

口頭説明原稿

1--1 ページ：全体の表紙：ドローン・スワーム戦闘の簡単なシミュレーション

（ウクライナ迎撃戦闘を念頭に）

本資料は、以下から構成されている。

資料-1: ドローン・スワームの攻防解析：

最も簡単なシミュレーション

資料-2: ロシアの攻撃用ドローン Shahed136 の分析とスワーム攻防解析について：

数学的モデルと解析

資料-3: ウクライナの迎撃用ドローン P1-SUN の概要とスワーム攻防解析の例：

・Shahed 136 対 P1-SUN

・Shahed 238 対 P1-SUN

・双方 P1-SUN 相のスワーム戦

資料 1

2-2 ページ：資料 1 の表紙：ドローン・スワーム戦闘の簡単なシミュレーション

本資料では、ウクライナ情勢を念頭に、ドローン・スワームの攻防を最も単純なモデルで解析します。攻撃

側と迎撃側が多数機で対峙した場合の挙動をアニメーションで示し、スワーム戦の基本的特徴を直感

的に理解することを目的としています。

3-3 ページ：中国「九天」など大量ドローン運用の脅威

中国の無人空母「九天」は最大 200 機のドローンを同時運用可能で、飽和攻撃能力が急速に高まっています。北朝鮮のシャヘド攻撃と合わせ、防空態勢の構築が喫緊の課題です。本資料は「スウォームにはスウォームで対抗する」ための基礎検討です。

4-4 ページ： 単純な攻守モデル：スウォーム対スウォームの考え方

攻撃側 A は目標到達を目指し、迎撃側 B は接近した A を探知・追尾して撃破します。A は B を障害物として回避し、A は撃破されると停止し、B は迎撃飛行を継続します。速度、探知距離、初期配置を変えながら、スウォーム同士の攻防の様相を理解することが目的です。**5-5 ページ： 結果：速度・探**

知距離が同じ場合（迎撃失敗）

攻撃側と迎撃側が同じ速度・探知距離の場合、迎撃側は十分に対応できず、攻撃側が目標到達に成功します。スウォーム同士の攻防では、同じ性能では迎撃が困難で、防御側は速度や探知性能で優位を持つ必要があることが示されます。

6-6 ページ： 結果：B 側速度 2 倍・探知距離 2 倍（迎撃改善するが不完全）

迎撃側 B の速度と探知距離を攻撃側の 2 倍にすると迎撃成功率は向上します。しかし依然として複数の攻撃機が目標到達し、完全防御には至りません。性能差をつけても迎撃は容易ではなく、戦術面の工夫が必要であることが分かります。

7-7 ページ： 結果：B 側速度 1.5 倍・探知距離 2 倍・全周ランダム攻撃

攻撃側が全周から侵入し、迎撃側が目標周辺を周回パトロールする条件では、迎撃側がほぼ勝利します。20 ケース平均の到達機数は約 1 機で、打ち漏らしは少ないもののゼロにはできません。巡回戦術が

有効であることが示されます。

8-8 ページ： 結果：左側面からの侵入（側面攻撃）でも迎撃ほぼ成功

攻撃側が左側面から集中侵入するケースでも、迎撃側の周回パトロールは有効で、ほぼ迎撃に成功します。ただし 20 ケース平均でも少数の到達が発生し、側面攻撃でも完全防御は困難です。迎撃戦術のさらなる最適化が必要です。

9-9 ページ： 今後の考え方：スウォーム攻防の難しさと課題

スウォーム対スウォームでは、速度差、探知性能、攻撃パターンが迎撃成否に大きく影響します。防御用無人機を多数装備しても、綿密な防護シミュレーションが不可欠です。高精細化、乱数によるケース拡大、AI による最適迎撃戦術の探索など、多くの課題があります。

