

1-3 歯車設計

この章では、テナックギアの破壊強度とテナックギアの高精度化についてご紹介します。プラスチック歯車の形状設計の詳細については各種解説書が出版されておりますので、そちらをご参照下さい。

1-3-1 テナックギアの強度

「テナックギアの強度」は一義的なものではなく、実用状況に応じて変化すると考えるべきです。実用において「テナックギアの強度」は、種々の意味を持っています。これら意味の一つ一つについて、テナックギア個々の実用条件の中で定量化していく必要があります。これはテナックギアの使われ方が多様であることとテナック自体の各特性が温度に依存して変化するからです。表 1-3-1 に「テナックギアの強度」として取り扱われている項目とその項目を支配する代表的な材料特性項目を示します。

ここではこれらギア強度の各項目とそれに関連する材料特性を具体的に示し、その関連について紹介します。

表 1-3-1-1 「テナックギア強度」と材料特性

ギア強度の項目		現象モード	材料特性
静的強度	破壊強度 変形	剪断破壊 歯元曲げ破壊 たわみ	剪断強さ 曲げ強さ、衝撃強さ 弾性率
動的強度	破壊寿命 損傷寿命 騒音寿命	軟化剪断破壊 歯元破壊 歯面温度上昇 歯面摩耗 騒音上昇	潤滑性、熱時剛性 疲労強さ、曲げ強さ 潤滑性 潤滑性 潤滑性

参考文献

- 1) 出口、白川、武士俣、岩井：日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集 (Vol.C 1990) p293
- 2) 武士俣、白川、岩井、出口：日本機械学会第67期通常総会講演会講演論文集 (Vol.C 1990) p296
- 3) 武士俣、岩井、出口：日本機械学会山梨地方講演会講演論文集 (90-10-27) p103
- 4) 武士俣、日本機械学会 [No.910-29] 講演会教材 (91-6-5,6) p69

試験ギアの諸元は次の通りです。m = 5、z = 30、b = 5 (射出成形品、JGMA3~5級)

1. 静的破壊強度

概要：非強化グレードは剪断破壊する。強化グレードは歯元破壊する。

非強化グレードは強化グレード以上の破壊強度を有する。

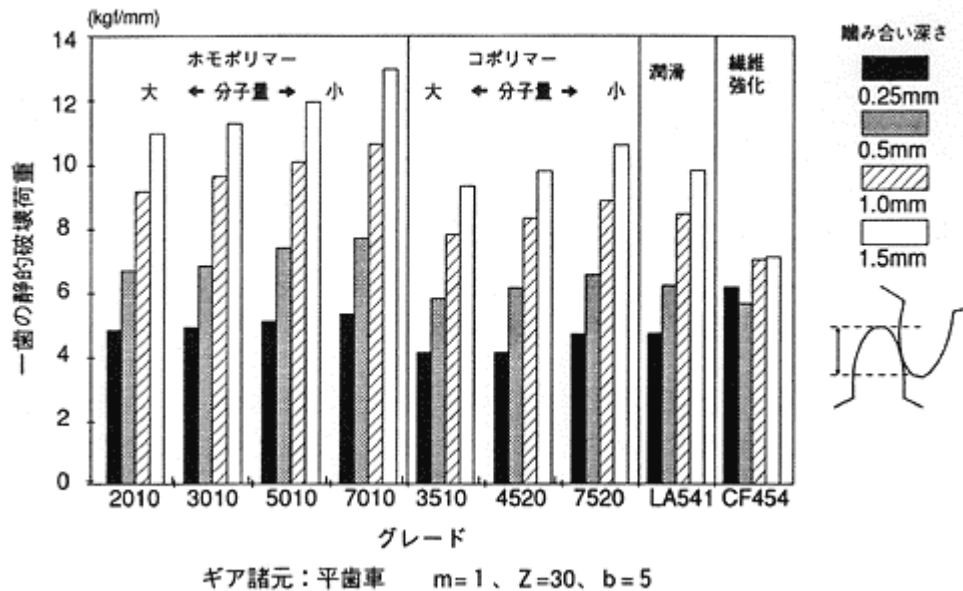
(1) 非強化グレード (標準的なグレード)

- ・主な破壊モードは相手ギアの歯先を起点とした剪断破壊です（図 1-3-1-1）。このため、噛み合いが深くなるに従いギア破壊強度が増加します（図 1-3-1-2）。
- ・ギア破壊強度は材料の強さと相関がある。
 ホモポリマーのほうがコポリマーよりも強い。
 高流動グレード（分子量低い）の方が高粘度グレード（分子量高い）より強い。

(2) 強化グレード（繊維強化グレード）

- ・破壊モードは歯元曲げ破壊です（図 1-3-1-1）。このため、噛み合いが深くなってもギア破壊強度の増加は小さくなります（図 1-3-1-2）。
- ・非強化グレードに比べ材料強さは向上していますが、ギア強度は同等以下です。

図 1-3-1-2 「テナックギア強度」と材料特性



2. 動的強度（寿命）

概要：・同材同士の連続耐久試験において

動的強度（寿命）は、対象とする寿命項目によって大きく異なる。

いずれの寿命項目に対しても「運転中のギアの温度上昇」が主要因の1つである。

従って、寿命に対して材料の潤滑性が重要になる。

・テナックは歯巾1mmあたり10N（約1kgf）の荷重では 10^7 回の運転に耐える。

試験条件 歯面荷重（ピッチ円上での歯幅1mm当たり接線力）5、10、20、30、40N/mm、

ピッチ円周速度 1 m/sec、無潤滑、同材同士、雰囲気温度 20 ± 3

(1) 破壊寿命：破壊に至る積算回転数（動力循環式歯車耐久試験）

10⁶回以前に破壊に至るような高い歯面荷重では、テナックの材料特性の影響が大きい。
特に、「潤滑性」と「熱時剛性」が重要な材料特性である。

- ・標準的なPOMの破壊モードは主に「軟化剪断破壊」である。

運転開始すると、急激な「歯の温度上昇」が起こる。

軟化剪断破壊はこの急激な温度上昇の仮定で起こることが多い。

温度上昇時の材料の熱時剛性が軟化剪断破壊強度を支配する。

（ホモポリマーのほうがコポリマーよりも寿命がやや長い。）

- ・潤滑性が歯の温度上昇を支配している。

高潤滑性のLA541では歯の温度上昇が少なく、破壊モードは「歯元割れ」となる。

LA541は標準的なテナックよりも寿命が長い。高潤滑性のLA541では歯の温度上昇が少なく、破壊モードは「歯元割れ」となる。

- ・熱時剛性の高いCF454の破壊モードは「歯元割れ」で、寿命が長い。

10⁶回に耐える歯面荷重では、テナックの種類によらず破壊寿命は同等である。

- ・どのグレードも、10~20N/mmの間に10⁷回に耐える歯面荷重を有する。

- ・破壊モードはいずれも「歯元割れ」である。

(2) 損傷寿命：歯の痩せ細り 同一運転条件での摩擦（動力循環式歯車耐久試験）

- ・破壊せずに10⁷回耐えたものでも、歯の摩擦状態は緒しく異なる。

- ・潤滑性が支配要因である。

高潤滑性POM「LA541」の摩擦は他のグレードに比べて少ない。

(3) 騒音寿命：急激な騒音上昇の発生に至る積算回転数（動力吸収式歯車耐久試験）

- ・破壊せずに10⁷回耐えたものでも、その過程で騒音上昇し騒音寿命に至る場合がある。

- ・潤滑性が支配要因である。

高潤滑性POM「LA541」では急激な騒音上昇は起こらない。

以下に具体的データを図示しますので、ご参照下さい。

図 1-3-1-3 テナックギアの連続耐久試験における破壊モード

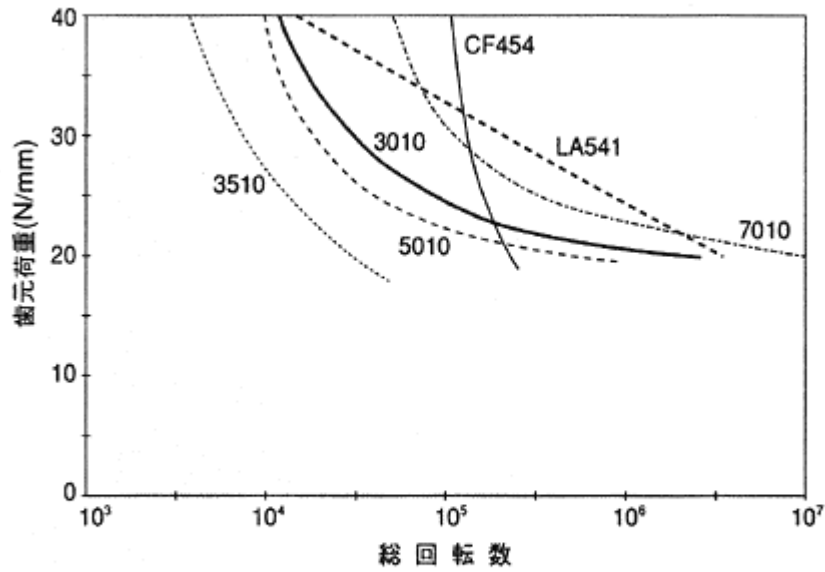


軟化剪断



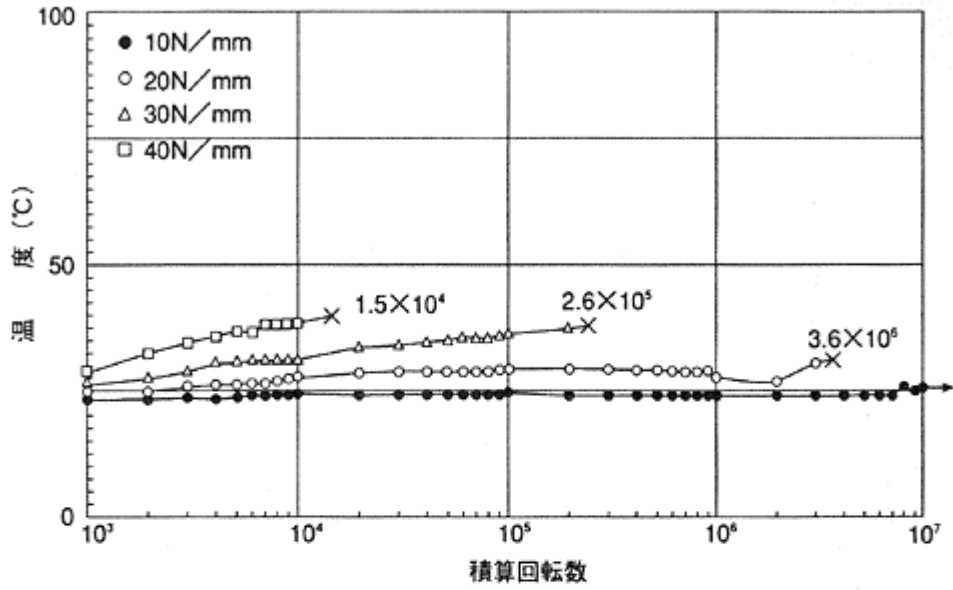
歯元割れ

図 1-3-1-4 テナックギアの破壊寿命



ギア諸元：平歯車 $m=1$ 、 $Z=30$ 、 $b=5$ 潤滑：無潤滑
ピッチ円周速度：1 m/s (637rpm) 雰囲気温度：20±3℃
駆動、従動ともに同材質のギア 試験機：動力循環式歯車耐久試験機

図 1-3-1-5 テナックギアの連続耐久試験における歯の温度上昇
 (LA541×LA541)



(5010×5010)

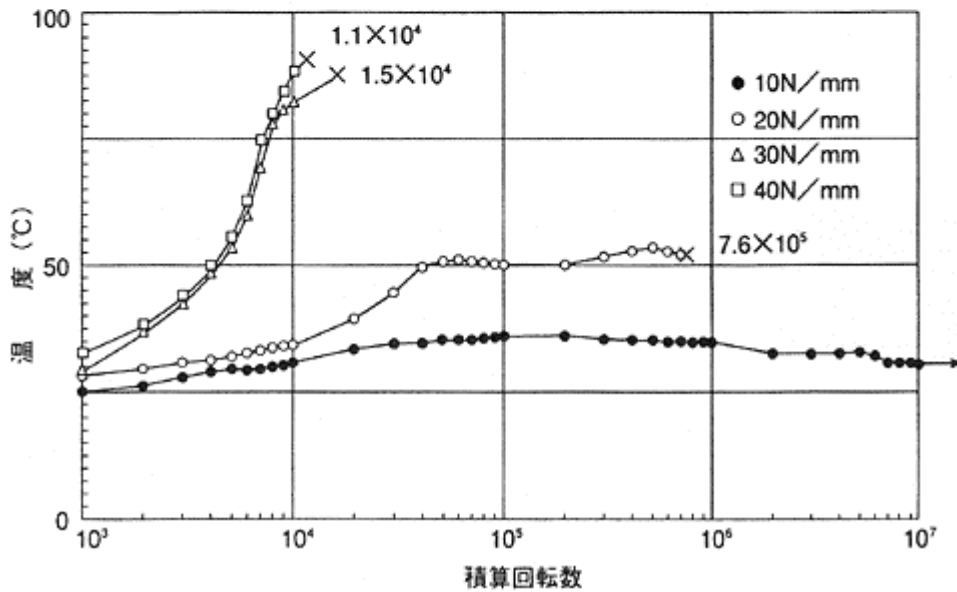


図 1-3-1-6 テナックギアの歯面の摩擦状態 7010

テナックギアの歯面の摩擦状態

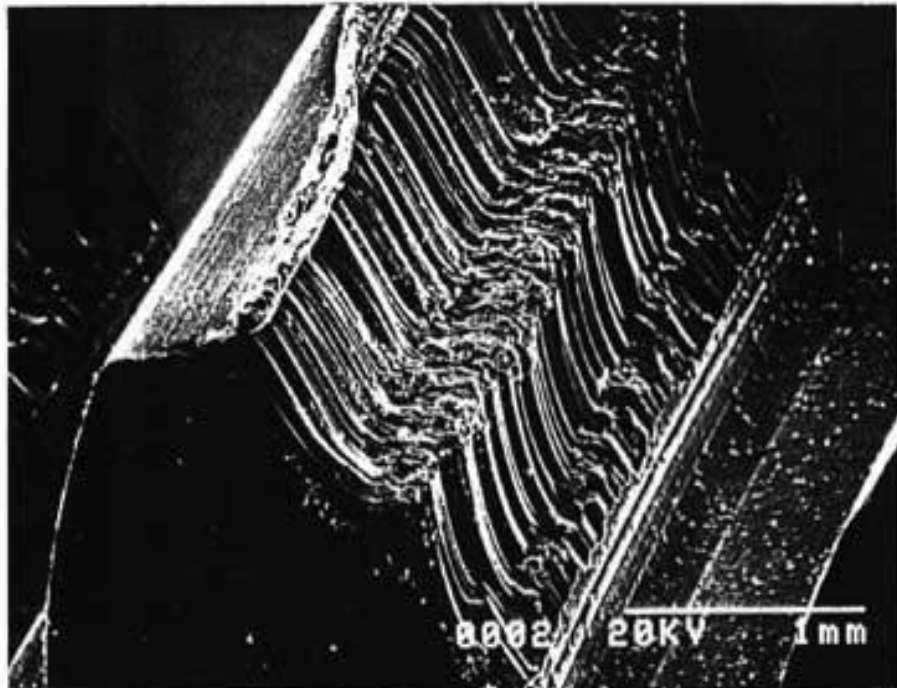
材料組合せ	駆動側 7010	従動側 7010
ギア諸元	平歯車、モジュール	1, 歯数 30、歯幅 5、ピッチ円直径 30
運転条件	単位歯幅接線荷重	10 N/mm(1.0kgf/mm)
	ピッチ線速度	1 m/sec (回転速度 637rpm)
	環境温度	23、無潤滑
	総回転数	1×10^2 rev.

