

高 Zn 低 Bi 系鉛フリー青銅合金： クリカブロンズ LN (CAC905) の開発

Development of KURIKA BRONZE LN ; High-Zn Low-Bi Lead-Free Copper Alloy

山田浩士* 山本匡昭** 松葉昌平*** 宮本武明*

Hiroshi Yamada Masaaki Yamamoto Shohei Matsuba Takeaki Miyamoto

鉛の水質基準が 2003 年に厚生労働省令により強化されて、10 年以上経過した。現在、水道部材は、ビスマス青銅系を代表とする様々な鉛フリー青銅合金が採用されている。しかしながら、これらの鉛フリー銅合金は、CAC804 で一部発生している耐食性の問題や、これまで水道部材に使用されていた鉛を含有する CAC406 と比べた際の価格差やモノづくりにおける安定性において課題が未だ残っている。当社は CAC406 相当の機械的性質、耐食性、モノづくり特性を有する安価な鉛フリー青銅合金「クリカブロンズ LN」の開発に成功した。特性の詳細を以下に報告する。

More than 10 years have passed since the Drinking Water Quality Standards regarding lead were strengthened by the Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan in 2003. Recently, various lead-free bronze alloys, exemplified by bismuth-bronze, have been adopted as materials for parts for water piping. However, as for the lead-free copper alloys that have been developed up to now, the poor resistance to corrosion, of CAC804 in particular, along with their high prices and the issues in their manufacturing properties compared with CAC406, which contains lead and is used for parts for water piping, still remain. A new kind of lead-free bronze alloy called KURIKA Bronze LN has been developed which has reasonable costs, mechanical properties, corrosion resistance, and manufacturing properties comparable with those of CAC406. The details of the properties of KURIKA Bronze LN are reported as follows.

1 はじめに

近年、世界的に水質に対する有害物質の規制が進められている。2012 年 7 月に米国の水道施設関連規格である NSF/ANSI61 により水道水中への鉛の許容溶出量の規制値が 0.015mg/L から 0.005mg/L に厳格化され、2014 年 1 月からは米国法律 3874 号において「接液部に関して製品重量ベースでの鉛の含有量は 0.25% 未満」と規制が強化された¹⁾。

一方、日本では 2003 年 4 月に施行された厚生労働省令により鉛の水質基準が強化されてから 10 年以上が経過した。給水用具各種部品、水道用資機材などには、従来は鉛を 4～6 mass% 含有する CAC406 が使用されてきたが、現在ではその代替としてビスマス青銅系を代表とする多くの鉛フリー青銅合金が採用されている^{2), 3)}。しかしながら、鉛フリー化による湯流れ性や切削加工性などのモノづくりにおける安定性、主にシルジンを発生している耐食性の問題、さらには、CAC406 と鉛フリー青銅合金の価格差などの課題が鉛フリー銅合金の採用における障壁になっている。また、ニッケルについても新たに規制が強化されることとなり、2014 年 4 月より水質管理目標設定項目の「評価値 (暫定値)」が見直しにより、暫定値の扱いを取りやめ 0.02mg/L の「評価値」に改正された。この「評価値」は、水質検査による遵守を徹底する必要のある「水質基準」に分類するか検討すべき項目に該当している⁴⁾。

そこで当社は上記課題を克服する新規鉛フリー青銅合金の開発に着手した。開発を進めるにあたっては、CAC904 (クリカブロンズ) を開発した時の JIS 化や水道用資機材の採用活動を通じて、お客様へのニーズヒアリングを行い、第一に安全・安心な水道部材を提供すること、第二に水道部材に適用する鉛フリー青銅合金の課題を解決し、お客様のニーズに応えることを目標とした。その結果、高 Zn 低 Bi 系鉛フリー青銅合金「クリカブロンズ LN」の開発に成功し⁵⁾、2016 年 3 月に JIS H5120 CAC905 として JIS に登録した^{6) ~ 9)}。本報告では「クリカブロンズ LN」(以下クリカ LN とする) の特徴について以下に紹介する。

2 クリカブロンズ LN について

2.1 主な特徴

- (1) 化学成分は、Pb フリーを必須条件とし、将来的に規制強化が予測される元素 (Ni, Bi) は極力低減した合金系である。
- (2) 機械的性質、耐食性は、CAC406 と比較して同程度である。
- (3) モノづくり面では、CAC406 と比較して湯流れ性が良好であり、切削性は同程度である。
- (4) 原材料価格については、安価な Zn の含有量を多くし、高価な Sn, Bi の含有量を少なくすることで、代表的なビスマス系鉛フリー青銅合金である CAC902

