

ザクロ石のインクルージョンおよび組成累帯構造に 基づく阿武隈変成岩の温度-圧力径路

廣 井 美 邦*

P-T Path of Abukuma Metamorphic Rocks Inferred from Inclusions and Compositional Zoning of Garnet

Yoshikuni HIROI *

Abstract

The Cretaceous Abukuma metamorphic terrane consists of the oceanic Gosaisyo Series overthrust onto the terrigenous Takanuki Series. Although the dominant mineralogy defines one of the classic andalusite-sillimanite-type progressive metamorphism, there are several lines of evidence suggesting an earlier higher -pressure history of the Takanuki Series. Garnet in the Takanuki pelitic rocks commonly shows textural sector zoning and preserves growth compositional zoning despite the high metamorphic grade, suggesting rapid and continuous changes in P-T conditions and a relatively short duration of high-temperature conditions. The common high grossular content of garnet interiors (up to *ca.* 30 mol%) overgrown by Ca-poor rims(less than 3 mol% grossular)in the pelitic rocks containing Al_2SiO_5 minerals, plagioclase, and quartz indicates high-pressure (> 12 kbar) and subsequent low-pressure (*ca.* 6 kbar) conditions. In addition, the occasional presence of low Ca cores with sillimanite-bearing plagioclase inclusions suggests earlier high-temperature and low-pressure conditions. Thus, the Abukuma (Takanuki) metamorphic rocks are inferred to have experienced rapid high-temperature loading and subsequent unloading, which may be in common with some Cretaceous metamorphic rocks in the circum-Pacific region.

Key words: Garnet inclusion, sector zoning, growth zoning, high-temperature loading, unloading, partial melting

キーワード: ザクロ石包有物, セクト構造, 成長累帯構造, 高温加圧, 減圧, 部分融解

1. はじめに

阿武隈変成帯は多くの研究者によって多様な視点から調査・研究されてきた本邦を代表する変成帯のひとつである。特に都城秋穂の一連の研究(たとえば, Miyashiro, 1958, 1961)により, 低

圧高温型(紅柱石-珪線石型)広域変成帯の世界標準となった。ところが後に, 宇留野勝敏や加納 博らの探查により, この変成帯から残晶状の藍晶石の産出が確認され(たとえば, Kano and Kuroda, 1968; 宇留野, 1979), 複変成論が強調された(たとえば, 総研阿武隈グループ, 1969)。すなわち,

* 千葉大学理学部地球科学教室

* Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Chiba University

より早期（先カンブリア時代？）に藍晶石を生じするような中圧型（藍晶石-珪線石型）の変成作用があり、そのずっと後（白亜紀）に別個の低压高温型（紅柱石-珪線石型）の変成作用があったとする説である。このほかに、阿武隈帯を西南日本の三波川帯の延長とする説も提案されたが（Faure *et al.*, 1986）、それは特に新しい岩石学的データに基づくものではなかった（Tagiri *et al.*, 1988）。なお、Miyashiro（1961）では、阿武隈帯は西南日本の領家帯の延長とされている。

残晶状の藍晶石の発見は、複変成論とは別に、個々の岩石の「温度-圧力-時間径路」という新しい概念を得るよい機会でもあった。すなわち、広域変成岩の圧力型を変成場の定常的な地温勾配の反映として一義的に捕らえるのではなく、地質学的な時間経過の中で最終的に獲得した特徴のひとつと考えるのである。そのような変成史の解析には時間軸の確立が不可欠である。しかしそれには技術的な困難が多く、現在でもまだ不十分な状況である。ところが阿武隈（竹貫）泥質片麻岩中のザクロ石斑状変晶には、それに準ずるほどの重要な情報が含まれている。それは多様な包有物の規則的な配列と組成累帯構造である。また高温変成作用と不可分の部分融解に関する情報も含まれている。これらの事項の多くについてはすでに報告しているので（廣井, 1990, 1993, 1997a, b; 廣井・岸, 1989; Hiroi and Kishi, 1989; Hiroi *et al.*, 1997, 1998）、小論では、既公表分に関しては簡単なレビューにとどめ、未公表のデータを提示して温度-圧力径路を求める際の基本的事項について若干の考察を行う。

II. 地質概説

阿武隈高原には白亜紀の花崗岩類が広く露出しているが（たとえば、柴田・内海, 1984; 柴田・田中, 1987; 田中・落合, 1988; 藤巻ほか, 1991）、その中-南部に変成岩類が比較的まとまって分布している（図1）。それが一般に阿武隈変成岩あるいは御斎所-竹貫変成岩と呼ばれるものである。阿武隈変成岩は、岩相構成から、御斎所変成岩と竹貫変成岩とに区分される。御斎所変成岩は主として

塩基性岩と珪質岩によって構成されており、少量の泥質岩・石灰質岩・超塩基性岩をともなう。塩基性岩には、比較的まれではあるが、枕状溶岩の形態が保存されていることがあり、そのようなものは主要・微量元素組成や同位体比などの点で海洋玄武岩に酷似している（野原・廣井, 1989; 佐藤・廣井, 1989）。また一部の珪質岩（変成チャート）からジュラ紀の放散虫化石が見出されている（Hiroi *et al.*, 1987）。このように、御斎所変成岩はジュラ紀海洋地殻の上部構成岩類起源と考えられる。しかし奇妙なことに、御斎所変成岩の低温部にはカルクアルカリ系列の安山岩質-流紋岩質岩が貫入し、被貫入岩とともに変成・変形作用を受けている（野原・廣井, 1989; 佐藤・廣井, 1989）。これは阿武隈変成帯の重要な特徴のひとつである。この変成石英斑岩中のジルコンの U-Pb SHRIMP 分析から、マグマからの晶出年代が 1.22 億年前であることが明らかにされ（廣井ほか, 1992; Hiroi *et al.*, 1998）、阿武隈変成作用の時期や期間が限定された。一方、竹貫変成岩は主として泥質ないし砂質岩によって構成されており、珪質岩・石灰質岩・塩基性-超塩基性岩をともなう。石灰質岩中にはシリカに乏しく、アルミニウムと鉄に富む岩石（小論では、ラテライト質変成岩とよぶ）がレンズ状の小岩塊として産出する。それはカルストボーキサイトのような風化残留土に由来するものと考えられる。このように、竹貫変成岩は主として陸源堆積物を原岩としているが、その形成時代は長い間不明であった。しかし竹貫泥質変成岩中のジルコンの U-Pb SHRIMP 分析によって、変成作用は白亜紀（約 1.1 億年前）の一度だけであることと、ジルコン粒内部に保存された碎屑粒部分から原生代中期（20-18 億年前）と古生代ないし中生代初期（4.9-2.0 億年前）の年代値が得られることの 2 点が明らかにされた（廣井ほか, 1992; Hiroi *et al.*, 1998）。したがって竹貫変成岩の原岩は日本列島に広く露出しているジュラ紀付加体の一部ということになる。

