

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

空蝕水翼設計與性能解析(III)

Design and Performance Analysis of Cavitating Hydrofoils (III)

計畫編號：NSC 88-2611-E002-012

執行期限：87 年 8 月至 88 年 7 月

執行單位：臺灣大學造船及海洋工程研究所

主持人：郭真祥

一、中文摘要

本計畫之目的為針對二維水翼在局部空化或超空化狀況下，建立其計算理論模型與電腦程式，其中採用奇異(singularities)分佈，以速度勢為基礎(potential-based)的定值小板法來求解二維翼形周圍流場的總速度勢，分布方式為在翼形表面、空泡和跡流處分佈偶流(doublet)，在空泡表面布置源流(source)，源流的目的是為了產生通量，由其大小的改變來控制空泡的成長，在計算過程中先給定空泡長度，再以Dirichlet型邊界條件求解小板上的偶流與源流強度，而以疊代的方式計算至空泡上源流強度變化率為零。除了空泡幾何的求解，並同時計算空化係數、升力、阻力與壓力分佈等性能係數，以作為性能分析的基礎。

本年度利用一些現成翼形做為實例，其中包括 NACA66, Eppler 3-Term 超空蝕及穿水式螺槳(surface piercing propeller)斷面等翼形加以計算，不論與理論計算值或實驗數據比較，皆顯示良好的一致性，初步顯示此計算工具的實用性。

關鍵詞：二維水翼、局部空蝕、超空蝕、小板法

Abstract

The purpose of this project is to develop a computational software system for design and performance analysis of two-dimensional hydrofoils about partial cavitation and supercavitation problem. A constant-valued and potential-based

boundary element method is used. The problem is solved to fulfill the Dirichlet-type boundary condition. Thereby, Doublets are distributed on the wetted part of the hydrofoil and the cavity while sources only on the cavity. With a given cavity-length and an angle of attack, their strengths are determined iteratively until the source strengths on the cavity converge. At the end, the geometric shape and the relating physical properties such as cavitation no., pressure distribution, lift- and drag- coefficient are calculated so that we can analyze the performances.

On this year, numerical computation are carried out with present method for several existing hydrofoil shapes. The results show good agreement with that obtained with other theories and experiments. It has demonstrated the usability of this computational software system for dealing with two-dimensional hydrofoil problems.

Keywords: Two-dimensional hydrofoil, Partial Cavitation, Supercavitation, Panel Method

二、緣由與目的

近年來船艇高速化已蔚為趨勢，當船舶在高速航行時推進效率的提升因此備受重視，但是當船舶的速度達到一定程度之後(超過 40 節)，在螺槳或水翼上所產生的空化現象，會使推進性能降低，甚至其所產生的振動、噪音及葉面侵蝕(corrosion)等問題，會對螺槳造成顯著的傷害。對於

高速操作環境下空化現象乃無法避免的事實，因此若能針對可能產生空蝕之流場，做一可靠的預測，將有助於螺槳性能的提昇及減低空化對槳葉造成的傷害。

本計劃即在針對二維空蝕水翼勢流場，建立其理論計算模型及電腦應用程式[1]，並針對一些現成翼形，計算並討論其各項性能參數及幾何參數，目標則希望提供此計算工具及研究結果，延伸應用於螺槳之設計及空化現象之控制，以提高國內在高速艇推進器的整體分析與設計能力。

相關之研究在國內有文獻[1]~[6]，國外則有[7]~[16]，本計劃理論部份大部份採用[16]之方法，唯加上一點修正，計算結果比較與討論則參照文獻[1]、[6]、[7]、[14]、[15]及[16]所發表之結果。

三、基本理論及數值方法

假設一穩定(steady)、非旋性(irrotational)、無黏性(inviscid)及不可壓縮(incompressible)流體，以與x軸形成攻角 α 流向一二維翼，如圖1所示。在水翼及空泡外的流場滿足Laplace方程式：

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

其中 Φ 為總速度勢，可表示成入流速度勢(inflow potential) $\bar{U}_\infty \cdot \bar{q}$ 與擾動速度勢(perturbation potential) ϕ 之和：

$$\Phi = \bar{U}_\infty \cdot \bar{q} + \phi \quad (2)$$

又總速度 $\bar{V}$ 與總速度勢 Φ 的關係式如下：

$$\bar{V} = \nabla \Phi \quad (3)$$

為了求解式(1)之總速度勢，尚須一些邊界條件：

1. 無限遠處條件：

$$\nabla \Phi \rightarrow \bar{U}_\infty \quad (4)$$

2. 在物體表面上的不穿透條件：

$$\nabla \Phi \cdot \bar{n} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \bar{V} \cdot \bar{n} = 0 \quad (5)$$

3. Kutta 條件：

$$\left| \bar{V}_{T.E.} \right| < \infty \quad (6)$$

4. 在空泡表面上的運動邊界條件：

$$\frac{DF}{Dt} = 0 \quad (7)$$

$F(x, y)$ 表示空泡外形之函數

5. 在空泡表面上之動力邊界條件：

$$p = p_v \quad (8)$$

$$\text{此式亦可表示為：} \left| \bar{V}_c \right| = \text{const} \quad (9)$$

6. 空泡之封閉條件：

$$T^c(x_{cte}) = 0 \quad (10)$$

$T^c(x)$ 表示空泡厚度函數

x_{cte} 為空泡尾緣之x座標值

7. 空泡流離(detachment)條件：超空化情況之翼形尾緣處速度向量必須連續

$$\lim_{A \rightarrow T.E.} \bar{V}_A = \lim_{B \rightarrow T.E.} \bar{V}_B \quad (11)$$

