Mooney　Viscometer（MVR）　vs　Rheometer (FDR)　　　　　2025.9.4　M.Hasumi

1. History

天然ゴム(Natural　Rubber)は非常に分子量が大きい成分(Gel)が含まれていて、そのままでは加工に適さない。Banbury　MixerやKneader、Open　millで強力な剪断力をかけてgelを破壊し低分子量化する。この操作を素練り（mastication）と呼ぶ。素練りの程度を表すために可塑度計(plastometer)が使われ、代表的なものは2枚の平行板の間でゴムを圧縮するWilliams Plastometerである。Williams　Plastometerは今もシリコーンゴムの分野で使われている。

1934年U.S.Rubber社のDr. Melvin Mooneyは回転円盤式の装置を考案し、Viscometerと名付けた。

第二次世界大戦が始まったとき、米国のタイヤ会社は東南アジア産の天然ゴムとドイツ製の合成ゴム(SBR)を使っていたが、どちらも入手困難になった。戦争によりゴムの需要は急増し、困った米国は石油化学工業による合成ゴムを研究し、GR-S(SBR)、GR-A(NBR)、Neopreneなどを開発した。初期の合成ゴムは品質性能が不十分なだけでなく、天然ゴムの設備で加工することが困難なことが多かった。このとき、加工性指標としてMooney Viscosityが有効であったので、合成ゴムだけでなくカーボンブラックなどを混合したコンパウンド（rubber　compound）にもMooney　Viscometerが使われるようになった。

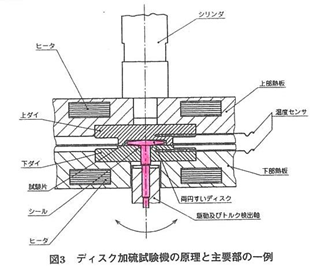
合成ゴムメーカーのカタログには必ずMooney　Viscosityが記載されていて、配合技術者(compounder)はそれを参考にしてゴムの銘柄を選択する。Mooney　Viscometerはゴム会社の必需品となった。

Mooney　Viscometerは通常100℃で5分間測定する。この温度ではゴムの加硫は起こらないが温度を125℃に上げると加硫が始まる。125℃で加硫開始するまでの時間はスコーチタイム(scorch　time)と呼ばれ、加硫特性の一つとして早期加硫を起こさずに加工できる時間の目安としてcompounderはMooney　Viscosity同様にScorch　timeを重視している。

第二次世界大戦以前は天然ゴムがほとんどであり、加硫促進剤(Accelerator)も限られていたが、いろいろなな合成ゴムか出現し、acceleratorも多彩になり、その配合技術も多様化すると加硫の挙動を解析する加硫試験機が必要になった。

Mooney　Viscometerは密閉した円形chamber(dies)の中に円盤状ローターがあり2rpmで回転させトルクを検出している。125℃よりも温度を上げて150℃とか160℃にすれば、ゴムが加硫する状況をみることが出来るはずであるが、ローターとゴムの間でスリップして不可能である。機械強度的にも不可能である。そこで加硫専用の装置が作られるようになった。

第一世代は1950年代に作られたVulkameter、Curometerといった往復振動形で、第二世代は1960年代のOscillating　Disk　Rheometer(ODR)の密閉ねじり振動形である。ムーニー粘度計はローターを一方向に回転するが、傘型のローターに微小角度（±1deg　or　±3deg）の往復ねじり振動を与えてトルクを検出するものである。ODRによって加硫試験機の性能は飛躍的に向上し、Monsanto社のODR100型および類似品は広く普及した。しかし、ローターの軸を伝わって放熱するので、温度コントロールが不十分であった。

　ダイアグラム, 設計図

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。　　

　 ローター使用の密閉ねじり振動形レオメーター　Oscillating Disk Rheometer(ODR)

第三世代は1980年代に開発されたローターレスの密閉ねじり振動形で、ローターを使わずにdiesに往復ねじり振動をあたえることで放熱の欠点を解消した。先鞭をつけたのがMonsantoのMoving　die　Rheometer(MDR)で、事実上後発メーカーに対する標準となった。更にPC化も図られ現在に至っている。

