

論文 早強セメントと耐寒促進剤を併用したコンクリートの性質

浜 幸雄*¹・影山友規*²

要旨:本研究では、早強ポルトランドセメントと耐寒促進剤を併用したコンクリートについて、凍結温度、凝結・硬化性状、初期凍害に対する抵抗性、圧縮強度増進性状に関する実験を行い、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの試験結果と比較検討した。その結果、早強ポルトランドセメントは単独でも初期凍害の防止のためには十分な早強性を有しており、経済性を考慮すると耐寒促進剤と併用する効果は少なく、耐寒促進剤は早強ポルトランドセメントが使用できない状況での利用が望ましいことが明らかとなった。

キーワード:寒中コンクリート, 耐寒促進剤, 早強セメント, 初期凍害, 強度増進

1. はじめに

省資源・省エネルギーを視野に入れた寒中コンクリート技術のひとつとして、通常の保温養生を必要としない効率的な施工を可能とする耐寒促進剤の利用があげられる。著者らは、耐寒促進剤による初期凍害の防止効果が必ずしも融点効果のみではなく、低温下での凝結・硬化促進との複合作用であることを明らかにするとともに¹⁾、優れた強度増進特性により気温による強度補正値を低減できることを示している²⁾。また、これらの成果が日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」に品質標準および施工ガイドとして反映されている³⁾。

しかし、耐寒促進剤は他の化学混和剤と比べて非常に高価であり、標準量の耐寒促進剤を用いた場合には、コンクリート価格が5～6割程度上昇する。一方、早強セメントによるコストアップはコンクリート価格の1割程度であることから、早強セメントと耐寒促進剤を併用し、耐寒促進剤の使用量を減らすことができれば、コストダウンが可能となるものと思われる。

本研究では、早強セメントと耐寒促進剤を併用したコンクリートについて、凍結温度、凝結・硬化性状、初期凍害に対する抵抗性、圧縮

強度増進性状に関する実験を行い、普通セメントを用いたコンクリートの既往の試験結果^{1), 2)}と比較検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

(1) 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm^3)を、細骨材は鶴川産陸砂(表乾密度 2.74 g/cm^3 , 吸水率 1.60% , 粗粒率 2.43)、粗骨材は常盤産碎石(表乾密度 2.65 g/cm^3 , 吸水率 3.01% , 実積率 57.3%)を用いた。混和剤は表-1に示す3種類の無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤および空気量調整用のAE助剤を使用した。また、比較用のコンクリートには、アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤を主成分とするAE剤を用いた。

(2) コンクリート供試体および調合

実験に用いたコンクリートの調合は、水セメント比 50% 、スランプ 18 cm 、空気量 3.5% 、練り上がり温度 15°C を目標とし、耐寒促進剤のタイプごとに同一調合となるように試し練りにより決定した。表-2にコンクリートの調合および練り上がり性状を示す。耐寒促進剤の使用量

* 1 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 博士(工学)(正会員)

* 2 北海道庁 修士(工学)

は各混和剤の標準使用量よりも少ない2ℓ/c=100kgを基本とし、ASについてののみ標準使用量4ℓ/c=100kgの条件を加えた。また、比較のために耐寒促進剤を使用しない供試体として、標準のAEコンクリート（HP）を作成した。

2.2 実験方法

(1) 凍結温度の測定

コンクリートの凍結温度は、φ10×20cmの円柱供試体の中心部にC-C熱電対を設置し、-18℃まで凍結させた時の温度変化曲線から凍結温度を読み取った。

(2) 凝結試験

打ち込み後のコンクリートの養生温度を20、10および5℃として、JIS A 6204 附属書1に準じたプロクター貫入抵抗試験を行い、それぞれの温度条件での凝結の始発時間と終結時間を測定した。

(3) 初期凍害試験

φ10×20cmの円柱供試体を用い、コンクリートの打ち込み後、所定の材齢まで養生したコンクリートを凍結条件下に置き、その後再び10℃で材齢28日まで封緘養生して、凍結作用を受けたコンクリートと受けないコンクリートの材齢28日での圧縮強度を比較することにより、初期凍害を受けたか否かの判定を行った。凍結開始材齢は6、12、18および24時間とし、凍結開始

