

出國報告（出國類別：研究）

第 27 屆國際昆蟲研討會 (XXVII International Congress of Entomology (ICE2024))

服務機關：農業部 農業藥物試驗所

姓名職稱：梁瑩如 副研究員

宋孟真 助理研究員

派赴國家：日本京都

出國期間：113 年 8 月 25 日 至 113 年 8 月 30 日

報告日期：113 年 11 月 21 日

摘要（200-300字）

第 27 屆國際昆蟲研討會於 2024 年 8 月 25-30 日在日本京都舉行，主題為「New discoveries through Consilience」，聚焦昆蟲研究的最新發現與防治策略。在害蟲管理方面，蘇力菌 Bt 技術雖廣泛應用於農業，但面臨抗藥性挑戰。結合金字塔組合毒素與 RNAi 技術的多層次策略，被證實可延緩抗藥性進化。白殭菌則透過菌株篩選與智能傳播設備展現非化學防治的潛力。RNAi 技術取得重要突破，首款噴灑型產品 Calantha™ 有效控制科羅拉多馬鈴薯甲蟲，展現環境友好與經濟可行性。此外，Dimpropridaz 等新型殺蟲劑為抗藥性管理提供了新方向。這些技術展示了跨學科合作的重要性，推動農業害蟲管理向永續發展轉型。未來，應積極引進並應用這些創新技術，提升國內農業效益，實現環境友好與生態平衡。

目次

摘要-----	III
目的-----	IV
過程-----	IV
心得與建議-----	XV
附錄-----	XIX

目的

本次希能藉由參加國際昆蟲研討會瞭解各國關心的昆蟲議題(特別是害蟲防治)、昆蟲學研究方法學、抗藥性與殺蟲劑議題，藉以接軌國際趨勢，同時精進我國對於害蟲管理的觀點與技術。

過程

研習日期:

8月24日 出發

8月24日 抵達京都

8月25日 ~ 8月30日 研習

8月31日 ~ 9月1日 個人行程

9月1日 抵桃園國際機場

國際昆蟲研討會(ICE2024) 於 2024 年 8 月 25-30 日在日本京都舉行。來自世界各地的昆蟲學家和研究人員齊聚一堂，討論最新的研究及當前和未來面臨的問題。今年吸引了來自 82 個國家的 4278 名與會者。此外，ICE2024 也促進已開發國家和新興國家昆蟲學家之間的合作。本次會議共包括 205 場同步會議、多場圓桌會議、約 1000 張海報。本次會議秋篠宮親王和親王妃、國務大臣、京都府知事和京都市市長也共同出席盛會。相關報導也在日本國內媒體報導，參見 <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20240825/k10014558801000.html>、<https://news.yahoo.co.jp/articles/35ea34d73b67301a31ad8f3c3eeea5487e652006>、<https://www.fnn.jp/articles/-/755886> (圖 1)。親王長子悠仁先生在本次研討會所作的主題為皇殿內的蜻蜓研究，也發表相關海報。而在研討會中實際看到日本親王(雖然距離有點遙遠)，還是覺得很不可思議! 從中也看到日本文化中對於皇室的尊重和禮節，從會場布置，日本親王的座位後方的金燦燦屏風 (圖 2)，還有每個首長、科學家上台演講的致意方式，都讓本次的研討會充滿濃濃的日本味。本次研討會選擇在日本京都，除了為文化古都之外，會議

各方面也展現日本傳統文化，包括本次會議主視覺，利用日式和紙紙門投影昆蟲剪影（圖3），處處展現巧思。

本次會議開幕日頒發 Filippo Silvestri Memorial Lecture and Award Ceremony，由明尼蘇達大學昆蟲學系的 George Heimpel 教授獲獎。該獎項為紀念義大利昆蟲學家菲利波·西爾維斯特里 (Filippo Silvestri, 1873-1949) 所設立了一個國際科學獎項：菲利波·西爾維斯特里紀念獎 (Filippo Silvestri Memorial Lecture and Award Ceremony)。菲利波·西爾維斯特里 (Filippo Silvestri) 是一位享有盛譽的傑出科學家，因其在昆蟲多胚胎方面的開創性工作而被國際公認為建立生物調控的開創研究。而獲獎的 George Heimpel 教授專長在於昆蟲生態學，也包括利用昆蟲進行生物防治，當天他所發表的演講是關於鳥類寄生蟲 *Philornis downsi* (雙翅目：蠅科) 的研究，該寄生蟲已入侵加拉巴哥群島並攻擊達爾文雀。他的研究在加拉巴哥群島以及厄瓜多大陸和特立尼達和多巴哥進行，目的為保護受威脅的特有鳥類。George Heimpel 教授提及不到 60 年前，*Philornis downsi* 在加拉巴哥群島首次被記錄，是第一種到達該群島的具有寄生幼蟲階段和非寄生成蟲的鳥類寄生蟲。自該雙翅目害蟲發生以來，該害蟲已成功傳播到群島的大多數島嶼和棲息地，並廣泛的危害多種鳥類宿主。該害蟲的幼蟲寄生性對多種鳥類幼鳥造成的影響並危害許多物種，使得加拉巴哥群島上的許多物種的數量正在減少。本次演講為說明該害蟲的生活史和危害情形，未來希能提出破壞該害蟲生活史的防治手段。