と比較して、より安価な合金系としている。

- (5) 既存の青銅合金と比べ低融点の合金系とすることで、溶解時間の短縮による省エネ効果やリードタイム短縮が期待できる。

2.2 化学成分

クリカ LN の JIS 化された化学成分範囲および代表成分を表 1 に示す。成分は、Zn を 12 ~ 17 mass% (以下、成分の単位は mass% を % と示す。) 含有し、Sn を 1.5 ~ 3.0%、Bi を 0.4 ~ 0.9%、脱酸の目的で添加する P を 0.05% 以下、残部が Cu で構成されている。さらに、各物性のバランスを取るため、Zn + Sn 量を 19% 以下に制限している。また、ニッケル水質規制を考慮し、残余成分の Ni を 0.5% 未満に制限している。

表 1 クリカ LN の CAC905 として JIS 化した化学成分範囲および代表成分

Type	主要成分					残余成分	
	Cu	Zn*	Sn*	Bi	P	Pb	Ni
鋳物用 銅合金地金 JIS H 2202 : CAC905In*	80.1~ 85.1	12.0~ 17.0	1.5~ 3.0	0.4~ 0.9	≤0.02	≤0.1	≤0.5
銅および 銅合金鋳物 JIS H 5120 : CAC905	80.1~ 85.1	12.0~ 17.0	1.5~ 3.0	0.4~ 0.9	≤0.05	≤0.25	≤0.5
銅合金連続 鋳造鋳物 JIS H 5121 : CAC905C	80.1~ 85.1	12.0~ 17.0	1.5~ 3.0	0.4~ 0.9	≤0.5	≤0.25	≤0.5
CAC905 代表成分	Bal.	15.0	2.3	0.6	0.02	≤0.25	≤0.5

* Zn+Sn<19.0%

3 実験方法

本報告で実施した試験を表 2 に示す。

表 2 実施した試験内容

	試験内容	方法	目的
1	金属組織観察	金属顕微鏡 SEM/EDS	金属組織確認
2	機械的性質	引張試験 (JIS Z2241)	機械的性質確認
3	耐脱亜鉛腐食性	脱亜鉛腐食試験 (ISO 6509)	静置浸漬時の耐食性確認
4	耐エロージョン- コロージョン性	隙間噴流法試験	流水環境下での耐食性確認
5	湯流れ性	渦巻き鋳型 湯流れ試験	鋳造時の湯流れ性確認
6	切削性 (旋削性)	外径切削試験	外径切削加工時の切削抵抗確認
7	切削性 (穿孔性)	穿孔試験	穿孔加工時の切削抵抗確認

3.1 試験片採取位置

図 1 に JIS H5120 A 号供試材¹⁰⁾ と試験片採取位置を示す。A 号供試材より、金属組織観察試験片として図 1 の 1. に示す引張試験片チャック部近傍から切断したものを金属組織観察に、図 1 の 2. から採取したものを引

張試験に、図 1 の 3. 4. から採取したものを脱亜鉛腐食試験およびエロージョン-コロージョン試験に用いた。

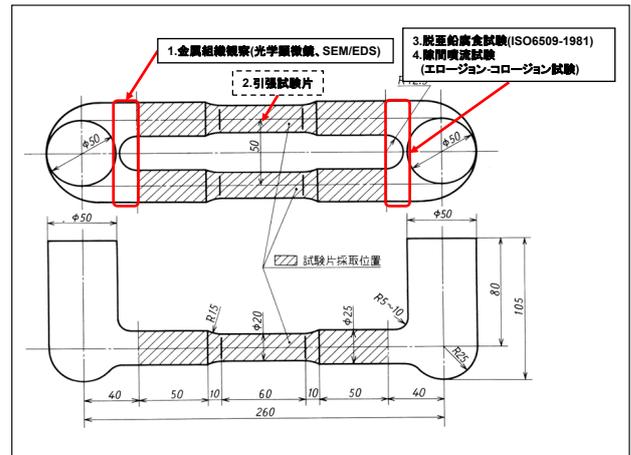


図 1 JIS H5120 A 号供試材と試験片採取位置

3.2 金属組織観察

金属組織観察は試験片を鏡面研磨後、光学顕微鏡観察および SEM-EDS 分析を実施した。

3.3 機械的性質

採取した試験片を 4 号引張試験片に加工した後に JIS Z2241 に準じて引張試験を行い、引張強さおよび伸びを測定した。

3.4 耐脱亜鉛腐食性

脱亜鉛腐食性評価は ISO 6509-1981 に準じて試験を実施した。一般に耐脱亜鉛腐食性は Zn 量が多く Sn 量が少ないほど低下する傾向を示すことから、本試験では、表 3 に示すクリカ LN の①代表成分と、代表成分をベースとして耐脱亜鉛腐食性が不利となる 3 種類の成分②~④で調査を行った。