　　日本では1960年代にJSR(現ENEOS)がローターレス加硫試験機「Curastometer」を開発し、

低価格であったので非常に普及し、高価なMDRは一部の合成ゴムメーカー、タイヤメーカ

ーにしか使われなかった。CurastometerはⅡ型、Ⅲ型、V型、W型、Ⅶ型と進化したが、Ⅲ

型以降は平行円盤dies（Flat　dies）となり、同一SpecのFDR(Ueshima)、RLR(Toyo-seiki)

も作られているので現在3社が製造している。日本国内ではflat　diesが主流であり、日本の

ゴム会社では加硫試験機は必需品としてタイヤメーカー、工業品メーカー、大会社、小会社を

問わず保有している。

しかし国外への輸出はあまり行われず、アジア地域を含むヨーロッパ、北米市場では

Monsanto（現Alfa-Technologies）のMDRあるいはその模倣品が使われている。

なかでも中国にはMDR模倣品を作る会社が10社以上あり、10,000 US$程度の低価格と聞

いているが、その性能、品質、耐久性などは全く信頼できないと思う。

　　Moving　die　Rheometer(MDR)の問題点については別に資料があるが、

1. Diesのprofile、dimensionが公開されていない。模倣品を作る会社が多数あるが、基準となるものがないのでalfa-technologies　MDRと同一であるか不明である。Diesのprofile、dimensionが異なれば測定結果は同じにならないことは明白である。

ねじり角度なども初期のMDRを模倣したマシンもあると聞いている。

1. MDRのbicornical　diesは中央が薄く周辺が厚くなるので中央は早く加硫し周辺は加硫

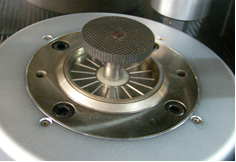
が遅れる。それに加えてMDRは上下にヒーターがあるが、側面にはヒーターがなく、側面への放熱によって周辺部は加硫不足となる。

Curing　behaviorを測定する装置でありながら、加硫状態が均一でないということは全くおかしなことである。

1. MDRのdiesには放射状の溝があるが、スリップを防止できない。

　　こういう問題点をalfa-technologiesが改善する動きは見られない。

1. MVR(Mooney　Visvometer)　の目的

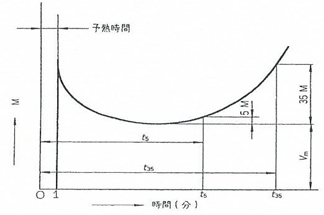
Mooney　Viscometerでは2種類の試験を行う。

試験1　Dies　temperature　100℃で未加硫ゴムサンプルを挿入加圧し、1分間余熱後ロータ

ーを回転させ、4分後の値を読み取る。一般的にMooney　Viscosity　Testと呼ばれ、ML1+4@100℃と表示する。

試験2　Dies　temperature　125℃で未加硫ゴムサンプルを挿入加圧し、1分間余熱後ロータ

ーを回転させ、指示値が最低値(Vm)に達してから5poit上昇(Vm+5)したら試験を終了し、サンプル挿入加圧から終了までの時間をMooney　Scorch　Time(t5　up　time)とする。

　　Mooney　Viscosity　Test　　　　　　　　Mooney　Scorch　Test

試験1は原料となる天然ゴム、合成ゴム、カーボンブラックなどを配合したゴムコンパウン

　　ドすべてについて行われ、ゴムの硬さ／軟らかさを表す。Mooney　Viscosityが高い天然ゴム、

合成ゴムは硬いゴムでありコンパウンドになったときにもMooney　Viscosityが高くなる。

Mooney　Viscosityが低い天然ゴム、合成ゴムは軟らかいゴムであり、コンパウンドになったときに低いMooney　Viscosityを示す。

　　　ここでいう「硬い／軟らかい」はMixing、Buildingなどの加工中の手触りの硬さ(toughness)

