

臺灣蝙蝠研究與調查新技術— 紅外線熱像儀之應用

Using thermal imaging technology in survey and study of Taiwan bats

張育誠 / Yu-Cheng Chang / vole.homerun@gmail.com

/ 行政院農業委員會特有生物研究保育中心計畫助理

周政翰 / Cheng-Han Chou / 行政院農業委員會特有生物研究保育中心計畫助理

黃光隆 / Kuang-Lung Huang / 行政院農業委員會特有生物研究保育中心專業技工

鄭錫奇 / Hsi-Chi Cheng / 行政院農業委員會特有生物研究保育中心研究員兼組長

電磁輻射

舉凡伽瑪射線、X射線、紫外線、可見光、紅外線、微波和無線電皆屬於電磁輻射，其波長由短至長，分別為伽瑪射線(0.01nm)、X射線(0.01-10nm)、紫外線(10-400nm)、可見光(400-700nm)、紅外線(700nm-1mm)、微波(1mm-15cm)及無線電波(15cm-2km)。太陽光組成比例中，紫外線占5%、可見光占46%、而紅外線占了49%。可見光由牛頓(Isaac Newton)於1666年發現，可分成紅、橙、黃、綠、

藍、靛、紫等光譜色。1800年赫胥黎(William Herschel)測量太陽光線經稜鏡折射出之光譜各色的溫度，瞭解溫度由紫光到紅光逐漸升高，更意外發現紅色光以外當溫度上升更快卻完全沒有顏色，推論太陽光於紅光以外有熱效應明顯的不可見光，即現稱之紅外線。隨後，1801年里特(Johann Wilhelm Ritter)認為光線應同樣具備兩極對稱的物理性質，當時已知氯化銀(AgCl)於陽光下會逐漸變黑，運用赫胥黎發現紅外線的方法，里特發現氯化銀於紫色光以

外區域變黑更快，推論紫光以外亦有不可見光的存在，即現稱之紫外線。其中人眼可見的電磁輻射波長範圍相當窄，僅可見光波段，但可見光是光源下人眼視覺成像中物體能有顏色表現的主因，當可見光照射物體時光線完全吸收後，人眼視覺中所見到的物體呈現黑色；光線完全反射則呈白色，吸收綠色以外光線且反射綠色光，物體則呈綠色。科技日漸發展，人類利用特殊材質的檢知器，把感覺範圍從可見光波段(波長較短的紫光及波長較長的紅光之間)往兩側擴充至紫外線和紅外線等不可見光波段。紫外線是太陽光具備殺菌功能的主因，照射適量紫外線有助於身體合成維生素D，但過量則會造成皮膚或眼睛的傷害及病變，輕者曬傷或眼睛不適，重者可能造成皮膚癌或白內障，甚至失明。紅外線技術之應用導因於二次世界大戰期間(1939-1945年)紅外線通信設備和紅外線夜視設備等軍備研發而大幅提升。德國標準化學會(Deutsches Institut für Normung, DIN)區分波長範圍0.75-1.4 μm 者為近紅外線(near infrared, NIR)、1.4-3 μm 為短波長紅外線

(short-wavelength infrared, SWIR)、3-8 μm 為中波長紅外線(mid-wavelength infrared, MWIR)、8-15 μm 為長波長紅外線(long-wavelength infrared, LWIR)，以及15-1,000 μm 為遠紅外線(far infrared, FIR)。根據熱傳導理論，任何物體溫度只要大於絕對零度(-273.15°C)，其表面便會放射能量(即紅外線輻射)。紅外線熱成像法(infrared thermography)即藉由紅外線熱像儀測量目標物表面放射的紅外線輻射，根據熱力學定律計算後獲得被測物體的表面溫度，並以色階不同之顏色區別不同溫度的成像技術。

紅外線熱像儀

紅外線雖可穿透煙霧或某些晶體材料，仍會受大氣中水、二氧化碳或其他氣體的吸收或反射的影響穿透率，產生大氣衰減(atmospheric attenuation)的情形。不過0.9-1.7 μm 、3-5 μm 和8-12 μm 這三個紅外線波段在大氣中有較佳穿透率，又稱為大氣窗口(atmospheric window)，因此紅外線熱像儀主要研發感測此三波段的紅外線輻射。紅外線熱像儀檢知器依

