

銅合金金型材料

福田 貴

マテリオンブラッシュジャパン(株)

古くから身近にあり、現代社会でも欠かすことのできない銅、銅に様々な添加元素を加え合金化して、今まで不足していた硬さを補うことにより、銅合金の特性は飛躍的に向上する。その使用例と新合金の紹介を行う。

1. はじめに

銅合金は純度の高い状態では非常に良く、電気や熱を伝える。また添加元素を加え合金化し、純銅では不足していた硬さを補うことにより、その用途は格段に広がり、十円玉に代表されるように様々な銅合金が昔から身近な金属として社会生活で役に立っている。今回の素形材誌に掲載されるテーマ『銅合金金型材料』の説明の前に簡単に銅および銅合金の長所・短所を改めて知っていただきたい。

まず長所としては、

- ① 電気を良く通す。銀に次いで電気伝導度が高く、電気機器部品等に多く使われる。
- ② 熱を良く伝える。やはり銀に次いで熱伝導度が高く、金型や熱交換器等に多く使われる。
- ③ 抗菌・殺菌作用がある。O157への抗菌効果が実証されており、台所の三角コーナー等。
- ④ 耐食性に優れている。海底ケーブルのジョイントボックス等に指定されている。
- ⑤ 非磁性・防爆性である。安全工具やボイスコイルモーターの部品等。
- ⑥ 延性に優れている。薄くバネ性に優れ、極小型の電子部品に。
- ⑦ 合金化し易い。添加元素に因り大幅に強度や他の特性を上げることが可能。

また短所は、純銅の場合、構造体には使えない程柔らかい。また合金化することにより強度と引き換えに犠牲になってしまう特性がある。

本題の銅合金金型材料として材料を選択するには金型として必要な特性が何なのか？を踏まえ、一般的な鉄系で十分なのか？もう一步踏み込んだ視野で選択肢を広げるのかにより、更に生産性向上や不良率の低減に繋がる可能性を考慮し銅合金を選択することを考えていただきたい。

次に記載のベリリウム化合物をご存知だろうか？

『 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ 』『 BeAl_2O_4 』最初が3月の誕生石の『アクアマリン』と言う宝石で、ここに『Cr(クロム)』が入った場合は5月の誕生石の『エメラルド』になる。後の化合物は『アレキサンドライト』であり、発見時のエピソードからロシア皇帝アレキサンドル2世の名前に由来している。いずれも緑柱石(ベリル)『 $3\text{BeOAl}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ 』のグループに属したベリリウム化合物である。ベリリウム銅はこのアクアマリンやエメラルドに含有されているベリリウムを銅と混ぜ合わせ合金化している、つまり、宝石に成れなかった低品位のベリリウム化合物が工業用に利用されている。最初でも述べたが、純銅は電気や熱を非常に良く伝え、鍍金に対しても強い、しかし非常に柔らかい、銅にベリリウムを約2wt%加え合金化し、析出硬化させることにより、飛躍的に特性を向上させた合金がベリリウム銅合金である。

歴史的にも長く、認知度の高いプラスチック成形用ハイサイクル金型材に関しては『Moldmax-HH』と言うベリリウム銅材料が既にこの業界のス

タンダード材になっているが、銅・ニッケル・シリコン・クロムの新合金『Moldmax-V』は上記の『Moldmax-HH』に比べ非常に熱伝導性が良い。その分、硬さは劣るものの世界的に大ヒットしているハイブリット車のインマニの成形金型には硬さを補う手段として表面処理を施し、量産用に投入している。モールドマックスの説明は『Moldmax-V』も含め、次の『ハイサイクル成形用プラスチック金型、銅合金の位置付け』の中で述べる。

弊社は米国に本社を持つ高機能銅合金及びベリリウム銅合金の原材料メーカーではあるが、Moldmax-Vの例のように、ベリリウム銅よりもある部分の特性では更に上に行く高機能銅合金の開発も強く進めており、この特性を生かした新たな金型での実用例も後半で紹介したい。今後の金型に期待されている用途としてロールフォーミング金型、パイプ曲げ金型(マンドレル、ワイパー材)、深絞りプレス金型等があり、これらに銅合金を使うことは日本より海外の方が先行していると思われる。