表 3 脱亜鉛腐食試験に用いた試験片の化学成分

成分 No.	化学組成 (mass%)				
	Zn	Sn	Bi	P	Cu
①代表	15.6	2.5	0.5	0.013	Bal.
②高 Zn 系	18.7	2.4	0.5	0.014	Bal.
③低 Sn 系	16	1	0.5	0.019	Bal.
④高 Zn 低 Sn 系	19.1	1.7	0.5	0.014	Bal.

3.5 耐エロージョン-コロージョン性

エロージョン-コロージョン (流れ誘起局部腐食) は、流れによるせん断力あるいは乱れの作用によって酸化皮膜が破壊されて発生する侵食現象である。材料の耐脱亜鉛腐食性が十分であってもバルブなど実際に水流が生じる環境下では十分な耐食性が発揮されないとの報告もあり、松村らは流れの生じる環境下での侵食がエロージョン-コロージョンに起因するものであることを明らかにした^{11), 12)}。また、エロージョン-コロージョンの加速試

験法として塩化銅(Ⅱ)水溶液を用いた隙間噴流法試験が適していることを報告している¹³⁾。このように耐エロージョン-コロージョン性評価は、バルブなどに新材料を適用する際、耐食性を評価する重要な評価手法の一つである。

図2に隙間噴流法試験の概略図を示す。本装置はノズルと試料の位置を平行に保ち、均一な隙間を条件に応じて設定することで溶液の流速を変化させることができ、流れが生じるさまざまな環境を模擬した条件での試験および評価ができる¹⁴⁾。エロージョン-コロージョンが発生すると試験片中心部に図2に示すような二重の腐食環が観察される。

本試験では、隙間噴流試験装置を用いて表4に示すクリカ LN の⑤代表成分と、代表成分をベースとして耐エロージョン-コロージョン性が不利となる3種類の成分⑥～⑧で調査を行った。表5に試験条件を示す。また、CAC203、CAC406、CAC804 および CAC904 の試験結果と比較評価を行った。なお、本試験は2016年のJIS H5120「銅および銅合金鋳物」の規格改正時の評価試験の一つとして実施されている^{6)、10)}。

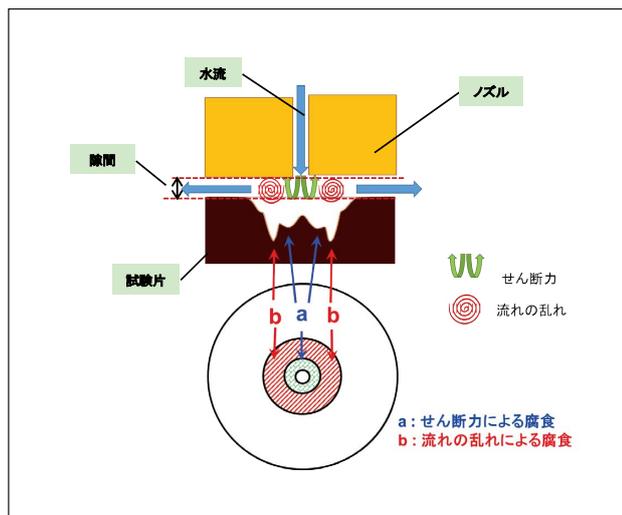


図2 隙間噴流法試験の概略図

表4 隙間噴流法試験に用いた試験片の化学成分

成分 No.	化学組成 (mass%)				
	Zn	Sn	Bi	P	Cu
⑤代表	15.6	2.5	0.5	0.013	Bal.
⑥低 Zn 系	12.2	2.4	0.5	0.015	Bal.
⑦高 Zn 系	18.7	2.4	0.5	0.014	Bal.
⑧低 Sn 系	15.4	1.6	0.5	0.015	Bal.

