

Investigation of the generation mechanism of galling between plunger-sleeve and plunger-tip

UBE machinery Corporation, Ltd.

○Motoki Tanaka, Kosei Murakami, Naoki Ishibashi, Mamoru Nishi, Takeshi Tokunaga,
Yuichiro Tsurugi, Natsuki Fujiwara

Abstract;

Galling between plunger-sleeve and plunger-tip is the factor of disturbing stable die casting operation. We studied about the influences of heat deformation of plunger-sleeve and movement of plunger-sleeve by clamping die against the galling. According to our experiment results, we investigated the mechanism of galling generation and its measure, especially paying attention to aluminum attachment behavior on the plunger sleeve.

1. はじめに

ダイカストマシンの射出工程において、射出速度の振動や鋳込み部品からの異音が発生するケースがある。この現象は一般的に、「チップかじり」と呼ばれ、鋳造品質の悪化、機械の稼働率低下、鋳込み部品の寿命低下による生産性の低下、コスト増大を引き起こす。筆者らはチップかじり現象への有効な対策を講じるため、発生メカニズムを理論的に把握することを目的として鋳造時の鋳込み部品の変形挙動、アルミ付着と摺動抵抗の関係を調査した。以下に調査結果を報告するとともに、チップかじりの発生メカニズムについて考察した。

2. チップかじりの発生原因の推定

図1に射出装置の正常動作時とチップかじり発生時の波形を示す。チップかじり発生時は、射出速度とロッド圧が振動し、チップに摺動抵抗が生じていることが分かる。鋳造前はチップ及びロッドを人力で容易に回転できることから摺動抵抗は無く、鋳造中に鋳込み部品間に干渉が生じ、摺動抵抗が増加したと考えられる。摺動抵抗の増加要因としては、鋳込み部品の(a)熱変形、(b)機械動作による変形及び(c)スリーブ内面のアルミ付着、が推測される。以下にこれら(a)~(c)に関する調査結果を報告する。なお、一般的にチップかじりは、(i)注湯口近傍の射出前半と、(ii)金型とスリーブの接合部近傍の射出後半、で多く確認されるが、本報告では前者を対象とした。

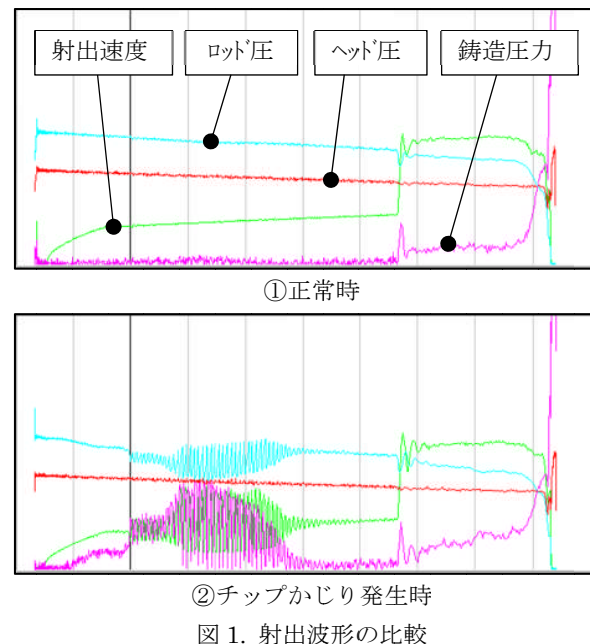


図1. 射出波形の比較

3. 空打ちによる鋳込み部品の変形と鋳造圧力の関係

鋳込み部品が変形した状態で摺動抵抗の発生傾向を調査し、変形とチップかじりの関係性を確認する。

3-1 実験方法

表1に実験に使用した条件を示す。図2に示す点a(射出ストローク:-15mm)に変位計(リニアゲージ:分解能1 μ m)を設置して変位量を計測し、点b(射出ストローク:160mm)に熱電対(ϕ 1.6mm シース)を設置してスリーブ温度を計測した。

まずスリーブ温度を上昇させるためスリーブ内で溶湯を凝固させ、射出動作を行わずに金型分割面から鋳造品

を取り出した。その際、スリーブ予熱時にはスリーブへのアルミ付着防止のため、注湯口直下に断熱紙を設置した。点 a の変位量が 2.5mm 以上になるまでスリーブ予熱作業を繰り返した後、自然放冷中に図 3 に示す射出開始タイミングで型締めを行った状態でアルミを給湯せざるに、射出動作を繰り返し行った。採取した射出波形から変形挙動と casting 圧力の関係を調査した。

表 1. 使用した条件 (空打ち実験)

