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

Age of formation for the Ishikawa composite mass, Abukuma mountains,
inferred from Nd and Sr isotopic systematics

柴 田 賢 (Ken Shibata)*
田 中 剛 (Tsuyoshi Tanaka)*

Sm-Nd and Rb-Sr isotopic compositions and REE abundances were measured on the Ishikawa composite mass, which is one of the older granitic rocks in the Abukuma mountains. Three mineral and two whole-rock samples define a Sm-Nd isochron yielding an age of 111 ± 42 Ma with an initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio of 0.51251 ± 3 . Eight whole-rock samples give a Rb-Sr isochron age of 106 ± 16 Ma with an initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.70518 ± 15 . These ages are interpreted to represent the time of intrusion, supporting the Jurassic age of the Gosaisho metamorphic rocks confirmed by the fossil evidence.

The Nd model ages of the Ishikawa mass relative to CHUR are as young as intrusion ages, whereas those relative to DM are 600-800 Ma. On the basis of the REE patterns and $\epsilon_{\text{Nd}} - \epsilon_{\text{Sr}}$ relationship, the Ishikawa mass is thought to be derived from the source material similar to CHUR. It is therefore suggested that the intrusion of the Ishikawa mass occurred subsequently to the differentiation of the source magma from the mantle.

I. はじめに

南部阿武隈山地の花崗岩類は渡辺ら (1955) によって古期と新期とに分けられ、古期は古生代末期-中生代初期、新期は白亜紀前-中期の貫入と考えられた。1960年代以降同位体年代測定が多数実施され、その結果黒雲母や角閃石の K-Ar 年代は 90-120 Ma であり、古期と新期との間にはっきりした年代差は認められなかった (河野・植田, 1965; 柴田・内海, 1983)。一方 Maruyama (1978) は古期岩体について Rb-Sr 全岩年代を測定し約 400 Ma という古い年代を得た。この結果は阿武隈山地におけるその後の深成・変成史の研究に重大な影響を与えた。

最近阿武隈山地の基盤をなす御所変成岩類からジュラ紀の放散虫化石が発見された (Hiroi *et al.*, 1987)。このことは変成作用の時期はいうにおよばず、深成作用の時期をも限定する、という点においてきわめて重要な事実である。そこで古期岩体の一つである石川複合岩体について Sm-Nd 法、Rb-Sr 法による年

代測定を試みた。さらに希土類元素存在度からその起源についても若干の考察を行った。

II. 地質概要と測定試料

石川複合岩体 (以下石川岩体) は宮本・鮫川岩体と共に南部阿武隈山地における古期花崗岩類として古くは Gorai (1944), 渡辺ら (1955) の研究がある。丸山 (1970, 1972) は石川・鮫川岩体の構造解析を行った。

石川岩体は南部阿武隈山地の北西部に位置し、北は福島県石川町から、鮫川村をへて南は塙町山形まで、南北に細長く分布する (Fig. 1)。岩相は石英閃緑岩、トータル岩、花崗閃緑岩、アダメロ岩からなり、中心部でより酸性、周縁部でより塩基性となる。石川岩体は一般的に塩基性包有岩が比較的多く、これは古期岩体の特徴である。黒雲母や角閃石の配列による面構造・線構造が良く発達し、南北に伸長した漏斗状構造を少なくとも 2 つ有する (丸山, 1972)。一方石川岩体と周辺の片麻岩 (竹貫変成岩類) との構造はほぼ調和的である。両者の関係については、石英閃緑岩が片麻岩 (竹

* 工業技術院地質調査所
〒305 茨城県つくば市東1丁目1-3

(昭和62年11月18日受付
昭和62年11月28日受理)

Fig. 1. Distribution of the Ishikawa mass (simplified from Maruyama, 1979), showing sample localities. Horizontally lined area indicates the Takanuki and Gosaisho metamorphic rocks. I, Ishikawa mass; S, Samegawa mass.