A點和B點分別位於水翼下表面和空泡下表面與尾緣連接點，如圖2。

利用上述之邊界條件求得翼形與空泡上速度勢，繼而由速度勢沿翼形與空泡上切線方向之梯度求得切向速度 $\left| \bar{V}_t \right|$ ，代入伯努力(Bernoulli)方程式以計算 p ，則各點壓力係數及空化係數即可求得如下：

壓力係數：

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{1/2 \rho U_\infty^2} = 1 - \left(\frac{\left| \bar{V}_t \right|}{U_\infty} \right)^2 \quad (12)$$

空化係數

$$\sigma \equiv \frac{p_\infty - p_v}{1/2 \rho U_\infty^2} = -C_{pv} = \left(\frac{\left| \bar{V}_c \right|}{U_\infty} \right)^2 - 1 \quad (13)$$

又相關之無因次性能係數如下：

升力係數 C_L 為：

$$C_L \equiv \frac{L}{1/2 \rho U_\infty^2 c} = - \int_{SB} C_p \bar{t} \cdot \frac{\bar{U}_\infty}{U_\infty} ds \quad (14)$$

曳力係數 C_D 為：

$$C_D \equiv \frac{D}{1/2 \rho U_\infty^2 c} = - \int_{SB} C_p \bar{h} \cdot \frac{\bar{U}_\infty}{U_\infty} ds \quad (15)$$

力矩係數 C_M (以導緣為基準點)為：

$$C_M \equiv \frac{M}{1/2 \rho U_\infty^2 c^2} = - \int_{SB} C_p \bar{r} \times \bar{h} ds \quad (16)$$

而空泡體積 Vol 可由空泡厚度函數算得：

$$Vol = \int_0^{l_{cov}} T^c(x) dx \quad (17)$$

四、數值方法

採用奇異點分佈的方法，其中將翼形表面、空泡離散為 N^D 個小板，整個跡流視為一個小板，於其上面分佈偶流 (doublet)，而另外在空泡表面再布置源流 (source)，離散為 N^S 個小板。上述之偶流及源流強度滿足下示之邊界條件：

$$\begin{aligned} \Phi^-(\bar{q}) = 0 = & \bar{U}_\infty \cdot \bar{q} + \frac{m(\bar{q})}{2} \\ & + \int_{S_B \cup S_C} \frac{m(\bar{p})}{2\rho} \frac{\partial}{\partial n_p} \log R(\bar{q}; \bar{p}) dS \\ & + \int_{S_C} \frac{d(\bar{p})}{2\rho} \log R(\bar{q}; \bar{p}) dS \\ & + \int_{S_w} \frac{m_w}{2\rho} \frac{\partial}{\partial n_w} \log R(\bar{q}; \bar{p}) dS \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} d(p) &= \text{源流強度} \\ m(p) &= \text{偶流強度} \\ \bar{q}(x, y) &= \text{擬計算誘導速度勢之場點} \\ \bar{p}(x, h) &= \text{奇異點所在之點} \\ R(\bar{q}; \bar{p}) &= \bar{q} \text{ 和 } \bar{p} \text{ 之距離} \\ &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \\ \frac{\partial}{\partial n_p} &= \bar{p} \text{ 點處之翼形表面法向導數} \end{aligned}$$

S_B ， S_C 及 S_w 分別表示翼形表面、空泡表面及跡流表面。

在局部空化部分，式(18)可以離散方式表示如下：

$$\begin{aligned} \Phi_i^- = 0 = & \bar{U}_\infty \cdot \bar{q}_i + \sum_{j=1}^{N^D} \frac{m_j}{2\rho} b_{ij} \\ & + \sum_{k=1}^{N^S} \frac{d_k}{2\rho} a_{ik} + \frac{m_w}{2\rho} b_{iw} \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{q}_i &= \frac{1}{2}(\bar{q}_i^p + \bar{q}_{i+1}^p) \quad i=1, \dots, N^D \\ \beta_{ij} &= \begin{cases} \pi & \text{if } i=j \\ \int_{C_j} \frac{\partial}{\partial n_p} \log R(\bar{q}_i; \bar{p}_j) ds & \text{if } i \neq j \end{cases} \end{aligned}$$

$$\alpha_{ik} = \int_{C_k} \log R(\bar{q}_i; \bar{p}_k) ds$$

$$\beta_{iw} = \int_{S_w} \frac{\partial}{\partial n_w} \log R(\bar{q}_i; \bar{p}_w) ds$$

N^D 為翼形表面與空泡表面小板數目之總和，而 N^S 則表示空泡表面佈置源流之小板數目， $\bar{q}_i^p$ 及 $\bar{q}_{i+1}^p$ 表示第 i 個小板兩個端點， $\bar{q}_i$ 則為該小板之中點， β_{ij} 、 α_{ik} 及 β_{iw} 各為翼形及空泡佈置偶流小板、空泡上源流小板及跡流上偶流小板對配置點 q_i (collocation point) 的影響係數。

又庫塔條件式(6)依照 Morino 的建議可表示為：

$$\mu_w = \Phi_{N^D} - \Phi_1 = \mu_{N^D} - \mu_1 \quad (20)$$

其中下標 1 與 N^D 連接了翼形尾緣處的下表面(第 1)及上表面(第 N^D)小板。而空泡表面上的動力邊界條件，因需滿足壓力等於常數，所以在空泡上第 j 個源流小板的速度勢可表示如下：

$$\mu_j^{u,l} = \mu_{cdp}^{u,l} + \left| \bar{V}_c^p \right| \sum_{k=1}^j \Delta s_k^{u,l} \quad (21)$$

