

まえがき

火山現象を研究し、仕組みや法則を解明するには、地球物理観測や地質調査、地球化学的分析、モデリングなど様々なアプローチが必要です。物質科学分析もその1つで、特に最近20年は、世界的に活発に研究が行われ、噴火様式や推移と噴出物との対応が調べられ、マグマの上昇速度などの噴火パラメータが定量的に推定されてきました。火山噴出物は、発生から、集積、上昇、噴火に至るすべての過程で、マグマが経験した発泡、結晶化や運動を、その化学組成や組織として記録しています。こうしたマグマの運動の記録を定量的に読み解くためには、その中心的过程であるマグマの発泡と結晶化を理解することが必要になります。しかし、そのための学問的手続きを解説した書がなく、その必要性を感じていました。

従来行われている火山の観測研究、例えば地球物理観測では、火山性地震の発生や、山体変形などのデータが得られます。その解釈には、地下でのマグマの状態についての知識が必要になります。また、計算機シミュレーションによる火道流のモデリングやマグマだまり内での対流や結晶の分別などの計算にも、物質科学についての基礎知識が必要になります。さらに、マグマの冷却や揮発性成分のマグマへの溶解度は、個別の観測やシミュレーションの方針を立てる際に前もって理解しておく、極めて基本的な事柄です。

本書の対象は、マグマの発泡過程と結晶化過程です。マグマの発泡と結晶化は、火山噴火のあらゆるシーンで登場する基本的过程です。地下深部のマグマだまりでは、冷却結晶化が起こり、結晶に入らない水やそのほかの揮発性成分が液に濃集し、あるとき発泡し、マグマだまりの増圧やマグマの上昇のための浮力を提供します。火道内を上昇するマグマでは減圧発泡が起こり、生成したガスの膨張が上昇速度や火口からの噴出速度を支配しています。さらに、減圧発泡による液中の含水量の減少の結果、鉱物の融点は上昇し、減圧誘導型結晶化が起こります。気泡や結晶の生成は、マグマの粘性や構造を変化させ、マグマの運動にフィードバックします。そうして地表に出てきた噴出物には、マグマが経験した温度・圧力経路やその変化速度が、気泡と結晶の組織(texture テクスチャー)として記録されています。そのため、噴出物の組織からこうした情報を読み出す方法論を適

切に用いれば、噴火に伴うマグマの運動を推定することが可能になります。

この方法論の開発には、岩石や鉱物等、物質についての博物学的知識に加えて、実際の物質を分析した結果出てくるデータを解釈するための、よって立つべき考え方方が必要になってきます。例えば、ポールの飛跡のデータを解釈するためのよって立つべき考えは、高校で学習するニュートン力学です。その意味で、火山物質のデータを解釈するためのよって立つべき考えは、大きく分けて2つあります。1つは、熱力学を基礎とし、相平衡図に集大成される平衡論と呼べるものです。これは、平衡状態という概念を前提とし、運動のない安定な状態を議論するものです。もう1つは、ある状態からある状態に向かう運動を議論する非平衡論とも呼べるもので、非平衡論は、カイネティックスや速度論などとも呼ばれます。本書では、この2つを軸にして、自然の物質を解釈するためのよって立つべき考え方の基礎を解説しています。

相平衡図やカイネティックスのテキストは、応用物理や材料科学の分野でたくさん出版されていますが、一般論の解説であったり、物質や取り扱う状況が異なっていたりし、火山物質に応用するにはいささか敷居が高いものになっています。また、マグマについて独自に発展してきたカイネティックスに関して包括的に解説した書は見当たりません。このことは、研究・教育を次のステップに進めるうえで、大きな障害になっていると思われます。

一方で、火山学にとどまらず、日本のテキストは、一般にコンパクトにまとめられていて、式の導出やその背後の基本的物理があまり丁寧に解説されていないことがあります。特に近年、わかりやすいことを念頭に置いて、難解な書は敬遠されがちです。そのことによって、詳細な探求過程を見ることができず、結局背景になっている仮定や基本原理について理解が得られないのではないかと危惧されます。本書は、こうしたデメリットの克服を目標として、できるだけ詳しくかつ「わかるように」記述することを心がけました。寺田寅彦は、RayleighのTheory of Soundを「懐手して読める」と評していますが、本書がそうした本になっているかは、まったく自信はありません。

