

サドベリー巨大ニッケル鉱床は隕石起源？ —高圧型鉱物による証拠—

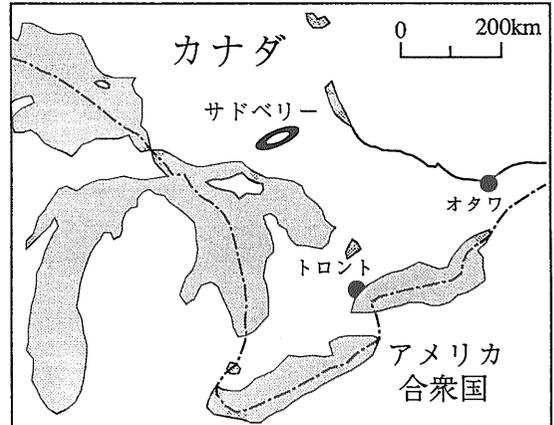
月村 勝宏¹⁾

1. はじめに

アメリカとカナダの国境にある五大湖から北へ50 km くらい行くと、19億年前の隕石の衝突でできたという大きな穴があります。この穴はサドベリー隕石孔と呼ばれており、南北27 km、東西60 kmで、東京都とほぼ同じ大きさです(第1図、第2図)。この隕石でできた穴の壁面にはニッケルや銅をたくさん含んでいる岩石がへばりついています。このニッケルや銅は掘って売られています。特に、ニッケルは多く、ここだけで世界の消費量の70%を供給したこともあるほどです。

ニッケルはあまり地表に出てこない元素ですが、サドベリーには多量のニッケルがあります。そこで、なぜここに多量のニッケルがあるのかを多くの人が研究しました。ある人は隕石からニッケルが来たと言い、また別の人は地下から来たと言います。しかし、19億年も昔のことなので、どちらが正しいかを定める証拠があまり残っていません。

私たちは、サドベリーのニッケルがどこから来たかを探るために、サドベリーのニッケルでできた鉱物(ペントランダイト)の原子配列を調べ、この鉱物が非常に高い圧力を経験したことを発見しました。これが本当ならば、ペントランダイトは小惑星の内部でできたか、隕石の衝突を経験したかのどちらかになります。ここでは、サドベリーの地質を説明し、私たちのペントランダイトの研究内容を紹介します。そして、ニッケルがどこから来たかを考えてみます。



第1図 カナダにあるサドベリー隕石孔の位置

2. サドベリー隕石孔の地質

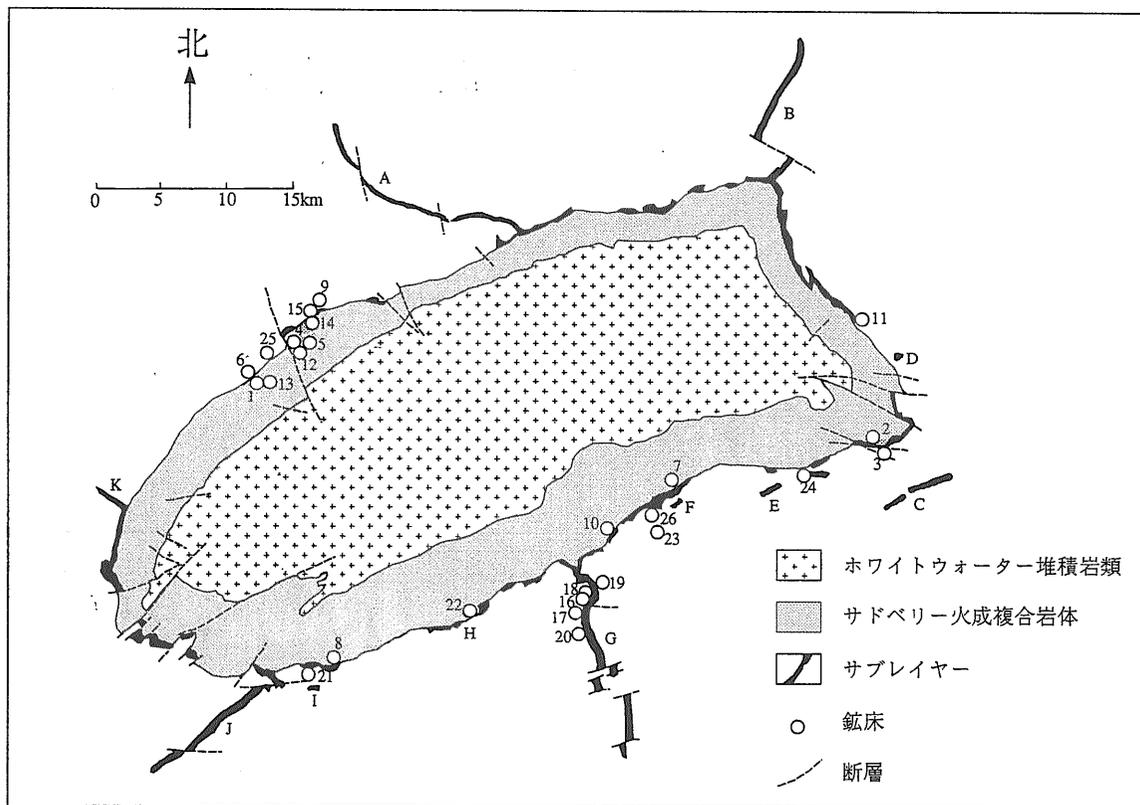
サドベリーの地質はメロンを半分に切って、切口を上に向けたような構造です。メロンの皮に当たる部分は、隕石孔にへばりついている火成岩で、ニッケルや銅をたくさん含んでいます。メロンの食べる部分も火成岩です。種のある中心部分が堆積岩です。

