

✖ ✖

✧ Bubble Formation and Eruption Mechanism of Volcanic Bombs ✧

[illegible]

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：宋 聖 榮

☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學地質科學系

中 華 民 國 90 年 10 月 14 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

火山彈的氣孔形成及噴發機制研究

Bubble Formation and Eruption Mechanism of Volcanic Bombs

計畫編號：NSC 90-2116-M-002-016

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：宋聖榮 國立臺灣大學地質學系

一、中文摘要

本研究利用阿基米得法、岩石薄片觀察、BET 比表面積測定、MIP 水銀測孔儀與同步輻射微斷層掃描術等五種方法，獲得孔隙分布、大小、連通性以及比表面積等火山彈物理特性；更進一步透過影像處理軟體觀察二維與三維內部結構影像。主要目的在於比較各方法間的優缺點，並嘗試瞭解玄武岩火山彈中心至外緣氣泡大小遞減的可能成因。

研究結果顯示，阿基米得法能顯示標本中開放與閉合孔比例，MIP 與 BET 方法可獲得十分良好的氣孔分布資料，BET 能快速測得比表面積，薄片分析技術與 CMT 能觀察火山彈內部孔隙結構。使用火山彈來源於大陸東北龍崗火山群與雲南騰衝火山群，實驗結果可解析多孔質玄武岩 2 mm 至 3 mm 孔隙直徑，分布曲線呈現多峰對數常態分布；孔隙平均直徑由外緣至中心增大，但最大與最小孔隙均存在於岩體中心區域。距標本表面 1 至 1.5 cm 處可能遭受火山彈噴發過程中冷卻嚴重影響，由分布曲線顯示最大臨界氣泡核直徑約 15 nm，可能歷經至少六次環境變化。這些結果與相關數據，可提供未來改進氣泡生長與成核理論之依據。

關鍵詞：火山彈、多孔質玄武岩、成核理論、氣泡生長、氣孔大小分布、孔隙率、連通率、比表面積

Abstract

This study uses five methods, such as Archimedes density measurement, the BET (Brunauer-Emmett-Teller), the MIP (mercury intrusion porosimeter), the CMT (computed microtomography) and petrographic image analysis to obtain the vesicle size distribution, vesicularity, connectivity and specific surface area of the vesicles in basaltic bombs. Furthermore, the inner structures of vesicles can be visualized in 2D and 3D using the visualization software. The aims of this study are to compare the advantage and disadvantage of different methods and to understand the origin and eruptive mechanism of basaltic bombs with vesicle size distributions decreasing from the core to the rim.

The results show that the Archimedes method can identify the percentage of open and close pores.

The MIP and petrographic methods obtain quite good data quality of vesicle size distributions. The BET is good method to quickly determine the specific surface area. The vesicle data obtained by the CMT and petrographic methods can be used to visualize the inner structures of vesicles in basaltic bombs. The samples in this study are basaltic bombs, which came from the Longkang volcano group, northeast China and Tengchong volcano group, southwest China. The measurements show that the vesicle sizes in these basaltic bombs range from 2 mm to 3 nm, which show a polymodal log-normal size distributions. Mean diameter of bubbles decrease from the core to the rim, but the distributions of the largest and smallest bubbles are located in the core. The bubbles distributed in top 1-1.5 cm thick of the rock surface may be affected by the quench when the bombs erupted out of the volcanic vent. These lines of evidence suggest that the largest critical bubble in basaltic bombs is probably in diameter of 15 nm and the basaltic bombs have been suffered at least six stages of bubble nucleation and growth. The data in this study can be used to improve the bubble nucleation and growth theories and simulation the eruptive processes in basaltic magma in the future.