であって、加硫した製品の硬さ(Durometer　Hardness)とは無関係である。

　　一般的にMooney　Viscosityが高く硬い天然ゴム、合成ゴムはBanbury　MixerやRoll　Mill

で加工するときに時間がかかり、電力消費も多い。逆にMooney　Viscosityが低く軟らかい天然ゴム、合成ゴムは加工が容易である。

それならば、Mooney　Viscosityが低く軟らかいゴムのほうが優れているかというとそうではない。なぜならば、実際のゴとム製品となるコンパウンドは天然ゴム、合成ゴム、カーボンブラック、softener、plasticizer、Mineral　filler、antioxidant、sulfur、accelerator、cure　activatorなどいろいろな添加剤が配合され、Mooney　Viscosityも変化するからである。

大型タイヤのtreadゴムは強度、耐摩耗性が重要なので硬くなければならない。カーボンブラックを配合して強度を上げるとCompoundのMooney　viscosityも高くなり、extrudingやbuildingの加工性が悪くなるから、Low　Mooney　Viscosityの天然ゴム、合成ゴムを選択する。同じタイヤ用のゴムでもカーカス(carcass)のゴムは耐摩耗性は必要ないが軟らかくて柔軟性が必要だからsoftenerを多く添加する。Softenerを多く加えるとCompoundは軟らかくなるが過度に軟らかいと機械に粘着したり成形(Forming、Building)で変形したりするので、High　Mooney　Viscosityの天然ゴム、合成ゴムを使用する。

このように製品によって、また加工プロセスによって最適なMooney　Viscosityがあり、Compounderはそれらを考慮しつつ配合を設計する。

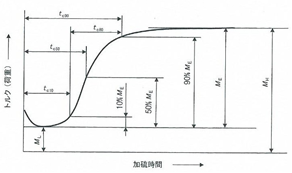
　　Mooney　Viscometerは加工性(processability)の試験装置である。

