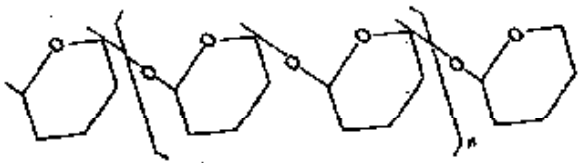


デキストリン

図７　α-グルコースのつながり方の違いによるデンプンとデキストリン

このような構造単位の違いにより，高分子鎖の形は当然違っており，アミラーゼとの相互作用も異なってくる。また，アミラーゼはデンプンと同じα－グルコースからできているデキストランも加水分解しない。図７のように，デンプンとデキストランはα－グルコースの結合の仕方の違いにより，高分子鎖の形が違うのでアミラーゼとの相互作用も異なってくる。これらのことから，アミラーゼはグルコースを認識して高分子を加水分解するだけでなく，グルコースの立体的構造（α－グルコース，β－グルコース）をも認識し，さらにグルコースの結合の仕方の違い（デンプン，デキストラン）をも認識していることがわかる。このような違いを認識するためには，アミラーゼがデンプンと相互作用する場合，数か所以上の場所で相互作用をする必要がある。このことは，アミラーゼの触媒活性部位がデンプンの基質結合部位と相互作用できるような空間配置になっていることを示している。すなわち酵素をつくっている高分子鎖の形が酵素作用を規定する決定的な役割を果たしていることがわかる。

[註]

(1) ゴムの木から採取される生ゴムは，夏はべとつき冬は硬化してしまうという欠点をもっている。この生ゴムの欠点を改良するために，グッドイヤー（合衆国）は1839年に生ゴムに硫黄を加えて加熱するという方法を発見した。この方法は加硫技術と呼ばれ，この発見により天然ゴムは工業原料として社会のいたるところで使用されるようになったのである。

(2) 戦略物資とは，戦争遂行のための必要不可欠な物資のことである。ゴムがなければタイヤなどは生産できず，ジープやトラックが走れないことはもちろん飛行機も離着陸できず，近代戦ではゴムは重要な戦略物資なのである。

(3) 当時すでにイソプレンが天然ゴムの構成単位であることがわかっていた。そこで，イソプレンからゴムをつくろうとしたのである。実際にイソプレンからゴムをつくるにはチィグラー・ナッタ触媒などが必要で，その当時の技術では不可能であった。

(4) 高分子溶液の粘度が分子量に比例するというシュタウディンガーの論文は厳密な意味では正しくないが，高分子の存在を実証する過程で果たした役割は重要である。

(5) ゴムの鎖状高分子を長い糸にみたて，例えば２本の長い糸がからみあってしまうというように，からみあいという表現で高分子間の独特の相互作用を説明することが多い。ここでは，ゴムなどの無定形高分子の相互作用の他に結晶性高分子の相互作用を含めた，高分子間の相互作用を示す概念として「からみあい」という表現を用いている。

III　授業書「高分子物質の化学」の教育内容の構成

１．授業書の骨子

１．１　人間と自然との関わりにおける高分子物質の位置づけ

自然の階層論によれば２次系列の一種ともいえるヒトは「社会的運動形態をともなって独特の進化をとげ，やがて質的・量的に一層高度な活動性」[(1)]をもつことになり，三次系列を生成した。人間はその活動性を主系列や二次系列に向けることにより，その活動性を巨大なものとしてきた。つまり，三次系列である人間の「二次系列への働きかけである農耕・牧畜」[(2)]や「主系列への働きかけである工業」[(2)]によって自然を加工し，人間中心につくり変えてきたのである。

