどであり、その場合の誤差は $X = Y = 0.1[NM]$ となることから、比較的小きな値と言える。一方、 D_e については、2.1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、漂流時間が長くなるほど総合確率誤差も大きくなり、搜索活動が困難となることが分かる。

デイトムポイントの位置に必ず誤差が含まれる以上、デイトムポイントのみを搜索することで搜索目標の発見を期待することは現実的ではない。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区域を決定し、効率的に搜索を実施する必要がある。IAMSAR マニュアルでは最終的に、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区域および搜索経路間隔を搜索実施者に提供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確率（探知確率）を意味する。

3 IAMSAR マニュアルに基づく最適搜索区域および搜索経路の導出

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およ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、実務上最もよく利用されると考えられる風圧流分離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、風圧流分離デイトムにおける POC および 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する無相関な円形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垂直な平面で円形正規分布の確率密度関数を切断した場合、その断面は期待値0かつ標準偏差 σ の一般的な正規分布の確率密度関数となる。2.2節で紹介した総合確率誤差の定義から、 $E = 1.1774\sigma$ の関係が成り立つことが知られている。今、図1のように2つのデイトムポイントを中心に長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 、デイトムポイント間の距離を $2\delta E$ とおく。搜索者は搜索係数と呼ばれる 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。ここで、円形正規分布および総合確率誤差 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。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。

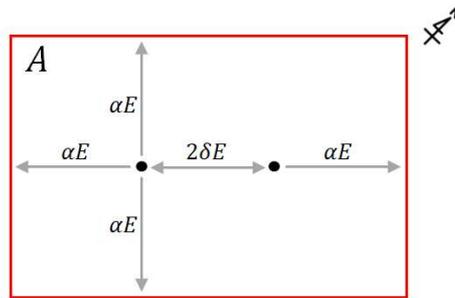


図 1: 従来の IAMSAR 手法に基づく搜索区域の設定。

この場合、片方のデイトムポイントを中心に円形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。

$$POC = \int_{-\alpha E}^{(\alpha+2\delta)E} f(x) dx \times \int_{-\alpha E}^{\alpha E} f(y) dy. \quad (3)$$

ここで、 $f(\cdot)$ 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。 δ および E の大きさは事案毎に自動的に決定される値であるため、 POC が係数 α の関数とな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、

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

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および搜索時の環境にも依存する。IAMSAR マニュアルでは、搜索者の能力は搜索努力量 Z と呼ばれる指標で表され、

$$Z = W \times V \times T \quad (5)$$

で計算される。ここで、 V および T はそれぞれ搜索速度および搜索時間を表し、 W は有効搜索幅と呼ばれ搜索実施時のセンサーが持つ能力を示す。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 マニュアル上に実験結果として用意されている。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。

目標を搜索するにあたっては、最も効率的な方法である並行搜索を選択することが一般的である。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。実務上においても搜索者は、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、搜索時の環境が常に搜索活動に適した状況であるとは言い難い。実際には多くの事案が気象条件の悪い中で発生しており、思う様に搜索活動を行なうことが出来ない状況はまま存在する。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として評価を行う。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、

$$POD = erf\left(\frac{\sqrt{\pi}C}{2}\right) \quad (6)$$

となり、ランダム搜索を行う場合の POD は、

$$POD = 1 - \exp(-C) \quad (7)$$

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 (6) および式 (7) 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。上述したように、実務上これらの式は搜索環境によって使い分ける必要があり、搜索環境が良好な場合には式 (6) を、通常の場合には式 (7) 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勢力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 従来手法の最適解と航空機搜索における問題点

3.1 節および 3.2 節で説明した通り、 POC および POD は共に搜索係数 α の関数とみなせるため、一定の搜索努力量 Z が与えられたとして、

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha} POS(\alpha) = \arg \max_{\alpha} \{POC(\alpha) \times POD(\alpha)\} \quad (8)$$

を解くことで、成功確率 POS を最大化する最適搜索係数 α^* を求めることが出来る。この結果を式 (4) に代入することで、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、ラン