御斎所・竹貫両変成岩は地質構造の面でも対照的である。すなわち、御斎所変成岩がほぼ南北方向の軸の折りたたんだ褶曲構造を示すのに対して、

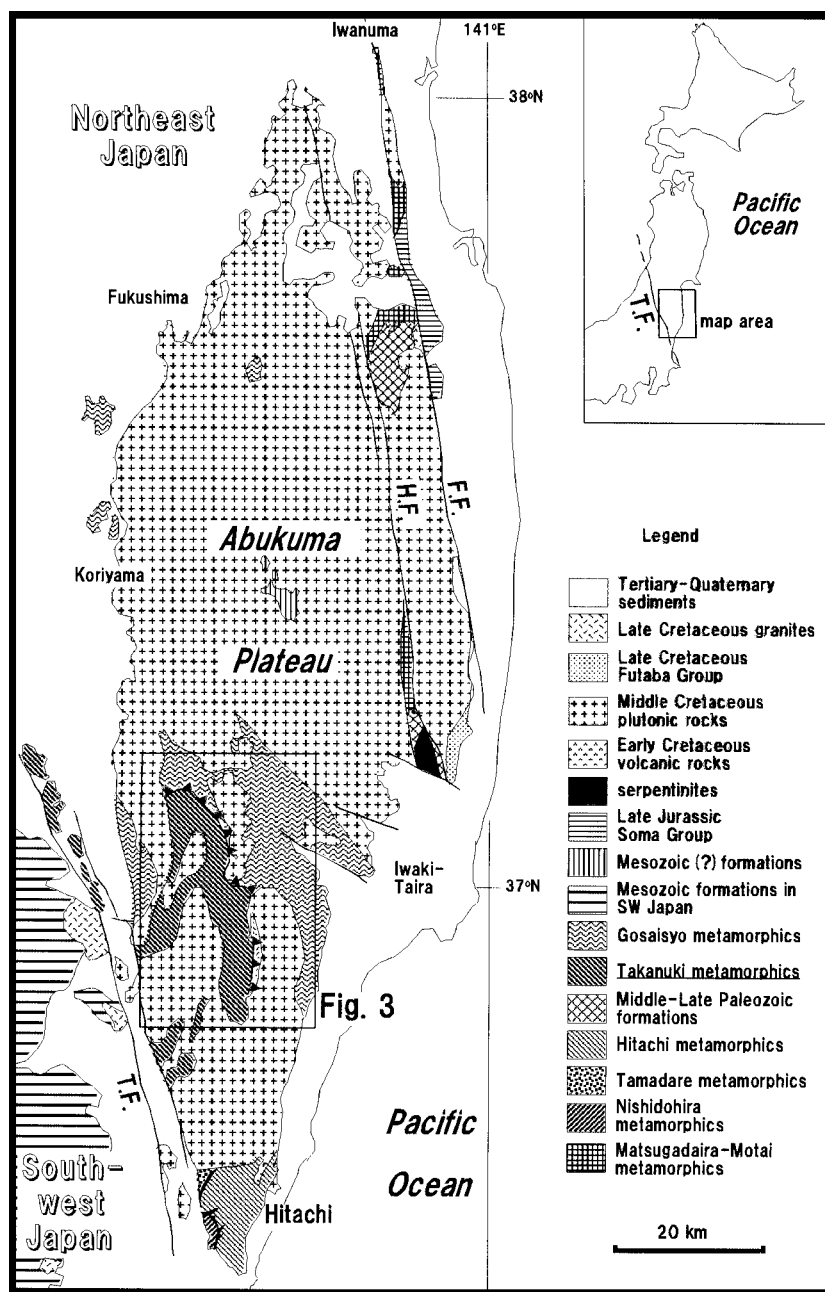


図1 阿武隈高原の地質概略図。

F.F. : 双葉断層, H.F. : 畑川断層, T.F. : 棚倉断層。先新第三紀の日本列島は左横ずれの棚倉断層によって東北日本と西南日本に分けられる。

Fig. 1 Generalized geological map of Abukuma Plateau.

F.F. : Futaba Fault, H.F. : Hatagawa Fault, T.F. : Tanakura Fault. Pre-Neogene Japan is divided into Northeast Japan and Southwest Japan by the left-lateral strike-slip Tanakura Fault.

竹貫変成岩はゆるやかな半ドーム構造を示す。詳細な地質調査と岩石ファブリックの解析から、御斎所変成岩が竹貫変成岩に衝上したと推定されている（たとえば、梅村，1979；石川・大槻，1990）。両者の境界付近に超塩基性岩の小岩体が点々と産出することは注目に値する。

御斎所-竹貫変成岩に対する変成分帯は Gorai (1944) や Miyashiro (1958, 1961) によってなされ、東から西に向かって緑色片岩相から角閃岩相へと変成度がしだいに上昇することが明らかにされている。したがって、広域変成作用の温度構造と地質構造とは不調和的である。また、Shido (1958) や Tagiri *et al.* (1993) により、特に東部の低変成度域において、花崗岩体による接触変成作用が広域変成作用に重複していることが明らかにされている。