サドベリーが隕石でできた穴だと発見したのは、ディーツというアメリカ人です。ディーツは世界中の隕石孔を調べており、1964年にサドベリーが隕石孔だと発表しました。その証拠として、隕石孔のまわりに衝撃を受けた跡があることをあげています。ディーツはサドベリーの地質のでき方を次のように説明しました。

- 1) 隕石が落ちて、地表に穴があいた。
- 2) その穴の壁面に隕石がへばりついた(メロンの皮)。

1) 地質調査所 鉱物資源部

キーワード: 隕石, サドベリー, ニッケル, ペントランダイト, 原子配列, 結晶構造, 温度, 圧力, 高圧型



第2図 サドベリー隕石孔の地質

- 3) 地表に穴があいて、地面が軽くなったので、穴の地下にマグマができた。
- 4) マグマが地表にでて穴を満たした。
- 5) マグマが冷えて固まり、火成岩(メロンの食べる部分)ができた。
- 6) 地下からさらにマグマが吹きだし、火山灰が積もって、堆積岩(メロンの種)ができた。
- 7) 周囲から堆積物が供給され、火山灰の上に砂岩や粘板岩(メロンの種)が堆積した。

ディーツの研究によりサドベリーの地質の解明は一步進みましたが、サドベリーの地質構造の成り方には、いまだにいろいろな意見があります。隕石なんか落ちていないという人もいます。その人たちはサドベリーの地質が隕石の落下とは関係ない火成活動でできたと主張しています。ディーツは、ニッケルや銅を含んでいるメロンの皮を隕石だと言っていますが、多くの方はマグマが冷えて固まったものだと思っています。また、マグマは地下にはできてお

らず、隕石の落下で地表の岩石が溶けたのだと言う人もいます。ディーツが火山灰だと言った岩石は、火山灰ではなく、隕石の落下により地表の岩石が粉々になり積もったものだという意見もあります。

こんなにいろいろな意見がでてくるのは、決定的な証拠がないからです。地質調査、岩石の化学分析や同位体分析、年代の測定などたくさんのデータがあるのですが、サドベリーの地質の成り方を明らかにするには、証拠はまだ十分ではありません。

最後にサドベリーの地質をもう少しだけ補足いたします。メロンの皮に当たる部分をサプレイヤー(Sublayer)と呼んでいます。これは塩基性から中性の岩石でできています。サプレイヤーには2種類あり、隕石孔の壁面に不連続に平行にくっついているもの(Contact Sublayer)と、周囲の岩石の割れ目に入りこんでいるもの(Offset Sublayer)とがあります。どちらの種類にも鉱床があります。鉱石鉱物は、ペントランダイト $(\text{Fe, Ni})_9\text{S}_8$ 、黄銅鉱 CuFeS_2 、磁硫鉄鉱 FeS 、黄銅鉱 FeS_2 、磁鉄鉱 Fe_3O_4 です。

メロンの食べる部分がサドベリー火成複合岩体 (The Sudbury Igneous Complex) です。下部が斜方輝石ハンレイ岩, 上部がグラノファイヤーで, 全体の厚さは1.5-3.0 km です。メロンの種のある部分がホワイトウォーター堆積岩類 (The Whitewater Group) です。この堆積岩類の厚さは全体で4 km です。下から凝灰岩と凝灰角レキ岩からなるオナッピング層 (Onaping Formation), 粘板岩からなるオンワチン層 (Onwatin Formation), 砂岩と泥岩からなるチェルムスフォード層 (Chelmsford Formation) があります。