以上のような思想のもとに、本書は下記のような構成を取っています。第I部では、理解したい火山現象を共有するために、著者の経験に基づいた事例を紹介します。ここでは、マグマの発泡と結晶化を学習するためのモチベーションや自然現象から直接受ける示唆についても記述しています。第II部では、マグマの発泡について、第III部ではマグマの結晶化について解説しています。第II部も第III部も、平衡論を始めに解説し、続いて非平衡論を解説しています。ただし、結晶化の平衡論は、発泡についての議論と重複すること、いくつかの既書が存在し

ていること、紙面の関係上などの理由により、詳しくは解説していません。マグマの発泡過程では、マグマが発泡する条件、気泡形成の仕組み、気泡の成長、気泡サイズ分布の時間発展、気泡に関わる種々の過程：2次成長、合体、変形、離脱、上昇、気泡の収縮・崩壊・振動などを取り扱います。マグマの結晶化過程では、マグマの冷却結晶化、発泡に伴う結晶化（減圧結晶化）および結晶サイズ分布（CSD：Crystal Size Distribution）について解説します。最後の第 IV 部の応用の章では、それまでの章での内容を、実際の火山の噴出物や岩石に応用し、マグマの振舞いを理解する試みを紹介します。付録では、本文の内容を理解するのに必要な事項を解説しました。主として、式の導出や計算、有用だと思われる概念やまとめ、物性の概要、組織解析の概念的基礎などです。たくさん登場するシンボルについては、違う意味に同じシンボルを用いないよう心掛け、記号一覧を掲載することで、読者の助けとしました。

火山現象を物質科学的側面から理解するのに欠かせない事項として、観測される結晶の化学組成の包括的紹介と検討、様々な結晶形態の成因、物性の詳しい説明とデータ（一部付録）、相変化と流体運動とのカップリングなどがあります。これらは、残念ながら本書に含めることができませんでしたが、まとめた解説の必要性を感じています。

市原美恵、大橋正俊、山河和也、丸石崇史、西脇瑞紀の諸氏には、延べ 8 日間に及ぶ 2 回のレビュー合宿で、物理や式の導出の確認に時間を費やして頂き、根本的な間違いや表現について、数限りない指摘とアドバイスを頂きました。この合宿がなければ、本書の内容ははるかに不正確なものになっていたに違いありません。ベストを尽くしたつもりでも、たくさんの間違いがあることは否めませんが、それは著者の責任です。また、市原氏には、核形成のエネルギー論、大橋氏には、気泡の合体や変形について有益な議論をして頂きました。西脇氏には付録の粘性の計算をして頂きました。島田和彦氏には、電子顕微鏡写真を撮影して頂きました。東京大学出版会の小松美加氏には、本書を出版するきっかけと励ましを頂き、また、難しい編集作業で手を煩わせました。以上の方々に、感謝の意を表します。

本書は、独立行政法人日本学術振興会平成 30 年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）（研究成果公開促進費）JP18HP5236 の交付を受けた。

目 次

まえがき	i
第Ⅰ部 はじめに	1
第1章 天然からの動機付け	3
1.1 伊豆大島 1986 年噴火	3
1.1.1 噴火様式の推移	3
1.1.2 気泡と結晶	6
1.2 軽石とプリニー式噴火	9
1.2.1 軽石を出す噴火	9
1.2.2 十和田火山	9
1.2.3 広域火山灰	13
1.2.4 究極の軽石レティキュライト	14
1.2.5 グローバルな現象としての火山噴火	16
1.2.6 爆発的噴火の多様性と統一的分類	17
1.3 溶岩ドームと火碎流	18
1.3.1 軽石を出さない噴火	18
1.3.2 雲仙平成噴火	19
1.3.3 噴出率の時間変化	20
1.3.4 ブロック・アンド・アッシュ・フロー	20
1.3.5 火碎物粒子の内部	21
1.3.6 マイクロライト	22
1.4 冷えて固まるマグマにおける結晶化と発泡	23
1.4.1 天然の冷却結晶化実験としての岩脈	23
1.4.2 岩脈における発泡	25
1.4.3 火山爆発の原動力としてのマグマの発泡	26

