

宇宙往還機帰還経路設計開発の効率化概念検討*

原 裕二^{*1}, 伊藤美子^{*2}, 末松俊二^{*3}

Conceptional Study for Improving the Efficiency of the Return Flight Path Design of the Space Shuttle*

Yasuji HARA^{*1}, Fumiko ITO^{*2}, Shunji SUEMATSU^{*3}

ABSTRACT

The return flight path of the space shuttle used to be designed through parametric iteration to reduce the gaps at the interface points of the two adjacent flight paths, of different flight phases of reentry, TAEM (Terminal Area Energy Management) and AL (Approach Landing), which are maneuvered by the guidance program.

This research shows that the return flight path can be deduced from the gliding performance which is determined by the lift/drag ratio (L/D), where L/D is controlled by the angle of attack, the speed brake angle and the bank angle, and that an algorithm to determine the return flight path corridor depending on the gliding capability of the vehicle can be derived.

Keywords: winged space vehicle, return flight path, reentry, space shuttle

概 要

宇宙往還機の再突入以降の帰還経路は、帰還飛行経路を再突入・エネルギー調整・進入着陸の3つのフェーズに分割し、各フェーズ間のインタフェース条件を仮定した上で、設計された誘導則をもとに各フェーズの飛行経路を個別に計算し、インタフェース点における各パラメータ値の差を最小とするよう繰り返し計算して求めるのが一般的である。本研究は、帰還飛行経路を飛行フェーズに分割し繰り返し計算により求めるのではなく、再突入から着陸点近傍までの飛行経路を機体の揚抗比で定まる帰還飛行時の滑空性能から、包括的に把握する手法を検討し、帰還飛行経路の存在域を回廊として求めるアルゴリズムの開発を行うものである。

1. 緒 言

宇宙往還機の帰還飛行経路の設計は概要の項でも触れた如く、飛行フェーズを3つに分けた上、これらフェーズ間のインタフェース条件と共に、各フェーズを飛行する際の迎角、バンク角、スピードブレーキ舵角等のスケジュー

ル他についてのパラメトリック・スタディによって実施するのが通常であり、これは常に複雑且つ多大の労力を要する作業である。ところで、今日迄にエネルギー・マニユーバビリティと云う概念が高機動性のジェット機の機動性を評価する為に、またエネルギー上昇法が上昇性能と上昇経路を推定する為に導入されてきた。これらのコンセプト

* 平成10年3月31日受付 (received March 1998)

*1 元新型航空機研究グループ 第3研究グループ
現三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所

宇宙技術部 基礎設計課 (Preliminary Designing Section, Space Systems Engineering Department, Mitsubishi Heavy Industries, Nagoya Aerospace Systems)

*2 新型航空機研究グループ (Advanced Aircraft Research Group)

*3 宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)

の共通要素はフライト・ダイナミクスの細部を無視した上、機体の運動を機体に加わる力とこれによる加速度の関係から把握するのではなく、エンジン・スラストによるエネルギーの流入と空力抗力によるエネルギーの消費に注目しエネルギー遷移の過程ととらえた点である。これらの手法は荒削りではあったが、日常のフライトにおいて詳細な解析を実施し得ない運用部門においては頼りとされ且つ成功した手法と見なされてきたと云って良い。本研究はエネルギー上昇法で提案された準定常飛行(Quasi-Steady State Flight)の概念(飛行中の運動方程式で $dy/dt = 0$ を仮定すること)を宇宙往還機の帰還飛行経路の設計に適用する試みであり、これにより帰還飛行経路設計の為の労力を低減すると共に帰還飛行経路の存在域を回廊として示すことで、様々な手法で求められる帰還飛行経路の妥当性の判断の一助となることが期待される。

2. 本 論

2.1 帰還飛行経路を求めるアルゴリズムの概要

2.1.1 宇宙往還機の運動方程式

検討に当たって使用する宇宙往還機の運動方程式を以下の(1)~(4)式に示す。ここでは、検討の対象とする機体の運動をダウンレンジ方向のみに限り、バンクを確立したときに発生するクロスレンジ方向への運動は考慮しない。

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{D}{m} - \left(\frac{R_o}{R_o + h}\right)^2 \cdot g_o \cdot \sin \gamma \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} = & \frac{L \cdot \cos \phi}{m \cdot V} - \left(\frac{R_o}{R_o + h}\right)^2 \cdot \frac{g_o}{V} \cdot \cos \gamma \\ & + \frac{V \cdot \cos \gamma}{R_o + h} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dh}{dt} = V \cdot \sin \gamma \quad (3)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{R_o}{R_o + h} \cdot V \cdot \cos \gamma \quad (4)$$

V ; 速度, t ; 時間, D ; 空力抗力, m ; 機体の質量,
 R_o ; 地球の半径, h ; 高度, g_o ; 地表面での重力定数,
 γ ; 飛行経路角, L ; 揚力, ϕ ; バンク角,
 s ; ダウンレンジ

飛行時に、制御変数となりうるのは機体の揚抗比を決定する迎角そして抗力を変化させるスピード・ブレーキ舵角及び揚力の方向を左右に傾けることで揚力の上向き方向成分を変化させるバンク角である。バンク角をとると揚力の方向が上向き方向から外れると共に速度ベクトルに対し水

平方向の成分の力が発生する。本来はこの水平方向の成分の力で飛行経路を曲げクロス・レンジを生じる為には実際の飛行経路の長さはダウン・レンジよりも長くなるが本論においてはバンク角は揚力の上向き成分を減らす機能を分担するのみとし、クロス・レンジの発生とこれによる飛行経路の増加は考慮しないこととする。

2.1.2 宇宙往還機の帰還経路上での機体運動

一般に航空機の高マヌーバ中を除く通常の飛行時と同様宇宙往還機の帰還経路上での機体運動は、速度ベクトル方向の速度の変化率に比べ速度ベクトルに垂直方向(通常は揚力方向)の変化率は小さく、これをゼロとおいても質点としての機体運動は十分近似できると考えられる。この条件をここでは準定常飛行の条件と呼ぶこととし、この条件を満たす飛行経路を準定常飛行経路と呼ぶ。この時飛行経路角の変化率である $d\gamma/dt$ はゼロであると仮定できる。

ここで(2)式より(5)式を得る。($\phi = 0$ と仮定する。)

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} = & \frac{L}{m \cdot V} - \left(\frac{R_o}{R_o + h}\right)^2 \cdot \frac{g_o}{V} \cdot \cos \gamma \\ & + \frac{V \cdot \cos \gamma}{R_o + h} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

この条件において、以下の式が導出できる。先ず V が $+\Delta V$ 変化したとして V を $V + \Delta V$ に置き換える。この時、(2)式は、

$$V \rightarrow V + \Delta V \quad (6)$$

$$\frac{1}{V + \Delta V} = \frac{1}{V} \cdot \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) \quad (7)$$

の変換により、

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} = & \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V + \Delta V)^2 \cdot C_L \cdot S}{m \cdot (V + \Delta V)} - \left(\frac{R_o}{R_o + h}\right)^2 \\ & \cdot \frac{g_o}{V + \Delta V} \cdot \cos \gamma + \frac{(V + \Delta V) \cdot \cos \gamma}{R_o + h} \end{aligned} \quad (8-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} = & \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V + \Delta V)^2 \cdot C_L \cdot S}{m \cdot (V + \Delta V)} - \left(\frac{R_o}{R_o + h}\right)^2 \\ & \cdot \frac{g_o}{V} \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) \cdot \cos \gamma + \frac{(V + \Delta V) \cdot \cos \gamma}{R_o + h} \end{aligned} \quad (8-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} = & \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_L \cdot S}{m \cdot V} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \Delta V \cdot C_L \cdot S}{m \cdot V^2} - \\ & \left(\frac{R_o}{R_o + h}\right)^2 \cdot \frac{g_o}{V} \times \left(1 - \frac{\Delta V}{V}\right) \cdot \cos \gamma + \\ & \frac{(V + \Delta V) \cdot \cos \gamma}{R_o + h} \end{aligned} \quad (8-3)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{L}{m \cdot V} - \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot \frac{g_o}{V} \cdot \cos\gamma + \frac{V \cdot \cos\gamma}{R_o + h} + \left(\frac{L}{m \cdot V^2} + \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot \frac{g_o}{V^2} \cdot \cos\gamma + \frac{\cos\gamma}{R_o + h} \right) \cdot \Delta V \quad (8-4)$$

を得る。

ここで ρ ; 空気密度, C_L ; 揚力係数, S ; 翼面積, σ ; である。(8-4)式において右辺の最初の3つの項は(5)式よりその値はゼロとおけるから,

$$\frac{d\gamma}{dt} = \left(\frac{L}{m \cdot V^2} + \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot \frac{g_o}{V^2} \cdot \cos\gamma + \frac{\cos\gamma}{R_o + h} \right) \cdot \Delta V \quad (8-5)$$

を得る。この式は(5)式を用いて $L / m \cdot V^2$ を消去し,

$$\frac{d\gamma}{dt} = \left(\frac{L}{m \cdot V^2} + \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot \frac{g_o}{V^2} \cdot \cos\gamma + \frac{\cos\gamma}{R_o + h} \right) \cdot \Delta V = 2 \cdot \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot g_o \cdot \cos\gamma \times \frac{\Delta V}{V^2} \quad (8-6)$$

と記述する事も可能である。(8-5)式, (8-6)式で V に掛かる係数相当部分の符号は正でありこれは準定常飛行経路から速度が V ずれた時, V が正の時は飛行経路角は増大し, V が負の時は飛行経路角は減少することを示す。従って, 高度・速度平面を準定常飛行経路が分割する2つの領域において高速側の領域が準定常飛行経路の下側, 低速側が準定常飛行経路の上側にあれば, 飛行中の質点に対して準定常飛行経路に接近させる方向の力が働くことになる。言い換えれば, 準定常飛行経路の右上がり(速度増加時に高度増加, 速度減少時に高度減少; $dV/dh > 0$)の領域に於いては宇宙往還機にはダイナミック・パス[(1)式~(4)式の運動方程式を解いて求まる飛行経路]を準定常飛行経路に収束させる力が働くことを示している。

2.1.3 準定常飛行経路の求め方

準定常飛行経路は高度・速度平面上では(5)式を満たす点の集合と見なすことができる。即ち, これらは何らかの時間的履歴としての関係を有する点の連続ではなく単に準定常飛行の条件(5)式を満たす個々の点を結んだ線として定義される。(5)式は高度 h , 速度 V , 飛行経路角 γ の3変数を含み, 本式のみでは一意的にこれらの値を決定するこ

とは出来ない。これらの値を求めるには, 例えば次の様な手順による必要がある。

(1) 準定常飛行経路を求める手順

- ① 準定常飛行経路を求める高度領域で特定の一点の高度を選択する。
- ② 上記高度における飛行経路角 γ の値を仮定しこの高度と飛行経路角に対し(5)式を満足する速度及びこの時のトータル・エネルギーを求める。
- ③ 上記高度の上下に h の高度差を持つ2点を仮定し, この高度差の範囲で飛行経路角 γ は前項で仮定した値で一定と仮定した上(5)式を用いてこれらの上下2点の高度における速度を求める。
- ④ これら2点の高度・速度より, それぞれの点のトータル・エネルギー量を求めた上, その差分を求める。
(9)式参照
- ⑤ 滑空中のエネルギー消費は滑空路長(= $[$ 水平飛行距離 2 + 高度差 $^2]$ $^{1/2}$)と空力抗力の積であるから, この関係式から2点間のエネルギー消費を求める。
(10)式参照
- ⑥ 前項と前々項で求めたエネルギー差分とエネルギー消費の大小関係を求める。
- ⑦ ④項⑤項のエネルギー差分とエネルギー消費の差がゼロになる飛行経路角 γ を求めるイタレーションを②~⑦項のループで実施する。
- ⑧ 飛行経路角が変化しなくなった時点の速度 V , 飛行経路角 γ が当該高度での準定常飛行経路の速度と飛行経路角である。
- ⑨ 再突入以降の各高度点に対して上記手順を実施することで, 高度・速度平面上での準定常飛行経路を得る。

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_+^2 - \frac{m \cdot g_o \cdot R_o^2}{R_o + h_+} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_-^2 + \frac{m \cdot g_o \cdot R_o^2}{R_o + h_-} \quad (9)$$

$$\Delta E_2 = D \cdot \sqrt{\Delta \ell^2 + \Delta h^2} \quad (10)$$

ℓ ; 水平飛行距離, h ; 高度差,

E_1 ; 高度差 $\pm h$ の2点間のトータル・エネルギー差,

E_2 ; 高度差 $\pm h$ の2点間を飛行する場合のエネルギー消費量, D ; 平均的空力抗力, C_D ; 抗力係数,

h_+ ; 高高度側の高度, h_- ; 低高度側の高度,

V_+ ; 高高度側の速度, V_- ; 低高度側の速度,

(2) ダウン・レンジを求める手順

- ① 準定常飛行経路の隣り合った点につき, 2点間の水平飛行距離を求め, 求めた水平飛行距離を地表へ投影し

て隣り合った2点間のダウンレンジ増分とする。

(11)式参照

- ② ダウンレンジ増分の総和を求め、準定常飛行経路全体に亘るダウンレンジとする。(12)式参照

$$\Delta s = \sqrt{\frac{\Delta E_{DR}^2}{D^2} - \Delta h_{DR}^2} \times \frac{R_o}{R_o + h} \quad (11)$$

$$s = \sum \Delta s \quad (12)$$

s ; ダウンレンジ増分, h_{DR} ; 高度差,
 E_{DR} ; 高度差 h_{DR} の2点間のトータル・エネルギー差, D ; 平均的空力抗力, s ; 準飛行経路全体に亘るダウンレンジ

(5) 式より飛行高度・速度が大きく飛行経路角が小さい領域では準定常飛行経路の高度・速度平面上での飛行プロファイルの決定要因は揚力係数であり(10)~(11)式より飛行経路角と飛行距離の決定要因は抗力係数である事が示される。

(3) 準定常飛行経路設定アルゴリズムのフローチャート Appendix A に再突入以降の準定常飛行経路を求めるアルゴリズムの主要部分のフロー・チャートを示す。これらのフロー・チャートの概要は以下である。

図 A-1; メイン処理

図 A-2; 準定常飛行状態量計算

メイン処理から呼ばれる。2.1.3 項(1) 準定常飛行経路を求める手順で②~⑦項のイタレーションを実施するアルゴリズム

図 A-3(1/2); ダウンレンジ - 高度差の幾何学的関係によるエネルギー差算出

準定常飛行状態量計算から呼ばれる。2.1.3 項(1) 準定常飛行経路を求める手順の⑤項の計算を実施するアルゴリズム

図 A-3(2/2); 2点高度間でのエネルギー差算出

準定常飛行状態量計算から呼ばれる。2.1.3 項(1) 準定常飛行経路を求める手順の③及び④項の計算を実施するアルゴリズム

図 A-4; 準定常飛行速度&エネルギー計算

ダウンレンジ - 高度差の幾何学的関係によるエネルギー差算出と2点高度間でのエネルギー差算出から呼ばれる。2.1.3 項(1) 準定常飛行経路を求める手順の②項の計算を実施するアルゴリズム

2.2 計算例

(1) ダイナミック・パスが準定常飛行経路に収束する計算例
ダイナミック・パスが準定常飛行経路に収束することを示す計算例を図1(初期高度 12.5km, 揚抗比 6, フロント・サイド), 図2(初期高度 80km, 揚抗比 1.7, バック・サイド)に示す。これらの図は準定常飛行経路を計算の後 準定常飛行経路の初期高度・速度・飛行経路角で運動計算を開始した場合のダイナミック・パスを求め準定常飛行経路とダイナミック・パスの一致の程度を見たものである。これらの図に於いては準定常飛行経路とダイナミック・パスの一致の程度は良好である。次に、初期条件でのトータル・エネルギー量が同等で、高度と速度に差を与えた場合についての計算例を図3(初期高度

