

ファインマン- α 法における 階差フィルターの適用

1997年11月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

ファインマン- α 法における階差フィルターの適用

毛利智聡、大谷暢夫^{*)}

要旨

核燃料施設の未臨界度モニターにおける測定手法のひとつとして、炉雑音解析法のひとつであるファインマン- α 法の開発を進めている。

中性子計数の単位時間内の統計的変動を評価するファインマン- α 法は、統計変動を平滑化した平均中性子束が、時間的に変化する様な過渡状態の体系には適用が困難である。時間的に変化する体系にファインマン- α 法を適用する手法として、中性子計数データを階差フィルターで処理し、中性子束の平均的な変化の成分を除去する方法が提案されている。

本研究では、階差フィルターによる処理が、ファインマン- α 法において遅発中性子の影響を除去する為にも同等の効果がある事に着目し、遅発中性子の影響が顕著に現れ、即発中性子減衰定数の評価が困難となる臨界近傍の炉雑音データに階差フィルターを適用した。階差フィルターを通した実効増倍率 0.999 から 0.994 までの炉雑音データに対して、ファインマン- α 法による評価を行う事によって、即発中性子減衰定数が正しく求められる事を明らかにした。

階差フィルターがファインマン- α 法による即発中性子減衰定数の評価に有効である事が確認された事によって、ファインマン- α 法を過渡状態の体系に適用できる見通しが得られた。

^{*)} 大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室

Application of Difference Filter to Feynman- α Analysis

Tomoaki MOURI and Nobuo OHTANI*)

Abstract

The Feynman- α method has been developed for monitoring sub-criticality in nuclear fuel facilities.

It is difficult to apply the Feynman- α method which estimates statistical variation of the number of neutron counts per unit time, to the system in transient condition such that the averaged neutron flux varies with time. In the application of Feynman- α method to such system, it is suggested to remove the averaged variation of neutron flux from neutron count data by the use of the difference filter.

In this study, we applied the difference filter to reactor noise data at sub-criticality near to criticality, where the prompt decay constant was difficult to estimate due to the large effect of delayed neutron.

With the difference filter, accurate prompt decay constants for effective multiplication factors from 0.999 to 0.994 were obtained by Feynman- α method.

It was cleared that the difference filter is effective to estimate accurate prompt decay constant, so that there is the prospect to be able to apply Feynman- α method having the difference filter to the system in the transient condition.

*) Criticality Engineering Section, Experimental Reactor Division,
O-Arai Engineering Center, PNC

目 次

要旨	I
Abstract	II
目次	III
図表一覧	IV
1. 緒言	1
2. 炉雑音データ解析式	3
2.1 階差フィルターの定義	3
2.2 階差フィルターを適用したファインマン- α 法	4
3. 解析法の評価	6
3.1 測定体系と測定システム	6
3.2 適用性評価	7
4. まとめと今後の計画	9
謝辞	10
参考文献	10

図表一覧

(表)

表 1	測定体系	11
表 2	測定条件	11
表 3	α 値の評価結果	12
表 4	α 値の評価結果 (遅発補正項の検討)	12

(図)

図 1	D C A 炉心構造図	13
図 2 (1)	測定炉心体系と検出器配置(ケース 1 ~ ケース 4)	14
図 2 (2)	測定炉心体系と検出器配置(ケース 5 ~ ケース 7)	15
図 3	ファインマン- α 法測定システム	16
図 4	フィルター非適用結果($K_{eff}=0.999$)	17
図 5	1 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.999$)	17
図 6	2 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.999$)	18
図 7	3 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.999$)	18
図 8	フィルター非適用結果($K_{eff}=0.997$)	19
図 9	1 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.997$)	19
図 10	2 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.997$)	20
図 11	3 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.997$)	20
図 12	フィルター非適用結果($K_{eff}=0.996$)	21
図 13	1 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.996$)	21
図 14	2 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.996$)	22
図 15	3 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.996$)	22
図 16	フィルター非適用結果($K_{eff}=0.994$)	23
図 17	1 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.994$)	23
図 18	2 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.994$)	24
図 19	3 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.994$)	24
図 20	フィルター非適用結果($K_{eff}=0.867$)	25
図 21	1 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.867$)	25
図 22	2 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.867$)	26
図 23	3 次階差フィルター適用結果($K_{eff}=0.867$)	26
図 24	フィルター非適用結果($K_{eff}=0.811$)	27

図25	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.811)	27
図26	2次階差フィルター適用結果(Keff=0.811)	28
図27	3次階差フィルター適用結果(Keff=0.811)	28
図28	フィルター非適用結果(Keff=0.663)	29
図29	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.663)	29
図30	2次階差フィルター適用結果(Keff=0.663)	30
図31	3次階差フィルター適用結果(Keff=0.663)	30
図32	階差フィルター非適用結果(Keff=0.999) (1次遅発項考慮)	31
図33	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.999) (2次遅発項考慮)	31
図34	階差フィルター非適用結果(Keff=0.997) (1次遅発項考慮)	32
図35	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.997) (2次遅発項考慮)	32
図36	階差フィルター非適用結果(Keff=0.996) (1次遅発項考慮)	33
図37	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.996) (2次遅発項考慮)	33
図38	階差フィルター非適用結果(Keff=0.994) (1次遅発項考慮)	34
図39	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.994) (2次遅発項考慮)	34
図40	階差フィルター非適用結果(Keff=0.867) (1次遅発項考慮)	35
図41	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.867) (2次遅発項考慮)	35
図42	階差フィルター非適用結果(Keff=0.811) (1次遅発項考慮)	36
図43	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.811) (2次遅発項考慮)	36
図44	階差フィルター非適用結果(Keff=0.663) (1次遅発項考慮)	37
図45	1次階差フィルター適用結果(Keff=0.663) (2次遅発項考慮)	37

1. 緒言

大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室では、高速炉燃料再処理施設等の核燃料施設の臨界安全管理の信頼性向上と臨界安全設計の合理化に資することを目的として、未臨界度すなわち実効増倍率のモニター技術の開発を実施している。未臨界度モニターは、核燃料物質を含む体系の時間変化(核燃料物質の濃度変化、燃料溶液の液位の時間変化、等)に対して、体系の実効増倍率の変化を測定によって検知する。核燃料施設で問題となる実効増倍率は、約0.5から0.9程度までの低い実効増倍率であり、原子炉炉心で問題となる実効増倍率が、臨界である1.0から完全な停止状態である0.95程度までであるのと比較すると極端に低い値である。この様な低い実効増倍率の安定した測定は新しい技術であるが、臨界データによる検証に基づく数値評価のみを根拠とする現在の核燃料施設の臨界安全の確保を、未臨界を直接測定によって監視するシステムに変更することを目標とする。

実効増倍率測定または未臨界度モニターに用いる物理的な手法として、炉雑音解析法のひとつであるファインマン-アルファ法^{(1),(2),(3)}の開発を進めている。炉雑音測定は、臨界近傍の体系については臨界集合体における古典的な実験手法として確立しているが、核燃料施設で問題となるような低い実効増倍率($k_{\text{eff}} \ll \sim 0.9$)の測定については経験が少なく、測定の可能性の確認が必要であった。DCAのATR型のクラスター燃料重水減速炉心にファインマン-アルファ法を適用した測定では、臨界近傍($K_{\text{eff}} \sim 0.98$)から非常に低い $K_{\text{eff}} \sim 0.3$ 程度の実効増倍率までの検出(厳密には実効増倍率の関数である α 値の検出)が可能であることが確認された。

核燃料施設に適用される未臨界度モニターにおいては、未臨界度の実時間測定が必要である。即ち、所定の時間内に実効増倍率の変化が検知される必要がある。臨界工学試験室では、計算機用のLAN回線をデータ転送に用いるマルチチャンネルスケーラーと高速のCPUを持つワークステーションで構成されたファインマン-アルファ法によるモニターシステムを試作し、上記と同様にDCAのATR炉心体系において、体系の実効増倍率が0.9になったことが1分程度で検知できることを確認した。^{(4),(5)} しかしながら、これまで検討されてきた炉雑音解析法では、未臨界度の評価に要求される統計精度を持つ炉雑音データを取得する間は、平均的な中性子束が定常であることが原理的に必要である。即ち、ファインマン-アルファ法の統計評価やミハルツ法に用いられる周波数解析(高速フーリエ変換)では、長時間にわたる雑音データを一括して評価する為、例えば、体系の平均中性子束がゆるやかに上昇または下降していると、ゆるやかな変化が統計的な変動(雑音)の評価に含まれてしまい、正しい評価を得ることができない。ファインマン-アルファ法では、所定の時間間隔に計数される中性子の個数の分布が、核分裂連鎖がない場合のポアソン分布からどの程度ずれるかを、通常"Y"で表される時間間隔の関数で評価する。関数"Y"は、定常な未臨界体系の場合は計数時間間隔とともに一定値に収束するが、平均の中性子束が時間的に変化している場合には、時間間隔の増加とともに一定値に収束せず、単調に増大していくことが知られている。

ファインマン-アルファ法のデータ解析において、平均中性子束の時間変化があっても正しい実効増倍率、厳密には即発中性子減衰定数を得る事ができるデータ処理法として、直接の測定データであるマルチチャンネルスケーラーで測定された中性子計数データに、階差フィルターを適用する方法が議論されている。階差フィルターを適用する事によって、中性子源が加わった事による中性子束の変化や、体系の変化による実効増倍率の変化に伴う中性子束の変化に対して、ファインマン-アルファ法による実効増倍率の測定値の乱れを安定させる事が期待できるが、実験体系として実効増倍率を変化させずに中性子束を変化させる事が困難であり、未だ実験による確認が実現していない。

一方、ファインマン-アルファ法で評価する関数“Y”は、計数時間間隔の長い所では、遅発中性子の効果によっても漸増する。核燃料施設の未臨界度として対象となる低い実効増倍率では、中性子連鎖の減衰が速く即発中性子減衰定数が大きい為、ファインマン-アルファ法で評価する計数時間間隔が短く、遅発中性子の影響が現れる様な長い時間間隔の計数を評価する必要がないが、もともと即発中性子寿命の長い重水減速のDCAの測定では、臨界近傍のデータであれば遅発中性子の影響を含むデータをとる事が可能である。本研究では、臨界近傍の測定データの処理によって、階差フィルターを通した炉雑音データがファインマン-アルファ法に適用できる事を確認する。

ファインマン-アルファ法による炉雑音解析において、階差フィルターが遅発中性子の影響の除去に有効である事を確認する事によって、これまで未臨界度の評価が困難であった、平均的な中性子束が時間的に変化する体系に対するファインマン-アルファ法の適用について見通しが得られる。

2. 炉雑音データの解析式

2.1 階差フィルターの定義⁶⁾⁷⁾

観測されたデータから予測可能な構造を導き出すために用いられるボックス-ジェンキンス-アプローチ(自己回帰和分移動平均 (ARIMA) 過程)という時系列データの分析方法では、第1段階として、 n 期にわたる実現値を同じ確率過程から生じた n 個のサンプルとみなし、その確率過程の期待値、分散および自己相関を推定するため、非定常な時系列データを近似的に定常な時系列データに変換する。そこでは、時系列データの水準に関するなんらかの系統的变化(トレンド)が存在する非定常な時系列データから、トレンドを除去し、定常な時系列データを得る有効な方法として差分法が使用される。時系列データの差分とは、ある決まった時間間隔において観測値の差をとることである。1階差分は2つの隣接した観測値間の差である。2階差分は1度差分をとった系列の差分を再びとることによって得られる。トレンドを有する非定常時系列データは、下記に示すように、差分処理によりトレンドが除去される。

時系列データ C_k に対して、次式の線形フィルターを適用する。

$$B_k = \sum_{i=-M}^M w_i C_{k+i} \quad (1)$$

(1)式で $M=1, W_{-1}=-1, W_0=1, W_1=0$ とおくと、(2)式は1階差分式となる。

$$B_k = C_k - C_{k-1} \quad (2)$$

(1)式で $M=1, W_{-1}=1, W_0=-2, W_1=1$ とおくと、(3)式は2階差分式となる。

$$B_k = C_{k-1} - 2C_k + C_{k+1} \quad (3)$$

ここで、時系列データが時間 t に対して1次および2次のトレンドをもつと仮定すると、時系列データは、各々(4)式および(5)式の回帰モデルで表すことができる。ただし、トレンド項の母数 β_1, β_2 は一定であると仮定されている。

$$C_t = \beta_0 + \beta_1 t + a_t \quad (4)$$

$$C_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + a_t \quad (5)$$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: 母数

a_t : 互いに独立な攪乱項(異時間に対して相関は0)

(4)式に(2)式の1階差分式、(5)式に(3)式の2階差分式を適用すると、各々、時間 t に対する1次および2次のトレンドが除去された(6)式および(7)式が得られる。

$$B_t = \beta_1 + (a_t - a_{t-1}) \quad (6)$$

$$B_t = 2\beta_2 + (a_{t-1} - 2a_t + a_{t+1}) \quad (7)$$

以上のように、時系列データに差分処理を行ないトレンドを除去する線形フィルターを階差フィルターと言う。ここでは、この階差フィルターがトレンドを除去する性質に着目して、ファインマン- α 解析に適用し、分散に含まれる遅発中性子成分(トレンド)の低減を試みる。

2.2 階差フィルターを適用したファインマン- α 法

通常ファインマン- α 法の解析で使用される時系列のデータの分散と平均の比は次のように表される。〈〉は集合平均、 N はデータ数、 C_k は K 番目の積算計数値、 t はゲート時間幅である。

$$\sigma(t) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (C_k - \bar{C})^2 / \bar{C} \right\rangle \quad (8)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_k$$

(8)式の時系列データに(9)式の線形フィルター処理を適用することにより、一般化された相関量を示す(3)式が得られる。

$$B_k = \sum_{i=-M}^M w_i C_{k+i} \quad (9)$$

$$\sigma(t) = \left\langle \frac{1}{N-2M} \sum_{k=1+M}^{N-M} (B_k - \bar{B})^2 / \bar{C} \right\rangle \quad (10)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{N-2M} \sum_{k=1+M}^{N-M} B_k$$

(10)式を Rice⁸⁾の手法を用いて定式化すると次式が得られる。

$$\sigma(t) = \sum_{i=-M}^M w_i^2 \left\{ 1 + 2\varepsilon D_v \sum_{p=1}^7 \frac{A_p T(s_p)}{s_p} f_p(t) \right\} \quad (11)$$

$T(s)$: 零出力伝達関数

s_p : 零出力伝達関数の極

A_p : $s = s_p$ における留数

$$\theta = \sum_{i=-M}^M w_i^2$$

$$f_p(t) = 1 - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M w_i w_j \left\{ e^{-|i-j|ts_p} - e^{-|i-j+1|ts_p} \right\} / \left(\sum_{i=-M}^M w_i^2 ts_p \right)$$

n 次微分演算子の離散表現から得られる重み関数を採用することにより、以下の n 次階差フィルターを考慮した解析式が得られる ((12)~(15)式)。

① 階差フィルター非適用 (ファインマン- α 法の基礎式、 $M=0, W_0=1$)

$$\sigma_0 = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (C_k - \bar{C})^2 / \bar{C} \right\rangle = 1 + \sum_{p=1}^7 B_p \left\{ 1 - (1 - e^{-\alpha_p \Delta t}) / (\alpha_p \Delta t) \right\} \quad (12)$$

② 1次階差フィルター ($M=1, W_{-1}=-1, W_0=1, W_1=0$)

$$\sigma_1 = \left\langle \frac{1}{N-1} \sum_{k=2}^N (C_k - C_{k-1})^2 / \bar{C} \right\rangle$$

$$= 2 \left[1 + \sum_{p=1}^7 B_p \left\{ 1 - \left(\frac{3}{2} - 2e^{-\alpha_p \Delta t} + \frac{1}{2} e^{-\alpha_p \Delta t} \right) / (\alpha_p \Delta t) \right\} \right] \quad (13)$$

③ 2次階差フィルター (M=1, W₋₁=-1/2, W₀=1, W₁=-1/2)

$$\sigma_2 = \left\langle \frac{1}{N-2} \sum_{k=2}^{N-1} \left(C_k - \frac{1}{2} C_{k-1} - \frac{1}{2} C_{k+1} \right)^2 / \bar{C} \right\rangle$$

$$= \frac{3}{2} \left[1 + \sum_{p=1}^7 B_p \left\{ 1 - \left(\frac{5}{3} - \frac{5}{2} e^{-\alpha_p \Delta t} + e^{-2\alpha_p \Delta t} - \frac{1}{6} e^{-3\alpha_p \Delta t} \right) / (\alpha_p \Delta t) \right\} \right] \quad (14)$$

④ 3次階差フィルター (M=2, W₋₂=1/3, W₋₁=-1, W₀=1, W₁=-1/3, W₂=0)

$$\sigma_3 = \left\langle \frac{1}{N-3} \sum_{k=3}^{N-1} \left(C_k - C_{k-1} - \frac{1}{3} C_{k+1} + \frac{1}{3} C_{k-2} \right)^2 / \bar{C} \right\rangle$$

$$= \frac{20}{9} \left[1 + \sum_{p=1}^7 B_p \left\{ 1 - \left(\frac{7}{4} - \frac{14}{5} e^{-\alpha_p \Delta t} + \frac{7}{5} e^{-2\alpha_p \Delta t} - \frac{2}{5} e^{-3\alpha_p \Delta t} + \frac{1}{20} e^{-4\alpha_p \Delta t} \right) / (\alpha_p \Delta t) \right\} \right] \quad (15)$$

$$B_p = 2\varepsilon D A_p T(s_p) / s_p$$

C_k : k番目の積算時間幅の計数值

N : データ数

Δt : 積算時間幅(sec)

A_p : 定数

α_p : 即発中性子減衰割合(sec⁻¹)

3. 解析法の評価

3.1 測定体系と測定システム

測定は、重水臨界実験装置（以下 DCA と略す。）で行なった。測定を実施した DCA の炉心構造を図 1 に示す。炉心は中心部の試験体領域とその周囲のドライバー領域で構成されている。試験体領域には $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 燃料ピン（0.79wt%Pu-fissile、（深い未臨界度での測定では 17.7wt% PuO_2 ））が 140 本装荷され、ドライバー領域には 1.2wt% UO_2 燃料ピン 28 本で構成される燃料クラスターが 132 体（深い未臨界度での測定では 136 体）装荷されている。ドライバー領域には重水減速材を、試験体領域には軽水減速材を供給することができ、重水水位または軽水水位を変更することにより、反応度を調整する。測定炉心体系の概略を表 1 と図 2 に示す。

