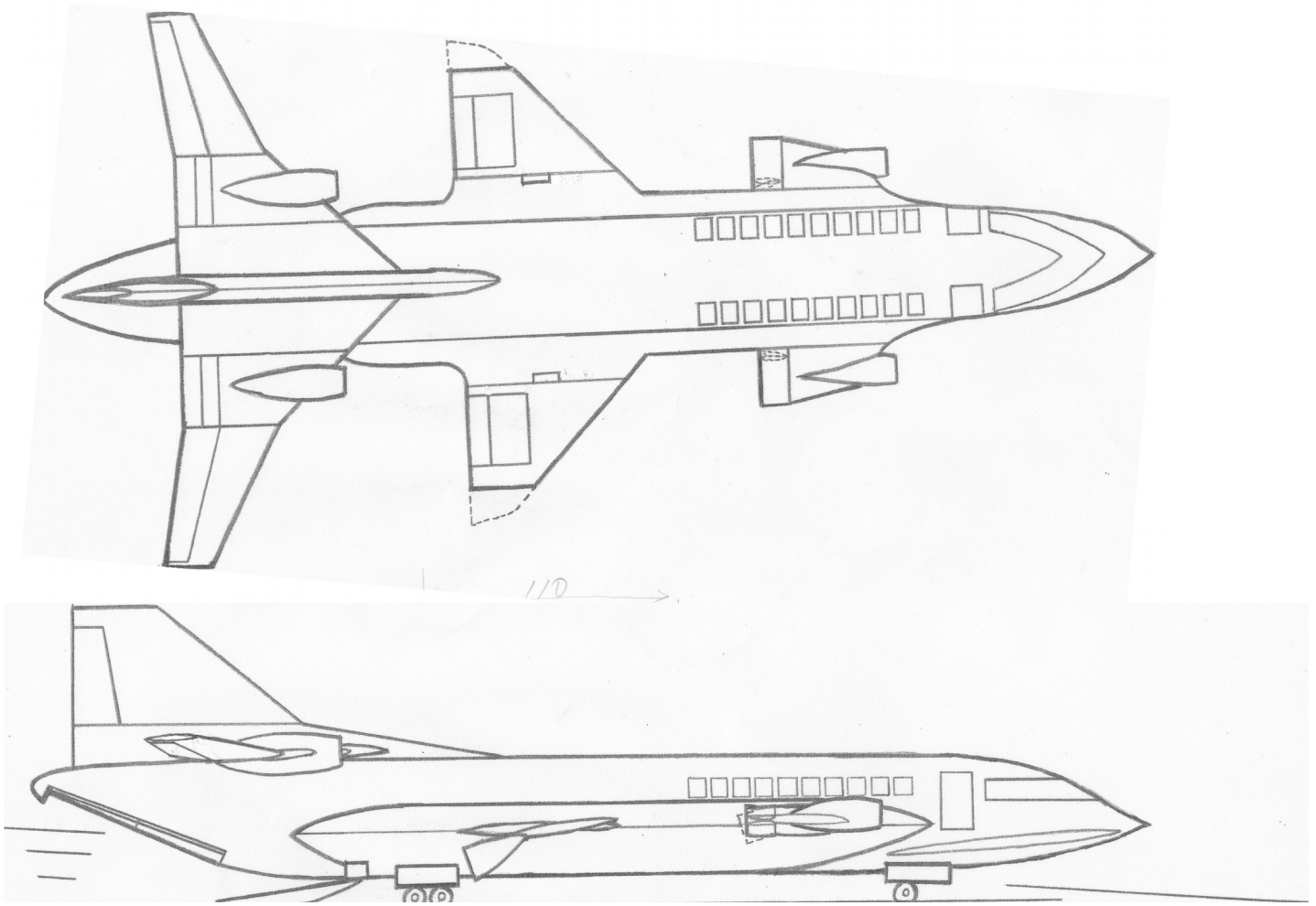
2E04　エンジン翼EW-2の形態過程自由度とフラッタ抑制を両立させる関節格子機構の諸元設定への課題

2019年4月19日

衣川　摂哉

エンジン翼クオッド型機動翼付汎用輸送機の概念例

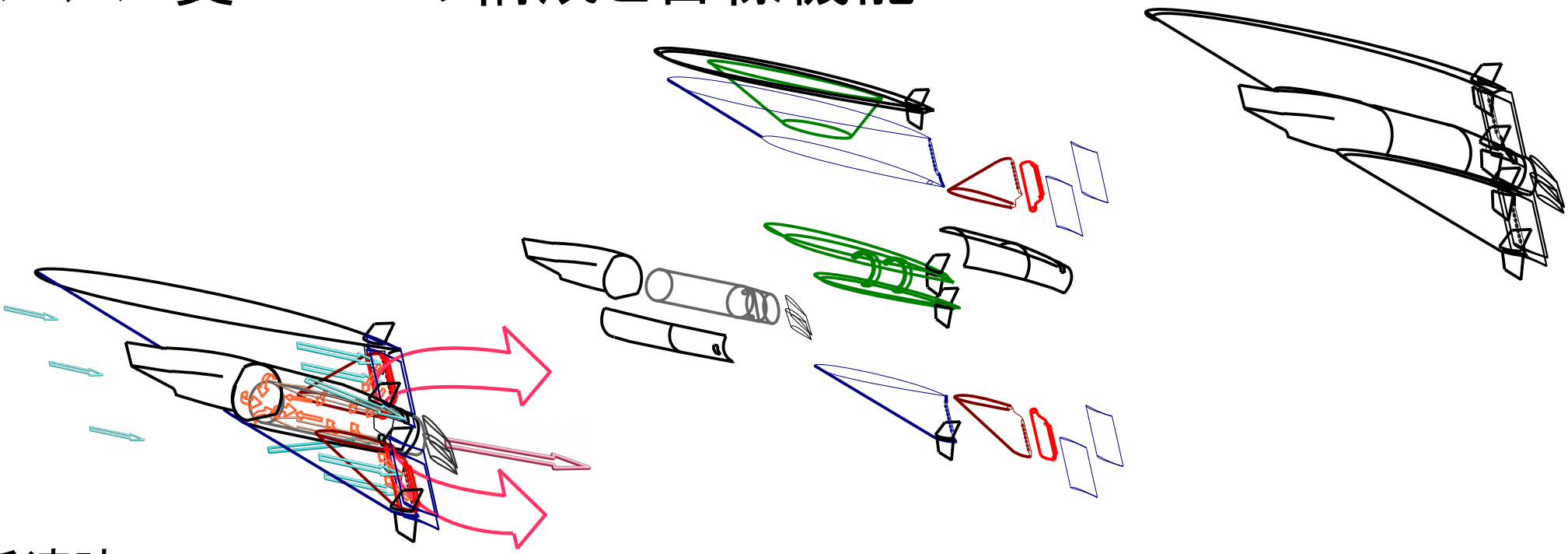


V/STOL, 高速巡航, 地面効果を低燃費で実現する設計を可能とし,
公共チャーター運用における高い運用生産性を目指す.

