

## 福島県、入水鍾乳洞におけるスカラップの形成

漆原和子・鈴木秀和・後藤憲央・高井寿文

### I. はじめに

福島県滝根町の入水鍾乳洞には洞内を流下する地下川の河床と側壁にスカラップがよく発達する。さらに洞床の低下に伴って発達したノッチが数段観察される。本研究の目的は、現在の地下川の河床面に発達するスカラップと地下水流の流速との関係を明らかにし、さらに現河床より一段高いノッチの底面と側壁に残るスカラップの大きさから、旧地下水流の流速を推定しようとするものである。諸外国ではスカラップの研究は進んでおり、流速とスカラップの長径との間に密接な関係があるとされているが、日本では系統的・数量的に把握した報告がない。入水鍾乳洞において、地下川の流速とスカラップの形成についてその関係を明らかにし、諸外国においてなされた報告との比較をし、入水鍾乳洞におけるスカラップ形成の位置づけをしようとするものである。

### II. 調査地域と調査方法

#### 1. 入水鍾乳洞の地理的位置

福島県滝根町は阿武隈山地の中央に位置し、北北西から南南東にひろがる石灰岩台地（仙台平）が分布する。入水鍾乳洞は仙台平の西縁に位置し、観光洞として一般公開されている長さは900mであり、そのうち、案内人付きで入洞できる長さ（探検コース）は750mである。この鍾乳洞の発見は昭和2年蒲生明、鈴木菊意、佐藤留男によってなされ、その後、滝根カルストとして昭和9年に天然記念物指定を受けた。その際、この鍾乳洞は脇水鉄五郎によって入水鍾乳洞と命名された。

滝根層群の石灰岩は、中生代ジュラ紀とされているが、白亜紀前半に花崗岩の貫入があり、石灰岩は大理石化している（滝根町史編さん委員会、1990；石灰石工業協会、1983）。入水鍾乳洞の大部分は、このきわめて均質な粒径3mm～4mmの結晶粒子からなる大理石である。しかし、入水鍾乳洞の入り口付近では、この大理石の中にホルンフェルスが脈状にはさまれている。入水鍾乳洞の位置は図1に示した。

入水鍾乳洞は滝根町史（滝根町史編さん委員会、1990）によると、滝根丘陵の東側、早稲川の上流にあるドリーネ、「ねこじゃくし」から地表水が流入し、地下水系につながり、入水鍾

