ノー ト

Viscoelasticity of Blood

by

Makoto KAIBARA and Eiichi FUKADA

(The Institute of Physical and Chemical Research, Wako, Saitama 351)

The dynamic rigidity and loss modulus of blood were measured. Two different kinds of apparatus were used at different ranges of frequency and shear rate. For the blood sample with a 43 per cent hematocrit, the dynamic viscosities η' and η'' decreased with increasing shear rate. At high shear rates, η'' was not observable. For a blood sample with a larger hematocrit, 64 per cent, η'' became observable.

For horse blood samples with the hematocrit below 50 per cent, the dynamic rigidity and loss were found to be time dependent at low measuring frequency and shear strain. This would be associated with the formation of rouleaux and their network.

血液の粘弾性

貝原真・深田栄一*

(原稿受理：1976年12月1日)

1. 緒言

ある種の動物（ヒト，ウマ等）の血液は，静止に近い状態で赤血球が棒状凝集物（rouleaux）を形成する．赤血球が rouleaux 等によるある種の構造を形成することが，血液が非ニュートン粘性を示し，降伏値をもつ原因の一つであると考えられている．最近血液の粘弾性測定に関する報告が^{2, 3}なされている^{1)~3)}．血液の弾性率は非常に小さく，これを測定するには高感度の測定器が必要とされる．ここでは血液の粘弾性を測定するために試作した装置と，それによって得られた結果のいくつかについて記述する．

2. 実験

2・1 測定装置

2・1・1 二重円筒型低ずり粘弾性計⁴⁾

同心二重円筒の間に試料を入れて，外筒を正弦的に回転振動させると，試料の粘弾性のために内筒にトルクが働き，内筒の上部の鏡が回転して光の反射量に変化する．このトルクは光の反射の変化量を電気信号に変換して検出される．ずり歪とずり応力の関係を表すリサージュ図から，動的弾性率 G' と損失弾性率 G'' が求められる．測定のずり歪は 0.06~0.2 の範囲で，また周波数は 0.02~1Hz の範囲で変えられる．この装置の検出可能な最小トルクは約 0.01 dyne・cm である．

2・1・2 キャピラリー型粘弾性計

この装置の原理を Fig. 1 に示す．約 1 ml の血液を 51 本からなるキャピラリーの束を通して連絡している上下の試料溜に満たす．1 本のキャピラリーの長さは 6.5mm，直径は 0.3mm である．bellows のついた加振板を加振器により上下に振動させ，キャピラリー内に振動的な流れを起こさせる．その時に液体中に発生する圧力変化は，圧電セラミックスで検出される．検出された力に比例する電圧を増幅し，位相検波回路へ導き，加振板の変位速度と同位相の成分と変位と同位相の成分とに分離する．前者から複素粘性係数の実数部 η' が，後者から虚数部 η'' が求められる．こ

Fig. 1. The schematic diagram of capillary type viscoelastometer.

* 理化学研究所 埼玉県和光市広沢 2-1

の装置では周波数は 30~100Hz の範囲で変えられ、また平均ずり速度は $1,500 \sim 7,500 \text{ sec}^{-1}$ の範囲で変えられる。

2.2 試料

血液は抗凝固剤として 3.8% クエン酸ナトリウム水溶液、あるいはヘパリン-ナトリウム水溶液を用いて採血した馬と牛のものをを用いた。リンゲル液中の赤血球サスペンション（以後赤血球サスペンションと略す）は、血液を遠心分離して赤血球と血漿に分け、赤血球を3度リンゲル液で洗浄した後、リンゲル液に再浮遊させてつくった。

3. 結果と考察

Fig. 2 に馬の血液の η' , η'' とずり速度の関係を示す。測定は低ずり粘弾性計（ずり速度 $0.35 \sim 1 \text{ sec}^{-1}$ ）とキャピラリー型粘弾

Fig. 2. The dynamic viscosities η' and η'' for horse blood determined by two types of apparatus.

Fig. 3. The values of dynamic rigidity G' and loss G'' for horse blood and the red blood cells suspended in Ringer solution as a function of hematocrit.

性計 ($1,500 \sim 7,000 \text{ sec}^{-1}$) で行った。低ずり粘弾性計による測定では η' , η'' は時間依存性を示すので、ここでは η' , η'' の最大値を各ずり速度に対して図示した。 η' , η'' はずり速度の増加とともに急速に減少し、特にヘマトクリット (Ht) 43% の血液では、 $1,500 \text{ sec}^{-1}$ 以上のずり速度で、 η'' は測定されなかった。

Fig. 3 に馬の血液（全血）および赤血球サスペンションの G' , G'' と Ht の関係を示す。 G' , G'' は Ht に著しく依存している。rouleaux を形成しない赤血球サスペンションの G' の値は、低い Ht では全血に比べて小さいが、Ht が増すにつれて全血の値に急速に近づく。

Fig. 4 に Ht が 21% と 35% の馬の血液の G' , G'' の時間変化と、これらの血液の赤血球の沈降の時間変化を示す。あらかじめ血液をずり速度 60 sec^{-1} の定常流下に 1 分間おいて赤血球の凝集構造を破壊した後、直ちに試料に振動歪を与えて G' , G'' の測定を行った。赤血球の沈降が認められる前に G' , G'' は急速に増加した後減少する。 G' , G'' の最大値および G' , G'' の値が最大になるまでの時間は Ht の減少とともに減少する。 G' , G'' の初期の急速な増加は、rouleaux による構造の形成に伴う変化と考えられる。それに続く減少は、形成された rouleaux の網目の構造変化に関係していると考えられ、この構造変化とともに赤血球の沈降が進むと思われる。

Fig. 4. The changes of G' , G'' and the erythrocyte sedimentation (ES) for horse blood with the measuring time.

rouleaux を形成しない牛の血液や馬の赤血球サスペンションでは G' , G'' の時間依存性は観測されず、また赤血球の沈降も測定時間範囲内ではほとんど起こらなかった。これらの血液の示す弾性は、赤血球間の弱い相互作用や赤血球と血液中の他の物質との相互作用等によると考えられる。Ht が極端に高い場合には赤血球の変形、すなわち赤血球自身の弾性も影響すると考えられる。

キャピラリー型粘弾性計を試作されたリオン株式会社の大野寿彦氏、荒木宏氏、本間章氏に深く感謝の意を表します。この研究は文部省科学研究費の援助によるものである。

(昭和51年10月30日 第24回レオロジー討論会にて講演)

文 献

- 1) Thurston, G.B., *Biophys. J.*, **12**, 1205 (1972).

-
- 2) Lessner, A., J. Zahavi, A. Silberberg, E.H. Frei, and F. Dreyfus, "*Theoretical and Clinical Hemorheology*", p. 194 (1971) Springer, Berlin.
 - 3) Chien, S., R.G. King, R. Skalack, S. Usami, and A.L. Copley, *Biorheology*, **12**, 341 (1975).
 - 4) Fukada, E., and M. Kaibara, *Thrombosis Res.*, Suppl. II, **8**, 49 (1976).