正式會議期間，除每日安排的上述會議外，我們分別選擇跟工作相關的主題與感興趣的議題聆聽，分述如下。

主題一: Transitioning Insecticide Science Technology for the Development of Novel Chemistries (利用轉變殺蟲劑技術開發新型化學物質)

該主題內容包括轉基因作物、新型化學物質評估、除蟲菊類藥劑作用機制探討、利用不同受器開發新型殺蟲劑、Insecticidal Alkylsulfones 作用機制探討、從分子機制探討新類尼古丁殺蟲劑 (neonicotinoid insecticides) 的作用機制等等。

在轉基因作物部分，探討玉米含有蘇力菌 *cry* 基因及其相關抗藥性部分，主要害蟲為秋行軍

蟲 (Fall armyworm (FAW), *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)), 該害蟲是一種原產於熱帶和亞熱帶美洲且極具破壞性的蛾類害蟲，主要以玉米植物為食。在國外秋行軍蟲的害蟲管理策略，大多依賴化學殺蟲劑和基改作物，主要的基改作物為含有蘇力菌 Cry 蛋白(例如 Cry1F) 的玉米。目前秋行軍蟲對於含有蘇力菌結晶蛋白的作物逐漸產生抗藥性，但是種植含有 Cry 蛋白的基改作物玉米雜交種仍然是北美洲防治秋行軍蟲的重要手段。目前基改作物中，對 Cry1F 的抗藥性相當普遍，且在某些情況下也會對帶有 Cry1A.105、Cry1Ab 和 Cry1Ac 等基因的基改作物產生交叉抗藥性。德國拜耳團隊說明 FAW 中的 Cry1F 抗藥性被證明與 ATP-binding cassette transporter C2 (ABCC2)基因的突變有關。德國拜耳團隊在巴西秋行軍蟲族群中，利用 pooled population sequencing 技術發現在秋行軍蟲的 ABCC2 extracellular loop domain 4 (ECL4) 基因群中有幾個高頻突變，包括缺失、插入和氨基酸取代等現象。該團隊發表 Cry1A 和 Cry1F 毒素結合以及對秋行軍蟲的 ABCC2 基因的選擇性有新的發現和說明。該團隊測試 ECL4 突變中 7 種不同的 ABCC2 變異體、nucleotide binding domain (NBD) 2 中的 2 種突變體，結果發現所測試的 ECL4 突變對 Cry1F 產生高抗藥性，但對 Cry1A.105 和 Cry1Ab 的抗藥性則較不明顯，而 NBD2 的突變幾乎不影響 Bt 毒素活性，因此在該試驗中證實 ECL4 基因插入或缺失對於秋行軍蟲 ABCC2 中 Cry1F 抗藥性具有重要性。

另外，田間害蟲防治失敗的原因之一是對殺蟲劑抗藥性的產生。一般來說重複使用相同的化合物或相同作用機制的(MOA)的化合物會導致抗藥性增加的風險。抗藥性產生的原因很多種，而避免或延緩因標靶蛋白突變而產生抗藥性尤為重要，通常抗藥性發生後也會誘發產生交叉抗藥性，進一步會限制殺蟲劑的選擇性。目前對於避免產生抗藥性的方法，包括輪替使用不同作用機制的殺蟲劑，因此需要瞭解各殺蟲劑的作用機制。NIHON NOHYAKU CO., LTD 公司目前正在開發一種新型殺蟲劑候選物 NNI-2101，鞘翅目和其他害蟲非常有效。根據該公司研究發現 NNI-2101 化合物對已對現有殺蟲劑產生抗藥性的害蟲也有效。該公司以 *Caenorhabditis elegans* 作為模式生物，利用其已全解序的基因組來分析和評估新型候選殺蟲劑 NNI-2101 的 MOA。其係以化學誘變劑處理線蟲，並以 NNI-2101 類似物處理線蟲以獲得具有抗藥性突變株線蟲。從所獲得的突變位點數量依據一定邏輯逐漸篩選，使評估突變位點的數量減少到 11 個，且發現這些突變位點多存在蛋白質編碼區，該研究主要將重

點放在 vesicular acetylcholine transporter (VAChT) 蛋白，根據研究結果推測 NNI-2101 的 MOA 抑制 VAChT 蛋白，並配合生化研究證明 NNI-2101 對 VAChT 的抑制作用並建立 NNI-2101 的 MOA。

