

ショーケース札幌
2013.10.17

コンクリートの面白さと 難しさ



独立行政法人 土木研究所
理事長 魚本 健人
(東京大学名誉教授)

コンクリートって何？



セメント、水、砂、砂利を練混ぜた混合物を
打設・養生して硬化させた建設材料

コンクリートの構成材料



水



セメント



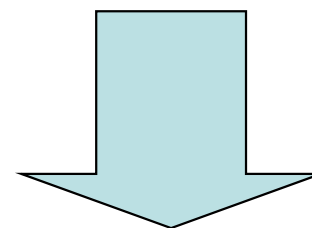
砂(細骨材)



砂利(粗骨材)



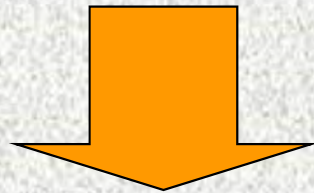
ミキサで練混ぜ



コンクリート

コンクリートに対する理解

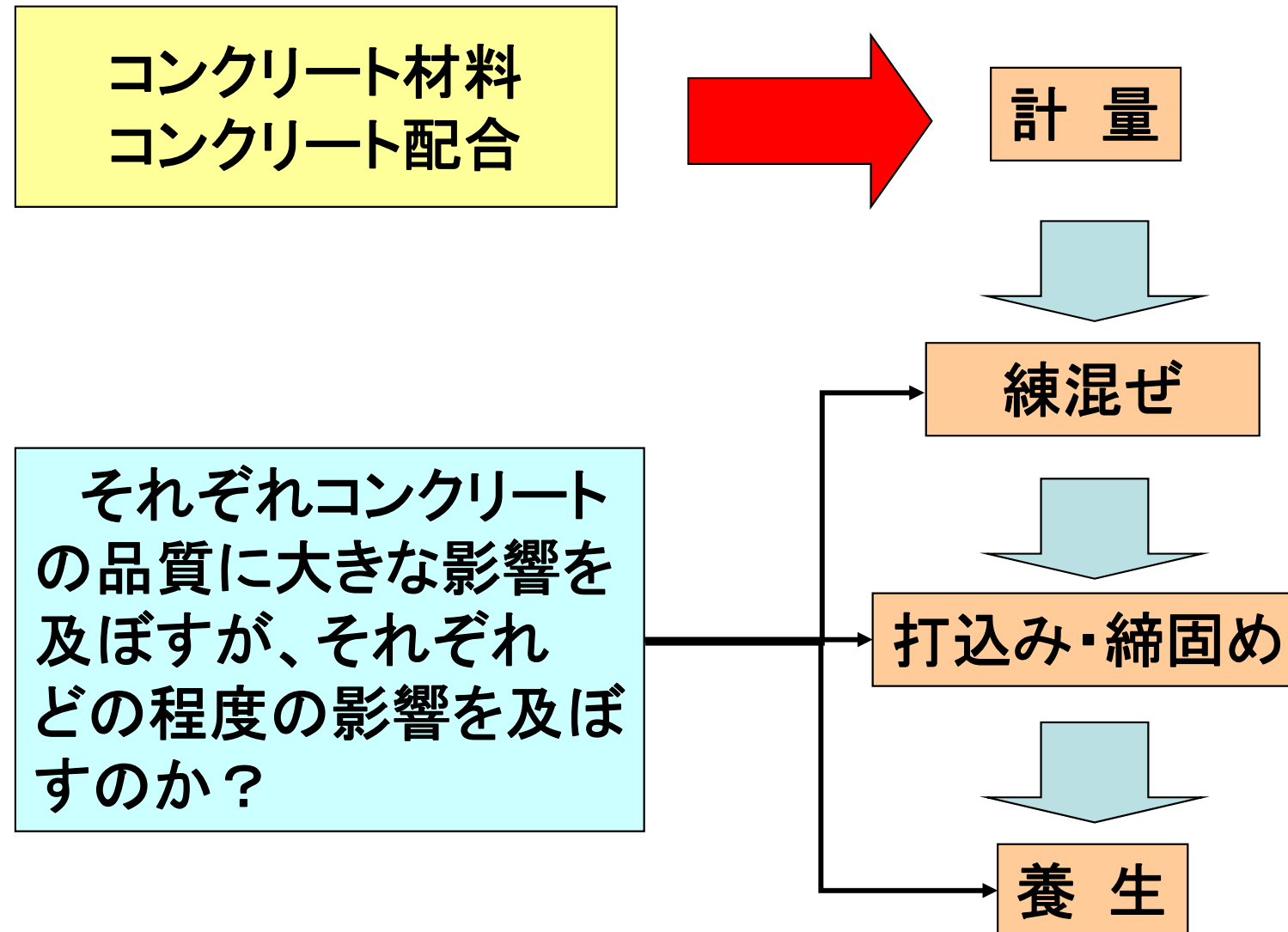
原理が必ずしも厳密には明確になっていなくとも、どの様に取り扱えばよいかは既にある程度明らかにされていると思われる。



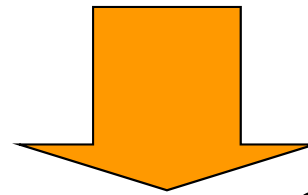
本当？

コンクリートを扱う人も、それを利用する人もある程度は理解できるので、コンクリートについてはわかっていると考えがちである。

コンクリートの品質に及ぼす要因

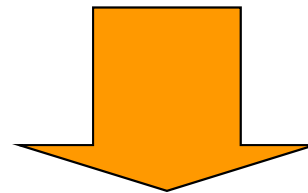


コンクリートは既に100年以上の使用実績があり、
コンクリート工学も今までの様々な経験に基づく
「経験工学」が確立されている。



実用上、あ
まり困らな
い！

原理が必ずしも厳密には明確になって
いなくとも、どの様に取り扱えばよいかは
既にある程度明らかにされていると思わ
れている。



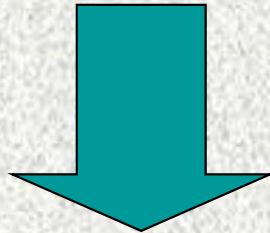
限られた範囲の中でコンクリートは使用されており、
何か問題が発生すると、その対策を考えるという方
法が採用されている。

セメントの水和反応 のモデル解析

セメントの水和反応は複雑であるが、コンピュータを用いて数値解析することが出来る。ここでは、2つの手法について説明する。

ポルトランドセメントの水和反応

ポルトランドセメントの水和反応は複雑で未だに詳細までは明らかでない。



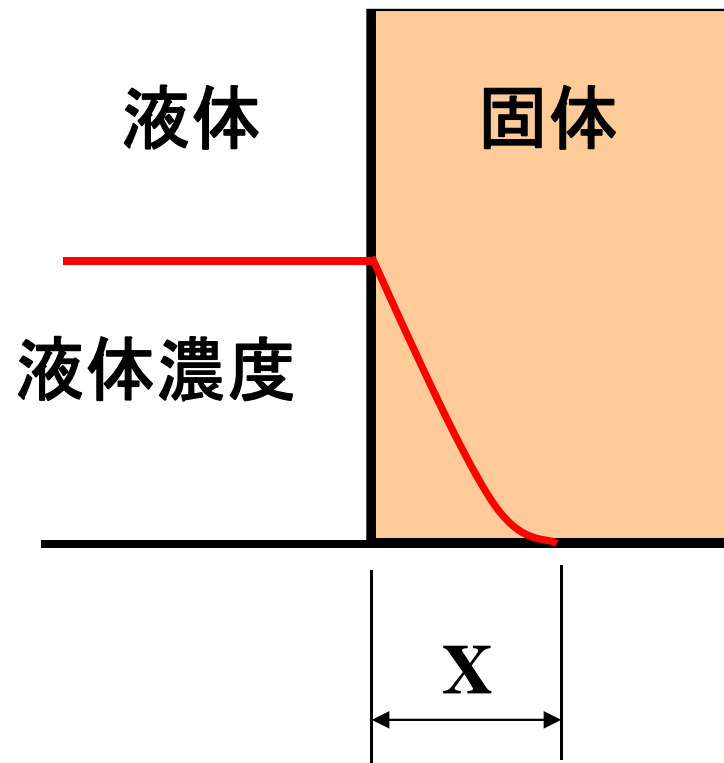
理論および実測による推定が中心であるが、コンピュータの普及により今後さらに明らかにされよう

後藤孝治氏のモデル

仮定条件

1. セメント粒子は球形である。
2. 誘導期の反応生成物(C-S-H_n)は、水がC₃A粒子中に拡散した表面のみに生じる。
(水の拡散律則: Janderの式)
3. 加速期では2と同時に直接C-S-Hの反応も生じる。
4. 減速期では3の直接C-S-Hが生じる反応のみが生じる。

Janderの式(1)



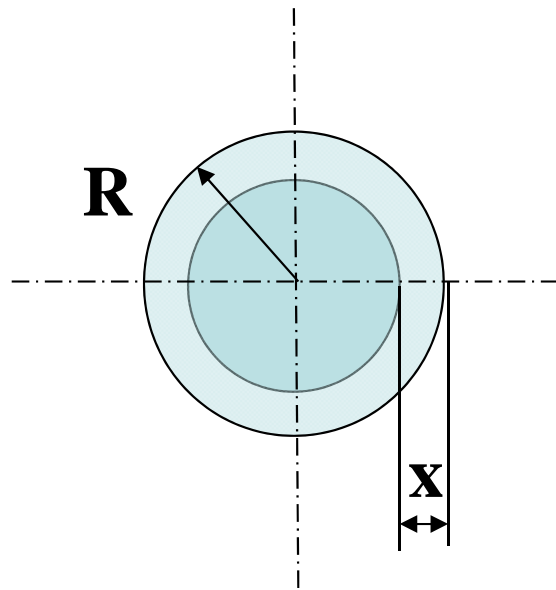
固体中に液体が拡散し
その濃度勾配に反応速度が
比例すると仮定すると

$$dX/dt = kC/X$$

これを積分すれば

$$X = \sqrt{kCt}$$

Janderの式(2)

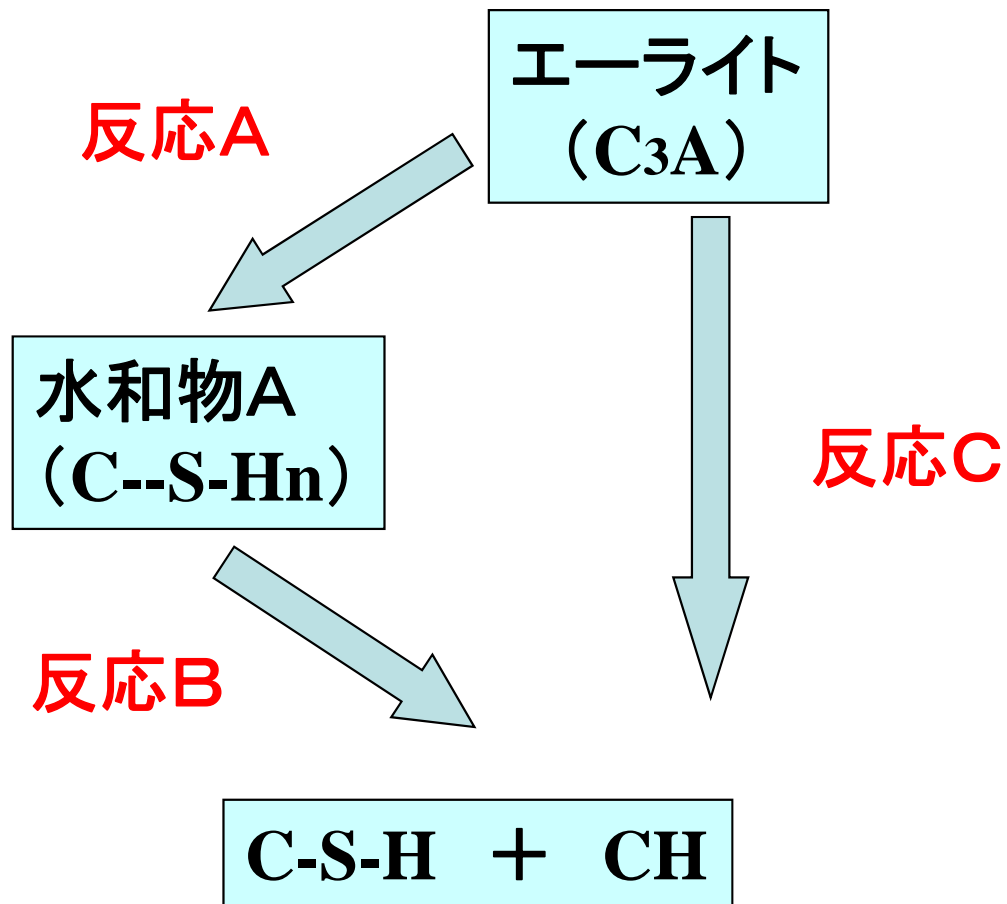


球形の粒子の場合

固体が球形の粒子の場合、
反応率を α とすれば

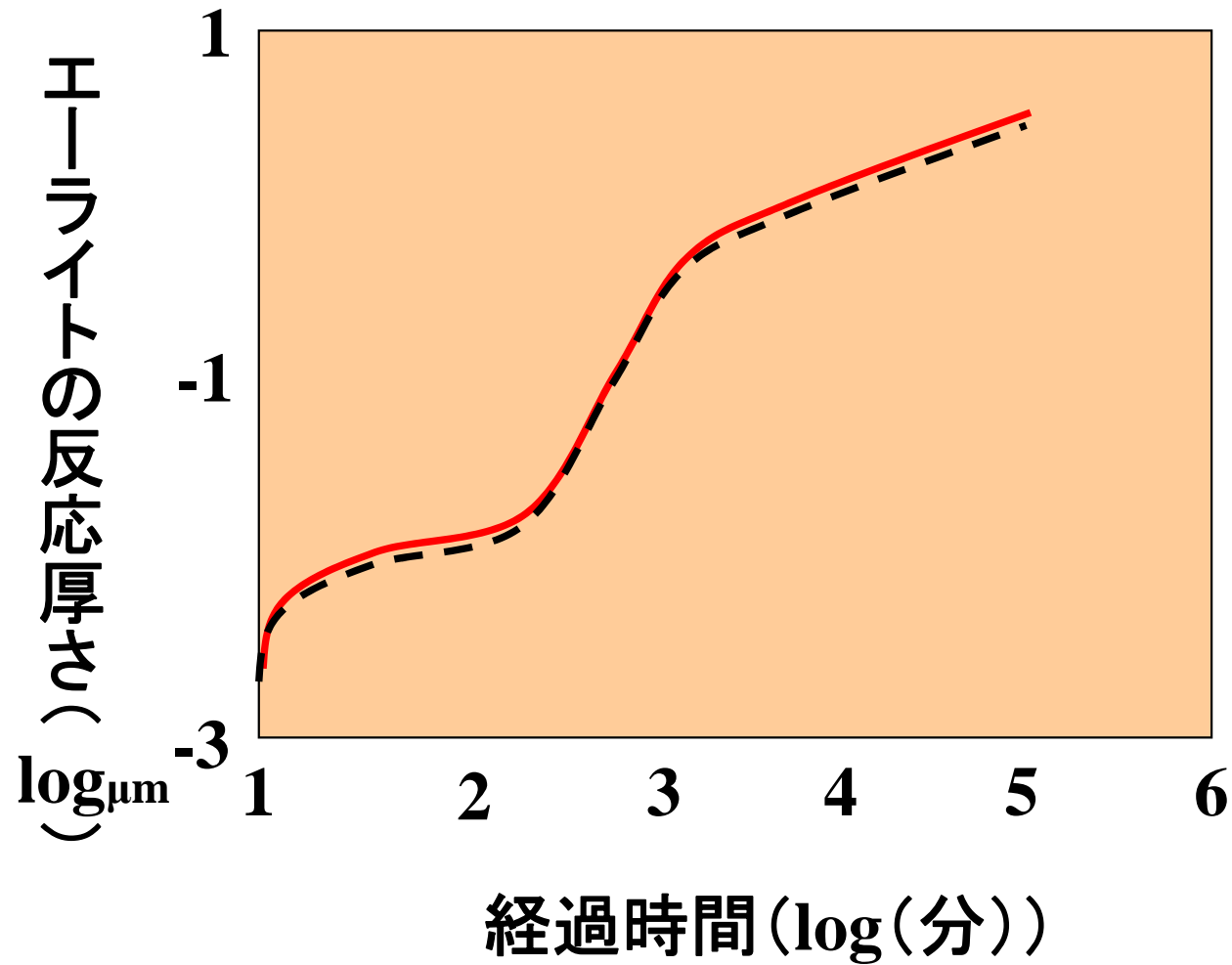
$$\begin{aligned}\alpha &= \{R^3 - (R-X)^3\} / R^3 \\ &= 1 - (1-X/R)^3 \\ &= 1 - \{1 - \sqrt[3]{kCt/R}\}^3\end{aligned}$$

エーライトの水和反応(1)



ポルトランドセメントでは種々の鉱物が存在するため、エーライトの場合について説明する。

エーライトの水和反応速度



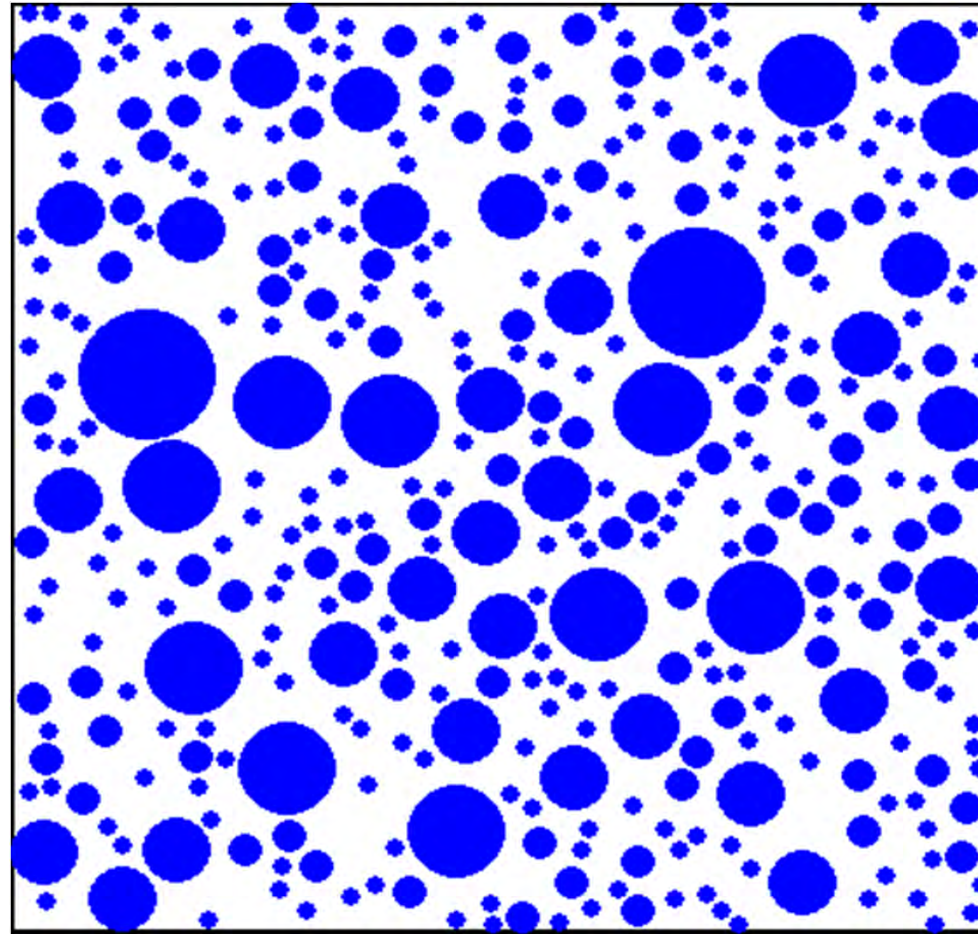
計算値と
実験値は
ほぼ一致

NIST & Phanのモデル

仮定条件

1. セメント粒子は球形で各種の寸法からなる。
2. セメント鉱物はC3A、C3S、C2S、C4AF および石膏からなる。
3. 鉱物はランダムに分布するが、10ミクロン以下の粒子は1つの鉱物からなる。
4. 計算時の1サイクルがどの程度の時間に相当するかは実験値との対応を考慮している。

C₃S粒子の初期分布状況 (W/C=50%)



