

# 高長滯空(HALE)太陽能 無人機發展的挑戰

林煥榮 教授

飛機系暨航空與電子科技研究所

國立虎尾科技大學

2025.06.20

# Contents

- 平流層的環境
- HALE太陽能無人機特點
- 國際商業應用與技術現況
- 國內(虎科大)技術現況與挑戰
- 國內發展規劃建議



# 平流層的環境

- 平流層從距離地球表面18~30(50)公里間的空層，有。
- 溫度為-56.5°C、壓力為8.8~1.2KPa (101.3KPa@SeaLevel)
- 中午陽光1130~1230W/m<sup>2</sup>(Solar Const.=1368)和風速5~25m/s
- 高濃度臭氧和宇宙輻射存在。(HAPS可在最大25m/s的風速下飛行和起降)

平流層風和日麗HAPS可以穩定  
飛行數月；但空氣稀薄、氣溫低

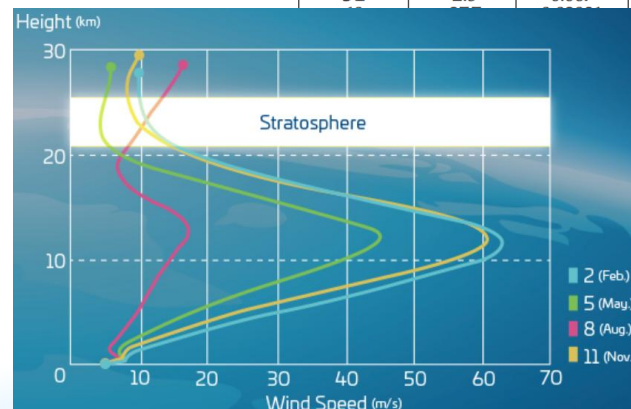
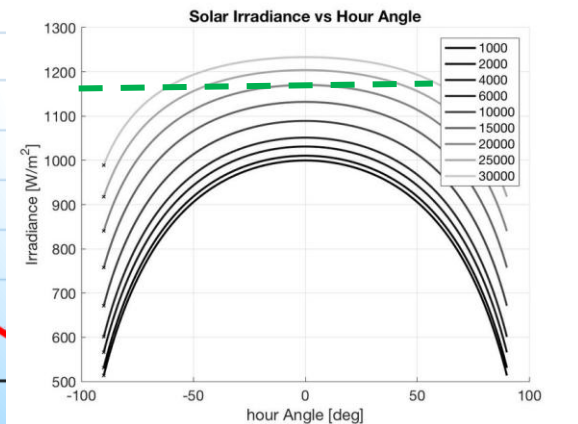
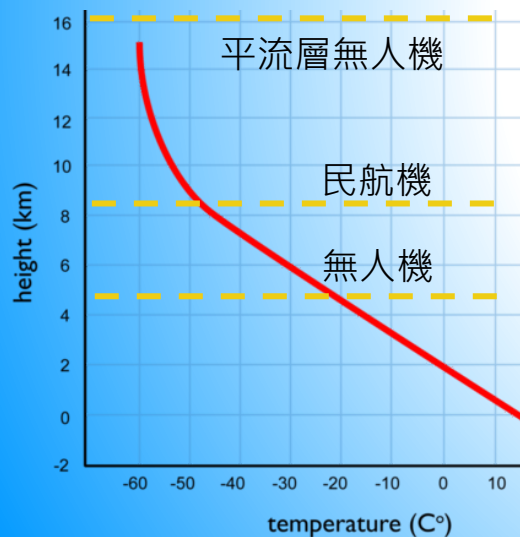
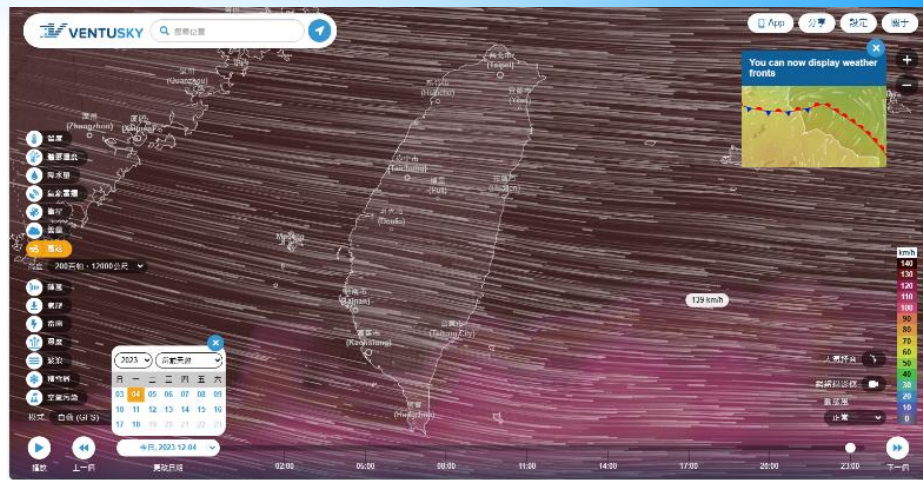


Table 1-5. Standard atmosphere.

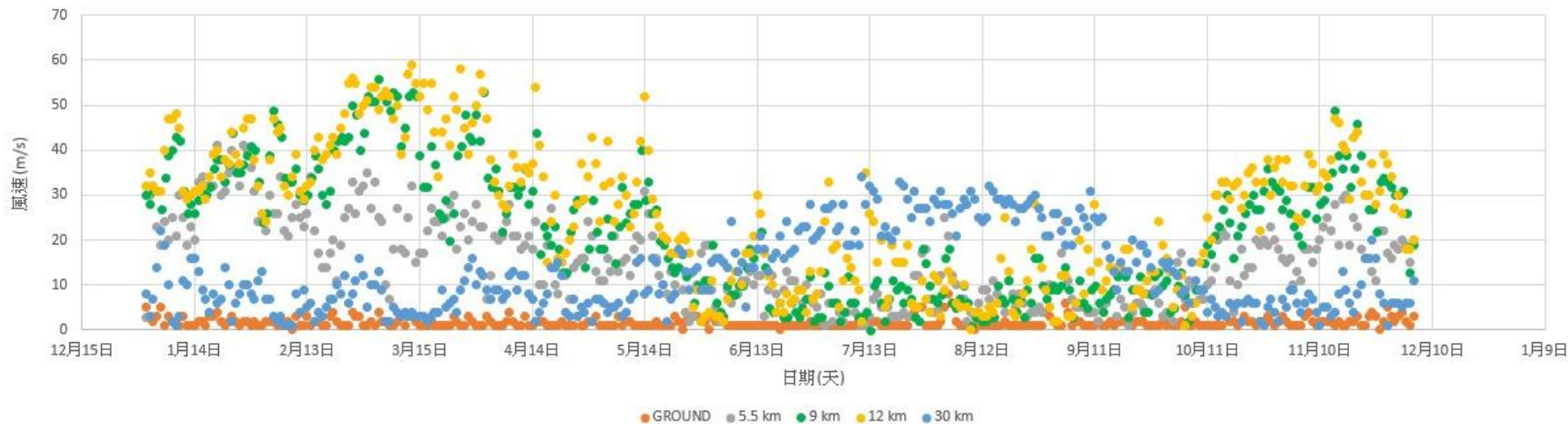
H (km)	T (°C)	P (kPa)	ρ (kg m <sup>-3</sup> )
-1	21.5	113.920	1.3470
0	15.0	101.325	1.2250
1	8.5	89.874	1.1116
2	2.0	79.495	1.0065
3	-4.5	70.108	0.9091
4	-11.0	61.640	0.8191
5	-17.5	54.019	0.7361
6	-24.0	47.181	0.6597
7	-30.5	41.060	0.5895
8	-37.0	35.599	0.5252
9	-43.5	30.742	0.4664
10	-50.0	26.436	0.4127
11	-56.5	22.632	0.3639
13	-56.5	16.510	0.2655
15	-56.5	12.044	0.1937
17	-56.5	8.787	0.1423
20	-56.5	5.475	0.0880
25	-51.5	2.511	0.0395
30	-46.5	1.172	0.0180
32	-44.5	0.868	0.0132
35	-36.1	0.559	0.0082
40	-22.1	0.278	0.0039
45	-8.1	0.143	0.0019
47	-2.5	0.111	0.0014
50	-2.5	0.076	0.0010
51	-2.5	0.067	0.00086
			0.000288
			0.000074
			0.000064
			0.000015
			0.000007
			0.000003
			0.0000005
			0.0000002
			0.0000001

