

# 氣候變遷下玉山森林大火

撰文 | 盧守謙 (大仁科技大學消防學程助理教授兼火災鑑識中心主任)

**世**界各國對森林火災之控制能力已有大幅提升，但對大火超過一定程度時，目前科技仍無法立即作出有效控制。近期在國內延燒12日(5/16—5/27)的玉山森林大火，延燒面積逾70公頃，出動陸空910人次，UH—60、CH—47直升機83架次；投水達161噸之多，派出大量地面救災單位；付出這麼大社會代價，或許我們能檢視本次整體事件並尋求新方法？

火場環境位於海拔3,200公尺的高山區域，自地面救災顯有困難，單是步行抵達就須耗時3日，且火場區域缺乏水源，地形為荖濃溪及其支流所切割形

成之陡峭谷地，人員也難以接近火點；而火場燃料之林相，為臺灣二葉松、鐵杉、臺灣冷杉等針葉樹為主，樹種化學油脂含量高，且林地地表已累積難以腐化松針落葉堆層，提供地表火勢得以延燒快速，控制極具困難且具危險。

火場位置無法提供救災水源，大量仰賴空中水袋及撒水，但此期間也有惠蓀林場與馬崙山等2場大型林火同時進行，空勤總隊的黑鷹直升機疲於奔命，加以還有登山客受傷而支援吊掛救援，使空中量能捉襟見肘，須再協請陸軍CH—47直升機加入救災。但因高山近午時易升雲霧，無

法達到目視航行的標準，因而直升機支援投水次數及時間皆有受限，大部分時間僅能靠地面部隊來阻絕火勢擴展，也因而動員來自嘉義、南投、花蓮及屏東等林區管理處的百名森林護管員，進行日夜與火搏鬥苦戰，實倍極辛勞，期間也因高海拔山區空氣稀薄引發高山症，致每日有人員受傷，甚至送醫治療。在上述情境下，火場靠森林護管員們著重裝戴面罩，奮力砍

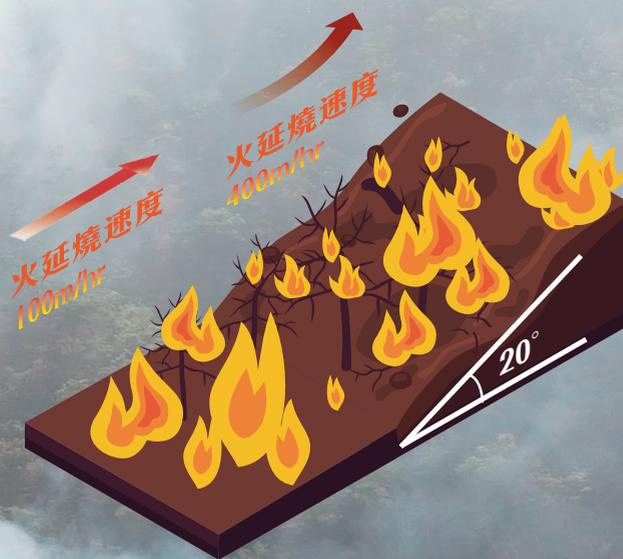
樹來開闢防火線，並清除地被植物燃料，以防火勢再擴展；到最後終在天氣條件（下雨）配合下，將這次大火完全予以滅熄。

檢視現場救災策略，本次火場已能由現場前進指揮所，依據空拍圖、氣象包等來了解溫度、濕度以及火燒方向，在制高點或空拍機得知火場位置，提供滅火參考，這些資料提供給現場指揮官作出滅火計畫，再轉交指揮中心進行綜合研判，最後由現場人員加以執行，如此根據科學化資料來做成決策，顯有大幅提昇國內火場之戰略與戰術執行。

以林火原理來檢視本次火場，我們知道火是一種物

理與化學反應的結果，在森林環境空間最主要的影響因數為燃料、地形、氣象與火源等因數，稱之為林火環境（Countryman, 1972）。於臺灣的地形南北狹長，地形的變化引起生態因子的重新分配，形成不同的局部氣候，影響森林植物的分布，使燃料的空間配置發生變化，與地形的起伏，形成不同的林火環境，不僅影響林火的發生發展，而且也直接影響林火的蔓延和火強度（林朝欽，1993）。觀察本次有顯著地形變化，

