

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	180016
參展科別	地球與環境科學
作品名稱	以3D模型沉降實驗探討有孔蟲 <i>Globigerinoidesella fistulosa</i> 的消失
就讀學校	臺北市立第一女子高級中學
指導教師	羅立 林郁梅
作者姓名	李昀捷 黃雯怡
關鍵詞	<u>雷諾數、3D列印、有孔蟲</u>

作者簡介



大家好，我是黃雯怡，目前就讀台北市立第一女子高級中學二年級。對於地球科學有濃厚的興趣，平時也會關注相關期刊。雖然實驗的過程耗時且困難重重，但我依然在過程中獲得許多珍貴的經驗及知識，也很高興可以更加深入的了解古海洋學的許多研究方法。

大家好，我是李昀捷，目前就讀台北市立第一女子高級中學二年級。從小對自然科學領域就有著很大的熱情，因緣際會下由指導老師及指導教授的帶領能參與專題製作，雖然成果仍尚有不足，但很高興能有這樣的機會探索喜歡的主題。

2025年臺灣國際科學展覽會研究報告

區別：北區

科別：地球與環境科學科

作品名稱：以 3D 模型沉降實驗探討有孔蟲 *Globigerinoidesella fistulosa* 的消失

關鍵字：雷諾數、3D 列印、有孔蟲

中文摘要

有孔蟲 *Globigerinoidesella fistulosa* 的滅絕時機(1.7 million years ago, Ma)恰與東西赤道太平洋水溫由似聖嬰現象狀態轉變為似反聖嬰現象狀態的時機相近，前人推論可能是有孔蟲為了維持雷諾數，將自身殼體生長階段倒退為較小的型態，進而提出假設「當垂直水溫梯度變緩，黏滯度變小，*Trilobatus sacculifer complex* 為了維持雷諾數，殼體半徑、沉降速率和殼體與水的密度差必須相對變小」。本研究利用 3D 列印的 *G. fistulosa*、*T. sacculifer* 有孔蟲殼體模型進行沉降實驗驗證此假設，同時探討浮游性有孔蟲的殼體型態對其沉降模式的影響，由多個角度分析浮游性有孔蟲改變外型的現象。

英文摘要

The extinction of planktonic foraminifera *Globigerinoidesella fistulosa* occurred in 1.7 million years ago. Simultaneously, the SST (sea surface temperature) in west-to-east equatorial Pacific Ocean was on the transform situation from El Nino – like conditions to La Niña-like conditions. The previous researches concluded that foraminifera probably altered their shells back into a primer state of their growth phase to maintain Reynolds numbers as the same. The hypothesis infers that “as the vertical sea water temperature gradient eases up, and viscosity declines to maintain the same Reynolds number, *Trilobatus*

sacculifer complex shrinks the shell diameter, sinking speeds, and the density difference between its shells and the surrounding seawater.” This study adopts 3D-printed models of the foraminifera *G. fistulosa* and *T. sacculifer* to conduct sedimentation experiments, testing this hypothesis. It also explores the impact of planktonic foraminiferal morphology on their sedimentation patterns, analyzing the phenomenon of shape changes in planktonic foraminifera from multiple perspectives.

壹、研究動機

Wara et al.(2005) 指出上新世早期暖期赤道太平洋地區表層水溫呈現似聖嬰現象狀態(註 1)，直到約 1.7 個百萬年前 (million years ago, Ma) 之後，東西赤道太平洋表層水溫梯度增加，才成為近似於現代海洋的似反聖嬰現象狀態(如圖 1)。浮游性有孔蟲 *G. fistulosa* 於晚上新世 (約 2.9 Ma) 自 *T. sacculifer* 演化而來，於 1.7 Ma 左右滅絕，而 *T. sacculifer* 則至今日依然未滅絕(如圖 2)。可以發現東西太平洋海水由似聖嬰現象改變為似反聖嬰現象的時間與 *G. fistulosa* 的滅絕時間相近。根據陳貞吟 (2008) 利用氧碳同位素及鎂鈣元素比分析的結果，得知 *G. fistulosa* 發展出特殊腔室的溫度較 *T. sacculifer* 生存環境的溫度低。另外透過雷諾數的分析與岩芯樣本中 *G. fistulosa* 的數量變化，推論 *G. fistulosa* 的滅絕與海水溫度變化相關。但先前的研究沒有測定過兩種有孔蟲殼體的沉降速度或直接計算雷諾數

