A02
ゴム動力模型飛行機の調整法の検討

滝　敏美（（株）ナスカ）

第28回 スカイスポーツシンポジウム
2023年12月2日

発表内容

- 背景
- 目的
- ゴム動力機の3次元運動解析
- ゴム動力機の運動に関わる要因
- パラメトリック・スタディ
- 新しく提案する調整法

ゴム動力機の飛行調整の難しさ

- ゴム動力機をうまく飛ばすのは難しい.
  - ゴムのトルクの変動が大きい. 飛行初期・大→滑空・ゼロ
  - 舵角を固定している.
  - 調整箇所が多い.
  - 調整ウィンドウが狭い.
- 滑空飛行調整と動力飛行調整が必要
  - 滑空飛行調整 → 動力飛行調整の順で調整
  - 滑空飛行調整は簡単
    - 重心位置を決める ← 水平尾翼容積比から
    - 水平尾翼取付角, またはエレベータ舵角で調整
  - 動力飛行調整は難しい
    - プロペラ軸の角度(スラストライン)とラダー舵角で調整する.
      (「ラダー舵角を使うな」とする説明が多い.)
    - 調整パラメータと飛行パターンの関係があきらかでない.

目的

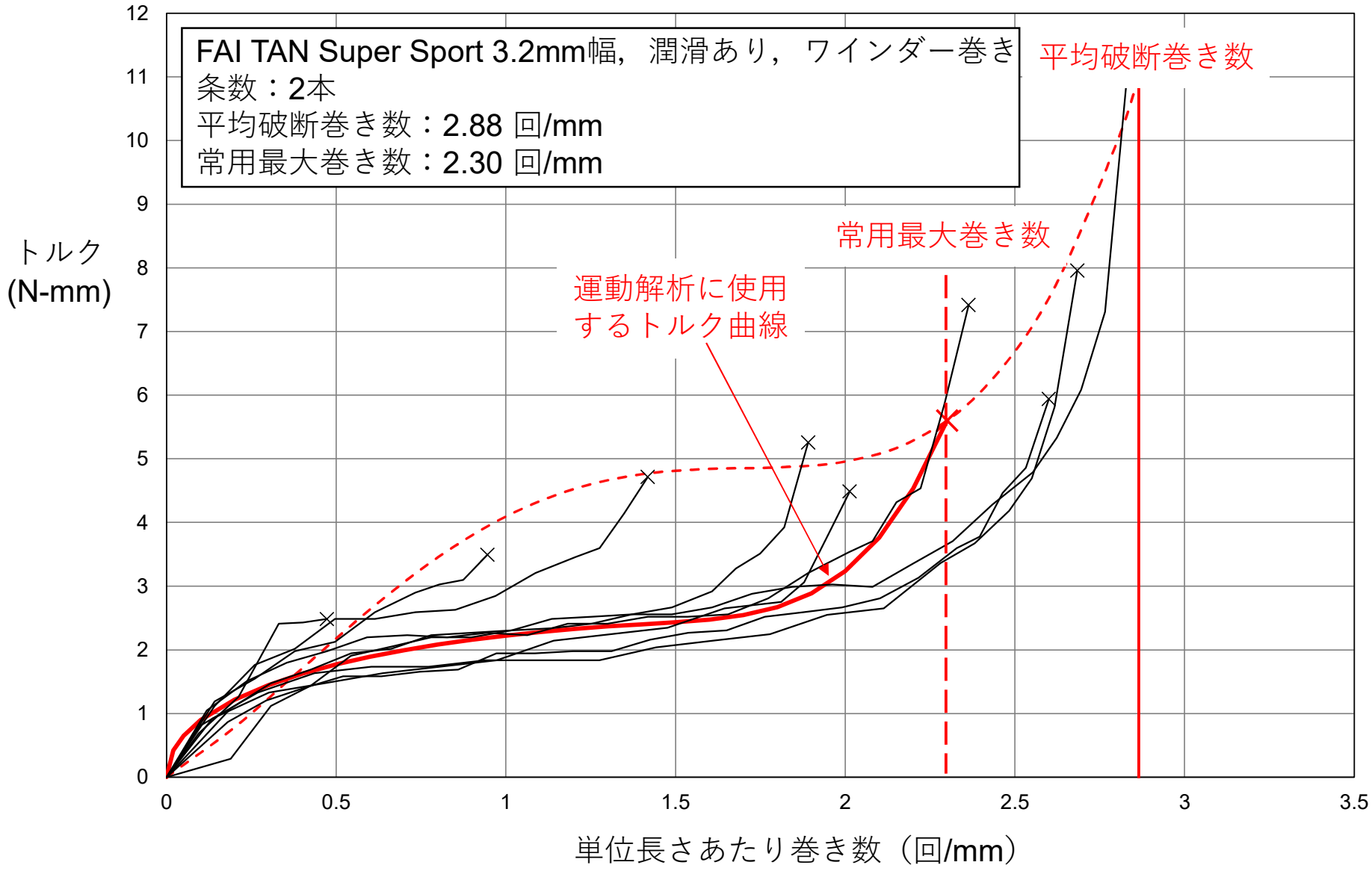
- ３次元運動解析によって，調整パラメータを変化させたパラメトリック・スタディを行い，その結果に基づいて調整方法を提案する.