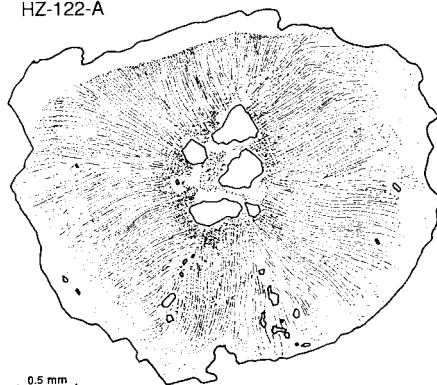
III．竹貫泥質片麻岩中のザクロ石

1) 包有物

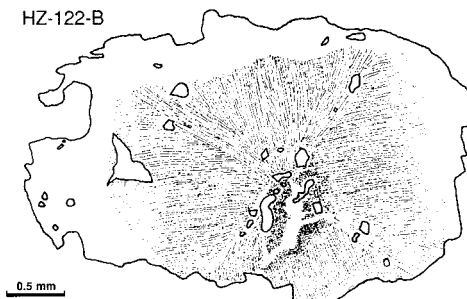
竹貫泥質片麻岩の一般的な鉱物組合せは、珪線石 + 堇青石 + ザクロ石 + 黒雲母 + 斜長石 + カリ長石 + 石英 + イルメナイト + ジルコン + 燐灰石 + モナザイト + ゼノタイム + 石墨 + 黄鉄鉱 + 磁硫鉄鉱である。このほかにルチルと残晶状の藍晶石や十字石，コランダムが斜長石とザクロ石中に包有されて少量出現することがある。またヘルシナイトも藍晶石や珪線石にともなわれて斜長石や堇青石中に少量出現することがある。紅柱石，緑泥石，白雲母などはよく見られる後退鉱物である。

ザクロ石は数 mm までの大きさの斑状変晶として出現するが、堇青石や黒雲母，斜長石などによってさまざまな程度に置換された残晶状であることが多い（たとえば、加納，2003）。そのため、置換の程度が低く、かつ、結晶の中心を切ったザクロ石粒を観察するためには、同一試料から多数の薄片を作成しなければならない。図 2 に示した 3 粒のザクロ石は大作産の試料 HZ122 から 300 枚以上の薄片を作成して得られたものの一部である。その結果、竹貫泥質片麻岩中のザクロ石には次のような注目すべき特徴があることが明らかになった。

HZ-122-A



HZ-122-B



HZ-122-C



図 2 竹貫泥質片麻岩（試料番号 HZ122）中のセクト構造を示すザクロ石 3 粒（HZ122-A, B, C）のスケッチ。

HZ122-C の顕微鏡写真を図 4 に示す。また、これらのザクロ石粒の元素マップを口絵 3 と図 5 に示す。

Fig. 2 Sketches of texturally sector-zoned garnets HZ122-A, HZ122-B and HZ122-C in the same Takanuki pelitic gneiss (Sp. HZ122). Photomicrograph of HZ122-C is shown in Fig. 4. Compositional color maps of these garnets are shown in Pictorial 3 and Fig. 5.

- (1) 細粒包有物（少なくとも一部は針状のルチルである）の規則的な配列による組織的なセクト構造が見られる（図2）。そのようなザクロ石は竹貫変成岩分布域全域に出現しており、特定の火成岩体の周辺等に限定されたものではない（図3）。
- (2) セクト構造を示す細粒の包有物とは別に、もっと粗粒の十字石やコランダム、珪線石、黒雲母、斜長石、石英、燐灰石、モナザイト等も包有されている。
- (3) 特に注目に値するのは、包有された斜長石の一部が自形的であり、マトリックスの斜長石よりもずっとCaに富む（また、ときにはKにも富む）ことである（たとえば、Hiroi *et al.*, 1998; 加納, 2003）。その一部は火成岩中の斜長石のような反復累帯構造（oscillatory zoning）を示すことがある（Hiroi *et al.*, 1998 の Fig. 4d）。包有斜長石のCa含有量はその周辺のザクロ石のCa含有量と正の相関を示す（廣井, 1997b; 加納, 2003）。すなわち、ホストのザクロ石がカルシックであれば包有斜長石もカルシックなのである。これは竹貫泥質片麻岩が部分融解（メルトとともにカルシックな斜長石やザクロ石などを生成する非調和融解反応が進行）したことによるものと考えられる（廣井, 1997a, b）。
- (4) 燐灰石やモナザイトなどのリン酸塩鉱物の包有物はザクロ石結晶中で偏在している。一般に、これらの鉱物は組織的なセクト構造が見られない部分に出現する（廣井, 1997a, b）。後述するように、リン酸塩鉱物が包有された部分とそうでない部分とではホストのザクロ石のP含有量も大きく異なる。これもまた竹貫泥質片麻岩が部分融解したことによるものと考えられる（廣井, 1997a, b; Hiroi *et al.*, 1997）。

2) 化学組成および組成累帯構造

珪線石 + カリ長石の組合せが安定な高変成度にもかかわらず、竹貫泥質片麻岩中のザクロ石には顕著な組成累帯構造（特に、Mn がコアからリムに向かって減少する成長累帯構造）が見られる。また組織的なセクト構造に加えて、組成的なセクト構造が見られる場合もある（図3）。竹貫泥質片

麻岩中のザクロ石の化学組成および組成累帯構造には次のような注目すべき特徴がある。ただし、加納（2003）も指摘しているように、結晶成長後の改変の効果は無視できない。そこで、特に黒雲母による部分的な置換の効果を検証するために詳細に分析したのが、図4と口絵3に示したHZ122-Cのザクロ石粒である。このザクロ石粒では、外側からばかりでなく、割れ目に沿っても黒雲母による置換が進んでいる。

- (1) グロッシュラー成分（以下 grs と記述する）含有量は、結晶のリム付近では3モル%以下と低い、内部では約30モル%に達するほど高いことが多い（Hiroi *et al.*, 1998）。一般に、これほどの高い grs 含有量を示すザクロ石は、全岩化学組成でCaに富む塩基性岩や石灰珪質岩中に産出する。ところが竹貫泥質片麻岩の総化学組成は、一部のものを除くと平均的な泥質岩とほとんど同じで、低いCa含有量である（Hiroi *et al.*, 1998）。多くの結晶粒で、grs 含有量が高くなるのは中心部であるが、一部のものではもっと複雑な組成変化が見られる。特に、中心部で低く、リムに向かって急上昇し、再び低下するような変化を示すものがあり（たとえば、Hiroi *et al.* (1998) の Fig. 4 と Fig. 5 の HZ122-A など）、後述するように、圧力変化の目安として重要である。
- (2) ザクロ石結晶中の同じ席に入る主要元素（Fe, Mg, Mn, Ca）に関する累帯構造のパターンは必ずしも同じではなく、体積拡散速度が元素によって異なることを示している（口絵3）。
- (3) 黒雲母などによって部分的に置換された場合、廣井ほか（1995）や坂野・廣井（1998）などにより相対的に体積拡散速度が遅いことが明らかにされたCaでさえも、その累帯構造は残存粒の形態に大きく支配されている（口絵3）。
- (4) P に関しても明瞭な累帯構造がある（廣井, 1997a, b; Hiroi *et al.*, 1997）。一般に、P は結晶の内部で乏しく、外縁部で富む（口絵3, 図5）。
- (5) ただし、結晶の内部であっても、割れ目に沿って他の鉱物による置換が進んだ場合には、局所

