

## 資 料

552.3 : 552.1

### 花崗岩の熔融条件について\*

N. I. Khitarov

小西 善治 訳

現在地質学の領域で、重要な、かつ興味ある問題は花崗岩の生成問題で、多くの研究者の間で活発な論争的となつている。間接指標によつて再現された条件の下で、深所において生成される花崗岩の成因問題は、多数の見解の違いを生み出す原因となつている。仮想的条件を裏付けるデータはきわめて少ない。

Vernadskii はすでに 1925 年に、内因的地質作用の発達地帯にみられるこのような状態を次のように述べている。“マグマの外殻帯の次帯においては、固体がもつ性質を著しく失つた物質、流動物質——おそらく気体で過充填された半液体状物質——が問題となつてくる。このような（環境）媒質の化学的、物理的性質は、全く異なるものであり、あまり知られない。われわれは具体的な科学的結論を下すのに充分な量的データをもっていない。”

このとき以来 30 年の才月を経たこんにちでは、この問題に関しては、1 歩前進したとはいえないが、きわめて僅かながら前進している。内因的地質作用の発達領域と密接な関連をもつ花崗岩の生成問題を中心とする論議も、この動きと結びついて、ときには弱まつて消え去り、ときには白熱化している。

多くの資料中で花崗岩の生成問題に関する知識の拡大に、本質的な影響を与えるものは、花崗岩基体の熔融条件に関するデータである。現在この方向における実験的研究成績がある。そのために、地質学的観察データとともに、実験データに照らして熔融条件に関する考え方がいくぶん前進している。

まず第一にこの方向において興味があるのは、花崗岩基体の 3 主熔融条件の特性である。すなわち基体の組成、温度間隔——熔融が行なわれる温度範囲——および熔融温度である。

基体の組成は、花崗岩の鉱物学的組成と融剤部分で決定される。これらの組成は、間接的に再現されたものであつて、一般に知られていない仮想的組成である。この組成には、原物質の揮発性成分および低融点成分が含まれている。これらの成分は一般に基体に接する地帯にそれぞれ分離して放出されている。

多くの地質学的物体は、この面において重要な示唆を与えている。一例としては、固相にしばしば結びつけられている鉱物中の液体包有物および気体包有物があげられる。

さまざまな生成期、およびさまざまな地域の花崗岩に含まれている水溶性成分（部分）の特殊研究結果によると、多様な割合で組成中にみられるこれらの物質は、硫酸塩類、塩化物類、弗化物類、アルカリ重碳酸塩類、アルカリ土類および珪素で代表される。花崗岩中にほとんどすべて含まれている気体状成分は、炭酸ガスと、少量であるが硫化水素である。もちろんこれらの成分でもつて花崗岩の他種潜在成分組成を完全に示しえられるものではない。

さまざまな花崗岩に関する現在のデータによれば、液体包有物の塩類濃度は 20% に達するが、主として 4~12% の濃度範囲である。ガス状炭酸ガスの含量は 0.001~0.1% の範囲にわたるが、硫化水素の含量は普通 0.005% 以下である。

\* Хитаров, Н. И. : Об условиях плавления гранитного субстрата, Геохимия, No. 2, Академия наук СССР, 1957

石英脈の石英、アルカリ長石脈、および斜長石質ペグマタイトにおける液体包有物の濃度は一層高い。ペグマタイト鉱物(石英・長石・斜長石)における包有物の塩類濃度は、70%に達するが、15~45%の濃度値のものが卓越している。石英脈の石英——“液体包有物”では3相、すなわち液相、気相、固相が出現する——では、鉱物物質と水との比は1.5に及ぶ。包有物にみられる塩類濃度の値は10%である。

