

## 水和熱抑制型膨張材添加量がコンクリートの強度発現性状に及ぼす影響

Influence by Dosage of Hydration Heat Control Type Expansive Admixture on Strength Gain Property of Concrete

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 ○学生員 畠田 聖史(SHIMADA Toshihito)  
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 澤村 秀治(SAWAMURA Shuji)  
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 橋本紳一郎(HASHIMOTO Shinichiro)  
 アイレック技建(株) 営業開発本部 永島 裕二(NAGASHIMA Yuji)

## 1. はじめに

外部拘束を受けるマスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御対策として、膨張材を用いる手法がある。この場合には、膨張材によるケミカルプレストレスの導入と温度降下時の収縮補償による発生引張応力の緩和とひび割れ制御効果を期待しているが、マスコンクリート構造物のように若材齢時に激しい温度変化を受ける場合には、膨張材の反応挙動は複雑となる。よって、膨張材を用いたコンクリートの温度応力解析を高い精度で行い、効果的なひび割れ制御対策を立案するためには、膨張材の反応の温度依存性を正確に評価しなければならない。また、マスコンクリート用として用いられる水和熱抑制型膨張材は、高温時に反応速度、強度発現速度が低下するという特殊な温度依存性を有しているため、これが評価をいっそう難しくしている<sup>1)</sup>。

筆者らは、若材齢コンクリートの強度発現・剛性の変化を、超音波伝播速度によって連続かつ自動的に計測する方法を開発し、これを用いた計測結果を基に、水和熱抑制型膨張材を用いたコンクリートの、超若材齢時からの弾性係数の変化の温度依存性を非線形アーレニウスプロットによりモデル化できることを示している<sup>2)3)4)</sup>。

しかしながら、これまでの実験データは膨張材量を標準添加量とした種類の配合に対するものであり、汎用的なものではない。また、高温時に反応速度が遅延する特殊な温度依存性の程度は、水和熱抑制型膨張材の添加量に支配されるので、これらを定量化するために膨張材量をパラメータとしたデータの蓄積が必要である。

そこで本研究では、膨張材添加量を変えたコンクリートの超音波伝播速度の変化を様々な温度水準で計測し、水和熱抑制型膨張材の添加量が超音波伝播速度のアーレニウスプロットに与える影響を解析し、コンクリートの強度発現性状に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および配合

表-1 に本実験で用いたコンクリートの配合を、表-2 に使用材料を示す。配合 R は、水結合材比を 55%とし、普通ポルトランドセメントに CSA 系水和熱抑制型膨張混和材をそれぞれ 10, 25, 30kg/m<sup>3</sup> 使用した膨張コンクリートである。配合 N は、比較のために普通ポルトランドセメントのみを使用した普通コンクリートである。

## 2.2 供試体および計測方法

超音波伝播速度の測定は、温度依存性を評価するために

表-1 コンクリートの配合

Name	W/C %	s/a %	単位質量(Kg/m <sup>3</sup> )						AE減水剤	AE助剤
			W	C	Ex	S	G			
N	55	42	168	305.5	0	754	1083	4.6	2.1	
R10				295.5	10	753	1082			
R25				280.5	25	753	1081			
R30				275.5	30	753	1081			

表-2 使用材料一覧

名称	仕様等	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
膨張混和材(R)	CSA系水和熱抑制型	2.83
細骨材	函館市豊原産天然砂	2.65
粗骨材	上磯峯産砕石2005	2.70
混和剤	AE減水剤標準型	1.07
助剤	空気量調整剤	1.00

表-3 実験温度水準

打設・養生温度								
N	8°C	20°C	30°C					
R10	10°C	15°C	18°C	21°C	24°C	28°C	30°C	34°C
R25	10°C	15°C	20°C	24°C	28°C	31°C	35°C	38°C
R30	12°C	24°C	30°C	33°C	35°C			

