

## 身近な酸性雨被害？ 三重大学構内における コンクリートつららについて（短報）

### Development of icicle-like material hanging from eaves and downside of roof of concrete buildings at Mie University

宇都宮 陽二郎

Yojiro Utsunomiya

**Abstract:** The author examined icicle-like material hanging from the eave and downside of roof of a concrete college building at Mie University, and the findings are reported here:

1. From a geomorphologic viewpoint, the micro-topography of the icicle-like material resembled that of an embryonic stalactite in a limestone cavern.
2. The icicle-like material was classified into eight types: (1) lucent tubular, (2) field horsetail-like lucent tubular, (3) field horsetail-like white and hard tubular, (4) hard tubular with a lucent part in the downward-pointing tail, (5) long tubular, (6) funnel-shaped tubular, (7) row type, and (8) merged type. The material develops from lucent tubular to hard and white tubular, and later merges with other adjacent icicle-like materials.
3. The annual rate of growth of the longest icicle-like material was calculated to be 1.25 cm/year within the last 36 years.
4. A converging lens-like deposit ("stalagmite") was observed on a stool of the building; therefore, the same kind of material might have formed on the ceiling that was removed by the construction.
5. A cusped horn was observed on the tubular surface of the icicle-like material, forming a right angle with it, and apparently uninfluenced by gravity.
6. These icicle-like materials are well developed underneath the eaves of rooms on the top floor. Their development may depend on the moderate volume of water supplied from the roof and cracks produced by relatively severe exposure to the sun and rain.

#### 1 はじめに

三重大赴任後まもなく、研究室の窓から空を見上げ、酸性雨に密接な(?) コンクリートつららが底部に発育していることに驚嘆し、疑問をいだきつつ3年が過ぎた。コンクリートつららは、専門研究者から小中学校の自由研究の課題で取扱われ、今更と感じていた。ところが、旧水産学部（医療短大）及び生物資源学部校舎の補強工事による庇、内装天井の撤去に遭遇し絶好のフィールドが出現したこと、カルスト地形（鍾乳石や石筍）の萌芽期の微地形を観察できることから、取壊しの合間を縫い調査をおこない記録にとどめることにした。

コンクリートつららと酸性雨については、交通量の激しい隧道など典型的な汚染箇所における野外調査では相互関係が指摘されているが（山口，2001）、室内実験では、酸性雨以外に雨水中の純水、さらにはアンモニウムイオン等の寄与も指摘されるなど（大阪府公害監視センター，1994、黒坂・畑中，1995）、相互関係は明らかではないようである。本調査によるコンクリートつららの成因を、必ずしも酸性雨に帰するわけではないが、次に津周辺における酸性雨の状況をみることにしたい。

## 2 酸性雨について

$\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  が大気中で移流時に変化した硫酸イオン、硝酸イオンを取り込み pH5.6 以下となった雨水が酸性雨であるが、国内外の排出源に由来する酸性雨の存在は、本邦では、29 年前から知られている。環境庁では 1988 年（昭和 63 年）以降、酸性雨の集中的な調査を、第 1 次、第 2 次（昭和 63 年度～平成 4 年度）、第 3 次酸性雨対策調査（平成 5～9 年度、48 カ所）、第 4 次調査（平成 10～12 年度）と実施しているが、この三重県でも平成元年以降、四日市、上野、松阪、飯南、磯部及び尾鷲の 6 箇所に設置された酸性雨モニタリング地点で観測が行われてきた（図 1）。三重県環境部より提供された雨水の pH 季節平均値に基づき、各地点の pH の季節・経年変化を図 2 に示す。ただし、この観測値は海塩粒子の影響が未補正であり、大気汚染にのみ起因する酸性雨を意味しない。

図 2 の a, b, c, d, e, f は各々、四日市、飯南、（伊賀）上野、松阪、磯部及び尾鷲における pH の季節・年変化である。本図によると、機器整備・保守など器差補正が実施されていることを前提として、飯南、上野を除くと一般に pH6 以下であること、尾鷲は一般に pH4～5 を示し、季節及び経年変化が少ないこと、松阪と飯南は類似した経年変化を示すこと、四日市は平成 14 年 1～3 月を除き、平成 11 年以降、低下傾向であるが、他は上昇傾向を示すことが知られる。