第 II 部 マグマの発泡 29

第 2 章 マグマが発泡する条件	31
2.1 気体成分の液体への溶解度と Henry の法則	32
2.2 水のケイ酸塩メルトへの溶解反応	33
2.3 溶解度の圧力変化 : Burnham モデル	38
2.4 気泡と液が異なる圧力をもつ場合の溶解度	41
2.4.1 気泡と液が力学平衡にない一般的な場合	41
2.4.2 気泡と液が力学平衡にある場合	43
2.5 不完全かい離を考慮した水の溶解度の圧力依存性	44
2.6 温度による溶解度の変化	46
2.7 結晶の融点に及ぼす水の影響と減圧発泡誘導型結晶化	50
2.8 冷却結晶化による揮発性成分の濃集と発泡	54
2.9 炭酸ガスを含む系	55
2.9.1 炭酸ガスの溶解度	55
2.9.2 水と炭酸ガスを含む系の溶解度	56
2.9.3 発泡の進行に伴うガス組成変化	57
2.9.4 炭酸ガスに富んだ流体の付加に伴うガス組成と圧力変化	60
第 3 章 気泡形成の仕組み	65
3.1 気泡核形成のエネルギー論	65
3.1.1 揺らぎの熱力学	66
3.1.2 気泡生成のエネルギー	68
3.2 均質核形成	72
3.3 気泡核形成の運動論	75
3.3.1 マスター方程式	77
3.3.2 気泡 (クラスター) サイズ分布についての Fokker-Planck 方程式	78
3.3.3 平衡分布	82
3.3.4 定常核形成速度の導出	84
3.3.5 定常サイズ分布	90
3.4 不均質核形成	91
3.5 非定常核形成速度	93
3.6 古典核形成理論に対する種々の補正	95
3.6.1 Tolman 補正	95
3.6.2 Poynting 補正	96
3.6.3 粘性補正	96

第 4 章 気泡の成長と膨張	97
4.1 気泡成長・膨張の計算の概略	97
4.2 気泡表面での平衡濃度	99
4.2.1 一般的表現	99
4.2.2 力学平衡にある場合の平衡濃度	99
4.2.3 臨界半径を用いた表現	99
4.3 定常拡散律速成長	101
4.3.1 移流項を含まない場合	101
4.3.2 移流項を含む場合	107
4.4 非定常拡散成長	108
4.5 気泡の力学的平衡膨張	109
4.5.1 断熱 vs 等温膨張と潜熱の影響	109
4.5.2 気泡径の関数としての気泡膨張率	110
4.6 粘性流体中での気泡径変化を記述する式 : Rayleigh-Plesset 方程式	111
4.7 気泡膨張の時間変化 : 慣性膨張	116
4.7.1 非粘性液体中での気泡膨張	116
4.7.2 気泡内圧一定の場合 : 単純慣性膨張	117
4.8 気泡膨張に対する粘性の影響 : 粘性律速膨張	119
4.8.1 気泡内圧や気泡内過剰圧が一定の場合	120
4.8.2 減圧量一定下での膨張	121
4.8.3 一定速度で減圧する場合	123
4.8.4 拡散と粘性が組み合わさった気泡成長	124
4.9 気泡成長の概要と実験結果	130
4.9.1 気泡成長における特徴的時間スケール	130
4.9.2 気泡の成長を支配する無次元パラメータ	132
4.9.3 実験との比較	135
4.10 Rayleigh-Plesset 方程式の拡張	137
4.10.1 粘弾性液体への拡張	137
4.10.2 多気泡の場合への拡張 : セルモデル	139
第 5 章 発泡の時間発展	144
5.1 全体のスキーム	144
5.2 Euler 的見方による発泡の時間発展	146
5.2.1 気泡数の保存を表す偏微分方程式	146
5.2.2 モーメント方程式の導出	148
5.3 Lagrange 的見方による発泡の時間発展	151

