2012 年の地質鉱物関連英文ニュース誌の話題 「鉱物資源開発，地域地質，及び新刊地質図」

Some topics in English newsmagazines in 2012, with special reference to mineral resources, regional geology, and new geological map

高橋 裕平 (Yuhei TAKAHASHI)*

Information collected from geological newsmagazines in 2012 is reviewed. First topic is overview of mineral resources such as mineral commodity summary of 2011 in USA, lead pollution of artisanal mining in Nigeria, dating Australia's uranium deposits and surface materials map of Afghanistan using broad scale hyperspectral data. Second topic is regional geology. This topic includes metamorphic rocks of Cape Denison in Antarctica and geology and geomorphology of Yosemite Valley. Third topic is new geologic map of Vermont.

Keywords: Mineral resource, Artisanal mining, Dating, Uranium, USA, Australia, Nigeria, Afghanistan, Antarctica, Vermont

I. ま え が き

地質鉱物学分野で今どんなことが話題となっているのか，あるいは社会が何を地質鉱物学分野に求めているかの情報源の一助となるよう，英文ニュース誌で野外系の鉱物科学分野に関する話題を紹介する。日本鉱物科学会会員は Elements から鉱物科学に関して最近の動向情報を得られるが，小論では野外系によりシフトした情報を提供する。地質鉱物学方面の実務をめざす学生諸氏を読者に意識しているが，開発最前線の地質技術者が周辺動向を展望することも考慮した。

小論では 2012 年に入手した地質鉱物関連英文ニュース誌記事から，鉱物資源関連で，米国の 2011 年の開発状況，ナイジェリアでの鉱山開発に伴う鉱害，オーストラリアのウラン鉱床形成年代，そして高精度のリモートセンシングにより得られたアフガニスタンの鉱物資源評価基礎図を紹介する。地域地質関連では，20 世紀初めのオーストラリア隊の南極調査，米国ヨセミ渓谷の地質紹介記事を取り上げた。新刊地質図として，60 年ぶりに改訂された米国バーモント州の地質図を紹介し，アパラチア山脈北東部の地質情報を提供する。

なお，ここで紹介した資料の中には 2012 年に入手できたが，名目 2011 年発行のものもあることを付記してお

く。また，原典にあたりたい方のためにそれぞれのウェブサイトを用いて文献で記した。図面類は大型プリンター等の環境が整っていれば手で印刷できる。著者が入手時では無料サイトだったが，その後有料サイトになったものがある。小論受理時点で要旨のみ無料となっているものはその旨を注記した。

II. 鉱物資源開発

1. 米国の 2011 年鉱産物生産高が上昇

高橋 (2012) は 2010 年の米国の鉱産物動向を紹介したが，その後 1 年間 (2011 年) の動向を Ober and Demas (2012) から概観する。それによると，米国で採掘された非燃料系鉱物資源は，2010 年の 660 億ドルから 2011 年には 740 億ドルとなり，12% 上昇した。このうち金属鉱物資源はその価格が上昇したこともあり，国内の生産額は 23% 増となった。非金属鉱物資源は 3% とわずかながら，2007 年以来的増加となった。

米国が国外の鉱物資源に依存する量は増加し，2011 年には，43 の鉱種，量では国内消費の 50% 以上を国外の鉱物資源に頼っている。さらにその 43 鉱種のうち 19 種は 100% 輸入である。

この Ober and Demas (2012) による概観は，米国地質調査所 (U.S. Geological Survey, 以下 USGS) の鉱産物要約

doi: 10.2465/gkk.130130

(平成 25 年 1 月 30 日受付，平成 25 年 5 月 6 日受理，平成 25 年 5 月 30 日早期公開)

* 産業技術総合研究所東北産学官連携センター，〒983-8551 仙台市宮城野区苦竹 4-2-1

* Tohoku Collaboration Center, AIST, Nigatake 4-2-1, Miyagino-ku, Sendai 983-8551, Japan E-mail: takahashi.yuh@aist.go.jp

(Mineral Commodity Summaries, MCS)に基づいている。そこではおよそ 90 の鉱産物統計と国内外の鉱物資源関連産業の市場の動向や今後の見通しを伝えている。

既に述べたように、2011 年の米国の鉱産物生産額は 2 年続けて前年より増加した。ただし、そのうちの非金属鉱産物については、2008 年から 2009 年にかけての景気後退の後、2011 年にも碎石はまだ後退傾向が続いている。建設業は 2011 年に上向きとなり、セメント、建設用砂礫や石膏の生産が増加に転じた。

USGS(2012)では、個々の鉱種の記述の前に、図や表を用いて鉱業統計の解説を行なっている。その一つとして鉱産物の 1989 年から 2011 年にかけての生産額成長率が示され、金属鉱業(primary metals industry)と非金属鉱業(non-metallic minerals products industry)の動向はもともと周期性があり、それらの成長速度は世界経済と米国の国内経済から影響を受けていると論じている。

金属鉱産物生産の成長速度は、2011 年の一時期に減少の傾向があったが、年全体でならずと高く、巨視的には米国の金属鉱業は回復傾向で 2012 年にも続くと観測されている。建設業界は 2008 年から 2009 年にかけての後退からまだ十分復活していないが、それでも非金属鉱業は回復しつつある。

鉱産物生産額は 2011 年に 740 億ドルで、2010 年の 660 億ドルから 12%増加している。スクラップも含めた鉱産物輸出は 320 億ドルである。米国国内の鉱産物は加工生産まで加味すると 6330 億ドルの価値を生み出している。さらに消費まで視野に入れると、アルミニウム、レンガ、銅、化学肥料、鉄鋼を含む鉱物資源と輸出鉱産物(360 億ドル)が、2.2 兆ドルの価値を生み出している。これは米国の GDP の約 15%にあたる。

2011 年における米国の金属鉱山の生産額は 371 億ドルで 2010 年より 23%増である。内訳は金(30%)、銅(27%)、鉄鉱(16%)、モリブデン(10%)、亜鉛(5%)であった。価格は上昇傾向で、例えば、金は 2011 年の 8 月末にトロイオンス 1881.34 ドルであった。非金属鉱山の生産額は、2011 年に 369 億ドルで 2010 年より 3%増加している。内訳は、碎石(28%)、建設用砂礫(16%)、セメント(16%)である。

2011 年に鉱山からの産出額が 10 億ドルを超えるものは 15 鉱種で、額の大きい順から、金、碎石、銅、鉄鉱、建設用砂礫、セメント、モリブデン精鉱、燐鉱、石灰、亜鉛、塩、粘土、ソーダ灰、銀、工業用砂礫である。

この USGS(2012)によると、既に述べたように、2011 年に消費量の半分以上を輸入に頼っている鉱種が 43 種に達し、そのうち 19 種が 100%輸入に頼っている。輸入に依存する鉱種は年々増えている。この統計をとり始めた 1978 年に 100%輸入に頼っていた鉱産物は 7 種、半分以上を輸入に頼っている鉱産物は 25 種であった。一方、正味の輸出鉱産物は 2011 年に 18、1978 年には 18 で、数字の