Keywords: Volcanic bomb, Vesiculated basalt, magma, Nucleation theory, bubble growth, vesicle size distribution, vesicularity, connectivity, specific surface area

二、緣由與目的

多孔質玄武岩多發生於較爆裂性噴發的玄武岩質岩漿，高壓下溶解的揮發性成分，在岩漿快速上升過程中，因壓力遽變，造成揮發性物質的發泡與破裂作用，因而形成許許多多的氣泡，氣泡內氣體溢散後所留下之孔隙充分表現出岩漿冷卻過程之特性，某一類型的多孔質玄武岩氣泡分布呈現由中心至邊緣大小遞減的趨勢。本研究主要目的即在於瞭解玄武岩火山彈中心至外緣氣泡大小遞減的可能成因。

過去研究所發展的理論，與實際較不能符合，且針對對象大多為矽質岩漿產物，本研究以多

孔質玄武岩為對象，利用不同實驗方法，建立較完整孔隙特性資料，嘗試瞭解孔隙分布與環境變化關係，並提供基性岩漿理論發展之基礎。

火山岩中氣泡的開始結晶(nucleation)、成長(growth)、膠合(coalescence)、碎裂(break up)等作用，深深影響火山岩漿的噴發機制和行為(Spark, 1978; Wilson and Head, 1981; Whitham and Spark, 1986; Cas and Wright, 1987; Jaupart and Vergnolle, 1988; Manga and Stone, 1994)。藉由火山岩中氣孔大小及分佈等物理性質的研究，可幫助我們了解及模擬火山作用的種種過程。

過去對於火山岩中氣孔的研究方法有：1)光學與電子顯微鏡測量法(Toramara, 1990; Mangan et al., 1993)；2)用低黏滯性樹脂充填氣孔，待凝固後再用 HF 酸溶法去除火山玻璃後，計算樹脂顆粒而得氣孔大小及分佈(Whitham and Sparks, 1986; Sahagian et al., 1989)；3)方法相同於(2)，但用高分子取代低黏滯性的樹脂(Toramara, 1990)；4)BET 表面吸附法、真空貫入法(vacuum impregnation)及汞孔隙度計(Mercury porosimetry) (Whitham and Sparks, 1986)等研究氣孔的物理性質。這些方法都有其限制，不是用二度空間來研究三度空間的問題，就是用間接的方法來推算氣孔的物理性質。

本研究計畫嘗試用同步輻射 X 光電腦微斷層攝影術(synchrotron X-ray computed microtomography)來研究火山岩中氣孔的物理性質。同步輻射 X 光電腦微斷層攝影術是八十年代末期開始發展出來的方法(Flannery, et al., 1987; Spanne and Rivers, 1987; Kinney, et al., 1989; Spanne et al., 1994a&b; Hazlett et al., 1996)，其中以在美國布魯哈汶國家實驗室(Brookhaven National Laboratory)發展最為成功，設有專門的實驗站。此方法因是石油公司所投資，故大都用於砂岩孔隙度(porosity)及流通性(permeability)的研究，尚未有人用於火山岩氣孔的研究。筆者和該實驗室研究人員為首次嘗試用此法研究火山岩中的氣泡大小(bubble size)、分佈(bubble distribution)、孔隙率(vesicularity)、連通性(connectivity)、表面積分佈(specific surface area)和變形程度等物理性質，目前已得到良好的三度空間影像圖，並與紐約大學 Stony-Brook 分校應用數學統計系 Brent Lindquist 教授合作，利用其發展出來的數學分析模式(Lindquist et al., 1996)來研究計算氣孔的物理性質，也已得到初步的結果。故用同步輻射 X 光電腦微斷層攝影術來量測火山岩中氣孔的物理性質，以探討騰衝和龍崗火山群的火山噴發機制，以及玄武岩質火山彈形成及氣體逸出的機制，應會比其他方法所測得氣孔之物理性質來的精確。另外，本研究也將利用本系現有的儀器設備：汞孔隙分析儀(Mercury porosimeter)、BET 分析儀(BET

analyzer)、以及用偏光顯微鏡或掃描式電子顯微鏡擷取影像，配合影像分析軟體，來分析火山彈的氣孔大小、分布、孔隙率、連通性、表面積量等，與同步輻射 X 光電腦微斷層攝影術所獲得的數據相比較，不僅可比較這些方法的優、缺點，且還可得到更強而可信的數據。

