温泉水中での珪華の形成

Precipitation of silica sinter in hot spring water

Abstract

赤羽久忠* 安田郁子** 宮島 宏***
後藤克己**** 朴木英治*

Hisatada Akahane, Ikuko Yasuda**,
Hiroshi Miyajima***, Katsumi Goto****
and Hideharu Honoki**

Several occurrences of silica sinter deposited in hot spring water were examined.

It was clarified that the excess silica in hot spring water become amorphous silica spheres. Silica sinter was formed by adhesion of these silica particles to algae or mold fungi.

Silica sinters which have become quartz mineralogically maintain their amorphous spheric external form.

Key words : hot spring, hot spa, silica, silica sinter, stromatolite

1996年8月12日受付.

1996年10月21日受理.

* 富山市科学文化センター.

Toyama Science Museum, 1-8-31 Nishinakanomachi, Toyama 939, Japan

** 富山県立大学.

Toyama Prefectural University, 5180 Kosugi, Imizugun, Toyama Prefecture 939-03, Japan

*** フォッサマグナミュージアム.

Fossa Magna Museum, 1313 Ichinomiya, Itoigawa 941, Japan

**** 前富山大学理学部. 札幌市中央区南12条西18丁目2-11 在住

2-11, Minami-12 jou Nishi-18 chome, Chuo-ku, Sapporo 064, Japan

はじめに

温泉水は地表に湧出することによって、温度・圧力が降下する。それにより珪酸(SiO_2)の溶解度が減少し、飽和して珪酸が析出・沈殿することがある。これらは、時に珪華(亀井, 1956; Walter et al., 1976 など)や蛋白石などとして沈殿する(吉沢, 1904; 丸野・久野, 1985; 赤羽, 1993 など)。

一方, Walter らによって, アメリカのイエローストーン国立公園内の温泉でストロマトライトなどの藻類に付着した珪華が報告(Walter, 1976 a, b; Walter et al., 1972, 1976)されて以来, 各地の珪華にストロマトライトなどの藻類の痕跡が見られるという報告が行われている(White et al., 1989; 八幡, 1994; 林ほか, 1994; 赤井ほか, 1995 など)。また, 珪酸と微生物との関わりは, 深海底の海嶺付近の温泉などからも報告され, バイオミネラライゼーションの観点からも注目されはじめている(Robert and Schiffman, 1990; 梶島ほか, 1996 など)。

筆者らは, いくつかの陸上の温泉において珪酸の沈殿を調べの中で, 珪華の形成機構に関して一定の知見を得たので報告する。なお, 本研究の主として野外調査・資料の収集からまとめに至る全般的なことがらを赤羽が, 主として藻類・菌類の分類・同定等に関することがらを安田が, 主として蛍光 X 線や EPMA による分析に関する部分を宮島が, 温泉水の水質分析に関する部分を後藤・朴木が担当した。

本研究を進めるにあたって, 富山大学理学部の氏家 治教授には EPMA による分析の, 鳴門教育大自然科学地学教室の村田 守助教授には蛍光 X 線分析の指導を受け, 富山大学教育学部の相馬恒雄教授・棚座圭太郎助教授には X 線粉末法の便宜をはかっていただいた。また信州大学理学部の山田哲雄教授・九州大学工学部大学院生(現資源環境研)の林秀氏にはいくつかの文献を教えていただいた。中房温泉株式会社の常務取締役百瀬孝仁氏には温泉および珪華の調査を快諾していただいた。さらに, 北海道立地下資源調査所の八幡正弘氏には, 北海道勢多地域の珪華についてご教示いただき, 資料をいただいた。東北大学理学部の秋月瑞彦教授には, 論文に対する貴重なご意見をいただいた。以上の方々にお礼申上げる。なお, この研究を行うにあたって, 必要経費の一部に平成6年度文部省科学研究費奨励研究 B (課題番号=06916017, 18 万円)を使用した。

温泉沈殿物としての蛋白石

蛋白石の一般的な構造については, 1960~70 年代になって電子顕微鏡の発達により, 内部の微細な構造の解明が進展した。それらによって, 宝石になるような貴蛋白石は径 0.2~0.3 μm で大きさの揃った珪酸の球状体から構成されていることおよびそれらの規則正しい配列による光の回折によって美しい遊色が生ずることなどが明らかになってきた(Pense, 1963; Darragh et al., 1966; Sanders, 1968; Akizuki, 1970

第1表. 珪華の化学組成.

