

[1151] 酸性雨環境下に屋外暴露したコンクリートの性質

迫田恵三^{*1}・天沼邦一^{*2}・鈴木健弘^{*3}

1. まえがき

産業活動の活発化に伴い地球環境の汚染が問題となっている。そのうち大気汚染の指標の一つとされる酸性雨は森林破壊や湖沼のpH値の低下として深刻な社会問題となっている。我が国においても工業化や車の普及によって大気中の窒素酸化物や硫黄酸化物が増加し、その結果、全国的に酸性雨が観測されるようになった。酸性雨がコンクリート構造物に及ぼす影響についてはおもにコンクリートのひび割れに生じる「つらら」が注目されている。この「つらら」の成因については幾つかの研究によって明らかにされている[1][2]。また、酸性雨がコンクリートに及ぼす影響については詳細な検討がなされている[1]。しかし、酸性雨によるとみなされるコンクリート構造物の劣化が顕著に現れていないこともあつてか、酸性雨がコンクリート構造物に及ぼす影響に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。小林ら[1]が指摘しているように酸性雨によつて構造物に劣化が進行していたとしてもその影響が顕在化するまでにはある程度の時間がかかることから、今の内から酸性雨に対する対策を講じる必要があり、そのためには屋外暴露実験や構造物の調査などを含めた研究が必要と考えられる。

本研究は以上の観点から酸性雨環境下の屋外にひび割れを有したコンクリート供試体や、酸性雨の浸透を防ぐために浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートなどを3年間暴露した結果についての報告である。

表-1 骨材の物理的性質

粗骨材	骨材名	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (t/m ³)	岩石名
	伊東産	2.66	1.75	1.53	安山岩
	葛生産	2.79	0.63	1.73	石灰岩
細骨材	富士川産	2.62	1.02	1.50	—

2. 実験概要

本研究では酸性雨がコンクリートに及ぼす影響を知るために、酸性雨環境下の屋外に各種の供試体を3年間暴露した。

2-1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は富士川産粗骨材は伊東産安山岩、及び葛生産石灰岩を用いた。これらの骨材の物理的性質を表-1に示す。酸性雨が供試体に浸透しないようにシラン系モノマーを主成分とする水性エマルジョンタイプの浸透性吸水防止材を用いた。

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C	C (Kg/m ³)	W (Kg/m ³)	S (Kg/m ³)	G (Kg/m ³)	AE剤 (Kg/m ³)
A	0.5	382	191	815	896	0.153
B	0.5	382	191	815	940	0.153

A: 粗骨材に安山岩使用 B: 粗骨材に石灰岩使用

*1 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科、工博 (正会員)

*2 シンエイマスタ (株) 技術部、工修 (正会員)

*3 東洋インキ製造 (株) 開発研究所、工修

2-2 配合

コンクリートの配合は2種類とし、A配合は粗骨材に安山岩砕石を用い、B配合は石灰岩砕石を用いたものである。水セメント比を50%、単位水量、単位セメント量、骨材容積を一定とした。コンクリートの配合を表-2に示す。

2-3 供試体

供試体は直径10cm、長さ20cmの円柱供試体であり、一部は割裂試験によって最大1.6mm、平均ひび割れ幅0.2~0.3mmのひび割れを導入した。また、一部は浸透性吸水防止材を1m²当り200~400g、コンクリート表面と、ひび割れ箇所にはけで塗布した。

2-4 養生及び暴露方法

供試体は脱型後2週間標準養生を行った。その後、一部は供試体にひび割れ、及び吸水防止材を塗布し、標準養生と屋外暴露を行った。養生、暴露期間は4週、13週、26週、1年及び3年とした。

2-5 屋外暴露環境

供試体は静岡県清水市の東海大学海洋学部の4階屋上に所定の期間暴露を行った。清水市は温暖で気温が氷点下になることは極めて希である。暴露地での年間卓越風向は北北東、平均風速は3.5mである。暴露期間3年間の暴露地での雨量を図-1に示す。年間の雨量でみると1991年では2369mm、1992年では2245mm、1993年では2295mmとなり総雨量では大差がない。

図-2に暴露地での降雨の月平均pH値を示す。一般に酸性雨は水素イオン指数で5.6以下と言われているが、図からも明らかのように1991年から1993年の暴露期間中酸性雨が降っている。1992年度でのpH値の出現頻度を見ると、約85%がpH5以下であり、4以下の割合は約11%となっている。