貫変成岩類)に貫入する関係が露頭で観察される(加納ら, 1973)。

年代測定に用いた試料は細長く分布する石川岩体の全域から採取した8個であり(Fig. 1), これらを Rb-Sr 年代測定に供した。その中から岩体北部(5A-73), 中部(A1111), 南部(A0912)の3個を選んで Sm-Nd 年代測定に供した。以下にそれらの岩質と採取場所を示す。

A0912: 角閃石黒雲母トータル岩

埴町吉沢 (36°54.7'N, 140°28.4'E)

A1001: 角閃石黒雲母トータル岩

鮫川村渡瀬 (36°58.6'E, 140°29.1'E)

A1111: 黒雲母角閃石トータル岩

鮫川村田苗下 (37°00.1'N, 140°29.4'E)

A1112: 黒雲母角閃石トータル岩

鮫川村茅 (37°02.4'N, 140°28.4'E)

A1113: 黒雲母角閃石花崗閃緑岩

鮫川村前田 (37°03.5'N, 140°30.6'E)

A-4: 角閃石黒雲母花崗閃緑岩

鮫川村前沼 (37°02.9'N, 140°03.5'E)

4A-73: 角閃石黒雲母花崗閃緑岩

石川町関田 (37°06.9'N, 140°26.1'E)

5A-73: 角閃石黒雲母花崗閃緑岩

石川町当町 (37°08.7'N, 140°27.3'E)

これらの岩石については柴田・内海(1983)により K-Ar 年代の測定が行われており, A0912 及び A1001 の角閃石で 111Ma 及び 119Ma, A1111 の角閃石で 117Ma, 黒雲母で 97.8 Ma, 斜長石で 85.4 Ma, 5A-73 の角閃石で 103 Ma という年代結果が得られている。

III. 測定方法

2-3 kg の全岩試料を粗砕し, 二分法で縮分し約 100 g を細粉して測定に供した。Rb, Sr 及び Sm, Nd を含む希土類元素の定量は同位体希釈法によって行った。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 及び $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の測定はスパイクを加えない試料について行い, それぞれ $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 及び $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ で規格化した値とした。この研究の期間中におけるストロンチウム標準試料 E & A 及びネオジウム LaJolla 標準試料のくり返し測定の結果は, それぞれ 0.70808 ± 0.00004 (2σ) 及び 0.51183 ± 0.00002 (2σ) であった。アイソクロンは, York (1966) 法により計算した。ここで $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比及び $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の誤差はそれぞれ 2%, 0.015% (共に 1σ) とし, ^{87}Rb の壊変定数は $1.42 \times 10^{-11}/\text{y}$ を用いた。文中に引用した年代はこの定数で換算した値である。 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 測定の誤差は 0.5% (1σ) とし, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の誤差は Table 1 に示した値を用いた。 ^{147}Sm の壊変定数は $6.54 \times 10^{-12}/\text{y}$ を用いた。年代と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 及び $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初生値の誤差は 2σ で示した。又, 本研究における LaJolla 標準試料の測定値が Lugmair and Carlson (1978) 及び Wasserburg *et al.* (1981) による値 (0.51186) より 0.00003 少ないので, 隕石の値 (CHUR) との比較に際して (すなわちモデル年代の計算及び ϵ 値表示) は全測定値に 0.00003 を

Table 1. Sm-Nd and REE analytical data for the Ishikawa mass, Abukuma mountains

Sample	A1111 W.R. (1)	A1111 W.R. (2)	A1111 Biot.	A1111 Hornb.	A1111 Plag.	A0912 W.R.	5A-73 W.R.
La	13.46		2.41			17.79	28.1
Ce	32.5		6.33			40.2	53.5
Nd	17.51	17.57	3.78	55.9	1.250	21.16	18.84
Sm	4.18	4.13	0.913	15.64	0.141	5.14	3.34
Eu	1.26	1.25	0.222	3.14	0.600	1.18	0.858
Gd							2.89
Dy							2.47
Er							1.33
Yb							1.21
Lu							0.179
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1444	0.1422	0.1461	0.1696	0.06823	0.1469	0.1072
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.51260 ± 3	0.51263 ± 3	0.51262 ± 3	0.51263 ± 4	0.51256 ± 2	0.51259 ± 2	0.51255 ± 2

REE concentrations in ppm, errors on isotope ratios are $2\sigma_m$.