铸造機	UH1250 ※宇部興産機械(株)製
合金	ADC12
保持炉温度	680°C
スリーブ充填率	35%

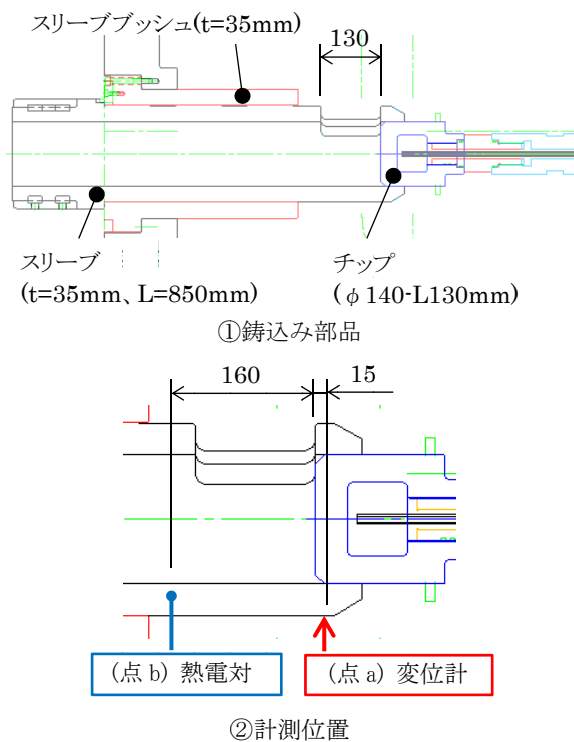


図 2. 鑄込み部品の概要と計測位置

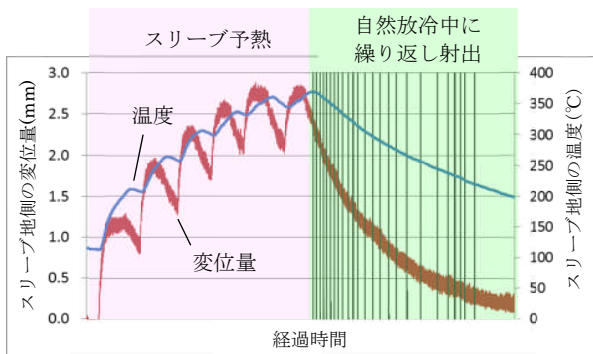


図 3. スリーブ予熱と射出空打ちタイミング

3-2 実験結果

図 4 に点 a の変位量と casting 圧力の関係を、図 5 に点 a の変位量毎の射出速度波形を重ねた結果を示す。点 a の変位量が 1.0mm 以下では casting 圧力に大きな差異は無いが、1.0mm を超えると変位量に応じて casting 圧力が徐々に増加した。射出速度も変位量が 1.0mm を超えると振動が大きくなり、変位量に応じて徐々に増大した。

この結果より、摺動抵抗は、アルミ付着の有無に関係なくスリーブの変形によって発生し、変形量に比例して増加することが確認された。

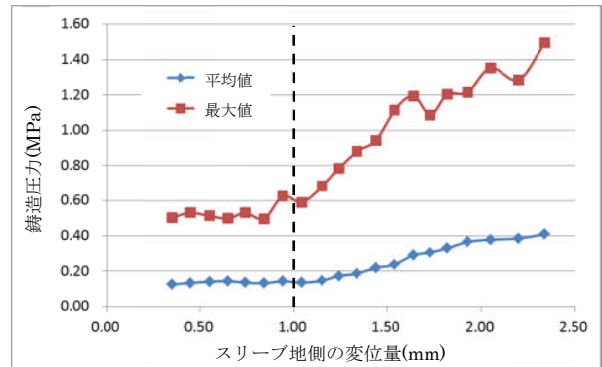


図 4. 変位量と casting 圧力

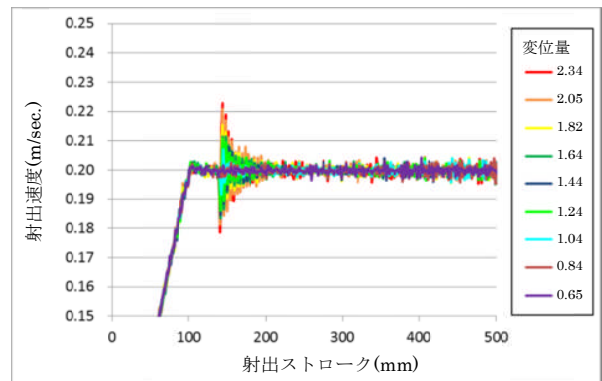


図 5. 変位量別の射出波形

4. 実鑄造による各部品の変形挙動とアルミ付着の影響

実鑄造における鑄込み部品の熱変形、機械動作による変形挙動を調査して変形挙動を詳細に把握するとともに、温度分布から熱変形の発生原因について考察する。また、スリーブ内面のアルミ付着と摺動抵抗の関係を調査する。

4-1. CAE による実験条件の確認

事前に簡易的な解析でスリーブの変位量の変化を確認した。図 6 に点 c、d、e の冷間時からの変位量を示す。鑄造開始から、サイクルが進むにつれて変位量は変化し、最終的に定常状態に至った。この間、常に点 c の変位量が大きく、点 c、d、e とともに変形挙動の傾向が変化しないことが分かる。

これより、鑄造開始から 30 サイクル程度を確認すれば、定常時も含めたスリーブの熱変形挙動を把握できると判断した。

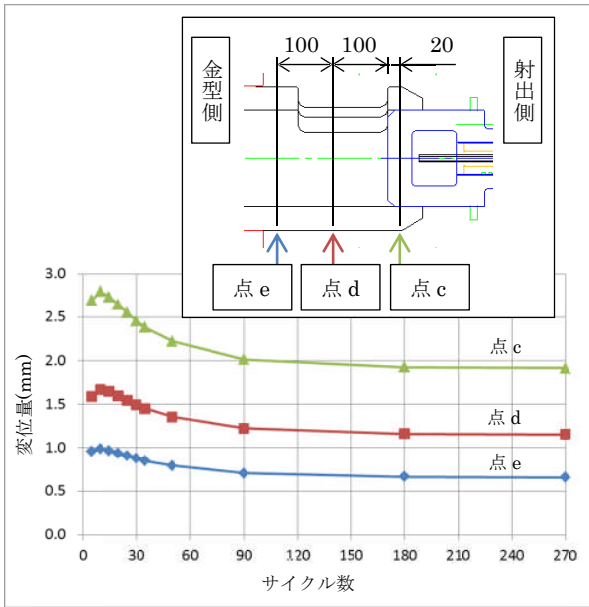


図 6. スリーブ変位挙動の変化

4-2. 実験方法

表 2 に鋳造実験に使用した条件を示す。鋳造機、鋳込み部品は表 1、図 2 と同様とした。スリーブ内面に付着したアルミがチップかじりに及ぼす影響を調査するため、2 種類のチップ潤滑剤を個別に使用した。