公共チャーター運用に適した汎用輸送機の運用生産性を高める要素技術

後方吸気ー排熱回生機能を有するエンジン翼EW-2

エンジン翼EW-2の構成と目標機能



低速時

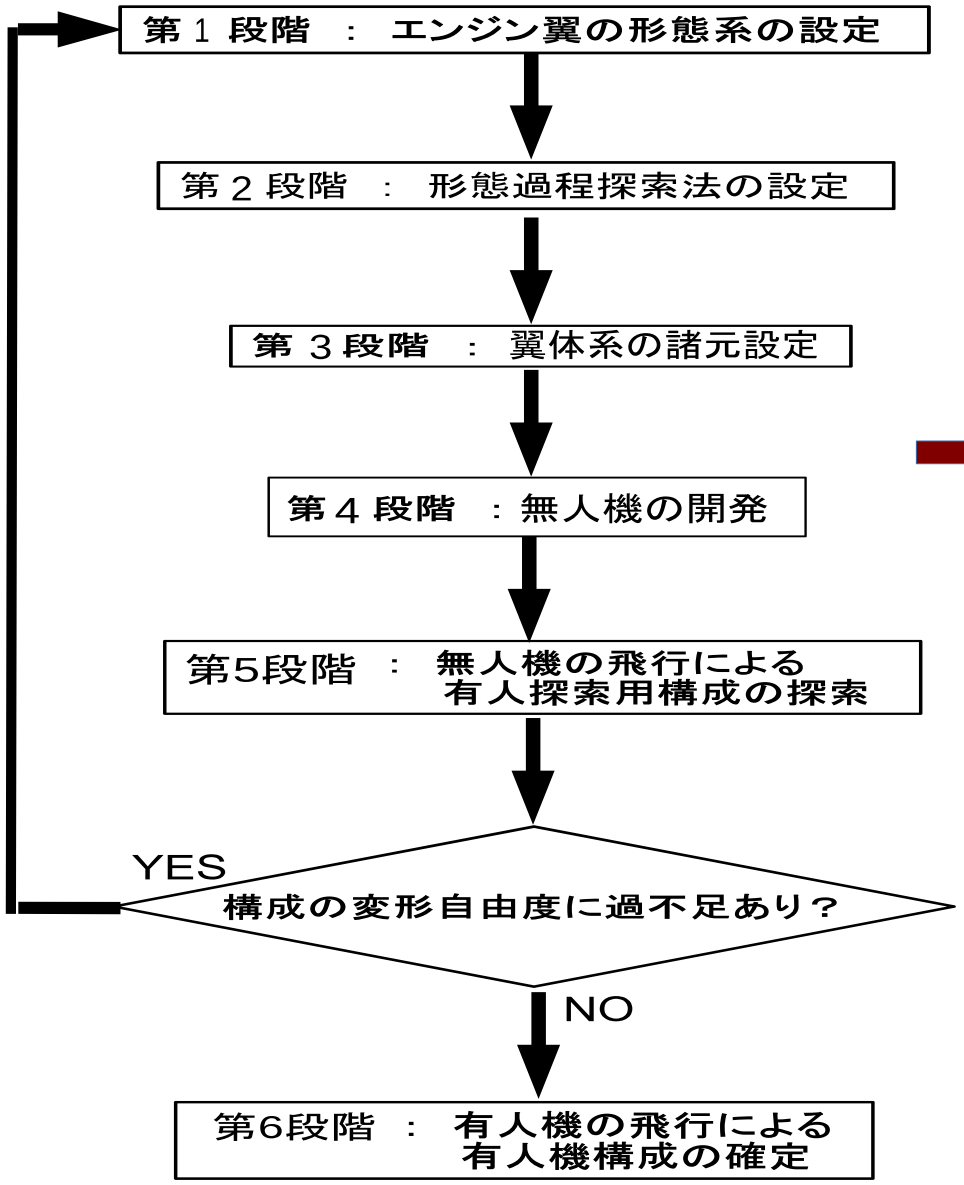
エンジン排気を内外翼後縁部のノズルに導き, ノズルを覆う吸気ダクトにより後縁部からの吸気に排気熱を伝達し, 加熱吸気をエンジン前部へ導く. 後方吸気により内外翼表面の気流を加速し後縁部のオーグメントフラップと共に推力, 揚力を増大する.

高速時

エンジン排気を直接エンジン後部の2次元ノズルより放出し, 2次元ノズル付近からの後方吸気に排気熱を伝達し, 加熱吸気をエンジン前部へ導く. オーグメントフラップは内外翼後縁部で閉じ操縦翼面となる.

広範囲の速度において加速度ベクトルの任意性と低燃費を目指す.

