

從海洋雪看氣候變遷

王博賢、何詩琬、陳光宇、雷漢杰、楊益、曾瓊蓉

季節的更替見證於陸地森林的葉落芽萌，也反映在海洋森林所灑下的海洋雪。海洋雪是什麼？跟氣候變遷有什麼關係？

在陸地上，一旦氣溫低於攝氏零度且空氣溼度夠高，便有機會飄下皚皚白雪。若我們潛入光線到達不了的深海中，也可見身旁隨時都有「海洋雪」漂落。海洋雪雖然並非由冰晶組成，它們的出現卻隱含氣候變化的訊息。為了探究海洋雪在環境上的意義，台灣海洋科技研究中心在台灣西南方，距離墾丁 670 公里遠的南海建立國際研究站，並且布放儀器收集海洋雪，以了解海洋雪的組成、性質，以及降雪量和氣候變遷的關係。

海洋下雪了

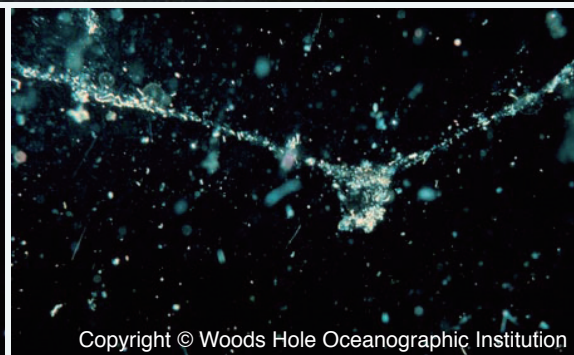
1930 年，美國海洋生物學家畢比（William Beebe）在百慕達海域搭乘球型潛水器到深海探險。他在海面下數百公尺的漆黑之中，看到防水窗外到處漂散著如雪般細小、蓬鬆的白點，便把這些小白點命名為海洋雪（marine snow）。

事實上，海洋雪是海洋生物殘骸的聚集體，沒有固定的形狀。這些生物殘骸聚集體的大小約數百微米（ μm ），肉眼不易觀察，有些海洋雪還能團聚成更大的，甚至達數公分的雪花。

海洋雪主要由浮游生物的碎屑所構成，來源是海洋表層 200 公尺，陽光可穿透的有光層。這一水層居住著大量的光自營浮游生物，包括藻類、藍綠菌等，利用光合作用自製養分維生，因此稱為初級生產者。有光層也住著許多浮游動物，以初級生產者為主食，有些浮游動物還會捕食身型較小的浮游動物。

這些海洋初級生產者和消費者，無論壽終正寢或遭捕食，其殘骸或殼體都因重力以每天數公尺至數十公尺的速度下沉，但這不足以形成海洋雪。海洋雪的形成還需要兩種天然的黏

海洋雪是海洋生物殘骸的聚集體，沒有固定的形狀，大小約數百微米，肉眼不易觀察，有些還能團聚成更大的，甚至達數公分的雪花。



無人駕駛潛艇在近千公尺深海拍攝燈光照射下的海洋雪（上圖）。透明膠質黏聚各類海洋生物顆粒而成海洋雪，因此每片雪花的大小、形貌，以及物理、化學組成都不同（下圖）。

著劑，一種是藻類或細菌所分泌的透明多醣類膠質，另一種是浮游動物攝食後所排泄的糞粒，其表面包覆著一層幾丁質結合蛋白薄膜。這兩種黏性物質可把死亡的生物殘骸黏合或包裹成海洋雪，其下沉的速度可達每天數百公尺。有些海洋雪含有少量來自陸地上的岩石碎屑，多半藉由大氣或河流輸送到海洋。

雪花快餐車

由於海洋雪沉降速度快，有利物質從表層海洋往深海輸送，提供底棲生物所需的營養。即使大部分有機養分在水深 200 ~ 1,000 公尺間的微光層已被細菌消耗分解，到達數千公尺深的海床時只剩原來的百分之一至千分之一，不過總聊勝於無。體型

大的海洋雪沉降速度通常較快，就像快餐車一般，宅配底棲生物最新鮮的美食。

海洋雪的體態和化學組成會隨著沉降至不同深度而有所變化，其中的有機質多在水深 1,000 公尺內被細菌降解為溶解態的有機或無機分子，也就是含碳、氮、磷等溶解營養鹽。換言之，在雪花快餐車下沉的過程中，車上搭載許多細菌乘客，牠們吃掉海洋雪大部分的有機物，把表層浮游生物從海水攝取的養分經由分解作用又歸還給海洋。這些溶解營養鹽透過擴散及對流作用，又再回到表層海洋為生物所用，形成一個循環的迴路。