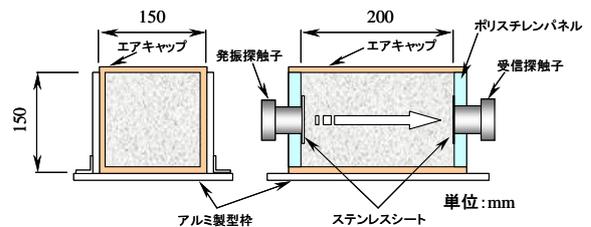


図-1 超音波伝播速度計測供試体

表-3 に示す水準の打設・養生温度に対する実験を行った。超音波伝播速度計測用供試体を図-1に示す。コンクリートを打設した供試体は、所定の温度に設定した恒温槽の中で養生し、超音波伝播速度の測定には自動計測システム<sup>3)</sup>を使用した。

## 3. 超音波伝播速度の温度依存性の評価

## 3.1 材齢と超音波伝播速度の関係

図-2 に打設・養生温度が低温(約 10°C)場合、図-3 に打設・養生温度が高温(約 30°C)である場合の材齢と超音波伝播速度の関係を示す。

図-2 には、表-1 に示す各配合の低温時における計測結果を合わせて示しているが、それぞれ滑らかな超音波伝播

速度の上昇が見られ、またほぼ同一のラインをたどっている。このことから、低温時には、水和熱抑制型膨張材を含む温度感応型遅延剤の効果は小さく、また膨張材添加量がコンクリートの強度発現性状に及ぼす影響は少ないと言える。

図-3 は高温時における各配合の超音波伝播速度の計測結果である。低温時とは異なり、膨張コンクリートの超音波伝播速度の発現は普通コンクリートよりも遅れ、また膨張材添加量が増加するにつれてその遅延傾向が大きくなる。配合 R30 が配合 N と同一の超音波伝播速度に至るまでに、材齢で約 2 日も要していることがわかる。これは、打設・養生温度が高温になったことにより温度感応型遅延剤が活性化され、また膨張材添加量の増加に伴ってその遅延効果も増していることを表している。このことから、高温時に反応速度が遅延する特殊な温度依存性の程度は、水和熱抑制型膨張材の添加量に支配されていることがわかり、今回の計測結果はその傾向を明瞭に捉えたといえる。

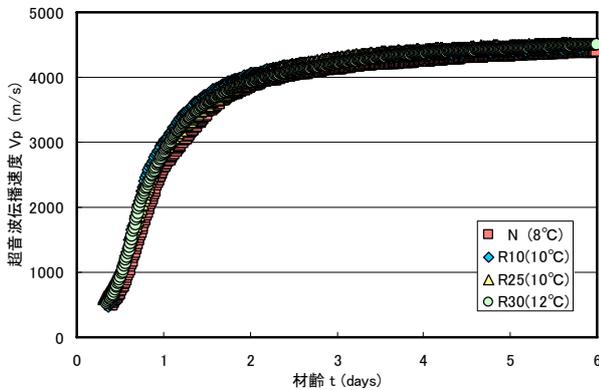


図-2 材齢と超音波伝播速度(低温時)

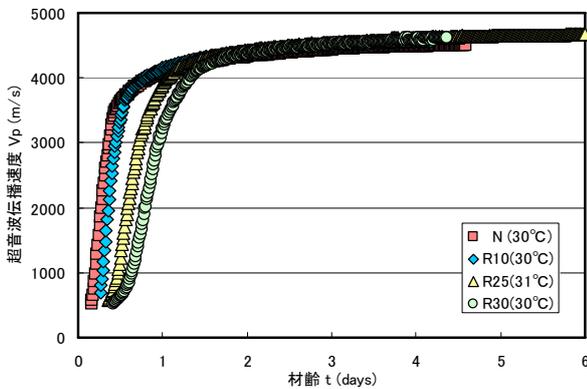


図-3 材齢と超音波伝播速度(高温時)

### 3.2 アーレニウスプロットによる温度依存性の評価

水和反応などの化学反応は、反応温度を変えると反応速度が著しく変化する。このような反応温度と反応速度の定量的な関係は、アーレニウスプロットによって表現できる。そこで本研究では、圧縮強度や弾性係数に寄与する水和反応の反応過程挙動を、剛性の変化を表すパラメータの1つとみなすことができる超音波伝播速度によって間接的に評価できると考え<sup>4)</sup>、反応速度を超音波伝播速度変化率  $\ln(dV_p/dt)$  に置き換え、アーレニウスプロットによってその温度依存性について評価・検討を行うこととした。