# 2023年12月4日12km高的模擬台灣風場(Ventusky - 風雨氣溫圖)

參考懷俄明大學的收集數據，選擇離台灣最近的 Ishigakijima(石垣島)觀測站位置，編號47918(ROIG)，記錄中午12點(另一點為凌晨)的量測數據

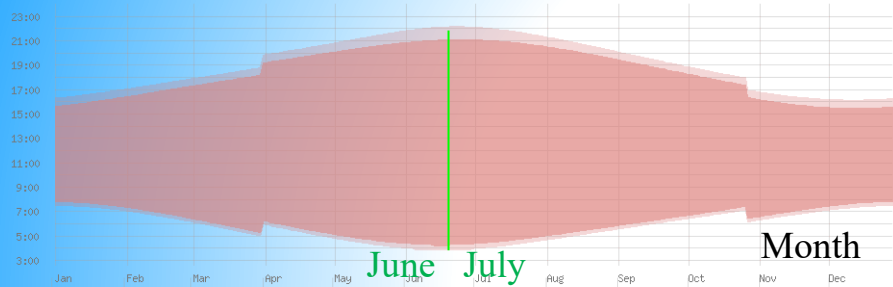


2023大氣層風速紀錄



# 日照時間比較(between sunrise and sunset)

O'clock

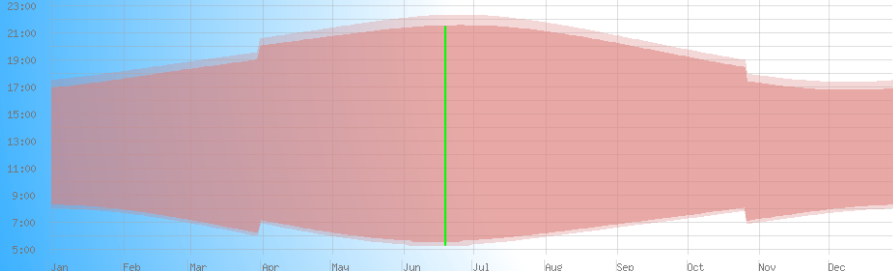


The longer the daylight hours, the easier it is to **fly overnight**.

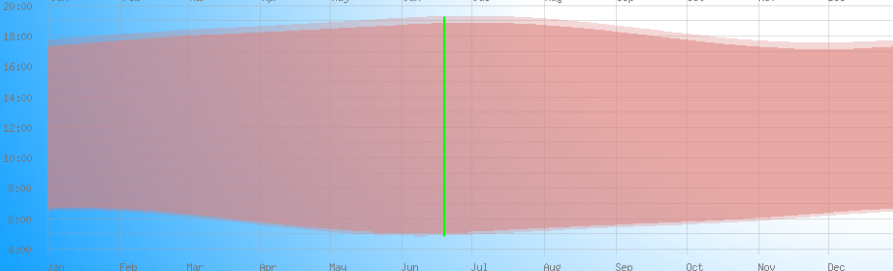
The longest daylight is about **16.8** hours on June in **華沙 Warsaw**



**AtlantikSolar**在2015年長滯空81hrs, the longest daylight is about **15.9hrs** on June in 伯恩, 瑞士理工學院



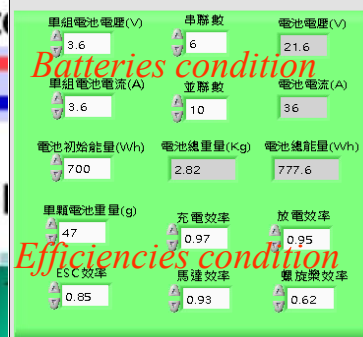
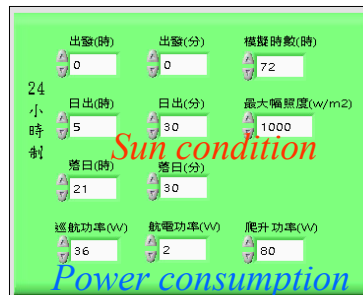
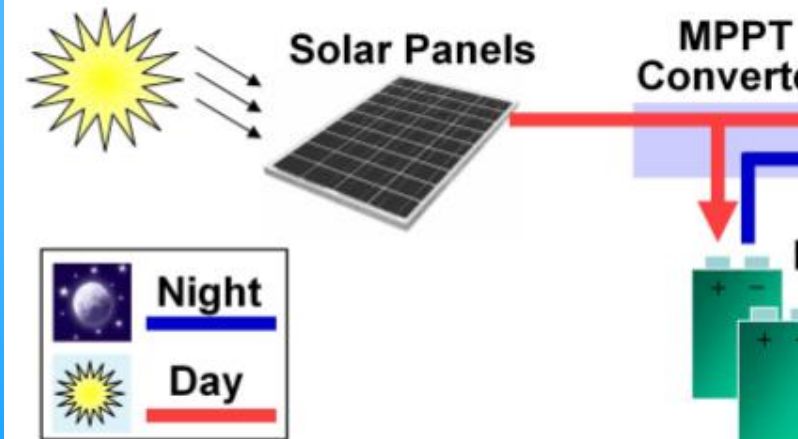
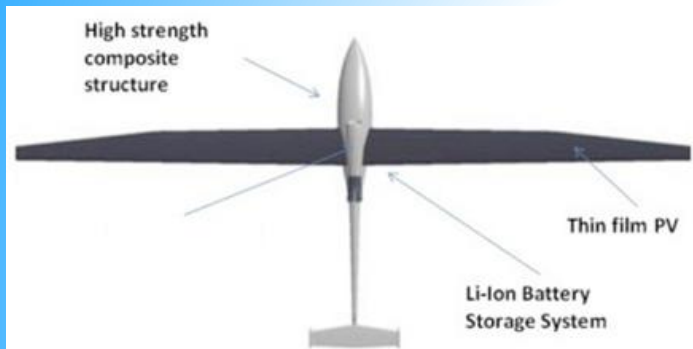
The longest daylight is about **13.7** hours on June in **Taipei**



<https://www.worlddata.info/asia/taiwan/sunset.php>

# HALE太陽能無人機特點

## Energy Simulation

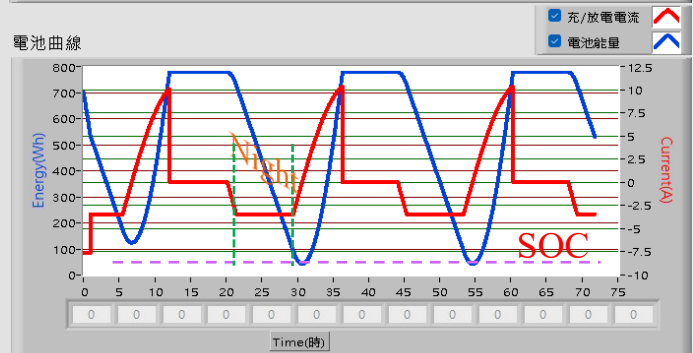
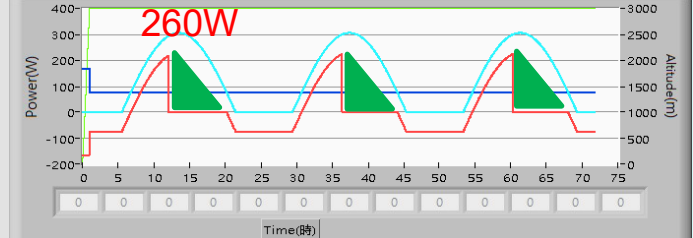


tan(度)	2度~10度	空速(km/hr)
3000	5	36

執行 載入 儲存

STOP

- 太陽能電力(MPPT輸出)
- 充電功率
- 消耗功率
- 高度



# 國際HAPS商業應用與技術現況

載具特性	HALE-固定翼飛機
載具尺寸	翼展25-80米
載具重量	70-2500+公斤
任務持續時間	1周-6個月
有效載荷重量	1-140公斤
當前TRL	TRL8/9
開始商業運營	2024
平台執行高度	18-35公里

HALE : High Altitude and Long Endurance

# 國際HAPS商業應用

## 營運商

## 運作情形

### 杜拜Mira Aerospace

<https://miraaerospace.com/platform>

- 採用ApusDuo HAPS



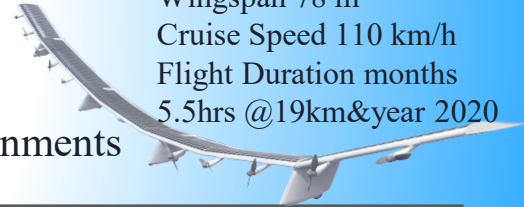
- 36m wingspan
- 8m/s IAS
- 223kg MTOW
- 100W 20kg payload
- 13,000m floor altitude
- <30 latitudes
- SolAero solar panels
- SionPower batteries

- Telecommunication, Earth observation & RF sensing

### 日本Softbank

<https://www.softbank.jp/en/corp/technology/research/research-areas/haps/>

- 採用AeroVironment SunGlider



- HAPS alliance
- Build stable Internet connection environments

Wingspan 78 m  
Cruise Speed 110 km/h  
Flight Duration months  
5.5hrs @19km&year 2020

### 日本Space Compass

1. <https://space-compass.com/en>
2. <https://www.docomo.ne.jp/english>

- AALTO HAPS Zephyr
- AALTO, NTT DOCOMO and Space Compass, a joint venture between NTT and SKY Perfect JSAT focusing on establishing a **Space Integrated Computing Network**.