2. ハイサイクル成形用プラスチック金型、銅合金の位置付け

ハイサイクル成形、今日1秒早くしても、明日もまた早くしなければならぬ永遠のテーマ。このハイサイクル成形を達成するには様々な方法がある。射出成形機の改善、プラスチック樹脂の選択、製品の薄肉化、複数ライン、冷却回路の改善、そして金型材を熱伝導性の悪いスチール系からモールドマックスへ変更。

プラスチックの成形サイクルは、①射出、②冷却、③型開、④取出し、⑤型閉の繰り返しである。この成形サイクルの時間はプラスチック製品の形状、板厚により大きく変化するが、①射出、③型開、④取出し、⑤型閉に比べ、②冷却の時間変化が最も大きい、つまりはプラスチック製品の大型化、肉厚化により極端に成形時間が長くなってしまふ主な要因は

②冷却の長時間化である。

各工程によりその時間的能力の主たる依存先が異なる。①射出→射出成形機、②冷却→金型材料を含む金型の冷却性能、③型開→射出成形機、④取出し→金型、周辺機器、⑤型閉→射出成形機。

長時間化の最大要因と考える②冷却は、金型材料を含む金型の冷却性能に多くを依存しており、如何に上手く冷すかが、ハイサイクルを達成するための技術力と言えよう。冷却媒体の流量を増やす等、単純に射出時の型温を下げれば、見かけのサイクルタイム短縮は可能であろう、ただしプラスチックの流動性低下に因るトラブルや結露の問題が浮上してくる。

ハイサイクルとは品質は維持・向上した上で、今日よりも1秒早く成形する技術力と考える。

3. モールドマックス / 高機能銅合金

現在、モールドマックスは5種類の銅合金が留意されており、硬さHRC40のMoldmax-HH、硬さと熱伝導性を上手くバランスさせたMoldmax-LH、ホットランナー等に多く使われる超熱伝導材(250W/(m・K))のProtherm(Moldmax-SC)、またアルミ合金A7075と同程度の切削性と放電加工性を持つ、銅・ニッケル・スズ合金のMoldmax-XL、更には銅・ニッケル・シリコン・クロムの新合金、Moldmax-Vがある。

ハイサイクル成形用金型材料に求められる最初の特性は熱伝導性能である。純銅の熱伝導率は400W/(m・K)であり非常に良い特性である、しかし非常に柔らかく、金型材としては適していない、アルミ合金の耐食性の低さも、使用できるプラスチックに制限を設けてしまう。量産を前提とした金型の場合、その材料には硬さ、靱性、引張強さ、耐食性等の特性が必要とされる。つまり、硬く、熱引けが良く、さび難い金属が量産を前提としたハイサイクル成形用金型材として適した金属である。Moldmax-HHは銅合金の中では一番硬く、NAK80などのP-21材と同等の硬さ、40HRCとそれらの金属よりも約3倍の熱伝導率で溶融したプラスチックの熱を奪い去る。熱伝導性の良い銅合金は多く有るが、モールドマックスは硬くて、熱伝導性の良い銅合金である。そして最近には富に使用例が増えている銅合金がMoldmax-Vである。硬さは25HRC程度であり、熱伝導率は160W/(m・K)である。過去において国内のハイサイクル用銅合金として非常に多く使われていた、20HRC前後の競合材に比べても更に硬く、更に熱伝導が良い。

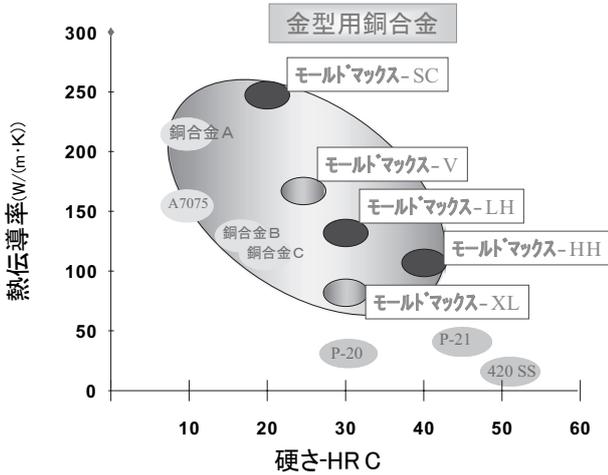


図1 プラスチック成形用金型材料

表1 モールドマックスの硬さと熱伝導率

材質名	硬さ	熱伝導率 (W/(m・K))
Moldmax-HH	40HRC	105
Moldmax-LH	30HRC	135
Protherm (Moldmax-SC)	20HRC	250
Moldmax-XL	30HRC	70
Moldmax-V	25HRC	160