測定条件を表 2 に示す。ファインマン- α 法の測定は、実効増倍率 0.994 から 0.999 の範囲の浅い未臨界度と、実効増倍率 0.663 から 0.867 の範囲の深い未臨界度で実施した。浅い未臨界度の実効増倍率は、パルス中性子源法により(16)式から α 値を評価し、計算から求めた β_{eff} （実効遅発中性子割合）と Λ （中性子生成時間）を用いて(17)式より算出した。

$$n(t) = Ae^{-\alpha t} + C \quad (16)$$

$n(t)$: 時間 t における中性子数

t : 時間

A, C : 定数

$$k_{\text{eff}} = 1 / \{1 - (\beta_{\text{eff}} - \alpha\Lambda)\} \quad (17)$$

浅い未臨界度の実効増倍率は、SCALE4.2 コードシステムの臨界解析モジュールを用いて計算した。ファインマン- α 法による評価では、未臨界度に応じて 1/2-inch、1-inch、2-inch の 3 種類の He-3 検出器を使用し、試験体領域中央の挿入孔から、浅い未臨界度での測定では重水減速材水位のほぼ中心位置、深い未臨界度では軽水減速材水位に応じて設置した。パルス中性子源法の評価では、5つの検出器から得られた α 値を平均して求めた。中性子検出器の配置は図 2 に示されている。

ファインマン- α 法の測定システムを図 3 に示す。検出器で検出した信号は、整形増幅された後 Multi Channel Scaler(以下 MCS と略す。)で計数される。計数の制御は Engineering Work Station (以下 EWS と略す。)で行われる。MCS で計数された後、計数データは EWS に転送され統計処理を行なう。深い未臨界度ではゲート時間幅を 1.0msec、浅い未臨界度では $10 \mu \text{sec} \sim 30 \mu \text{sec}$ とし、スイープ数を 801~2000 で測定した。

3.2 適用性評価

(1) 階差フィルターの適用結果

測定した結果に(12)式から(15)式の階差フィルターを適用した。計数データを解析式の左辺の式で処理した後、右辺の式を最小自乗フィッティングして α 値を求めた。すべての解析式について即発中性子項($p=1$)のみを考慮し、さらに、不感時間の補正項(積算時間幅の0乗の項:定数)を加えてフィッティングした。

各ケースについて、積算時間幅に対する分散と平均の比の変化を図4～図31に示す。表3には α 値の評価結果と、浅い未臨界度での測定では、比較のためにパルス中性子源法で測定した α 値を示している。

表3のケース1からケース4の浅い未臨界度の結果より、階差フィルターを適用しない場合の α 値とパルス中性子源法で評価した α 値との差は10%以上と大きい。階差フィルターを適用することによって、パルス中性子源法の結果と同程度の値が得られている。以上の結果から、階差フィルターが遅発中性子成分を除去するのに有効であることが確認できる。

表3のケース5からケース7の深い未臨界度での測定結果では、階差フィルターを適用しない結果と適用した結果の差は0.72%以下で、階差フィルターの効果は小さいことが判る。深い未臨界度での測定では、最大積算時間幅が浅い未臨界度に比べて小さい設定となる為、遅発中性子の影響を受け難いこと、また、階差フィルターは遅発中性子の影響の少ない測定データに対して悪い影響を与えないことが確認できる。

図4～図31に見られるように、階差フィルターの階差次数の違いによって、分散と平均の比の曲線の形が変化し、階差の次数が増えるにしたがって、データのばらつきは大きくなっているが、 α 値自体の変化は小さく、浅い未臨界度の結果(ケース4を除く)では、1次の階差で十分遅発中性子成分が除去されていると判断できる。ケース4については、1次の階差フィルターを用いた結果とパルス中性子源法による測定結果とは同程度であるが、2次以上の階差フィルターを適用した場合の結果との差が大きく、今後の検討が必要である。

(2) 遅発補正項の影響

ファインマン- α 法のフィッティングの式に遅発補正項を付加し、遅発補正項の効果を調べた。①階差フィルターを適用しない場合と②1次階差フィルターを適用する場合について、各々以下に示す遅発補正項を付加した。①は従来から採用している補正法である。

- ① (1)式に積算時間幅の1乗の項($C \Delta t$: C は定数)を付加
- ② (2)式に積算時間幅の2乗の項($C (\Delta t)^2$: C は定数)を付加
ただし、不感時間の補正項は付加されている。

図 32～図 45 に、積算時間幅に対する分散と平均の比の曲線を、表 4 に α 値の評価結果を示した。

表 4 から、浅い未臨界度のケース 1 からケース 3（ケース 4 を除く）では、①の結果はパルス中性子源法による評価結果と同程度の値で、十分精度の良い結果となっており、遅発中性子の補正項として積算時間幅の 1 乗の項を適用する方法が有効であることがわかる。②は更に高次の遅発中性子の補正項を加えたこととなっているが、表 3 の遅発補正項のない 1 次階差フィルターの結果と比べてほとんど差はなく、遅発中性子の高次の補正項を加えた効果は小さいことがわかる。ケース 4 については、階差フィルターの適用結果と同様、パルス中性子源法の結果との違いが大きく、今後検討が必要である。

深い未臨界度のケース 5 からケース 7 については、表 4 の遅発補正項を加えた結果は、表 3 の遅発補正項を加えない結果と同程度の値が得られており、遅発補正項を加える効果は小さいことが確認できる。

階差フィルターを適用する場合、最小自乗法でフィッティングする際のパラメータは 2 パラメータ（不感時間補正を除く）であり、積算時間幅の 1 乗の補正項を用いる従来手法の場合の 3 パラメータ（不感時間補正を除く）に比べて、パラメータが少ない。最小自乗法のパラメータが多いと解析式にフィッティングするのが困難であるため、従来手法に比べてパラメータが少ない階差フィルターの方が、オンラインモニターの解析式としては適している。

4. まとめと今後の計画

ファインマン- α 法の解析式に階差フィルターを適用し、階差フィルターによって遅発中性子の成分が低減できることを確認した。併せて、遅発中性子の補正項を直接評価法に加える手法を検討し、以下の結論が得られた。

- ① 遅発中性子の影響が顕著に現れる臨界近傍（実効増倍率 0.999～0.994）の炉雑音データに対して階差フィルターを適用することによって、即発中性子減衰定数が正しく求められることを明らかにした。
- ② 遅発中性子の影響の少ない深い未臨界度（実効増倍率 0.663～0.867）の炉雑音データに階差フィルター適用した場合、階差フィルターは、遅発中性子以外の成分に対してはほとんど影響を及ぼさず、深い未臨界度での測定に適用しても誤差が増大することはないことを確認した。
- ③ 遅発中性子の影響の補正として積算時間幅の1次補正項を用いる従来手法と1次階差フィルターを適用する方法では、同じ結果が得られることを確認した。
- ④ 階差フィルターを適用する方法は、従来手法に比べて、最小自乗法でフィッティングするパラメータが少なくすむため安定した評価結果が得られ、オンラインモニターの信頼性の向上が期待できる。

階差フィルターがファインマン- α 法による即発中性子減衰定数の評価に有効であることが確認されたことにより、ファインマン- α 法を過渡状態の体系に適用できる見通しを得られた。今後は、平均中性子束レベルが変化する体系において、ファインマン- α 法による測定を実施し、階差フィルターの有効性を確認する計画である。

謝辞

ファインマン- α 法の解析に階差フィルターを適用する方法は、近畿大学原子力研究所の橋本憲吾氏が御提案されたものであり、階差フィルターの解析式の導出等の理論的検討は、同氏による「ファインマン- α 解析における遅発中性子成分削減法」- 日本原子力学会『炉雑音計測の高度化と新しい応用』研究専門委員会配布資料 - を参照し、また、同氏には階差フィルターに関する参考資料を提示していただくなど、多大なる御協力を頂いたことを付記し、ここに感謝の意を表します。

実験の実施、原子炉運転、実験データの整理等において、御協力を頂いた臨界工学試験室の相原永史 室長、八木昭 主査研究員、羽様平 研究員、上園洋一 研究員、Tagor Malem Sembiring 研修生、ならびに協力会社である原子力システム（株）の有賀正訓氏、原子力技術（株）の柳沢真哉氏、平賀勝志氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 大谷暢夫、 「ファインマン- α 法による低実効増倍率測定」、
日本原子力学会 1993 年春の年会 予稿集(1993) A15
- (2) 林津雄厚他、 「ファインマン法による未臨界度測定の基礎検討」、
日本原子力学会 1993 年春の年会 予稿集(1993) A16
- (3) 大谷暢夫、 「ファインマン- α 法による低実効増倍率測定(2) 中性子バックグラウンドの影響」、日本原子力学会 1993 年秋の大会 予稿集(1993) E23
- (4) 大谷暢夫、 「ファインマン- α 法による未臨界度モニターの開発」、
日本原子力学会 1994 年秋の大会 予稿集(1994) G33
- (5) N. Ohtani and T. Hazama、 「SUBCRITICALITY MONITORING BY FEYNMAN- α METHOD」、
THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR CRITICALITY SAFETY(1995)
- (6) W・ヴァンデル著 蓑谷千風彦、松 毅 訳、「時系列入門」 多賀出版
- (7) A・C・ハーベイ著 国友直人/山本 拓 訳 「時系列モデル入門」 東京大学出版会
- (8) Rice S. O. Bell System Tech. J. 23, 282(1944), or Rice S. O. ibid. 24, 46(1945).

表1 測定体系

ケース	Keff*	ドライバ領域		試験体領域	
		燃料の種類	重水水位 (cm)	燃料の種類	軽水水位 (mm)
1~4	0.994~0.999	1.2wt%UO ₂	1574~1634 (臨界: 1654)	PuO ₂ -UO ₂ (0.79 wt%Pu-fissile)	0.0
5~7	0.663~0.867	1.2wt%UO ₂	0.0	PuO ₂ -UO ₂ (17.7wt%PuO ₂)	200~600

* ケース1~4 はパルス中性子源法による評価、ケース5~7 は計算値。

表2 測定条件

ケース	Keff*	検出器	ゲート時間幅 (msec)	最大積算時 間幅 (sec)	スイープ数	カウント数 (cps)
1	0.999	1/2in. He-3 (炉心中心)	1.0	0.5	999	7200
2	0.997	〃	1.0	0.5	801	3000
3	0.996	〃	1.0	0.5	999	2200
4	0.994	〃	1.0	0.5	999	1500
5	0.867	1in. He-3 (炉心中心)	0.03	0.01	999	18000
6	0.811	〃	0.02	0.006	999	9800
7	0.663	2in. He-3 (炉心中心)	0.01	0.003	2000	6000

* ケース1~4 はパルス中性子源法による評価、ケース5~7 は計算値。

表3 α 値の評価結果

ケース	Keff*	階差フィルター 非適用	階差フィルター適用			パルス中性子 源法
			1次	2次	3次	
1	0.999	22.6	33.4	33.4	33.1	32.7
2	0.997	25.9	39.1	40.9	41.8	40.2
3	0.996	40.7	48.5	48.5	48.1	45.2
4	0.994	29.1	52.5	60.5	63.2	52.6
5	0.867	2321.5	2282.5	2372.9	2450.4	—
6	0.811	3153.4	2943.7	2991.8	3002.4	—
7	0.663	4487.4	4233.5	4483.7	4575.6	—

* ケース1～4 はパルス中性子源法による評価、ケース5～6 は計算値。

表4 α 値の評価結果 (遅発補正項の検討)

ケース	Keff ¹⁾	階差フィルター非適 用+1次遅発項 ²⁾	1次階差フィルター +2次遅発項 ³⁾	パルス中性子源法
1	0.999	32.5	31.7	32.7
2	0.997	42.2	42.4	40.2
3	0.996	46.1	45.7	45.2
4	0.994	67.7	70.5	52.6
5	0.867	2457.3	2568.6	—
6	0.811	3001.0	2963.5	—
7	0.663	4330.0	4332.1	—

1) ケース1～4 はパルス中性子源法による評価、ケース5～7 は計算値。

2) 遅発成分を積算時間幅の1乗の項($C \Delta t$)で表す。

3) " 2乗の項($C(\Delta t)^2$)で表す。

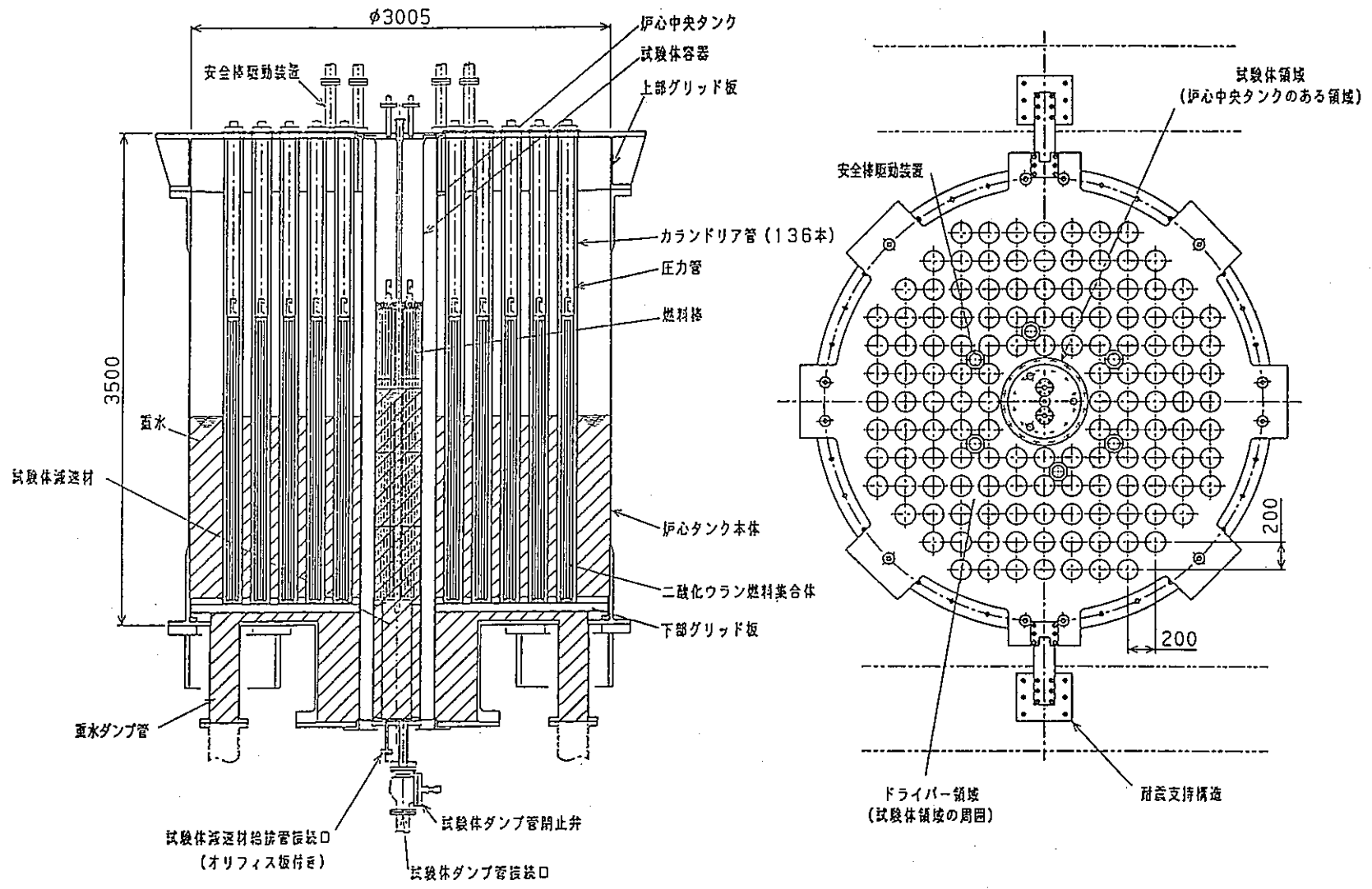


図1 DCA炉心構造図

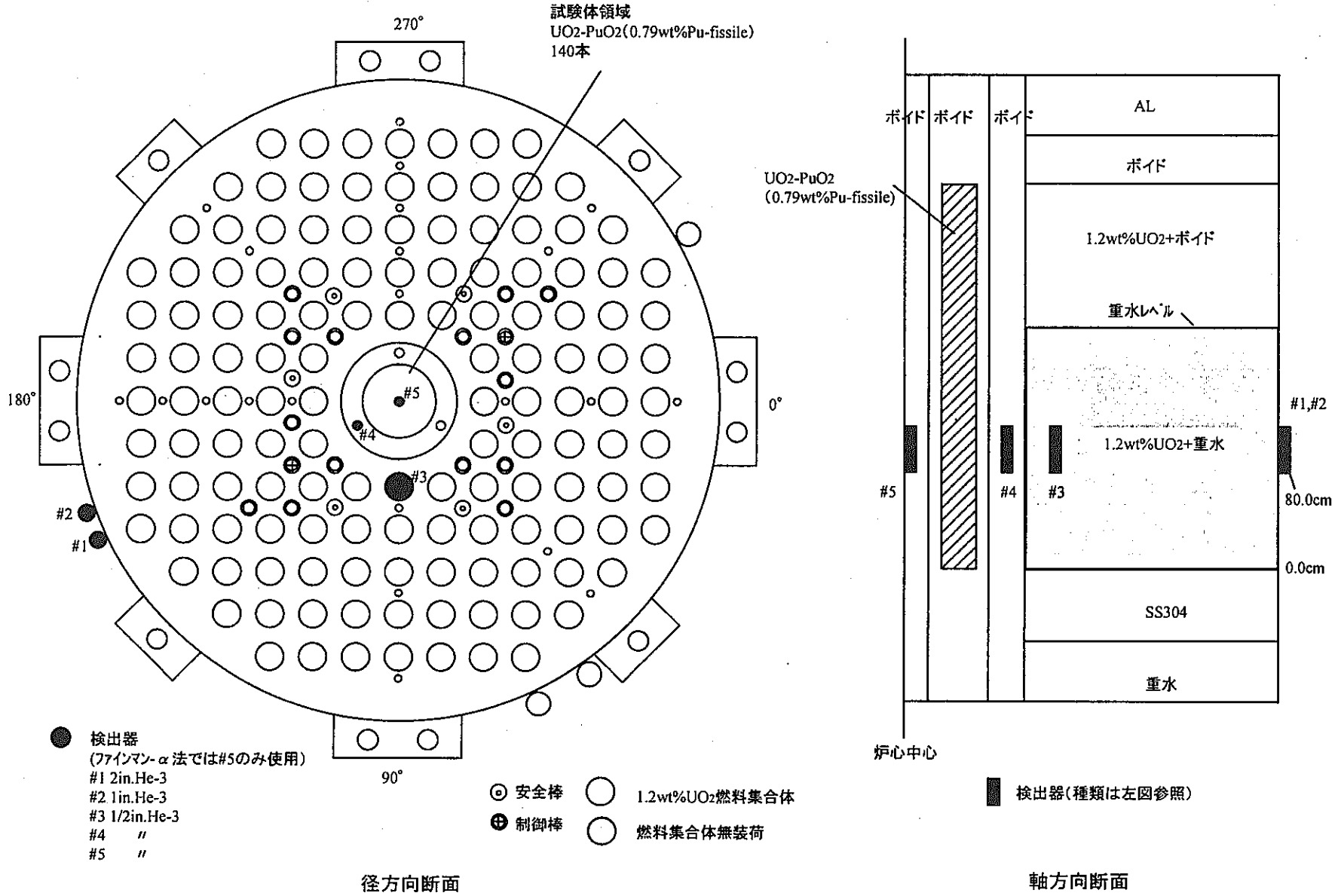


図2(1) 測定炉心体系と検出器配置(ケース1~ケース4)