ダム搜索の POD を用いて搜索活動を評価することがあるとは言え、実際の搜索活動ではどのような環境下であっ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 および搜索経路間隔 S に $A \approx SVT$ の関係が成り立つことから、搜索密度は

$$C = \frac{Z}{A} = \frac{W}{S} \quad (9)$$

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^* は最適搜索面積 A^* 、有効搜索幅 W および搜索努力量 Z を用いて、 $S^* = W \cdot A^*/Z$ で求めることが出来る。

こうして求めた搜索区域に基づいて搜索活動を開始したとする。搜索区域の端の方から搜索経路に沿って移動を始めた搜索勢力は、左右に目を凝らしながら、搜索目標を見つけるべく活動を開始する。搜索活動の途中で、距離があり目標と判別出来ない物体を見つけた場合、搜索勢力は一度搜索経路を離れて、目標か否かの確認作業を実施するために該当物体に向けて接近していく必要がある。一度接近し、該当物体が何であるかを確認した後、仮にそれが搜索目標でないのであれば、搜索経路を離れた地点まで戻り、再度搜索経路に沿った搜索活動に移ることとなる。この場合、搜索勢力が船であれば、電子チャートなどにより容易に元の経路上に戻ることが可能となるが、勢力が航空機の場合は一気に困難度が増す。オートパイロットの発達した航空機の場合、並行搜索の各変針点を予めシステムに入力することで、自動的に経路上を飛ぶことは容易である。一方で、ある地点から一度離れ、再度ある地点に戻るようなマニュアル操縦をする場合には、そう簡単にはいかない。一般的な装備品として電子チャートなどが搭載されている訳ではない航空機では、GPSの緯度経度の値のみを頼りに、基準としていた経路からのずれを算出し、元の経路に戻る必要がある。これは言うなれば、広い草原を直進中の車にて、その直進経路から一定程度離れた後、地図が表示されないナビ上で緯度経度の値のみを頼りに元の経路に戻るようなものである。これを高速で移動する固定翼や高度な操縦技術を必要とする回転翼で実施することが如何に困難であるかは、想像に難くない。これまで紹介してきた通り、IAMSAR マニュアルに則り策定された搜索区域は、デイトムを基準にその範囲を決定するため、必ずしも緯線経線に平行な搜索区域となるとは限らない。上記の問題を少しでも解消すべく、実務上では、斜めに設定された搜索区域をどうにか緯線経線に平行となる様に変形し、搜索活動を実施する例も少なくない。ただし、この場合はIAMSAR マニュアルで策定した搜索区域を自ら壊すこととなることから、 POS は期待される値よりも必ず減少しているものと考えられる。このことから本稿では、 POS の減少量を抑えつつ、緯度経度に基づいた矩形搜索区域の中で如何に効率よく搜索活動を実施していくことが出来るかを検証する。

4 緯度経度に基づく矩形搜索区域の提案

3.3節で述べた様に、従来手法で設定された搜索区域にて航空機による搜索を実施した場合、搜索効率が低下する可能性がある。これを踏まえ、本節では航空機による搜索効率の低下を抑えるため、緯線経線に平行な辺を持つ搜索区域を設定する方法を3つ提案する。

4.1 提案手法1（搜索区域の回転による補正）

一つ目は、従来手法の最適搜索区域の面積および形状を維持したまま、傾きのみを修正する方法である。本手法には、IAMSAR マニュアルの計算結果をそのまま利用することで、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、IAMSAR マニュアル上の最適搜索係数 α^* をそのまま利用するため、他の手法と比べて POS の低下が著しい可能性が残る。

従来手法の適用の結果、一定の Z, E, δ の下で、最適搜索係数 α^* が求められたとする。また、この際の搜索区域の長辺と緯線又は経線との傾きのうち、小さい方を θ ($0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$) とおく。航空機の搜索経路

が緯線又は経線と傾きを持たない状態を目指すことから、 $\theta = 0^\circ$ となる様に区域の中心点周りで搜索区域を回転させることとする。この場合、最適搜索面積 A^* および搜索区域の形状に変化はないため、 POD は従来手法と一致する一方で、デイトムと搜索区域の各辺までの距離が変化することから POC には変化が生じる。