このように自然を加工しつくられた物質のひとつにゴム物質がある。ゴムの木から得られる

生ゴムはそのままでは硬化しやすいなどの性質のため，ゴムを人間の生活に役立てる上で大きな障害となっていた。そこで人間は生ゴムに硫黄を加えて加熱することで生ゴムの性質を改良し，人間の生活に利用しやすい製品をつくったのである。さらに高分子の分解生成物である化石燃料を原料に，人間は新たなゴム物質である合成ゴムを創り出したである。合成ゴムなどの合成高分子は人間の自然への働きかけにより創り出されたもので，もともと自然界に存在しないものであり，合成高分子は人間と自然との関わりを考える上での象徴的な物質といえる。

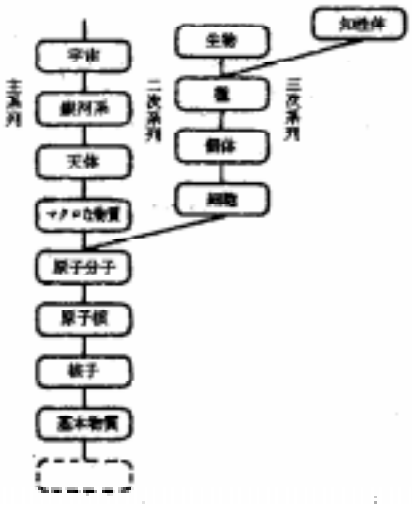


図８　自然の階層構造（田中一「未来への仮説」培風館1985，p103）

高分子は自然の階層構造においては図８のように主系列の原子・分子の位置に属するが，さらに明確に位置づけると図９のようになると考えられる。図９のように高分子は主系列と二次系列への橋渡しの役割を担っており，二次系列である生命体を構成する基本物質でもある。

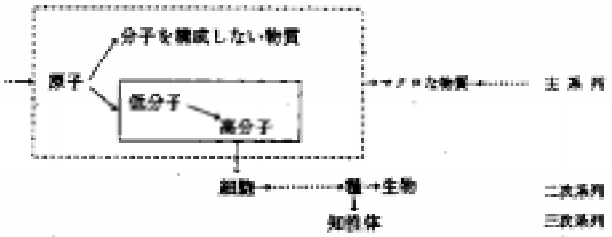


図９　自然の階層論における高分子の位置づけ

高分子は生命体の構造材料という特性の他に，酵素（タンパク質）やＤＮＡにみられるように高分子鎖の形の複雑さによって極めて高次な機能性材料という特性をもち，生命体を内部から支えている。高次な機能性は，当然，人間の働きの対象となり，新素材としての高分子は将来さらにその役割を大きくすることが予想される。このように高分子は未来においても人間と自然との深い関わりをもつ典型的物質と考えられる。

１．２　ゴム・プラスチック・繊維の高分子特性

高分子の本質的特性は高分子鎖の形の多様性である。高分子鎖の形の多様性が他の分子との相互作用を規定するため，高分子鎖の形の多様性は高次な機能性と深く関連している。高分子鎖の形の多様性は分子内回転運動による多様性と構造単位の並べ方による多様性があるが，身近な高分子物質の中でこれらの多様性を豊かに発現しているのがゴムである。

小さな力でよく伸びるというゴムのマクロな性質（ゴム弾性）は分子内回転運動というミクロな分子運動によって担われている。ゴムの温度が高くなると分子内回転運動をする炭素－炭素軸の数が多くなり，ゴムをつくっている高分子の形は図10(a)から(b)のように，さらに丸まって小さな糸まり状になる。つまりゴムの分子の丸まり具合はその温度によって規定される。このようなゴムの分子がお互いにからみあった状態になっているゴムを手で引っ張ったときどうなるか。ゴムの分子は分子内回転運動をしており，図11(a)のように丸まって糸まり状になっている。これを図11(b)のように伸長させると，ゴムの分子は分子内回転運動によって元の丸まった糸まり状に戻ろうとする。ゴムの分子どうしはおたがいにからみあっているので，元の丸まった糸まり状に戻ろうとする力が次々に伝わって，ゴムは縮もうとする。これがゴム弾性である。

