

# アニーリングマシンを用いた最適航路選択アプリケーションの開発 -混雑海域における衝突回避問題-

## 1. 背景

世界の物流大部分を占める海運業界では、海峡や港出入口などの混雑海域での船舶衝突回避問題やそれを避けるための人的リソース浪費が課題となっている。現在、海峡・港における混雑海域では、航海士が Global Positioning System (GPS)や管制からの情報をもとに船舶の衝突回避を行っている。しかし、航海士は混雑海域におけるすべての船舶の動きを考慮して進路を決定できるわけではないため、衝突事故は頻繁に発生している。また、このような回避行動はさらなる海域の混雑を生む原因にもなり、船舶がその海域を通過する時間を増加させてしまう。つまり、船舶衝突回避問題を効率よく処理するシステム構築が必要となる。そこで、航空業界における、アニーリングマシンを用いた先行研究事例である飛行機の衝突回避問題[1]に注目し、これを応用する形で海運業界における衝突回避問題を解決できるのではないかと考えるに至った。

## 2. 目的

本プロジェクトの目的は大きく分けて以下の二つである。

- A) 混雑海域における衝突回避問題を解決する
- B) 上記問題の課題解決の様子を様々な方々に紹介する

これらの目的を達成するため、以下を実施する。

航空業界における先行研究では、飛行機の衝突回避問題を組合せ最適化問題として定式化し、それをアニーリングマシンで処理している[1]。これを参考にし、海運業界における重要な課題である、混雑海域における衝突回避問題へ横展開する。その際に他の最適化ソルバとの比較も行った。これにより目的 A)が達成される。また、目的 B)の達成のために、上記の問題をその定式化や数学的な操作に踏み込まず直感的に使えるデモアプリケーションの製作を行う。

## 3. ソフトウェア開発内容

開発したソフトウェアは、船舶衝突回避問題をアニーリングアルゴリズムを用いて解くデモ形式のアプリケーションである。Google Cloud Platform の CloudRun というサーバーレスのサービスで運用し、Web サイト <https://deconfships.dev/>で公開している。

ユーザーは、船舶のサイズや、船舶の移動の出発地点と到達地点、出発時間と可能遅れ時間、大きさを選ぶ(図 3-1)。図 3-1 の右下にある Solve を押すこと

により、船舶衝突回避問題をアニーリングアルゴリズムで解くことができる。

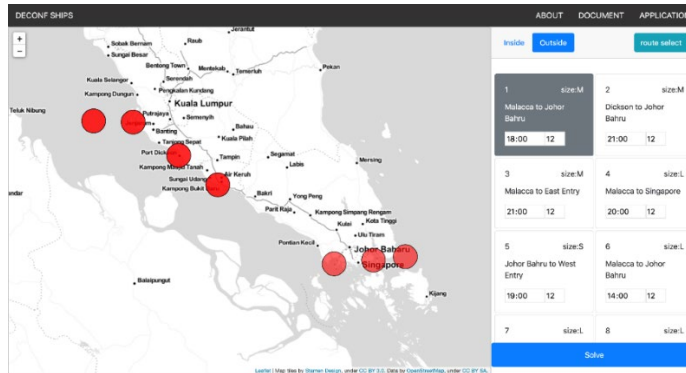


図 3-1. マラッカ海峡における船舶の行き先選択画面

最適化する前、すなわち、各船舶の出発地点、到着地点、出発時刻、希望到着時刻の要求をもとに、単純にマラッカ海峡への入場スケジュールを求めると衝突が発生する(図 3-2(a))。これをアニーリングアルゴリズムで最適化することにより、衝突を回避することが可能になる。図 3-2(b)の赤字部分は一アニーリングマシンを用いて求めた最適な入場タイミングを表している。またその結果を可視化し、実際に回避されている様子が分かるように設計した(図 3-2(c))。

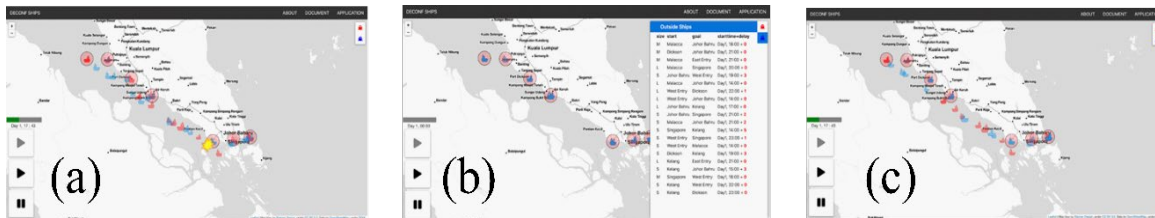


図 3-2. (a)衝突回避前 (b) アニーリングマシンを用いて求めた最適な入場タイミング(赤字部分) (c)アニーリングによる衝突回避後

#### 4. 新規性・優位性

本プロジェクトで達成された新規な点は以下の通りである。

- 問題サイズが大きい領域(100 隻程度)で、既存ソルバに対してアニーリングマシンが解精度で一定の優位性を持つことを示したこと
- 海運業界における問題を具体的に定式化したこと
- 海運業界へのアニーリングアルゴリズム適用の初めての試み

