

# 風力發電技術與實務推廣教育培訓班


## 複合材料風力葉片疲勞壽命分析

研究生:賴文祥

指導教授:金大仁 教授

# 大綱

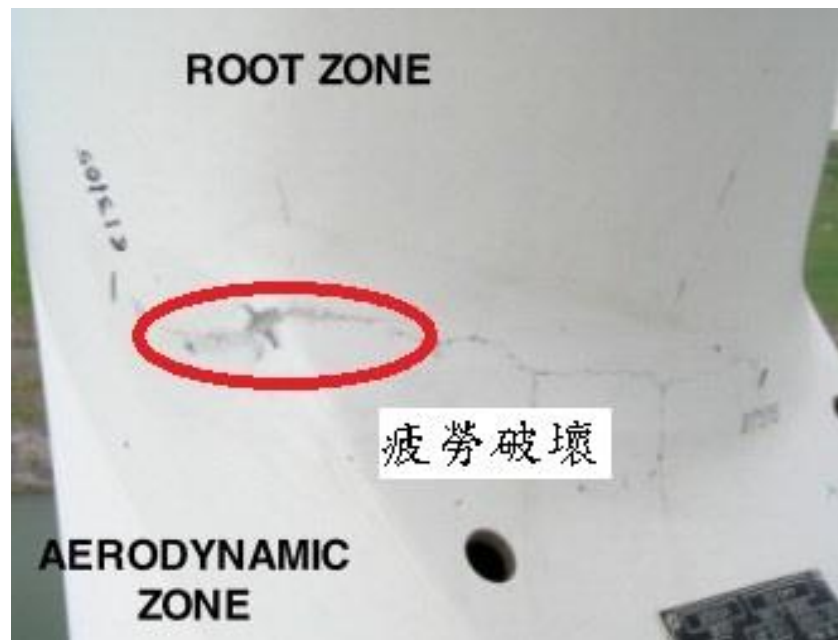
---

- ▶ 前言
  - ▶ 疲勞分析方法
  - ▶ 葉片疲勞損傷分析
  - ▶ 葉片有限元素模型
  - ▶ 疲勞分析實例
  - ▶ 複合材料材料疲勞實驗
  - ▶ 應變實驗
- 
- 

# 前言

---

- ▶ 複合材料葉片長期受風力負載，雖然風力負載未達到葉片破壞，但反覆的受力長時間下來會有疲勞破壞產生。

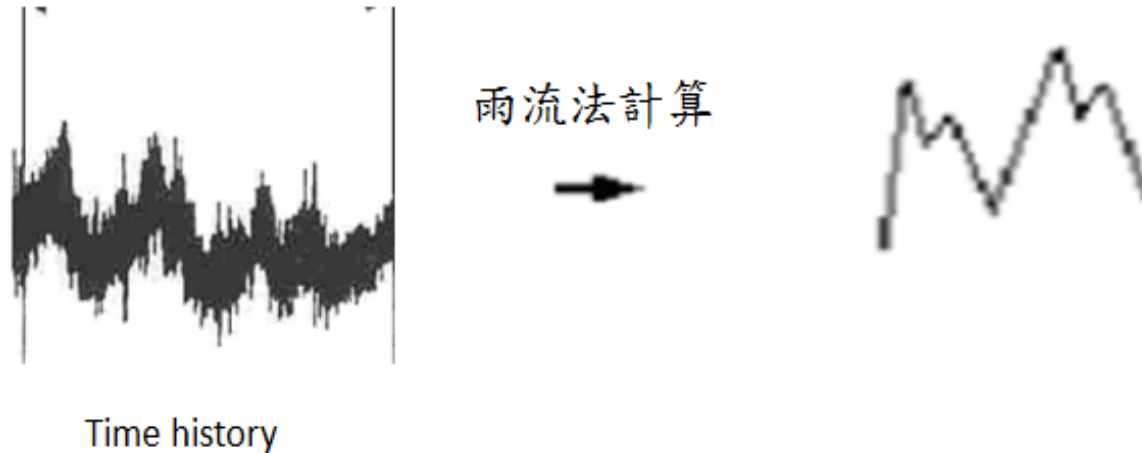


疲勞破壞已經是風力工程失敗造成系統失效的主要原因之一。

---

# 疲勞分析方法(一)-雨流法

---



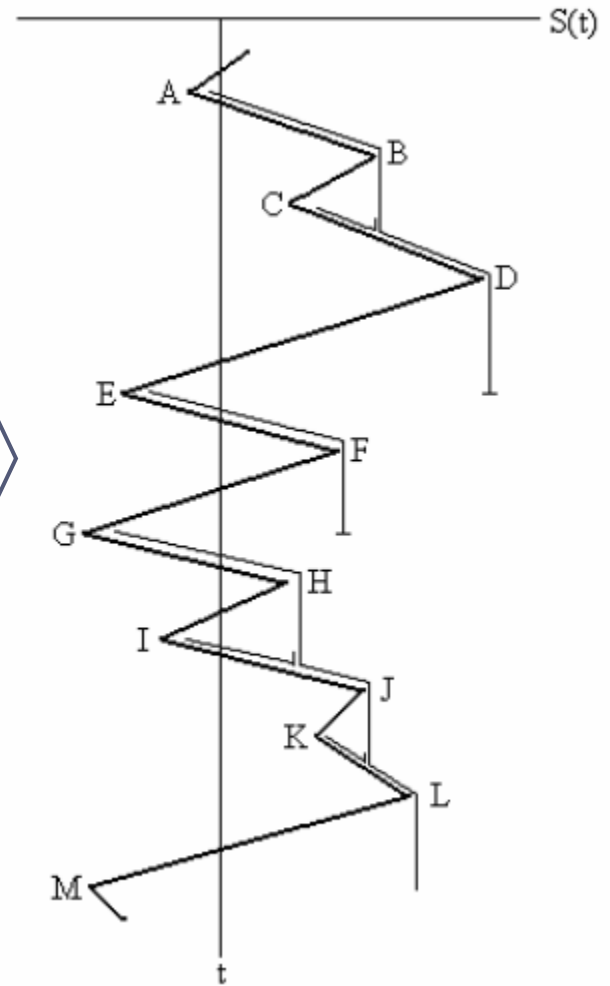
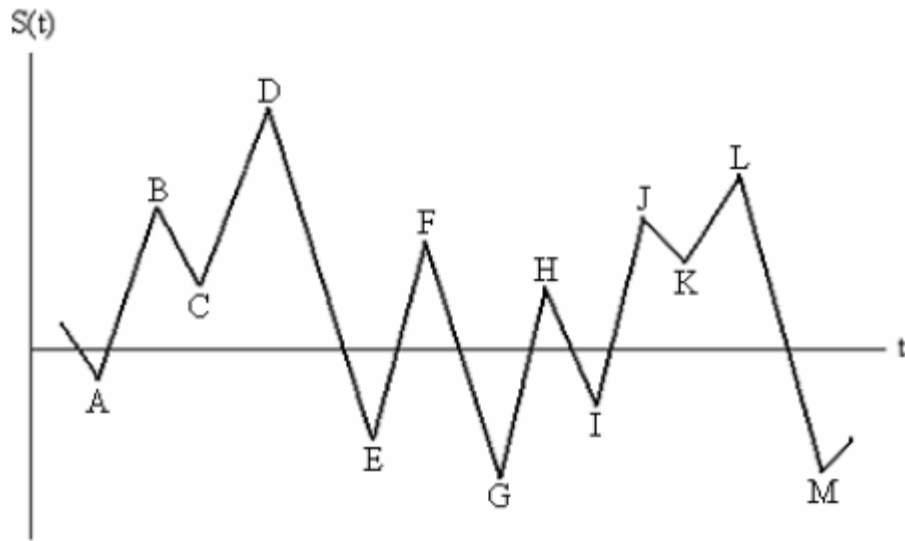
在做疲勞分析時，當受力為隨機不規則時，可以透過雨流計算方法將其應力譜分類成不同平均應力和不同振幅應力，將原始應力譜簡化

# 疲勞分析方法(一)-雨流法

---

- ▶ 雨流計算方法規則如下
  - ▶ 1. 雨流法是將負載頻譜圖轉九十度，時間變為垂直軸，像雨滴自每個轉折點順勢而下，然後依照下列規則形成雨流法的規則。
  - ▶ 2. 雨滴由一個波峰(波谷)流向另一個波峰(波谷)時，如果後者大於前者值，則停止雨流，此區間為其應力值，算為一個半週期(圖1-2)。
  - ▶ 3. 當雨滴流下時，遇到上一雨滴的路徑，雨流停止，此區間為其應力值，算為一個半週期(圖1-3)。
  - ▶ 4. 雨滴向左流為壓應力，雨滴向右流為拉應力。
  - ▶ 5. 一個半週期壓應力值與一個半週期拉應力值相同時，可合為一週期循環。
  - ▶ 最大應力加最小應力除以2為平均應力。
-

# 疲勞分析方法(一)-雨流法

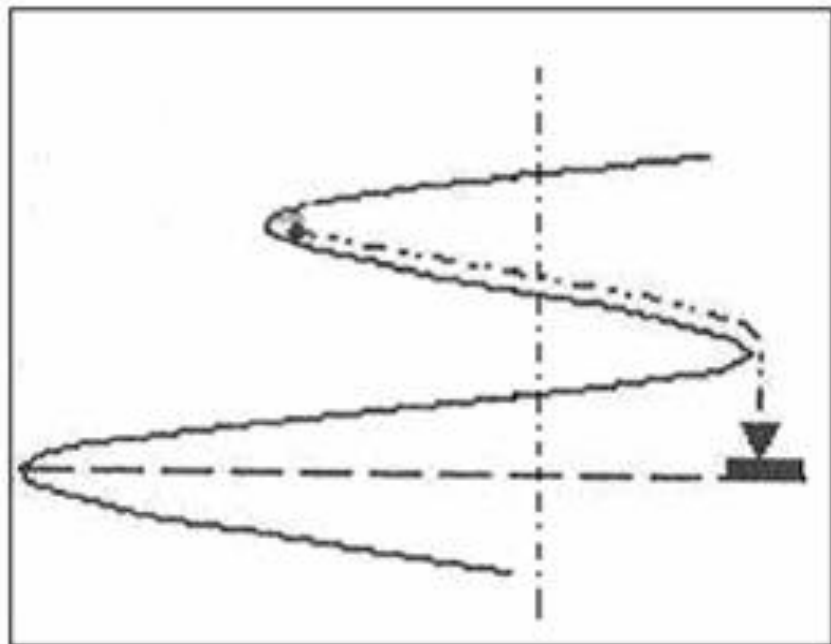


將負載-時間圖轉九十度

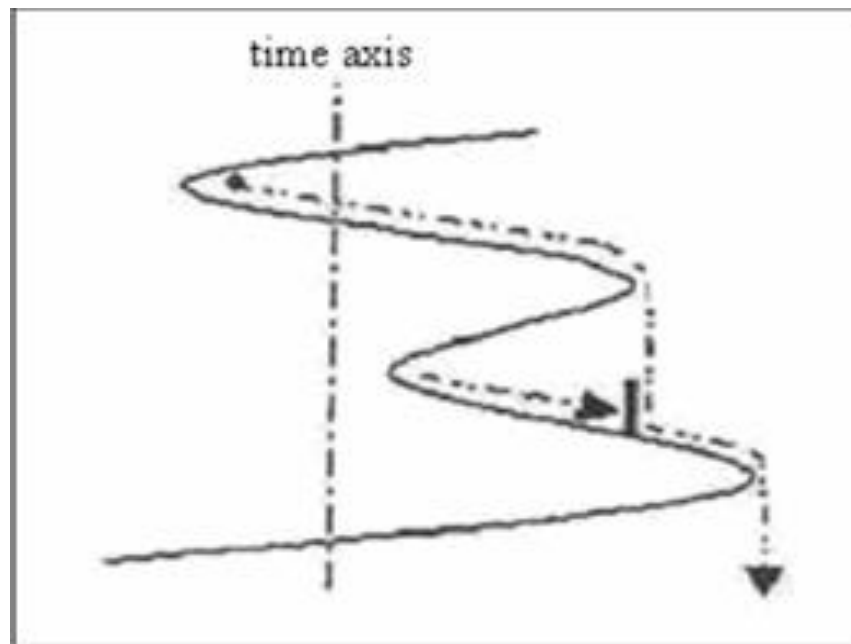


# 疲勞分析方法(一)-雨流法

---



(圖1-2)