其中

$m_{cdp}^{u,l}$ 表示在翼面導緣及尾緣處，空泡流離點上的偶流強度。

$\Delta s_k^{u,l}$ 表示沿空泡上及下表面第 k 個小板之長度。

最後空泡封閉條件可表示如下：

$$\sum_{k=1}^{N^S} \delta_k \Delta s_k = 0 \quad (22)$$

求解所有的未知數，有 $N^D - N^S$ 個偶流， N^S 個源流及 $\left| \bar{V}_c^p \right|$ ，共有 $N^D + 1$ 個。可由式(19)、式(21)及式(22)所組成之聯立方程式解之。

另外在超空化部分，為了在翼形尾緣處能產生連續性之流離條件，所以在空泡下表面流離點處的斜率要與水翼下表面尾緣處的斜率相等，因此：

$$d_{cdpte} = \left| \bar{U}_\infty^p \right| \tan g_{cdpte} \quad (23)$$

其中 δ_{cdpte} 為靠近尾緣處的空泡流離點處的源流強度， γ_{cdpte} 表示緊鄰尾緣流離點之翼形小板與空泡小板間之夾角。

而式(18)以離散方式則表示如下：

$$\Phi_i^- = 0 = \bar{U}_\infty \cdot \bar{q}_i + \frac{d_{cdpte}}{2\rho} a_{i(cdpte)} + \sum_{j=1}^{N^D} \frac{m_j}{2\rho} b_{ij} + \sum_{k=1}^{N^S-1} \frac{d_k}{2\rho} a_{ik} + \frac{m_w}{2\rho} b_{iw} \quad (24)$$

其中下標 cdpte 表示緊鄰翼形尾緣處下游方向的小板標號。

最後空泡封閉條件可表示為：

$$\sum_{k=1}^{N^S-1} \delta_k \Delta s_k = -\delta_{cdpte} \Delta s_{cdpte} \quad (25)$$

其中 Δs_{cdpte} 表示連接尾緣之空泡小板之長度。

求解所有的未知數，因為其中一個源流強度 δ_{cdpte} 可由式(23)求得，所以未知數減少到只有 N^D 個，可以(24)和(25)式來求得。

五、計算結果與討論

1. 與實驗數據比較

包括 NACA 翼、Eppler 翼及 Three-term 翼的計算，並與台大空蝕實驗室之實驗數據相互對照。其中仿照文獻[6]選定之參數變化列於表 1，NACA 翼在攻角 $\alpha = 4^\circ$ 時之局部空化、超空化的空泡外形及壓力分布分別如圖 3、4。而不同攻角下的升力與阻力值則繪於圖 5、6，圖中顯示在正攻角的情況下，局部空化的升力係數 > 超空化的升力係數，但在負攻角的情況時則相反。阻力部分則顯示在正攻角時之局部空化的阻力係數較超空化為小，負攻角則又相反。另外針對在不同攻角下，升力與空蝕係數之關係則示於圖 7，圖中亦載入[6]之實驗數據，比較結果差異不大。阻升比之結果則如圖 8，可觀察出在正攻角時之超空化升阻比較局部空化情況為大。

表 1 NACA 翼之各參數變化表

參數 \ 變化量	起始值	結束值	增加量	其他計算值	總計算量
空泡長度 l/c (無因次化)局部空化	0.0955	0.9045	5 個小板長度	無	7
超空化	1.1、1.2、1.4、1.6、2.0、2.2、2.4、2.5、2.6、2.7、3.0				11
攻角 α	-4°、-2°、0.45°、2.3°、3.3°、4°				6

Eppler 翼之局部空化及超空化的空泡外形、壓力分布如圖 9、10。圖 11 則為不

同攻角下之升力值，趨勢同樣為在正攻角的情況下，局部空化的升力係數 > 超空化的升力係數。阻力部分則顯示於圖 12，在正攻角時之局部空化的阻力係數較超空化為小。另外針對在不同攻角下，升力與空蝕係數之關係則示於圖 13，與實驗數據之趨勢差異不大。阻升比之結果則如圖 14，圖中顯示在正攻角時之超空化升阻比略大於局部空化。

Three-term 翼在攻角 $\alpha = 2^\circ$ 、 3° 時超空化的空泡外形 壓力分布分別如圖 15、16。而不同攻角下的升力與阻力值則繪於圖 17、18，與 NACA 翼及 Eppler 翼有相同的趨勢。而針對在不同攻角下，升力與空蝕係數之關係則示於圖 19，升阻比之結果則如圖 20。

2. 穿水式螺槳翼形計算

鑑於高速推進器的應用越來越受重視，而其中又以穿水式螺槳(SPP) 較於其他高速推進器具有更廣的操作範圍，因此選擇 SPP 1440、1443 及 1445 翼形作為計算實例，討論其幾何與性能參數關係。其中選定之攻角與空泡長度等參數變化列於表 2。而 SPP 1440 翼形在不同的攻角下，給定相同的空泡終點位置之空泡外形則如圖 21，上述情況之壓力分佈繪於圖 22，由圖中可觀察出處於高攻角狀態時的水翼，空泡多由導緣處開始成長，而當攻角愈來愈小，則空泡發生位置將延後至最大弦拱處附近。另外，其升力係數隨不同攻角的變化情形則示於圖 23，圖中顯示隨著空泡長度減少，會有升力增加的趨勢，且針對同一空泡長度，在不同攻角下的升力值，約呈線性變化。阻力部分則如圖 24 所示，在正攻角時，阻力會隨著空泡長度的增加而降低，而負攻角則有相反的趨勢。最後針對升力及升阻比之結果則整理於圖 25、26，圖中顯示隨著空蝕係數增加，升力約成線性關係增加，升阻比亦增加，且在小攻角時之增加趨勢較大攻角時顯著。