### 百慕達Paradise電信商

- Paradise Mobile , direct-to-device 4G/5G services
- AALTO HAPS Zephyr 2023

# 酬載種類Payloads

- Payload小型化
- 重量輕
- 能源需求少

種類	參數
<b>1. EO Image GSD</b> 地球觀測	<ul style="list-style-type: none"><li>• day operation: 8 ~15 cm (3cm)</li><li>• night operation : 100 cm</li><li>• footprint : 1000 m in diameter</li></ul>
<b>2. Telecommunication</b> 電信	<ul style="list-style-type: none"><li>• Extended footprint : 322 km radius</li><li>• 3G, 4G in radius up to 100 km</li><li>• 5G in a radius up to 75 km</li><li>• <b>Laser communication</b> link can provide Gb/s in a radius of 100 km to the ground station.</li></ul>
<b>3. Navigation</b> 導航	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alternative Position, Navigation and Timing</li><li>• Augmentation Solution for GNSS</li></ul>
<b>4. Others</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• LiDAR、SAR、Air Quality sensor、Hyperspectral、Supporting space missions</li></ul>

# P1. 光學酬載

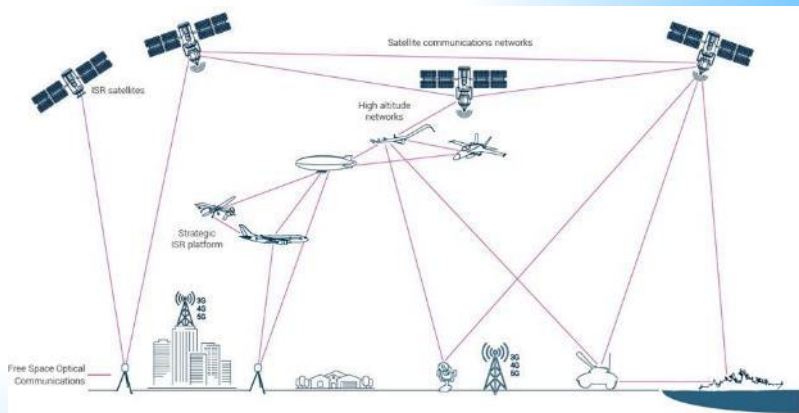
- 多種光譜和RGB，RGB更適合AI圖像識別或機器學習
- 平流層的可行圖像解析度範圍為8(1x1公里條帶)~30cm(3x3公里條帶)，而大面積可以覆蓋1000km<sup>2</sup>，解析度為10米。
- 解析度為8cm進行即時視頻下傳，需每秒2~5Gb的頻寬。
- 紅外熱像儀顯示地表的熱圖，可用於探測隱蔽目標、部隊、車輛或船隻。



6092輛汽車

## P2. RF、電信酬載

- HAPS可以在24.25~27.5GHz和38-39.5GHz的feeder link和2GHz的service link，搭載5G基地台和衛星電視相關設備的**空中基地台**或扮演**同步衛星**的功能。
- **雷射**通訊可傳輸高達10Gb/秒數據，但須**萬里無雲的天空和高精度的指向**。一個地面站可以與半徑達100公里的平臺建立鐳射鏈路。對於遠距遠端操作，需更多地面站或幾個相互連接的HAPS或衛星來建立網路。

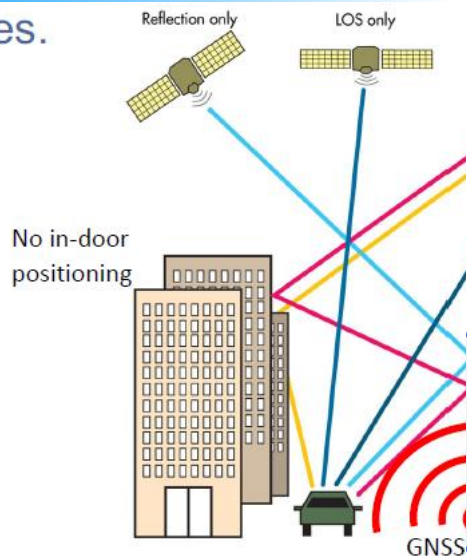


# P3. Augmentation Solution for GNSS(增強GPS訊號)

- Cesar Roda Neve, “HAPS AS AN AUGMENTATION SOLUTION FOR GNSS: POTENTIAL USE CASE ANALYSIS”, by M3 Systems Belgium in **HAPS 4 ESA 2019**

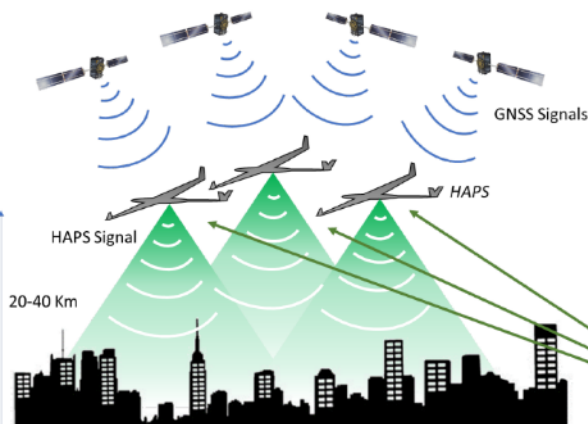
PNT (Positioning,  
Navigation, and Timing)

es.



## NEW HAPS-BASED LOCAL POSITIONING SYSTEM

- **New signal** for PNT to overcome GNSS limitations
- Allowing positioning at **in-door** and **dense-building urban** environment



- **Lower frequency** carrier for better in-door penetration and lower free space losses
- **CDMA signal modulation** (BPSK10 or BPSK20) less multipath error envelope and thermal noise effect
- **Higher signal power** for in-door positioning and less interference sensitivity
- Not requires iono delay removal, **only tropospheric error** correction
- Continuous **in & out-door positioning**



Possible application(s)

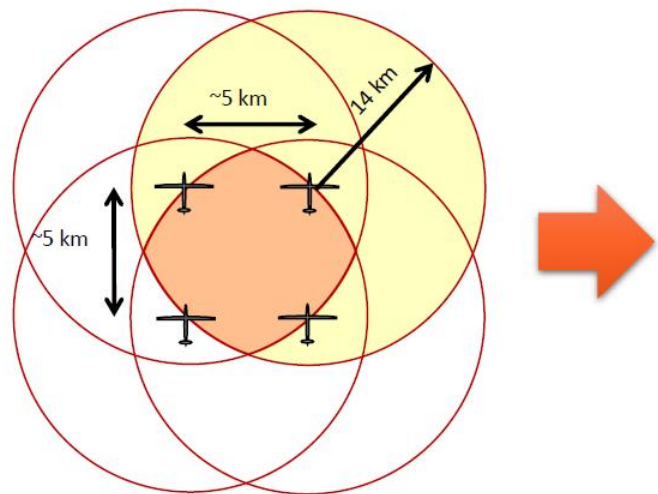
PNT to emergency services  
Autonomous vehicles

