

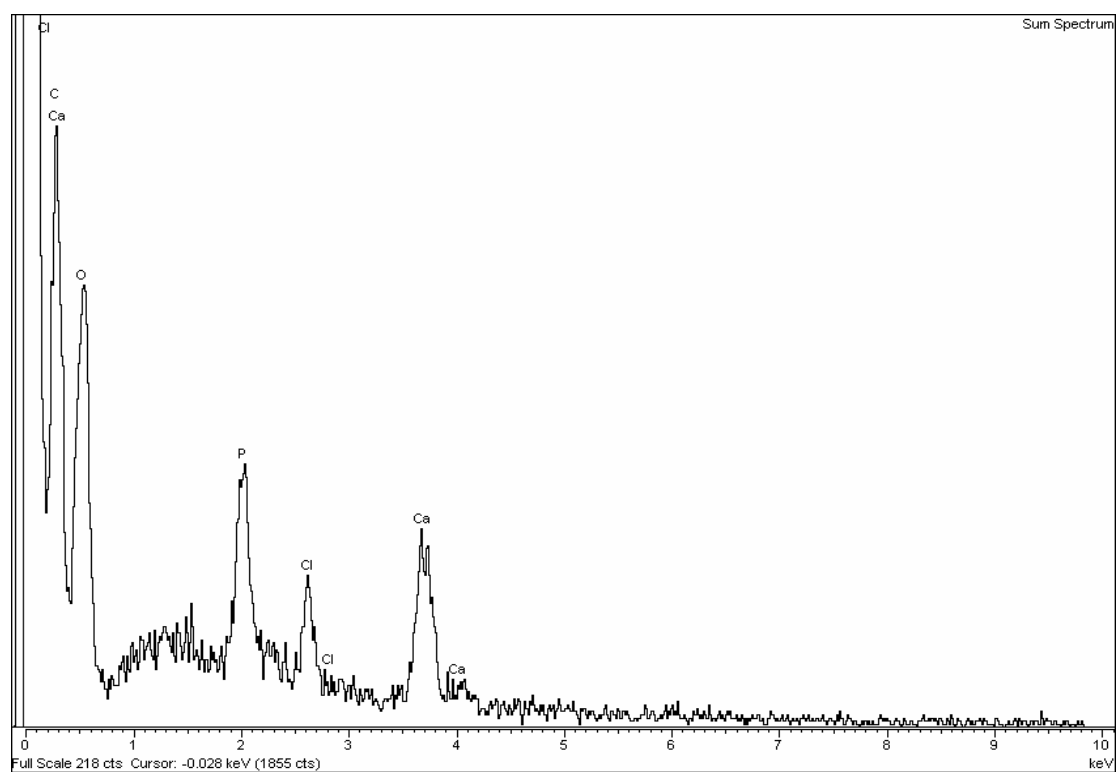
五、結論

從上述實驗結果得到以下幾點結論：

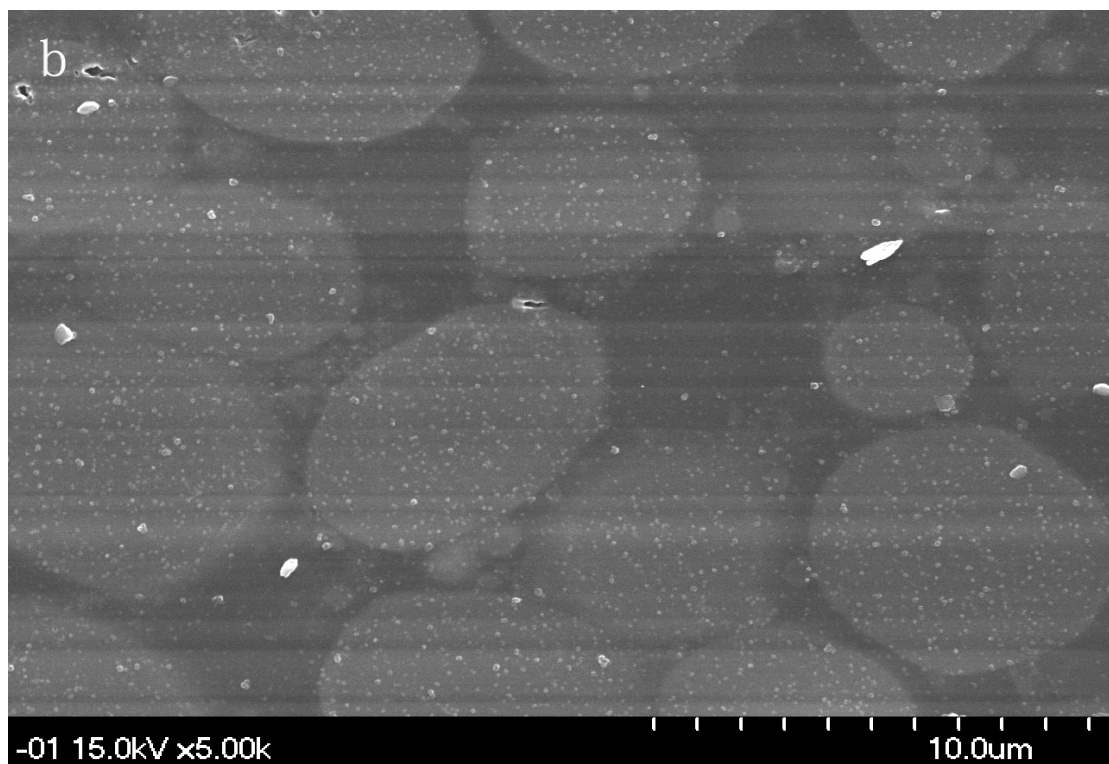
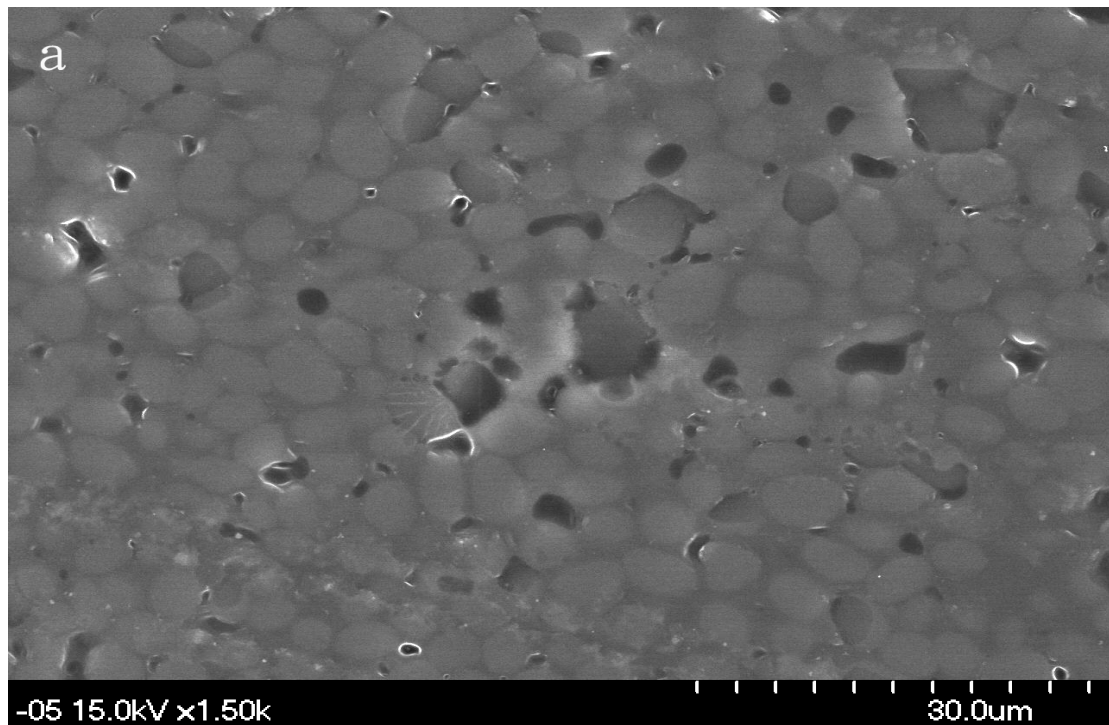
第一，我們認為生物軟組織遭磷酸礦化的磷來源是來自外在環境，而非生物體本身。因為如以生物體本身當作磷的來源，則開始礦化所需的時間太長，可能需要幾星期才會出現礦化現象，然而時間愈長，軟組織愈容易受到微生物分解或其他生物的破壞而難以保存下來。從我們的重複沈積實驗知道，卵細胞在第一次沈積後，也就是至少於四天內即開始出現礦化的現象。此外，也只有外在環境突然出現大量磷來源參與沈積反應，才能解釋瓮安生物群集體遭磷酸礦化而被封存起來的情形。

