

氏名・(本籍)	ふじ 藤	なわ 縄	あき 明	ひこ 彦
学位の種類	理	学	博	士
学位記番号	理	第	767	号
学位授与年月日	昭和59年11月28日			
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当			
最終学歴	昭和54年3月 東北大学大学院理学研究科 (前期二年の課程) 地学専攻修了			
学位論文題目	Petrology and geochemistry of the Adatara volcano, Northeast Japan (東北日本, 安達太良火山の岩石学と地球化学)			
論文審査委員	(主査) 教授 青木謙一郎 教授 荻木浅彦 教授 砂川一郎			

論 文 目 次

Abstract

Chapter 1 Introduction

Chapter 2 General information for the study

- 1) Theories on the genetical relationships between the tholeiite and the calc-alkali rock series proposed up to the present
- 2) Topography
- 3) Geological outline
- 4) Petrography

Chapter 3 Petrochemistry

Major element chemistry and definition

Trace element chemistry

Interpretation

Summary

Chapter 4 Sr isotope geochemistry

Introduction

Analyst and analytical procedure

Results

Interpretation

Summary

Chapter 5 Mineralogy

Introduction

Chemical composition of the phenocrystic minerals

1) Tholeiite series

2) Calc-alkali rock series

Interpretation

Summary

Chapter 6 Discussions

1) Evolving mechanism of the tholeiitic magma

2) Mechanism of evolution of the calc-alkaline magma

3) The most primitive magmas in the shallower magma chamber and the parental magmas

4) Physico-chemical conditions in the primitive and parental magmas

5) Examination of the petrogenetic models for the genetic relation between the tholeiitic magma and the calc-alkaline magma

Chapter 7 Conclusion

Acknowledgement

Figures

Tables

References

論文内容要旨

第一章 緒言

東北日本，第四紀火山フロント付近の火山において，全岩化学組成的ならびに記載岩石学的に対照的な特徴を有する二系列の岩石が密接にともなって噴出している事実は，すでに1960年代に認識され，以来両者は各々(低アルカリまたは島弧型)ソレイト系列およびカルクアルカリ系列として識別されてきた。

本研究の目的は，1) (低アルカリ)ソレイトマグマ，カルクアルカリマグマ各々の組成変化メカニズムの解明および組成変化時における両マグマの物理化学的条件の推定を行う事，更にこれらの情報をもとに，2) 両系列の岩石学的相違をうむ原因を究明し両マグマ(岩石系列)の成因関係を考察する事である。

安達太良火山にはこれら二系列の岩石の共存が確認されかつ両者の地質学的関係が明らかにされており(藤縄，1980)，上記の研究目的を達成するのに好都合な代表的火山である。そこで，安達太良火山の構成岩石に関する，1) 主成分および微量成分の全岩化学組成，2) Sr 同位体比および3) 斑晶鉱物の造岩鉱物学的特徴を明らかにし，各々について本研究目的にそって考察，解釈を加えた。そのうえで，これら解釈をもとに各系列(マグマ)の組成変化メカニズムの解明，両系列の成因関係の考察を行った。

第二章 地質および岩石記載概説

安達太良火山は福島市の南西約1.5kmに位置し，南北約14km，東西約9 kmの楕円形底面をもち，南北方向に伸びた火山列を主体とする火山である。

本火山主体部の形成史は，前ヶ岳形成期(Stage 1)，古和尚山形成期(Stage 2)および火山列形成期(Stage 3)に分けられる。

Stage 1ではカルクアルカリ安山岩質マグマが，また Stage 2ではソレイト質マグマが噴出し，各々前ヶ岳，古和尚山火山体を形成した。Stage 3では，多量のカルクアルカリ安山岩質マグマの噴出により，火山列が形成された(岩石系列の定義は岩石化学の項参照)。