2-6 試験方法

(1) 中性化の測定

暴露期間が短期間のものはX線回折解析によって中性化の程度を測定した。まず、コンクリート表面から深さ約5mmでセメント部を採取しこれを粉砕し200メッシュを通過する粉体を用いて測定した。中性化の程度はCa(OH)₂とCaCO₃の明瞭なピークでのX線強度を比較し、その相対強度の経時変化を求めた。暴露期間

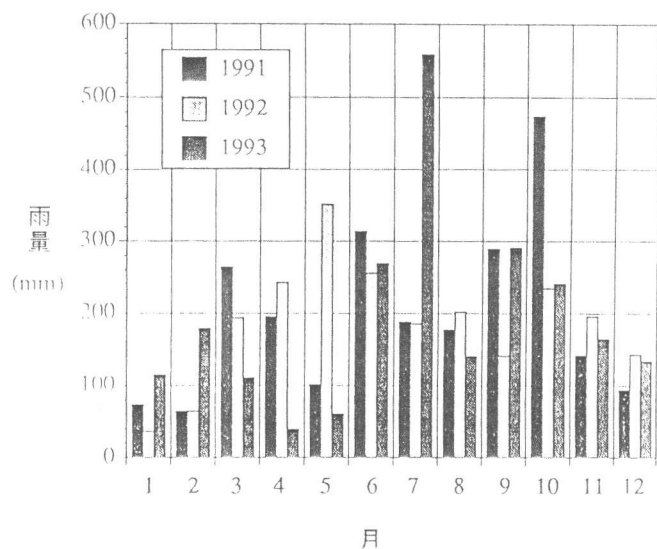


図-1 暴露地における雨量

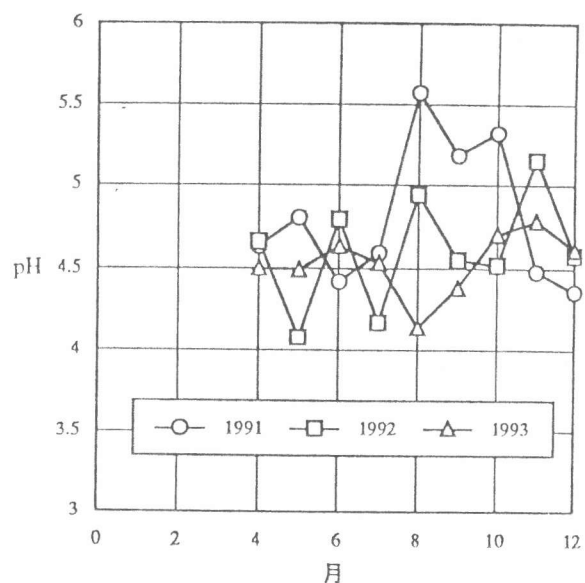


図-2 暴露地における降雨のpH

3年の供試体についてはフェノールフタレイン1%アルコール溶液を用いて中性化深さを測定した。

(2) 白色状析出物及びつららの分析

ひび割れ供試体から析出した白色状析出物と、暴露地の構造物に生じたつららをX線回折解析によって分析し比較した。

3. 実験結果及び考察

3-1 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度の経時変化を図-3に示す。圧縮強度比は各々の供試体の4週強度との比で示してある。標準養生を3年行った供試体の強度は4週の強度と比較して、約20%大きくなっている。これに対して、屋外暴露の浸透性吸水防止材（以下、吸水防止材と略記する）を塗布したコンクリートは、暴露年数の経過と共に強度比が小さくなり、3年では4週強度より約16~17%の強度減が見られる。吸水防止材は降雨などによる外部からの水を遮断し、かつ、乾燥によって内部から水分が逸散することから、水和に必要な水分が不足し強度低下につながったものと考えられる。一方、吸水防止材を塗布しないコンクリートは、酸性雨の浸透が容易になり石灰分の溶出によって多孔質化し、あるいはC-S-Hゲルが破壊され強度が低下する可能性が考えられる。しかし、図からも明らかなように暴露3年の強度は4週強度より安山岩骨材を用いたもので約14%、石灰岩骨材を用いたもので約5%の強度増が認められる。この強度増については降雨によって水和に必要な水分が補給されたことと、炭酸化によって表層部がち密化したことが原因と思われる。