表5 隙間噴流法試験条件

条件項目	条件値
試験片形状	φ 16 mm × 12 mm
使用溶液	1% 塩化銅水溶液 (40℃)
流量	0.4 L/min (ノズル内径 φ 1.6 mm)
試験時間	5 時間
隙間	0.4 mm

3.6 湯流れ性評価

湯流れ性評価は、クリカ LN と CAC406 の代表成分を渦巻き試験片に鋳造した際の流動長によって評価した。各供試材の液相線温度から約 50℃～200℃ 高くなるよう、鋳込温度を 1,050℃～1,200℃ の範囲でそれぞれ 3 水準に変化させ渦巻き試験片に鋳造後、流動長を測定して比較評価を行った。なお、熱分析により求めたクリカ LN の液相線温度は約 1,004℃、CAC406 の液相線温度は約 1,016℃ である。

3.7 切削性評価 1 (旋削性)

供試材として、CAC406 およびクリカ LN の Bi 含有量を 0～1.6% まで 7 水準に変化させた φ 50 丸棒を用いた。図3に旋削加工の概略図を、表6にその際の条件を示す。旋削性評価として、外径切削時に発生する主分力、送分力、背分力の切削抵抗をキスラー切削動力計により測定し、図3の式(1)より各供試材の3合力を求めた。比較評価として CAC406 の 3 合力を 100 とした場合のクリカ LN の被削性係数を図3の式(2)により算出し、被削性係数に及ぼす Bi 含有量の影響について調査を行った。また、旋削加工後の切粉形状の比較も実施した。

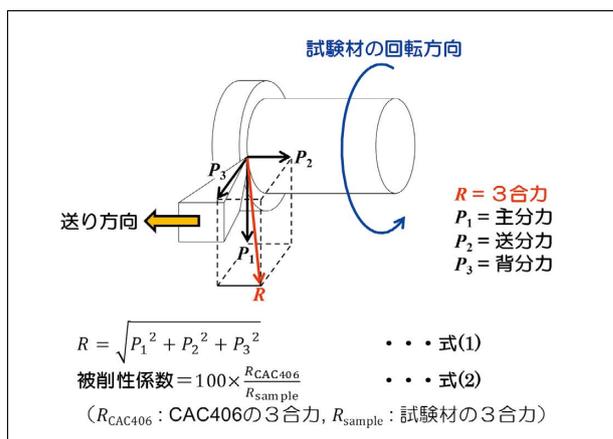


図3 旋削加工試験の概略図

表6 旋削試験条件

条件項目	条件値
試験片形状	φ 50 mm × 90 mm
使用工具	超硬工具
切削速度	400 m/min
切込量	1.0 mm
送り量	0.1 mm/rev
切削長	60 mm

3.8 切削性評価 2 (穿孔性)

供試材として、CAC406 およびクリカ LN の Bi 含有量を 0～1.6% まで 7 水準に変化させた φ 46 × 30mm の丸棒を用いた。図4に穿孔試験の状況を、表7に穿孔試験条件を示す。穿孔加工を外径部より 20mm の位置で各供試材 2 点ずつ実施し、穿孔性評価としてスラスト抵抗およびトルク抵抗をキスラー切削動力計により測定

し、CAC406 と比較評価を行った。また、穿孔加工後の切粉の比較も実施した。

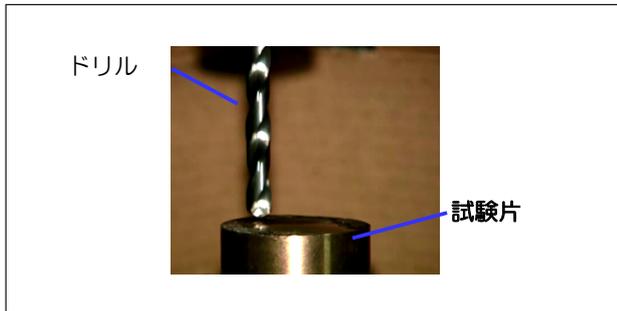


図4 穿孔試験の状況

表7 穿孔試験条件

条件項目	条件値
試験片形状	φ 46 mm × 30 mm
使用ドリル	超硬ドリル
ドリル形状	φ 8 mm-118°
回転数	1500 min ⁻¹
穿孔深さ	20 mm
送り量	0.1 mm/rev