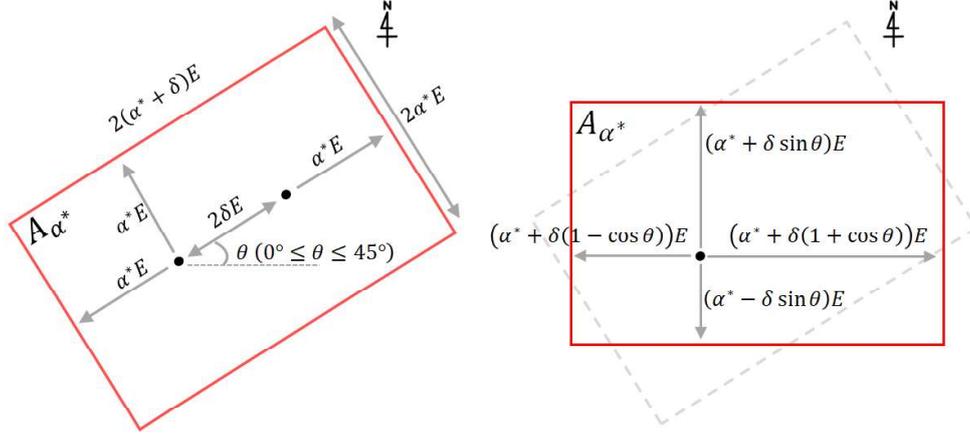


図 2: 提案手法 1：搜索区域の回転による傾きの補正

新たな搜索区域に対して、図 2 の右図のようにデイトムと各辺との距離が表現できることから、存在確率 POC は次のように計算できる。

$$POC = \int_{-(\alpha^* + \delta(1 - \cos \theta))E}^{\alpha^* + \delta(1 + \cos \theta))E} f(x) dx \times \int_{-(\alpha^* - \delta \sin \theta)E}^{(\alpha^* + \delta \sin \theta)E} f(y) dy. \quad (10)$$

こうして求めた POC を搜索環境に応じて式 (6) および式 (7) の POD と掛け合わせることで、提案手法 1 における POS は容易に計算することが出来る。また、この場合は、IAMSAR マニュアルで求めた搜索経路を搜索区域と同時に回転させることで、最適な搜索経路間隔 S^* についても変更することなく搜索を実施することが可能である。

4.2 提案手法 2（長方形搜索区域の再最適化）

二つ目は、斜めに配置された 2 つのデイトムポイントを中心に新たに長方形の搜索区域を設定し、デイトムと各辺との距離で最適化した搜索区域を求める方法である。図 3 のようにデイトムとそれに近い 2 辺との距離を新たに βE とおく。この場合、デイトムと各辺との距離の関係から存在確率 POC は

$$POC = \int_{-\beta E}^{(\beta + 2\delta \cos \theta)E} f(x) dx \times \int_{-\beta E}^{(\beta + 2\delta \sin \theta)E} f(y) dy \quad (11)$$

となる。また、この場合の搜索面積は

$$A = 4(\beta + \delta \sin \theta)(\beta + \delta \cos \theta)E^2 \quad (12)$$

で計算される。この搜索面積 A を用いて POD を算出することで、

$$\beta^* = \arg \max_{\beta} \{POC(\beta) \times POD(\beta)\} \quad (13)$$

より、最適搜索係数 β^* を求めることが出来る。また、この場合は、改めて搜索経路間隔を $S^* = W \cdot A(\beta^*)/Z$ で求め、並行搜索の経路を設定することとなる。

本手法は、各辺が緯線経線と平行となる長方形の中から、搜索に最適な区域を求めているものである。本手法を適用することのメリットとして、手法1と比べて POS が向上する可能性があること、また、IAMSAR マニュアルと同様に結果が長方形となることから、従来までの手法と同じように容易に搜索経路を決定し、これまでと同様の感覚で搜索に従事することが出来ることが挙げられる。一方でデメリットとしては、最適化に計算コストを要すること、また、図3の左上や右下など、データムからある程度離れた点についても、搜索区域として含まれてしまうことが挙げられる。IAMSAR マニュアルがデータムを中心に各辺までの距離を均等においているのは、 POC が円形正規分布で与えられていることが影響している。円形正規分布の対称性から、ある搜索面積 A を持つ四角形の搜索区域を設定しようとした場合、データムを中心に正方形の搜索区域を設定することで最も POC が高くなることは自明である。したがって、同じ搜索面積 A を持つ搜索区域の場合、データムから離れた点を多く含むほど、搜索勢力を無駄に消費していることとなり、搜索効率が低下する原因となり得る。

