

利用電腦數值模擬進行軍用降落傘充氣膨脹過程之研究

蘇仁寶^{1,2}、張育璋¹、吳宗信^{1*}

¹國立交通大學機械工程學系

²軍備局生產製造中心第209廠

摘 要

近年來，多重物理模擬已廣泛地被運用於航太工程相關研究，以節省研發成本及縮短時程。本研究主要基於 T-10R 降落傘建立降落傘有限元素數值模型，利用商用軟體 LS-DYNA，以「任意拉格朗日-歐拉法」(Arbitrary Lagrangian-Eulerian; ALE)，在次音速的風洞及自由落體狀態下模擬開傘充氣膨脹的動態過程。依據模擬結果，討論傘形狀的變化、降落傘與流場之間流固耦合現象及傘具投影面積變化情形。

關鍵字：降落傘、任意拉格朗日-歐拉法、充氣膨脹、流固耦合

Numerical Simulation of the Inflation Process of a Military Parachute

Jen-Pao Su^{1,2}, Yu-Wei Chang¹, Jhe-Wei Lin¹, and Jong-Shinn Wu^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University

² The 209th Arsenal, Materiel Production and Manufacturing Center, Armaments Bureau, MND

ABSTRACT

For the past few years, the simulation of multi-physics coupling computation had been used widely in aerospace engineering to reduce development cost and time. In this study, we numerically investigate the dynamic inflation process of T-10R parachute under the condition of subsonic flow in a wind tunnel and free-fall by using the Arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE) method through the commercial package, LS-DYNA. Many discussions are made based on the simulation results of canopy shape, the fluid-structure interaction (FSI) of a parachute and the surrounding air flow and the evolution of projection area.

Keywords: Parachute, ALE, Inflation, Fluid-Structure Interaction

一、前言

過去降落傘具的開發多依賴地面風洞測試及多次高空投放測的實驗所累積的數據進行統計分析，其成本不但高昂，在建立降落傘充氣性能與開傘條件之間的關係與降落傘充氣時間和傘衣投影面積的變化都存在著一定的局限性，因而只能在某些特殊情況下適用。近年來CFD的發展越來越成熟，因對降落傘的分析需考慮具有彈性(大位移)和透氣性布料與三維流場變化的影響，則須考慮複雜的流固耦合現象，因此在計算流體力學上仍是一項相當困難的領域。

在國外實例，美國T[★]AFSM團隊發展出數種數值方法，以綜合Deforming-Spatial-Domain/Stabilized Space-Time (DSD/SST) formulation quasi-direct fluid-structure coupling method及automatic mesh update technique 與平行計算等方法，模擬降落傘的三維流場[1-3]。但由於T[★]AFSM團隊模擬降落傘所需的數值方法與撰寫程式的技巧相當艱深，故後續轉而運用商業軟體如LS-DYNA應用在降落傘流固耦合模擬分析領域。如美國Airborne Systems公司，近年來累積使用LS-DYNA模擬經驗，參與美軍先進戰術降落傘系統(Advanced Tactical Parachute System, ATPS)的開發計畫，成功發展新式T-11人員傘[4-7]。

反觀國內學術單位在降落傘方面的研究甚少，然而依現有國軍作戰需求，對於人員傘、物品傘和靶機傘都有相當的需求，故本文將首先利用LS-DYNA商業科學計算模擬軟體，以T-10R降落傘為例初步建立有限元素分析模型，探討降落傘充氣過程之流固耦合現象。

二、研究方法

2.1 LS-DYNA 流固耦合模型建立

LS-DYNA計算流程與大多數分析軟體分析程序相同。如圖1所示，需要經過建模、前處理、求解及後處理。處理流固耦合的問題時，固體結構會使用拉格朗日網格(Lagrangian mesh)，網格會隨固體結構一起變形，流場則使用歐拉網格(Eulerian mesh)固定在計算空間中，每步計算時會將固體結構網格的位移與變形