(a)低い温度
（回転できるＣ－Ｃ軸が少ない）

(b)高い温度
（回転できるＣ－Ｃ軸が多い）
図10　高分子鎖の形と温度との関係を示した模式 図

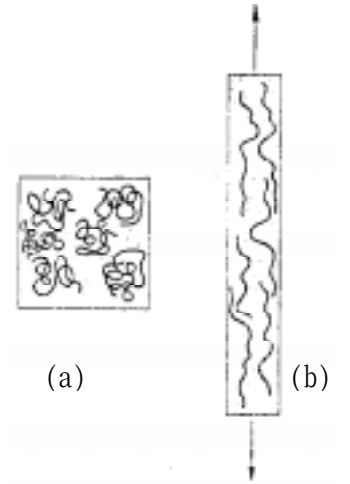


図11　高分子鎖の形とゴム弾性
（中川鶴太郎『ゴム物語』，大月書店，1984年，167頁）

ゴムをつくっている高分子鎖の形は温度によってその平均的な形が変化する。また，ゴムをつくっている高分子鎖のひとつは同じ温度でも分子内回転運動により時間とともにその形がゆらいでいる。このようにゴムは高分子鎖の形の多様性を豊かに示している。

ところでゴム弾性を示す条件とは何か。それは高分子が分子内回転運動をしていることである。すなわちゴム弾性はある特定の高分子に限定されるのではない。高分子は分子内回転運動をしているときが「ゴム状態」であり，分子内回転運動が凍結されているときが「プラスチック状態」「繊維状態」といえる。「プラスチック状態」「繊維状態」は，すでに図２で示してあるように高分子鎖の形が違っており，その形によってからみあいの度合いが大きく違っている。このように分子内回転運動の有無やからみあいの質の違いよって，高分子は「ゴム状態」「プラスチック状態」「繊維状態」をとる。

２．授業書の構成

２．１　授業書の基本的構成

高等学校の教育内容において，ゴムを中心に高分子物質を展開する根拠は次の２点から示される。

(1) 高分子概念の導入として，高分子の本質的特性を豊かに備えているゴムが適当であること。

(2) 人間と自然との関わりにおいてゴムには長い歴史があり，ゴムを合成しようとする技術を通して高分子概念の形成がなされたという歴史的事実があること。

また，高分子概念の形成には科学ばかりでなく，産業界における合成ゴムをつくる技術やその時代の政治的，経済的，歴史的状況が関わっているので，ゴムの科学・技術・社会の歴史を通して，ゴムをトータルに捉える認識を形成できるように構成する。さらに，未来において高分子物質が人間社会にどのような貢献ができるか，その可能性を示すことができるように構成する。

このような観点から授業書の基本骨格は次のようになる。

「ゴムの科学」
「ゴムの科学・技術・社会」
「未来の高分子へ]

２．２　ゴムの科学

高分子概念の形成の歴史を通して，高分子概念の形成には科学だけでなく産業界の技術が重要な役割を担っていたことを明らかにするとともに，ゴムに熱湯をかけるとゴムが縮む現象を分子内回転運動による高分子鎖の形という視点から学習する。さらに，ゴム状態からプラスチック状態への相転移を学習することにより，分子内回転運動の凍結という分子の運動形態の非連続的変化がゴム弾性の消失という非連続的変化とつながっていることを学習する。

「ゴムの科学」は次の三部で構成した。

- ゴムの不思議な性質
- ゴム分子の素顔
- ゴムの性質

(1) ゴムの不思議な性質

大型の輪ゴムをつないだものに煉瓦２個をつるし，そこに熱湯をかけるとゴムが縮んで煉瓦を持ち上げるという実験を実施し，このゴムの不思議な性質を解明することが今後の学習目標のひとつであることを示す。

p．９

質問１　図のように大型の輪ゴムをつないだものに煉瓦２個を下げ，そこに熱湯をかけるとゴムはどうなるでしょうか。

予　想

ア　ゴムは縮む

イ　ゴムは伸びる

ウ　ゴムは変化しない

討論：

実験の結果：

p．１１

ところで，ゴムを温めるとなぜゴムは縮むのでしょうか。温めることにより，ゴムの内部にどのような変化が起こっているのでしょうか。

この疑問に答えるためには，まずゴムがどのような分子からできているのかを突き止め，次にゴムが伸び縮みしているときゴムの分子がどうなっているかを考えることが必要です。