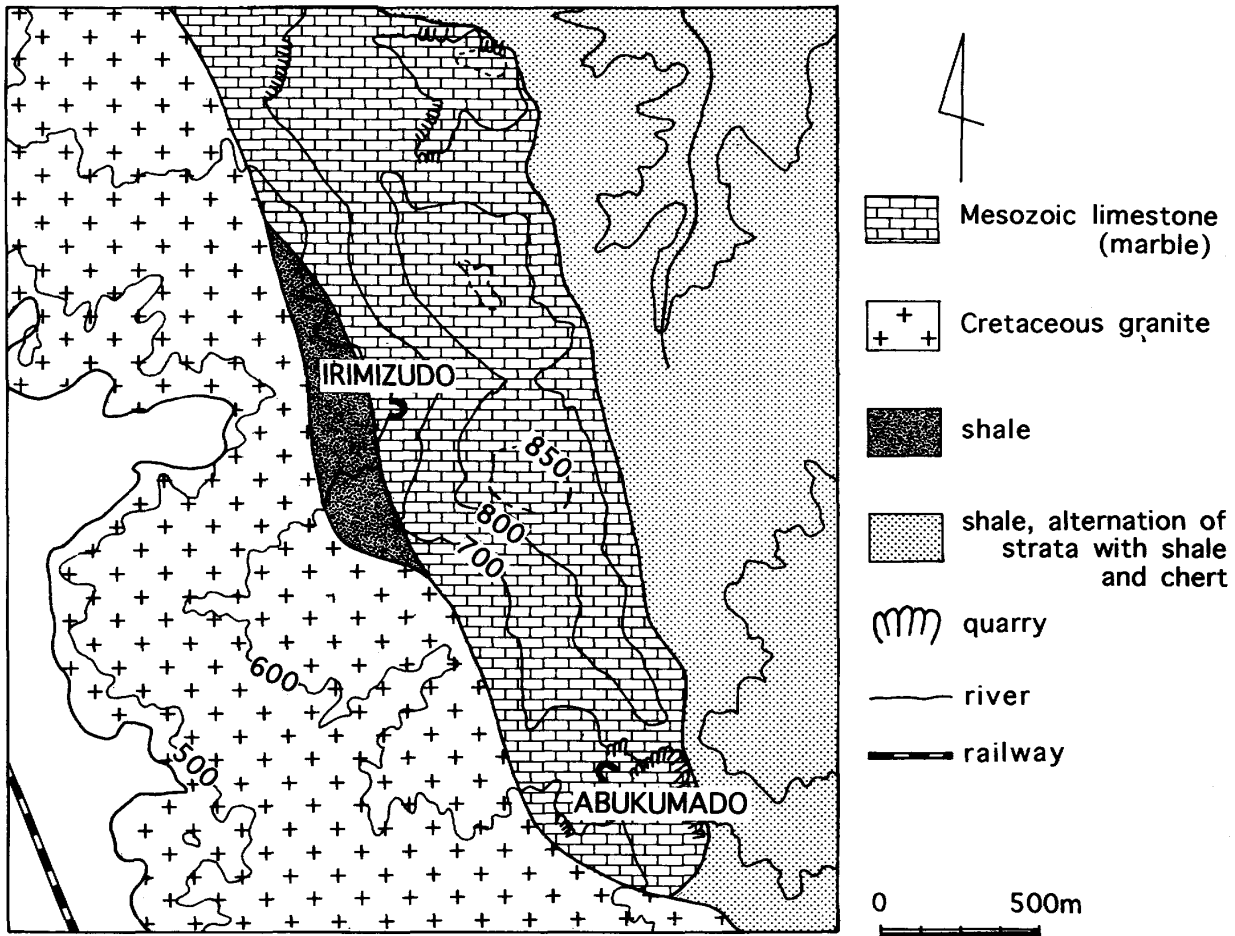


図1 入水鍾乳洞付近の地形と地質

乳洞入口や入水寺付近で流出すると考えられている。トレーサーとしてNaClを使用し、ねこじゃくしに投入した後、入水鍾乳洞や入水寺の裏の池では1時間30分で反応が現れ、4時間から5時間で顕著な反応が現れたと報告されている。

入水鍾乳洞は上部洞，中部洞，下部洞に分けられている。上部洞は現在の地下水流（カルスト川）の河床から約35m（形成当時は水平洞）にあるが，安定期のあと急激な地下水位の低下があった。そして，中部洞は初期に水平洞が形成され，その後空間の拡大が始まった。下部洞は現在の地下川のあるレベルで，弱線～構造線の方向に主方向が支配され，それらに直行する方向に何度か急激に方向転換をして，蛇行しながら流下している。この鍾乳洞は，台地をほぼ東西に横切っている。下部洞の現河床面の上には数段のノッチがあることから，安定して地下水が流下する時期と，下刻が激しい時期があったことをうかがわせる。ノッチの高度は場所により少しずつ比高を異にするが，滝根町史によると約50cm，1 m ±，2 m ±，3 m ±，5 m ±，75m ±，85m ±に発達しているとされている。現在のノッチは，現河床から約30～40cmの比高によく発達する。この研究では現河床と最下位の比高約80cmの旧ノッチを対象とし，その底部，側壁に発達するスカラップを計測した。入水鍾乳洞のほぼ中間にある8地点（図2）（A，B，C，D，E，F，G，H地点）で現河床と最下位旧ノッチのスカラップの計測