ゴム動力機の3次元運動解析

解析法の詳細は
「第61回飛行機シンポジウム講演集」参照

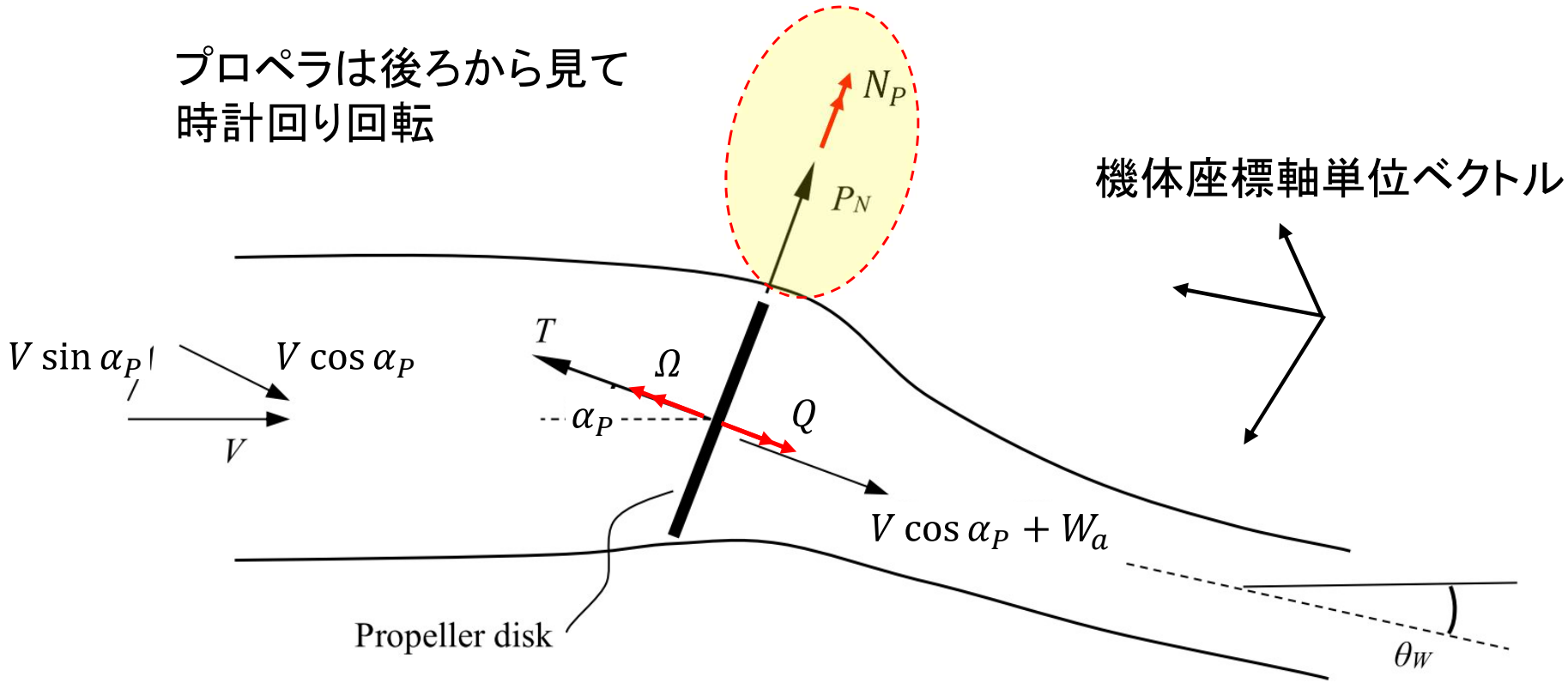
- 考慮する要因
  - ゴムのトルク
    - トルク変動＝巻き数-トルク曲線
    - 機体を傾ける効果
  - プロペラの影響
    - プロペラ軸の位置，偏心，角度
    - プロペラの性能曲線：プロペラ直径，ブレード形状，ピッチ比分布
    - Pファクター：プロペラに斜めに気流があたる影響
    - ジャイロ効果
    - プロペラの回転慣性
    - 滑空時の空転プロペラの影響
  - 垂直尾翼の傾き（ラダー舵角）
  - エルロン舵角
  - 水平尾翼の傾き（スタブ ティルト）
- 考慮しない要因
  - プロペラ後流の影響