上では変化はない。

2011 年に非燃料系鉱産物(つまり金属及び非金属鉱物資源)生産額が 20 億ドル以上の州は 10 州あり、多い順から、ネバダ、アリゾナ、ミネソタ、ユタ、アラスカ、フロリダ、カリフォルニア、テキサス、ミシガン、ミズリーである。これらの 10 州で米国の生産額の 62%となる。

USGS(2012)では、全般的な解説に続き、鉱種ごとに、生産額や用途、過去 5 年間の生産額、輸出入、価格、鉱山(工場)数などの変遷、状況全般、代替物などを記している。ここでは、市況を反映して話題が多い金、工業用原料として大量に利用される螢石、それに我が国が主要な生産国となっているゼオライト(天然ゼオライト)とヨードについて記す。以下の記述の順は USGS(2012)に従いアルファベット順である。

螢石：イリノイでは螢石(フッ化カルシウム)は石灰岩採掘の際の副産物として生産されているが、その品質などに関して不明である。ルイジアナやテキサスでは螢石からフッ酸(HF)を生産している。

螢石はフッ素を使う化学産業に必須の原料である。またアルミニウムやウランの精錬に多量に利用される。そのほか、鉄鋼でのフラックス、アルミニウム生産の初期段階、ガラス産業、エナメル、ロッドコーティング、セメント生産などで用いられる。2011 年フルオロ珪酸 74000 トン(品位 92%の螢石 130000 トンに相当)がリン酸塩岩加工の際、回収されている。フルオロ珪酸は飲料水に少量混ぜられている。

年間数千トンの合成螢石が、ウラン濃集過程、石油アルキル化過程、ステンレス鋼を酸で洗浄する過程で回収される。アルミニウム精錬過程でフッ酸やフッ素をリサイクルしている。

螢石の価格は上昇傾向である。ことに、中国の螢石は、中国国内の生産コストが上昇し、中国ウォンが値上がり、さらに需要の増大で、最も価格上昇している。

世界の生産は、米国を除くと、2011 年、中国が世界の産出高(620 万トン)の半分以上の 330 万トンを生産している。さらにメキシコ(108 万トン)、モンゴル(43 万トン)と続く。米国のほかいくつかの産出国の埋蔵量が伏せられている。公表されている中では、南アフリカ、メキシコ、中国、モンゴルの埋蔵量が多い。埋蔵量が明らかにされていない国では、リン酸塩岩に伴う螢石の量が膨大らしい。

螢石の代替品は、アルミニウム精錬過程での生成物、ホウ砂、塩化カルシウム、鉄酸化物、マンガン鉱、ケイ砂、二酸化チタンで、フラックスとして利用されている。

金：約 50 のロード鉱山、いくつかの大規模な漂砂鉱山(全てアラスカ)、多くの小規模漂砂鉱山(主にアラスカと西部の州)から生産されている。加えて、銅の精錬過程の副産物として金が回収される。2011 年の生産額は約 122 億ドルであった。用途は装飾に 54%、歯科に 10%、電子関連に 7%、そのほか 29%である。

2011年に鉱山から237トン、リサイクルで225トン回収されている。金の価格は2007年に1オンスあたり699ドルであったが、毎年上昇して、2011年には1600ドルを超え8月末に1881ドルとなっている。鉱山や選鉱に従事する者は2007年に9130人であったが、毎年少しずつ雇用が増え、2011年には10300人である。

2011年の米国内の金鉱山生産額は2010年の3%増である。これは、モンタナやネバダの休止鉱山が再開したこととネバダの稼行鉱山が増産し、ネバダやユタの鉱山の一部が減産し、それらを差し引きした結果である。米国は正味の金輸出国ではなく、主にメキシコから鉱石や精鉱を輸入し米国で精錬加工している。

世界的には、オーストラリア、カナダ、チリ、中国、メキシコ、ロシアが増産して、世界の金の生産量が増え続けている。国別の生産量では、多い順から中国、オーストラリア、米国、ロシア、南アフリカとなる。これら5ヶ国の生産量で世界の生産量(2700トン)の半分近くになる。世界の埋蔵量は51000トンと推定されているが、このうち18000トンは未発見で、例えば今後開発する斑岩銅鉱床に伴うものなどを見込んでいる。

一般にパラジウム、白金、銀が金を代替する。また、電子製品には金で覆ったベースメタルが広く使われている。

ゼオライト(天然ゼオライト)：米国では10社がゼオライトを採掘している。菱沸石がアリゾナで、クリノプチロライトがカリフォルニア、アイダホ、ネバダ、ニューメキシコ、テキサスで採掘されている。このうち、ニューメキシコが生産量が最も多く、アイダホ、テキサス、アリゾナ、カリフォルニア、ネバダと続く。

米国で採掘されているゼオライトは凝灰岩の変質に伴うものである。菱沸石、クリノプチロライト、エリオン沸石、モルデン沸石、フィリップス沸石を産出するが、最も普通に産出するのは菱沸石、クリノプチロライト、モルデン沸石である。

米国におけるゼオライトの採掘量は、2011年は62000トン、消費は61000トン、そして価格はトン当たり40-900ドルである。

用途は多い順から、飼料、ペットリッター(猫砂)、脱臭、水のろ過、ガス吸着、排水浄化、化学肥料、乾燥剤、油の吸着、水耕、殺菌・殺虫剤のキャリアー、触媒、である。

リサイクルは基本的にはない。乾燥剤、ガス吸着、水の清浄やろ過用に使われるゼオライトには、消費されたゼオライトが再調製して使われる。

天然ゼオライトの輸出入に関して十分な資料がない。輸出入のゼオライトのほとんどが人工ゼオライトで、天然ゼオライトについてはわずかにブルガリアとインドから輸入している。

天然ゼオライト市場は小さく米国の経済への影響はわずかである。また、世界各国の生産統計は、概して不十分で

ある。大量に採掘している国では低品位鉱を利用している。国によってはゼオライトとされているものの多くがゼオライトをわずかししか含まない凝灰岩である。このような例では石材、軽量骨材、火山灰セメント、土壌改良剤に利用している。

生産高では、2010年には、米国は62000トンである。これより上位は、中国が200万トンで圧倒的に多く、以下、大韓民国(240000トン)、日本(155000トン)、トルコ(150000トン)、ヨルダン(140000トン)、スロバキア(80000トン)である。これらの国以外は総量で5000トンである。

天然ゼオライトの世界的な埋蔵量は推定されていない。埋蔵量推定の困難さは、世界での生産高にはゼオライトの品位が低いものから中程度のものがかなりの量が含まれていることによる。そのような場合、大量の建材として利用され、ゼオライトの鉱物学的特性を利用していない。このため資源量から除く必要があり、統計集計の困難がある。