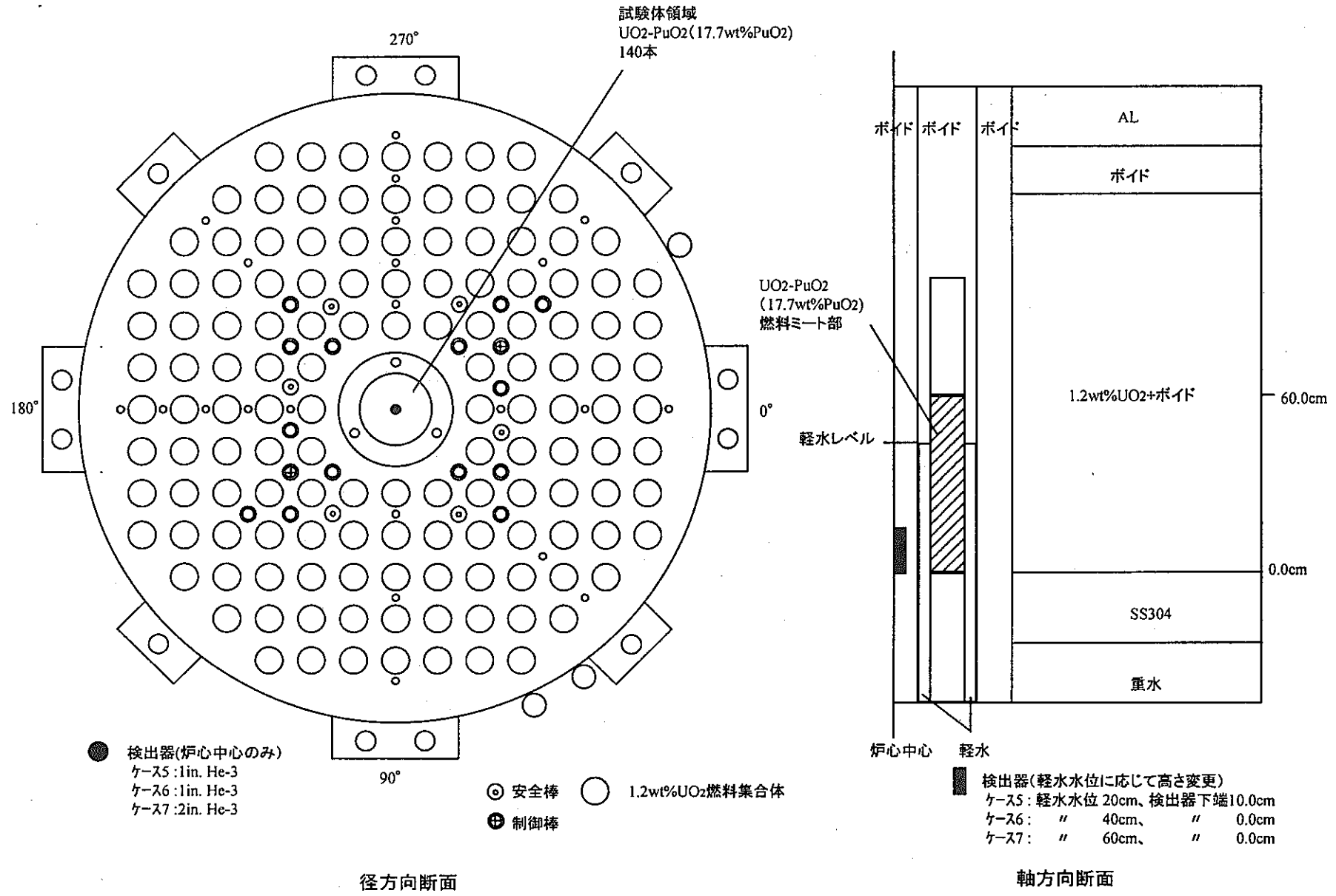


図2(2) 測定炉心体系と検出器配置(ケ-5~ケ-7)

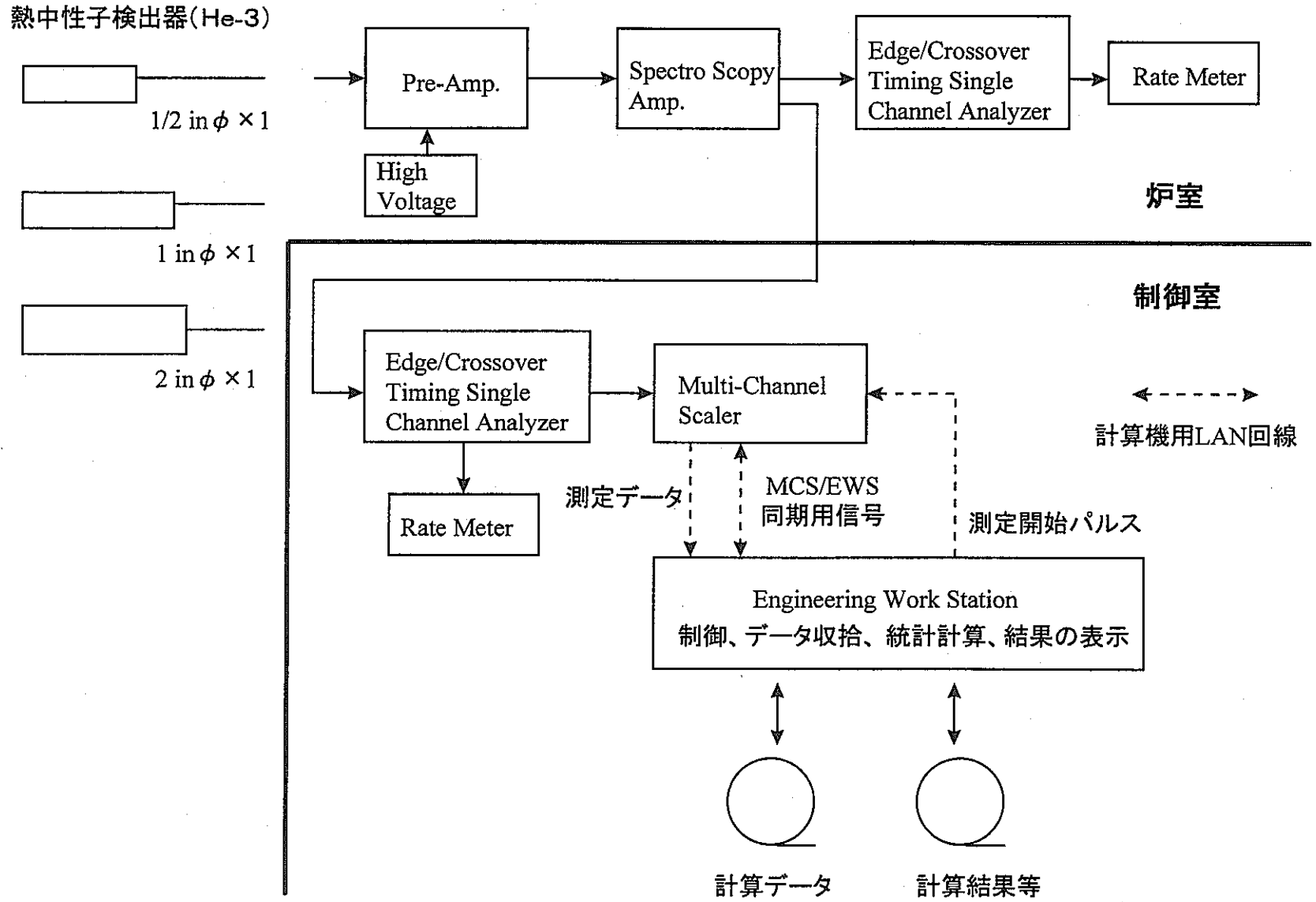


図3 ファインマン-アルファ法測定システム

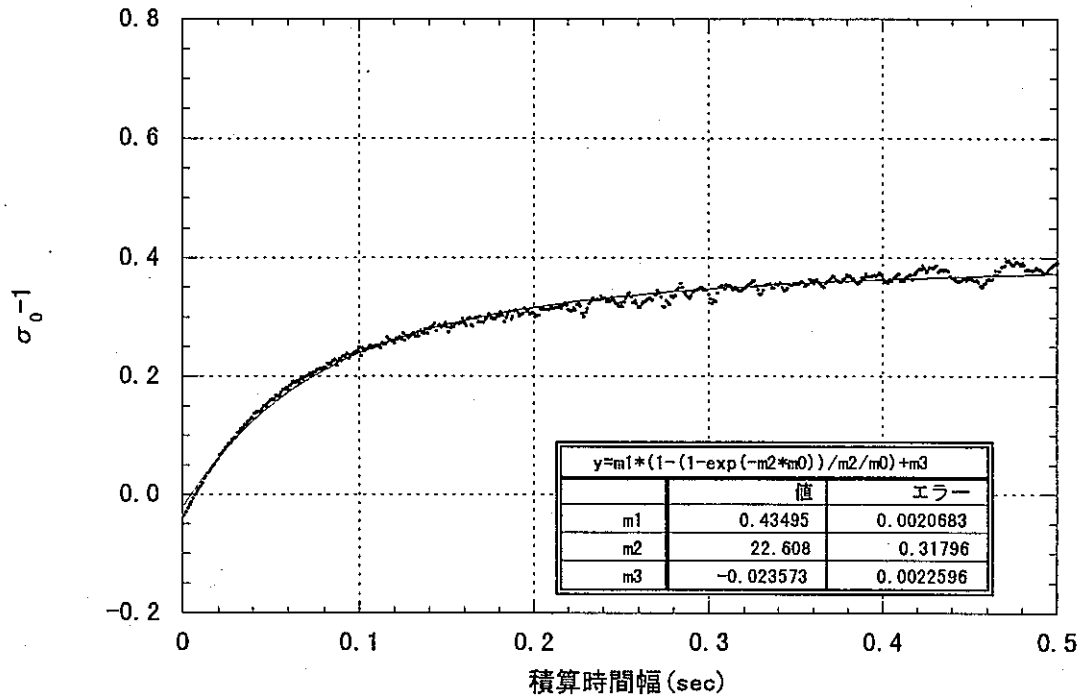


図4 フィルター非適用結果 (Keff=0.999)

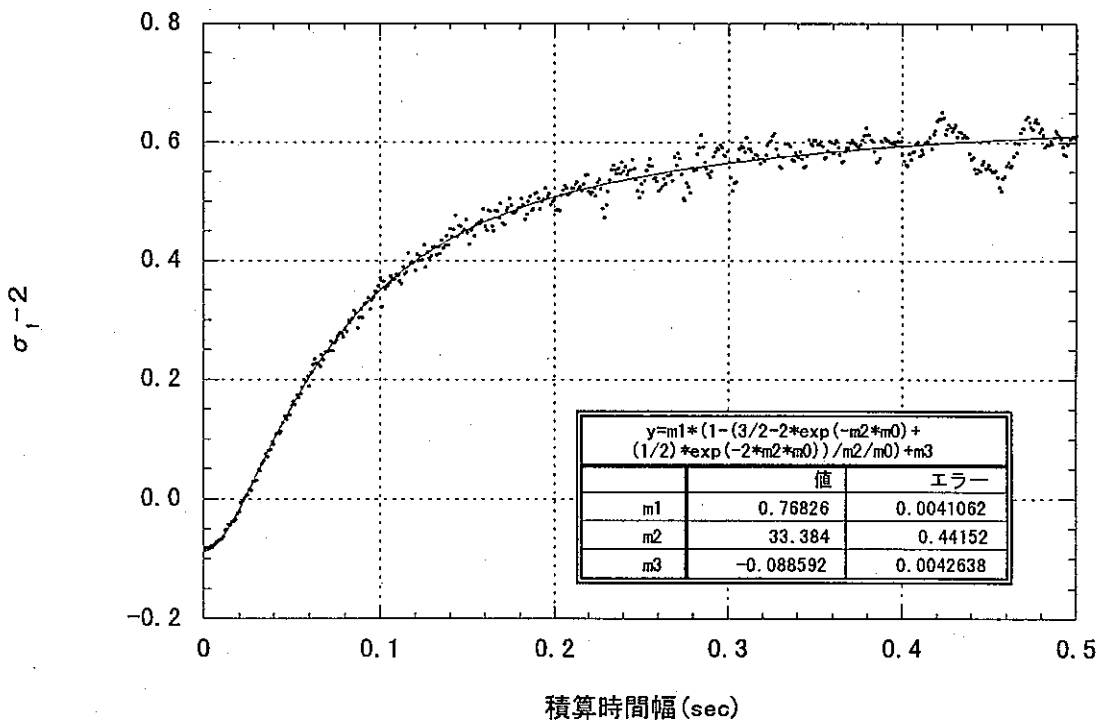


図5 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.999)

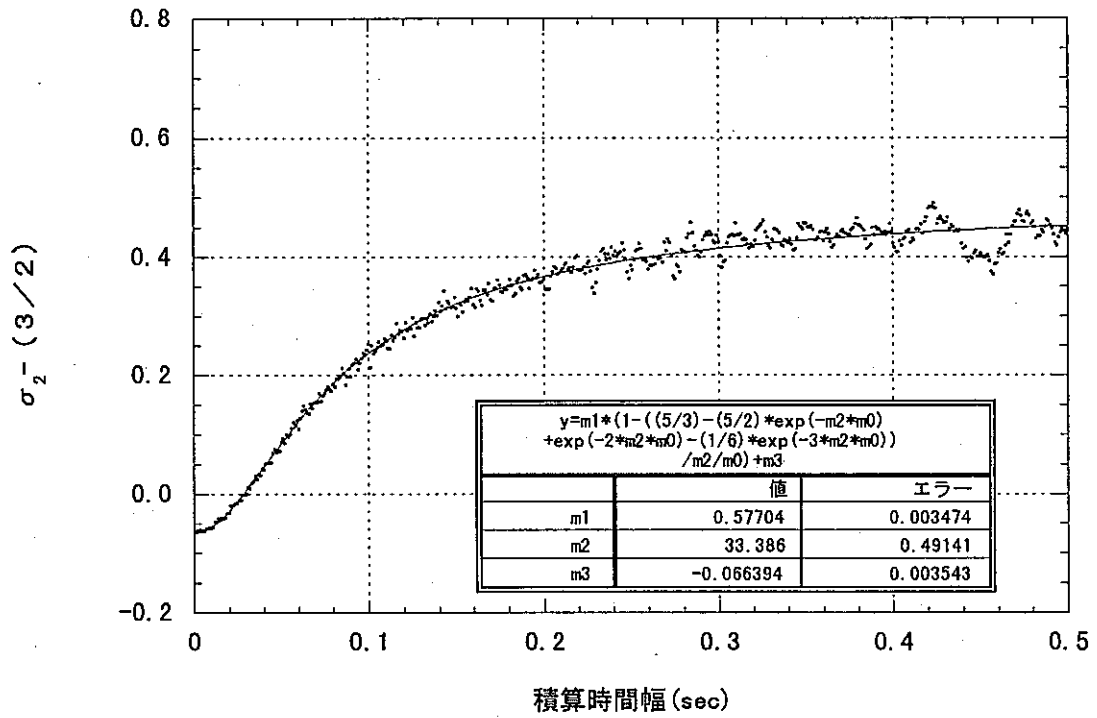


図6 2次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.999)

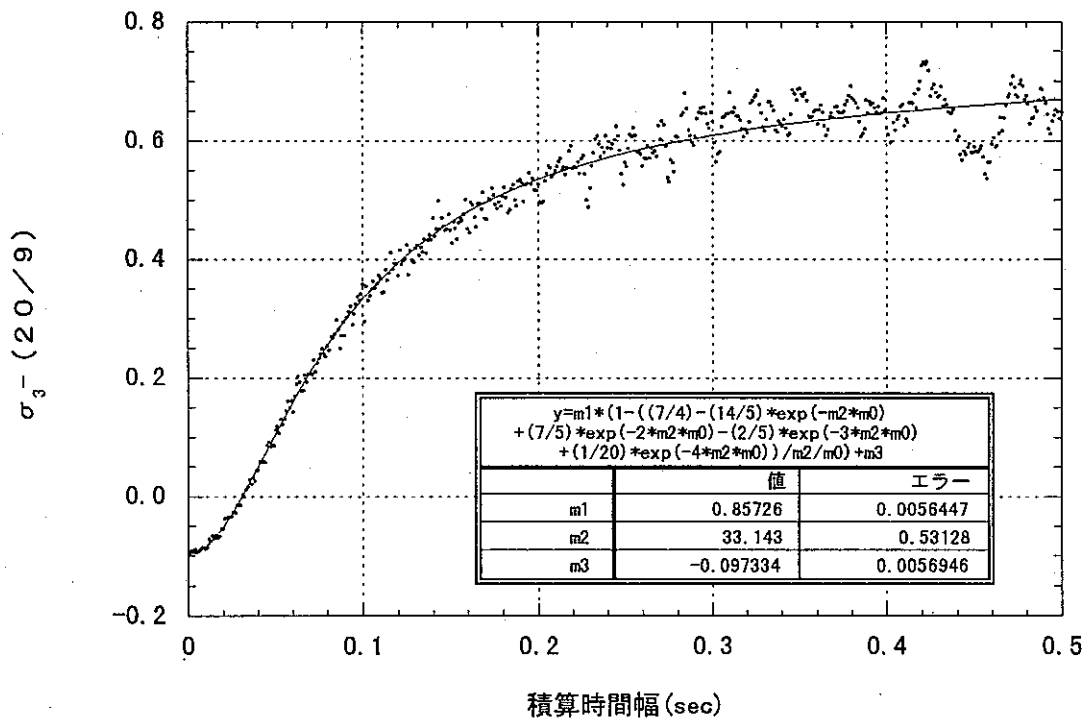


図7 3次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.999)

