(昭和 59 年 3 月 31 日受理)

冷却効果を含む溶融紡糸における Draw resonanceに関する研究

信州大学繊維学部 鳥海浩一郎・近田淳雄・藤本和士

DRAW RESONANCE IN MELT-SPINNING. EFFECTS OF COOLING

By Koichiro Toriumi, Atsuo Konda and Kazushi Fujimoto

(Faculty of Textiles, Shinshu University, Ueda, Nagano, Japan)

This paper attempts to quantitatively predict the occurrence of draw resonance in water-bath quenched melt-spinning of PET under non-isothermal conditions.

An empirical criterion of stability was introduced and tested against experimental spinning results and against previous simulation results by the authors.

It was found that:

(1) When newly defined nondimensional logarithmic elongation-rate (r) is larger than about 3, spinning becomes unstable to develop draw resonance.

(2) In the case of small Stanton number, onset of draw resonance was found to be predicted by simply using the above criterion on steady state solution of governing equations. The present prediction was in close agreement with theoretical and experimental results by previous workers.

(Received March 31, 1984)

1. 緒 言

Draw resonance現象は元来、溶融紡糸では冷却があまり大きくない等温紡糸に近い状態で生じるため、等温紡糸を仮定した理論的研究や、紡糸機に特別な加熱装置を付加したり、室温で液状である試料を用いる実験的研究は多く見られ、Draw resonanceの発現する臨界条件の推定など多くの成果が上げられている¹⁾。しかしながら通常の溶融紡糸に代表される非等温紡糸においてフィラメントからの熱移動の与える影響については詳細な実験データも少なく研究報告も多くない。

冷却を伴う紡糸についてDraw resonanceを生じない限界を示す安定性については、微小変動振動法による理論的研究がShahとPearson^{2,3)}によって行なわれた。また加瀬⁴⁾は同様の手法により理論結果と実験とを比較検討している。これらの研究では紡糸の流れの安定度を決める因子として、紡糸口金近傍のポリマー物性や紡糸変数、及び紡糸口金からフィラメント固化点、または巻取点までの距離で定まるスタントン数を用いている。Shahらは紡糸の安定性がスタントン数と、口金からの

平均吐出速度と巻取速度の比 Draw ratioによって定まるとし、その臨界値を求めた。加瀬はそれを拡張し、スタントン数と紡糸フィラメント周囲の空気温度によって定まる安定限界を算出している。またDraw resonanceが発現した時のResonanceの周期と理論計算で予測される周期が一致する事、溶融フィラメントが巻取点に達する前に固化し、伸長変形をしなくなるような紡糸系ではスタントン数が大きいと、紡糸系は安定になりDraw resonanceは発生しなくなる事を示した。

Pearsonらはその後、固化点を持つ紡糸条件について理論的解析を行ない、固化点の存在が紡糸の安定性と向上させる事を報告している。FisherとDenn⁶⁾はマクスウェル型の粘弾性流体モデルを用いて、非等温紡糸の理論的解析を行ない、冷却の存在及び弾性の存在が紡糸系を安定化させる事を示している。

加瀬⁴⁾は紡糸の安定性に対する直交冷却風の影響に関して、直交冷却風なしでDraw resonanceを生じている紡糸系に対して冷却風を吹きつけると、系は安定な状態に近づき resonanceの振幅は小さくなる事を示した。一方Hannら⁷⁾は彼らのDraw resonanceの観測から冷

却風速の増大が resonance の増大をもたらすと報告している。これら一見相反する実験結果については、これまでの研究結果に合わせていくつかの説明がなされている¹⁾。しかしながら Draw resonance, 及びそれよりも振幅も小さく周期性も明確でない一般の変動, いわゆる織度むらを通じての定量的解析はまだほとんど行なわれていない。

本研究は主として冷却を伴う溶融紡糸過程において発生する Draw resonance を対象に, 種々の条件下で実験を行ない, 著者らが既報で報告した^{8,9)}, シミュレーション計算による理論的考察と比較検討し, Resonance の発生挙動, 及びそれらの定量的解釈を行なう事を目的としている。

2. 実 験

溶融紡糸実験は前報⁹⁾で行なった装置による, 半水中紡糸によった。ただし今回の実験では Draw resonance の発現を制御するため, 直交冷却風装置に電気ヒーターを取り付け, 所定の温度に(20℃-100℃)に加熱した空気を送風できるように改造した。