エンジン翼の開発法

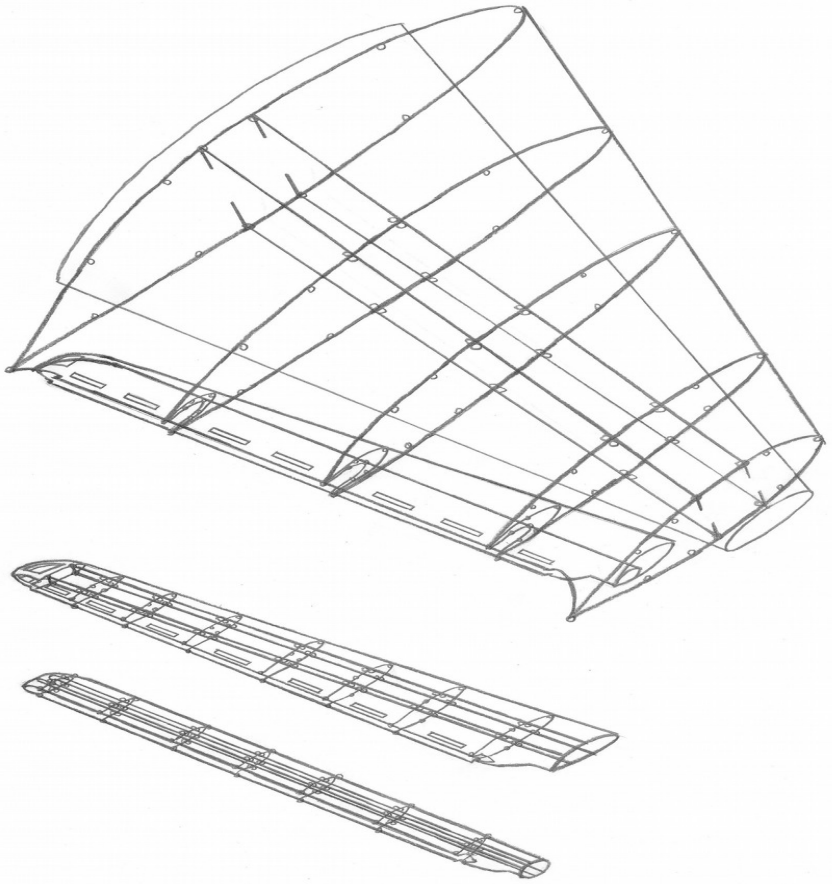


形態過程自由度とフラッタ抑制を両立させる関節格子機構の諸元設定への課題を探る

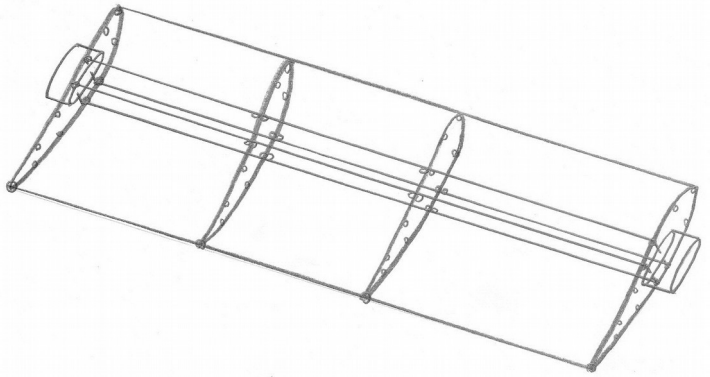
形態過程の自由度とフラッタ限界速度の両立を目指す

翼体系の骨格をなす関節格子機構の諸元と
フラッタ限界の関係の解明のため

高速飛行状態でのフラッタ解析の設定と課題を考える



第　図　内翼の関節格子機構

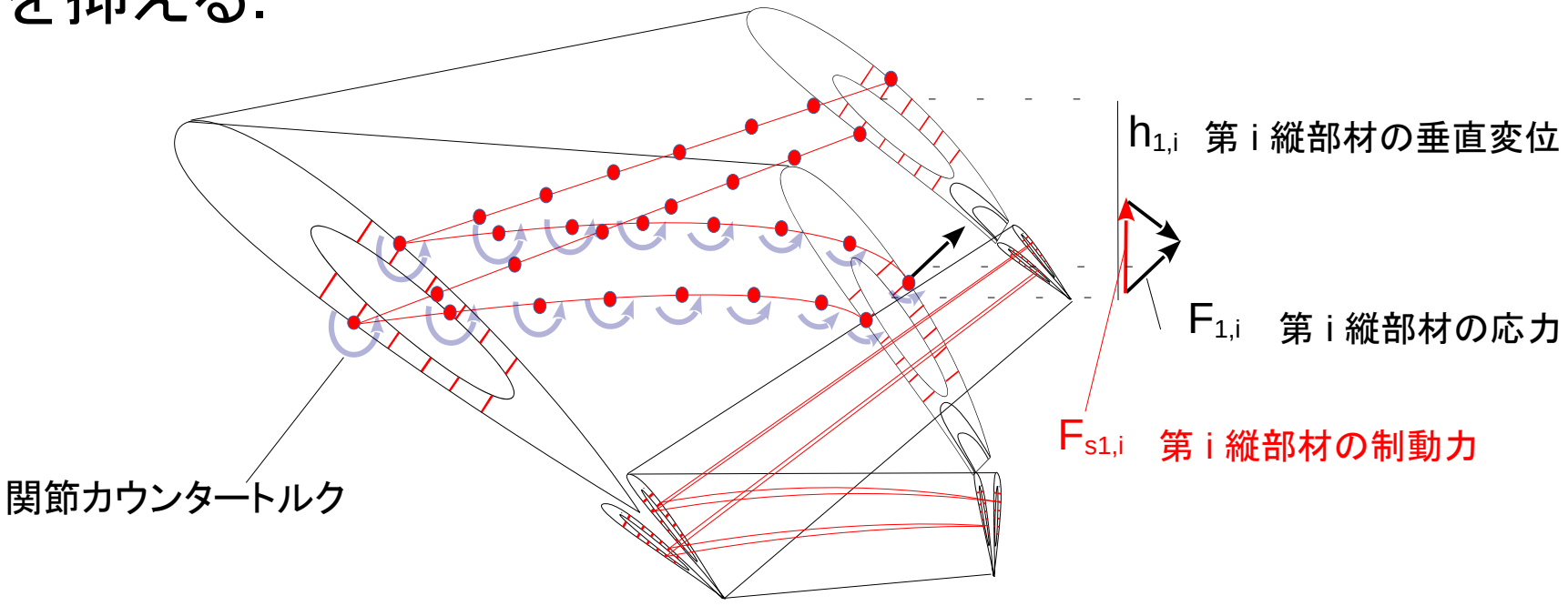


第　図　オーグメントフラップの関節格子機構

高速飛行状態

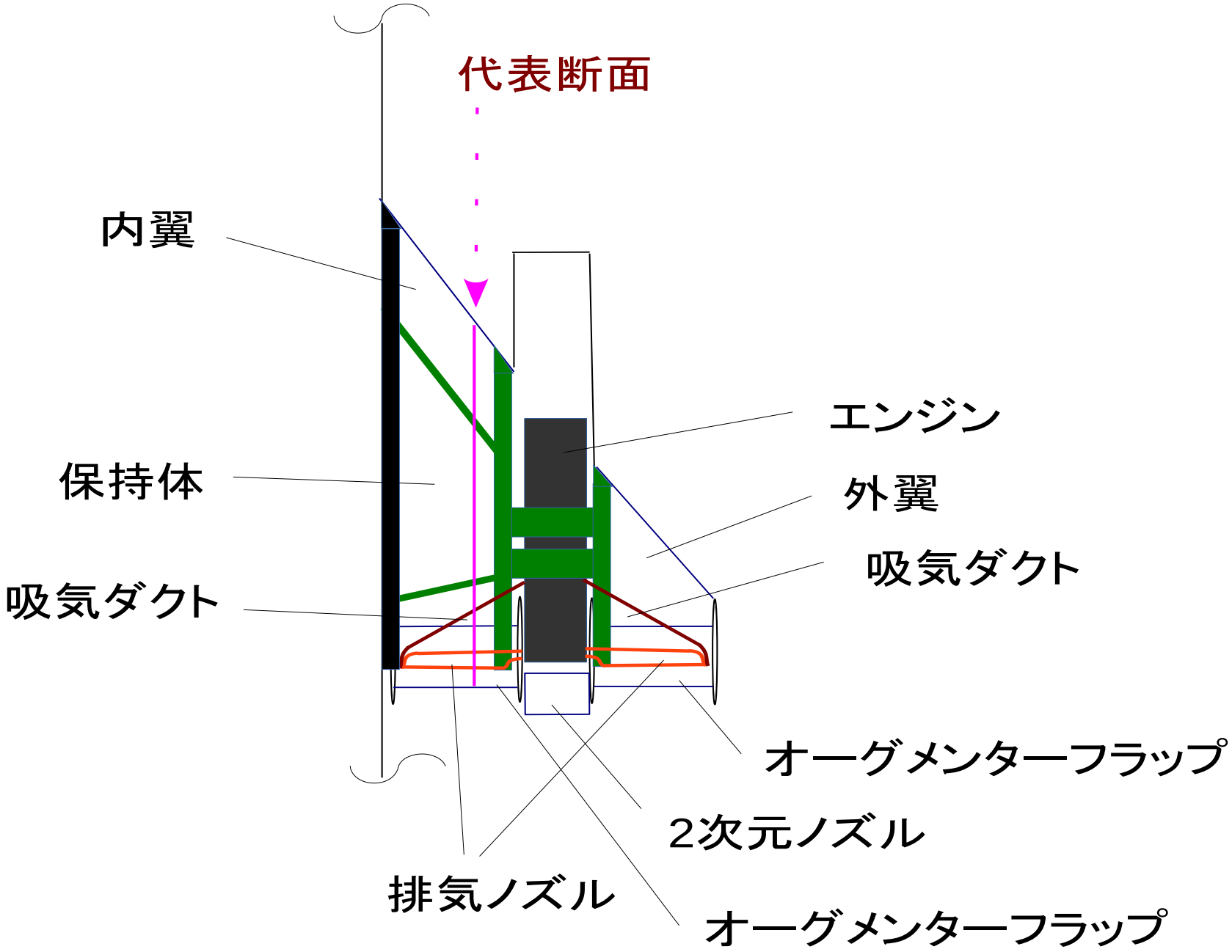
高速飛行状態ではエンジン排気は直接後方より排出され，内，外翼の各後方で夫々
上下オーグメントフラップが閉じた状態で一体的に回転支持される．