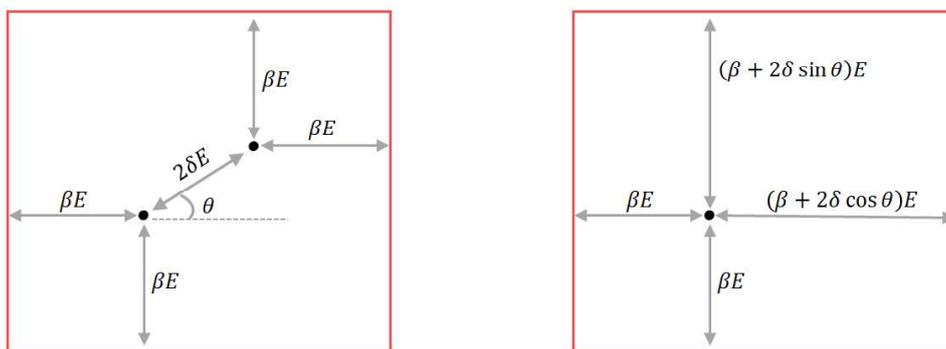


図3: 提案手法2における長方形搜索区域。

4.3 提案手法3 (分離正方形搜索区域の最適化)

提案手法3は提案手法2の弱点を克服するために、2つのデータムポイントに対してそれぞれ正方形の搜索区域を設定する方法を考えるものである。この場合、図4のように2つの搜索区域それぞれが重なる場合と重ならない場合が考えられる。今、データムと各辺との距離を λE とおけば、データムと各辺との関係から存在確率 POC は

$$POC = \begin{cases} \int_{-\lambda E}^{\lambda E} f(x) dx \times \int_{-\lambda E}^{\lambda E} f(y) dy & (\lambda < \delta \cos \theta) \\ + \int_{-(\lambda - 2\delta \cos \theta)E}^{\lambda E} f(x) dx \times \int_{-(\lambda - 2\delta \sin \theta)E}^{\lambda E} f(y) dy & \\ \int_{-\lambda E}^{(\lambda + 2\delta \cos \theta)E} f(x) dx \times \int_{-\lambda E}^{(\lambda + 2\delta \sin \theta)E} f(y) dy & \\ - \int_{\lambda E}^{(\lambda + 2\delta \cos \theta)E} f(x) dx \times \int_{-\lambda E}^{(-\lambda + 2\delta \sin \theta)E} f(y) dy & (\lambda \geq \delta \cos \theta) \\ - \int_{\lambda E}^{(-\lambda + 2\delta \cos \theta)E} f(x) dx \times \int_{\lambda E}^{(\lambda + 2\delta \sin \theta)E} f(y) dy & \end{cases} \quad (14)$$

と表せる。また、この場合の搜索面積はそれぞれ

$$A = \begin{cases} 8\lambda^2 E^2 & (\lambda < \delta \cos \theta) \\ 4 \{ 2\lambda^2 - (\lambda - \delta \sin \theta)(\lambda - \delta \cos \theta) \} E^2 & (\lambda \geq \delta \cos \theta) \end{cases} \quad (15)$$

となる。これらの式から

$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda} \{POC(\lambda) \times POD(\lambda)\} \quad (16)$$

