

日本におけるドロマイト鉱床の形成過程 ーガラス原料の一つであるドロマイトの起源についてー

日本板硝子(株) 研究開発部

野見山 邦 洋

Formation process of dolomite deposits in Japan -Origin of dolomite for manufacturing of glass products-

Kunihiro Nomiyama

Research and development NIPPON SHEET GLASS CO. LTD.

1. はじめに

ドロマイトは、ガラス製品に MgO 成分を供給する原料としてだけでなく、肥料、耐火物あるいは鉄鋼等の分野においてもその利用が広く知られている。ドロマイト鉱床は、地質学（鉱床学あるいは堆積学）や採鉱学の分野を生業とする方々以外には、どのようにして形成されたかを知る人は少ないようである。しかし、その形成の過程を知ることは、先に本誌で取り挙げた珪砂と同様に、資源の有限性と有効性を理解する上でも重要であることは言うまでもない。そのため、本誌では、日本国内に分布するドロマイト鉱床の形成過程を先人の研究成果に基づき概説する。さらに、日本列島（島弧）に分布するドロマイト鉱床は、その形成過程において特徴的なプロセスを経ている。それは、日本列島の形成とも関連し、国内産のドロマイトを理解する上でも興味深い要素である。それは、古くはアルフレート・ロータル・ヴェーゲナー^{注①}（Alfred Lothar Wegener）が、その著書である「大陸と海洋の起源」¹⁾で述べた「大陸移動説」とも関係することから、その特徴についても触

れることとする。

2. ドロマイトとは？

ドロマイト（dolomite）は、理想化学式が $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ であり、方解石（calcite: CaCO_3 ）、アラレ石（aragonite: CaCO_3 ）、菱苦土鉱（magnesianite: MgCO_3 ）、菱鉄鉱（siderite: FeCO_3 ）および菱マンガン鉱（rhodochrosite: MnCO_3 ）等と共に炭酸塩鉱物（carbonate mineral）に属する。方解石を主要構成鉱物とする岩石を石灰岩（limestone）と称するのに対して、ドロマイトが主要構成鉱物である岩石をドロマイトと呼ぶ。これでは、鉱物と岩石の表記が同一であることから、それを区別するために、ドロマイトを主構成鉱物とする岩石を「ドロストーン（dolostone）」と称する場合もある。そして、ドロストーンや石灰岩に代表される炭酸塩鉱物を主構成鉱物とする岩石は、炭酸塩岩（carbonate rock）と称される。炭酸塩岩は堆積岩の一種であり、石灰質生物の遺骸や化学的沈殿物が堆積して形成される点で、後背地から河川や風雨を介して供給された碎屑物が堆積して形成された砂岩あるいは泥岩等とはその形成過程が異なる。

3. ドロマイトの分布と品位

地球上において、ドロマイトを含む炭酸塩岩

〒664-8520 兵庫県伊丹市鴻池 2 丁目 13 番 12 号
TEL 072-781-0081
FAX 072-781-9097
E-mail: kunihiro.nomiyama@nsg.com