紡糸試料には前報と同じ TiO₂ 含有, 固有粘度 0.66 のポリエステルと今回新たに, 公称固有粘度 0.73 のポリエステルの 2 種を用いた。紡糸条件は前者については表 1

に示す条件で, 後者については表 2 に示す条件で行なった。表中, 冷却風温度 T_a , 冷却風速度 V_a の測定は冷却風の吹出面から 3 cm の距離で面の中央位置で行ない, その値(平均値)が表に示す値になるように送風機, 加熱装置を調節した。図 1 及び図 2 は冷却風装置のそれぞれ, 風速, 風温の面内分布の一例を示す。風温については面内の最大値と最小値の差が約 3℃, 風速は面内約 6 cm/sec の差であり, かなり均一な風速, 風温が得られた。冷却風については面内分布よりむしろ, 風速や風温が時間的に変化すると, それがフィラメントの織度むらを引き起こし, 正確な測定を防げる可能性がある。図 3 の(a), (b), (c) はそれぞれ平均風速を 20 cm/sec, 50 cm/sec, 100 cm/sec に設定した時の風速の時間的変動を熱線風速計で測定し, MEM 法¹⁰⁾によってパワースペクトルを計算し図示したものである。横軸については, 今回行なった実験で最も多く用いた巻取速度 125 m/min から, フィラメントの長さに換算し, 単位長さ当りの波数で示した。これらのスペクトルはいずれもきわだった周期成分の存在を示していない。また変動の大きさ自体が(a)の場合 1.35%, (b)では 0.75%, (c)では 0.46% と小さく非常に安定した気流が得られている。これから判断して, 冷却風の変動が直接の原因となってフィラメントに特定周期の大きな変動が起こる事はないか, あったとしても非常に小さ

Table 1. Conditions for spinning experiments (1).

		Polymer Polyester		[η] = 0.66			
		Spinneret diameter		1.0 mm			
No.	L (cm)	T (°C)	V (cm/s)	W (g/s)	T_a (°C)	V_a (cm/s)	Resonance
1	3.5	283	416.7	0.0233	20	0	×
2	6.0	283	416.7	0.0219	20	0	×
3	18.5	283	416.7	0.0264	20	0	○
4	9.0	285	208.3	0.0178	40	20	○
5	9.0	285	208.3	0.0172	40	50	○
6	9.0	285	208.3	0.0174	40	100	○
7	9.0	285	208.3	0.0231	70	20	○
8	9.0	285	208.3	0.0255	70	100	○
9	9.0	285	208.3	0.0291	100	20	×
10	9.0	285	208.3	0.0225	100	50	○
11	9.0	285	208.3	0.0220	100	100	○
12	6.0	285	208.3	0.0227	20	0	×
13	6.0	285	208.3	0.0227	20	100	○
14	6.0	285	416.7	0.0225	20	0	×
15	6.0	285	208.3	0.0252	20	50	○
16	6.0	285	208.3	0.0263	20	0	×
17	6.0	285	208.3	0.0293	20	25	×
18	6.0	285	208.3	0.0293	20	50	○
19	6.0	285	416.7	0.0120	20	50	○
20	6.0	285	416.7	0.0225	20	50	×

L : Spinning length

W : Thru-put rate

○ : Stable

T : Spinning temperature

T_a : Cooling air velocity

×

V : Take-up velocity

V_a : Cooling air temperature

Table 2. Conditions for spinning experiments (2).

Polymer Polyester $[\eta] = 0.73$
 Spinneret diameter 0.5 mm

No.	L (cm)	T (°C)	V (cm/s)	W (g/s)	T _a (°C)	V _a (cm/s)	Resonance
1	5.0	285	208.3	0.0223	20	0	○
2	5.0	285	208.3	0.0189	20	0	○
3	5.0	285	250.0	0.0177	20	0	○
4	5.0	285	250.0	0.0210	20	0	○
5	5.0	285	333.3	0.0229	20	0	×
6	5.0	285	333.3	0.0133	20	0	×
7	5.0	285	416.7	0.0198	20	0	×
8	5.0	285	416.7	0.0187	20	0	×
9	5.0	285	416.7	0.0196	20	0	×
10	5.0	285	416.7	0.0203	20	0	×
11	4.0	285	208.3	0.0207	20	0	○
12	4.0	285	208.3	0.0235	20	0	○
13	4.0	285	250.0	0.0204	20	0	×
14	4.0	285	416.7	0.0181	20	0	×
15	4.0	285	416.7	0.0143	20	0	×
16	6.5	285	416.7	0.0176	20	0	○
17	4.8	285	500.0	0.0253	20	0	×

All symbols have the same meaning as in Table 1.

