

高速主轴モータ用 低欠陥純アルミ導体ロータ

石川 寛* 古谷紀宗**
山根慎次郎**
玉腰知玄**

Low Defected Pure Aluminum Conductor Rotor for High Speed Spindle Motor

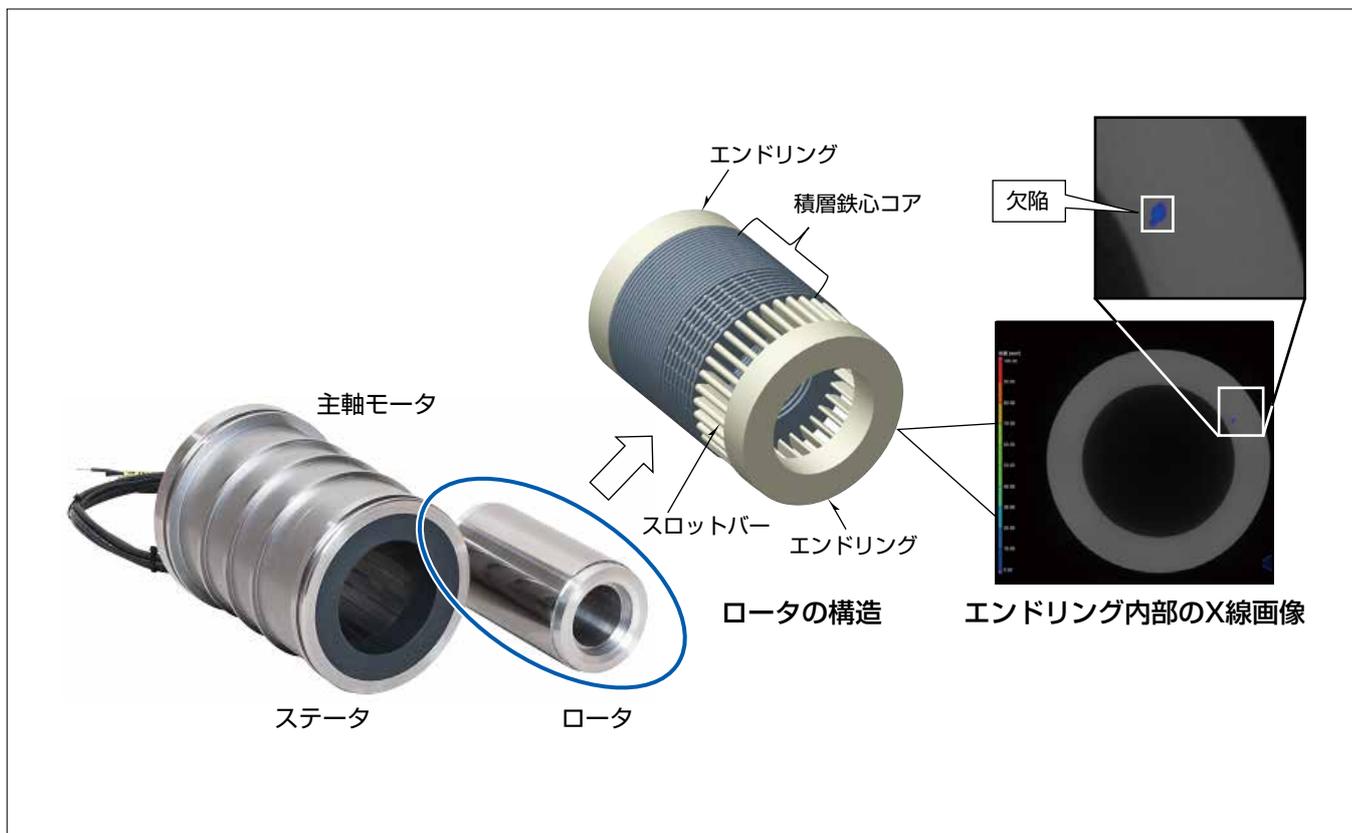
Hiroshi Ishikawa, Shinjiro Yamane, Tomoharu Tamakoshi, Norihiro Furutani