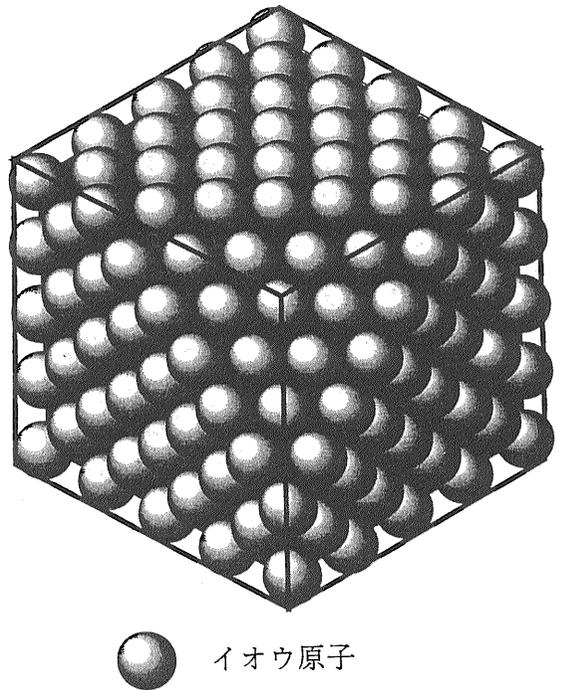
サドベリーの詳しい地質については, Dressler (1991) の総説を参照ください。サドベリーが隕石孔であるとした Dietz (1964) の論文も重要です。日本語の解説書としては, 兼平 (1979) による「サドベリーの大隕石孔」, 地質調査所環境地質部の高田 (1994) による「サドベリー隕石孔訪問記」があります。

3. ペントランダイトの原子配列

私たちが研究したペントランダイト ($(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$) は, ニッケル鉱物の主要な鉱物です。ペントランダイトは, 塩基性火成岩にも含まれており, 地球上に広く分布しています。この鉱物は炭素質コンドライトという隕石や星間宇宙塵に多量に入っていることでも注目されています。

ペントランダイトは, 鉄とニッケルとイオウの原子できています。このうちイオウ原子は, パチンコ玉を積み重ねたように並んでいます (第3図)。このすきまに, 鉄やニッケルが入ります。ペントランダイトの場合, あるブロックには, 鉄やニッケルがひとつだけ入り, 別のブロックには, 鉄やニッケルが8個入ります。この2種類のブロックは交互に並んでいます (第4図)。

イオウが建物に相当し, すきまが部屋に相当します。すきまに入る鉄やニッケルは人間です。ひとつだけしか入らないブロックは個室であり, 8個入るブロックは大部屋です。ペントランダイトには個室と大部屋は同じ数だけあります。個室が10室あれば, 大部屋も10室あります。この場合, 個室に10人, 大部屋に80人, 合わせて90人の鉄とニッケルが入ります。簡単のため, 鉄とニッケルが同数だと



第3図 立方最密パッキング

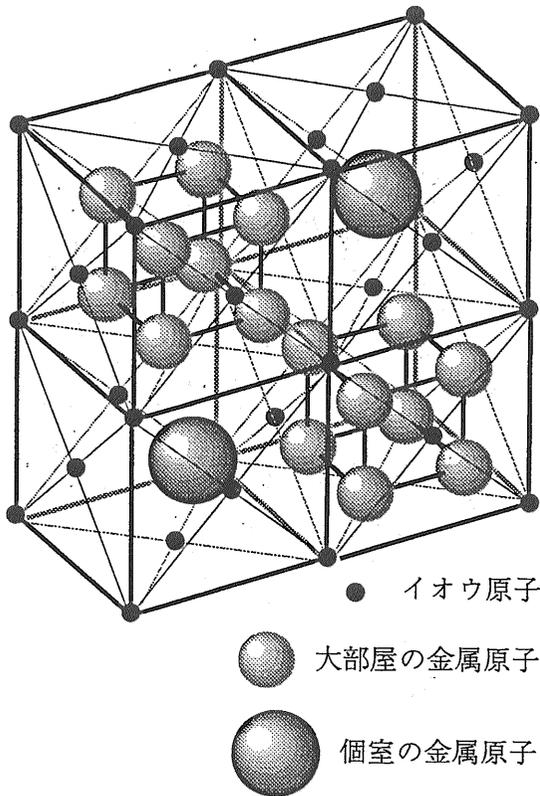
すると, 鉄とニッケルはそれぞれ45人づついることとなります。

ペントランダイトの内部では, だれが個室を占めるかで, 争いがおきています。鉄がたくさん個室を取る場合もあるし, 逆にニッケルがたくさん個室を取る場合もあります。どちらがどれだけの個室を取るかは, 温度や圧力で決まります。私たちは, 温度や圧力でこの状況がどのように変わるかを調べました。