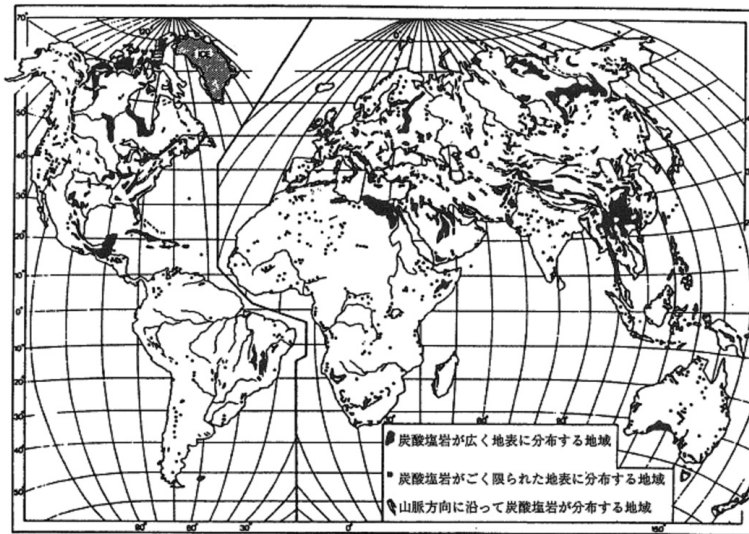


図1 世界の炭酸塩岩の分布（吉田²⁾より引用）

類は、全堆積岩類の1/5以上を占めるとされている。図1に示すように、世界には多くの炭酸塩岩体が分布している。日本列島においても、それは例外ではなく、多くの炭酸塩岩鉱床が北海道から沖縄にかけて分布している。日本列島における石灰岩およびドロマイト鉱床の分布（産出地）を図2に示す。ドロマイトの分布は、石灰岩の分布域（あるいは量）と比べて極めて

少なく、主な分布域は2～3の地域に限られている。その一つは、国内最大の産地である栃木県佐野市北東部に位置する「葛生地区」である。本地区は、国内最大のドロマイト鉱床を有している。葛生地区に胚胎するドロマイトは、古くから資源として調査が成され、鉱床の形成過程も研究されてきた（吉田^{3)・4)}、河田⁵⁾および鎌田^{6)・7)}を参照）。

一方、岐阜県山県市の北西部に位置する「美山地区」および同県揖斐川町の「春日地区」にも「葛生地区」に次ぐ規模のドロマイト鉱床が分布している。美山地区のドロマイト鉱床は、レンズ状の鉱体が舟伏山周辺に分布している（河田^{8)・9)・10)}および大塚¹¹⁾を参照）。何れの地区においてもドロマイトは、ガラス、肥料あるいは鉄鉱原料とし出鉱され、現在も工業用原料としての利用が活発に行われている。「葛生地区」あるいは「美山地区」と比べて小規模なドロマイト鉱床が、東北地方（北上山地）あるいは四国地方等にも分布している。しかし、要求される品位（MgO含有量や不純物の量等）を満たせない場合や採算性に乏しく、工業用原料としての採掘あるいは供給は行われていないのが現状である。



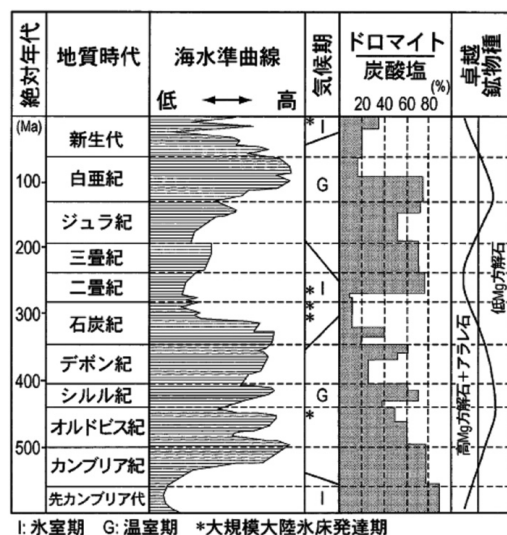
図2 日本の地質概要と炭酸塩岩の分布（吉田²⁾より引用し、筆者により一部加筆した）

ドロマイトが工業用原料（特にガラス原料）として用いられる場合、最も重要視されるのがMgO含有量である。ドロマイト中のMgO含有量の理論値は、21.9 wt. %とされる。ガラス原料として用いられる主な国内産ドロマイトのMgO含有量は、18 wt. %前後である。一方、海外では20 wt. %を超える含有量を有するドロマイトが産出されている。さらに、ドロマイトに含まれる不純物としてSiO₂あるいはFe₂O₃が含まれる場合があるが、国内産のドロマイトは、海外産のドロマイトと比して、これらの不純物も高い傾向を呈する。例えば、中華人民共和国南部に位置する広西壮族自治区で採掘されるドロマイトには、その不純物がppmオーダーと低いドロマイトが存在する。これは、ドロマイト中のMgOの含有量が、理想化学組成に極めて近く、その純度が高いことを意味し、低鉄ガラスを生産する場合には、効率の高い原料である。このように、東アジアに焦点を絞っても、島弧（日本列島）と大陸（ユーラシア大陸）では、存在するドロマイト鉱床の質や規模も大きく異なる。これらの差異が生じた要因を解析することにより、炭酸塩原料の品位に応じた有効活用に取り組むことができると考えられる。

