

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)

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相当のスワーム戦

F-3勉強会—A 資料—表紙

齊藤 英明

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

F-3勉強会—A 資料-1

齊藤 英明

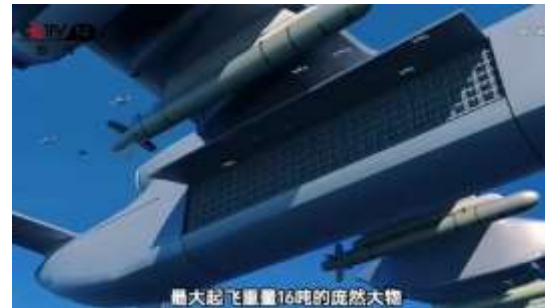
中国は小型無人機を同時に多数飛ばす「スウォーム(群れ)飛行」技術の向上を図っている

喫緊の課題; 防空態勢の構築
「九天」の飽和攻撃へ
北朝鮮によるシャヘドの飽和攻撃へ
一つの検討課題; スウォームにはスウォームで



200機もの小型ドローンを搭載する中国の無人空母機「九天」(2025-05-19)

<https://milirepo.jp/chinas-unmanned-aircraft-carrier-jiutian-carries-up-to-200-small-drones/>



100機もの自爆型ドローン一斉発進も可能、中国のドローン空母「九天」。

翼幅25メートル、最大離陸重量16トン、最大積載量6トン。動力システムはターボファンエンジンを採用。最大飛行高度は高高度の1万5000メートル、最大飛行速度は時速700キロメートル、最大航続距離7000キロメートル、飛行時間は12時間以上

JBPress(2025.5.22)

<https://jbpress.ismedia.jp/articles/-/88459>

単純な攻守モデル:スウォーム対スウォーム

目的:スウォーム攻撃対スウォーム迎撃の様相をアニメーション等で理解する

考え方

A群;20機の自爆ドローン:目標地点への攻撃(目標位置の α 距離以内への到達)

B群;20機の防御ドローン:目標位置或は周辺から発進し迎撃撃破

(ドローン同士の δ 接近を迎撃とみなす。撃破後も生き残る)

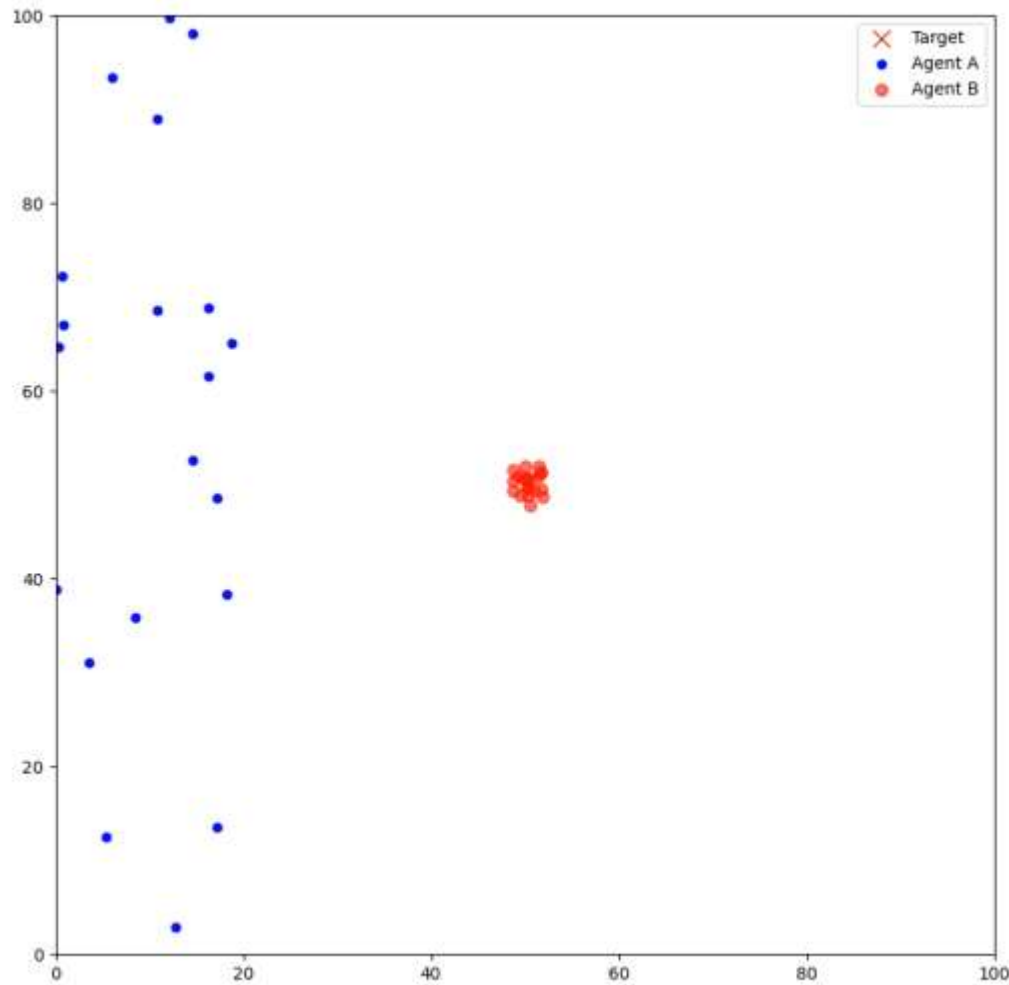
A群ドローンはB群ドローンを障害物として回避飛翔する。

(撃破すると飛翔停止)

B群ドローンは、個々が接近するA群ドローンを個別に探知・追尾・撃破する

A-Bの飛行速度と探知距離性能及び初期攻撃配置および迎撃配置は解析時指定

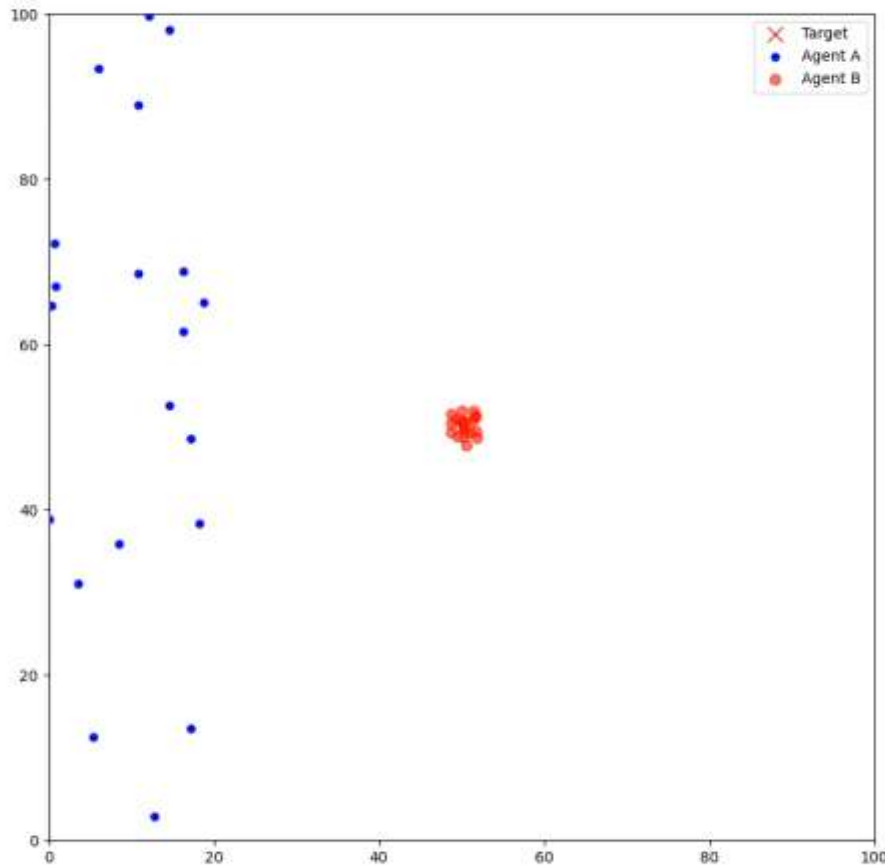
A-B群： 平均速度 A、Bともに同じ平均速度で移動
探知距離も同じ
迎撃側が目標地点から発進



x印：目標地点

結果：
攻撃側の勝利
迎撃にほぼ失敗

A-B群: 平均速度 B側がAの2倍
探知距離 探知距離もB側が2倍
迎撃側が目標地点から発進
攻撃側は側面より侵攻



x印: 目標地点

結果:
複数のケースでの検討は
していないが、

攻撃側の数機は目標位置
へ到達

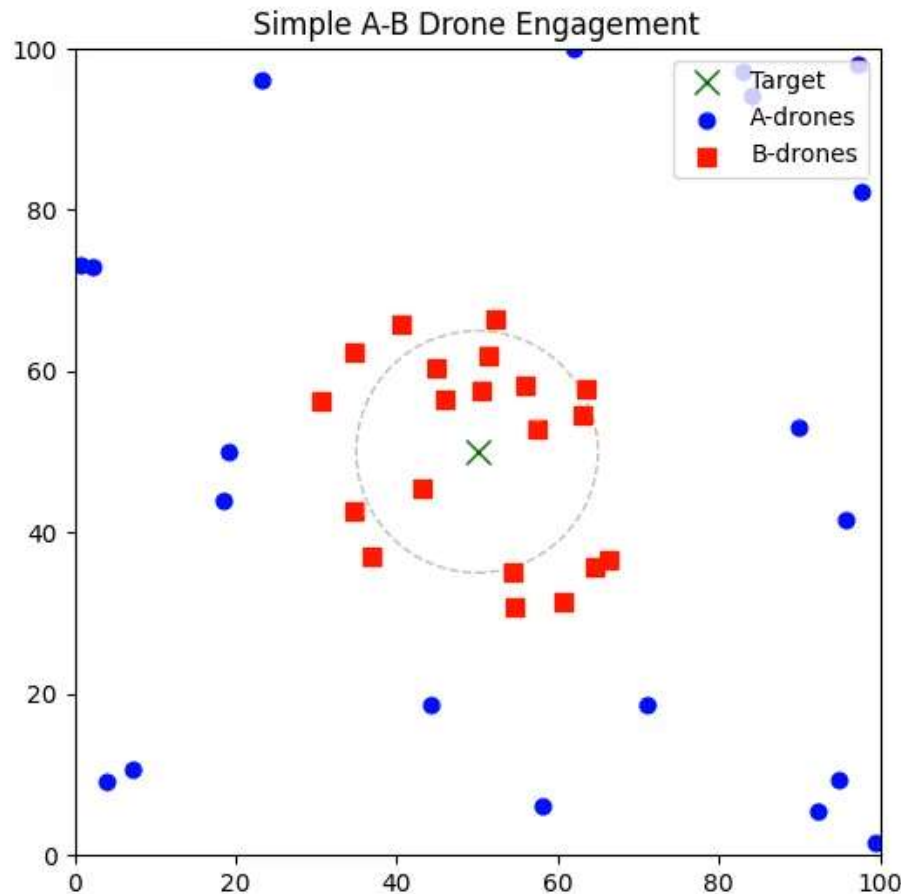
A-Bの平均速度が同じ先の
ケースより、迎撃に成功し
ているが迎撃は不完全

A-B群: 平均速度 B側の速度がAの1.5倍

探知距離 探知距離も2倍

初期配置: 攻撃側は全周にランダム

迎撃側は、目標位置から適当に離れて周回パトロール



x印: 目標地点

結果:

