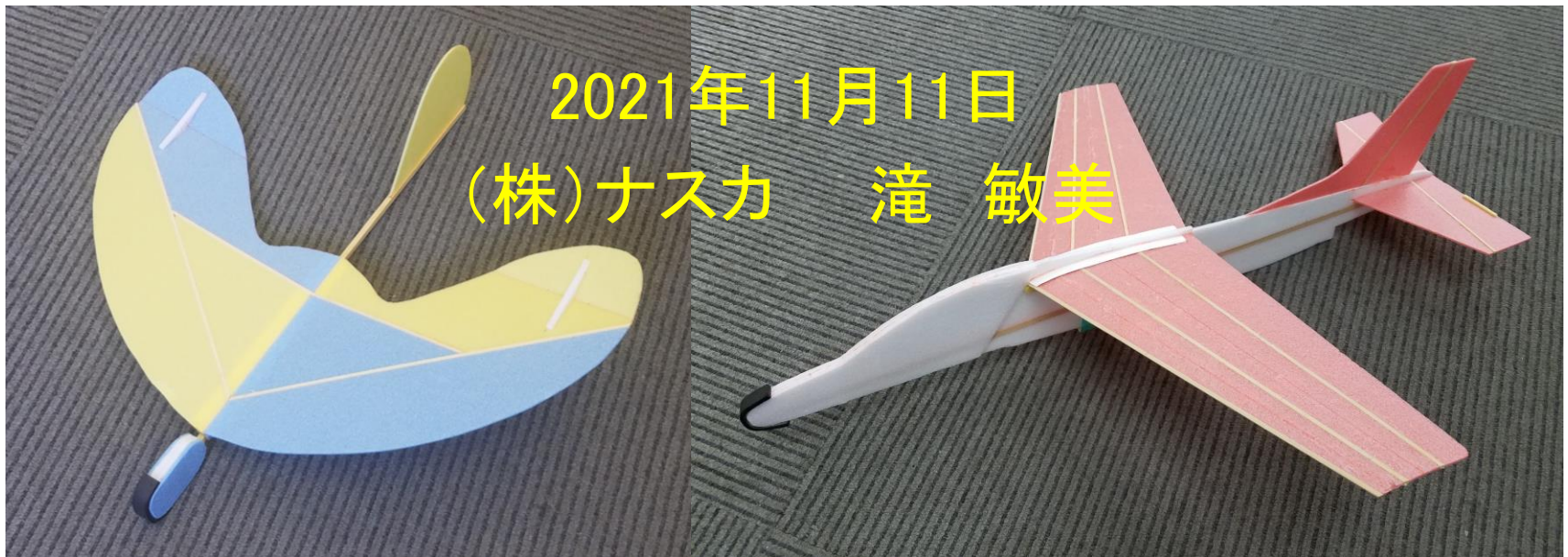


模型飛行機のすすめ



講演の目的

- この講演で伝えたいこと
 - フリーフライト模型グライダーのおもしろさ
 - 模型飛行機は飛行機を学ぶのに有用
- 模型飛行機を楽しむ人が増えてほしい
- まだわからないことがある. 新しい技術を使うことで解明できる. 研究してみる人はいませんか？

講演内容

- フリーフライト模型グライダーを始めたきっかけ
- わたしのグライダーの紹介
- 模型グライダーで学べること
- 研究課題と取り組み

きっかけ

きっかけ

- 高校，大学の時に紙飛行機等を設計，製作して飛ばしていた．
- 昨年2月，エアクラフトオリンポス社の四戸社長の講演（@中部大学）を聞き，懇親会で学生さんが持ってきていたラジコン機の構造（発泡材＋CFRP補強）を見て興味が蘇った．
- インターンシップの題材にザノニアの種のグライダーを採用し，無尾翼機に興味を持った．



- 無尾翼グライダーを飛ばすことを思い立ち，調査開始（昨年6月）→ フリーフライト模型グライダーの研究へ

ザノニアの種 - 滑空する種



ザノニアの種の飛行実験模型



わたしのグライダーの紹介

わたしのグライダーの紹介 - ねらい

- 製作するのに特別な技能がいらないこと
- 入手し易く, 安価な材料でできること
 - バルサ材を使わない
- 塗装が不要なこと
 - 有機溶剤を使わない
- 飛ばすのが簡単なこと
 - ハンドランチグライダーや紙飛行機は調整が難しい
- 性能がよいこと, ただし, 比較的狭い場所で飛ばす
 - 小さすぎる機体は性能が悪い → 翼幅 500 mm程度は必要
 - 小さすぎる機体は製作と調整が難しい
 - 大きすぎると性能が良すぎて, 狭い場所では飛ばせない

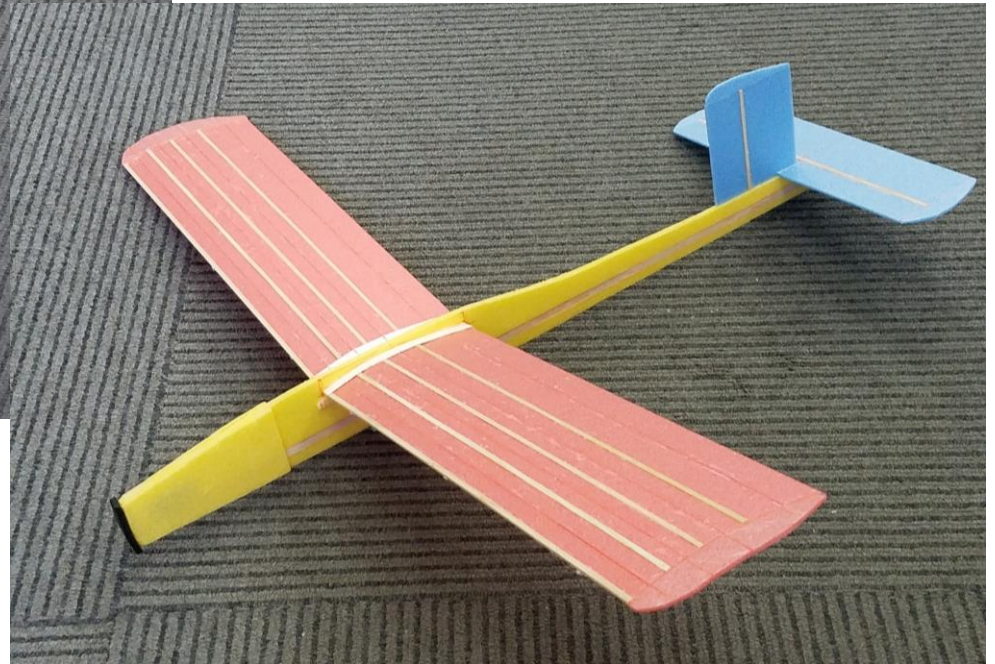
模型飛行機の種類

- フリーフライト（操縦できない）
 - 無動力＝グライダー ← 最も単純，安価
 - 紙飛行機
 - ハンドランチ・グライダー
 - 曳航グライダー
 - ゴム動力機
 - エンジン機
 - 電動モーター機
- コントロールライン（Uコン）
 - エンジン機
- 無線操縦（ラジコン）
 - 無動力＝グライダー
 - エンジン機
 - 電動モーター機

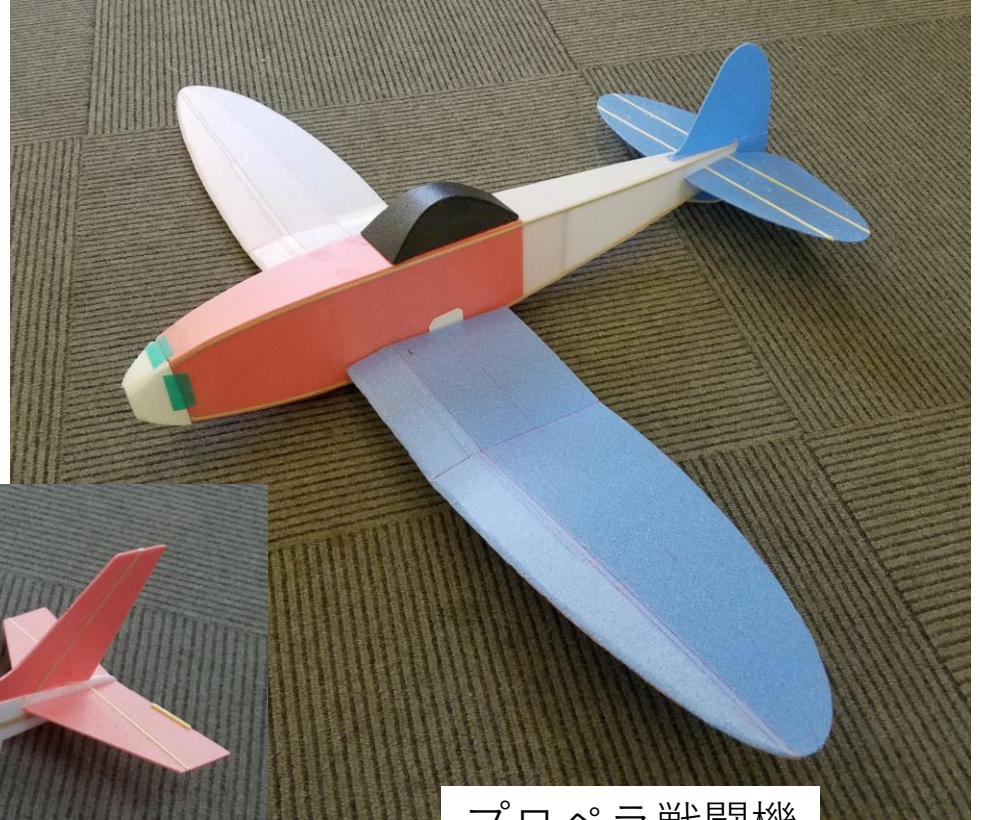
わたしのグライダーの特徴

- 小型, 軽量
 - 翼幅 300～900 mm, 重量 20～90 gf
 - 低レイノルズ数: 20,000～40,000
 - 比較的狭い場所で飛ばす. 滞空時間は20～60秒.
- 材料, 構造, 工作法
 - スチレンペーパー+ヒノキ棒: 入手容易, 簡単な工法
- 形状
 - いろいろな形状が可能
- 発進方法
 - ハイスタート発進を採用
 - 機体の大きさ, 形状の制限無し
- 調整方法
 - 簡単, 確実な調整: ガーニーフラップの採用

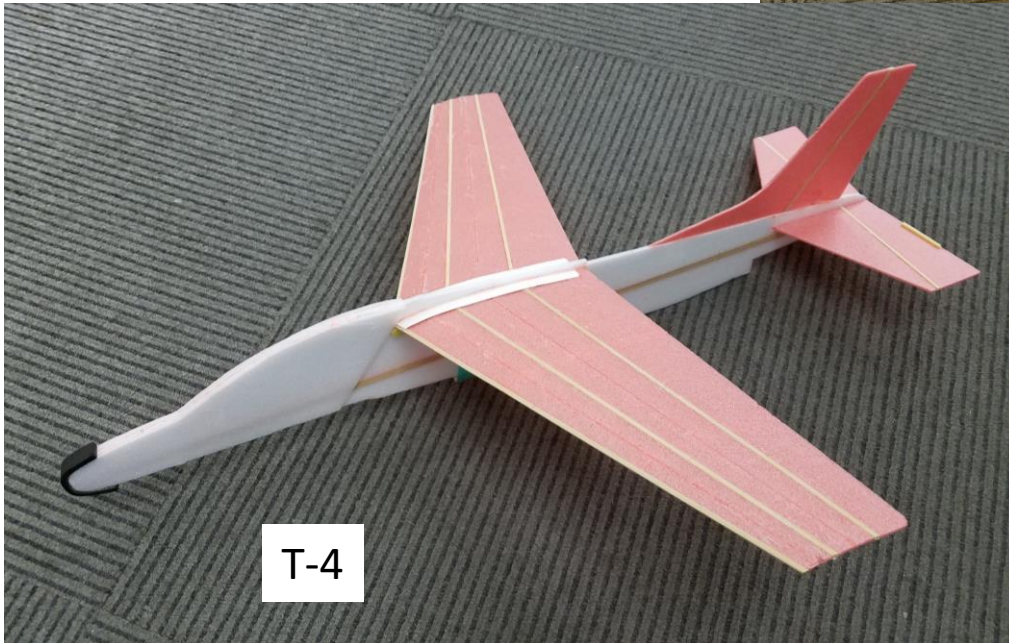
普通の形状の機体



普通の形状の機体

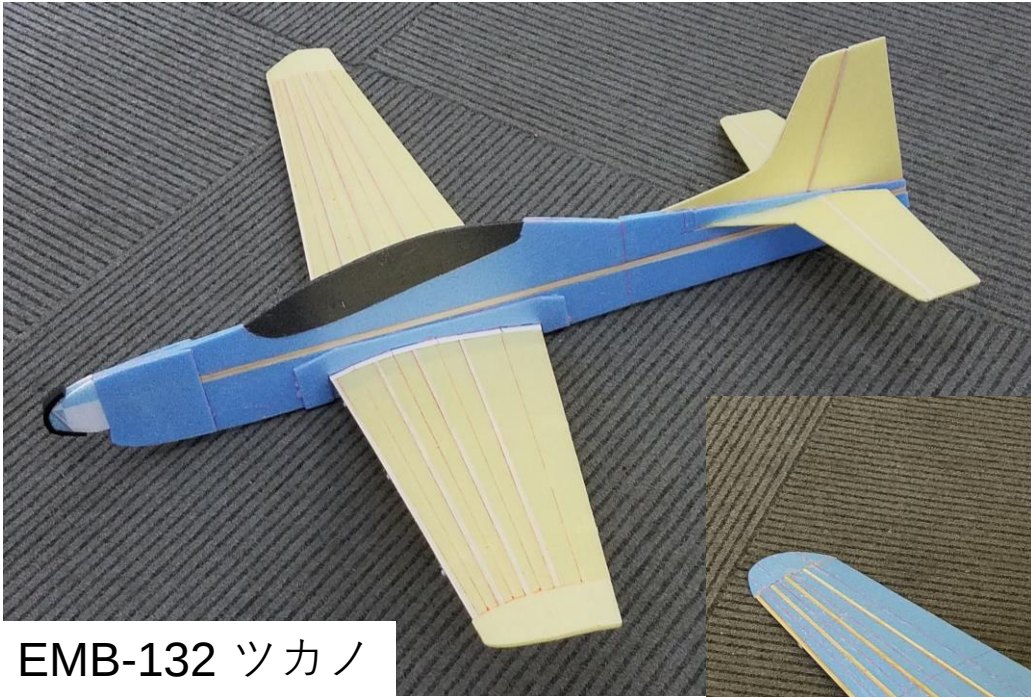


プロペラ戦闘機



T-4

普通の形状の機体

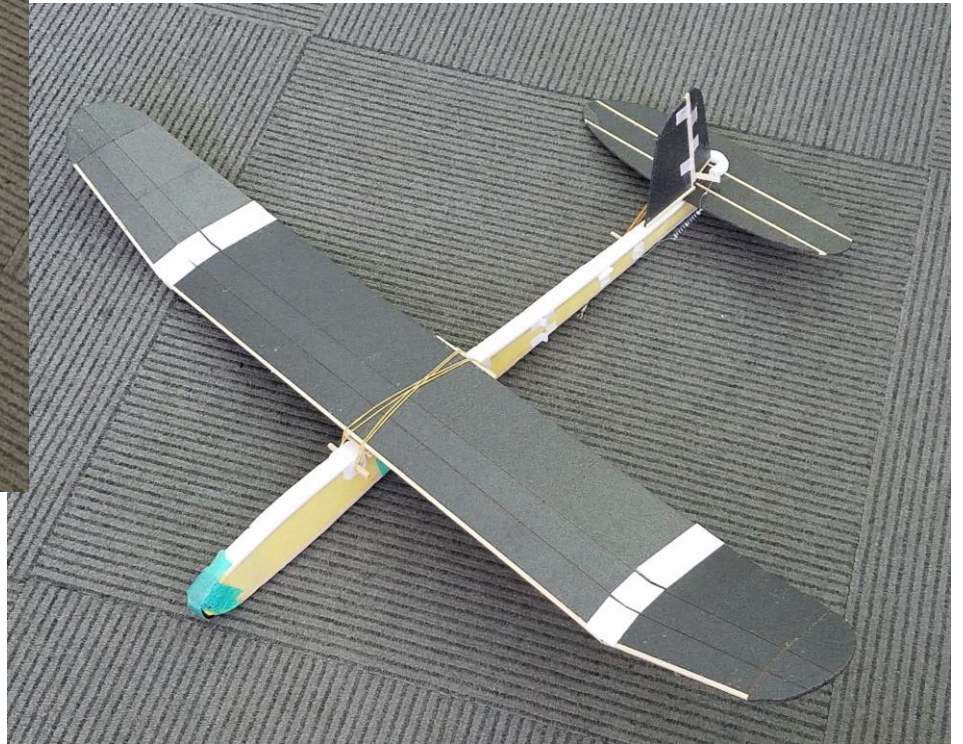


EMB-132 ツカノ

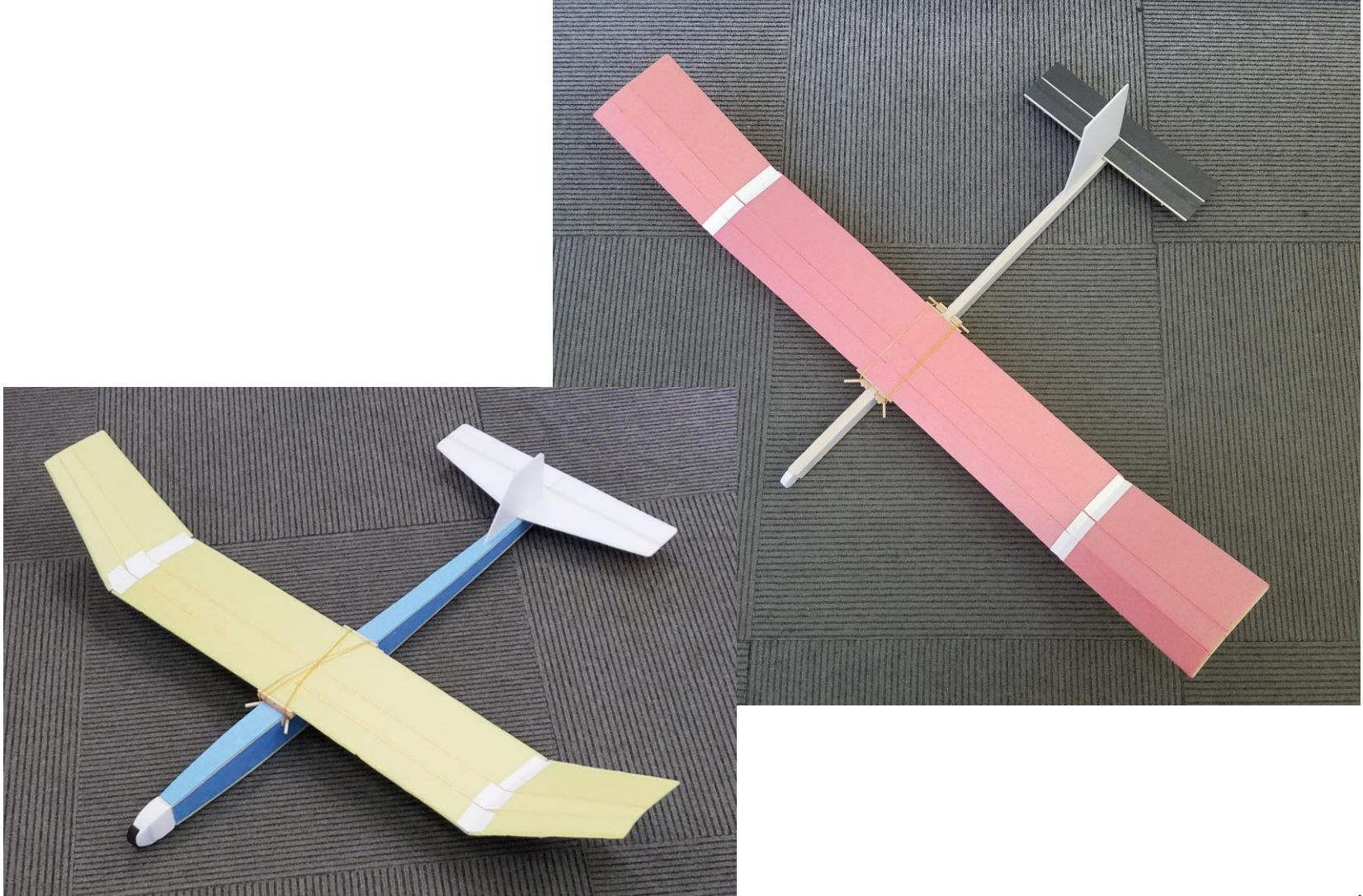


飛燕

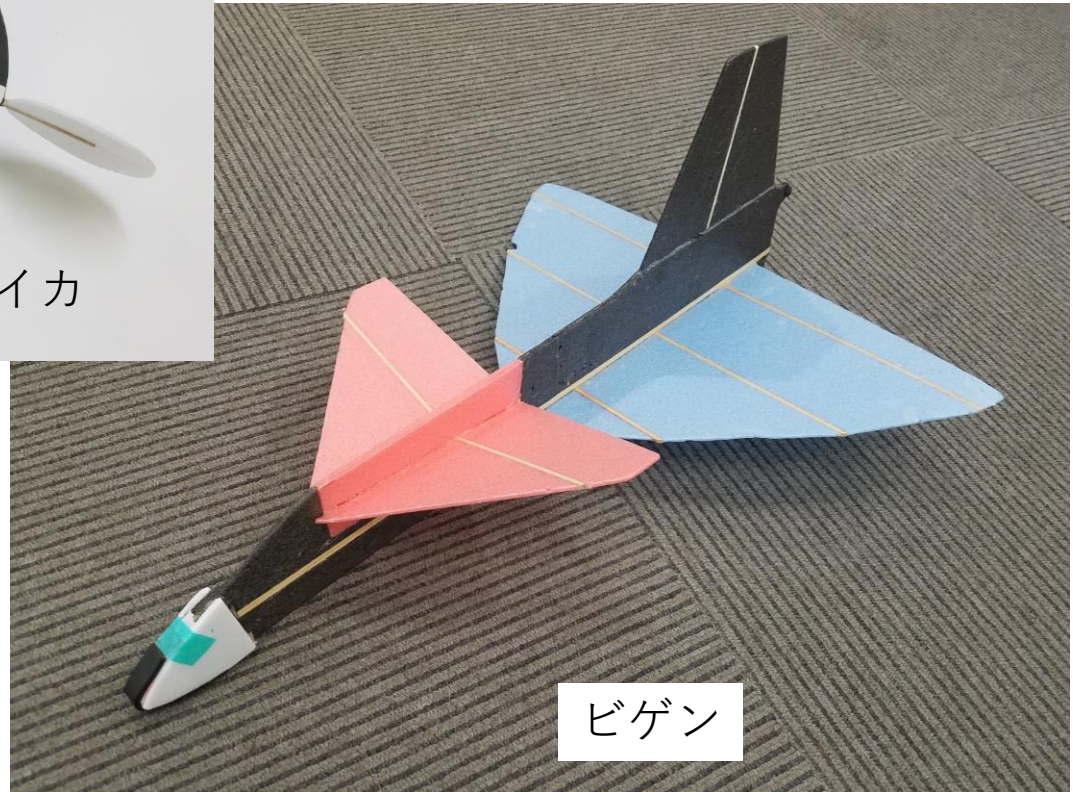
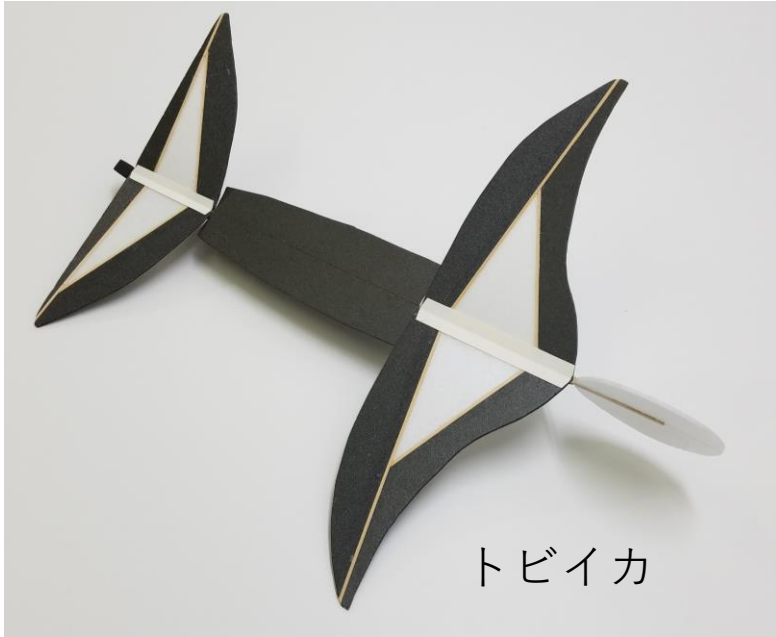
普通の形状の機体



