

火成弧に由来する砂岩の化学組成

君波和雄*・公文富士夫**・西村年晴, ***・志岐常正****

Chemical composition of sandstones derived from magmatic arcs

Kazuo Kiminami*, Fujio Kumon**, Toshiharu Nishimura*** and Tsunemasa Shiki****

Abstract We propose a new diagram using major element compositions of the Paleozoic and Mesozoic sandstones derived from magmatic arcs in Japan for discrimination of the degree of growth and nature of magmatic arcs.

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and $(\text{FeO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ are adopted as the most discriminating parameters. In general, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ is considered to correspond to the feldspar/quartz ratio in sandstones. $(\text{FeO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (basicity index = B.I.) is a rough measure of basicity of the sandstones derived from magmatic arcs. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and B.I. increase progressively in sandstones from continental arc through evolved island arc to immature island arc. The dissected-arc type sandstones fall in the same field as the continental-arc type sandstones in our diagram, although both sandstones are clearly distinguishable from each other by their modal composition.

Most of the Permian sandstones from the Ultra-Tamba Belt, Maizuru Belt and Chichibu Belt (Kyushu) plot in the immature and evolved island-arc fields. The Jurassic sandstones from the Oshima Belt, Northern Kitakami Belt, Soma Group, Tetori Group and Tamba Group display a fairly good concentration in the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I. diagram, and fall in the continental-arc/dissected-arc field. Considering their modal composition, they are inferred to be of the dissected-arc type. The composition of the Cretaceous sandstones from the Middle Yezo Group, Hidaka Supergroup, Yubetsu Group, Nemuro Group, Shimanto Supergroup (Kii Peninsula and Shikoku) and Izumi Group spread in a wide area from the immature island-arc to continental-arc/dissected-arc fields, and areal differences in composition are distinct.

Key words: sandstone, chemical composition, magmatic arc, Paleozoic, Mesozoic

* 山口大学理学部地質学鉱物科学教室, Department of Geology and Mineralogical Sciences, Faculty of Science, Yamaguchi University, Yamaguchi 753, Japan.

** 信州大学理学部地質学教室, Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto 390, Japan.

*** 兵庫教育大学自然系地学科, Geoscience Institute, Hyogo University of Teacher Education, Yashiro-cho, Hyogo 673-14, Japan.

**** 京都大学理学部地質学鉱物学教室, Department of Geology and Mineralogy, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto 606, Japan.

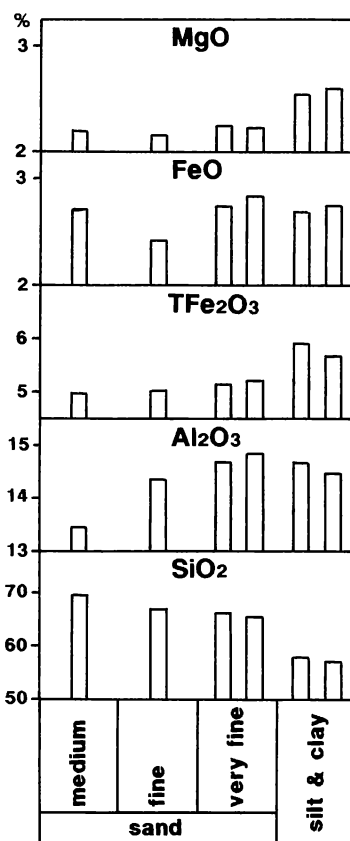
はじめに

昭和63年度および平成1・2年度の3ヶ年にわたり実施された文部省科学研究費補助金による総合研究(A)「変動帯の砂岩—日本列島を例として」の企画の一つとして, 日本列島各地およびその近海に分布する古生代~現世の砂・砂岩を主とする約220試料の全岩化学分析(主成分)が行われた。分析は, ケメックス社(カナダ)に依頼した。分析方法は, FeOが滴定法, これ以外の主成分がICP-AES法で

ある。これら試料の分析結果は、各地域の堆積盆を構成する砂岩の化学的特性を明らかにしたり、各時代・地域における後背地の性格を考察したりする上で貴重な資料になるものと考えられる。また、これらの資料は、砂岩が堆積した造構場の位置づけと化学組成との関連を検討する際にも役立つだろう。

Dickinson & Suczek (1979) や Ingersoll & Suczek (1979) の提案以来、砂岩のモード組成を用いて、特に QFL 等の三角図上においてプレート・テクトニクスと関連づけた造構場を識別する試みが広く行われている。モード組成を利用したこれらの造構場判別法は、有効な結論を与えてくれることが多いが、判別図に盛り込まれる情報の量が限定されていることもあり、決して絶対的な判定基準とはならない。事実、指定された造構場領域以外にプロットされる砂岩が多数存在することも知られている(たとえば、Mack *et al.*, 1983)。砂岩組成を用いた造構場判別法の精度をより高めるためには、モード組成以外のデータも利用してこれら従来の方法を補完する必要がある。また、モード組成ではこれまでに行われていない、より詳細な造構場の判別も重要な課題である。これらの問題を解決するための重要な手段の一つとして、化学分析値の利用が考えられる。Crook (1974) や Schwab (1975) は、いくつかの特徴的な造構環境と砂岩の SiO_2 量や $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比との関連を議論した。さらに近年には、砂岩の主成分化学組成や微量成分組成を用いて判別図を描き、プレート・テクトニクスと関連づけた後背地の造構場を推定することが試みられている(たとえば、Bhatia, 1983; Roser & Korsch, 1986; Bhatia & Crook, 1986)。しかし、その方法も十分に確立しているとはいえない。

日本列島は、古生代末から現在に至るまで基本的に弧―海溝系に位置していたと考えられる。この期間にはいろいろなタイプの火成弧(島弧、陸弧および解析された火山弧の総称として使用)が存在した可能性がある。こういった点を考慮すると、砂岩組成と火成弧の発達程度やタイプとの関連を議論するにあたって、日本列島は格好の素材と考えられる。本論では、火成弧に由来する砂岩の化学組成に基づき、その後背地となる火成弧の発達程度や性格の相違を識別するための判別図を提案する。さらに、この判別図からみた中・古生界砂岩の特徴を概観する。



