

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 自然科

第三名

081513

微風吹吊橋

臺北市大安區私立復興國民小學

作者姓名：

小五 曹之丞 小五 陳炫瑋 小五 劉彥含

指導老師：

鄭及蘭 張慎

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

微風吹吊橋



科 別：自然科

組 別：國小組

關鍵詞：振幅、頻率、節點

作品名稱：微風吹吊橋

壹、摘要	1
貳、研究動機	1
參、研究目的	1
肆、研究器材設備	2
一、實驗一：看見水波的折返 — 水波槽	2
二、實驗二：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形	2
三、實驗三：繩波及盪鞦韆	2
四、實驗四：模型吊橋實驗 — MJB 橋第一代、第二代、第三代的實驗	3
伍、研究過程及方法	3
一、實驗一：看見水波的折返 — 水波槽	3
二、實驗二：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形	5
三、實驗三：繩波及盪鞦韆	8
四、實驗四：模型吊橋實驗 — MJB 橋第一代、第二代、第三代的實驗	9
五、實驗五：探討不同橋面寬度在間歇風的吹拂下翻轉的變化	12
陸、研究結果	13
一、實驗一：看見水波的折返 — 水波槽	13
二、實驗二：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形	13
三、實驗三：繩波及盪鞦韆	16
四、實驗四：模型吊橋實驗 — MJB 橋第一代、第二代、第三代的實驗	17
五、實驗五：探討不同橋面寬度在間歇風的吹拂下翻轉的變化	19
柒、討論	21
捌、結論	25
玖、參考資料及其他	27
拾、附錄	28

微風吹吊橋

壹、摘要

一則電視上“鋼筋水泥吊橋被風吹垮”的轉播報導，引發了我們的研究興趣，想要知道為何風作用在橋上，會引起橋面的振動扭轉？

風吹造成空氣的波動，爲了瞭解波的現象，我們先觀察生活中常見的水波、聲波及繩波的振動。於是我們設計了(1)在池塘中丟石子，進而發展出水波槽實驗。(2)以提琴弓在金屬板邊緣拉奏，造成板面上細砂跳動而呈現各種克拉尼圖形。(3)以甩動童軍繩產生繩波，進一步製作鞦韆，觀察其受風力的運動情況。(4)最後，製作模型吊橋，以觀測受風中橋面的變化。

從實驗結果，我們歸納出無論在水面、金屬板面或橋面施力，造成的振動，藉由介質產生波的前進，波碰到阻擋會反射，與原來的波交疊形成不振動的「節點」。包括水波槽中形成的格狀波紋，及金屬板面細砂呈現的克拉尼圖形，都是振動、反射與節點交互作用的結果。至於風吹吊橋實驗中，我們發現頻率與角度是影響橋面振動的關鍵因素。雖然我們的吊橋實驗無法驗證橋的斷裂，但的確觀察到(1)間歇來回的風比持續風容易造成受風橋面的扭曲晃動。(2)45度風向比垂直風向更容易引起橋面的晃動。(3)減少同頻率的振動，可降低橋面斷裂的危險。

貳、研究動機

九十三年九月十九日星期天上午 8 時 45 分，在家中看到三立新聞介紹香港青馬大橋，新聞中引用 National Geography 頻道有關 1940 年 11 月美國華盛頓州首府 Tacoma 的一座新建的吊橋-Tacoma Narrow Bridge 被風吹斷的記錄片，覺得很新奇。一座鋼筋水泥的堅固吊橋，怎麼就被風，而且不是強風，就吹垮了？是什麼力量使橋垮掉的？如果是風，為何吹不倒人，卻能將比人強壯不知多少倍的橋吹垮掉？

有人說是由於「共振現象」，也有一說是陣風誘發的「自激振盪」。因爲從自然課實驗中，我們得知聲波、水波、繩波、都是由振動造成的，當外力的頻率與振動體固有頻率接近或相等時，會產生共振，振動的幅度就急劇增大。1831 年的英國及 1902 年的俄國都有軍隊齊步走過吊橋，而爆發了塌橋慘事的紀錄。而自然課也學過古代人用風力轉動風車來磨麵粉或引水，現代則可用風力來發電。但是風太大時，會吹倒房屋、樹木造成災害，甚至人畜的傷亡。爲何一陣不算強的風，竟然把橋吹斷？我們想要一探究竟，就開始各式各樣的實驗。

參、研究目的：

重建 Tacoma Narrow Bridge 現場，用風吹模型吊橋，作測試，觀察吊橋晃動、扭轉的情形，

找出：

- 一、風是怎樣作用在橋上的呢？
- 二、爲什麼相當均勻的風，會使橋產生脈衝式的振動，然後變爲扭轉振動呢？
證實 Tacoma Narrow Bridge 坍塌的真正原因是間歇而來回的風吹所產生的結果。

肆、研究設備及器材

一、實驗一：看見水波的折返— 水波槽

- (一) 塑膠水波槽(82cm x 45cm x 15cm) 1 個
- (二) 壓克力條(10cm x 40cm x 1cm) 2 條，作爲阻擋板
- (三) 實物投影機
- (四) 馬達、塑膠環、鐵鍊、齒輪(7)個、鋼桿、開關、藍色壓克力板 (30 cm x 38 cm)
- (五) 數位相機

二、實驗二：留住聲音的波動— 克拉尼圖形

- (一) 不鏽鋼板
 1. 圓形(半徑 20 cm ，厚 0.3 cm)
 2. 長方形(60 cm x 20 cm ，厚 0.3 cm)
- (二) 圓鐵桿(長 35 cm ，直徑 9mm)
- (三) 混凝土基架、水泥、碎石、細砂、水
- (四) 塑膠底盤(30cm x 39cm x 8cm)
- (五) 石英砂：粗(2 號)和細(3 號)
- (六) 大提琴弓、松香、音頻器
- (七) 數位相機

三、實驗三：繩波及盪鞦韆共振的實驗

- (一) 紅絲帶一條(約 20cm)
- (二) 三股棉線童軍繩(284cm)
- (三) 五片短磁鐵(15cm x 1.2cm)
- (四) 一根長磁鐵(30cm x 1.5cm)
- (五) 棉線
- (六) 吹風機
- (七) 大量角器
- (八) 長尺(30cm)
- (九) 椅子

四、**實驗四**：MJB 橋第一代、第二代、第三代的實驗

- (一) 第一代：咖啡攪拌棒(0.7cm x 19cm) 二根及小攪拌棒(6cm x 0.7cm) 21 根
 第二代：木條(15cm x 2.5cm x 1.5cm) 40 塊
 第三代：木條(15cm x 2.5cm x 0.9cm) 40 塊
- (二) 中央有孔的玻璃珠(8 顆)
- (三) 不銹鋼條(120cm x 25cm x 50cm)
- (四) 螺絲釘 6 個
- (五) 軸流風扇
- (六) 三條鋼索長 115cm
- (七) 數位相機及 DV 攝影機

伍、研究過程或方法：

一、**實驗一**：看見水波的折返— 水波槽

(一) 觀察池塘中的水波變化

1. 在花園池塘(3m x 5m x 50cm)，先以石頭投入池中，觀察水波的產生及擴散方向。
(如圖 1,2)
2. 放一片直徑約 15 公分的葉片在水面上，觀察水波碰到葉子的情形。



圖 1：石頭濺起水花



圖 2：校門口小瀑布形成的光影

(二) 水波槽實驗

1. 用馬達，塑膠環，鐵鍊，7 個齒輪，銅桿，開關，藍色壓克力板，組成振動產生器(如圖 3、圖 4)



圖 3：振動產生器正面



圖 4：振動產生器背面

2. 為能更清楚觀測水波變化，改用各種不同顏色(綠，橘，紅，白，黑)，兩公分寬的膠帶，貼在水波槽的底部(如圖 5)：



圖 5：貼上有色膠帶的水波槽

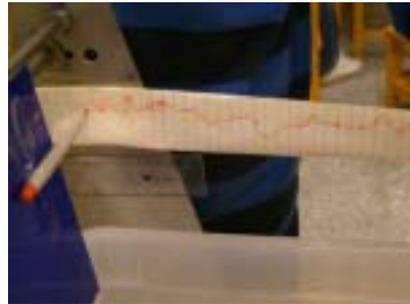
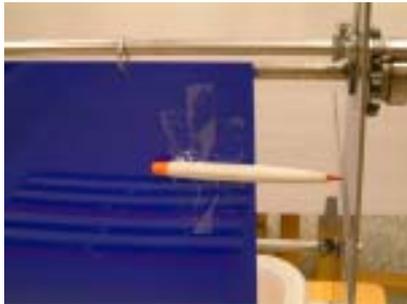


圖 6，7：以自行設計的方法，用紅筆劃出振動頻率，如上圖右，決定以 3.5 轉速進行實驗。

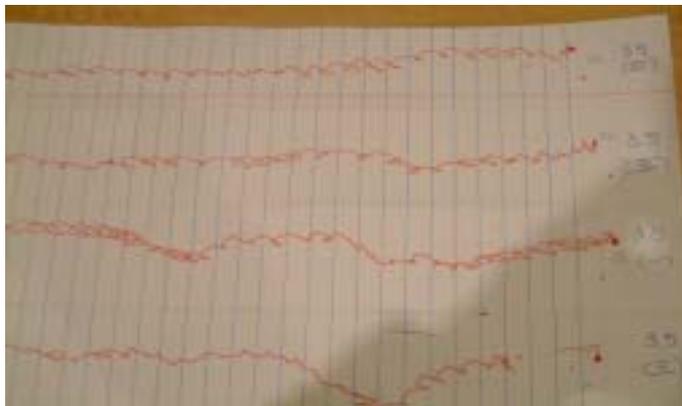


圖 8：3.5 轉速格

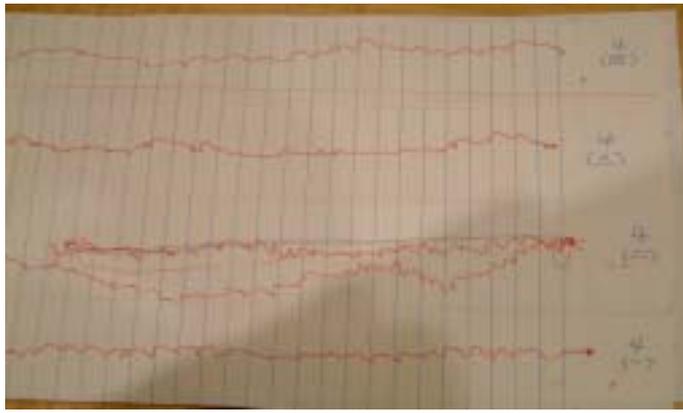


圖 9：4 轉速格



圖 10：4.5 轉速格

二、實驗二：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形

(一) 大提琴的共振實驗

1. 拉第三弦的低音 Do 時，觀察其他各弦。

(二) 在科學館觀察克拉尼振動實驗

1. 用小提琴弓拉奏厚約 0.3 公分且舖有細玻璃砂的鋼板邊緣。
2. 琴弓造成的振動，引發細砂跳動並以波形散開(如圖 11)，且波紋相遇處會形成節點，當波紋停止時，觀察在鋼板上所形成的圖形，亦即所謂的“克拉尼圖形”。(見參考資料十)
3. 在科學館中的鋼板形狀有四種：圓形、正方形、六邊形、八邊形。
4. 在正方形鋼板邊緣的不同位置上，以琴弓製造同樣音高的拉弦方式，重覆 2.的實驗步驟，並用音頻器紀錄音高，其結果紀錄如圖 12。
5. 在銅板上重覆上述實驗，結果紀錄如圖 13。



圖 11：觀察細玻璃砂受音波振動而跳動的情形

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
音頻	E	E	G#	作	G#	F	G#	E	A#	D	D	D	A#	G#	E	B	B	F	C
	0	0	-10	廢	-20	0	-10	0	-25	35	35	-25	35	15	15	0	15	50	-35

