九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

暑中環境下で製造されるコンクリートの温度推定式に関する研究 ： 推定式中の係数βに影響を及ぼす要因

米谷，裕希
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻修士課程

小山，智幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

小山田，英弘
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 | 北九州市立大学

伊藤，是清
東海大学

他

https://doi.org/10.15017/26781

出版情報：都市・建築学研究. 22, pp.161-166, 2012-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第22号，2012年7月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.22, pp.161～166, July. 2012

暑中環境下で製造されるコンクリートの温度推定式に関する研究
― 推定式中の係数βに影響を及ぼす要因 ―

The Equation Estimating Temperature of Concrete mixed in hot weather
― Primary Factors affecting Coefficient β in the Equation ―

米谷裕希*1，小山智幸*2，小山田英弘*3，伊藤是清*4，原田志津男*5，黒田泰弘*6
Yuki YONETANI, Tomoyuki KOYAMA, Hidehiro KOYAMADA, Korekiyo ITO, Shizuo HARADA and Yasuhiro KURODA

The formula to estimate the concrete temperature from mixing to placing on hot weather concreting is shown in JASS 5. Although the coefficient β in the formula is requested to be measured at every mix proportion on each ready-mixed concrete plant, there is a few data. In this study, experiments were carried out at the ready-mixed concrete plants in Fukuoka, Kumamoto and Miyakonojo comparing the type and capacity of the mixer, mix proportion of concrete, season, etc. Therefore, the β was mainly affected by the mixing period, and was about 2.0 to 2.5℃ at ordinary-type concrete mixed in about 40 seconds.

Keywords *: Hot Weather Concrete, Estimated Formula for Concrete-Placing Temperature, Real Size Experiment, Coefficient β*
暑中コンクリート，温度推定式，実機実験，係数β

1．序

暑中環境下で製造，運搬されるコンクリートは，主として高い外気温の影響でコンクリートの温度が高くなるため，初期の水和反応が促進され，スランプロスが大きくなる，コールドジョイントが生じやすくなる，初期ひび割れが生じやすくなるといった不具合を生じる．また長期にわたる硬化体組織の密実性の向上が通常期のコンクリートと比較して鈍化するため，長期強度の増進が少なくなる，耐久性が低下するなどの問題が生じる[1)2)]．

このように暑中コンクリート工事における種々の「わるさ」は，主としてコンクリート温度が高いことに端を発することから，日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説5鉄筋コンクリート工事（以下JASS 5）[1)]や暑中コンクリートの施工指針・同解説[2)]では荷卸し時のコンクリート温度の上限値を35℃とするよう規定している．また上記仕様書・指針ではこの温度を満足するよう，輸送中のコンクリートの温度上昇を考慮して練上がり温度を定めることとしている．JASS 5解説（指針では4.3.b本文）には，その際に用いることのできる，コンクリート温度の推定式が示されている．同式には，係数α，βが含まれ，αは外気とコンクリートとの間の熱の伝達のしやすさを表す係数，βはセメントの水和熱および材料間の摩擦熱などによる温度上昇量を表している．両者については実験室レベルで多くの検討が行われ[3)]，その値が示されているが，実機レベルでの測定は少なく，JASS 5解説に示される沖縄県のレディーミクストコンクリート工場での実測（**表 1**）や，船本ら[4)]の実験は貴重な例である．

本研究は，温度推定式の係数βについて，実機レディ

表 1　α，βの実測例（JASS 5解説表より抜粋）

W/C(%)	スランプ(cm)	単位セメント量(kg/m³)	α	β
61	18	306	0.4	1.8
61	15	296	1.0	2.7
49	12	372	0.5	3.0
43	15	394	1.8	3.4

*1 空間システム専攻修士課程　*2 都市・建築学部門
*3 北九州市立大学　*4 東海大学　*5 都城工業高等専門学校
*6 清水建設(株)