第1図. 駿河トラフの現世堆積物の化学組成と粒度との関連。TFe₂O₃は、Fe₂O₃に換算した全鉄を示す。

単層中における化学組成の変化

砂岩のモード組成が、粒度組成により影響を受けることは以前より知られている(志岐, 1959; Shiki, 1961)。砂岩のモード組成と化学組成とは密接に関連していると推定されることから、化学組成も粒度組成に多かれ少なかれ影響をうけていると考えられる。粒度組成と化学組成との関連を議論する場合、級化構造が一般に存在するタービダイト単層を使用するのが有効と判断した。そこで、ペルム系舞鶴層群、上部白亜系四万十累層群日和佐累層、上部白亜系―古第三系湧別層群等の過去のタービダイト層および現世タービダイト層(駿河トラフ・沖繩トラフ)について予察的な検討を行った。今回の検討では、湧別層群と日和佐累層において使用された各

1枚のタービダイト層の級化が不十分であったため、両砂岩単層から採集したいくつかの試料の化学組成は、顕著な相違を示さなかった。しかし、これ以外のタービダイト層においては、粒度と化学組成との間に多少の相関が認められた。一例として、現世駿河トラフ・タービダイトにおける粒度と化学組成との関連を示した(第1図)。ここで使用されている試料は、アマルガメイトした単層を含む3~4枚のタービダイト層から成る厚さ約1.3mのコアーから採集された。したがって、第1図の横軸(粒度)は、1単層中における変化ではない。また、今回の検討結果は、ごく細粒な砂を除外すると、1タービダイト層中における砂サイズ内での化学組成の変化量よりも、試料を採集した地層・地域間での変化量の方が一般に大きいことを示している。この事実は、広い地域のさまざまな地層から採集された砂岩を用いて、大局的な化学組成の変化を議論する場合、粒度組成の相違を副次的要因としてあつかい得ることを意味している。

今回確認された粒度と化学組成との関連を以下に列挙する。

- 1) SiO_2 量は、中粒砂から泥に移行するにしたがって一般に減少するが、細粒砂〜シルト段階において局所的に増大する場合がある。しかし、湧別層群のように玄武岩質安山岩〜玄武岩起源の砂においては、泥の方がむしろ SiO_2 に少し富む傾向が認められる。
- 2) Al_2O_3 量や K_2O 量は、中粒砂から泥に移行するにしたがって一般に増大する。
- 3) TFe_2O_3 や FeO , MgO の量は、細粒になるにしたがって若干増大する傾向がいくつかのタービダイトにおいて認められる。しかし、これらの成分は、葉理を形成する重鉱物(とくに輝石や角閃石)と密接に関連している場合があり、重鉱物に富む葉理の発達部位に支配されて変化する可能性がある。湧別層群のタービダイトの場合では、これらの量は砂岩部に比べて泥岩部において明らかに低くなっている。

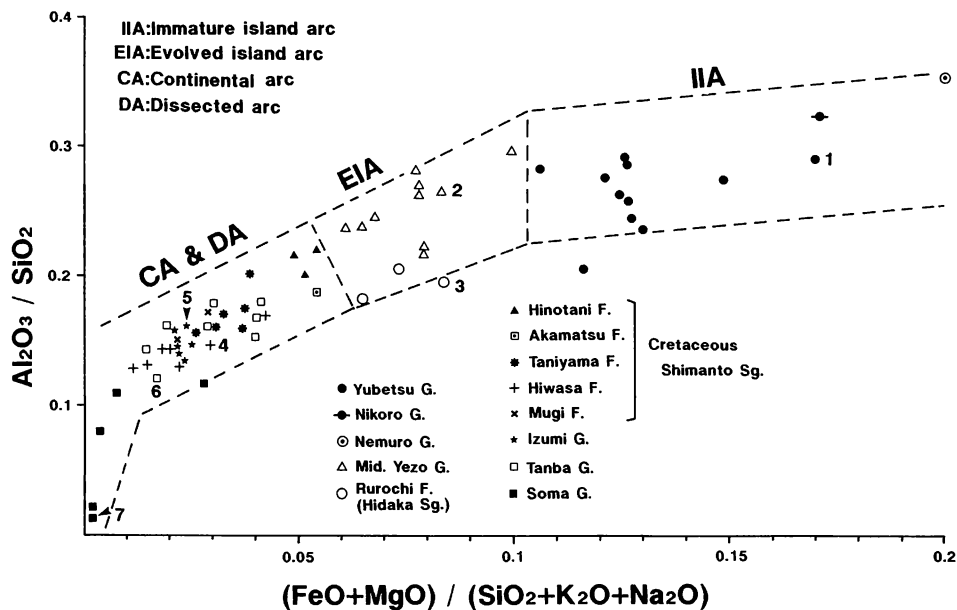
上記の諸事実は、砕屑岩の組成的なタイプが異なると、粒度組成に対して化学組成が異なった変化傾向を示す場合があることを示唆している。化学組成と粒度組成との関連を解明するためには、組成的にいろいろなタイプの砂岩〜泥質岩について化学・粒度組成とともにモード組成についても組織的に検討する必要がある。

判別図に採用したパラメータの持つ意味

砂岩の化学組成は、その関与の程度に相違があるものの、源岩構成、風化過程、分級、粒度、続成作用等のさまざまな要因に支配されている。これらの支配要因のうち、単一の、もしくは複数のどの要因が最も重要な役割を演じているかは、造構場や堆積環境とも密接に関連しているだろう。火成弧に由来する砂岩の場合、一般に火山岩類が最も主要な源岩になっている。こういった砂岩においては、ある程度細粒になっても火山岩石基が砂粒として保存される。そのため、粒度の相違や分級が砂岩の化学組成に与える影響は、前章でも述べたとおり小さくおさえられていると考えられる。また、火成弧から収束域周辺に運搬される砂は、その運搬距離や削剝から堆積までの時間が比較的短い場合が多いので、機械的風化や化学的風化の影響もかなり小さい可能性が高い。これらの点を考慮すると、火成弧起源の砂の化学組成は、多くの場合源岩構成に最も強く支配されていると推定される。このことは、判別図を作成する場合のパラメータの選択とも関係してくる。