	A	B	C	D
SiO ₂	97.49	95.54	99.76	99.04
TiO ₂	0.05	0.04	0.01	0.05
Al ₂ O ₃	1.24	2.25	0.12	0.67
Fe ₂ O ₃	0.54	0.25	0.04	0.09
MnO	0.01	0.02	tr	tr
MgO	0.13	0.02	tr	tr
CaO	0.23	0.60	0.04	0.07
Na ₂ O	0.16	0.42	tr	0.02
K ₂ O	0.15	0.84	0.02	0.05
P ₂ O ₅	0.01	0.01	tr	0.01
Total	100.01	99.99	99.99	100.00

A: 牧園産珪華, B: 中房温泉珪華, C: 宝泉寺珪華, D: 勢多珪華

蛍光 X 線による, 高シリカの標準試料としては, ゼーゲルコーン社製 JRRM 201 (SiO₂ = 84.36 wt.%), JRRM 205 (SiO₂ = 90.96 wt.%), JRRM 210 (SiO₂ = 97.69 wt.%) を用いた.

第2表. 鹿児島県牧園産の魚卵状蛋白石の EPMA 分析による化学組成.

	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	91.20	90.39	90.53	90.05	92.08	91.88	90.26	91.79
TiO ₂	tr	tr	0.05	0.04	tr	0.02	0.06	tr
Al ₂ O ₃	0.14	0.15	0.15	0.17	0.21	0.11	0.35	0.14
Cr ₂ O ₃	tr	tr	tr	0.01	tr	tr	tr	tr
FeO*	0.01	tr	tr	0.02	0.01	0.01	tr	0.04
MnO	tr	tr	tr	0.03	tr	0.03	tr	0.03
MgO	0.02	0.01	tr	tr	0.01	0.01	tr	tr
NiO	0.04	tr	tr	0.02	0.05	tr	0.02	tr
CaO	0.02	0.06	0.03	0.04	tr	0.01	0.05	0.03
Na ₂ O	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06
K ₂ O	0.01	0.03	0.05	0.05	0.01	0.03	0.02	0.03
Total	91.49	90.67	90.86	90.48	92.42	92.14	90.82	92.12

*: Total iron as FeO

など).

それ以来, 主としてオーストラリアの Darragh らのグループによって蛋白石の研究が行われた. オーストラリアの乾燥地帯では, 水分の蒸発によって珪酸に飽和した地下水から珪酸の球状体が析出する. 粒径の揃った珪酸の球状体が整列した充填構造を形成して貴蛋白石 (precious opal) となり, 球径が不揃いで配列にも規則性がない場合は遊色を示さず, 普通蛋白石 (common opal) となる (Darragh et al., 1966 など).

日本における貴蛋白石は, 石川県赤瀬・福島県宝坂 (堤・坂本, 1973) などに温泉沈殿物として産出する. 富山県立山温泉新湯・秋田県秋ノ宮温泉および鹿児島県牧園産の遊色を示さない普通蛋白石や魚卵状蛋白石の産状・成因については赤羽 (1993) によって議論された. それによれば, これらの蛋白石は温泉水中に析出した珪酸の球状体が沈殿・固結することによって形成されたものである.

牧園の珪華

鹿児島県始良郡牧園町三体堂坂下に魚卵状蛋白石や珪華が産出することが知られている (丸野・久野, 1985). この珪華は層状に発達しており, かつてこの地点に湧出していた温泉

第1図. 牧園産珪華の走査型電子顕微鏡写真.

