

# 穴およびクラックがあいても漏れない容器の開発

Vessels without Leakage when Holes and Cracks Appear

群馬大学工学部 長屋 幸助 Kosuke NAGAYA Member  
群馬大学大学院 和田 誠 Makoto WADA  
群馬大学工学部 新井 幸広 Yukihiro ARAI  
群馬大学工学部 村上 岩範 Iwanori MURAKAMI

This paper proposes a method for obtaining the vessel, in which there is no fluid leak when broken holes and cracks exist, because the broken part is repaired automatically by its self-repairing mechanism. The self-repairing unit (sealant layer) is consisting of two rubber sheets with lattices inside. Polymer particles, which expand their volume with water, are used for having self-repairing forces. This article first discusses a method for making the vessel, then the method is applied to a tire with large inside pressure.

**Keywords:** Vessel, Self-Repairing, Sealant, Polymer, Tire, without Leakage, Hole, Crack

## 1. 緒言

内部に液体あるいは気体の封入される構造体（容器）に突起物が刺さり、破れた場合、あるいは材料劣化により割れなどが発生すると、封入気体・液体が漏れ出す。この問題は原子力機器をはじめ化学プラントにおける危険流体の保存容器などで重要な問題である。このような容器に対し、穴があいても自己修復して漏れない容器があれば、安全性が極めて高くなると思われるが、著者らの調べた限り、自己修復型の容器は開発されていないように思われる。自己修復構造に対して、著者らは2枚のシート間に格子を作りそのなかに吸水ポリマーを充填することで、穴が空いても自己修復して水を漏らさない遮水シートを開発した[1]。しかし、これは容器に対しては直ちに適用できず、また容器内の流体が水以外の場合に利用できないという欠点があった。本研究では、新たに容器からの流体漏洩を防止するための方法を示し、その問題点を明らかにするとともに解決法を提案し、穴があいても漏れない自己修復型の流体封入容器を開発する。

## 2. 本容器の構造と自己修復の原理

いま図1のように2枚のシートに格子を作り、その中に水を吸うと膨張する吸水ポリマーをサンドイッチしたシーラント層を考える。この中に水を注入すると、内部の吸水ポリマーが半固体のゲル状に膨

連絡先:長屋幸助、〒376-1585 群馬県桐生市天神町1-5-1、群馬大学工学部機械システム工学科、電話:0277-30-1563、e-mail:nagaya@me.gunma-u.ac.jp

張する。このとき、吸水ポリマーは格子内に閉じこめられているので、格子内部に膨潤圧が発生する。また容器内水圧でポリマーが圧縮される。

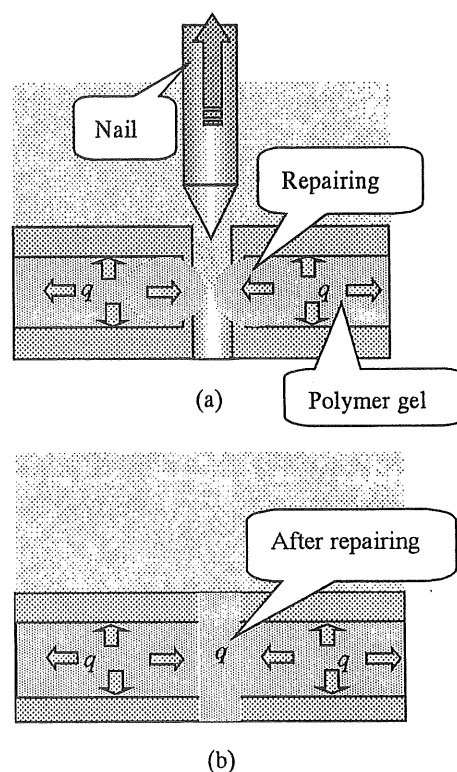
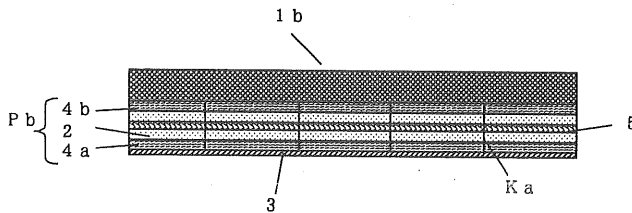