Stage 1および Stage 2の噴出物は，各々久野によるシソ輝石質岩系(H-series)の安山岩およびピジョン輝石質岩系(P-series)の玄武岩ないし安山岩である。Stage 3の噴出物は主に H-seriesの安山岩であるが，P-seriesの安山岩溶岩流も二枚確認された。斑晶鉱物として斜長石，シソ輝石，普通輝石，磁鉄鉱がすべての岩石中に確認され，時にカンラン石がこれに加わる。また，H-seriesの岩石中にはまれにイルメナイトや石英の斑晶が認められる。含水鉱物斑晶は全く認められない。また，斑晶鉱物のモード組成では，ソレイト系列の岩石に比べカルクアルカリ系列の岩石の方が，普通輝石，鉄チタン酸化物に富む傾向にある事が解る。

第三章 岩石化学

本研究では、Gill (1981)による、low-K andesite ないしその延長上の basalt および medium-K andesite とを各々(低アルカリ)ソレイト系列およびカルクアルカリ系列と定義した。この定義は、東北日本第四紀火山フロント付近で奥羽山脈内に位置する、いわゆる那須火山帯主要部の火山を構成する岩石に関しては適用可能である。

安達太良火山では前記のように、Stage 2 の噴出物がソレイト系列に、Stage 1 および 3 の噴出物がカルクアルカリ系列に属する。本火山での各系列の岩石の主成分化学組成は各々那須火山帯(北帯)における各系列の平均値付近の値を有する。従って、本火山での両系列の火山岩の化学組成は各々東北日本の火山フロント付近の安山岩質火山岩の組成を代表していると思なす事ができる(図1)。

微量元素は、プラズマ発光分光分析法により、Ba, Y, Li, Sr, Sc, および V が定量された。このうち、Ba, Sr, Sc および V は、両系列間に有意の差が見出され、各系列毎異なる組成変化トレンドを形成する事が明らかになった(図2)。

本火山で見られる、ソレイト、カルクアルカリ各系列の全岩化学組成変化トレンドに関し、斑晶鉱物の分別結晶作用による解釈を試みた。その結果、斑晶鉱物の、重力分離に対する何らかのバリエーション(例えばビンガム流体の yield strength あるいはまた、溜り内のマグマ中の対流の影響など)の効果を考慮した分別結晶作用により、各系列の組成変化トレンドは説明可能である事を示す事ができた。同時に、両系列の組成変化トレンドの違いは、斑晶モード組成から予測されるように、分別鉱物中に占める普通輝石および磁鉄鉱の割合が両系列間で異なっていた事の反映であると解釈できる事も明らかとなった。

第四章 Sr 同位体比

本火山構成岩石の Sr 同位体比を用いて、1)マグマの chemical evolution において異物質混入過程(magma mixing, contamination)が効果的に作用したか否か?また、2)ソレイトマグマとカルクアルカリマグマとは同源か否か?について検討した。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比は、ソレイト系列の火山岩で0.7056-0.7058、またカルクアルカリ系列の火山岩では0.7048-0.7052であった。また、各系列とも Sr 同位体比と、全岩化学組成変化との間の相関は見出せなかった。

この結果から次の結論が導ける。

(1)ソレイトマグマとカルクアルカリマグマとは各々Sr 同位体比を一定に保つような組成変化過程により chemical evolution を行った。従って、マグマと異なる Sr 同位体比を持つ異物質の混入の効果はマグマの chemical evolution に関しては、無視できる程度である。

(2)ソレイトマグマとカルクアルカリマグマとは各マグマの生成した場所から segregate する時点ですでに異なる Sr 同位体比を有していた。

(3)カルクアルカリ成因論のうち、(i)ソレイトマグマ同士の internal mixing 説、(ii)

source material の異なる玄武岩マグマと石英安山岩質マグマとの混合説および(iii)玄武岩へのシアル質地殻由来の物質の混染説は本火山の Sr 同位体比を説明し得ない。

(4)本火山の Sr 同位体データは、カルクアルカリマグマの source material は、ソレアイトマグマの source material よりも ^{87}Sr に乏しくなければならない事を示している。