までの養生条件は10℃封緘養生とした。また凍結条件は+10~-18℃の気中凍結水中融解を1日で4サイクル繰り返す方法とした。圧縮強度の測定は、凍結開始時と材齢28日で行った。

(4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験用供試体はφ10×20cmの円柱とし、JIS A 1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)に準じて作製した。打込み後直ちに、供試体を封緘状態とし、所定の条件で養生を開始した。圧縮強度の測定は、表-3に示す養生温度ごとに定めた初期材齢から長期材齢までの3~7材齢で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 初期凍害の防止効果

(1) 凍結温度・凝結・初期強度増進性状

コンクリートの凍結温度は、表-4に示すように、混和剤の種類と使用量による差は見られるものの、セメントの種別による大きな差は認められない。したがって、早強セメントを用いた場合においても、耐寒促進剤による大幅な凍結温度の低下は期待できない。

図-1に早強セメントを用いたコンクリートの養生温度による凝結（終結）時間の変化を示す。普通セメントの場合と同様に、耐寒促進剤を用いたコンクリートは5℃養生の条件でも20℃養生の普通コンクリートと同程度の凝結性状

表-1 耐寒促進剤の種類

混和剤種類	主成分	比重	R ₂ O量 (%)	Cl-量 (%)	外観	標準使用量 (ℓ/c=100kg)	
耐寒促進剤	タイプ I AS	ポリグリコールエステル誘導体および含窒素化合物	1.40	0.03	0.01以下	淡褐色液体	3~5
	CS	含窒素化合物Ca塩ヒドロキシ複合体	1.28	0.2	0.01以下	淡赤褐色液体	3~5
	II E	含窒素化合物	1.33	0.03	0.01以下	淡黄色液体	4~8

表-3 圧縮強度試験の材齢

養生温度 (℃)	圧縮強度試験材齢 (日)
20	0.5、1、3、7、14、28、91
10	3、7、28、91
5	
-2	7、28、91

表-2 コンクリートの調合および練り上がり性状

記号	混和剤		W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)			練り上がり性状		
	種類	使用量 (ℓ/m ³)				セメント	細骨材	粗骨材	練温 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)
HP	ブレーション	—	50	47.5	203	128	301	333	14.0	18.1	5.6
HAS1	タイプ I	6.9 (2ℓ/C=100kg)			182	115	317	351	13.5	17.9	4.3
HAS2		13.8 (4ℓ/C=100kg)		46.0	190	120	301	354	13.0	18.1	2.5
HCS		20.6 (2ℓ/C=100kg)							16.0	15.0	3.2
HE		タイプ II		15.4 (2ℓ/C=100kg)	198	125	295	346	14.0	17.8	3.0

を示し、低温による凝結遅延がほとんど見られない。また、早強セメントを用いたコンクリートの5℃養生での凝結（終結）時間を普通セメントを用いたコンクリートの結果と比較して図-2に示す。早強セメントで耐寒促進剤を用いないコンクリートPでも、耐寒促進剤を用いた普通セメントのコンクリートの凝結時間と同程度となっている。さらに、耐寒促進剤を用いることにより5～6時間で終結している。なお、

表-4 コンクリートの凍結温度

コンクリート (混和剤種類)	混和剤使用量 ($Q/c=100\text{kg}$)	凍結温度 (°C)	
		普通セメント	早強セメント
P	-	-1.5	-1.6
AS1	2.0	-1.9	-1.7
AS2	4.0	-2.1	-2.1
CS	2.0	-	-2.4
	4.0	-3.0	-
E	2.0	-	-1.9
	6.0	-3.6	-