ーミクストコンクリートで練混ぜを行って，これらの値やこれらに及ぼす種々の影響要因の検討を行ったものである．

2．コンクリート温度の推定式

式(1)に示すコンクリートの温度推定式は，練上がり後，トラックアジテータなどで運搬されるコンクリート温度の単位時間当たりの変化量が，外気温とコンクリート温度との差に比例すると仮定して求めたものである[3]．

$$\theta(t)=(\theta_0-\theta_r+\beta)\cdot\exp(-\alpha t)+\theta_r \qquad (1)$$

ここに，

$\theta(t)$：時刻 t におけるコンクリート温度(℃)

θ_0：式(2)で求められる温度(℃)

θ_r：レディーミクストコンクリート出荷時の外気温(℃)

α：外気とコンクリートとの熱の伝達の割合を表す係数(1/時間)

β：セメントの水和熱および材料間の摩擦熱による温度上昇量(℃)

t：運搬時間(時間)

$$\theta_0=\frac{\alpha_c\theta_cW_c+\alpha_a\theta_aW_a+\alpha_m\theta_mW_m}{\alpha_cW_c+\alpha_aW_a+\alpha_mW_m} \qquad (2)$$

ここに，

α_c, θ_c, W_c：セメントの比熱(0.836kJ/kg･K)，温度(℃)，質量(kg)

α_a, θ_a, W_a：式(3)で算出される含水状態での骨材の比熱(kJ/kg･K)，温度(℃)，骨材の質量(kg)

α_m, θ_m, W_m：水の比熱(4.18kJ/kg･K)，温度(℃)，質量(kg)

$$\alpha_a=\frac{\alpha_{a0}\alpha_m\mu_a+\alpha_m f_a(1+\mu_a)}{(1+f_a)(1+\mu_a)} \qquad (3)$$

ここに，

α_{a0}：絶乾状態の骨材の比熱(0.836kJ/kg･K)

μ_a：骨材の吸水率(%)×1/100

f_a：骨材の表面水率(%)×1/100

外気温 θ_r は，「実際には直射日光やアジテータ車の発生熱により外気温よりも一般的に高くなっており，とくに晴天時にコンクリートを輸送する場合は，θ_r は外気温よりも高い値を使用する必要がある」[1)2)]．

また，練上がり温度は，**式**(1)において輸送時間 t=0 として，$\theta(0)=\theta_0+\beta$ から求められる．θ_0 は，「1993 年版 JASS 5 に規定されていた推定式により求められる練上がり温度であるが，同解説にも示されていたように実際の練上がり温度は，セメントの加水直後の水和熱や機械的に生じる熱が加算されるため推定値よりも若干高い値になる．この値は 2～3 ℃ に達する場合もあり，暑中コンクリートではこの値が無視できないため，β によりこれらの影響を考慮した．β の値は調合や使用するコンクリートミキサの種類によって変化し，水セメント比が小さく，単位セメント量が多くなるほど大きくなる．」[1)]とされている．なお本研究では，β の値は前述した $\theta(0)=\theta_0+\beta$ より，$\beta=\theta(0)-\theta_0$ として算出している．

さらに，「係数 α は，外気とコンクリートとの間の熱の伝達のしやすさを表す係数であり，この値が大きくなるほどコンクリート温度 $\theta(t)$ は短時間に θ_r に近づくことになる．したがって係数 α は，アジテータ車の種類や輸送可能容量と輸送量の関係，さらにはコンクリートのスランプ値によって変化し」[1)]，筆者の一部は日射のない実験室内での実験で，0.3～0.9 を得ている[3)]．

これらの係数の値は，各レディーミクストコンクリート工場において，材料や調合，ミキサの種類や容量と練混ぜ量，季節などの条件ごとにあらかじめ測定し設定しておくことが望ましいが，煩雑でありコストもかかるため，測定結果はほとんど存在しないのが実情である．そこで本研究では，九州内の複数の県における工場で実験を行い，コンクリート温度推定式中の係数 β の値と，それを決定づける主要因に関して検討を行った．