鉄やニッケルは次のような性質をもっています。

- 1) 鉄もニッケルも個室に入りたがっています。
- 2) 鉄は孤独を好むので, 個室に入るとあまりできません。
- 3) ニッケルは元気なので, 個室に入っても外に出たがります。
- 4) 鉄が大部屋に入ると, 孤独を好むので, 隅に寄り壁を押し大部屋を広げて, 他人との接触をさけようとします。

最初に, 鉄とニッケルで個室を5室づつ分けたとします。そして, 冬の寒い季節だとどうなるかをお話いたします。孤独が好きな鉄は個室にいると



第4図 ペントランダイトの結晶構造. ペントランダイトでは、イオウ原子の立方最密パッキングのすきまに鉄やニッケル(金属原子)が入っている。ひとつの金属原子があるブロック(個室)と8個の金属原子があるブロック(大部屋)が交互に並んでいる。

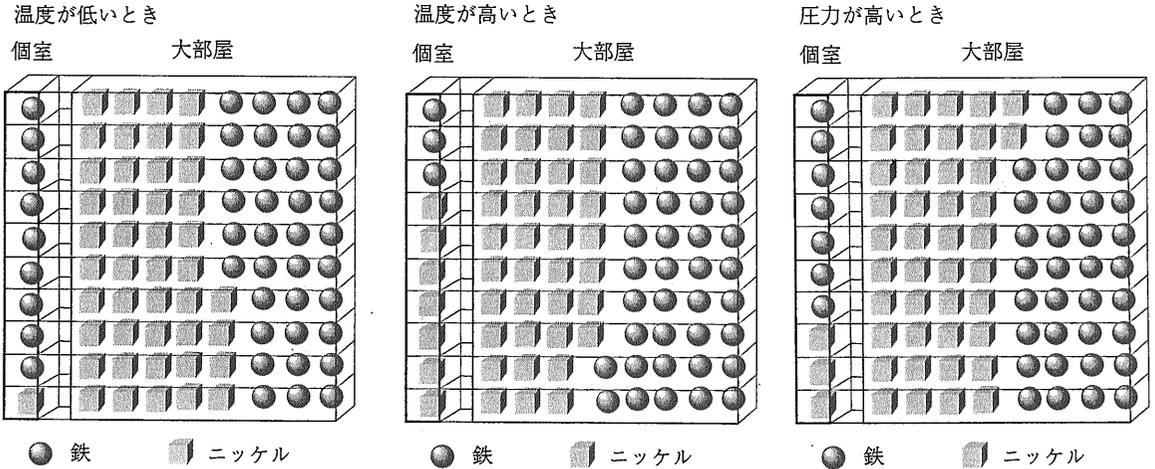
居心地がよく暖かいのでほとんど部屋を空けません。ニッケルは個室に入っても元気なので、時たま部屋を空けます。ニッケルが10日に1回部屋を空けるのに対して、鉄は100日に1回くらいしか部屋を空けません。一方、大部屋は暖房があまりきかない寒い部屋なので、鉄とニッケルは、ときどき部屋をでて、個室が空いていないかを見にいけます。もし、空いている個室があれば乗っ取るのです。たくさん空いているのは、ひんぱんに外に出るニッケルがいた個室です。ここにニッケルが入る場合もあるし、鉄が入る場合もあります。ニッケルが入ればもともとと同じですが、鉄が入ると鉄が一部屋分得したことになります。こんなことが何回も繰り返されるとニッケルは個室からだんだんしめだされて、ほとんどの個室が鉄により占拠されてしまいます。10の個室のうち鉄が9室くらい占拠してしまいます。

