

論文 高流動コンクリートの流動性保持機構に関する一考察

稲葉美穂子¹・丸山久一²・皆口正一³・坂田 昇⁴

要旨：石粉を用いた粉体系あるいは併用系の高流動コンクリートを対象とした流動性保持機構を解明する目的で、石粉及び高性能減水剤の添加量を変化させることで両者の流動性保持に及ぼす影響をモルタルについて実験的に検討した。その結果、石粉は化学的に不活性なことから、セメントの初期水和反応による時間経過に伴う流動性の低下及び粘性の増加がなく、流動保持性が高くなる。また、高性能減水剤をコンクリート中に多く残存させることにより、流動性保持性能を高めることができることが分かった。

キーワード：高流動コンクリート、流動性保持機構、石粉、高性能減水剤

1.はじめに

高流動コンクリートは、建設工事における省力化施工及びコンクリート構造物の耐久性向上の可能性を有しており、現在実構造物への適用が盛んに行われている。今後、高流動コンクリートは大型かつ複雑な構造物の工事には主流となっていく可能性が高く、その場合には、長時間所要の流動性を保持していることが求められる。

現在、スランプロスを抑制するため、スランプ保持性能を有する高性能AE減水剤やスランプ保持剤が一般に用いられているが、この種の混和剤は凝結時間を長くする作用があり、その結果、型枠補強に対し、通常のコンクリートよりも大幅にコストが増大する等の問題を生じる。これに対し、増粘剤ウェランガムを使用し、遅延作用のない高性能減水剤（以下、SP剤）の添加量を調整することで、通常の凝結時間を有しつつ、上述の混和剤を使用した場合と同程度の流動性を保持できることが報告されている [1]。

一方、高流動コンクリートの配合において、所要の流動性及び材料分離抵抗性を確保する方法の一つとして粉体量を多くする方法が用いられている。この場合、粉体全てをセメントとするとコンクリートの発熱が大きくなる等の問題が生じる恐れがある。今までに粉体の一部を化学的に不活性な石灰石粉（以下、石粉）で置換したコンクリートが、高流動コンクリートとして様々な点で優れていることが報告されている [2]。

本研究は、石粉を用いた粉体系あるいは併用系の高流動コンクリートを対象とした、流動性の保持機構を解明しようとするものである。コンクリートが流動性を保持する性状は、コンクリートの配合のうち、SP剤がどれだけ多くコンクリート中に残存しているかに依存していると考えられる。また、石粉という不活性粉体の使用により、セメントの水和反応過程におけるコンクリート中のSP剤量の減少を抑制し、流動性を保持しているものと考えられている。したがって、モルタルの経時的な流動性状を観察すると共に、このときのモルタル中に残存するSP剤量を調べ、両者の関係を検討した。また、石粉単味のモルタルについて、流動性状及びSP剤の吸着状況を調べ、流動性保持に対する石粉の効果を検討した。

¹ アジア航測(株)、工修（正会員）

² 長岡技術科学大学教授 工学部建設系、Ph.D.（正会員）

³ 地崎工業(株)、工修（正会員）

⁴ 鹿島(株) 北陸支店、工修（正会員）

2. コンクリートの凝結試験

スランプ保持剤（以下、SC剤）を使用した高流動コンクリートと遅延作用のないSP剤を使用した高流動コンクリートについて、凝結性状の違いを比較するため、表-1に示す配合についてスランプフロー試験及び凝結試験を行った。表-1において、ケース1はSC剤およびSP剤を使用したもの、ケース2は増粘剤と

表-1 コンクリート配合

ケース No.	W/P (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単体量 (kg/m ³)					増粘剤 (W×%)	SP剤 (P×%)	SC剤 (P×%)	AE剤 (P×%)
				W	C	SD	S	G				
1	30.2	65±5	4.5±1	165	331	216	713	888	0.0	1.7	0.2	0.05
2									0.05	2.5	0.0	0.02
3									0.0	1.7	0.0	0.05