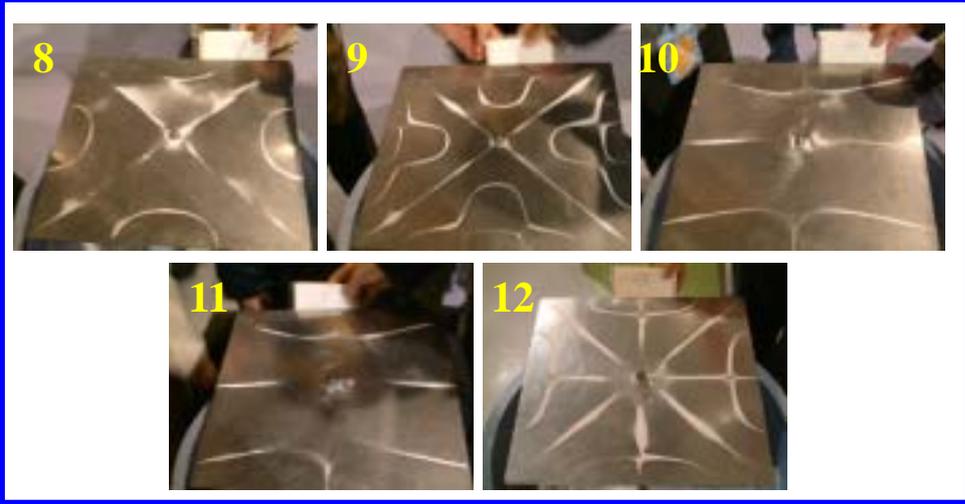
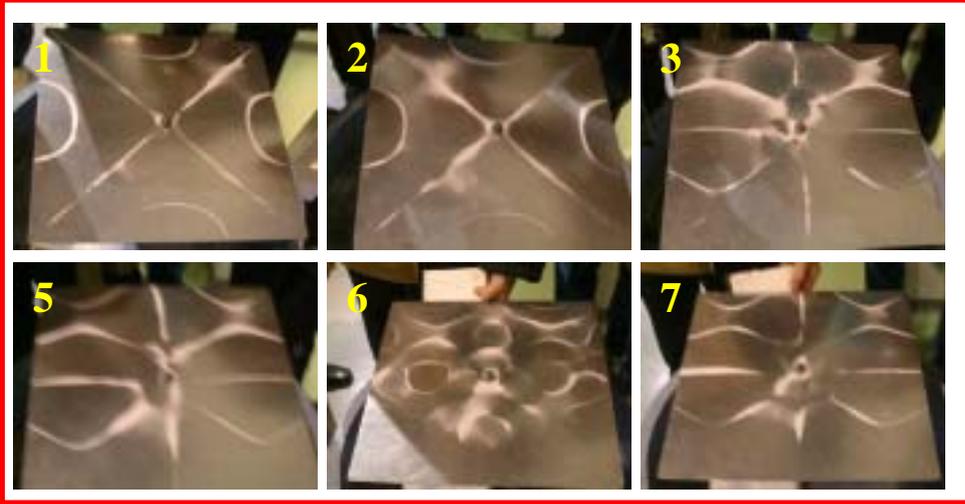


圖 12：正方形鋼板上的克拉尼圖形

圖 13：銅板上的克拉尼圖形

(三) 自製不鏽鋼板之聲波實驗 — 克拉尼圖形

1. 做兩塊不鏽鋼板：長方形(60cm X 20cm)和圓形(半徑 20cm)，厚度皆為 0.3cm。
2. 以水泥砂做固定基架，爲了固定不鏽鋼板，做了一個鋼筋製的網架。(如下圖)：

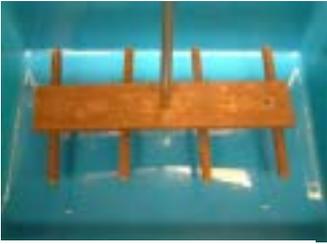


圖 14：
將鋼筋和鋼板鑄成的板子用螺絲釘在不鏽鋼板的角架上



圖 15：
再將不鏽鋼板放在靠門的地方，以門上的鋁條的水平線爲基準，測量出水平線。用書本使不鏽鋼板保持水平。



圖 16：
放一個塑膠盒在不鏽鋼板下方，角架板離盒子約(3cm)。



圖 17：
靜置三天，繼續放七天，讓混凝土達到中級凝固後才可進行實驗。

3. 測試石英砂的選擇

- (1) 2 號石英砂顆粒較粗，不鏽鋼板振動時，砂粒跳動較明顯，但圖形較不明顯。
- (2) 3 號石英砂顆粒較細，不鏽鋼板振動時，砂粒跳動較不明顯，但圖形較明顯。
- (3) 我們決定用 3 號石英砂。

4. 聲波的呈現

- (1) 在圓形不鏽鋼板圓周上取 a. b. c. d.四點，每點距離相同(如圖 18)
- (2) 將 3 號石英砂均勻灑在不鏽鋼板上。
- (3) 輪流在 a. b. c. d.四點上用大提琴弓拉奏，用音頻器記錄各個聲音的音高。
- (4) 當板面停止振動時，用照相機記錄石英砂所呈現的克拉尼圖形。

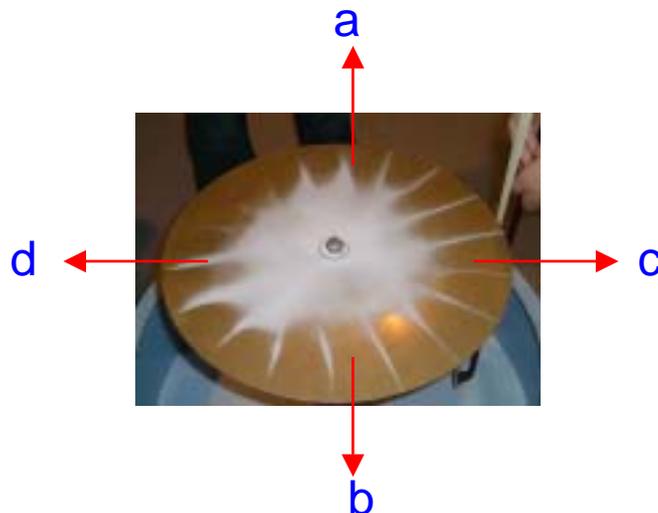


圖 18：圓形鋼板的拉奏位置

(5) 在長方形不鏽鋼板上

取 a. b. c. d. e. f. g. h 八點(如圖 19)：

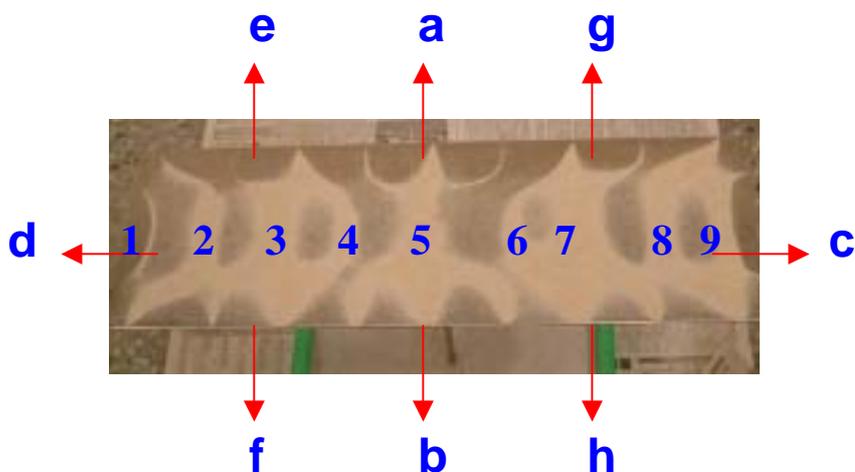


圖 19：長方型鋼板的拉奏位置

(6) 重覆步驟(2) — (4)

三、實驗三：繩波及盪鞦韆的實驗

(一) 繩波實驗

1. 兩人同時握童軍繩的兩端施力，觀察上下振動和左右施力時波的前進。
2. 二人各執童軍繩兩端，相距 217cm，以擺幅 42cm，擺動 20 次(來回為一次)，計時並記錄停止時的波數：



項次	計時	波數	項次	計時	波數
1	10" 06	1.5	9	5" 90	2.5
2	7" 90	2.5	10	5" 50	2.5
3	7" 21	2.5	11	3" 37	2.5
4	8" 19	2.5	12	5" 15	2.5
5	6" 21	2.5	13	5" 13	2.5
6	6" 93	2.5	14	5" 16	2.5
7	5" 37	2.5	15	4" 47	2.5
8	6" 25	2.5	16	4" 68	2.5
經過此訓練，二人能甩出相同波數。					

3. 二人能甩出相同波數後(亦即頻率相同)，開始左右同時反方向搖晃童軍繩，並觀察。

(二) 盪鞦韆實驗

1. 將五片短磁鐵綁起來，再綁到一根長磁鐵上做成鞦韆，懸吊線長 20cm(鞦韆本身高 20cm)。(這是我們自己命名為 MJB 吊橋的雛型)
2. 將椅子放在桌子上，把鞦韆架在椅子上，鞦韆底部離桌面 9cm。
3. 把尺(30cm) 放在下方桌面上，用來觀察振幅的大小。
4. 將量角器豎在旁邊，以控制吹風機離開桌面吹向鞦韆的角度(如圖 20)。
5. 用吹風機的一段風吹鞦韆。
6. 吹風機的底端固定對齊量角器的中心點。吹風口隨著鞦韆的晃動舉高至 30 度的地方。以間歇吹風的方式，試著配合鞦韆擺動的頻率，增大鞦韆的晃動幅度。
7. 逐次減少磁鐵片數，重覆步驟(6)，紀錄結果。
8. 改以兩種懸吊線長(14cm 及 20cm)，但皆維持磁鐵片數為 5 片的裝置，重覆步驟(6)，紀錄鞦韆擺動 20 次所需的時間。



圖 20：盪鞦韆的實驗

四、實驗四：模型吊橋實驗—MJB 吊橋第一代(MJB I)第二代(MJB II)第三代(MJB III) (以實驗同伴的英文名字第一個字母為命名：MJB)

(一) MJB 橋第一代(MJB I)

1. 將七根咖啡攪拌棒各剪成 3 等份，做出 21 節小棒。將這 21 節小棒和兩根長條的咖啡攪拌棒用繩子綁起來，做成一 6cm x 19cm 的橋面。
2. 將它架在椅子上，如前盪鞦韆。
3. 將尺放在桌面上，以便觀察振幅的大小。
4. 將量角器豎在旁邊，以控制吹風機離開桌面的角度。
5. 用吹風機的一段風吹 MJB 橋。
6. 吹風機的底端固定對齊量角器的中心點。吹風口隨著 MJB 橋的晃動舉高至 30 度的地方。以間歇吹風的方式，試著配合鞦韆擺動的頻率，以增大 MJB 橋的晃動幅度(如圖 21)。



圖 21：MJB 吊橋第一代 MJB I

(二) MJB 橋第二代(MJB II)

1. 用不鏽鋼條做 MJB II 的框架(120cm x 25cm x 50cm)。
2. 將 40 塊木條(15cm x 2.5cm x 1.5cm)，以 3 條鋼索串成橋面(圖 22)。
3. 在 MJB II 後方，立一木框鋼索架(長 112cm，寬 45cm，41 條鋼索，每條鋼索間距 2.5cm)，以對齊橋面底部為基準，每 5mm 噴上藍，紅，黃，綠四種顏色的油漆，以便觀察橋面上下振動的幅度(圖 23)。

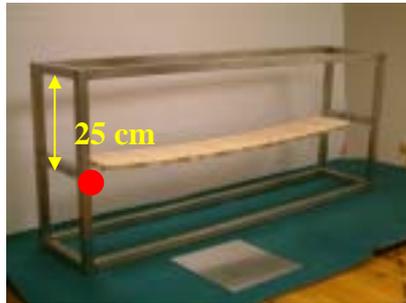


圖 22：MJB II 的框架與橋面



圖 23：鋼索噴上油漆

4. 再將白色塑膠瓦楞板放在木框後方做背景。
5. 以軸流風扇，用連續風及間歇風，依不同角度(東北，北，北北東，西北，北北西)，觀察 MJB II 晃動的情形。
6. 五個方位(東北，北，北北東，西北，北北西)的定位(圖 24)：
 - (1) 在 MJB II 橋的前面地上做標示。
 - (2) 橋前方與橋垂直的一條地上線定為北方。
 - (3) 為觀察不同區段橋面的振幅，用橘色圖形貼紙自中心點起，每五格作標示(圖 25)。
7. 用 DV 攝影機來記錄。

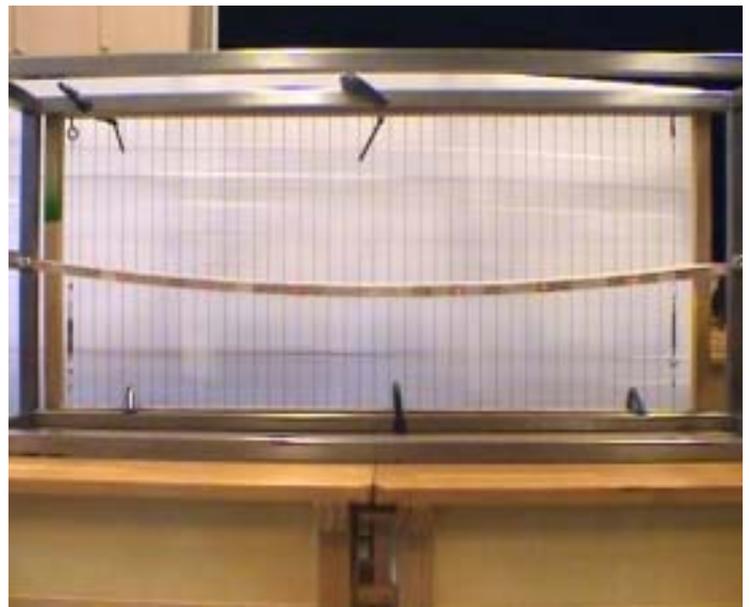


圖 25：MJB 橋第二代 MJB II



取一張報紙，將一角對折，使短的一邊與長邊對齊重疊。這時這個角是 45 度。

將這個 45 度角的斜邊對齊北方線，畫出左右各一 45 度線，用綠色膠帶貼上代表東北，用紅色膠帶代表西北方。

再將這個角對折，這時這個角是 22.5 度。畫出 22.5 度的線，用白色膠帶貼上，視為北北東方。

做出另一條白色的北北西方線將北方貼上黑色膠帶是為北方線

圖 24：五個方位的定位過程

(三) MJB 橋第三代(MJBⅢ)，將 MJBⅡ改良成 MJBⅢ

1. 將橋面的 40 塊木條改成較薄的木條(15cm x 2.5cm x 0.9cm)，因為 MJBⅡ 的橋面太重，實驗結果不易呈現。
2. 拆掉中間的一條鋼索，改成二條鋼索。
3. 在每 8 塊木板中間加 2 顆玻璃珠，以做區隔，並易於觀察扭動。
4. 將橋面如下圖分成 A,B,C 三區(圖 26)。