等數據，因此本研究利用 3D 列印做出的模型進行沉降實驗，期提供直接支持 *G. Fistulosa* 滅絕原因與溫度變化相關的數據。

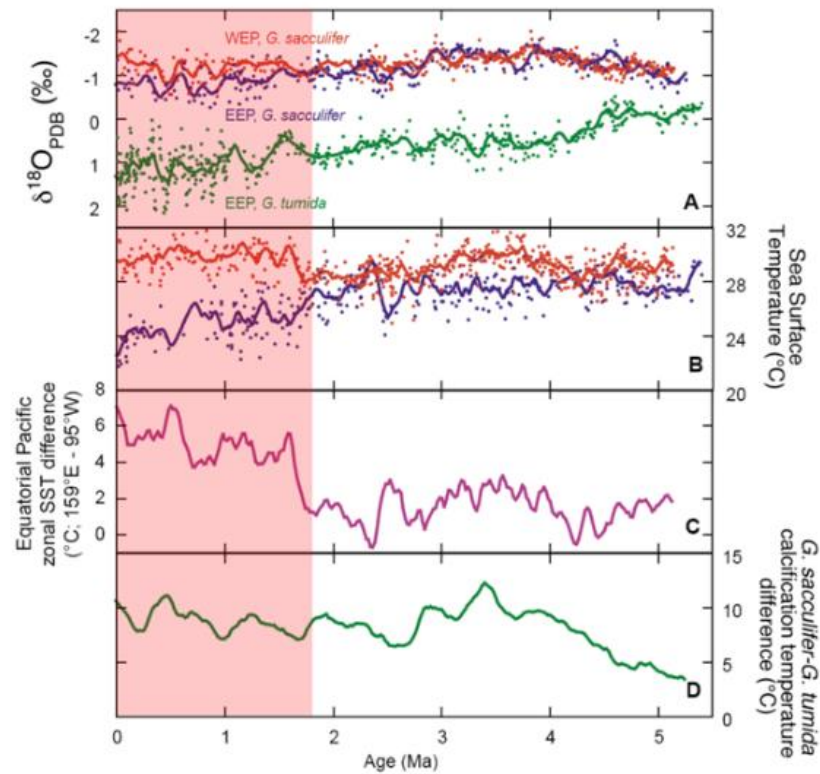


圖 1 東西赤道太平洋同位素與溫度分析結果，引自 Wara et al.(2005) ，B 欄為近五個百萬年間東西赤道太平洋表水溫變化，紅色區域界線約為 1.7 個百萬年前。

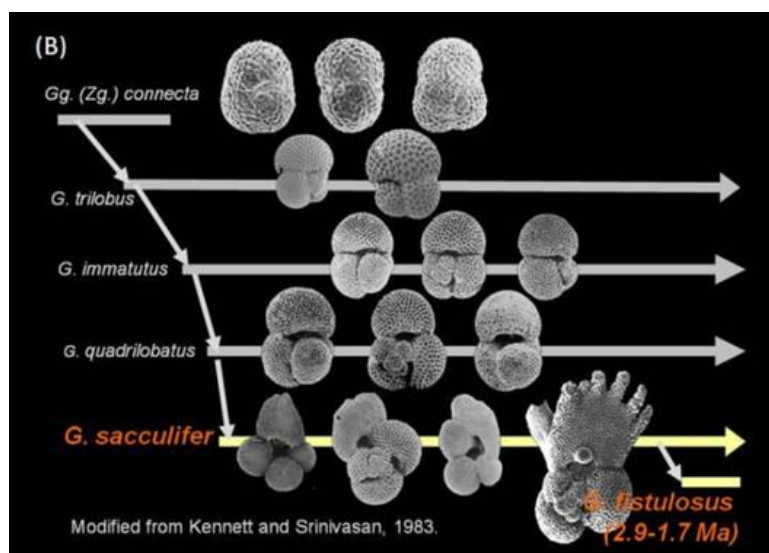


圖 2 *T. sacculifer* 與 *G. fistulosa* 的譜系演化示意圖，引自陳貞吟碩論（2008）
 修改自 Kennett and Srinivasan（1983），使用 *T. sacculifer* 之舊種屬名
Globigernoidesella sacculifer，於 2019 年更改了種屬名。

貳、研究目的及研究問題

T. sacculifer 被分類成四種型態—normal form、kummer form、sac-like form 和 fis form，其中將 *G. fistulosa* 視為 *T. sacculifer* 的型態變種 fis form，而這四種型態被定義為一個複合種群 *T. sacculifer complex*。

雷諾數（Reynolds number）為慣性力與黏性力之比值，是一個用以描述流場狀態及特性的無因次量，也可用於描述近球體粒子（如浮游性有孔蟲殼體）之沉降模式，計算有孔蟲殼體之雷諾數公式為

$$Re=D*SS*\Delta\rho/\mu$$

其中 Re 為雷諾數 (Reynolds number)，D 為有孔蟲殼體直徑 (cm)，由長與寬之幾何平均得到，SS 為該殼體之沉降速率 (cm / s)， $\Delta\rho$ 為殼體與周圍水體的密度差 (g/cm³)， μ 為水體之黏滯度 (Poise)。