表 2 SPP1440 翼之各參數變化表

參數	參數值	總計 量
攻角	-4°、-2°、1°、2°、3°、4°、6°	7
空泡長度 l/c (無因次化)	1.1、1.2、1.4、1.6、2.0、2.2、2.4、 2.5、2.6、2.7、3.0	11

六、結論

綜而言之，NACA 翼、Eppler 翼及 Three-term 翼之計算結果，其數值分布趨勢與實驗數據具有某種程度的一致性，顯示本電腦程式對於二維水翼空化問題定性分析上之實用性。而 SPP 1440 翼形之計算結果，仍有待相關之實驗數據或其他理論計算之比較與驗證，以臻實用化之目標，由前面之比較說明可得結論如下：

1. 當二維水翼處於高攻角時，空泡多由導緣處開始成長；而當在小攻角情況時，則空泡發生在最大弦拱處附近或在翼壓力面。且約可看出空泡起始位置由導緣逐漸後退的趨勢。
2. 對於 NACA 翼、Eppler 翼及 Three-term 翼，在同一攻角下，正攻角的局部空化升力較超空化大，負攻角反之。
3. 對於 NACA 翼、Eppler 翼及 Three-term 翼，當空化係數漸減，局部空化的阻力增加，超空化的阻力則漸減。
4. SPP 翼形在同一攻角下，升力係數會隨著空泡長度增加、空化係數的減小而減少。
5. 在小攻角情況下，SPP 翼形具有較大的升阻比；在負攻角時則升阻比極小，對翼形升力的產生，貢獻非常有限。
6. SPP 1440 翼形與 Three-term 的性能比較，在大角度 ($\alpha=3^\circ$ 及 4°) 時 Three-term 的升阻 SPP 1440 為高，於 $\alpha=2^\circ$ 時，互相交叉，在較小角度時 ($\alpha=1^\circ$)，則 SPP 1440 之升阻比較高。

七、參考文獻

- [1] 郭真祥，田曉真，“空蝕水翼設計與性能解析”，第十一屆中國造船及輪機工程研討會暨國科會成果發表會論文集，1998，pp.29-34.
- [2] 辛敬業，“應用邊界元素法之二維翼面

設計方法”，第八屆造船及輪機工程研討會論文集，1995，pp.314-318.

- [3] 柯永澤，辛敬業，孫永清，“空泡螺槳對其上方一平板誘導之表面激振力計算”，第八屆造船及輪機工程研討會論文集，1995，pp.523-532.
- [4] 陳建宏，翁英傑，“二維全空蝕水翼的邊界元素法解析”，第十屆中國暨輪機工程研討會論文集，1997，pp.204-211.
- [5] 郭真祥，劉人間，“應用以 B 木條曲線為基礎之高階小板法計算二維水翼勢流場”，中國造船及輪機工程學刊第十七卷第一期，1998，pp.49-60.
- [6] 楊偉翰，“二維翼空化性能研究”，國立台灣大學造船及海洋工程研究所碩士論文，1998 年 6 月。
- [7] Geurst, J.A., "Linearized Theory for Fully Cavitated Hydrofoils," "International Shipbuilding Progress, Vol. 7, No. 65, January 1960.
- [8] Tulin, M.P., "Supercavitating Flows-Small Perturbation Theory", Journal of Ship Research, Vol.7, No.3, January 1964, pp.16-37.
- [9] Kinnas, S.A. and Fine, N.E., "Theoretical Prediction of the Midchord and Face Unsteady Propeller Sheet Cavitation" in Proceedings, 5th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Japan, September 1989.
- [10] Kinnas, S.A., "Inversion of the Source and Vorticity Equations for Supercavitation Hydrofoils," Journal of Engineering Mathematics, 1992, pp. 349-361.
- [11] Kinnas, S.A., "Leading-edge corrections to the linear theory of partially cavitating hydrofoils. Journal of Ship Research, Vol 35, No.1, March 1991, pp.15-27.
- [12] Fine, N.E., and Kinnas, S.A., "A Boundary Element Method for the Analysis of the Flow Around 3-D Cavitating Hydrofoils," Journal of Ship Research, Vol.37, No.3, September 1993, pp.213-224.
- [13] Kinnas, S.A. and Mazel, C.H., "Numerical Versus Experimental Cavitation Tunnel" (A Supercavitating Hydrofoil Experiment) Trans. of the ASME, Vol. 115, 1993, pp.760-765.
- [14] Uhlman, J.S., "The surface singularity

method applied to partially cavitating hydrofoils. Journal of Ship Research, Vol. 31, No.2, June 1987, pp. 107-124.

- [15] Uhlman, J.S., the surface singularity or boundary integral method applied to supercavitating hydrofoils. Journal of Ship Research, Vol. 33, No.1, March 1989, pp.16-20.

- [16] Lee, C.-S. Lim, Y.-G. and Lee, J.-T., "A Potential-Based Panel Method for the Analysis of a Two-Dimensional Super- or Partially-Cavitating Hydrofoil", Journal of Ship Research, Vol.36, No.2, June 1992, pp.168 ~ 181.