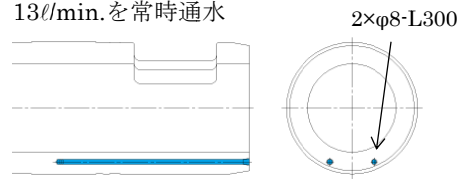
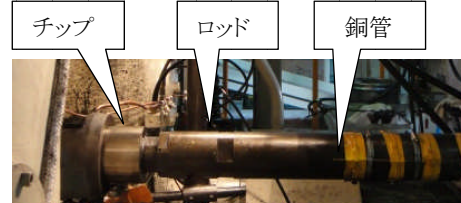
表 3 にスリーブ冷却条件を示す。条件 1：冷却なし、条件 2：冷却孔に通水した条件、条件 3：通水に加えてブランジャーロッドに取り付けた銅管より射出後にスリーブ内面に散水する条件として、それぞれ冷間状態から 30 サイクル連続鋳造した。

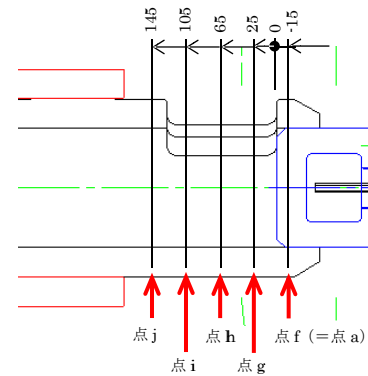
図 7 に示すように、変位計、熱電対を設置し、スリーブ各部の変位量と温度変化を測定した。変位計は軸方向に直線状に点 f~j の 5 箇所を設置した。なお、点 f は空打ち実験で計測した点 a と同じ位置とした。熱電対はスリーブ円周方向の変化を確認するために A 断面位置に 8 箇所を設置した。

表 2. 使用した条件 (鋳造実験)

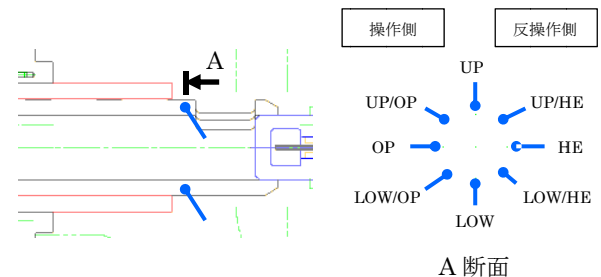
射出速度	0.3m/s→0.4m/s→1.0m/s
合金	ADC12
保持炉温度	680℃
給湯量	11.6kg
スリーブ充填率	35%
潤滑剤	①油性、黒鉛含む (5cc) ②水溶性、黒鉛含まず (10cc)

表 3. スリーブ冷却条件

条件 1	冷却なし
条件 2	13ℓ/min.を常時通水 
条件 3	冷却条件 2+銅管から散水 



①変位計 (計 5 箇所)



②熱電対 (計 8 箇所)

図 7. 計測点

4-3. 実験結果

(1) スリーブ温度、機械動作が変位量に及ぼす影響

図 8 に点 f における射出直前の変位量と低速射出区間の鋳造圧力の関係を示す。空打ち実験と同様に、点 f の変位量が 1.0mm を超えると変位量の増加に応じて鋳造圧力が増加し、変位量が減少に転じるのに合わせて低減した。

図 9 にスリーブ冷却条件 1 のスリーブ温度と点 f の変位量の関係を示す。スリーブ温度は天側、地側ともに鋳造開始から徐々に上昇し、地側は 25 サイクル程度で定常状態に至ったが、天側は 30 サイクル時でも上昇傾向である。両者の温度差は 10 サイクル程度で最大となり、

その後は徐々に減少した。変位量は casting 開始から徐々に増加し、最大で 1.8mm ほど天側に変位した後、20 サイクル程度から減少に転じた。これにより、鉛直方向のスリーブ変形の原因はスリーブ地側の温度上昇よりも、天地の温度差に依存していると考えられる。なお、変位量と温度差で、減少に転じるタイミングが異なるのは、計測部（注湯口近傍）が他の部位に比べて高温部であることが原因と考えられ、スリーブ全体で考えた場合の天地の温度差は、変位量が減少に転じた 20 サイクル程度がピークであると推察される。

図 10 に 1 サイクル中の点 LOW の温度、点 UP と LOW の温度差と点 f の変位量の関係を示す。機械動作によって一時的に変位量が増加しているが、 casting 時に生じる変位量に占める割合は小さいことが分かる。

スリーブ冷却条件 2、3 のスリーブ温度と変位量の関係を、それぞれ図 11、12 に示す。条件 2 では、スリーブ内に通水することで点 f の温度が約 200°C、変位量が約 1.4mm に抑制された。条件 3 では、さらにスリーブ内表面からの冷却を追加することにより、点 f の温度が約 100°C、変位量が約 0.6mm に抑制された。

これらの結果から、スリーブ変形の主要原因は天地の温度差であり、ダイカストマシンの構造や動作の影響は小さい。また、スリーブ冷却が熱変形の抑制に効果的であることが確認された。