ゴムの巻き数-トルク曲線の例



プロペラに斜めに気流があたる影響

プロペラは後ろから見て
時計回り回転



プロペラ軸と空気流速度ベクトルが作る平面に垂直に見る

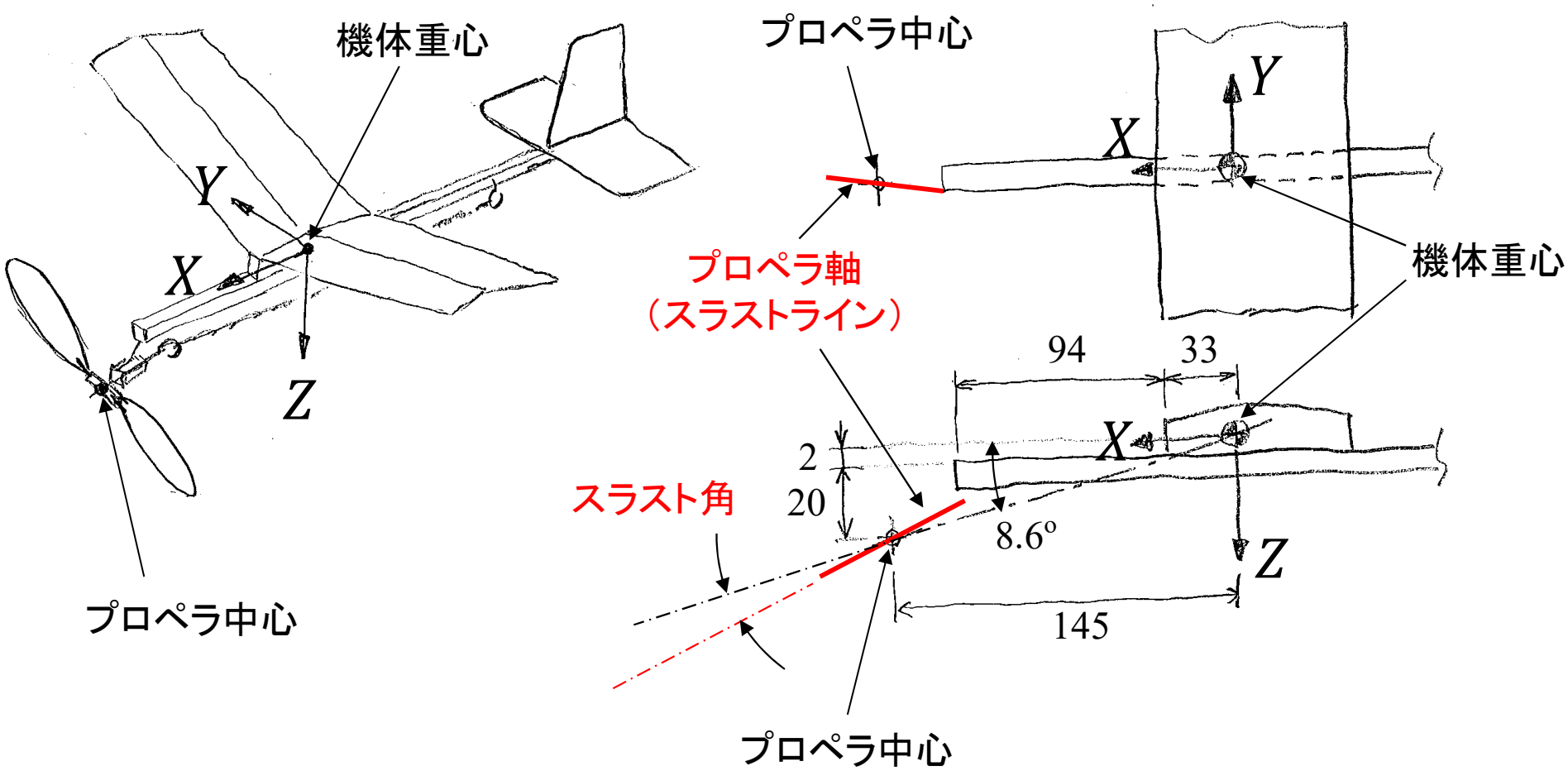
解析対象の機体

小池勝,「フリーフライト　F1B 滞空時間を延ばす技術と科学」, スタジオ・タック・クリエイティブ, 2022 年.