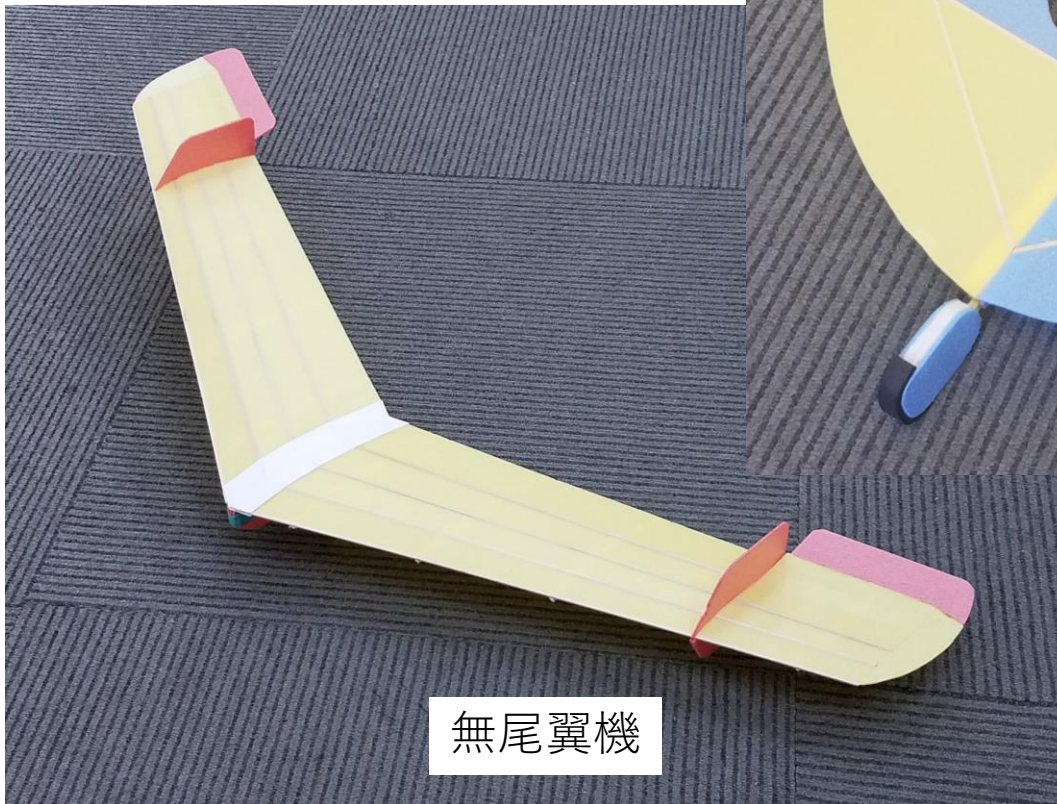
普通の形状の機体



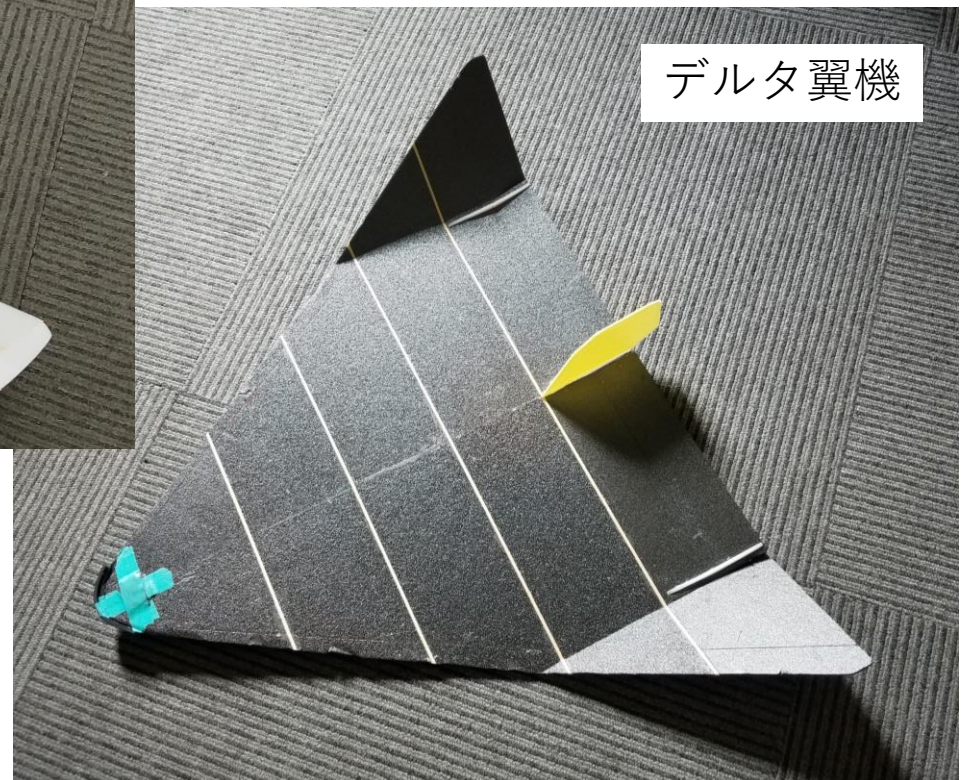
カナード機



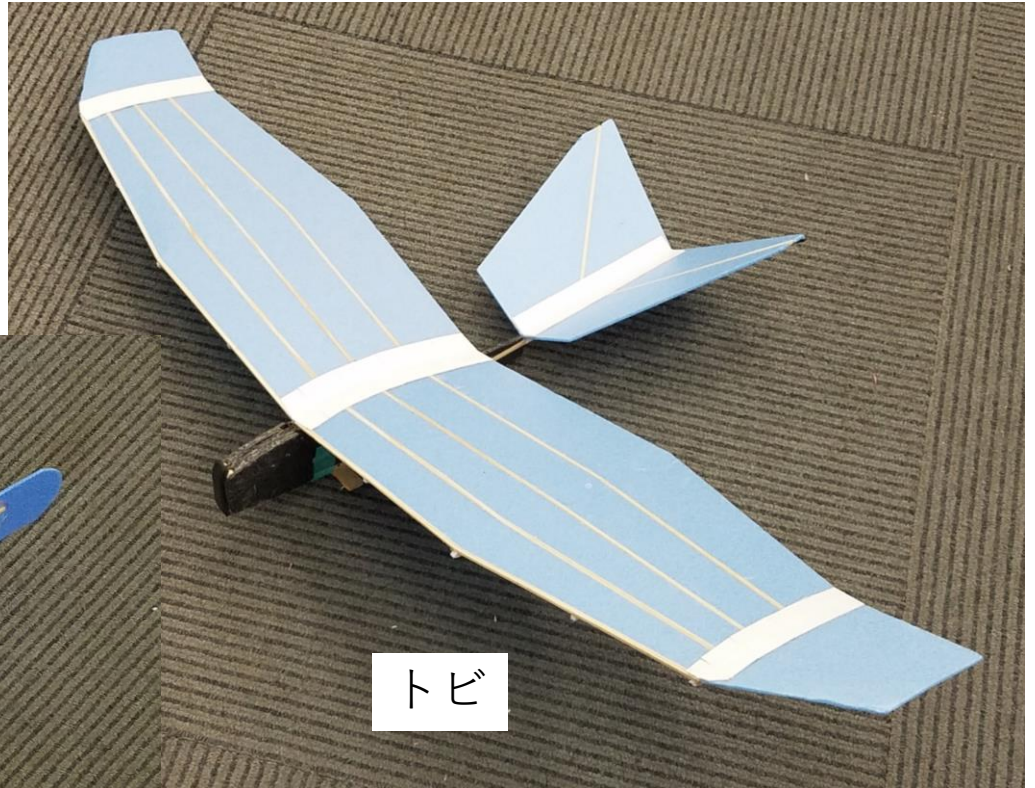
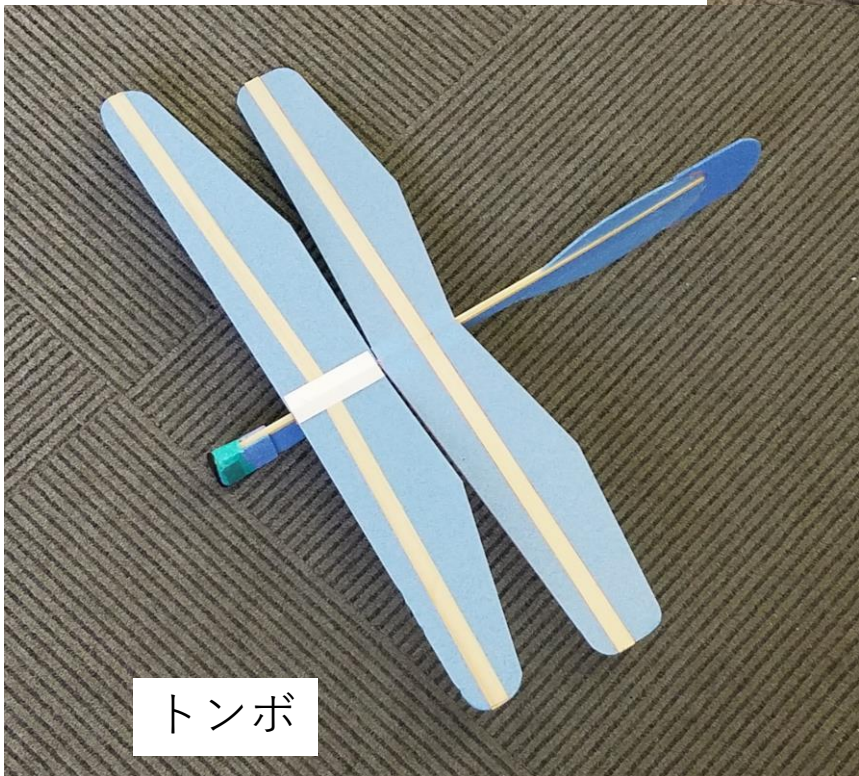
無尾翼機



変わった形状



生物の形



材料, 工法

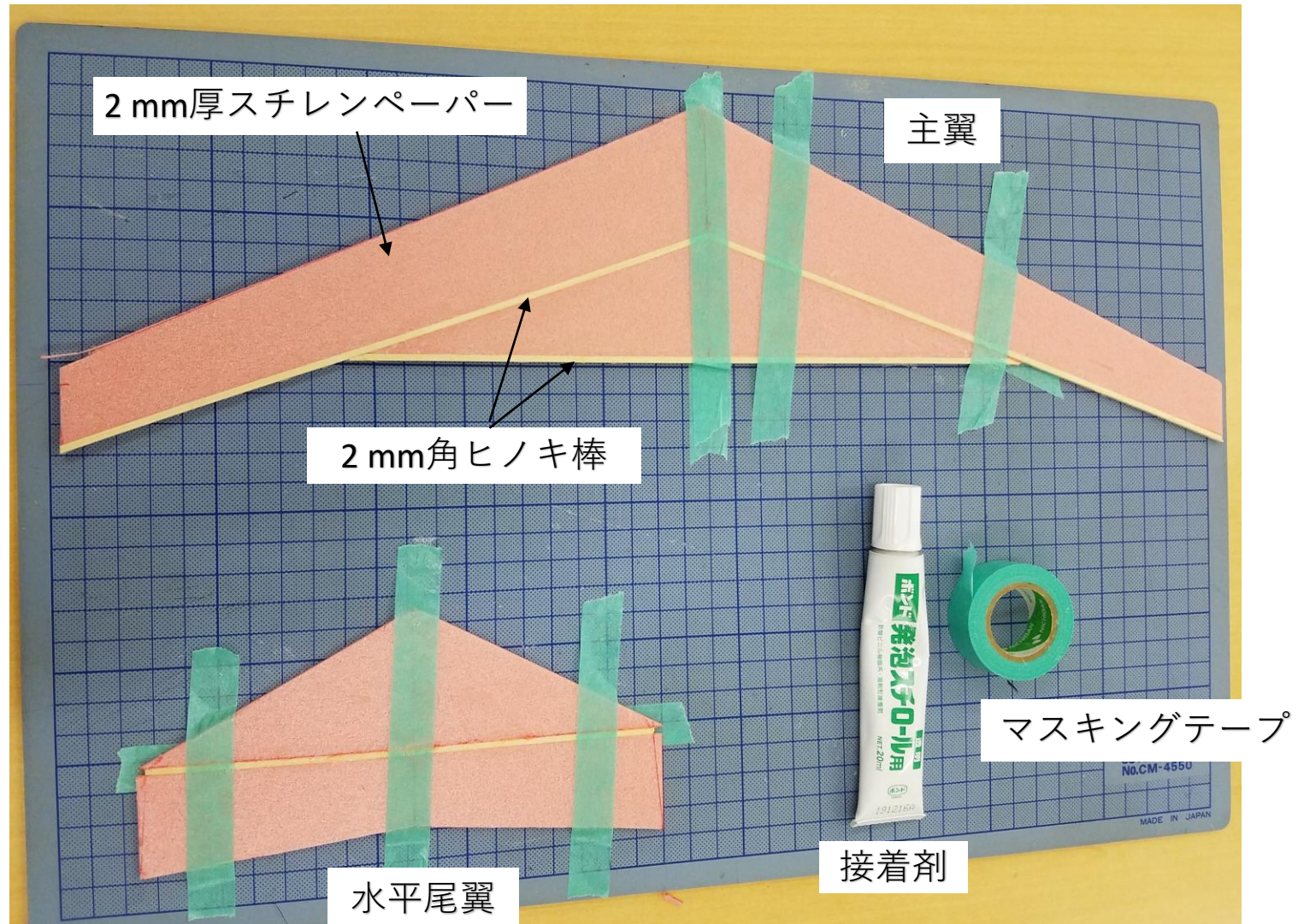
- 材料

- 2mm厚スチレンペーパー
 - ダイソーでA3サイズ5枚が110円
 - 軽い
 - 加工しやすい
- ヒノキ棒
 - ホームセンターで入手可能, 安価
 - 軽くて, 強い
 - 加工しやすい

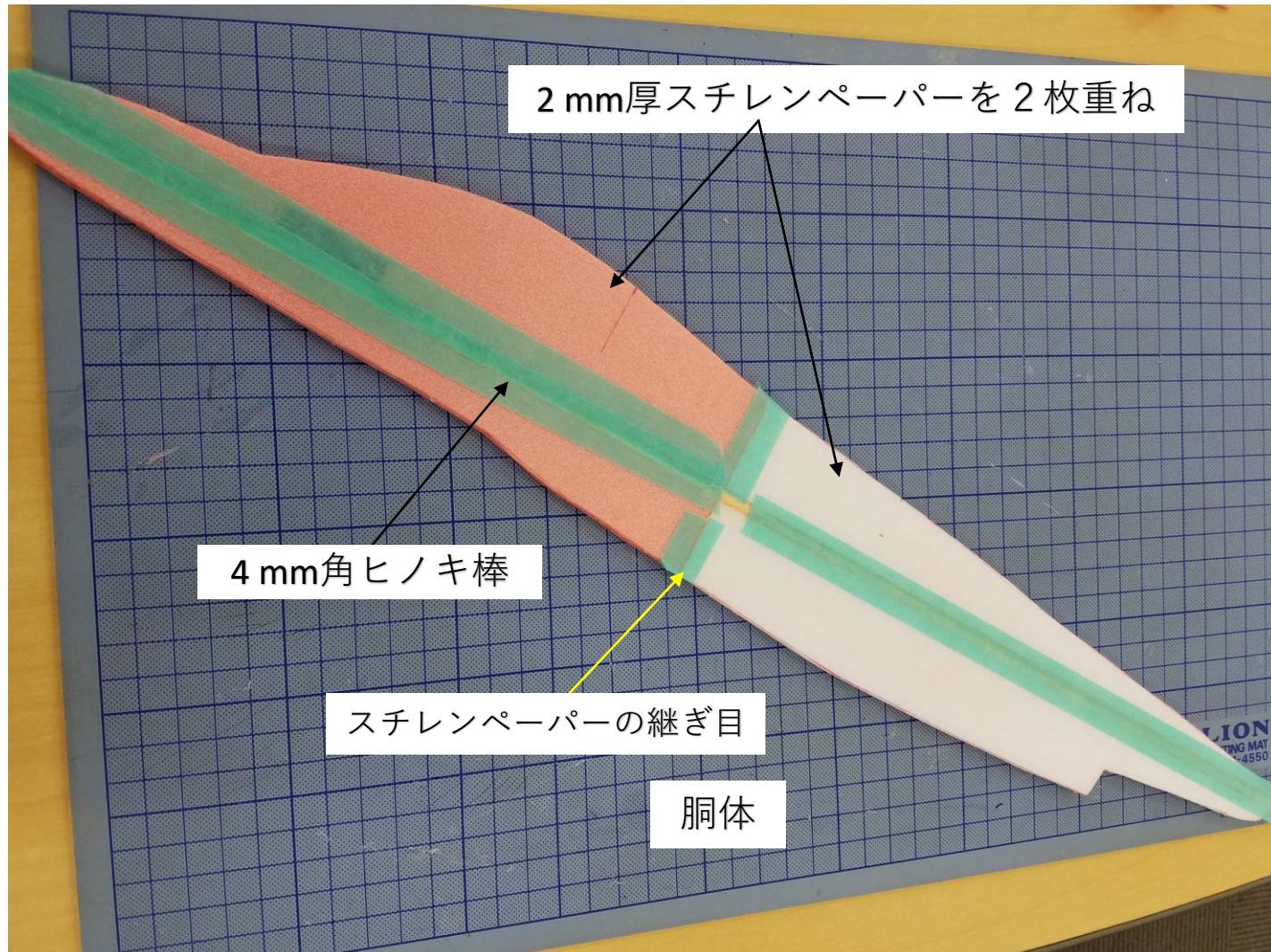
- 工法

- 平板上で接着: 正確にできる.
- 塗装が不要: 有機溶剤を使わない.
- 修理が簡単

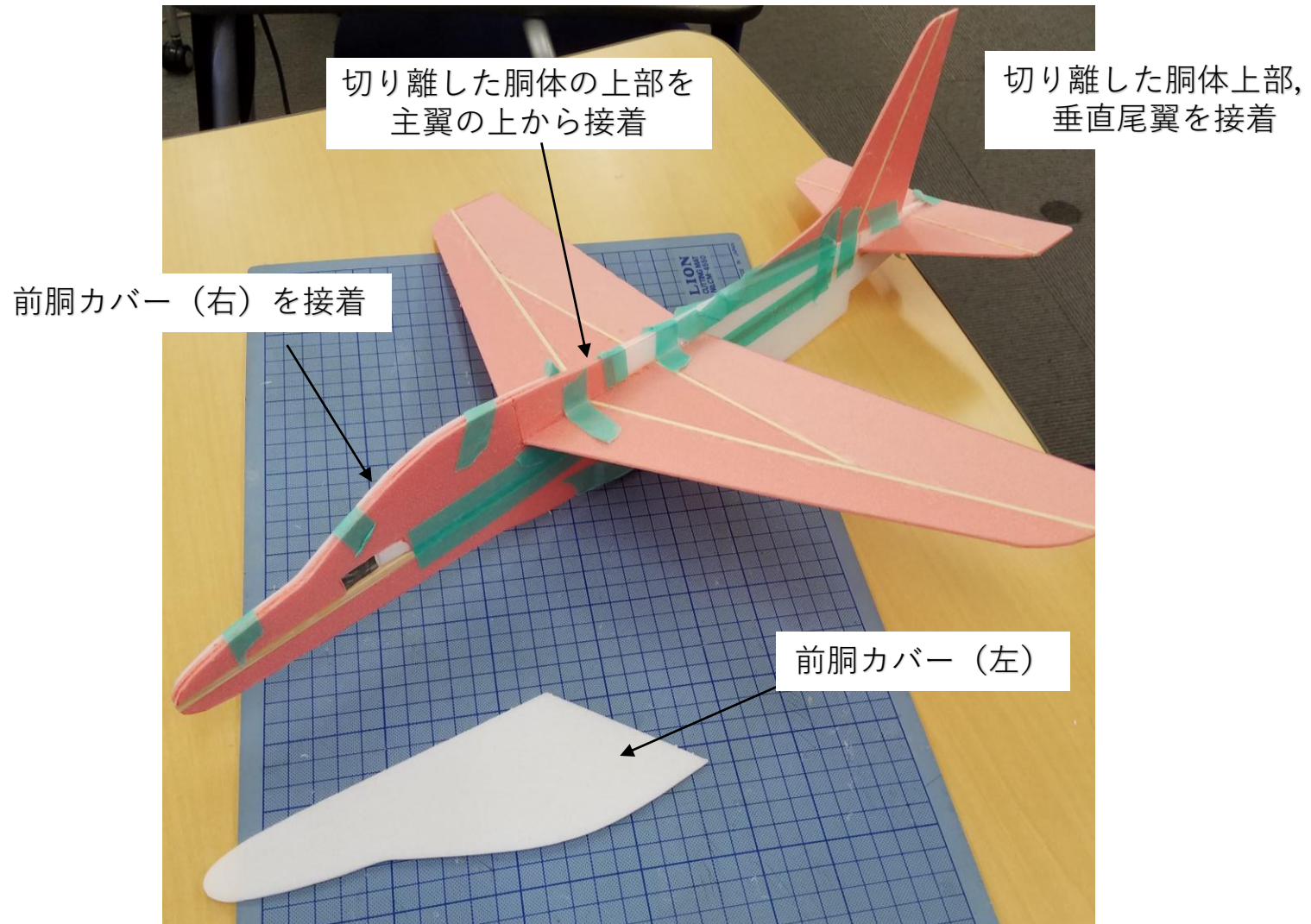
構造と工法 - T-4



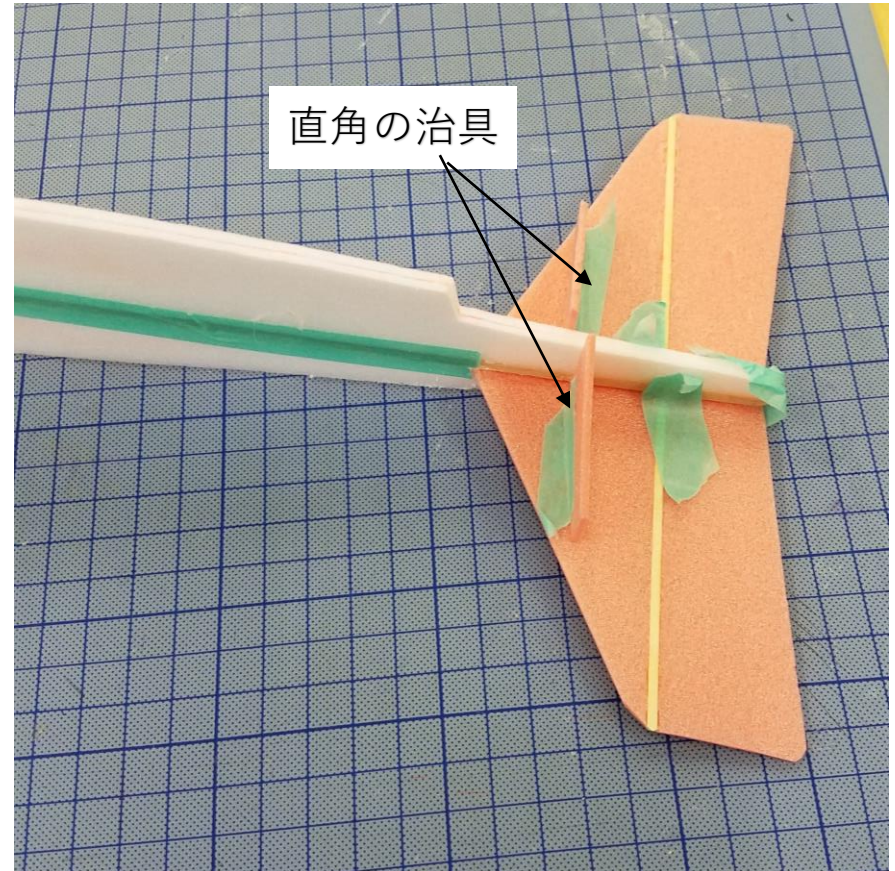
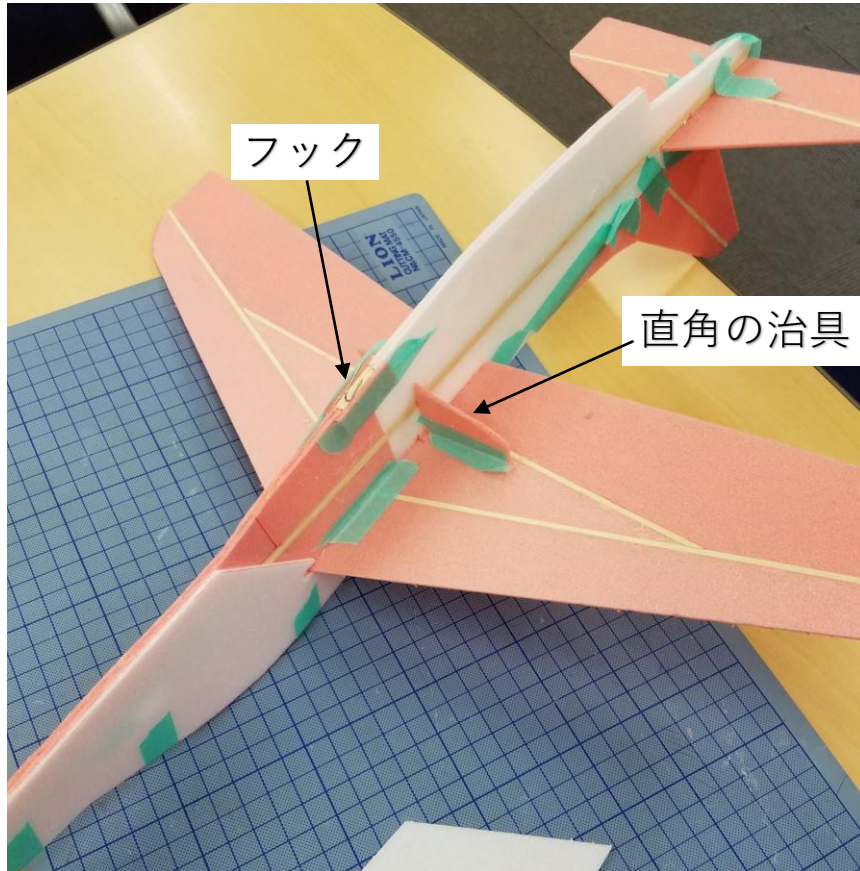
構造と工法 - T-4



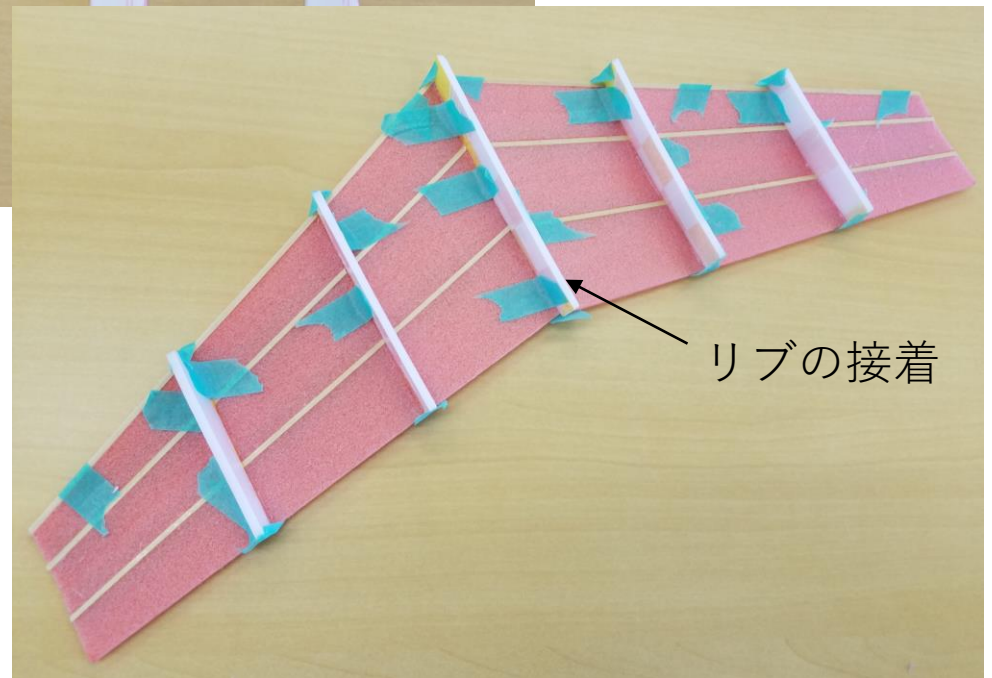
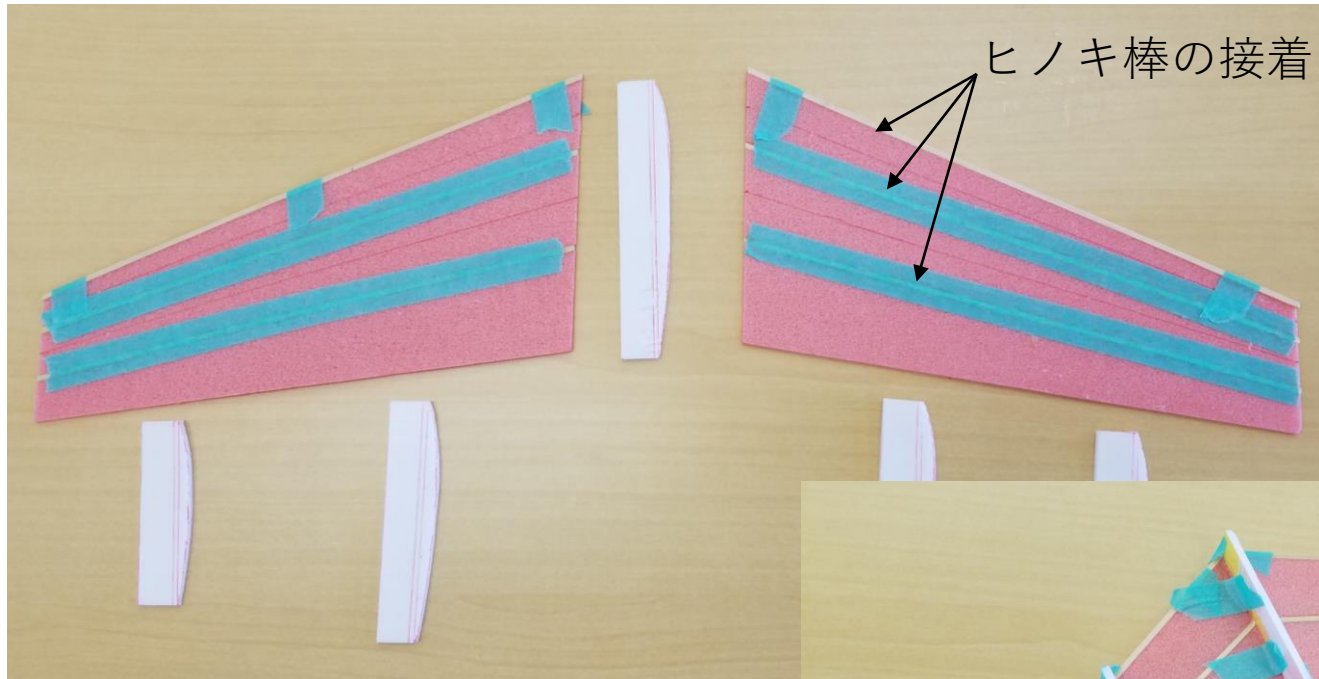
構造と工法 - T-4



構造と工法 - T-4



キャンバー付き主翼の場合

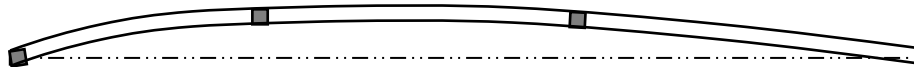
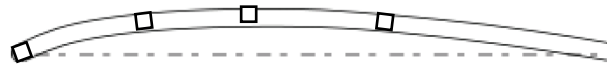


主翼の翼型／構造の例 - 空力性能と強度の両立

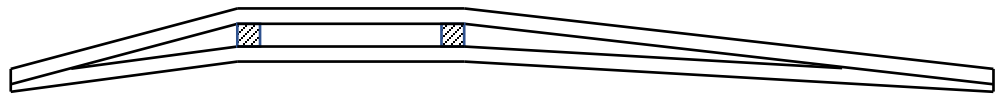
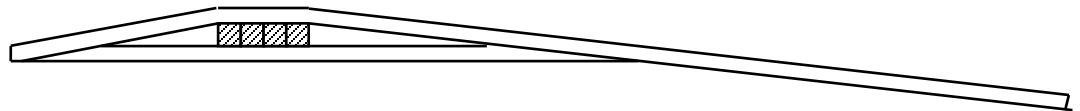
平板翼