3．温度推定式の係数 β に関する実機実験

3.1 実験概要

各プラントの概要，測定対象としたコンクリートの使用材料，調合を**表 2** に示す．材料温度は可能な限り練混ぜ直前に測定すること，ならびにコンクリート温度はできるだけ練上がり直後に測定することを目標とし，それぞれ，ミキサ直上の計量瓶とミキサ直下のホッパで熱電対を用いて測定した（プラント D を除く）．基本的に自動測定としたが，骨材の場合は，落下する骨材によって熱電対が切断されミキサに巻き込まれる懸念があるため，計量瓶内を改造して熱電対を設置頂いたプラントを除き，先端に熱電対を固定した棒を計量の都度骨材に挿入して測定した．コンクリート温度については，アジテータ車積載後に排出して測定した練上がり温度と比較を行い，差が小さいことを確認している．さらに，練混ぜ時におけるセメントの水和熱の影響を検討するため，セメントの水和反応速度測定を別途行った．

3.2 実験結果および考察

図 1 は，福岡市内，熊本市および都城市のプラントに

表2　各プラントの概要，使用材料，調合

プラント	A					B		C			D	
所在地	福岡市					福岡市		熊本市			都城市	
ミキサ容量(m^3)	強制(2.50)					強制(1.50)		強制(1.67)			傾胴(1.50)	
骨材貯蔵	サイロ					ストックヤード		ストックヤード			ストックヤード	
測定時期	夏，冬					夏，秋，冬		夏			夏	
データ数	128					84		23			5	
水	上澄水					水道水		地下水			地下水	
細骨材	玄界産海砂					玄界産海砂		海+山+砕砂			大崎町菱田産陸砂	
粗骨材	山口+津久見産砕石					下関産砕石		砕石/人工軽量骨材			財部町北俣産砕石＋大崎町菱田産陸砂利	
FA	—					II種		—			—	
混和剤	AE 減水剤/SP					AE 減水剤/SP		AE 減水剤			AE 減水剤	
呼び強度	24	36	40	42	42	24	33	18	24	27	18	18
Sl(cm)	18	18	18	15	21	18	18	15	18	15	8	5
セメント種類	N	N	N	N	BB	N	N	N	N	N	BB	BB
W/C(%)	55	43	40	40	38	55	46	69.7	56.8	53.0	57.0	57.0
W(kg/m^3)	178	170	170	160	170	178	178	175	184	174	144	138
C(kg/m^3)	324	396	425	400	448	323	384	251	324	328	253	242

おける材料温度と日平均気温との関係の一例を示したものである．日平均気温は気象庁発表の各地における値を用いている。図中の記号の違いはプラントの違いを表している。

細・粗骨材の温度は，前日の日平均気温に対しほぼ±5℃の範囲にあり，季節やプラントが異なっても同様の傾向となっている。同一プラントであれば，今回測定したプラントの場合，すべてが±2℃の範囲にあった。一般的な調合のコンクリートでは骨材の温度が 2℃変化すると，**式**(1)における練上がり温度は約 1℃変化するので，前日の気温により予測した骨材温度の誤差がコンクリートの練上がり温度の予測値に及ぼす影響は 1℃程度ということになる．

練混ぜ水の温度も，プラントにより種類が異なるにもかかわらず，前日の日平均気温に対しほぼ±5℃の範囲になっている．骨材と同様，同一プラントではすべてが約±3℃の範囲にある。練混ぜ水が 4℃高くなると練上がり温度は約 1℃高くなるので，前日の気温により予測した翌日の練混ぜ水の誤差がコンクリートの練上がり温度の予測値に及ぼす影響は 1℃以内となる．

