

研究ノート

ホイールアライメントゲージの測定原理

浜松職業訓練短期大学校 伊藤 徹

Measuring Principle of Wheel Alignment Gauge

Tōru Itō

要 約 ホイールアライメントの測定は、従来から水準器を利用したアライメントゲージによりおこなわれている。教育訓練の現場において、その使用方法についてはよく知られているが、基本的な測定原理については理解されていない。

本報告では、アライメントゲージによるホイールアライメントの測定原理について明確にし、次の3点について具体的計算例を加えて検討した。

- (1) キャスタ角の測定原理
- (2) キングピン傾斜角の測定原理
- (3) タイヤの空気圧がキャンバ角、キャスタ角、キングピン傾斜角に及ぼす影響

I ま え が き

自動車における旋回性能と、高速安定性においてホイールアライメントが重要な役割を果たしている。とりわけフロントサスペンションには、キャンバ角、キャスタ角、キングピン傾斜角がつけられている。これらの角度の必要性はすでに明白である⁽¹⁾。

車両検査においては、サイドスリップテストにより直進時におけるタイヤの横すべり量を測定している。横すべり量は、トーイン量とキャンバ角の両者に依存しているが、通常の調整では両者を測定することなくトーイン量のみを変えることにより規定値の範囲におさめているにすぎない。

この3つの角度を測定するには、アライメントゲージ（以下、ゲージと略す）を使用するのが一般的である。ゲージの使用方法については説明されているが、その原理について明確に述べた文献が見られない。そこで今回、このゲージによるホイールアライメントの角度の測定原理について検討したので報告する。

II ゲージによる角度測定

上記の角度を測定するためにゲージには水平、キャンバ角、キャスタ角、キングピン傾斜角測定用の水準器が組み込まれている。図1は各水準器の配置の状態および測定概要を示す。ゲージは①の水準器によりタイヤの車軸に進行方向と水平に取り付ける。キャンバ角は車軸と水平面のなす角度であり、②の水準器で測定できることは容易に理解できるので考察は省略する。キャスタ角、キングピン傾斜角は、ハンドルを操舵することにより車軸の水平面とのなす角度の変化量より求める。

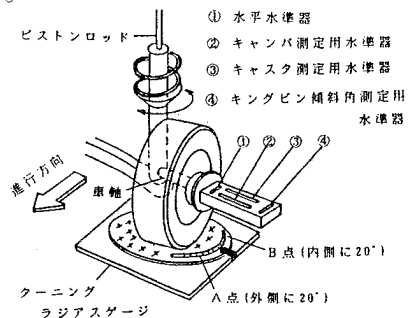


図1 測定装置

1 測定原理

図2(a)~(c)は、図2(d)の座標系に至る座標変換の過程を示す。図2(d)は、ハンドル操舵に伴う車軸の運動を表す座標軸を示す。

車軸の運動を表すために空間に固定座標系 O-xyz と、回転座標系 O-X₁Y₁Z₁を重なり合うように設定する。固定座標系 O-xyz において、x軸、y軸、z軸上で正の向きをもつ単位ベクトルを **i**、**j**、**k** とし、これらを基本ベクトルとする。まず、回転座標系を Z₀ 軸回りに α 回転(図2(a))し、つぎに、その回転座標系の X₁ 軸回りに ε 回転(図2(b))する。この状態から回転座標系を Y₂ 軸回り時計方向に 90° 回転(図2(c))した位置を回転座標系の基準位置とする。

図2(d)において、原点Oを始点とするベクトル \vec{OP} ($|\vec{OP}|=1$ とする) を車軸、ベクトル \vec{OQ} をピストンロッドと考える。キャンバ角を β、キャスト角を α、キングピン傾斜角を ε とすると、この2つのベクトルのなす角度は β + ε + 90° となる。また基準位置より、Y 軸回り反時計方向に θ 回転することにより車軸先端の P 点(ベクトル \vec{OP} の終点)は、1→2→3→4 と移動する。回転角度 θ = 90° (3の状態) が車輪の直進状態となる。