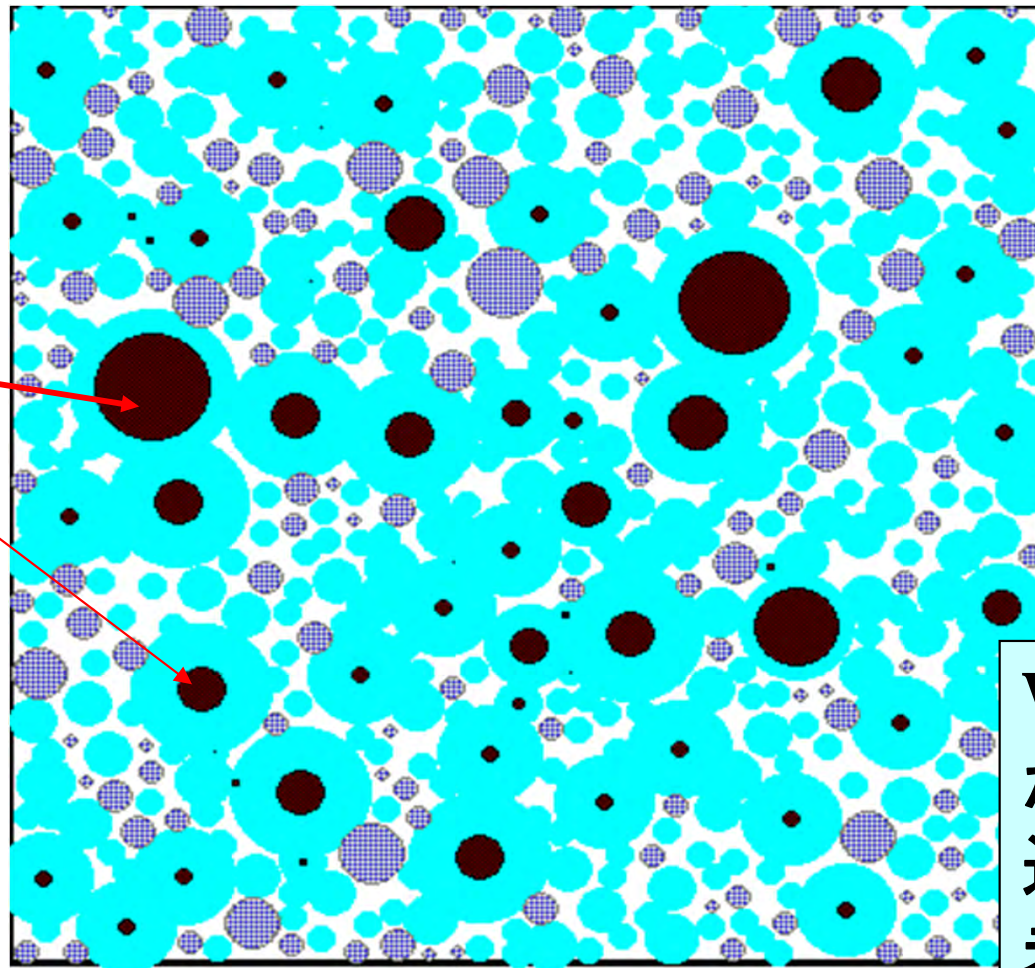
C3S



PORE

1500時間後の分布状況 (W/C=50%)

未水和セメント



W/Cが小さいとかなり水和水和が進行しても、未水和セメントは存在する。



C-S-H



C3S



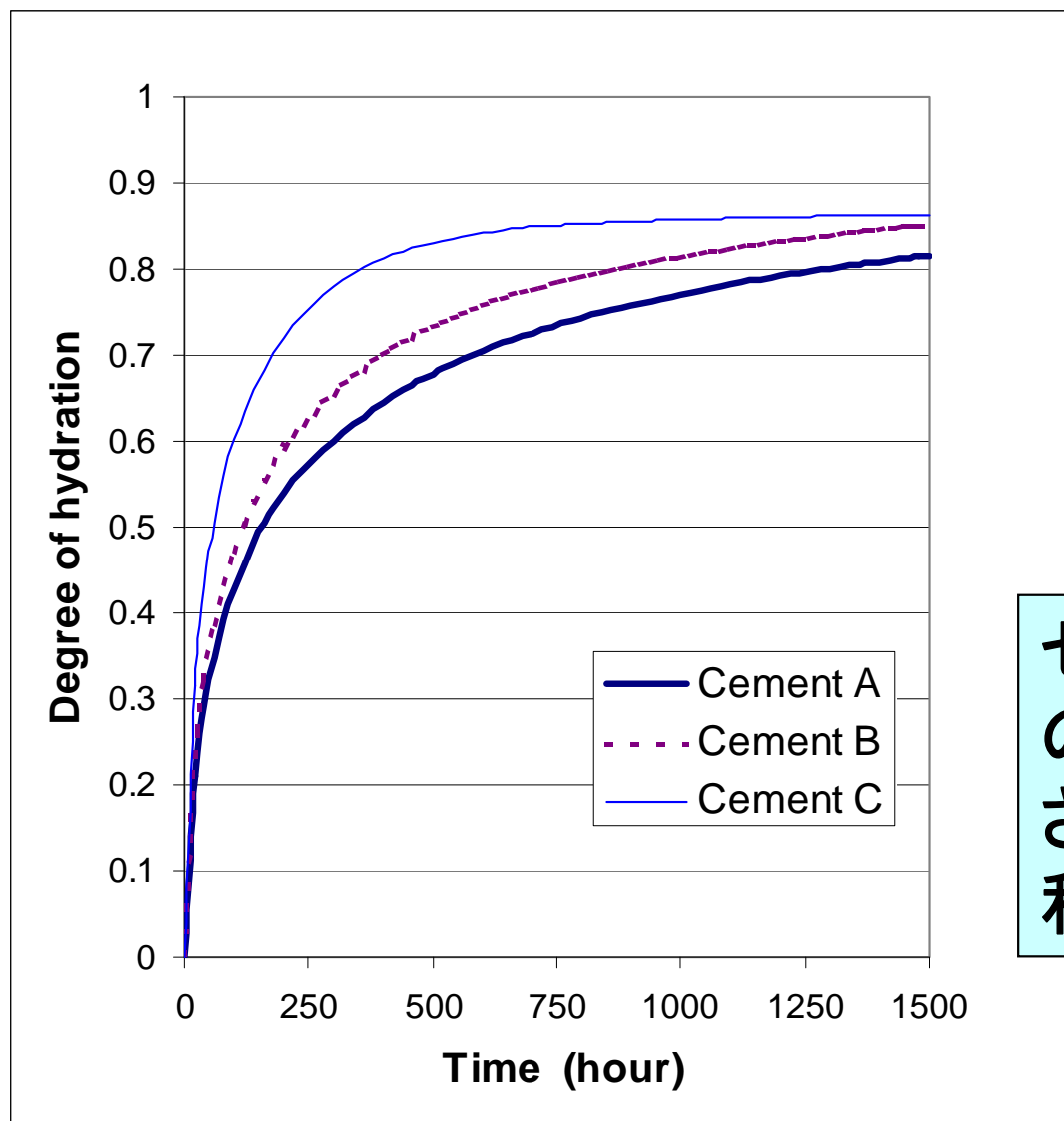
PORE



CH

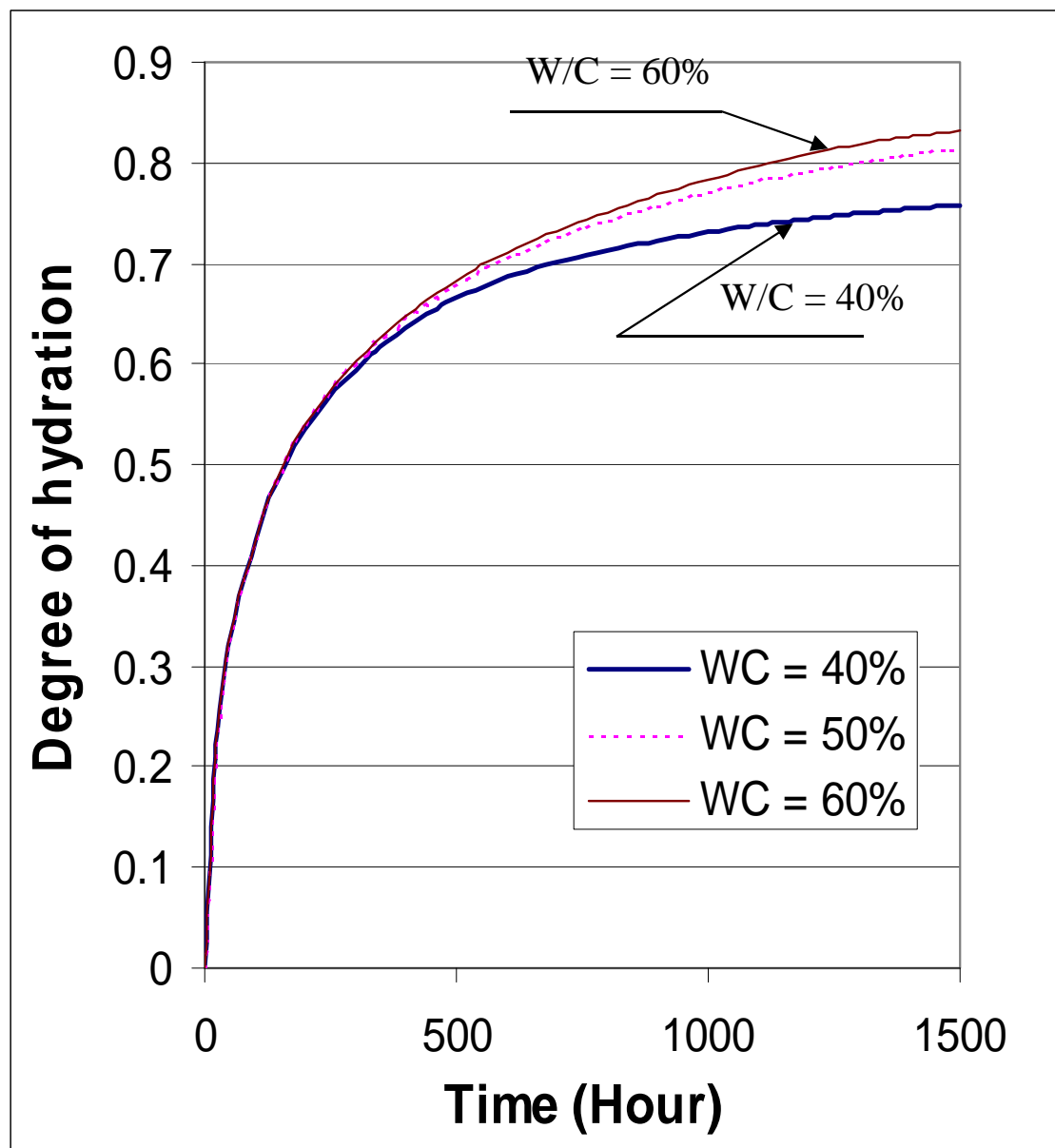
セメント粒子寸法の影響 (W/C=50%)

セメント粒子
の寸法は
 $A > B > C$

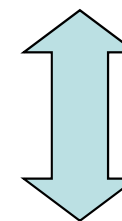


セメント粒子
の寸法が小
さいほど水
和しやすい

水セメント比の影響 (セメント)



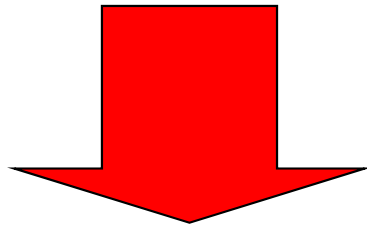
水セメント比
が大きいほど
水和は速い



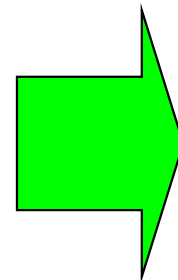
水セメント比
が小さいと
水和に必要な
水が不足する

セメントの水和反応モデルの前提

いずれのモデルでも固体である
セメント粒子は反応すべき水ときちんと
接していると仮定しているが、……

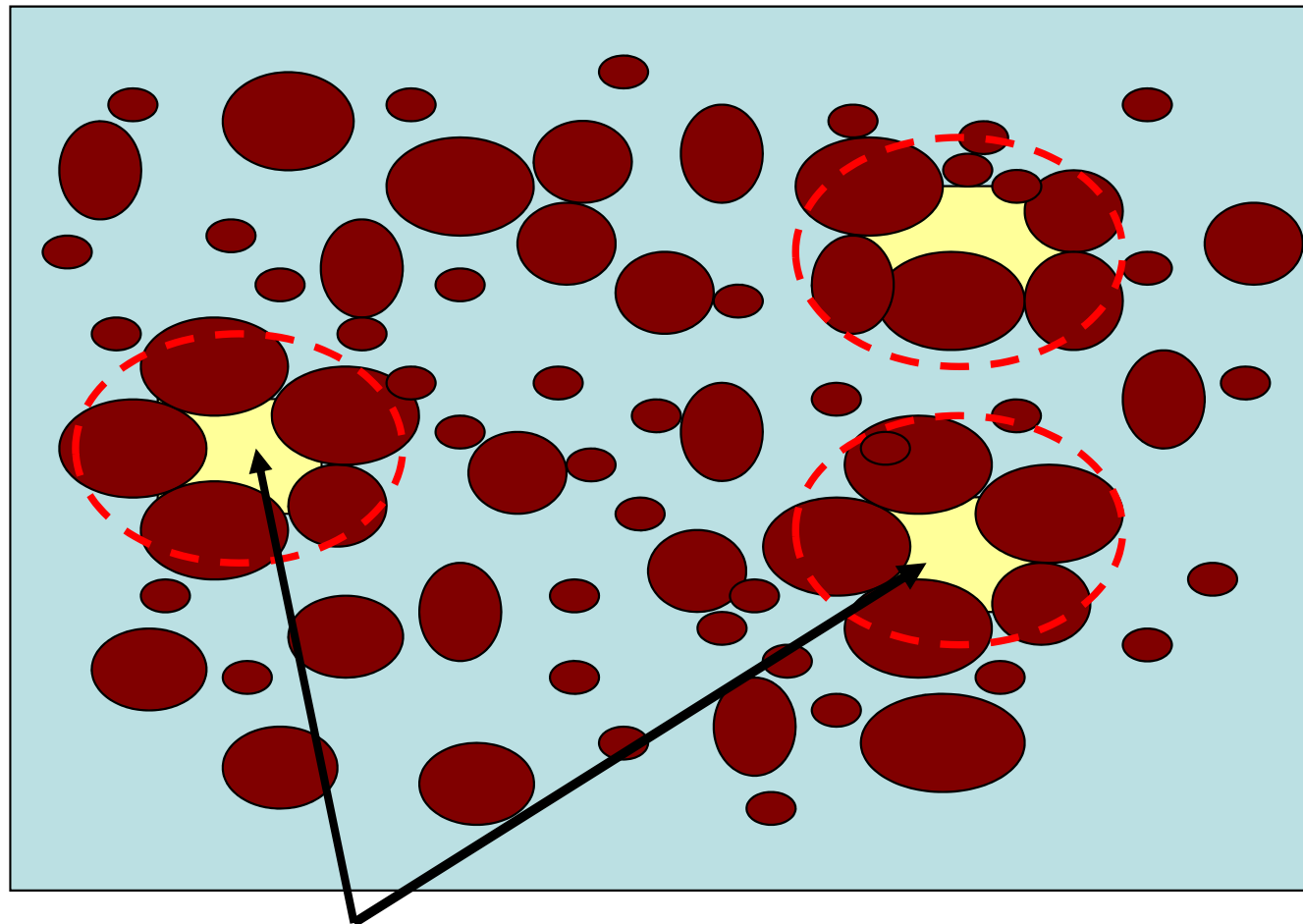


現実の全セメント粒子は
必ずしも均等に水と接して
いるわけではない！



思わぬ
結果が発生
することが
ある！

微粒子と液体との混合(モデル図)



● 微粒子

○ フロックなど

空隙になりやすい

練り混ぜは粒子を分散させ、セメントの微粒子までもその表面に薄く水をコーティングし、全てのセメント粒子が反応できる状態を作り出す操作である。

高硫酸塩スラグセメント を用いたコンクリート

省資源・省エネルギー
を達成できる？

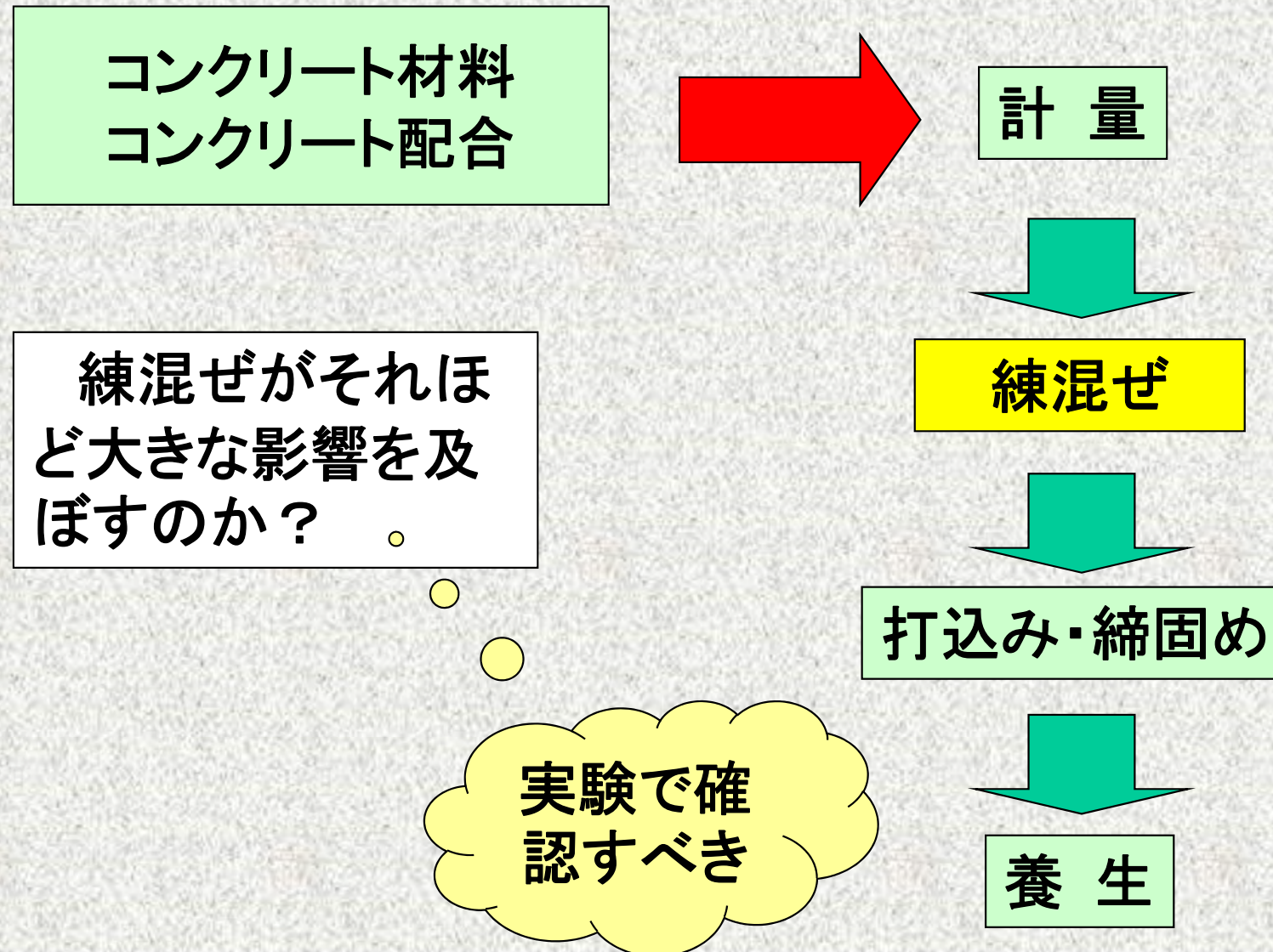
エコ材料で セメントの代替材料を！



高炉スラグ微粉末、排煙脱硫石膏、普通ポルトランドセメントを 85-80:15-10:5-0で混合した高硫酸塩スラグセメントを利用することはできないか？

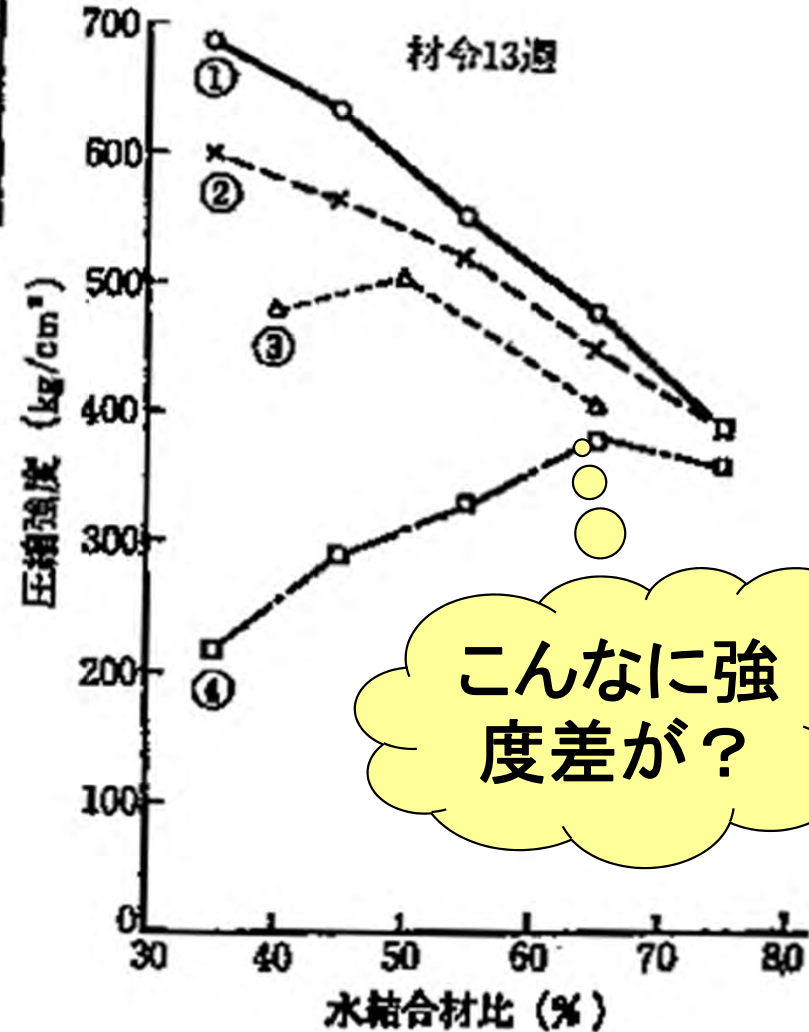
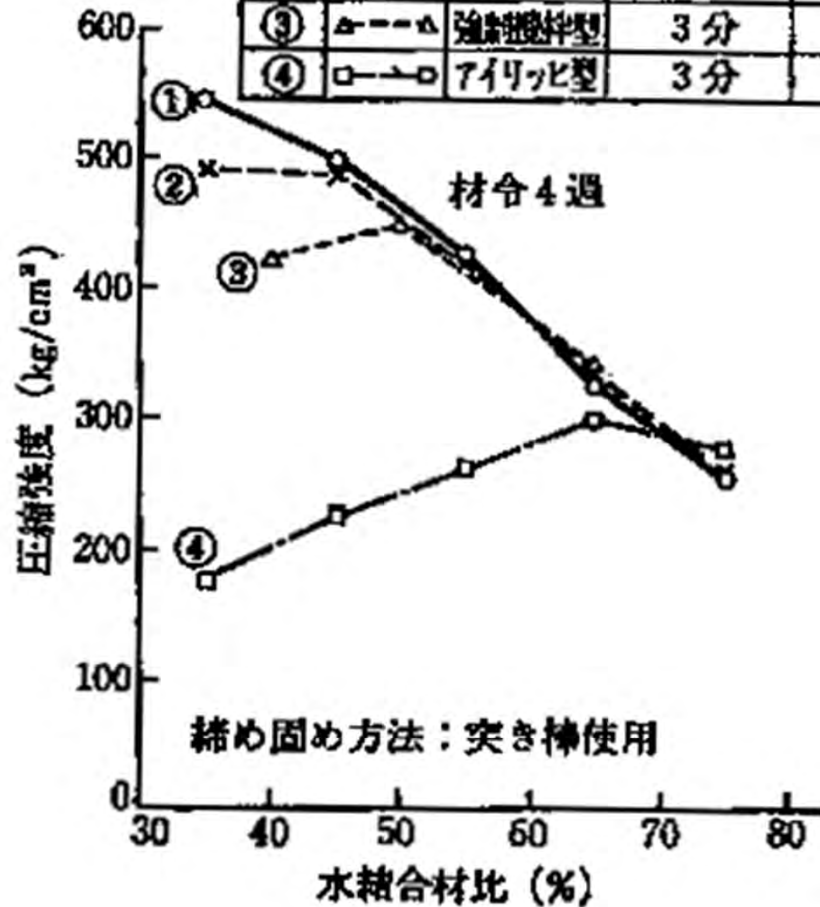
(1978-1981)