一方，セメントの温度は絶対値が他の材料より高く，ばらつきも大きい．前日の日平均気温に対し，最大で 40℃近くも高くなっており，また同一の気温に対するセメント温度の幅も 20℃程度となっている。さらに，同一プラント内における全データが存在する範囲は約±30℃である。セメントの温度が 8℃変化すると θ_0は約 1℃変化するため，セメント温度の誤差がコンクリートの練上がり温度の予測値に及ぼす影響も大きいものと予想される．したがって，コンクリート製造時における温度上昇の抑制には，コンクリート材料，とくにセメント温度を低減することが重要である．

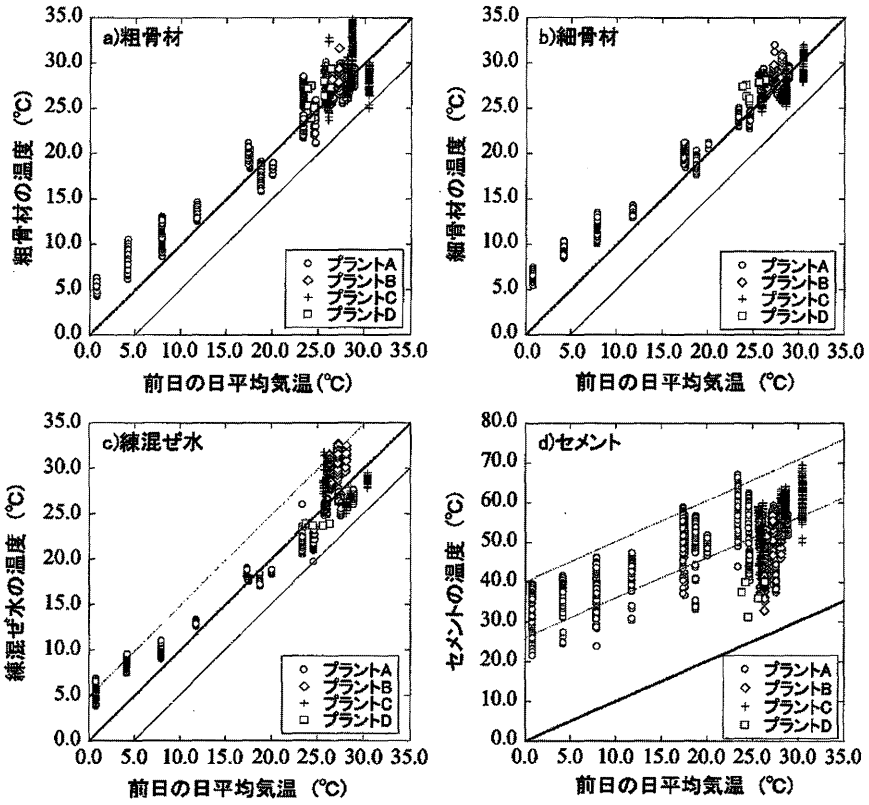


図1　材料温度と日平均気温

図2に，自動測定されたセメント計量瓶内の温度およびミキサ直下のホッパ内の温度の経時変化の例を示す．同図のように計量瓶内にセメントが投入されると温度は急激に上昇して一定となり，セメントがミキサ内に排出されると急激に低下する．このタイミングは，オペレータ室で観察したセメントの投入から排出までの時刻と一致したので，上昇後に一定となった温度の最大値をセメント温度として用いた.同様にホッパにおいて，上昇後に一定となった温度の最大値を練上がりコンクリートの温度とした．他の材料も同様としている．

また，図2中の縦破線2本のうち左側は先述のようにセメントが計量瓶からミキサに排出された時刻を，右側はホッパに生コンが排出された時刻を表している．セメント以外の材料のミキサへの排出時刻もほぼ同時であり，