4. ドロマイト問題

松田¹²⁾によると、ドロマイトには「Dolomite Problem」と称する課題があり、長年にわたって多くの研究者が、その解析に取り組んできた。その課題とは、図3に示すように、各地質時代を通じて生じているドロマイト形成頻度の不均一性（地質時代毎にドロマイトの形成量の差が生じている現象）である。

松田¹²⁾によると、現在、地球上の炭酸塩岩においてドロマイトが形成されている地域は極めて限られており、圧倒的に石灰岩の形成比率が高い。にもかかわらず、地質時代の炭酸塩岩には多くのドロマイトが存在する（図3参照）。過去において、ドロマイトの形成頻度は、地質



1: 氷室期 G: 温室期 *大規模大陸氷床発達期

図3 各地質年代における炭酸塩岩中のドロマイトの占める比率と気候変動との関係（松田¹²⁾より引用）

時代を遡るほど高くなると考えられていた。しかし、近年では地球規模での気候変動と相関があり、ドロマイトの形成頻度は温室期に高く、氷室期には低くなることが指摘され、ドロマイト形成と地球規模での地球表層環境変動の因果関係について言及がなされるようになってきた。地質時代のドロマイトの一部は、初生的に堆積したと考えられているが、大部分のドロマイトは、造礁サンゴ、石灰藻、あるいは二枚貝などの海棲生物遺骸を含む。このことから、多くのドロマイトは、初生的には石灰質堆積物（例えば、石灰岩）として堆積したものが、ドロマイト化作用により二次的にドロマイトになったと推定される。これまで多くのドロマイト化作用のモデルが提唱され、そのメカニズムが検討されてきているが、依然、不明な点も多々残されている。これらの課題が解明できれば、ドロマイト鉱床のさらなる開発や有効な利用に貢献できるかも知れない。

5. ドロマイト鉱床の形成

本節では、松田¹³⁾において示されている内容を引用あるいは参照して、未解明の部分の多い

ドロマイトの生成およびその生成環境を解説する。

一部には、初生的に海水（高塩分濃度を有する）から直接沈殿（堆積）したドロマイトもあると考えられているが、現在、地球上に存在するドロマイトの大部分は、石灰質堆積物が続成作用によりドロマイトに交代されたと考えられている。これを「ドロマイト化作用 (dolomitization)」と称する。ドロマイトの生成は、以下の反応を経て行われる。

交代反応



沈殿反応



しかし、上記(1)および(2)の反応は、常温常圧における天然と同等の環境下では、ドロマイトを実験的に生成することが困難である。つまり、ドロマイトの生成環境を再現することができないため、天然の現象を解析していくことが有効な研究手段であると言える。

一方、ドロマイト化作用が行われるためには、以下に示す4つの要件が必要とされる。

- (1) ドロマイト化作用に適した溶液を生成する地質学的あるいは地球化学的環境
- (2) 大量の石灰岩を交代しうる大量の Mg^{2+} の存在
- (3) 大量の Mg^{2+} をドロマイト化作用が起きている場所へ連続的に供給する機構
- (4) 上記の3つの要件が、長期間維持される地質学的セッティング

上記(1)～(4)の要件を満たした自然界におけるドロマイト化作用のモデルが、これまで幾つも提唱されてきた。これらのモデルは、ドロマイトの形成時期と場所（深度）により、続成過程初期の地表付近や海底面近くを想定するモデルと続成過程後期の深部埋没環境を想定するモデルの2つに大別される。前者におけるその代表的なモデルとして、「蒸発性ドロマイト化作用 (Evaporative dolomitization)」が挙げられる。本モデルは、ドロマイト化溶液として蒸発作用による高塩分水を Mg^{2+} の供給源と想定しており、「サブカ^{注2)}モデル (Sabkha model: 図4A参照)」と「シーページ・リフラックスモデル (Seepage-reflux model: 図4B参照)」に分類される。両モデルとも、特徴的な地形に