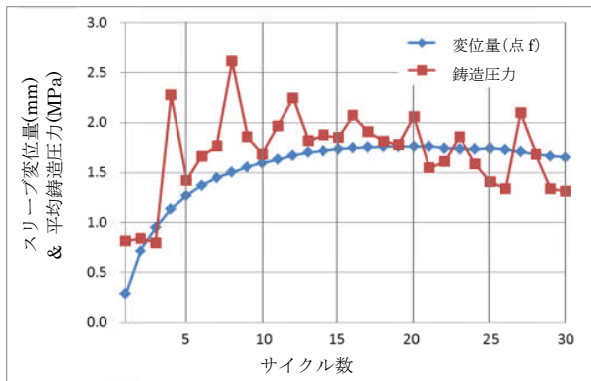


図 8. 変位量と casting 圧力の関係（スリーブ冷却条件 1）

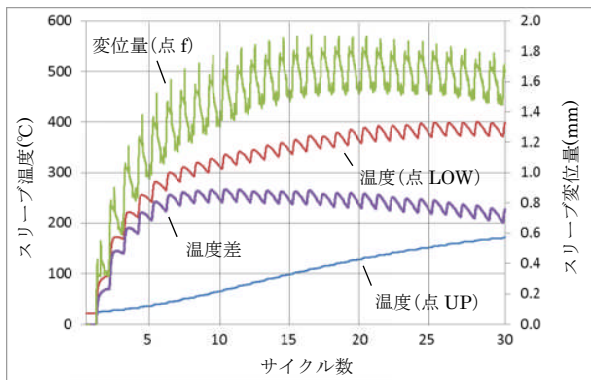


図 9. 温度と変位量の関係（スリーブ冷却条件 1）

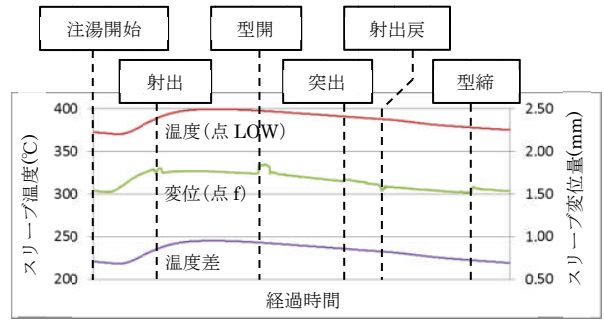


図 10. 1 サイクル中の温度差と変位

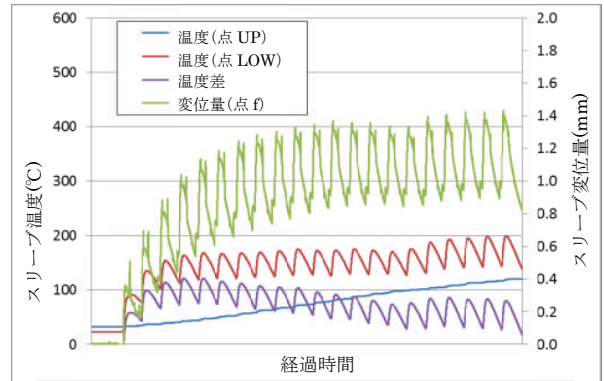


図 11. 温度と変位量の関係（スリーブ冷却条件 2）

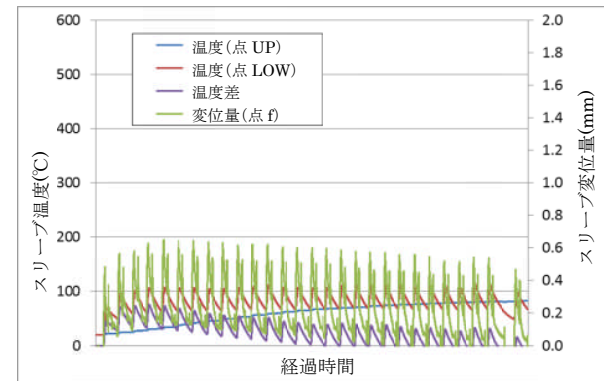


図 12. 温度と変位量の関係（スリーブ冷却条件 3）

(2) スリーブ温度と変形挙動の経時変化

図 13 にスリーブ冷却条件 1 のスリーブ各部の 10 サイクル毎の温度（射出動作開始直前）を示す。点 LOW が最も温度が高く、天側に近いほど温度が低い。また、反操作側のほうが操作側に比べて温度が高い。これは、注湯時に溶湯が落下、衝突する位置と一致し、熱伝達が促進されて高温になっているためと考えられる。

図 14 にサイクル毎の鉛直方向のスリーブ曲がり挙動を示す。射出側スリーブ端が最大に変位し、いわゆる「バナナ変形」状態となっており、さらにサイクル毎に変形モードが変化していることが確認された。これは、時間経過とともにスリーブ天地の温度差の変化に伴い、スリーブの変形モードが変化していると考えられる。また、スリーブブッシュと接触していない部位で急激に屈曲し

