

都市林風倒木風險評估-以2019年利奇馬颱風環流對
大安森林公園茄苳樹動態受力調查為例

**Urban Tree Risk Assessment – An Investigation of Dynamic
Wind force on a tree (*Bischofia javanica* Blume) in DAAN
Forest Park by Peripheral circulation of Typhoon Lekima in
2019**

陳鴻楷¹ 林博雄² 陳奕良²

臺灣大學環境變遷與永續發展國際學位學程(IPCS)博士班¹

臺灣大學大氣科學系²

**The International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development
(IPCS)**

Ph.D. program, National Taiwan University¹

The Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University²

2020年7月之前，台灣地區六都發生行道樹倒塌造成行人受傷達79件，樹木健康診斷因子之中，以外力風速搖晃的衝擊最大，以往樹木力學研究均常以樹木幾何外形和靜態拉力為假設進行模擬計算。本研究改以大自然的颱風為外力，並將大安森林公園北側一株茄苳樹(*Bischofia javanica* Blume)透過 Trimble TX83D Lidar SCANNER 外觀掃描其幾何外形，並在該樹不同方位不同離地高度安置31組微型 HOBO Pendant G-sensor (1Hz),和一套 ATI TriSonica 音波風速風向計，於2019年8月7日最接近台北盆地之際，進行整株樹木受力情況的研判。資料整合分析結果發現，樹枝和樹葉的不均勻分布會造成 (1)樹緣外側以及頂部是內側的1.03倍 (2)迎風面受力是背風面的2倍 (3)樹梢頂部並非受力最大之處。

From January to July 2020, there has been 79 injury or car accidents due to falling trees or branches in six major cities in Taiwan. The major factor of to causing unsound tree to fall is the external forcing of winds. In the literature review, tree dynamic used the geometric appearance of tree and static pull forcing to approach the study of failure tree. This Study focus on the nature forcing, typhoon gust, and how it shaked one isolated tree (*Bischofia javanica* Blume) in Daan Forest Park of Taipei. We used Trimble TX83D 3D Lidar scanner to scan the tree geometric, and hanging 21 sets of HOBO Pendant G-sensors in four direction and three layer, one ATI TriSonica wind sensor (ultrasonic anemometer). These device record 1Hz data during Typhoon Lakima approach Taipei city. The observations showed that the uneven distribution of leaves and rod of tree will give (1) G forces had 1.3 times different between the internal and outbound edge location. (2) G forces had 2 times between windward side and leeward side (3) the top of tree is not the maximum point of G force.

一、 前言

2020年元月份到六月底全台灣發生公園、行道樹倒塌，造成行人受傷達 79 件，其中還包含三件因樹木倒伏造成當場死亡事件，樹木健康診斷因子之中 以外力風速搖晃的衝擊最大，以往樹木力學研究均常以樹木幾何外型 and 靜態拉力為假設進行模擬計算。

本研究改以大自然的颱風為外力，並將大安森林公園北側一株茄冬樹透過 Trimble TX83D Lidar SCANNER 外觀掃描，然後在該樹不同方位、離地不同高度安置 31 組微型 HOBO Pendant G-sensor (1Hz, 機台 xyz 震盪測試其儀器誤差)，和一套 ATI trisonica 音波風速風向計，於 2019 年 8 月 7 日最接近台北盆地之際，進行整株樹木受力情況的研判資料整合分析，結果發現陣風和亂流、樹枝和樹葉以不同的頻率和強度產生荷重，導致複雜的動力學 (dynamic) 反應，風以不協調的方式，從不同的方向造成枝條的擺動，這種枝條間的晃動得以消散風能並減緩大枝條的晃動，該過程稱為量體減振 (mass damping)，可降低樹幹負重和震盪的減少，具有不同直徑和長度的枝條，在不同的負重下用不同的速度晃動增加減振，此次實驗觀察到以下結果：