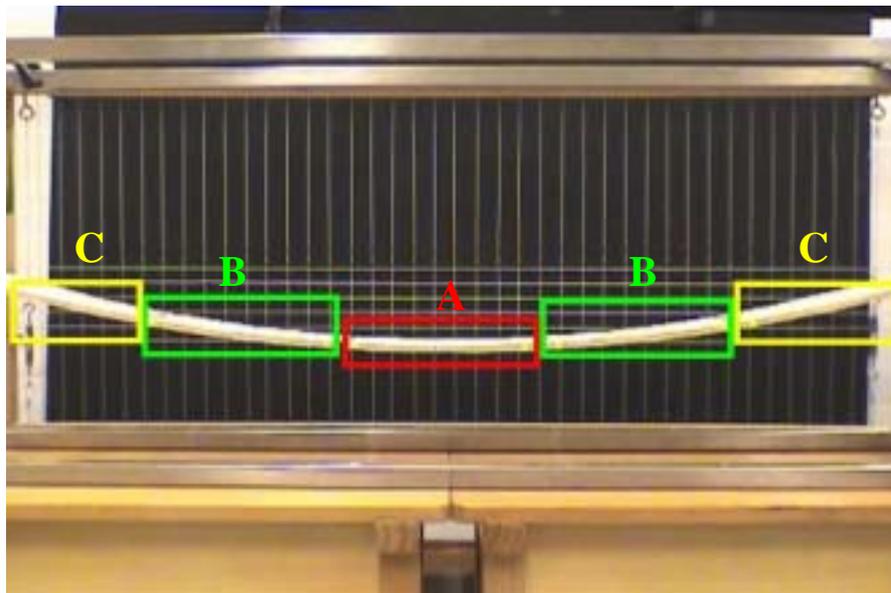


圖 26：MJB 橋第三代 MJBⅢ

5. 在木框鋼索架上，自橋面底部等高位置，每間距 2cm，橫向向上加上 6 條鋼索(圖 27)。(因為鋼索上的彩色噴漆不明顯，影響測量結果的觀察)
6. 背景改用黑色三夾板。
7. 以 DV 攝影機鏡頭水平正對橋面，拍攝風吹 MJBⅢ 晃動的情形。
8. 以電腦定格，擷取畫面，來測量橋面的變化。

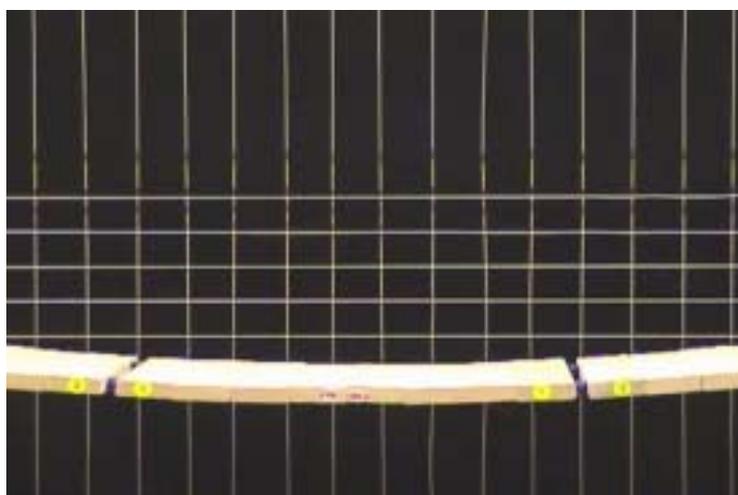
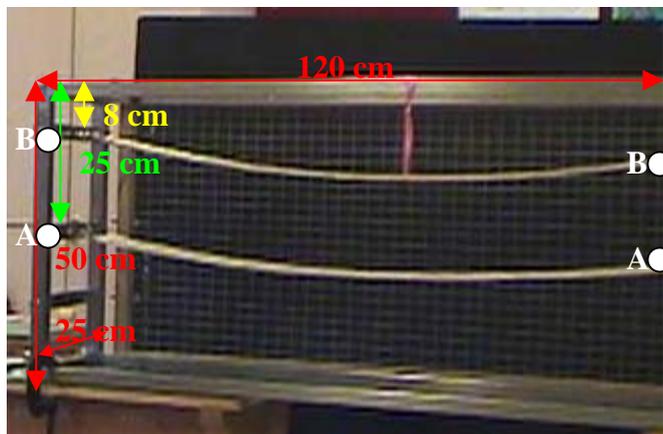


圖 27：加裝橫向鋼索

五、**實驗五**：探討不同橋面寬度在間歇風的吹拂下翻轉的變化

- (一) 分別製作以 MJB 橋第三代為(橋面寬 15cm)基礎(本實驗稱爲一號橋)，將橋寬縮減爲 10cm(稱爲二號橋)，7.5cm(稱爲三號橋)，橋長均維持 120cm。
- (二) 在原橋基架上 25cm 處設爲 A 位置，並多增設一組橋的位置(B 位置)(如下圖)



- (三) 風扇放在 A 位置的高度，水平方向吹風，並在原橋基架綁上小絲帶，拍下間歇風吹拂時的橋面變化。



- (四) 用書遮去風扇背面 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{3}{4}$ 、全部或不遮(全開)來改變風力大小，並做攝影紀錄。
- (五) 橋分別架在 A、B 位置時，安排出六種可能性排列，並攝影紀錄。

	1	2	3	4	5	6
B 位置	二	三	一	三	一	二
A 位置	一	一	二	二	三	三

陸、研究結果

一、實驗一：看見水波的折返— 水波槽

(一) 在池塘中做水波變化

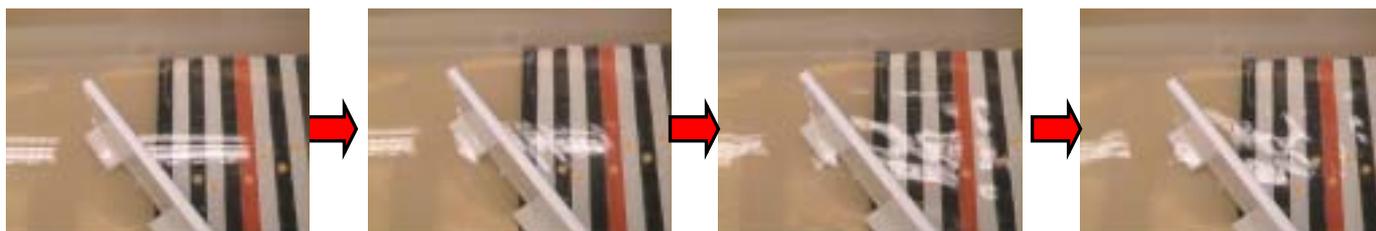


圖 28：水波呈同心圓擴散，波由密到疏



圖 29：與原先波紋交叉形成格子狀波紋

(二) 水波槽的水波實驗



阻擋板與水波紋成 45 度角。

水波碰到阻擋，水波會反彈。

與原先波紋交叉形成格子狀波紋

看出水波的反射。

圖 30：置入阻擋板後，波紋交叉形成格子狀

二、實驗二：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形

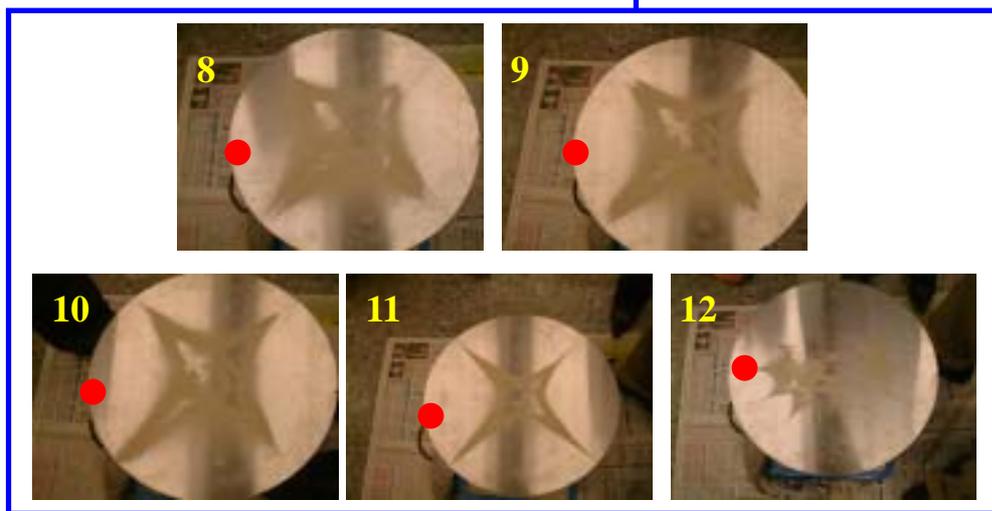
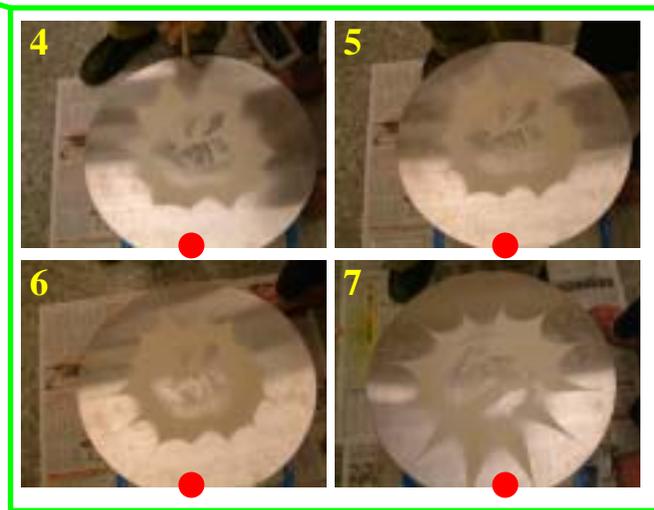
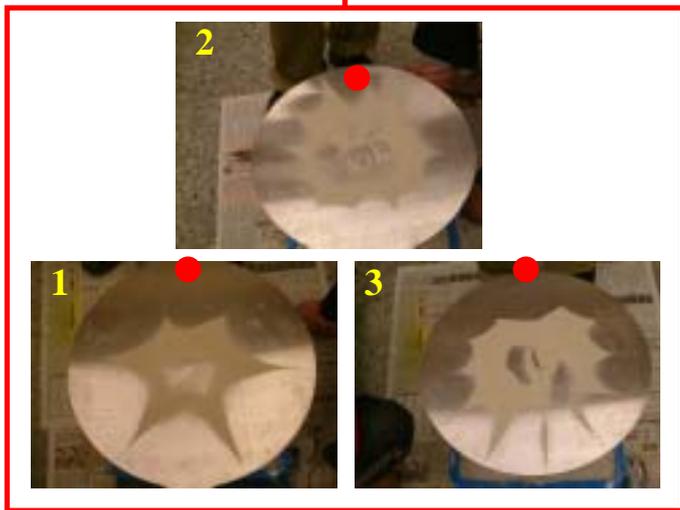
(一) 大提琴實驗

拉第三弦的低音 Do 時，第四弦空弦的 Do(低八度)也會振動，以目測及手觸摸得知。

(二) 克拉尼圖形的實驗

1. 拉奏發出低音時：亦即低頻率波動時，所呈現圖形中的細砂紋路較少。這是因為波長較長，形成節點較少。
2. 反之拉奏發出高音時：亦即高頻率波動時，所形成圖形中的紋路較多，此乃因波長較短，故節點較多。

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
位置	a	a	a	b	b	b	b	d	d	d	d	d	c	c	c	c	c
音頻	C	A	A#	A#	A#	D#	D#	A#	A#	A#	A#	D#	A#	A#	D#	D	A#
圖形(角)	6	12	11	12	12	14	14	4	4	4	4	14	4	4	14	14	12