4. 金型としての使用実績

ハイサイクル成形、それは『安く(=早く)』生産するための手段の一つであるが、一体どれ位の成果を見込めるのか？プラスチック製品の形状、肉厚、生産数、機器、他によりその条件は千差万別、この場で答えを出せないのは当然だが、考え方を以下に示す。

製造コストの比率の中では人件費の割合が非常に高い、日本の人件費は世界でもトップクラスに位置するのは間違いないが、以下の計算を容易にするため、日本の人件費とはかけ離れた『1円/1秒』で計算を行う。

数年前の例だが、仮に写真1のようなパソコン用マウスの成形品の場合、鋼材の金型で29秒、Moldmax-HHでは25秒、1ショットあたり4秒のセーブ。100万ショットの成形をした場合、4秒/ショット×100万ショット=400万秒(400万円)のセーブとなる。

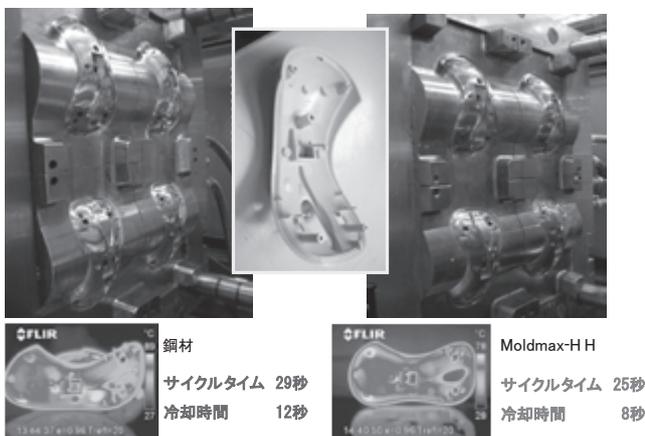


写真1 マウス(ABS樹脂)用金型の使用事例

熱をコントロールし、上手く冷やせる金型は品質の維持・向上に非常に重要であり『早く、安く、そして良い物を』のためにモールドマックスを使う例が増えている。写真2は薄型TV・ディスプレイの金型であるが、4つのコーナーは製品の強度を出すために通常は内部にリブを設ける。そうするとクーリングチャンネルを表面近くまで引けず、結局この4コーナーがサイクルタイムのボトルネックとなり、この部分を待つが故にサイクルタイムが長くなってしまう。同時に角のある成形品は辺が内側に引き込まれる傾向にある。この現象はコーナーの内側と外側の温度差による。この現象を非常に簡単な形状でコストセーブも含め検証した。

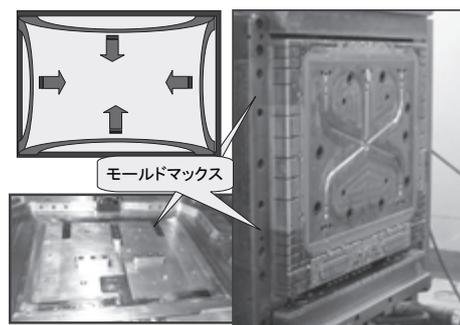


写真2 薄型TV等の箱物への適用事例

図2は非常に簡単な形状のプラスチックキャップである。この製品が変形する現象は『足が窄まる』と『天井が凹む』の二つに限定した。この金型をキャビ型はP-21材で統一し、コア型をP-21材とMoldmax-HHの2とおりとして各々変形量を測定したデータを図3に示す。まず足が窄む対策を探すために冷却時間と変形量をグラフ化した。コア材がMoldmax-HHでもP-21材でも冷却時間が短くなる