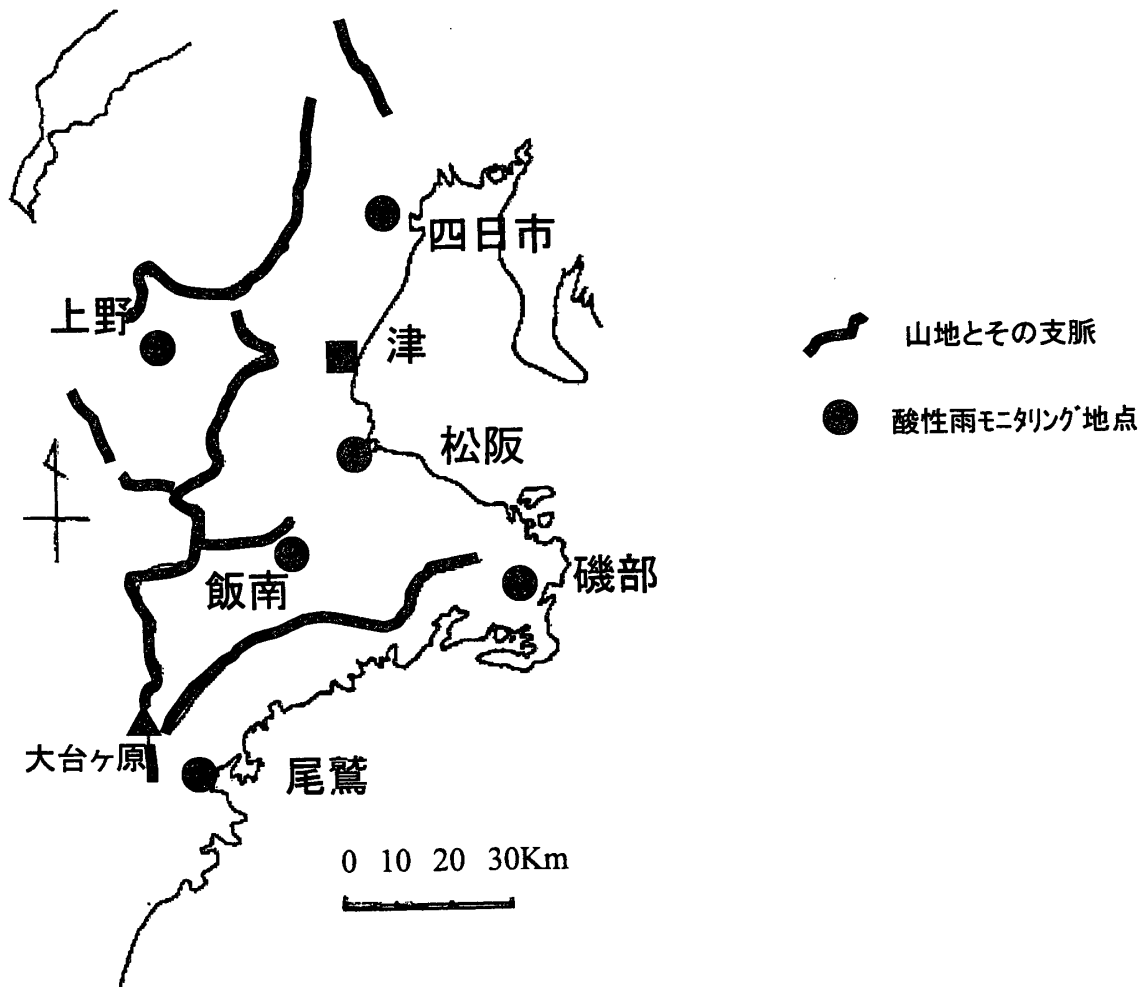


図 1 三重県における酸性雨モニタリング地点

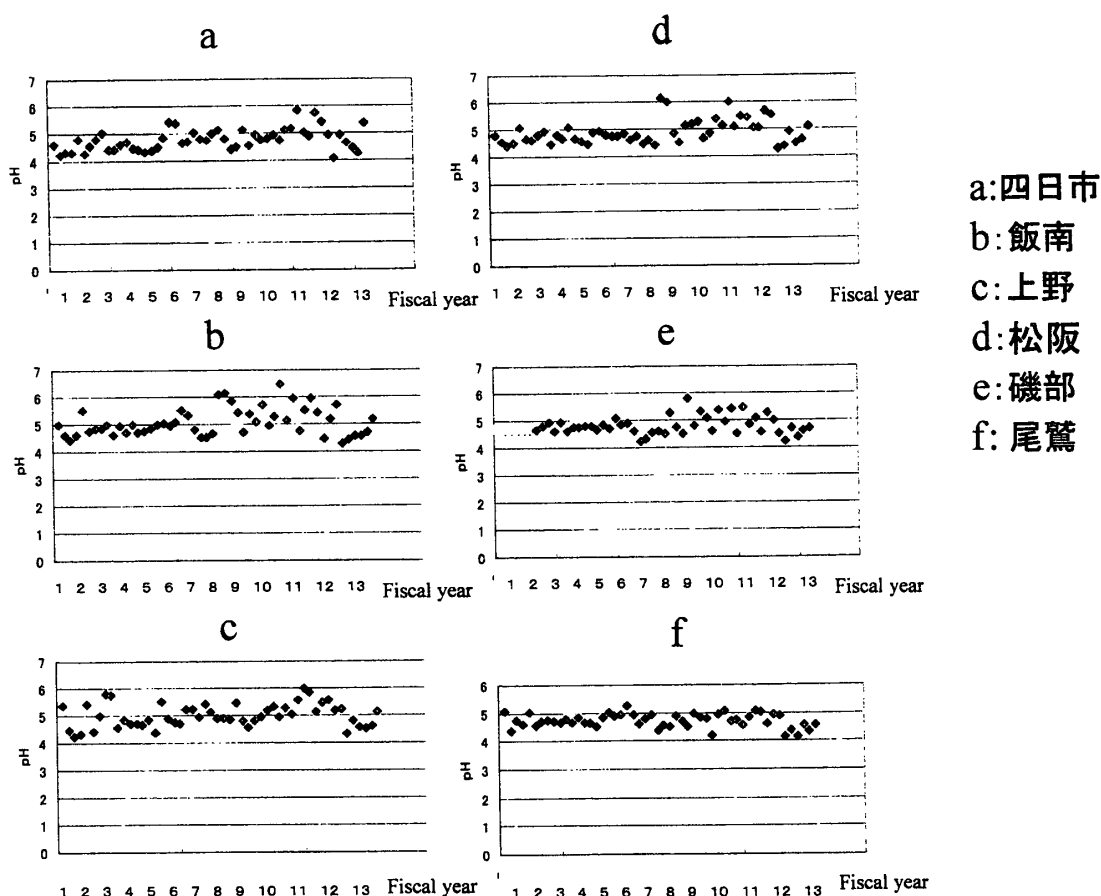


図2 平成1～13年度における pH の季節・年変化

コンクリートつららと大気汚染との関連については、黒坂・畑中 (1995)、大阪府公害監視センター (1994) 及び山口 (2001) らによれば、アルカリのセメント水和物が酸と反応し、結合能力を失い、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  はそれぞれ溶出ないしゲル状となり浸出した可溶性のカルシウム塩が蒸発や大気と反応し、再び固化してコンクリートつららを形成する。一方、必ずしも酸性雨は必須でなく、純水へ溶出する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が大気中の二酸化炭素と反応し、溶解度の低い炭酸カルシウムとなり析出し、コンクリートつららを形成するとされており、研究者により見解がやや異なるコンクリートつららと酸性雨の詳細な議論及び化学的記載は大気化学研究者に委ねることとして、ここではコンクリートつららの分布と形態を記載することにした。上述のとおり、取壊しの合間の調査のため、工事作業の進捗状況により、予定した測定時ではコンクリートつららが亡失しているなど、限られた状況の中における観察結果である。

### 3 三重大学生物資源棟におけるコンクリートつらら

調査方法はコンクリートつららの生育地点の図化とそれぞれの形態観察及び長さの測定である。測定方法は、概査によるコンクリートつららの発達地点について、窓のない底など接近できない箇所コンクリートつららの長さは目測により測定した。また、限られた時間内で調査を行う都合上、測量用の簡易箱尺を底や天井に当てて、斜め下方から双眼鏡で目盛を読みとる方法をとった。斜め計測であるため、cm オーダーの測定誤差が必然的に含まれる。さらに数mmの突起状

をなすコンクリートつららを含めた全てを測定したわけではない。箱尺を当てる際に接触し落下させ調査不能となった場合もある。また、壁や天井の白華は屋根下のコンクリートの罅の周辺には面積の大小を問わず観察されたが、この無数に存在する白華部分の観察は実施していない。これらの制約があるが、以下にコンクリートつららの観察及び測定結果を記載する。以上の測定結果をもとに、コンクリートつららの地点別測定値の最大、平均、最小値を表1に示す。なお、表1下欄の統計量は地点集計値をまとめたもので全データの集計値ではない。本表によると、最大値は、Loc. 312-1の45cmで、平均値及び最小値は45～1cmの間にある。これは、地点に1本しかないコンクリートつららの値が、集計値に影響しているためである。

図3、4、5は各建物におけるコンクリートつららの位置を示している。生物資源棟の底部分に発達するコンクリートつららについては、一般に最上階の底に多く認められ、下層階の底部分にはほとんど認められない。これは、上層階の底に裂罅が多く、適度な流水の供給があることに起因すると考えられる。なお、建物の長軸方向が北東であるが、方位別にみるとコンクリートつららは、南及び北側に多く認められる。安全用の鉄柵で周囲を囲まれた屋上の傾斜がその中心軸から南北の両方向に微傾斜し、底部への雨水の供給量が比較的多いと推定される。