照材質可分為光電型檢知器和熱感型檢知器兩類，兩類檢知器熱像儀主要差異在於光電型檢知器需搭配冷卻系統降溫。1958年AGA/Bofors公司研發世界第一套採用光電型檢知器的軍用紅外線熱像系統；1980年Texas Instruments公司首先完成採用熱感型檢知器，並可觀測影像的紅外線熱像儀。隨後紅外線熱像儀除廣泛應用於軍事、工業、醫學方面外(Burnay *et al.* 1988)，而至少自1972年開始應用於哺乳類、鳥類、爬行類及昆蟲等動物輻射熱溫度方面的研究(Mccafferty *et al.* 1998)。熱感型檢知器的紅外線熱像儀構造主要分為三大部分，一是特殊塗料(例如元素銻germanium)鏡面鏡頭的光學模組，使紅外線輻射得以通過及光學成像；二為熱感型檢知器模組，接收紅外線輻射並轉換為數位訊號；三是運算及影像處理模組，將數位訊號進行運算獲得溫度資訊並以圖像顯示。紅外線熱像儀應用於動物的研究有許多優點，除了無需將設備直接碰觸動物，而在不干擾野生動物作息狀況下獲得其表面溫度；再者，不僅可獲得被測物體某單點溫度，亦可獲得量測

視野範圍內的整體溫度分布。此外，紅外線熱像儀資料與物體的熱輻射相關，因此可在各種不同的光源條件、甚至是全黑暗環境中進行攝錄並測溫。

紅外線熱像儀應用於哺乳動物的研究

Maccafferty(2007)回顧1968-2007年間發表的71篇運用紅外線熱像儀於哺乳動物研究的文獻，其中34篇研究熱生理學(thermal physiology)、19篇為疾病和受傷的獸醫診斷(veterinary diagnosis of disease and injury)、18篇則和族群調查(population surveys)相關。已知研究物種涵蓋11個目的哺乳動物，其中陸域動物占三分之二，海洋動物占三分之一。

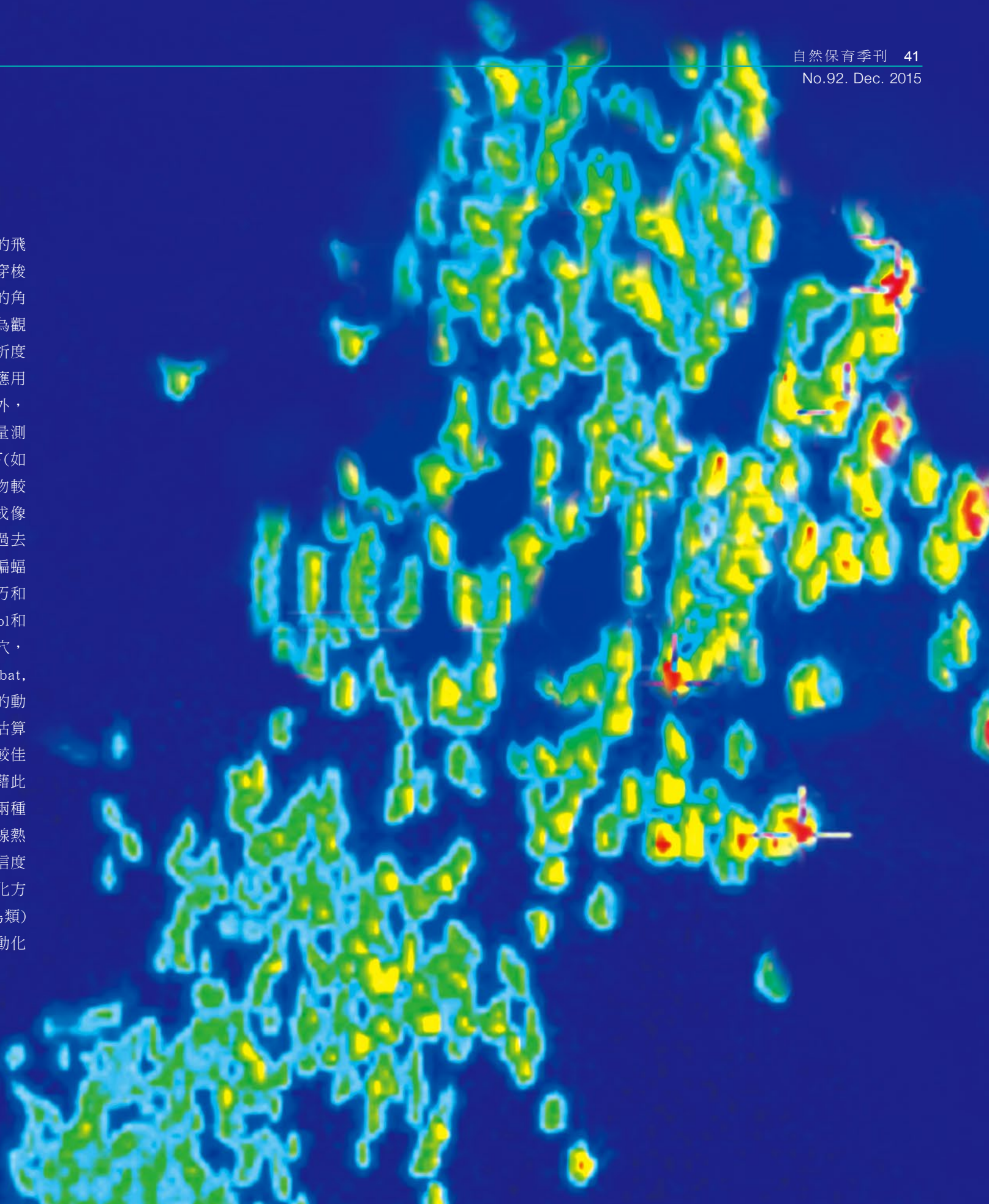
熱生理學方面，應用紅外線熱像儀搜尋身體相對高溫部位並測量其溫度，藉以探討該高溫部位與解剖學和生理學上的關聯性，例如運用紅外線熱像儀發現多數種類的哺乳動物，其主要散熱部位於頭部外，肢體在調控散熱方面亦有其重要性。Nakayama等人2005年利用紅外線熱像儀發現恆河猴(Rhesus monkeys, *Macaca*