判別図を作成する場合、適切なパラメータの選択とそのパラメータの持つ意味に対する正しい認識とが必要不可欠となる。これまでに報告されている Bhatia(1983)や Roser & Korsh(1986)の判別図に今回の総研で得られた分析結果の一部をプロットしたが、設定された領域からはずれる分析値がかなり存在したり、同一の分析値を用いても判別図が異なると別のタイプの造構場にプロットされたりする場合があり、必ずしも満足のいく判別結果は得られなかった。これは、これらの判別図に使用されたパラメータの選択が適切ではなかったことによるのだろう。しかし、Bhatia(1983)の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - \text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 図と Roser & Korsch(1986)の $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 図は、比較的良好な判別結果を示した。今回、さまざまなパラメータを用いた図を作成して検討した結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ と $(\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ の二つを用いた図が火成弧起源の砂岩を比較・分別する際に最も有効であるという結論に達した。

分析された砂岩における Al_2O_3 量と SiO_2 量は、基本的に反比例の関係にある。陸源砕屑岩の場合、 Al_2O_3 の起源は主にカオリナイト等の粘土鉱物や雲母類、長石類である。また、砂岩における Al_2O_3 量は、



第2図. 諸地層砂岩の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 図.

泥質基質量に大きな違いがなければ一般にその主要構成要素をなす長石類の量に最も強く規定されていると考えられる。一方、砂岩中の SiO_2 はさまざまな鉱物片・岩石片に由来すると考えられるが、チャートや複結晶石英を多量に含む砂岩を除外すると、その含有量は単結晶石英の量に最も強く規定されている (Crook, 1974)。こういったことから $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ は、多くの場合砂岩中の長石/単結晶石英比にほぼ対応すると考えられる。すなわち、火山岩類に富む砂岩の場合、この値は、一般に、より塩基性の火山岩に由来する砂岩においてより高くなるだろう。

火成弧から供給された、多量の火山岩類岩片を含む砂岩の場合、その化学組成は源岩である火山岩類の平均的な組成的特徴を基本的に保持していると考えてよいだろう。火成弧を構成する火山岩の主体がより塩基性であるか、より酸性であるかといった点は、火成弧の発達程度や性格とも密接に関わっている。Miyashiro (1974) は、地殻が厚くなるにしたがって火成弧を構成する火山岩類の SiO_2 が増大するといった一般的傾向を明かにした。すなわち、伊豆一小笠原のような未発達な火成弧ではソレライト玄武岩が卓越し、アンデスのような発達した火成

弧ではカルクアルカリ系列の安山岩やより珪長質な火山岩が卓越するとしている。火成岩においては、一般により塩基性の岩石において CaO や FeO , MgO に富み、より酸性の岩石において SiO_2 や K_2O , Na_2O に富む傾向が知られている。しかし、砂岩に含まれる CaO の一部は、生物源の可能性があると同時に二次的付加に由来する可能性もある。実際、比較的均質な同一単層中において CaO 量のみが著しく変化する場合があり、 CaO の二次的付加・移動が推定される。そのため、源岩の組成を議論する場合には、測定された CaO 量をそのまま使用することには問題がある。そこで、塩基性成分を示す指標としては、 FeO と MgO を用いるのが適当と考えられる。酸性の火成岩において SiO_2 や K_2O , Na_2O が多くなることを考慮し、ここでは火成弧に由来する砂岩の塩基性の程度を示す指標 (Basicity Index = B.I.) として、 $(\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ を用いることを提案する。火山岩岩片を多量に含む砂岩の場合、この指標は岩片全体の平均的・相対的な塩基性度を示すことになるだろう。

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$
判別図

今回の総合研究で分析された砂岩のうち、比較的特徴的な組成を示している砂岩、もしくは後背地の性格がよく検討されている地層の砂岩を選び、 Al_2O_3/SiO_2 -B.I.図にプロットした(第2図)。ここで使用された砂岩のうち、ジュラ系相馬層群とジュラ系丹波層群以外の砂岩は、いずれも多量の火山岩岩片を含む。プロットされたデータは、多少のばらつきがあるものの全体的に一連のトレンドを示す。各層の砂岩のモード組成の特徴と推定される後背地の状況・性格は次のとおりである。

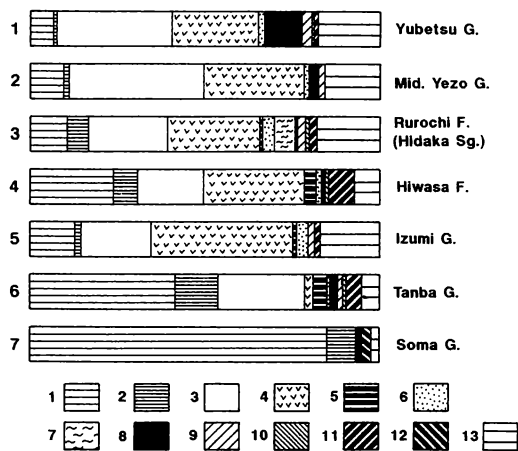
- 1) 湧別層群：後期白亜紀～古第三紀最初期。石英が非常に少なく、多量の玄武岩～玄武岩質安山岩岩片を含む。単斜輝石の含有量も高い。未発達な島弧に由来する可能性が高い。
- 2) 仁頃層群：前期(後期?)白亜紀。多量の玄武岩質岩岩片から構成され、海洋島(常呂帯研究グループ, 1984)から供給された砂岩と推定される。
- 3) 根室層群(門静層)：後期白亜紀。玄武岩～玄武岩質安山岩岩片を多量に含む。輝石の含有量も高い。未発達な島弧に由来する可能性が高い。
- 4) 中部蝦夷層群：後期白亜紀。安山岩岩片を多量に含み、角閃石をかなり伴う。より発達した島