ごく一部（loc. 2）の窓枠上部には列状に並ぶ短いコンクリートつららがあり、その下の窓

表1 生物資源学部棟のコンクリートつらら

(unit:cm)

Loc.	Ave	Max	Min	54	2	4	1	310	6	15	1.5
1	1	6	6	55	0.85	1	0.7	311	2.95	6	2
2	5.5	8.5	3	56	4.2	6.3	2.1	312-1	45.2	45.2	45.2
2	4.67	7.5	2.5	57	2.2	2.5	1.9	312-2	3.29	8.5	1
2-2	3.75	5	2.5	58	5.6	5.6	5.6	312-3	6	14.5	1
3	9	9	9	59	3.2	3.4	3	313-1	1.38	1.8	1
9	5	10	2	60	1.75	3	0.5	313-2	5.44	11	1.5
10	4	7	1	61	3.2	5	1.5	314	3.5	3.5	3.5
11	4.4	5	4	64	1.72	2	1	315	2.77	9	1
12	5.83	10.2	3	69	3.43	8.5	2	316	1.33	1.5	1
20	6.88	10.5	3	71	1.35	1.7	1	317	15.5	15.5	15.5
21	3.2	4.5	1	72	2.67	6.5	1	318	9.91	28	1.5
22	3.08	5	2	80	0.5	0.5	0.5	319	12.2	25.5	5
23	4.45	9.5	1	86	1.65	2.3	1	320	3.38	6.5	2
30	5	5	5	87	0.75	1	0.5	321	2.5	4	1
31	6.2	6.2	6.2	88	11.3	11.3	11.3	322	11.1	25	1.5
32	3.5	3.5	3.5	92	1	1	1	323	2.75	4	1.5
33	1	1	1	100	4.03	5.2	2.1	324	1.5	1.5	1.5
34	2.25	3	1.5	105-1	8.4	8.4	8.4	325	1	2	0.5
35	2.65	8	1	105-2	5.65	6	5.3	326	5.17	10.5	2
36	8.5	9.5	7.5	107	1.5	2.5	1	327	9.5	15	4.5
37	7	8	6	108	3.5	3.5	3.5	328	4.15	7.5	2
38	11.5	12	11	301	3.47	9.5	1	329	3.63	5	2
39	3.31	5	2	302	4.54	10.5	1	330	3.83	4.5	3
40	2	3	1	303	1.43	1.8	1	331	2.57	5	1
41	6	8	5	304	5.5	7.8	3.2	332-1	8	18	3
42	6.75	11	3	305	6.5	12.5	1.5	332-2	11	30	2
43	7.5	13	2	306-1	2.11	2.8	1.1	333	1.88	3	1
44	8.75	13	3	306-2	3.93	5	2.8	334	1.5	1.5	1.5
45	5.25	7	3.5	307	5.25	9.5	1	335	1.33	3	0.5
51	2.11	4	1	308	2.33	3.8	1	Min.	0.5	0.5	0.5
52	3.22	5.7	1.3	309	4.24	10.2	2	Ave.	4.83	7.667	3.055
53	4.85	7.2	2.5	309	1.17	2	0.5	Max.	45.2	45.2	45.2