攻撃側の目標値到達機数: 0

迎撃側のほぼ勝利

初期配置を乱数で決定した20
ケースでの平均攻撃目標到達
機数; 1.05機

それでも打ち漏らしは発生する

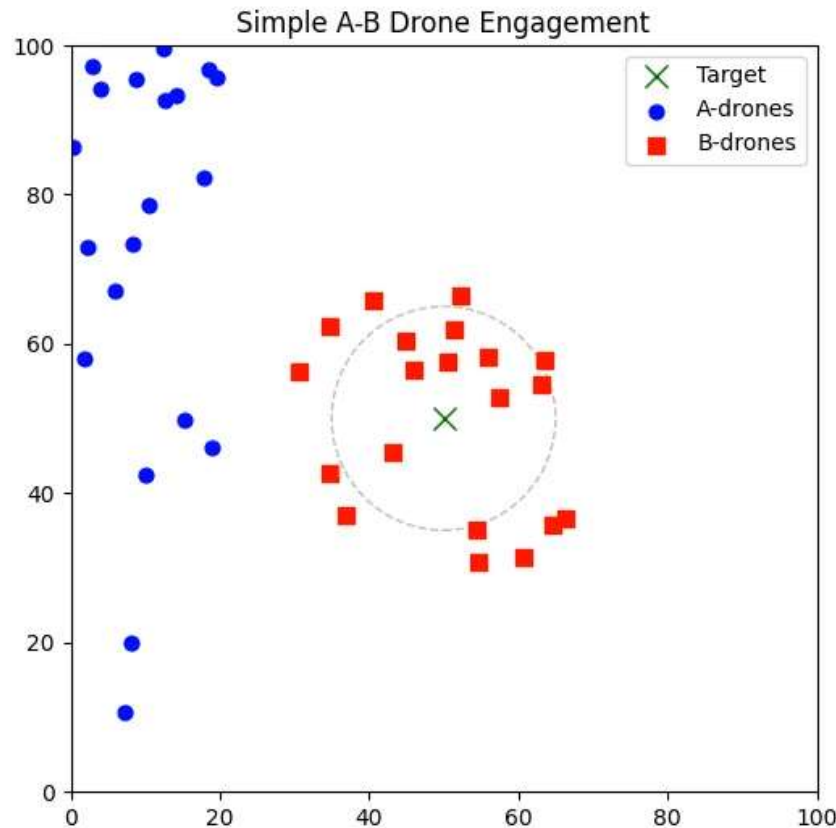
撃墜に成功すると攻撃
機、迎撃機共に消滅する
としている

A-B群: 平均速度 B側の速度がAの1.5倍

探知距離 探知距離も2倍

初期配置: 攻撃側は左側面から侵入

迎撃側は、目標位置から適当に離れて周回パトロール



x印: 目標地点

結果:

攻撃側の目標値到達機数: 1機
迎撃側のほぼ勝利

初期配置を乱数で決定した20
ケースでの平均攻撃目標到達
機数; ほぼ同じ

それでも打ち漏らしは発生する

撃墜に成功すると攻撃
機、迎撃機共に消滅する
としている

結果から今後の考え方

スウォーム対スウォームの攻守では、同じ機数であっても、速度差、攻撃パターン、探知性能差、等に大きく迎撃成否が関わる。従って、防御用無人機を多数装備しても、その防護シミュレーションを相当綿密に行わないと、迎撃率が大きく影響を受ける。

シミュレーションの高精細化、忠実度、乱数による攻撃、防御パターンのケース数拡大とAI導入による適切迎撃方法の解明など、課題は多い。

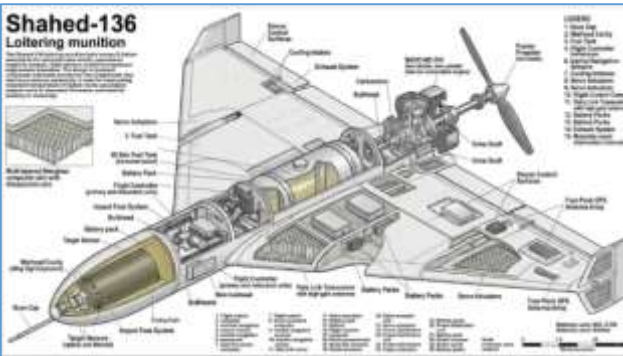
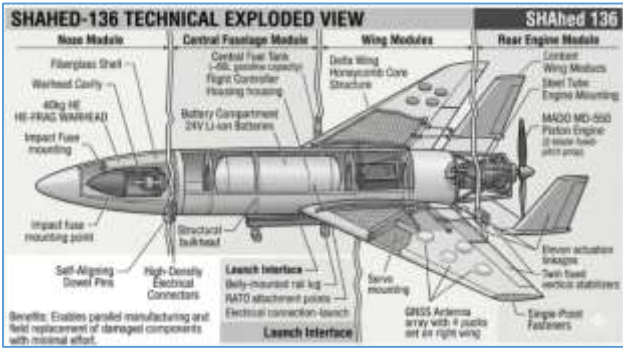
資料-2

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

ASPI-F-3勉強会A 資料-2

齊藤 英明

Shahed-136の構造と概略性能: 低価格ミサイル様ドローン



Shahed 136 Drone: Complete Mechanical Engineering Breakdown

By Saikrishna / April 12, 2026

<https://mechconcepts.tech/shahed-136-drone-mechanical-engineering/>

Shahed-136 の機体形状は :

- デルタ翼 (2.5 m) + 細長い胴体 (3.5 m) + 逆 V 尾翼
- 後部プッシャー式プロペラ
- 前方に大型弾頭、中央に燃料タンク
- 低コスト素材で構成された簡素な構造
- 長距離巡航に必要な $L/D \approx 10-12$ を達成

Calculation verification

- Fuel mass: 40 kg gasoline
- Specific fuel consumption: 0.3 kg/kWh (realistic for small engines)
- Cruise power required: ~18 kW (25 HP)
- Endurance: $40 / (18 \times 0.3) = 7.4$ hours
- Range: $7.4 \text{ h} \times 185 \text{ km/h} = \mathbf{1,369 \text{ km}}$

To achieve 2,500 km, design likely includes:

- Extended fuel capacity (60-70 kg)
- Optimized cruise at 150 km/h (lower power setting)
- Improved engine efficiency (0.25 kg/kWh)

Installation Layout

Pusher Configuration:

- Engine mounted at rear, thrust line through CG
- Propeller: 2-blade, fixed-pitch, ~1.2m diameter
- Direct drive (no gearbox) — reduces failure points
- Steel tube mount frame bolted to wing spar carry-through

Cooling System:

- Ram air intake (NACA duct or simple scoop)
- Baffled cylinder fins
- Exhaust heat shielding (fiberglass wrap)

Vibration Isolation:

- Rubber mounts between engine frame and wing structure
- Prevents fatigue cracking in composite airframe
- Mass balancing of reciprocating components

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

1.モデル化の前提(パラメータ)

本モデルは、Shahed-136 に類似した固定翼 UAV を想定し、以下の物理量を用いる。

- 重量: $W = mg$
- 翼面積: S
- 揚力係数: C_L
- 抗力係数: C_D
- 空気密度: ρ
- 飛行速度: V
- 揚抗比: $\frac{L}{D}$
- 比燃料消費率(プロペラ機): c
- 初期重量: W_i
(乾燥重量: W_{dry} + 燃料重量: W_{fuel})
- 最終重量: W_f
(乾燥重量: W_{dry})
- 典型値(推定)
- 質量: 200 kg
- 翼面積: 2.5 m²
- 巡航速度: 50–70 m/s
- 揚抗比: 8–12
- 燃料比: 25–35%
- プロペラ効率: 0.7–0.85

2. Breguet 航続方程式(プロペラ機) 航続距離R

$$R = \frac{\eta_p}{c} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V}{g} \cdot \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right)$$

ここで

- η_p : プロペラ効率 c : 比燃料消費率
- L/D : 揚抗比 V : 巡航速度
- W_i/W_f : 初期重量と最終重量の比
燃料比から

$$\frac{W_i}{W_f} = 1 + \frac{W_{fuel}}{W_{dry}}$$

3. 揚力・抗力モデル

定常水平飛行では揚力が重量に等しい。

$$C_L = \frac{2W}{\rho V^2 S}$$

抗力係数は

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2$$

揚抗比は

$$\frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

Shahed 系 UAV の性能推定 思考過程

仮置き条件

計算条件 (最も保守的条件)

乾燥質量 (W_{dry}): 150.0 kg

燃料質量 (W_{fuel}): 70.0 kg

空気密度 (ρ): 0.9 kg/m³

速度 (V): 60.0 m/s

翼面積 (S): 2.5 m²

ゼロ揚力抗力係数 (CD_0): 0.03

誘導抗力係数 (k): 0.05

推進効率 (η_p): 0.8

燃料消費率 (c): 1/9000.0 (1/s)

結果:

揚力係数 (CL) = 0.533

抗力係数 (CD) = 0.044

揚抗比 (L/D) = 12.06

航続距離 (Range) $\approx$ 203.3 km

空力はそれなりに妥当だが、「燃料比・比燃料消費率・速度」の設定が保守的すぎて、航続距離が実機想定より短く出ている



「燃料搭載量が少なめ」
「エンジンの燃費もそこまで良くない」
という前提に成っている

改善 ; 燃料比をもっと増やす
燃費を良くする

乾燥質量を120kg、燃料質量を100kg、比燃料消費率 c を1/15000、速度 V を70m/s

揚力係数 (CL) = 0.392 抗力係数 (CD) = 0.038 揚

抗比 (L/D) = 10.39

航続距離 (Range) $\approx$ 539.5 km

再検討

航続距離を 2,000 km とすると、
540 km からは数倍異なる

$$\frac{2000}{540} \approx 3.7$$

検討:

航続距離R 203 km は、公開情報
(おおよそ 1,500–2,500 km クラス)
と比べると明らかに短すぎる。

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

$$R \propto \underbrace{\frac{\eta_p}{c}}_{\text{燃費}} \cdot \underbrace{\frac{L}{D}}_{\text{空力}} \cdot \underbrace{V}_{\text{速度}} \cdot \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right)_{\text{燃料比}}$$

航続距離の向上:
この4つのどれをどれだけ
動かすかの設計問題

質量構成 (Mass Breakdown)

項目	値	コメント
乾燥質量 (構造 + 弾頭 + エンジン + 電子機器)	100 kg	Shahed の公開推定値 (80–120 kg) と整合
燃料質量	150 kg	非常に燃料リッチな設計 (燃料比が航続の鍵)
離陸質量	250 kg	公開推定 (200–250 kg) と一致
燃料比 W_i/W_f	2.5	航続距離を決める最重要パラメータ
$\ln(W_i/W_f)$	0.916	Breguet 式の燃料項

Shahed は「燃料タンクの塊」と言われるほど燃料比が高い

空力特性 (Aerodynamics)

項目	値	コメント
翼面積 S	2.5 m ²	Shahed の実測写真から妥当
空気密度 ρ	0.9 kg/m ³	低～中高度巡航を想定
揚力係数 C_L	0.42	最適巡航時の計算値
抗力係数 C_D	0.038	$C_D0 + kC_L^2$ モデルから算出
揚抗比 L/D	11.08	小型固定翼 UAV として十分高い

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

推進・燃費 (Propulsion & Fuel Efficiency)

項目	値	コメント
プロペラ効率 η_p	0.8	2 枚プロペラの典型値
比燃料消費率 c	$1/20000 \text{ s}^{-1}$	時間スケール ≈ 5.6 時間
エンジン種別	MD550/MD560 系コピー (推定)	公開情報と一致

最適巡航条件 (Optimal Cruise Condition)

項目	値
最適巡航速度 V_{opt}	76 m/s (約 274 km/h)
航続距離 R	2110 km
飛行時間 T	約 7.7 時間
CL	0.42
CD	0.038
L/D	11.08

実機は 60–70 m/s で飛ぶが、燃費・空力の最適点は 75 m/s 付近にある可能性が高い。

公開情報から見たshahed-136の誘導・航法方式の特徴

公開情報を総合すると、Shahed-136 の誘導・航法は、「商用グレード INS + GNSS (GPS/GLONASS) による事前プログラム飛行」が基本

- 誘導方式:

- 商用グレードの INS (慣性航法装置) + GNSS (GPS/GLONASS) ハイブリッド
- 目標座標 (緯度・経度・高度) を事前入力し、ウェイポイント列を順次追従
- 多くの運用では「発射→自律飛行→目標座標で突入」という