而坡度是戲劇性影響林火蔓延必要環境因素之一，其中陡坡（Steep Slope）也同樣會使滅火人員陷入非常危險的情況（Dupuy and Alexandrian, 2010）。火焰是揚起向前且緊接近於未燃燒燃料，因此燃料在預熱範圍，將增加輻射熱傳情況，這些因素將改變燃料面燃燒狀態。如谷地林火常形成捲吸氣流結構變化，而熱氣流沿著坡面上昇形成對流輻射之預燃效應，並大量減少燃料水份蒸發時間，使火焰更易迅速擴開（圖①）。



① 坡度使林火捲吸氣流結構形成對流輻射預燃效應  
（改繪自Ripley Valley Rural Fire Brigade and Brigade, 2008）

換言之，本次顯著地形也直接影響燃料濕度的變化，不同坡度，降水停滯時間不一樣。陡坡降水停留時間短，水分容易流失，燃料易乾燥而燃燒；相反，坡度平緩水分降水停留時間長，水分流失少，林地潮濕，燃料含水量高，不易著火。坡度越大，符合火焰向上浮昇原理，上方燃料能預先接受火焰熱量（傳導、對流及輻射），熱分解加速，假使此時上方滅火人員將易被火勢圍困，致不易脫逃情況。相反，向下延燒，火勢進展緩慢，火強度勢弱而易於撲滅。又上揚火焰輻射熱會隨著距離平方而遞減，滅火人員在大火來襲前，切忌站在上坡火之上方位置，並尋求非火焰延伸方向處、低窪遮蔽點，以避開輻射高熱之衝擊。

在空中灑水方面，因林火前鋒取氧的關係向上伸展，形成捲吸氣流結構變化，致使燃燒產生強烈的空氣渦流，林火在渦流動力學的作用下，產生現場上所見分散的、方向飄忽不定的煙流層現象。檢視本次玉山火場，使空中滅火機組人員面對連續性高聳樹冠層上煙

流分層，在判斷地面真正火點位置，大多數灑水能有效滅火，但有時也會形成意外之無效情況。

在陡坡救災方面，筆者曾在2002年梨山地區延燒6日之武陵大火，指揮來自7縣市消防單位。經驗指出，林火發生在地形陡峻的山坡，常使燃燒中塊木或樹枝幹材向下滾落，引起二次火流現象。陡峻之山坡或懸崖峭壁，在此處進行活動中滅火人員，會受到因火燒物體堆疊或倚靠燒失，使上方石塊等物體滾落，對下方人員形成某種程度威脅，造成落石滾落擊傷事件。今年3月阿里山林火延燒5日之久，現場植被土壤淺薄且屬輕質燃料類型，加上地形相當陡峭，坡面岩層受熱崩解產生落石不斷，不得不封閉公路，而現場參與救災人員因難以攀爬，滅火難度偏高，其中也發生有人遭落石擊傷送醫事件。檢視本次火場，在專業及搶救經驗之地面救災人員，甚知陡坡火場出現潛在之可能，因此無人遭落石擊傷。

檢視本次飛火（Spotting,



② 美國奧克蘭山林火飛火星：直徑50公釐、厚5公釐，重2.3克，相對照本次玉山飛火星體積推估為其1/3以下，圖中尺標單位公釐。（Koo et al., 2010）

或稱團火）現象，在長期乾旱加上陡坡地形風及本身火場風之競合作用下，出現明顯數次飛火。此種現象越過防火線，同時引燃多次火場。飛火是林火中一種特殊火行為，飛火星物質主要是林火中木材元素熱解和降解的結果，本身通常是樹皮、樹葉和樹枝（圖②）。Manzello et al. (2008) 指出燃燒物質在物理作用下，在燃燒上昇氣流中夾帶揚起的火星（Firebrands），能飄至很遠的另一山頭。意即，擁有較長燃燒時間的火星，能傳播至長達數公里遠之下風區域，導致另一火場（圖③）。基本上，在樹幹火、樹冠火或枯立木燃燒，都是產生火星之來源，大大增加了現場的控制難度（van Wagtenonk, 2006）。