- (1) 樹緣外側以及頂部的擺動幅度是內側的 1.03 倍
- (2) 迎風面受力是背風面的 2 倍。
- (3) 樹梢頂部並非受力最大之處。

二、 都市林風倒木及樹木風險評估

- (1) 造成都市林風倒木的因子：

都市內包含公園的樹木、行道樹，除了結構上有瑕疵（空洞、腐朽、盤根…）的苗木造成的結構不穩定之外，另外經過長時間的種植後，較大或較老的樹逐漸邁向成熟階段，米徑、高度還有樹冠的寬度生長的速度會趨緩，整體的活力也會開始下降。當樹木無法再提供維持生長所需足夠之碳水化合物、養分，老樹會進入縮減階段 (retrenchment phase)，樹冠幅內枯枝會大量增加、高度及冠幅也會慢慢減少，對於風力和病蟲害的抵抗力變弱，因此枝條斷裂或倒伏的機會隨之增加。除了來自樹木本身的負重外，其樹種特性、樹冠形狀及尖削度、維護管理、土壤質地及含水率、根系的型態及分布、樹體本身的健康度及結構穩定性、病蟲害以及氣象，然而氣象因素是斷裂或倒伏最重要的外在因子之一。氣象因素包括：颱風（颶風）、季節風—風害、下雨、落雷…等，以下就氣象因素之風力因子在大安森林公園以利奇馬颱風為例進行觀察。

樹木風險評估的定義：

量化的風險=機率*後果

樹木風險評估的不確定性很高，例如預測自然過程的腐朽擴散速率、木材的反應成長…等，都需要量化，而風險評估涉及判斷，系統化的過程還包括鑒定、分析、衡量樹木的風險…。

風荷重=

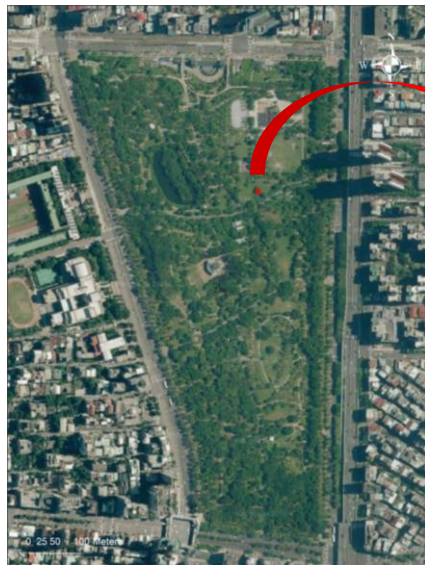
$$\frac{1}{2} \times \text{大氣的密度(kg/m}^3\text{)} \times \text{風速(m/s)}^2 \times \text{樹冠的垂直面積(m}^2\text{)} \times \text{抗力係數} \times 1$$

樹木風險評估步驟如下：

- A. 確定潛在的標的
- B. 評估生育地內會導致風險、或緩減風險的因素
- C. 衡量導致塌壞「樹木潛在負重的結構或生育力的狀況」以及樹木對缺陷反應生長，以判斷塌壞的可能性
- D. 評估一棵樹或樹的一部分，導致撞擊人或財產，或中斷活動的可能性、及分級撞擊的可能性
- E. 以分級塌壞的後果，來衡量目標及潛在的損害
- F. 衡量所評估的風險與客戶的風險容忍度
- G. 報告調查的結果，包括建議「緩解」選項、和其他相關的「殘留」的風險。