3-2. 静弾性係数

図-4は静弾性係数の経時変化を示している。静弾性係数比は暴露期間4週の静弾性係数との比で表してある。4週と3年の値を比較すると、屋外暴露したもので吸水防止材を塗布したものは、4週のものより静弾性係数が小さくなっている。この原因については圧縮強度で述べたことと同じことが考えられる。また、吸水防止材を塗布しないものは暴露期間1年から3年にかけて静弾性係数が低下している。この静弾性係数の低下についてはコンクリートの乾燥

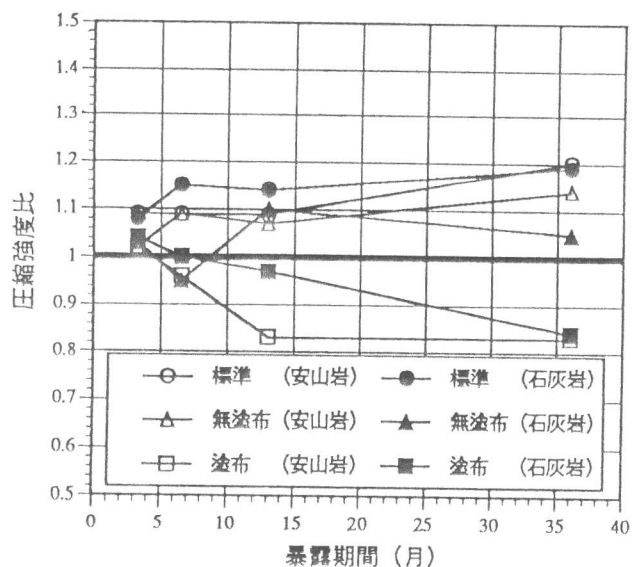


図-3 圧縮強度の経年変化

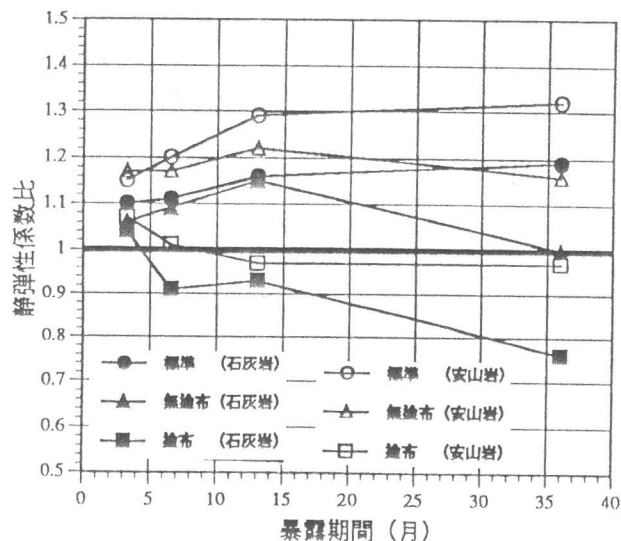


図-4 静弾性係数の経時変化

と酸性雨による表層劣化が影響したものと考えられる。

3-3. 動弾性係数

暴露前から暴露3年にかけて同一供試体を用い、動弾性係数の変化を示したのが図-5、6である。各暴露期間における動弾性係数比は暴露前との比で表してある。標準養生は水和が十分行われるのに対し吸水防止材を塗布したものは、降雨によっても水分が補給されずに、さらに乾燥による内部からの水分の逸散によつて水和が妨げられ、暴露期間の経過と共に動弾性係数が低下したものと考えられる。また、吸水防水材無塗布のものは暴露期間1年まで暴露前より動弾性係数が大きくなっているが、1年から3年にかけて低下する傾向がみられる。これは図-7に示したように供試体の重量が1年から3年にかけて減少していることから明らかなように、供試体の乾燥と酸性雨による石灰分溶出が影響したものと考えられる。

次にひび割れを有した供試体で吸水防止材無塗布のものは、暴露前より3年を経過した方が約12~18%大きくなっている。これはひび割れを通じて酸性雨が浸透して石灰分を溶解する劣化より、吸水による水和作用進行の効果の方が大きいのと、溶出した石灰分がひび割れを塞いだためと思われる。このことは図-8の重量変化率をみても明らかである。すなはち、ひび割れ供試体の重量は暴露期間6ヶ月よりほとんど変化していない。