另外住友化學研究除蟲菊類的殺蟲劑，除蟲菊酯是除蟲菊中含有 6 種殺蟲活性成分的混合物。除蟲菊酯及其合成衍生物擬除蟲菊酯均已被證明會使多種昆蟲產生拒食作用。住友化學以綠頭蒼蠅 *Phormia regina* (Meigen) 作為模式生物，來探討除蟲菊酯和擬除蟲菊酯在昆蟲產生拒食的原因。目前所知，天然除蟲菊酯和合成除蟲菊酯可透過調節昆蟲神經系統中的鈉離子通道的活性來發揮殺蟲作用。由本次發表的試驗結果顯示，當在蔗糖溶液中添加天然除蟲菊酯會降低昆蟲對含有殺蟲劑溶液的吸引力，因而不會產生擊落(knockdown)效應。在毛細管餵食試驗中，當把一隻綠頭蒼蠅固定後，並給予含有天然除蟲菊酯和六種合成除蟲菊酯的蔗糖溶液時，綠頭蒼蠅會透過縮短攝食時間來減少該含藥食物攝取。在住友化學的觀察試驗中，發現攝食抑制行為(feeding inhibitory patterns)與餵食氯化鈉、奎寧和酒石酸等引起味覺的物質之抑制行為非常相似。在本試驗中住友化學公司觀察到天然除蟲菊酯的 IC₅₀ 值為 0.4 μ M，比其他引起味覺物質低了 200 倍以上，且不論是天然除蟲菊酯或合成除蟲菊酯的處理濃度，綠頭蒼蠅的進食均會因口吻片(labelle)顫動和吻(proboscis)伸展猶豫而中斷攝食，偶爾還會伴隨嘔吐。這些反應的特徵是因為吻部肌肉被過度刺激，只要吻部肌肉持續被刺激，後續的食物攝取就會受到抑制。住友化學公司的研究證實攝入除蟲菊酯會導致綠頭蒼蠅的吻部肌肉過度活躍，而既有研究中，科學家瞭解除蟲菊酯和合成除蟲菊酯的作用機制為調節神經元的鈉離子通道(Nav)，使得神經元過度興奮，因此在本次的發表中住友化學的科學家認為除蟲菊酯和合成除蟲菊酯是透過其對 Nav 通道的刺激，同時也刺激昆蟲口腔味覺器官，而阻止綠頭蒼蠅進食，因此 Nav 通道的活化也是昆蟲拒食的新機制，而不需要一組特定的味覺受體受到作用。

主題二: 殺蟲蛋白防治害蟲的新進展(New developments in controlling insect pests with insecticidal proteins)

玉米穗蟲 *Helicoverpa zea*，是美國 Bt 基改棉花和 Bt 基改玉米的主要害蟲。但是玉米穗蟲對於 Bt 作物已產生抗藥性，抗藥性對 Bt 基改作物的有效性構成重大威脅。在美國南部玉米種植區，種植含有蘇力菌 Cry 蛋白的玉米因玉米穗蟲抗藥性而大大降低防治效果，目前研究則進一步探討表現蘇力菌 Vip3Aa 蛋白的 Bt 基改棉花和玉米。由於蘇力菌 Vip3Aa 蛋白的相關研究增加，使得對於含有 Vip3Aa 蛋白的基改玉米之研究更快速演進。在明尼蘇達大學的研究團隊中發表美國田間 Bt 玉米之抗藥性監測結果，揭露在美國田間玉米族群對 Cry 和 Vip3Aa 的感性(susceptibility)和抗藥性等位基因頻率、不同抗藥性的遺傳、交叉抗藥性和適應性成本(fitness costs)等。另外，結合美國不同大學對於來自蘇力菌 Vip3Aa 殺蟲蛋白之研究，發現可使用 Vip3Aa 殺蟲蛋白作為植物保護劑，可有效防治玉米和棉花中的玉米穗蟲和秋行軍蟲 (*Spodoptera frugiperda*) 的幼蟲危害。Vip3Aa 蛋白經過蛋白水解後與標的害蟲中腸上皮上的特定受體結合後發揮毒性。因此對於 Vip3Aa 抗藥性機制的探討，可以提升抗藥性管理方法並開發改良式殺蟲技術。該研究團隊透過比較抗藥性菌株和感性菌株中的 Vip3Aa 作用機制，來瞭解在玉米穗蟲和秋行軍蟲對於 Vip3Aa 蛋白的抗藥性機制。結果發現當 Vip3Aa 蛋白參與時，可降低玉米穗蟲和秋行軍蟲的抗藥性。這樣的研究結果將有助於田間抗藥性管理工作，有助於改善及克服既有殺蟲蛋白的抗藥性問題。此外在中國的研究團隊中也使用蘇力菌所產生的 Vip3Aa 蛋白作為殺蟲劑輔助劑。由目前的研究結果顯示，中國發生的秋行軍蟲目前並未對 Vip3Aa 蛋白產生抗藥性，但迫切需要更進一步地瞭解 Vip3Aa 蛋白的抗藥性遺傳基礎，方能主動監測、延遲和對抗害蟲產生抗藥性。這對秋行軍蟲來說十分重要，因為據報導在中國秋行軍蟲已對 Cry 蛋白產生抗藥性，而秋行軍蟲是世界上最具破壞性的害蟲之一。在中國的研究報告中發現秋行軍蟲轉錄因子基因 Sfmyb 的下調與 Vip3Aa 抗藥性之間具有關聯性。由全基因組關聯性研究等結果顯示，該基因可在實驗室作為篩選對 Vip3Aa 抗藥性的基礎。該團隊使用 RNA 干擾技術或 CRISPR/Cas9 基因編輯技術來降低菌株的 Sfmyb 基因表達，可降低對 Vip3Aa 的敏感性，這樣的結果顯示 Sfmyb 基因表達降低會導致對 Vip3Aa 蛋白產生抗藥性。相對於 Sfmyb 的野生型啟動子，在抗藥性菌株中的啟動子有缺失且活性較低，由上述成果將有助於瞭解害蟲對 Vip3Aa 的抗藥性。

