

土木研究所資料

高炉スラグ微粉末混入コンクリートの 断熱温度上昇に関する検討

1992年11月

建設省土木研究所
地質化学部コンクリート研究室

Copyright © (1992) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

高炉スラグ微粉末混入コンクリートの 断熱温度上昇に関する検討

コンクリート研究室	室長	河野	広隆
	研究員	森濱	和正
	研究員	渡辺	博志
	研究員	高橋	弘人
	研究員	森田	良美 ^{*1}
	部外研究員	山本	一 ^{*2}
	部外研究員	松井	淳 ^{*3}

要 旨

ダム用コンクリートに高炉スラグ微粉末（スラグ）を混入した場合の温度特性を調べ、断熱温度上昇の予測法の検討を行った。

コンクリートの断熱温度上昇特性に大きな影響を与えるスラグの水和発熱速度の温度依存性を調べるため、セメントペーストの水和発熱特性およびコンクリートの断熱温度上昇試験を行い、この温度依存性をコンクリートの断熱温度上昇推定解析に組み込むための簡易な手法の開発を試みたものである。

キーワード：高炉スラグ微粉末、水和熱、断熱温度上昇、温度依存性

^{*1}現、関東地建江戸川工事事務所

^{*2}現、松尾建設㈱

^{*3}現、小野田セメント㈱

目 次

	page
1. まえがき	1
2. 研究の概要	2
2.1 既往の研究	2
2.1.1 配合、フレッシュコンクリート	2
2.1.2 強度特性	2
2.1.3 発熱特性	2
2.2 本研究の概要	3
3. 各種セメントを用いたコンクリートの発熱特性に関する検討	5
3.1 実験概要	5
3.2 使用材料	5
3.2.1 セメント	5
3.2.2 混和材	6
3.2.3 骨材	7
3.2.4 混和剤	7
3.3 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果	7
3.4 試験方法	11
4. 実験結果	13
4.1 セメントの水和熱試験による発熱特性	13
4.1.1 微少熱量計試験	13
4.1.2 JIS溶解熱法	23
4.2 コンクリートの断熱条件下における温度上昇特性	27
4.3 まとめ	36
5. 考察	37
5.1 コンクリートの断熱温度上昇試験	37
5.1.1 断熱温度上昇の回帰	37
5.1.2 熱試験法の検討	43
5.1.3 水和発熱の温度依存性	47
5.2 セメントペーストの水和発熱試験	55
5.2.1 概要	55
5.2.2 水和発熱速度のモデル化	55
5.2.3 水和発熱の温度依存性	60
6. まとめ	65
参考文献	66

1. まえがき

ダム用コンクリートの混和材には、これまで施工性の改善および断熱温度上昇の抑制のため、フライアッシュが多用されていた。しかしながら、最近のエネルギー政策や環境保全のため、燃焼温度が低く抑えられるなどの結果、良質なフライアッシュが得られにくくなっている。また、石炭火力発電所の地域的偏在により、フライアッシュの供給が難しい地域もある。

そのため、フライアッシュに代わる材料として、高炉スラグ微粉末（以下、スラグと呼ぶ）の使用を考えた。スラグは、我国での生産量が多く、入手の困難さが少なく、ダム用コンクリートにとって選択肢が広がることになる。また、スラグ混入コンクリートの品質も、これまで通常の配合のコンクリートでは、フライアッシュ同様に、施工性の改善や断熱温度上昇の抑制が期待される。また、スラグ自身、水硬性があることから、フライアッシュの場合より高い強度発現も期待できる。

ただし、スラグは水和発熱特性の温度依存性が高いため、コンクリートの打設温度や周辺環境の温度の影響により断熱温度上昇速度や強度発現が大きく左右されることから、スラグを使用するにあたっては、その発熱温度特性を十分に把握しておくことが非常に重要である。

このようなことから、ここでは、スラグ混入コンクリートの発熱温度特性を把握すること、そして、断熱温度上昇を簡易に予測する手法を開発することを試みたものである。

本報告書の構成は以下のとおりである。

2章では、既往の研究からスラグ混入コンクリートの特徴を明らかにし、その中で断熱温度上昇およびその予測に関して明らかにすべきことを記述した。

3、4章では、実験方法、実験結果を述べた。3章は、実験概要、使用材料、実験条件、試験方法について、4章は、セメントペーストの水和発熱試験結果、コンクリートの断熱温度上昇試験結果について述べた。

5章では、4章の実験結果からスラグの温度依存性を明らかにし、それをもとにアレニウス則によるコンクリートの断熱温度上昇を予測する方法を提案した。

2. 研究の概要

2. 1 既往の研究

スラグ混入コンクリートについては、これまで多くの研究が行われており、以下に詳述するように、^{1, 2)}フレッシュコンクリートの性状（施工性）は単位水量を減らすことができるなど改善されること、強度特性についても初期強度は普通コンクリートに比べ小さいものの長期強度は大きくなるなど、ダム用コンクリートにとっても好ましい性質を有している。しかしながら、最も重要な発熱特性については、温度依存性があるために単純ではない。スラグ混入率の変化による水和熱（JIS溶解熱法）と断熱温度上昇の傾向の違いや、最終断熱温度上昇量は混入率50～60%がピークになるなど、複雑な現象を示している。

2. 1. 1 配合、フレッシュコンクリート

- ・所要のスランプを得るために必要な単位水量は、普通セメントのみによるコンクリートと比べて2～5%小さくなる。
- ・コンクリートの打設温度が10℃上がると、同一スランプを得るのに必要な単位水量は2～3%増加する。
- ・高炉スラグ微粉末を用いると、セメントより比重が小さいためペーストの容積が増すため細骨材率は小さくなる。
- ・所要の空気量を得るためのAE剤量は、セメントのみの場合に対して増大する傾向にある。
- ・高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは、そうでないコンクリートに比べブリージング率は変わらないが粉末度が大きくなるとブリージング率は1/3程度に減少する。
- ・スラグの混入率が大きいほど凝結時間は遅くなる。

2. 1. 2 強度特性

一般にスラグの混入率が大きくなると圧縮強度は低下する。しかしながら、材令の変化にともない以下のようなことが言える。

- ・材令3、7日の初期では、スラグ無混入の場合に比べてスラグ混入率が50%程度で圧縮強度が約5割、スラグ混入率が70%で約4割と強度の低下が著しい。
- ・材令28、91日の長期になると、スラグ混入率が70%でも無混入の8割以上を確保できる。
- ・材令6ヶ月、1年になると、スラグ混入率が70%程度でも無混入の場合より圧縮強度が大きくなる。
- ・粉末度が大きくなると、同一混入率の場合初期の圧縮強度が大きく、長期になるほどその差は小さい。
- ・養生温度の違いによる影響は、低い温度の場合ほど材令初期の圧縮強度は小さいが、長期特に1年材令程度になると標準養生と同程度になる。

2. 1. 3 発熱特性

一般に、高炉スラグ微粉末混入コンクリートについて、定性的に以下のようなことが言える。

- ・結合材の水和熱は、JIS溶解熱法によればスラグ混入率が大きくなるほど一般に減少する。
- ・粉末度が大きくなると水和熱は、材令3日までは増大するがそれ以降の伸びは小さい。
- ・最終温度上昇量は、混入率が60%程度までは無混入の時よりも高く、70%以上になったときに減少する。
- ・断熱温度上昇速度は、混入率が大きくなるほど遅くなる、これは、普通、中庸熱ポルトランドセメントを

用いたコンクリートについてともに同様である。

- ・打設温度が低いほど温度上昇速度は小さいが最終温度上昇量は大きくなる。

2. 2 本研究の概要

ダム用コンクリートの温度制御は、断熱温度上昇を低く抑えるよう材料を吟味するとともに、プレクーリング、パイプクーリングにより実施されている。最近、ダムの合理化施工の主流となっているRCD工法では、パイプクーリングの実施がむずかしく、温度制御は材料の選定、プレクーリング、施工上の配慮によることになる。温度制御は図-2.1のように行われているが、温度上昇はセメント自身の水和発熱によるものであり、適切な材料の選定によるセメントの発熱抑制が重要な抑制対策のひとつとなる。

ここでは、断熱温度上昇の抑制のため、混和材をフライアッシュに代え、スラグを対象にしている。スラグを使用するにあたっては、2. 1で述べたように、水和発熱速度の温度依存性と断熱温度上昇の関係はまだあまり明確にされていない。

そのため、まずスラグを混入したセメントペーストの水和発熱特性を調べた。水和熱試験は、種々に材料の温度を変えたときの水和発熱速度を求め、そのデータより双曲線関数を用いて積算発熱量を推定し、温度依存性について検討した。

次に、コンクリートについても打設温度を変化させたときの断熱温度上昇試験を行い、発熱速度や温度依存性の検討を行った。

これらの結果から、温度依存性を考慮した簡易な断熱温度上昇の予測を試みた。温度依存性がほぼアレニウス則に従うことを明らかにし、それを利用した温度上昇予測方法を提案した。この予測方法により、季節など温度変化に応じた適正な抑制方法が可能になるものと考えられる。

条 件

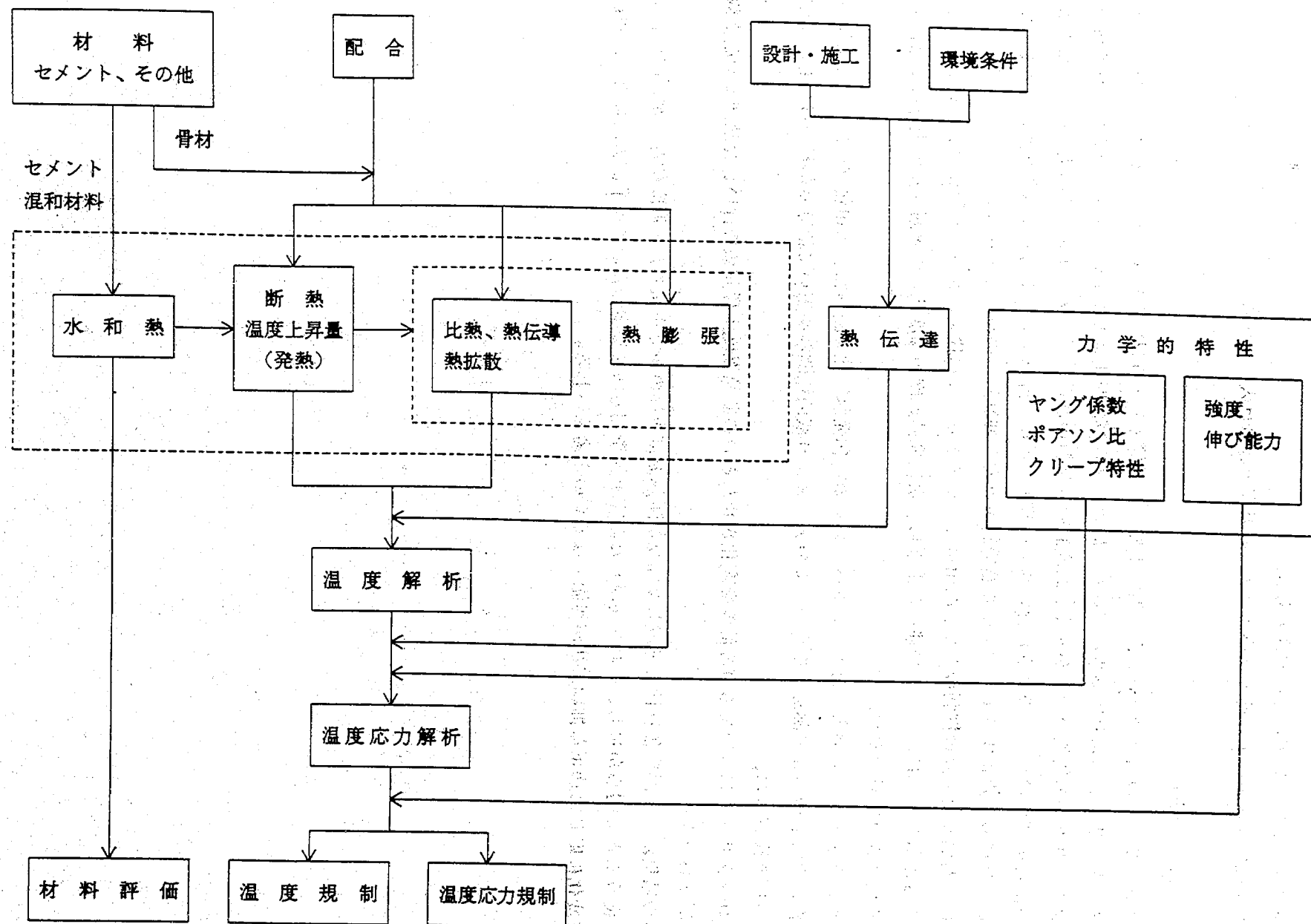


図-2.1 温度ひびわれ制御フロー

3. 各種セメントを用いたコンクリートの発熱特性に関する検討

3. 1 実験概要

前章で述べたように、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの研究および実績について、スラグ混入率が60%程度までのものは数多くなされてきた。しかし、それ以上の混入率についてはあまりなされていない。

本研究では、高炉スラグ微粉末を多量に混入させたときのコンクリートの諸特性を述べるものとする。諸特性に関しては配合、フレッシュコンクリート、硬化後のコンクリート、耐久性等多種多様あるが、温度ひびわれ解析に最も影響を与えるコンクリートの発熱特性について実験的研究を行った。表-3.1に実験要因と水準を示す。

表-3.1 実験要因と水準

項 目	条 件	備 考
スラグ混入率	普通セメント : 0, 50, 60, 70, 80% 中床熱セメント : 0, 40, 50, 60, 70%	高炉スラグ微粉末を大量に混入したときの発熱特性
スラグの粉末度	4000, 6000, 8000 cm^2/g	スラグの粉末度による発熱特性
打設温度	10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$	打設温度による発熱特性

3. 2 使用材料

3. 2. 1 セメント

セメントは普通ポルトランドセメント及び中床熱ポルトランドセメント（大日本セメント(株)製）を用いた。表-3.2にセメントの物理試験結果、表-3.3にセメントの化学分析結果を示す。

表-3.2 セメントの物理試験結果

	比 重	粉末度 (cm^2/g)	凝 結			安定性	圧縮強さ (kgf/cm^2)			水和熱 (cal/g)	
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3d	7d	28d	7d	28d
普通セメント	3.16	3250	28.1	2-27	3.47	良	163	260	416	—	—
中床熱セメント	3.20	3130	27.2	3-35	5-15	良	122	180	353	67	78

表-3.3 セメントの化学分析結果

	化 学 成 分 試 験 結 果 (%)						
	MgO	SO ₃	ig-loss	C ₃ S	C ₃ A	R ₂ O	Cl ⁻
普通セメント	1.6	2.0	1.4	—	—	0.60	0.006
中庸熱セメント	1.4	1.9	0.8	47	3	0.57	0.004

3.2.2 混和材

混和材は高炉スラグ微粉末（新日鐵化学(株)製 エスメント）を用いた。高炉スラグは粉末度4000, 6000, 8000 cm²/gの3種類を使用した。

表-3.4、表-3.5にそれぞれ高炉スラグの試験成績表、高炉スラグの粒度分布を示す。

表-3.4 高炉スラグの試験成績

粉末度 (cm ² /g)	比 重	化 学 成 分 試 験 結 果 (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	TOTAL
4000	2.89	32.2	13.5	0.3	42.8	6.2	2.0	97.0
6000	2.89	32.6	14.0	0.5	41.5	6.4	2.0	97.0
8000	2.89	32.9	14.1	0.1	42.5	6.7	2.0	98.3

表-3.5 高炉スラグの粒度分布（通過百分率(%)）

μm		0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.5	2	3	4	6	8
粉 末 度	4000	0.0	0.3	0.8	1.4	2.4	3.2	6.5	11.3	18.2	24.4	32.5	40.8
	6000	0.3	0.7	1.9	3.3	5.1	6.4	11.7	19.5	30.7	40.9	51.8	59.6
	8000	0.2	0.6	1.9	3.6	5.3	7.7	15.7	26.5	40.0	52.4	67.7	78.6
μm		12	16	24	32	48	平均粒径 (μm)						
粉 末 度	4000	53.5	65.3	82.5	93.0	100	10.9						
	6000	70.0	78.6	89.4	95.7	100	5.7						
	8000	90.2	96.0	98.6	100	100	3.8						

※ 粉末度は単位: cm²/g

3. 2. 3 骨材

細骨材は富士川産川砂，粗骨材は笠間産砂岩砕石を用いた。表-3.6に使用骨材の物性，表-3.7に骨材の粒度分布を示す。細骨材はF. M. = 3. 28とやや粗目であった。

表-3. 6 使用骨材の物性

	分 類	産 地	比 重	吸水率	粗粒率	備 考
細骨材	川 砂	富士川	2.63	2.09	3.29	
粗骨材	硬質砂岩	笠 間	2.66	0.69	6.66	5号と6号を1:1で混合

表-3. 7 骨材の粒度分布

	ふるい通過百分率 (%)								F. M.
	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材			97	72	52	31	14	5	3.29
粗骨材	98	34	2						6.66

3. 2. 4 混和剤

使用した混和剤を以下に示す。

AE減水剤 ; ポゾリスNO.70 (標準型, リグニンスルホン酸系, エヌエムビー社製)

AE調整剤 ; 303A

3. 3 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

コンクリートの配合は目標スランプ、目標空気量を各々8cm, 4%とし、練り上がり温度は10, 20, 30℃を目標とした。単位セメント量は300kg/m³と一定にし、AE減水剤は標準量(C×0.25%)添加し、AE調整剤を所定の空気量が得られるように添加した。

練りまぜは強制パン型ミキサ(公称容量50%)を使用し、図-3.1のような手順で行った。

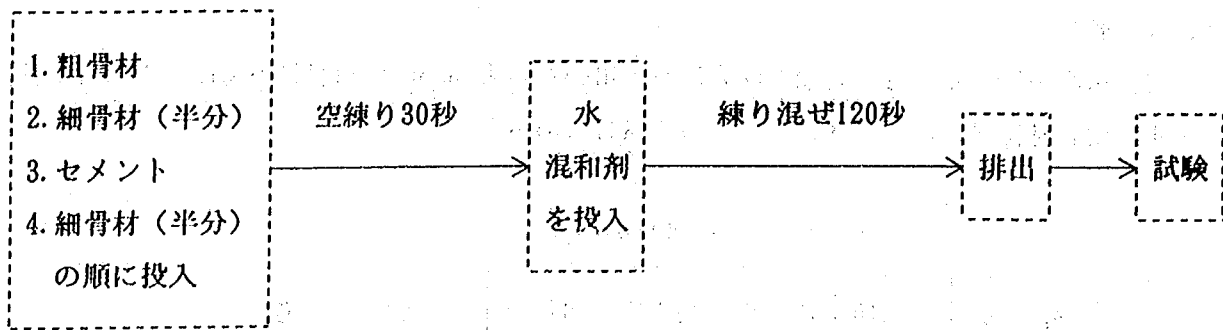


図-3.1 練りまぜ方法

表-3.8、表-3.9に配合及びフレッシュコンクリートの試験結果を、また表-3.10に、NS0(4)20～NS80(4)20についての凝結試験結果を示す。

フレッシュコンクリートはセメントの種類、高炉スラグの混入率によって大きく変わらないので、同一の打設温度においては単位水量を一定にした。但し、高炉スラグは粒子表面の平滑性から単位水量が小さくなり、粉末度が大きくなる（高炉スラグ微粉末）とさらに単位水量を小さくできるという報告もある。しかし、これはスランプ大の軟練りでありスランプ8cm程度ではこの効果は顕著に現れないと思われる。

コンクリートの断熱温度上昇試験について、後に述べるように試験機を2種類（住友セメント㈱、東京理工㈱）用いたため、表-3.8、表-3.9中にその種別も記した。

なお、下表中の配合の記号は以下のように決めた。

(例)	NS	50	(4)	20
	セメントの種類	スラグの混入率	スラグの粉末度	打設温度

- ・セメントの種類：普通セメントNS，中熱セメントMS
- ・スラグの混入率：百分率（％）で表示
- ・スラグの粉末度： $4000\text{cm}^2/\text{g} = (4)$ ， $6000\text{cm}^2/\text{g} = (6)$ ， $8000\text{cm}^2/\text{g} = (8)$
- ・打設温度：目標打設温度（℃）

表-3. 8 配合及びフレッシュコンクリート試験結果 (その1)

配 合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)						スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	温度 (°C)	試験 機の 種類
			W	C	S	G	N070	303A				
NS0(4)20	53.3	48.0	160	300	890	975	0.75	1.0A	5.5	4.9	22.0	住友
NS50(4)20	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	1.0A	7.0	4.7	20.4	住友
NS60(4)20	53.3	48.0	160	300	884	968	0.75	1.5A	6.1	3.7	21.8	住友
NS70(4)20	53.3	48.0	160	300	882	967	0.75	4.5A	6.7	4.3	22.4	住友
NS80(4)20	53.3	48.0	160	300	881	965	0.75	4.0A	4.6	3.3	21.3	住友
MS0(4)20	53.3	48.0	160	300	892	977	0.75	1.0A	8.4	4.1	22.0	住友
MS40(4)20	53.3	48.0	160	300	887	972	0.75	3.0A	7.1	3.8	22.1	住友
MS50(4)20	53.3	48.0	160	300	885	970	0.75	3.5A	9.4	3.9	21.5	住友
MS60(4)20	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	4.0A	8.4	4.1	21.1	住友
MS70(4)20	53.3	48.0	160	300	883	968	0.75	5.0A	7.1	4.2	21.9	住友
NS50(6)20	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	5.0A	5.0	4.3	22.7	住友
MS50(6)20	53.3	48.0	160	300	885	970	0.75	5.0A	10.7	4.7	21.9	理工
NS50(8)20	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	5.0A	4.7	3.4	21.6	住友
MS50(8)20	53.3	48.0	160	300	885	970	0.75	5.0A	7.0	4.4	21.4	理工

表-3. 9 配合及びフレッシュコンクリート試験結果 (その2)

配 合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	温度 (°C)	試験 機の 種類
			W	C	S	G	N070	303A				
NS0(4)10	52.7	48.0	158	300	893	978	0.75	4.0A	8.1	4.9	13.4	住友
NS50(4)10	52.7	48.0	158	300	887	972	0.75	4.5A	10.3	5.0	12.2	住友
NS60(4)10	52.7	48.0	158	300	886	971	0.75	4.75	5.3	5.2	12.3	住友
NS70(4)10	52.7	48.0	158	300	885	970	0.75	5.0A	4.2	4.75	10.5	住友
NS80(4)10	52.7	48.0	158	300	884	969	0.75	5.0A	6.8	4.8	13.0	住友
NS50(6)10	52.7	48.0	158	300	887	972	0.75	5.25	10.3	5.1	12.3	理工
NS50(8)10												
NS0(4)30	56.3	48.0	169	300	879	963	0.75	4.0A	6.8	4.9	32.2	理工
NS50(4)30	56.3	48.0	169	300	874	958	0.75	5.0A	12.5	4.8	31.5	住友
NS60(4)30	56.3	48.0	169	300	872	956	0.75	5.5A	7.6	5.0	32.0	理工
NS70(4)30	56.3	48.0	169	300	871	955	0.75	5.5A	10.0	4.8	31.5	理工
NS80(4)30	56.3	48.0	169	300	870	953	0.75	5.5A	12.4	5.0	31.1	理工
NS50(6)30	56.3	48.0	169	300	874	958	0.75	5.0A	5.7	4.4	31.4	理工
NS50(8)30	56.3	48.0	169	300	874	958	0.75	5.5A	3.8	4.0	31.5	住友

表-3. 10 凝結試験結果

実験NO.	NS0(4)20	NS50(4)20	NS60(4)20	NS70(4)20	NS80(4)20
始発(h:m)	5 : 5 1	6 : 5 4	6 : 4 0	7 : 5 7	8 : 3 6
終結(h:m)	7 : 5 4	1 0 : 0 0	1 0 : 1 5	1 2 : 2 6	1 4 : 2 7

3. 4 試験方法

試験方法を表-3.11に示す。

表-3.11 試験方法

	供試体寸法など	試験方法	備考
断熱温度上昇試験	大型 $\phi 30 \times 30 \text{cm}$		住友セメント(株)製
	小型 3 リットル	3 連空気循環式	東京理工(株)製
水和熱試験	微量熱量計試験	3 連式(C=20g, w=10g)	東京理工(株)製
	J I S 溶解熱法	J I S R 5203に準ずる	—

また、試験機の概要について、以下に記す。

1) 断熱温度上昇試験機 (住友セメント(株))

図-3.2に、試験機の概要を示す。

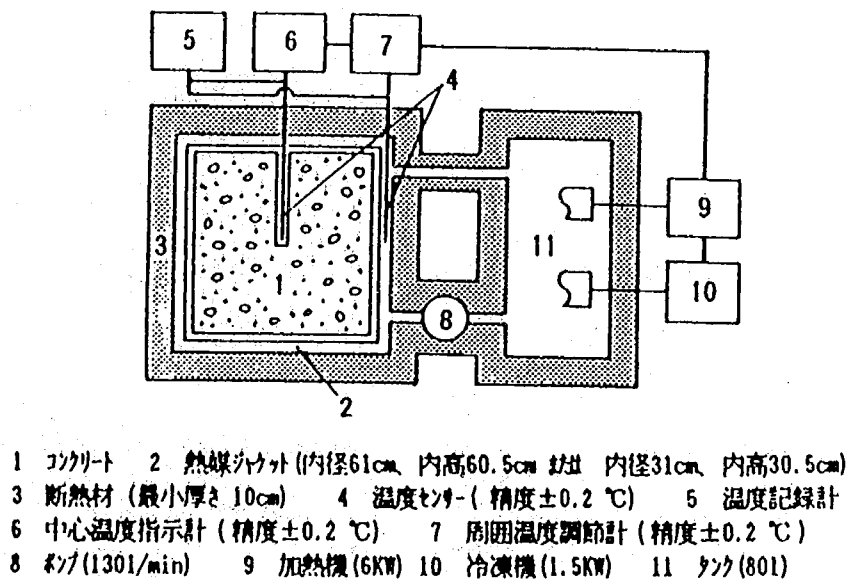


図-3.2 断熱温度上昇試験装置の概要

この試験機は、内径が30cm、内高が30cmの隔壁構造の循環経路を有する熱媒ジャケットを断熱材を設けずに供試体に密着させ、供試体の中心温度に熱媒ジャケット内の熱媒の温度を追従させて、供試体を断熱状態に保ち、コンクリートの断熱温度上昇量を測定する形式のものである。その際、最大で $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 程度を想定した中心温度の急激な変化にも、ジャケット内の熱媒の温度を追従させるため、遅れ補正演算器

を備え、 0.2°C 以内の精度で制御を可能にした。なお供試体および熱媒の温度は、白金抵抗体（JIS0.2級）で検出している。熱媒としては主にシリコンオイルを使用し、断熱温度上昇量が 100°C 以上の高温となる場合にも測定できるようにした。

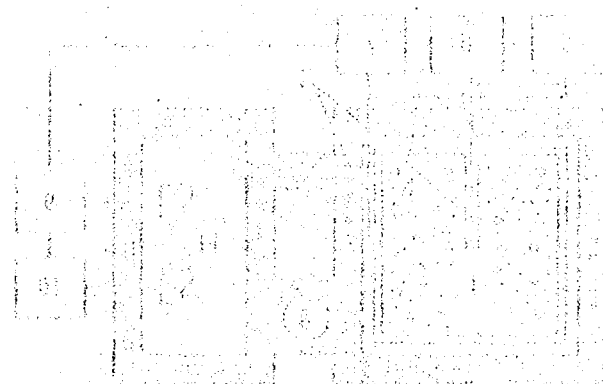
2) 断熱温度上昇試験機（東京理工(株)）

この試験機は、本来モルタルの断熱温度上昇試験用であるが、本研究ではコンクリートの試験に用いた。

試験機の特徴として、3種類の供試体について同時に断熱温度上昇試験を行える利点がある。コンクリートの中心部に熱電対（銅コンスタンタン）を入れ、温度を制御する際、3個の供試体のうち最も温度の低い供試体に環境温度を合わせ、他の2個の供試体の温度は供試体の周りの熱電対によって空気循環により熱を供給し温度を追従させるものである。

3) 微少熱量計試験機

この試験機は、熱容量の大きい金属ブロックを恒温体とし、熱変化を生ずる反応槽を熱伝導体を経由して恒温体と接続している。そして、熱変化によって生じた温度差を測定し、その値から単位時間に発熱した熱量と総発熱量を求めている。この試験機は、高感度の熱伝導体を使用することで少量の試料でできるだけ恒温状態で測定できるように設定されている。さらに、反応熱以外の熱変化や外部温度の影響を除外するために一対の熱量計を1セットとし、両者の温度差を検出する示差方式を採用し、複数の供試体の場合、1個の熱量計を標準とし、これを中心として各々の熱量計と標準熱量計との温度差から発熱速度を求め、発熱速度を積分することにより発熱量を求めるものである。



4. 実験結果

4.1 セメントの水和熱試験による発熱特性

4.1.1 微少熱量計試験

本研究では、セメントの微少熱量計試験を各配合および系の温度について各々試験期間を72時間（3日間）行った。このときの配合は、結合材料を20g、水を10g、水セメント比50%とした。

表-4.1に材令72時間後の積算発熱量一覧を示す。また、図-4.1にスラグの混入率、粉末度、系の温度を変化させたときの積算発熱量を示す。なお積算発熱量の経時変化については付図-1.1に載せた。

表-4.1a) 積算発熱量一覧（混入率の変化、単位:cal/g）

セメントの種類	スラグ混入率(%)	20°C	30°C	40°C	50°C
普通	0	63.9	81.9	87.1	86.3
	50	51.7	65.3	75.2	75.4
	60	48.6	62.1	74.3	67.1
	70	44.4	56.9	67.9	66.7
	80	38.9	50.5	56.3	56.3
中庸熱	0	53.9	60.5	66.0	70.5
	40	44.9	55.0	64.6	71.6
	50	41.8	52.7	65.0	74.9
	60	39.9	51.5	66.2	68.6
	70	36.1	49.8	60.8	63.6

表-4.1b) 積算発熱量一覧（粉末度、単位:cal/g、混入率50%）

セメントの種類	粉末度(cm^2/g)	20°C	30°C	40°C	50°C
普通	4000	51.7	65.3	75.2	75.4
	6000	57.3	75.6	89.1	86.6
	8000	62.2	81.6	91.4	89.9
中庸熱	4000	41.8	52.7	65.0	74.9
	6000	48.8	64.0	73.9	70.8
	8000	53.2	70.7	79.6	73.0

これらの図、表より、系の温度が一定かつセメントの種類が同一の場合、スラグの混入率が大きくなるにつれて積算発熱量が小さくなることがわかった。また、スラグの粉末度が大きくなると積算発熱量は大きくなる。

3日間においてスラグ混入率の大きい配合の積算発熱量が小さい配合のそれを追い抜く逆転現象が起こることはないようである。さらに、同一配合において、系の温度が高くなるに従って積算発熱量は増加する。しかしながら、系の温度が50°C以上になると増加量はほとんど見られず発熱に限界があると思われる。

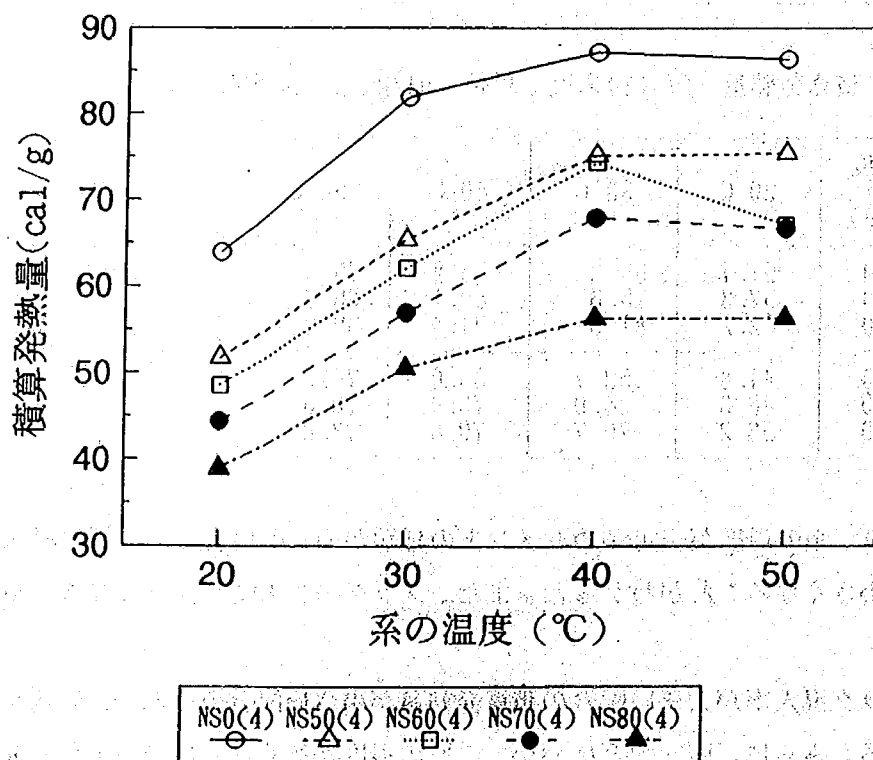
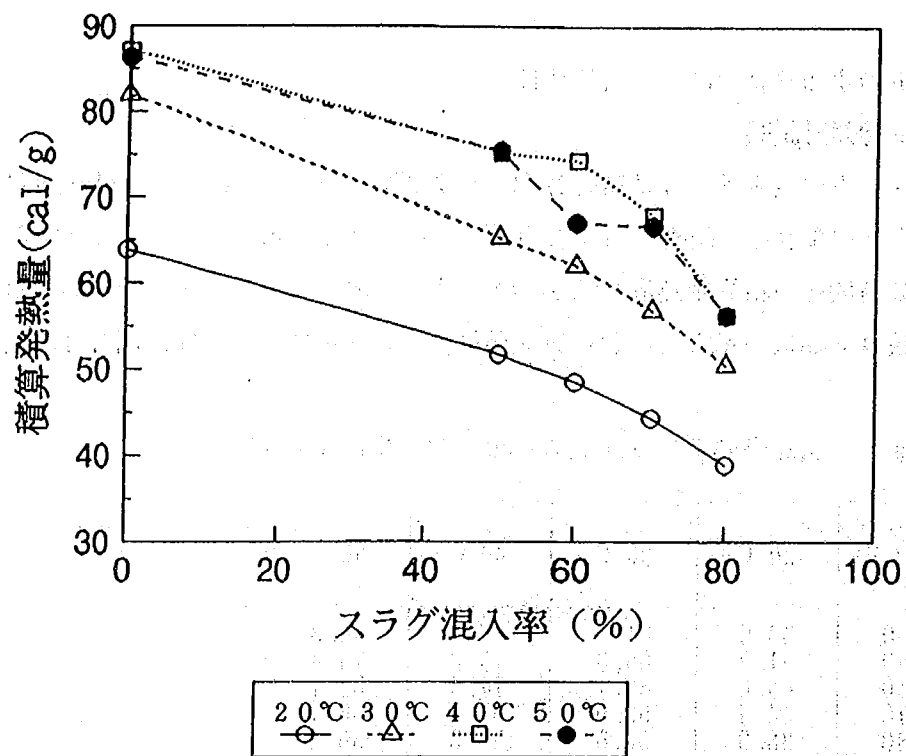


図-4.1 積算発熱量の変化 (普通セメント)

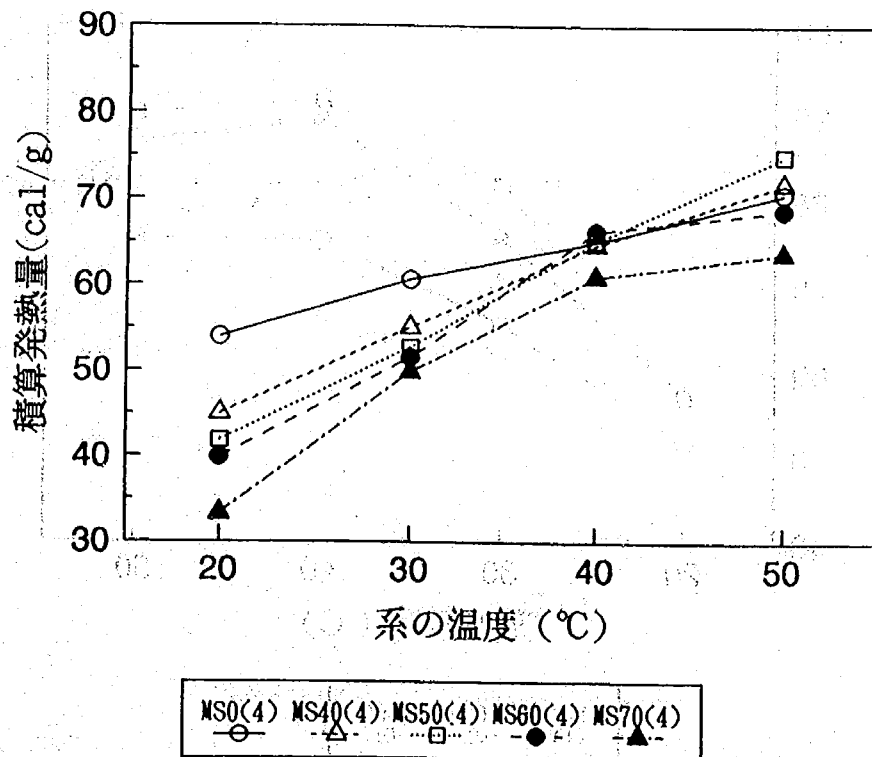
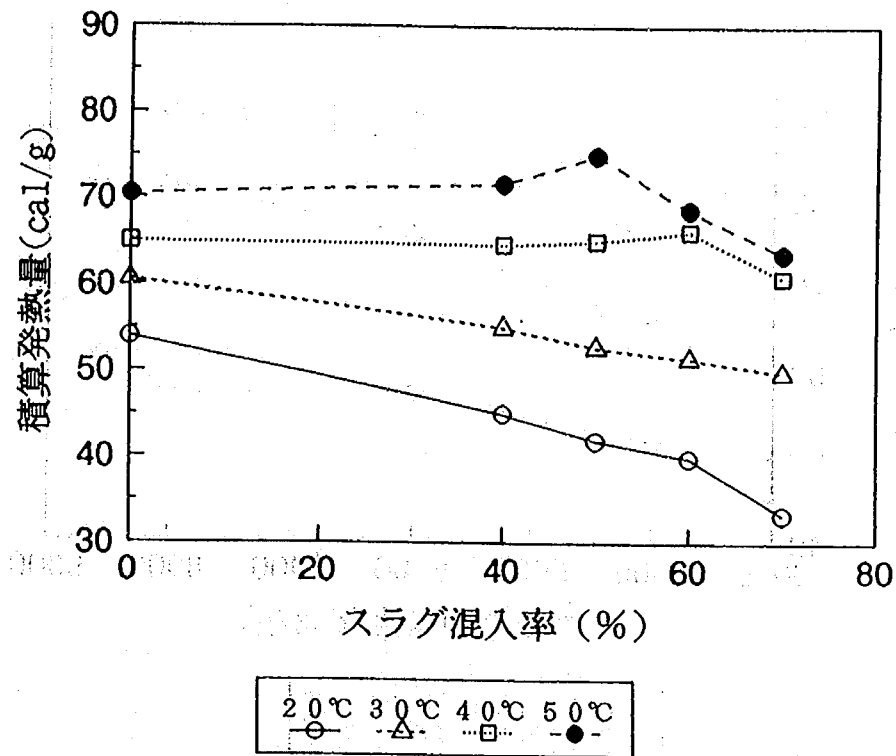


図-4.1 積算発熱量の変化 (中熱セメント)

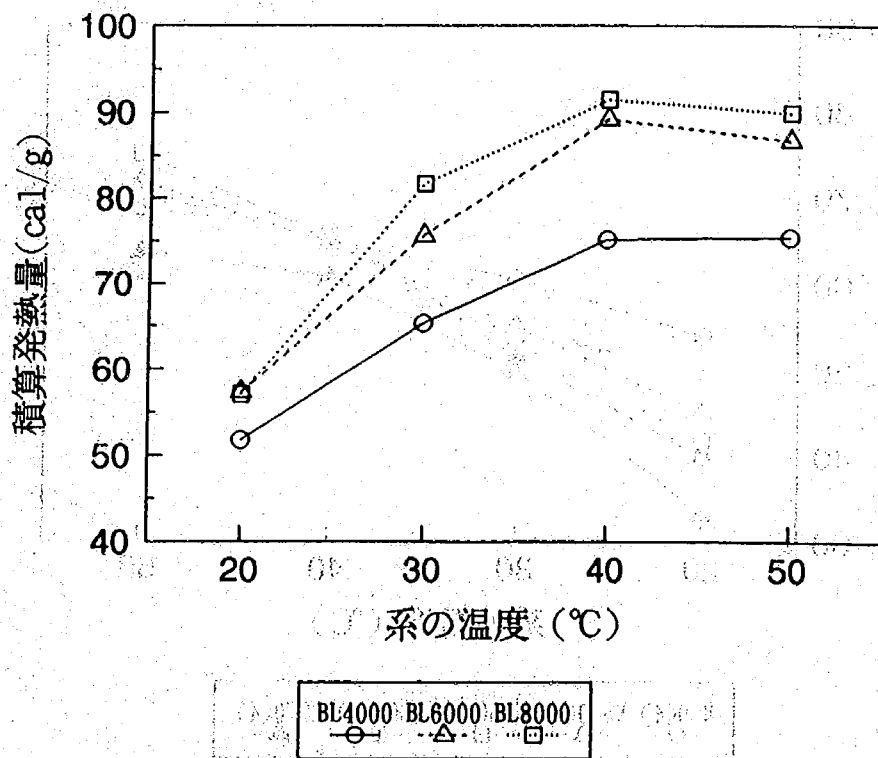
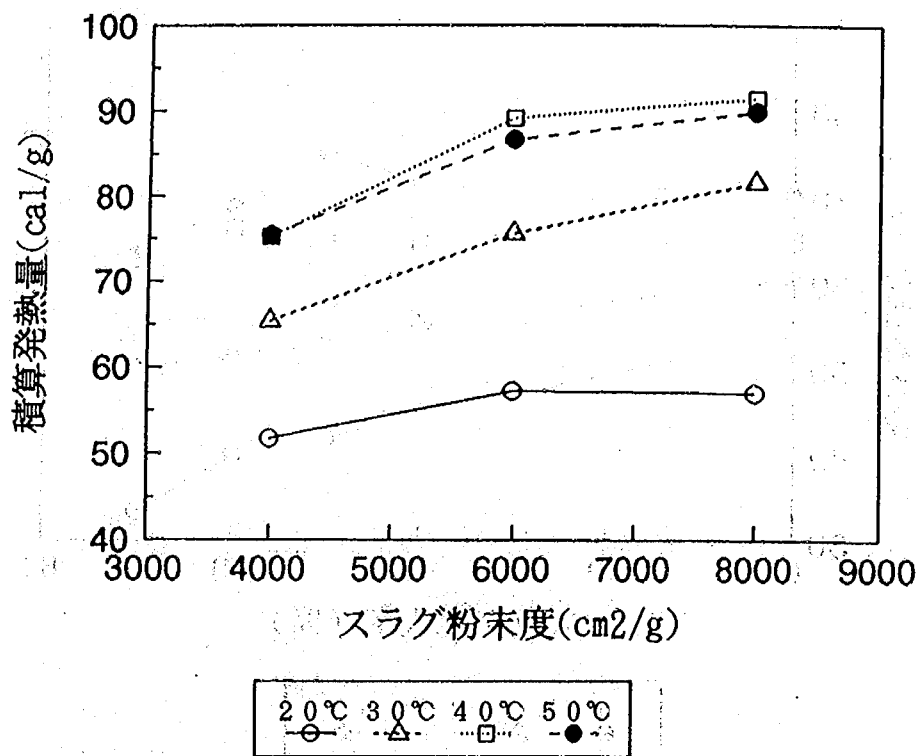


図 4.1 積算発熱量の変化 (普通セメント)

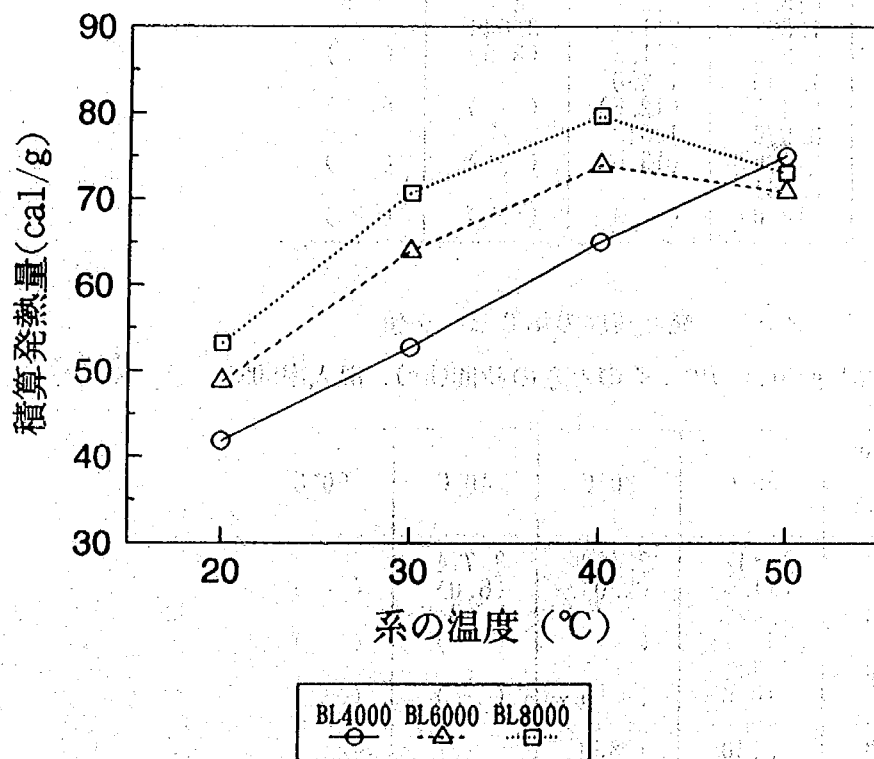
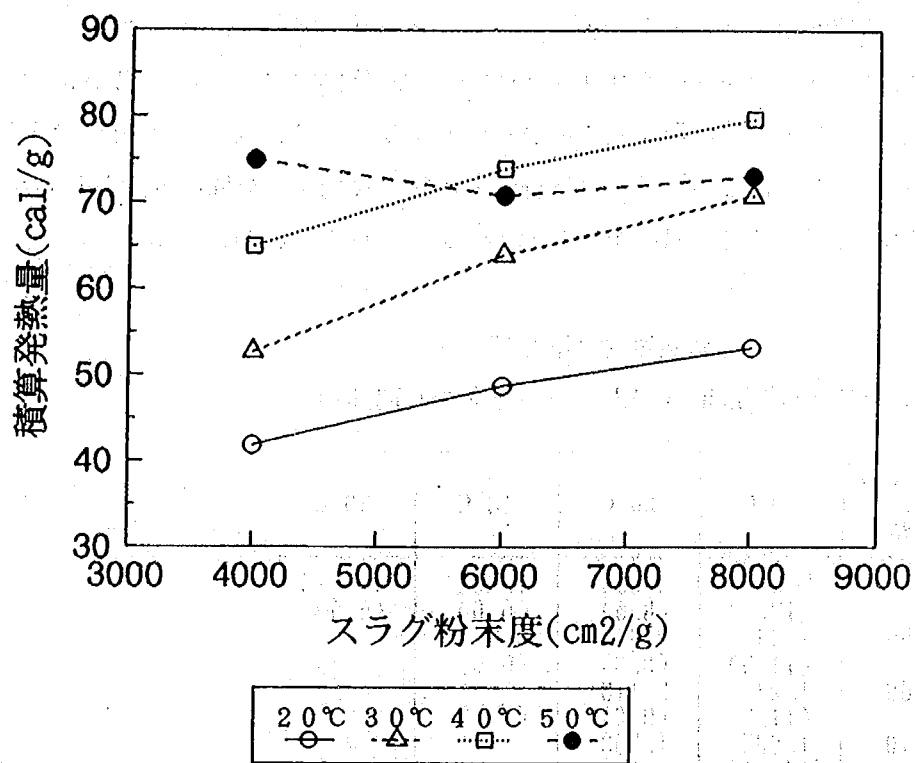


図-4.1 積算発熱量の変化 (中庸熱セメント)

次に、表-4.2に発熱速度の第2ピーク、表-4.3に第3ピーク、図-4.2に発熱速度の経時変化を示す。

図-4.2は系の温度が20℃の粉末度4000 cm²/gの場合を載せその他の場合については付図-1.2に載せた。本研究では、セメントの接触湿潤熱や遊離石灰およびC₃Sによる水和発熱の第1ピークについては特に述べないものとする。これはこの発熱が、結合水との接触後約10分間程度でありしかも5 cal/g程度の発熱で、次章以降に述べる発熱量の予測に大きな影響を与えないからである。

表-4.2 a) 発熱速度の第2ピーク値
(混入率、単位: cal/g/hr, ()内: そのときの時間, hr)

セメントの種類	混入率 (%)	20°C	30°C	40°C	50°C
普通	0	2.572 (12.5)	4.699 (8.5)	7.804 (6.0)	14.022 (5.5)
	50	1.442 (11.5)	2.419 (8.0)	3.774 (6.0)	(-)
	60	1.249 (11.5)	2.113 (9.0)	(-)	(-)
	70	1.035 (14~15)	1.853 (11.0)	(-)	(-)
	80	0.868 (18.5)	(-)	(-)	(-)
中庸熱	0	1.962 (15.5)	3.423 (10.5)	5.101 (8.0)	8.649 (6.5)
	40	1.309 (15.0)	2.111 (11.5)	3.644 (8.5)	(-)
	50	1.140 (14.5)	1.830 (12.5)	(-)	(-)
	60	0.970 (16.5)	1.613 (13.5)	(-)	(-)
	70	0.741 (14.0)	(-)	(-)	(-)

表-4.2 b) 発熱速度の第2ピーク値
(粉末度、単位: cal/g/hr, ()内: そのときの時間(hr), 混入率50%)

セメントの種類	粉末度 (cm ² /g)	20°C	30°C	40°C	50°C
普通	4000	1.442 (11.5)	2.419 (8.0)	3.774 (6.0)	(-)
	6000	1.522 (14~15)	(-)	(-)	(-)
	8000	1.441 (10.0)	(-)	(-)	(-)
中庸熱	4000	1.140 (14.5)	1.830 (12.5)	(-)	(-)
	6000	(-)	(-)	(-)	
	8000	(-)	(-)	(-)	

表-4.3a) 発熱速度の第3ピーク値
(混入率、単位: cal/g/hr, ()内: そのときの時間, hr)

セメントの種類	混入率 (%)	20°C	30°C	40°C	50°C
普通	0	- (-)	- (-)	- (-)	- (-)
	50	1.200 (27.0)	2.625 (15.0)	5.164 (9.0)	8.501 (7.0)
	60	1.176 (27.0)	2.585 (15.0)	5.066 (9.5)	5.749 (6.0)
	70	1.230 (28.0)	2.512 (15.5)	4.943 (9.5)	7.361 (7.5)
	80	1.225 (28.0)	2.503 (15.0)	4.770 (9.0)	6.422 (7.0)
中 庸 熱	0	- (-)	- (-)	- (-)	- (-)
	40	- (-)	1.972 (18.0)	3.702 (11.0)	5.915 (8.0)
	50	0.978 (32.0)	1.948 (20.0)	3.471 (12.0)	5.896 (8.5)
	60	1.0430 (32.0)	2.004 (19.5)	3.623 (11.5)	5.546 (8.5)
	70	0.900 (36.0)	2.143 (19.0)	3.869 (12.0)	6.265 (8.5)

表-4.3b) 発熱速度の第3ピーク値
(粉末度、単位: cal/g/hr, ()内: そのときの時間, hr, 混入率50%)

セメントの種類	粉末度 (cm ² /g)	20°C	30°C	40°C	50°C
普通	4000	1.200 (27.0)	2.625 (15.0)	5.164 (9.0)	8.501 (7.0)
	6000	1.930 (21.5)	3.901 (12.0)	7.376 (8.0)	10.751 (7.0)
	8000	2.249 (18.0)	4.356 (11.0)	7.957 (7.0)	12.952 (6.0)
中 庸 熱	4000	0.978 (32.0)	1.948 (20.0)	3.471 (12.0)	5.896 (8.5)
	6000	1.727 (26.0)	3.158 (15.5)	5.388 (10.5)	7.846 (8.5)
	8000	1.885 (22.5)	3.430 (14.0)	5.722 (9.0)	9.605 (8.0)

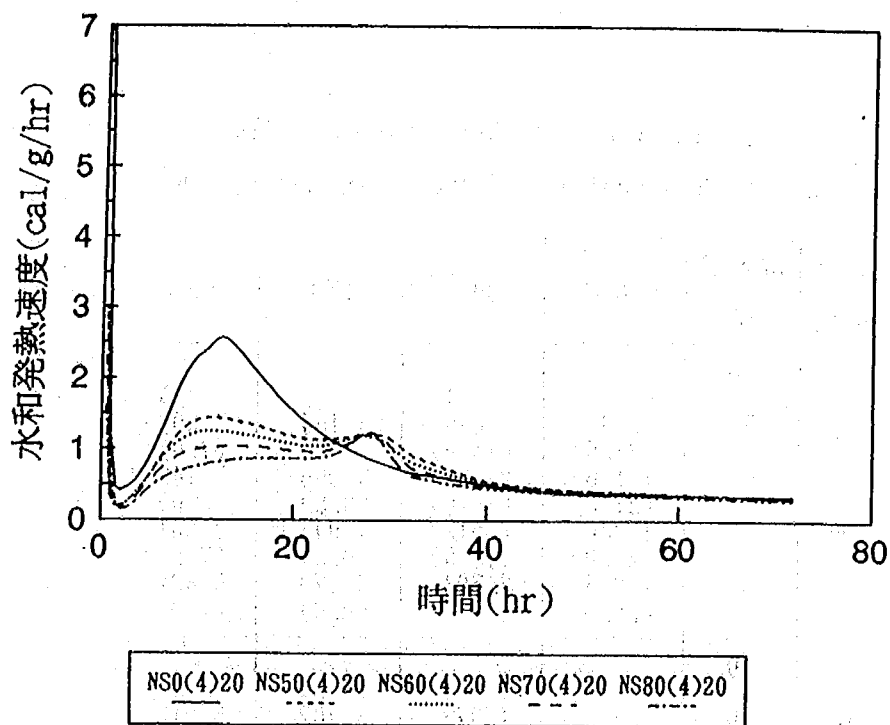


図-4.2 発熱速度の経時変化 (系の温度 20℃・普通セメント)

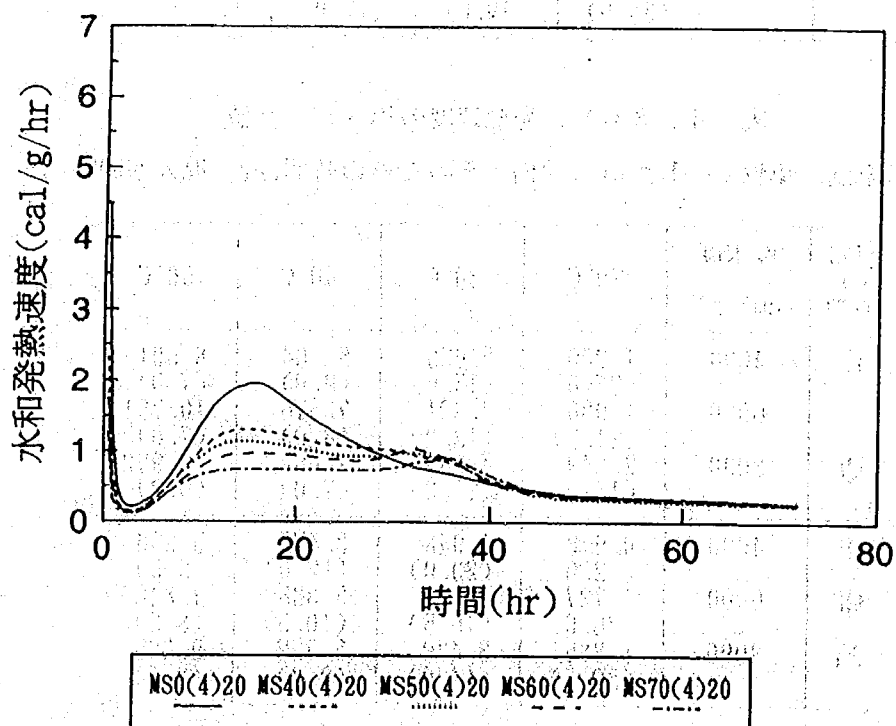


図-4.2 発熱速度の経時変化 (系の温度 20℃・中庸熱セメント)

第2ピークの存在は、ポルトランドセメント中のC₃Sによるものである。⁴⁾このピークをとる時間は、スラグ混入率にかかわらずほぼ一定である。混入率が高い場合ピークの時間が遅くみえるがこれはセメントの割合が小さいためピークの値が顕著に現れなかったためである。ピークの値はスラグ混入率が大きくなるほど小さくなる。また、ピーク値はスラグ粉末度が大きくなるほど大きい。スラグ混入率が大きくなるにつれて、温度が高くなるにつれて、スラグ粉末度が大きくなるにつれて第2ピークの存在が薄れている事がわかる。

第3ピークの存在は、高炉スラグ微粉末のアルカリ刺激による水和熱が含まれている。このピークは同一温度・同一スラグの場合、スラグ混入率にかかわらずピークの値およびその時間はほぼ一定である。また、スラグの粉末度が大きくなるほどピークの時間は早くなる。ピークの値は同一配合の場合、温度が高くなるに従って大きくなる。

なお、通常言われている第3ピークは、セメントの水和初期のC₃Aと石膏によって生成するエトリンガイト相のモノサルフェート相への転移によって放出される熱であるが⁴⁾、本実験では明確な値は現れなかったので特に記述しない。

図-4.3に、発熱速度の第3ピーク値H3peakと発生時間tの関係を示す。

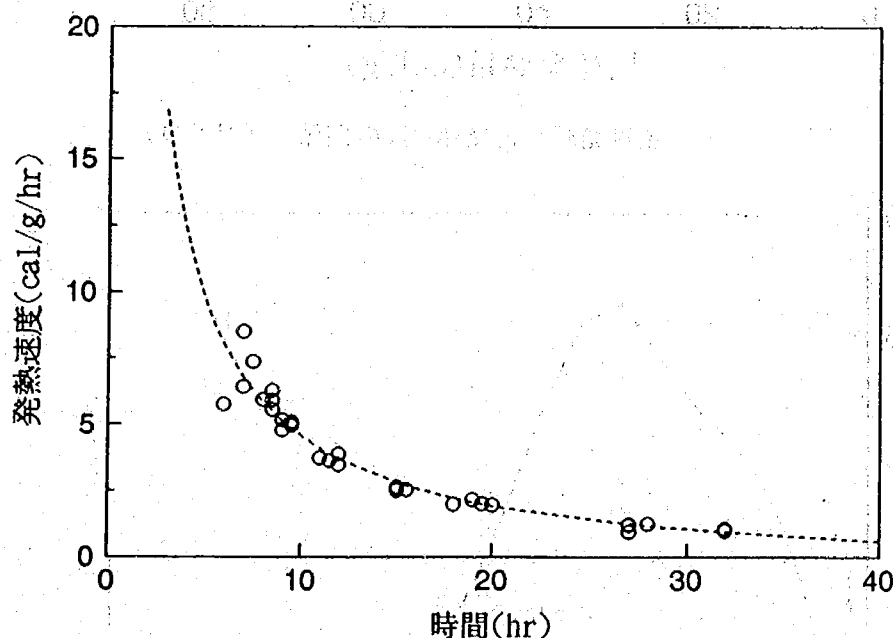


図-4.3 発熱速度の第3ピークと発生時間の関係

図中には、この関係の回帰式(3.1)も記した。実験値と回帰式の相関が良いことがわかる。

$$H3peak = 52.6 \sqrt{t} - 0.721 \quad (t: \text{発生時間}(\text{hr}), \text{相関係数} = 0.959) \quad \text{--- (3.1)}$$

また、水和発熱速度曲線は温度が高くなるほど初期の発熱が大きく、ピークの発現時間が短時間にシフトし、逆に長時間では、急速に発熱が低下する傾向がみられる。

次に、試験より得られた発熱量と発熱速度について、発熱量を横軸にまた発熱速度を縦軸にとり値をプロットしたものを図-4.4に示す。なおN S 0 およびN S 5 0 の場合のみを載せその他については付図-1.3に載

せた。

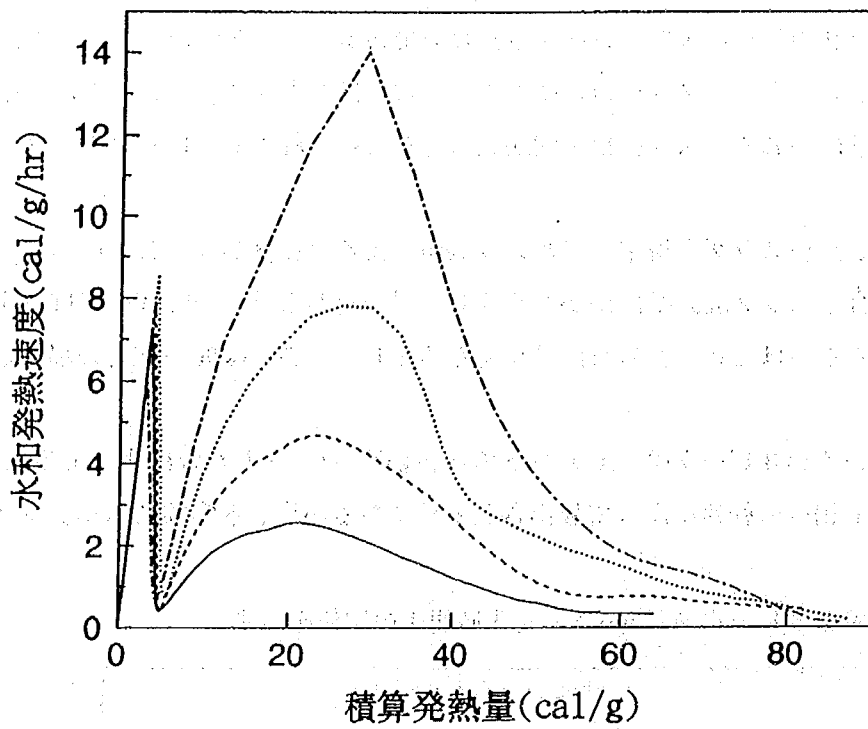


図-4.4 積算発熱量と発熱速度の関係 (NSO)

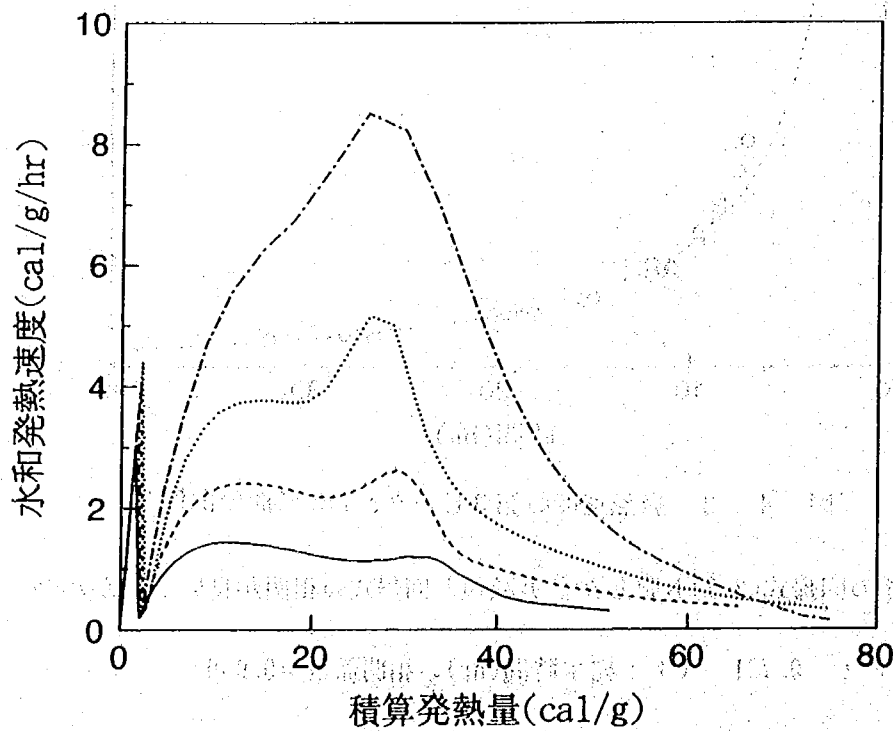


図-4.4 積算発熱量と発熱速度の関係 (NS50)

同一配合では、系の温度が異なっても発熱パターンやピークなどはよく似た傾向を示している。しかしながら、高温になるほど温度の影響を考慮に入れなければならないことがわかる。本研究では、各温度における発熱速度を発熱量の値毎にアレニウスプロットし温度上昇の予測を行った。これについては、次章に述べるものとする。

4.1.2 J I S溶解熱法

本研究では、J I S溶解熱法によるセメントの水和熱試験も行った。表-4.4および図-4.5に試験結果を示す。なお表中には微少熱量計試験の結果も記す。

表-4.4 a) J I S溶解熱法試験結果（混入率、単位:cal/g）

セメントの種類	スラグ混入率 (%)	微少熱量計試験 (3day)	J I S溶解熱法			
			3day	7day	28day	91day
普通	0	63.9	65.6	79.4	92.8	99.1
	50	51.7	51.6	67.8	84.3	89.4
	60	48.6	47.0	61.4	76.9	83.2
	70	44.4	42.1	53.6	65.8	72.9
	80	38.9	37.6	46.9	54.8	60.7
中庸熱	0	53.9	53.0	64.0	77.2	85.0
	40	44.9	44.4	57.2	77.2	84.8
	50	41.8	41.6	55.6	74.6	81.6
	60	39.9	38.4	50.2	66.6	74.3
	70	36.6	36.7	48.4	61.0	67.1