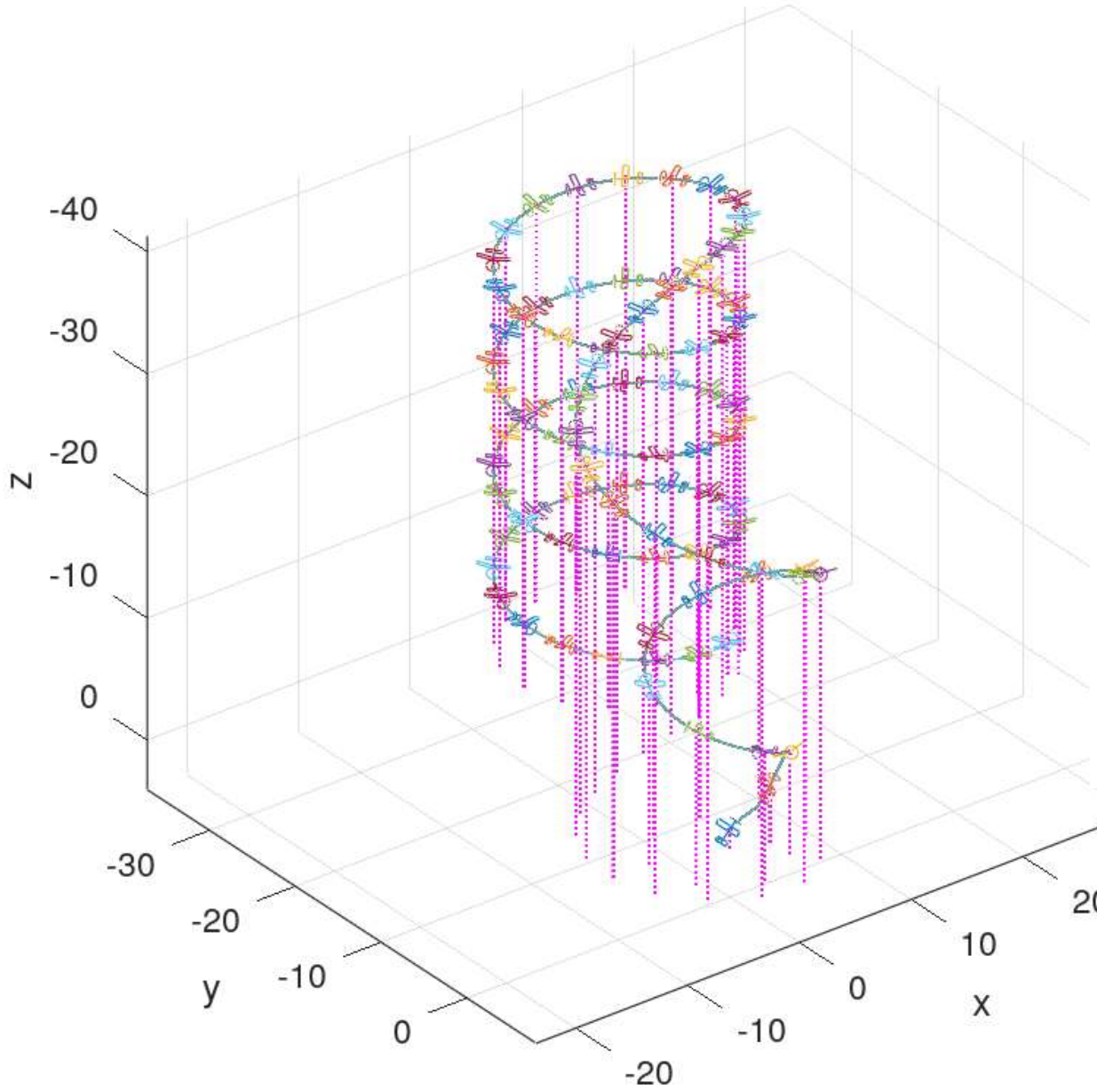
解析条件

- 発進条件
  - 初速 3.0 m/s
  - 上向き角度 45度
  - プロペラ回転数 15回/s
- ゴム
  - FAI TAN Super Sport, 3.2 mm幅×2条
  - ループ長 320 mm
  - 巻き数 740回
- 舵角
  - ラダー（旋回直径）:
  - エルロン舵角 : 無し
  - スタブ・ティルト : 無し
- プロペラ軸角度（プロペラ中心と機体重心を結んだ線を基準）
  - ダウンスラスト
  - サイドスラスト

スラスト角の基準線の定義



解析例1 – 右旋回上昇・左旋回滑空



調整パラメータ

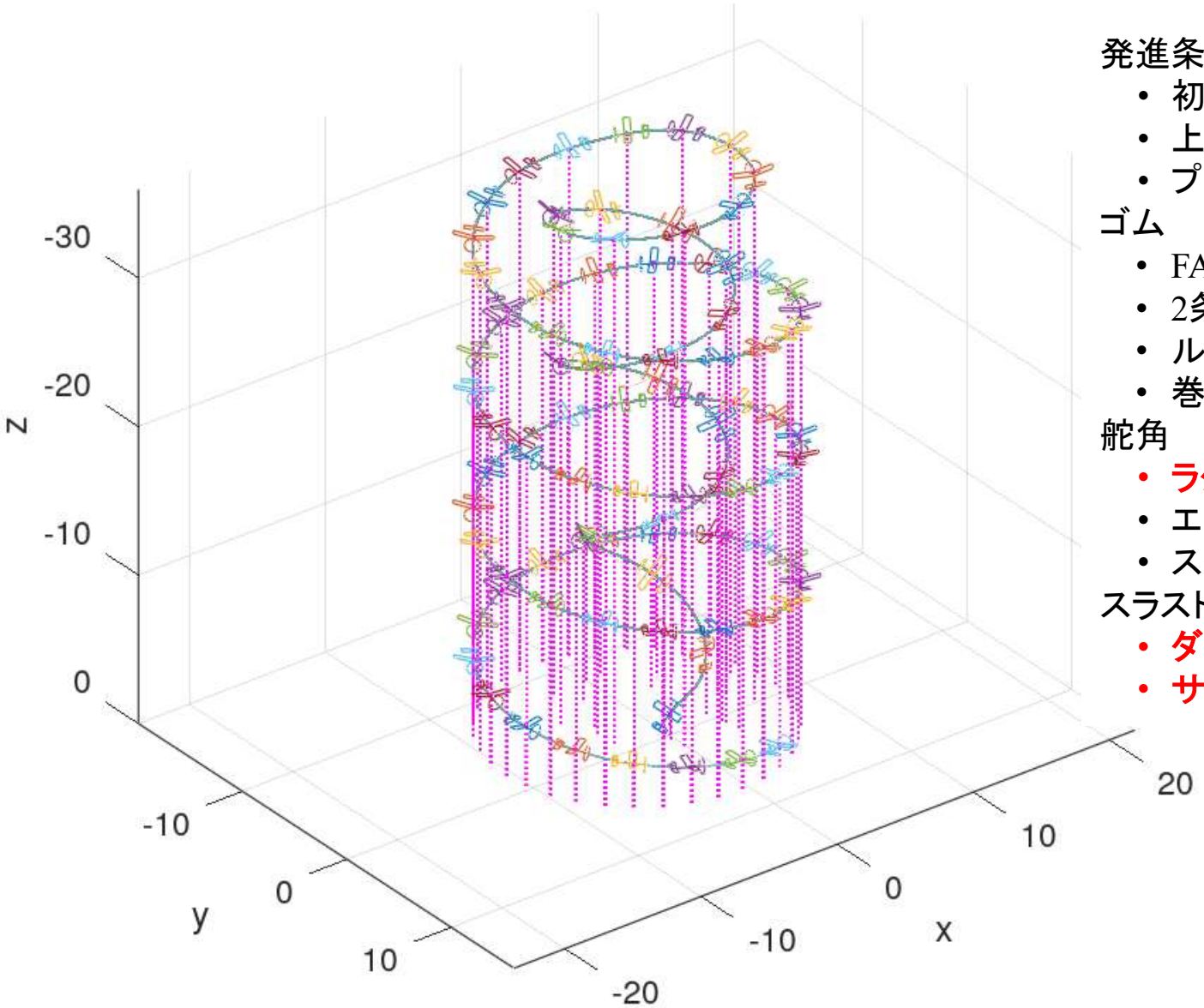
発進条件
- 初速 3.0 m/s
- 上向き角度 45度
- プロペラ回転数 15回/s