ているのではなく、スリーブブッシュで包まれている部位も含めて変形していることが予測される。

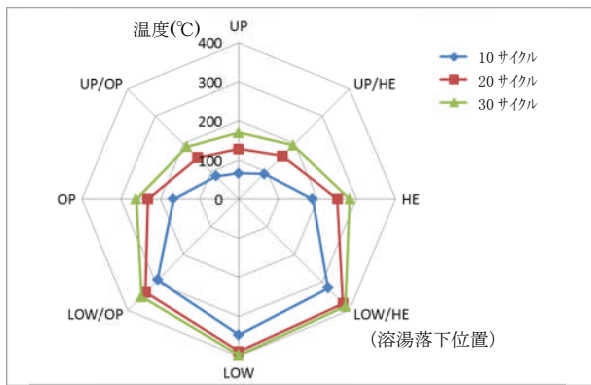


図 13. スリーブ円周上の温度（注湯口終端部）

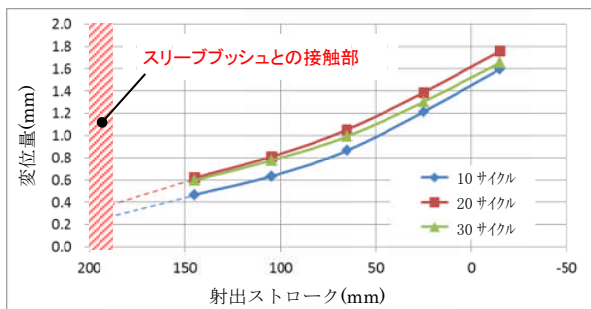


図 14. スリーブの鉛直方向の曲がり挙動

(3) アルミ付着がチップかじりに及ぼす影響

2種類の潤滑剤を使用してアルミ付着の違いによる現象を比較した。図 16 に注湯口近傍における射出直前のスリーブ内面の状況を示す。水溶性・非黒鉛系潤滑剤では、油性・黒鉛系潤滑剤に比してアルミの付着量が多く、サイクルの増加に伴い付着量が増加している。

図 15 に潤滑剤別の変位量と平均铸造圧力の関係を示す。変位量が同等にもかかわらず、アルミ付着量の増加した水溶性・非黒鉛系潤滑剤では、極端に铸造圧力が増加していることが分かる。

この結果より、アルミの付着がチップかじりを深刻化する要因の一つと判断できる。

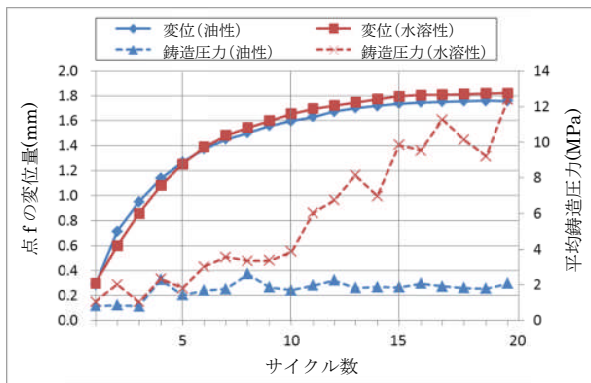
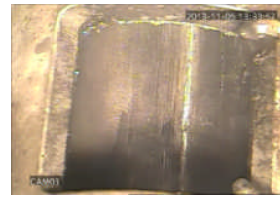
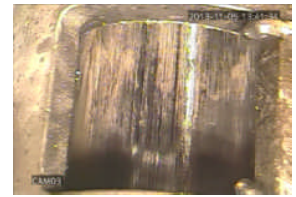


図 15. チップ潤滑剤別の変位量と铸造圧力

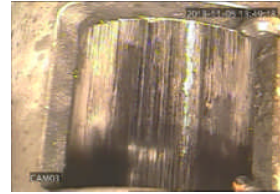
5 サイクル



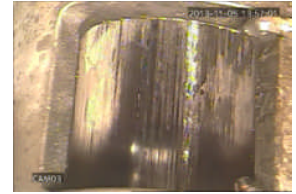
10 サイクル



15 サイクル

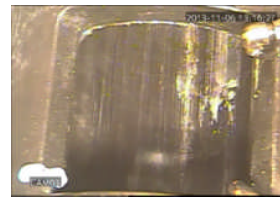


20 サイクル

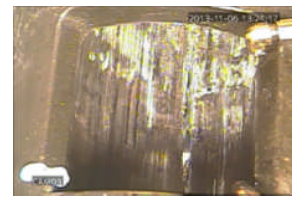


①油性・黒鉛系 5cc/shot

5 サイクル



10 サイクル



15 サイクル



20 サイクル



②水溶性・非黒鉛系 10cc/shot

図 16. 注湯口近傍のスリーブ内面の比較

5. チップかじり発生メカニズムの考察

これまでの結果から、チップかじりはスリーブの熱変形によって生じ、さらにアルミ付着によって悪化する。本項では、プランジャーロッドに生じる応力、チップの損傷部位を調査してチップかじり発生メカニズムについて考察する。

(1) プランジャーロッドの変形挙動の調査

図 17 に示すように、プランジャーロッドの B 断面部の 4 箇所歪みゲージを設置して、軸方向の応力を測定した。

铸造中にスリーブが天側へ約 1.8mm 変位し、注湯口近傍のスリーブ内面にアルミが付着した状態で注湯、射出を行った。チップ先端が注湯口終端部に達すると射出速度及び铸造圧力が振動してチップかじりが生じた。

図 18 に各種計測値を示す。チップが前進してスリーブへの進入長さが増加するとプランジャーロッドの全ての部位で圧縮応力が生じ、チップ後方が注湯口終端部を通過するまで（140mm～320mm）に徐々に応力が増加した後、減少に転じた。スリーブ変位量はチップが注湯口終端を通過する間（140mm～320mm）に地側に約 0.2mm 変位した後、射出前の水準に戻った。

図 19 に前記 casting 後、射出後退動作によって注湯口近傍のスリーブ内面のアルミ付着が解消した状態で、注湯せずに射出動作を行った際の各種計測値を示す。射出開始直後は図 18 と同様の挙動であったが、チップ先端が注湯口終端に達するとプランジャーロッドは天側で引っ張り、地側で圧縮の応力が生じており、プランジャーロッドには下向きに曲げが発生していることが分かる。

以上より、スリーブが熱変形すると射出時に抵抗が生じてプランジャーロッドに下向きの曲げが発生する。スリーブ内面にアルミが付着すると、さらに抵抗が加わって圧縮応力が支配的となり、歪み量から算出した軸力と casting 圧力はよく一致していた。

