



Title	水の流出からみた沖縄島における新旧石灰岩地域の溶食速度に関する一考察
Author(s)	廣瀬, 孝; 大城, 和也
Citation	国際琉球沖縄論集 = International Review of Ryukyuan and Okinawan Studies(3): 1-9
Issue Date	2014-03-28
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/30096
Rights	

【研究論文】

水の流出からみた沖縄島における新旧石灰岩地域の 溶食速度に関する一考察

廣瀬 孝* 大城 和也**

A Study on Dissolution Rate of New and Old Limestone Area in Okinawa Island

HIROSE Takashi* and OSHIRO Kazuya**

要旨

本研究では、沖縄島に分布する古期石灰岩地域 6 地点、第四紀琉球石灰岩地域 9 地点の湧水・河川水において調査を行い、電気伝導度（EC）の値から、両地域の溶食速度を推定した。その結果、溶食速度は、古期石灰岩地域では 75.4mm/1,000 年、第四紀琉球石灰岩地域では 101.7mm/1,000 年であり、大きな差がみられ、空隙率の大きさと水と岩石との接触面積の違いなどが影響していると考えられる。また、秋吉台で水質から求められた溶食速度（51mm/1,000 年）よりも速く、亜熱帯気候に属している沖縄島の豊富な降水量や高い二酸化炭素（CO₂）濃度との関係が示唆される。また、沖縄島でも、カメニツァなどの溶食が進んでいる地点で求められた溶食速度に比べるとはるかに小さい値を示し、水の流出から求められた本研究の結果は、その地域全体の平均値を示しているものと考えられる。

キーワード：石灰岩、溶食速度、沖縄島、電気伝導度

Keywords : limestone , dissolution rate , Okinawa Island , electrical conductivity

*琉球大学法文学部 准教授 Associate Professor, Faculty of Law and Letters,
University of the Ryukyus

**琉球大学大学院人文社会科学研究所 M.A. Student, Graduate School of Humanities
and Social Sciences, University of the Ryukyus

はじめに

石灰岩は水に溶けやすい性質を有している岩石であり、石灰岩が広がる地域では、雨水による溶食作用で独特なカルスト地形が形成されている。また、石灰岩地域では地表河川よりも地下水流が発達し、非石灰岩地域の河川や湧水に比べ、カルシウムイオン (Ca^{2+}) 濃度が高いという特徴がある。石灰岩地域の地形変化に関する研究として、従来から様々な方法で、溶食速度が求められてきた。

漆原ほか (1999) は、日本全国における 7 カ所の石灰岩地域 (当麻、阿武隈、秩父、秋吉台、四国大野ヶ原、龍ヶ洞、南大東島) で、石灰岩片の溶食率と地域性を求めた。その結果、本州では、北の当麻よりも南の四国大野ヶ原や秋吉台で高い溶食率を示し、空中よりも土壤中において高い溶食率を示した。これは、土壤の温度が高いほど有機物や植物の活動が活発になり、その結果、土壤中の二酸化炭素 (CO_2) が高濃度になることにもとづいた結果となっている。また、現地調査から石灰岩の溶食速度を求めた研究では、松倉ほか (2005) の喜界島におけるペDESTALの調査や青木・前門 (2010) の沖縄島読谷海岸におけるカメニツアの調査などといった、地表の地形変化から溶食速度を求めた事例と、吉村・井倉 (1992) が秋吉台で行った研究のように、石灰岩地域を流れる水の水質から溶食速度を求めた事例がある。特に、流域から流出する溶存物質の量から求めた溶食速度は、化学的削剥速度 (chemical denudation rate) と呼ばれ、石灰岩地域をはじめとする様々な岩石の地域でその値が求められている。しかし、沖縄における石灰岩地域を流れる水の水質から石灰岩の溶食速度を求めた調査はこれまでにほとんどなされていない。