●表示琴弦拉奏位置

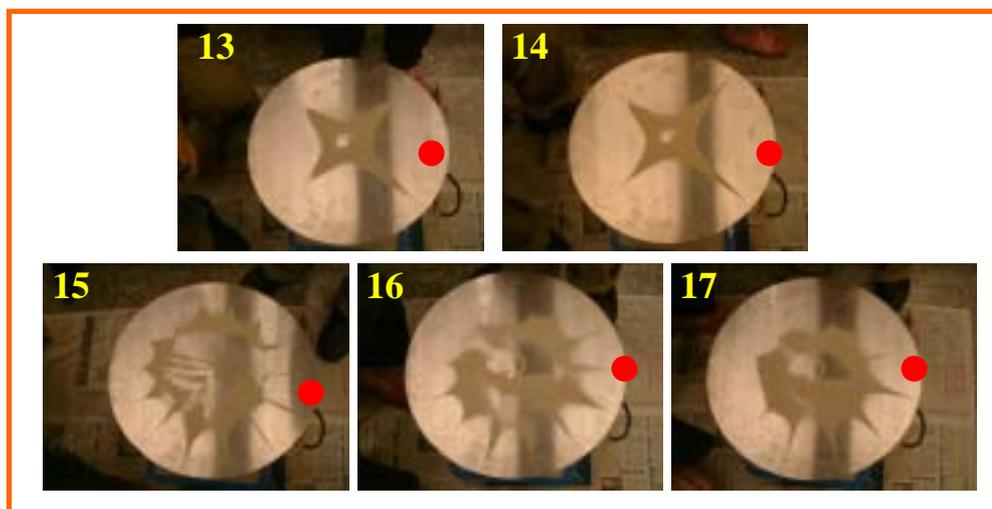


圖 31：圓形不鏽鋼板之克拉尼圖形

編號	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18
位置	a	a	a	a	e	g	g	f	f	h	H	h	b	b	b	c	c	c	d	d	d	d
音頻	E#	D#	D#	E#	G#	G#	A	A	A	C#	A	G#	D	D	D	C	C	C	G#	A#	C	C
	-30	30	-30	-40	30	10	-30	-50	-40	20	-30	25	-10	-15	-10	-20	0	40	-50	20	-50	0
圖形(角)	啞鈴狀				4	2	2	2	4	4	2	2	啞鈴狀			10	10	8	5	10	10	10

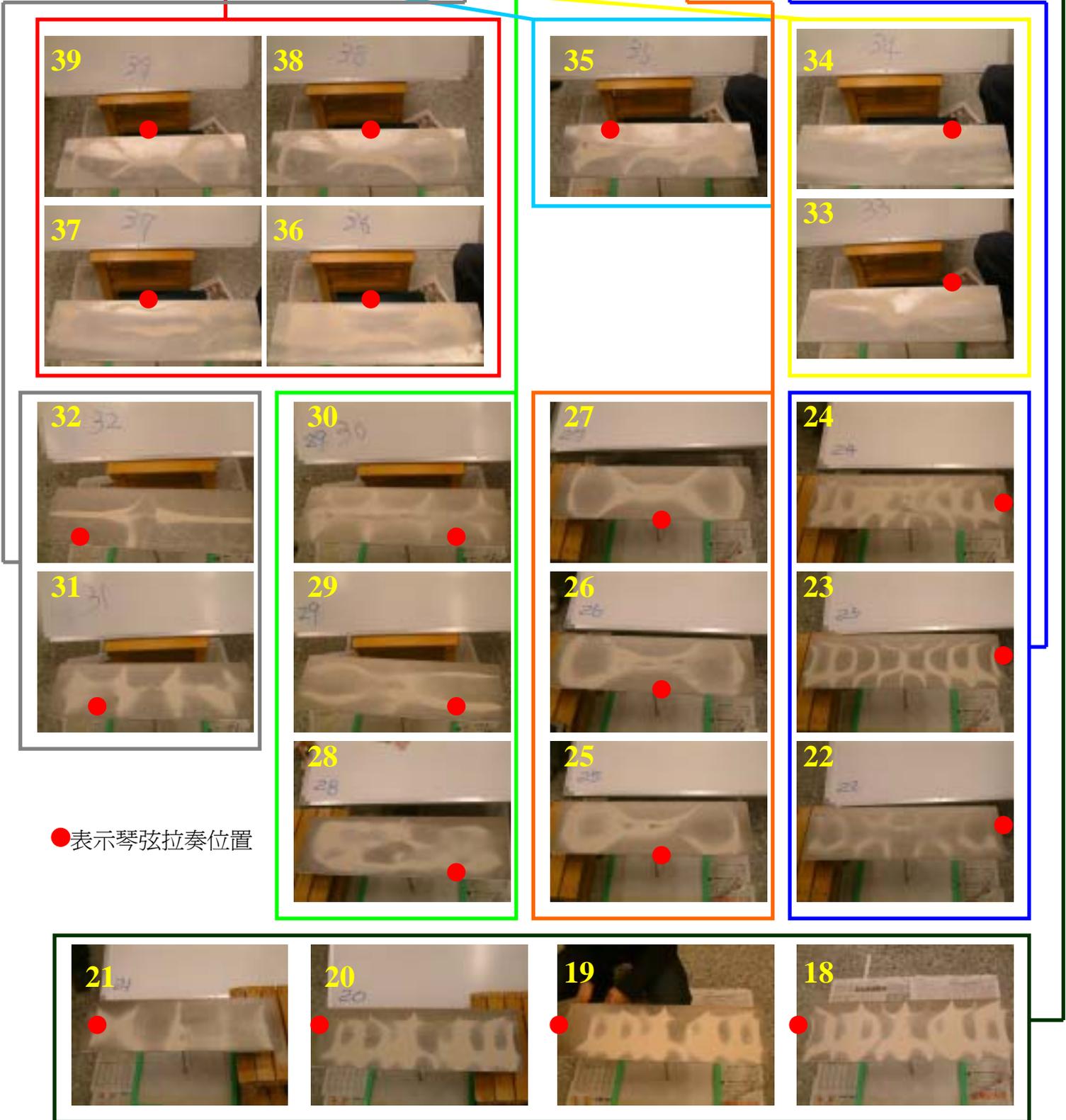


圖 32：長方形不鏽鋼之克拉尼圖形

三、實驗三：繩波及盪鞦韆的實驗

(一) 繩波實驗



施力越大，波紋振幅越大且密度越高。 相遇處形成不動的節點。圖形稱為駐波。

圖 33：照片顯示不動的節點

(二) 盪鞦韆實驗：

1. 實驗結果

磁鐵(片)	5	4	3	2	1
吹風間隔時間(秒)	1	1	1	1	1
晃動幅度	/				
1 分鐘內	2.5cm	3cm	7cm	4cm	4cm
2 分鐘內	3cm	4cm	7cm	5cm	3cm
3 分鐘內	2cm	4cm	9cm	6cm	4cm

2. 不同懸吊繩長晃動的頻率：懸吊橋長分別為 14cm 及 20cm，擺動 20 次所需時間(圖 34)的紀錄如下：

項次 長度	第一次	第二次	第三次	平均
20cm	18" 75	18" 03	17" 59	18" 12
14cm	14" 46	14" 22	14" 12	14" 27

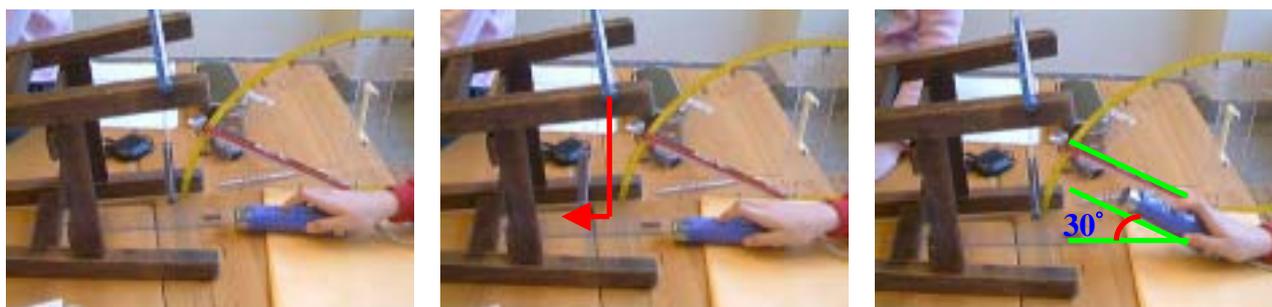


圖 34：盪鞦韆實驗

四、實驗四：MJB 橋的實驗

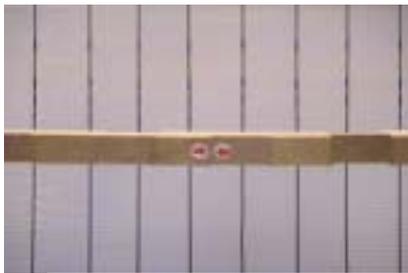
(一) MJB I

1. 輕型模型吊橋在受風的角度上，以正北風吹向橋中心點搖晃幅度最明顯，振幅可達 17 公分(圖 35)。
2. 若以東北方向吹陣風，繩子會扭曲轉圈，可知橋面的各點受力大小不均。

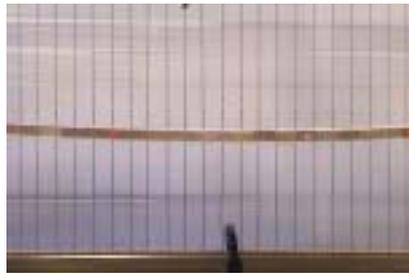


圖 35：MJB I 的擺動變化

(二) MJB II



以左右兩側拉緊固定



以東北或西北的陣風吹拂



搖晃並翻起大約一個橋頭(1.5 公分)

圖 36：MJB II 的擺動變化

(三) MJB III

1. 加上玻璃珠並瘦身，目的在便於觀察中央 A 段，兩側 B 段及固定端 C 段的翻轉(圖 37)

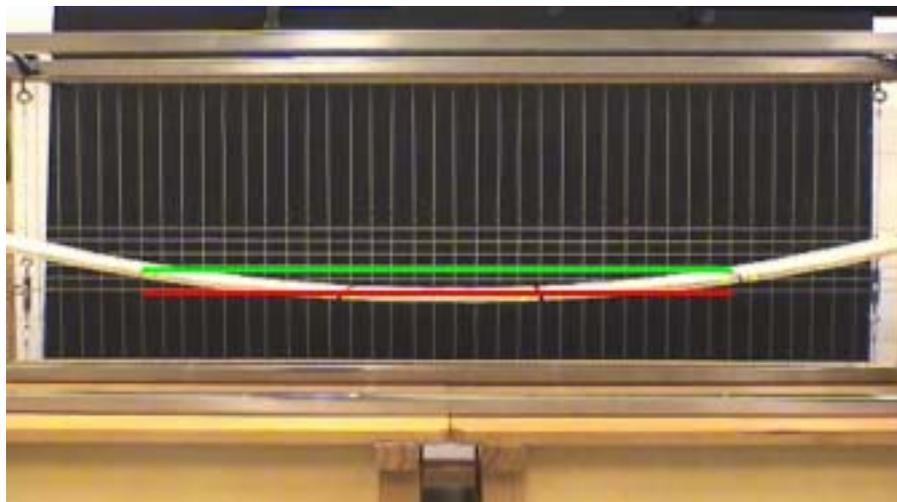


圖 37：MJB III 橋面在第一條線上，用 DV 正對橋面拍攝，並與橋面水平。

2. 從錄影截取畫面並做測量，A 段的翻轉最明顯可超過上下 5 格，前側可翻上 9 格之距離(如圖 40)，B 段做上下 3 格的翻轉(如圖 38)，C 段可達 2 格的翻轉(如圖 40)。
3. 我們觀察正北風吹動橋面，前端和後端受力不同再加上左右拉力的影響，發現間歇性的陣風造成的翻轉最為明顯。
4. 因東北、西北風吹拂變因太多不易觀察，但如同 MJB II 的結果，扭曲搖擺更為複雜。