根據陳貞吟 (2008) 研究及提出之假設，西太平洋暖池區域的 *G. fistulosa* 消失事件源自 *T. sacculifer complex* 的型態逐漸往幼年移動 (異時發生 (註 2) 的 paedomorphosis)。前文提到 *G. fistulosa* 滅絕前後西太平洋表水溫的溫度升高導致混合層變厚，*G. fistulosa* 結殼深度 (海平面以下 100 公尺左右) 之垂直水溫升高、黏滯度降低。由於浮游性有孔蟲有著為了維持固定的雷諾數而根據環境變換而調整自身殼體結構及型態的趨勢，因此陳貞吟 (2008) 提出「當垂直水溫梯度變緩，黏滯度變小，*T. sacculifer complex* 為了維持雷諾數 (Re)，殼體半徑 (D)、沉降速率 (SS) 和殼體與水的密度差 (ρ) 必須相對變小」的假設，詮釋 *G. fistulosa* 的消失原因為 *T. sacculifer complex* 為了適應水溫變化而縮小自身殼體直徑。

本研究試圖以 3D 列印的蟲體樣本模型進行沉降實驗，透過實驗了解 *G. fistulosa* 的消失原因是否是因為水溫梯度變化，蟲體為了維持雷諾數而表現出整體往幼態移動的趨勢？詳細實驗設計與流程將在第四部份說明。

參、研究設備及器材

軟體:

軟體圖示	名稱	用途
	Dragonfly 插件 bone analysis	用以清除有孔蟲檔案內部雜質
	切片軟體 chitubox	為 3D 模型檔案架設支架及轉檔

硬體:

圖 片				
名 稱	3D 列印機 Phrozen Sonic Mighty 8K Resin 3D Printer	後處理清洗機	後處理固化機	顯微鏡

用途	列印實驗用 3D 模型	清洗列印後模型表面殘留的樹脂	風乾及固化模型	觀察並挑選有孔蟲樣本
圖片				
名稱	電子天秤	烘箱	超音波清洗器	
用途	秤量岩芯重量	風乾沉積物樣本	清洗篩網與燒杯	

肆、研究過程或方法及進行步驟

為了更了解研究內容，藉由研讀〈浮游有孔蟲 *Globigerinoides fistulosa* 消失與熱帶太平洋表水水文變化關係〉(陳貞吟 2008)，了解 *G. fistulosa* 的消失背景、*T. sacculifer complex* 的相關知識及 *G. fistulosa* 消失的基礎假說。另一篇參考資料是〈Planktonic foraminifera-factors controlling sinking speeds〉(Takahashi 1984)，這篇論文是有關於有孔蟲沉降速率的研究，此研究是以實際的有孔蟲殼體進行沉降實驗，但並未進行 *G. fistulosa* 的沉降實驗，並透過這篇論文了解有孔蟲沉降

速率的受控變因，以及計算雷諾數時需使用的模型。在實作部分，本研究從學習挑選目標有孔蟲開始，可分為六個階段，各階段學習暨試驗工作如下圖三所示，並針對階段細節進行說明。