の沈殿物であることを示している.

第1表 A に, 牧園産珪華の蛍光 X 線分析による化学組成を, 第2表に牧園産蛋白石 (魚卵状蛋白石) の EPMA 分析による化学組成を示す. 珪華および魚卵状蛋白石はほとんど珪酸より成る. 通常の蛋白石が数%~10%程度の水を含むことを考え合せば, 珪華の分析値 (第1表 A) と共存する魚卵状蛋白石 (第2表) との間に化学組成上の違いはほとんどないといえることができる.

牧園産珪華の割裂面で空隙の部分走査型電子顕微鏡で観

第2図. 中房温泉元湯.

第3図. 中房温泉産珪華の実体顕微鏡写真.

察した(第1図). 珪華の空隙の壁は、藻類または糸状細菌のような糸状の生体が集ってコロニーを作っていたと思われる形態が観察される(第1図A). さらにそれらを拡大して見ると、全体が球状の物体で覆われている(第1図B, C)が、一部糸状体が露出しているように見える部分もある(第1図C). 化学分析の結果(第1表A)を合せ考えると、これらの球状体は珪酸であること以外考えられない.

中房温泉の珪華

中房温泉は、長野県南安曇郡穂高町有明にあって、白亜紀後期～古第三紀にかけて活動した有明花崗岩類(有明B型花崗岩. 佐藤, 1983)の割れ目から高温の温泉水が湧出している(第2図). 湧出口の周りにはゾル状～ゲル状の珪酸が沈殿している. 多量の珪酸を含む温泉水が地表に出て、圧力・温度の低下と藻類の作用で、沈殿したものであるという(亀井, 1956; 品田, 1984; 山田, 1992). これらゾル状～ゲル状の珪酸が脱水し、固化して珪華になったものであろう. 中部山岳国立公園内の中房温泉は、珪華が産出することで有名で、昭和3年10月4日に「中房温泉の膠状珪酸および珪華」として国の天然記念物に指定されている.

亀井(1956)は、珪酸のまだ十分凝固しない淡紫色のようかん状(ゲル状)のものの中に分生藻類(*Phormidium* sp. a, b)を多量に発見したことを報告している. 本研究でもこれ

第4図. 中房温泉産珪華の生物顕微鏡写真.

らの珪華の破断面を実体顕微鏡で観察した(第3図). 中房温泉の珪華は、いくつもの糸状の物質に珪酸が付着沈殿したもののように見える.

これらの糸状物質を確認するため、光学顕微鏡(生物顕微鏡)で観察した(第4図). 顕微鏡下の珪華には筒状の物質が見られ、その中に糸状体が観察される(第4図A, B). これらの糸状体は太さが一定でなく、1本の筒状の物質の中に入っていた糸状体が2～3束に分れているものも観察される(第4図B). また糸状体の内部に仕切りのような構造も見られないことなどから、これらの糸状体は束状に生長した糸状細菌であろうと思われる.

第5図に電子顕微鏡で観察した結果を示す. この珪華も、糸状細菌などのコロニーの形態を示し、空隙が多い. コロニーの生体は、付着した珪酸で覆われているが、一部糸状体が露出しているように見える部分もある(第5図A, B).

第1表Bに、中房温泉の珪華の化学組成を示す. 一般的に、蛋白石が数%～10%程度の水を含むことを考え合せば、この値は鉱物学的に蛋白石として妥当なものであろう.

中房温泉の温泉水中に生息する糸状細菌

一方、中房温泉の温泉水から発見された現生の糸状細菌と思われる生体のコロニーの産状を第6図に示す. 糸状細菌と思われるコロニーは、温泉水の流れの岸の岩石に体の一部を付着し、温泉水の流れの中に揺れていた. これらのコロニー

第5図. 中房温泉産珪華の電子顕微鏡による観察.