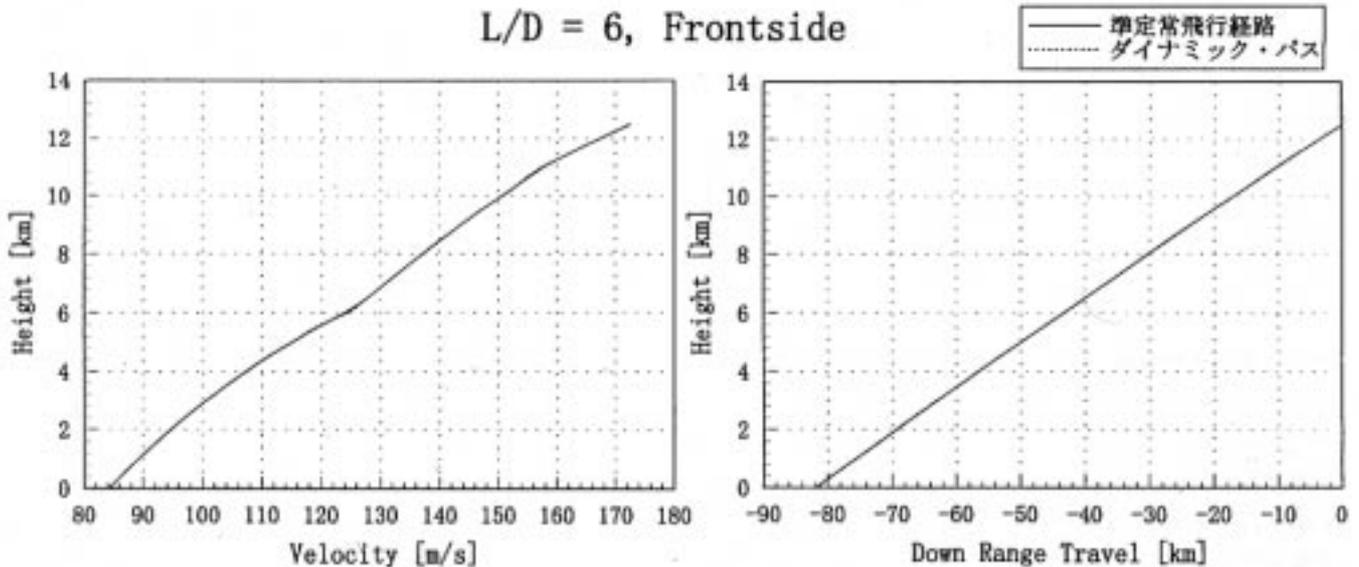


図1 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較

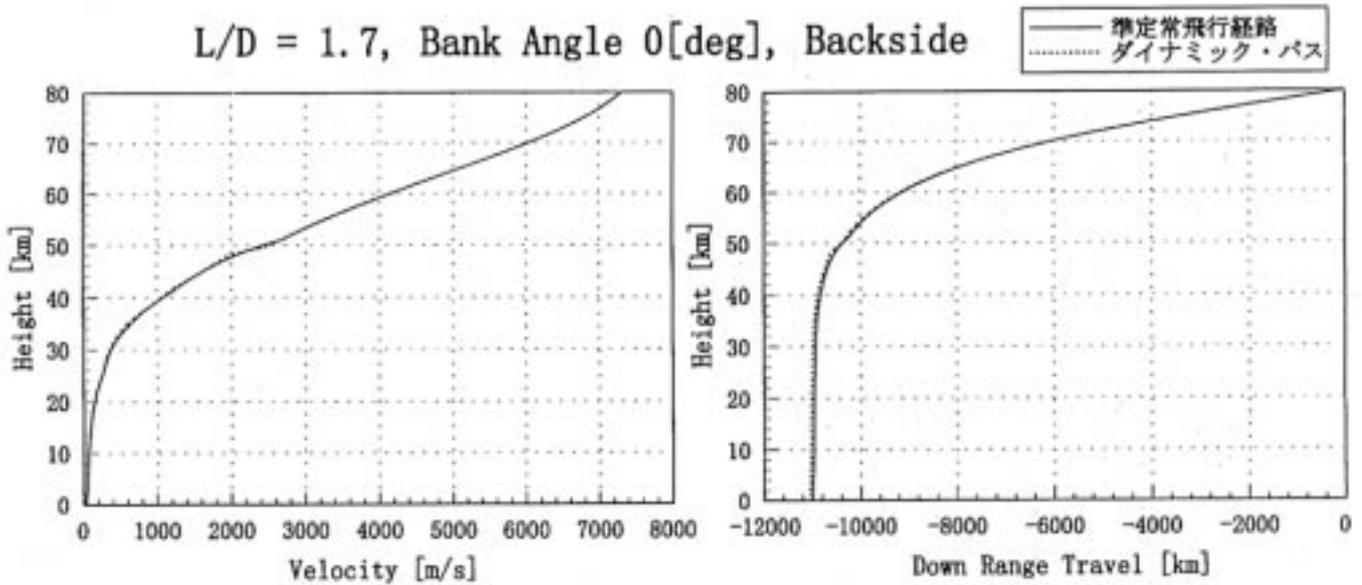


図2 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較

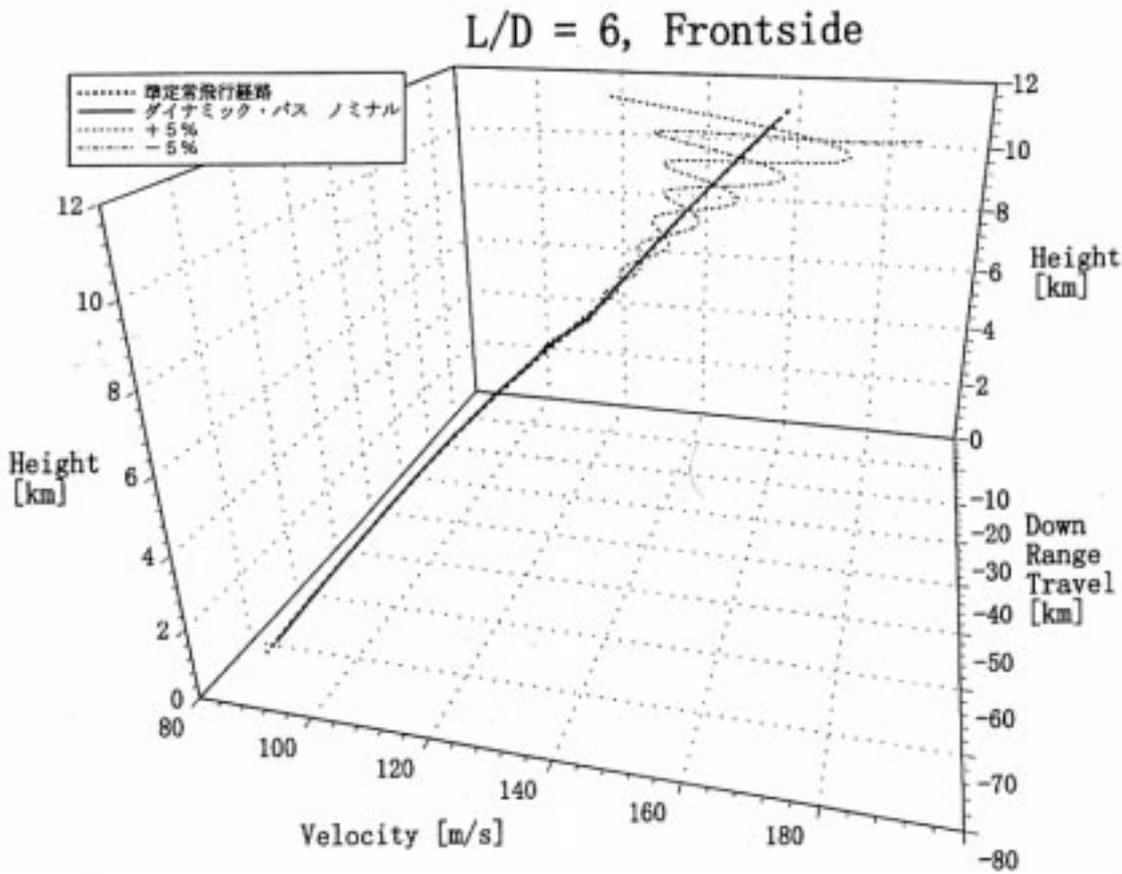


図3 初期エネルギー同等の場合の飛行経路の比較

11.5km, 揚抗比6, フロントサイド, 高度差 $\pm 5\%$)と図4 (初期高度80km, 揚抗比1.7, バンク角0deg, バックサイド, 高度差 $\pm 5\%$)に示す。これらによればエネルギー状態が同等であれば準定常飛行経路から初期高度速度が多少外れていても最終的に飛行経路は準定常飛行経路に収束する。

(2) 準定常飛行経路とダイナミック・パスにずれが生じる計算例

前項とは異なり, 準定常飛行経路とダイナミック・パスにずれが生じる事例も見られる。図5 (1/3) (2/3) (3/3) (初期高度120km, 揚抗比1.5, バンク角0deg, 45deg, 60deg)では高度・速度平面では準定常飛行経路とダイナ

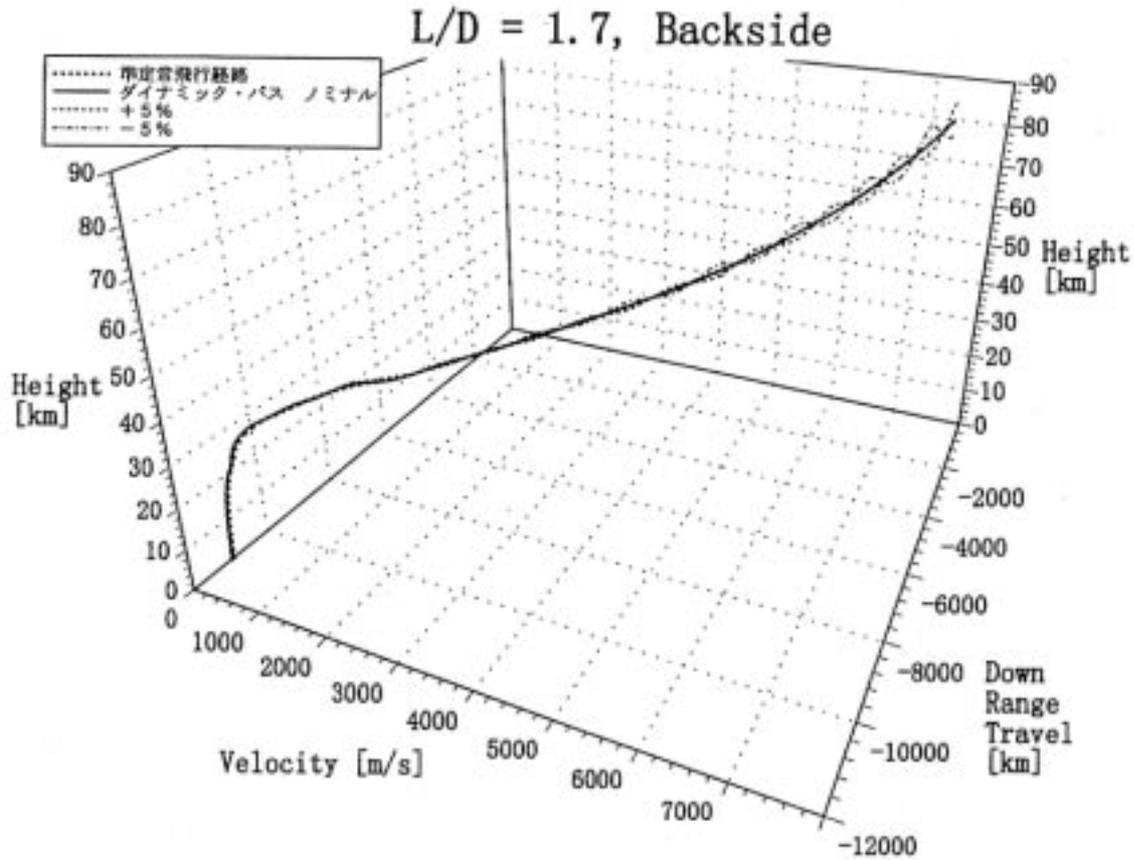


図 4 初期エネルギー同等の場合の飛行経路の比較

H=120 L/D=1.5 Bank=0 Backside

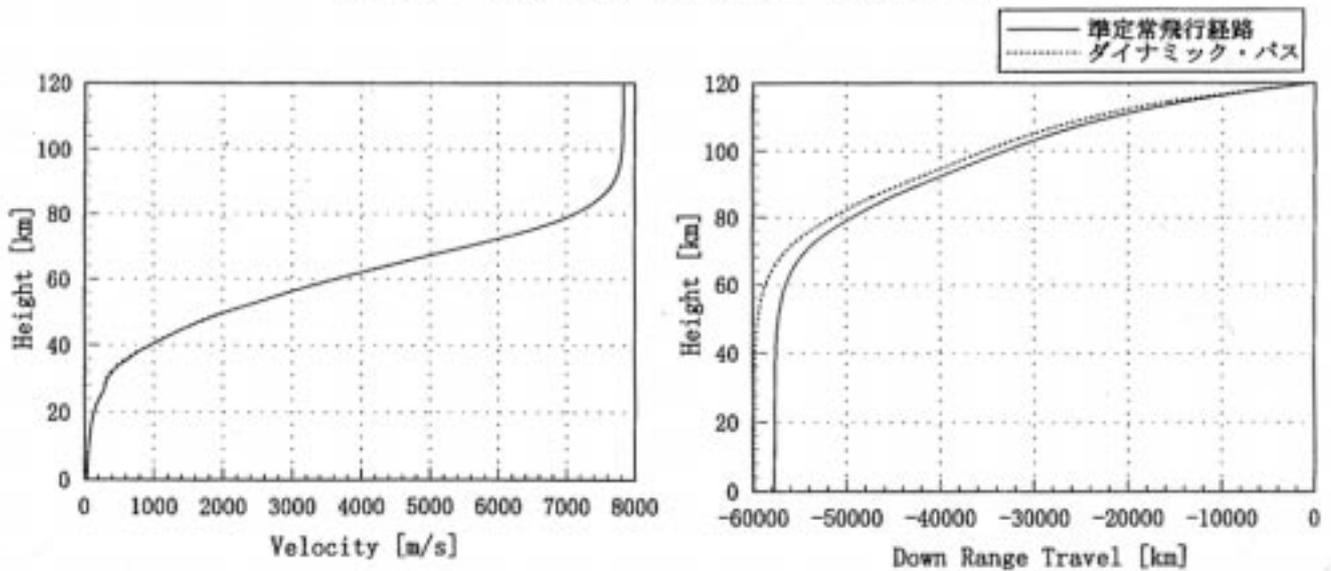


図 5(1/3) 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較

H=120 L/D=1.5 Bank=45 Backside

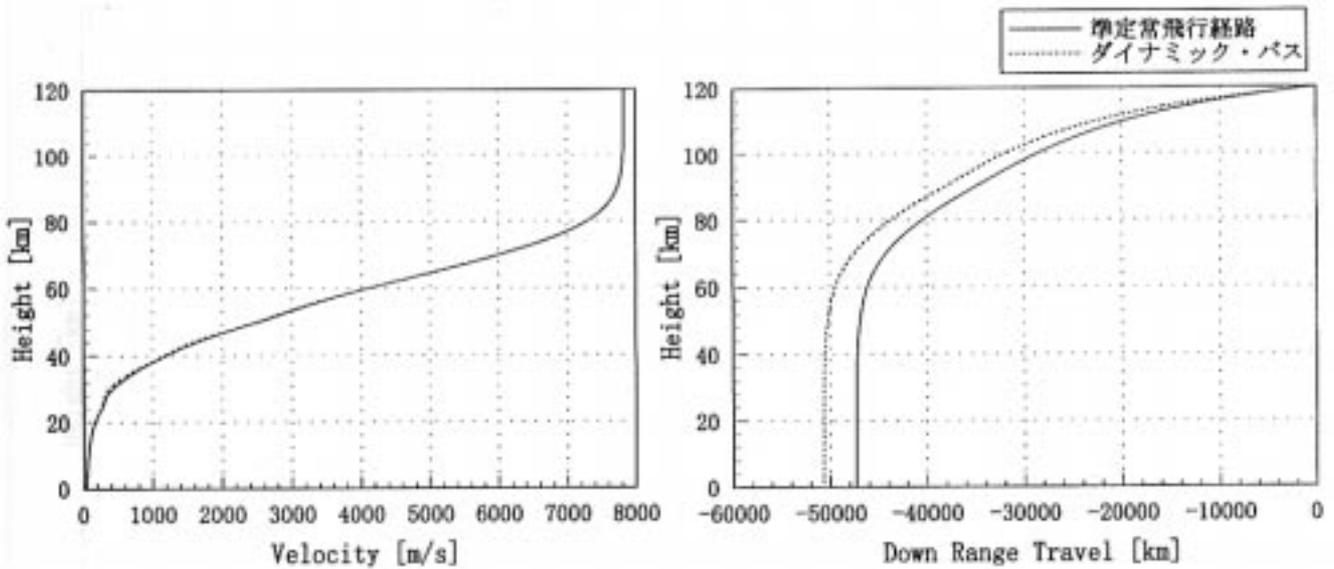


図 5(2/3) 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較

H=120 L/D=1.5 Bank=60 Backside

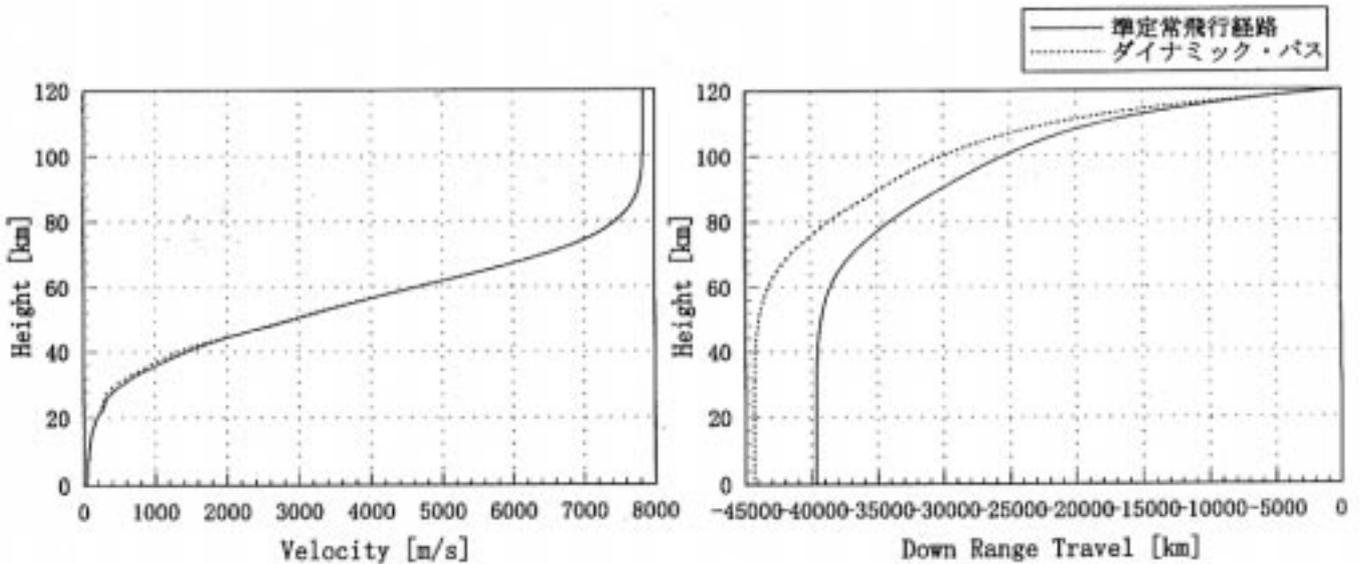


図 5(3/3) 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較

ミック・パスの一致は比較的良好であるにも関わらず、高度・ダウンレンジ平面に於いてはバンク角が深まるに従い準定常飛行経路とダイナミック・パスとの差が大きくなっていく。これらのケースについて準定常飛行経路とダイナミック・パスのダウンレンジの差を調べると図 6 の如くとなる。図 6 によると、高度 120km での再突入以降高度 100km 付近までの降下時に準定常飛行経路とダイナミック・パスのダウンレンジ差が開いた後は、両者の偏差は大きく変化しない。

2.1.2 項で「高度速度平面上で準定常飛行経路が右上が

り(速度増加時に高度増加、速度減少時に高度減少)の範囲においては、滑空経路を準定常飛行経路に収束させる方向の力がはたらく」旨述べたが、本アルゴリズムで求めた準定常飛行経路を数値的に解析すると再突入以降しばらくの間は(高度 110 km 程度まで)は、図 7 (1/2),(2/2)に示す様に準定常飛行経路は右下がり(速度増加時に高度低下、速度減少時に高度上昇; $dV/dh < 0$)となっていることが判明した。(図 7 の詳細データを Appendix B の表 B 1, B 2, B 3 に示す。これら各表中の矩形枠で囲まれた部分で dV/dh が負値となっている事が示される。)これは揚力を