3-4. 重量変化

同一供試体の重量変化を暴露前から3年間、測定した結果を図-7、8に示す。図の重量変化率は暴露前との比で表してある。酸性雨の浸透によつてコンクリートの石灰分が溶出し、重量変化が生じるものと予想した。ひび割れなしの吸水防止材無塗布のものは、暴露期間3ヶ月より供試体重量が暴露期間の経過と共に減少している。乾燥による重量減も考えられるが、酸性雨による石灰分の溶出が重量変化を大きくしたものと推定される。

3-5. 中性化 (炭酸化)

X線回折解析によつて相対強度を求め、中性化の程度を推定したのを図-9に示す。吸水防止材は無塗布のものと比較して、暴露期間が短期間では効果はあるが暴露期間3年になると中性化抑制効果は見られない。これは吸水防止材の疎水層には二酸化炭素などの気体の遮断性がないことが原因と考えられる。

表-3にフェノールフタレイン1%ア

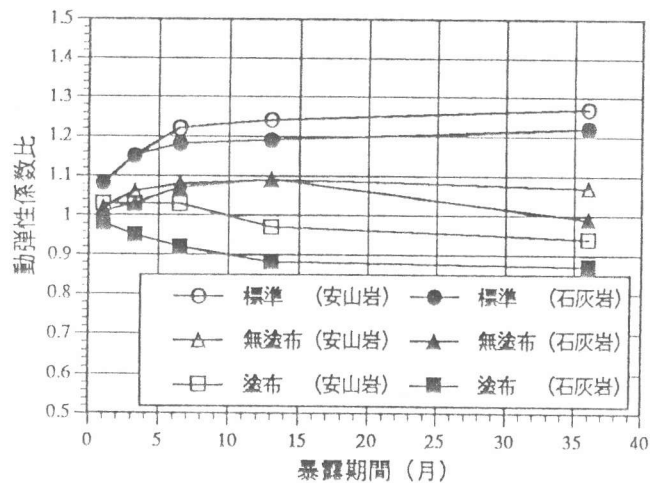


図-5 動弾性係数の経時変化

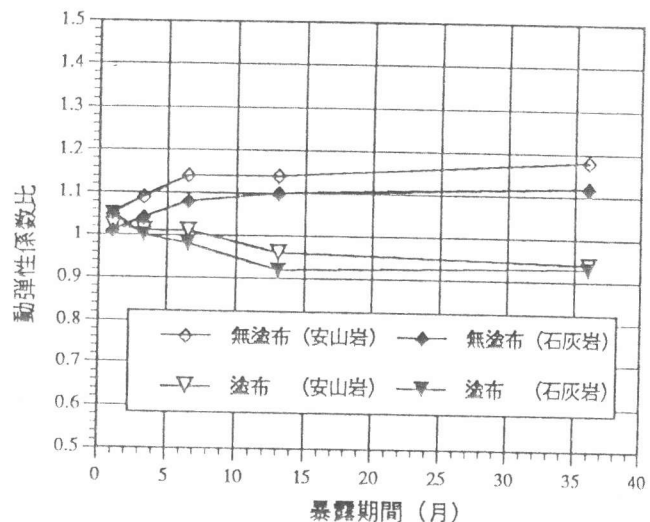


図-6 ひび割れ供試体の動弾性係数の経時変化

ルコール溶液によって求めた、暴露期間3年の中性化深さを示す。一般に屋外に暴露したコンクリートの中性化は屋内に暴露したものより小さいと言われている。この理由については組織のち密化と、水酸化カルシウムの逆拡散によるものであるという報告がなされている [3]。吸水防止材無塗布のものは石灰岩骨材を用いたコンクリートで2.0mm、安山岩骨材を用いたもので1.7mmとなった。屋内及び雨に浸されない屋外のコンクリートの中性化深さは材令の平方根に比例することが明らかにされている [4]。この理論値と、酸性雨の環境下に3年間暴露した方の中性化を比較すると後者の方が大きい。この結果より酸性雨環境下では中性化速度が速まることが予想される。他方、吸水防止材を塗布した供試体の中性化深さが、無塗布のものと比較して約2倍となっている。これは前述したように吸水防止材が二酸化炭素などの気体の浸透を防げないことや、雨水の浸透を妨げることなどが原因と考えられる。また、ひび割れを有した供試体はひび割れに沿って内部まで中性化が進行し、さらにひび割れ断面に対し、垂直方向にも表に示すような中性化が確認された。