コンクリートの品質に及ぼす要因

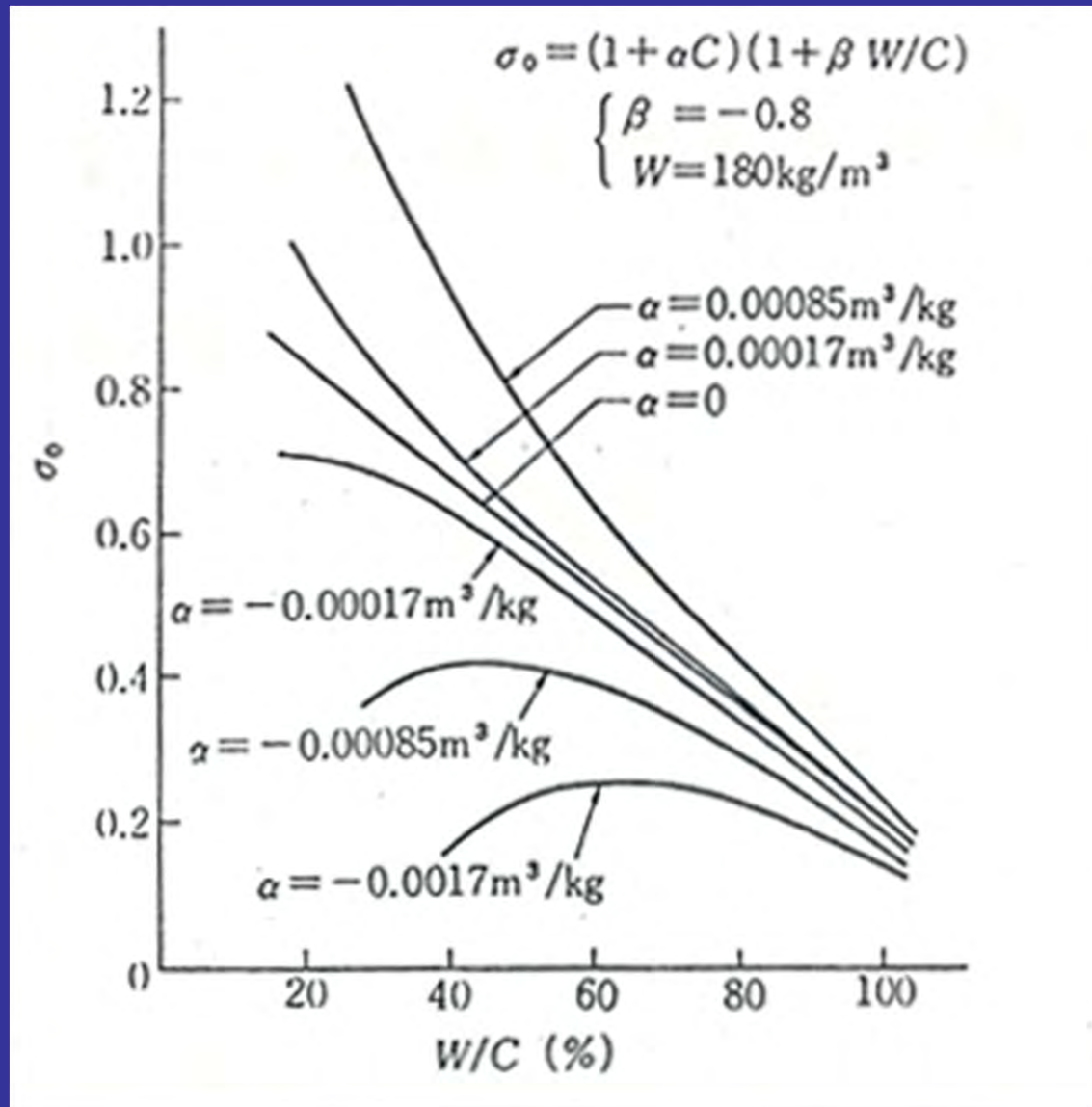


練り混ぜ方法とコンクリート圧縮強度の関係 (高硫酸塩スラグセメント)

No	記号	ミキサー型式	練り混ぜ時間	練り混ぜ量
①	○—○	強制攪拌型	6分	1/5
②	x—x	強制攪拌型	3分	1/5
③	△—△	強制攪拌型	3分	1/2
④	□—□	アイリット型	3分	1/2



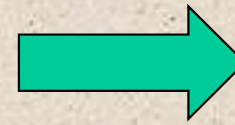
高硫酸塩スラグセメントの圧縮強度はセメント量による影響を受ける



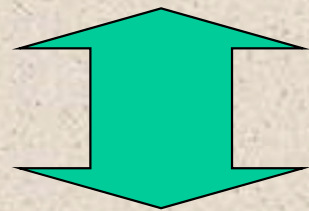
高硫酸塩セメントコンクリートの品質と練混ぜ

このようなことが起こったのは高硫酸塩スラグセメントという特殊なセメントを用いたからなのか？

高炉スラグ：石膏：ポルトランドセメント
= 85：13：2



これは、わずか2%添加されているポルトランドセメントの分散が大きな役割を占めていることが原因ではないか？



普通ポルトランドセメント等を用いた場合に、同様な影響を受ける可能性があるのか？

高硫酸塩スラグセメントの反応

高硫酸塩スラグセメント
(高炉スラグ＋二水石膏
＋ポルトランドセメント)

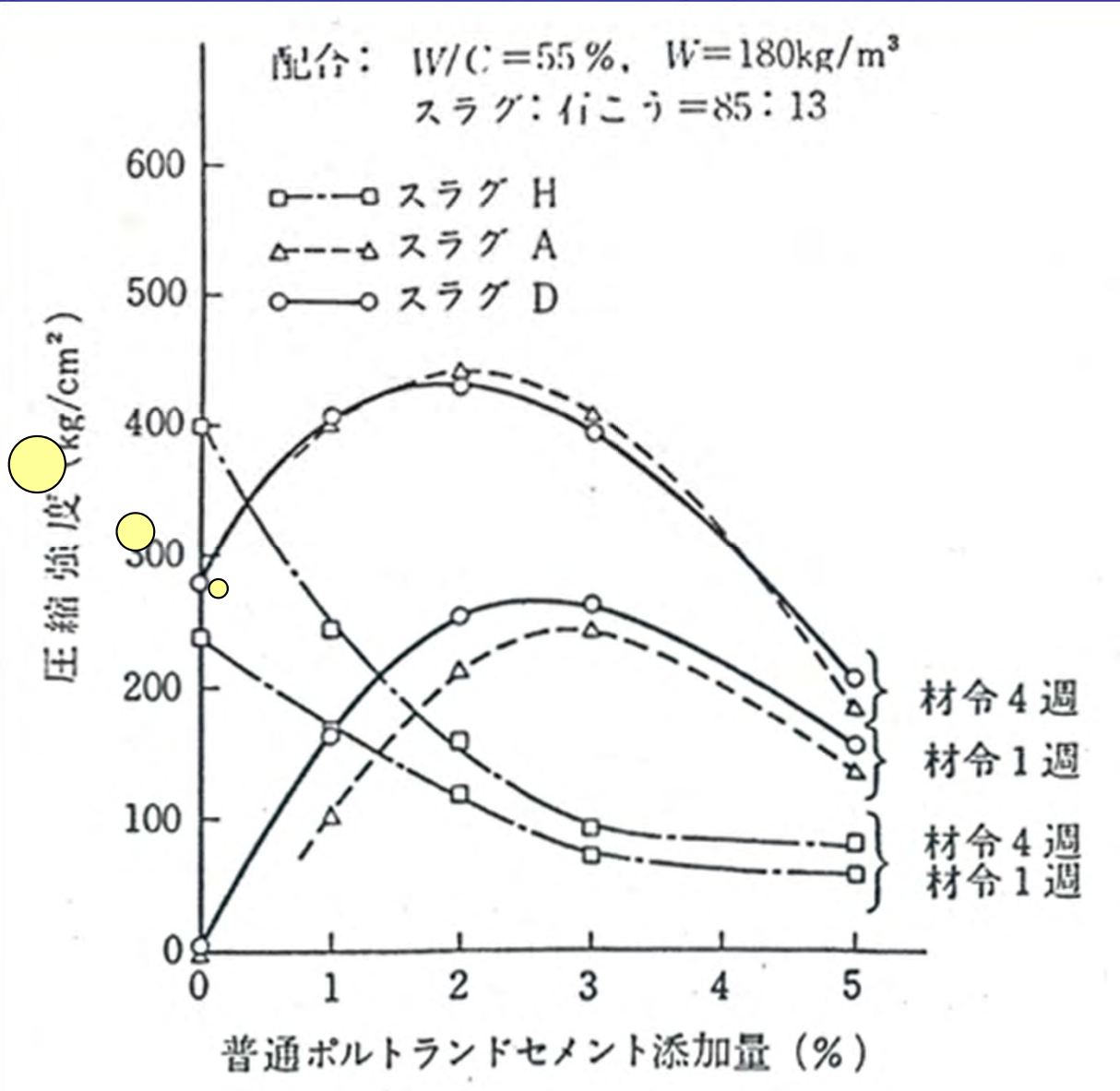
＋ 練混ぜ水

→ 水和反応

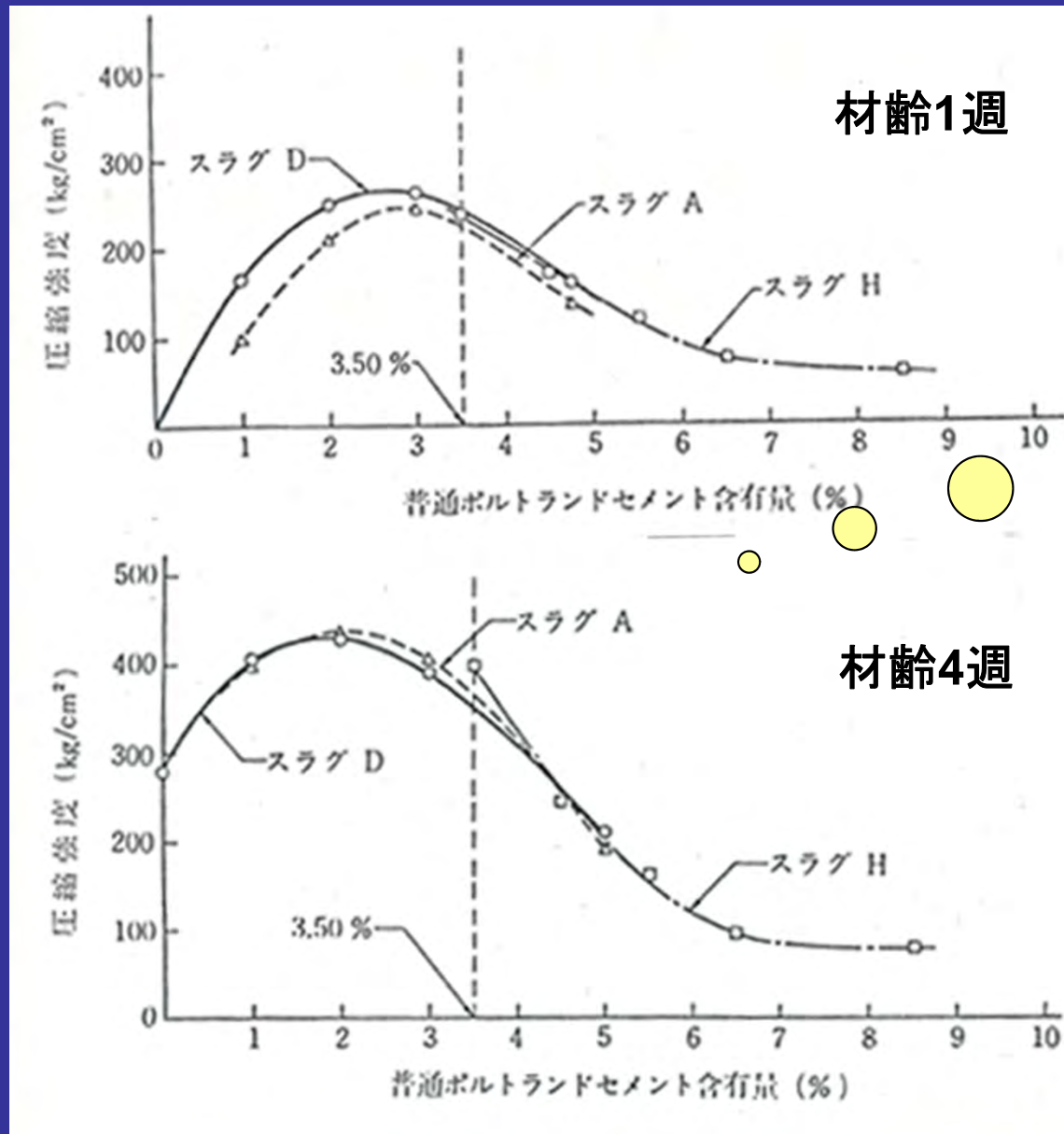
基本的には高炉スラグと石膏の反応であるが、その反応を生じさせるためには僅か2%しか添加されていないポルトランドセメントまたは他のアルカリ刺激剤が不可欠である。このため、練混ぜが不十分だと、このアルカリ刺激剤がうまく機能していないのではないかと？

高炉水砕スラグの違い

違う高炉スラグを利用したら？



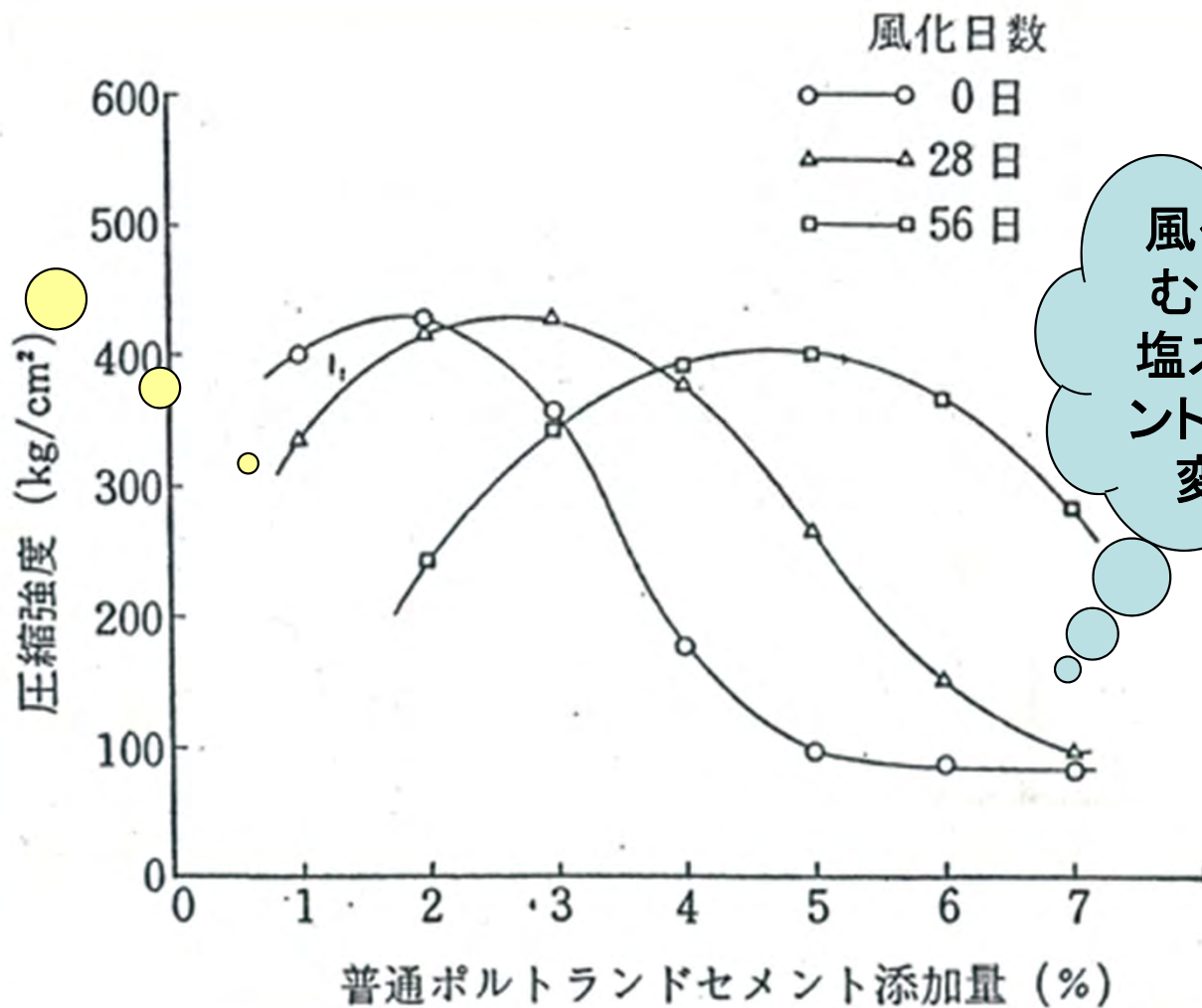
高炉水砕スラグに含まれるアルカリ刺激剤量の違い



高炉スラグには僅かなアルカリ刺激剤が含まれていることがある？

風化させた高硫酸塩スラグセメントの圧縮強度はポルトランドセメント添加量の影響を受ける

セメントを風化させてアルカリを変化させたら？



風化がすすむと高硫酸塩スラグセメントの反応が変化する

高硫酸塩スラグセメントの品質と制御

○高硫酸塩スラグセメントは、省エネルギー型セメントであり、高炉スラグと石膏が反応して硬化体を形成する。

○高硫酸塩スラグセメントの品質を制御するには、僅かな量しか添加されていないアルカリ刺激剤のコントロールが大切で、セメントの風化等によってもコンクリートの品質は大きく変動し、使用する高炉スラグなどに含まれる遊離石灰分の制御も必要とされる。

○コンクリートの品質を制御するためには、単位セメント量に応じた十分な練混ぜが不可欠である。

普通セメントを用いた
コンクリートの品質と
練混ぜの関係は？

高硫酸塩セメントは特
殊なセメントだからで
は？

レディーミクストコンクリート (JIS A 5308)

レディーミクストコンクリートの製造設備であるミキサは、JIS A 8603に適合するものでなければならないとされている。

(1)ミキサは、固定ミキサとする。

(2)ミキサは、所定のスランプのコンクリートを JIS A 1119 に定める試験を行って定めた容量を練り混ぜるとき、各材料を十分に練り混ぜ、均一の状態で排出できるものでなければならない。