本主題中最令人印象深刻的是對於蘇力菌抗藥性的說明與探討，可以發現使用轉基因作物並無法解決抗藥性問題，且 cry 蛋白是可能讓害蟲產生抗藥性的。而目前科學家積極的研究其它殺蟲蛋白，例如 Vip3Aa 蛋白，雖目前對該蛋白的機制和其它特性的研究相對於傳統的 cry 蛋白少，但是進步速度飛快，且各研究團隊均研擬相關的抗藥性策略。目前在臺灣蘇力菌產品主要還是以 cry 蛋白為主，其它殺蟲蛋白的產品均未見到，未來可留意相關的發展和研究，為我國提供不同的微生物農藥品項和選擇。

主題三：RNAi 技術：未來農業害蟲管理的關鍵突破

在本次大會參與最多的主題，就是與 RNAi 在農業應用上相關的議題，以下分為 6 點做說明。

1. RNAi 綜合管理：與 IPM 的結合

有關 RNAi 技術在綜合害蟲管理（IPM）中的應用讓我們對永續農業策略的發展方向有了更深入的認識。來自中國西南大學和英國紐卡斯爾大學的研究團隊分別展示了 RNAi 技術如何通過高度特異性的基因沉默機制，有效應對刺吸式害蟲並與生物防治因子形成協同作用。這一方法被稱為基於 RNAi 的生物防治，不僅能顯著降低害蟲種群密度，還能避免傳統化學殺蟲劑對非目標生物（如瓢蟲、草蛉和寄生蜂）的破壞性影響。

通過改進 dsRNA 的設計與篩選，並結合創新的生產與遞送技術，RNAi 技術的應用效果和生物安全性得到了顯著提升。例如，針對昆蟲發育或生存所必需基因的高效靶向設計，顯示出對害蟲控制的高度專一性，同時減少了對天敵的非目標效應。此外，結合 IPM 的整體策略框架，RNAi 技術可以有效減少合成化學殺蟲劑的使用，提升作物產量與品質，同時保護農業生態系統的多樣性和穩定性。會議中的案例研究進一步表明，RNAi 作為 IPM 的核心組成部分，不僅能提升防治效率，還能減輕農業生態環境的壓力。

2. RNAi 抗藥性：分子調控與抗藥性機制

RNAi 技術在抗藥性管理方面的挑戰和應對策略成為討論的焦點。來自韓國忠南國立大學和美國田納西大學等研究團隊的報告展示了 RNAi 抗藥性機制的分子基礎及其應用潛力。針對秋行軍蟲的研究表明，特定 miRNA (如 sfr-miR-10465-5p 和 sfr-miR-10476-5p)

可通過調控細胞色素 P450 基因 (如 CYP4C1 和 CYP4C21) 的表達,顯著影響害蟲對氯蟲苯甲酰胺的敏感性。通過模擬物調控 miRNA 水平,研究發現可以有效降低秋行軍蟲對殺蟲劑的抗藥性,這為設計基於 RNAi 的分子靶標提供了重要參考。

此外,針對科羅拉多馬鈴薯甲蟲的研究揭示了多基因抗藥性類型的特徵,特別是抗藥性群體在中腸細胞對 dsRNA 的攝取能力顯著下降,而非傳統的靶標位點突變或核酸酶降解機制。這些發現為 RNAi 技術的抗藥性管理提供了新思路。研究還表明,結合化學殺蟲劑或蘇力菌 (Bt) 蛋白的綜合防治策略,能有效延緩害蟲對 dsRNA 的抗藥性進化,並為確保該技術的長期可持續性奠定基礎。

3. RNAi 防治：基因靶點的選擇與應用

基於 RNAi 的生物農藥展現出高度的環境友好性與物種特異性,特別是在針對 28 點瓢蟲、秋行軍蟲和蚊類等害蟲的研究中,成果令人振奮。以 28 點瓢蟲為例,通過基因靜默技術包括 HvABCH1 和 HvSrp54k 在內的關鍵基因, RNAi 技術有效降低了害蟲的存活率,同時對非目標捕食性瓢蟲未產生負面影響,展現了高度的安全性。這種基因靶向的防治策略為作物保護提供了可行的方案。

針對秋行軍蟲等鱗翅目害蟲的研究中, RNAi 技術的挑戰主要來自經口攝入 dsRNA 的效率較低。然而,利用基於植物的 dsRNA 遞送技術和跨界 RNAi (TK-RNAi),研究顯示出提高 dsRNA 穩定性和遞送效率的創新方法,為解決鱗翅目害蟲抗藥性與控制提供了突破口。同時,針對蚊類害蟲的酵母 RNAi 技術也展現了強大的應用潛力。這項技術通過釀酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)表達短髮夾 RNA (short hairpin RNAs, shRNA),實現了對埃及斑蚊、按蚊(*Anopheles*)和家蚊(*Culex mosquito*)的高效控制。此外,這些酵母菌株還被應用於誘引餌劑 (ATSBs) 中,用於成蚊防治,並在不育昆蟲技術 (SIT)計劃中,用於優化雄性蚊子的生產。

4. RNAi 技術改良：載體與量產

曼尼托巴大學展示的「結構化雙鏈 RNA」技術令人印象深刻,通過設計對腸道核酸酶更具抗藥性的「紙夾 RNA」(paperclip RNA, pcRNA),顯著提高 RNAi 殺蟲劑的穩定性和效能,甚至能克服某些對傳統 dsRNA 具有自然抗藥性的害蟲問題。此外,希臘國家科