5.4	減圧発泡における支配パラメータ	155
5.5	減圧速度一定の条件下での発泡の時間発展	159
5.5.1	減圧速度	159
5.5.2	Euler 的記述に基づくモーメント方程式による解	159
5.5.3	Lagrange 的記述による解	164
5.5.4	気泡数密度をきめる要因としての気泡成長	165
5.6	減圧量一定下での発泡過程の時間発展	166
5.6.1	核形成・成長の概要	166
5.6.2	最大核形成速度	169
5.6.3	気泡数密度	169
5.6.4	メルト中の水濃度の減少率	170
5.7	発泡実験	171
5.7.1	減圧速度一定実験	172
5.7.2	減圧量一定実験	176
5.8	均質核形成の限界	177
5.9	2次核形成	178
	第6章 気泡に関わるその他の過程	183
6.1	気泡の2次成長：Ostwald 熟成	183
6.1.1	2次成長の仕組み	183
6.1.2	サイズ分布についての Lifshitz と Sliyozov の解 (LS 理論)	184
6.1.3	成長則の定性的理解	185
6.1.4	実験との比較	186
6.2	気泡の変形	187
6.2.1	理論的研究	187
6.2.2	実験的研究	189
6.3	気泡の合体	189
6.3.1	合体頻度	190
6.3.2	気泡間距離の短縮過程：合体の素過程	193
6.3.3	気泡の形状緩和	200
6.3.4	初期サイズ分布が単分散の場合のサイズ分布の時間発展	201
6.3.5	連続サイズ分布による解析	203
6.3.6	実験との比較	208
6.4	ガス浸透性の獲得	210
6.4.1	ガス浸透性の重要性	210
6.4.2	流れのない等方的な場での気泡の連結	211
6.4.3	せん断流の中での気泡の連結	212

6.5 気泡の離脱・上昇	213
6.5.1 気泡の離脱 (detachment)	213
6.5.2 気泡の上昇	216
6.5.3 気泡の上昇と移流過剰圧 (advection overpressure)	218
6.6 気泡の収縮	219
6.6.1 Rayleigh 崩壊	219
6.6.2 気泡収縮に対する気泡内ガスの影響	222
6.7 気泡振動	223
6.7.1 気泡内ガス量一定の場合	223
6.7.2 Rayleigh-Plesset 方程式の線形解析	225
6.8 気泡崩壊と振動に及ぼす液の粘弾性の影響	227
第 III 部 マグマの結晶化	229
第 7 章 マグマの冷却結晶化	231
7.1 冷却結晶化の熱力学	231
7.1.1 結晶の融点と相平衡図	231
7.1.2 結晶核の熱力学的考察と Gibbs-Thomson の関係	235
7.2 核形成速度と成長速度を用いた岩石組織の古典的理解	240
7.3 結晶の核形成	243
7.3.1 均質核形成の基本的特徴	243
7.3.2 核形成実験との比較	248
7.4 拡散律速成長	252
7.4.1 球状結晶の定常拡散成長	252
7.4.2 平面結晶面の非定常拡散成長	256
7.5 反応律速成長	259
7.5.1 理論的考察	259
7.5.2 実験との比較	262
7.5.3 拡散と反応のバランス成長	264
7.6 結晶化過程の時間発展：2 成分共融系の結晶化	266
7.6.1 スケーリングと支配パラメータ	266
7.6.2 一定熱損失下での結晶化過程の基本的振舞い	269
7.6.3 結晶化過程を特徴づける結晶化パラメータ	272
7.6.4 結晶数密度の冷却速度依存性と結晶成長則の関係	274
7.6.5 室内実験との比較	276
7.6.6 天然の実験	277
7.6.7 結晶数密度の支配要因についてのまとめ	282

7.7 結晶の化学組成	283
7.7.1 2成分固溶体における固液平衡・非平衡と結晶化学組成	285
7.7.2 成長則と累帯構造の関係	294
7.7.3 界面の動きを考慮した拡散プロファイルと結晶の化学組成	299
第8章 発泡に伴う結晶化	306
8.1 減圧結晶化と冷却結晶化との類似点と相違点	306
8.1.1 相平衡関係	306
8.1.2 減圧結晶化における過冷却度	308
8.2 平衡発泡領域における結晶化	310
8.2.1 平衡発泡領域における熱力学因子	310
8.2.2 平衡発泡領域における結晶数密度	312
8.2.3 MND 脱水速度計と減圧速度計	313
8.3 非平衡発泡領域における結晶化	314
8.3.1 非平衡発泡領域における熱力学因子	314
8.3.2 非平衡発泡領域での脱水速度	315
8.3.3 非平衡発泡領域における結晶数密度	316
8.4 発泡過程と結晶化過程を組み合わせた計算	317
8.4.1 簡単化モデルの問題点	317
8.4.2 気泡と結晶の均質核形成が起こる場合	318
8.4.3 気泡と結晶の不均質核形成が起こる場合	319
8.5 減圧結晶化実験との比較	321
8.5.1 実験的研究の簡単な整理	321
8.5.2 SDE	322
8.5.3 MDE および CDE	324
8.6 結晶成長の複雑さ	327
第9章 CSD (Crystal Size Distribution)	329
9.1 岩石組織へのCSD導入の背景と研究の現状	329
9.1.1 CSD導入の背景	330
9.1.2 指数関数的CSDの物理的意味づけ	332
9.1.3 CSDの記載的研究	335
9.1.4 CSD研究の問題点と計算手法の確立	336
9.2 Euler的記述に基づくCSDの解析解	337
9.2.1 変数分離による解：一般解と指数分布になる例	337
9.2.2 成長速度が時間のみに依存する場合の一般解	341
9.2.3 成長速度がサイズのみに依存する場合の一般解	344