表-4.4 b) J I S溶解熱法試験結果（粉末度、単位:cal/g、混入率50%）

セメントの種類	粉末度 (cm ² /g)	微少熱量計試験 (3day)	J I S溶解熱法			
			3day	7day	28day	91day
普通	4000	51.7	51.6	67.8	84.3	89.4
	6000	57.3	56.8	70.2	86.3	92.6
	8000	62.2	61.6	75.0	85.6	91.6
中庸熱	4000	41.8	41.6	55.6	74.6	81.6
	6000	48.8	46.6	61.6	77.5	83.6
	8000	53.2	49.4	64.7	77.0	82.8

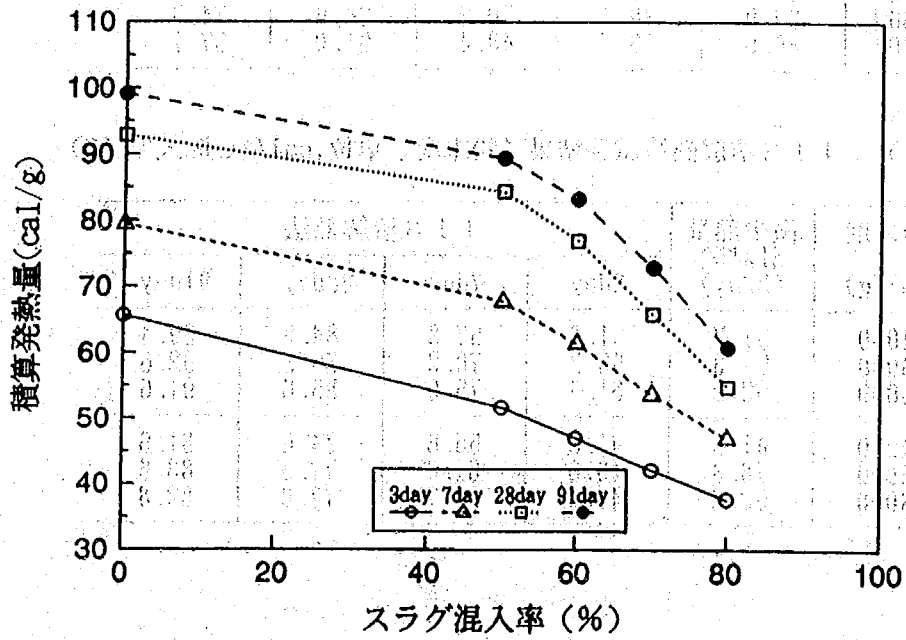
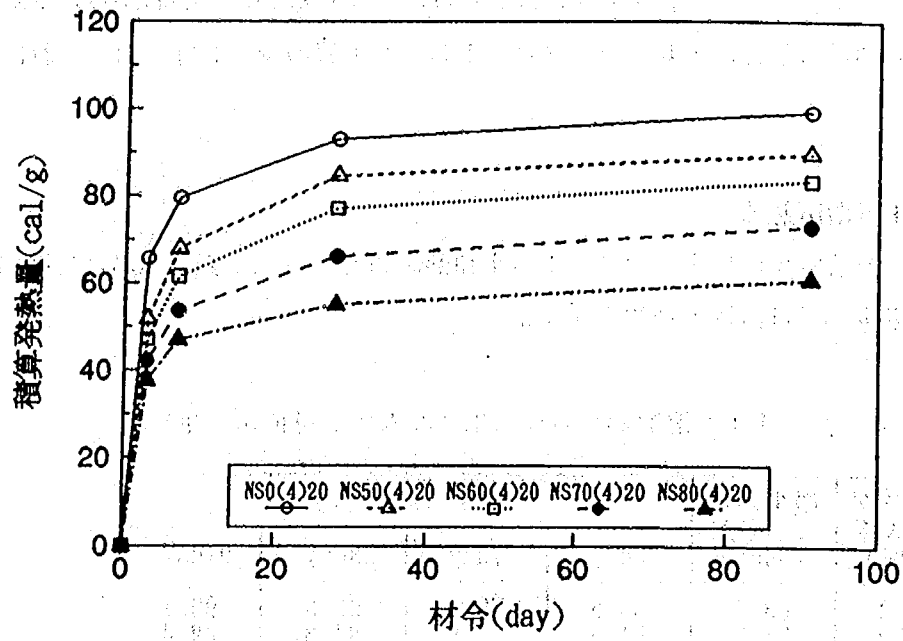


図-4.5 J I S 溶解熱法試験結果 (普通セメント)

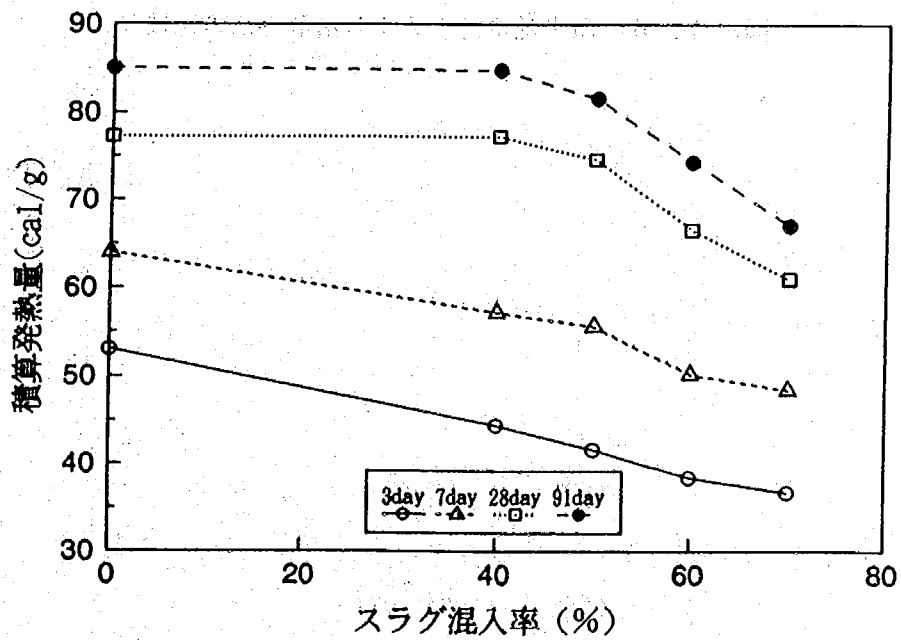
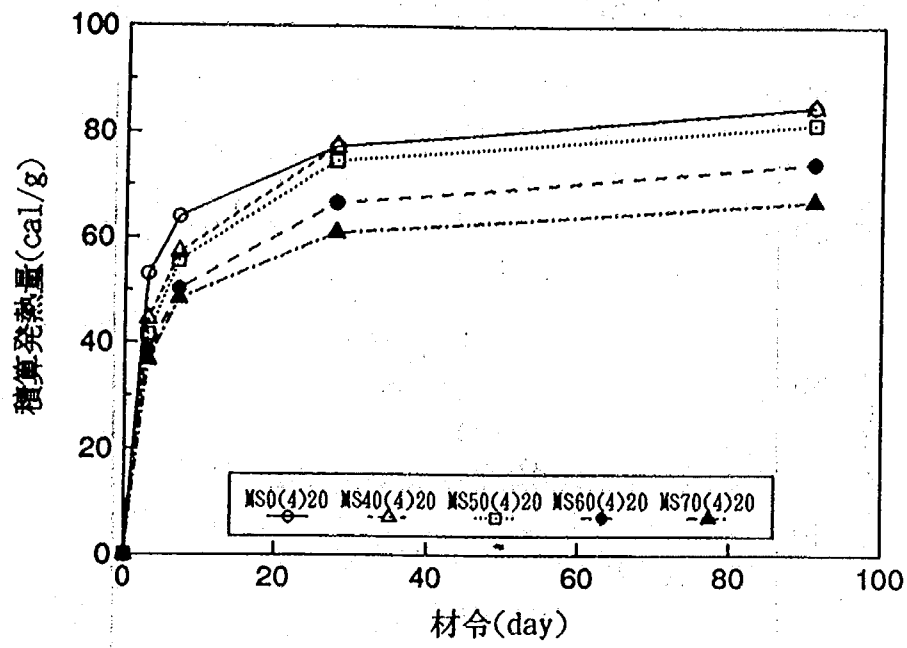


図-4.5 JIS溶解熱法試験結果 (中庸熱セメント)

表より、微少熱量計とJ I S溶解熱法とでは材令3日で非常に良い相関（相関係数=0.989）がみられた。
 微少熱量計と溶解熱法による水和熱の関係を図-4.6に示す。

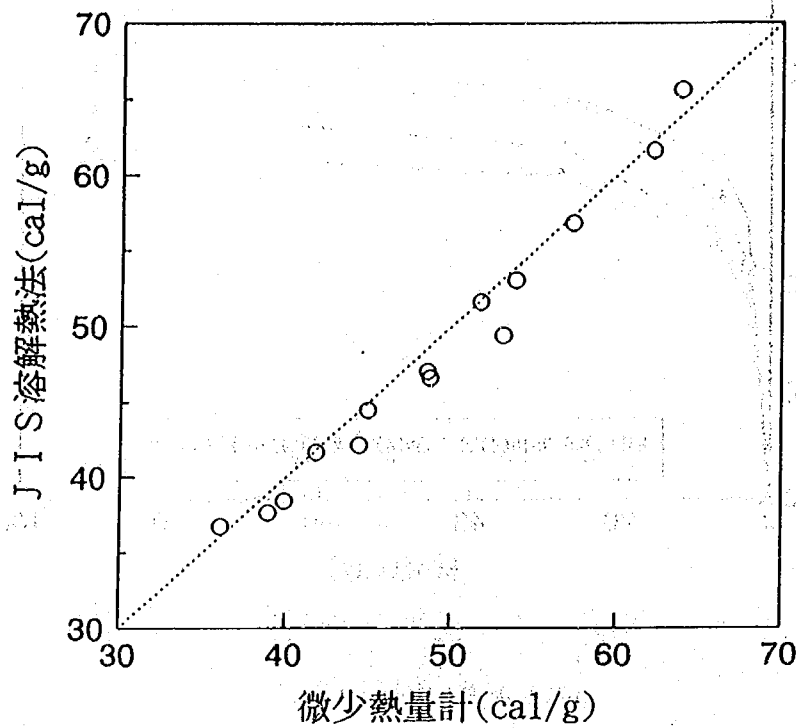


図-4.6 微少熱量計とJ I S溶解熱法の比較

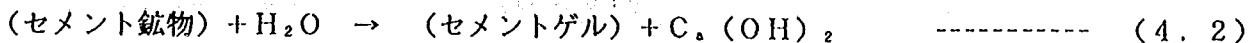
4.2 コンクリートの断熱条件下における温度上昇特性

コンクリートの断熱条件下における温度上昇特性を調べるために、断熱温度上昇試験を行った。試験期間は、セメントの断熱温度上昇がほぼ終了するであろうと思われる10日間とした。

図-4.7に、打設温度20℃、スラグの粉末度4000cm²/gの場合の、スラグの混入率を変化させたときのコンクリートの断熱温度上昇試験結果を示す。

図より断熱状態のコンクリートの温度上昇はスラグの影響を強く受けていることがわかる。つまり、結合材中のスラグ混入率が大きくなるほど温度上昇速度が緩やかになっている。また、普通ポルトランドセメント（以下普通セメントと呼ぶ）でスラグ混入率が60%、中熱ポルトランドセメント（以下中熱セメントと呼ぶ）でスラグ混入率が60%まではスラグ混入率0%より最終温度上昇量が大きくなっている。スラグの混入により断熱温度上昇量が低くなるのは普通、中熱セメントともに70%以上と推定される。

以上の結果はセメントの水和反応およびスラグのアルカリ刺激と関係があるものと推測される。セメントの水和反応は式(4.2)のように表すことができる。



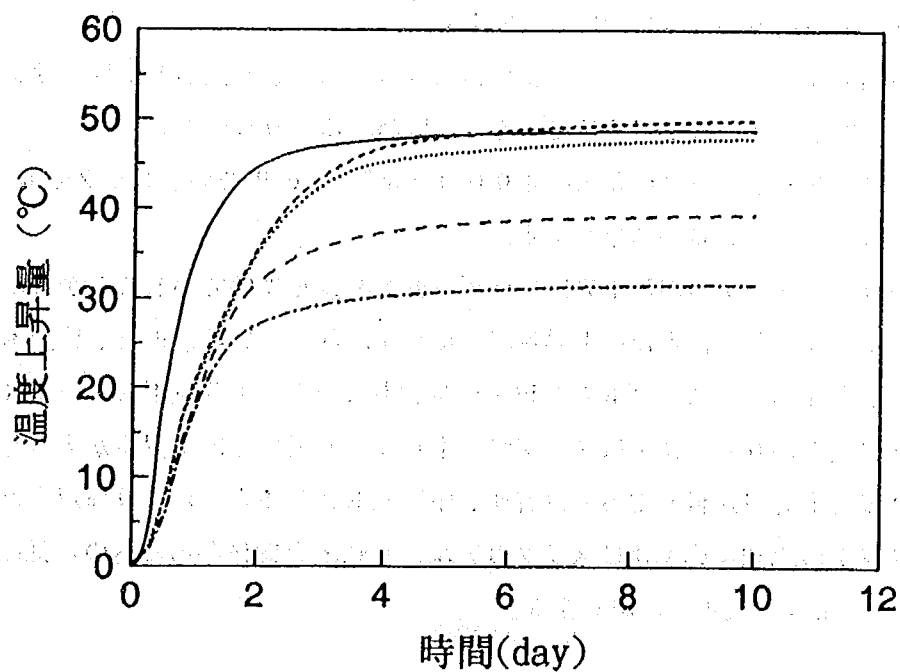
式(4.2)右辺のC_s(OH)₂がアルカリ刺激としてスラグの潜在水硬性を発揮させる。このときC_s(OH)₂がスラグの反応に用いられると式(4.2)は平衡を保とうとし左辺から右辺への反応が促進される（ル・シャトリエの法則）。言い換えれば、スラグが反応すると同時にセメントの水和反応も加速されお互いの相乗効果の下で反応が進むものと考えられる。また、スラグ混入率が50、60%のときに、式(4.2)中のC_s(OH)₂の生成とスラグへのアルカリ刺激がほぼ一致し、その結果、断熱温度上昇試験における最終温度上昇量が大きくなったと思われる。

次に、打設温度が20℃、スラグ混入率が50%のときスラグの粉末度が変化したときの断熱温度上昇試験結果を図-4.8に示す。

試験開始直後よりスラグ粉末度の影響がみられスラグ粉末度が大きくなるに従って上昇速度が大きくなる。また粉末度が大きいほど最終温度上昇量が大きくなる。

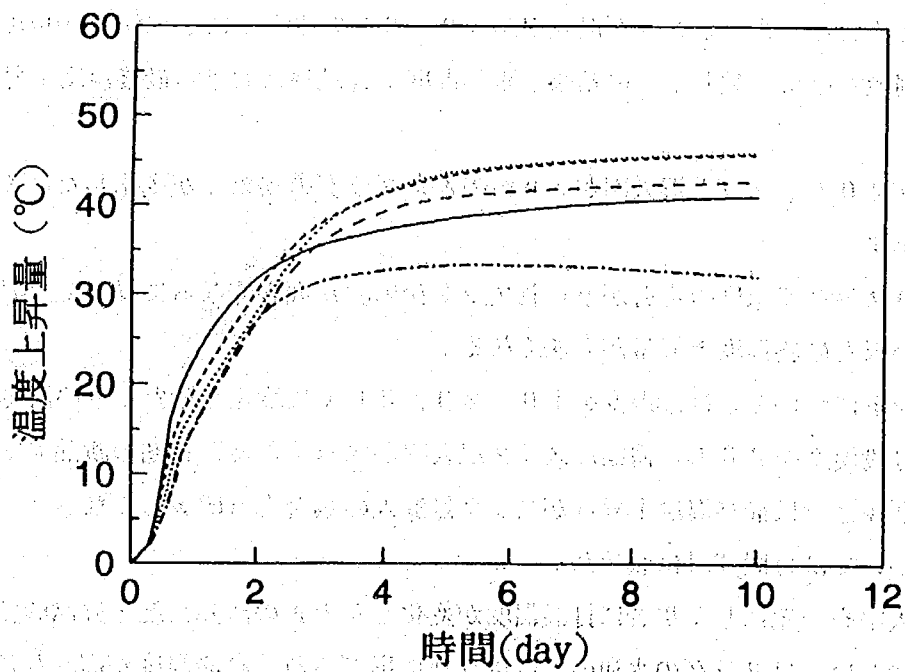
次に、普通セメントについて、打設温度を10、20、30℃に変化させたときの断熱温度上昇試験結果を図-4.9に示す。打設温度が20℃と同様にスラグ混入率が大きくなると初期の断熱温度上昇速度が小さくなり、混入率が60%までは最終温度上昇量がスラグ無混入の場合とほぼ等しくなった。なお、粉末度が変化した場合の図については付図-2.1に載せた。

次に、スラグ混入率を一定にした場合に打設温度が変化したときの断熱温度上昇試験結果について述べる。同一スラグ混入率においてはスラグの水和の温度依存性に影響され、打設温度が高くなるにつれて初期の温度上昇速度が大きくなり最終温度上昇量は低くなった。また、これらの図は付図-2.1に載せた。



NS0(4)20 NS50(4)20 NS60(4)20 NS70(4)20 NS80(4)20

図-4.7 断熱温度上昇試験結果 (普通セメント)



MS0(4)20 MS40(4)20 MS50(4)20 MS60(4)20 MS70(4)20

図-4.7 断熱温度上昇試験結果 (中熱セメント)

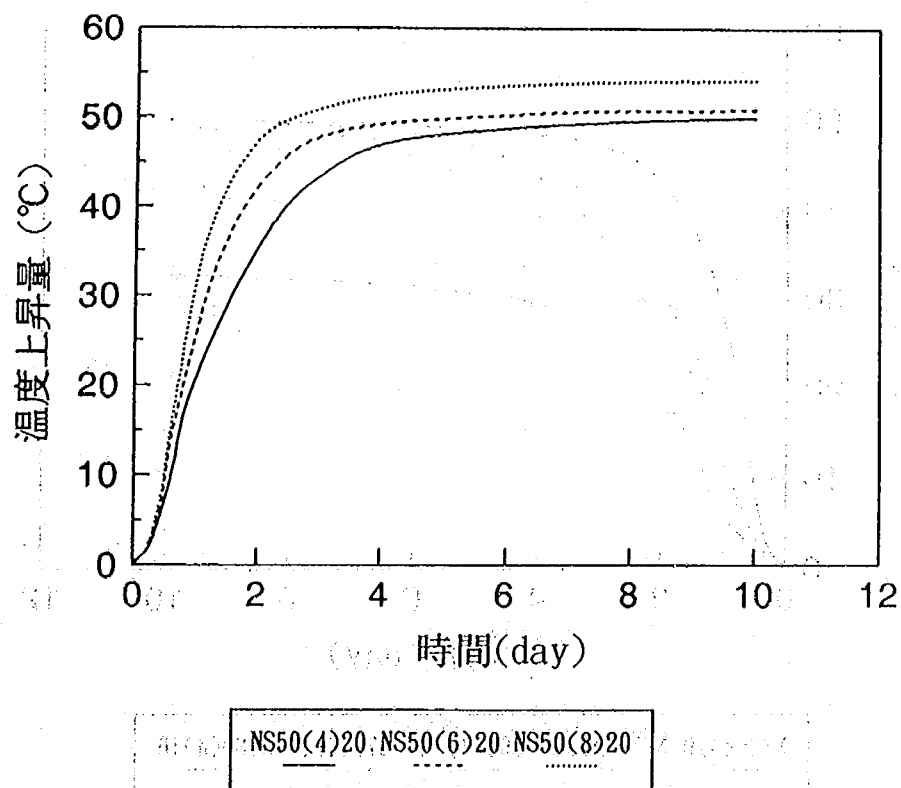


図4.1.8 断熱温度上昇試験結果 (普通セメント)

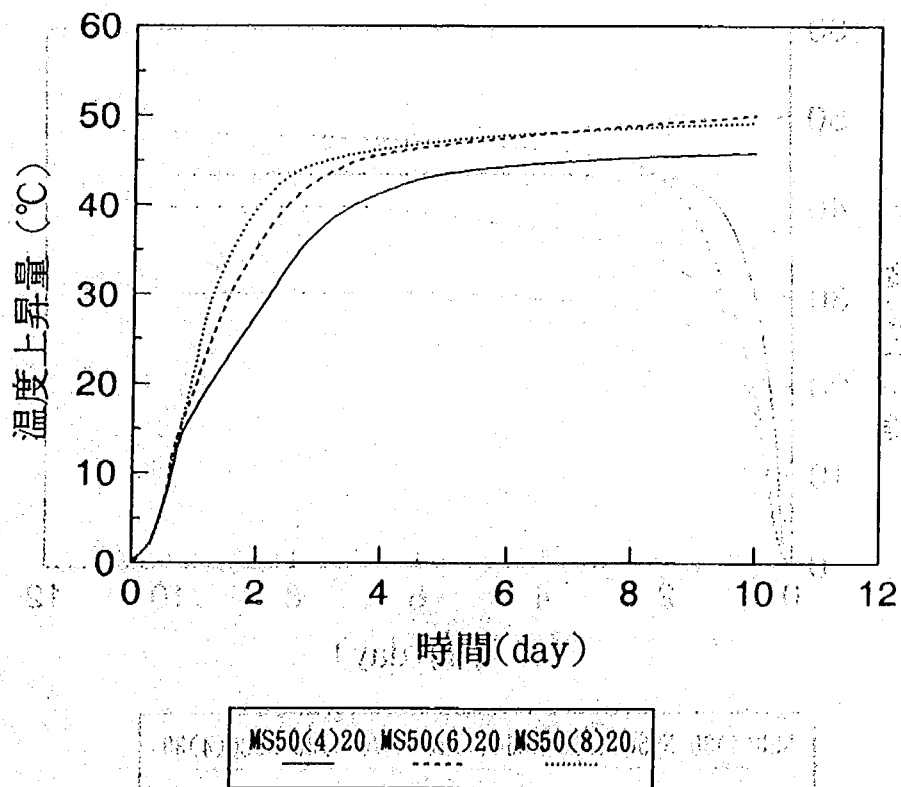
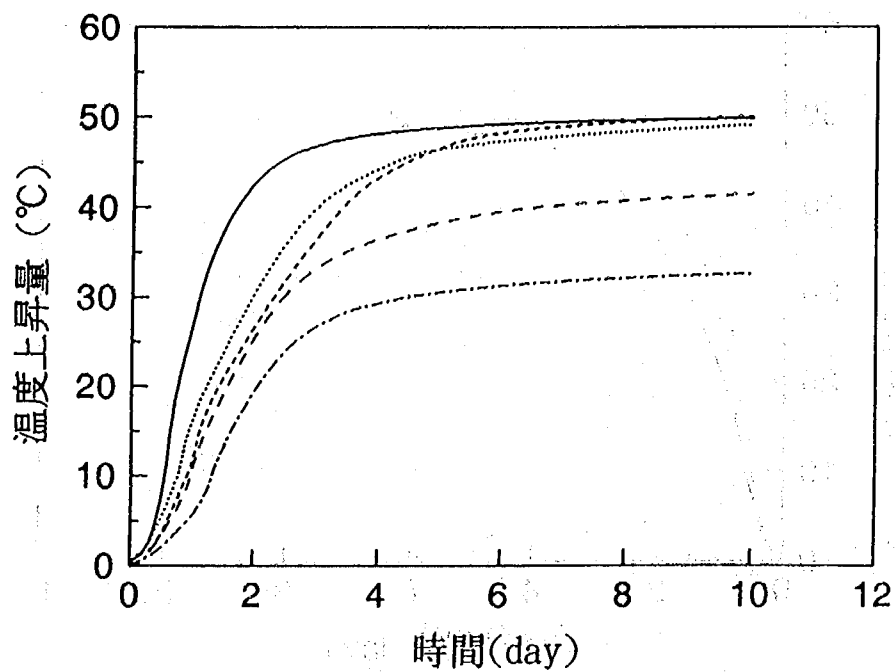
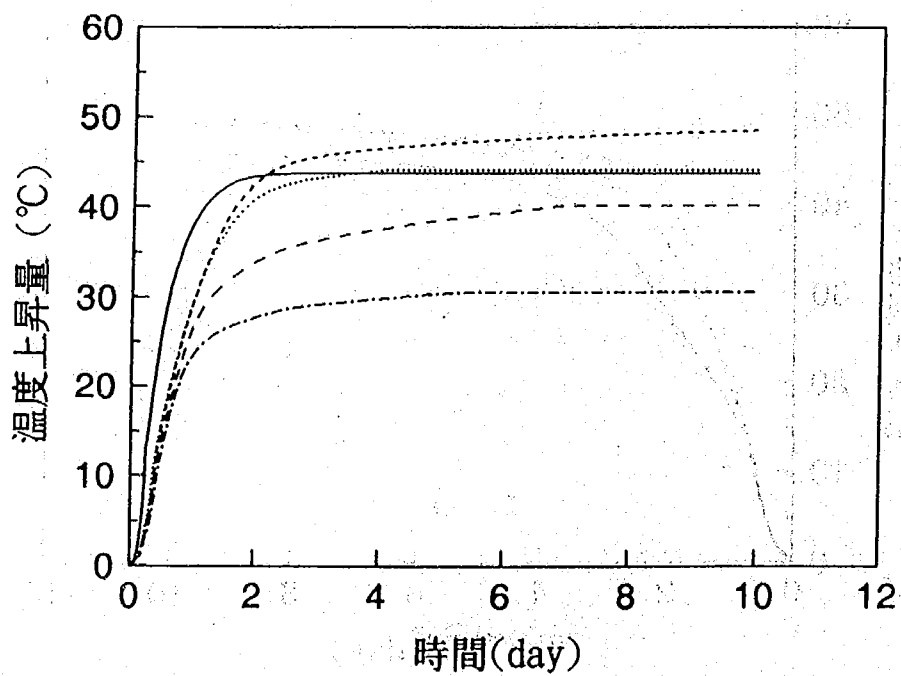


図4.1.8 断熱温度上昇試験結果 (中熱セメント)



NS0(4)10 NS50(4)10 NS60(4)10 NS70(4)10 NS80(4)10

図-4.9 断熱温度上昇試験結果 (打設温度 10°C)



NS0(4)30 NS50(4)30 NS60(4)30 NS70(4)30 NS80(4)30

図-4.9 断熱温度上昇試験結果 (打設温度 30°C)

次に、材令10日における最終温度上昇量を図-4.10に示す。

図より、最終温度上昇量は、打設温度が一定ならば、セメントの種類にかかわらずスラグ混入率が50～60%程度まではスラグ無混入の場合に比べて大きくなる。また、スラグ粉末度が大きくなるにつれて最終温度上昇量は大きくなる。また、同一配合において打設温度が変化したときの最終温度上昇量は温度が低いときほど最終温度上昇量は大きくなることからわかる。

次に、断熱試験開始後より0～1, 1～2, 2～3, 3～7, 7～10日における平均温度上昇速度を図-4.11に示す。なお、粉末度が変化した場合については付図-2.2に載せた。

図より、0～1日の初期において打設温度に関係なくスラグ混入率が大きいほど上昇速度は大きい。1～3日では混入率が50もしくは60%で速度が最大となり無混入の場合と混入率70, 80%での上昇速度はほぼ等しくなった。さらに3日以降は上昇速度はほぼ0～1℃/日以下となる。

打設温度が変化したときも同様の傾向を示すが、打設温度が10℃の2～3日の上昇速度と30℃の1～2日の上昇速度がほぼ同様となった。各々のスラグ混入率および粉末度について、水和発熱状況が打設温度に依存していることがわかる。この温度依存性については次章で述べ、温度依存性を考慮した断熱温度上昇予測を行うこととする。



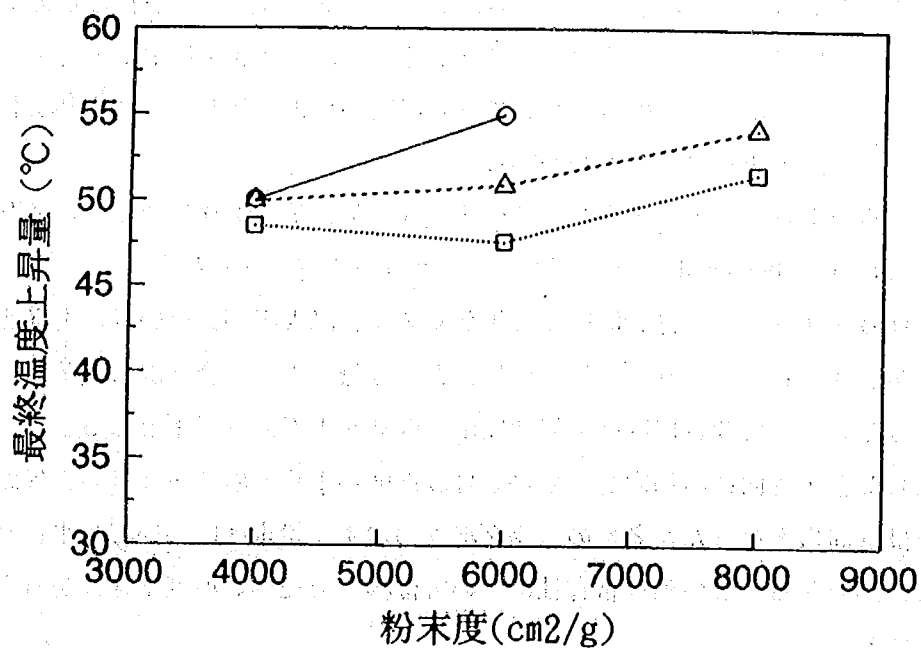


図-4.10 材令10日の断熱温度上昇量 (普通セメント)

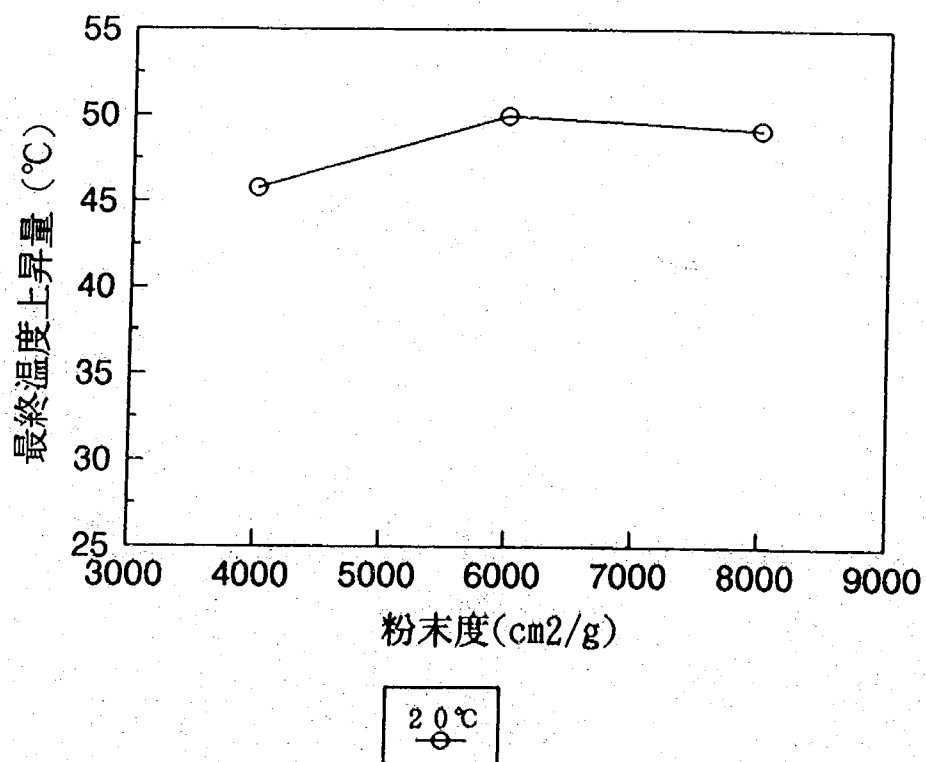


図-4.10 材令10日の断熱温度上昇量 (中熱セメント)

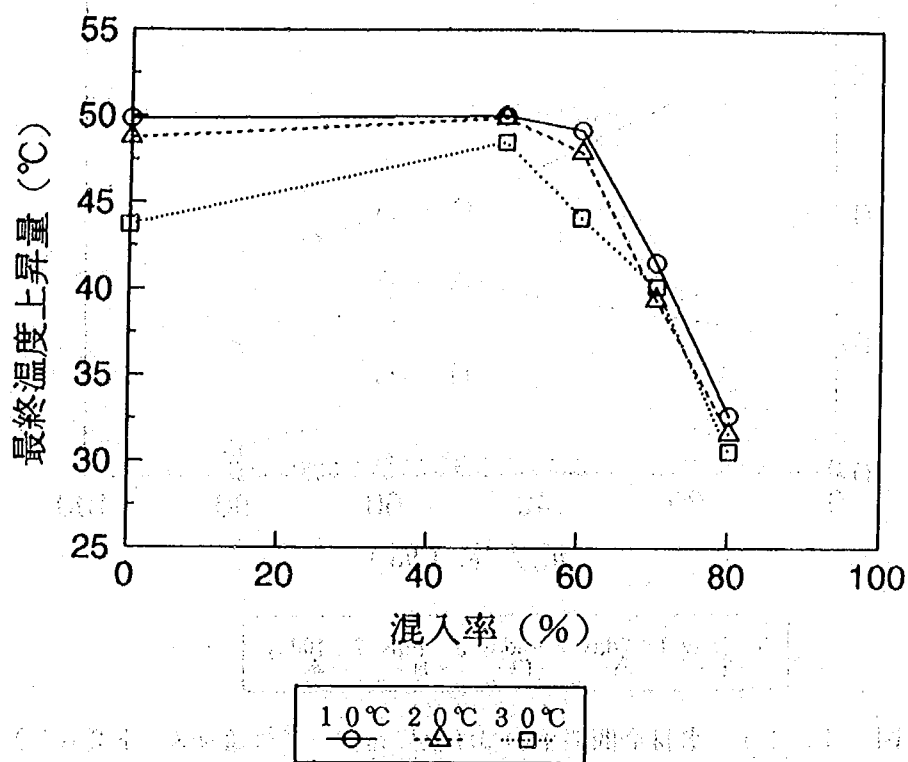


図-4.10 材令10日の断熱温度上昇量 (普通セメント)

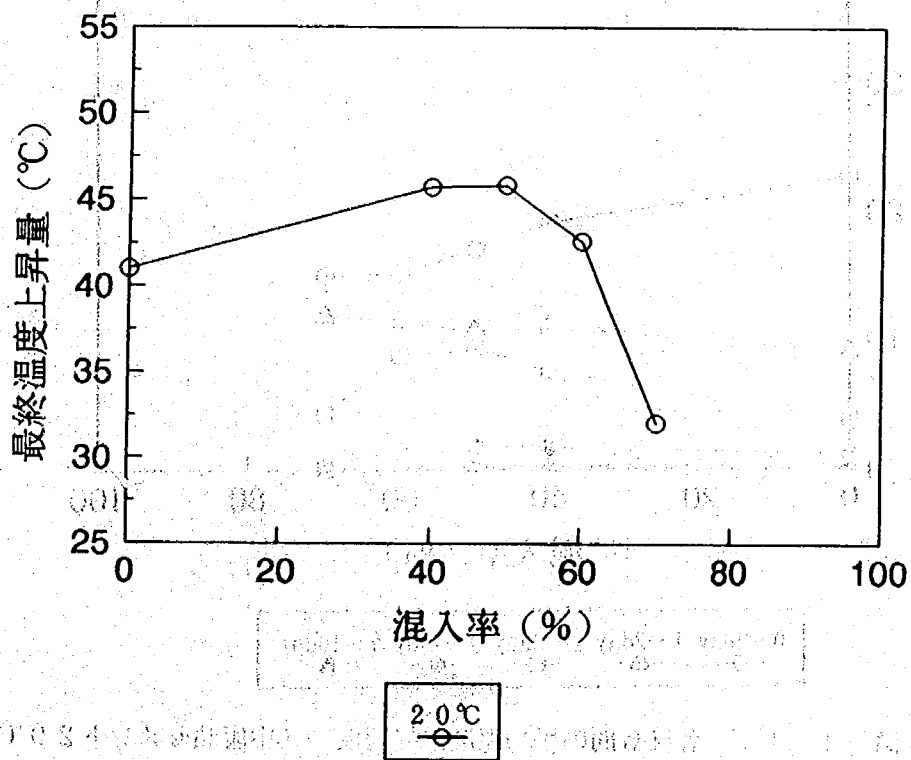


図-4.10 材令10日の断熱温度上昇量 (中熱セメント)

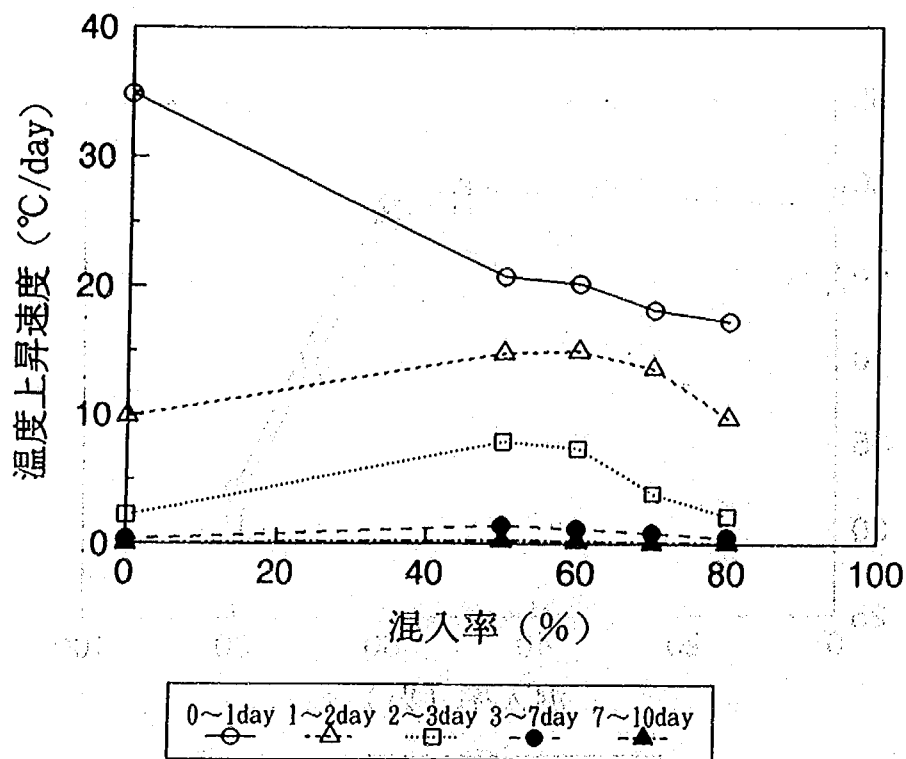


図-4. 1.1 各材令間の平均温度上昇速度 (普通セメント 20°C)

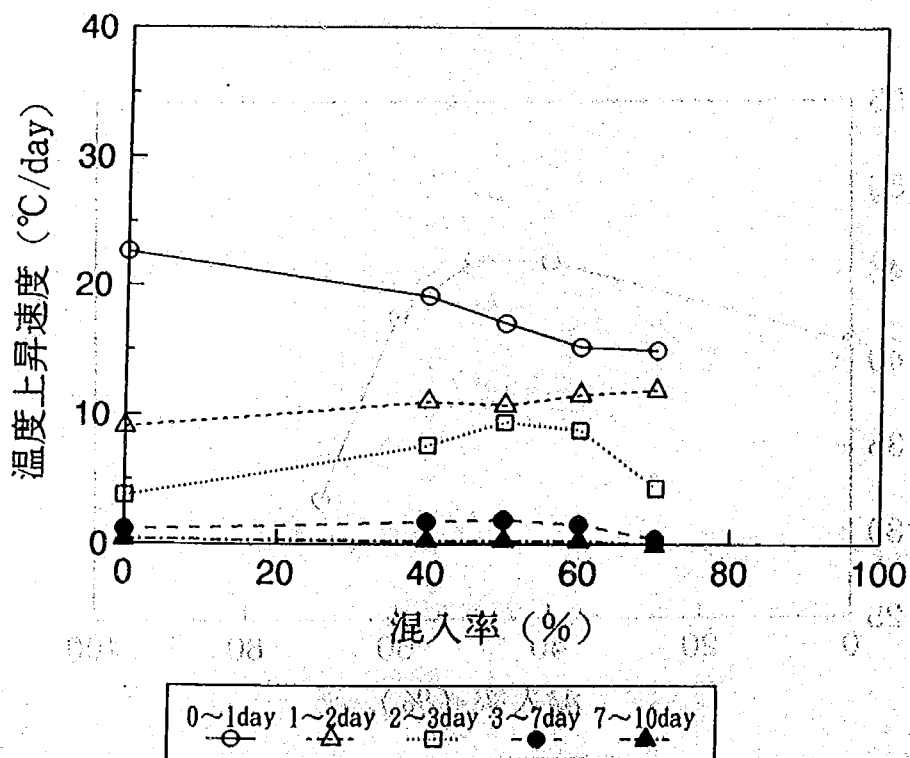


図-4. 1.1 各材令間の平均温度上昇速度 (中庸熱セメント 20°C)

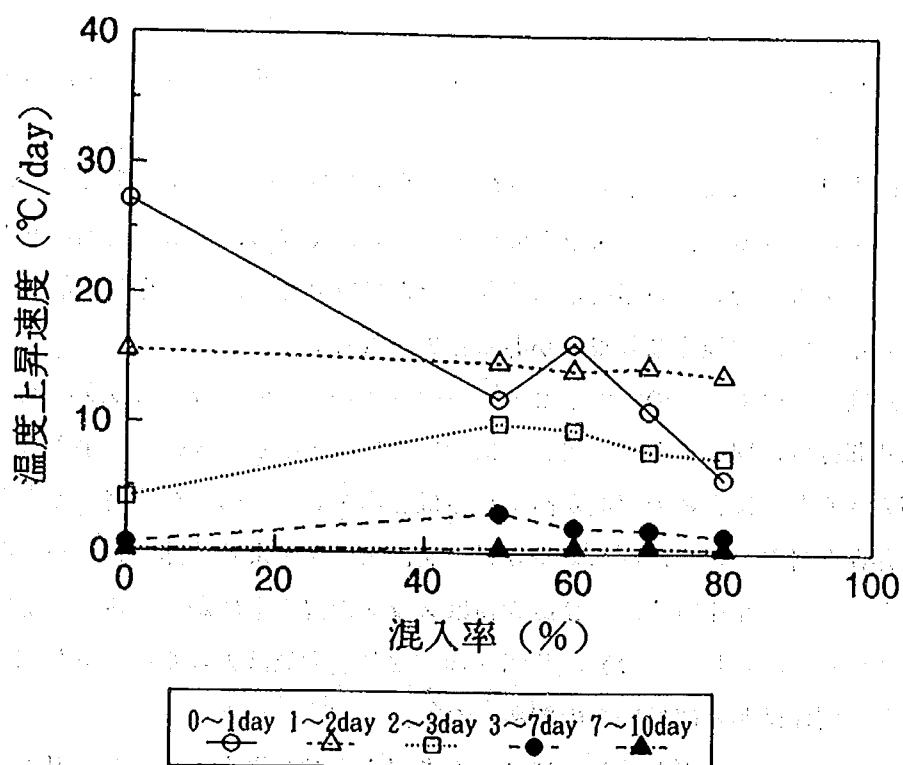


図-4.11 各材令間の平均温度上昇速度 (普通セメント10°C)

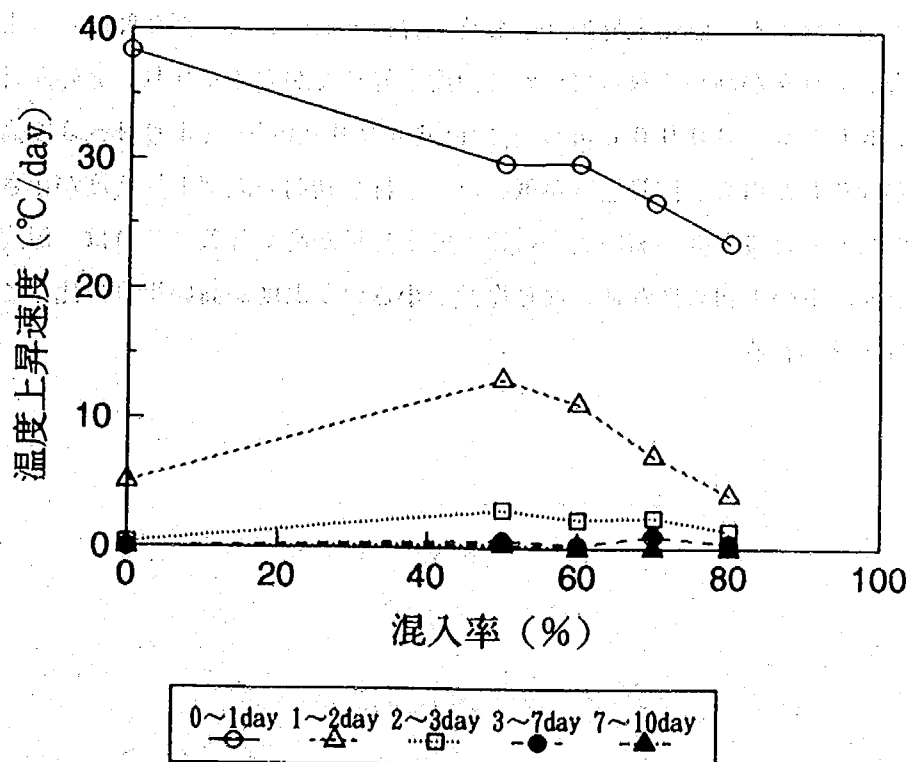


図-4.11 各材令間の平均温度上昇速度 (普通セメント30°C)

4. 3 まとめ

これまでの実験結果より、高炉スラグ微粉末を多量に混入したコンクリートの発熱特性および強度特性として以下のようなことが分かった。

セメントペーストの微少熱量計試験より、セメントの積算発熱量は系の温度が一定のときスラグ混入率が大きいほど積算発熱量が小さくなる。また、スラグの粉末度が大きくなるほど積算発熱量は大きくなる。同一スラグ混入率、同一スラグの場合、系の温度が高くなるほど積算発熱量は大きくなるが系の温度が40℃～50℃の場合では発熱量の伸びが鈍くなり限界があると思われる。

セメントの水和発熱速度について、系の温度、セメントの種類が同一の場合、スラグの混入率の如何によらず第2ピークの発現時間はほぼ同一であるが最大値については混入率が大きいほど小さいことがわかる。また、スラグ混入率が大きくなるほど系の温度が高くなるほど第2ピークの存在が消滅の方向に進んでいき変わって第3ピークの存在が目立つようになる。第3ピークはスラグによる発熱であるが、系の温度、セメントの種類が同一のとき、ピーク発生時間および最大値はスラグの混入率にかかわらず一定である。また、同一配合で系の温度が変化した場合ピークの発現時間が速くなり最大値は大きくなる事が認められた。

またJIS溶解熱法との関係は非常に良いものであった。

断熱温度上昇試験より、ポルトランドセメントにスラグを混入させた場合、スラグの混入率による影響を大きく受け、従来の高炉セメントB種のスラグ混入率(60%以下)では、セメント単身のときより温度上昇速度は小さいものの最終温度上昇量は大きくなる。

また、それ以上の混入率になると、温度上昇速度、最終上昇量ともに、スラグ0%のときより小さくなる。

粉末度が変化した場合、スラグが細かくなるにつれて温度上昇速度が大きくなり、発熱が盛んになる。また、最終温度上昇量は、6000、8000 cm²/gでは4000 cm²/gより2～3℃高くなる。

同一配合で打設温度が変化した場合、打設温度が低いほど、材令初期の温度上昇速度が小さく上昇量は低い、3日以降の材令になると打設温度が高い場合に比べて上昇量が高くなる。これは、温度が低いほど強度発現と同様に初期のセメントの水和活性が鈍くなり発熱が小さいが温度が高い場合に比べて長期にわたって水和が進むためであると思われる。



図1-17 温度上昇速度とスラグの割合

(注) 1. 温度上昇速度は、セメント単身のときよりスラグの割合が増えるにつれて小さくなる。

5 考察

5.1 コンクリートの断熱温度上昇試験

5.1.1 断熱温度上昇の回帰

現在、コンクリート標準示方書⁶⁾ およびマスコンクリートのひびわれ制御指針⁷⁾ではコンクリートの断熱温度上昇の回帰に関する回帰式である式(5.1)および式(5.2)を用いて最小二乗法による回帰を行った。

$$K = K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t)) \quad (5.1)$$

$$K = K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta)) \quad (5.2)$$

上記の2つの式において、

K : 時間 t における断熱温度上昇量 (°C)

K_0 : 回帰から決まる係数 (最終温度上昇量 (°C))

t : 打設開始時からの時間 (日)

α, β : 回帰から決まる係数

表-5.1および表-5.2に回帰式(5.1), (5.2)を用いて最小二乗法により回帰して得られた断熱定数 K_0 , α , β および実験値と回帰による値との誤差の標準偏差の一覧を示す。なお、試験機の種類において、住友セメント社使用の場合は「L」で、東京理工社使用の場合は「M」で区別した。

表-5.1 コンクリートの断熱温度上昇の回帰結果 (打設温度 20°C)

実験No.	試験機の種類	$K = K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t))$			$K = K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta))$			
		K_0	α	標準偏差	K_0	α	β	標準偏差
NS0(4)20	L	48.67	1.142	1.426	48.19	1.189	1.340	0.885
NS50(4)20	L	50.52	0.586	1.547	49.25	0.511	1.320	0.591
NS60(4)20	L	48.37	0.612	1.528	47.19	0.532	1.346	0.514
NS70(4)20	L	39.59	0.696	1.551	38.65	0.612	1.448	0.760
NS80(4)20	L	31.60	0.819	1.271	30.97	0.763	1.497	0.701
NS50(6)20	L	51.83	0.869	1.465	51.14	0.838	1.300	0.867
NS50(8)20	L	54.25	0.867	2.248	53.19	0.818	1.555	1.057
MS0(4)20	L	40.08	0.748	1.135	39.97	0.745	1.030	1.129
MS40(4)20	L	46.01	0.544	0.809	45.31	0.513	1.129	0.557
MS50(4)20	L	46.80	0.484	1.174	45.50	0.427	1.235	0.536
MS60(4)20	L	43.62	0.496	1.465	42.12	0.409	1.359	0.415
MS70(4)20	L	33.55	0.715	1.485	32.85	0.588	1.538	0.357
MS50(6)20	M	49.71	0.584	1.575	48.44	0.515	1.314	0.834
MS50(8)20	M	49.16	0.697	2.159	47.88	0.599	1.545	1.009

表-5.2 コンクリートの断熱温度上昇の回帰結果（打設温度10℃および30℃）

実験No.	試験機の種類	$K=K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t))$			$K=K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta))$			
		K_0	α	標準偏差	K_0	α	β	標準偏差
NS0(4)10	L	50.09	0.818	2.035	49.08	0.752	1.514	0.930
NS50(4)10	L	52.95	0.376	2.019	49.73	0.287	1.419	0.460
NS60(4)10	L	50.31	0.473	1.675	48.40	0.388	1.360	0.438
NS70(4)10	L	42.62	0.441	1.781	40.50	0.343	1.451	0.731
NS80(4)10	L	34.24	0.412	2.057	31.77	0.253	1.805	0.654
NS50(6)10	M	56.95	0.389	2.385	53.42	0.291	1.474	0.718
NS50(8)10								
NS0(4)30	M	43.88	1.856	1.039	43.65	2.242	1.367	0.474
NS50(4)30	L	48.07	0.958	1.323	47.52	0.944	1.296	0.797
NS60(4)30	M	44.42	1.093	1.158	44.00	1.100	1.332	0.419
NS70(4)30	M	39.51	0.978	1.115	39.44	0.979	1.028	1.111
NS80(4)30	M	30.46	1.247	0.977	30.19	1.342	1.286	0.819
NS50(6)30	M	47.78	1.406	1.112	47.47	1.525	1.318	0.489
NS50(8)30	L	51.10	1.468	1.363	50.60	1.657	1.305	1.012

※標準偏差の単位は「℃」

また、図-5.1に式(5.2)によって得られた断熱定数 K_0 、 α 、 β の分布を示す。また、NS0(40)の場合について、回帰式と測定値の誤差の経時変化を図-5.2に示す。その他の場合の定数、断熱温度上昇の推定結果および誤差の分布については付図-3.1に載せた。試験機の種類が異なる試験があるため、各係数についての統一的な傾向を述べるのは次項に回し、ここでは実験値との誤差についてのみ記述する。

いずれの回帰も式(5.2)の方が標準偏差が小さく精度がよい。これは、定数 β を考慮することにより、式(5.1)に比べて材令初期（特に1日まで）の回帰を忠実に表現できるためである。また、誤差の経時変化も同様で、断熱試験開始直後で双方とも大きな誤差を示すが式(5.2)による誤差は式(5.1)のその約1/2となり、さらに式(5.2)では試験開始から2日以降の誤差が最大でも1℃以下となっており式(5.1)に比べて回帰による値の精度が非常に良いものとなった。

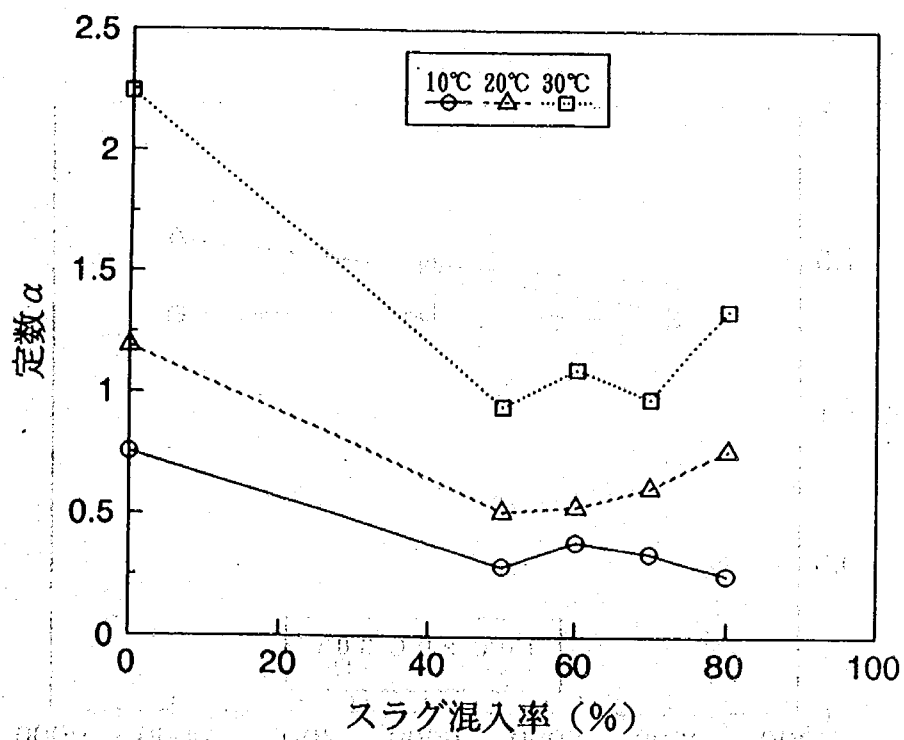
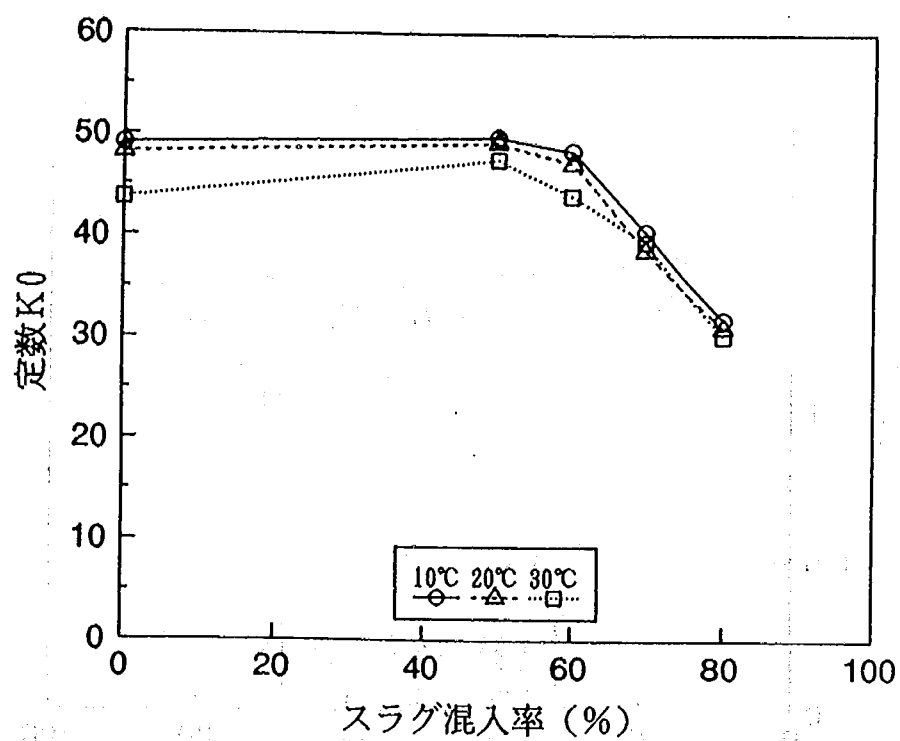


図-5.1 断熱定数分布

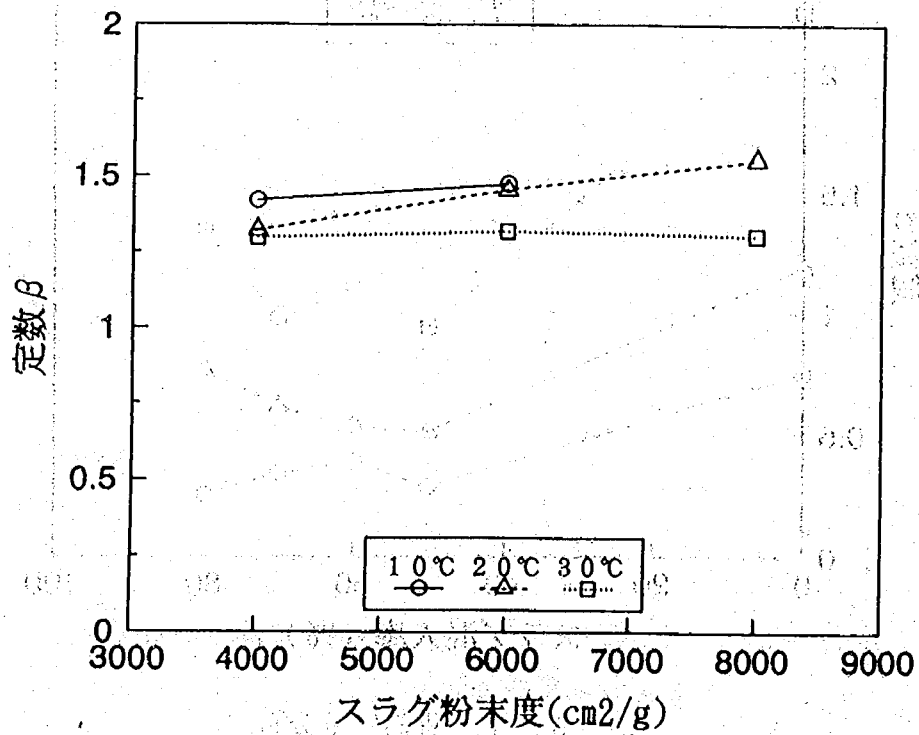
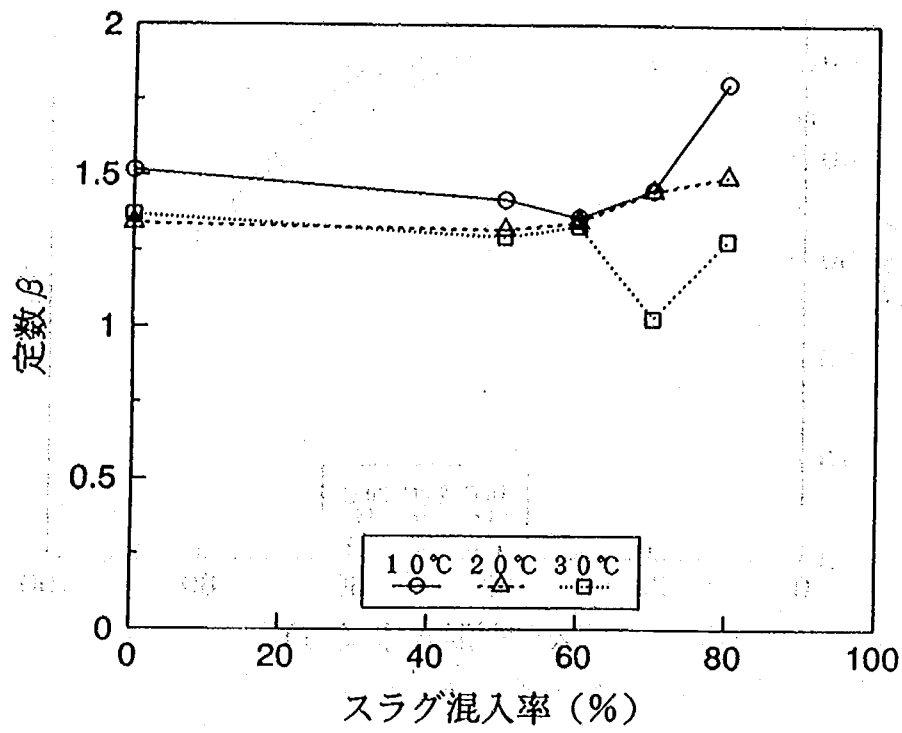


図-5.1 断熱定数分布

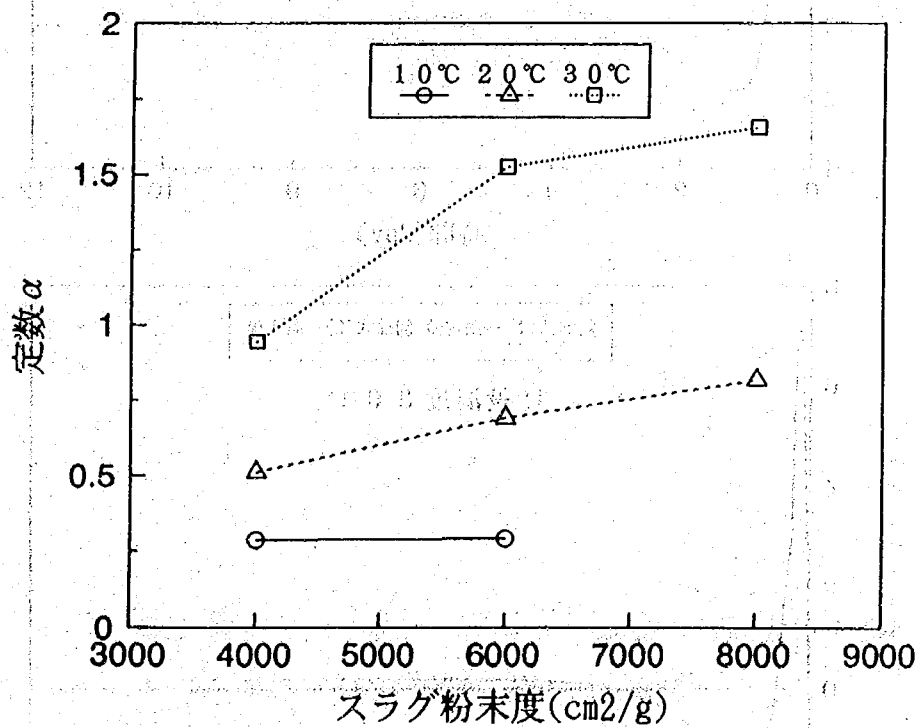
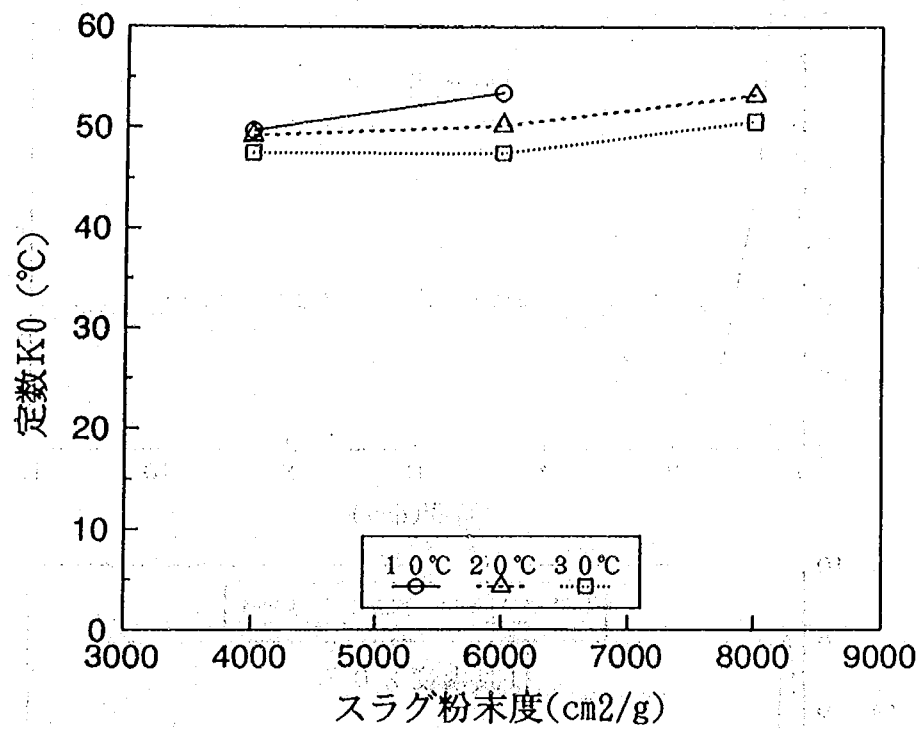