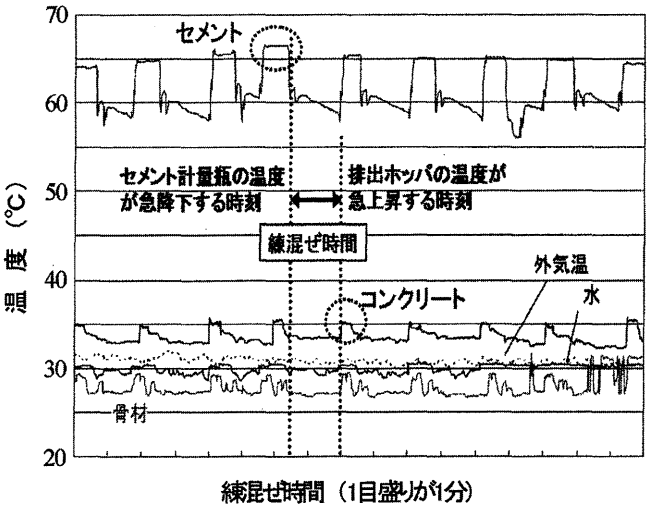
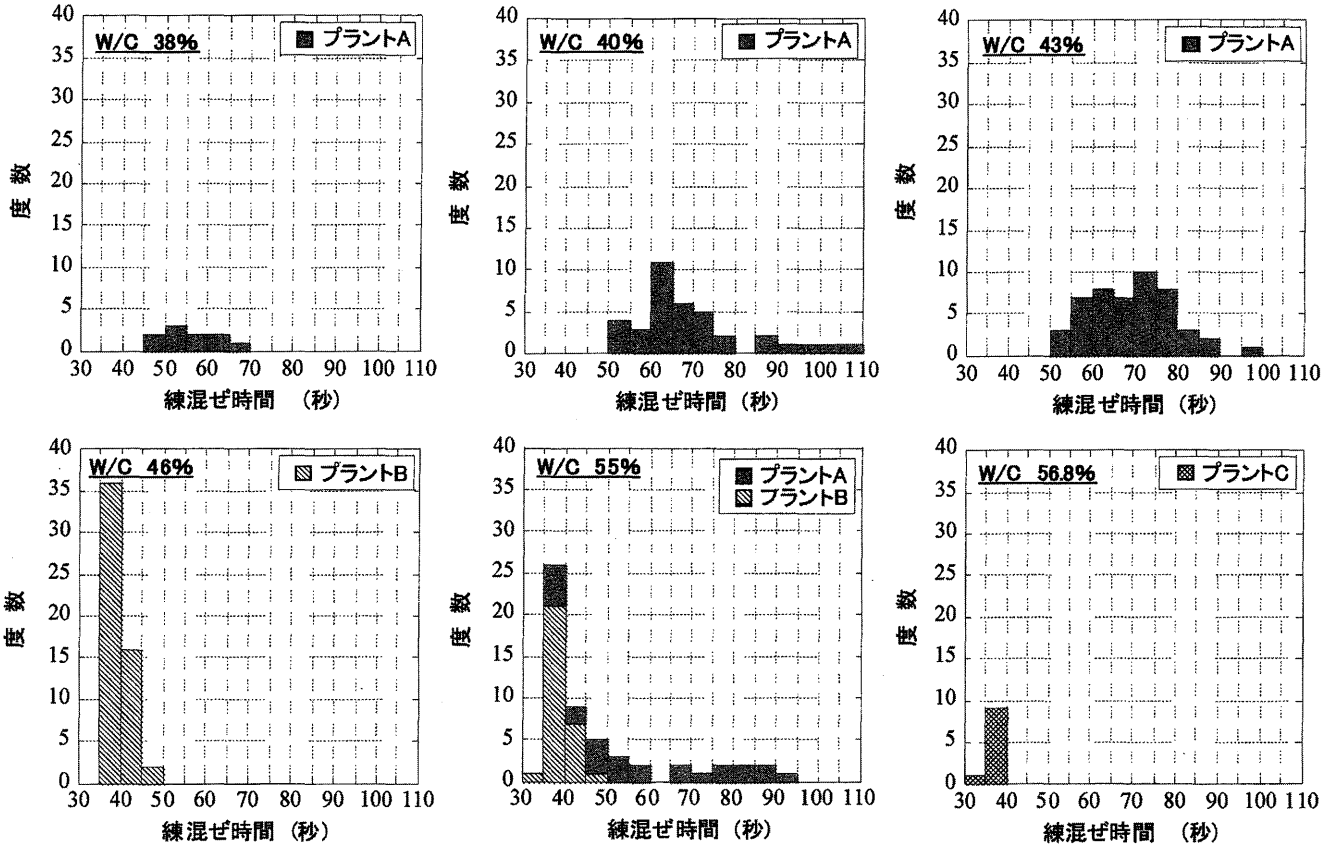