図-4 に各配合の超音波伝播速度  $V_p=900\text{m/s}$  におけるアーレニウスプロットを、図-5 に各配合の  $V_p=3000\text{m/s}$  におけるアーレニウスプロットを、図-6 に各配合の  $V_p=4200\text{m/s}$  におけるアーレニウスプロットを示す。

図-4 より、配合 N と配合 R10 のアーレニウスプロットは概ね直線性を示すのに対し、配合 R25 と配合 R30 のアーレニウスプロットは絶対温度の逆数  $1/T=0.00335$  ( $25.5^\circ\text{C}$ ) 付近を境に屈曲する傾向が表れている。配合 R10 のアーレニウスプロットは、低温域では配合 N と重なるが、高温域の  $\ln(dV_p/dt)$  の値は若干下回っている。配合 R25 と配合 R30 は、すべての温度範囲において、ともに配合 N・配合 R10 の  $\ln(dV_p/dt)$  を下回るが、高温域においては著しい  $\ln(dV_p/dt)$  の低下が見られる。この  $\ln(dV_p/dt)$  の低下傾向は、高温になるほど顕著に表れる。すなわち、膨張材添加量  $10\text{ kg/m}^3$  ではどの温度でも遅延効果は小さいが、 $25, 30\text{ kg/m}^3$  と膨張材添

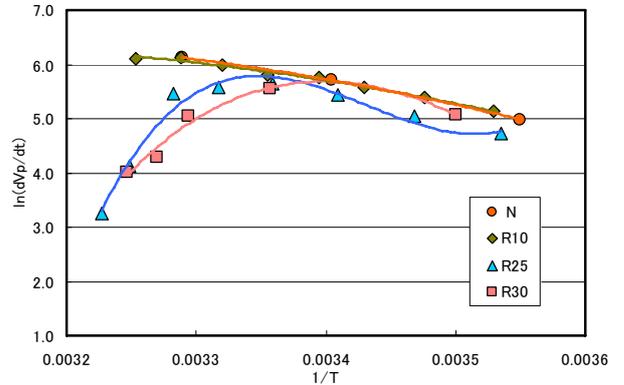


図-4 アーレニウスプロット ( $V_p=900\text{m/s}$ )

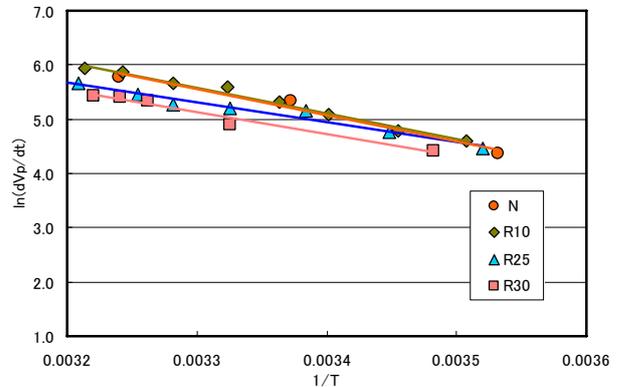


図-5 アーレニウスプロット ( $V_p=3000\text{m/s}$ )

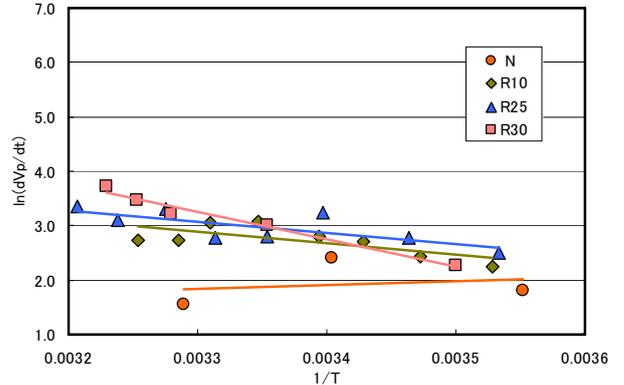


図-6 アーレニウスプロット ( $V_p=4200\text{m/s}$ )