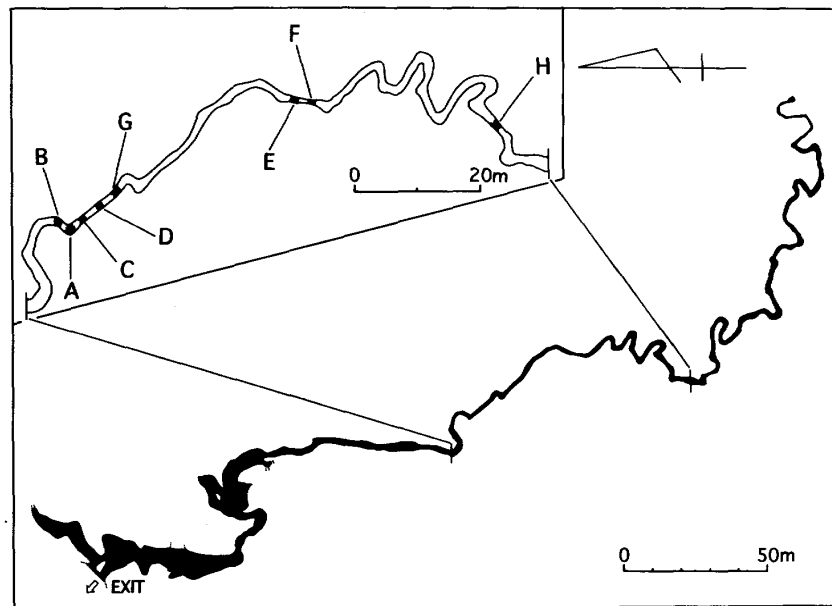


図2 入水鍾乳洞内のスカラップ計測地点

を行ったが、E、FとH地点では最下位の旧ノッチにはケイブコーラルが付着したり、フローストーンでおおわれているので、スカラップの計測ができなかった。

## 2. スカラップのこれまでの研究

国外ではスカラップと地下川の流速との関係についての研究は多くなされており、そのメカニズムや流速と長径の関係についても明らかにされている。とくにColeman (1949) は、スカラップの急傾斜な頭部の形態から上流側の方向を知ることができることと、スカラップの長径と地下川の流速とは反比例していると述べた。またCurl (1966) は、スカラップの形態は流体特性によって決まるものであり、その大きさはレイノルズ数によって定まっていると述べている。一方、Goodchild ; Ford (1971) は、流水内でのスカラップの形成を実験によって明らかにしようとし、石膏で作ったブロックを用いてスカラップの計測を行った。しかし、平均流速とスカラップの長径との間に明瞭な関係は得られなかった。さらにCurl (1974), Blumberg ; Curl (1974) は、スカラップの形態のうち、特に長径と流速との間にきわめて明瞭な関係があらわれるとした。その際、スカラップの大きさは単に算術平均をするのではなく、スカラップの長径をSauter mean  $\bar{L}_{32} = \frac{\sum l_i^3}{\sum l_i^2}$  として表した場合、形成する地下川の流速との間に逆相関が成立すると述べている。またLauritzen et al. (1983) は、スカラップの形成と今日の雪解け水の排水との関係を明らかにしており、スカラップと環境との関わりを知ろうとする指標にも用いている。

スカラップの形成メカニズムについてはSweeting(1972)やWhite(1988), Ford ; Williams (1989) に詳しく述べられているが、これらに基づき、入水鍾乳洞で実測したスカラップを用いて図3にモデルを示した。すなわち、流速が大きくなり、レイノルズ数が大になることに

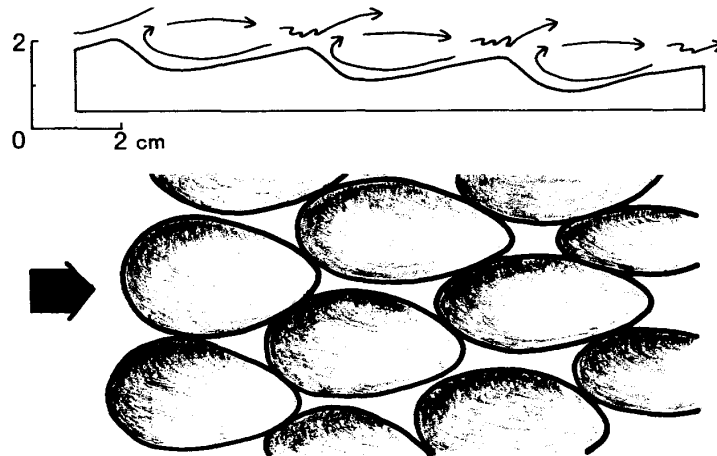


図3 スカラップの形成モデル。流水の上流側に深い凹地をつくる。

よって、流水は乱流をはじめ、地下川の河床面に対して空隙を有するようになる。水粒子は河床に沿って巻くように動くので、河床に沿って逆流した $\text{CO}_2$ を含む水が溶食をし、かつ侵食を行う。しかし、再び表層流となって下流側に流下する水粒子は、スカラップの末端で飛沫となり、十分に溶食や侵食をすることができない。結果的にスプーンのような上流側に深くえぐられた凹地を持ち、下流側にわずかにえぐられた凹地が形成される。以上のように、スカラップは侵食ばかりではなく、溶食を伴う現象である。したがって、スカラップは炭酸塩岩の地域に $\text{CO}_2$ を含む水が流れる地下川に形成される特殊な微地形である。しかし、一般に炭酸塩岩の鉱物粒子の大きさが均一であるときに形成されやすいとされている。