Fig. 1 Spatial distribution of cooling air velocity.
 mean velocity 51 cm/sec

Fig. 2 Spatial distribution of air temperature.
 mean temperature 70 °C

なものであろうと考えられる。

巻取った紡出フィラメントの太さ変動は前報と同じ方法で、顕微鏡、TVカメラ、Width analyzerを組合せた測定系によって測定した⁹⁾。得られた織度データは長さ方向に変動しているが、生データだけではDraw resonanceが生じているかどうか判別しにくい場合があったので、冷却風速の変動データと同じく、最大エント

Fig. 3 Power spectrum estimation for oscillation of cooling air velocity.

mean velocity	CV%
(a) 20 cm/sec	1.35%
(b) 50 cm/sec	0.75%
(c) 100 cm/sec	0.46%

ロピー法により、パワースペクトルの計算も行ない、変動の周期分析も行なった。

3. 結果と考察

3.1 Draw resonanceの判定

図4に測定結果の例を示す。(a)は実験条件4の結果で、紡糸系が安定であった場合であり、(b)は実験条件9の場合で、Resonanceが発生していると推定される。前報にも示したようにDraw resonanceが発生すると通常は図のように明確な単一周期的変動が観測される。しかしながら、Draw resonanceを生じているかどうかの

Fig. 4 Illustration for oscillation of filament thickness both stable and unstable case.

- (a) Stable spinning CV%=2.8
(b) Unstable spinning CV%=51.1

境界(臨界点と呼ぶ)付近ではピークの高さは低くなり、また波動も鋭いピークから滑らかな曲線になるため、Draw resonanceの判定は困難になる。

本研究では実験データについて Draw resonanceかどうかの判定を行なうため、測定して得られた時系列データを、前述したように、パワースペクトルを計算し、これと、変動の大きさをCV%として計算し、これら二つの値から判定した。図5はいくつかの紡糸条件に対する紡出フィラメントの太さ変動のCV%の計算例を示した。図中、温度100℃、風速0.2m/secのものが唯一明確な Draw resonanceを示している。図6、図7は紡糸条件表1のNo.4~6およびNo.9~11に対する太さ変動のパワー・スペクトルの計算例であるが、図7の(a)の場合が Draw resonanceを示した場合で、他の条件では明確な Resonanceはない。これらのスペクトルの形から Draw resonanceの振動は長い波長を持ち、大きなピークを持つ事がわかる。本研究では判定の基準として、CV%が

Fig. 5 CV% value of filament unevenness in relation to cooling air velocity and air temperature.

Fig. 6 Power spectrum estimation curves for filament thickness oscillation.

Spinning conditions: Table 1. $T_a = 40^\circ\text{C}$

- (a) $V_a = 20$ cm/sec (No. 4) CV%=3.7
(b) $V_a = 50$ cm/sec (No. 5) CV%=2.9
(c) $V_a = 100$ cm/sec (No. 6) CV%=2.8

Fig. 7 Power spectrum estimation curves for filament thickness oscillation.

Spinning conditions: Table 1. $T_a = 100^\circ\text{C}$

- (a) $V_a = 20$ cm/sec (No. 9) CV=51.1
(b) $V_a = 50$ cm/sec (No. 10) CV=5.8
(c) $V_a = 100$ cm/sec (No. 11) CV=7.8

20%以上でスペクトルの長波長側にピークを持つ場合を Draw resonanceを生じているものとして分類した。表1及び表2の右側の白丸と×印の記号はこの基準によって決めた結果を示したもので×印が Draw resonanceを生じているものである。

3.2 Draw resonance発生時の臨界条件

加瀬の指摘によれば⁴⁾、Draw resonanceを生じさせるためには紡出フィラメントがまだ熔融状態で変形しつつある時、紡糸線上一定の位置(速度固定点と呼ぶ)で、紡糸速度を強制的に一定速度に固定するような巻取を行えばよい。例えば半水中紡糸のように口金から高々数cmの位置で常温の水中に紡糸フィラメントを通して急