# NEW HAPS-BASED LOCAL POSITIONING SYSTEM

低空定位系統

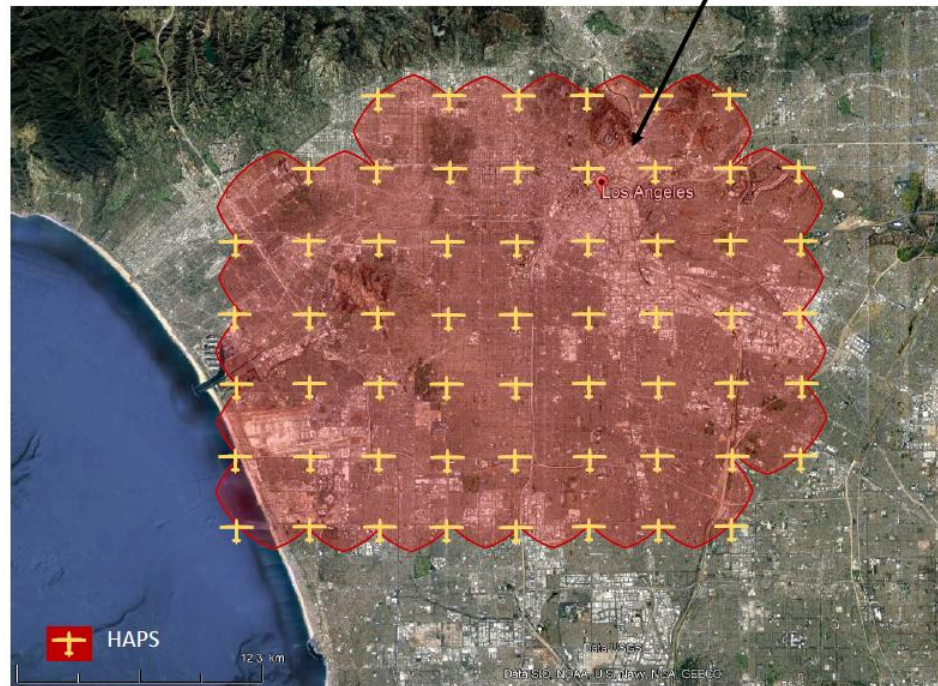
## HAPS fleet

At least 4 HAPS must be visible at any time



- single HAPS coverage
- 4 HAPS visibility coverage

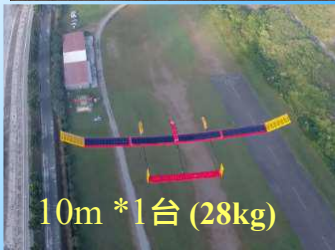
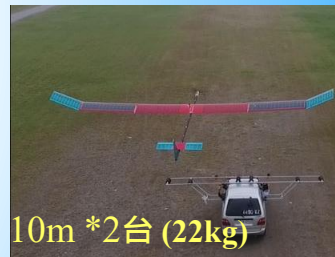
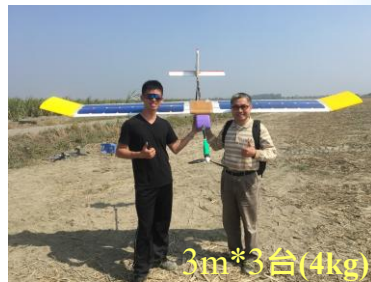
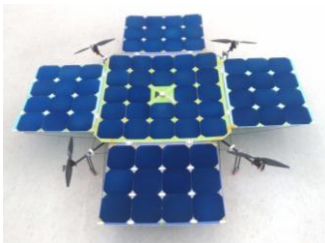
- For a 600 km<sup>2</sup> area coverage
- HAPS at 20 km altitude and 70° beam width



# 國內(虎科大)技術現況與挑戰

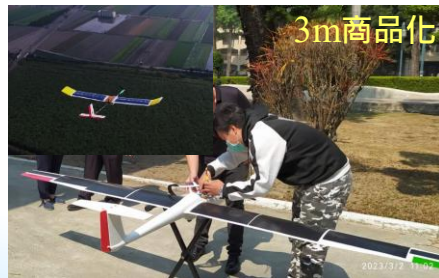
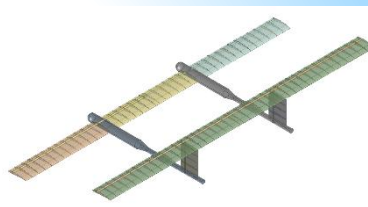
# 國內太陽能無人機之發展

- 淡江航太2012年最早
- 虎尾科大飛機系2015~
- 台大電機2017
- 成大航太2020
- 漢翔2019翼展15m



# 虎科大太陽能無人機研究成果

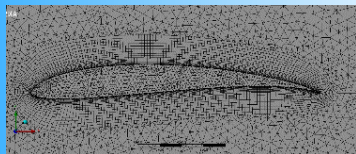
- 2023年tandem wing翼展15m設計分析
- 2023年3m翼展商品化
- 2022年6月2日5m翼展創新亞洲學界長滯空22小時記錄
- 2020年科技部綠能無人機大賽獲獎金230萬
- 2017~2018製作三台10m翼展於屏東連續飛行3hr。
- 2017年3m翼展最大發電80W連續飛行6hr



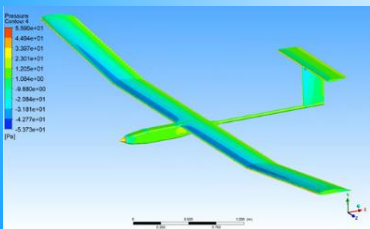
# HALE太陽能無人機團隊—氣動力分析



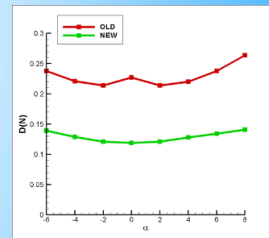
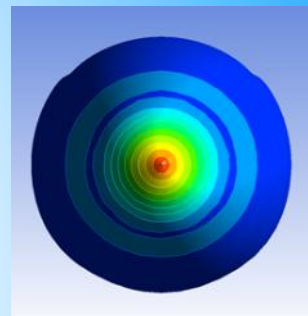
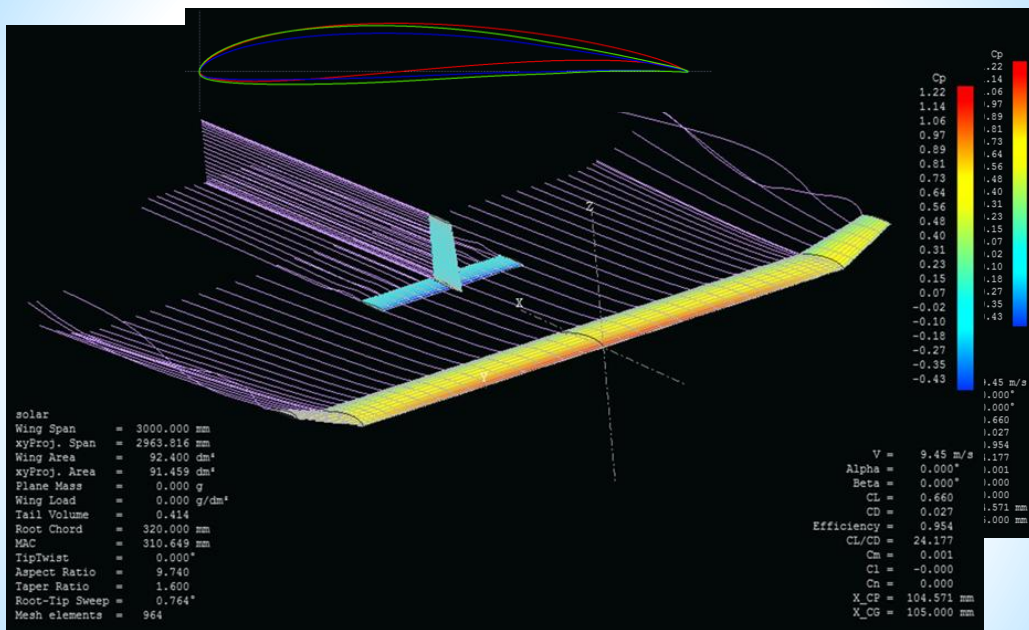
全機物理系統示意圖