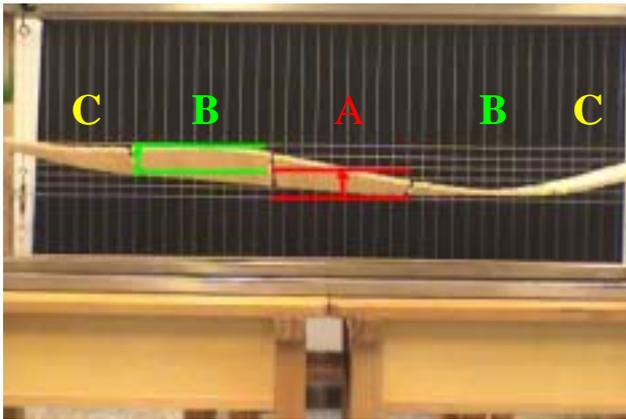


圖 38：MJB III
用間歇的風吹，中央上 3 格，左邊上 3 格。

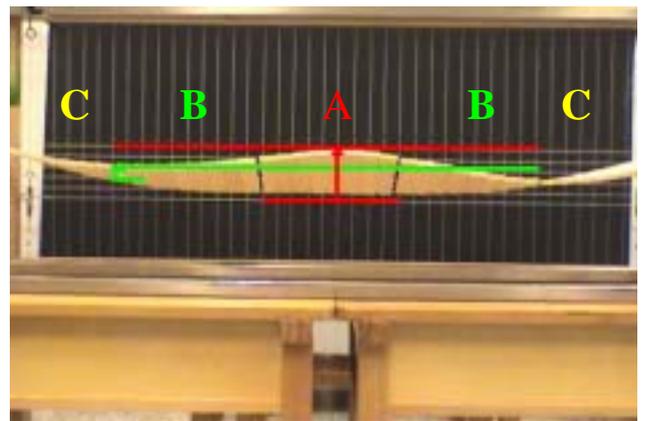


圖 39：MJB III
用間歇的風吹，中央上 5 格，左邊上 1 格。

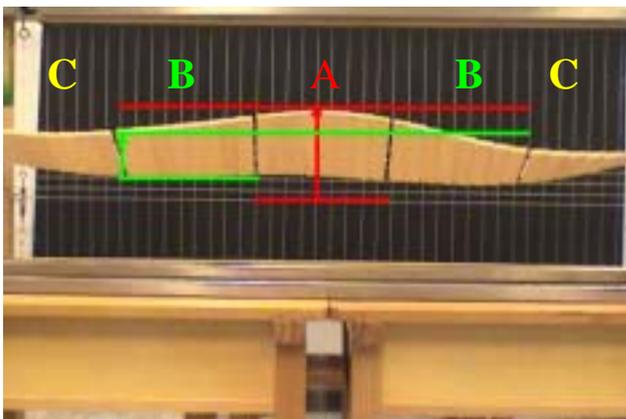


圖 40：MJB III
用間歇的風吹，最大翻轉可達 9 格大小的翻轉。

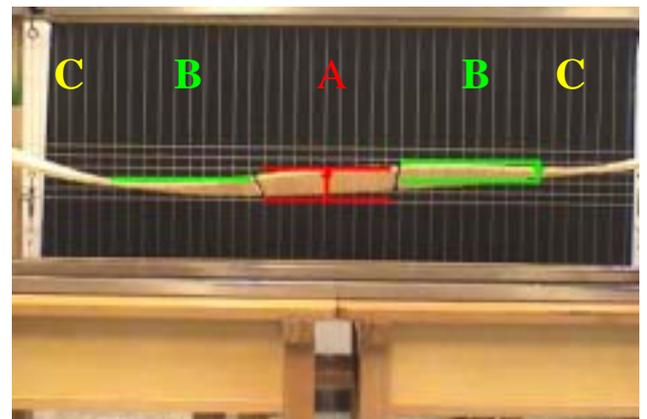
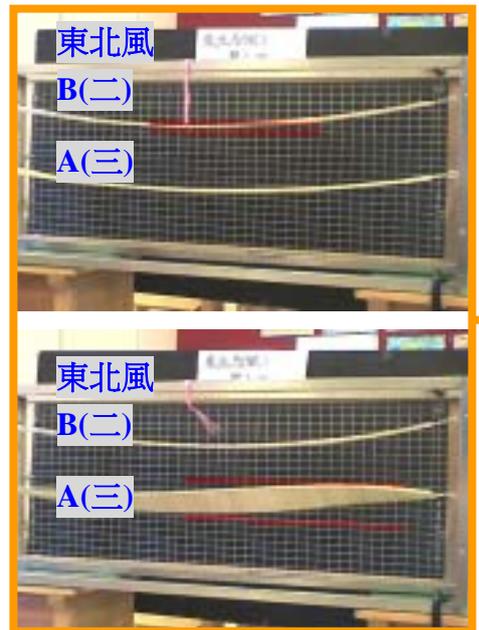
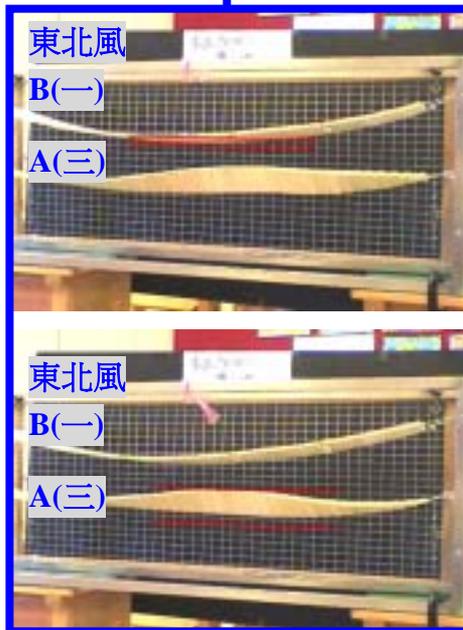
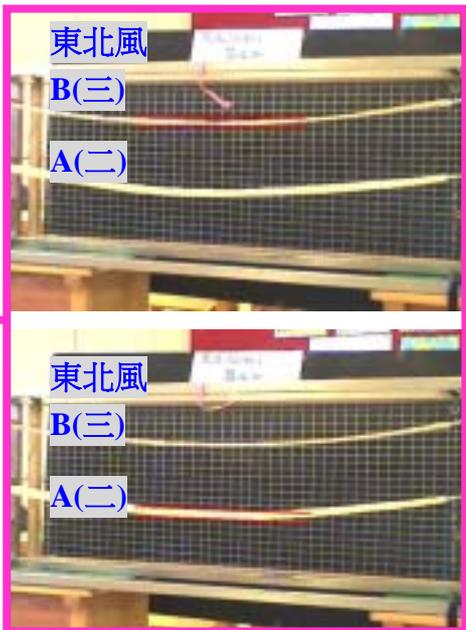
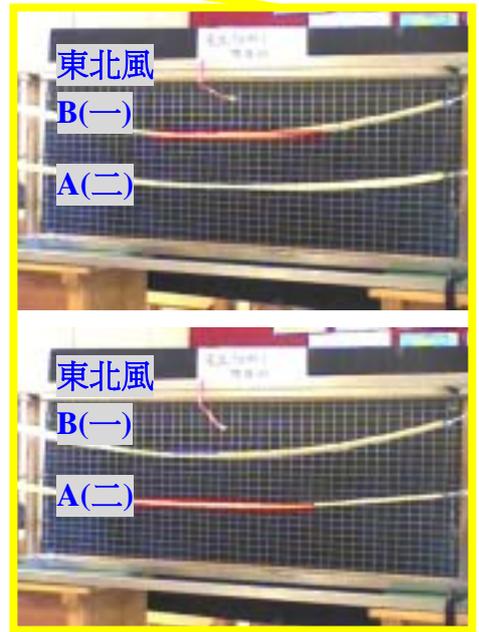
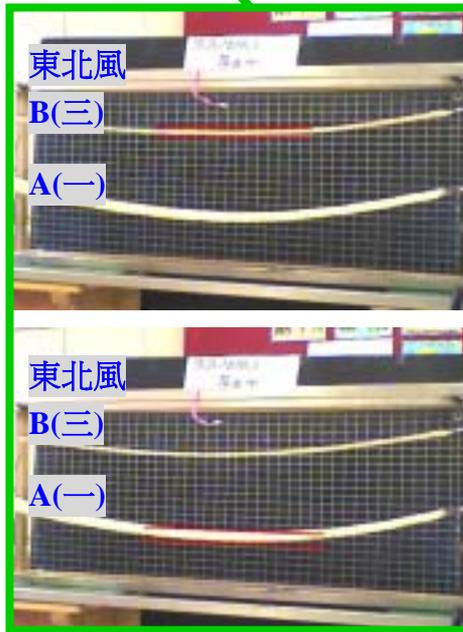
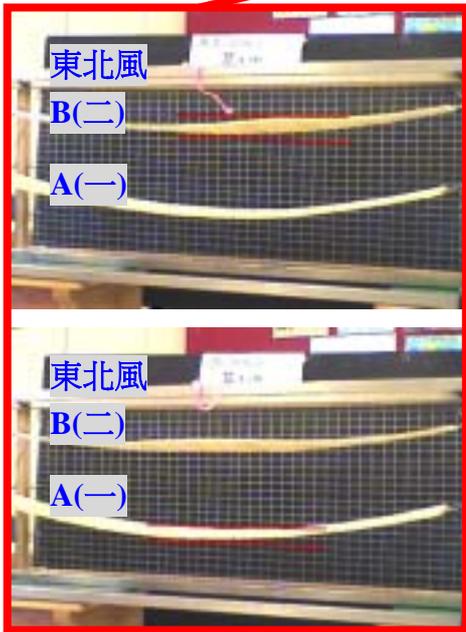


圖 41：MJB III
停止吹風時，橋面會恢復落下，間歇陣風使橋面產生反覆翻轉扭轉的波動。

五、**實驗五**：探討不同橋面寬度在間歇風的吹拂下翻轉的變化

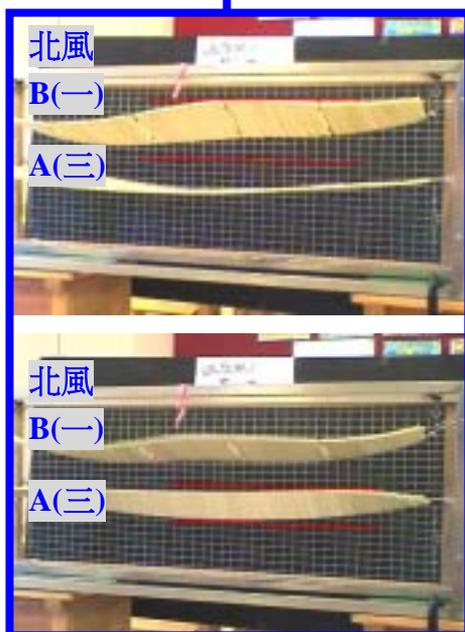
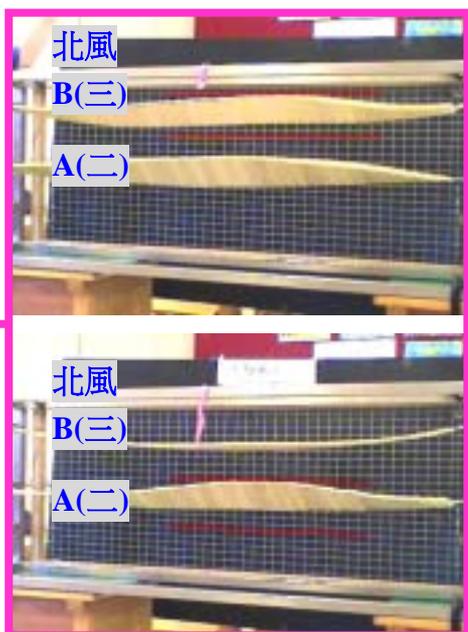
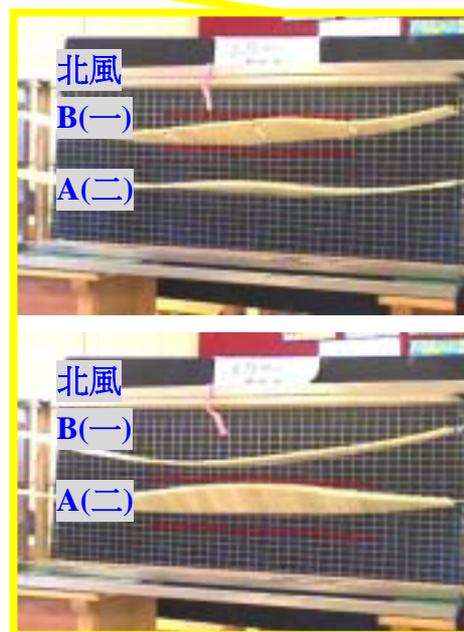
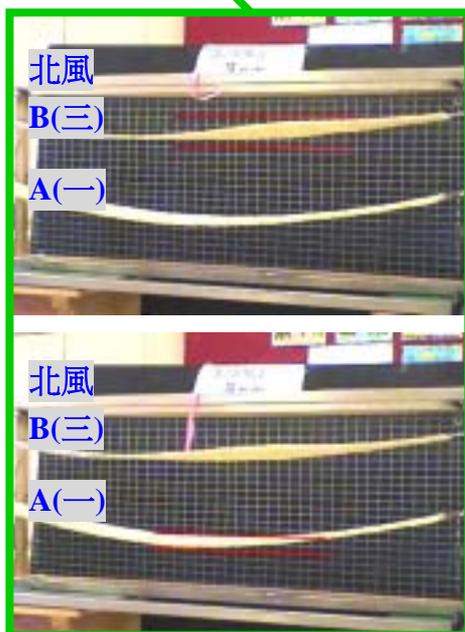
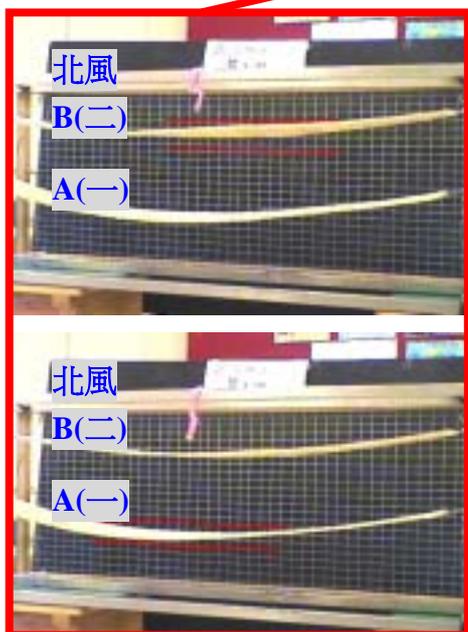
(一) 東北風吹不同組合的橋面翻轉情形，並記錄橋分別架在 A、B 位置時翻轉的最大幅度。

