

渦放出法による高揚力装置まわりの空力解析

酒 井 謙 二

第一工業大学 航空工学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)

E-mail:k-sakai@daiichi-koudai.ac.jp

The Improved Vortex Shedding Method to calculate the High Lift Device which are Slat, Wing and Flap Combinations

Daiichi Institute of Technology
Kenji SAKAI

The vortex shedding method has been improved to calculate the two dimensional high lift device, which are slat, wing and flap combinations. The improvement are the inner vortex position, the reduction of calculating time, the vortex position and the position of Kutta condition. Two high lift devices are studied and these results are demonstrated that this method is useful to calculate the aerodynamic characteristics for the high lift device.

Key Words : Vortex Shedding Method, High Lift Device, Air Plane, Pressure Distribution

1. はじめに

渦放出法は粘性流の模擬解析ができるうえ、パネル法をベースにしているため、差分法による粘性流解析に比べて、計算準備や計算時間は格段に短いという利点を持っている。そのため、設計には有効な手段と考えられる。

渦放出法によって、簡単な形状まわりの粘性流の模擬解析ができることは参考文献(1)で示した。しかし、もっと複雑な形状や形態について、渦放出法を適用した例は少ない。

今回、スラット・主翼・フラップを持つ高揚力装置まわりの解析へその適用範囲を広げ、その有効性を検討した。

2. 渦放出法の概要

この解析法の基本思想はクッタの条件に通じる。

迎角を持つ翼が流れに置かれたとすると、図 2.1 に示すようにスタート時に後縁を回る流れが存在する。しかし、非粘性流れと異なり、後縁を回る流れは負の圧力に耐えきれず、すぐに後流渦を放出して後縁を起点とする流れを形成する。従って、後縁を起点とする流れを形成するというクッタの条件を満たす非粘性流れを解くということは第 1 次近似として粘性流を解くことになる。

このことは図 2.2 のベースフローにも適用できる。角を回り込む流れが無いように各時間毎に放出する渦の強さと位置を決めることができれば、非定常解となるが、翼と同様に第 1 次近似の粘性流を求めることができる。

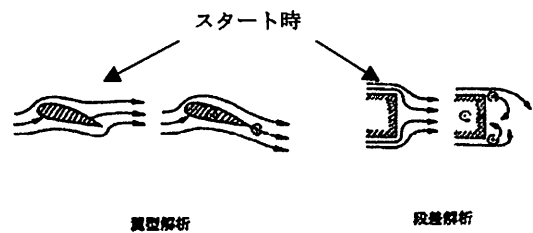


図 2.1 翼解析

図 2.2 ベースフロー解析

3. 渦放出法のステップ解析

角近傍に放出渦を置き、角を回り込む流れが無いように放出渦の強さを決める。同時にヘルムホルツの渦定理（非粘近似では全体の渦強さは変わらない）により、反対の強さの渦を、物体内に生じさせる。

次に渦によって誘導される速度を計算し、次の渦の位置を計算する。渦の位置の計算には、急激な位置変化による計算誤差を少なくするため、Taylor 展開を使って次の渦位置を計算した。

ステップ時間後に渦が後方へ移動すると、クッタの条件を満たすために新たな放出渦が必要となる。新たな放出渦を角近傍に置き、回り込む流れが無いという条件で、同様に渦の強さを決める。翼の場合は、この繰り返しが進むにつれて、翼内部の渦強さが大きくなり、翼内部の渦強さだけでクッタの条件を満たす定常解に漸近する。

計算時間を短縮するために、参考文献(1)では下記のことを行った。

- ①ステップごとの逆行列計算を省略する方法を導入した。
- ②位置が変る放出渦の誘導速度の計算は省略できないが、固定の物体からの誘導速度計算などの重複計算を回避した。

4. 各種基本形状の解析検討

(参考文献(1) 参照)