敷居には、少なくとも厚さ 2.5cm の餅状の膨らみ (石筍) も認められた。

西側棟、東側棟及びその間の中間棟を含めて、校舎の底部のコンクリートつらは、内部の天井部に比較すると、比較的少ない。校舎の各階にある底部分に発達するつらは 4 階、あるいは 2 階建校舎においては、一般に最上階の底に多く、3 階以下ないし 1 階などの下層階の底にはほとんど

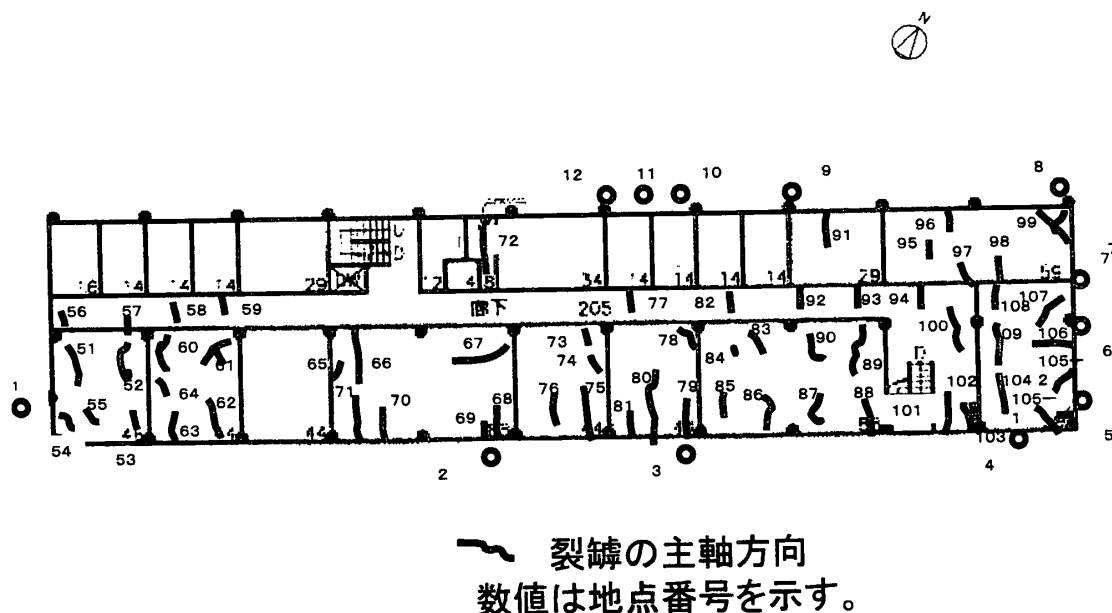


図3 生物資源西側棟屋上コンクリート下部の主な裂罅及び地点番号

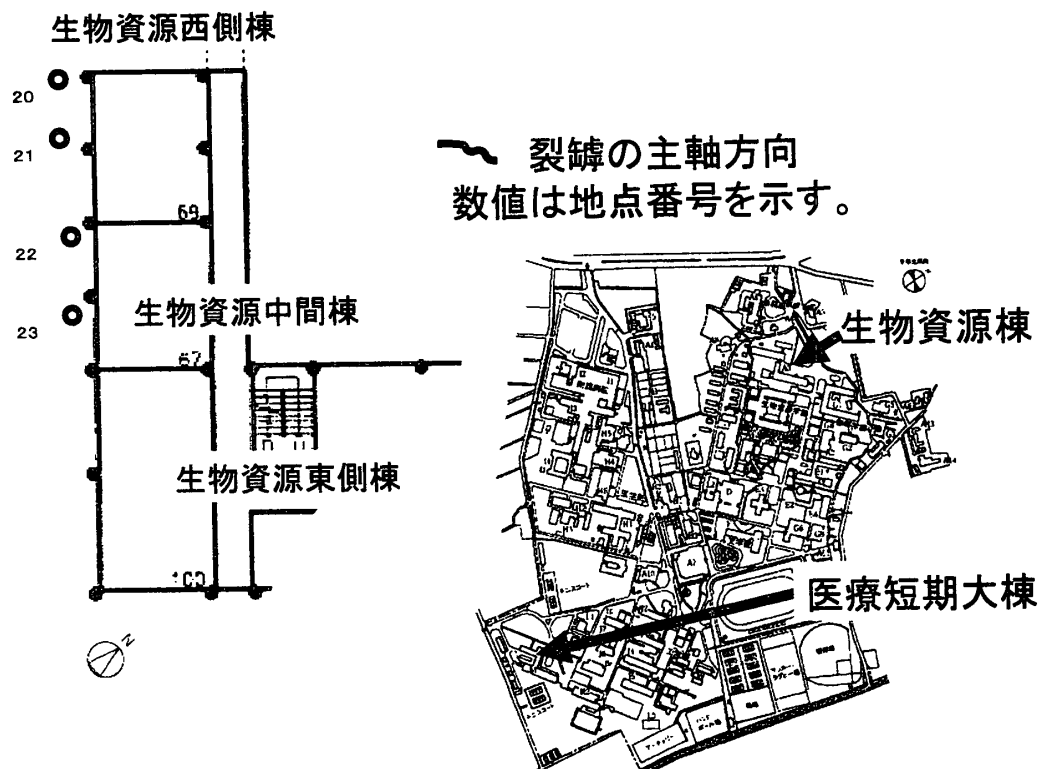


図4 生物資源東西棟の中間部校舎底部のコンクリートつらら地点番号及び校舎位置図

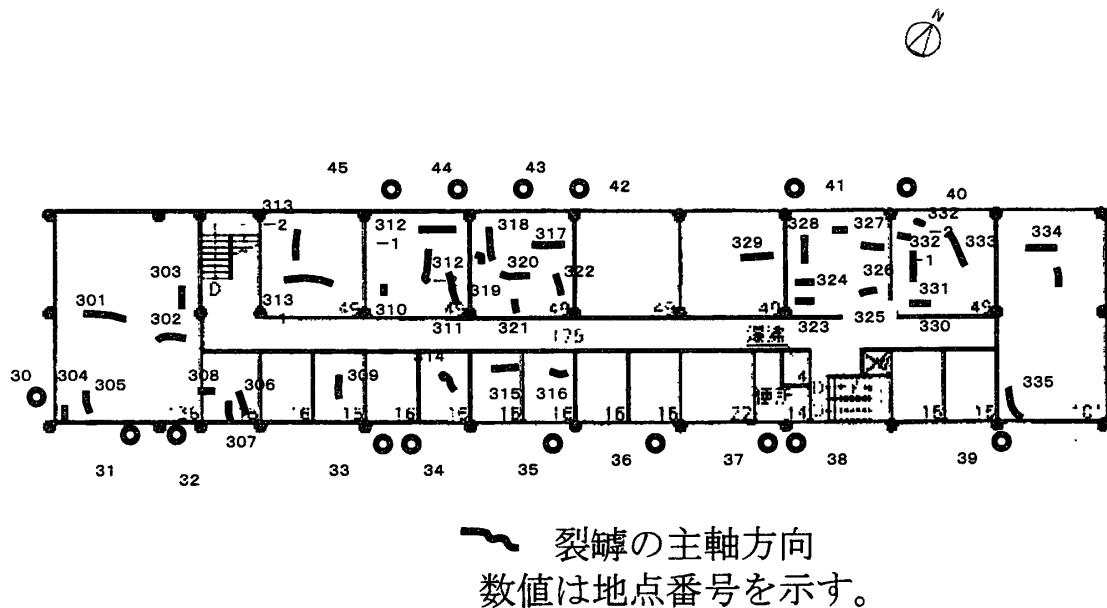


図5 生物資源東側棟屋上コンクリート下部の主な裂罅及び地点番号

認められない。これは、風雨に暴露する上層階の底に裂罅が多く、また、滴下水の供給量が適当であることに起因すると思われる。

コンクリートつらは、地形学的視点から見れば、都会のコンクリートビル（鍾乳洞）内に出現した鍾乳石であり、長い地質年代を通じ形成される鍾乳石の形成萌芽期の形態とメカニズムを示す貴重な微地形と言える。以上の各地点に発達するコンクリートつらの形態を詳細にみると以下のようなものである。

観察されたつらは、1) 数 cm の透明な管状をなすタイプ、2) 長さ 1 cm の透明管と長さ 0.5 cm 白い縞様のやや太い不透明管が交互にある土筆状タイプ、3) 白管の下部が透明管に移行するタイプ、4) 土筆状の白管タイプ、5) 全体が白く長い白管をなすタイプ、6) 天井付近の根元で白管の直径が漏斗状に太い漏斗長管タイプ、7) 上部につらが並列するタイプ、8) 上部のつらら数本が融合し、複合円錐状をなすタイプに分けられる。一般につらの発達は 1) から 8) へ移行すると考えられる。ただし、3), 4) については 3) が成長しつつある段階を示すと解釈することができよう。さらに、5) の長管型と 7)、8) の複合型は漏水箇所が点か列状裂罅など場所と条件の違いにも依存し、必ずしも発達順を示さないことも考えられる。