参考；数理モデルの簡単な説明

このモデルでは、攻撃側 A 群と迎撃側 B 群が多数の自律ドローンから構成され、2 次元平面上で運動します。A 群は衝突を避けながら目標地点上空の通過を目的とし、B 群は同地点から発射され、A 群との衝突（捕捉）を目的に移動します。A の速度は一定、B はその速度と同じ或は 2 倍として設定し、A は他の A との分離、B からの回避、目標指向のベクトルを合成して進行方向を決定します。B は近傍の A を追尾するか、A の進行方向を予測して先回りする制御を行います。両群の距離が所定値以下になれば衝突とみなし、捕捉数や目標到達数、生存率を多数のシミュレーションで統計的に評価できます。速度比や初期配置に応じて、捕捉可能領域や最適戦術の比較が可能です。

資料 2

10-1 ページ：ロシアの攻撃用ドローン Shahed136 の分析とスワーム攻防解析について：数学的モデルと解析

本資料は、Shahed136 の機体構造、航続性能、誘導方式、スワーム攻撃モデル、防空側の迎撃最適化を体系的に整理した技術レポートである。空力推定、燃費モデル、INS + GNSS 航法、到達密度解析、多層防空シミュレーションを統合し、迎撃ドローンと SAM の費用対効果を比較する。特に、スワーム攻撃の「到達密度」が防空負荷を決定する点を強調し、迎撃ドローンが低コストで高効率な防空レイヤーとなることを示す。

11-2 ページ：Shahd-136 の構造と概略性能：低価格ミサイル様ドローン

Shahed136 はデルタ翼・逆 V 尾翼・後部プッシャープロペラを備えた簡素な固定翼 UAV で、前方に大型弾頭、中央に燃料タンク、後部に MD550/560 系エンジンを搭載する。燃料比を高く取る設計により揚抗比 10～12 を達成し、長距離巡航を可能にする。燃料 40kg・消費率 0.3kg/kWh とした試算では航続 1,369km となるが、実際の 2,500km 級航続には燃料増量、燃費改善、速度最適化が必要と推定される。構造は低コストながら長距離飛行に必要な空力効率を満たしている。

12-3 ページ：性能推定の実施：空力・航続モデル（Shahed 系 UAV の推定モデル）

Shahed 系 UAV の性能推定に必要な物理モデルを整理する。揚力係数、抗力係数、揚抗比、比燃料消費率、燃料比などを用いて、プロペラ機の航続距離を与える Breguet 式を適用する。揚力 = 重量、抗力 = ゼロ揚力抗力 + 誘導抗力で表される。典型値として質量 200kg、翼面積 2.5m²、巡航

速度 50–70m/s、揚抗比 8–12、燃料比 25–35%を設定し、航続性能が燃料比と燃費に強く依存することを示す。

13-4 ページ：Shahed 系 UAV の性能推定 思考過程

乾燥 150kg・燃料 70kg・速度 60m/s など保守的条件で計算すると航続距離は 203km となり、実機の 1500～2500km より大幅に短い。原因は燃料比・燃費・速度設定が控えめすぎるためである。改善案として乾燥 120kg・燃料 100kg・燃費 1/15000・速度 70m/s とすると航続距離は約 540km まで増加するが、実機級にはさらに燃料比を高める必要がある。Shahed の航続性能は燃料比が支配的であることを示す。

14-5 ページ：Shahed-136：公開された航続距離 R を達成できる推定機体諸元まとめ

公開情報と整合する機体諸元を再設定。乾燥 100kg、燃料 150kg、離陸 250kg とし、燃料比 $W_i/W_f=2.5$ を採用。空力特性は翼面積 2.5m^2 、空気密度 0.9、揚力係数 0.42、抗力係数 0.038、揚抗比 11.08 と推定される。これらは実機写真・既存研究と整合し、Shahed が長距離飛行を達成するために燃料比と空力効率を最大化した設計であることを示す。航続距離は燃費・揚抗比・速度・燃料比の 4 要素の積で決まり、特に燃料比が支配的である点を強調する。

15-6 ページ：Shahed-136：公開された航続距離 R を達成できる推定機体諸元まとめ（続き）

プロペラ効率 0.8、比燃料消費率 1/20000、MD550/560 系エンジンを想定した推進モデルを示す。最適巡航速度は 76m/s（約 274km/h）と推定され、航続距離は約 2,110km、飛行時間 7.7 時間となる。実機は 60–70m/s で飛行するが、燃費最適点は 75m/s 付近にある可能性が高い。空力係数