耐久試験機 動力循環式小型歯車耐久試験機

* 青山学院大学理工学部機械工学科 岩井研究室で耐久試験を実施。

駆動側

7010



従動側

7010

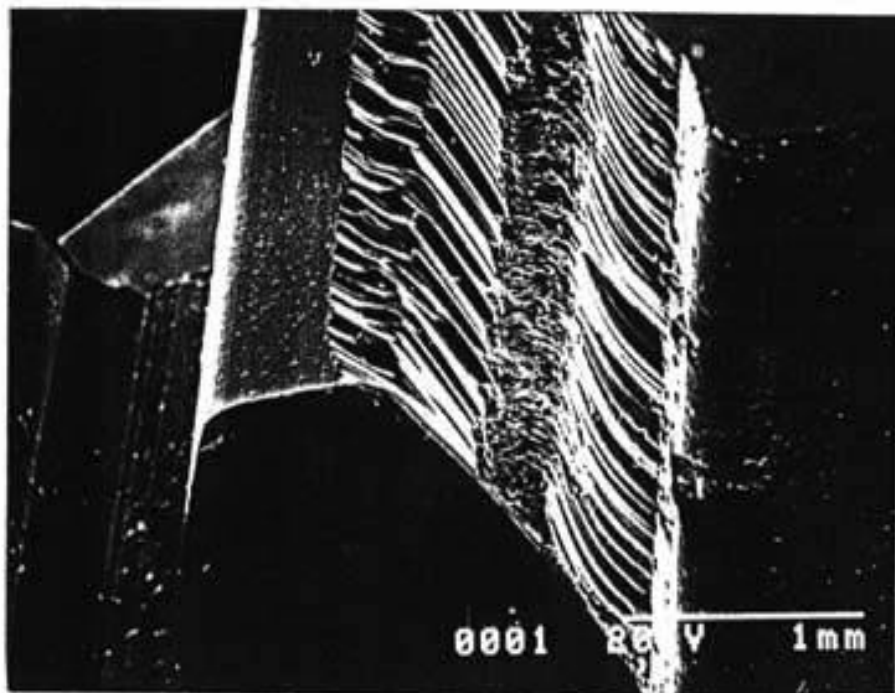


図 1-3-1-7 テナックギアの歯面の摩擦状態 LA541

テナックギアの歯面の摩擦状態

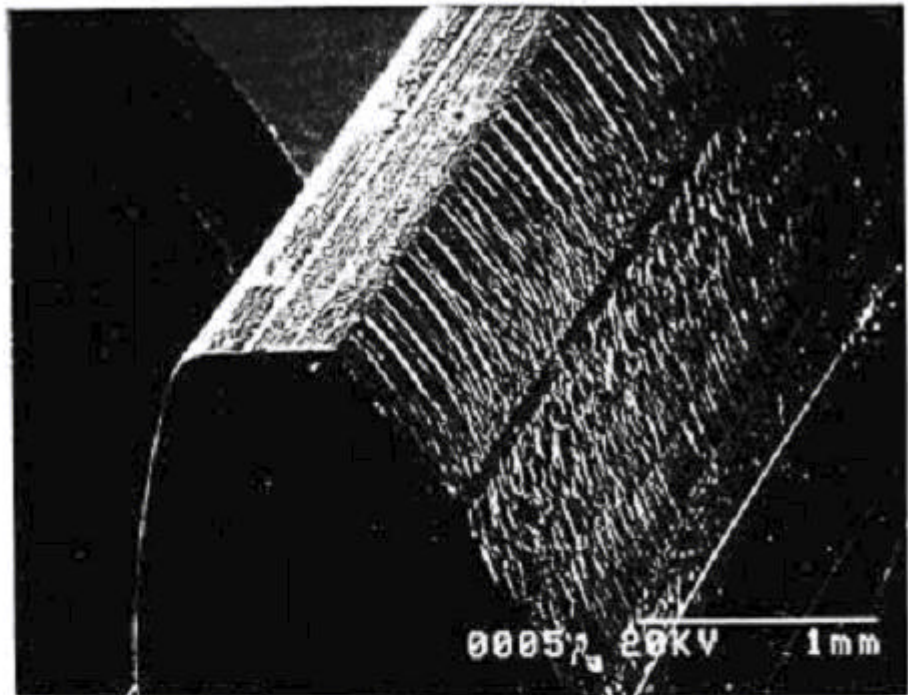
材料組合せ	駆動側 LA541	従動側 LA541
ギア諸元	平歯車、モジュール 1	歯数 30、歯幅 5、ピッチ円直径 30
運転条件	単位歯幅接線荷重	10 N/mm(1.0kgf/mm)
	ピッチ線速度	1 m/sec(回転速度 637rpm)
	環境温度	23、無潤滑
	総回転数	1×10^2 rev.

耐久試験機 動力循環式小型歯車耐久試験機

* 青山学院大学理工学部機械工学科 岩井研究室で耐久試験を実施。

周区動側

LA541



従動側

LA541

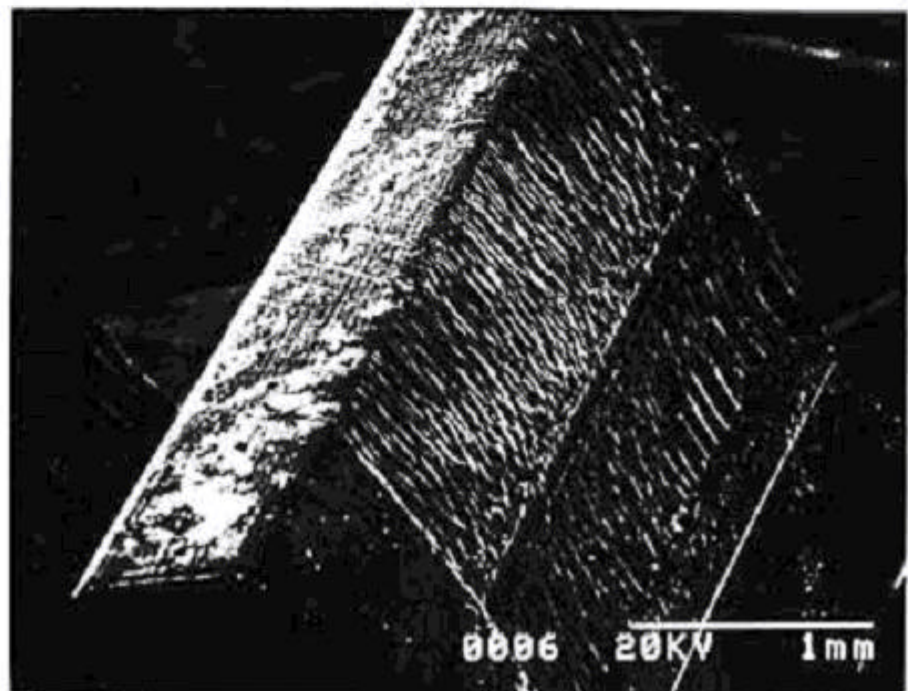
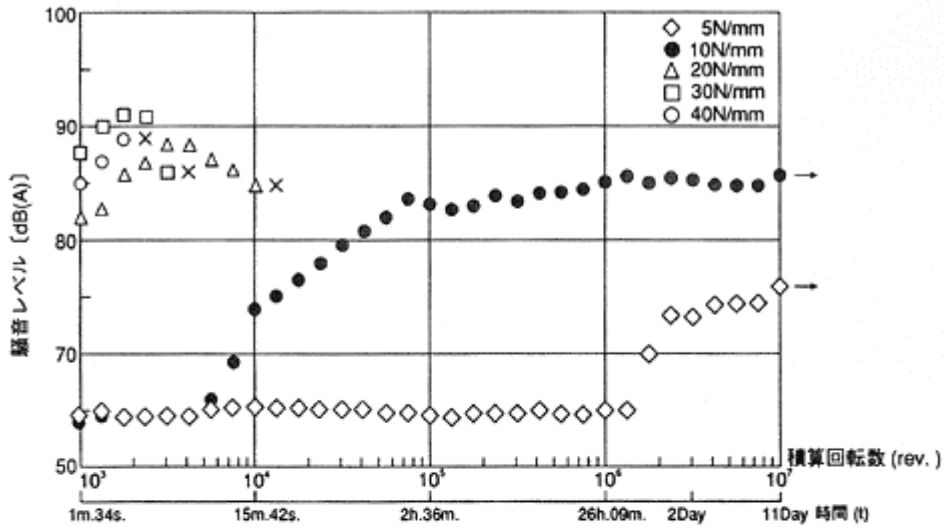


図 1-3-1-8 テナックギアの積算回転数と騒音
 (3010)



(LA541)

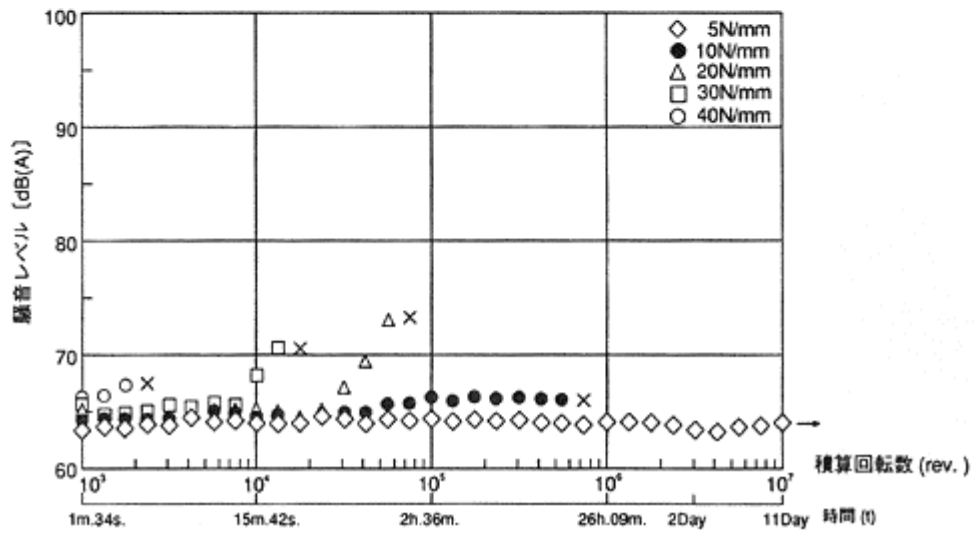
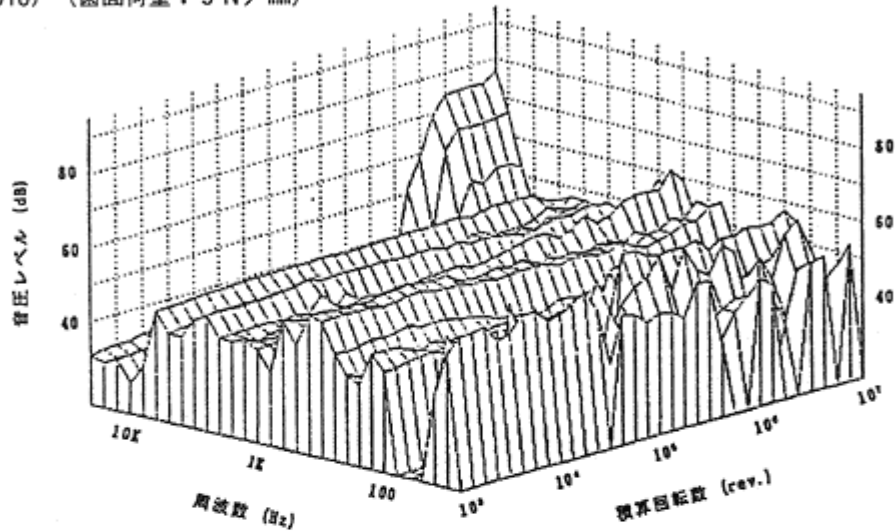
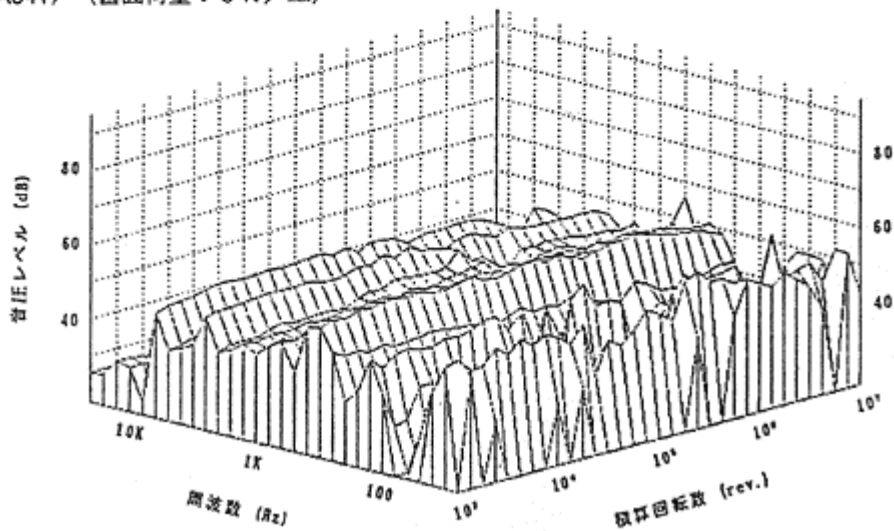


図 1-3-1-9 テナックギア騒音の周波数、積算回転数および音圧レベルの関係

(3010) (歯面荷重: 5 N/mm)



(LA541) (歯面荷重: 5 N/mm)