三、 實驗設計

(1) 標的木基本資料



座標	
X	304107.4171
Y	2769350.1670
Z	8.0107

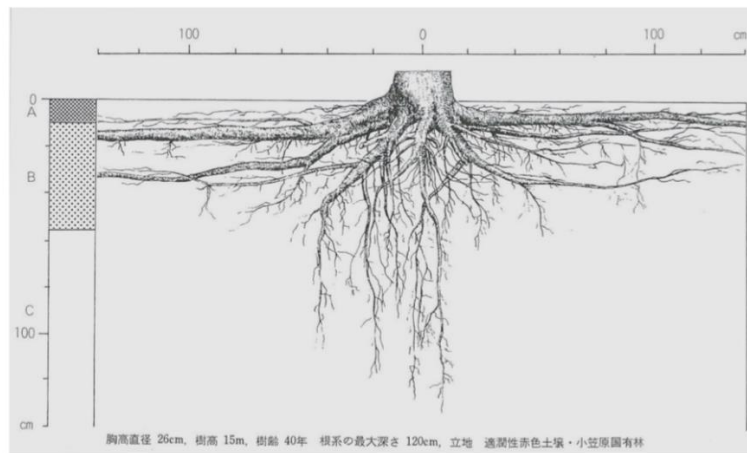
樹種	茄苳
枝下高	1.55
幹徑(cm)	44.6
樹高(m)	8.71
樹冠幅-N(m)	11.72
樹冠幅-E(m)	11.95



(2) 茄苳的樹木特性

樹種名： 茄苳		<i>Bischoffia javanica</i> Blume	葉下珠科 重陽木屬
生活型態：常綠，潤葉，喬木		植栽地區：亞熱帶地區	移植難易度：中
適合 土壤	土性：壤土—埴壤土	鹽類濃度：中	乾濕：弱濕性～適當濕潤性
	通氣：中	pH：中	緊密度：中
根系 形態	中・大徑的水平根型		
	垂直分佈：淺根型	細根多少：疏生型	分歧：疏放型
	水平分佈：中間型	細根粗細：纖細型	根毛量：不明型
斷根時的發根性：良好		根系支撐力：中	日光條件：陰性

(3) 根系的特徵



圖、茄苳的根系圖(引用 苧住昇：根系圖說)

根端直徑 0.2~0.3 mm，長度 3~5 mm 較短小，表皮呈淡褐色因菌根凹凸較多、粗糙。細根分歧疏放，土壤保持能力小。分佈狀況偏於表層。小・中徑根的分歧稀疏。樹齡小的幼木主根很明顯，但大樹 水平根較明顯。根系的土壤緊搏力中等、材質軟。淺根性且伸展性一般。適當濕潤且肥沃的土壤環境生長得好。沿沼澤地生長得好，可看到細根在沼澤的水中呈房狀生長。



圖、土壤及根系調查

(4) 大安森林公園茄苳樹-光達樹木掃描

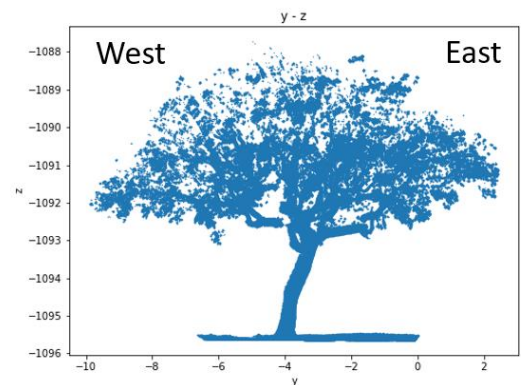
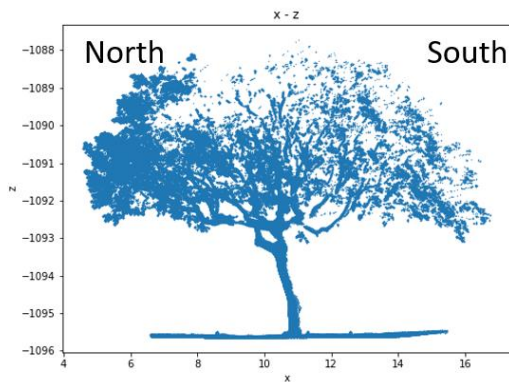
A. 光達儀器- FARO Focus 3D S120 Laser Scanner