加量が増えると遅延効果は大きくなり、コンクリート温度が高くなるほど遅延効果は更に大きくなる。

図-5 に示す  $V_p=3000\text{m/s}$  の結果は、どの配合においてもアーレニウスプロットは直線的な傾向を示している。すなわち、 $V_p=3000\text{m/s}$  のレベルでは  $1/T$  と  $\ln(dV_p/dt)$  の関係において、温度に対して活性化エネルギーが一定の値をとると考えてよい。配合 R25, 配合 R30 の  $\ln(dV_p/dt)$  の値は、全温度域で配合 N の値を下回るものの、その差は小さい。

図-6 に示す  $V_p=4200\text{m/s}$  の結果では、図-5 と同じようにどの配合においてもアーレニウスプロットは直線性を示しているが、普通コンクリートと膨張コンクリートの超音波伝播速度変化率の関係が逆転し、膨張材添加量が増えるほど  $\ln(dV_p/dt)$  が大きくなるという傾向が見られた。これは、配合 N の強度発現、すなわち水和反応が終息に近づいているのに対し、膨張材の混入によって強度発現が遅延した膨張コンクリートは、まだ強度発現途上にあるということを示している。ここでは、配合 R30 のみ低温域において  $\ln(dV_p/dt)$  の値が小さくなり、配合 N とほぼ同じ値をとっている。これは低温域における配合 R30 の測定データの不足に原因があると思われるので、今後データを蓄積し検証する必要がある。

#### 4. 膨張材添加による反応速度の遅延効果の検討

##### 4.1 超音波伝播速度とアーレニウスプロットの関係

図-7 は、配合 R10 のアーレニウスプロットを超音波伝播速度別に表示したものである。x軸が絶対温度の逆数  $1/T$ 、y軸が超音波伝播速度  $V_p$ 、z軸が超音波伝播速度変化率の対数  $\ln(dV_p/dt)$  となっている。図-7 から、アーレニウスプロットが直線となることから配合 R10 の活性化エネルギーは配合 N と同様に、温度に対しては一定で、超音波伝播速度の増加に依存する値であることがわかる。図-8 は、配合 R30 のアーレニウスプロットを超音波伝播速度別に表示したものである。若材齢でかつ高温域では  $\ln(dV_p/dt)$  が著しく低下するという特殊な温度依存性が見られる。 $V_p=2500\text{m/s}$  付近を境に、それ未満の若材齢では、アーレニウスプロットの勾配、すなわち活性化エネルギーは超音波伝播速度と温度の双方に依存し、それ以上では温度に対して一定で、超音波伝播速度のみに依存することがわかる。

##### 4.2 強度発現遅延効果の定量化

図-9, 図-10 は、配合 N のアーレニウスプロットを基準として、配合 R10, 配合 R30 が持つ水和熱抑制型膨張材の強度発現遅延効果を抽出したものである。これらの図は、それぞれの配合のアーレニウスプロットから、配合 N のアーレニウスプロットを差し引くことによって遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  を求め、 $\Delta \ln(dV_p/dt)$  を  $V_p$ ,  $1/T$  の3次元空間にプロットしたものである。この図においては、配合 N を基準に、 $\Delta \ln(dV_p/dt)$  の値がマイナスの場合には強度発現が遅延傾向、プラスの場合には促進傾向であることを示している。

図-9 に示す水和熱抑制型膨張材を  $10\text{kg/m}^3$  添加した配合 R10 の場合は、超音波伝播速度が小さい若材齢時の高温領域で若干の強度発現遅延傾向が認められるものの、遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  の値はゼロ付近にあり、膨張

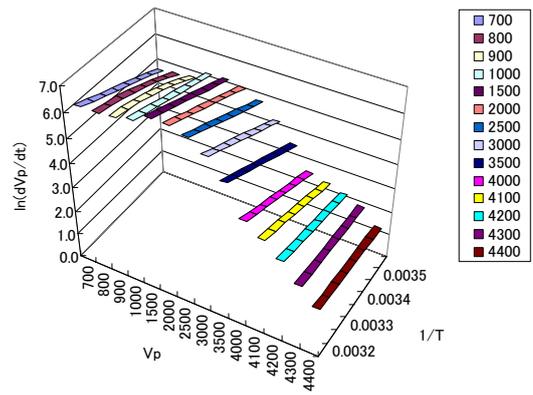


図-7 超音波伝播速度とアーレニウスプロット(配合 R10)