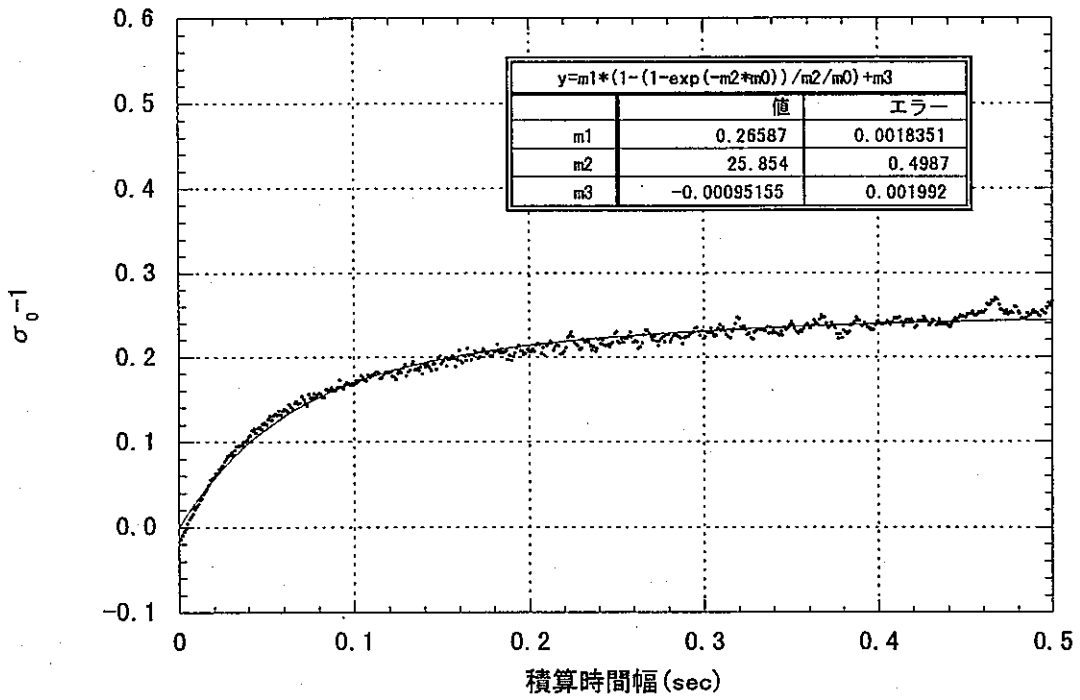


図8 フィルター非適用結果 (Keff=0.997)

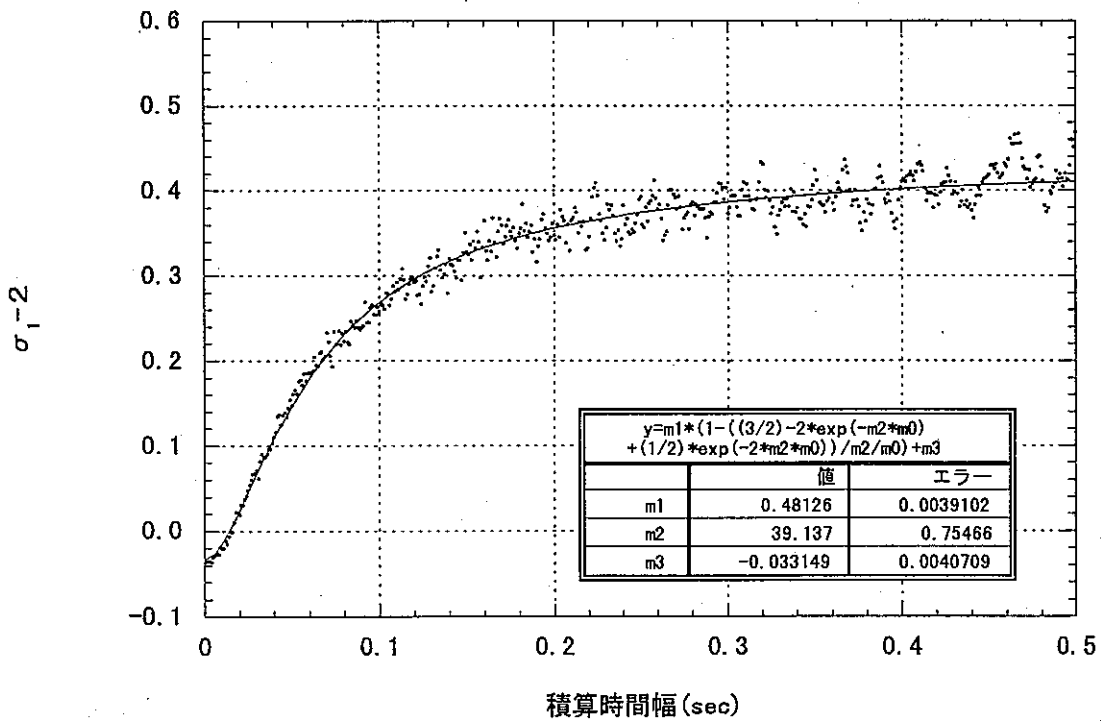


図9 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.997)

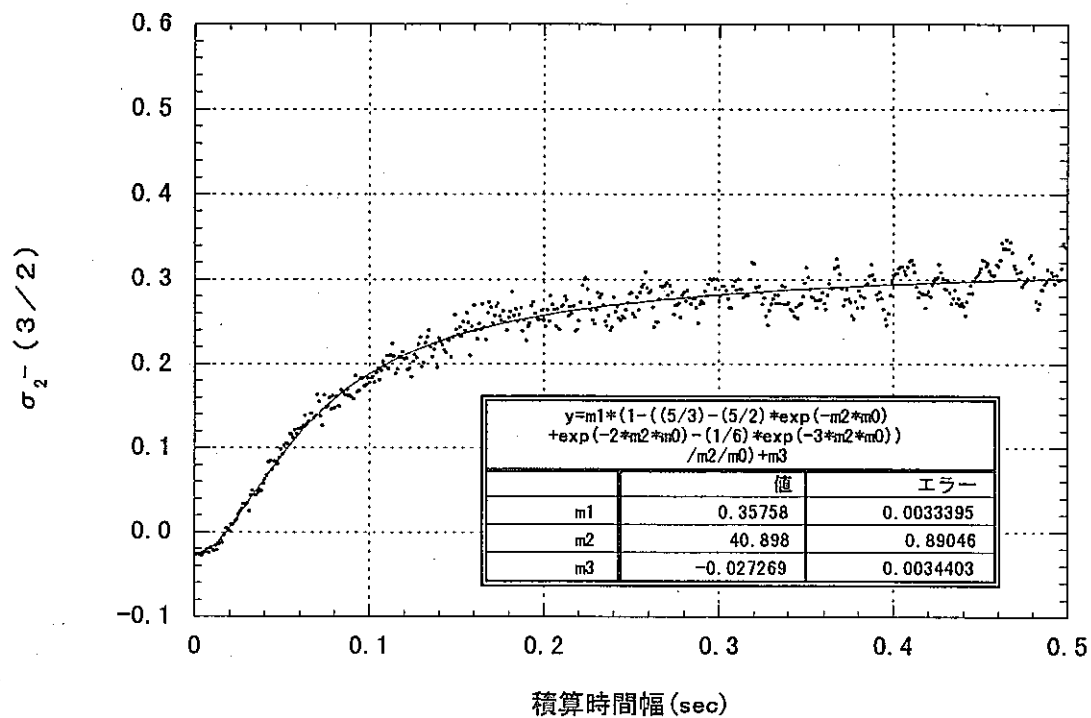


図 10 2次階差フィルター適用結果 (Keff=0.997)

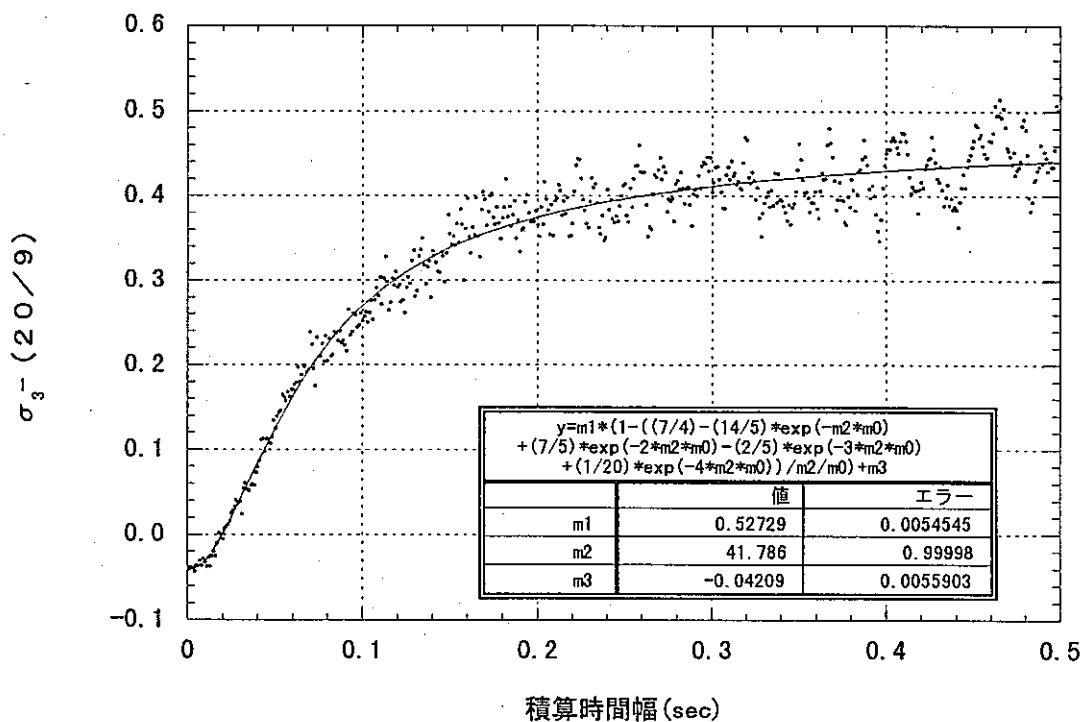


図 11 3次階差フィルター適用結果 (Keff=0.997)

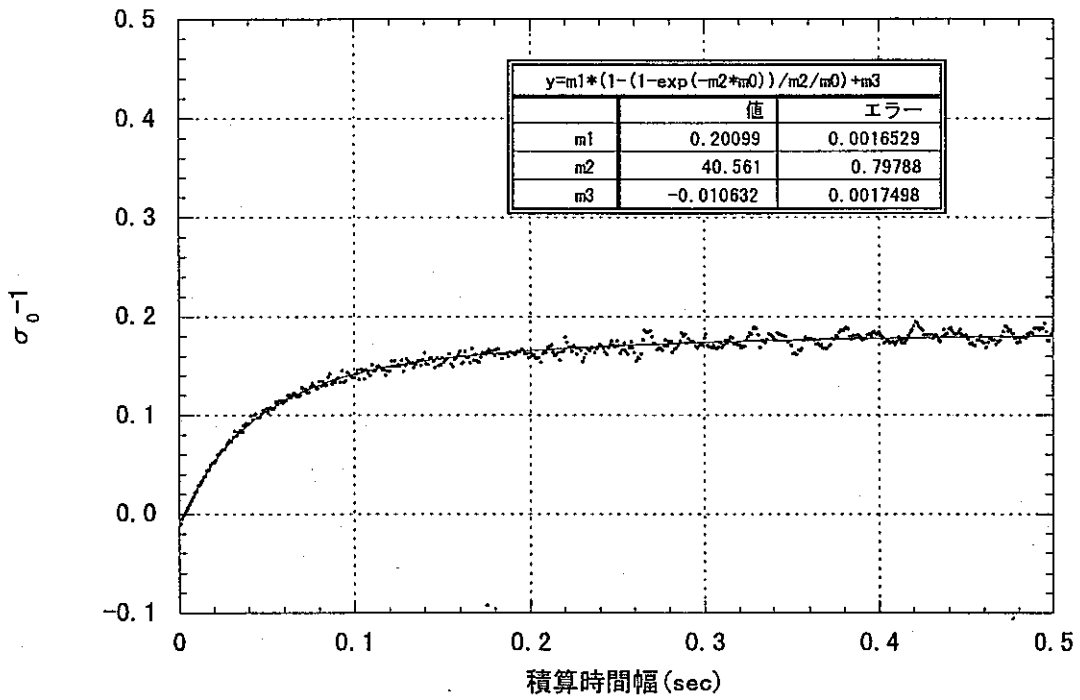


図 1 2 フィルター非適用結果 (Keff=0.996)

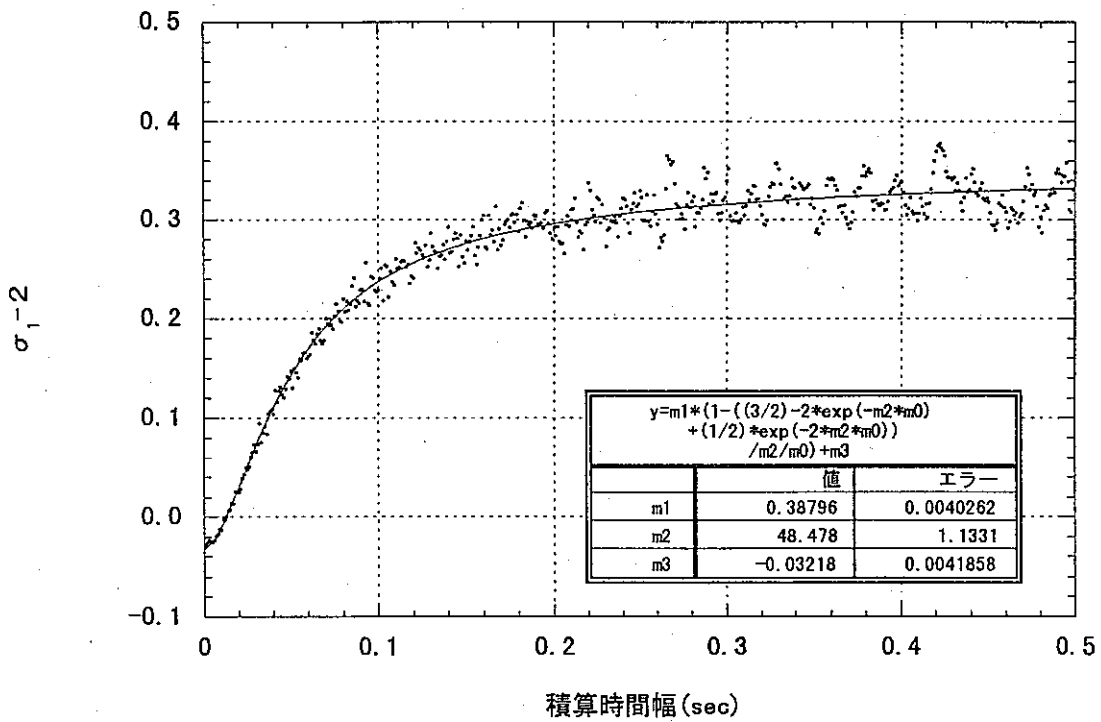


図 1 3 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.996)

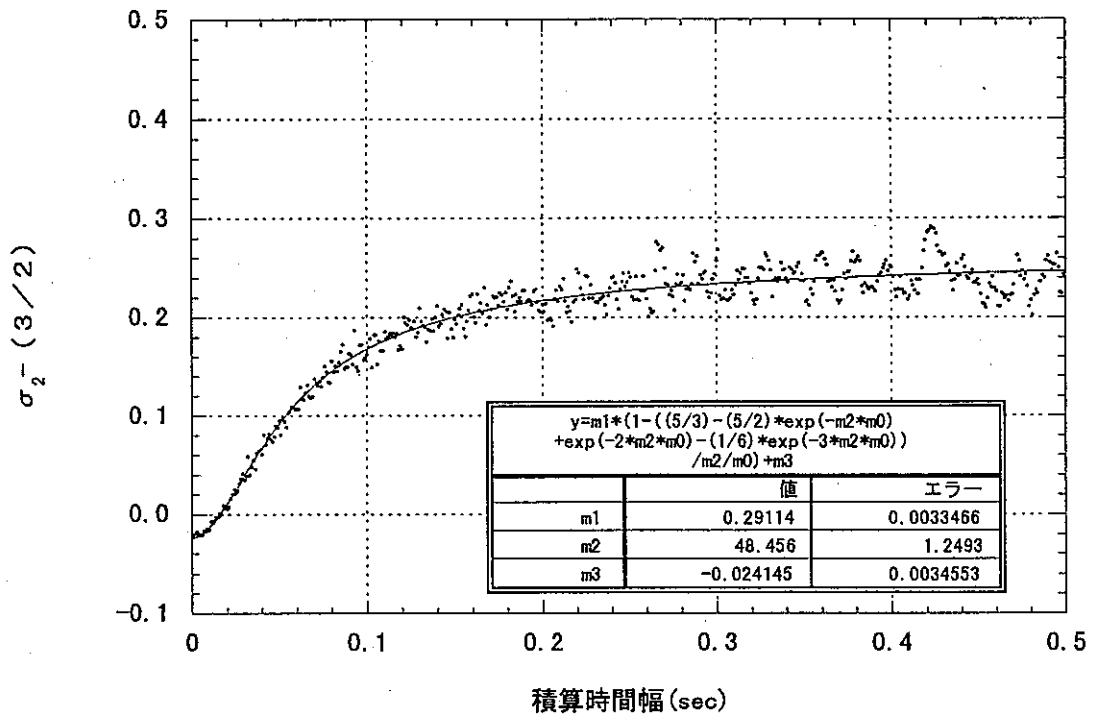


図 1 4 2次階差フィルター適用結果 (Keff=0.996)

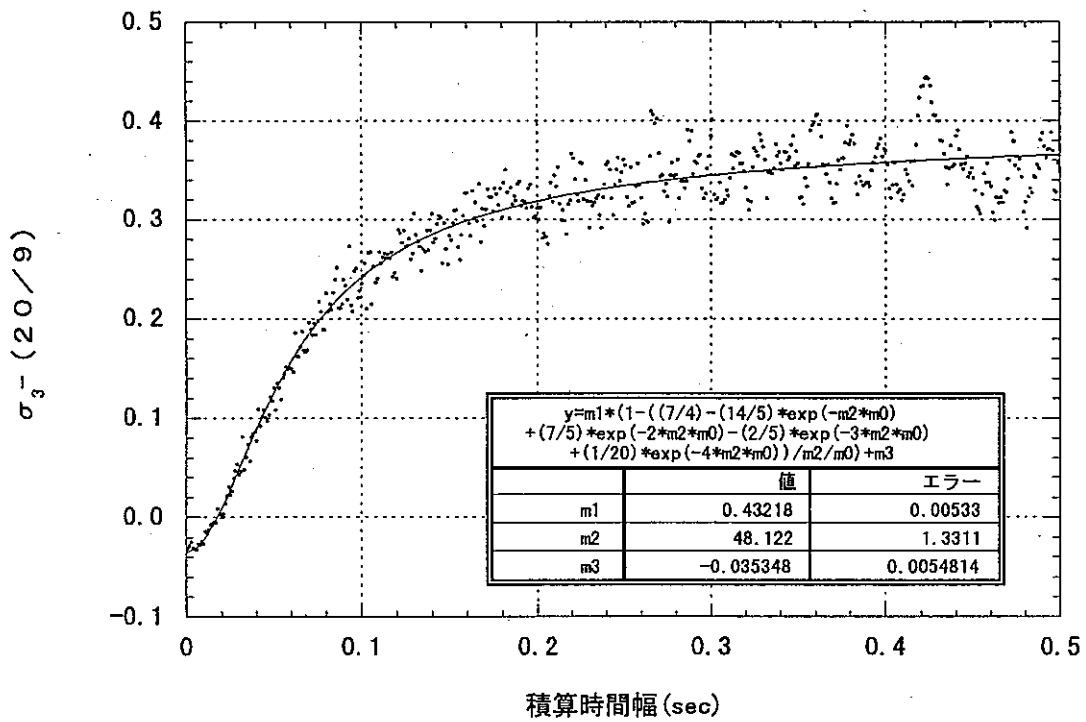


図 1 5 3次階差フィルター適用結果 (Keff=0.996)