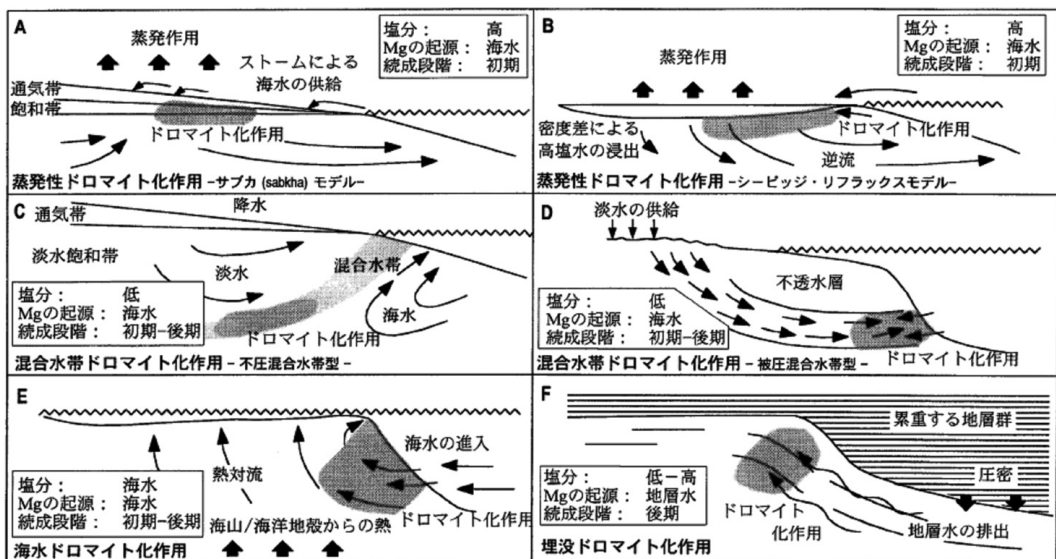


図4 代表的なドロマイト化作用のモデル (松田¹³⁾より引用)

流入することで蒸発（濃集）した海水から高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比を有する高塩分水（ドロマイト化溶液）が、石灰質堆積物をドロマイト化している。

また、後者におけるモデルとしては、海水と淡水の混合比により、ドロマイト化が促進される「混合水ドロマイト化作用（Mixed-water dolomitization：図4CおよびD参照）」、低温海水が、ドロマイト化を促す「海水ドロマイト化作用（Marine dolomitization：図4E参照）」も提唱されている。特に海水ドロマイト化作用は、近年において最も重要なドロマイト化作用のモデルとされており、後述する海洋プレートとドロマイト鉱床の関係においても関わりがあると考えられる。そして、前述した葛生地区のドロマイトは、松田¹⁴⁾によると、同地区の石灰岩が陸化した後、海水と陸水（淡水）の混水部において行われたと推定している。これは、混合水ドロマイト化作用に相当するものと考えられる。その他には、続成作用に伴う石灰質堆積物の埋没箇所に、 Mg^{2+} に富む間隙水が供給されることで生じる「埋没ドロマイト化作用（Burial dolomitization：図4F参照）」がある。

このように、ドロマイト（あるいはドロマイト鉱床）の成因は、形成当時の地形的特徴や続成作用を考慮し、解析が現在も続けられている。但し、大部分のドロマイト鉱床の形成過程において共通することは、石灰質堆積物中の Ca^{2+} を交代するために必要十分な量の Mg^{2+} を含む溶液が、継続的に供給される環境が存在することである。これらの環境が、地球上に（偶然）整えられることでドロマイトが形成され、我々は地質時代の恩恵を「今」受け取ることが出来るのである。