學研究中心的研究利用病毒樣顆粒(VLPs)作為奈米載體，成功提高作為殺蟲劑的 dsRNA 的遞送效率，並減少了應用過程中劑量需求，這為玉米穗蟲等鱗翅目害蟲的防治提供了創新思路。

在大規模量產方面，日本味之素株式會社的團隊報告利用 *Corynebacterium glutamicum* 的生產 dsRNA 之生產技術。通過刪除特異性 RNA 酶基因、優化質粒系統和提高 RNA 轉錄效率，使得每公升的培養液可產生超過 1 公克的 dsRNA 產量，進而可以降低成本、提高生產效率的微生物發酵技術，為 RNAi 農藥的商業化應用提供可靠的技術支援。針對 28 點瓢蟲的防治研究顯示，利用該系統生產的 dsRNA 能顯著抑制害蟲目標基因的表達，從而減少植物損害，展現了強大的應用潛力。

5. RNAi 商品化：遞送平台與實地應用

有關 RNAi 技術商品化進程的報告展現了這項創新技術在害蟲管理中的巨大潛力，並讓我們對其實現商業應用的挑戰和機遇有了全新認識。RNAi 技術可作為一種具有高度特異性和環境友善的生物殺蟲劑，其發展正在逐步成為新興商品，特別是針對科羅拉多馬鈴薯甲蟲(CPB)的應用，GreenLight Biosciences 開發的首款可噴施 RNAi 產品 Calantha™ 成為焦點，其活性成分 ledprona 被 IRAC 列為全新作用機制的蛋白質抑制劑。田間試驗結果顯示，Calantha™ 的效果與傳統商業殺蟲劑相當，且對非目標生物無不良影響，這使該產品可成為綜合害蟲管理 (IPM) 中的重要技術手段。

此外，澳大利亞昆士蘭大學的 BioClay™ 和 BenPol 遞送技術通過創新設計大幅提高了 dsRNA 的穩定性與遞送效率，解決 RNAi 技術在田間應用中的核心瓶頸問題。BioClay™ 利用層狀雙氫氧化物 (LDH) 將 dsRNA 穩定地載入植物葉片表面，而能達到長效保護的效果，而 BenPol 技術則通過 pH 釋放機制專門應對具有鹼性腸道的害蟲，結果顯示對玉米穗蟲等害蟲具有卓越防治效果。

在大規模生產方面，RNAiSSANCE Ag 的細菌發酵平台和 GreenLight Biosciences 的無細胞 RNA 生產技術分別展示 dsRNA 生產技術的躍升。RNAiSSANCE Ag 每升發酵液超過 10 克的 dsRNA 產量顯著降低生產成本，使 RNAi 生產技術在能與傳統化學農藥競爭，為商業化帶來可能性。

這些研究與技術展示，讓我們深刻意識到 RNAi 技術的商品化是害蟲管理的一場革命，特別是在滿足全球對環境友善型農藥需求的背景下，這項技術的潛力不可忽視。

6. RNAi 安全性：對非目標生物的影響

RNAi 技術以其高度物種特異性和環境友好性，逐漸成為永續農業的重要工具。來自多個研究團隊的報告，從非目標生物影響到哺乳動物安全性，全面展示 RNAi 技術在不同層面的安全性評估。

德國的研究以瓢蟲 (*Coccinella septempunctata*) 為模型，證實針對害蟲設計的 dsRNA 對非目標天敵的影響有限，即使在高暴露風險下，也未觀察到顯著的負面生物效應。同時，針對巴西四帶無刺蜂 (*Melipona quadrifasciata*) 的研究，進一步透過電腦模擬和活體實驗，評估了 dsRNA 對授粉昆蟲的影響。結果顯示，雖然四帶無刺蜂對 RNAi 技術具有一定敏感性，但其內部補償機制有效減少了不良影響。這些研究結果顯示 RNAi 技術在環境應用中的非目標生物風險是可控的，並可以藉由設計特異性更高的 dsRNA 進一步降低風險。

此外，來自美國拜耳作物科學的報告從哺乳動物的角度分析了 RNAi 技術的安全性。基於 Codex 評估流程，結合脊椎動物的生物屏障機制和核酸消費的歷史數據，大量證據證實 RNAi 農業產品對哺乳動物無害。這些結論為 RNAi 技術的田間應用及相關產品的商業化提供了有力支持。

其他主題：

1. Bt 轉基因作物的現狀與挑戰

Bt 轉基因作物技術已在全球廣泛應用，特別是在玉米、棉花和大豆這三大作物上，為農業生產帶來顯著的經濟效益。全球已有 27 個國家採用 Bt 轉基因作物技術，種植面積達 1.09 億公頃，而 Bt 玉米和 Bt 棉花分別帶來了 45.3 億美元和 43.8 億美元的淨收入增長。然而，Bt 作物的應用仍面臨抗藥性問題。近年來，部分害蟲對 Bt 植物的抗藥性已在田間觀察到，特別是在目標害蟲群體壓力較高的地區，例如秋行軍蟲 (*Spodoptera*

frugiperda) 和番茄夜蛾 (*Helicoverpa armigera*)，這些害蟲的抗藥性快速演化成為一大挑戰。

研究顯示，抗藥性害蟲主要通過兩種機制對 Bt 毒蛋白產生抗藥性：其一是目標蛋白的突變或缺失，降低 Bt 毒蛋白的結合能力；其二是腸道酶的改變，干擾 Bt 毒蛋白的活化過程。此外，在某些農業系統中，由於 Bt 作物的單一品系長期應用，導致害蟲群體對特定 Bt 蛋白的抗藥性增加。這一問題尤其在以玉米和棉花為主的集約農業區域尤為顯著。