Fig.1 Principle of self-repairing

この状態で、釘を貫通すると、釘の太さ分だけゲル化した吸水ポリマーが押しつけられるが、釘を抜いた瞬間に膨潤圧と容器内流体圧  $q$  がゲル化した吸水ポリマーに作用して瞬時に穴を塞ぐ。このとき、膨潤圧と水圧の和が水圧より大きければ水は漏れな

いことになる[1]。このような方法で水の漏洩を止めることはできるが、吸水ポリマーを膨張させない油とか気体の場合にはこの方法では効果が無い。そこで、予めシーラント層に水を入れて吸水ポリマーを膨潤させておくと、上記と同様の膨潤圧が常時シーラント層に作用しているので、水のみならず他の流体の漏洩も止めることができると考えられる。本研究は基本的にこの原理を用いて、流体（気体・液体）の穴からの漏洩を止めるものである。



1b Outer wall of the vessel, 2 Polymer, 4a,4b Sheets, 5 Net  
3 Inner wall, Ka Sewing portion

Fig.2 Geometry of the self repairing vessel

本研究で開発する容器の構造は図2に示すようなもので、容器内壁面にシーラント層（Pb）が接着される。空気とか水の漏洩を防止するときは、シーラント層にゴムとかプラスチックなどのカバーシートをシーラント層の内面に接着する。また、容器内面にダメージを与えるような液体・気体を封入するときは、Pbに接着させる材料をその流体に強い材料を選ぶものとする。シーラント層は図2に示されるように2枚のシートの中に粉末状の吸水ポリマーがサンドイッチされており、適当な間隔で格子状に上下面を縫い合わせてある。しかし、このままでは下記に示す多くの問題点があるので、以下逐一問題点を明らかにし、その解決法を示す。

### 3 膨潤液の作成

**3.1 膨潤液の鋼への影響** 本論では、熱による蒸発とか凍結を防止することを考え、膨潤液として、不凍液に水を混入する方法を採用する。したがって、シーラント層には水で希釈した不凍液がポリマー内に混入さる。この水分が容器に用いられる鋼を腐食させる恐れがある。そこで、水で希釈した不凍液が鋼壁に接触したときの錆の程度を実験により検証する。実験では、(a)水、(b)不凍液 30Wt.%, 水 70 wt %, (c)不凍液 50wt.%, 水 50wt.%, (d)不凍液 70wt%, 水

30wt%の四つのサンプル液を透明のペットボトルに入れ、サンプル液に直径 5.2mm の軟鉄製の釘を入れて4ヶ月間放置した後、取り出して検査を行った。なお、用いた不凍液は、エチレングリコール 95wt % に防錆剤と消泡剤が含まれた市販の不凍液である。まず、釘の腐食を目視で観察したところ、不凍液を含有しない水に浸した釘は明らかに赤錆を発生していたが、それ以外のものの変化は目視では確認することができなかった。

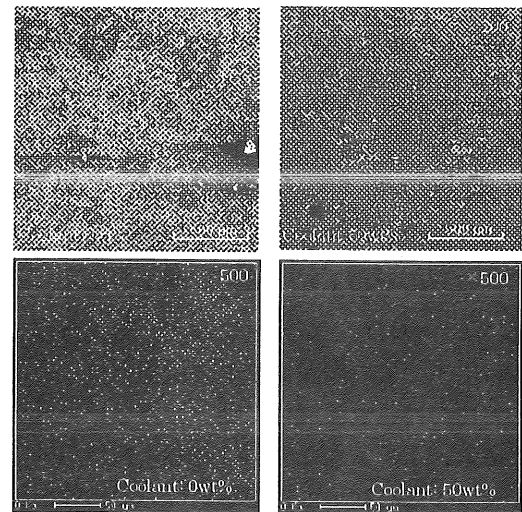


Fig.3 Photograph of SEM and EPMA for the surface of nails.