(歪、変形、応力低下、他)

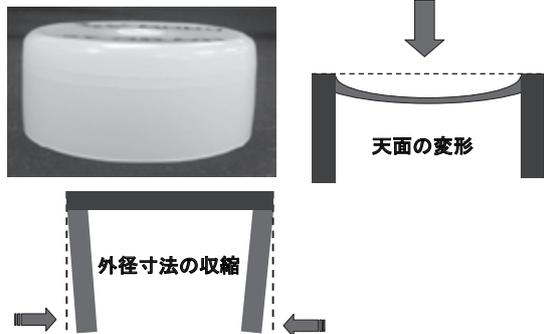


図2 キャップの収縮・変形形態

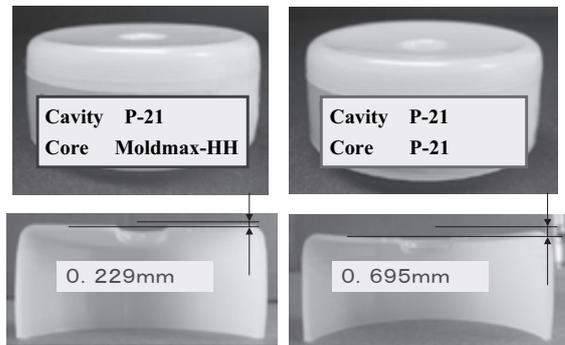


写真3 コア材を変更した場合の天面寸法の変化

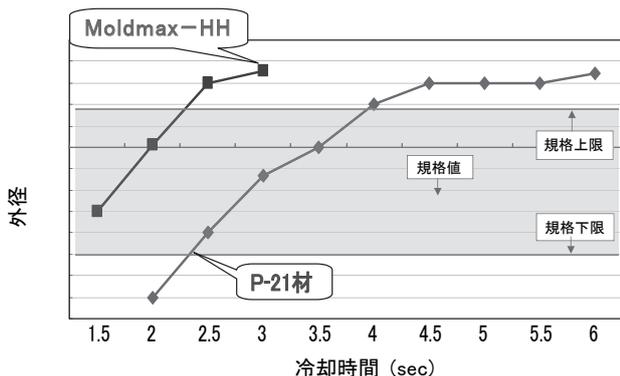


図3 Moldmax-HHとP-21の変形量比較

に連れ、寸法は下限を割ってしまう。規格値に乗せるにはコアがP-21材の場合で3.5秒の冷却時間が最良の形状だったのに対してコアがMoldmax-HHは2秒が最も良かった。Moldmax-HHをコア型に使用した場合、最良の形状を維持した上で1ショット当たり1.5秒のセーブとなる。この製品は5000万個/年を必要とし16個取りの金型で300万ショット行う必要がある。先の計算で言えばランニングコストのセーブは1.5秒/ショット×300万ショット=450万秒(450万円)となる。

図4は金型をP-21材とMoldmax-HHで組み合わせた際、『足の窄み』が最良の時の『天井の凹み』である。『天井の凹み』の変形量は明らかにキャビ・コアをP-21材にした時が大きい。各組み合わせでこの時の温度分布を、流動解析ソフトでは世界のスタ