エンジン翼の曲げ，捩りに伴って横断面機構の関節にカウンタートルクを発生させることによって翼端側縦部材に制動力が生じ，曲げ，捩りの振幅及び中立位置付近での速度を抑える．



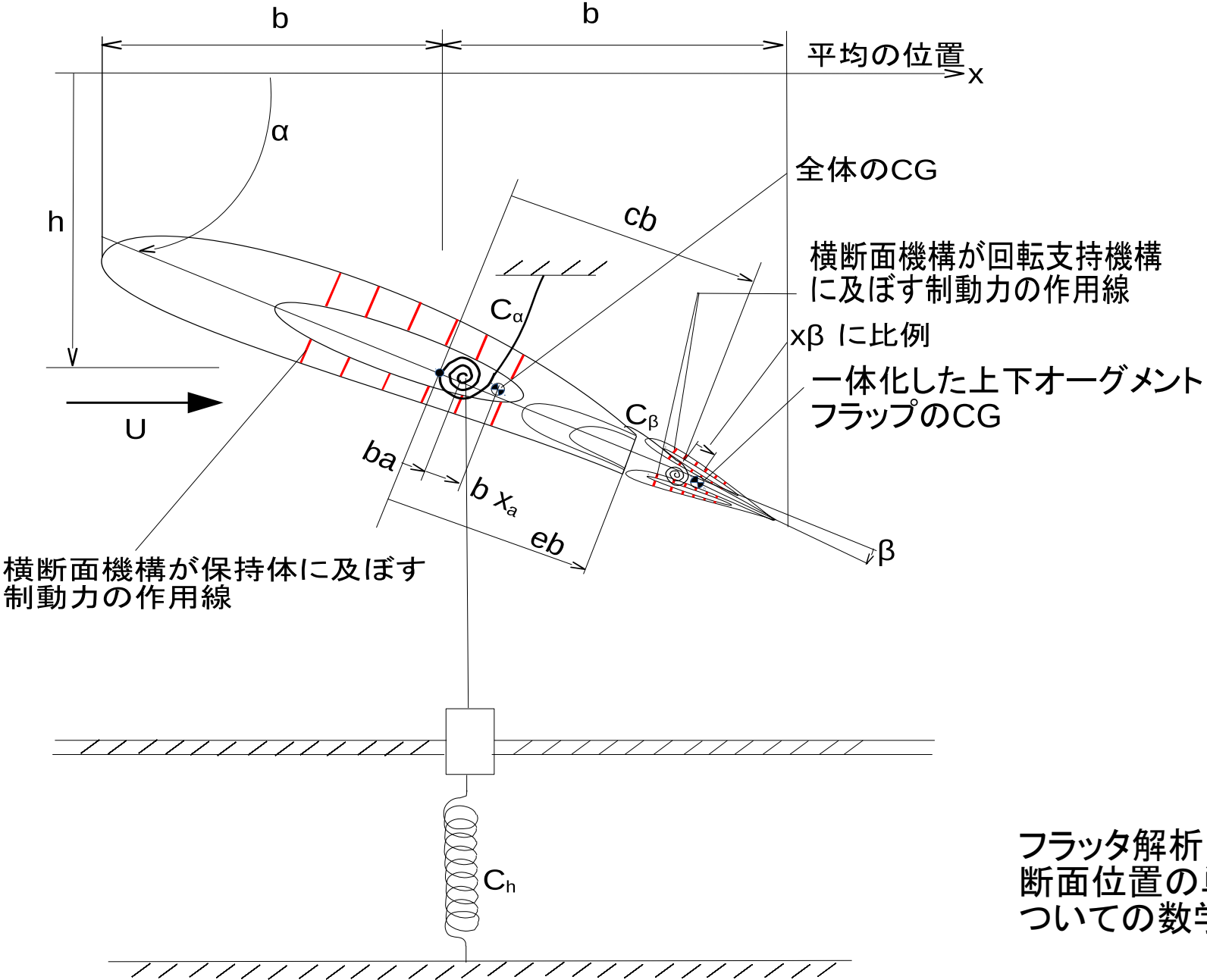
第　図　　内翼の制動力発生の説明図

フラッタ解析のための設定

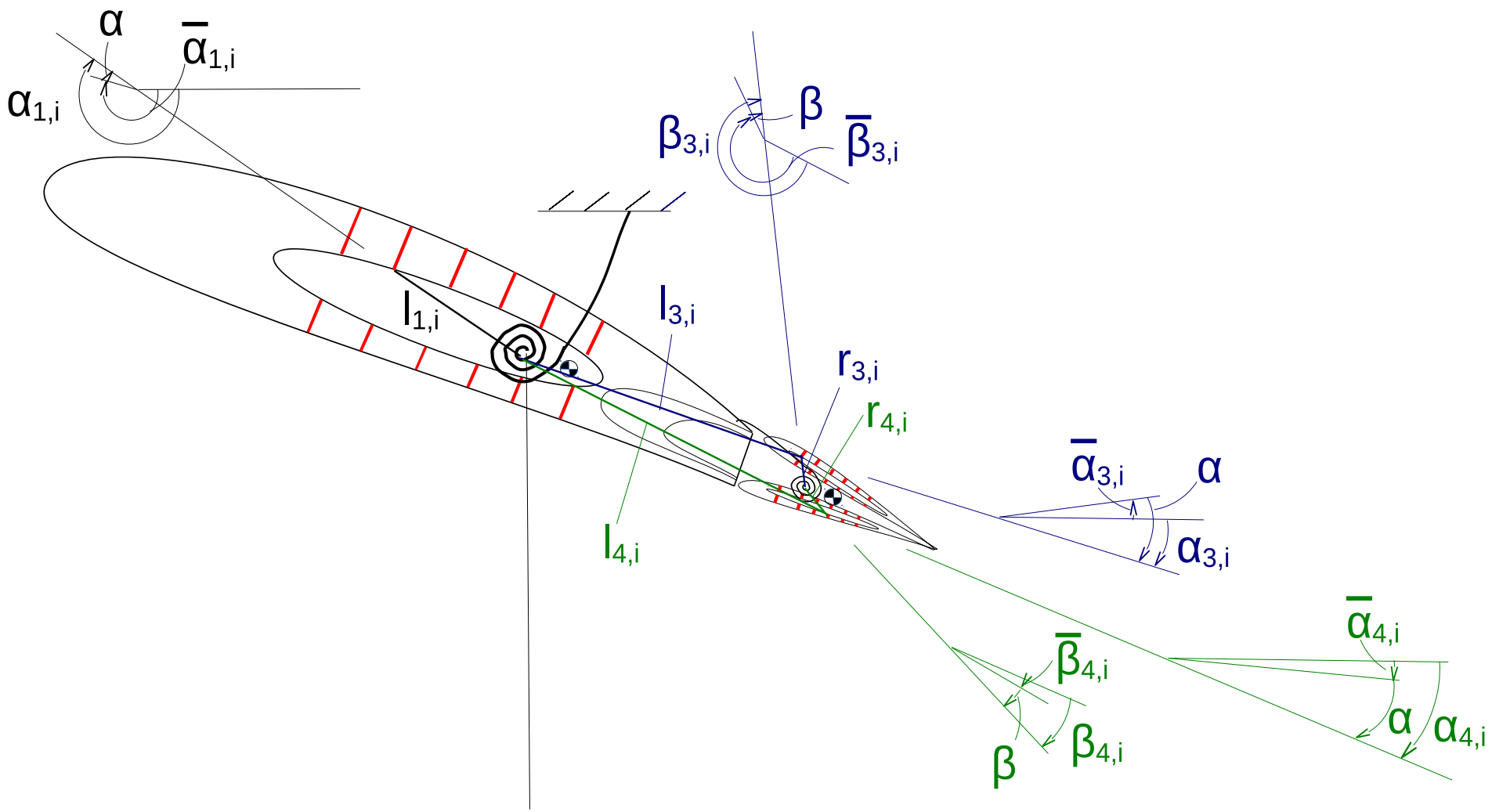


エンジン翼EW-2の平面概略透視図と代表断面位置

代表断面位置の単位スパンについて関節フリー状態で弾性軸に関し弾性特性を与える.



フラッタ解析に用いる代表断面位置の単位スパンについての数学的模型



制動力の作用点の角度座標, パラメータ

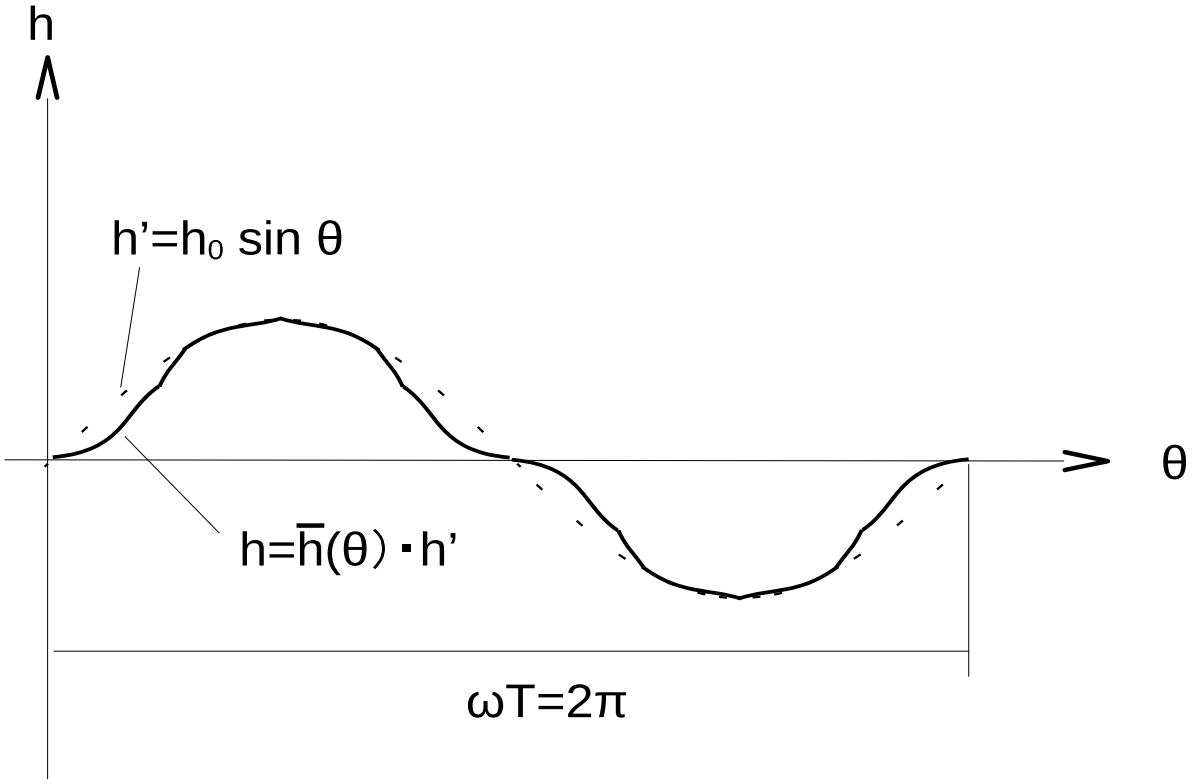
フラッタ臨界状態の運動設定

横関節のカウンタートルクにより発生する制動力が曲げ,捩りの変形を抑えられなくなると振動状態に到る, 振動状態では制動力は中立位置付近での変位速度, 振幅を減少させる.

曲げ変位 h を単純調和振動を表すh' にh=0 付近で速度の減少を与える制動係数$\overline{h}(\theta)$ を乗じて表す.

hの複素表示を次に示す

$$h=h^*_0\,\overline{h}(\theta)e^{i\theta}$$



曲げ変位hの挙動設定

α, β に関しても同様である.

フラッタ臨界状態の制動力F_S

内翼および上下一体のオーグメントフラップの曲げ,捩り変形に対し,横断面機構の関節のカウンタートルクにより内翼および上下一体のオーグメントフラップの翼端側縦部材に垂直変位方向の制動力F_Sを発生させる.第　　図参照.

各縦部材毎の制動力を翼体番号1,3,4 と縦部材番号 i により識別し次の通り与える.