CL=0.42、CD=0.038、L/D=11.08 と整合し、Shahed の長距離性能が燃費と空力の最適化によって成立していることを示す。

16-7 ページ：公開情報から見た shahed-136 の誘導・航法方式の特徴

Shahed の誘導は商用グレード INS + GNSS による事前プログラム飛行が基本で、ウェイポイント列を順次追従する巡航ミサイル的運用を行う。通信更新は限定的で、リアルタイム映像伝送や高度な遠隔操縦機能は一般に非搭載。GNSS は GLONASS 中心だが近年は GPS/BeiDou 併用型も存在。INS 誤差を GNSS で周期補正するハイブリッド方式が必須であり、長距離飛行でも数十～百 m 級の精度を維持できる。

17-8 ページ：Shahed が 2000 km 飛んだときの着弾誤差解析モデル

簡略数理モデルを記載しています。INS 誤差はランダムウォーク + ドリフトとして時間とともに増大し、長距離飛行では数百 m～数 km の誤差が蓄積する。

18-9 ページ：Shahed が 2000 km 飛んだときの着弾誤差解析モデル(続き)

GNSS 観測をカルマンフィルタで統合することで誤差を周期的にリセットできる。終末誘導の CEP は INS 誤差と GNSS 誤差の合成で決まり、GNSS 更新周期が精度を左右する。大型固定目標を狙う Shahed の運用に適した精度を確保できる。

19-10 ページ Shahed が 2000 km 飛んだときの着弾誤差分布解析 結果

INS 単独では誤差が数千 km に達し実用にならないが、INS + GNSS + EKF 統合では誤差が数 m ～十数 m に抑制される。8 時間飛行後の誤差比較を示し、GNSS 補正の重要性を定量的に示す。

長距離飛行でも実用的な誘導精度を維持できることが明確に示されている。

20-11 ページ：群攻撃（スウォーム）モデル：攻撃側（Shahed 群）

Shahed の巡航速度・航続距離・誘導方式を各機体にコピーし、発射時刻・経路長・速度ばらつきを与えて群攻撃をモデル化する。到達時刻分布をヒストグラム化することで、スウォーム攻撃の本質である「到達密度」を解析する。ピーク密度が防空処理能力を超えると突破が発生する。

21-12 ページ：群攻撃（スウォーム）モデル：攻撃側（Shahed 群）（続き）

ここでは、発射スケジュールと経路のモデル化を示しています。

発射時刻を同時発射型または分散型としてモデル化し、経路長を代表値 + ばらつきで設定する。複数発射地点や迂回経路を考慮し、スウォームの到達密度を決定する要因を整理する。攻撃側の時間分散と経路差が防空負荷に与える影響を定量化する。

22-13 ページ：防空システムのモデル

防空システムの処理能力として、防空側が単位時間あたり最大 μ 機を迎撃可能とするモデルを提示。

到達密度 $\lambda(t)$ が μ を超えると突破が発生する。生残確率モデルも示しつつ、ここでは時間帯ごとの迎撃能力で簡略化。スウォーム攻撃の飽和条件を数学的に整理している。

23-14 ページ：計算条件：200 機のシャヘド攻撃：攻撃側 1 分あたり 10 機を迎撃できるモデル

200 機の Shahed を発射し、速度・経路長・発射時刻にばらつきを与えた場合の到達時刻分布を示す。

1 分あたり 10 機迎撃可能な防空能力と比較し、ピーク密度が飽和攻撃を引き起こす可能性を示す。ス

ウォーム攻撃の脅威を定量的に理解できる。

24-15 ページ：防空側の迎撃最適化モデルの作成

攻撃側の到達密度に対し、防空側が SAM・SHORAD・CIWS を用いて突破機数を最小化する最適化モデルを構築する。時間ビンごとの到達数、迎撃能力、弾薬制約を組み合わせ、貪欲法による迎撃配分が合理的であることを示す。