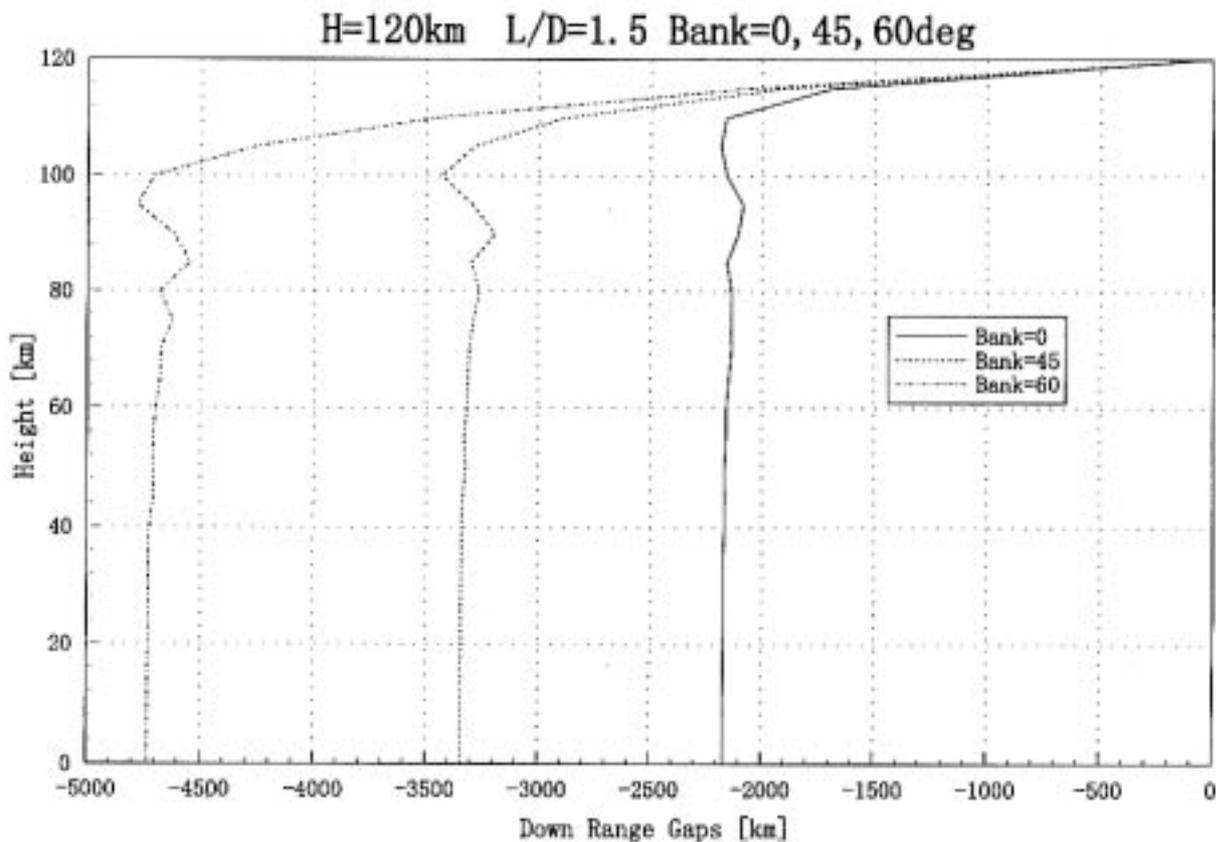


図 6 準定常飛行経路とダイナミック・パスのダウンレンジの差

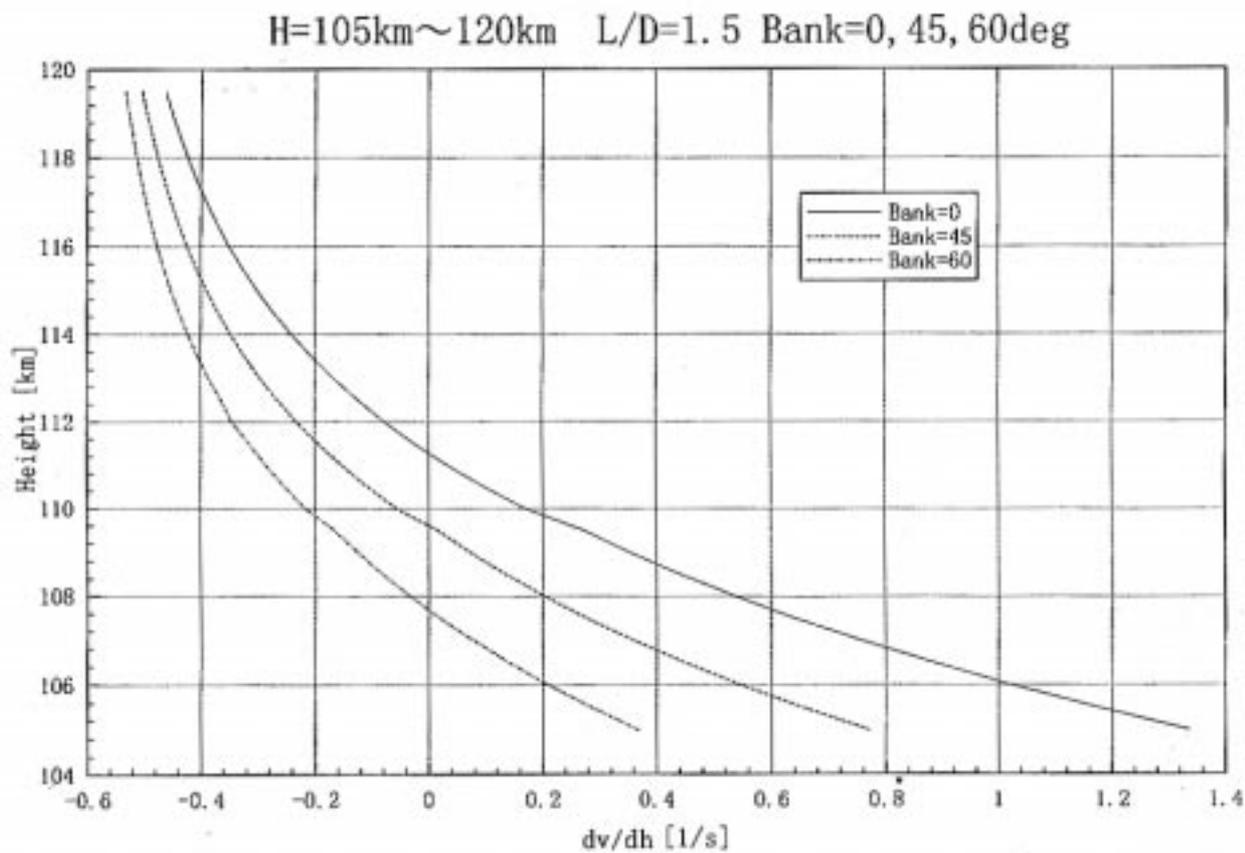


図 7(1/2) 準定常飛行経路上での dv/dh

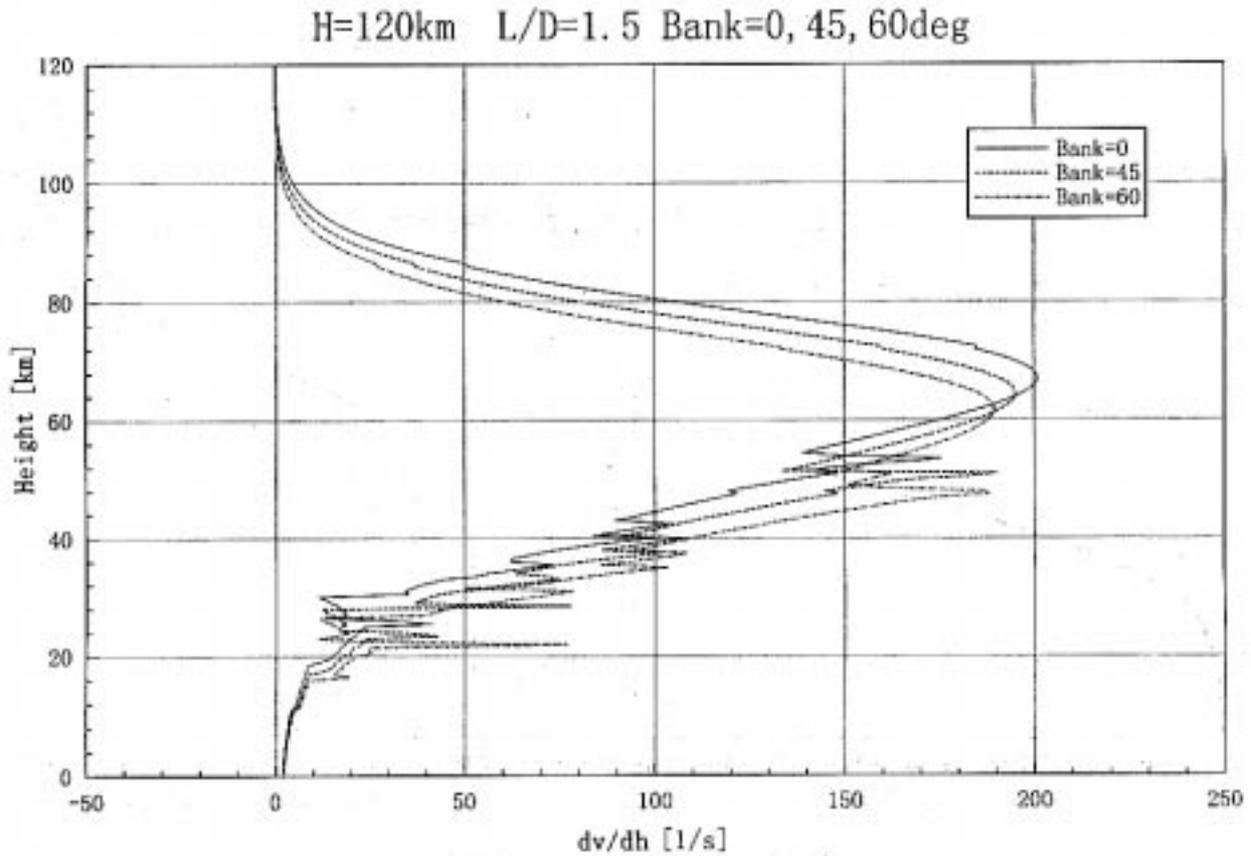


図 7(2/2) 準定常飛行経路上での dv/dh

発生しない質点の運動においては通常現象である。高度 100km 以上付近での準定常飛行経路とダイナミック・パスのプロファイルの不一致を確認する為に準定常飛行経路と初期飛行経路角をパラメトリックに振った場合のダイナミック・パスを重ね描きした結果を図 8 (1/3), (2/3), (3/3) に示す。これらによると、高度 100km 以下では両飛行経路のプロファイルは合致するが高度 120km ~ 100km 付近においてはダイナミック・パスが準定常飛行経路から離れていく現象も見られ両飛行経路のプロファイルの違いは明白であり、この領域ではダイナミック・パスを準定常飛行経路へアラインさせる力が働いていないことが確認できる。従って、準定常飛行経路を基にダイナミック・パスのプロファイルを推定するのは高度 100km より低い高度に限るのが妥当と考えられる。

(3) 準定常飛行経路と飛行距離について

図 8 の例が示すように 高度 120km からの降下の準定常飛行経路は飛行距離が数万キロに及んでいる。HOPE 等の再突入以降での飛行距離が概ね 10,000km 以下である事を考慮すると数万キロの飛行距離を示す準定常飛行経路は実用的とは言い難い。この事象は準定常飛行経路の再突入時の(高度 120km での)飛行経路角が HOPE 等の飛行経路角より浅い為に生ずる。準定常飛行経路を基に実用

的な再突入飛行経路とする為には再突入時の飛行経路角の条件を別途定める必要がある。

(4) 準定常飛行経路と飛行経路角について

再突入以降暫くの間は、空力加熱が厳しく有翼の再突入機はこの影響を低減するため迎角を大きくとる必要がある。そして高迎角飛行で機体が空気力によって跳ね上げられる事を回避するため深いバンク角(概ね 60deg 以上)を確立した状態で降下する。高度 120km から準定常飛行経路での再突入速度と同等の初期速度で飛行経路角をパラメトリックに振り運動計算を実施して飛行経路を求める場合、降下中のバンク角や揚抗比の値に関わらず再突入以降暫くの間飛行経路は図 9 の右図で見られる様に高度・ダウンレンジ平面上では直線に近い。一方、図 9 の右図で見られる様に高度・速度平面ではこの間の速度ほとんど変化せず高度のみが減少して行く。そして高度のみでなく速度の変化も顕著に現れ始めるのは高度 90km ~ 80km からであることが分かる。従って、再突入以降、前述の高度(90km ~ 80km)に至るまでの領域に於いては揚抗比やバンク角よりも再突入時の飛行経路角が飛行経路決定の支配項となる。(ここでは、再突入速度を準定常飛行経路での再突入速度[ほぼ周回速度に近い]と同等としたが、再突入速度も選択肢の一つとなるので有れば或いは再突入条件と