### 3. スカラップの計測方法

スカラップの計測と流速の観測は、1995年5月3日、1995年8月20、21日、1995年11月21日の合計3回に分けて行った。流速の測定は、浮子法と、TK-105X型小型電磁流速計（株式会社東邦電探）を用いて行った。浮子法は7回計測をし、そのうち5回の平均で表した。流速計による計測も同様にして求め、両者間の誤差が信頼できる範囲内にあることを確かめた。現在の河床におけるスカラップの計測は流水中で行うため、物差しでは誤差が生じやすく、型どりゲージ（15cm長）を用いて行った。スカラップの長径、短径、最大の深さを求めたが、ここでは現河床と最下位の旧ノッチにおけるスカラップの長径と流速の関係のみ論じた。付表には各地点の流速、スカラップの長径、最大の深さの実測値を挙げた。観測地点Dのスカラップは写真1に示すとおりである。計測地点Hの実測断面は図4に示した。H地点では現河床にわずかに径5cm～2cmの垂角礫（花崗岩、ホルンフェルス、砂岩、方解石）が堆積する。また、H地点の旧ノッチの表面にはケイブコーラルが付着していて、旧ノッチのスカラップは計測できなかった。

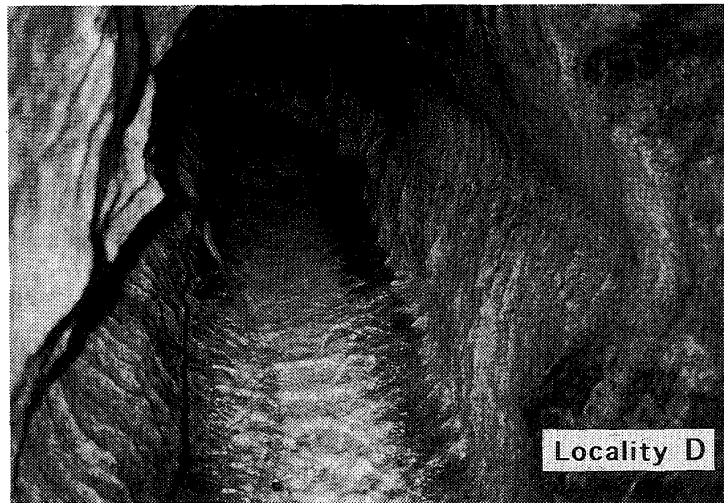


写真1 入水鍾乳洞内D地点の現在の地下川河床と側壁に発達するスカラップ。

最下位の旧ノッチの側壁にもスカラップが発達する(D地点旧ノッチとして計測値を示した場所)。  
95.11.6撮影

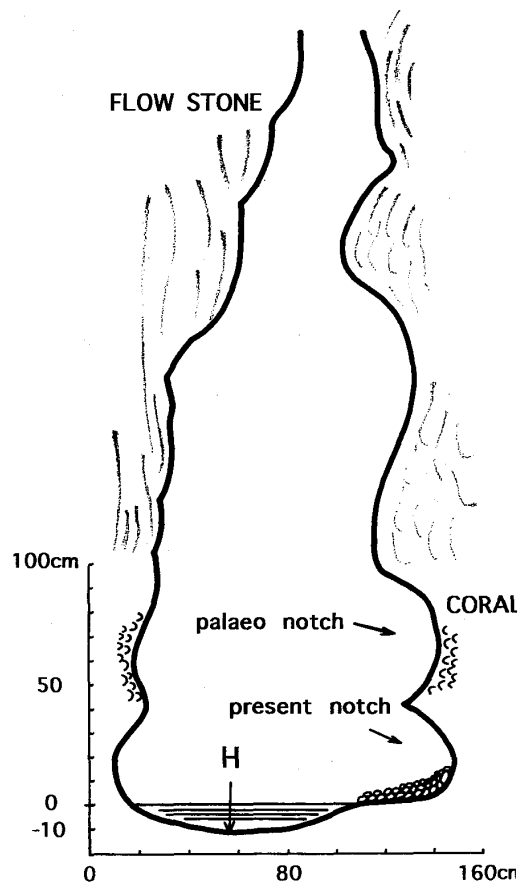


図4 入水鍾乳洞内H地点の断面図

### Ⅲ. スカラップと流速の関係

入水鍾乳洞においては、滝根町史（滝根町史編さん委員会，1990）にスカラップの直径と、地下水流の流速との関係が示されているが、洞床からの高さが70～280cmにわたっているので、この研究の最下位の旧ノッチのスカラップも含まれていると思われる。