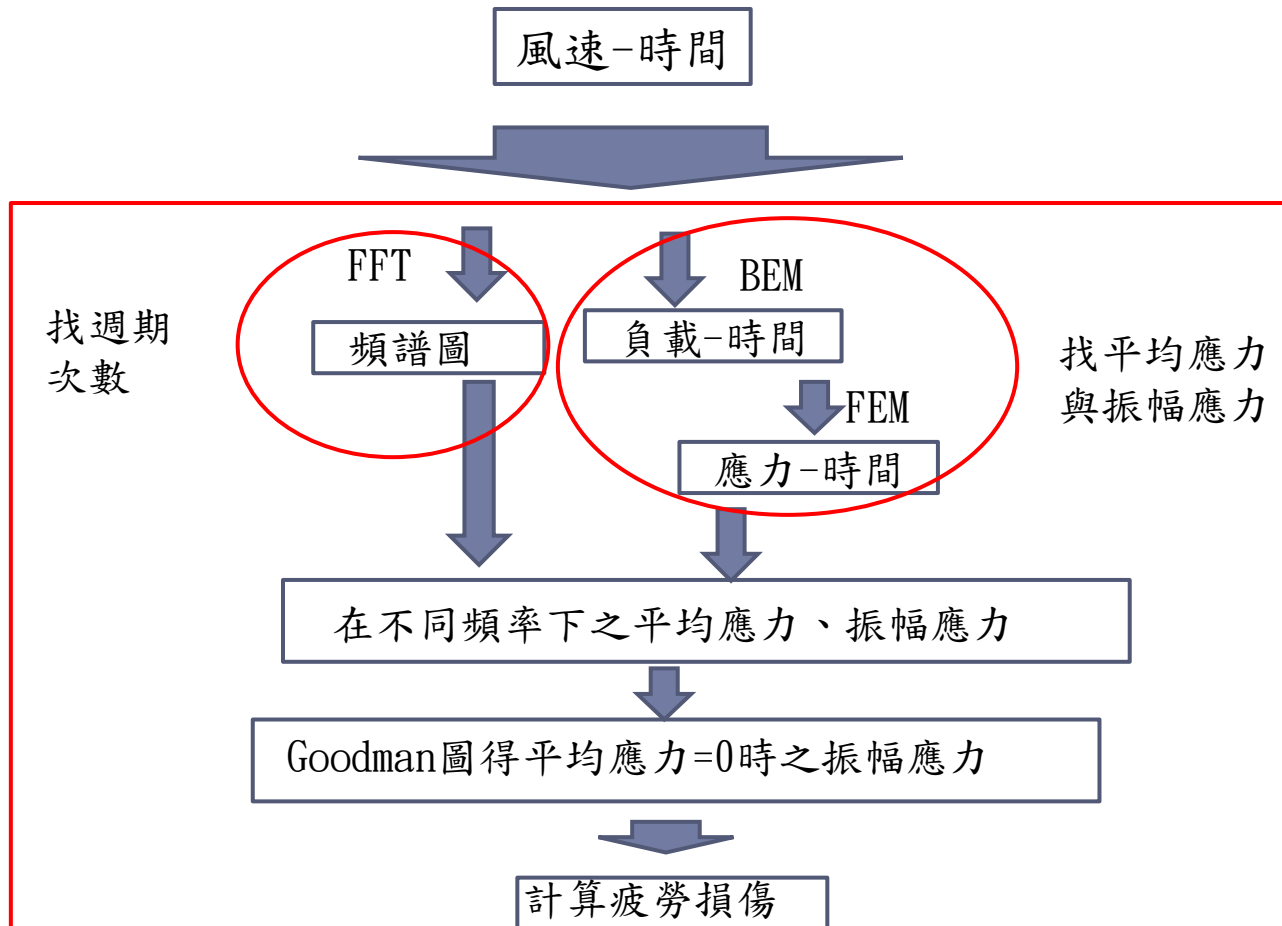
(圖1-3)

一個半週期壓應力值與一個半週期拉應力值相同時，可合為一週期循環

---



# 疲勞分析方法(二)-流程圖

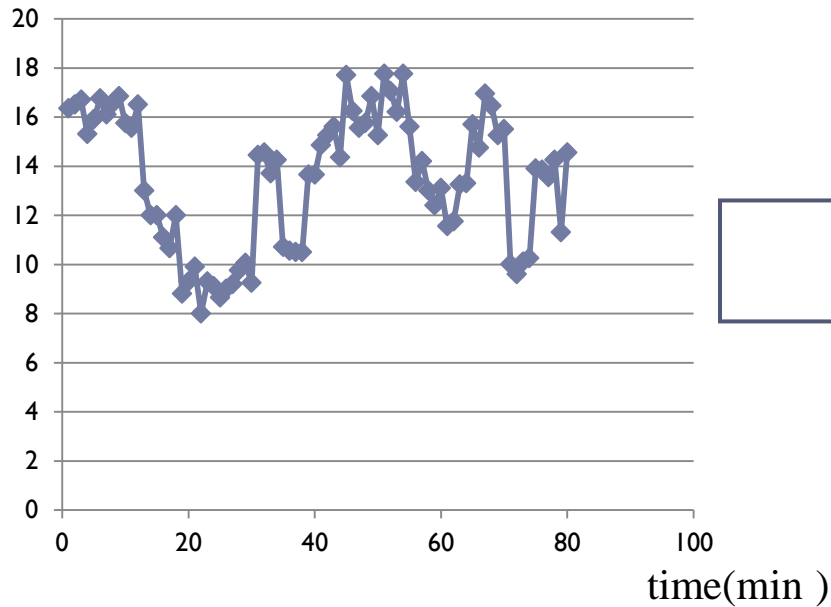




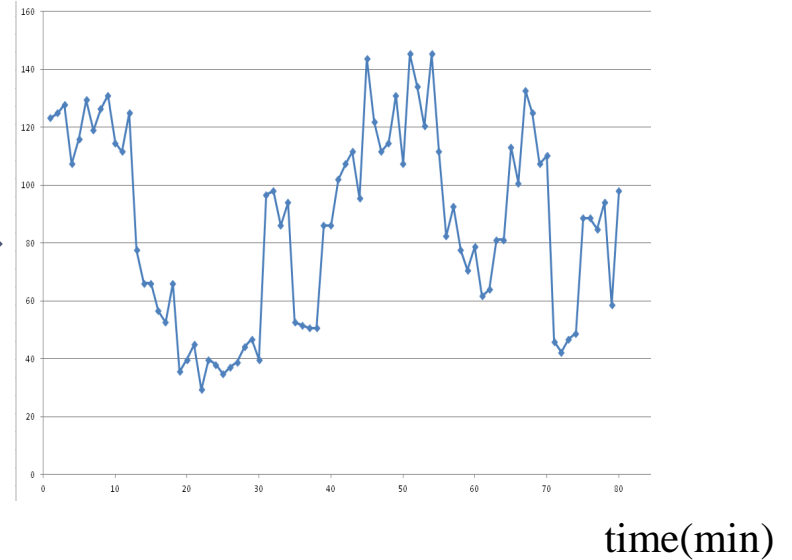
# 疲勞分析方法(二)-隨機風速-時間圖

風是隨機的，裡面包含很多不一樣的頻率

wind speed(m/s)



stress(MPa)



## 疲勞分析方法(二)-快速傅立葉轉換

---

將離散信號從時間域轉換到頻率域

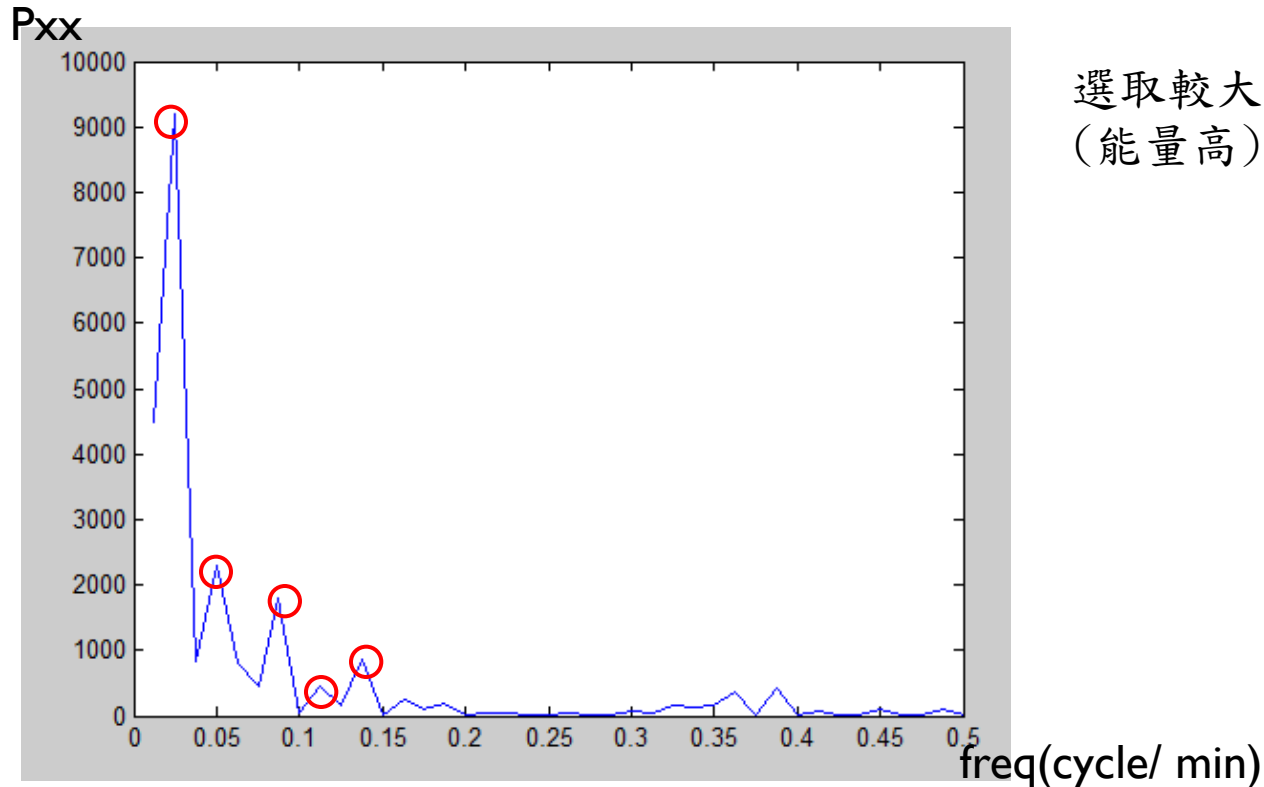
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-2\pi j k \left(\frac{n}{N}\right)} \quad , \quad 0 \leq k \leq N - 1$$