海洋雪的無機成分包含碳酸鈣（鈣板藻、有孔蟲）或矽質（矽藻、放射蟲）的殼體，一般這類無機的顆粒物無法被微生物利用，因此能順利沉降至海床，成為海洋沉積物的一部分。不過，隨著深度增加，壓力變大、溫度降低，在躍溶帶（3,500 ~ 4,500 公尺）碳酸鈣開始大量溶解。在深度達到碳酸鈣補償深度時，碳酸鈣殼體全數溶解。因此，在水深超過 5,000 公尺的大洋海床，因為碳酸鈣已溶解殆盡，通常以矽質的顆粒為主要成分。

海洋雪分別對某些元素有特別的親和性，例如有機質容易吸附鉍、砷、稀土、鉛、鈦等元素，無機質則易吸附磷、鐵、錳等元素。其中，鐵、錳等元素形成奈米級的氧化顆粒後，還能不斷吸附更多過渡金屬元素，包含釩、鉻、鈷、銅、鋅、鎳、錫、稀土和放射性的鈾—鈾序列元素如鉛、鈾、

鐳、鈾、鈾等。這些元素搭著海洋雪的便車，如果中途沒有下車（脫附），最終會到達海床。

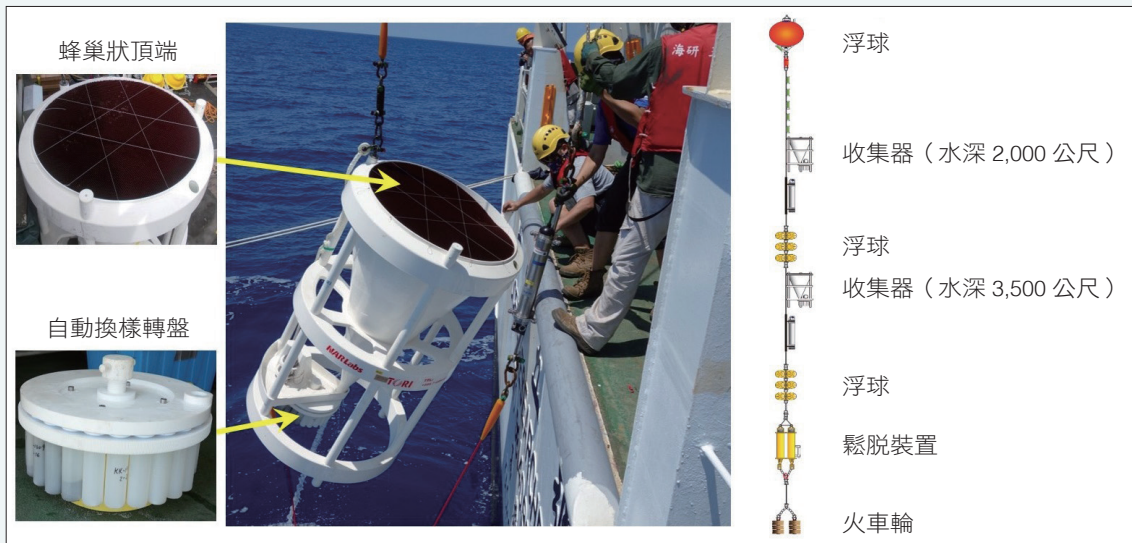
由此可知，海洋雪從表層水到海床沉積的過程中，歷經了團聚 / 離散、吸附 / 脫附等不同的物理、化學和生物作用的演化。即便塵埃落定，海洋雪也會成為底棲生物和細菌的食物，元素的吸附、脫附等作用也持續進行。而釋放出來的元素，直到某一天又循著洋流返回有光層，等待下一個再次形成雪花的機會。

海洋雪與碳封存

海洋的有光層又稱為海洋森林，有許多藻類、藍綠菌等光自營生物在這裡行光合作用，因而把大氣的二氧化碳轉為自身可用的有機養分，這就是碳固定。如此日出而作、日落而息，每年竟能固定約 500 億噸的碳，與陸地森林旗鼓相當。也就是說，全球的總固碳量有一半是海洋中的光合生物所貢獻的。另外，海洋中有些浮游動物能吸收海水中的碳酸氫根離子形成碳酸鈣的殼體，這也是碳固定的一種。

有光層的浮游生物死亡，團聚成海洋雪而沉降，其中的有機碳和無機碳也跟著一起往深海輸送，這樣的作用稱為生物幫浦。雖然大部分海洋雪有機碳在水深 200 ~ 1,000 公尺間會遭細菌分解而回歸海洋，無機碳的部分如碳酸鈣殼體還是能沉降至海床。