25-16 ページ：防空側最適化の結果

このシミュレーションは、200 機の Shahed 型 UAV によるスウォーム攻撃に対して、多層防空システムがどのように迎撃を行い、どの程度の UAV が突破されるかを評価したものです。

26-17 ページ：結果：防空システムがある場合とない場合の一分毎の目標到達機数

200 機のスウォーム攻撃に対し、3 層防空システムが突破率 4.5%を達成。

27-18 ページ：結果に関する考察

SAM120 発、SHORAD131 発、CIWS41 発を使用し、ピーク密度を効果的に削減。多層防空が高い迎撃効果を持つことを示す。殺傷確率や弾薬数が異なる複数の防空層を連携させることで、攻撃側の UAV の集中を分散させつつ、効果的に撃墜できることが分かった。

28-19 ページ：防空システムを突破した 9 機に関する考察

先の図では、時間ビン毎には 1 機に満たない突破機数が示されているが、これは統計的数値であり、トータルとしては 9 機が突破できているが、これらの突破機数は、特定時間帯に集中せず広く分散している。防空側がピーク密度を効果的に処理した結果、残存機が均等に分散した可能性がある。初期条件のば

らつきが突破分布に影響する。

29-20 ページ：防空システム：「ミサイル防空システム」か「迎撃防空ドローンシステム」

命題として「ミサイル防空システムと迎撃ドローン防空システムでどちらが安く・どれだけ落とせるか」を示している。

SAM は高 kill 確率だが高価で弾数制約が厳しい。迎撃ドローンは低 kill 確率ながら極めて安価で大量投入可能。Shahed のような低コスト UAV に対しては迎撃ドローンが費用対効果で圧倒的に優位である。

30-21 ページ：「ミサイル防空システム」のみか「迎撃防空ドローンシステム」のみか、そのハイブリッドシステムか

SAM のみでは突破率 68%、迎撃ドローンのみでは 20%、ハイブリッドでは 6.4%。迎撃ドローンは圧倒的に低コストで高効率。ハイブリッドは突破率最小だがコストも最大。各戦略の費用対効果を比較し、迎撃ドローン中心の防空が合理的であることを示す。

31-22 ページ：防空システム：コスト解析モデル

時間ビンごとに SAM と迎撃ドローンの撃墜数・突破数・総コストを計算するモデルを提示。撃墜あたりコストを定量化し、最適化の基礎を構築する。

32-23 ページ：防空システム：コスト解析結果

SAM のみでは突破率 68%、迎撃ドローンのみでは 20%、である

33-24 ページ：防空システム：コスト解析結果（続き）

ハイブリッドでは 6.4%。迎撃ドローンは圧倒的に低コストで高効率。各戦略の費用対効果を比較し、迎撃ドローン中心の防空が合理的であることを示す。

34-25 ページ：SAM と迎撃ドローンの最適な配分比率を求めるシミュレーション結果

予算 82M USD の範囲で突破率最小となる構成を探索。SAM を増やしても費用効率が悪化し、迎撃ドローン中心の構成が合理的であることを示す。

35-26 ページ：最適化の結果（結論）最適構成（予算 82M\$の範囲で突破率を最小化）

予算 82M USD で最適構成は SAM0 発・迎撃ドローン 16,400 機。実際の迎撃使用は 474 機で突破率 5.2%。迎撃コストはわずか 2.37M USD であり、迎撃ドローンの費用対効果が突出する。