沖縄島は動植物の活動が活発な亜熱帯環境下に属しているため、土壤中の二酸化炭素 (CO_2) 濃度が本州に比べ高く、年間で 2,000mm 以上という豊富な降水量から、秋吉台における溶食速度よりも速いと考えられる (たとえば、目崎 1984)。また、沖縄島では古期石灰岩と、第四紀琉球石灰岩という大きく分けて 2 つの時代の性格の異なる石灰岩が分布している。古期石灰岩は本部半島を中心とする北部に分布し、第四紀琉球石灰岩は中南部と島の周辺に分布している。そこで、本研究では、古期石灰岩と第四紀琉球石灰岩が分布しているそれぞれの地域において、湧水や河川水の水質を測定し、そこから沖縄島における石灰岩地域の溶食速度を求めるとともに、ほかの石灰岩地域やほかの手法で求められている結果と比較して考察することを目的とする。

1. 調査地域

本研究では、古期石灰岩が分布している沖縄島北部の大宜味村および本部半島と、第四紀琉球石灰岩が分布している沖縄島中南部の宜野湾市および南城市

において、「〇〇カー（ガー）」や「〇〇ヒージャー（樋川）」などと呼ばれている湧水や河川水を中心に、計 15 地点を調査地点として選定した（図 1）。

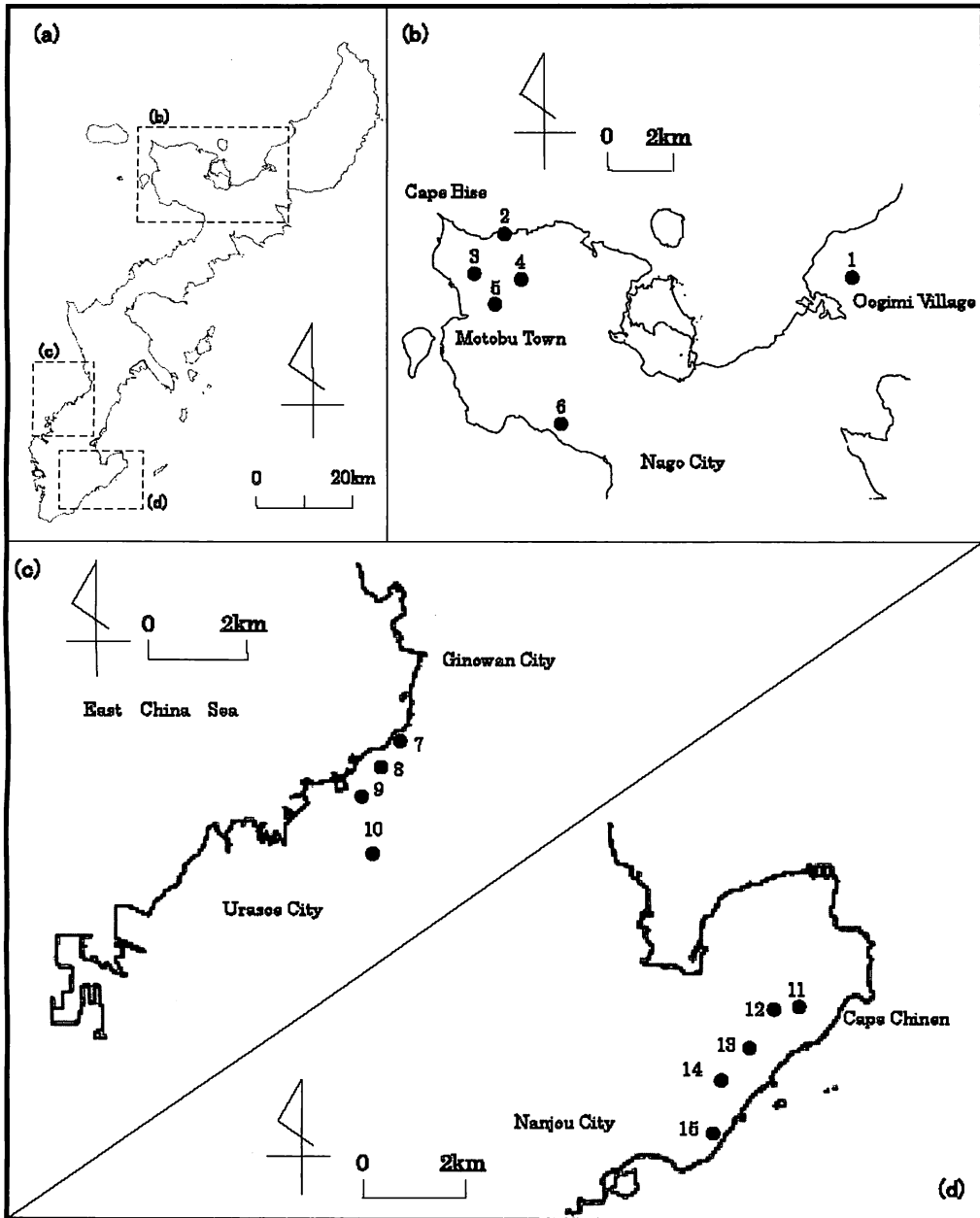


図 1 調査地点

●：採水地点、1：ダチガー、2：フブガー、3：浦崎の湧水、4：大堂の湧水、5：ウフワク、6：潮平川湧水、7：ヒャーカーガー、8：アラナキガー、9：ヒージャーガー、10：ムンヌカー、11：カンチャ大川、12：志喜屋の湧水、13：垣花樋川、14：仲村渠樋川、15：受水走水

これら 15 地点の内、ダチガー、フプガー、浦崎の湧水、大堂の湧水、ウフワク、潮平川湧水の 6 地点は古期石灰岩地域の調査地点である。ダチガーは塩屋富士を伏流している水が湧き出ており、浦崎の湧水、大堂の湧水は山里のカルスト地域からの水が流れ出ていると考えられ、潮平川湧水は嘉津宇岳を水源としていると考えられる。