キャンバー付き
薄翼



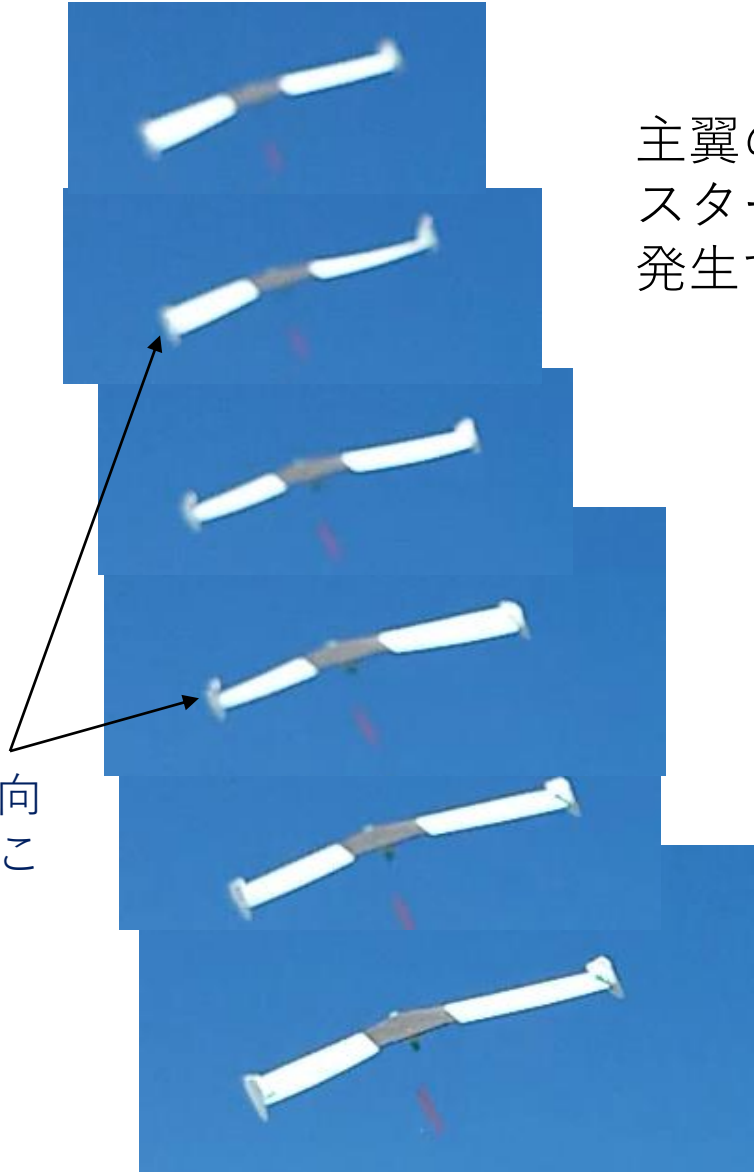
ねじり剛性を上げる
ためにボックス構造
とした



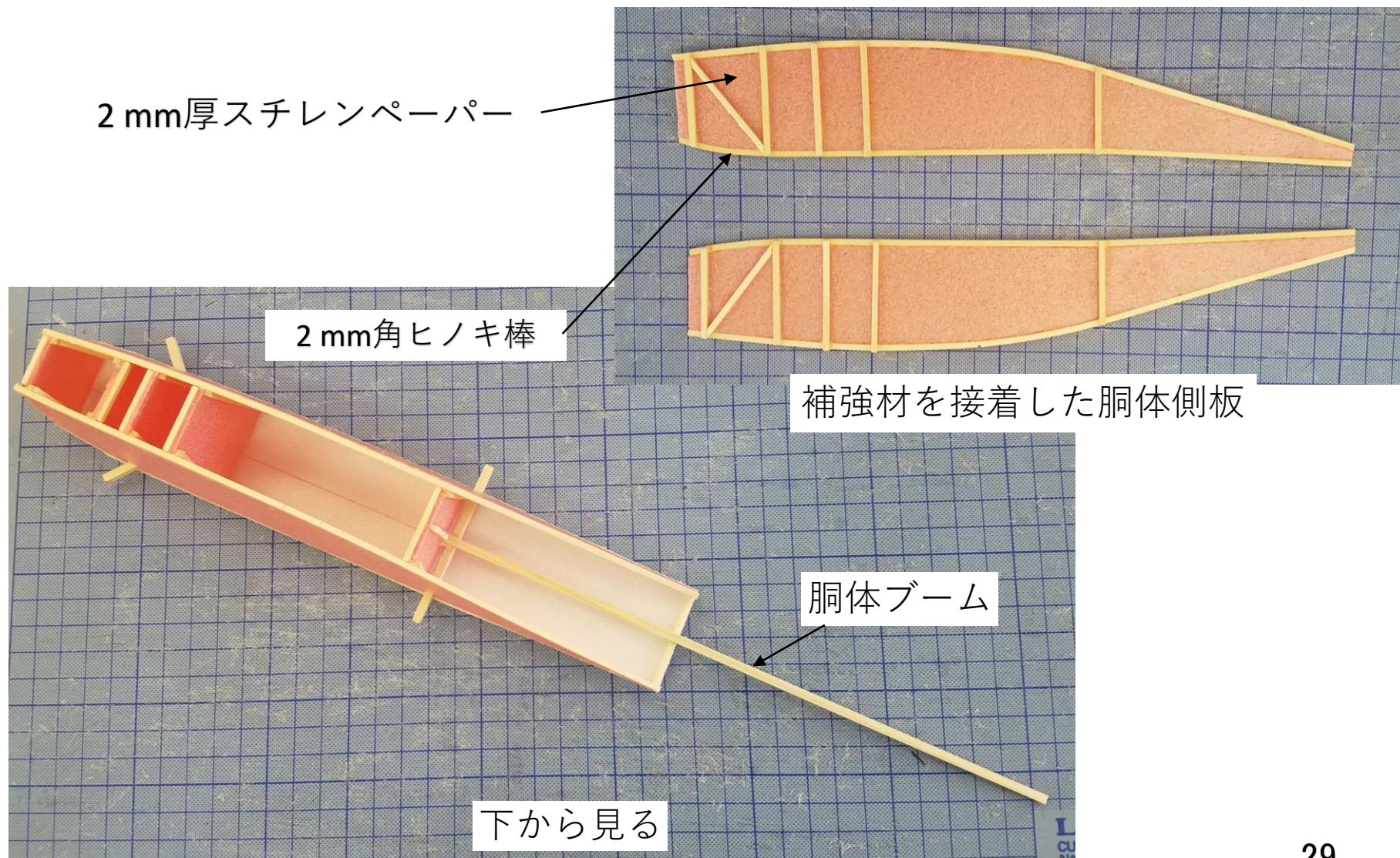
剛性不足 - フラッターの発生

主翼の剛性が足りないと、ハイスタート発進時にフラッターが発生する。

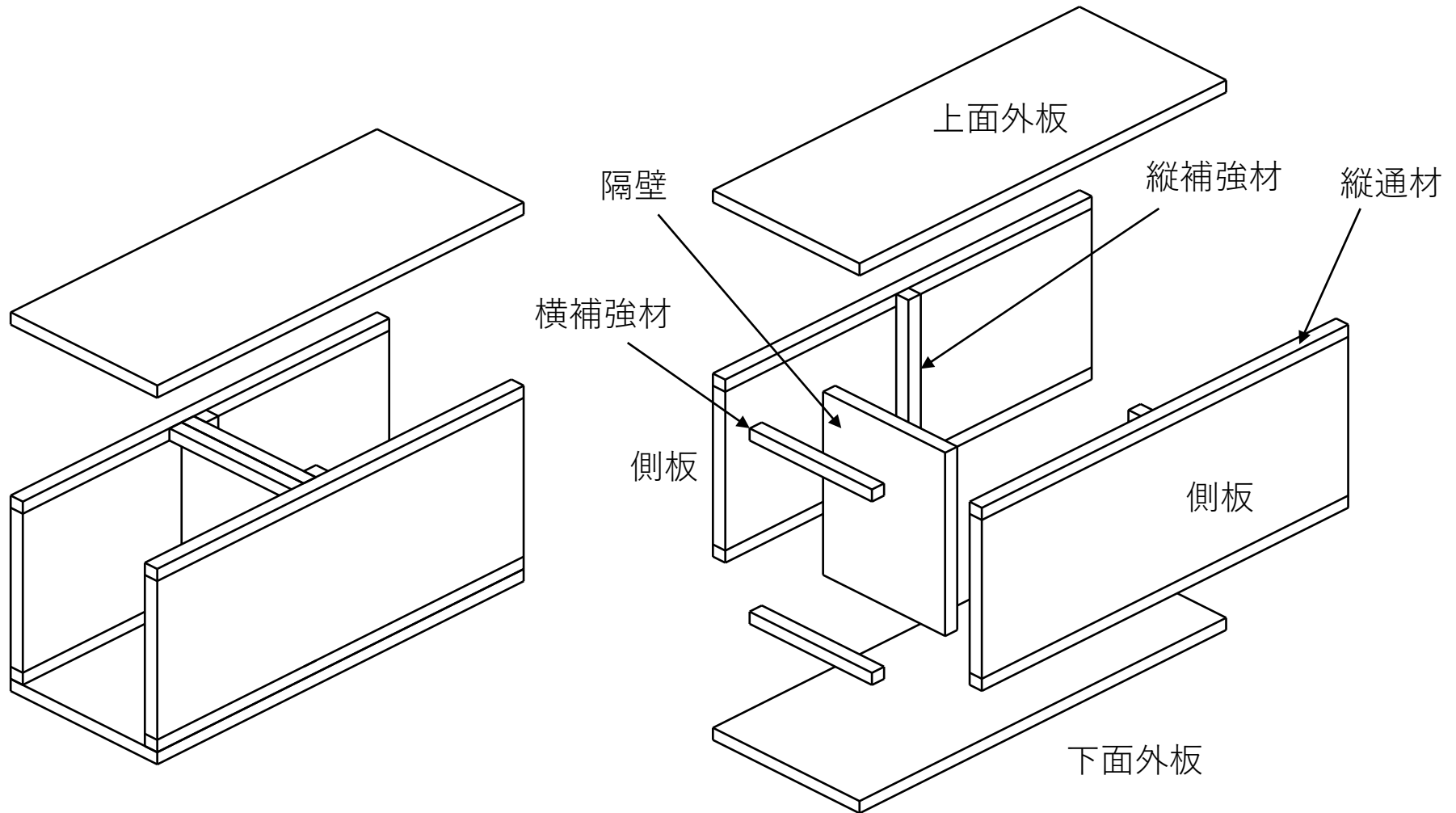
左右の翼が逆方向にねじれていることがわかる



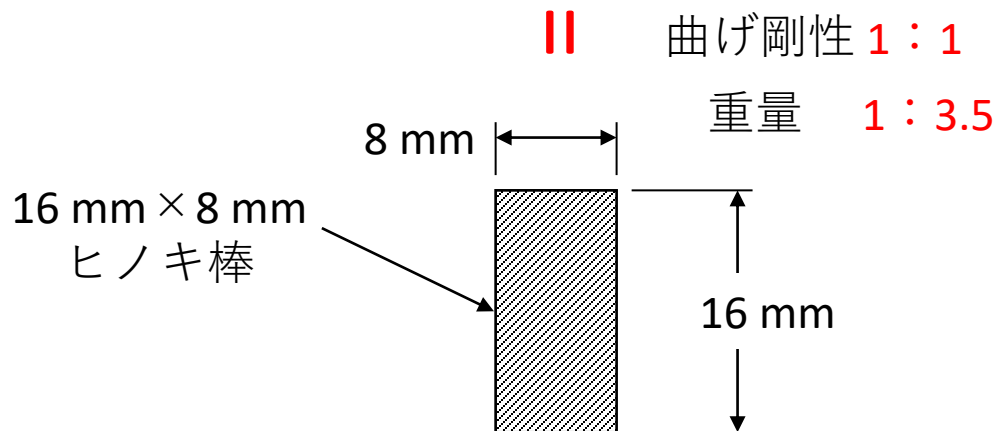
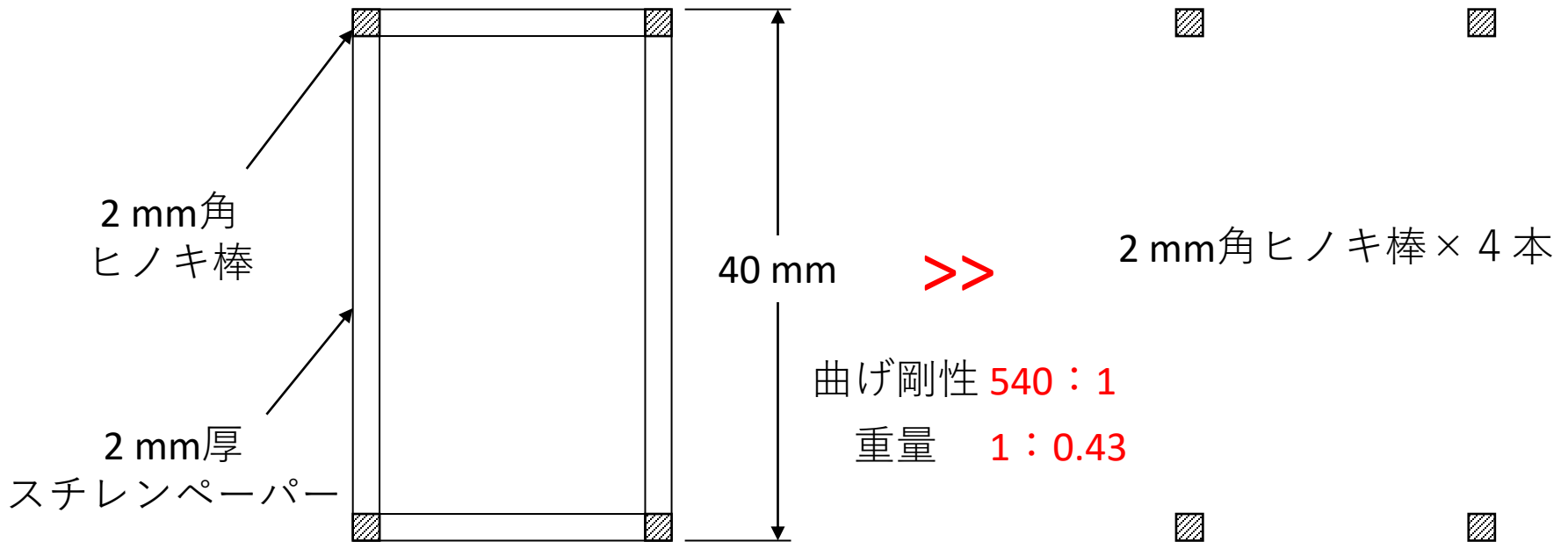
角胴の構造



角胴（軽量，高剛性）の構造

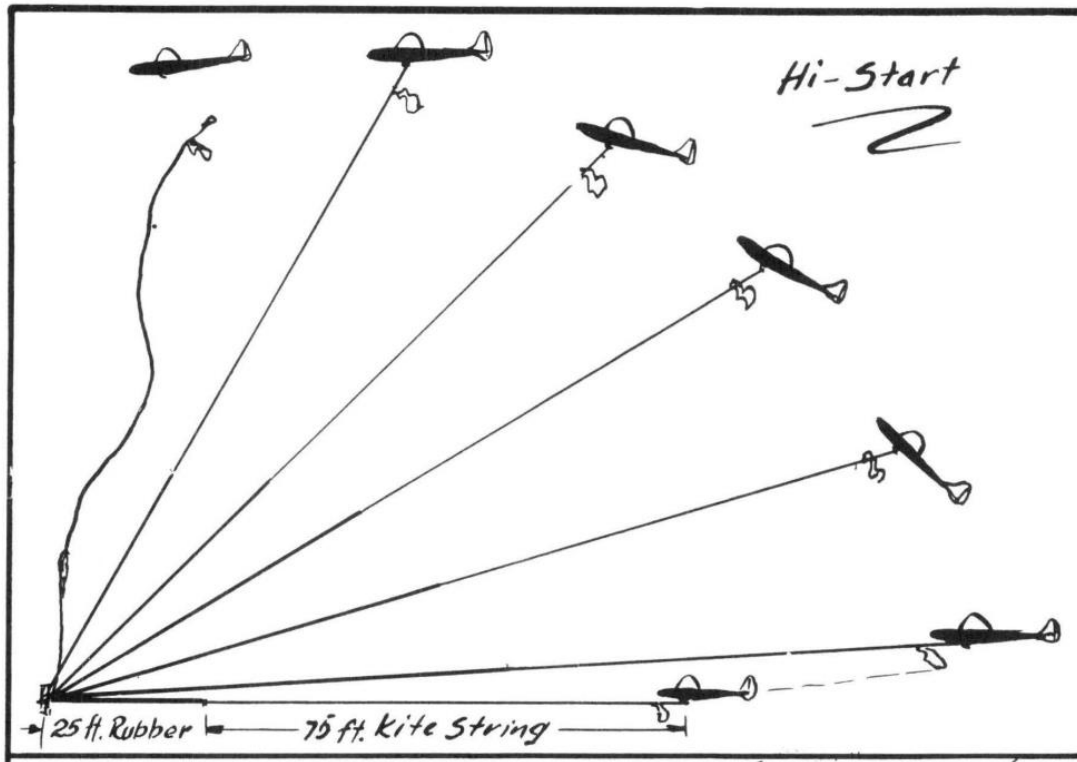


縦曲げ剛性の比較



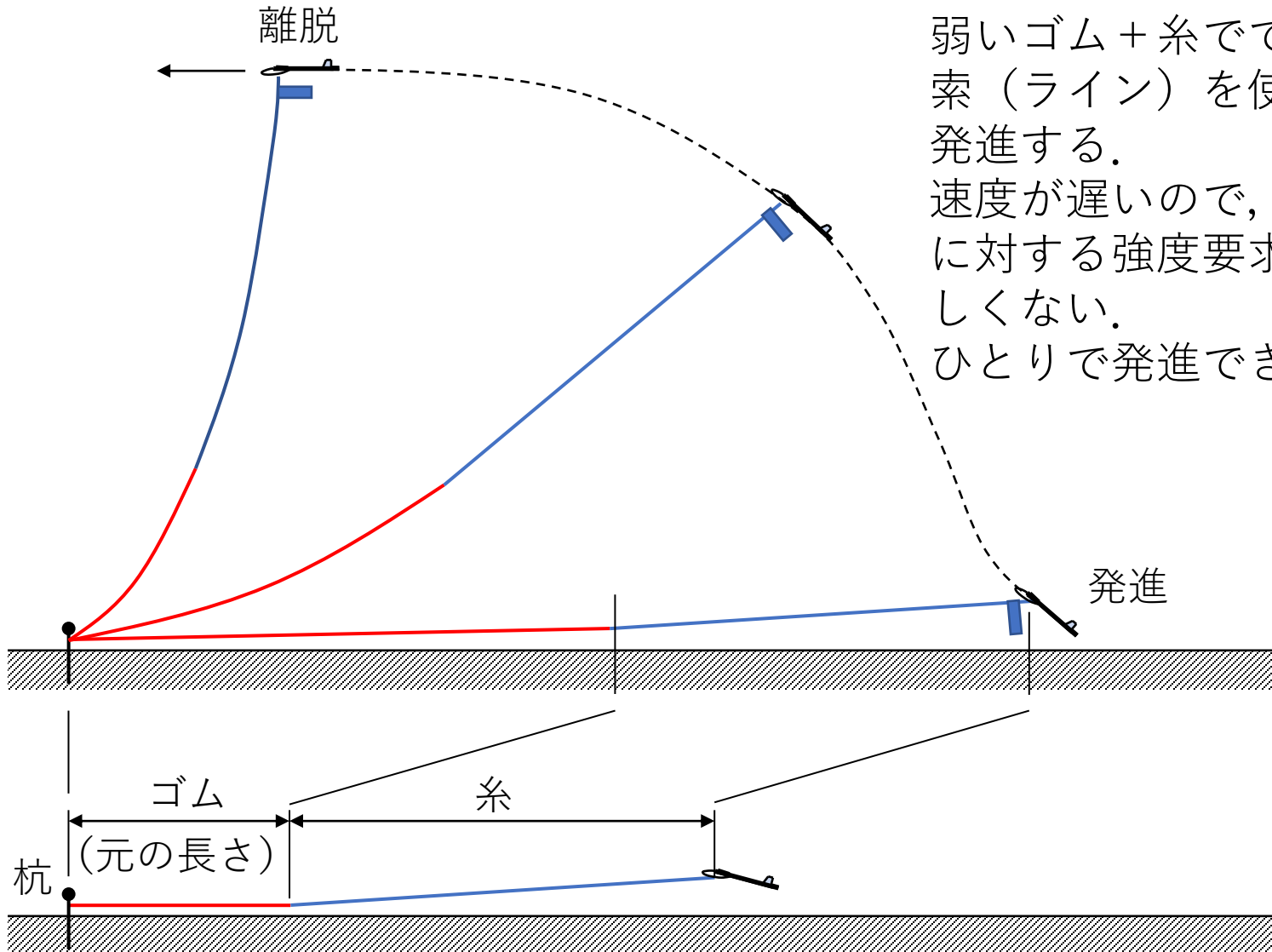
ハイスタート発進

- 1930年代にドイツで開発された
- 1930年代に米国のFrank Zaicが米国に紹介
- 最近, 見直されている ⇒ RCグライダーで採用



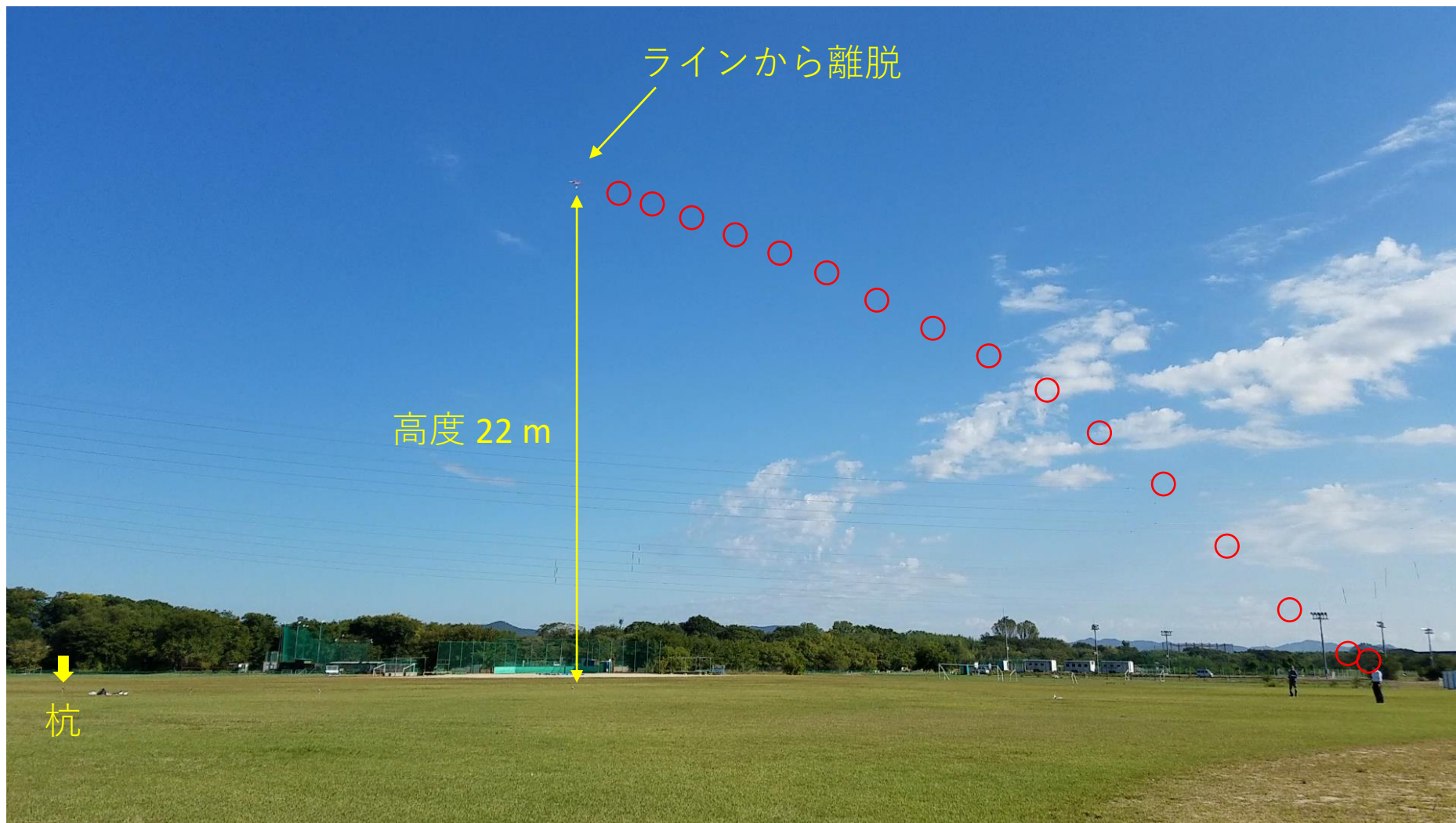
F. Zaic, "Model
Glider Design,"
1944. より

ハイスタート発進



弱いゴム＋糸でできた
索（ライン）を使って
発進する。
速度が遅いので、機体
に対する強度要求は厳
しくない。
ひとりで発進できる。

ハイスタート発進

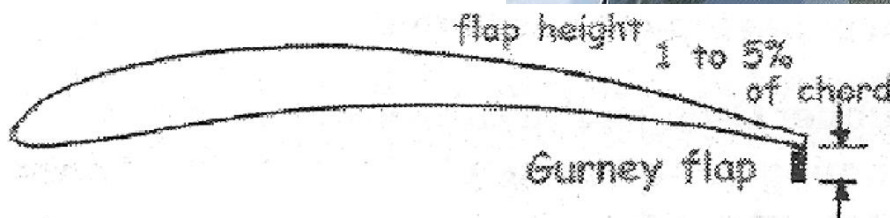


ハイスタート発進

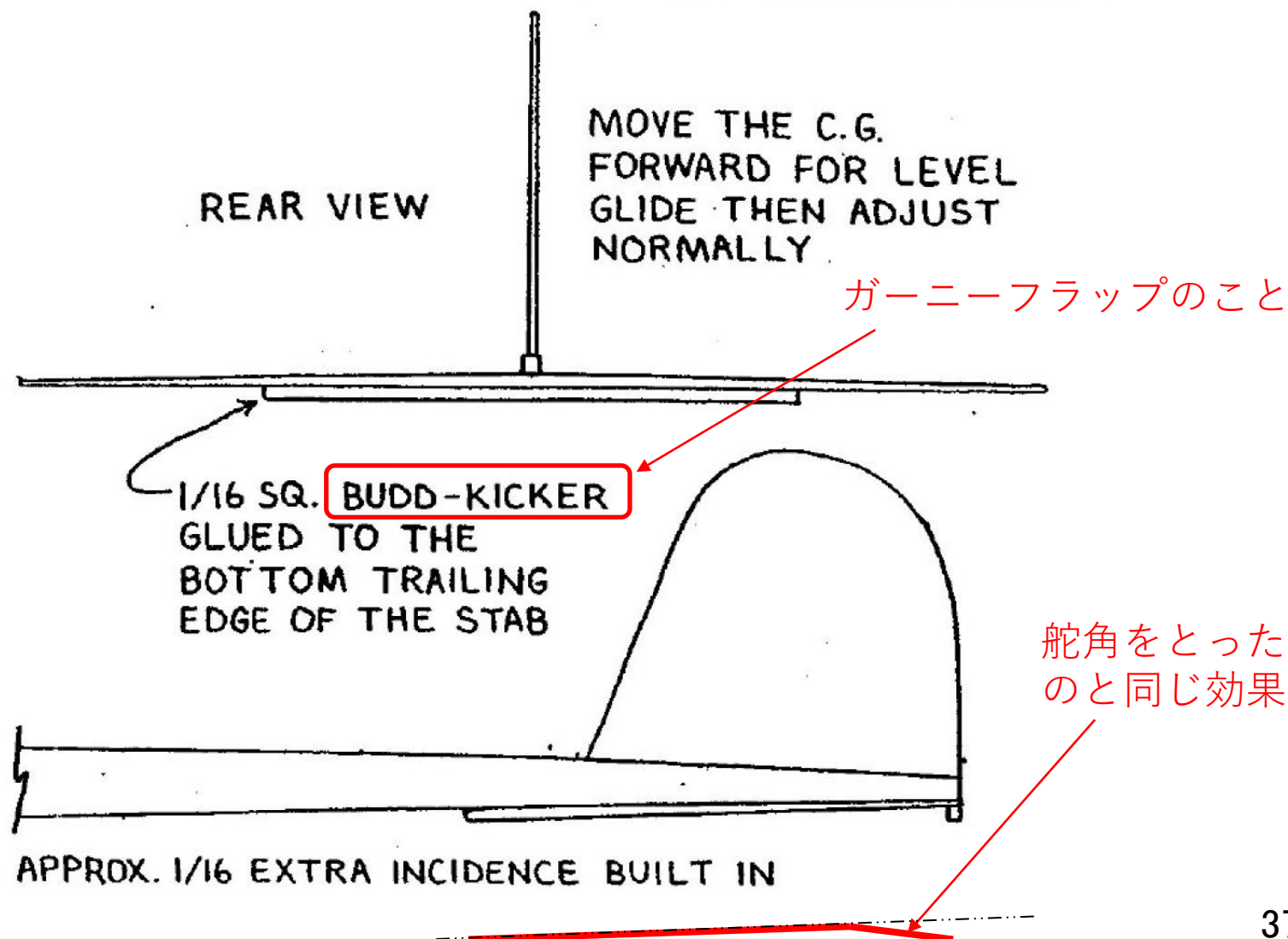


ガーニーフラップ

- ガーニーフラップとは自動車のエアロパーツのひとつであり、ウイング後端等に垂直に立てられる細い板状のパーツである。その名は往年の名ドライバーである開発者のダン・ガーニーから。（Wikipediaより）



釣り合い調整に使用するガーニーフラップ



模型グライダーで学べること

模型グライダーで学べること

- 空気力学
 - 低レイノルズ数用の翼型
- 飛行力学
 - 性能
 - 安定性, 飛行機の運動
 - 渦格子法で空力微係数を計算: AVL
 - 微分方程式の解き方: Octave
 - 発進の力学
- 構造力学
 - 軽量・高剛性構造の設計
- 実験技術
 - 機体の慣性能率の測定
 - 画像解析による飛行軌跡測定