1-3-2 テナックギアの高精度化

樹脂製ギアは、金属ギアと比較して、軽量、低騒音、大量生産性等の優れた特徴を有し、AV、OA 機器を中心に各分野で金属ギアの代替が進んできました。特に、テナックは優れた摩擦摩耗特性を生かして、ギア材料として広く使用されています。本用途では高い寸法精度が必要であり、特に次世代商品ではギアの一層の高性能化が望まれています。高性能ギアは以下の要求性能を満たす必要があります。

1) 軽駆動性

- 2) 静音性
- 3) 低トルク変動
- 4) 低摩擦摩耗

この章では上記の要求性能を実現するための一手段として高精度成形ギアの製作方法を紹介致します。

ギア精度については JIS に検査規格があり、単一ピッチ誤差、隣接ピッチ誤差、累積ピッチ誤差、法線ピッチ誤差、歯形誤差、歯ミゾの振れ、の 6 項目が挙げられています。これらの項目を掘り下げてみると次の 3 点が最も重要であることがわかります。

- 1) 歯形を規定の形状にすること
- 2) 偏心を最小に抑えること
- 3) 各歯間のピッチを等間隔にし、ピッチ円を真円に近づけること

本章ではこれらに注目し、下記の 4 点について検討を行いました。

- 1) 圧力角誤差の向上
- 2) 偏心度の向上
- 3) 真円度の向上
- 4) 歯スジ方向誤差の向上

[] 検討方法

1. 成形ギア

(1) 諸元.....本技報では以下の諸元をもつギアで検討を行った。

種 類	: 平歯車	歯先円直径	: $d_x = 32\text{mm}$
モジュール	: $m = 1$	基準圧力角	: $\alpha_0 = 20^\circ$
歯 数	: $z = 30$	転位係数	: $x = 0$
ピッチ円直径	: $d_0 = 30\text{mm}$		

(2) 形状図 (図ナックルギア形状図)

2. 金型

(1) キャビティ.....本章では以下に示す 2 種類を用いた。キャビティ諸元の決定方法に関する詳細は次ページ以下に示します。

a	: $m = 1.00$ 、	$z = 30$ 、	$\alpha = 16.64^\circ$ 、	$x = 0.32$
b	: $m = 1.02$ 、	$z = 30$ 、	$\alpha = 20.00^\circ$ 、	$x = 0$

(2) ゲート.....以下に示す様に、ゲート位置、ゲート数、ゲートサイズを変化させました。

ボスゲート: 8 円周上に 3 点あるいは 1 点で配置

ウェブゲート: 17 円周上に 3 点あるいは 1 点で配置

ゲートサイズ: 1.2、1.7 の 2 種類を採用

(3) 冷却配管.....各キャビティプレートのギヤセンターより左右 40mm、深さ方向 13mm の位置に、天地方向ストレート 8 穴を配置。

3. 使用樹脂

テナック	3010	(ホモポリマー高粘度グレード)
	5010	(ホモポリマー中低粘度グレード)
テナック-C	3510	(コポリマー高粘度グレード)
	CF454	(コポリマーカーボンファイバー強化グレード)

4. 成形条件

標準条件として以下の条件を設定しました。種々の成形条件依存性については各データ参照。
 なお、樹脂温度と金型温度はすべてのグレードにおいて共通です。

樹脂温度：200	金型温度：80
射出時間：10sec	冷却時間：20sec

5. ギア精度測定法

CNC三次元測定機：歯形誤差測定、ピッチ誤差測定、偏心率測定、歯スジ誤差測定

万能歯車試験機：ピッチ円真円度測定、偏心率測定

両歯面噛合い試験機：噛合い誤差測定

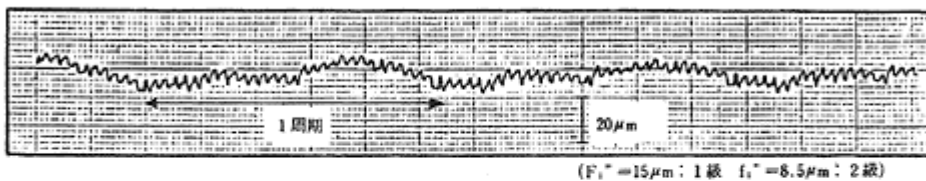
注) 各歯ミゾピッチ点の深さをダイヤルゲージで測定後、偏心率成分を取り除くために一周期補正を施し、円グラフ化しました。

6. 成型ギア噛合い精度 (JGMA)

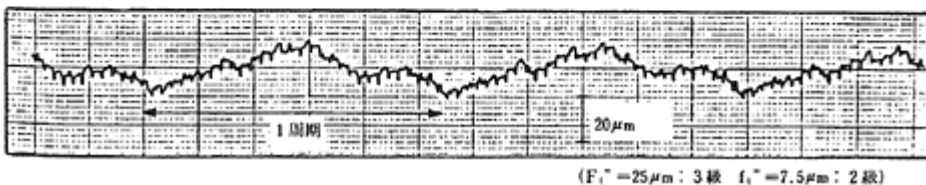
本章で検討を行った成型ギア噛合い精度の代表例を示します。噛合い精度は使用グレード、成形条件、金型構造等で変化しますが、標準条件で成形したギアを用いて測定した場合、JGMA2～3級となります。

グレード：5010

キャビティ a： $m=1.00$, $z=30$, $\alpha=16.64^\circ$, $x=0.32$, $\phi 1.2$ ボス3点ゲート



キャビティ b： $m=1.02$, $z=30$, $\alpha=20.00^\circ$, $x=0$, $\phi 1.2$ ウェブ3点ゲート



7. 本章で引用した文献

- 1： 武士侯貞助：プラスチック成形技術 Vol. 5,5, p41～45
- 2： 特公平 1-24053

[] 概 論

ギア精度向上のための指針を次ページ以下に述べます。検討を加えた点は、すでに述べた通り次の4つです。

- (1) 圧力角誤差 (2) 偏心度 (3) 真円度 (4) 歯スジ方向誤差

本項ではこれら4点について、以下の3方面からのアプローチを行った。

- (a) 金型 (b) 樹脂特性 (c) 成形条件

一般的に精度向上にはこれら3つのアプローチのうち最も大きいのが金型影響です。このことは、キャビティの歯切、ゲート、肉盗み形状等が不適切な金型を用いた場合、樹脂や成形条件の検討のみでは高精度ギアを得ることができないことを意味しています。

高精度ギアを得るためには以下の手順をふむとよい。

- 1) まず、使用状況に応じたグレードを選択する。一般に、高流動グレードを利用したほうが成形条件を広く設定することができ、高精度化が容易である。
- 2) 金型キャビティ歯切方法、ゲート、肉盗み形状、冷却配管等の検討を行う。キャビティ製作の際には、適正な成形収縮率を見込む必要がある（テナックの場合、1.8~2.5%程度）。
- 3) 成形条件を検討する。その際、でき上がった製品寸法の収縮率と、キャビティ製作時に見込んだ成形収縮率が一致するように条件を検討する必要がある。

[] 圧力角誤差の向上

歯形誤差は歯形角誤差と歯形・形状誤差に大別されるが、成形ギアで問題となるのは歯形角度誤差の方であり、成形ギアの圧力角をいかに適正な圧力角に近づけるかがポイントとなる。金型キャビティの製作に際しては樹脂の成形収縮率を見込む必要があるが、以下の2つの方法を推奨する。

a. 成形収縮率をプラス転位で見込んで圧力角を変化させる方法

キャビティモジュールは成形品と同一にし、圧力角及び転位係数で整形収縮率を見込み、以下の岩井、武士俣¹の式にしたがって変化させる。

$$\cos \alpha = \left[\left(100 + \frac{2}{z} \right) / \left(100 + \frac{2}{z_0} \right) \right] \cos \alpha_0$$

$$x = \left[\left(z + 2 \right) / 200 \right]$$

α : 収縮率 (%) x : 転位係数 α₀ : キャビティ圧力角 (°)

z : 歯数 α₀ : 成形品圧力角 (°)

b. 成形収縮率をモジュールで見込む方法

キャビティ圧力角は成形品と同一にし、モジュールで成形収縮率を見込み、以下の式に従って変化させる。

$$m_1 = \left(1 + \frac{1}{100} \right) m_2$$

m₁ : キャビティモジュール

m₂ : 成形品モジュール

c. 計算例

本章で試験を行った成形ギアを例にとって説明する。

$M = 1.0$ 、 $z = 30$ 、 $\alpha_0 = 20^\circ$ のギアを得たい場合、見込収縮率を仮に $\epsilon = 2\%$ とすると、

a 法では、 $m = 1.00$ 、 $\alpha_0 = 16.64^\circ$ 、 $x = 0.32$

b 法では、 $m = 1.02$ 、 $\alpha_0 = 20.00^\circ$ 、 $x = 0$

にキャビティを製作すれば良い。その際のキャビティ諸元は以下ようになる。

諸元	計 算 式	a 法	b 法
基礎円直径	$d_x = z m \cos \alpha_0$	28.74	28.75
歯先円直径	$d_s = m (z + 2) + 2 x m$	32.64	32.64
歯底円直径	$d_r = d_x - 2.25 \times 2 m$	28.14	28.05
円弧歯厚	$s_0 = m (\pi / 2 + 2 x \tan \alpha_0)$	1.762	1.602
k 枚またぎ歯厚 (k = 4)	$w(k) = m \cos \alpha_0 \{ (k - 0.5) \pi + z \operatorname{inv} \alpha_0 \} + 2 x m \sin \alpha_0$	10.96	10.97

d. 実施例

上記の a、b 法を用いて実際に製作した金型を用いて標準条件で成形したギアの各部寸法を測定した所、以下の様な結果を得た。

(図 実施例)

成形ギアの圧力角はグレードおよび成形条件によって変化する。この圧力角変化は成形収縮率に依存した一定の曲線を描く(図 1-3-2-1)。従って、上記のいずれかの方法によって製作したキャビティであれば、キャビティ製作の際に見込んだ成形収縮率と成形品の歯先円直径の収縮率を合わせることで圧力角の適正化を図ることができる。

また、同一ギア内においても各歯の圧力角が $0.2 \sim 0.3^\circ$ 程度ばらつくことがしばしばある(図 1-3-2-2)。これは熔融樹脂の流動状態、金型の冷却構造、ギアの肉盗み形状等により変わり、なかなか厄介な問題である。これを改善するには、ダイヤフラムゲートの採用、金型の均一冷却、成形品の肉盗み等を実現しなければならない。

(データ各論)

下記の諸元を持つ金型を用いて以下の関係を調べた(図 1-3-2-1 ~ 図 1-3-2-3)。

$M = 1.0$ 、 $\alpha_0 = 16.64^\circ$ 、 $x = 0.32$ 、 $b = 5.0$ 、1.2 ボス 3 点

図 1-3-2-1：ギア成形品圧力角と歯先円収縮率の関係

図に示した様にギア成形品圧力角は歯先円収縮率と相関がある。ほとんど全てのテナックグレードで同様の曲線がえられるが、繊維強化グレードでは収縮挙動が異なるためにこの関係は成り立たない。

図 1-3-2-2：成形品圧力誤差と成形条件の関係

5010 を用いた場合の成形品圧力角と射出時間、冷却時間、射出圧力の関係を示した。図に示した 4 本の曲線は 1 つのギアを 4 分割した際の各々の歯の圧力角誤差を表している。射出時間に関してはゲートシール時間（3sec）後は圧力角変化はほとんどない。冷却時間に関しては長めにとったほうが圧力角は安定する傾向がある。また、射出圧力に関しては圧力角に対しある範囲で一次の相関があり、最も影響が大きい。従って、圧力角の適正化は射出圧力を調整して合わせるのが望ましい。

図 1-3-2-3：成形品歯先円直径と成形条件の関係

5010 を用いた場合の歯先円直径と成形条件の関数を示した。歯先円直径の挙動は圧力角変化の挙動と同一である。従って、先に述べた様に歯先円直径の収縮率をキャビティ製作時の見込み収縮率と合わせることによって、圧力角の適正化を図ることができる。

[] 偏心度の向上

偏心度は金型精度によって決定するものであり、偏心が小さいギアを得るためには金型の芯ブレを最小に抑えることが原則である。ゲートバランスが適切な金型を用いた場合、樹脂の種類、成形条件が偏心度に与える影響は小さい。従って、偏心度が問題となる場合は、まずキャビティの偏心量、ゲートバランスチェックをする必要がある。

また、偏心が生じる原因の 1 つとして、ゲート部とウエルド部の保圧効果の差の影響が挙げられる。この場合、偏心はウエルドラインに沿った方向に生じ、偏心量は成形条件によって変化する。一般的に、ゲートはダイヤフラムゲートが最も良いとされているが、それが困難な場合はギアセンター付近に多点ゲートを設けた方が偏心は生じにくい。ギアウェブに 1 点ゲートを設けた場合は、上記の理由で偏心度が成形条件の影響を受けて変化する可能性があるので注意を要する。

また、成形条件上の留意点として以下の項目が挙げられる。

1. ゲートシール時間を確認し、それ以上の射出時間をとること。ゲートシールが不十分の場合、偏心が生じやすい傾向にある。
2. 射出時間を高めに設定すること。キャビティへの樹脂充填量が不足している場合、偏心が生じやすい傾向にある。

（データ各論）

図 1-3-2-4：成形品偏心量と成形条件の関係

1.2 ウェブ 3 点ゲートの金型を用い、偏心量と成形条件の関係を示した。樹脂は 5010 を使用した。偏心量は射出時間及び射出圧力に対して依存性があるが、冷却時間に対する依存性は小さい。この傾向はキャビティへの樹脂充填量あるいは圧力が偏心に対して影響を及ぼすために生じる。従って、上記した様に成形時にはゲートシールとキャビティへの樹脂充填量に注意をはらうべきである。

[] 真円度の向上

ギアのピッチ円における真円度は以下の諸要因の絡みで複雑に変化する。

樹脂.....流動性、収縮の異方性、結晶化速度

金型.....キャビティ精度（歯形誤差、ピッチ誤差等）、ゲートの位置、数、大きさ

成形品.....リップ、肉盗み形状、ひけ、ボイド

成形条件

本章では真円度に及ぼす樹脂の影響として、ホモポリマー、コポリマーのポリマー種による影響（図 1-3-2-5、6）、樹脂流動性の違いによる影響（図 1-3-2-7）、補強材の影響（図 1-3-2-8）、また金型の影響として、ゲート位置の違いによる影響（図 1-3-2-9～12）、ゲート数の違いによる影響（図 1-3-2-14、15）、ゲートサイズの違いによる影響（図 1-3-2-16～19）を検討した。真円度を高める方法として以下の事が言える。