重新對應到歐拉網格上。但當固體會產生大量變形時，拉格朗日網格的變形量也會很大，網格品質會變差而使模擬出現錯誤。因此衍生出了Arbitrary Lagrangian-Eulerian method，簡稱ALE法。在ALE法中拉格朗日網格對應到在計算空間中會移動的ALE網格，使拉格朗日網格不會過度變形(如圖2)。其中在LS-DYNA建模指令中會以*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID來執行流固耦合計算。

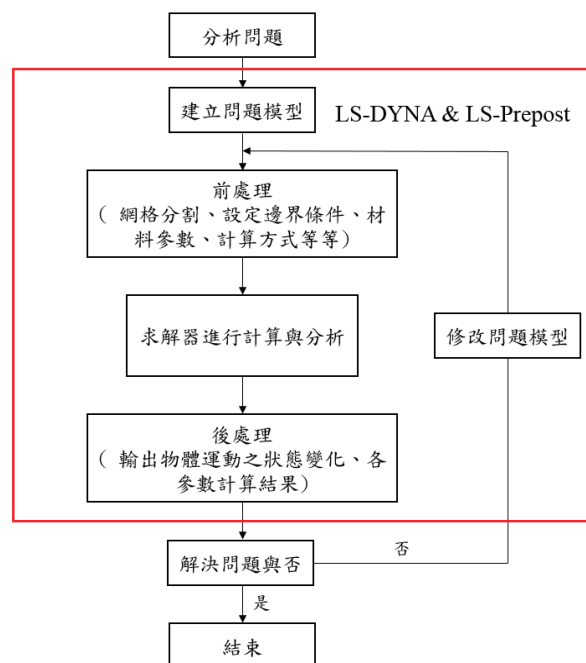


圖1. LS-DYNA計算流程

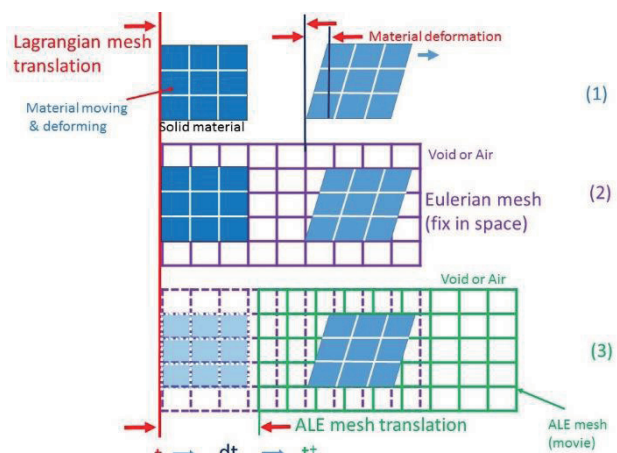


圖2. 拉格朗日(Lagrangian)、歐拉(Eulerian)與ALE網格[8]

2.2 降落傘幾何模型

T-10R降落傘為國軍現役的降落傘之一，可做為傘兵用的副傘以及空投物資用的物品傘(圖3所示)。圖4是T-10R降落傘在充氣前與在充氣狀態下各相關尺寸的示意圖。相關基本諸元參數如表1所示。由於降落傘在開傘前摺疊於傘包中，但由於摺疊狀的降落傘模型難以建模，因此降落傘模型以軸對稱受重力影響下自然垂掛的狀態進行建模。



圖3. T-10R降落傘

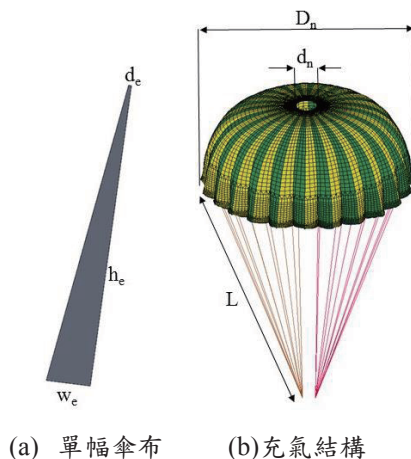


圖4. T-10R降落傘結構示意

表1. T-10R降落傘基本諸元參數

傘直徑 (D_n) (m)	7.3
傘繩數(條)	24

傘繩長度(L) (m)	6
透氣孔直徑(d_n) (m)	0.46
傘布單幅高度(h_c) (m)	3.4
傘布單底幅寬(w_c) (m)	0.48
傘布頂幅寬(d_c) (m)	0.03