第五章 鉱物学

斑晶鉱物の化学組成および鉱物相互間の組織上の特徴をもとに、1)ソレアイト、カルクアルカリ両マグマ間の、斑晶晶出時の物理化学的条件の相違、および2)各マグマにおける、chemical evolution の進行にともなう mineralogical evolution の把握ならびに非平衡斑晶鉱物組合せや各斑晶鉱物相の化学組成の不均質性等を生み出すメカニズムについての検討を行った。

ソレアイト、カルクアルカリ各系列の岩石中の斑晶鉱物の化学組成上の特徴は各々表1、2の様にとまとめられる。

1) マグマ溜りの中で準平衡に共存していたと判断した鉱物の組合せを使い、平衡温度および f_{O_2} を見積った。その結果を表3、4にしめす。準平衡な鉱物組合せと、各鉱物の化学組成の検討から、ソレアイト、カルクアルカリ両マグマ間の斑晶晶出時の物理化学的条件の相違として次の二点を挙げる事ができる。

(1)見積られた平衡温度から明らかな通り、ソレアイトマグマの方がカルクアルカリマグマよりも高温(約50°C)で斑晶鉱物の晶出を行っていた。

(2)カルクアルカリマグマにおいて Usp 35 mole%の磁鉄鉱とイルメナイトが共存するのに対し、ソレアイトマグマでは Usp 40-50 mole%の磁鉄鉱がイルメナイトと共存していない。この事はソレアイトマグマがカルクアルカリマグマよりも還元的な条件下で斑晶を晶出していた事を示している(約50°Cの温度差を両マグマ間に見積った場合でも)。この事は、カルクアルカリ安山岩中の鉄チタン酸化物斑晶がソレアイト系列の岩石中の約二倍である事とも調和的である。

2) 一方マグマの chemical evolution の進行にともなう、液と準平衡に共存し得た斑晶鉱物の mineralogical evolution は図3の様にとまとめられる。

ソレアイトマグマでは、マグマの SiO_2 含有量増加にともない(i)斑晶シソ輝石、普通輝石の core の Mg-value が減少し、(ii)斜長石斑晶の core の An モルが減少し、(iii)磁鉄鉱斑晶の core の Usp モルが増加する。こうした、マグマの chemical evolution の進行と調和的な mineralogical evolution が見出された。

一方カルクアルカリマグマでは、各鉱物の化学組成の変化に関してはソレアイトマグマの場合ほど明瞭でない。しかし、液と準平衡に共存していた斑晶鉱物の組合せが、マグマの chemical evolution の進行と調和的に変化している事が見出された。また、カルクアルカリ安山岩中に見出された鉱物学的特徴のうち(i)Mgに富むマフィック鉱物、An成分に富む斜長石の存在は、より未分化なマグマの間欠的な混入を、また(ii)斜長石斑晶の単一試料内および単一粒子内で

の An 成分の変化幅が広く、30%を越える事実は、マグマ溜り内のマグマにアルカリに関する不均質性が存在する事をそれぞれ強く示唆している。

第六章 議論（および第七章 結論）

1) ソレイトマグマの進化(組成変化)メカニズム

本研究で示されたデータのうち、ソレイトマグマの進化メカニズム解明に有効なものをまとめると表5の様になる。これはすべて、ソレイトマグマの進化メカニズムが、斑晶鉱物の分別結晶作用を主体とするものである事を示している。

2) カルクアルカリマグマの進化メカニズム

カルクアルカリマグマの進化メカニズム解明に有効なものを表6にまとめた。(i)~(iii)はカルクアルカリマグマの組成変化において、斑晶鉱物の分別結晶作用が主要な役割を果している事を支持している。(iv)は、分化中の溜り内のマグマに間欠的により未分化なマグマの混入があった事を示している。しかし、未分化マグマに由来すると推定される斑晶量が少ない事から、混入するマグマの量は、溜り内のマグマよりもかなり少ないと推測される。(v)は、斜長石斑晶の core が溜り内で準平衡な状態で結晶していたと考えたと溜り内のマグマが、アルカリに関し不均質であった事を示している事になる。以上まとめると、カルクアルカリマグマの組成変化過程の主体は分別結晶作用であったと結論できる。