機翼附近網格



全機表面壓力圖



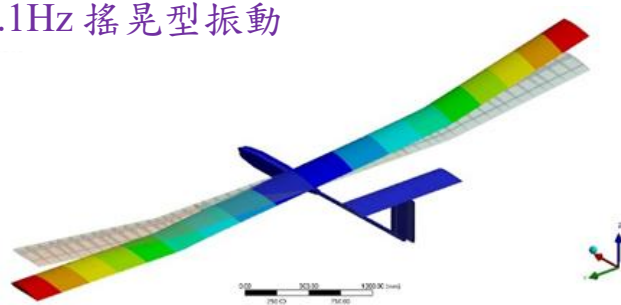
機身外型阻力分析

長滯空飛機設計為低雷諾數、低風阻( $CD=0.027$ )、低翼面負載、大展弦比和高升阻比( $L/D=24.2$ )之固定翼UAV。

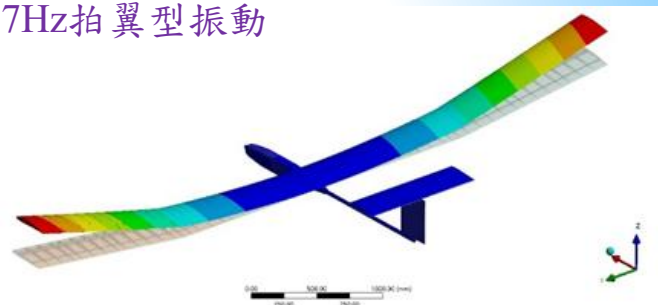


# 複合材料全機結構振動模態分析

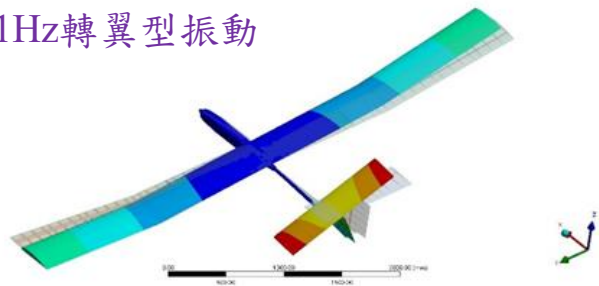
2.1Hz 搖晃型振動



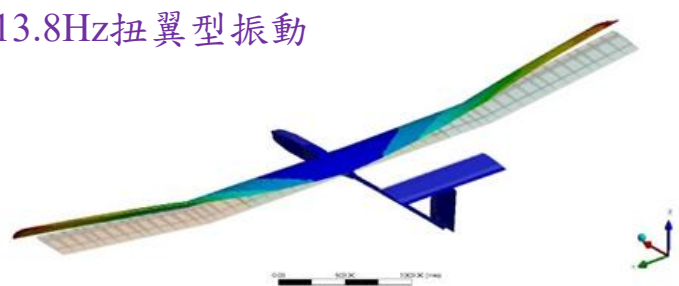
3.7Hz 拍翼型振動



4.1Hz 轉翼型振動

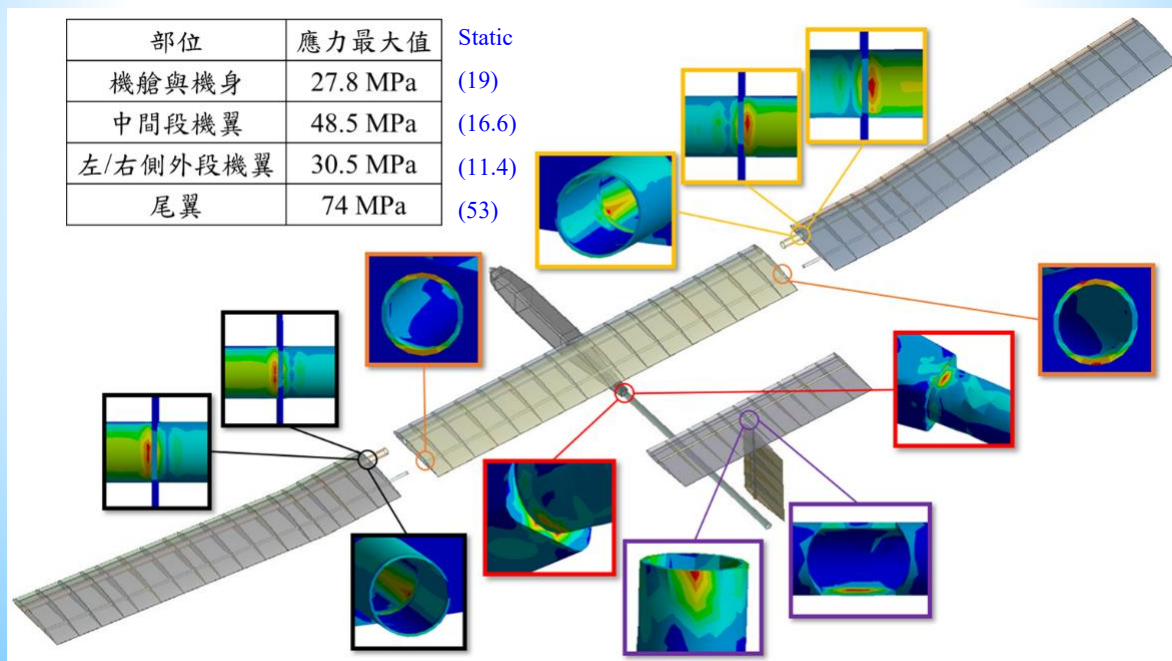


13.8Hz 扭翼型振動

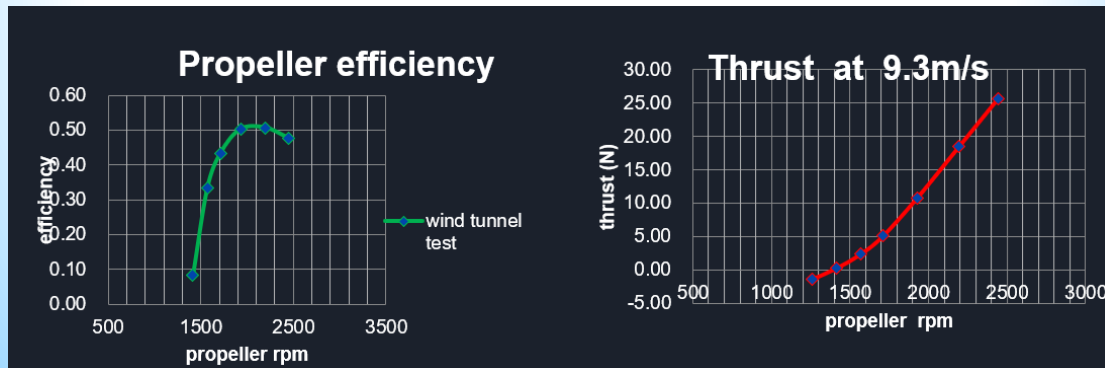
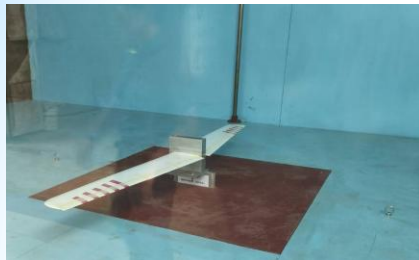


# 穩態流場下全機主要部位應力(集中)分布

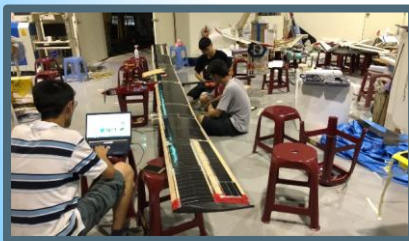
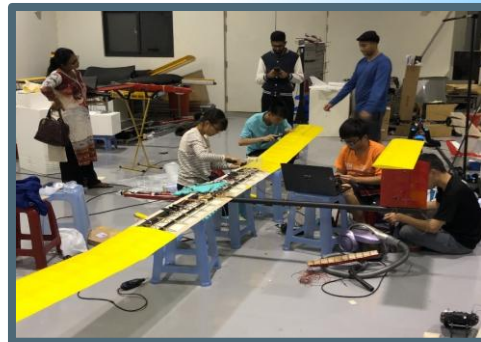
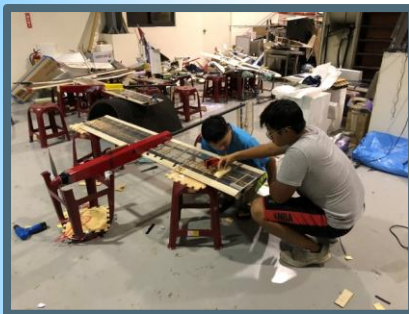
- 航速12m/s和攻角4°下各主要部分均於結構安全範圍。
- 最大應力於尾翼連結處。



# 推進系統機電轉換效率低速風洞測試



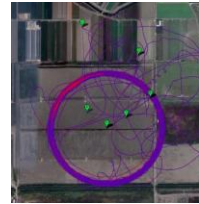
# 5m翼展太陽能無人機初期製作與整測



[打造太陽能無人機 熱血追夢! \(yahoo.com\)](http://yahoo.com)

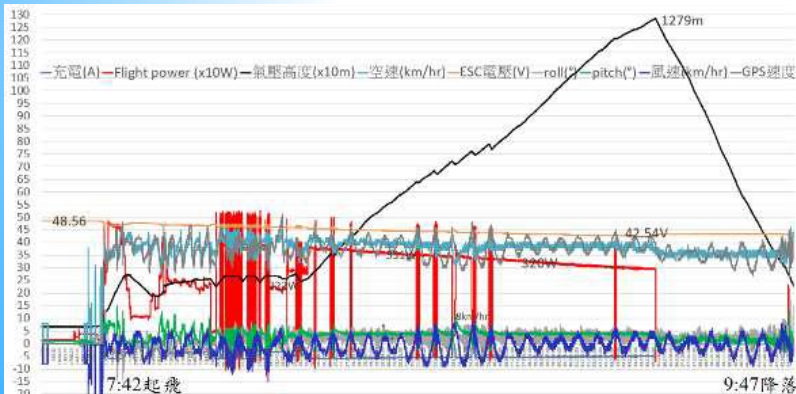
# 5m翼展太陽能無人機製作整測與試飛

[\(749\) Solar-powered UAV set 22 hours flight record by NFU. - YouTube](#)