4 試験結果と考察

4.1 金属組織観察

クリカ LN の代表成分の光学顕微鏡金属組織写真を図5に示す。この図においてCuのα固溶体と考えられる基地組織中にδ相と考えられるSnの濃化相およびBiが分散している組織が観察された。続いてクリカ LN の代表成分およびクリカ LN にZnとSnを添加した比較材のSEM-EDS分析した結果を図6、図7にそれぞれ示す。図6の代表成分では微小なδ相と推察されるSnの濃化相がわずかに分散した組織になっているのに対し、図7の高Zn高Sn系成分では粗大なSnの濃化相の周囲にBiが生成している。これは、Znの含有量が多くなるとSnの固溶度が減少し、Snの濃化相が生成しやすくなるからと推察される。

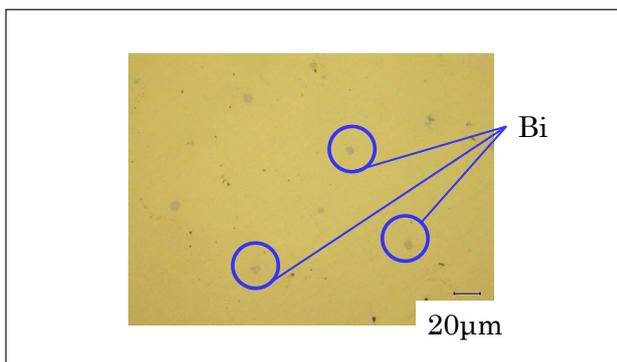


図5 代表成分の光学顕微鏡金属組織写真

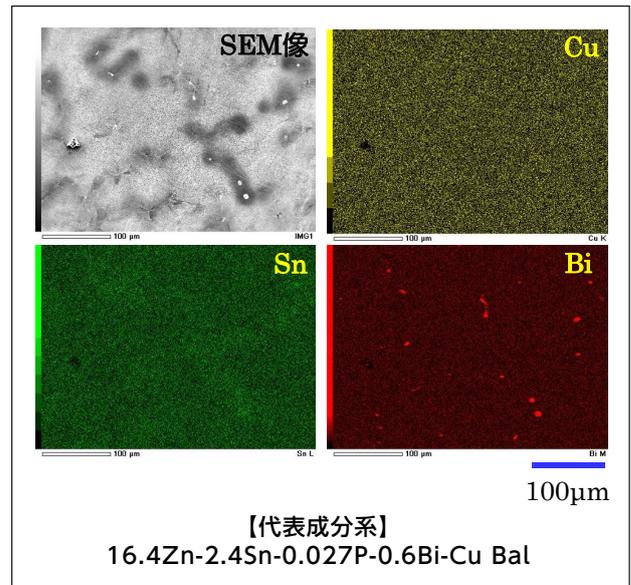


図6 クリカLNの代表成分のSEM-EDS分析結果

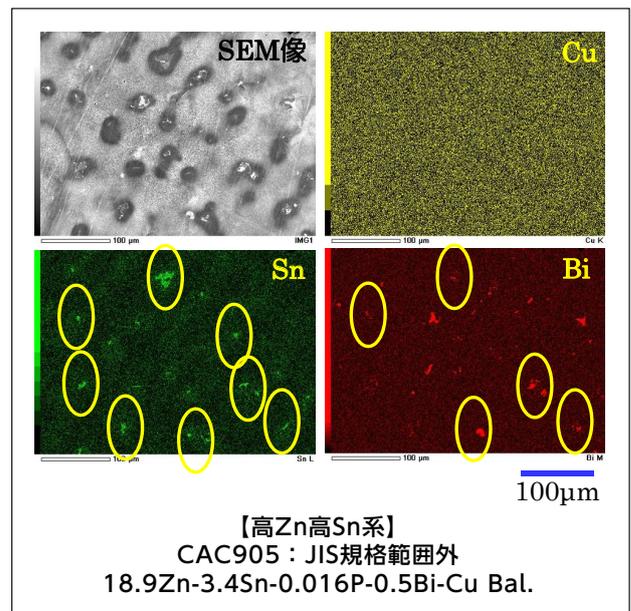


図7 高Zn-高Sn比較材のSEM-EDS分析結果

4.2 機械的性質

クリカ LN のJIS成分範囲内での伸びと引張強さの関係を図8に示す。JIS成分範囲内では、全ての結果においてJIS H5120 CAC406の規格値である引張強さ195MPa以上、伸び15%を満足していたことから、クリカ LN のJISの規格値は引張強さ195MPa以上、伸び15%以上と規定した。また、クリカ LN の伸びは20~60%と高い伸びを示していることから、従来の青銅合金と比較して特に伸びが優れていることが分かった。

