

最近のタイヤの設計について

(株)ブリヂストン タイヤ研究部
大沢 靖雄

- 1 ブリヂストンの概要
- 2 タイヤの概要
- 3 タイヤの設計
- 4 タイヤの形状設計
- 5 航空機用タイヤの設計
- 6 まとめ

1. ブリヂストンの概要



社名 株式会社ブリヂストン
本社所在地 東京都中央区
創立年月日 1931年(昭和6年)3月1日

タイヤ事業(売上構成比80%)

乗用車用タイヤ、トラック・バス用タイヤ、二輪車用タイヤ、
建設車両用タイヤ、航空機用タイヤ、農業機械用タイヤ 他



多角化事業(売上構成比20%)



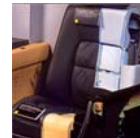
コンベヤベルト



自転車



ゴムホース



自動車用シートパッド(ウレタン)



免震ゴム



スポーツ用品

2/49

世界の主要生産・開発拠点

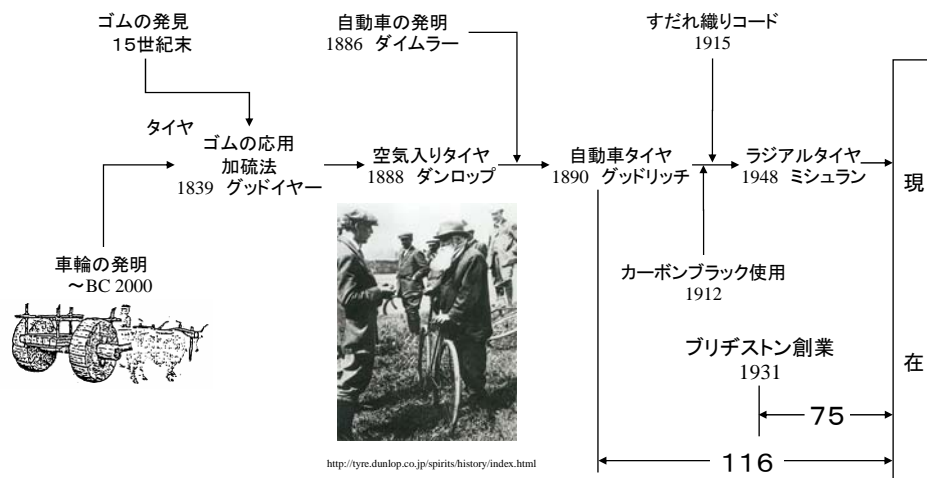


ブリヂストンは世界150か国超の国々で事業活動を行っています。



3/49

2 タイヤの概要: 歴史



タイヤの歴史は約115年 = おそらくあと100年はタイヤはなくなるだろう

革新的技術開発は？

タイヤの役割・機能

タイヤの 4大機能

①車両の重量を支える

(負荷荷重性能)
車体や乗員・荷物などの重量を支えます。

②駆動力、制動力を伝える

(トラクション・ブレーキ性能)
車のエンジンやブレークのパワーを速やかに路面に伝え、進んだり止まったりします。

③方向を転換・維持する

(操縦性・安定性能)
直進を維持したり方向を転換したり車の進む方向をリードします。

④路面からの衝撃をやわらげる

(乗心地性能)
路面の凹凸によって発生する衝撃を吸収し緩和します。

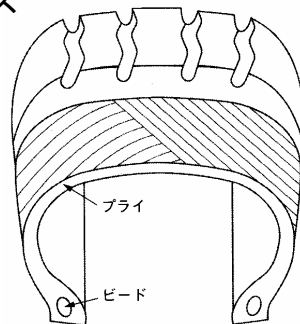
接触面積は
「ハガキ1枚分」

一つの部品で多数の機能を負担している

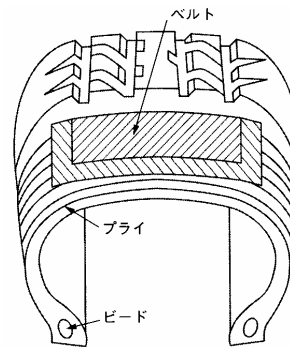
バイアスとラジアル

BRIDGESTONE
PASSION for EXCELLENCE

バイアス



ラジアル



プライコード層＝圧力容器

交差するプライ層
→積層板として強度と剛性

放射状のプライ層＋
交錯ベルト層＝タガ効果

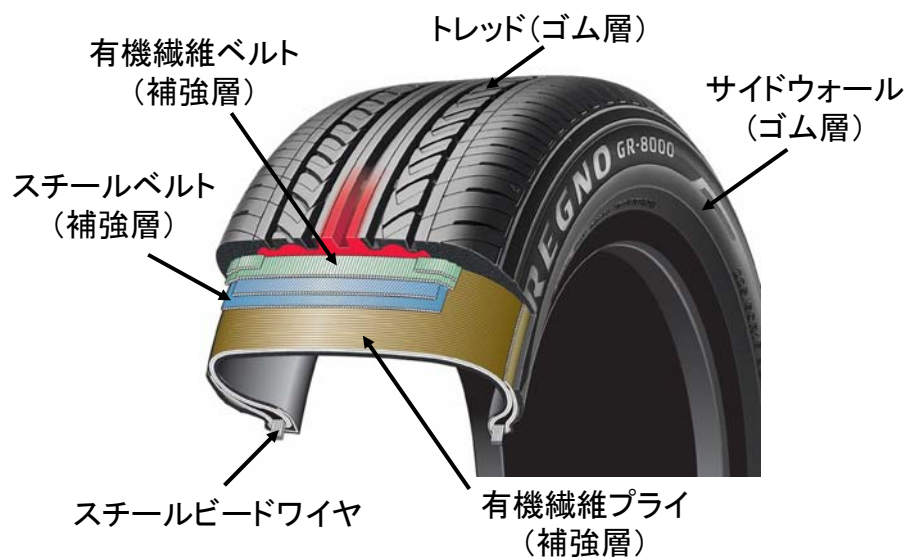
ラジアル構造のメリット

- ・転がり抵抗が小さい
- ・摩耗性能が良い

6/49

タイヤの内部構造

BRIDGESTONE
PASSION for EXCELLENCE

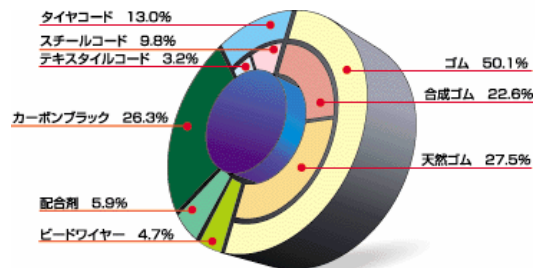


7/49

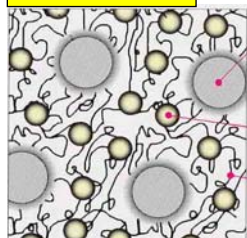
タイヤの原材料

タイヤは複合材料を使った複合構造体
多数の機能を同時に実現する

ゴムとスチールコード/有機繊維の
複合材料（FRR）



ゴムも複合材料



カーボン
ブラック

硫黄

ゴム分子
・天然ゴム
・合成ゴム

8/49

タイヤの種類



for Passenger Car



for Trucks and Buses



for Construction and
Mining



for Aircraft



for Racing



for Motorcycles

安全性

経済性

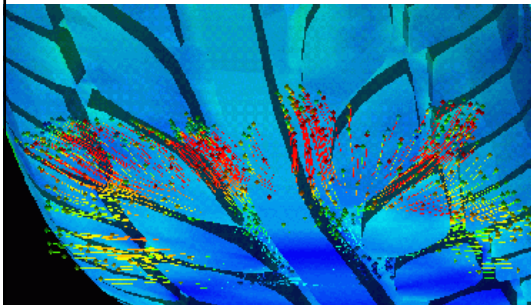
極限の追求

快適性

環境

9/49

乗用車用タイヤ

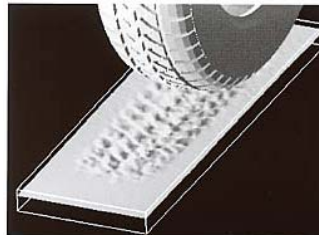


Hydro-planing性能向上のための