第二，磷酸鈣之所以能精細地保存軟組織的細微結構，一般認為是因為在礦化之初，大量的磷酸鈣礦晶能進入組織中沈積，並沿著其中的細微結構排列填充，不僅將組織包裹保護起來，也因此將其型態給複製下來並變成化石。從我們的實驗結果做了以下兩點推測：(1)當時的生物在被礦化前，可能由於某種化學或物理因素先改變了細胞的通透性，才使後來的礦物能大量入侵組織中；(2)或者當時短時間內曾發生連續沈積的地質事件，因而大大地增加入侵生物體的礦物量。

對於遠古海洋環境及當時氣候條件的瞭解的確還需要搜集更多資料，以進一步的實驗來模擬及推測可能的磷酸礦化機制，希望我們目前的工作及所得到的初步結果，對於軟組織礦化方面的研究能提供一些值得參考的訊息。

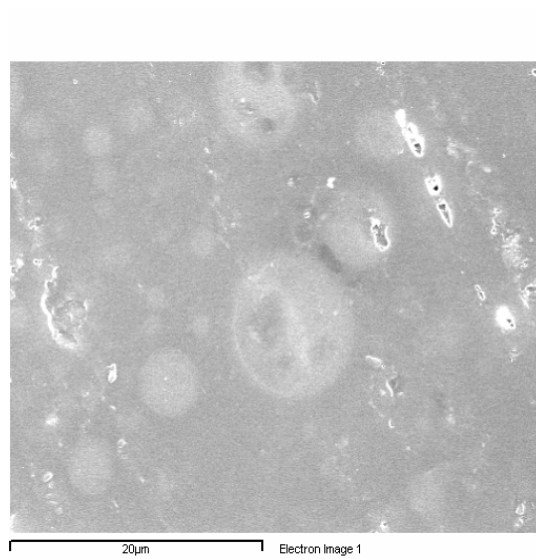


圖一：卵細胞內部的元素分析結果，測到的訊號分別為磷、鈣與氯。

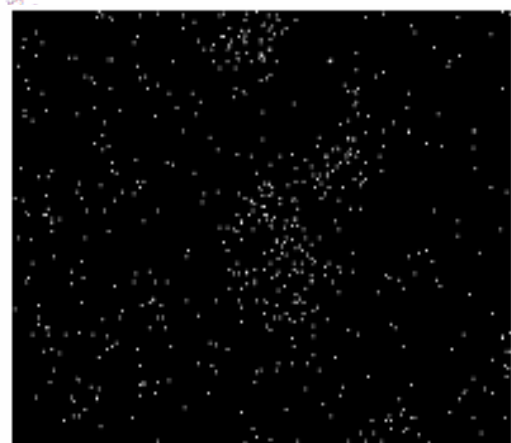


圖二：(a) 以 SEM 觀察沈積後之卵細胞的內部，可看到其內充滿大量的蛋黃顆粒，此為放大 1500 倍時的狀況。

(b) 放大 5000 倍時即可看見沈積於蛋黃顆粒中的白色結晶。

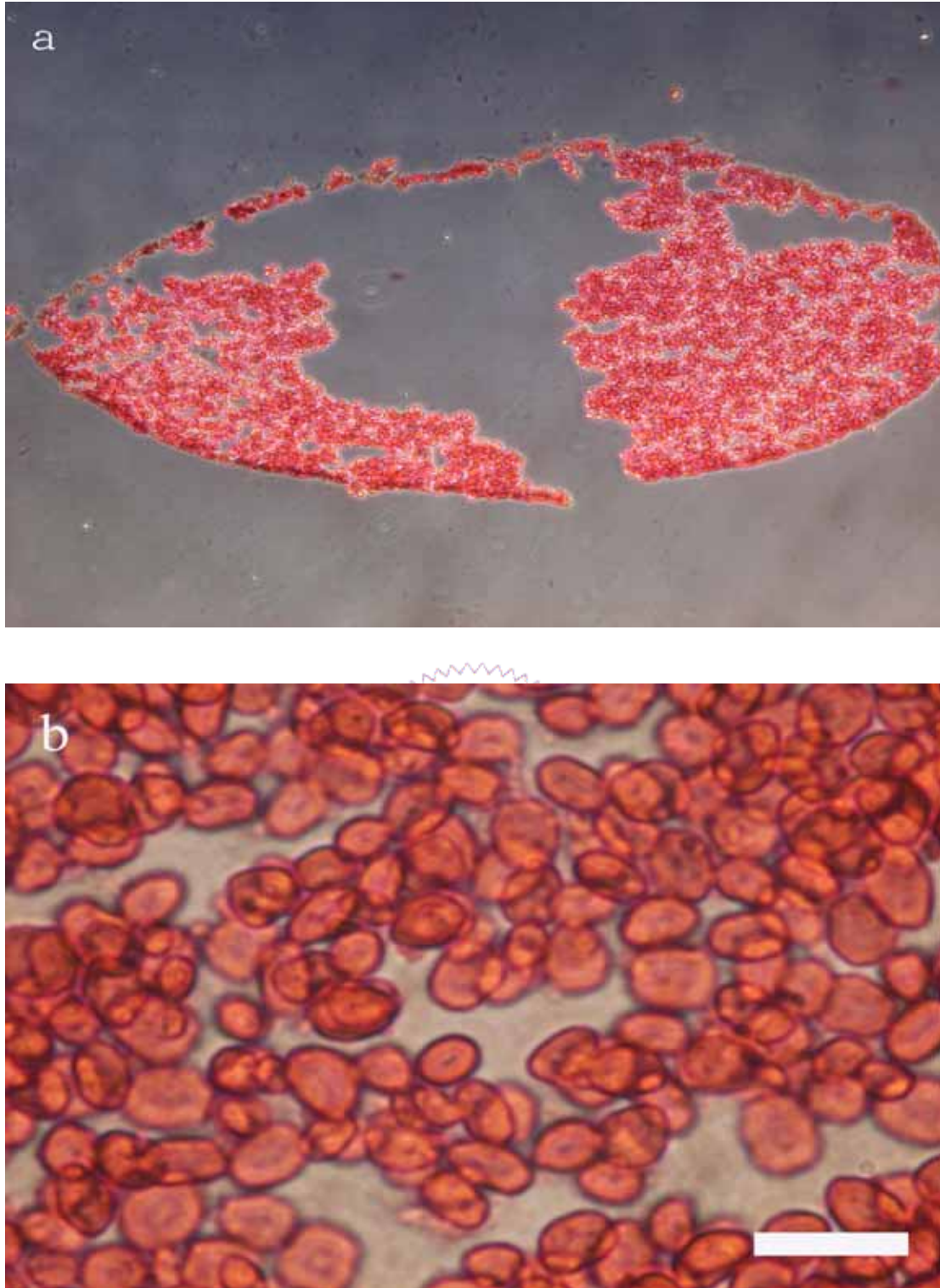


Calcium Ka1



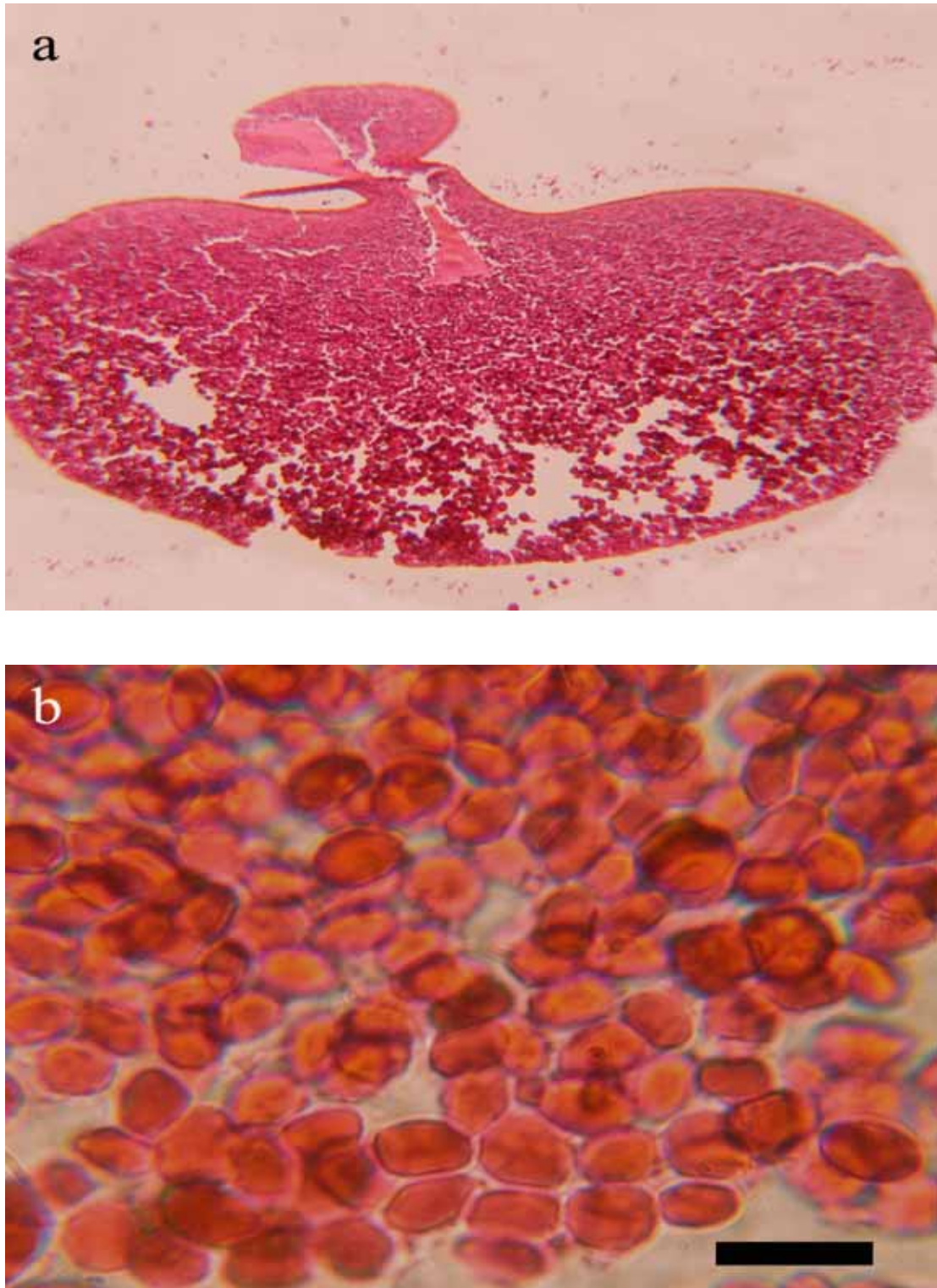
Phosphorus Ka1