冷固化させる時の水面とか、フィルム製膜過程で、一定速度で回転する冷却ロールに溶融状態のフィルムを接触させる時のロールとの接触点が上記の条件になる。

一方同じく加瀬の報告によってもこれら条件は必要条件であっても十分条件とはいいがたく、実際速度固定点でまだ変形しつつある状態の紡糸条件でも安定である場合があるようである⁴⁾。そこで、速度固定点における変形量によって紡糸系が安定系から不安定系になり、Draw resonanceが生じる臨界条件を定める事が出来ると推定される。

実際の紡糸でこれらの値を直接測定する事は不可能なので、ここでは定常紡糸に対するシミュレーション計算を行ない、その計算結果から得た変形量と、同一紡糸条件で紡糸実験を行ない、その条件で紡糸系が安定であるかどうかを繊維変動の測定結果から判定し、両者の比較から臨界条件を求める事を試みた。定常紡糸に対するシミュレーション計算は以前報告した⁸⁾方法を用いた。

図8は定常紡糸のシミュレーション計算の結果から無次元対数伸長速度 r を、

$$r = \frac{L}{v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1)$$

と定義し、これを紡糸線に沿っての位置 x に対してプロットしたものである。容易に計算される事だが、ニュートン流体の等温紡糸の場合、通常用いられる仮定の下でこの値は紡糸線に沿って一定であり、Draw ratioの自然対数値 $L_n(D)$ に等しくなる。

図8と表1を比較した結果無次元対数伸長速度の速度固定点における値が約3を越えるとDraw resonanceが発生する事がわかる。無次元対数伸長速度の紡糸線に沿っての値の変化は、ニュートン流体の等温紡糸の場合で

Fig. 8 Result of computer simulation assumed as steady-state spinning.
Nondimensional logarithmic extension rate ($\frac{L}{V} \frac{\partial V}{\partial x}$) for various spinning conditions.

も、重力、加速度、空気抵抗などが無視できない程大きければこれらの影響を受ける。しかし、非等温紡糸の場合には、冷却効果の影響が最も大きいと考えられるので、次の仮定の下に考察を行なった。

すなわち、

(1) 張力は紡糸線に沿って一定。本実験の範囲では紡糸線は高々10cm程で短く、紡糸速度も250m/min程度で大きくないので、妥当な仮定と考えられる。

(2) ポリマーはニュートン流体であり、その伸長粘度は温度のみに依存し、アレニウス型の関数で表わされる。

以上の仮定の下で、非等温定常状態の紡糸過程は以下の四つの式で与えられる。

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$F = A \cdot \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp[E/(T+273)] \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \pi \frac{K_a \cdot Nu}{C_p \cdot W} \cdot (T_a - T) \quad (5)$$

(3)式を(2)式に代入し、(1)式及び紡糸線に沿っての座標を以下の(6)式によって無次元化し整理すると、(7)式が得られる。

$$X = L \cdot x \quad (6)$$

$$\frac{\partial r}{\partial X} + \frac{\partial v}{v \cdot \partial T} \frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad (7)$$

ここで

$$v = \eta / \rho$$

さらに(4)式を代入して、 r に関する微分方程式が(8)式のように得られる。

$$\frac{\partial r}{\partial X} + \frac{\pi K_a \cdot Nu}{C_p \cdot W} \cdot \frac{E(T - T_a)}{(T + 273)^2} r = 0 \quad (8)$$

$$\int_0^1 r dX = \ln(D) \quad (9)$$

(9)式は r に対する境界条件を与える。温度 T やヌッセルト数 Nu は紡糸線に沿って変化するため、 r は(8)式及び(9)式から直接求める事は出来ないが、 $X=1$ における r の値を形式的に計算すると、

$$r = r(X=1) = C \cdot \exp\left[-\int_0^1 \frac{\pi K_a \cdot Nu}{C_p \cdot W} \cdot \frac{E(T - T_a)}{(T + 273)^2} dX\right] \quad (10)$$

になる。 C は条件(9)から決定される積分定数である。

(10)式の指数関数の中を K とおくと、すなわち、

$$K = \int_0^1 \frac{\pi K_a \cdot Nu}{C_p \cdot W} \cdot \frac{E(T - T_a)}{(T + 273)^2} dX \quad (11)$$