# 10m翼展太陽能無人機整測與試飛

- 屏東賽嘉與恆春機場



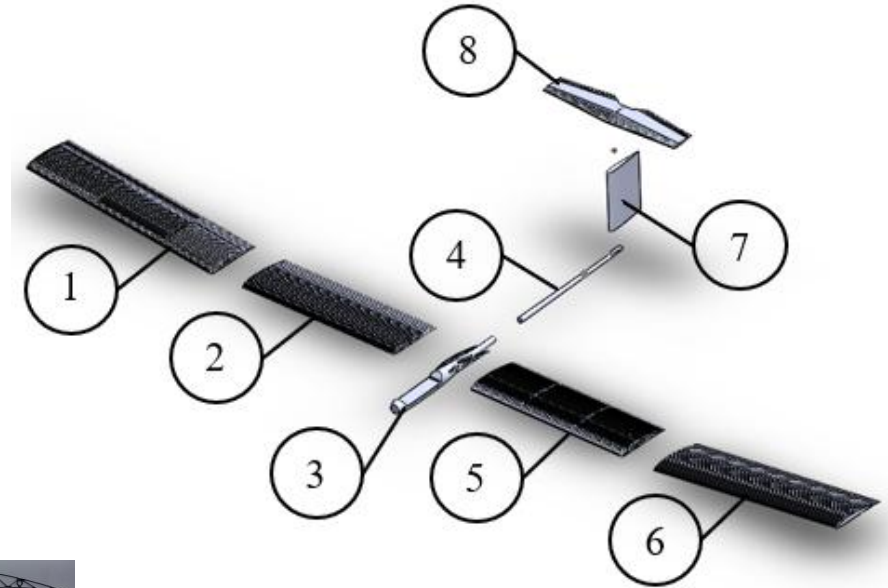
# 複材製造

After the successful flight, the entire airframe will be made of composite materials.

Wing	Parts : 1, 2, 5, 6 Material : solar panel(up skin) carbon fiber(lower skin) Process : Hand-laminate and autoclave
------	---

Fuselage	Parts : 3, 4 Material : carbon fiber Process : dewaxing(front) blow bag(back)
----------	--

Tail	Parts : 7, 8 Material : carbon fiber Process : Autoclave
------	--

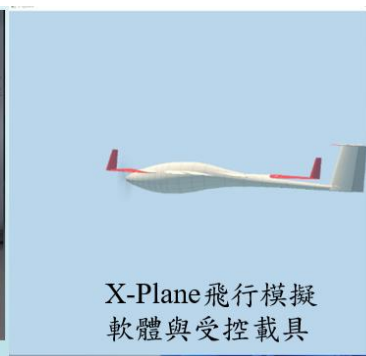
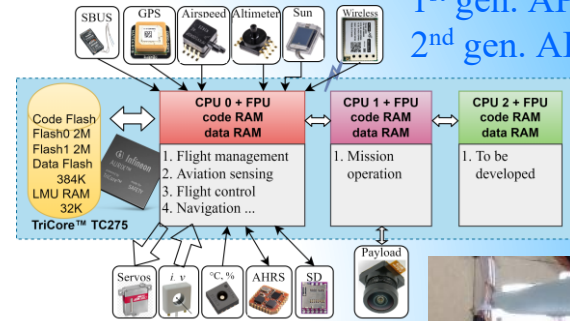


# Autonomous flight system & HIL

Microhard  
up/ down  
link



1<sup>st</sup> gen. AP built in 2008  
2<sup>nd</sup> gen. AP built in 2021



3 Pr solar panel sensors



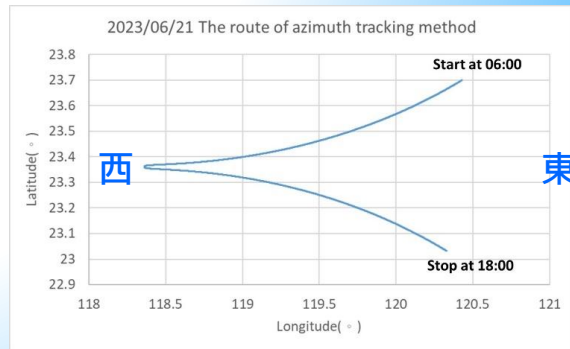
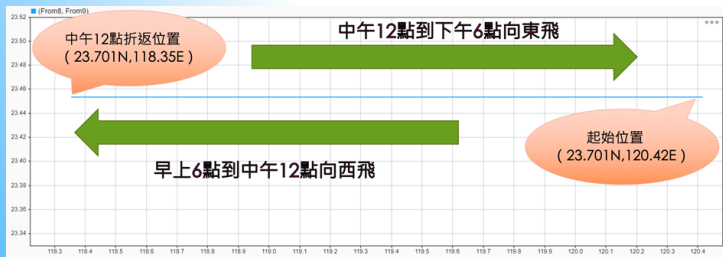
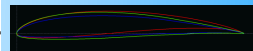
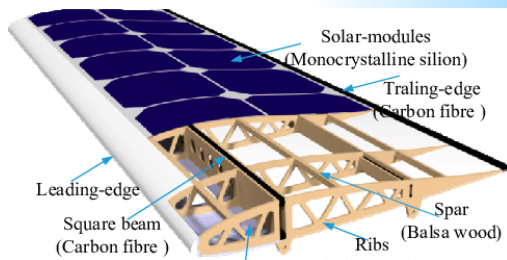
# 太陽能無人機飛行與發電的HIL模擬系統(2)

5米太陽能飛機

Simulation Solar Power Generation (Wh)

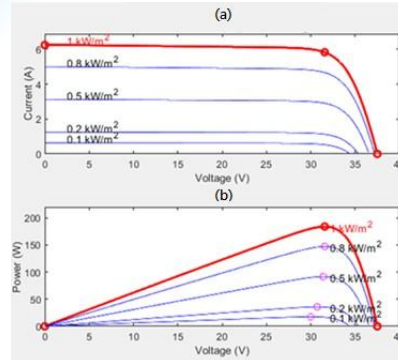
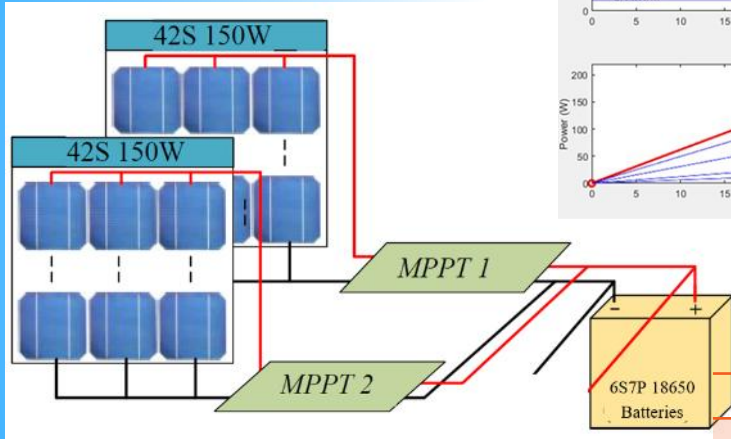
Flying keeps	Spring equinox	Summer solstice	Autumna 1 equinox	Winter solstice
East	1476	1743	1449	852
West	1544	1817	<b>1517</b>	892
South	1504	1785	1475	854
North	1520	1777	1494	889
Southwest	1563	<b>1866</b>	1502	873
Northwest	<b>1575</b>	1860	1515	<b>899</b>
1km Circle	1509	1836	1482	872

追蹤太陽方位角飛行模式：  
透過太陽運行模型計算太陽方位角來調整飛機航向角。

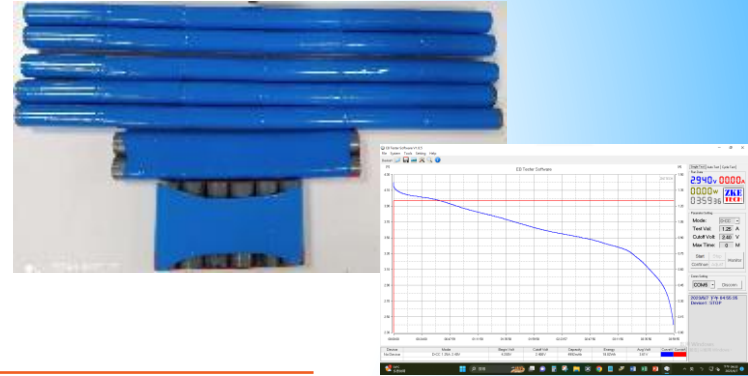


# Solar power system

Cell: **Sunpower C60**  
( $200\text{W}/\text{m}^2$ )