図2は左から不凍液 0wt%と 50wt%の2例を示したものである。70wt%についても観察したが、50wt%の結果との差が見られなかったのでここでは省略する。図から、不凍液 0wt%では明らかに表面が荒れているのに対し、50wt%では、0wt%のような荒れは見受けられない。しかし、この図だけでははっきりしないところもあるので、さらにEPMA解析を試みた。その結果を、図2の下段に示す。まず、どんな成分が含まれているかを調べるために定性分析を行った。腐食によると考えられ、かつ、顕著に現れたものは、酸素のみであったので、酸素について測定してみた。図の下段で、白く分布しているものが酸素である。不凍液が 0wt%に比べ 50wt%のときに酸化した部分が極端に小さくなっていることが認められる。50wt%のときでもわずかに酸化している点が認められるが、これと新しい釘との比較を行ったところ、その差は認められなかった。すなわち、50wt%の図の酸化している点は初期の釘が持っている酸化度

とほぼ同じものである。したがって、不凍液を 50wt% 以上とした膨潤液で鋼壁を酸化させることは無いといえる。

**3.2 膨潤を考慮した不凍液の適正割合** 吸水ポリマーを不凍液そのもので膨脹させることはできないので、膨潤を得るためにはそれに水を混入させる必要がある。そこで、吸水ポリマーの膨張実験を行い、釘が錆びない不凍液の濃度を用いてもポリマーが膨らむかを調べた。その結果、70wt%の不凍液まではポリマーの膨潤を確認できた。よって、水 30wt%、不凍液 70wt%の液を膨潤液として用いることとする。この割合のとき、鋼の腐食は無く、凍結温度は-50℃以下である。

## 4 ポリマー層の作成法

格子を作る方法として、前報では、2枚のシートに吸水ポリマーをサンドイッチして、格子状に縫い合わせる方法を提案した[1]。しかし、この方法では、縫い目部の吸水ポリマーが縫製中に逃げるため、縫い目が薄くなり、そこに釘が刺さった場合は、空気漏れが発生する。上記問題の縫い目厚を確保するには、図2のようにカバーシートの間縫い目厚を確保するネットを入れて縫製すると良い。しかし、容器を膨らませる必要のあるときは、ネットは伸びず、ネットの材料費が別にかかる。この場合、吸水ポリマー同士が接着し、かつある程度の硬さがあれば縫製時に吸水ポリマーは逃げない。吸水ポリマーは若干でも水分を吸収すると、吸水ポリマー自体が接着力を発現するが、水で接着してシート状にしたとき、乾いた状態になると、硬く脆い板状になるので、水だけでポリマー層を作ることはできない。しかし、吸水ポリマーに少量の不凍液を吹き付けて圧力を与えると、粘着性が得られ、しなやかになることが分かった。そこで、本研究では、吸水ポリマーに不凍液を吹き付けた後にポリマーに圧力を加えて板状になったポリマーブロックを作成した。これを2枚の加硫前のゴムシートに挟み、縫い合わせることで膨潤液注入前のシーラント層を作成することができた。このときのポリマーブロックはしなやかではあるが、十分な硬さを持っており、縫い目がつぶれ無いことを確認した。実際のポリマー層の作成では、ローラによりシート状のものを作れば良い。