- 距離精度(Distance accuracy) $\pm 2\text{mm}$
- 範圍(Range) 從 0.6m 至 120m
- 測量速率(Measurement rate) 最大 976,000 點/每秒



B. 樹木掃描成果



(5) 大安森林公園茄苳樹-HOBO 架設

A. HOBO sensor 介紹

- Measure 3-dimensional motion, such as sports activity or medical therapy compliance with the HOBO® Pendant G data logger. With this logger, users can measure acceleration and angular displacement in 1, 2 or 3 axes.
- Measurements: Acceleration and Tilt



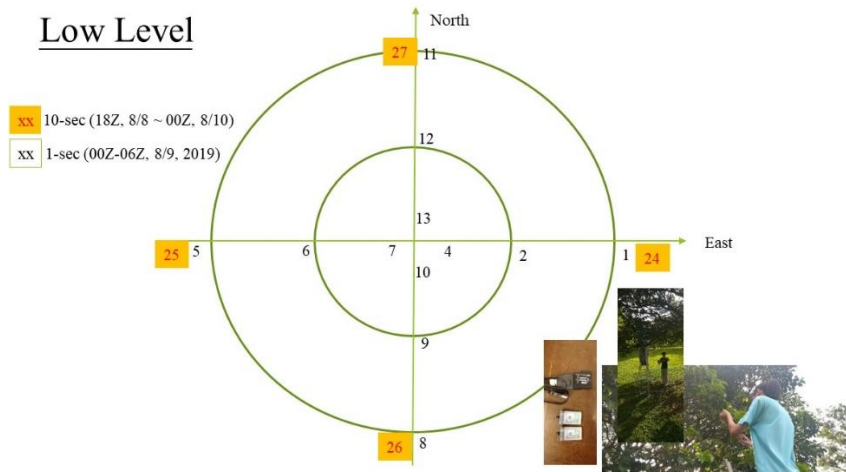
B. HOBO sensor 架設位置

低層外圈	東 (離地 290cm, 距主幹 530cm 枝條直徑 2cm)
	南 (離地 302cm, 距主幹 560cm 枝條直徑 1cm)
	西 (離地 322cm, 距主幹 500cm 枝條直徑 2.5cm)
	北 (離地 413cm, 距主幹 410cm 枝條直徑 2cm)
中層外圈:	東 (離地 525cm, 距主幹 503cm 枝條直徑 1.5cm)
	南 (離地 478cm, 距主幹 550cm 枝條直徑 1.5cm)
	西 (離地 453cm, 距主幹 440cm 枝條直徑 1.5cm)
	北 (離地 608cm, 距主幹 370cm 枝條直徑 1.2cm)
頂層	頂 (離地 762cm, 距主幹 5cm 枝條直徑 3cm)

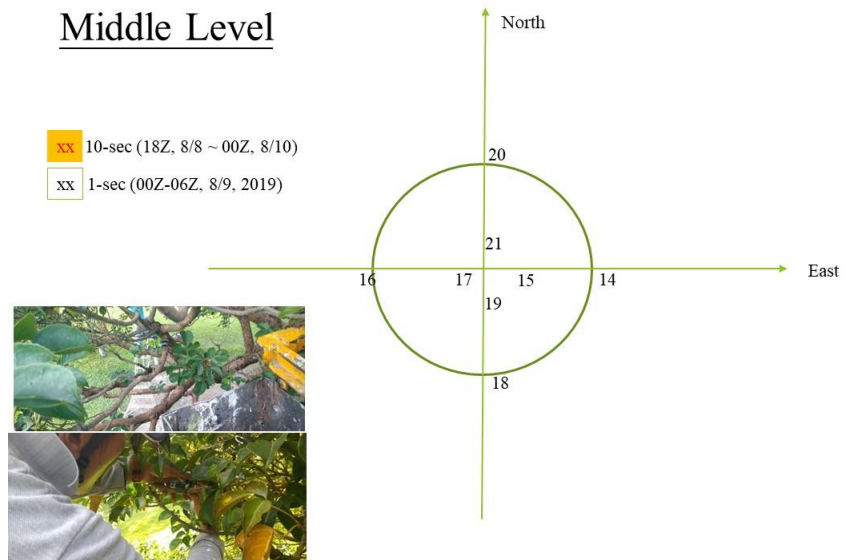
監測時間：2019 年 8 月 8 日至 2019 年 8 月 9 日(利奇馬颱風)