本次研究採用大陸東北龍岡火山群與大陸雲南騰衝火山群之多孔質玄武岩火山彈為對象。騰衝和龍崗火山群都含有豐富的玄武質火山彈，火山彈的氣孔大小分佈從內往外遞減，至火山彈邊緣達到最小，表現快速冷卻的作用，顯示氣體達到飽和、離溶、結晶、成長是在很短的時間內完成，且可能是火山彈離開火山口剎那，才開始有的作用。故對其進行多種孔隙分析相關實驗，利用各實驗方法之不同解析能力，建構出較為完備之氣孔特性資料，提供更進一步理論研究基礎資料，並進一步瞭解冷卻對於玄武岩火山彈中心至外緣氣泡大小遞減的影響情形。

三、採樣與分析方法

火山彈樣本從外到內共採了七個樣本，從事阿基米得法、BET 比表面積測定和 MIP 水銀測孔儀等方法分析，採了五個樣本從事岩石薄片和同步輻射微斷層掃描術實驗。

四、結果與討論

(1) 各個實驗方法分析所得結果如下：

表一、阿基米得法實驗結果(平均值)

採樣點	01	02	03	04	05	06
開放孔隙率(Po%)	32.04	40.60	40.04	53.41	36.42	48.48
閉合孔隙率(Pc%)	11.63	12.18	1.18	1.33	4.91	0.98
總孔隙率(P%)	43.67	52.78	41.22	54.74	41.33	49.46
固體佔有率(S%)	56.33	47.22	58.78	45.26	58.67	50.54
視密度(g/mL)	2.3223	2.2250	2.7450	2.7197	2.5836	2.7466
總體密度(g/mL)	1.5773	1.3221	1.6460	1.2671	1.6428	1.4151

表二、BET 比表面積法實驗結果(平均值; m²/g)

採樣點	01	02	03	04	05	06
比表面積	4.0337	3.5349	3.1383	4.5909	4.4165	3.6561

表三、CMT 分析結果

採樣位置	總像素 (voxel)	孔隙像素 (voxel)	孔隙率 (%)	原始比表面積 (micron ⁻¹)	修正比表面積 (micron ⁻¹)
A01	90793260	57096947	62.89	0.132912	0.005538
A02	90793260	66451696	73.19	0.090976	0.003791

A03	90793260	66085714	72.79	0.081354	0.003390
A04	90793260	67304219	74.13	0.079960	0.003332
A05	92755400	68512924	73.86	0.086866	0.003619
B01	90793260	55217571	60.82	0.172076	0.007170
B02	90793260	66443136	73.18	0.103014	0.004292
B03	90793260	66276429	73.00	0.073836	0.003077
B04	90793260	72499916	79.85	0.069985	0.002916

表四、Image Pro Plus 孔隙占有率

採樣點		S01	S02	S03	S04	S05
平均孔隙面	圓形	0.060	0.085	0.123	0.136	0.207
積 (mm ²)	多邊形	0.056	0.081	0.117	0.130	0.200
孔隙數量		2146	1492	1081	930	650
總孔隙面積(mm ²)	圓形	128.99	127.22	132.46	126.58	134.59
總孔隙面積(mm ²)	多邊形	121.17	120.53	126.70	121.34	129.95
孔隙率 (%)	圓形	35.47	34.98	36.42	34.81	37.01
	多邊形	33.32	33.14	34.84	33.37	35.74
固體占有率 (%)	圓形	64.53	65.02	63.58	65.19	62.99
	多邊形	66.68	66.86	65.16	66.63	64.26