(3)ミキサは、所定容量を所定時間練り混ぜて、JIS A 1119によって試験した値が下記の値以下であれば、コンクリートを均等に練り混ぜる性能を持つものとする。

コンクリート中のモルタルの単位容積質量差	0.8%
コンクリート中の単位粗骨材量の差	5%

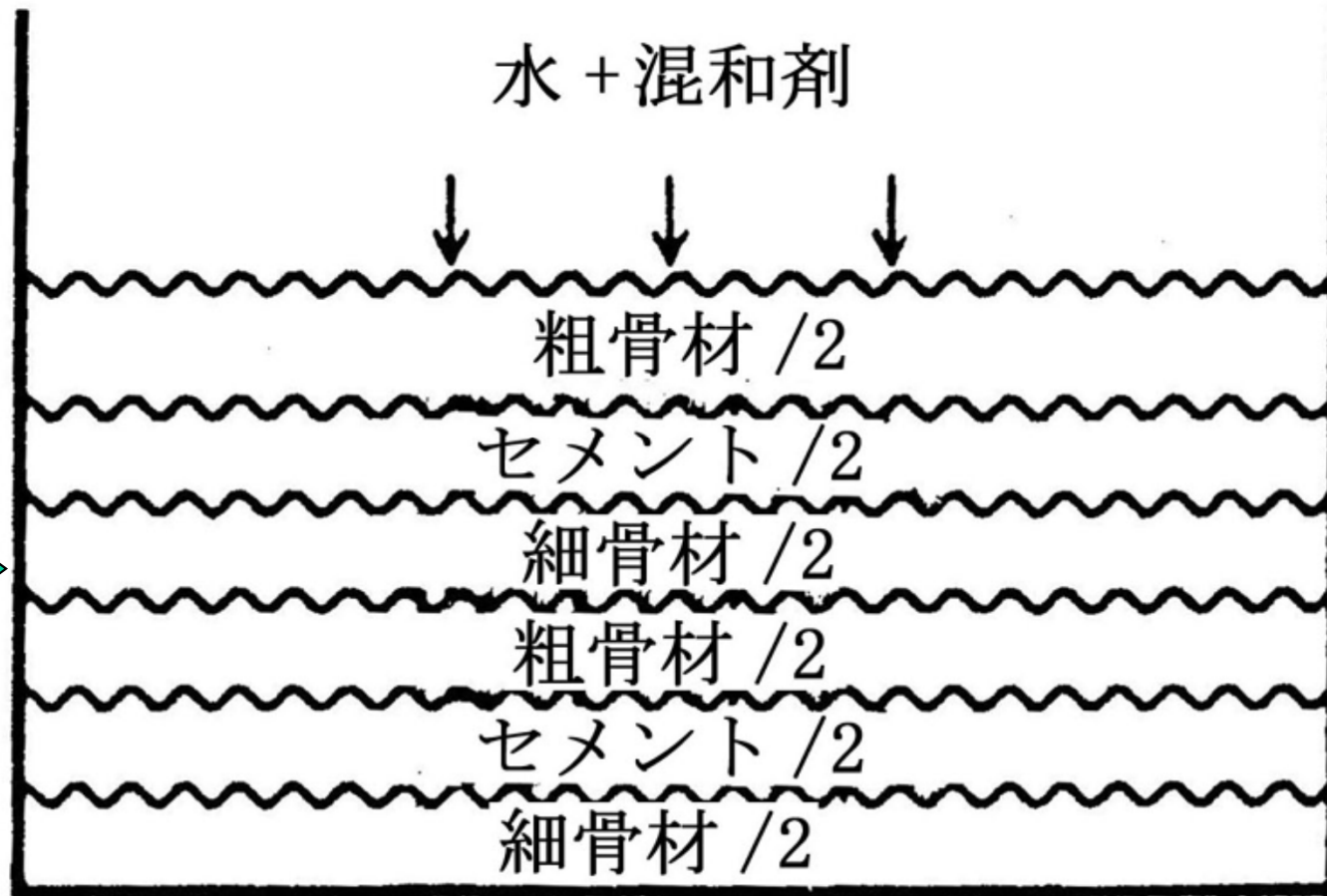
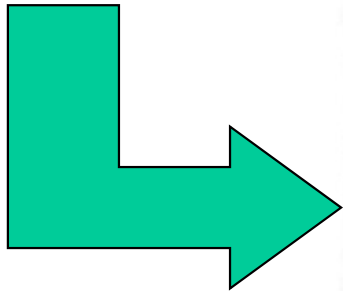
JIS A 8603によるミキサの分類と練混ぜ時間

種類		公称容量(m ³)
重力式ミキサ	傾胴形	0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0、2.5、3.0
強制練りミキサ	水平1軸形	
	水平2軸形	
	パン型	

ミキサの種類	練り混ぜ時間
傾胴形ミキサ	公称容量1.0M ³ 以下のものは90秒、 1.0M ³ を越えるものは0.5M ³ 増す毎に 5秒ずつ加算した時間
強制練りミキサ	60秒

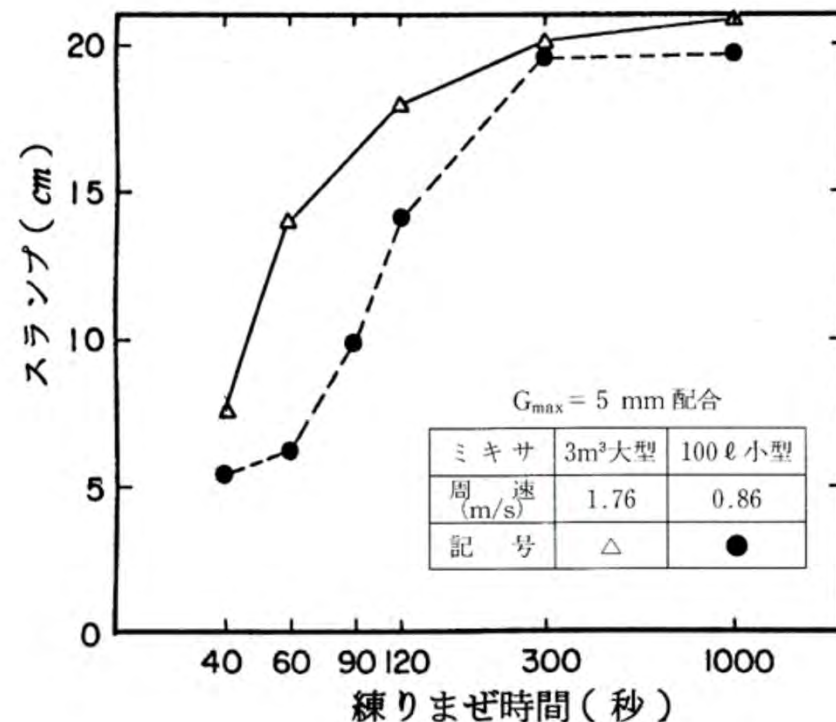
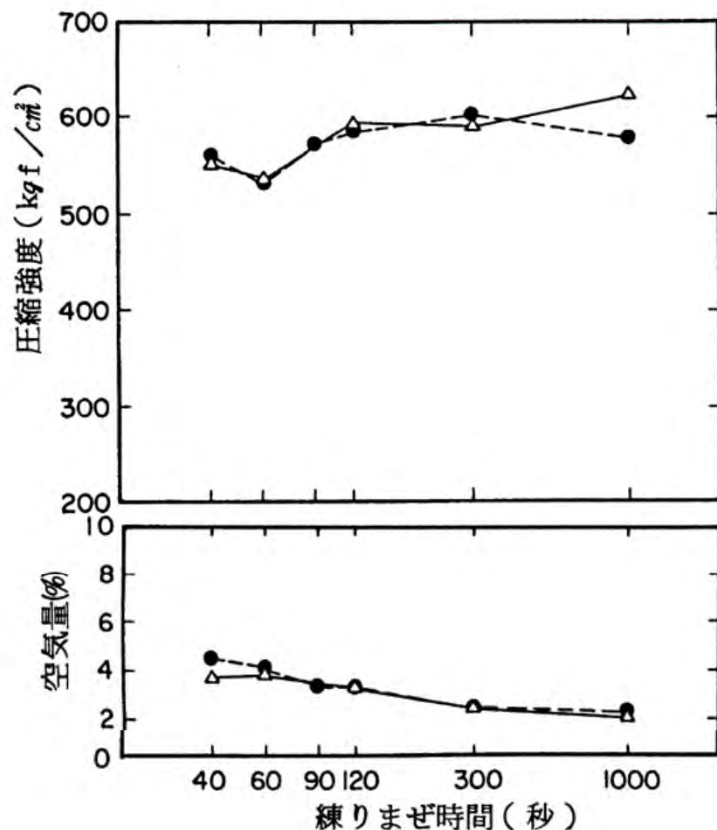
コンクリートミキサを使用した練混ぜが コンクリート品質に及ぼす影響の解明

ミキサ

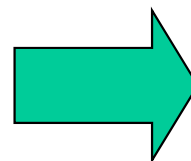


練りませ時間を変化させた場合の品質変化

プレーンコンクリート

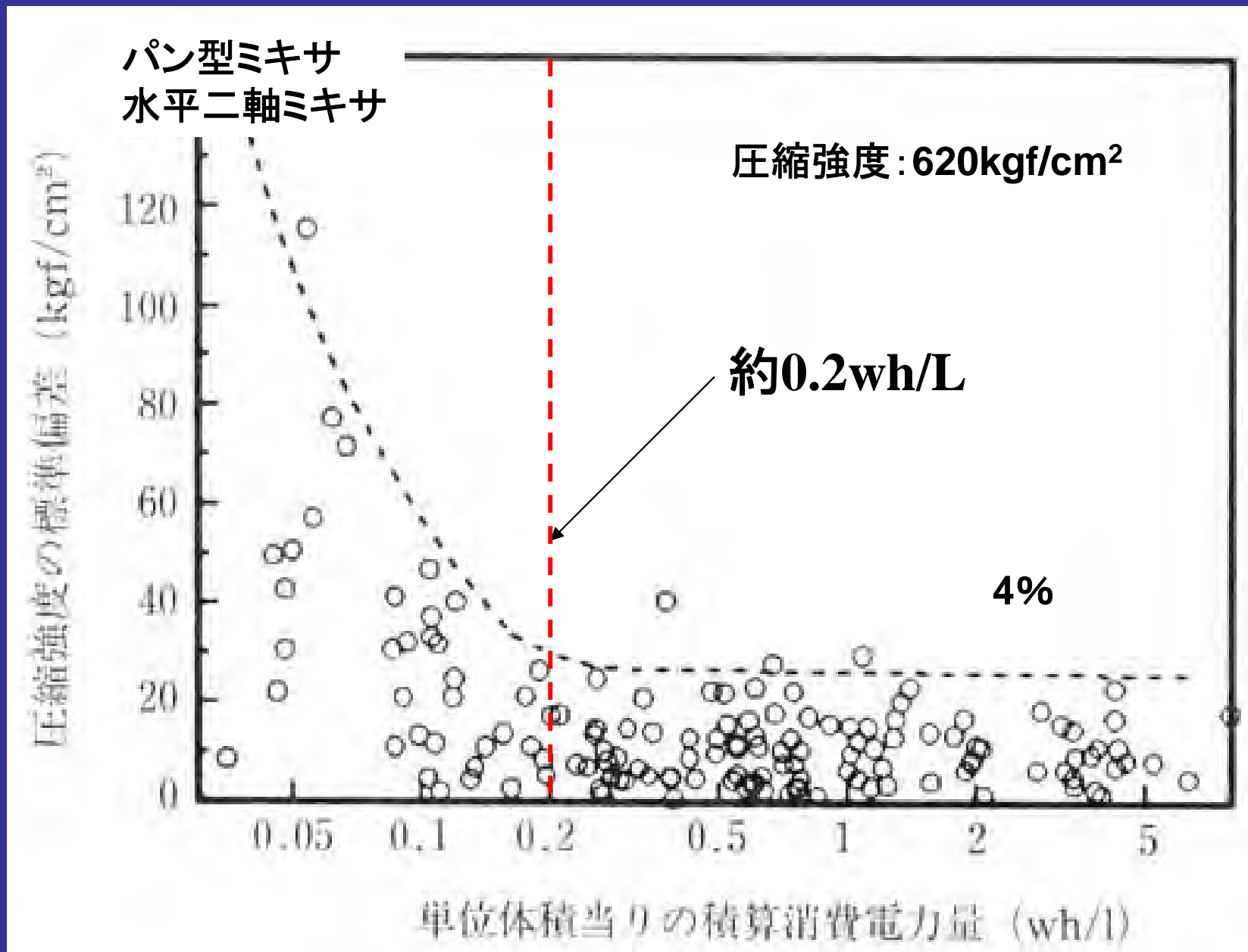


ミキサの種類や大きさが違うときは時間でない指標が必要では？

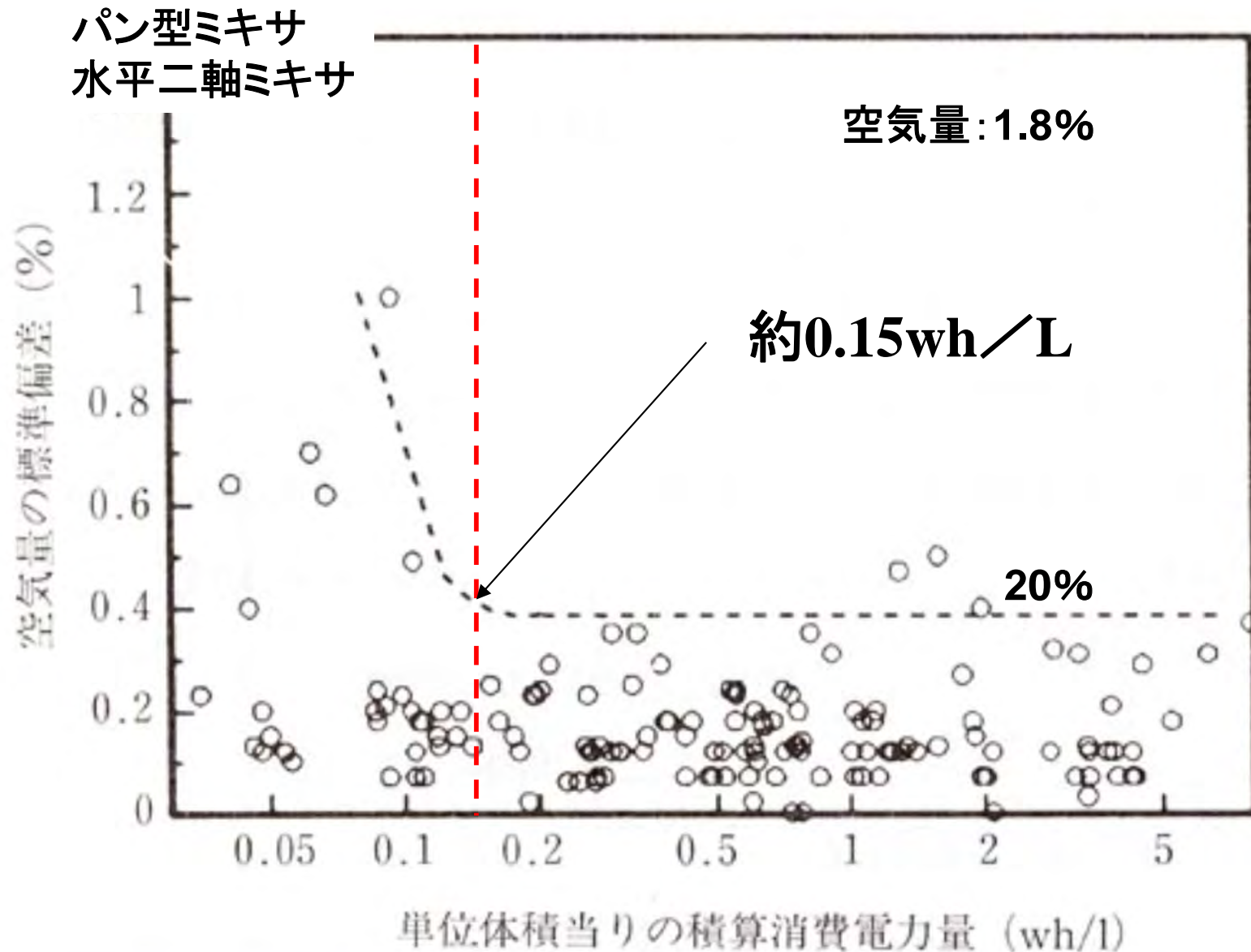


練混ぜエネルギーを指標とする

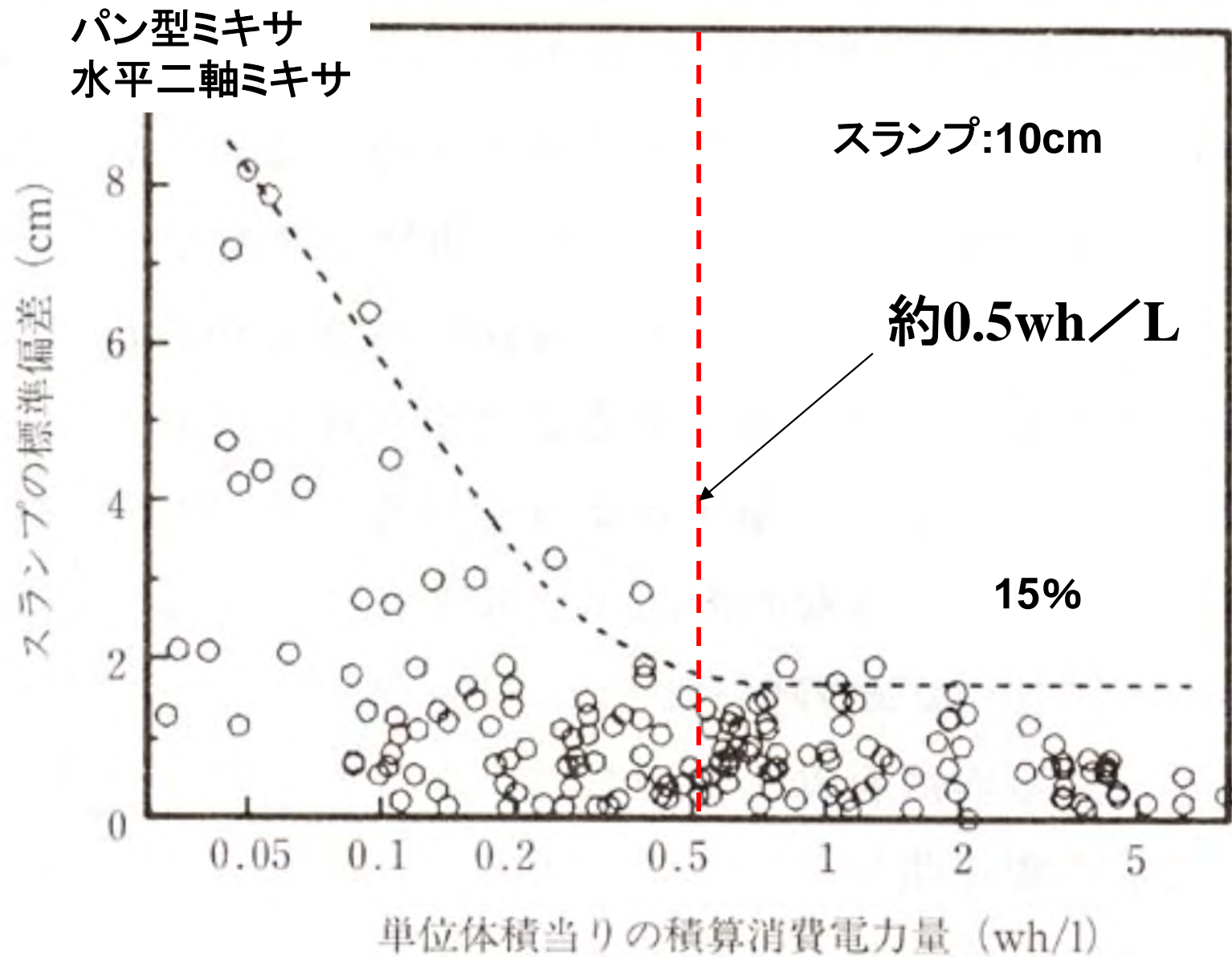
ミキサ消費電力量と圧縮強度の標準偏差



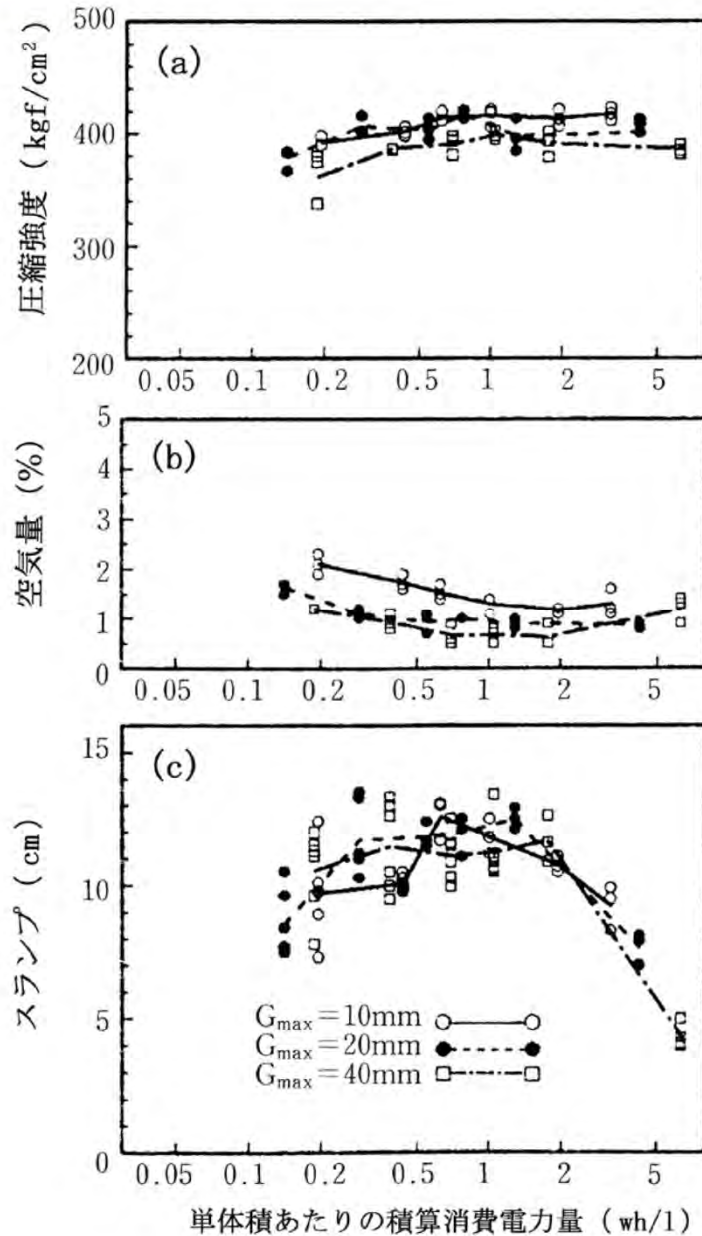
ミキサ消費電力量と空気量の標準偏差



ミキサ消費電力量とスランプの標準偏差



粗骨材最大寸法が異なるプレーンコンクリートの ミキサ消費電力量と品質特性の関係(パン型ミキサ)