また、ヒャーカーガー、アラナキガー、ヒージャーガー、ムンヌカー、カンチャ大川、志喜屋の湧水、垣花樋川、仲村渠樋川、受水走水の 9 地点は第四紀琉球石灰岩地域の調査地点である。ヒャーカーガー、アラナキガー、ヒージャーガー、ムンヌカーは、石灰岩段丘上にある普天間飛行場の西側に位置し、宜野湾市大山の田芋畑の水源となっており、「大山の湧水群」と称されている。また湧水は、文化的にも重要な場所として位置づけられており、カンチャ大川と仲村渠樋川は、それぞれ南城市指定文化財、国指定重要文化財に指定され、また、垣花樋川は、1985 年に環境省により沖縄県で唯一の名水百選に選定されている。

2. 現地調査および溶食速度の推定法

2-1. 現地調査

現地調査は、古期石灰岩が分布している大宜味村と本部半島における湧水・河川水、第四紀琉球石灰岩が分布している宜野湾市、南城市における湧水の計 15 地点を調査地点として（図 1）、2012 年 8 月～2013 年 1 月にかけて数回（それぞれの地点で 1 回～4 回）、pH と電気伝導度（EC）および水温の測定を行なった。測定には、ポータブルタイプの電気伝導度計と pH 計を用いた。

2-2. 溶食速度の推定

本研究では、新旧石灰岩の溶食速度を求めるために、次式のコルベンの式を用いた。

$$K = 0.4 H \cdot G \cdots \cdots (1)$$

ここで、 K は石灰岩の溶食速度（mm/1,000 年）、 H は水の年流出高（m/年）、 G は Ca^{2+} 濃度（mg/l）から算出した炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の溶解量（g/m³）を示し、0.4 という数値は石灰岩の密度（g/cm³）が 2.5 のときの係数を示している。

(1) 式から溶食速度 K を求めるため、本研究においては、年流出高、 CaCO_3 の溶解量（g/m³）、および石灰岩の密度の係数 0.4 に関して、次のように推定を行なった。