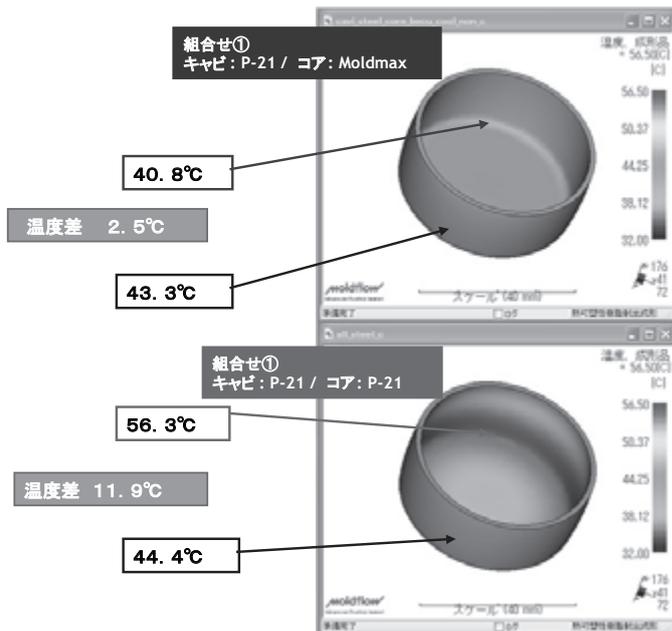


図4 キャビ・コアの温度差比較

ンダードとなっているオートデスク社のモールドフローで解析したところ、キャビに触れている製品の外側とコアに触れている内側の温度差がMoldmax-HHの場合は2.5°C、P-21材の場合は11.9°Cあり、この温度差が『天井の凹み』を発生させている、と推測できた。この温度差を減らす手段は冷却媒体の流量を増やしても可能と思えるが、流動性低下や結露等を考慮しなければならず、コア材をMoldmax-HHに変更することが、より確実な方法と言えよう。

5. 金型の作成に関して

① 切削

金型を作成する手段は時代と共に、そしてワークの材質により変化する。モールドマックスは全て銅合金であり、3種類のベリリウム銅と2種類の銅-ニッケル系の合金からなるが、銅合金の中で一番硬いMoldmax-HHは40HRC、今日の加工機、切削ツールでは問題はないが、以前は40HRCの銅合金を直

接切削するのは困難であり、その際に40HRCの銅合金を使い、金型を製作するには鋳造・電鋳による物が主流であった。但し現在は銅合金であっても40HRC程度では難削材の部類には入らず、必要サイズのブロックを手に入れた後、直接切削し金型を作成できる時代となってきている。

② 放電加工

モールドマックスが一般的な鋼材に比べて数倍以上も熱伝導性が良いにも係わらず、その比率で放電加工時間が伸びていないのは何故か？モールドマックスは熱伝導が良いことでハイサイクル金型として使われているが、この熱伝導が良いが故に放電加工性は犠牲になる部分がある。放電加工の効率はワークの熱伝導性（電気伝導性）だけでは無く、金属としての溶融温度も大きく係わっている。放電加工は電極から発せられたスパークがワーク表面の微小部分を溶かして削っていく、熱伝導性の良いワークはこのスパークのエネルギーが逃げてしまい、その加工性が落ちてしまう。但し溶融温度の低い金属はスパークのエネルギーで金属を溶かす（＝削る）部分が多くなり放電加工性は良くなる。つまり、モールドマックスは一般的な鋼材に比べ熱伝導性が数倍良いにも係わらず、放電加工性が極端に悪くないのは銅合金が鋼材に比べ溶融温度が低く、この分が放電加工性の低下を抑えている。アルミ合金の放電加工性が良いのは更に溶融温度が低いからである。また最近の加工機は最適な条件のデータベース化が進んでおり更に高効率の加工が可能となっている。

③ ドリル

ドリル加工においては『締まる』『折れる』等に注意が必要であり、且つその対策は昔ながらの方法しかない。モールドマックスの熱膨張係数は、一般的な鋼材の $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に対して、 $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と高く、温度上昇と共により多く膨張していく。ドリル加工の際に『締まる』『折れる』等のトラブルはこの熱膨張が原因である。ドリル加工時の発熱により膨張傾向となったワークに穴を開けても、ワークの温度低下と共にこの穴は収縮してドリルを締め上げていく。またアルミ合金は銅合金以上に熱膨張係数は大きい、ワークの硬さ、強度が極端に低く、ドリルのパワーに負けてしまい、現象としては現れ難くなってしまっている。この『締まる』『折れる』等の対策は如何にワークの発熱を抑えるかが重要となる。この発熱量を抑えるためにドリルメーカーは

各社、内部給油、オイルホール等の名称により先端から給油できる方式のドリルを供給しており、かなりの効果があると聞く、またドリル加工時のステッピングを増やすことにより、発熱を抑えると共にワークの温度が安定した後の状態でドリル径の仕上げとして行う場合も多い。