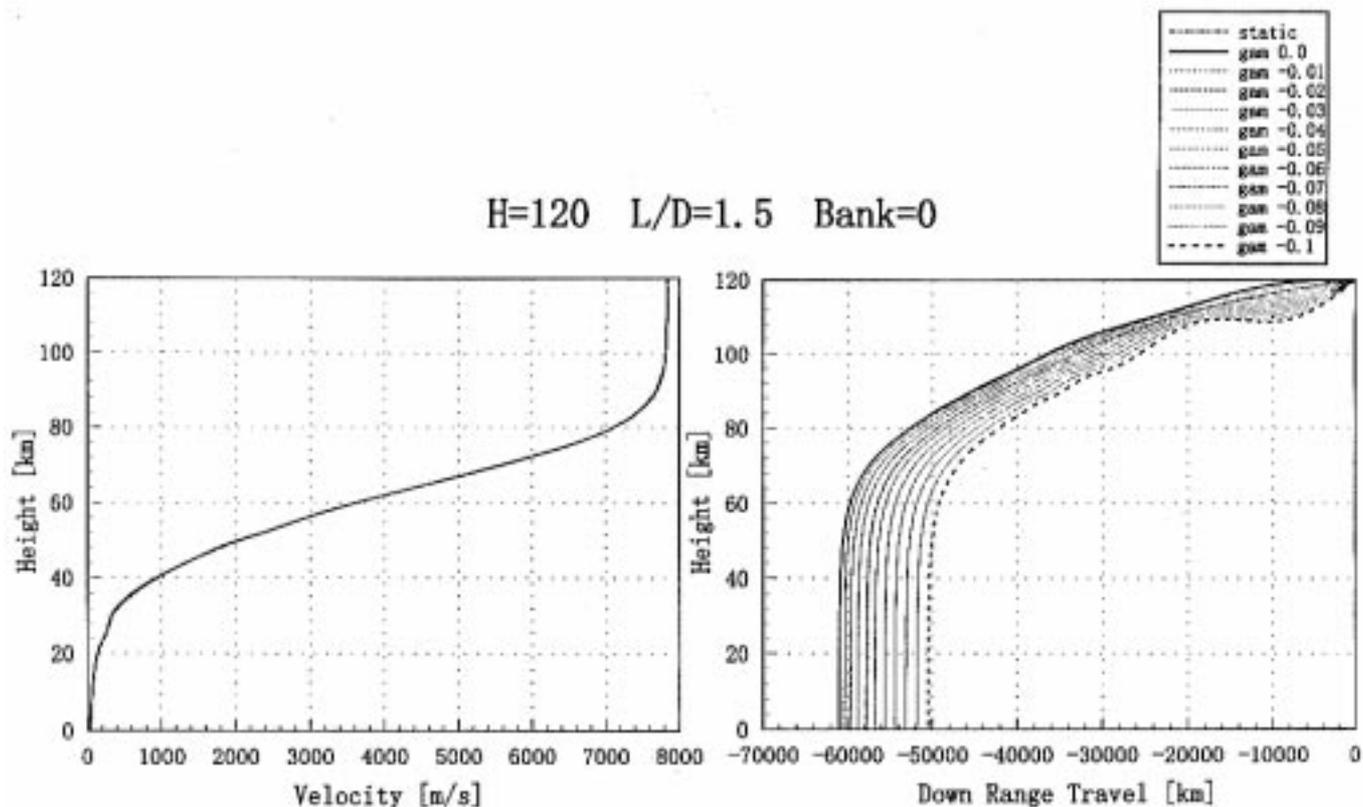


図 8(1/3) 準定常飛行経路とダイナミック・パス(複数初期飛行経路角)の比較

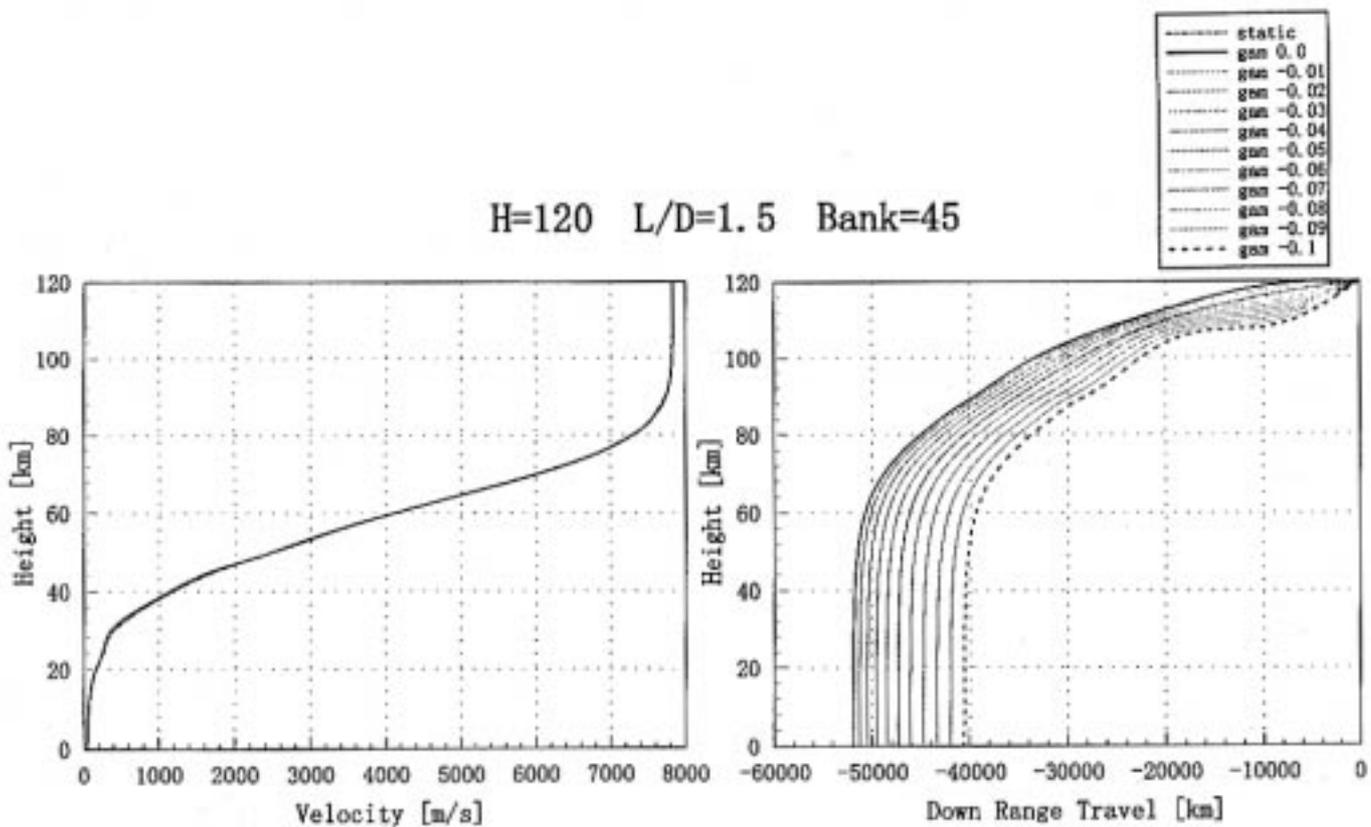


図 8(2/3) 準定常飛行経路とダイナミック・パス(複数初期飛行経路角)の比較

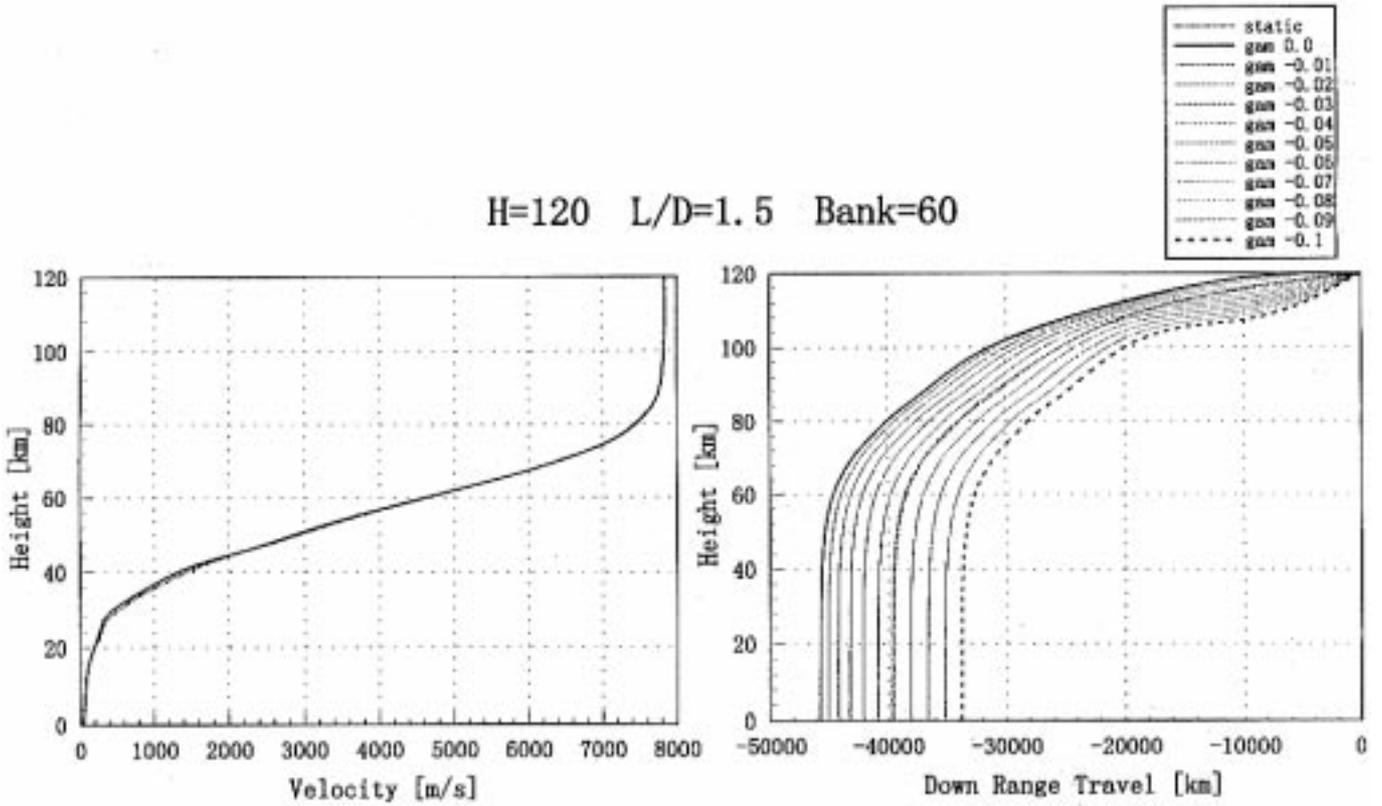


図 8(3/3) 準定常飛行経路とダイナミック・パス(複数初期飛行経路角)の比較

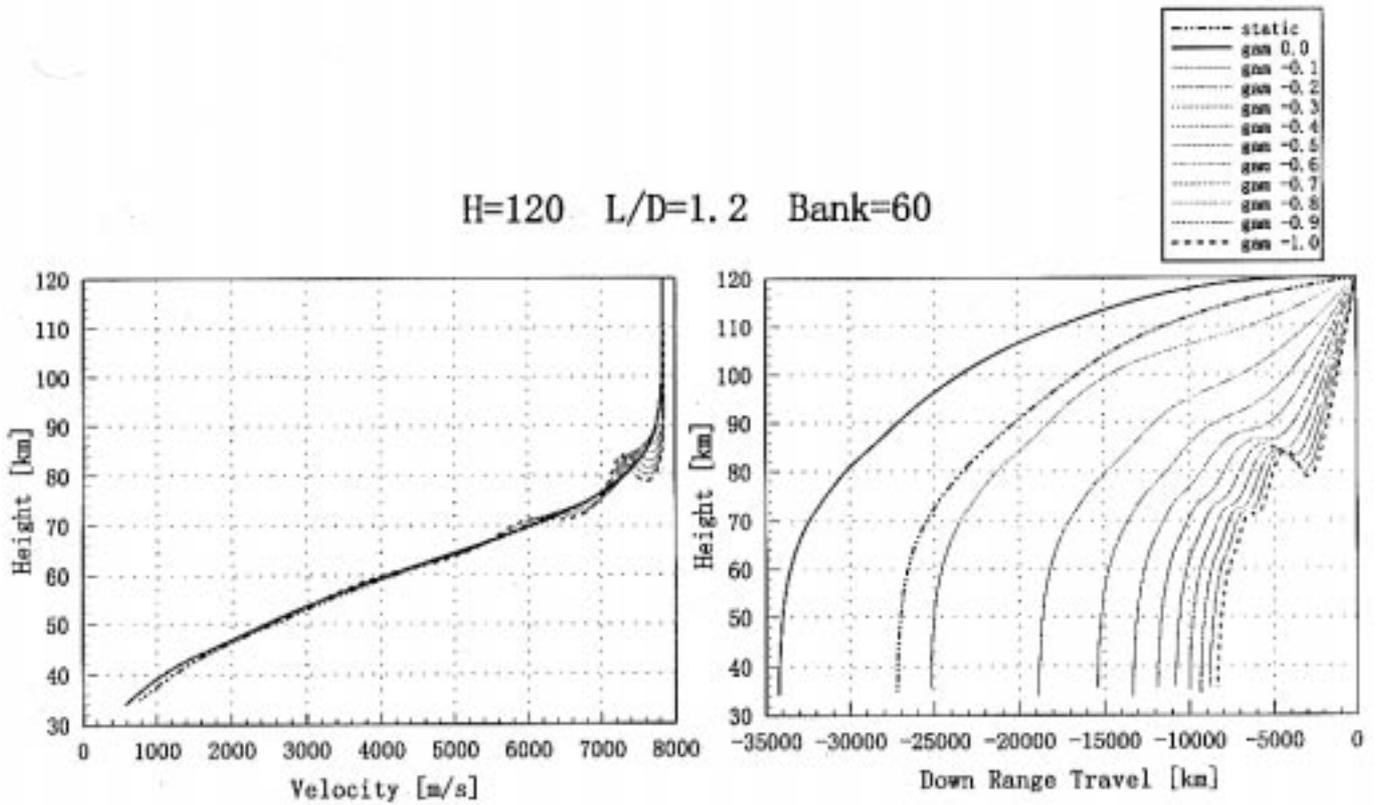


図 9(1/3) 再突入時の初期飛行経路角のダイナミック・パスへの影響

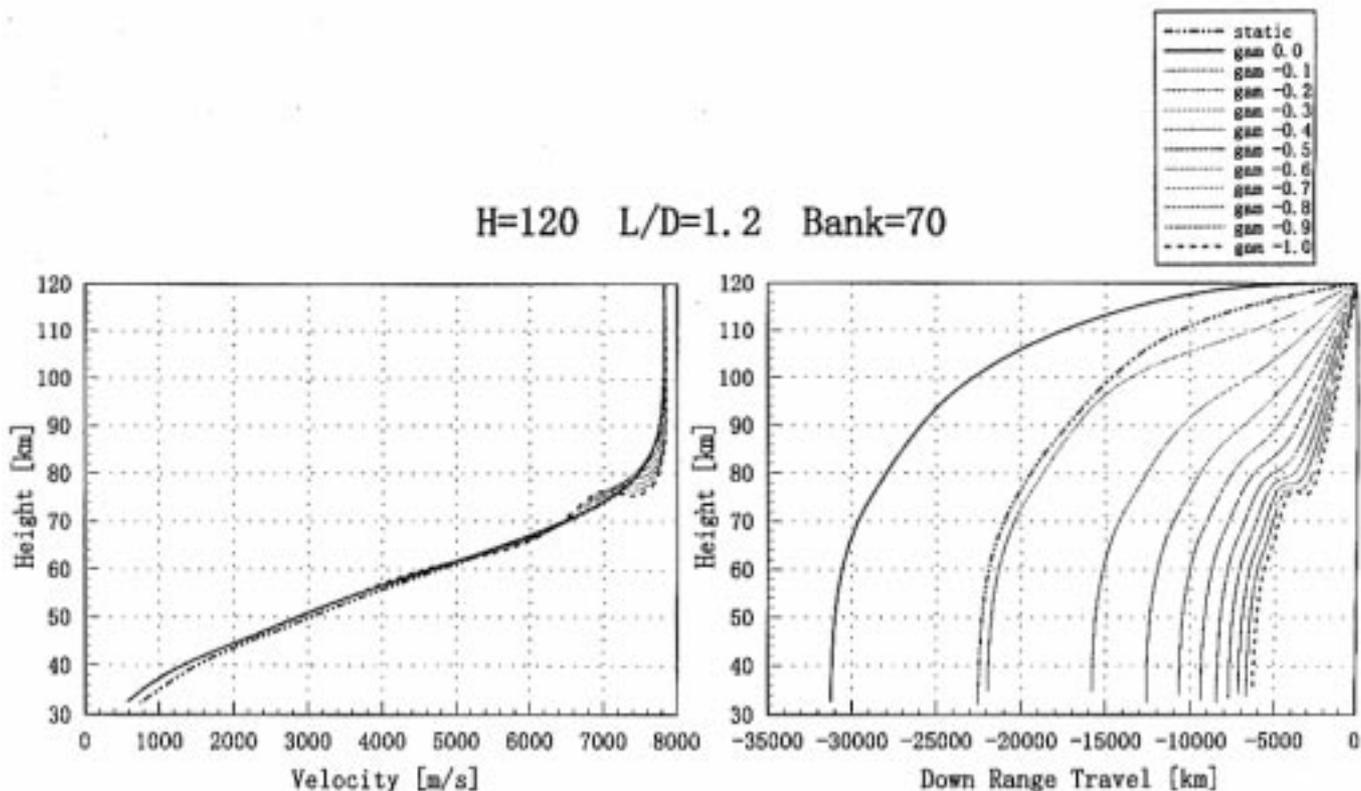


図 9(2/3) 再突入時の初期飛行経路角のダイナミック・パスへの影響

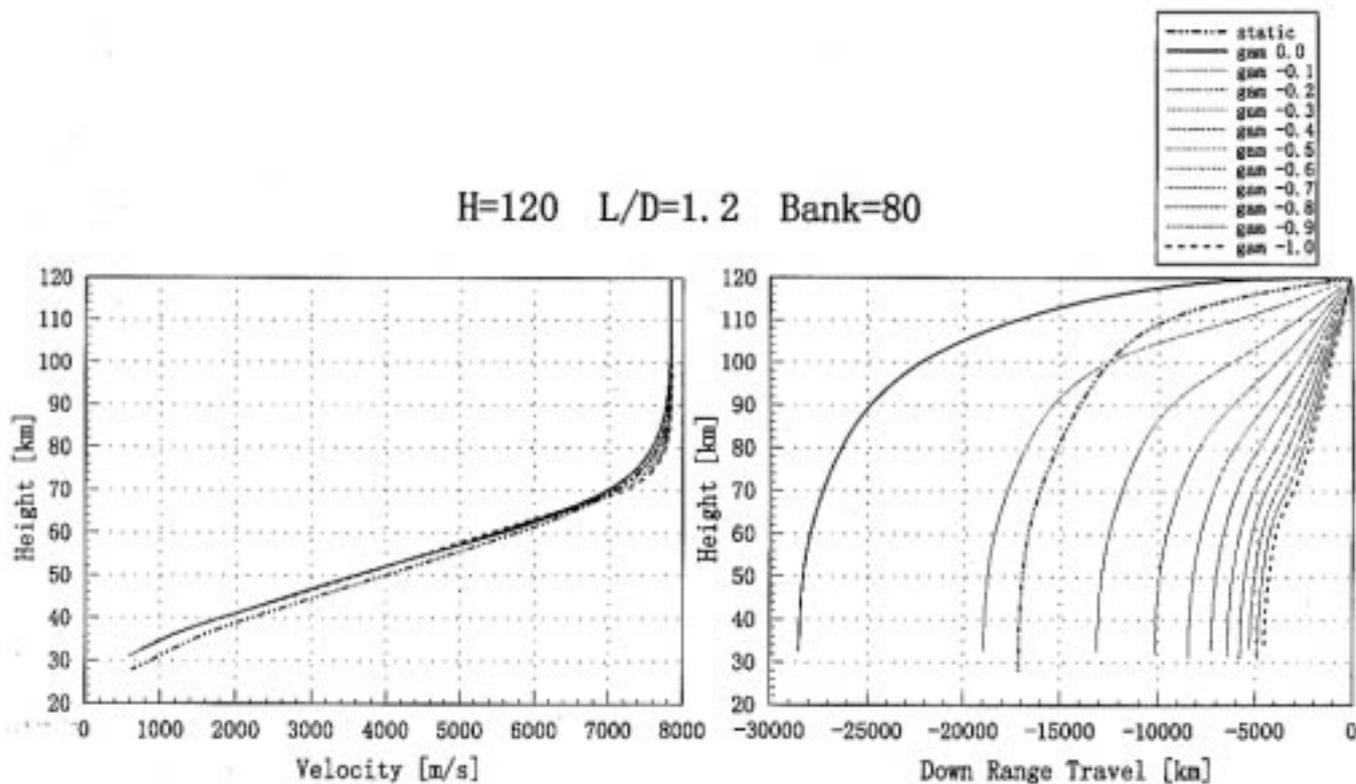


図 9(3/3) 再突入時の初期飛行経路角のダイナミック・パスへの影響

して何らかの数値の速度が与えられるのであればこれも支配項の一つとなるであろう。)これと(2)項で述べた様に再突入以降高度 100km 付近まではダイナミック・パスは準定常飛行経路にアラインしない事を考慮すると再突入以降高度 100km 以下に至るまでの高度範囲は空力加熱等の問題の回避を主体とした軌道決定を行い,更にそれより低高度で準定常飛行経路をレファレンスとして帰還飛行経路を推定するのが妥当と考えられる。

(5) 準定常飛行経路による帰還経路の存在域について

これまでに示したように、高度 90km ~ 80km 以下の高度に於いては 準定常飛行経路は宇宙往還機の帰還経路のレファレンスとなり得る。この高度域内で高空・高速域に於いては揚抗比とバンク角を振って準定常飛行経路の存在する領域を求め、低空・低速域では揚抗比とスピードブレーキ舵角を振って準定常飛行経路の存在する領域を求め、これらの領域を宇宙往還機の帰還経路の存在域として求めた帰還飛行経路の回廊の例を図 10 に示す。図 10 にはこの回廊を通過して降下するダイナミック・パスの例も記入した。尚、準定常飛行経路への定常風の影響を示す事例を ± 20m/sec の風がある場合について図 11 に示す。

宇宙往還機は、これらの回廊の中を通過して帰還することができる

(6) ダイナミック・パスの高度・速度平面における偏差について

(4)項で示した図 9 によるとバンク角が深まるにつれて準定常飛行経路とこれと同じ初期条件で降下するダイナミック・パスの高度・速度平面における偏差が大きくなっている。この原因調査の為にバンク角を 80deg とし、且つ空力係数が飛行中に変化する影響を排除する為にマッハ数に関わらず C_L と C_D そして揚抗比を一定とした下表の 3 種類のケースについて準定常飛行経路とダイナミック・パスを求め、以下の結果を得た。

	C_L	C_D	揚抗比	バンク角	備考
ケース 1	1.2	0.1	12	80deg	図 12a 参照
ケース 2	1.2	1.0	1.2	80deg	図 12b 参照
ケース 3	0.12	0.1	1.2	80deg	図 12c 参照

- ① ケース 1(図 12a)と ケース 2(図 12b) に示す準定常飛行経路は 高度・速度平面上では殆ど差異が見られない。これは、準定常飛行の条件である(5)式が C_L のみを含み、 C_D を含んでおらず、 C_D の値は飛行経路角 の値に影響するが高空高速域では飛行経路角 の絶対値が小さい為 (5)式中の \cos の値はほぼ 1.0 であり、ケース 1 とケース 2 で C_L の値(両ケースで同値)が高度・