パターン解析

→ 安全性の探求

雪上性能向上のための
パターン解析

→ 安全性の探求



雪の上をタイヤが走行するシミュレーション



雪のせん断応力分布

10/49

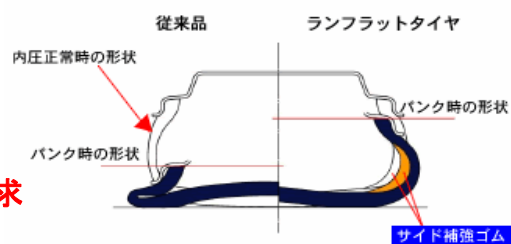
乗用車用ランフラットタイヤ



サイド補強型ランフラットタイヤのメカニズム

空気圧0kPa時に、タイヤサイドの補強ゴムが車両を支える
★80km/h以下で80kmまで走行可能
★スベアタイヤは不要
★通常ホイールに装着可能

→ 安全性・環境性の探求



▼ BMW/3シリーズ



サイド補強型
ランフラットタイヤの構造



【主な装着車種】

- BMW/Z8 ■BMW/Z4
- BMW/7,5シリーズ ※
- BMW/3,1シリーズ
- Ferrari/599, 612 ※
- Audi/TT※
- VW/Passat, Golf※
- LEXUS/SC430, GS430, GS450h ※
- Toyota/Siena※
- NISSAN/Infiniti Q45, FX35/45 ※
- NISSAN/Hypermini
- Mazda/Roadstar※
- DAIHATSU/MOVE Sloper ※
- ※Optional equipment

11/49

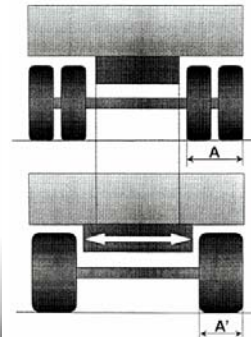
大型トラック用超偏平シングルタイヤと安全装置

BRIDGESTONE
PASSION for EXCELLENCE

☆ 大型トラック用超偏平シングルタイヤ
(GREATEC) 及び
安全装置『AIRCEPT』の開発

GREATEC

→ 経済性・環境性
・安全性の探求



AIRCEPT



GREATEC + AIRCEPT



【2本→1本によるメリット】	市内バス用	トラック用
従来複輪タイヤ	275/70R22.5	315/70R22.5
超偏平シングルタイヤ	435/45R22.5	495/45R22.5
転がり抵抗低減	10%以上	12%以上
重量低減(リム付き)	50kg	45kg
廃材ゴム量低減	20%	25%
タイヤ横幅低減(A-A')	145mm	175mm

12/49

鉱山用超々大型タイヤ

BRIDGESTONE
PASSION for EXCELLENCE

→ 経済性の探求



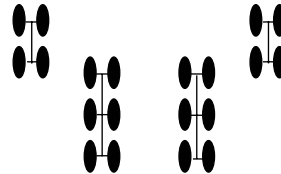
世界最大のラジアルタイヤとF1用タイヤ
(59/80R63)

13/49

→ 経済性・安全性の探求

エアバス社
A380

ノーズタイヤ: 2本/機



メインタイヤ: 20本/機

ボーイング社
787

課題:

- ・ 耐FOD(カット)性向上
- ・ FOD(カット)受傷時の耐破壊性向上(動的/静的)
- ・ タイヤ重量ダウン

14/49



For:

極限の追求 ⇔ エンターテインメント
Brand Image
Technical Reputation

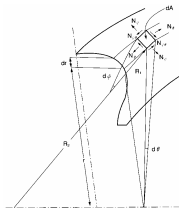
15/49

3 タイヤの設計

販売先、使用実態、目標性能



理論、解析、実験



$$z = \int_r^{r_0} \frac{(r^2 - r_m^2) \exp\left(\int_r^{r_0} \frac{N_\theta}{N_\phi} \frac{1}{r} dr\right)}{\sqrt{(r_0^2 - r_m^2)^2 - \left\{(r^2 - r_m^2) \exp\left(\int_r^{r_0} \frac{N_\theta}{N_\phi} \frac{1}{r} dr\right)\right\}^2}} dr$$