速度固定点($X=1$)における r はDraw ratio D の対数値

と、 K の両者によって決定される事になる。なお、

$$St = \frac{\pi K_a \cdot Nu \cdot L}{C_p \cdot W} \quad (12)$$

$$v^* = \frac{R}{2L} v \quad (13)$$

とすると、 St は v^* を代表速度とするスタントン数であり、このパラメータが紡糸の安定限界に影響を与える事は加瀬¹¹⁾によって報告されている。加瀬^{4,11)}は D 、 E 等が一定であるとして、 St と周囲温度 T_a の二つをパラメータとして、種々の紡糸条件に対して、微小変動をする非定常紡糸系を仮定し、摂動法による線型近似シミュレーション計算を行ない、安定限界の算出を行なっている。

表3は種々の紡糸条件について、定常状態に対する数値計算を行ない、その結果から K の値を求め、Draw ratio、無次元対数伸長速度をまとめたものである。表の右側2列の記号は、その紡糸条件が安定であるかどうかを示したもので、exp.は実験結果から判定したもの、comp.はシミュレーション計算の結果を示している。×はDraw resonanceを生じ、不安定であった場合を、○は安定であった場合を示している。 $r > 3$ という安定条件は実験・理論共よく一致している。以上の結果から、固化点など速度固定点において無次元対数伸長速度 r がおおよそ3以上になると、紡糸系が不安定になり、Draw resonanceを発現するものと結論できる。

なお、この条件は必ずしも冷却を伴う紡糸の場合だけ

ではなく、非ニュートン流体の等温紡糸等一般的に成立するものと推定される。付録に、伸長度が指数則に従う場合の流体の等温紡糸の解析を行ない、従来の報告と比較した結果を示す。

本研究で行なった紡糸実験の範囲はスタントン数の小さい比較的等温紡糸に近い条件の場合であるが、このような条件内では、上の結果から、紡糸条件と安定限界を近似的に直接導く事ができる。以下にその結果を示す。

紡出フィラメントの温度は、口金点での温度から、速度固定点まで次第に減少していくが、その値は比較的小さいものとして、口金点における温度(紡糸温度)で一定とする。またヌッセルト数は同じく紡糸線に沿って変化するが、これは速度の大きい所でより効果が大きいの、速度固定点(水面)における値に等しいものとする。以上の仮定の下では(11)式は、

$$K = \frac{\pi K_a Nu_1}{C_p \cdot W} \cdot L \cdot \frac{E(T_0 - T_a)}{(T + 273)^2} \quad (14)$$

となる。この値を用いて、(8)式を(9)式の境界条件の下に解くと、

$$r(x=1) = \frac{K \cdot \exp(-K)}{1 - \exp(-K)} \ln(D) \quad (15)$$

が得られる。先に求めた臨界条件 $r(x=1)=3$ を代入し、横軸にDraw ratio、たて軸に K を取り、 K とDraw ratioの関係をプロットしたものが図9の実線である。 K の値は(14)式から紡糸条件、紡糸流体の物性から定まる。また表1及び表2の紡糸条件に対して、 K とDraw ratioを計算し、図中に記号でプロットした。○は安定であったもの、×は不安定であったものを示す。実験結果は図の実線の上下で明確に分離され、スタントン数の小さい(約0.2以下)範囲に限定されるが、(15)式の結果を溶融紡糸の安定条件を決定する値として用いる事ができる事を示している。

Fig. 9 Critical K -value versus draw ratio (D) for onset of draw resonance.

Experimental results are plotted by symbol ○ as stable and × as unstable.

Table 3. Comparison of experimental and computational result.

No.	K	Dr	r	Exp.	Comp.
1	0.377	172.9	4.06	×	×
2	0.690	184.0	3.43	×	×
3	1.965	152.6	1.47	○	○
7	0.916	87.2	2.90	○	○
9	0.645	69.2	3.15	×	×
10	1.032	89.5	2.78	○	○
11	1.278	91.5	2.48	○	○
12	0.461	95.9	3.52	×	×
13	1.278	88.7	2.38	○	○
14	0.464	177.5	3.99	×	×
15	0.949	79.9	2.81	○	×
16	0.386	76.6	3.44	×	×
17	0.669	67.8	3.04	×	○
18	0.812	66.7	2.83	○	○
19	1.671	335.8	2.57	○	○
20	0.999	179.1	3.26	×	×

Exp. experimental Comp. computational
result for onset of draw resonance.