圖三：元素分佈結果，發現鈣與磷的訊號主要隨著蛋黃顆粒而分佈。

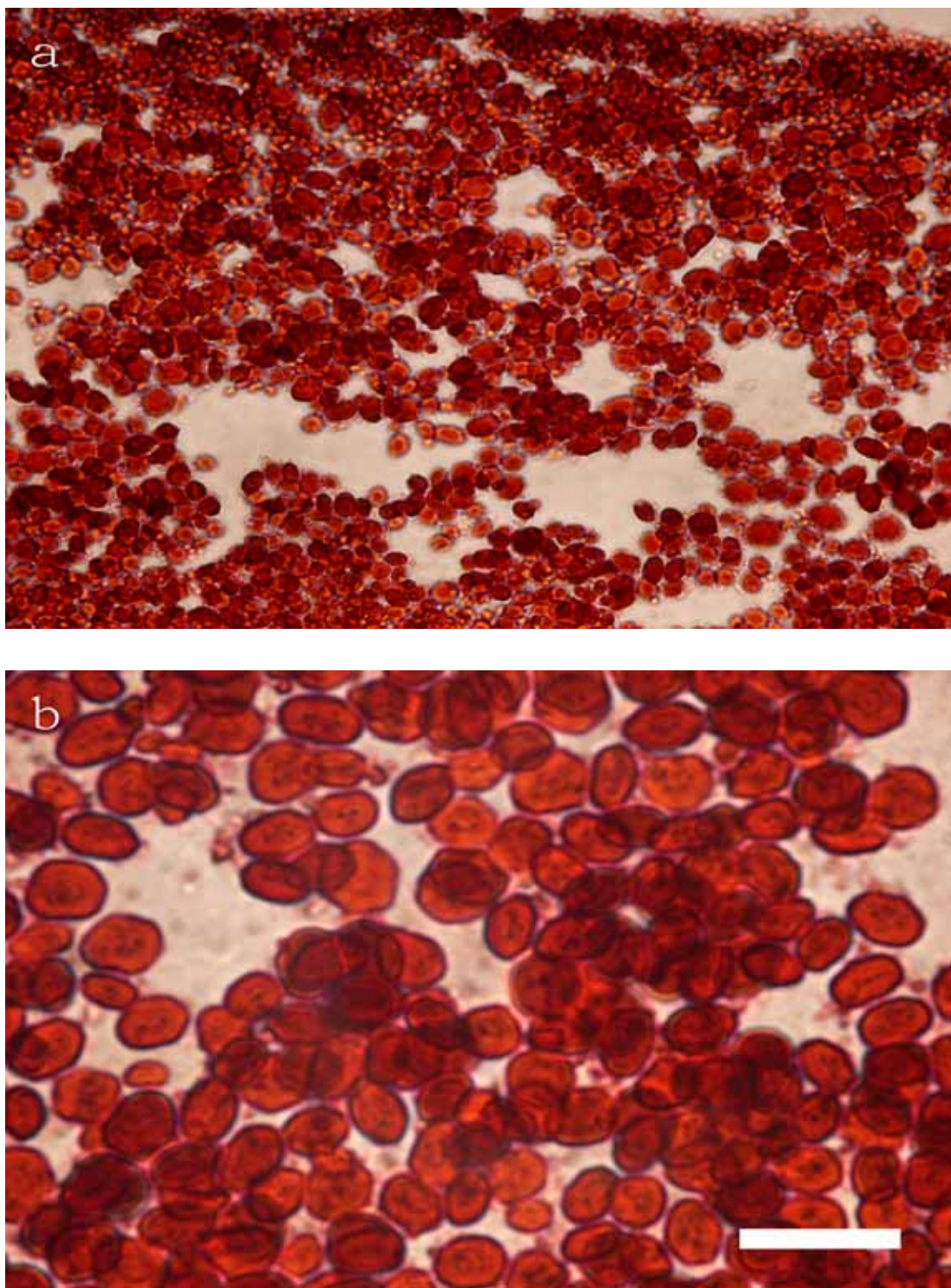


圖四：(a) 未經過沈積的卵細胞，其石蠟切片染色的結果。

(b) 放大觀察，發現蛋黃顆粒的內外並無被硝酸銀染黑的區域，比例尺為 $20\mu\text{m}$ 。

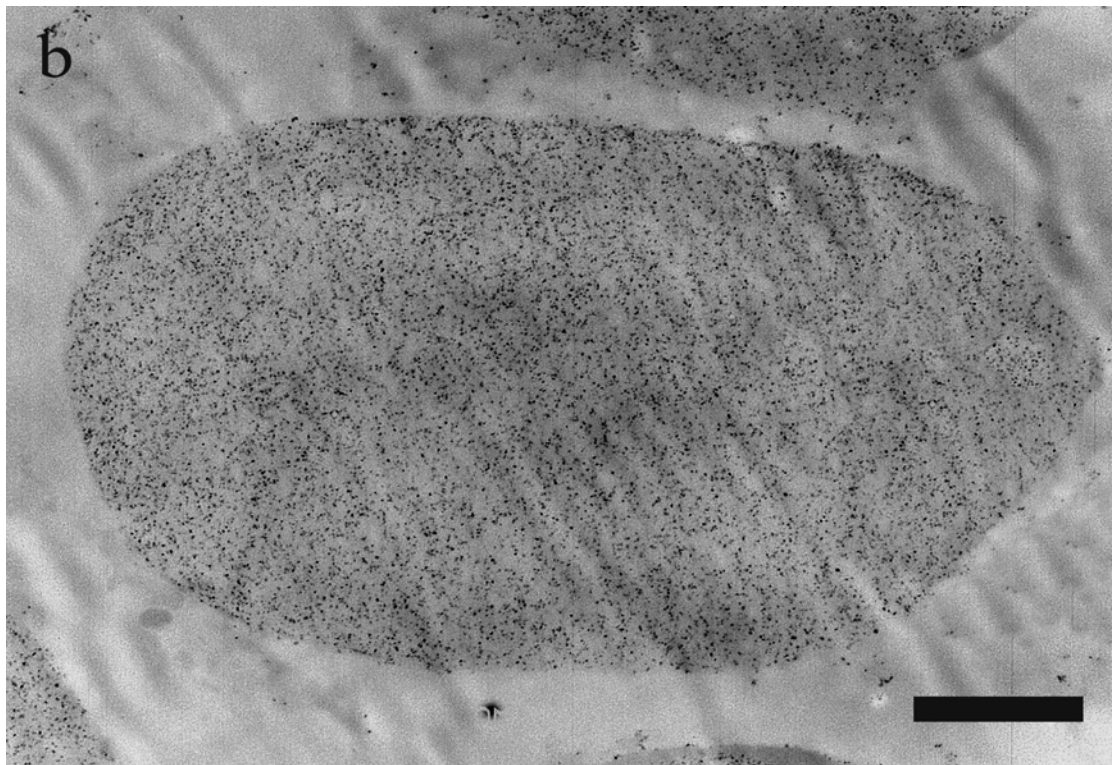
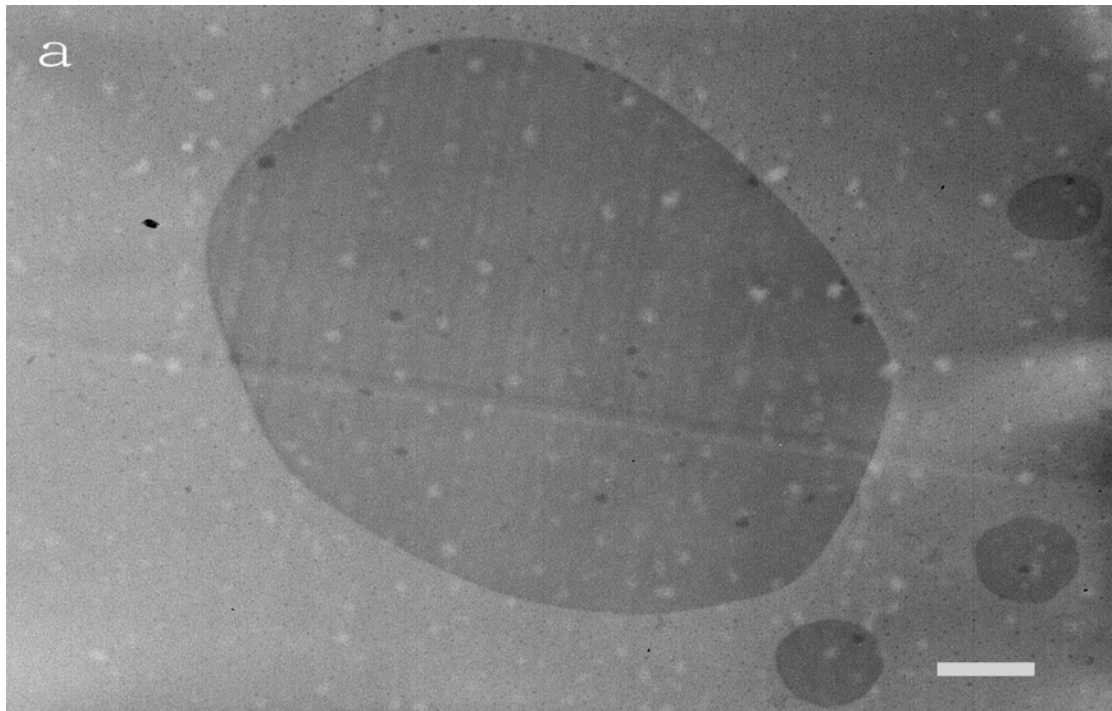


圖五：(a) 經過沈積兩星期的卵細胞中，出現被硝酸銀染黑的區域。
(b) 放大後可看見有些蛋黃顆粒被硝酸銀染黑，即代表磷酸鈣的沈積位置，比例尺為 $20\ \mu\text{m}$ 。