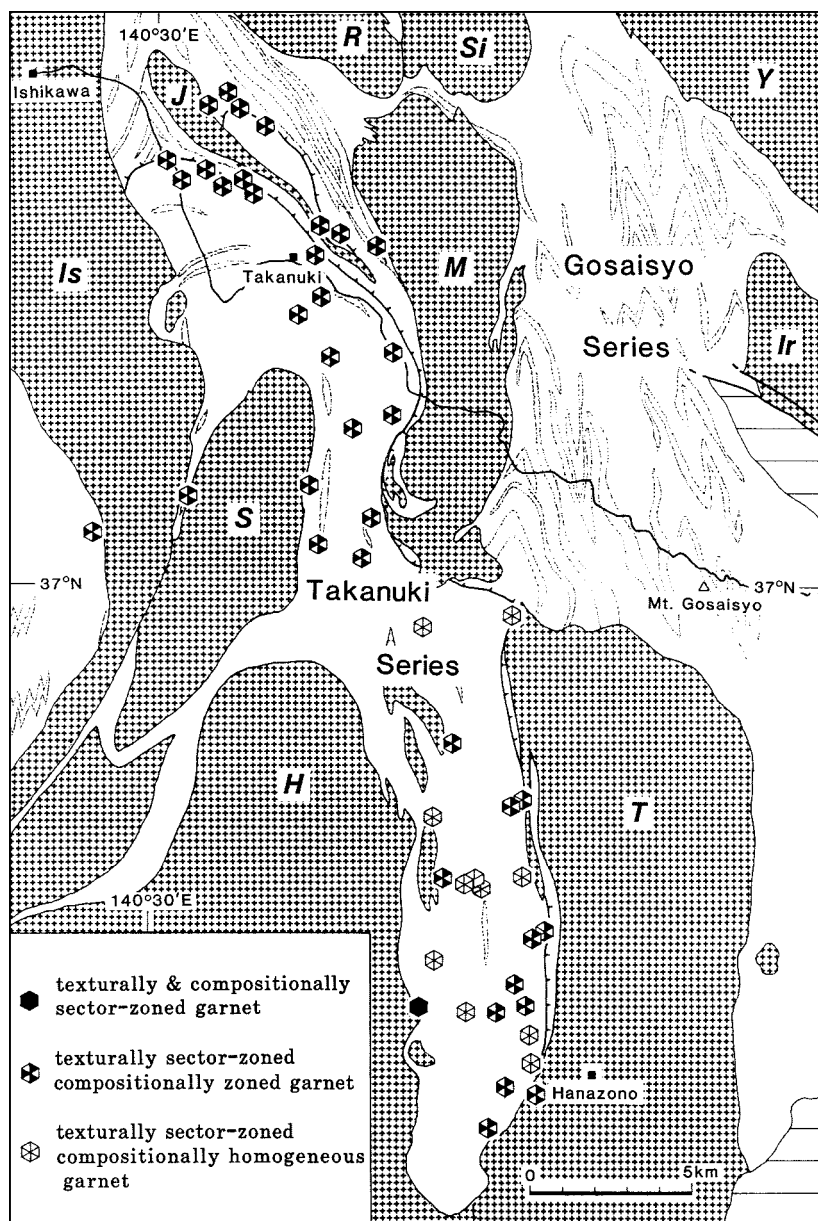


図 3 泥質片麻岩中の組織的および組成的なセクト構造を示すザクロ石の広域分布図。
 H: 埴古期花崗岩体, Ir: 入遠野新期花崗岩体, Is: 石川古期花崗岩体, M: 宮本古期花崗岩体,
 R: 論田新期花崗岩体, S: 鮫川古期花崗岩体, Si: 柴山新期花崗岩体, Y: 好間川新期花崗岩体
 Fig. 3 Map showing regional occurrence of texturally and compositionally sector-zoned
 garnet in plitic gneisses.
 H: Hanawa late-kinematic (older) granitic mass, Ir: Iritono post-kinematic (younger) granitic
 mass, Is: Ishikawa late-kinematic granitic mass, M: Miyamoto late-kinematic granitic mass,
 R: Ronden post-kinematic granitic mass, S: Samegawa late-kinematic granitic mass, Si:
 Shibayama post-kinematic granitic mass, Y: Yoshimagawa post-kinematic granitic mass

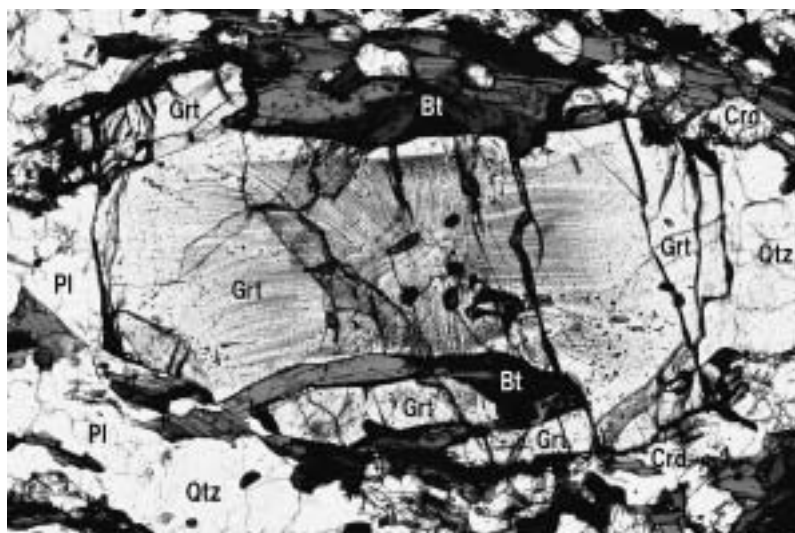


図 4 大作産の竹貫泥質片麻岩（試料番号 HZ122）中のセクト構造を示すザクロ石（HZ122-C）の顕微鏡写真。
黒雲母（Bt）がザクロ石（Grt）を外側からと割れ目に沿って置換している。堇青石（Crd）、斜長石（Pl）、石英（Qtz）も出現している。

Fig. 4 Photomicrograph of sector-zoned garnet HZ122-C in Takauki pelitic gneiss (Sp. HZ122) from Osaku.
Biotite (Bt) occurs replacing garnet (Grt) from outside and along cracks. Cordierite (Crd), plagioclase (Pl) and quartz (Qtz) are also present.