2.3 材料模型設定

T-10R傘布材料符合美軍MIL-C-7020III規範，密度(Density)為553.77 kg/m³，楊氏係數(Young's modulus)為4.309 x10⁸ Pa，剪力模數(Shear modulus)為4.0 x10⁷，柏松比Poisson's ratio為0.14，厚度為0.0001m，LS-DYNA材料屬性指令為*MAT_FABRIC。傘繩則採用MIL-W-5625K規範，密度為462 kg/m³，楊氏係數為7.0x10¹⁰ Pa，LS-DYNA材料屬性指令為*MAT_CABLE_DISCRETE_BEAM。風洞之空氣，密度為1.184 kg/m³，黏滯係數(Viscosity coefficient)為1.862 x10⁻⁵ kg/(m·s)，熱容比(heat capacity ratio, Cp/Cv)為1.4，LS-DYNA材料屬性指令為*MAT_Null。

2.4 傘布透氣度計算

空氣流過透氣性傘布產生的壓差可應用Ergun Equation:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} \cdot v_f + \frac{\rho}{K_2} \cdot v_f^2 \quad (1)$$

其中為 ΔP 、 V_f 、 ρ 、 μ 分別為差壓、空氣流速、空氣的密度及黏滯係數，係數 K_1 、 K_2 與流體黏滯性與傘布的慣性有關，分別為：

$$K_1 = \frac{\varepsilon^2 \cdot D^2}{150 \cdot (1-\varepsilon)^2} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{\varepsilon^3 \cdot D}{1.75 \cdot (1-\varepsilon)} \quad (3)$$

其中D為特徵長度， ε 為開口面積與整體表面積的比率(porosity)。在固定的傘布幾何形狀及空氣性質下進行透氣性實驗，可瞭解不同傘布材料在不同差壓下的透氣性(如圖5所示)。

在固定的實驗條件下可將(1)~(3)參數結合成下式(4):

$$\frac{dP}{e} = a \cdot v_f + b \cdot v_f^2 \quad (4)$$

其中 e 為傘布厚度， a 、 b 兩個係數可由透氣性實驗的結果計算。T-10R降落傘所使用的傘布材料為MIL-C-7020 type III，此種材料的透氣性參數 a 、 b 分別1,599,174 kg/(m²·s)·480,514 kg/m³ [9]。

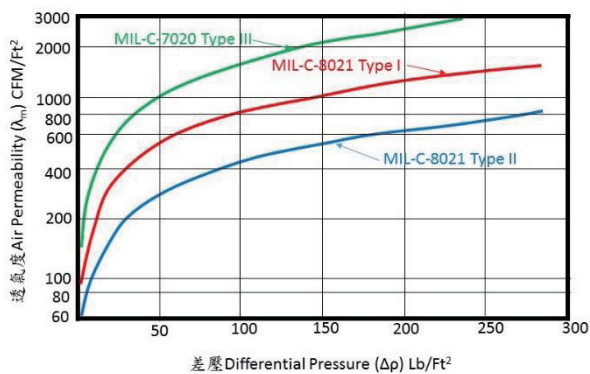


圖5. 美軍各種傘布之透氣性參數[10]

2.5 流場建模

(1) 風洞流場

首先以圓柱形的網格作為數值風洞，尺寸為直徑 D_a 為18公尺、 h_a 為21公尺，空氣網格軸心平行 Z 軸，圓柱的中心部分加密(圖6)。以空氣網格數為分別為346,968及770,640的風洞模型進行格點收斂測試，風洞周圍為非反射性邊界(non-reflection boundary condition)，邊界的指令為*BOUNDARY_NON_REFLECTING，全尺寸的T-10R降落傘模型置於風洞中央，降落傘的網格數量為15,792，傘布使用Belytschko-Tsay membrane model，傘繩尾端固定於風洞底面中心，風洞中設定一個均勻向上的流場，流速 v_i 為10 m/s。使用國家高速網路電腦中心的個人叢集電腦系統，以64 core 進行模擬格點數為346,968的算例，平均每模擬1秒需耗時7.1小時。