世界の資源量は不明だが、米国のペーズンレンジ地域では地表近くにクリプチロライト、菱沸石、エリオン沸石、モルデン沸石、フィリップス沸石が総量1億2000万トン見積もられている。米国全体では10兆トンが見積もられる。

代替物は、ペットリッターの利用ではアタパルジャイト、珪藻土、フーラー土、セピオライトである。軽量骨材用途では、珪藻土、パーライト、バーミキュライト、凝灰岩である。土壌改良剤では、ベントナイト、石膏、モンモリロナイト、ピート、パーライト、珪砂、バーミキュライトがあげられる。水浄化用途では、カーボン、珪藻土、珪砂がゼオライトの代替物となる。油吸着ではベントナイト、珪藻土、フーラー土、セピオライト、さまざまなポリマーや天然有機物質が代用品となる。

ヨード：ヨードは、オクラホマの2会社が生産を続け、2010年3月からモンタナの会社が生産を行っている。2010年より2011年の生産は伸びている。ただし、米国では企業の生産高は公表されていない。米国の企業のうち、Woodward社がヨードの産状を公表していて、地下のかん水からヨードを抽出している。

ヨードは中間過程で化合物に加工されてから最終的な生産物に利用される。2010年には16の工場が無機ならびに有機化合物の加工に向けられ、このうちヨー化エチルとヨー化メチルが66%を占める。日本では2011年3月の地震と津波で生産量が落ち込み、さらに抗被爆剤の需要が急増して、ヨード価格は2009年と2010年の25ドル/kg前後から2011年には27ドル/kgと上昇した。

最近、ヨードは液晶ディスプレイやX線硬調媒体に向けられている。加えて、日本からの供給が一時中断したためヨードの需要が急激に高まった。このため価格は2011年から2012年初めにかけて急騰したが、チリの増産と日本の復興で2012年中頃には安定する模様である。ヨードの

少量がリサイクルされているが、詳細は不明である。2007年から2010年の米国の輸入量は5-6000トン程度で、相手国内訳はチリ83%、日本16%である。

世界の主要な生産国は、多い順にチリ、日本、米国である。このうち、チリは世界の生産の58%を占めている。埋蔵量(総量1500万トン)では、チリは世界の6割、日本は世界の3割を占める。この埋蔵量に加え、海水には0.05 ppmのヨードが含まれ、3400万トンとなる。乾燥した海藻には0.45%のヨードが含まれている。

飼料、触媒、栄養摂取、製薬、写真に用いられ、ヨードの代替物はあまりない。バイオサイド(殺生物剤, bio-cide)、着色剤(colorant)、インク(ink)の用途には、ヨードの代りに臭素や塩素を使えるが、通常はあまり好まれない。抗生物質がヨードバイオサイドの代りに使われることがある。

2. ナイジェリアの小規模鉱業における鉛汚染

小規模鉱業(Artisanal mining)における健康被害が開発途上国で問題となっている。Hansen(2012)は、健康被害の中でも深刻なナイジェリアの例を紹介している。

2010年3月、国境なき医師団(MSF)のチームはナイジェリア北西部の2村を訪れ、子供の死亡率が40%を超えることを明らかにした。この死亡の原因は伝染病ではなく重金属中毒であろうと医師団は判断し、血液検査を実施した。手始めに8人の子供と2人の大人を検査したところ、全員、血液中の鉛が100 µg/dLを超えた。そこでさらにこの2村の5歳未満の子供205人の血液検査を行なったところ、97%が鉛45 µg/dLを超え、何人かは700 µg/dLに達している。ちなみに米国感染予防センター(U.S. Centers for Disease Control and Prevention; CDC)の基準は10 µg/dLである。この鉛汚染はZamfara地域で行われている鉛に富む金鉱石の家内工業的な精錬によると判断された。

ベネズエラなどラテンアメリカでは露天掘りで採掘した鉱石を水銀アマルガムとしてから金属を抽出するため、しばしば、水銀中毒が問題となる。ナイジェリアでも、水銀は長期的に環境や人の健康課題であるが、加えて鉛の健康被害が浮かび上がっている。

鉛に富む金鉱石を得るため、鉱夫は45 mの深さの穴(縦坑)にロープを伝い降り、そこで鉱石を採掘する。その鉱石を袋に詰め、村までバイクで運び、金抽出で生計を立てる家族に売却する。その家族は鉱石を家に持ち帰り、ハンマーやすりこぎで粉碎を行う。ここで使うすりこぎなどは食事の準備で使うものである。次に小麦製粉機で鉱石を粉にし、深鍋や皿で重金属を濃集する。最後に液体水銀を加えアマルガムを作り熱して水銀を蒸発させて金を得る。

選鉱のあらゆる段階で鉛を含んだ塵が発生するため、調査は、土壌、住居の床、小麦製粉機、すりこぎ、河川、井戸を対象に行われた。選鉱や貯鉱の場所が住居のため、子供たちは鉛汚染にさらされる。ナイジェリア政府の要請を

受け、CDCは2010年の5月と6月に汚染が進んでいる2村を訪れ、戸口調査、子供の血液中の鉛レベルを測定し、携帯型測定器でその地域の鉛と水銀量を測定した。これらの分析結果と子供の死亡率の統計的なリスクの関係の解釈を行い、専門誌(Journal Environmental Health Perspectives)で公表し、金鉱石選鉱過程で過度の鉛汚染が起きていることを示した。

2010年10月と11月には、CDCはMSFとナイジェリア地方庁の報告を参考に、小規模な金鉱山業が営まれている74村の調査を行った。これらの村の61%で子供が鉛汚染や鉛中毒となっている証拠を見出した。

Hansen(2012)はこの地域が汚染に至る素因として3つ挙げている。1つは、金価格上昇で人々が鉱床や貯鉱を盛んに採取するようになったことである。その結果、人々はこれまで農業による1日2-3ドルの収入から鉱業により20ドル以上の収入を得るようになった。2つ目は、この地域(Zamfara)は保守的なイスラム圏で、女性の多くは家を離れられないことである。このため、金鉱石の選鉱や精錬の70%以上が集落内で行われ、家族が鉛の塵にさらされる。3つ目はこの地域の地質と自然環境である。地表近くに鉱脈があるため、小規模な鉱業が可能である。鉱脈は後期原生代から前期顕生代の結晶片岩と片麻岩中のせん断帯に発達している。メソサーマル型(造山型)鉱床に分類されるが、この種の鉱床としては鉛が異様に多いという特徴がある。鉱床は風化で酸化され、鉛硫化物は二次的な鉛炭酸塩や鉛酸化物に変化する。このうち鉛炭酸塩が問題で、人の胃液で溶解してしまう。このように地域の地質と気候が鉛汚染の大きな要因である。

医療チームは7村の480集落、3000家族以上について再検査を行ない、MSFの医師は、2010年の6月から子供たちの治療を始めている。鉛が体内に取り込まれると、亜鉛、カルシウム、鉄イオンの吸収が妨げられ体に影響を与える。その結果、IQの低下、発作、昏睡、盲目、そして死に至る。子供がこれらの影響から回復しても、脳の障害やその他の身体障害がしばしば残る。