第6図. 現生糸状細菌のコロニー.

の一部を採取し、ホルマリン溶液に浸して持ち帰り安田が同定を行った。

第7図に光学(生物)顕微鏡写真を示す。採集したコロニーを構成する糸状体はほとんどが束状に生長した糸状細菌(第7図A)で、一部にラン藻(*Synechococcus* sp.)が含まれている(第7図B)。

これらの一部を乾燥して、分析電子顕微鏡で観察した。第8図の中央より右側矢印の部分に上下方向に糸状体が確認さ

第7図. 中房温泉で束状に生長した糸状細菌(A). 共生する糸状細菌(黒の矢印)とラン藻(*Synechococcus* sp., 白の矢印)(B). 光学(生物)顕微鏡写真.

れる。上半部は糸状体が露出し(第8図A)シリコンの反応は弱い、下半部を覆っている物質には強いシリコンの反応が見られる(第8図B)。シリコンの反応は珪酸によるものであろう。すなわち現生の糸状細菌が珪酸で覆われていることが確認される。

中房温泉の温泉水について水質分析を行った。第3表にその結果を示す。比較のため、野口(1976)および三宅ほか(1988)による公表された分析値の範囲も示した。これらと比較すると、少なくともここ20年間程は水質に大きな変化はなく、水素イオン濃度(pH)9.0~9.4のアルカリ性を示している。藤田・大城(1989)によれば、*Synechococcus* sp.などのラン藻は中性・アルカリ性の温泉で水温30℃~65℃ぐらいの場所でしばしば優先種になるという。温泉水の湧出後の流下による温度降下を考えれば、中房温泉の温泉水の流れの中は*Synechococcus* sp.などのラン藻類の生育にも適した環境であるといえることができる。

勢多地域の珪華と蛋白石

八幡(1994)によれば、北海道勢多地域に約3Maにはじまる湖沼性堆積物よりなる足寄層の勢多砂岩泥岩中に層厚20~200 cmの珪華が介在し、Filamentous algaeの痕跡と思われる組織(White et al., 1989)やストロマトライトによると思われる柱状の構造が認められる。堆積環境としては、熱水(温泉)の湖岸附近と考えられている(八幡, 1994)。す

第8図. 中房温泉の温泉水中に生息する糸状細菌(矢印)とそれに付着する珪酸の分析電子顕微鏡による観察。A: SEM像, B: Si-K α X線像。

なわち、この珪華は、地表に湧出した温泉水の中で形成されたものであることが地質学的に明らかになっている。

第9図は、勢多地域の珪華の切断研磨面である。切断面における構造は複雑であるが、Walter et al. (1976) がイエローストーンで観察し模式的に表したストロマトライトのツリー状の構造が明瞭に現れている。一般的に珪華は密度が小さく、内部にかなり空洞を伴う場合が多い。勢多鉱山の珪華も例外ではなく、内部に多くの空隙がある。この空隙には、時に蛋白石の沈殿が見られる(第9図、矢印)。蛋白石沈殿の堆積面は互いに平行で、重力の作用で堆積したものであることを示している。

第10図は、勢多地域の珪華中に沈殿した蛋白石の走査型電子顕微鏡写真である。珪華中の空隙に沈殿した蛋白石は、球状体から構成されている。これは温泉水中に析出した珪酸の球状体の内、珪華を形成しなかったものが一部の空隙の中に閉じ込められ、重力の方向に沈降したものと思われる。

第11図は、勢多地域の珪華の割裂面で、蛋白石の沈殿で満たされていない空隙の壁部分の走査型電子顕微鏡写真である。この珪華も空隙の壁の部分には藻類または糸状細菌などの生体のコロニーと思われる形態が見られる(第11図A)。それらの表面は、付着沈殿した珪酸の球状体の形態が観察さ