ホモポリマーとコポリマーでは、ホモポリマーのほうが真円度は良い。従って、ホモポリマーを使用する。

低粘度グレードを使用する。

ゲートはセンターに近く、数を多く、サイズを大きくする。

繊維強化グレードでは極端に悪いので、高精度を狙う場合は使用しない。

ギア真円度に関しては、樹脂の流動性の影響が最も大きい。例えば低粘度グレードを用いればゲートの影響は比較的受けない。のホモポリマーとコポリマーの差も低粘度グレードでは小さい。

また、繊維強化グレードの精度をナチュラルグレード並みにすることは困難であるが、一般的にセンターゲート、制限ゲートの利用が有効であるとされている。

肉盗み形状もまた、ギア真円度に大きな影響を与える。良好な真円度を得るためには円周方向に対して均一な肉盗みをする必要がある。例えば、ギアウェブに補強リップが立っている場合、リップ近傍の歯に収縮による倒れ込みが起こりピッチ円真円度は低下する傾向がある。

真円度に対する成形条件の影響も大きい。特に、ゲート位置が不適切な場合あるいは樹脂の流動性が低い場合などは成形条件によって真円度が大きく左右される。この場合、冷却時間あるいは射出圧力に対する依存性が大きい。

（データ各論）

* 歯ミゾのバラツキ $n-1$ 成形条件依存性データ(図 1-3-2-6、11、12、15、18、19)の読み方
真円度の円グラフにおいて、破線の円は真円（理想的なピッチ円）を表し、実線は、成形ギアにおける各歯ミゾピッチ点での実測値をつないだ実際のピッチ円を表している。

$n-1$ 値データは、この各ピッチ点実測値の、真円の各ピッチ点に対するバラツキ（ $n-1$ ）を計算し、この値を比較することによって真円度の比較をおこなったものである。従って、 $n-1$ 値が小さいほど真円度が良好であると言える。

図 1-3-2-5：ホモポリマーとコポリマーのピッチ円真円度

同一の流動性（高粘度タイプ）を持つホモポリマー3010とコポリマー3510を用い、同一金型、同一成形条件でギアピッチ円真円度を比較した。コポリマーの方が幾分真円度が劣っていることがわかった。

図 1-3-2-6：ホモポリマーとコポリマーの真円度差

図 1-3-2-5 のデータをもとに各成形条件（射出、冷却時間、射出圧力）について真円度の変化を値で比較した。成形条件を変化させた場合でもホモポリマーの方がコポリマーよりも幾分真円性に優れる。この真円度差は、キャビティへの樹脂充填後の冷却過程において、ホモポリマー、コポリマー両者の結晶化速度に差があるために、成形品表層と内部の固化速度が異なりキャビティ歯ミゾの転写性に影響を及ぼすために生ずる。

図 1-3-2-7：流動性の異なった樹脂によるピッチ円真円度

流動性の異なる 2 種類のホモポリマー 3010、5010 を用い、同一金型、同一成形条件でギアピッチ円真円度を比較した。高粘度タイプ 3010 を用いた場合、3 点ゲートでは三角オムスピ形の形状をとりやすい。一方、中低粘度タイプ 5010 では良好な真円度を示す。これは、樹脂流動性の差による成形時の保圧効果の差、分子鎖長の違いによるウエルド部流動配向の緩和効果の差が関与していると思われる。

図 1-3-2-8：繊維強化グレードのピッチ円真円度

カーボンファイバ充填グレード CF454 を用いた場合のギアピッチ円真円度を示した。ウエルド部が存在する場合、繊維充填ギアの真円度はナチュラルグレードと比較して著しく劣る。この真円度低下は、ファイバーがウエルドに沿って配向するため、他の部分との収縮率が大きく異なりを生ずるためと推定される。

図 1-3-2-9、10：ボスゲートとウェブゲートのピッチ円真円度

高粘度グレード 3010（図 1-3-2-9）、中粘度グレード 5010（図 1-3-2-10）を用いて、同一成形条件でゲート位置の違いによる真円度差を比較した。

高粘度グレードではゲート位置の影響は比較的顕著に現われるが、中粘度グレードではゲート位置の影響は小さい。しかしながら、一般にセンターボス付近にゲートを設けた方が、樹脂の流動性を問わず真円度は良好である。

図 1-3-2-11、12：ゲート位置の違いによる真円度差

図 1-3-2-9、10 のデータをもとに各成形条件（射出、冷却時間、射出圧力）について真円度の変化を値で比較した。図 1-3-2-11 に高粘度グレード 3010 の、図 1-3-2-12 に中粘度グレード 5010 の結果を示す。

高粘度グレードにおいてウェブゲートを用いた場合、特に射出圧力の影響を受けて真円度がばらつきやすい。

図 1-3-2-13：ボス 3 点ゲート、ウェブ 3 点ゲートの流動パターン

ボス 3 点ゲート、ウェブ 3 点ゲートを用いた場合の金型流動のコンピュータ シミュレーションを示した。ボスゲートの場合はほぼ同心円状の流動パターンを示すが、ウェブゲートの場合はウエルド部の流動が遅れるため三角オムスピ形状となりやすい。なお、このシミュレーションは実際の流動とよく対応している。

図 1-3-2-14：1 点ゲートを用いた場合の円真円度

ウェブ 1 点およびボス 1 点ゲートを用い、両者の真円度を比較した。樹脂は中粘度グレード 5010 を用いた。一般に、ゲート位置によってピッチ円形状は変化する。これは肉盗み形状に依存する。この例ではウェブ肉盗み部の圧力損失の影響によって、ゲート位置変更による形状変化が現われており、ボスゲートでは横長、ウェブゲートでは縦長となっている。

図 1-3-2-15：ウェブ、ボス 1 点ゲートを用いた場合の真円度差

図1-3-2-14のデータを元に歯ミゾバラツキを比較した。樹脂は同じ5010を用いている。この例ではウェブ1点ゲートの方がボス1点ゲートよりもバラツキが小さくなった。このウェブ1点ゲートの値は3点ゲートの値と同レベルである。従って、ゲート位置を適切に選択すれば、1点ゲートを用いた場合でも3点ゲートと変わらない良好な真円度が得られると言える。

図1-3-2-16、17：ゲートサイズの違いによるピッチ円真円度

ホモポリマー3010（図1-3-2-16）、コポリマー3510（図1-3-2-17）を用いて同一成形条件で、1.2、1.7とゲートサイズを変えた場合の真円度比較を行った。

ホモポリマーではゲートサイズ変更による真円度の形状変化は見られないが、コポリマーでは幾分真円度が向上している。

図1-3-2-18、19：ゲートサイズの違いによる真円度差

図1-3-2-16、17のデータをもとに各成形条件（射出、冷却時間、射出圧力）について真円度の変化を値で比較した。図1-3-2-18にはホモポリマー3010の、図1-3-2-19にコポリマー3510の結果を示す。上記した様に、ホモポリマーとコポリマーのゲートサイズ依存性には差異が存在する。ホモポリマーではゲートサイズを変更しても真円度はあまり変わらないが、コポリマーではゲートサイズを大きくすることによって真円度をホモポリマー並に向上させることができる。

[] 歯スジ方向誤差の向上

歯スジ方向誤差は金型構造に起因する場合が多く、成形条件、樹脂が原因で問題となる場合は、少ない。従って、金型面での検討を進める必要がある。金型上の問題点は均一冷却が行われているか否かである。図aに一つのギアについて全ての歯スジ誤差のを測定した例を示した。金型キャビティの歯スジ誤差に問題がない場合でも成形品歯スジ誤差は発生する。この歯スジ方向誤差を小さくするには歯先円・円周方向に均一な冷却を行う必要がある。一般に歯先円・円周方向に均一な冷却を確保することは困難であるが、インシュレートキャビティ方式^{*2}の採用によって均一な冷却を行うことができることが提示されている。

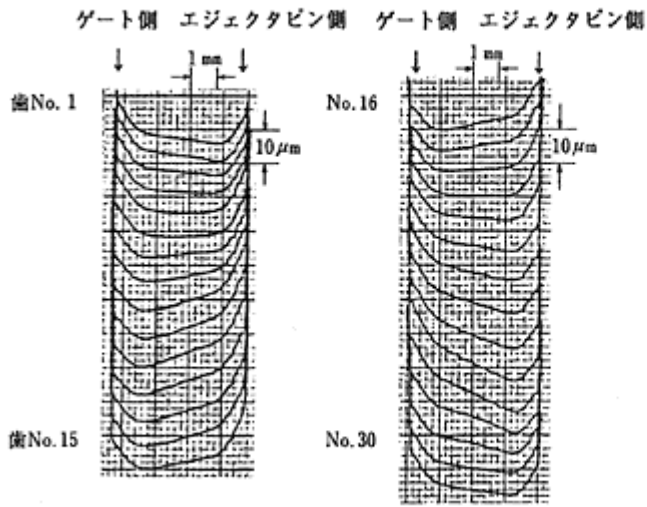
また、単一の歯について歯先から歯元まで数点歯スジ誤差を測定した例を図bに示す。一般に歯先では凸になり、歯元では凹になる傾向がある。これは歯先と歯元における歯厚の違いや結晶化挙動の違いが関係しているが、歯幅を小さめにとったほうがこの現象は起こりにくい。また、1つの平歯車のゲート側とエジェクタピン側の歯先円直径に寸法差が生じ、歯スジ方向に影響を与える場合がある。図1-3-2-3は、この1例を示している。これは可動側と固定側のキャビティの熱容量の差、固定側キャビティのランナーからの流入熱等によって生ずると考えられる。従って、金型設計の際には