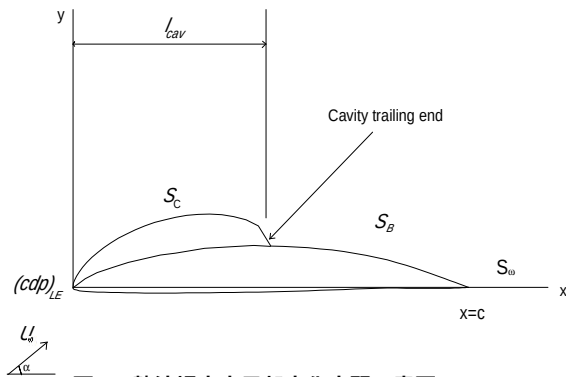


圖 1 勢流場中之局部空化水翼示意圖

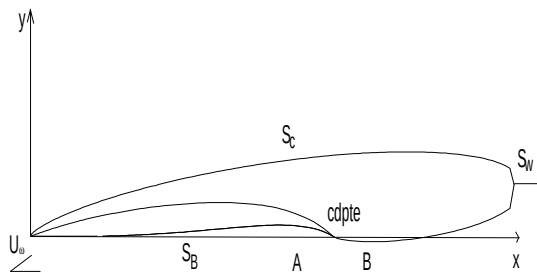


圖 2 勢流場中之超空化水翼示意圖

圖 3 NACA 翼之空泡外形及壓力分布, $\alpha=4.0^\circ$, $l/c=0.3455$

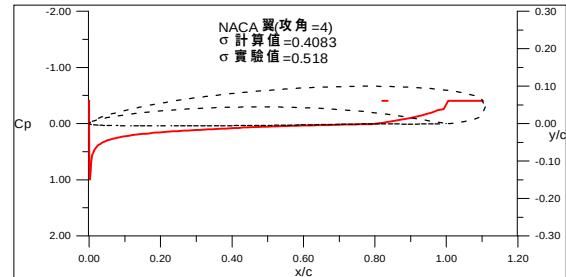


圖 4 NACA 翼之空泡外形及壓力分布, $\alpha=4.0^\circ$, $l/c=1.1086$

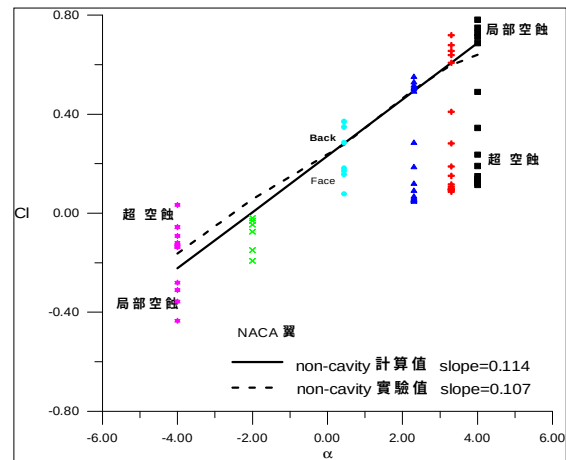


圖 5 NACA 翼升力係數與攻角關係

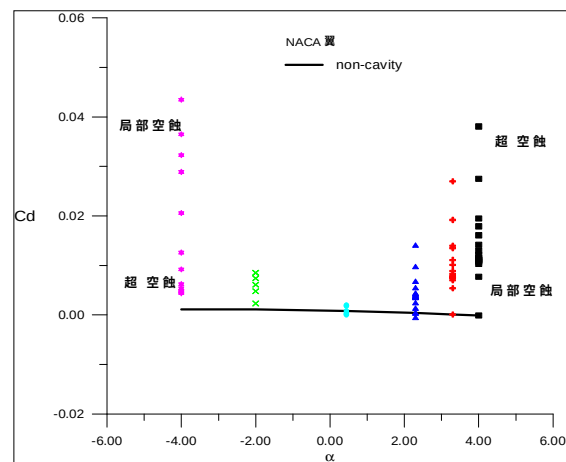


圖 6 NACA 翼阻力係數與攻角關係

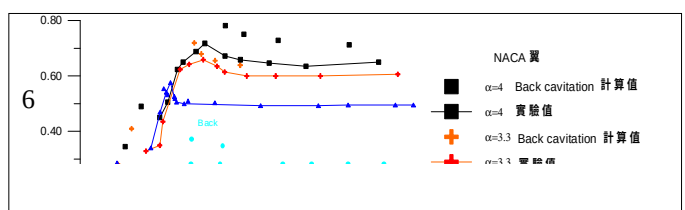
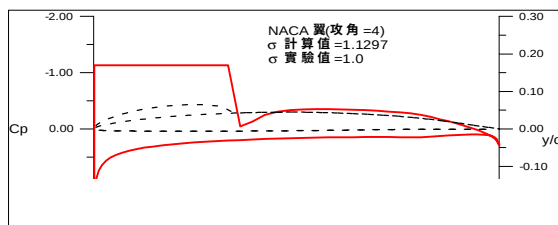