図-5.1 断熱定数分布

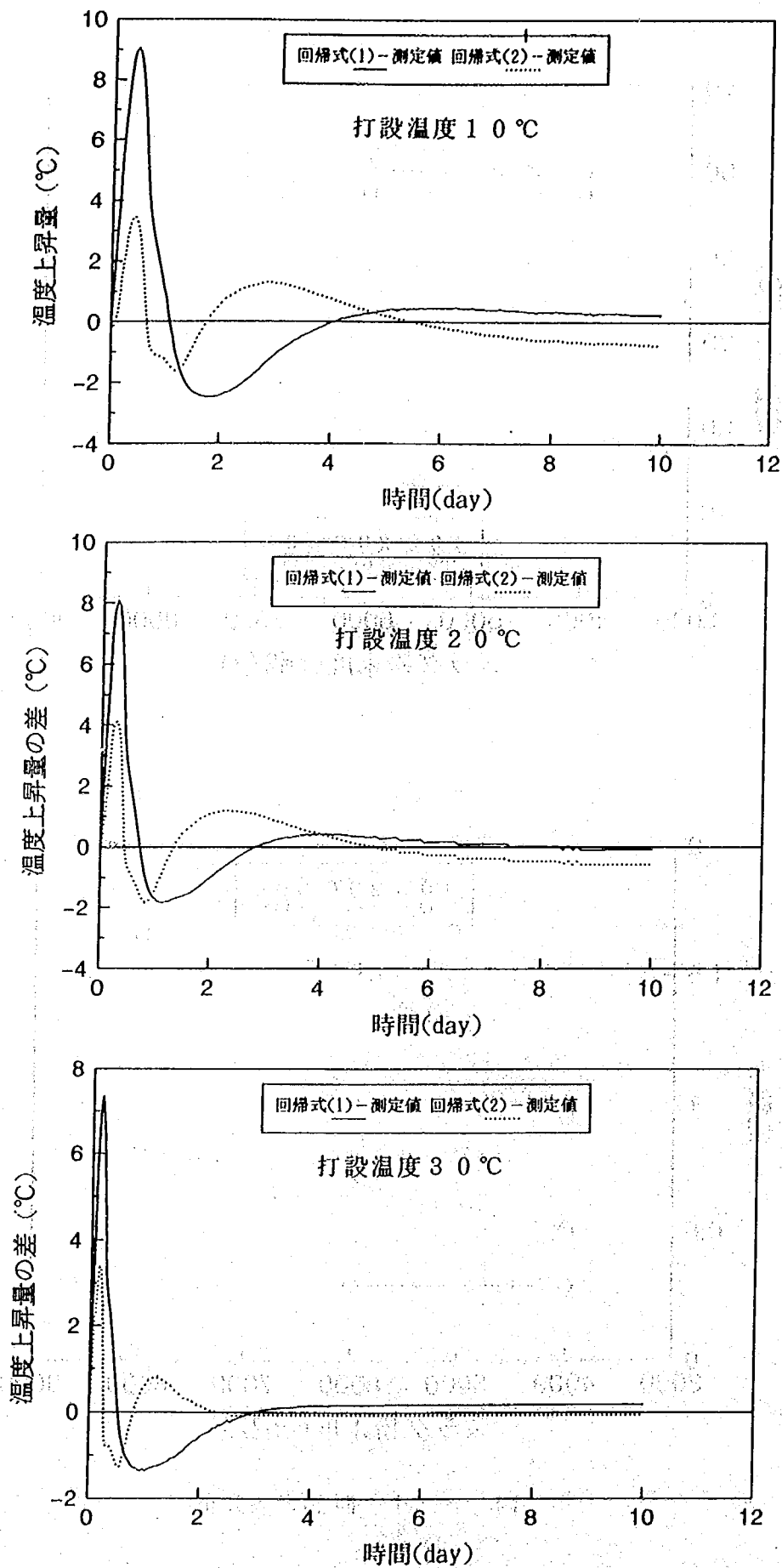


図-5. 2 回帰式と測定値の誤差の経時変化

5.1.2 熱試験法の検討

大型コンクリート構造物において断熱温度上昇試験を行うことは非常に重要なことであるが、試験方法や試験装置については定まっていない。断熱材料、供試体周囲の断熱材の有無、断熱媒体も水循環、空気循環、オイル循環とさまざまであり、実験目的に応じた断熱供試体の寸法も一定でなく普遍的データが得にくい。

本実験では、住友セメント社製と東京理工社製の2種類の試験機を用いて実験を行った。部外研究員研究報告書「マスコンクリートの配合条件が強度および発熱特性に及ぼす影響」⁹⁾は、これら2つの試験機の関係を示し、断熱温度上昇曲線の回帰式の統一化を行った。

得られた関係式を次に示す。なお、係数の後の添字について、「L」は住友社、「M」は東京理工社の値であることを意味する。また()内の数字は試験機間の相関係数である。

$$\left. \begin{aligned} \text{式(5.1): } K_L &= 1.164 * K_M - 5.809 \quad (R=0.976) \\ \alpha_L &= 0.874 * \alpha_M + 0.050 \quad (R=0.961) \end{aligned} \right\} \text{----- (5.3)}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{式(5.2): } K_L &= 1.171 * K_M - 6.159 \quad (R=0.980) \\ \alpha_L &= 0.854 * \alpha_M + 0.052 \quad (R=0.967) \\ \beta_L &= 0.723 * \beta_M + 0.398 \quad (R=0.750) \end{aligned} \right\} \text{----- (5.4)}$$

式(5.3)および式(5.4)の関係を用いることにより、2つの試験機の相関より、住友社の値としてこれらの値を新たに断熱定数とした。表-5.3および表-5.4に定数を示す。

表-5.3 コンクリートの断熱温度上昇の回帰結果 (打設温度20℃)

実験No.	試験機の種類	$K=K_0 \cdot (1-E(-\alpha \cdot t))$		$K=K_0 \cdot (1-\exp(-\alpha \cdot t^\beta))$		
		K_0	α	K_0	α	β
NS0(4)20	L	48.67	1.142	48.19	1.189	1.340
NS50(4)20	L	50.52	0.586	49.25	0.511	1.320
NS60(4)20	L	48.37	0.612	47.19	0.532	1.346
NS70(4)20	L	39.59	0.696	38.65	0.612	1.448
NS80(4)20	L	31.60	0.819	30.97	0.763	1.497
NS50(6)20	L	51.83	0.869	51.14	0.838	1.300
NS50(8)20	L	54.25	0.867	53.19	0.818	1.555
MS0(4)20	L	40.08	0.748	39.97	0.745	1.030
MS40(4)20	L	46.01	0.544	45.31	0.513	1.129
MS50(4)20	L	46.80	0.484	45.50	0.427	1.235
MS60(4)20	L	43.62	0.496	42.12	0.409	1.359
MS70(4)20	L	33.55	0.715	32.85	0.588	1.538
MS50(6)20	M	52.05	0.560	50.56	0.492	1.348
MS50(8)20	M	51.41	0.659	49.91	0.564	1.515

表-5.4 コンクリートの断熱温度上昇の回帰結果 (打設温度 10℃および30℃)

実験No.	試験機の種類	$K=K_0 \cdot (1 - E(-\alpha \cdot t))$		$K=K_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta))$		
		K_0	α	K_0	α	β
NS0(4)10	L	50.09	0.818	49.08	0.752	1.514
NS50(4)10	L	52.95	0.376	49.73	0.287	1.419
NS60(4)10	L	50.31	0.473	48.40	0.388	1.360
NS70(4)10	L	42.62	0.441	40.50	0.343	1.451
NS80(4)10	L	34.24	0.412	31.77	0.253	1.805
NS50(6)10	M	60.48	0.390	56.40	0.301	1.464
NS50(8)10						
NS0(4)30	M	45.27	1.672	44.96	1.967	1.386
NS50(4)30	L	48.07	0.958	47.52	0.944	1.296
NS60(4)30	M	45.90	1.005	45.37	0.991	1.361
NS70(4)30	M	40.18	0.905	40.03	0.888	1.141
NS80(4)30	M	29.65	1.140	29.19	1.198	1.328
NS50(6)30	M	49.81	1.279	49.43	1.354	1.351
NS50(8)30	L	51.10	1.468	50.60	1.657	1.305

※標準偏差の単位は「℃」

表-5.3および表5.4の値を本研究での断熱定数とする。図-5.3に、これらの値を用いたときの普通セメント 20℃の場合の断熱温度上昇曲線を示す。その他については付図-3.4に載せる。

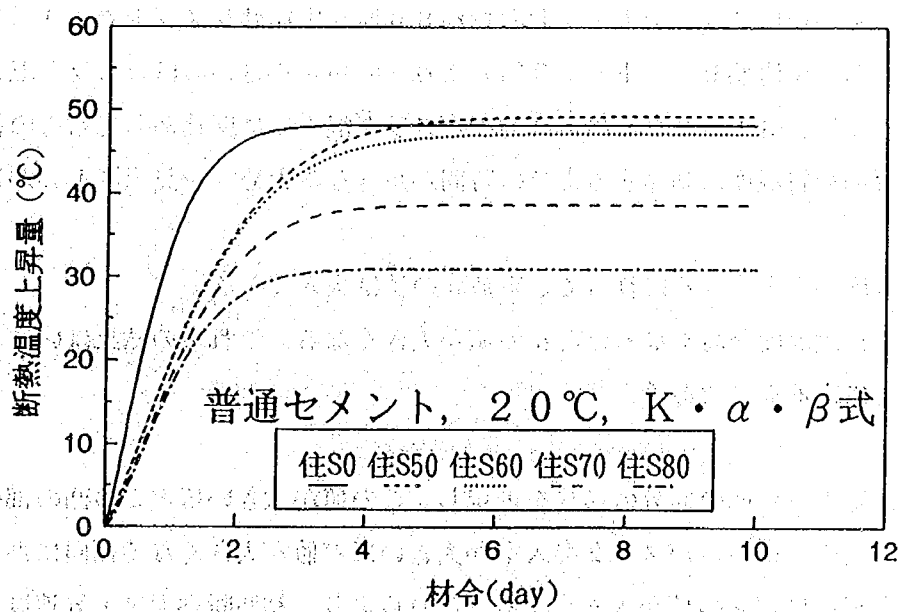
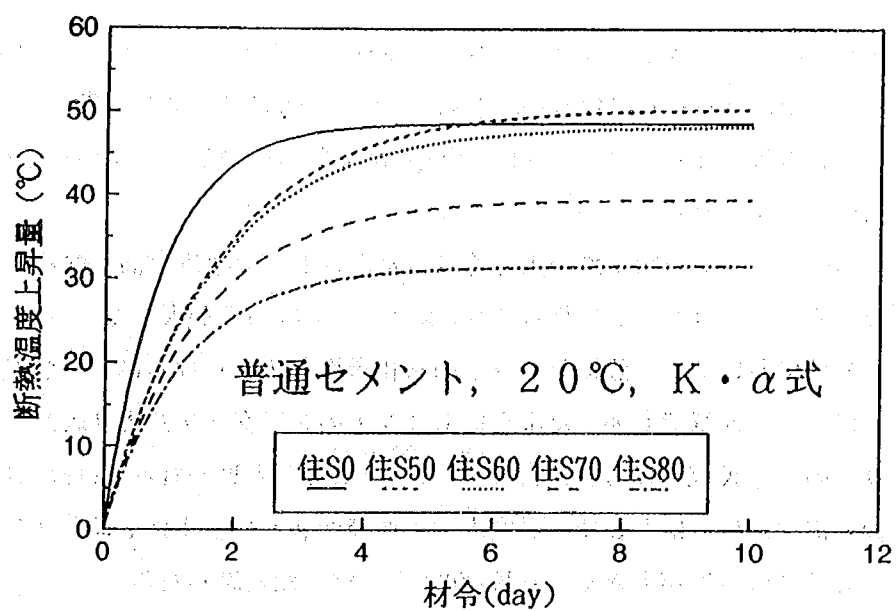


図 - 5. 3 断熱温度上昇曲線 (東京理工は補正)

以下に、得られた係数 K_0 、 α 、 β について特徴を記述する。

1). K_0 について

スラグ混入率が変化した場合、混入率が50、60%では前章でも述べたように無混入の場合とほぼ同じ値を示し、それ以上の混入率になると K_0 は小さくなる。このことは打設温度が変化しても同様の傾向を示す。

打設温度が変化した場合の K_0 の回帰係数は、打設温度が高くなるにつれて値が小さくなる。これはスラグ混入率が変化しても大きな変化はみられない。

同一スラグ混入率においてスラグの粉末度が大きくなったときも打設温度が高くなるにつれて K_0 は小さくなる。また、スラグの粉末度が大きくなるに従って K_0 はわずかではあるが大きくなる。

セメントとスラグの発熱において、一般にセメントの水和活性が大きくなるほど断熱温度上昇量が大きくなるが、スラグの混入によって前章でも述べたようにセメントのスラグへアルカリ刺激による相乗効果のため混入率が50、60%のとき K_0 が無混入の場合と同じ値となったと思われる。打設温度が変化した場合圧縮強度の経時変化と同様温度が低いほど長期の温度上昇の伸びが著しい。また、同一スラグ混入率の場合、粉末度が大きくなるとスラグの活性が大きくなり K_0 が大きくなったと思われる。

2). α について

α は、断熱温度上昇において、値が大きいと温度上昇速度が速く最終温度に速く近づくことを意味する。

式(5.1)と式(5.2)とでは β の有無があるため定数 α について直接比較はできないので全般的な傾向について述べるものとする。 α の値はスラグ混入率がおおむね60%（中熱セメントで50%）で最小値をとる。またスラグ混入率80%（中熱セメントで70%）より α の値が小さいのは、スラグ混入率80%（中熱セメントで70%）では材令1～2日での速度勾配がスラグ混入率に反比例してもその後の上昇温度量が10℃以上も小さいため最終温度に到達するまでの時間が短くなるため、一見温度上昇が速く見えるのである。

また、スラグの粉末度が大きくなるに従って、定数 α の値は大きくなる。

さらに、同一配合で打設温度が高くなるほど α の値が大きくなる。これらの結果はいずれも結合材の水和活性が盛んになることによるものである。

3). β について

β は断熱温度上昇曲線の下に凸の部分の形状を表現し、この値が大きいほどこの凸の部分が顕著になる。

定数 β の回帰値は、若干ではあるがスラグ混入率が高いほど値が大きくなる傾向にある。打設温度が変化した場合は、温度が低いほど β の値が大きくなる。これらより、初期断熱温度上昇速度が小さいほど β の値は大きくなったと思われる。

また、粉末度が変化した場合は、 β の値の変化は小さい。

5.1.3 水和発熱の温度依存性³⁾

セメントの水和反応は非常に複雑なものであり、簡単に表すことは非常に困難であるがセメントの水和反応において、反応熱である積算発熱量は、その時刻においてセメントがどのように反応しているか、またそれ以降の反応および発熱速度がどの程度になるかを表すパラメータになると考えられる。

従来のコンクリート構造物の温度ひびわれ解析では、コンクリートの水和発熱速度を時間 t における断熱温度上昇量 $K(t)$ を用いて、

$$H(t) = \frac{d(\rho \cdot c \cdot \Delta K(t))}{dt} \quad (5.5)$$

であると評価してきた。ここで $H(t)$ は時間 t における水和発熱速度、 ρ はコンクリートの密度、 c はコンクリートの比熱である。式(5.5)は時間 t のみの関数として表されマスコンクリートのような断面の大きいコンクリートの中心部分では適用されるであろうが、表面の外気の影響を受ける部分や断面の小さく断熱状態が期待されないコンクリートでは式(5.5)の発熱は期待できない。

従って、水和反応状態を解析的にモデル化して、解析領域の各位値でそれぞれ異なる水和発熱速度 $H(t)$ を考慮することが、コンクリートの温度解析の向上につながるであろう。

本実験では、単位体積重量当たりのコンクリートの水和発熱速度 $H(t)$ が、反応工学で用いられる自己依存型微分方程式で表現できることを、一定温度下におけるセメントペーストの発熱量および水和発熱速度の試験結果から実証している。

$$\left. \begin{aligned} H &= C^* H \\ H &= H_{\infty}(Q) \cdot \exp\left(-\frac{E(Q)}{RT}\right) \\ Q &= \int H dt \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

ここで、 C^* は単位セメント量、 T は絶対温度、 R は気体定数、 $E(Q)$ は活性化エネルギー、 Q は単位重量当たりのセメントの積算発熱量であり、 $E(Q)$ は Q の関数で与えられる。 $H_{\infty}(Q)$ は温度無限大における水和発熱速度に相当する。水和発熱速度が温度と積算発熱量とで与えられることを意味する。

式(5.6)の両辺の自然対数をとると、式(5.7)のように書き直すことができる。

$$\ln H = \ln H_{\infty}(Q) - \frac{E(Q)}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (5.7)$$

上式はコンクリートにおいて、水和発熱速度 H の自然対数と絶対温度 T の逆数が、式(5.7)で表されるアレニウスの法則に従うことを意味する。ここで、式(5.7)中の傾き $-E(Q)/R$ は活性化エネルギーを気体定数で除したものであり以後セメントの温度活性と呼ぶこととする。

図-5.4に本実験におけるこの関係をNS0およびNS50について最小二乗法により直線回帰したアレニウスプロットを示す。その他の場合については付図-3.5に載せる。

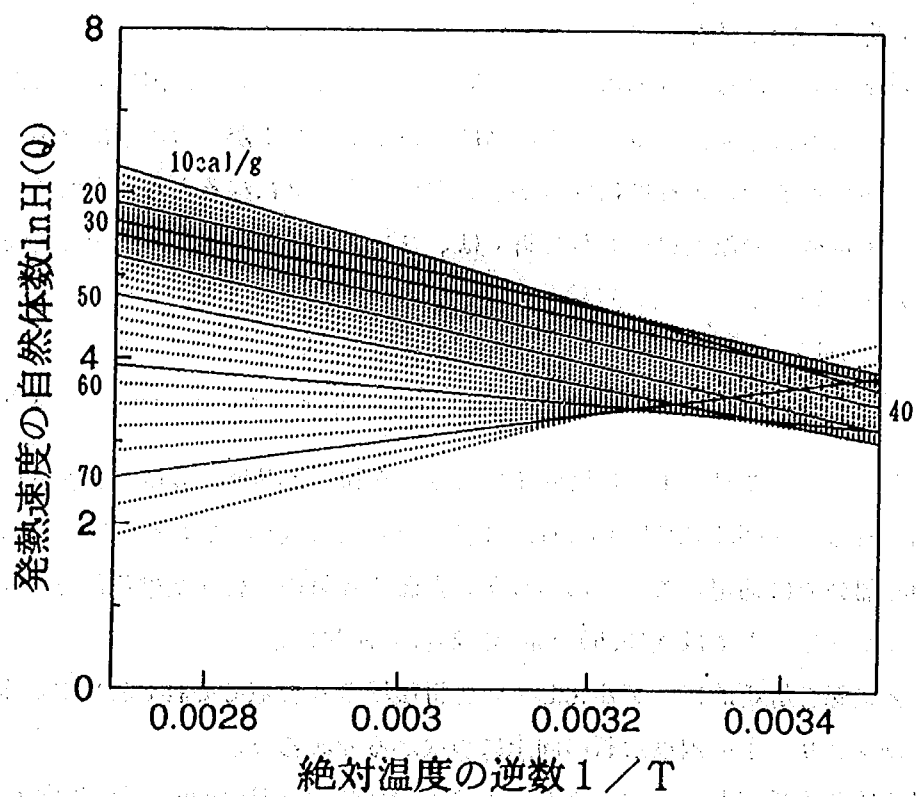


図-5.4 区間別アレニウスプロット (NS 0)

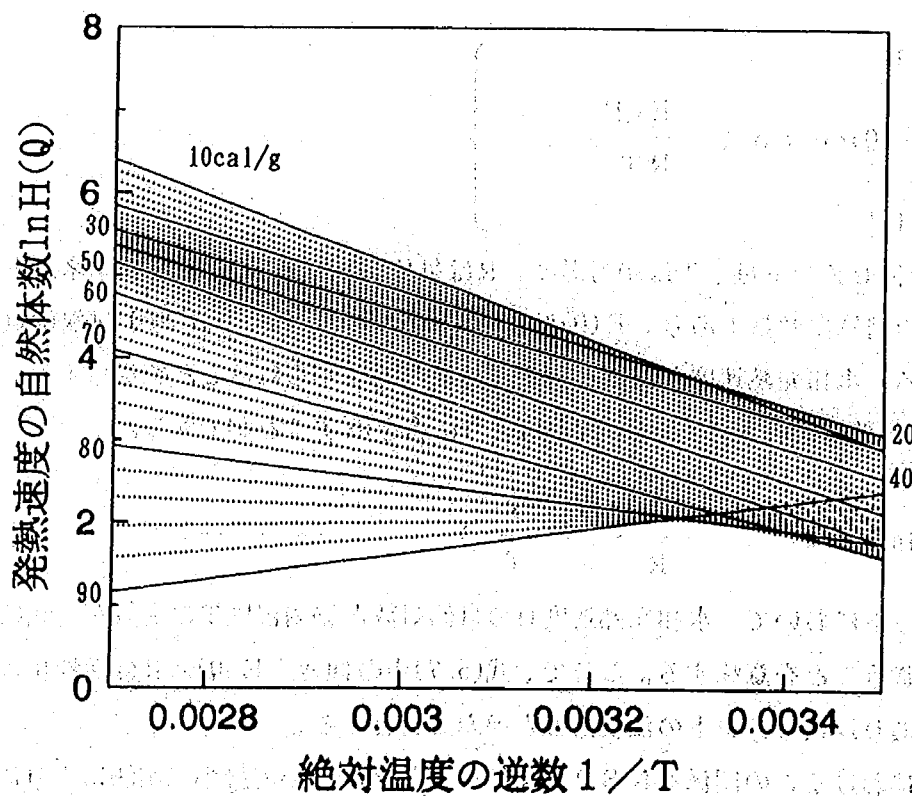


図-5.4 区間別アレニウスプロット (NS 50)

なお、このときの発熱量に対する水和発熱速度の値は、式(5.4)により回帰して求めた断熱定数を用いてプロットしたものである。これは、実験値におけるわずかな誤差が大きく拡大されるのを排除するのと、試験機間の計測値を統一するためである。

図-5.4において、系の温度が大きくなると同一積算発熱量において系の高い温度が低い温度よりセメントの温度活性 $-E(Q)/R$ が小さい場合もあった。これは、系の高い温度の発熱ほど短時間側にシフトされ早い時間で発熱速度が減少するためである。各配合におけるセメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ は一定値をとらず、積算発熱量 Q によって異なることが認められる。

本研究では、セメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ を積算発熱量 Q の3次関数で表した。

$$\left. \begin{aligned} -E(Q)/R &= f(Q) = a \cdot Q^3 + b \cdot Q^2 + c \cdot Q + d \\ \ln H_{\infty}(Q) &= g(Q) = k \cdot Q^3 + l \cdot Q^2 + m \cdot Q + n \end{aligned} \right\} \text{-----} \quad (5.8)$$

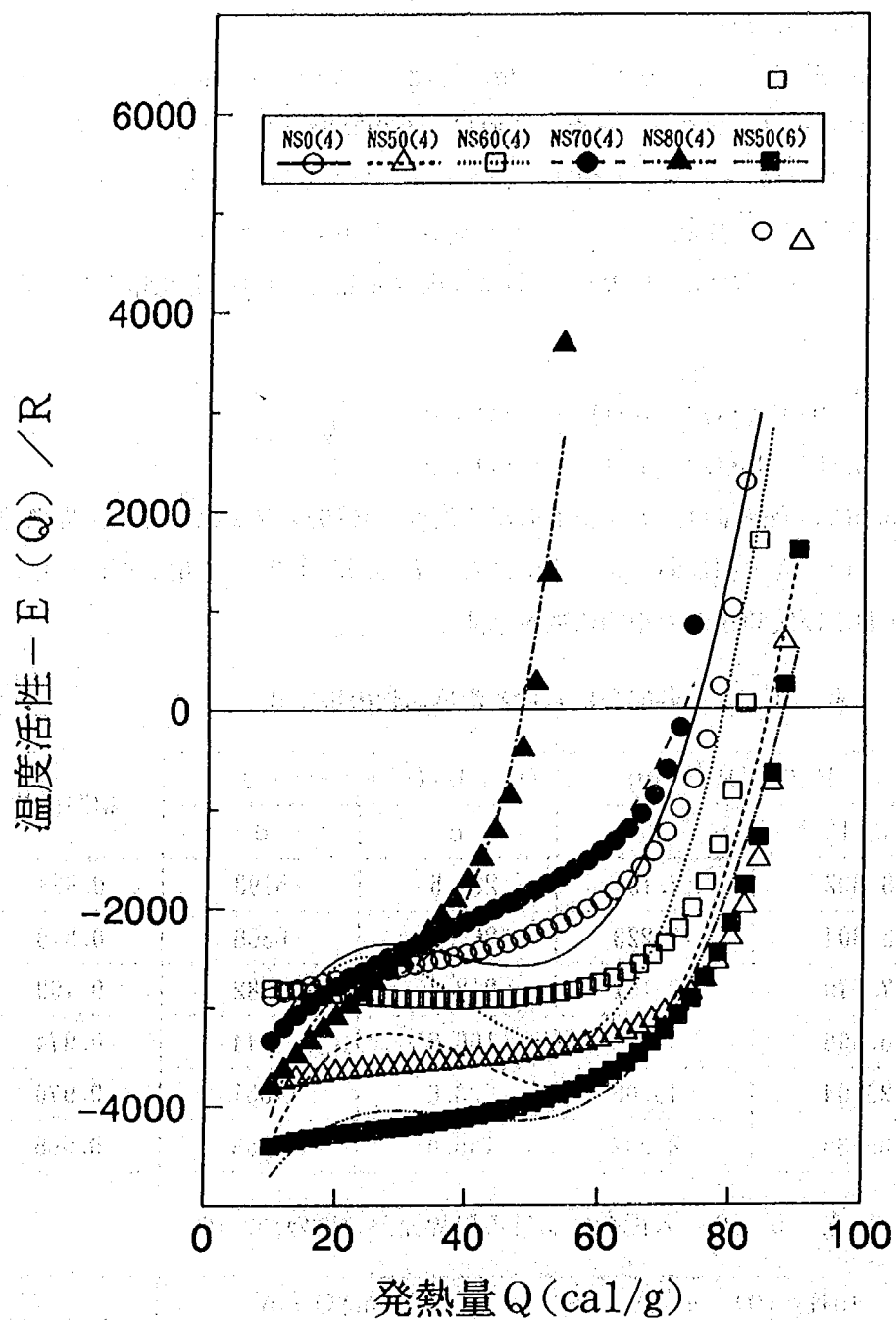
図-5.5および図-5.6に、発熱量 Q とセメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および Q と限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ の関係について測定値とそのときの回帰曲線を表す。また、表-5.5および表-5.6に式(5.8)中の係数 a, b, c, d, k, l, m, n および実験値との相関係数を示す。

表-5.5 各配合における温度活性の推定式

配 合	$-E(Q)/R = f(Q) = a \cdot Q^3 + b \cdot Q^2 + c \cdot Q + d$				相関係数
	$a \cdot 10^{-2}$	b	c	d	
NS0(4)	6.302	-7.131	251.5	-5193	0.924
NS50(4)	5.804	-7.223	267.9	-6366	0.810
NS60(4)	7.770	-9.151	312.4	-5782	0.799
NS70(4)	3.596	-4.002	166.5	-4744	0.974
NS80(4)	23.94	-19.06	523.6	-7661	0.970
NS50(6)	3.735	-4.292	155.6	-5858	0.966

表-5.6 各配合における限界発熱速度の推定式

配 合	$\ln H_{\infty}(Q) = g(Q) = k \cdot Q^3 + l \cdot Q^2 + m \cdot Q + n$				相関係数
	$k \cdot 10^{-3}$	$l \cdot 10^{-2}$	m	n	
NS0(4)	-0.194	2.172	-0.780	21.13	0.940
NS50(4)	-0.180	2.227	-0.845	24.56	0.856
NS60(4)	-0.240	2.797	-0.967	22.41	0.837
NS70(4)	-0.142	1.552	-0.638	20.25	0.972
NS80(4)	-0.778	6.155	-1.711	28.90	0.975
NS50(6)	-0.113	1.282	-0.488	23.35	0.976



図一5. 5 積算発熱量と温度活性の関係

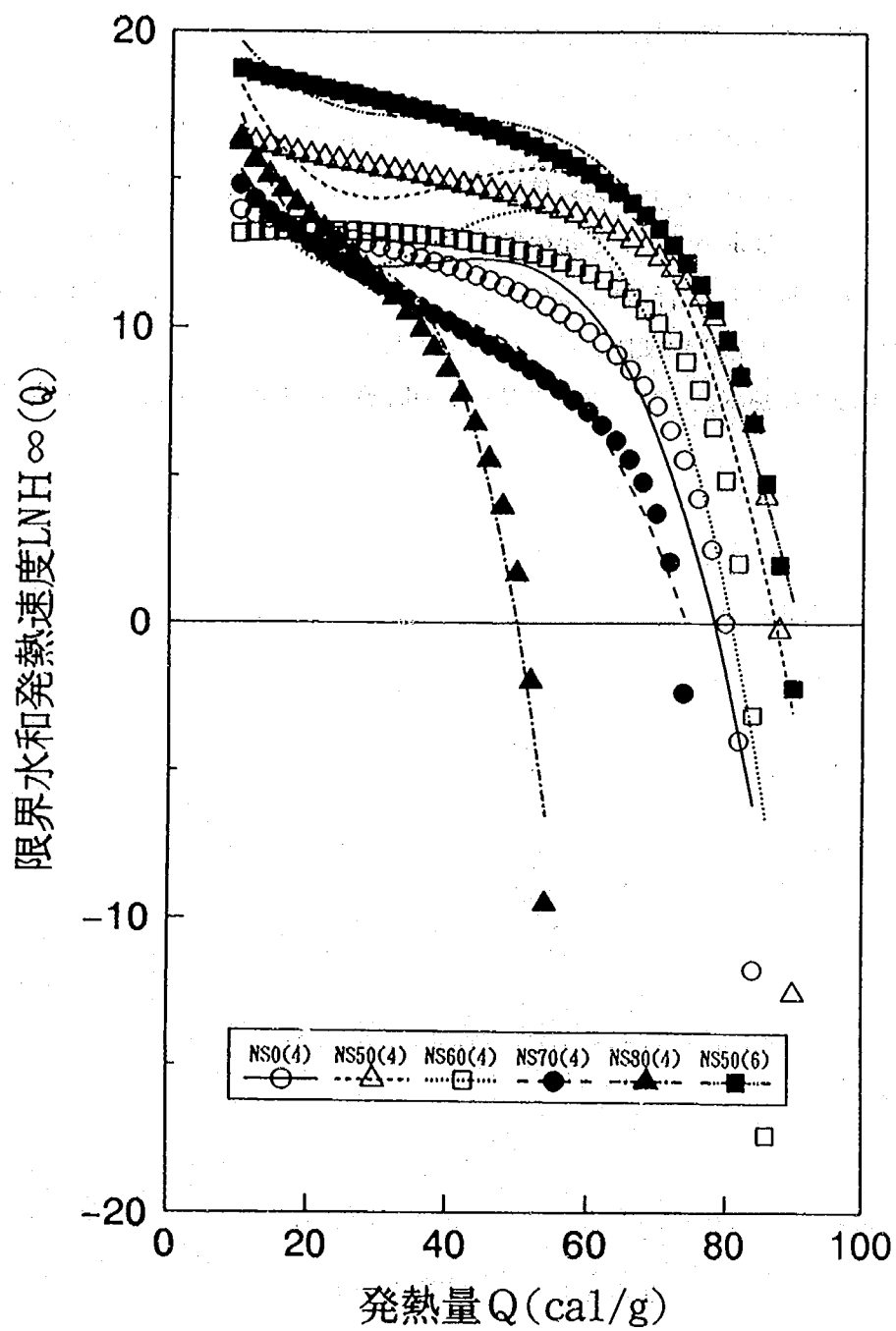


図-5.6 積算発熱量と限界発熱速度の関係

図より、セメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ は Q の3次式で良好に表される。

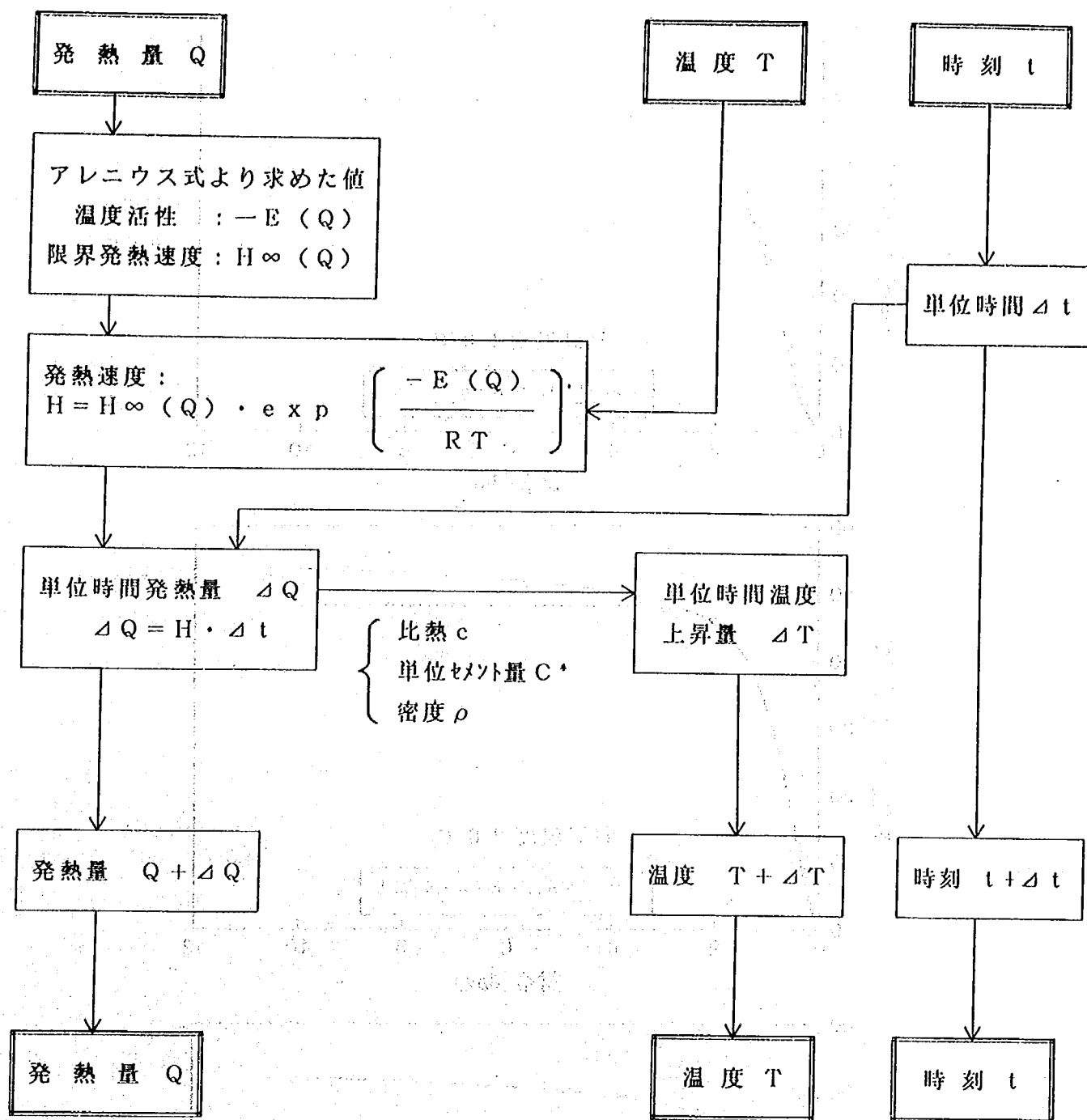
式(5.8)を用いることにより、各結合材料について任意の打設温度における断熱温度上昇の予測が可能となった。図-5.7に、温度上昇予測のフローを示す。

上図の流れによって温度上昇を予測した結果を図-5.8に示す。なお、本文中ではNS0(4)についての図のみを載せその他の場合については付図-3.6に載せた。

図-5.8より、断熱温度上昇の予測は良好な結果を得ていることがわかる。特に、初期温度上昇区間では実験値との整合性が良い。長期区間になると実験値に比べて、予測値が高くなっている。これは、発熱量が大きい部分での温度依存による推定がデータ不足のために得られなかったことによる誤差であると思われる。

しかしながら、以上の考察により各配合について、少なくとも2種類の打設温度で断熱温度上昇試験を行えば、その配合について任意の打設温度における断熱温度上昇の予測が可能となった。

次節では、セメントの水和熱試験より、コンクリートの断熱温度上昇を予測する手法について述べるものとする。



☆次のステップへ（同様の計算の繰り返し）

図-5. 7 温度予測のフロー

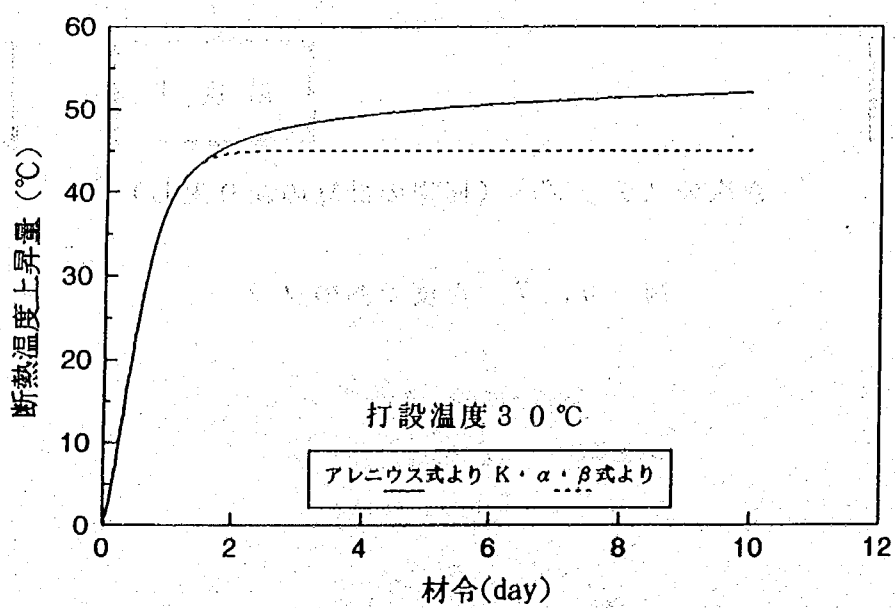
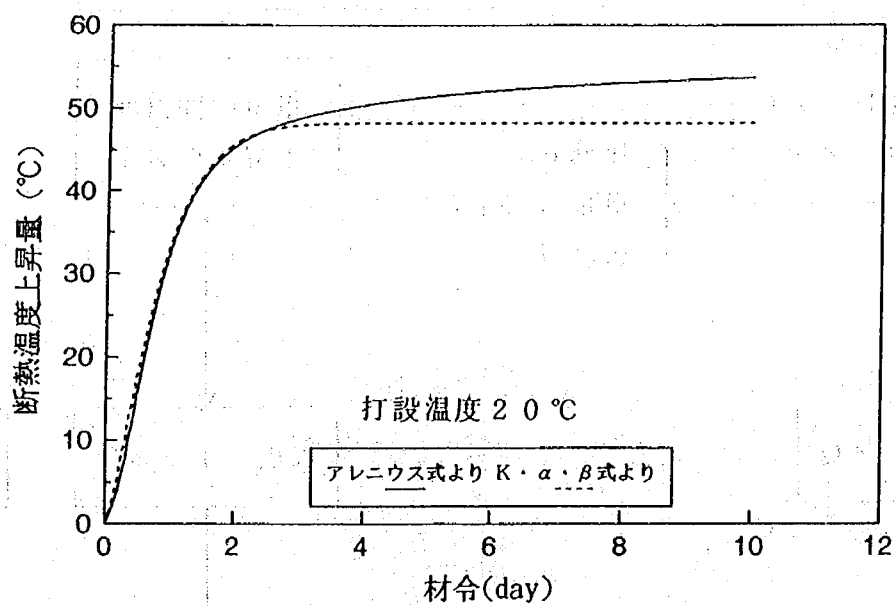
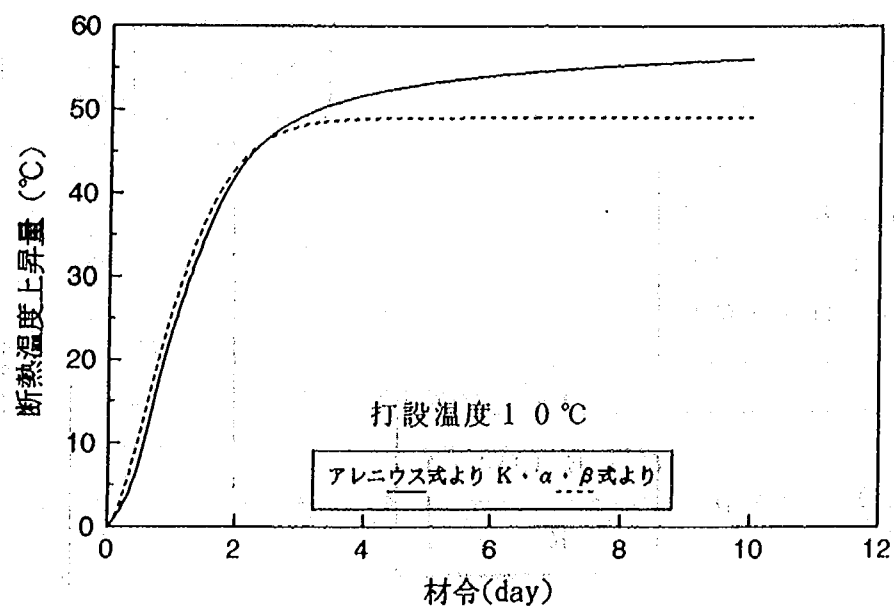


図-5.8 断熱温度上昇予測結果 (NS0(4))

5.2 セメントペーストの水和発熱試験

5.2.1 概要

セメントの初期水和性状に関するデータは、フレッシュコンクリートおよび若材令コンクリートの挙動を理解する上で重要である。一般に、セメントの初期水和性状は、微少熱量計による水和発熱速度曲線によって評価される。水和発熱速度曲線は複雑な曲線を示し、組成鉱物比や環境温度などによってその形状が異なる。初期水和形状を定量評価するには、この曲線を数理モデル化することが必要となる。大型コンクリート構造物の温度ひびわれ解析を行うため発熱量を基本にモデル化した研究はあるが、水和発熱速度曲線を忠実に関数によってモデル化した研究はほとんどない。本研究では、高炉スラグ微粉末を混入したセメントについて、水和発熱速度曲線を双曲線関数によってモデル化し、発熱量を推定し、セメントの水和発熱からコンクリートの断熱温度上昇を予測した。

5.2.2 水和発熱速度のモデル化

一般に、微少熱量計試験により求められたセメントの発熱速度の経時変化は図-5.9のようになる。また、横軸である時間 t を対数に変えて同様の経時変化をプロットすると図-5.10のようになる。

このとき、時間 t の対数をとったとき、発熱速度の数理モデル化する上で簡単であることがわかる。

本研究では、双曲線関数に注目し水和発熱速度のモデル化を行った。⁶⁾

いま、図-5.11のような数理モデルを考える。

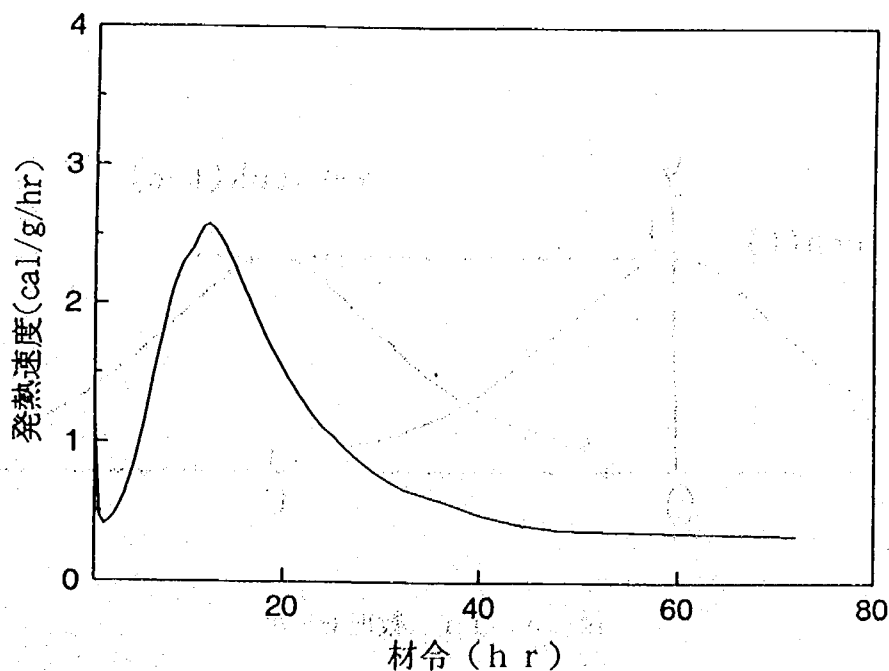


図-5.9 発熱速度の経時変化

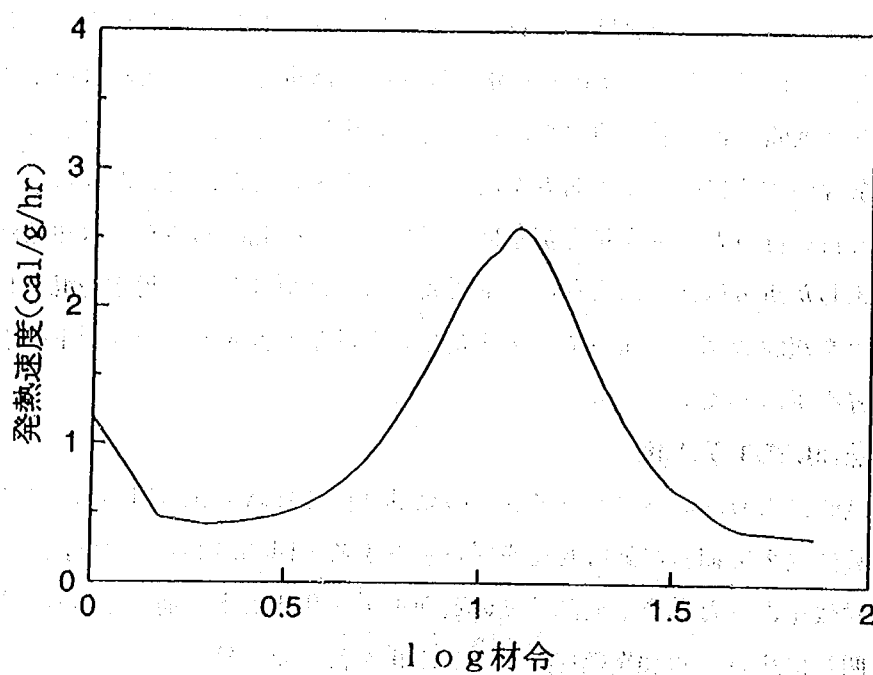


図-5.10 発熱速度の経時変化 (時間 t の対数プロット)

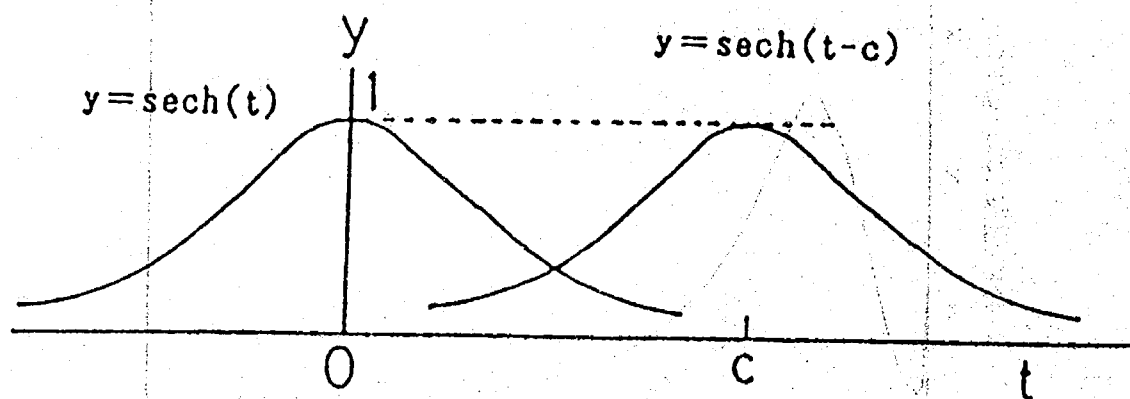


図-5.11 数理モデル

同図は、 $y = \text{sech}(t)$ であり $t = 0$ のとき極大値 $y = 1$ をとる。また、この曲線が横軸に c だけ並行移動されたときは $y = \text{sech}(t - c)$ で表され $t = c$ で極大値 $y = 1$ をとる。本研究では、 $t = \ln t$, $c = \ln c$ とし、さらに極大値が $y = a$ の場合を考えた。このとき y は、

$$y = a * \text{sech}(\ln t - \ln c) \\ = a * \text{sech}(\ln(t/c))$$

となる。また、曲線の曲がり方を表すパラメータとして b を用いると以下のようになる。

$$y = a * \text{sech} \left\{ b * \ln \left(\frac{t}{c} \right) \right\} \quad \text{-----} \quad (5.9)$$

セメントの水和発熱速度の経時変化においては、通常3つのピークを持つことが分かっているため、式(4.9)の組み合わせによって発熱速度のモデル化を行った。なお、前章と同様に第1ピークについては特に言及しないものとする。よって、第2および3ピークについてのモデル化を行った。次式に数理モデルを示す。

$$H = a * \text{sech} \left\{ b * \ln \left(\frac{t}{c} \right) \right\} + a' * \text{sech} \left\{ b' * \ln \left(\frac{t}{c'} \right) \right\} \quad \text{-----} \quad (5.10)$$

ここで、 H : 水和発熱速度(cal/g/hr)、 t : 時間(hr)、 a , a' : 第2および3ピークの値(cal/g/hr)、 b , b' : 第2および3ピークの曲がり方を表す係数、 c , c' : 第2および3ピーク値をとる時間(hr)である。

また本研究では、第3ピーク以降の水和発熱の減速期について、以下のような関数を当てはめモデル化を行った。

$$H = H_0 * \alpha * (1 - \exp(-\alpha * t)) \quad \text{-----} \quad (5.11)$$

ここで、 H_0 、 α は発熱速度の減速度合いを表す係数である。

式(5.10)および式(4.11)を、セメントの水和発熱速度の数理モデル式として本研究で取り扱うこととした。

表-5.7に、数理モデル化によるこれらの係数の値を示す。

表-5.7の値を用いて、積算発熱量 Q の推定を行った。推定結果を NS0(4) について図-5.12に示す。その他の場合については付図-4.1に載せる。

表-5. 7 発熱速度の双曲線による数値モデル定数一覧

実験No.	第 2 ピーク による モデル				第 3 ピーク による モデル				減 速 期 の モ デ ル		
	a	b	c	t 範囲	a'	b'	c'	t 範囲	K	α	t 範囲
NS0(4)20	2.572	2.071	12.5	2.0~32.0	—	—	—	—	62.69	0.0127	36.0~72.0
NS0(4)30	4.699	2.583	8.5	1.5~19.0	—	—	—	—	82.45	0.0148	19.5~72.0
NS0(4)40	7.804	2.964	6.0	1.5~11.0	—	—	—	—	72.34	0.0431	11.5~72.0
NS0(4)50	14.02	4.851	5.5	1.5~7.5	—	—	—	—	68.27	0.0635	8.0~72.0
NS50(4)20	1.442	1.693	11.5	2.0~40.0	0.611	5.393	29.0	16.0~40.0	60.45	0.0143	44.0~72.0
NS50(4)30	2.419	1.756	8.0	1.5~21.0	1.179	10.07	15.0	11.5~21.0	68.22	0.0223	21.5~72.0
NS50(4)40	3.774	2.133	6.0	1.5~12.0	2.529	11.04	9.5	7.5~12.0	69.74	0.0341	12.5~72.0
NS50(4)50	6.244	3.811	5.5	1.5~8.0	4.715	8.675	7.5	6.0~8.0	65.58	0.0611	8.5~72.0
NS60(4)20	1.249	1.490	11.5	2.0~40.0	0.553	6.537	28.0	17.0~40.0	61.71	0.0135	44.0~72.0
NS60(4)30	2.096	1.757	8.0	1.5~18.5	1.333	9.377	15.0	8.5~18.5	67.63	0.0244	19.0~72.0
NS60(4)40	3.278	2.085	6.0	1.5~10.0	2.873	13.34	9.5	8.5~10.0	74.70	0.0376	10.5~72.0
NS60(4)50	5.093	1.920	4.5	1.0~28.0	1.516	3.736	6.5	7.0~28.0	45.21	0.0207	29.0~72.0
NS70(4)20	1.021	1.624	11.5	2.0~36.0	0.774	6.194	28.0	12.0~36.0	60.01	0.0144	40.0~72.0
NS70(4)30	1.797	1.844	8.5	1.5~26.0	1.442	7.129	15.5	9.0~26.0	63.02	0.0214	27.0~72.0
NS70(4)40	3.076	2.459	6.0	1.5~10.5	3.143	9.970	9.5	6.5~10.5	69.90	0.0419	11.0~72.0
NS70(4)50	—	—	—	—	7.361	3.918	7.5	1.5~12.0	49.27	0.0514	12.5~72.0
NS80(4)20	0.801	1.857	11.5	2.0~36.0	0.929	5.425	28.0	12.0~36.0	56.32	0.0131	40.0~72.0
NS80(4)30	1.534	2.111	8.5	1.5~17.5	1.655	9.545	15.0	9.0~17.5	59.30	0.0306	18.0~72.0
NS80(4)40	2.726	2.595	6.0	1.5~11.0	3.074	8.172	9.0	6.5~11.0	54.85	0.0487	11.5~72.0
NS80(4)50	—	—	—	—	6.422	2.986	7.0	1.5~40.0	16.86	0.0327	44.0~72.0

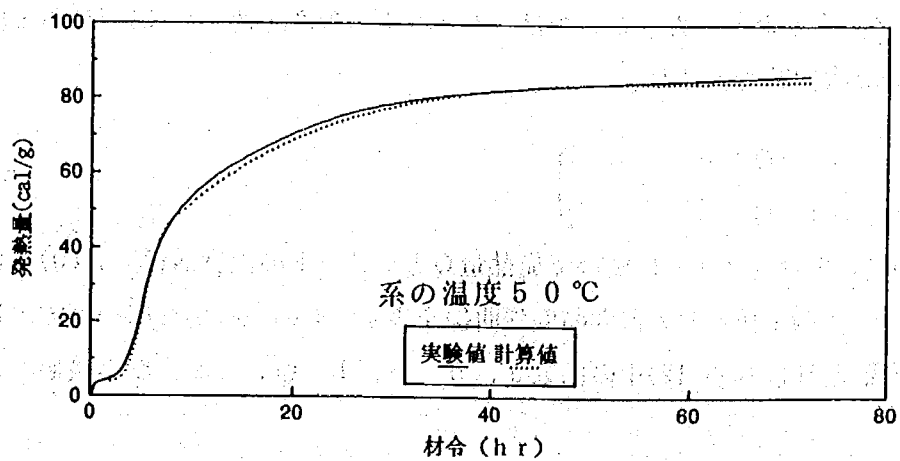
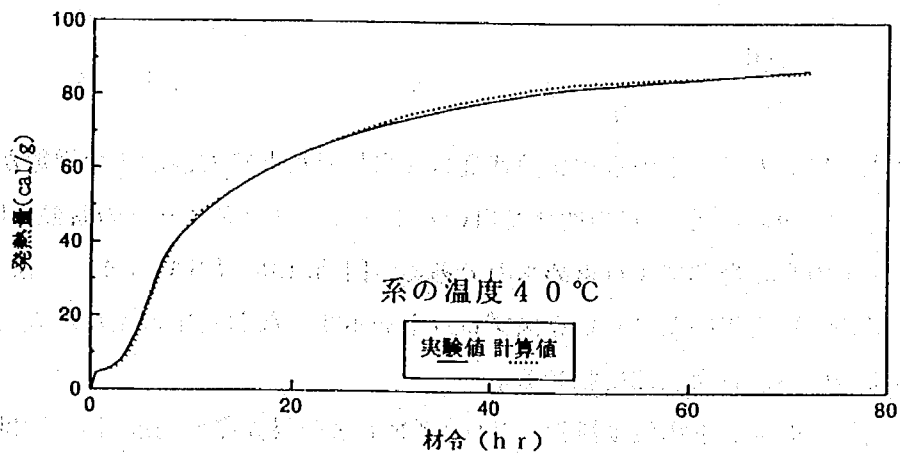
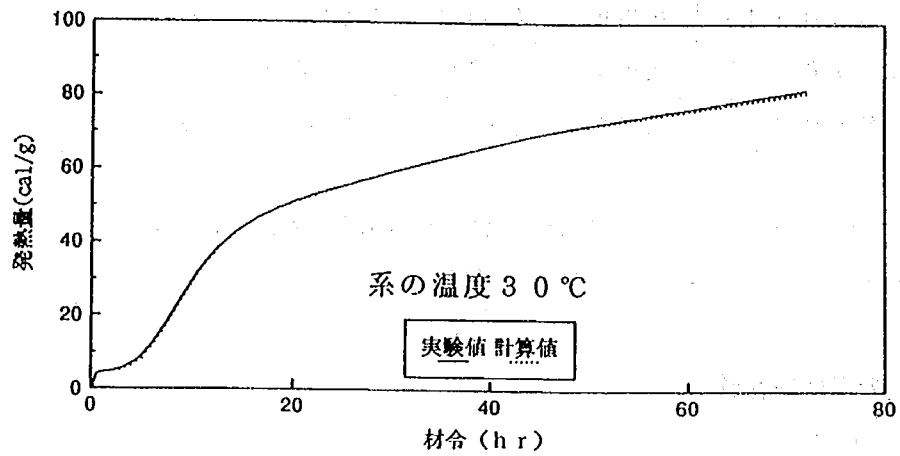
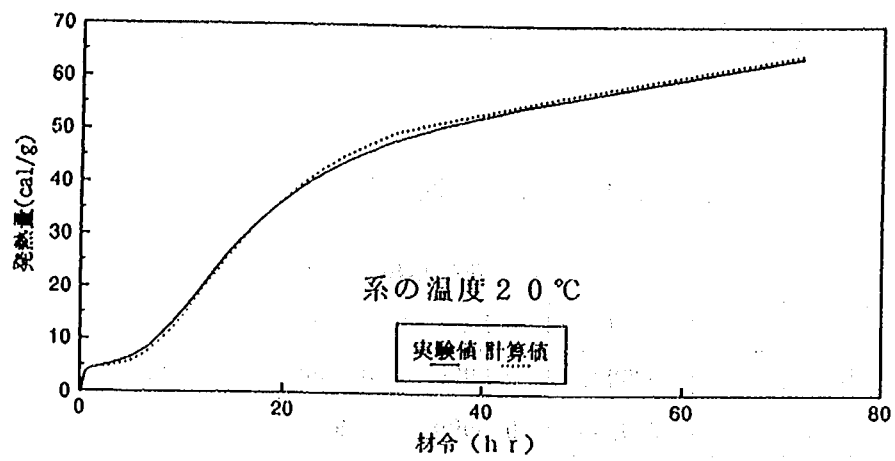


図-5. 12 数値モデルによる積算発熱量の推定 (NS0(4))

上図より実験値と計算による推定値は非常に良い精度で対応していることがわかる。表-5.8に両者の相関係数を示す。

表-5.8 実験値と推定値の相関関係

実験No.	系の温度 (°C)			
	20	30	40	50
NS0 (4)	0.9996	0.9999	0.9996	0.9995
NS50 (4)	0.9999	0.9999	0.9996	0.9984
NS60 (4)	0.9999	0.9998	0.9988	0.9987
NS70 (4)	0.9996	0.9994	0.9992	0.9979
NS80 (4)	0.9984	0.9997	0.9992	0.9970

式(5.10)および式(5.11)を用いて、5.1と同様に水和発熱の温度依存性によるコンクリートの断熱温度上昇予測を次項以降に述べることにする。

5.2.3 水和発熱の温度依存性

最初に、式(5.7)を再度示す。

$$\ln H = \ln H_{\infty}(Q) - \frac{E(Q)}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (5.7)$$

5.1.3でも述べたように、セメントの水和発熱速度Hの自然対数と絶対温度Tの逆数が式(5.7)で表されるアレニウス則に従う。³⁾本節では式(5.7)の関係を用いることで、コンクリートの断熱温度上昇を分散状態の異なるセメントペーストの水和発熱により求めものである。図-5.13にNS0 (4) およびNS50 (4) について式(5.10)および式(5.11)を用いたアレニウスプロットを示す。なお式中の定数は表-5.7の値を用いた。また、その他の場合については付図-4.2に載せる。

コンクリートの場合と同様、セメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ は一定値をとらず発熱量Qによって異なることがわかった。ここでは、セメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ を積算発熱量Qの2次関数で表した。

$$\left. \begin{aligned} -E(Q)/R &= a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c \\ \ln H_{\infty}(Q) &= l \cdot Q^2 + m \cdot Q + n \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

図-5.14および図-5.15に、NS0 (4) について発熱量Qとセメントの温度活性 $-E(Q)/R$ および限界発熱速度 $H_{\infty}(Q)$ の関係について測定値とそのときの回帰曲線を表す。その他の場合については付図-4.3に載せる。また、表-5.9および表-5.10に式(5.12)中の係数a, b, c, l, m, nおよび実験値との相関係数を示す。

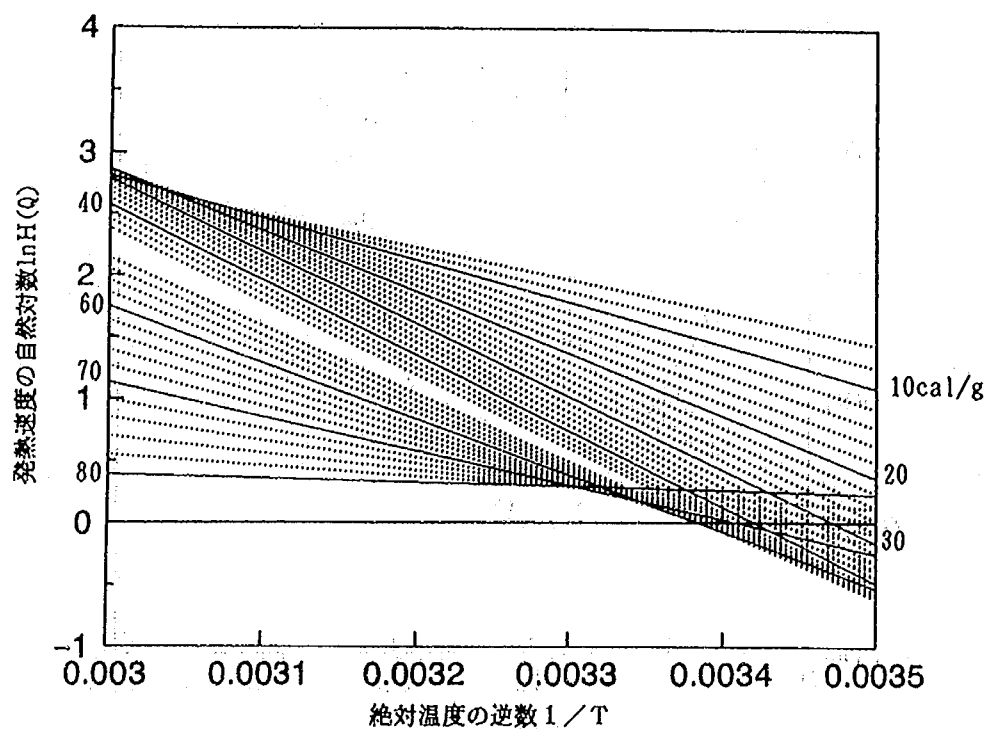


図-5. 13 区間別アレニウスプロット (NS0(4))

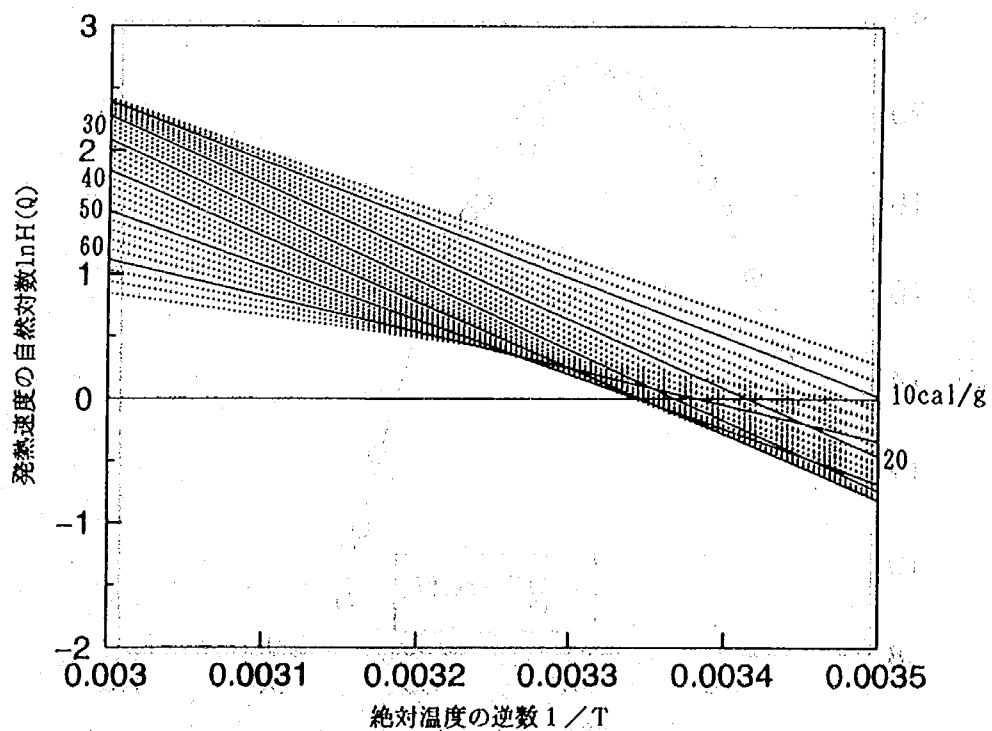


図-5. 13 区間別アレニウスプロット (NS50(4))