K and r are calculated from eq. (10) and (11).

Dr: Draw ratio

No. is correspond to that in Table 1.

Fig. 10 Comparison of critical curves calculated by Kase and others at the spinning conditions used by Kase.

----- Shah and Pearson²⁾³⁾
 Kase⁴⁾¹¹⁾
 ————— Author's result

以上の結果を、加瀬^{4,11)}の結果と比較するため、紡糸条件を、 $D=264$, $T_0=270^\circ\text{C}$, $E=3500^\circ\text{K}$

$$St_1 = \frac{\pi K_a \cdot Nu_1}{C_p \cdot W} \cdot L$$

として、(14)式の K を計算して $K=St_1 \cdot 0.011 \cdot (270 - T_a)$ を求めた。本研究における St_1 数と加瀬の St 数の間には、代表値を口金側取るか、巻取側取るかによって、およそ、

$$St_1 = D^{0.167} \cdot St$$

の関係があるので、これより、 $St = St_1 / 2.54$ とおいた。

St と T_a の関係をプロットしたものが図10である。 St 数の小さい範囲で加瀬の結果、さらにはShah-Pearson^{2,3)}の关系到非常に一致している。

4. 結 論

紡出フィラメントに対する冷却効果が無視できず、等温紡糸とは仮定できない紡糸条件下でのDraw resonance発現の条件を得るため、ポリエステルの中溶融紡糸実験を行なった。これと、溶融紡糸過程の非定常シミュレーション計算の結果及び理論的考察の結果を比較検討し、以下の結論を得た。

1) 定常紡糸状態に対する理論的考察と紡糸実験の結果から、Draw resonance発現の臨界条件は、速度固定点における無次元対数伸長速度が((1)式)およそ3になる事であると推定される。この値以上で紡糸系は不安定になる。紡糸実験の結果、および非定常紡糸過程に対するシミュレーション計算の結果ともよく一致した。

2) 1)の結果を使用して、比較的等温紡糸に近い(スタント数が小さい)条件では、臨界条件は、各紡糸条件から直接計算される。この結果は本紡糸実験の結果とよく対応し、また加瀬ら、およびShahとPearsonの得た

結果と比較したところ、よく一致する結果が得られた。

ここで得た判別条件は理論的に証明されたものではなく、経験則であるが、簡単な判別法として利用できるものと考えられる。

3) 同一紡糸条件下で実験とシミュレーション計算結果を比較したところ、Draw resonance発現に関しておおむね一致した。臨界条件近くでは振幅が小さく判別が困難であった。

4) (1)式が3を越えると不安定化するという結果は冷却のある紡糸以外の条件にも適用可能であると考えられ、実際Shah-Pearsonが解析した、伸長粘度の伸長速度依存性がべき法則に従うような流体モデルの等温紡糸に対して適用した所、Shahら^{A-1, A-2)}及びKaseら^{A-4)}の結果とべき指数の小さい範囲で比較的良好一致した(付録参照)。

付記：本実験に用いたポリエステル試料は帝人株式会社より提供されたもので、誌上を借りて感謝の意を表します。また本実験を行なう上で協力を得た元本学学生の小久江・萩原両君に感謝致します。

文 献

- 1) Petrie, C. J. S. and M. M. Denn, *A.I.Ch.E. Journal*, **22**, 209 (1976)
- 2) Shah, Y. T. and J. R. A. Pearson, *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, **11**, 45 (1972)
- 3) Pearson, J. R. A. and Y. T. Shah, *ibid.*, **13**, 134 (1974)
- 4) Kase, S., *J. Appl. Polym. Sci.*, **18**, 3279 (1974)
- 5) Pearson, J. R. A. and Y. T. Shah, *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, **15**, 31 (1976)
- 6) Fisher, R. J. and M. M. Denn, *A.I.Ch.E. Journal*, **23**, 23 (1977)
- 7) Han, C. D. and R. R. Lamonte, *Appl. Polym. Sci.*, **16**, 3307 (1972)
- 8) 鳥海, 近田, 清水, 織学誌, **38**, 49 (1982)
- 9) 鳥海, 織学誌, **40**, 193 (1984)
- 10) 日野幹雄, スペクトル解析, 朝倉書店(1977)
- 11) 加瀬, 織機誌, **27**, 167 (1974)
- A-1) Shah, Y. T. and J. R. A. Pearson, *Poly. Eng. Sci.*, **12**, 219 (1972)
- A-2) Pearson, J. R. A. and Y. T. Shah, *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, **13**, 134 (1974)
- A-3) Fisher, R. J. and M. M. Denn, *A.I.Ch.E. Journal*, **22**, 236 (1976)
- A-4) Kase and Araki, *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 4439 (1982)