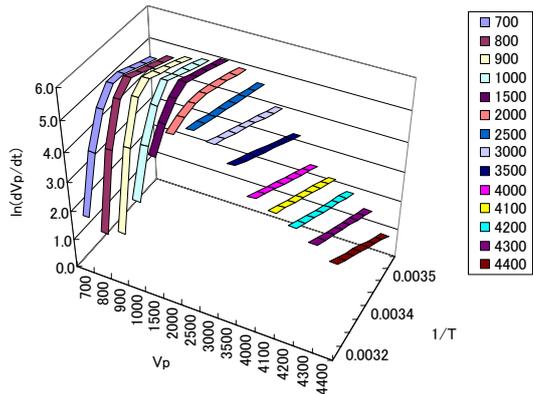


図-8 超音波伝播速度とアーレニウスプロット(配合 R30)

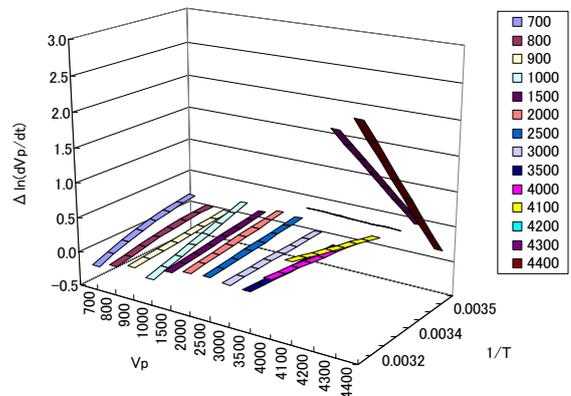


図-9 超音波伝播速度と遅延パラメータの関係(配合 R10)

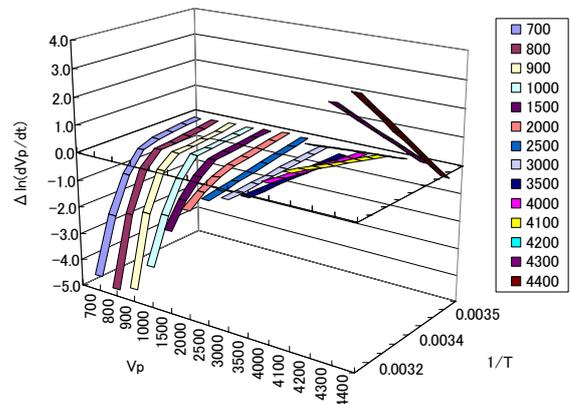


図-10 超音波伝播速度と遅延パラメータの関係(配合 R30)

材を用いない配合 N との差は顕著ではない。

図-10 に示す水和熱抑制型膨張材を  $30\text{kg/m}^3$  添加した配合 R30 の場合は、超音波伝播速度が  $2500\text{m/s}$  未満の若材齢でかつ高温の領域で、遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  の値が大きくマイナス側に向かう。このように、水和熱抑制型膨張材の添加量が多い場合は、若材齢高温域での強度発現遅延傾向が顕著になる。

図-9, 図-10 に共通して、超音波伝播速度が大きい領域で遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  の値が大きくプラス側の値を示す部分がある。この領域では、水和熱抑制型膨張材を添加しない配合 N では水和反応が既に終息に近いのに対し、水和熱抑制型膨張材を添加した配合 R10, R30 は、全体的に強度発現が遅延傾向のため、超音波伝播速

度が大きい領域まで緩やかに水和反応が継続しているためと考えるが、超音波伝播速度の終局値が、配合 N に比べて配合 R のほうが若干大きいことも要因となっている。

図-11～図-13 は遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  を補間し、3次元空間に曲面表示したものである。この曲面モデルに、ある任意の時刻の超音波伝播速度  $V_p$  と、その時刻のコンクリートの絶対温度の逆数  $1/T$  を代入すると、その時点における遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  を求めることができる。

## 5. まとめ

本研究では、水和熱抑制型膨張材の添加量が、コンクリートの強度発現性状に及ぼす影響を把握することを目的とし、膨張材添加量とコンクリート温度を要因とした超音波伝播速度の連続自動計測実験を行った。それらのデータを検討した結果、以下のような知見を得た。