両者の型板を極力同じ大きさにして熱容量をそろえる

ランナーからの流入熱を考慮して両者の型板に温度差を設ける

等を考慮する必要がある。

図a



図b

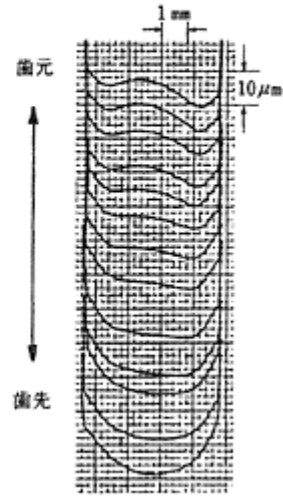


図 1-3-2-1 ギア成形品圧力角と歯先円収縮率の関係

注) 図中斜線は圧力角のバラツキ範囲を表す。

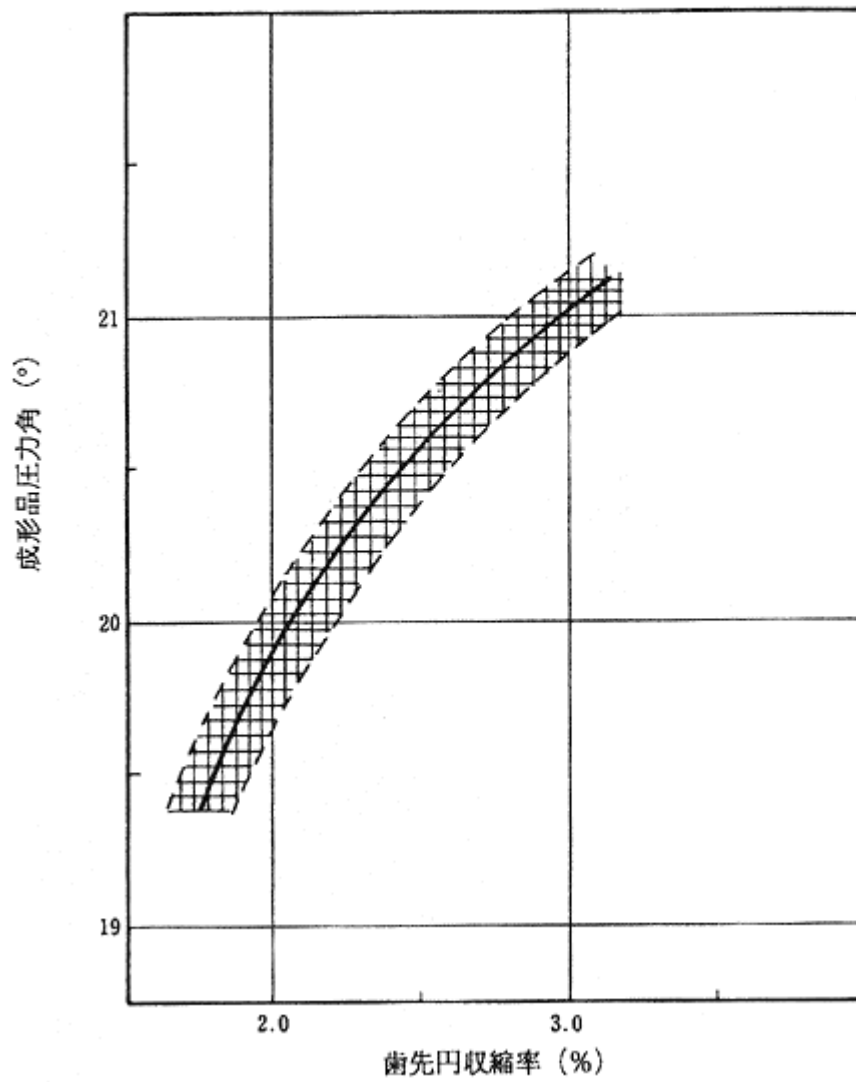


図 1-3-2-2 成形品圧力角誤差と成形条件の関係

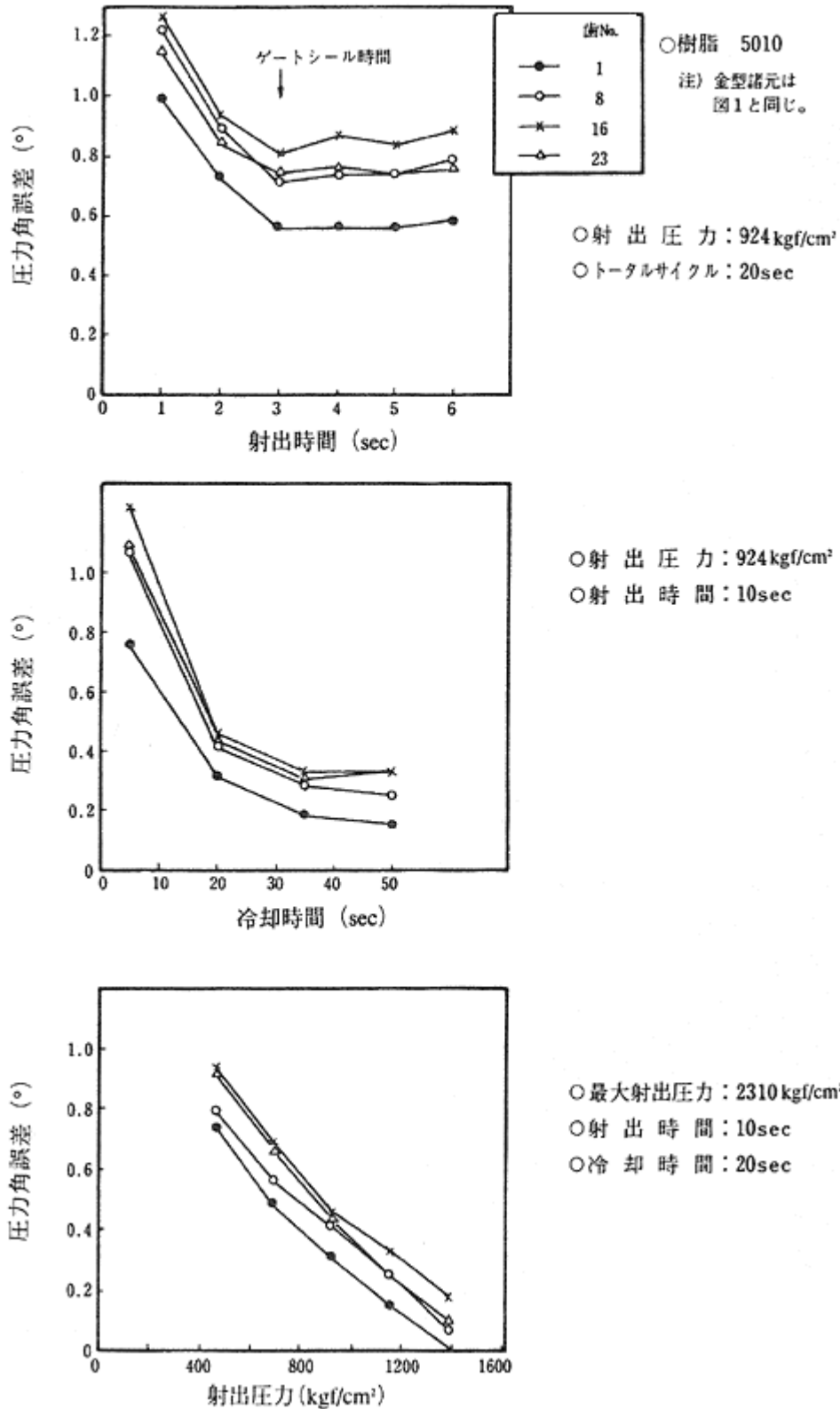


図 1-3-2-3 成形品歯先円直径と成形条件の関係

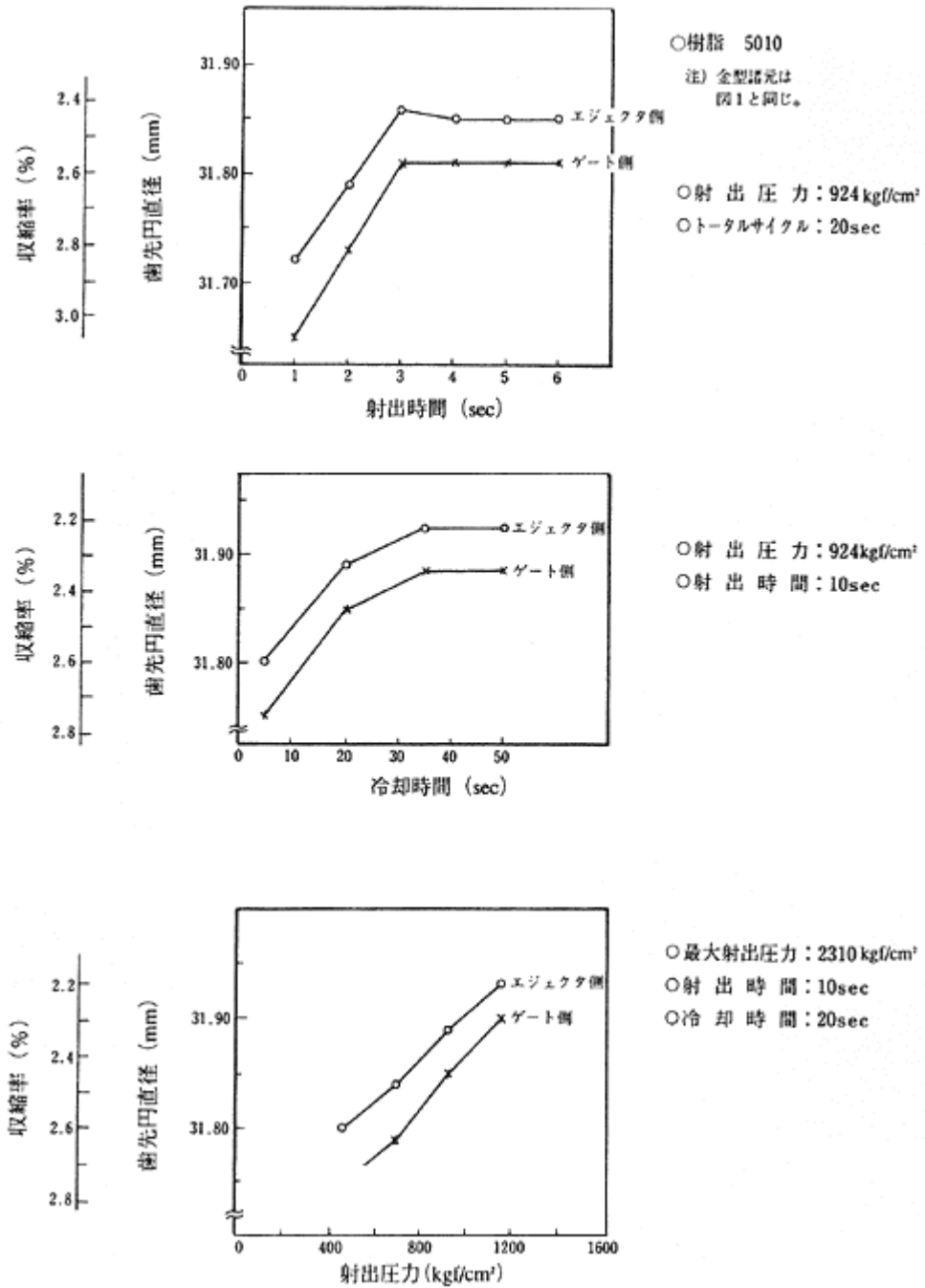


図 1-3-2-4 成形品偏心率と成形条件の関係

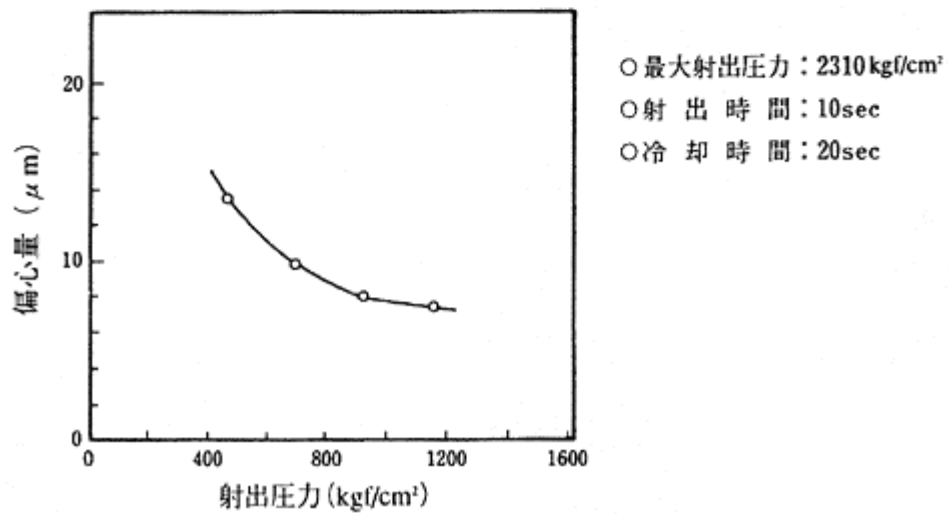
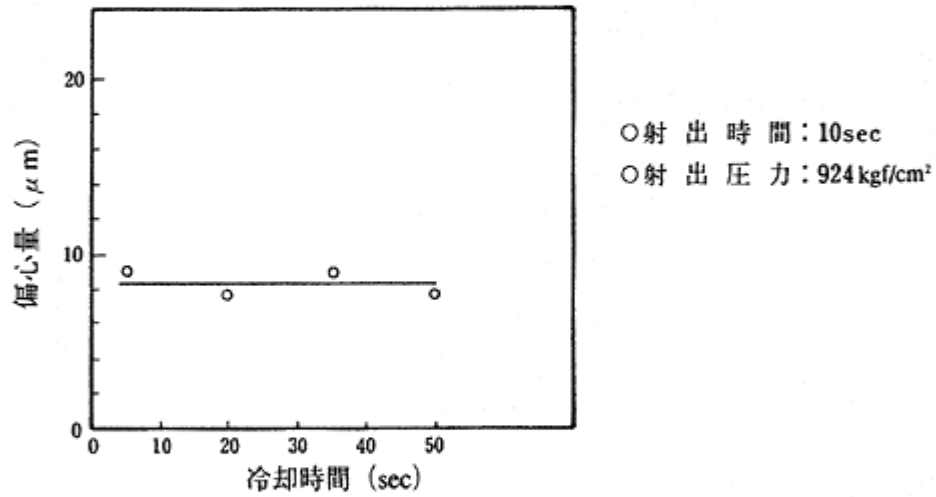
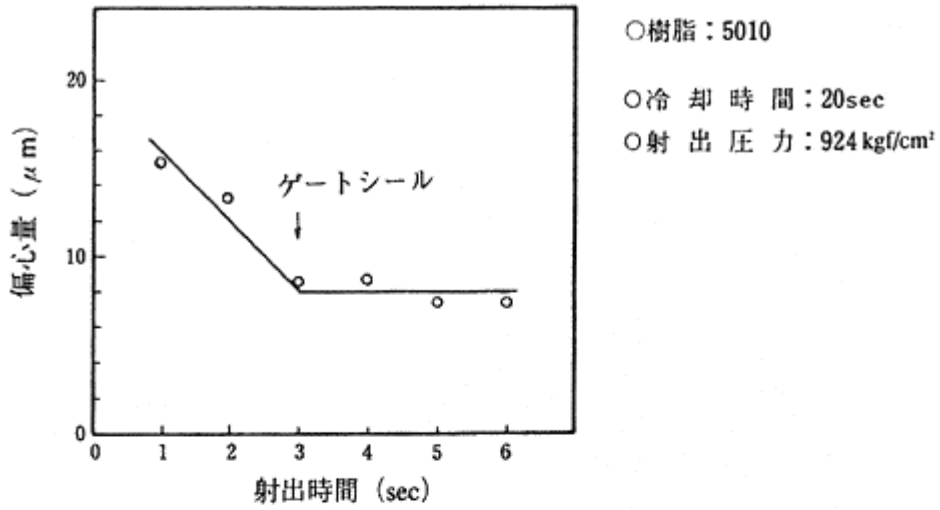
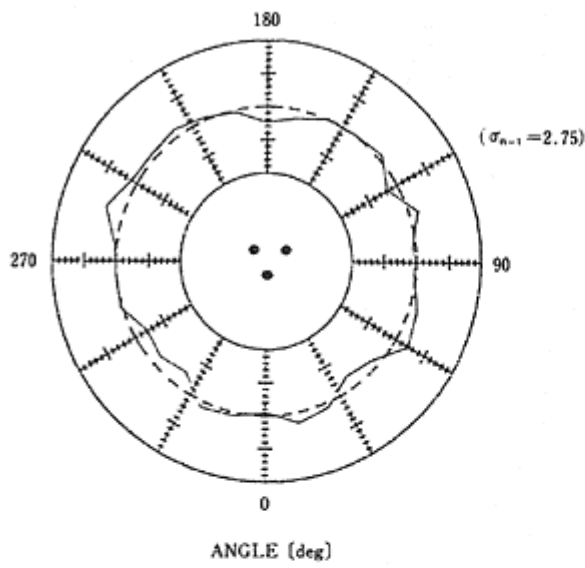
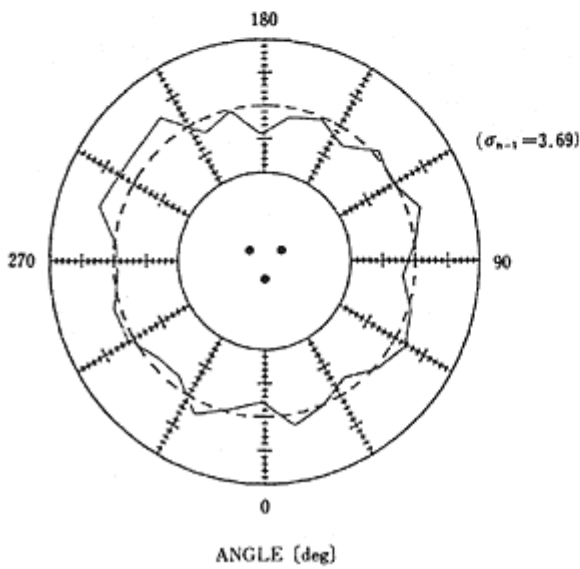