これが温度の低い(絶対零度に近い)ときの状態です(第5図)。

冬の寒い時期から、春になり少し暖かくなりました。暖かくなってきたので個室にいるニッケルも鉄も外に出たくなるときが増えます。冬の寒いときはほとんど外にでなかった鉄も、天気の良い日だけは外に出たくなります。ニッケルが1週間に7回部屋を空けるとすれば、鉄も1週間に3回くらい部屋を空けるようになります。こうなると、大部屋にいたニッケルも鉄から個室を取り返すチャンスが増えます。冬が長かったので、個室を鉄が9室も占拠しているのに対して、ニッケルは1室しか占拠していません。空いている部屋の割合を計算してみると、鉄のいる個室は1週間に27回(=9室×3回)空くのに対して、ニッケルのいる個室は1週間に7回(=1室×7回)しか空きません。したがって、鉄のいた個室はニッケルに乗っ取られやすくなり、鉄の個室は9室から7室に減ります。そして、この状態で落ち着きます。このときの空いている部屋の割合を計算してみると、鉄のいる部屋は1週間に21回(=3室×7回)、ニッケルのいる部屋も1週間に21回(=7室×3回)と同数の部屋が空くので、乗っ取られる危険は同じになり、この状態でおちつくのです。さらに、温度が高くなると、鉄もニッケルも毎日1回個室を空けるようになります。こうなると、個室を乗っ取られる危険は鉄もニッケルも同じになるので、個室を占拠する割合も同じになります。

以上を熱力学の言葉で説明すると、「鉄が個室に入った方が安定であるが、温度が高くなるとバラバラになる効果が大きくなるので、個室は鉄とニッケルが同じくらい入るようになる」ということになります。しかし、実際はもう少し複雑な要素があります。それは熱振動によるバラバラの割合も考えなければならぬことです。鉄よりもニッケルが個室に入った方が熱振動によるバラバラの割合が大きいので、温度が高いときはニッケルが個室に入った方が有利になります。したがって、実際には温度が高いとニッケルが個室を7室くらい占拠してしまいます(第6図)。

少し複雑になりますが、熱振動の効果も建物のたとえで説明します。実は鉄は選り好みが多いのです。冬の寒いときには、あまり選り好みをしない



第5図 温度が低いときのペントランダイトの金属原子の配列. 鉄がほとんどの個室を占拠している.

第6図 温度が高いときのペントランダイトの金属原子の配列. ニッケルが半分以上の個室を占拠している.

第7図 温度が高く、圧力が高いときのペントランダイトの金属原子の配列. 鉄が個室をニッケルから取り返している.

で、空いている個室があればすぐに乗っ取ってしまいますが、暖かくなり余裕があると、個室が空いても気に入らなければ入らないのです。ところが、ニッケルは空いていれば選り好みをしないで個室を乗っ取ってしまうのです。したがって、温度が高いとニッケルの方がたくさんの個室を占拠するのです。温度が低くても、鉄は温度が高いときと同じように選り好みすると仮定するのが、高温近似です。しかし、実際にはこの選り好みが高い温度ではなくなってきました。これは量子効果によるものです。私たちの計算にはこの量子効果をいれませんでした。この効果を組み込むほどの精度の高い実験結果が得られなかったからです。

圧力の影響をみるために、大部屋にいる鉄の状態を見てみます。鉄は大部屋に入ると、まわりと関係を持ちたくないで、それぞれが部屋の壁を押してお互いが離れ、できるだけ人と接触しないようにします。この結果、大部屋に鉄が入ると、部屋を大きくしてしまい、全体の建物が膨らみます。

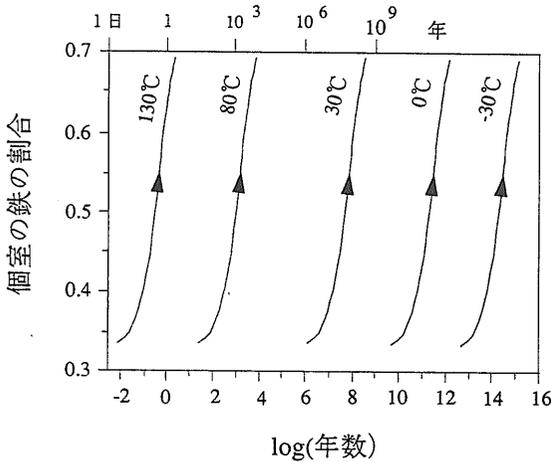
建物に圧力がかかるとどうなるかを見てみます。建物に圧力がかかると、部屋を狭くするように力が働きます。すると、大部屋にいる鉄は困ります。部屋が小さくなるので、どうしてもまわりの人と接触するようになってしまいます。すると今度は鉄が居心地が悪くなって、大部屋をでて個室に入りたいと

