加硫試験機　Flatdie　Rheometer（FDR）　vs　Moovingdie　Rheometer(MDR)

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　2025.9.1　M.Hasumi

1. 試験機の目的と概要

ゴムの製造ProcessではCompounding、Mixing、Building（Foaming）、Curingがessentialな工程である。Rheometer(curemeter)はCuring　Behaviorを測定する装置であるが、Curig　BehaviorはCompounding、Mixingによって影響を受けるので、それらをも管理するための装置である。

FDR(Flat-die　Rheometer) とMDR(Mooving-die　Rheometer)とがある。FDRは日本のJSRによって開発され、ENEOS(JSR)、Ueshima、Toyo-seikiの3社が製造していて、日本国内では主流であるが、海外にはあまり輸出されておらず、海外ではMDR　typeが殆どである。

MDRはMonsanto（現Alfa-Technologies）の商品名で、Alfa-Technologies以外にも多数のメーカーが類似品を製造していて、加硫試験機の主流となっているが、いろいろな問題点がある。それについては後述する。

どちらも密閉された円形チャンバー(dies)の中に未加硫ゴムを入れて加圧し、一方のdiesにねじり振動をかけ、他方のdiesに伝わるトルクを測定する。Diesは140～230℃に加熱されているのでゴムは加硫し、硬くなるにつれて伝達されるトルクが増大する。加硫時間とトルク変化をグラフ化した加硫曲線(curing　curve)を解析して最適な加硫温度、加硫時間を求めることが出来る。

ねじり振動の回数はどちらも100cpmである。ねじり角度はFDR（±1deg）、MDR(±0.5deg　or

±1deg)である。

ダイアグラム

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

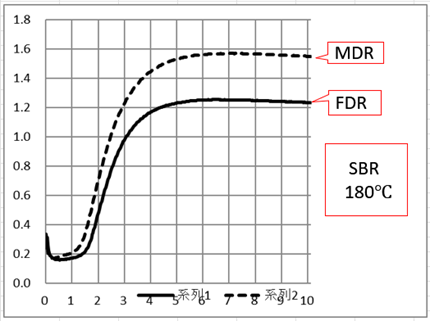
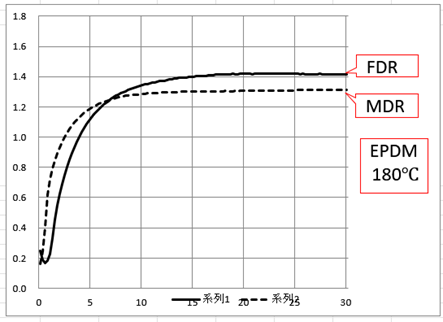
通常　ML、MH、tc(10)、tc(90)、tc(Δ80)を管理パラメーターとする。

トルクをPC解析することで粘弾性特性(DMA)　[動的弾性率（dynamic　elasticity）、動的粘性率（dynamic　viscosity）複素弾性率(Complexed　elasticity)、tanδ]を求めることができる。

これはFDRでもMDRでも同じように測定できるが、数値的には一致しない。一致しない理由は次に述べるdiesの形状、寸法が異なるからである。

1. FDRとMDRの加硫曲線

2種類のcompoundをFDRとMDRで試験した。

　　SBR　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　EPDM

図で見る通り非常に近似した加硫曲線になる。これは当然のことで、ゴムは同じ温度、同じ時間加硫されれば同じ加硫状態になるからである。

単純に加硫曲線が描けてそれがいつもと同じで異常がないことが分かればよい、という検査目的であればどちらのRheometerでも使うことができる。

1. MDRの欠点　diesの形状、寸法が不明

FDRとMDRの違いはdiesのprofileとdimension　である。

FDRは上下分割された平行なdiesであり、dies間隔2.0mmで、0.5mm深さの格子溝が彫られている。FDRのdiesはJIS K6300-2 Method-Aとしてその形状、寸法が細かく規定されている。FDRのメーカー3社（JSR、Ueshima、Toyo-seiki）はこの規格に従っているので、測定値は再現性があり、同一なcuring　Curveを与える。

一方、MDRは上下とも円錐状(corn-shape)のbicornical-die　である。中心は薄く、周辺は厚くなる。　JIS　K6300-2　Method-B とされていて断面図が示されているが、断面形状と上下のdiesが形作るテーパーの角度のみしか書かれておらず、寸法が記載されていない。　ISO 6502、ASTM6601-02も同様に断面形状のみで寸法は書かれていない。