④ 表面処理

Moldmax-HH は銅合金の中で一番硬いとは言っても所詮は 40HRC である、プラスチック製品の強度、耐熱性を上げる手段としてガラス繊維の添加は一般的な手段であり、ガラス繊維が 30% も入っていれば、硬さ 40HRC 程度の銅合金では摩耗による金型寿命の低下は明らかである。この摩耗対策としてはメッキ、イオンコーティング、他の表面処理により表面硬度を上げてきた。各種メリット、デメリットがあり一概に何の表面処理が良いとは言いが、メッキの例では(株)旭プレジジョン殿のニウフォス II がハイブリッドのインマニ金型に施されており、相当数の成形をしているが、まだ再メッキの必要がないことからかなりの耐久性がある物と思われる。イオンコーティングにおいては二層コーティングにより、更なる耐久性の向上とメンテ時期の目安等、工夫を凝らした使い方が出てきた。

以上が現在使われている金型用銅合金を紹介したが、ベリリウム銅よりもある部分の特性を重要視して開発した合金があり、ここで紹介したい。

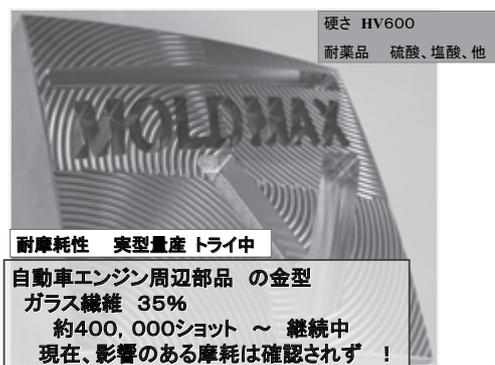


写真4 メッキ（ニウフォスII）適用事例

6. 開発合金

① Formamet フォーマメット

銅・アルミ・マンガン・コバルト合金で 39HRC もの硬さを発揮し、主な用途はシーム加工を行うロールフォーミング加工のロール材や深絞り用金型材等である。次に説明する C72900 と同様にエクィアキャスト (Equa Cast™) という特別な铸造方法

により、銅をベースとした場合、通常では偏析してしまうような高濃度の添加量も均一且つ微細組織を維持しながら高機能銅合金を製造することに成功した。このエクィアキャスト (Equa Cast™) の製法により耐摩耗性と高い耐力を両立させている。

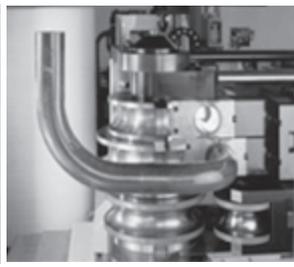
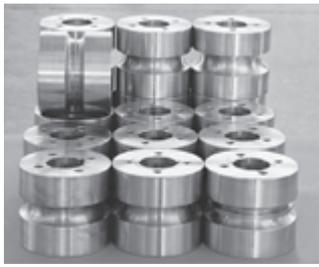


写真5 ロールフォーミングの使用例

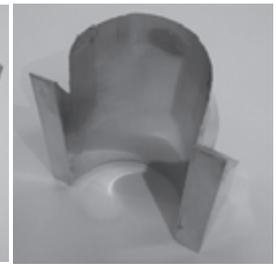
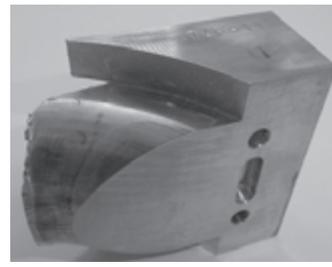


写真6 ワイパー材の使用例

② C72900

エキュアキャスト (Equa CastTM) 製法^(※1) で最初にビレットを製造した後、スピノーダル分解により非常に高バランスの銅合金に仕上がっている。

今回の素形材誌のテーマは『銅合金金型材料』であるので、別な機会に詳しく紹介したいが、C72900の硬く、低い摩擦係数と耐摩耗性に注目し、採用した市場が航空機業界と建設機業界で高信頼性を必要とする摺動部に実装している。この航空機に採用された理由は深絞りプレス型、パイプ曲げ (マンドレル・ワイパー材) に銅合金を選択する上で非常に参考となる。航空機の摺動部品が使われる環境温度は -50°C