## 5 膨潤液の自動注入法

ポリマーに予め膨潤液を混入して膨潤させてから格子を作るのでは格子内に膨潤圧が得られないので、本シーラントは、ポリマーの格子を作った後に適量の不凍液をポリマー層に一樣に注入する必要がある。前報では、注射器で強制的に膨潤液を注入しているが[1]、この方法で膨潤液を一樣注入することは難しく、実用化に難点があった。そこで、膨潤液を満たしたタンク内に表面のゴムシートに多数の小さな穴をあけたシーラント層をドブ漬けし、タンク内を膨潤液で加圧し、シーラント層内に膨潤液を強制注入する方法を開発した。本実験では、円筒内を膨潤液で満たし、その中にシーラント層を入れ、ポンプを用いて加圧した。図4は本実験によりシーラント層に注入された膨潤液の割合[膨潤液の重量/(ポリマーの重量+膨潤液の重量)×100]と加圧時間の関係を表したものである。図4より、0.6MPaの加圧量で最高の吸水量を示している。一般的には、高圧をかけた方が不凍液はポリマー層内に入り込み易いと考えられるが、結果は必ずしもそうはなっていない。圧力 1.0MPa では、高圧のために不凍液はシーラント層の中に入り込もうとするが、吸水ポリマーの膨潤圧より外圧の方が高いため、吸水ポリマーの膨潤が妨げられてしまうと考えられる。また、0MPa や 0.3MPa のように、加圧量が少ない場合、注入圧力が小さいので、試験片の中まで膨潤液が入り込むことができなくなる。一方、0.6MPa の場合、不凍液が試験片の中に入り込もうとする圧力が、吸水ポリマーの膨潤圧より少しだけ小さく、水を吸収しやすくなっていると考えられる。このようにして膨潤液が注入されたシーラント層は縫い目を境にした大きな凹凸があり、このままでは容器内面に接着できない。そこで、シーラント層を2枚のアルミ板に挟み、ボルトで圧縮して所定の厚さにしたところ、一樣な厚さのシーラント層が得られることが分かった。すなわち、実用上は、ローラなどで平らにすれば良い。

図5は本実験の空気漏洩試験装置を示したもので、図中①は実験装置本体であり、アルミニウム製の円筒に穴が掘られており、一端(左端)に試験片を入れる円形の段が掘られている。その段の中に試験片②が入られる。その試験片の上に蓋③が被さりボルト④で蓋を本体に締め付けて結合する。蓋の中心

には直径8mmの穴が開けられている。本体の他端にはホース⑤が結合されており、ホースの中間に圧力計⑥とふたつのコック⑦⑧が取り付けられている。この図でコック⑦と⑧を開放し、パイプ⑤の右端よりコンプレッサで空気を入れ、コック⑧を閉じると、本体①内の空気圧が圧力計⑥に表示される。

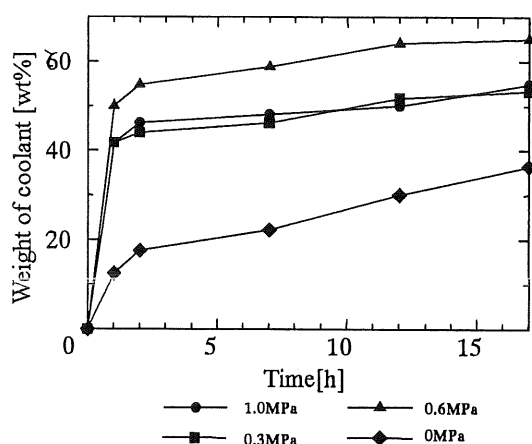


Fig.4 Absorbed water weight versus time when our method is used.

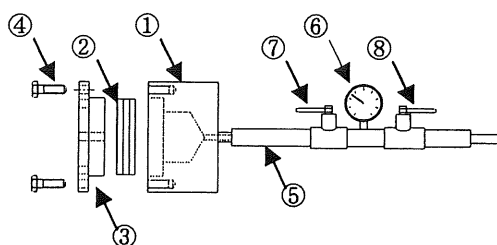


Fig.5 Experimental apparatus.