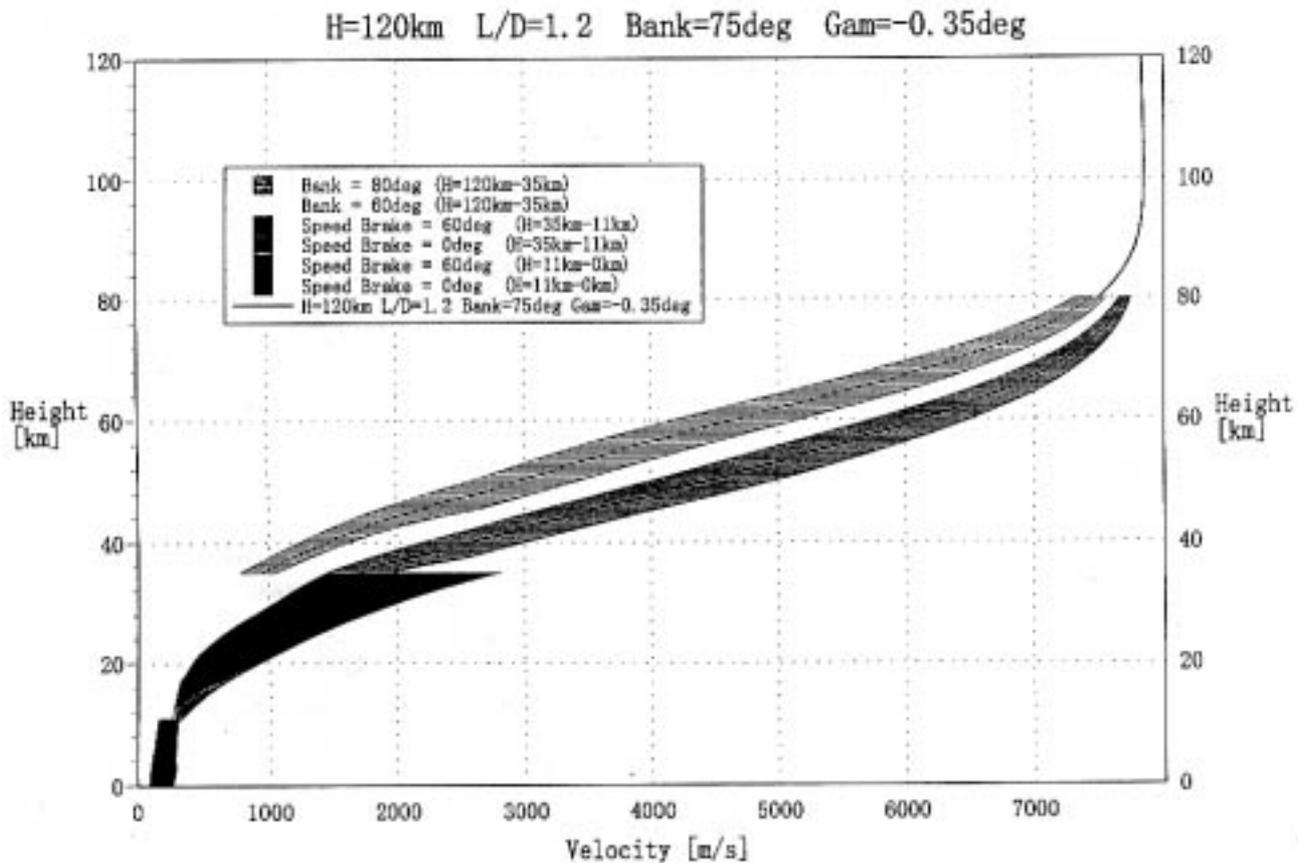


図 10a(1/3) 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

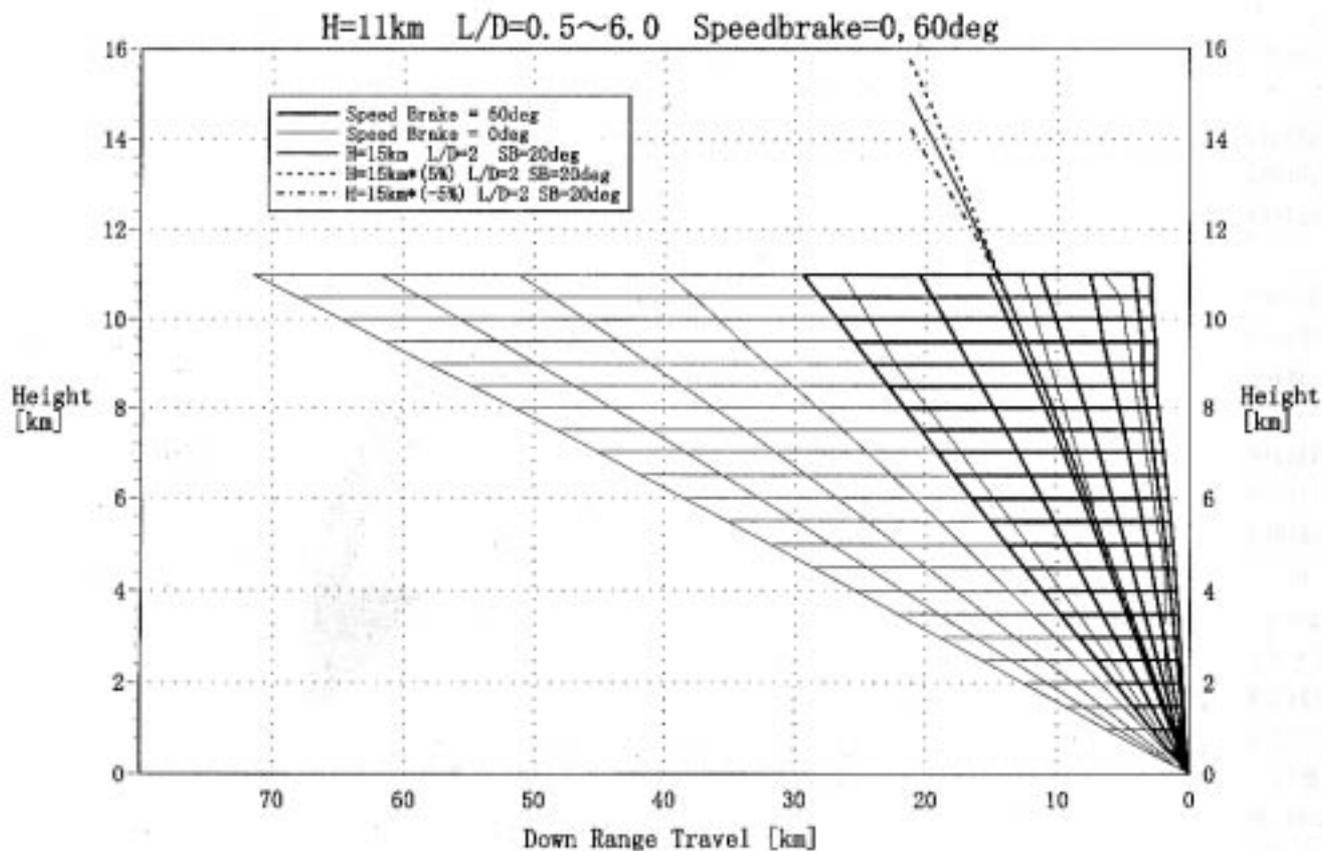


図 10a(2/3) 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

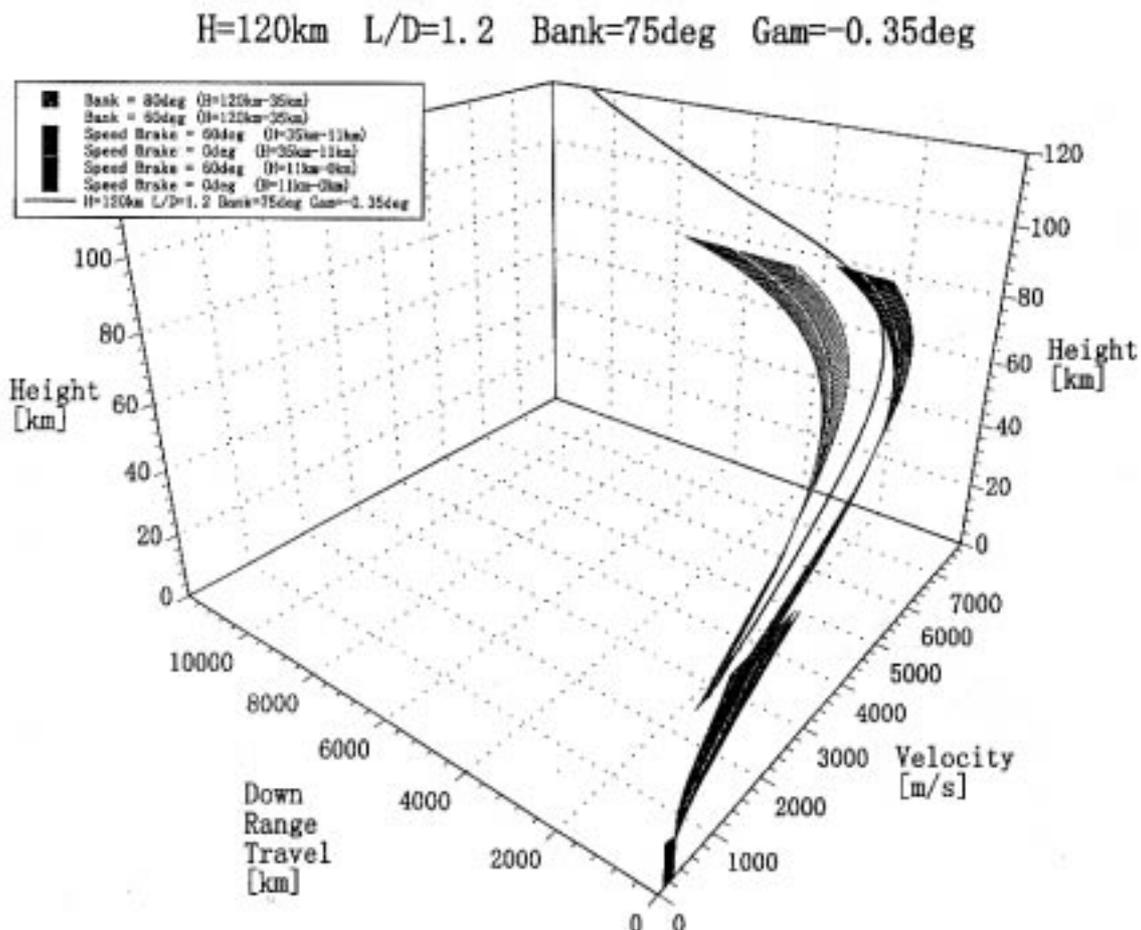


図 10a(3/3) 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

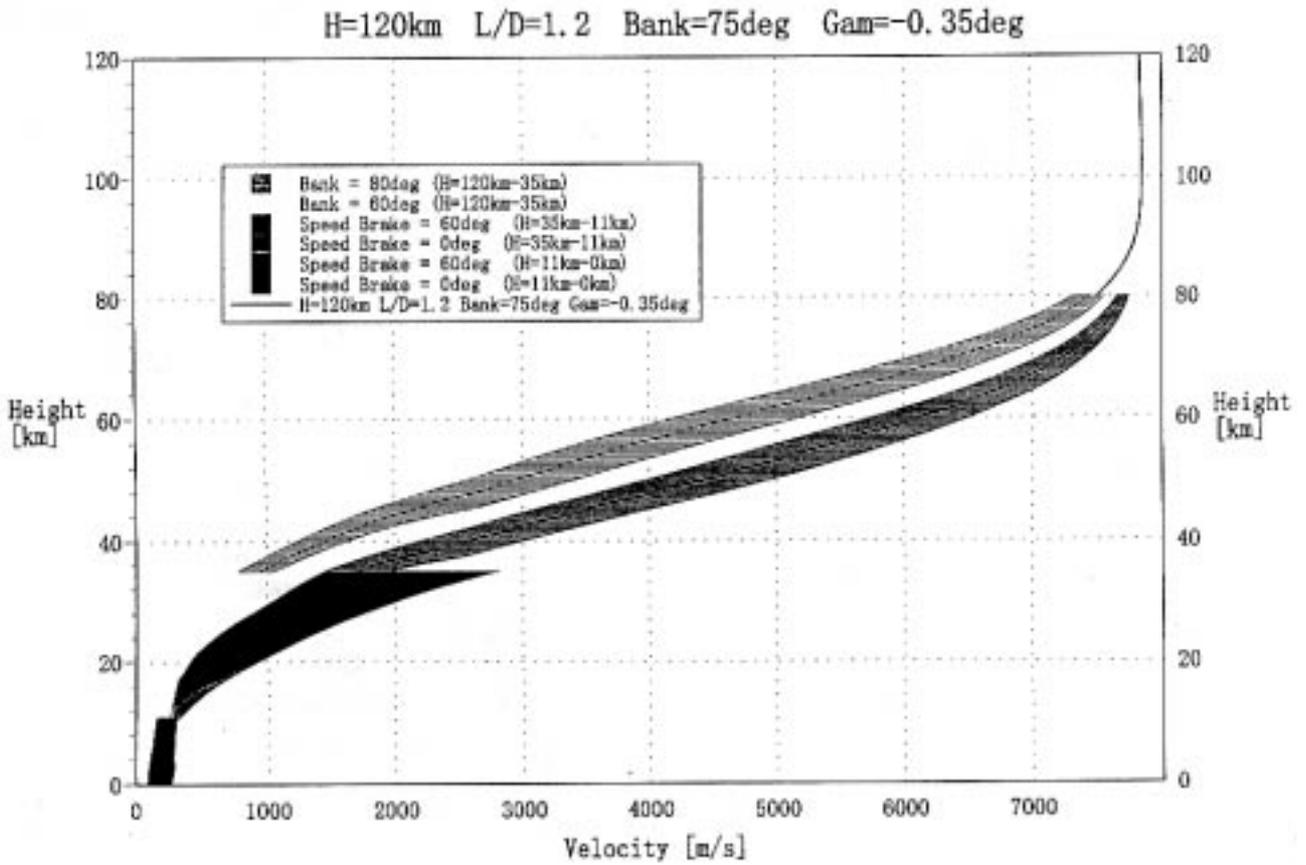


図 10b(1/3) 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

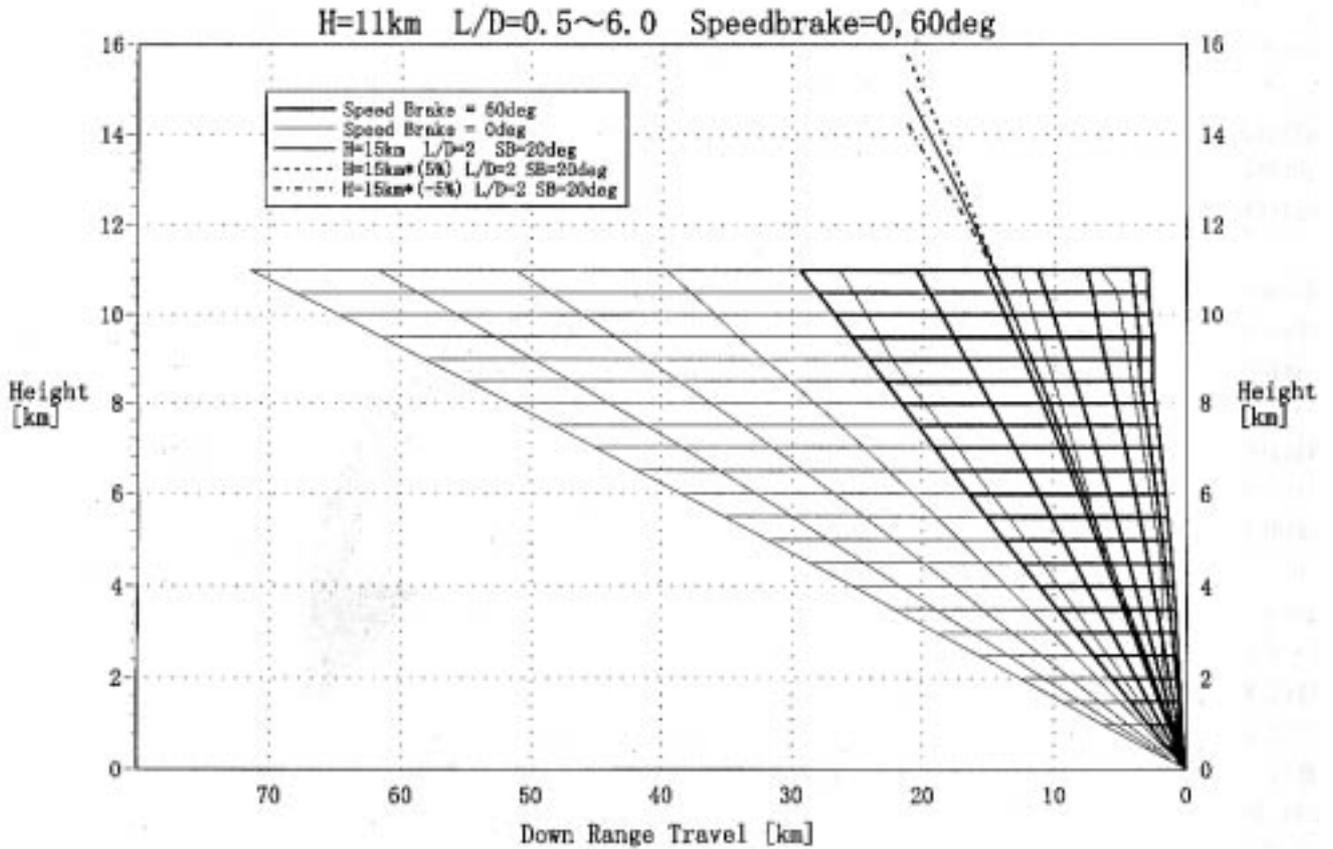


図 10b(2/3) 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

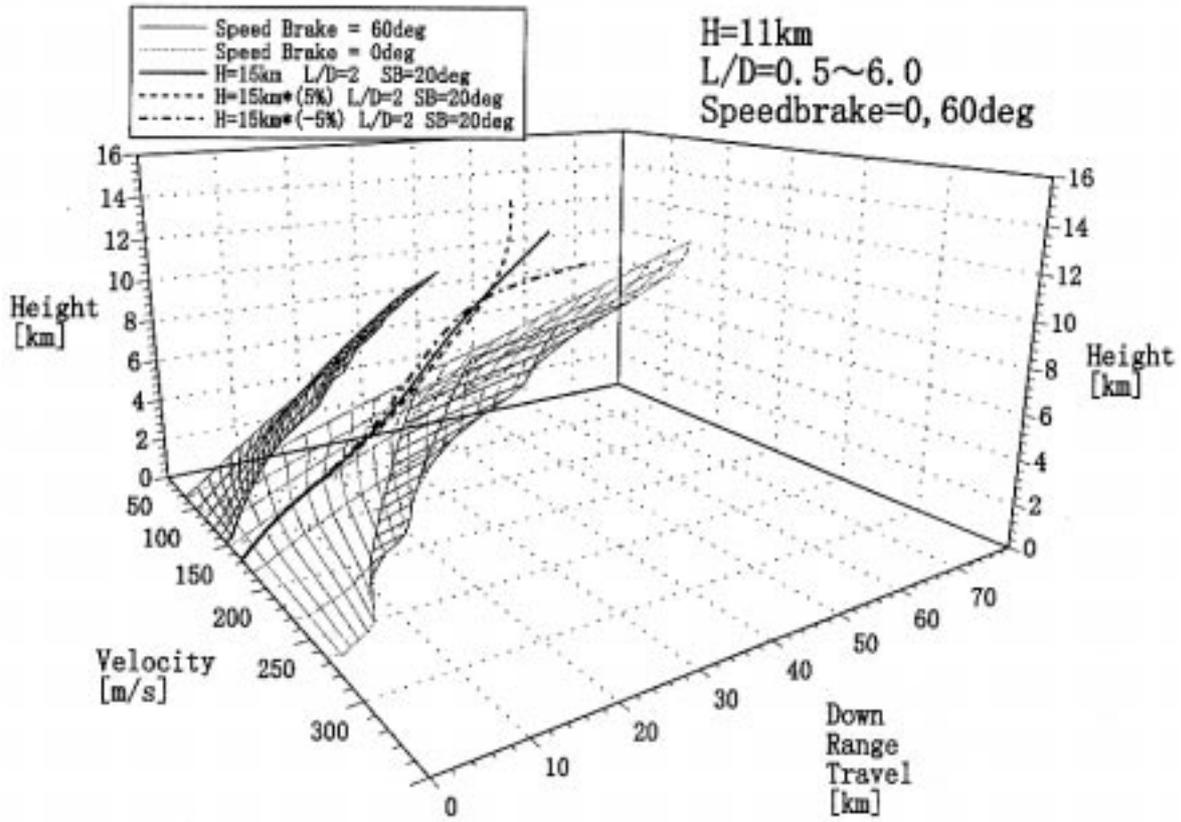


図 10b(3/3) 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

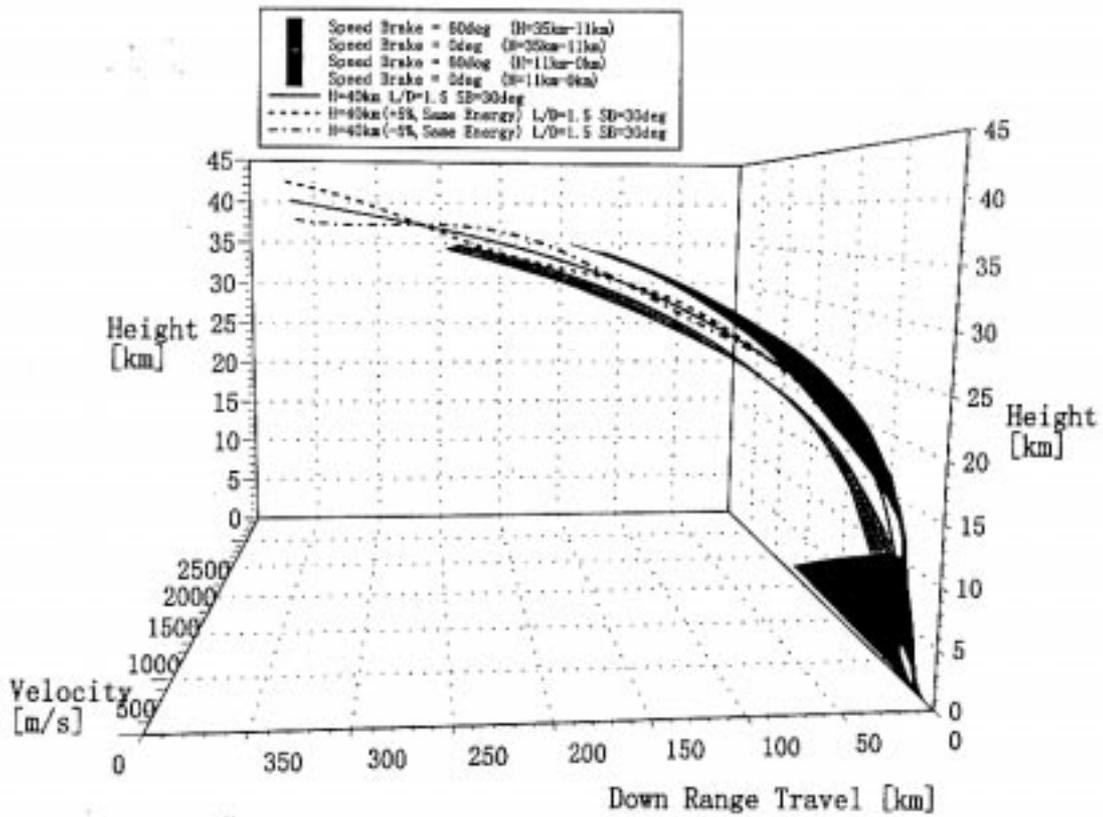


図 10c 宇宙往還機帰還飛行経路の回廊及びダイナミック・パスの例

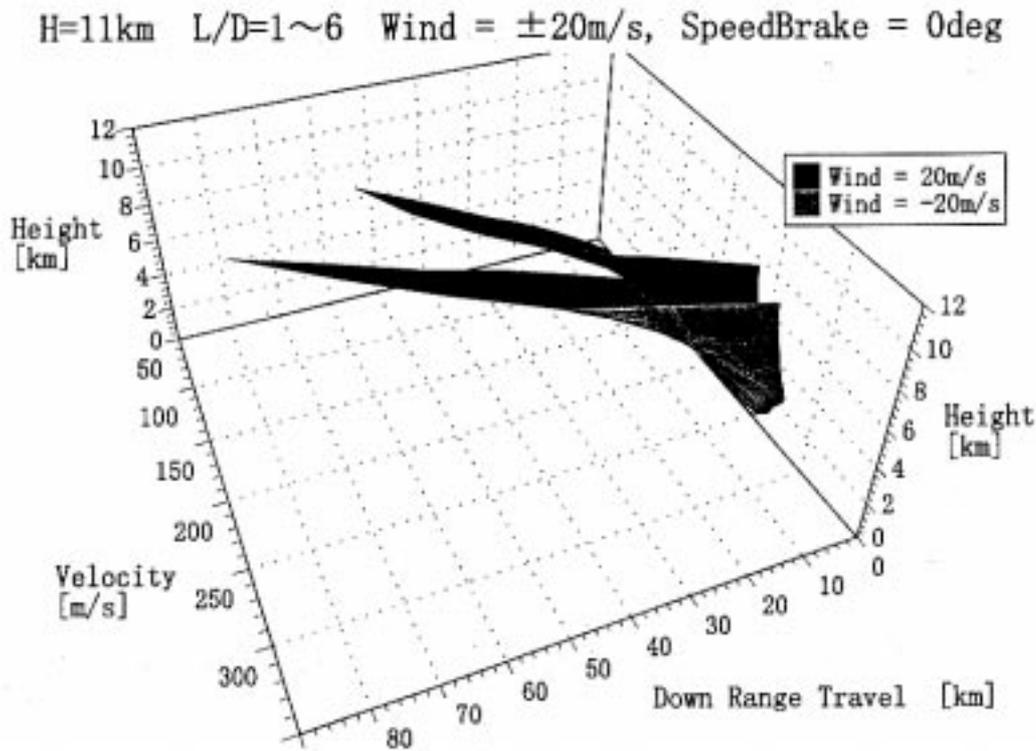


図 11 風の有る場合の準定常飛行経路の変化

速度平面上での準定常飛行経路を決定する支配項となる為と考えられる。低空域では C_D の絶対値が大きくなり、それによって \cos の値が変化し C_D の値も高度・速度平面上の準定常飛行経路に影響を与える。

- ② ケース 2(図 12b)と ケース 3(図 12c)では同一揚抗比で、準定常飛行経路はケース 2 より ケース 3 の方が高度・速度平面上で低空側を通る。これは ケース 3 では低い揚力係数で(5)式を釣り合わせるために大気が濃い領域を飛行する為と考えられる。
- ③ 上記の各ケースでそれぞれダイナミック・パスを計算すると揚抗比が 12 のケース 1 では準定常飛行経路とダイナミック・パスの一致は良好であるが揚抗比が 1.2 のケース 2,3 の場合は準定常飛行経路とダイナミック・パスに偏差が生じている。高速域の C_L が小さい飛行領域では揚抗比が 12 でも 1.2 でも C_L が同等であれば(8-6)式で V に掛かる項の値に大差なく従ってダイナミック・パスが準定常飛行経路に収束する傾向は同程度であるはずである。それにもかかわらず、前述した様に同一 C_L であっても C_D が大きくなると高度・速度平面上で準定常飛行経路とダイナミック・パスに偏差が生じている。本論においては、その理由を明らかにするに至っていないが、以下の事項が原因となっている可能性が有る。
 - a. 準定常飛行経路を構成する各点は準定常の条件を満足する点の集合であり、ダイナミック・パスのように過去の時間履歴が現在に影響を与えると云う種類

のものではない。

- b. 図 12b,c の高度・速度平面での両飛行経路より、ダイナミック・パスは準定常飛行経路に対して低速側に偏差を持っていると考えることが出来る。
- c. ダイナミック・パスを準定常飛行経路に収束させる(揚力に起因する)力が働いていても、ダイナミック・パス上で抗力に起因する減速が準定常飛行経路で想定される減速の程度より大きくなる可能性があり、この場合ダイナミック・パスは準定常飛行経路より低速側にずれていくと考えられる。
- d. 2.1.3 項で述べたように準定常飛行経路を求める際には或る微小区間速度を一定としてエネルギー消費や飛行距離を計算しており、この間の減速は考慮していない。
- e. 減速によってダイナミック・パスを準定常飛行経路から低速側へ遠ざける傾向の程度は微小区間において減速率を考慮しない前提を基に求めた準定常飛行経路では十分近似出来ない可能性がある。
- ④ 図 13a, b, c に揚抗比 1.2 パンク角 60deg, 70deg, 80deg のケースにつき、初期飛行経路角をパラメトリックに振って得られるダイナミック・パスと準定常飛行経路の比較を示した。初期飛行経路角を振ることで生じるダイナミック・パスの飛行距離の分散は、高度・ダウンレンジ平面上において高度 100km と高度 30 ~ 40km で殆ど変わらないことから高度 100km 付近で再突入条件に起因するトランジェントはほぼ収束して