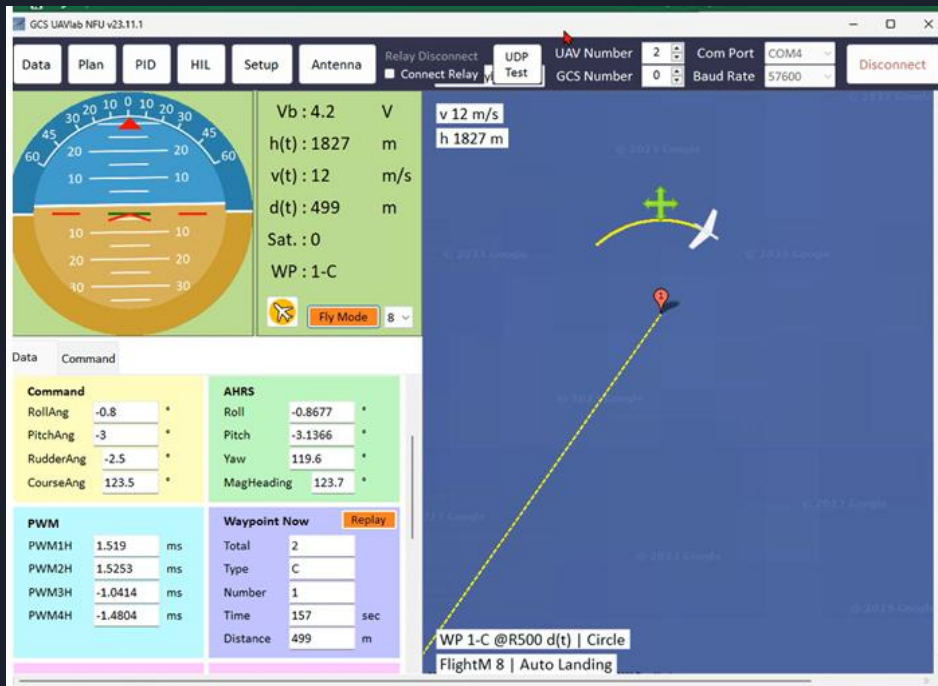
Battery: **LG 21700**  
( $250\text{ Wh}/\text{kg}$ )



Items	C60 Specification
material	Monocrystalline Si
efficiency	21.8%
$V_{mpp}$	0.574V
$I_{mpp}$	5.83A
$P_{mpp}$	3.34W/cell(-0.32%/°C)
Physical	12.5x12.5cm <sup>2</sup> , 6.5g

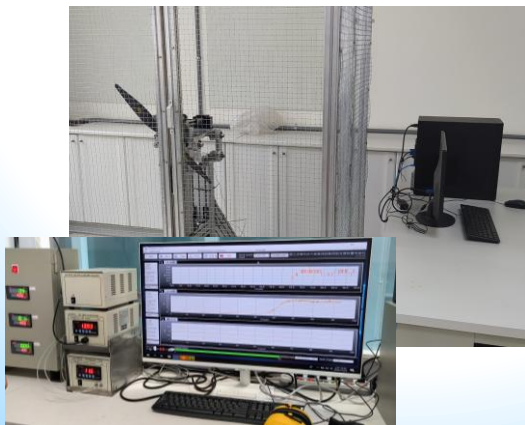
電池品牌	Size	mAh	V	g	Wh/kg	Wh
Samsung	21700	5000	4	69	260.87	18
Panasonic	18650	3550	4	48	269.05	12.78
Samsung	18650	3600	4	48	270	12.96
LG	18650	3600	4	48	268.88	12.96
Panasonic	18650	3400	4	46	266.09	12.24
LG	18650	3500	4	46	273.91	12.6
LG	21700	5000	4	70	257.14	18
Panasonic	21700	4800	4	68	254.12	17.28

# 全天候地面智慧飛行管理系統



AI監飛和警示系統

# 虎科大執行教育部無人機基地計畫檢測能量



# 國內發展HALE高空平台的瓶頸與對策

項次	HALE技術盤點	國內水準與策略
1	對流層和平流層氣象預報	(無)中型太陽能無人機探測對流平流層一年
2	平流層空域管理辦法	(無)尚未討論(介於航空法與太空法間的空域)
3	(大型)高空平台長滯空飛行任務規劃與操作	(無)以中型太陽能無人機執行氣象探空任務
4	稀薄氣體空氣動力學(飛機設計和推進系統)	(部分)氣動力模擬後以中型太陽能無人機驗證
5	高升阻比大型飛機與輕韌結構設計分析	(部分)氣動力和流固分析多年經驗
6	輕量化飛機製造工藝(減重)	(部分)已建立50~60%複材製造經驗
7	輕質高效率太陽能機翼複材製造技術	(部分)已建立40~50%之製造經驗
8	低壓低溫環境之材料與製造技術	(有)以高空無人機探空1年或藉助TASA經驗
9	長滯空自主飛行與電能管理系統	(部分)使用閉源飛控系統
10	能量密度400Wh/kg以上儲能電池	(無)TASA有外購經驗
11	高效率太陽能發電系統	(有)30%,700W/kg和250W/m <sup>2</sup> ↑太陽能模組
12	地球觀測(高空相機與圖傳)	(部分)需克服真空和低溫
13	網路通訊酬載系統	(少)需克服重量、低功耗和指向性

# Technological challenges(1)

- 可靠性和低溫元件，**電子元件**和設備的性能受到溫度的極大影響，溫度可降至 $-90^{\circ}\text{C}$ 。金屬在低溫下的電導率顯著降低，電阻隨著溫度的降低而升高，電子元件上會發生熱應力，並可能導致元件損壞和故障。
- 在**低溫和真空下電池**電解質中離子間的內阻增加容量降低。在極低溫下，如果沒有隔熱罩的保護，電池可能會停止工作。
- 電池放電的最低溫度為 $-20^{\circ}\text{C}$ ，充電為 $0^{\circ}\text{C}$ 。但是，建議建立一個溫度高於 $0^{\circ}\text{C}$ 的熱管理系統。最高工作溫度約為 $50^{\circ}\text{C}$ 。

## Technological challenges(2)

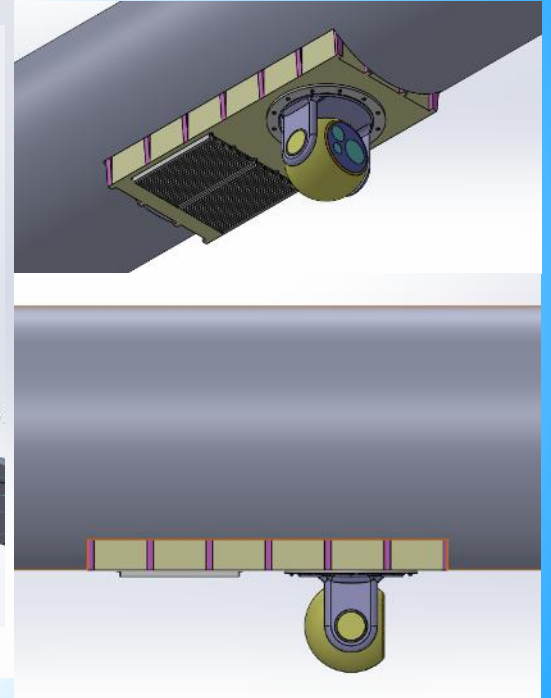
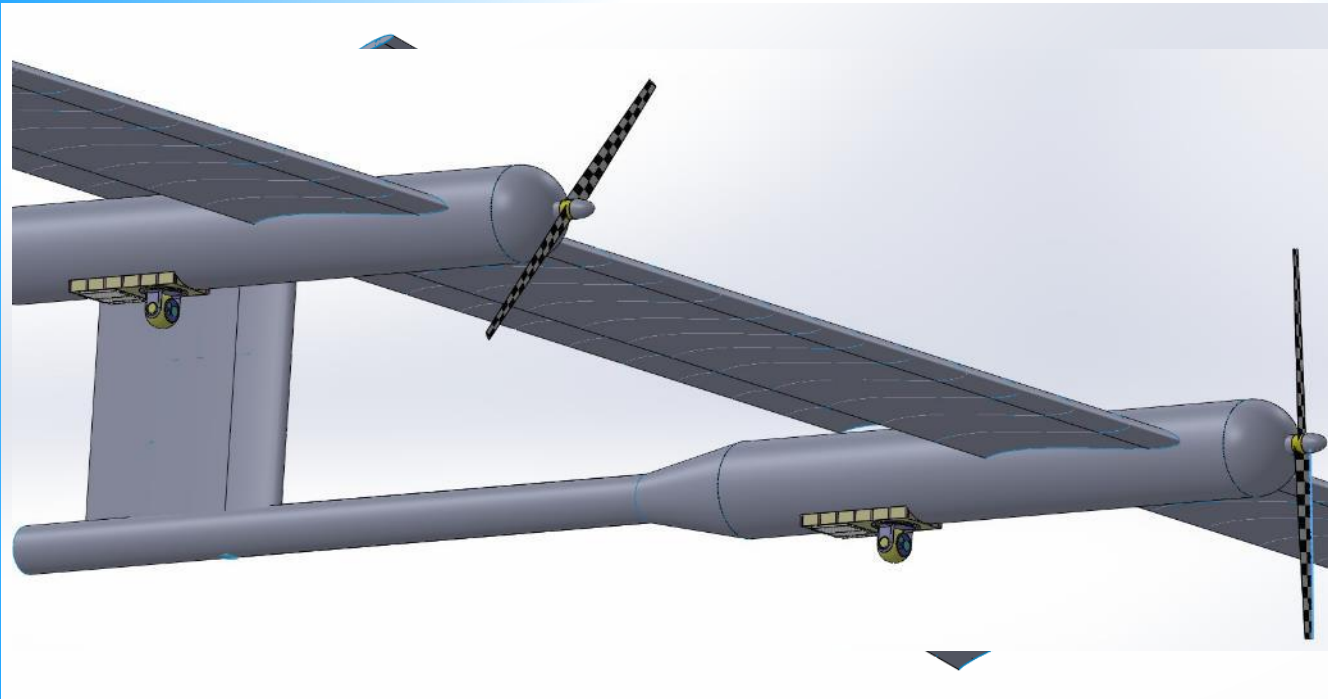
- **結構材料**必須仔細選擇，以承受平流層的低溫。某些材料在**低溫下可能會變脆**和斷裂(例如，塑膠和金屬部件)，或者它們可能會經歷熱膨脹和收縮，從而導致機械故障（例如，複合材料）。因此須對結構進行設計和測試證明低溫正常工作。
- **低溫下潤滑劑**會變得粘稠甚至固體。將增機械部件磨損。
- **熱管理**：敏感元件必須保持在適當的溫度下，以防止損壞和故障。也須電子設備或其他元件產生過多熱量之**散熱**防過熱。
- 為了應對這些挑戰，**HAPS**設計人員必須仔細考慮其系統中使用的材料和元件，並制定適當的熱管理策略。