この装置を用いた本シーラント層の空気漏洩試験の結果を図6に示す。図で空気圧が下がっていなければ実験装置内容器からの空気漏れがないことを示し、空気圧が下がる場合は空気漏れがあることを示す。実験では、5.2mmの釘を用いて穴をあけた後引き抜いている。初期圧力を実験装置の最大測定圧力0.5MPaとし、5時間放置後の圧力を測定した。図中の数値(例えば44wt%等)は全体重量(ポリマー+膨潤液重量)に対する膨潤液の重量割合を示したものである。図で膨潤液の量が44.0wt%では釘を引き抜いてから漏れ続け、抜けきってしまっている。53.3wt%では、釘を引き抜いた瞬間多めに抜けてし

まったが、5時間放置後には0.01MPa(2%程)の低下に留まっている。また、58.8wt%~72.5wt%では、5時間放置後に若干(1%程)圧力の低下がみられるが、これは釘を引き抜いた瞬間に漏れたことに起因すると思われる。その後自己修復し、空気漏れはみられなかった。これらの結果より、膨潤液量が53.3wt%以上であれば、不凍液を多め(72.5wt%)に入れても釘を抜いた瞬間以外、空気漏れがないことがわかる。前報の実験では[1], 吸水ポリマーを固定するために接着剤をポリマーに混入しており、膨潤液は接着剤の量との関係から定まるため、膨潤液量が多ければ良い訳ではなく、多く入れすぎると漏れてしまう傾向があったが、本実験ではそれが見られない。これは、本実験では、ポリマーに接着剤を混入していないことから、吸水ポリマーが十分に膨潤できたためと思われる。

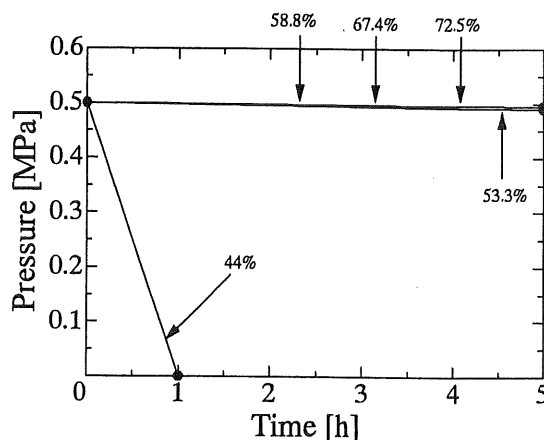


Fig.6 Pressures versus time for various weights of water diluted coolant fluid.

ついで、この製造法を用いたシーラントに対し、格子間隔を変化させたときの空気漏洩実験を行った。図7は正方形の格子を縫い目づくり、縫い目に穴をあけ、格子間隔を変えたときの圧力変化を示したものである。図で格子間隔が25mmで初期圧力が0.4MPaのときに空気漏れが認められるが、その他では、ほとんど空気漏れが認められない。なお、ポリマー層の厚さは4mmが適当であった。

以上より、ポリマー層厚は4mm(0.36g/cm<sup>2</sup>), 膨潤液は60wt%, 格子間隔は2cm程度が適当といえる。このときの膨潤液注入圧力(タンク内圧力)は0.6MPa, 膨潤継続時間は約2時間が適当である。

## 6 シーラント層の拡大法

容器を風船のように膨らませて用いる場合は、シーラント層も伸ばさなければならぬ。しかし、上記シーラント層を用いた場合、縫い糸が邪魔してシーラント層の伸びを抑制する。

