

### 3H04 測定した遠隔気流情報 (LIDAR 情報) を活用した、速度制御の為の推力設定法

○上村常治(東京大学)、ヨルグ・オノ・エントジナー(東京大学)  
森亮太(電子航法研究所)、鈴木真二(東京大学)、

#### Method of Thrust Setting for Speed Control using LIDAR Wind Information.

Tsuneharu UEMURA(CAIR), Jorg Onno ENTZINGER (Univ. of Tokyo), Ryota MORI(ENRI)  
Shinji SUZUKI (Univ. of Tokyo)

Key Words: LIDAR, Thrust setting, Speed Control

#### Abstract

Methods for speed control are considered utilizing future wind information obtained by LIDAR. In case of sudden wind change, LIDAR information can positively contribute to speed control. However optimal to keep constant thrust if the average wind has no big change and adequate thrust values are determined.

#### 使用した略号

LIDAR : Laser Imaging Detection and Ranging  
CAS : Calibrated Air Speed  
ATS : Auto Throttle System  
P-ALT : Pressure Altitude  
L-TSPD: LIDAR Target Speed  
RMSE : Root Mean Squared Error  
N1 : ファン・低圧コンプレッサー回転数  
IAS : Indicated Air Speed  
N1 TGT: 目標となる N1 回転数

#### 1. 概要

LIDAR 計測により、これから遭遇する風が予測できるとして、速度制御の為の推力制御法について、数値シミュレーションを行い、最適な推力設定法の考察を行った。JET 発動機は推力設定と、実際に発生する推力に時間遅れがある。そこで、前もって風速の変化が判るなら、その影響を加味して、目標となる速度 (L-TSPD、後述) を設定することで、効果的な速度制御が可能となると計算された。

さらに、風速の平均値が一定で、最適な推力設定値が判っているならば、その値を保持すれば、安定した飛行が可能と計算された。速度は守れても、騒音等で、客室環境が悪化する事は、現実的ではない。(図-11)

#### 2. LIDAR が無い場合の飛行法

これは筆者が今まで行っていた方法で、ベシック推力値 (後述) に加減速を考慮して、適正な

推力設定 (バランスド推力値) を用いて、速度制御する方法である。[参考文献 1)] 其の概要を説明する。まず、各種の飛行条件 (飛行高度、計器速度、飛行経路角、飛行形体、外気温度、風速、pitch 角) から、其の状態を満足する推力設定値を計算する。それをベシック推力と名付ける。それに加減速を加味して、最適な推力値を求める。それをバランスド推力と名付ける。

ところで、毎秒1ノットの加速、減速を生じる、推力設定値は、簡便法として、3度の降下角度の推力と水平飛行の推力差がかなり良い精度で、使用できる。最終進入時の飛行形体では、飛行速度は抵抗が最小の所に近いので実用上それが可能である。

飛行中は現在の風向・風速は飛行計器で表示される。地表の風は、管制塔から知らされる。因って、操縦者はその間の風向・風速の変化はある程度予想できる。風の変化に起因する、機体表示速度の変化も予想出来る。結果、加速度を加味した推力設定値 (バランスド推力) は推定できる。

#### 2.1 実施例 (図-1/2)

前述の論文で掲載した実際の飛行記録である。途中で Auto throttle system を OFF とし、その後はバランスド推力値を保持している。図-1の一部、オレンジ色で囲まれた区域を推力設定に注目して、拡大したのが、図-2である。

実施例は推力一定で飛行している。後で判ったが、これは平均気流が判った時に、適切な推力設定法と考えられる。実施例は接地90秒前から、接地操作まで推力設定値は一定である。速度はゆっくりと減速している。

制御を採す為に 0.5 秒に一回とした。(図-11)