$x(n)$  為複數序列、 $N$  離散信號個數



## 疲勞分析方法(二)-快速複利葉轉換

將應力-時間圖透過快速複利葉轉換，將時間域轉頻率域，找出不同的頻率

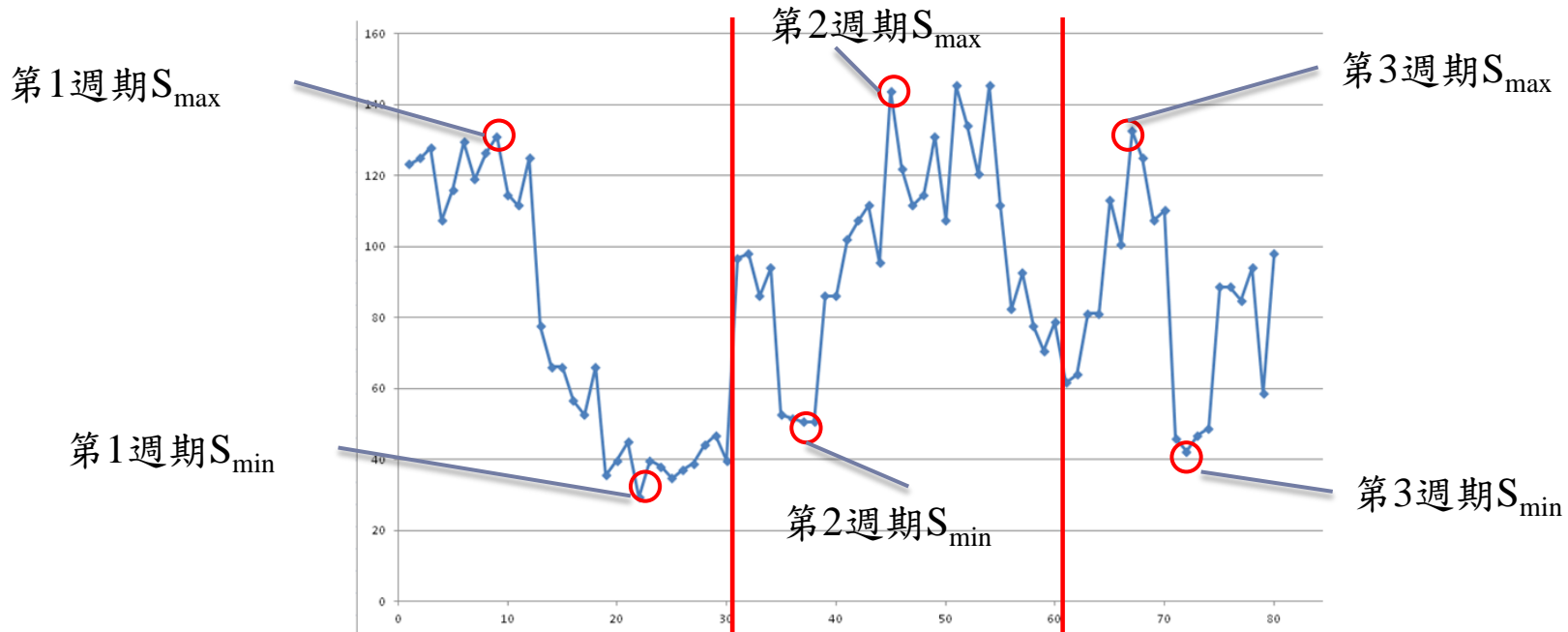


選取較大之峰值做分析  
(能量高)

經由頻譜圖可以快速找到週期次數  
週期次數=頻率\*總時間

# 疲勞分析方法(二)-疲勞應力

找出各個週期的最大值與最小值，求得平均應力與振幅應力



$$\text{平均應力} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$$

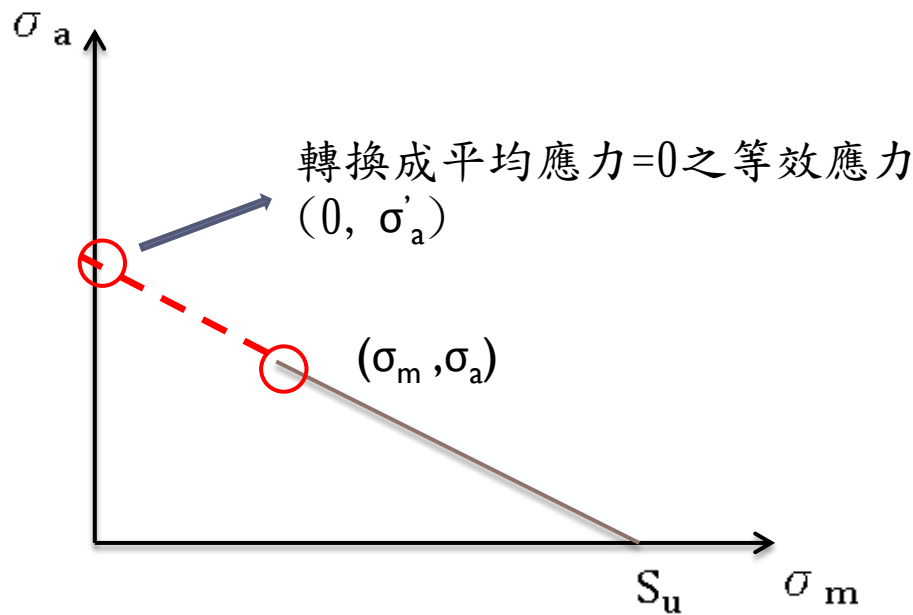
$$\text{振幅應力} = \frac{S_{max} - S_{min}}{2}$$

▶  $S_{max}$ :最大應力

$S_{min}$ :最小應力

# 疲勞分析方法(二)-Goodman diagram

因平均應力與振幅都不同，將平均應力統一為0



$$y = \frac{\sigma_a}{\sigma_m - S_u} (x - S_u)$$

$$x = 0 (\text{平均應力} = 0)$$

$$\sigma'_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_m - S_u} * (-S_u)$$

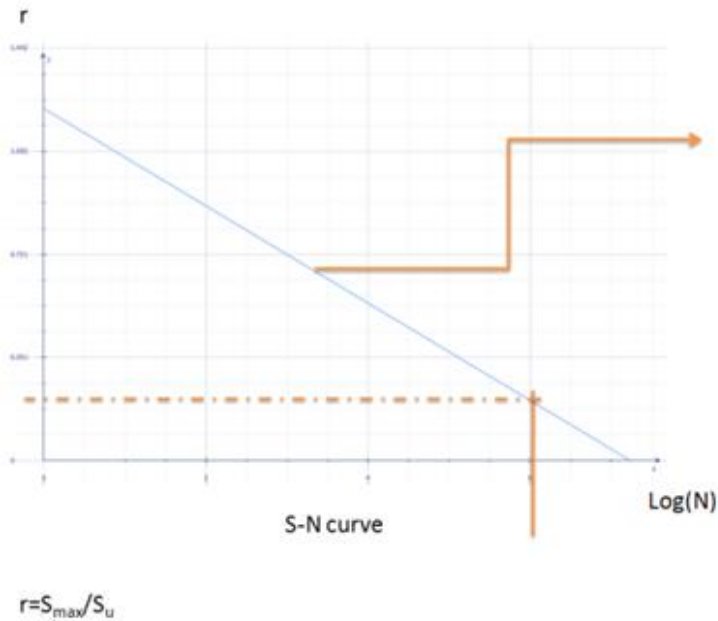
求的等效應力  $\sigma'_a$



$S_{max}$ : 最大應力     $\sigma_m$ : 平均應力     $S_u$ : 極限應力

$S_{min}$ : 最小應力     $\sigma_a$ : 振幅應力     $r$ : 應力比

# 疲勞分析方法(二)-疲勞極限



$$r = a + b \times \log(N)$$

當  $N=10^6$

$$r_{\text{limit}} = a + 6b$$

$$S_{\text{limit}} = r_{\text{limit}} S_u$$

由S-N曲線找出疲勞極限，疲勞極限以下應力不會造成損傷

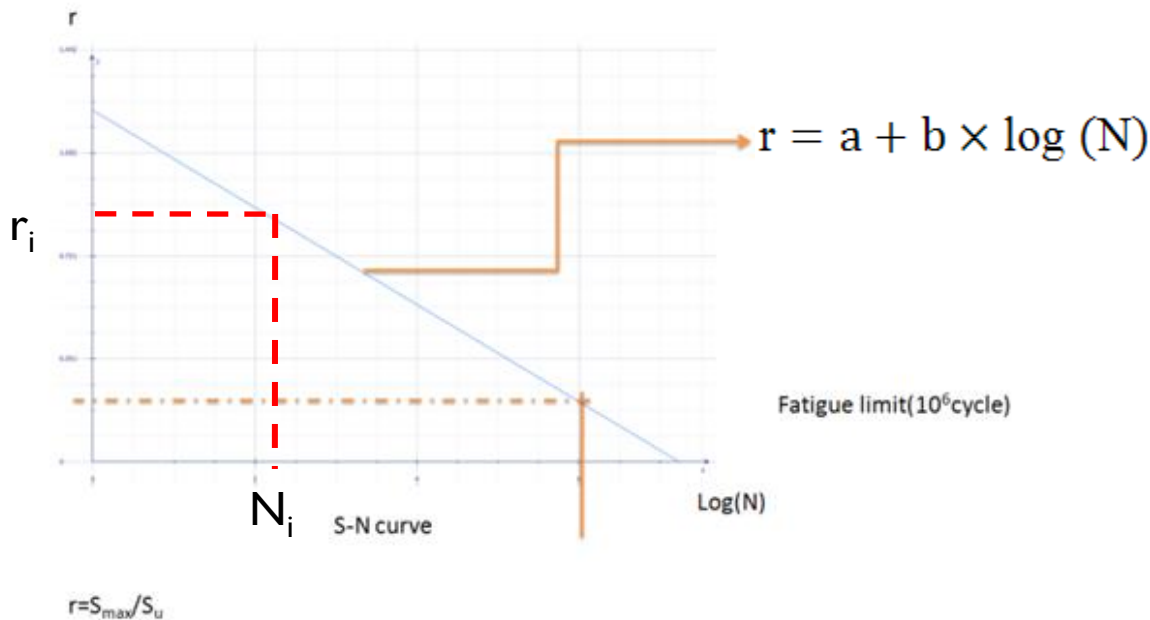
$$r_{\text{limit}} = \frac{S_{\text{limit}}}{S_u}$$

►  $r$ : 應力比  $S_u$ : 極限應力  $N$ : 疲勞壽命  $r_{\text{limit}}$ : 疲勞極限應力比  $S_{\text{limit}}$ : 疲勞極限應力

# 疲勞分析方法(二)-累積損傷模型Miner's rule

利用S-N曲線找出在應力比 $r_i$ 力下的壽命 $N_i$

Miner's rule計算疲勞損傷



$$N_i = 10^{\frac{r_i - a}{b}}$$

其中  $r_i = \frac{\sigma'_{ai}}{S_u}$

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

$r_i$ : 應力比、 $N_i$ :  $i$  應力位準疲勞壽命、 $a, b$  為常數

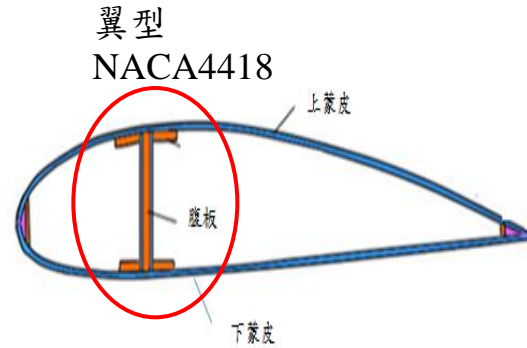
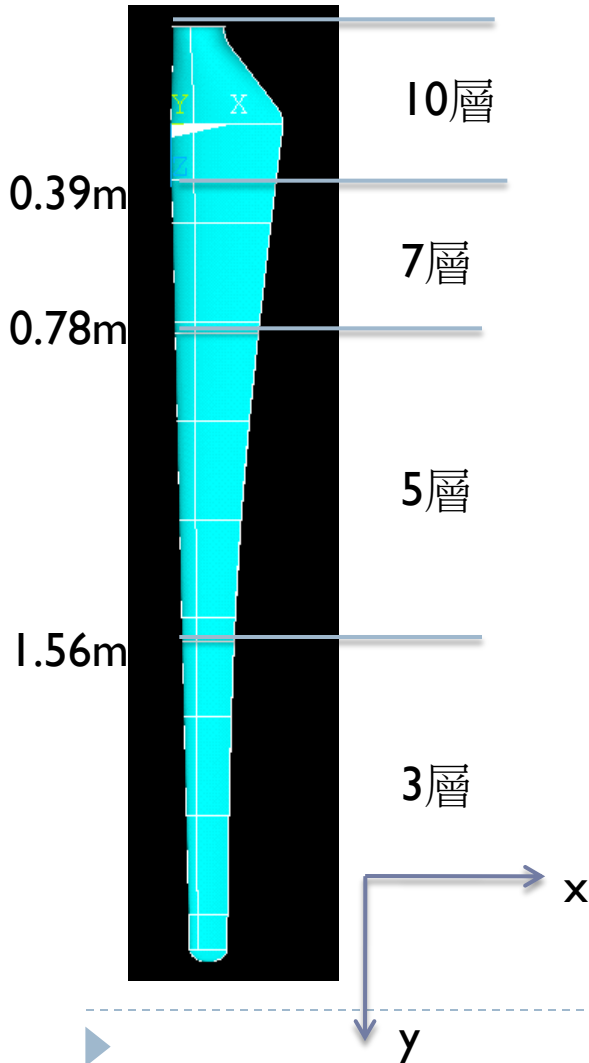
$\sigma'_{ai}$ :  $i$  應力位準的平均應力等於 0 之振幅應力