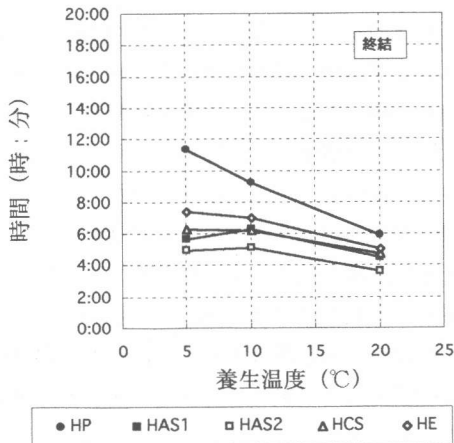


図-1 養生温度による凝結時間の変化

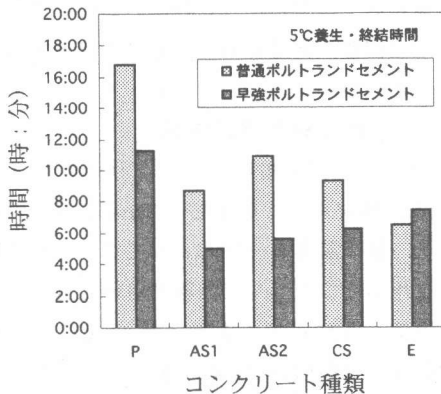


図-2 セメント種別による凝結時間の比較

混和剤Eは普通セメントの場合の1/3の量の添加であり、普通セメントの場合よりも凝結時間が若干遅延している。

初期凍害防止に必要な圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ が得られる積算温度を普通セメントの場合と比較して図-3に示す。早強セメントの場合には、セメント自体による早強性が大きく耐寒促進剤による硬化促進の効果が小さくなっている。いずれのコンクリートでも $10^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 前後で圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ が得られており、普通セメントよりも大幅に硬化が促進されている。早強セメントは単独でも初期凍害防止のために十分な早強性を有しており、経済性を考慮すると、耐寒促進剤と併用する効果は少ない。

(2) 初期凍害に対する抵抗性

図-4に初期凍害試験における凍結開始時の圧縮強度と凍結作用を受けないコンクリートに対する凍結作用を受けたコンクリートの材齢28日（積算温度 $560^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ ）時の強度比の関係を示す。HCSを除くすべてのコンクリートで、凍結開始時の圧縮強度が $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の場合には強度比は100%以上となっており、初期凍害を受けていない。また、耐寒促進剤コンクリート（HAS1, HE）では圧縮強度 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 以下、普通コンクリート（HP）では圧縮強度 $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の範囲で十分な強度回復が見られなかった。一方、耐寒促進剤CSを用いたコンクリートHCSでは、凍結開始時に $5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の強度があるにもかかわらず強度比が $0.5\sim 0.7$

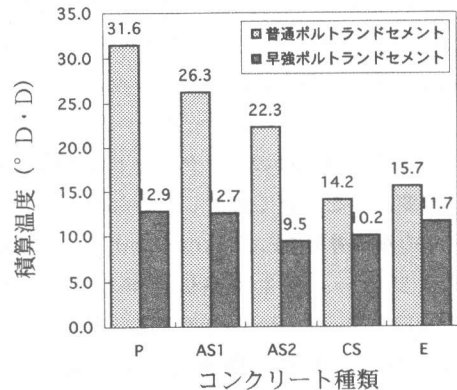


図-3 圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ を得る積算温度

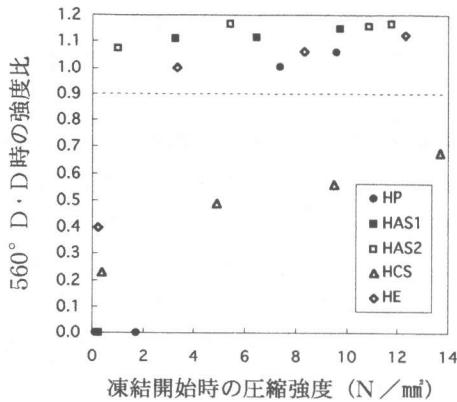


図-4 凍結開始時の圧縮強度と4週強度比

程度と小さく、初期凍害を受けたようである。この傾向は、普通コンクリートの場合にも認められており、耐寒促進剤CSの主成分が尿素系窒素であること、使用した粗骨材にモンモリロナイトが含まれていたことなどから、凍結作用時に混和剤成分が濃縮され、モンモリロナイトの溶出による骨材の劣化、骨材とセメントペースト界面の付着力の低下などの理由が考えられる¹⁾が、現段階では明らかではない。さらに、尿素系窒素を主成分とした混和剤ではアンモニアガス発生の問題もあり、たとえ凍結温度低下、凝結・硬化促進性状に優れていたとしても、耐寒促進剤として使用してはならない。