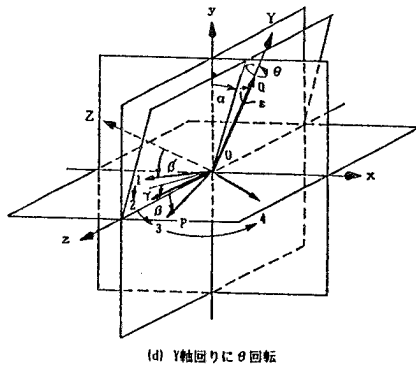
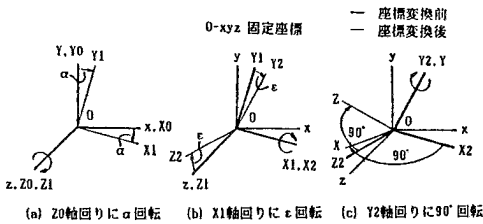


図2 サスペンションの座標軸

図2(a)~(d)と座標変換をおこない、図2(d)における任意の位置での回転座標系(O-XYZ)の基本ベクトルを固定座標系(O-xyz)の成分で表すと(1)式の行列となる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sin \theta \cos \alpha \\ a_{12} &= \cos \theta \sin \epsilon - \sin \theta \sin \alpha \cos \epsilon \\ a_{13} &= \cos \theta \cos \epsilon + \sin \theta \sin \alpha \sin \epsilon \\ a_{21} &= \sin \alpha \\ a_{22} &= \cos \alpha \cos \epsilon \\ a_{23} &= -\cos \alpha \sin \epsilon \\ a_{31} &= -\cos \theta \cos \alpha \\ a_{32} &= \sin \theta \sin \epsilon + \cos \theta \sin \alpha \cos \epsilon \\ a_{33} &= \sin \theta \cos \epsilon - \cos \theta \sin \alpha \sin \epsilon \end{aligned}$$

なお図2(d)における β' は、ベクトル \vec{OP} が Y 軸回りに回転したときに xy 平面上においての Z 軸となす角度である。

ここで、回転座標系において、ベクトル \vec{OP} は

$$\vec{OP} = -\sin \beta' Y + \cos \beta' Z$$

で表され、上式に(1)より求めた

$$Y = a_{21} i + a_{22} j + a_{23} k$$

$$Z = a_{31} i + a_{32} j + a_{33} k$$

を代入することによりベクトル \vec{OP} の固定座標系における x 方向成分、y 方向成分、z 方向成分を求めることができる。

これより、Y 軸回りに任意のベクトル \vec{OP} が原点 O を始点として回転座標系 O-XYZ とともに θ 回転したときの水平面(xz平面)とのなす角度を γ とすると

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= \sin \beta' \cos \alpha \cos \epsilon \\ &\quad - \cos \beta' \sin \theta \sin \epsilon \\ &\quad - \cos \beta' \cos \theta \sin \alpha \cos \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

2 キャスタ角の測定原理

任意の位置での車軸が水平面となす角度は(2)式で表されることより、キャスタ角測定用の水準器は、車軸の延長上に取り付けられる。測定方法は、タイヤの直進状態を基準に外側に20°(図1のA点)回転したときキャスタ角測定用の水準器の気泡を0°にあわせる。つぎに内側に20°(図1のB点)回転したときの水準器の値を読むことにより求める(外側に20°とは、基準位置から $\theta = 110^\circ$ 、内側に20°とは基準位置から $\theta = 70^\circ$ 回転した位置に相当する)。

ここで仮に、車軸がY軸回りに任意に回転することが可能であるとすると、 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 180^\circ$ におけるそれぞれの水平面となす角度 γ_0 、 γ_{180} は(2)式を用いて以下のように求めることができる。

$$\gamma_0 = \sin^{-1}(\cos \varepsilon (\sin(\beta' - \alpha)))$$

$$\gamma_{180} = \sin^{-1}(\cos \varepsilon (\sin(\beta' + \alpha)))$$

したがって、 $\cos \varepsilon = 1$ と考えるとキャスタ角 α は次の近似式で求められる。

$$\alpha = \frac{1}{2}(\gamma_{180} - \gamma_0) \quad (3)$$

キャスタ角は、車軸を180°回転させたときの水平面となす角度差の1/2で表されることがわかる。

しかし、実車では車軸の回転角度は $\theta = 50^\circ \sim 130^\circ$ 程度の範囲でしか回転することができない。このため、すでに述べたように実際のキャスタ角測定では便宜上、A点での車軸が水平面となす角度 γ_a とB点での車軸が水平面となす角度 γ_b との角度差 $\gamma_a - \gamma_b$ (以下、 $\Delta\gamma$ と記す)により求めている。すなわち、ゲージのキャスタ角目盛りは、車軸の回転角度 $\theta = 110^\circ$ と $\theta = 70^\circ$ の位置における水平面との角度差 $\Delta\gamma$ とある一定値 Kc (以下、 Kc をキャスタ係数と呼ぶこととする)との積で目盛られた数値となっている。