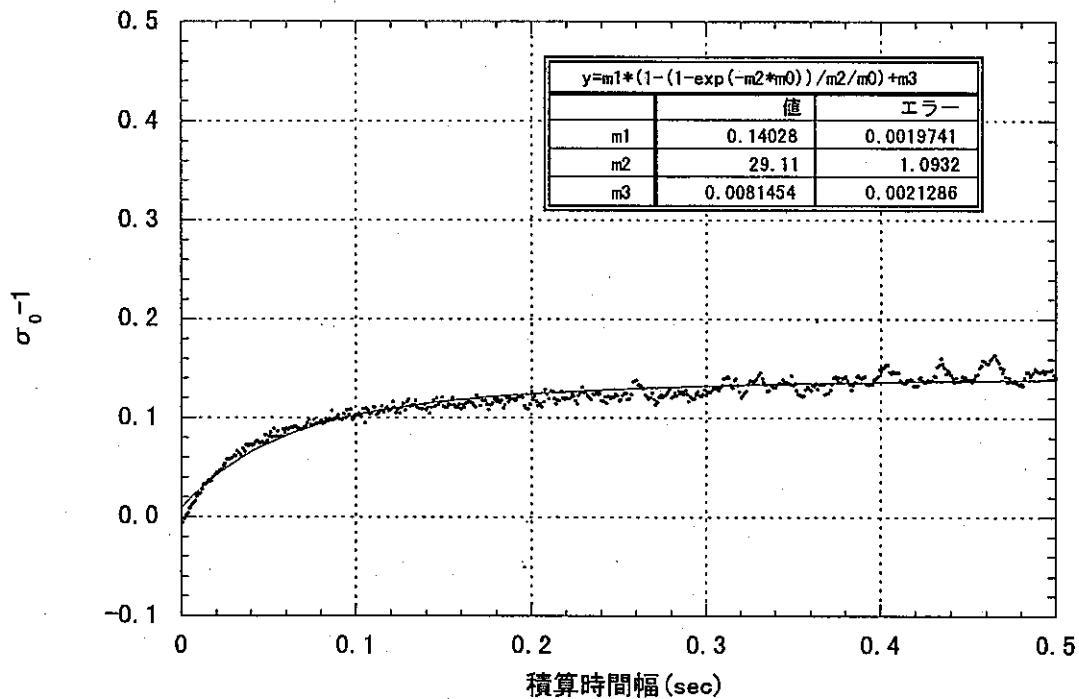


図 1 6 フィルター非適用結果 (Keff=0.994)

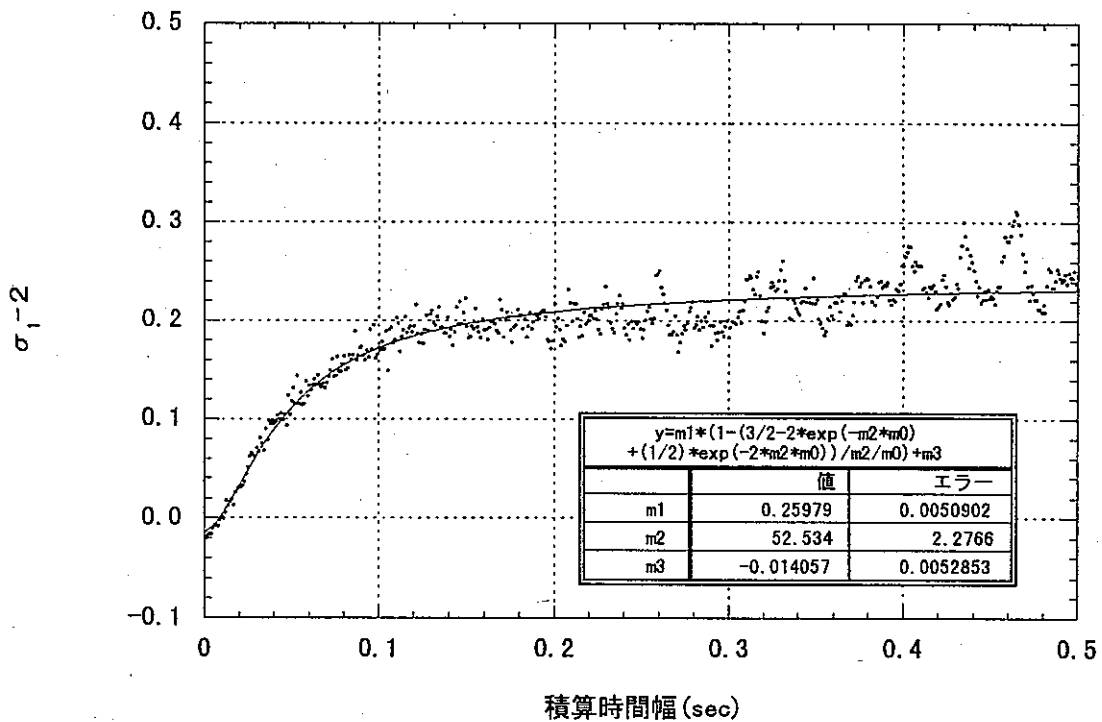


図 1 7 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.994)

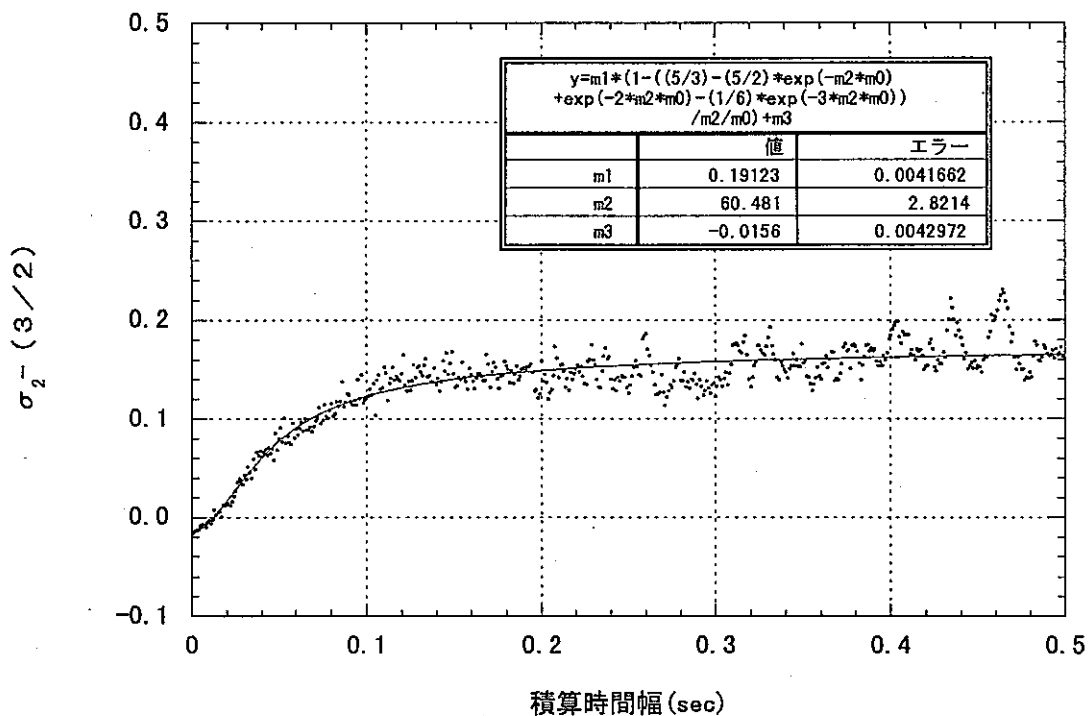


図18 2次階差フィルター適用結果 (Keff=0.994)

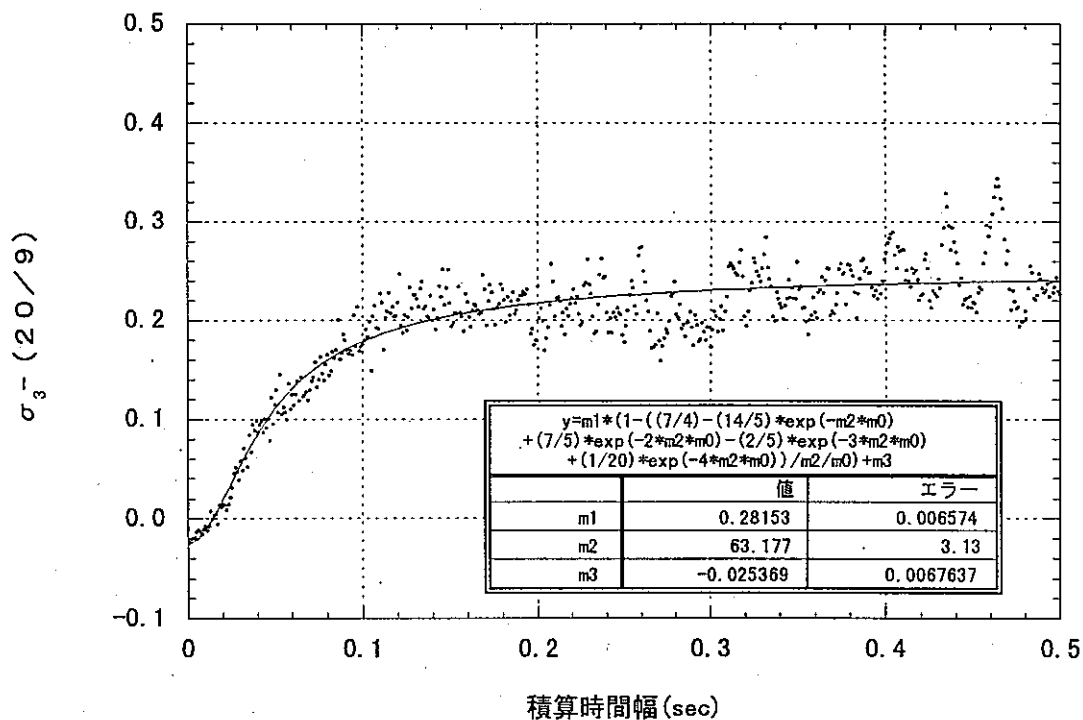


図19 3次階差フィルター適用結果 (Keff=0.994)

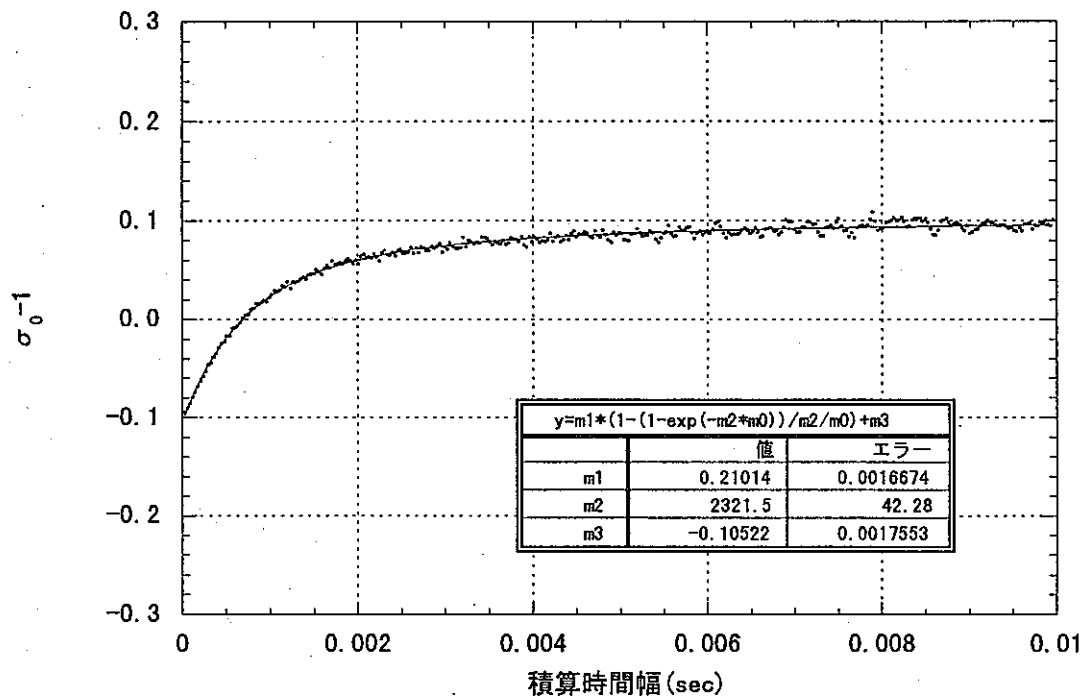


図 2 0 フィルター非適用結果 (Keff=0.867)

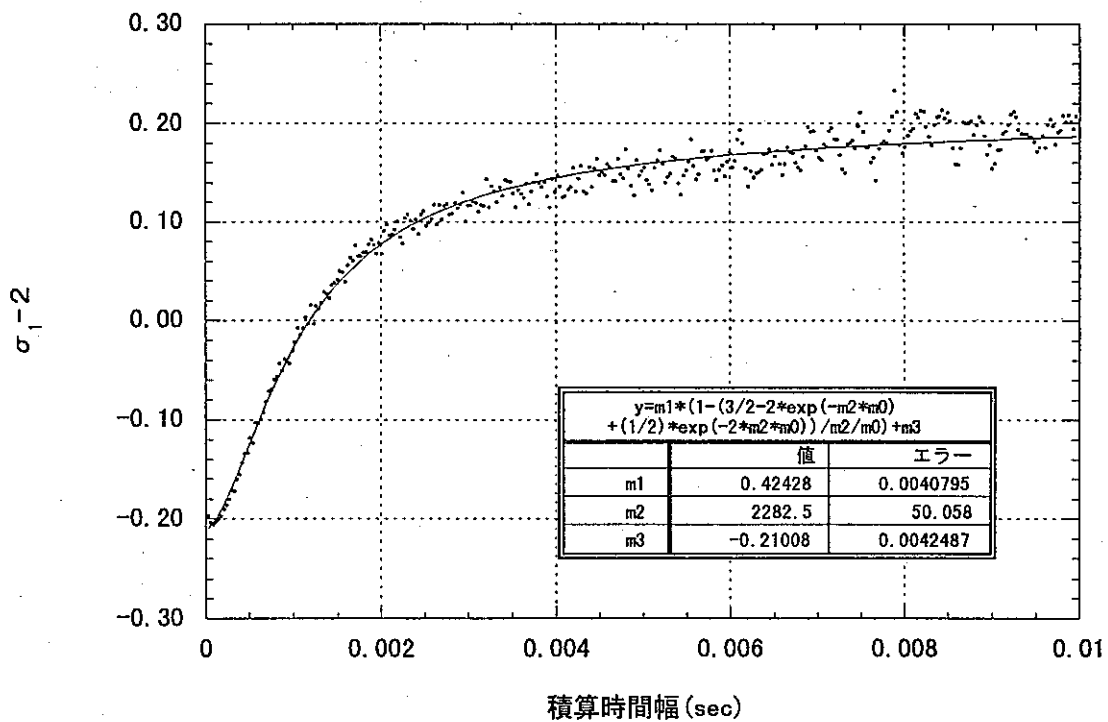


図 2 1 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.867)

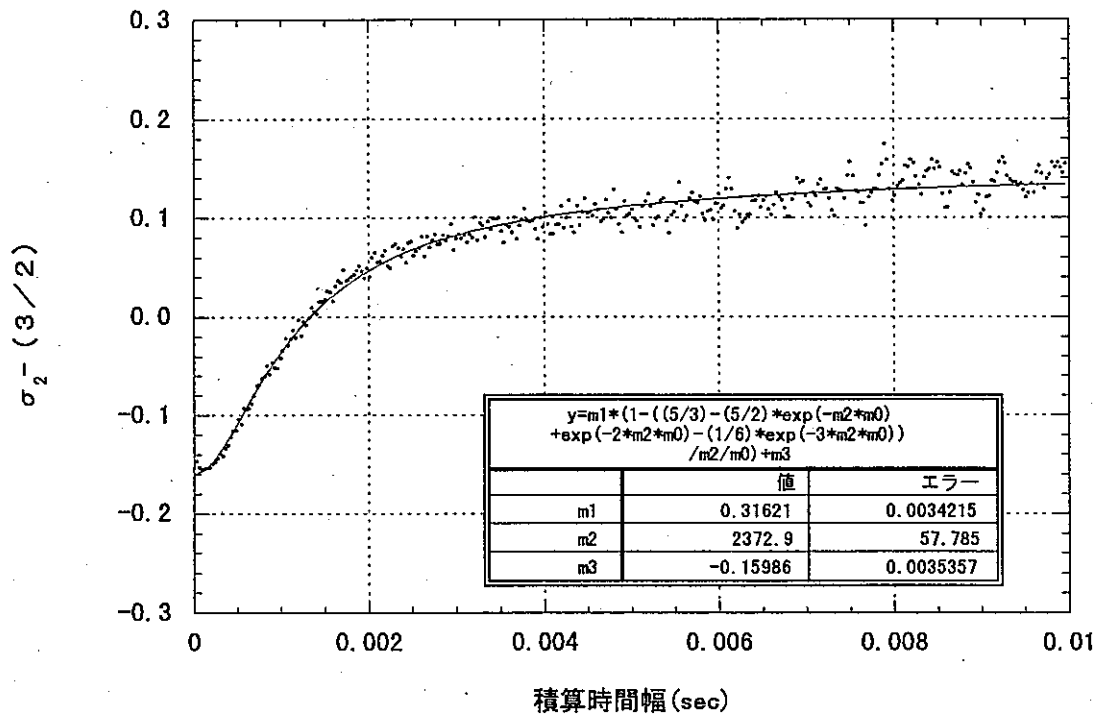


図 2 2 2次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.867)