当研究では、まず現在の地下川の常時水流のある洞床部におけるスカラップの計測と流速の計測を行い、両者の関係を見た。少なくとも1地点において10個以上計測し、各地点とも異常値を除いて10サンプルとして数的処理をした。図5にはそれぞれの地点の平均流速を縦軸に、横軸にはスカラップの長径そのものを示した。流速の大きいC、E、H地点は、スカラップの長径の示す幅は狭く、集中度はよい。特にEやC地点のように流速が70cm/sを越えると、長径の数值は1cmから3cmの間に集中してくる。しかし、平均流速50cm/s以下になると、次第にスカラップの長径の数值幅が大きくなる。平均流速20cm/sときわめて遅い時にはスカラップの長径の数值幅は110mm～265mmと、広い範囲にわたる傾向がある。しかし、A地点は蛇行しているカーブに相当し、河床の乱流状態が均質ではないと思われる。ここでのスカラップと流速の関係は、前述のB～Fの数值の示す傾向から大きくずれる。

図6では、Curl (1974) に従って、長径のそれぞれを2乗したものの合計と、3乗したものの合計の比 (Sauter mean) を横軸 (対数目盛) にとり、縦軸にはその地点の平均流速を示した。傾向曲線を描くと放物線状になり、流速が緩やかになるとスカラップの長径は長くなることを示している。この傾向曲線に近似の式を算出すると、 $v \text{ (cm/s)} = \frac{1000}{L_{32}^{0.7}}$  となる。CurlのSauter mean  $\bar{L}_{32} = \frac{\sum l_i^3}{\sum l_i^2}$  は、この入水鍾乳洞においても流速との関係を知るうえで、きわめて有効な指数として用いることができる。

次に、現在の河床のすぐ上にある最下位の旧ノッチの洞床部と、側壁に分布するスカラップ

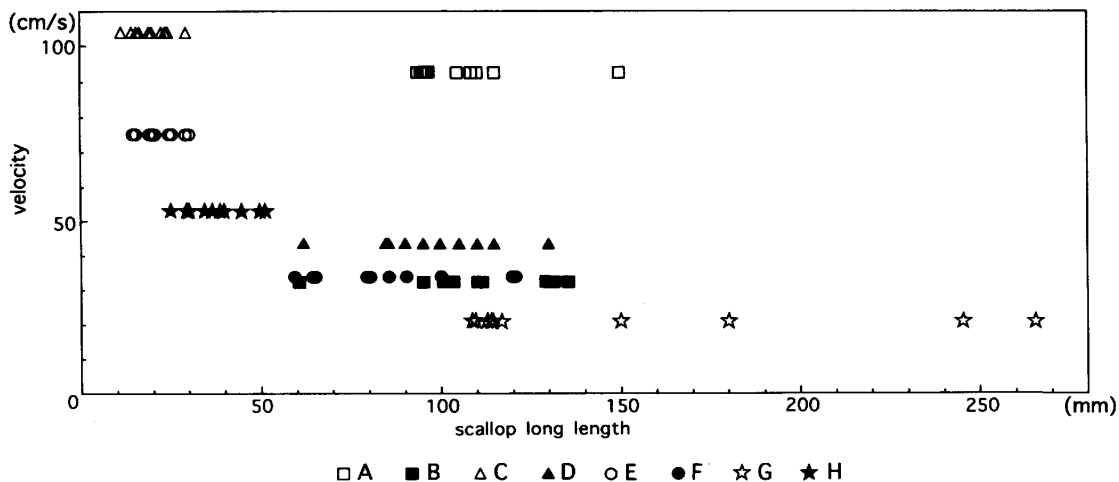


図5 現河床のスカラップの長径の出現範囲と流速

を計測した。それぞれの測点の最下位の旧ノッチの高度は、現在の河床から、C地点；80cm，D地点；69cm，G地点；78cm，H地点；80cmである。このうちA地点はカーブなので、流速との関係式（図6）から大きくずれる。したがって、関係式の算出からは除いた。B，C，D，G地点の旧ノッチの上のスカラップのSauter mean  $\bar{L}_{32} = \frac{\sum L_i^3}{\sum L_i^2}$  を算出すると、それぞれBは108.6，Cは39.1，Dは97.0，Gは130.1となる。この数値を図6で得られたグラフを用いて流速を推定すると、Bは32.8cm/s，Cは55.5cm/s，Dは35.0cm/s，Gは30.0cm/sとなる。この推定流速とそれぞれの地点の現在の流速とを比較すると、表1のようになる。