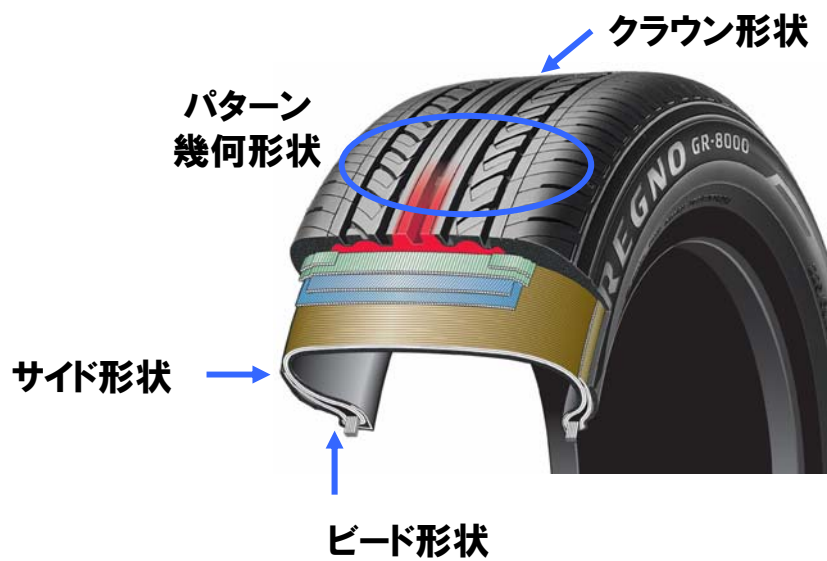


形状、構造、材料



16/49

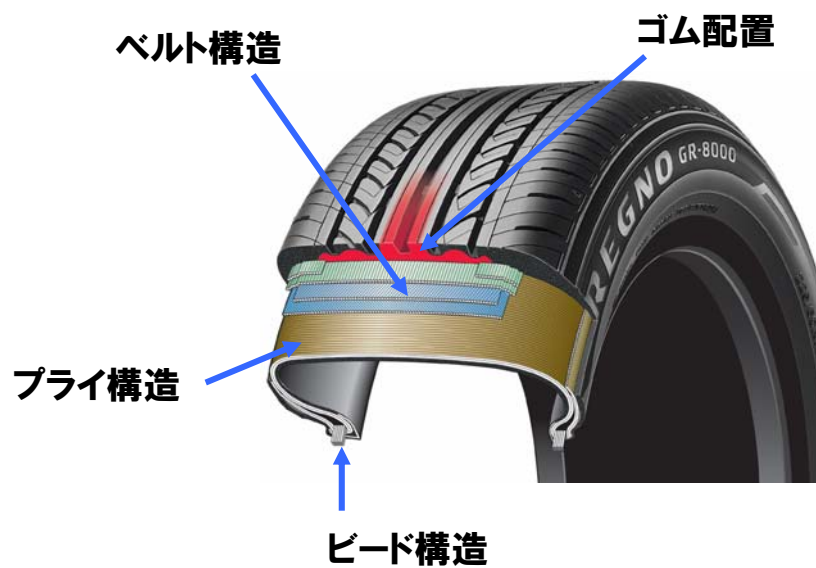
タイヤの形状設計



17/49

タイヤの構造設計

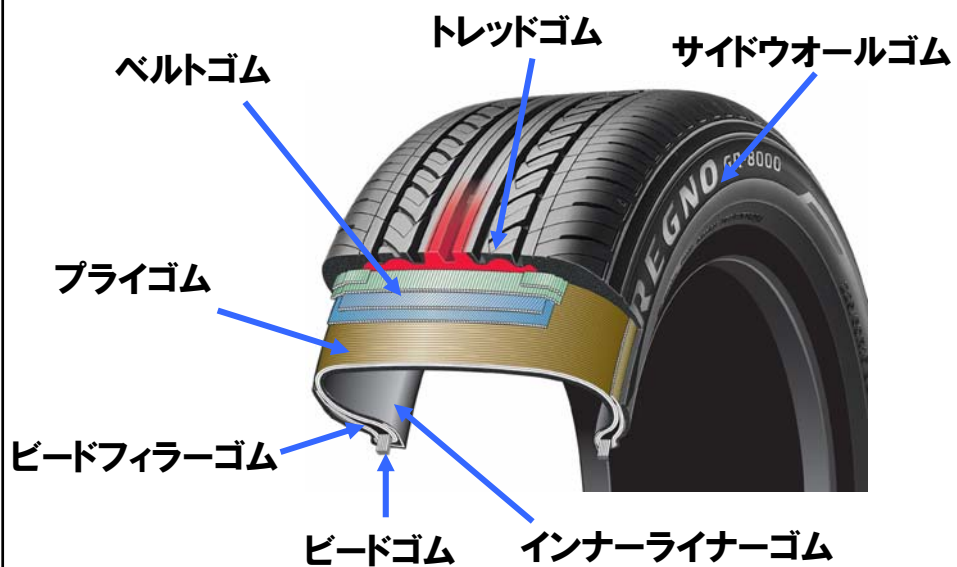
BRIDGESTONE
PASSION for EXCELLENCE



18/49

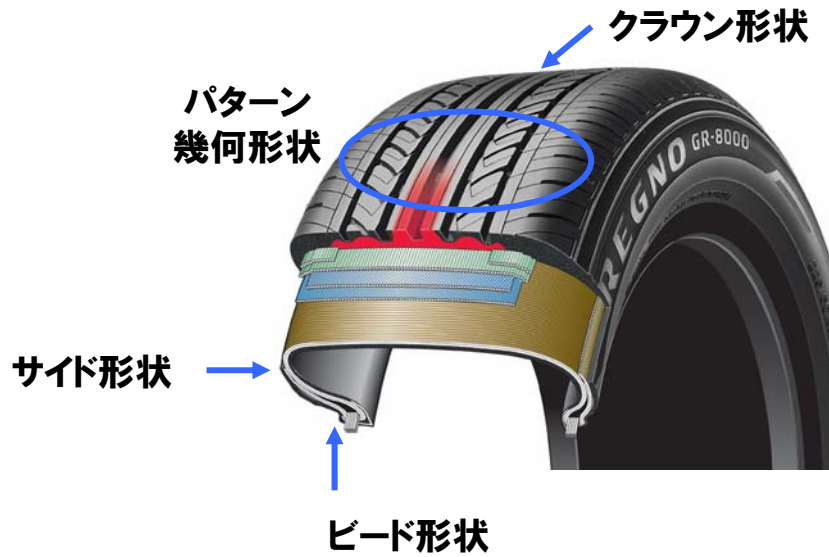
タイヤの材料設計

BRIDGESTONE
PASSION for EXCELLENCE



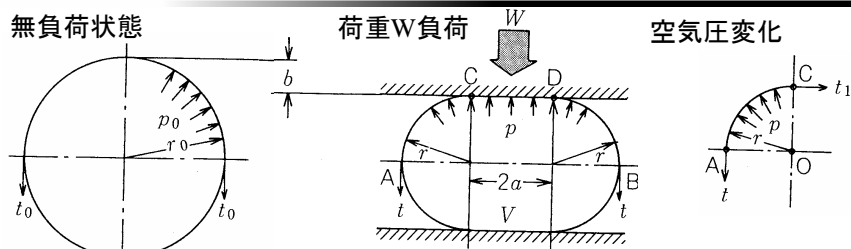
19/49

4 タイヤの形状設計



20/49

風船の力学



空気圧の上向き成分合計

$$P_0 = 2r_0 p_0$$

下向き張力合計

$$T_0 = 2t_0$$

力の釣り合いから

$$P_0 = T_0$$

$$\therefore t_0 = r_0 p_0$$

空気圧の上向き成分合計

$$P = 2(r+a)p$$

下向き張力合計

$$T = 2t$$

荷重Wと力の釣り合いから

$$W = P - T$$

$$W = 2ap$$

膜が伸びない仮定では

$$2a = \pi b$$

張力で荷重支持できる

空気圧の左向き成分合計

$$P_1 = pr$$

左右力の釣り合いから

$$P_1 = t_1 = pr$$

$$t = t_1 = pr = p(r_0 - b)$$

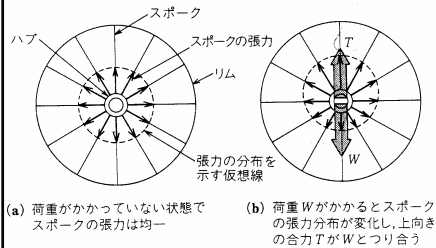
$$p_0 V_0 = pV \text{ より}$$

$$p = p_0 \frac{V_0}{V} = p_0 \frac{\pi r_0^2}{\pi r^2 + 4ar} = p_0 \frac{r_0^2}{r_0^2 - b^2}$$

$$= p_0 \frac{1}{1 - (b/r_0)^2} \cong p_0$$

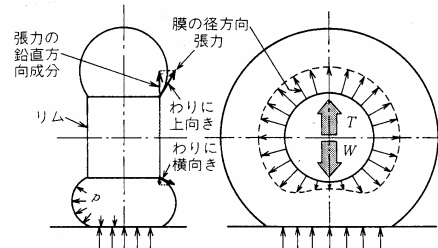
21/49

自転車の場合



張力変化で荷重支持

タイヤとホイールの場合



サイド部の張力変化

ホイールとの力の釣り合い

荷重支持

張力が重要ポイント

22/49