要 旨

工作機械にチャックされたドリルやフライスカッター等を回転させるためにコラムに内蔵されているモータ(以下“主轴モータ”という。)の籠形回転子(以下“ロータ”という。)は導体が純アルミで、ダイカスト鋳造法によって製造される。一般的にダイカスト鋳造部品は肉厚3mm以内が適正とされるが、ロータ両側端部のアルミ製短絡環(以下“エンドリング”という。)は10mm以上の肉厚であるために引け巣欠陥等の鋳造欠陥が発生しやすい。一方でモータが回転と停止を繰り返すと、ロータには遠心力による応力振幅によって、特にエンドリング内部の鋳造欠陥を起点として金属疲労による損傷が進展しやすい。近年、加工時間を短縮することが原価低減に有効であり、それに伴い高速回転仕様の工作機械の需要が世界的に高まってきているが、

高速回転仕様の主轴モータに適用するロータについては先に述べた理由からエンドリング内部の欠陥の大きさについて厳しく規定されている。

周速120m/s(2万rpm相当)の高速主轴モータに適用するロータの製造に当たり、上下方向に型締めを行って下方から上方にアルミ溶湯を射出する方式のスクイズキャストマシンと呼ばれるダイカストマシンを使用し、0.2m/s以下の低速(一般的に1.5m/s~4.0m/sの高速で充填する)で金型内にアルミ溶湯を充填させるとともに、凝固後にエンドリング端面部分を加圧することで、鋳造したロータ全数の欠陥寸法について規定値以下を達成し、低欠陥ロータを安定して連続鋳造することに成功した。



高速主轴モータ用ロータとその構造

工作機械の高速スピンドルモータに使用されるロータは、所定の高さだけ積層された円形電磁鋼板の両端部を純アルミ製エンドリングが挟み込み、両側エンドリングをスロットバーで締結した構造になっている。三菱電機ではロータをダイカスト鋳造法で製造している。一般にダイカスト鋳造法では適正肉厚は3mm以下とされ、厚肉では引け巣欠陥が発生しやすいとされるが、特殊な鋳造法で高速回転用の低欠陥ロータを実現した。

1. ま え が き

当社グループでは、工作機械にチャックされた、ドリルやフライスカッター等のツールを回転させるための主軸モータを工作機械メーカーに納品している。近年、加工時間を短縮することが原価低減に有効であることから高速回転仕様の主軸モータの需要が世界的に高まってきている。

本稿では、周速120m/s(2万rpm相当)の高速回転仕様の主軸モータの構成部品であるロータの製造技術開発について述べる。

2. 主軸モータ用ロータの製造方法と課題

2.1 主軸モータ用ロータの構成

図1にロータの構造を示す。ロータは軸方向に所定の厚みだけ積層された、円形に打ち抜いた電磁鋼板(以下“鉄心コア”という。)を軸方向両端部からアルミ製のエンドリングが挟み込んだ構造となっている。エンドリングは、鉄心コアの外周に円周方向に等間隔で打ち抜かれた穴を貫通するアルミ製のバー(以下“スロットバー”という。)によってつながっている。また、鉄心コア中央にも穴があいていて、穴にはツールを脱着する治具(ドローバー)等を内蔵する軸が焼き嵌(ば)めによって装着される。

2.2 主軸モータ用ロータの製造方法

当社では主軸モータ用のロータをダイカスト鋳造法によって製造している。一般には水平方向に型締めを行い、固定ダイプレート後方から水平方向に溶湯を射出する方式のダイカストマシンが広く普及しているが、ロータ鋳造では上下方向に型締めを行って下側の固定ダイプレート下方から上方に射出する方式のダイカストマシンを使用する。