的に P に富むようになる（口絵 3、図 5）。

- (6) 重希土類元素（ここでは Er、Yb のほかに Y を含む）が P に乏しい結晶の内部に濃集している。累帯構造のパターンは元素によって異なり（口絵 3、図 5）、それらの地球化学的挙動が必ずしも同じではないことを示している。
- (7) 結晶の外側や割れ目に沿って黒雲母化が進んでいる場合でも、重希土類元素の累帯構造は自形的で、主要元素に比べて体積拡散速度が著しく遅いことを示唆している（口絵 3、図 5）。
- (8) しかし、そのような重希土類元素でさえも、割れ目に沿って他の鉱物による置換が進んだ場合には、局所的に濃度が改変されることがある（口絵 3、図 5：特に口絵 3 では、P の濃集にともない Yb が乏しくなっているのがわかる）。
- (9) 重希土類元素の濃集部が黒雲母によって置換された場合、重希土類元素は微細なリン酸塩鉱物となってほぼその場に留まることがある（口

絵 3）

IV．阿武隈変成作用の温度-圧力経路

阿武隈変成岩は低圧高温型広域変成岩の世界標準であるが、それは最終的に獲得した特徴である。残晶状の藍晶石の出現で示唆されるように、その生成過程のある時期にはもっと高圧条件下におかれたらしい。上述したザクロ石の種々の特徴から、それが急激な高温加圧によるものであることが分かる。それについてもう少し詳しく考察しよう。

細粒包有物の連続的な配列は、(1) 等軸晶系に属するザクロ石がセクト構造を形成しながら成長するような特殊な環境（この場合、変成条件の急変の可能性がもっとも高い）が生じたことと、(2) そのような変成条件の変化は時間的な途切れのない、連続的なものであったことを示している。また成長累帯構造の保存は、高温条件の継続時間が比較的短かったことを示している。高温条件の継

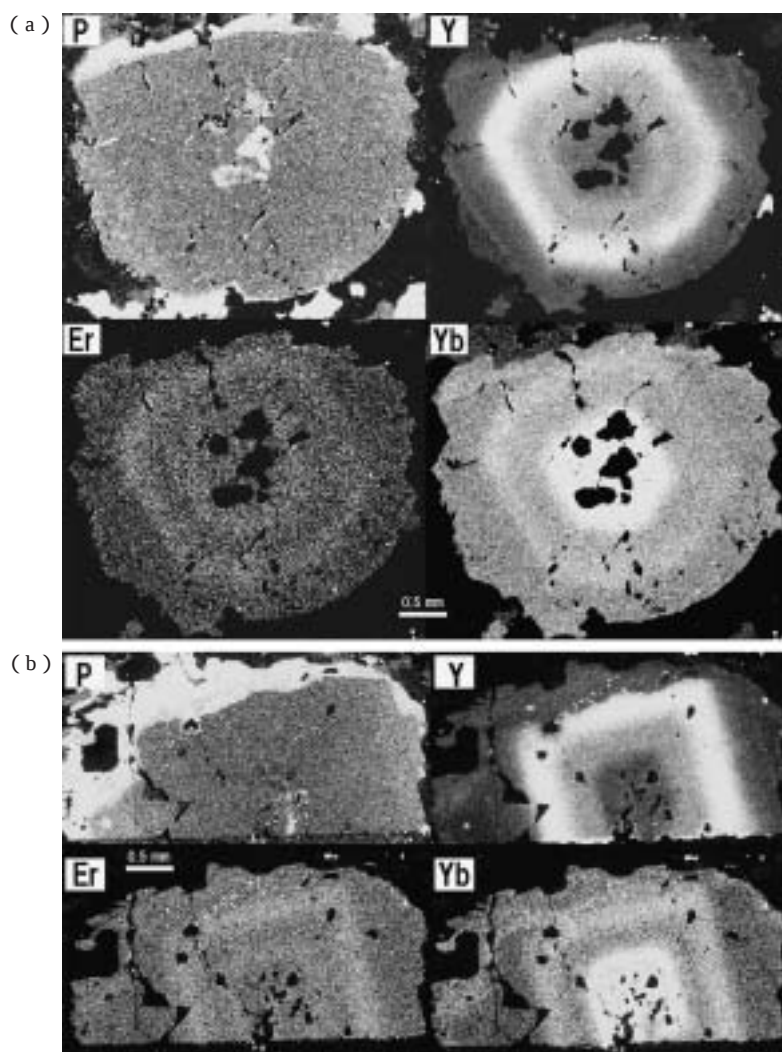
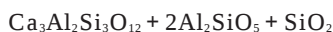


図 5 竹貫泥質片麻岩（試料 HZ122）中の組織的なセクト構造を示すザクロ石の微量元素（P，Y，Er，Yb）に関する組成像．a）HZ122-A，b）HZ122-B

Fig. 5 Compositional maps of texturally sector-zoned garnets in Takanuki pelitic gneiss (Sp. HZ122) for trace elements P, Y, Er, and Yb. a) HZ122-A, b) HZ122-B

続時間がどれほど短かったのかを定量的に見積もるためには，多成分系ザクロ石結晶内での各元素の体積拡散の機構や速度などの基礎的なデータが必要であるが，それらはまだ十分な精度をもっていない。また成長累帯構造の組成変化から，変成条件の変化を読み取ることができるが，その際，現在見られる累帯構造が初生的な成長累帯構造か

らどの程度改変されているのかを見積もる必要がある。大部分のザクロ石粒で，主要成分に関する成長累帯構造は多かれ少なかれ改変されている（たとえば，加納，2003）。しかし，ここで特に注目するのは Al_2SiO_5 鉱物，斜長石，石英と共存するザクロ石の grs 含有量で，変成作用の温度・圧力条件の変化に対して敏感に変わるためである。