考えます。そこで、鉄は何回も大部屋を出て、空いている個室がないかを探しにいきます。こうした努力が報われて鉄が個室を少し取り返します(第7図)。

以上のように、個室に何人の鉄が入るかは温度と圧力で決まります。したがって、ペントランダイトの個室に何人の鉄が入っているかを見れば、そのペントランダイトがどんな温度や圧力のもとにあったかを推定できるのです。

ペントランダイトの内部の様子から、ペントランダイトの経験した温度や圧力を推定するには、内部の人間がどれくらいの速さで入れ替わるかを、知っておく必要があります。ある圧力を経験したとしても、入れ替わりがゆっくりで、ほとんど変化がないかもしれません。あるいは、高圧でできた配置が、高圧を抜いたとたんに、低圧の配置にすぐ変わってしまい、高圧を経験した痕跡を残さないかもしれません。

そこで、私たちはペントランダイトの入れ替わる速さがどのくらいかを調べました。零下30℃では、50兆年かかっても動きがありません。0℃では、5億年でもほとんど変化がなく、20億年でようやく少し変化が見えます。30℃では、500万年で変化し始め、20億年くらいで変化が終了します。80℃では50年で変化し始め、1万年で変化が終了します。



第8図 個室の鉄の割合が0.33から最終状態の0.69に変化するときのようす。温度により変化に要する時間は大きく異なる。

また、300°Cでは1秒以内に変化が終了してしまいます。このように、変化する速さは温度によって大きく変わります(第8図)。

以上で私たちのペントランダイトの研究の説明は終わります。定量的な話をするには、熱力学や反応速度論を使い、これらを数式で表現する必要がありますが、今回は数式を使わないようにいたしました。定量的な詳しい内容については Tsukimura et al. (1992)を参照ください。

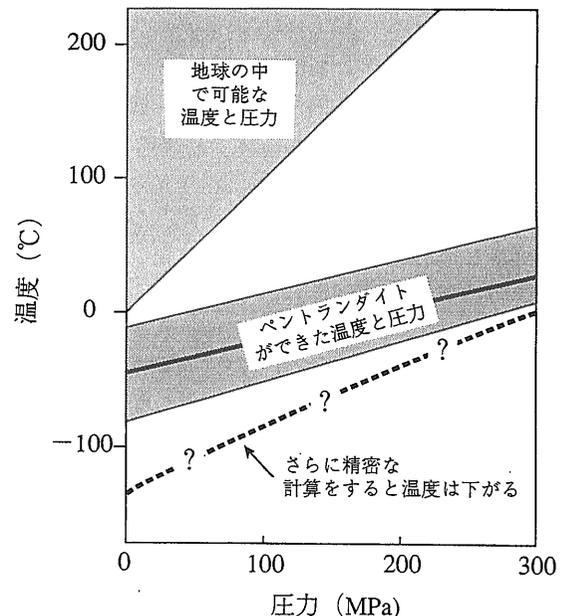
4. サドベリーのペントランダイトは隕石か？

私たちは、手の大ききくらいの鉱石からペントランダイトだけをとって、個室にいる鉄の割合を調べました。どこをとっても個室の鉄の割合は69%でした。移動が起こっている最中のペントランダイトは、場所によって個室の鉄の割合が異なるので、今回調べたペントランダイトは、ある温度圧力で移動が終わっている状態を保っていると考えられます。また、この割合から温度と圧力を推定すると第9図のようになります。

第9図に地球の中で可能な温度圧力の範囲をしめしましたが、ペントランダイトが示す温度圧力の範囲と、地球の中で可能な温度圧力の範囲は一致しません。圧力が0 MPaだとすると、ペントランダイトが示している温度は $-40 \pm 33^\circ\text{C}$ です。この温度は地球内では低すぎます。また、温度が30°C

だとすれば、ペントランダイトが示している圧力は300 MPaです。この圧力は地球内では高すぎます。したがって、サドベリーのペントランダイトが示す温度圧力は、地球内部では実現しないことがわかります。このペントランダイトの示す温度圧力は、低温高圧側に偏っています。このような温度圧力は、地球よりも小さい惑星または衛星で実現されます。サイズが小さければ、表面積と体積の比が大きくなるので、放射性元素により発生した熱が表面から逃げやすくなり、内部の温度は低下します。あるいは、サドベリーのペントランダイトの原子配列は隕石が地球に衝突したときの高い圧力を示しているのかもしれませんが、いずれにしても、この結果はサドベリーのペントランダイトが地球外の天体で生成された可能性を示唆しています。