## Technological challenges(3)

- 缺乏在平流層上空協同操作的認證要求和適當的空中交通管理規則。第一批在2025年監管沙箱開始，而整體**監管框架**在2030年之前。
- 展望未來到2025年，HAPS可能會在**歐盟**提供其首個服務和特定批准的法規，同時改善技術設計和性能。從**2025年到2030年**，隨著**營運平台數量的增加**和更多公司和類型的HAPS進入市場，HAPS會迅速擴大規模。
- **2030年後**，市場結構應已到位，並有**適當的監管**，這將導致運營**HAPS呈指數級增長**，以滿足對HAPS服務和應用的高需求。一般而言，**平流層空域管理**可能限制在役營運平台的總數，而不是滿足HAPS平臺的需求。
- 平流層環境帶來了巨大的工程挑戰。然而，**附加價值和市場潛力**促使工業參與者投資數百萬歐元開發HAPS，從而**打開了平流層大門**，為歐盟開關可能性與內部安全相關的生態系統來利用該技術和提供明確的附加價值。

# 國內發展規劃建議

# 曾經的需求



# 可行的里程碑

總結：1<sup>st</sup>年飛到12km之探空、2<sup>nd</sup>年飛到20km和10hr+滯空。3<sup>rd</sup>~4<sup>th</sup>年攜中繼站飛到18~22km滯空24hr+(翼展約40m)。

	第一年114年	第二年115年	第三年116年	第四年117年
國際合作	與國外具HALE載台設計經驗的公司，以5kg/80W之通訊酬載規格和連續飛行24小時以上進行 <b>共同設計</b> 平流層太陽能飛機載台。	與國外具HALE載台設計經驗的公司，以5kg/80W之通訊酬載規格和連續飛行24小時以上進行 <b>共同製造</b> 平流層太陽能飛機載台1架。	單機 <b>試飛與任務操作</b> 國外共同研製的HALE平流層太陽能飛機和通訊酬載性能測試；共同製造平流層太陽能飛機載台2架。	<b>多機試飛與任務操作</b> 國外共同研製的HALE平流層太陽能飛機和通訊酬載任務執行。
自製	研製與試飛2台太陽能 <b>探空載具</b> 爬升至台灣及臨海上空5~15km的 <b>對流層</b> 空域量測四季大氣氣流與太陽能發電數據資料紀錄與即時傳輸並滯空至少8小時。	研製與試飛2台太陽能 <b>探空載具</b> 爬升至台灣及臨海上空15~20km的 <b>平流層</b> 空域進行四季環境、大氣與太陽能發電數據資料紀錄與即時傳輸並滯空至少10小時。	研製和試飛1台HALE <b>平流層</b> 太陽能飛機載台，以5kg/80W之通訊酬載規格和連續飛行15小時以上。	研製和試飛1台HALE <b>平流層</b> 太陽能飛機載台，以7kg/100W之通訊酬載規格和連續飛行24小時以上。

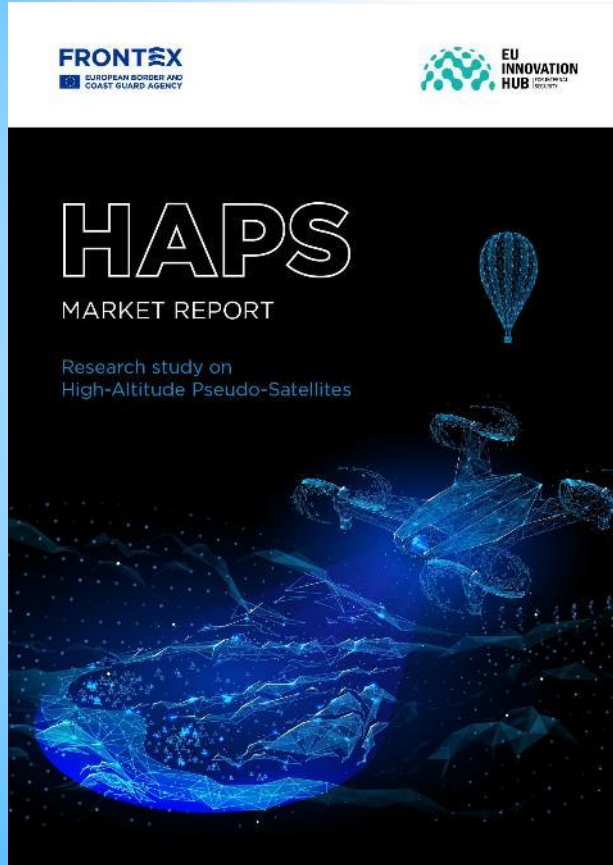
# 附錄-HAPS Ecosystem

HAPS製造商	
	HALE UAV
	Airbus Zephyr/AALTO
	HAPS Mobile (SoftBank+AeroVironment)
	<b>Solaris Suborbital</b> (巴基斯坦)
	Stratospheric platforms(英國)
Payload developers	
Airbus	
QinetiQ	Zephyr提供LIDAR有效載荷
Phase One	丹麥公司，專門從事高端數位中畫幅相機和成像系統
SoftBank	電信
其他	
國際通信衛星組織Intelsat	全球政府和商業客戶提供基於衛星的網路解決方案
University of York	高空平台應用中心

# HAPS聯盟

目的	與各國相關部門共同宣導HAPS的優勢，構建合作的HAPS生態系統，制定共同的产品規範，推動HAPS網路互操作性標準化。
描述	成立於2020年2月，彙集了行業參與者，致力於建立明確的法規、商業採用和互操作性通用標準。
主要機構	執行成員：Airbus、HAPSMobile、國際通信衛星公司、諾基亞公司 主要成員：Aerostar、AeroVironment、凱捷工程、愛立信、克勞斯、Hamdani、Sceye、德國電信、TonumusNeom。 普通成員：北領地(澳洲)、卡爾頓大學、DhruvaSpace、Gilat、Kea航空航太(New Zealand)、利物浦希望大學、Mynaric、NTTDocomo、Prismatic、UAVOS、SKY Perfect JSAT Corporation、SoftBank。 *支援者組是另一類相關但未包括在上面的成員
全球/區域	全球
工作組	航空工作群組、電信工作群組、行銷與傳播工作群組
Deliverables	致力於制定監管框架，並與電信和航空監管機構建立安全、非歧視的HAPS生態系統

# 歐盟Frontex HAPS Year 2023 reports



# 指正與交流

05-6315550、[hjlin@nfu.edu.tw](mailto:hjlin@nfu.edu.tw)