図 1-3-2-5 3010と3510のピッチ円真円度

3010



3510



フルスケール：±20μm
成形条件：樹脂温度 200℃
金型温度 80℃
射出時間 10sec
冷却時間 50sec
ゲート：φ1.2ボス3点ゲート

図 1-3-2-6 3010と3510のピッチ円真円度差

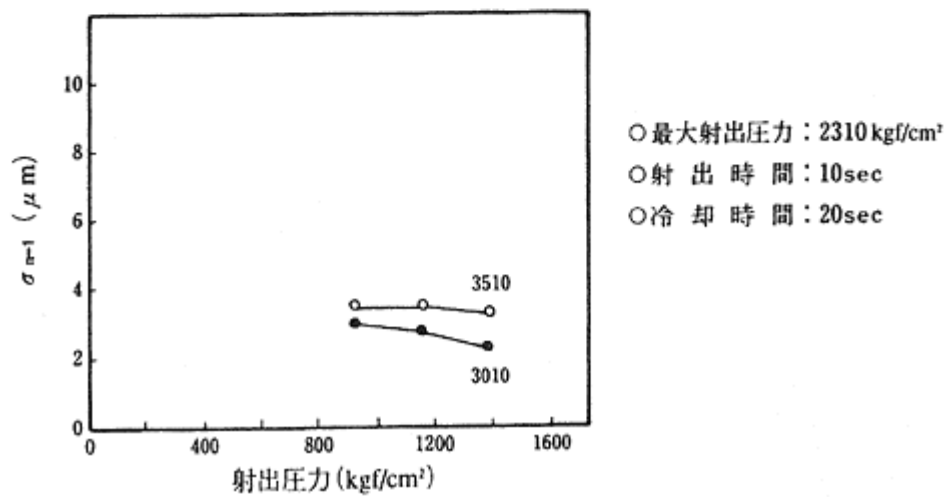
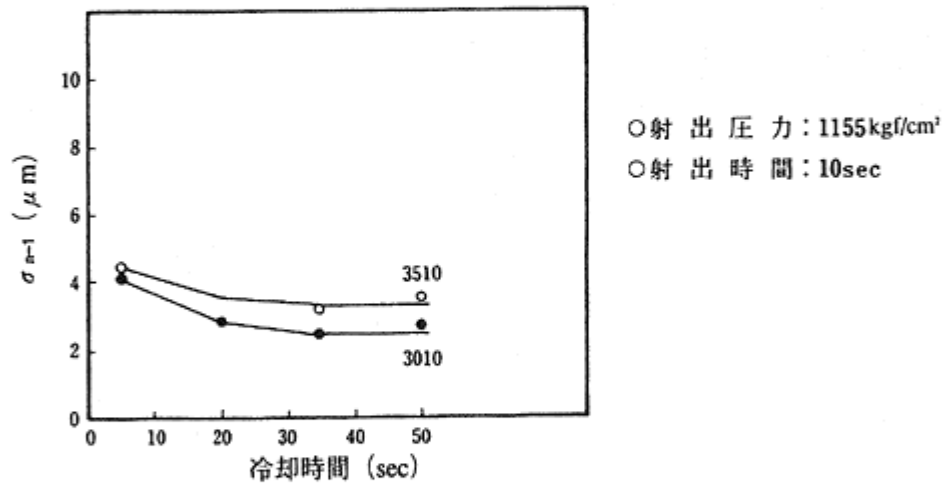
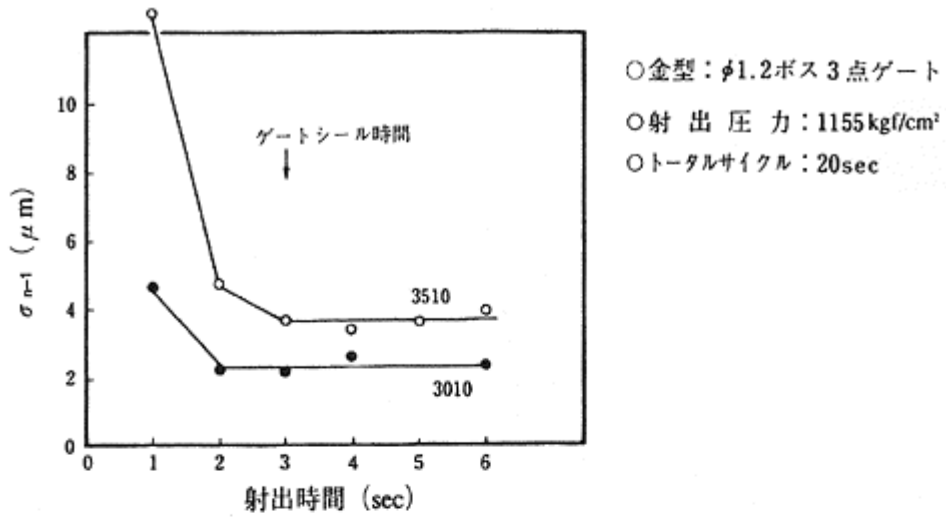
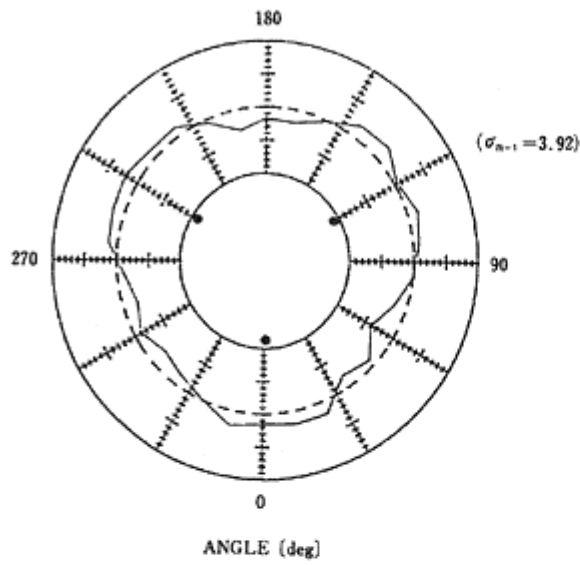
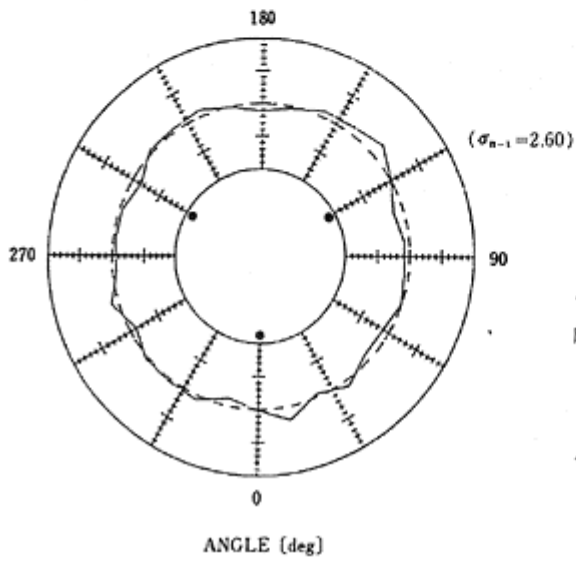


図 1-3-2-7 流動性の異なった樹脂によるピッチ円真円度

高粘度タイプ (3010)



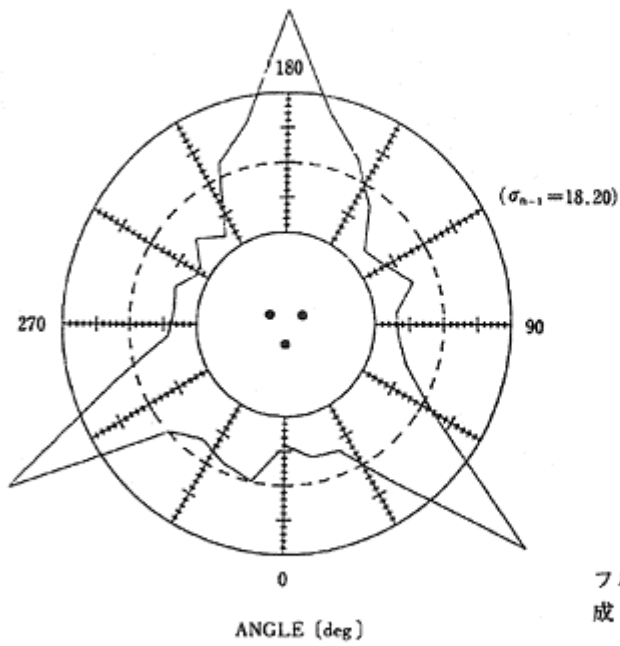
中低粘度タイプ (5010)



フルスケール：±20μm
 成形条件：樹脂温度 200℃
 金型温度 80℃
 射出時間 10sec
 冷却時間 20sec
 ゲート：φ1.2ウェブ3点ゲート

図 1-3-2-8 繊維強化グレードのピッチ円真円度

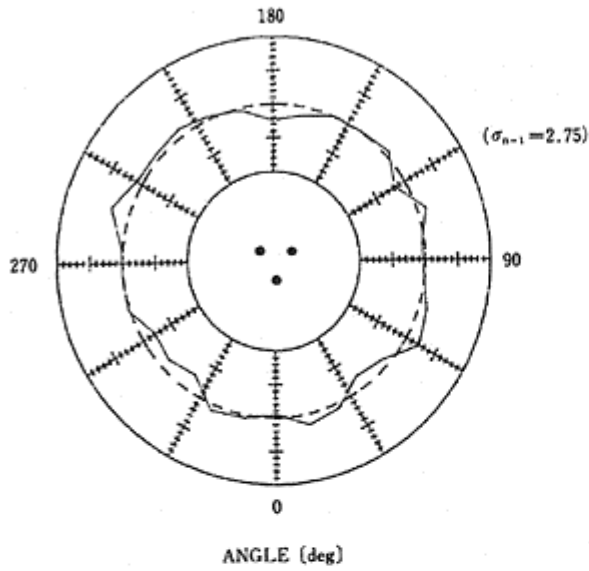
カーボンファイバー充填グレード (CF454)



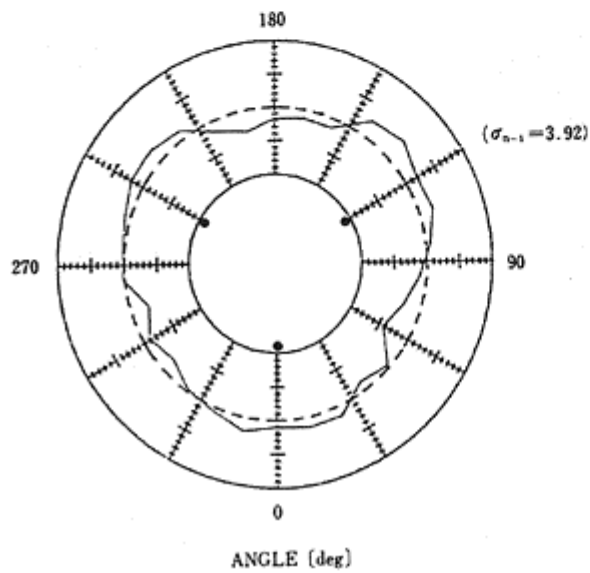
フルスケール：±20μm
成形条件：樹脂温度 200℃
金型温度 80℃
射出時間 10sec
冷却時間 50sec
ゲート：φ1.2ボス3点ゲート

図 1-3-2-9 ポスゲートとウェブゲートのピッチ円真円度

φ1.2ボス3点ゲート (3010)



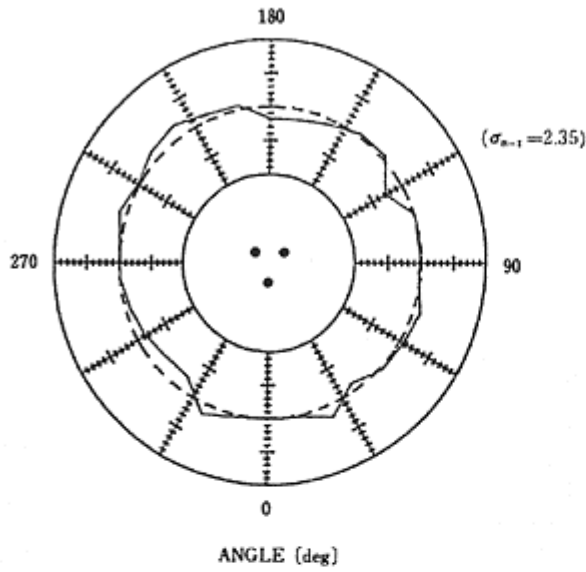
φ1.2ウェブ3点ゲート (3010)



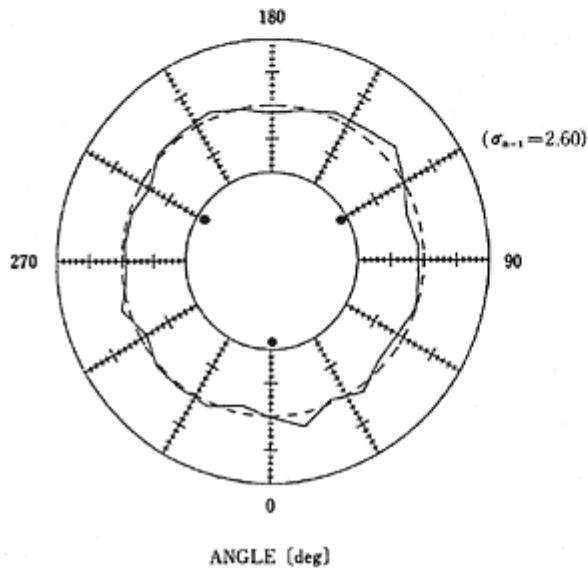
フルスケール：±20μm
 成形条件：樹脂温度 200℃
 金型温度 80℃
 射出時間 10sec
 冷却時間 20sec

図 1-3-2-10 ポスゲートとウェブゲートのピッチ円真円度

φ1.2ボス3点ゲート (5010)



φ1.2ウェブ3点ゲート (5010)