C. 枝條各位置點所受應力大小與樹木枝條位置

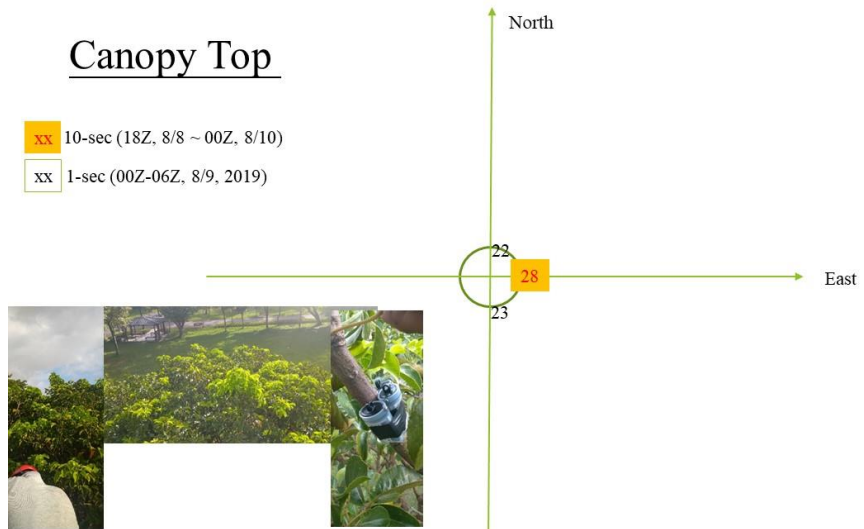
Low Level



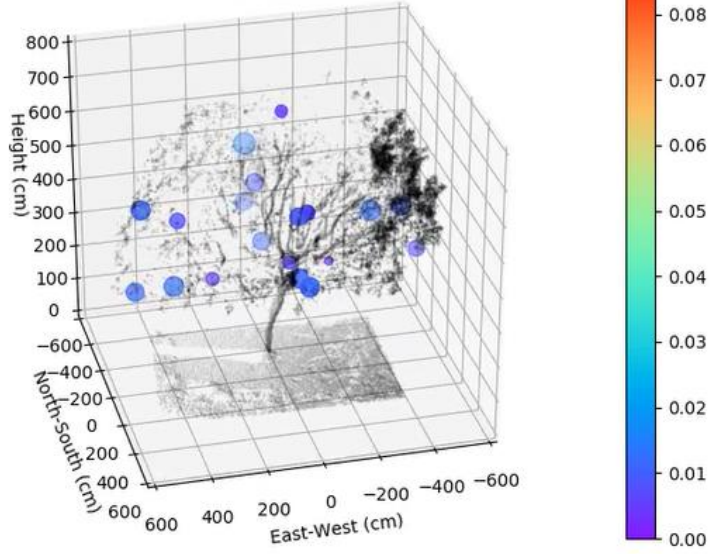
Middle Level



Canopy Top

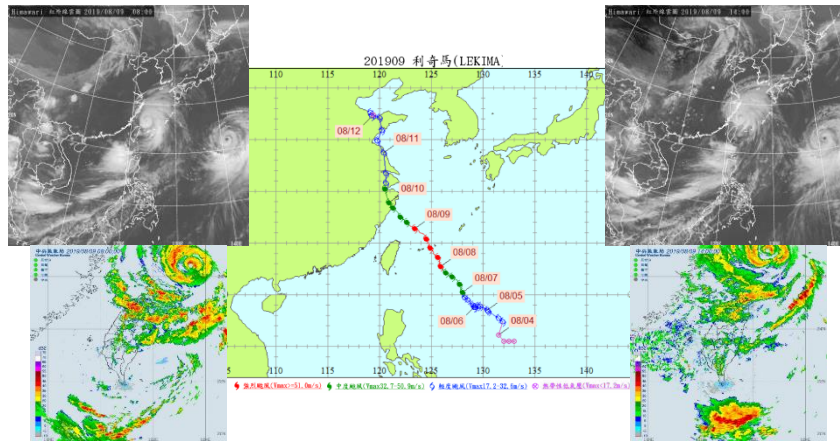


acceleration standard deviation (g) : 2019-08-09 10:14:00

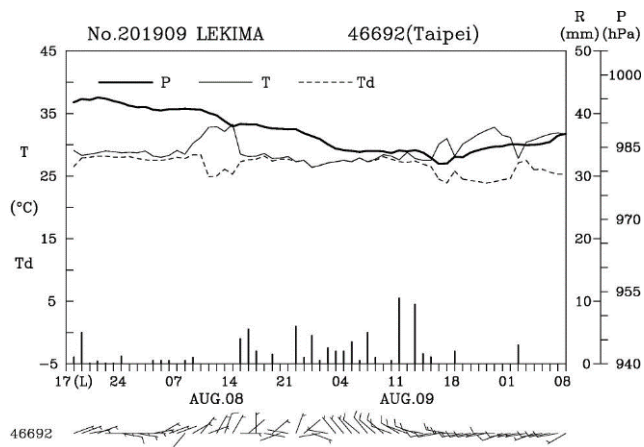


D. 利奇馬颱風氣象資料：

- 颱風路徑

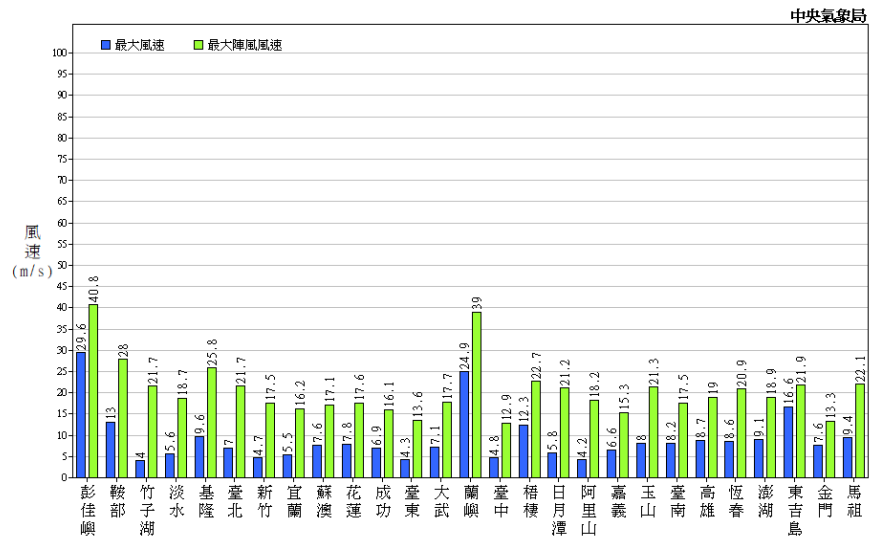


- 利奇馬颱風台北測站資料



- 利奇馬颱風各測站最大風速及最大陣風分布圖

2019 08/07 17:30 到 08/10 08:30 LEKIMA 颱風發警報期間各測站最大風速及最大陣風分布圖



四、 結論

本試驗的目的為樹形對於耐風性的影響，但實際上在耐風性評價中，損傷、腐朽、強度特性等，其他的要素也應該要考慮進來。

- (1) 不同方位的攔腰折斷的極限風速差中，最大為 24.6m/s。在目視判斷中，判斷方位是重要的因素。樹幹斷面不整齊的話，最好是從樹冠面積大的方位來判斷。
- (2) 連根拔起抵抗與扭轉剪斷應力的指標，在不同樹種間其各自的平均值並沒有差異。但是徑級(木材直徑的分級)與連根拔起抵抗的指標之間因為樹種不同而有差異，還有，白樺的扭轉剪斷應力較大的樹形的個體容易顯現。因此樹形的因素於不同樹種間有差異，考量各個樹種的特性、在進行植栽管理是最好的。
- (3) 形狀比、連根拔起抵抗的指標與扭轉剪斷應力的指標的相關性是高的。透過樹形因素來評價耐風性之後，形狀比較容易使用且信賴度較高。