ペントランダイトの原子配列以外にも、サドベリーのニッケルが宇宙起源である可能性を示唆する事実もあります。ペントランダイトが星間宇宙塵や炭素質コンドライトによくある鉱物であることが最近指摘されています。これはペントランダイトが小惑星内部の主要な鉱物であることを示しています。ペントランダイトを多量に含む小惑星が地球に衝突すればニッケル鉱床ができていいはずですが、また、



第9図 原子配列から求めたサドベリーのペントランダイトが経験した温度圧力領域。灰色の部分は測定誤差です。

ニッケルは地殻に濃集しにくい元素であり、ニッケルの宇宙存在度は地殻存在度に比べて1,000倍大きいことから、地殻で集まったとするより、隕石だとする方が自然です。

ディーツもペントランダイトのであるサブレイヤーは、隕石起源であると考えています。地質や地球化学の点からもサブレイヤーが隕石起源であるとしても、矛盾無く説明できるようです。また、地質調査からサブレイヤーが火成複合岩体よりも先にできたとして、サブレイヤーは隕石からできたと主張する人もいます。さらに、周囲にできている火成岩の量の割には、硫化物が多すぎるとの指摘もあります。これほどたくさんの硫化物はマグマに溶けないからです。

多くの人は、ニッケルのあるサブレイヤーが多量の銅を含んでいることから、隕石では有り得ないとしています。小惑星の内部で銅が集まっている部分がある可能性を否定できないと思います。それは、銅も宇宙存在度の方が地殻存在度より10倍ほど多い元素だからです。

ペントランダイトの原子配列からニッケルが宇宙起源であるとするには、解決すべき問題もあります。それは原子配列が宇宙で生成したままの状態あるいは落下の衝撃による高圧の状態を保っているかを確認することです。宇宙で生成したままの状態を保つには、高温状態が長期間続かないことが必要です。30°Cの状態が100年以上続くと、ペントランダイトの内部の鉄やニッケルは動き始めるので、宇宙で生成したままの状態を保つには、サドベリーの地下が30°C以上になった期間が100万年以下である必要があります。隕石が衝突したときや火成活動のときに原子配列が変化するほどの高温にならなかった必要もあります。原子配列を根拠にニッケルが宇宙起源とするには、その後の反応も考えなければなりません。

5. おわりに

これまでのペントランダイトの研究から、サドベリーのペントランダイトの起源が隕石であると考えましたが、結論をだすにはまだ早いと思っています。今回の仮説を確実なものにするには、さらに精密な実験を行う必要があります。

私たちは、高温の実験をして、低温での原子配列を計算するときに高温近似を用いましたが、さらに精密な実験をして低温での量子効果を考慮に入れたと思っています。量子効果を見積もれる実験をおこなえば推定温度はさらに低くなり、ペントランダイトの宇宙起源説が有利になります。量子効果を見積もるには、熱測定による方法も有効だと考えています。

サドベリーのさまざまな場所やサドベリー以外から採取したペントランダイトの原子配置を測定してみる必要もあります。熱履歴が異なる場所から取ったサドベリーのペントランダイトを測定してみれば、熱履歴により差がでるかもしれません。宇宙起源ではないと確実にわかっているペントランダイトを測定すると、サドベリーとは違った結果がでるかもしれません。また、隕石中のペントランダイトや小惑星内部のペントランダイトを調べれば、サドベリーと同じ原子配列になっているかもしれません。

サドベリーのニッケルが隕石起源であるならば、隕石孔を探せばニッケルが見つかるかもしれません。隕石の衝突は、ニッケル鉱床を作るだけでなく、地球の元素存在度や活動にも影響を与えているはずで、この研究が進展して、隕石の落下が地球へどのような影響を与えていたかの研究にもつながるかもしれません。