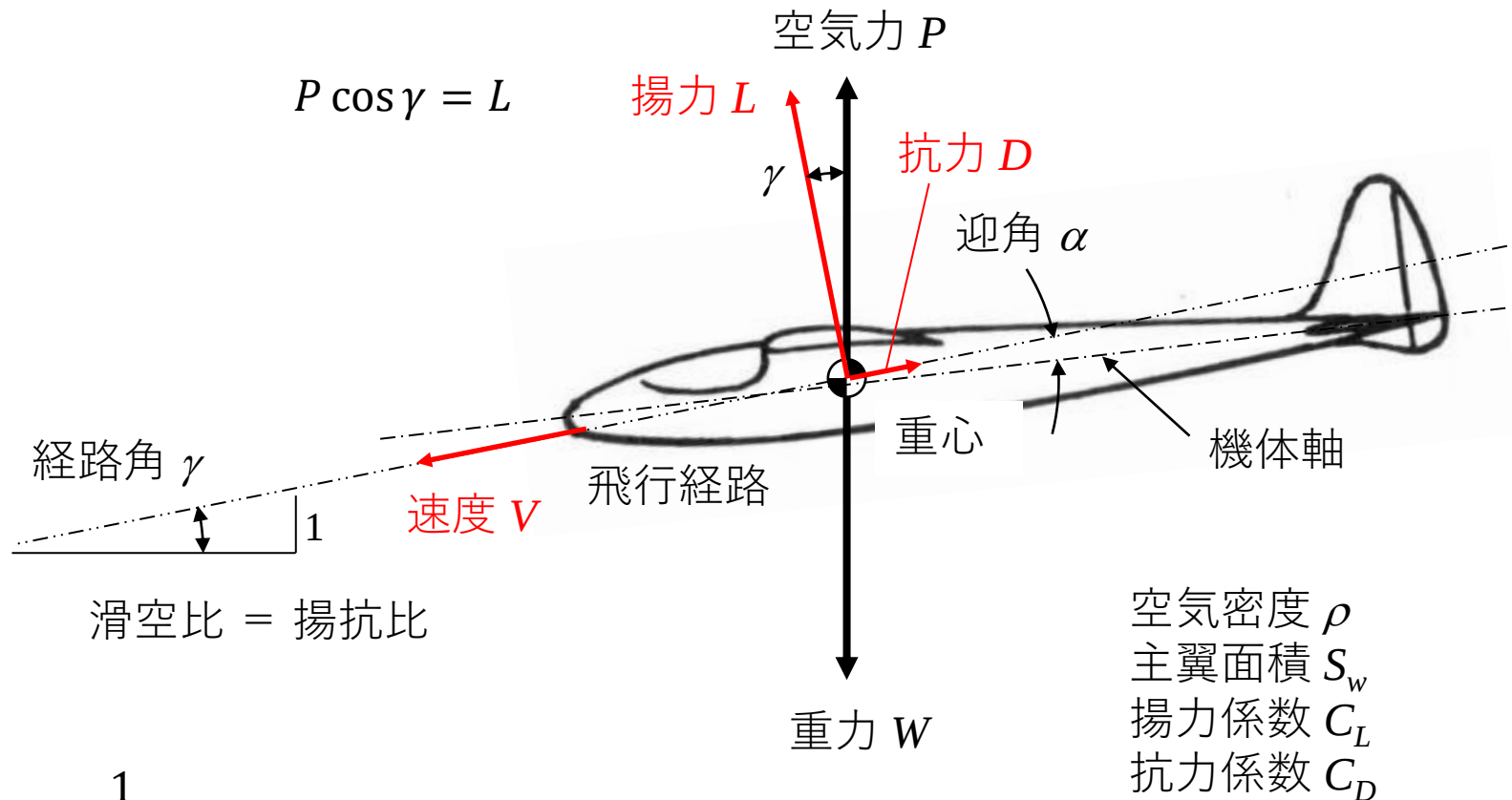
低レイノルズ数用の翼型

- レイノルズ数 10^5 あたりで翼のまわりの空気の流れの様子が激変する.
- このレイノルズ数はちょうどフリーフライト模型飛行機の飛ぶ領域の上限.
- 実機用の翼型はフリーフライト模型飛行機では性能が悪い --- モデラーの間では常識であった.
- 最近, 低レイノルズ数用の翼型の研究が盛んに行われている. = 火星飛行機, 小型無人機

レイノルズ数 = 粘性の影響を表す指標: $Re = 68460 \times VL$

速度 V (m/s), 長さ L (m)

定常滑空の状態



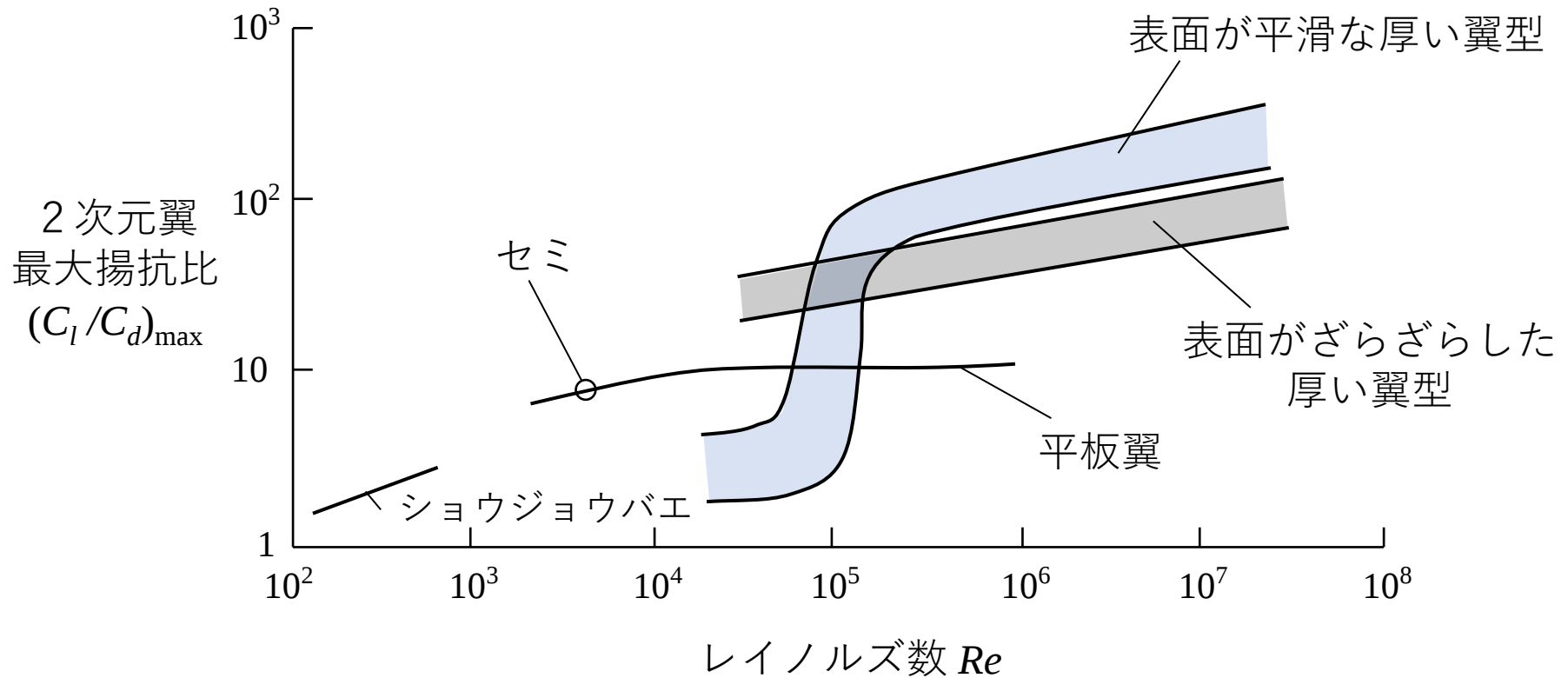
$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w C_D$$

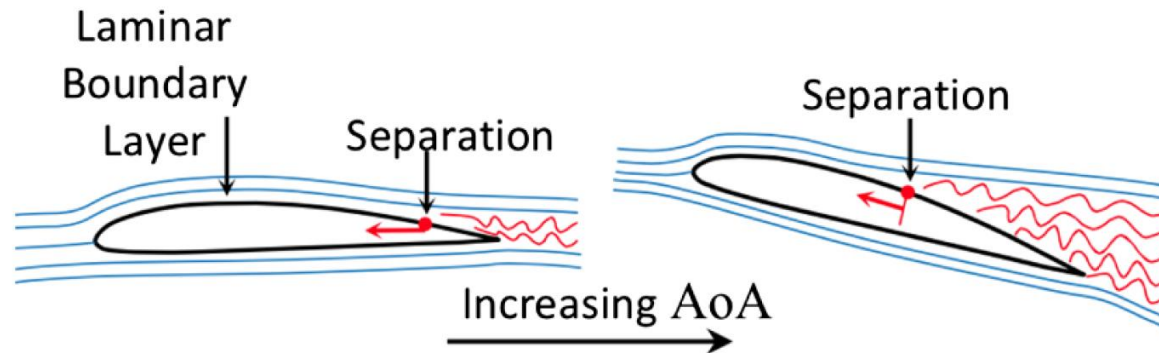
$$\gamma = \tan^{-1} \frac{D}{L} = \tan^{-1} \frac{C_D}{C_L} \cong \frac{C_D}{C_L}$$

$$\text{揚抗比} : \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

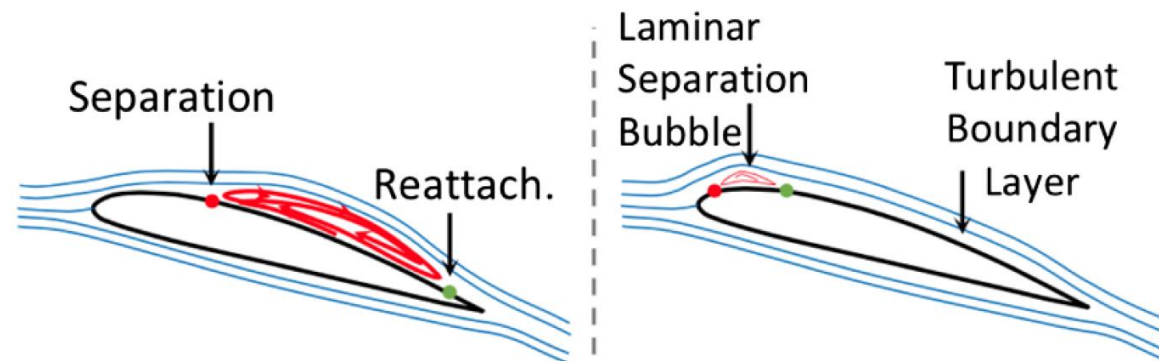
レイノルズ数と揚抗比の関係



レイノルズ数の違いによる剥離の様相の変化



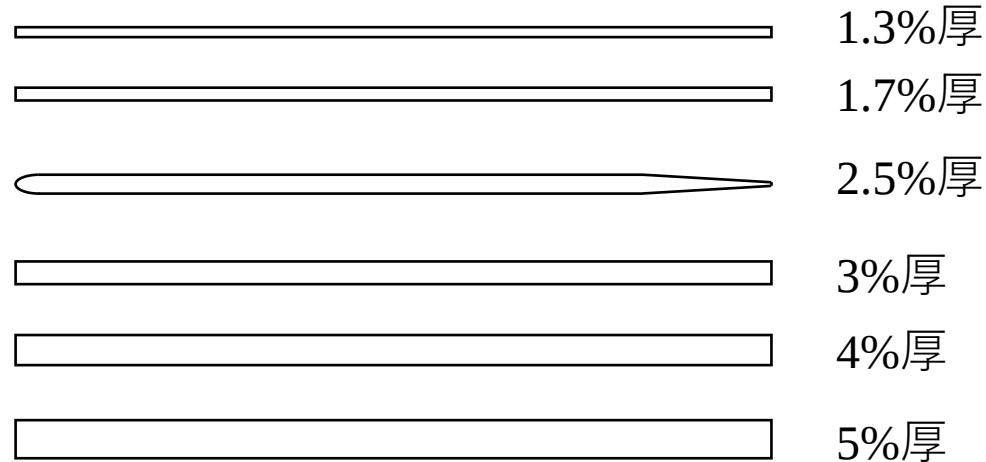
a) $10,000 < Re < 50,000$



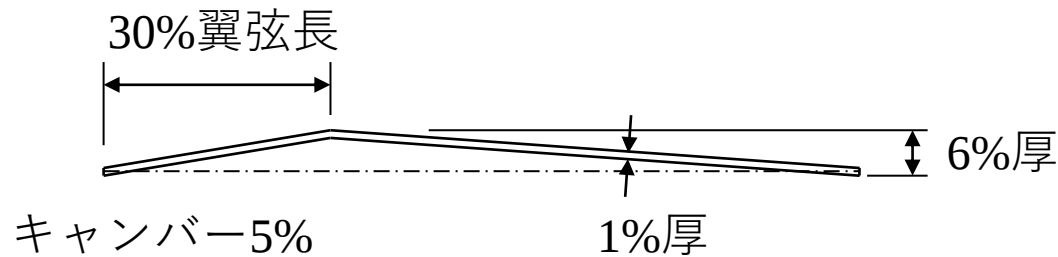
b) $50,000 < Re < 100,000$

c) $Re > 500,000$

低レイノルズ数における翼の性能比較

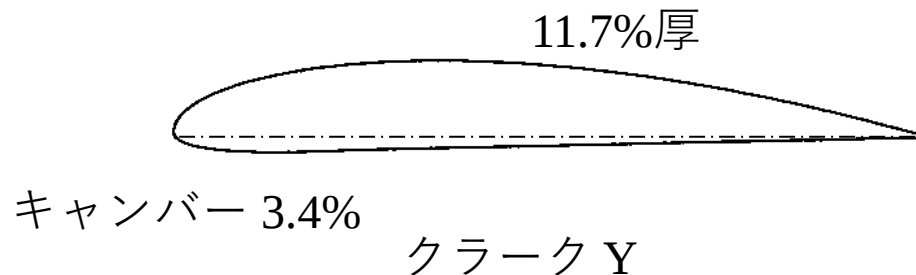
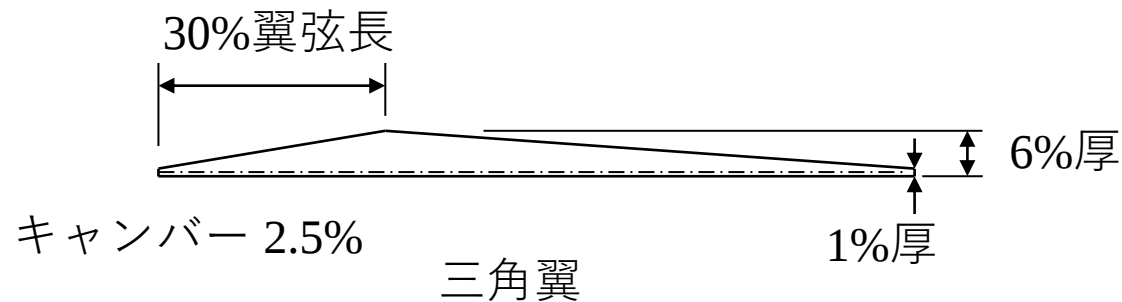
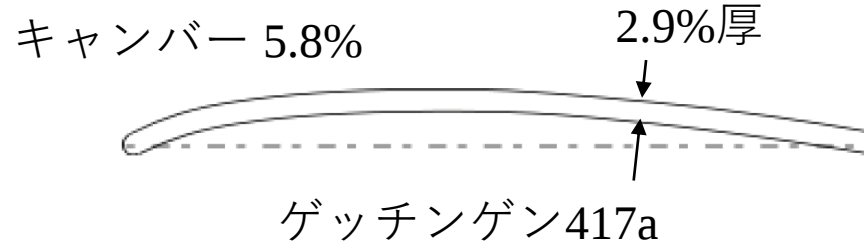


平板翼

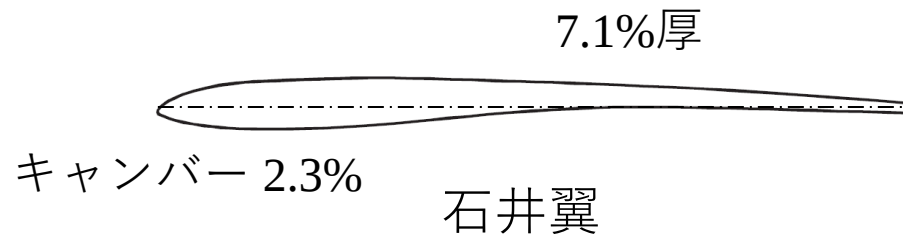


折り曲げ翼

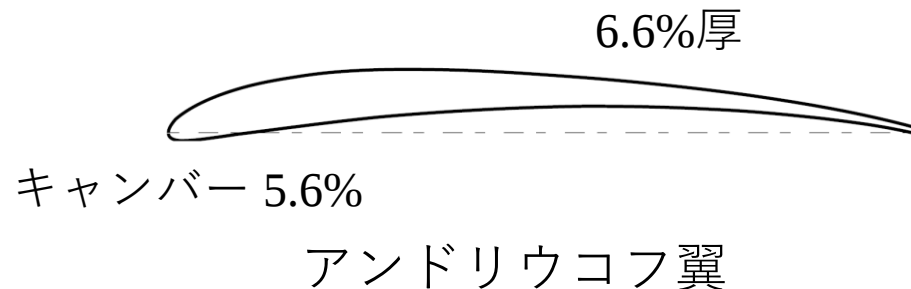
低レイノルズ数における翼の性能比較



低レイノルズ数における翼の性能比較

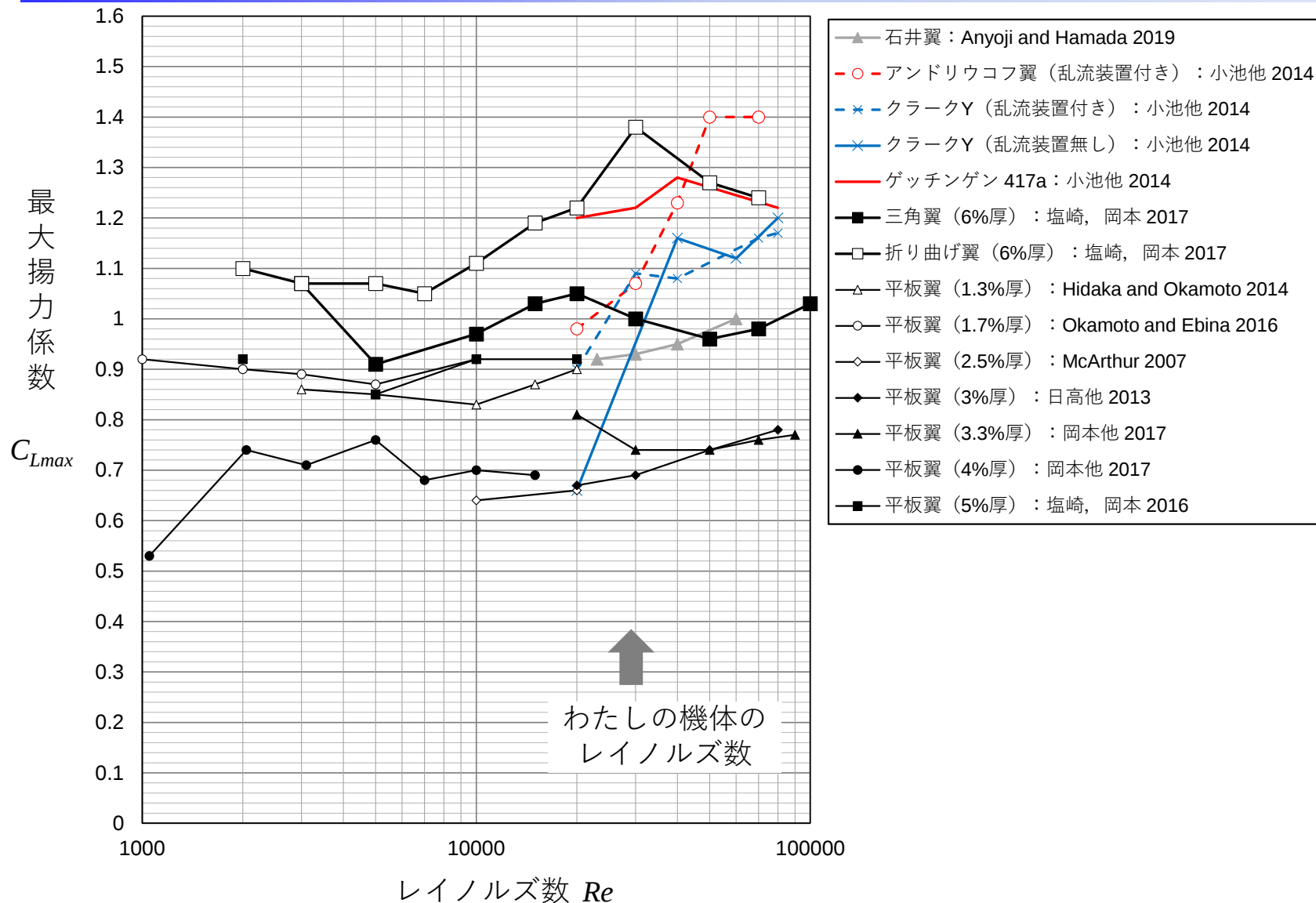


ハンドランチグライダー用翼型
高速発進時の低抵抗と滑空時の高揚抗比の両立

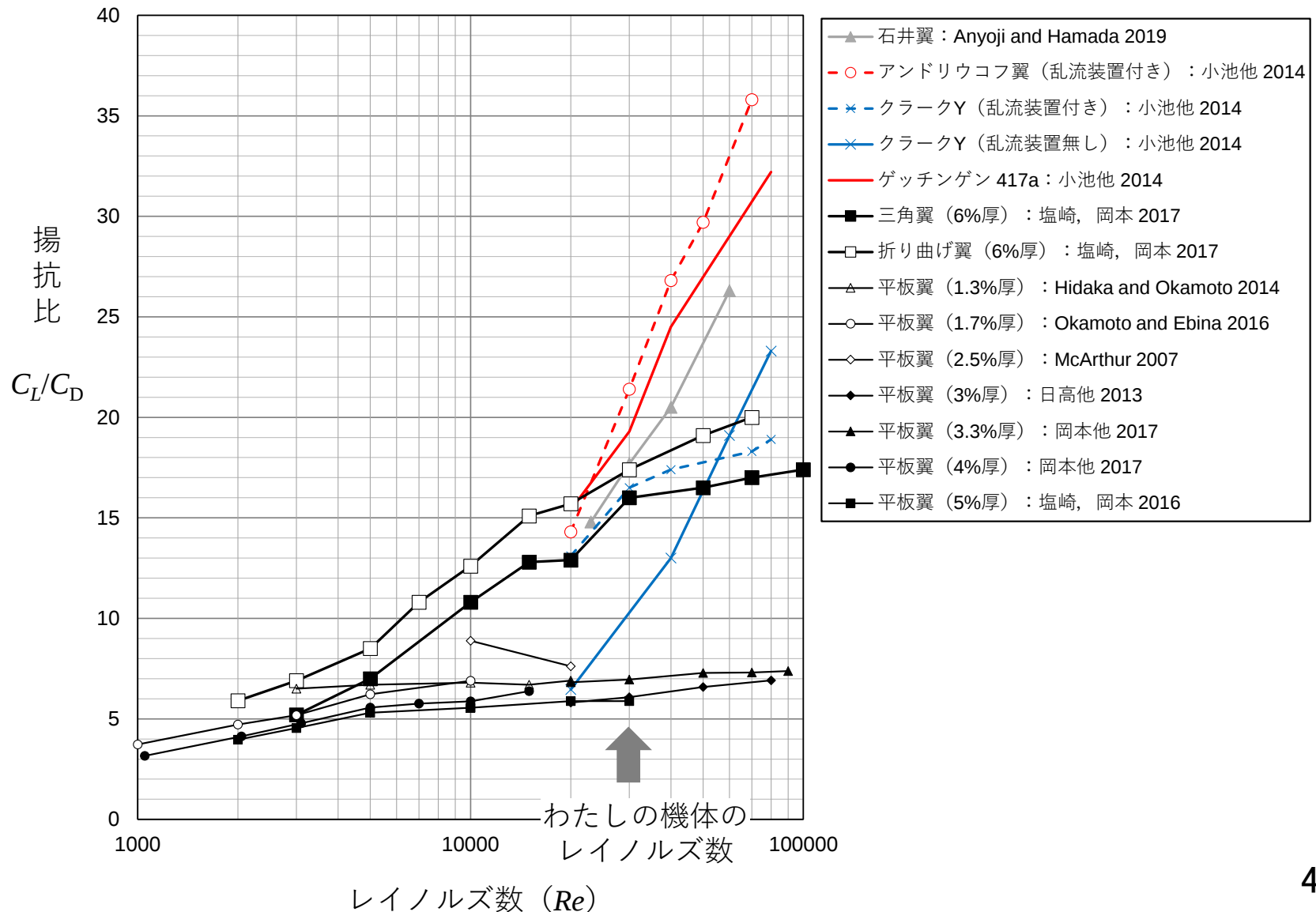


フリーフライト模型グライダー，ゴム動力機用翼型
高揚力係数，高揚抗比．乱流発生装置が必要

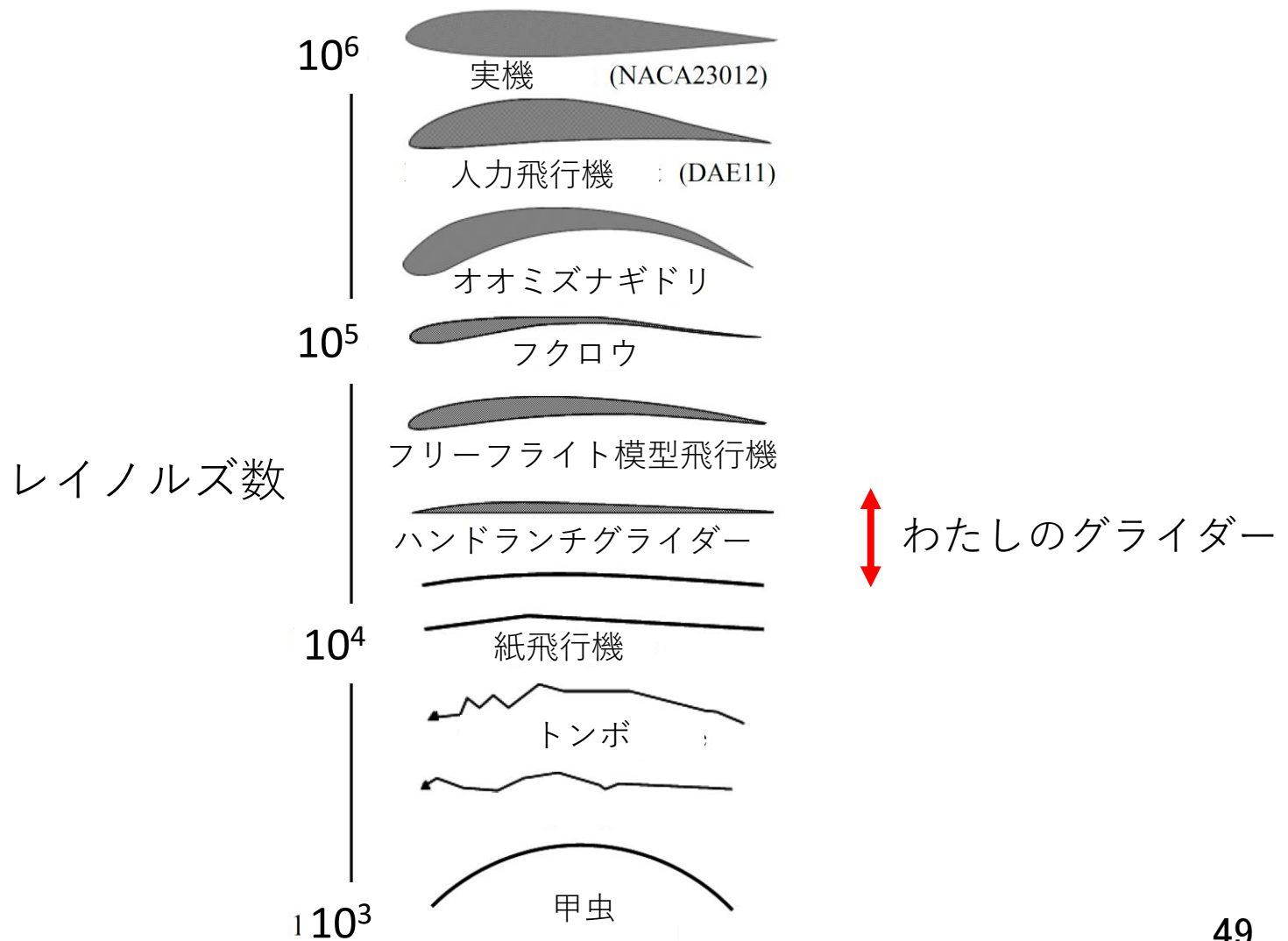
低レイノルズ数における翼の性能比較



低レイノルズ数における翼の性能比較



レイノルズ数と翼型



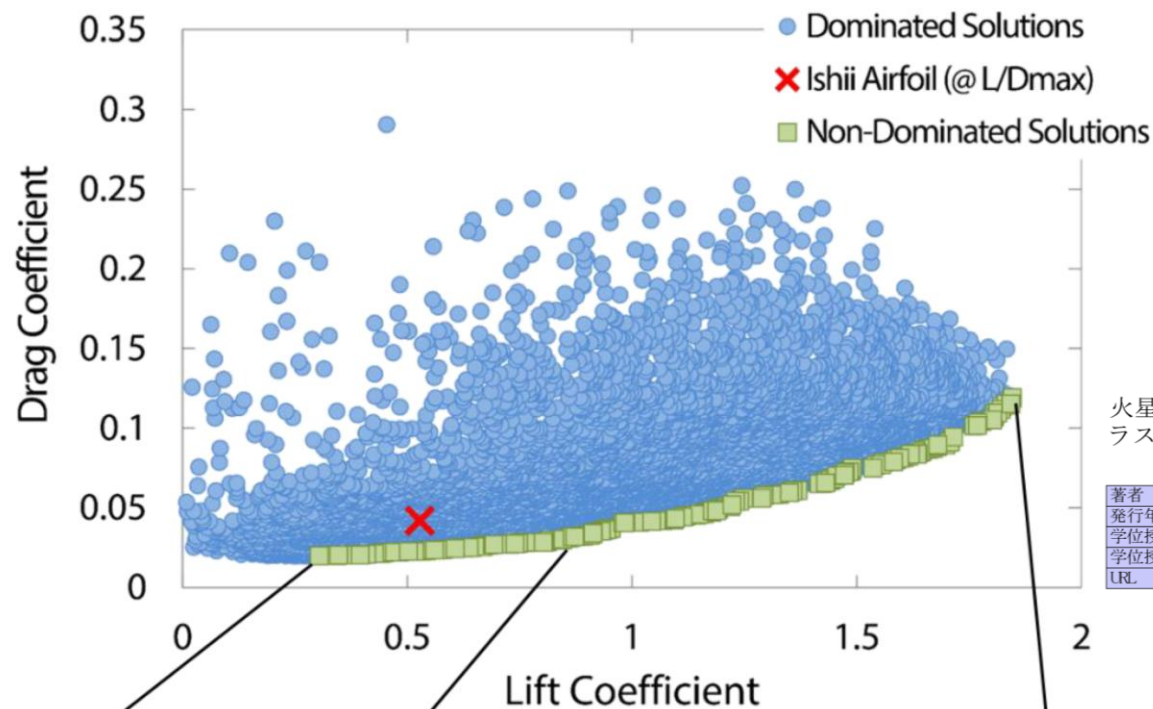
トンボの翅まわりの流れのようす



Figure 2-8 Dragonfly wing and captured vorticity [23].