36-27 ページ：シミュレーション結果からの考察

攻撃側；スウォーム攻撃は単位時間当たりの攻撃密度が本質

スウォーム攻撃の本質は「到達密度」。SAM は発射レート制約からピーク密度に弱い。

迎撃側：ドローンは大量に且つ同時投入でき、ピーク密度に強い。迎撃ドローン中心防空が最適である。

37-28 — 42-33 参考資料

以下の数学的解析モデルは参考資料として 37-28 ページから 42-33 ページに示す。

攻撃側到達プロファイル

防空側の迎撃能力

突破機数と目的関数

総迎撃リソース制約

最適化の直感的解

多層防空の数学的扱い

シミュレーションで検討すべき関数（目的と制約）

多目標への配分（重要度付き）

資料— 3

43-1 ページ：表紙（ウクライナの迎撃用ドローン P1-SUN 概要とスワーム攻防解析の例）

本資料は、ウクライナが実戦の中で開発した迎撃専用ドローン P1-SUN の特徴と、Shahed136・Shahed238 との交戦解析、さらに双方が高速迎撃機を用いるスワーム戦のシミュレーション結果をまとめたものです。迎撃ドローンの性能、旋回能力、誘導方式、交戦モデルを数理的に整理し、実戦での防空運用の課題と可能性を示します。

44-2 ページ：「迎撃専用ドローン（interceptor drones）」という新しい防空システム

ウクライナはロシアの Shahed・Geran 攻撃に対抗するため、極端に低コストで高機動な迎撃専用ドローンを実戦投入しました。特徴は「1,000～5,000 ドル級の低価格」「200～450km/h の高速」「体当たり迎撃」「大量生産前提」。ミサイルの代わりにドローンで迎撃する新しい防空概念が確立され、世界初の本格的インターセプタードローンとして評価されています。

45-3 ページ：ウクライナ軍の迎撃ドローン機能・性能の共通設計思想

迎撃ドローンは 3D プリントと市販部品で構成され、低コストで大量生産可能です。速度は 200～

450km/h で Shahed136 より高速。誘導は FPV 手動から AI 支援型へ進化し、自動追尾やコース生成が可能になりつつあります。高価な SAM を節約しつつ、安価な攻撃ドローンを大量に迎撃する運用思想が中心です。

46-4 ページ：インターセプタードローンの主なファミリー

最も現有で使用されている迎撃ドローンが即席／改造型 FPV 迎撃ドローンです。

市販 FPV レーシングドローンを改造した即席迎撃機で、速度 100～200km/h、航続距離が数 km の短距離迎撃を行います。体当たりや小型弾頭で Shahed や偵察 UAV を迎撃し、専任の「Shahed Hunter」パイロットが育成されています。低コストで大量投入可能ですが、操縦者の技能に依存する方式です。

47-5 ページ：インターセプタードローンの主なファミリー(続き)

次が、「Shahed Hunter」と呼ばれる固定翼・ハイブリッド迎撃機です。

Sting や Wild Hornets などの固定翼迎撃機は、速度 200～300km/h、高度 5,000m まで対応し、Shahed の巡航高度に合わせた空対空迎撃が可能です。Terra A2 は最高速度 312km/h、航続 75km、弾頭 750g と高性能で、ウクライナ公式メディアでも迎撃機として紹介されています。

48-6 ページ：インターセプタードローンの主なファミリー(続き)

Shahed136 キラーとして使用されている高速・量産型 P1-SUN がある。

P1-SUN は弾丸形の高速固定翼 + VTOL 構造を持ち、速度 300～450km/h と Shahed136 を確実に追尾できる性能を備えます。コストは 1,000～3,000 ドルと極めて安価で、3D プリントを多用。高度

5,000m 到達、AI 支援誘導、800g 弾頭など、現行迎撃ドローンの中で最もバランスの取れた主力機です。

49-7 ページ：インターセプタードローンの主なファミリー(続き)

Interceptor 2.0 はターボジェット推進で最大速度 320km/h、迎撃距離 30km、Kill 確率 0.7～0.8 を持つ高性能迎撃機です。自動ロックにより GPS 依存の Shahed に強い EW 耐性を持ち、都市到達前に迎撃可能。仏 Alta Ares や米 Roadrunner など各国も同様の高速迎撃機を開発しています。

50-8 ページ：他のジェット迎撃機の比較

Interceptor 2.0、Alta Ares、ロシア Jet Kamikaze、米 Roadrunner を比較し、推進方式・速度・迎撃距離・再利用性などを整理しています。ウクライナの Interceptor 2.0 は再利用可能で、Shahed 迎撃に最適化された設計が特徴です。