以下で、摺動部に塗られた油の性能をあまり期待できない温度帯となり、この中で仮に鉄系同士が擦れあった場合、かじり・偏摩耗が起きてしまう。金属同士の摺動でもかじり・変摩耗を抑えられる鉄対銅の組み合わせが一般的ではあるが、通常の銅合金では応力に負けて変形してしまう。この対策として硬く、剛性がある銅合金が求められ、C72900をB社、A社、E社や日本のM社等が採用している。つまりワークを痛めず (かじり)、金型のライフ (偏摩耗) も維持できる特性と理解して頂きたい。

スピノーダル分解は核生成段階のない連続拡散過程で、同じ結晶構造を持つ二種類の化学的に異なる

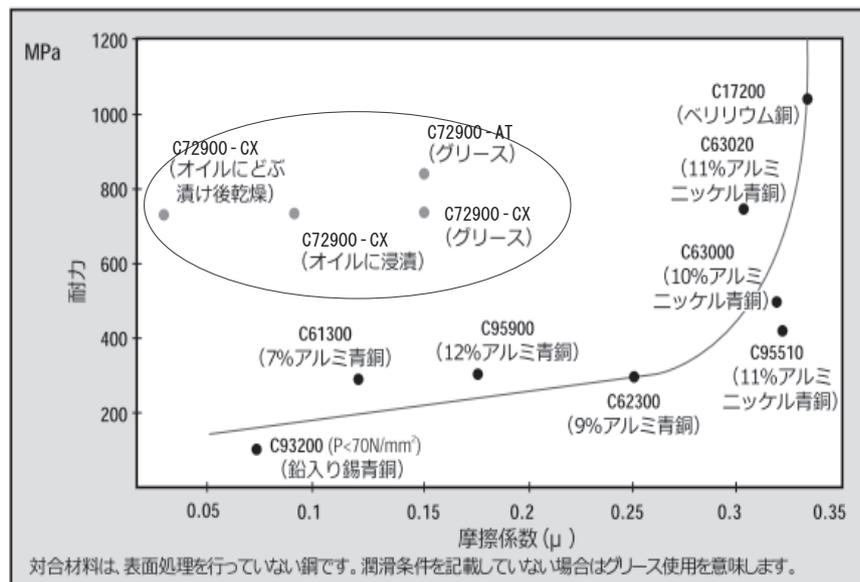


図5 各種材料の耐力・摩擦係数の位置付け

(※1) エキュアキャスト (Equa CastTM)

マテリオン ブラッシュが所有する特許で製造技術・設備に関係する内容である。エキュアキャスト (Equa CastTM) とは通常の溶解では偏析しやすい様な成分配合でも均質且つ微細粒子の状態での製造を可能とした技術である。このエキュアキャスト (Equa CastTM) で製造された合金は製造組織のまま使われる材料とその後に鍛造され、より強固な銅合金として市場で使われる材料とがある。何れも殆どの場合が (※2) で述べる、スピノーダル分解を施しており、この二つの重要な処理により高機能の銅合金が生まれたと言ってもよい。

(※2) スピノーダル分解

ほとんどの銅合金は、固溶体硬化、冷間加工、析出硬化、あるいはそれらの組み合わせによって強さを得ている。C72900などの銅・ニッケル・スズ系の3成分合金では、スピノーダル分解と呼ばれる熱処理によって機械的強さを発生させる。

表2 C72900の代表的な機械的特性値

材質別	形状	直径 (mm)	耐力 (MPa) 以上	引張り強さ (MPa) 以上	伸び (%) 以上	硬さ (HRC) 以上
CX105		-	724	758	4	28
AT90	丸棒	<102	621	758	15	260HBS
	丸棒	≥ 102	621	758	12	260HBS
AT110	丸棒	<102	758	862	10	30
	丸棒	≥ 102	758	862	6	30
	管	-	760	880	5	30
	板	-	758	861	6	30
TS160U	丸棒	10~19	1035	1138	7	36
	丸棒	19~41	1035	1138	5	34
	丸棒	41~82	1035	1105	3	34
	管	-	1034	1103	3	34