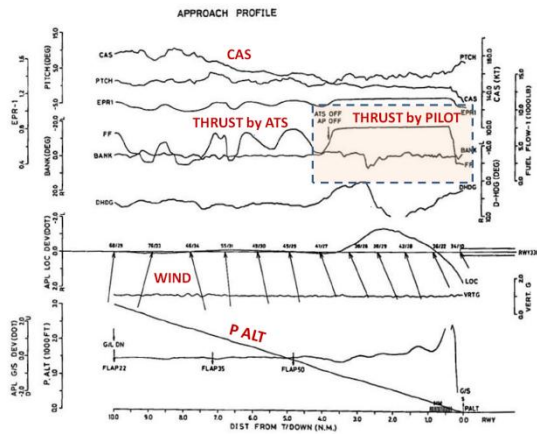


図 1 飛行機記録

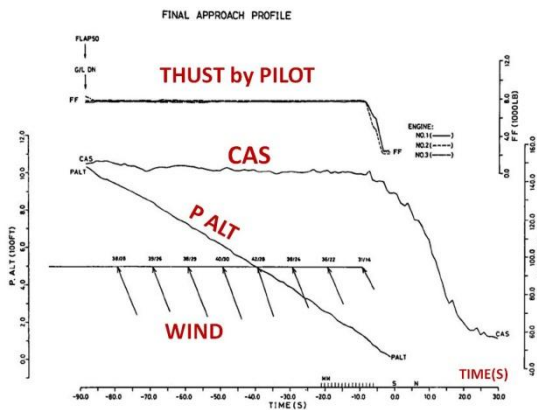


図 2 飛行記録 (図-1 拡大)

### 3. LIDAR を想定した飛行シミュレーション

#### 3.1 以下の条件で行った

1. 航空機 B747-400
2. 発動機 CF-6 80C2B1F
3. 高度 1000ft (水平飛行)
4. 飛行形体 FLAP=10、降着装置 上げ
5. 計器飛行速度 180kt
6. 外気温度 IAS+0
7. 推力の時間遅れ係数、3 秒

#### 3.2 速度制御機能

速度制御につかう飛行情報を、目標速度差、速度微分値、目標飛行経路差とした。

その各値に、重みを与え、必用な推力設定値を求めた。そして、その推力設定値で、速度保持する機能とした。推力設定の時間遅れ係数は 3 秒後と仮定した。

人間の制御を想定し、4 秒に一回の推力設定とした。ただし、5.4 で速度変化を最小にする推力

#### 3.3 高度制御機能

高度制御に使用する飛行情報を、目標飛行経路角差、飛行経路角一階微分値、飛行経路角二階微分値とし、その各値に、重みを与え、pitch 角加速度を求めた。そして、その角加速度を操舵量として、高度保持する機能とした。

#### 3.4 目標とする飛行と風の設定

飛行は、直線飛行で、横方向の運動は考えていない。また風は高度に関わらず一定で、進行方向の水平成分が時間で変化するとした。飛行高度は揚力の影響を受け、変化するが、モデルの航空機は高度制御機能で水平直線飛行を試みる。

#### 3.5 航空機数値モデル

東大航空宇宙工学専攻、鈴木・土屋研究室で開発した、航空機数値モデルを使用した。(図-3)

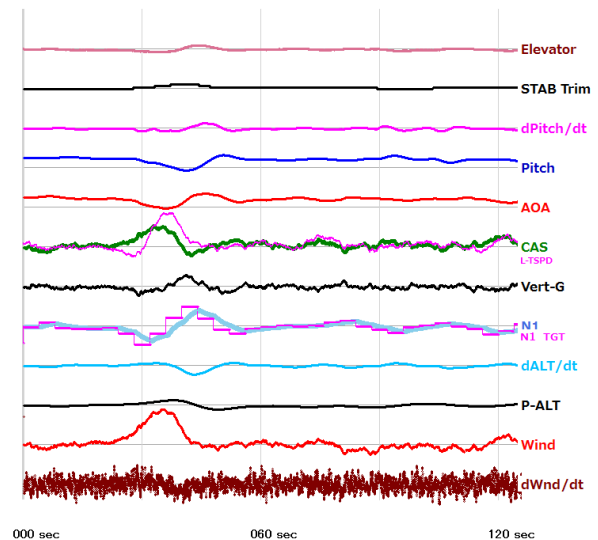


図 3 モデルで計算された内部変数の一部

#### 3.6 RMSE の判断基準

ここでは RMSE が 80%以下で、有効・優位と判断する事にした。

#### 4. L-TSPD (LIDAR Target Speed)

L-TSPD とは、LIDAR で計測した将来遭遇する風速変化を考慮して定めた、目標速度である。この目標速度に追従する速度制御を試みる。

この速度は、例えば、数秒後に、速度が急減する場合、前もって増速しておけば、それに対処できる。急増はその逆である。速度制御は推力で行

うが、そこには時間遅れが存在する。

さらに、風の変化の平均値がゼロでも、計測された分散値を加えておけば、最低速度を切る危険性が減少する。

### 5. 計算結果(除く乱気流)

速度表示のマゼンタ色線は、L-TSPD の値であり、推力表示のマゼンタ色は、推力のコマンド値である。(図-5) 推力は時間遅れを伴って、この値となる。青い太い線は、遅れて設定される N1 値である。