ここで説明したサドベリー鉱床の隕石説の研究に関心がある方は、共同で研究を進めたいと考えておりますので、この機会にご連絡くだされば幸いです。

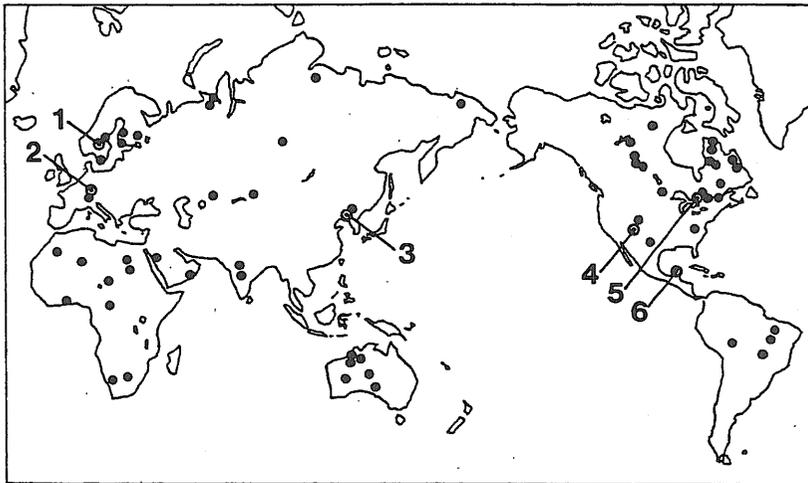
参考文献

- Dietz RS (1963) : Sudbury structure as an astrobleme. *J. Geol* 72, 412-434.
- Dressler, B. O., Gupta, V. K. and Muir, T. L. (1991) : The Sudbury Structure. In *Geology of Ontario* (Thurston, P. C., Williams, H. R., Sutcliffe, R. H. and Scott, G. M., eds.), 97-136. Ontario Geological Survey Spec. Volume 4, Part 1, Ministry of Northern Development and Mines.
- 兼平慶一郎(1979) : サドベリー大隕石孔。地質構造の形成(植村武, 水谷伸治郎編), 123-135. 岩波地球科学 9, 岩波書店.
- 高田 亮(1994) : サドベリー隕石孔訪問記。火山学会月惑星グループ報告書(惑星火山学入門), 印刷中.
- Tsukimura, K., Nakazawa, H., Endo, T. and Fukunaga, O. (1992) : Cation distribution in pentlandite (Fe, Ni)₉S₈: dependence on pressure and temperature and kinetics of the cation exchange reaction. *Phys Chem Minerals*, 19, 203-212.

TSUKIMURA Katsuhiko (1994): Is Sudbury nickel ore deposit cosmogenic? —Evidence from crystal structure of pentlandite—

〈受付：1993年6月21日〉

~~~~~ インパクトクレーター ~~~~~



- 主なインパクトクレーターの位置(●)
- 1：シルヤン
  - 2：リース
  - 3：遼寧省の環状構造
  - 4：メテオールクレーター
  - 5：サドベリー
  - 6：チクシュループ

(NASA, "Astronaut's Guide to Terrestrial Impact Craters", 1988を加筆修正)

地球上で確認された隕石孔(インパクトクレーター)はそう多くはない。宇宙から見たインパクトクレーターを紹介したNASAの小冊子では未確認を含めて59個のクレーターが取り上げられている。推定の域を出ないものを含めておそらく100前後であろう。ここでは、本号の他の部分で記述されていない幾つかのクレーターを簡単に紹介する。

シルヤン(Siljan)

スウェーデン中部スカンディナヴィア楕状地のほぼ中央にあり、デボン紀末のものとする。直径52 kmでヨーロッパ最大の隕石孔。現在中心部は盛り上がった地形となっており、その周りの環状の凹地に湖が点在する。ここでは、天文学者 T. Gold が提案した深層無機起源メタンガスを期待して深層ボーリングなど各種探査が実施された(地質ニュース, 419号(1989))。

メテオールクレーター(Meteor Crater)

米国アリゾナ州にある、おそらく世界で最も有名な隕石孔。直径は1.2 km と小さいが新しいため(約

5万年前)形がよく保存されている。発見当初は火口と考えられたが、その後の研究により地球上で最初に確認されたインパクトクレーターとなった。探鉱技師 Barringer が隕石本体を求めて勢力的に探査したことで知られ、バリンジャー隕石孔とも呼ばれる。ここからは SiO<sub>2</sub> の高圧相であるコーサイトとスティショバイトが初めて発見された。

チクシュループ(Chicxulub)

ユカタン半島北端部における石油探査により、埋没した巨大クレーターが発見された(1981年)。重力異常から見積もられた直径はおおよそ180 km で、既知のインパクトクレーターとしては地球最大の規模となる。ボーリングによって得られたクレーター底部のガラス質岩石について、白亜紀-第三紀(K-T)の境界に相当する65 Ma という<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代が得られた。カリブ海周辺ではいわゆる K-T 境界テクトタイトなどが広く分布しており、恐竜などの絶滅に関連したクレーターとして最近とみに興味を持たれている。

(地質ニュース編集委員会 宮崎光旗)