3) ソレイト、カルクアルカリ両マグマの成因関係

両マグマの物理化学的条件違いをまとめると表7の様になる。これらのデータは、ソレイトマグマとカルクアルカリマグマとは異なる parental magma に由来するものである事を示している。そして、これらデータを最もうまく説明するモデルは次の様なものである。

*ソレイト質 parental magma は wedge mantle の部分溶融により生じた。

**一方カルクアルカリ parental magma は、最上部マントルと最下部地殻との部分溶融によって生じたか、あるいは wedge mantle の部分溶融で生じた primary magma が地殻下部物質を取り込む事によって生じた。

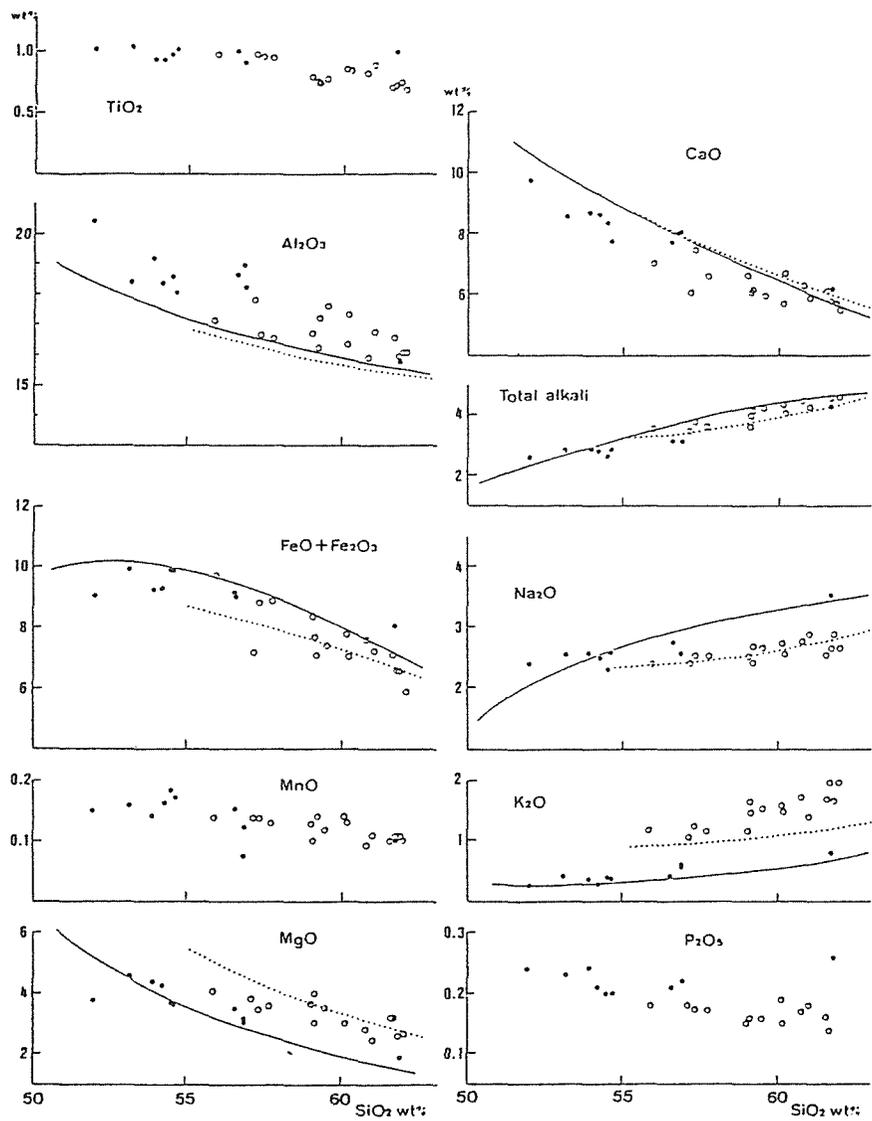


図1 安達太良火山構成岩石の主成分全岩化学組成

黒丸……ソレイト系列, 白丸……カルクアルカリ系列

(実線……那須火山帯北帯のソレイト系列の平均的組成変化曲線)