曲げ変位 h と同様に,

単純調和振動を表す$F'_{S1、i} = F^{0}_{S1、i}\cos\theta$に,
$F_{S1、i} = 0$ 付近で変化率を調整する制動係数$\overline{F}_{S1,i}(\theta)$ を乗じて制動力$F_{S1、i}$を 次の通り表す.

$$F_{S1、i} = \overline{F}_{S1,i}(\theta) F^{0}_{S1、i}\cos\theta$$

$$= F^{0}_{S1、i}\,\overline{F}_{S1,i}(\theta)\cos\theta$$

$F_{S3、i}, F_{S4、i}$も同様である.

制動力F_Sの複素化

各制動力毎の複素表示は次の通りである.

$$F_{S1,i}=F^{0*}_{S1,i}\cdot\overline{F}_{S1,i}(\theta)\cdot e^{i\theta}$$

$$F_{S3,i}=F^{0*}_{S3,i}\cdot\overline{F}_{S3,i}(\theta)\cdot e^{i\theta}$$

$$F_{S4,i}=F^{0*}_{S4,i}\cdot\overline{F}_{S4,i}(\theta)\cdot e^{i\theta}$$

制動力の合力F_Sは次の通りである.

$$F_S=\overline{F}_S e^{i\theta}$$

$$\overline{F}_S=\sum_{i-1}^{N_1}F^{0*}_{S1.i}\cdot\overline{F}_{S1,i}(\theta)+\sum_{i=1}^{N_3}F^{0*}_{S3,i}\cdot\overline{F}_{S3,i}(\theta)+\sum_{i=1}^{N_4}F^{0*}_{S4,i}\cdot\overline{F}_{S4,i}(\theta)$$

各制動力による弾性軸まわりのモーメントの総和$M_{S,ea}$は次の通りである.

$$M_{S,ea}=\overline{M}_{S,ea}e^{i\theta}$$

$$\overline{M}_{S,ea}=-\sum_{i-1}^{N_1}F^{0*}_{S1.i}\cdot\overline{F}_{S1,i}(\theta)l_{1,i}\cos\alpha_{1,i}-\sum_{i=1}^{N_3}F^{0*}_{S3,i}\cdot\overline{F}_{S3,i}(\theta)l_{3,i}\cos\alpha_{3,i}$$
$$-\sum_{i=1}^{N_4}F^{0*}_{S4,i}\cdot\overline{F}_{S4,i}(\theta)l_{4,i}\cos\alpha_{4,i}$$

各制動力による上下一体フラップの弾性軸まわりのモーメントの総和$T_{S,hinge}$は次の通りである.

$$T_{S,hinge}=\overline{T}_{S,hinge}e^{i\theta}$$

$$\overline{T}_{S,hinge}=-\sum_{i=1}^{N_3}F_{S3,i}^{0*}\cdot\overline{F}_{S3,i}(\theta)r_{3,i}\cos\beta_{3,i}-\sum_{i=1}^{N_4}F_{S4,i}^{0*}\cdot\overline{F}_{S4,i}(\theta)r_{4,i}\cos\beta_{4,i}$$

フラッタ臨界状態の空気力

内翼弾性軸に作用する揚力L_{ea}の複素表示を次の通り置く.

$$Q_{Ah}=-L_{ea}=Q_{Ah,h}\frac{h_0^*}{b}e^{i\theta}+Q_{Ah,\alpha}\alpha_0^*e^{i\theta}+Q_{Ah,\beta}\beta_0^*e^{i\theta}$$

内翼弾性軸回りのモーメントM_{ea}の複素表示を次の通り置く.

$$Q_{A\alpha}=M_{ea}=Q_{A\alpha,h}\frac{h_0^*}{b}e^{i\theta}+Q_{A\alpha,\alpha}\alpha_0^*e^{i\theta}+Q_{A\alpha,\beta}\beta_0^*e^{i\theta}$$

上下一体フラップのヒンジ回りのモーメントT_{hinge}の複素表示を次の通り置く.

$$Q_{A\beta}=T_{hinge}=Q_{A\beta,h}\frac{h_0^*}{b}e^{i\theta}+Q_{A\beta,\alpha}\alpha_0^*e^{i\theta}+Q_{A\beta,\beta}\beta_0^*e^{i\theta}$$

構造減衰力

次の通り仮定する.

$$Q_{Dh}=-i\cdot g_h m\omega_h^2 h \qquad Q_{D\alpha}=-i\cdot g_\alpha I_\alpha\omega_\alpha^2\alpha \qquad Q_{D\beta}=-i\cdot g_\beta I_\beta\omega_\beta^2\beta$$

ラグランジュの運動方程式の具体化

運動設定,制動力,空気力,構造減衰力を適用してラグランジュの運動方程式を次の通り具体化する.

$$\begin{bmatrix} C_{hh} & C_{h\alpha} & C_{h\beta} \\ C_{\alpha h} & C_{\alpha\alpha} & C_{\alpha\beta} \\ C_{\beta h} & C_{\beta\alpha} & C_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{F}_S \\ \overline{M}_{S,ea} \\ \overline{T}_{S,hinge} \end{bmatrix}$$

$$C_{hh} = mb\left[dH(\theta)\cdot\omega^2 + \left\{\omega_h^2(1+i\cdot g_h)-\omega^2\right\}\cdot\overline{h}(\theta)\right] - Q_{Ah,h}$$
$$C_{h\alpha} = \omega^2\cdot S_\alpha\left(dA(\theta)-\overline{\alpha}(\theta)\right) - Q_{Ah,\alpha}$$
$$C_{h\beta} = \omega^2\cdot S_\beta\left(dB(\theta)-\overline{\beta}(\theta)\right) - Q_{Ah,\beta}$$

$$C_{\alpha h} = b\,\omega^2\cdot S_\beta\left(dH(\theta)-\overline{h}(\theta)\right) - Q_{A\alpha,h}$$
$$C_{\alpha\alpha} = I_\alpha\left[dA(\theta)\cdot\omega^2 + \left\{\omega_\alpha^2(1+i\cdot g_\alpha)-\omega^2\right\}\overline{\alpha}(\theta)\right] - Q_{A\alpha,\alpha}$$
$$C_{\alpha\beta} = \omega^2\left\{(c-a)bS_\beta + I_\beta\right\}\left(dB(\theta)-\overline{\beta}(\theta)\right) - Q_{A\alpha,\beta}$$

$$C_{\beta h} = b\,\omega^2\cdot S_\beta\left(dH(\theta)-\overline{h}(\theta)\right) - Q_{A\beta,h}$$
$$C_{\beta\alpha} = \omega^2\left\{(c-a)bS_\beta + I_\beta\right\}\left(dA(\theta)-\overline{\alpha}(\theta)\right) - Q_{A\beta,\alpha}$$
$$C_{\beta\beta} = I_\beta\left[dB(\theta)\cdot\omega^2 + \left\{\omega_\beta^2(1+i\cdot g_\beta)-\omega^2\right\}\overline{\beta}(\theta)\right] - Q_{A\beta,\beta}$$