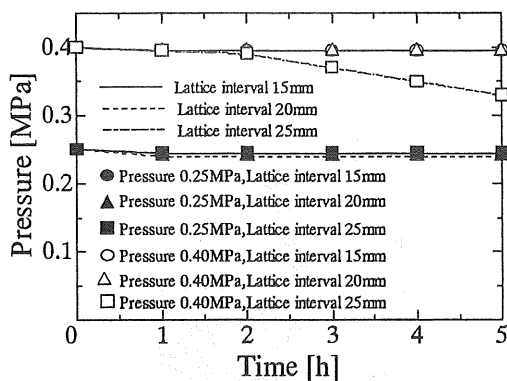
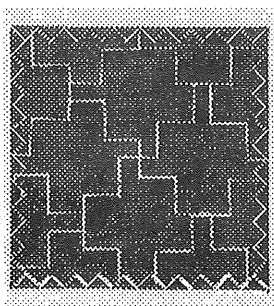
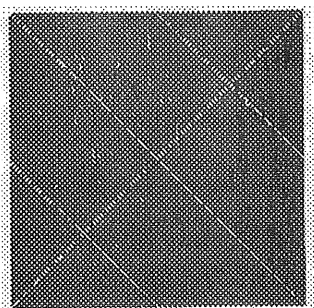


Fig.7 Pressure versus time when nails break the sealant.



(a) Figure before extension



(b) Figure after extension

Fig.8 Shape of sawing for the sealant.

この問題を解決する方法として、格子を構成させるための縫い方を斜めに、かつジグザグに緩く縫う方法を考えた。この方法の縫い方を図 9(a)に、それが伸ばされた状態を図 9(b)に示す。実際にシーラント層を格子状に縫い、膨潤液を注入した後金型に挟み込み、その状態で圧延し、そのままオープンに入れて加熱した。加熱後、縫製糸図 9 の圧延前のシー

ラント層の寸法は、50mm×50mm であるが、圧延後の寸法は 80mm×80mm 程度であり、面積比で約 2.5 倍程度までこの方法でシーラント層を拡大できることを確認した。

## 7 空気漏洩試験.

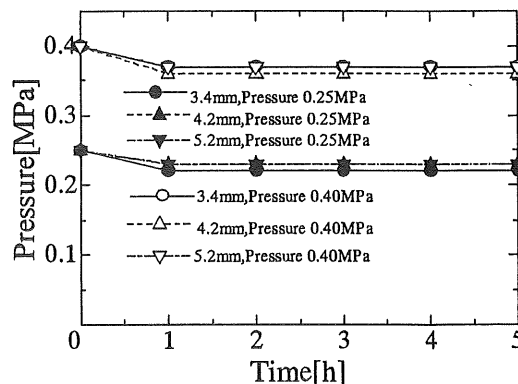


Fig.9 Pressure versus time for the sealant made by the present method.

以上のように作成した試験片について、空気漏洩試験を行った。穴をあける釘の直径は 3.4mm, 4.2mm, 5.2mm の 3 種類であり、結果を図 10 に示す。図からすべての釘径について、穴あけ後 1 時間までの間に若干の空気圧の減少がみられるものの、その後は一定となり、空気漏れが止まっていることがわかる。このときの空気漏洩による圧力低下は 7~10% 程度である。これまでの試験 (図 6, 図 7) で試験片の圧延を行わなかったときは、釘を引き抜いた瞬間でも空気漏れはなかったが、試験片を大きく圧延したときは、釘を抜いた瞬間に漏れが多くなる。これは吸水ポリマーが圧延時の圧力により強固に接着されたため、膨潤圧で穴の修復が行われるとき、接着力が邪魔して穴の修復に時間がかかったものと考えられる。この図で圧力低下は釘を抜いてから穴が自己修復するまでの間に起こるものであるため、穴に洗剤をたらして空気漏れが止まるまでの時間を測定したところ、漏洩時間は 1 分にも満たないことが分かった。