		1	2	3	4	5	6
B 位置		二	三	一	三	一	二
A 位置		一	一	二	二	三	三
東北風	最大振幅 B	3	1	1	1	1	1
	最大振幅 A	2	2	1	1	5	5



(二) 正北風吹不同組合的橋面翻轉情形，並記錄橋分別架在 A、B 位置時翻轉的最大幅度。

		1	2	3	4	5	6
B 位置		二	三	一	三	一	二
A 位置		一	一	二	二	三	三
北風	最大振幅 B	4	4	5	6	8	5
	最大振幅 A	3	2	7	7	5	7



柒、討論

一、實驗一：看見水波的折返 — 水波槽

(一) 當阻擋物體與水波呈 45 度角時，水波與反彈波形成的格子狀最清楚，節點多而整齊。

1. 阻擋板呈 45 度角時

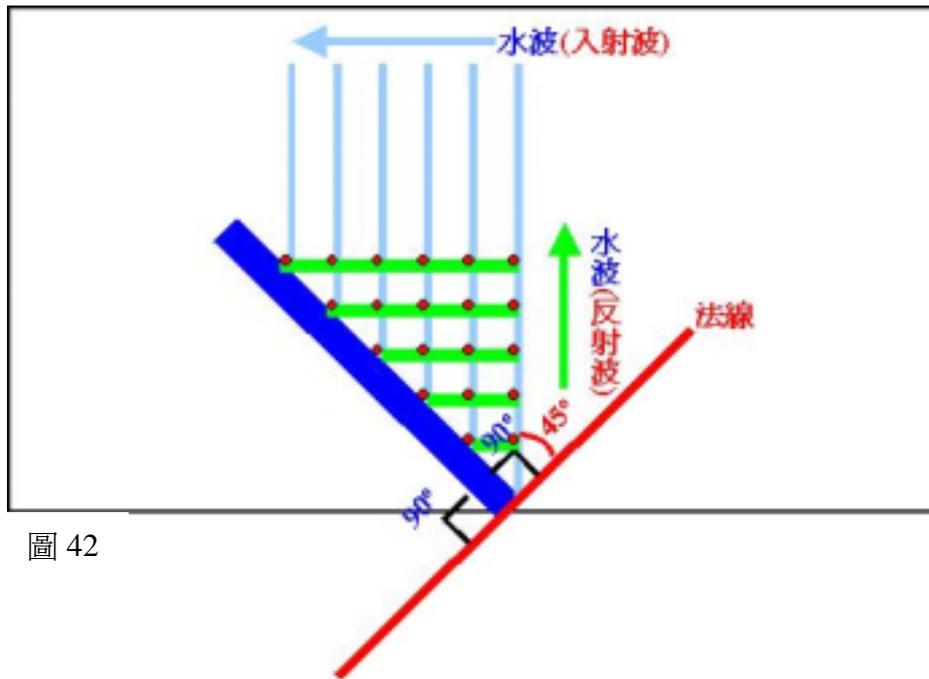


圖 42

2. 阻擋板呈 10 度角時

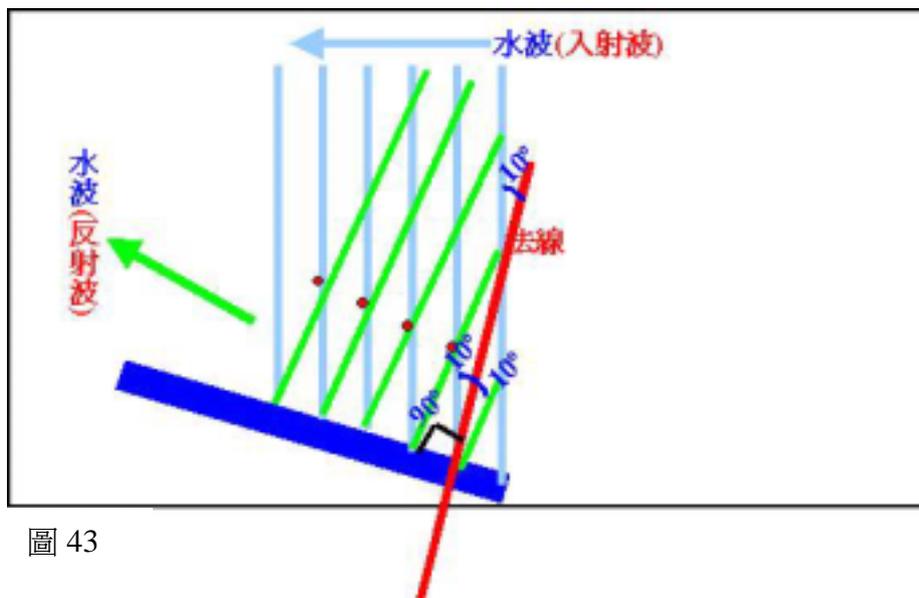


圖 43

二、**實驗二**：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形

- (一) 用提琴弓摩擦金屬板邊緣，拉奏出聲音時，振動波傳到邊緣，會反射回來，相遇處會產生節點，節點不會振動，就是白色細砂部分。
- (二) 金屬板振動時，手靠近板面時會覺得麻麻的(振動)，但手靠近白色細砂的部分(節點)不會麻(不會振動)。
- (三) 不同材質的金屬板，不會影響圖形。
- (四) 拉奏出的音高會影響圖形。
音調高→頻率高→波長短→節點多→圖形較複雜
音調低→頻率低→波長長→節點少→圖形較簡單
- (五) 拉弓的位置會影響圖形(圓形金屬板除外)。
- (六) 不同形狀的金屬板，會呈現不同的圖形。
- (七) 拉弓時手觸碰金屬板面，則觸碰處(不振動)，細沙會完全乾淨。
- (八) 金屬板上的圖形都是對稱的，但如果金屬板凹凸不平，會影響圖形的對稱。
- (九) 金屬板面振動時，細砂會隨著聲波上下跳動。

三、**實驗三**：繩波及盪鞦韆的實驗

兩端相反方向的施力，在頻率相同時會形成兩個大小相同但方向相反的波，亦即波和反射波振幅相同時，會產生節點。

四、**實驗四**：模型吊橋實驗

- (一) 懸吊繩越長，吊橋晃動的幅度越大。
- (二) 陣風引發的橋面振動較大。
- (三) 鞦韆、MJB 橋的擺動頻率和重量沒有直接關係。
- (四) 吊橋的擺動頻率和橋的懸吊繩長有關，懸吊繩長，則每一個擺動的間隔時間較長；懸吊繩短，擺動間隔時間較短。
- (五) 持續的(非間歇的)風，並不會使橋面劇烈晃動。間歇的陣風，才會使橋面劇烈晃動。
- (六) 當陣風的頻率和原來吊橋的晃動的頻率相等時，產生共振，加劇晃動的幅度。
- (七) 一般吊橋兩端懸吊纜繩較長，而中間懸吊纜繩較短。所以受陣風吹襲時，擺動幅度頻率不同，所以會產生扭轉的現象(剪力現象)。

五、實驗五：探討不同橋面寬度在間歇風的吹拂下翻轉的變化

- (一) 橋在 A 位置幾乎是一次陣風就翻轉一次，在 B 位置放二、三號橋翻轉頻率約為陣風頻率的兩倍。
- (二) 橋分別架在 A、B 位置時翻轉的最大幅度記錄。

		1	2	3	4	5	6
B 位置		二	三	一	三	一	二
A 位置		一	一	二	二	三	三
東北風	B 最大振幅	3	1	1	1	1	1
	A 最大振幅	2	2	1	1	5	5
北風	B 最大振幅	4	4	5	6	8	5
	A 最大振幅	3	2	7	7	5	7

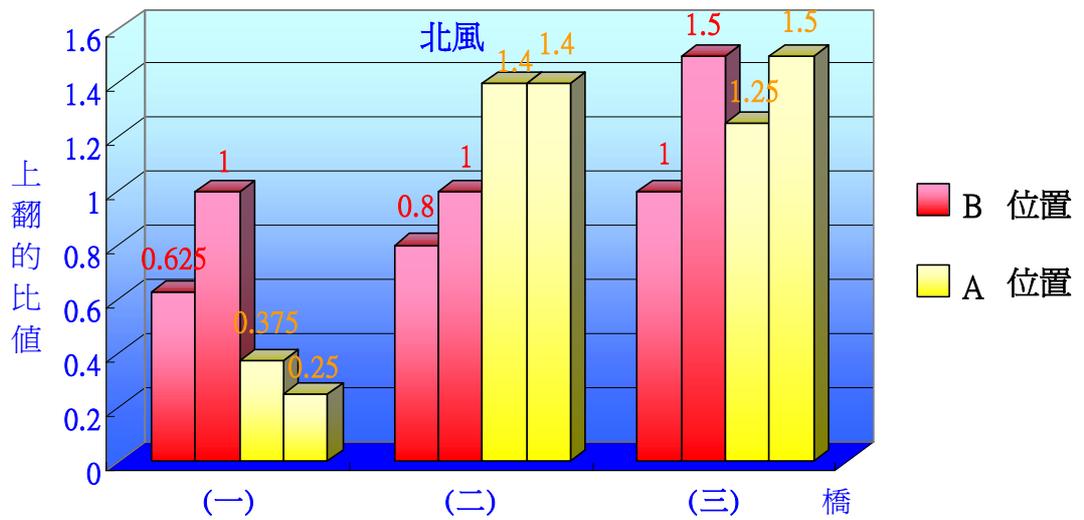
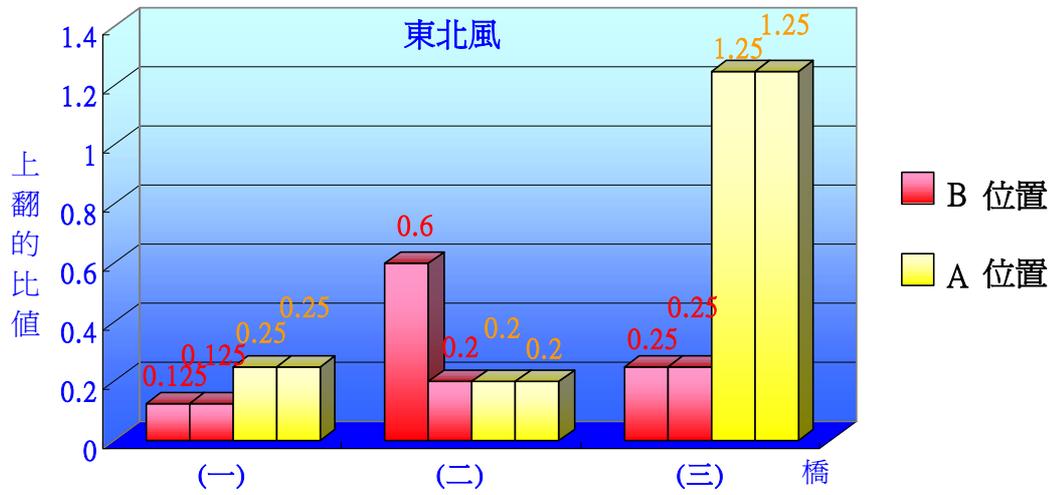
註：最大振幅為記錄橋面上翻轉時與對應格子網的格子數

- (三) $\frac{\text{上翻的格子數}}{\text{橋面格數}} = \text{上翻的比值} \Rightarrow$ 做成下表

		1	2	3	4	5	6
B 位置		二	三	一	三	一	二
A 位置		一	一	二	二	三	三
東北風	B 最大振幅	$3/5=0.6$	$1/4=0.25$	$1/8=0.125$	$1/4=0.25$	$1/8=0.125$	$1/5=0.2$
	A 最大振幅	$2/8=0.25$	$2/8=0.25$	$1/5=0.2$	$1/5=0.2$	$5/4=1.25$	$5/4=1.25$
北風	B 最大振幅	$4/5=0.8$	$4/4=1$	$5/8=0.625$	$6/4=1.5$	$8/8=1$	$5/5=1$
	A 最大振幅	$3/8=0.375$	$2/8=0.25$	$7/5=1.4$	$7/5=1.4$	$5/4=1.25$	$7/4=1.5$