#### 5.1 迎え風が 20 秒かけて 10kt 増速し、其のままの場合 (図-4/5) (表-1)

RMSE を見ると、L-TSPD に有効性は見られない。

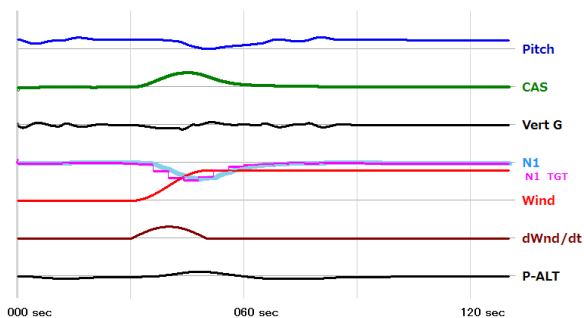


図 4 10kt 風が増加した場合 L-TSPD 無

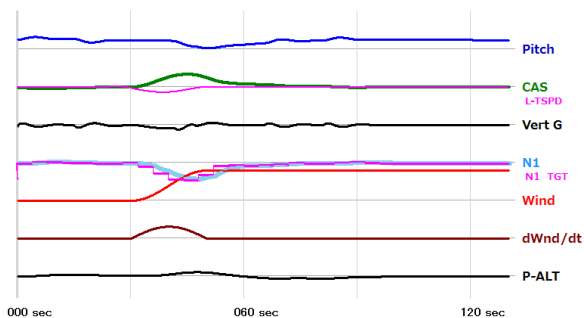


図 5 10kt 風が増加した場合 L-TSPD 有

表 1 RMSE 10kt 風増加時

L-TSPD	CAS (kt)	ALT (ft)	Vert G
無し	1.76	6.34	0.00452
有り	1.62	5.82	0.00432

#### 5.2 迎え風が 20 秒かけて 10kt 増速し、その後 20 秒かけてゼロに成った場合 (図-6/7) (表-2)

L-TSPD は速度制御に優位である。RMSE では評価できないが、航空機運用の観点からは、目標速度を

切っていない事は大いに有用である。

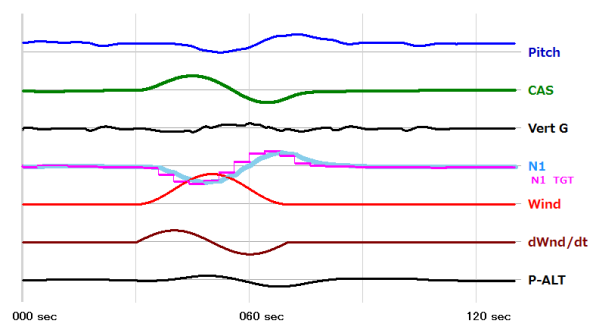


図 6 増加減少時 L-TSPD 無

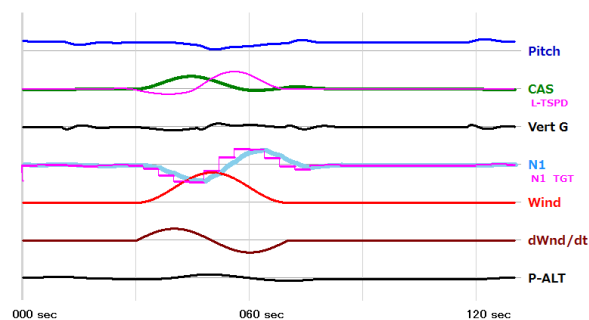


図 7 10kt 増加減少風 L-TSPD 有

表 2 MSE 10kt 増加減少時

L-TSPD	CAS (kt)	ALT (ft)	Vert G
無し	2.06	8.46	0.00641
有り	1.54	5.21	0.00462

#### 5.3 25 秒から 20 秒かけて、迎え風が 10kt 増速し、ゼロに戻る。その後 50 秒から 40 秒かけて、追い風が 10kt 増速し。そしてゼロに戻る場合 (図-8/9) (表-3)

L-TSPD 有は速度・高度で優位である。