ゴム
- FAI TAN Super Sport, 3.2 mm幅
- 2条
- ループ長 320 mm
- 巻き数 740回

舵角
- **ラダー 左旋回直径 17 m**
- エルロン 0度
- スタブ・ティルト 0度

スラスト角
- **ダウンスラスト 0度**
- **サイドスラスト 右 1 度**

解析例2 – 左旋回上昇・左旋回滑空



調整パラメータ

発進条件
- 初速 3.0 m/s
- 上向き角度 45度
- プロペラ回転数 15回/s

ゴム
- FAI TAN Super Sport, 3.2 mm幅
- 2条
- ループ長 320 mm
- 巻き数 740回

舵角
- **ラダー 左旋回直径 17 m**
- エルロン 0度
- スタブ・ティルト 0度

スラスト角
- **ダウンスラスト 0度**
- **サイドスラスト 左 1 度**

パラメトリックスタディ – 高翼機

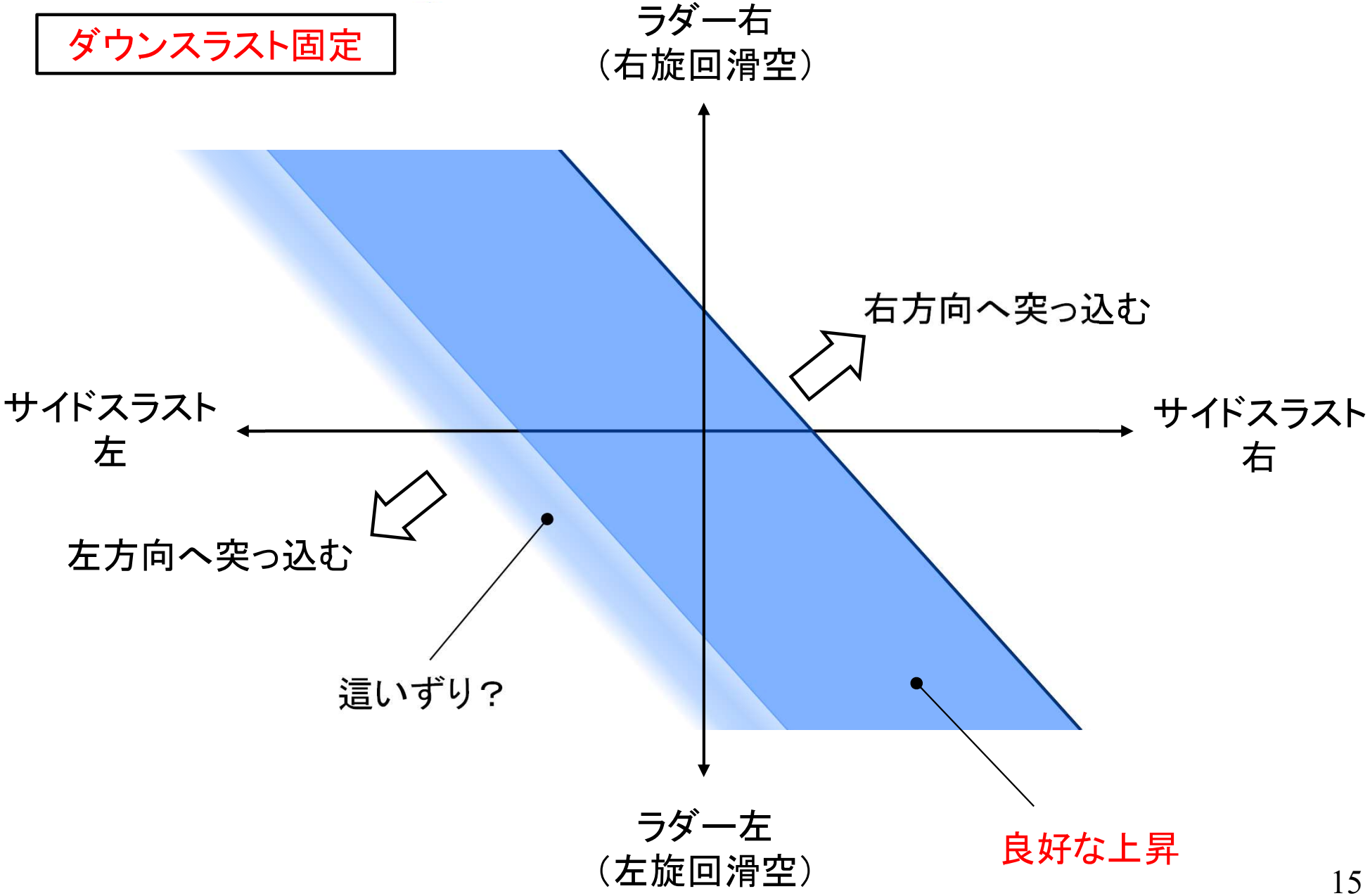
到達高度（上昇旋回/滑空旋回）

	ラダー（滑空旋回直径）↓	左サイドスラスト 4度	左サイドスラスト 3度	左サイドスラスト 2度	左サイドスラスト 1度	0度	右サイドスラスト 1度	右サイドスラスト 2度	右サイドスラスト 3度	右サイドスラスト 4度
ダウンスラスト 4度	右 9 m	2.2	22.7 (L/R)	7.6	7.0	6.2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	右 13 m	2.2	2.3	26.8 (L/R)	11.6	7.2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	右 25 m	2.2	2.2	24.5 (L/R)	28.7 (-/R)	10.3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
	直進	2.2	2.2	19.7	27.3 (L/-)	28.9 (R/-)	8.5	5.9	4.7	4.1
	左 27 m	2.2	2.2	2.3	23.6 (L/L)	29.3 (L/L)	25.5 (-/L)	7.0	5.1	4.2
	左 14 m	2.2	2.2	2.3	16.4	26.8 (L/L)	30.2 (-/L)	16.0	5.7	4.5
	左 9 m	2.2	2.2	2.3	2.4	20.9 (L/L)	29.4 (L/L)	29.2 (R/L)	9.6	4.8
ダウンスラスト 2度	右 9 m	25.6 (L/R)	31.7 (L/R)	35.0 (L/R)	25.4 (dive)	8.4	6.3	5.1	4.4	3.9
	右 13 m	2.4	28.9 (L/R)	33.6 (L/R)	35.6 (-/R)	10.8	6.9	5.4	4.5	4.0
	右 25 m	2.4	24.7 (L/R)	31.7 (L/R)	34.8 (L/R)	25.4 (dive)	7.8	5.8	4.7	4.1
	直進	2.3	2.5	28.3 (L/-)	33.8 (L/-)	35.6 (-/-)	9.9	6.3	5	4.2
	左 27 m	2.3	2.4	22.4 (L/L)	31.5 (L/L)	34.5 (L/L)	32.5 (L/L)	7.1	5.3	4.3
	左 14 m	2.3	2.4	2.6	26.4 (L/L)	34.0 (L/L)	35.9 (-/L)	16.7	5.7	4.5