mulatta)在被捕捉的威脅下，臉部表面溫度有相應變化產生。疾病和受傷的獸醫診斷方面，紅外線熱像儀發現被測動物異常或不對稱的體表溫度部位，通常是由於潛在性的血液循環問題或免疫反應失調造成的外在病徵。此外，紅外線熱像儀的非侵入性測量也特別適用於探討農場飼育動物的動物福祉議題，例如雄鹿鹿茸切除後的生理影響、圈養牲畜在運送過程中的體溫變化是否反映其身心適應不良情況、監測動物蹄部異常溫度變化可及早發現其潛藏疾病，以及動物因感染而造成體溫異常升高的現象等(Stewart *et al.* 2005)。族群調查方面，紅外線熱像儀可裝載在飛行器或車輛等交通工具，藉以偵測或計數大型哺乳動物的族群數量；通常不需要精確地量測動物的體表溫度，主要透過哺乳動物恆定體溫和較低環境背景溫度的溫度反差，藉此區別個體進而估算族群數量。Perryman等人(1999)曾於美國加州中部海岸的研究站架設紅外線熱像儀，藉由東太平洋灰鯨(Pacific grey whales, *Eschrichtius robustus*)上浮海水平面呼氣時與水面溫度反差，在1994-1996年的每年1月進行一段時間的資料蒐集來估算其族群數量，並發現灰鯨的全日遷徙速率夜間游速較日間快。

紅外線熱像儀應用於蝙蝠類研究

蝙蝠是地球上唯一真正具有飛行能力的

哺乳類動物。當暗夜降臨時始憑藉著高超的飛行技術與神奇的超音波偵測能力在夜空中穿梭自如、活動覓食；白天則通常隱棲在陰暗的角落，這種晝伏夜出的習性讓調查研究或行為觀察相當困難。隨著紅外線熱像儀設備的解析度提高和功能強化，以及體積大幅縮小，其應用層面與攜帶便利性在近幾年明顯提升。另外，紅外線熱像儀不需直接接觸被測物即可量測其溫度，有助於探討動物處於運動狀態下(如飛行時)的體表溫度變化，甚至可利用動物較高體溫與較低環境溫度的溫差對比的熱成像資料，透過電腦運算來估算族群數量。過去以夜視鏡(night-vision scope)觀測並估算蝙蝠數量的方法，常因不同觀測者的估算技巧和經驗等差異，產生較大的估算偏差。Sabol和Hudson(1995)於美國阿拉巴馬州北方的洞穴，試圖以紅外線熱像儀攝錄灰鼠耳蝠(*Grey bat, Myotis grisescens*)群集夜間飛離棲息洞穴的動態影像，結合電腦的數位影像處理技術來估算族群數量，同一時間亦以估算技巧和經驗較佳的目視觀測者利用夜視鏡進行族群估算，藉此比較兩種方法的估算數量差異。結果顯示兩種方法估算結果差異小於6%，說明了以紅外線熱像儀結合電腦影像處理運算的估算數量可信度高，而且其估算方式是較為一致性的標準化方法，並可能適用於估算其他恆溫動物(如鳥類)族群數量，開啟了以紅外線熱像儀進行自動化偵測動物族群的可能性。