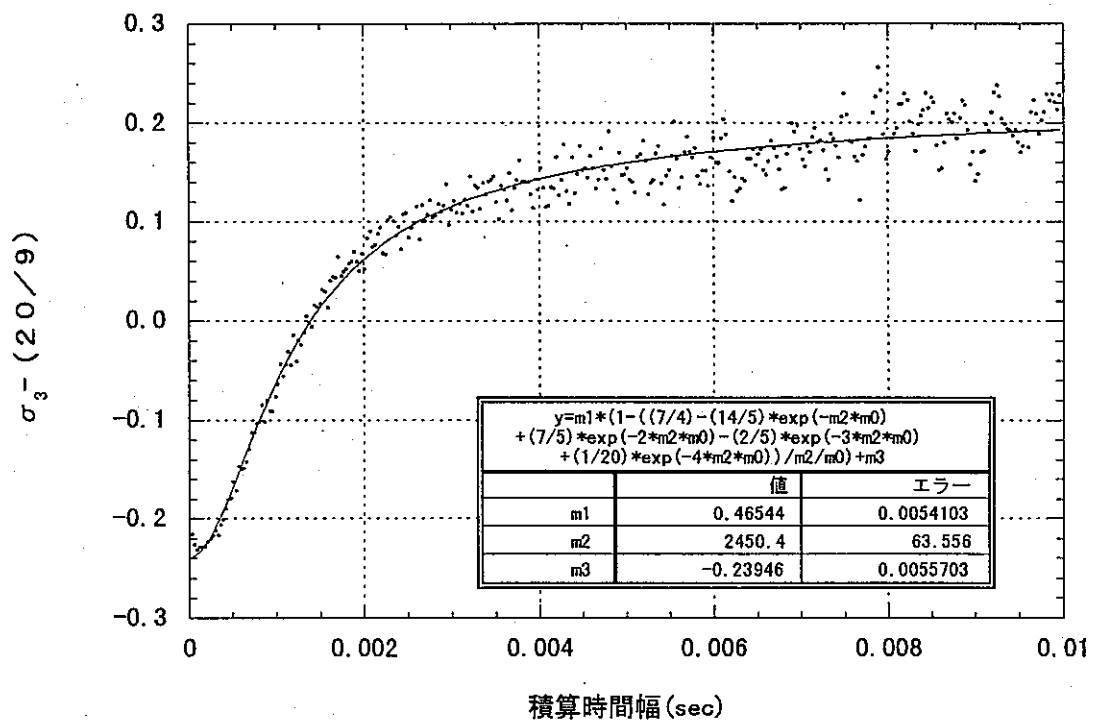


図 2 3 3次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.867)

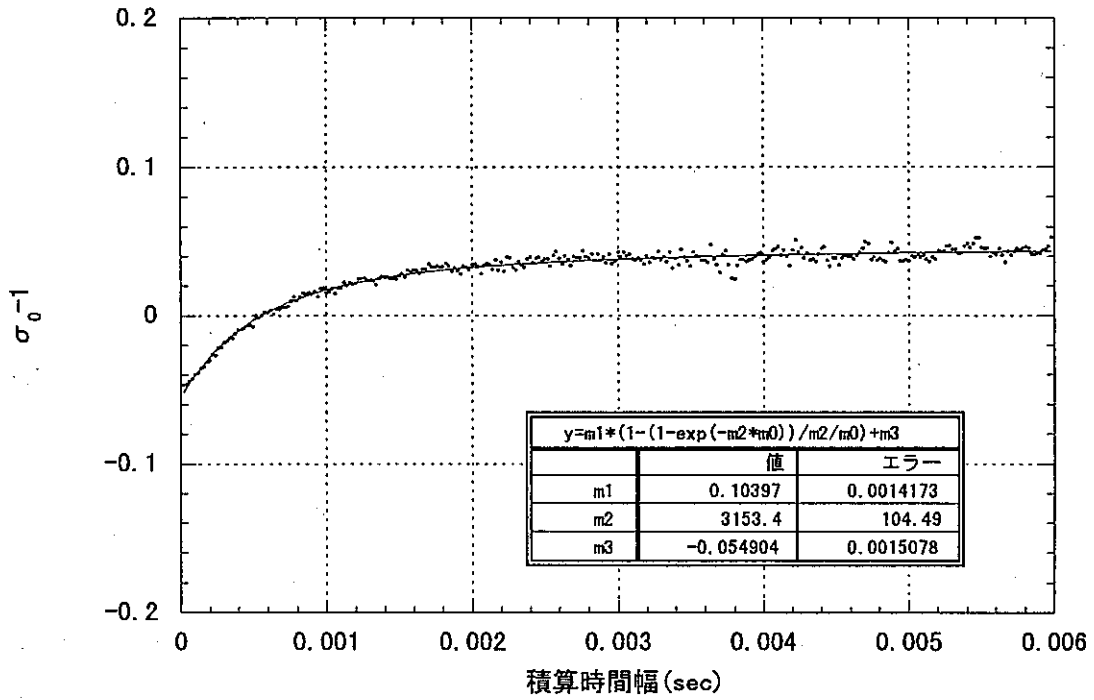


図 2 4 フィルター非適用結果 (Keff=0.811)

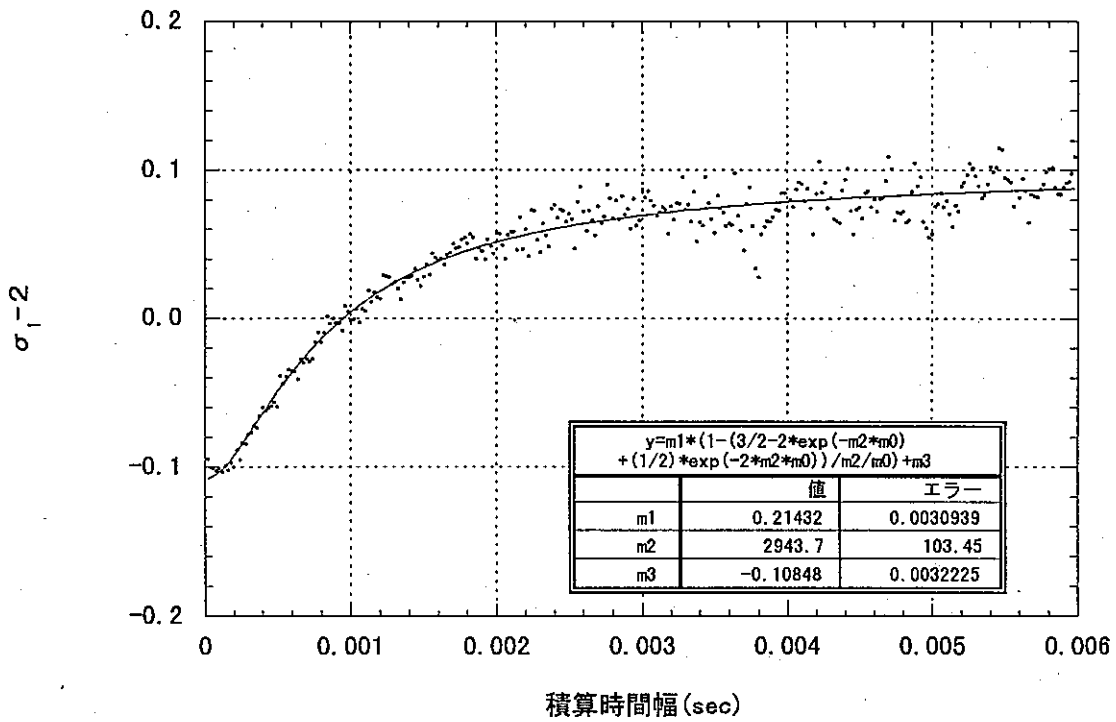


図 2 5 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.811)

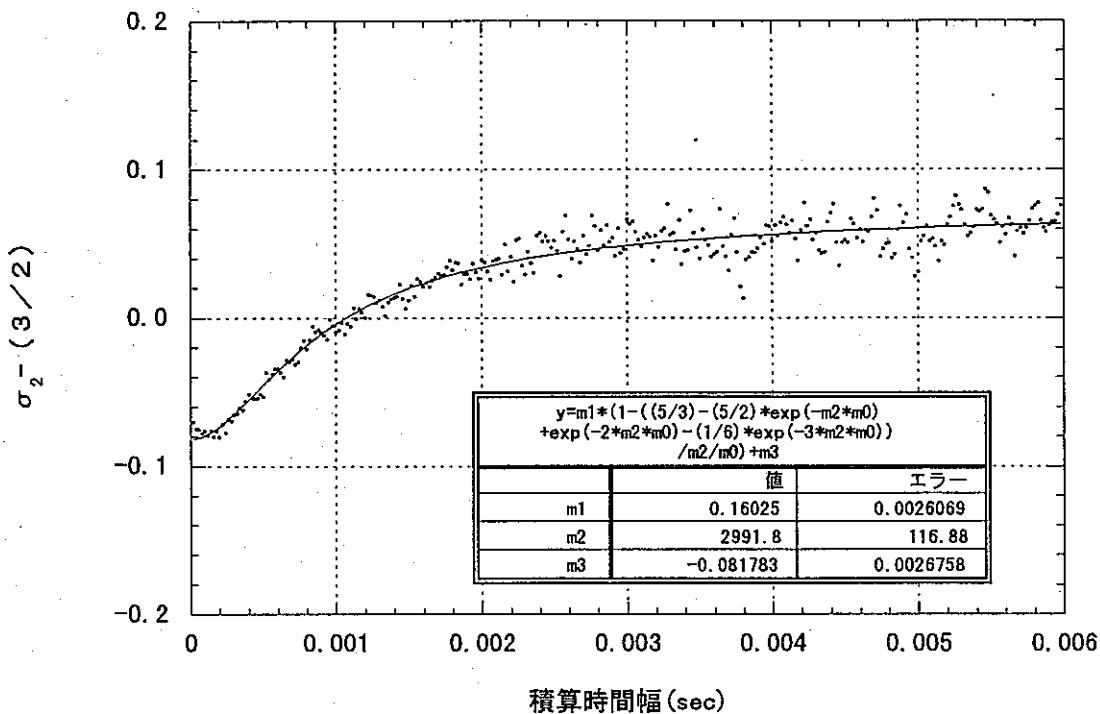


図 2 6 2 次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.811)

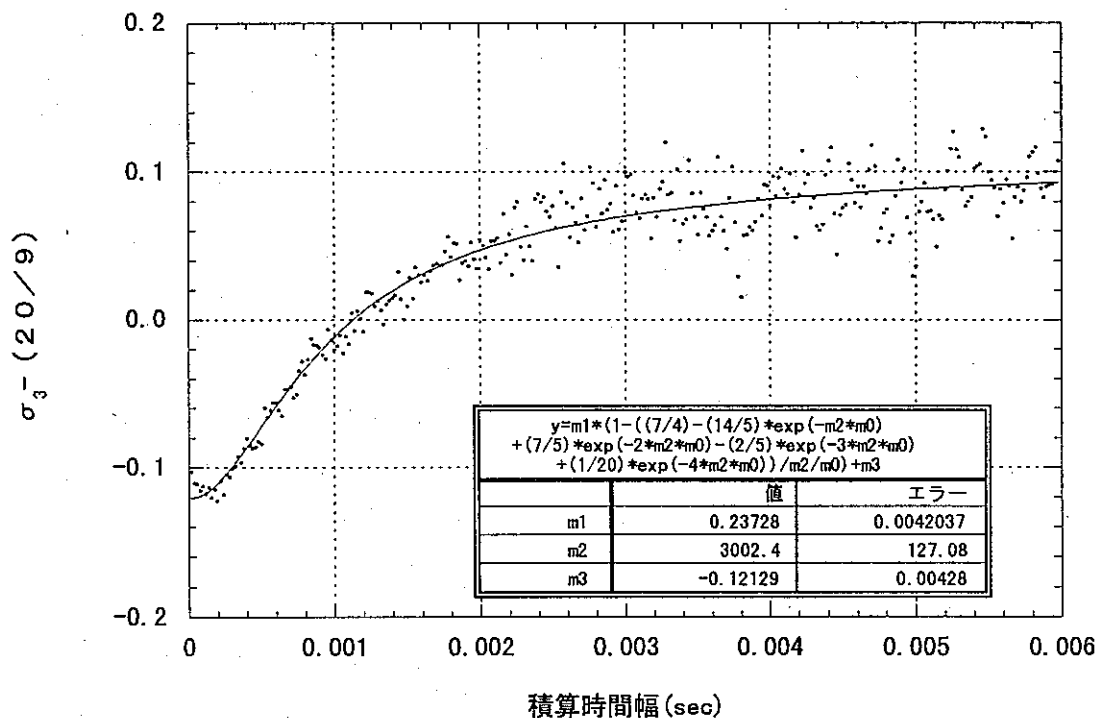


図 2 7 3 次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.811)

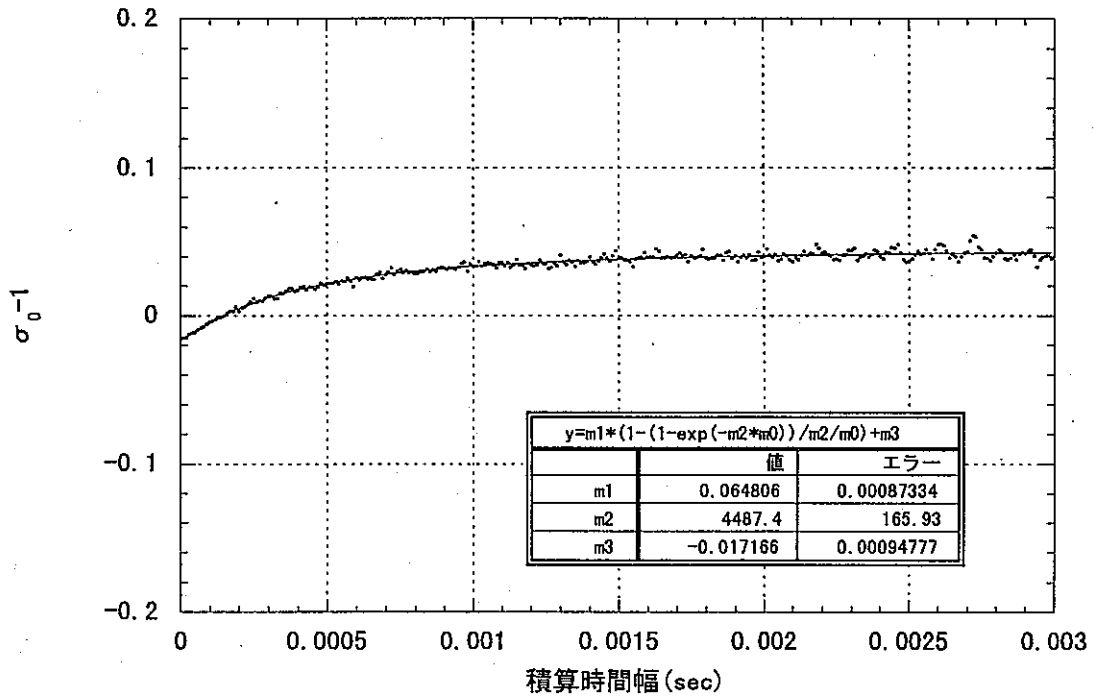


図 2 8 フィルター非適用結果 (Keff=0.663)

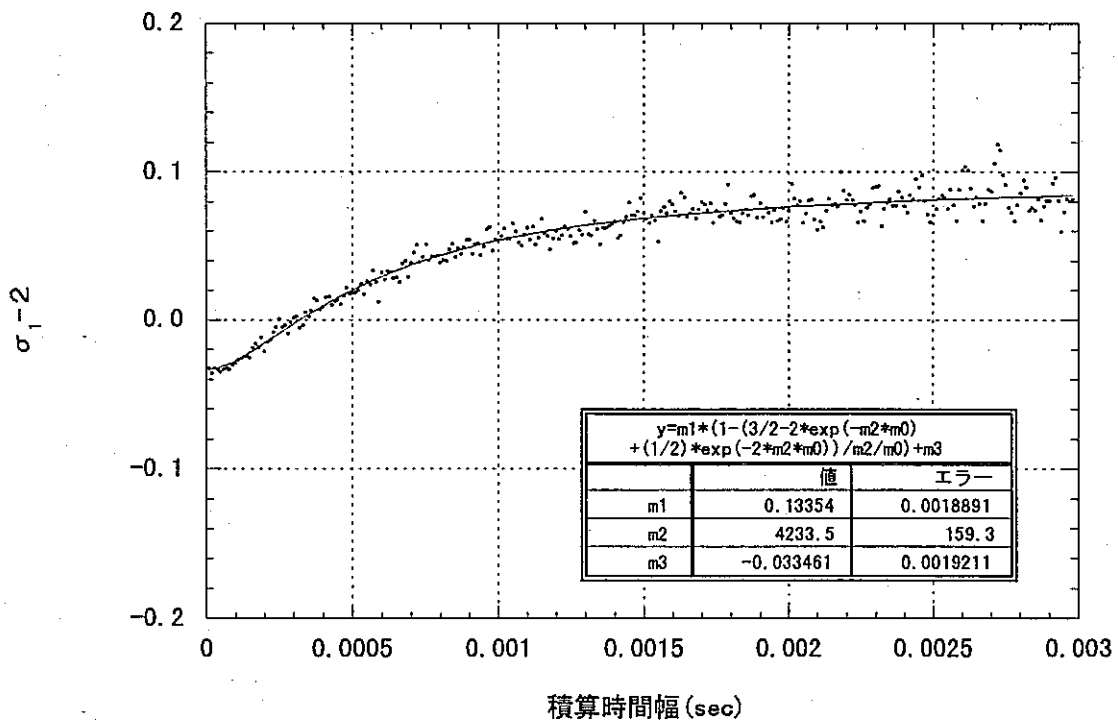


図 2 9 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.663)

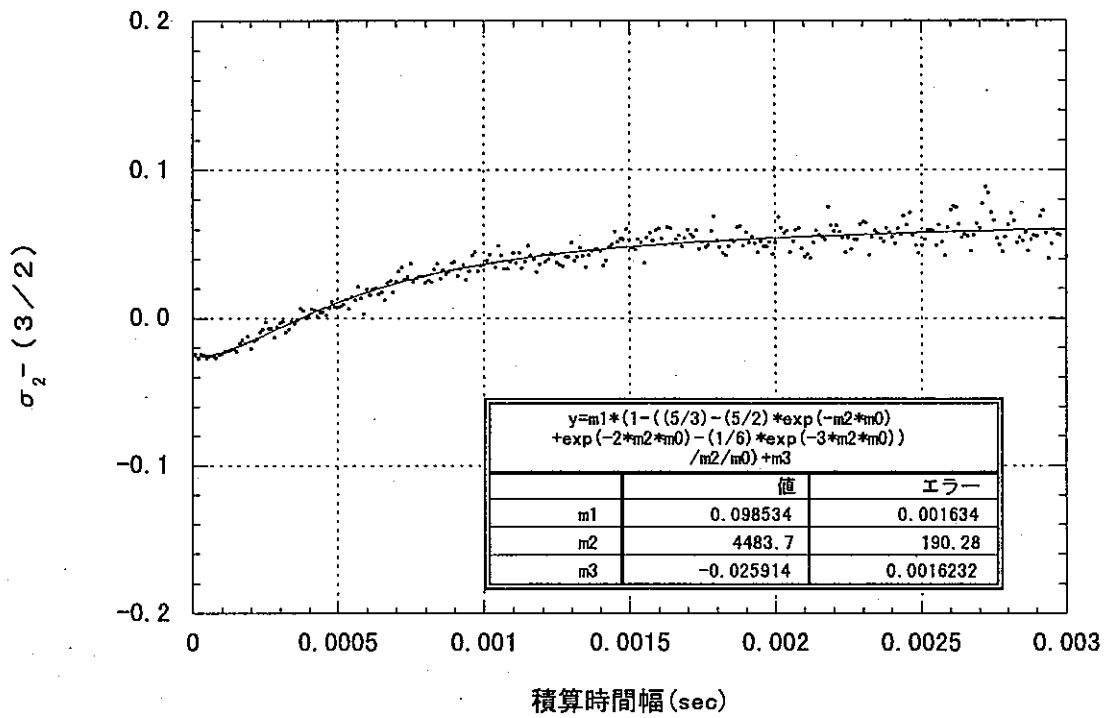


図 3 0 2次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.663)