年流出高 H に関しては、流出高は実際に計測せず、沖縄島の年間降水量から

蒸発散量を差し引いた値を用いることとした。流出高の把握には、流出量を長期にわたって観測する必要があり、また、石灰岩地域の地下水流は地表河川のように目でみることができず、ある湧水点の水がどこから流れてきたのか（すなわち流域面積）が把握しづらく、流出高を正確に把握することが困難であるため、このような手法を用いた。沖縄島の年間降水量としては、那覇で約2,000mmであり、また、水収支における蒸発散量を考慮すると、年間降水量の約半分が蒸発散量であると考えられる（たとえば、廣瀬 2013）。したがって、その差である年流出高は 1,000mm/年となり、H は、1 (m/年) という値とした。

つぎに、CaCO₃の溶解量 G については、水の Ca²⁺濃度を知る必要があるが、本研究では直接 Ca²⁺濃度の測定は行わず、現地調査で得られた電気伝導度の値から以下のように Ca²⁺濃度を推定して求めた。図 2 は、ほぼ島の全域が石灰岩からなる宮古島の水質について調査された東田ほか（2003）のデータをもとに、電気伝導度と Ca²⁺濃度の関係を求めたものである。

この図から、電気伝導度と Ca²⁺濃度の関係式を求めると次式のようにになる。

$$y = 1.4913x + 1.0548 \dots \dots (2)$$

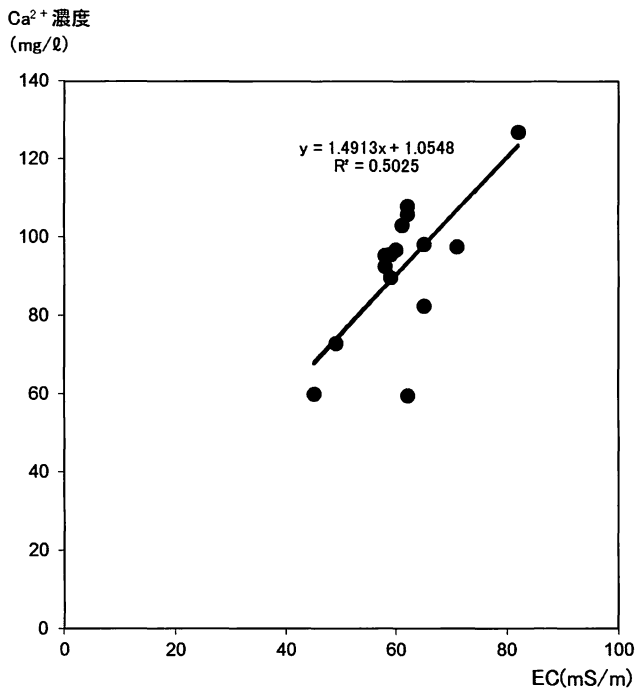


図 2 電気伝導度 (EC) とカルシウムイオン (Ca²⁺) 濃度の関係 (東田ほか (2003) のデータをもとに作成)

ここで、 y は Ca^{2+} 濃度 (mg/ℓ)、 x は電気伝導度 (mS/m) を示す。本研究では、(2) 式に各地点で計測された電気伝導度 (mS/m) の値を代入して Ca^{2+} 濃度 (mg/ℓ) を算出した。さらに、算出した Ca^{2+} 濃度を 2.5 倍することで CaCO_3 の溶解量 (g/m^3) を求めた。

(1) 式では、石灰岩の密度 (g/cm^3) が 2.5 のときの係数が 0.4 であるが、古期石灰岩と第四紀琉球石灰岩とでは空隙率の違いから密度も異なる。沖縄島に分布する石灰岩の諸性質を示した前門 (1996) によれば、古期石灰岩である本部石灰岩および今帰仁石灰岩の密度が $2.6\sim 2.7\text{g}/\text{cm}^3$ であるのに対し、第四紀琉球石灰岩である那覇石灰岩、読谷石灰岩および牧港石灰岩の密度はそれぞれ $2.29\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $2.24\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.40\text{g}/\text{cm}^3$ と小さい。そこで、本研究では、古期石灰岩では $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、第四紀琉球石灰岩では、調査地点の地質を考慮し、牧港石灰岩を除く 2 種の琉球石灰岩の平均値から $2.265\text{g}/\text{cm}^3$ を石灰岩の密度とした。係数を求めると、古期石灰岩では 0.37、第四紀琉球石灰岩では 0.44 となり、調査地点の地質によって異なった係数を用いて溶食速度を推定した。