$$dH(\theta) = \frac{d^2\overline{h}(\theta)}{d\theta^2} + i\cdot 2\cdot\frac{d\overline{h}(\theta)}{d\theta}$$

$$dA(\theta) = \frac{d^2\overline{\alpha}(\theta)}{d\theta^2} + i\cdot 2\cdot\frac{d\overline{\alpha}(\theta)}{d\theta}$$

$$dB(\theta) = \frac{d^2\overline{\beta}(\theta)}{d\theta^2} + i\cdot 2\cdot\frac{d\overline{\beta}(\theta)}{d\theta}$$

$$m = m_w + m_F$$
$$m_w = \int dm_w$$
$$m_F = \int dm_F$$

$$I_\alpha = I_w + I_F$$
$$I_w = \int r^2\,dm_w$$
$$I_F = \int\left\{(c-a)b+s\right\}^2 dm_F$$

$$S_\alpha = S_w + S_F$$
$$S_w = \int r\,dm_w$$
$$S_F = \int\left\{(c-a)b+s\right\}dm_F$$
$$S_\beta = \int s\,dm_F$$
$$S_{\beta_2} = \int s_2\,dm_{F2}$$

$$I_\beta = \int s^2\,dm_F$$

フラッタ条件式

ラグランジュの運動方程式

$$\boldsymbol{C}\begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \overline{F}_S \\ \overline{M}_{S,ea} \\ \overline{T}_{S,hinge} \end{bmatrix} \qquad (\ -1)$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{hh} & \boldsymbol{C}_{h\alpha} & \boldsymbol{C}_{h\beta} \\ \boldsymbol{C}_{\alpha h} & \boldsymbol{C}_{\alpha\alpha} & \boldsymbol{C}_{\alpha\beta} \\ \boldsymbol{C}_{\beta h} & \boldsymbol{C}_{\beta\alpha} & \boldsymbol{C}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \qquad (\ -2)$$

(1),(-2)式より

$$\begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}_S=\boldsymbol{C}^{-1}\begin{bmatrix} \overline{F}_S \\ \overline{M}_{S,ea} \\ \overline{T}_{S,hinge} \end{bmatrix} \qquad (\ -3)$$

を求める.(-3)式の

$$\begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}_S$$

を用いて,

$$\boldsymbol{C}\begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}_S=\begin{bmatrix} \overline{F}_S \\ \overline{M}_{S,ea} \\ \overline{T}_{S,hinge} \end{bmatrix} \qquad (\ -4)$$

と表す.

一方,

$$\boldsymbol{C}' \begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}_S = \begin{bmatrix} \overline{F}_S \\ \overline{M}_{S,ea} \\ \overline{T}_{S,hinge} \end{bmatrix} \qquad (\ -4)$$

と置くと,(-3),(-4)式より

$$\left(\boldsymbol{C}-\boldsymbol{C}'\right) \begin{bmatrix} h_0^*/b \\ \alpha_0^* \\ \beta_0^* \end{bmatrix}_S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (\ -5)$$

と表され,次のフラッタ条件式を得る.

$$det\left(\boldsymbol{C}-\boldsymbol{C}'\right)=0 \qquad (\ -6)$$

又, (-4)式において

$$\boldsymbol{C}' = \begin{bmatrix} \overline{F}_S b/h_0^* & 0 & 0 \\ 0 & \overline{M}_{S,ea}/\alpha_0^* & 0 \\ 0 & 0 & \overline{T}_{S,hinge}/\beta_0^* \end{bmatrix} \qquad (\ -7)$$

と表わすことができて.(-6)式は次の通りとなる.

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{C}_{hh}-\overline{F}_S b/h_0^* & \boldsymbol{C}_{h\alpha} & \boldsymbol{C}_{h\beta} \\ \boldsymbol{C}_{\alpha h} & \boldsymbol{C}_{\alpha\alpha}-\overline{M}_{S,ea}/\alpha_0^* & \boldsymbol{C}_{\alpha\beta} \\ \boldsymbol{C}_{\beta h} & \boldsymbol{C}_{\beta\alpha} & \boldsymbol{C}_{\beta\beta}-\overline{T}_{S,hinge}/\beta_0^* \end{vmatrix} = 0 \qquad (\ -8)$$

但し, Cramerの公式により次式が表される.

$$h_0^* = |\boldsymbol{C}1| / |\boldsymbol{C}|$$

$$\alpha_0^* = |\boldsymbol{C}2| / |\boldsymbol{C}|$$

$$\beta_0^* = |\boldsymbol{C}3| / |\boldsymbol{C}|$$

$$|\boldsymbol{C}1| = \begin{vmatrix} \overline{F}_S & \boldsymbol{C}_{h\alpha} & \boldsymbol{C}_{h\beta} \\ \overline{M}_{S,ea} & \boldsymbol{C}_{\alpha\alpha} & \boldsymbol{C}_{\alpha\beta} \\ \overline{T}_{S,hinge} & \boldsymbol{C}_{\beta\alpha} & \boldsymbol{C}_{\beta\beta} \end{vmatrix}$$

$$|\boldsymbol{C}2| = \begin{vmatrix} \boldsymbol{C}_{hh} & \overline{F}_S & \boldsymbol{C}_{h\beta} \\ \boldsymbol{C}_{\alpha h} & \overline{M}_{S,ea} & \boldsymbol{C}_{\alpha\beta} \\ \boldsymbol{C}_{\beta h} & \overline{T}_{S,hinge} & \boldsymbol{C}_{\beta\beta} \end{vmatrix}$$

$$|\boldsymbol{C}3| = \begin{vmatrix} \boldsymbol{C}_{hh} & \boldsymbol{C}_{h\alpha} & \overline{F}_S \\ \boldsymbol{C}_{\alpha h} & \boldsymbol{C}_{\alpha\alpha} & \overline{M}_{S,ea} \\ \boldsymbol{C}_{\beta h} & \boldsymbol{C}_{\beta\alpha} & \overline{T}_{S,hinge} \end{vmatrix}$$

フラッタ条件式を用いた特性評価

各種初期値諸元の設定に際しては特に物理的に意味のある値ではなく,単純に1や0で与えた上で

系の角振動数を動かして|det C-C'|の値を計算し,ほぼ0になる場合を調べた.

|det C-C'|がほぼ0になる場合について
各空力係数の値を動かして|det C-C'|の値の傾向を計算し,
|det C-C'|の値が0に対する許容範囲となるために各空力係数の変動範囲がどうなるかを調べた.

各空力係数は変動範囲が大きい程精度要求が小さい,
変動範囲が小さい程精度要求が大きい.

各種初期値諸元の設定

m=1.,b=1.,Sa=1.,Sb=1.

Ia=1.,Ib=1.,a=0.3,.,c=0.5.

運動設定の次数　N=4　　制動力設定の次数　M=2.

N1=5　内翼の制動力数　N3=5　上オーグメントフラップの制動力数

N4=5　下オーグメントフラップの制動力数

ω=20.　ωh=600., ωα=900., ωβ=800.