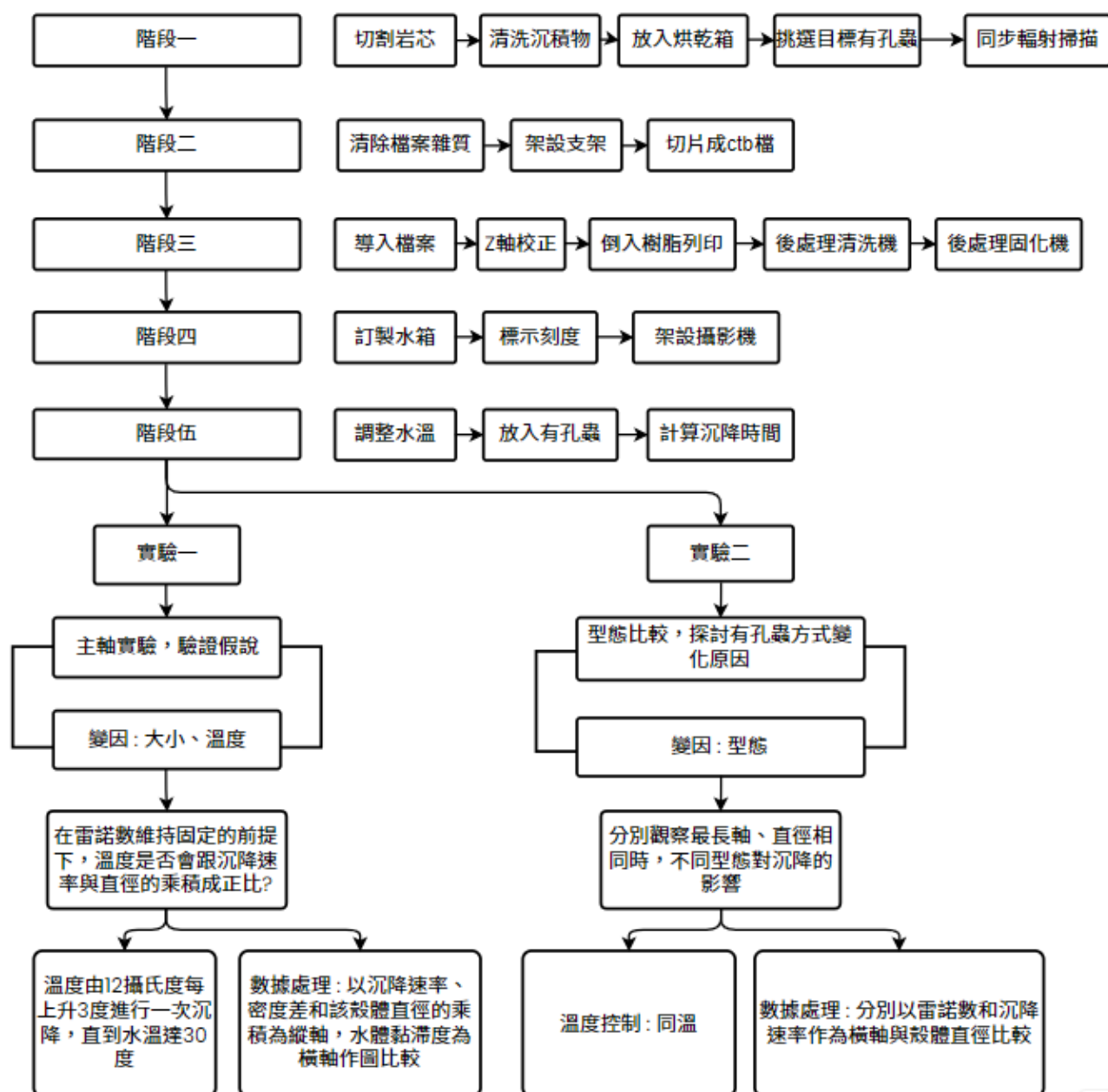


圖 3 本研究的流程圖，作者自繪。

階段一：樣本採樣與 3D 模型建立

本研究將 ORI-715 21-BC 岩芯每隔五公分切片，洗除泥土等雜質留下沉積物後，放入烘乾箱依深度烘乾裝瓶，最後透過顯微鏡分別挑選 normal form 及有 sac 的 *T. sacculifer*，並於 2024 年 3 月 22 日至同步輻射中心進行 3D 掃描。除了學習了解其 3D 結構的取得方法之外，也一併獲得 *T. sacculifer* 的立體空間結構分布。而 *G. fistulosa* 蟲體的檔案則是使用先前研究已取得的掃描檔。

階段二與三：檔案處理暨 3D 列印技術

本研究利用 Phrozen Sonic Mighty 8K Resin 3D Printer（以樹脂光固化列印的 3D 印表機）列印出 3D 有孔蟲模型。因為掃描時是將蟲體放在錐形蠟槽中，有孔蟲的原始掃描檔會含有許多雜質，且先前研究指出原生質的存在與否對沉降速率影響不大，因此利用 Dragonfly 內的插件 Bone analysis 將殼體內外的雜質及與蠟槽連接處掃描到的管壁清除，留下蟲體本身。由於處理過的 stl 檔無法直接用於列印，所以還須利用切片軟體 chitubox 為有孔蟲檔案加支架，並且將 Dragonfly 導出的 stl 檔切片成 ctb 檔後進行列印。

階段四與五：實驗設計與沉降實驗

本研究訂製一個內部直徑為 25 公分、高為 200 公分、管壁厚度為 0.5 公分的圓柱水箱，預計在水箱外側標示刻度，架設手機紀錄模型達到終端速度所花的時間與距離，計算出其沉降速率。

箱中水體初始溫度將設定在 12 °C 且每上升 3 °C 進行一次沉降實驗，直到水溫達到 30 °C，其溫度對應的密度與黏滯度由 The Engineering ToolBox (2005) 給出的資料得知。此外，本研究透過列印體積為一立方公分的正方體模型，並測得其重量為 1.10 g，得知固化後樹脂的密度為 1.10 g/cm³。

本研究將進行兩組實驗，第一組為主軸實驗，目的為驗證陳貞吟碩論之假說，將改變水體溫度、殼體模型大小進行沉降。實驗結果以密度差、沉降速率和該殼體直徑的乘積為縱軸，水體的黏滯度為橫軸，在較低的溫度（黏滯度較大）取直徑較大的資料點繪製，反之亦然，看數據是否能呈現符合假說的斜直線分佈。