疑似巡航ミサイルのプロファイル

- 通信・更新:

- 一部機体は「商用デジタル通信モジュール」を搭載し、目標座標の更新・変更が可能とされる
- ただし、ウクライナで回収された機体の多くは、リアルタイム映像伝送や高度な遠隔操縦機能は持たないと報告されている

- GNSS 種別:

- 初期は GLONASS 依存が強い構成
- 近年は GPS/GLONASS/BeiDou など複数システムを利用する派生型も指摘されている

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

状態ベクトル

機体の 2D 平面運動（地表近似）に絞ると、状態ベクトルを下記とする

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ v(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix}$$

- x, y : 地表座標（東・北方向） v : 対地速度 ψ : 機体のヨー角（進行方向）

運動モデル（INS による自己推定）

INS による連続時間モデル（簡略化）は

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \psi, \dot{y} = v \sin \psi, \\ \dot{v} &= a + w_v, \dot{\psi} = \omega + w_\psi \end{aligned}$$

- a : 加速度センサからの推定加速度 ω : ジャイロからの推定角速度
- w_v, w_ψ : センサ雑音・バイアスを含む誤差項

INS 誤差成長モデル

INS の位置誤差 $\delta x, \delta y$ は、ジャイロ・加速度計のバイアス・ノイズにより、概ね「ランダムウォーク＋ドリフト」として時間に比例して増大すると近似できる。

$$\sigma_{\text{INS}}(t) \approx \sqrt{\sigma_0^2 + (k_{\text{drift}} t)^2}$$

- $\sigma_{\text{INS}}(t)$: 時刻 t における位置誤差の標準偏差 σ_0 : 初期アラインメント誤差
- k_{drift} : INS のドリフト係数（[m/s] など）

注（商用グレード INS では、数時間飛行すると数百 m～数 km の誤差が生じ得る）¹⁷

Shahed が 2000 km 飛んだときの着弾誤差解析モデル

GNSS 補正とハイブリッド誘導

Shahed-136 は、INS の誤差成長を GNSS で周期的に補正する構成と考えられている

GNSS 観測モデル

GNSS による位置観測を、以下とする。

$$z_{\text{GNSS}}(t_k) = \begin{bmatrix} x(t_k) \\ y(t_k) \end{bmatrix} + v_k$$

- t_k : GNSS 更新時刻
- v_k : GNSS 観測ノイズ (標準偏差 σ_{GNSS})

カルマンフィルタ統合

INS と GNSS を統合する簡略モデルとして、離散時間カルマンフィルタの更新則を用いると：

- 予測ステップ (INS による状態推定)
- 更新ステップ (GNSS による位置補正)

により、INS のドリフトを GNSS が定期的にリセットする構造になる

終末誘導と CEP モデル

CEP を、INS 誤差と GNSS 誤差の合成として

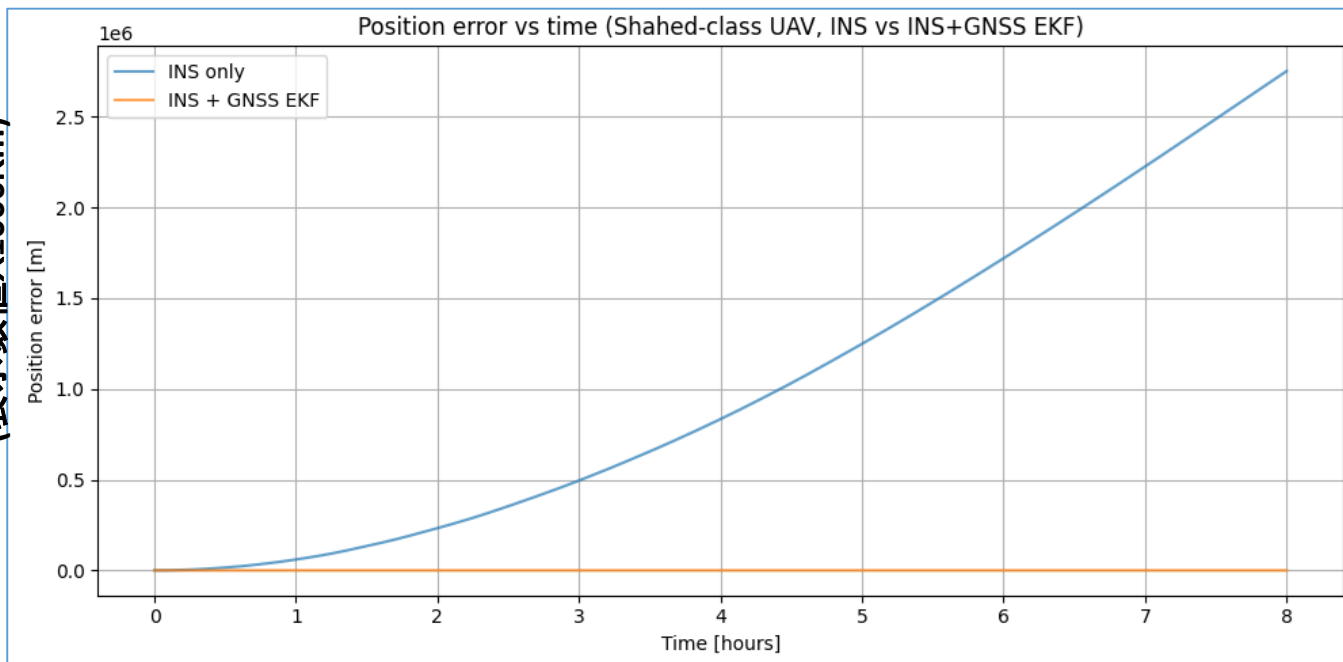
$$\text{CEP} \approx \sqrt{\sigma_{\text{INS}}^2(T) + \sigma_{\text{GNSS}}^2}$$

と近似すると、飛行時間 T が長くなるほど INS 誤差が支配的になるが、GNSS 更新周期を短くすれば $\sigma_{\text{INS}}(T)$ を抑制できる

(公開情報では、Shahed-136 は主に「静的・大型目標 (倉庫・変電所・ビル等)」を狙うため、数十 m ～ 数百 m 程度の CEP (円形誤差半径) で十分とされる)

Shahed が 2000 km 飛んだときの着弾誤差分布解析 結果

着弾位置誤差
(表示数値X1000km)



飛行時間(Hour)

INSとGNSSを適切なカルマンフィルタ処理で長時間の飛行においても位置誤差を効果的に抑制し、高精度な航法が可能になることを明確

- ・総飛行時間(Time [hours]): 8 時間
- ・着弾位置誤差: UAVの真の位置と、INS単独、またはINS+GNSS EKFで推定された位置との間の距離誤差(メートル単位)を示す
- ・青色の線: INS単独での位置誤差を表す
(時間の経過とともにセンサーのバイアスやノイズが蓄積するため、誤差が急速に増加していることがわかります。8時間後には、位置誤差が数百万メートル(数千km)に達して実用に供さない
- ・オレンジ色の線: INSとGNSSのデータをEKFで統合した場合の位置誤差を表す
(GNSSが一定周期(30秒ごと)で位置情報を更新するため、INS単独の場合とは異なり、誤差の蓄積が抑制され、比較的低い値(数メートル~十数メートル程度)に収まっている

群攻撃（スウォーム）モデル：攻撃側（Shahed 群）

単機でここまで整理した前提を、そのまま各機体にコピーする：

- ・ 巡航速度： $V \approx 76 \text{ m/s}$ 航続距離： $R \approx 2100 \text{ km}$ 飛行時間： $T \approx 7.7 \text{ h}$
- ・ 誘導：INS+GNSS による事前プログラム飛行（直線 or 折れ線経路）
- ・ CEP：数十～数百 m クラス（ここでは「命中判定」の確率モデルに吸収）

これを $i = 1, \dots, N$ 機に対してコピーし、

- ・ 発射時刻 ・ 経路長 ・ 経路方向 ・ 生残／撃墜
- だけを機体ごとに変える。

各機のパラメータ

機体 i について：

- ・ 発射時刻： $t_{0,i}$
- ・ 経路長（総飛行距離）： D_i
- ・ 巡航速度： V_i （基本は $76 \text{ m/s} \pm$ ばらつき）
- ・ 飛行時間： $T_i = \frac{D_i}{V_i}$
- ・ 目標到達時刻： $t_{\text{arr},i} = t_{0,i} + T_i$

群としての到達パターン

群攻撃の「密度」を見るために、目標周辺における到達時刻の分布を考える

- ・ 到達時刻集合： $\{t_{\text{arr},i}\}_{i=1}^N$

（これを時間軸上でヒストグラム化すると、「何秒あたり何機が到達するか」＝飽和度が見える）

群攻撃（スウォーム）モデル：攻撃側（シャヘド群）（続き）

発射スケジュールと経路のモデル化

発射時刻のモデル

- ・ 同時発射型：

$$t_{0,i} = t_0$$

- ・ 時間分散型（ポアソン過程近似）：

$$t_{0,i} \sim \text{Poisson-like} / \text{一様分布}$$

経路長のモデル

複数の発射地点・迂回経路を考慮して、経路長 D_i を以下とする

$$D_i = D_0 + \delta D_i$$

- ・ D_0 ：代表的な距離（例：1500 km）
- ・ δD_i ：経路差・回避行動によるばらつき

防空システムのモデル

防空システムの処理能力

防空側が、単位時間あたり最大 μ 機まで迎撃可能とする。

- ・ 時刻 t に到達する攻撃機数： $\lambda(t)$
- ・ もし $\lambda(t) \leq \mu$ なら、理論上は全機迎撃可能
- ・ $\lambda(t) > \mu$ なら、

$$\text{突破機数} \approx \lambda(t) - \mu$$

個々の機体の生残確率

機体 i の生残（目標到達）を確率的に

$$P_{\text{Surv},i} = \exp\left(-\int_0^{T_i} \alpha(t) dt\right)$$

と置くこともできるが、ここでは簡略化して「時間帯ごとの迎撃能力」で近似する。

解析方法

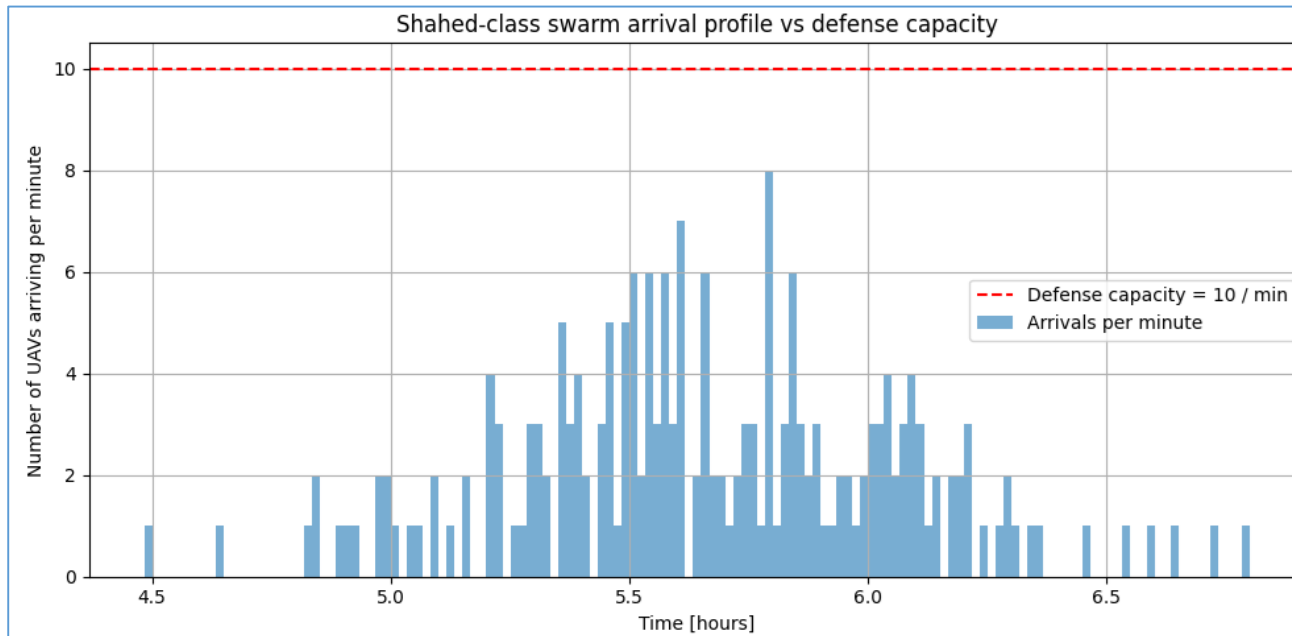
スウォーム・シミュレーション

- ・ N 機の Shahed を発射
- ・ 発射時刻・経路長・速度にばらつきを与える
- ・ 到達時刻のヒストグラムを描き、防空側の処理能力 μ と比較する。