6. 国内におけるドロマイト鉱床の特徴

次に、日本国内のドロマイト鉱床の形成における特徴に触れておきたい。日本国内（日本列島）のドロマイト鉱床（岩体）の大部分は、「付加体（付加コンプレックス/accretionary com-

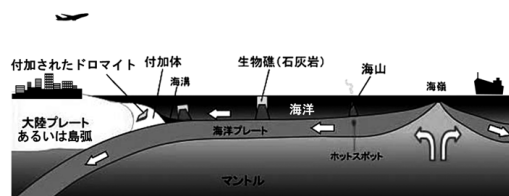


図5 付加体の模式形成過程（石灰石鉱業会¹⁶⁾HPより引用し、筆者により一部加筆した）

plex）」と称する形成過程を経ている。そして、日本列島（島弧）も同様の形成過程を経ている。小出¹⁵⁾によると、海洋プレートが海溝で沈み込む際に、沈み込まれる側のプレート（島弧あるいは大陸プレート）に海洋プレートの上部の物質が剥ぎ取られ、付加されたものを「付加体」としている。付加される物質は、陸側のプレート起源のもの（主に陸源性の堆積物）と海洋プレートの上部、およびその上に堆積した深海底堆積物から構成される。そのため、複数の起源の異なる物質が、付加体内部において構造的に混在する。付加体が継続的に形成されると、既に形成されていた古い付加体は陸側に押しやられる。この現象を模式的に表すと図5のようになる。島弧（あるいは大陸プレート）との接触部においては、海洋プレートの拡大に伴い沈み込みが生じ、海洋プレート上の物質が島弧側に付加される。その付加された物質の中にドロマイト（炭酸塩岩）が含まれていたことで、現在の日本列島にドロマイト鉱床が存在することになる。つまり、ドロマイト鉱床は、現在の日本列島と同じ場所において形成されたのではなく、海洋プレートの発生するはるか東方から、プレート移動により日本列島にまで運ばれてきたことにより形成されたと考えられている。これが、現在広く認められているプレートテクトニクスにより生じる現象であり、その初生的な学説が、ウェーゲナーが1912年に提唱した「大陸移動説」に他ならない。

図6に示すように、日本列島（西南日本）には、古い時代の付加体が帯状配列していることが知られている。西南日本では、北から南へ付

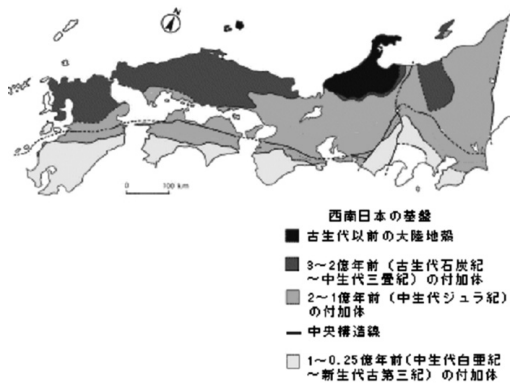


図6 付加体としての西南日本の基盤の形成時期（佐藤¹⁷⁾より引用）

加体を構成する地層の堆積年代が新しくなる。つまり、沈み込みが継続し付加体が増加すると島弧が成熟し、やがては大きく厚い地殻へと成長していくことを意味する。そして、図7に示すように、島弧（日本列島）には火成作用も生じ、大陸地殻の形成場（縁辺部）という位置付がなされる。付加された岩体は、島弧に剥ぎ取られることにより大きく乱される。本来、堆積岩は、下位より上位にかけて堆積年代が新しくなるのが地質学の普遍的な原理である。しかし、付加体内の地層は、地層の逆転、変形あるいは変質等が生じており、複雑な構造を呈して