を解くことで、最適探索係数 λ^* を求めることが出来る。

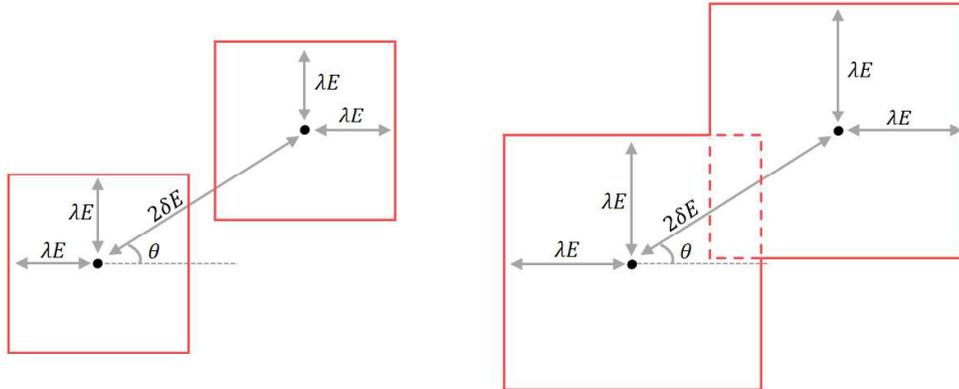


図 4: 提案手法 3 における分離正方形搜索区域の構成。

本手法は、各辺が緯線経線と平行となる正方形の組合せの中から、搜索に最適な区域を求めているものである。本手法を適用することのメリットとして、手法 2 と比べて更に POS が向上する可能性がある。一方で、本手法で得られる搜索区域は四角形とはならないことから、搜索経路を設定する上で問題が生じる可能性が残る。これまでと同様に搜索経路間隔については、 $S^* = W \cdot A(\lambda^*)/Z$ で求めることが出来るが、これを維持しただけでは搜索に有効な搜索経路が得られるとは限らない。具体的には、 $\lambda^* \geq \delta \cos \theta$ が成り立つ場合において、正方形同士が重なる領域に収まる搜索経路数が奇数の場合は良い (図 5 の左図) が、偶数の場合には搜索経路が途切れてしまう問題が生じる (図 5 の右図)。これにより本手法を適用して搜索経路を設定するには、更なる条件が必要となる。つまり、得られた搜索経路間隔 S^* と最適探索係数 λ^* に対して、

$$2(i-1)S^* \leq (\lambda^* - \delta \sin \theta)E < (2i-1)S^* \quad (17)$$

を満たす様な自然数 i が存在する場合にのみ、本手法はそのまま適用可能となる。式 (17) を満たすような自然数 i が存在しない場合、多少の効率性を犠牲にして搜索区域の形状を更に変形するか、この問題が生じることのない提案手法 2 を改めて採用するかを選択することが現実的な解決策となる。

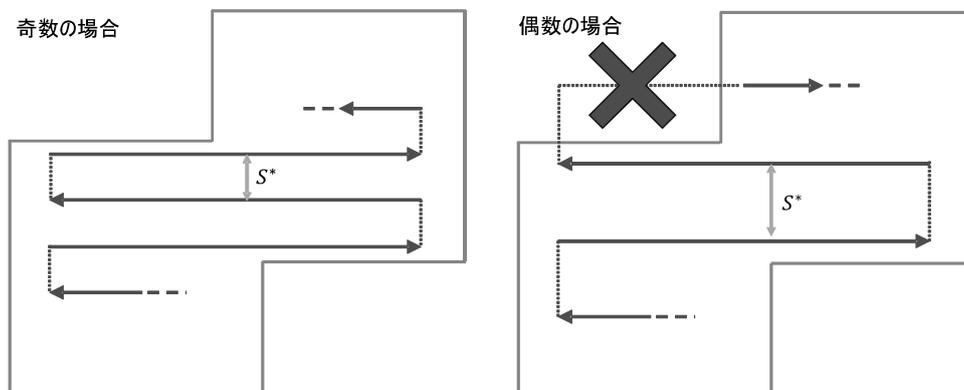


図 5: 提案手法 3 における搜索経路配置の成立条件。

5 数値例による性能比較

本章では、各種パラメータを変化させた場合の提案手法の性質を確認すると共に、従来手法との差を確認し、実務における適用可能性を検証する。以下の数値例では全て、検索環境は良好であり、総合確率誤差を $E = 1.1774$ ($\sigma = 1$) と想定した場合の結果を示す。図6の左図は $\delta = 0.25, \theta = 15^\circ$ とした場合、つまり、データ間距離が近く、かつ、区域の傾きも比較的小さい場合における検索努力量 Z と成功確率 POS の関係を示している。この条件では、 Z の大きさに関わらず、手法間における POS の差はほんのわずかであることが確認出来る。一方、図6の右図は $\delta = 1.5, \theta = 45^\circ$ の場合、つまり、データ間距離が遠く、かつ、区域の傾きが比較的大きい場合における Z と POS の関係を表す。この条件では、従来手法と提案手法3の結果は遜色がなく、提案手法1および2はそれよりも明らかに劣っていることが確認出来る。