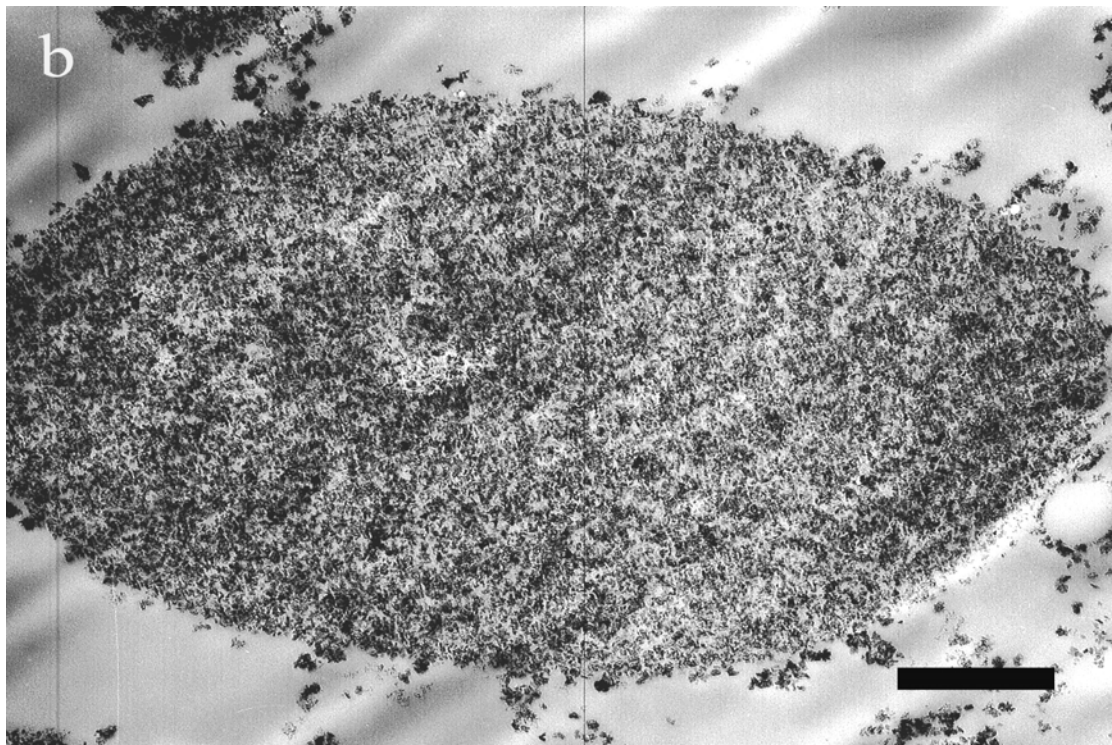
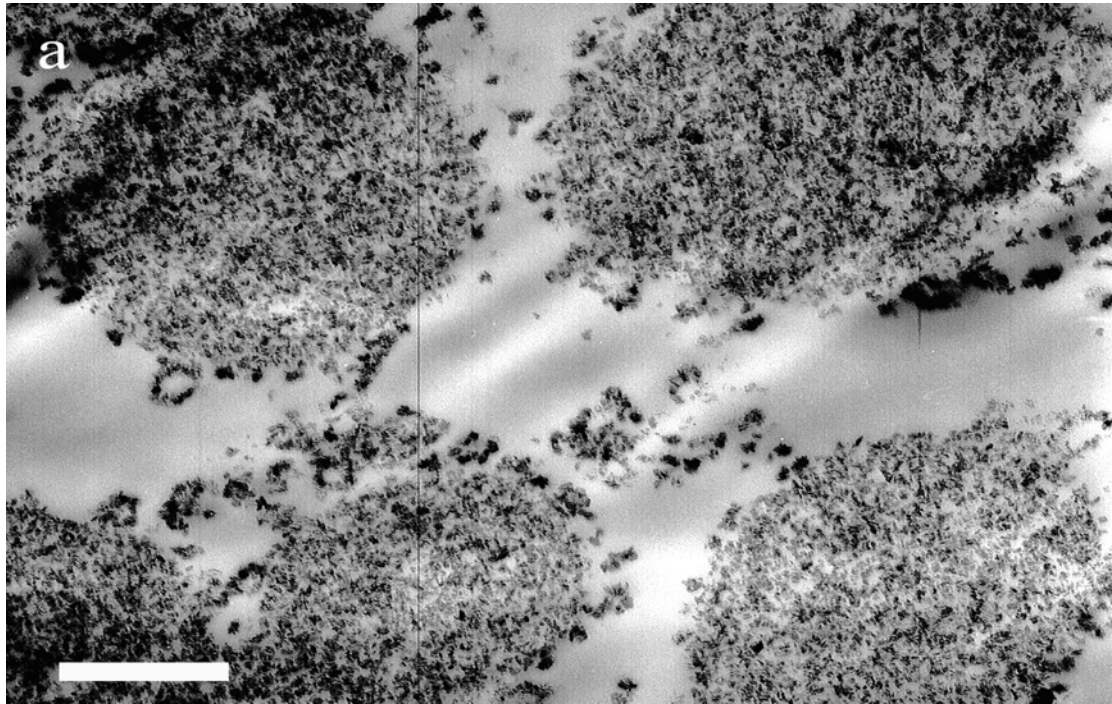
圖六：(a) 經過 Triton X-100 處理過的卵細胞，由於細胞膜通透性增加，沈積後經硝酸銀染色，發現於大多數的蛋黃中均被染成黑色，代表有更大量的磷酸鈣沈積於蛋黃中。

(b) 放大後，幾乎可在所有蛋黃顆粒中看見被銀離子所標定之磷酸鈣結晶的位置。比例尺為 $20\ \mu\text{m}$ 。

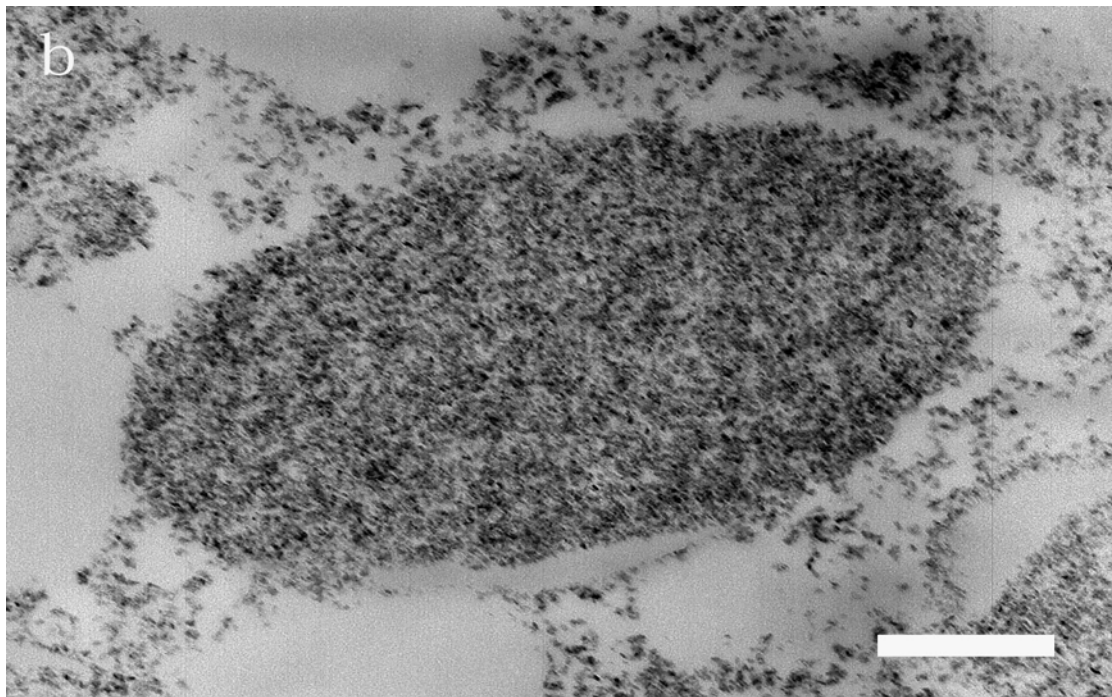
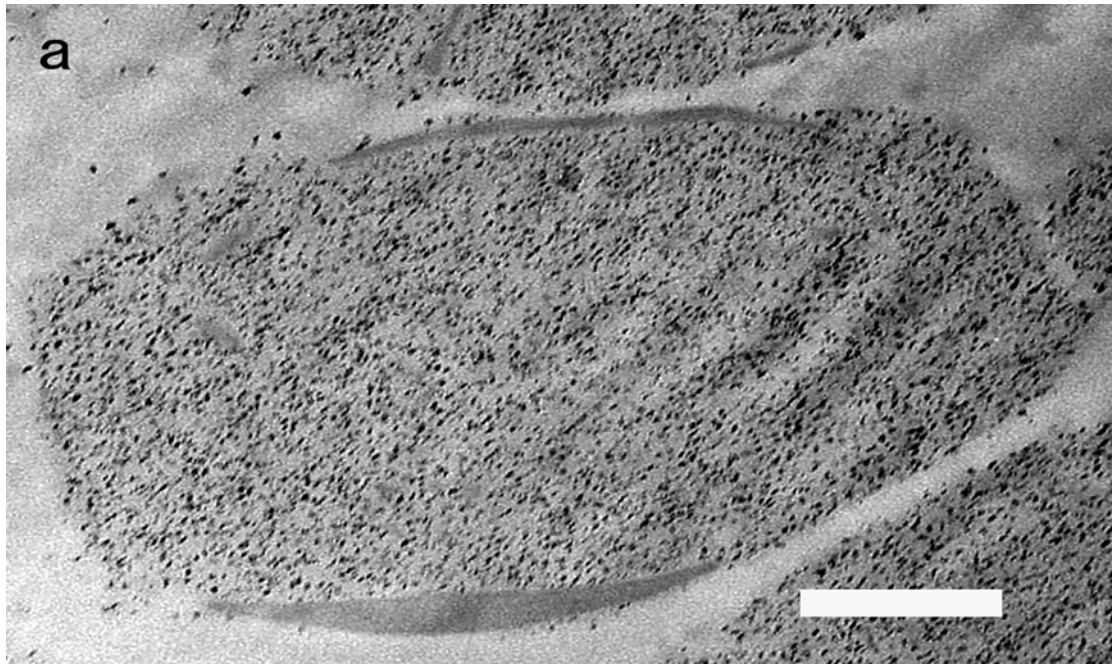