次に、機械的性質に及ぼすBi含有量の影響を図9に示す。クリカ LN はBi含有量が増加することによって機械的性質が低下する傾向を示した。また、Bi含有量が1%になると引張強さはJIS規格値である195MPaを下回る傾向が見られたことから、クリカ LN の成分規格範囲におけるBi含有量の上限を0.9%とした。

さらに、図7に示した高 Zn 高 Sn 系成分の 18.9%Zn-3.4%Sn-0.016%P-0.5%Bi-Cu Bal. の引張強さは 170MPa という結果が得られており、JIS 規格値である 195MPa を下回る結果が得られた。これは、Sn の濃化相が多くなり、これを起点に近接する Bi の影響によって機械的性質が低下したためと推察される。したがって、JIS 規格におけるクリカ LN の Zn+Sn の含有量は 19.0% 以下と制限している。

4.3 耐脱亜鉛腐食性

脱亜鉛腐食試験後の試験面の断面組織写真を図10に示す。表3に示した成分①～④のいずれの成分系においても青銅特有の全面腐食の形態となり、脱亜鉛腐食の発生は見られなかった。また、クリカ LN の成分範囲内における Zn 含有量、Sn 含有量では、脱亜鉛腐食は発生せず良好な耐脱亜鉛腐食特性を有することが明らかとなった。

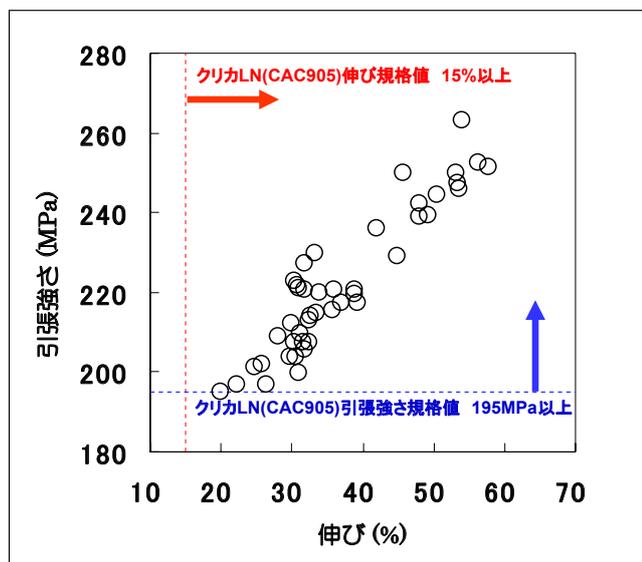


図8 規格成分範囲内での伸びと引張強さの関係

4.4 耐エロージョン-コロージョン性

隙間噴流試験後の外観写真、最大深さおよび減耗量を図11に示す。各供試材の外観観察結果より、黄銅系のCAC203およびシルジン青銅系のCAC804は中心部に流れの乱れとせん断力に起因する腐食環が確認されており、エロージョン-コロージョンが発生していることが分かった。一方CAC406、ビスマス系のCAC904およびクリカ LN の表5に示した⑤代表、⑥低 Zn 系、⑦高 Zn 系、および⑧低 Sn 系のいずれの供試材においても腐食環が確認されず良好な耐エロージョン-コロージョン性が確認された。また最大深さ、減耗量においてCAC406を基準とした場合、CAC203とCAC804は劣っている結果であるのに対し、CAC904およびクリカ LN の⑤～⑧ではCAC406と同程度であった。これらの結果よりクリカ LN はいずれの成分系においてもCAC406同等の耐エロージョン-コロージョン性を有していることが分かった。