	左 9 m	2.3	2.4	2.6	15.7	31.0 (L/L)	34.5 (-/L)	33.1 (R/L)	9.4	4.7
ダウンスラスト 0度	右 9 m	30.8 (L/R)	35.2 (L/R)	35.4 (L/R)	34.0 (L/R)	8.5	6.2	5.0	4.3	3.8
	右 13 m	27.3 (L/R)	33.7 (L/R)	36.5 (L/R)	33.8 (-/R)	10.8	6.6	5.3	4.4	3.9
	右 25 m	21.7 (L/R)	30.7 (L/R)	36.0 (L/R)	33.7 (L/R)	37.9 (R/R)	7.2	5.5	4.6	3.9
	直進	2.6	25.7 (L/-)	33.8 (L/-)	36.4 (L/-)	33.5 (L/-)	8.2	5.8	4.7	4.1
	左 27 m	2.6	16.3	29.6 (L/L)	36.4 (L/L)	33.5 (L/L)	29.9 (R/L)	6.2	4.9	4.2
	左 14 m	2.6	2.8	20.9 (L/L)	33.7 (L/L)	32.4 (L/L)	37.8 (R/L)	10.4	5.2	4.3
	左 9 m	2.5	2.8	3.4	26.6 (L/L)	36.3 (L/L)	35.0 (-/L)	32.7 (R/L)	7.0	4.4
アップスラスト 2度	右 9 m	34.1 (/R)	37.0 (L/R)	29.6 (L/R)	32.5 (-/R)	6.6	5.4	4.6	4.0	3.6
	右 13 m	31.4 (L/R)	36.2 (L/R)	35.7 (L/R)	27.5 (-/R)	6.9	5.6	4.7	4.1	3.7
	右 25 m	27.0 (L/R)	34.2 (L/R)	36.7 (L/R)	14.0 (stall)	7.2	5.8	4.8	4.2	3.7
	直進	19.1	30.5 (L/-)	36.3 (L/-)	18.3 (stall)	11.1	6.1	5.0	4.3	3.8
	左 27 m	3.1	23.2 (L/L)	34.0 (L/L)	29.9 (L/L)	26.9 (R/L)	6.4	5.2	4.3	3.8
	左 14 m	3.0	3.7	28.0 (L/L)	35.6 (L/L)	12.7 (stall)	34.1 (R/L)	5.4	4.5	3.9
	左 9 m	2.9	3.4	10.1	33.5 (L/L)	14.3 (stall)	32.5 (R/L)	28.8 (R/L)	4.6	4.0
アップスラスト 4度	右 9 m	35.1 (L/R)	25.0 (stall)	16.7 (stall)	11.0	5.2	4.5	4.0	3.7	3.4
	右 13 m	33.5 (L/R)	35.3 (L/R)	16.4 (stall)	21.0 (stall)	5.3	4.6	4.1	3.7	3.4
	右 25 m	30.1 (L/R)	35.2 (L/R)	20.5 (stall)	16.7 (stall)	5.4	4.7	4.2	3.8	3.5
	直進	23.8 (L/-)	33.0 (L/-)	33.7 (L/-)	15.7 (stall)	21.0 (R/-)	4.8	4.2	3.8	3.5
	左 27 m	3.6	27.7 (L/L)	34.6 (L/L)	16.1 (stall)	22.8 (R/L)	4.9	4.3	3.9	3.6
	左 14 m	3.5	14.1	31.8 (L/L)	24.1 (stall)	15.7 (stall)	22.1 (R/L)	4.4	3.9	3.6