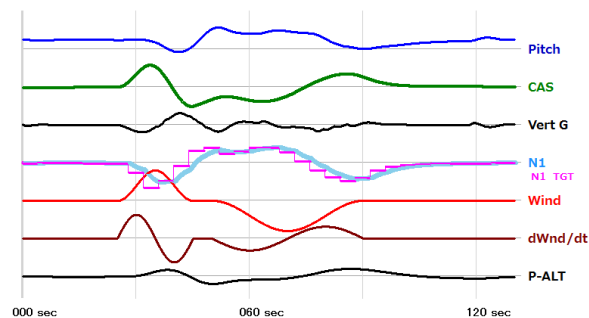


図 8 増加減少、減少増加 L-TSPD 無

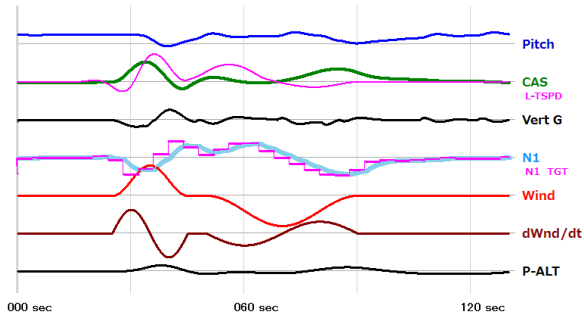


図 9 増加減少、減少増加 L-TSPD 有

表 3 RMSE 増加減少・減少増加時

L-TSPD	CAS (kt)	ALT (ft)	Vert G
無し	3.34	13.27	0.01199
有り	2.50	7.71	0.01003

5.4 周期 10 秒のサイン形状の風 (図-10/11/12) (表-4)

速度の制御には、不満が残る。(図-10) そこで、速度変化を最小にする事を目標とし、それを満足する、条件を探した。(図-11) この時、先読みは 3.5 秒となった。

結果を良く見ると、確かに速度変動は最小に近づいたが、その条件を満足する推力変化は、大きくて、客室環境は快適では無い。

RMSE (表-4) では、速度変化を最小にする制御は、速度では、優位だが、その他は、ほぼ同じである。L-TSPD 有りは、ほぼ推力一定の飛行と成った。(図-12)

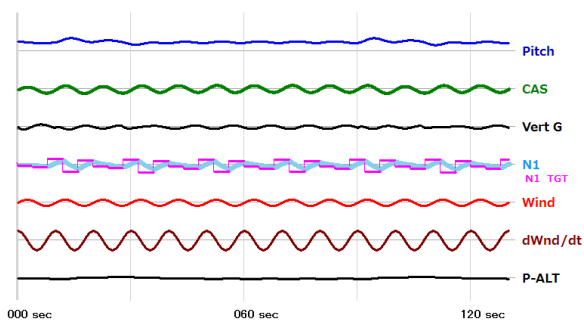


図 10 周期 10 秒サイン波風 L-TSPD 無

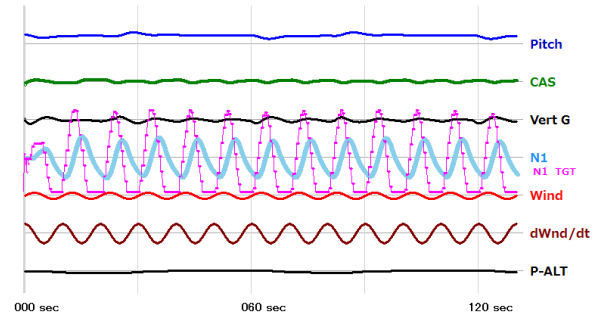


図 11 速度変化を最小にする飛行

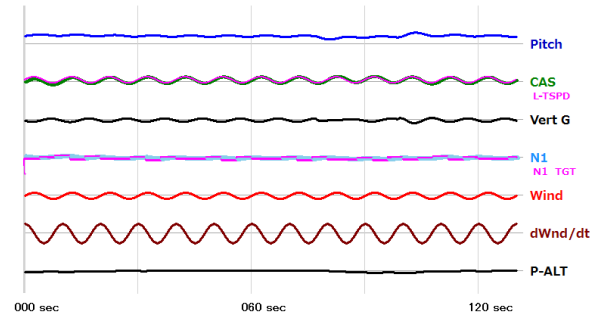


図 11 10 秒サイン波風 L-TSPD 有

表 4 RMSE 10 秒サイン波風

L-TSPD	CAS (kt)	ALT (ft)	Vert G
無し	0.85	2.60	0.00380
速度変化最小	0.58	3.26	0.00432
有り	1.14	2.57	0.00412

5.5 周期 5 秒のサイン形常の風 (図-13)