(3) 許容外気温

既往の研究¹⁾と同様の方法で、早強セメントを用いたコンクリートの初期凍害防止のための許容外気温を算出する。解析の条件は、上部をシート養生とした幅150mmの住宅用布基礎を想定し、早強セメントを用いた単位セメント量 330kg/m^3 、打設温度 15°C のコンクリートとして、外気温が -2 、 -3 、 -5 、 -10 および -18°C の場合の打設後のコンクリートの温度履歴を有限要素法を用いて解析した。なお、コンクリートの熱伝導率を $2.424\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、合板型枠およびシート養生の熱伝達率をそれぞれ $6.6\text{kcal/h}^\circ\text{C}$ 、 $5.2\text{kcal/h}^\circ\text{C}$ とし、断熱温度上昇特性値である終局断熱温度上昇量 Q_∞ を 45.311°C 、断熱温度上昇速度定数 α を 0.958 と

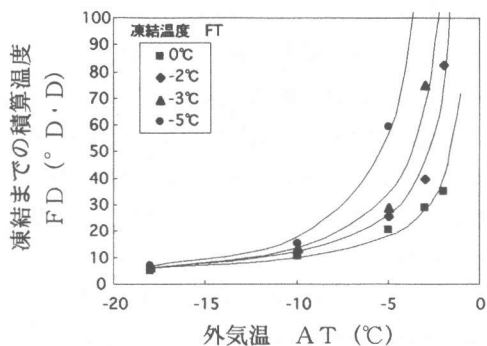
して計算した。

外気温とコンクリート表面が冷却して凍結温度に達するまでに得られる積算温度の関係を示したのが図-5であり、図中の表にコンクリートの凍結温度ごとの外気温と凍結までの積算温度の関係を表わす回帰式(1)の諸係数を示す。また、初期凍害防止に必要な圧縮強度を得る積算温度と許容外気温の関係を凍結温度ごとに示したのが図-6であり、図中の表に所要の強度を得る積算温度およびコンクリートの凍結温度と許容外気温の関係を表わす回帰式(2)の諸係数を示す。さらに、実験結果から得られた早強セメントと耐寒促進剤ASを併用したコンクリートの場合の混和剤濃度と圧縮強度 5N/mm^2 を得る積算温度の関係を図-7に、混和剤濃度とコンクリートの凍結温度の関係を図-8に示す。

これらの結果から得られた混和剤濃度と許容外気温の関係を、普通セメントの場合の結果とあわせて図-9に示す。実験の結果から明らかのように、早強セメントを用いた場合、凍結温度の低下は普通セメントと変わらないものの、初期強度増進が大きく 5N/mm^2 が早期に得られるために、耐寒促進剤を用いなくても許容外気温が -8°C 程度と大幅に低下している。さらに、耐寒促進剤を併用することにより許容外気温はわずかに低下するが、早強セメントと耐寒促進剤の両者によるコストの上昇に見合うかどうかの判断が必要である。また、HCSの許容外気温の低下は非常に大きいのが、前述のように成分上の問題があるため、実際には使用することはできない。

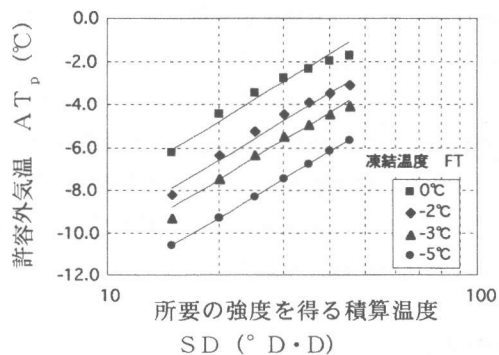
3.2 圧縮強度増進性状

早強セメントを用いたコンクリートについて、 20 、 10 および 5°C 養生での圧縮強度試験の結果を、基準温度を -10°C として算出した積算温度を用いてゴンベルツ曲線を用いて近似した結果を表-5に示す。また、図-10にゴンベルツ曲線と実験値の対応の一例を示す。普通セメントの場合と同様に、 20 、 10 および 5°C 養生