フルスケール：±20 μm
 成形条件：樹脂温度 200℃
 金型温度 80℃
 射出時間 10sec
 冷却時間 20sec

図 1-3-2-11 ゲート位置の違いによるピッチ円真円度差

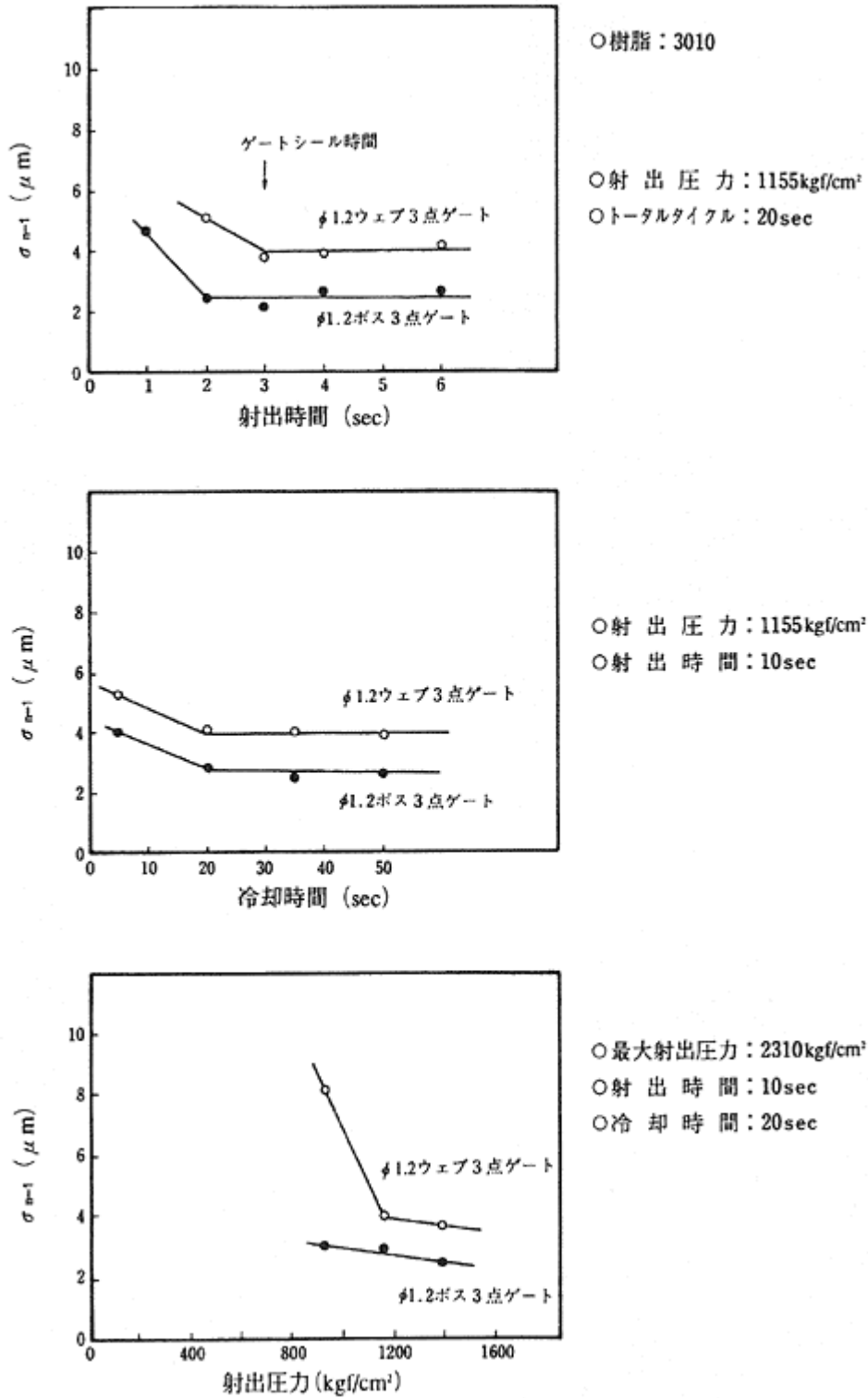


図 1-3-2-12 ゲート位置の違いによるピッチ円真円度差

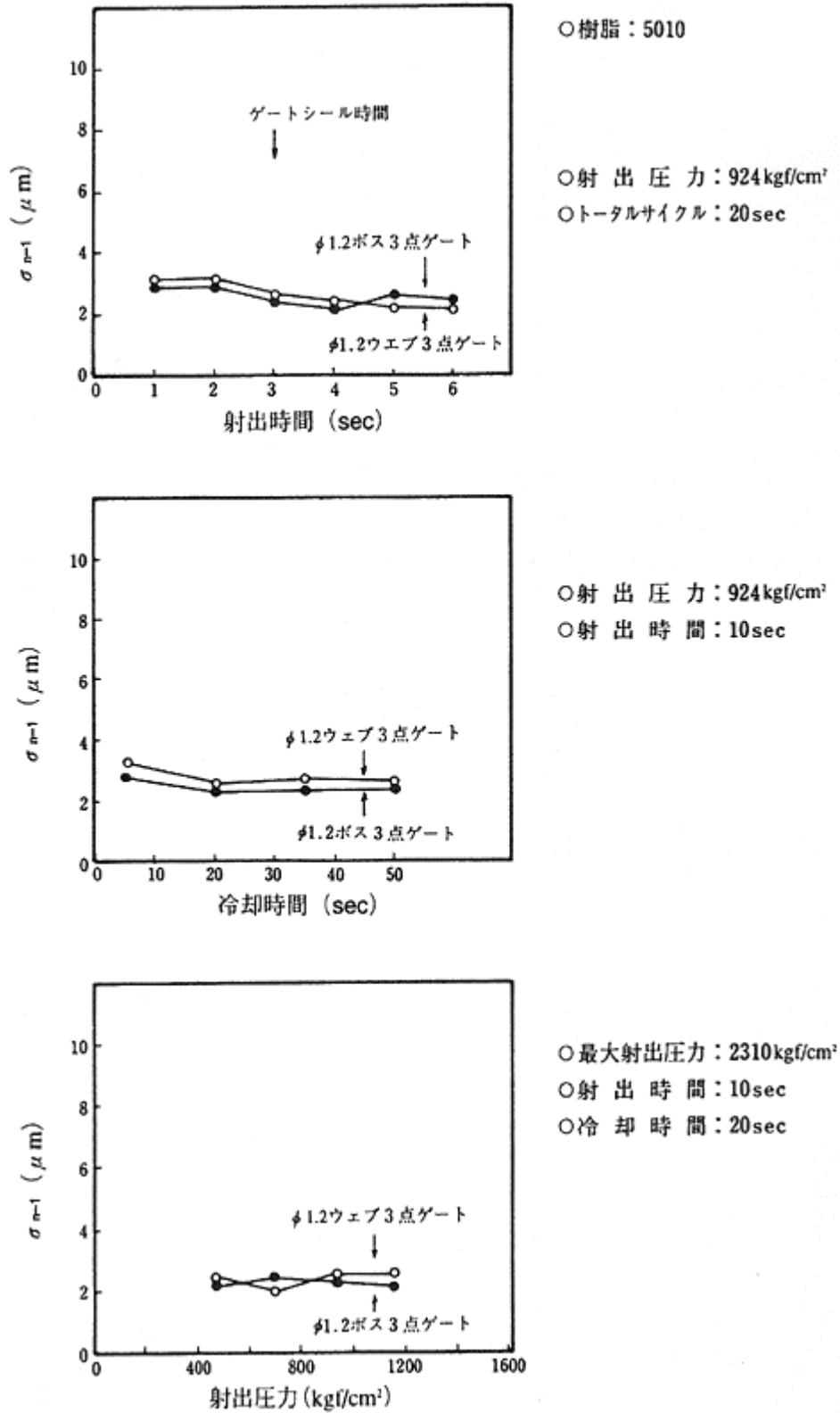
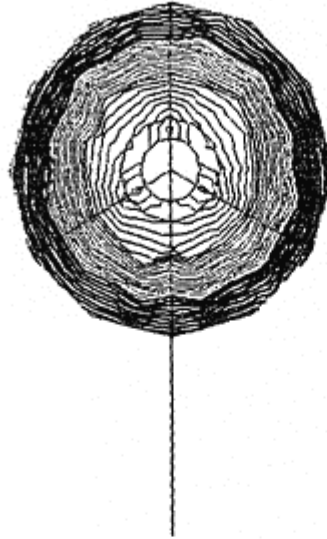


図 1-3-2-13 ポス3点ゲート、ウェブ3点ゲートの流動パターン

ポス3点ゲート



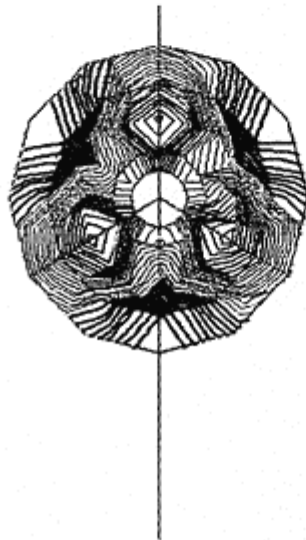
射出時間(sec)

○0.21~0.31

○0.31~0.42

○0.42~0.52

ウェブ3点ゲート



射出時間(sec)

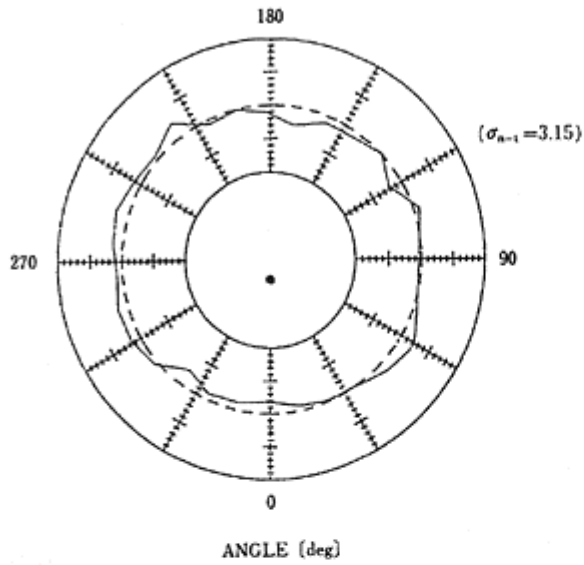
○0.21~0.31

○0.31~0.42

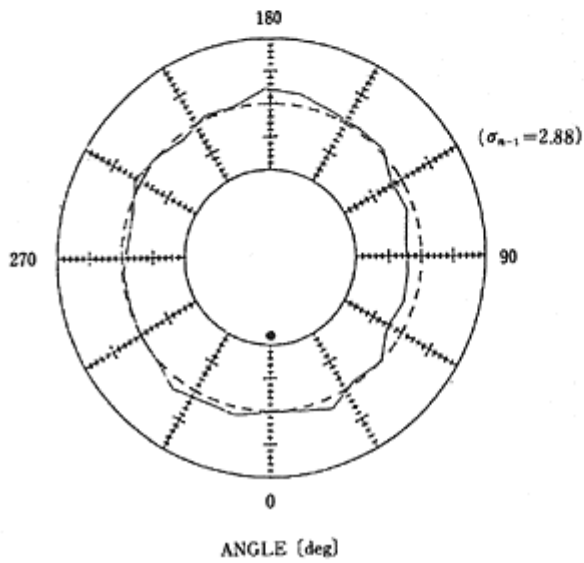
○0.42~0.52

図 1-3-2-14 1点ゲートを用いた場合の円真円度

φ1.2ボス1点ゲート (5010)



φ1.2ウェブ1点ゲート (5010)



フルスケール：±20μm
 成形条件：樹脂温度 200℃
 金型温度 80℃
 射出時間 10sec
 冷却時間 20sec

図 1-3-2-15 ウェブ、ボス1点ゲートを用いた場合のピッチ円真円度差

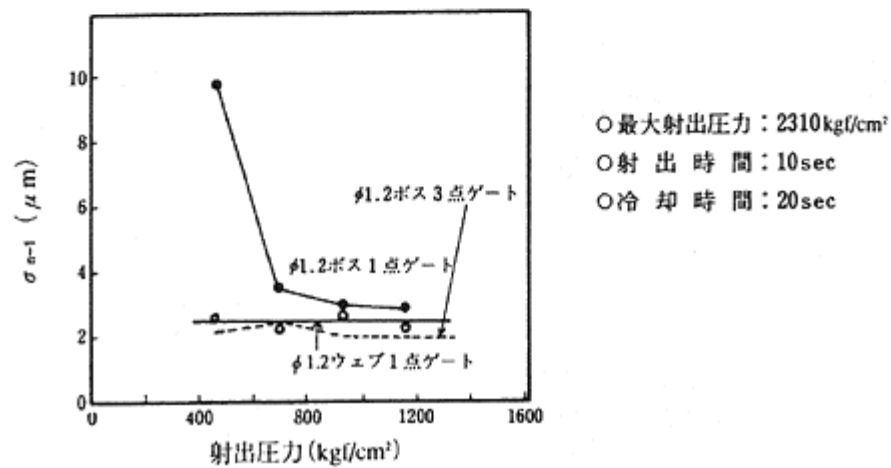
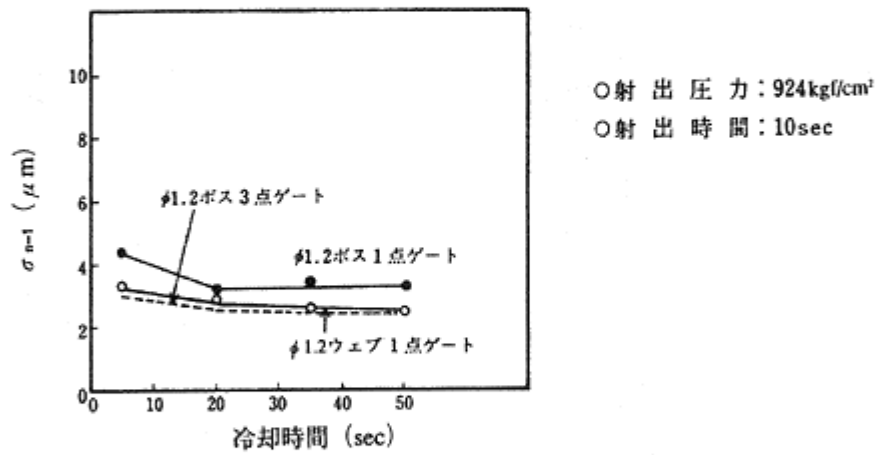
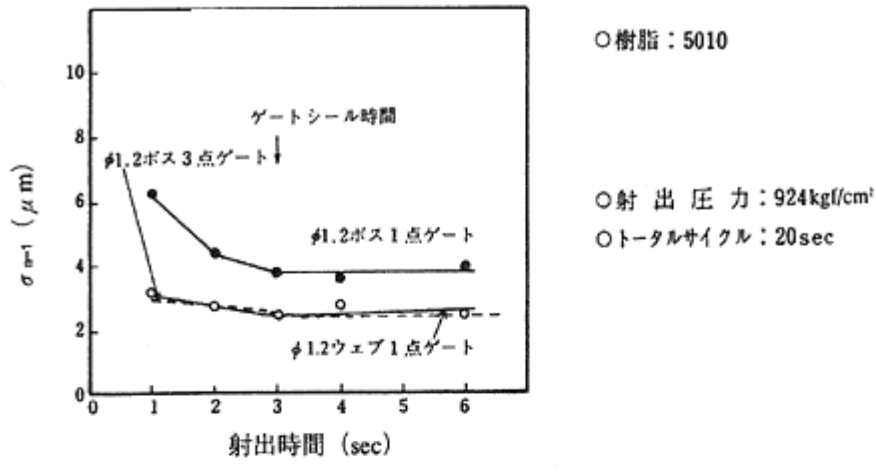
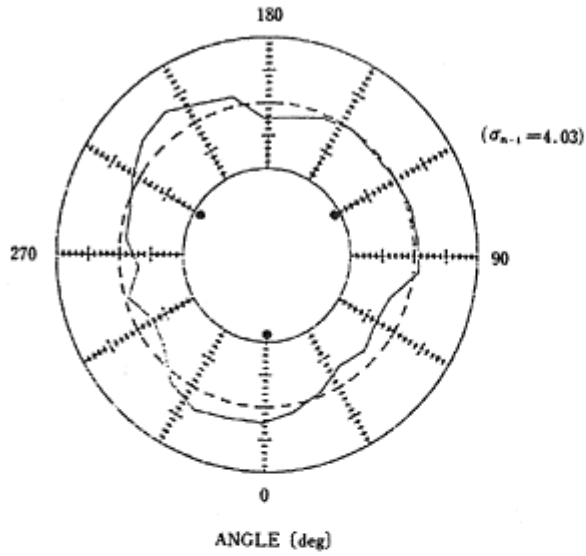
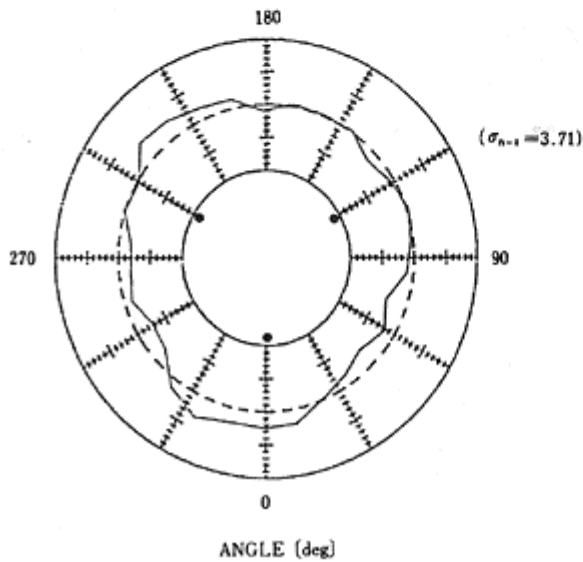