タイヤの空気充填時自然平衡形状理論

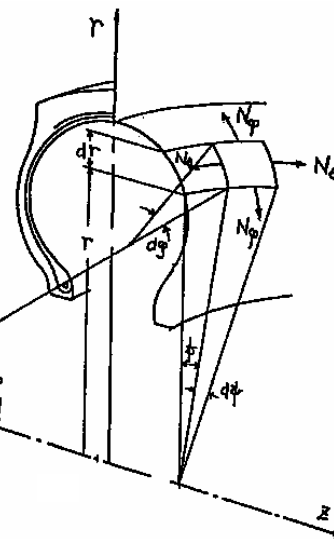
バイアスタイヤの形状理論：

J.F. Purdy	1928	米
W. Hofferberth	1955	仏
V.I. Biderman	1957	露
Day, Gehman	1963	米

圧力容器としての基本

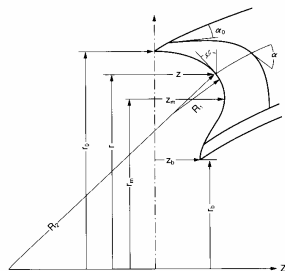
自然平衡形状理論の仮定：

- カーカスを曲げ剛性のない“膜”と考える
膜理論 (Membrane Theory)
- 膜力はすべてカーカスのコードが受け持つ
網目理論 (Netting Theory)
- コードはパンタグラフ変形をする
cosine則



23/49

空気充填時の膜力の算出: 力の釣り合い



θ 、 ϕ 、膜面法線方向の力の釣り合いから

$$\frac{d(N_\phi r)}{dr} - N_\theta = 0, \quad \frac{N_\phi}{R_1} + \frac{N_\theta}{R_2} = P$$

微分幾何と図から

$$\frac{1}{R_1} = \cos \phi \frac{d\phi}{dr}, \quad R_2 = \frac{r}{\sin \phi}$$

積分し最も幅広部で $\phi = 0$ を考慮すれば

$$N_\phi = \frac{r^2 - r_m^2}{2r \sin \phi} P, \quad N_\theta = \frac{2R_1 \sin \phi - (r^2 - r_m^2)}{2R_1 \sin \phi} P$$

平衡形状は

$$z = \int_r^{r_0} \frac{(r^2 - r_m^2) \exp\left(\int_r^{r_0} \frac{N_\theta}{N_\phi} \frac{1}{r} dr\right)}{\sqrt{(r_0^2 - r_m^2)^2 - \left\{ (r^2 - r_m^2) \exp\left(\int_r^{r_0} \frac{N_\theta}{N_\phi} \frac{1}{r} dr\right) \right\}^2}} dr$$

24/49

ラジアルタイヤの自然平衡形状理論

カーカス+ベルトの剛性バランス

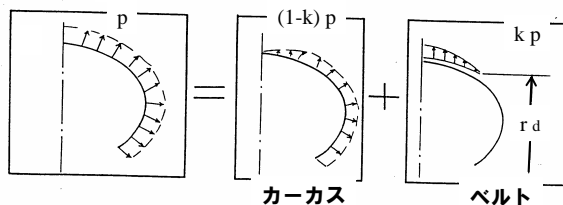
形状計算の仮定:

- カーカス、ベルトとも完全な膜

仮定の吟味: 張力剛性 vs. 構造剛性

高内圧+薄肉→◎、低内圧+圧肉→×

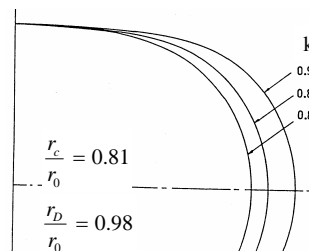
- 内圧はカーカスとベルトが分担 (ベルトの内圧負担率 = k)
- カーカスのコード張力は一定



内圧の分担例 (放物線分布):

$$p = p_0, \quad r \leq r_D$$

$$p = p_0 \left\{ (1-k) + k \left(\frac{r_0 - r}{r_0 - r_D} \right)^2 \right\}, \quad r_D \leq r \leq r_0$$



偏平タイヤはベルトの内圧負担率 (張力) が高い!!

自然平衡形状: 補強層以外に応力がかからない (耐久メリット)

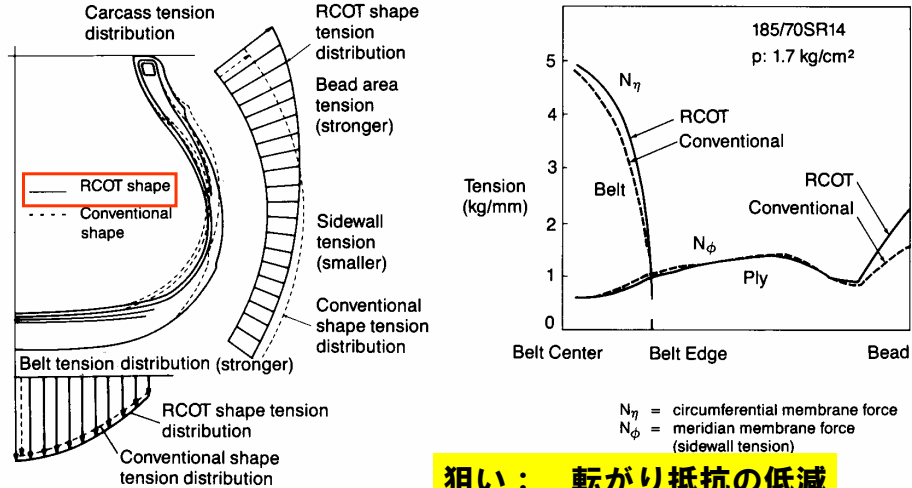
25/49

タイヤの非平衡形状理論

実際はタイヤは“膜”ではなく、“殻(シェル)”的な要素も備える。
補強層の張力もその影響を顕著に受ける。

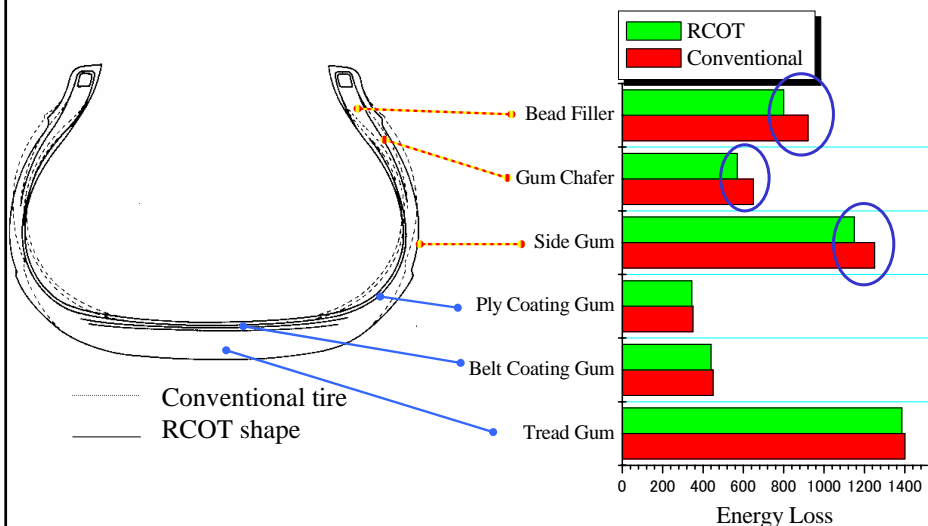
FEMを用いた解析へ

RCOT (Rolling Contour Optimization Theory)