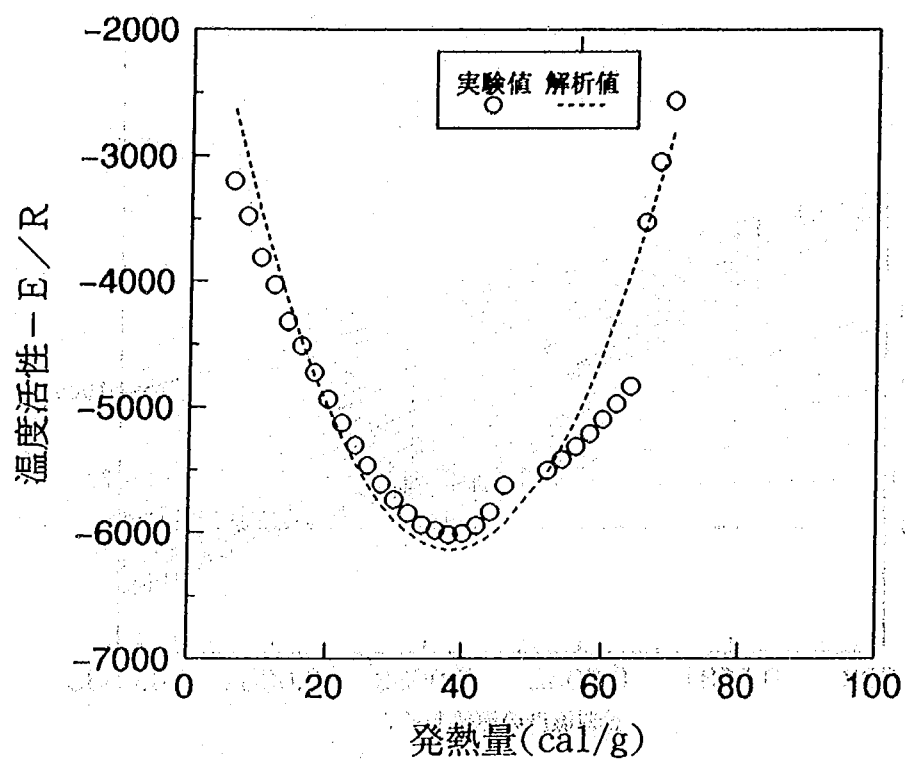


図-5. 14 積算発熱量と温度活性の関係 (NSO(4))

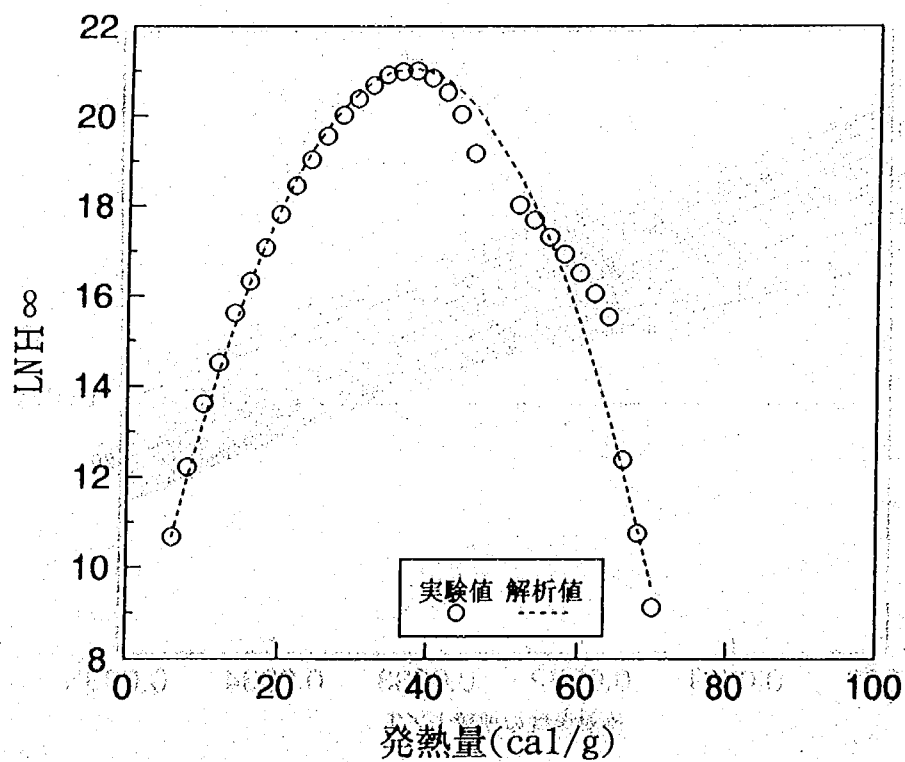


図-5. 15 積算発熱量と限界発熱速度の関係 (NSO(4))

表-5.9 温度活性の推定式

配 合	$-E(Q)/R = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c$			相関係数
	a	b	c	
NS0(4)	3.345	-256.5	-1221	0.985
NS50(4)	2.756	-156.8	-3445	0.820
NS60(4)	4.455	-211.6	-2558	0.890
NS70(4)	4.567	-227.9	-3411	0.879
NS80(4)	2.155	-161.2	-4013	0.765

表-5.10 限界発熱速度の推定式

配 合	$-E(Q)/R = l \cdot Q^2 + m \cdot Q + n$			相関係数
	$l \cdot 10^{-2}$	m	n	
NS0(4)	-1.070	0.795	6.285	0.994
NS50(4)	-0.861	0.469	12.77	0.815
NS60(4)	-1.403	0.643	9.741	0.907
NS70(4)	-1.589	0.766	11.88	0.907
NS80(4)	-0.884	0.579	13.51	0.740

図-5.14, 15および表-5.9, 10において、相関係数がコンクリートの場合より精度が悪いことが明確にわかる。これは、関数のモデル化を行った際、関数と関数の境界点で連続とならないためであると考えられる。式(5.12)を用いることにより、各結合材料について任意の打設温度におけるコンクリートの断熱温度上昇予測を行う。図-5.16に、NS0(4)について温度上昇の予測を行った結果を示す。また、その他の結果については付図-4.4に載せる。

図より、セメントの水和発熱よりコンクリートの断熱温度上昇が可能となった。

5.1.3に比べ精度が劣っている。この原因として、上でも述べたように発熱速度のモデル化を複数の関数での推定を行ったため関数同士の境界点で発熱速度が連続にならないこと、また、試験面では微少熱量計によるセメントペーストの水和熱試験において、混和剤を一切用いず水のみで試験を行ったことがコンクリートの断熱試験とは異なっている。混和剤の使用により、水和発熱の発生が変化することは確かであると思われる。

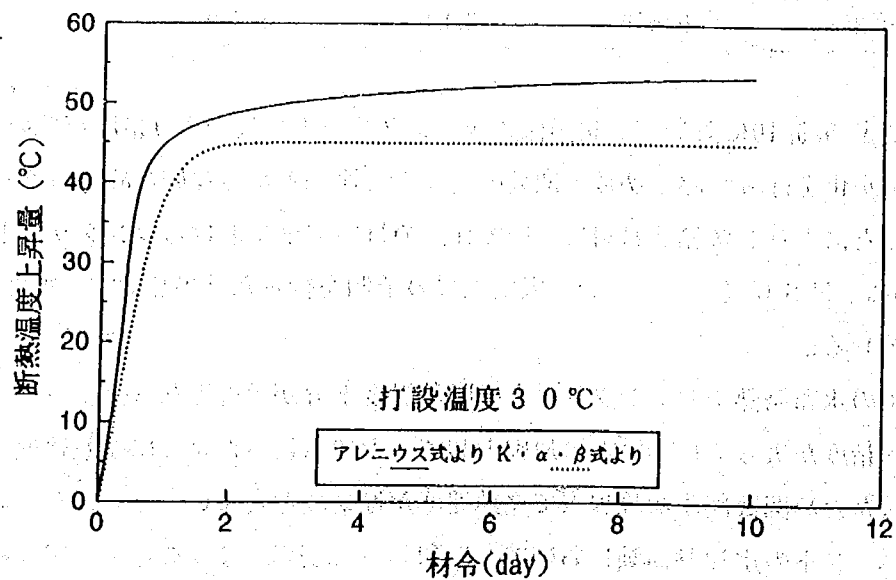
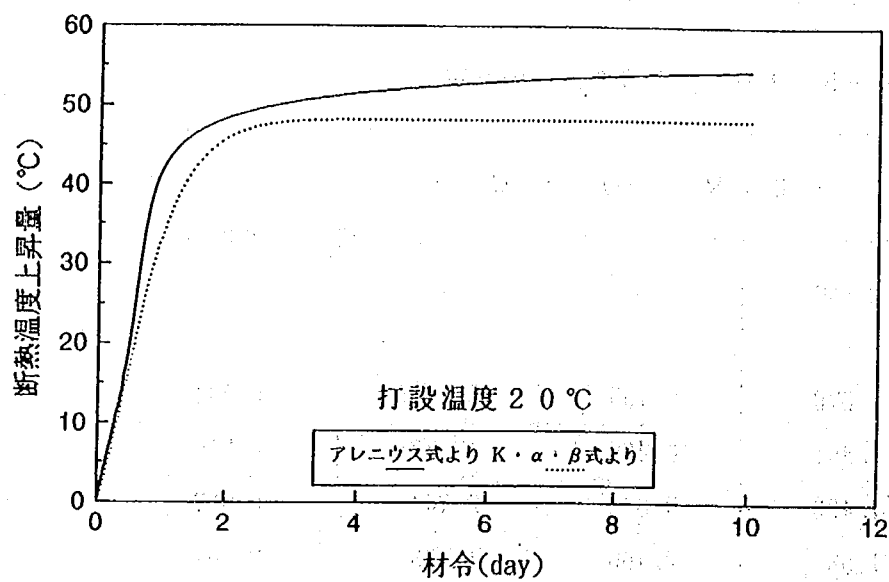
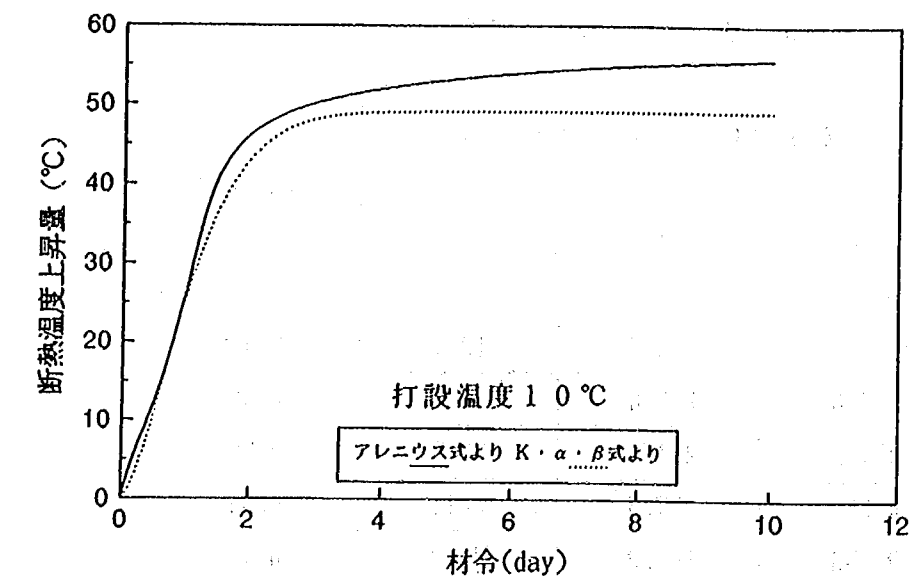


図-5.16 断熱温度上昇予測結果 (NS0(4))

6. まとめ

本研究は、コンクリート構造物に発生する温度応力、温度ひびわれの抑制を図るため低発熱セメントとしてしばしば用いられている高炉スラグ微粉末混入コンクリートについて、スラグ混入率を従来の高炉セメントB種より高めたときのコンクリートの発熱特性を調べ、コンクリートの断熱温度上昇予測を行った。

以下に、得られた結果を示す。

1) コンクリートの断熱温度上昇試験

スラグ混入率が大きくなるほど上昇速度は小さくなるが、混入率が60%程度までは最終温度上昇量に大きな変化はみられない。

スラグの粉末度が大きくなると上昇速度が大きくなり最終温度上昇量も大きくなる。これは結合材の水和活性が盛んになるためである。

同一配合において打設温度が変化した場合、打設温度が低いほど上昇速度は小さいが長期における温度上昇の伸びが著しく最終温度上昇量は大きくなる。

断熱温度上昇曲線の回帰をした結果、式(5.1)より式(5.2)での回帰が良好であった。

試験機の違いによる断熱温度上昇の経時変化に一定の傾向がみられ、双方の相関関係より回帰式の統一が可能となった。

2) セメントペーストの水和発熱試験

同一温度の場合、スラグ混入率が大きくなるほど同材令における発熱量は小さくなる。

スラグの粉末度が大きくなると、同材令での発熱量は大きくなる。

系の温度が高くなると発熱量は大きくなるが、温度が40℃を超えると発熱量の伸びが顕著に現れない。

発熱速度の経時変化を見ると、同一温度の場合、C、Aによる第2ピークの発生時間は一定であり、ピーク値は混入率が大きくなるほど小さくなる。

スラグの発熱による第3ピークについて、同一温度のとき、発生時間およびピーク値は一定である。

微少熱量計試験とJIS溶解熱法の相関関係は非常に良いものとなった。

3) コンクリートの断熱温度上昇の予測

コンクリートについて、水和発熱の温度依存性を考慮することによりコンクリートの断熱温度上昇を予測した結果、断熱試験による予測は材令初期について精度が非常に良いが、終局的に温度上昇が継続し精度が劣った。これは、発熱量の大きい部分での温度依存性が明確に現れなかったことによるものである。

微少熱量計試験による予測は、断熱試験による予測に比べて精度は劣った。これは混和剤の有無によるものであると思われる。しかしながら、これにより断熱温度上昇の簡易予測が可能となった。

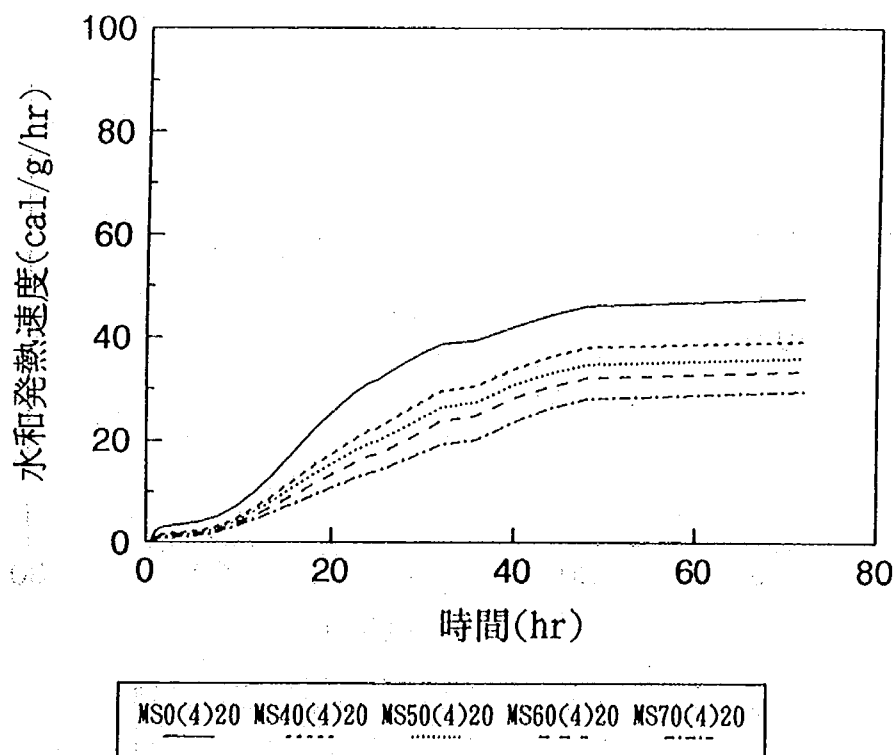
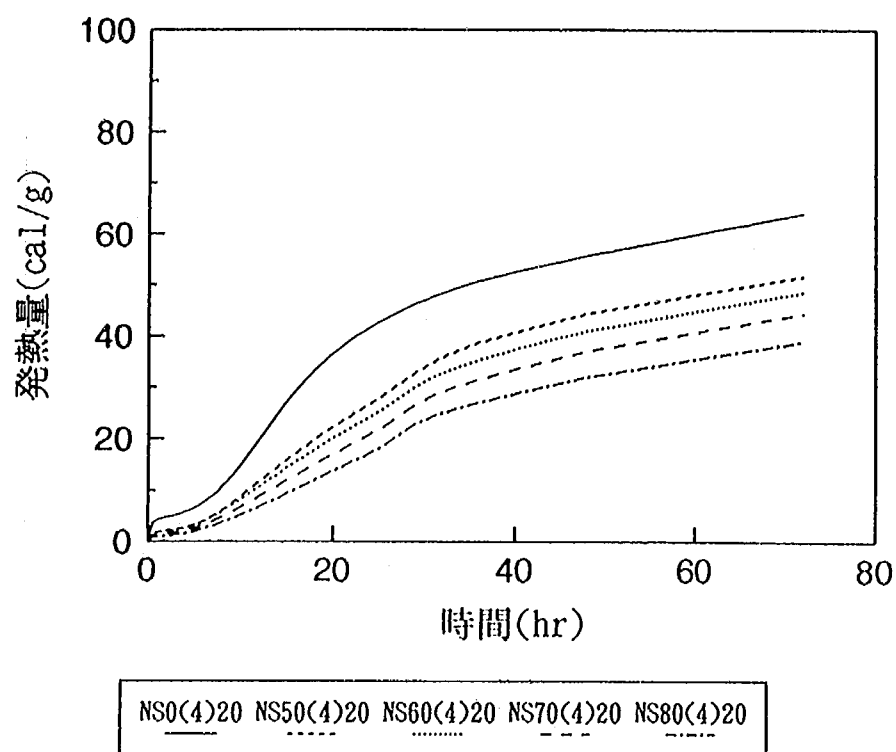
今回、コンクリートの断熱温度上昇の簡易予測の第1段階としてセメントペーストにおける微少熱量計試験からの予測を提案した。今後、さらに精度の良い予測が課題となる。

参考文献

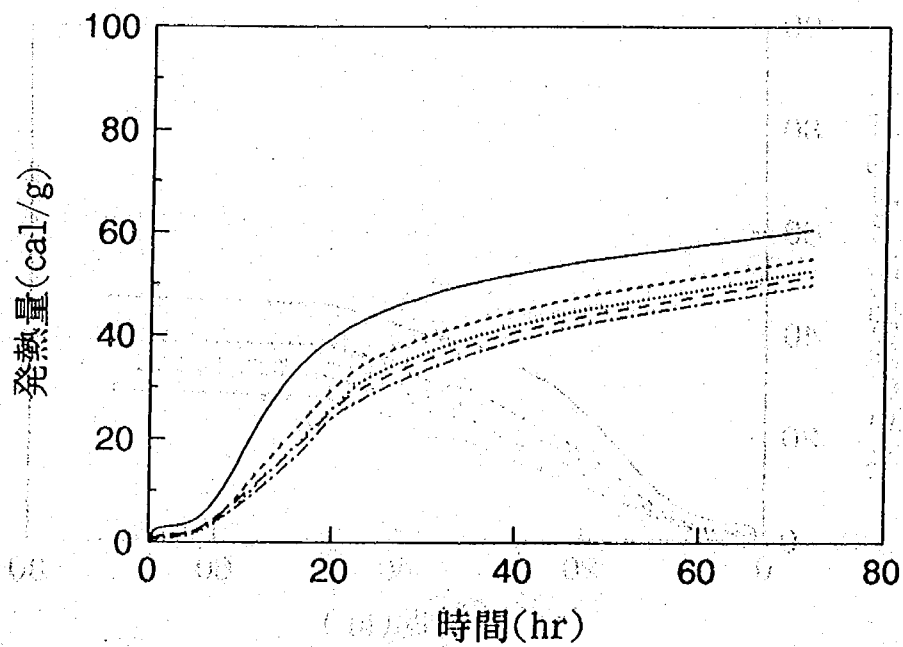
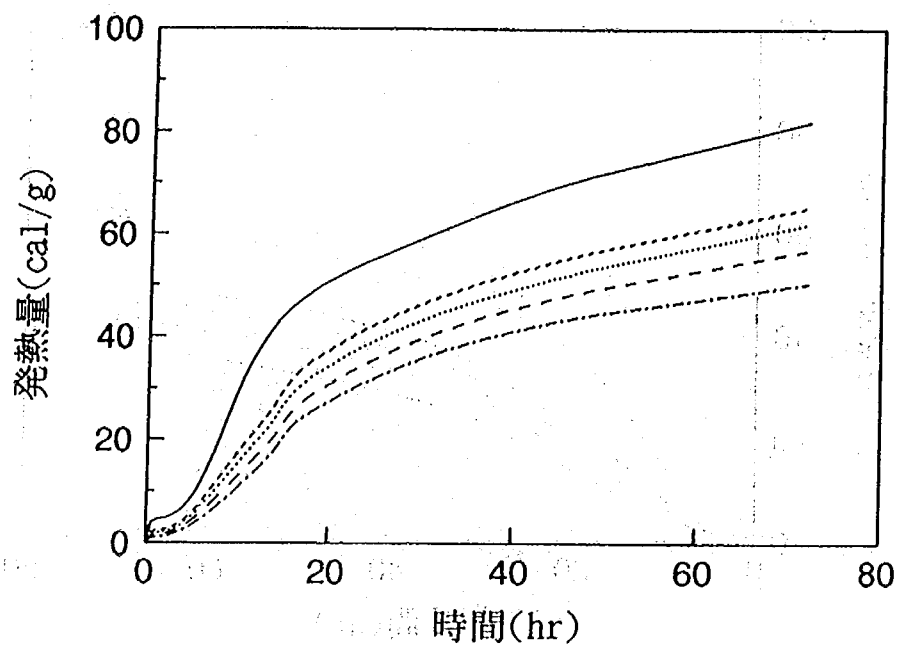
- 1) 土木学会；高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案）
コンクリートライブラリー第63号；1988. 1；pp60～77
- 2) 阪本好史、富沢年道、近田孝夫；高粉末度スラグのコンクリートへの利用の現状と展望
コンクリート工学；1991. 4；pp17～26
- 3) 鈴木康範、辻 幸和、前川宏一、岡村 甫；コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化；土木学会論文集；1990. 2；pp155～164
- 4) 内田清彦、構原弘幸、斉藤 豊；積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測；コンクリート工学；1986. 4；pp105～113
- 5) 岡本寛昭、伊藤直人；セメント初期水和発熱速度のモデル化とその応用
第46回セメント技術大会講演集；1992；pp38～43
- 6) 土木学会；コンクリート標準示方書、施工編；平成3年版
- 7) 日本コンクリート工学協会；マスコンクリートのひびわれ制御指針；1986. 1
- 8) 松井 淳；マスコンクリートの配合条件が強度および発熱特性に及ぼす影響
建設省土木研究所部外研究員研究報告書；1992. 3；pp28～33

添付資料

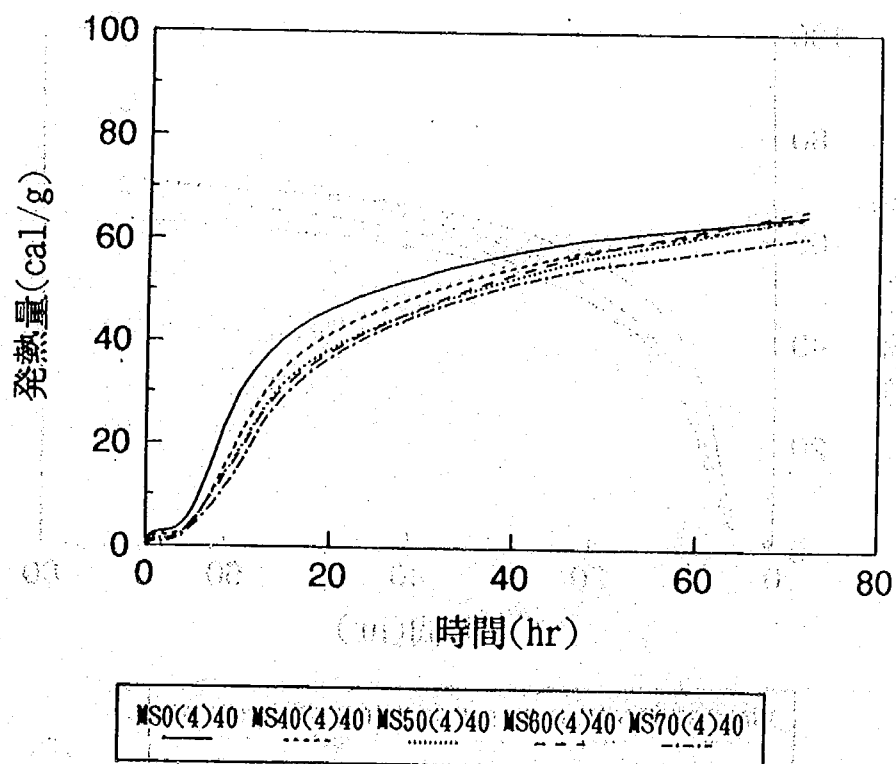
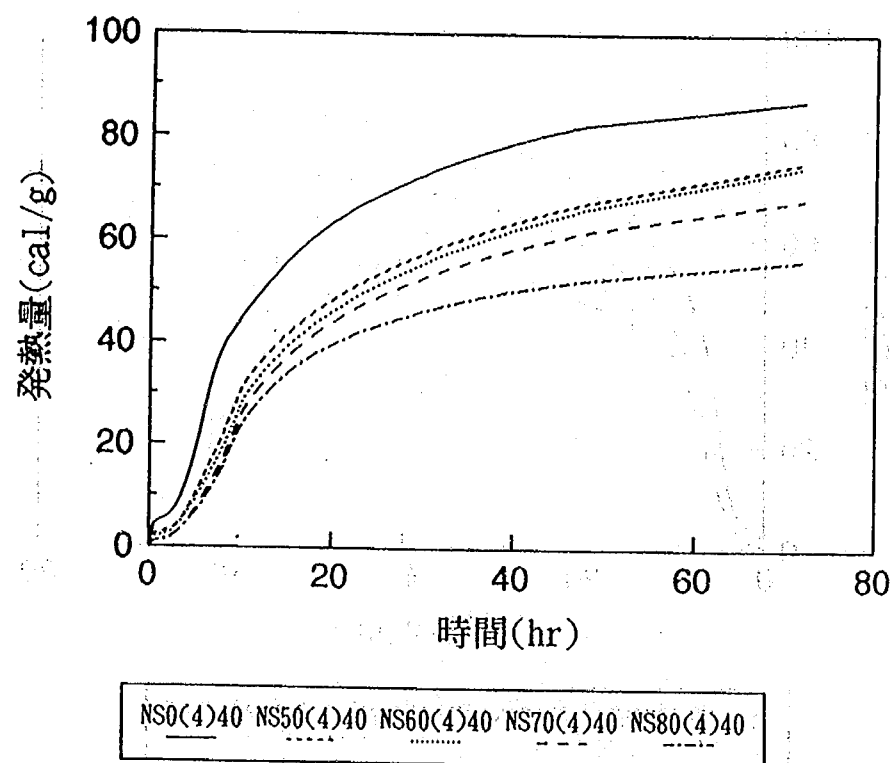
	page
付図－１．１ 積算発熱量の経時変化	1
付図－１．２ 発熱速度の経時変化	7
付図－１．３ 積算発熱量と発熱速度の関係	12
付図－２．１ 断熱温度上昇試験結果	16
付図－２．２ 各材令間の平均温度上昇速度	21
付図－３．１ 断熱定数分布	23
付図－３．２ 断熱温度上昇の推定結果	28
付図－３．３ 回帰式と測定値の誤差の経時変化	38
付図－３．４ 断熱温度上昇曲線推定結果（東京理工は補正）	47
付図－３．５ 区間別アレニウスプロット	54
付図－３．６ 断熱温度上昇予測結果	56
付図－４．１ 数理モデルによる積算発熱量の推定	61
付図－４．２ 区間別アレニウスプロット	65
付図－４．３ 積算発熱量と温度活性、限界発熱速度の関係	67
付図－４．４ 断熱温度上昇予測結果	71



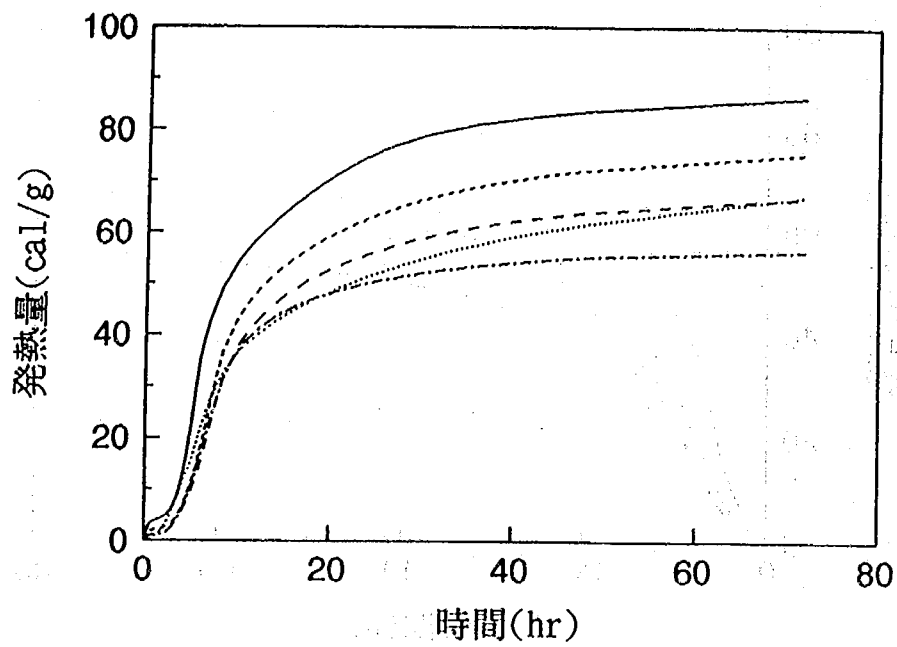
付図-1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 20℃)



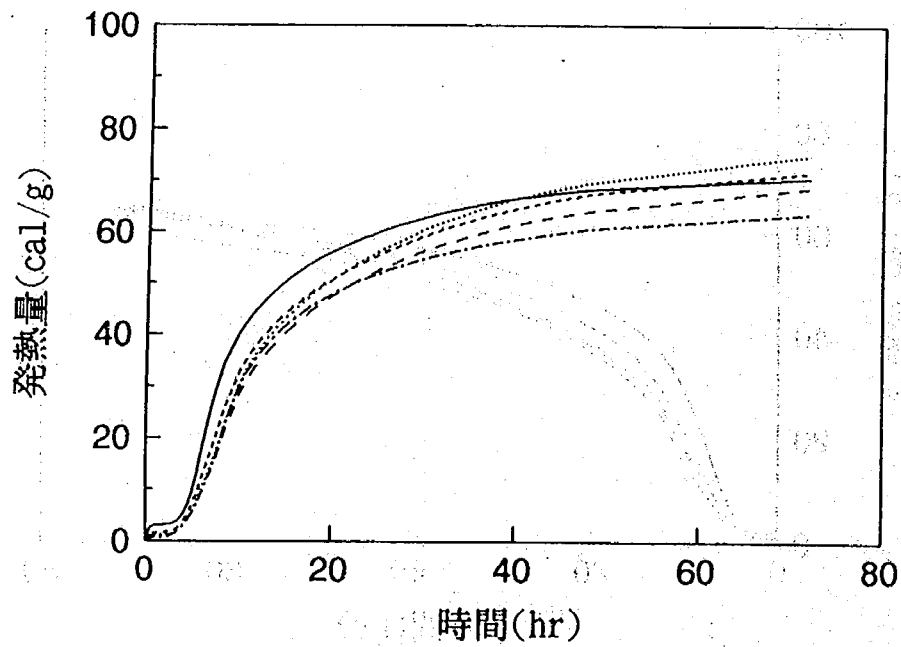
付図-1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 3.0℃)



付図 - 1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 40 °C)

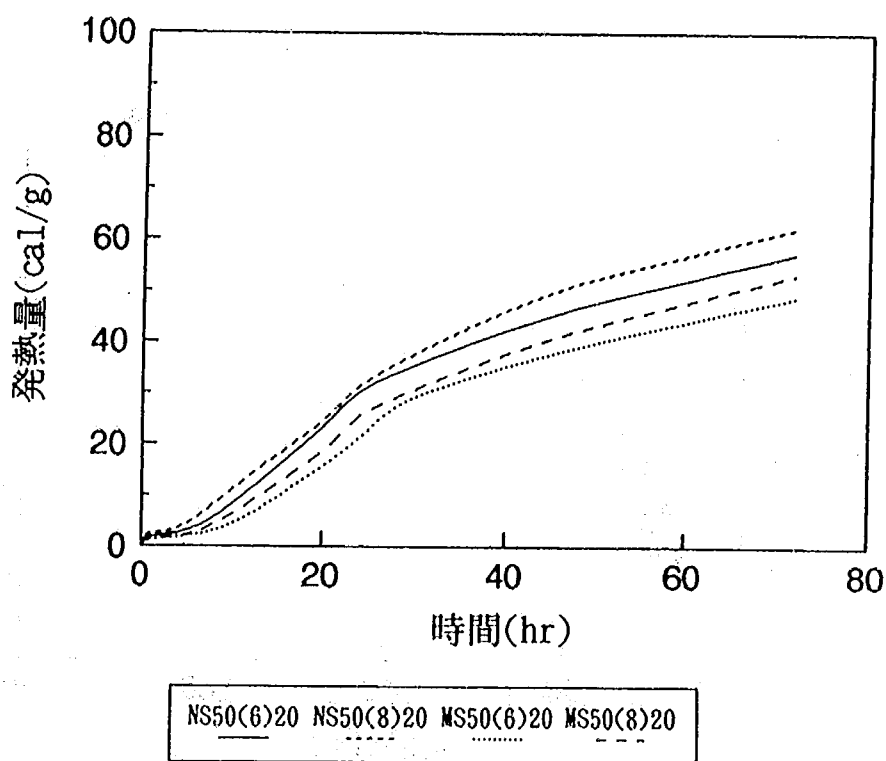


NS0(4)50 NS50(4)50 NS60(4)50 NS70(4)50 NS80(4)50

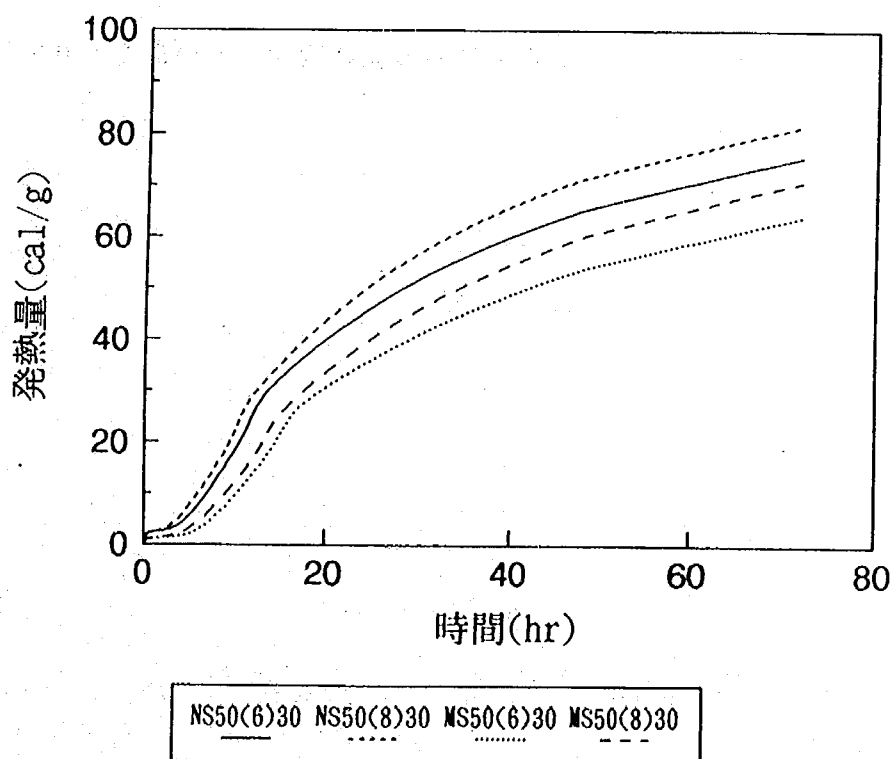


MS0(4)50 MS40(4)50 MS50(4)50 MS60(4)50 MS70(4)50

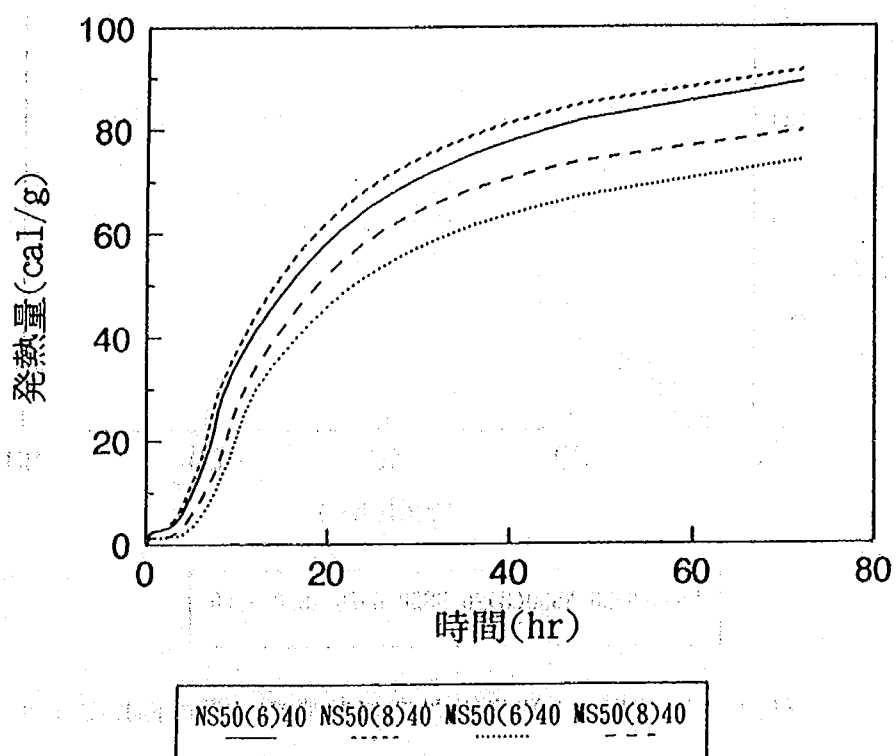
付図 - 1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 5.0 °C)



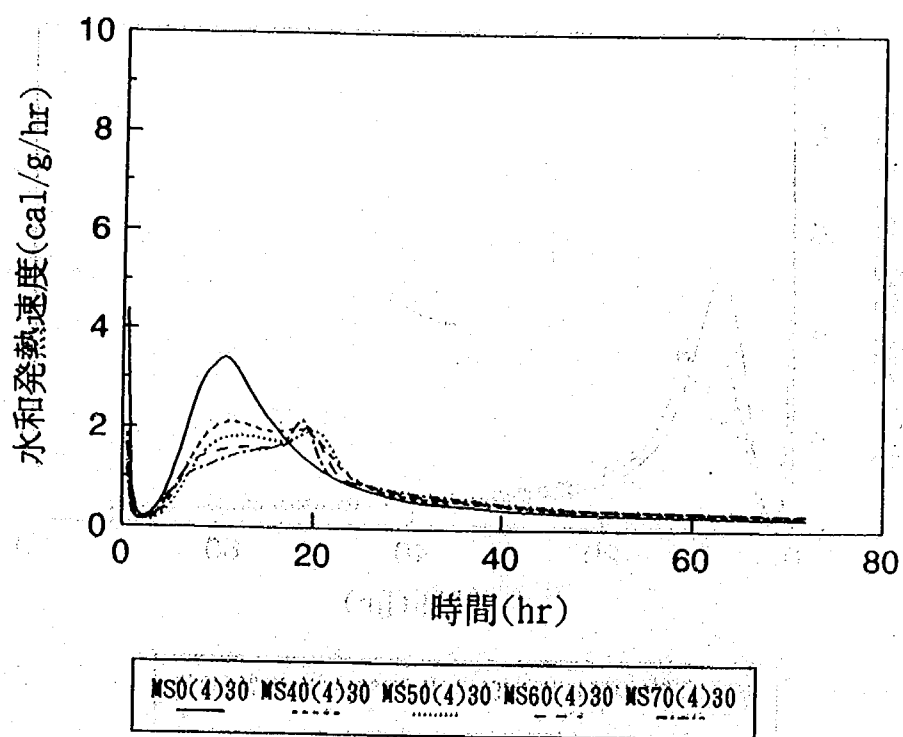
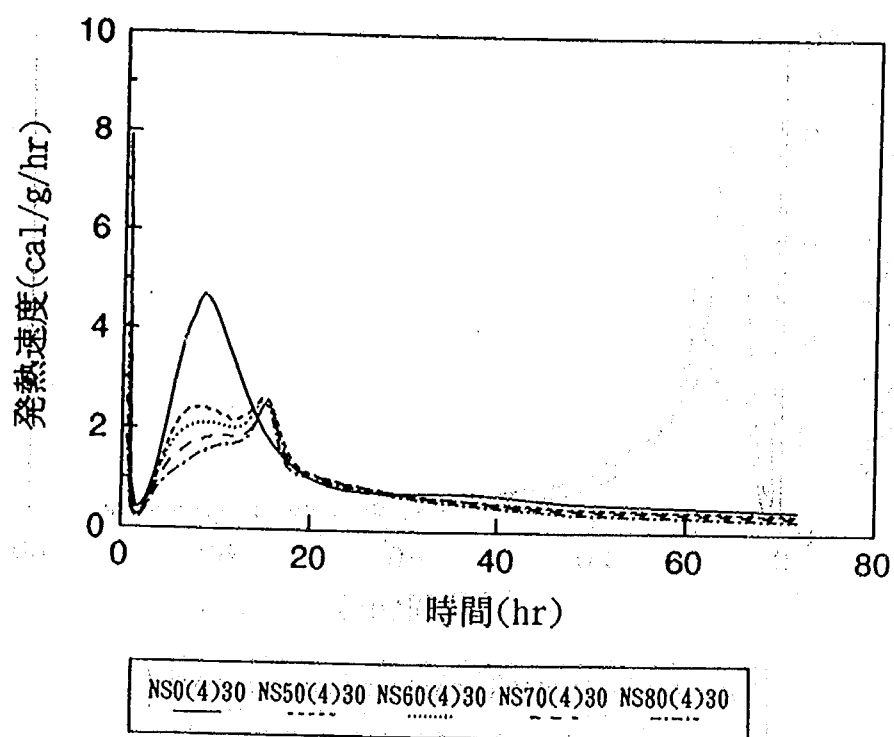
付図 - 1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 20 °C)



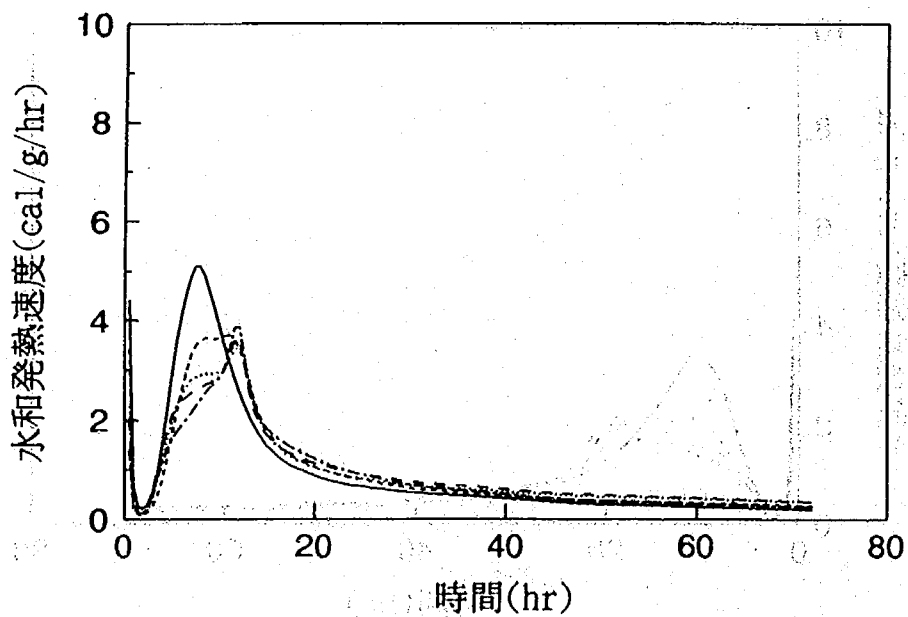
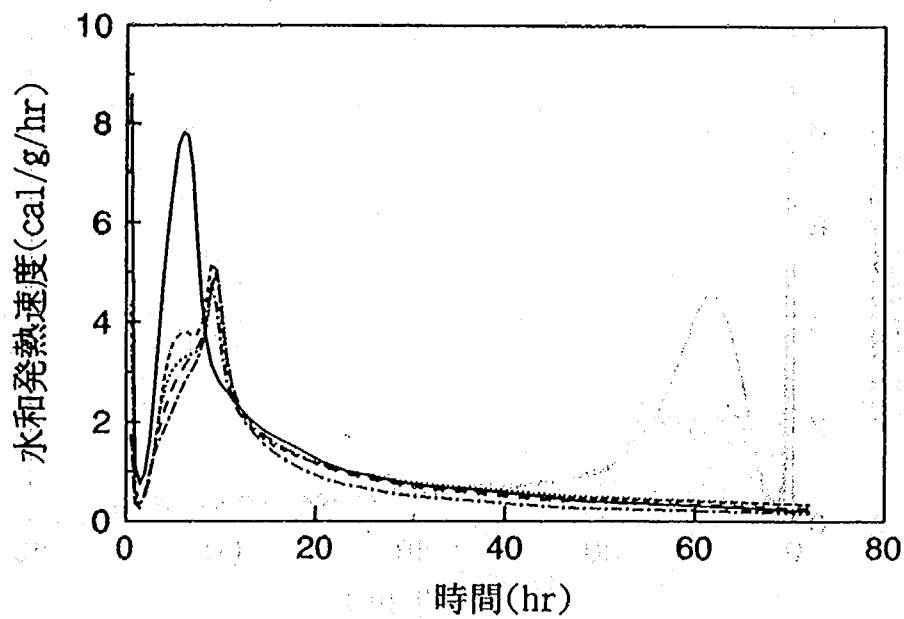
付図 - 1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 30 °C)



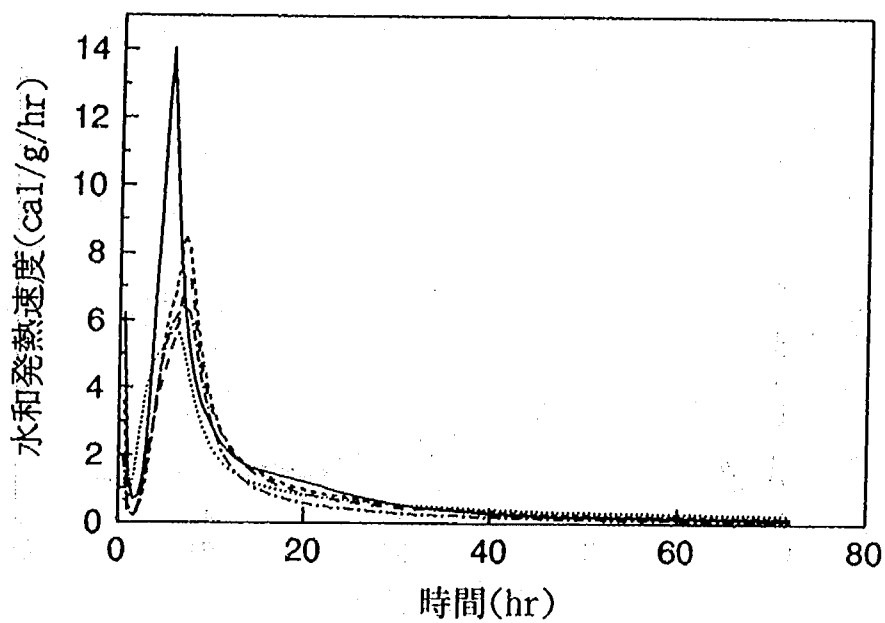
付図 - 1. 1 積算発熱量の経時変化 (系の温度 40 °C)



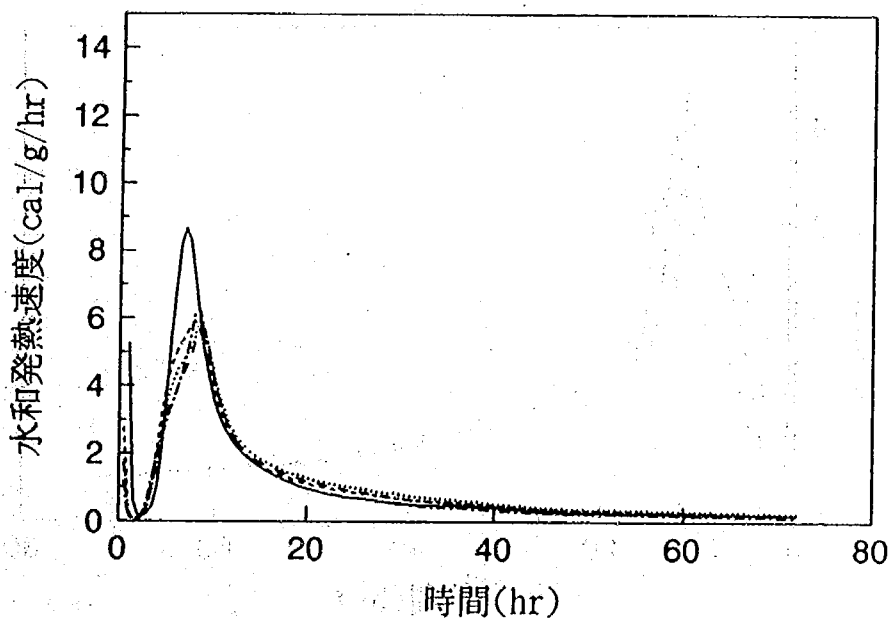
付図 - 1. 2 発熱速度の経時変化 (系の温度 30 °C)



付図-1, 2 発熱速度の経時変化 (系の温度 40 °C)

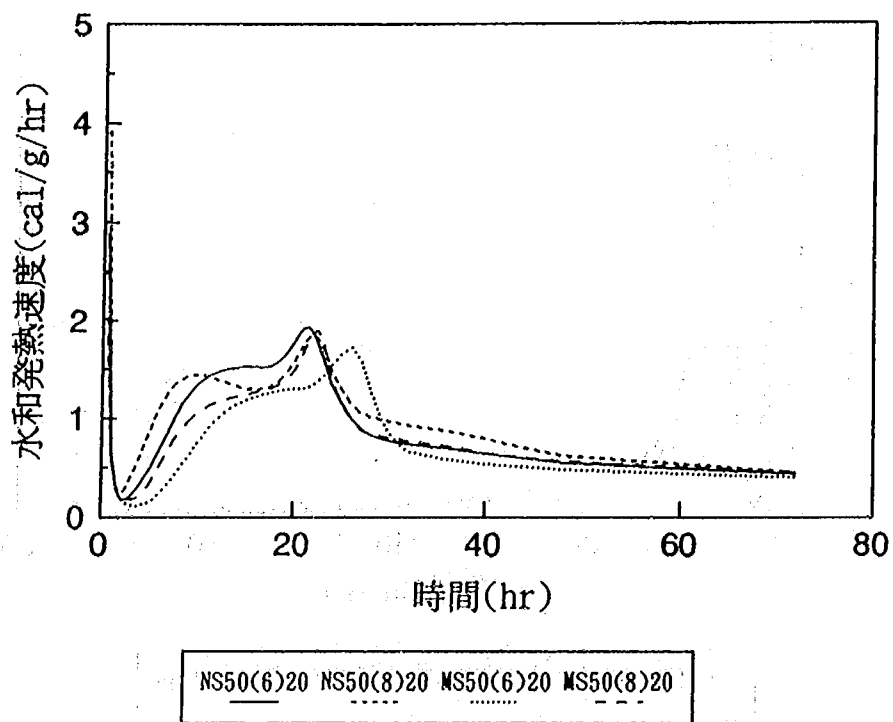


NS0(4)50 NS50(4)50 NS60(4)50 NS70(4)50 NS80(4)50

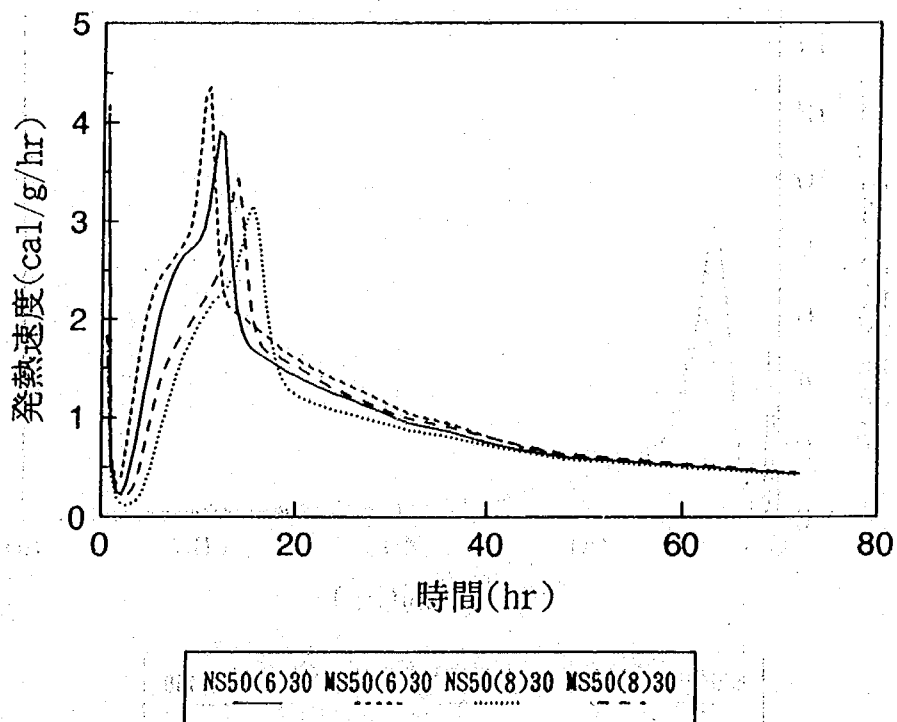


MS0(4)50 MS40(4)50 MS50(4)50 MS60(4)50 MS70(4)50

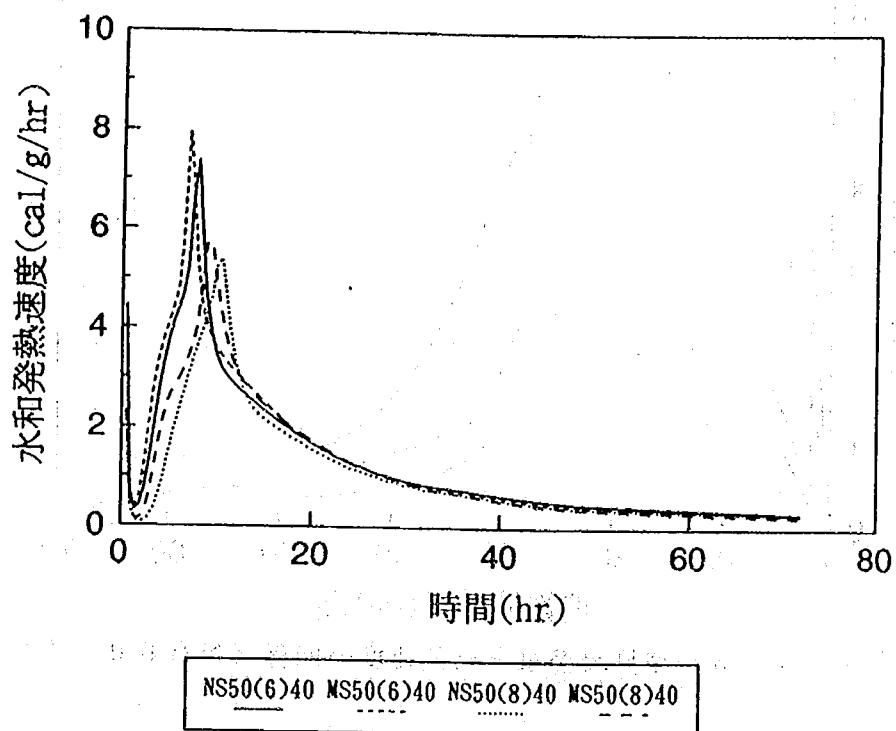
付図 - 1. 2 発熱速度の経時変化 (系の温度 50 °C)



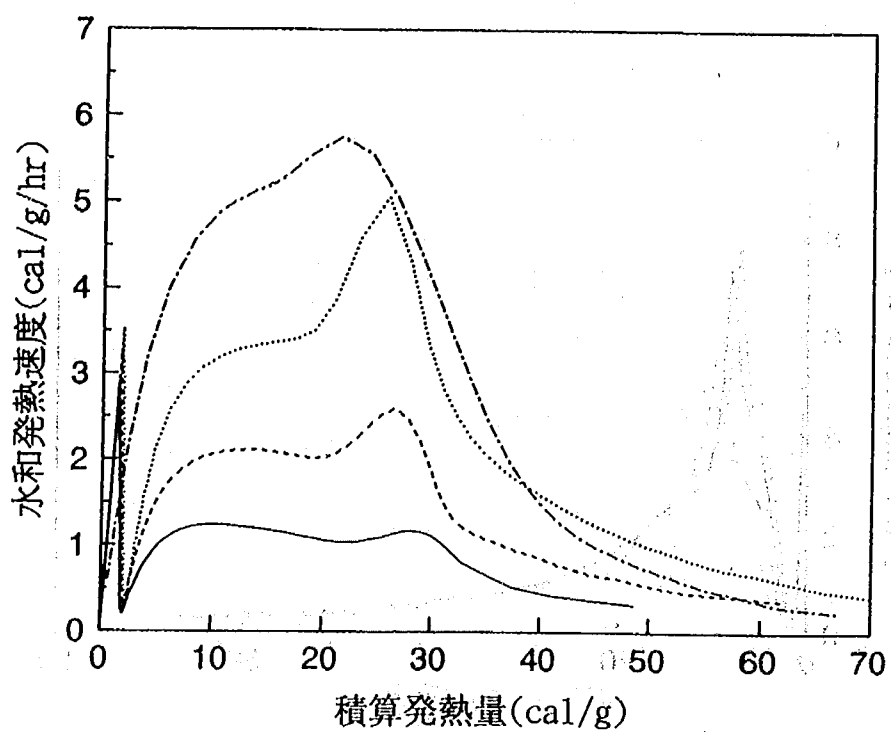
付図 - 1. 2 発熱速度の経時変化 (系の温度 20 °C)



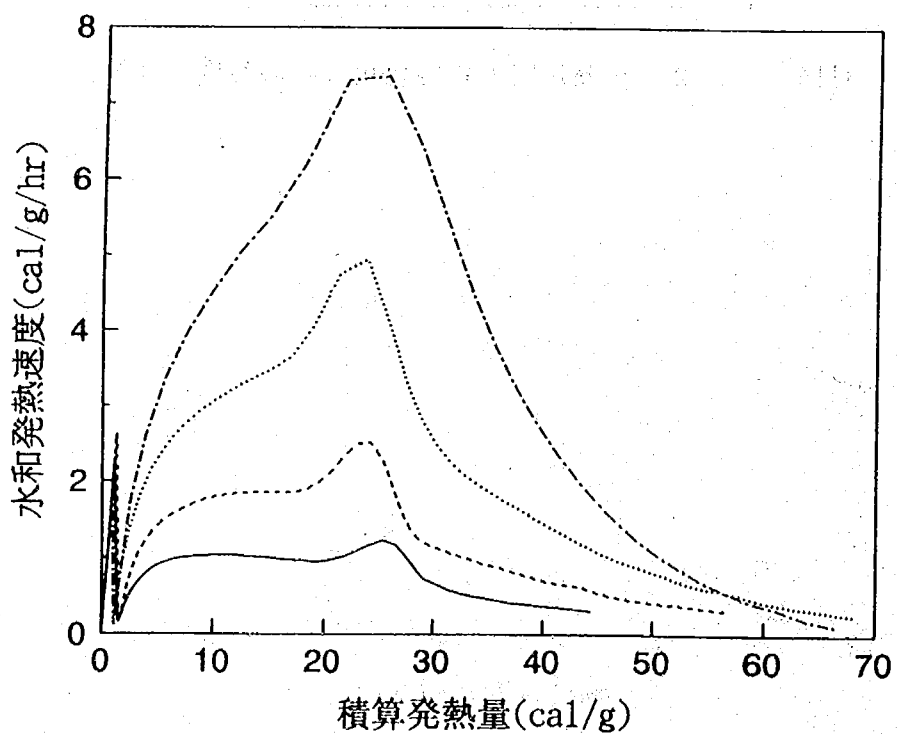
付図 - 1. 2 発熱速度の経時変化 (系の温度 30 °C)



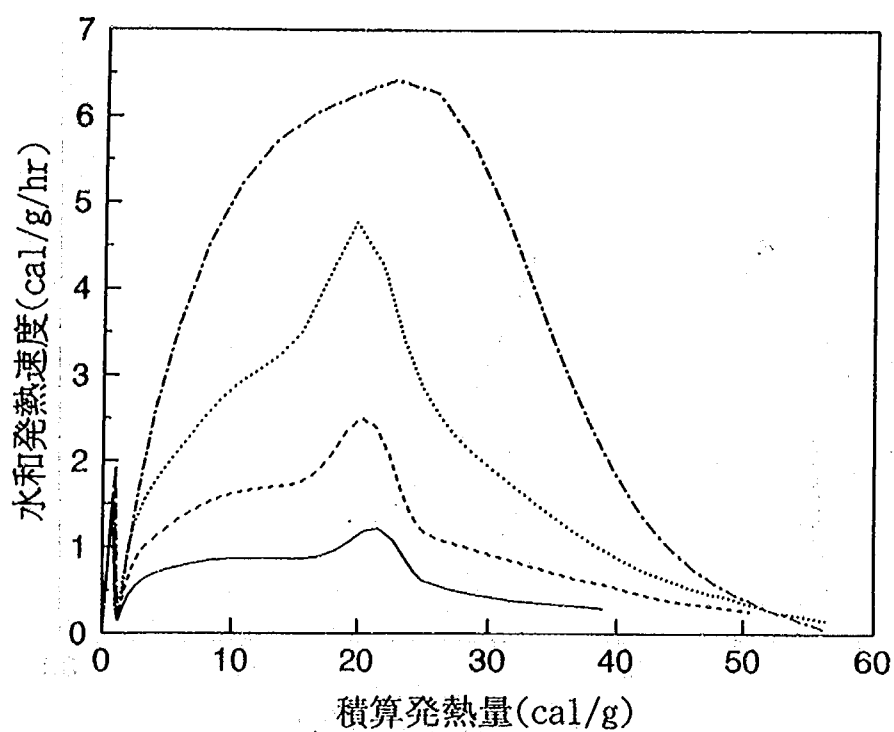
付図－1. 2 発熱速度の経時変化（系の温度 40℃）



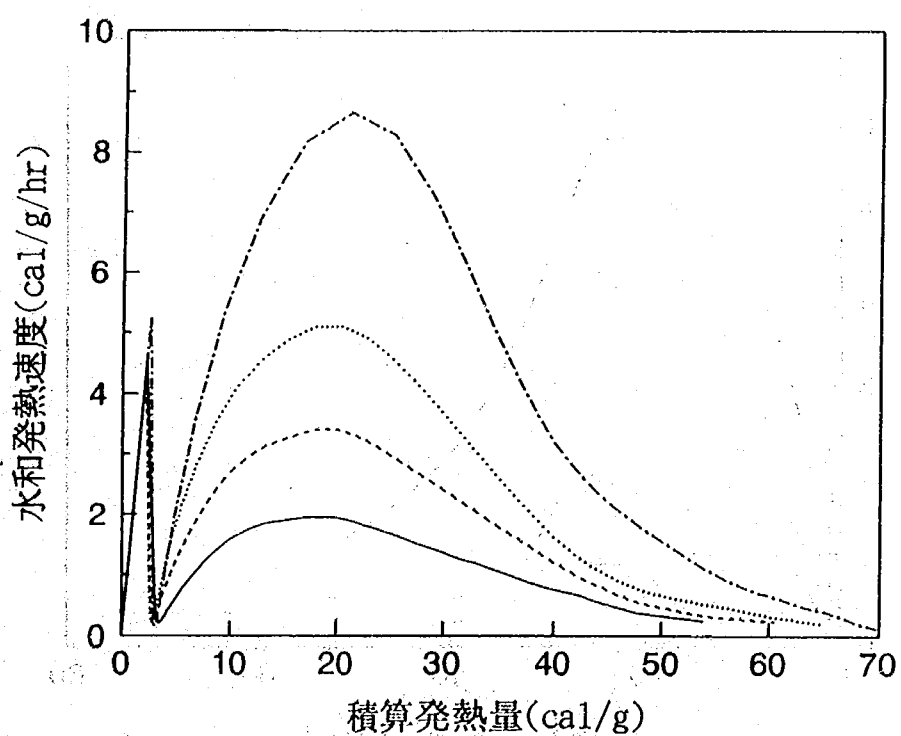
付図 - 1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (NS 60 (4))