計算条件: 200機のシャド攻撃: 迎撃側 1分当たり10機を迎撃できるとするモデル

- 機数 (N) : 200機
- 平均巡航速度 (V_{mean}) : 76.0 m/s (約273.6 km/h) と、2.0 m/sのばらつき
- 平均経路長 (D_{mean}) : 1500 km と、100 kmのばらつき
- 発射時刻のばらつき ($t0_{\text{spread}}$) : 30分 (1800秒) の範囲で各UAVが発射
- 防空側の処理能力 ($\mu_{\text{per_min}}$) : 1分あたり10機

各1分間隔で目標に到達するUAV数



UAVが目標に到達する時刻

最も多いピークでは、1分間に8機程度が到達しており、防空能力の10機には達していないが、これは現在のランダムシードによるもので、パラメータ調整によってはさらに高い集中度を示す可能性がある。この結果は、スウォーム攻撃の有効性を評価する上で重要な情報となる。

青色の棒グラフ: 200機のUAVの到達時刻の分布を表す

赤色の破線: 防空システムが1分間に迎撃できるUAVの最大数を示す

「飽和攻撃」となるの可能性がある

防空側の迎撃最適化モデルの作成

攻守の考え方

攻撃側： Shahed クラス UAV が N 機、到達時刻分布 $\lambda(t)$ を持って目標に殺到

防空側： 迎撃手段（SAM、SHORAD、CIWS 等）を複数保有し、「突破機数を最小化」

あるいは「重要目標への命中確率を最小化」したい

検討の進め方

単一目標・単一防空サイトの最適化モデルを作り、その後に多目標・多サイトへの拡張の形で整理する

以下の数学的解析モデルは参考資料として、巻末に移す

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）

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

シミュレーションの概要と設定:

・ 攻撃側スウォーム:

- 総機数: 200機。
- 平均巡航速度: 76.0 m/s、平均経路長: 1500 km で、それぞれにばらつきがある
- 発射時刻は30分（1800秒）の幅で分散されている

・ 防空システム:

- Layer1_SAM（長距離地对空ミサイル）: 殺傷確率 (pk) 0.8、総弾数 120発
- Layer2_SHORAD（中距離短距離防空システム）: 殺傷確率 (pk) 0.6、総弾数 150発
- Layer3_CIEWS（近接防御火器システム）: 殺傷確率 (pk) 0.4、総弾数 200

迎撃の順番

- Layer1_SAM (長距離SAM): 最初に迎撃を行う。
- Layer2_SHORAD (中距離SHORAD): 次に迎撃を行う。
- Layer3_CIEWS (近距離CIEWS): 最後に迎撃を行う。
- これは、各層が前の層を突破した残りのUAVに対して「貪欲な」迎撃配分アルゴリズムを適用するためとする。それぞれの迎撃距離は、考慮していない。

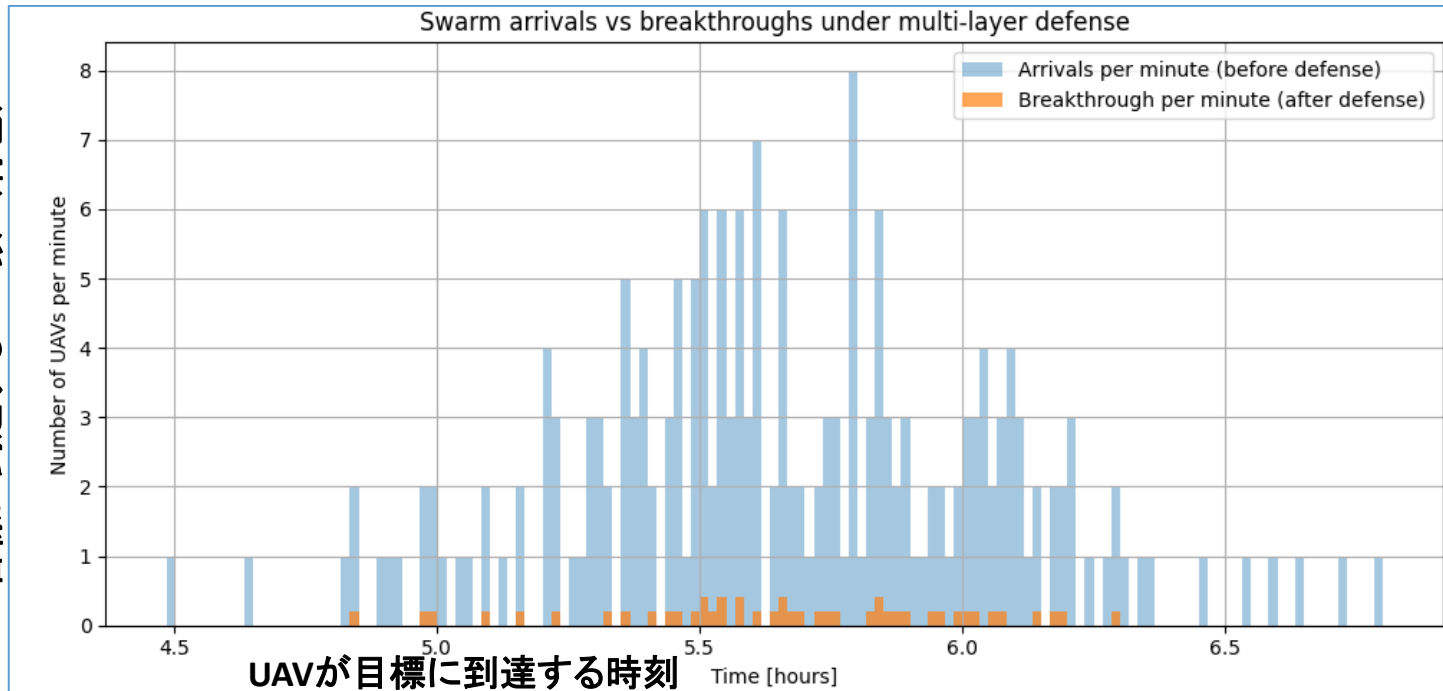
・ 迎撃戦略: 各防空層は、UAVの到達数が最も多い時間帯（ビン）から優先的に弾薬を割り当てる「Greedy（貪欲）アルゴリズム」で迎撃を行う

これは、最も脅威が高いと思われる時間帯にリソースを集中させる戦略に相当する

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

コード: 3層防空の到来時間履歴と撃墜数の統計処理

各1分間隔で迎撃システムがない条件下で
目標に到達するUAV数 (青色)



各1分間隔で迎撃後でも目標に
到達するUAV数 (ダイダイ色)

1. 突破機数と突破率:

- 総攻撃機数 $N = 200$
- 総突破機数 ≈ 9.0 機
- 突破率 $\approx 4.5\%$

注:

・迎撃シミュレーションでは、迎撃成功確率 p_k を使用して $\text{expected_kill} = \text{shots} * p_k$ を計算し、残存機数 $A_{\text{remaining}}$ を減算する
、「1分あたり0.2機が突破」といったように、各ビンでの突破機数が1未満の小数になることがあり、総突破機数 ≈ 9.0 機となる。例えば、20のビンでそれぞれ0.4機が突破したと予想される場合、個々のビンの棒グラフは0.4の高さになりますが、総突破機数は $0.4 * 20 = 8$ となる。これらの小数点以下の突破機数が多くのビンにわたって合計された結果、約9機という総突破機数になっている

- 薄青い色の棒グラフ (Arrivals per minute (before defense)) : 防空システムによる迎撃がなかった場合に、各1分間に目標に到達するUAVの数を示す。
- 濃ダイダイ色の棒グラフ (Breakthrough per minute (after defense)) : 防空システムによる迎撃後も目標に到達してしまったUAVの数を示す。

結果に関する考察

各防空層の弾薬消費:

- Layer1_SAM: 120発中120発を使い切っています。これは、最も高い殺傷確率を持つ層が、多くのUAVを迎撃しようと最大限に稼働したことを示している
- Layer2_SHORAD: 150発中131発を使用しています。SAM層が迎撃しきれなかったUAVに対して、この層も積極的に迎撃を行ったことがわかる。
- Layer3_CIWS: 200発中41発を使用しています。これは、CIWS層に到達するUAVの数が比較的少なかったか、あるいはCIWSの殺傷確率が低いために多くの弾薬を消費しなかったことを示唆している。

結果の解釈:

200機のUAVスウォーム攻撃に対して、多層防空システムが平均的に約9機（全体の4.5%）のUAVしか突破を許さなかったことを示している。

これは、この防空システムがこの規模のスウォーム攻撃に対して、かなり高い迎撃効果を発揮したことを意味する。

適切に設計された多層防空システムと貪欲な迎撃配分戦略は、UAVスウォーム攻撃の飽和効果を大きく軽減できる可能性が示された。

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。

ただし、この結果は設定されたpkやM_totalなどのパラメータに強く依存するため、これらの値を変更することで突破率は大きく変動する可能性があります。

防空システムを突破した9機に関する考察

結果：

突破したUAVは特定の時間帯に集中しているわけではなく、幅広い到達時間ビンに分散している

解釈：

多層防空システムが特定のピークを効果的に迎撃した結果、突破がより均等に分散された可能性を示唆している

スウォーム攻撃の一般的な特性が影響していると考えられる

(設定した初期条件)・平均巡航速度: 76.00 m/s (ばらつき: 2.00 m/s)

・平均経路長: 1500.0 km (ばらつき: 100.0 km)

・発射時刻のばらつき: 30 分

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： 同じ Shahed スウォームに対して、「ミサイル防空システム」と「迎撃ドローン防空システム」で、どちらがどれだけ安く・どれだけ落とせるか

前提：

- ・ 攻撃側：前に作った Shahed スウォームモデル（到達時刻分布は同じ）
- ・ 防空側：
 - 防空ミサイル（SAM）：高価・高 kill 確率・弾数制約
 - 迎撃ドローン（ID：Interceptor Drone）：安価・中 kill 確率・大量運用可能

「期待撃墜数・総コスト・1機撃墜あたりコスト」を比較するモデルを作成し検討

想定コスト及びKill 確率

典型値のイメージ（大胆に予想）

- ・ Shahed 1機：2～5万ドル級
- ・ Patriot 1発：300～400万ドル級
- ・ 中距離 SAM：数十万～100万ドル級
- ・ 迎撃ドローン：1,000～5,000ドル級

kill 確率のイメージ：

- ・ SAM： $p_{\text{SAM}} \approx 0.8$
- ・ 迎撃ドローン： $p_{\text{ID}} \approx 0.4$ （1機あたり）

「ミサイル防空システム」か「迎撃防空ドローンシステム」 或は両方使用するハイブリッドシステムか

予想される結論

- ・ ミサイル防空システムのみ (SAM only)
 - 撃墜数が多いが、総コストが桁違いに高い
 - 1機撃墜あたりコストも非常に高い
- ・ 迎撃防空ドローンシステムのみ (Interceptor Drone only)
 - 撃墜数は SAM より少ないが、コストは圧倒的に安い
 - 1機撃墜あたりコストは SAM の 1 桁～2 桁安い
- ・ 両方を適切な割合で使用するハイブリットシステム (Hybrid)
 - 「ピークだけ SAM で削り、残りを迎撃ドローンで処理」することで
 - 突破機数を抑えつつ、コストも SAM only より大幅に低い
 - 「高価な SAM は本当に必要なところだけに使う」戦略が定量的に見える