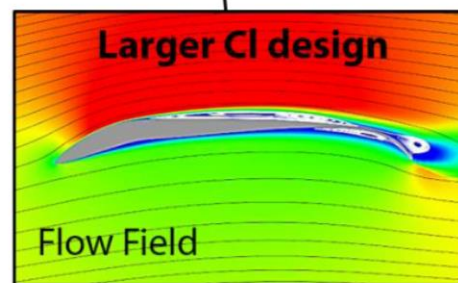
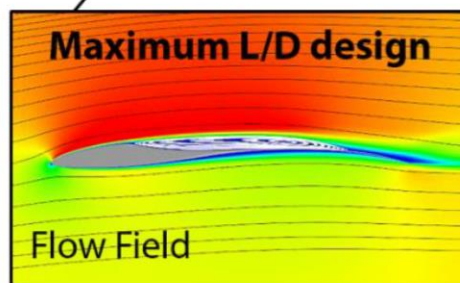
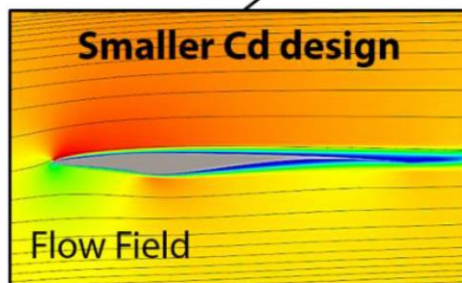
剥離泡によって自然に
高性能な翼型が形成さ
れる。

低レイノルズ数用の翼のまわりの流れ



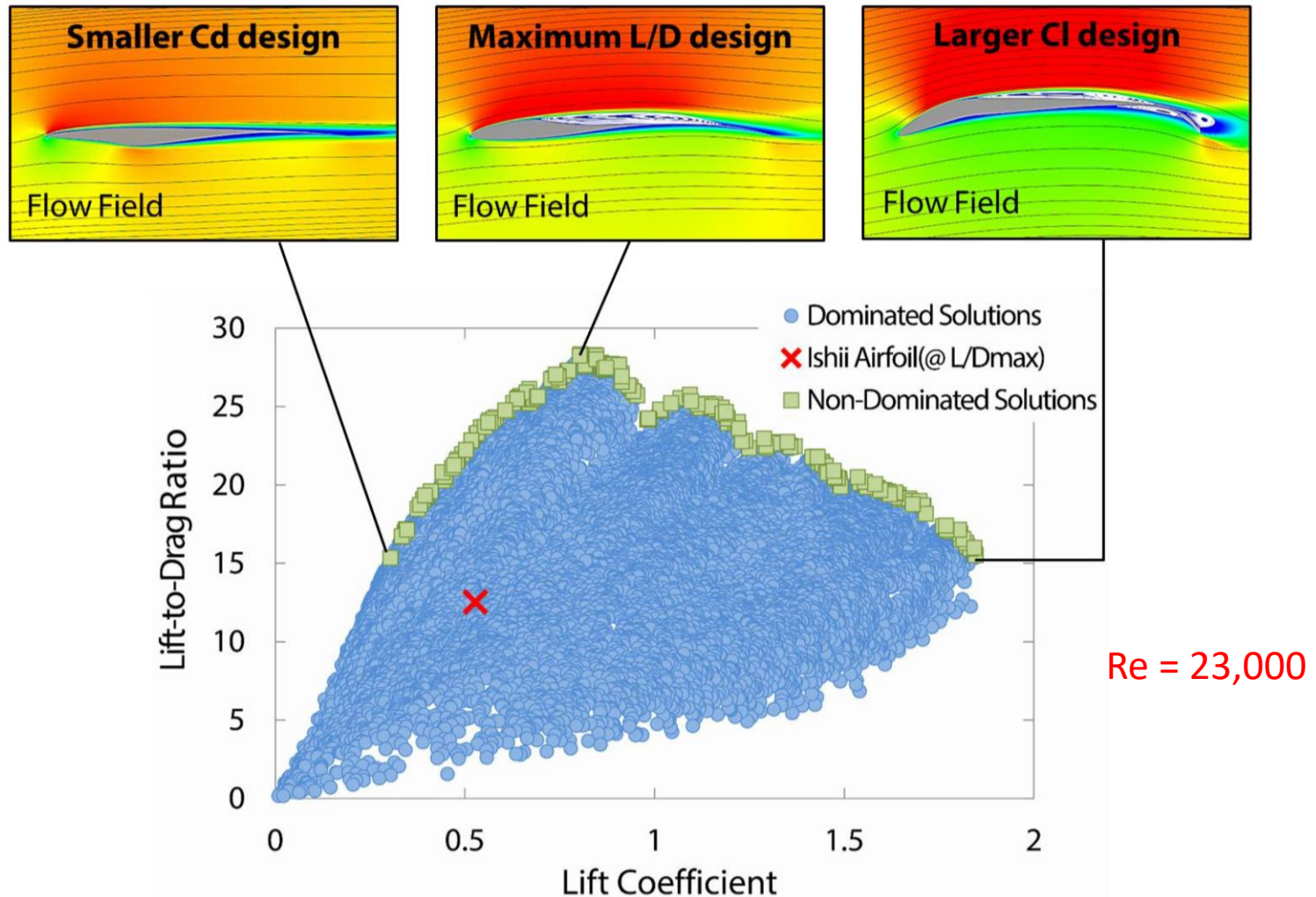
火星探査航空機主翼翼型の多目的最適設計探索とクラスタ分析を用いたデータマイニング

著者	佐々木 岳
発行年	2015-01
学位授与年度	平成26年度
学位授与番号	17104甲工第379号
URL	http://hdl.handle.net/10228/5443



(a) Lift Coefficient versus Drag Coefficient

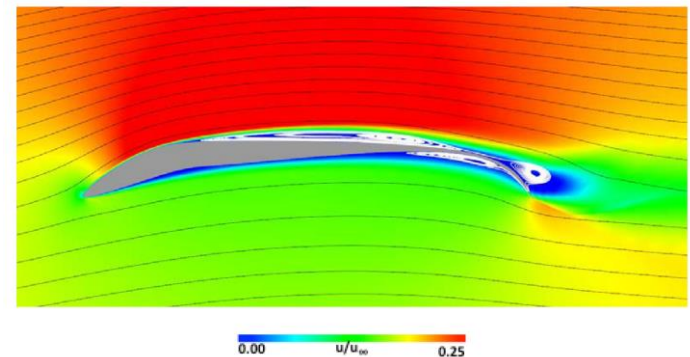
低レイノルズ数用の翼のまわりの流れ



(b) Lift-to-drag Ratio versus Lift Coefficient

低レイノルズ数で飛ぶグライダー用の翼型

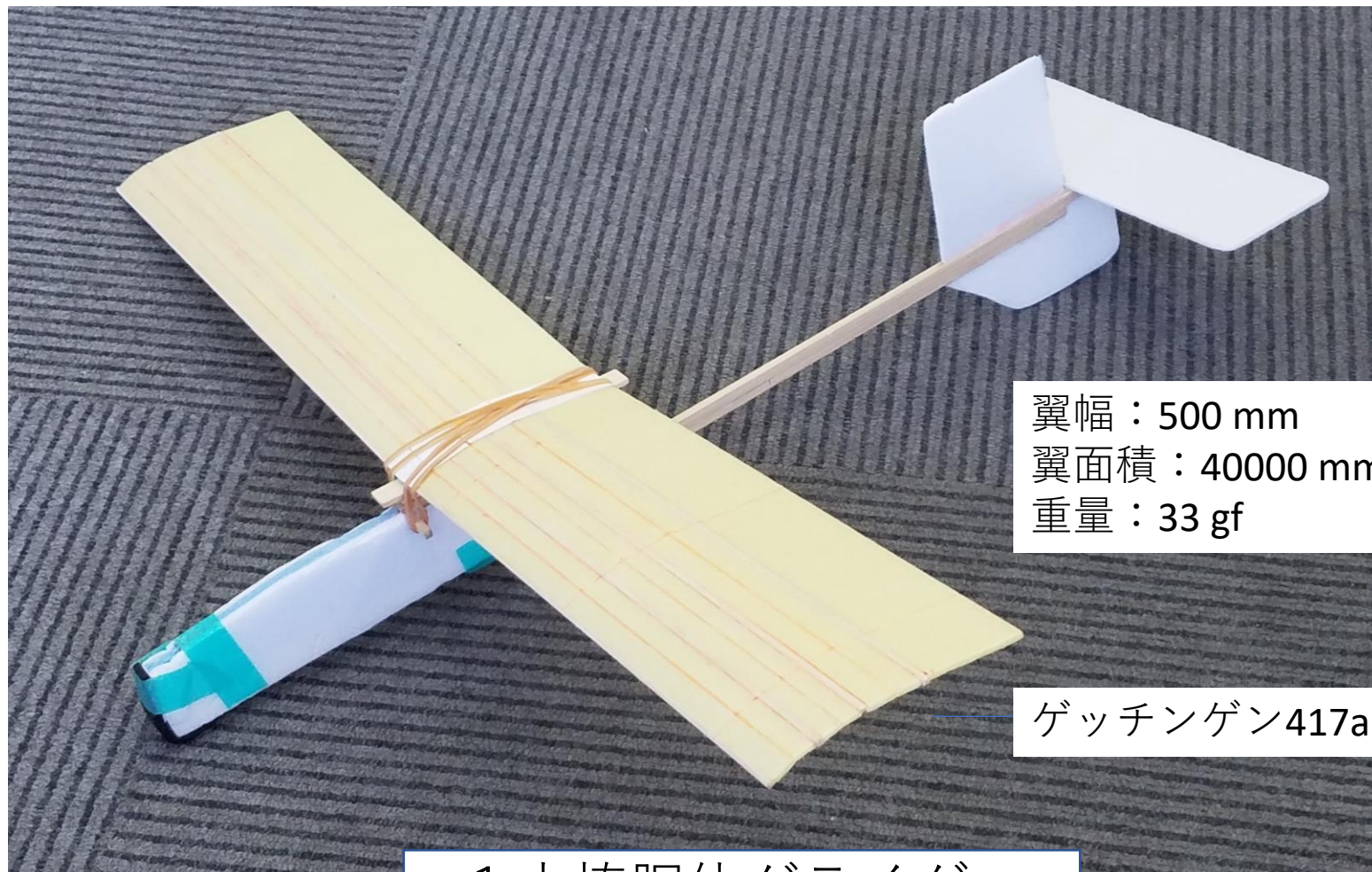
- 要求
 - 耐空時間を長くする
- 望まれる性能
 - 最大揚力係数が多い
 - $C_L^{3/2}/C_D$ が大きい ← 揚抗比ではない, C_L のほうが重要
 - フリーフライト模型飛行機の滑空時の揚力係数は0.6～0.8程度？
- レイノルズ数 20,000～40,000
 - 薄くて, 反りがある翼型がよい
 - ゲッチンゲン417a
 - 折り曲げ翼
 - 剥離泡を利用した高性能翼型の可能性



渦格子法による空力計算

- 空力微係数の計算
 - 縦の空力微係数 $\Rightarrow$ 滑空調整の模擬に使用
 - 横の空力微係数 $\Rightarrow$ 発進時の安定計算に使用
- 変わった形状の機体の空力微係数を計算することが可能
 - 縦の安定計算 $\Rightarrow$ 機体設計: 重心位置, 翼の取付角差
 - ビゲン, トビ, トビイカ, トンボのグライダー等
- 「AVL」という無料のソフトウェアがある.

渦格子法による縦の空力微係数の計算

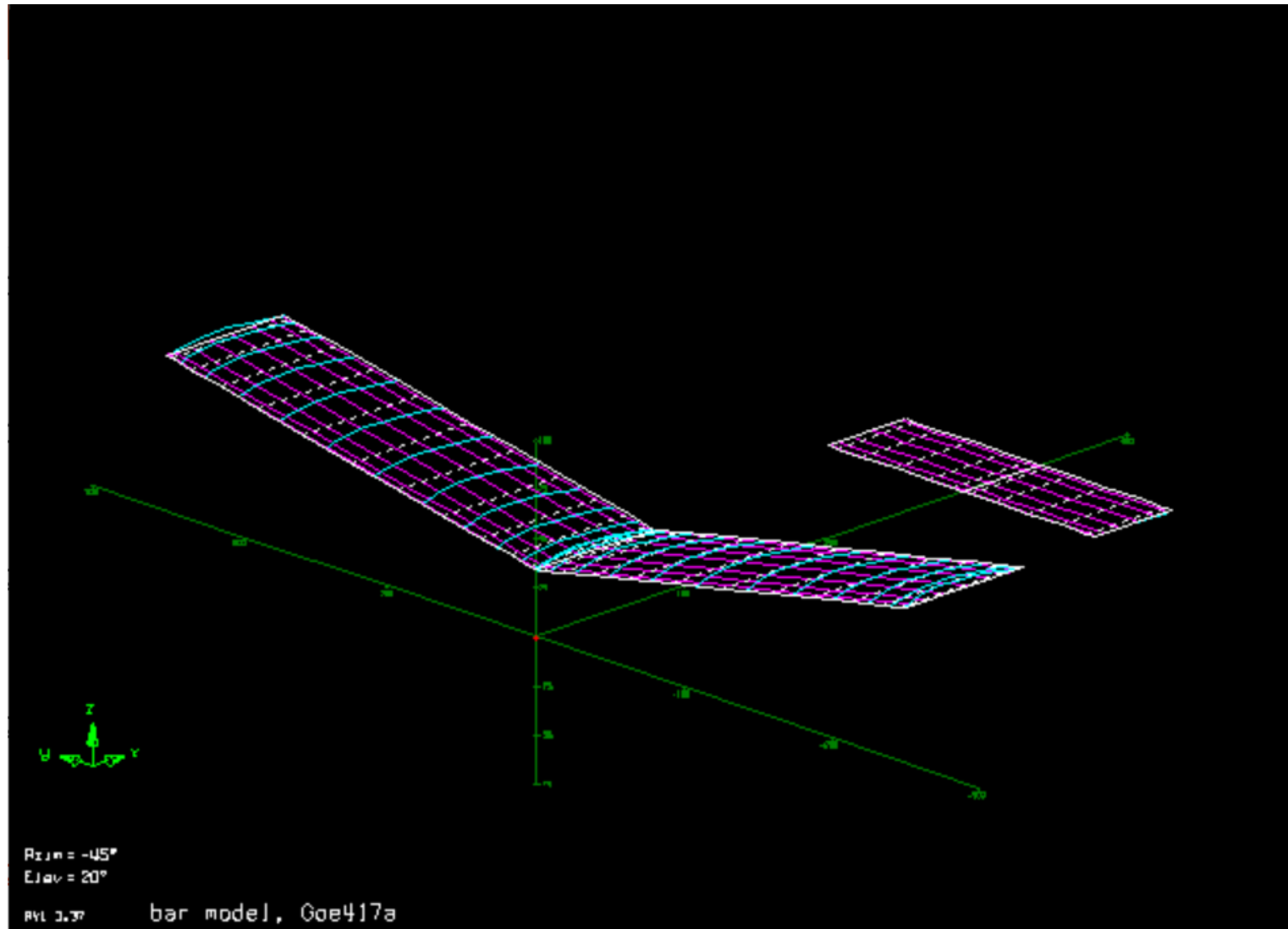


翼幅：500 mm
翼面積：40000 mm²
重量：33 gf

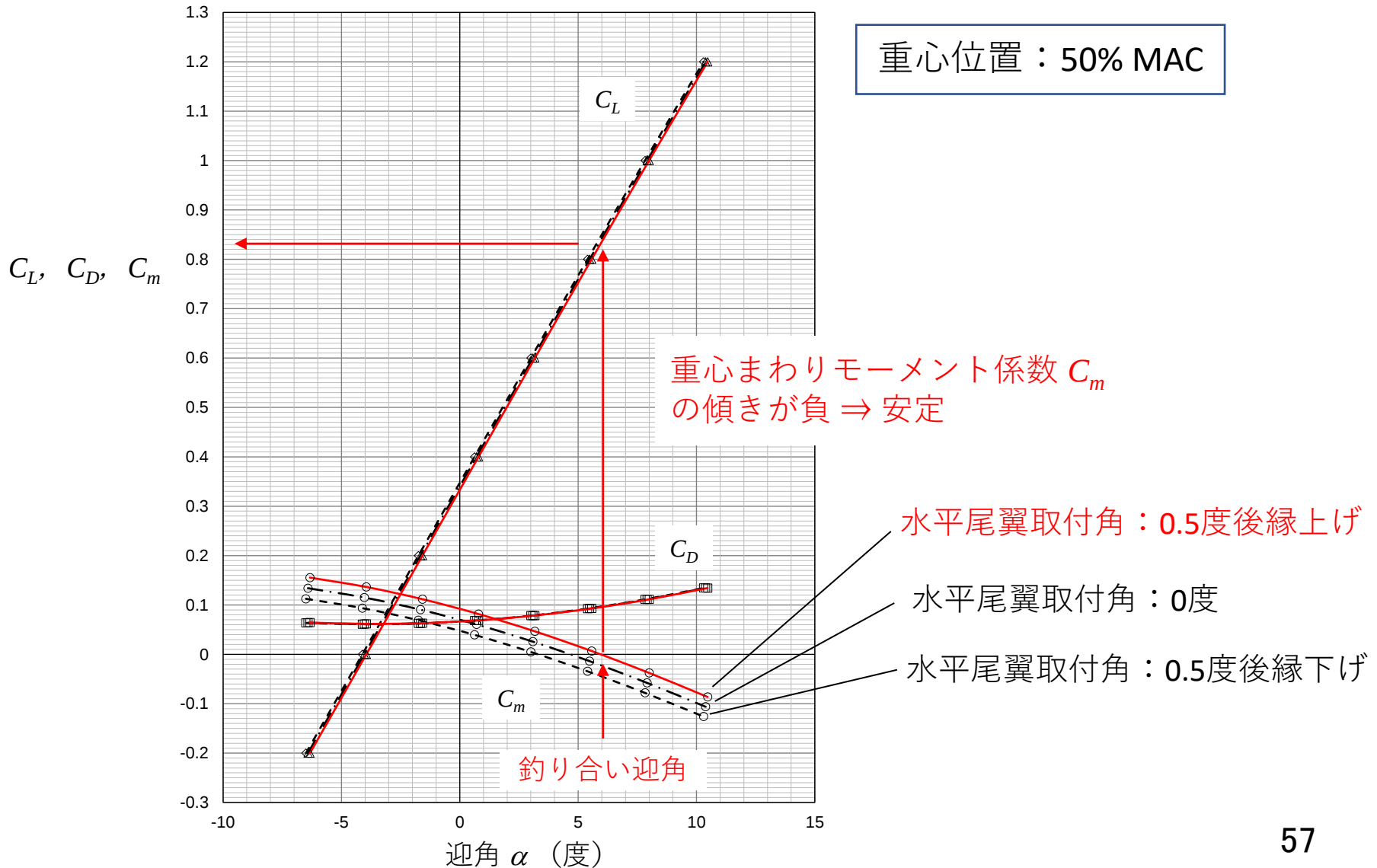
ゲッチンゲン417a 翼型

1 本棒胴体グライダー

AVL解析モデル - 1本棒胴体グライダー

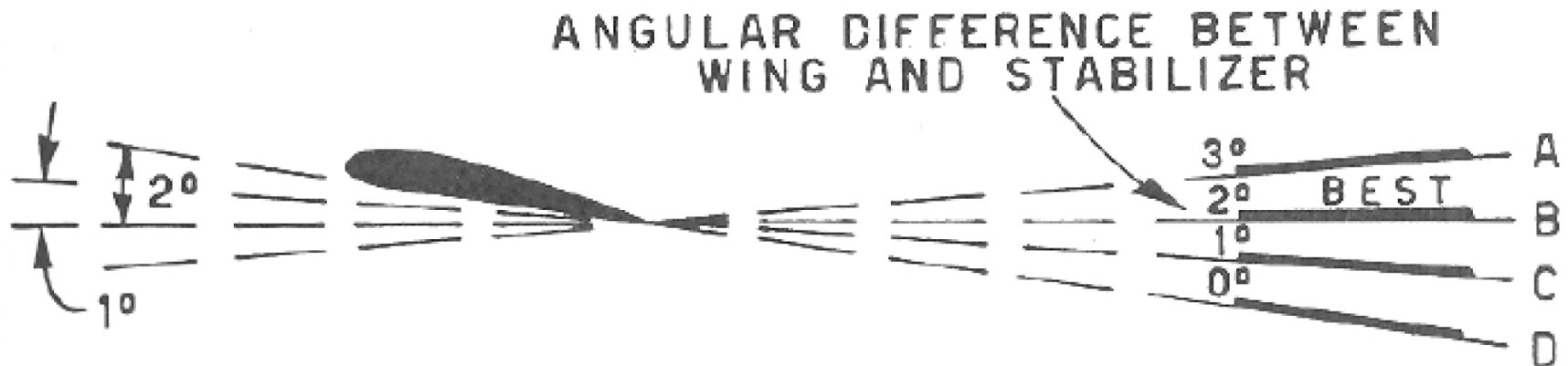


縦の空力係数 - 性能, 安定

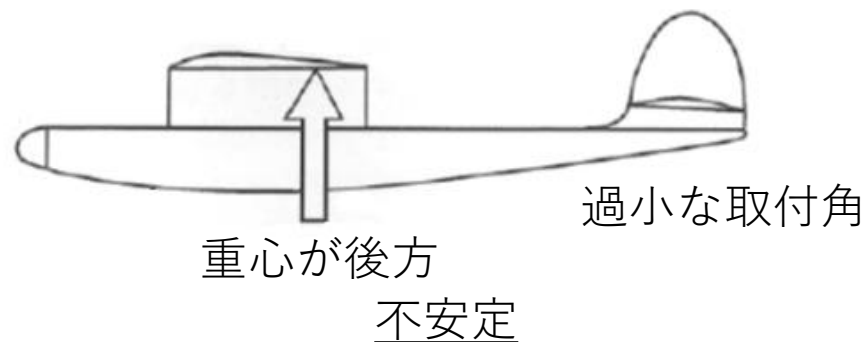
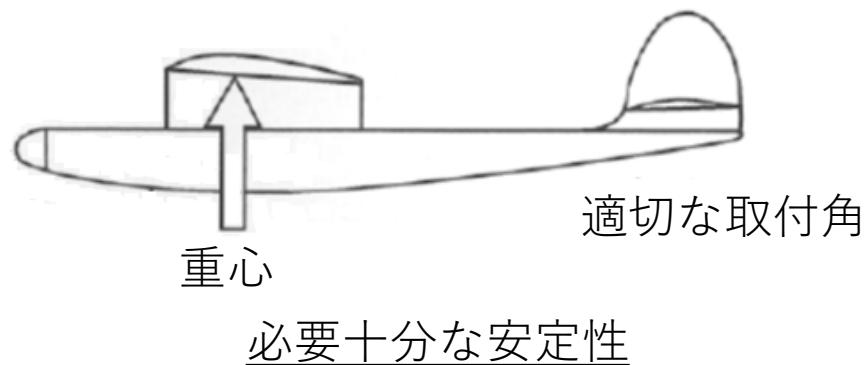
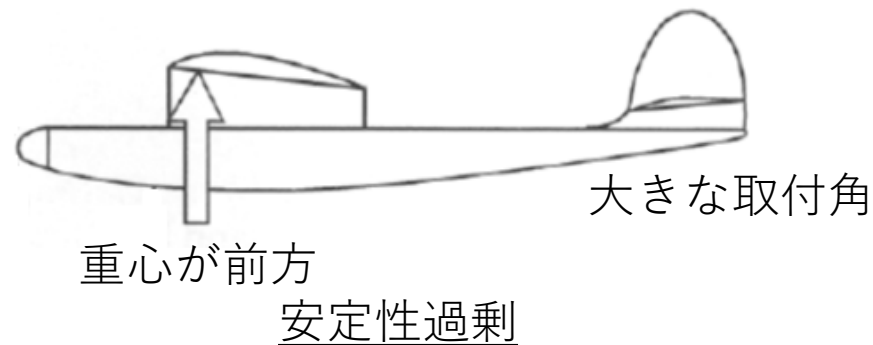


縦の安定性と釣り合い

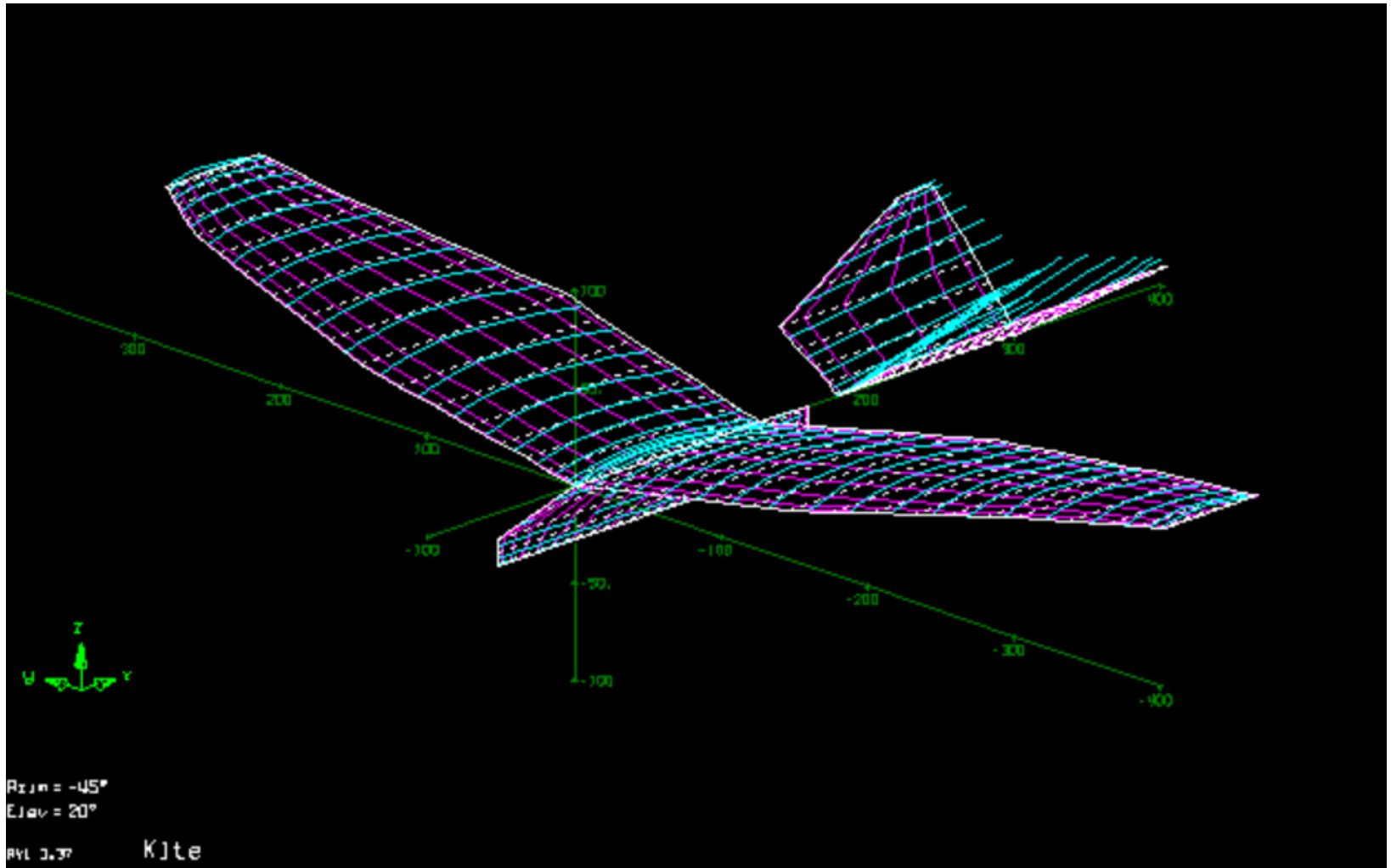
- 縦の安定性に重要なパラメータ
 - 重心位置 $\Rightarrow C_m$ の傾き (安定性の強さ) を決める
- 縦の釣り合いのパラメータ
 - 主翼と水平尾翼の取付角差 $\Rightarrow$ 釣り合い迎角を決める
 - (操縦する機体では, エレベータ舵角)



縦の安定性と釣り合いの関係



トビのグライダーのAVL解析モデル



研究課題

研究課題

- 滑空調整の方法
 - 従来の説明は正しいのか？
- 縦の安定と性能
 - 揚力尾翼の効果
 - 水平尾翼の大きさ
- ハイスタート発進の力学
 - 適正なゴムの強さ
 - 適正なゴムと糸の長さの比率
 - 安定性:フックの位置, 垂直尾翼の大きさ, 胴体側面積
 - エネルギーによる考察
- 飛行実験
 - 画像解析による飛行軌跡データの取得
 - 今後: 小型センサーの利用