3. 結果と考察

古期石灰岩地域における 6 地点の湧水・河川水と第四紀琉球石灰岩地域における 9 地点の湧水で計測した電気伝導度と pH の結果を表 1 に示す。

これをみると、琉球石灰岩地域のほうが電気伝導度の値が高い傾向が認められる。また、15 地点の湧水・河川水の中で、測定日によって電気伝導度の変化が大きかった地点は、古期石灰岩地域にある潮平川湧水と第四紀琉球石灰岩地域にあるヒージャーガー、志喜屋の湧水、カンチャ大川の 4 地点であった。とくに、潮平川湧水においては、倍近くも値に差がみられた。このように、電気伝導度の値に差がみられたのは、先行降雨などの影響で、測定日の流出水の状況が異なっていたことが考えられる。一般に、降雨の水（溶存成分が少ない水）が多く含まれる場合には電気伝導度の値は低くなり、地下のたまり水（溶存成分が多い水）などが多く混じって流出した場合には電気伝導度の値は高くなる。測定時の水と降雨流出現象についての詳細を明らかにするためには、詳細な水文観測が必要である。

表 2 に、計測した電気伝導度の平均値からそれぞれの地点の溶食速度を求めた結果を示す。古期石灰岩地域において、最も石灰岩の溶食速度の値が高かったのは、浦崎の湧水 ($93.7\text{mm}/1,000$ 年) であり、最も値が小さかったのはダチガー ($44.8\text{mm}/1,000$ 年) であった。第四紀琉球石灰岩地域においては、受水走水での $134.0\text{mm}/1,000$ 年が最高値で、ムヌカーでの $83.3\text{mm}/1,000$ 年が最小値を示した。

古期石灰岩地域と第四紀琉球石灰岩地域における石灰岩の溶食速度の平均値は、それぞれ $75.4\text{mm}/1,000$ 年および $101.7\text{mm}/1,000$ 年となり、両地域に差

表 1 現地調査結果

No.	計測地点	地質	EC (mS/m)	pH	測定回数
1	ダチガー	古期石灰岩	31.8	7.86	1
2	フブガー	古期石灰岩	65.8~66.0	7.08~7.34	2
3	浦崎の湧水	古期石灰岩	66.4~67.9	7.29~7.46	2
4	大堂の湧水	古期石灰岩	42.6~47.6	7.42~7.81	2
5	ウフワク	古期石灰岩	49.1~52.2	7.32~7.64	2
6	潮平川湧水	古期石灰岩	42.5~83.4	7.12~7.27	2
7	ヒャーカーガー	第四紀琉球石灰岩	53.9~58.4	7.19~7.50	3
8	アラナキガー	第四紀琉球石灰岩	54.5~55.9	7.39~7.65	3
9	ヒージャーガー	第四紀琉球石灰岩	56.5~67.5	7.25~7.43	3
10	ムンヌカー	第四紀琉球石灰岩	49.6~50.5	7.11~7.40	3
11	カンチャ大川	第四紀琉球石灰岩	57.7~69.4	6.87~7.33	4
12	志喜屋の湧水	第四紀琉球石灰岩	46.9~71.6	7.35~7.68	4
13	垣花樋川	第四紀琉球石灰岩	59.3~62.8	7.18~7.69	4
14	仲村渠樋川	第四紀琉球石灰岩	50.5~56.8	7.34~7.99	4
15	受水走水	第四紀琉球石灰岩	77.2~85.9	7.22~7.49	3