## 8 タイヤのパンクレス化

本方法はタイヤへも応用できる。タイヤについては、シーラント層に液体を用いたものが開発されているが [2]-[3]、貫通穴には、空気漏洩遮断が不完全

となり、またタイヤ側面を強化したランフラットタイヤでも空気漏洩があり、パンク修理が必要である。本研究では、穴があいても漏れないタイヤを開発する。本タイヤの製造では、バランスをとるため、タイヤの対向する2カ所に上記方法で作成されたシーラント層を図10のようにタイヤ内面にブチルゴムを用いて貼り付けた。まず、パンクレスの施していない通常のタイヤに0.40MPaの空気を入れ、直径5.2mmの釘を貫通させ引き抜いた後の圧力を測定したところ、わずか540秒間で空気が無くなり圧力は零となった。ついで、パンクレスを施したタイヤに、初期圧力が0.40MPaになるまで空気を入れたあと、直径5.2mmの釘でタイヤを貫通させ引き抜いた。釘を抜いた瞬間に「シュッ」という音があり、わずかな空気漏れはあったが、圧力計には現れず、また、その直後に洗剤により空気漏れを確認したが、漏れは認められなかった。

ついで、実際に自動車の1輪だけに、本パンクレスタイヤを装着し、走行試験を行った。初期圧力を0.25MPaとし、直径5.2mmの釘でシーラント層のあるタイヤ部分に穴を開け引き抜いた後の結果を求めた。その結果40日間(900Kmの走行)で、0.01MPa程度の圧力低下が認められた。このように長い期間において数パーセントの圧力低下が見られるが、このタイヤのパンク穴に洗剤液を垂らして空気漏れを観察したかぎりでは、まったく空気漏れがみられないことから、この圧力低下は計測時の空気漏れによるものと考えられ、パンク穴は修復しているといえる。

## 9 結言

本研究は、穴があいても漏れない容器の開発を行ったものである。その内容を列記するとつぎのようである。

(1) 吸水ポリマーの性質を用いたポリマーブロックを成型した。このブロックを用いてシーラント層を作成すると、格子構成のための縫い目における厚みを十分に確保でき、縫い目に釘が刺さったときの空気漏れを抑えることができた。

(2) 鋼製容器を腐食させず、かつ膨潤も得られる水と不凍液濃度の割合、およびポリマーに対する適切な膨潤液の割合を見いだした。

(3) シーラントのポリマー層への膨潤液の自動注入法を開発した。

(4) 使用中に膨らむ容器にも対応できる拡大できるシーラント層の構成と製作方法を提案した。

(5) 実際の応用として、タイヤに対して本方法を適用したところ、穴があいても漏れないタイヤを作ることができた。

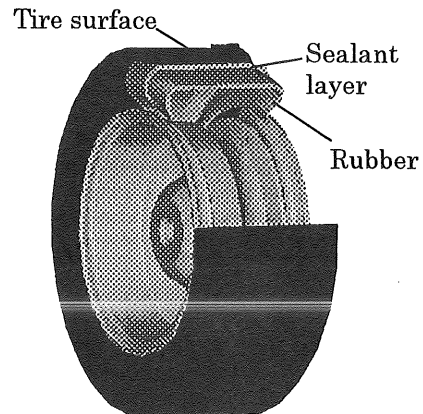


Fig.10(a) Model of present tire.

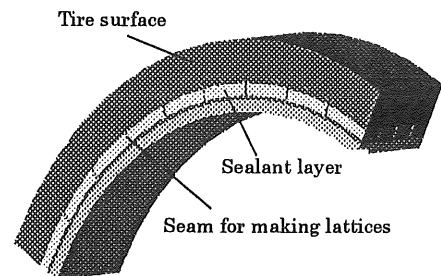


Fig.10(b) Cross section of the present tire.

## 文 献

- [1] 長屋幸助、超字、和田誠、金田祐次、安藤嘉則、村上岩範、穴があいても漏れない自己修復機能を有する遮水シートの開発、機械学会論文集、69-678(2003), pp.545-553.
- [2] 山際登志夫、中山研吾、清田悟、田中明子、槇坂昇、二輪車のパンク性向上チューブの開発、自動車技術会講演会前刷集、No.976 (1997), pp.279-282.
- [3] ホンダの2輪技術 新しい防止液の効果、タフアップチューブでパンク率が激減、自動車と整備、Vol.51, No.1 (1997), pp.40-41.