- ① コンクリート温度が低いときには、膨張材添加量にかかわらず、水和熱抑制型膨張材による強度発現遅延効果は顕著ではない。
- ② 配合 R10 は配合 N と同様にアーレニウスプロットが直線になり、膨張材添加量  $10\text{kg/m}^3$  程度では強度発現の遅延効果はほとんど認められない。
- ③ 配合 R25 と配合 R30 のアーレニウスプロットは直線にはならず、若材齢高温域で超音波伝播速度変化率、すなわち強度発現速度の低下が著しい。水和熱抑制型膨張材の強度発現遅延効果は膨張材添加量に支配され、膨張材添加量が多いほど遅延傾向が顕著になる。
- ④ プレーンコンクリート（配合 N）を基準に、アーレニウスプロットの差をとることによって、遅延パラメータ  $\Delta \ln(dV_p/dt)$  を定義することができる。

今後は、遅延パラメータと水和熱抑制型膨張材添加量の関係を精査し、水和熱抑制型膨張材添加量に及ぼす影響の定量化を試みたい。

謝辞：本研究は、平成 18 年度科学研究費補助金 基盤研究(C) 課題番号:18560456(代表:澤村秀治)により遂行したものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 相馬直樹・吉田安寿・澤村秀治：膨張コンクリートの自由膨張ひずみの温度依存性に関する検討，平成16年度土木学会北海道支部論文報告集第61号，V-9，2005.2
- 2) 臼井裕規・澤村秀治：超音波伝播速度による若材齢コンクリートの強度特性評価に関する研究，平成17年度土木学会北海道支部論文報告集第62号，V-18，2006.2
- 3) 川尻峻三・澤村秀治・橋本紳一郎・永島裕二：超音波伝播速度による膨張コンクリート強度発現特性の評価，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，5-495，2006.9
- 4) 澤村秀治・須藤卓哉・丸山久一・永島裕二：超音波伝播速度による水和熱抑制型膨張コンクリートの強度発現特性の評価，コンクリート工学年次論文集，第29巻，705-710，2007.7

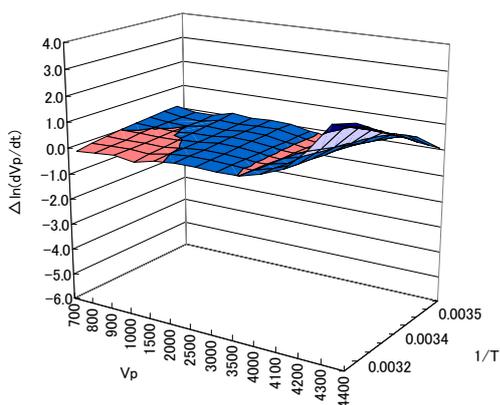


図-11 遅延パラメータの曲面表示(配合 R10)

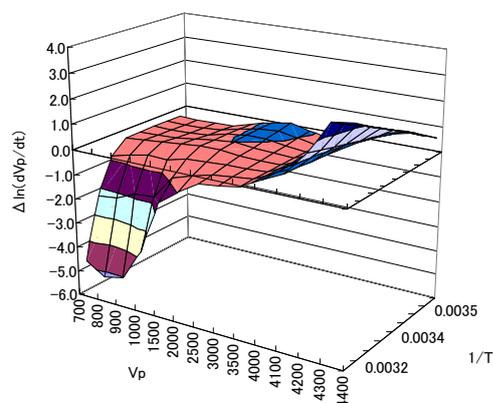


図-12 遅延パラメータの曲面表示(配合 R25)

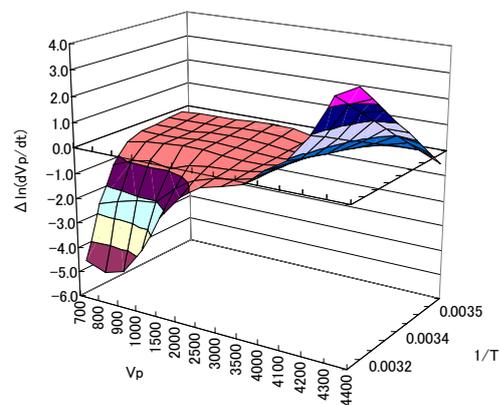


図-13 遅延パラメータの曲面表示(配合 R30)