パラメトリックスタディ – 低翼機

	ラダー（旋回直径）↓	左サイドスラスト 4度	3度	2度	1度	0度	右サイドスラスト 1度	2度	3度	4度
ダウンスラスト 6度	右 9 m	2.2	2.3	6.4	7.7	7.1	6.0	5.0	4.3	3.7
	右 13 m	2.2	2.3	29.0 (L/R)	32.7 (-/R)	8.2	6.6	5.3	4.4	3.8
	右 25 m	2.2	2.3	26.0 (L/R)	32.3 (L/R)	13.7	7.5	5.7	4.6	3.9
	直進	2.2	2.3	2.4	29.6 (L/-)	34.4 (L/-)	9.2	6.3	4.9	4.0
	左 27 m	2.2	2.3	2.4	25.7 (L/L)	32.7 (L/L)	34.2 (R/L)	7.2	5.2	4.2
	左 14 m	2.2	2.3	2.3	19.6	29.7 (L/L)	34.9 (-/L)	9.1	5.7	4.4
	左 9 m	2.2	2.3	2.3	2.4	24.6 (L/L)	33.0 (L/L)	34.2 (R/L)	6.5	4.6
ダウンスラスト 4度	右 9 m	2.3	26.0 (L/R)	32.3 (L/R)	36.3 (L/R)	38.7 (-/R)	8.0	6.0	4.9	4.2
	右 13 m	2.3	2.4	29.4 (L/stall)	34.3 (L/R)	38.1 (L/R)	9.2	6.5	5.1	4.3
	右 25 m	2.3	2.4	26.2 (L/R)	32.8 (L/R)	36.1 (L/R)	12.9	7.0	5.4	4.4
	直進	2.3	2.4	21.4 (L/-)	30.4 (L/-)	35.1 (L/-)	38.6 (L/-)	7.9	5.7	4.5
	左 27 m	2.3	2.4	2.5	26.2 (L/L)	33.9 (L/L)	36.8 (L/L)	9.5	6.1	4.7
	左 14 m	2.3	2.4	2.5	19.0	30.5 (L/L)	35.1 (L/L)	37.5(R/L)	6.6	4.9
	左 9 m	2.3	2.4	2.5	2.7	24.1 (L/L)	34.5 (L/L)	38.2 (L/-)	16.3	5.2
ダウンスラスト 2度	右 9 m	2.4	23.5 (L/R)	29.5 (L/R)	32.9 (L/R)	32.9 (L/R)	10.1	6.7	5.3	4.4
	右 13 m	2.4	20.3 (L/R)	28.5 (L/R)	34.6 (L/R)	33.4 (L/R)	37.3 (-/R)	7.0	5.5	4.5
	右 25 m	2.4	2.5	26.6 (L/stall)	33.1 (L/stall)	36.9 (L/L)	30.4 (L/R)	7.5	5.7	4.6
	直進	2.4	2.5	20.3 (L/-)	29.9 (L/-)	36.0 (L/-)	34.8 (L/-)	8.4	6.0	4.8
	左 27 m	2.4	2.5	2.7	24.8 (L/L)	33.6 (L/L)	35.8 (L/L)	34.6 (-/L)	6.4	4.9
	左 14 m	2.4	2.5	2.7	15.7	29.2 (L/L)	36.7 (L/L)	35.3 (-/L)	6.8	5.1
	左 9 m	2.4	2.5	2.7	3.0	20.8 (L/L)	33.9 (L/L)	34.2(-/L)	32.7 (-/L)	5.4
ダウンスラスト 0度	右 9 m	2.5	22.9 (L/R)	29.3 (L/R)	33.8 (L/R)	37.5 (L/R)	21.2 (stall)	6.4	5.2	4.3
	右 13 m	2.5	19.3	28.2 (L/R)	34.1 (L/R)	37.3 (L/R)	14.1	6.7	5.3	4.4
	右 25 m	2.5	12.1	24.1 (L/R)	31.9 (L/R)	36.5 (L/R)	19.2	7.0	5.5	4.5
	直進	2.3	2.5	17.2	27.9 (L/-)	34.7 (L/-)	35.1 (L/-)	7.3	5.7	4.6
	左 27 m	2.5	2.6	2.9	21.5 (L/L)	31.6 (L/L)	36.5 (L/L)	20.3 (stall)	5.9	4.8
	左 14 m	2.5	2.6	2.9	3.5	25.9 (L/L)	35.1 (L/L)	17.1	18.4	4.9
	左 9 m	2.5	2.6	2.8	3.3	14.0	30.9 (L/L)	25.9 (-/L)	28.7 R/L)	5.0
アップスラスト 2度	右 9 m	2.6	21.7 (L/R)	27.2 (L/R)	32.4 (L/R)	27.9 (L/stall)	17.6	8.7	4.7	4.1
	右 13 m	2.6	2.9	26.0 (L/R)	32.0 (L/R)	34.6 (L/R)	16.5	10.2	4.9	4.2
	右 25 m	2.6	2.8	20.8 (L/R)	29.3 (L/R)	34.4 (L/stall)	21.2 (L/stall)	29.0 (R/stall)	5.0	4.3
	直進	2.6	2.8	3.2	24.5 (L/-)	32.3 (L/-)	34.8 (L/-)	17.7	5.1	4.3
	左 27 m	2.6	2.8	3.1	16.0	28.2 (L/L)	34.5 (L/L)	18.1	5.2	4.4
	左 14 m	2.6	2.7	3.0	3.6	20.3 (L/L)	31.8 (L/L)	31.3 (L/L)	5.3	4.5
	左 9 m	2.5	2.7	3.0	3.5	4.3	25.3 (L/L)	33.5 (L/L)	5.4	4.6

適切な動力飛行の存在範囲の模式図



新しい調整法の考え方

- ゴムのトルクの大きな変動への対応
  - トルク変動による機体のピッチ角変動を小さくするため，スラストラインが機体重心近傍を通るように固定する.
- 調整状況の理解
  - 飛行の観察により，現状を把握できる. ⇒　前のスライド（模式図）
- スラスト角の調整をしない
  - スラスト角の微小な変化が運動に大きな影響をおよぼす. スラスト角の微調整は難しい.
  - スラスト角を最初に固定しておき，基本的に変えない.
- ラダーによる調整
  - 動力飛行調整はラダーで行う.
  - ラダーの調整は，タブ，またはガーニーフラップを使う.
  - 欠点：滑空旋回径を好みの値に調整できない.
    - サイドスラストの調整を追加すると，滑空旋回径を調整できる.

提案する調整法

1. 重心位置の決定
   - 水平尾翼容積比に応じた適切な重心位置を計算する.
   - おもりを使って重心位置を調節する.
   - 以後，重心位置を変えない.
2. 滑空試験による定常滑空迎角の設定
   - ゴムを巻かずに，滑空試験を行い，波状運動をしない定常滑空をするように，水平尾翼取付角，または水平尾翼後縁のガーニーフラップを使って調節する.
   - 左右に曲がらず滑空するように，垂直尾翼のタブ，またはガーニーフラップを使って調整する.
3. スラスト角の設定
   - サイドスラスト角はほぼゼロにセットする.
   - ダウンスラスト角は，プロペラ中心と機体重心を結ぶ線に一致するようにセットする（高翼機の場合）．ダウンスラスト角はこの角度で固定し，以後変えない.