第9図. 勢多地域の珪華の切断研磨面。

第10図. 勢多地域の珪華中に沈殿した蛋白石の走査型電子顕微鏡写真。

れる(第11図B)。これが八幡(1994)による Filamentous algae の痕跡と思われる組織やストロマトライトによると考えられる構造に対応するものであろう。

第1表C, Dに、勢多地域の珪華の化学組成を示す。勢多地域の珪華がほとんど珪酸より成ることから、この珪華は藻類や Filamentous algae などのコロニーに蛋白石を形成する球状体と同じ珪酸の球状体が付着沈殿することによって形成されたものであるということが出来る。

X線粉末解析

牧園産珪華と魚卵状蛋白石、中房温泉の珪華、勢多地域の珪華について粉末 X 線解析を行った(第12図)。使用した機器は、富山大学教育学部所属の島津製作所製の X 線回折装置 XD-610、管球は Cu 2 kW 標準仕様、スリットは 1° スキャン速度は 1 deg/min、時定数は 1.0 秒である。

牧園産の珪華および魚卵状の蛋白石は、ともに $2\theta \approx 22$ 度付近に同様の幅広いピークが認められる。鉱物学的にはともにオパール A (Jones and Segnit, 1971) である。中房温泉の珪華も $2\theta \approx 22$ 度付近に幅広いピークが認められるが、これに加えてかなり強い石英のピークが認められる。勢多地域

第3表. 中房温泉水の化学組成.

	後藤克己&朴木英治*		野口(1976)	三宅ほか(1988)範囲**
年 月 日	1994. 6. 12	1994. 11. 30	1975. 9. 12	1981. 10. 24
水温			89.0	91.0~94.8
導電率(μ S/cm)	672	753		
pH	9.2	9.4	9.0	9.02~9.36
Cl	74.62	96.98	96	72.0~99.5
SO ₄	63.02	35.15	39	26.4~36.2
CO ₂			0	
7カ利度(meq/l)	1.62	2.63	3.3	
HBO ₂			2.6	
As			0.08	0.14~0.18
H ₂ S			7.6	
SiO ₂ (Total)	246	281	252	
SiO ₂ ($\pm$ /マ-状)	134	142		
Na	108.7	138.9	127	109~147
K	18.83	16.22	15	16.1~17.8
Ca	5.95	4.18	1.6	1.70~3.82
Mg	0.078	0.099	0.0	0.010~0.032
Fe			0.1	0.031~0.303
Al			2.9	0.03~0.66
Mn			0.005以下	
Cr				
F			0.01以下	9.52~13.6
HCO ₃				141~177

単位は, mg/l

*: pH およびシリカは後藤, その他は朴木による分析.

**: 6つの源泉の分析値の範囲.

の珪華は, 明確に石英のピークを示している. これは, 約3 Ma 経過する間に続成作用で石英に変化したものであろう.

討 論

立山温泉新湯・秋田県秋ノ宮温泉・鹿児島県牧園などに産する魚卵状や塊状の蛋白石は, 温泉水中に析出した珪酸の球状体が沈殿して形成されたものである(赤羽, 1993). 一方, 長野県中房温泉や鹿児島県牧園・北海道勢多地域の珪華からは, 球形の珪酸が観察される. また, northern Gorda Ridge における海底の温泉からは, 硫酸化バクテリアに付着した球状の珪酸ゾルが発見されている(Robert and Schiffman, 1990). これらのことから, 温泉水中で珪酸は, 球状に析出するものと思われる.