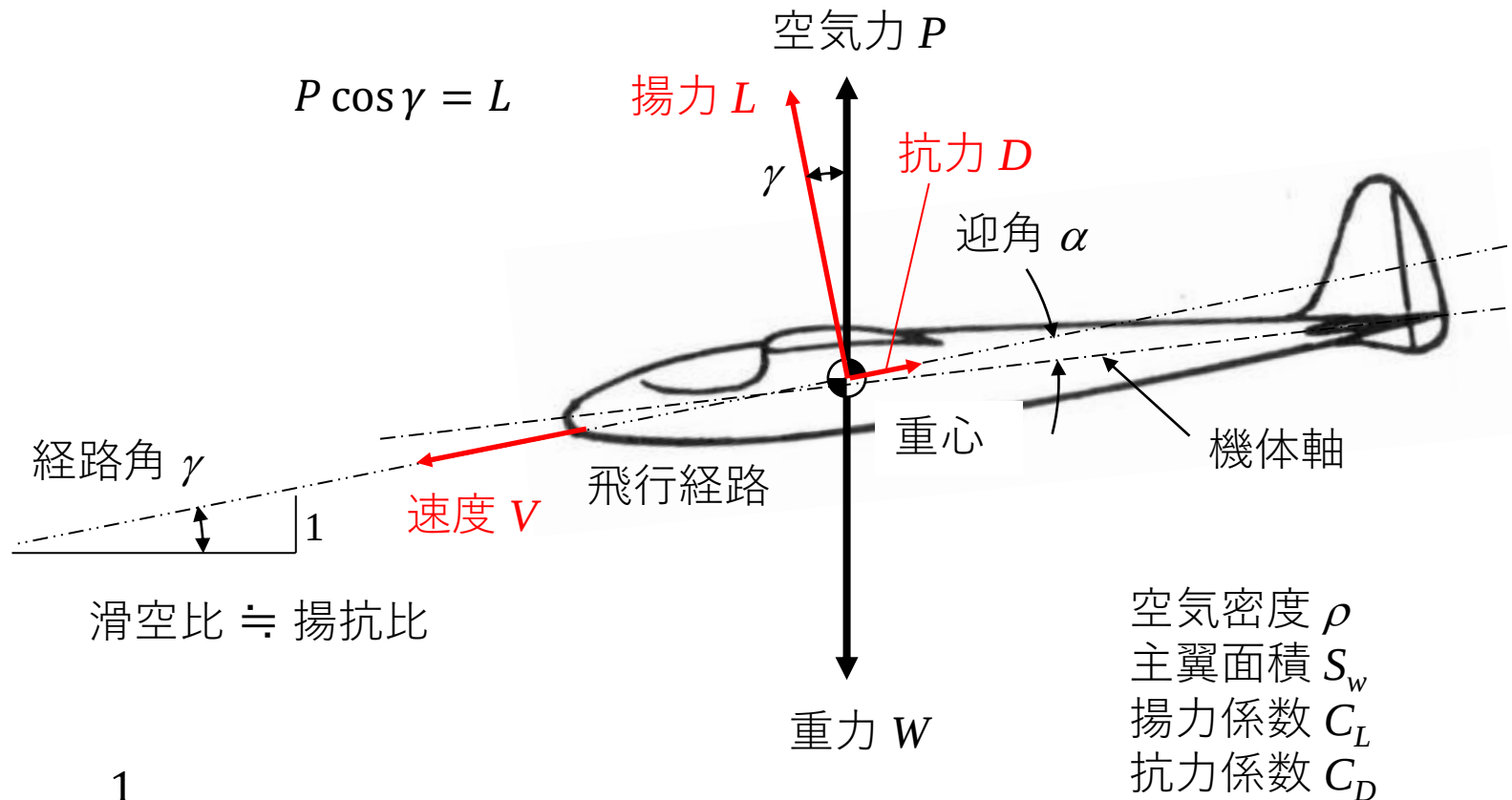
研究課題

滑空調整

滑空調整について

- 滑空調整の目的
 - 曲がらず, 真っ直ぐに飛ぶようにする.
 - 適切な迎角(=滞空時間最大になる迎角)で飛ぶように水平尾翼取付角を設定する.
 - 適切な安定性をもつように重心位置を設定する.
- 縦の釣り合いを決める変数
 - 重心位置
 - 主翼と水平尾翼の取付角の差

定常滑空の状態



$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_w C_D$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{D}{L} = \tan^{-1} \frac{C_D}{C_L} \cong \frac{C_D}{C_L}$$

$$\text{揚抗比} : \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

定常滑空の状態

経路角： $\gamma = \tan^{-1} \frac{C_D}{C_L}$

滑空速度： $V = \sqrt{\frac{2W \cos \gamma}{\rho S_w C_L}}$

水平速度： $V_H = V \cos \gamma$

沈下速度： $V_V = V \sin \gamma$

ここで、

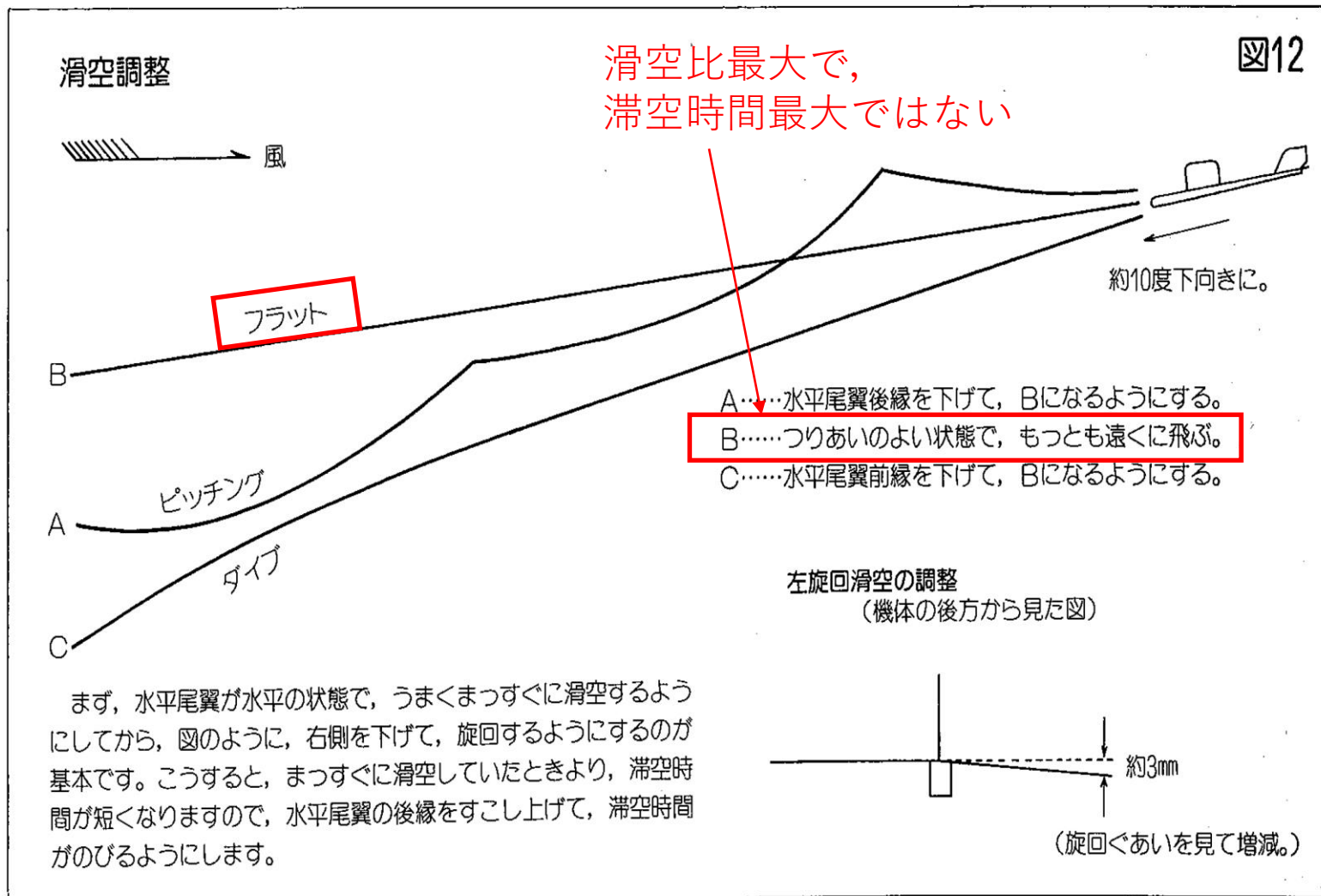
W ：機体重量， S_w ：主翼面積

W/S_w ：翼面荷重

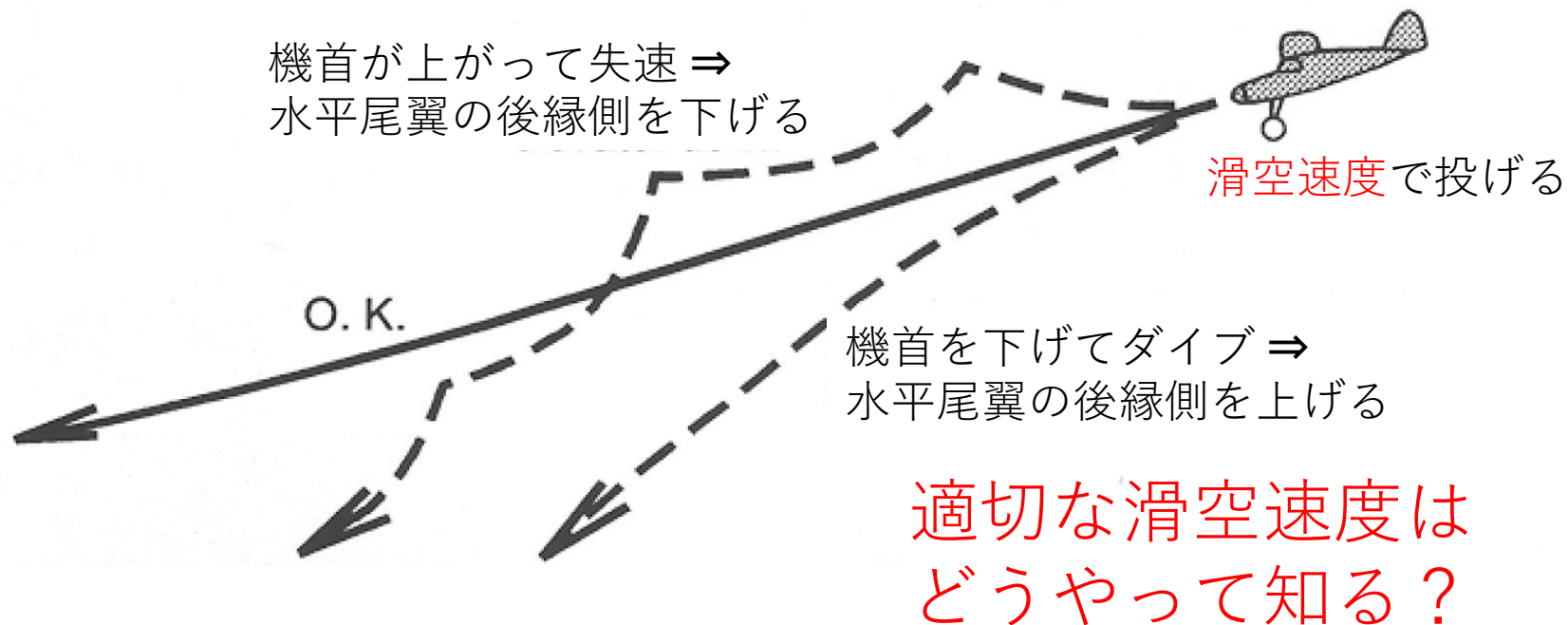
ρ ：空気密度



滑空調整の説明の例1



滑空調整の説明の例2



GET THAT CG RIGHT

A first step in trimming free-flight models

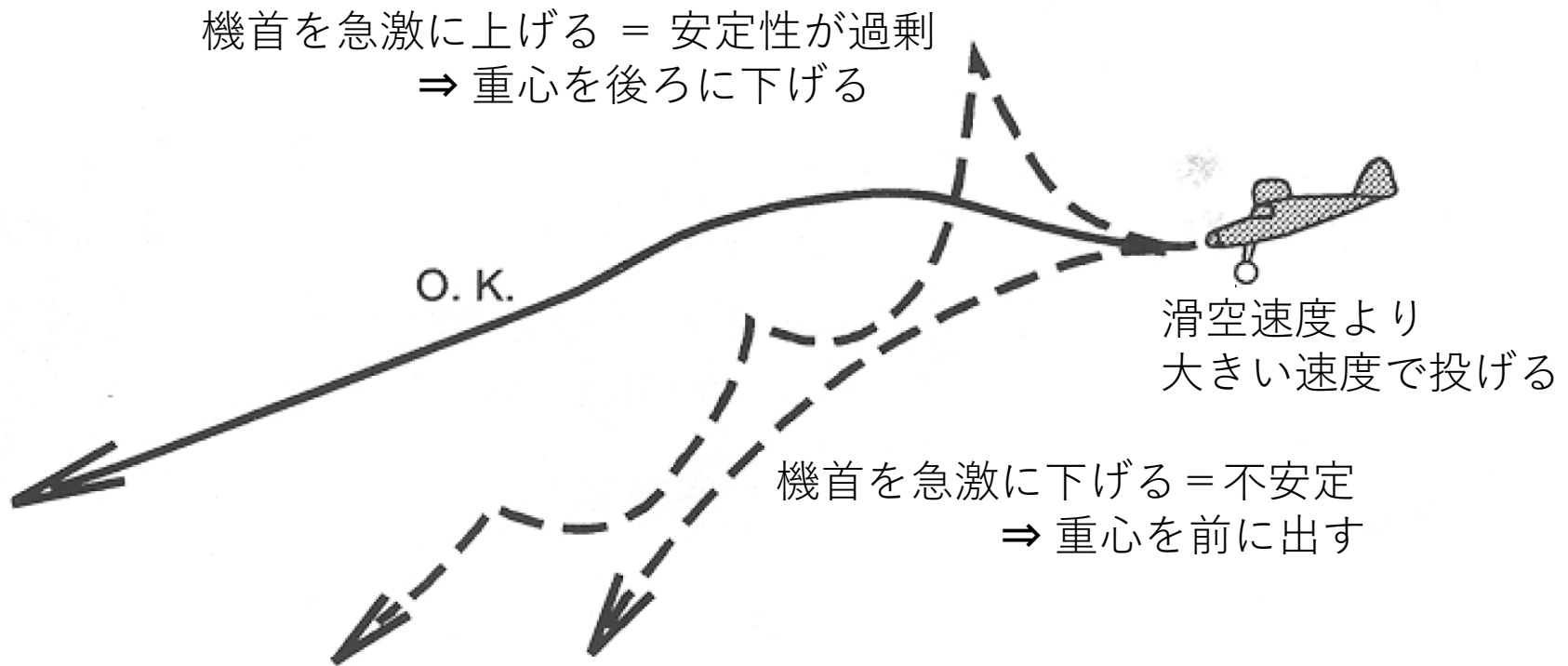
by Don Srull 9/06

An Article published in the September 2006 issue of MaxFax,
the journal of the DC Maxecuters, Stew Meyers, Editor

滑空調整の理解

- 重心位置は設計で決定済み = 適切な縦安定
 - 重心位置を調節(変更)するのはよくない.
- 滑空調整で調節するのは, 翼の取付角差 = 釣り合い迎角
- 翼の取付角差をどのような値にセットしても, それに対応する定常滑空の釣り合い迎角, 経路角, 滑空速度がある.
 - 「滑空調整の説明の例1」のピッチングやダイブをするのは, 投げたときの経路角と速度がよくないだけ.
 - 適切な初期条件で投げれば定常滑空する. 適切な初期条件を知るには?
 - 適切な初期条件で投げない場合は?
- どの定常滑空状態を選ぶかが問題 ⇒ 判断基準は?

縦の安定性の調整の説明



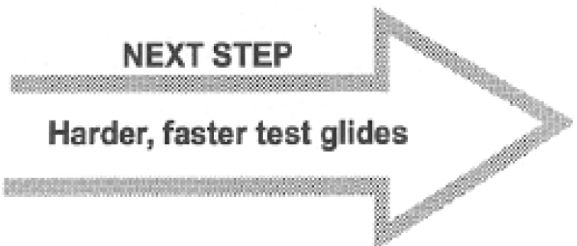
GET THAT CG RIGHT

A first step in trimming free-flight models
by Don Srull 9/06

*An Article published in the September 2006 issue of MaxFax,
the journal of the DC Maxecuters, Stew Meyers, Editor*

縦の釣り合いの調整

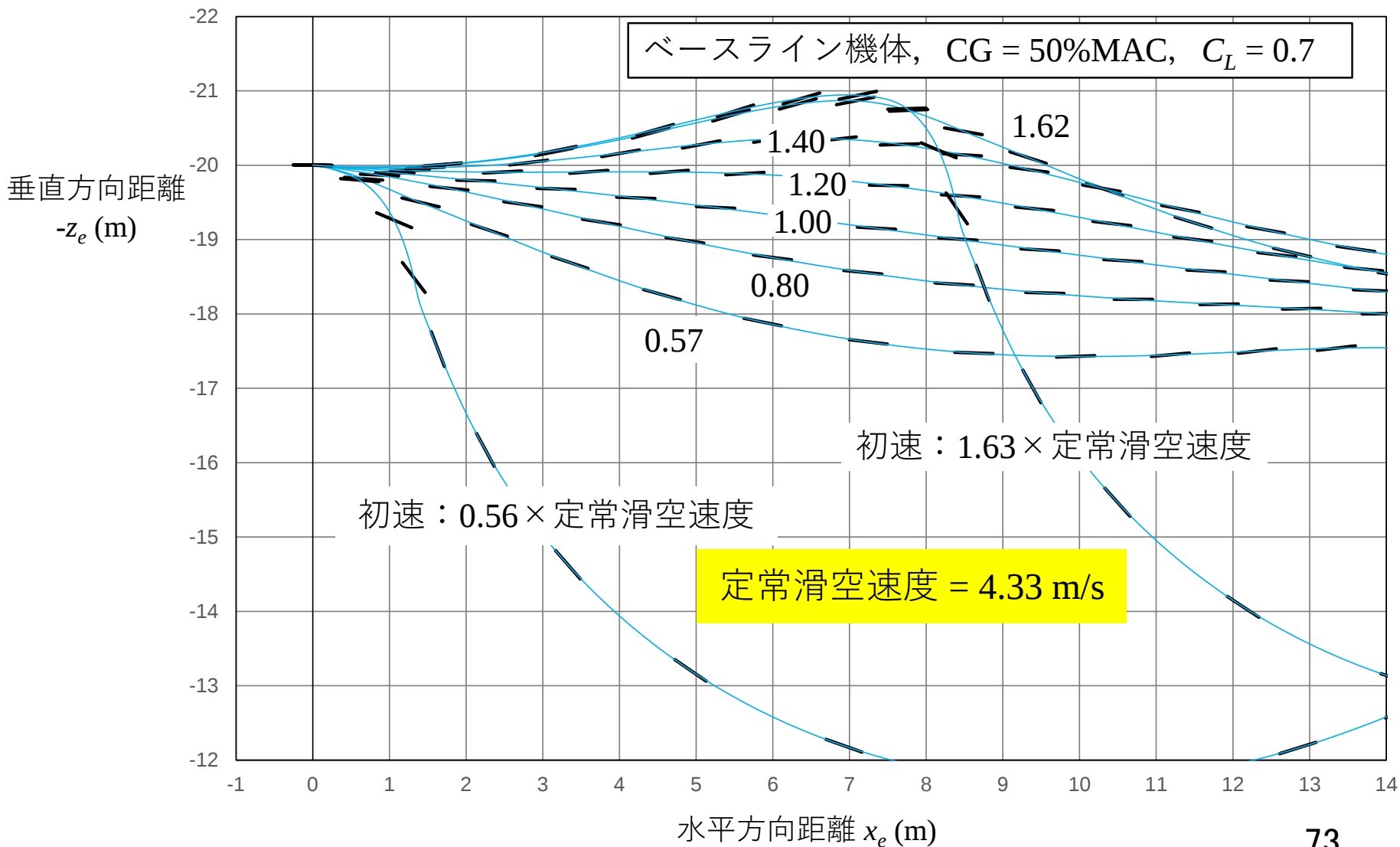
Table 1 Summary of process for finding suitable C.G. and incidence angular differences

	<u>Glide Result</u>	<u>Adjustment</u>
INITIAL STEP  Test glides at slow, normal flight speeds	Stalls Dives Smooth, good glide	Bend elevator trailing edge down Bend elevator trailing edge up Go to next step
NEXT STEP  Harder, faster test glides	Zooms or tends to loop Model dives or nose tucks under Model climbs slightly & glides smoothly	Move C.G. rearward and repeat slow glides Move C.G. forward and repeat slow glides Finished; go to power tests

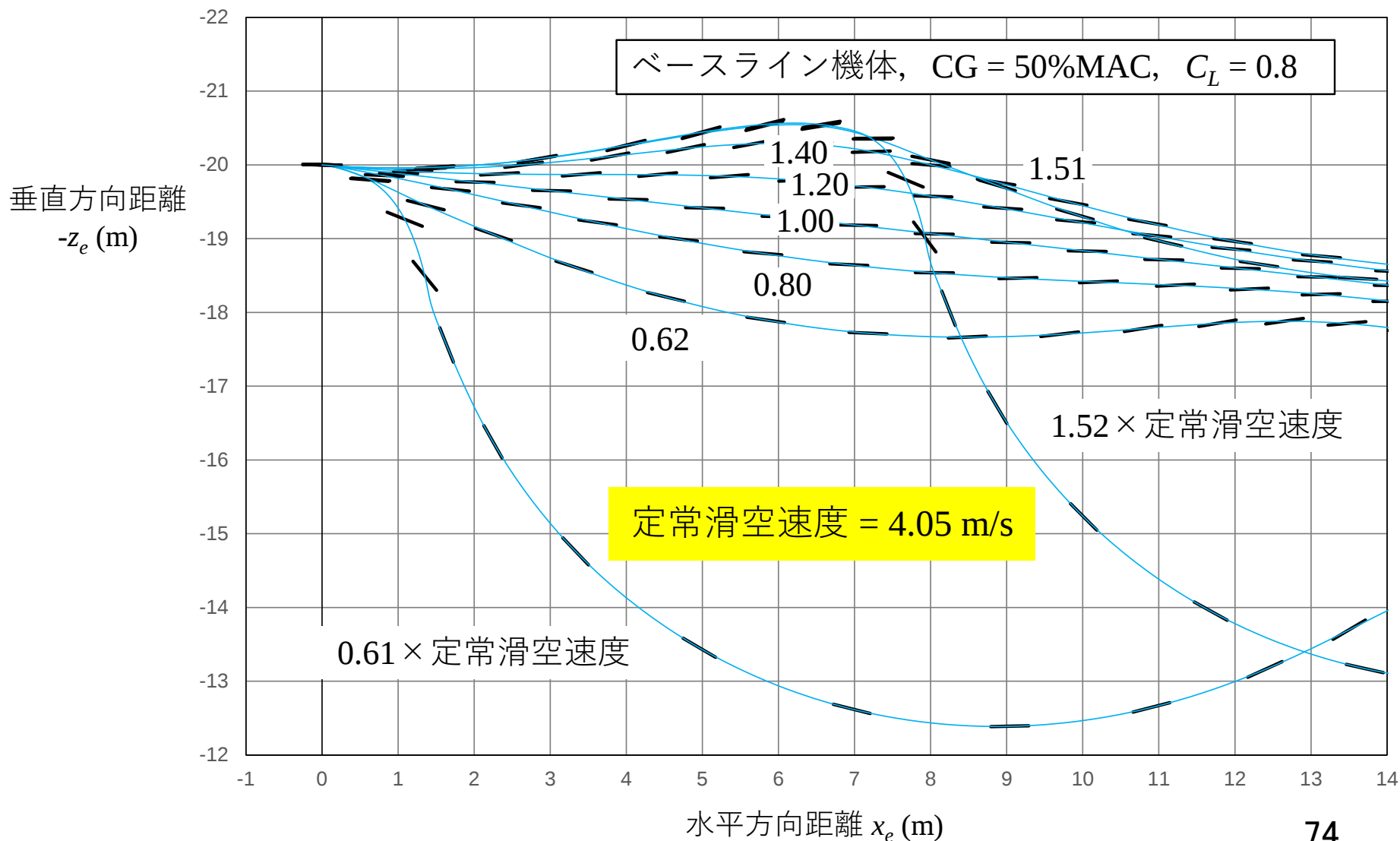
滑空調整の正しい方法は？

- 縦の運動計算をして検討する.
 - 運動計算
 - Octaveを使って微分方程式を解く
 - 空力係数の計算
 - AVL(渦格子法ソフト)を使って縦の空力微係数を計算する
- 滑空調整飛行の模擬計算を実施

縦の運動計算の例 - 滑空調整飛行の模擬1



縦の運動計算の例 - 滑空調整飛行の模擬2



研究課題

ハイスタート発進の解析

ハイスタート発進の解析法

- ハイスタート発進の解析の目的
 - 2次元解析
 - 必要なゴムの強さ, ゴムと糸の長さ
 - 機体諸元と到達高度の関係
 - ゴムの長さで糸の長さの適正な比率は？
 - 機体に作用する荷重倍数
 - 3次元解析
 - 適切なフックの位置を決めるには？
 - 横の安定性
 - 垂直尾翼の大きさ
 - 上反角の大きさ
 - 胴体の側面積

ハイスタート解析

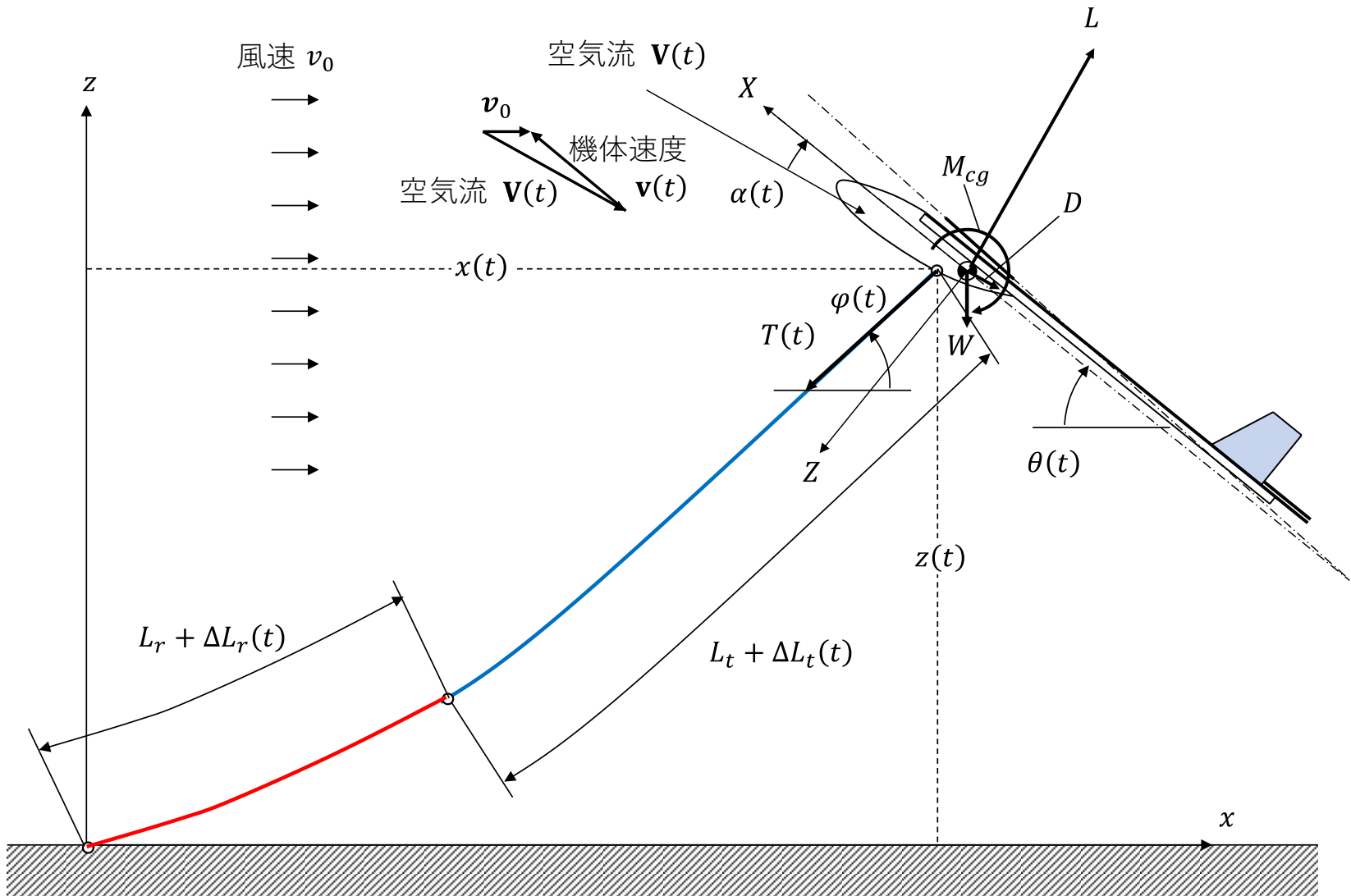
- 仮定

- ゴムと糸の伸びと張力を考慮する.
- ゴムの伸びと張力の関係は実験データに基づく(非線形).
- ゴムと糸の重量によるたわみを考慮する.
- ゴムと糸に作用する空気力は無視する.
- 目印の空気抵抗と重量を考慮する.
- 機体の運動は地面に垂直な平面内であるとする. したがって, 縦の運動だけを考える.
- ゴムと糸のたわみ, 伸び, 張力の関係式は非線形偏微分方程式であるので, エネルギー法を使って計算する.