第二組為型態比較實驗，目的為探討有孔蟲型態變化之原因。以兩組模型的實驗比較進行，其一將在殼體模型最長軸相同、水溫相同的情況下以改變不同型態沉降；其二則預先設定出相同直徑，以 xy 軸、xy 軸的比值反算所需各軸長後得到不同型態但相同直徑之殼體模型，直徑設定為使最終比較疊圖上不對數據進行過多縮放，而取 16、24、32、40、48、56 公分（圖 4），試圖得知為何 *G. fistulosa* 選擇長出形狀特殊形狀的房室，而非以 *T. sacculifer* 原本的型態等比例放大。實驗結果將分別以雷諾數和沉降速率作為橫軸與殼體直徑做為縱軸比較。

同時也將兩組實驗數據與由原化石沉降得出的實驗數據(Takahashi 1984)比較，用結果得出的雷諾數，因為黏滯度相同並且已知直徑放大的倍數，就可以推估放大殼體後對其他數值的影響，由此得知用 3D 列印取代化石進行實驗的

影響。

圖 4 最長軸相同設定之有孔蟲模型資料，可知得出直徑區間在 15~56，為相同

項目	x軸長(mm)	y軸長(mm)	z軸長(mm)	最長軸長(mm)	直徑D(mm)[x-y]	直徑D(mm)[x-z]	放大比率(%)	檔案	模型
T. sacculifer sac-like form 2	13.96	17.75	20	20	15.74134683	17.04922297	4113.45	完成	完成
T. sacculifer sac-like form 3	20.94	26.63	30	30	23.61423723	25.57543522	6170.3	完成	完成
T. sacculifer sac-like form 4	27.91	35.51	40	40	31.48148821	34.09757553	8227.06	完成	完成
T. sacculifer sac-like form 5	34.89	44.39	50	50	39.35437841	42.62378766	10283.83	完成	完成
T. sacculifer sac-like form 6	41.87	53.26	60	60	47.22283558	51.14679889	12340.6	完成	完成
T. sacculifer sac-like form 7	48.85	62.14	70	70	55.09572579	59.67301102	14397.36	完成	完成
T. sacculifer sac-like form original	0.3393	0.4316	0.4862	0.4862	0.382677253	0.414470301	100	x	x
T. sacculifer normal form 2	16.85	15.52	20	20	16.17133266	17.35830064	4102.61	完成	完成
T. sacculifer normal form 3	25.28	23.28	30	30	24.25939818	26.03916779	6153.85	完成	完成
T. sacculifer normal form 4	33.71	31.04	40	40	32.34746358	34.72003483	8205.13	完成	完成
T. sacculifer normal form 5	42.13	38.8	50	50	40.43073089	43.39746848	10256.41	完成	完成
T. sacculifer normal form 6	50.56	46.56	60	60	48.51879636	52.07833558	12307.69	完成	完成
T. sacculifer normal form 7	58.99	54.32	70	70	56.60686177	60.75920263	14358.97	完成	完成
T. sacculifer normal form original	0.4108	0.3783	0.4875	0.4875	0.39421522	0.423136477	100	x	x
G. fistulosa 2	14.08	15.25	20	20	14.65332727	16.25427107	1987.68	完成	完成
G. fistulosa 3	21.12	22.87	30	30	21.97758858	24.37963005	2981.51	完成	完成
G. fistulosa 4	28.17	30.49	40	40	29.30705205	32.5088361	3975.35	完成	完成
G. fistulosa 5	35.21	38.11	50	50	36.63131311	40.6341949	4969.19	完成	完成
G. fistulosa 6	42.25	45.74	60	60	43.96037989	48.76310759	5963.03	完成	完成
G. fistulosa 7	49.29	53.36	70	70	51.28464098	56.88846642	6956.87	完成	完成
G. fistulosa original	0.7085	0.767	1.0062	1.0062	0.737169926	0.81772356	100	x	x

直徑組模型的直徑設定原因，作者自繪。

有關直徑之計算，由於 *G. fistulosa* 並不貼近於球體，因此本研究採用最長軸及次長軸，與次長軸及最短軸兩種方式計算直徑，依照呈現結果討論何種直徑計算方式更能反應其沉降機制。