弧に由来する可能性が高い。

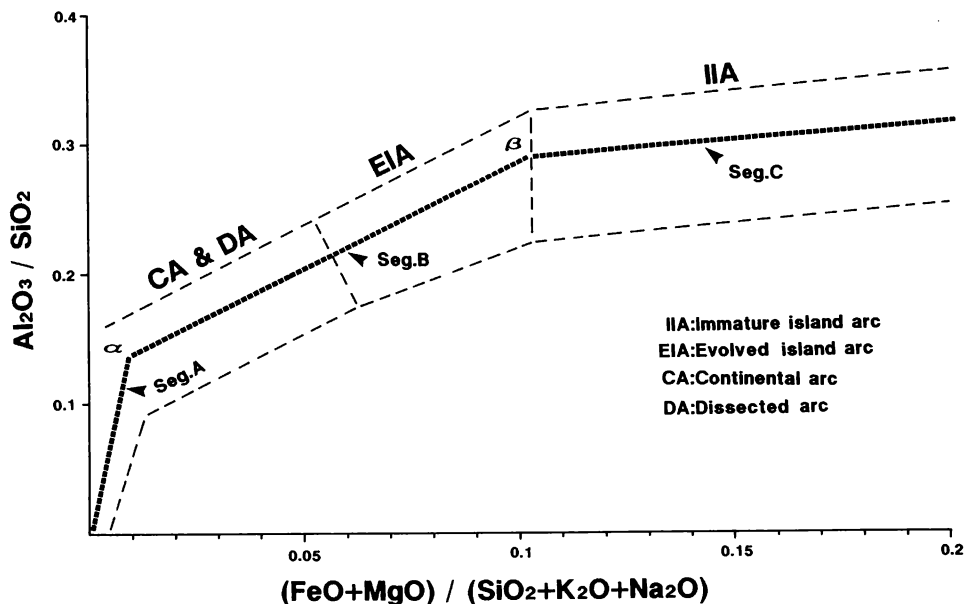
- 5) 日高累層群(瑠椽層)：古第三紀。安山岩～石英安山岩岩片を多く含む。多結晶石英やチャート少なからず含む。より発達した島弧と付加体が後背地をなす。
- 6) 白亜系四万十累層群(日野谷・赤松・谷山・日和佐・牟岐累層)：前期白亜紀末～後期白亜紀。累層により多少の組成的相違が認められるが、基本的に酸性火山岩岩片を多量に含み(公文, 1981), 陸弧的な後背地が推定される。
- 7) 和泉層群：後期白亜紀。酸性火山岩岩片を多量に含み、陸弧的な後背地が推定される。
- 8) 丹波層群：ジュラ紀。岩片に乏しく、石英や長石に富む。後背地には多くの花崗岩が存在したと考えられ、解析された火山弧からなる後背地であった可能性が高い。
- 9) 相馬層群：ジュラ紀。ほとんど円摩した石英から構成される。非常に成熟した花崗岩源砂岩と考えられる。

上記の地層のうち、火山岩岩片を多量に含む砂岩から構成される地層(海洋島起源の仁頃層群を除く)においては、火山岩岩片の性質から湧別層群→中部蝦夷層群→日高累層群瑠椽層→白亜系四万十累層群の順により発達した火成弧が後背地になっていたと考えられる。現世の火成弧のタイプや発達程度を考慮し、これらをそれぞれ未発達な島弧(IIA), 発達した島弧(EIA), 陸弧(CA)に対応するものとする。また、丹波層群や相馬層群は、解析された火山弧(DA)を後背地としていた可能性が高い。第2図は、白亜系四万十累層群→中部蝦夷層群→日高累層群瑠椽層→湧別層群の順にB.I.が大きくなる一連のトレンドを示している。また、それぞれは図中において独自の領域を占有している。しかし、丹波層群と四万十累層群が占める領域はだぶってしまい識別が困難である。この両者は、モード組成から明確に区別できる(第3図)が、主成分化学組成からは他のいろいろなパラメータを用いても区別できなかった。相馬層群は、図中において丹波層群や四万十累層群の左側延長にプロットされ、 Al_2O_3/SiO_2 が急激に減少する特徴的な変化を示している。これら諸層の第2図中における分布を考慮し、IIA, EIA, およびCA & DAの占有領域を設定した。

プロットされたデータの細部に注目すると、1)湧別層群砂岩のばらつきが大きい、2)中部蝦夷層群砂岩の一部や瑠椽層砂岩がトレンドから少しはずれ、



第3図. 代表的砂岩のモード組成。1～7の柱状は、第2図中の1～7の試料に対応する。1: 単結晶石英, 2: 複結晶石英, 3: 長石, 4: 火山岩岩片, 5: 花崗岩岩片, 6: 細粒砂岩・泥質岩岩片, 7: チャート岩片, 8: 重鉱物, 9: 緑泥石, 10: 泥岩同時礫, 11: 方解石セメント, 12: 石英セメント, 13: 基質。



第4図. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 図上で火成弧起源砂岩が示すトレンド (Seg.A~C).