一方, 長野県中房温泉やアメリカイエローストーン国立公園(Walter, 1976a, b; Walter et al., 1972, 1976)・鹿児島県牧園・宮城県鬼首温泉(赤井ほか, 1995)・大分県別府温泉や生竜(林ほか, 1994)などの珪華では, ストロマトライトなどの藻類や糸状細菌を核にして珪酸が付着沈殿し, 珪華を形成している. 特に中房温泉では, 現生の藻類や糸状細菌のコロニーに珪酸が付着沈殿し(第8図), 現時点において珪華を形成しつつある現場であるということが出来る. 地質時代に形成された珪華では, オーストラリアの north Queensland の古生層中の珪華(White et al., 1989)・北海道の勢多地域の鮮新世の足寄層の珪華(八幡, 1994)などよりストロマトライトなどの藻類の痕跡をもつ珪華が確認されている. これらの事実より, 一般的に珪華は, 温泉水中に析出した珪酸の球状体が, 藻類や糸状細菌などのコロニーに沈殿することによって形成されたものである可能性が高い. 多くの珪華

第11図. 勢多地域の珪華の割裂面の走査型電子顕微鏡写真.

第12図. 珪華および蛋白石の粉末X線回折図.

A: 牧園産珪華, B: 牧園産魚卵状蛋白石, C: 中房温泉珪華, D: 勢多地域の珪華.

がポーラスで、空隙が多いという事実は、珪酸の球状体が藻類など空隙の多い生体のコロニーに付着沈殿することによって珪華を形成したという考えと調和的である。

また化学組成や粉末X線回折図によれば、牧園産の珪華はオパールAで、化学組成のみならず鉱物学的にも共存する魚卵状蛋白石と同じものであるということが出来る。すなわち、温泉水中に析出した珪酸の球状体が岩石や鉱物の核に付着沈殿して魚卵状蛋白石を形成し、藻類や糸状細菌などのコロニーを核に付着沈殿して珪華を形成するという図式を描くことができる。勢多地域の珪華（第9図）で空隙に蛋白石の沈殿があることから、ここでも珪酸の球状体が藻類などに付着沈殿して珪華を形成し、重力方向に沈降して蛋白石を形

成したものと思われる。

ここで問題になるのは、藻類や糸状細菌は単に珪酸の球状体が付着する場（核）を提供しただけなのか、それとも藻類や糸状細菌の生命活動（同化や異化）に珪酸を積極的に付着させる働きがあったのかということである。現在のところ明確な結論を出すことはできないが、岩石や鉱物の核に付着沈殿して魚卵状蛋白石を形成していることなどを考えると、必ずしも生命活動と結びつける必然性はないように思われる。ただし、これについては生物学的な検討を含めてさらに詳細な調査が必要である。

勢多地域の珪華は、明確に石英のピークを示している（第12図）。走査型電子顕微鏡観察の結果（第10・11図）などで

球状の形が観察されることなどを考慮すると、オパール A として沈殿したものが、約 3 Ma 経過する間に続成作用で石英に変化したものであり、地質学的時間の経過によって結晶状態が改変されても、オパール A として付着・沈殿した時の外形は保持されているといえることができる。

ま と め

1. 蛋白石や珪華を代表とする温泉水中に沈殿した多くの珪酸は、球状に析出した珪酸（珪酸の球状体）が沈殿してきたものである。

2. 中房温泉は、現生の藻類や糸状細菌にゾル状の珪酸が付着・沈殿して、正に現在珪華を形成している現場である。

3. 本研究で扱った珪華は、温泉水中に析出した珪酸の球状体がある場に生息する藻類や糸状細菌などに付着沈殿して形成されたものである。

いくつかの文献においても同様の藻類やストロマトライトの構造が報告されていることを考えると、一般的に珪華は温泉水中に析出した珪酸の球状体が、藻類や糸状細菌など生体のコロニーに付着・沈殿することによって形成されたものである可能性が高い。