このため、多数存在するα-Technologies　MDRを模倣した他のメーカーのReometerが原型であるα-TechnologiesのMDRと同一であるか否かと言うことは分からない。上下のdiesの直径やgapが異なれば伝達されるトルク値は同一にならないことは当然で、MDR模倣品の測定結果は保証されない。

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。　　　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。

**FDR　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　MDR**



ラケット, 作品, ブルー, テーブル が含まれている画像

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。　 　　　 建物, 大きい, フロント, テーブル が含まれている画像

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。　 海に浮いている

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

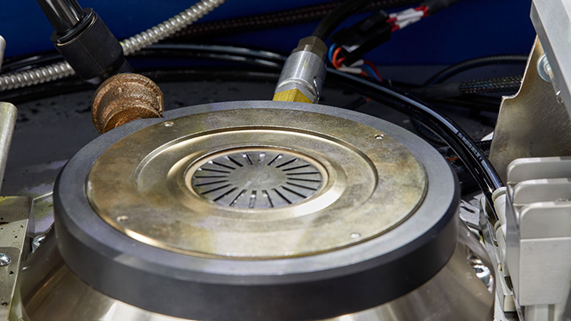
最近のMDRは放射状溝20本になったらしい。(これを知っているユーザーは殆どいない)

このようにdiesの形状、profileなどが一定に規格化されていないので、α-Technologiesの

製品同士においても再現性が保証されているか疑わしい。まして、MDRを模倣した他社の

RheometerがMDRと同じ結果が得られるとは考えられない。

これはMDRの大きな欠点である。



最近のα-Technologies　RPA　溝は20本で長さは同じである

1. MDRの欠点　温度の不均一

MDRはbicornical-dieなので、gapは中央は薄く、周辺は厚くなる。中央のゴムは早く加硫し、周辺のゴムは遅れて加硫するから外周部分のゴムは加硫不足になる。中心から遠ざかるほど厚みが厚くなり体積が大きくなるから、周辺部分の加硫不足は大きく影響する。

MDRのdiesはフィルムヒーターで加熱されているが、側面にはヒーターがない。このために側面から放熱して外周部分はdies温度が低下するから、周辺部分は更に加硫が不足する。

加硫の進行を観察するための試験機でありながらサンプルの中で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。なぜこの形状にするのか理解できない。

FDRのdiesは2mmの平行円板で、しかも側面にもヒーターを入れ(4-heater drive)放熱を防止しているので温度は均一で加硫状態も均一である。

1. MDRの欠点　ゴムのslip

ゴムの加硫が進むとdiesとの間でslipを起こす。MDRは放射状の溝（通常24本）を彫ってslip防止しているが完全に防止できないことがある。FDRは細かい格子溝なのでslipは起きない。

　　　スピーカー, 写真, テーブル, 小さい が含まれている画像

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。　　　　　　　　　時計, 小さい, 座る, 閉じる が含まれている画像

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

　　　　FDR　　　　　　　　　　　　　　　　MDR

グラフ, 折れ線グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。　　　　　　障子, 挿絵, 時計 が含まれている画像

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

上図はタイヤのcurimg　bladder (Butyl　rubber)のslipの事例である。FDRではslipしないがMDRはslipしてトルクが低下していることが明らかである。

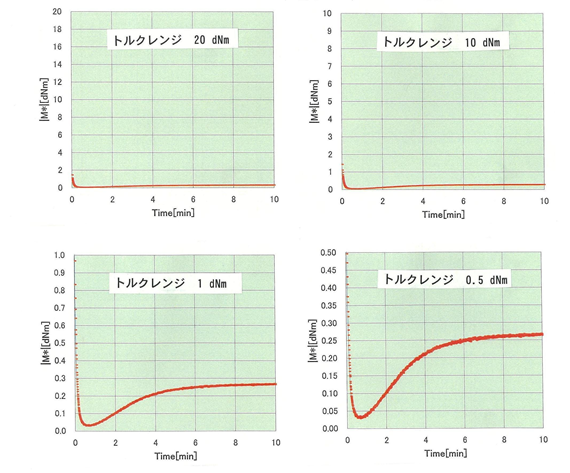
1. FDRの良い点　低粘度ゴムを測定できる

Slipするような硬いゴムもあるが逆に非常に軟らかいゴムもある。

図は乗用車タイヤ(Passenger Tire)の内面に貼るsealantゴムの加硫試験である。Sealantは釘が刺さっても包み込んで空気漏れを防ぐために、ブチルゴム(butyl-rubber)の非常に軟らかい配合である。通常の条件で加硫試験をしてもほとんどトルクは上昇せず、加硫挙動は解析できない。