(2) 各實驗方法解析度比較

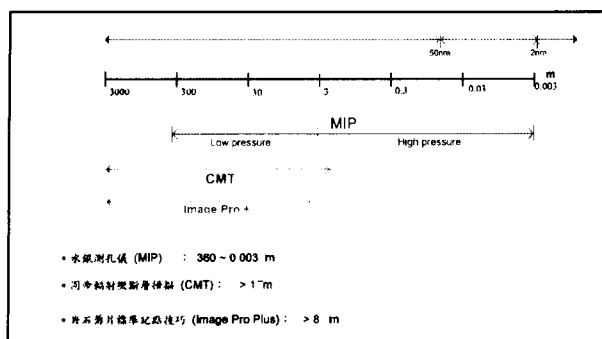


圖 5-4、各實驗方法解析度比較。

表五、實驗能力比較表

實驗種類	測量項目						
	密度	孔隙測定		比表 面積	孔隙 體積	孔隙 徑	孔隙 大小 分布
		開放 孔	閉合 孔				
阿基米得法	✓	✓	✓		✓		
MIP		✓		✓	✓	✓	✓
CMT		✓	✓	✓	✓	✓	✓
BET	✓	✓		✓			
Image Pro +		✓	✓			✓	✓

(3) 玄武岩氣孔階段性生長速率變化及可能原因

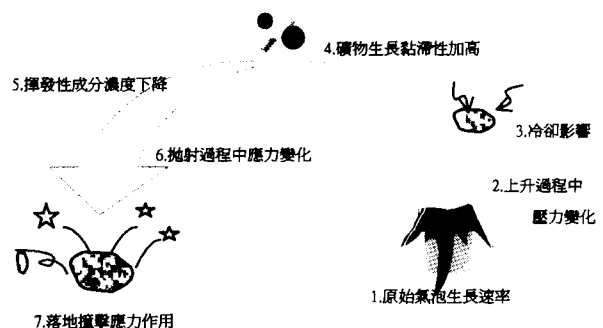
Image Pro Plus 在 8 μm 以上，S01 顯示一個

對數常態分布，S04 開始明顯出現兩個對數常態分布。MIP 對採樣點 01 所測定的孔隙分布，在 1 至 100 μm 間，可以觀察到兩個明顯對數常態分布，在採樣點 02 還約略可見到兩個對數常態分布，到了採樣點 03 幾乎不可見。而採樣點 03、04 與 06 出現位於 1 至 10 μm 處的富集帶，由於占有比率與採樣點 01 明顯不同，因此與前者不屬於同一時期產物。玄武岩火山彈噴發過程中表面與環境接觸，使得外緣整體溫度下降，則會造成氣泡生長緩慢，且大小較小，藉此可以判定在 01 圖形中左側的對數常態分布應該與其他採樣點屬於同一時期。而右側可能為冷卻因素所造成。

觀察 1 μm 至 30 nm 間，在採樣點 04 至 06 於 0.3-0.7 μm 有一富集帶。在 30 nm 以下，各採樣點看似有一相同富集帶，但若以 MIP 高壓高解析度資料顯示，不只一富集帶，在 15 nm、8.5 nm、7 nm 與 5.5 nm 都各有一富集帶，這些富集帶可能為不同階段的臨界氣泡大小。

綜合以上所述，若以不同期稱呼不同生長速率階段，則在 300 μm 以上可能有一至二個生長期（稱之為第一期）；100 μm 左右富集帶應該為第二期（所有採樣點均可見）；5 μm 左右為第三期（所有採樣點均可見）；0.5 μm 階段為第四期（僅可見於採樣點 04 至 06）；15nm 為第五期（所有採樣點均可見），7nm 可能為第六期（所有採樣點均可見）。由高壓資料顯示，在採樣點 05 至 07 應該仍存在一定比例的 3nm 以下孔隙，依據先前討論結果，這些孔隙最可能為另一階段生長之微小氣泡，其次可能為裂隙或連接頸。因此認定，在本次多孔質玄武岩的氣泡生長過程上，保守估計至少歷經六期生長變化階段，也就是至少經歷了六次明顯環境變化。