4.1 翼型まわりの解析

2次元翼まわりのスタート時からある時間後までの解析結果と、試験結果の比較を図 4.1 に示す。両者は良い一致を示す。

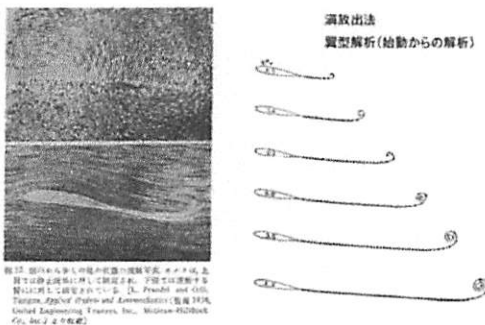


図 4.1 翼解析の風洞試験との比較

翼の揚力係数と放出渦強さの時間履歴を図 4.2 に示す。

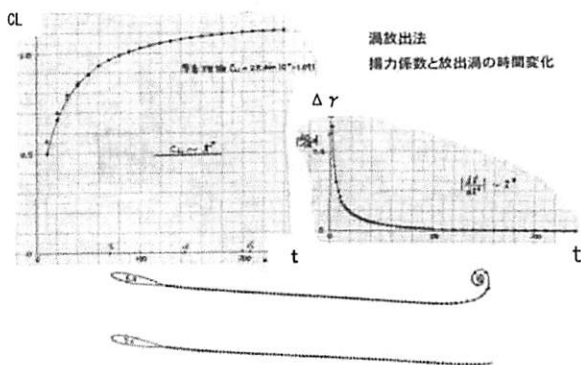


図 4.2 翼の揚力、放出渦の時間履歴
Cl~t、Δγ~t

この図から、揚力係数、内部渦とも、定常解に漸近するのが分かる。

4.2 ベースフローまわりの解析

ベースフローを渦放出法で解いた結果と実験との比較を図 4.3 に示す。

この例では、渦は上下から交互に発生し、一般的に言われるカルマン渦を形成する。両者は良い一致を示しているといえる。

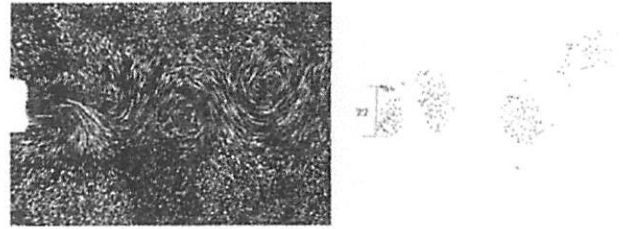


図 4.3 ベースフローへの適用

4.3 上下運動している翼まわりの解析

翼が上下に運動している(Heaving Motion)場合の計算結果と試験結果の比較を図 4.4 に示す。

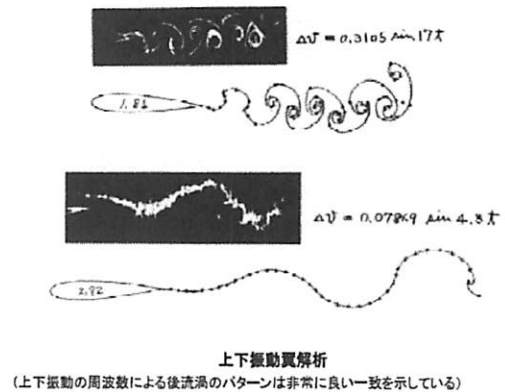


図 4.4 上下運動翼まわり解析の比較

後流の渦パターンを含め、解析結果は風洞試験結果と良い一致を示す。

5. 渦放出法の高揚力装置解析への改良検討

今回、新たに高揚力装置の解析に対し、

- ①計算精度の向上
- ②計算時間の短縮
- ③物体内へ流入した渦の処理
- ④クッタの条件位置の検討

を行った。なお、今回の検討では、手法の有効性を評価するために、表 5.1 に示す2形態の高揚力装置の解析を行った。

2つの形態の差は、翼素の形は同じだが、スラット、フラップの位置に差がある。位置の定義を図 5.1、

図 5.2 に示す。

	ベースライン 形態	デザイン 形態
スラット舵角	25.0°	23.1°
スラットギャップ	0.0169C	0.0293C
スラット オーバーラップ	0.0050C	-0.0096C
フラップ 舵角	35.0°	40.0°
フラップギャップ	0.01660C	0.01164C
フラップ オーバーラップ	0.01000C	0.00922C