加えた後考察を行った。

IV. 結果と考察

石川岩体の Sm-Nd 及び希土類元素含量測定結果を Table 1 に、Rb-Sr 測定結果を Table 2 に示した。また Sm-Nd 及び Rb-Sr アイソクロン図をそれぞれ Fig. 2 及び Fig. 3 に示した。

試料 A1111 の黒雲母-角閃石-斜長石-全岩による Sm-Nd 鉱物年代は 111 ± 42 Ma, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初生値は 0.51251 ± 3 である (Fig. 2)。この年代は誤差はかなり大きい、これまで阿武隈山地の花崗岩類について求められた鉱物の同位体年代にはほぼ等しい。一方、3 個の全岩試料によるアイソクロン年代は $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比の幅がせまいため 200 ± 180 Ma と誤差が大きく、意味のある年代とはいえない。

石川岩体の 8 個の試料による Rb-Sr 全岩年代は 106 ± 16 Ma, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値は 0.70518 ± 15 である (Fig. 3)。この年代は誤差の範囲内で Sm-Nd 鉱物年代と一致する。これはまた阿武隈山地北端部の丸森地域の花崗岩類について求められた 111.6 ± 2.4 Ma, 106.4 ± 3.5 Ma という Rb-Sr 全岩年代 (柴田, 1987) とよくあう。さらに石川岩体の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値は Shibata and Ishihara (1979) による阿武隈帯の花崗岩類の初生値 0.7047-0.7058 の範囲内にある。

Sm-Nd 系は Sm, Nd が共に 3 価の希土類に属するため、変成・変質作用の影響を受けにくいとされている。

一方 Rb-Sr 全岩系の閉鎖温度は $650^\circ\text{--}700^\circ\text{C}$ と見積られており (Harrison *et al.*, 1979), 従って花崗岩類が貫入後かなり高度の変成作用を受けないかぎり、その Rb-Sr 全岩年代は貫入の年代を表すものとみなされる。これらの事実から、今回石川岩体について求められた約 110 Ma という年代は花崗岩貫入の年代を示すものと解釈できる。石川岩体はその北部で御所変成岩類に接しており (梅村, 1979), 両者はおそらく貫入関係にあるものと考えられる。もしこの地域の御所変成岩類の時代が、化石が発見された東部地域のそれと同様にジュラ紀であるならば、石川岩体の貫入時期はジュラ紀以降ということになる。石川岩体について求められた約 110 Ma という年代はこの推論を支持するものである。

ここで Maruyama (1978) が石川岩体について求めた 364.0 ± 83.9 Ma という Rb-Sr 全岩年代について若干の考察を行う。Maruyama (1978) の Is-1 の採取場所は石川町東方で本研究の 5A-73 の近くであり、岩質は共に角閃石黒雲母花崗閃緑岩である。さらに前者の Rb と Sr の含有量は 107.4 ppm と 248.0 ppm, 後者のそれは 106.3 ppm と 246.3 ppm であり、両者はきわめてよく似ている。これに対して $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は前者が 0.7120 (標準試料 E & A の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70855$), 後者が 0.70707 と大きな違いがある。Maruyama (1978) における $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の測定誤差 0.15% を考慮に入れても、この差は誤差を大幅にこえるものである。Is-1

Table 2. Rb-Sr analytical data for the Ishikawa mass, Abukuma mountains

Sample No.	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
A0912	79.25	375.5	0.6112	0.70623
A1001	29.09	374.0	0.2246	0.70551
A1111	47.87	376.3 353.8	0.3919	0.70572
A1112	41.63	333.5	0.3614	0.70575
A1113	74.73	311.9	0.6938	0.70612
A-4	72.69	317.4	0.6632	0.70607
4A-73	76.51	356.3	0.6218	0.70621
5A-73	106.3	246.3	1.250	0.70707

Fig. 2. Sm-Nd isochron plot for the Ishikawa mass.