$N$ : 疲勞壽命

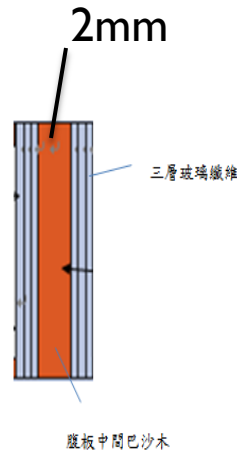
$D$ : 損壞數值

$n_i$ : 週期次數

# 葉片有限元素模型-葉片幾何模型



在氣動力中心上有中間支撐腹板，腹板兩旁有巴沙木卡槽



中間支撐腹板

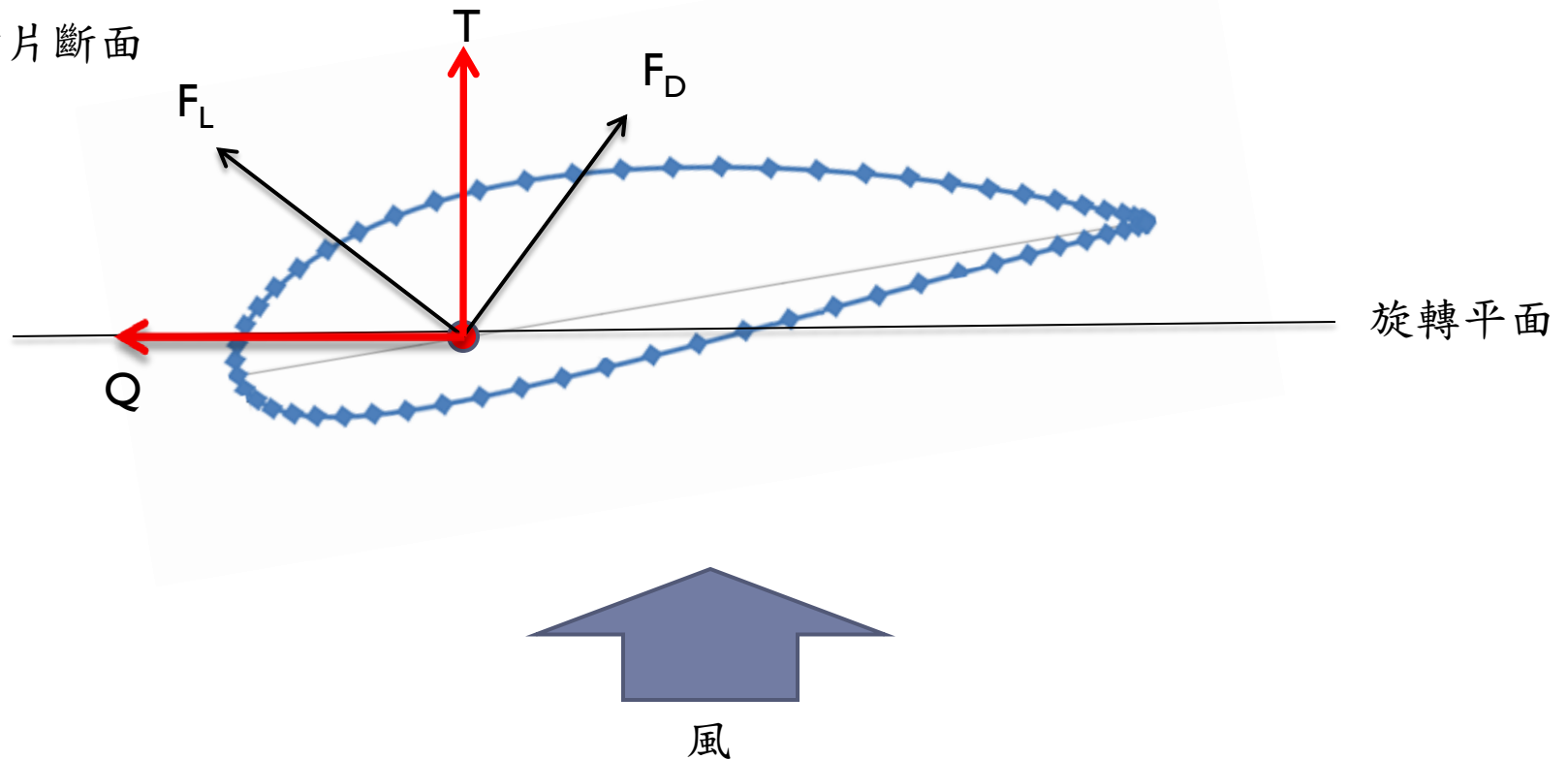
	玻璃纖維	巴沙木
Ex	20GPa	3.7GPa
Ey	20GPa	55MPa
Ez	3GPa	55MPa
Gxy	2.6GPa	50MPa
Gyz	2.6GPa	8.33MPa
Gxz	2.6GPa	50MPa
$\nu_{xy}$	0.15	0.02
$\nu_{yz}$	0.212	0.2
$\nu_{xz}$	0.212	0.02
D	3700kg/m <sup>3</sup>	300kg/m <sup>3</sup>



# 葉片有限元素模型-風力計算方式

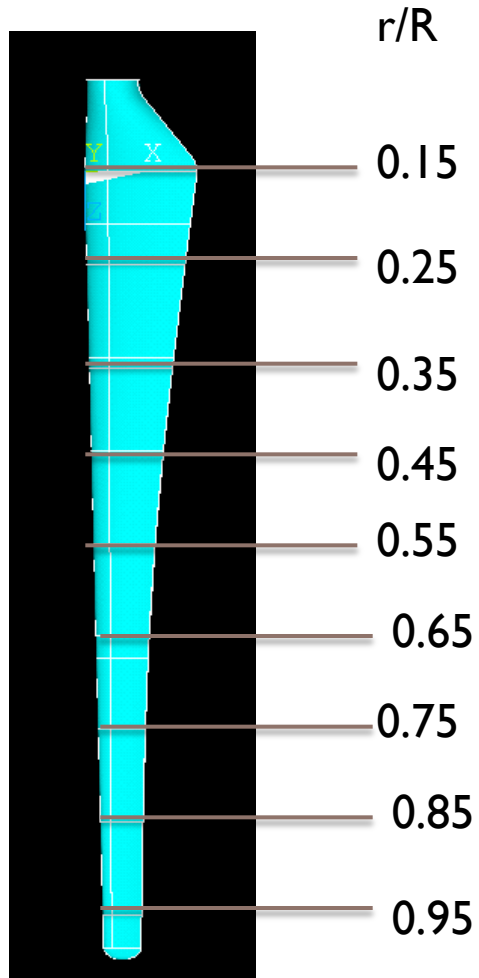
BEM(風速→負載)