SP剤を使用したものであり、双方ともスランプフローが練上り後90分までほとんど変化がないように、混和剤（SC剤、増粘剤及びSP剤）添加量を調整した。また、ケース3は、SP剤のみを使用したものであり、練上りのスランプフローが65cmとなるようにSP剤の添加量を調整した。実験に供した材料を表-2に示す。図-1にコンクリートのスランプフローの経時変化を示す。図から、増粘剤を使用することでSP剤の添加量を増やすことになり、SC剤を使用した場合と同程度の流動性保持能力を持たせることが可能であることが分かる。また、このときのコンクリートの凝結試験結果を表

表-2 使用材料

名称		特性・主成分
粉体P	セメントC	普通ポルトランドセメント (比重：3.16、比表面積3850cm ² /g)
	石粉SD	石灰石粉 (比重：2.70、比表面積3370cm ² /g)
細骨材S		山砂 (比重：2.59、 F.M.2.69、吸水率1.31%)
粗骨材G		碎石 (Gmax20mm、比重：2.69、 F.M.6.61、実積率63.0%)
混和剤	増粘剤WG	ウェランガム
	高性能減水剤SP	β-ナフタリンスルホン酸Na塩
	SC剤	徐放剤 (反応性高分子)
	AE剤	アルキルアクリルスルホン酸塩

3に示す。試験方法は、JIS A 6204の付属書1（コンクリートの凝結時間試験方法）によった。表に示すように、SC剤を用いたケース1では、始発及び終結とも普通のコンクリートよりも大幅に長くなった。これは、SC剤の遅延作用が長時間にわたって作用したためであると考えられる。これに対し、増粘剤を使用し、SP剤の添加量を増やしたケース2では、ケース1と同程度の流動性保持能力を持つにもかかわらず、凝結時間はケース1よりも大幅に短くなった。これは、SP剤を用いることで、長時間に渡る遅延作用が働かなかつたためと推察する。一方、ケース3はケース2よりSP剤の添加量が少ないため、始発及び終結とも早くなったが、その差は、双方とも2時間程度であった。このように、増粘剤を使用し、SP剤の添加量を調整することで、SC剤を使用した場合と同程度の流動性保持能力をコンクリートに付与でき、しかも凝結時間の大幅な延長を阻止できた。

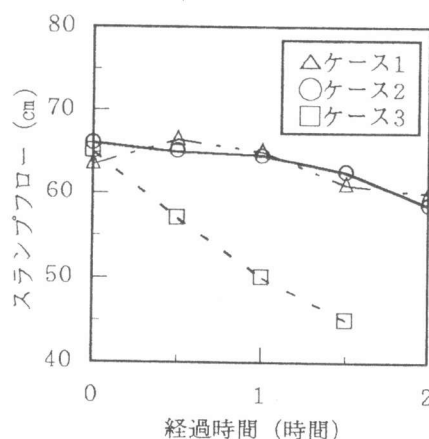


図-1 スランプフローの経時変化

表-3 凝結試験結果

	始発	終結
ケース1	13:00	19:25
ケース2	9:50	12:55
ケース3	8:05	10:30

3. 石粉がコンクリートの流動性保持に及ぼす影響

粉体の一部を石粉で置換した高流動モルタルについて、文献 [3]、[4] に

準拠してフロー試験及びJ14ロート試験を行った。

実験に供した材料及びモルタルの配合をそれぞれ表-4、表-5に示す。ここで、セメントと石粉はほぼ同程度の比表面積をもつものとした。表-5に示すようにシリーズ1として、SP剤を一定量添加し、石粉粉体容積比 (V_{sd}/V_p) を0、25及び

50%の3水準変化させた配合のモルタルについて試験を行った。またシリーズ2として、 V_{sd}/V_p をシリーズ1と同様の3水準変化させた配合について、それぞれSP剤の添加量を調整し、初期フローが 290 ± 15 mmになるようにしたモルタルについて試験を行った。モルタルの練混ぜ方法は、容量11.4ℓホバート型ミキサーを使用し、細骨材、セメント、石粉、水+混和剤の順に投入し、全材料(体積5ℓ)投入後、低速(106rpm)1分、中速(196rpm)1分及び高速(358rpm)3分の計5分間練り混ぜた。練上り後、モルタル試験において静置フロー及びJ14ロート流下時間の経時変化を測定した。