國內野生動物研究之應用

國內已廣泛運用紅外線熱像儀於國防軍事、消防救災、中西醫醫療診斷、工廠高溫機械監控、海關檢疫及發燒篩檢等方面，卻鮮見運用於野生動物研究或生態調查上。行政院農業委員會特有生物研究保育中心多年來專注於蝙蝠類研究，深知在野外對於蝙蝠個體或棲所的搜尋相當不容易，因此於2011年添購一部紅外線熱像儀R300(NEC avio infrared technologies Co., Ltd. JAPAN)嘗試運用於蝙蝠類的調查與研究。基本特性為波段範圍8-14 μm 的熱感型檢知器；鍍塗料鏡面光學標準鏡頭(視角為24°)；解析度為320 × 240，相當於每個熱影像畫面

能有76,800個溫度數據；敏感度0.05°C，即被測物最小可區別溫差為0.05°C；分析軟體為TAS熱像分析軟體(景興電腦科技有限公司研發)。我們認為應用紅外線熱像儀不僅可以測量記錄蝙蝠體表溫度，探討其體表溫度變化與生理調節(如夏棲、冬眠、生殖、活動等)間的關係，也可以於全暗的環境中利用溫度反差尋找蝙蝠之所在、估算群集數量，甚至進行生態習性的研究。

以下就特生中心運用紅外線熱像儀進行霜毛蝠(Asian parti-colored bat, *Vespertilio sinensis*)和臺灣葉鼻蝠(Taiwan leaf-nosed bat, *Hipposideros armiger terasensis*)的初步研究成果分述如下：

(一)霜毛蝠簡介及紅外線熱像研究成果

霜毛蝠分布的範圍主要在北方高緯度寒帶地區，臺灣可能是其分布的最南界(鄭錫奇及周政翰 2011)。在2010年以前，霜毛蝠在臺灣的發現地點僅有2筆(林良恭等人 2004；陳家鴻等人2006)，直至2010年於新竹市一處廢棄的大煙囪與排渣道間的裂縫處內始發現一群集棲息數量600多隻的霜毛蝠，根據鄭錫奇等人2011-2014年的觀察研究，該群集為繁殖育幼的母系群集，在煙囪棲所並非整年棲息，出現的時間大約在每年清明節前(3月下旬或4月上旬)，隨著時序逐漸聚集，懷孕母蝠於5月中旬開始產仔並育幼，待新生霜毛蝠幼蝠成長至可自行外飛覓食後，約於中秋節前(9月上旬或9月中

旬)又漸次地全數遷離該棲所。根據當地居民表示，該群霜毛蝠至少自1968年起就會飛來此煙囪棲所棲息，數月後再漸次飛離，每年造訪的情形迄今未曾中斷。

目前所知，全臺灣就只發現此一處霜毛蝠繁殖育幼棲所，根據鄭錫奇等人2011-2014年的研究發現，霜毛蝠煙囪棲所內月均溫(HOBO微氣候測量儀資料)比新竹地區環境月均溫(中央氣象局新竹測站資料)高約1°C。蝙蝠類在繁殖育幼時會以群體聚集的方式來提升群集和棲所的溫度，藉此提高仔蝠基礎代謝率來加速其成長發育(Altringham 2011)。因此希望透過紅外線熱像儀來瞭解這全臺 唯一的霜毛蝠繁殖群集體表溫度狀況。2012年6月3日是我們首次運

霜毛蝠。(黃光隆 攝)

紅外線熱像儀(NEC R300)架設運用於蝙蝠調查研究的情形。(張育誠 攝)