葉片斷面

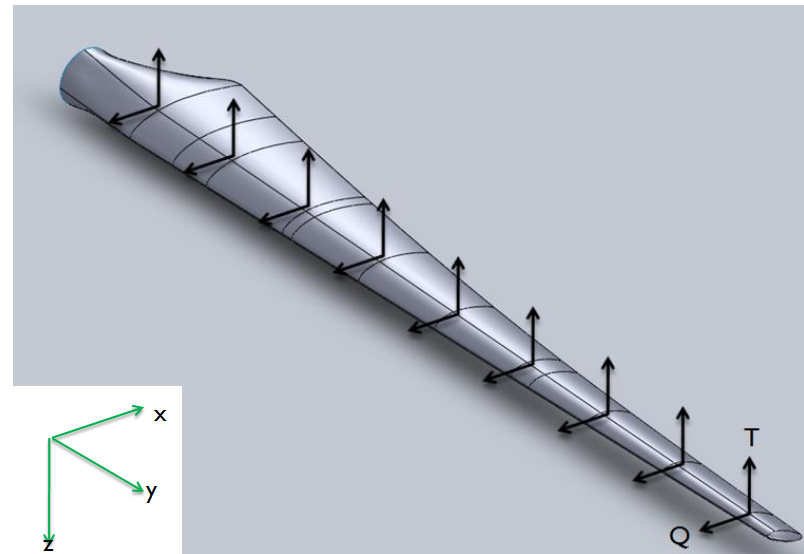


►  $F_L$ : 升力    $F_D$ : 阻力   T: 推力   Q: 扭力

# 葉片有限元素模型-邊界條件

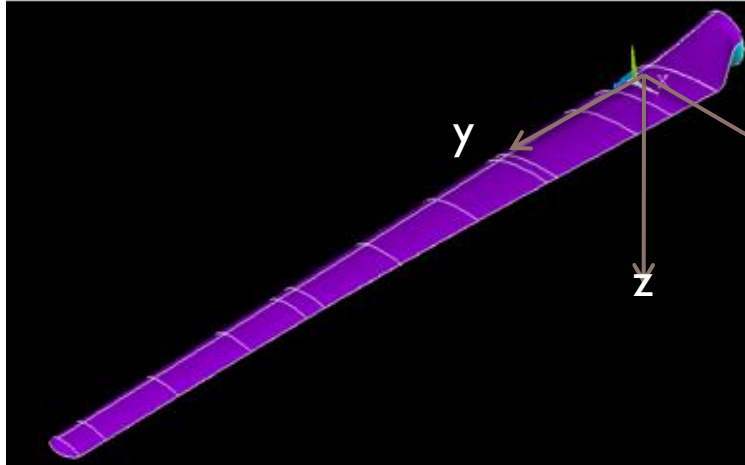


邊界條件: 葉片根部fix

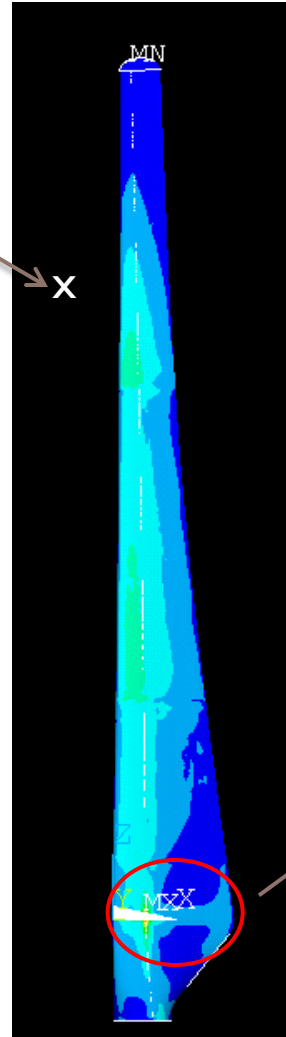


推力( $T$ ): - $z$ 方向  
扭力( $Q$ ): - $x$ 方向

# 葉片有限元素模型-風力負載分析

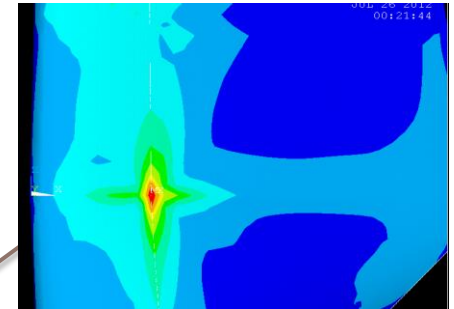


邊界條件:葉片根部fix



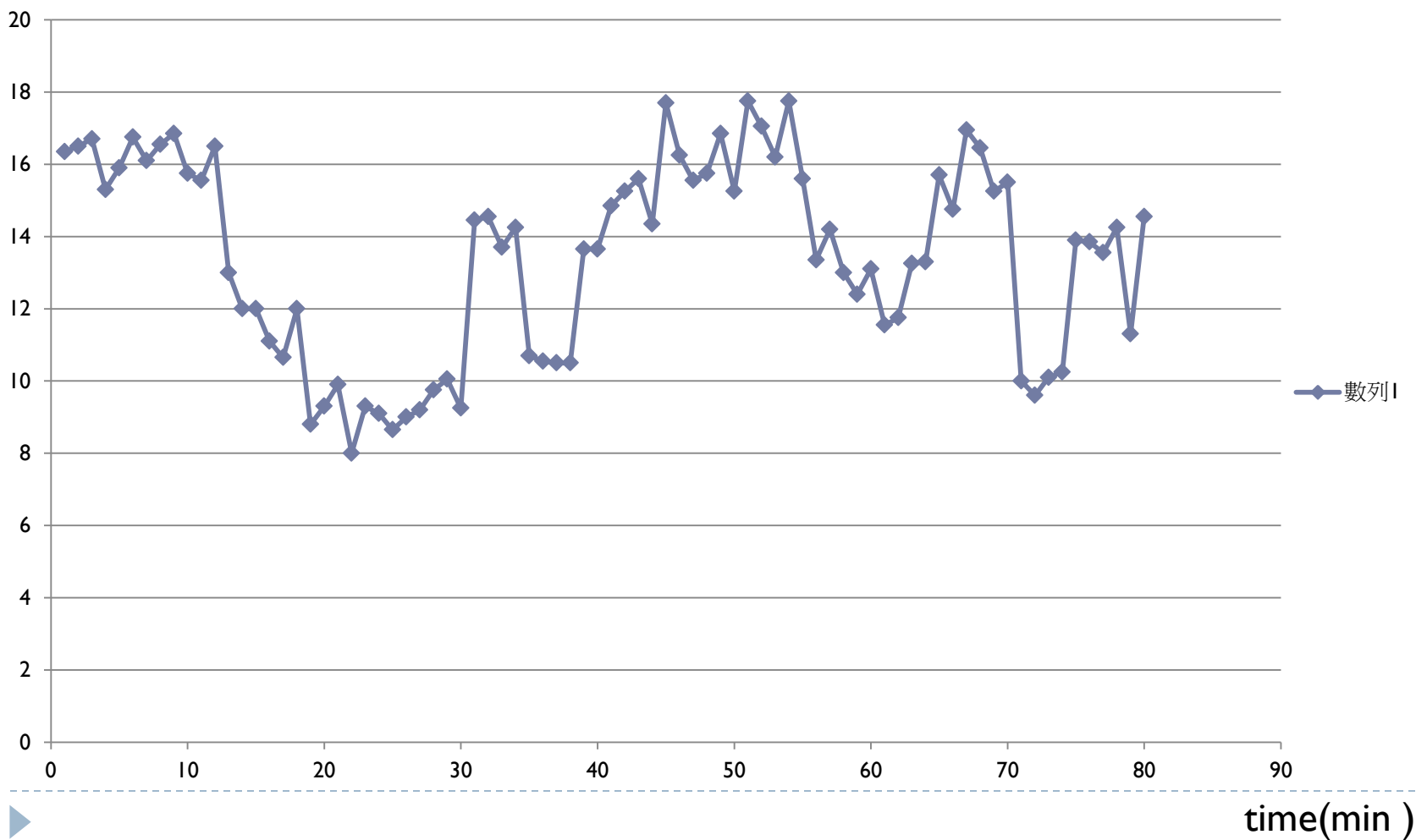
y方向應力

最大應力都發生在下蒙皮處  
對此處進行疲勞分析



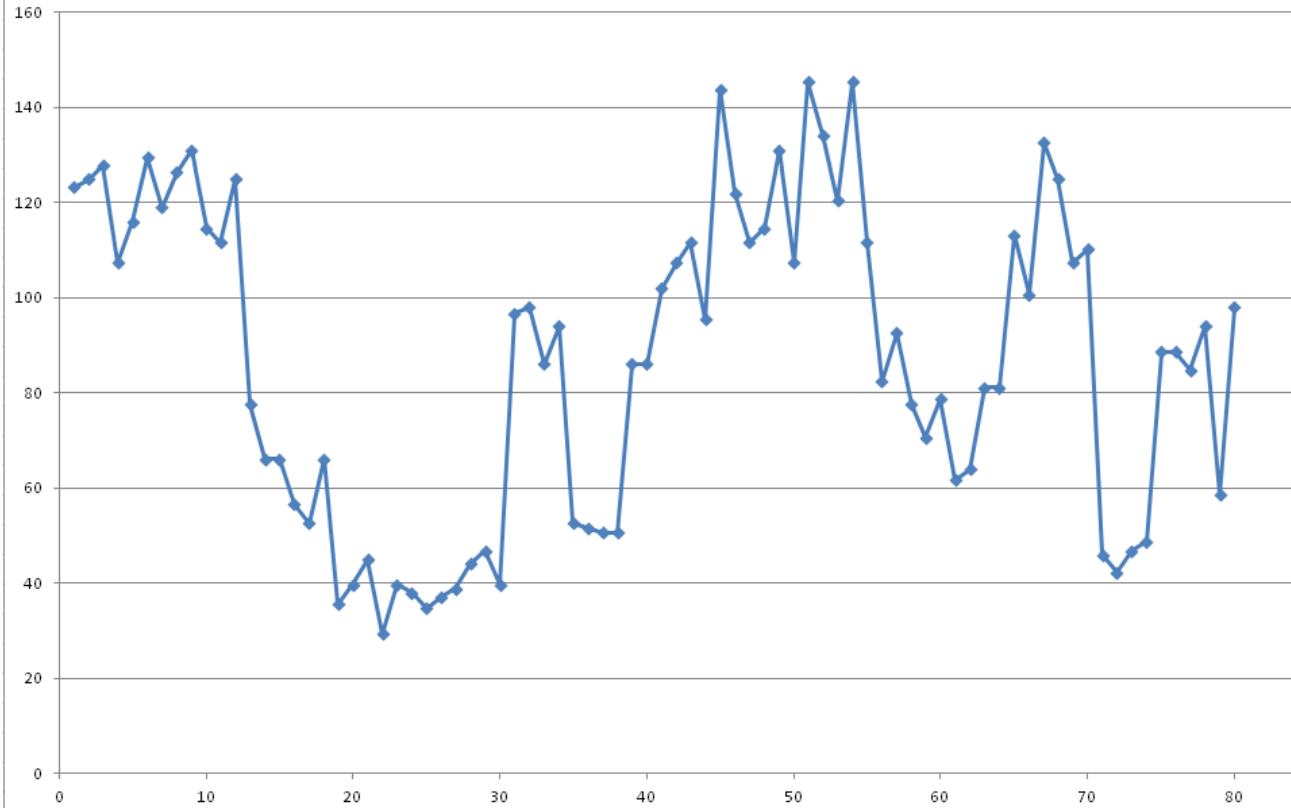
# 疲勞分析實例

wind speed(m/s)



# 疲勞分析實例-應力-時間圖

應力(MPa)



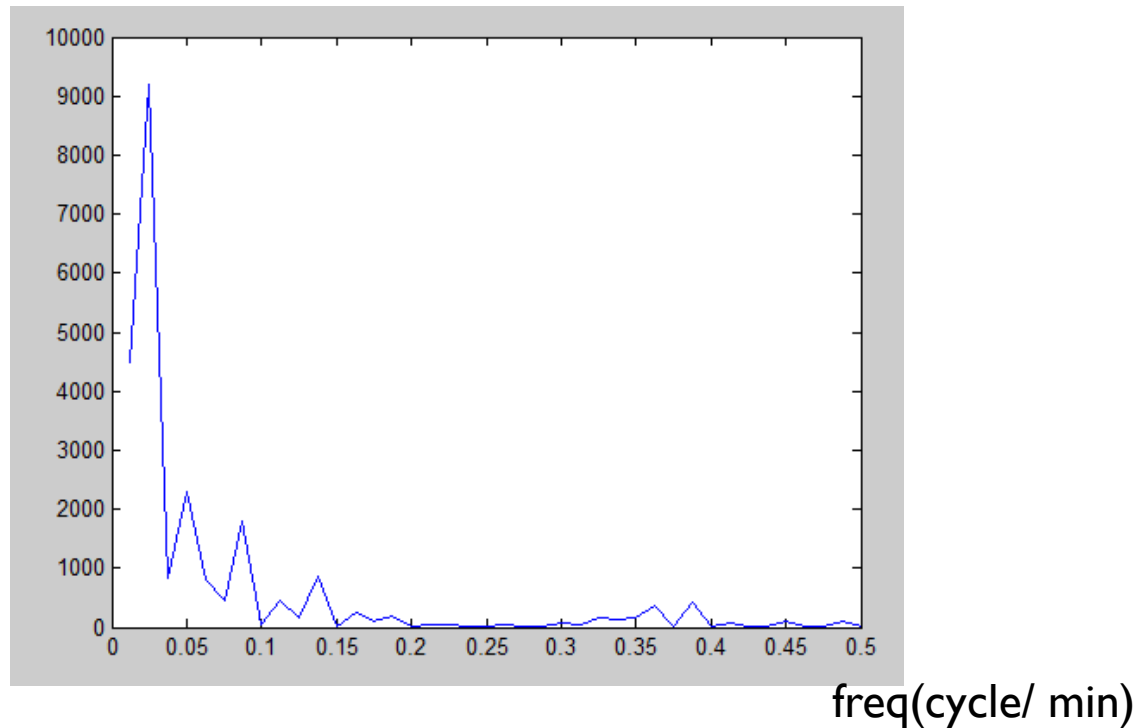
時間(min)