防空システム：コスト解析モデル

単純化したコスト・効果モデル

時間ビン k ごとに考えます（例：1 分ビン）

- そのビンに到達する シャヘド 機数： A_k
- SAM が撃つ弾数： n_k^{SAM}
- 迎撃ドローンが出撃する機数： n_k^{ID}

それぞれの kill 確率を

- SAM： p_{SAM}
- 迎撃ドローン： p_{ID}

とすると、そのビンでの期待撃墜数は $K_k = \min(A_k, n_k^{\text{SAM}} p_{\text{SAM}} + n_k^{\text{ID}} p_{\text{ID}})$

突破機数： $B_k = A_k - K_k$

総突破機数： $B_{\text{tot}} = \sum_k B_k$

コストモデル

- SAM 1 発あたりコスト： C_{SAM}
 - 迎撃ドローン 1 機あたりコスト： C_{ID}
- 総コスト： $C_{\text{tot}} = \sum_k (n_k^{\text{SAM}} C_{\text{SAM}} + n_k^{\text{ID}} C_{\text{ID}})$

機撃墜あたりコスト（期待値ベース）：

$$C_{\text{per kill}} = \frac{C_{\text{tot}}}{\sum_k K_k}$$

攻撃側スウォーム：従前と同一

総機数：200機 平均巡航速度：76.0 m/s、
平均経路長：1500 km で、それぞれにばらつきがある 発射時刻は30分（1800秒）の幅で分散されている

迎撃側：

SAM総数：80機 ドローン総数：400機
コスト；
SAM 1 機当たり 100万ドル、 $P_{\text{kill}}=0.8$
ドローン1機当たり 5千ドル、 $P_{\text{kill}}=0.4$

防空システム：コスト解析結果

SAMのみ (SAM only)

- ・ 総撃墜数: 64.0機
- ・ 総突破機数: 136.0機
- ・ 突破率: 68.0 %
- ・ 総コスト: \$80,000,000.0 * **1機撃墜あたりコスト:** \$80,000,000.0 **1機撃墜あたりコスト:** \$1,250,000.0

分析: SAM (地対空ミサイル) のみで迎撃した場合、弾薬数 (80発) が攻撃機数に対して少ないため、突破率が非常に高くなっている。また、SAMの単価が高いため、総コストも1機撃墜あたりのコストも極めて高額になる

迎撃ドローンのみ (Interceptor Drone only)

- ・ 総撃墜数: 160.0機
- ・ 総突破機数: 40.0機
- ・ 突破率: 20.0 %
- ・ 総コスト: \$2,000,000.0 * **1機撃墜あたりコスト:** \$2,000,000.0 * **1機撃墜あたりコスト:** \$12,500.0

分析: 迎撃ドローンのみで迎撃した場合、突破率は20%とSAMのみより大幅に改善される。迎撃ドローンの単価がSAMに比べて格段に安いため、総コストおよび1機撃墜あたりコストも非常に低く抑えられている。多数の低コストUAVには、多数の低コスト迎撃システムがコスト効率の良い選択肢となることを示唆している

防空システム：コスト解析結果

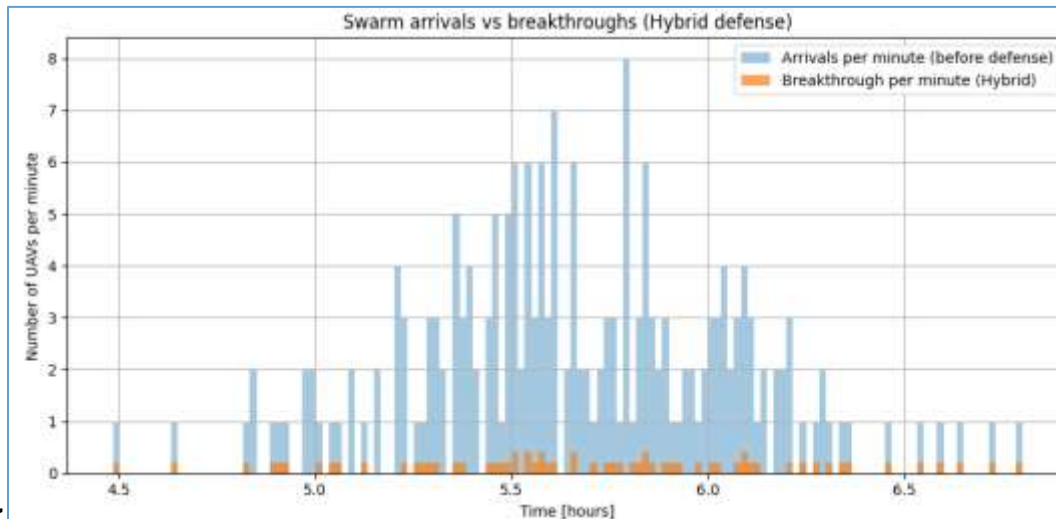
ハイブリッド (SAM + ID) (Hybrid (SAM + ID))

- ・ 総撃墜数: 187.2機
- ・ 総突破機数: 12.8機
- ・ 突破率: 6.4 %
- ・ 総コスト: \$81,540,000.0 * **1機撃墜あたりコスト:** \$81,540,000.0 * **1機撃墜あたりコスト:** \$435,576.9

分析: SAMと迎撃ドローンを組み合わせたハイブリッド戦略が、最も低い突破率(6.4%)を達成し、攻撃側UAVのほとんどを撃墜できることが示された。

これは、SAMの高い単体撃墜能力と、迎撃ドローンの飽和攻撃への対応能力を組み合わせた結果である。しかし、SAMの使用量(80発中74発)が多いため、総コストは最も高額になる。1機撃墜あたりコストもSAMのみよりは低いものの、迎撃ドローンのみの場合よりはかなり高額となる。

各1分間隔で迎撃システムない
条件で目標に到達するUAV数
(薄い青色)



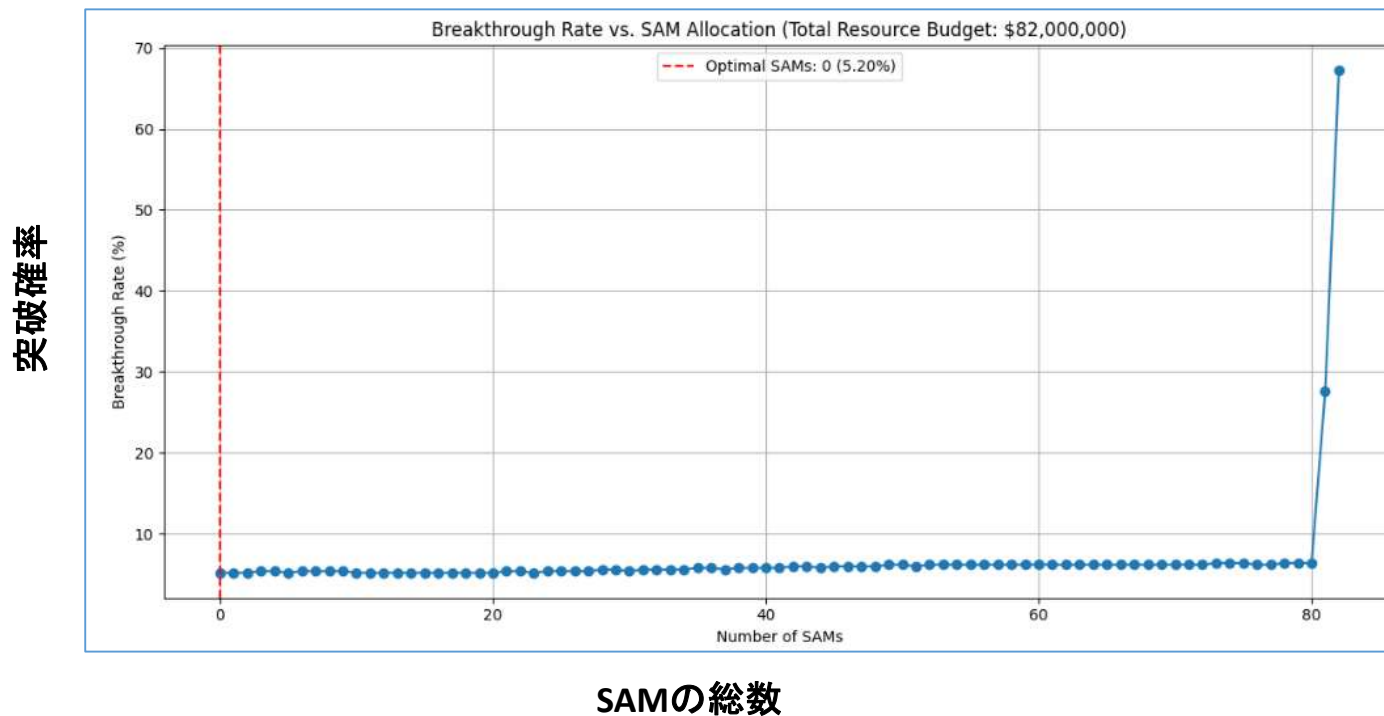
各1分間隔で迎撃後でも
目標に到達するUAV数
(ダイダイ色)

UAVが目標に到達する時刻

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の結果

結果： 突破を最小限に抑えるという防衛目標であれば、ハイブリッド戦略が最も効果的であることが明らか。SAMが最初の層として大きな脅威を排除し、残りを迎撃ドローンが処理することで、相乗効果が生まれている

構成比率の検討： 上記の総コストが \$81,540,000.0 であったことから、総予算 \$82,000,000.0 の中で、攻撃に対する突破率を最小にするSAMとドローンの構成比率を検討する



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）

項目	最適値
SAM 数	0 発
迎撃ドローン数	16,400 機
最小突破率	5.20 %
撃墜数(期待値)	189.6 機
総迎撃コスト(実際に消費した分)	2,370,000ドル(迎撃ドローン464機分)
総予算(購入可能な最大の予算金額)	82,000,000ドル

結果： 総予算82,000,000ドルの中で、攻撃に対する突破率を最小になる最適構成として
 SAMを0発、迎撃ドローンを最大16,400機割り当てることができる

最適化の結果によると、迎撃に使用されたドローンの実際の数は次のように計算できる

総迎撃コスト: \$2,370,000 と迎撃ドローン1機あたりの: \$5,000
 実際に迎撃に使用されたドローンの数は 474機 ($\$2,370,000 / \$5,000 = 474$)である。

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の「密度」が本質
（目標攻撃時の到達時間に対する攻撃密度）

Shahed スウォームは：・同時刻に多数が到達する
・ピーク密度」が防空の弱点を突く

迎撃側：大量の迎撃ドローンは「スウォーム密度」に対して圧倒的に強い

SAM は：発射レートに同時交戦数に制約があるため、攻撃のピーク密度
に対して「数で押される」

迎撃ドローンは：多数同時発進が可能で攻撃ピーク密度に合わせて柔軟に
迎撃出撃の割り当てが可能

参考： 多層防空の防空側の数学的モデルについて

単一目標・単一防空サイトの迎撃モデル

攻撃側到達プロファイル

時刻 t に目標周辺に到達する Shahed の期待機数を $\lambda(t)$ とする
(前のスウォームモデルのヒストグラムに相当する)