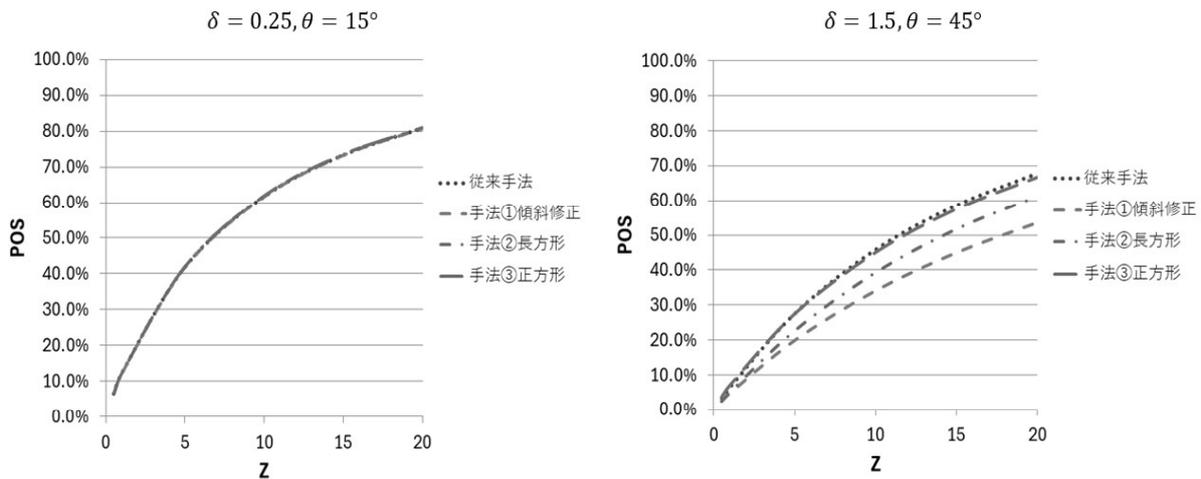


図6: 検索努力量 Z に対する成功確率 POS の比較。

更に、図7は左からそれぞれ、 $Z = 0.5, \delta = 0.25$ (条件1)、 $Z = 20, \delta = 0.25$ (条件2) および $Z = 20, \delta = 1.5$ (条件3) とした場合の区域の傾斜角 θ と POS の関係を示している。図から、いずれの条件であっても区域の傾き θ が大きくなるほど、4つの手法間の差が大きくなることが読み取れる。ただし、その差は条件1では最大でも0.1%未満であり、条件2でも最大0.5%程度に留まる。これらの結果から、データ間距離が近い場合は、区域の傾斜具合や検索努力量の大小に関わらず、いずれの手法を選んだとしても検索の効率は大きく変わらないと言える。したがって、この場合には、実務上最も容易に検索区域を設定することが出来る提案手法1を選択することが現実的な解となり得る。一方、条件3の場合、従来手法が最も高い POS を示し、かつ、提案手法1および2では POS の低下度合いが無視できないほど大きいことが分かった。その傾向は特に、区域の傾きが大きい程顕著に表れている。したがって、この場合、4.3節で述べた様な検索経路に関する問題が生じない様であれば、提案手法3を用いた方が都合がよく、仮に検索経路を上手く設定出来ない状況となれば、次なる手として提案手法2を適用することが現実的な解決策となり得る。一例として、条件3かつ $\theta = 45^\circ$ の場合を考える。この場合の最適搜索係数および最適搜索区域はそれぞれ $\lambda^* = 1.502$ および $A^* = 17.27$ となったことから、 $C^* = Z/A^* = 1.16$ である。今、搜索勢力の有効搜索幅が $W = 3$ であった場合、この際の搜索経路間隔は $S^* = W/C^* = 2.59$ となるため、 $i = 1$ で式(17)が成り立つことが確認出来る。したがって、この場合には搜索経路上も問題なく提案手法3を適用することが出来る。一方で、有効搜索幅が $W = 0.5$ となる事案の場合、経路間隔は $S^* = 0.42$ となり、式(17)が成り立つような自然数 i が存在しないことから、提案手法3を適用することは困難となる。この場合には、上述した通り、次点の方策として提案手法2を選択するか、効率が多少低下することを許容して搜索経路や搜索区域を変更することになる。有効搜索幅は搜索目標の種類や気象海象条件などにより IAMSAR