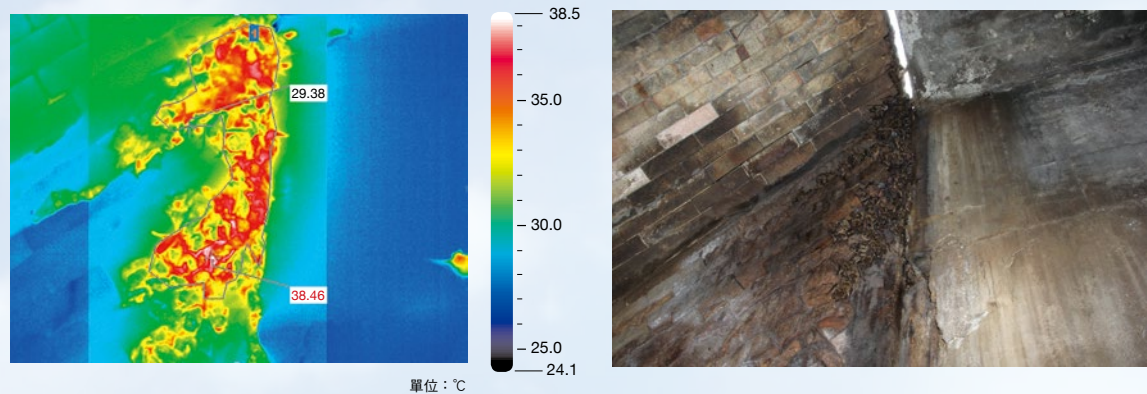
用紅外線熱像儀進行蝙蝠觀察的日子。此時期霜毛蝠母蝠多已陸續產下仔蝠，但多數新生仔蝠尚未成長發育至可獨立外飛階段，當傍晚母蝠外飛覓食時，會將仔蝠留棲在棲所內。因此，我們選擇兩時間點利用紅外線熱像儀測量霜毛蝠群集的體表溫度：1. 傍晚霜毛蝠母蝠尚未外飛前，由母蝠仔蝠組成的霜毛蝠群集；2. 母蝠外飛覓食而僅留的仔蝠群集，藉以瞭解母蝠仔蝠群集與單純仔蝠群集的溫度差異為何，並量測當時棲所內部建材的表面溫度以資比較。

由熱成像資料顯示，霜毛蝠母蝠仔蝠共棲群集中個體最高溫度為 38.46°C ，最低溫度為 29.38°C ，群集平均溫度為 33.78°C 。當母蝠外飛覓食時，針對尚無飛行能力的仔蝠進行溫度測量。因單純仔蝠群集的數量較少且分布零散，我們框出兩主要群集進行溫度量測，結果顯示兩仔蝠群集中個體最高溫度分別為 34.76°C 和 33.03°C ，最低溫度為 29.74°C 和 28.68°C ，兩群集平均溫度各為 32.54°C 和 31.14°C ，兩群集總平均溫度則為 31.84°C 。此外，霜毛蝠母蝠仔蝠群集和單純仔蝠群集與棲所內部建材(紅磚

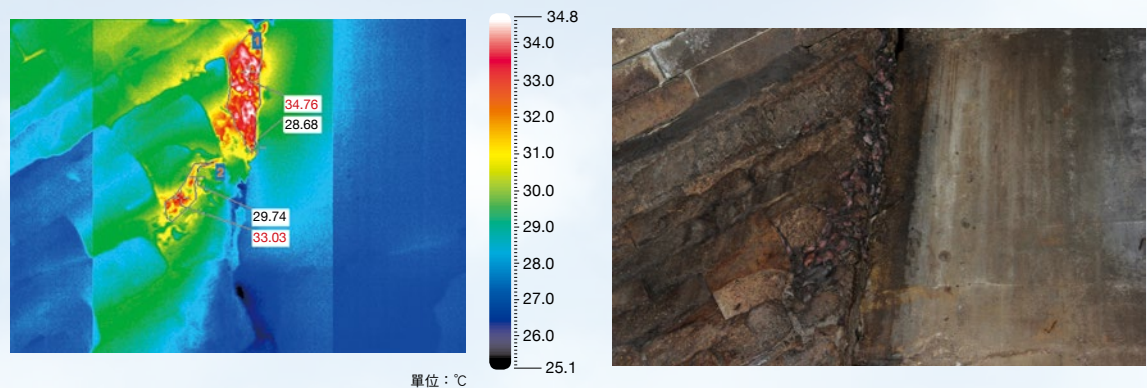
牆表面溫度)的測量結果為：母蝠仔蝠群集共棲時的棲所磚牆溫度為 30.03°C ，而單純仔蝠群集時的棲所磚牆溫度則為 29.61°C (見表1)。