時間ビン幅 Δt ごとに $A_k = \lambda(t_k)\Delta t$ を「時刻区間 k に到達する機数」とみなす

防空側の迎撃能力

防空サイトの「1 ビンあたり最大迎撃可能数」を μ_k とする。

突破機数と目的関数

ビン k における突破機数の期待値を、以下とする

$$B_k = \max\{A_k - \mu_k, 0\}$$

総突破機数は以下で表せる

$$B_{\text{tot}} = \sum_k B_k$$

目的は、1 ビン当たりの最大迎撃可能数で総突破数を最小にする

$$\min_{\{\mu_k\}} B_{\text{tot}}$$

防空リソース制約と最適配分

総迎撃リソース制約

例えば「総発射可能弾数」が M_{tot} 発であるとする、以下が制約になる

$$\sum_k \mu_k \leq M_{\text{tot}}$$

(μ_k は「ビン k で実際に撃てる弾数」と解釈)

最適化の直感的解

$B_k = \max\{A_k - \mu_k, 0\}$ を最小化するには、

到来機数 A_k が大きい時間帯 (= 飽和しやすい時間帯) に優先的に 迎撃機数 μ_k を割り当てる。つまり、 μ_k を「 A_k の大きい順」に配分するのが合理的

形式的には、 μ_k を連続変数とみなすと、

- $A_k \leq \mu_k$ なら 突破機数 $B_k = 0$
- $A_k > \mu_k$ なら 突破機数 $B_k = A_k - \mu_k$

なので、限られた $\sum_k \mu_k$ を使って 「到来機数 A_k が大きいビンから順に 到来機数 A_k を削っていく」 のが最適

多層防空・多種迎撃手段の拡張

多層防空

層 $j = 1, \dots, J$ (長距離 SAM、中距離、近距離 CIWS など) を考える

- ・ 各層のビン k における迎撃能力: $\mu_{j,k}$
- ・ 各層の迎撃成功確率: p_j (1 発あたり kill 確率)

ビン k に到達した攻撃・到来機数 A_k に対し、層 $1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow J$ と順に迎撃するときの突破期待値は

$$B_k = A_k \prod_{j=1}^J (1 - p_j u_{j,k})$$

- ・ $u_{j,k}$: ビン k で層 j が 1 機あたりに割り当てる「射撃回数」(平均的な意味)

現実には、 $\mu_{j,k}$ (総射撃数) と $u_{j,k}$ (1 機あたり射撃数) の関係は

$$\mu_{j,k} = u_{j,k} \cdot A_k$$

のように結びつく

多層防空・多種迎撃手段の最適化のための数学的扱い

シミュレーションで検討すべき関数（目的と制約）

最適化のための目的関数とそれを制約する制約関数は以下である

- 目的関数：
$$\min_{\{\mu_{j,k}\}} \sum_k B_k$$
- 制約関数：
$$\sum_k \mu_{j,k} \leq M_j \text{ (各層の総弾数)}$$

多目標への配分（重要度付き）

目標 $m = 1, \dots, M$ があり、それぞれ重要度 w_m を持つとする

- 目標 m に対する突破機数： $B_{m,\text{tot}}$
- 目的関数：

$$\min \sum_{m=1}^M w_m B_{m,\text{tot}}$$

防空サイト s ごとに、どの目標方向にどれだけ迎撃リソースを向けるか ($\mu_{s,j,k,m}$) を決める問題になる

防空側最適化の考え方

入力：

- 攻撃側スウォームから得た「到達時刻分布 $\lambda(t)$ 」
- 防空システムごとの「発射レート・弾数・kill 確率」
- 目標ごとの重要度

決めるべきもの：

- 各時間帯・各層・各目標方向に対して、迎撃リソース $\mu_{j,k}$ （あるいは $\mu_{s,j,k,m}$ ）をどう配分するか

最適化の目的：

- 総突破機数、あるいは重要度重み付き突破機数を最小化

計算の構造：

- 本質的には「時間帯ごとの攻撃機の突破機数の到達密度に対するリソース配分問題」として扱う
- 単純な場合は「到達密度の高い時間帯から優先的に迎撃能力を集中させる」解が最適防空システムのリソース配分に近い

求めるべき計算の結果：

「防空側最適配分シミュレーション」として、
N 機スウォーム 複数防空層及び弾数制約の下で「何機が突破するか」を
数値で求める

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相当のスワーム戦

ASPI-F-3勉強会A 資料-3

齊藤 英明

ウクライナ軍：「迎撃専用ドローン（interceptor drones）」という新しい防空システム

ロシアのシャヘド／ゲランやランセットに対抗するため、実戦の中で立ち上げた：

特徴は一貫：

極端に低コスト（1,000～5,000ドル級）

高機動・高速度（200～450 km/h クラス）

ドローン対ドローンの近接迎撃（体当たり＋小型弾頭）

大量生産・大量運用を前提とした設計

			
Майкоронок 48 886 грн	Безпілотний літальний апарат "FALCON-JET" для данного... Ціну уточнітьте	Безпілотний літальний апарат "FALCON-JET" для данного... Ціну уточнітьте	Безпілотний літальний апарат "FALCON-JET" для данного... Ціну уточнітьте
			
Безпілотний літальний апарат "FALCON-JET" для данного... Ціну уточнітьте	БПЛА-перехоплювач Вектор 3210 АІ/Т (аналоговий канал) 94 500 грн	БПЛА MAC DEAD FLY-01 3 168 000 грн	БПЛА (перехоплювач) MAC DEAD FLY-01 114 200 грн
			
БПЛА "BATON PEREKOPLYUVACH KRYLO" 1.225 000 грн	БПЛА "BATON PEREKOPLYUVACH KOPTEP" 1.810 000 грн	SKY HAWK 100 44 100 грн	Безпілотний літальний апарат "Vidun/ШВідун" 2 160 000 грн

A small sample of the interceptor drones produced by Ukrainian industry.

Inside Ukraine's Interceptor Drone Innovations Swatting Down Thousands Of Russian Shaheds (2026/5/15)

各種迎撃ドローン

https://www.twz.com/news-features/inside-ukraines-interceptor-drone-innovations-swatting-down-thousands-of-shahed-drones?utm_source=copilot.com

ウクライナ軍の迎撃ドローン機能・性能の共通設計思想

- **低コスト・大量生産性**
 - 多くが 3D プリント+市販コンポーネントで構成
 - 単価 1,000~5,000ドル級 → Shahed や SAM より圧倒的に安い
- **高速度・高機動**
 - Shahed の巡航速度（約 185 km/h）を上回る 200~450 km/h クラス
 - 近距離での急旋回・急上昇・体当たりを前提
- **誘導方式**
 - 初期：FPV 手動操縦（ゴーグル+オペレータ）
 - 現在：AI 支援（自動追尾・コース生成）を組み込んだ半自律型が登場しつつある
- **運用コンセプト**
 - 「ミサイルの代わりにドローンで迎撃」
 - Patriot や NASAMS の高価なミサイルを節約しつつ、Shahed のような安価な O 攻撃型ドローンを大量に落とす
 - Brave1 CEO の言葉を借りれば、「世界で初めて本格的に実用化されたインターセプタードローン・クラス」

Pilots Can Shoot Down russian Drones in Ukraine from New York or Anywhere Else in the World - Brave1 CEO Told About Interceptor Drones

Defense Express (2026/5/18)

[https://en.defence-](https://en.defence-ua.com/analysis/pilots_can_shoot_down_russian_drones_in_ukraine_from_new_york_or_anywhere_else_in_the_world_brave1_ceo_told_about_interceptor_drones-18524.html?utm_source=copilot.com)

[ua.com/analysis/pilots_can_shoot_down_russian_drones_in_ukraine_from_new_york_or_anywhere_else_in_t
he_world_brave1_ceo_told_about_interceptor_drones-18524.html?utm_source=copilot.com](https://en.defence-ua.com/analysis/pilots_can_shoot_down_russian_drones_in_ukraine_from_new_york_or_anywhere_else_in_the_world_brave1_ceo_told_about_interceptor_drones-18524.html?utm_source=copilot.com)

インターセプタードローンの主なファミリー

1 : 即席／改造型 FPV 迎撃ドローン

・ 機体形状:

- 市販／軍用 FPV レーシングドローンをベースにしたクアッドローター／X 形マルチコプタ
- 小型フレームに高出力モーター＋リポバッテリー

・ 用途:

- Shahed・偵察 UAV・ランセットなどへの体当たり迎撃
- 小型破片弾頭を付ける場合もあれば、完全な「キネティック・ラム」もある

・ 性能イメージ:

- 速度：100～200 km/h クラス
- 航続：数 km～十数 km（前線～目標空域までの短距離）
- 操作：FPV ゴーグル＋手動操縦（専任の「Shahed Hunter」パイロットが育成されている）



https://www.twz.com/news-features/inside-ukraines-interceptor-drone-innovations-swatting-down-thousands-of-shahed-drones?utm_source=copilot.com

インターセプタードローンの主なファミリー(続き)

2. 専用設計の「Shahed Hunter」固定翼／ハイブリッド機

- 機体形状:
 - 小型固定翼機（翼幅 1～2 m 級）
 - あるいは FPV と固定翼を組み合わせた X 翼／ハイブリッド形状
 - 一部は弾丸形・細長い胴体＋小型翼という「高速ミサイル的」外形
- 代表例・コンセプト:
 - Sting 系、Wild Hornets 系などの「Shahed Hunter」専用機
 - 速度 200 km/h クラス、5 km 高度まで運用可能な設計が報告されている
- 性能イメージ:
 - 巡航速度：200～300 km/h
 - 迎撃高度：～5,000 m
 - 誘導：地上オペレータによる手動＋簡易自動操縦、将来的には AI 支援も導入
 - 役割：シャヘドの巡航高度・速度帯に合わせた「空対空ミサイル的」迎撃



日本の Terra Drone が2026年に公開した Terra A2 は、ウクライナ公式メディアでも“Shahedを追跡・破壊する固定翼迎撃ドローン”として紹介されている

Terra A2 のスペック

- 固定翼インターセプター
- 最高速度: 312 km/h (Shahed より速い)
- 航続 75 km
- 滞空 40 分
- 高度 5,000 m
- 750 g の弾頭

インターセプタードローンの主なファミリー(続き)

3. 高速・専用量産機 (例: P1-SUN など)

UNITED24 Media などが紹介している「インターセプタードローン」の中で、特に象徴的なのが SkyFall 社の P1-SUN

- 機体形状:
 - 弾丸形・細長い胴体＋小型翼
 - 垂直離陸 (VTOL) 可能な設計
 - 3D プリントを多用した低コスト構造
- 性能 (公開情報ベースのレンジ):
 - 速度: 300 km/h ~ 最大 450 km/h
 - 目的: Shahed-136 (巡航約 185 km/h) を確実に追尾・迎撃できる速度マージンを確保
 - コスト: 1,000~3,000ドル級 (Patriot 1 発 400万ドルとの対比が強調されている)
- 機能:
 - 垂直発進→高速上昇→目標空域での迎撃
 - 目標は主に Shahed/Geran 系 OWA ドローン
 - 将来的には AI 支援誘導 (自動追尾・衝突コース生成) も組み込まれつつあるとされる

What Is Ukraine's Interceptor, One of the World's Most In-Demand Drones? (2026/35/22更新)

https://united24media.com/war-in-ukraine/what-is-ukraines-interceptor-one-of-the-worlds-most-in-demand-drones-17055?utm_source=copilot.com



約800gの弾頭搭載
直撃又は近接信管



新型ジェット推進式シャヘド-238
:最高速度550~600km/hに達する

長期的には阻止するのがはるかに困難になる可能性がある。

P1-SUNは高度5キロメートルまで到達可能。また、パイロットによる操縦が可能で、オプションとしてAI支援による目標捕捉機能も備えている。

インターセプタードローンの主なファミリー(続き)

4. ジェット／ターボジェット推進インターセプタ (Interceptor 2.0 など)

- ・ 機体形状:
 - 小型固定翼＋ターボジェットエンジン
 - カタパルト発進
- ・ 性能 (公開情報ベース):
 - 機体全長 : 1650 mm 翼幅 : 1500 mm 離陸重量 : 10.4 kg ペイロード : 1.6 kg
 - 巡航速度 : 約 220 km/h 最大速度 : 320 km/h 迎撃高度 : 多様な高度・温度条件で運用可能
- ・ 用途:
 - 。 Shahed だけでなく、偵察 UAV や他の空中目標も含む「汎用空対空迎撃プラットフォーム」