図2にロータの鋳造工程を模式的に示す。固定ダイプレート上に金型を設置する。溶湯の通り道であるランナとゲート及びエンドリング形状がかたどられた下型の中心とスリーブ中心が一致するよう設置する。また、下型中央の

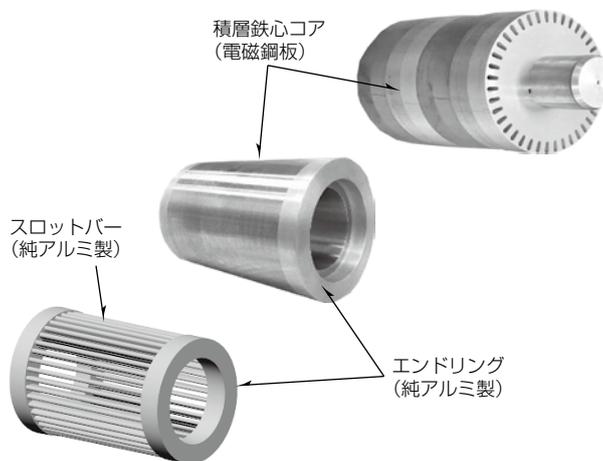


図1. 主軸モータ用ロータの構造

穴に仮軸と呼ばれる軸心棒を立てる。鉄心コアの中央の穴を仮軸に通すようにして下型の上方に所定の高さまで積層する。

このとき、各鉄心コアのスロットバー穴の位相が揃うようにする。コアバンドと呼ばれる円筒形状の金型を、鉄心コア外周部を覆うように設置する。そしてエンドリング形状とガス抜き溝がかたどられた上型をコアバンド上方に設置する。

金型設置後、可動ダイプレートが下方に下がって型締めされる。一方、マシン給湯装置でアルミ溶湯を射出部に注いだ後、固定ダイプレートとドッキングして溶湯を射出する。

アルミ溶湯は下型のランナからゲートを経てエンドリング部を充填し、次に鉄心コアのスロットバー穴を充填し、上型のエンドリング部を充填する。金型内の空気や気化した離型剤はガス抜き溝から排出される。金型内のアルミが凝固、冷却後にダイカストマシンから金型を取り出して、ゲートから下部を切断し、金型を分解してロータを取り出す。

2.3 高速主軸モータ用ロータ鋳造の課題

工作機械稼働時、ロータが回転すると、遠心力によって応力が発生する。このためモータが回転と停止を繰り返すと、ロータには金属疲労による損傷が発生する。金属疲労はロータの応力振幅が大きい部位や材料自体の強度が低い部位で顕著に発生し、応力集中係数の高い形状、例えば亀裂や不規則な形状の空洞等の鋳造欠陥を起点として損傷が進展しやすい。