全球的總固碳量有一半是海洋中的光合生物所貢獻的，海洋中有些浮游動物能吸收海水中的碳酸氫根離子形成碳酸鈣的殼體，也是碳固定的一種。



左圖：台灣科學團隊在研究船上進行錨碇沉降顆粒收集器的回收工作。收集器頂端具蜂巢狀結構，底部有自動換樣轉盤。右圖：SEATS 研究站的沉降顆粒收集串列設計。

科學家研究海洋生物幫浦碳固定，是想減緩因化石燃料使用而引發的全球氣候變化。其中，海洋化學家馬丁（John Martin）於 1990 年提倡的「鐵假說」最受矚目。此前已有學者提出利用藻類行光合作用來降低大氣二氧化碳，卻不知如何驅使藻類工作。鐵是葉綠素執行光合作用的必需元素，馬丁發現有光層海水溶解鐵濃度平均是 17 ppt，也就是 1 億公升海水中只含鐵 1.7 公克。因此，他認為只要在大洋中溶解鐵低的海域施灑鐵粉，就能促進藻類生長，進而降低大氣的二氧化碳濃度。

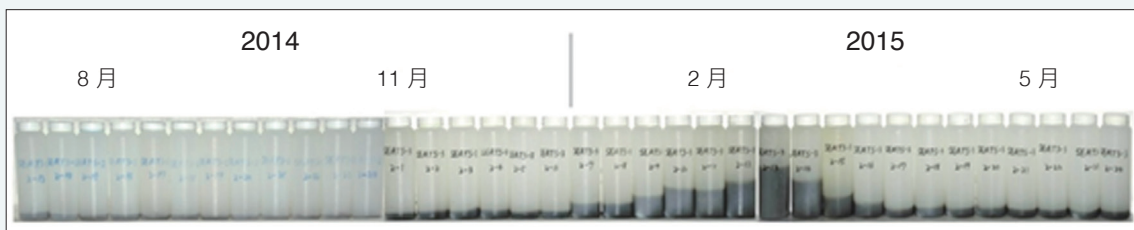
馬丁構想的「鐵肥實驗」自 1990 年起陸續展開，主要以高營養鹽低葉綠素的缺鐵海域為實驗場所。實驗結果雖然在南大洋等海域獲得成功，然而在部分海域的結果不如預期，仍有問題需要克服，包括浮游動物同步增長而消耗藻類，以及大部分的顆粒有機碳在微光層遭細菌分解而把碳

釋放出來。此外，也有部分科學家警告過度介入生物循環會引發生態浩劫。無論如何，馬丁的這個概念仍非常有創意。

大家一起來賞雪

為能了解海洋的碳循環模式，1984 ~ 2003 年間，一個由美國發起的「全球海洋通量研究計畫」就此展開，共有二十幾個國家參與。在這個跨國合作計畫裡，科學家試圖釐清全球海洋中控制碳及相關元素的地球化學與生物過程的循環機制，並估計碳在大氣、陸地與海洋 3 個碳儲庫的儲量、碳固液氣三相轉換及庫間遷移，藉以了解人為製造二氧化碳輸送到深海的比率，以及預測大氣二氧化碳的未來發展。

目前，科學家認為沉降到深海的顆粒碳主要由海洋雪提供，如果可以知道海洋雪的碳通量，就能推算海洋的顆粒碳通量。為了估算海洋雪的碳通量，科學家研發沉降



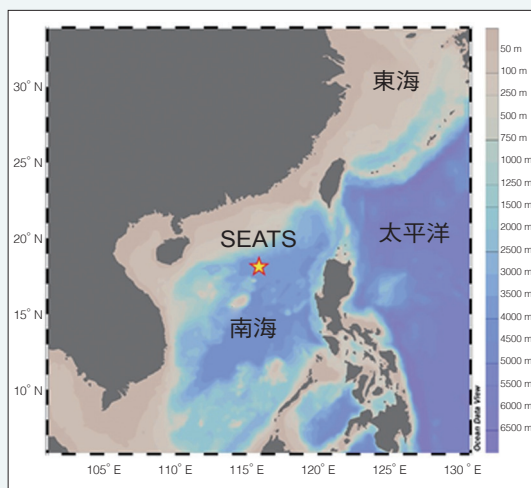
南海 SEATS 研究站在 2014 ~ 2015 年間，水深 3,500 公尺處收集的沉降顆粒，其通量在冬季明顯高於夏季。自動換樣轉盤每 8 天旋轉一次，因此每個收集瓶的顆粒反映 8 天的顆粒沉積結果。

顆粒收集器。沉降顆粒收集器主要分為隨波逐流的漂浮收集器和不動如山的錨碇收集器兩種。如果把水下顯微攝影系統裝載於收集器旁，還能研究海洋雪花大小、形狀、組成性質和下沉速度之間的關係。