いる。一方、図6および図7に示すように、付加された順序は、島弧－海溝系の関係から島弧側にあるものが古く、西南日本においては、南に位置する地層が最も新しく付加されたことが確認できる。これらの現象から、日本列島は連続した付加体により構成されており、日本列島とドロマイト鉱床は、その形成過程に密接な関係がある。そして、ドロマイト鉱床は、付加された地層に後から形成された鉱床ではなく、現在の日本列島が出来上がる前に存在していた初生的な鉱床である。さらに、日本列島は、様々な時代の付加体が形成され続けてきた場で、現在も形成中の付加体があるとされる。つまり、極めて遠い将来においては、新たなドロマイト鉱床が日本列島内に形成されるかもしれない。但し、このドロマイト鉱床の形成サイクルは、地質学的に膨大な時間を要することから、ドロマイト鉱床が有限性のある資源としての位置付けに変化は無い。そして、ガラス原料として用いられる国内産ドロマイトは、今後も新たな開発は困難と推定されることから、現存の鉱床の有効利用がより重要になると考えられる。

最後に、ドロマイト鉱床の形成過程と品質の

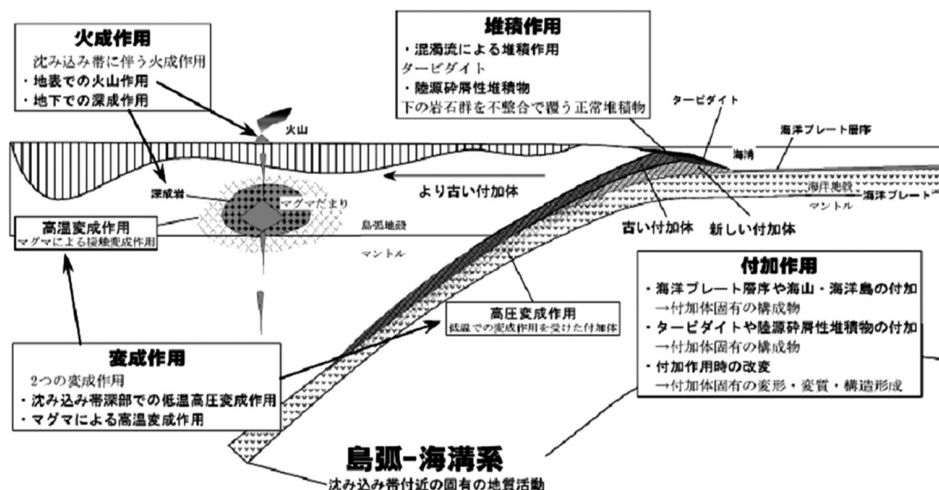


図7 島弧－海溝系における付加体の模式構造図（小嶋¹⁸⁾より引用）

関係について触れておきたい。ガラス原料としてのドロマイトの品質（品位）に求められる要件は、主要成分量あるいは種、不純物の量、粒径分布、粒子形状、粒子サイズ、異物の混入量、水分および均質性等々と多岐に渡る。そして、これらの性状を左右するのが、これまでに述べてきたドロマイトの生成環境とその形成過程である。生成環境は、ドロマイト中のMgO含有量に影響を及ぼし、付加された後の続成作用によっては、不純物の供給や新たな金属鉱床の形成にも関与することもあり、鉱床の数だけ様々な性状が付与されている。したがって、これまで述べてきたドロマイトの成因や形成過程を総合的に理解することが、ドロマイトをガラス原料として品質管理を行う上でも有益であり、資源の有限性を考慮した効率的な採掘や不要な開発を抑制することにもつながる。そして、これらの知見が、国内に止まらず、ドロマイトの有効利用に寄与するものと考えている。

7. まとめ

本誌では、ドロマイト鉱床の国内分布におけるドロマイト鉱床の形成過程を概説した。それらの項目を以下に整理する。

- 1) 工業用原料として扱われるドロマイト鉱床は、国内において2~3か所程度の分布しか認められない。小規模な鉱床は、石灰石に付随して全国に分布しているが、その品質あるいは採算性の低さにより、現在は工業用原料としての利用は行われていない。
- 2) ドロマイトの形成環境を考える上で、代表的なモデルが複数提唱されている。ドロマイトの形成時期と形成場所（深度）の違いにより、続成過程初期の地表付近や海底面近くを想定するモデルと続成過程後期の深部埋没環境を想定するモデルの2つに大別される。
- 3) 日本列島（島弧）のドロマイト鉱床は、列島のはるか東方において形成された後、海