H=120 L/D=12 (CL=1.2 CD=0.1 Fix) Bank=80

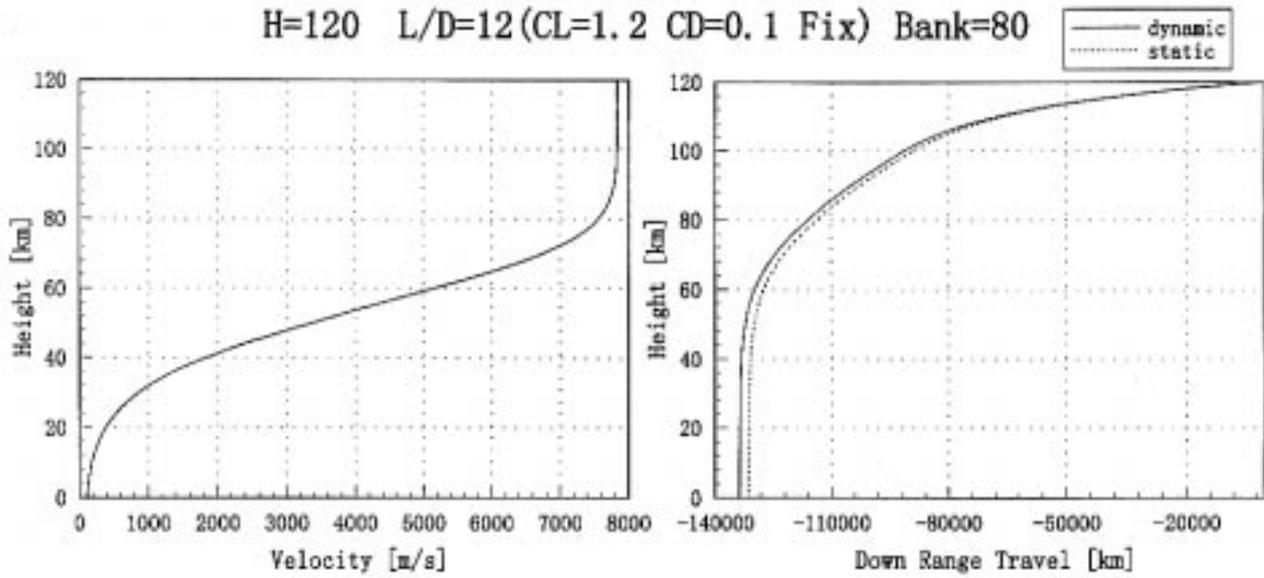


図 12a 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較 (CL, CD 一定)

H=120 L/D=1.2 (CL=1.2 CD=1.0 Fix) Bank=80

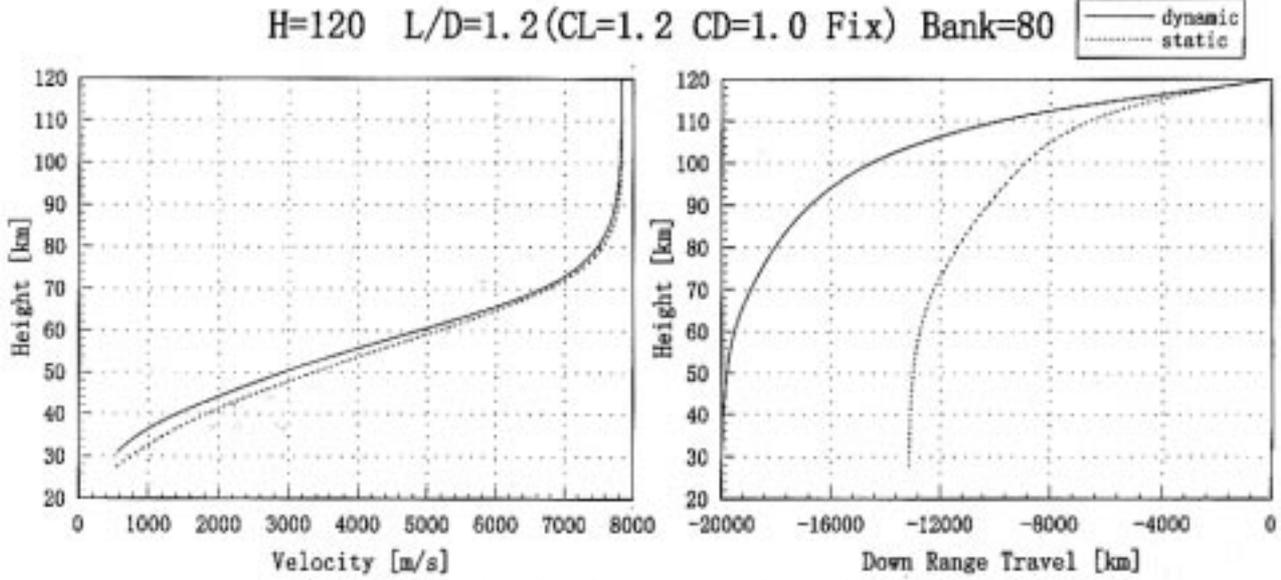


図 12b 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較 (CL, CD 一定)

H=120 L/D=1.2 (CL=0.12 CD=0.1 Fix) Bank=80

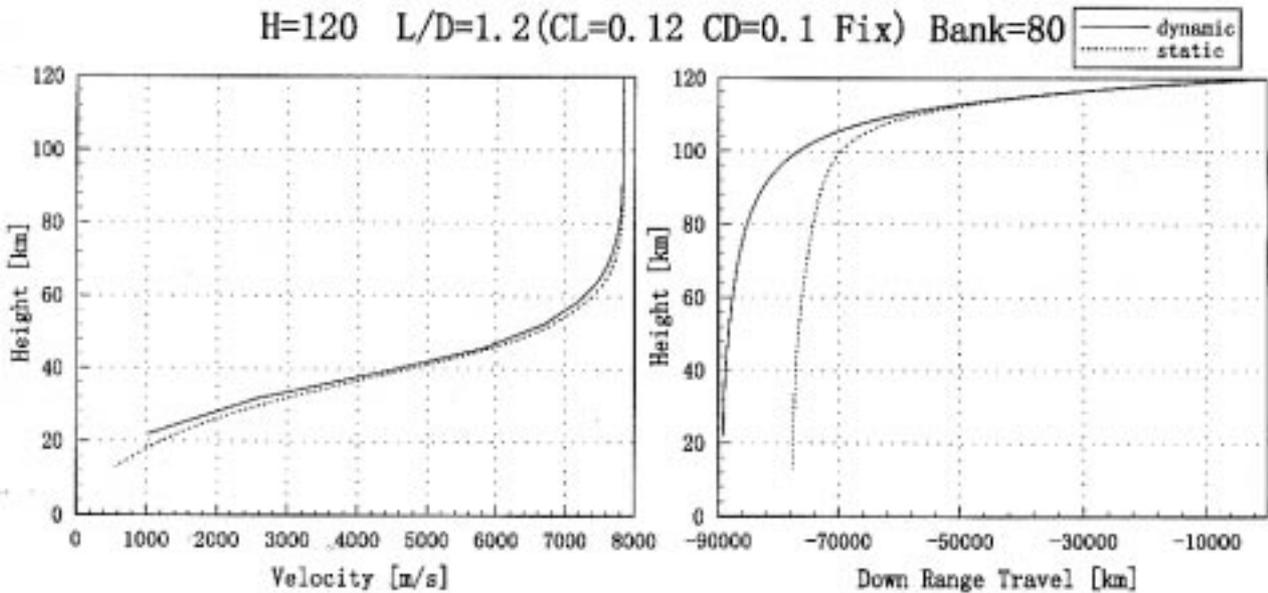


図 12c 準定常飛行経路とダイナミック・パスの比較 (CL, CD 一定)

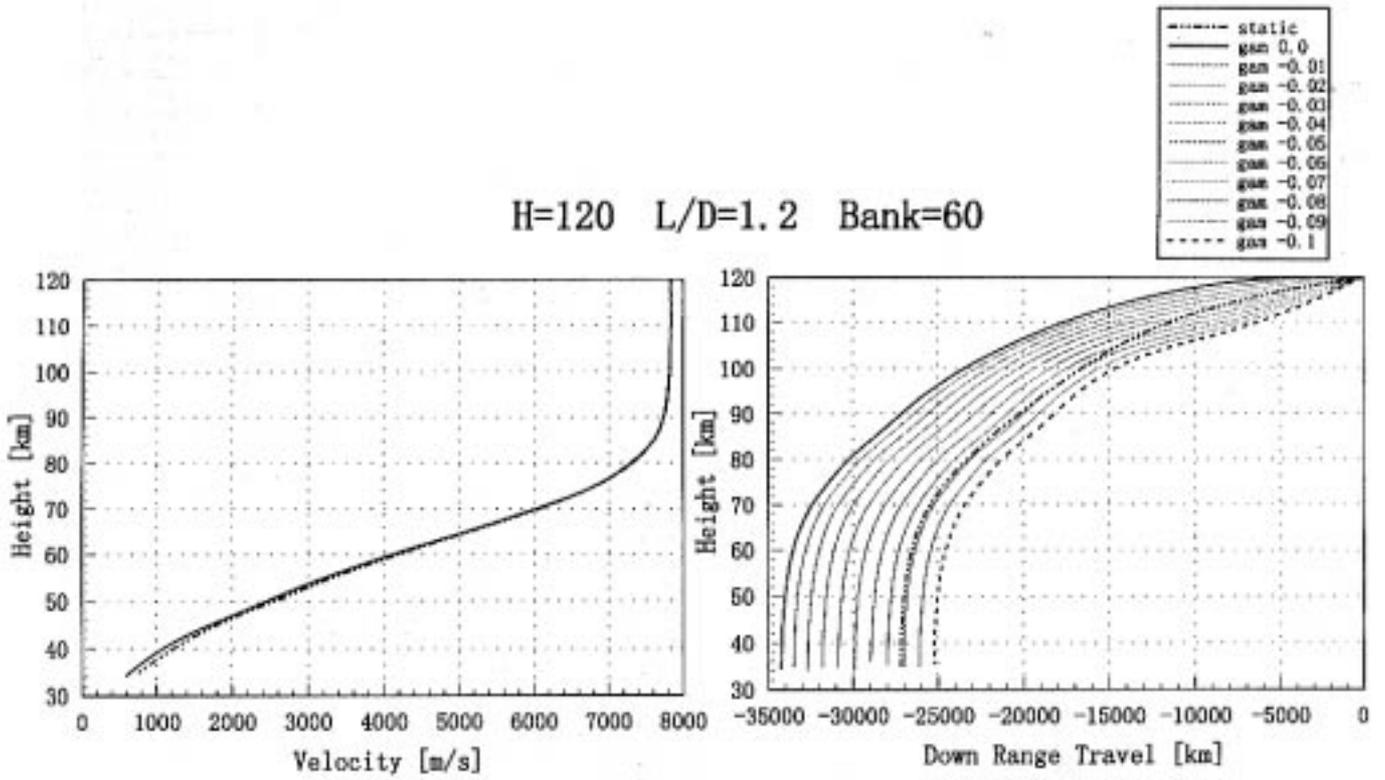


図 13a 準定常飛行経路とダイナミック・パス(複数初期飛行経路角)の比較

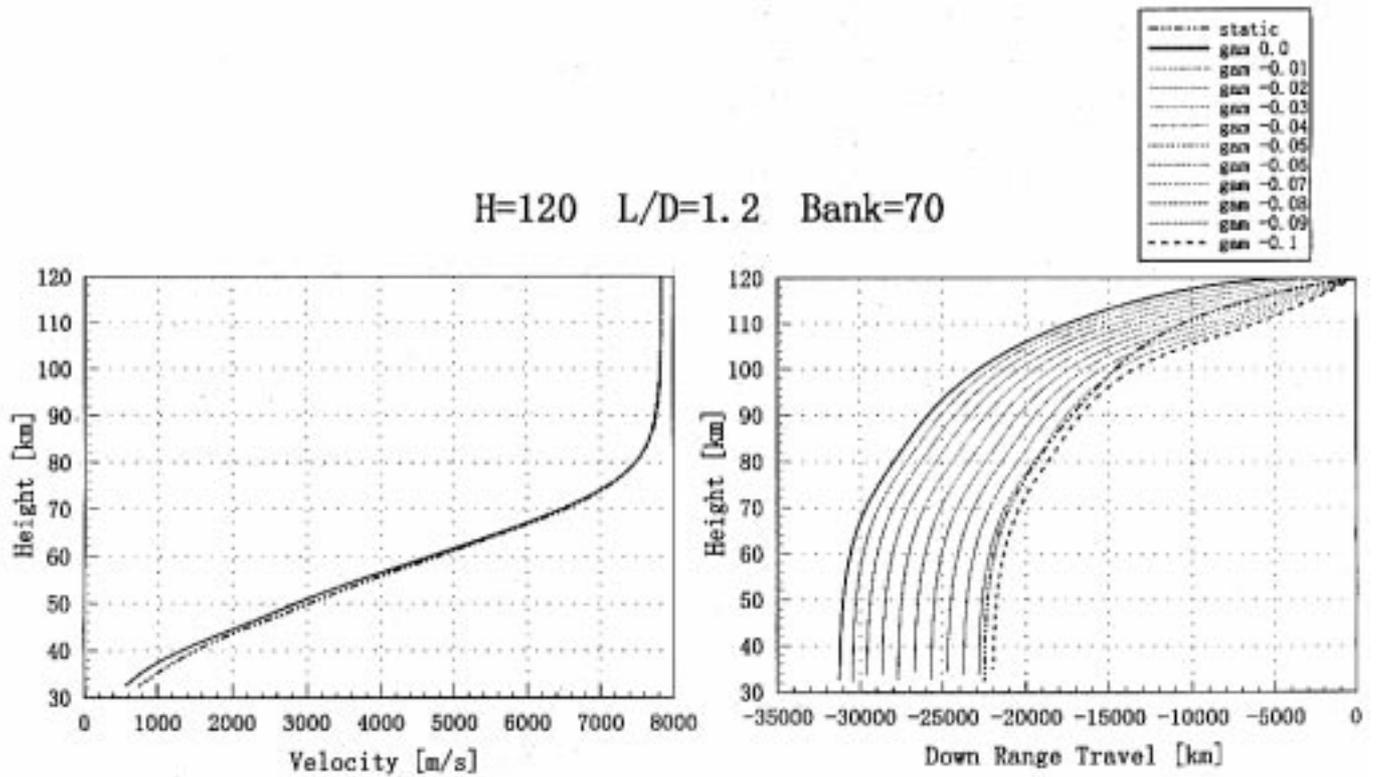


図 13b 準定常飛行経路とダイナミック・パス(複数初期飛行経路角)の比較

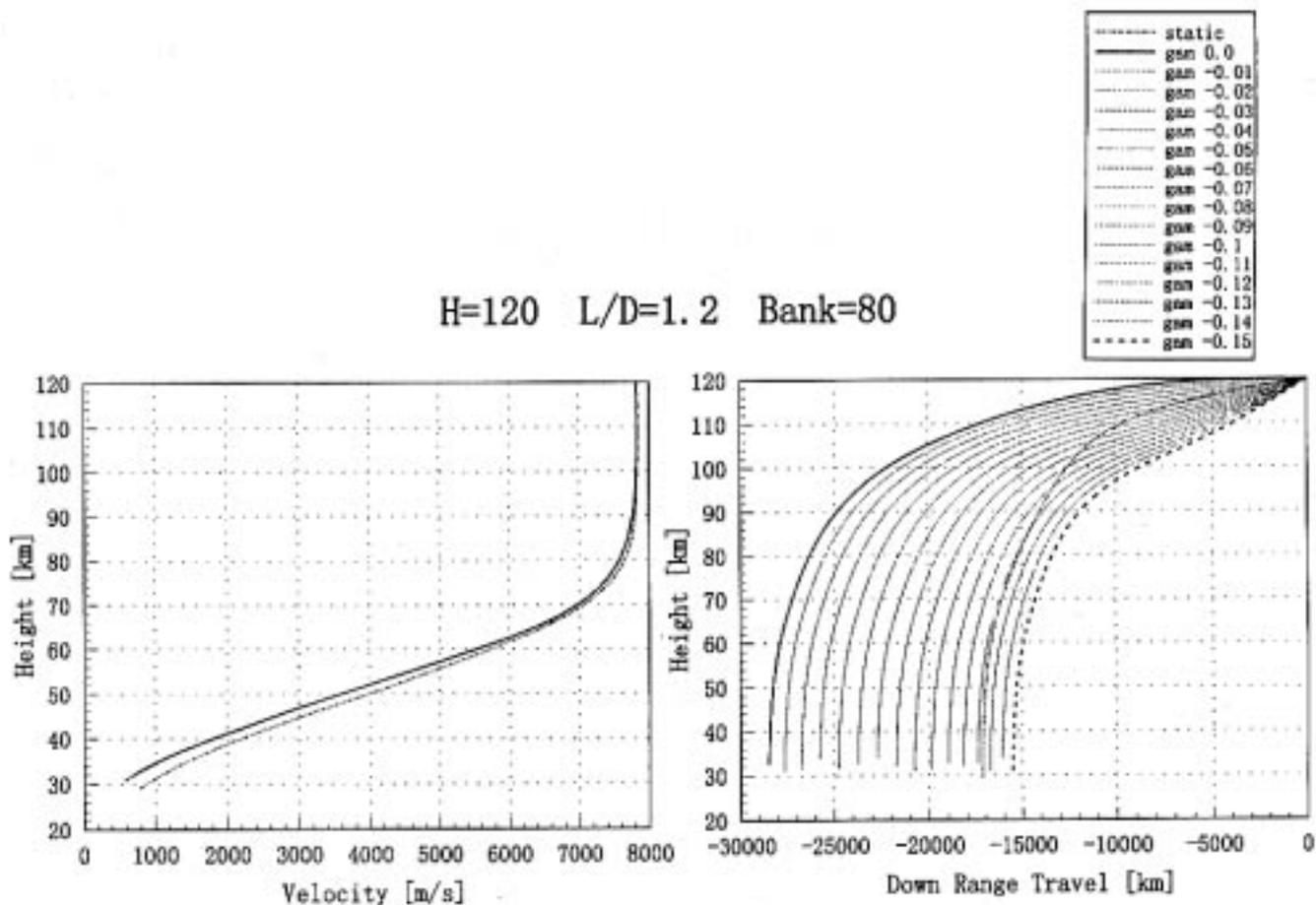


図 13c 準定常飛行経路とダイナミック・パス(複数初期飛行経路角)の比較

いると考えられる。一方、同平面上に於ける 準定常飛行経路とダイナミック・パスの一致の程度はバンク角 60deg では高度 100km 付近以下でほぼ一致しており、バンク角 70deg では高度 90km 付近以下でほぼ一致している。しかし、バンク角 80deg の場合については両飛行経路のプロファイルは相当低高度域に達するまで必ずしも一致しているとは言い難いように見える。但し、降下が急であるのでダウンレンジに現れる差は小さく実質上 準定常飛行経路でダイナミック・パスを近似するのは高度 80km 付近から以下であれば多少精度は落ちるものの大きな問題とはならないと考えられる。

(7) 準定常飛行経路への飛行経路角の影響について

前項の検討より 高空・高速域では 飛行経路角 の値は小さくこの値が準定常飛行経路に与える影響が小さいことが示された。この場合、近似的に cos の値を 1 と置く事が出来る。この時 (5) 式は以下のように変形する事が可能である。

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{L}{m \cdot V} - \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot \frac{g_o}{V} + \frac{V}{R_o + h} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_L \cdot S}{m \cdot V} - \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot \frac{g_o}{V} + \frac{V}{R_o + h} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_L \cdot S - \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right)^2 \cdot m \cdot g_o + \frac{m \cdot V^2}{R_o + h} = 0 \quad (15)$$

(15) 式は 速度 V についての 2 次式であり、 C_L の値(本来は V の関数)を 速度 V とは別途設定できるなら (15) 式より、

$$V = \left(\frac{R_o}{R_o + h} \right) \times \frac{\sqrt{m \cdot g_o}}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot S + \frac{m}{R_o + h}}} = \frac{R_o \cdot \sqrt{m \cdot g_o}}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot S \cdot (R_o + h)^2 + m \cdot (R_o + h)}} \quad (16)$$

と記述することも可能である。この様に 高空・高速域で cos がほぼ 1 と見なされる領域では 準定常飛行経路の

高度と速度の関係は比較的単純な関係式で記述できる。空力係数が速度 V で変化しない等の仮定を設けた場合、この近似による解と2.1.3項に示したアルゴリズムによる解を比較すると条件にもよるが高度50km以上では両者の差は非常に小さい。

3. 結論

(1) 準定常飛行経路による帰還経路の存在域について

宇宙往還機の帰還経路設計において機体の質点運動の速度ベクトルの垂直方向の変化率(飛行経路角の変化率; $d\theta/dt$)は小さくほぼゼロと見なし得る(準定常飛行の仮定)と云う考え方にに基づき、この条件を満たす飛行経路を求めるアルゴリズムを確立した。このアルゴリズムで求めた高度・速度・ダウンレンジの3軸で張られる空間上の飛行経路を準定常飛行経路と呼ぶ時、準定常飛行経路は、飛行条件等に若干の制約は有るものの、ダイナミック・パスとほぼ一致しこれに基づき誘導則を設計すること無しに宇宙往還機の帰還経路の存在域を把握することが可能である。

(2) 高度120kmから再突入する場合の準定常飛行経路について

高度120kmから再突入する場合を初期条件として求めた準定常飛行経路はダウンレンジが数万キロにもおよび宇宙往還機の帰還経路としては実際のでない。この場合、準定常飛行経路のダウンレンジが長くなるのは再突入時の飛行経路角が浅い為である。