すなわち4地点において、最下位の旧ノッチ形成時期から現在のノッチと洞床部形成時期までに、局所的に流速が大になったり、小になったりしている。このことは、流速は少なくとも最下位の旧ノッチと現在の河床の流速と等率で変化したのでないことを示している。両時期に

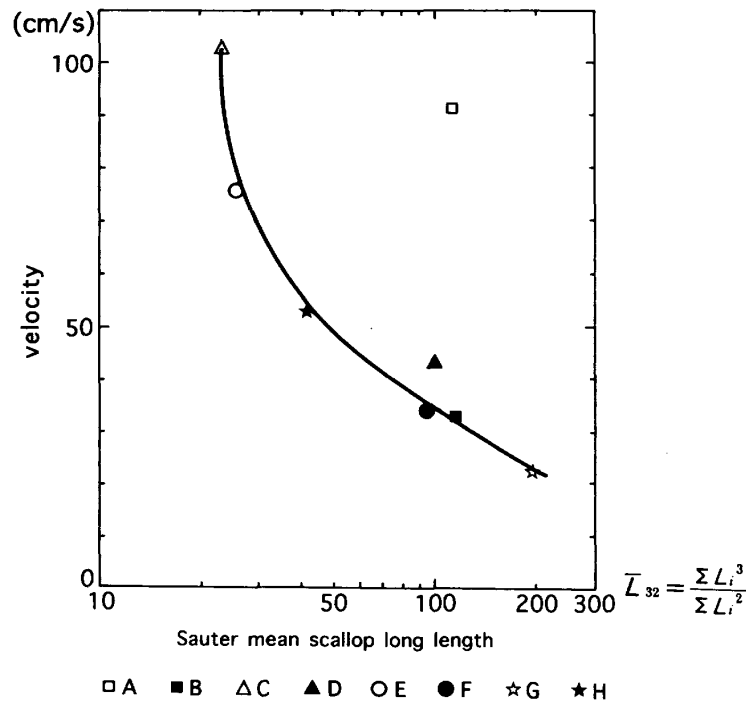


図6 現河床のスカラップと流速の関係図

表1 B，C，D，G地点における現在の流速（cm/s）と、最下位の旧ノッチのスカラップから推定した流速（cm/s）

	現在の流速（cm/s）	最下位の旧ノッチの推定流速（cm/s）
B	33.28	32.80
C	22.88	55.50
D	103.98	35.00
G	22.25	30.00

おける流量の変化や急激な隆起のような均質な条件の変化が起きたのではなく、むしろ、局地的に流速が変化していることを示している。

#### IV. 結論と問題点

入水鍾乳洞の現河床から求めたスカラップの長径は、流速との間に明瞭な関係が成り立つことがわかった。また、この関係から、旧ノッチに残るスカラップの長径を計測し、その結果を用いて、当時の流速を知る手がかりにすることが可能であることがわかった。すなわち、結論として次のことがいえる。

- (i) 現河床の流速が大きくなれば、スカラップのSauter mean  $\bar{L}_{32} = \frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}$  は小さくなる。その関係式は  $v \text{ (cm/s)} = \frac{1000}{\bar{L}_{32}^{0.7}}$  となる。この結果はCurl (1974) が求めた結果と同じである。粒径のそろった大理石化した入水鍾乳洞の石灰岩は、スカラップ形成に良い条件を与え、諸外国の洞窟にみられるスカラップと流速の関係がここでも成立している。
- (ii) B, C, D, G地点の最下位の旧ノッチのスカラップの計測結果をもとに、現在のスカラップと流速の関係から求めた旧流速との間には、その数値は等率に変化していない。すなわち、最下位の旧ノッチと現在の流速は局地的に変化をしている。