為應對上述挑戰，研究者提出多種抗藥性管理策略，包括使用多種 Bt 毒蛋白的金字塔組合作物，減少抗藥性害蟲的選擇壓力；結合 RNAi 技術以提供額外的基因靜默途徑；以及加強昆蟲抗藥性管理(IRM)和綜合害蟲管理(IPM)的整體規劃。例如，在一些田間試驗中，藉由輪作其他非 Bt 作物來中斷害蟲對 Bt 毒蛋白的持續暴露，這樣的做法也已顯現出對抗藥性抑制的積極效果。同時，非轉基因方法(如 Bt 毒蛋白噴霧)也逐步被納入綜合管理措施中，為延緩抗藥性策略提供不同選擇。

目前，Bt 技術的發展正向多層次抗藥性管理方向邁進，結合奈米技術、人工智慧和生物資訊學的應用，將進一步提升技術穩定性和應用效益。這些進步不僅有助於應對抗藥性問題，還能加速 Bt 技術在全球農業中的可持續推廣。

2. 白殭菌的潛力與創新應用

白殭菌 (*Beauveria bassiana*) 作為一種昆蟲病原真菌，在非化學防治技術中具有重要地位，其應用不僅可以減少化學農藥的使用，還能有效解決害蟲抗藥性問題。近期研究成果顯示，白殭菌在多樣性和毒力方面展現出顯著差異，這對於生物殺蟲劑的開發具有深遠影響。例如，南非研究顯示，與 *Gonipterus* sp. 2 相關的白殭菌隱藏種包括多個未進一步描述的物種，其中部分菌株在毒力測試中展現出極高的潛力，特別是 *B. namnaoensis* 和部分未定義的新穎分離株所展現之毒力，未來均可作為專門針對此害蟲的生物殺蟲劑候選菌株。此外，白殭菌的應用還拓展到智慧傳播技術的開發。以美國夏威夷為例，研究者開發了一種自動傳播設備，通過市售白殭菌與性費洛蒙誘餌結合，成功設計出吸引

瓜實蠅的裝置。該裝置利用 3D 列印技術製成，能有效將孢子傳播至雄性瓜實蠅，並藉由交配行為將孢子傳遞至雌蠅，達成族群控制效果。實驗顯示，該設備在不同天氣條件下均能保持孢子存活率，並顯著減少瓜實蠅族群密度，為害蟲管理提供新的解方。

3. 光學控制措施的創新發展

在害蟲管理中，光學技術的應用令人印象深刻。利用特定波長的光對昆蟲行為的影響成為研究重點。例如，405nm 的紫光能吸引天敵 *Orius sauteri* 及 *Nesidiocoris tenuis*，有效促進其從補償植物向目標作物的遷移，並顯著提升其捕食粉蝨的能力。田間試驗顯示，紫光輔助的天敵管理策略不僅大幅降低了害蟲密度，還為溫室害蟲綜合管理提供了一個環保、高效的方案。

此外，針對甘蔗害蟲綠金龜(*Anomala albopilosa*)的研究發現，376nm 的紫外光波段對成蟲具有最強的吸引力，相關誘捕裝置在田間試驗中可顯著降低害蟲數量。這種基於光譜敏感性的物理誘捕方法，可降低化學農藥的使用，也為害蟲的生態管理提供了更多可能性。光技術的應用不僅局限於誘捕和驅避，其與其他生物防治工具的結合將進一步擴展綜合害蟲管理(IPM)的應用範圍。例如，通過光誘技術將害蟲引導至捕殺區域或促進天敵的遷移，為大田和溫室作物的害蟲管理提供了一種全新的思路。未來，結合人工智慧設備與自動化設備的智慧光誘捕裝置，有望進一步提升害蟲控制的精準性，推動永續農業的實現。

4. 新型殺蟲劑與奈米載體技術在害蟲管理中的應用

Dimpropridaz (Axalion®) 和奈米載體技術的研究展示新型殺蟲劑與遞送方法之進展。這些技術的應用不僅為解決害蟲抗藥性問題提供新方案，也說明化學、生物與工程技術在農業害蟲管理中的高度融合。

Dimpropridaz 是由巴斯夫公司與哥廷根大學合作開發的一種全新嘧啶吡唑甲酰胺化合物(pyridazine pyrazolecarboxamide)，其獨特作用機制針對昆蟲和甲殼類動物特有的弦音感器，這是一種牽張感受器，負責聲音、運動與平衡等功能。該化合物的研究首次將殺蟲劑的目標鎖定在昆蟲的感覺神經系統，填補現有第 9 組與第 29 組殺蟲劑的空白，並被殺蟲劑抗藥性行動委員會(IRAC)歸類為第 36 組殺蟲劑。研究結果顯示，Dimpropridaz 能