(3) 準定常飛行経路が宇宙往還機の帰還経路のレファレンスとならない場合

ダイナミック・パスが準定常飛行経路に一致するのは高度・速度平面上において準定常飛行経路が $dV/dh > 0$ となる範囲で、ダイナミック・パスを準定常飛行経路に収束させる方向の力が生じることによるものであるが、高度120kmから100km付近までの準定常飛行経路の dV/dh は負値である為、この領域ではダイナミックパスが準定常飛行経路に収束しない。従って、この領域では準定常飛行経路は宇宙往還機の帰還経路のレファレンスとはならない。

(4) 再突入時の初期飛行経路角 - 飛行プロファイルの決定要因

(2)項のダウンレンジが長い問題及び(3)項の準定常飛行経路が帰還経路のレファレンスとならない問題の解決の方向を探る為再突入時の飛行経路角が準定常飛行経路の初期飛行経路角より深い範囲でダイナミック・パスについてパラメトリック・スタディした結果、高度120kmからの再突入飛行経路(ダイナミック・パス)は揚抗比バンク角の値

に関わらず高度約100kmに至るまでは高度・ダウンレンジ平面上で直線的且つ速度はほぼ一定であり、この領域では再突入時の初期飛行経路角が飛行プロファイルを決定する支配要因と考えてよい。

(5) 準定常飛行経路の帰還経路のレファレンス

高度約80km以下では準定常飛行経路とダイナミック・パスの一致は概ね良好で準定常飛行経路は帰還経路のレファレンスになり得る。この領域で、揚抗比バンク角スピード・ブレーキ舵角等を振って準定常飛行経路を計算し、これらの包絡域を帰還飛行経路の回廊として描くことが可能である。

(6) 宇宙往還機の帰還経路の概略プロファイルの把握

高度120kmからの再突入後暫くの間は空力加熱等の問題を回避するように飛行経路角バンク角揚抗比等を選択し、高度80km付近から準定常飛行経路から求められた帰還飛行経路の回廊に突入する方法で宇宙往還機の帰還経路の概略のプロファイルを把握することが可能である。

4. 参考資料

- (1) Bryson, A., et al; Energy-State Approximation in Performance Optimization of Supersonic Aircraft, *J. Aircraft*, Vol. 6, No. 6, 1969, pp. 481-488.
- (2) Joosten, K.; Descent Guidance and Mission Planning For Space Shuttle, *NASA CP-2342 Part 1*, Space Shuttle Technical Conference NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas, June 1983, pp. 113-124.
- (3) Schultz R.L. & Zagalsky N.R.; Aircraft Performance Optimization, *J. Aircraft*, Vol. 9, No. 2, 1972, pp.108-114.
- (4) Hedrick J.K. & Bryson A.E.; Three Dimensional Minimum Time Turns for a Supersonic Aircraft, *J. Aircraft*, Vol. 9, No. 2, 1972.
- (5) Rutowski E.S.; Energy Approach to the General Aircraft Performance Problem, *J. Aeronautical Science*, March 1954.
- (6) 日本航空宇宙学会編 航空宇宙工学便覧 丸善

Appendix A

準定常飛行経路 スタティック計算アルゴリズム

メイン処理

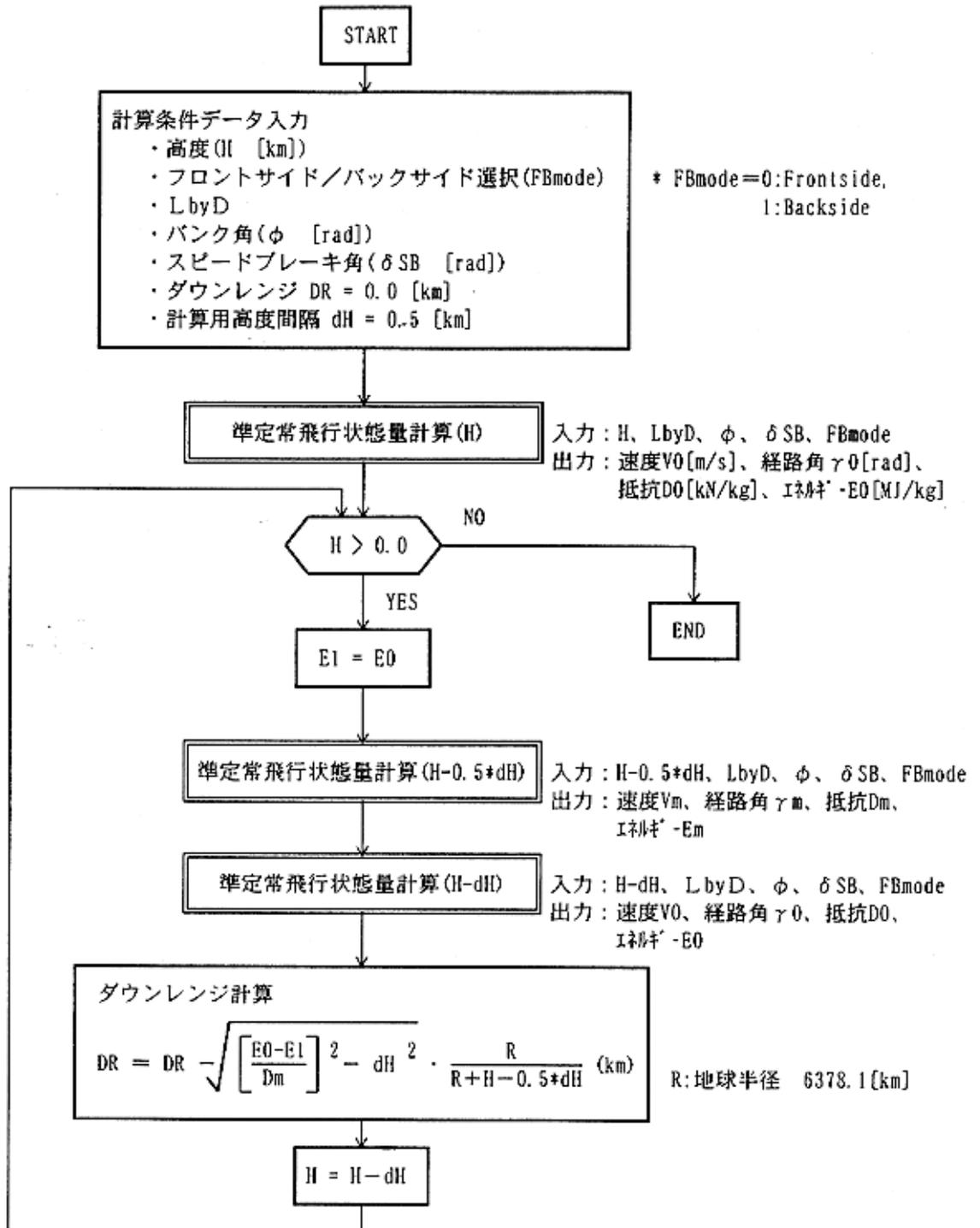


図 A-1

下位モジュール：準定常飛行状態量計算

入力：高度H、LbyD、バンク角 ϕ 、スピードブレーキ角 δSB 、FBmode
 出力：速度V[m/s]、経路角 γ [rad]、抵抗D[kN/kg]、エネルギーE[MJ/kg]

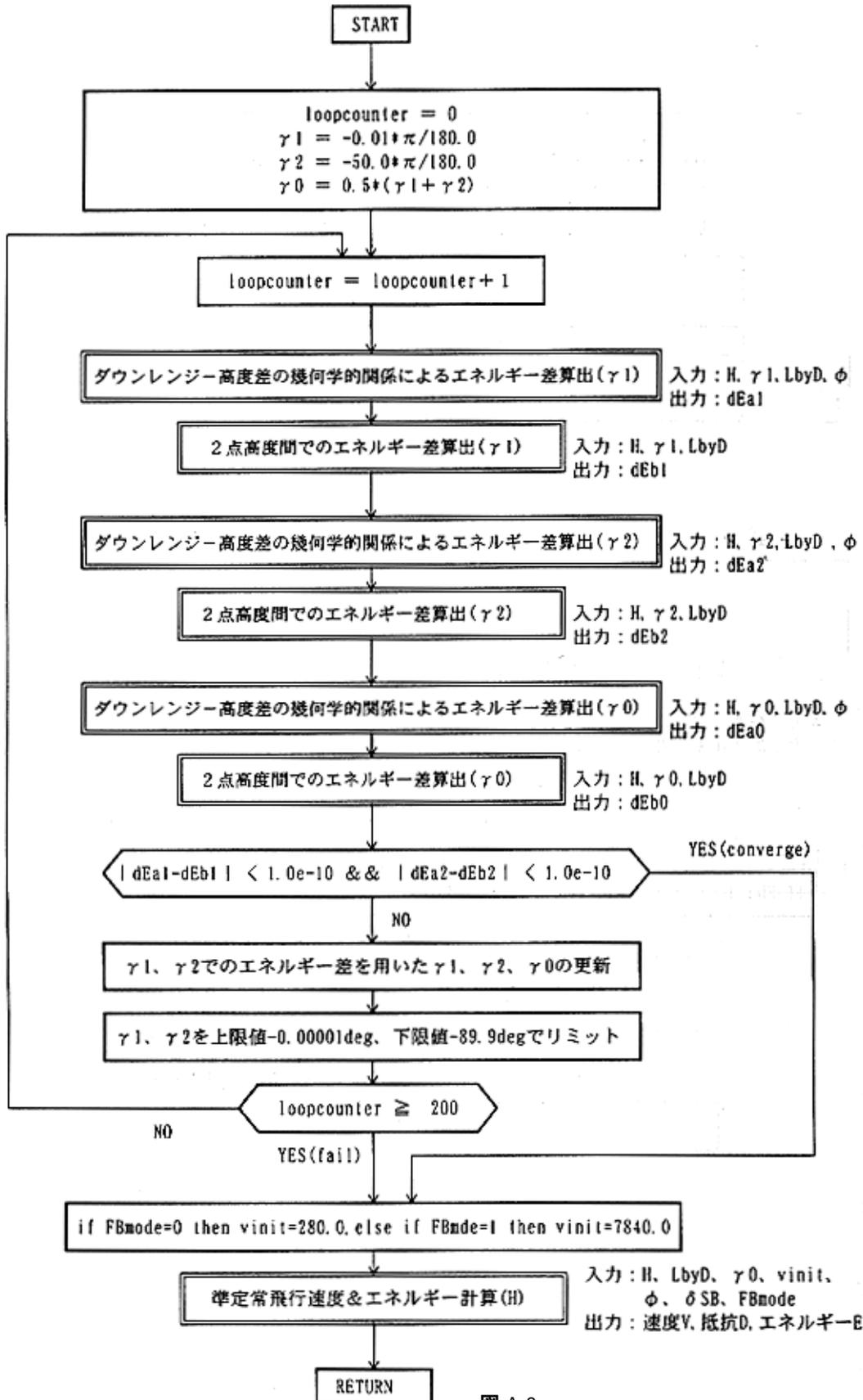


図 A-2

下位モジュール：ダウンレンジ-高度差の幾何学的関係によるエネルギー差算出

入力：高度H、LbyD、経路角 γ [rad]、バンク角 ϕ [rad]、FBmode
出力：エネルギー差dE [kmN/kg]

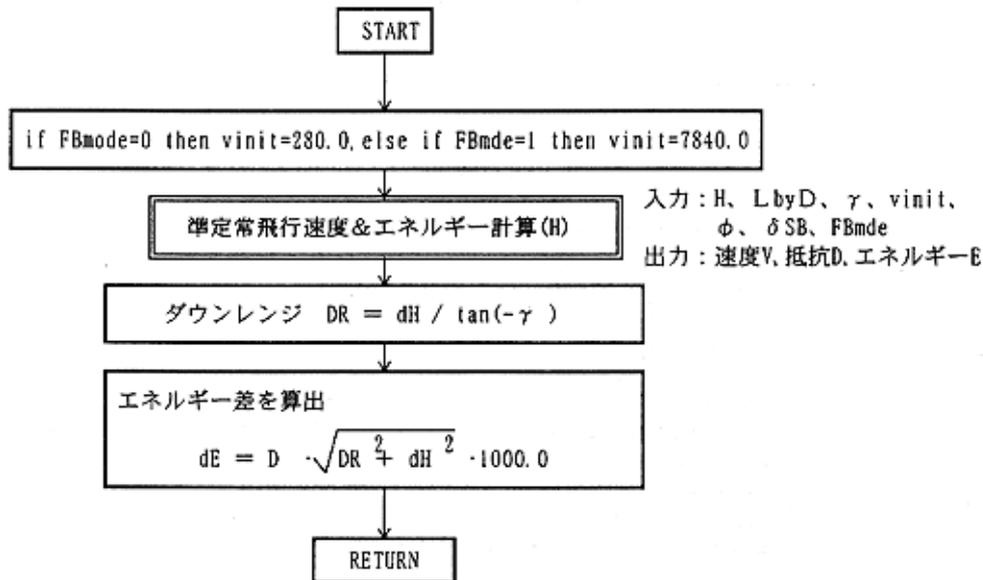


図 A-3(1/2)

下位モジュール：2点高度間でのエネルギー差算出

入力：高度H、L/D、経路角 γ [rad]、FBmode
出力：エネルギー差dE [kmN/kg]

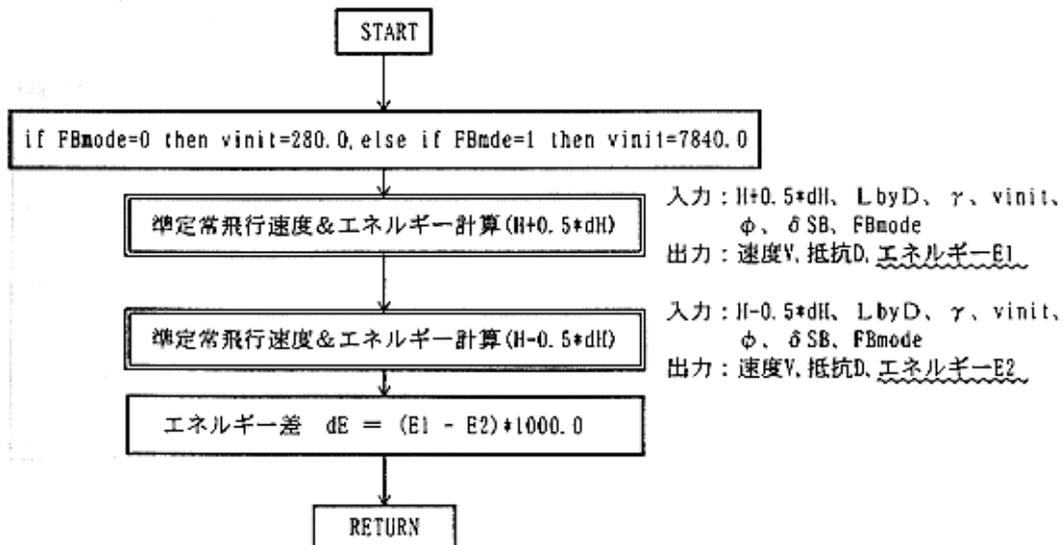


図 A-3(2/2)

下位モジュール：準定常飛行速度&エネルギー計算

入力：高度H、LbyD、経路角 γ [rad]、バンク角 ϕ [rad]、スピードブレーキ角 δSB [rad]、FBmode
 出力：速度Vout [m/s]、抵抗D [kN/kg]、エネルギーE [MJ/kg]