L-TSPD 有りを一つ示す。ほぼ推力一定の速度制御に成った。風速の上ピークと下ピークは周期の半分の 2.5 秒である。推力遅れが有るので、速度一定にする速度制御は出来ない。同様に推力一定の飛行がお勧めである。

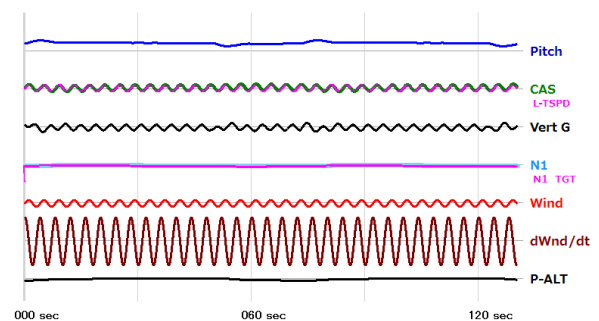


図 12 周期 5 秒のサイン波風 L-TSPD 有

## 6. 計算結果(乱気流中の飛行)

乱気流として、Dryden Wind Turbulence model を使用した。

### 6.1 L-TSPD 有無とバランスド推力一定 (図-14/15/16) (表-5)

高度、速度に、乗り心地、そんなに差は無い。(表-5) 推力設定は、T-TSPD 有りは無駄な動きが少ない。バランスド推力一定は(図-16) なかなか良い制御と思える。つまり、必要な推力設定値を保持する事が、運用上良い制御と言える。

速度を除き RMSE にはあまり差は見られない。バランスド推力一定飛行は速度の RMSE が若干大きい。

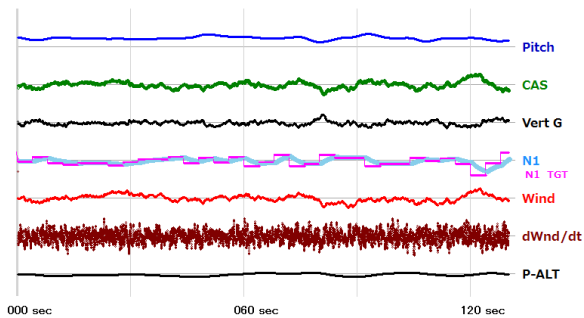


図 14 乱気流 L-TSPD 無

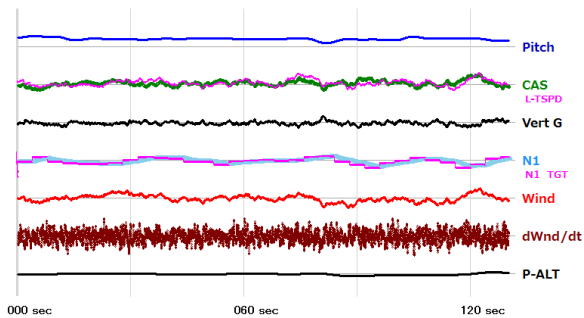


図 15 乱気流 L-TSPD 有

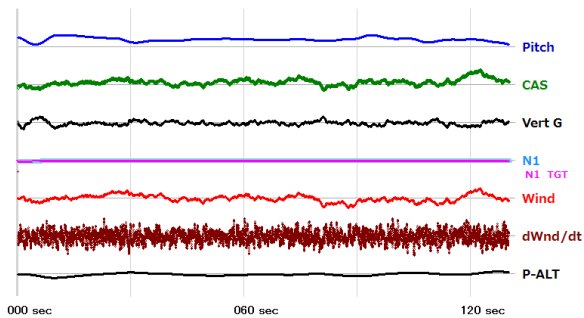


図 16 乱気流 バランスド推力一定

表 5 RMSE 乱気流飛行の比較

L-TSPD	CAS (kt)	ALT (ft)	Vert G
無し	0.93	4.16	0.00631
有り	1.07	2.50	0.00527
推力一定	1.30	3.86	0.00570