表 5.1 2形態のスラット、フラップ位置

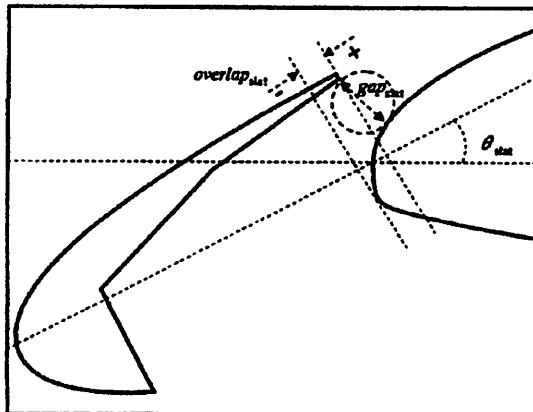


図 5.1 スラット位置の定義

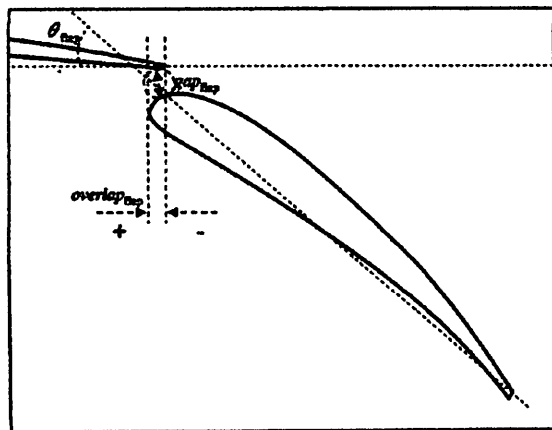


図 5.2 フラップ位置の定義

5.1 計算精度の向上

参考文献(1)では、内部渦はキャンパーライン上に置いていたが、精度向上を図るため、今回は翼素の表面に置くこととした。

5.2 計算時間の短縮

参考文献(1)の計算でも、重複計算を避ける改良

を行ったが、今回もう一度全面的に見直し、繰り返し計算での重複を避けるようにした。今回の改善により、今回の高揚力装置の場合で定常解を得るまでに、1ケースあたりパソコンで3時間程度の計算時間に短縮できた。

5.3 物体内へ流入した渦の処理

放出渦は誘導速度によって各時間での渦位置が求まるが、計算によっては、物体内部に入る場合が生じる。これは実流れではありえないので、内部に入った渦は翼素の表面に戻すこととし、ソフトウェアに反映させた。処理した結果を図 5.3 に示す。

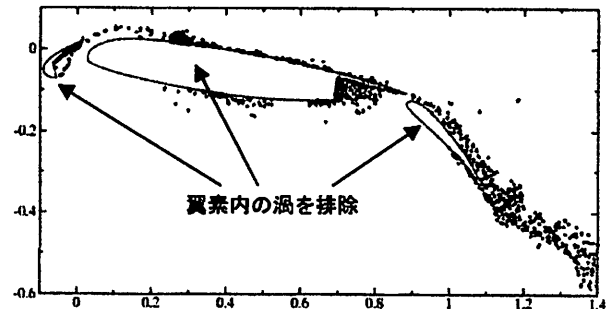


図 5.3 翼素内に入った放出渦の処理

5.4 クッタの条件位置の検討

翼素角から発生させる放出渦位置については明確な指針は難しい。今回、クッタの条件位置について以下の2つの方法について比較検討を行った。

①速度ベース

各後縁から一様流速の0.5%だけ離れた位置

②各翼弦ベース

各後縁から各翼弦の0.5%離れた位置

これらの方法を使って、2つの高揚力装置に適用した場合の、迎角8°での揚力係数の時間履歴を図 5.4 に示す。

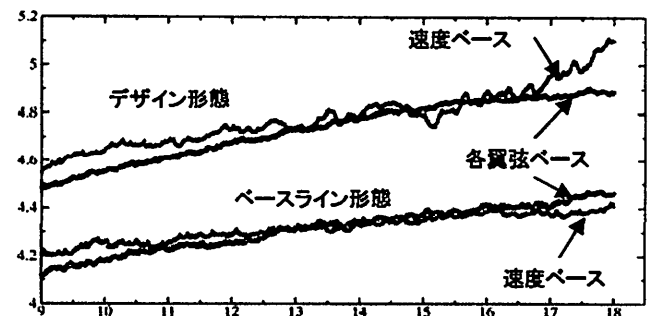


図 5.4 迎角 8°での揚力係数の時間履歴 CL~t(s)