ザクロ石中の grs 成分 + 藍晶石または珪線石 + 石英



斜長石中の an 成分

主要成分の中で Ca は相対的に体積拡散速度が遅い(たとえば, 廣井ほか, 1995; 坂野・廣井, 1998)。また同一試料から多数の薄片を作成したり, 多数のザクロ石粒を破壊しないで母岩から分離するなどの選別をすると, 初生的な成長累帯構造を比較的良好に保存したものを得ることができる場合もある(たとえば, Hiroi *et al.*, 1998 の Fig. 5d の HZ13B-10)。それらを吟味すると, grs 含有量にはもともと上限があり, それがほぼ 30 モル%であるという結論に達する(HZ13B-10 では, Mn がベル型の累帯プロフィールを示すのに対して, Ca は結晶の内部でほぼ一定の値をもつ)。この約 30 モル%に達する grs 成分は, 上述したように, 泥質変成岩中のものとしては異常に高い。ただし, その高い grs 含有ザクロ石と共生していたと考えられる斜長石も an 成分に富んでいる。ところが包有斜長石の an 含有量も粒ごとに, また同一粒でも部分によって異なる。これも, 少なくとも一部は, 結晶成長後の改変のためと考えられる。したがって, 高 grs ザクロ石-高 an 斜長石の確実に初生的なペアを決定しえないのが実情である。それでも, 上記の反応を利用した圧力計(たとえば, Kozioł, 1989)から, 700–800 で 10 kbar よりもずっと高い値が得られる。さらに重要なものが, まれではあるが grs 成分がコアからリムに向かって低→高→低と変化しているものがあることである。特に Hiroi and Kishi (1989), 廣井 (1993), Hiroi *et al.* (1998) で記述された HZ122-A の中心部には, 珪線石を包有した比較的 an 成分に乏しい斜長石包有物がある。この結晶粒の grs 含有量はもっとも高いところで 17 モル%程度である。元素マッピングによる Ca の累帯構造からも, 後生的な改変は明らかである。問題は, 中心部で grs が低いことが初生的なものなのか後生的なものなのかということである。上述したように, 重希土類元素の体積拡散は主要元素に比べて著し

く遅い。しかし他の鉱物による部分的置換などの後生的な効果が特に大きい場合は, P とともに重希土類元素の濃度や分布パターンも改変される(たとえば, HZ122-B や HZ122-C)。一方, HZ122-A の場合, 結晶中心部の珪線石を含む低 an 斜長石の周りで, P や重希土類元素の濃度や分布パターンに特に異常は見られない(図 5)。したがって HZ122-A の grs 含有量がコアからリムに向かって低→高→低と変化するパターン(grs 含有量の絶対値ではない)は結晶成長後の改変によるものとは考えられない。そうすると, 変成条件が珪線石の安定な高温で比較的低圧の条件から部分融解が進行するほどの高温で高圧の条件に急変し(この時, 藍晶石の安定領域に入った), さらに引き続いて高温のまま減圧したことを示唆している(図 6)。すなわち, 高温での急激な加圧と減圧である。なお, 加納 (2003) が記載したいくつかの例(Ga 型と分類されている)も, この HZ122-A と同様のものと考えられるが, P や重希土類元素のマッピングで検証しなければならない。

阿武隈帯を特徴づける事項のひとつに, 海洋地殻的な御斎所変成岩にカルクアルカリ系列の火成岩が貫入し, とともに変形・変成していることがある。これは阿武隈変成作用の前からカルクアルカリ系列の火成作用があったことを示しているが, そのマグマの結晶化年代は約 122 Ma である。広域変成岩に重複熱変成効果を及ぼした膨大な量の花崗岩類の産出も阿武隈帯を特徴づけることから, 阿武隈変成・変形作用はカルクアルカリ岩系の火成作用と密接な関係があり, その間, 図 6 に示したような変成条件の急変があったことになる。それは 700 以上の高温条件下で 5 kbar 以上の加圧があり, 引き続いてそれ以上の減圧があったということである。この図には SHRIMP による年代測定の結果なども示してあるが, 計 10 kbar 以上の圧力変化が約 1000 万年以内におこったことになる。

ところで驚くべきことに, 環太平洋域の下記の各地から, ほぼ同時代(白亜紀)に阿武隈変成岩と同様の温度-圧力径路をたどった岩石が報告されている。

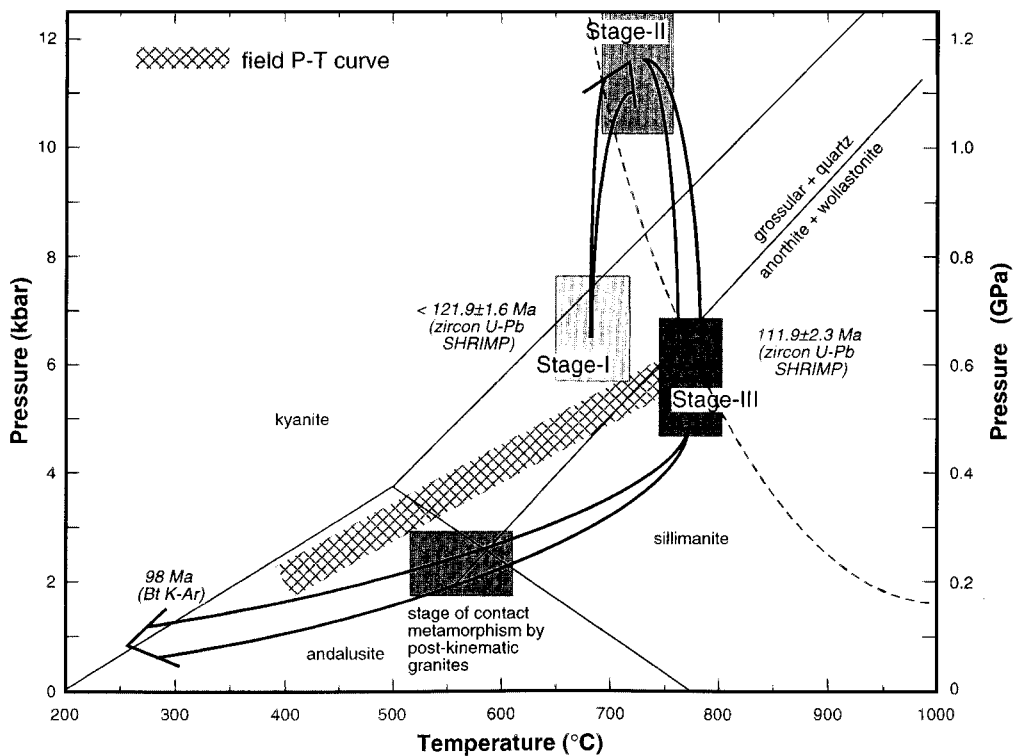


図 6 阿武隈（竹貫）変成岩の温度-圧力径路を示す温度-圧力図．
部分融解反応曲線（破線），地球年代学的データ（柴田・内海，1983; Hiroi *et al.*, 1998），地域の
温度-圧力曲線も示した．