Large open and filled circles represent whole-rocks, small filled ones minerals.

Fig. 3. Rb-Sr whole-rock isochron plot for the Ishikawa mass.

と 5A-73 は共に石川岩体の中で最も Rb/Sr 比の大きい試料であり、それらの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は Rb-Sr 年代値に大きな影響を与える。同一岩石での比較検討ではないので断定はできないが、Maruyama (1978) では何らかの原因で Rb/Sr 比の大きい試料の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が実際より高めに測定され、その結果 364 Ma という見かけ上古い年代が得られたものと推定される。

次に、Nd モデル年代、希土類元素存在度パターン、及び Nd, Sr 同位体初生値から石川岩体の起源についての考察を行う。

Sm-Nd 同位体体系では、マグマが生成すると、一般的にその Sm/Nd 比は源物質より小さくなるので、Rb/Sr 同位体体系よりもモデル年代が求め易い。Table 3 に石川岩体の 5 試料の隕石様源物質 (CHUR) および Depleted Mantle (DM) に対するモデル年代を示す。 $T_{\text{CHUR}}^{\text{Nd}}$ は前述の鉍物年代と同様極めて若い年代となるが $T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$ は 600~800 Ma となる。このように、モデル年代は仮定される源物質の同位体の性質に依存するが、源物質から分離した年代はいずれにせよこの両モデル年代の間にあると考えられる。そのどちらに近いかについて考察を進める。

Nd 同位体比が測定された試料の希土類元素存在度パターンを Fig. 4 に示す。もし、源物質として DM を仮定するならば、そこでは La や Ce など軽希土に極めて乏しい (隕石中の値で規格化した値として La で

1~2 倍) ことが予想される。石川岩体の花崗岩試料中の La の隕石に対する濃縮度は Fig. 4 に示すように 40~90 倍であるから、約 50 倍の濃縮率である。これはマグマの熔融・固結時に、La がすべて液相に分配されたとした場合でも、最終生成物の 50 倍の親物質が必要なことを意味する。岩体のもとの大きさを巾、深さ 4 km 長さ 25 km とすれば、体積は 400 km³ となる。石川岩体はこの 50 倍、すなわち 20000 km³ の DM の希土類元素を完全に枯渇させて生じたことになる。この

Table 3. Nd model ages for the Ishikawa mass

Sample No.	Nd T_{CHUR} (Ma)	Nd T_{DM} (Ma)
A1111(1)	30	810
A1111(2)	negative	740
A0912	60	850
5A-73	100	640

Model ages relative to chondritic uniform reservoir (CHUR) and depleted mantle (DM). Present $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ for CHUR: 0.51264 and 0.1966 (Wasserburg *et al.*, 1981), those for DM: 0.51313 and 0.2389 (Jacobsen and Wasserburg, 1979).

Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns for the Ishikawa mass.

領域は上下方向に 10 km を仮定すれば平面的には 40 km×50 km となる。従ってこの領域には同一の DM から生じた火成岩は他に存在し得ないはずであるが、現実には石川岩体に類似の鮫川・宮本岩体、さらに新期の瑯岩体等が存在する。従って、石川岩体が軽希土に乏しい DM に直接由来するという仮定は適切でなく、むしろ、比較的軽希土に富む (CHUR 様の) 源物質に由来したと判断される。そうであれば石川岩体の源物質からの分化と貫入固結とは時間的間隙なしに起こったことになる。