洋プレートが日本列島を構成するプレートの下位に沈み込む際にはぎ取られた付加体の中に存在し、列島各地に分布している。

- 4) 付加体の形成は現在も継続されており、遠い将来（地質学的な時間経過の後）においては、新たなドロマイト鉱床が大陸縁辺部にあたる日本列島（島弧）においても形成される可能性があると考えられる。

謝辞

本誌への執筆を薦めて頂き、さらに本稿の査読を頂いた日本板硝子株式会社 研究開発部の長嶋廉仁氏、本誌への投稿の機会を与えて頂いた日本板硝子株式会社 技術研究所の服部明彦所長、そして、本稿の査読を頂き、貴重な助言を賜った日本板硝子株式会社 研究開発部の酒井千尋博士に、この場を借りて心よりお礼を申し上げる。

注

- ①：大陸移動説の提唱で著名な20世紀初頭に活躍したドイツの地球物理学者（気象学者）。
- ②：乾燥気候下のベルシャ湾岸に広がる、起伏に乏しく極めて緩い傾斜を持った低平な海岸平野。

参考文献

- 1) アルフレート・ヴェーゲナー（1981）：大陸と海洋の起源 大陸移動説（上）・（下）、岩波文庫。
- 2) 牧雄一郎・松本仁之（2000）：石灰石鉱業の現状と課題、地質ニュース、547号、pp.23-35。
- 3) 吉田三郎（1965）：栃木懸安蘇郡葛生町附近の地質（1）、北海道地質要報、北海道支部ニュース第28号、pp.1-11。
- 4) 吉田三郎（1967）：栃木懸安蘇郡葛生町附近の地質（2）、北海道地質要報、北海道支部ニュース第34号、pp.1-5。
- 5) 河田茂磨・高橋博・井上秀雄（1959）：栃木県葛生ドロマイト鉱床について、石膏と石灰、No.41、pp.407-410。
- 6) 鎌田祥仁（1997）：足尾帯葛生地域におけるチャート-砕屑岩シーケンスの復元、地質学雑誌、第103巻第4号、pp.343-356。
- 7) 鎌田祥仁（2000）：足尾帯白岩地域における葛生コンプレックスのチャート-砕屑岩シーケンスの覆瓦構造、地質学論集、第55号、pp.203-221。
- 8) 河田茂磨（1958）：岐阜県舟伏ドロマイト鉱床について、石膏と石灰、No.36、pp.139-147。
- 9) 河田茂磨（1961）：岐阜県下のドロマイト鉱床、石膏と石灰、No.51、pp.75-90。
- 10) 中村萬次郎（1965）：岐阜県舟伏山ドロマイト層

- の層位学的研究, 石膏と石灰, No. 76, pp. 348-358.
- 11) 大塚寅雄 (1954) : 岐阜県揖斐郡地方ドロマイト鉱床の概査報告, 地質調査所月報, 第5巻 第6号, pp. 35-38.
 - 12) 松田博貴 (2006) : ドロマイトの形成過程とドロマイト化作用, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 13, pp. 245-252.
 - 13) 松田博貴 (2009) : ドロマイト化作用と貯留岩性状, 地学雑誌, 118 (2), pp. 297-308.
 - 14) 松田博貴 (1991) : 日本におけるドロマイトの産状とその成因-特に栃木県葛生地域および鹿児島県喜界島のドロマイトを例として-, 石油技術協会誌, 第56巻第2号, pp. 199-200.
 - 15) 小出良幸 (2013) : 島弧における付加体の形成と擾乱機構について, 札幌学院大学人文学会紀要, pp. 37-58.
 - 16) <http://www.limestone.gr.jp/introduction/>
 - 17) http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/ene/2013/document/20140125/20140125-satou.pdf
 - 18) 小出良幸 (2012) : 島弧-海溝系における付加体の地質学的位置づけと構成について, 札幌学院大学人文学会紀要, pp. 1-23.