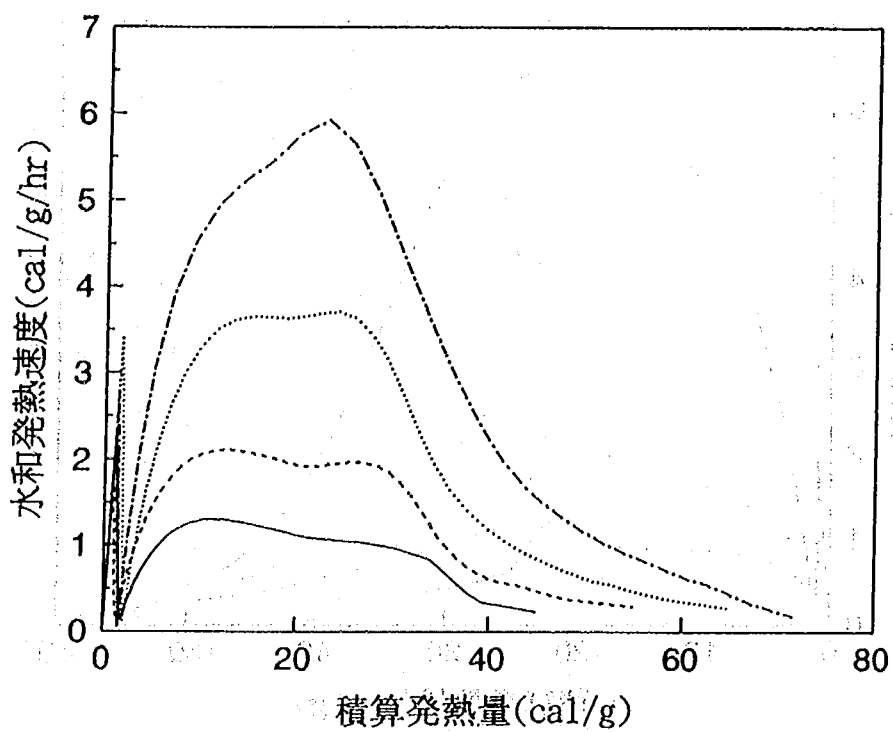
付図 - 1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (NS 70 (4))



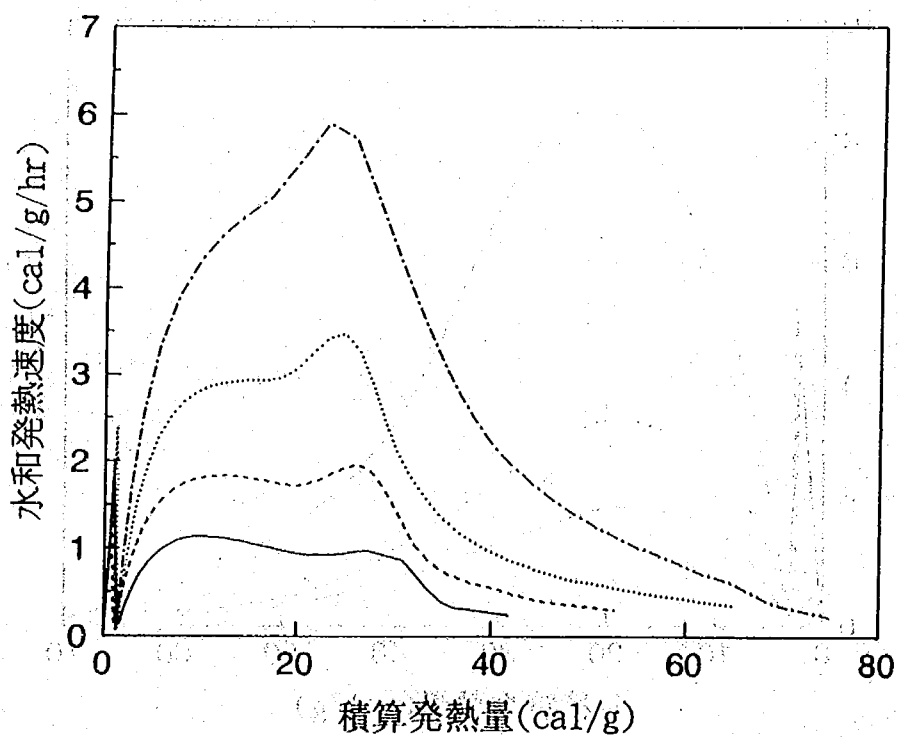
付図-1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (NS 80 (4))



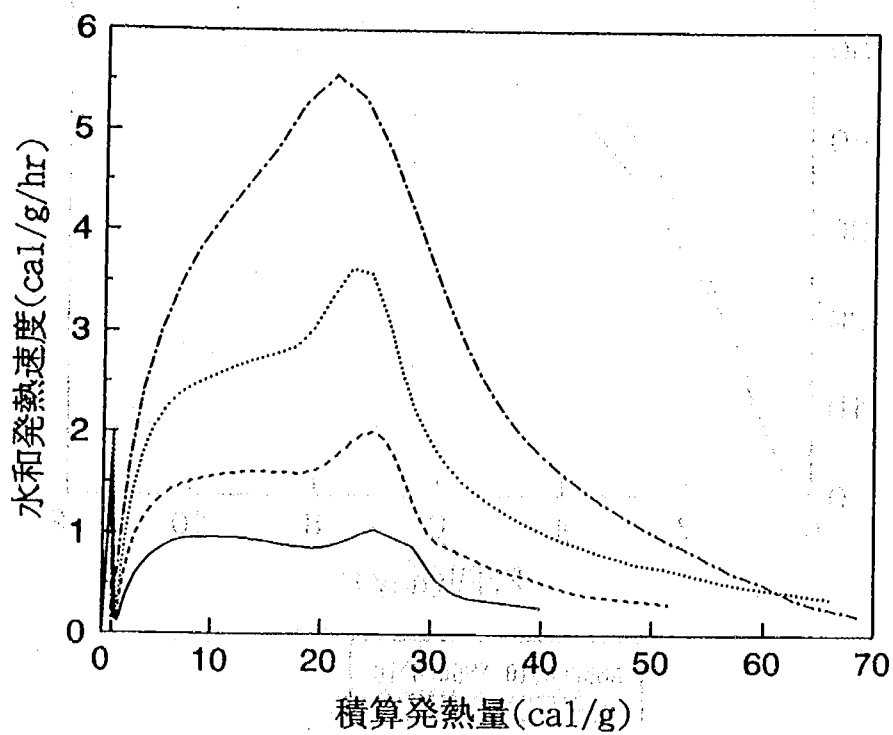
付図-1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (MS 0 (4))



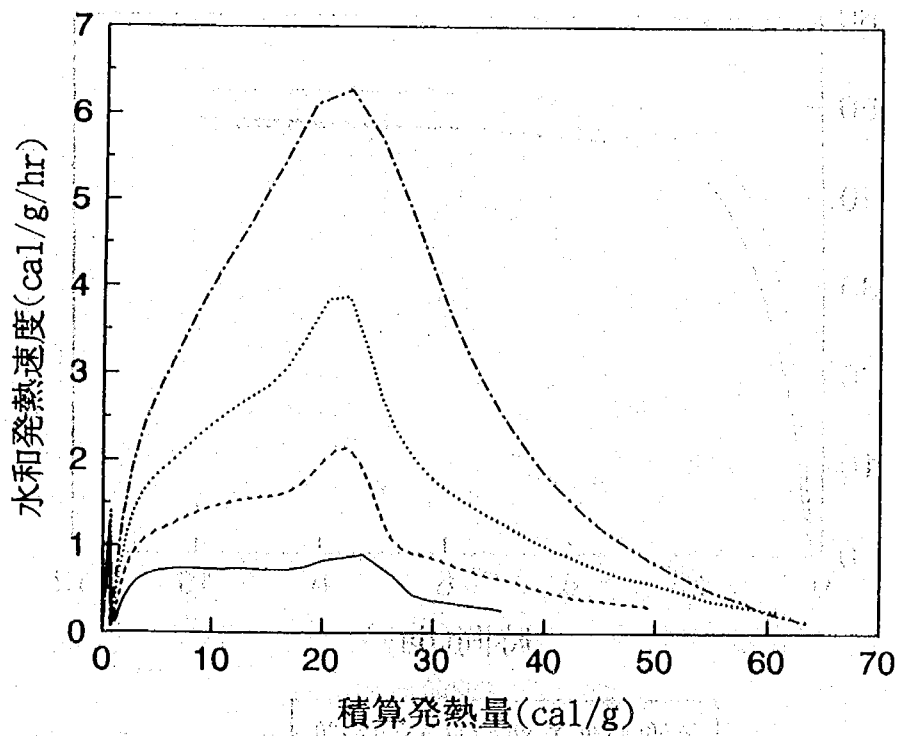
付図 - 1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (MS40 (4))



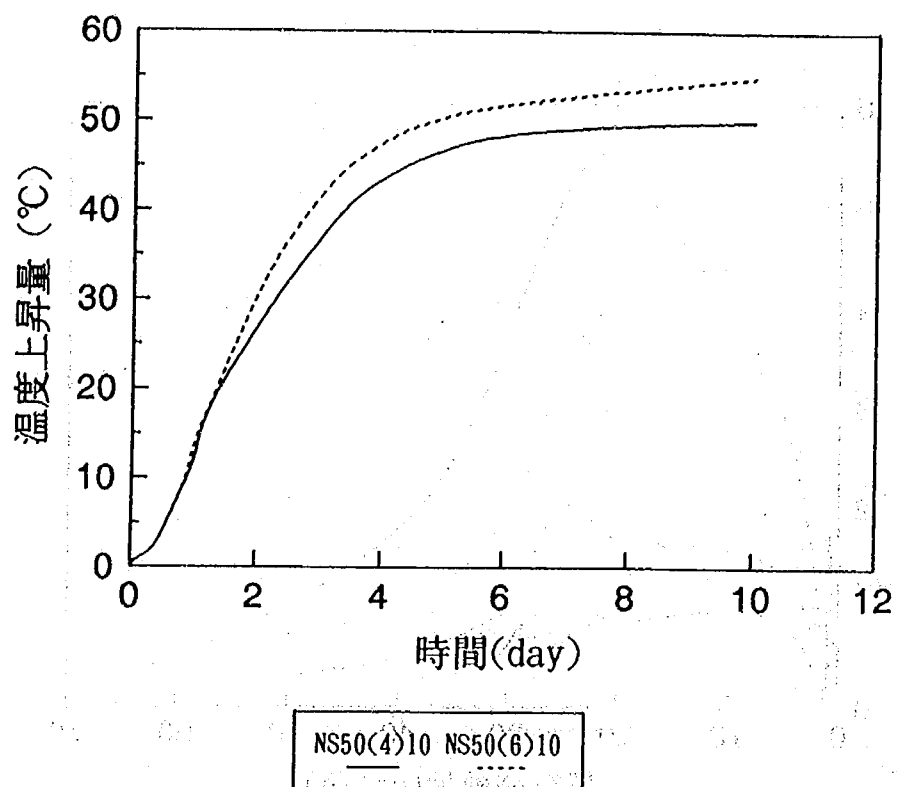
付図 - 1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (MS50 (4))



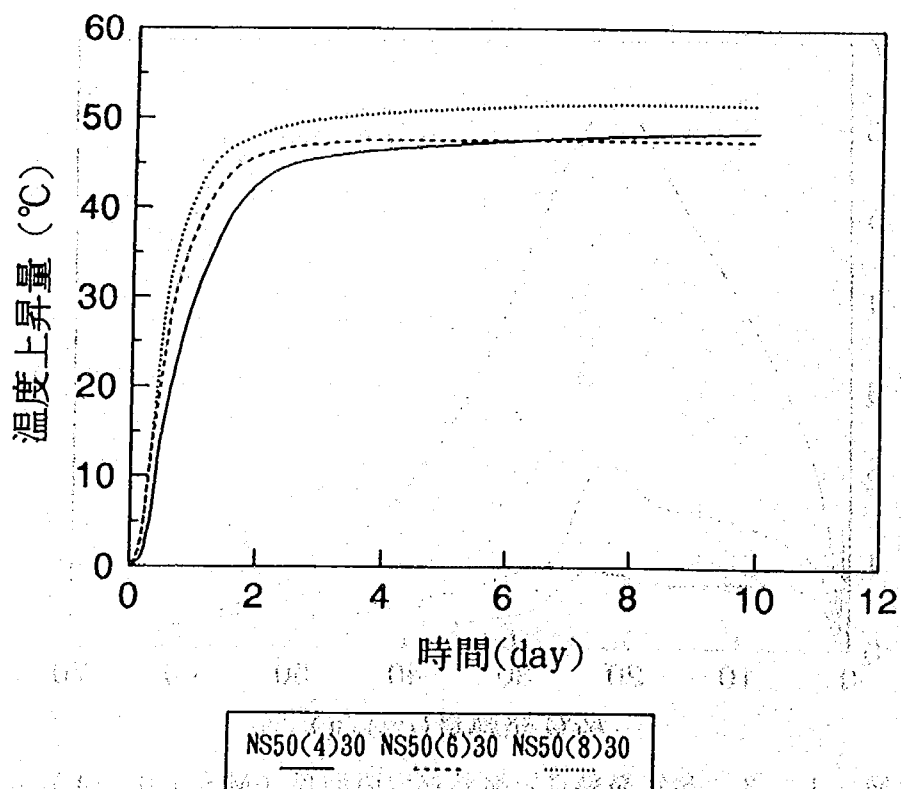
付図－1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (MS 60 (4))



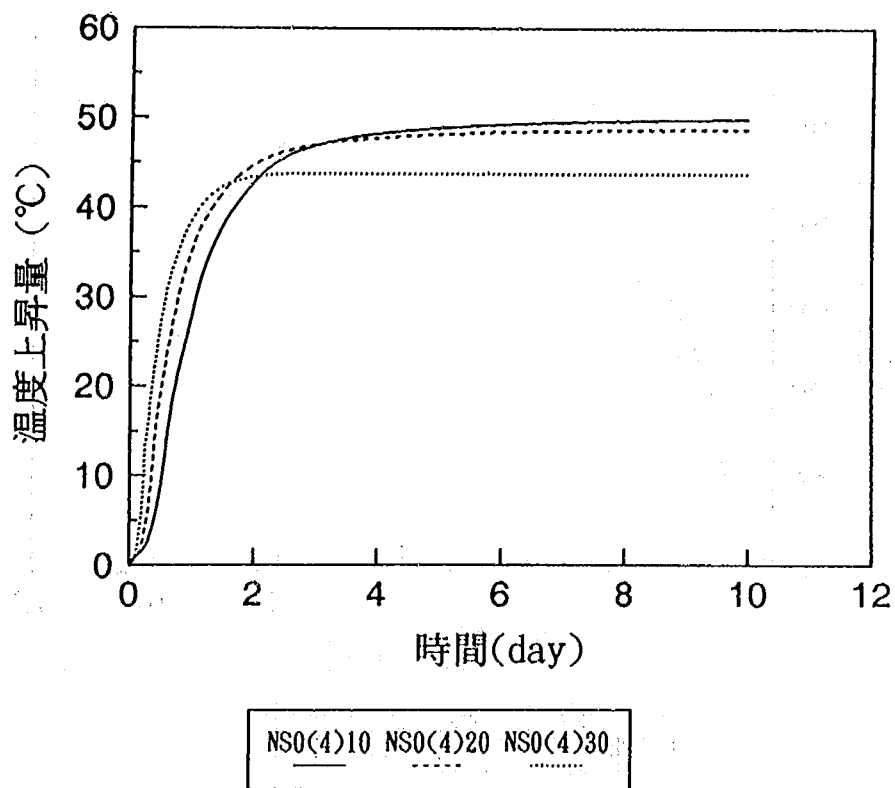
付図－1. 3 積算発熱量と発熱速度の関係 (MS 70 (4))



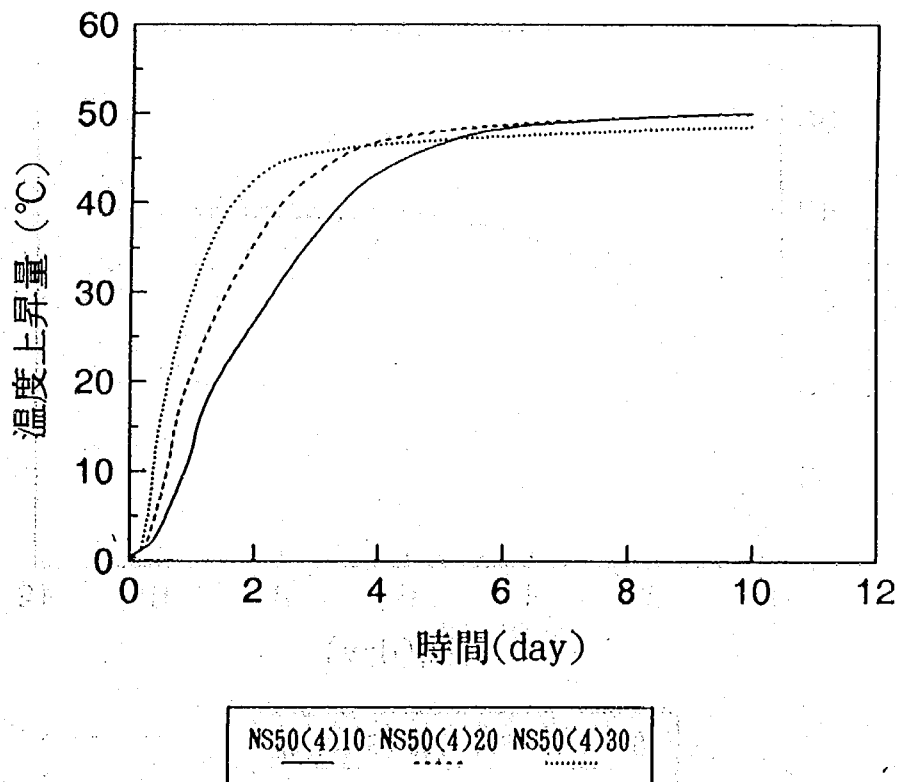
付図－2. 1 断熱温度上昇試験結果 (普通セメント、打設温度 10℃)



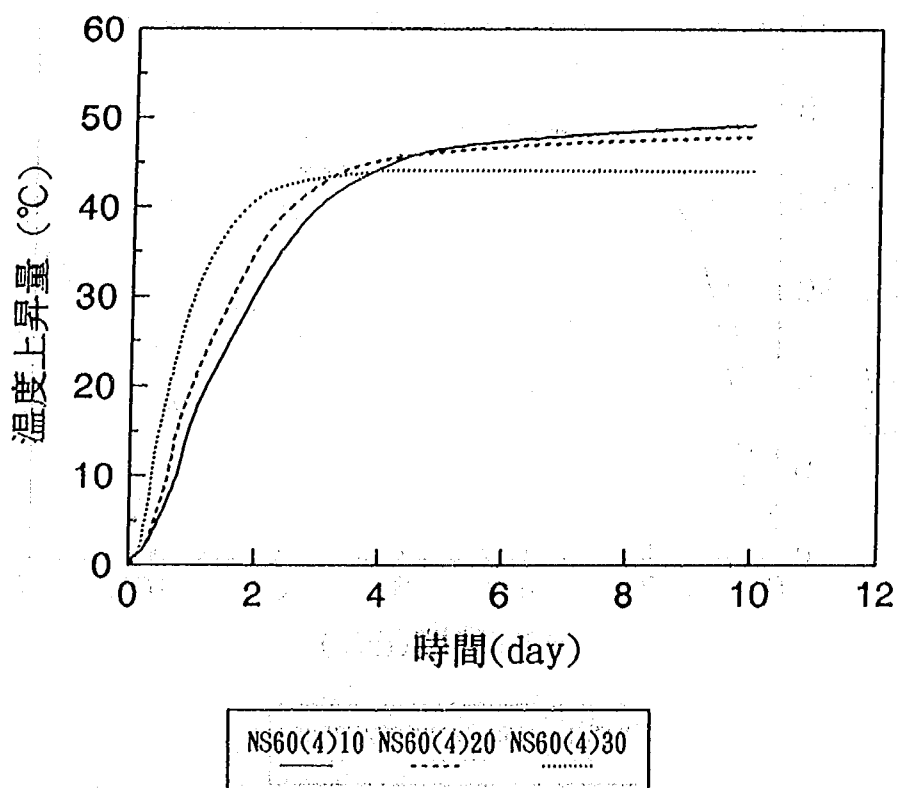
付図－2. 1 断熱温度上昇試験結果 (普通セメント、打設温度 30℃)



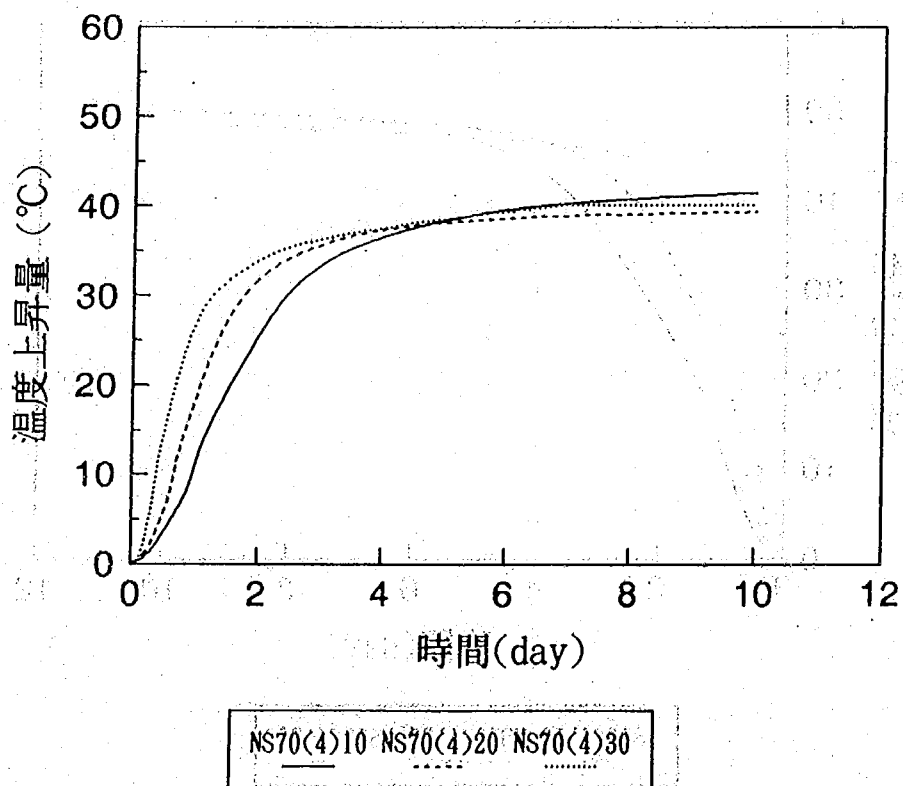
付図-2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS0(4))



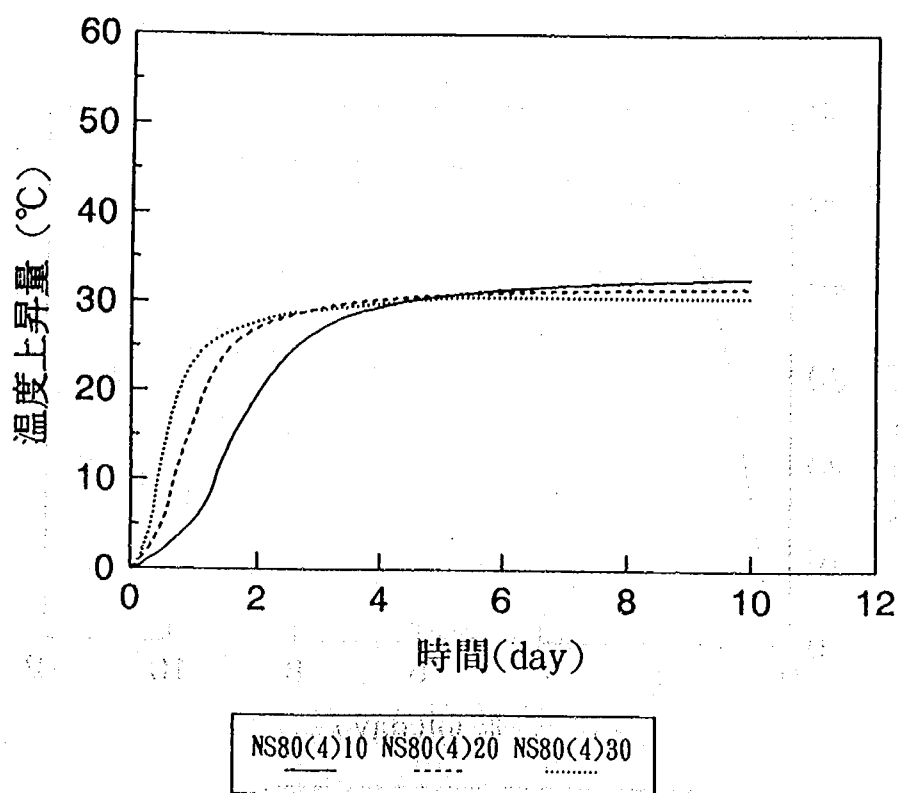
付図-2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS50(4))



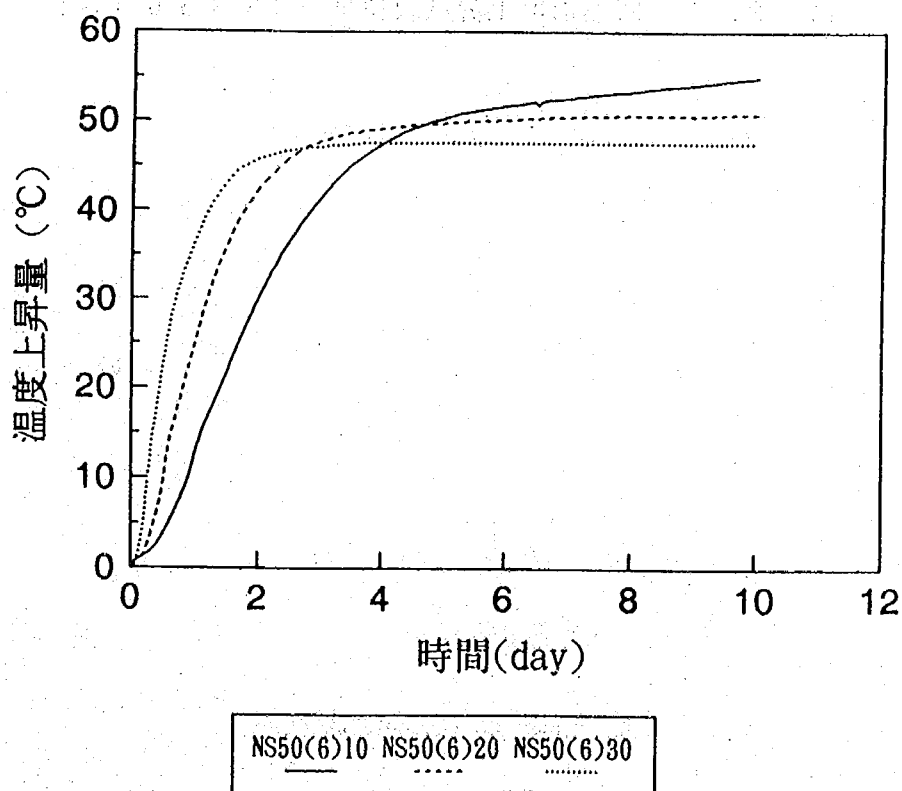
付図-2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS60(4))



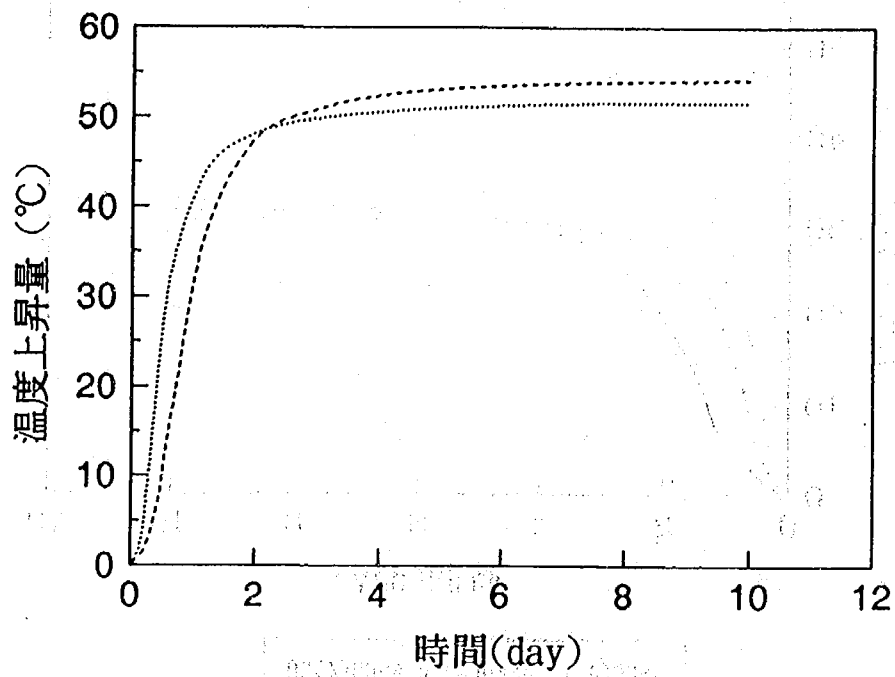
付図-2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS70(4))



付図 - 2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS80(4))

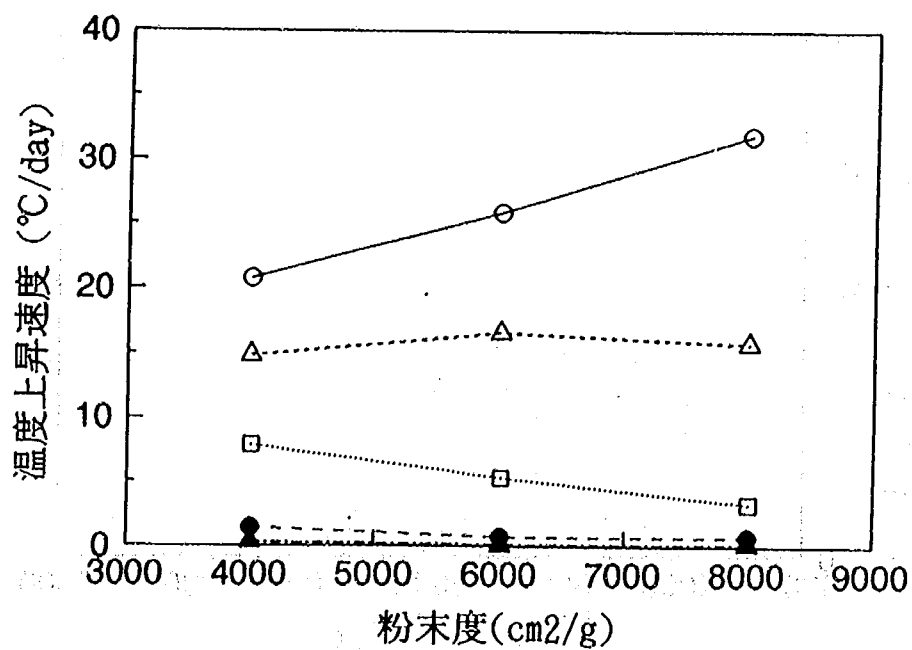


付図 - 2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS50(6))

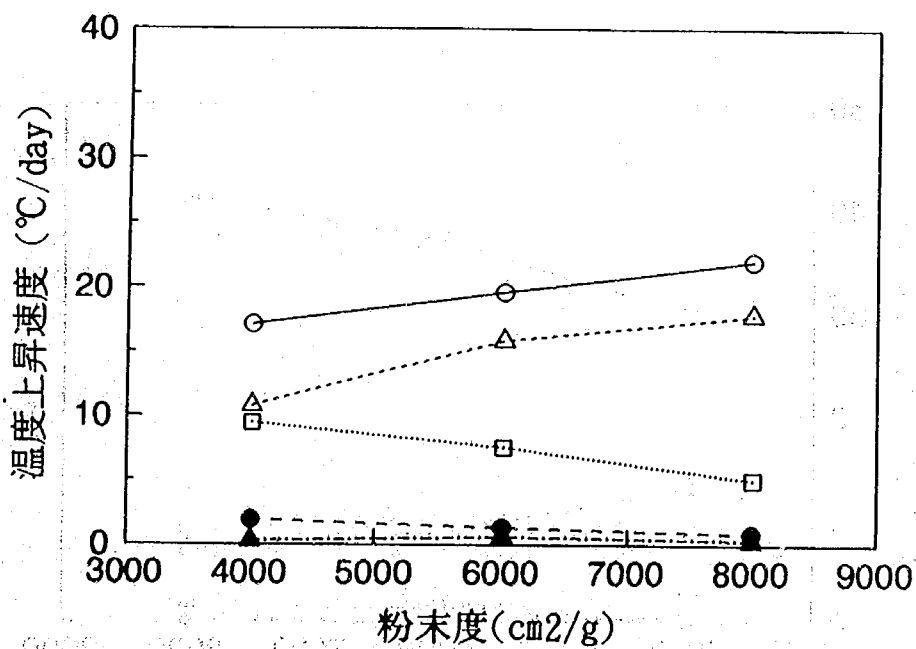


NS50(6)10 NS50(8)20 NS50(8)30

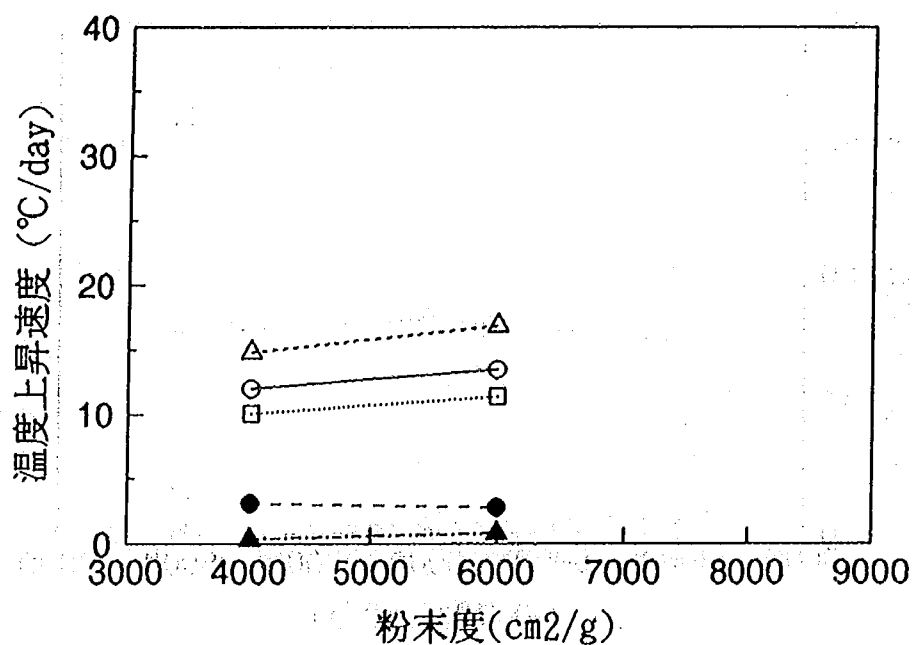
付図－2. 1 断熱温度上昇試験結果 (NS50(8))



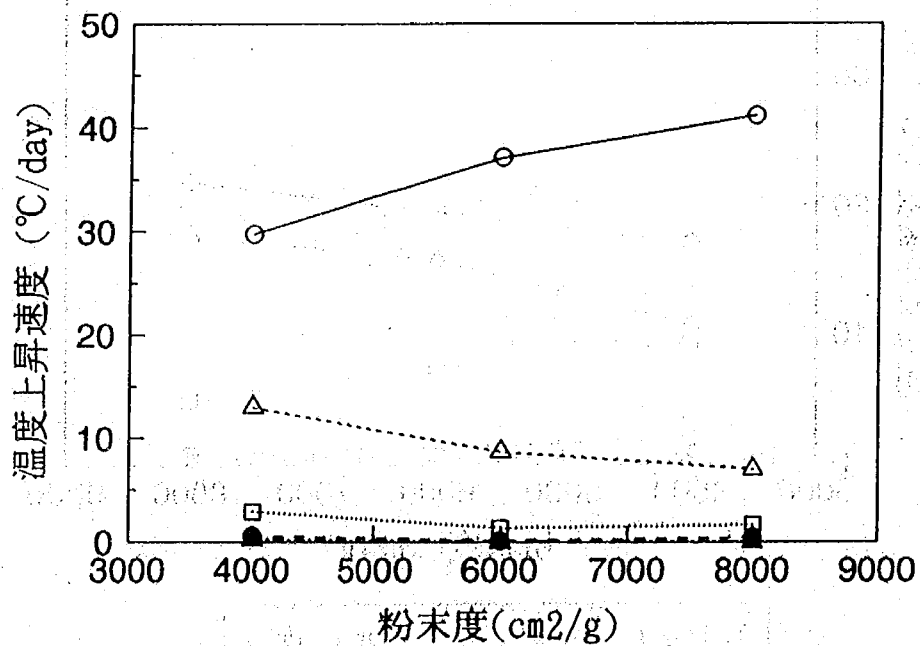
付図 - 2. 2 各材令間の平均温度上昇速度 (普通セメント 20°C)



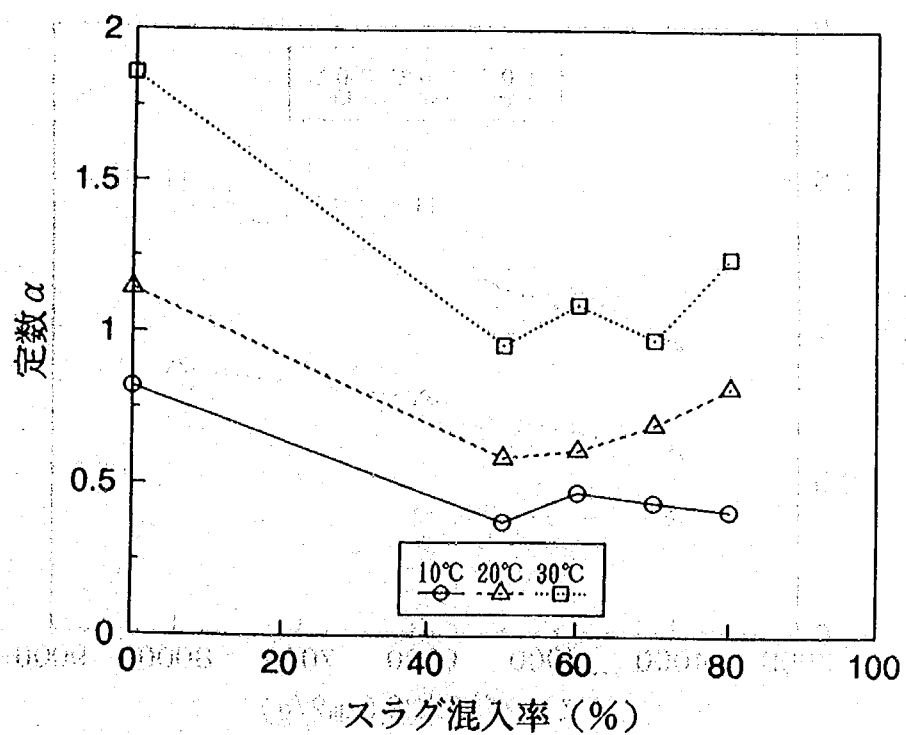
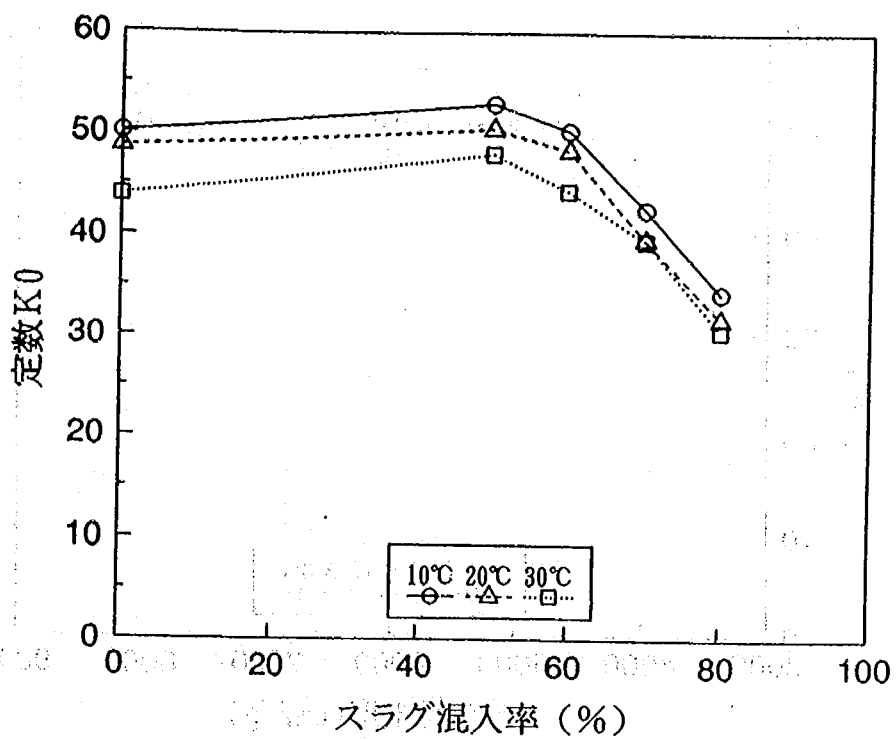
付図 - 2. 2 各材令間の平均温度上昇速度 (中熱セメント 20°C)



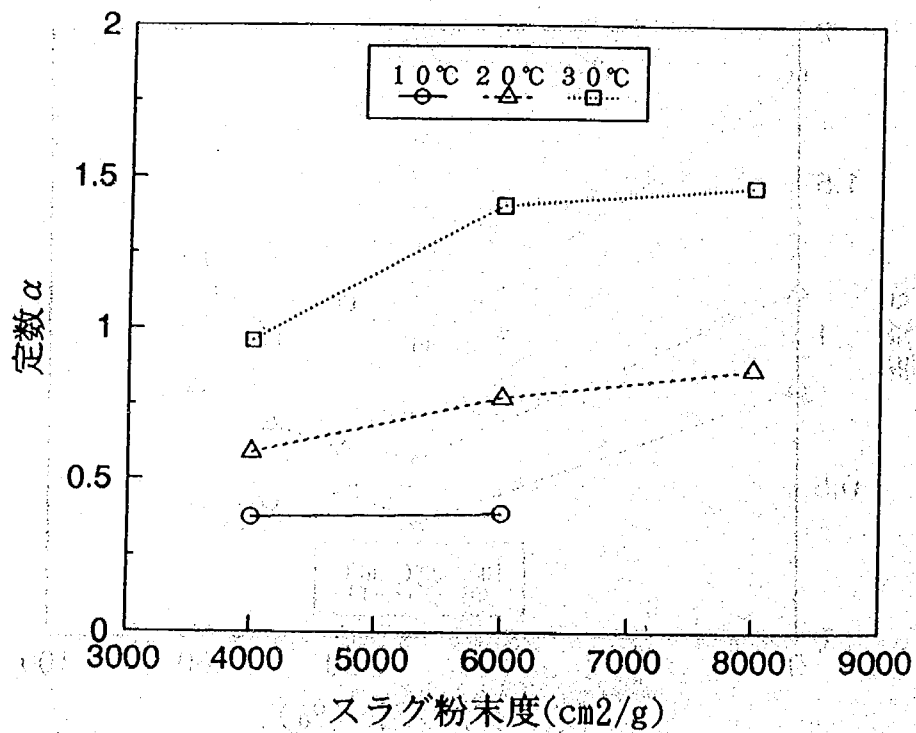
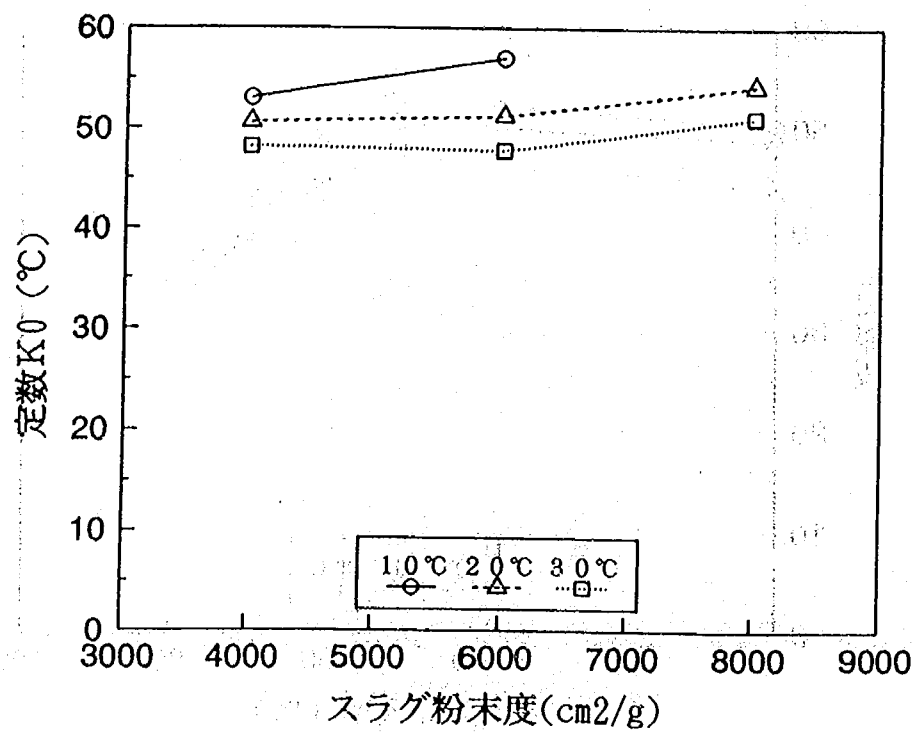
付図 - 2. 2 各材令間の平均温度上昇速度 (普通セメント 10 °C)



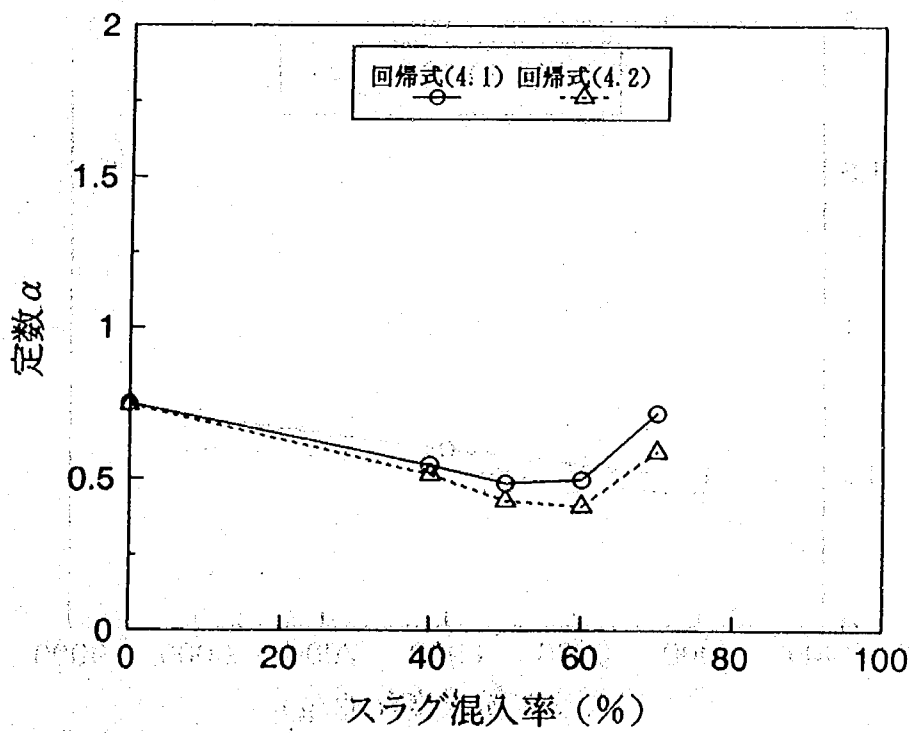
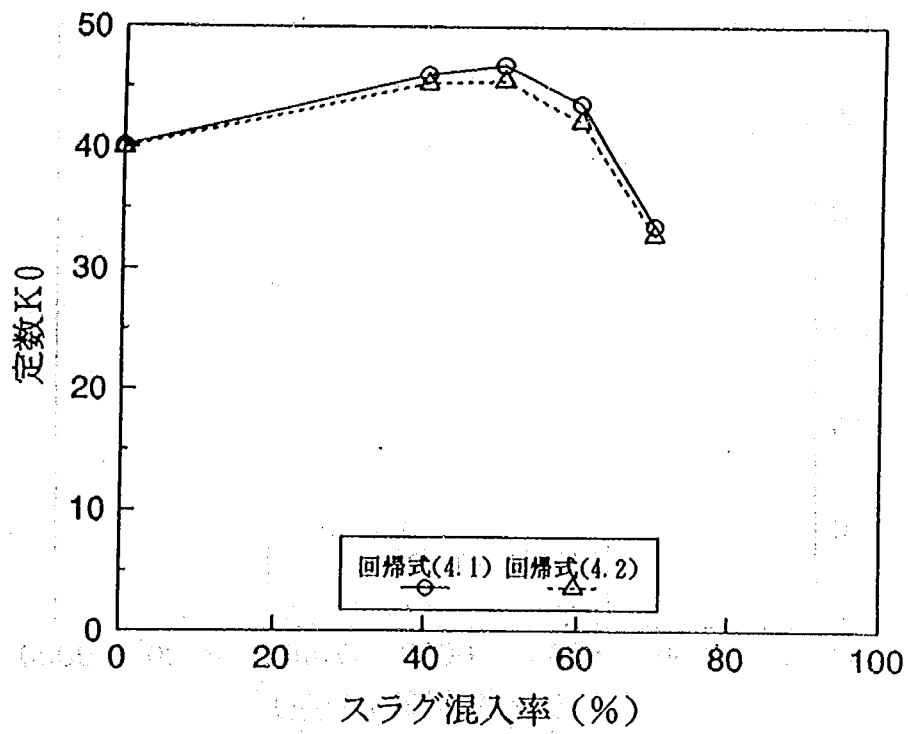
付図 - 2. 2 各材令間の平均温度上昇速度 (普通セメント 30 °C)



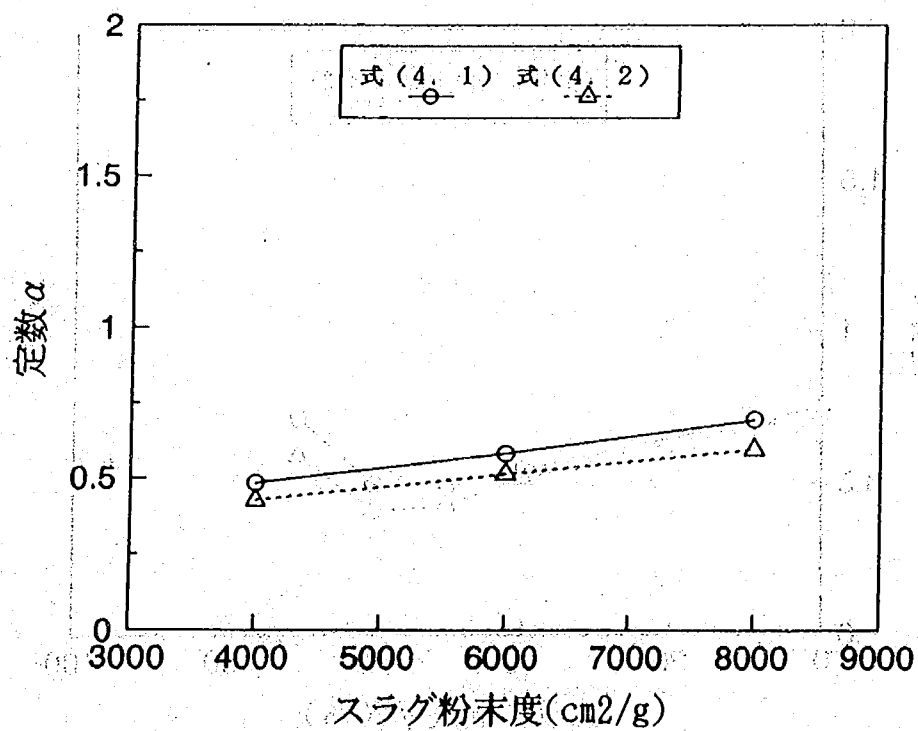
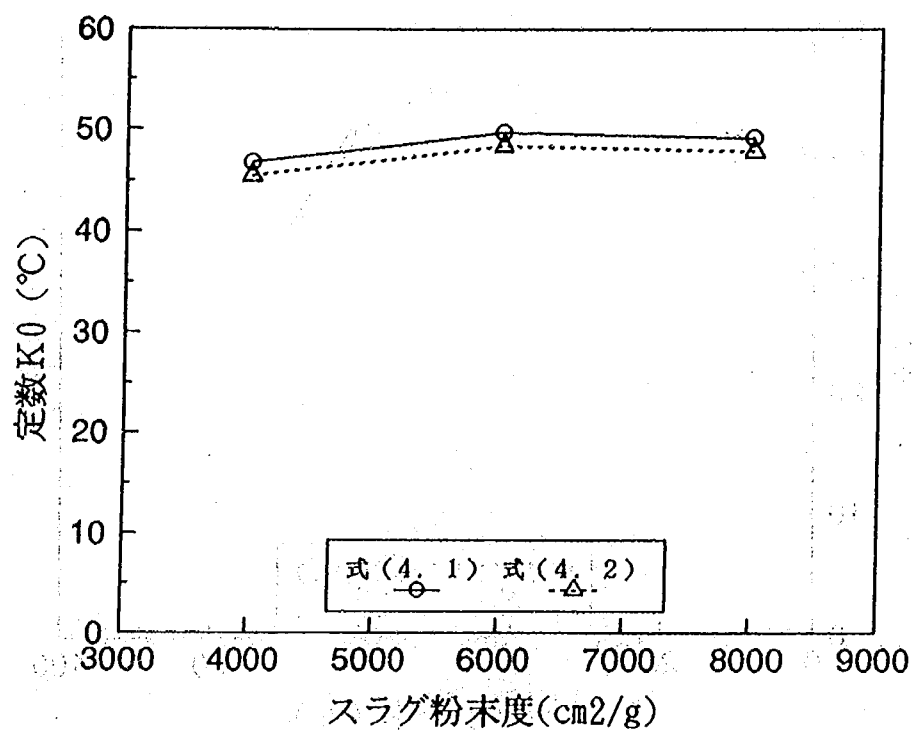
付図-3. 1 断熱定数分布 (普通セメント、 $K \cdot \alpha$ 式)



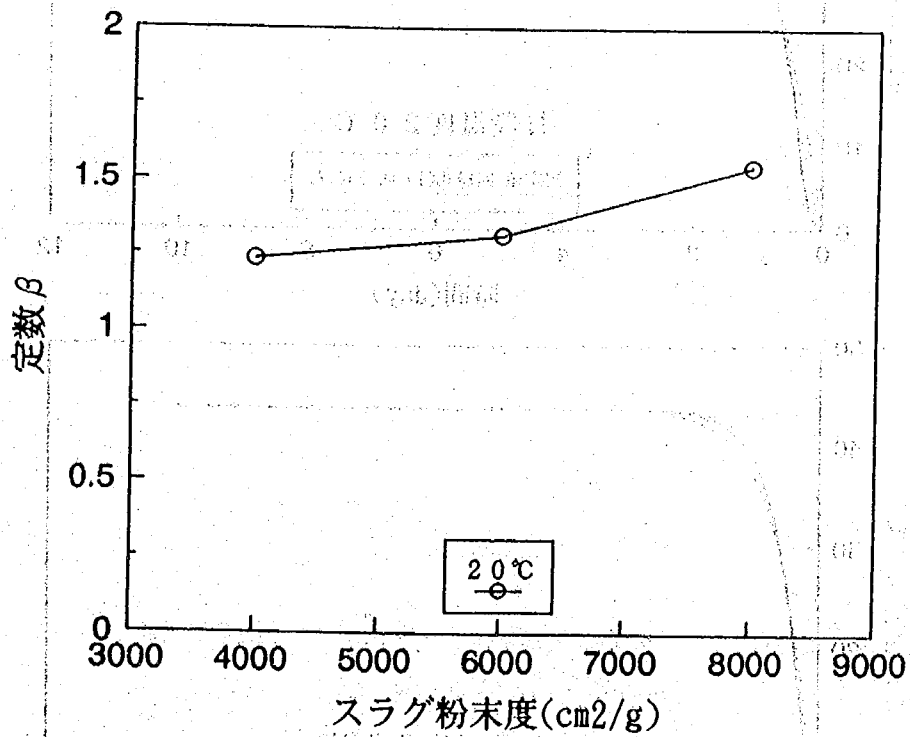
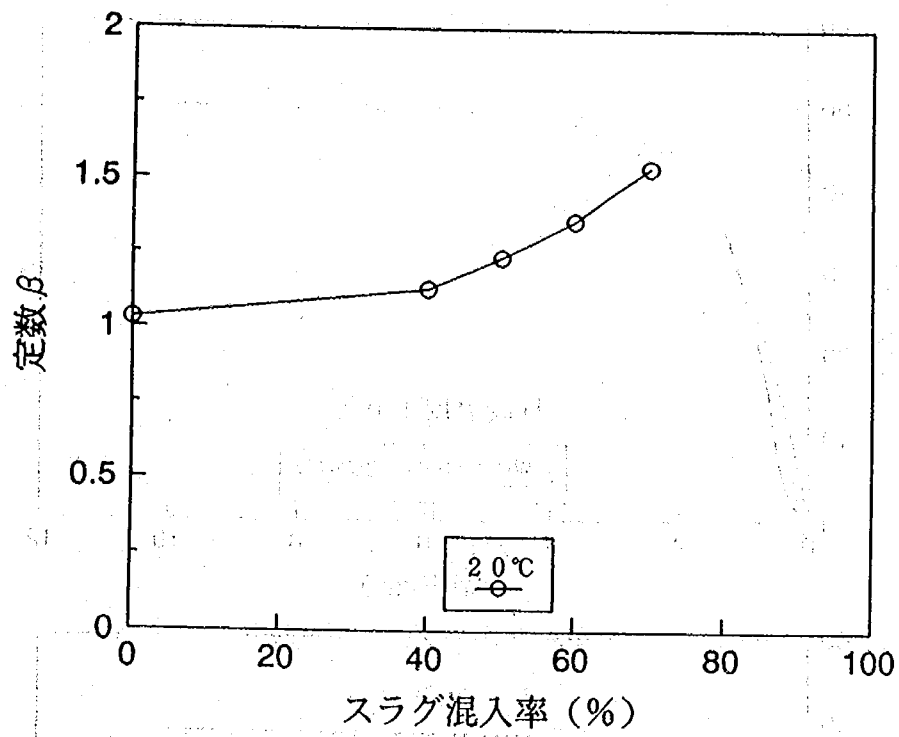
付図-3. 1 断熱定数分布 (普通セメント、 $K \cdot \alpha$ 式)



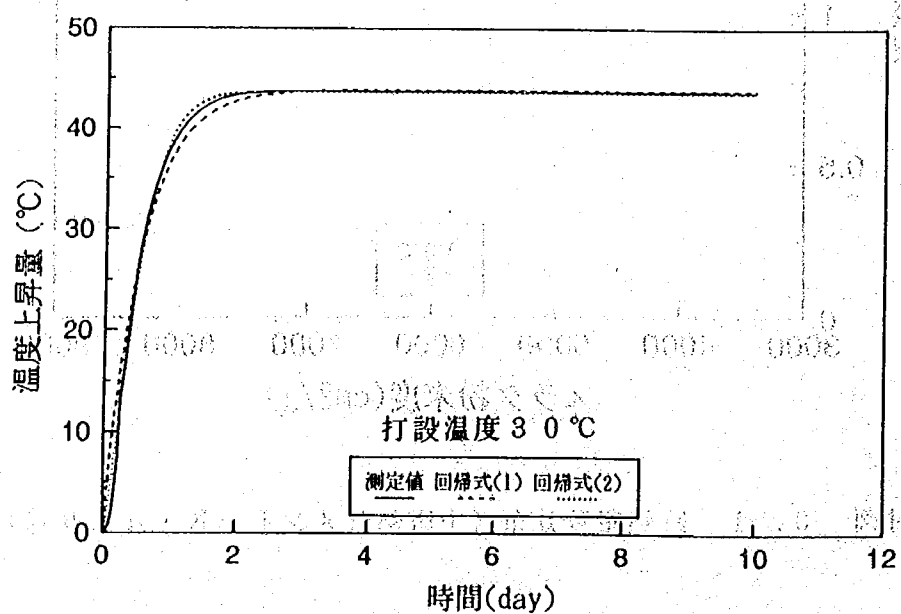
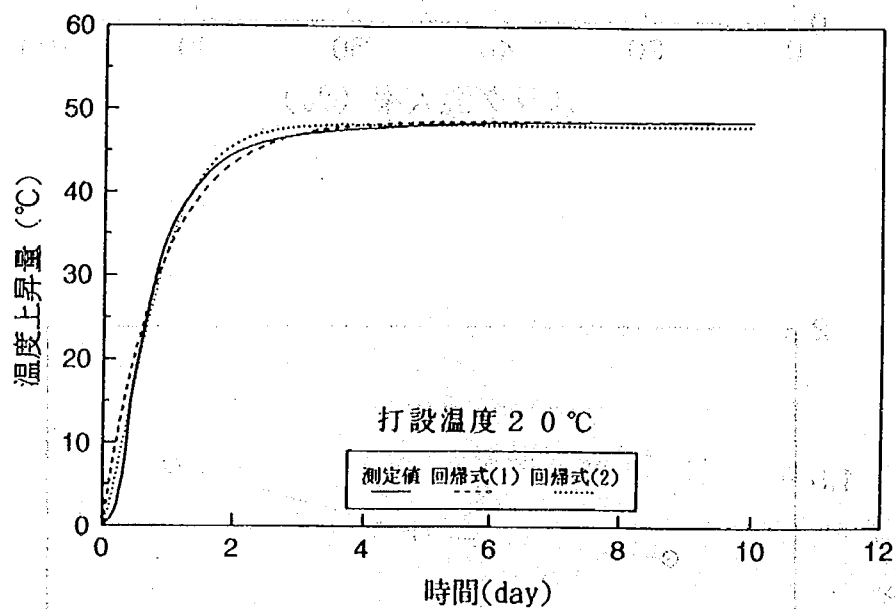
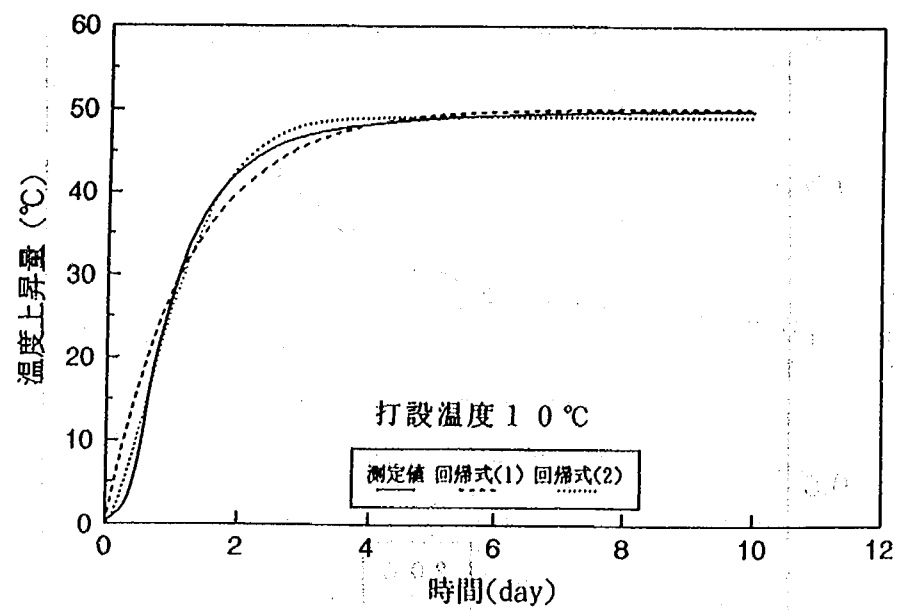
付図－3. 1 断熱定数分布（中庸熱セメント）