FDRのトルクスケールを調整し、トルクrange 20dN⇒10dN⇒1dN⇒0.5dN にしたところ加硫挙動があきらかになった。

このような軟らかいゴムはスポンジゴムやシリコンゴムなど非タイヤ用途では珍しくはない。

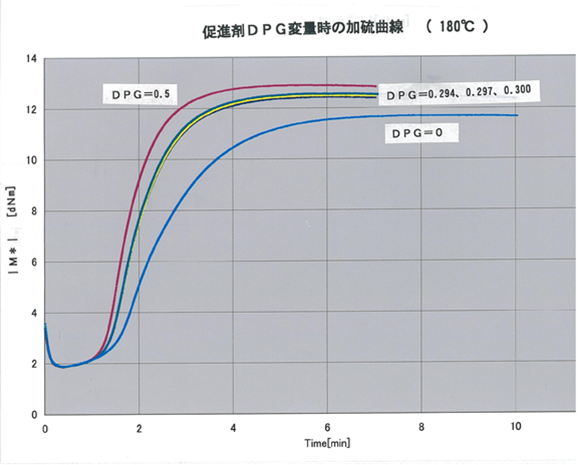


実は、MDRでもPCの操作によって感度を上げ、加硫curveを書くことは可能である。しかし

MDRで描いたcurveはFDRのcurveに比べてバラツキが大きい。

1. FDRの良い点　配合剤の微量な違いでも検知できる

ゴムにはいろいろなingredientが混合されている。中でも加硫促進剤（Accelerator）は少量でも加硫を早めるので正確に重量を量らなければならない。Acceleratorのミスは致命的なscorchの危険がある。



図はAccelerator (DPG)　をSBR 100gに対して0.3gという少量配合する場面において、DPGが

2% (0.006g)少ない場合と1%(0.003g)少ない場合を試験したものである。このような僅かな誤差は通常問題にされない程度の誤差である。比較のためにDPGを加えなかった場合(DPG=0)とDPGが多かった場合(DPG=0.5)も試験した。　その結果、1%、2%少なくても加硫curveでは

重なってしまい差が見られなかったが、統計解析すると差があることが証明できた。

FDRは測定精度が極めて高いのでこのような僅かな違いも鋭敏に検出でき、品質の安定に寄与できる。

1. FDRの良い点　　発泡ゴムの測定　（Option）

発泡ゴム(foamed　rubber、sponge　rubber)は加硫と発泡のタイミングが重要である。加硫が早すぎると発泡する前に硬化して発泡不足となり、逆に加硫が遅すぎると発泡ガスが抜けて収縮する。加硫と発泡がバランスよく同時進行しなければならない。

FDRはoptionで発泡測定ができる。発泡圧力を測定するセンサーをdiesに取り付け、加硫進行と発泡進行を同一画面で見ることができる。

MDRでもOptionでfoamed　rubberを測定することはできるが、UeshimaのPC softは加硫の

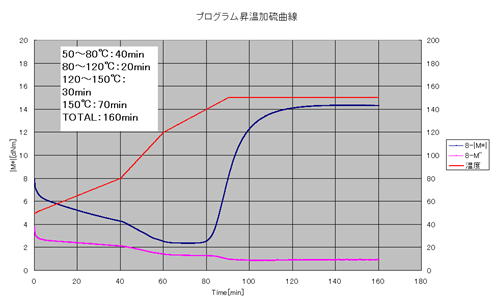
進行と発泡の進行をvisualに見ることができ、compounderの開発を援助する。



1. FDRの良い点　　昇温試験ができる　Temperature　Elevating　Test

大型タイヤ、大型防振ゴムのようにゴムの厚みが厚い製品は内部の温度が上昇するのに時間がかかる。内部まで十分に加硫しているかを確認するために、製品をカットし内部の加硫度や引張強さなどを測定していた。これは非常に手間がかかるだけでなく、貴重な製品をスクラップにしなければならない。

FDRの昇温試験（Temperature　Elevating　Test）は内部の温度上昇をプログラム化し、dies　Tempをcontrolするので、製品内部の加硫状態を再現することができる。



この加硫グラフはdies　Temp（赤い線）が140℃以下ではゴムは軟化するだけで加硫は起きないが140℃に達すると加硫が始まり、約40分で加硫が完結する状態が良くわかる。

昇温加硫の機能はMDRにはない。

1. FDRの良い点　　コンパクト

UESHIMA　FDRは世界中のRheometerの中で最も小型でコンパクトである。しかも重量も最軽量である。広いスペースを必要としないのでLaboのどこにでも置くことが出来る。頑丈なworking　benchは必要ない。電気とエアーがあれば自由にレイアウトすることが出来る。