Interceptor 2.0

Interceptor 2.0 が「Shahed迎撃」に最適化されている理由

- ① Shahed の速度 (180 km/h 前後) を上回る
→ 320 km/h なら正面衝突迎撃が可能
- ② 30 km の迎撃距離
→ Shahed の侵攻ルートに対し、都市上空に到達する前に迎撃
- ③ 自動ロックによる EW 耐性
→ Shahed のような GPS 依存・低機動 UAV に対し非常に有効
- ④ 迎撃確率 (Kill 確率); 0.7~0.8
- ⑤ コスト: 不明 但しミサイル (SM-2/3/6、NASAMS、IRIS-T 等) より桁違いに安価と推定

他のジェット迎撃機との比較

システム	推進	最大速度	迎撃距離	特徴
Interceptor 2.0 (ウクライナ)	ターボジェット	320 km/h	30 km	自動ロック・再利用可能
Alta Ares (仏)	ターボジェット	不明 (高速)	不明	Shahed迎撃用、実証済み Ref.1
ロシア Jet Kamikaze (展示)	ターボジェット	不明	不明	攻撃用途中心 Ref.2
Anduril Roadrunner (米)	ジェット	高速	長距離	再利用可能迎撃機 Ref.3

1: https://united24media.com/latest-news/shahed-killers-ukraine-and-france-launch-next-gen-jet-powered-interceptor-drones-13528?utm_source=copilot.com

2: https://www.analisidifesa.it/2023/04/la-russia-sviluppa-un-drone-kamikaze-a-turbogetto-e-attrezza-le-basi-per-gli-uav/?utm_source=copilot.com

3: https://www.defenseone.com/defense-systems/2023/12/anduril-unveils-jet-powered-interceptor-designed-down-enemy-drones-missiles/392403/?utm_source=copilot.com

Shahed136攻撃に対するP1-SUN迎撃の特性

Shahed-136 (Geran-2) の探知距離

探知手段

探知距離軍用レーダー max.50km程度

音響センサー 1～5km (max.20km)

肉眼 0.5～1km

赤外線カメラ 0.5～2km

光学カメラ 0.5～2km

Shahed-136は通常、高度100～300m速度180～200km/h程度で飛行する

レーダーのLine of sightから実用上20-30km

RCSはおおよそ0.01～0.1m²程度と推定

Object Detection Models in Counter-Unmanned Aircraft Systems Based on Devices with Limited Computing Capabilities

Conference: 13th International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems and Technologies", ICST 2025At: OdesaVolume: 4048

https://www.researchgate.net/publication/396930352_Object_Detection_Models_in_Counter-Unmanned_Aircraft_Systems_Based_on_Devices_with_Limited_Computing_Capabilities?utm_source=chatgpt.com

P1-SUN迎撃との関係

Shahedが30kmで探知されたと仮定Shahed速度: 約190km/h

P1-SUNの対処可能時間: 約9～10分
(探知識別-P1-SUN発進-誘導-迎撃)

「Shahedは「見えにくい、うるさい」レーダーよりも「音響網で早期警戒し、迎撃ドローンに向かわせる」

静穏な環境なら20km以上で音が聞こえる場合がある

"COMBINED ARMS UNITS TO COMBAT IRANIAN-MADE STRIKE UAVS "SHAHED-136" ("GERAN-2") AND THE RUSSIAN FEDERATION "LANCET-2" according to the experience of the Russian-Ukrainian war of 2022-2023)

https://mil.ee/wp-content/uploads/2024/10/2023_Ukrainian-handbook-C-UAS-ON-IRANIAN-MADE-SHAHED-136-GERAN-2-AND-LANCET-2-ASSOCIATION-AIRCRAFT.pdf?utm_source=chatgpt.com

Shahed136 vs P1-SUN 旋回性能比較

モデル全体の考え方

- 攻撃側 (A) : Shahed-136
速度 : $V_A \approx 51 \text{ m/s}$ (ほぼ一定)
旋回性能 : 極めて低い → 直線飛行 + 微小なランダム偏差として扱う
- 迎撃側 (B) : P1-SUN
フェーズ1 : 高速接近フェーズ
速度 : $V_{B1} \approx 80 \sim 90 \text{ m/s}$
旋回 : $n_{B1} \approx 3 \sim 4 G$
フェーズ2 : 減速・高機動フェーズ
速度 : $V_{B2} \approx 40 \sim 70 \text{ m/s}$
旋回 : $n_{B2} \approx 4 \sim 6 G$ (瞬間的でもよい)

Shahed-136 の旋回性能 (推定)

- 旋回半径は 0.6 ~ 1.2 km 程度
- 高G旋回は不可能

旋回半径モデル

$$\text{水平定常旋回の基本式 : } R = \frac{v^2}{g\sqrt{n^2-1}}$$

Shahed は構造的に $n \approx 1.1 \sim 1.2 G$ 程度が限界 (高G不可)

- $n = 1.15$ (限界的) で計算 : $R = \frac{51.4^2}{9.81\sqrt{1.15^2-1}} \approx 890 \text{ m}$
- $n = 1.1$ (より現実的) : $R \approx 1200 \text{ m}$

P1-SUNの旋回性能 (推定)

- 高速フェーズ, $V \approx 89 \text{ m/s}$, $n = 3 \sim 4 G$:
旋回半径 $R \approx 200 \sim 300 \text{ m}$
- 減速・高Gフェーズ, $V \approx 40 \sim 70 \text{ m/s}$:
旋回半径 $R \approx 100 \sim 200 \text{ m}$

旋回半径モデル : 水平定常旋回の基本式 : $R = \frac{v^2}{g\sqrt{n^2-1}}$

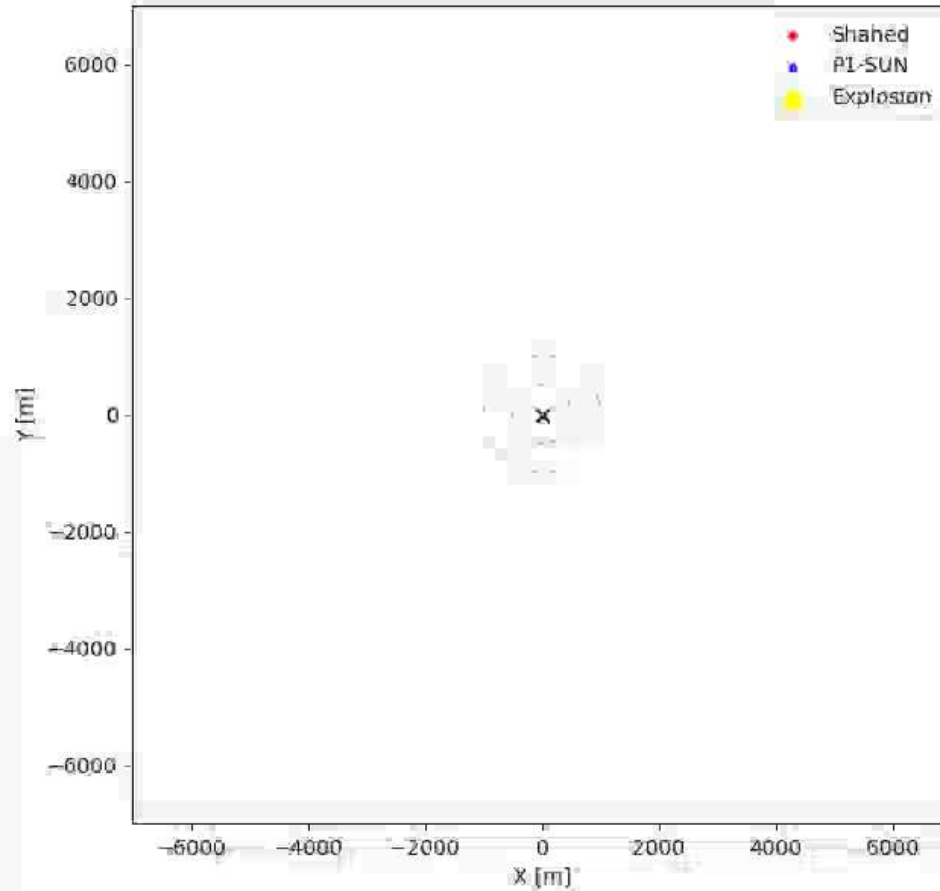
$n = 3 G$ $R = 285 \text{ m}$ 旋回角速度 $\omega = 17.9 \text{ 度/s}$

$n = 5 G$ $R = 185 \text{ m}$ 旋回角速度 $\omega = 31 \text{ 度/s}$

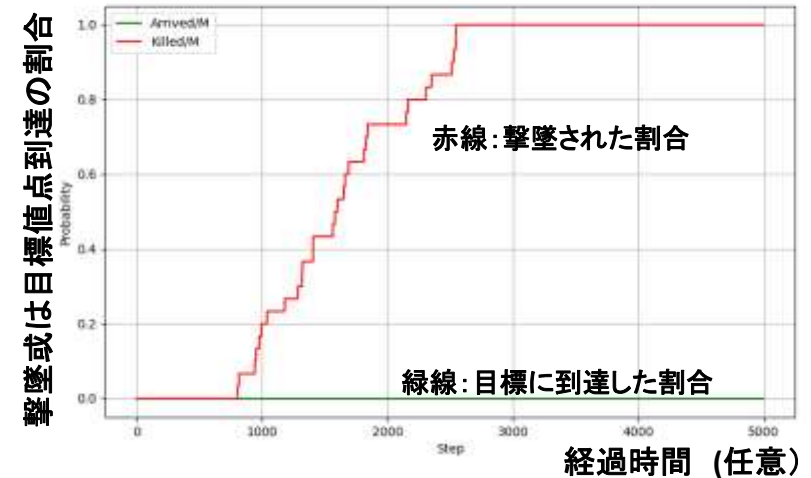
シャヘド136・スワーム攻撃対P1相当迎撃ドローンの攻守の結果例 (迎撃シナリオ(2段階追尾・撃破)による交戦様相)

Kill確率0.8の迎撃機30機と攻撃機の
交戦展開 (迎撃成功例)

Shahed vs P1-SUN (Optimal Allocation)



総攻撃機数に対する目標地点到達機数
と撃墜機数割合の時間履歴



防衛領域: 3ゾーン (Z1: 1km、Z2: 200m、Z3: 20m)

攻撃目標: 最終目標地点Z3 以内への到達

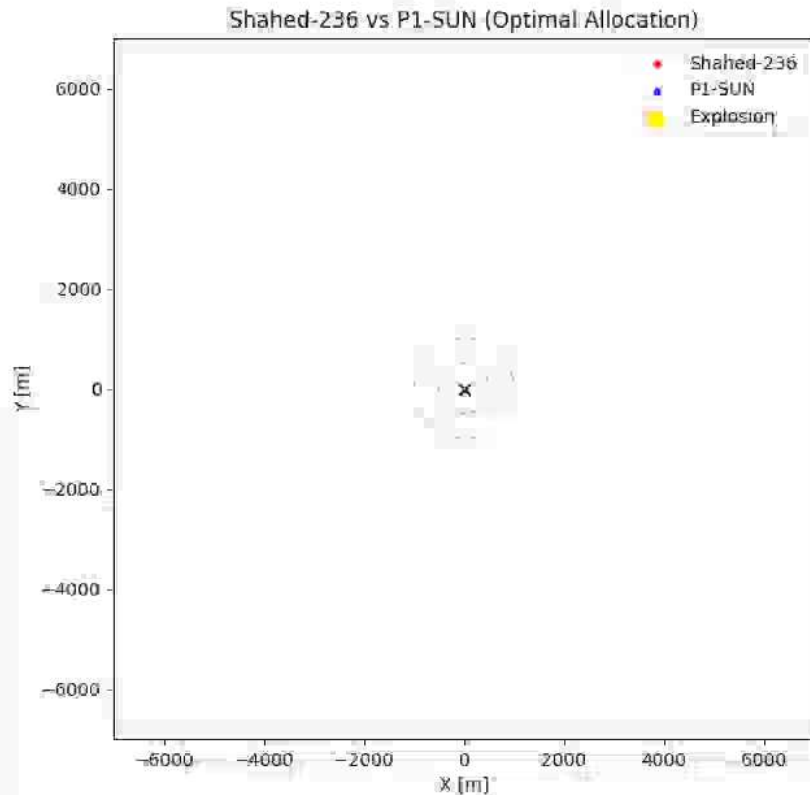
- ・攻撃機: シャヘド136模擬 (ほとんど直線飛行)
- ・機数数: 30機・距離6kmから開始 速度51m/s
- ・発射時間遅れ: ランダム
(距離1500km飛行後の各機体間で遅れが生ずると想定)