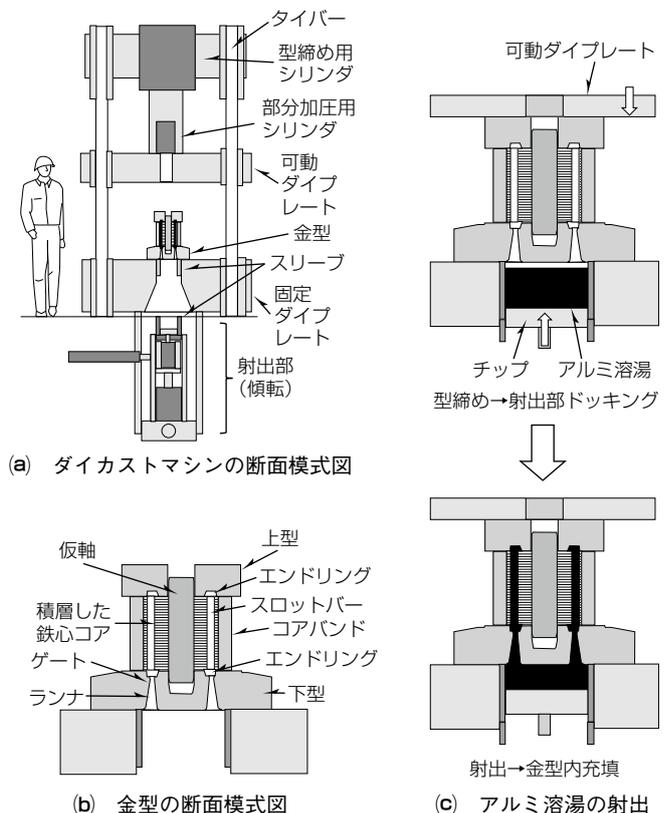


図2. ロータの鋳造工程概要

ロータの場合、導体が純アルミであり、一般的に使用されるアルミ合金材に比較して著しく引っ張り強さや疲労限度が低い。そして周囲を電磁鋼板に囲まれ、拘束されているスロットバー部に比較して、エンドリング部はスロットバーとつながっているところ以外は拘束されていないために応力振幅が大きい。したがってエンドリング部の気泡欠陥や引け巣欠陥はロータ疲労破壊の起点となりやすい。

ロータ鑄造では溶湯がゲート→エンドリング→スロットバー→エンドリングと広い場所と狭い場所を交互に通るために乱流による空気の巻き込みが多くなるのが懸念される。加えて一般的にダイカスト部品の肉厚は3mm以下とされるが、ロータのエンドリング部の肉厚は10mm以上あり、軸方向での中央付近はアルミ材の凝固収縮による不規則な形状の引け巣欠陥が発生しやすく、厚肉ゆえに引け巣欠陥サイズも大きくなる。鑄造欠陥が大きいほど、また応力振幅が大きいほど、金属疲労寿命は短くなる。したがって周速120m/s以上の高速回転仕様のモータに適用するロータの鑄造ではエンドリングの欠陥のサイズについて他機種より厳しく規定されており、欠陥発生を抑制する製造技術を開発する必要がある。

3. 高速主軸モータ用ロータの鑄造

3.1 鑄造欠陥抑制方法

一般的に鑄造欠陥を抑制する方法は次のとおりである。気泡欠陥については熔融アルミの金型への充填速度を低く抑えて乱流を抑制し、空気の巻き込み量を低減させる。引け巣欠陥は凝固収縮によって未凝固の液相の圧力が飽和蒸気圧以下まで低下して発生する。したがって抑制方法として未凝固の液相部位に持続的に溶湯を供給し、最終凝固部位を製品形状外に持っていく方法と未凝固の液相部位を加圧し圧力低下を防ぐ方法がある。前者は鋳物鑄造での押し湯やダイカスト鑄造でのオーバーフローが相当する。後者はダイカスト鑄造での部分加圧が相当する。部分加圧については、凝固後も発生した引け巣欠陥に荷重を付加して塑性変形で潰すという効果も期待される。

当社でのロータ鑄造の場合、先に述べたように上方に射出する方式のダイカストマシンを使用している。このダイカストマシンはスクイズキャストマシンとも呼ばれ、気泡欠陥抑制の点で水平方向に射出する方式より有利である。これは容器に入った液体を定速で上方に持ち上げても波立たないように、射出時、スリーブ内の溶湯はゲートに到達するまで波立たないためである。また水平方向に射出する方式のマシンと比較して径の大きなスリーブを使用できる。その効果として単位時間あたりの充填流量が多いため、低速でも短時間で充填が完了して巻き込む空気も少ない。またエンドリング下部に均等にゲートを配置でき、各スロットバーを均等な速度で充填できるといった特長もある。

しかしながら、充填速度が低いと充填途中で凝固して止まったり、局所的に未充填のまま凝固し、しわや亀裂のような外観形状となる湯廻り不良といった不具合が発生したりする。また充填速度が高いと、エンドリング内充填中に溶湯内への空気の巻き込みが多くなるだけでなく、各スロットバーが均等な速度で充填せず、充填の早いスロットバーからの溶湯流れでゲートと反対側のエンドリングが充填される。その結果充填が遅いスロットバー内の空気が閉じ込められて気泡欠陥となる可能性があるため、適正な充填速度についてCAE流動解析を用いて推測した。