この結果から、各翼弦ベースの方が解の安定が良いことが分かる。この検討をベースに、今回の計算では各翼弦ベースを採用した。クッタの条件による迎角8°の圧力分布の比較を、ベースライン形態につい

て図 5.5 に、デザイン形態について図 5.6 に示す。

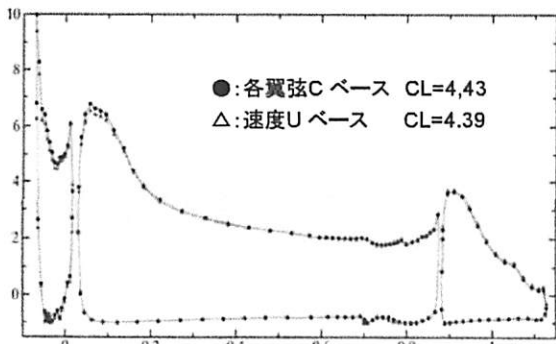


図 5.5 圧力分布の比較(1) $-C_p \sim x/c$
(ベースライン形態 迎角 8°)

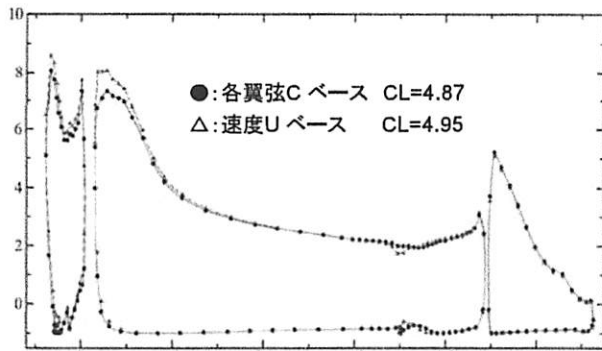


図 5.6 圧力分布の比較(2) $-C_p \sim x/c$
(デザイン形態 迎角 8°)

ベースライン形態での差は小さいが、デザイン形態では、主翼前方位置での圧力に差が生じている。他の圧力分布の形からも、各翼弦ベースの方が滑らかで、妥当と考えられる。

6. ベースライン形態での計算結果の検討

6.1 放出渦位置

ベースライン形態の迎角 8° での計算結果を以下に示す。スタート時から 1.5 秒後の後流渦位置を、図 6.1 に示す。

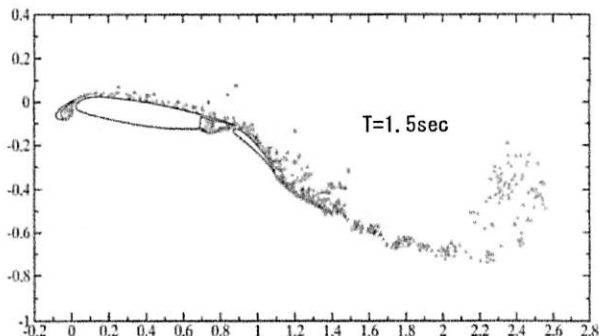


図 6.1 ベースライン形態の計算(1.5 秒後・迎角 8°)

フラップ上などに多くの放出渦があり、この時間で

は定常解とはなっていないことが分かる。

スタート時から 10 秒後と 18 秒後の後流渦位置を、図 6.2 に示す。左端の小さい形が翼を表す。18 秒後では、後に示す放出渦強さの結果も踏まえ、翼上は、ほぼ定常解になっているといえると考えられる。

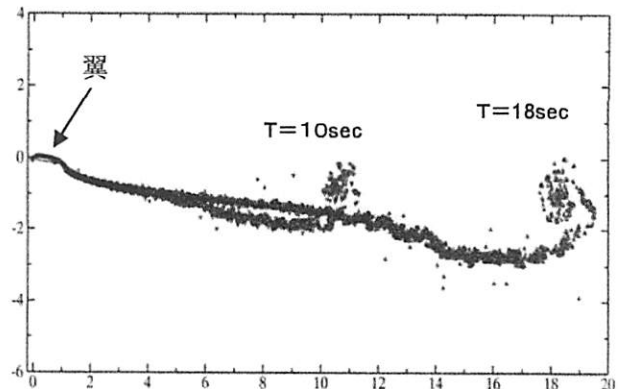


図 6.2 10秒後、18秒後の渦位置(迎角 8°)