除氣象資料外，其他幾個影響枝條斷裂或樹木倒伏的因子還包括：

- (1) 樹木生理特性：
 - A. 抗風性低枝條易斷裂的樹種：黑板樹、水黃皮...等
 - B. 自然枯枝、落枝頻度較高的樹種：苦楝、羊蹄甲...等
 - C. 病蟲害（以松材線蟲為例）多的樹種：黑松、琉球松...等
 - D. 腐朽菌（褐根病）侵入導致支撐力弱的樹種：榕樹、菩提樹、橡膠樹、樟樹...等
- (2) 施工管理維護不當：
 - A. 造成樹體腐朽、空洞
 - 幼年成長的障礙-共主莖、等勢幹、內生夾皮

- 連續的強剪及斷頭
 - 修剪位置錯誤樹皮受傷
 - 支架、木格柵構造物引起的樹幹包覆受傷
- B. 錯誤的修剪方式-造成不定之徒長枝叢生
- C. 強剪造成徒長枝條生長迅速-H/D、L/D 過大
- D. 土壤條件不適合（硬度太高、排水不良）
- E. 沒有適當的間距，導致樹木尖削、活冠比差
- F. 周邊營建工程影響（造成根系損傷）
- G. 五大管線地下空間相互競爭

都市林樹木風險評估目的是為了防止樹木因結構上的安全事故發生，可以早期發現樹勢活力不佳、結構安全有疑慮、有斷枝倒伏的風險，避免此類的問題發生，以往樹木力學研究均常以樹木幾何外形和靜態拉力為假設進行模擬計算。本次研究以利奇馬颶風為外力，並將大安森林公園北側一株茄苳樹進行動態受力試驗，藉以了解樹冠內枝條擺動受風力相互的影響、受力的大小，唯觀測的次數及數據尚需重複驗證，以深入了解樹葉、樹枝、樹幹彼此間的影響及阻尼的效果如何降低風能，待蒐集更多的實驗數據，再加以驗證。

五、參考文獻

1. 小泉章夫(2017)。街路樹の力学。環境ストレスと樹林地管理。21(4)，217-221。
2. 荻住昇(2010)。最新樹木根系図説。日本：誠文堂新光社。
3. 茅島信行、佐々木重行、檜崎康二(2013)。スギにおける引き倒し試験および力学モデルを用いた風害に強い樹形の解明。福岡県森林林業技術センター研究報告，14，17-45。