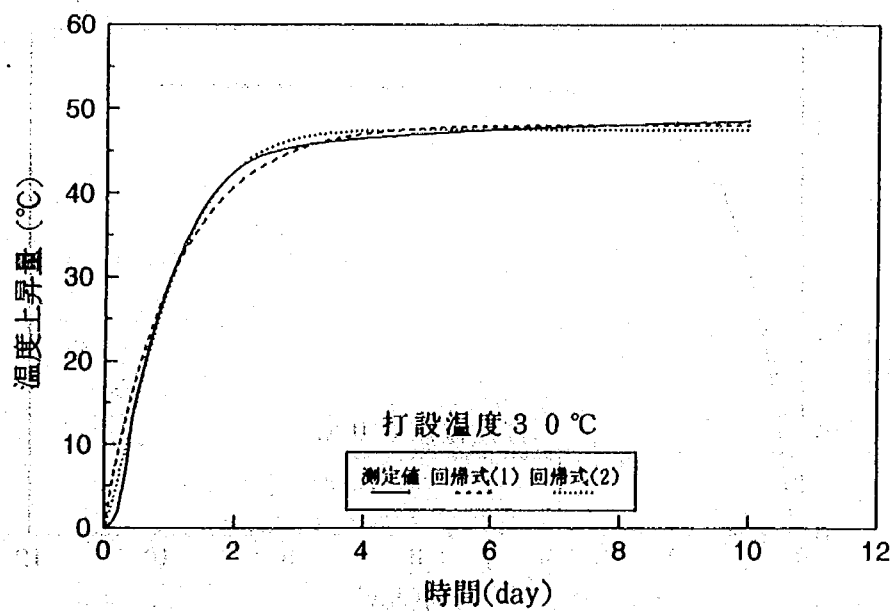
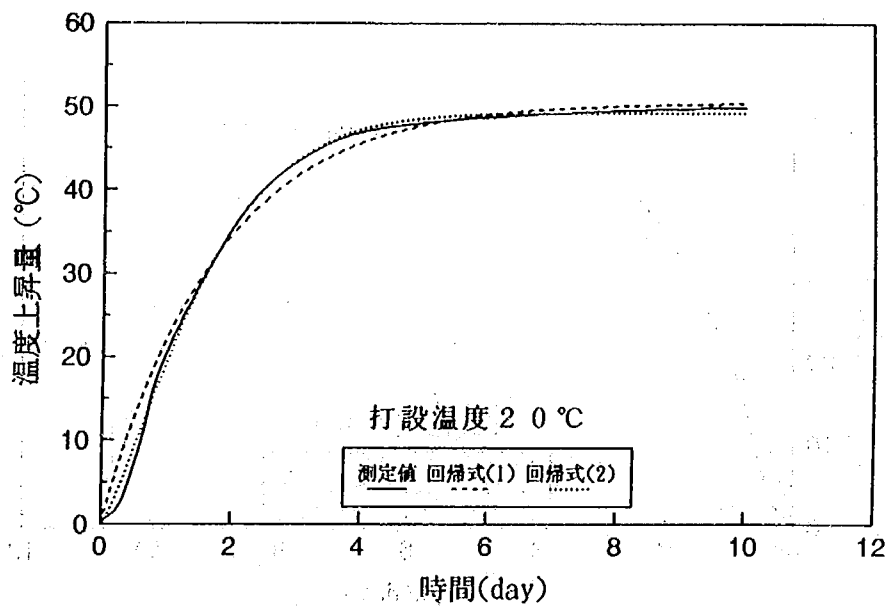
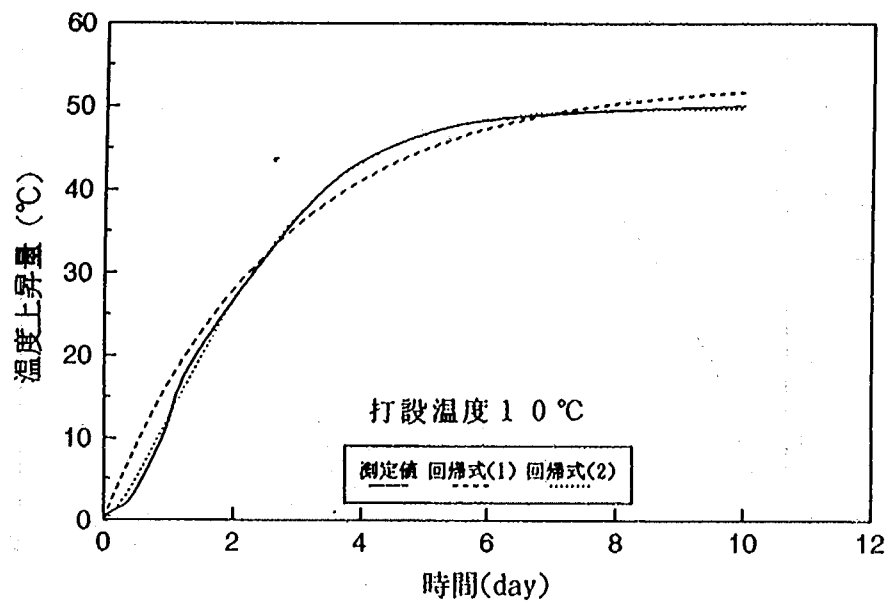
付図-3. 1 断熱定数分布 (中庸熱セメント)



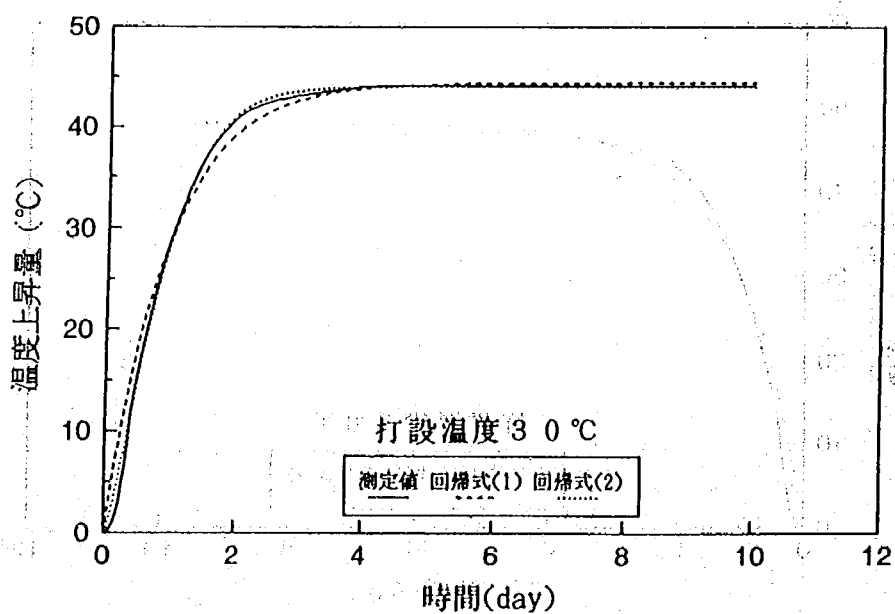
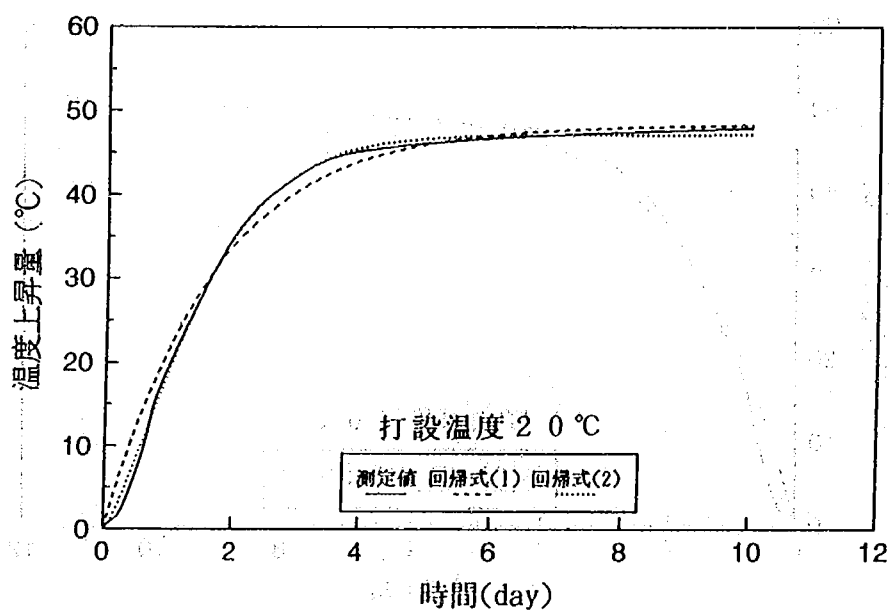
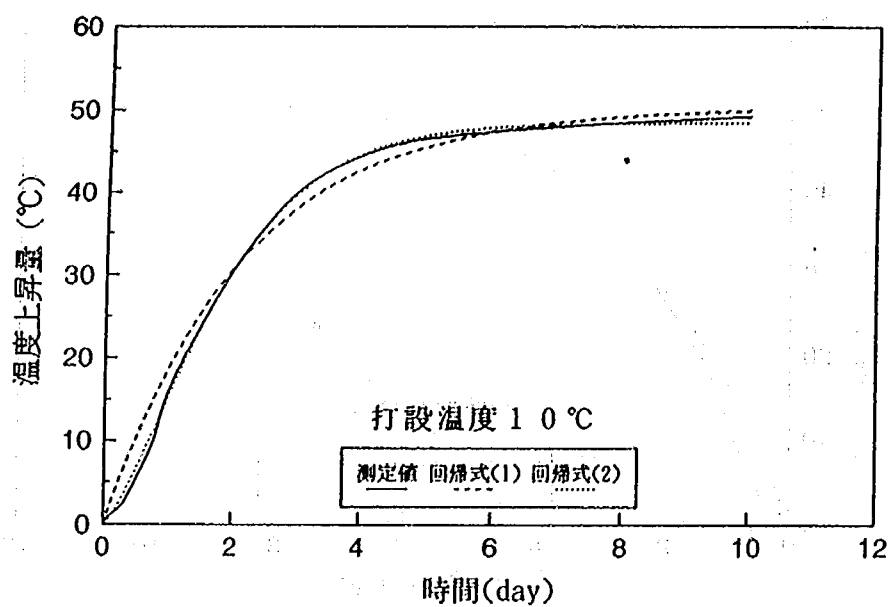
付図-3.1 断熱定数分布 (中庸熱セメント、 $K \cdot \alpha \cdot \beta$ 式)



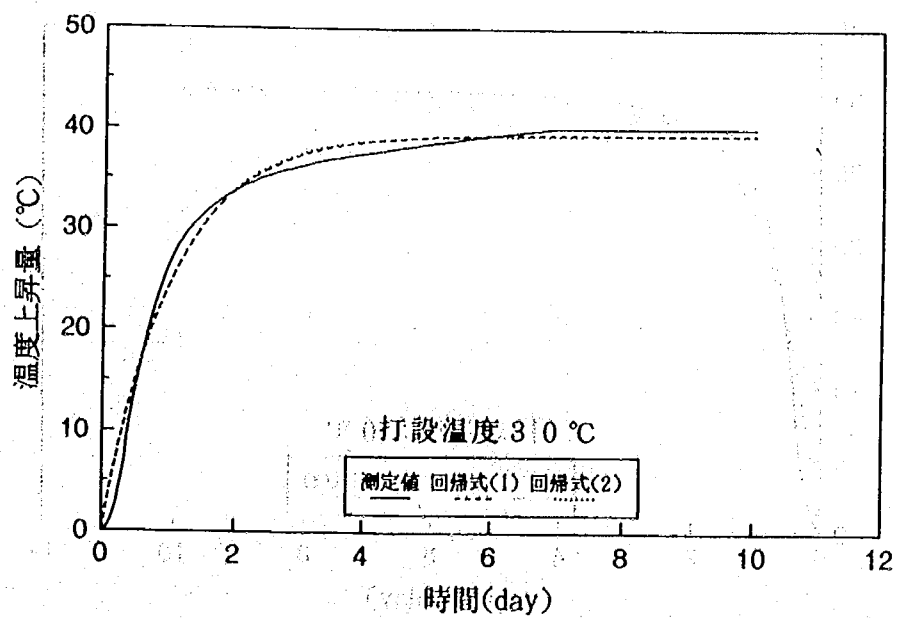
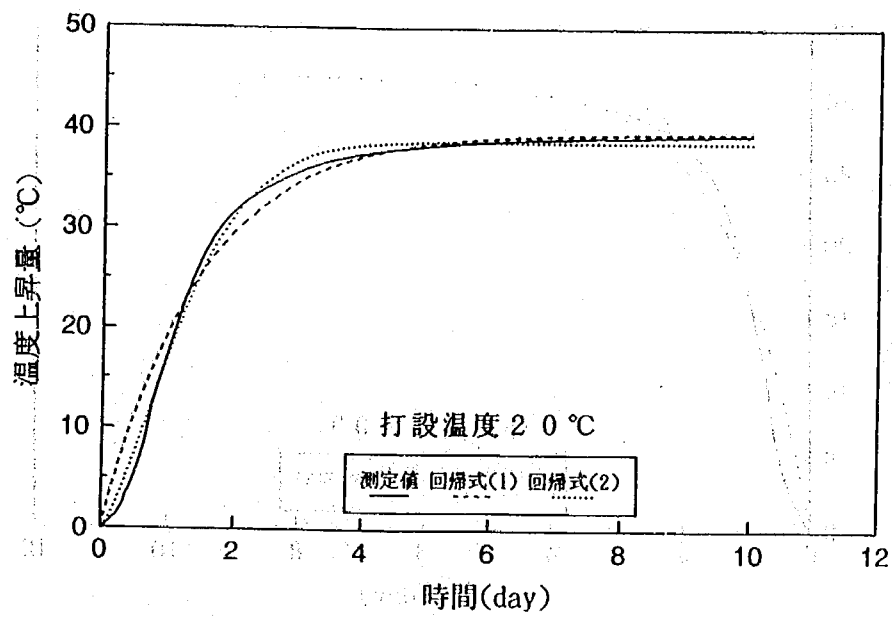
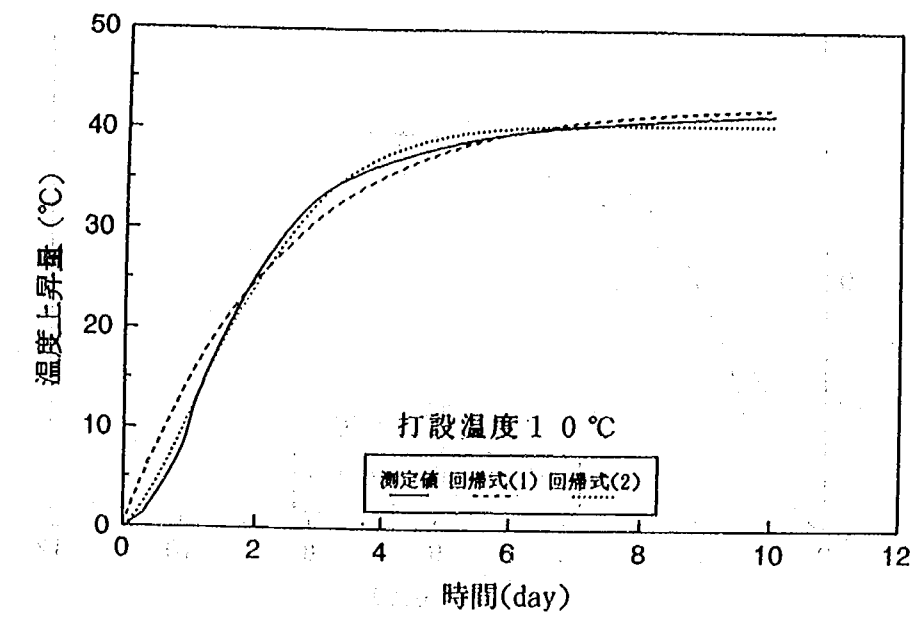
付図－3. 2 断熱温度上昇の推定結果 (NS0 (4))



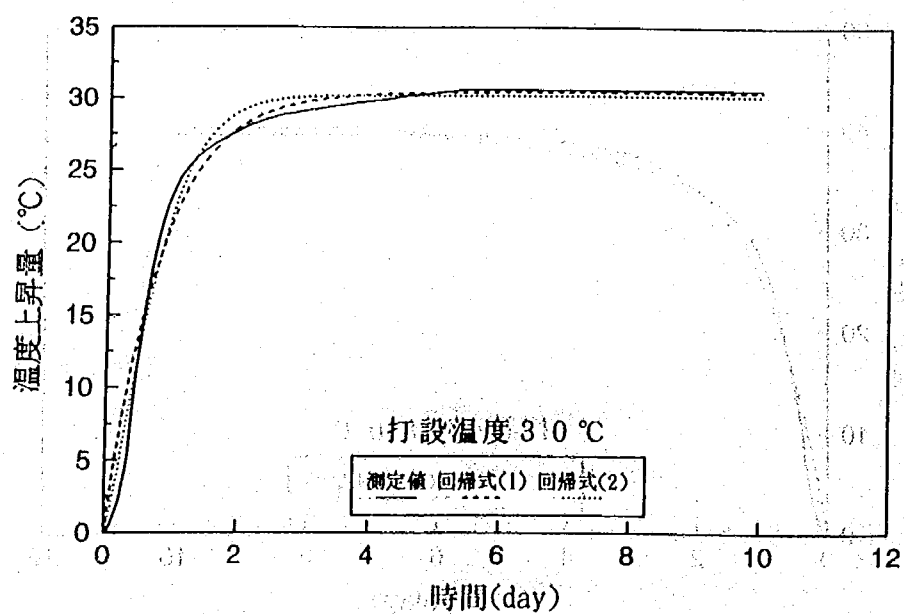
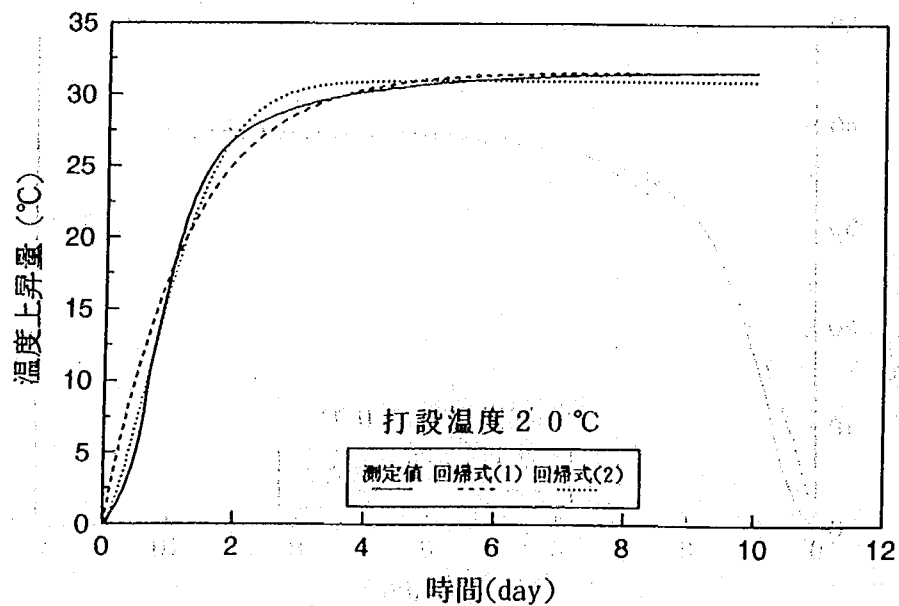
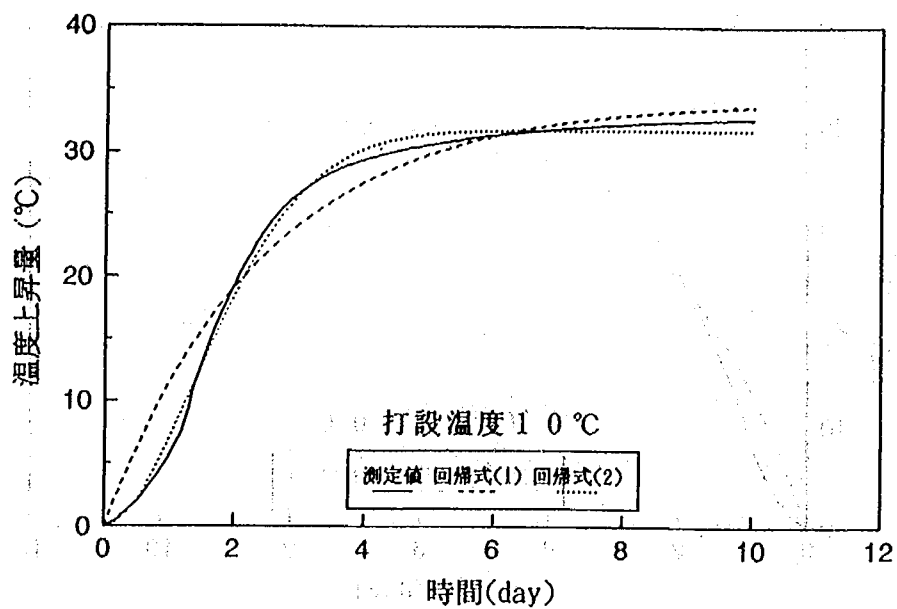
付図-3.2 断熱温度上昇の推定結果 (NS50(4))



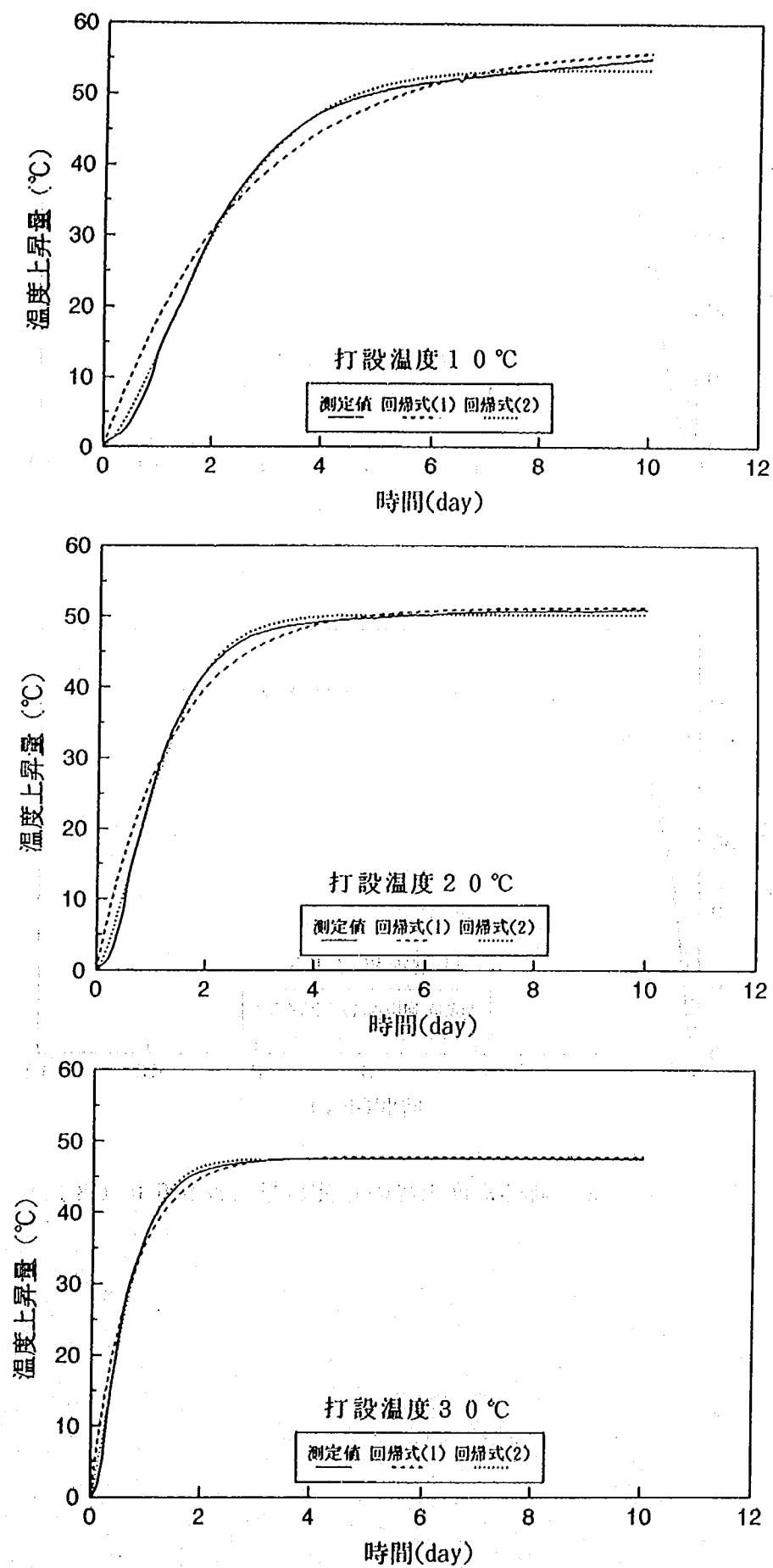
付図 - 3. 2 断熱温度上昇の推定結果 (N S 6 0' (4))



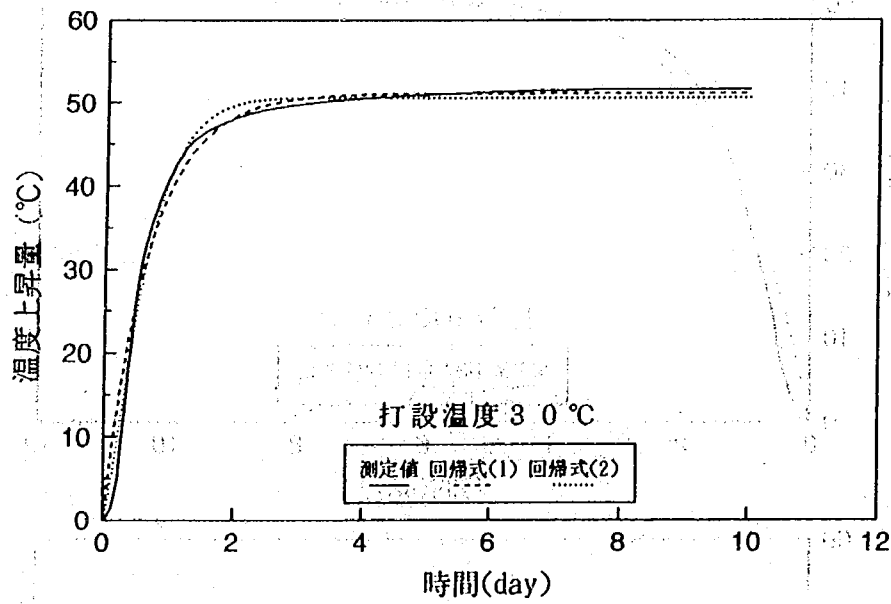
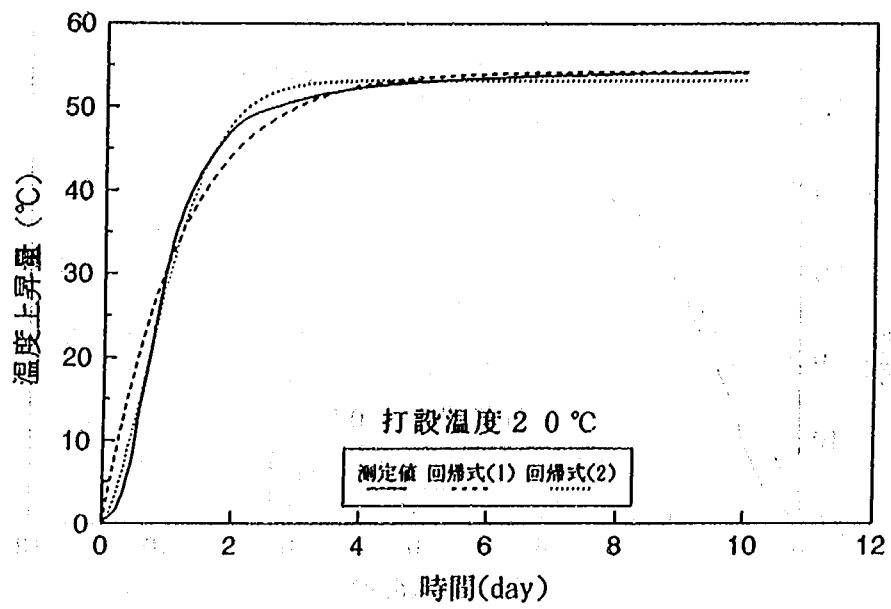
付図－3. 2 断熱温度上昇の推定結果 (N S 7 0 (4))



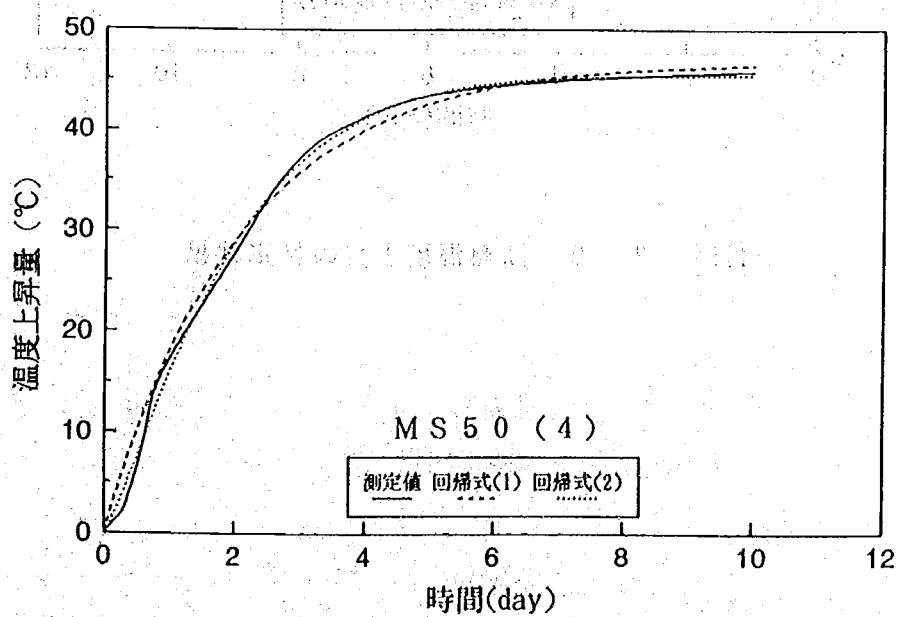
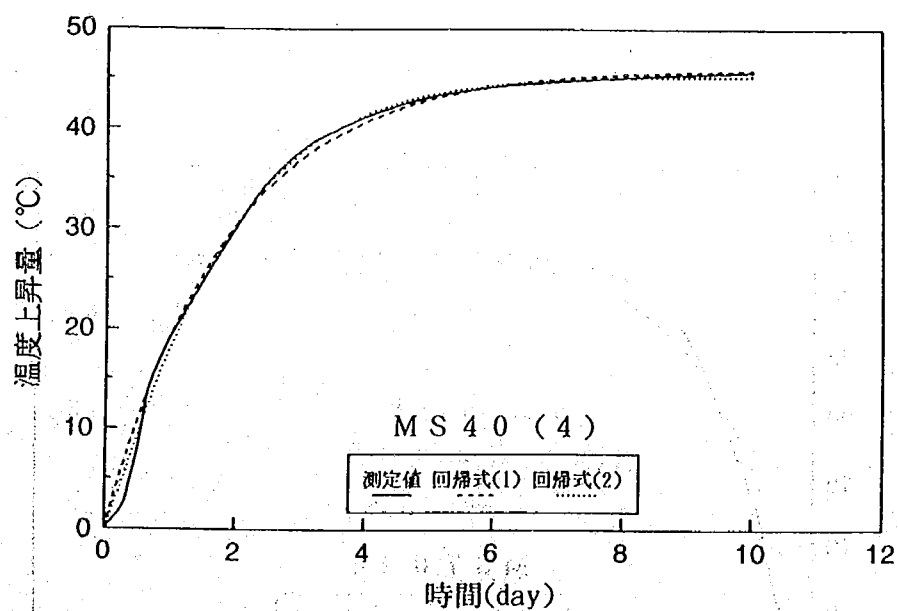
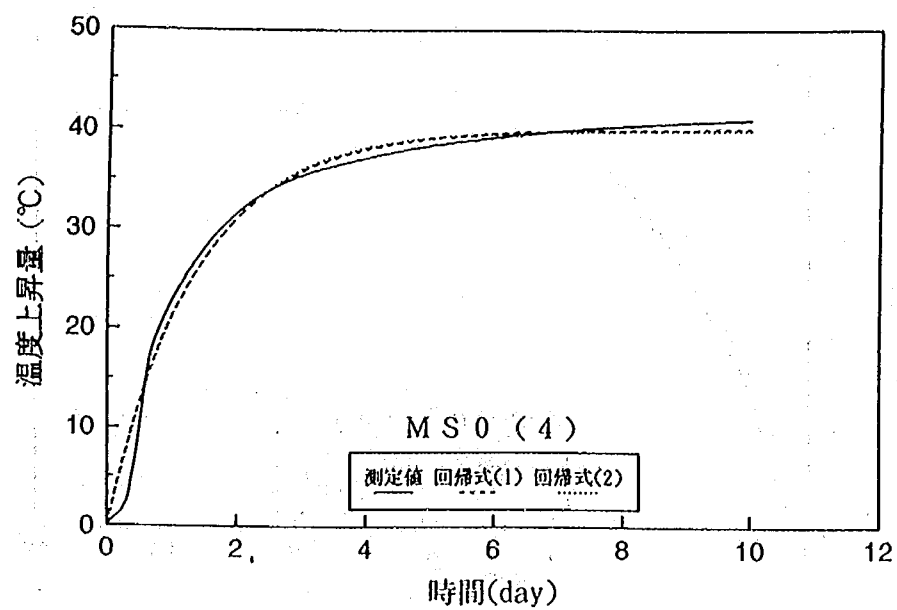
付図 - 3、2 断熱温度上昇の推定結果 (N S 8 0 (4))



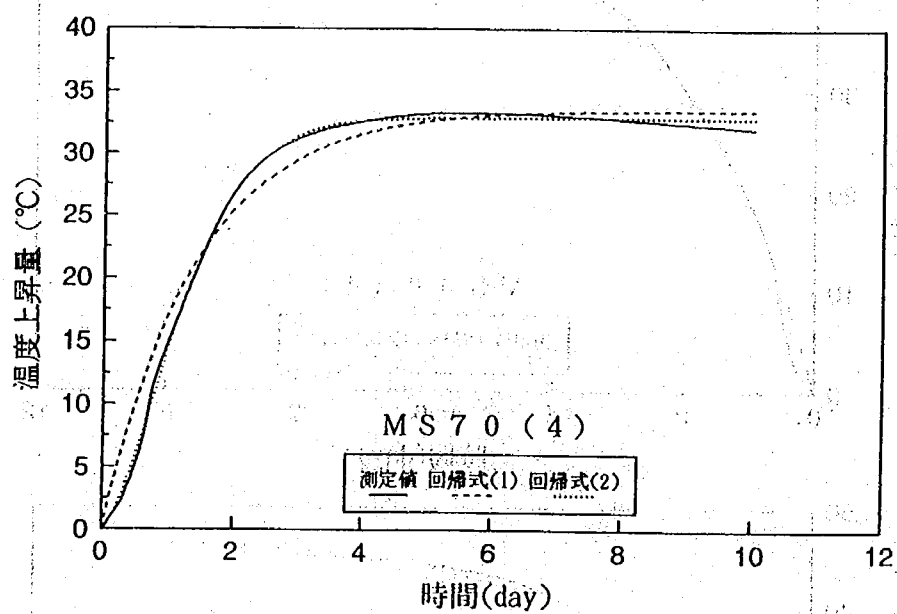
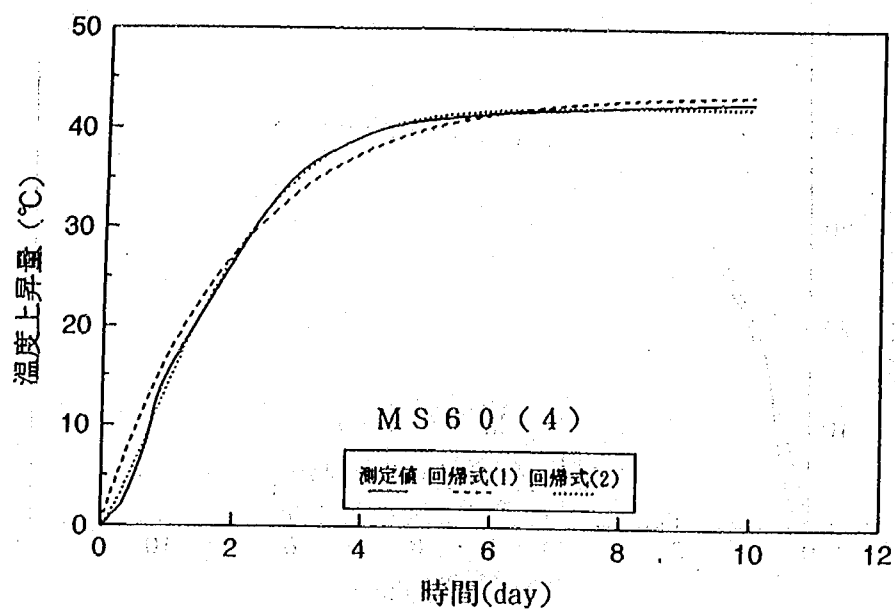
付図－3. 2 断熱温度上昇の推定結果 (NS50(6))



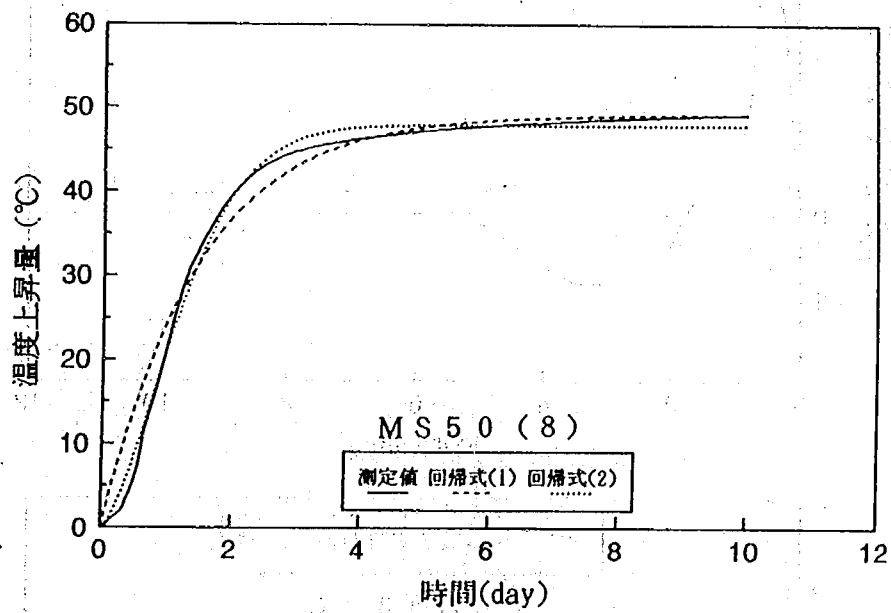
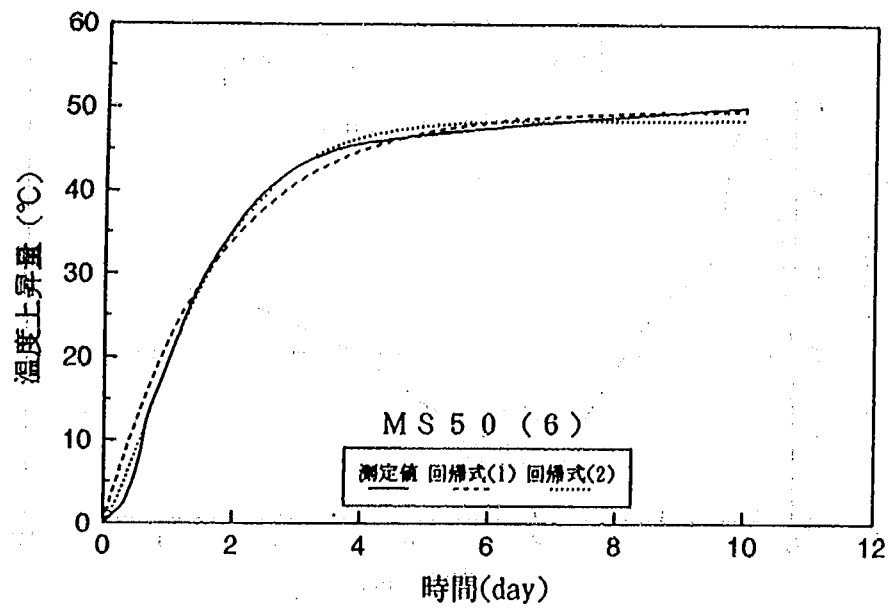
付図-3. 2 断熱温度上昇の推定結果 (NS50(8))



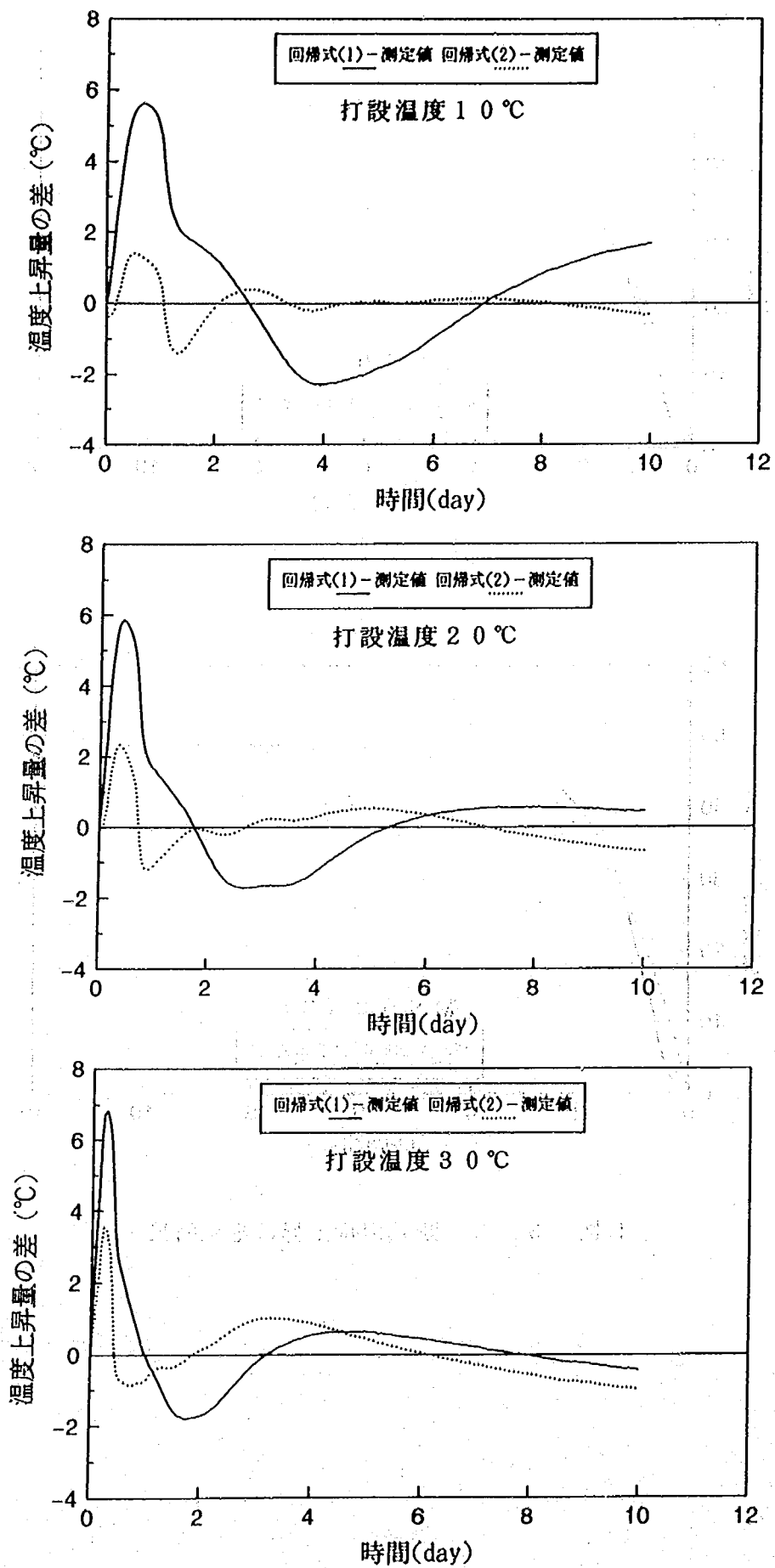
付図－3. 2 断熱温度上昇の推定結果



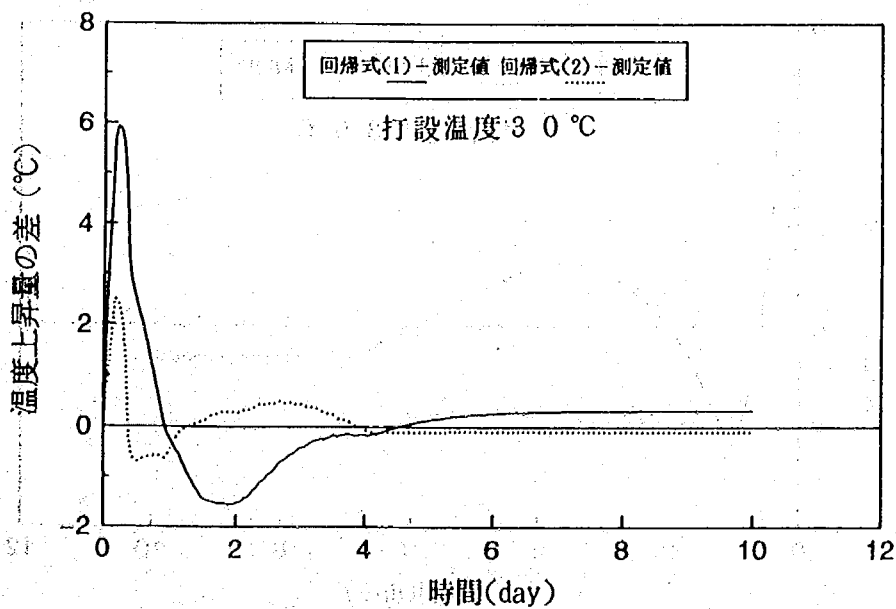
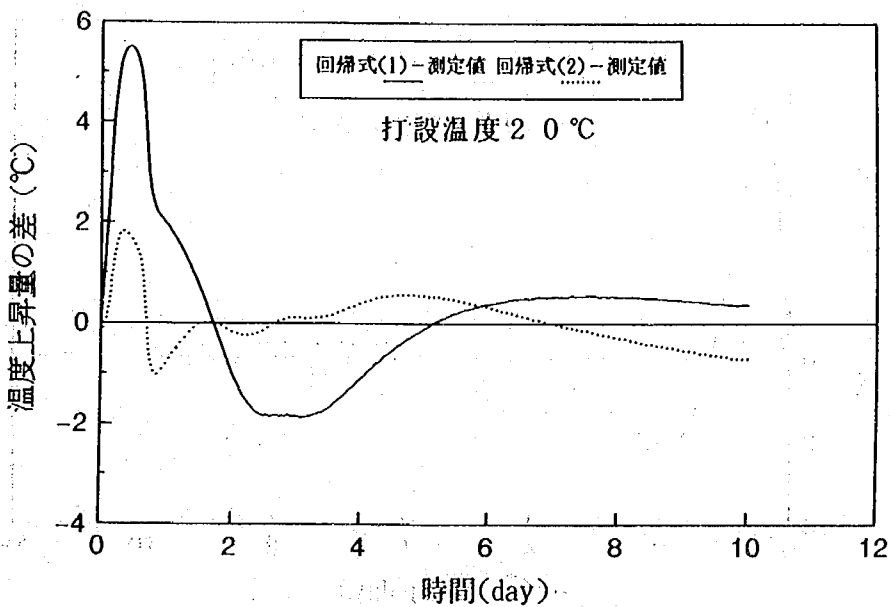
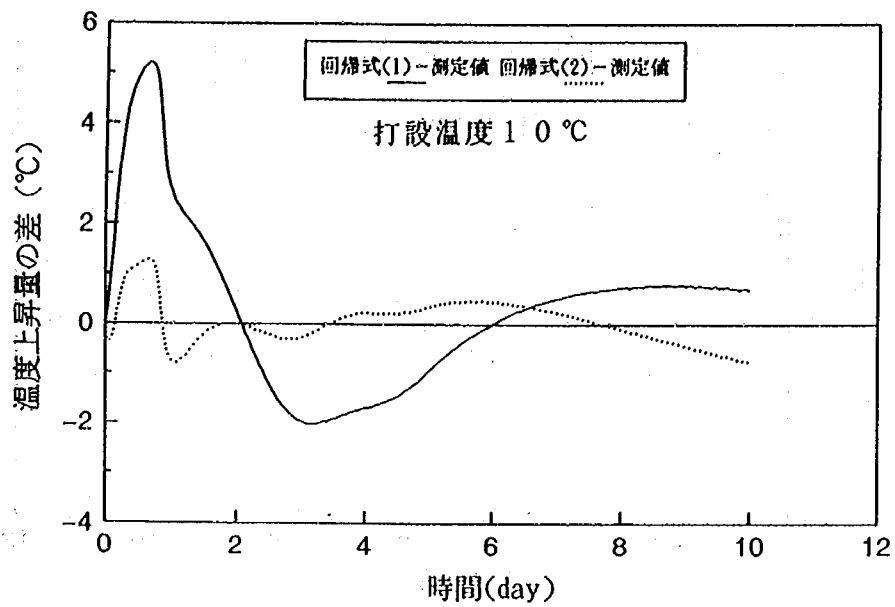
付図-3. 2 断熱温度上昇の推定結果



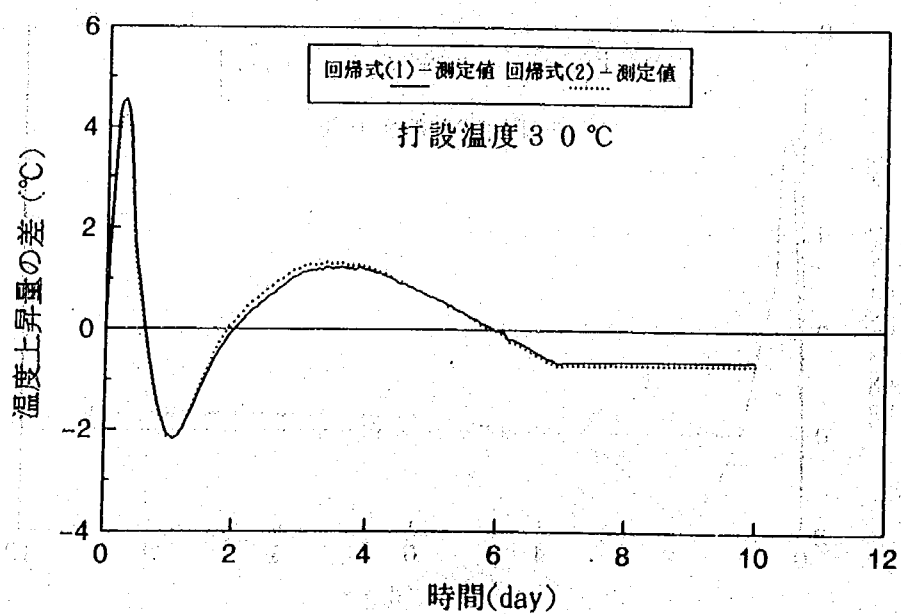
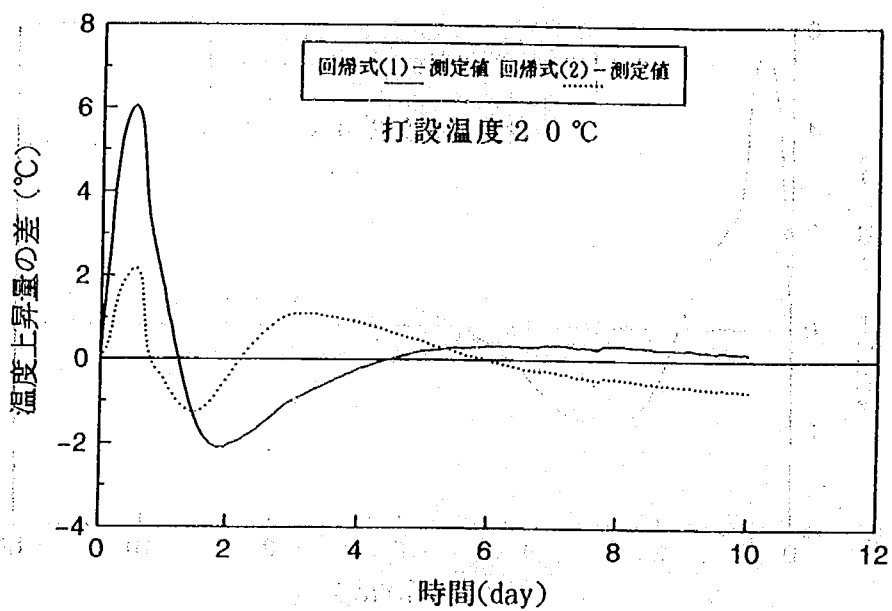
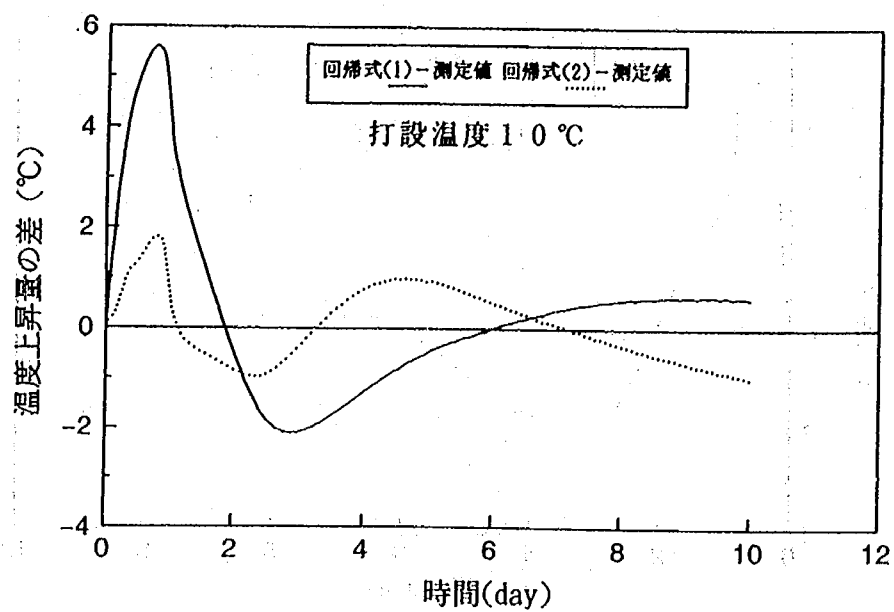
付図－3. 2 断熱温度上昇の推定結果



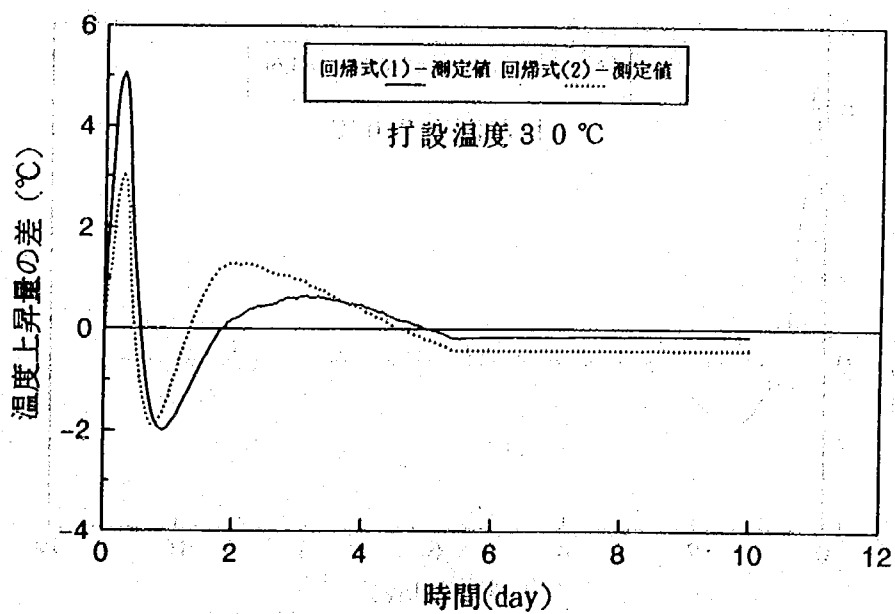
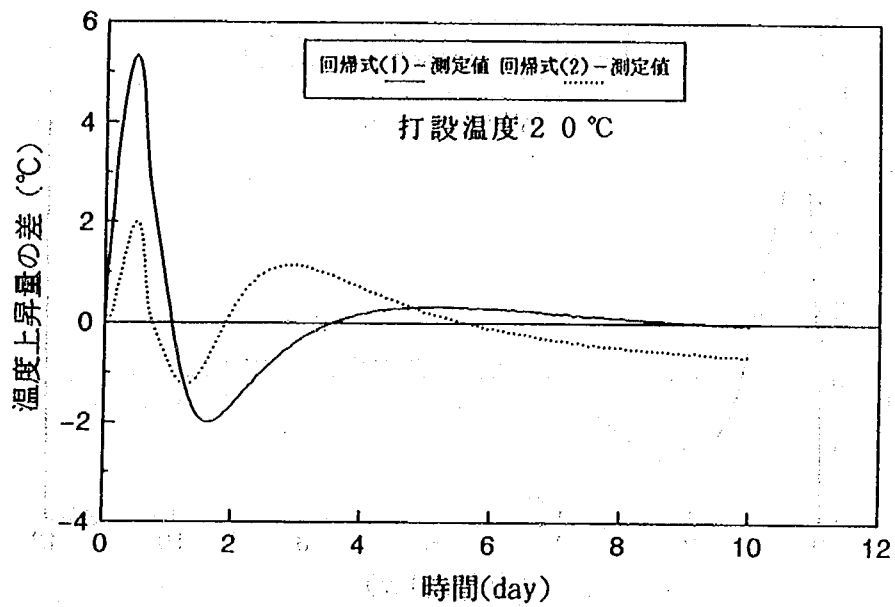
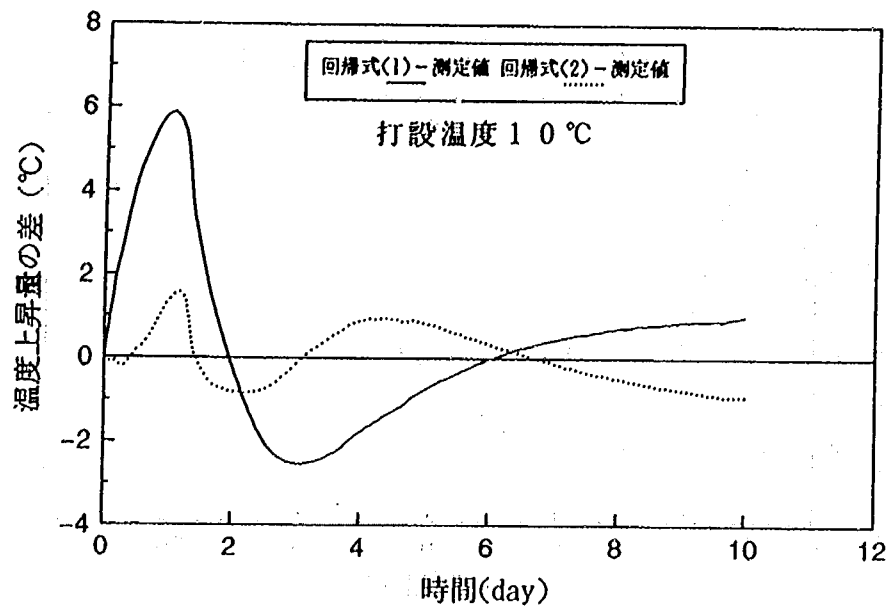
付図 - 3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化 (NS50 (4))



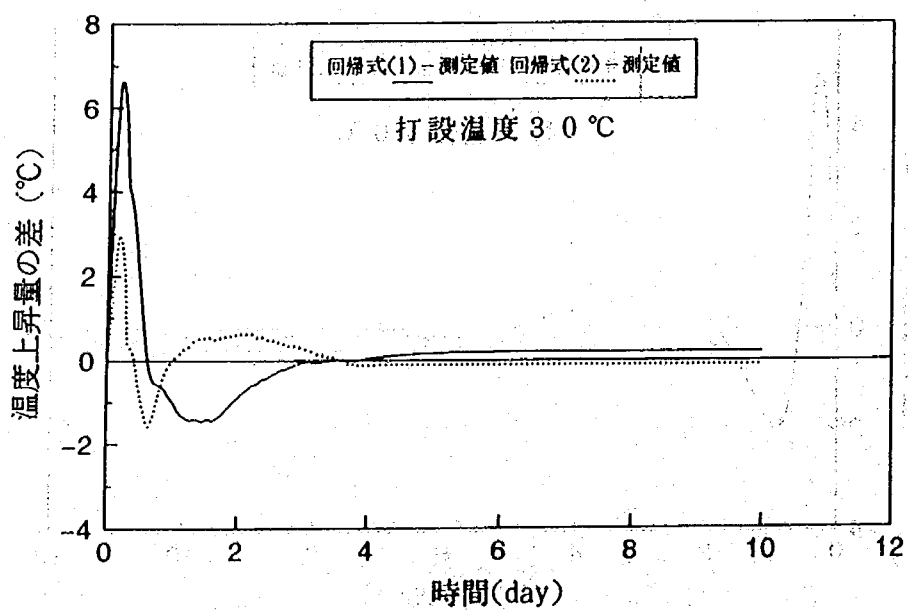
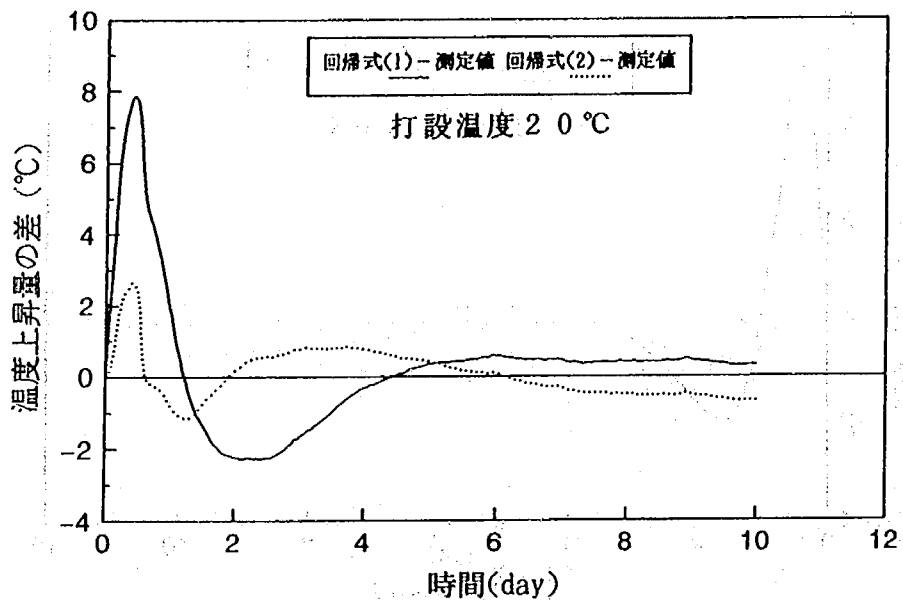
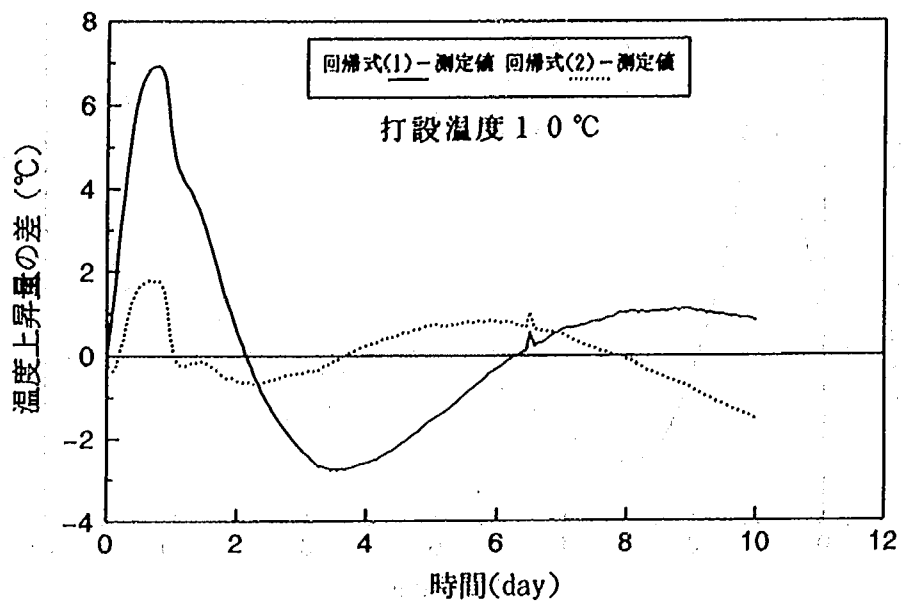
付図 - 3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化 (NS60(4))