図 1-3-2-16 ゲートサイズの違いによるピッチ円真円度

φ1.2ウェブ3点ゲート (3010)



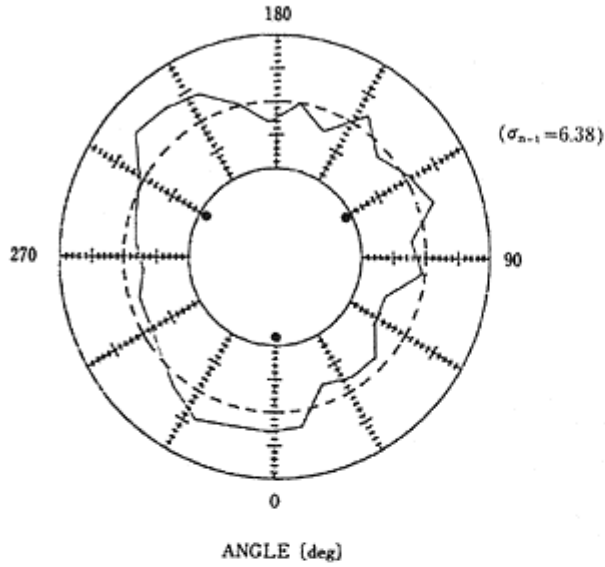
φ1.7ウェブ3点ゲート (3010)



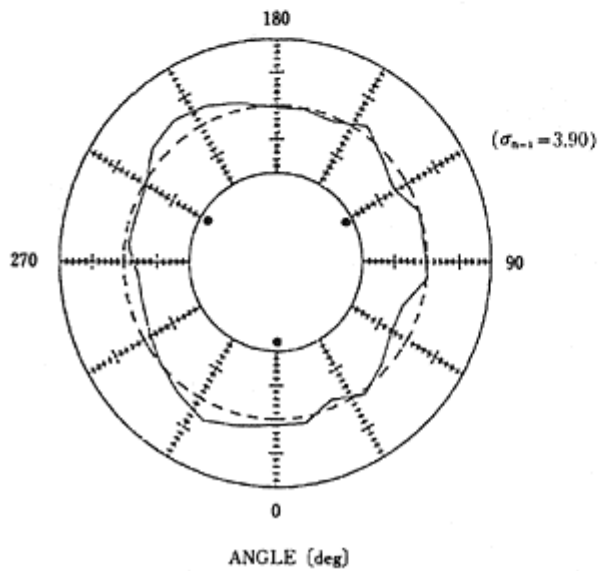
フルスケール：±20μm
成形条件：樹脂温度 200℃
金型温度 80℃
射出時間 10sec
冷却時間 20sec

図 1-3-2-17 ゲートサイズの違いによるピッチ円真円度

φ1.2ウェブ3点ゲート (3510)



φ1.7ウェブ3点ゲート (3510)



フルスケール：±20μm
成形条件：樹脂温度 200℃
金型温度 80℃
射出時間 10sec
冷却時間 20sec

図 1-3-2-18 ゲートサイズの違いによるピッチ円真円度差

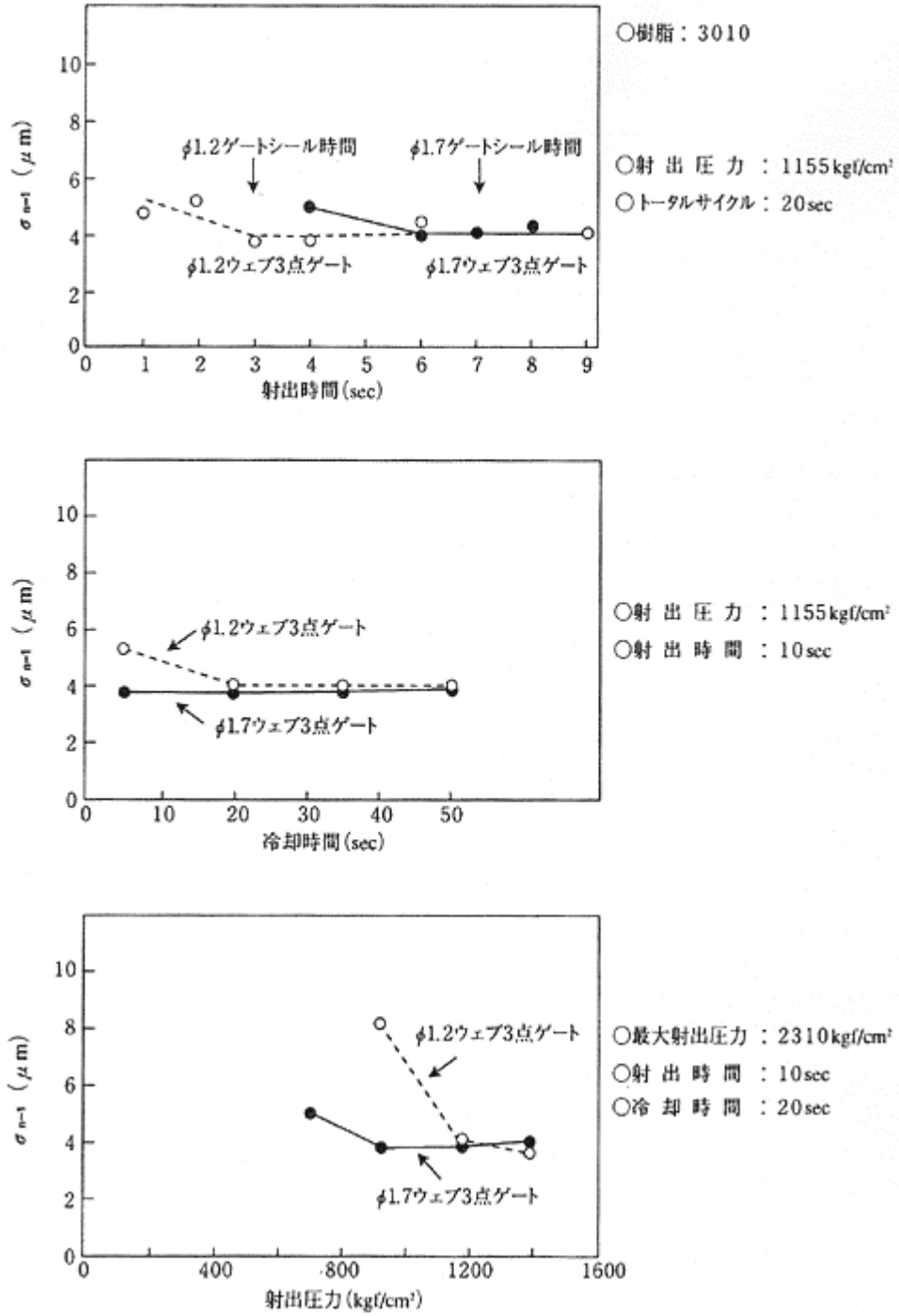
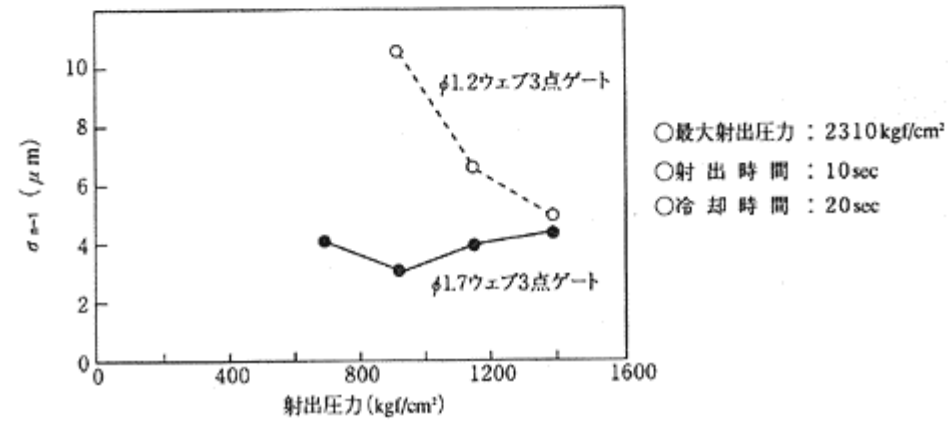
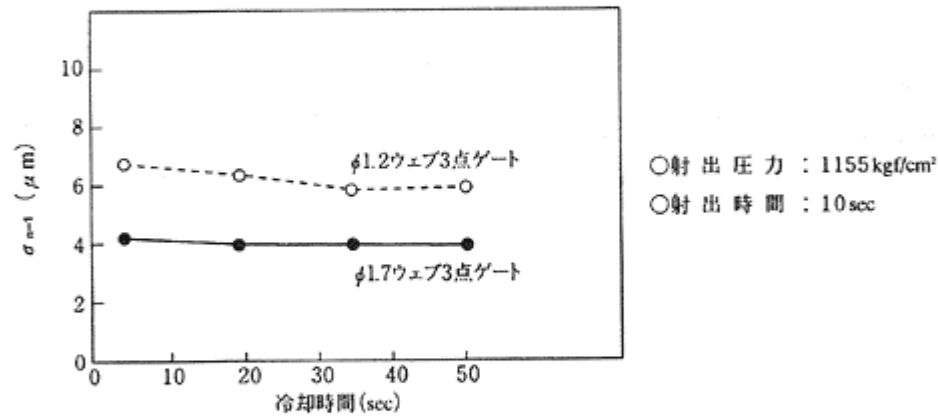
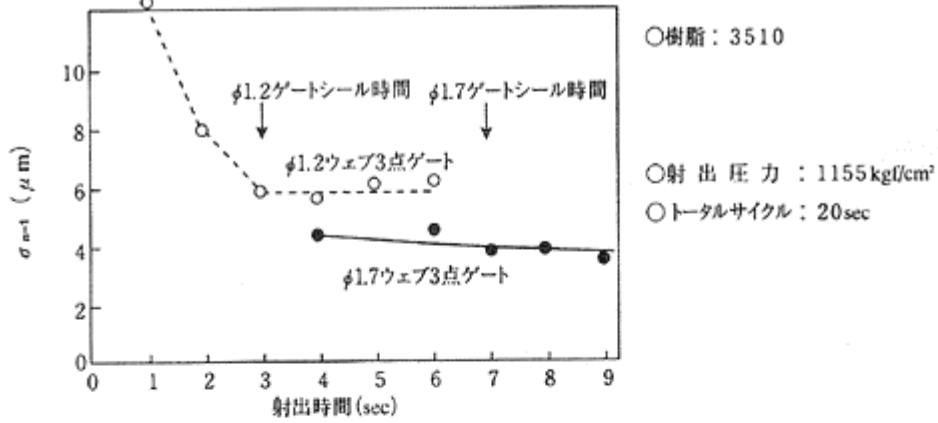


図 1-3-2-19 ゲートサイズの違いによるピッチ円真円度差



1-3-3 ギヤ精度向上法まとめ

これまで述べてきた内容を簡単にまとめると下表のようになる。

	圧力角誤差の向上	偏 心 度 の 向 上
金 型	<p>*キャビティ 先を示した2つの式のいずれかを用いてキャビティを歯切りする。見込み収縮率は2～2.3%程度が適切である。</p> <p>*冷却配管 各歯の圧力角のバラツキを最小限にするには、金型の均一冷却を行う必要がある。対策として、インシュレートキャビティの採用が挙げられる。</p>	<p>*ゲート ゲートバランスがくずれないように十分に考慮して設計する必要がある。ギヤセンター付近にゲートを設けたほうが偏心は生じにくい。1点ゲートを用いた場合、成形条件の影響をうけて偏心量が増える場合がある。従って、多点ゲートを用いることが望ましい。</p>
樹 脂	<p>ほとんどのホモポリマー、コポリマー各グレードは先を示した式が適用できるが、繊維強化グレードは収縮挙動が異なるため適用できない。</p>	<p>偏心はゲート部付近とウエルド付近の樹脂の保圧効果の差が原因となる場合がある。一般的な傾向として流動性の良い高流動グレードを用いたほうが偏心は生じにくい。</p>
成 形 条 件	<p>*射出圧力 圧力角誤差の微調整は射出圧力を変化させて行うのが望ましい。歯先円収縮率を見込み収縮率に合わせることで、ほぼ適正な圧力角が得られる。</p>	<p>*ゲートシール時間 射出時間をゲートシール時間より長めにとること。</p> <p>*射出圧力 高めに設定したほうが偏心は生じにくい。</p>

	真円度の向上	歯スジ方向誤差の向上
金 型	<p>*キャビティ 歯切れ精度の影響が最も大きい。円周方向に均一な肉盗みをしたほうが真円度は向上する。</p> <p>*ゲート センターダイヤフラムゲートが最も望ましい。センター付近に多点ゲートを設けたほうが真円度は向上する。 ゲートサイズを大きめにとって保圧効果を高めたほうが真円度が向上する。</p>	<p>*温調 成形時の可動側、固定側両キャビティの型温を極力同一にすること。</p> <p>*冷却配管 歯先円・円周方向に均一な冷却をすること。インシュレートキャビティ方式の採用によって均一冷却を確保することができる。</p> <p>*ゲート ゲートを大きめにとって保圧効果を高めた方が歯元のヒケは小さくなる。</p>
樹 脂	<p>結晶化速度の速いホモポリマーのほうが真円度は良好である。 高流動グレードを用いたほうが真円度は良好である。 繊維強化グレードでは極端に悪くなる。</p>	<p>高流動グレードを用いたほうが歯元のヒケは減少する。</p>
成 形 条 件	<p>*冷却時間 長めに設定したほうが真円度は向上する。</p> <p>*射出圧力 高めに設定したほうが真円度は向上する。</p>	<p>*射出圧力 高めに設定して保圧効果を高めたほうが歯元のヒケは減少する。</p>