回帰式	$FD=a \cdot (-AT)^b$ [式(1)]			
凍結温度	0°C	-2°C	-3°C	-5°C
回帰係数	a	72.0	160.2	289.9
	b	-0.859	-1.126	-1.330
相関係数	R	0.987	0.995	0.994

図-5 外気温と凍結までの積算温度の関係



回帰式	$ATp \geq c \cdot \log SD + d \cdot FT + e$ [式(2)]	
回帰係数	c	10.4
	d	0.904
	e	-18.3
相関係数	R	0.994

図-6 初期凍害防止に必要な圧縮強度を得る積算温度と許容外気温の関係

の実験値とゴンベルツ曲線は非常に良い対応を示しているが、打込み後直ちに-2°Cで養生した条件では、すべてのコンクリートで強度増進が緩慢となり、ゴンベルツ曲線と実験値が対応していない。これは、コンクリートの強度増進の温度依存性を氷点下の温度域をも含めた広い温度範囲で表現しようとする積算温度方式の限界を示唆していると同時に、耐寒促進剤を用いても凍結環境下では強度増進は緩慢になりプラスの温度域での強度増進性状とは異なることを示している。

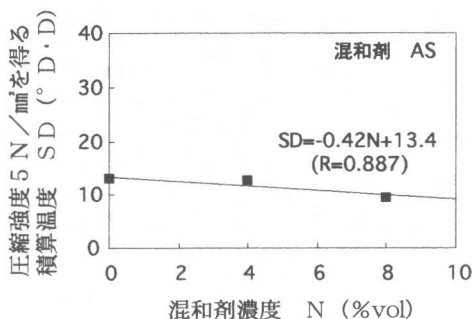


図-7 耐寒促進剤濃度と圧縮強度 5 N/mm²を得る積算温度の関係

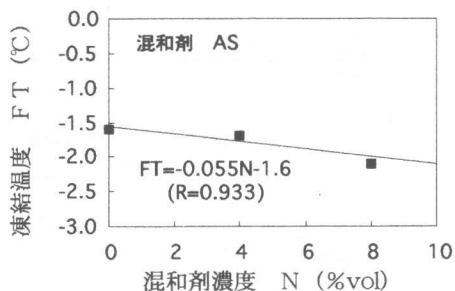


図-8 耐寒促進剤濃度と凍結温度の関係

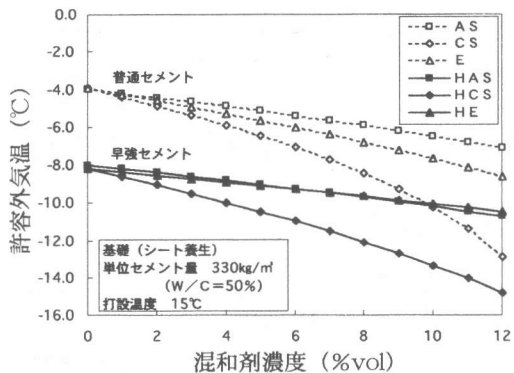


図-9 耐寒促進剤濃度と許容外気温の関係

図-11は早強セメントと耐寒促進剤を併用したコンクリートの圧縮強度増進傾向を水セメント比の同じ普通セメント（耐寒促進剤なし）のコンクリートの結果²⁾と比較して示したものである。早強セメントを用いたコンクリートは、普通セメント（P）のコンクリートと比べて初期強度、長期強度ともに大幅に増大している。さらに、耐寒促進剤を併用したコンクリートは、使用しないコンクリートよりも2~3割強度が大きくなっている。