図-10は暴露期間3年で供試体表面

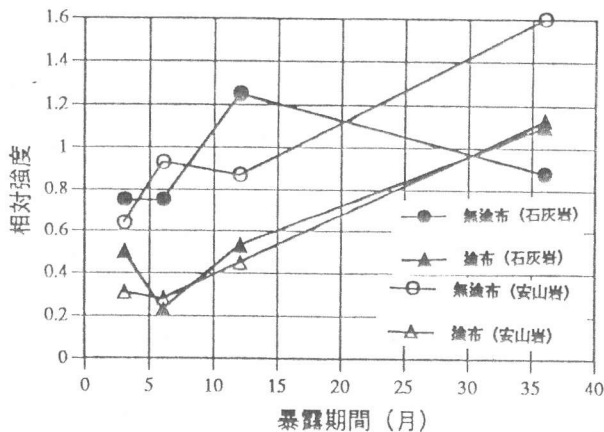


図-9 X線による相対強度の経時変化

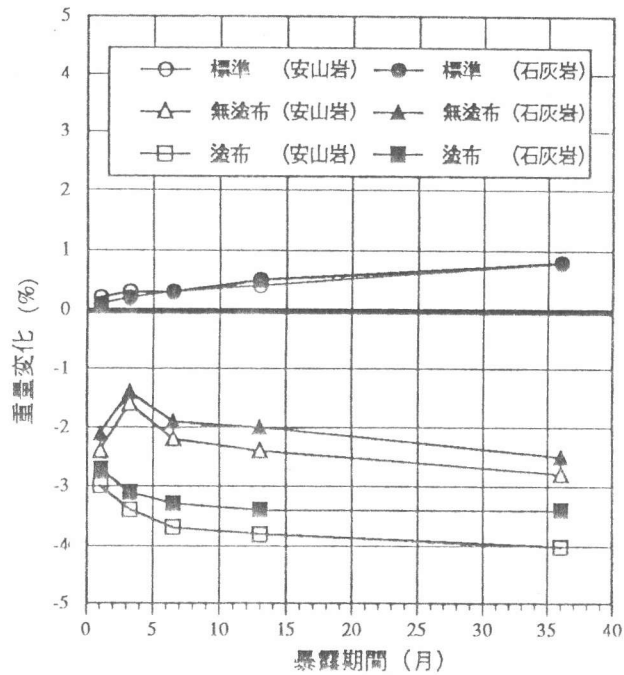


図-7 供試体重量の経時変化

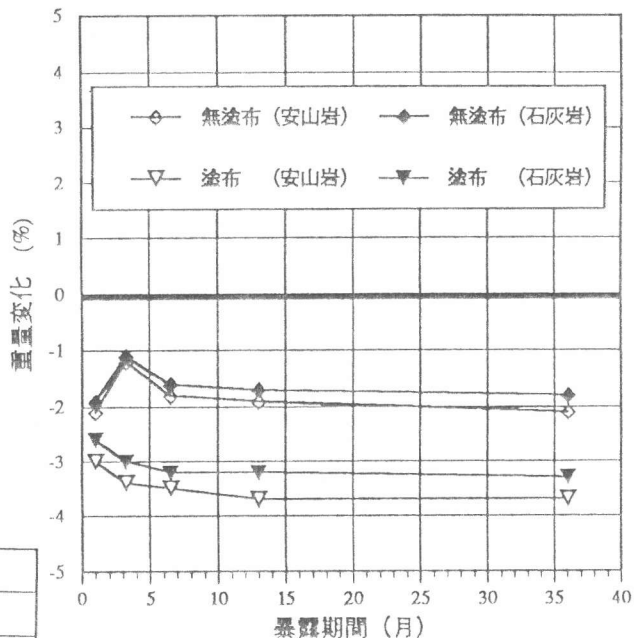


図-8 ひび割れ供試体の重量変化

表-3 中性化深さ

	ひびわれなし		ひびわれあり	
	無塗布	塗布	無塗布	塗布
石灰岩	2.0	5.0	0.4	0.9
安山岩	1.7	4.2	0.3	1.4

塗布：浸透性吸水防止材 単位 (mm)