(点線……那須火山帯北帯のカルクアルカリ系列の平均的組成変化曲線)

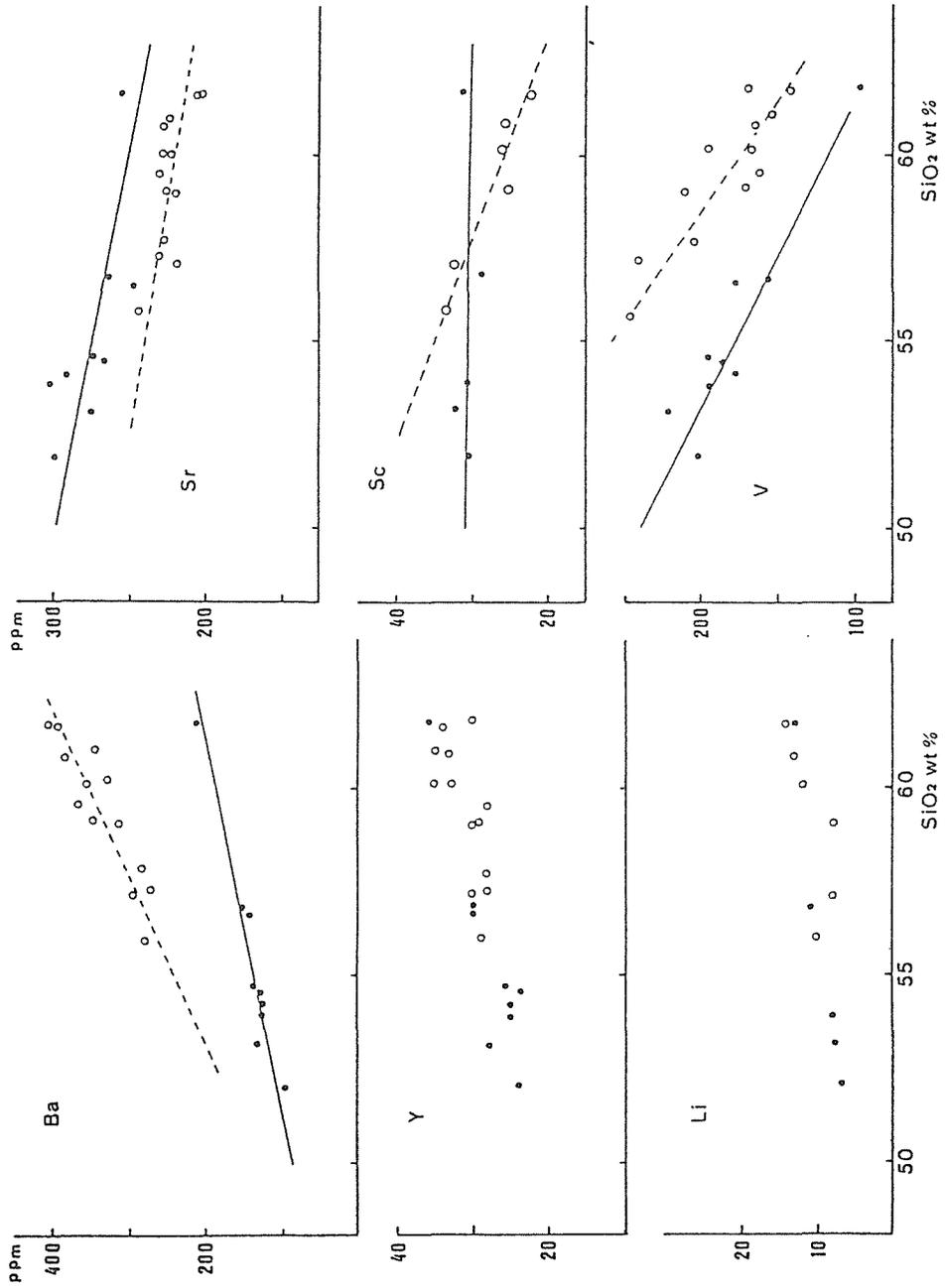
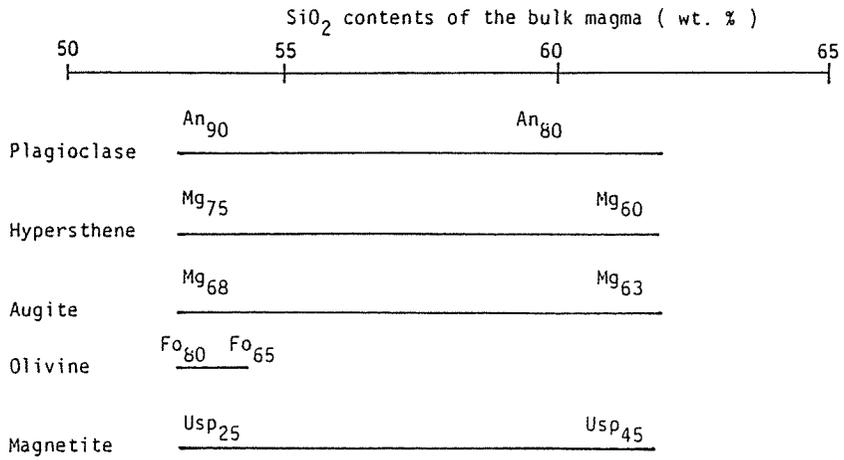