さて、ここまでは花崗岩が単一の起源物質に由来するとして議論を進めたが、マントルあるいは下部地殻に由来するマグマと、より古い地殻物質の混合により、石川岩体の親マグマが生成された可能性も検討を要する。マグマが生成した年代を石川岩体の Sm-Nd, Rb-Sr 年代である 110 Ma と仮定して、110 Ma における ϵ_{Nd} , ϵ_{Sr} の値を Table 4 に、またそれらの値を ϵ_{Nd} - ϵ_{Sr} 関係図 (Fig. 5) に示した。石川岩体の値は ϵ_{Sr} 軸の近くでかついわゆるマントル・アレーのすぐ右側にプロットされる。本地域において、マグマに混入するより古い地殻物質として考えられるのは、隣接する御齊

所・竹貫変成岩類であろう。Ueno (1977) によれば竹貫変成岩の 1 試料は 0.7142 と高い $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比を持ち、それは本文で論じている 110 Ma 以前において 0.7116 ($\epsilon_{Sr}=+102$) となる。変成岩の Nd 同位体比が測定されていないので、ここにおいて DM との混合曲線を描くことはできないが、DM と地殻物質の混合曲線は、端成分としての地殻物質の同位体比が大きく変化してもおおよそ同一の経路、すなわち Fig. 5 に示し

Table 4. Initial ϵ_{Nd} and ϵ_{Sr} for the Ishikawa mass

Sample No.	ϵ_{Nd}	ϵ_{Sr}
A1111 (1)	+0.6	+10.5
A1111 (2)	+1.2	+10.5
A0912	+0.2	+12.9
5A-73	+0.0	+10.6

Values at 110 Ma, calculated using the parameters of CHUR (Table 3) for ϵ_{Nd} and those of undifferentiated reservoir (UR) for ϵ_{Sr} i.e. present $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7045$ and $^{87}Rb/^{86}Sr=0.0839$ (DePaolo and Wasserburg, 1976).

Fig. 5. Initial ϵ_{Nd} and ϵ_{Sr} values for the Ishikawa mass.

た石川岩体の ϵ 値付近を通過する。従ってマントルに由来するマグマと地殻物質の混合の可能性はある。しかし一方富樫ら (1986) は本地域周辺でマントルに由来したと考えられる火山岩 (那須, 安達太良) の Sr-Nd 同位体比を測定し, $\epsilon_{Nd}=0\sim1$, $\epsilon_{Sr}=0\sim15$ を得た。富樫ら (1986) はこれらの火山岩が始原的なマントルに由来すると考えている。110 Ma 以前と現在において, 地殻の下に同じマントルが存在している必然性はないが, 上記火山岩と石川岩体の親マグマが類似のマントルに由来すると考えることも可能である。

いずれにせよ, 前記のごとく, 混入対象となる岩体周辺岩石についての同位体データに乏しい現時点では, その可能性についての議論だけで結論を出すには至らない。今後, この種のデータの蓄積が望まれる。

V. ま と め

1. 南部阿武隈山地における古期岩体の一つである石川複合岩体について, Sm-Nd 鋳物年代及び Rb-

Sr アイソクロン年代を測定し, それぞれ 111 ± 42 Ma 及び 106 ± 16 Ma という結果を得た。これらの年代は石川岩体の貫入固結の時期を表すものと解釈され, ジュラ紀の化石が発見された御所変成岩類との関係から, 地質学的に推定される貫入時代と矛盾しない。

2. 石川岩体の Nd モデル年代は CHUR に対しては貫入年代と同様に若く, DM に対しては 600-800 Ma となる。希土類元素存在度パターンは軽希土に富み, 石川岩体は CHUR 様の源物質に由来したと判断される。 $\epsilon_{Nd}-\epsilon_{Sr}$ の関係もこのことを支持する。従って石川岩体の源物質からの分化と貫入固結は引き続き起こったと考えられる。

謝 辞 この研究にあたり, 秋田大学丸山孝彦博士には試料採取の際の御協力と有益な御助言を賜った。また東北工業技術試験所石原舜三博士には一部の試料の御提供をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