したがって、キャスタ角 α は、

$$\alpha = Kc \cdot \Delta\gamma \quad (4)$$

と求めることができる。

図4はキャンバ角を、図4はキャスタ角を、図5はキングピン傾斜角を変化させた時のキャスタ係数への影響を具体的な計算例で示したものである。斜線内は一般的な実用範囲を示す。

キャスタ係数はキャンバ角、キャスタ角、キングピン傾斜角が大きくなるとキャスタ係数も大きくなる。特に、キングピン傾斜角がかなり大きく影響することがわかる。実用範囲ではキャスタ係数 $Kc = 1.49 \sim 1.51$ であることがわかる。

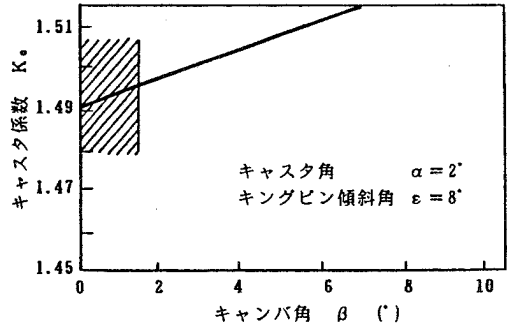


図3 キャスタ係数のキャンバ角による変化

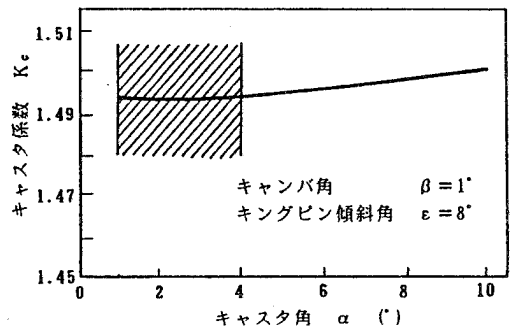


図4 キャスタ係数のキャスタ角による変化

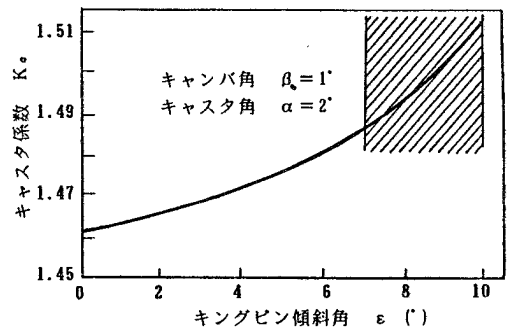


図5 キャスタ係数のキングピン傾斜角による変化

3 キングピン傾斜角の測定原理

キングピン傾斜角測定用の水準器は、車軸と直角方向に取り付けられている。測定方法は、タイヤを外側に20°回転(A点)し、キングピン傾斜角測定用水準器の気泡を0°に合わせる。つぎに内側に20°回転(B点)

したときの水準器の値を読むことにより求める。

図6は、キングピン傾斜角の測定原理を示す。座標系 O-XYZ は図2(c)における座標変換後の座標系(基準位置)と同じである。Y軸はベクトル \vec{OQ} (ピストンロッド) に一致する。理解を容易にするためにベクトル \vec{OP} (車軸) の先端に一本の棒(b-b')をX軸と平行に取り付ける。基準位置よりY軸回り反時計方向に回転座標系を θ 回転することにより $P \rightarrow P'$ と移動するとともに、棒は ψ だけ傾斜したとすると、同様にX軸単位ベクトルも水平面より ψ だけ傾斜する。すなわち、棒 b-b' の傾斜角はX軸単位ベクトルの傾斜角で表すことができる。

Y軸回り反時計方向に θ 回転するとX軸単位ベクトル X は、(1)式より

$$X = (\sin \theta \cos \alpha) i + (\cos \theta \sin \varepsilon - \sin \theta \sin \alpha \cos \varepsilon) j + (\cos \theta \cos \varepsilon + \sin \theta \sin \alpha \sin \varepsilon) k \quad (5)$$

と表される。

したがって、水平面からの傾斜角 ψ は単位ベクトルの大きさが1であることから、(5)式の y 方向成分で表される。

$$\sin \psi = \cos \theta \sin \varepsilon - \sin \theta \sin \alpha \cos \varepsilon \quad (6)$$