これらのことを，今後の学習をとおしてひとつひとつ明らかにし，ゴムの伸び縮みの謎を解いていくことにしましょう。

(2) ゴム分子の素顔

ゴムの分子が「恐ろしくひょろ長い分子（高分子）」であることがわかったのは，つい70年ほど前であったことを示し，高分子の存在が認められるまでには約10年間にわたる激しい論争があったことを学習する。その中で，多く

の化学者に反対されながらも，高分子の存在を確信をもって主張し続けたシュタウディンガーに焦点を当て，高分子概念の形成には科学のみならず産業界の技術やその時代の社会的背景が密接に関わっていることを明らかにする。

---

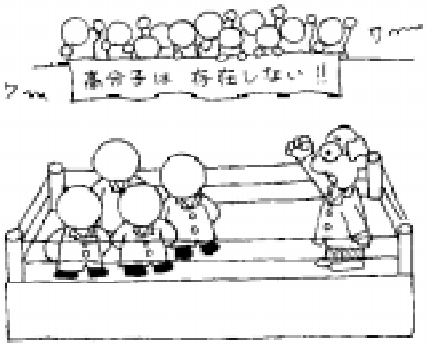
p．１８

---

(3)　シュタウディンガーの孤独な戦い

1920年代ではほとんどの化学者が高分子の存在を否定し，ゴムなどは小さな分子の集合体であると考えていました。

このような時代に，オストワルドの主張や分子についての伝統的イメージに束縛されることもなく，ドイツ人であるシュタウディンガーはあるがままの物質の性質から高分子の存在を確信し，高分子説の正しさを証明しようと孤独な戦いをしていたのでした。

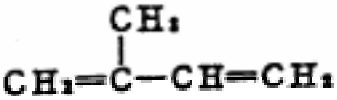


質問４　それにしても，ほとんど全部の化学者が高分子は存在しないと主張する中で，シュタウディンガーはどうして高分子の存在を実感することができたのでしょうか。

---

p．１９

１９００年代には，すでにゴム分子はイソプレン



が数個つながったものと考えられていました。シュタウディンガーはこのイソプレンに関連した研究をしているとき，イソプレンを効率よくつくる方法を見つけました。この頃（１９１０年頃），自動車産業の成長とともに天然ゴムの価格が上昇し，産業界では合成ゴムの研究が盛んに行われるようになりました。

しかし，当時の化学者はゴムなどをつくる仕事を，化学理論と関係のない経験だけがものをいう世界という意味で，「ねばっこい，汚らしい化学」と呼んで軽蔑していました。したがって，このような仕事に携わっていた化学者はシュタウディンガーを除いてほとんどいませんでした。シュタウディンガーはイソプレンからゴムをつくろうと実験を重ね，イソプレンを次々に結合させる技術を学び，結合させる数が多いほどゴムに似た物質※ができることを体験したのでした。

ゴムに似た物質は，溶液にしたときの粘度などが，天然ゴムの性質と違っていました。この性質の違いを，ゴムに似た物質は天然ゴムに比べて分子の長さが短いからだと，シュタウディンガーは**ゴムづくりの体験から実感**したのでした。

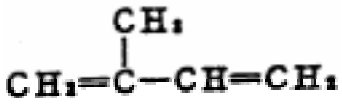
ここのところが，高分子の存在に迫りながらも，高分子を実感できなかったフィッシャーとシュタウディンガーの違いなのです。