Fig. 6 P-T diagram showing P-T path followed by Abukuma (Takanuki) metamorphic rocks.

Partial melting reaction curve (broken line), geochronological data (Shibata and Uchiumi, 1983; Hiroi *et al.*, 1998) and a field P-T curve are also shown.

- (1) ニュージーランド南西部のフィヨルドランド (Bradshaw, 1989; Brown, 1996)
- (2) 北米大陸西部，ワシントン州のカスケード山脈 (Whitney, 1992; Brown and Walker, 1993; Miller *et al.*, 1993)
- (3) アラスカのシェアード半島 (Patrick and Lieberman, 1988)

Hiroi *et al.* (1998) は，海洋地殻的な御斎所変成岩がジュラ紀付加体起源の竹貫変成岩に衝突したのは一種のオブダクションで，それは海嶺の海溝への沈み込みによるのではないかと考えた。環太平洋域では，現在，南米の西岸などいくつかの地点で海嶺が海溝に沈み込んでいることが知られ

ている（たとえば，Cande *et al.*, 1987）。地質時代を通してみると，環太平洋域では海嶺の沈み込みが繰り返りあったはずで，それが主要な造山運動（あるいはその転換期）に対応しているといわれている（たとえば，Uyeda and Miyashiro, 1974; 磯崎・丸山，1991）。

一方 Brown (1996) は，フィヨルドランドやカスケード山脈での高温加圧現象は膨大な量のマグマの荷重によるものとしている。阿武隈でも広域変成・変形作用とカルクアルカリ系列の火成活動は密接な関係にある。短期間のうちに膨大な量のマグマを生み出すためには巨大な熱源が必要であるが，海嶺の沈み込みはそれを可能にする。ある

いはもっと別の特殊なテクトニクスが白亜紀に環太平洋域であったのかもしれない。

V. おわりに

ザクロ石中の未同定の微細包有物に対しては、レーザーラマン法などの新しい手法を導入すべきであろう。そうすると「超高压変成作用」を指示する鉱物が見出されるかもしれない。

構成元素の体積拡散によってザクロ石の成長累帯構造が改変されるとき、元素によって挙動が大きく異なることが示された。逆にそれを利用して、少なくとも累帯構造のパターンが初生的なもののか後生的なもののかを判断することができるが、慎重な検討が必要である。

ザクロ石を後退的に置換した黒雲母中に、ザクロ石中に濃集していた重希土類元素が、それに富むリン酸塩鉱物としてほぼ同じ場所に留まっている例が見出された。これは後退的な鉱物置換の機構やその際の元素の挙動を解明する上で重要である。

変成史をより綿密に解明するためには、多様な産状のジルコンやモナザイトの SHRIMP 分析や CHIME 法による年代測定が望まれる。特に、累帯構造を示すザクロ石内外のジルコンやモナザイト粒の詳細な測定が重要である。

謝 辞

千葉大学の学生として阿武隈研究に携わった小白井亮一、岸 智、野原 壮、佐藤和彦、後藤淳一の各氏には多量の貴重なデータを提供していただいた。日本電子(株)の近藤裕而氏にはザクロ石の元素マッピングで大変お世話になった。坂野昇平・京都大学名誉教授、田切美智雄・茨城大学教授、加納 博・秋田大学名誉教授には日頃より種々の議論していただいた。以上の方々に深謝する。

文 献

坂野昇平・廣井美邦 (1998) 鉱物に記録された造山運動の履歴. 科学, **68**, 651-660.
Bradshaw, J.Y. (1989) Origin and metamorphic history of an Early Cretaceous polybaric granulite terrain, Fiordland, southwest New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **103**, 346-360.

Brown, E.H. (1996) High-pressure metamorphism caused by magma loading in Fiordland, New Zealand. *J. Metamorphic Geol.*, **14**, 441-452.
Brown, E.H. and Walker, N.W. (1993) A magma-loading model for Barrovian metamorphism in the southeast Coast Plutonic Complex, British Columbia and Washington. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **105**, 479-500.
Cande, S.C., Leslie, R.B., Parra, J.C. and Hobart, M. (1987) Interaction between the Chile ridge and Chile trench: Geophysical and geothermal evidence. *J. Geophys. Res.*, **92**, 495-520.
Faure, M., Lalevee, F., Gusokujima, Y., Iiyama, J. and Cadet, J. (1986) The pre-Cretaceous deep-seated tectonics of the Abukuma massif and its place in the structural framework of Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **77**, 384-398.
Gorai, M. (1944) Petrological study on the plutonic rocks of Gosaisho-Takanuki district, southern Abukuma Plateau. *Mem. Fac. Sci. Kyushu Imp. Univ., Ser. D*, **2**, 239-321.
藤巻宏和・宮嶋 敏・青木謙一郎 (1991) 南部阿武隈山地の宮本複合岩体の Rb-Sr 年代. 岩鉱, **86**, 216-225.
廣井美邦 (1990) 阿武隈変成帯, 横川の同一露頭に見られる高压および低压で安定な鉱物合せ—変成史の解析. 岩鉱, **85**, 207-222.
廣井美邦 (1993) 高度変成岩の P-T-t path と中-下部地殻における造構過程: 阿武隈とスリランカの例. 月刊地球, **15**, 140-147.
廣井美邦 (1997a) 高度変成岩の部分融解と希土類元素の挙動について. 月刊地球, **19**, 92-96.
廣井美邦 (1997b) 変成岩岩石学的手法による岩石の部分融解の研究. 地学雑誌, **106**, 707-713.
廣井美邦・岸 智 (1989) 阿武隈変成帯, 竹貫泥質片麻岩中の十字石と藍晶石, 岩鉱, **84**, 141-151.
Hiroi, Y. and Kish, S. (1989) P-T evolution of Abukuma metamorphic rocks in Northeast Japan, metamorphic evidence for oceanic crust obduction. In Daly, J.S., Cliff, R.A. and Yardley, B.W. D. eds.: *Evolution of Metamorphic Belts*. Geol. Soc. London, Special Pub. (43), 481-486.
Hiroi, Y., Yokose M., Oba, T., Kishi, S., Nohara, T. and Yao, A. (1987) Discovery of Jurassic radiolaria from acmite-rhodonite-bearing metachert of the Gosaisyo metamorphic rocks in the Abukuma, terrane, Northeastern Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **93**, 445-448.
廣井美邦・Fanning, C.・Ellis, D.J.・仲井 豊・本吉洋一・白石和行 (1992) 阿武隈変成岩中のジルコンのイオンマイクロプローブ年代値とその意味. 日本地質学会第 99 年学術大会講演要旨, 472.
廣井美邦・Seneviratne, L.K.・本吉洋一・Ellis, D.J.・近藤裕而 (1995) スリランカ産泥質グラニュライト中のザクロ石の組成累帯構造: 主要 4 元素 (Fe, Mg, Mn, Ca). 地質学雑誌, **101**, 口絵 VII-VIII.
Hiroi, Y., Motoyoshi, Y., Ellis, D.J., Shiraishi, K.