海運業界における船舶衝突回避問題を現実と乖離しないように定式化を行うため、企業へのヒアリングを通し、混雑海域における船舶のルートがある程度固

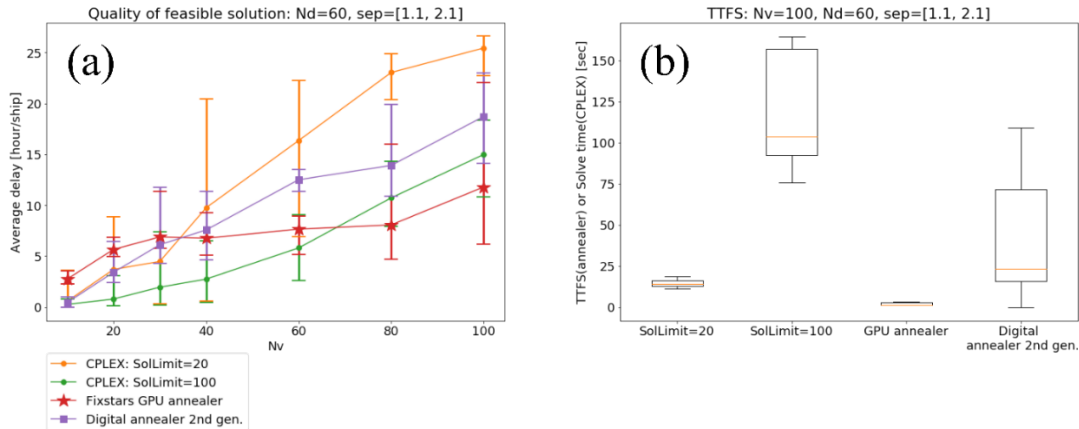


図 4-1. (a)解精度、高低線は最大最小を示している (b)TTFs のアニーリングマシンと既存ソルバ(CPLEX)との比較。ひげは外れ値を除いた最大最小値。

定されていること、一部の管制は海域を通過する全船舶の情報を取得できることなどが分かった。それをもとに具体的な設定で、船舶衝突回避問題の定式化に成功した。アニーリングマシンを用いる場合、目的関数と制約条件を表現するそれぞれの項の係数の設定や、アニーリングマシンの動作パラメータなど、様々なパラメータが存在する。これを適切に設定しないと、与えられた制約条件を満たさない解が得られたり、制約条件を満たしたとしても精度の低い解が得られたりすることが知られている。そこで、グリッドサーチと呼ばれる手法を用い、使用するアニーリングマシンに最適な値を決定できたことも本プロジェクトの優位点であると考えられる。

先に挙げた既存ソルバに対する優位性について詳細を述べる。まず、船舶数(Nv)と、希望到着時刻からの遅れ(average delay)の関係を調べた(図 4-1(a))。船舶数(Nv)が 80 を超えたあたりから、アニーリングマシン (図 4-1(a)における赤線: Fixstars GPU annealer)が、もっとも average delay が小さくなっていることがわかる。つまり、解の精度は、既存ソルバの解(CPLEX で求めた解 100 個のなかでもっとも良い解)よりも良い。

更に、既存ソルバ CPLEX をローカル環境(CPU: Intel core i7-8700 3.4GHz, OS: Windows10, メモリ: 16GB)で動かした場合とアニーリングマシンの計算時間(TTFs: Time to feasible solutions)を比較した。図 4-1(b)は海峡内外に船舶が 50 隻ずつ存在し、最大 60 時間まで遅れ可能、大きい船は 2.1km、小さい船は 1.1km、時間的には 30 分以上近づいたら衝突と判定するという条件のもと、ある確率で実行可能解が得られるまでの平均時間(TTFs)計測したデータである。このとき、解を求めるまでに要する時間が既存ソルバよりも短いことがわかる。

以上をまとめると、大規模な問題設定に関しては、アニーリングマシンによって、

既存ソルバより良い解を、より短時間で求められるという結果が得られた。すなわち、今回取り扱った船舶衝突回避問題に対して問題サイズ(船舶数)が大きくなると、アニーリングアルゴリズムを用いる優位性があると言える。

#### 5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

期待されるユーザー価値として、本プロジェクトで開発した船舶衝突回避 Web アプリケーションは、定式化に関する専門知識を必要とせずに実行することが可能である。これを用いることにより、混雑海域における船舶衝突回避を簡便に行うことができる。また、これまで熟練の経験に頼って行われていた衝突回避を自動化することにより昨今の人手不足の解消にもつながると考える。

また、本プロジェクトの社会へのインパクトとして考えられることは、海運業界へのアニーリングの適用の加速である。これまで、混雑海域における衝突回避は人の手による部分が大きかった。また、管制の指示を受けて船舶が行動することにより、全体としての遅れを小さくしながら混雑海域を通過できることも示せた。そして、この成果を非専門家が見ても分かりやすく、使いやすい形で公開することができた。そのため、本プロジェクトは海運業界へアニーリングマシンを適用する際の指針となり、これを足掛かりとした最適化対象の再発見が海運業界、ひいてはその他、モビリティが関係するあらゆる業界において期待できる。

#### 6. 氏名(所属)

白井 菖太郎 (東京理科大学 理学研究科 物理学専攻)

八木 武尊 (東京理科大学 理学研究科 応用数学専攻)

新保 潤 (東京理科大学 理学部第一部 物理学科)

#### (参考)関連 URL

製作したデモアプリケーション: <https://deconfships.dev>

衝突事故について:

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jinnavi/196/0/196\\_89/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jinnavi/196/0/196_89/_pdf)

#### (引用文献)

[1] Stollenwerk, Tobias, et al., IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems, 21, 285–297 (2020). DOI:10.1109/TITS.2019.2891235