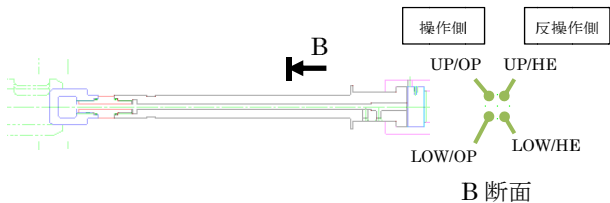


図 17. 歪み計測点

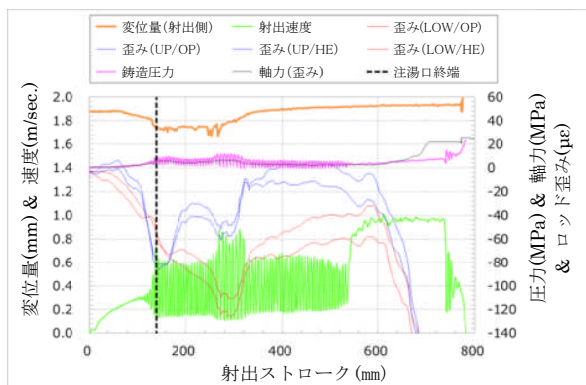


図 18. casting 時における射出中の各種計測値

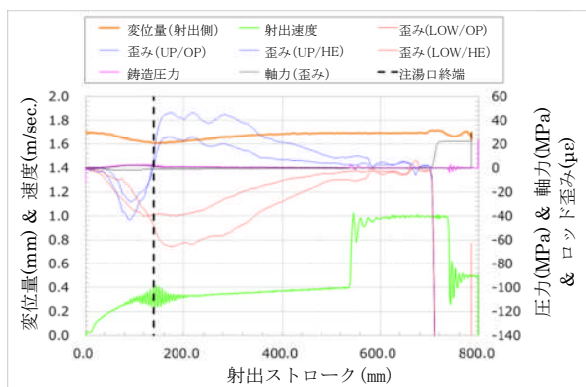


図 19. 空打ちにおける射出中の各種計測値

(2) casting 後のスリーブ内面とチップ表面の観察

実験後のスリーブ内面とチップ表面をそれぞれ図 20、図 21 に示す。スリーブは天側に傷が多く、注湯口の金型側の壁面に打痕状の傷があり、注湯口の両サイド、注湯口から金型側に 120mm ほどの範囲に擦れたような傷があった。さらに、注湯口下の反操作側に溶損と思われる

小さな孔状の傷が確認された。チップは全周で金型側に多少の傷が確認されたが、天側は傷が広範囲に及んでおり、エッジが磨耗していることが確認された。このことから、スリーブとチップは天側で強く接触していると考ええる。

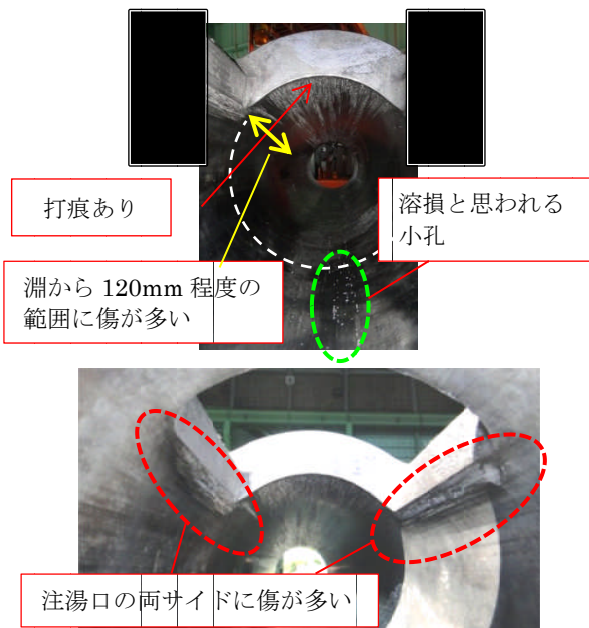


図 20. 実験後のスリーブ内面

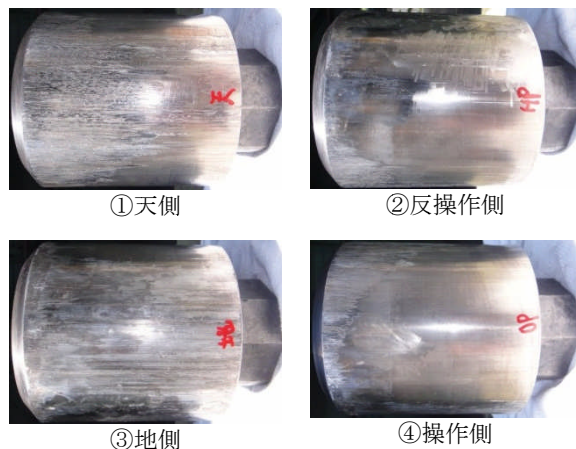


図 21. 実験後のチップ表面

(3) チップかじりの発生メカニズム

これまでの結果から、チップかじりの発生メカニズムを図 22 のように考察した。

- ① 冷間 : 射出芯が一致しているため、射出を前進してもスリーブとチップの寸法公差によってスリーブとチップは接触せず摺動抵抗は生じない。
- ② 熱間 1 : スリーブが天地の温度差によって天側へ反るように変形し、射出芯が一致しなくなる。チップは射出側でスリーブに支持されて金型側が浮いた状態で前進する。