比較霜毛蝠母蝠仔蝠共棲群集與單純仔蝠群集，其最高溫度相差 $3.70\text{--}5.43^{\circ}\text{C}$ ，平均溫度相差 $1.24\text{--}2.64^{\circ}\text{C}$ ，母蝠仔蝠共棲時的溫度明顯較單純仔蝠群集高出許多。此結果支持霜毛蝠在繁殖育幼時，母蝠會以群聚方式確實能提

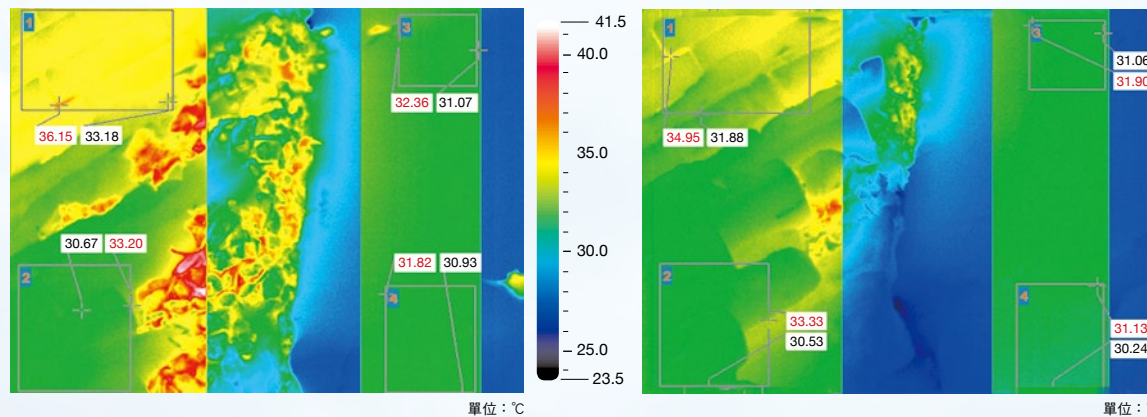
新竹市區霜毛蝠棲息煙囪棲所外觀。
(張育誠 攝)



霜毛蝠成蝠仔蝠群集體表溫度，左為熱成像資料(NEC R300)，右為數位單眼相機(Cannon 60D)於可見光源下拍攝結果。左圖熱成像以藍色多邊形框出群集，最高測溫點 38.46°C (紅色數值)，最低 29.38°C (黑色數值)。蝙蝠放射率修正為0.98。(張育誠 提供)



霜毛蝠仔蝠群集體表溫度，左為熱成像資料，右為數位單眼相機拍攝照片。紅外線熱成像以藍色多邊形框出兩群集，群集1最高測溫點 34.76°C (紅色數值)，最低 28.68°C (黑色數值)；群集2最高 33.03°C (紅色數值)，最低 29.74°C (黑色數值)。蝙蝠放射率修正為0.98。(張育誠 提供)



霜毛蝠群集熱成像資料，左為母蝠仔蝠群集時期，右為單純仔蝠群集時期。皆以藍色四邊形框出四方框瞭解當時棲所建材溫度，紅色數值為方框內最高測溫點，黑色數值為最低測溫點。紅磚牆放射率修正為0.93。(張育誠 提供)



臺灣葉鼻蝠。(鄭錫奇 攝)

表 1. 新竹市霜毛蝠母蝠仔蝠群集與單純仔蝠兩群集表面溫度及棲所溫度資料

群集狀態	蝙蝠表面溫度			棲所平均溫度
	最高溫度	最低溫度	平均溫度	
母蝠仔蝠群集	38.46℃	29.38℃	33.78℃	30.03℃
單純仔蝠群集 1	34.76℃	28.68℃	31.84℃	29.61℃
單純仔蝠群集 2	33.03℃	29.74℃		

升群集溫度，藉此加速仔蝠成長發育速度。此外，母蝠仔蝠共棲群集和單純仔蝠群集，與棲所內部建材溫度差方面，母蝠仔蝠共棲群集的平均溫度高出當時棲所磚牆溫度3.75℃，高於單純仔蝠群集與棲所磚牆的平均溫差2.23℃，此結果同樣支持母蝠群體聚集的方式亦有助於提升棲所內部建材乃至於周邊環境的溫度。