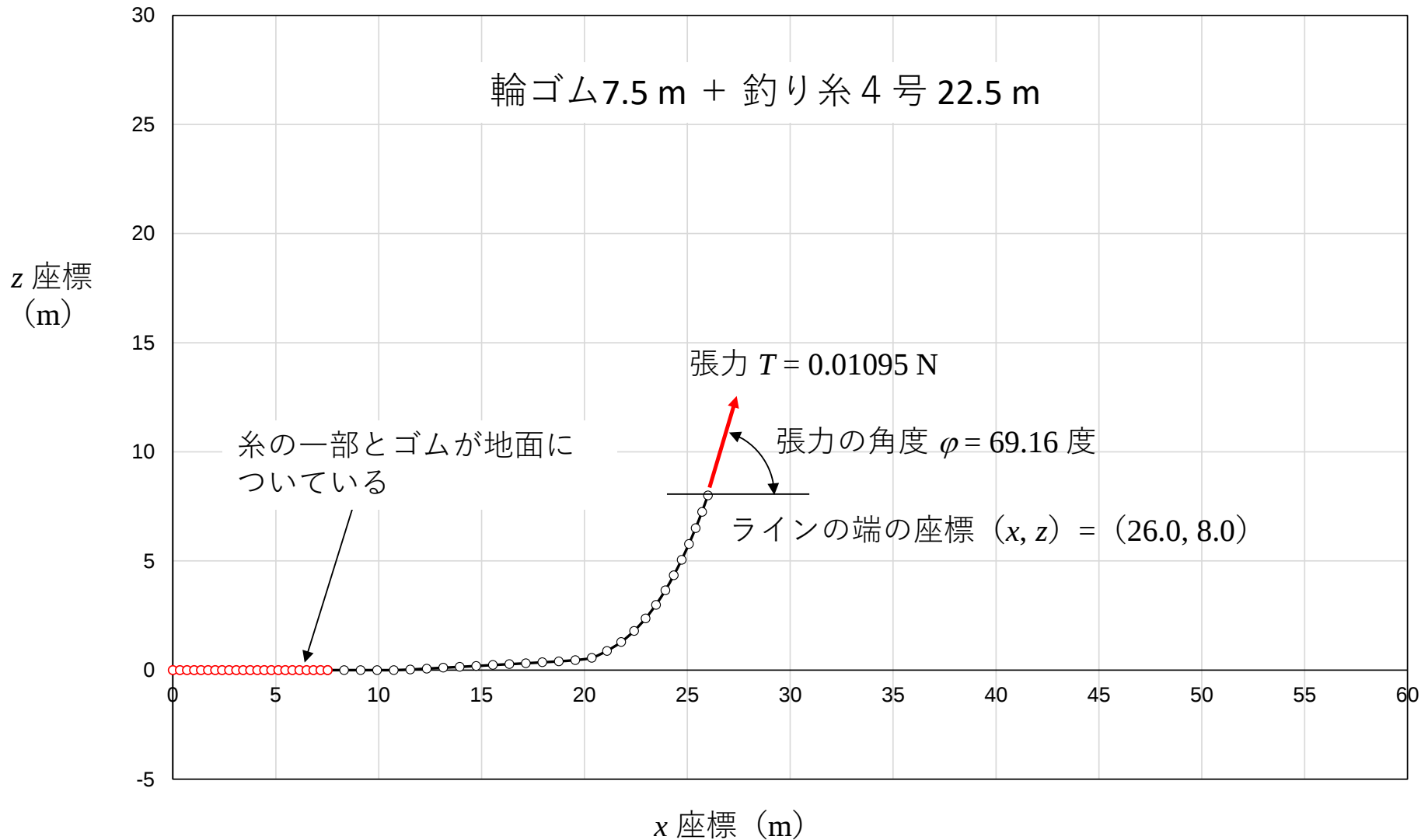
- 2次元運動方程式をOctaveで解いた.

⇒ 今後: 飛行実験による解析の妥当性の検証

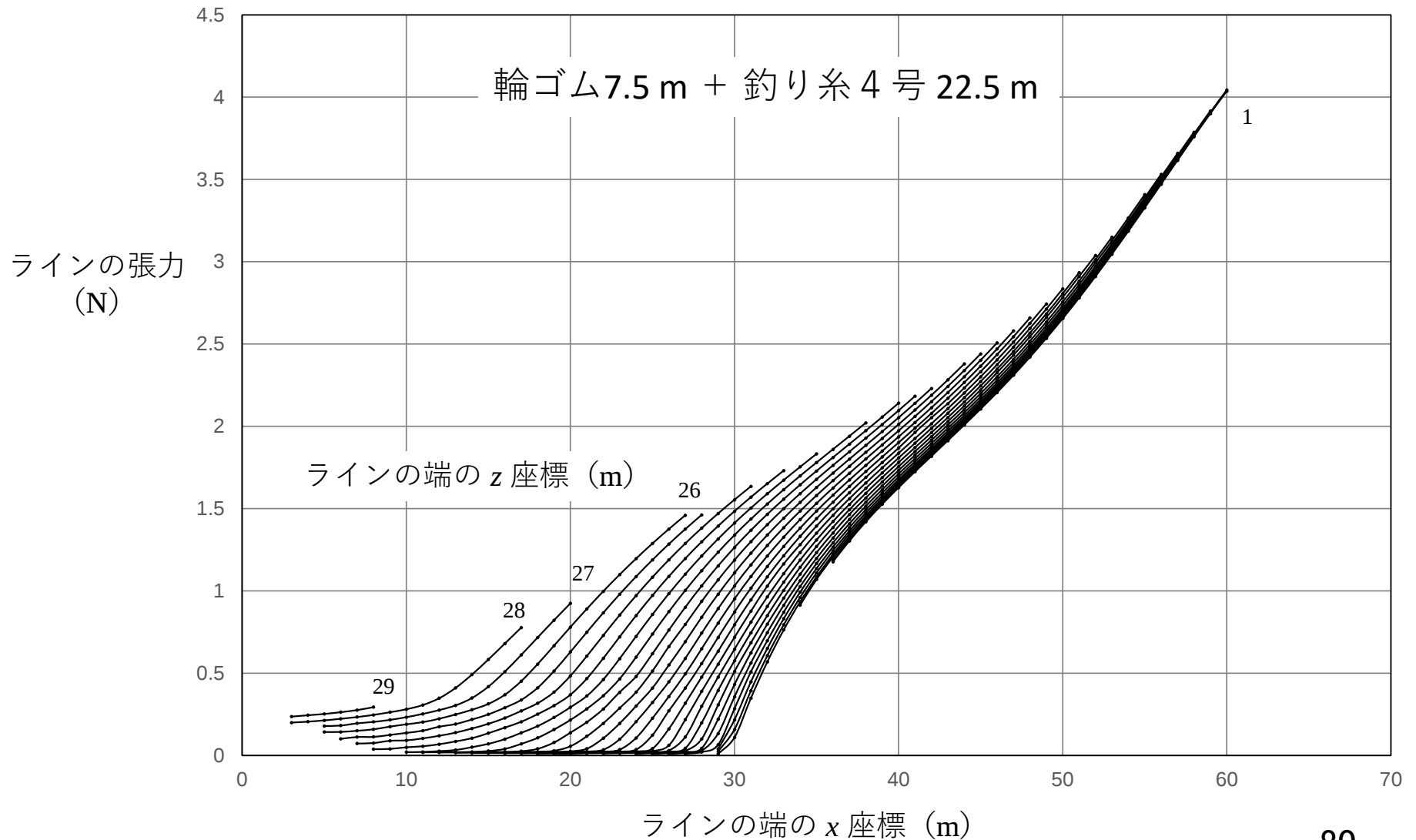
ハイスタート解析のモデル



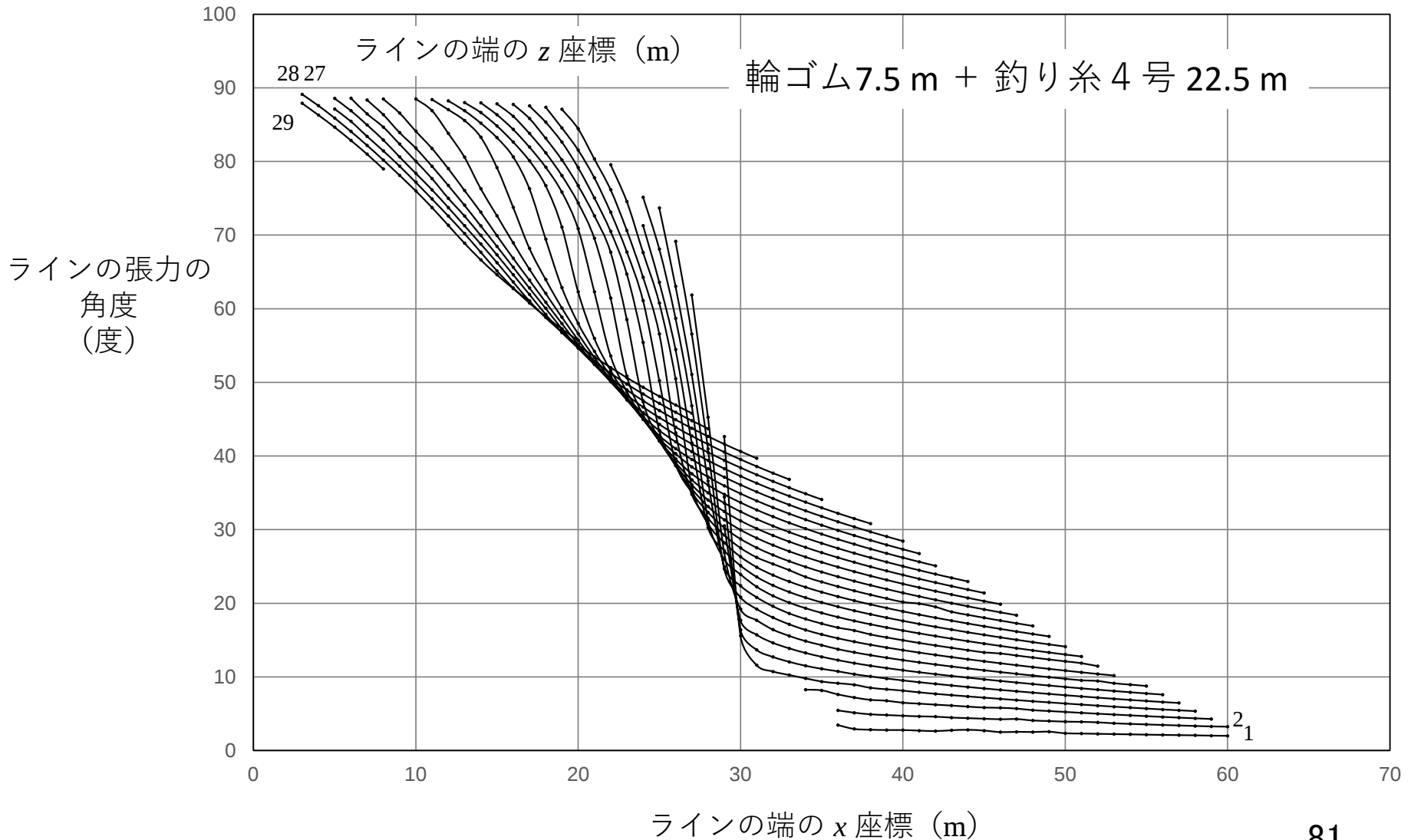
ライン張力の計算



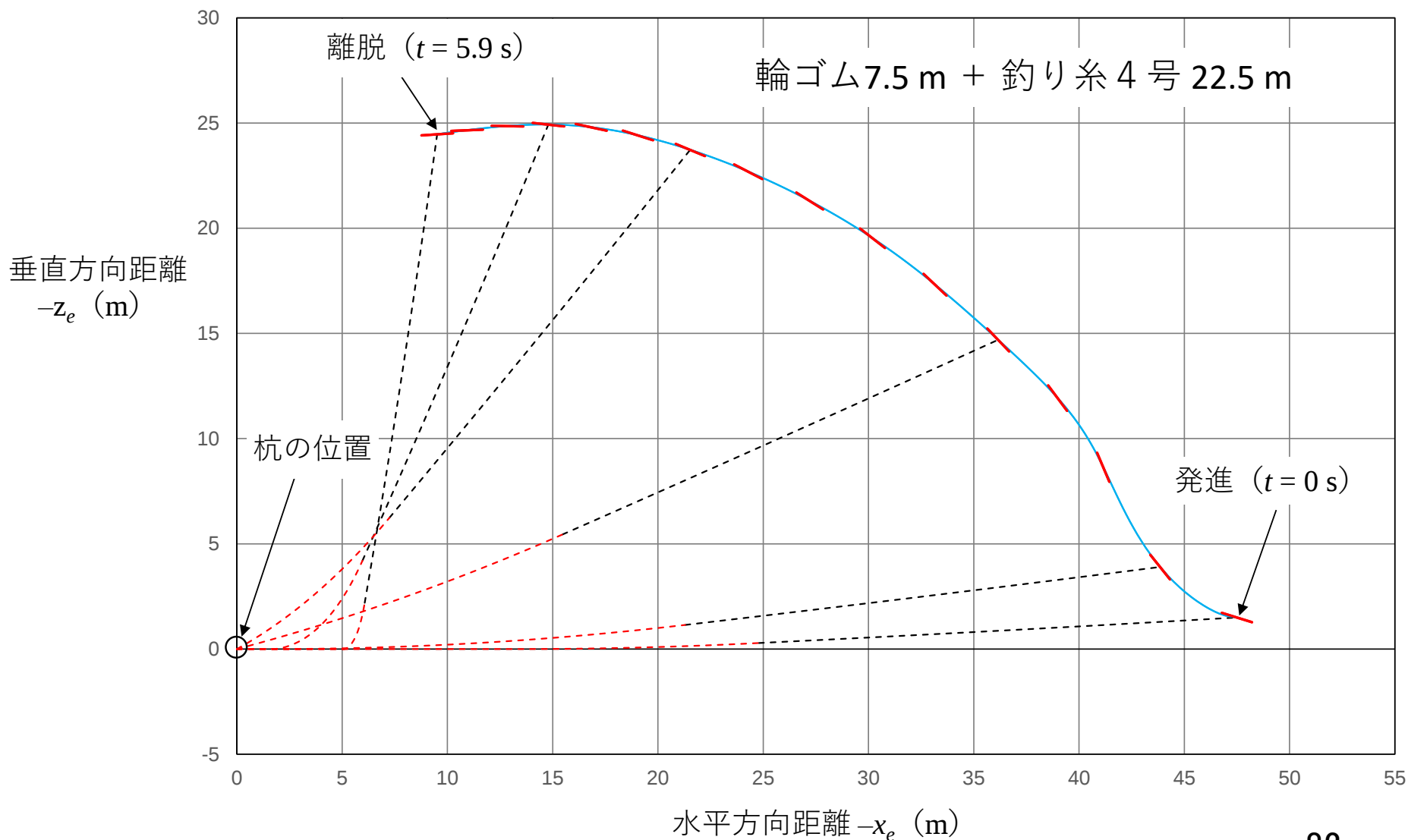
ライン張力のグラフ



ライン張力の角度のグラフ

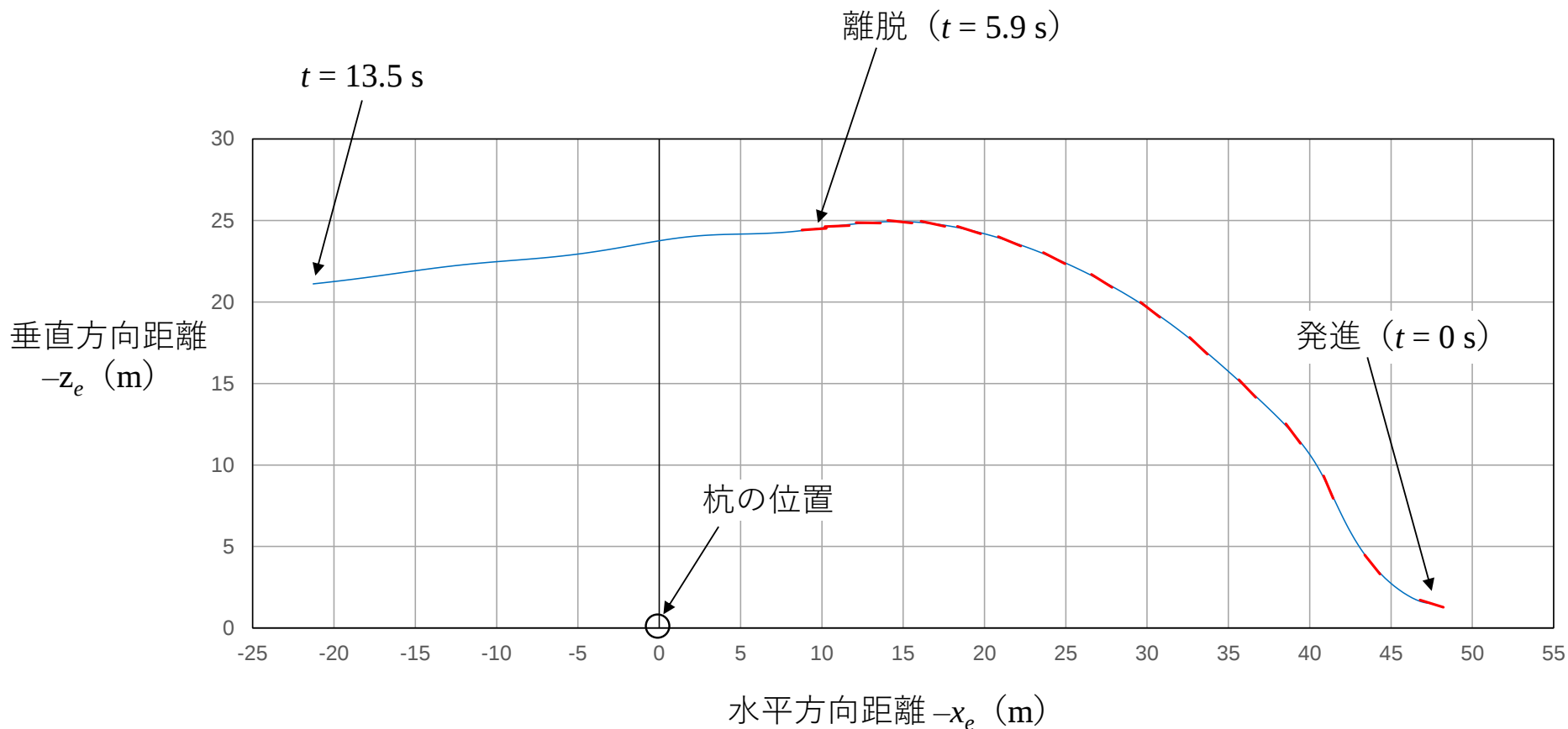


ハイスタート解析結果の例

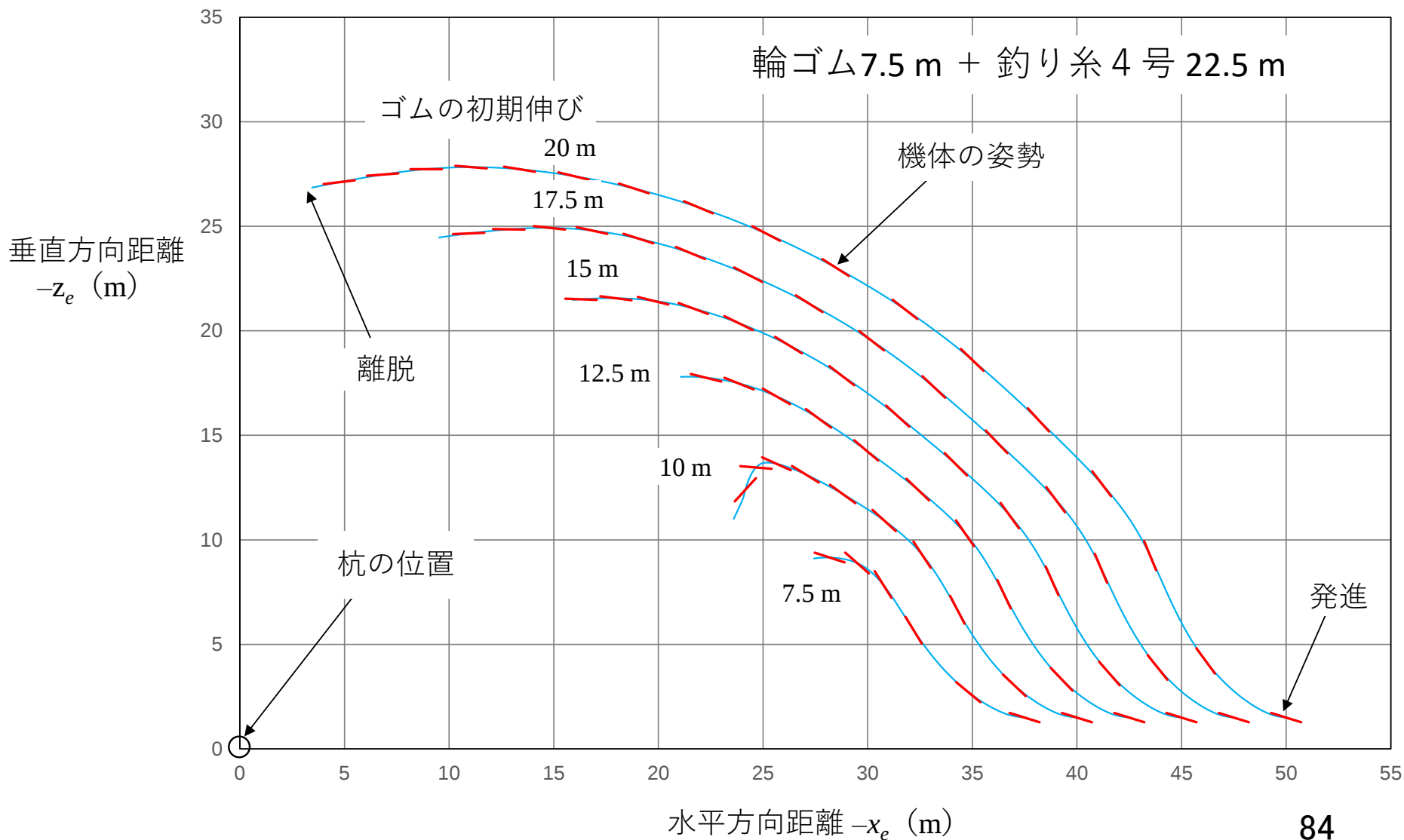


ハイスタート解析結果の例 – 離脱後の運動

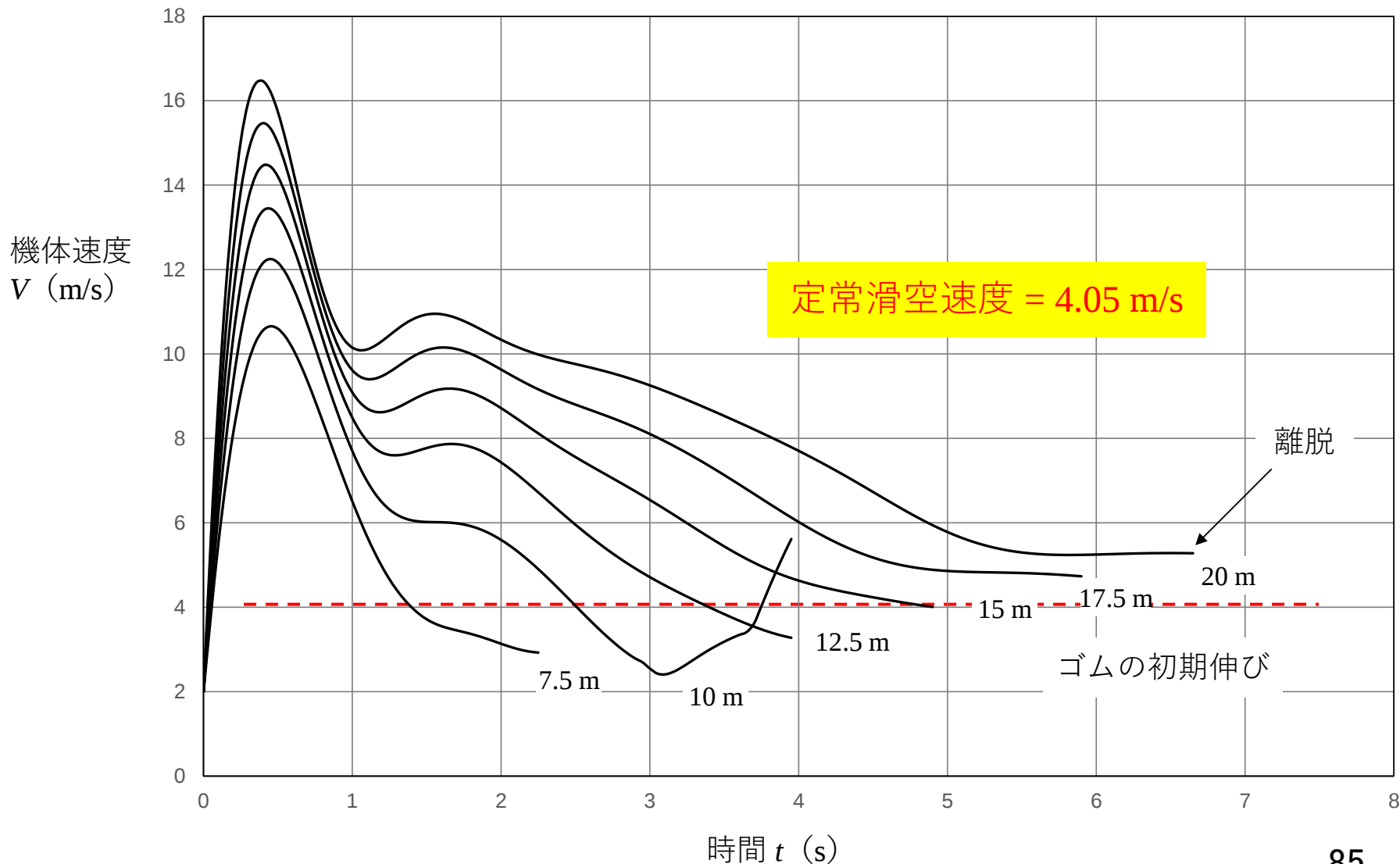
輪ゴム7.5 m + 釣り糸4号 22.5 m



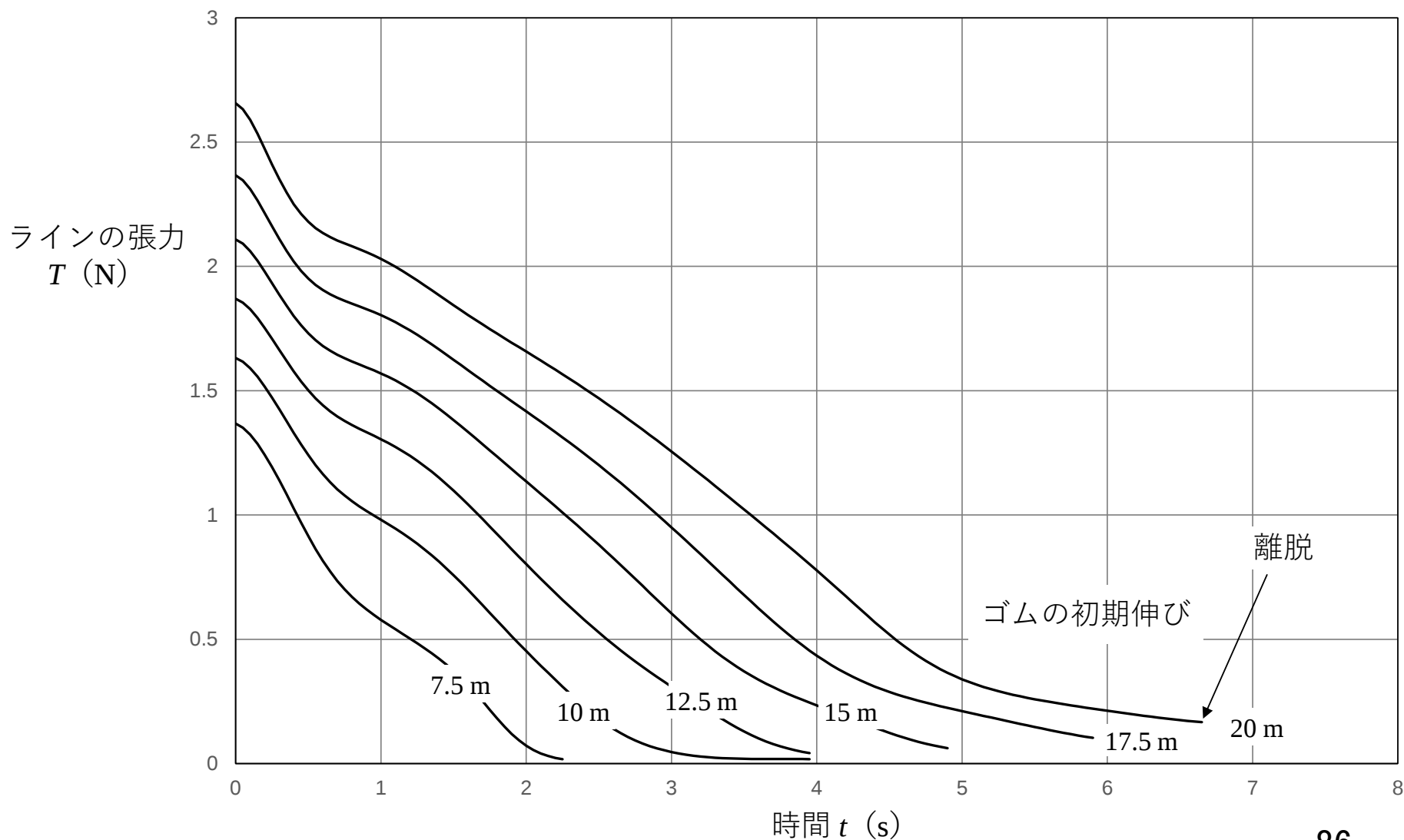
ハイスタート解析結果の例 - 飛行軌跡



ハイスタート解析結果の例 - 機体速度



ハイスタート解析結果の例 - ライン張力



研究課題

飛行実験

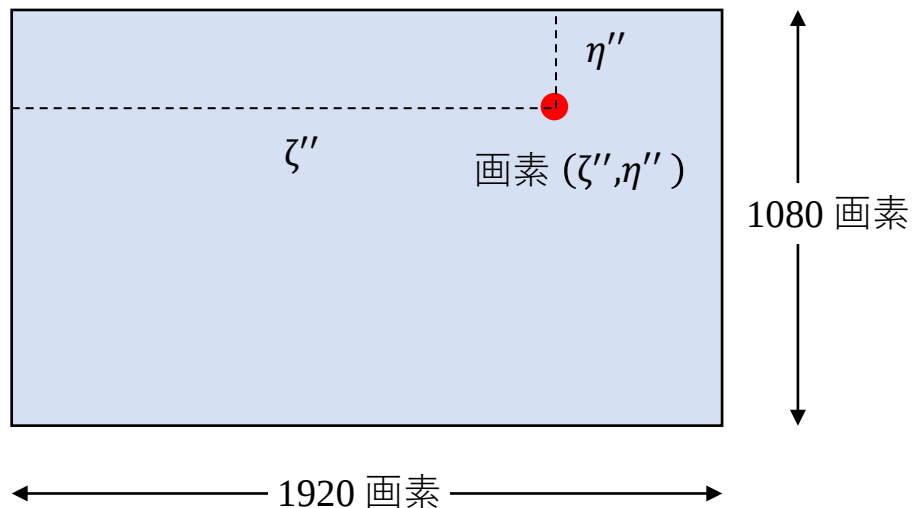
飛行実験

- 滑空試験, ハイスタート試験
 - 動画を撮り, 画像解析
 - 飛行軌跡, 飛行速度を測定
 - 解析と比較し, 解析の妥当性を確認
- 画像解析
 - スマートフォンの動画の画像から画角を計算
 - 画素位置⇒画角変換式を作成
 - ニューラルネットワークの適用
 - 画角⇒位置変換方法を開発, 直線上を運動すると仮定