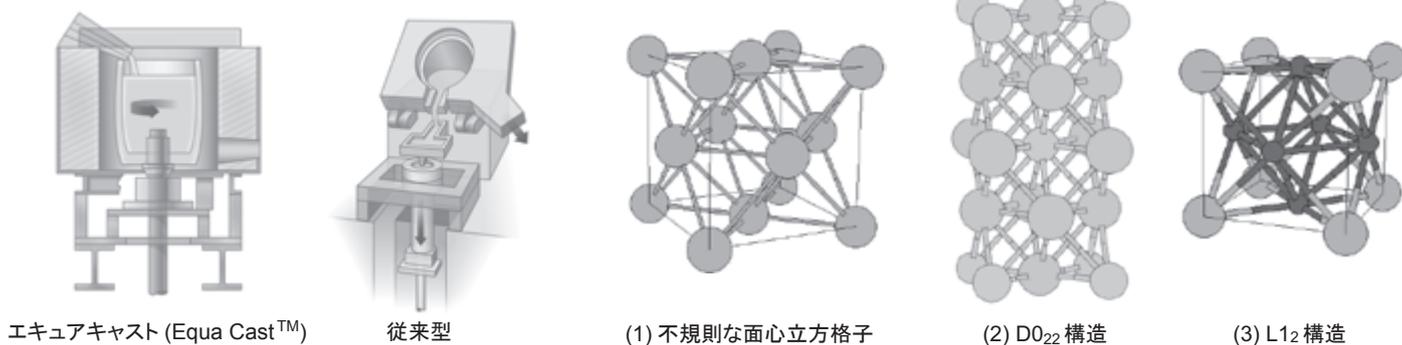


図6 エキュアキャストと従来型の比較

図7 スピノーダル合金の時効硬化過程

相が形成される。スピノーダル硬化型合金における二つの相構造は、目に見えないほど緻密で、結晶粒全体を覆い粒界に達している。このスピノーダル分解で生成された銅・ニッケル・スズ合金の強さは、銅格子内に均一に分散したスズに富む相が作り出す干渉性歪に起因し、耐力は基金属の値の3倍に増大する。スピノーダル分解で硬化作用を起こすには、一定の条件が必要である。固体相におけるスピノーダル機構の相系統図に、単相合金が二相に分れる領域である混和性間隙が必要であり、合金成分は相互拡散ができるように、熱処理温度において母格子内で十分な流動性を有していなければならない。

スピノーダル分解で強化された合金は、特有の微細構造をもっている。この緻密な構造は光学顕微鏡の解像領域を超えており、電子顕微鏡でなければ見ることができない、あるいは、X線回折像における基本ブラッグ反射周辺の付随反射によって、銅・ニッケル・スズ、あるいは他の合金で発生したスピノーダル分解の存在を確認することも可能である。

熱処理の初期段階でスピノーダル分解によって形成されたスズに富む粒子が、最大時効条件で序列化されたD0₂₂構造を作り出す。過剰時効すると、不連続粒界反応が起こり、α相とγ相が交互に現れる混合相がスピノーダル硬化粒子を破壊して軟ら

かい構造を残す。

簡単な表現をすれば、銅・ニッケルの結構格子にニッケル・スズの結晶格子が重なり合って全体を構成しているイメージである。銅・ニッケル格子は硬く、全体の合金としての応力を受け止め、ニッケル・スズ格子は滑りやすく、全体の合金としてのすべり性、耐摩耗性等の特性を発揮している。この二つの組み合わせに因り耐摩耗性と高い硬さ、且つ低い摩擦係数を維持している。

最後に、この資料を作成するにあたり、様々な技術協力を頂いた関係各位、プラ型材モールドマックスの安定供給にご尽力を頂き日本国内の販売をお願いしているウッデホルム(株)殿各位、韓国のYDP殿各位、技術アドバイスをいただいたDr. Yoshi 岡本、SDr. K村上、TG八木、他各位に深く感謝すると共にこの場でお礼申し上げます。

マテリオン ブラッシュ ジャパン 株式会社
 〒101-0051 東京都千代田区神田神保町3-9
 第一丸三ビル
 TEL. 03-3230-2961 FAX. 03-3230-2908
 E-Mail : takashi.fukuda@materion.com