図2　測定された材料温度と練混ぜ時間



一方ミキサの軸は常に回転しているので，両破線の間の時間をコンクリートの練混ぜ時間とした．練混ぜ時間の定義に関しては，プラント操作員へのヒアリングで得られた練混ぜ時間（以後，公称練混ぜ時間）と，上記のように求めた練混ぜ時間（同，測定練混ぜ時間）との間に若干の差があり，また同じ公称練混ぜ時間であってもバッチ間のばらつきが見られたので，以後は測定練混ぜ時間を練混ぜ時間として用い，検討を行った．ただし，プラントDにおいては公称練混ぜ時間を用いた．

図3は，各々の水セメント比における練混ぜ時間の度数分布である．水セメント比が45%を超える調合では練混ぜ時間が40秒程度となり，水セメント比がそれを下回る調合では，練混ぜ時間が60秒前後程度となっている．また，水セメント比が55%

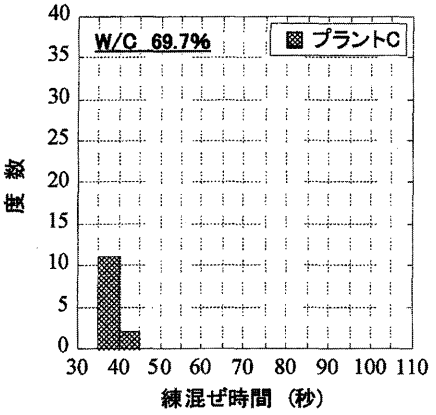


図3　練混ぜ時間の度数分布

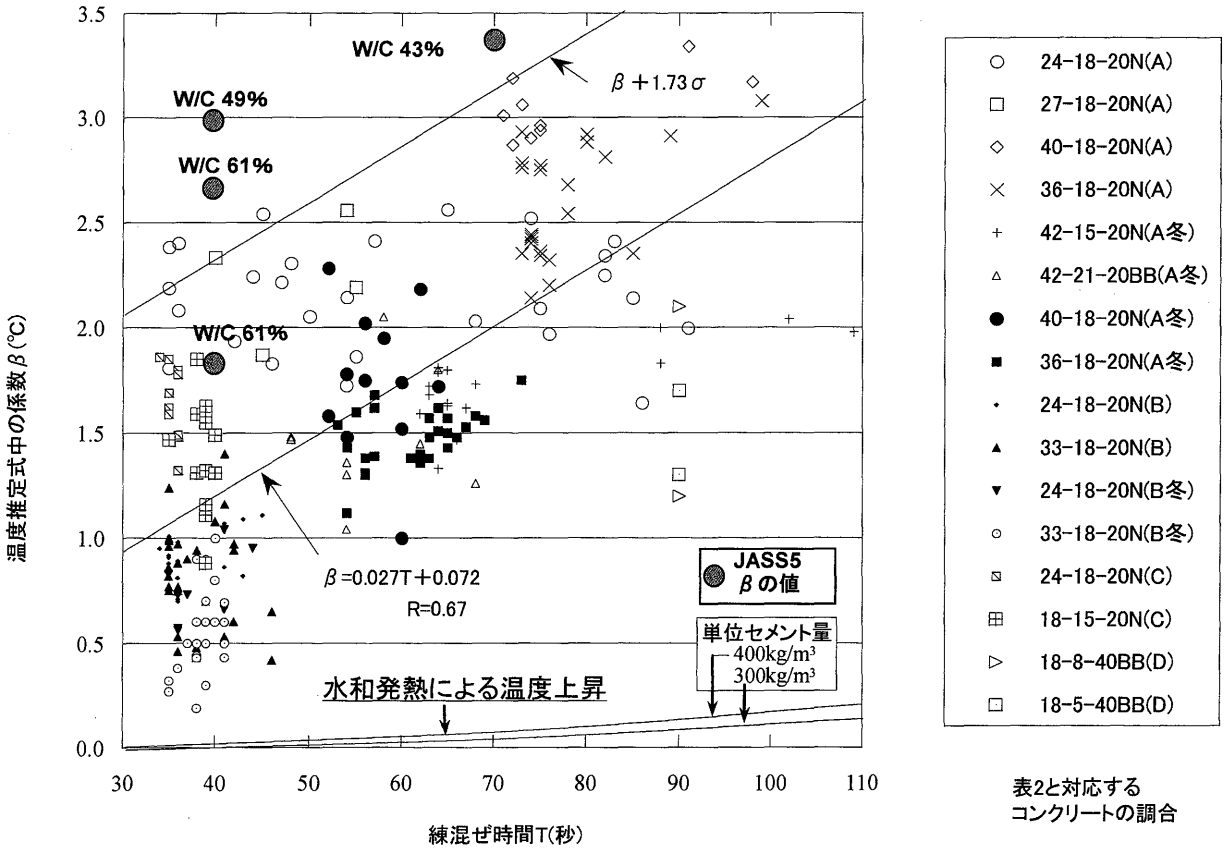


図 4　練混ぜ時間と β の関係

の図から，原因は明らかでないが，同一の調合であっても，プラントにより練混ぜ時間が大きく変動していることがわかる．

図 4 に，β の値を練混ぜ時間との関係として示した．図中の σ は全ての β の値から求めた標準偏差を示している．図より明らかなように練混ぜ時間の影響が大きく，練混ぜ時間が長くなるほど β の値は大きく，傾胴式のプラント D を除き，調合や季節が異なってもおおよそ一本の直線で回帰できる．これは β は練混ぜ中の材料どうしならびに材料とミキサとの摩擦熱，およびセメントの水和熱により生じると考えられるが，練混ぜ時間が長くなるほどこれらの影響が大きくなるためと推察される．なお，**図 4** 中には，**図 5** に示す暑中期に使用されるセメントの水和速度測定結果に基づき算定したセメントの水和反応によるコンクリートの温度上昇量の経時変化を併記している．単位セメント量が 300kg/m³, 400kg/m³ のいずれの場合も水和熱の影響は微小であることが明らかである．よって，練混ぜ中の温度上昇については，材料間，材料と機械の摩擦熱および機械熱が大部分を占めることがわかる．