この中で、1) は極めて透明な管状をなし、中には水が充填されており、先端部から一定間隔で水滴が落下する地点もある。2) は管内に数 mm ～ 1 cm 間隔の白色の縞模様（節）をなす部分を有する。1, 2 のいずれも、極めて脆く、触れるだけで破損し、落下するため、サンプリングは困難である。この皮膜状の管部は、外気にふれる蒸発部分でセメント水和物から溶出したカルシウム塩の固化または  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の炭酸カルシウム化により、間歇的に形成されたと推定される。白色の縞模様は、室内の炭酸ガス量、水滴の滴下速度や蒸発速度にも関係するが、外気に触れる時間が長いいため、固化が進行したと推定される。3) コンクリートの天井から固結した管が発達し、その先端付近にのみ透明な管が形成されている。これらの中には若干、固化したものもあり、さらに進み 4) の段階では、全体が固結した管をなし、節の部分では直径が少し小さくなっている。管の直径は先端で細いが、根元から細・太を交互に繰り返しながら細くなる。一

部には、管の先端部から水滴が落下するところも認められた。さらに発達すると5) 管の根元から先端まで全体が白い管をなす。この段階で先端部が、開口した状態と閉塞したタイプに分かれる。6) 天井部付近の管の根元部分の直径が増大し漏斗状をなし、全体が固結した状態となる。最後に7)、8) 数本のコンクリートつららが融合して複合円錐状をなす。この段階では、先端の開口部は充填され消滅するものも認められた。根元部分から先端まで空管が残るものと根元部分が閉塞されるコンクリートつららがあるが、一般に6) 漏斗状の形態から8) 融合型では閉塞している。管内への流水が制限されるためか、コンクリートつららの表面全体が濡れており、天井から漏出する水はコンクリートつららの表面を流下することが知られる。この肥大化の進行と同時に、近接するコンクリートつららが数本、連合してさらに肥大するものも認められる。以上のコンクリートつらら形成史を模式化すれば、図6 のようである。

これは規模が小さいが、鍾乳石の萌芽期における発達過程を示すと推定される。この生物資源学部とは別棟の旧医療短期大学校舎でも同様な調査を行ったが、工事の進捗が早くコンクリートつららの残存状況は悪い。その一部に残された底部分に垂下する長さ 17.5cm のコンクリートつららの一つには、これに対して 90 度をなす水平方向の長さ 0.8cm の短い突起が一本認められた。流下する水滴で形成されるコンクリートつららの中では極めてまれな形態を示している。

昭和 41 年 (1966) に建築された生物資源学部校舎に認められる最大長のコンクリートつららは loc. 312-1 の 45.2cm であり、本調査を実施した 2002 年にいたる 36 年間の年平均成長率は 1.25cm 余となる。屋上をなすコンクリートの裂罅が生成された時期を考慮すると、形成速度はさらに大きな値を示すであろう。これは、裂罅から適度な速度の浸出水の供給があり、風の影響のない天井裏という好条件下の成長率である。コンクリートつららは、豪雨時に雨水が噴出するような樋の破損箇所などには存在せず、コンクリートの罅割れ箇所に主に発達する。このように流水の流下速度が著しく大であれば、つららは形成されにくく、その速度が適度に遅いことが好条件となる。実際は、裂罅の著しい loc. 66 地点の天井部のコンクリートには白華とチョーク跡があり、過去に漏水場所の特定と補修が行われていたことが知られる。また、生物資源棟の東側と西側では断熱材とその施工法が異なり、西側校舎は空間を空けた状態で断

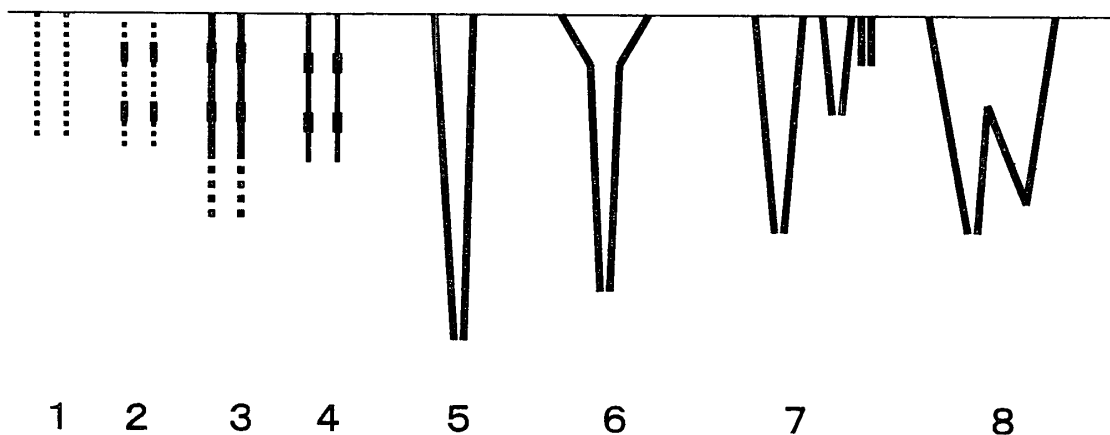


図6 コンクリートつららの発達模式図

- 1: 透明管(成長型)、2: 土筆状透明管(成長型)、3: 下方成長型複合管、  
4: 土筆型管、5: 長型管、6: 漏斗長型管、7: 上部並列型管、  
8: 上部複合型管