表-5 ゴンベルツ曲線の諸係数と相関性

コンクリート 種類	ゴンベルツ曲線の諸係数			相関係数	標準誤差 (N/mm ²)	
	F _∞	a	b			
HP	48.2	8.55	0.590	0.990	1.72	
耐寒促進剤	HAS1	56.9	6.22	0.519	0.992	1.58
	HAS2	60.8	6.53	0.524	0.997	1.10
	HCS	60.1	5.67	0.491	0.990	1.77
	HE	56.9	6.72	0.519	0.989	1.92

＜ゴンベルツ曲線式＞

$$F = F_{\infty} \cdot \exp \{-a (1/M)^b\}$$

ここに、F：圧縮強度 (N/mm²)
 F_∞：最終強度 (N/mm²)
 M：積算温度 (°D・D)
 a, b：定数

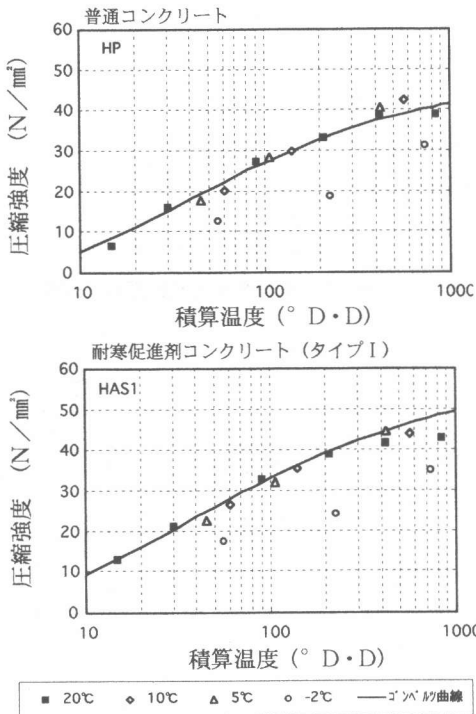


図-10 ゴンベルツ曲線による強度増進曲線と実験値との対応

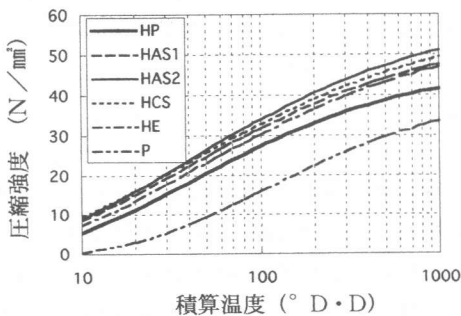


図-11 強度増進傾向の比較

4. まとめ

早強セメントと耐寒促進剤を併用したコンクリートの凍結温度、凝結性状、初期強度増進性状、初期凍害に対する抵抗性および圧縮強度増進性状について、普通セメントの場合の既往の実験結果と比較、検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) コンクリートの凍結温度は、耐寒促進剤の種類および濃度に依存し、セメントの種別による差は見られない。
- (2) 早強セメントと耐寒促進剤を併用した場合においても、普通セメントの場合と同様に、低温による凝結遅延が抑制され、初期強度、長期強度ともに増大する。しかし、早強セメントの場合には、セメント自体の早強性が大きく、硬化促進に及ぼす耐寒促進剤の影響は小さい。
- (3) 早強セメントは単独でも初期凍害の防止のためには十分な早強性を有しており、経済性を考慮すると、耐寒促進剤と併用する効果は少ない。したがって、耐寒促進剤は早強セメントが使用できない状況での利用が望ましい。

参考文献

- 1) 浜 幸雄, 鎌田英治: 無塩化・無アルカリ型防凍性混和剤による初期凍害の防止効果, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.113~122, 1996.1
- 2) 浜 幸雄, 三森敏司, 鎌田英治: 防凍性混和剤を用いたコンクリートの強度増進性状, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.161~170, 1997.1
- 3) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説 (資料3 耐寒促進剤の利用について), pp.170~188, 1998.2

謝辞

本研究の実施にあたり、故 鎌田英治先生(前北海道大学教授)の御指導を受けました。ここに記して謝意を表わすとともに、先生の御冥福をお祈りいたします。