4. 藻類や糸状細菌などの生命活動が珪酸の沈殿にどのように関わっているのか、生物学的な検討を含めて明らかにする必要がある。

5. 勢多地域の珪華や蛋白石の場合、非晶質な球状体として付着沈殿した珪酸は、鉱物学的に石英に変化した後も付着沈殿した当時の外形を保っている。

<付記>

全岩化学組成（第 1 表）には、フォッサマグナミュージアムの理学電機工業製 RIX 2000 蛍光 X 線分析装置を用いて、村田（1993）の方法により検量線法により定量した。印加電圧・電流は 50 kV・50 mA、管球はエンドウィンドー型 Rh 管球である。ただしガラスビードは、希釈率 10（試料 0.400 g、特級試薬無水四硼酸リチウム 4.000 g）で理学電機工業製ビードサンプラーにより作成し、白金るつばからのガラスビードの離脱を容易にするため加熱終了直後に沃化リチウム（特級試薬）を極少量加えた。珪華はきわめて SiO_2 に富む物質のため、蛍光 X 線分析の検量線作成にあたっては、標準試料として地質調査所調整の地球化学標準試料とともに、耐火物技術協会認証調整、ゼーゲルコーン社（現岡山セラミック技術振興財団）頒布の耐火れんがおよび耐火モルタル蛍光 X 線分析標準試料・けい石れんがのうちから 3 種 JRRM 201 ($\text{SiO}_2 = 84.36 \text{ wt.}\%$)、JRRM 205 ($\text{SiO}_2 = 90.96 \text{ wt.}\%$)、JRRM 210 ($\text{SiO}_2 = 97.69 \text{ wt.}\%$) を使用した。

EPMA 分析（第 2 表）は富山大学理学部の日本電子製 JXA 733 波長分散型 EPMA を、分析電子顕微鏡による表面観察（第 8 図）には、フォッサマグナミュージアムの日本電子製 JSM-6300 走査型電子顕微鏡にリンク QX 2000 エネルギー分散型スペクトロメーターを取り付けた分析走査型電子顕微鏡を用いた。両者とも測定条件は加速電圧 15 kV、ZAF 補正法、ビーム径 $1 \mu\text{m}$ である。