図-2及び図-3にシリーズ1におけるモルタルのフロー及びJ14ロートの流下時間の経時変化を示す。図に示すようにSP剤の添加量が一定の時、 V_{sd}/V_p が大きくなる、即ち粉体中に占める石粉量が多くなると初期フロー値は大きくなり、またJ14ロート初期流下時間は小さくなった。これは、粉体によってSP剤の分散性能が異なるためと考えられる。セメントの場合、練混ぜ水に接触した極初期の水和反応がSP剤の効果を阻害するのに対し、石粉は化学的に不活性であることからSP剤によって効率よく分散性能が発揮されると考えられる。経時的なフローの低下を比べてみると、 $V_{sd}/V_p=0\%$ 、即ちセメント単味のものは、練上り直後からフローコーンの形に留まっていてフローせず、フローの経時変化の測定は不可能であった。一方、 $V_{sd}/V_p=25\%$ と $V_{sd}/V_p=50\%$ の石粉を添加した2ケースには大きな差はなく、フローは時間と共に比例的に減少した。またJ14ロート流下時間の経時変化は、 V_{sd}/V_p が大きくなる、即ち粉体中に占める石粉量が多くなるほど小さくなった。この理由として、図-2に示すように石粉の置換率が大きくなるほど初期のフロー値が大きくなるために、モルタルの流動性が向上し、その結果、粒子どうしの凝集の影響が小さく、粘性の経時変化が緩和され、J14ロート流下時間の経時変化が小さくなったものと推察する。

次にシリーズ2のモルタルフロー及びJ14ロートの流下時間

表-4 使用材料

名称		特性・主成分
粉体P	セメントC	普通ポルトランドセメント (比重: 3.16)
	石粉SD	石灰石粉 (比重: 2.70)
細骨材S		川砂 (比重: 2.56, F.M.2.68, 吸水率2.1%)
混和剤	高性能減水剤SP	β -ナフタリンスルホン酸Na塩
	増粘剤WG	ウェランガム

表-5 モルタル配合

シリーズNa	V_w/V_p (%)	V_s/V_p	V_{sd}/V_p (%)	増粘剤 (W×%)	SP剤 (g/ℓ)
1	94.8	1.30	0,25,50	0.05	18.0
2			0		28.2
			25		20.4
			50		16.7

V_w : 水容積

V_s : 細骨材容積

V_p : 粉体容積

V_{sd} : 石粉容積

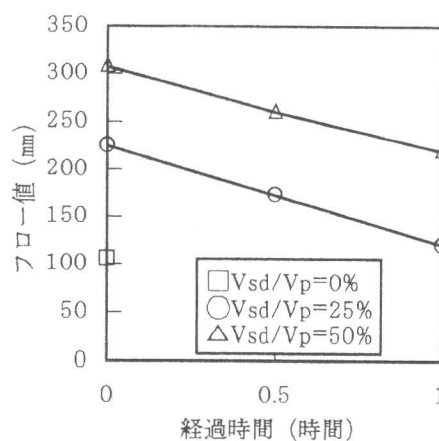


図-2 フローの経時変化 (シリーズ1)

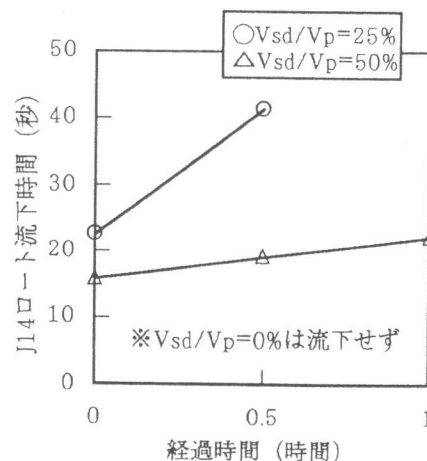


図-3 J14ロート流下時間の経時変化 (シリーズ1)

の経時変化を図-4及び図-5に示す。ここで表-5に示すように、石粉の置換率が增大するほど同一初期フロー値を得るためのSP添加量は減少した。図-4より、初期フロー値が一定の場合、フローの経時変化は石粉置換率の違いによる差はほとんど見られなかった。これはSP添加量の減少による流動性保持能力の低下と石粉置換率の増大による流動性保持能力の向上とがバランスしたためと考えられる。即ち、SP添加量が減少することによってモルタル中のSP残存量が少なくなり、流動性保持能力が低下する [5]。一方、石粉置換率の増大により、粉体中の化学的不活性な石粉の占める割合が増え、流動性保持能力が向上することが考えられる。したがって、今回検討したような石粉を用いた併用系の高流動コンクリートの場合、SP剤の添加量と石粉の相互の配合バランスによって流動性の保持能力が決まるものと考えられる。よって増粘剤の添加量を増やすなどして、初期フロー値が一定の下でSP添加量を増やすことにより流動性保持能力がさらに向上することが考えられる。