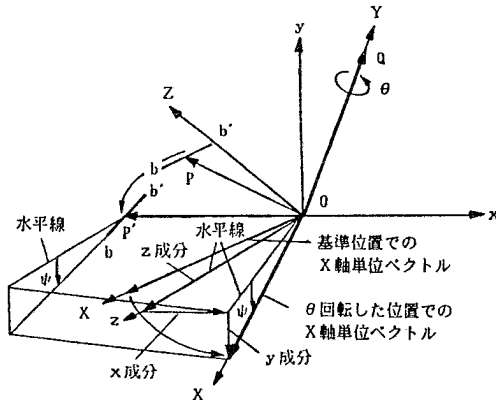


図6 Y軸回りの回転によるX軸の単位ベクトルの変化量

ここで、仮に車軸がY軸回りに任意に回転することが可能であるとすると、(6)式から $\theta = 0^\circ$ のときの棒の傾斜角 ψ_0 と $\theta = 180^\circ$ のときの ψ_{180} は、以下のように求められる。

$$\sin \psi_0 = \sin \varepsilon$$

$$\psi_0 = \varepsilon$$

$$\sin \psi_{180} = -\sin \varepsilon$$

$$\psi_{180} = -\varepsilon$$

となる。

したがって、傾斜角 ψ は、キングピン傾斜角 ε に相当することがわかる。

しかし、実車では車軸の回転角度はすでに述べたように $\theta = 50^\circ \sim 130^\circ$ 程度の範囲でしか回転することができないので、実際のキングピン傾斜角測定では便宜上、A点($\theta = 110^\circ$)での傾斜角度 ψ_A とB点($\theta = 70^\circ$)での傾斜角度 ψ_B との角度差 $\psi_A - \psi_B$ (以下、 $\Delta \psi$ と記す)により求めている。すなわち、ゲージの目盛りは $\Delta \psi$ とある一定値 K_k (以下、 K_k をキングピン係数と呼ぶこととする)との積で目盛られた数値となっている。

したがって、キングピン傾斜角 ε は

$$\varepsilon = K_k \cdot \Delta \psi \quad (7)$$

と求めることができる。

図7はキャンバ角を、図8はキャスト角を、図9はキングピン傾斜角を変化させたときのキングピン係数 K_k への影響を具体的な計算例で示したものである。キングピン係数は、キャンバ角が変化しても一定であるが、キングピン傾斜角とキャスト角が変化することによりわずかに変化する。実用範囲ではキングピン係数 $K_k = 1.46 \sim 1.47$ であることがわかる。

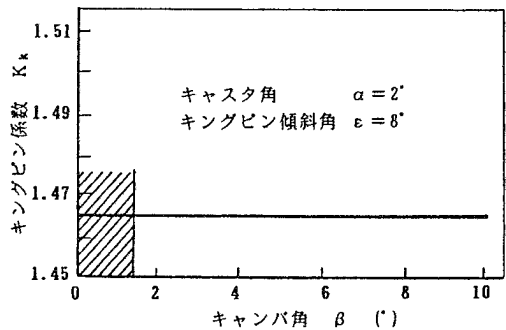


図7 キングピン係数のキャンバ角による変化

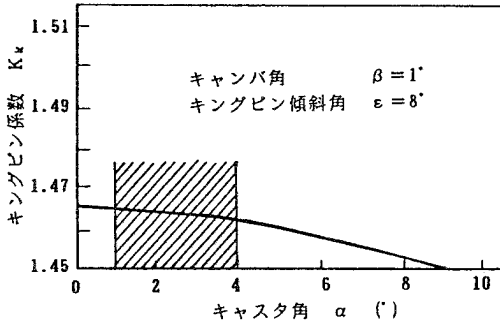


図8 キングピン係数のキャスト角による変化

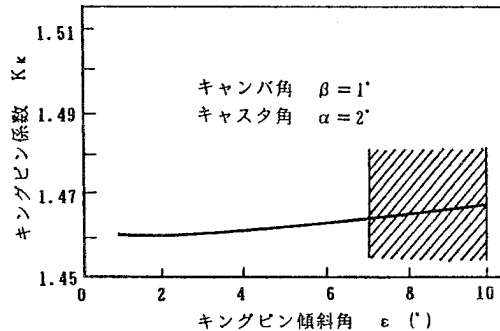


図9 キングピン係数のキングピン傾斜角による変化

4 タイヤの空気圧の影響

表1は175/70 R 13 82 Hタイヤにおいて、軸重約5250Nで前輪片側のタイヤの空気圧を減少させていったときの、その車輪上での車高の変化量(Δh)を測定したものである。図10はキャンバ角、キングピン傾斜角の変化の状態を示す。