圖七：(a) 以 TEM 觀察未經沈積的卵細胞，內部蛋黃顆粒無見到任何結晶沈積其中。比例尺為 $2\mu\text{m}$ 。

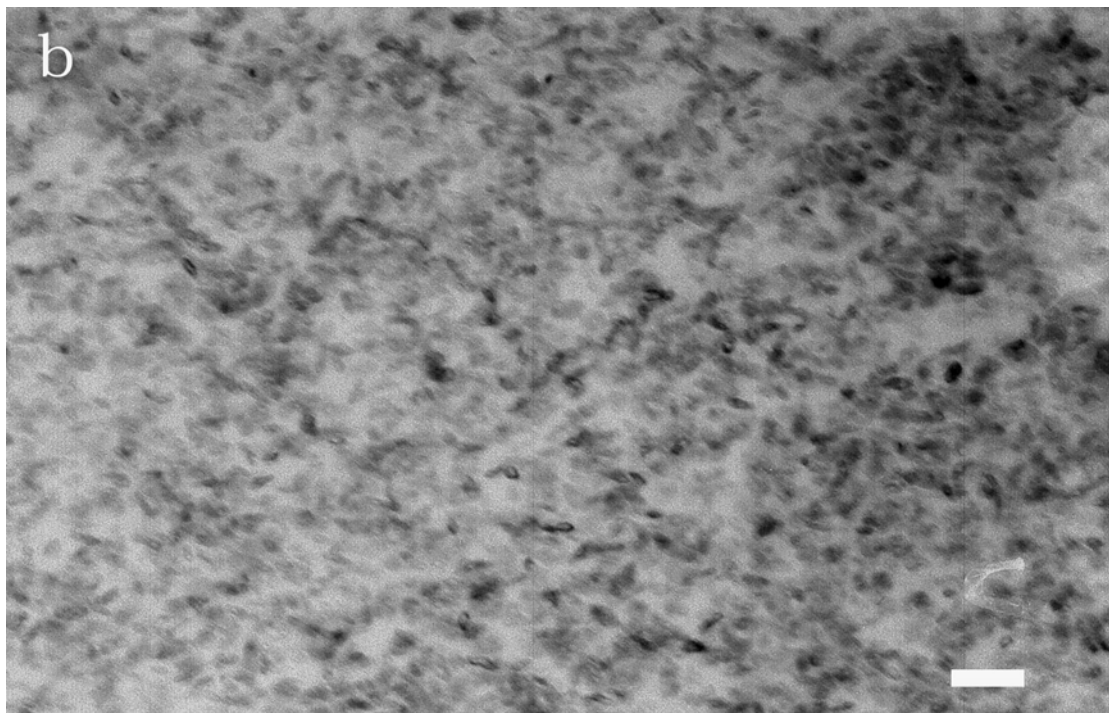
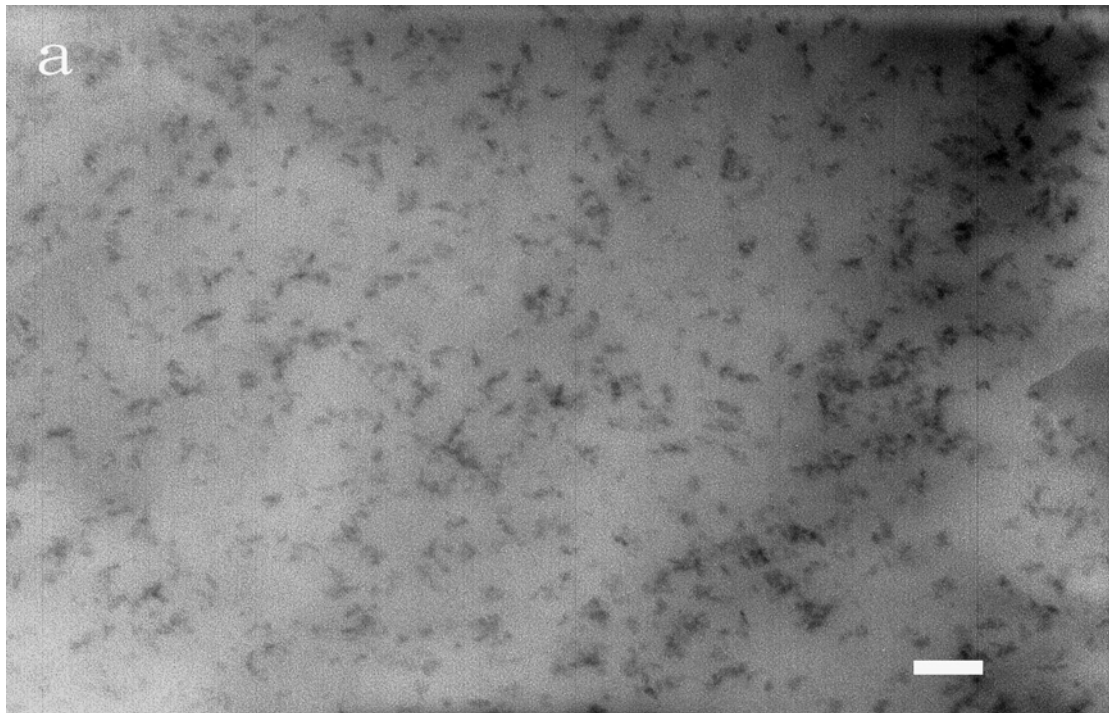
(b) 經過兩個星期沈積的卵細胞，可看見蛋黃顆粒內有磷酸鈣晶體沈積，不過晶體密度尚未很高。比例尺為 $2\mu\text{m}$ 。



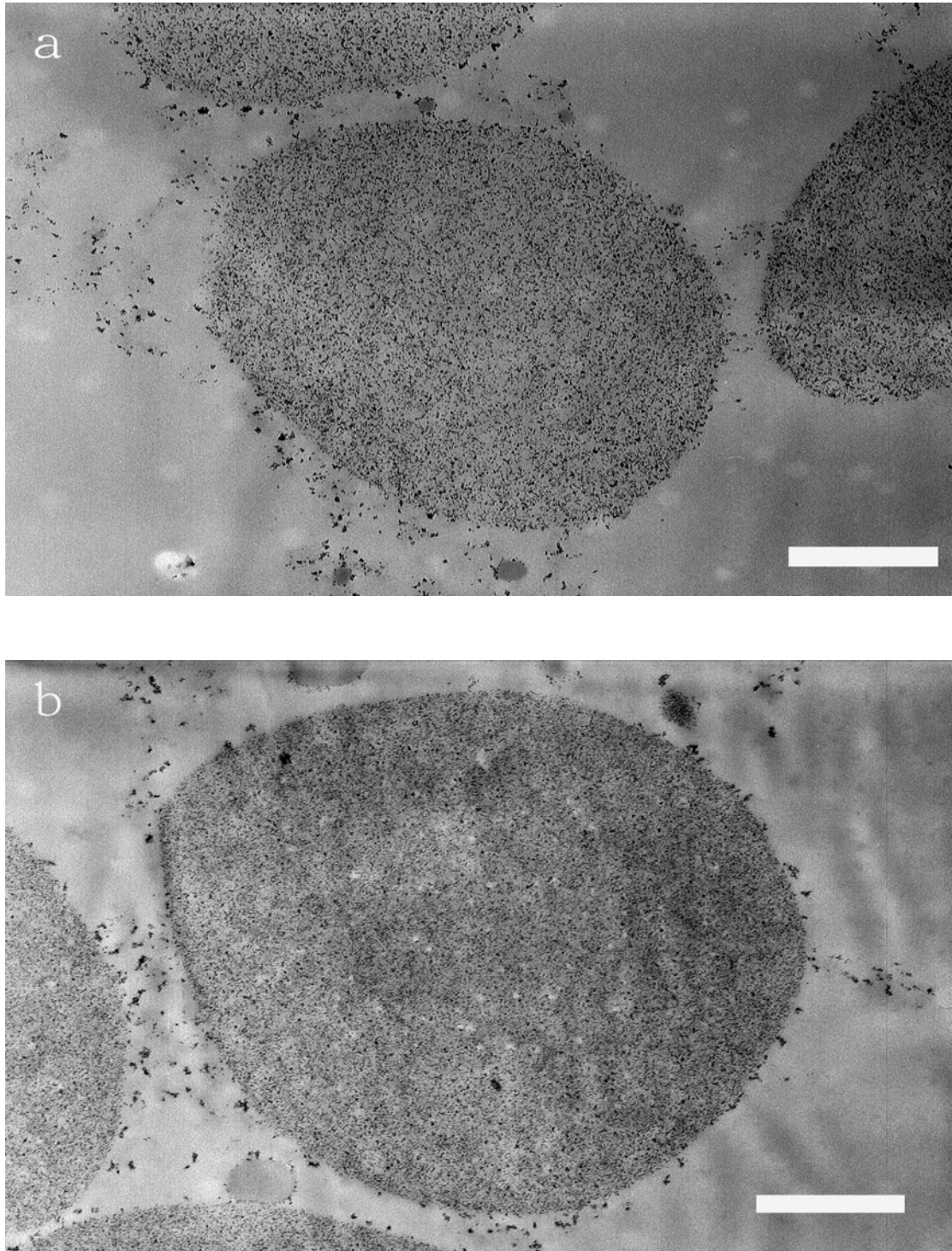
圖八：(a) (b) 以 triton 增加細胞膜通透性後再沈積，則蛋黃顆粒被磷酸鈣入侵的程度大大增加。比例尺均為 $1\mu\text{m}$ 。