今後の残された問題として、数段ある旧ノッチの形成年代が求められれば、時代ごとの過去の流速を知ることができ、入水鍾乳洞に流入する水の側の環境変化をも知ることができるであろう。この研究では、H地点に示すように、最下位の旧ノッチの壁面には既に2 cm～5 cm大のケイブコーラルが密に付着している。このことから、最下位の旧ノッチが形成されて乾燥する環境におかれてから、かなりの時間が経過していることが推定できるが、正確な時間の推定は困難である。

#### 謝 辞

観光洞である入水鍾乳洞の調査を快く許可下さり、御協力をいただいたあぶくま洞事務所所長郡司憲一氏、前所長荒井一雄氏と、入水鍾乳洞の所長木村久次氏に深く感謝します。また、入水鍾乳洞の発見者の一人鈴木菊意氏の御子息であられる鈴木勝義氏には、多くの測量図、新聞記事等を見せて頂いた事を記して感謝いたします。また、スカラップと水流の関係については、筑波大学水理実験センターの池田宏教授に御助言をいただき、また、駒沢大学自然科学教室篠原正雄教授には近似式の算出を指導していただいたことを記して感謝いたします。

調査には平成7年度文部省科学研究費（一般研究（C）, 課題番号07680190, 代表者吉野和子）の一部を使用した。



## 参 考 文 献

- Blumberg, P. N.; Curl, R. L. (1974) : Experimental and theoretical studies of dissolution roughness. *J. Fluid Mech.*, 65, 735~751.
- Coleman, J. C. (1949) : An indicator of water-flow in caves. *Proc. Univ. Bristol Speleol. Soc.*, 6, 57~67.
- Curl, R. L. (1966) : Scallops and flutes. *Trans. Cave Rese. Group Great Britain*, 7, 212~160.
- Curl, R. L. (1974) : Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. *Natl. Speleol. Soci. Bull.*, 36, 1~5.
- Ford, D.; Williams, P. (1989) : "Karst geomorphology and hydrology" Unwin Hyman, London, 601 p.
- Goodchild, M. F. ; Ford, D. (1971) : Analysis of scallop patterns by simulation under controlled conditions. *J. Geol.*, 79, 52~62.
- 加藤 守 (1981) : 「日本列島洞穴ガイドー暗黒の世界への旅」コロナ社, 154 p.
- Lauritzen, S. E.; Ive, A.; Wilkinson, B. (1983) : Mean annual runoff and the scallop flow regime in a subarctic environment. *Trans., Brit. Cave Rese. Assoc.*, 10 (2) , 97~102.
- 石灰石鉱業協会 (1983) : 「日本の石灰石」石灰石鉱業協会, 503 p.
- Sweeting, M. M. (1972) : "Karst Landforms" Macmillan, 362 p.
- 滝根町史編さん委員会 (1990) : 「滝根町史第一巻自然編」滝根町, 361 p.
- White, W. B. (1988) : "Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains" Oxford University Press, 464 p.

## The formation of scallops in the Irimizu Cave, Northeast Japan

Kazuko URUSHIBARA-YOSHINO, Hidekazu SUZUKI,  
Noriyisa GOTO and Toshibumi TAKAI

The scallops are formed on the present cave floor and notches. Size of the scallops and flow velocity of underground water were measured at 8 points in the Irimizu Cave in Fukushima Pref., Northeast Japan. The bedrock is well crystalized marble, and grain size is about 3 ~ 4 mm. The relationship between scallop's Sauter mean of long lengths  $\bar{L}_{32} = \frac{\sum l_i^3}{\sum l_i^2}$  and flow velocity of underground water is negative. The formula is  $v \text{ (cm/s)} = \frac{1000}{\bar{L}_{32}^{0.7}}$ . The scallops formed on the lowest palaeo-notches were also measured. The palaeo-velocity at 4 points were estimated by the relation of present scallops between Sauter mean of long length and flow velocity of underground water. The palaeo-velocity in each points are different from present-velocity.