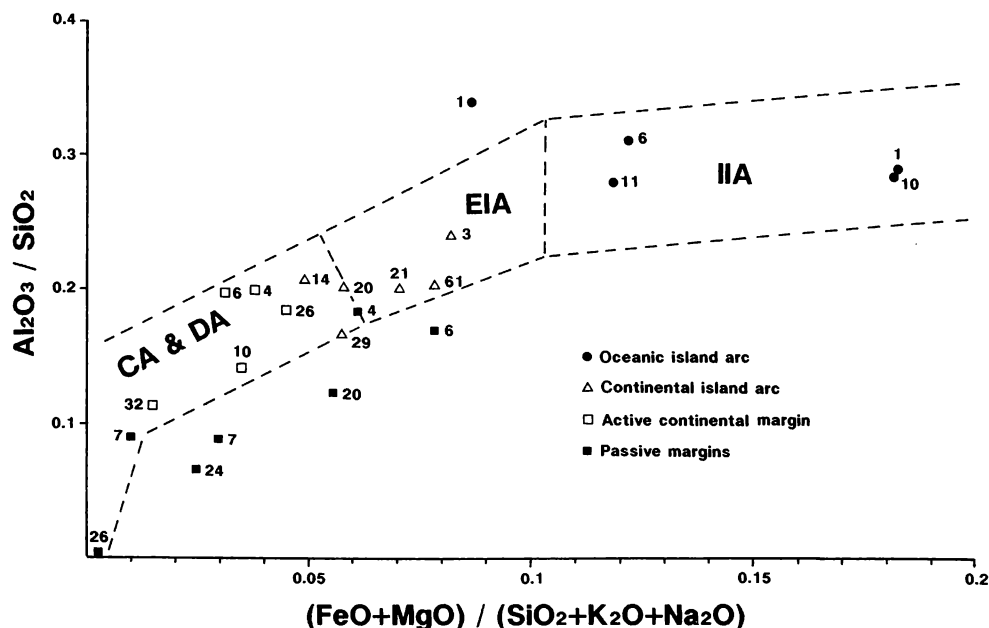
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が低い、といった傾向を読み取れる。湧別層群において $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の低い砂岩は、いずれも1~数%のチャート岩片を含んでおり、これが湧別層群のばらつきの一因になっていると考えられる。もともと石英に乏しいこの領域の砂岩は、チャートの混入に対して $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 値が敏感に反応すると考えられる。チャートの混入がなければ、湧別層群の砂岩はもう少し良い集中(もしくは直線的分布)を示すだろう。全体的に直線的分布を示す中部蝦夷層群においては、2つの砂岩が明らかにこの傾向から外れ、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が低くなっている。他の試料が中粒砂岩なのに対してこの2試料のみ細粒砂岩であることから推して、この2試料は組成的により成熟した結果、長石が減少し、相対的に石英が増大したために、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が低下し、トレンドから少し外れたと考えられる。この領域付近の砂岩は、多くの長石とかなりの量の石英を含む(第3図)。こういった砂岩においては、特に中粒砂岩から細粒砂岩(シルト岩)に細粒化する過程での長石の減少・石英の相対的増大の影響を受け易いのであろう。瑠璃層の砂岩は、複結晶石英やチャートを少なからず含む(第3図)。ここでも、火山岩以外の SiO_2 の混入により $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の低下が起きていると考

えられる。もともと SiO_2 に富む白亜系四万十累層群や丹波層群の領域では、この種の影響は比較的小さいと考えられる。

判別図上の一連のトレンドの意味

第2図にプロットされたデータは、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の増大と共にB.I.が増大する一連のトレンドを示すが、二つの変曲点(α , β)を持つ三つの直線(Seg.A・B・C)に分割される(第4図)。Seg.Aでは、B.I.の減少に伴って $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が急激に減少する。この直線を構成する砂岩は相馬層群である。Seg.Aが示すこのトレンドは、花崗岩源砂岩が組成的に成熟し、長石が減少しながら、ほとんど石英に占有されていく過程を示していると考えられる。この直線は、DA起源の砂岩に特有である可能性が高い。

Seg.Bは、より塩基性の鉱物片・火成岩岩片の増大に伴ってB.I.と共に長石/石英が増大していくトレンドであろう。Seg.Bの左半分は、CAタイプとDAタイプの砂岩によって共有される。しかし、酸性火山岩岩片を多量に含んだCAタイプの砂岩では、成熟が進んでも火山岩石基片がかなり多く残されるので、DAタイプの砂岩の様にSeg.Aに移行するといった変化は示さないだろう。Seg.Bの右半分を



第5図. Bhatia(1983)において使用された造構場と本論の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I.図において設定された造構場との関係。砂岩(砂)の分析値は、Bhatia(1983)から引用。各記号に附された数字は、分析試料数を示す。

構成する EIA タイプの砂岩は、中粒砂岩から細粒砂岩やシルト岩への粒度の減少やチャート・複結晶石英の混入によりさまざまな程度に下方もしくは左下方に遷移しやすい。

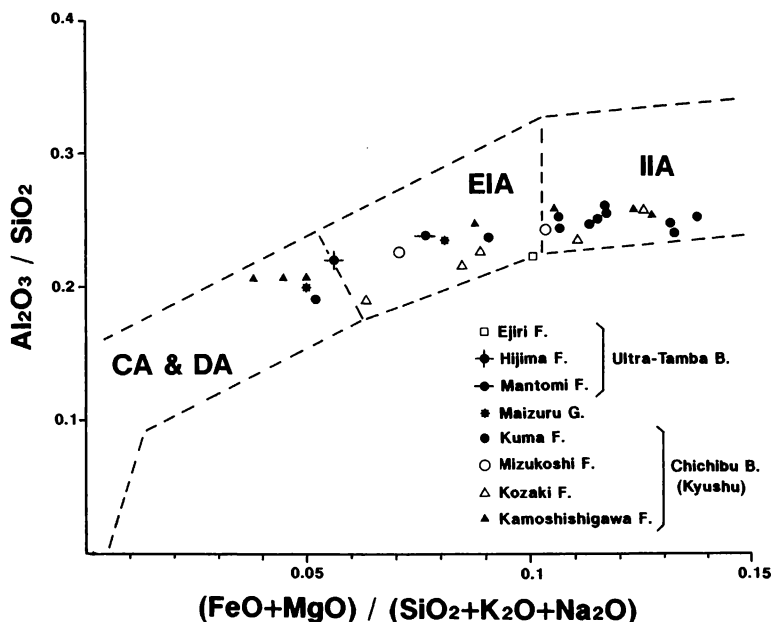
変曲点 β を境にして Seg.C に入ると、B.I.の増大に対する $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の増大傾向が著しく弱まる。この領域の砂岩の単結晶石英含有量が非常に乏しいことを考慮すると、ここでは $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の変化に対して単結晶石英粒があまり重要な役割を演じなくなったと考えることができる。一般により塩基性の火成岩ほどカルシウム長石が増大するが、これによっても $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ は増大する。しかし、その変化傾向は、石英対長石のそれに比べて弱い。Seg.C の傾斜が Seg.B のそれに比べてずっと低角になっているのは、こういった事情を反映しているのだろう。