4. 財團法人氣象應用推廣基金會，颶風和台灣地形。檢自
<http://www.metapp.org.tw/index.php/weatherknowledge/37-typhoon/81-2009-01-22-07-19-46>
(Jul.27.2020)
5. 深見悠矢、北原曜、小野裕、藤堂千景、山瀬敬太郎(2011)。土壤水分等の条件が異なる場合の立木引き倒し試験。日林誌，93(1)，8-13。
6. 陶山正憲(1993)。台風による樹木の風倒・折損機構。37(1)，25-53。
7. 飯塚康雄，松江正彦，長濱庸介(2011)。沖縄における都市緑化樹木の台風被害対策の手引き。国土技術政策総合研究所資料，621 號。
8. 藤田歩(2013)。緑化木樹種の樹形による耐風性の評価。
9. Chiraz, M. (2013). Growth of Young Olive Trees: Water Requirements in Relation to Canopy and Root Development. American Journal of Plant Sciences, 04(07), pp.1316-1344.
10. Duryea M, Kampf E (2007) Wind and trees: lessons learned from hurricanes. University of Florida, Gainesville, FL
11. England, A.H., Baker, C.J. and Saunderson, S.E.T. (2000). A dynamic analysis of windthrow of trees. Forestry, 73(3), 225-237.