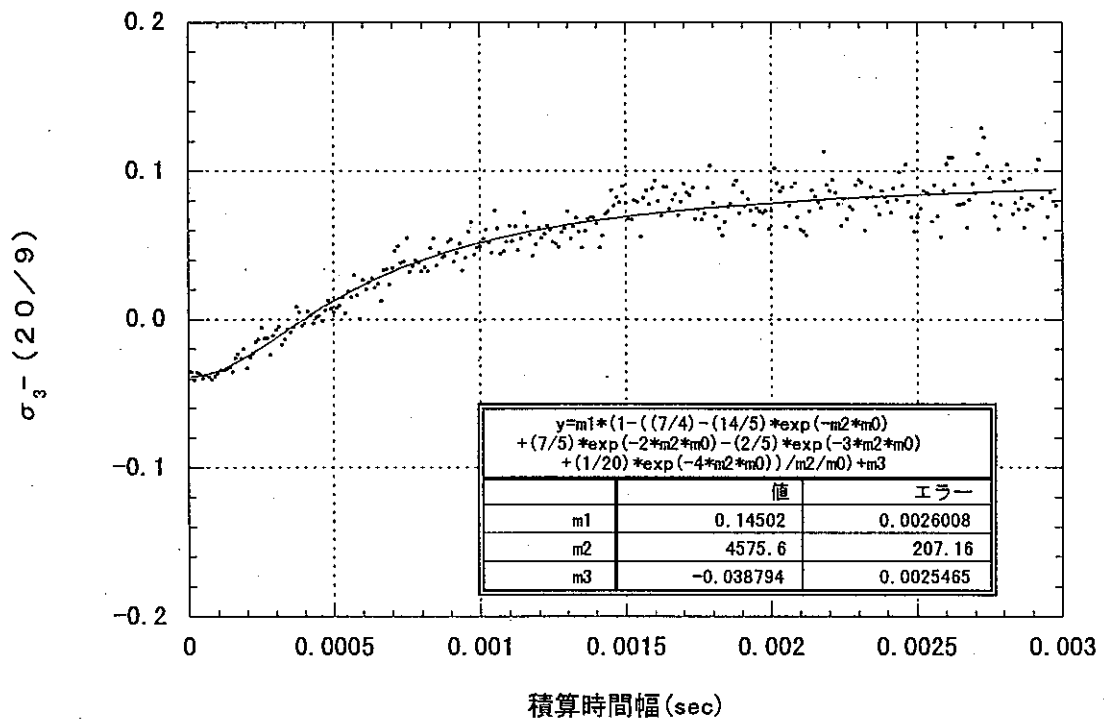


図 3 1 3次階差フィルタ一適用結果 (Keff=0.663)

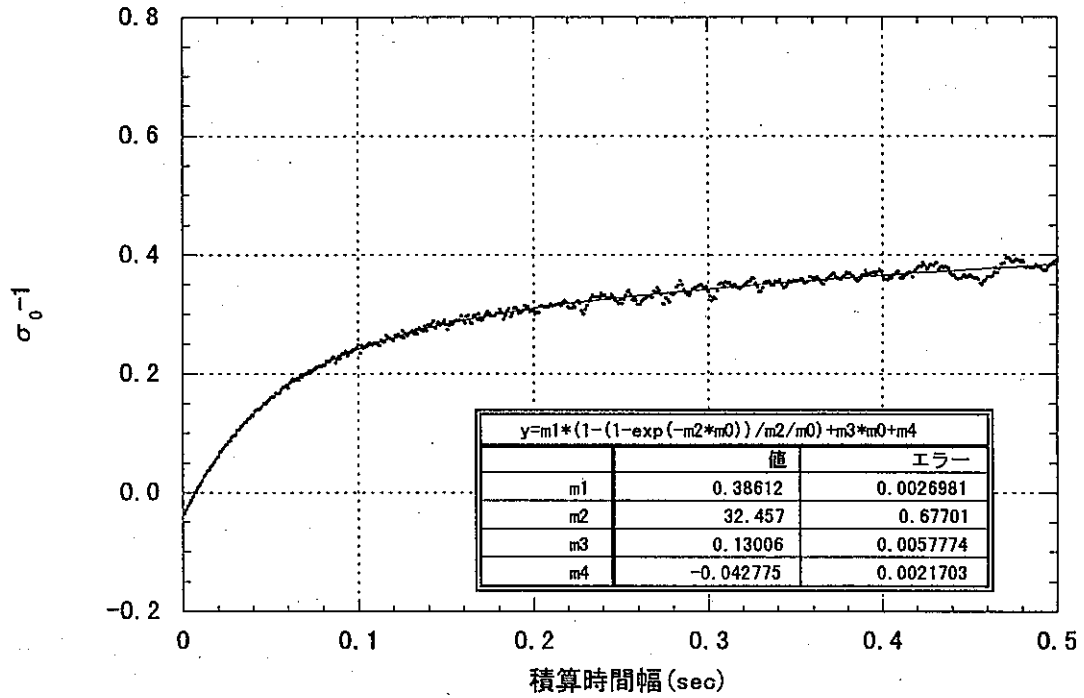


図 3 2 フィルター非適用結果 (Keff=0.999)
(1次遅発項考慮)

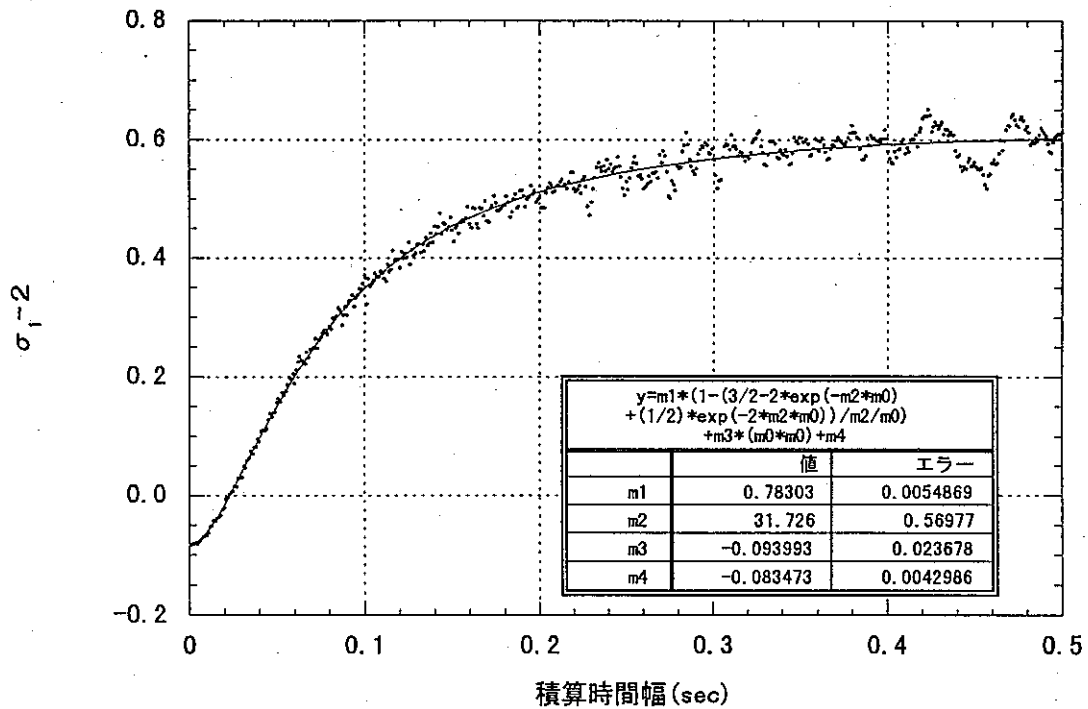


図 3 3 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.999)
(2次遅発項考慮)

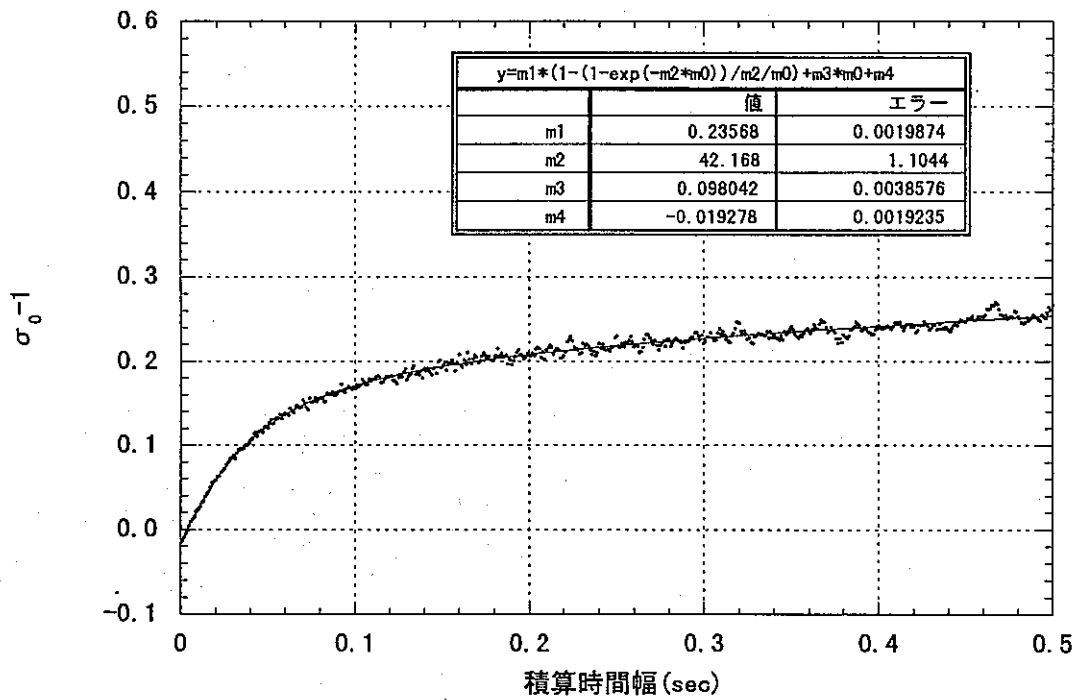


図 3 4 フィルター非適用結果 (Keff=0.997)
(1次遅発項考慮)

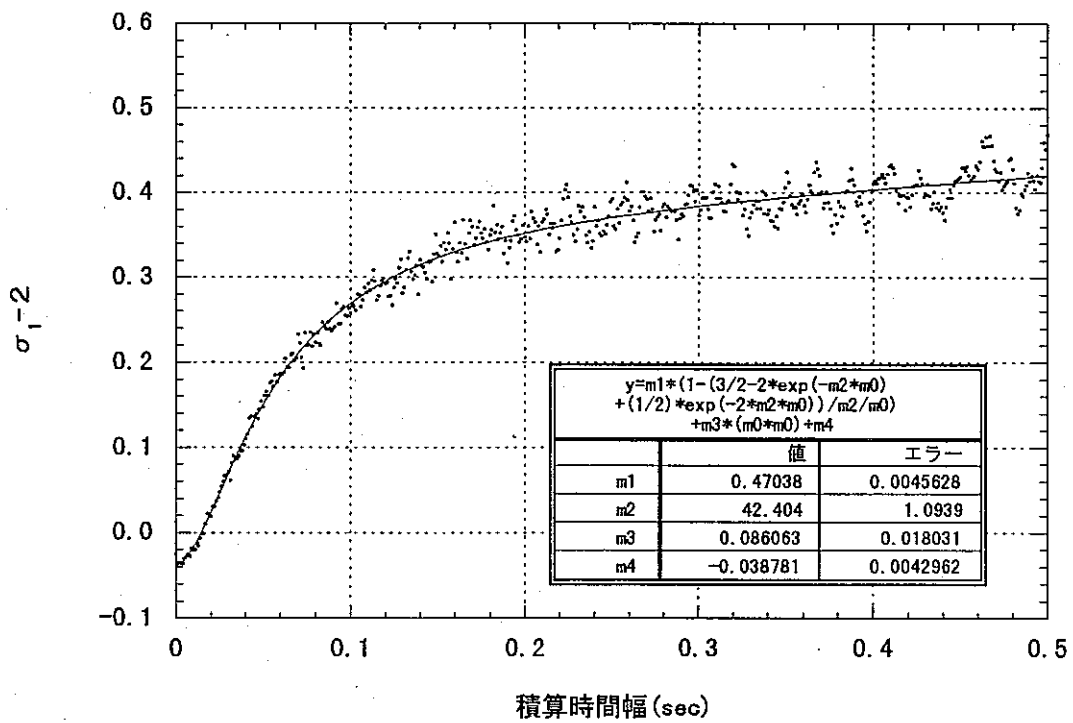


図 3 5 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.997)

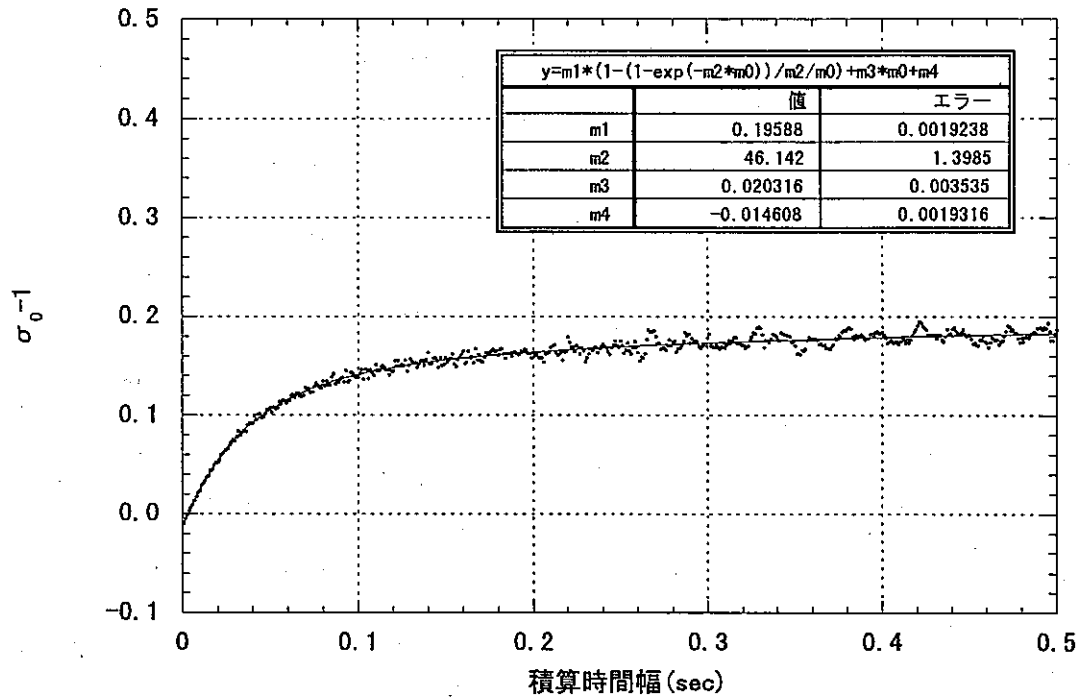


図 3 6 フィルター非適用結果 (Keff=0.996)
(1次遅発項考慮)

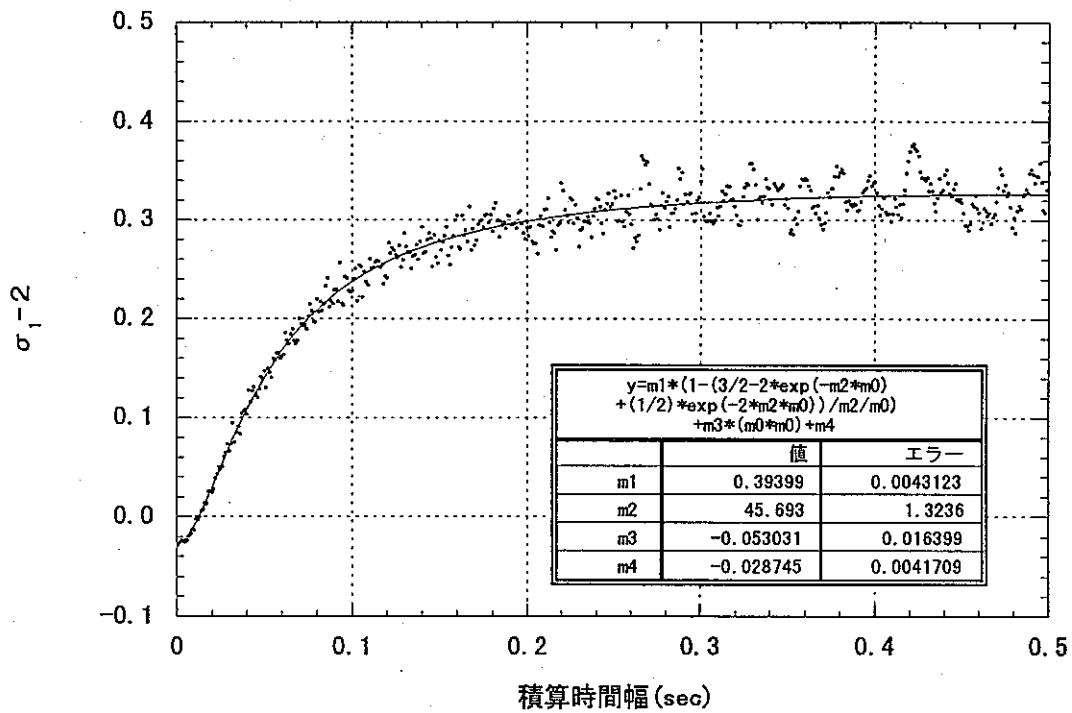


図 3 7 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.996)
(2次遅発項考慮)