前人對於孔隙分佈的研究，已知岩體內氣泡生長，很少僅單存由單一、穩定的生長速率形成。（Whitham and Sparks, 1986; Toramaru, 1990; Klug and Cashman, 1994）。本多孔質玄武岩的確也顯現出複雜的生長變化，這些變化很可能由下列因素所造成，諸如：冷卻、礦物生長導致黏滯性增高、揮發性成分濃度降低，以及拋射和落地過程中的應力變化。歸結前面討論，以下面的卡通示意圖（圖二）說明造成六階段生長變化的可能原因：



圖二、階段性生長速率變化的可能成因

假設上述判定正確，冷卻的確造成影響，環境溫度、黏滯性改變的結果，生長速率應有所不同，則第五期與第六期之富集點(15 nm 與 7 nm 處)不應出現 S01。但以實驗結果顯示，的確在這些部分有共同的富集區，此可能即為該濃度下之臨界氣泡核大小，換句話說 15 nm 以下之富集點，可能皆為臨界氣泡核存在區域，而本實驗所觀察之最大臨界氣泡核為 15nm。

五、參考文獻

- Cas, R.A.F. and Wright, J. V. (1987) Volcanic Successions: modern and ancient; a geological approach to processes, products and successions. *Allen & Unwin London*, pp.33-41
- Flannery, B.P., Deckman, H.W., Roberge, W.G. and D'Amico, K.L. (1987) Three-dimensional X-ray microtomography: *Science*, 237, 1339-1444.
- Hazlett, R.D., Coles, M.E., Jones, K.W., Andrews, B., Dowd, B., Siddens, P. and Peskin, A. (1996) Developments in synchrotron X-ray microtomography for application to flow in porous media: (submitted)
- Jaupart, C. and Vergnolle, S. (1988) Laboratory models of Hawaiian and Strombolian eruptions: *Nature*, 331, 58-60.
- Kinney, J.H., Johnson, Q.C., Nichols, M.C., Bonse, U., Saroyan, R.A. and Nusshardt, R. (1989) X-ray microtomography on beamline X at SSRL: *Rev. Sci. Instrum.* 60, 2471-2474.
- Klug, C. and K.V. Cashman, (1994) Vesiculation of May 18 1980, Mount St. Helens magma. *Geology* 22, pp.468-472
- Lindquist, W.B., Lee, S.M., Coker, D.A., Jones, K.W. and Spanne, P. (1996) Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media: *J.G.R.*, 101, 8297-8310.
- Mangan, M.T., Cashman, K.V. and Newman, S. (1993) Vesiculation of basaltic magma during eruption: *Geology*, 21, 157-160.
- Manga, M. and Stone, H.A. (1994) Interactions between bubbles in magmas and lavas: effects of bubble deformation: *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 63, 267-279.
- Sahagian, D.L., Anderson, A.T. and Ward, B. (1989) Bubble coalescence in basalt flows: comparison of a numerical model with natural examples: *Bull. Volcanol.* 52, 49-56.
- Spanne, P. and Rivers, M.L. (1987) Computerized microtomography using synchrotron radiation from the NSLS: *Nuclear Instrum. Methods, Physics Res.*, B24/25, 1063-1067.
- Spanne, P., Jones, K.W., Prunt, L. and Anderson, S.H. (1994a) Potential applications of synchrotron computed microtomography to soil science: *SSSA special publication* 36., 43-57.
- Spanne, P., Thovert, J.F., Jacquin, C.J., Lindquist, W.B., Jones, K.W. and Adler, P.M. (1994b) Synchrotron computed microtomography of porous media: topography and transports: *Physical Review Letters*, 73, 2001-2004.
- Spark, R.S.J. (1978) The dynamics of bubble formation in magmas: A review and analysis: *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 3, 1-37.
- Toramara, A. (1990) Measurement of bubble size distributions in vesiculated rocks with implications for quantitative estimation of eruption processes: *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 43, 71-90.
- Whitham, A.G. and Sparks, R.S.J. (1986) Pumice, B. *Volcanology*, 48, 209-223.
- Wilson, L. and Head, J.W. (1981) Ascent and eruption of basaltic magma on the Earth and Moon: *J. G. R.*, 86, 2971-3001.