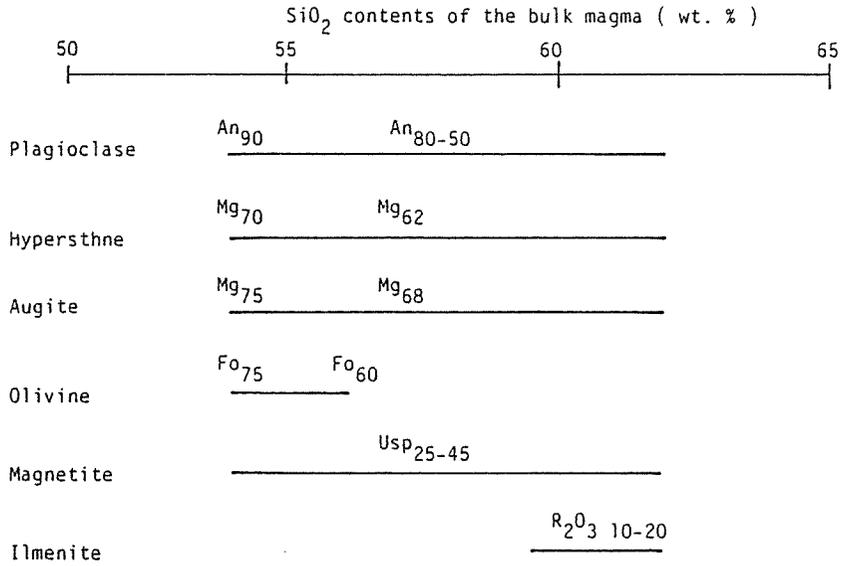
図2 安達太良火山構成岩石の微量元素全岩化学組成

黒丸……ソレイト系列, 白丸……カルクアルカリ系列

Tholeiite series



Calc-alkali rock series



Mg - Mg-value

図3 マグマ溜り内で液と準平衡に共存し得た、斑晶鉱物の組合せ

表1 ソレアイト系列の岩石中の斑晶鉱物の鉱物学的特徴

THOLEIITE SERIES		
Phase	Chemistry in the core	Zoning pattern
Olivine	Fo ₈₀₋₆₄ CaO 0.1-0.26 wt %	normal (core-rim)
Hypersthene	Mg-value 75-60 Wo 3-4.5 mol. %	normal (rim)
Augite	Mg-value 68-63 Wo 39-41.5 mol. %	normal (rim)
Pigeonite	Mg-value 67.5-62.5 Wo 8.8-10 mol. %	normal
Plagioclase	An ₉₅₋₇₀ Or _{0-0.7}	normal (rim)
Magnetite	Usp ₂₅₋₅₂	