1. FDR　(Flat　die　Rheometer)の目的

一方、FDRあるいはMDRに代表されるRheometerは加硫（Vulcanization）を測定する装置である。

ローターは使わず、上下のダイス(dies)の片方に往復ねじり振動(±1deg)を与え、ゴムを介して他方に伝わるトルクを測定する。



　　　　　　　　　　　Mooney　Scorch

　　　　　　　　Mooney　Viscosity

　　試験温度は実際の加硫温度で（通常140～200℃）行う。ムーニー粘度計では1分間の予熱を

するがRheometerでは予熱はしない。サンプルを挿入しdiesを閉じて加圧したらモーターを

回転して試験開始する。開始直後はまだ加硫は始まらず、ゴムは熱を受けて軟らかくなるから

トルクが低下するが、時間経過と共にイオウ(sulfur)による加硫反応が起こり、ゴムは加硫す

ると硬くなるから伝達されるトルクは急速に増大する。イオウ（sulfur）が消費されると加硫

速度が遅くなり、トルク増加は緩やかになり、最終的に平衡に達してトルクは平坦になる。

こうして得られる加硫曲線（curing　curve）はその配合に固有の形状となるので、Rheometer

試験を行って、いつもと同じcurveであれば正常なcompoundとしてOKと判定し、いつも

と同じでなければ異常があったとしてNGと判定することができる。

Rheometerの使用目的の多くはmixed　compound　inspectionである。

　　一般的にトルクの最小値(ML)、最大値(MH)、10%加硫時間(tc10)、90%加硫時間(tc90)を

チェックゲート(check　gate)とする

　　　　　MLは加硫していないゴムの硬さを表し、MHは加硫したゴムの硬さを表す。MH－ML

　　　　　(ME)は加硫によって増加した硬さである。MEの10%に相当する時間を「加硫開始時

間」、MEの90%に相当する時間を「最適加硫時間」と考え、それぞれtc10、tc90と

する。

　　FDR(Rheometer)のもう一つの使用目的はR&Dの分野である。FDRはイオウ(sulfur)の化学

反応そのものを測定はしない。イオウ(sulfur)の架橋(cross-linking)によって生じた粘弾性変

化(visco-elastic　properties)を測定している。具体的にはM’(dynamic　modulus)、

M”(elastic　modulus)、M\*(complexed　modulus)、tanδを測定してグラフ化している。

これは一種のDMAである。通常のDMAは加硫したゴムを測定し、未加硫ゴムの測定はで

きないが、FDRは未加硫流域から加硫領域、更にはover　cure領域までの粘弾性変化を測定

でき、架橋のメカニズム解明の手段である。

1. MVR　(Mooney　Viscometer)とFDR　Cure－curve　の関連

MVRとFDRの原理はゴムに一定の変形を加え抵抗をトルクとして検出している。変形がローターの回転であるかdiesのねじり振動であるかという点が違うが、得られる結果は動的弾性率(dynamic　elasticity)と動的粘性率(dynamic　viscosity)が複合された複素弾性率(complexed　elasticity)であり、同じ特性を観察していることになる。

Rheometer　Graphにおける青丸の部分は試験開始後ゴムが軟らかくなって最低値（ML）に

なる部分であるが、これはMooney　Viscometerで測定するMooney　Viscosity（ML1+4）と同じ挙動を測定している。Rheometer　Graphにおける赤丸の部分はゴムの加硫が始まり弾性率の増加が始まる(tc10)の部分であるが、これはMooney　Viscometerで測定するMooney　Scorch　Testと同じ意味である。

言い換えれば、Mooney　Viscometerで測定するMooney　Viscosity（ML1+4）とMooney　Scorch　Time（t5　up　time）はFDR　Cure－curveの初期の部分であるML、tc10と同じ変化を観察している。実際にMooney（ML1+4）とFDR(ML)は相関するし、Mooney　scorch(t5　up　time)とFDR(tc10)も相関することは確認されていて、FDRがあればMooney　Viscometerは不要ではないかと考える人もいる。

タイヤ会社のように大量のcompoundを毎日消費する工場では短時間に検査を行わなければならないので、Mooney　Viscometer　Testは行わず、Rheometer　Testのみ行ってOK／NGを判定することは珍しくない。

では、Mooney　Viscometerは過去の遺物で無駄な試験なのか？　答えはNoである。

確かにRheometerだけを使っていてMooney　Viscometerは廃止したというゴム会社もあるが、多くのゴム会社はRheometerとMooney　Viscometerの両方を持っているし、実際に運用している。その理由は

* 1. Rheometerは140℃～200℃で測定するが、Mooney　Viscometerは100℃または125℃で測定する。ゴム工場における加工は80℃～120℃程度で行われることが多い。例えばタイヤトレッドゴムの押出温度は80～110℃程度であり、ゴムホースの押出温度も同程度である。タイヤカーカス(tire　carcass)はpolyester繊維の織物にcalendar　machineでゴムをコーティングするが70℃～100℃で行う。O-ringやdiaphragmなどの小さなゴム部品は射出成型（injection　molding）で行われ、100℃～150℃でのゴムの流動性が重要である。

このようにMooney　Viscometerは加硫以前の加工における特性を評価するのに適している。Rheometerは加硫するときの特性を評価する試験機であって使用目的が異なる。

* 1. Rheometerは試験温度が高温なのでLM、tc(10)は短時間で通り過ぎてしまい、トルク値も小さい。ゴムの微妙な差を検出するには適さない。Mooney　Viscometerは

Rheometerでは検出が難しい微妙な違いを検出できる。

レオメーターグラフの赤円の部分あるいは青円の部分を拡大していると考えれば理解できる。

* 1. 多くのゴム技術者は自社の加工設備、加工方法、加工条件に適するムーニー粘度の範囲を経験から知っている。この知識は数多くの失敗と試行錯誤によって得られたknow-howであり、ゴム技術者は重視している。

類似のデーターがRheometerから得られるとしてもknow-howを築き上げるには時間と労力が必要なので彼らがMooney　Viscometerの有用性を疑うことはないだろう。