伍、研究結果

目前已完成的結果如下：

1. 岩芯樣本處理、沉積物清洗及有孔蟲化石樣本挑選
2. 至國家同步輻射研究中心掃描有孔蟲樣本

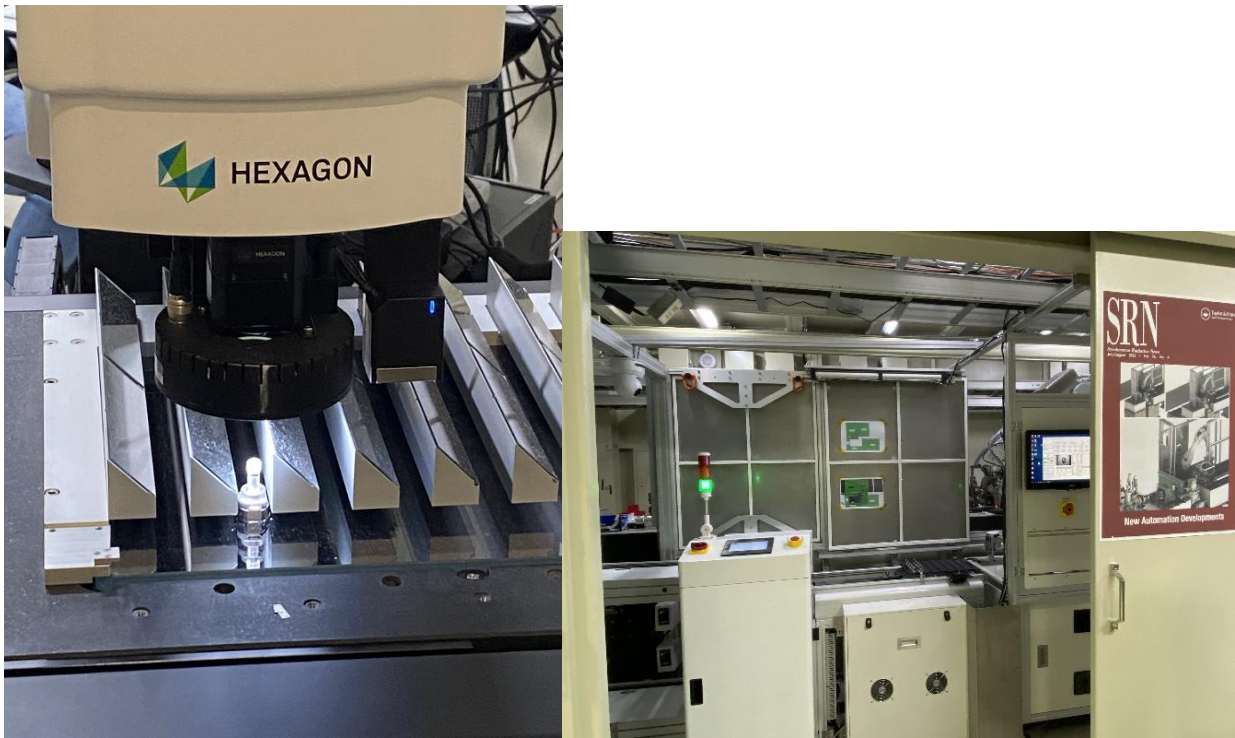


圖 5 同步輻射掃描之儀器，作者自攝。

3. 3D 列印技術學習及研究相關文獻閱讀

4. 浮游性有孔蟲初步掃描樣本檔案處理：

原始的掃描檔案包含了兩個 *T. sacculifer normal form* ($>500\ \mu\text{m}$)、兩個 *T. sacculifer sac-like form* ($>500\ \mu\text{m}$)，兩個 *G. fistulosa* ($>500\ \mu\text{m}$)。我們使用軟體 Dragonfly 裡的插件 Bone analysis，去除掃描到的雜質（包含載台管壁、空氣的雜質及腔內化石）。



圖 6 軟體操作畫面，電腦畫面右上視窗為清理後的模型，其餘三個視窗為不同軸的剖面，作者自攝。

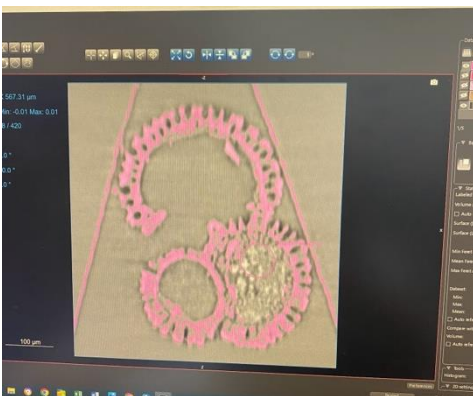


圖 7 清除雜質之操作畫面。粉色區域為選取範圍，灰色區域為清除範圍，蟲體兩側直線為管壁，作者自攝。

5. 3D 列印有孔蟲模型：

將先前處理完的 stl 檔放入 chitobox 軟體，使模型尺寸由原蟲體大小放大 10^3 倍（ μm 換成 cm ）並架設支架，轉成 ctb 檔導出，再使用 3D 列印機印出，利用工具拆除其支架，放入異丙醇溶液中清洗多餘樹脂，再利用後處理固化機加