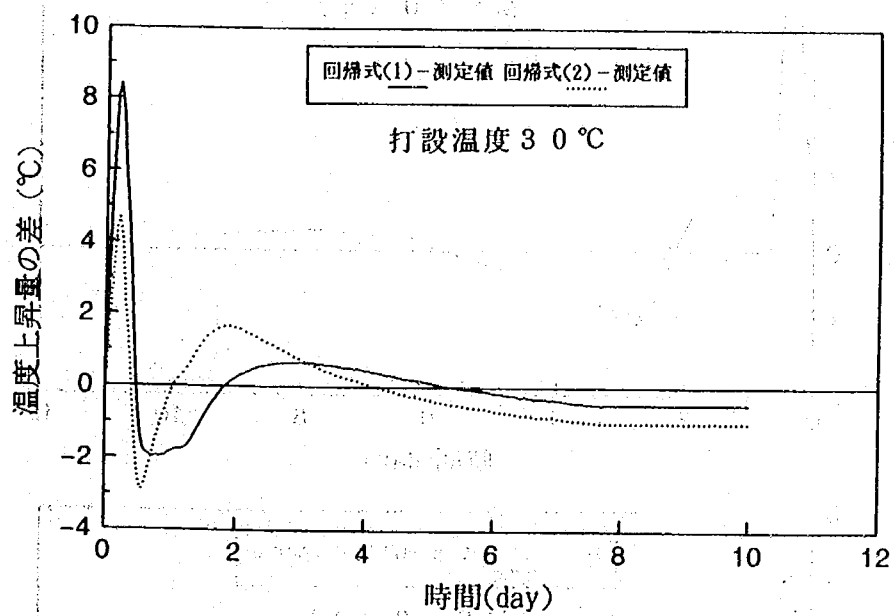
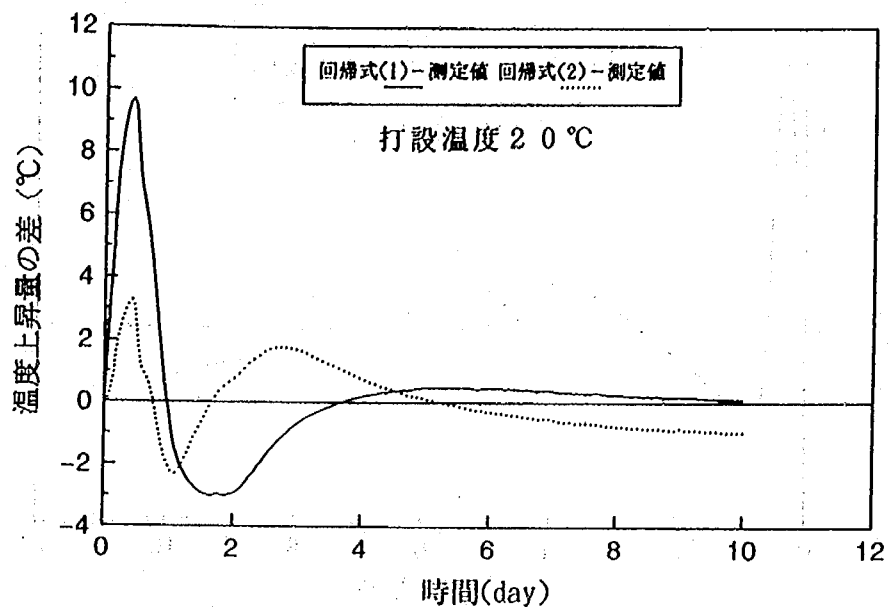
付図-3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化 (N S 7 0 (4))



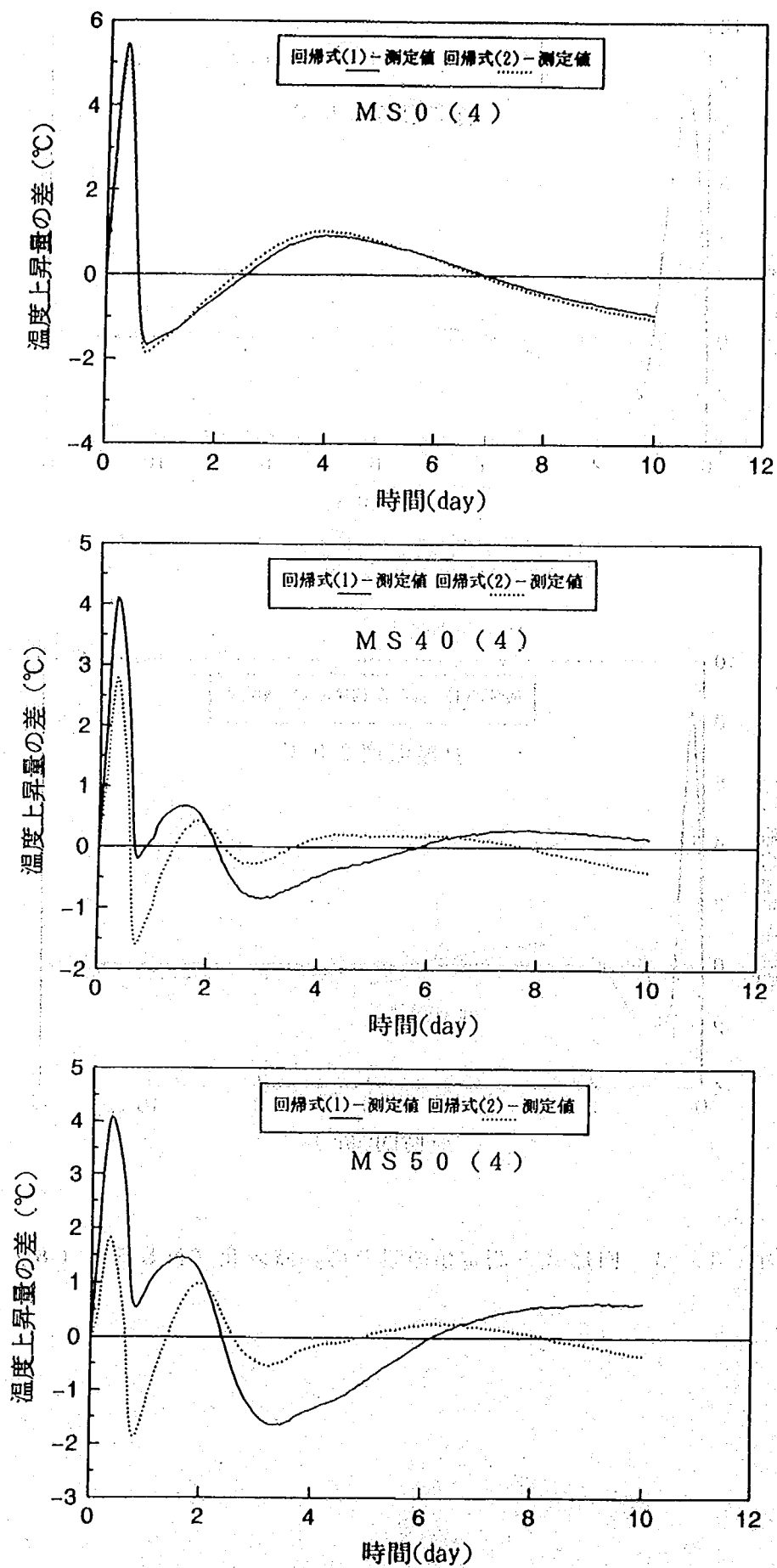
付図-3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化 (NS80(4))



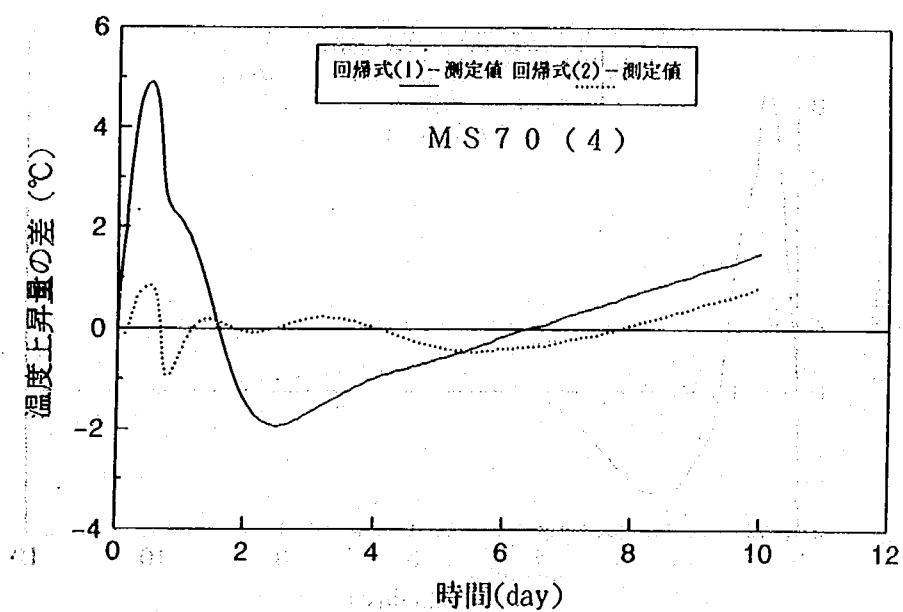
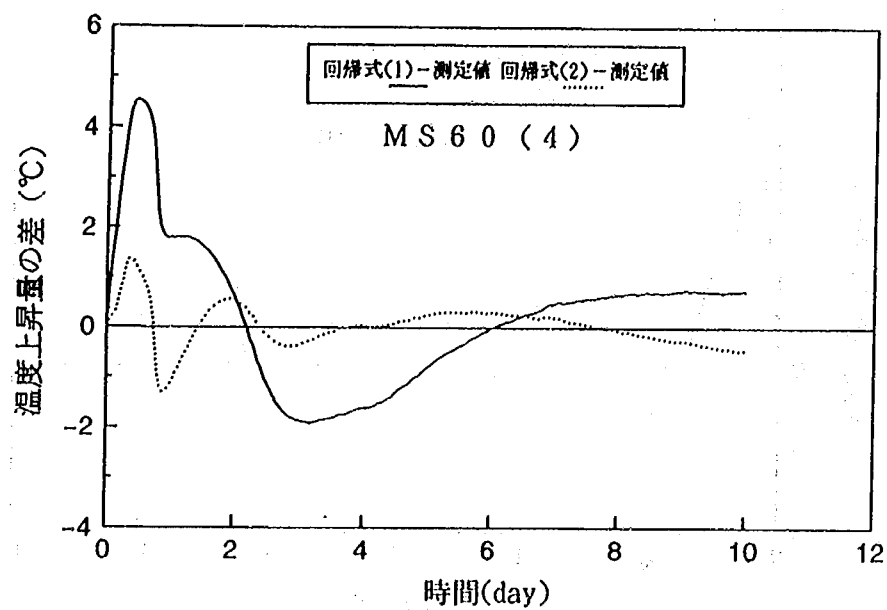
付図-3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化 (N S 50 (6))



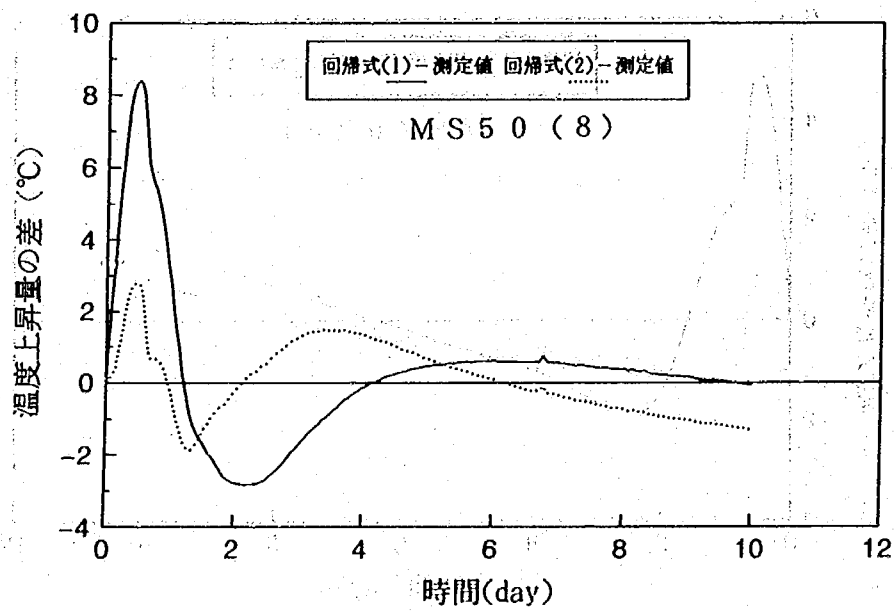
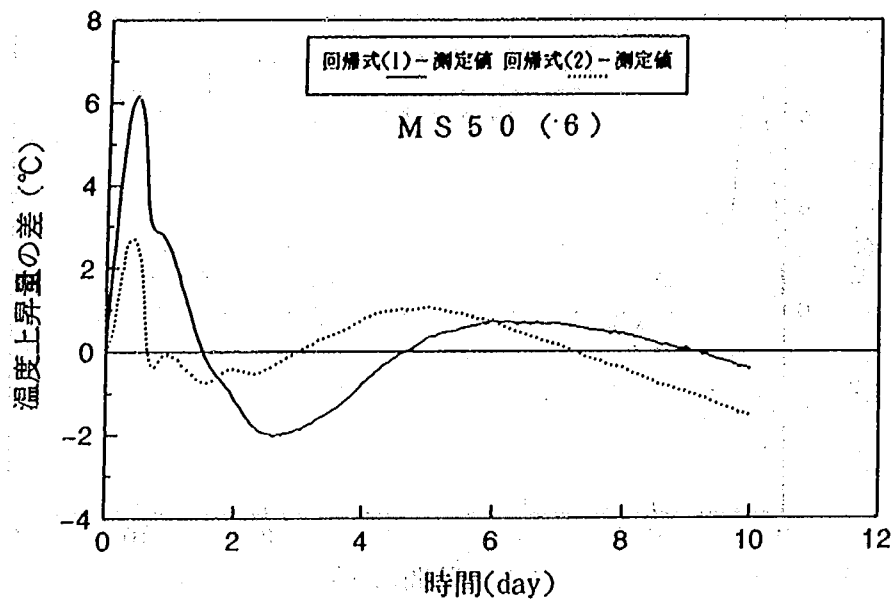
付図-3.3 回帰式と測定値の誤差の経時変化 (NS50(8))



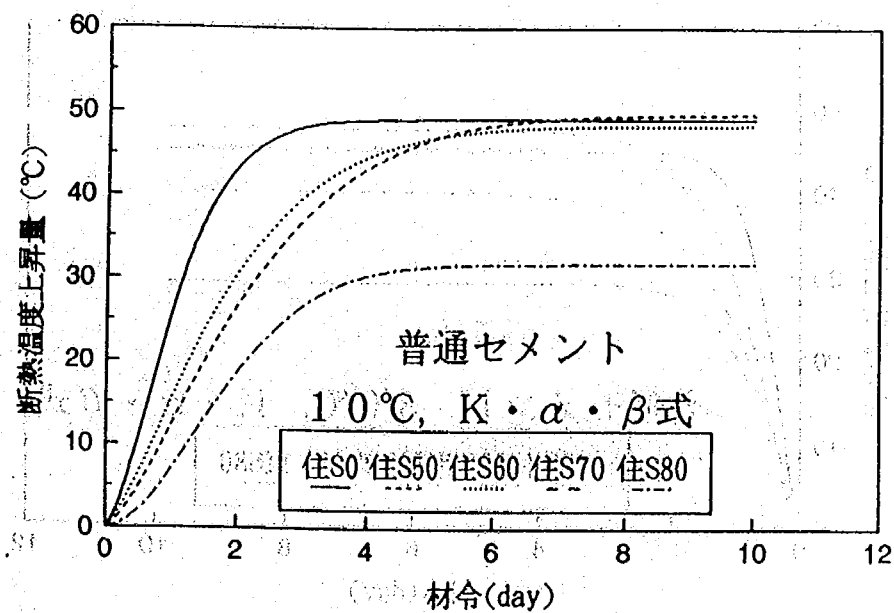
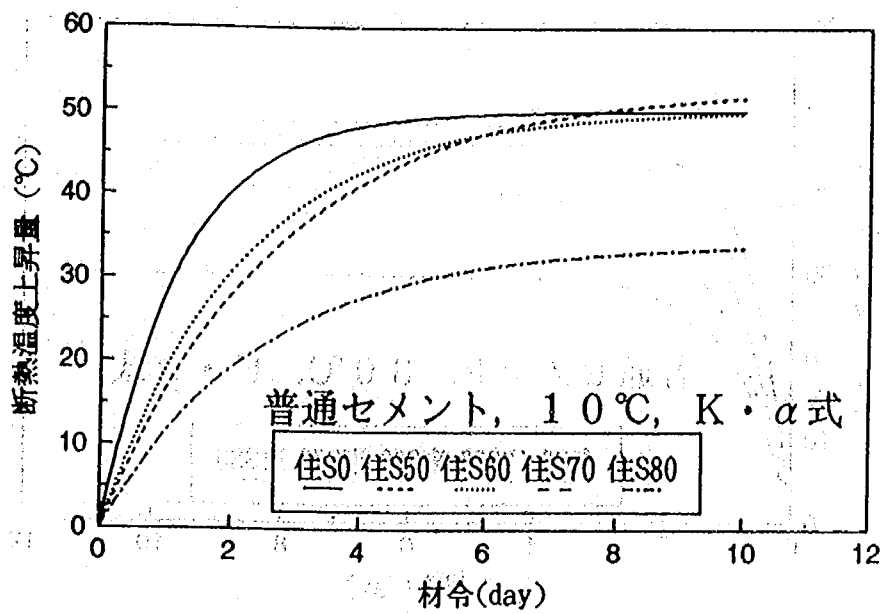
付図 - 3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化



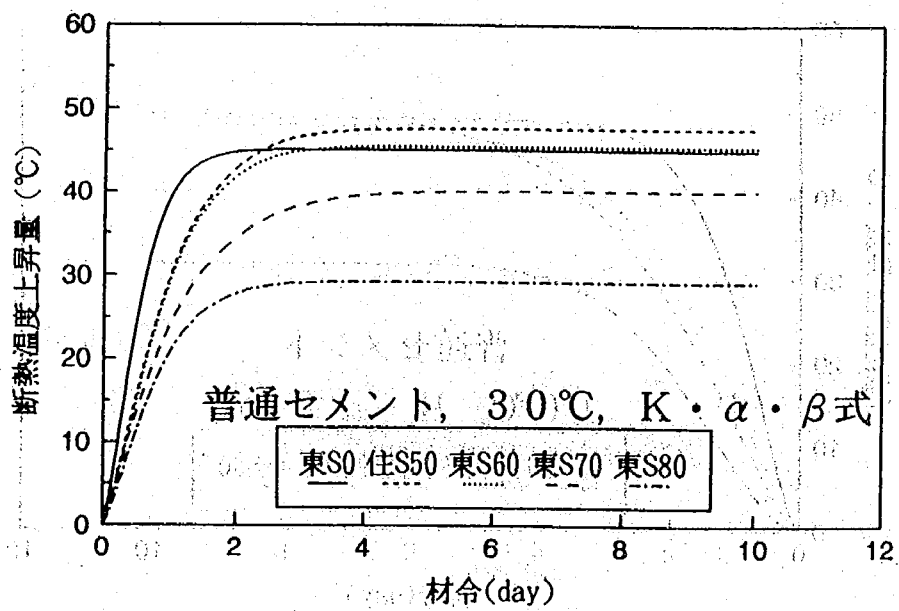
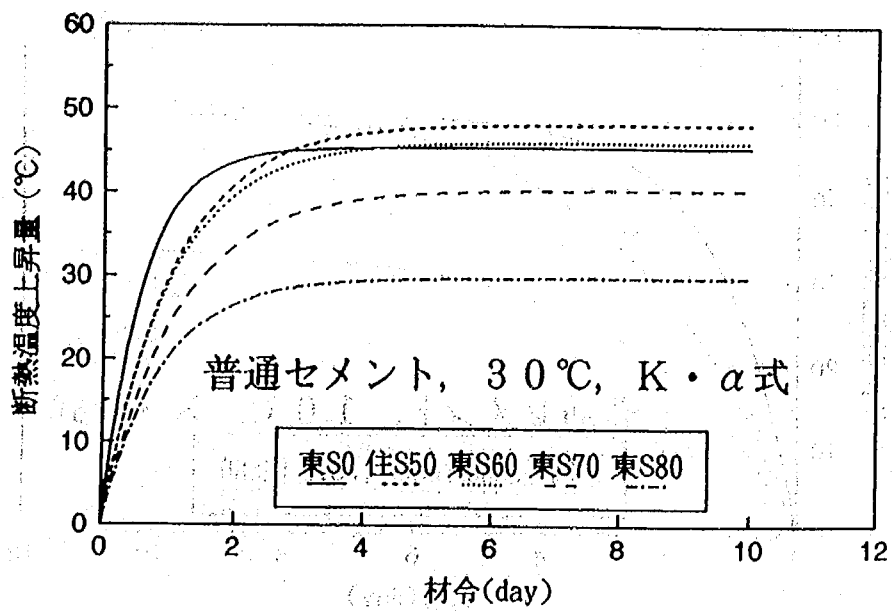
付図 - 3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化



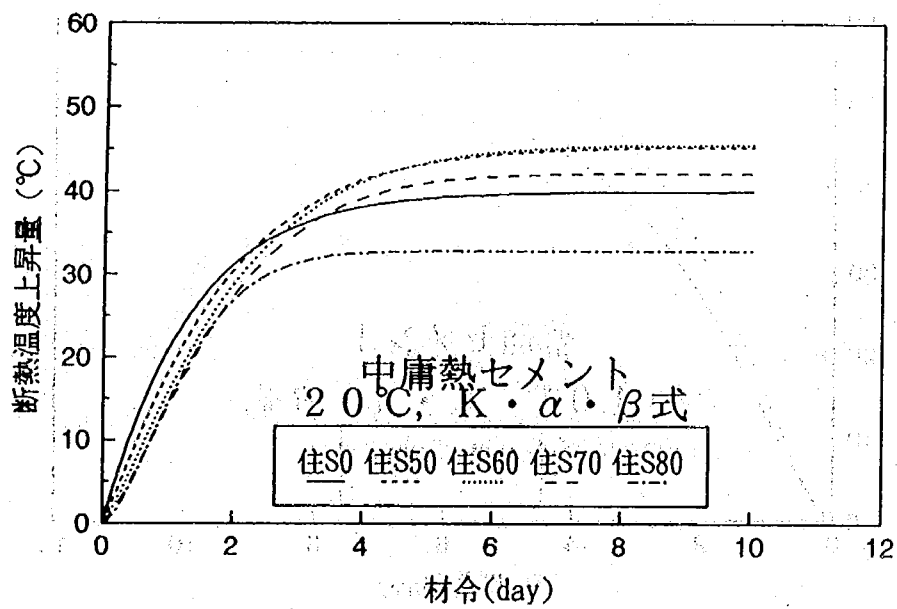
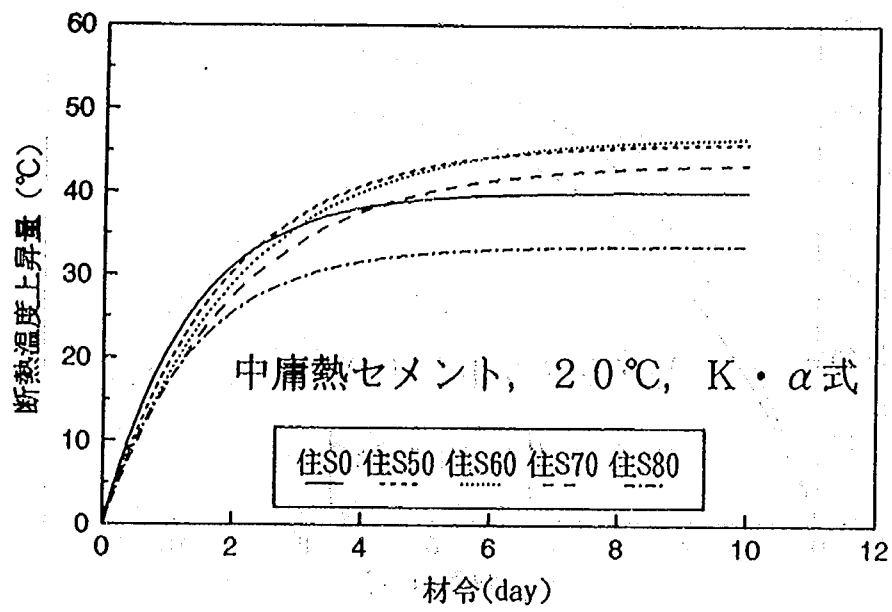
付図 - 3. 3 回帰式と測定値の誤差の経時変化



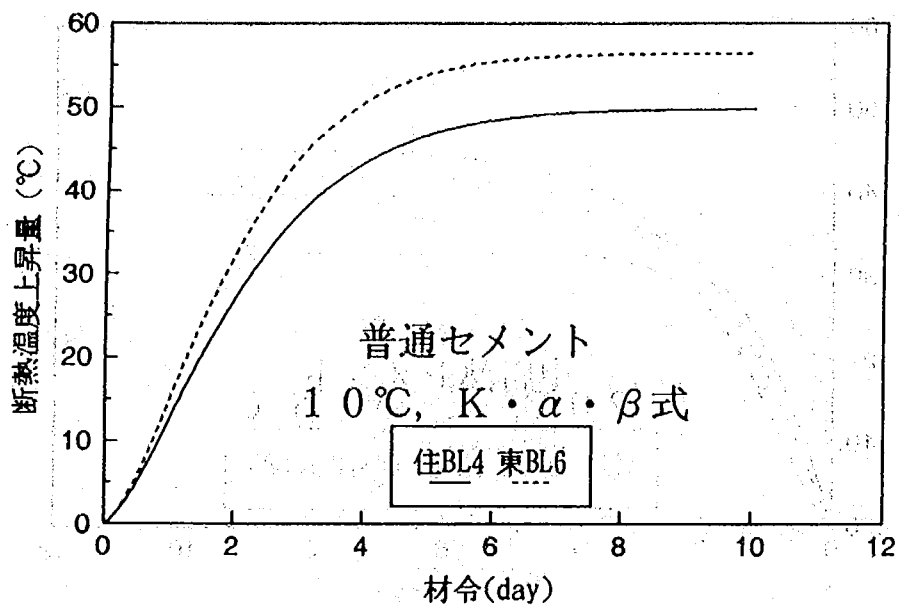
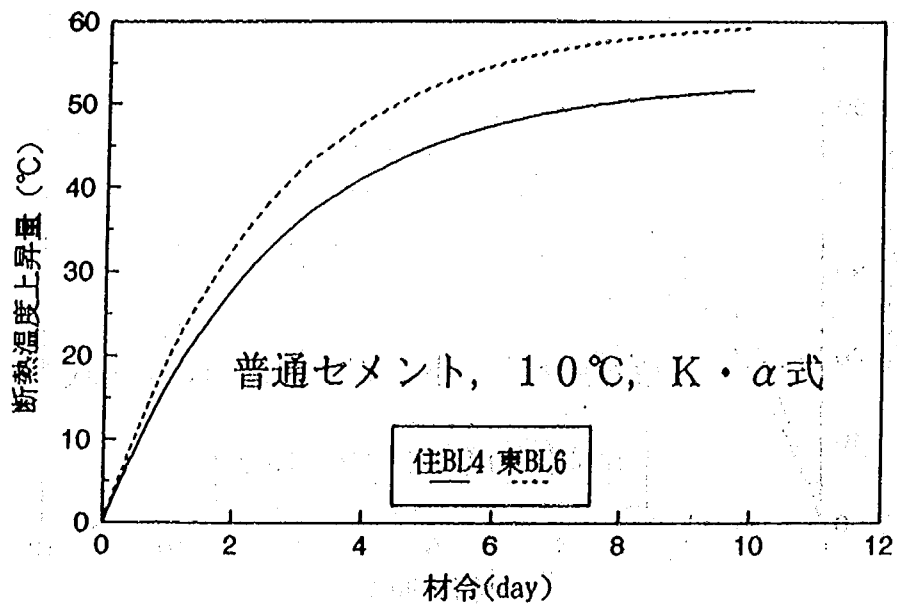
付図-3. 断熱温度上昇曲線推定結果(東京理工は補正)



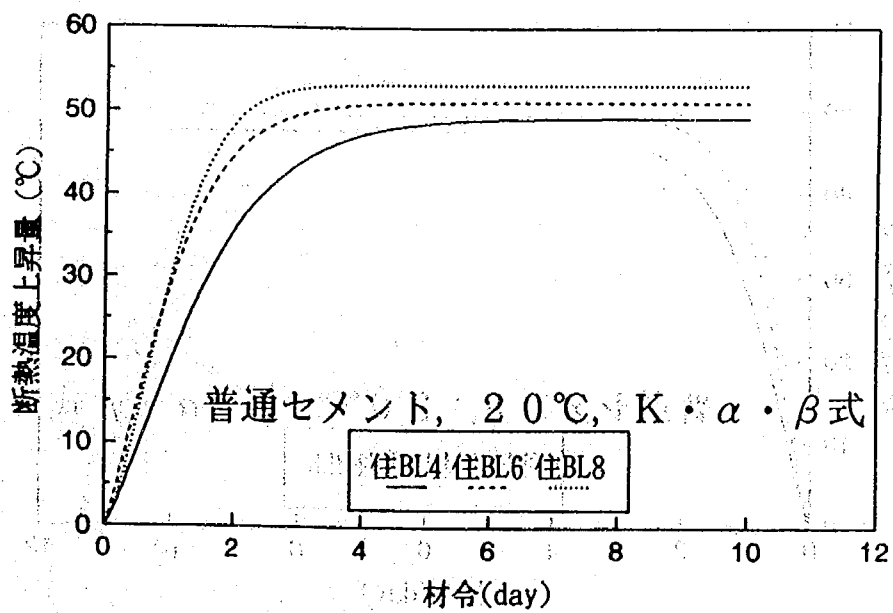
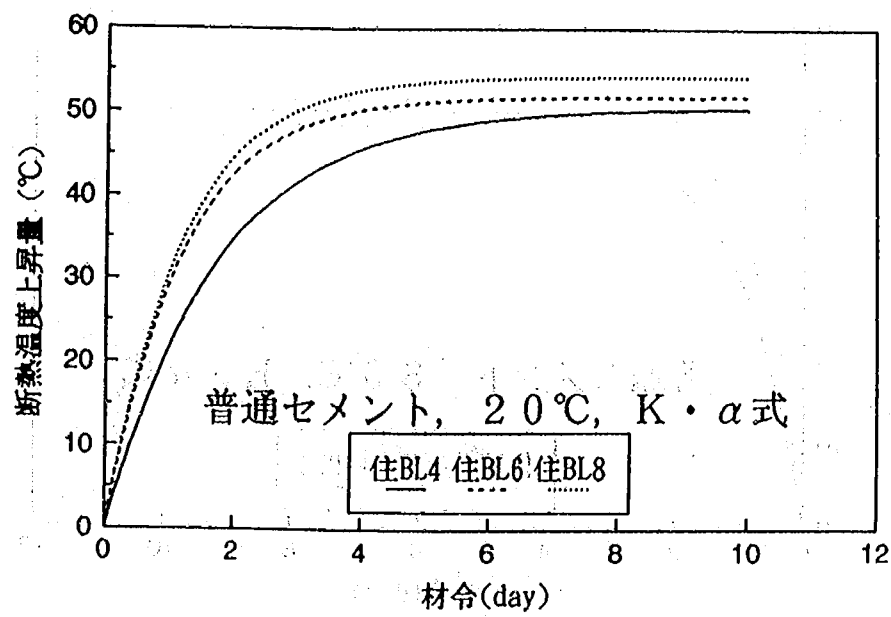
付図-3, 4 断熱温度上昇曲線推定結果(東京理工は補正)



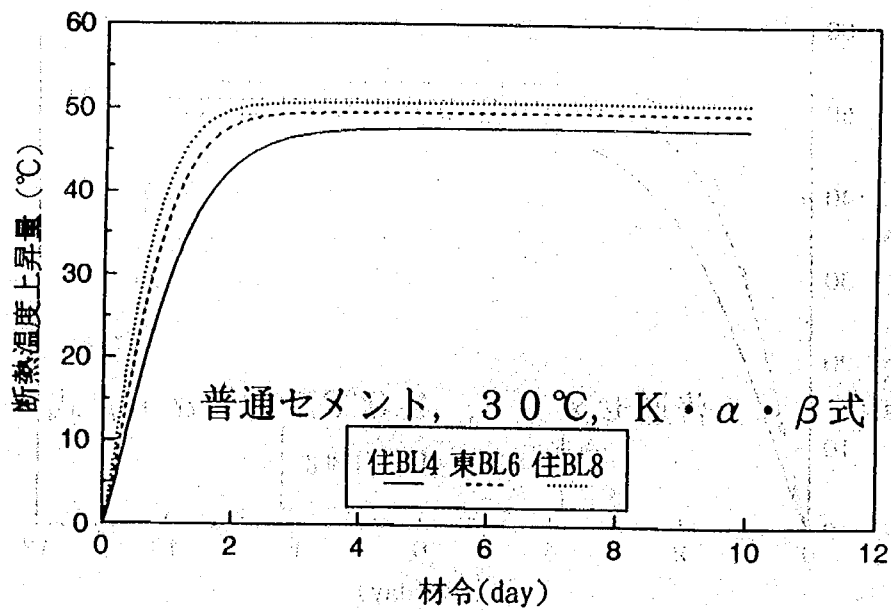
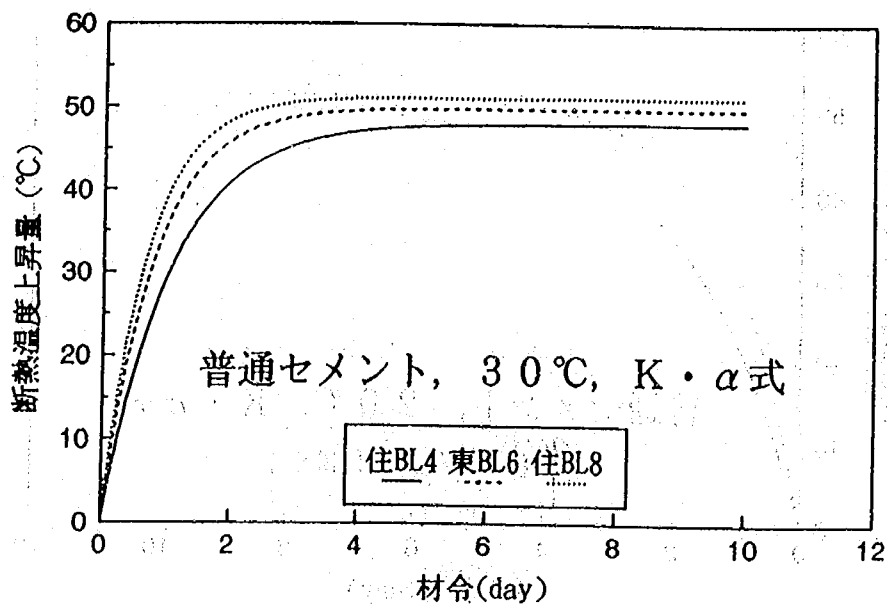
付図－3. 4 断熱温度上昇曲線推定結果（東京理工は補正）



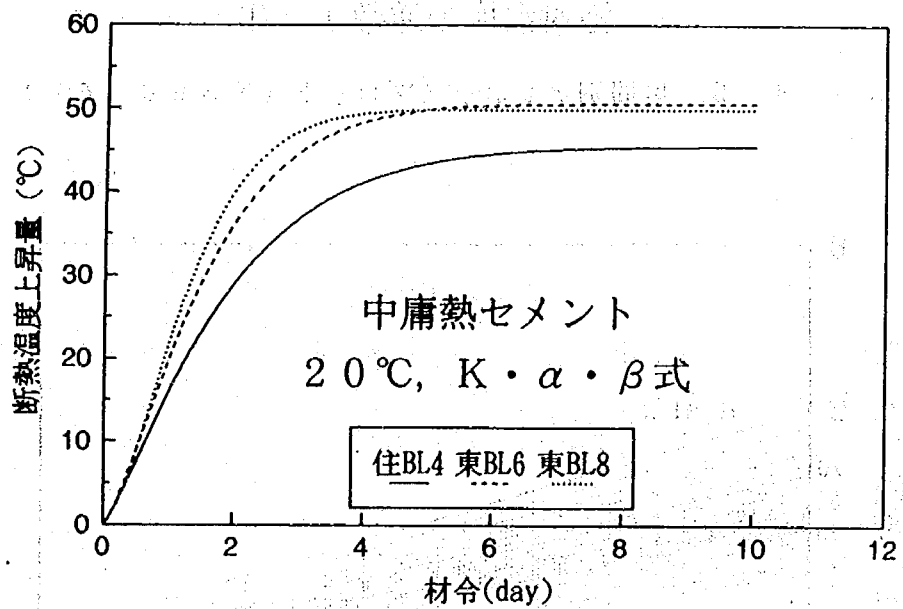
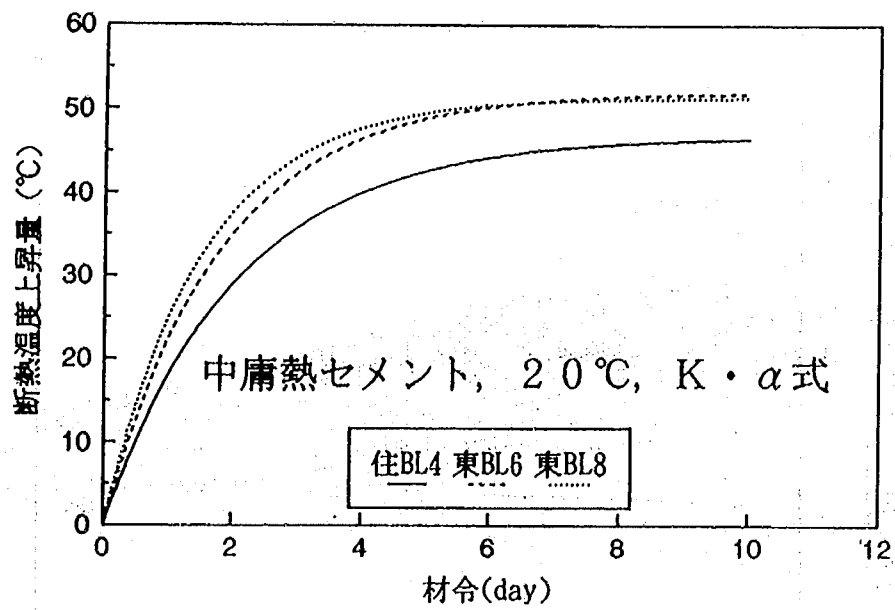
付図 - 3. 4 断熱温度上昇曲線推定結果 (東京理工は補正)



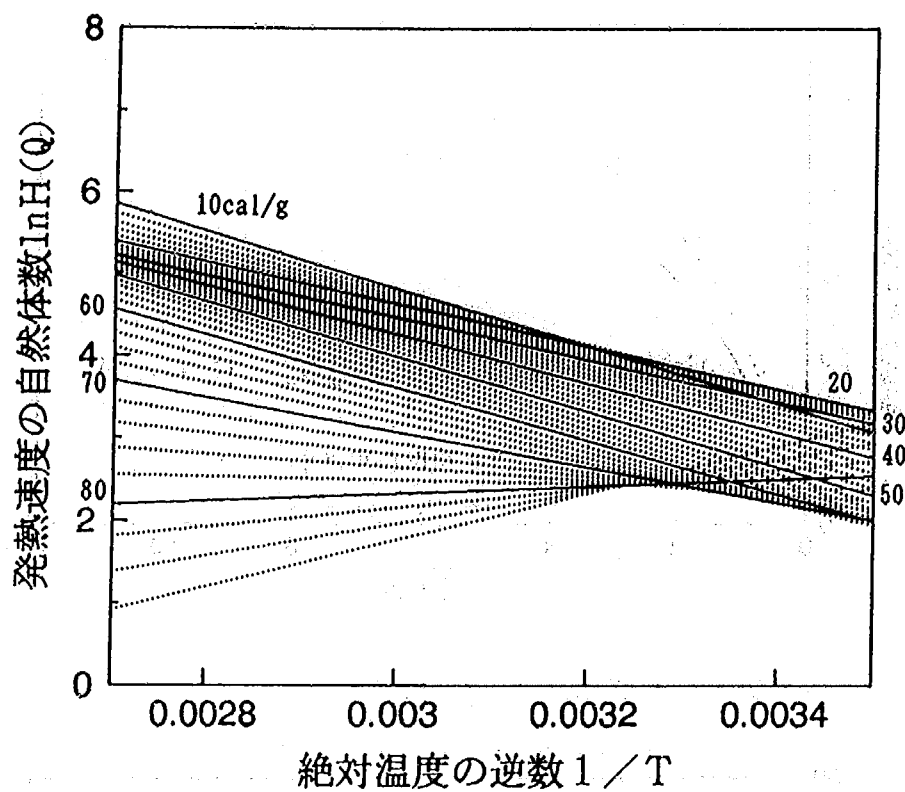
付図-3 4 断熱温度上昇曲線推定結果 (東京理工は補正)



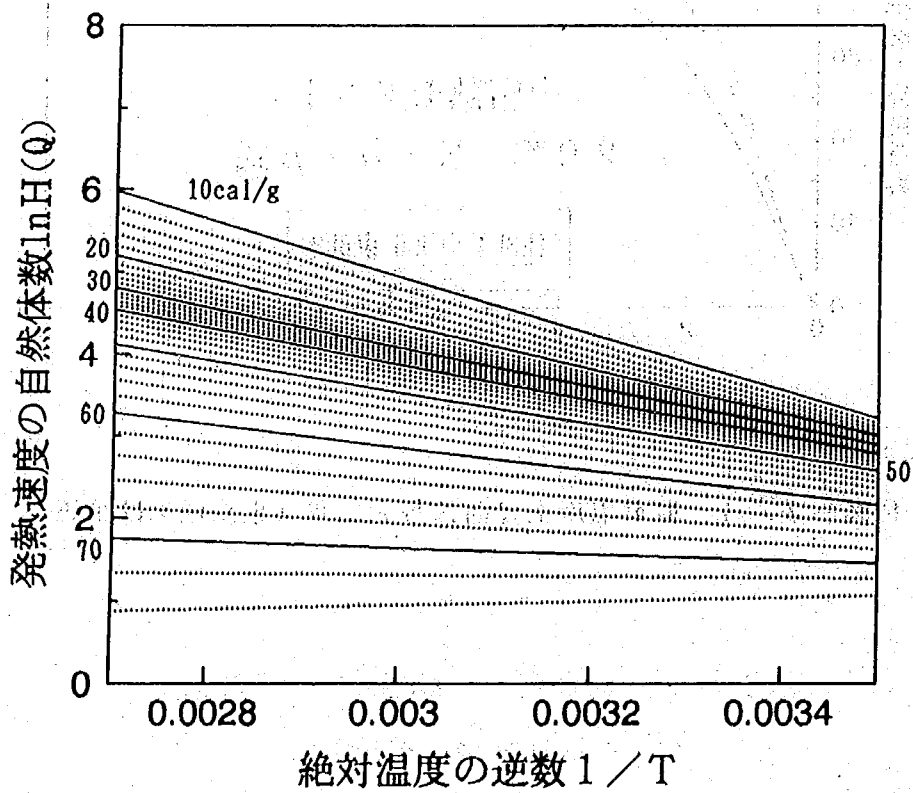
付図-3.4 断熱温度上昇曲線推定結果(東京理工は補正)



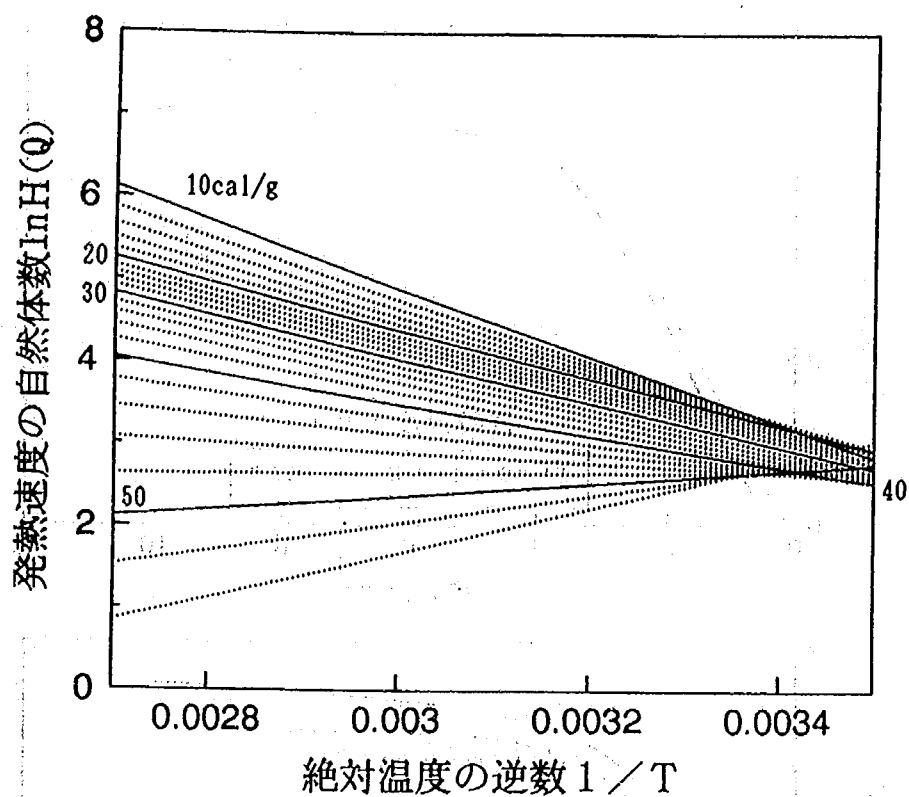
付図 - 3. 4 断熱温度上昇曲線推定結果 (東京理工は補正)



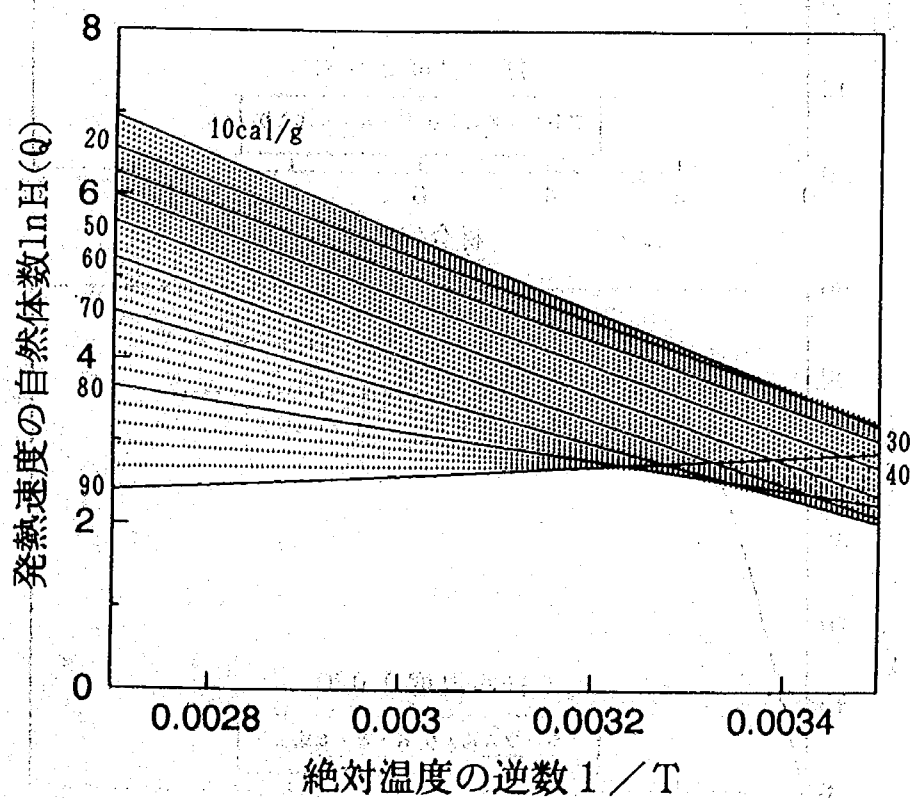
付図 - 3. 5 区間別アレニウスプロット (NS 60 (4))



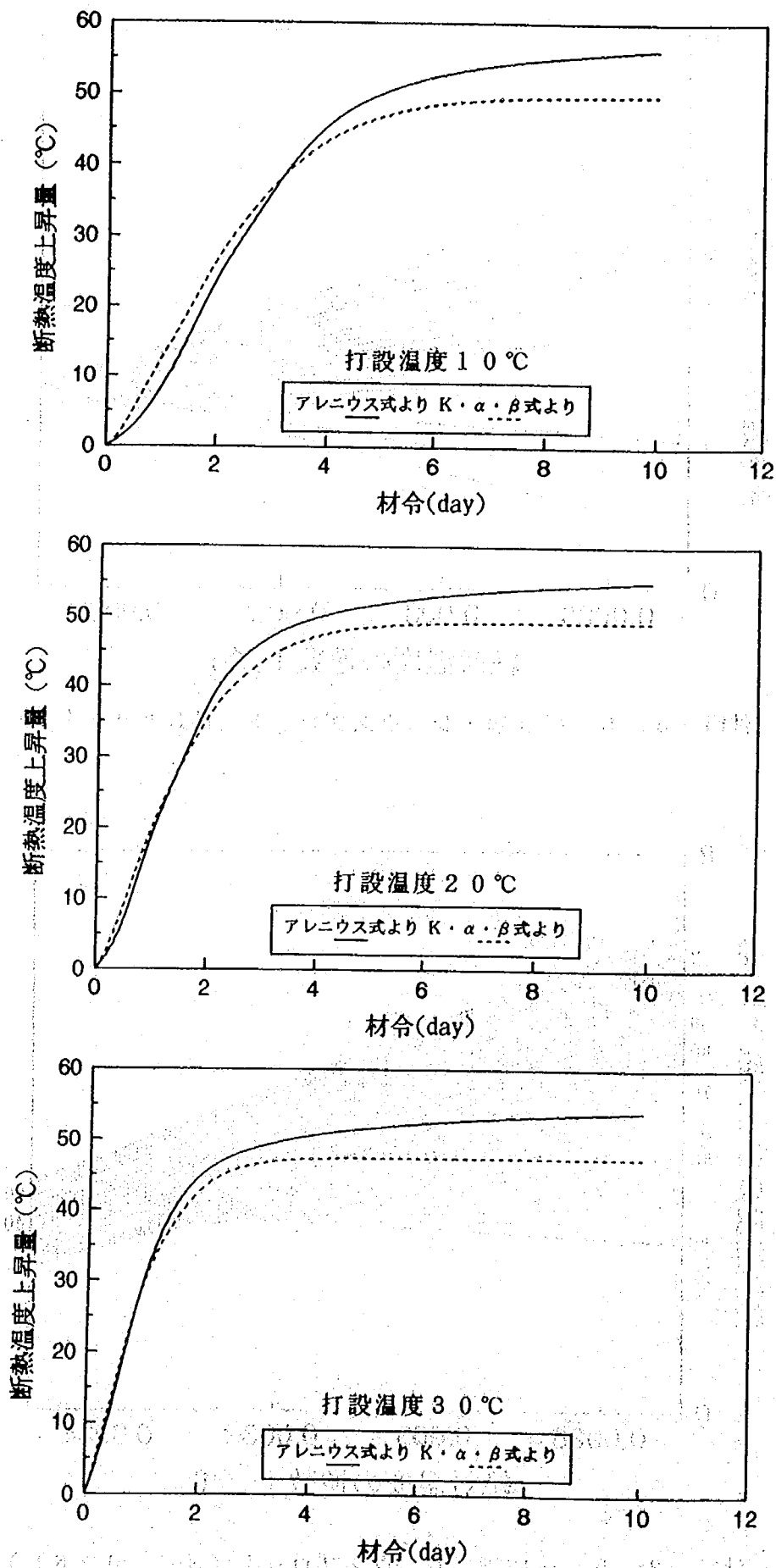
付図 - 3. 5 区間別アレニウスプロット (NS 70 (4))



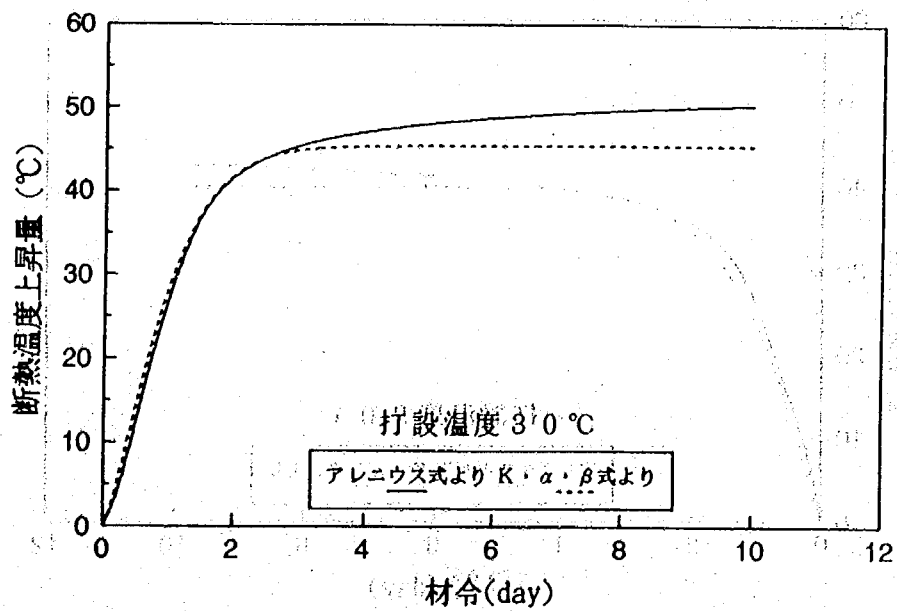
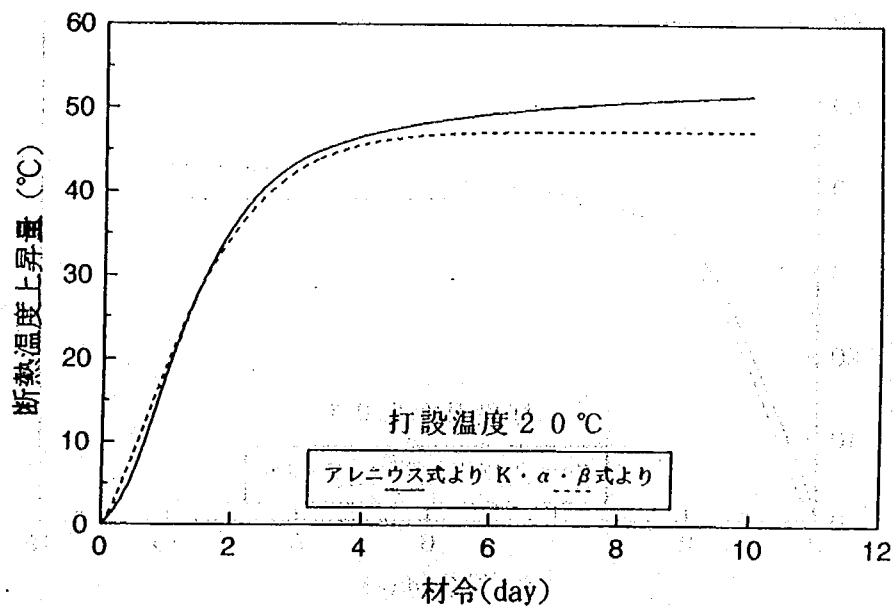
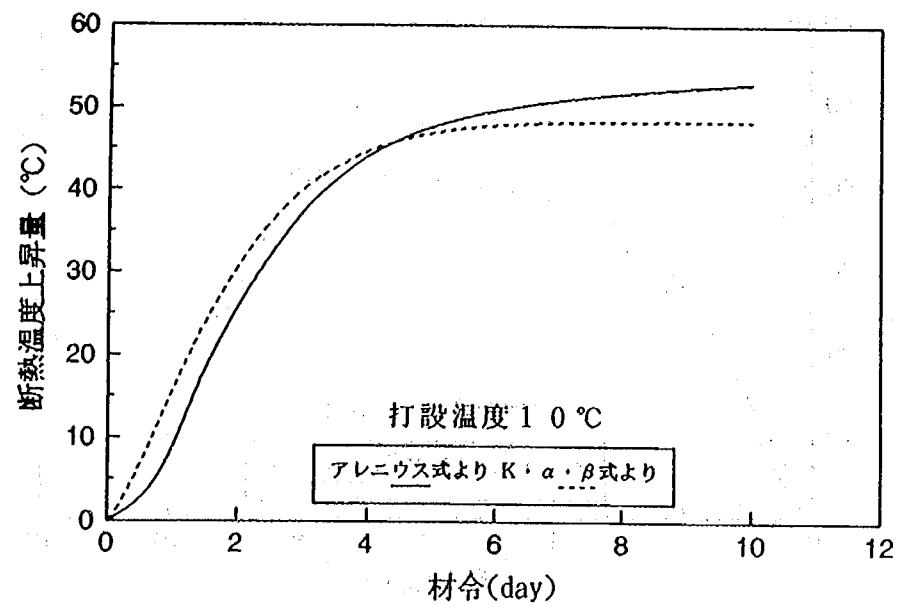
付図－3. 5 区間別アレニウスプロット (NS 80 (4))



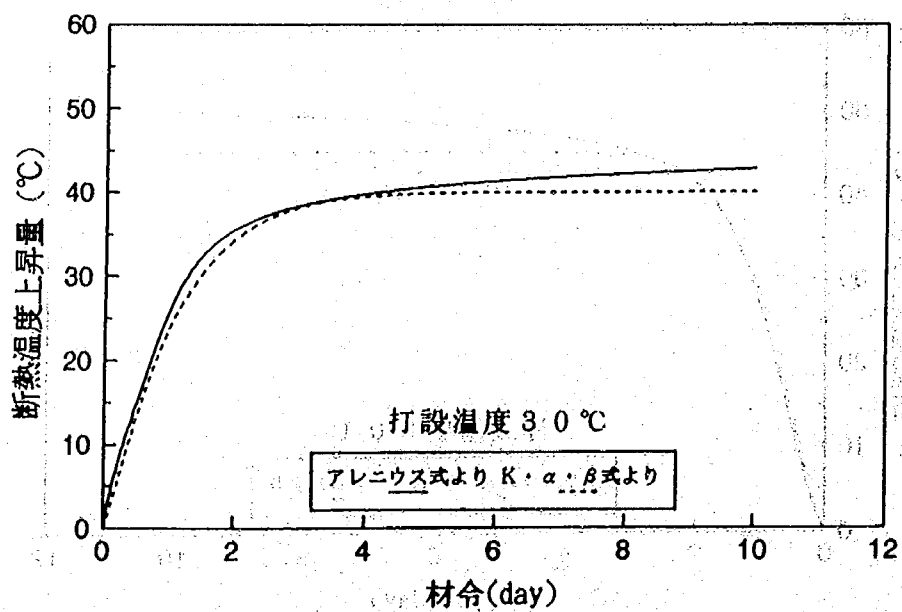
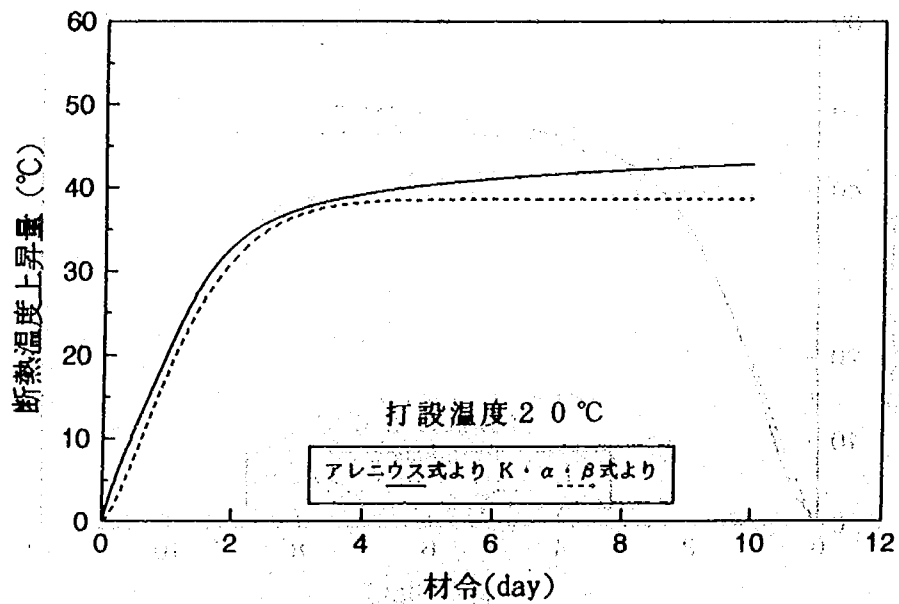
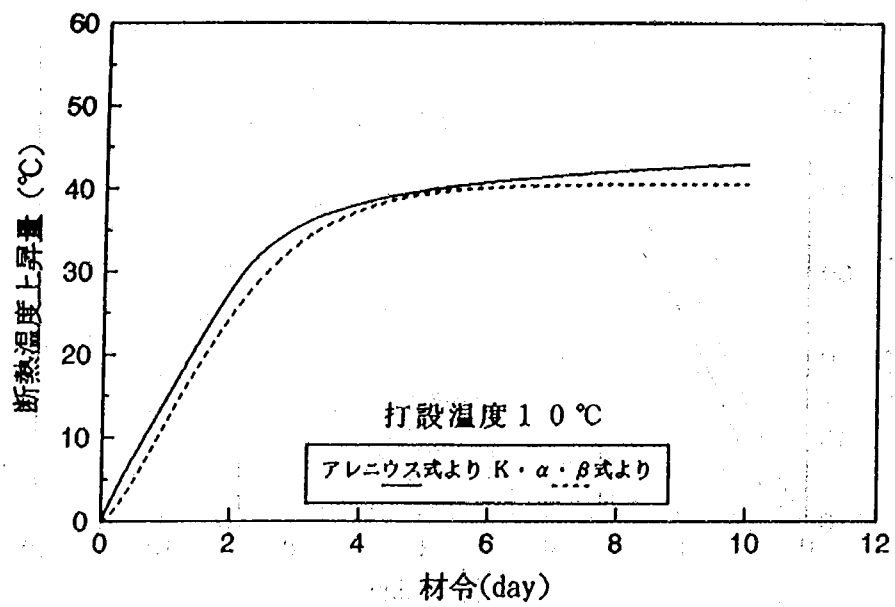
付図－3. 5 区間別アレニウスプロット (NS 50 (6))



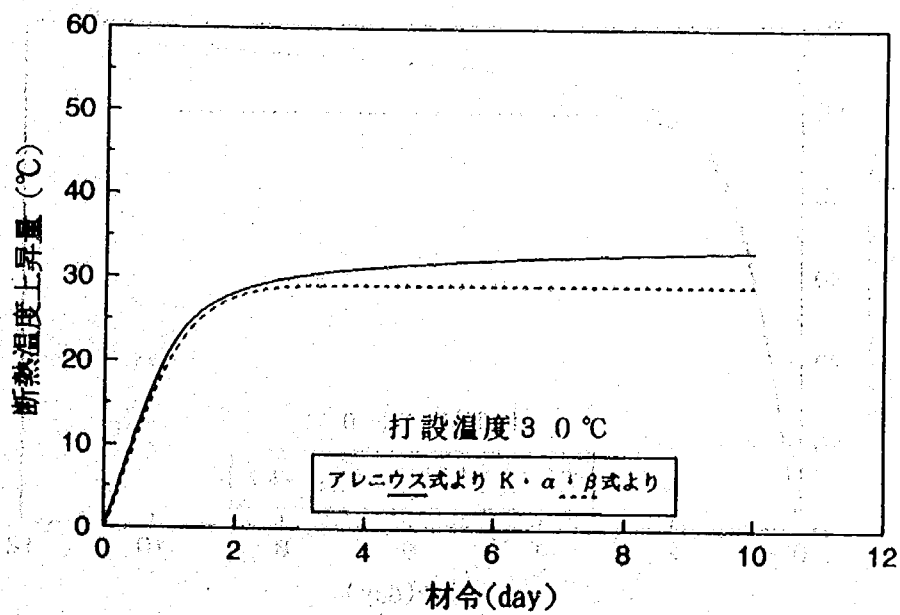
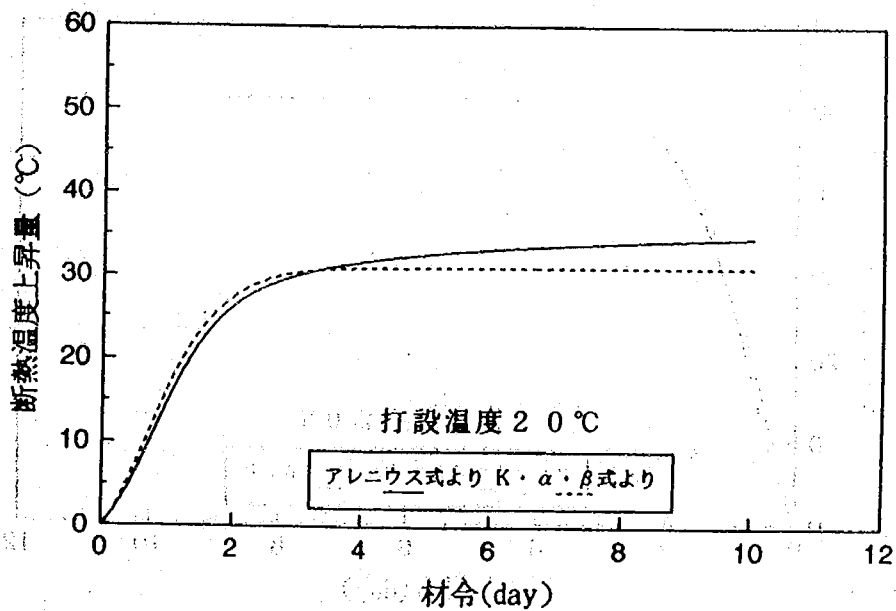
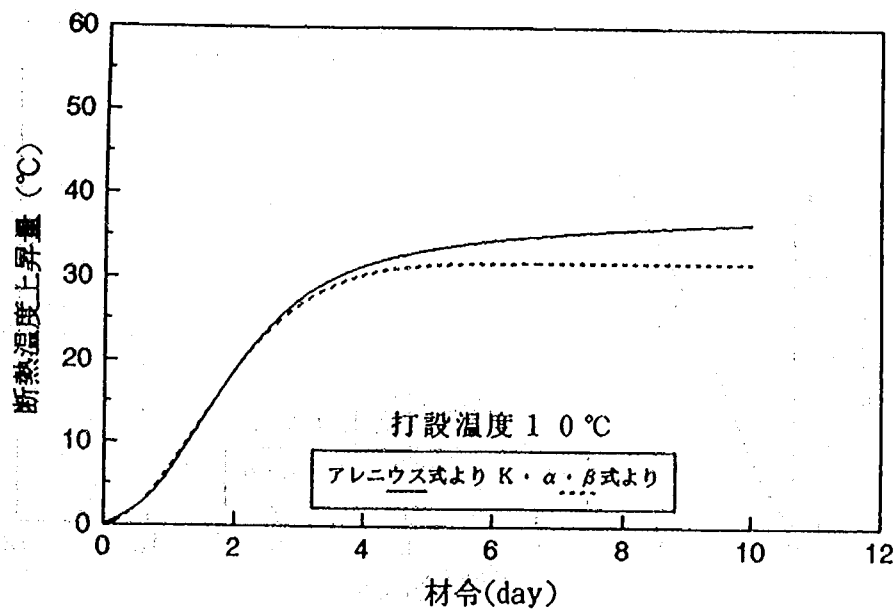
付図-3.6 断熱温度上昇予測結果 (NS50(4))