Bhatia(1983)において使用された造構場との関連

Bhatia(1983)は、種々の造構場において堆積したと推定される東オーストラリアの古生界砂岩を地質環境、鉱物組成、希元素組成等に基づき、次の4つの造構場に区分した：1)海洋性島弧(Oceanic island

arc), 2)大陸性島弧 (Continental island arc), 3)活動的大陸縁辺 (Active continental margin), 4)非活動的縁辺 (Passive margin)。そして、これらの造構場に対応する砂岩の主成分化学組成上の特徴を議論した。さらに、これらの検討に基づき、これまでに主成分化学組成が明らかにされている世界各地の砂岩や砂をこれら4つの造構場に類別することを試みている。Bhatia(1983)に示された造構場と本論の判別図に使用された造構場との関係を検討するために、Bhatia(1983)により類別された世界各地の砂岩や砂の組成を本論の判別図にプロットした。使用されている各地域砂岩(砂)の平均化学組成には、全酸化鉄の量のみが表示され、FeO の表示のないものがいくつかある。これらは、ここにおける検討対象からはずした。

Bhatia(1983)によって設定された海洋性島弧、大陸性島弧および活動的大陸縁辺の砂岩は、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I.図上における IIA~CA & DA の領域にほぼおさまる(第5図)、日本各地の砂岩から得られたトレンドとほぼ同じ傾向を示す。さらに、海洋性島弧砂岩は1地域の砂岩を除き IIA の領域に、大陸性島弧砂岩は EIA 領域から CD & DA 領域の左端



第6図. 日本のペルム系砂岩の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I.図.

に、活動的大陸縁辺砂岩は CA & DA の領域に入る。これらの事実から、本論において設定された IIA, EIA および CA & DA の造構場領域は、それぞれ Bhatia (1983) の海洋性島弧、大陸性島弧および大陸性島弧の一部から活動的大陸縁辺にほぼ対応すると推定される。

一方、Bhatia (1983) の非活動的縁辺の砂岩は、IIA ~ CA & DA 領域からはずれるものが多く、基本的に CA & DA 領域の下方にプロットされる。これらの砂岩がこのような位置にプロットされる理由は、これに対応する砂岩が今回の検討試料に含まれないことやこれら砂岩のモード組成が不明なこともあり、現在のところ明かではない。

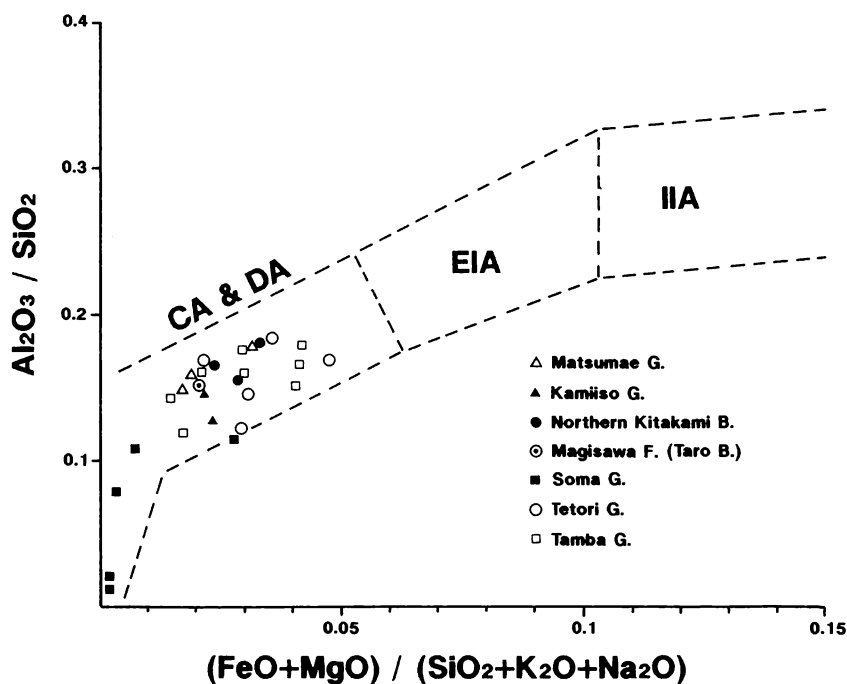
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I. 判別図からみた 日本列島の中・古生界砂岩

「変動帯の砂岩」総研において得られた分析結果を主に使用し、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I. 図上における日本の中・古生界砂岩の一般的特徴を検討する。ここでは、試料採集地域が限定され、分析試料数も少ないトリ阿斯系砂岩については言及をさけ、ペルム系砂岩、ジュラ系砂岩および白亜系砂岩について検討する。

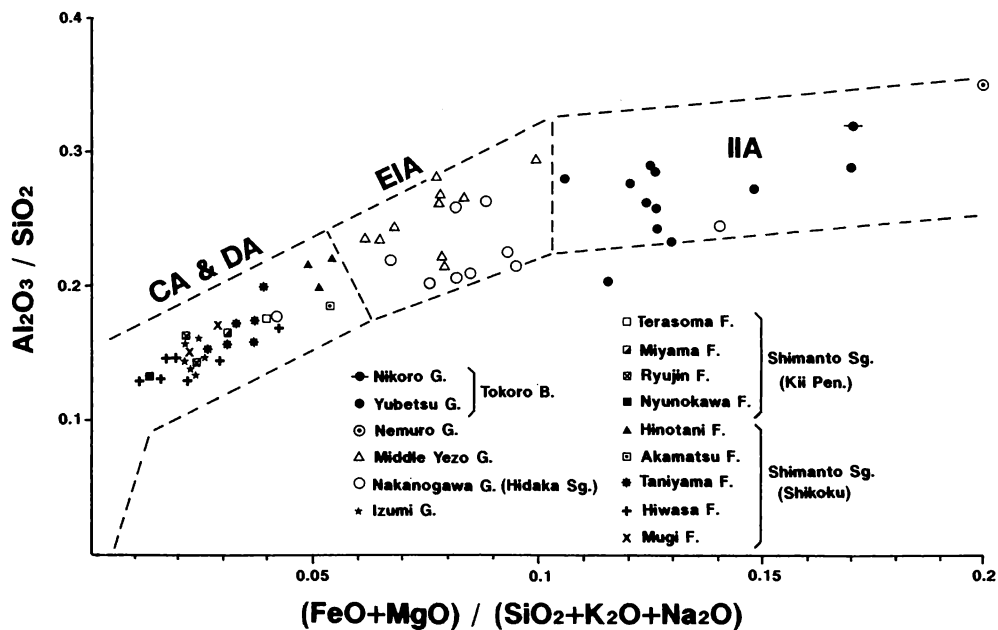
超丹波帯、舞鶴帯および九州秩父帯より採集されたペルム系砂岩の多くは、IIA 領域から EIA 領域に