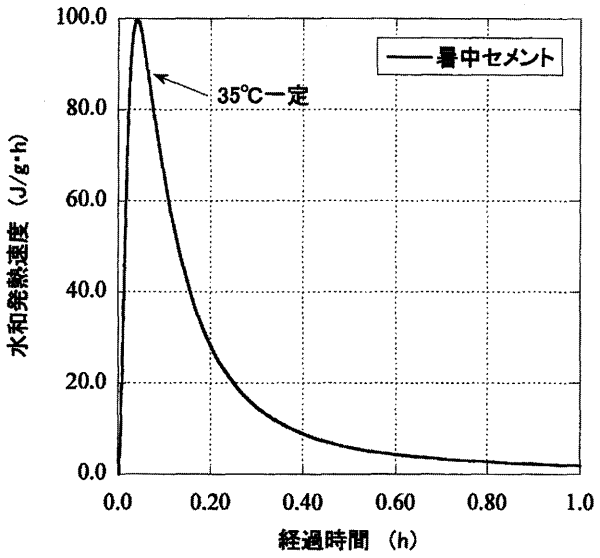


図 5　水和発熱速度

次に調合による影響を比較するとプラント B および C でそれぞれの調合を比較するとその差は小さい．季節による差は，プラント B の 24-18-20N あるいは 33-18-20N の夏期と冬期で比較すると同じ練混ぜ時間でも夏期の方が冬期よりも若干大きくなっている．またプラント B とプラント C で同じ調合 24-18-20 N どうしを同一季節どうしで比較すると，いずれもプラント C における β が大きくなっている．ミキサの練混ぜ容量や調合等はほぼ同じであるにもかかわらず，プラント間で異なる β の値を示したのは，使用材料等の影響が考えられる．ただし，その影響は練混ぜ時間の影響と比較すると小さい．

ここで，**表 1** に示した現行 JASS 5 に記載されている水セメント比から**図 3** をもとに練混ぜ時間を推測し，β の値とともにプロットしたものを**図 4** 中に示す．水セメント比が 61%の場合を除き，現行 JASS 5 に掲載されている β の値は同じ水セメント比であっても現在より若干大きい．これは**表 1** における測定が行われた当時（1990 年頃）の練混ぜ時間が現在より長かったことなどが要因として考えられる．

現在では，一般的なプラントで出荷の多いコンクリート練混ぜ時間は 40～60 秒程度であるが，**図 4** における練混ぜ時間でこれに対応する範囲でみると，β の値として 2～2.5℃を用いれば十分であることがわかる．よって，β の値は各工場で実測することが望ましいが，コストや労力の問題で難しい場合には，一般的な調合であれば上記 2～2.5℃を用いればよい．一方，プラントや，季節，調合ごとに求めればより正確な値が得ることができる．

5．まとめ

本研究は，実際のレディーミクストコンクリート工場において，暑中環境下で製造されるコンクリートの材料温度およびコンクリート温度を測定し，温度推定式中の係数 β について実測し考察を行ったものである．得られた結果を以下にまとめる．

(1) コンクリート製造時における温度上昇の抑制には，コンクリート材料，とくにセメント温度を低減することが重要である．

(2) 練混ぜ中の温度上昇の要因として，セメントの水和反応の影響は微小であり，材料どうし・材料と機械の摩擦熱や，機械熱が大部分を占める．

(3) 現行 JASS 5 に掲載されている β の値は，今回実測した値と比較して大きめの値となっている．当時の練混ぜ時間が現在よりも長かったためと考えられる．

(4) 練混ぜ時間が 40 秒程度の一般的なコンクリートにおいては，β の値として 2～2.5℃を用いればよい．

〈謝辞〉

実験に際して，福岡菱光㈱，アサノ有明生コン（株），都城生コン（株）をはじめ関係者に多大な協力を得た．また，東京工業大学大学院の新大軌助教授には水和発熱速度の測定ならびに貴重な助言を頂いた．さらに，本学卒論生の大庭早弥香氏，井手祐輔氏，松本侑也氏，張安穎氏（いずれも当時），都城高専専攻科の高木翔太氏の多大な貢献を得た．

本研究の一部は，科学研究費補助金（基盤研究(C)，課題番号 22560564）の助成を受けて行われたものである．ここに謝意を表す．

〈参考文献〉

1) 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5　鉄筋コンクリート工事 2009
2) 暑中コンクリートの施工指針・同解説，日本建築学会，2000.9
3) 松藤泰典，大久保孝昭，小山智幸，眞方山美穂，野原博志，暑中環境下で練混ぜ・運搬されるフレッシュコンクリートの温度推定に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，pp.85-88，1991.3 など
4) 船本憲治，稲冨敬，志垣隆浩，伊集院博敏，寺原学，亀谷哲章，暑中環境下で製造・輸送されるコンクリートの温度推定およびその抑制対策に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，pp.883-884，2008.3

（受理：平成24年6月7日）