51-9 ページ：Shahed136 攻撃に対する P1-SUN 迎撃の特性

Shahed136 は RCS0.01～0.1 m²と小さく、レーダー単独では探知が難しいため、音響・光学・AI 統合監視が実戦で用いられています。探知距離 30km とすると、Shahed 速度 190km/h に対し、P1-SUN は発進から迎撃まで約 9～10 分の対処時間を確保できます。音響網が早期警戒に重要です。

52-10 ページ：Shahed vs P1-SUN 旋回性能比較

Shahed136 の旋回半径は 0.9～1.2km で高 G 旋回不可。一方 P1-SUN は高速フェーズで 200～300m、減速高 G フェーズで 100～200m と圧倒的に小さい旋回半径を持ちます。比例航法と高 G 旋回により、直線飛行主体の Shahed を確実に捕捉できます。

53-11 ページ：シャヘド 136・スワーム攻撃対 P1 相当迎撃ドローンの攻守の結果例

（迎撃シナリオ(2 段階追尾・撃破) による交戦様相)

30 機同士の交戦では、Kill 確率 0.8 の P1-SUN が Shahed136 をほぼ全機迎撃します。旋回性能差と速度差が決定的で、緑線（到達率）はほぼゼロ、赤線（撃墜率）が急上昇します。P1-SUN は Shahed136 に対して十分な迎撃能力を持つことが示されます。

54-12 ページ：能力向上型 Shahed238 による攻撃 対 P1 相当機 迎撃の例

Shahed238（600km/h）との交戦では、同数の迎撃機を投入しても撃墜率 0.5、到達率 0.5 となり迎撃失敗します。速度差が大きく、現行 P1-SUN では追尾能力が限界に達します。高速化・誘導強化・空中発射化が必要であることが明確になります。

55-13 ページ：P1-SUN の進展：地上発射と航空機（無人機を含む）からの発射

P1-SUN は地上発射だけでなく、An-28 輸送機や無人機から空中発射する方式が実戦投入されています。高度を既に持つため追いつきやすく、航続距離を節約でき、安価な空対空ミサイルとして運用可能です。ロシア側も高速攻撃ドローンを導入し、攻守の高度化が進んでいます。

56-14 ページ：P1-SUN 相当機を攻撃機：P1-SUN を迎撃機とするスワーム戦闘

攻撃側・迎撃側ともに P1-SUN 相当の高速迎撃機をそれぞれ 30 機用いた場合、迎撃確率は 0.6、撃墜数 18 機となり、完全撃破は困難です。双方が高機動で回避・追尾を行うため、交戦は複雑化し、迎撃側は常に多数の高性能機を必要とします。

57-15 ページ：まとめ（迎撃能力と課題）

Shahed136 には P1-SUN で十分対処可能ですが、Shahed238 級には現行能力で不十分です。探知はレーダー単独ではなく、音響・光学・AI 統合追跡が不可欠。P1-SUN 相当機同士のスワーム戦では、迎撃側が常に多数・高性能である必要があり、精密なシミュレーションが防空設計に不可欠です。

58-16 ページ：追加資料（日本の迎撃ドローン早期取得プログラム）

日本の防衛装備庁は迎撃ドローン早期取得プログラムを開始し、令和 8 年 7 月に実証試験を予定。受託企業が決定し、実証後は量産契約へ移行可能。世界的に迎撃ドローンの導入が進む中、日本も本格的な防空ドローンの整備に踏み出しています。

59-16 ページ：追加資料（多層防空の現状）

ウクライナ空軍の公式発表を基にした Defence Ukraine Team の多層防空の現状分析結果を示している。弾道弾や超音速ミサイル対処を行う高層防空では、迎撃率約 27%、巡航ミサイル対処の中層防空では、撃墜率 91%、Shahed136 等のドローン対処の低層防空では撃墜率 92%となっている。高層防空能力の向上が喫緊の課題である。では我が国の多層防空システムでは、どのようなことが想定されるのか、特に低層防空或はハイブリッド防空を如何に進めるかが喫緊の課題ではないかと思われます。