(二)臺灣葉鼻蝠簡介及紅外線熱像研究成果

臺灣葉鼻蝠為臺灣食蟲性蝙蝠中體型最大的物種，主要棲息在天然洞穴、廢棄坑道、隧道等之人工建築內，是典型的穴居性蝙蝠，棲息的群集通常為數十隻至數百隻，偶可發現數千隻的群集(鄭錫奇等 2010)。為瞭解棲居於不同棲所(環境)的臺灣葉鼻蝠體表溫度的表現，以及族群數量大小是否影響其溫度表現，我們選擇南投縣水里鄉及中寮鄉境內海拔高度皆在300m以下的兩處臺灣葉鼻蝠棲所，並以紅外線熱像儀進行蝙蝠體表溫度測量。此兩處棲所於每年5-7月間的生殖季，均有臺灣葉鼻蝠母蝠聚集於此生產幼蝠並哺育之。

我們在2012年6月14日進行臺灣葉鼻蝠個體體溫測量，首先於早上11時進入水里棲所以紅外線熱像儀進行測量，當時棲所內的群集數量僅有42隻，所有個體均已產仔並正哺育仔蝠中。測得溫度後利用軟體自動標定排序p1-p20等前20個高溫點，最高溫p1為34.09℃、p2-p20依序為其餘19個次高測溫點，20點溫度平均為30.48℃。同日下午3點進入中寮棲所進行測量，此群集數量較多，約有630隻，大多數個體已產仔並正哺育仔蝠中。測得溫度亦自動標定排序p1-p20等前20個高溫點，最高溫p1為34.30℃、p2-p20為其餘19個次高測溫點，20點溫度平均為31.77℃。



水里棲所，臺灣葉鼻蝠群集棲息之棲所外觀。(黃光隆 攝)



中寮棲所，臺灣葉鼻蝠群集棲息之棲所外觀。(黃光隆 攝)

表 2. 南投縣臺灣葉鼻蝠水里棲所群集與中寮棲所群集表面溫度及棲所溫度資料

群集狀態	數量（隻）	蝙蝠表面溫度			棲所平均溫度
		最高溫度	最低溫度	平均溫度	
水里棲所群集	42	34.09℃	26.84℃	30.48℃	29.00℃
中寮棲所群集	630	34.30℃	29.68℃	31.77℃	26.20℃

由紅外線熱像儀攝得臺灣葉鼻蝠停棲休眠狀態的體溫表現發現，不同個體的體表溫度並不一致。以兩處棲所棲息之蝙蝠群集各選出的20個高溫個體來看，水里棲所個體最高溫度為34.09℃，最低為26.84℃，溫度相差約7.25℃；中寮棲所個體最高溫度為34.30℃，最低為29.68℃，溫差約4.62℃；此外，水里棲所與中寮棲所的20個高溫個體平均溫度分別為30.48℃和31.77℃，中寮棲所族群高出水里棲所1.29℃。另外，測溫當時的棲所環境溫度，水里棲所為29.00℃，中寮棲所為26.20℃，水里棲所高出中寮棲所2.80℃(見表2)。由上述溫度資料顯示，水里及中寮棲所20個高溫個體最大溫差可達7.25℃及4.62℃。綜合以上資料，

臺灣葉鼻蝠群集平均溫度以中寮棲所內群集較高，高出1.29℃，但棲所內的環境溫度則以水里棲所較高，高出2.80℃。臺灣葉鼻蝠群集於棲所內聚集狀態屬分散聚集，個體間保持一定距離(5-10cm)，中寮棲所內群集數量較大，其平均溫度較水里的群集高可以理解，但是其棲所的環境溫度卻反比水里棲所較低(理論上棲所內群集數較大應會提高棲所內環境溫度)。我們推測水里棲所環境溫度較高的原因，除了分散聚集的蝠群對棲息環境的影響不如聚集族群(如霜毛蝠)外，其主要因素可能是水里棲所為一個防空洞建築，呈口字型小空間的結構且僅有一個出口而導致通風度不佳有關。此外，何英毅(2000)研究發現汐止、水里與白雲的臺灣葉鼻