付表 入水鐘乳洞のA～H地点における現河床のスカラップと最下部の旧ノッチのスカラップの計測値

A '95年8月20日流路蛇行

現河床 (流速92.56cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
1	97	14
2	94	10
3	105	15
4	109	18
5	95	13
6	110	5
7	95	19
8	95	15
9	150	15
10	115	11
平均	106.5	13.5

$\Sigma l_i^2$	116051
$\Sigma l_i^3$	12994911
$\bar{L}_{32}$	111.97586

最下部の旧ノッチ

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
11	100	11
12	75	16
13	80	10
14	92	22
15	110	20
16	80	16
17	113	14
18	147	18
19	130	25
20	125	15
平均	105.2	16.7

$\Sigma l_i^2$	115892
$\Sigma l_i^3$	13325108
$\bar{L}_{32}$	114.97866

B '95年8月20日

現河床 (流速33.28cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
21	131	16
22	100	15
23	103	18
24	95	8
25	60	13
26	110	10
27	110	10
28	130	18
29	135	15
30	130	12
平均	110.4	13.5

$\Sigma l_i^2$	126620
$\Sigma l_i^3$	14930568
$\bar{L}_{32}$	117.91634

最下部の旧ノッチ

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
31	75	12
32	65	10
33	80	11
34	150	20
35	100	11
36	60	8
37	65	16
38	55	5
39	123	30
40	110	12
平均	88.3	13.5

$\Sigma l_i^2$	86829
$\Sigma l_i^3$	9432367
$\bar{L}_{32}$	108.63152

C '95年8月21日

現河床 (流速103.98cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
41	12	3
42	23	5
43	20	3
44	25	4
45	25	3
46	30	4
47	15	2
48	20	4
49	17	2
50	16	4
平均	20.3	3.4

$\Sigma l_i^2$	4393
$\Sigma l_i^3$	100529
$\bar{L}_{32}$	22.883906

最下部の旧ノッチ

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
51	27	5
52	32	7
53	38	9
54	36	5
55	27	5
56	42	5
57	50	8
58	30	7
59	40	7
60	42	9
平均	36.4	6.7

$\Sigma l_i^2$	13750
$\Sigma l_i^3$	537838
$\bar{L}_{32}$	39.115490

D '95年 8月21日

現河床 (流速44.30cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
61	62	7
62	100	9
63	95	8
64	90	8
65	85	6
66	115	11
67	130	18
68	105	15
69	85	8
70	110	12
平均	97.7	10.2

$\Sigma l_i^2$	98669
$\Sigma l_i^3$	10259453
$\bar{L}_{32}$	103.97848

最下部の旧ノッチ

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
71	45	10
72	95	25
73	80	7
74	40	12
75	110	15
76	110	12
77	122	20
78	60	13
79	42	7
80	60	10
平均	76.4	13.1

$\Sigma l_i^2$	67098
$\Sigma l_i^3$	6508436
$\bar{L}_{32}$	96.998956

E '95年 5月3日

現河床 (流速75.98cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
81	20	2
82	30	3
83	30	10
84	20	5
85	30	5
86	25	5
87	15	3
88	25	3
89	20	4
90	15	7
平均	23	4.7

$\Sigma l_i^2$	5600
$\Sigma l_i^3$	143000
$\bar{L}_{32}$	25.535714

F '95年 5月3日

現河床 (流速34.08cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
91	120	12
92	80	7
93	60	15
94	65	2
95	90	20
96	120	20
97	80	15
98	65	8
99	100	9
100	85	20
平均	86.5	12.8

$\Sigma l_i^2$	78975
$\Sigma l_i^3$	7588375
$\bar{L}_{32}$	96.085787

G '95年11月12日

現河床 (流速22.20cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
101	111	29
102	150	32
103	117	15
104	115	20
105	110	18
106	265	40
107	180	25
108	113	24
109	245	40
110	115	11
平均	152.1	25.4

$\Sigma l_i^2$	262479
$\Sigma l_i^3$	51307641
$\bar{L}_{32}$	195.47332

最下部の旧ノッチ

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
111	125	18
112	140	15
113	130	20
114	125	20
115	130	25
116	115	26
117	125	25
118	140	20
119	120	35
120	140	32
平均	129	23.6

$\Sigma l_i^2$	167100
$\Sigma l_i^3$	21734250
$\bar{L}_{32}$	130.06733

H '95年11月12日

現河床 (流速53.07cm/s)

スカラップNo	長径L(mm)	深さD(mm)
121	35	2
122	25	2
123	37	3
124	30	2
125	39	2
126	31	3
127	50	3
128	40	3
129	52	3
130	44	3
平均	38.3	2.6

$\Sigma l_i^2$	15341
$\Sigma l_i^3$	640055
$\bar{L}_{32}$	41.721856