次の要因は、熔融過程の発達地域を支配している岩圧である。岩圧に関する判断基準は、熔融過程が行なわれるとみなされる深度について求められる。累重堆積柱に関する圧力計算は、作用圧力を大して明確に反映していない。複雑な形態のマグマの溜り地帯では、上部荷重を支える構築物質が形成され、マグマ基質(体)は、累重岩石の直接圧から保護されている。この種構築物質は、アーチ型のトンネル状構築物に類似し、そこでは放出帯が形成されるとともに、累重岩石層の荷重を超える内圧で支えられている。したがって放出帯はオートクレープの内部に類似している。マグマの溜りの岩圧値は、(堆積)柱の理論値をはるかに上廻るが、個々の堆積層の場合には、反対の現象が現われる。

信頼度の高い岩圧値を算出する方法としては、どのような方法が考えられるであろうか。可能な算出方法として、岩圧に対する個々の鉱物の安定度を実験によつて求めて、圧力の算出が行なわれている。地質学的・岩石学的データの補足としては、熔融過程が発生した深度および発生する深度の推定データとして、地球物理学的データが利用される。さらに造岩鉱物類の液体包有物および気体包有物に関するデータも利用される。しかしこの方向における立派な研究業績も、多くの物理的、化学的現象を把握するにいたっていない。H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>系のP-T-Vに関するデータでも、依然として信頼度のおけるものは存在しない。包有物中における水、水溶性塩類、ガス状炭酸ガスの含量の決定を基にして行なわれた花崗岩試料の岩圧の概算値と、比微孔隙値とによれば400°の温度の下では、空胞の形成によつて発達する圧は3,200 kg/cm<sup>2</sup>にあたっているが、温度600°の下では、圧力は7,000 kg/cm<sup>2</sup>に達する。

花崗岩の熔融温度は、最近多くの研究者によつて多方面から実験的に明らかにされている。BowenとTuttle<sup>註1)</sup>は、上昇温度・圧力の条件の下で、ソーダ長石—カリ長石—水系を実験的に裏付けている。この実験データは、花崗岩質溶液(granitic liquid)の判断基準に利用されている。高温領域では、この種溶液は、一層低温の条件の下で分解を起す固溶体の連続系列を形成している。

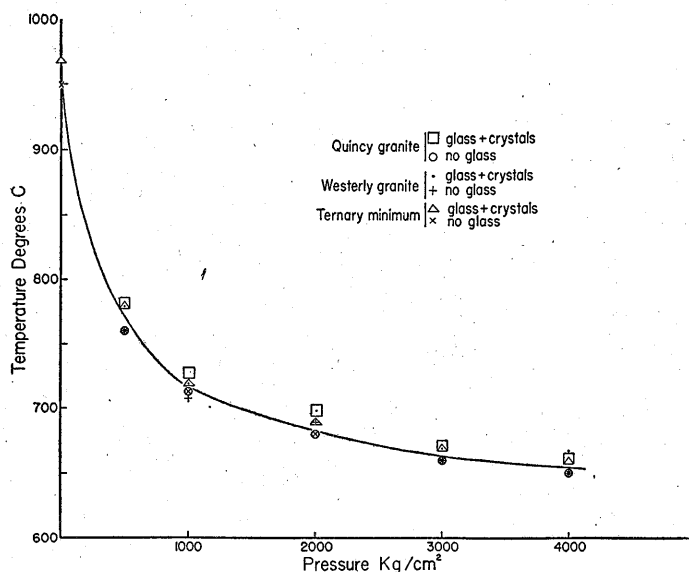
1,000 kg/cm<sup>2</sup>の蒸気圧下で現われる液相線の極小値は、Na<sub>2</sub>O・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・6SiO<sub>2</sub> 70%の組成に相当する。温度は854°にあたっている。乾熔融液のデータと比較すると、温度の低下は220°となつている。このような温度の低下は、液相——H<sub>2</sub>O 7.5%の熔融液——の存在によるものである。