12. Gilman, E. (2007). Restoring trees after a hurricane. 1st ed. [Gainesville, Fla.]: University of Florida, IFAS Extension, p.Chapter 4.
13. Gilman, E.F., Grabosky, J.C., Jones, S., and Harchick, C. (2008). Effects of Pruning Dose and Type on Trunk Movement in Tropical Storm Winds. *Arboriculture and Urban Forestry*, 34(1), 13-19.
14. Gilman, E.F., Masters, F. and Grabosky, J.C. (2008). Pruning Affects Tree Movement in Hurricane Force Wind. *Arboriculture and Urban Forestry*, 34(1), 20-28.
15. Gross, G. (2018). A windthrow model for urban trees with application to storm "Xavier". *Meteorologische Zeitschrift*, 27(4), pp.299-308.
16. Kampf, M. (2018). FOR118/FR173: Wind and Trees: Lessons Learned from Hurricanes. [online] *Edis.ifas.ufl.edu*. Available at: <http://edis.ifas.ufl.edu/fr173> [Accessed 28 Mar. 2018].
17. Kang, N. and Elsner, J. (2016). Climate Mechanism for Stronger Typhoons in a Warmer World*. *Journal of Climate*, 29(3), pp.1051-1057.
18. Kazuhisa Tsuboki, Mayumi K Yoshioka, Taro Shinoda, Masaya Kato, Sachie Kanada, & Akio Kitoh (2014). Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change: Increase of super-typhoon intensity. *Geophysical Research Letters*. 42. 10.1002/2014GL061793.
19. Kenneth Ronald James (2010). A Dynamic Structural Analysis of Trees Subject to Wind Loading
20. Knudson, M. and Knudson, M. (2018). Why Do Trees Topple in a Storm?. [online] *Scientific American Blog Network*. Available at: <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/why-do-trees-topple-in-a-storm/> [Accessed 8 Mar. 2018].
21. Manual of Countermeasures Against Typhoon Damage on Urban Planting Trees in Okinawa. (2011). 1st ed. Okinawa: National Institute for Land and Infrastructure Management, pp.1-350.
22. Mattheck, C. and Breloer, H. (1994). The body language of trees. HMSO, Dept of Environment.
23. Mattheck, C., Bethge, K., Kappel, R., Mueller, P. and Tesari, I. (2003). Failure modes for trees and related criteria., International Conference "Wind Effects on Trees", University of Karlsruhe, Germany.
24. Milne, R. (1991). Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. *Tree-Physiology*, 9(3), 383-399.
25. Moore, G. (2019). Windthrow of Trees: Storms or Management. *International Society of Arboriculture*, pp.1-25.
26. National Institute for Land and Infrastructure Management(2011) Manual of Countermeasures Against Typhoon Damage on Urban Planting Trees in Okinawa. 1st ed. Okinawa. pp.1-350
27. Sarikas, C. and Urquhart, G. (2012). Survival of *Dipteryx oleifera* (Fabaceae) trees after Hurricane Ida in Nicaragua. *Journal of Tropical Ecology*, 28(03), pp.327-329.
28. Ueda, M. and Shibata, E. (2004). Why do trees decline or dieback after a strong wind? Water status of Hinoki cypress standing after a typhoon. *Tree Physiology*, 24(6), pp.701-706.
29. Virost, E., Ponomarenko, A., Dehandschoewereker, É., Quéré, D. and Clanet, C. (2016). Critical wind speed at which trees break. *Physical Review E*, 93(2).