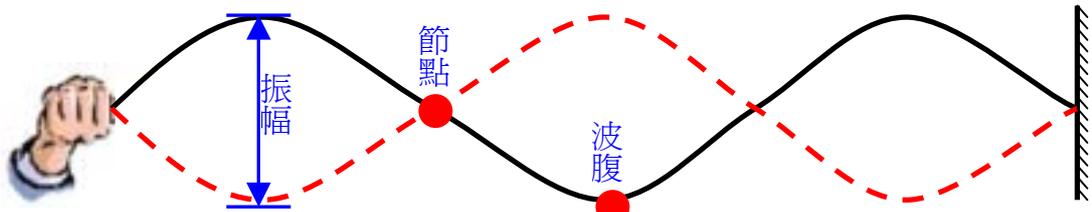
註：一號橋 15 cm 約八格大小
二號橋 10 cm 約五格大小
三號橋 7.5cm 約四格大小

長條圖比較：



捌、結論：

- 一、由實驗一：水波碰到阻擋時就折回，就像溜冰時我們撞到牆壁會向後退一樣，折回的水波會和下一個向前的波交疊產生各種交錯的圖形，圖形的變化和阻擋物的大小、接觸邊緣和角度有關。我們設計，使水波紋和長條日光燈影垂直，當水波經過燈影，燈影會產生變化(彎曲或模糊)如圖 30。當進來的波與阻擋板呈 45 度時，產生的格子紋波動使原來水平的燈管倒影又回復出現水平。所以知道，如果在阻擋板，畫出 90 度的線，則入射角等於反射角。(如圖 42,43)
- 二、在拉大提琴時，發現同音階的弦在有一條被拉動時，另一條也會振動。透過科學館的“克拉尼”實驗，設計了實驗二的兩組不鏽鋼板，一個圓板(類似科學館所見)，另外做一面長方形鋼板，了解在振動時，都可以藉著石英砂知道有振幅大小不同。細砂跳動高的，振幅大；反之，細砂集中的是振幅小。(如圖 11,12,13)
- 三、由實驗三：繩子做一次快速左右振動時，可產生一個波向前推進，當反射回來波和前進的波重疊時，形成如下的駐波，可看到某些點是固定不上下移位的，我們用數位相機拍攝到節點，就是左右端移位，而節點固定的那一瞬間。(如圖 33)

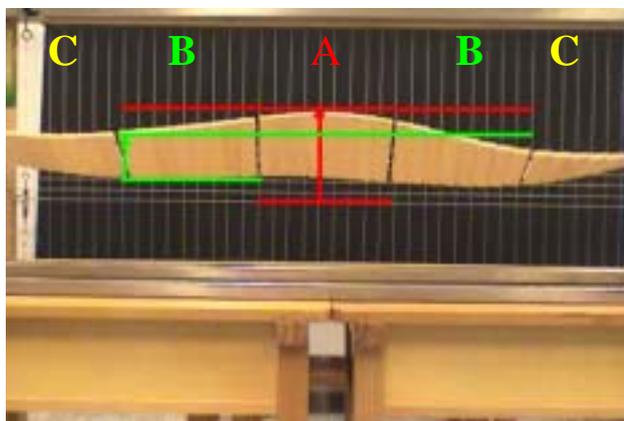


- 四、弓拉在鋼板上產生了振動，聲音以音頻器做記錄，鋼板上細砂排列出波動折返與原波交疊後之駐波圖形。振動大的波腹，跳動的細砂會集中到節點的位置，這樣的沙圖稱為克拉尼圖形。
- 五、在圓形板上不論那個位置，拉出的沙圖為多角星，我們推測因為反折回來的波距離都相等，同一個音高像 A(La)不是 4 角星就是 12 角星。似乎是 4 的倍數，D(Re)是 14 角星。長方形板的沙圖較複雜，在長邊的中點拉出的沙圖都是啞鈴形，我們推測波前進的距離很近就折返，多沙的節點落在中央，圖形單純。在短邊中點拉出許多節點，沙圖像許多元寶相連，可見長距離的傳送波動及折返的波相疊，可出現很多駐波。

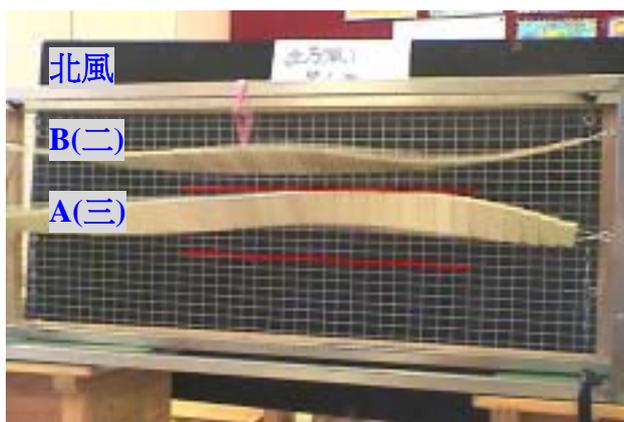


六、透過 MJB 橋 I、II、III 代改進的過程中，知道風向和繩子要垂直，吹風頻率要和晃動頻率相同，才能使橋持續晃動到一定的高度。晃動的週期，擺動 20 次的時間，繩長短則時間短，晃得快。

七、MJB 第一代小橋是放大的鞦韆，吹風的頻率和角度也得到印證。MJB 第二代做了不同方向的陣風試驗，對著橋中心吹東北風，產生的幅度大，也有扭轉的現象，但不易測量，大約造成一到二個的橋板的翻轉。經改進後的第三代 MJB 吊橋翻轉更明顯，當我們以正北風向橋中心吹風時，因前後受風力的不同產生的運動速度也不同，就造成如圖所見的翻轉，中間部分有 9 格的變化，B 段有 3 格的翻轉，C 段也有 2 格左右的轉動。



八、透過實驗五的觀察，由上翻的比值大證明了以北風吹模擬橋，橋面翻轉情形明顯。橋面窄的三號橋同時會出現上飄。



玖、參考資料及其他

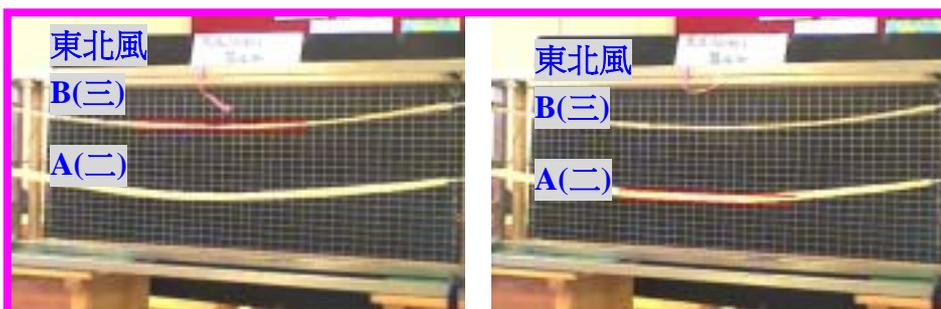
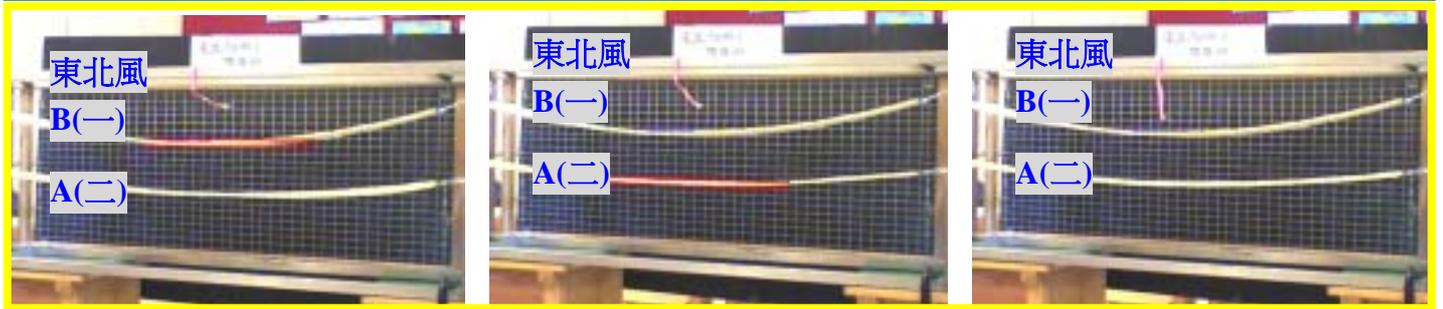
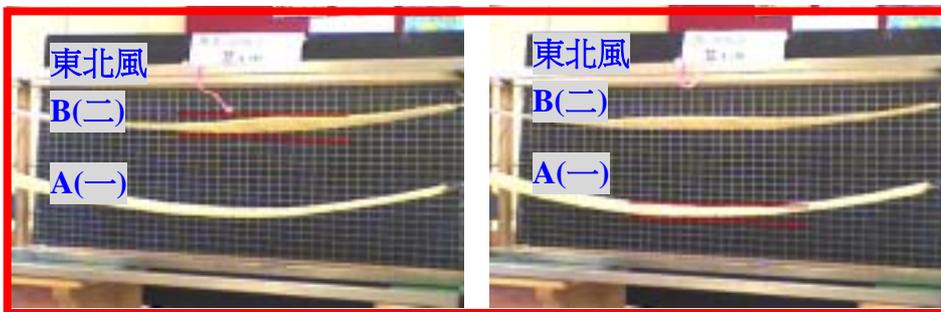
- 一、史家瑩主編，2004. 8，國民小學 1 上生活，翰林出版，P64
- 二、史家瑩主編，2004. 2，國民小學 2 下生活，翰林出版，P50
- 三、廖進德主編，2003. 1，國民小學 4 下，自然與生活科技，P52
- 四、Paul G. Hewitt 著，2004. 3，陳可崗譯，觀念物理IV (Conceptual Physics – The High School Program)，P42
- 伍、郭重吉主編，2003. 8，國民中學自然與生活科技第三冊，南一書局，P46
- 六、吳惠潔主編，1984.10，小牛頓 8，P86
- 七、高源清主編，1988. 4，小牛頓 50，P38
- 八、吳惠潔主編，1997. 3，小牛頓 157，P28
- 九、吳惠潔主編，1997.10，小牛頓 164，P72
- 十、若使一定大小的板面產生振動時，由於板面邊緣有波的反射，因而產生駐波，形成不振動的「波節」與激烈振動的「波腹」。由於是平面振動，所以波節排列在曲線上，形成複雜的模樣。在振動狀態的板面上撒上細砂，則細砂會聚集在不振動的波節上。而所產生的模樣，依研究者的名字，取名為「克拉尼(Chladni Figures)圖形」。(國立台灣科學教育館，四樓看板 5C-17)