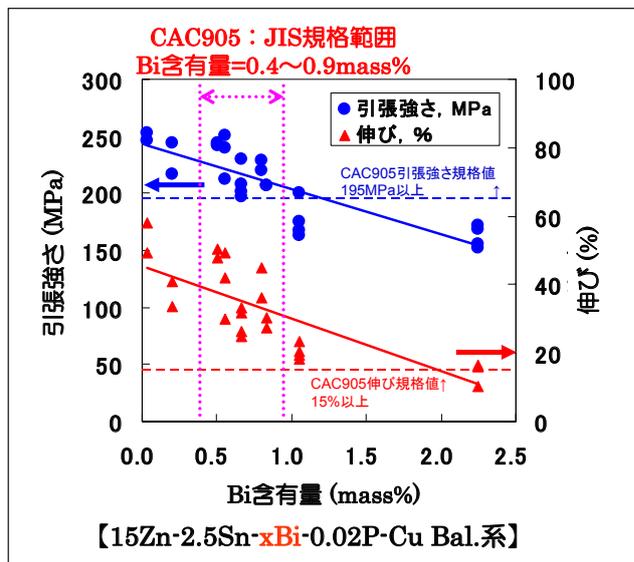


図9 機械的性質に及ぼすBi含有量の影響

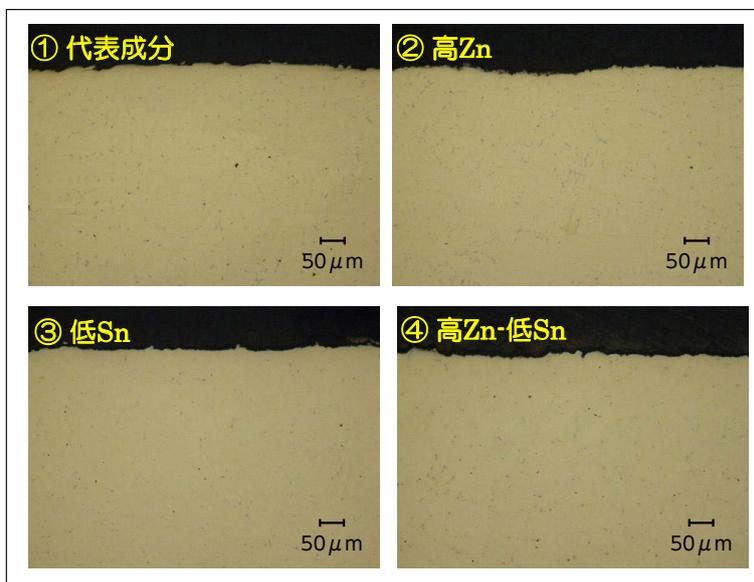


図10 脱亜鉛腐食試験後の試験面断面組織写真

外観写真				
合金種	CAC203	CAC406	CAC904	CAC804
最大深さ(μm)	927	90	71	810
減耗量 (mg)	656	222	191	645
外観写真				
合金種	クリカLN ⑤(代表)	クリカLN ⑥(高Zn系)	クリカLN ⑦(低Zn系)	クリカLN ⑧(低Sn系)
最大深さ(μm)	80	74	84	77
減耗量 (mg)	201	236	220	261

図11 隙間噴流試験後の外観写真、最大深さおよび減耗量

4.5 湯流れ性

渦巻き試験片の流動長に及ぼす鋳込温度の影響を図12に示す。クリカLNは、CAC406の鋳込温度よりも約40℃低い温度でも同等の流動長が得られ、CAC406と比べ良好な湯流れ性を有することがわかった。この結果より、本試験では、例えばCAC406の鋳込温度条件が1,150℃の場合、クリカLNの鋳込温度を1,110℃としてもCAC406と同様の湯流れ性を示すことがわかる。

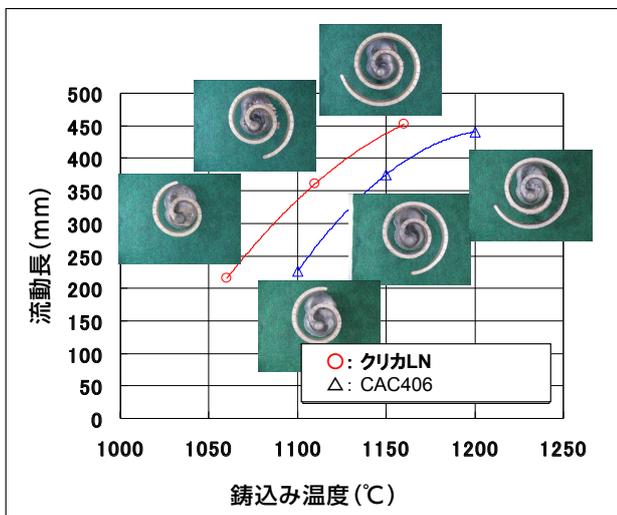


図12 渦巻き試験片の流動長に及ぼす鋳込温度の影響

4.6 切削性評価1 (旋削性)