在樹種、高度、胸徑，以及形成樹幹火時，都會影響火星的燃燒時間。當火星在飛行中，風速、風向和植被覆蓋度，會影響飛行的距離。在乾燥空氣動力條件下，含水率低燃料即增加飛火數量可能性。因此，飛火是一個不連續的火勢傳播機制，經常使滅火控制工作無效，突破防火線，形成又一火勢。所以預判下風處可能飛火位置，即派人予以撲熄，就顯得相當重要。

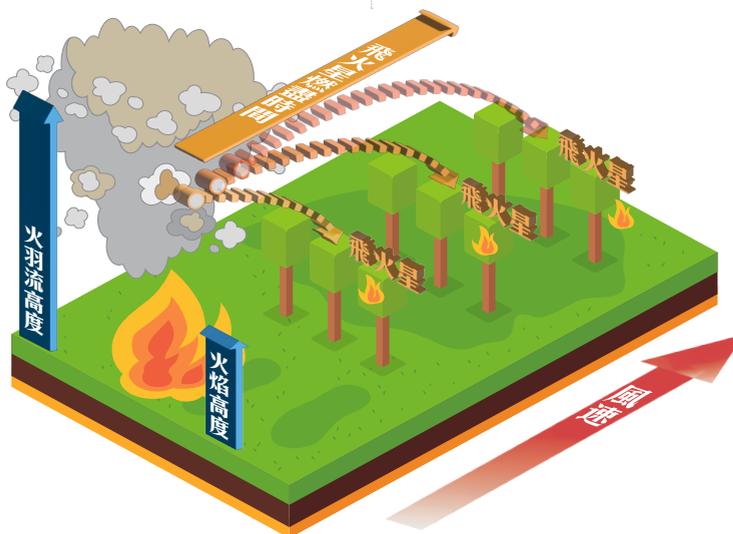
檢視本次係出自於登山客烹煮意外失火（弄翻爐火），如同臺灣林火95%以上是由人為引起的（林朝欽，2016）。臺灣地區每逢假日都會有眾

多的遊客上山，林火隨時會發生。森林起火是一種燃料、氧氣和熱量，同時輸入特定位置和特定時刻的組合結果。因是大氣開放火燒，氧氣不是限制因子，熱量是關鍵因素。以今年3月阿里山林火，於達邦公路邊坡引燃事件，跟以往災例一樣，可能是彈落菸蒂或其他人為火源所導致。林火原因與土地使用型態有關，國內林務主管機關長期以來建置植被燃料型態及林火歷史斑點，進行區位套圖後的高風險區域圖，能看出人對土地利用方式與林火，是極具顯著之關係。

在林火氣象上，火燒是許多森林生態過程的重要驅動

力，並決定其物種組成和景觀結構（Trabaud, 1994）。從生態而言，林火是許多森林生態系統中的自然過程，但負面的環境影響（Velez, 1990），如植被退化、對生物多樣性的影響、生命和財產損失以及煙霧人類健康影響和碳排放到大氣中。這些不良的作用可能會加劇，且氣候變遷下世界許多地區的林火活動，已有逐漸增加之趨勢（Moritz *et al.*, 2012）。從近幾年南歐、加州及澳洲大規模野火事件，已得到其關聯性之可能印證。

國內林務主管機關指出，2021年1—5月時，國有林地就已發生62起林火，創歷年最高紀錄。而加拿大和美國的大部分地區，氣候變遷下增加了林火季時間長度（Wotton and Bevery, 2007）、雷擊頻率（Price and Rind, 1994）、乾旱頻率（Rind *et al.*, 1990）和地區火燒範圍（Flannigan and Harrington, 1988；Stocks, 1987）；但有些地區的林火活動預計會減少（Bergeron and Archambault, 1993）（意指大型林火燒掉大範圍森林燃料，反而使林火