圧力を2,000 kg/cm<sup>2</sup>まであげると、極小値の温度低下がさらに起るが、僅か73°である。500 kg/cm<sup>2</sup>の場合の極小値の低下は160°に相当している。500, 1,000, 2,000 kg/cm<sup>2</sup>の等圧線で求められたデータを比較して、著者は次のような現象を指摘している。すなわち圧力の等増大で形成される温度(熔融)の低下効果は、圧力自体の増加に伴なつて急速に弱まつてくる。

珪素の添加によつて起るこの種偏りの錯雑化は、水の存在で極小値の温度のさらに著しい低下を招いている。石英および長石の固溶体の場の限界曲線に現われた温度の極小値は、2,000 kg/cm<sup>2</sup>の下では675°にあたっていたが、3,000 kg/cm<sup>2</sup>では熔融温度は670°に達した。最低温度で熔融するこの種混合物質は、事実上人工アルカリ花崗岩に類似している。岩圧が算出されても、熔融温度の低下率は僅かである。しかし圧力が温度に影響を及ぼす初期には、温度の低下効果は顕著に現われる。

TuttleとBowenは、人工混合物の研究を押し進めて、2種の天然花崗岩の熔融温度を決定

註1) Bowen N.L., Tuttle O.F. Synthetic granites and their melting behavior under high H<sub>2</sub>O pressure. Am. Min. No. 3/4, 1952. abstract



第1図 人工混合物の熔融温度に関するデータと対比された天然花崗岩の熔融開始温度

Quincy 花崗岩: □ ガラス+結晶類  
 ○ ガラスが存在しない  
 Westerly 花崗岩: ● ガラス+結晶類  
 + ガラスが存在しない  
 3成分系の鉱物類: △ ガラス+結晶類  
 × ガラスが存在しない

した。

カーネギー研究所で行なわれたこの種研究に関する Morey の簡単な報告<sup>註2)</sup>には、第1図にあげられている図表以外に、花崗岩自体の知識についても、与えられた条件下における物質の放置時間についても、さらにまた水の干与割合についても、なんらふれていない。たゞ単に次のように指摘している。すなわち“乾”花崗岩は、標準圧の下では950°で熔融が始まる。この温度は Greig, Shepherd, Merwin<sup>註3)</sup>が確認した温度よりも150°高い (Greig らは800°で1週間の間、花崗岩を熔融状態のまま放置すると半液体状態に移行することを観察した)。Goranson<sup>註4)</sup>によれば、水が存在すると、圧力約1,000 kg/cm<sup>2</sup>下で、温度700±50°の場合に花崗岩が熔融する。

主揮発性成分以外に、さらに他種フラックス成分が花崗岩中に含まれているから、熔融条件が当然変わってくるはずである。

花崗岩の凝固期に放出されることが想像される、若干の揮発性および可溶性組成成分の影響は、実験室でマグマの分化過程を再現して行なわれた一連の実験成績をみると、明らかである。この種の実験は、R. V. Arsenev が Eldzhurty 産花崗岩と Kavak-tau 産の花崗岩について行なわれ、初期熔融温度が決定された。前者は黒雲母・斑状花崗岩、後者は粗結晶質黒雲母・角閃石花崗岩である。鉱物学的特性は、標式的組成をもっていることを示している (第1表)。

多量 (知られていない) の揮発性成分および可溶性成分が花崗岩の生成期に放出されたと考えるならば、熔融期における液体包有物の“水溶性部分”に属する成分の存在量は2~2.5%に達することが考えられるであろう。すなわち、熔融期における成分の存在量を凝固花崗岩 (0.5%以下) の含量の10倍以上にとるならば、含水量に対して40~50%となるであろう。

註2) Tuttle, O.F., Bowen, N.L.: Beginning of melting of some natural granites. Carnegie Institution of Washington, Year book, No. 52, G.W. Morey, 1952~1953

註3) Greig, Shepherd, Merwin, :Carnegie Institution of Washington, Year book, 30, 1930~1931