表2 カルクアルカリ系列の岩石中の斑晶鉱物の鉱物学的特徴

CALC-ALKALI ROCK SERIES		
Phase	Chemistry in the core	Zoning pattern
Olivine (Mg-rich olivine)	Fo ₆₈₋₅₅	normal (core-rim)
	Fo ₇₃₋₇₀	normal (rim)
Hypersthene (Mg-rich hypersthene)	Mg-value 62-61 Wo 2.5-3.5 mol. %	normal,reverse (rim)
	Mg-value 72-63	normal (rim)
Augite (Mg-rich augite)	Mg-value 69.5-67.5 Wo 41-45 mol. %	normal,reverse (rim)
	Mg-value 76-70 Wo 41-45	normal (rim)
Plagioclase (Xenocrystic)	An ₉₀₋₈₀	oscillatory (core) normal (rim)
	An ₈₀₋₅₀	oscillatory (core) reverse (rim)
	An ₉₅₋₉₀	normal (rim)
Magnetite	Usp ₂₀₋₄₅	
Ilmenite	R ₂ O ₃ 10-20 mol. %	

表 3 輝石温度計による斑晶のコアの平衡温度

Table 19. Equilibrium temperatures of the pyroxenes in the rocks from the Adataro volcano.

Sample No.		Orthopyroxene		Clinopyroxene		T(°C)
		Mg-value	Wo. mol.%	Mg-value	Wo. mol.%	
Tholeiite series						
2-1	Max.	74.0	3.5	67.3	39.2	1029
	Min.	64.0	3.8	63.0	40.3	987
2-1				(pigeonite) 59.5		1075
2-3	Max.	70.4	3.7	68.4	40.6	1008
	Min.	63.2	3.6	64.9	41.0	984
2-7	Ave.	63.3	3.6	65.8	40.4	1003
2-8	Ave.	62.1	3.7	64.3	40.8	987
2-10	Max.	65.4	3.0	66.2	40.2	1005
	Min.	59.1	3.7	62.5	40.5	988
Calc-alkali rock series						
3-1	Max.	69.0	3.0	71.4	44.3	920
	Min.	61.0	2.7	68.0	44.0	920
3-2	Max.	65.0	2.7	69.4	41.7	989
	Min.	60.8	2.6	67.0	44.6	894
3-5	Max.	71.0	3.2	75.7	43.1	982
	Min.	60.0	2.6	66.7	42.8	950
3-8	Ave.	61.2	2.7	68.8	43.7	934
3-9	Ave.	61.4	2.9	68.0	43.4	938
3-11	Ave.	61.5	2.8	67.5	42.9	950
3-14	Ave.	63.4	3.1	69.2	43.0	956
3-15	Ave.	62.0	2.8	68.5	43.4	940

表4 斑晶磁鉄鈷-イルメナイトの平衡温度および酸素フュガシティー

Table 20. Equilibrium temperatures and oxygen fugacities of the titanomagnetite and ilmenite phenocrysts.