圖 7 NACA 翼升力係數與空化係數關係

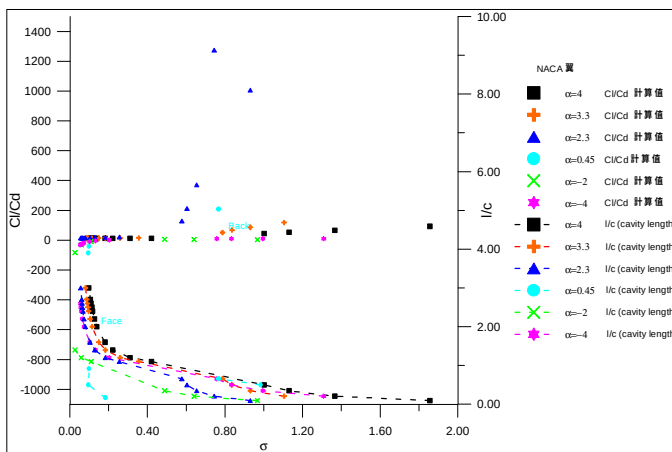


圖 8 NACA 翼 C_L / C_D 、空泡長度與空化係數關係

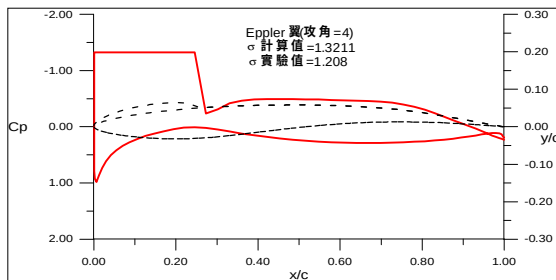


圖 9 Eppler 翼之空泡外形及壓力分布, $\alpha=4^\circ$, $l/c=0.2591$

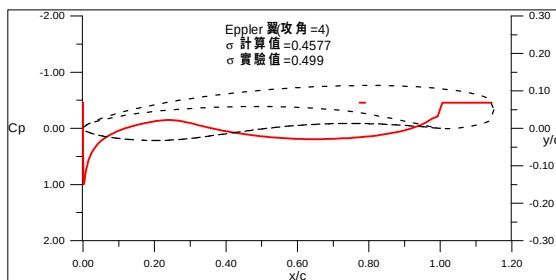


圖 10 Eppler 翼之空泡外形及壓力分布, $\alpha=4^\circ$, $l/c=1.15$

圖 11 Eppler 翼升力係數與攻角關係

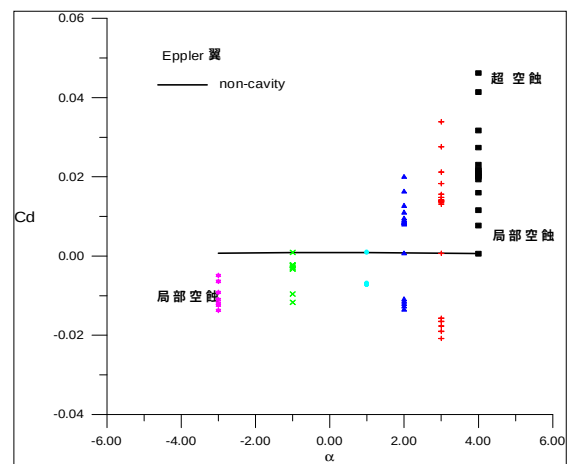


圖 12 Eppler 翼阻力係數與攻角關係

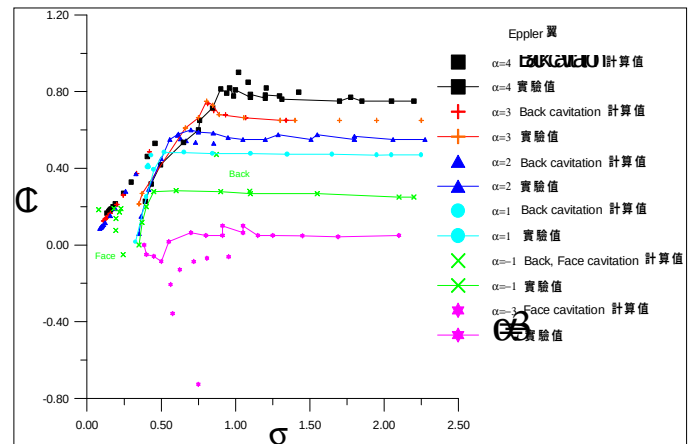
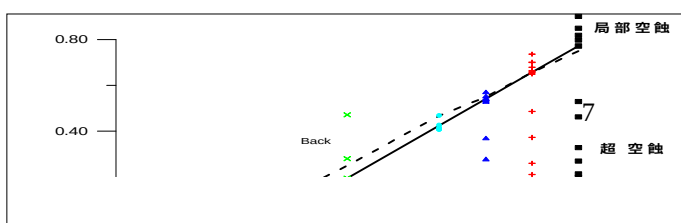