迅速使昆蟲喪失方向感和運動能力，最終因飢餓與脫水而死亡。與傳統化學農藥相比，其對目標害蟲具有更高的專一性，對環境和非目標生物的影響更小，為抗藥性管理提供了一個全新利器。這次演講詳細介紹了 Dimpropridaz 的多輪優化過程，展示了從體內篩選到化學結構設計的完整開發過程，體現了科學家們對高效性、低毒性與可持續性的追求。這一突破性的研究範例讓我們更加認識到技術創新在應對農業害蟲挑戰中的重要性。

此外，針對殺蟲劑傳遞效率低下的挑戰，加州大學河濱分校與巴斯夫公司聯合開發的奈米載體技術也讓我們印象深刻。該技術利用碳點 (CD)與分子籃(γ -環糊精, γ -CDs)，顯著提升殺蟲劑有效成分(AI)通過昆蟲跗節孔的遞送效率。以南方綠臭蟲(*Nezara viridula* L.)為目標害蟲，研究顯示，奈米載體技術可提升殺蟲劑的防治效果達 25%，且能有效避免有效成分滲入作物葉片，能對標的害蟲進行精準防治，同時降低對環境的影響。藉由「Styletectomy experiments」驗證， γ -CDs-AI 配方能夠高效進入昆蟲體內，這一突破為害蟲綜合管理(IPM)提供全新的解方，也展示了奈米材料在農業中的廣闊應用前景。這兩項技術研究讓我們深刻體會到跨學科合作的重要性。Dimpropridaz 的作用機制展示了化學與神經生物學的深度結合，而奈米載體技術則融合了奈米材料科學與農業應用的創新思路。這些研究不僅為抗藥性管理與害蟲防治提供新的方向，也啟發我們進一步關注如何將技術創新與環境友好型農業實踐相結合。未來，我們希望能在國內推動這類先進技術的研究與應用，助力解決害蟲防治中的實際問題，為提升農業生產效率和推動永續農業發展貢獻一份力量。

心得及建議

本次國際昆蟲研討會我們主要聽講農藥抗藥性、生物防治、微生物農藥等議題，這些議題與本所和本組的研究議題相關。在微生物資材相關部分，特別是在蘇力菌的 Vip3Aa 蛋白為新興研究領域，通常被認為具有毒性，能夠對昆蟲產生致命作用。由研討會報告者的內容和文獻檢索閱讀，可以知道蘇力菌所產生的兩類重要蛋白質分別為 Vip3Aa 和 Cry 蛋白，二

者都是用於對抗昆蟲的毒性蛋白質，但這兩類蛋白在結構、機制和應用上有顯著的差異。以蛋白質結構與分類而言，Cry 結晶蛋白，通常以結晶形式存在於 *Bacillus thuringiensis* 中，生成時通常也伴隨孢子，而結晶蛋白可在昆蟲消化系統中被活化並轉化為具有毒性的形式；Cry 蛋白有多個亞型，根據它們的氨基酸序列和作用範圍不同，分為 Cry1、Cry2、Cry3、Cry4 等，每個類別的蛋白對不同昆蟲具有選擇性毒性。而 Vip3Aa 蛋白(Vasoactive Intestinal Peptide family 3A)也由蘇力菌所分泌，屬於 Vip3 家族的蛋白質一種，其結構並不形成結晶體，而是以水溶性形式存在，該蛋白通常在生長期(孢子形成之前)就會釋放到外部環境；如同前述 Vip3Aa 屬於水溶性蛋白，其也具有不同的亞型 (如 Vip3Ab、Vip3Ac 等)，對特定害蟲可發會毒性作用。在作用機制部分，Cry 結晶蛋白可在昆蟲腸道被蛋白酶活化並昆蟲腸道細胞的受體結合，進而破壞腸道細胞的結構，造成腸道通透性增加，導致昆蟲死亡，目前已知這些蛋白主要對鱗翅目和雙翅目等昆蟲具有毒性作用，同時它們對昆蟲的腸道細胞膜具有很高的選擇性。Vip3Aa 蛋白不像 Cry 結晶蛋白需要被活化，Vip3Aa 蛋白可在昆蟲消化系統中直接發揮作用，並與昆蟲腸道細胞的受體結合，形成一種孔洞，從而損害腸道屏障功能，進而干擾營養吸收，導致昆蟲衰弱並最終死亡，Vip3Aa 蛋白對多種昆蟲，特別是鱗翅目、雙翅目和部分甲蟲目均具有毒性。而在抗藥性與應用部分，Cry 結晶蛋白長期在農業中廣泛使用，因此部分害蟲已經對 Cry 結晶蛋白產生抗藥性，大部分的抗藥性產生原因是因為基因突變或昆蟲腸道受體產生變異，使得 Cry 蛋白無法與受體結合，進而失去毒性，同時 Cry 蛋白也廣泛應用於基因工程作物(如本次報告中常提及的 Bt 棉花、Bt 玉米等)。在 Vip3Aa 蛋白部分，由於 Vip3Aa 蛋白在農業上的應用較新，抗藥性問題的研究較少，目前研究成果顯示，某些昆蟲對 Cry 蛋白具有抗藥性，但對 Vip3Aa 蛋白的抗藥性發展較為緩慢，因此它被認為是一種較為有前景的“二代”生物農藥，目前 Vip3Aa 蛋白在農業中的應用主要是作為一種新型的生物防治劑，可作為與 Cry 蛋白聯合使用的輔助蛋白，延緩抗藥性的出現。未來對於二種蛋白的發展和應用，由於 Cry 蛋白和 Vip3Aa 蛋白的作用機制不同，因此可利用它們協同使用以提高對害蟲的防治效果，並減少抗藥性問題的發生，對於我們本土蘇力菌研究除有不同的領域開拓，也可思考未來配合不同蛋白之應用提升防治效果和廣度。而 Vip3Aa 蛋白的發展目前仍存在一些挑戰，包括蛋白質表達與穩定性，對於蘇力菌在