さらに、ゲートと反対側のエンドリングの引け巣欠陥発生を抑制策として、ダイカストマシンの可動ダイプレート中央に搭載されている部分加圧用の大径シリンダを用いてエンドリング端面を加圧した。部分加圧についてはCAE凝固解析を用いて適正な開始時間を推測した。一方、ゲート側のエンドリングには金型及びマシンの構造上、部分加圧はできないが、保圧機構によってスリーブ内の溶湯からゲートを通じてエンドリング内の溶湯に圧力を伝達することで圧力低下を防ぎ、発生を抑制できる。ゲートが凝固する時点でのゲート側エンドリング内の未凝固部位をCAE凝固解析で推測するとともに、エンドリング凝固後にゲートが凝固するような適正なゲート方案を検討した。

3.2 CAE鑄造解析による適正鑄造条件推測

ロータのアルミの部分(ゲート、ランナ、スリーブの一部含む)の3Dモデルを作成した。鉄心コア部は省略して金型と同じ材質と定義した。溶湯の温度は670℃で、金型の温度は一律で150℃とした。溶湯の流速は①1.00m/s、②0.20m/s、③0.10m/s、④0.05m/sの4通りとし、モデル下面から流動させる。溶湯の流動が停止する固相率を50%に設定した。

図3は充填完了時(全体の98%まで充填した状態)の溶湯温度分布を示したコンター図である。黒い部分は未充填

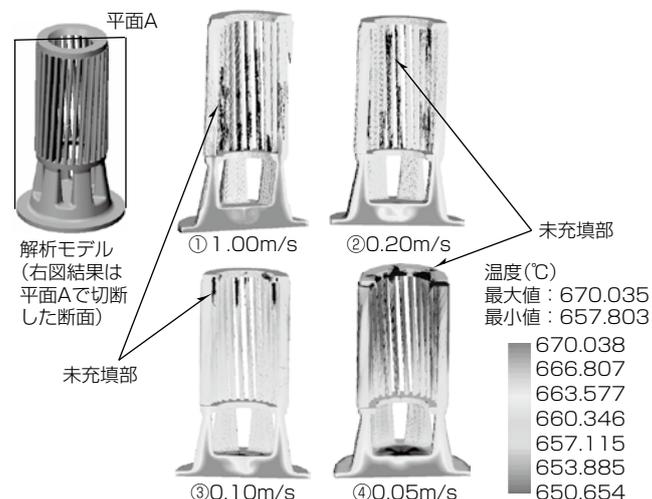


図3. 各充填速度での流動解析結果

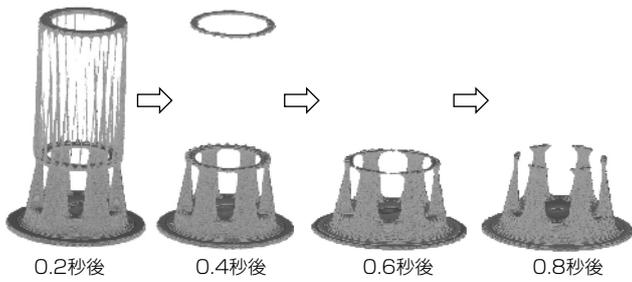


図4. 充填完了後からの固相率50%以下領域の推移

部位を示している。①1.00m/sと②0.20m/sとではエンドリング上部は充填されるが、各スロットバーが均等に充填されず、スロットバーに未充填部位が残り、この部位に空気が閉じ込められ気泡欠陥になると推測される。③0.10m/sでは各スロットバーが均等に充填されているが、スロットバー上部からエンドリングにかけて未充填部位が見られ、④0.05m/sでは未充填部位が広がる。以上から適正な充填速度は0.10~0.20m/sの間と推測されることから試作鑄造では0.10m/sと0.20m/sの2通りで充填して比較した。