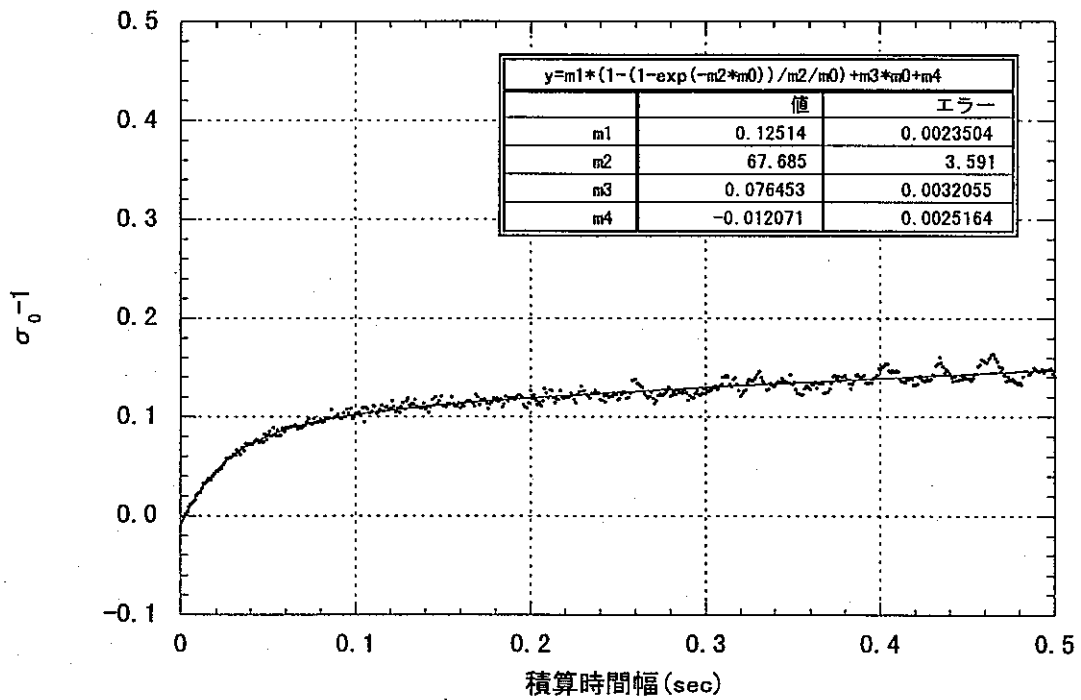


図 3 8 フィルター非適用結果 (Keff=0.994)
(1次遅発項考慮)

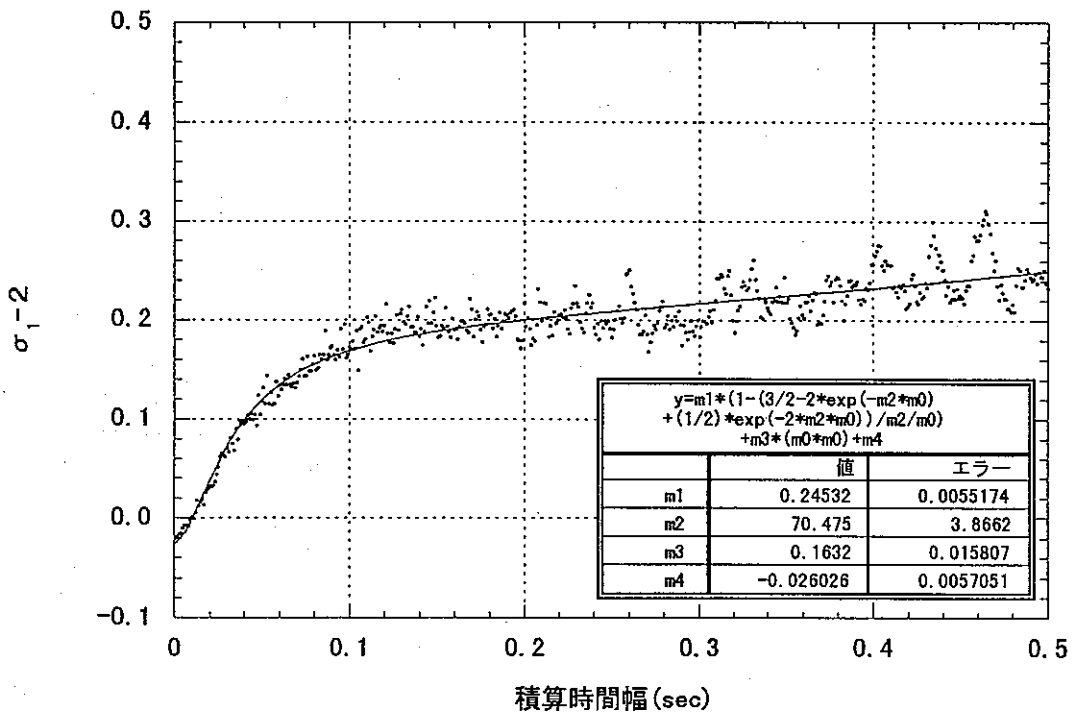


図 3 9 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.994)
(2次遅発項考慮)

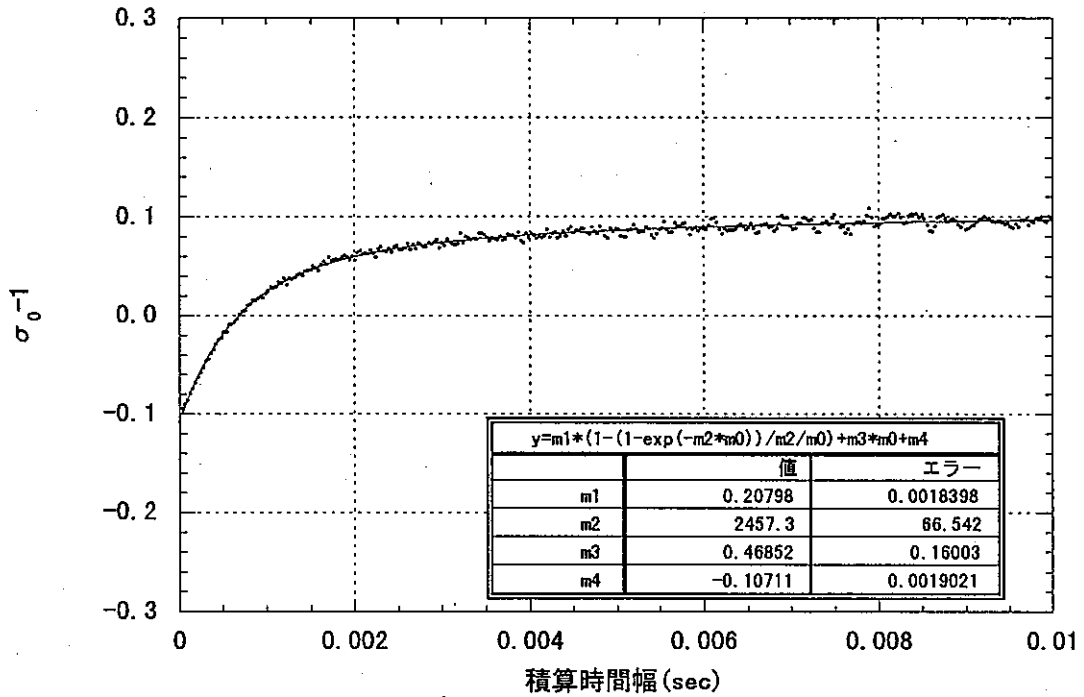


図 4 0 フィルター非適用結果 (Keff=0.867)
(1次遅発項考慮)

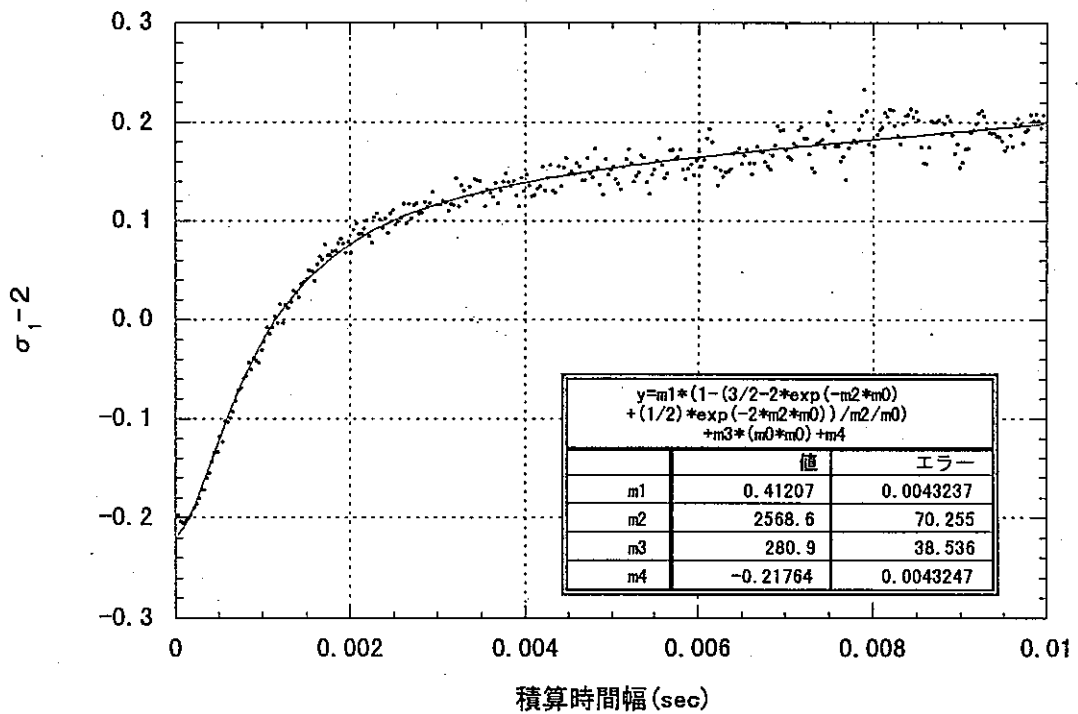


図 4 1 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.867)
(2次遅発項考慮)

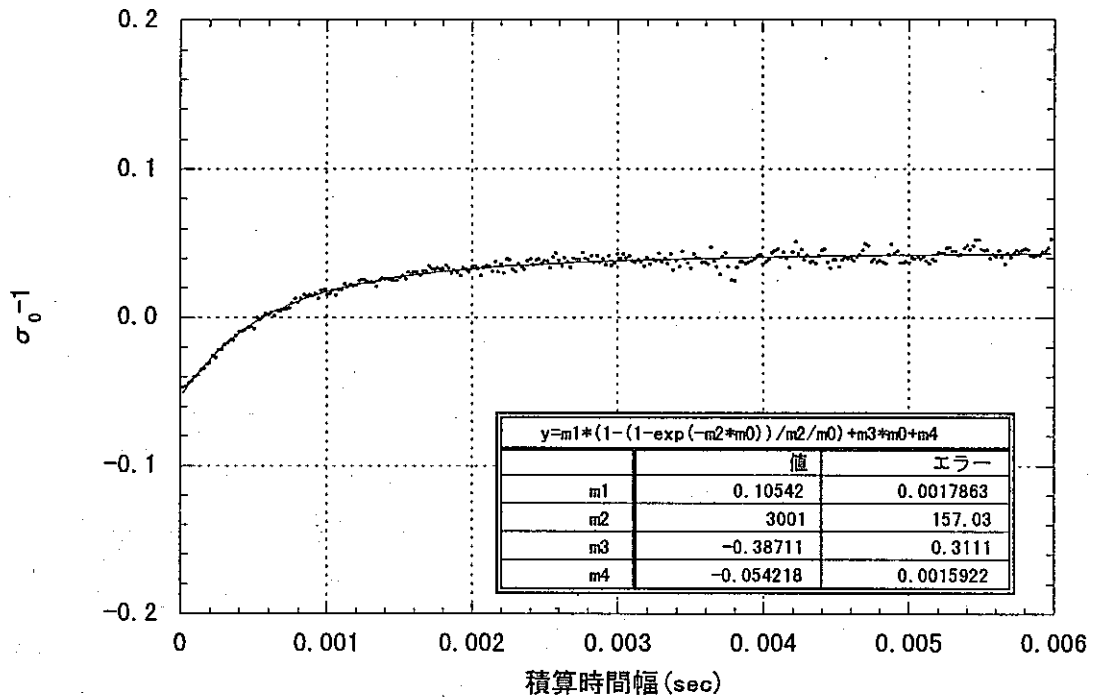


図 4 2 フィルター非適用結果 (Keff=0.811)
(1次遅発項考慮)

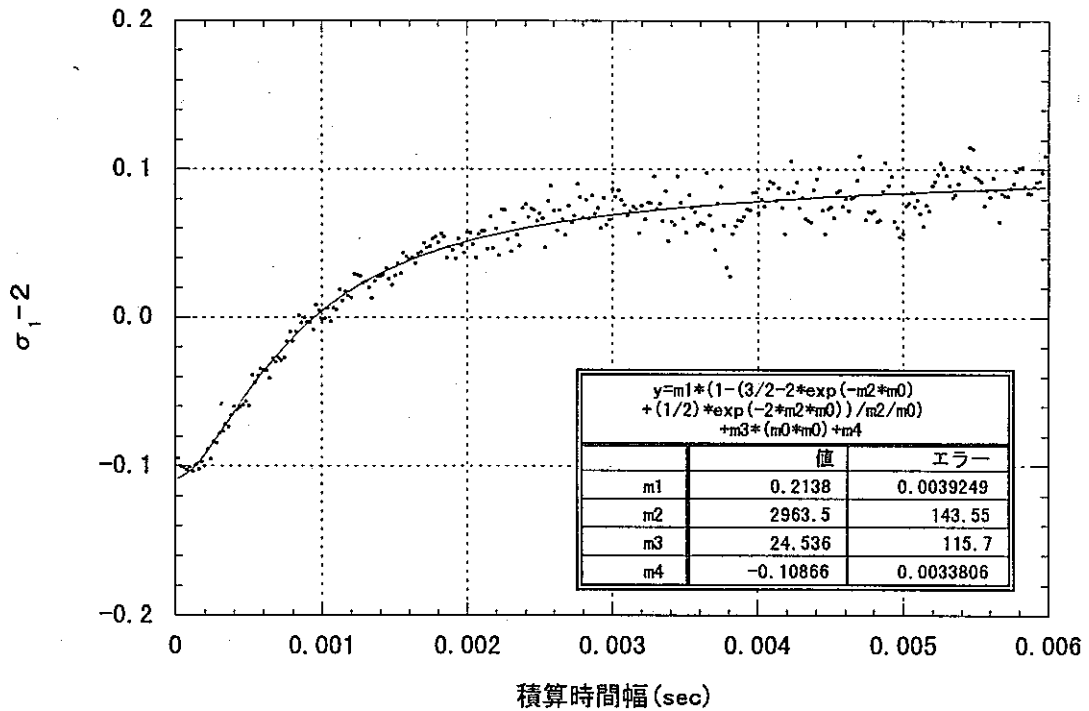


図 4 3 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.811)
(2次遅発項考慮)

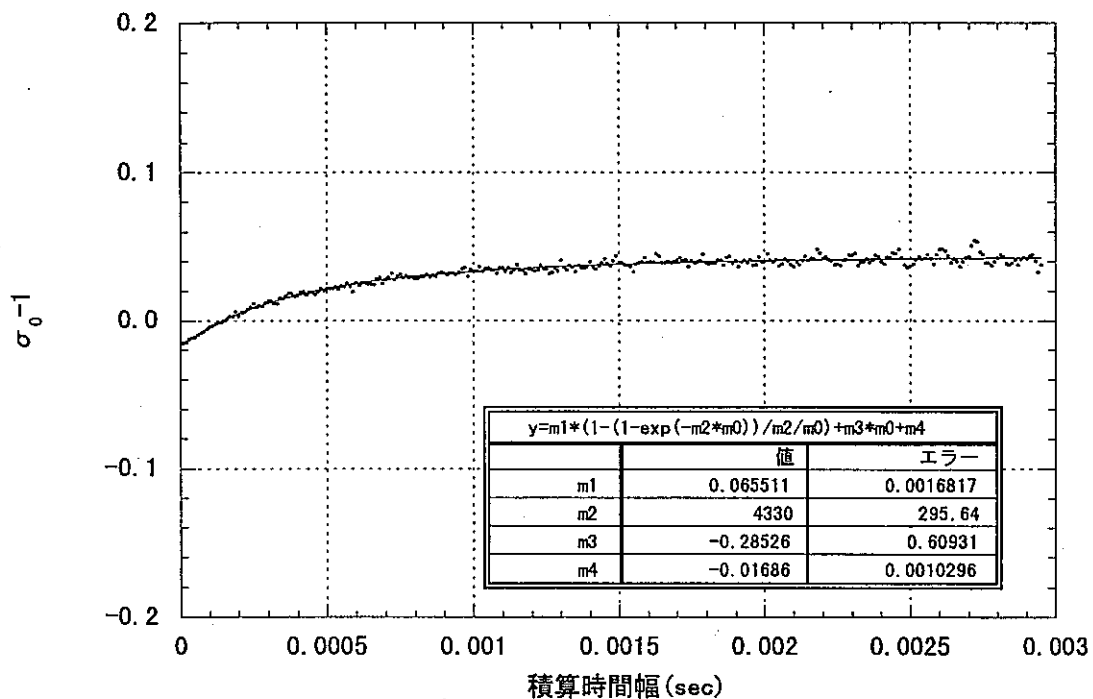


図 4 4 フィルター非適用結果 (Keff=0.663)
(1次遅発項考慮)

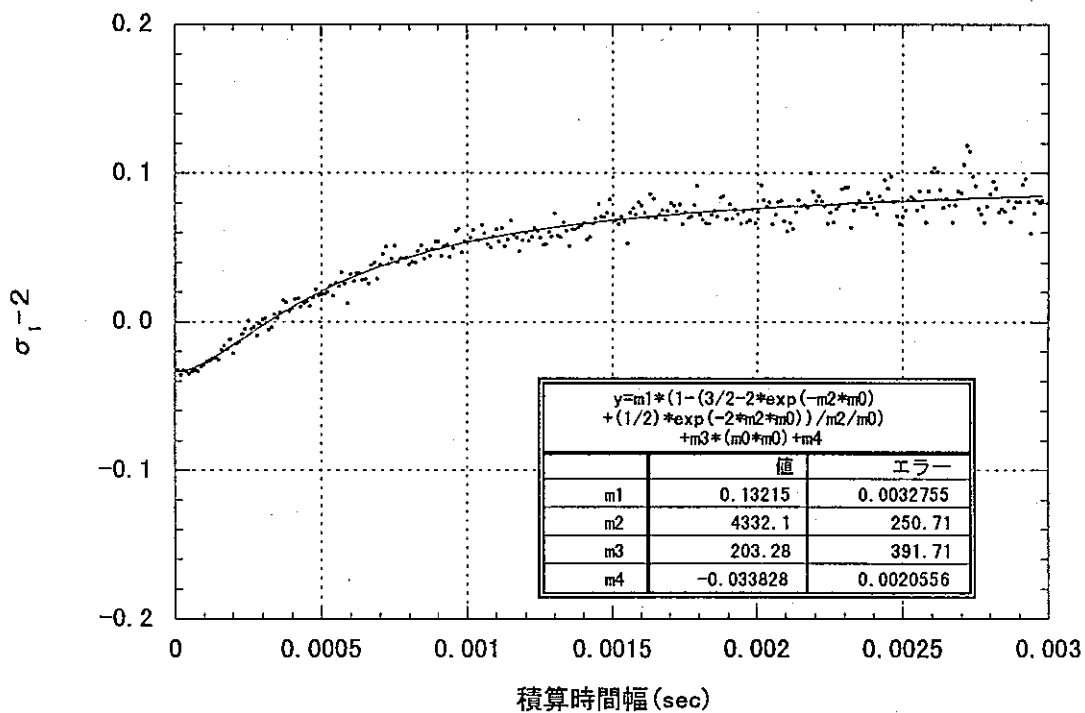


図 4 5 1次階差フィルター適用結果 (Keff=0.663)
(2次遅発項考慮)