何種培養條件下可持續表達和釋放足夠量的 Vip3Aa 蛋白仍須要進一步瞭解，且對於大量生產 Vip3Aa 蛋白的安全性及對非靶標生物和人類仍需進一步評估；此外對不同昆蟲的敏感性不同，如何確保 Vip3Aa 能夠對目標害蟲發揮高效的毒性作用，並且不對其他有益昆蟲造成傷害，是需要解決的問題。

在本次國際昆蟲學會議中，RNAi 技術的多層次應用與創新成果充分展現了其在現代農業害蟲管理中的核心地位。從綜合害蟲管理(IPM)的整合應用，到針對抗藥性機制的深入研究，再到商品化技術的突破，RNAi 技術以其高度特異性、環境友善性和技術創新性，為永續農業發展提供了革命性的解決方案。

針對抗藥性管理，會議中的研究揭示了 miRNA 和多基因抗藥性機制在害蟲對 RNAi 技術敏感性中的關鍵作用，並提出結合化學殺蟲劑與 RNAi 的多層次防治策略。這些研究不僅為延緩害蟲抗藥性提供了新方向，也展示 RNAi 技術與其他防治方法的協同潛力。基因靶點的選擇與應用則進一步強化 RNAi 技術的廣泛適應性，特別是在針對 28 點瓢蟲、鱗翅目害蟲以及蚊類等多樣害蟲時，其高度靶向的防治效果展現極大的應用潛力。

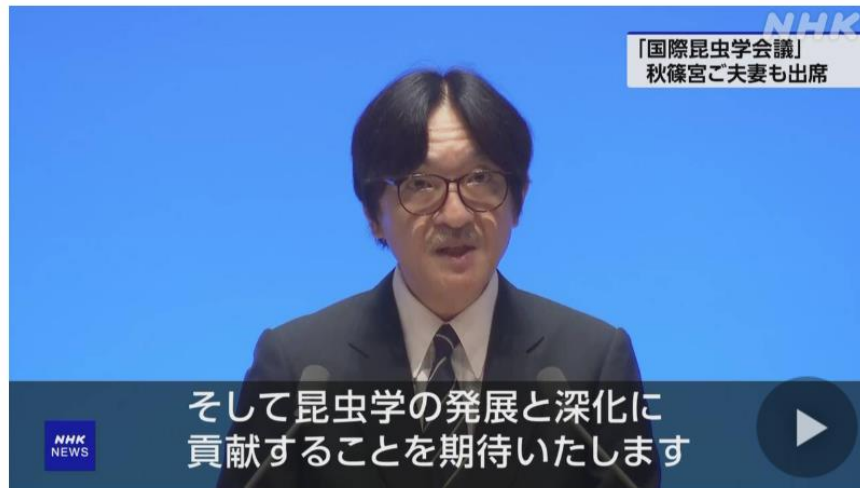
在商品化方面，RNAi 技術的突破性進展尤其令人矚目。首個 RNAi 噴灑型產品 Calantha™ 的成功開發，為該技術的實地應用奠定了堅實基礎。作為一款針對科羅拉多馬鈴薯甲蟲的創新產品，Calantha™ 不僅在田間試驗中展現了與傳統化學殺蟲劑相當的防治效果，還具有高度環境友好性，對非目標生物的影響極低。這意味 RNAi 技術從實驗室走向田間的里程碑，也是農業技術發展的重大進展。

此外，會議中展示的多項支持 RNAi 商品化的技術進一步拓展了這項技術的可能性。包括 BioClay™ 和 BenPol 在內的新型遞送平台顯著提升了 dsRNA 的穩定性與釋放效率，解決田間應用中的關鍵瓶頸。RNAiSSANCE Ag 的細菌發酵平台實現了每升發酵液超過 10 克 dsRNA 的高產量，大幅降低生產成本，使 RNAi 技術在經濟性上可與傳統化學農藥競爭。這次會議讓我們深刻體會到，RNAi 技術不僅是科學研究的一次突破，更是全球農業向可持續發展轉型的重要里程碑。從基因靶點的精準設計，到創新的遞送技術與商品化應用，RNAi 技術的全方位進步展示其在解決害蟲抗藥性、降低農藥使用及保護農業生態系統中的不可

替代性。目前，RNAi 應用於農業的研究在國內並不多，本所也尚未有相關得研究計畫，未來是否能將這些創新技術引入國內，結合本地農業需求推動其實際應用，實現高效、環保的害蟲綜合管理，是將來值得討論的議題。

附錄

因本次會議內容禁止拍照，故無附相關研討會照片。



秋篠宮ご夫妻 国際昆虫学会議の開会式に出席 悠仁さまも参加

圖 1、日本國內媒體報導親王殿下演講。



第27回 国際昆虫学会議 (京都市)

圖 2、為親王與親王妃之座位與布置



圖 3、本次會議主視覺