図-5より、J14ルート初期流下時間は石粉の置換率が大きくなるほど減少する傾向が見られた。また、フローの経時変化は石粉の有無で大きな差はなかったが、 $V_{sd}/V_p=0\%$ 、すなわち石粉無添加のルート流下時間の経時変化は、石粉添加のそれと比べて非常に大きくなった。これらの結果から、石粉の添加によりモルタルの練上り直後の粘性を低減させ、さらに経時的な粘性の増加も抑制することができると考えられる。

ここで、石粉がコンクリートの流動性保持にどのように影響しているかについて、詳細に検討した。まず、SP剤の影響を省くため、石粉単味及び石粉+増粘剤のモルタルフローの経時変化を測定し、その結果を図-6に示す。これらのモルタル配合は、細骨材粉体容積比 (V_s/V_p) = 1.30を一定とし、SP剤を使用せずに高流動域のフローを得るために、それぞれの水石粉比 (以下、 W/SD) を変化させた (石粉単身; $W/SD=60\%$ 、石粉+増粘剤; $W/SD=70\%$)。図から、高流動域のモルタルにおいて、経過時間2時間の範囲で、石粉及び増粘剤はフロー経時変化にほとんど影響しないことが分かった。混和材として石粉の他に、スラグやフライアッシュ等があり、これら自体は単独で水とは反応しないが、時間経過とともにスランプダウンすることが知られている [6]。これは、比較的硬いコンクリートの場合であって、砂のせん断抵抗や粉体の物理的凝集などの理由によりスランプダウンするものと考えられる。一方、高流動域の場合は自由水の量が多く、これらの要因の影響を受けにくくなり、フローの経時的変化が小さくなるものと考えられる。

次に、SP剤による流動性保持能力を一定にしたときの石粉による流動性保持の向上を検討した。モル

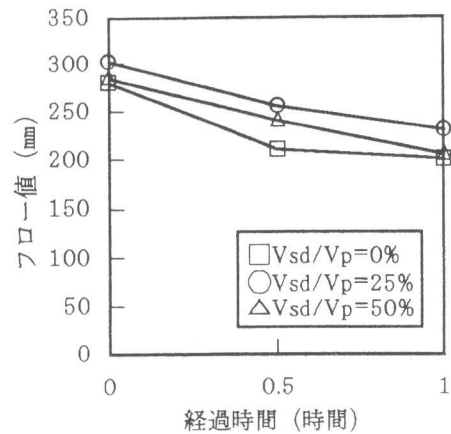


図-4 フローの経時変化 (シリーズ2)

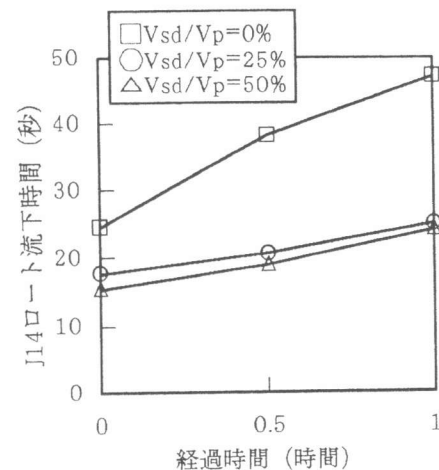


図-5 J14ルート流下時間の経時変化 (シリーズ2)