強定型，一個模型的列印時間大約是五個小時。

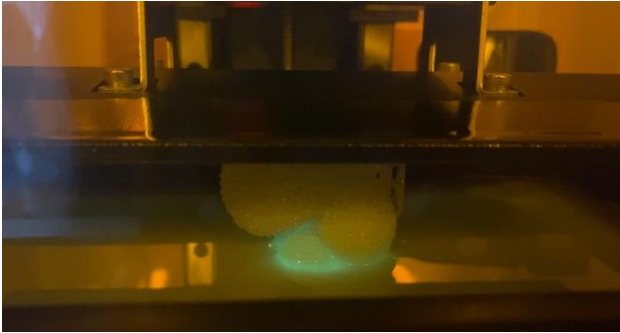


圖 8 3D 列印機運作，作者自攝。

6. 實驗環境架設：

(1) 訂製的實驗用水箱已完工，攝影裝備及溫度調整方法也已構思討論雛型如圖 9 所示，後續即將著手實驗操作沉降實驗。

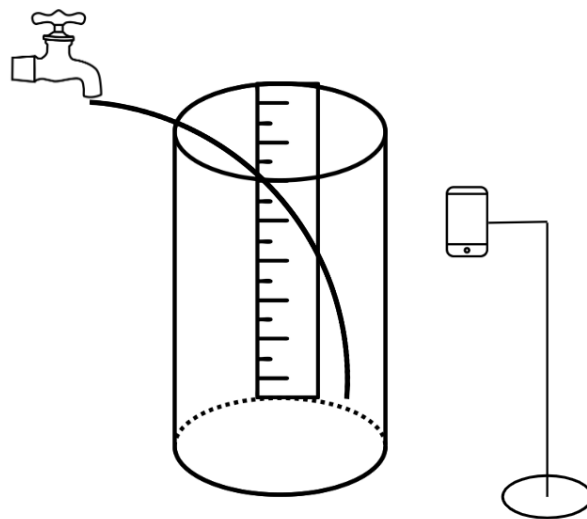


圖 9 實驗環境裝置。利用水管將水引入，丟入 3D 列印的有孔蟲進行沉降，並架設手機錄影，作者自繪。

(2) 目前已列印 18 隻 3D 有孔蟲，分別為 6 隻 *T. sacculifer normal form*、6 隻 *T.*

sacculifer sac-like form、6 隻 *G. fistulosa*（如圖 10）。

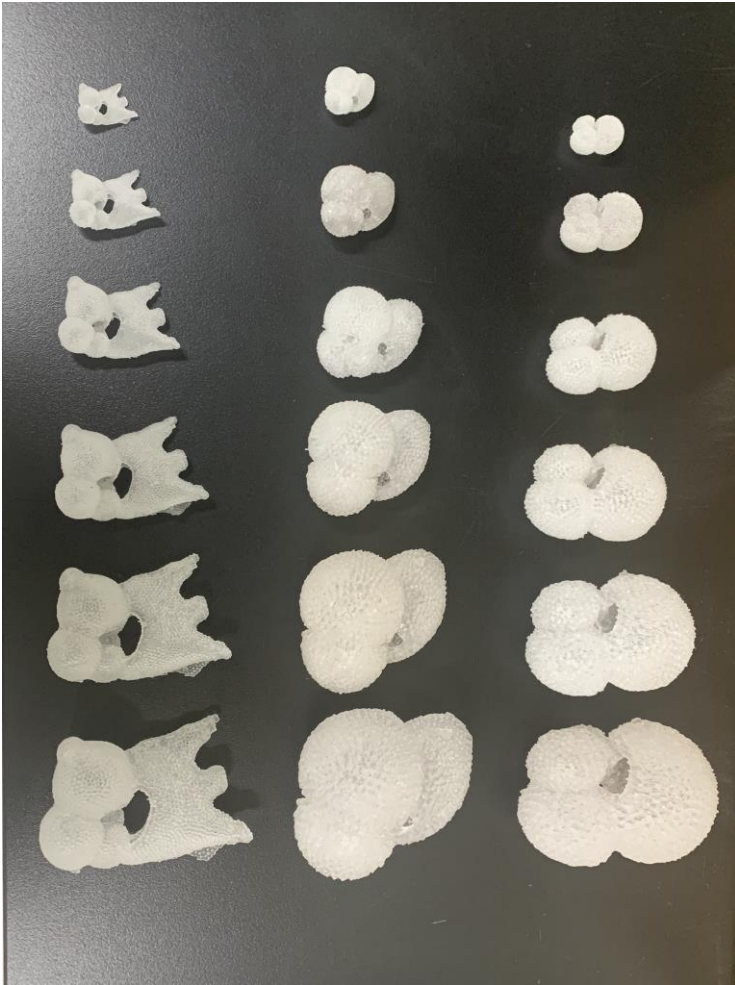


圖 10 列印完成之有孔蟲模型，由右到左分別為 *T. sacculifer normal form*、*T. sacculifer sac-like form*、*G. fistulosa*，作者自攝。