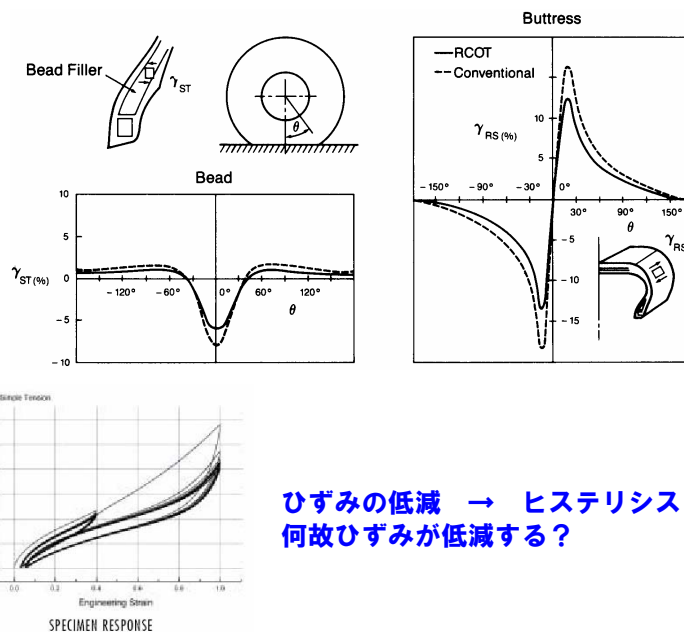
26/49

形状によるエネルギーロス低減



27/49

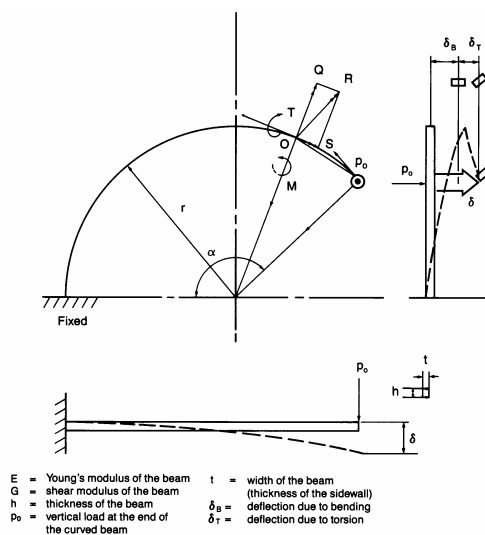
ビード部での歪低減



ひずみの低減 → ヒステリシスロス低減
何故ひずみが低減する？

28/49

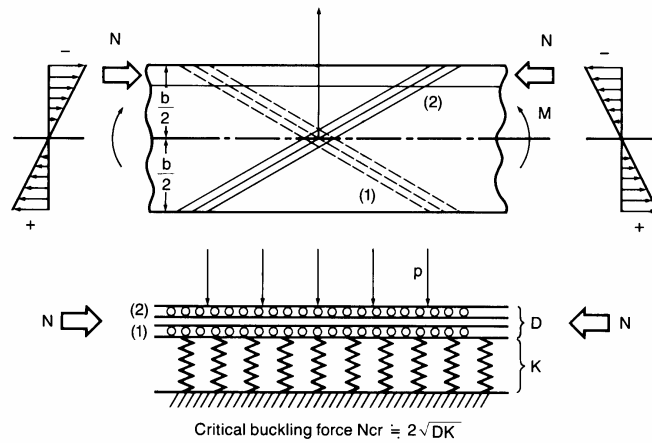
サイド部の解析的モデル



- ・カーカス張力の増加
→ 張力剛性アップ
→ ビード部変形を抑制
- ・サイド部形状効果
→ 曲がりはりによる構造剛性
→ サイド部変形抑制

29/49

ベルト座屈と面内曲げ剛性



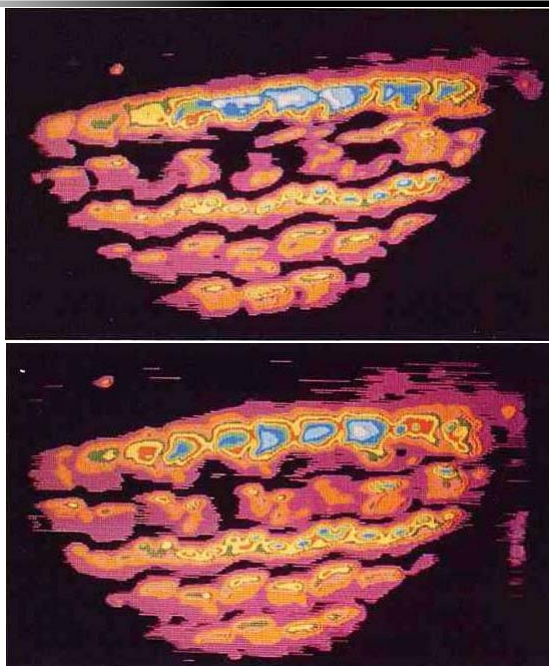
b = tread width
 D = bending stiffness (belt)
 K = tread spring rate
 M = bending moment
 N = actual compression force
 p = inflation pressure

ベルト張力UP効果により限界操安性能も向上。

30/49

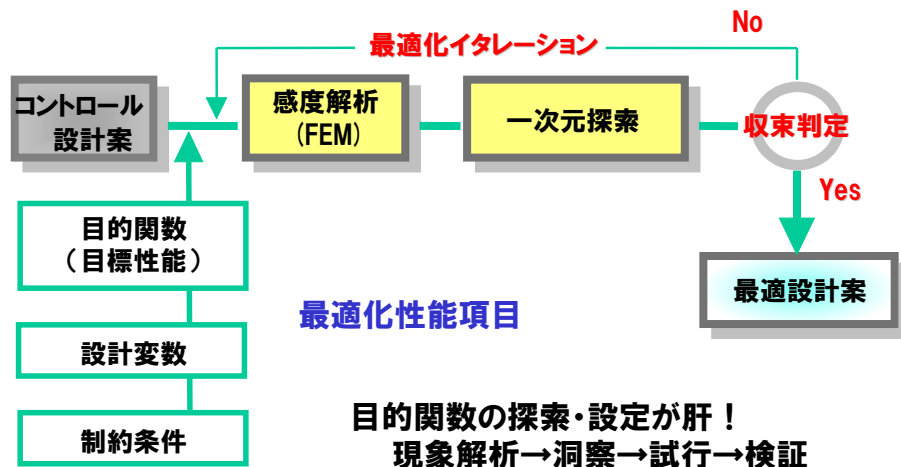
Conventional

RCOT



31/49

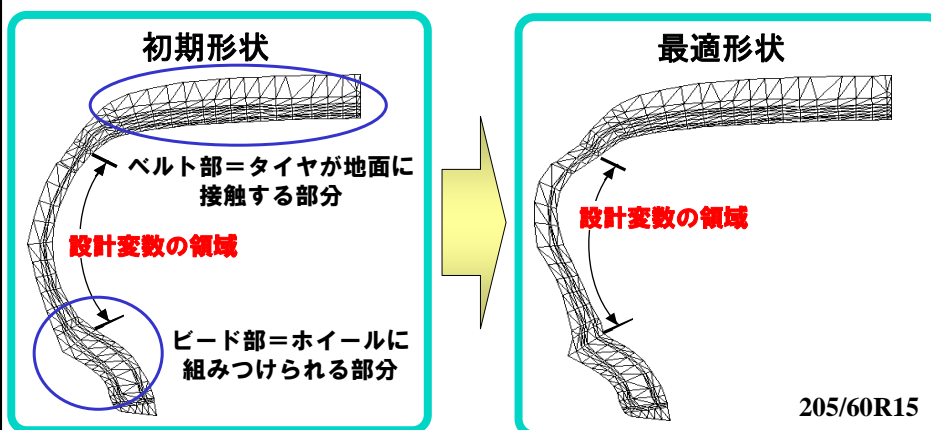
最適化手法のタイヤ設計への応用



32/49

タイヤ最適形状: 操縦安定性能の改良

ベルト部の張力とビード部の張力を最大化



これまでの常識とかけ離れた形状が得られた

33/49

フィーリング評価



205/60R15

評価項目	従来形状	最適形状
振動・乗心地	6	-1
ドライ ハンドリング	6	+3
ウェット ハンドリング	7	+3

コメント: “操縦性能・安定性能が改良され
別の車に乗っているよう“

34/49

5 航空機用タイヤの設計: 歴史



タイヤの歴史

1888: 空気入りタイヤ (Dunlop)
1890: 自動車用タイヤ (Goodrich)
1948: 乗用車用ラジアルタイヤ (Michelin)
1952: トラック用ラジアルタイヤ
1959: 鉱山用ラジアルタイヤ