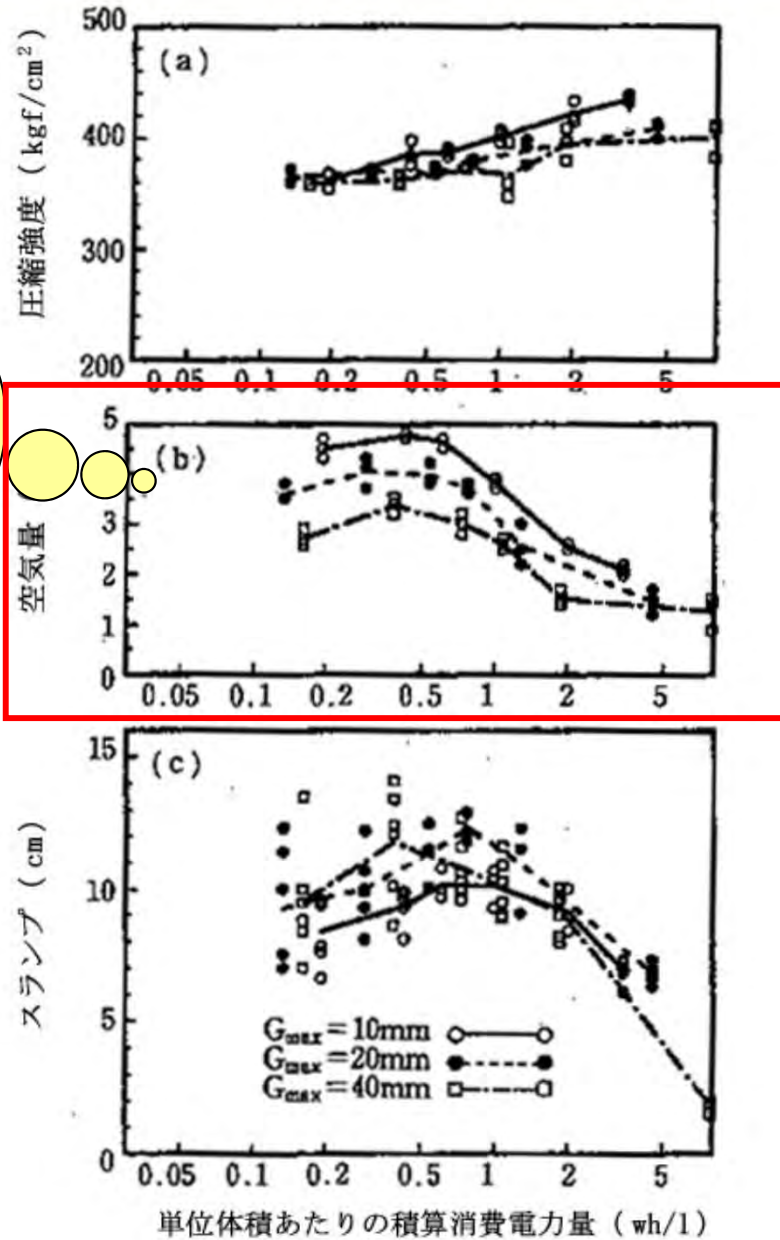
粗骨材最大寸法
G_{max} :10mm-40mm

粗骨材最大寸法
による違いはあまり
認められない。

○強度は増大
○空気量は減少
○スランプは増大
後減少

粗骨材最大寸法が異なるAEコンクリートの ミキサ消費電力量と品質特性の関係(パン型ミキサ)

骨材が
小さい
ほど大
きい



粗骨材最大寸法
による違いはあまり
認められない。

消費電力量が増
すと

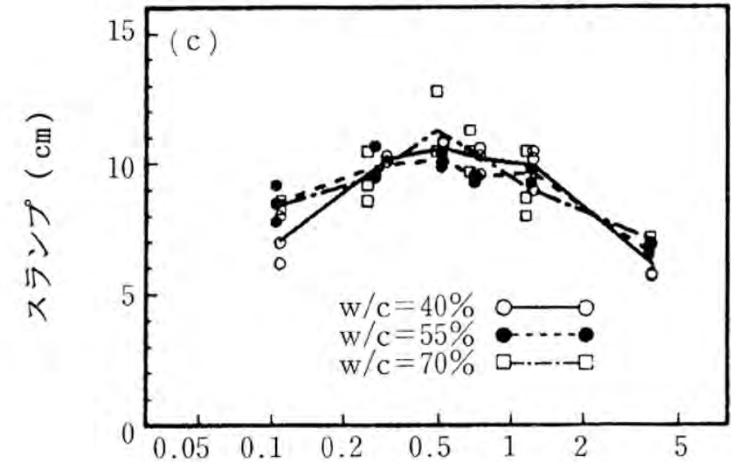
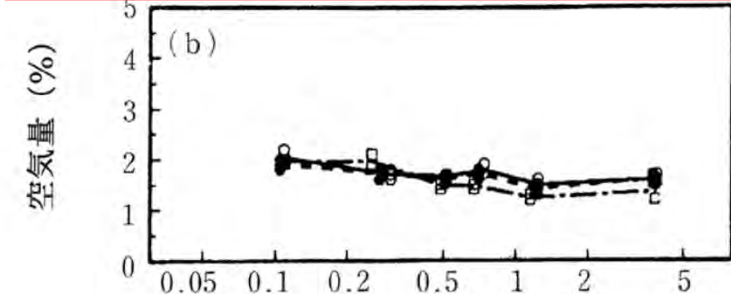
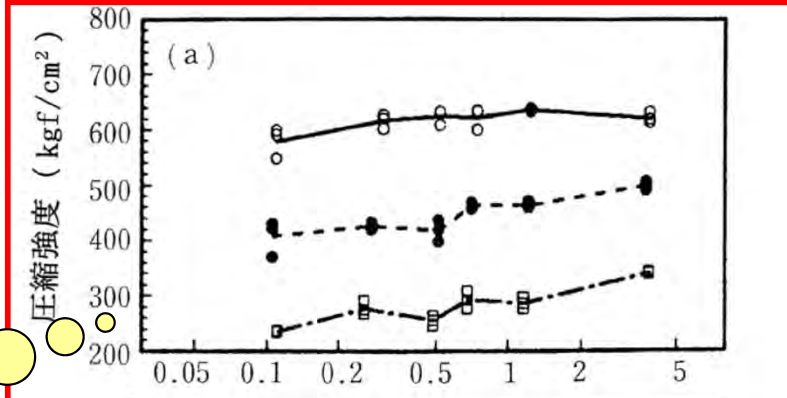
○強度は増大

○空気量は増大
後減少

○スランプは増大
後減少

水セメント比が異なるコンクリートの ミキサ消費電力量と品質特性の関係(パン型ミキサM)

ほぼ
平行
移動

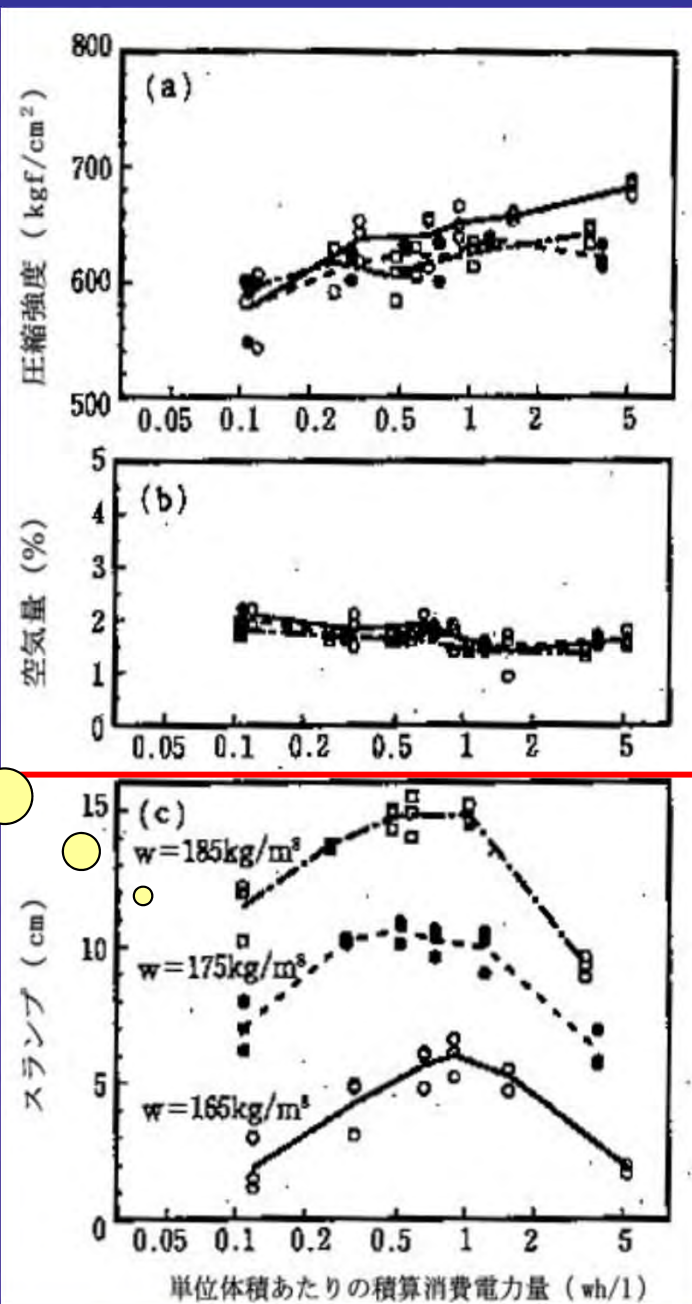


単体積あたりの積算消費電力量 (wh/1)

水セメント比による
違いは強度以外で
はあまり認められな
い。

消費電力量が増すと
○強度は増大
○空気量は減少
○スランプは増大
後減少

単位水量が異なるコンクリートの ミキサ消費電力量と品質特性の関係(パン型ミキサM)



ピークは無変化

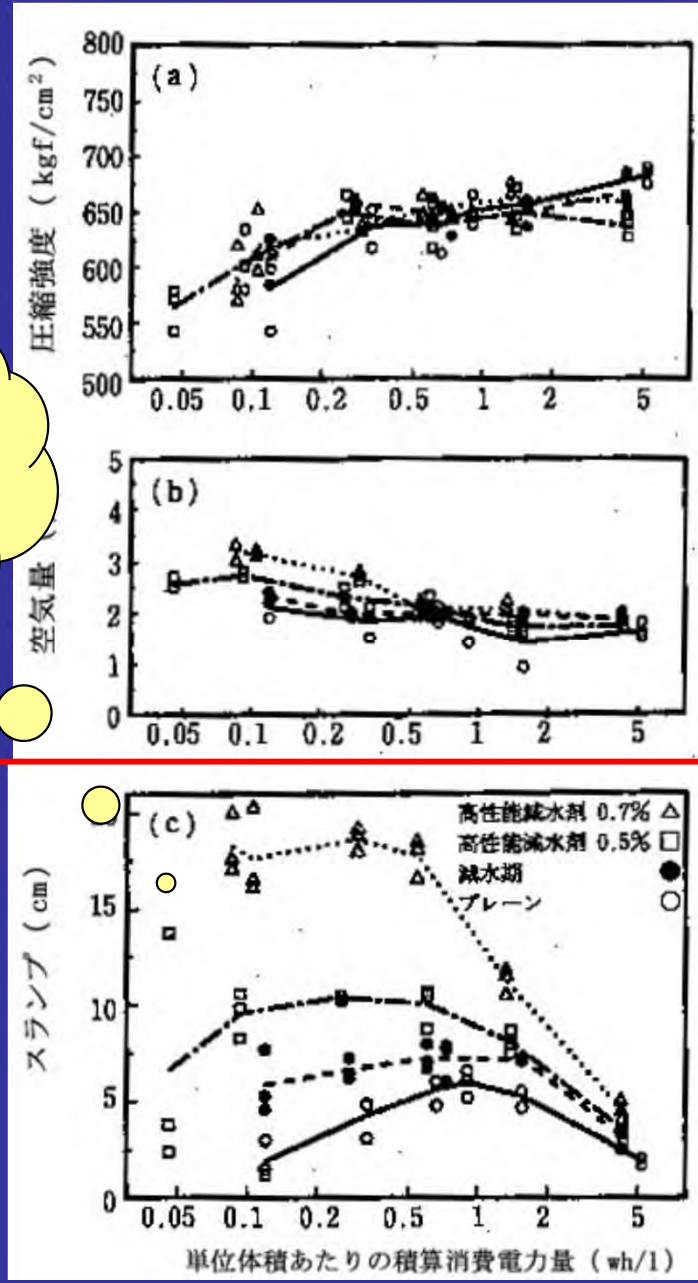
単位水量による違いはスランプ以外ではあまり認められない。

消費電力量が増すと

- 強度は増大
- 空気量は減少
- スランプは増大後減少

減水剤系混和剤を添加したコンクリートの ミキサ消費電力量と品質特性の関係(パン型ミキサM)

ピーク
は移動



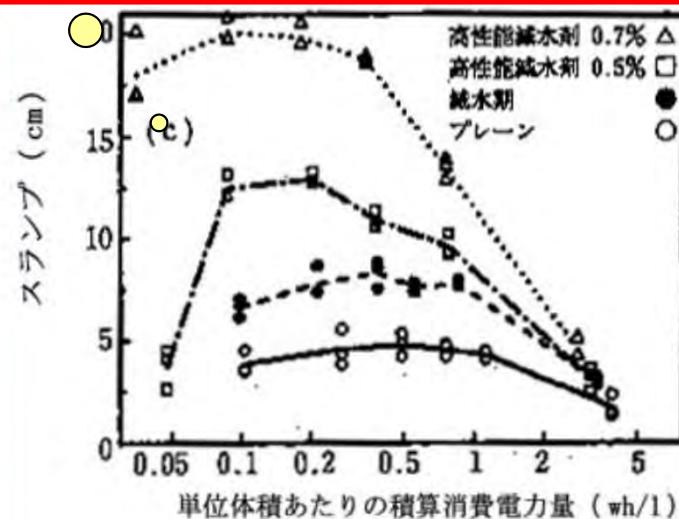
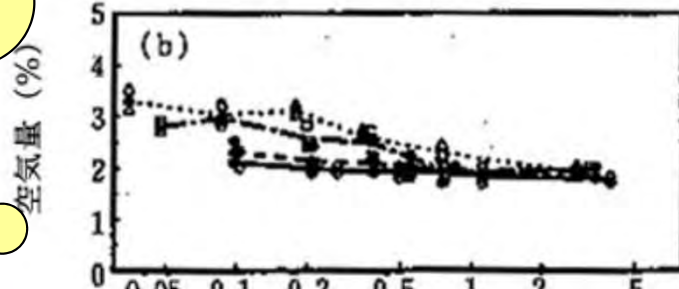
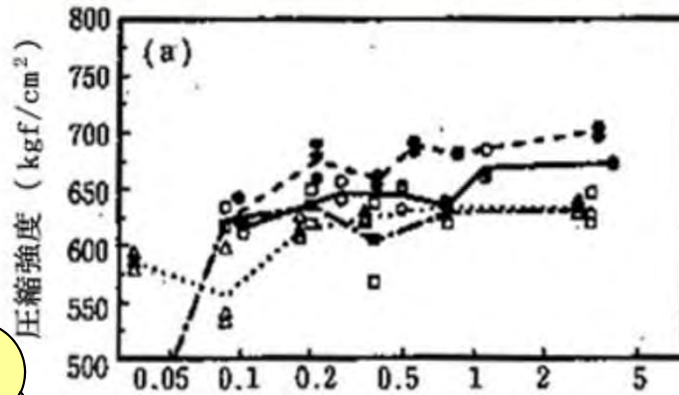
混和剤による
違いはスランプ以
外ではあまり認め
られない。

消費電力量が増
すと

- 強度は増大
- 空気量は減少
- スランプは増大
後減少

混和剤を添加したコンクリートの ミキサ消費電力量と品質特性の関係(水平二軸型ミキサ)