註4) Goranson R. Some notes on the melting of granite, J. Am. Sci., Vol. 23, 1932

第1表 花崗岩の(量的) 鉱物学的特性

鉱物類	花崗岩 (%)	
	Eldzhurty	Kavak-tau
石英	30.95	32.65
カリ長石	31.70	37.00
斜長石	30.30	23.25
黒雲母	6.74	4.86
角閃石	0.37	1.72
他種共生鉱物類		0.48

第2表 装入塩類および水の含量によつて異なる Kavak-tau 産花崗岩の熔融成績

装入量 (%)	水 (%)	ガラス化	実験時間
3.8	7.4		45
2.2	7.4		22
0.1	7.4		22
2.2	12.0		45
2.2	7.4		22
2.2	5.0		22

(温度 800°, 圧力 800 kg/cm<sup>2</sup>)

の量と組成とに相関関係がある。各花崗岩の熔融の開始は、その組成の特性によつて異なる。

Kavak-tau 産の花崗岩では、熔融は H<sub>2</sub>O 7.4% および装入塩類の 2.2% の含量で起ることを示した Eldzhurty 産の花崗岩では、類似の条件下で同量の装入塩類によつて熔融しないが、実験条件の(熔融状態での) 放置時間では、花崗岩は 12% の H<sub>2</sub>O を含む場合には、塩類の装入を行わなければ熔融しない。そこで 2.2% のフラックスを添加すると、花崗岩は熔融する。少量の NaF を導入すると、花崗岩の熔融は著しく促進され、他種のフラックス成分の干与によつて熔融温度が著しく低下する(第2図)。例えば NaF 0.3% を添加した際には、花崗岩は(装入) 塩類が 1.5% および 7.4% の含量の水に存在すると熔融する。Kavak-tau 産の花

花崗岩の造岩鉱物類中にみられる液体包有物の“水溶性部分の総含量は 0.01~0.02% である。しかし一般には岩石(容積) に対して 0.03~0.04% の含量をし

ばしば示すことがある。さまざまな実験条件およびその実験成績は、第2表と第3表とに掲げられてある。実験は 800° の一定温度、圧力 800 kg/cm<sup>2</sup> で主として行なわれた。さらに水以外のフラックス成分が、花崗岩の熔融に及ぼす影響を解明するために、造岩鉱物類にみられる“液体包有物”の水溶部分の組成に対応する塩類を被実験花崗岩に添加した。

装入塩類の組成 (%)

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> —51.0	CaSO <sub>4</sub> —11.3
NaHCO <sub>3</sub> —14.0	MgSO <sub>4</sub> — 8.0
KCl—12.4	NaCl— 3.3
100.0	

実験成績によれば、熔融は装入塩類の存在によつて、著しく増進するとともに、そ

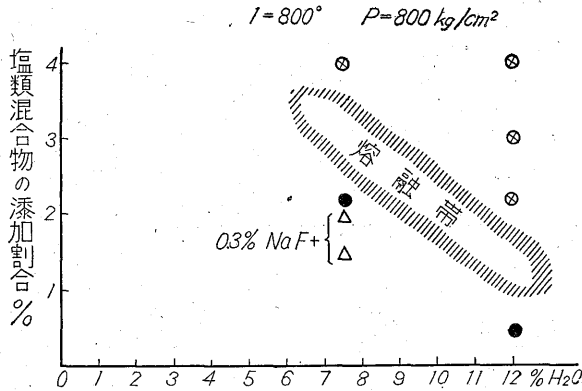
第3表 装入塩類および水の含量によつて異なる Kavak-tau 産花崗岩の熔融成績

圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	温度 (°C)	装入量 (%)	水 (%)	NaF (%)	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	ガラス化
800	800	4.0	12.0	—	—	
800	800	3.0	12.0	—	—	
800	800	2.2	12.0	—	—	
800	800	0.5	12.0	—	—	
800	800	—	12.0	—	—	
1800	650	2.2	12.0	—	—	
800	800	4.0	7.4	—	—	
800	800	2.2	7.4	—	—	
800	800	2.0	7.4	0.3	—	
800	800	1.5	7.4	0.3	—	
700	800	1.5	7.4	0.2	0.2	