18 秒後での翼近傍での渦位置を図 6.3 に示す。翼素内にためられた渦強さと、死水領域の渦位置が固定し、放出渦が少ない定常解が得られている。

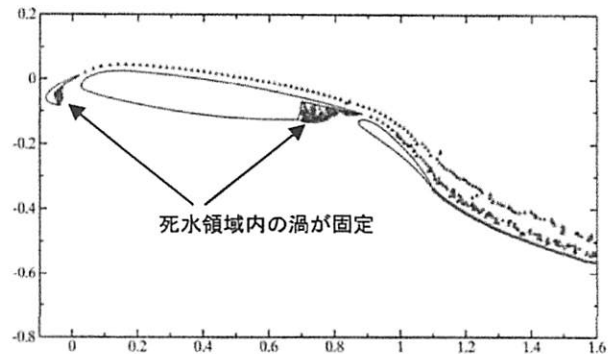


図 6.3 18 秒後の翼近傍での渦位置(迎角 8°)

6.2 放出渦強さの時間履歴

各後縁から放出される渦強さの時間履歴について検討する。

スラット下角とスラット後縁より放出される渦強さの時間履歴を図 6.4 と図 6.5 に示す。

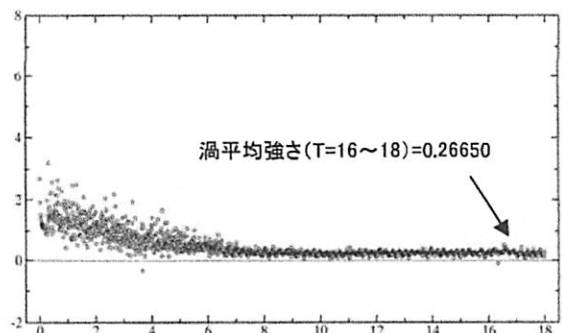


図 6.4 スラット下角からの放出渦強さ(迎角 8°)
 $\Delta \gamma \sim t(s)$

スラット下角から放出される渦の平均強さは 0.26650 に収束している。

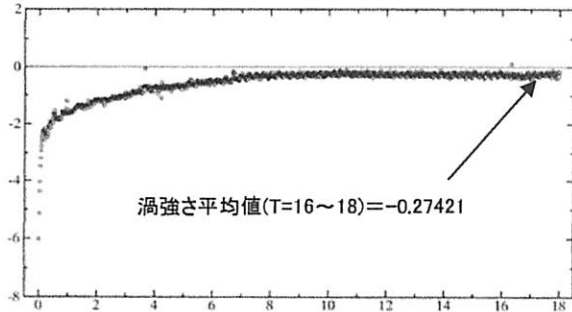


図 6.5 スラット後縁からの放出渦強さ(迎角 8°)
 $\Delta \gamma \sim t(s)$

スラット後縁から出る渦の平均強さは、 -0.27421 に収束している。

スラット全体から放出される渦の平均強さは、両方を加えた値、 $0.26650 - 0.27421 = -0.00771$ と、0 に漸近しており、そこでは定常状態の結果を示しているといえる。