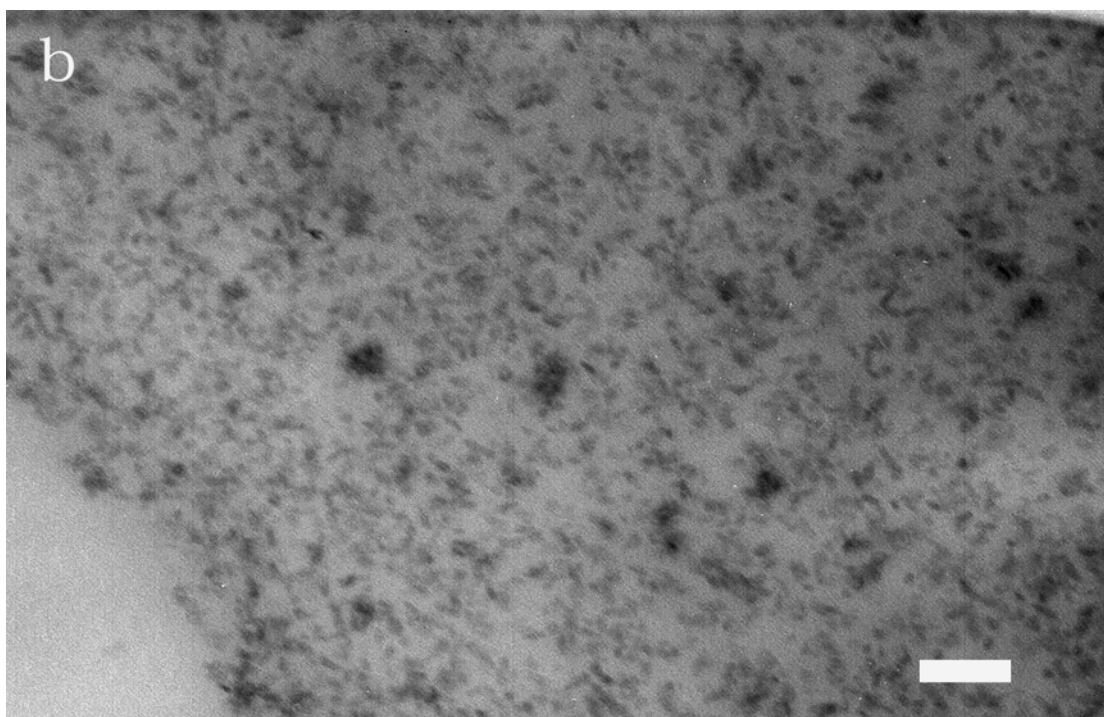
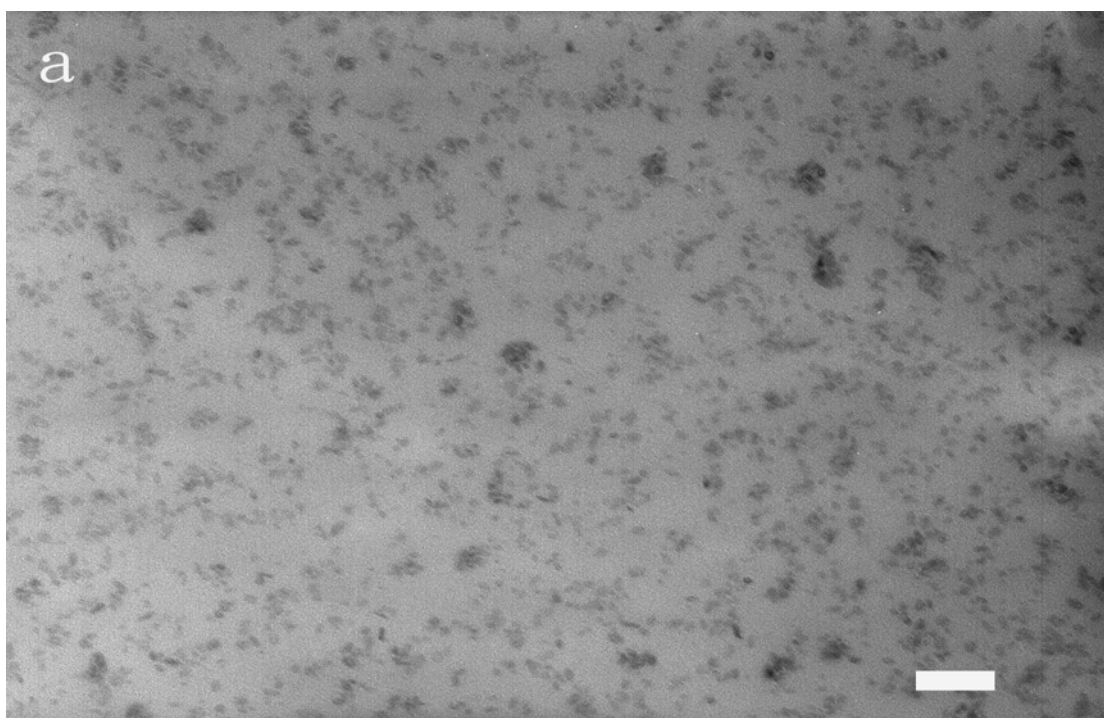
圖九：(a) 在只沈積一次的卵中，雖然可見磷酸鈣晶體於蛋黃中，但結晶量並沒有太高。比例尺為 $2\mu\text{m}$ 。
(b) 經過重複三次的沈積後，結晶量明顯增加並足以填滿蛋黃。比例尺為 $1\mu\text{m}$ 。