※　ゴムの木から得られたゴムは天然ゴムといわれます。これに対して，化学の力で人工的につくられたゴムを合成ゴムといいます。シュタウディンガーは合成ゴムをつくろうとして，ゴムに似た物質をつくったのでした。しかし，ゴムに似た物質はひょろ長い分子でしたが，実際の高分子のように「恐ろしくひょろ長い分子」ではありませんでした。

---

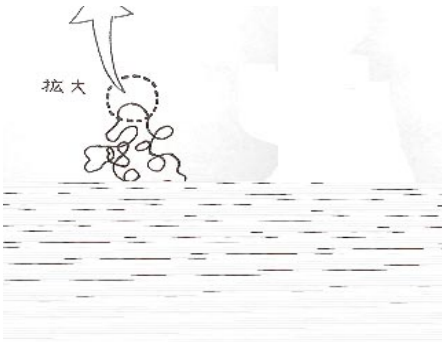
p．２３

天然ゴムの分子は，



イソプレン

が非常に多く結合した



ポリイソプレン

という高分子です。

すなわち天然ゴムは炭素が約20000個結合した恐ろしくひょろ長い分子で，曲がりくねった形をしています。

---

(3) ゴムの性質

「１　ゴムの不思議な性質」での課題を分子内回転運動による高分子鎖の形から探究的に学習して解決する。さらに液体窒素で冷却したゴムボールを床に落とすとゴムボールがガチャンという音とともに割れることを観察させ，ゴムを冷却するとプラスチックになることを示し，ゴム・プラスチック・繊維の関係を相転移として捉えさせる。

---

p．２５

３　ゴムの性質
３－１　ゴムの性質とゴム分子の特性

質問６　水の中にある花粉の微粒子を顕微鏡で見ると，微粒子がふるえるように絶えず動きまわっていることが観察できます。これは水分子が絶えず動きまわって，微粒子に衝突していることが原因です。
　ところで，固体のゴムは高分子という恐ろしくひょろ長い分子でできていますが，ゴム分子は運動しているのでしょうか。
予　想
ア　水分子と同じように絶えず動きまわっている。
イ　水分子とは違う運動をしている。

ウ　まったく運動していない。
エ　その他（　　）

p．２６

正解はイです。ゴム分子はおそろしくひょろ長く，おたがいにからみあっているので，自由に動きまわることができません。したがって，水分子のようにあちこちへ動きまわるような運動はできません。それで，ゴム分子は回転運動をしています。
ところで，回転運動とはどのような運動なのでしょうか。分子模型を使って考えることにしましょう。

［分子模型による回転運動の演示］
ゴム分子をまっすぐ伸ばしたときの炭素原子の骨格をごく単純に示すと，図３－１のようになります。

図３－１　まっすぐ伸ばしたときのゴム分子の炭素骨格

この炭素骨格は，温度が高くなると図３－２のように，あるＣ－Ｃ軸を回転軸にして隣のＣ－Ｃ軸の回転が行われています。この回転運動のため，Ｃ－Ｃ軸はグニャグニャした形になり，ゴム全体は丸まった形になります。

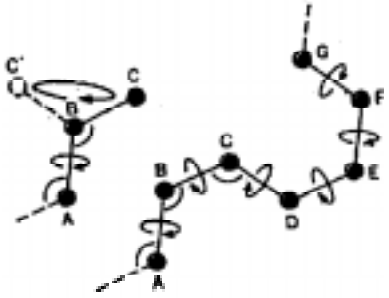
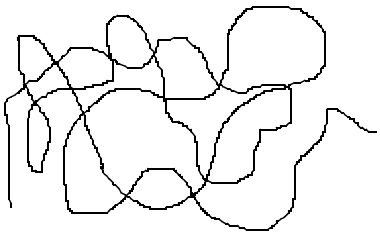