- ・迎撃機: P1-SUN模擬 (Max5G旋回可能)
- ・機数: 30機・距離5kmで0.5度の方探誤差
速度 遠距離89m/s 迎撃近距離70m/s
- ・終末誘導: 比例航法・距離1km接近70m/sで4G旋回
- ・kill確率(迎撃確率/1機)=0.8 撃墜可能範囲: 5m
- ・撃墜後、攻撃機と迎撃機はともに消滅

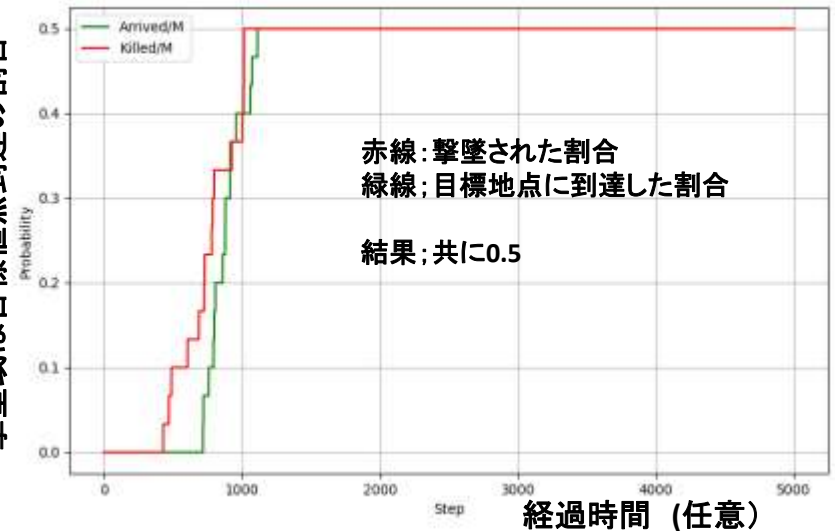
能力向上型Shahed238による攻撃 対 P1相当機 迎撃の例

攻撃機30機と同数のKill確率0.8の
迎撃機30機の交戦展開
(完全撃破はできない)

総攻撃機数に対する目標地点到達機数
と撃墜機数割合の時間履歴



撃墜或は目標地点到達の割合



計算条件:

Shahed 236の飛行速度: 時速600km

他の初期値、計算方法: 変更なし

結果: ・迎撃率と目標地点到達率=0.5で、
迎撃に失敗

・P1-SUNの能力向上型が必要

P1-SUNの進展

地上発射と航空機（無人機を含む）からの発射

An-28輸送機から空中発射する方法も実戦投入

無人機から空中発射する方法も実戦投入



**Ukraine launches P1-Sun and Sting interceptor
drones from aircraft to down Shahed attack UAVs**

Iryna Levytska —24 April,10:40

Aprilhttps://www.pravda.com.ua/eng/news/2026/04/24/8031613/?utm_source=chatgpt.com

空中発射の利点は、

- 高度を既に持っている
- Shahedに追いつきやすい
- 航続距離を節約できる

実質的に「安価な空対空ミサイル」として使う



ロシア攻撃ドローンの進展

ジェット推進型攻撃ドローンの配備

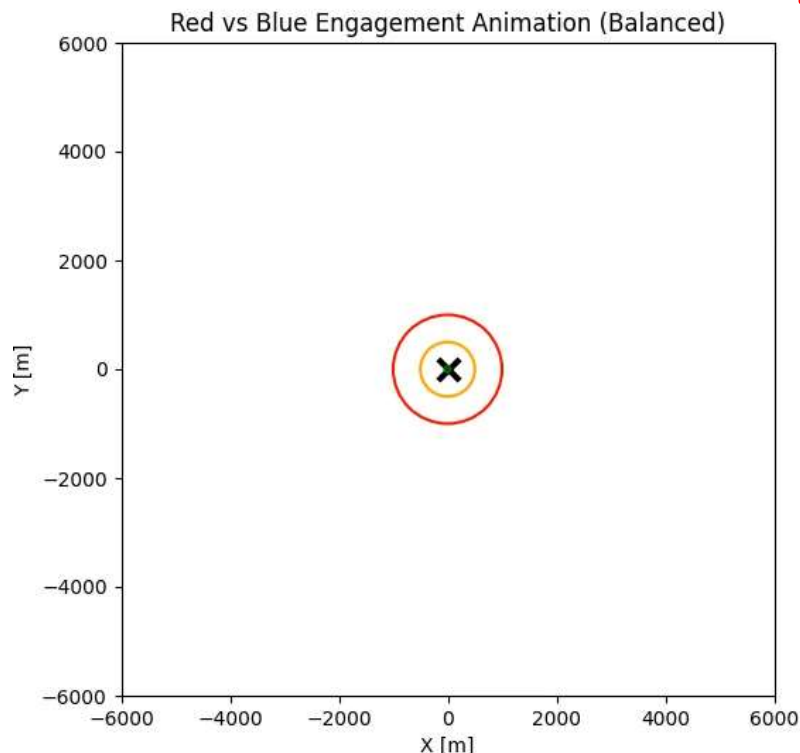
- Geran-3
- Shahed-238など

速度: 500km/h級 > P1-SUN

(Max.約310km/h)

攻守の進展は続く

攻撃機(赤)・迎撃機(青):機数30 機 交戦の時間履歴



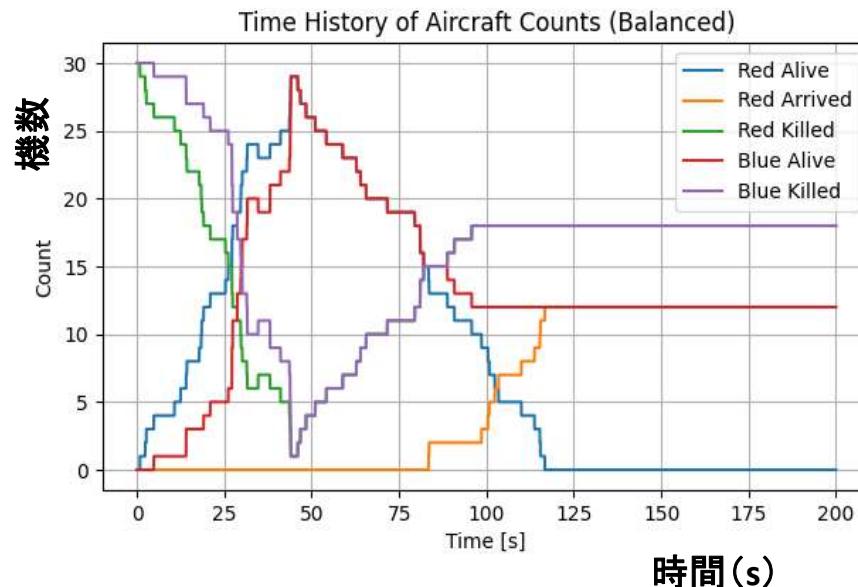
初期条件の抜粋

攻撃機:30機 6km全周からランダム出現 遠距離での速度80m/s (旋回4G) 近距離での速度70m/s(旋回6G) 目標探知距離:1500m 回避飛行 速度切替距離:目標から1km 目標到達判定距離 20m

迎撃機:30機 50m半径以内から発進 目標機方位探知誤差 ± 1 度
遠距離速度 117m/s (旋回4G) 近距離速度91m/s(旋回5G) 目標機追尾方式:比例航法(PN) 撃墜距離6m 目標機探知距離3km
Kill 確率0.8

P1-SUN相当機を攻撃機として利用 P1-SUNを迎撃機とするスワーム戦闘

交戦進捗に伴う攻撃機・迎撃機の機数変化



攻撃機 残存
 目標点到達
 撃墜
 迎撃機 残存
 撃墜に伴い消滅

結果:迎撃確率;0.6
撃墜数;18機

まとめ

- ・ ウクライナの迎撃用ドローンの現状概要
- ・ スwarm攻撃と迎撃シミュレーションにより解析した
数学的簡易モデルを作成し、結果の一例を提示
 攻撃ドローンとしてShahed136相当とShahed238を想定
 迎撃ドローンとしてP1-SUN相当を想定
 各種パラメータ解析可能；
 - ・ 迎撃kill確率・攻撃迎撃機数・初期位置・攻撃パターン
 - ・ 迎撃機発射遅れ時間　・ 探知距離等
結果：Shahed136には、P1-SUNは対処可能
 能力向上型Shahed238には、対処が難しい
- ・ 実戦では、Shahed136 探知に「下記のセンサー・フュージョン」を利用
 単独のレーダーではなく、レーダー・音響センサー・
 市民通報・光学監視・AIによる統合追跡を実施
- ・ P1-SUN相当のドローンによるスワーム（攻撃と迎撃）戦闘を想定し解析した
 シミュレーションの結果、迎撃機的能力を相当上げても完全撃破に至らない

**結果から：スワーム戦闘を想定した精密なシミュレータが不可欠
 攻撃ドローンよりも高い性能の迎撃ドローンが常に多数必要**

迎撃ドローン早期取得プログラムの実施について

令和8年7月に迎撃ドローン（供試器材）を用いた実証試験を計画しています。さらに、実証の結果、部隊の運用に適するものがあれば、迅速な量産契約・納入を目指すこととしています。

令和8年7月15日 防衛装備庁 迎撃ドローン早期取得プログラムの実証機種 の決定について

実証試験を行う機種について 迎撃ドローン早期取得プログラムの一環として、本年6月30日～7月6日まで海上自衛隊より実証試験に向けた公募を実施し、本日7月15日、4つの区分全てについて、実証試験を受託する企業が決定しました。

迎撃ドローン ここでいう迎撃ドローンとは、

概ね高度18,000ft未満、速度250kt程度で飛行する無人航空機（重量600kg以下）、

特に、長射程自爆型UAV（例えばシャヘド型、HARPY 型等）に対処する無人航空機をいう。

	機種名	(参考)	
		製造企業	契約相手方
タイプ1	BVQ404	Beyond Vision（葡）	エアモビリティ株式会社
タイプ2	QS INTERCEPTOR	QuantumSyetems（独）	全日空商事株式会社
タイプ3	TerraB1	TerraDrone（日）	TerraDrone 株式会社
タイプ4	IonStrike	DZYNE Technologie（米）	日本海洋株式会社

多層防空の現状

ウクライナ空軍公式発表を基にした Defence Ukraine teamの分析 (2026/6/5)

The Saturation Test: 1-2 June 2026 and Ukraine's Air-Defence Reserve
By Defence Ukraine Team · June 5, 2026

https://www.defenceukraine.com/en/insights/kyiv-saturation-test-air-defence-reserve/?utm_source=copilot.com

階層	対象兵器	ロシア側 投入数	ウクライ ナ迎撃数	迎撃率	備考
高層防空 (弾道・極超音速)	Iskander-M、 Zircon、その他 弾道	41 発	11 発	26.80%	Zircon 8発は全弾 突破
中層防空 (巡航ミサイル)	Kh-101、 Kalibr	32 発	29 発	90.60%	Westernシステム が主力
低層防空 (ドローン)	Shahed- 136/131/238	656 機	602 機	91.70%	Gepard・ MANPADS・IRIS- T



我が国の多層防空システム？
低層防空システムの充実とハイブリッド防空システム