車高の変化に対してキャンバ角、キングピン傾斜角の関係は、

$$\beta'' = \beta + \sin^{-1} \frac{\Delta h}{L} \quad (8)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon - \sin^{-1} \frac{\Delta h}{L} \quad (9)$$

の近似式で表される。

具体的な計算例について述べる。表1、図10よりL=1000mm、Δh=11.5mmとする。また、キャンバ角β=1°、キャスト角α=2°、キングピン傾斜角ε=8°を基準とし片側のタイヤの空気圧が118kPaに減少するとキャンバ角は、(8)式より0.66°の増加となりβ''=1.66°となる。またキングピン傾斜角も(9)式よりε''=7.34°となる。

表2は、空気圧の減少によるγとψの変化を比較した計算例を示す。左の欄は、タイヤの空気圧が左右均

等(236 kPa)としたものであり、右の欄は片側のタイヤの空気圧が118 kPaに減少したときのものである。

キャスト角測定においてそれぞれの回転角度θにおけるγは異なっているがΔγは1.34°と同値を示す。すなわち空気圧が減少し車高が下がってもキャスト角測定には影響しない。またキングピン傾斜角測定におけるΔψは空気圧の減少により5.46°→5.01°と減少し測定に影響を与えることがわかる。

表1 空気圧と車高の関係

タイヤの空気圧 (kPa)	高さの変化 (Δh) (mm)
235	0.0
216	1.5
196	2.9
176	4.1
157	6.0
137	8.5
118	11.5

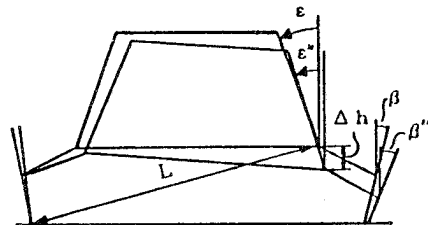


図10 空気圧の減少による対地キャンバ角、キングピン傾斜角の変化量

表2 空気圧低下によるγ, ψの計算例(°)

空気圧	235 kPa		118 kPa		
	α=2° β=1° ε=8°	γ	α=2° β'=1.66° ε'=7.34°	ψ	
回転角度θ	0	6.93	8.00	6.42	7.34
内側	10	5.59	7.53	5.71	6.88
	20	4.34	6.83	4.58	6.21
	30	3.24	5.93	3.58	5.36
	40	2.31	4.84	2.74	4.34
	50	1.58	3.61	2.09	3.19
	60	1.07	2.27	1.64	1.94
	70	0.80	0.87	1.42	0.64
	80	0.78	-0.57	1.42	-0.68
	90	1.00	-1.98	1.66	-1.98
	100	1.45	-3.34	2.11	-3.23
外側	110	2.14	-4.59	2.76	-4.37
	120	3.03	-5.71	3.61	-5.39
	130	4.10	-6.66	4.61	-6.24
	140	5.31	-7.40	5.75	-6.90
	150	6.64	-7.92	6.98	-7.35
	160	8.04	-8.20	8.28	-7.58
	170	9.42	-8.23	9.60	-7.58
	180	10.89	-8.00	10.91	-7.34
Δγ	1.34		1.34		
α/Δγ	1.49		1.49		
Δψ		5.46		5.01	
ε/Δψ		1.46		1.47	

III まとめ

実際の車両検査においてホイールアライメントの検

査は、直進時の横すべり量による判定のみで実施されている。また、教育訓練の現場では、機器を使用している測定だけに主眼がおかれているが、測定原理についても十分理解することが必要であると考ええる。

アライメントゲージの測定原理について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ゲージのキャスト角、キングピン傾斜角の目盛りは、回転角度 $\theta = 110^\circ$ と $\theta = 70^\circ$ の位置における車軸の軸方向または直角方向の角度差 $\Delta\gamma$ 、 $\Delta\psi$ に著者の定義したキャスト係数、キングピン係数をかけた値となっている。
- (2) ゲージの水準器におけるキャスト係数、キングピン係数はそれぞれのゲージ固有の値であり、車種によっては測定誤差が大きくなる。
- (3) タイヤの空気圧の不揃いはキャンバ角測定では、大きく影響するが、キャスト角測定においては影響されない。

参考文献

- (1) たとえば、尾崎 紀男：自動車工学、森北出版、pp. 93-96 (1986)