1978: レース用ラジアルタイヤ
1983: 航空機用ラジアルタイヤ (軍用)
1987: 2輪用ラジアルタイヤ
1988: A320ラジアルタイヤ標準装着

BS航空機用タイヤの歴史

1936: 軍用機向け

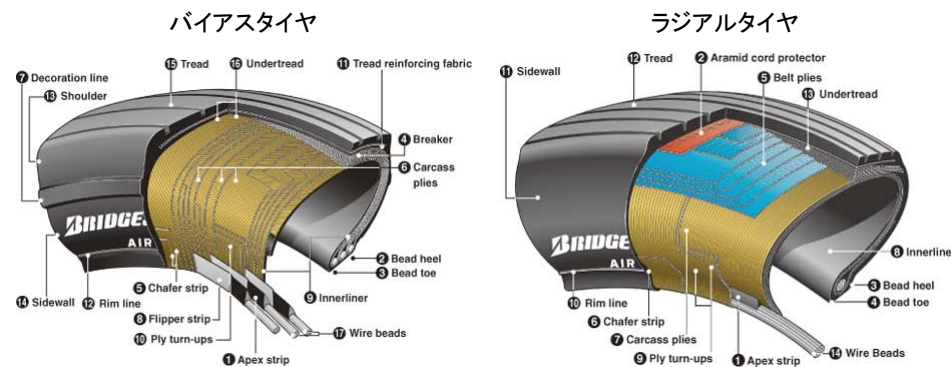
1959: DC-3向け
1969: DC-8向け
1973: DC-9, L1011, DC-10
1982: B767/757

1988: B747-400
1989: A320向けラジアル
1993: B777向けラジアル
1995: A330/340向けラジアル
2003: A380向けサプライヤー
2004: B787向けサプライヤー

ラジアルになる時期が遅い

35/49

バイアスとラジアル



各種航空機へ承認済み

一部新機種へ承認

B777, B747-400ER, B767-400ER MLG, B737 NLG
A320 family, and A330/A340 operators.

ラジアルタイヤ：軽量、耐摩耗性に優れる、横剛性が低い
→ 機体メーカーの認可必要

36/49

航空機用タイヤ：他種との比較



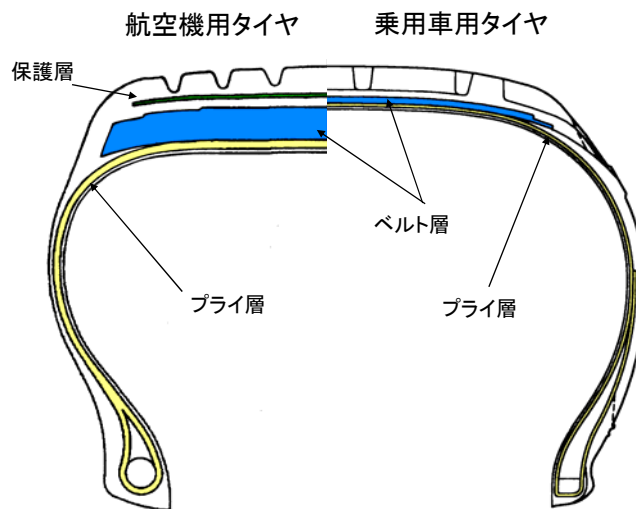
タイヤ種 サイズ	荷重 (t)	内圧 (bar)	速度 (km/h)	直径 (mm)	質量 (kg)	たわみ率 ※
乗用車 195/65R15	0.4	2	～200	640	10	0.25
トラック・バス 11/70R22.5	2.5	7	～120	970	50	0.20
鉱山用 59/80R63	101	6	～30	4020	5100	0.30
航空機用 50x20.0R20	26	15	～376	1300	106	0.35

※ タイヤたわみ/タイヤ断面高さ

航空機用タイヤは、小さいサイズで大きな荷重
→ 内圧 大 = 乗用車の7倍、トラックの2倍

トラック・バスタイヤの大きさで、
鉱山用タイヤの荷重を支え、F-1タイヤの速度

乗用車用タイヤとの比較



- ・ベルト、プライ層共に非常に多い
- ・トレッドゴムを張り替えて使用

38/49

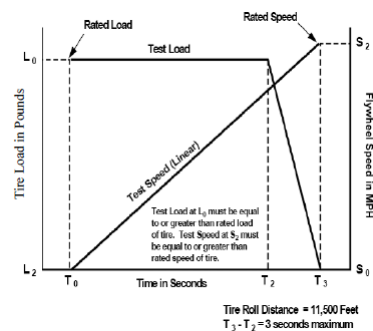
試験条件 (TSO-C62e)



- 基本特性
 - 40~+70°Cで24時間
 - ホイール部が150°Cで1時間
- スピードレンジ
 - 120, 160, 190, 210, 225, 235, 245 mph = 最大394 kph
 - 参考: 乗用車の場合
 - 180, 210, 240, 270, 300 kph

3 ドラム試験

Takeoff	50回
Taxi (40mph、35000ft)	8回
Taxi (1.2倍荷重)	2回
Takeoff (1.5倍荷重)	1回
合計	61回



39/49

その他の試験



•Taxi, TakeOff, Landing, Overload, Overspeed等各種条件での試験



レーザーホログラフィ

レーザー光を使い、
常圧と低圧で計測し、非破壊検査



ドラム試験機

ドラム

径: 3048mm (10ft)

巾: 800mm

最大速度: 640km/h (400mph)