※2回以上測定した地点の EC および pH は、最小値～最大値を示す

表 2 溶食速度の推定結果

No.	計測地点	地質	EC平均 (mS/m)	Ca ²⁺ 濃度 (g/m ³)	CaCO ₃ 溶解量 (g/m ³)	溶食速度 (mm/1,000年)
1	ダチガー	古期石灰岩	31.8	48.5	121.2	44.8
2	フブガー	古期石灰岩	65.9	99.3	248.3	91.9
3	浦崎の湧水	古期石灰岩	67.2	101.3	253.2	93.7
4	大堂の湧水	古期石灰岩	45.1	68.3	170.8	63.2
5	ウフワク	古期石灰岩	50.7	76.7	191.7	70.9
6	潮平川湧水	古期石灰岩	63.0	95.0	237.5	87.9
7	ヒャーカーガー	第四紀琉球石灰岩	56.8	85.8	214.4	94.3
8	アラナキガー	第四紀琉球石灰岩	55.4	83.7	209.2	92.0
9	ヒージャーガー	第四紀琉球石灰岩	63.8	96.2	240.5	105.8
10	ムンヌカー	第四紀琉球石灰岩	50.1	75.8	189.4	83.3
11	カンチャ大川	第四紀琉球石灰岩	65.1	98.1	245.3	108.0
12	志喜屋の湧水	第四紀琉球石灰岩	63.3	95.5	238.6	105.0
13	垣花樋川	第四紀琉球石灰岩	61.7	93.1	232.7	102.4
14	仲村渠樋川	第四紀琉球石灰岩	54.3	82.0	205.1	90.2
15	受水走水	第四紀琉球石灰岩	81.0	121.9	304.6	134.0

がみられた。これは、石灰岩の種類によって溶ける量が異なることに基づくと考えられる。鈴木ほか（2000）が行った16種の石灰岩タブレットを用いた閉鎖系の溶解実験によると、琉球石灰岩が実験開始から985時間後の電気伝導度の値が最も高く、溶解速度が速かったが、ほかの石灰岩との大きな溶解差はみられていない。一方、前門（1988）は、沖縄島に分布する新旧の石灰岩試料を土壤に埋設し、水が流動する開放系の環境下で溶解実験を行なった結果、古期石灰岩よりも第四紀琉球石灰岩の方がより多く溶けることを報告し、これには、岩石中の空隙率の差が関係していると示唆している。本研究で求めた新旧石灰岩の溶食速度は、野外、すなわち開放系の環境下で計測した結果に基づくものであるため、両地域における石灰岩の溶食速度の差は、前門（1988）の実験結果で考察されているように、岩体の空隙率の差によって水との接触面積が異なってくるのが一因として考えられる。

本研究で得られた、古期石灰岩地域と第四紀琉球石灰岩地域における石灰岩の溶食速度の平均値 $75.4\text{mm}/1,000$ 年および $101.7\text{mm}/1,000$ 年という値は、吉村・井倉（1992）によって求められた秋吉台における石灰岩の溶食速度（ $51\text{mm}/1,000$ 年）よりも高い値を示した。これは、亜熱帯気候に属する沖縄島が秋吉台のある山口県に比べ、降水量が多く、土壤中の二酸化炭素（ CO_2 ）濃度が高いためであると考えられる。

また、本研究で得られた値を琉球列島で行われた、ほかの手法から求められた値と比較すると、松倉ほか（2005）がペDESTALを用いて求めた喜界島の石灰岩地表面の溶食速度（約 $40\sim 50\text{mm}/1,000$ 年）より高い。また、青木（2009）において求められた完新世サンゴ礁段丘に形成されているカメニツアの成長速度（ $0.025\text{cm}/\text{year}$ （ $=250\text{mm}/1,000$ 年））や青木・前門（2010）において求められた沖縄島読谷海岸に形成されるカメニツアの成長速度（ $0.59\text{mm}/\text{年}$ （ $=590\text{mm}/1,000$ 年））と比較するとかなり低い値を示した。本研究で求められた値は、湧水・河川水によって、その地域から運び出された炭酸カルシウムの総量を示しており、石灰岩地域全体の平均値を示していると思われる。一方、カメニツアなどの凹地は溶食の進行している地点であるため、値が大きくなっているものと考えられる。