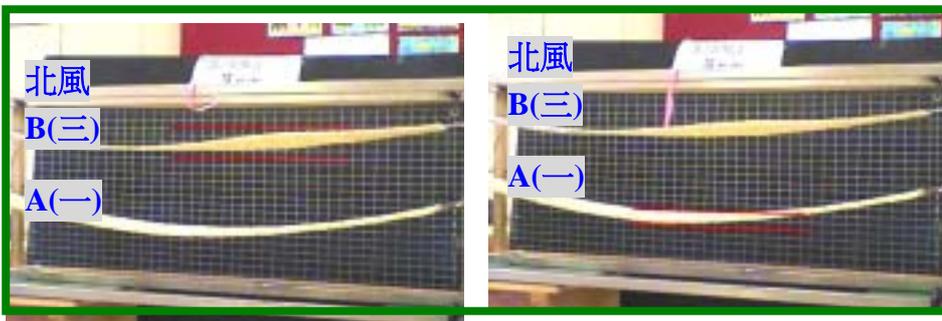
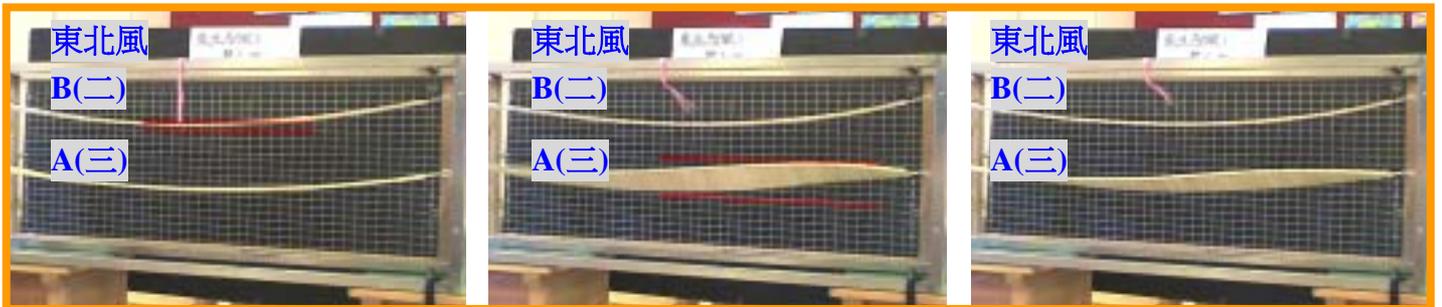
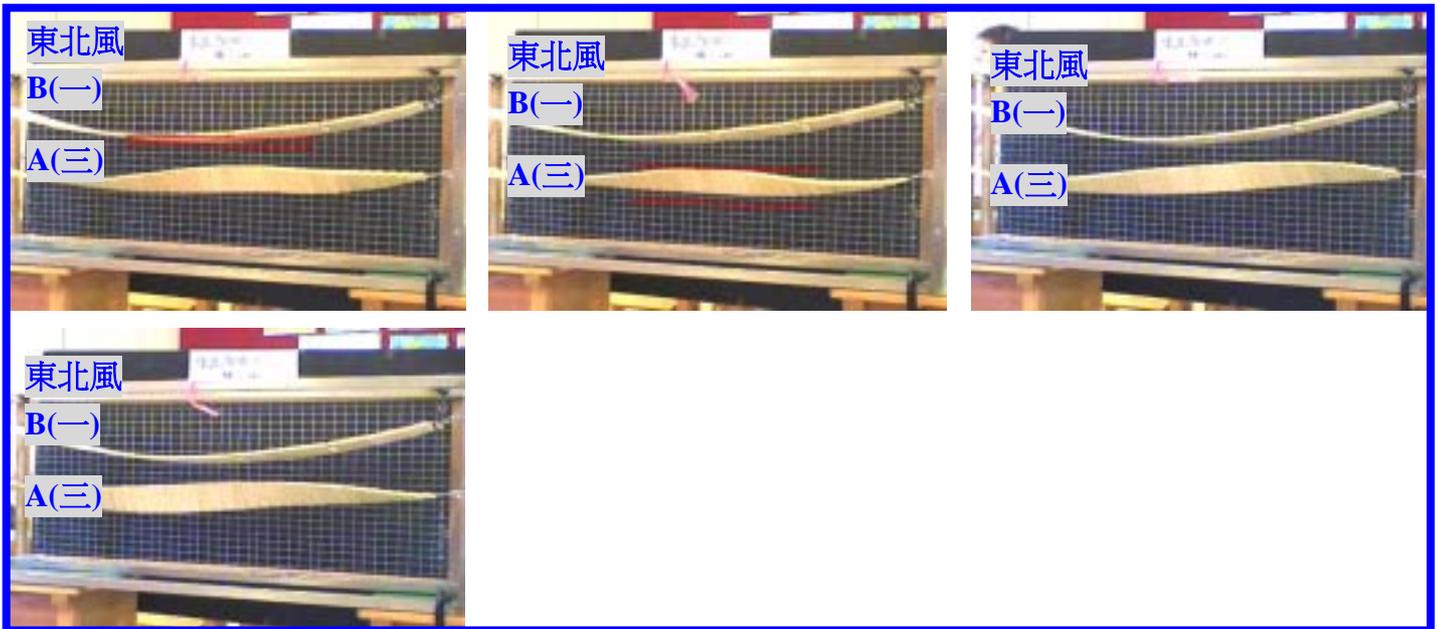
拾、附錄

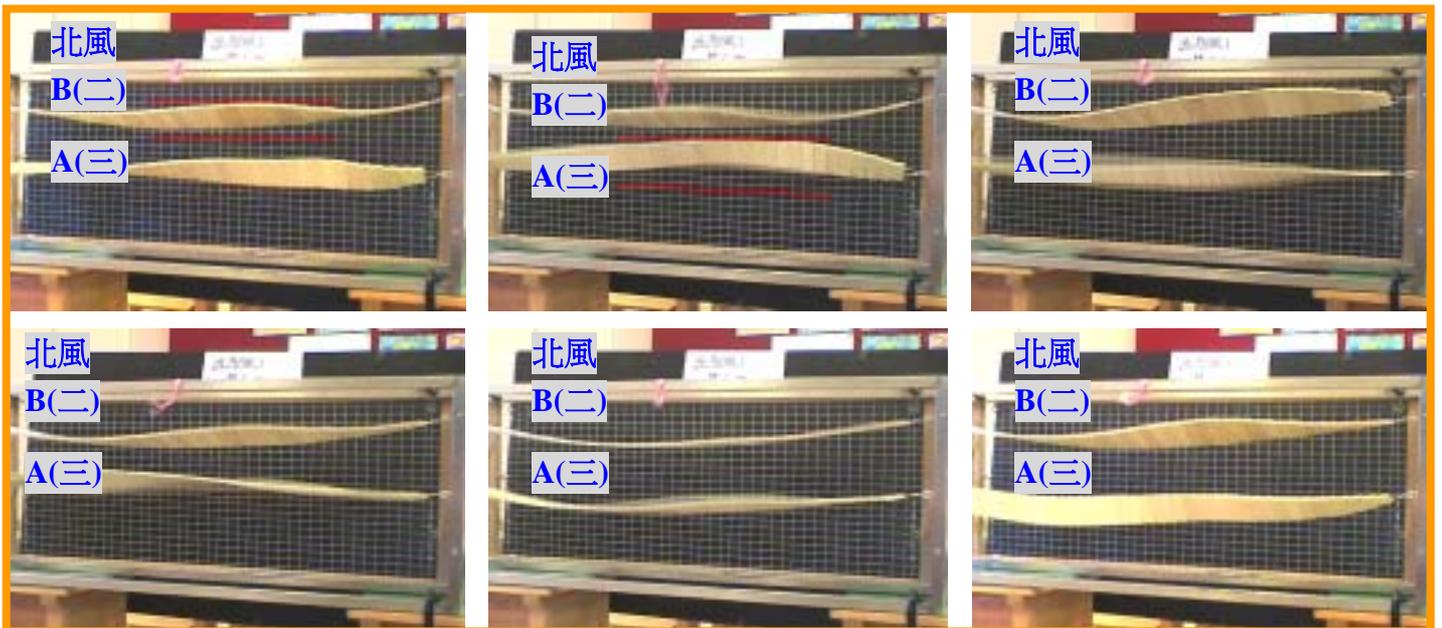
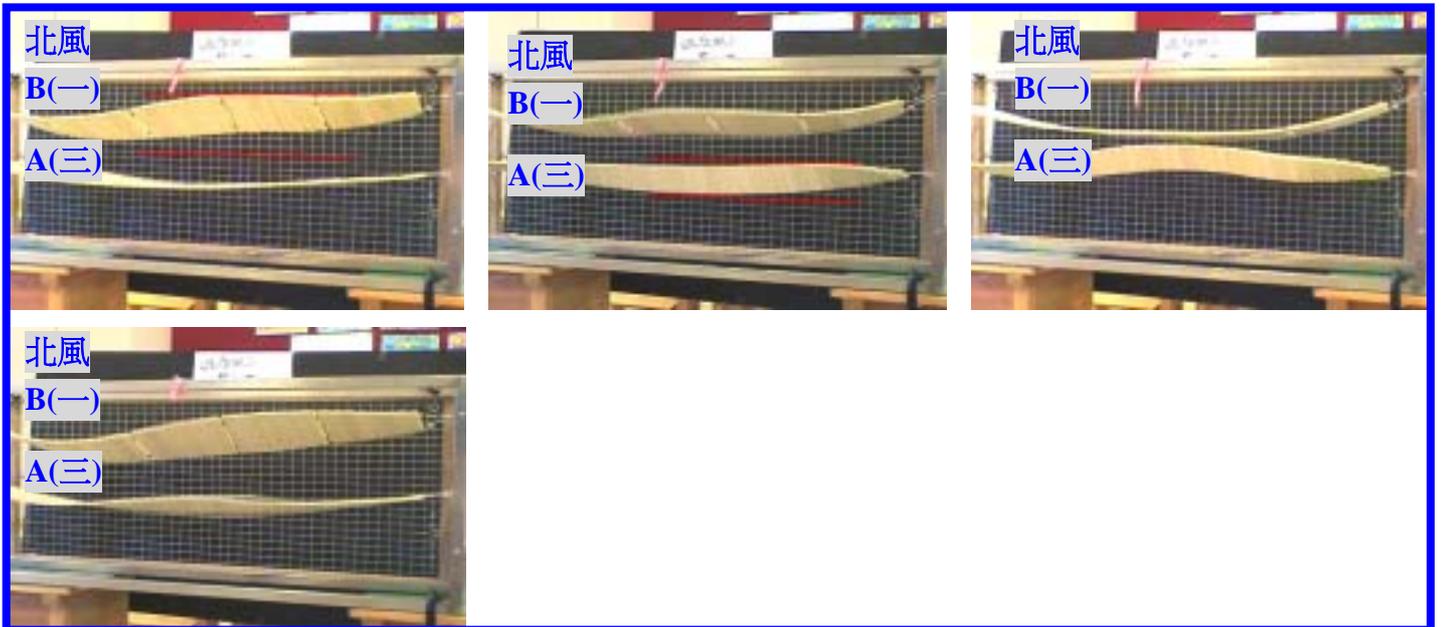
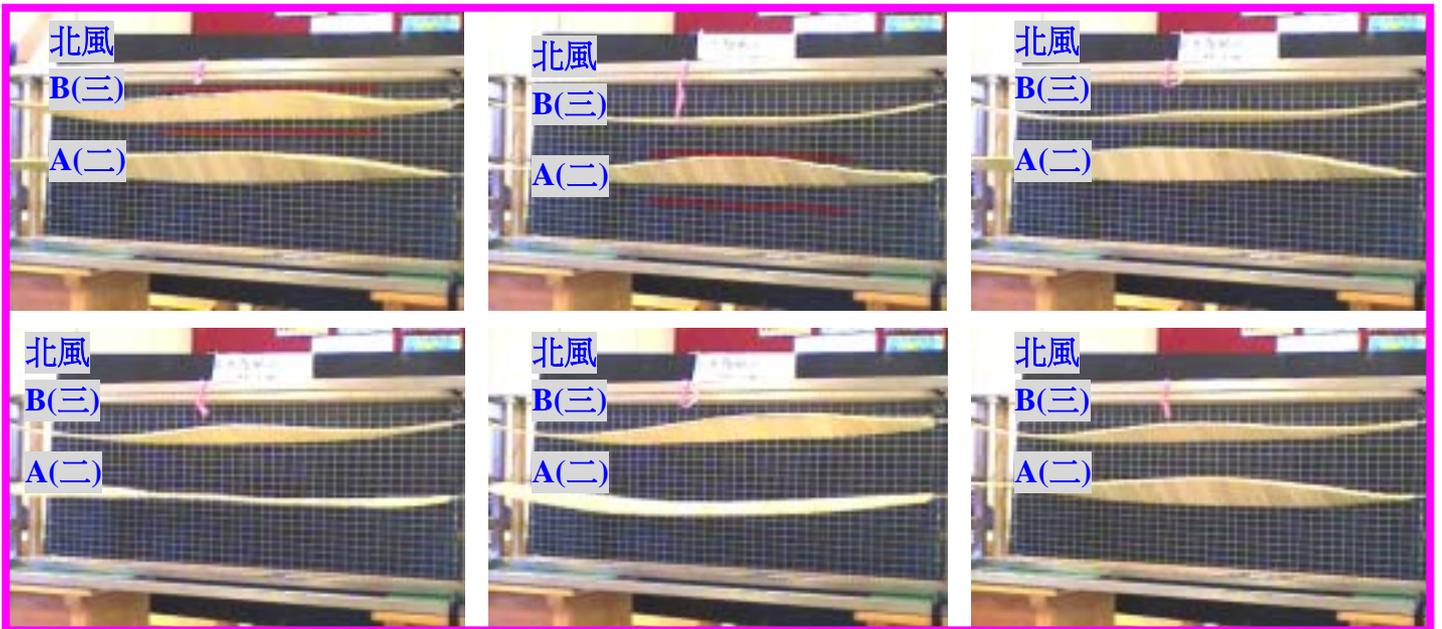
音高的音頻顯示 (實驗二：留住聲音的波動 — 克拉尼圖形)

音名	唱名	音頻器顯示	
中央 C	Do	C -50~50, C# -50~50	全音
D	Re	D -50~50, D# -50~50	全音
E	Mi	E -50~50	半音
F	Fa	F -50~50, F# -50~50	全音
G	Sol	G -50~50, G# -50~50	全音
A	La	A -50~50, A# -50~50	全音
B	Si	B -50~50	半音
高音 C	Do	C -50~50, C# -50~50	全音

實驗記錄 (實驗五：探討不同橋面寬度在間歇風的吹拂下翻轉的變化)







中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

國小組 自然科

第三名

081513

微風吹吊橋

臺北市大安區私立復興國民小學

評語：

本作品利用均勻的風，使橋產生脈衝式振動去
控討橋的振動及扭動，實驗各項變因考慮詳
實。結果具有實用性。