実験(放置) 時間 22 時間

崗岩は Eldzhurty 産の花崗岩よりも容易に熔解する。熔融の開始は装入塩類が2.2%と5%との H<sub>2</sub>O 中に含まれている場合に確認されている。

Lebedev が参加し、intensifierを利用して行なわれた実験によると、Eldzhurty産の花崗岩は、塩類を装入しないで、含水状態のままで、温度 800°C、P=2,000 kg/cm<sup>2</sup> の加圧の下では 5½ 時間、P=3,000 kg/cm<sup>2</sup> では 4½ 時間で、それぞれ熔解した。しかし温度 700°C、圧力 2,000kg/cm<sup>2</sup> の加圧下では、5 時間放置しても、熔融現象は認められなかった。圧力をさらに 4,000 kg/cm<sup>2</sup> に引き上げると、温度 700°C、放置時間 5 時間で、花崗岩が熔解した。



第2図 フラックスの含量(水と塩類)とによつて異なる Eldzhurty 産花崗岩の熔融帯にみられる標式的特性  
 ⊗ ガラス+結晶類  
 ● ガラスが存在しない  
 △ ガラス+結晶類  
 たゞし組成が一定な塩類装入物質に NaF を補足的に添加した場合

以上の実験成績は次のことを示している。温度 800°C、圧力 800 kg/cm<sup>2</sup> オーダは、被検花崗岩が上述のフラックス物質の存在によつて、1 昼夜範囲の時間内に熔融を始めるとの充分条件であることが明らかである。実験に利用された装入塩類は、少量の塩化物と炭酸塩類とを添加した液体包有物の“水溶性部分”の塩類の標準組合せにすぎない。したがつて、さらに好ましい添加塩類の組合せを利用すれば、花崗岩の熔融にさら

に著しい影響が現われるとともに、フラックスの所要量——水を含む——の低下が計られることが考えられる。花崗岩の熔融過程の研究を押し進めるうえにおいて、きわめて重要な影響を及ぼす因子は、時間すなわち heating の持続時間である。

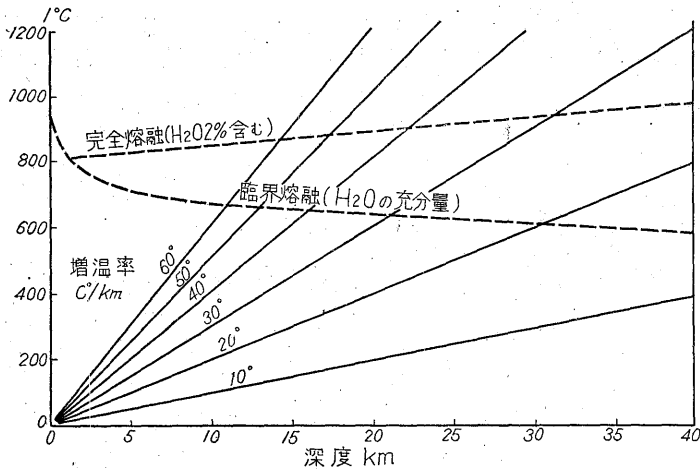
Tuttle および Bowen の天然花崗岩の熔融研究に関するデータ中には、実験 (heating) の持続時間が指摘されていない。

課題の条件下で、花崗岩の heating の持続時間を 1 昼夜にとり、フラックス——塩類混合物の型態——を含む花崗岩について行なわれた上述の実験では、花崗岩塊の熔融が促進された。このように時間成分は明白な役割を演じている。しかし熔融過程の進行は、フラックス成分(水と塩類)が不足している場合には、顕著に現われないはずである。