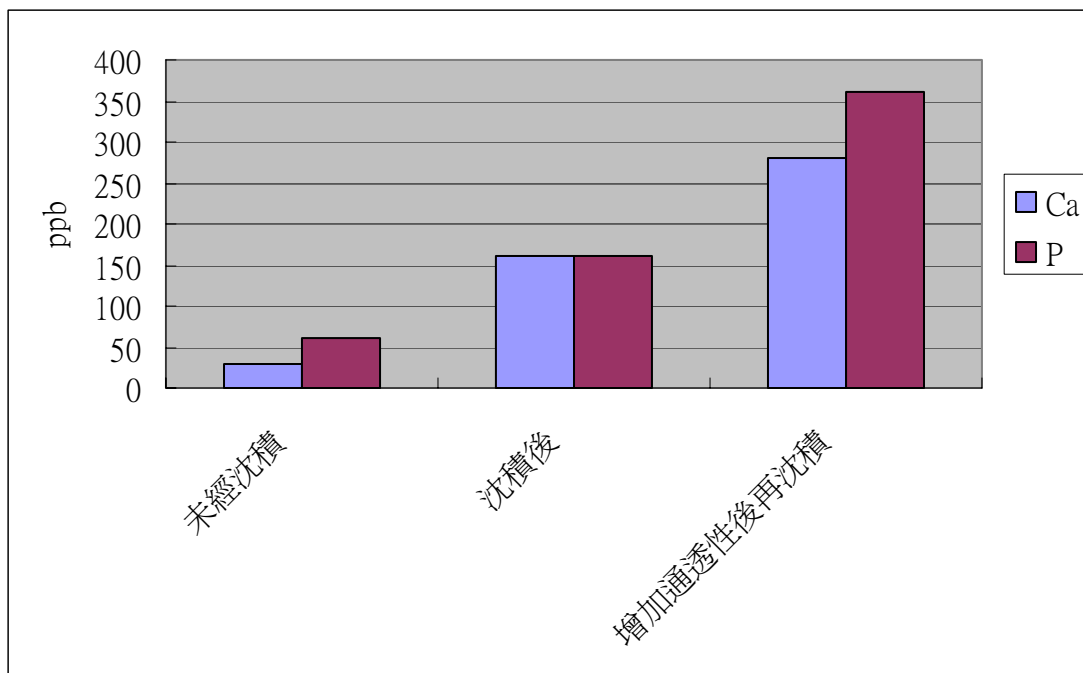
圖十：(a) 放大觀察經不同沈積次數的結晶密度，只沈積一次的磷酸鈣礦晶密度較稀疏。比例尺為 125nm。
(b) 經過重複三次的沈積後，磷酸鈣礦晶密度則明顯增加許多。比例尺為 125nm。



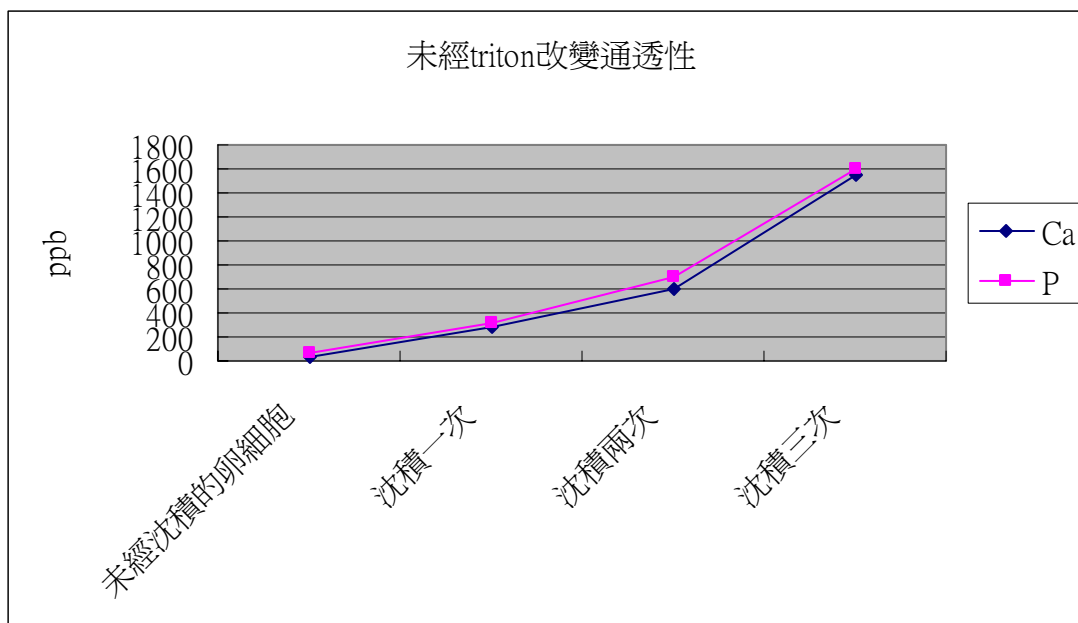
圖十一：(a) 經 triton 改變通透性的卵細胞沈積一次後的結果。比例尺為 $1\mu\text{m}$ 。
(b) 在連續沈積三次後，蛋黃顆粒中的結晶量明顯多於只沈積一次(圖 (a))的結果。比例尺為 $2\mu\text{m}$ 。



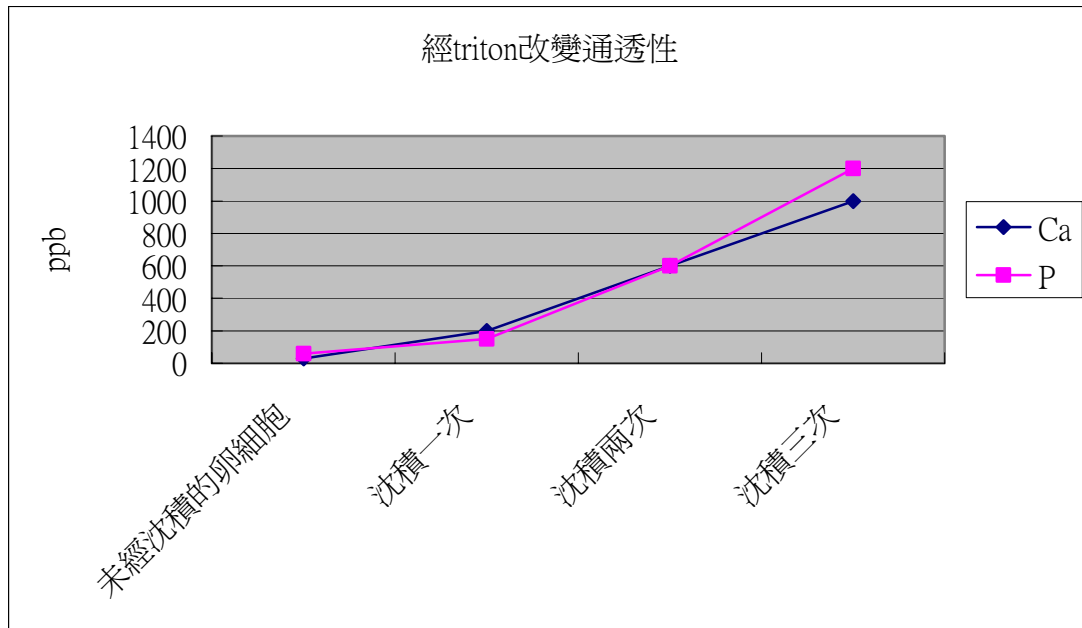
圖十二：(a) 放大觀察經不同沈積次數的結晶密度，只沈積一次的磷酸鈣礦晶密度較稀疏。比例尺為 125nm。
(b) 經過重複三次的沈積後，磷酸鈣礦晶密度則明顯增加許多。比例尺為 125nm。



圖十三：沈積後，卵內鈣的量鈣的量從 30ppb 上升至 160ppb，是未經沈積細胞的 5~6 倍，磷的量從 60ppb 上升至 160ppb，約 2~3 倍。利用 triton 改變通透性後再進行沈積，可使鈣的量升至 280ppb，約九倍多，磷的量則升至 360ppb，約 6 倍。此數據來自 20 個樣本。



圖十四：重複沈積的實驗分析結果發現，未改變通透性的卵細胞，隨著沈積次數增加，會使入侵其內的磷酸鈣量跟著上升，沈積三次後鈣的量從 30ppb 升至 1550ppb，約 50 倍以上，磷則由 60ppb 升至 1600ppb，約 25 倍以上。此數據來自 10 個樣本。



圖十五：重複沈積的實驗分析結果發現，先改變通透性的卵細胞，隨著沈積次數增加，會使入侵其內的磷酸鈣量跟著上升，沈積三次後鈣的量從 30ppb 升至 1000ppb，約 30 倍以上，磷則由 60ppb 升至 1200ppb，約 20 倍。此數據來自 10 個樣本。