圖 13 Eppler 翼升力係數與空化係數關係



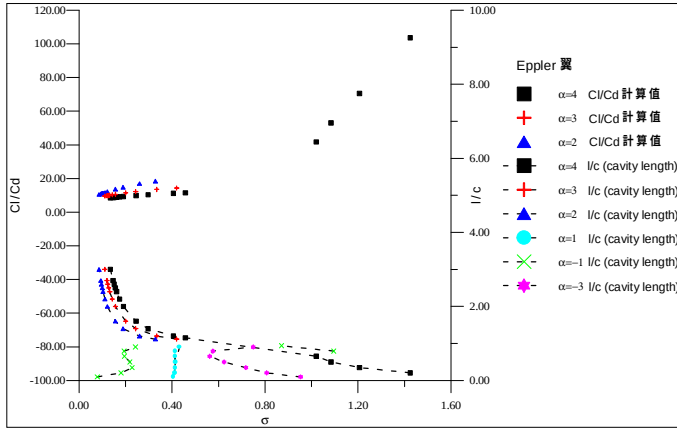


圖 14 Eppler 翼 C_L/C_D 、空泡長度與空化係數關係

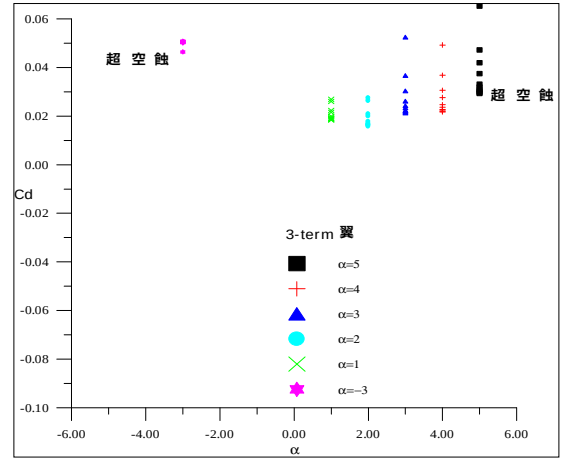


圖 18 Three-term 翼阻力係數與攻角關係

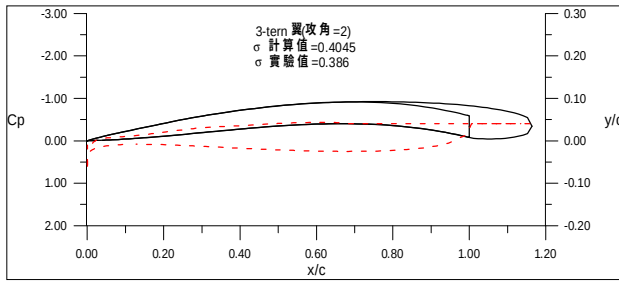


圖 15 Three-term 翼之空泡外形及壓力分布, $\alpha=2^\circ$, $l/c=0.4879$

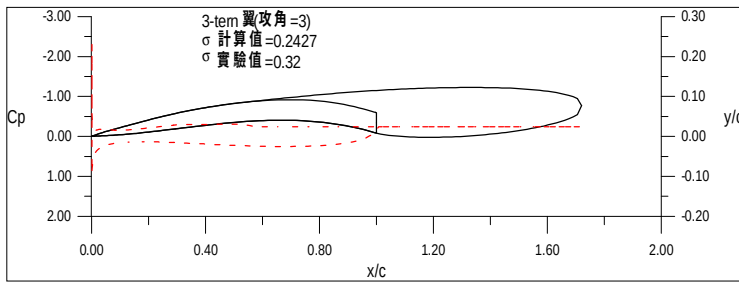


圖 16 Three-term 翼之空泡外形及壓力分布, $\alpha=3^\circ$, $l/c=1.16$

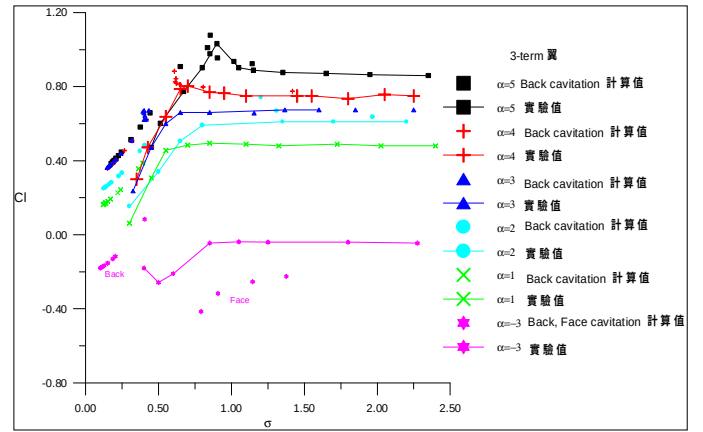


圖 19 Three-term 翼升力係數與空化係數關係

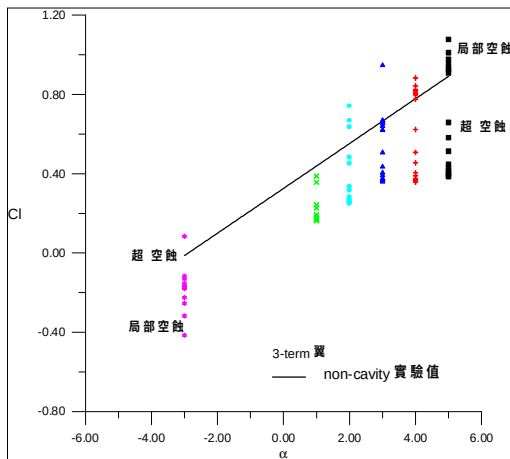


圖 17 Three-term 翼升力係數與攻角關係