かけて分布し、一部が CA & DA 領域の左端にプロットされる (第6図)。試料が採集された地層や地域間での組成上の相違は小さく、同一層中の砂岩が IIA 領域から CA & DA 領域の一部にわたる広い分散を示す傾向にある。また、西南日本の外帯と内帯における組成上の顕著な相違は認められない。判別図は、西南日本のペルム系砂岩の多くが未発達～発達した島弧に由来することを示唆している。超丹波帯や舞鶴帯、秩父帯のペルム系砂岩 (鈴木, 1987; 酒井, 1987; 木村, 1988; 楠・武蔵野, 1990) は、一部の地層中のものを除くと (たとえば、氷上層やその相当層)、一般に石英に比較的乏しく、中性～酸性の火山岩岩片に富む傾向にある。化学組成上の特徴は、中性から多少塩基性の火山岩が卓越している可能性を暗示しているが、モード組成から推定される後背地の状況と基本的に矛盾しない。

ジュラ系砂岩は、渡島帯、北部北上帯、榎木沢層 (田老帯)、相馬層群、手取層群、丹波層群から採集された。これらの砂岩は、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I. 図上においてかなりよい集中を示し、CA & DA 領域にプロットされる (第7図)。ジュラ系砂岩とペルム系砂岩の分布領域は重複せず、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I. 図上においてかなり明確に区別される。一方、渡島帯、北部北上帯、南部北上帯、丹波帯、秩父累帯南帯 (関東山地～九州) 等のジュラ系砂岩 (田近ほか, 1984; 木村ほ



第7図. 日本のジュラ系砂岩の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I.図.



第8図. 日本の白亜系砂岩の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -B.I.図.

か, 1989; 酒井, 1987; 楠・武蔵野, 1989; 滝沢ほか, 1990; Minoura, 1990; 酒井, 1991)の多くは, 石英長石質であり, 岩石片に乏しいといった共通の特徴を示している。ジュラ系砂岩が東北日本から西南日本内帯, さらに西南日本外帯にいたるまでかなり類似した化学組成やモード組成を示すことは注目に値し, 当時の古地理を考える上で極めて重要である。化学組成やモード組成に基づくと, これらの後背地は, 解析された火山弧であった可能性が大きい。

白亜系については, 仁頃層群, 湧別層群, 根室層群, 中部蝦夷層群, 日高累層群(中の川層群), 和泉層群, 四万十累層群(紀伊半島・四国)から採集した試料を使用した。これらの砂岩は, $Al_2O_3/SiO_2-B.I.$ 図上において IIA 領域から CA & DA 領域のほぼ全体にわたる広い分布を示す(第8図)。しかし, 試料が採集された地域や地層によって図中における占有領域が明瞭に異なる。まず, 湧別層群や根室層群の砂岩は, ほとんど IIA 領域にプロットされ, 未発達な島弧に由来すると推定される。この組成的特徴は, 白亜紀後期(〜古第三紀初期)におけるオホーツク地域の後背地の性格を表していると考えられる。次に, ユーラシア・プレート東縁に位置していたと推定される中部蝦夷層群や日高累層群の砂岩は, EIA 領域にプロットされ, より発達した島弧からなる後背地を示している。紀伊半島や四国の白亜系四万十累層群および和泉層群の砂岩は, 全体として CA & DA 領域にプロットされる。しかし, 試料が採集された地層によってプロットされる位置にわずかながら相違が認められる。四万十累層群についてみると, 地層が若くなるに従い, しいに CA & DA 領域中の左側に移動する傾向がある。四国における白亜系四万十累層群砂岩のモード組成(公文, 1981)を参考にすると, この変化傾向は, 白亜紀末に向かって酸性火山岩類が次第に増大することに起因すると推定される。いずれにしても, 四万十累層群や和泉層群は, 多量の酸性火山岩岩片を含んでおり, 酸性火山岩類が主体をなす火成弧からの供給を示している。中部蝦夷層群や日高累層群と同様にユーラシア・プレート東縁に位置していたとされる両(累)層群の砂岩は, 中部蝦夷層群や日高累層群のそれらとは組成的特徴を異にしている。この事実, ユーラシア・プレート東縁に位置した火成弧の発達程度に地域差が存在していた可能性を示している。

ま と め

火成弧に由来する砂岩の主成分化学組成上の特徴, 火成弧の発達程度・タイプの相違と砂岩の主成分化学組成との関連および日本の中・古生界砂岩の主成分化学組成上の特徴を以下に整理する。

1. 火成弧に由来する砂岩の化学組成上の特徴は, 一般に後背地の岩石構成に最も強く影響されている。
2. $Al_2O_3/SiO_2-B.I.$ 図を用いることにより, 砂岩の後背地となっていた火成弧の発達程度やタイプの相違をよく識別することができる。
3. 陸弧, 発達した島弧, 未発達の島弧と移行するに従って, 砂岩の Al_2O_3/SiO_2 値と B.I.値は増大する。
4. 解析された火山弧に由来する砂岩と陸弧に由来する砂岩とは, 化学組成上の特徴がよく類似している。両者を主成分化学組成から識別することは困難である。
5. 日本のペルム系砂岩の多くは, $Al_2O_3/SiO_2-B.I.$ 図上において未発達の島弧〜発達した島弧の領域に分類される。
6. 日本のジュラ系砂岩は, $Al_2O_3/SiO_2-B.I.$ 図上においてペルム系砂岩とは異なった位置にプロットされ, 陸弧〜解析された火山弧の領域に分類される。
7. 日本の白亜系砂岩は, $Al_2O_3/SiO_2-B.I.$ 図上において未発達の島弧から陸弧〜解析された火山弧にかけての広い領域にプロットされる。これは, 白亜紀における日本列島が地域により異なったプレート境界(オホーツク地塊の一部およびユーラシア・プレートの東縁部)に位置していたこと, およびユーラシア・プレート東縁部に存在した火成弧の発達程度に地域差があったこと等に由来すると推定される。