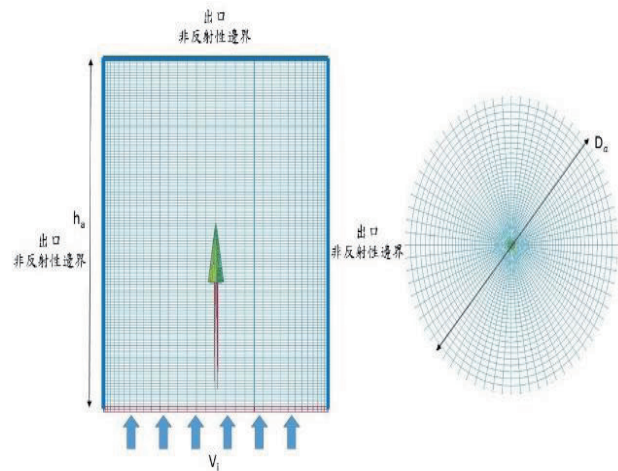


圖6. 風洞模擬的網格模型

(2) 垂直投放流場

在垂直投放模擬的部分，空氣流場直徑 D_a 與風洞相同為18m，高 h_d 增至55.3m，空氣網格數量為947,068 (圖7)，將降落傘的傘繩下固定一個空投物上，空投物的大小為長0.29m、寬0.22m，高為0.56m及0.86m的長方體，重量分別為60kg及100kg，降落傘頂端置於空氣網格頂端距離 h_p 為3.45m，流場全邊界設定為非反射性邊界，給予 v_i 分別10 m/s及24.5m/s的初速度觀察其降落的過程。

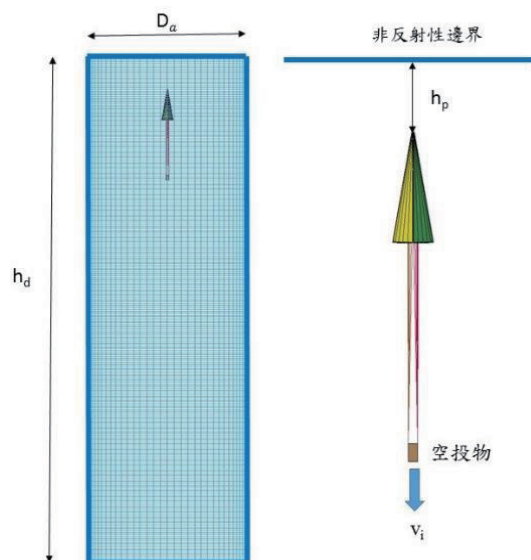


圖7. 垂直投放模擬的網格模型。

(3) 空投流場

而空投模擬的部分，建構長寬高分別為31m、20m、37.5m的長方體空氣範圍，網格數

為976,646，考量空投環境設定較為複雜，在未取得實際降落傘空投初始速度與角度等參數之前，僅以模擬傘布開始充氣的時候傘繩約與地面成 45° 夾角。如圖8，給予向下的初速度 V_{zi} 為24.5m/s，另外再給予不同Y方向的初速度 V_{yi} ，觀察其降落過程給予不同Y方向的初速度 V_{yi} ，觀察其降落過程。