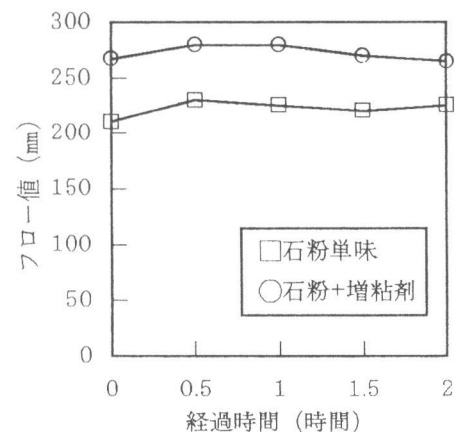


図-6 石粉及び石粉+増粘剤のフロー経時変化

タルの配合は、表-5のシリーズ2の $V_{sd}/V_p=0\%$ 及び 50% において、SP剤の添加量を一定にして練上りフローを一定にするために増粘剤添加量を変化させた（SP剤の添加量は粉体重量の 4.0% 、増粘剤添加量は $V_{sd}/V_p=0\%$ が水の質量の 0.05% 、 $V_{sd}/V_p=50\%$ が 0.1% ）。このとき、(1)式からフロー低下率を求め、その経時変化を図-7に示す。図に示すように、時間経過に伴うフロー低下率が增大するのを、石粉を添加することで大幅に低減できる。

$$\text{フロー低下率 (\%)} = \frac{(\text{練上りのフロー}) - (\text{練上り後 } t \text{ 時間のフロー})}{(\text{練上りのフロー}) - 100} \times 100 \quad (1)$$

このような現象が、粉体の違いによるSP剤の粉体への吸着挙動に関係しているのではないかと推察し、SP吸着量を測定してみた。モルタルの配合は表-6の配合1及び2に $V_{sd}/V_p=100\%$ を加えた3水準とする。SP吸着量の経時変化は、図-8に示すように、 $V_{sd}/V_p=100\%$ 、即ち石粉単味のモルタルはSP剤をほとんど吸着せず、さらに経時的なSP剤の消費が極めて小さいことが分かる。また、 $V_{sd}/V_p=0\%$ 、すなわちセメント単味と $V_{sd}/V_p=50\%$ を比べると、練上り直後のSP吸着量はほぼ同じであるが、経時変化が $V_{sd}/V_p=50\%$ の方が小さいことが分かる。したがって、石粉はSP量の消費による流動性の低下を抑制する効果があると考えられる。

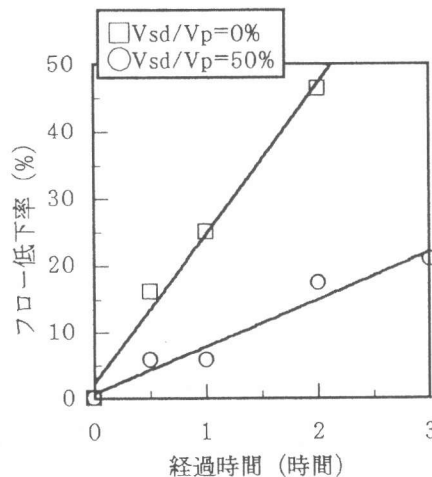


図-7 フロー低下率の経時変化

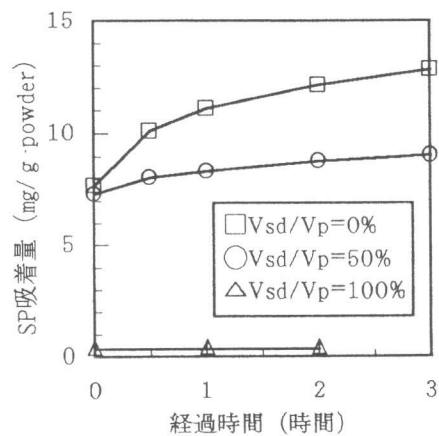


図-8 SP吸着量の経時変化

4.モルタルの流動性保持に及ぼすSP残存量の影響

セメントに吸着しないでモルタル中に残っているSP剤（以下、SP残存量と記す）がモルタルの流動性保持に及ぼす影響を検討するために実験を行った。モルタルの配合は表-6に示すように、すべてのケースにおいて増粘剤を使用し、細骨材容積 (V_s) を一定とした。それぞれの練上りフローを一定にするためSP剤の添加量を変化させ、このときのモルタルフローとモルタル中のSP残存量の経時変化を測定した。モルタルの練混ぜ方法は3章と同様とした。SP残存量の測定方法は、モルタルを 3000rpm で10分間遠心分離して得られた上澄水中のSP量を紫外線吸光スペクトルにより測定した。