次に主翼下角と上角からの放出渦の時間履歴について図 6.6 と図 6.7 に示す。

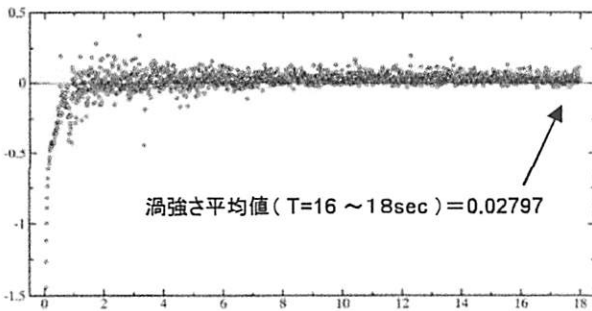


図 6.6 主翼下角からの放出渦強さ(迎角 8°)
 $\Delta \gamma \sim t(s)$

主翼下角からの放出渦の平均強さは、 0.02797 に収束している。

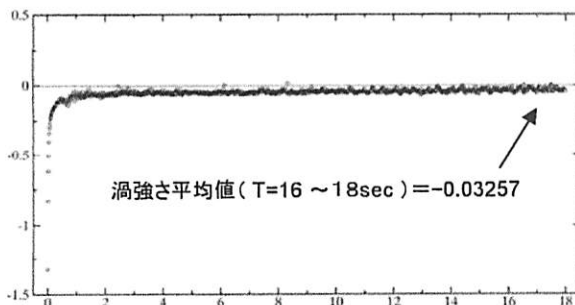


図 6.7 主翼上角からの放出渦強さ
 $\Delta \gamma \sim t(s)$

主翼上角からの放出渦の平均強さは、 -0.03257 に収束している。従って、主翼内に蓄積される渦強さは、 $0.02797 - 0.03257 = -0.00460$ と、0 に漸近しており、そこでは定常状態の結果を示しているといえる。

次に、フラップ後縁から放出される渦強さの時間履歴を図 6.8 に示す。

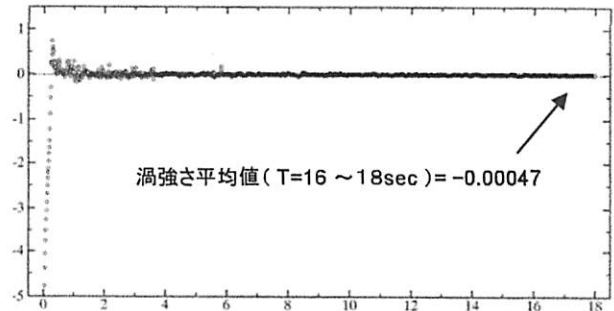


図 6.8 フラップ後縁からの渦強さ
 $\Delta \gamma \sim t(s)$

これからフラップから放出される渦の平均強さは -0.00047 と、0 に漸近しており、そこでは定常状態の結果を示しているといえる。

6.3 揚力係数の時間履歴

迎角 0° 、 4° 、 8° について、揚力係数の時間履歴を図 6.9 に示す。

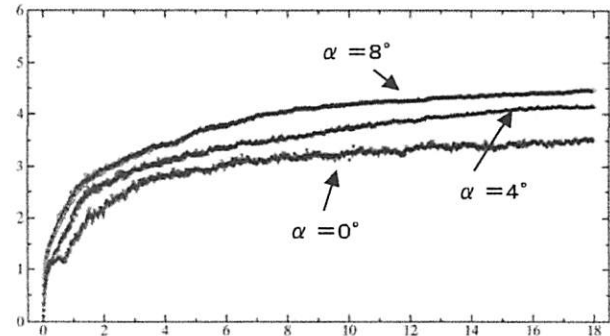


図 6.9 揚力係数の時間履歴
 $CL \sim t(s)$

16 秒～18 秒の揚力係数の平均値を取った値は $\alpha = 0^\circ$ で $CL = 3.49$ 、 $\alpha = 4^\circ$ で $CL = 4.13$ 、 $\alpha = 8^\circ$ で $CL = 4.43$ を示す。

迎角が大きくなるにつれて、揚力傾斜が小さくなり、粘性特性を表わしているといえる。

6.4 圧力分布の比較

NS 解析との比較を検討する。NS 解析は差分法で、レイノルズ数 (Re 数) $= 1.23 \times 10^7$ 、マッハ数 $M = 0.184$ の条件で計算した結果である。迎角 8° での圧力分布の比較を図 6.10 に示す。