最大加速度: 12.5m/s^2

最大荷重: 80t

CA、SA: ± 20 度

40/49

コンコルド墜落事故



2000年7月25日 パリ、フランス

BEA report、*Accident on 25 July 2000 at La Patte d'Oie in Gonesse (95) to the Concorde registered F-BTSC operated by Air France*

フランス運輸省事故調査局の報告書参照下さい

2000年以降、新たな航空機用ラジアルタイヤ開発へ

41/49

各種空気入りタイヤの比較



タイヤ種 サイズ	荷重 (t)	内圧 (bar)	速度 (km/h)	直径 (mm)	質量 (kg)	たわみ率 ※
乗用車 195/65R15	0.4	2	～200	640	10	0.25
トラック・バス 11/70R22.5	2.5	7	～120	970	50	0.20
鉱山用 59/80R63	101	6	～30	4020	5100	0.30
航空機用 50x20.0R20	26	15	～376	1300	106	0.35

※ タイヤたわみ/タイヤ断面高さ

航空機用タイヤは、小さいサイズで大きな荷重
→内圧 大=乗用車の7倍、トラックの2倍

内圧充填時の変形量 大 → カット、摩耗に考慮必要



Revolutionarily Reinforced Radial Tire = RRR開発へ

RRRの新技术



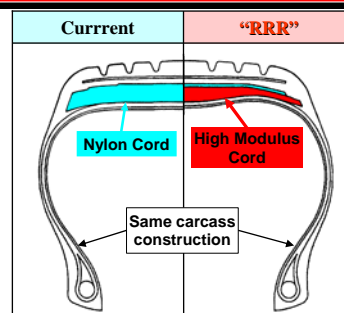
Restrain tyre growth



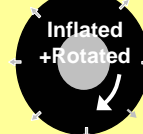
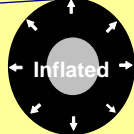
New Belt

- Apply High Modulus cord for inner Belt
- Convex belt shape

Patent applied



Tyre growth ratio



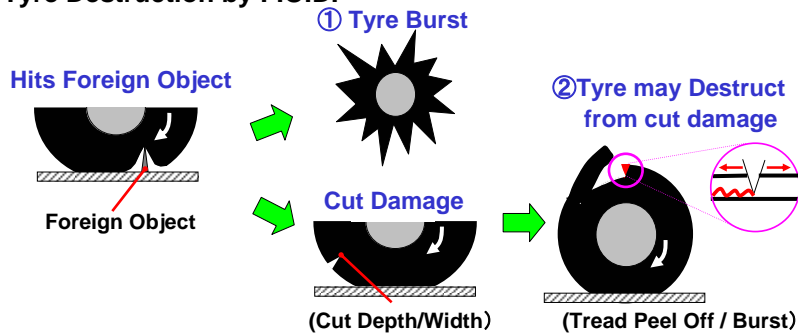
	Deflated→Inflated	Inflated→Rotated	Total
Current	7%	2%	9%
“RRR”	2%	1%	3%

43/49

RRRの効果は？

(1) Higher Safety

Tyre Destruction by F.O.D.



Two types of tyre performance are required.

- ① Higher cut resistance
- ② More casing durability after receiving F.O.D.

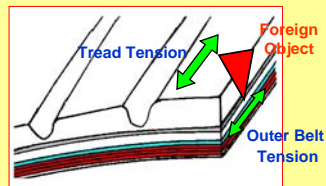
44/49

RRRの効果は？

Features of new belt

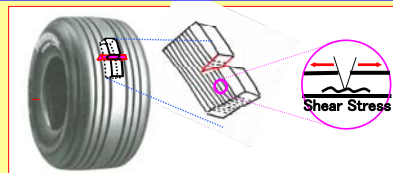
- (i) Restrain tyre (belt) growth
- (ii) Application of “high modulus/strength” cord for inner belt

① Higher cut resistance



- Less outer belt tension
- Less circumferential tread tension
- High strength inner belt cord

② More casing durability after receiving F.O.D.



Current

RRR

- Less shear stress at bottom of cut

45/49

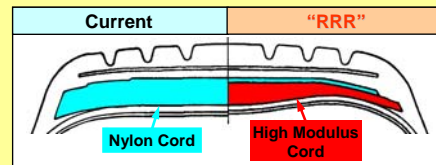
RRRの効果は？

(2) Lighter weight

(i) Belt weight reduction

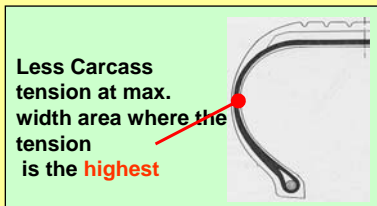
- High modulus / strength cord
- Optimized construction with convex shape

→ **Less volume of belt plies**



(ii) Carcass weight reduction

Less Tire Growth



Less number of carcass plies

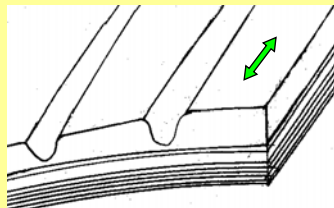
46/49

RRRの効果は？

(3) More Landing cycles

① Effect of less tyre growth

Effect of rubber tension on the wear rate



	Current	"RRR"
Rubber Tension	9%	3%
Wear Rate	100	92

② Effect of reduction in tire inertia (tyre weight)

- Wear amount at Landing
(Slip Rate) X (Duration of slip time)

- (Duration of slip time)
 \propto tyre/wheel inertia
 \propto tyre weight

47/49

- **Bridgestone has successfully developed new technology radial tire “RRR”.**
- **“RRR” superior performances;**
 - Safety : Higher cut resistance**
More casing durability after received F.O.D.
 - Economy : Lighter Weight**
More Landing Cycles
- **“RRR” radial tyres are selected as Airbus and Boeing new aircraft models’ original equipment.**
 - A380-800, A340-500/600 : Already get in-service (A340-600)**
 - B787 : Expanding “RRR” technology**

形状設計を中心に、
新たな航空機用タイヤ技術を紹介

理論、実験、シミュレーションの組み合わせ

- ・自然平衡形状、複合材料力学
- ・サンプル、タイヤ、ハイプレ、スノー
- ・FEM、流体との連成解析、最適化



10年以上前から最適化を実製品に適用

- ・サイド形状等で性能大幅向上