Sample No.	Usp	R ₂ O ₃	T (°C)	log f _{O₂}
3-8	39	12.9	890	-12
			933 *	-12.7 *
3-9	32.7	19.8	920	-11.2
			991 *	-11.4 *
3-14	31.9	20.5	920	-11.2
			992 *	-11.4 *
3-15	35.3	10.7	830	-13.5
			868 *	-14.2 *
3-15 (inclusion)	32.2	11	820	-13.8
			856 *	-14.5 *

* Itaya (1980)

表5 ソレライトマグマの岩石学的特徴

- (i) ソレイト系列の全岩化学組成変化は、斑晶鈷物の分別結晶作用によって説明できる。
- (ii) ソレイト系列の火山岩の Sr 同位体比は、全岩化学組成変化とはかかわりなく、ほぼ一定に保たれている。
- (iii) ソレイト系列において、マグマの chemical evolution の進行と調和的な、斑晶鈷物の mineralogical evolution (鈷物組合せ、各斑晶鈷物の core の化学組成の変化) が確認される。
- (iv) 輝石斑晶の core の平衡温度が、全岩のシリカ含有量増加に従い低下する傾向にある。
- (v) マグマの混合や異物質の混入を示す様な鈷物学的特徴は見出されない。

表6 カルクアルカリマグマの岩石学的特徴

- (i) カルクアルカリ系列の全岩化学組成変化は斑晶鉱物の分別結晶作用で説明可能である。
- (ii) カルクアルカリ系列の火山岩の Sr 同位体比は全岩化学組成変化とは無関係にほぼ一定に保たれている。
- (iii) 液と準平衡に共存する斑晶鉱物組合せが、マグマの chemical evolution の進行と調和的に変化する。
- (iv) Mg に富むマフィック鉱物の斑晶, An 成分に富む斜長石斑晶が、特に、急冷組織をもつ同源捕獲岩を含有する火山岩に顕著に見られる。
- (v) 斜長石斑晶の core の組成範囲が広い。単一試料内あるいは単一粒子内での組成変化幅が An モルで30%を超える。

表7 ソレアイト, カルクアルカリ両マグマ間の物理化学的条件の相違

Physico-chemical constraints to the parental magmas

	Tholeiite magma	Calc-alkaline magma
Temperature	high	low
f_{O_2}	low	high
H ₂ O content	low	high
Silica	low	high
Alkali	low	high

論文審査の結果の要旨

東北日本、第四紀火山フロントの火山には記載岩石学的ならびに全岩化学組成的に対照的な特徴を有するソレイト系列とカルクアルカリ系列の2系列火山岩類が密接に伴なって噴出している。そらの成因関係は極めて重要であるにもかかわらず明確な考察と解釈は与えられていない。

本論文ではソレイト、カルクアルカリ両系列火山岩が出現する安達太良火山について詳細な地質調査を行ない、その形成史を明らかにし、採集した火山岩類について1)微小部分分析装置による造岩鉱物の定量、2)全岩の主成分および微量成分の重量法、光量子放射化法とプラズマ発光分析法による定量と3)全岩の質量分析法によるSr同位体比の測定を行っている。

本火山は活動の初期にはカルクアルカリ安山岩質、中期にはソレイト質、晩期にはカルクアルカリ安山岩質マグマが活動している。構成鉱物の組成をみると、ソレイト、カルクアルカリ両系列マグマの斑晶晶出時の平衡温度はそれぞれ1080°～980°Cと990°～890°Cと前者が高く、また酸素分圧も前者が低い。両系列の主成分化学組成はそれぞれ那須火山帯の両系列の平均値を有している。また微量成分のうちBa, Sr, ScとVは両系列間に有意義の差が認められ、それぞれ異なった変化経路を辿っている。さらにSr同位体比はソレイト系列0.7056～0.7058、カルクアルカリ系列0.7048～0.7052であって両者のマグマの本源物質が異なっていることを示している。

以上の実験結果をまとめると、ソレイト質マグマとカルクアルカリ安山岩質マグマとは異なる本源マグマに由来するものであって前者は上部マンツルの部分融解により、後者は最上部マンツルと最下部地殻の部分融解によって生じたか、あるいは上部マンツルの部分融解で生じた初生マグマが地殻下部物質を取り込む事によって生じたと考えられ、両者のマグマはそれぞれ別個に生成したことを示している。

このように本論文はソレイト系列とカルクアルカリ系列火山岩の成因に新しい考察と解釈を与えた点で優れており、藤縄明彦が独立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって藤縄明彦提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。