に析出した白色状の析出物を示している。この物質はエフロレッセンスの一種とみなされるが、石灰岩骨材を用いた吸水防止材無塗布のひび割れコンクリート全てに観察された。この白色状析出物と暴露地の同じ校舎に生成されたつららをX線回折解析によって比較したのが図-11である。図からも明らかなようにひび割れに生じた白色状の析出物はつららと全く同じ物質が検出された。室内の促進実験では純水によってもつららが生成したという報告[2]もあり、この白色状析出物が酸性雨によるものと断定はできないが、中性化や重量変化、弾性係数などの結果と暴露年数3年などから類推して、酸性雨によって石灰分の溶出が速まったものと考えられる。

4. 結論

本研究は酸性雨環境下の屋外にひび割れを有する供試体や、吸水防止材を塗布した供試体を3年間暴露し、酸性雨がコンクリートに及ぼす影響について検討を行った。本研究で得られた結論は以下のようになる。

- (1) 3年間屋外に暴露したコンクリートの圧縮強度は雨水の浸透による水和作用の進行と、炭酸化によって4週強度より大きくなる。
- (2) 吸水防止材は酸性雨の浸透に対する抵抗性が大きく、石灰分の溶出を少なくできるが中性化抑制効果は薄い。
- (3) 酸性雨環境下に暴露したコンクリートの中性化速度は大きい。
- (4) 石灰岩を用いたコンクリートのひび割れ供試体より白色状の析出物が見られ、この成分は同暴露地でのつららと同じ成分であることが確認された。

参考文献

- 1) 小林一輔・宇野祐一：酸性雨による構造物の劣化機構に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.13-1 pp.615-620,1991
- 2) 堤 博文・河野広隆・渡辺博志：酸性雨とコンクリートに生じるつららに関する実験的考察，土木学会年講，第46回，pp.304-305,1991
- 3) 大賀宏行・佐伯竜彦・長滝重義：乾湿繰り返しを受けるコンクリートの中性化に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No43.pp.418-423,1989
- 4) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性 鹿島建設技術研究所出版部，pp147-149,1963.

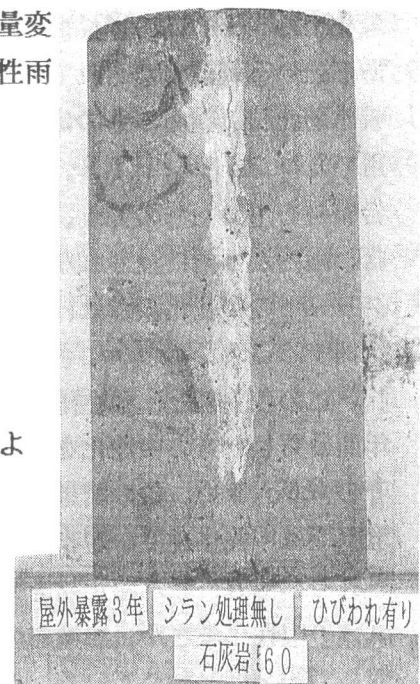


図-10 ひび割れからの白色状析出物

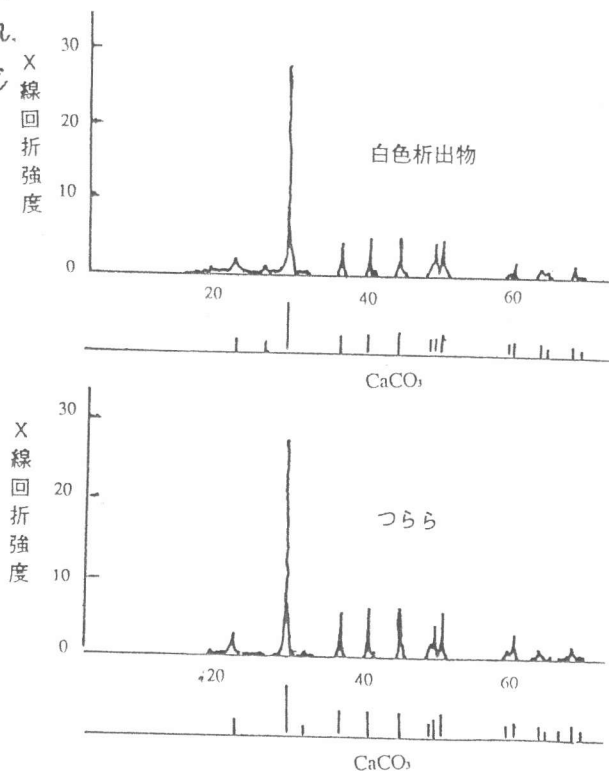


図-11 白色状析出物とつららのX線回折図