文 献

- 赤井くるみ・黒川勝己・赤井純治, 1995, 温泉中で生成しているストロマトライト—鬼首温泉と赤倉温泉の例—. 地球科学, **49**, 292-297.
- 赤羽久志, 1993, 富山県立山温泉新湯における蛋白石の生成. 岩鉱, **88**, 469-477.
- Akizuki, M., 1970, Fractured Surface of Opal., *Contr. Mineral. Petrol.*, **28**, 57-61.
- Darragh, P. J., Gaskins, A. J., Terrell, B. C. and Sanders, J. V., 1966, Origin of precious opal. *Nature*, **209**, 3-16.
- 藤田善彦・大城 香, 1989, ラン藻という生きもの. 東大出版会, 東京, 98 p.
- 林 秀・廣田康一・井沢英二・本村慶信・横山拓史, 1994, 熱水から沈殿したケイ酸質物に見られるバクテリア組織について. 日本岩石鉱物鉱床学会・日本鉱物学会・資源地質学会平成 6 年度秋季連合学術講演会演旨, 111.
- Jones, J. B. and Segnit, E. R., 1971, The Nature of Opal 1. Nomenclature and Constituent Phases. *Jour. Geol. Soc. Aust.*, **18**, 57-68.
- 桃島太郎・磯崎行雄・寺林 優・丸山茂徳, 1996, 35 億年前の“ストロマトライト”様構造の産状と成因—西オーストラリア, ノースポール地域の例—. 地球惑星科学関連学会 1996 年合同大会予稿集, 259.
- 亀井節夫, 1956, 鉱物. 南安曇郡誌, 第 1 巻自然, 南安曇郡誌改訂編集会編, 155-186.
- 金原啓司, 1992, 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧. 地質調査所.
- 丸野伊勢夫・久野 武, 1985, 始良郡牧園町三休堂坂下の魚卵状珪石. 地学研究, **36**, 7-12.
- 三宅 徹・鶴見 実・一国雅巳, 1988, 長野県中房温泉のケイ華中のヒ素. 地球化学, **22**, 157-161.
- 村田 守, 1993, 蛍光 X 線分析法による韓国岩石標準試料の主成分および微量成分の分析. 鳴門教育大研究紀要（自然科学編）, **8**, 37-50.
- 野口喜三雄, 1976, 長野県の温泉の化学成分. 温泉科学, **27**, 74-84.
- Pense, J., 1963, Ein elektronenmikroskopischer Beitrag zur Optik der Edelpale. *Forsscher. Miner.*, **41**, 166.
- Robert, A. Z. and Schiffman, P., 1990, Microbial control of silver mineralization at a sea-floor hydrothermal site on the northern Gorda Ridge. *Nature*, **348**, 8, 155-157.
- 佐藤岱生, 1983, 飯鬼岳-常念岳-有明山地域の花崗岩類. *MAGMA*, **67**, 37-44.
- Sanders, J. V., 1968, The diffractions of light by opal. *Acta Cryst. A*, **24**, 423-434.
- 品田 稔, 1984, 中房温泉の膠状珪酸および珪華. 日本の天然記念物, **6**, 126-127.
- 堤 貞夫・坂本尚史, 1973, 福島県宝産蛋白石について. 岩鉱, **68**, 295-302.
- Walter, M. R., 1976 a, Geysirites of Yellowstone National Park: An example of abigenic “stromatolites”. In Walter, M. R., ed., *Stromatolites ; Developments in Sedimentology 20*. Amsterdam, Elsevier, 273-310.
- Walter, M. R., 1976 b, Hot spring sediments in Yellowstone National Park. In Walter, M. R., ed., *Stromatolites ; Developments in Sedimentology 20*. Amsterdam, Elsevier, 489-498.
- Walter, M. R., Bauld, J. and Brock, T. D., 1972, Siliceous algae and bacterial stromatolites in hot springs and geyser deposits of Yellowstone National Park. *Science*, **78**, 402-405.
- Walter, M. R., Bauld, J. and Brock, T. D., 1976, Microbiology and morphogenesis of columnar stromatolites (Conophyton, Vicerilla) from hot springs in Yellowstone National Park. In Walter, M. R., ed., *Stromatolites ; Developments in Sedimentology 20*. Amsterdam, Elsevier, 273-310.
- White, N. C., Wood, D. G. and Lee, M. C., 1989, Epithermal sinters of Paleozoic age in north Queensland, Australia. *Geology*, **17**, 718-722.
- 八幡正弘, 1994, 北海道勢多地域の温泉型金鉱床. 地質ニュース, **480**, 34-43.

山田哲雄, 1992, 中部地方の天然記念物. 地質ニュース, 453, 38-49.
吉沢庄作, 1904, 越中地質断片 (新湯, 玉滴石, 材木坂, 角閃石, 角

石, 硫黄, 銅鉱床, 石器). 地質雑, 11, 406-414.

(要 旨)

赤羽久忠・安田郁子・宮島 宏・後藤克己・朴木英治, 1997, 温泉水中での珪華の形成. 地質雑, 103, 154-162. (Akahane, H., Yasuda, I., Miyajima, H., Goto, K. and Honoki, H., 1997, Precipitation of silica sinter in hot spring water. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 103, 154-162.)

温泉水中に含まれる珪酸は, 析出・沈殿して蛋白石 (Opal) や珪華 (Silica Sinter) を形成する. 蛋白石が珪酸の球状体によって形成された (赤羽, 1993) と同様に, 長野県中房温泉・鹿兒島県牧園および北海道勢多地域などの珪華は, 温泉水中に生息する藻類や糸状細菌などを核にして珪酸の球状体が付着・沈殿して形成された.

温泉水中に含まれる珪酸は, 非晶質の球状体として析出し, それが温泉水中に生息する藻類や糸状細菌などに付着・沈殿して珪華を形成したものと思われる.

鉱物学的に変化して X 線粉末法で石英のピークを示す北海道勢多地域の第三紀鮮新世足寄層の珪華は, 非晶質の球状体として沈殿したことを示す外形を保っている.