陸、本計畫遇到的問題及解決方式

1. 實驗設計的修正過程

最初根據原理的實驗構想是「沉降 3D 有孔蟲模型後，先查找 *T. sacculifer* 的

雷諾數值，經實驗得出沉降速率後，調整水的密度使每個樣本得出的雷諾數相同，再利用密度換算海水溫度。經過 *T. sacculifer* 和 *G. fistulosa* 換算出的溫度比較，推論 *G. fistulosa* 的滅絕是否與溫度相關。」但是只能查到 20 °C 與 3 °C 時有孔蟲沉降的雷諾數，數據較少、不夠支撐觀點，且其雷諾數是利用化石實驗測量，與 3D 列印模型的尺寸及密度都不相同。此外，海水密度受到溫度影響過小，並不能利用此方法求出明顯溫度變化，所以此方案不可行。

其後，本研究嘗試「用黏滯度求雷諾數，利用黏度器測量黏滯度，同一個體下沉降速率與殼體直徑是定值，已知水體密度，則可以求雷諾數。」但因溫度會影響黏滯度數值，測量中並不能保證黏滯度的正確與否，所以此方案也不可行。

經過多次討論後，確定了目前的實驗方式（詳細描述於肆、研究過程或方法及進行步驟 的 階段四與五：實驗設計與沉降實驗）：將水溫逐步升高進行沉降實驗，並測定黏滯度。以沉降速率和該殼體直徑的乘積為縱軸，水體的黏滯度為橫軸，在較低的溫度取直徑較大的資料點，反之亦然，觀察數據是否能呈現正相關的斜直線。

2. 列印失敗及解決

先前的失敗原因包括：Z 軸未進行歸零與校正、載台螺絲未旋緊、樹脂中有殘留的固塊、樹脂的量不足、檔案裝設的支架不足，現在都已經克服並能進行成功率高的模型列印。

柒、研究結論

現階段，藉由此研究我們學習如何將原始岩芯處理、清洗成可用的沉積物；運用 Dragonfly 內的插件 Bone analysis 將有孔蟲殼體檔案中的雜質清除，再運用 chitubox 架設支架，將原始的 stl 檔轉換為 3D 列印機器可用的 ctb 檔；操作 3D 列印機器，熟練列印有孔蟲的步驟及過程；閱讀 *T. sacculifer*、*G. fistulosa* 的相關知識及他人先前的實驗結果，自行發想實驗設計並撰寫報告。目前訂製水箱已完成送達，沉降實驗用有孔蟲已列印完成、並且已有實驗流程的架構，後續將開始進行沉降實驗。

註 1：此處之似聖嬰現象指的是東西赤道太平洋表水溫的表現與聖嬰現象相似（赤道東太平洋水溫增加，湧升流減弱），但因為上新世的海水現象是持續多個百萬年，並非和今日的聖嬰現象一般有 2~7 年的週期，故使用似聖嬰現象以指稱。

註 2：異時發生是指後代種與其祖先種具有共同特徵，但因特徵出現的時間或發育速率不同，而分成不同的種。異時發生分成 Paedomorphosis 和 Peramorphosis 兩種模式。前者是譜系發展越到後代種表型越接近祖先種的幼態階段；後者是譜系發展越到後代種表型越接近祖先種的成體階段。

捌、參考資料(文獻)及其他

陳貞吟 (2006)。以「異時發生」觀點探討 *Globigerinoides fistulosa* 的絕滅〔學士論文，國立臺灣大學〕。

陳貞吟 (2008)。浮游有孔蟲 *Globigerinoides fistulosus* 消失與熱帶太平洋表水水文變化關係〔碩士論文，國立臺灣大學〕。

Takahashi, K., & Allan, W. H. (1984). Planktonic foraminifera: factors controlling sinking speeds. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 31(12), 1477-1500.

Wara, M. W., Ravelo, A. C., & Delaney, M. L. (2005). Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science*, 309(5735), 758-761.

The Engineering ToolBox(2005). *Seawater - Properties*. [online] Available at:

https://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html [Accessed Day

Month Year]

【評語】180016

本研究利用 3D 列印的 *G. fistulosa*、*T. sacculifer* 有孔蟲殼體模型進行沉降實驗驗證此假設，以不同的雷諾數探討浮游性有孔蟲的殼體型態對其沉降模式的影響，由多個角度分析浮游性有孔蟲改變外型的現象，是一個有創意的想法。唯實驗數據過少，樣品數與代表性仍有待加強。