熱材が施工され、西と東を連結する2階校舎部分では、屋舎の建築後に屋上コンクリート下部の表面に断熱材を貼り付けていたため、内装の天井除去時に断熱材とともに、コンクリートつららが破壊されてしまったと推定される。東校舎のコンクリート打付けでは、断熱材を敷きその上にコンクリートを流し込む工法であるため、コンクリートつららの保存が良好で、最大長のコンクリートつららの残存に寄与したと推定される。上述のように窓敷居に凸レンズ型の石筍状の塊も認められるため、一部にはコンクリートつららから滴り落ちた水滴で内装室内の天井裏に石筍状の突起が形成されたと推定されるが、これらの天井部が小型の室内用ブルトーザ等によって除去されているため、現在では確認することができない。以上、解体の合間の緊急調査は、建物におけるコンクリートつららの分布と形態の観察を中心としたが、一部は試料の採取も実施している。この中の良好な部分は、専門分析者によっていずれ報告されるであろう。本大学構内における他の校舎でもコンクリートつららが認められるため、屋上コンクリート下部には、建築年に応じた同様のコンクリートつららの存在が推定される。将来の解体時には詳細調査と分析により記録を残すことが望まれる。なお、赤化したコンクリートつららや裂罅部は、コンクリート内の鉄筋の錆によると推定され、総体的な構造物の弱화가窺える。

#### 4. まとめ

大学構内におけるコンクリート校舎の底には、いわゆるコンクリートつららが認められるが、強化工事が行われている生物資源学部及び旧医療短大校舎では、内装の天井部が除去され屋上直下のコンクリートつららが露出したため、概略調査を実施した。これらの調査結果をまとめると以下のとおりである。

1. コンクリートつららは、地形学的観点からすれば、都会の中の鍾乳石であり、これらの形成萌芽期の形態と形成メカニズムを知る微地形と言える。
2. 底部分のコンクリートつららは、一般に最上階の底に発達し、下層階の底ではほとんど認められない。これは、風雨に暴露する上層階の底に裂罅が多く、流水の供給量が適度に多いことによると思われる。
3. 旧医療短大校舎の底で垂直に垂下していた長管状のコンクリートつららには、これに90度をなす短い角状の突起が認められた。流下する水滴で形成されるコンクリートつららの中では異常な形態をなす。
4. 一部の窓敷居には餅状の膨らみ（石筍）が認められた。天井裏にも形成が推定される石筍状微地形については内装の天井部が除去されているため不明である。
5. コンクリートつららの発達を透明管から上部複合管型の8タイプに区分した。
6. 生物資源学部校舎で最大長をなすコンクリートつららの過去36年間の年平均成長率は1.25 cm/年である。

#### 謝 辞

三重県の酸性雨観測資料は三重県保健環境研究所保健環境研究部川上正純氏より提供いただいた。コンクリートつららの現場調査では、当大学の改装補強工事を担当した鹿島建設の中村守氏及び浅沼組の奥村淳一氏に多大な危険と労力をおかけした。なお、独立行政法人国立環境研究所大気圏環境研究領域主任研究官の村野健太郎氏には酸性雨に関する有益な情報を頂いた。記して謝意を表する次第である。



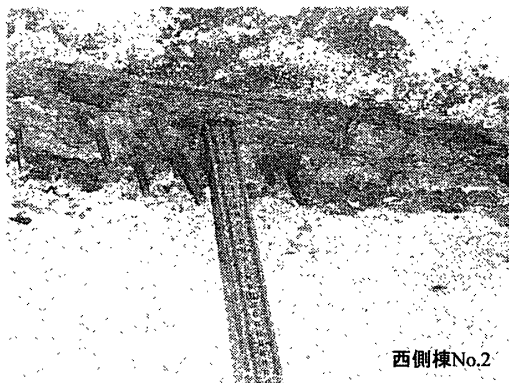
## 文 献

大阪府公害監視センター 酸性雨によるコンクリート構造物への影響調査ーコンクリートつららー 大阪府公害監視センター所報 No. 15, 1994, 1-91

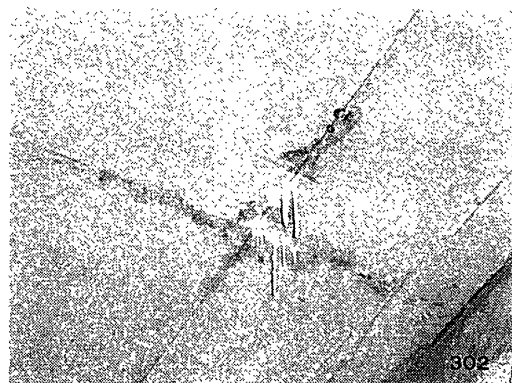
黒坂吉成・畑中弘 炭酸カルシウムの溶解に関する酸性雨等の影響評価 大阪府公害監視センター所報 No. 16, 1995, 1-44.

西尾文彦・松田和也・伊藤俊彦 酸性雨がコンクリートつららやエフロレッセンスの生成に及ぼす基礎的研究(I) 北海道教育大学紀要(第2部B) Vol. 46 (2), 1996, 25-40.