図３－２　回転運動

p．２７

温度が高くなると回転できるＣ－Ｃ軸の数が多くなり，図３－３のように，ゴム分子はさらに丸まって，小さな糸まり状になります。



回転できるＣ－Ｃ軸が少ないゴム分子の形（低温）　　**回転できるＣ－Ｃ軸が多いゴム分子の形（高温）**

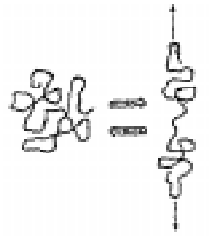
図３－３　回転できるＣ－Ｃ軸の数とゴム分子の形

p．２８

質問７　大型の輪ゴムをつないだものにレンガを下げ，そこに熱湯をかけるとゴムひもは縮みます。このことをゴム分子の回転運動から説明してください。

p．２９

ゴム分子が回転運動のため，下図Ａのように丸まっています。これを下図Ｂのように伸長させると，ゴム分子は丸まった形にもどろうとします。これがゴム弾性です。ゴムに熱湯をかけるとゴムの温度が高くなり，ゴム分子はさらに丸まって小さな糸まり状になります。
ゴム分子はおたがいにからみあってゴムをつくっているため，ゴム分子がさらに丸まって小さくなるのが次々に伝わって，ゴムが縮んで，レンガを持ち上げるのです。



A　　B

図３－４　高分子の形態とゴムの性質
（日本化学会編『身近な現象の化学』，培風館，１９７８年，５８頁）

ゴム弾性は「**からみあい**」「**回転運動**」というゴムをつくっている高分子の特性によるものです。

もしゴムをつくっている分子が，炭素が100個程度つながった分子なら，分子の長さが短いためからみあいがなく，ゴムをいったん伸ばすと伸びたままでもとにはもどらなくなります。

p．３０

３－２　ゴムの相転移とゴム分子の運動

質問８　ゴムボールを液体窒素で冷却（約－196℃）すると，ゴム弾性はどうなっていくと予想されますか。また，なぜそうなると予想したのか，その理由も明らかにしてください。
予　想
ア　ゴム弾性は小さくなり，やがてほとんどなくなり，ゴムの性質を失う。
イ　ゴム弾性は小さくなるが，ゴムの性質は失われない。
ウ　ゴム弾性はほとんど変化がなく，ゴムの性質は失われない。
理　由

実験　ゴムボールを液体窒素で冷却し，床に落してゴムボールのはずみ方を観察する。これをゴ

ムボールの冷却時間を変えてやってみる。
　実験結果：
＊　予想と実験結果が違っていた人は，ここであらためてその理由を考え，それをまとめてみてください。

p．３１

正解はアです。冷却すると，回転できるＣ－Ｃ軸の数が少なくなり，ゴム弾性は小さくなります。冷却がどんどん進むと，やがて回転できるＣ－Ｃ軸はほとんどなくなります。
このときゴムの性質が失われ，ゴムボールはゴム状態からプラスチック状態へと変化します。

ゴム状態からプラスチック状態への変化は相転移といわれ，天然ゴムでは－73℃で相転移が起こります。

相転移は目に見える世界では物質の性質の変化であり，原子・分子の世界では原子・分子の運動形態の変化なのです。

２．３　ゴムの科学・技術・社会

天然物である生ゴムを加硫技術により加工することで，人間社会はゴム物質の存在を認識できたことを学習する。この加硫技術は過去の歴史的蓄積の中から生まれた人類の共通の財産であるにもかかわらず，結果的には大英帝国の帝国主義政策を支えるという役割を果たしてきたことを示す。さらに大英帝国の戦略物資であるゴムの独占を切り崩すために，ドイツ帝国が産業界の技術を利用して，はじめて合成ゴムをつくったことを学習する。そしてこのような時代背景の中での合成ゴムづくりが高分子概念の形成にどのように関わっていたかを明らかにし，高分子概念の形成の歴史を通して，人間社会と科学・技術との関わりについての問題提起とする。