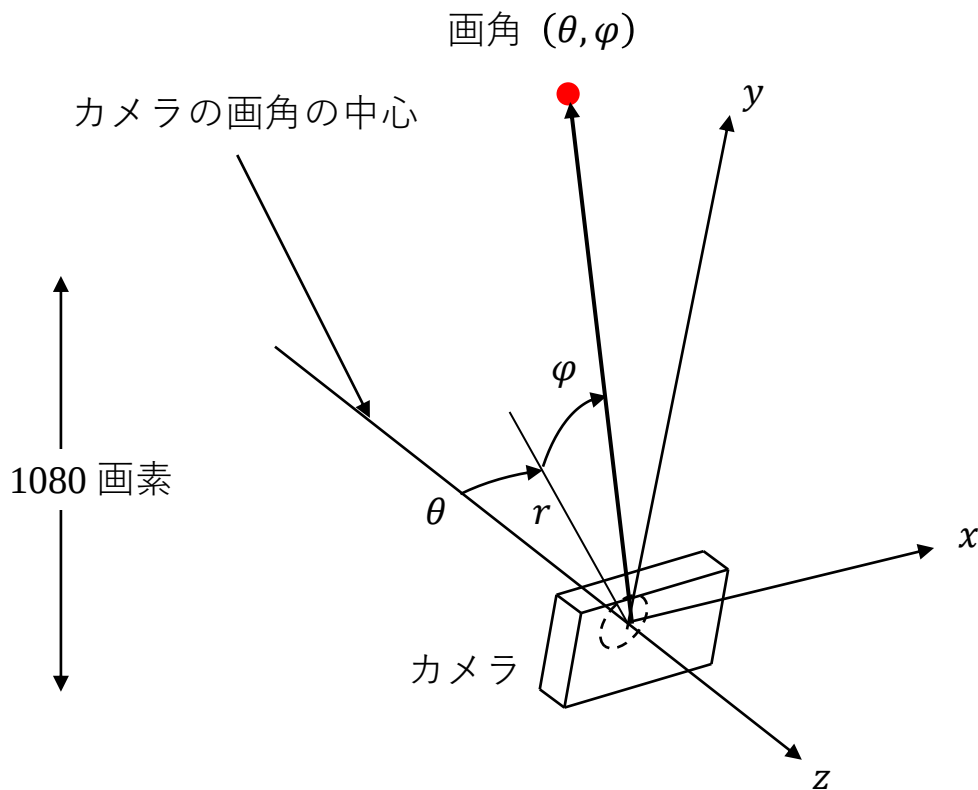
画像⇒画角変換式

- 多数の基準点の空間位置と画角のデータを作成
- 基準点を撮影し、画素位置を計測
- 人工ニューラルネットワークを使って画素位置と画角の変換式(近似式)を作成
 - 人工ニューラルネットワークの利点
 - 多パラメータの非線形変換式を精度よく近似できる.
 - 近似式の精度は学習データの数次第

カメラの画角と画素位置

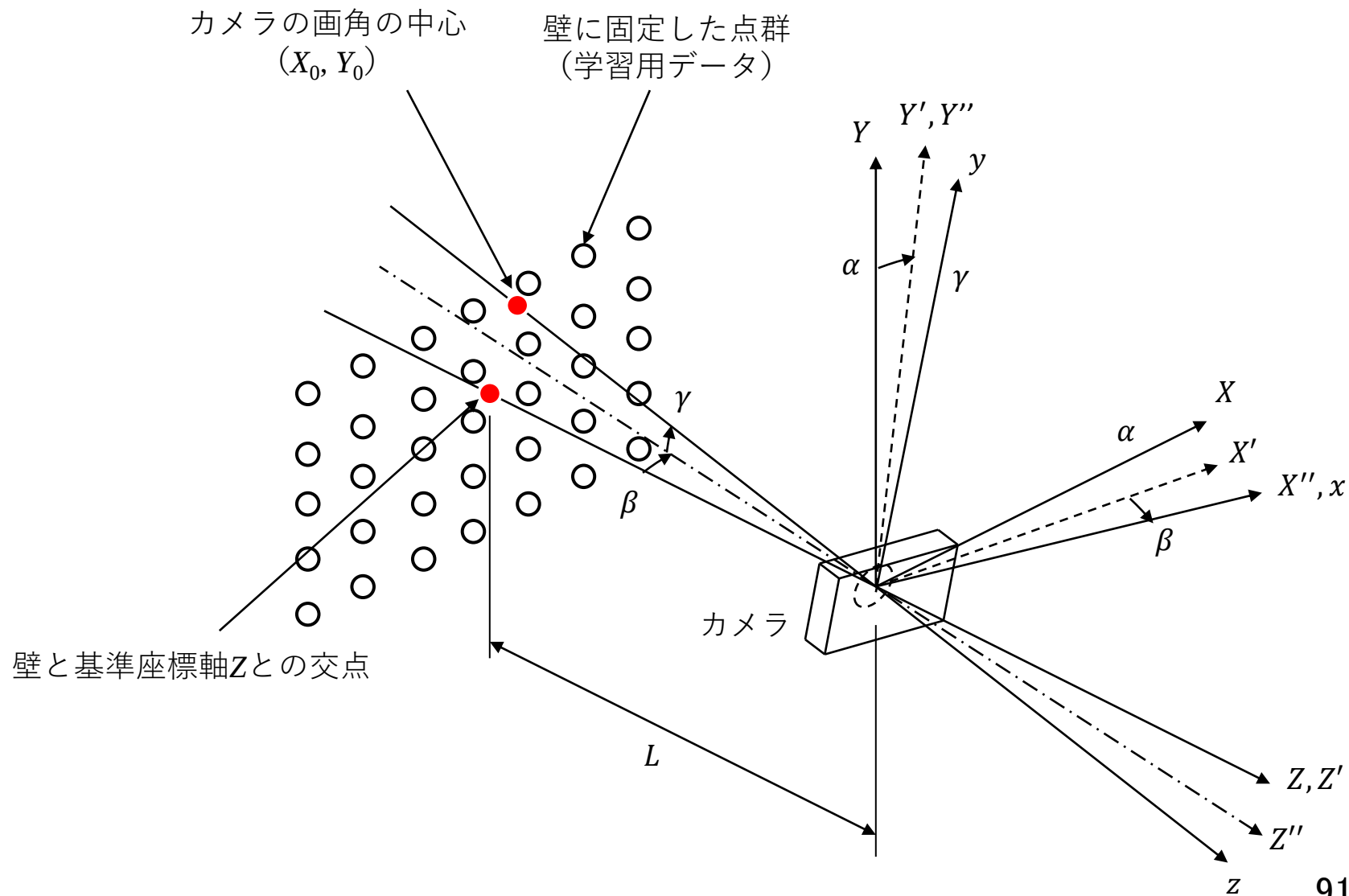


カメラの画像の画素位置



カメラの画角

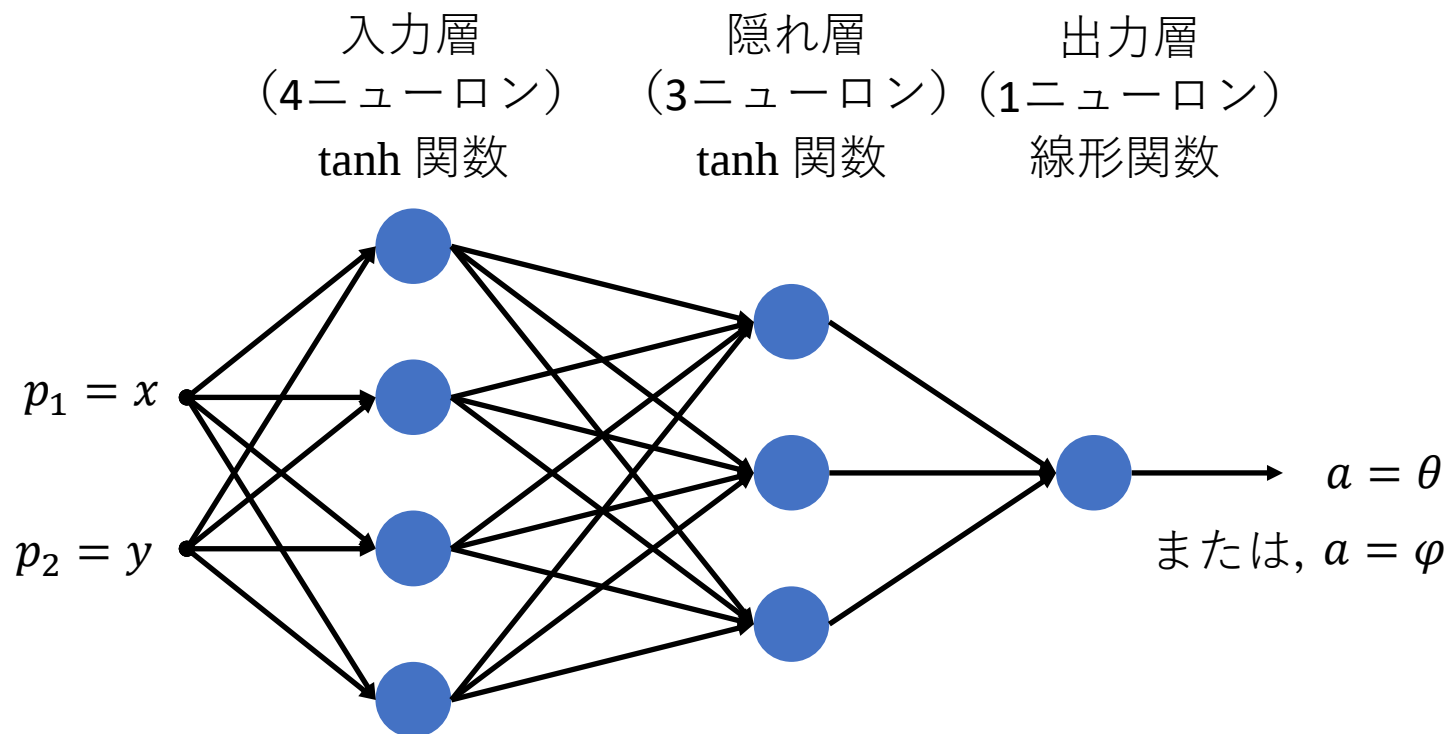
学習用データ



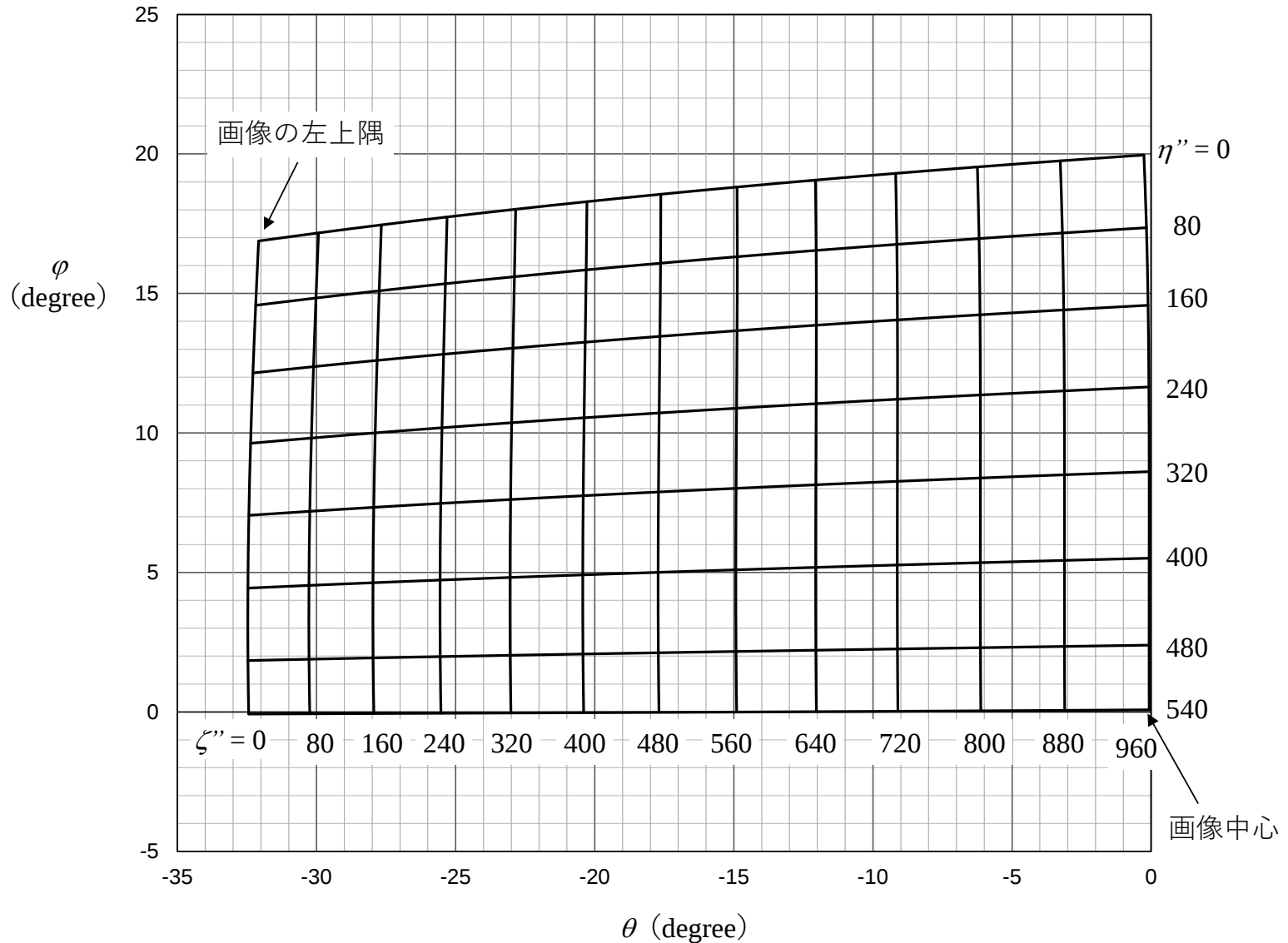
基準点 - ロッカーの鍵穴を利用



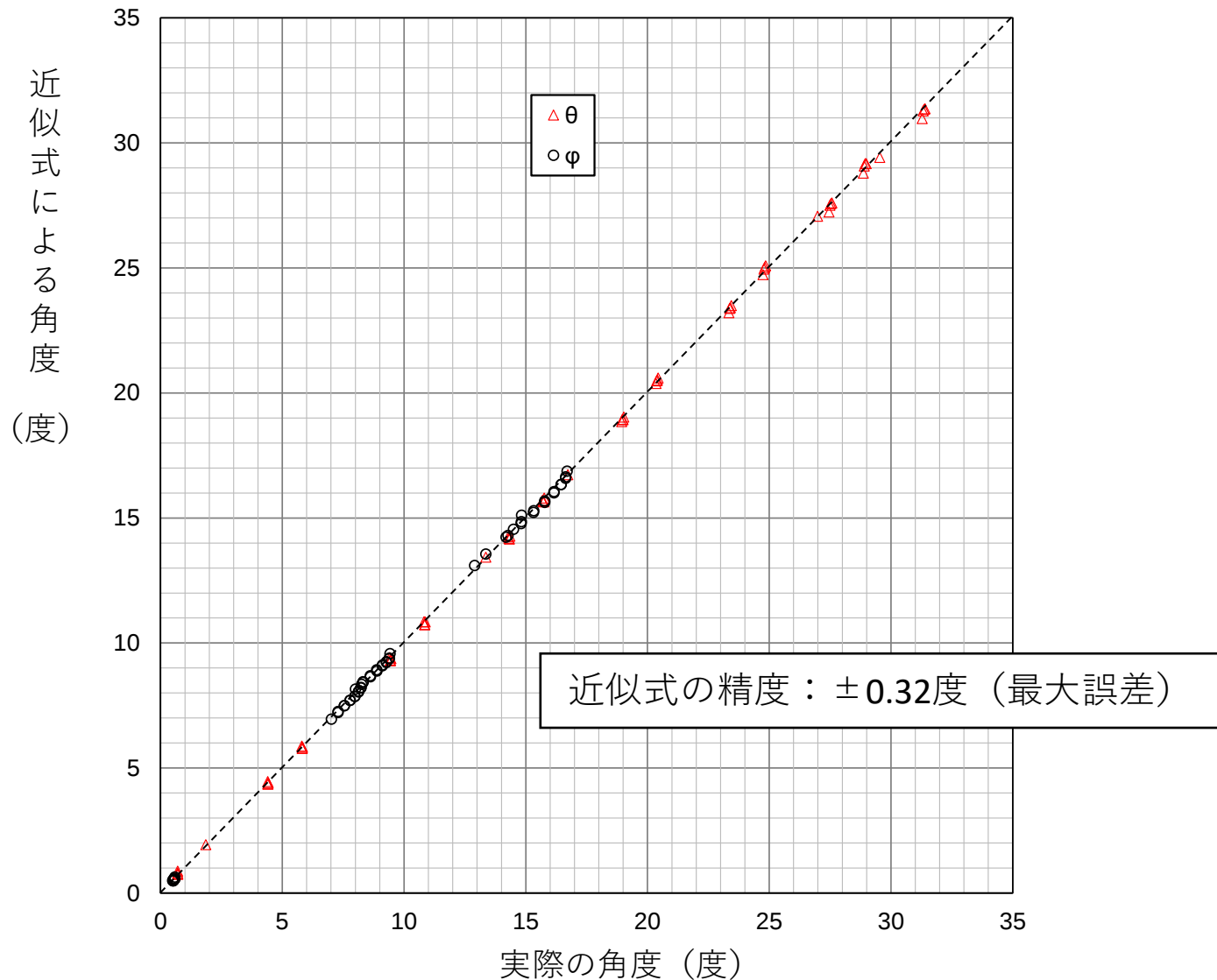
人工ニューラルネットワーク



変換式のグラフ表示



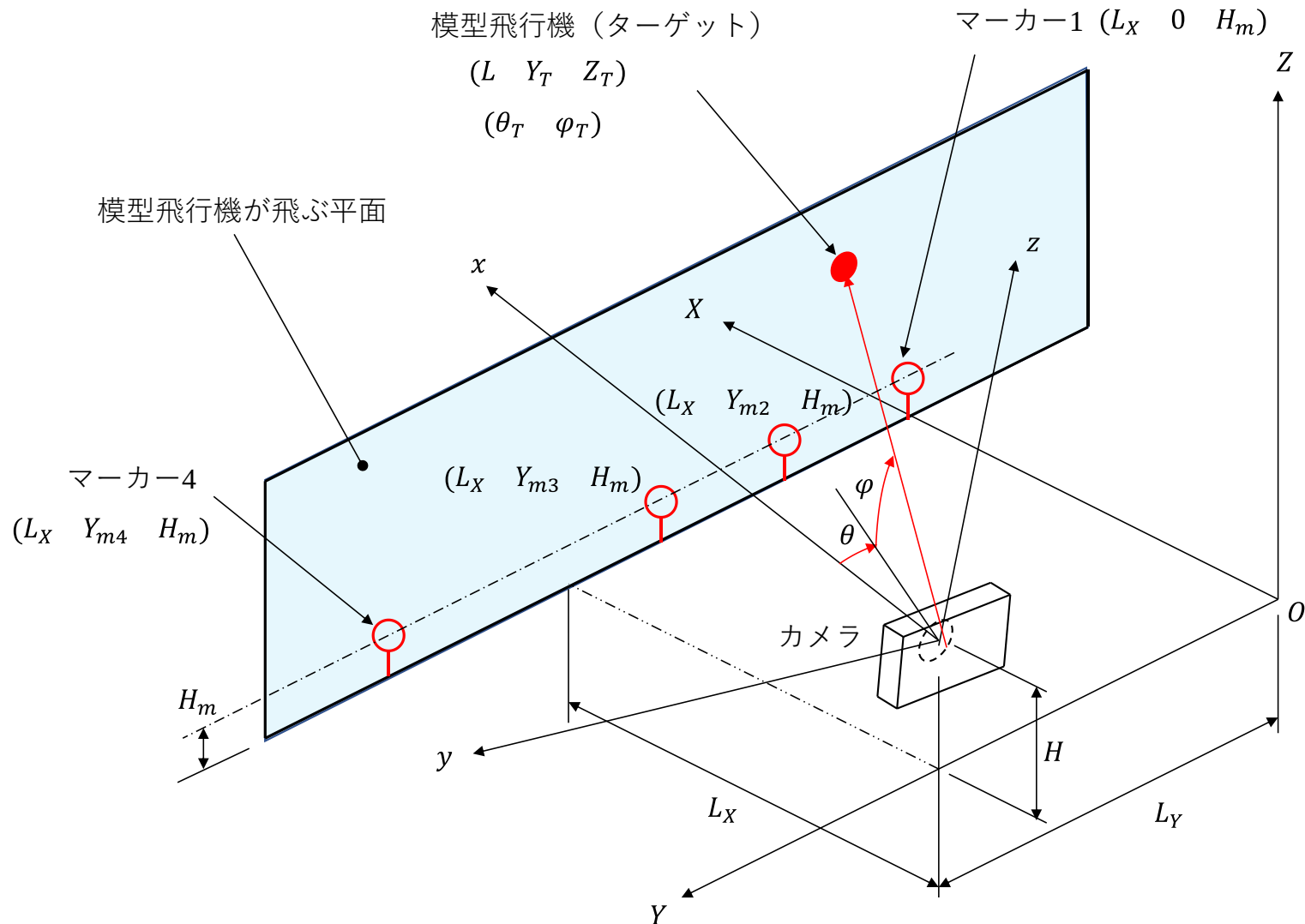
変換式の誤差評価



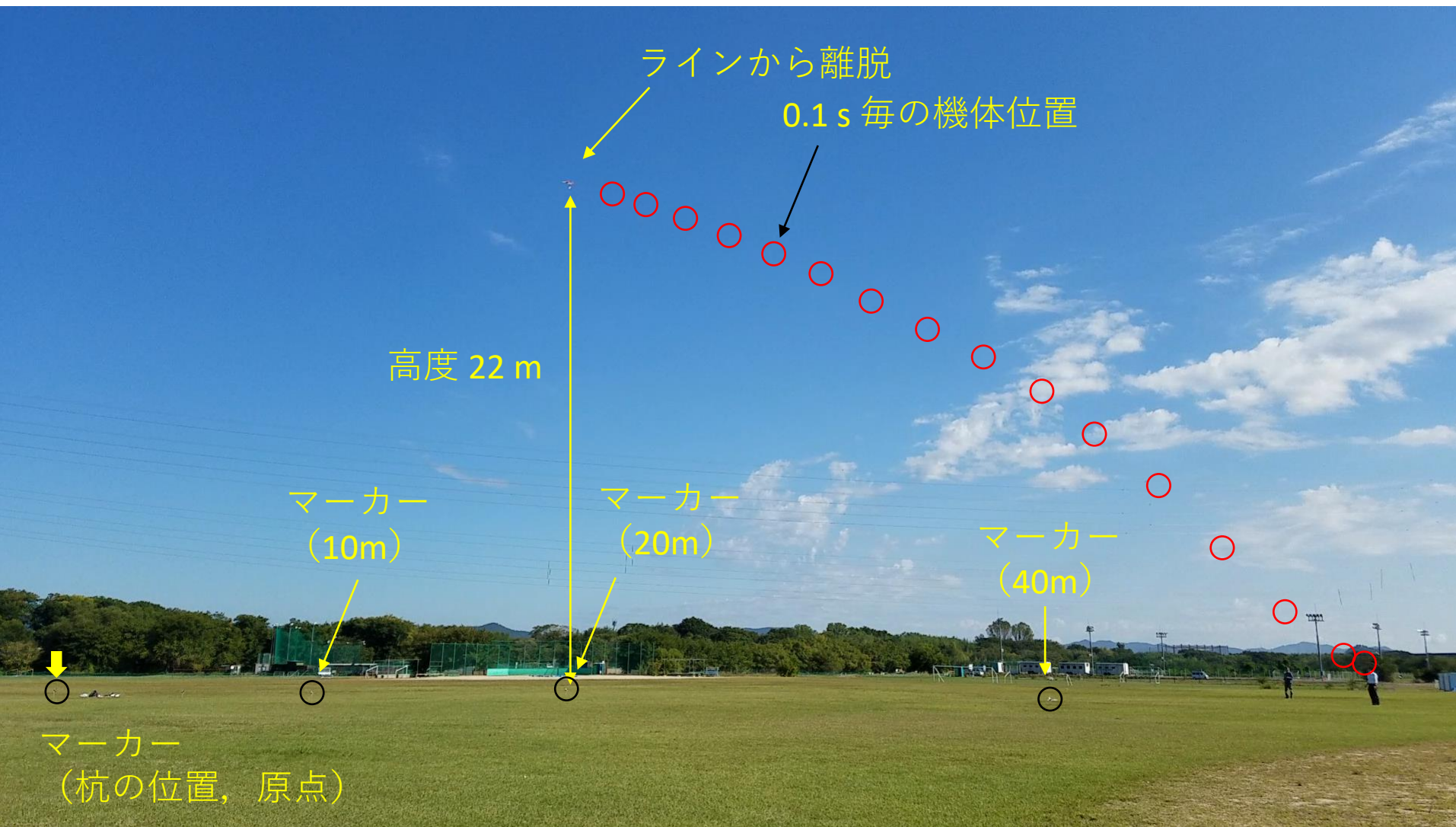
飛行試験画像⇒空間座標

- カメラは1台
- 仮定
 - 平面内を飛行すると仮定する.
- 解析手順
 - 動画をコマ送り画像に変換
 - 機体の画素位置を計測
 - 画素位置から画角に変換
 - 画角から空間座標に変換

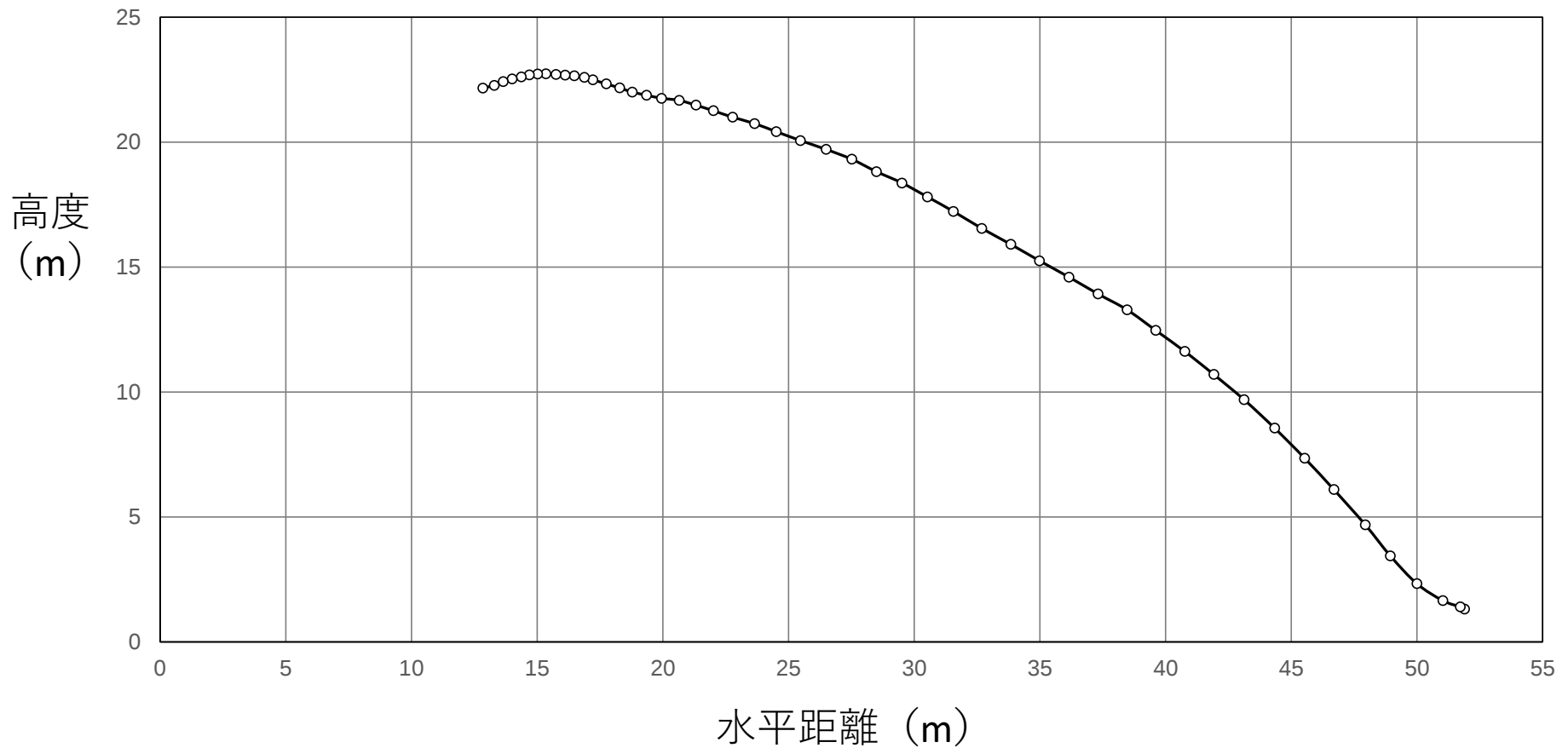
空間座標の求め方



画像の例 - T-4グライダーのハイスタート発進



T-4グライダーのハイスタート発進の軌跡



まとめ

まとめ

- 作りやすく, 飛ばしやすいフリーフライト模型グライダーを設計・製作した.
 - フリーフライト模型グライダーは飛行機を学ぶのに有用.
 - いろいろな形の機体を作って, 飛ばして, 楽しく学べる.
 - 研究するネタが残っている.
 - 新しい機材, ツールを使うことで, これまでできなかったことができる.
 - 例: 小型センサーをつけて機体運動データを取得する.
 - ゴム動力機, 電動モーター機へ発展させていけるのでは.
- ⇒ **模型飛行機を飛ばしてみませんか**