付 録

本文(1)式の値が巻取側速度固定点で3を越えると不

安定になるという条件は、冷却を伴う熔融紡糸に限定されるわけではない。ニュートン流体の等温紡糸の場合、(1)式は紡糸線に沿って常に一定であり、従って本研究で得た条件は、Draw ratioの自然対数値が3以上になる事に対応する。これは既に多くの研究者によって報告されている。

ここでは流体の伸長粘度が伸長速度のべき乗に比例するような非ニュートン流体の等温紡糸に上記条件を適用してみる。本文と同様、慣性力、重力、空気抵抗などを無視し、紡糸張力は紡糸線に沿って一定である(時間のみによって変化する)と仮定する。定常状態では、紡糸系は、

$$W = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{A-1})$$

$$F = \eta_0 \cdot A \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^n \quad (\text{A-2})$$

$$v = V_0 \quad x = 0 \quad (\text{A-3})$$

$$v = V_1 \quad x = L \quad (\text{A-4})$$

の方程式で表わせる。ここで n はべき指数である。(A-3)(A-4)の境界条件下で(A-2)に(A-1)を代入し、解くと、

$$v^{1-\frac{1}{n}} - V_0^{1-\frac{1}{n}} = (V_1^{1-\frac{1}{n}} - V_0^{1-\frac{1}{n}}) \cdot \frac{x}{L} \quad (n \neq 1) \quad (\text{A-5})$$

$$v = V_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^{\frac{x}{L}} \quad (n = 1) \quad (\text{A-6})$$

この結果から、本文(1)式の臨界条件式を計算すると、

$$\ln(D) = 3 \quad (n = 1) \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{n}{n-1} (1 - D^{\frac{1}{n}-1}) = 3 \quad (n \neq 1) \quad (\text{A-8})$$

$$D = V_1 / V_0$$

指数 n と D の関係を図A-1に示す。べき乗則伸長粘度を持つ流体の等温紡糸の安定性についてはすでに、ShahとPearson^(A-1, A-2)およびKaseとAraki^(A-4)によって理論的解析が行なわれている。図にはこれらの結果を同時に点線で示したが、指数 n が1より小さい範囲では比較的良好に一致している。またFisherとDenn^(A-3)はマクスウェル型の粘弾性流体で伸長粘度がべき乗則に従う場合について、理論計算結果を報告している。緩和時間を0に外挿した時の結果は、上のべき乗則流体の場合に対応

Fig. A-1 Critical draw ratio (D) versus flow index (n) for onset of draw resonance in isothermal spinning of power-law fluid.

1. solid line	Author's result
2. dotted line	Shah and Pearson (A-1)
3. dotted line	Shah and Pearson (A-2)
4. dotted line	Kase and Araki (A-4)
5. ○	Fisher and Denn (A-3)

する。この報告は n が1より小さい範囲に限定されるが、他の結果とよく一致している。 n が1より大きい範囲では著者らの結果は他の結果との一致はよくない。本研究の結果では、 n が1.5以上ですべての D に対して、系は安定になる。Shahらは n が1.5以上でほとんどすべての D に対して安定であるとしているが^(A-1)、Kaseらは詳細な理論解析の結果、 n が2の時、安定限界の D は無限大になる事を示した^(A-4)。著者らの結果は、安定限界の D が n に対して単調に増加し、 n が1より大きい値で無限大なるという定性的特徴は一致している。ここで求めた臨界条件は理論的に証明されたものではなく、経験則であるが、(1)式の値が主要な因子である事を示している。この値は紡糸線に沿っての走行糸の変形状態を与えるもので、直接的には物性等の影響は受けないため、一般的な因子であると推定される。