第 20 回万国地質学会議における Tuttle および Bowen の報告と、ナシイーで開かれた万国岩石学会における Tuttle の報告には、充分量の水が存在し、圧力 4,000 kg/cm<sup>2</sup> の加圧の下では、熔融現象は平均成分に近い花崗岩に、温度 640°C で始まることが述べられている。完全熔解は、水を 9% 以上含む場合に起る。水の含量 2%、温度 640°C、圧力 4,000 kg/cm<sup>2</sup> の場合には、岩石の約 20% が液体状態に移行する。

Tuttle は次のような問題を提起している。すなわち、水以外に、他種の揮発性成分が存在するものと仮定すると、たとえこの場合正確な温度が知られなくても、熔融温度を引き下げるところか、むしろ他種の全揮発性成分が熔融温度を事実において引き下げないことが考えられる。しかし上述の塩類型のフラックス添加による温度の低下が疑わしい場合でも、花崗岩の熔融過程を研究する際には、この種現象を見落すことはできない。すなわち塩類の役割は存在する。したがつて将来の研究では、天然現象のこの面を明らかにすべきである。

Tuttle は地熱データを基にして、花崗岩の部分融解および完全融解の起る深度の興味ある図表を求めている (第 3 図)。



第3図 地下増温率および H<sub>2</sub>O の含量と花崗岩の完全、部分熔融の発達深度との  
 相関関係 (Tuttle 1955)

この場合、地下増温率は深度とともに増加し、平均値は 1 km 6° のオーダにとられている。この考え方は実際上のデータで完全に裏付けられていないようである。Tuttle 自身も若干疑問をもっている。したがって結論はノーブルのデータによっている。このデータは深度の増大に伴って水分が放出され、岩石の絶縁性(熱に対する)が強まり、そのために地下増温率が上昇するような現象で裏付けられている。地下増温率からみれば、次のような結論が求められる。

熔融開始深度、熔融温度 640°、地下増温率 1 km に対して 30° にとれば 2.1 km にあたる。ただし揮発性成分が充分量存在するものとする。

地下増温率が 1 km 50° の割合の場合には、650° の温度は 13 km に達する。地下増温率を 1 km 6° にとれば、熔融は深度 12 km で始まる。

完全融解深度は H<sub>2</sub>O の含量で決定される。水の含量 9% とすると、1 km 30° の地下増温率の場合には、熔融は 21 km の深所で始まり、完全融解はこの深度で行なわれる。水の含量が少なく、2% とすると、熔融は 21 km で始まるが、完全融解は 31 km に達しないうちは起らない。

1 km 50° の場合には、熔融は、水が充分量存在すると、12 km で起る。しかし水の含量が少なく、2% と仮定すると、完全融解は 17 km の深所で行なわれる。この場合には、岩石の化学的性質が本質的な役割をなすことは明らかである。

部分熔融はきわめて重要な現象である。この条件の下で、岩石が相対的に硬い場合には、再結晶作用が行なわれるとともに、岩石にはある程度の塑性が附与され、流動現象が現われる。したがって、変成過程の進行につれて、好ましい条件が発生する。

Tuttle の考え方によれば、1 km 40° 以上の熱勾配は、堆積岩中ですべて出会い、1 km 20° 以下の低熱勾配は楕状地域で認められることを考慮に入れば、花崗岩の熔融は、むしろ 10~40 km の深度で行なわれる。

熱勾配の評価に基づくこの種の考え方は、論理的である。しかし深度の増大に伴って熱勾配の均一性が乱されて、強烈な熱対流が局所的に高まることが除外できないであろう。

この場合には、地熱の局部的上昇地域では、一層上位の造構造階梯で熔融過程の発達が可能となる。

そのほかに、この考え方は花崗岩基体の熔融の主要な因子として、熱因子のみがとられている点で論理的である。すなわち、この考え方は、他の熔融原因についてふれないで、全体的に被融解系の組成を等しいものと考えている。この因子を考慮に入れるならば、花崗岩の熔融深度は著しく補正されて、減少される傾向がある。