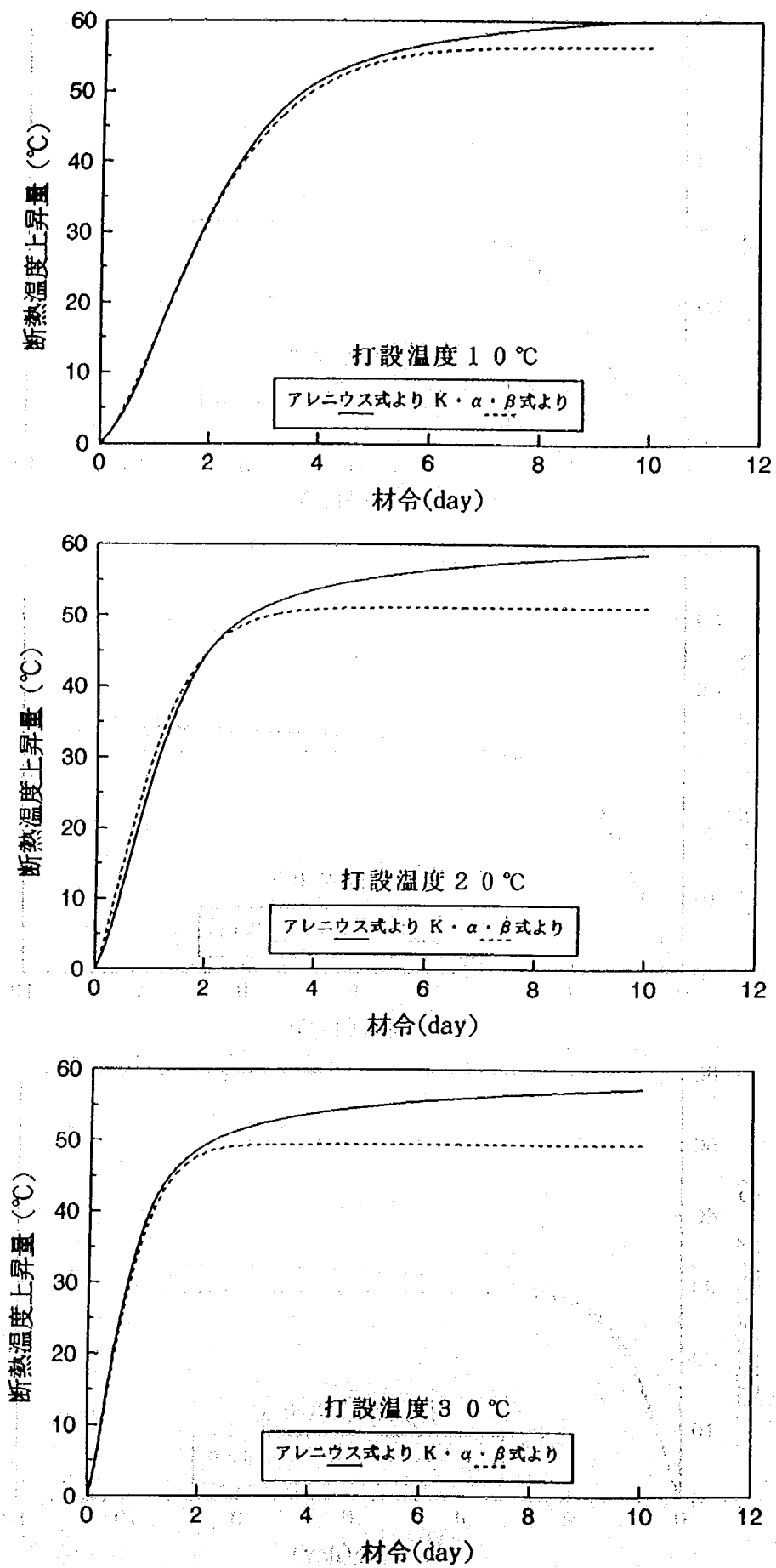
付図 - 3.0.6 断熱温度上昇予測結果 (NS60(4))



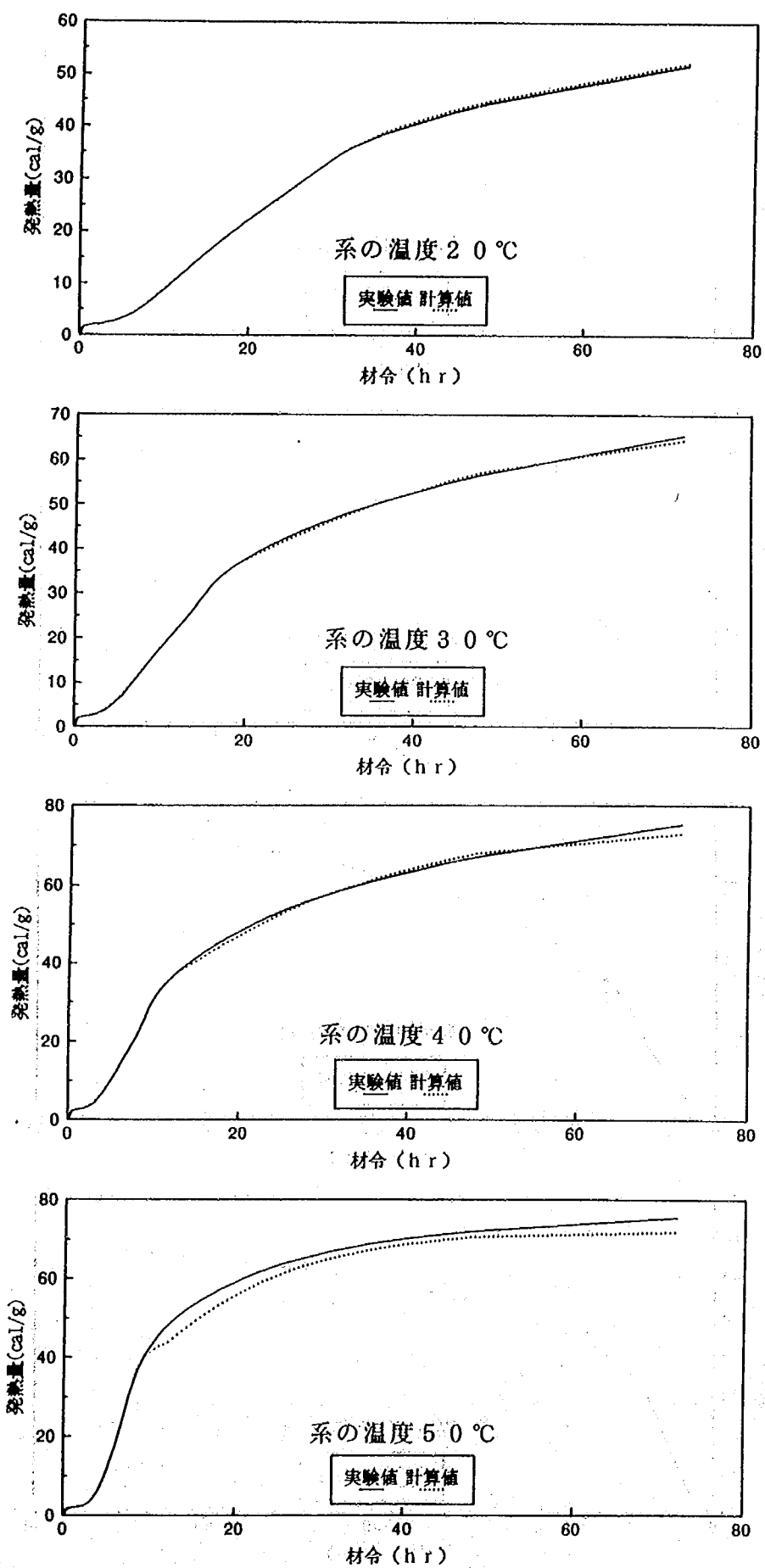
付図 - 3. 6 断熱温度上昇予測結果 (NS70 (4))



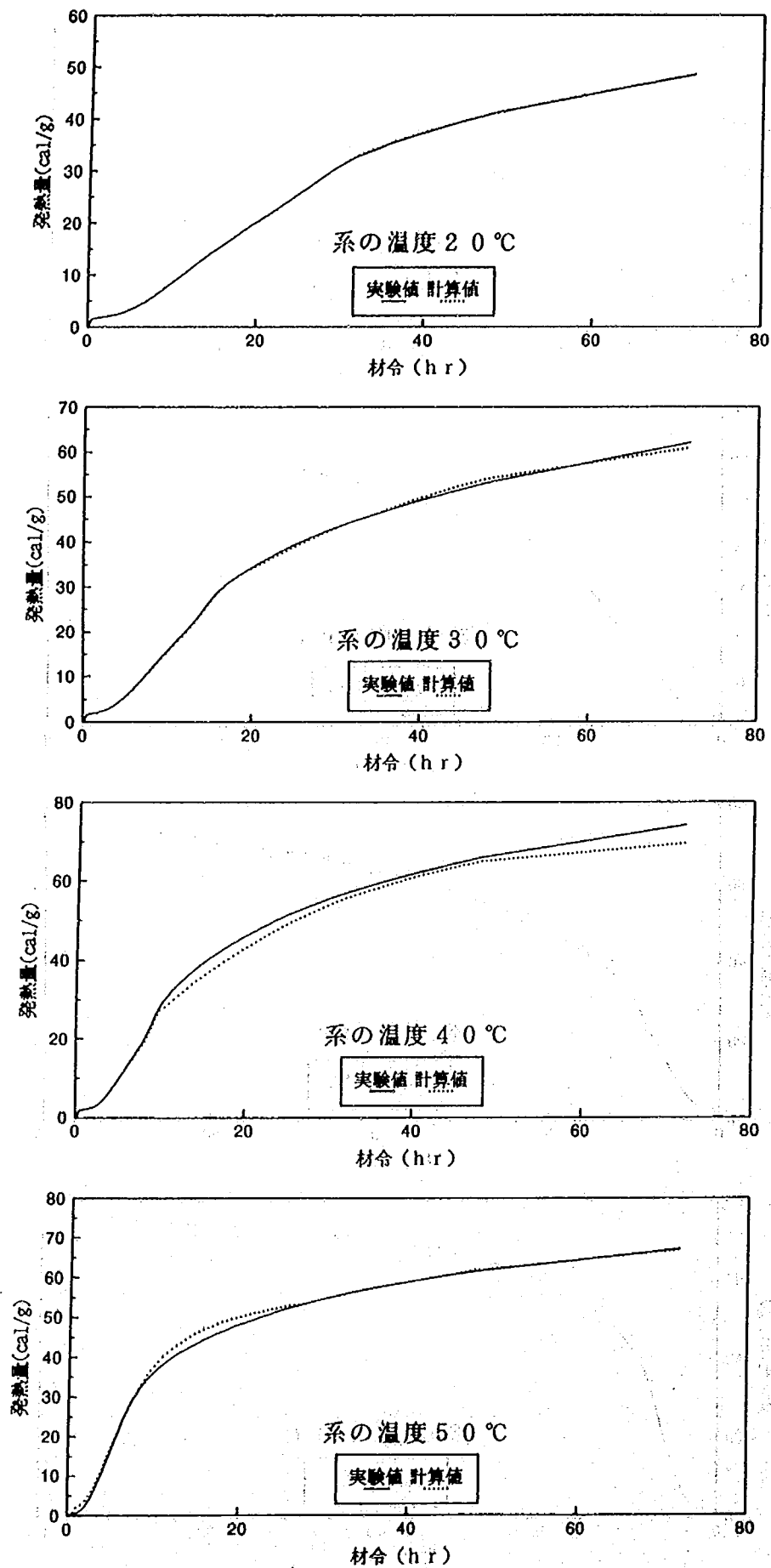
付図-3(6) 断熱温度上昇予測結果 (NS80(4))



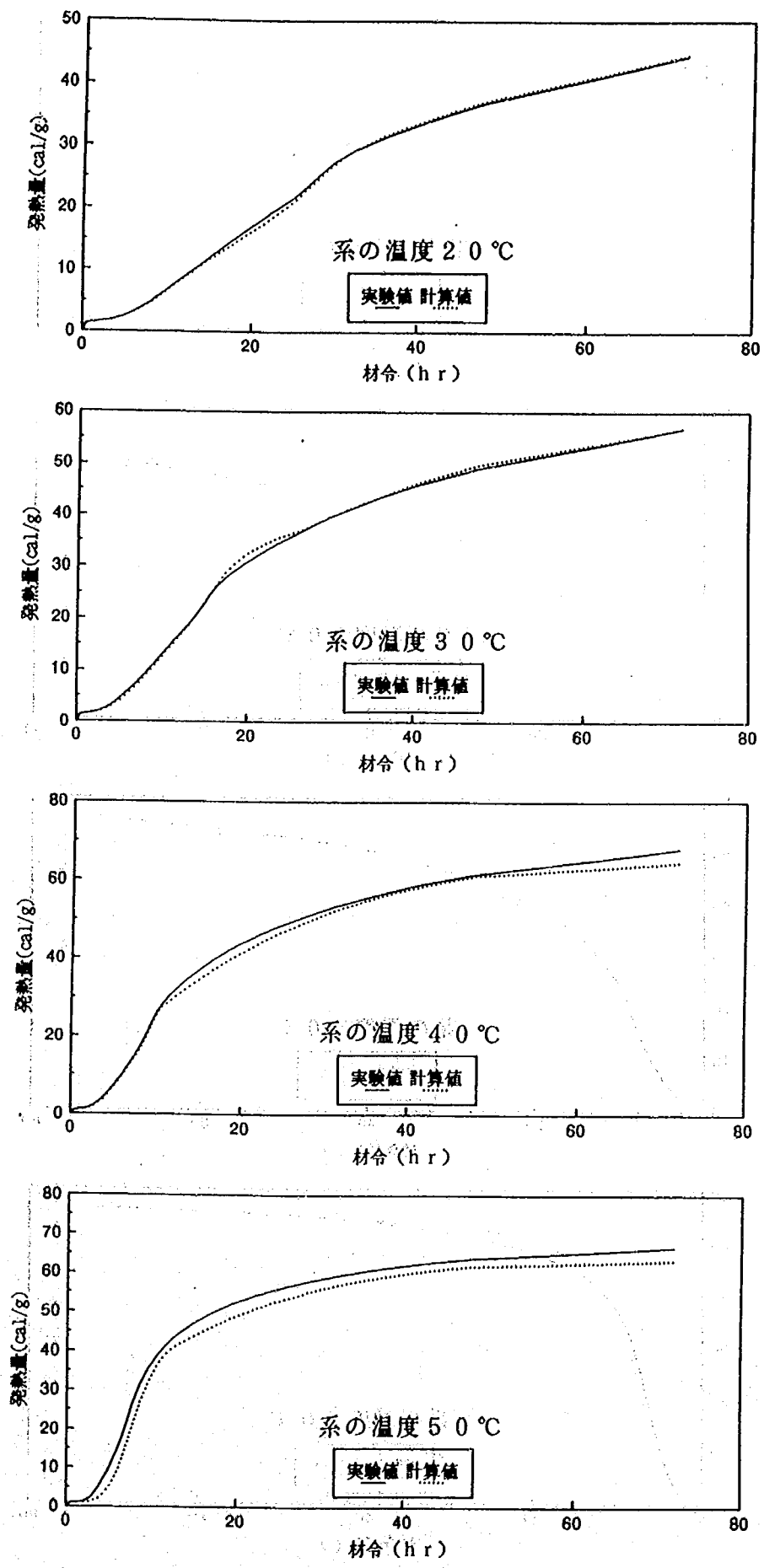
付図-3. 6 断熱温度上昇予測結果 (NS50(6))



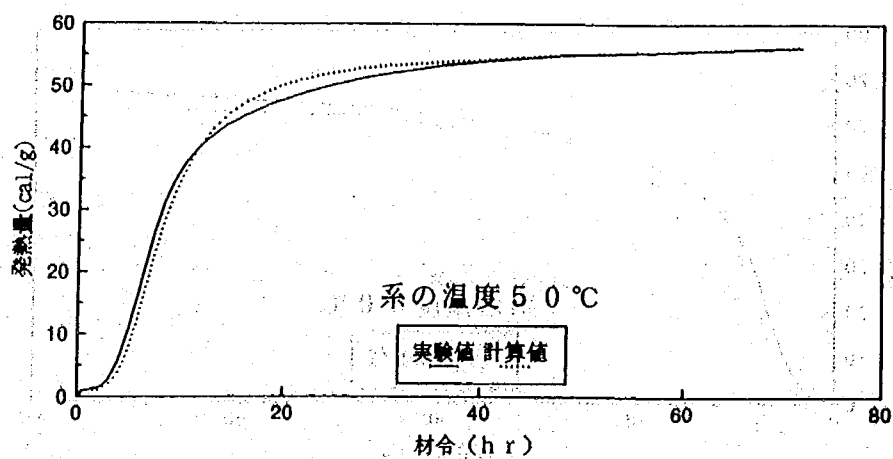
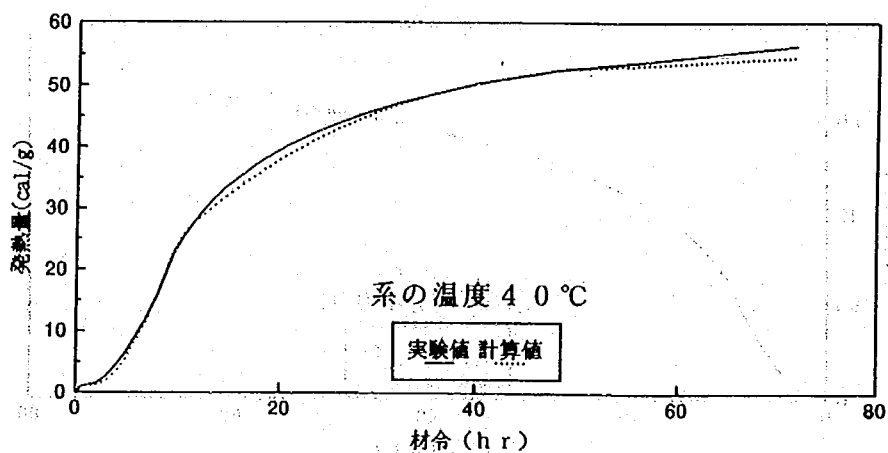
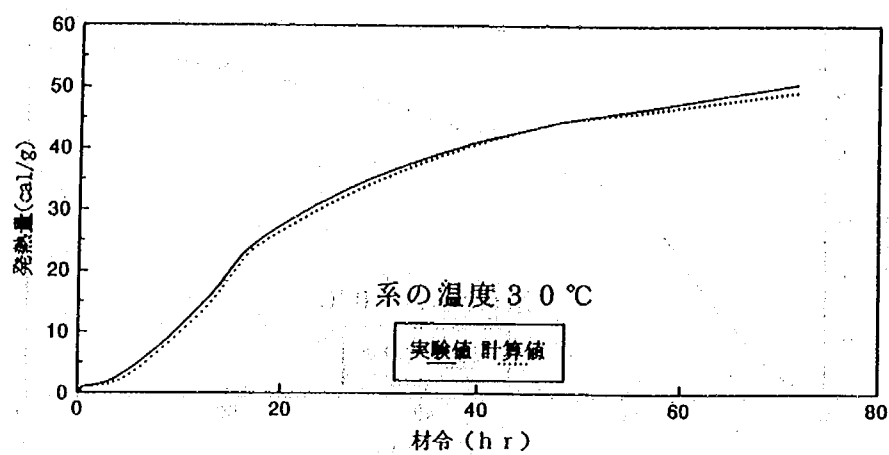
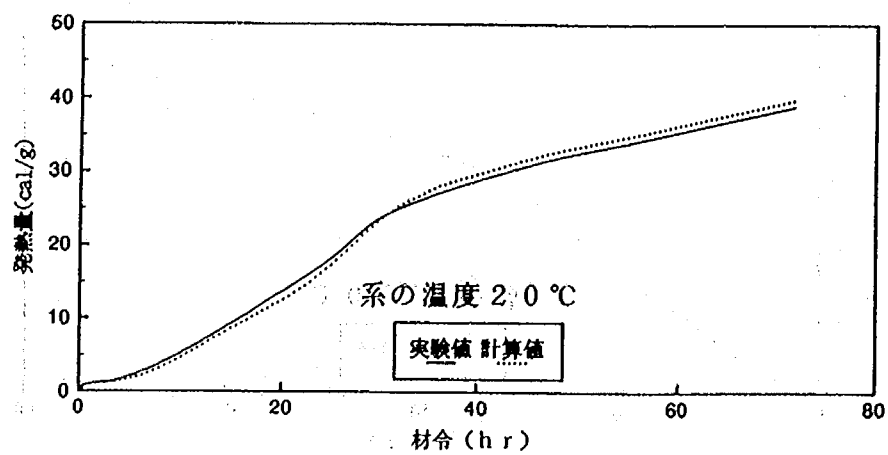
付図 - 4. 1 数理モデルによる積算発熱量の推定 (NS50 (4))



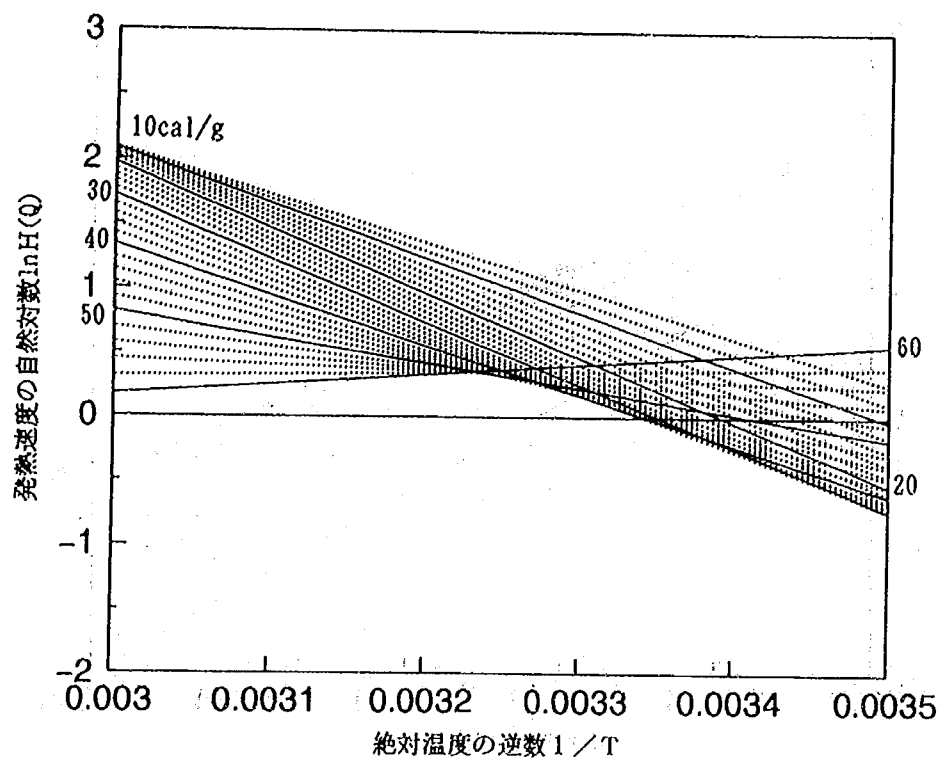
付図 - 4. 1 数理モデルによる積算発熱量の推定 (NS60(4))



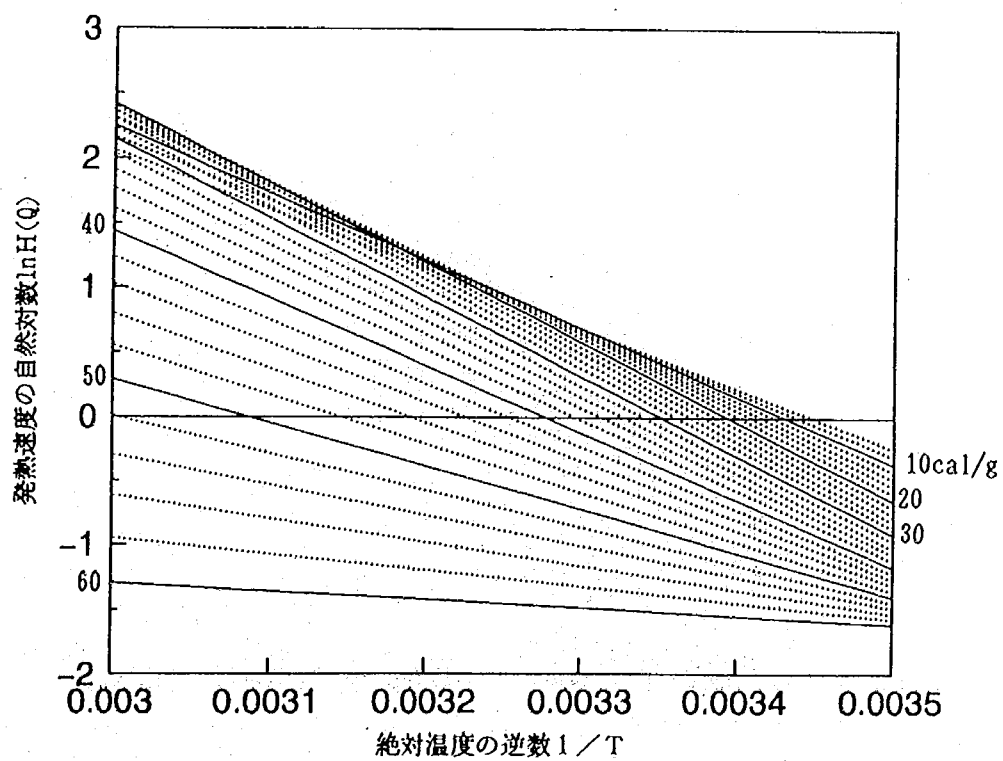
付図 - 4. 1 数理モデルによる積算発熱量の推定 (NS70(4))



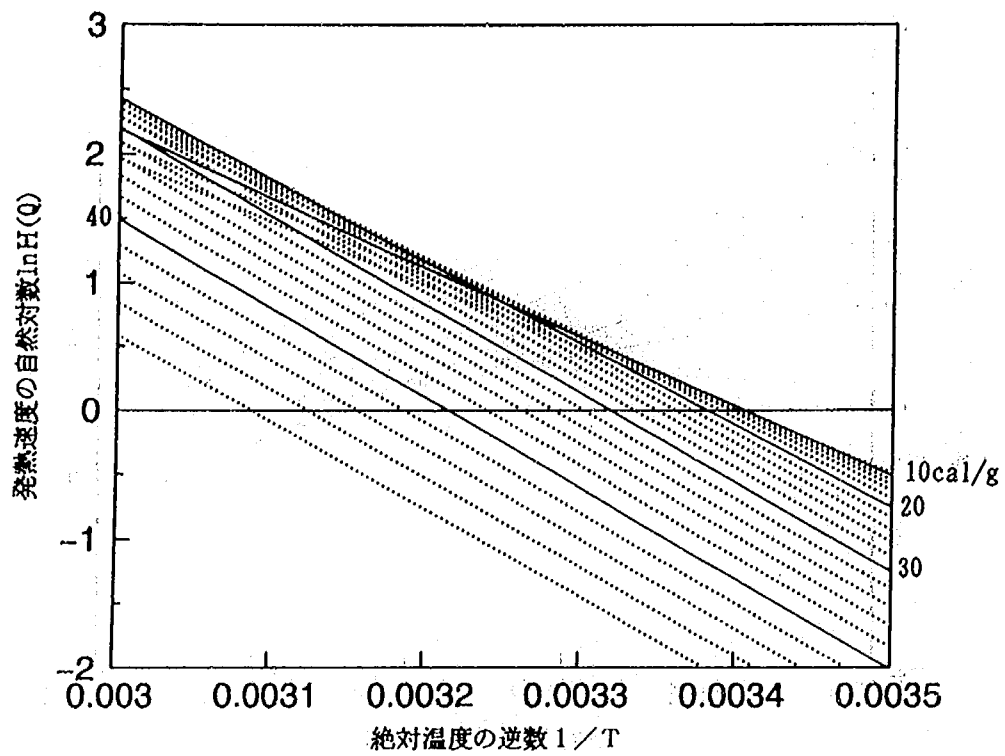
付図 - 4. 1 数理モデルによる積算発熱量の推定 (NS80 (4))



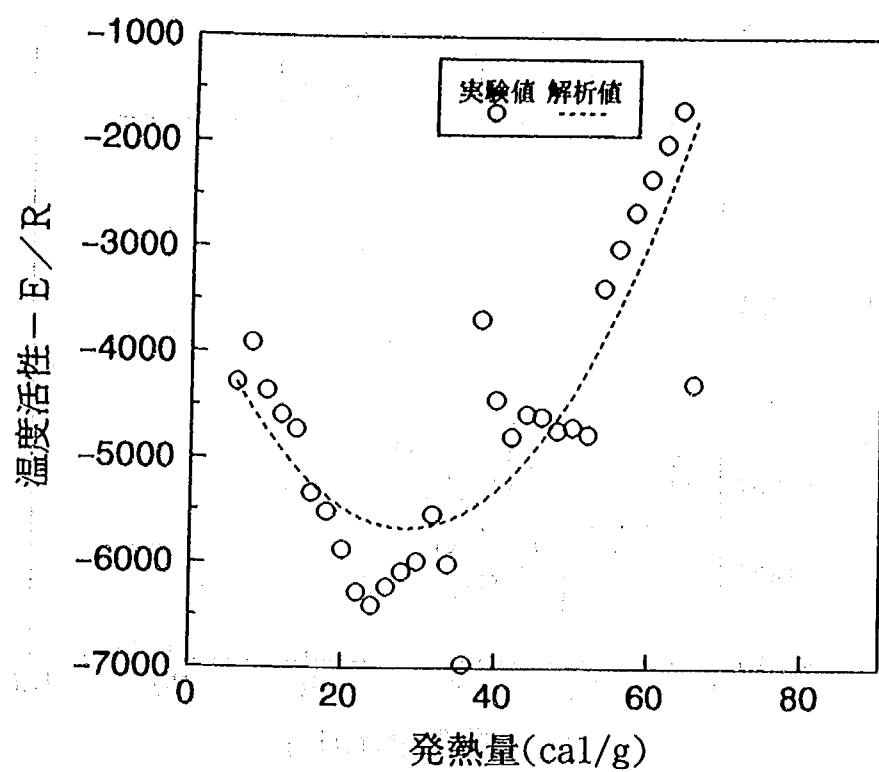
付図－4. 2 区間別アレニウスプロット (NS 60 (4))



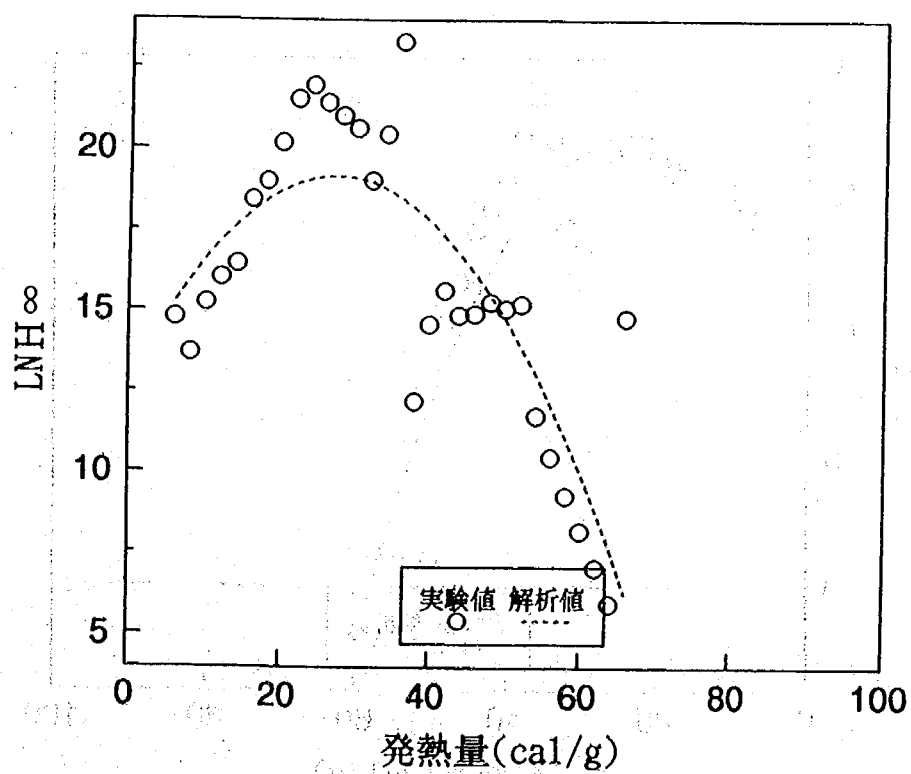
付図－4. 2 区間別アレニウスプロット (NS 70 (4))



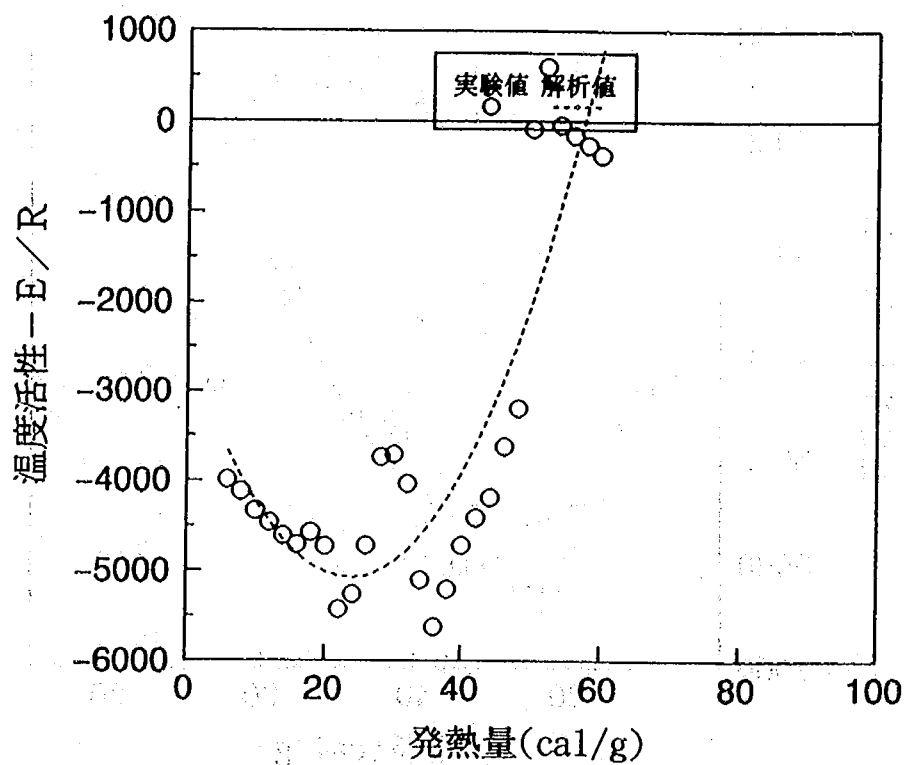
付図-4.2 区間別アレニウスプロット (NS80(4))



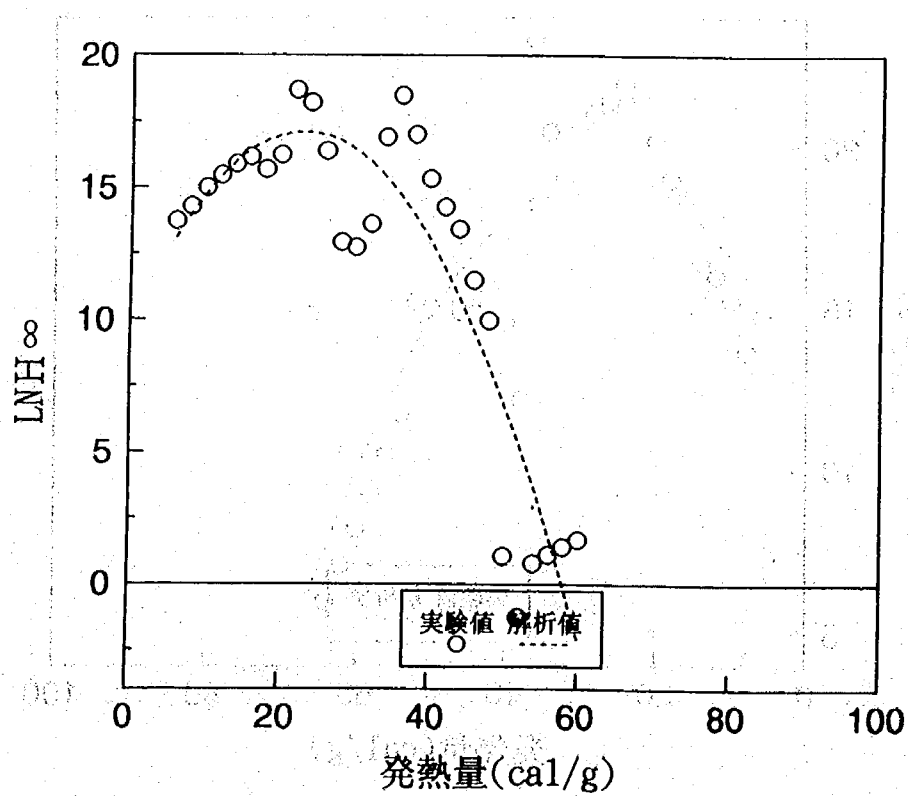
付図 - 4. 3 積算発熱量と温度活性の関係 (NS50(4))



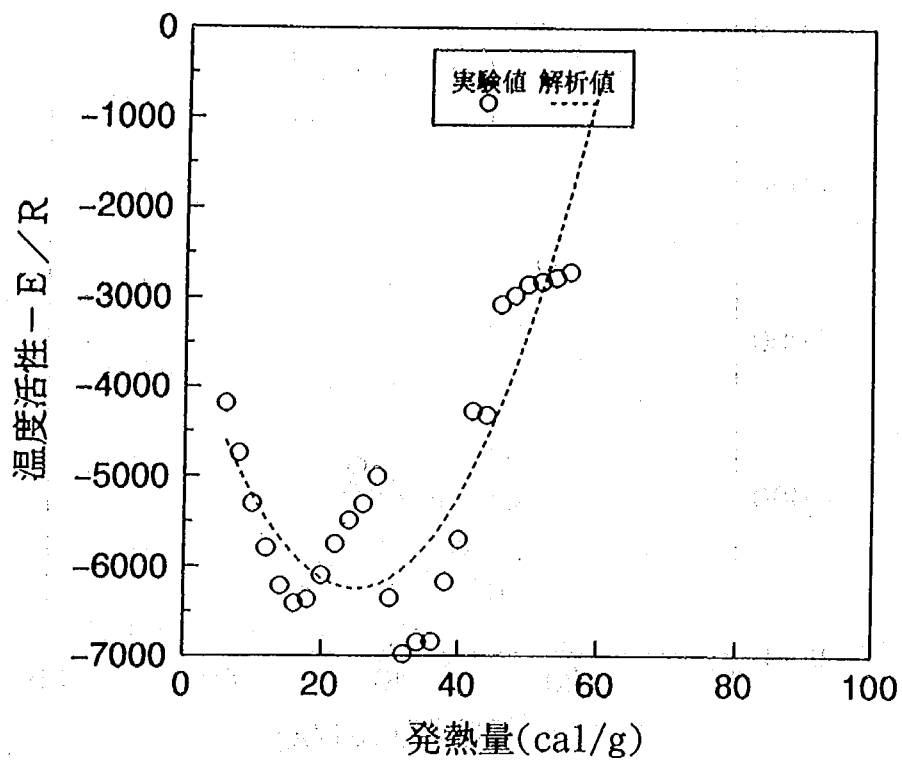
付図 - 4. 3 積算発熱量と限界発熱速度の関係 (NS50(4))



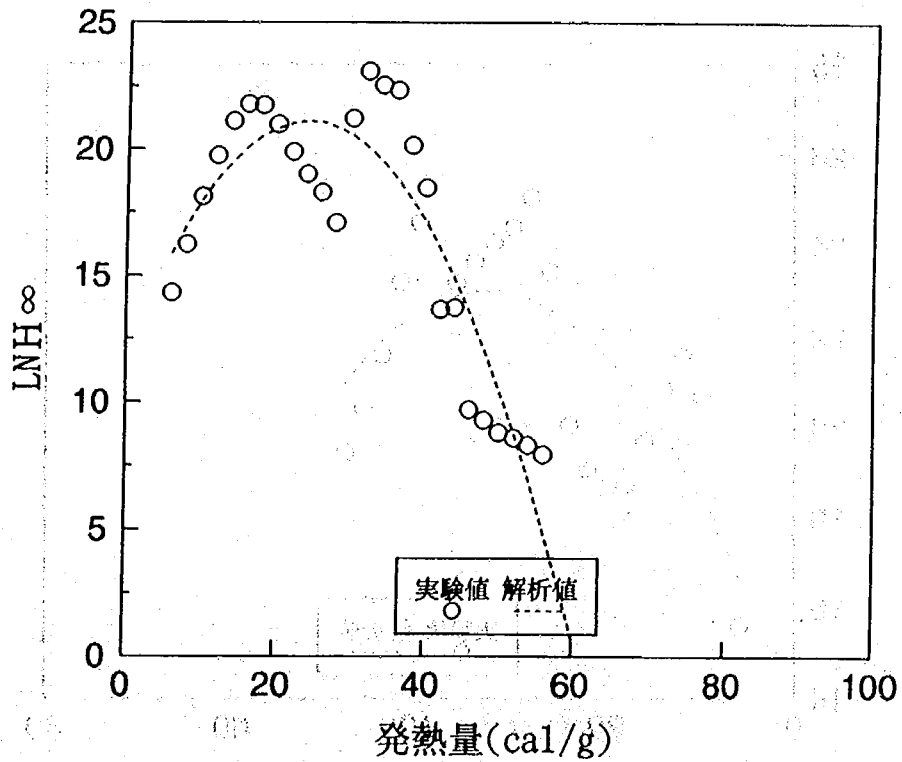
付図 - 4. 3 積算発熱量と温度活性の関係 (NS60(4))



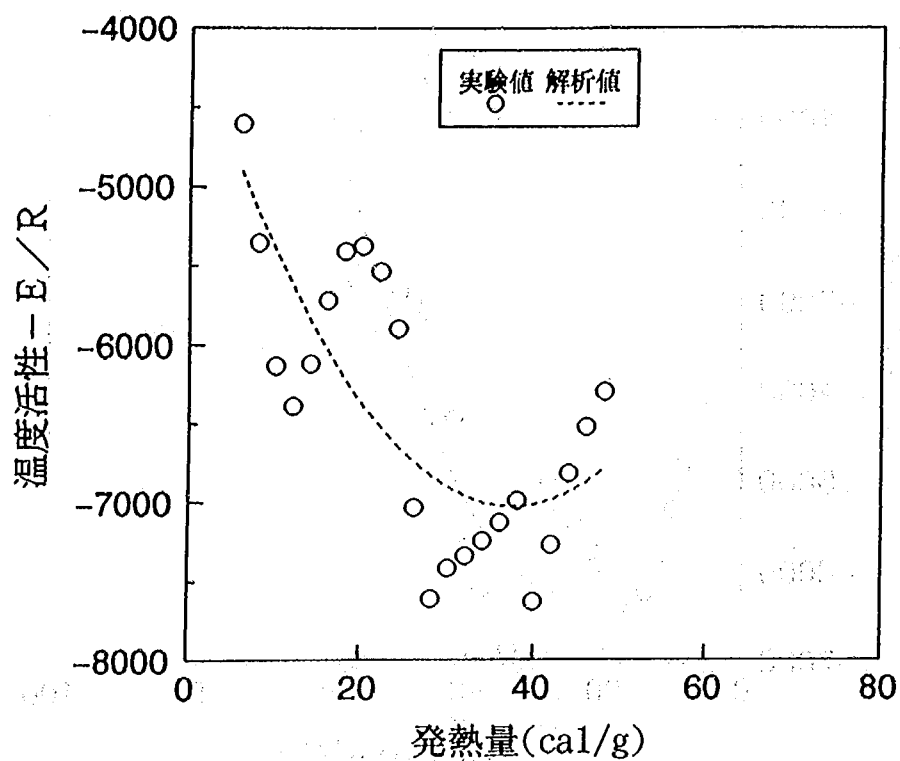
付図 - 4. 3 積算発熱量と限界発熱速度の関係 (NS60(4))



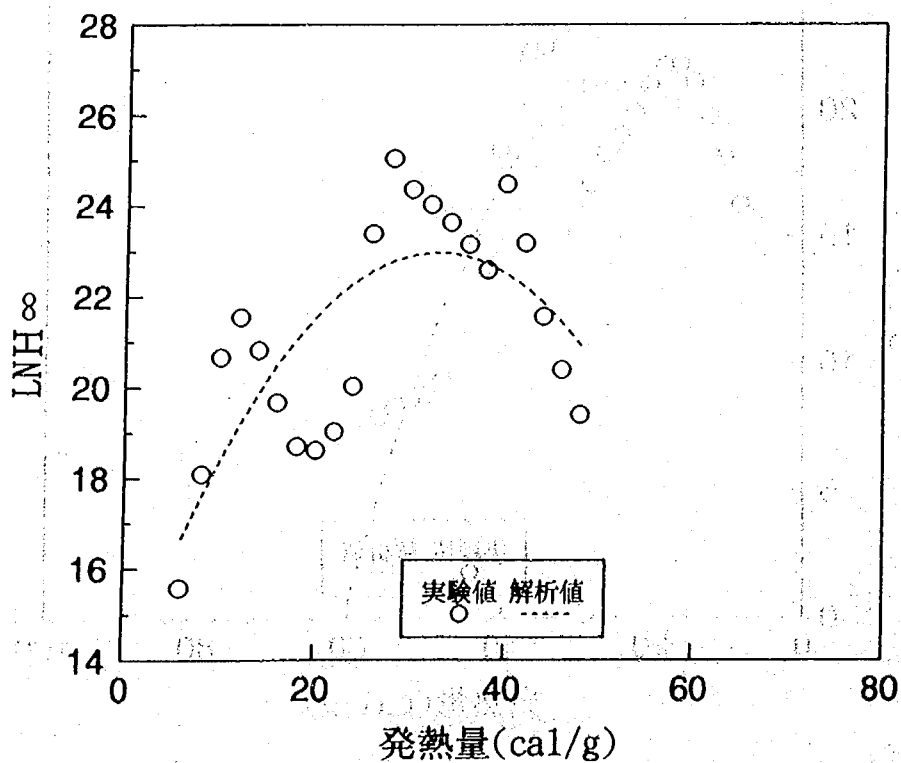
付図 - 4. 3 積算発熱量と温度活性の関係 (NS70(4))



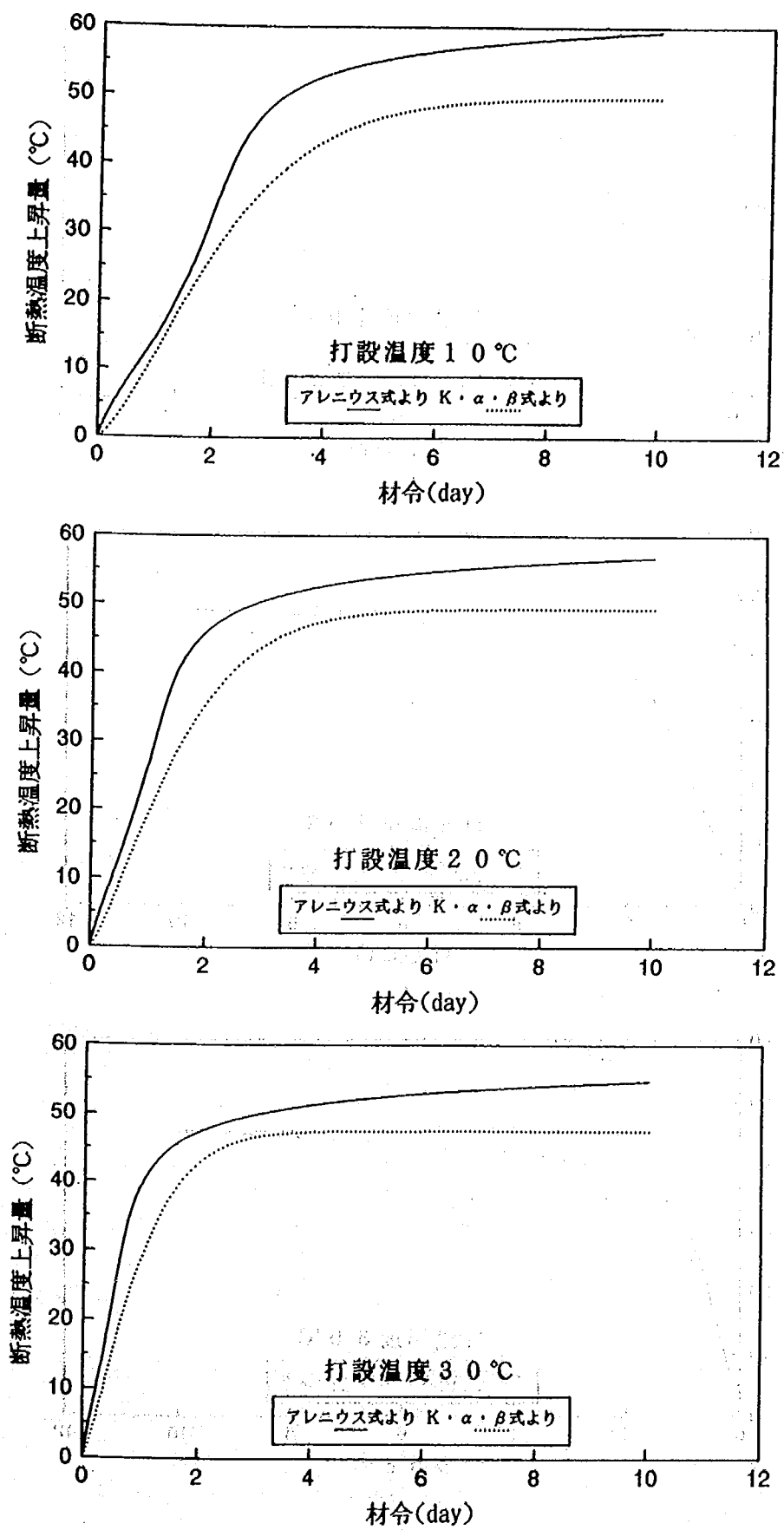
付図 - 4. 3 積算発熱量と限界発熱速度の関係 (NS70(4))



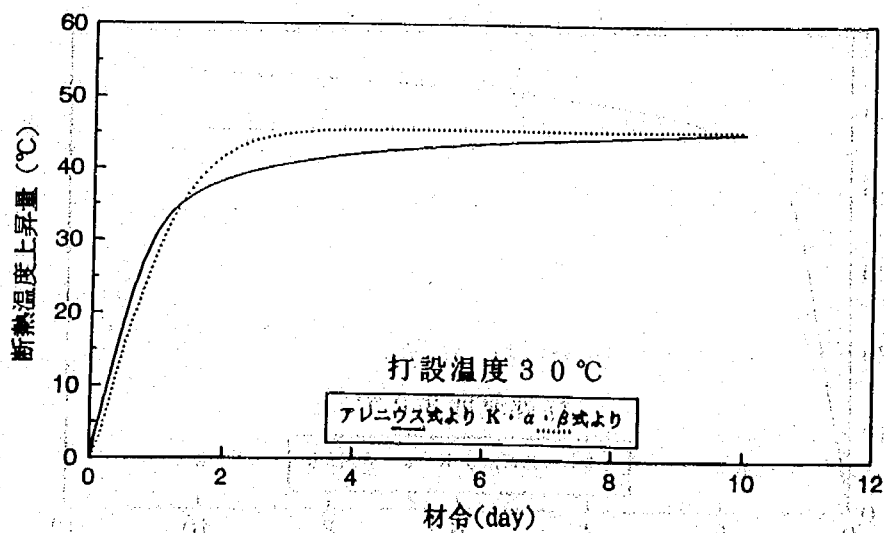
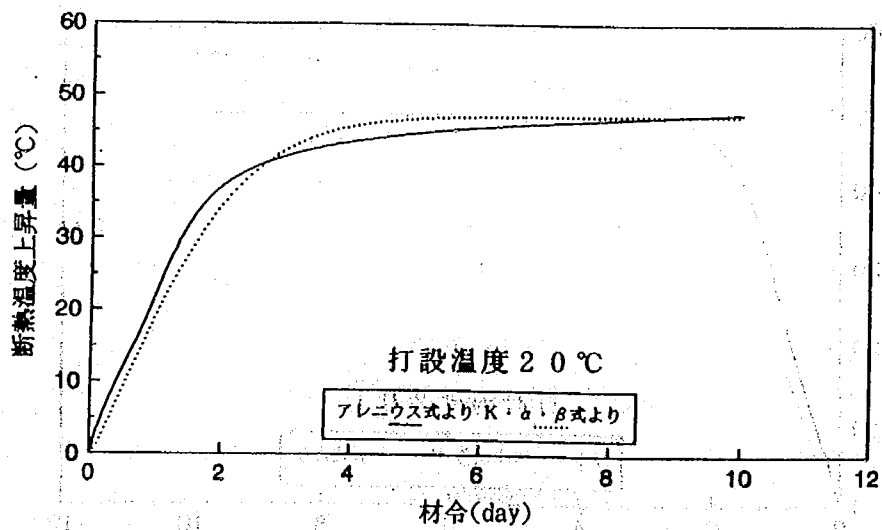
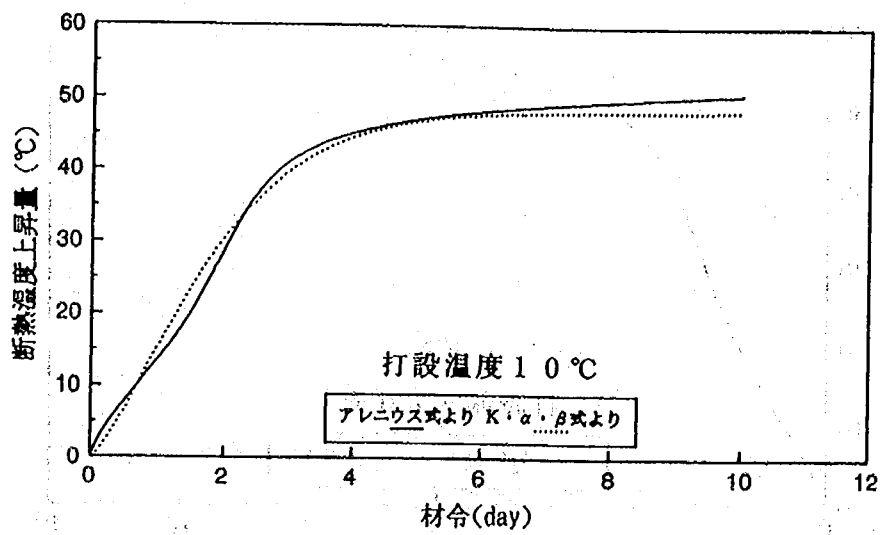
付図-4. 3 積算発熱量と温度活性の関係 (NS80(4))



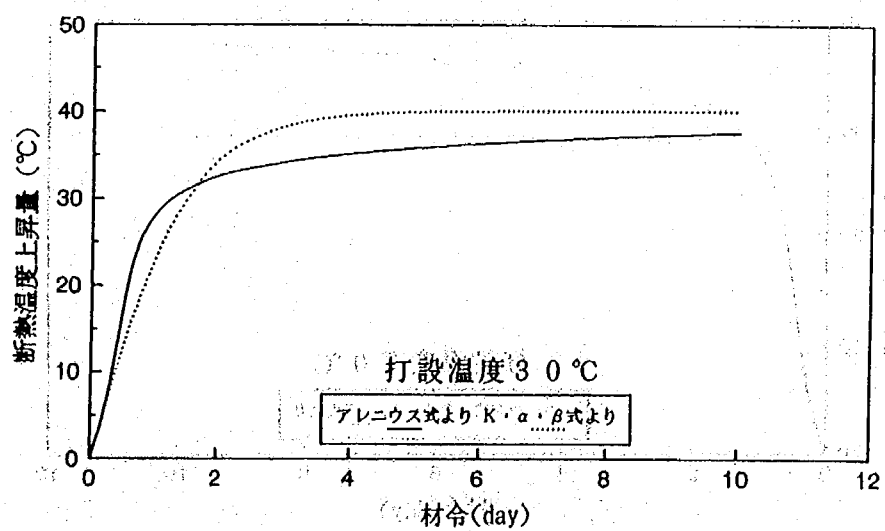
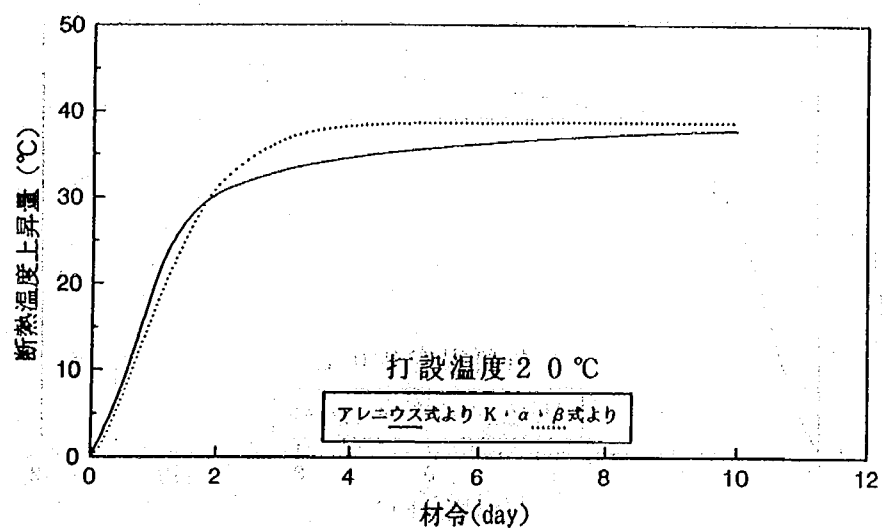
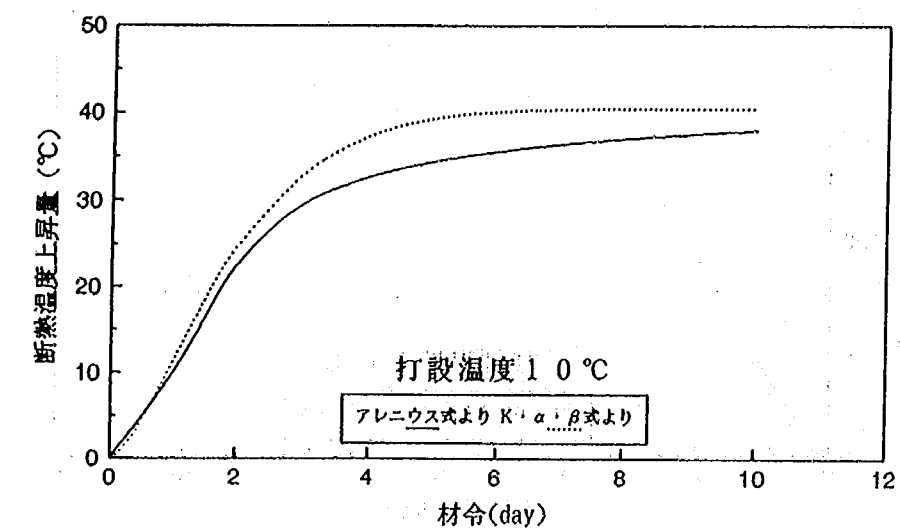
付図-4. 3 積算発熱量と限界発熱速度の関係 (NS80(4))



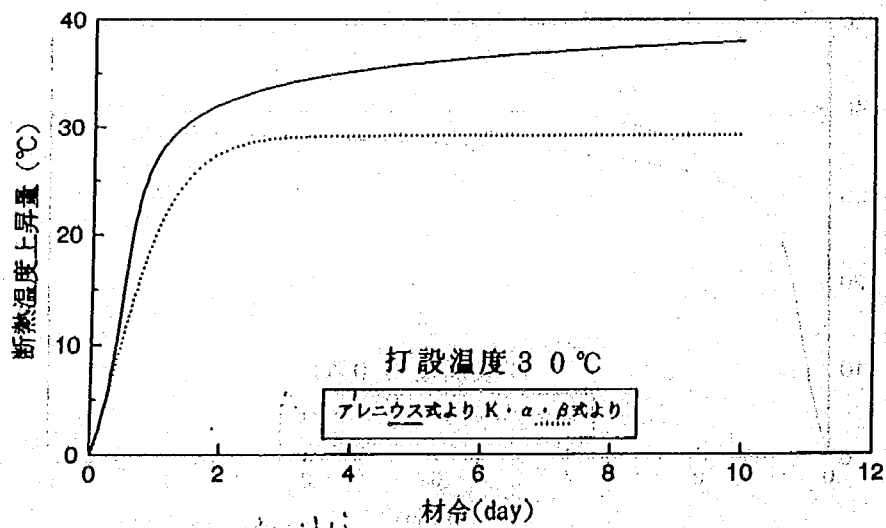
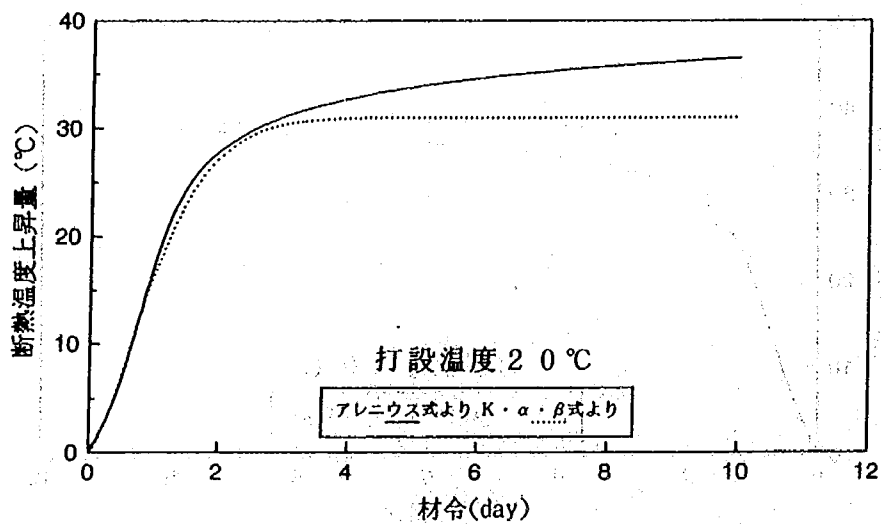
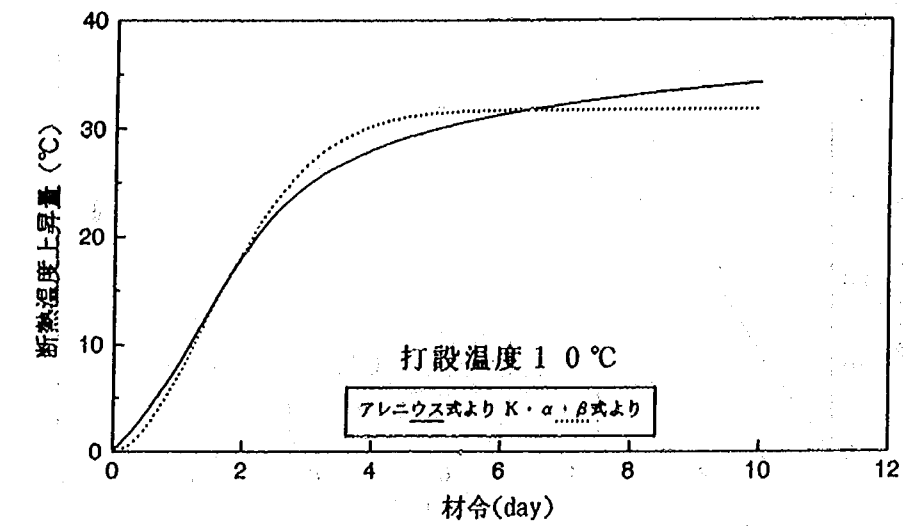
付図-4.4 断熱温度上昇予測結果 (NS50(4))



付図-4. 4 断熱温度上昇予測結果 (NS60(4))



付図一 4.4.4 断熱温度上昇予測結果 (N S 7.0 (4))



付図-4.4 断熱温度上昇予測結果 (NS80(4))

高炉スラグ微粉末混入コンクリートの
断熱温度上昇に関する検討

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3151号
平成4年11月 (1992)

河野広隆・森濱和正・渡辺博志・
高橋弘人・森田良美・山本 一・
松井 淳

要旨： ダム用コンクリートに高炉スラグ微粉末（スラグ）を混入した場合の
温度特性を調べ、断熱温度上昇の予測法の検討を行った。

コンクリートの断熱温度上昇特性に大きな影響を与えるスラグの水和発熱速度の
温度依存性を調べるため、セメントペーストの水和発熱特性およびコンクリートの
断熱温度上昇試験を行い、この温度依存性をコンクリートの断熱温度上昇推定解析
に組み込むための簡易な手法の開発を試みたものである。

キーワード：高炉スラグ微粉末、水和熱、断熱温度上昇、温度依存性

郵便はがき

切手
はって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

コンクリート研究室 御中

No. 0003

No. 0003

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3151号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印