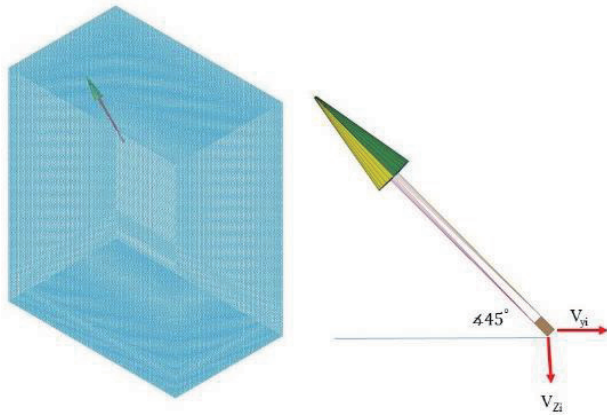


圖8. 空投模擬的網格模型

三、模擬結果與討論

3.1 風洞模擬

首先比較降落傘模型在空氣網格數量分別為346,968及770,640的風洞中，開傘作用力的模擬結果(圖9)，結果相差不大，因此後續的風洞模擬以空氣網格數量為346,968的風洞進行，以節省計算時間。圖10為降落傘在風洞風速為10m/s時，開傘過程與空氣流速分佈的模擬結果，可看出傘布充氣與傘裙跟傘布周圍渦流的分佈(紅色區域)，在透氣孔與傘布、傘裙邊緣處空氣流速較快，故傘頂首先充氣後傘布才開始向外擴張，如圖10所示。由傘投影面積(如圖11所示)可以得知開傘過程可看出開傘時間為1.616秒時，開傘時的最大阻力達4.83 kN，之後快速減弱，由於這個風洞模擬屬有限空氣流場，使穩定後的阻力僅只有0.6 kN (如圖11所示)，與T.W. Knacke所述有限空氣環境下(finite mass)的傘布阻力曲線(如圖12所示)趨勢吻合[10]，而投影面積於1.91秒時面積達到最大值。應力集中在傘頂排氣口、傘布圓弧處與傘繩縫合處，傘布應力分佈的模擬結果如圖13所示。在此時，使用的傘布與縫合處的結構強度之設計遠大於模擬的最大應力值。

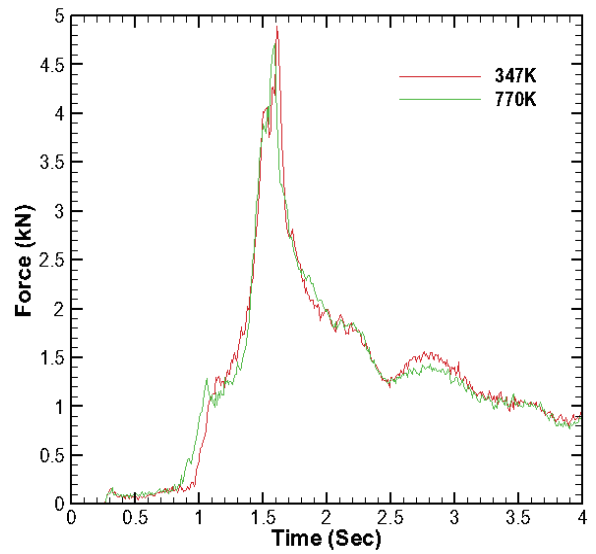


圖9. 風洞網格格點測試

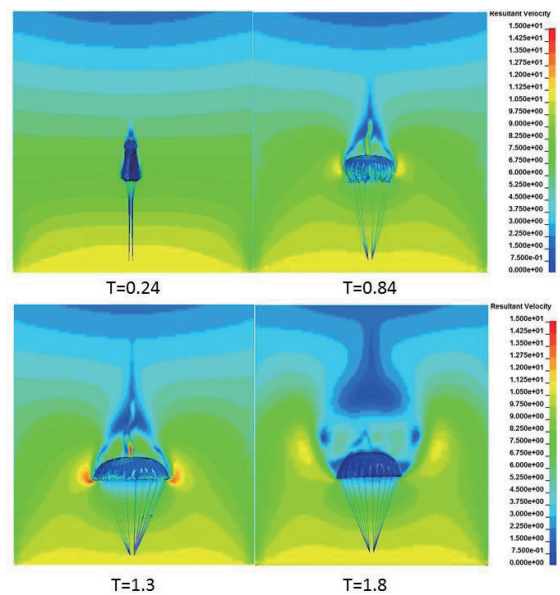


圖10. T-10R降落傘在風洞之開傘過程與空氣流速分佈模擬結果($v_i=10\text{m/s}$)