### 6.2 乱気流中の飛行法

現状の乱気流中の飛行法は、速度保持は緩やかに、高度の保持も緩やかに、そして推力はバランスド推力近辺に設定する。

### 6.3 乱気流と 5.2 の風が合わさった風 (図-17/18) (表-6)

L-TSPD 有りは、速度・高度で優位となり、推力制御は無駄な動きが少くない。

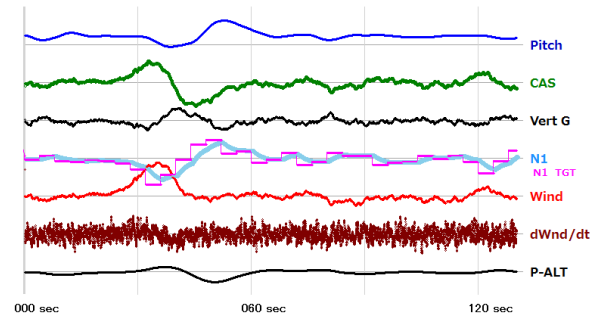


図 17 気流 10kt 増加減少 L-TSPD 無

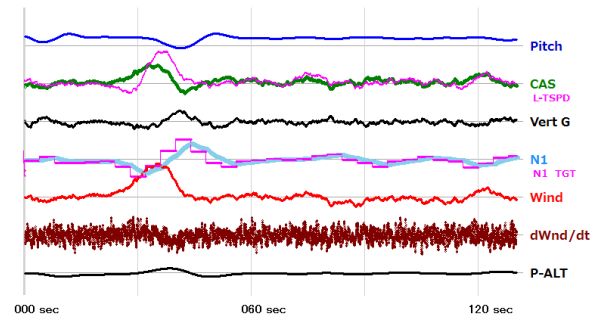


図 18 気流 10kt 増加減少 L-TSPD 有

表 6 RMSE 乱気流 10kt 増減

L-TSPD	CAS (kt)	ALT (ft)	Vert G
無し	2.79	10.68	0.01316
有り	2.04	5.63	0.01010

## 7. 考察

- 今回の計算により、LIDAR による、将来遭遇する、風が計測出来れば、L-TSPD を使用して、より有効な速度制御が出来る。また、無駄が少ないスムーズな推力制御となる。
- 周期 10 秒の規則的な風に起因する速度変動は、LIDAR 情報を用いて速度制御は出来るが、客室環境を考えれば、現実的ではない。
- JET 発動機は、推力の時間遅れが有るので、あまり短い風の変動は、制御出来ない。
- LIDAR 情報により、平均風速が変化しないもしくは変化が予想できた場合、機体速度の保持は風に任せて、推力設定一定で、飛行する事は現実的な良い制御との答えが得られた。
- バランスド推力値の把握は必須である。

## 8. 問題点

上下方向と左右の風速変化は考えていない。今後はそれを考慮して同様の計算を試みたい。

人間の操縦を模して、推力制御は 4 秒に一回としたが、現在は、高度制御は 1/100 秒に一回である。同様に、1 秒に一回としたい。

## 9. 速度を守る事の意義（目的と手段）

航空機は、飛行を安全に快適に運航する事を目的としている。そして、その手段として、推力を制御して、速度を守る。

状況により、安全性を確保するために、速度を第一目的とする場合もあるが、推力設定一定で、速度が多少変動しても、安全に快適に運航出来れば、それは現実的な飛行方法である。

## 10. 感想

LIDAR 情報を活用した、速度制御の為の推力制御法を模索していたが、状況に応じ、バランス推力一定で、速度は風まかせの飛行は、有用な推力制御と計算された。実施例（図-2）はそれを実践していた。

実施例は、幸運な飛行記録と想っていたが、今は、バランスド推力を維持すれば、誰でも出来る、手法と思う。現状で速度制御に、苦勞するのは、過度に目標速度を追いかけるからであり、速度保持の重みを減らし、バランスド推力を維持すれば、安定した飛行に成ると思う。それを実施する判断に、LIDAR 情報は有益である。

## 11. 展望

ここで計算された、速度制御の為の N1-TGT（目標 N1 値）は、推力の FD（Flight Director）として期待している。

発生する推力と、機体速度と加速度から、上下方向の速度が想定される。計測される、上下速度との差より、下降気流を表示する機能として期待している。[参考文献 2) ]

## 参考文献

- 1) 上村 常治、加藤 寛一郎、「ジェット旅客機の進入時の推力設定に関する一覚書」Vol. 40(1992) No457 P92-102。
- 2) 上村 常治、加藤 寛一郎、「Digital Flight Recorded Data から下降気流を推定する方法」VOL. 41(1993) No. 474 P400-406。
- 3) 上村 常治、鈴木 真二、柄沢 研治、「燃料消費節減に効率的な降下開始地点の予測についての覚書（降下飛行の経験則の検証」、航空宇宙技術、12、2013、p. p. 107-109。