③ 小型飛火星能散開很遠距離，但落地前經常已熄；但大型飛火星並不像小型上昇那樣高，但其高溫仍持續較長時間，來點燃下風處區域。（改繪自Redrawn from Finney, 1998）



④ 林火過程中釋放出大量含碳氣體，對地球碳迴圈造成直接影響，同時也是陸地生態碳損失過程並增加了溫室效應。(改繪自Aniceto, 2011)

發生次數減少了)。除了天氣對林火直接影響之外，預計颶風等在氣候變遷中更為嚴重 (IPCC, 1996a)，如果是這樣，增加風力對森林的破壞，可能會大大增加火災燃料量 (Available Fuels)，如倒木、枯立木等含水率低易燃之燃料 (Ryan, 2000)；又林火過程中釋放出大量含碳氣體 (圖④)，同時也是陸地生態系統中碳的損失過程，並引起大氣化學性質的整體變化。

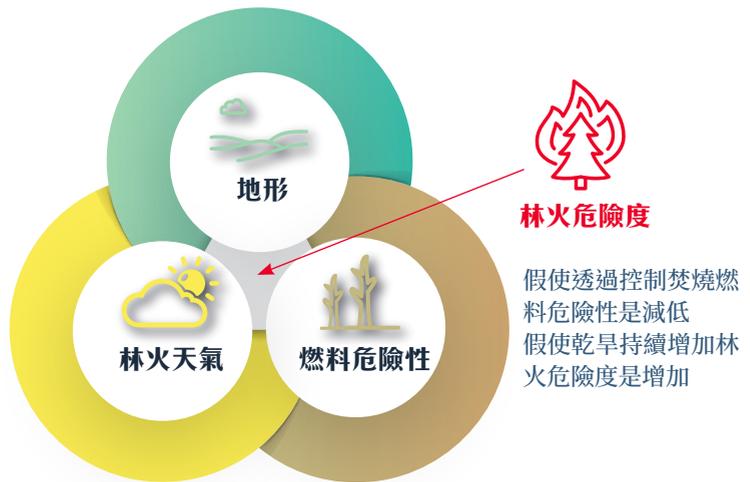
在不同氣候條件下，只有林火天氣和燃料危害才會發生變化，地形不受氣候變遷影響。因此，林業管理如何來減少燃料危險性，如透過機械處理或燃料的控制焚燒

(Prescribed Burning 或計畫燃燒)，可以降低在特定位置引起的林火危險度 (CSIRO, 2016)。事實上，減少燃料危險性，不僅可以減少特定地點的整體燃料危害，還可以增加滅火成功，也增加空中滅火之有效機會，並減少大範圍破壞性