# 疲勞分析實例-PSD

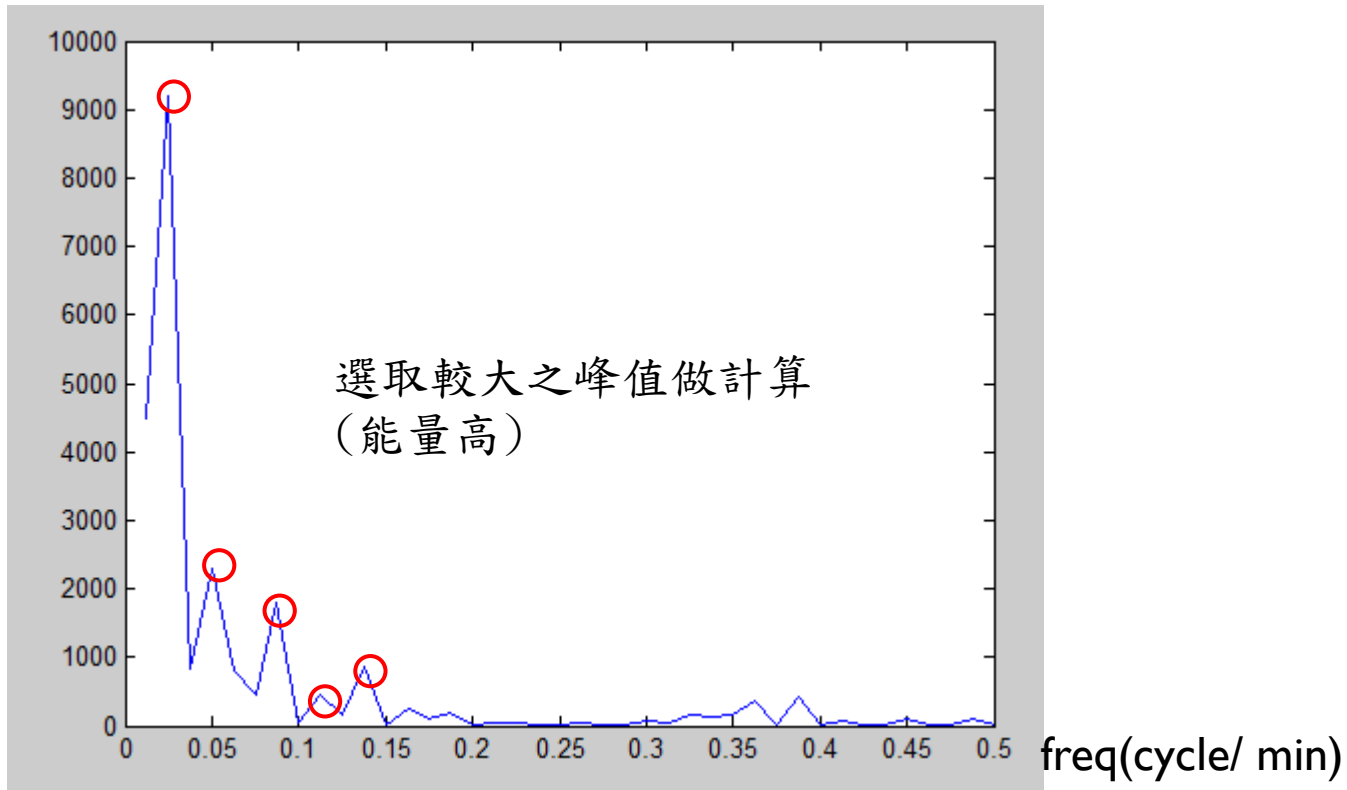
將應力-時間圖利用快速複利葉轉換，時間域轉頻率域

Pxx



# 疲勞分析實例- PSD

Pxx

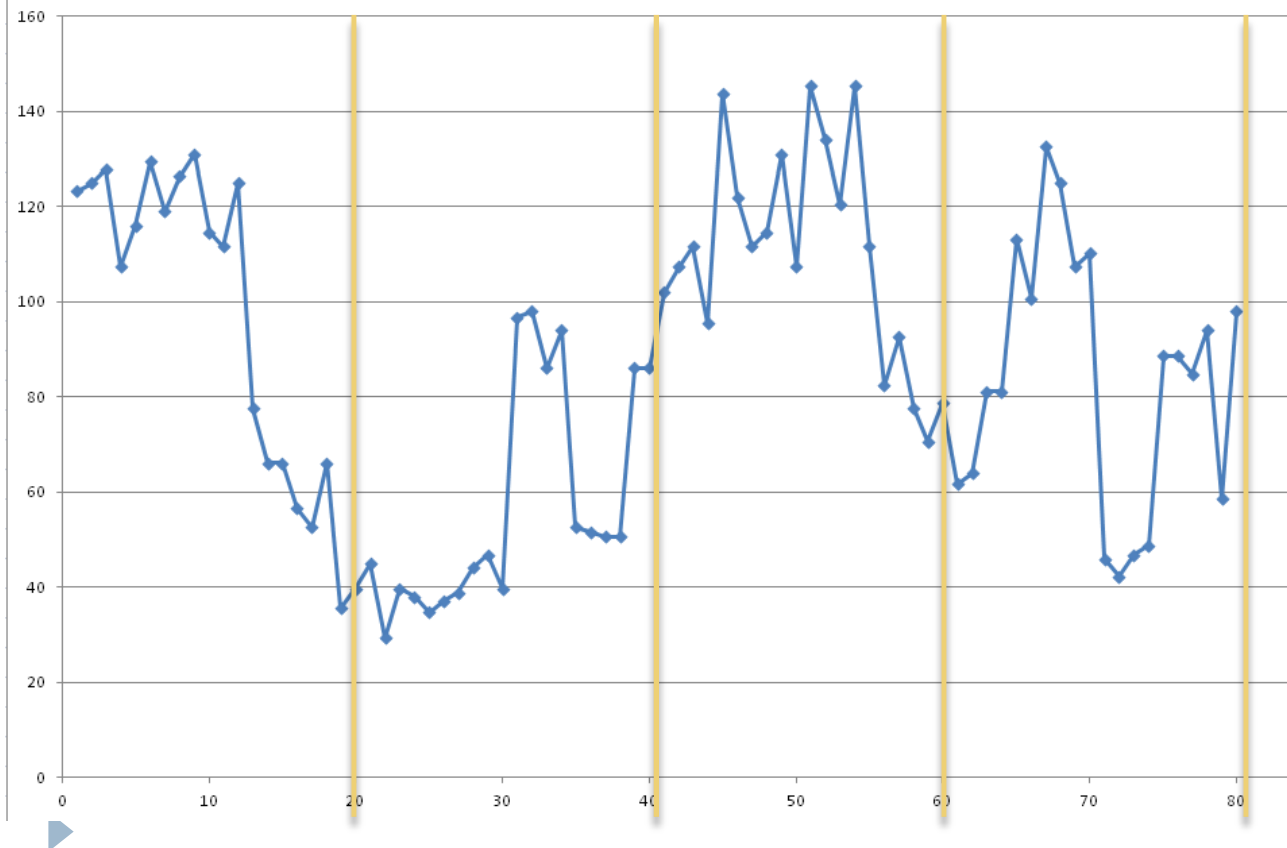


# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析

例如：

選取頻率0.05 cycle/min

將0.05乘以總時間80分鐘，表示每80分鐘4 cycle



將應力-時間圖分4區塊，即可找出各區塊之最大、最小值

得平均應力與振幅應力

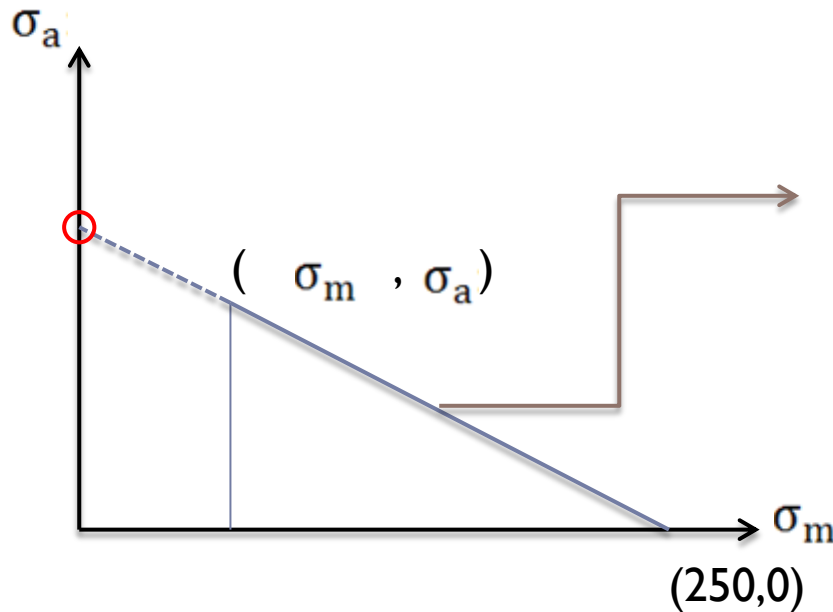


# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析

頻率(cycle/min)	0.025			
cycle	2			
	max(MPa)	min(MPa)	mean(MPa)	ampl. (MPa)
	131.06	29.336	80.198	50.862
	145.4	42.3	93.85	51.55
頻率(cycle/min)	0.05			
cycle	4			
	max(MPa)	min(MPa)	mean(MPa)	ampl. (MPa)
	131.06	35.55	83.305	47.755
	98.07	29.36	63.715	34.355
	145.4	70.56	107.98	37.42
	132.6	42.3	87.45	45.15
頻率(cycle/min)	0.0875			
cycle	7			
	max(MPa)	min(MPa)	mean(MPa)	ampl. (MPa)
	131.06	107.4	119.23	11.83
	124.9	29.36	77.13	47.77
	98.07	34.75	66.41	31.66
	143.77	50.58	97.175	46.595
	145.4	77.54	111.47	33.93
	132.6	61.75	97.175	35.425
	110.23	42.3	76.265	33.965

頻率(cycle/min)	0.1125			
cycle	9			
	max(MPa)	min(MPa)	mean(MPa)	ampl. (MPa)
	131.06	107.4	119.23	11.83
	124.9	52.55	88.725	36.175
	44.98	29.36	37.17	7.81
	98.07	39.71	68.89	29.18
	111.68	50.58	81.13	30.55
	145.4	107.4	126.4	19
	145.4	61.75	103.575	41.825
	132.6	81.18	106.89	25.71
	98.07	42.3	70.185	27.885
頻率(cycle/min)	0.1375			
cycle	11			
	max(MPa)	min(MPa)	mean(MPa)	ampl. (MPa)
	129.52	107.4	118.46	11.06
	131.06	66.07	98.565	32.495
	66.07	35.55	50.81	15.26
	44.09	29.36	36.725	7.365
	98.07	39.71	68.89	29.18
	111.68	50.58	81.13	30.55
	143.77	95.41	119.59	24.18
	145.4	82.4	113.9	31.5
	81.18	61.75	71.465	9.715
	132.6	42.3	87.45	45.15
	98.07	46.82	72.445	25.625

# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析



$$y = \frac{\sigma_a}{\sigma_m - 250} (x - 250)$$

$x=0$ 時， $y$ 為平均應力=0之振幅應力

$S_u=250\text{MPa}$

$S_u$ : 極限應力

$\sigma_m$ : 平均應力

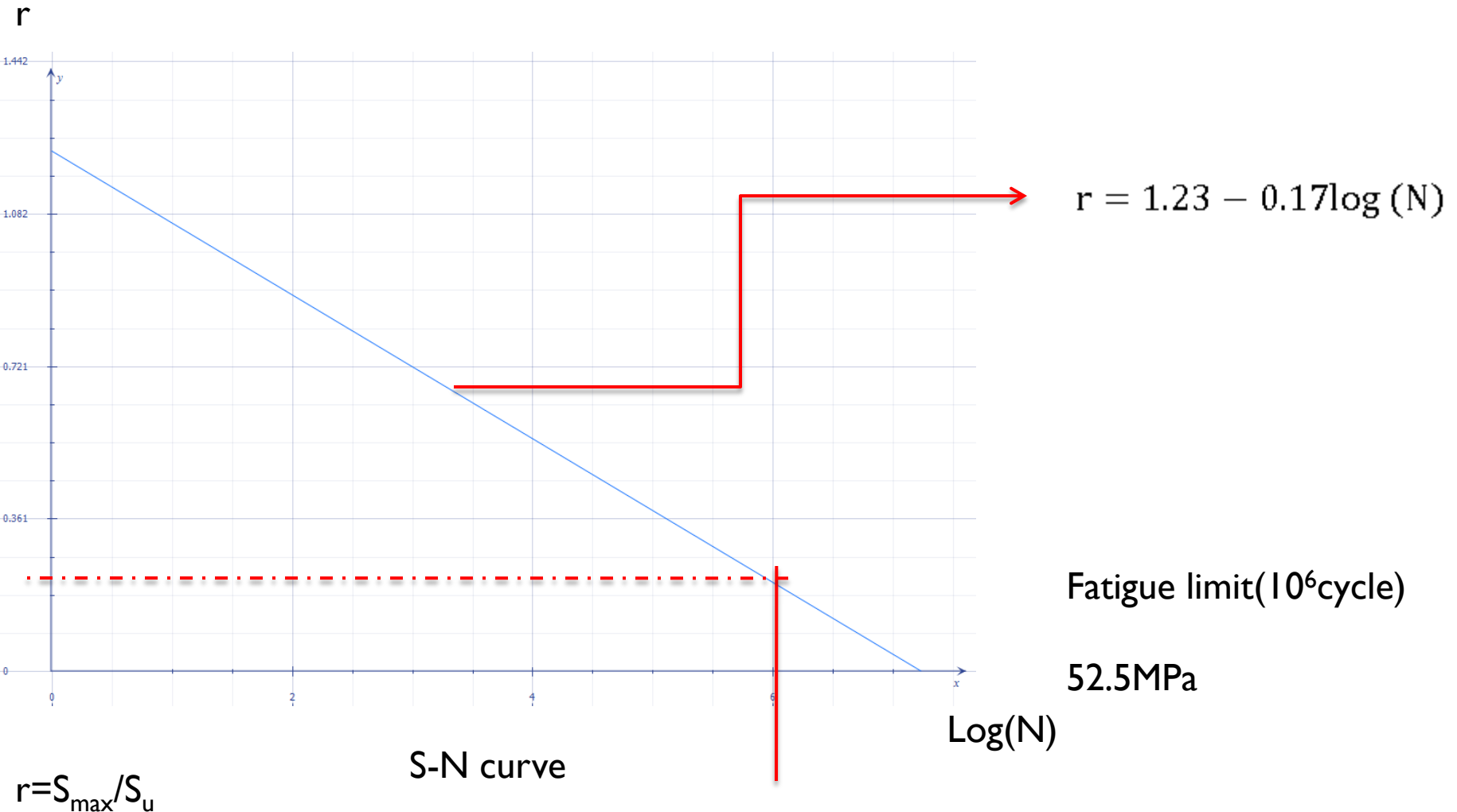
$\sigma_a$ : 振幅應力

# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析

平均應力=0

振幅應力 (MPa)	振幅應力 (MPa)	振幅應力 (MPa)
8.63	43.11	65.87
9.17	44.91	69.08
13.60	45.23	69.44
19.15	45.23	69.44
21.02	46.11	71.41
22.62	46.35	71.62
22.62	48.87	74.88
36.08	53.65	76.22
38.43	56.08	82.53
38.77	57.86	
40.28	57.95	
40.28	61.23	

# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析(S-N curve)



# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析

平均應力=0

振幅應力 (MPa)	振幅應力 (MPa)	振幅應力 (MPa)
8.63	43.11	65.87
9.17	44.91	69.08
13.60	45.23	69.44
19.15	45.23	69.44
21.02	46.11	71.41
22.62	46.35	71.62
22.62	48.87	74.88
36.08	53.65	76.22
38.43	56.08	82.53
38.77	57.86	
40.28	57.95	
40.28	61.23	

Fatigue limit( $10^6$ cycle)

52.5MPa

小於疲勞極限應力  
忽略

# 疲勞分析實例-疲勞損傷分析(Miner's rule)

	振幅應力(MPa)	振幅應力(MPa)	振幅應力(MPa)	振幅應力(MPa)
	53.65	61.23	71.41	82.53
	56.08	65.87	71.62	
	57.86	69.08	74.88	
	57.95	69.44	76.22	
		69.44		
平均	56.385	67.012	73.5325	82.53
應力比(r)	0.22554	0.268048	0.29413	0.33012
壽命(N)	810192	455851	320019	196522
週期(n)	4	5	4	1
D	4.9371E-06	1.09685E-05	1.24993E-05	5.08849E-06
TOTAL D	3.34933E-05			

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

N:疲勞壽命  
D:損壞數值

# 複合材料疲勞實驗

---

## ▶ 疲勞壽命實驗

1. 常態下疲勞壽命實驗

2. 加速老化下疲勞壽命實驗(模擬數年後)



# 複合材料疲勞實驗

疲勞實驗

試片:材料為0度與90度編織玻璃纖維布  
5層與樹酯

ASTM試驗試片規格  
長250mm，寬25 mm

疲勞負載皆為拉

負載條件:

最小應力為最大應力的0.1倍

頻率3Hz

$$\frac{S_{\min}}{S_{\max}} = 0.1$$

$S_{\max}$ : 最大應力

$\sigma_m$ : 平均應力

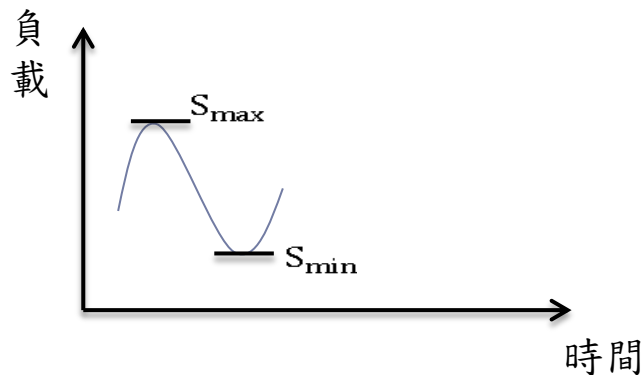
$S_u$ : 極限應力

▶  $S_{\min}$ : 最小應力

$\sigma_a$ : 振幅應力

r: 應力比

$$r = \frac{S_{\max}}{S_u}$$





# 複合材料疲勞實驗

---

做材料疲勞壽命實驗時，材料疲勞壽命是隨機的，此時利用機率與統計來分析這些離散資料

常態分佈 (Normal Distribution)

對數常態分佈 (Log-Normal Distribution)

韋柏分佈 (Weibull Distribution)

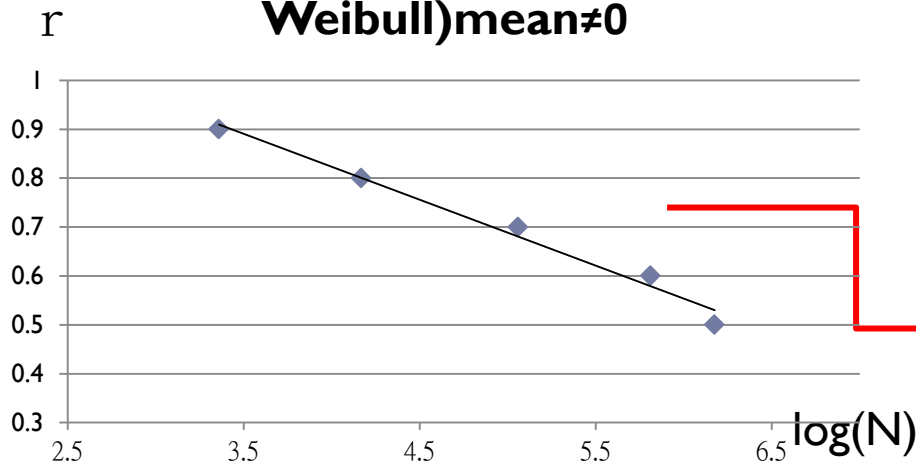
是最常被使用在材料之疲勞壽命統計

# 複合材料疲勞實驗-S-N curve(常態mean ≠0)

0.9, 0.8, 0.7, 0.6之疲勞壽命

應力比	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
疲勞壽命	2290	14727	114540	648590	1500000

**S-N curve (常溫 Weibull) mean≠0**



將疲勞壽命取log，在利用回歸方式找出回歸線，此線為S-N曲線

$$r = -0.1349 \log(N) + 1.3633$$

$S_{max}$ : 最大應力     $\sigma_m$ : 平均應力     $S_u$ : 極限應力

$S_{min}$ : 最小應力     $\sigma_a$ : 振幅應力     $r$ : 應力比

# 複合材料疲勞實驗

---

疲勞實驗

疲勞負載為拉-拉

$$\frac{S_{\min}}{S_{\max}} = 0.1$$

會有平均應力存在

利用Goodman圖

將其轉換成平均應力=0之等效應力

$$\text{平均應力: } \sigma_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} = 0.55 S_{\max}$$

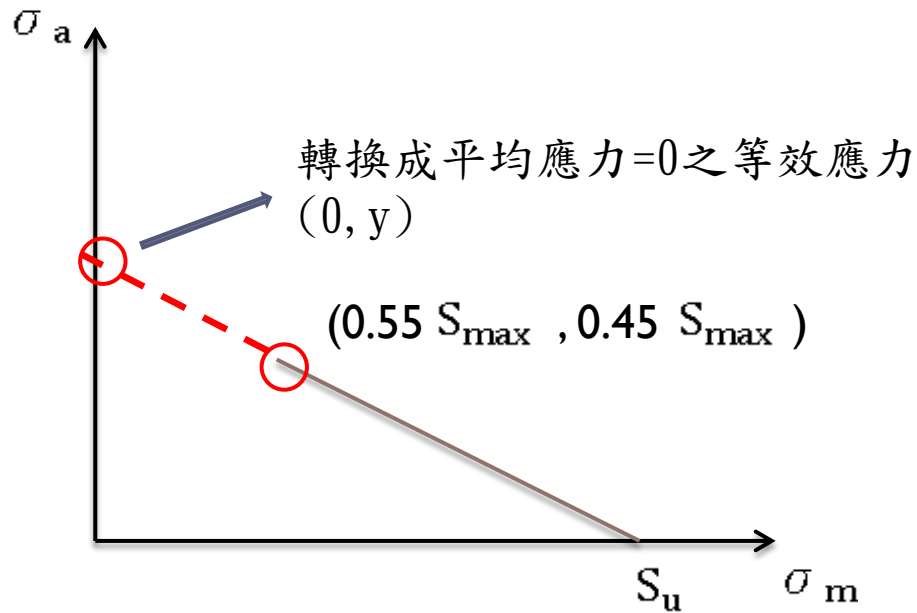
$$\text{振幅應力: } \sigma_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} = 0.45 S_{\max}$$

---

$S_{\max}$ : 最大應力     $\sigma_m$ : 平均應力     $S_u$ : 極限應力

$S_{\min}$ : 最小應力     $\sigma_a$ : 振幅應力    r: 應力比

# 複合材料疲勞實驗-Goodman diagram



玻璃纖維極限應力  
 $S_u = 211 \text{MPa}$

$$y = \frac{\sigma_a}{\sigma_m - 211} (x - 211)$$

$$\sigma_a = 0.45 S_{\max}$$

$$\sigma_m = 0.55 S_{\max}$$

$$x = 0 (\text{平均應力} = 0)$$

求的等效應力 y

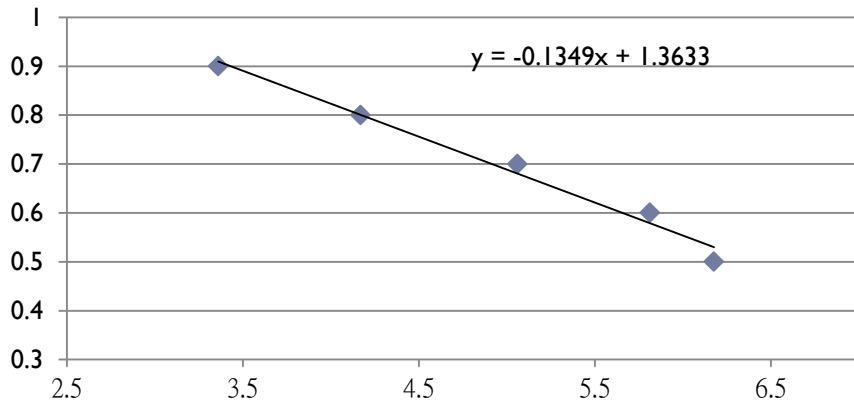
$S_{\max}$ : 最大應力     $\sigma_m$ : 平均應力     $S_u$ : 極限應力