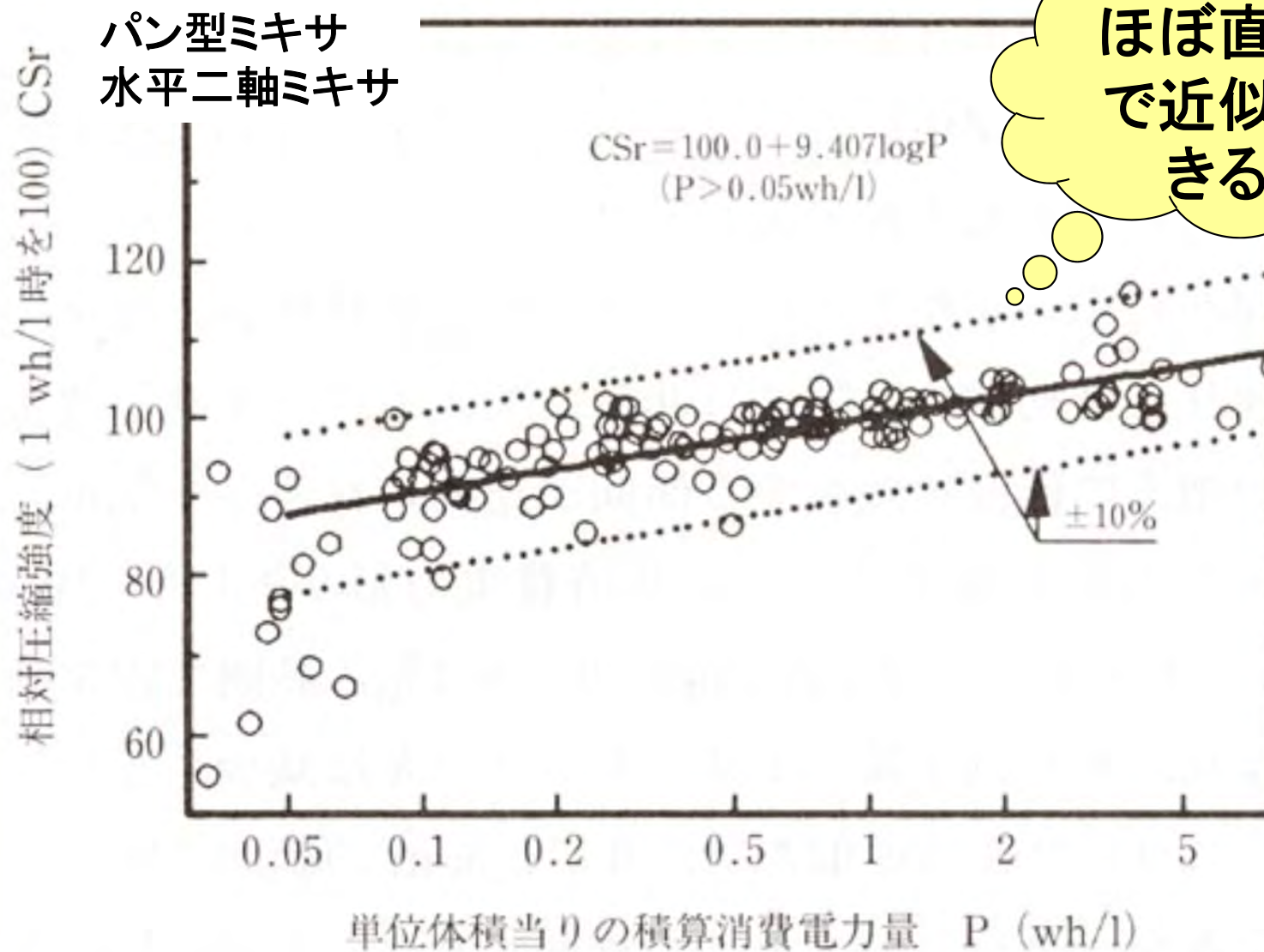
ピーク
は移動



混和剤による
違いはスランプ以
外ではあまり認め
られない。

消費電力量が増
すと
○強度は増大
○空気量は減少
○スランプは増大
後減少

圧縮強度の変化曲線の一般化

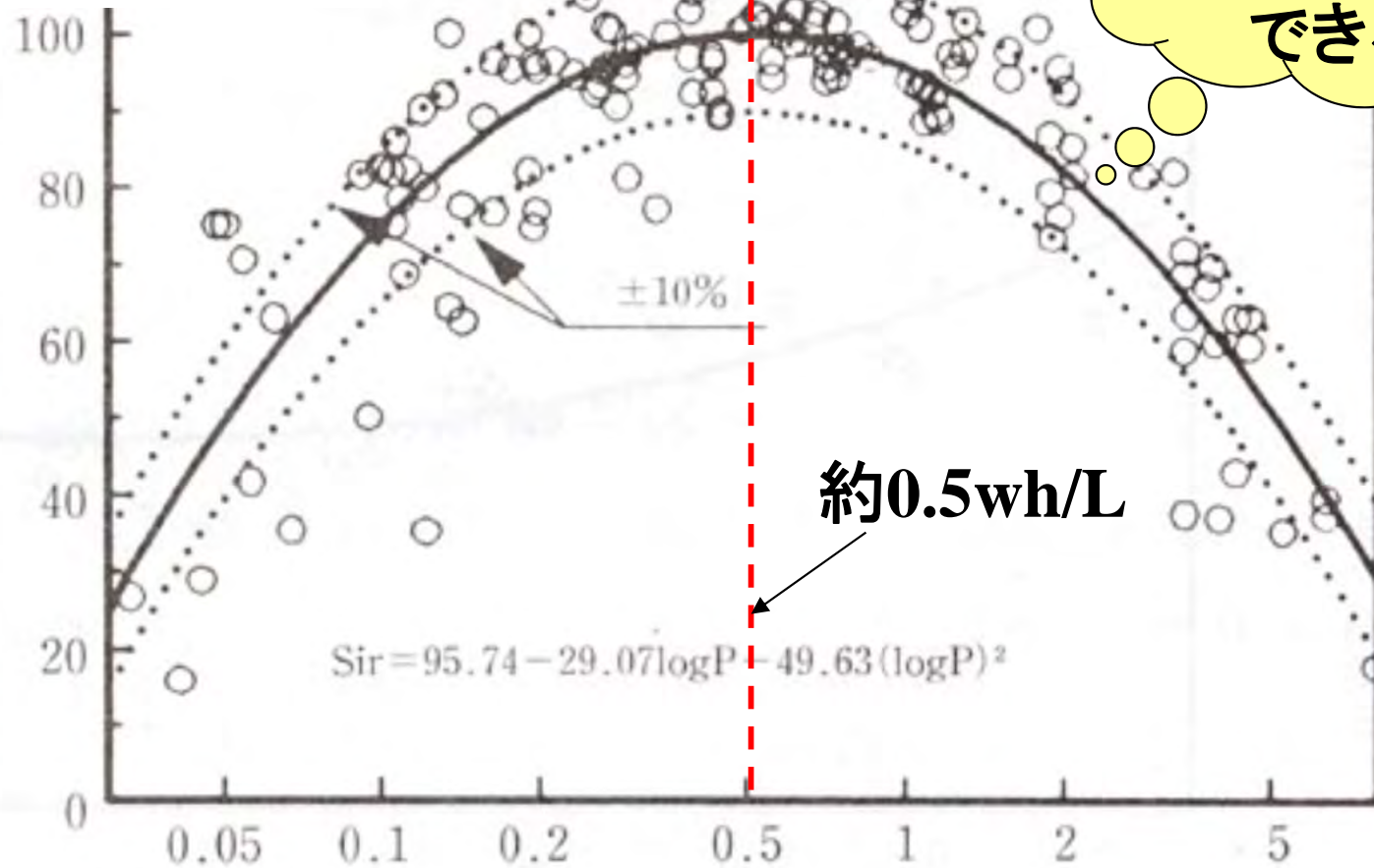


ほぼ直線
で近似で
きる

スランプの変化曲線の一般化

相対スランプ (最大スランプを100) S_{lr}

パン型ミキサ
水平二軸ミキサ

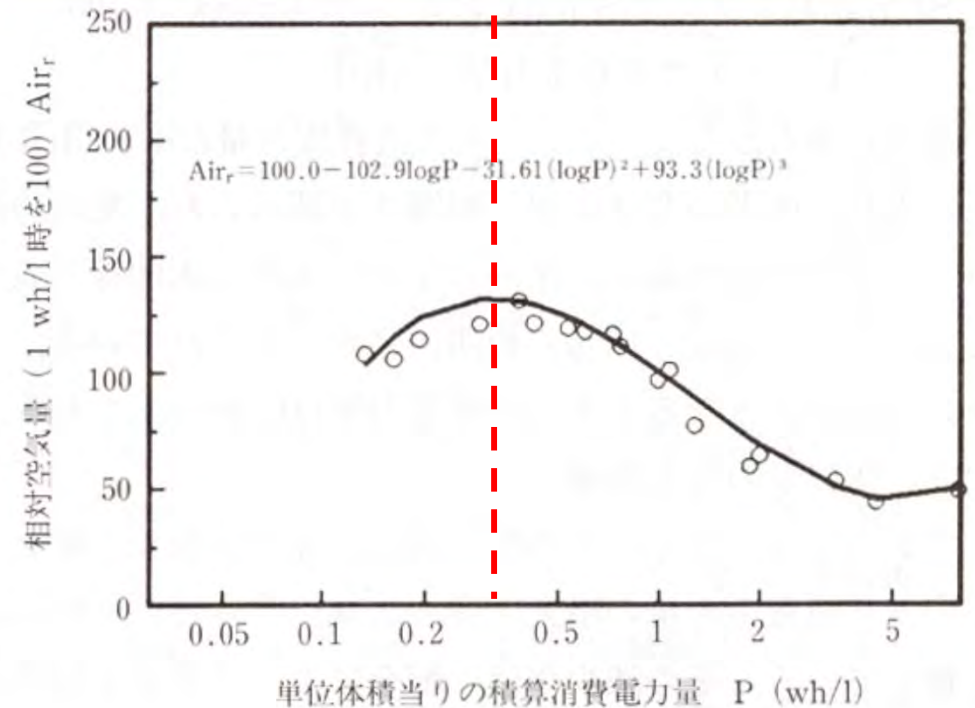
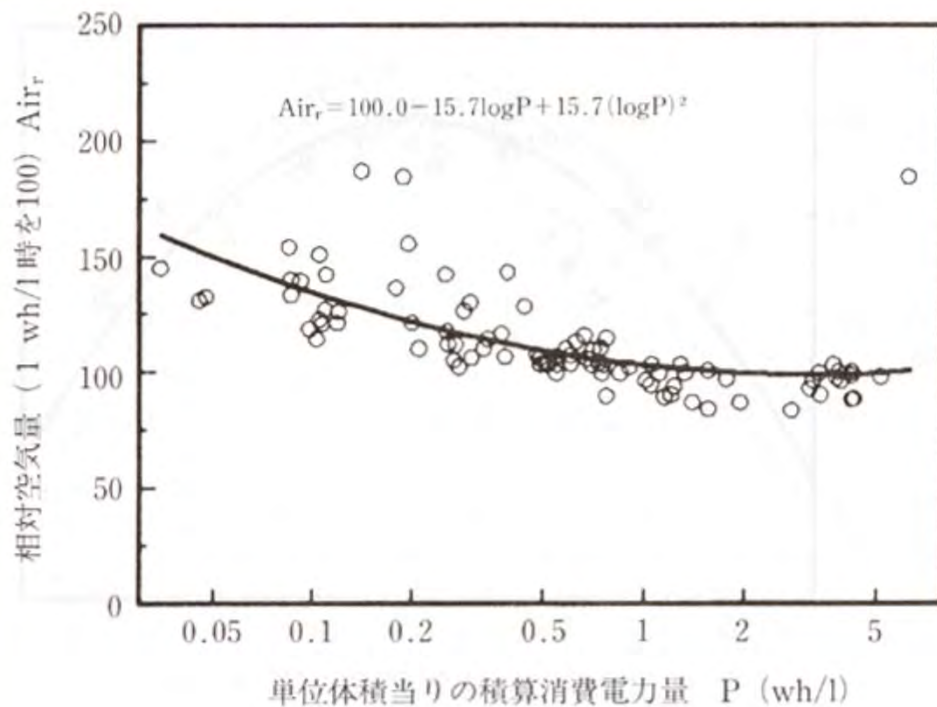


ほぼ放物
線で近似
できる

単位体積当りの積算消費電力量 P (wh/l)

空気量の変化曲線の一般化

パン型ミキサ
水平二軸ミキサ

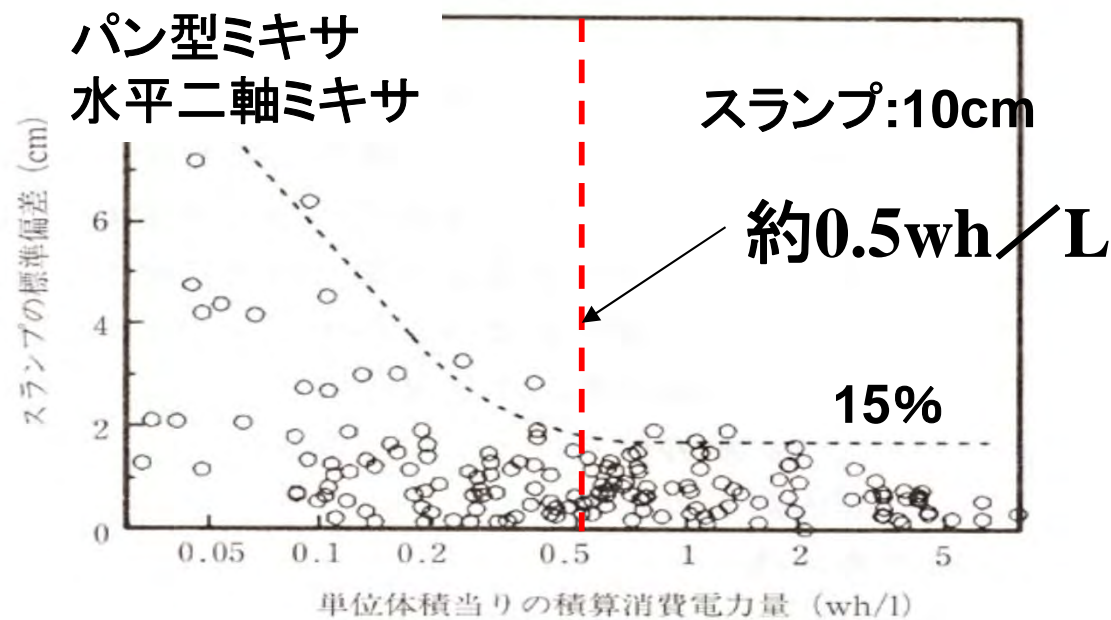
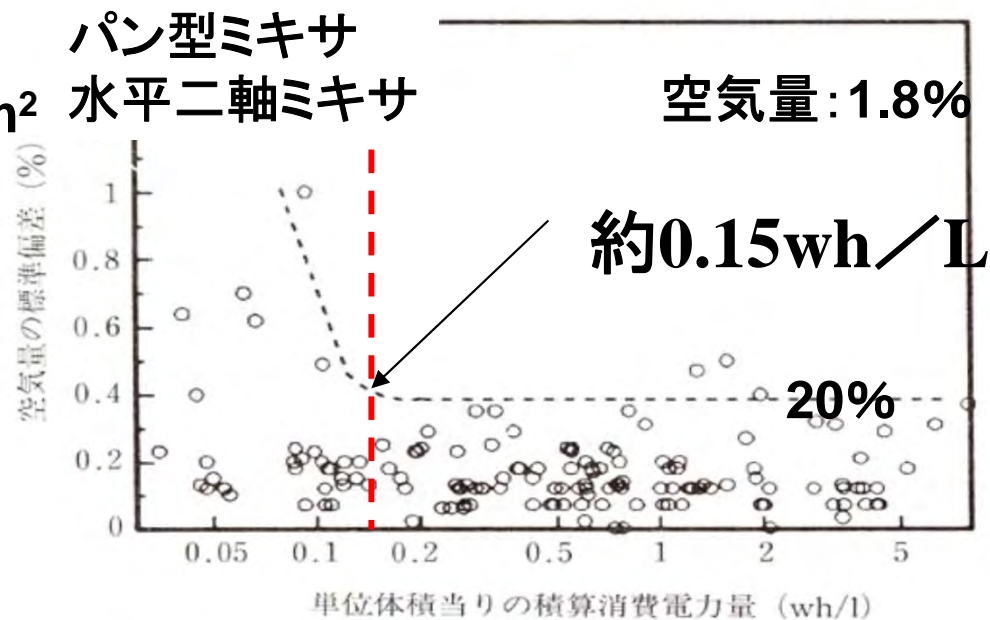
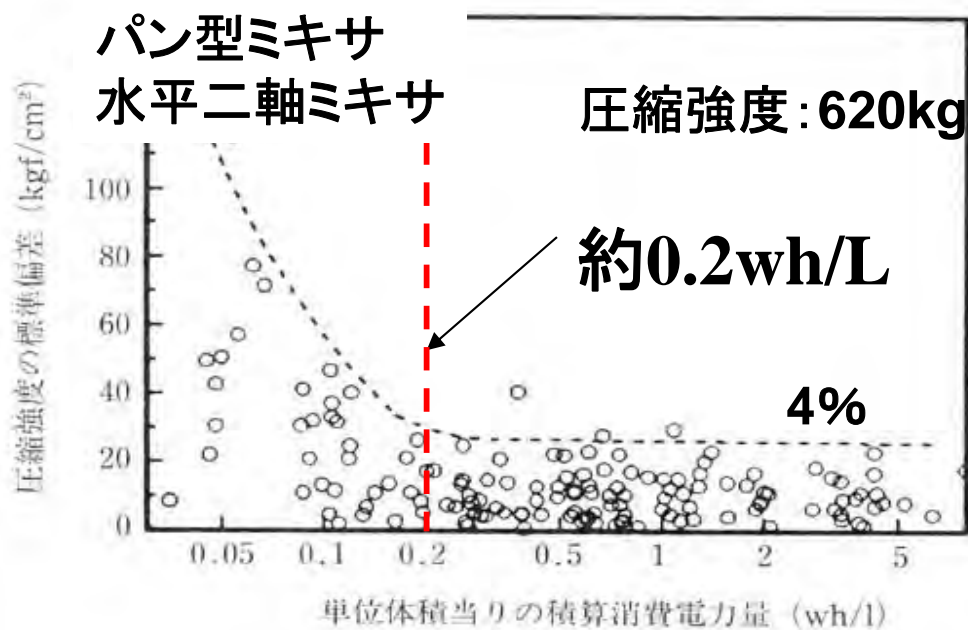


プレーンコンクリート

AEコンクリート

プレーンコンクリートでは練混ぜるほど空気量は減少するが
AEコンクリートでは一度増大した後、減少する。

ミキサ消費電力量とコンクリート品質の標準偏差



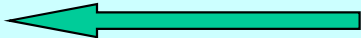
ミキサ消費電力量(対数表示)とコンクリートの品質変化

○パン型ミキサおよび水平二軸ミキサで練混ぜた場合、コンクリートのスランプ、空気量、圧縮強度は単位体積当たりミキサ積算消費電力量(対数表示)で表示できる。

○単位体積当たりミキサ積算消費電力量(対数表示)が増すと

- ・強度はほぼ直線的に増大する。
- ・空気量はプレーンコンクリートでは緩やかな放物線状に減少するが、AEコンクリートでは増大した後減少する。
- ・スランプはほぼ放物線状に増大後減少する。

○コンクリートの品質が定常になるのは

- ・スランプでは約0.5wh/L 
- ・空気量では約0.15wh/L(プレーン)で、AEコンクリートでは約0.2wh/L
- ・強度では約0.2wh/L

練混ぜ時の ミキサ寸法は どう影響する？

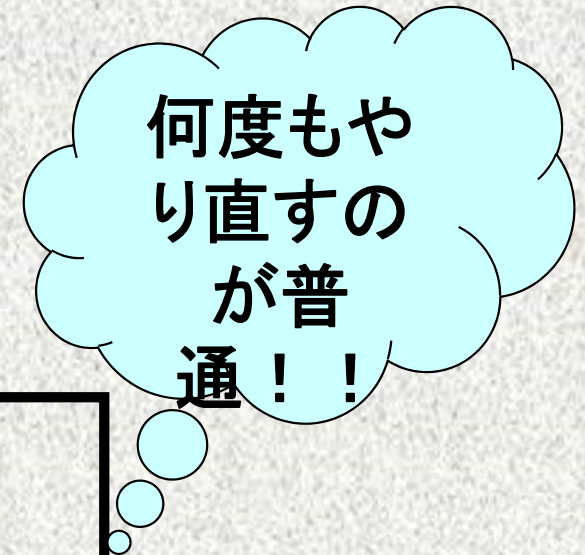
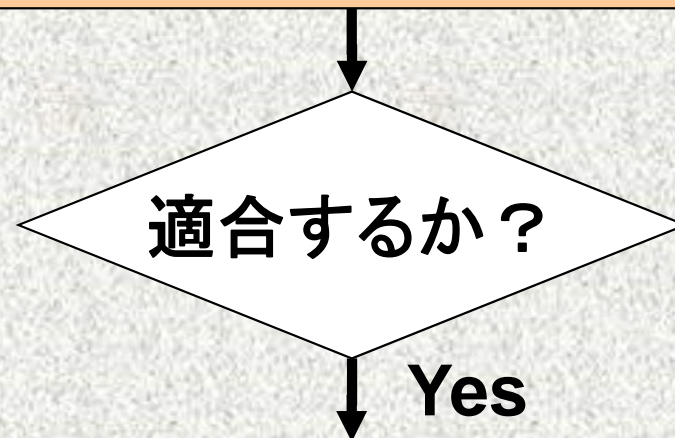
疑問！
小型ミキサによる
試し練りは意味があるのか？

試し練りは本当に役立つか？

実験室で行う試し練りで
コンクリートの示法配合を
決めているが？

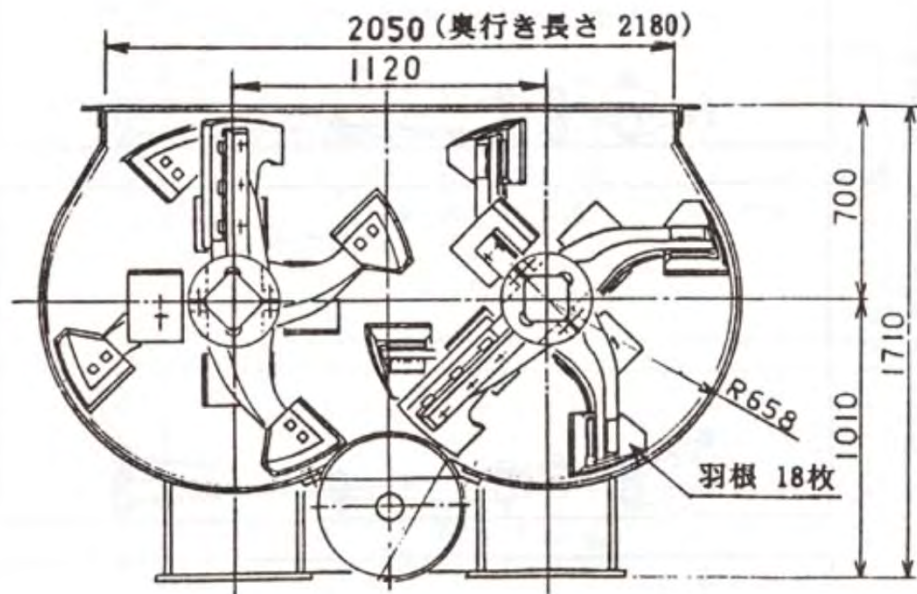


実際のプラントで練ると
違った品質のコンクリート



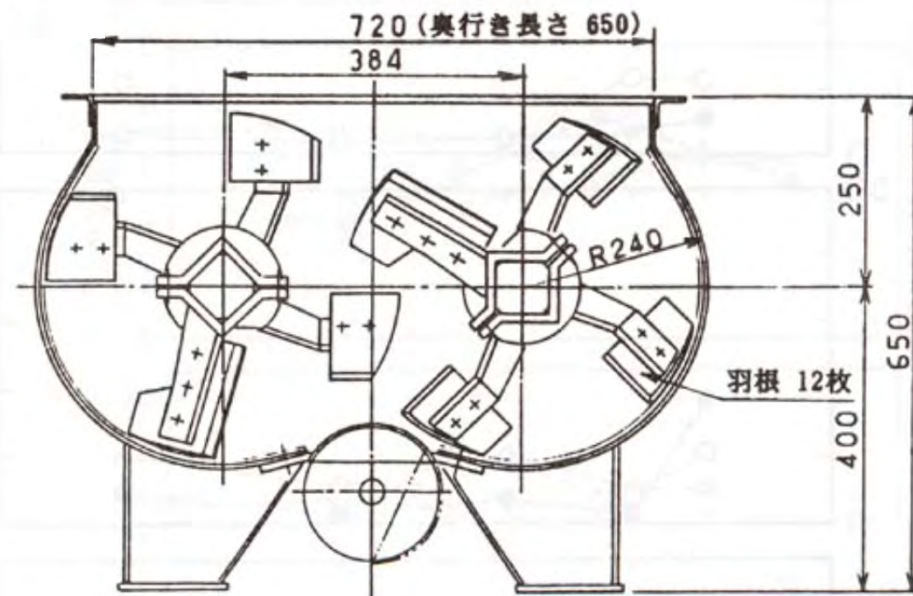
END

実験に使用した大型および小型水平二軸ミキサ



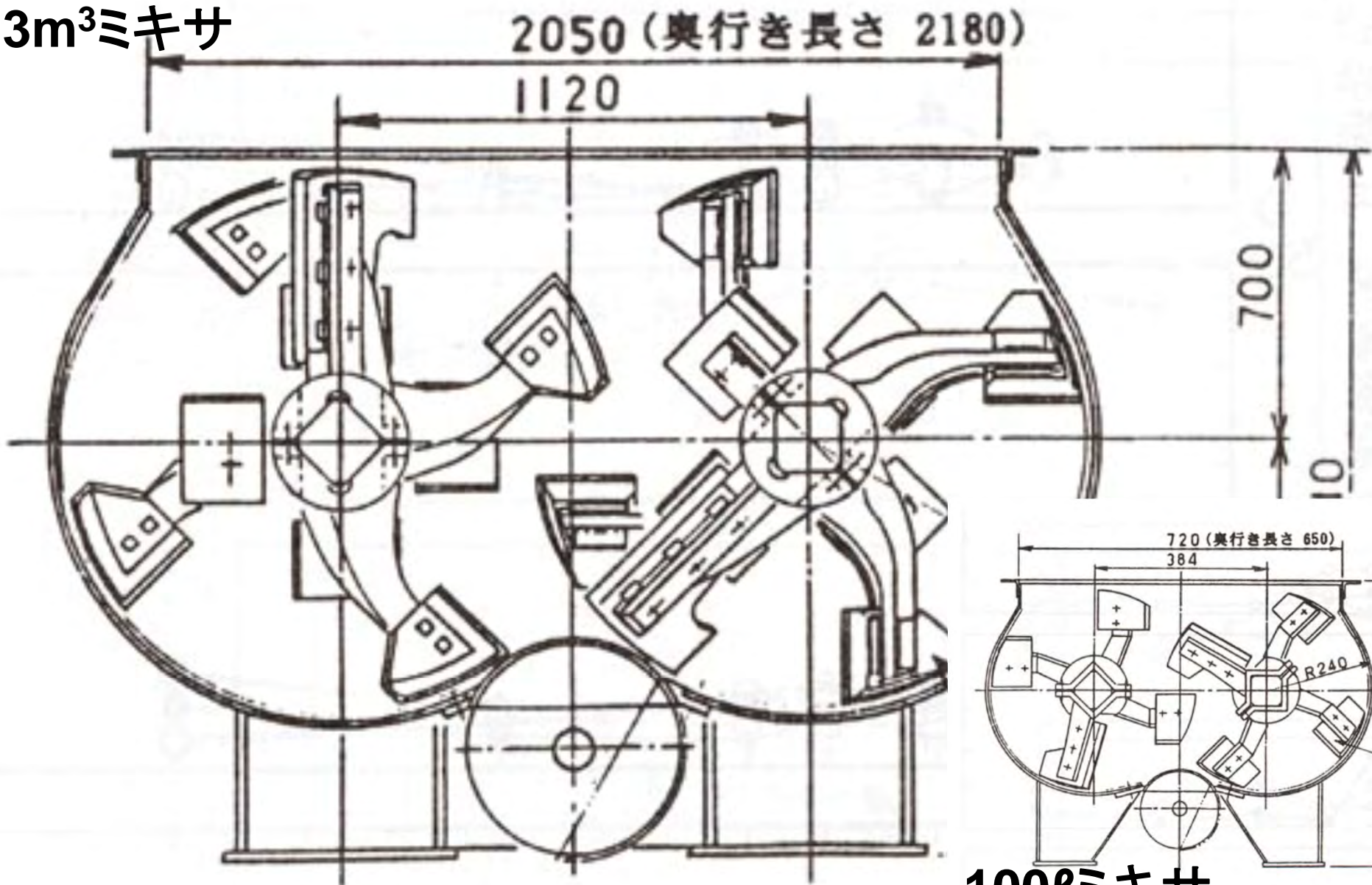
3m³大型ミキサ
(実際のコンクリート
はこちらで製造)