治療は溶けやすくある種の金属イオンを持った錯体などの化学物質が有効で、その摂取で重金属を体外に取り出す。治療に10年くらいかかる。

子供たちが再び汚染した環境に戻ってくるとこれらの治療は意味がなくなる。そこでチームは集落の汚染された土壌を深さ5 cm取り除き、それらを埋める場所を設定した。それから新鮮なセメントで表面を再び覆った。さらに村の井戸、池、貯水池、小川をきれいにした。さらに村人に安全に行う作業法を教えた。チームが優先して行なったことは、女性や子供を労働から外し、家の中で行われていた選鉱などの作業を集中化して塵の拡散を最小限にすることであった。さらに新鮮な衣類を用意し、風呂を準備し、家の清掃を行なった。Hansen(2012)によると、MSFの調べで鉛やその他の重金属の汚染が多くの開発途上国で進

んでいる。しかしその対策は十分でない。

3. オーストラリアのウラン鉱床の形成年代

オーストラリアはウランの埋蔵量が世界の総量の23%を占め、生産量は現在カザフスタン、カナダに続く世界で3番目を誇っている。そのような状況にもかかわらず、オーストラリアの主要なウラン鉱床の形成年代の議論は不十分であった。

多くの初生ウラン鉱床では閃ウラン鉱が主要な鉱床構成物なのでその年代が鉱化作用の時期を与える。これは多くの鉱床では鉱化作用の年代が鉱床と同時期に形成された(と考えられる)白雲母、黒雲母、モナズ石、ゼノタイムなどの年代を参照していることと対照的である。

Cross *et al.* (2012)は、ウェスタンオーストラリア州のキンタイヤ(Kintyre)鉱床とクイーンズランド州のオアシス(Oasis)鉱床の閃ウラン鉱について電子線微小部分分析装置(EPMA)を用いたU-Th-Pbの化学分析による年代値を報告した。

ウラン鉛年代測定では ^{235}U - ^{207}Pb 、 ^{238}U - ^{206}Pb の同位体を用いることが多いが、U-Th-Pbの化学分析による年代測定も1990年代初期から使われるようになってきた。この化学分析ではEPMAを使い、モナズ石の年代決定が行われて、さらに閃ウラン鉱にも応用されている。ここでは全ての鉛が ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{232}Th の放射壊変で形成されたという前提がある。この手法で得た年代値とSHRIMP $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ の年代値が良く一致することが示されている。鉛の中には放射壊変以外のものもともとあったという議論があるが、あってもごく少量で、特に閃ウラン鉱ではそのような鉛を想定しなくてよい。

なお、Cross *et al.* (2012)で報告された分析は、オーストラリア国立大学地球科学教室のCameca SX100で得られたものである。

キンタイヤ鉱床は不整合型ウラン鉱床で、ウェスタンオーストラリアのパターソンオロゲン(Paterson Orogen)にあり、ポートヘッドランド(Port Headland)の南東420 kmに位置する。Cameco Corporation(70%)とMitsubishi Development Pty Ltd(30%)の共同出資で開発している。オーストラリアで最も大きな不整合型鉱床の一つで U_3O_8 換算24000トンの資源量である。

鉱床はパレオ〜メソ原生代のルードル(Rudall)コンプレックス中に産する。ホストは、ルードルコンプレックスのヤンググージー(Yandgooge)層の炭質変堆積岩で、ネオ原生代のクールブル(Coolbro)砂岩が不整合で重なる。このクールブル砂岩はイエニーナ(Yennena)盆地の堆積物の基底を形成し、クールブル砂岩とルードルコンプレックスは共にその後の840–810 Maのマイルズ造山(Miles Orogeny)で褶曲し、閃ウラン鉱は褶曲軸面と平行に発達する炭酸塩-緑泥石脈中に産する。イエニーナ盆地の堆積物の時代は、クールブル層中の碎屑性ジルコンの年代910 Maと盆地下部に貫入している中性-苦鉄質岩の年代830

Maの間である。

年代測定に供したキンタイヤ鉱床の閃ウラン鉱は、1997年に探査会社により採集されたものである。U-Th-PbのEPMA化学分析の結果、この閃ウラン鉱は、 $837 \pm 35/-31$ Maの年代値を示し、別に既に得られている鉱化作用の年代845 Maとほぼ同じである。すなわち、ウラン鉱化作用はパレオ原生代のヤンググージー層中に後生的に産し、マイルズ造山と関係していると解釈できる。この結果からCross *et al.* (2012)は、オーストラリアの他のネオ原生代地域にも同様のウラン鉱床の存在の可能性を指摘した。

もう一つのオアシスウラン鉱床は、クイーンズランド北東部のジョージタウン(Georgetown)とエザリーリッジ(Etheridge)の2地域に分布する。このうちジョージタウン地域の鉱床は火山活動に関連したもので、最も大きな鉱床はベンラモンド(Ben Lamond)とモーリーン(Maureen)である。鉱化作用は、従来から、後期デボン紀-前期石炭紀と後期石炭紀-前期ペルム紀の二つの時期であったと考えられていた。例えば、モーリーン鉱床について、鉱化作用に伴う螢石のウラン鉛年代として 330 ± 10 Maが得られている。

このようにジョージタウン地域の鉱床は火山に関連したウラン鉱化作用が卓越しているが、もう一つのエザリーリッジ(Etheridge)地域の鉱床はメソ原生代のMywyn花崗岩を切る南北のトレンドのせん断帯に産する。鉱化帯は圧碎質で黒雲母に富む岩石に発達し、それは10–15 mの厚さで走向方向に300 m伸び、深さ方向は175 mになる。鉱床の品位は U_3O_8 で0.12–0.17%である。

Mywyn花崗岩は長石の斑状組織が目立つSタイプ花崗岩で、片状を呈する。最近得られたジルコンのSHRIMP U-Pb年代は、 1559 ± 3 Maで、これはウラン鉱化作用の下限年代を与える。鉱化したマイロナイト帯の白雲母と黒雲母のAr-Ar年代は432–429 Maでマイロナイト化の上限の年代となり、429 Ma以降は白雲母成長の後期にあたる。

Cross *et al.* (2012)によると、鉱化したマイロナイト帯の閃ウラン鉱からU-Th-PbのEPMA化学分析で $433 \pm 3/-4$ Maの晶出年代を得た。この結果は、同じ標本から得られている雲母の年代439–429 Maと誤差の範囲で一致する。そこで440–430 Maがこの地域のウラン鉱化作用の時期と推察され、また、鉱床が中期シルル紀の変形イベントの影響を受けたことが推定される。この変形イベントがクイーンズランド北部に広く及んでいることから鉱床のさらなる広がりが示唆される。