謝辞 本研究を進めるにあたり, 「変動帯の砂岩」総研の分担者ならびに協力者の諸氏にはさまざまなご教示をいただいた。また, 本論では, データの一部として「変動帯の砂岩」総研における大上和良博士, 武蔵野実博士, 足立 守博士, 宮本隆実博士, 川村信人博士ならびに鈴木茂之博士の化学分析値, および地質調査所の特別研究「深部鉱物資源ポテンシャルティー評価に関する研究」における分析値(紺谷吉弘博士により採集された試料の分析値を含

む)を使用させていただいた。以上の諸氏ならびに関係機関に感謝の意を表します。

文 献

- Bhatia, M.R., 1983, Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Jour. Geol.*, **91**, 611-649.
- Bhatia, M.R. and Crook, K.A.W., 1986, Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting of sedimentary basins. *Contrib. Min. Petrol.*, **92**, 181-193.
- Crook, K.A.W., 1974, Lithogenesis and geotectonics: the significance of compositional variations in flysch arenites(graywackes). In Dott, R.H. and Shaver, R.H., eds., *Modern and ancient geosynclinal sedimentation*. SEPM Spec. Publ., **19**, 304-310.
- Dickinson, W.R. and Suczek, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone compositions. *Bull. A.A. P.G.*, **63**, 82-86.
- Ingersoll, R.V. and Suczek, C.A., 1979, Petrology and provenance of Neogene sand from Nicobar and Bengal fans, DSDP sites 211 and 218. *Jour. Sed. Petrol.*, **49**, 1217-1228.
- 木村克己, 1988, 京都府綾部市西部の超丹波帯の地質と造構環境. 地質雑, **94**, 361-379.
- 木村克己・牧本 博・吉岡俊和, 1989, 綾部地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 104p.
- 公文富士夫, 1981, 徳島県南部の四万十累帯白亜系. 地質雑, **87**, 277-295.
- 楠 利夫・武蔵野実, 1989, 丹波帯の砂岩の特性. 地球科学, **43**, 75-84.
- 楠 利夫・武蔵野実, 1990, 超丹波帯・丹波帯および舞鶴帯のペルム-三畳系砂岩-モード組成とその比較-. 地球科学, **44**, 1-11.
- Mack, G.H., Thomas, W.A. and Horsey, C.A., 1983, Composition of Carboniferous sandstones and tectonic framework of southern Appalachian-Ouachita orogen. *Jour. Sed. Petrol.*, **53**, 931-946.
- Minoura, K., 1990, The pre-Cretaceous geology and tectonics of northern Kitakami region. In Ichikawa, K. et al., eds., *Pre-Cretaceous Terranes of Japan*. Publ. IGCP Proj. no. 224, 267-279.
- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. Jour. Sci.*, **274**, 321-335.
- Roser, B.P. and Korsch, R.J., 1986, Determination of tectonic setting of sandstone mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Jour. Geol.*, **94**, 635-650.
- 酒井 彰, 1987, 五日市地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 75p.
- 酒井 彰, 1991, 秩父帯南帯砂岩の地域的組成変化. 地質学論集, no. 38.
- Schwab, F.L., 1975, Framework mineralogy and chemical composition of continental margin-type sandstone. *Geology*, **3**, 487-490.
- 志岐常正, 1959, 舞鶴地帯に分布する二畳系の砂岩の 2・3 の性質, とくに maturity の問題について. 地球科学, **42**, 5-17.
- Shiki, T., 1961, Studies on sandstones in the Maizuru zone, Southwest Japan II: Graded bedding and mineral composition of sandstones of the Maizuru Group. *Mem. Coll. Sci., Univ. Kyoto, Ser. B*, **27**, 293-308.
- 鈴木茂之, 1987, 舞鶴帯東部の堆積史と造構史. 広島大学地学研究報告, **27**, 1-54.
- 滝沢文教・鎌田耕太郎・酒井 彰・久保和也, 1990, 登米地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 126p.
- 田近 淳・岩田圭示・黒沢邦彦, 1984, 西南北海道・島牧村大平山周辺の中生界. 地球科学, **38**, 397-407.
- 常呂帯研究グループ, 1984, 常呂帯仁頃層群の岩石構成と佐呂間層群基底の不整合. 地球科学, **38**, 408-419.

(要 旨)

君波和雄・公文富士夫・西村年晴・志岐常正, 1992, 火成弧に由来する砂岩の化学組成. 地質学論集, 38 号, 361-372. (Kiminami, K., Kumon, F., Nishimura, T. and Shiki, T., 1992, Chemical composition of sandstones from magmatic arcs. *Mem. Geol. Soc. Japan*, No.38, 361-372.)

火成弧に由来する日本列島の中・古生界砂岩の主成分化学組成を検討した。火成弧起源の砂岩の化学組成は, その源岩構成に強く規定されていると推定される。 $Al_2O_3/SiO_2 - (FeO + MgO)/(SiO_2 + K_2O + Na_2O)$ 図を用いることにより, これらの砂岩の供給源であった火成弧の発達程度やタイプの相違をよく識別することができる。未発達な島弧から発達した島弧, さらに陸弧へと移行するに従い, Al_2O_3/SiO_2 と $(FeO + MgO)/(SiO_2 + K_2O + Na_2O)$ は, 次第に増加する。解析された火山弧に由来すると推定される砂岩は, この図中において陸弧起源の砂岩とほぼ同じ領域を占める。日本列島のペルム系, ジュラ系および白亜系の砂岩をこの判別図にプロットし, これら各時代の後背地の性格を概観した。