- ③ 熱間 2 : 射出前進に伴いチップの傾斜も大きくなり、チップ天側と注湯口の両サイドが接触して摺動抵抗が増加する。さらに注湯口終端に衝突することもある。
- ④ 熱間 3 : 注湯口の終端部でチップがスリーブ内に押し込まれるため大きな摺動抵抗が発生して擦れたような傷が生じる。
- ⑤ 熱間 4 : スリーブ内面にアルミが付着すると、チップがアルミに乗り上げ、スリーブの変位量以上に射出芯の乖離が大きくなり、変形量以上に摺動抵抗が大きくなる。

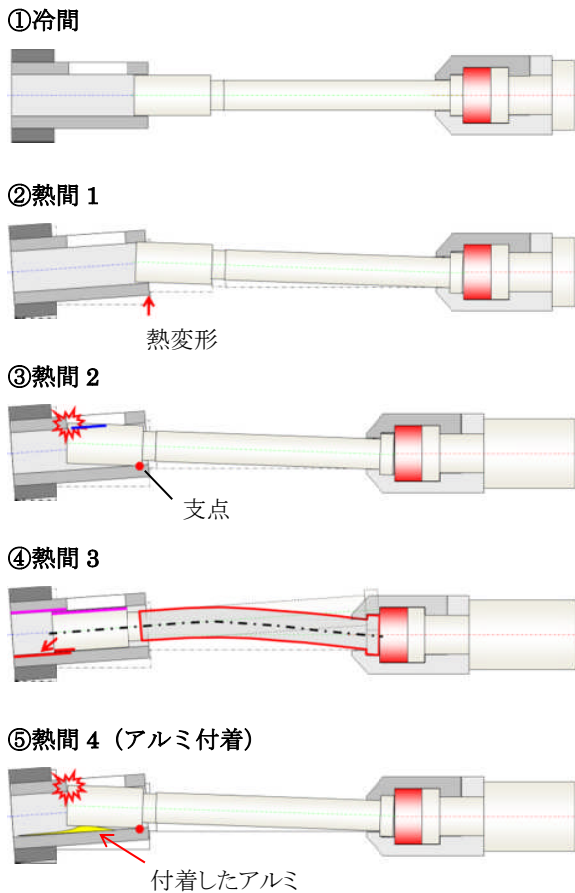


図 22. 発生メカニズムの考察

6. CAE によるチップかじり現象の再現

チップかじり現象を理論的に証明するために、得られた実験結果を基に CAE を活用してチップかじり現象の検討を行った。

6-1 解析方法

図 23 に解析フローを示す。第一段階として、3 次元 CAD で作成した鋳込み部品のモデルを、鋳造 CAE (ADSTEFAN) で FDM メッシュを用いて伝熱解析を実施し温度分布を求める。次に、この温度分布を構造解析 (I-DEAS) で作成した FEM メッシュに移行 (マッピング) した後、熱変形解析を行う。第二段階として、第一段階で得られた変形後の鋳込み部品をソリッド化する。

次に、その結果を機構解析により 3 次元 CAD 上で摺動させて、スリーブとチップの接触状況を確認し、さらにはプランジャーロッドに掛かる負荷等を把握する。

本報告では第一段階について述べる。解析物性値は、それぞれ ADSTEFAN、I-DEAS の標準データベースを使用した。また伝熱解析 (金型温度解析) に用いたサイクルタイムは実験条件と同様とし、熱伝達係数は当社のデータベース値を使用した。図 24 に構造解析に用いた拘束条件を示す。スリーブブッシュによる拘束の影響を評価するために、①拘束条件を与えない条件と、②両者が冷間で接触している部位を完全に拘束した条件の 2 種類を検討した。

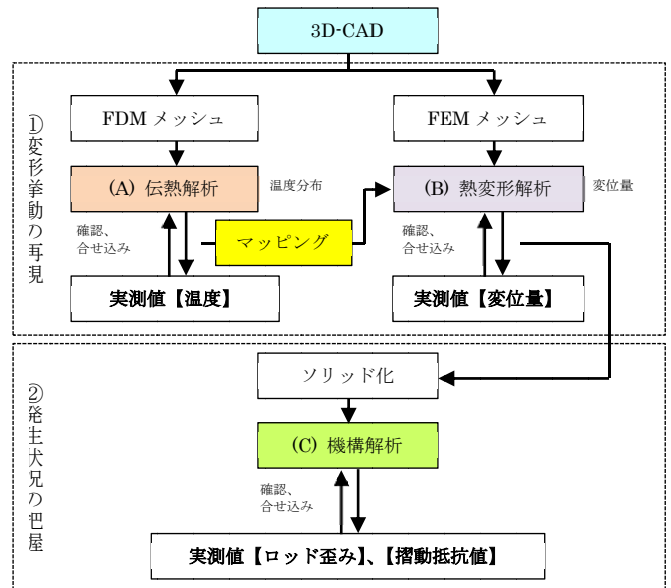


図 23. 解析フロー

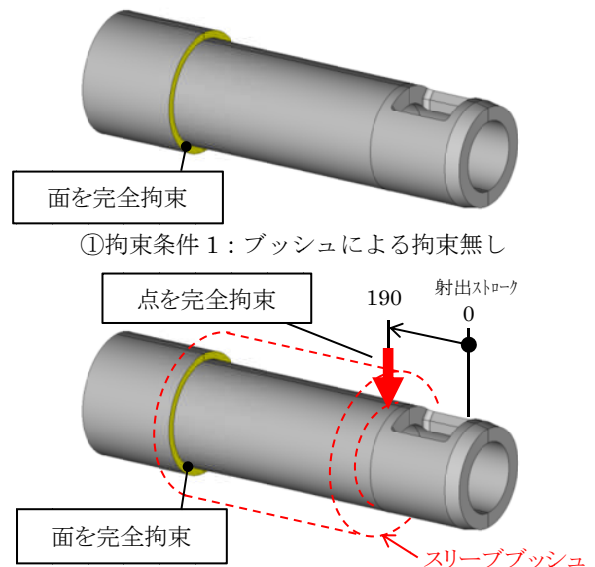


図 24. 拘束条件

6-2 解析結果

(1) 伝熱解析の整合確認

熱変形解析の基本となるスリーブの温度の整合確認を行った。図 25 に点 f の温度履歴の比較を示すが、ほぼ同等の結果が得られていることが分かる。

図 26 に 30 サイクルのスリーブ断面の温度比較を示す。解析では溶湯の落下を考慮していないため、落下位置の温度が多少異なるが、その他の点はほぼ一致した結果が得られており、解析条件及び解析手法の妥当性を確認できた。