9.3	Lagrange 的記述に基づく CSD の解析解.....	347
9.3.1	方法	347
9.3.2	例 1 : $J = J_0 \exp(t/t_J)$ と $G = G_1$ = 一定の場合 ; 指数分布	350
9.3.3	例 2 : $J = J_0 \exp(t/t_J)$ と拡散成長の場合	354
9.3.4	例 3 : $J = J_0 \exp(t/t_J)$ と $G = G_0 \exp(t/t_G)$ の場合	356
9.3.5	例 4 : 核形成速度と結晶化速度が一定の場合 ; 指数分布	361
9.4	実験との比較	364
9.4.1	CSD の実験的研究	364
9.4.2	閉鎖系 CSD の実験への応用	366
9.5	開放系での CSD	373
9.5.1	定常解としての指数分布 : 抜き取り率一定の場合	373
9.5.2	非定常解	374
9.6	Avrami モデルとサイズ分布	377
	第 IV 部 応用	383
	第 10 章 発泡と結晶化から探る噴火現象	385
10.1	噴火生成物の産状と岩石組織	385
10.1.1	産状	385
10.1.2	気泡と結晶の便宜的分類	386
10.2	プリニー式噴火の軽石	387
10.2.1	気泡組織の特徴	387
10.2.2	Matrix-bubble	389
10.2.3	Pheno-bubble	393
10.2.4	発泡度 (Vesicularity)	395
10.3	(準) プリニー式噴火におけるマイクロライト結晶組織	397
10.3.1	結晶組織の特徴	397
10.3.2	結晶数密度と脱水速度, 減圧速度, 上昇速度 : MND 脱水速度計の応用	398
10.3.3	噴火推移との関係	399
10.3.4	結晶数密度と結晶度との関係	400
10.3.5	新燃岳 2011 年準プリニー式噴火のマイクロライト化学組成 ..	402
10.4	ブルカノ式噴火による火山灰	403
10.4.1	ブルカノ式噴火の特徴	403
10.4.2	桜島ブルカノ式噴火と火山灰の特徴	404
10.4.3	結晶組織と表面現象の関係	404
10.5	溶岩ドームにおけるマイクロライト組織	406

10.5.1	雲仙平成噴火の溶岩ドーム	406
10.5.2	爆発的噴火と非爆発的噴火を分ける支配要因	409
10.6	流紋岩溶岩中の気泡と結晶組織.....	411
10.6.1	流紋岩溶岩	411
10.6.2	気泡の変形度.....	412
10.6.3	流紋岩溶岩の結晶組織.....	414
10.7	溶岩流の斑晶組織.....	417
10.7.1	斑状組織：斑晶と石基.....	417
10.7.2	桜島歴史時代溶岩	418
10.7.3	斑晶のCSD.....	418
10.7.4	斑晶 CSD の解釈	419
10.7.5	開放系 CSD における成長速度とマグマの供給率.....	420
10.7.6	斑晶 CSD を用いた噴火長期予測の可能性	422
10.8	貫入岩の岩石組織.....	424
10.8.1	岩体のサイズによる構造と組織の特徴	424
10.8.2	幅の狭い岩脈中の石基結晶数密度の空間変化	424
10.8.3	斜長石と輝石の相互関係に注目した石基組織の空間変化	425
付録		429
A.1	熱力学ポテンシャル	429
A.2	水を含む系の相平衡図のまとめ	430
A.3	Fokker-Planck 方程式の導出	431
A.4	平衡サイズ分布の係数	434
A.5	定常核形成速度を求める際の積分.....	436
A.6	ケイ酸塩メルトの物性	437
A.7	粘弾性体の構成方程式	441
A.8	岩脈や岩床, 溶岩などの冷却	445
A.9	2次元組織解析の基礎.....	455
記号一覧		458
参考文献		467
索引		485