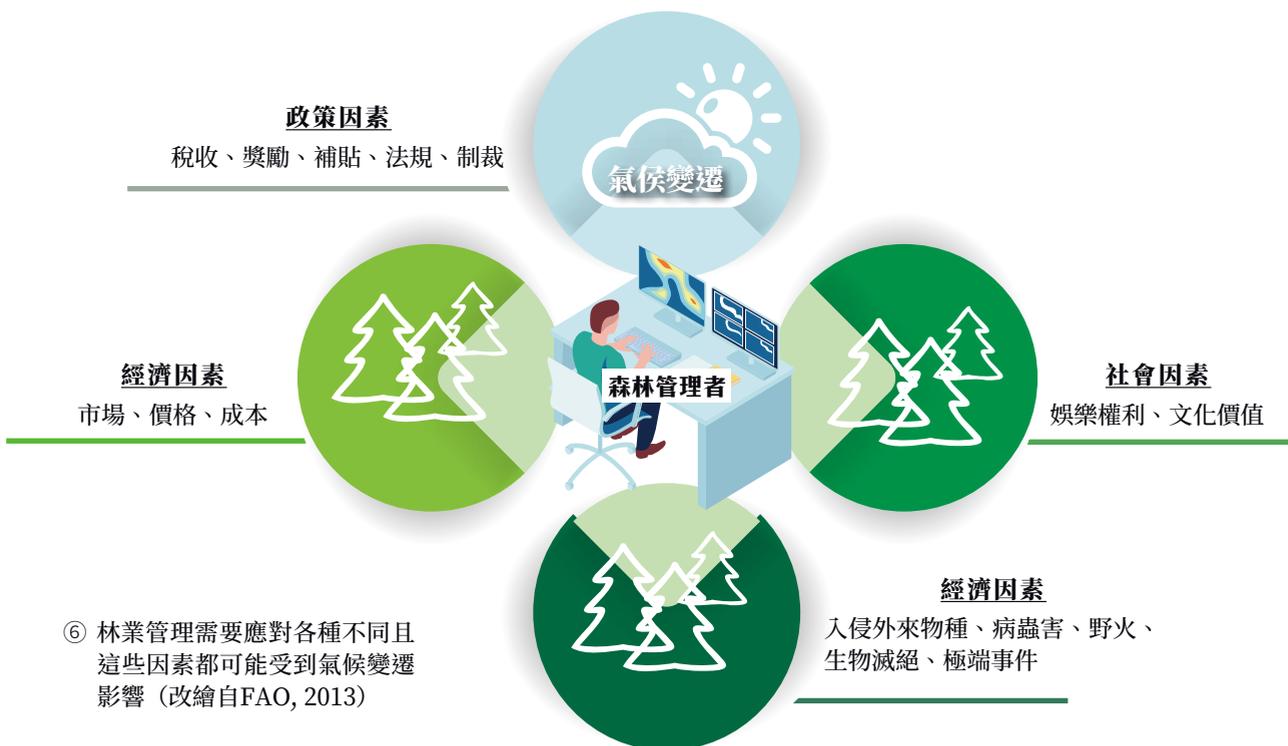
林火現象之形成 (Plucinski, 2012) (圖⑤)。因此，氣候變遷下面對逐漸嚴峻林火情況，「控制焚燒」對林火燃料能徹底釜底抽薪，不失為是尋求減災之一項有效方法。

「聯合國糧食及農業組織」(FAO, 2013) 指出，氣候變

遷對森林生態系影響，在全球範圍內是顯而易見的，至少在中短期內進一步的影響，已是不可避免的。在某些情況下，氣候變遷正在削弱森林提供關鍵商品和生態系統服務能力，如木材、非木材產品和清潔水源等 (FAO, 2013)。因此，對氣候變化帶來的挑戰，林業管理需要調整森林策略、森林管理計畫和作法。採取行動的延遲，將會增加進行這些調整的成本和難度。氣候變遷只是林業管理必須處理的許多因素之一 (圖⑥)，但其影響預計會增加並衍生次要的衝擊。雖然一些森林將受益於溫度升高和降水變化，但大多數森林將遭受重要物種的損失、生長量下降、風暴和其他干擾的頻率／強度的增加 (FAO,



⑤ 控制焚燒能減少特定位置危險度及增加成功滅火機會 (改繪自CSIRO, 2016)



2013)。另一方面，控制林火最佳滅火方法是用水，但實際上對於大多數林區來說，供水是有問題的，尤其是臺灣高山地區。當林火救災時透過控制焚燒來清除地表燃料之防火線。林火前使用控制焚燒，來消除堆積燃料之危險區域；或許從本次玉山事件，國內該適時考量引進歐美之控制焚燒，來作為林業管理之一項新方法。

現在，儘管各國均在盡最大努力以人為方式壓制火燒，

但林火的生態作用正在發生變化。由於積聚的燃料，林火會燃燒得更強烈，所以樹木樹皮等抵抗機制已不夠用。在世界各地一些大型林火每年都會威脅到更多的資源和更多的人類社區。結果，救災預算支出增加了。由於人為搶救努力在很大程度上是成功的，如此傾向已促進人類能居住在大片森林邊緣交界面。因此，在撲滅林火方面的內在成功有助於外在風險擴大，促使對更多搶救壓制的需求。但是內在積聚的燃料量危險，隨著林火被外在壓

制而增加。與氣候變遷有關的新風險，包括更乾燥和更熱的條件，預計未來林火只會增加而不會減少。🚒

（參考文獻請逕洽作者）