表-6 モルタル配合

図-9にSP残存量とフロー値の関係を示す。図からSP残存量が多いほうが同一残存量低下量によるフローの低下量が小さいことが分かる。ここで、図-9におけるそれぞれの配合についてフロー値 200mm の時のSP残存量とこのフロー値になるまでに要する時間

配合 No	V_w/V_p (%)	V_s/V_m	V_{sd}/V_p (%)	増粘剤 (W×%)	SP剤 (P×%)	練上りフロー (mm)
1	100	0.4	0	0.05	5.0	293
2			50		2.5	313
3	0		4.0		240	
4	50		2.0		243	

※ V_m ; モルタル容積

(フロー値の上限は250mmとする)をそれぞれのケースにおいて整理したものを図-10に示す。図より、SP残存量が多いほど同一のフロー低下に要する時間が長くなる結果となった。このことはSP残存量、すなわちセメント粒子周辺に存在する余剰のSP量が流動性保持に寄与している可能性を示すものである。

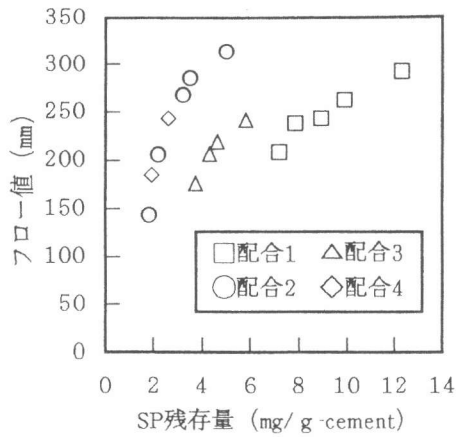


図-9 SP残存量とフローの関係

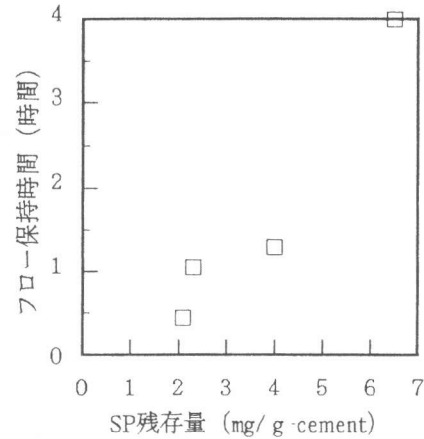


図-10 SP残存量とフロー保持時間の関係

5. 結論

本研究から以下のことが結論づけられる。

- (1) 増粘剤ウェランガムを使用し、遅延作用のない高性能減水剤の添加量を調整することで、スランプ保持剤を使用した場合と同程度の流動性保持能力をコンクリートに付与でき、凝結時間の大幅な延長を阻止できる。
- (2) 粉体に石粉単味を用いたモルタルは、高流動域において流動性の経時的変化が極めて小さくなる性質を有しており、またSP剤をほとんど吸着しないため、セメントの一部に石粉を置換した高流動コンクリートの流動性保持性能の向上をもたらしている。
- (3) 石粉はコンクリートの粘性を低減し、経時的な粘性の増大を抑制する効果がある。
- (4) 時間の経過が2時間以内であれば増粘剤の使用により、コンクリート中の高性能減水剤の残存量を多くすることにより、流動性の低下を緩和できる。

謝辞：本研究を進めるにあたり実験及び材料提供にご協力頂きました、花王(株)和歌山研究所の泉達男氏と山室穂高氏、三晶(株)の南昌義氏と吉崎政人氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 坂田 昇ほか：高流動コンクリートの流動性保持性能の向上に関する一実験、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、V-151、pp.302-303、1994
- [2] 坂田 昇ほか：高流動コンクリートの配合が施工性、充填性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.131-136、1993
- [3] 岡村 甫、前川宏一、小澤一雅：「ハイパフォーマンスコンクリート」、技報堂出版、1993.9
- [4] コンクリート標準示方書 (J S C E.F 542-1993) 充填モルタル試験方法 (案)
- [5] 稲葉美穂子ほか：増粘剤ウェランガムを用いた高流動コンクリートの流動性保持について、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、V-541、pp.1082-1083、1995
- [6] 服部健一：超高強度鉄筋コンクリート建造物の開発に果たす高性能減水剤の役割、建築雑誌、Vol.105、No.1298、1990.