引用文献

- DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J. (1976), Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 743-746.
- 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.
- Harrison, T.M., Armstrong, R.L., Naeser, C.W. and Harakal, J.E. (1979), Geochronology and thermal history of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 400-410.
- Hiroi, Y., Yokose, M., Oba, T., Kishi, S., Nohara, T. and Yao, A. (1987), Discovery of Jurassic radiolaria from acmite-phodonite-bearing metachert of the Gosaisyo metamorphic rocks in the Abukuma terrane, Northeastern Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **93**, 445-448.
- Jacobsen, S.B. and Wasserburg, G.J. (1979), The mean age of mantle and crustal reservoirs. *J. Geophys. Res.*, **84**, 7411-7427.
- 加納 博, 黒田吉益, 宇留野勝敏, 濡木輝一, 蟹沢聰史, 丸山孝彦, 梅村隼夫, 光川 寛, 瀬戸延男, 大平芳久, 佐藤 茂, 一色直記(1973), 竹貫地域の地質, 地域地質研究報告(5 万分の 1 図幅), 109p, 地質調査所.
- 河野義礼, 植田良夫 (1965), 本邦産火成岩の K-Ar dating (III)-阿武隈山地の花崗岩類, 岩鉱, **54**, 162-172.
- Lugmair, G.W. and Carlson, R.W. (1978), The Sm-Nd history of KREEP. *Proc. 9th Lunar Planet. Sci. Conf.*, 689-704.
- 丸山孝彦 (1970), 阿武隈高原・鮫川~石川地方の地質と構造-特に古期型花崗質岩類の構造に関して その 1-. 地質雑, **76**, 355-366.
- 丸山孝彦 (1972), 阿武隈高原・鮫川および石川複合岩体の構造-特に古期型花崗質岩類の構造に関して その 2-. 地質雑, **78**, 117-127.
- Maruyama, T. (1978), Geochronological studies on granitic rocks distributed in the Gosaisho-Takanuki district, southern Abukuma Plateau, Japan. *J. Min. Coll. Akita Univ. Ser. A*, **5**, 53-102.
- 丸山孝彦(1979), 南部阿武隈高原の花崗岩類の Rb-Sr 同位体年代論. 日本列島の基盤, 加納博教授記念論文集, 523-558.
- 柴田 賢(1987), 阿武隈山地北端部, 丸森地域の花崗岩類の Rb-Sr 全岩年代, 岩鉱, **82**, 36-40.
- Shibata, K. and Ishihara, S. (1979), Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic rocks from Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 381-390.
- 柴田 賢, 内海 茂(1983), 南部阿武隈山地花崗岩類の角閃石 K-Ar 年代, 岩鉱, **78**, 405-410.
- 富樫茂子, 田中 剛, 倉沢 一, 吉田武義, 石川賢一, 藤縄明彦(1986), 東北日本の島弧ソレイアイトの Sr, Nd 同位体と REE 組成, 日本火山学会 1986 年度秋季大会講演予稿集, 21.
- Ueno, N. (1977), Rb-Sr and K-Ar isotopic investigations of granodiorites and the associated metamorphic rocks in the Abukuma Plateau, Japan. *Chikyu Kagaku (Earth Science)*, **31**, 49-54.
- 梅村隼夫 (1979), 御斉所・竹貫地域の構造運動, 特に御斉所・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.
- Wasserburg, G.J., Jacobsen, S.B., DePaolo, D. J., McCulloch, M.T. and Wen, T. (1981), Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 2311-2323.
- 渡辺岩井, 牛来正夫, 黒田吉益, 大野勝次, 砥川隆次 (1955), 阿武隈高原の火成活動-阿武隈高原の地質学的岩石学的研究(その 9). 地球科学, No. 24, 1-11.
- York, D. (1966), Least squares fitting of a straight line. *Can. J. Phys.*, **44**, 1079-1086.