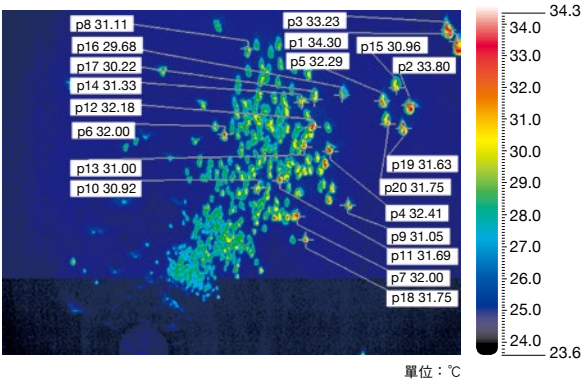
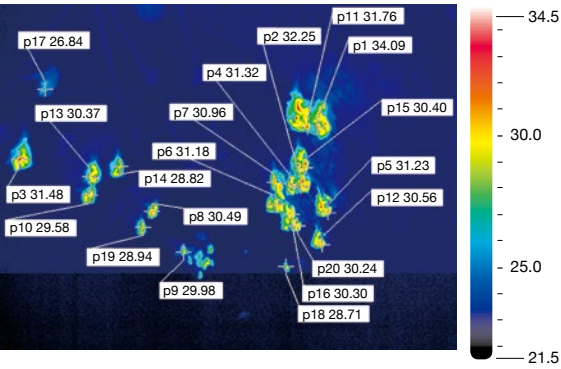
蝠的夏季棲所平均溫度通常不超過30℃，群集數量多寡與棲所環境溫度高低並非絕對相關。

紅外線熱像儀操作經驗分享

由霜毛蝠與臺灣葉鼻蝠紅外線熱像儀測得之資料發現，個體溫度表現最高的區域大多在其臉部，此現象和Maccafferty(2007)指出熱成像資料顯示多數哺乳動物主要散熱部位為頭部吻合。紅外線熱像儀可協助我們同時且全面性地瞭解族群數量達600隻左右的霜毛蝠族群溫度表現，亦同時能掌握棲所建材溫度概況，藉以探究其交互關係。此外，蝙蝠棲所通常黑暗潮濕，而且蝙蝠個體白天棲息時很敏感，當發現有人進入棲所內，易受干擾而飛離。從臺灣葉鼻蝠的熱成像資料來看，棲所環境背景溫度通常較低的反差，利用不同色階區別，紅外線熱像儀不僅可協助搜尋蝙蝠在黑暗環境中的棲息位置，更由於臺灣葉鼻蝠停棲時個體與個體間並不緊靠，會保持一定間距的特性，可計數棲所內臺灣葉鼻蝠族群數量。因此實務上，利用紅外線熱像儀，研究人員不僅可以在零或較低光源(不使用照明設備)的狀況下發現蝙蝠棲

息位置，並可藉由蝙蝠個體較高體溫與較低環境溫度之反差估算數量。

紅外線熱成像法自1968年即開始運用於生物科學及生態學相關研究，近年來由於技術提升，例如設備體積減小便於攜帶、解析度增加提升測量精確度、設備價格降低等趨勢，並可同時間監測瞭解個體、族群或其所處環境的表面溫度，即時獲得動物活動狀態下的動態溫度變化等優點，促進紅外線熱像儀運用於野外環境的調查研究或尋找隱棲動物的可行性。此外，不同材質的被測物放射率(emissivity)修正與否可影響其數值表現約占52%，因此當比較不同物質之表面溫度時，應考量各項量測參數影響並予以修正，如蝙蝠放射率應修正為0.98，而紅磚牆應修正為0.93(參考Monteith and Unsworth 1990)。此外，紅外線熱像儀與被測物間的量測距離(理論上量測距離越遠，熱輻射耗損將越多)，和被測物所處環境溫濕度及風速等微氣候因子等，影響數值表現約占18%，亦應詳加記錄並予以修正。如此一來，紅外線熱像儀探索發現的紅外線視界能量表現及溫度數值將更為精確。



水里棲所臺灣葉鼻蝠個體體表溫度，左為熱成像資料，右為數位單眼相機拍攝照片。熱成像資料 p1~p20 為前 20 個較高測溫點，後接數字為該點溫度（℃），蝙蝠放射率設定為 0.98。（張育誠 提供）

中寮棲所臺灣葉鼻蝠個體體表溫度，左為熱成像資料，右為數位單眼相機拍攝照片。熱成像資料 p1~p20 為前 20 個較高測溫點，後接數字為該點溫度（℃），蝙蝠放射率設定為 0.98。（張育誠 提供）