FDR、MDRの寸法、重量は別資料に記載してある。

1. FDRの良い点　　排気がついている

ゴムにはいろいろなingredientが含まれていて、加硫時の温度で揮発、分解してgas、fumeを発生する。中には塩素ガス(chlorine　gas)のような有害なヒュームを発生することもある。

FDRには排気ファンが備えられていて、加硫終了してdies　openと同時にヒュームを後方に排出してoperatorの健康を守る。

このようなことは試験機の性能や試験結果の精度とは無関係なので軽視されることが多いが、働く人たちの健康を守り快適に過ごすために重要である。

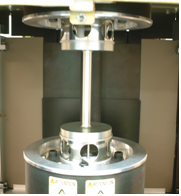
1. FDRの良い点　　Calibrationが容易

Rheometerは精密測定器であり、日常的にCariblationをおこなわなければならない。

FDRのCariblationはErectrical　CariblationとDynamic　Cariblationがある。

Electrical　Cariblationは特別なツールを使わずにdailyなcontrolとして行い、数秒でできる。

Dynamic　Cariblationは専用のジグ(zig)を使って行うが、熟練したoperatorは15分以内に完了する。MDRも同様なジグ(zig)で行うが作業が複雑で2時間必要である。

　FDRのDynamic　Cariblator

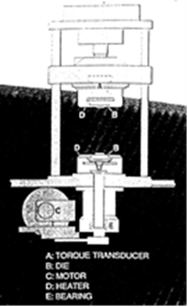
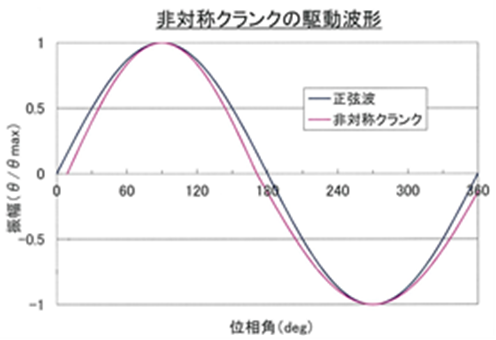
1. FDRの良い点　　データーの保存

測定したデーターはEXCELとしてPCに保存される。海外工場で測定した結果もインターネットで瞬間的に送られ、共有できる。試作したときの加硫曲線とupdateされた加硫曲線を比較したり、あらかじめ設定したgateの値と比較してOK／NGの判定をしたりできる。

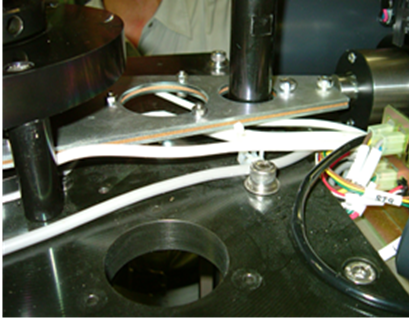
1. Advantages of FDR　: 　FDR as a DMA

The Rheometer (FDR, MDR) is a testing machine used to observe the progress of vulcanization; however, it does not observe the chemical reaction of vulcanization itself.d

It measures changes in visco-elastic behavior due to vulcanization. In other words, it is similar to DMA. DMA measures the visco-elasticity of vulcanized rubber but cannot measure unvulcanized rubber. The Rheometer is the only testing machine that can continuously observe the visco-elasticity from the unvulcanized state to the vulcanized state, and even to the overcured state where rubber deteriorates. This capability is extremely important for R&D applications and is used in the study of cross-linking mechanisms.Visco-elastic testing involves applying a sin curve deformation to the dies and measuring the response. The sin curve must be accurate. In general applications, the crank mechanism converts rotational motion into reciprocating motion to vibrate the dies, but a crank does not yield an accurate sin curve, resulting in a slightly distorted curve.

The above figure shows the driving method and waveform of MDR. The true sin-curve should be the blue line, but in the crank method, it becomes a phase-shifted red waveform. FDR creates a perfect sin-curve through corn-drive.

The corn-drive is a mechanism that eliminates the vertical movement of a rotating disk and extracts only the horizontal movement to transmit to the dies.

Only two companies in the world use corn-drive in their rheometers.(Ueshima & ENEOS)

1. FDRの問題点

FDRにはAuto　Samplerがない。　過去に製作したことがあるが動作の信頼性に欠けるため現在はやめている。　Tire　Maker　は試験数が非常に多く、60秒～120秒で加硫試験を行うことがあるが、多くのゴム会社のLaboにはoperatorがいるし、加硫試験のサイクルが5分～20分ならばAuto　Samplerは必要ない。