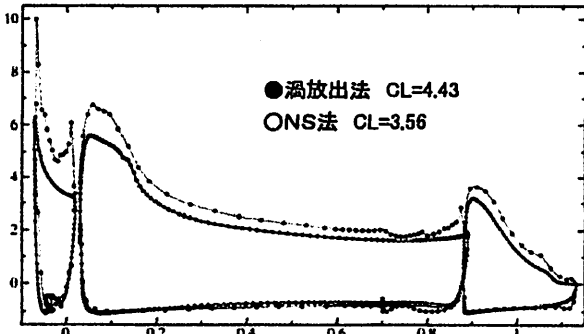


図 6.10 ベースライン形態での圧力分布の比較 (迎角8°) $-C_p \sim x/c$

揚力係数は、渦放出法が、CL=4.43 に対し、NS 解析が、CL=3.56 を示し、約 2 割の差がある。

従って、揚力係数を近い値で比較するために、渦放出法は迎角 4° と NS は迎角 8° の比較を図 6.11 に示す。

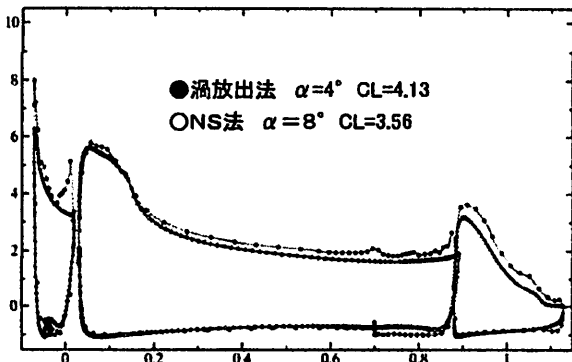


図 6.11 揚力を合わせての比較検討 (ベースライン形態) $-C_p \sim x/c$

広範囲に亘って、両者の一致は良いが、スラット後縁付近と主翼後縁付近で差が見られる。

後縁での圧力の連続性から考えると、図 6.12 のように渦放出法のほうが妥当と考えられることもできるが、今後の検討課題である。

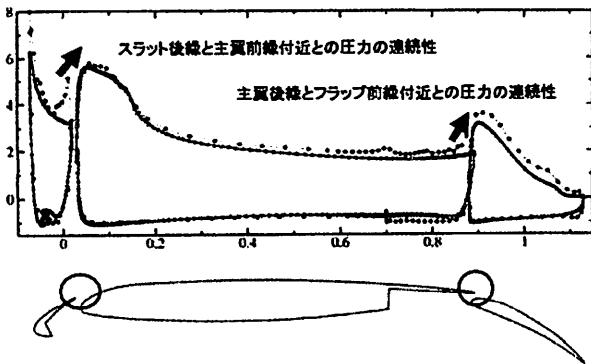


図 6.12 後縁近傍での圧力分布の差の検討 $-C_p \sim x/c$

7. デザイン形態の計算結果の検討

デザイン形態の計算結果の検討を行う。

迎角 8° の、渦放出法の計算と NS 計算との圧力分布の比較を図 7.1 に示す。揚力係数は、渦放出法が、CL=4.87 に対し、NS 解析が、CL=3.80 を示し、ベースライン形態同様、約 2 割の差がある。