4. リモートセンシングによるアフガニスタンの鉱物資源評価基礎図

高精度のリモートセンシング(ハイパースペクトラルイメージング, hyperspectral imaging)を用いて、アフガニスタンの国土のおよそ7割で鉱物資源評価の基礎となる調査が行われた。この調査は、Demas and Medlin(2012)に

よると、USGSと国防省の経済活動自立特別支援(Task Force for Business and Stability Operations, 略してTFBSO)部門がアフガニスタンを支援するため、経済的価値がある鉱物資源の開発を進めるものである。まず、エアボーンセンサーから、鉱物、人工の物質、雪、植生などを識別する。さらにこれらのデータを即座にそして正確に地図上に表し、鉱物資源、自然災害、農業開発状況、インフラ発達状況を示すことができる。

TFBSOは、私企業を育成しアフガニスタンの安定と安全を促進する目的のために国防省に組織されたものである。そこではアフガニスタン鉱山省とともに調査を進め、鉱床を同定し、その情報を国際的な(外資系)鉱山会社の利用に供する。ハイパースペクトラルというリモートセンシングの新しい技術を使い作成された地図類から、アフガニスタンの鉱物資源ポテンシャルを明らかにする。

Demas and Medlin (2012)のハイパースペクトラルデータの説明によると、2007年にUSGSは、石油及び天然ガス資源プロジェクトの一環でアフガニスタンのほとんどの地域でハイパースペクトラルデータを得た。そのデータから、画像化したハイマップ(HyMap)を利用できる。それは0.4から2.5ミクロンの間の波長で128チャンネルの反射太陽光を測定したものである。その測定のために、200ラインを飛行し、438012 km²の面積にわたるものであった。結果として得られたデータは8億ピクセル以上のデータである。

新しい地図類はオンラインで入手可能で、Demas and Medlin (2012)からリンクしているKokaly *et al.* (2011)から、炭酸塩類、フィロシリケート類、硫酸塩類、変質鉱物の情報(地図)を、King *et al.* (2011)から、鉄を含む鉱物類の情報(地図)を得ることができる。

このうち鉄鉱に関する地図について説明する。この地図には鉄含有鉱物の分布がハイマップ画像に示されている。その元データは、NASAが2007年8月22日から10月2日の間に5万フィート(15240 m)の高度で218の測線から得たものである。地表の反射波を加工し、現場で蓄積されてきた経験的なものを加味し調整した。

国境近傍を除く国土の大部分について鉄含有鉱物情報が地図上に示された。例えば、ヘマタイトの凡例は、薄く被覆、細粒、中粒、粗粒に分けて示されている。ゲータイトの凡例は、細粒、中粒、粗粒、鉄明礬石を伴い産する、に分けられている。この地図の活用例は示されていないが、もう一つの地図(炭酸塩類、フィロシリケート類、硫酸塩類、変質鉱物)と組み合わせて鉱床の絞込みなどに活用していると推測できる。

III. 地域地質

1. オーストラリア南極観測発祥の地、ケープデニソンの変成岩

2011年は日本では白瀬南極探検100周年として各地で

記念行事が行われた。オーストラリアでもオーストラリア南極地域観測(Australasian Antarctic Expedition, AAE, 1911-1914)の100周年記念の年で、Carson (2011)が、地質専門家のDouglas Mawson率いるAAEと基地周辺地域の地質について、その後の研究も加え、紹介した。

Carson (2011)によると、AAEはアデリーランド周辺の海岸やその奥の探検と科学調査を目的として組織されたものであった。探検隊はオーロラ号で1911年12月2日にホバートを出発した。

大陸到着後、基地建設場所の適地を見つけるのは困難であったが、Mawsonは、コモンウェルス湾(Commonwealth Bay)の露岩地域、後のケープデニソン(Cape Denison)に基地を設けることとした。上陸直後の天候はたまたま良好であったが、実はコモンウェルス湾はカタバ風があり、湾の背後の内陸から寒気が流れ下る場所であった。実際、AAEの2年間の観測によると風速は平均71 km/h (19.7 m/s)であった。ケープデニソンそのものは氷が覆っていない露岩の岬であるが、その背後3マイルで氷床が1000フィート、5.5マイルで1500フィートの高さがあり、寒気の供給源となっている。

MawsonとともにFrank Stillwellがコモンウェルス湾の地質調査を行ない、その報告が1918年から1940年にかけて出版公開された。一方、フランスの地質専門家が、1950年代から1960年代初めにかけてアデリーランド西側のフランスのデュモン・デュルビル基地周辺を調査研究し、さらに最近、ケープデニソンの東側と西側の露頭を調査している。

AAEは南極で初めての隕石の記載も行なっている。その隕石はケープデニソンから20マイルの距離の氷床上で発見された。

Carson (2011)はケープデニソンの地質について最近の成果を加え紹介している。当地には、主にケープデニソン正片麻岩とそれに貫入する角閃岩化した苦鉄質岩脈(ケープデニソン角閃岩)が分布する。ケープデニソン正片麻岩は、灰色の層状花崗岩質片麻岩で、部分的にミグマタイト化している。ケープデニソン正片麻岩はSタイプ花崗岩の性質を有し、既存の堆積岩類が溶融したマグマに由来することが示唆される。角閃岩化している苦鉄質岩脈は、幅0.1-2 mで暗緑～灰色の岩石で広域的なフォリエーションにはほぼ平行に産し、岩脈の岩石自身も片状化している。

ケープデニソン正片麻岩で最初に得られた放射年代値は、1983年に公表された 2366 ± 33 Maであった。ジオサイエンスオーストラリアで最近得られたSHRIMP年代では、 $2445 \pm 6.1/-5.2$ Maの²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年代値で、ケープデニソン正片麻岩定置の時期を示すと考えられている。ジルコンの縁部から若い $2419 \pm 11/-20$ Maの²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年代が得られているが、これはオーストラリア南部のガウラークラトン(Gawler Craton)のスリーフォード造山(Sleatford Orogeny)に対比できる。

苦鉄質岩脈の定置年代については議論がある。当初、オーストラリア南部ガウラークラトンの岩脈と同じ 1600 Ma 前後であろうと考えられた。しかしながらケーブデニソン角閃岩(苦鉄質岩)から得られた 3 粒のジルコンは Th/U の特徴から珪酸塩メルトからの晶出が示唆され、得られた $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代値 1809 ± 10 Ma は苦鉄質岩脈の定置年代と考えられる。1960 年代から 1970 年代に得られた Rb-Sr 年代値 1500–1700 Ma は角閃岩相の変成作用の時期を示唆する。