「ゴムの科学・技術・社会」は次の三部で構成した。

・華麗なるゴムのデビュー
・大英帝国のゴムの独り占め
・ドイツ帝国の挑戦

(1) 華麗なるゴムのデビュー

グッドイヤーの加硫技術によってゴムが生産材（工業原料）として使用できるようになったことを明らかにし，加硫技術が「人工的からみあい」をつくる技術であることを学習する。また，加硫技術が偶然発見されたとい説は不合理であることを示し，過去の歴史的蓄積の中から発見されたと考えるのが合理的であることを示す。

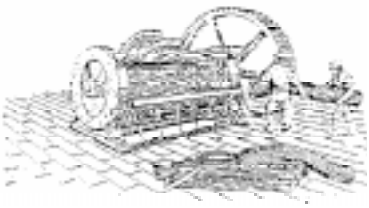
p．３８

１　華麗なるゴムのデビュー

１－１　加硫技術の発見
コロンブスが西欧人としてはじめてゴムボールの弾む様子を目撃してから２００年以上たった１

７３６年のことでした。地理の研究のために南米に来ていたラ・コンダミーヌ（フランス）は先住民による水筒・ゴム靴・防水布などへのゴムの利用を目撃し，フランスの王立アカデミーにこのことを報告しました。そしてこの報告が１７５１年に出版されると，それはただちにヨーロッパの技術者の関心を集めました。こうして１９世紀初めには，産業革命を背景にしたイギリスを中心にゴムを防水コートやゴムバンド，ガーターなどに利用※されるようになりました。しかし夏はべとつき冬は硬化する生ゴムの欠点はその利用拡大に大きな障害となっていました。

※　すでにこの時代にハンコック（イギリス）によってゴムの加工についての種々の機械がつくられていました。



ゴムを練り混ぜて均質なゴム塊にする機械
図１－１　ゴムの加工機械
（シンガー，高木純一訳『技術の歴史第１０巻』，筑摩書房，１９７９年，６１７頁）

ｐ．３９

イギリスでは生ゴムの欠点を少しでも改良しようと，ゴムを布に包み込むなどの工夫をしていました。しかしゴム工業の後進国である合衆国では，この欠点を改善する配慮を払わずに製造に着手したため，夏はべとつき冬には硬化して弾性を失うという**危機的な状況**が生まれました。

このような状況の中にあって，金物商であったグッドイヤー（合衆国）は生ゴムの欠点を改良するために実験を始めました。実験は失敗の連続でしたが，１８３９年には生ゴムに硫黄と鉛白※を混ぜて１５０℃で加熱することによって，ついにべとつきも硬化もしないゴムをつくることに成功したのです。

グッドイヤーの発見した技術は，日本では硫黄を加えるということで「加硫」技術と呼ばれますが，英語では「ｖｕｌｃａｎｉｚａｔｉｏｎ」と呼ばれます。この言葉は直接硫黄とは関係なく，火の神Ｖｕｌｃａｎにちなんだもので，加熱の意味なのです。

※　鉛白（炭酸水酸化鉛）は一般には触媒といわれるもので，生ゴムと硫黄との反応温度を下げるためのものです。反応温度が高いと生ゴムの分子は切断されやすくなります。

ｐ．４５

生ゴムは高分子どうしが「からみあって」できている物質です。この「からみあい」はゆるやかなものなので，温度が低い冬では，生ゴムの高分子が折りたたまれた形になり，硬化してしまします。また，ゴムを引っ張っていると「からみあい」がほぐれて，生ゴムの高分子が流れやすくなります。このため，温度が高い夏では，べとついてしまいます。

このように生ゴムは弾性を失いやすいという欠点をもっています。生ゴムに硫黄をまぜて加熱することによって，下図のように，生ゴムの高分子間に結合（共有結合）ができ，さらに巨大な高分子ができるため，生ゴムの高分子の流動性が妨げられます。したがって，正解はアです。

「からみあい」という高分子の特性は，加硫技術による結合（共有結合）で補強され，「分子内回転運動」が保障されているのです。つまり，**加硫技術は「人工的からみあい」をつくる技術**とも言えます。