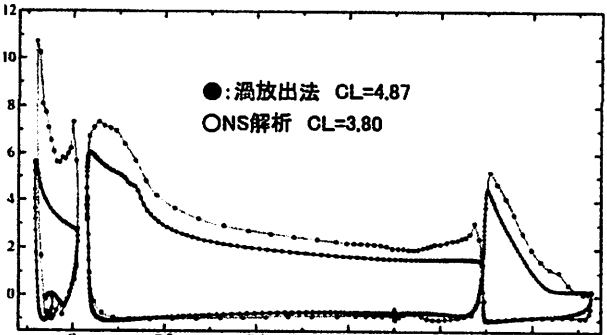


図 7.1 デザイン形態での圧力分布の比較 (迎角8°) $-C_p \sim x/c$

ベースラインと同じく、揚力の近い渦放出法の迎角 4° と NS 解析の迎角 8° との圧力分布の比較を図 7.2 に示す。

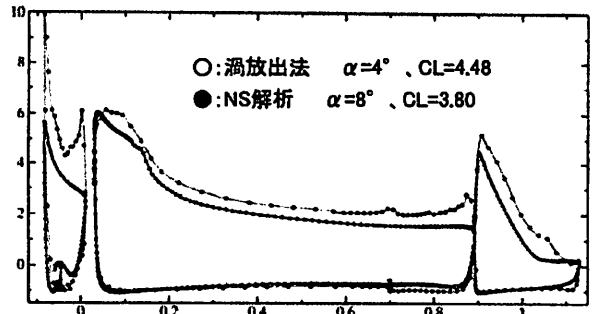


図 7.2 揚力を合わせての圧力分布の比較 (デザイン形態) $-C_p \sim x/c$

ベースライン形態同様、スラット後縁付近での差が大きい、全般的に良い一致を示しているといえる。

8. 両形態の渦放出法の解析結果の比較検討

2形態の迎角 8° の揚力係数の時間履歴の比較を図 8.1 に示す。

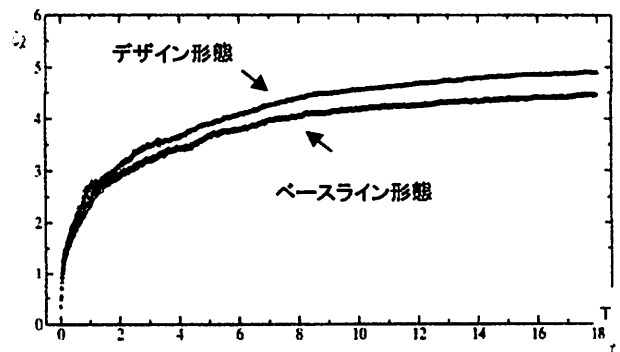


図 8.1 迎角8°での形態による揚力履歴差 $CL \sim t(s)$

定常時での迎角 8° での揚力係数の比較を表 8.1 に示す。

CL の比較	渦放出法	NS 解析
①ベースライン形態	4.43	3.56
②デザイン形態	4.87	3.80
比(②/①)	1.10	1.07

表 8.1 迎角 8° の定常時での揚力係数の比較

揚力係数の絶対値の差はあるものの、ベースライン形態とデザイン形態との比は良い一致を示しているといえる。

2形態の渦放出法による圧力分布の、迎角 8° での比較を図 8.2 に、迎角 4° の比較を図 8.3 に示す。

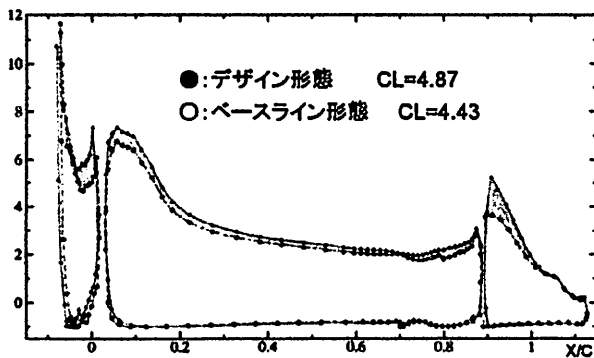


図 8.2 迎角 8° での圧力分布の比較
- $C_p \sim x/c$

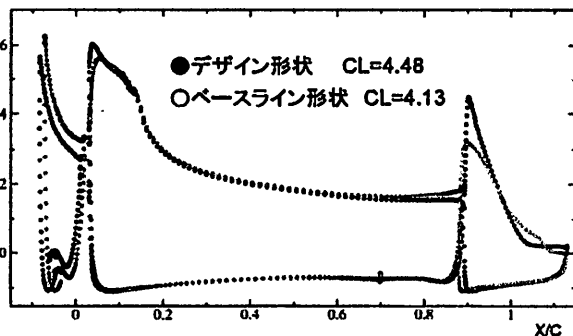


図 8.3 迎角 4° での圧力分布の比較
- $C_p \sim x/c$

スラット後縁荷重やフラップ圧力分布の差など、デザイン形態とベースライン形態との差を計算できており、渦放出法の解析手法が有効であると考えられる。

9. 今後の課題

今後の課題を以下に示す。

- ①スラット後縁、主翼後縁付近の圧力分の NS 解析との差の検討
- ②精度の向上、ロバスト性の向上、仕様マニュアルの作成
- ③他の形態について解析検討

10. まとめ

渦放出法による高揚力装置の流れ解析のための追加改良を実施した。手法の有効性を評価するため、2形態の高揚力装置の流れについて解析を行った。その結果、高揚力装置の流れの解析に対しても渦放出法が有効であることを確認した。

11. 謝辞

最後になりましたが、渦放出法の研究のきっかけを作っていただき、またその後の指導もしていただきました、故谷一郎先生に感謝申し上げます。

12. 参考文献

- (1)酒井 謙二 ‘渦放出法による流れ解析’
第 18 回風洞研究会議 1977 年 6 月
- (2)R.R.Clements ‘An inviscid model of two-dimensional vortex shedding’ J.Fluid Mech.(1973),vol.57,part2,pp.321-336