次に凝固解析結果から、図4に固相率50%以下の領域の推移を示す。なお固相率50%以上の領域は空白で示されるように設定している。まず充填完了後0.2~0.4秒の間にスロットバーが凝固する。それ以降、ゲートと反対側のエンドリング内部に液相が残存して孤立することから、充填完了後0.2~0.4秒後が部分加圧開始タイミングと推測される。ゲート側については、エンドリング→ゲート→ランナの順に凝固し、ゲート凝固後の時点でゲート側のエンドリング内に液相は残存しないので、このランナゲート形状は適正であると推測される。試作鑄造では部分加圧開始を充填完了後0.3秒後と凝固が完了する1.0秒後に設定した。1.0秒後の部分加圧は3.1節で述べた、荷重を付加して塑性変形で引け巣欠陥を潰す効果を狙っている。

3.3 試作鑄造

試作鑄造では、まず各条件でN=3鑄造を行い、鑄造したロータのゲート側とゲートと反対側のエンドリングの軸方向の中心付近を端面に平行な方向に輪切りし、目視で欠陥の有無を確認した。欠陥のない良好な条件について連続で鑄造を行い、全数をX線で検査した。

輪切りしたエンドリングの切断面を鑄造条件ごとに表1に示す。どれもゲート側のエンドリング切断面に気泡欠陥や引け巣欠陥は見られなかった。ゲートと反対側のエンドリングは、部分加圧開始時間を充填完了後1.0秒後としたものについて引け巣欠陥が存在し、凝固後に塑性変形によって潰す引け巣欠陥の大きさに限界があることが判明した。部分加圧時はエンドリングの上面から荷重が負荷され

表1. 試作鑄造ロータのエンドリング切断面

充填速度	0.10m/s	0.20m/s	0.20m/s
部分加圧開始時間 (充填完了後)	0.3秒後	0.3秒後	1.0秒後
ゲート側			
ゲート反対側			

○ 鑄造欠陥

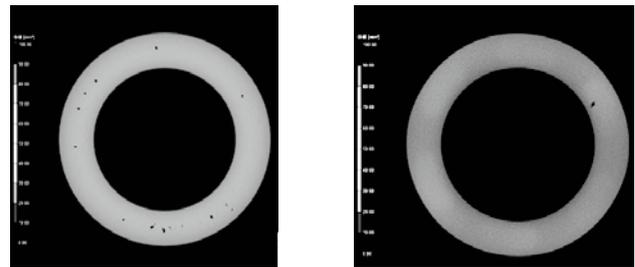


図5. 連続試作鑄造ロータのX線CT画像例

るが、側面は金型、底面は鉄心コアによって拘束されているために、塑性流動が起きにくかったと推測される。充填速度の違いによる鑄造品質の差は見られなかった。連続鑄造は充填速度を0.20m/sに、部分加圧開始時間を充填完了0.3秒後に固定して実施した。なお充填速度についてはN=3の試作鑄造品質に違いが見られなかったことから、比較的安定した速度で射出できる0.20m/sに設定した。N=15連続試作鑄造ロータのX線CT画像例を図5に示す。エンドリングの内部に見える黒い斑点が欠陥である。どのロータでも欠陥サイズについては目標とした高速主軸モータ適用規格内であった。なおスロットバー内部は無欠陥であることを確認している。

4. む す び

高速主軸モータ用としてエンドリング内の欠陥サイズが厳しく規定されているロータの製造に当たり、上下方向に型締めし、下方から上方に射出するスクイズキャストマシンを使用し、低速で溶湯を金型内に充填し、ゲートと反対側のエンドリングを部分加圧する方法で鑄造した。ゲート方案設計及び充填速度と部分加圧開始時間はCAE鑄造解析を用いて適正な案を推測した。その結果、低欠陥ロータを安定して連続で鑄造することを可能にした。