100ℓ小型ミキサ
(配合決定時)



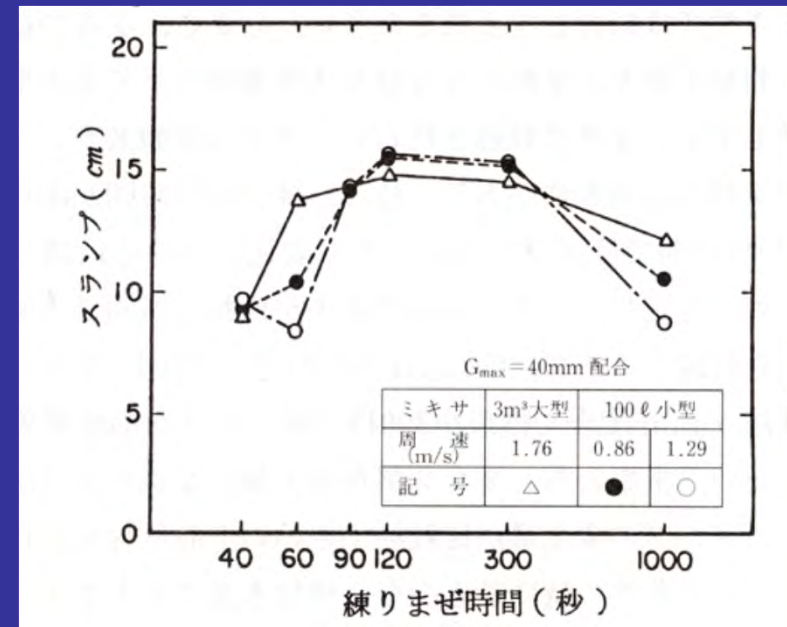
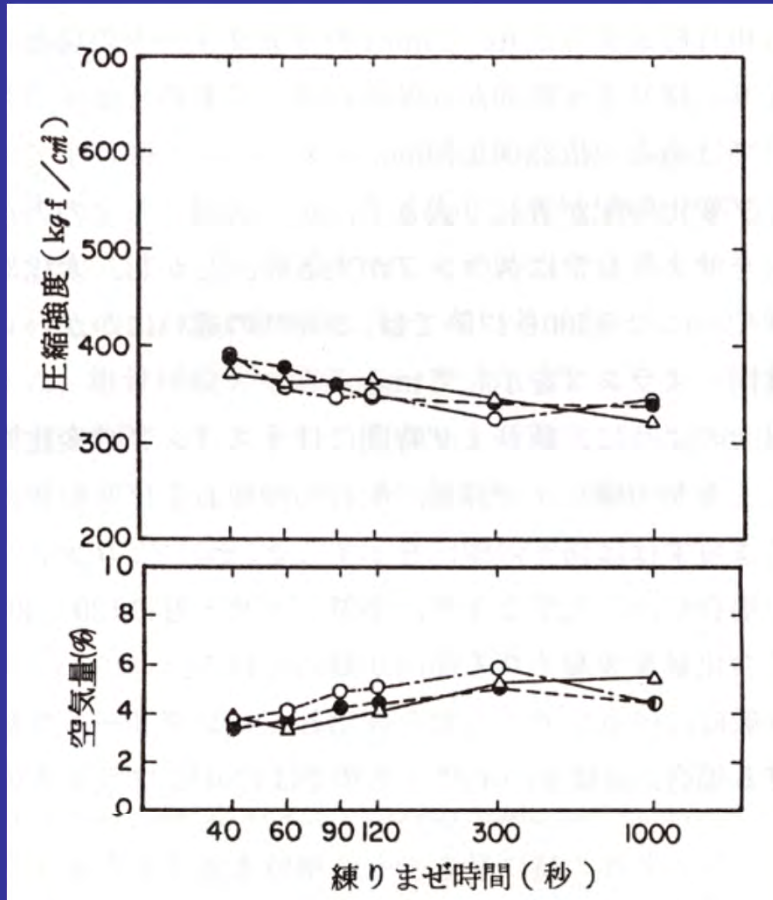
実験に使用した大型および小型水平二軸ミキサ

3m³ミキサ



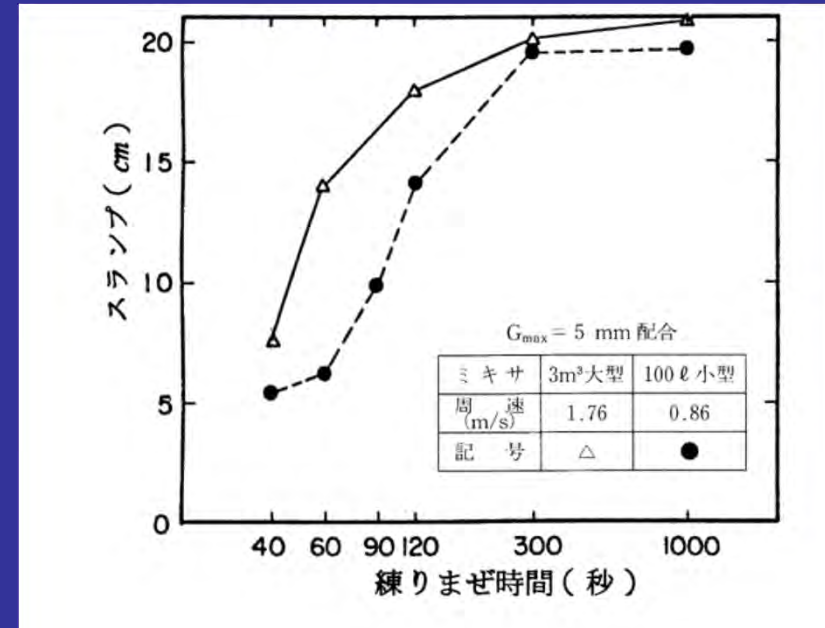
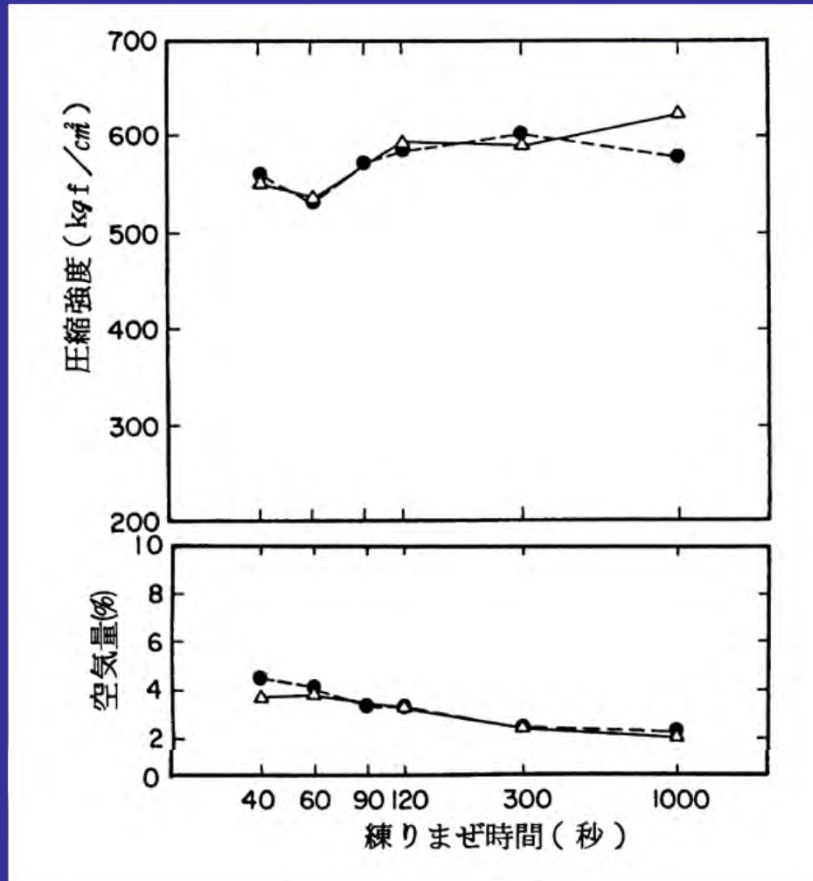
100ℓミキサ

練りませ時間に伴う品質特性値の変化 (Gmax=40mm)



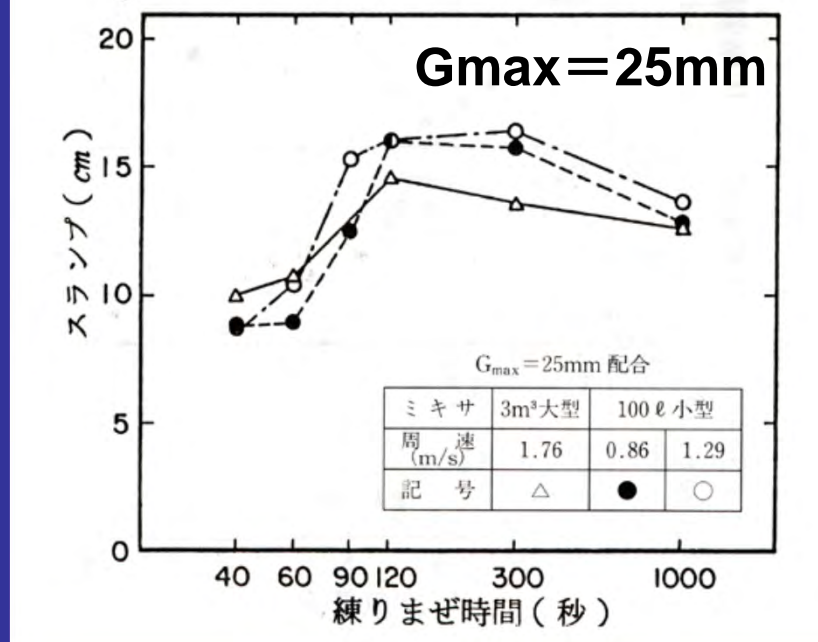
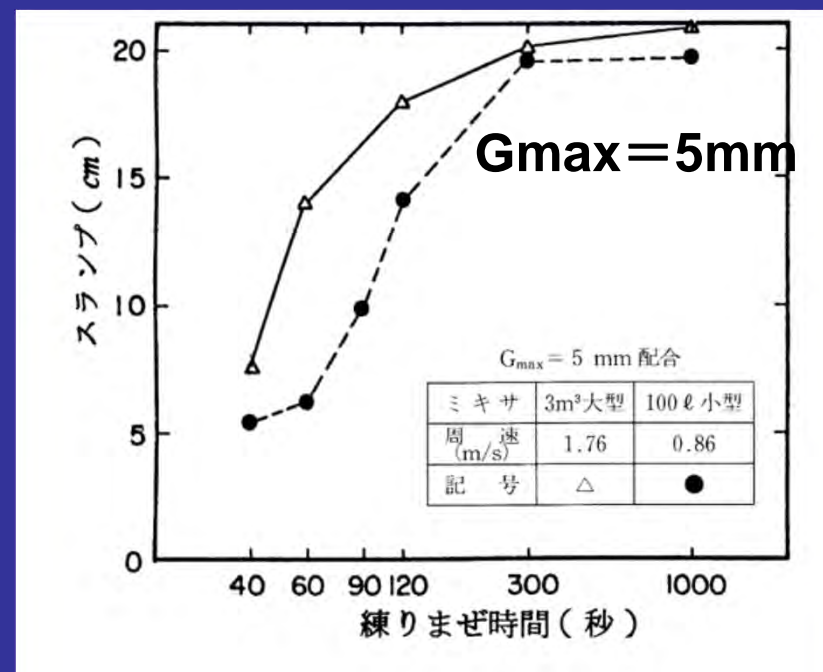
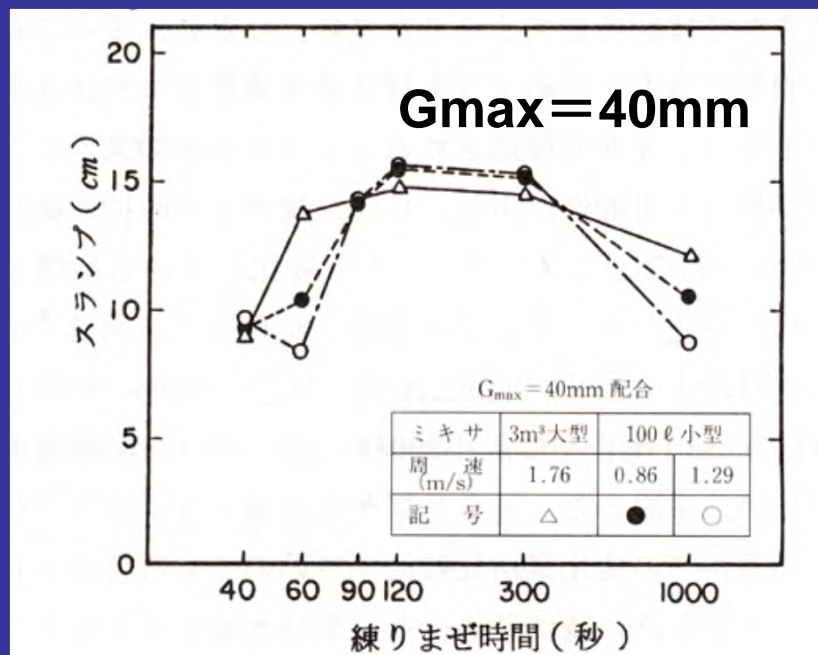
圧縮強度と空気量は
同じ練りませ時間であ
れば変わらない。しかし
スランプは異なる。

練りませ時間に伴う品質特性値の変化 (Gmax=5mm)



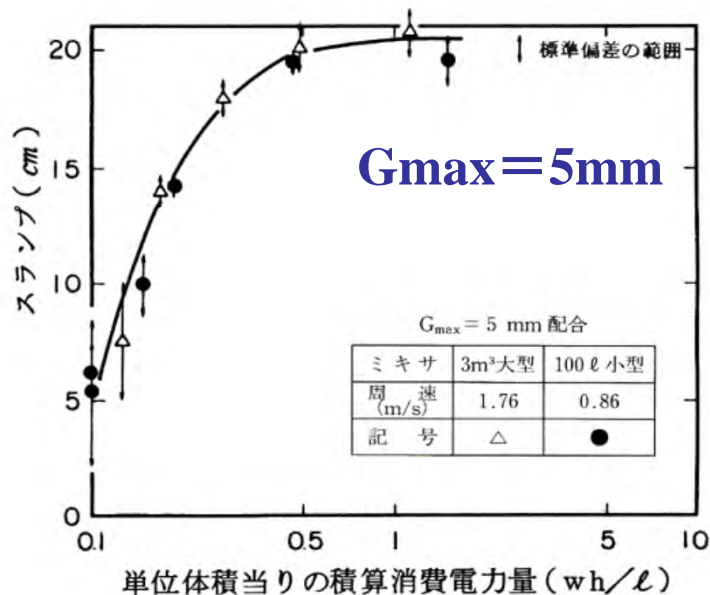
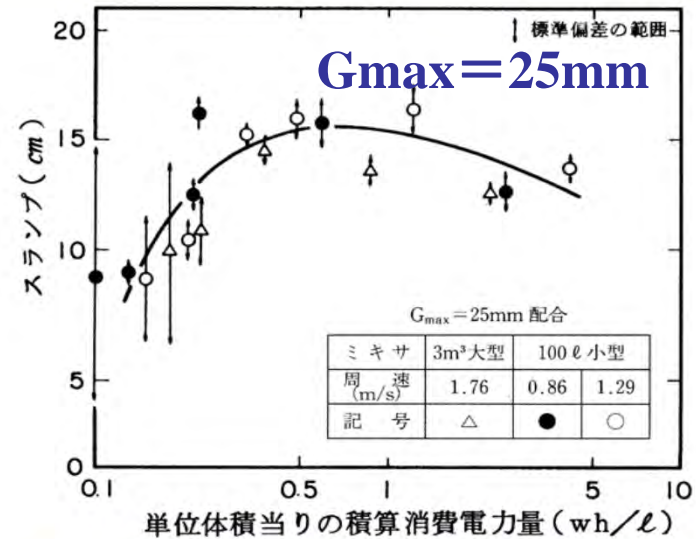
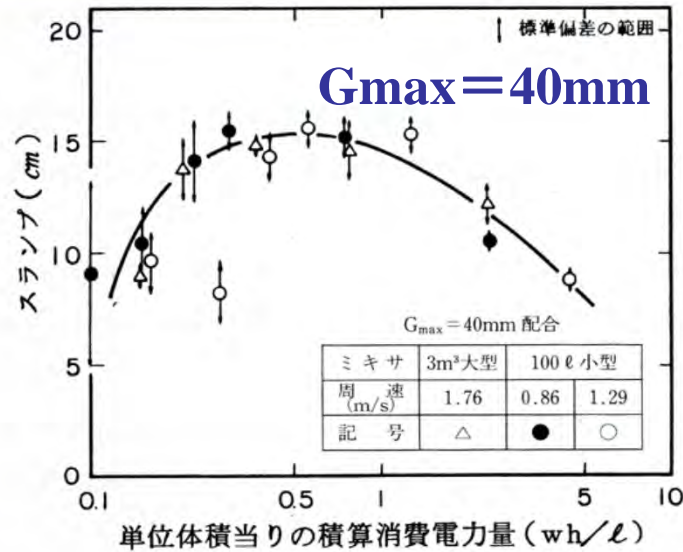
圧縮強度と空気量は同じ練りませ時間であれば変わらない。しかしスランプは大きく異なる。

練りませ時間に伴うスランプの変化 ($G_{max}=5\text{mm}\sim 40\text{mm}$)



スランプは最大骨材寸法が小さいほどミキサによる違いが大きくなる。

単位体積当りの積算消費電力量 とスランプの関係($G_{max}=5-40mm$)



小型および大型ミキサの場合も単位体積当り積算電力量を指標とすれば、同じスランプのコンクリートとなる。

大型ミキサと小型ミキサの違い

○大型ミキサと小型ミキサでは形式が同じで、同一練混ぜ時間の場合、コンクリートの空気量と圧縮強度はほぼ等しい。

○大型ミキサと小型ミキサでは形式が同じであっても、同一練混ぜ時間の場合、同じスランプのコンクリートとはならない。特に粗骨材の最大寸法が小さいとその違いは大きい。

○単位体積当たりミキサ積算消費電力量(対数表示)で表示すると大型ミキサと小型ミキサで練ったコンクリートスランプは同じ曲線状に載る。

○**小型ミキサで試し練りを行う場合**、大型ミキサで得られるコンクリートのスランプを推定するためには**大型ミキサと同じ単位体積当たりミキサ積算消費電力量で行うことが必要**である。