提案する調整法（つづき）

4. 動力飛行の調整
   - 常用巻き数の約半分までゴムを巻き，上向き約20度で発進して飛行状態を観察する．模式図により，現在の設定状況を判断する．
     調整は垂直尾翼舵角（ガーニーフラップ）で行う．
     ① 旋回しながら上昇し，滑空に移行する．⇒ OK
       - 旋回の向きを確認すること．ほとんど旋回しない場合もある．
     ② 右方向に旋回しながら落ちる．速度は速い．
       - 垂直尾翼後縁の左側にガーニーフラップをつける．
     ③ 左方向に旋回し，ほとんど上昇しない．速度は速い．
       - 垂直尾翼後縁の右側にガーニーフラップをつける．
     ④ 左方向に旋回しながら落ちる．速度は速い．
       - 垂直尾翼後縁の右側にガーニーフラップをつける．
   - 巻き数を増やして，前項と同様に調整する．
   - 旋回滑空させたい場合は，サイドスラスト角を約1度つけて，調整をやりなおす．

謝辞

ゴム動力飛行機の調整について，親切に教えてくださった松本允介氏（「ゴム動力模型飛行機掲示板」サイトオーナー）に感謝します．

参考文献

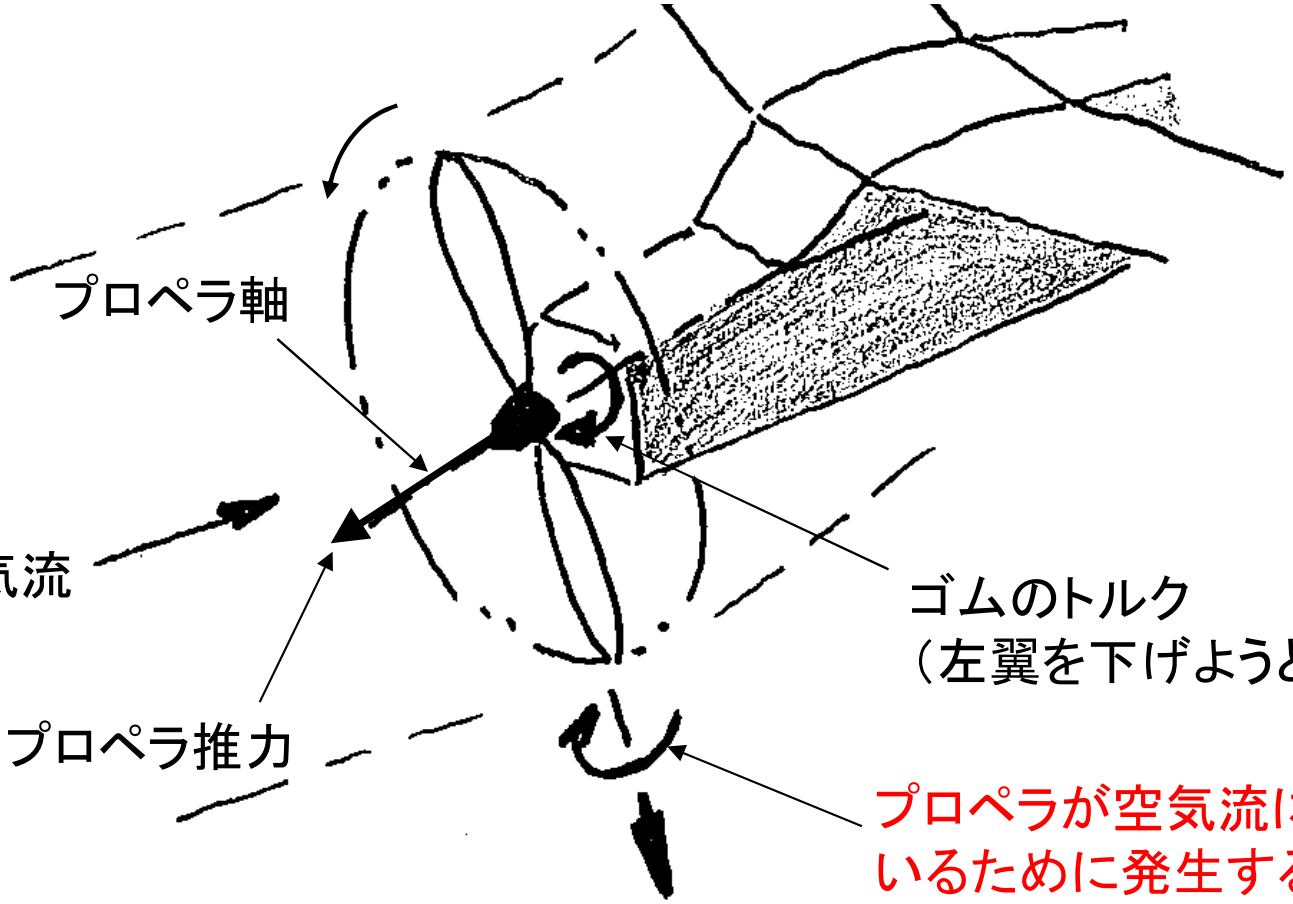
[1] 小池勝,「フリーフライト　F1B 滞空時間を延ばす技術と科学」, スタジオ・タック・クリエイティブ, 2022 年.

[2] D. Deloach, “My Approach to Rubber Scale Flying,” FAC Newsletter in 2012.

[3] D. Deloach, “Trimming Advice From Don Deloach,” July 2013 British SAM 35 Speaks Magazine.

[4] 平尾寿康,「石井英夫氏監修 ライトプレーンの4ステージ調整法」, 模型飛行機クラブ会報 Launchers 2009年11-12月号, p.14-15.

[5] 滝敏美,「ゴム動力模型飛行機の3次元運動解析」, 第61回飛行機シンポジウム講演集, 2023年11月.

高翼機

空気流がプロペラ軸に対して上方向からあたる
⇒ 機首を右に向けるヨーイングモーメントが発生
＝ ゴムのトルクによる左旋回を打ち消す効果