おわりに

本研究では、沖縄島に分布する古期石灰岩地域と第四紀琉球石灰岩地域における湧水・河川水の電気伝導度の値から、両地域の溶食速度を推定した。その結果、古期石灰岩地域では $75.4\text{mm}/1,000$ 年、第四紀琉球石灰岩地域では $101.7\text{mm}/1,000$ 年であり、溶食速度には大きな差がみられた。これは、空隙率の大きい第四紀琉球石灰岩のほうが、水と岩石との接触面積が大きいことが、一因として考えられる。

また、本研究で得られた結果は、同様に水質から求められた、吉村・井倉（1992）による秋吉台の溶食速度（51mm/1,000年）よりも速い。これは、亜熱帯気候に属している沖縄島の豊富な降水量や土壌中の二酸化炭素濃度が関係しているためであろう。また、青木（2009）や青木・前門（2010）が求めたカメニツァの成長速度に比べるとはるかに小さい値を示した。これは、カメニツァなどの凹地は、溶食が進んでいる地点であるのに対し、水の流出から求めた本研究の結果はその地域全体の平均値を示しているからであろう。

本研究では、電気伝導度からカルシウムイオン濃度を推定したり、流出高には一定の値を用いたりしている。さらに正確な溶食速度を求めるためには、調査地点を増やすとともに、水質分析によるカルシウムイオン濃度の正確な把握や、水文観測による流出高や平均的水質の正確な把握が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、前門先生をはじめとする琉球大学法文学部地理学教室の先生方には貴重な助言をいただきました。調査時学部生であった地理学教室卒業生の武石 裕さん、内原友紀さんには現地調査に協力していただきました。以上の方々に心から感謝いたします。

【参考文献】

- 青木 久（2009）「琉球列島の完新世サンゴ礁段丘上に形成されるカメニツァの成長速度」『地形』30、pp.317-329。
- 青木 久・前門 晃（2010）「琉球石灰岩の石切場跡におけるカメニツァの成長速度—沖縄島読谷海岸の事例—」『沖縄地理』10、pp.25-28。
- 東田盛善・宮里 健・伊敷 牧・渡久山章（2003）「沖縄県宮古諸島における陸水の水質形成に関する研究」『地下水学会誌』45、pp.115-132。
- 漆原和子・鹿島愛彦・榎本浩之・庫本 正・Franz-Dieter MIOTKE・仲程 正・比嘉正弘（1999）「日本における石灰岩溶食率の経年変化とその地域性」『地学雑誌』108、pp.45-58。
- 鈴木麻沙美・高屋康彦・松倉公憲（2000）「石灰岩タブレットを用いた溶解実験」『筑波大学陸域環境研究センター報告』1、pp.19-26。
- 廣瀬 孝（2013）「沖縄島の水文環境—水資源・水利用と水収支—」『地理歴史人類学論集』4、pp.67-76。
- 前門 晃（1988）「土層を用いた石灰岩の溶食に関する野外実験」『地形』9、p.61。
- 前門 晃（1996）「多様な琉球列島のカルスト地形」、『カルスト—その環境と人びとのかかわり—』（漆原和子編）大明堂、pp.161-167。
- 松倉公憲・前門 晃・廣瀬 孝・青木 久・小暮哲也（2005）「台座岩から推定される石灰岩地表面の溶解による低下速度：喜界島における一例」『筑波大学陸域環境研究センター報告』6、pp.17-21。
- 目崎茂和（1984）「日本の主要カルストの地形形成について」『琉球大学法文学部紀要史学・地理学篇』27・28 合併号、pp.139-169。
- 吉村和久・井倉洋二（1992）「石灰岩地域秋吉台における水循環と地下水水質の形成」『地下水学会誌』34、pp.183-194。