Carson (2011) はさらにこの地域に関連した Gondwana の復元モデルを次のように紹介した。かつてオーストラリア南部、アデリーランド (Adelie Land)、ジョージ 5 世ランド (George V Land) は接していた。コモンウェルス湾とオーストラリア南部で確実な接合部は、南極側ケーブハンター千枚岩 (Cape Hunter Phyllite) とオーストラリア側エア (Eyre) 半島に露出する千枚岩である。このケーブハンター千枚岩はケーブデニソンの西に露出するもので、低変成の細粒千枚岩である。さらに、ジオサイエンスオーストラリアが求めた年代値からケーブデニソン地域とオーストラリア南部のガウラークラトンが対比でき、モーソンブロック (Mawson Block) という大陸ブロックの概念を導く。南極は氷床に覆われているが、地球物理データからモーソンブロックが南極の内陸部にまで広がっていると推定されている。Gondwana 超大陸はジュラ紀 (185 Ma 頃) に分裂を開始したが、モーソンブロックは長く安定で、南極とオーストラリアは後期白亜紀の 85–80 Ma に分裂を始めた。

2. ヨセミテ渓谷とシェラネバダバソリス

花崗岩を学ぶ者にとって、シェラネバダバソリス (Sierra Nevada Batholith) は花崗岩研究の代表地の一つとして、たとえ現地を訪れる機会がなくても何らかの文献を読むこととなる。現在は、Bateman (1992) などの USGS の総合的な報告を無料のサイトから入手できる。

シェラネバダの中で最も魅力あるヨセミテ渓谷 (Yosemite Valley) を中心に Waltham (2012) が地質に加え氷河地形などを一般向けに紹介している。その紹介ではまずヨセミテ渓谷の地質調査史から始まる。新住民のアメリカ人が初めてシェラネバダを横断したのは 1833 年で、ヨセミテ渓谷を望んだ。その後、20 年経ち、カリフォルニア地質調査所の調査隊が渓谷を馬で踏査し、壮大な眺望が報告され、国立公園として保護されることとなった。当時は、カリフォルニアに砂金を求め、そしてシェラネバダ花崗岩の西縁に沿い砂金の源の金脈を目指した人々が移住してきた時代である。このゴールドラッシュが収まると、ヨセミテはシェラネバダで最も魅力ある場所として脚光を浴びるようになった。

Waltham (2012) は、さらに、巨大な花崗岩バソリス形成史、バソリスが織り成す美しいドームや崖の地形形成史、更新世からの氷河の物語について紹介している。

シェラネバダバソリスは、カリフォルニア州中で大きな面積を占め、長さ 600 km、幅 80 km にわたる。中生代にファラロンプレートが北アメリカプレートに潜り込みマグマが貫入して、バソリスが形成された。このバソリスは数百の貫入岩体からなり、このうちヨセミテのシェラネバダの南ではマグマは地表に達していないが、北ではマグマは地表に達していて変成岩に溶岩や火山砕屑岩が重なっている。

火成活動は白亜紀に特に活発になり、ヨセミテ渓谷には 114–87 Ma の貫入岩体が露出している。マグマのパルスはさまざまな深度から供給され、その結果隣接する貫入岩体で組成が異なることが多い。また、花崗岩と呼称する場合には広義で用いていて、例えばヨセミテ渓谷の壁に露出する 10 個の貫入岩体は、狭義の花崗岩に比べるとカリ長石が少なく、花崗閃緑岩、閃緑岩、トータル岩からなる。谷の下流側の北側を占める巨大な崖のエル・キャピタン花崗岩 (El Capitan Granite) は、108 Ma の年代で古いグループに属する。谷の奥には峡谷で最も新しい 87 Ma のハーフドーム花崗閃緑岩 (Half Dome Granodiorite) が露出している。この岩体は、大きな普通角閃石が目立ち、さらに場所によっては正長石の斑晶が特徴的である。これら二つの巨大な貫入岩体の間には、主に花崗閃緑岩からなるいくつかの小規模な貫入岩体が高い崖を形成している。

シェラネバダバソリスは、鉱物組み合わせに基づく圧力推定から地下 3–6 km で冷却固化したと考えられている。貫入岩体の定置に引き続き山地が隆起して、上位にあった岩石が削剥され白亜紀末期には岩体の多くが露出した。

バソリスには、定置前に貫入の場がどう確保されたかという空間課題がある。それは古くからの「花崗岩の課題」の一つであるが、プレートテクトニクスの理解が進み、堅い地殻を想定しなくてよくなった。多くの貫入岩体がレンズ状で、隣接する変成岩類の構造から粘性を持ったマグマが強制貫入することが可能であったと考えられる。岩体の貫入前に占めていた古い岩石は、マグマの中で下方に落ちて、その落ちた分だけ上方に空間が確保され、加えて、沈み込み帯の上の大陸地殻が膨張して空間が用意される。花崗岩化作用やストーピングも花崗岩の定置にある程度寄与している。ストーピングはバソリスの周辺で広く起きている。ストーピングの結果形成されたと考えられているアグマタイトをヨセミテの道路沿いで見ることができる。それは、花崗岩中にゼノリスが散在する産状と周囲の岩石中に貫入した火成岩脈の産状の中間的な産状を呈する。

ヨセミテの大きな魅力は地形にあり、その一つは、大規模な花崗岩の露岩である。氷河によって形成された谷合いの崖はもちろん、高所の斜面、塁壁、ドームが露岩となっている。この地域で良く認められる剥落は応力除去の現象である。覆っていた氷河が消失し封圧が除かれたとき、岩石が膨張する。その結果形成された節理は、地表面に平行である。浸食で花崗岩から風化殻が剥離すると、新しい節

理が発達し、徐々に丸みを帯びてくる。この剥離の原因となる節理の形成について議論がある。1860年代には、湾曲した節理は花崗岩が冷却したときに収縮したことで形成されたと考えられた。1900年代初期に、この冷却理論は氷河消失で封圧が除かれるアンローディング理論に置き換わり、その後は、これらの節理の形成深度がどのくらいであったかに関心は移った。ヨセミテはドームが有名であるが、真のドームと言える対称性をもったものはわずかで、ほとんどは垂直方向の節理によってドーム構造が壊れている。節理の特徴が顕著に見られるのは、ハーフドームの一方の端の巨大な壁で、南東側で剥離がドームの丸い形に沿って形成されている。北西側では垂直な節理が卓越し、大きな垂直な壁が形成されている。

壮麗な岩石景観は、ほとんどが氷河に起因するものである。現在は、シェラネバダの高所周辺にわずかに氷河が残るにすぎないが、更新世には氷河がもっと広がっていた。氷河は花崗岩の表面をきれいに磨き、谷氷河となってヨセミテ峡谷を下った。更新世の氷河は寒冷期の初期に最も広がり、シェラネバダのほとんどを覆った。それはシャーウィーン氷河作用 (Sherwin Glaciation) で、かつてエル・ポータル (El Portal) というヨセミテの地名で呼ばれていたものである。氷河に関連する風化面をビショップ凝灰岩 (Bishop Tuff) が被覆していることから、少なくとも、80万年前の氷河作用とみなされている。ヨセミテ渓谷に注いだ最後の氷河は、タイオガ氷河作用 (Tioga Glaciation) で後期 Devensian (後期ウルム氷期の前半) の26000年前から14000年前のもので、量はわずかであった。グリーンランドの氷床における酸素同位体の研究からシャーウィーン氷河作用とタイオガ氷河作用の間に世界的な寒冷期が5回あり、世界的に氷河が拡大したと考えられているが、ヨセミテでは、これら5回の記録がない。