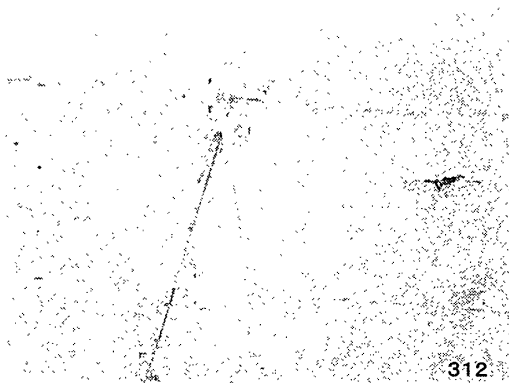
山口晴幸 太古の神秘と現代の脅威ー鍾乳洞とコンクリートつらは語るー 水利科学, Vol. 45 (2), 2001, 71-100.



1 Loc. 2 生物資源西側棟屋上下部のコンクリートつらら



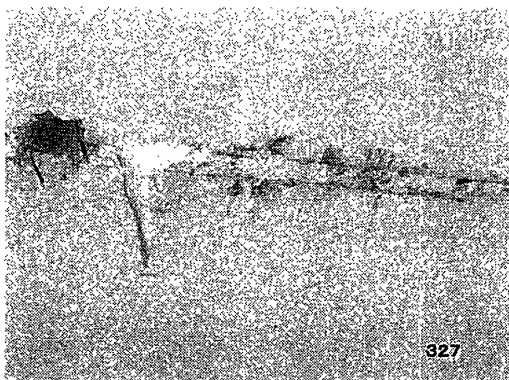
2 Loc. 302 生物資源東側棟屋上下部のコンクリートつらら



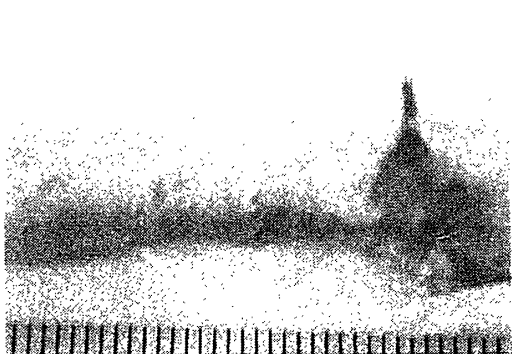
3 Loc. 312 生物資源東側棟屋上下部のコンクリートつらら



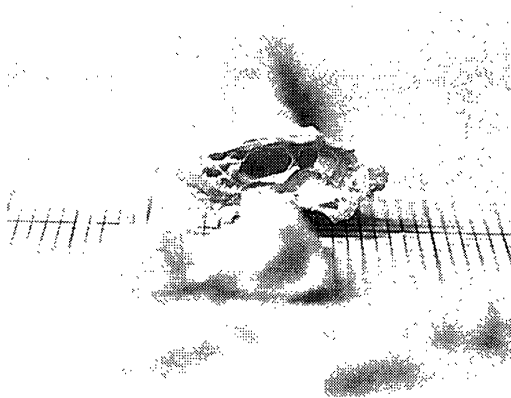
4 Loc. 322 生物資源東側棟屋上下部のコンクリートつらら



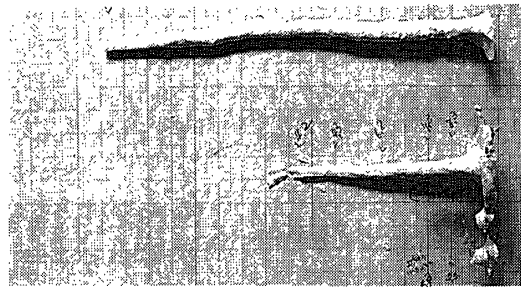
5 Loc. 327 生物資源東側棟屋上下部のコンクリートつらら



6 医療短大庇部 Loc. 1 のコンクリートつららサンプルに認められる突起



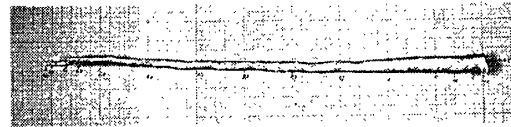
7 Loc.72 小さなコンクリートつらら基部の空洞



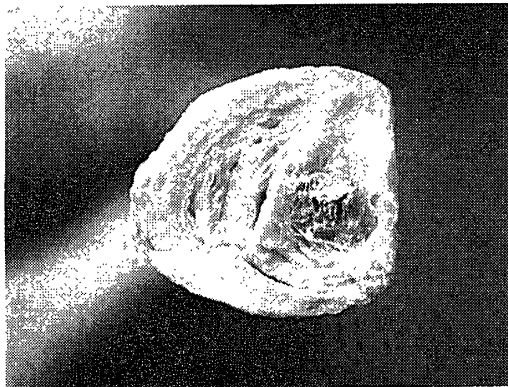
8 Loc. 320 小さなコンクリートつらら



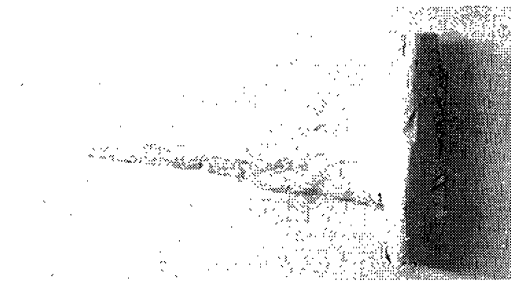
9 Loc. 320 コンクリートつらら基部の空洞と閉窄



10 Loc. 312 コンクリートつらら



11 Loc. 312 コンクリートつらら基部空洞の閉窄



12 Loc. 327 コンクリートつららの融合