コンクリートの品質 と 分割練混ぜ

樋口先生の提案された
SEC工法

スラグ粉末に水を加えた場合の外観



(a)水スラグ比 0%



(b)水スラグ比 8%



(c)水スラグ比 20%

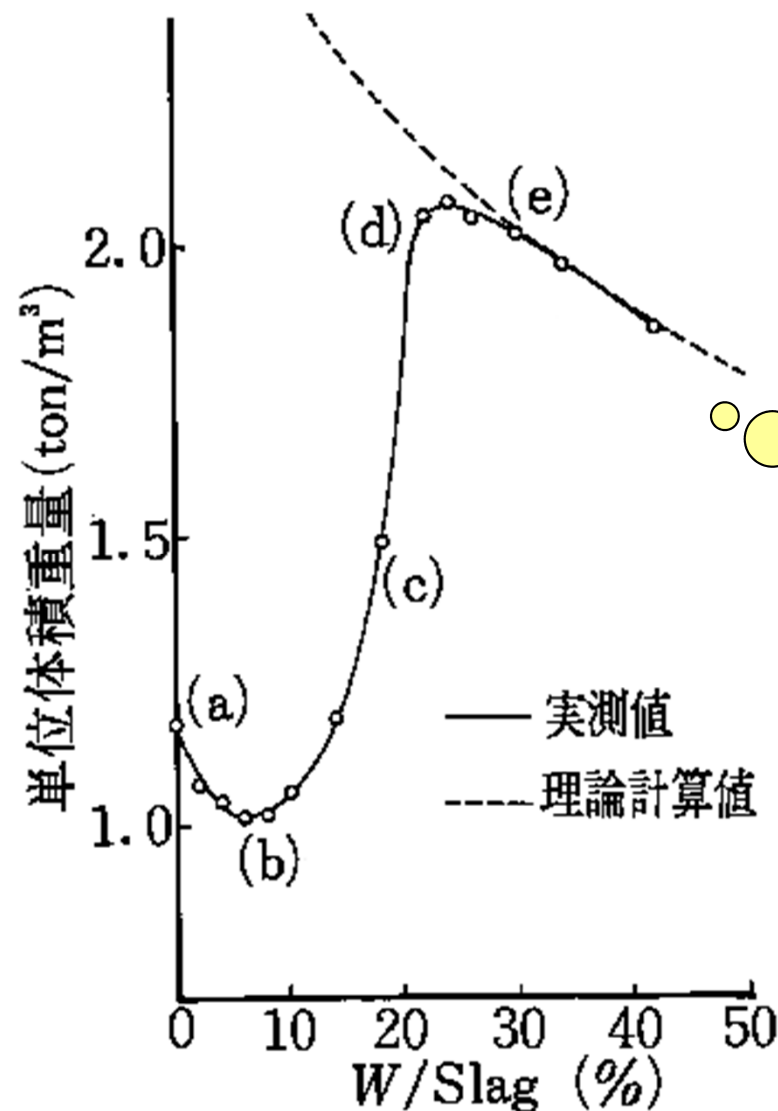


(d)水スラグ比 24%



(e)水スラグ比 28%

スラグ粉末を用いた場合のペーストの 単位体積質量と水スラグ比との関係



水スラグ比が
28%程度以
上で理論値と
一致する

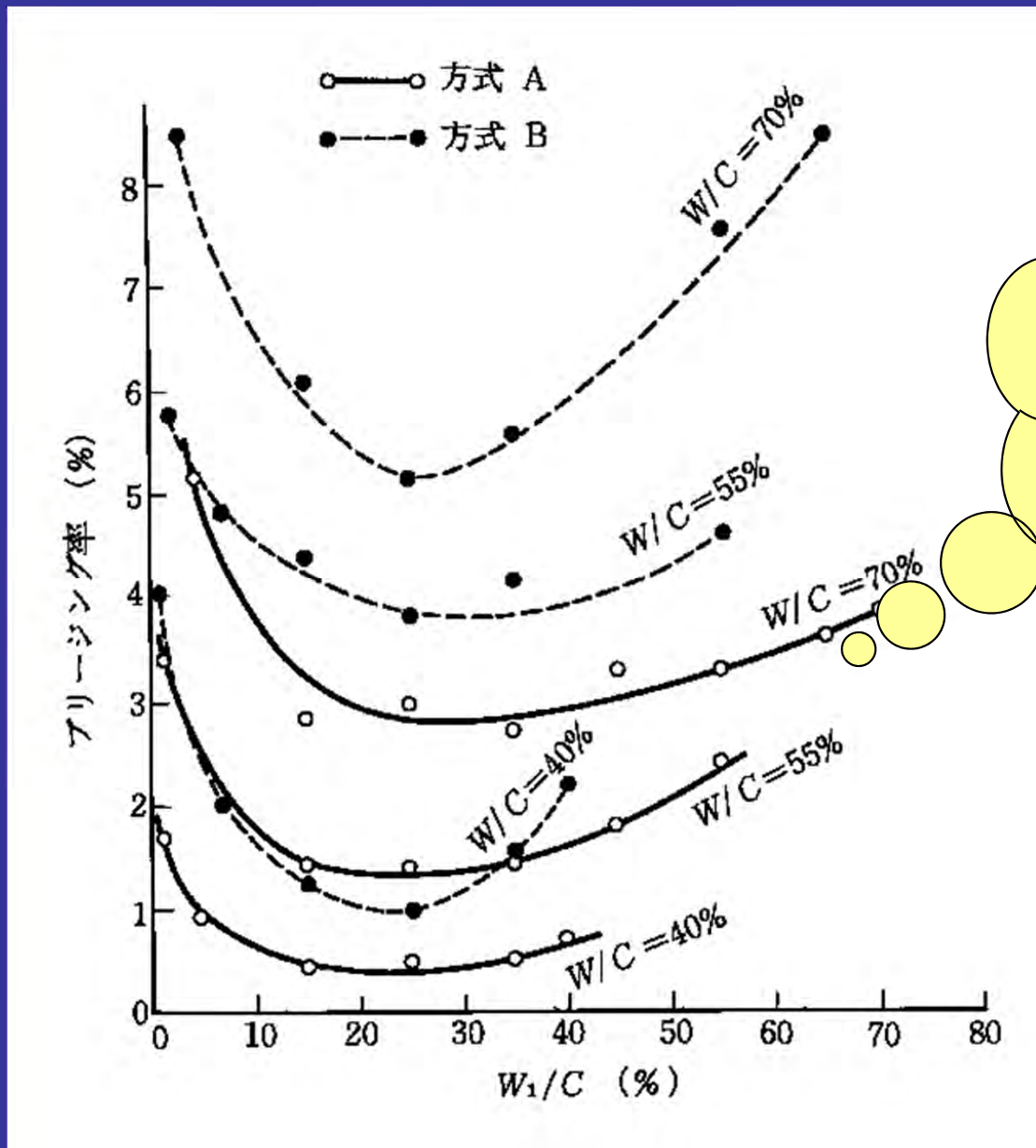
方式Aおよび方式Bによる分割練混ぜ方法

方式	投入順序および練混ぜ時間	全練混ぜ時間
A	<p>投入順序: S, G, W₁, C, W₂</p> <p>練混ぜ時間: 15秒 1分 1分 2分</p>	4分15秒
B	<p>投入順序: S, G, C, W₁, W₂</p> <p>練混ぜ時間: 15秒 2分 2分</p>	4分15秒

(注) (S) : 細骨材 (G) : 粗骨材 (C) : セメント

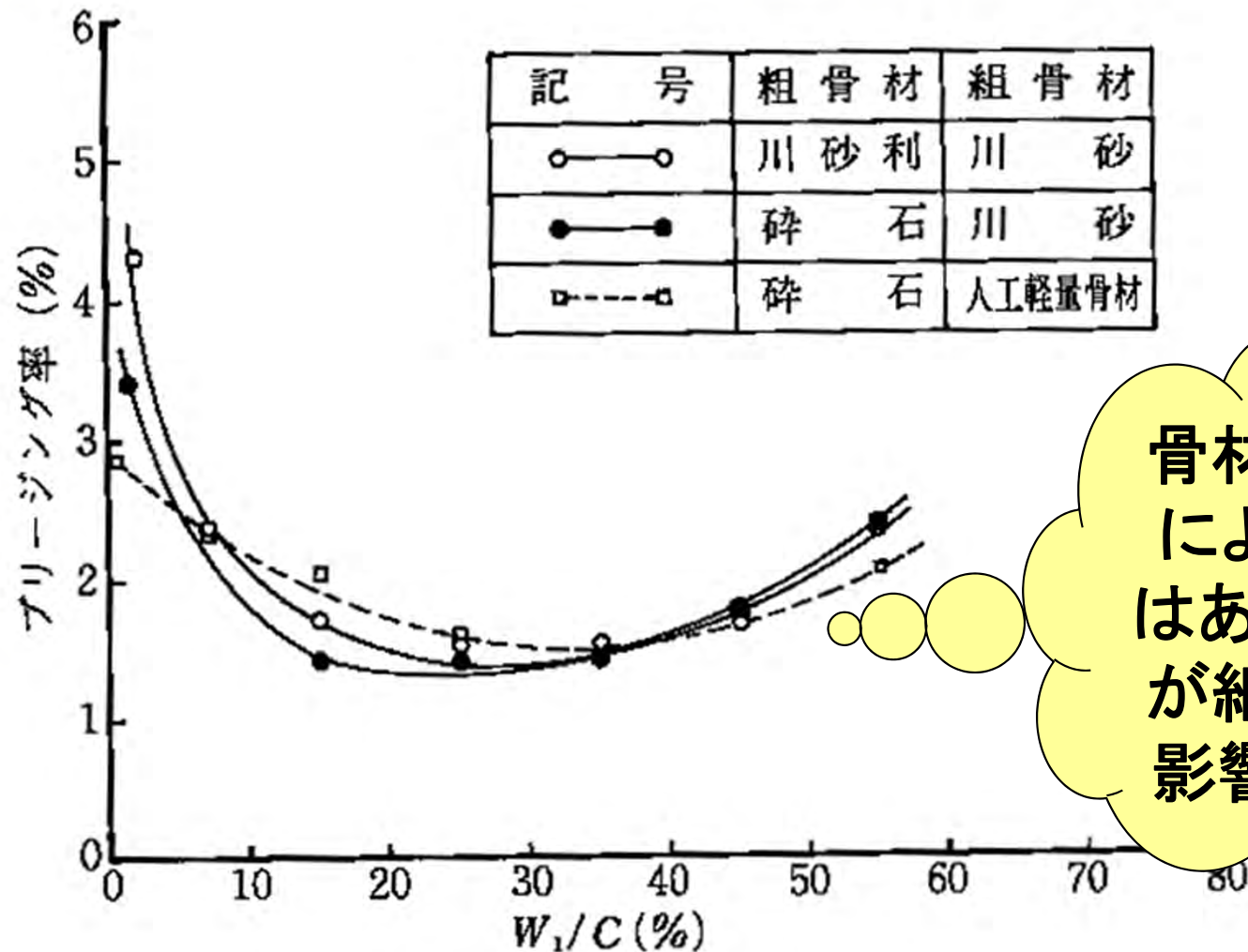
(W₁) : 一次水 (W₂) : 二次水

分割方式(方式Aおよび方式B)を用いた場合の ブリーディング率と一次水セメント比との関係



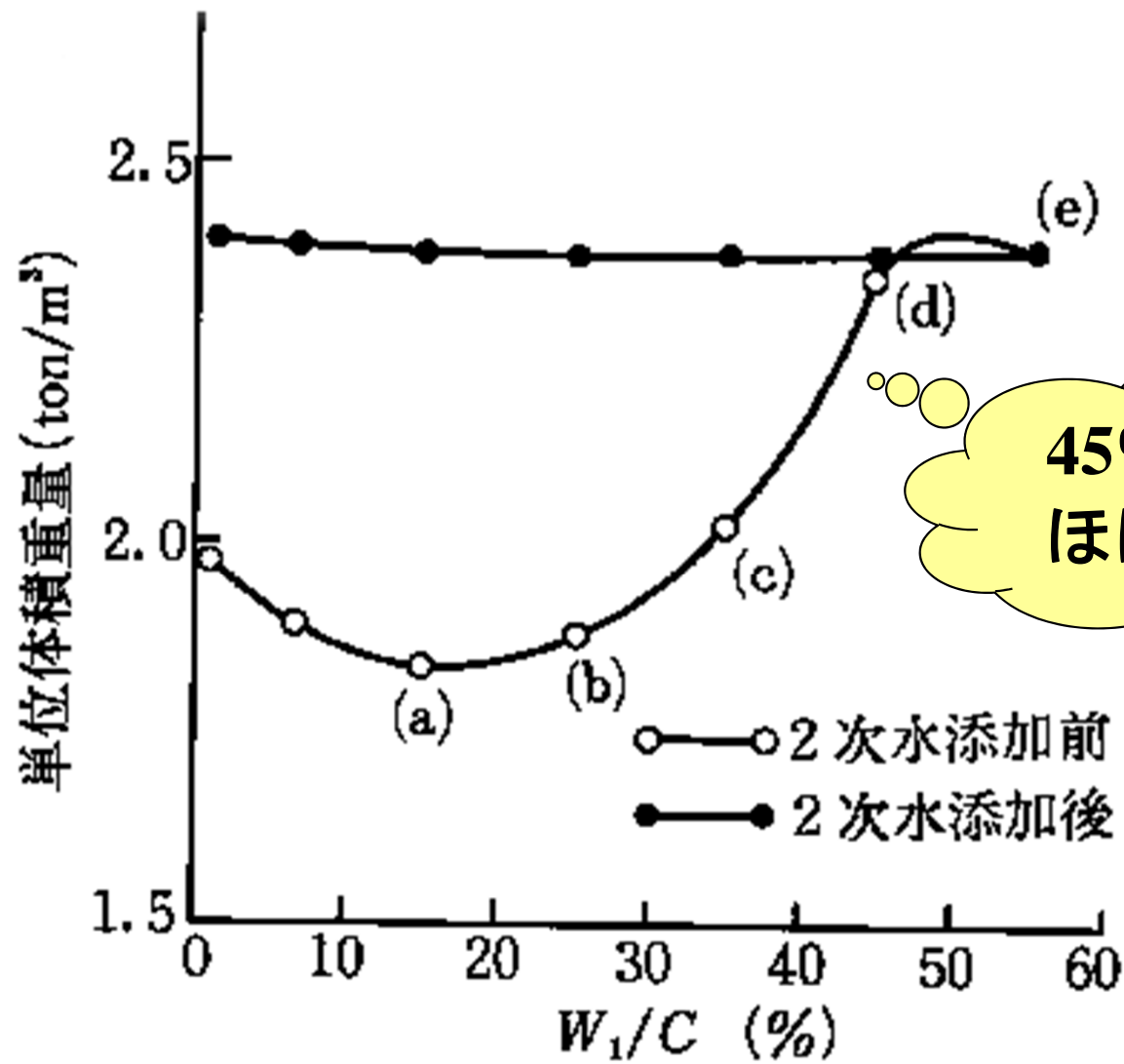
方式A(セメントを入れる前に練混ぜる)の方がブリーディングは少ない

ブリーディング率と一次水セメント比との関係に及ぼす 使用骨材の影響

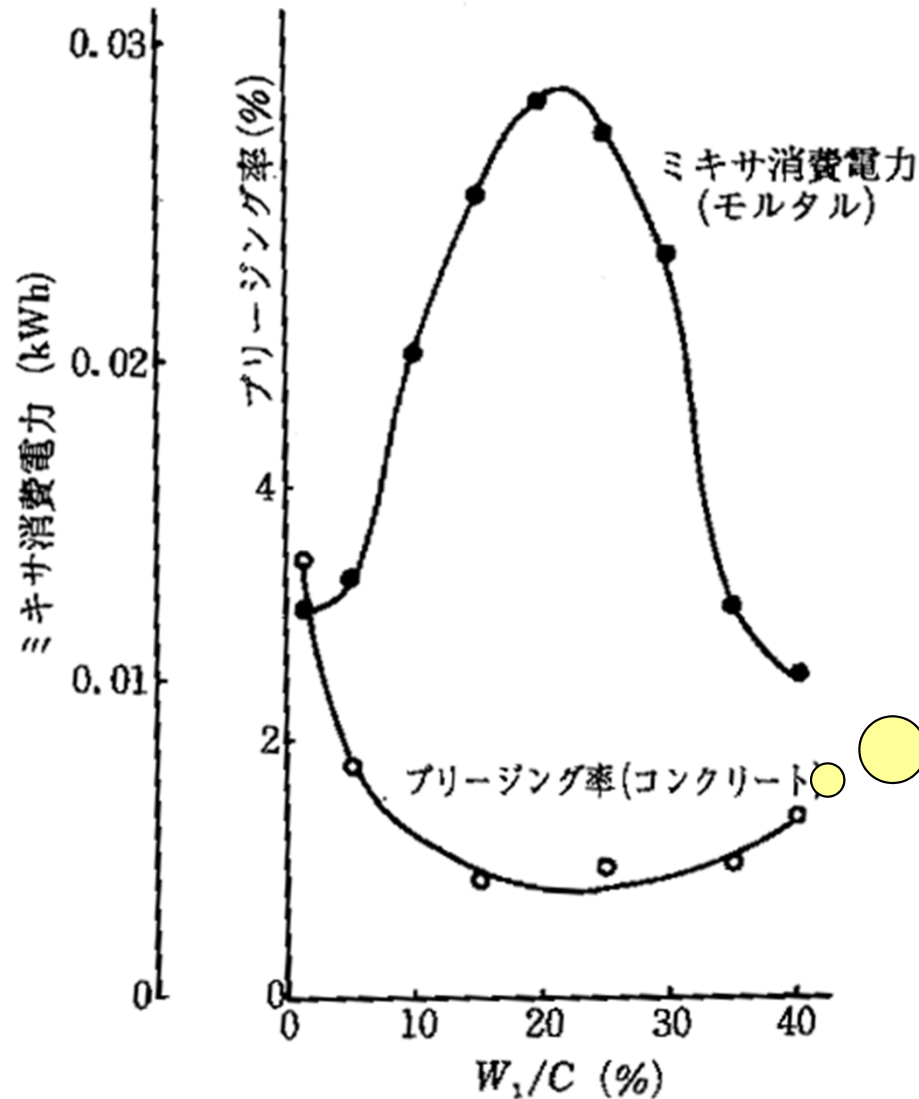


骨材の種類
による違い
はあまりない
が細骨材の
影響を受ける

コンクリートの一次水セメント比と単位体積質量との関係



一次水セメント比とブリーディングおよびモルタルの ミキサ消費電力との関係



モルタルのミキサ消費電力最大時にブリーディングが少ない

分割練混ぜによるコンクリート品質の変化

○コンクリートを練混ぜる場合、構成材料を一度にミキサに投入して練混ぜるとフリージングが多くなる。

○コンクリート構成材料のうち、水を分割添加して練混ぜを行うと水の分離が抑えられ、フリージングの少ないコンクリートとなる。

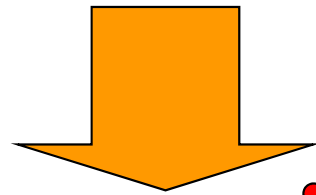
○分割練混ぜによりフリージングが最小となるのは一次水セメント比で約20%程度であるが、その条件ではミキサ消費電力がほぼ最大となる。

○分割練混ぜによる強度への影響は、ほとんどないがスランプは若干減少する。

ま と め

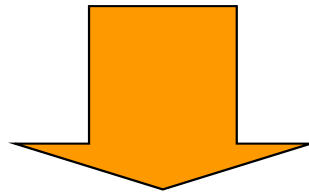
コンクリート研究の面白さ

限られた範囲の中でコンクリートは使用されており、何か問題が発生すると、その対策を考えるという方法が採用されている。



意図的にまたは間違えて従来行われている方法以外で製造、施工を行うと、想像を超える現象が現れることがある。

完成された工学とはいえない！

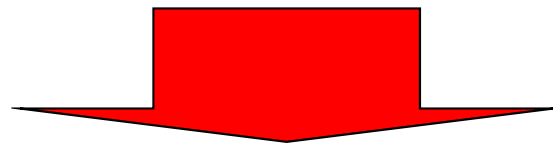


なぜこのような現象が現れるかを解明することは技術者としても研究者としても非常に面白く、飽きることはない。

コンクリート品質の研究と他分野の研究

練り混ぜの手法は食品や工業製品を製造する多くの分野で研究・活用されている。

特に、チョコレートの製造やインキの製造などの分野で重要な役割を果たしているが、いずれの場合も経験則が重要な役割を果たしている。

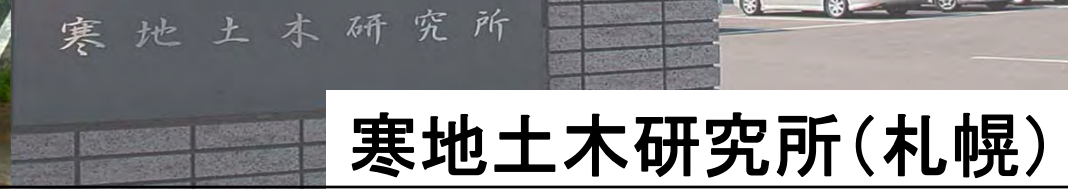


他の分野で行われている研究はコンクリート分野でも参考になる。

これからも
土木研究所を
よろしく！



独立行政法人
土木研究所(つくば)



寒地土木研究所(札幌)