構造減衰　gh=0.,gα=0.,gβ=0.

l1=1.0,　α1=1.0,　F^0_{S1}=(1.0,1.0),

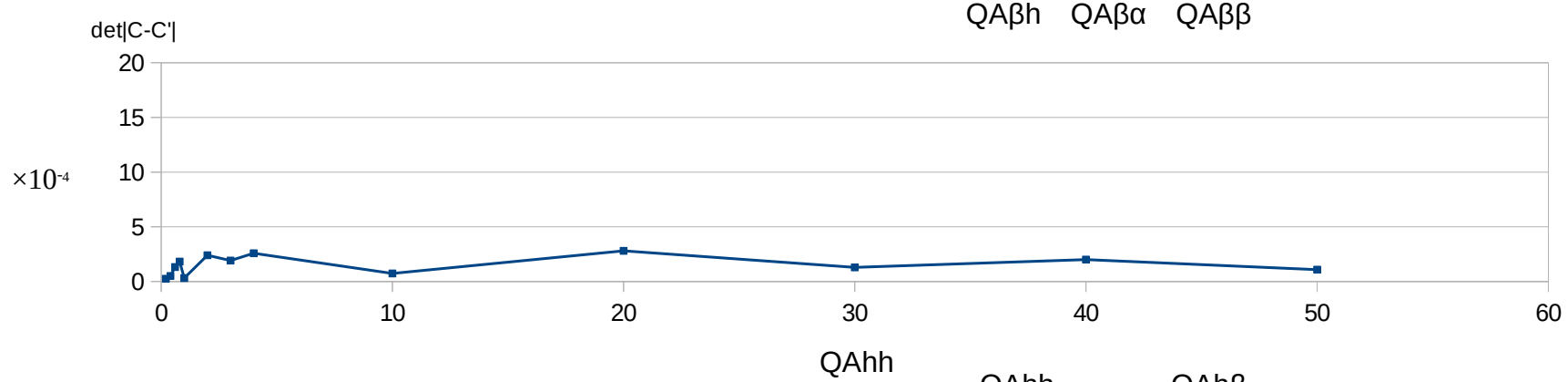
l3=1.0,　r3=0.5, α3=1.0, β3=1.0, F^0_{S3}=(1.0,1.0),

l4=1.0,　r4=0.5, α4=1.0, β4=1.0, F^0_{S4}=(1.0,1.0),

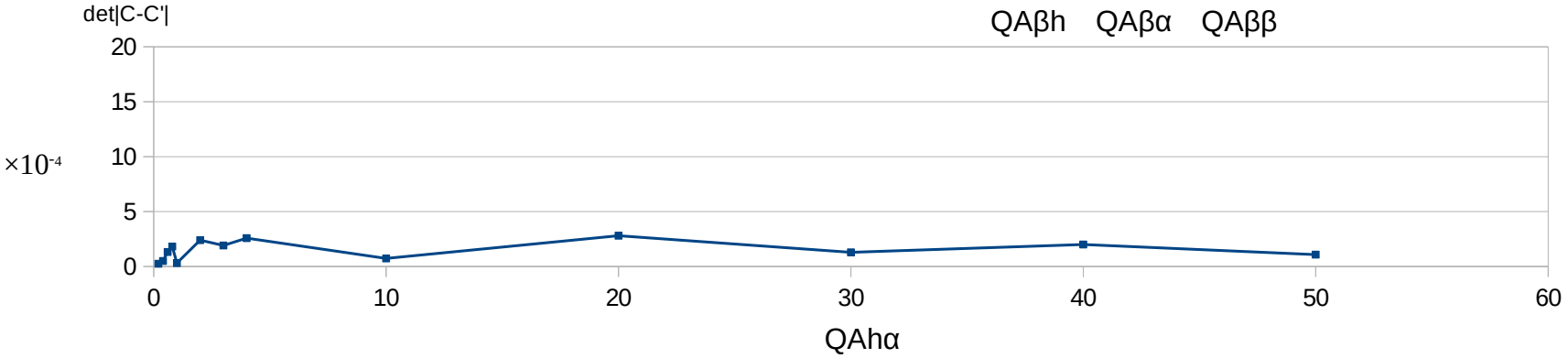
計算結果

t=0.0314　　ω=20

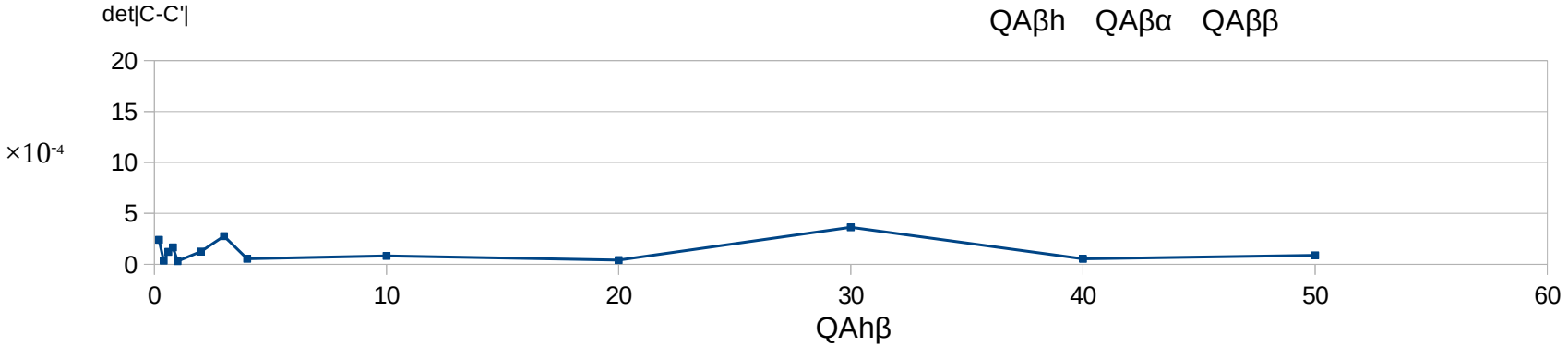
QAhα　QAhβ
QAαh　QAαα　QAαβ　　全て1.0
QAβh　QAβα　QAββ



QAhh　　QAhβ
QAαh　QAαα　QAαβ　　全て1.0
QAβh　QAβα　QAββ



Qahh　QAhα
QAαh　QAαα　QAαβ　　全て1.0
QAβh　QAβα　QAββ



エンジン翼EW-2ではフラッタ臨界状態で想定する運動および制動力について単純調和振動に補正係数を導入することにより, 運動方程式からフラッタ安定性行列式を導いた.

一般化力の内, 合力項に関する空力係数

QAhh　QAhα　QAhβ

に関し,　精度要求には大きな違いは無いと言えそうである.

今後の課題

内翼および上下オーグメントフラップの関節分布と運動特性, 制動力の特性,更に空力係数の精度要求についての関係について考察を進める.