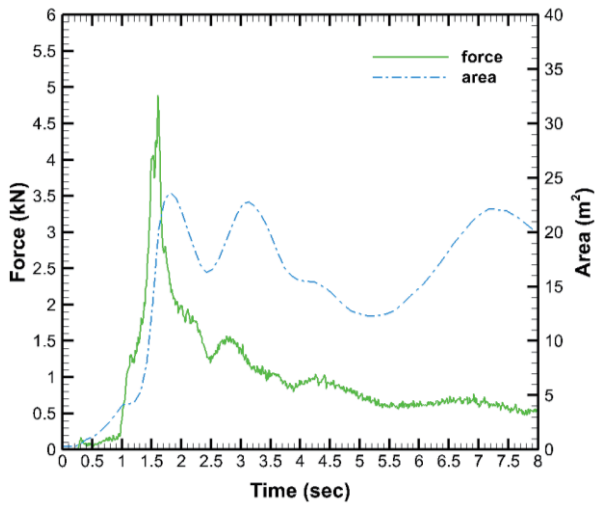


圖11.模擬在風洞環境傘布阻力與投影面積變化

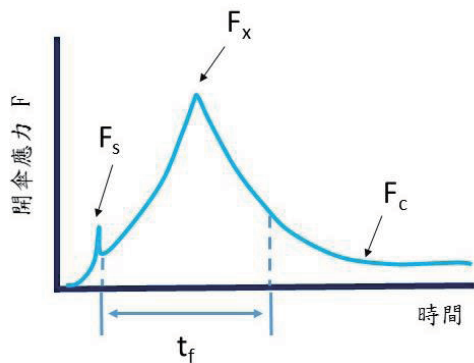


圖12.有限空氣環境下(finite mass)的傘布阻力曲線[11]

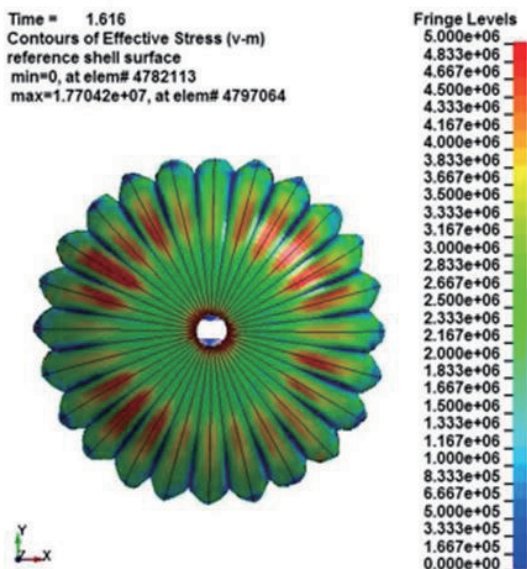


圖13. 風洞中開傘過程傘布的最大應力分佈

3.2 垂直投放與模擬

分別給予向下10m/s及24.5m/s 的初速度垂直投放時，傘布阻力與傘布投影面積的模擬結果如圖14及圖15。在初速度為10 m/s時，降落傘傘布投影面積在2秒時達最大值約31.28m²，而初速度為24.5 m/s時，降落傘傘布投影面積於1.2秒時達最大值。而投放過程中，降落傘在傘頂透氣孔週圍之空氣流速較快，在無額外側向力影響下，全傘的流場速度呈錐型對稱分佈，並穩定下降，其開傘與空氣流速分佈的模擬如圖16。無論何種初速，在傘布第一次完全充氣後降落速度大幅減緩，垂直投放3.8秒後的降落速度約為每秒8公尺上下(如圖17)。

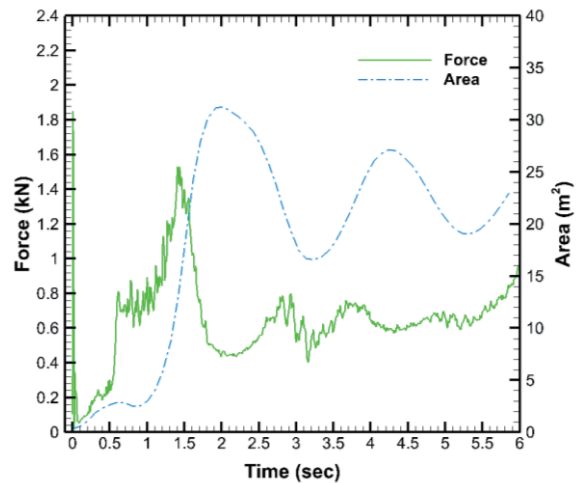


圖14. T-10R降落傘垂直下降時傘布投影面積與阻力曲線 ($v_i=10$ m/s)