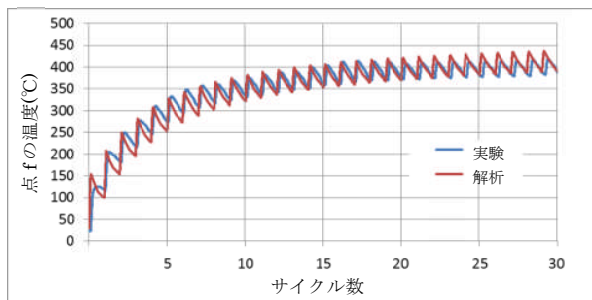


図 25. 温度履歴の比較

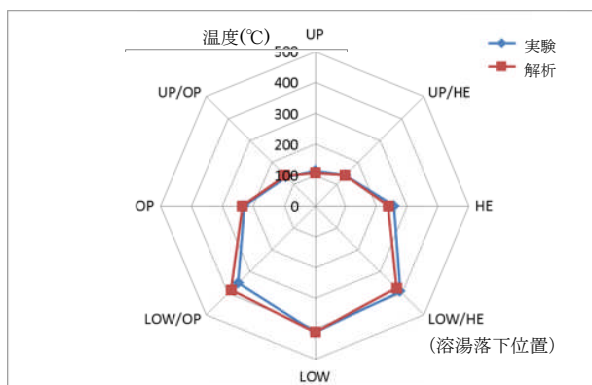
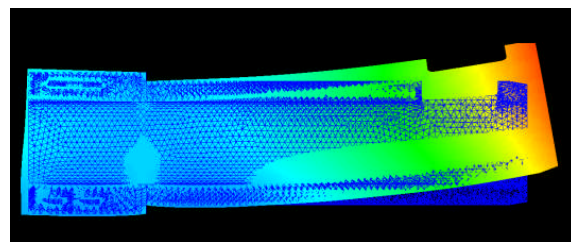


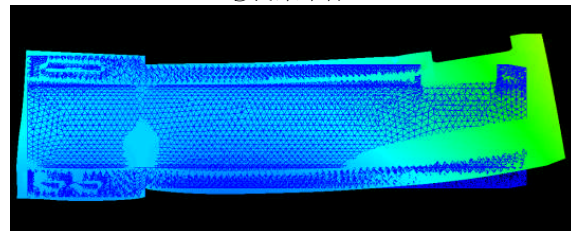
図 26. 温度分布 (30 サイクル)

(2) 熱変形解析の整合確認

図 27 に図 24 で示した拘束条件における熱変形解析の結果を示す。いずれの結果も変位量は異なるが、射出側に向かって膨張し、天地の温度差によって天側に反り、「バナナ変形」状態になっていることが確認された。また、図 28 に点 f~j の実測した変位量と解析値を比較した結果を示す。実測値は拘束条件 1、2 の結果の中間を示しており、スリーブブッシュによる拘束は考慮する必要はあるが、完全拘束では厳しすぎる事が分かる。これにより、スリーブブッシュはスリーブと接触し、さらに伝熱による温度変化で変形して拘束位置が変化していると推察する。



①拘束条件 1



②拘束条件 2

図 27. 熱変形解析結果

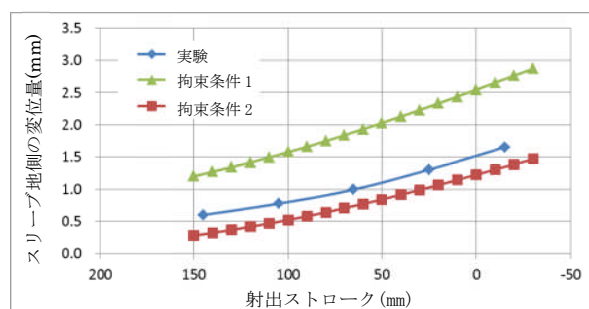


図 28. 変位量 (地側) の比較

7. まとめ

鑄造時の温度、変位量、摺動抵抗、アルミ付着状況を調査することで得られたチップかじり現象の発生メカニズムに関する知見は以下の通りである。

- (1) スリーブ天地方向の温度差によって、本報告では 1.8mm の熱変形、いわゆる「バナナ変形」が生じた。
- (2) アルミ付着が無くても熱変形による射出芯の不一致によって、スリーブとチップが接触して摺動抵抗が生じている。
- (3) 機械動作による変形は 0.1mm 程度であり、熱変形量に比して影響は小さい。
- (4) スリーブ内面にアルミが付着すると射出芯の乖離が大きくなって摺動抵抗が増大する。
- (5) スリーブ冷却は熱変形の抑制に有効な手段である。一方で破断チル層の発生など溶湯品質の悪化を招く要因となるため適用には注意が必要である。
- (6) 伝熱解析は当社データベース値を使用することで、実測値とほぼ一致した結果が得られるが、熱変形解析はスリーブブッシュとスリーブの接触状況を考慮した拘束条件の確立が必要である。