ヨセミテ渓谷の形成史は、約15 Maまでに隆起したシェラ地域を流れていた河川にまでさかのぼる。隆起が再度起こると、河川浸食が進み、それまでの峡谷をさらに深く切り込んでいく。初期更新世には、氷河がその河川浸食の役割を果たすようになった。シャーウィーン氷河作用の極大期には氷がこの花崗岩地域のほとんどを覆い尽くし、それ以前に形成されていた谷を伝って氷河は西へ流れた。これに対してヨセミテの氷河で最後となったタイオガ氷河作用では、渓谷の河床に沿いわずかな氷の流れがあったに過ぎなかった。

このようにタイオガ氷河作用はヨセミテ渓谷の壁の高さに達しておらず、ハンギングした谷の形成は、主にシャーウィーン氷河作用に由来する。巨大な滝が形成されていて、例えば、北端にあるヨセミテ滝 (Yosemite Falls) は、3段合わせて740 mになり、上段の滝は435 mになる。この滝は6月に雪が溶け最大の水量となるが、夏には枯れてしまう。南側にあるブライダルベイル滝 (Bridalveil Fall) は約200 mの高さで、夏の渇水期にも枯れない。ネバダ滝

(Nevada Fall) とヴァーナル滝 (Vernal Fall) も著名な滝で、前者が200 m、後者が100 mの高さである。

現在ヨセミテには年間500万人の人々が訪れる。そのほとんどは夏に集中し、そして谷底のロッジなどの宿泊施設やキャンプサイトを利用する。ハーフドームを登るコースは丸一日を要するが、ヴァーナル滝やネバダ滝を通り、200 mの高さを登るケーブルラダーがある。ただし、冬期には道が閉鎖され、またケーブルラダーが使える時期は限られる。

IV. 新刊地質図-バーモント州地質図

米国地質調査所 (USGS)、バーモント天然資源庁、バーモント大学の三機関連携でバーモントの地質図が新たに作成された。Walsh *et al.* (2012) は地質図の有用性を説き、その上でこのバーモントの地質図の概要を紹介している。

地質図は資源管理や国土管理の諸機関にとって基礎情報や総合情報として有益で、例えば、帯水層を特定し、かつその保全に利用できる。あるいは、資源や国土利用の評価に用いて、さらには地震や地盤沈下などの自然災害対策などに使う。廃棄物の処理サイトを選定し、エコシステム保護の評価手段となる。異なる種類の岩石がどこに分布するかを地質図から知ることができ、地下水や鉱物資源がどこに存在するかの手掛かりとなる。

Walsh *et al.* (2012) は、新しいバーモントの地質図の特徴として、米国の州単位の地質図ではこれまでにない詳細なものであることをあげている。多くの岩型を包含した従来の累層表示ではなく、岩相あるいは岩型に基づく表現である。その結果、486の異なった岩石(部層)が識別されている。さらにこのプロジェクトの調査で、新たな多くの断層を見出し、また地下の地層の分布から水の経路を理解でき、その結果、貴重な真水源である地下水の賦存状況を知ることができるようになった。

この地質図が前回作成の1961年の地質図から全面的に改訂できたのは、50年前にはなかったプレートテクトニクス理論が新しい地質図に反映できたことが大きい。バーモントの脊梁のグリーン山脈は14億年にわたる地質の歴史があるが、サンゴ礁、海洋底、火山弧の形成などをプレートテクトニクスで説明できるようになった。

Walsh *et al.* (2012) は、この新しい地質図から、これまでのバーモント州の地質の見方を変える可能性も指摘している。すなわち、古い地質図で曖昧であったある種の岩石と地質構造との間の関係を解釈できるようになった。さらに教育的側面として地質図の三次元表示の準備を進め、地球科学の理解に貢献する。

地質図は、10万分の1の縮尺で、USGSやバーモント地質調査所で購入可能である。さらに次のURLからオンラインで図面を入手可能である。

USGS <http://pubs.usgs.gov/sim/3184/>

バーモント地質調査所 <http://www.anr.state.vt.us/>

dec/geo/vgs.htm

筆者(高橋)は、このバーモント州の地質図(Ratcliffe *et al.*, 2011)の実物を手にすることができたので、地質各論も含め、あらためて地質図を詳しく紹介する。同州のかつての地質図は、1861年のEdward Hitchcockらによるもの、1961年のCharles G. Dollらによるものであった。

1961年の地質図は、62500分の1縮尺の地質図を基礎として、その縮尺の地質図が未完の地域については、小縮尺の地質図を基に編集されたものであった。今回の地質図は、12000分の1、24000分の1の詳細な地質図を加え編集したもので、その際、プレートテクトニクスの考えを地質区分に適用した。

印刷物は、3枚の大判のシート(52×76インチ、132×193cm)からなり、そのうちシート1と2は、バーモント州北半分と南半分の地質図である。これには10方向の断面図と地質構造図が添えられている。シート3の表は、地質図で使われている486の地質単元の記載と参考文献一覧からなる。シート3の裏には編集に利用した195の地質データ(大縮尺の地質図など)と岩石のジルコンウラン鉛年代値が載っている。

バーモント州は米国の東部に位置し、北側がカナダケベック州と接し、東がメイン州、南がマサチューセッツ州、西がニューヨーク州である。州の主要部はアパラチア山脈北東部のグリーン山脈からなる。

地域の基本的な地質構造は、各地質帯が南北に伸びていて、西からローレンシア縁辺(Laurentian margin)、漸移帯(Transitional margin rocks)、タコニアン付加帯(Taconian accreted terrane)、コネチカット海溝(Connecticut Valley trough)に分けられている。地質総括をFigure 1にまとめた。

ローレンシア縁辺帯には、縁辺域で形成された地層と基

盤岩や異地性の地質体が分布している。ローレンシア縁辺で形成された地層は、ネオ原生代末期からオルドビス紀にかけた石灰岩、ドロストーン、砂岩、頁岩、クォーツァイト、礫岩からなる地層、ネオ原生代末期からカンブリア紀のクォーツァイト、千枚岩、礫岩とオルドビス紀のスレート、千枚岩、チャートからなる地層、それにオルドビス紀の玄武岩などからなる。

ローレンシア縁辺の基盤は、メソ原生代からネオ原生代にかけたグリーン山脈地塊(Green Mountain massif)及びその相当地質体、後期ネオ原生代からオルドビス紀にかけグリーン山脈地塊に重なった地層(Cover rocks of Green Mountain massif)、ローレンシア縁辺の地層にスラストで接しているタコニック異地性岩体(Taconic allochthon)である。グリーン山脈地塊は、片麻岩、片岩、マーブル、クォーツァイトなど変成度の高い変成岩類やそれらに貫入する花崗岩類からなる。グリーン山脈地塊に重なる地質体は、片岩、グラノフェルス、クォーツァイト、礫岩、スレート、千枚岩、片岩、マーブル、ドロストーンからなる。タコニック異地性岩体は、スレート、千枚岩、ドロストーン、石灰岩、クォーツァイトなどからなる。