$S_{\min}$ : 最小應力     $\sigma_a$ : 振幅應力    r: 應力比

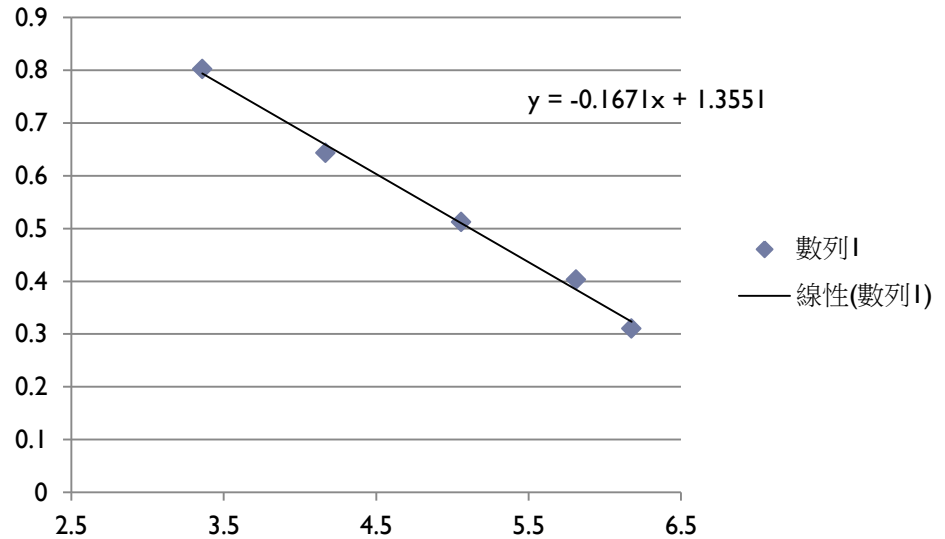
# 複合材料疲勞實驗-S-N curve(常態mean =0)

有平均應力存在，利用Goodman圖  
將其轉換成平均應力=0之等效應力

**S-N curve (常溫 Weibull) mean≠0**



平均應力=0.55  $S_{max}$



平均應力=0

S-N曲線

$$r = -0.1671 \log(N) + 1.3551$$

►  $S_{max}$ : 最大應力      r: 應力比      等效S-N curve

# 複合材料疲勞實驗

將季節分為春夏秋冬

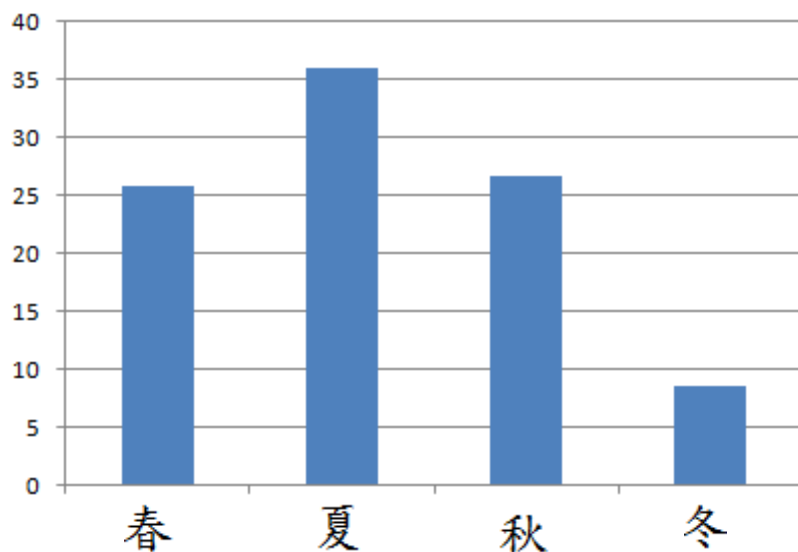
夏天選取6月-8月**最高溫度平均**與平均相對濕度

冬天選取12月-2月**最低溫度平均**與平均相對濕度

春秋季都以**平均溫度與**平均相對濕度

用此模擬室外不同季節環境老化

溫度(攝氏)

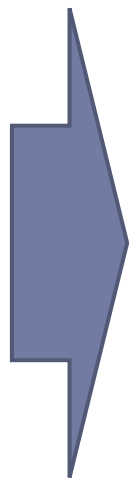


春:3月-5月  
夏:6月-8月  
秋:9月-11月  
冬:12月-2月

# 複合材料疲勞實驗-加速老化

春	25.8度，79%
夏	36.1度，79.3%
秋	26.8度，75%
冬	8.6度，86.6%

真實環境條件



85度，95%

加速老化條件

4.5天=模擬1年  
4.5n天=模擬n年

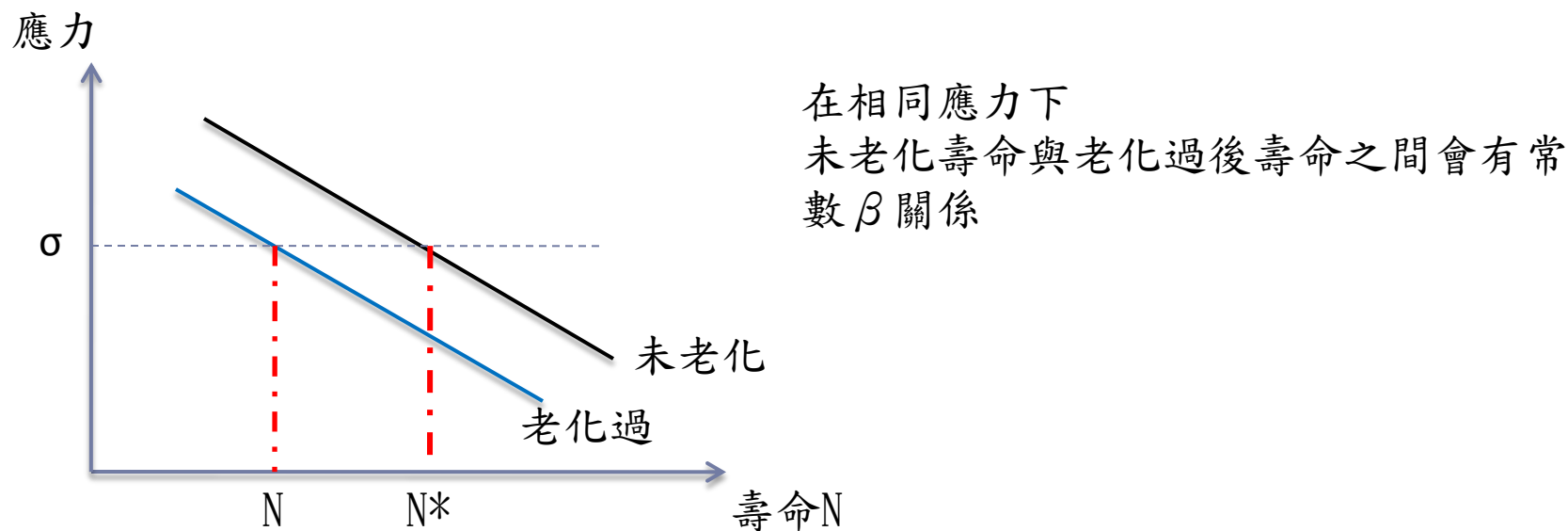
$$A_f = \frac{\eta_0}{\eta_1} = \left(\frac{RH_1}{RH_0}\right)^n * e^{\left[\left(\frac{Ea}{K}\right) * \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right]}$$

透過加速老化公式，在溫度85度，濕度95%環境下4.5天相當於常態下環境1年

- Ea : activation energy
- K : Boltzmann' s constant (8.623\*10<sup>-5</sup> )
- T<sub>0</sub>=正常工作溫度=273+常溫
- T<sub>1</sub>=施加應力溫度=273+試驗溫度
- η<sub>0</sub>=正常操作狀態之壽命
- η<sub>1</sub>=加速壽命狀態之壽命
- RH<sub>1</sub>: 加速老化濕度
- RH<sub>0</sub>: 正常環境濕度
- n : 濕度加速率常數=2.56

# 複合材料疲勞實驗-推估疲勞壽命

利用  $N \times \beta = N^*$  關係求出在不同應力之壽命



$N^*$ : 常態疲勞壽命    $N$ : 老化疲勞壽命    $\beta$ : 常數



# 應變實驗

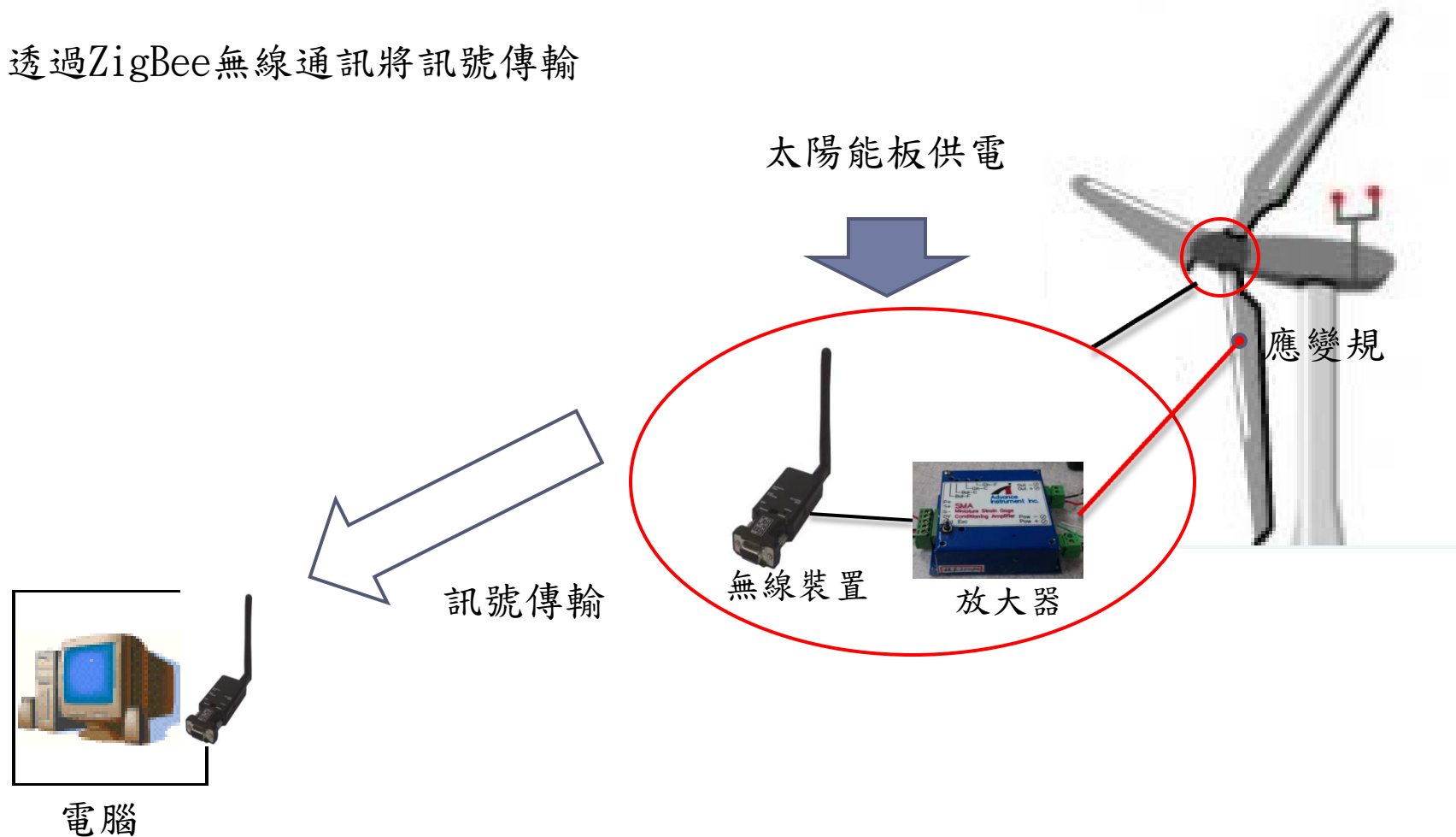
---

在實驗風場裝設2.5米風力發電機，為了瞭解葉片疲勞情形，在葉片內部黏貼應變規，將應變規連接至微型動態放大器，再經由無線通訊裝置ZigBee將應變值傳輸到電腦，記錄葉片的應變情況。



# 應變實驗-應變實驗初步架構

透過ZigBee無線通訊將訊號傳輸



---

謝謝各位

Thanks for your attention

Q&A

---