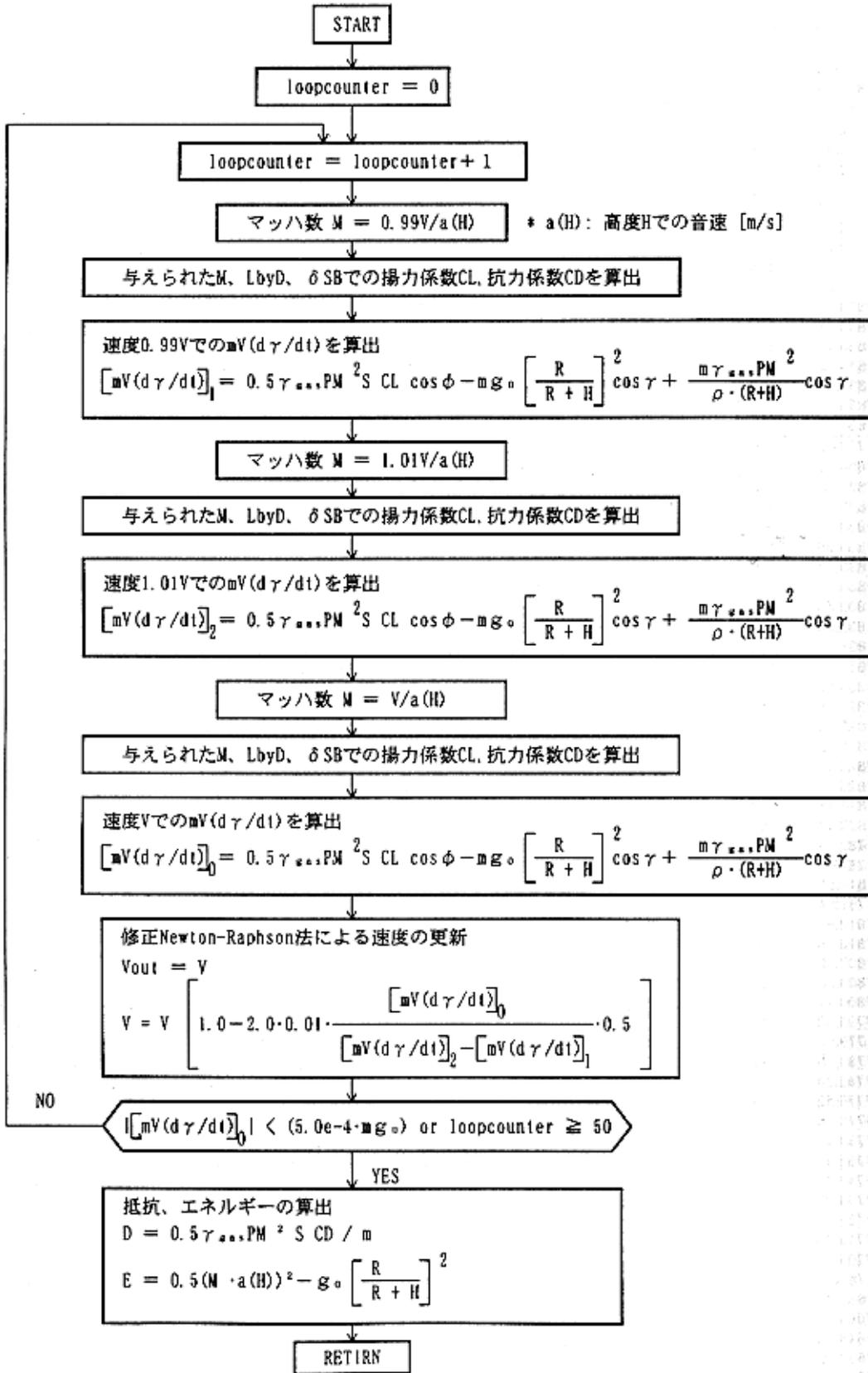


図 A-4

Appendix B

図 7 の詳細データを Appendix B で表 B1, B2, B3 として次ページ以降に示す。

表B1		準定常飛行経路上での dV/dh								dV/dHが負の領域	
高度 120km	バンク角 Q_{deg}	L/D 1.5									
vel	h	range	Drag	gamma	E	Twall	Qs	dV/dH			
7831.63	120	0	2.00E-06	-0.017068	-30.683879						
7831.86	119.5	-1607.499	2.00E-06	-0.017831	-30.68677	739	13.2	-0.462578			
7832.09	119	-3145.001	2.00E-06	-0.018698	-30.689715	745	13.6	-0.450689			
7832.31	118.5	-4611.572	2.00E-06	-0.019606	-30.692711	751	14.1	-0.43764			
7832.53	118	-6010.692	2.00E-06	-0.020553	-30.695762	758	14.6	-0.423307			
7832.73	117.5	-7345.784	2.00E-06	-0.021539	-30.698874	765	15.1	-0.40755			
7832.93	117	-8620.212	2.00E-06	-0.022564	-30.702053	772	15.7	-0.390211			
7833.12	116.5	-9837.27	3.00E-06	-0.023626	-30.705306	779	16.3	-0.371117			
7833.29	116	-11000.177	3.00E-06	-0.024722	-30.70864	786	16.9	-0.350072			
7833.46	115.5	-12112.069	3.00E-06	-0.025851	-30.712063	793	17.5	-0.326855			
7833.61	115	-13175.996	3.00E-06	-0.027009	-30.715585	801	18.2	-0.301221			
7833.75	114.5	-14194.918	4.00E-06	-0.028193	-30.719216	809	18.9	-0.272894			
7833.88	114	-15171.696	4.00E-06	-0.029398	-30.722967	817	19.7	-0.241562			
7833.99	113.5	-16109.098	4.00E-06	-0.030619	-30.726852	825	20.5	-0.206877			
7834.08	113	-17009.788	4.00E-06	-0.031851	-30.730884	833	21.3	-0.168446			
7834.14	112.5	-17876.329	5.00E-06	-0.033087	-30.73508	842	22.2	-0.125826			
7834.19	112	-18711.181	5.00E-06	-0.034322	-30.739457	851	23.2	-0.078518			
7834.21	111.5	-19516.7	6.00E-06	-0.035548	-30.744035	860	24.2	-0.025961			
7834.2	111	-20295.138	6.00E-06	-0.036759	-30.748837	869	25.2	0.032481			
7834.16	110.5	-21048.644	7.00E-06	-0.037947	-30.753887	878	26.3	0.097525			
7834.08	110	-21779.263	7.00E-06	-0.038762	-30.759215	888	27.5	0.169982			
7833.96	109.5	-22499.335	8.00E-06	-0.039809	-30.764942	898	28.8	0.271886			
7833.79	109	-23194.336	9.00E-06	-0.04121	-30.770979	909	30.1	0.352781			
7833.58	108.5	-23866.379	9.00E-06	-0.042583	-30.777356	919	31.6	0.441164			
7833.33	108	-24517.397	1.00E-05	-0.043924	-30.784103	930	33.1	0.537728			
7833.02	107.5	-25149.16	1.10E-05	-0.045227	-30.791255	941	34.6	0.643226			
7832.65	107	-25763.289	1.20E-05	-0.046491	-30.79885	952	36.3	0.758483			
7832.23	106.5	-26361.267	1.30E-05	-0.047712	-30.806927	963	38	0.884397			
7831.73	106	-26944.45	1.50E-05	-0.048844	-30.815532	974	39.8	1.021951			
7831.17	105.5	-27514.606	1.60E-05	-0.050021	-30.824722	985	41.7	1.172356			
7830.52	105	-28071.857	1.70E-05	-0.051103	-30.834533	997	43.7	1.336515			
7829.78	104.5	-28617.731	1.90E-05	-0.052136	-30.845031	1009	45.8	1.515825			
7828.95	104	-29153.179	2.10E-05	-0.053121	-30.856279	1020	47.9	1.711676			
7828.02	103.5	-29679.088	2.30E-05	-0.054058	-30.868347	1032	50.2	1.925579			
7826.97	103	-30196.192	2.50E-05	-0.054947	-30.881309	1044	52.5	2.159186			
7825.79	102.5	-30705.274	2.70E-05	-0.055789	-30.895247	1056	55	2.414291			
7824.48	102	-31206.975	2.90E-05	-0.056585	-30.910251	1068	57.6	2.692851			
7823.02	101.5	-31702.147	3.20E-05	-0.057311	-30.926427	1080	60.2	3.001151			
7821.4	101	-32190.862	3.50E-05	-0.058047	-30.943864	1093	63	3.329248			
7819.6	100.5	-32673.848	3.80E-05	-0.058716	-30.962686	1105	65.9	3.691739			
7817.61	100	-33151.56	4.20E-05	-0.059346	-30.98302	1117	69	4.087394			
7815.4	99.5	-33624.409	4.60E-05	-0.05994	-31.005001	1130	72.1	4.51919			
7812.97	99	-34092.769	5.00E-05	-0.060499	-31.028779	1143	75.4	4.990356			
7810.28	98.5	-34556.979	5.50E-05	-0.061027	-31.054517	1155	78.8	5.504401			
7807.32	98	-35017.343	6.00E-05	-0.061524	-31.082391	1168	82.4	6.065124			
7804.06	97.5	-35474.137	6.50E-05	-0.061995	-31.112593	1181	86.1	6.676645			
7800.47	97	-35927.805	7.10E-05	-0.06244	-31.14533	1194	89.9	7.343419			
7796.53	96.5	-36377.967	7.80E-05	-0.062883	-31.180829	1207	93.9	8.070265			
7792.2	96	-36825.417	8.50E-05	-0.063266	-31.219334	1220	98	8.862387			
7787.45	95.5	-37270.126	9.30E-05	-0.063651	-31.261112	1233	102.3	9.725397			
7782.24	95	-37712.243	0.000101	-0.064021	-31.306449	1247	106.8	10.665342			
7776.52	94.5	-38151.897	0.00011	-0.064377	-31.355655	1260	111.4	11.688723			
7770.26	94	-38589.195	0.00012	-0.064723	-31.409068	1273	116.2	12.802524			
7763.41	93.5	-39024.227	0.000131	-0.065056	-31.467049	1288	121.7	14.014226			
7755.91	93	-39457.065	0.000143	-0.065391	-31.529989	1301	126.8	15.331833			
7747.71	92.5	-39887.763	0.000156	-0.065719	-31.598309	1315	132.2	16.763883			
7738.75	92	-40316.36	0.000171	-0.066045	-31.672459	1328	137.6	18.319465			
7728.96	91.5	-40742.876	0.000186	-0.066372	-31.752925	1342	143.3	20.008226			
7718.28	91	-41167.318	0.000203	-0.066703	-31.840227	1355	149.1	21.840367			
7706.62	90.5	-41589.673	0.000221	-0.06704	-31.934918	1368	155	23.826644			
7693.9	90	-42009.918	0.000241	-0.067386	-32.03759	1382	161.1	25.978347			
7680.05	89.5	-42428.011	0.000262	-0.067743	-32.148872	1395	167.4	28.307272			
7664.95	89	-42843.895	0.000286	-0.068115	-32.26943	1408	173.8	30.825681			
7648.53	88.5	-43257.499	0.000311	-0.068503	-32.39997	1421	180.3	33.54624			
7630.66	88	-43668.735	0.000339	-0.068912	-32.541234	1434	186.9	36.481944			
7611.24	87.5	-44077.502	0.000369	-0.069345	-32.694002	1446	193.6	39.646018			
7590.15	87	-44483.681	0.000401	-0.069805	-32.859088	1459	200.3	43.051788			
7567.26	86.5	-44887.138	0.000436	-0.070295	-33.037338	1471	207.1	46.71253			

表B2 準定常飛行経路上でのdV/dh

高度 120km バンク角 45deg L/D 1.5

dV/dhが負の領域

vel	h	range	Drag	gamma	E	Twall	Qs	dV/dh
7831.94	120	0.00	0.000002	-0.01794	-30.681			
7832.2	119.5	-1524.35	0.000002	-0.01888	-30.684	738.95	13.19	-0.503576
7832.44	119	-2972.59	0.000002	-0.01988	-30.687	745.15	13.64	-0.495188
7832.69	118.5	-4348.25	0.000002	-0.02094	-30.690	751.51	14.11	-0.485979
7832.93	118	-5654.81	0.000002	-0.02205	-30.693	758.03	14.60	-0.475862
7833.16	117.5	-6895.68	0.000002	-0.02322	-30.695	764.73	15.13	-0.464736
7833.39	117	-8074.25	0.000002	-0.02446	-30.698	771.61	15.68	-0.452493
7833.61	116.5	-9193.79	0.000003	-0.02575	-30.701	778.66	16.26	-0.439008
7833.82	116	-10257.53	0.000003	-0.02710	-30.704	785.89	16.87	-0.424141
7834.03	115.5	-11268.61	0.000003	-0.02851	-30.708	793.31	17.52	-0.407739
7834.23	115	-12230.07	0.000003	-0.02990	-30.711	800.91	18.20	-0.389626
7834.42	114.5	-13144.89	0.000004	-0.03150	-30.714	808.71	18.92	-0.369607
7834.59	114	-14015.92	0.000004	-0.03308	-30.717	816.71	19.68	-0.347462
7834.76	113.5	-14845.92	0.000004	-0.03470	-30.721	824.90	20.48	-0.322944
7834.91	113	-15637.57	0.000004	-0.03637	-30.724	833.30	21.33	-0.295774
7835.04	112.5	-16393.43	0.000005	-0.03808	-30.728	841.92	22.22	-0.26554
7835.16	112	-17115.95	0.000005	-0.03982	-30.732	850.74	23.17	-0.232187
7835.27	111.5	-17807.51	0.000006	-0.04158	-30.736	859.79	24.17	-0.195018
7835.35	111	-18470.34	0.000006	-0.04335	-30.740	869.05	25.23	-0.153682
7835.41	110.5	-19106.61	0.000007	-0.04513	-30.744	878.55	26.35	-0.107671
7835.44	110	-19718.36	0.000007	-0.04655	-30.749	888.29	27.54	-0.05641
7835.44	109.5	-20314.78	0.000008	-0.04824	-30.753	898.26	28.80	0.015693
7835.41	109	-20886.12	0.000009	-0.05032	-30.758	908.75	30.16	0.07294
7835.35	108.5	-21434.50	0.000009	-0.05238	-30.763	919.37	31.60	0.135496
7835.26	108	-21961.86	0.00001	-0.05442	-30.769	930.11	33.10	0.203851
7835.13	107.5	-22469.96	0.000011	-0.05644	-30.775	940.99	34.68	0.278542
7834.96	107	-22960.43	0.000012	-0.05842	-30.781	951.99	36.33	0.360156
7834.75	106.5	-23434.76	0.000013	-0.06035	-30.787	963.13	38.06	0.449331
7834.49	106	-23894.31	0.000015	-0.06225	-30.794	974.40	39.87	0.546768
7834.17	105.5	-24340.32	0.000016	-0.06408	-30.801	985.80	41.77	0.653229
7833.8	105	-24773.93	0.000017	-0.06587	-30.809	997.34	43.76	0.769546
7833.37	104.5	-25196.20	0.000019	-0.06759	-30.817	1009.04	45.85	0.896828
7832.87	104	-25608.06	0.000021	-0.06925	-30.826	1020.76	48.02	1.035468
7832.3	103.5	-26010.40	0.000023	-0.07084	-30.835	1032.59	50.28	1.187147
7831.64	103	-26404.33	0.000025	-0.07231	-30.845	1044.53	52.65	1.356932
7830.9	102.5	-26789.97	0.000027	-0.07382	-30.855	1056.57	55.12	1.53404
7830.06	102	-27168.29	0.000029	-0.07521	-30.867	1068.71	57.70	1.731781
7829.11	101.5	-27539.89	0.000032	-0.07653	-30.879	1080.97	60.39	1.947767
7828.05	101	-27905.33	0.000035	-0.07778	-30.892	1093.32	63.20	2.183663
7826.86	100.5	-28265.12	0.000038	-0.07896	-30.906	1105.78	66.13	2.441298
7825.54	100	-28619.73	0.000042	-0.08008	-30.921	1118.34	69.19	2.72262
7824.06	99.5	-28969.57	0.000046	-0.08114	-30.937	1131.00	72.37	3.029813
7822.42	99	-29315.04	0.00005	-0.08214	-30.955	1143.76	75.69	3.36521
7820.6	98.5	-29656.48	0.000055	-0.08308	-30.974	1156.61	79.15	3.731361
7818.59	98	-29994.22	0.00006	-0.08397	-30.994	1169.56	82.76	4.131037
7816.36	97.5	-30328.53	0.000065	-0.08480	-31.017	1182.60	86.51	4.567249
7813.9	97	-30659.70	0.000071	-0.08559	-31.041	1195.73	90.42	5.043265
7811.18	96.5	-30987.95	0.000078	-0.08633	-31.066	1208.95	94.48	5.562631
7808.19	96	-31313.49	0.000085	-0.08703	-31.095	1222.25	98.71	6.129193
7804.9	95.5	-31636.52	0.000093	-0.08769	-31.125	1235.63	103.10	6.747116
7801.27	95	-31957.22	0.000102	-0.08827	-31.158	1249.09	107.67	7.420908
7797.29	94.5	-32275.91	0.000111	-0.08881	-31.194	1262.61	112.41	8.155945
7792.91	94	-32592.39	0.000121	-0.08948	-31.233	1277.60	117.84	8.956534
7788.11	93.5	-32906.94	0.000132	-0.09002	-31.275	1291.31	122.98	9.828808
7782.84	93	-33219.66	0.000144	-0.09054	-31.321	1305.06	128.31	10.778883
7777.06	92.5	-33530.65	0.000157	-0.09104	-31.370	1318.87	133.82	11.813332
7770.74	92	-33839.97	0.000172	-0.09153	-31.424	1332.71	139.53	12.939216
7763.81	91.5	-34147.70	0.000188	-0.09201	-31.483	1346.59	145.43	14.164098
7756.23	91	-34453.88	0.000205	-0.09247	-31.547	1360.48	151.53	15.496068
7747.95	90.5	-34758.55	0.000223	-0.09294	-31.616	1374.38	157.81	16.943754
7738.89	90	-35061.73	0.000244	-0.09340	-31.690	1388.28	164.29	18.518339
7729	89.5	-35363.44	0.000266	-0.09386	-31.772	1402.16	170.97	20.223565
7718.19	89	-35663.68	0.00029	-0.09433	-31.860	1416.01	177.82	22.075734
7706.41	88.5	-35962.44	0.000316	-0.09481	-31.956	1429.80	184.85	24.0837
7693.56	88	-36259.70	0.000344	-0.09530	-32.059	1443.54	192.06	26.258854
7679.55	87.5	-36555.43	0.000375	-0.09581	-32.172	1457.18	199.42	28.613089
7664.29	87	-36849.60	0.000408	-0.09633	-32.294	1470.72	206.93	31.158763
7647.69	86.5	-37142.14	0.000445	-0.09689	-32.425	1484.12	214.58	33.908629

表B3 準定常飛行経路上での dV/dh

高度	120km	バンク角	60deg	L/D	1.5	dV/dHが負の領域			
vel	h	range	Drag	gamma	E	Twall	Qs	dV/dH	
7832.16	120	0.00	0.000002	-0.01865	-30.680				
7832.43	119.5	-1462.35	0.000002	-0.01969	-30.682	738.969	13.19	-0.532572	
7832.69	119	-2847.42	0.000002	-0.02081	-30.685	745.166	13.64	-0.52666	
7832.96	118.5	-4158.75	0.000002	-0.02199	-30.688	751.527	14.11	-0.520168	
7833.21	118	-5399.80	0.000002	-0.02324	-30.690	758.057	14.61	-0.513033	
7833.47	117.5	-6574.01	0.000002	-0.02458	-30.693	764.757	15.13	-0.505185	
7833.72	117	-7684.74	0.000002	-0.02599	-30.696	771.632	15.68	-0.496546	
7833.96	116.5	-8735.28	0.000003	-0.02749	-30.699	778.685	16.26	-0.487029	
7834.2	116	-9728.86	0.000003	-0.02907	-30.702	785.919	16.87	-0.478534	
7834.43	115.5	-10668.60	0.000003	-0.03074	-30.704	793.339	17.52	-0.469553	
7834.66	115	-11557.57	0.000003	-0.03250	-30.707	800.948	18.20	-0.452162	
7834.88	114.5	-12398.72	0.000004	-0.03435	-30.710	808.750	18.92	-0.438023	
7835.1	114	-13194.92	0.000004	-0.03629	-30.713	816.749	19.68	-0.422379	
7835.3	113.5	-13948.93	0.000004	-0.03832	-30.717	824.950	20.48	-0.405056	
7835.5	113	-14663.42	0.000004	-0.04043	-30.720	833.356	21.33	-0.385857	
7835.68	112.5	-15340.96	0.000005	-0.04263	-30.723	841.972	22.23	-0.36456	
7835.86	112	-15982.50	0.000005	-0.04497	-30.726	850.803	23.18	-0.344967	
7836.02	111.5	-16593.46	0.000006	-0.04721	-30.730	859.854	24.18	-0.314563	
7836.16	111	-17174.54	0.000006	-0.04962	-30.733	869.128	25.24	-0.285346	
7836.29	110.5	-17727.89	0.000007	-0.05208	-30.737	878.635	26.36	-0.25282	
7836.41	110	-18255.54	0.000007	-0.05425	-30.741	888.379	27.55	-0.216579	
7836.49	109.5	-18764.47	0.000008	-0.05673	-30.745	898.362	28.81	-0.165595	
7836.56	109	-19248.31	0.000009	-0.05963	-30.749	908.662	30.18	-0.125112	
7836.61	108.5	-19709.17	0.000009	-0.06255	-30.754	919.491	31.62	-0.08087	
7836.63	108	-20149.00	0.00001	-0.06548	-30.758	930.249	33.12	-0.03252	
7836.63	107.5	-20569.56	0.000011	-0.06842	-30.763	941.137	34.70	0.020318	
7836.6	107	-20972.49	0.000012	-0.07136	-30.768	952.158	36.35	0.07806	
7836.53	106.5	-21359.27	0.000013	-0.07427	-30.773	963.312	38.09	0.141162	
7836.44	106	-21731.27	0.000015	-0.07716	-30.779	974.600	39.90	0.210119	
7836.3	105.5	-22089.72	0.000016	-0.08001	-30.784	986.025	41.81	0.285474	
7836.13	105	-22435.79	0.000017	-0.08280	-30.791	997.586	43.80	0.36782	
7835.91	104.5	-22770.50	0.000019	-0.08544	-30.797	1009.308	45.90	0.457802	
7835.65	104	-23095.22	0.000021	-0.08822	-30.804	1021.060	48.08	0.556264	
7835.33	103.5	-23410.05	0.000023	-0.09081	-30.811	1032.921	50.35	0.66373	
7834.95	103	-23716.17	0.000025	-0.09333	-30.819	1044.891	52.72	0.781155	
7834.51	102.5	-24014.31	0.000027	-0.09575	-30.827	1056.971	55.20	0.909458	
7834.01	102	-24305.15	0.00003	-0.09809	-30.836	1069.159	57.79	1.049642	
7833.43	101.5	-24589.29	0.000032	-0.10033	-30.845	1081.458	60.50	1.202601	
7832.76	101	-24867.31	0.000035	-0.10248	-30.855	1093.865	63.32	1.370129	
7832.01	100.5	-25139.71	0.000038	-0.10445	-30.866	1106.381	66.27	1.552929	
7831.16	100	-25407.16	0.000042	-0.10648	-30.877	1119.006	69.35	1.752835	
7830.2	99.5	-25669.71	0.000046	-0.10834	-30.889	1131.738	72.56	1.970992	
7829.12	99	-25927.94	0.00005	-0.11010	-30.902	1144.572	75.91	2.209278	
7827.92	98.5	-26182.20	0.000055	-0.11177	-30.917	1157.510	79.40	2.469532	
7826.58	98	-26432.82	0.00006	-0.11334	-30.932	1170.553	83.04	2.753754	
7825.09	97.5	-26680.09	0.000065	-0.11483	-30.948	1183.697	86.83	3.064125	
7823.43	97	-26924.29	0.000072	-0.11623	-30.966	1196.942	90.78	3.403015	
7821.59	96.5	-27165.66	0.000078	-0.11756	-30.985	1210.285	94.90	3.773004	
7819.56	96	-27404.43	0.000085	-0.11880	-31.006	1223.725	99.19	4.176895	
7817.3	95.5	-27640.80	0.000093	-0.11997	-31.028	1237.259	103.65	4.617736	
7814.82	95	-27874.95	0.000102	-0.12108	-31.052	1250.885	108.29	5.098833	
7812.07	94.5	-28107.05	0.000111	-0.12212	-31.079	1264.598	113.12	5.623775	
7809.05	94	-28337.26	0.000122	-0.12311	-31.107	1279.795	118.65	6.196453	
7805.71	93.5	-28565.70	0.000133	-0.12404	-31.138	1293.727	123.90	6.821081	
7802.05	93	-28792.49	0.000145	-0.12492	-31.171	1307.736	129.36	7.502221	
7798.02	92.5	-29017.75	0.000158	-0.12576	-31.207	1321.818	135.02	8.244802	
7793.6	92	-29241.57	0.000173	-0.12655	-31.247	1335.966	140.90	9.054149	
7788.74	91.5	-29464.03	0.000189	-0.12732	-31.289	1350.176	146.99	9.936004	
7783.42	91	-29685.20	0.000206	-0.12805	-31.335	1364.438	153.30	10.896553	
7777.58	90.5	-29905.15	0.000225	-0.12876	-31.386	1378.747	159.83	11.942444	
7771.19	90	-30123.93	0.000246	-0.12944	-31.440	1393.092	166.59	13.080815	
7764.18	89.5	-30341.58	0.000268	-0.13012	-31.499	1407.465	173.57	14.319316	
7756.52	89	-30558.14	0.000292	-0.13078	-31.563	1421.852	180.77	15.666123	
7748.14	88.5	-30773.63	0.000319	-0.13143	-31.633	1436.244	188.20	17.129956	
7738.99	88	-30988.07	0.000348	-0.13208	-31.709	1450.626	195.86	18.720094	
7728.98	87.5	-31201.47	0.00038	-0.13274	-31.791	1464.985	203.73	20.446377	
7718.06	87	-31413.82	0.000414	-0.13340	-31.880	1479.304	211.81	22.319207	
7706.15	86.5	-31625.13	0.000451	-0.13408	-31.977	1493.568	220.10	24.349541	