- and Kondo, Y. (1997) The significance of phosphorus zonation in garnet from high grade pelitic rocks: A new indicator of partial melting. *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*. Terra Antarctica Publication, 73–77.
- Hiroi, Y., Kishi, S., Nohara, T., Sato, K. and Goto, J. (1998) Cretaceous high-temperature rapid loading and unloading in the Abukuma metamorphic terrane, Japan. *J. Metamorphic Geol.*, **16**, 67–81.
- 石川正弘・大槻窟四郎 (1990) 御斎所変成帯の褶曲と左横ずれ塑性せん断変形. 地質学雑誌, **96**, 719–730.
- 磯崎行雄・丸山茂徳 (1991) 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地体構造区分. 地学雑誌, **100**, 697–761.
- 加納 博 (2003) 阿武隈山地竹貫変成岩のセクターザクロ石—記載と考察—. 秋田大学工学資源学部「鉱業博物館」, 第36号, 3–30.
- Kano, H. and Kuroda, Y. (1968) On the occurrence of staurolite and kyanite from the Abukuma Plateau, northeastern Japan. *Proc. Japan Acad.*, **44**, 77–82.
- Koziol, A.M. (1989) Recalibration of the garnet-plagioclase- Al_2SiO_5 -quartz (GASP) geobarometer and applications to natural parageneses. *EOS*, **70**, 493.
- Miller, R.B., Brown, E.H., McShane, D.P. and Whitney, D.L. (1993) Intra-arc crustal loading and its tectonic implications, North Cascades crystalline core, Washington and British Columbia. *Geology*, **21**, 55–258.
- Miyashiro, A. (1958) Regional metamorphism of the Gosaisyo-Takanuki district in the central Abukuma Plateau. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. 2*, **11**, 219–272.
- Miyashiro, A. (1961) Evolution of metamorphic belts. *J. Petrol.*, **2**, 277–311.
- 野原 壮・廣井美邦 (1989) 阿武隈変成帯, 御斎所変成岩類の塩基性岩の源岩について (主要, 微量元素, 及びREEでの考察). 岩鉱, **84**, 118.
- Patrick, B.E. and Lieberman, J.E. (1988) Thermal overprint on blueschists of the Seward Peninsula: The Lepontine in Alaska. *Geology*, **16**, 1100–1103.
- 佐藤和彦・廣井美邦 (1989) Sr, Nd 同位体からみた阿武隈変成帯御斎所変成岩中の塩基性岩と珧長質岩脈. 平成元年度三鉱学会講演要旨集, 70.
- 柴田 賢・内海 茂 (1984) 南部阿武隈山地花崗岩類の角閃石 K-Ar 年代. 岩鉱, **78**, 405–410.
- 柴田 賢・田中 剛 (1987) Nd・Sr 同位体からみた阿武隈山地石川複合岩体の形成年代. 岩鉱, **82**, 433–440.
- Shido, F. (1958) Plutonic and metamorphic rocks of the Nakoso and Iritono districts in the central Abukuma Plateau. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. 2*, **11**, 131–217.
- 総研阿武隈グループ (1969) 阿武隈高原の複変成作用, 地質学論集, **4**, 83–98.
- Tagiri, M., Hiroi, Y. and Banno, S. (1988) Comments on the paper “The pre-Cretaceous deep-seated tectonics of the Abukuma massif and its place in the structural framework of Japan” by M. Faure, F. Lalevee, Y. Gusokujima, J.-T. Iiyama and J.-P. Cadet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **87**, 362–363.
- Tagiri, M., Sato, H., Matsumura, E. and Nemoto, H. (1993) Late Mesozoic low-P/high-T metamorphism preceding emplacement of Cretaceous granitic rocks in the Gosaisyo-Takanuki district, Abukuma metamorphic belt. *The Island Arc*, **3**, 152–169.
- 田中久雄・落合清茂 (1988) 南部阿武隈山地, 塙深成岩体と周辺の変成岩類について. 岩鉱, **83**, 318–331.
- 梅村隼夫 (1979) 御斎所・竹貫地域の造構運動, 特に御斎所・竹貫変成岩の構造的縫合について. 日本列島の基盤: 加納 博教授記念論文集. 491–511.
- 宇留野勝敏 (1979) 阿武隈山地の川砂中の十字石・藍晶石ほか2, 3の耐酸重鉱物. 日本列島の基盤: 加納博教授記念論文集. 407–429.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974) Plate tectonics and the Japanese islands. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **85**, 1159–1170.
- Whitney, D.L. (1992) High-pressure metamorphism in the Western Cordillera of North America: An example from the Skagit Gneiss, North Cascades. *J. Metamorphic Geol.*, **10**, 71–85.

(2004年7月6日受付, 2004年9月9日受理)