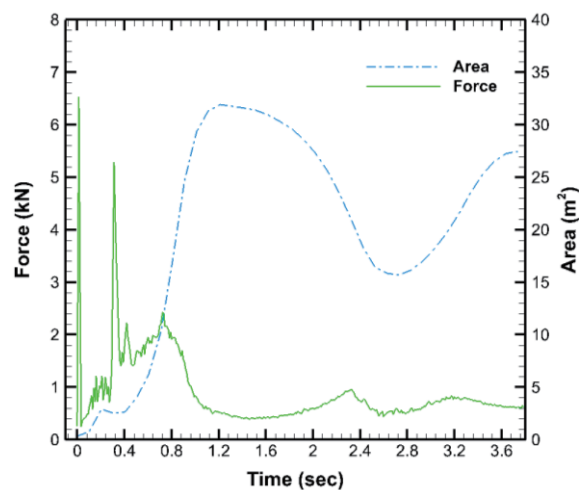


圖15. T-10R降落傘垂直下降時傘布投影面積與阻力曲線 ($v_i=24.5$ m/s)

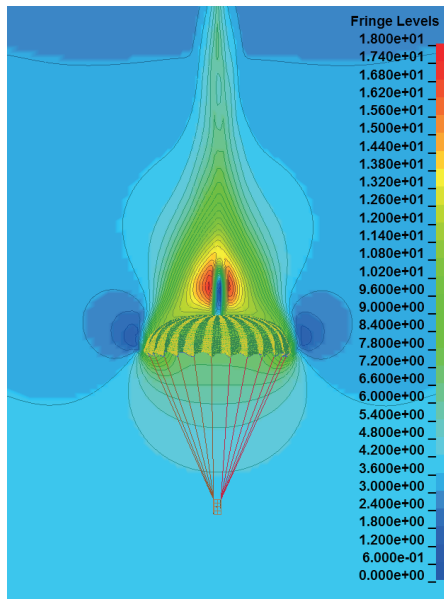


圖16.垂直投放過程之降落傘週邊空氣流速分佈($v_i=10\text{m/s}$, $t=1.61\text{s}$)

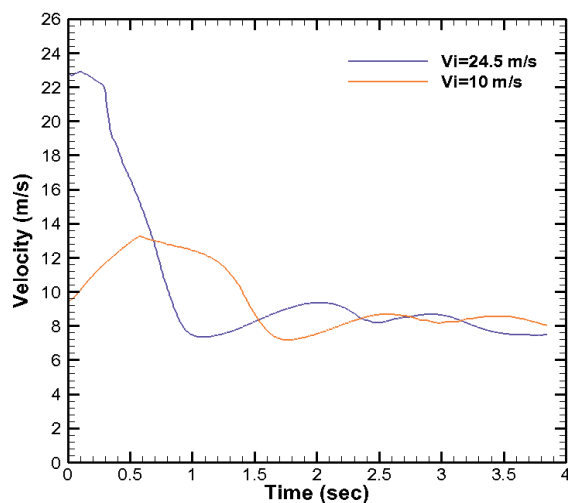


圖17.不同初速度狀況下垂直投放下落速度變化

3.3 空投模擬

在空投模擬中，無論何種設定開傘後2秒的下降速度範圍在每秒6~8公尺(圖18)，與T-10R降落傘的平均下降率6.7m/s接近，當 v_{yi} 初速度為10m/s、空投物重量60公斤時，降落傘下降速度為6.35m/s最為接近。而各種設定條件下，T-10R降落傘在空投過程中均出現傘布充氣膨脹不均勻，造成下凹的現象可能造成翻覆，比較實際空投情形較為嚴重(如圖19所示)，是否為原T-10R降落傘設計因素或是模型的問題有待