漸移帯とタコニアン付加帯の大部分は、後期ネオ原生代からオルドビス紀のロー-ホーリー帯(Rowe-Hawley Zone)で、片岩、千枚岩、クォーツァイト、グラノフェルス、角閃岩からなり、ネオ原生代末期からカンブリア紀はじめの超苦鉄質岩もある。ロー-ホーリー帯に属さない後期オルドビス紀の漸移帯は、礫岩、千枚岩、変玄武岩からなる。そのほかのタコニアン付加帯はカンブリア紀後半からオルドビス紀のスレート、千枚岩、凝灰岩、変砂岩、変シルト岩、片麻岩からなる。

コネチカット海溝堆積物はシルル紀からデボン紀に形成されたもので、スレート、千枚岩、片岩、クォーツァイト

Miocene		Organic silt,sand and gravel with lignite			
Cretaceous		WHITE MOUNTAIN IGNEOUS SUITE Syenite and essexite Granite, syenite-porphyr,ite, and hornfels			
Jurassic		Syenite, granite and essexite			
Devonian	CONNECTICUT VALLEY TROUGH Quartzite, phyllite, slate and amphibolite Metasandstone Slate, phyllite and limestone Phyllite,schist, quartzite, amphibolite and granofels Quartzite and conglomerate		NEW HAMPSHIRE PLUTONIC SUITE Granite, granodiorite, qatrz monzonite, diorite, gabbro and small dikes LAKE MEMPHREMOGOG INTRUSIVE SUITE Diorite and granodiorite	Slate and meta-basalt Metamorphosed limestone, sandstone and siltstone Quartzite and conglomerate	
Silurian					
Ordovician	LAURENTIAN MARGIN Limestone,dolostone,sandstone and shale Basalt Slate, phyllite and chert	COVER ROCKS OF GREEN MOUNTAIN MASSIF Slate, phyllite, schist and marble Dolostone Albite schist, granofels, quartzite and conglomerate	TACONIC ALLOCHTHON Slate, phyllite, limestone and quartzite Phyllite, dolostone, limestone and quartzite	TRANSITIONAL MARGIN ROCKS Conglomerate,phyllite and meta-basalt ROWE-HAWLEY ZONE Slate, Phyllite, schist, granofels and amphibolite Phyllite, schist and quartzite Carbonaceous phyllite,schist,quartzite and amphibolite Schist, phyllite and amphibolite	EARLY TO LATE TACONIAN ACCRETED TERRANE Slate,phyllite and meta-volcanics Gneiss Metasandstone, metasiltstone and phyllite ROWE SCHIST Phyllite, schist and quartzite Ultramafic rocks
Cambrian	Dolostone, limestone, quartzite and conglomerate Quartzite, phyllite and conglomerate				
Neoproterozoic	Diabase dikes Pegmatite dikes Metagabbro and gneiss Quartzite and marble	INTRUSIVE ROCKS Granite GREEN MOUNTAIN MASSIF AND EASTERN DOMES Granite and pegmatite Gneiss,quarz schist, marble and quartzite Gneiss			
Mesoproterozoic					

Fig. 1. Summary of geology of Vermont. Simplified Ratcliffe *et al.* (2011).

ト、変砂岩、グラノフェルス、角閃岩からなり、シルル紀はじめには礫岩も形成された。これらの堆積物にシルル紀からデボン紀の、花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩、はんれい岩などの深成岩が貫入している。

ジュラ紀から白亜紀には、閃長岩やエセクサイトなどのアルカリ深成岩(White Mountain Igneous suite)が貫入している。中新世には褐炭をはさむシルト、砂、礫が堆積している。

謝 辞 本稿は、赤坂正秀編集委員長の助言で改善されました。ここに感謝申し上げます。

引用文献

- Bateman, P.C. (1992): Plutonism in the central part of the Sierra Nevada Batholith, California. pp. 186, USGS Prof. Paper 1483, <http://pubs.usgs.gov/pp/1483/report.pdf>
- Carson, C. (2011): Cape Denison, the birthplace of Australian Antarctic expeditions. AusGeo News, Dec 2011, Issue no. 104, http://www.ga.gov.au/image_cache/GA20294.pdf
- Cross, A., Jaireth, S., Huston, D. and Skirrow, R. (2012): Dating Australia's uranium deposits. AusGeo News, June 2012, Issue no. 106, http://www.ga.gov.au/webtemp/image_cache/GA20846.pdf
- Demas, A and Medlin, J. (2012): Afghanistan the First Country Mapped using Broad Scale Hyperspectral Data. USGS Newsroom, released 7/17/2012, <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3280>
- Hansen, K. (2012): Gold, lead and death in Nigeria. Earth, February 20, 2012, <http://www.earthmagazine.org/article/gold-lead-and-death-nigeria>
- King, T.V.V., Kokaly, R.F., Hoefen, T.M., Dudek, K.B. and Livo, K.E., (2011): Surface materials map of Afghanistan: iron-bearing minerals and other materials: USGS Sci. Invest. Map 3152-B, one sheet, scale 1 : 1,100,000, <http://pubs.usgs.gov/sim/3152/B/>
- Kokaly, R.F., King, T.V.V., Hoefen, T.M., Dudek, K.B. and Livo, K.E., (2011): Surface materials map of Afghanistan: carbonates, phyllosilicates, sulfates, altered minerals, and other materials: USGS Sci. Invest. Map 3152-A, one sheet, scale 1 : 1,100,000, <http://pubs.usgs.gov/sim/3152/A/>
- Ober, J. A. and Demas, A. (2012): U.S. Mineral Values Up in 2011. USGS Newsroom 3090, released 1/30/2012, <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3090>
- Ratcliffe, N.M., Stanley, R.S., Gale, M.H., Thompson, P.J. and Walsh, G.J. (2011): Bedrock geologic map of Vermont: USGS Sci. Invest. Map 3184, 3 sheets, scale 1 : 100,000.
- 高橋裕平(2012): 2011年の地質鉱物関連英文ニュース誌の話題「鉱物資源展望, ジオパークなどの地域地質, 及び造岩鉱物」. 岩石鉱物科学, **41**, 133-144.
- USGS (2012): Mineral commodity summaries 2012. pp. 198, USGS, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>
- Walsh, G., Mehrtens, C. and Becker, L. (2012): New Geologic Map of Vermont Unveiled. USGS newsroom, 4/11/2012, <http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=3167>
- Waltham, T. (2012): Yosemite-the Incomparable Valley. Geology Today, **28**, 31-38, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2451.2012.00823.x/abstract> (アブストラクトのみオープンアクセス)