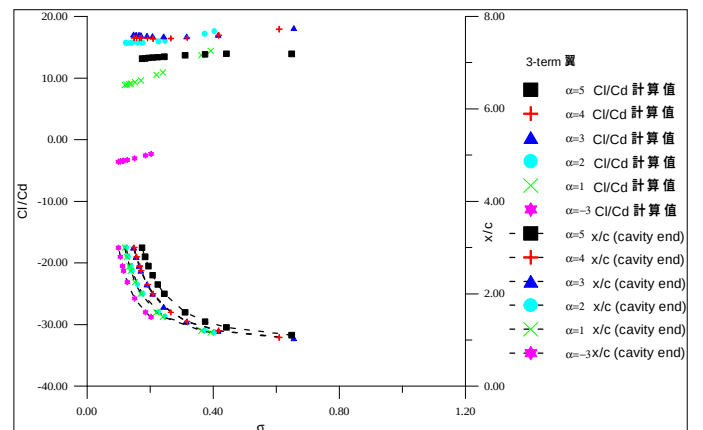


圖 20 Three-term 翼 C_L/C_D 、空泡長度與空化係數關係

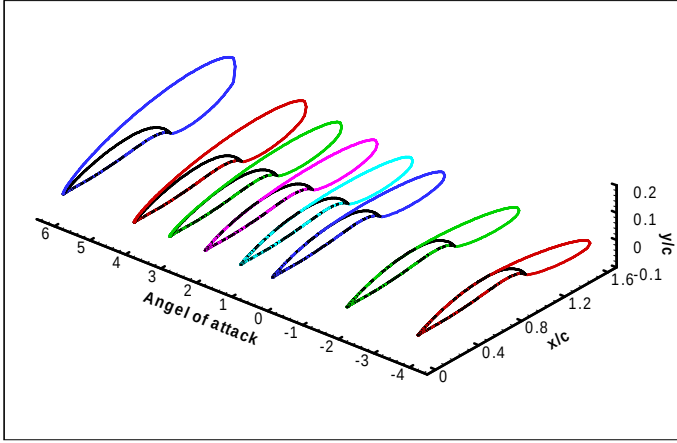


圖 21 SPP 1440 翼之空泡外形

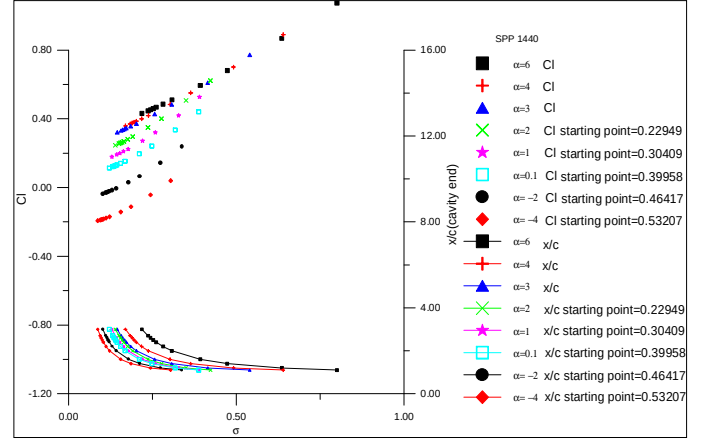


圖 24 SPP 1440 翼阻力係數與攻角關係

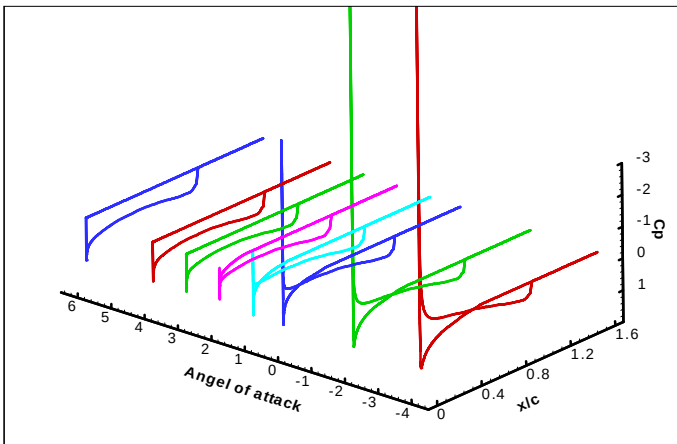


圖 22 SPP 1440 翼之壓力分布

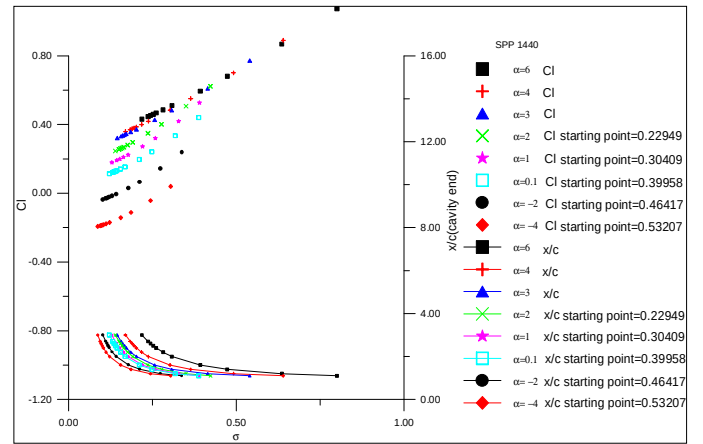


圖 25 SPP 1440 翼升力係數、空泡長度與空化係數關係

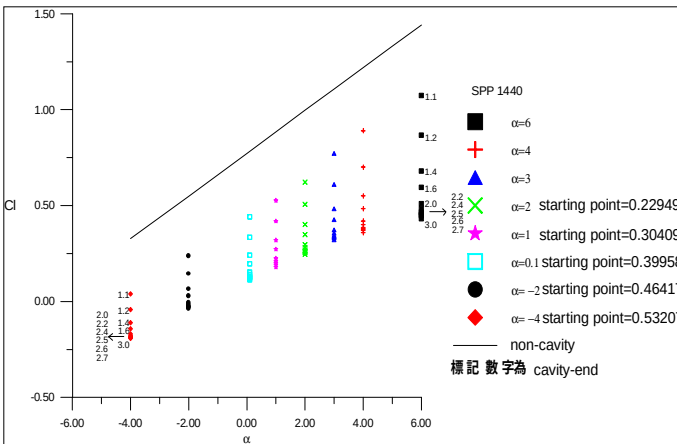


圖 23 SPP 1440 翼升力係數與攻角關係

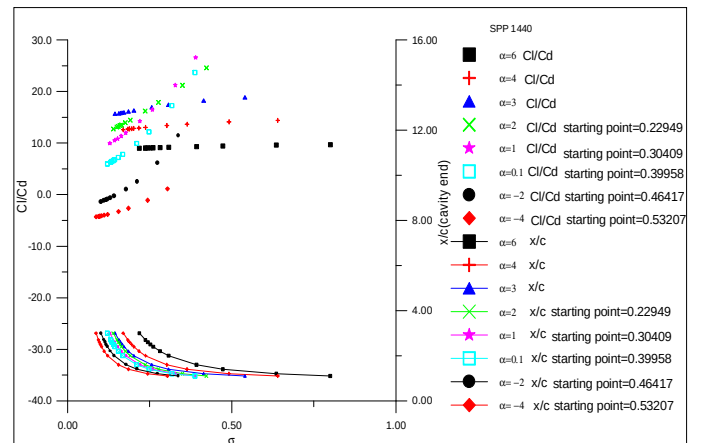


圖 26 SPP 1440 翼 C_L / C_D 、空泡長度與空化係數關係