進一步確認。

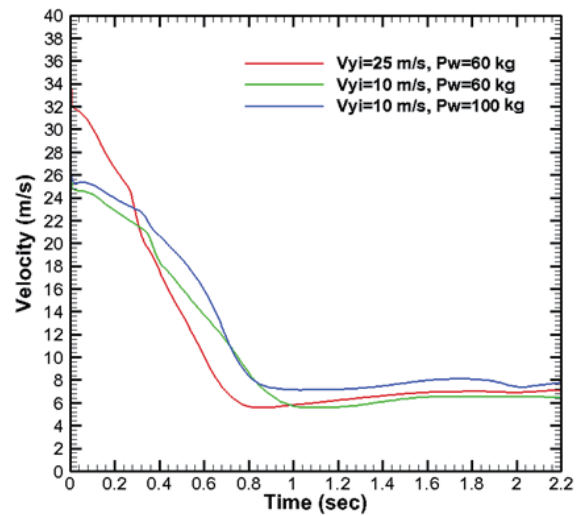


圖18. 不同初速度及空投物重量時降落速度變化

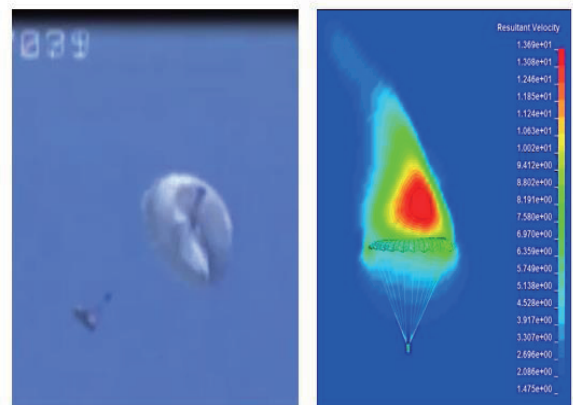


圖19. T-10R降落傘空投模擬(right)與實際空投傘布充氣膨脹不均勻現象(left). ($V_{yi}=10\text{m/s}$ $P_w=60\text{kg}$)

四、結論

在本研究中，吾人利用ALE方法進行T-10R降落傘進行流固耦合模擬，探討在各種不同模擬條件下在降落傘受力與面積變化情形。結果顯示，在無限空氣環境與有限空氣環境下所模擬出的受力情況接近實際操作情況的特徵。在風洞、垂直投放及空投三種情況下的模擬中，可觀察出降落傘在空氣流場中不同條件下，傘布充氣的開傘過程，與傘布周圍空氣的流速分佈、傘布阻力、傘布投影面積的變化以及傘布所受的應力分佈。垂直投放及空投模擬的結果顯示，開傘後的下降速度與實際降落傘的下降率相當接近。目前的傘繩為簡化模型，後續將

進行實驗與模擬的比較，確認模型的準確性，以利對降落傘進行更多分析，以及未來設計降落傘時的參考依據。

Systems Design Manual”, Para Publishing, Chap. 5, pp.5-49, 1992.

誌謝

本研究感謝財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心提供軟、硬體協助。

參考文獻

- [1] Stein K. etc., “Parachute Fluid-Structure Interactions: 3-D Computation”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol190, pp. 373-386, 2000.
- [2] Stein K. etc., “Aerodynamic Interactions Between Parachute Canopies”, Journal of Applied Mechanics, vol70, pp. 52-57, 2003.
- [3] Stein K. etc., “Applications in Airdrop Systems: Fluid-Structure Interaction Modeling”, Proceedings of the Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria, 2002.
- [4] Anthony P. Taylor, “Developments in the Application of LS-DYNA to Fluid Structure Interaction (FSI) Problems in Recovery System Design and Analysis”, 7th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2002.
- [5] Tutt B., “The Application of a New Material Porosity Algorithm for Parachute Analysis”, 9th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2006.
- [6] Tutt B., Charles R. etc., “Development of Parachute Simulation Techniques in LS-DYNA”, 11th International LS-DYNA Users Conference. Detroit, 2010.
- [7] Tutt B. et al., “The use of LS-DYNA to Assess the Performance of Airborne Systems North America Candidate ATPS Main Parachutes”, 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, Munich, 2005.
- [8] Ian Do, Jim Day, “Overview of ALE Method in LS-DYNA”, LSTC, 2005.
- [9] Tutt B., “The Application of a New Material Porosity Algorithm for Parachute Analysis”, 9th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2006. [10]
- [10] T.W. Knacke, “Parachute Recovery