南海時間序列研究站

南海是當今全球最大的邊緣海，因此陸源物質的輸入和人類活動對海洋環境及生態的影響，比太平洋、大西洋等開放大洋顯著許多。由於地緣關係，台灣科學界在全球海洋通量研究計畫中負責南海的碳循環研究。自 1998 年起，由國家海洋科學研究中心主導，聯合中研院及海洋大學、臺灣大學、中央大學、成功大學、中山大學等共同參與東亞時間序列研究。

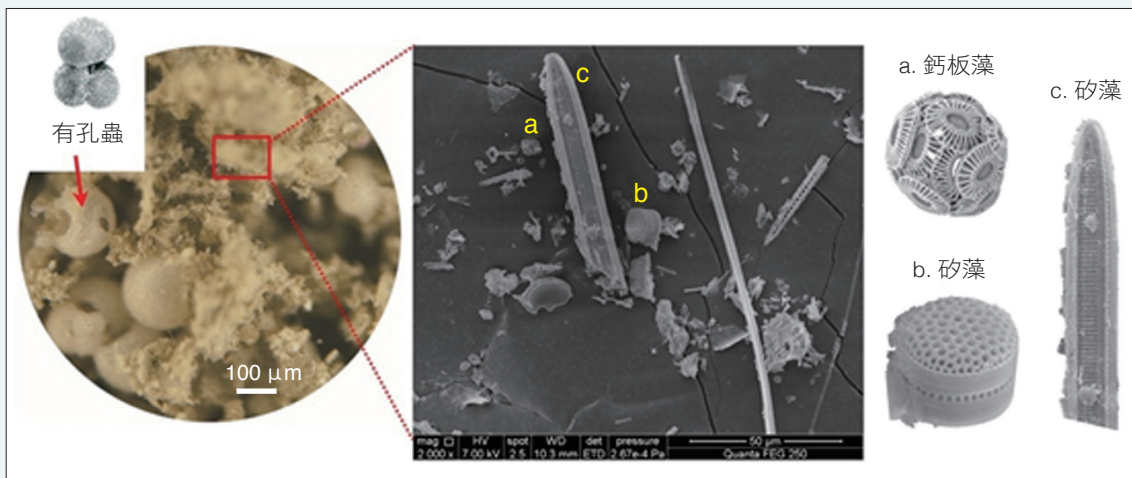
研究人員起初在南海北坡建立南海時間序列國際研究站（SEATS 研究站），除了記錄季節性水文物理及化學變化外，也嘗試布放漂浮沉降顆粒收集器。然而，考慮呂宋一帶的內波與海水湧升現象，以及來自台灣、菲律賓等河流輸出物的干擾，SEATS 研究站便南移至現今位置（116°E, 18°N），並開始布放錨碇沉降顆粒收集器，連續且長期監測海洋雪的通量變化和生物、化學參數。



南海 SEATS 研究站位置，水深 3,800 公尺。顏色梯度表示水深。

從錨碇收集器所獲得的顆粒資訊，發現南海的沉降顆粒主要是生物碎屑，也就是海洋雪，且其通量在冬季明顯高於夏季。由於冬季季風強烈攪動表層海水，南海上層海水的混合層會從夏季的 30 公尺加深至 80 公尺。混合層加深有助於營養鹽含量較豐富的下層海水翻攪而上，加上熱帶海域的冬季水溫足夠溫暖，致使藻類、浮游動物的數量急遽成長，最終導致大量海洋雪的漂落。

藉由沉降顆粒收集器的紀錄，已知現代海洋的降雪量會受日照強度、水溫、表層水營養濃度、生物群落結構等環境因素影響，因而有季節和年際變化。



SEATS 研究站錨碇收集器採集的海洋雪經冷凍乾燥，以光學顯微鏡可清楚觀察浮游有孔蟲的碳酸鈣殼體（約 400 μm ）。以掃描式電子顯微鏡拍攝，可見許多不同屬種的鈣板藻（約 2 ~ 5 μm ）和矽藻（多在 10 ~ 40 μm ）。

藉由沉降顆粒收集器的紀錄，已知現代海洋的降雪量會受日照強度、水溫、表層水營養濃度、生物群落結構等環境因素影響，因而有季節和年際變化。然而，尚不清楚人為活動對海洋降雪量的影響，包括使用化石燃料所引發的氣候暖化，以及人為汙染引發的生態結構改變。我們也不了解極端環境變化對於海洋降雪的效應，

例如颱風、南海內波、沙塵暴、火山灰等。種種的疑問只能依靠持續監測、收集海洋雪，才可望釐清。

王博賢、何詩琮、陳光宇、雷漢杰
楊益、曾瓊蓉
國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心