マニュアル上で使用すべき値が定められているものであるため、提案手法 3 がそのまま適用可能かどうかについては、その事案の状況に応じて確認する必要がある。

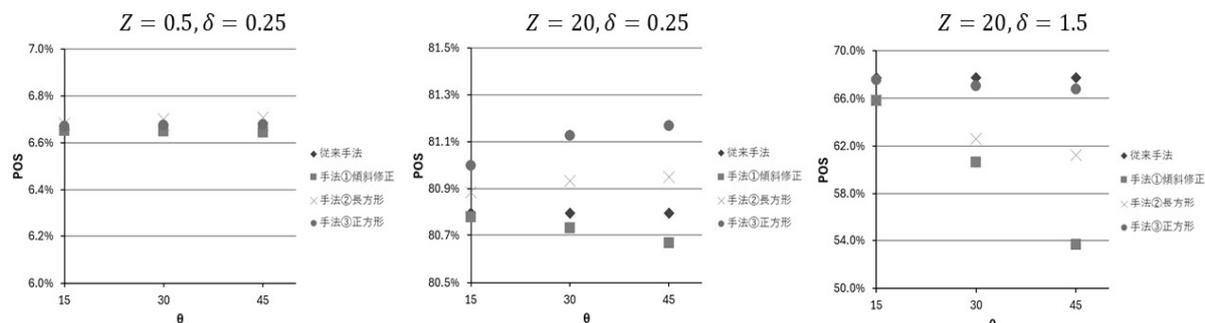


図 7: 搜索区域の傾斜角 θ に対する成功確率 POS の比較。

6 まとめと今後の課題

航空機による搜索効率の向上は、洋上搜索における人命救助の成否に大きな影響を与える可能性がある。本稿では、IAMSAR マニュアルの搜索理論に潜む航空機搜索の困難性を解消するために、緯度経度に基づいた搜索区域を設定する手法を 3 つ提案した。それぞれの手法を適用した場合のメリットおよびデメリットを明らかにすると共に、数値例での比較を通じて、それぞれの提案手法を適用すべき条件を整理した。これらの手法を実運用に組み込むことで、従来の搜索活動で損なわれていた可能性のある航空機搜索の効率性が改善されることが大いに期待出来る。

本稿では、実務上最も頻繁に利用する可能性のある風圧流分離ダイタムを対象として、傾きのない中で最適な搜索区域を設定する手法について述べてきた。同様に、フェリーからの海中転落などに対処するためのラインダイタムについても、IAMSAR マニュアルの方法であれば緯度経度に斜めな搜索区域が設定されることから、今後の課題として、異なるダイタムが設定されるべき状況においても、緯度経度に基づく矩形搜索区域を設定することで航空機搜索の効率を維持する方法を考案する必要がある。

参考文献

- [1] International Maritime Organization, *International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual 2022 Edition, vol. II*, IMO Publication, London, 2022.
- [2] 海上保安庁, “令和 6 年版 海難の現況と対策”, URL:https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/keihatsu/20250414_state_measure01.pdf (閲覧: 2025-12-2) .
- [3] B. O. Koopman, *Search and Screening*, Operations Evaluations Group Report No.56, Center for Naval Analyses, Alexandria, VA, 1946.
- [4] A. Sulaiman and K. Pierce, “Modelling Maritime SAR Effective Sweep Widths for Helicopters in VDM,” *arXiv e-prints*, arXiv: 2304.00983, 2023.
- [5] P. Xiong, H. Liu, Y. Tian and Z. Chen, “A Time Domain-Based Iterative Method for Helicopter Maritime Search Area Planning and Construction of the Simulation Environment,” *IEEE Access*, **8**, pp.191460-191471, 2020.