被削性係数に及ぼすBi含有量の影響について図13に示す。クリカLNはBi含有量の増加により切削性が向上し、Bi含有量が0.7%付近からCAC406相当の切削性を有することがわかった。旋削加工後の切粉形状を図14に示す。クリカLNのBi含有量を0%~0.2%とした場合、旋削加工において好ましくない連続的で巻いた形状となっているのに対し、Bi含有量が0.4%以上では、CAC406と同様に分断された形状であった。クリカLNは、被削性係数、切粉形状ともCAC406と比べて大きな差異は見られなかった。

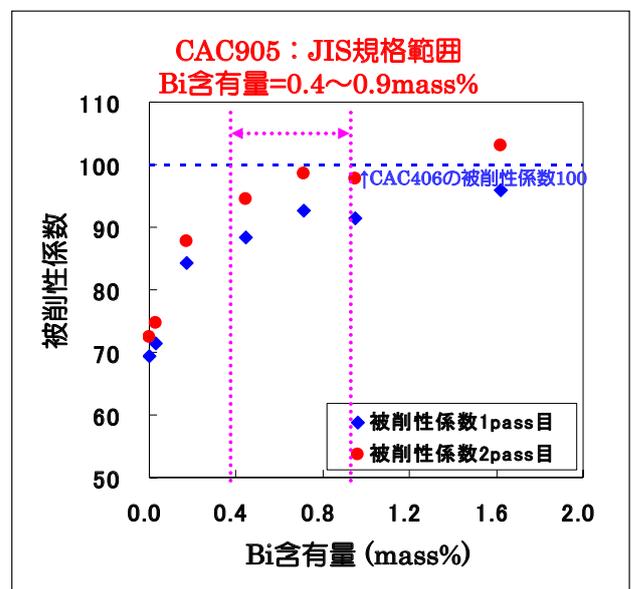


図13 被削性係数に及ぼすBi含有量の影響

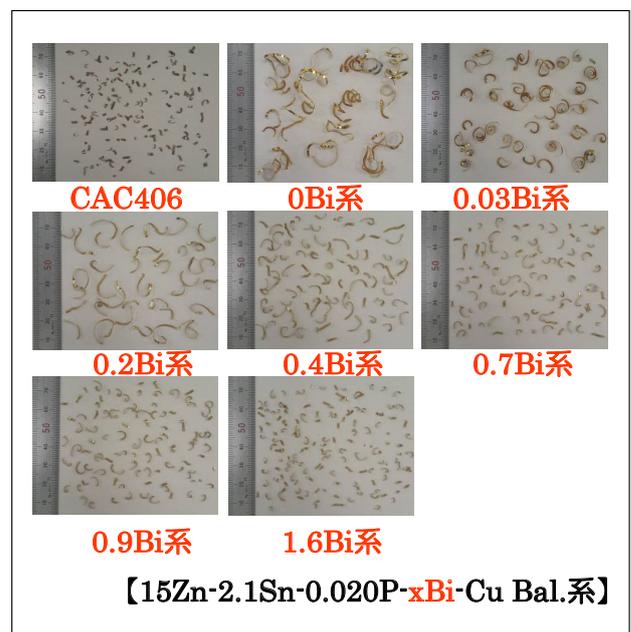


図14 旋削試験後の切粉形状

4.7 切削性評価 2 (穿孔性)

スラスト抵抗およびトルクに及ぼす Bi 含有量の影響を図 15 に示す。Bi 含有量の増加によりスラスト抵抗、トルク抵抗ともに減少する傾向を示した。スラスト抵抗はクリカ LN の Bi 成分範囲では CAC406 と比較し 1.5 ~ 2 倍高くなる傾向を示した。また、トルク抵抗は Bi 含有量が 0.7% において、CAC406 に近づき、それ以上 Bi 含有量が増えてもほぼ一定となる傾向を示した。次に、Bi 含有量による切粉排出状況の違いを図 16 に示す。図 16 (1) に示すように Bi 含有量が 0% の場合は、切粉が分断されているためにドリルに沿って排出されにくくなり、加工の継続が困難となった。一方、図 16 (2) に示すように Bi 含有量が 0.4% の場合は、連続的に巻かれた形状の切粉が穿孔加工中のドリルに沿ってスムーズに排出された。図 17 に穿孔加工後の切粉形状を示す。クリカ LN の Bi 含有量を 0% ~ 0.2% とした場合は、切粉が分断された形状を示したが、Bi 含有量が 0.4% 以上では CAC406 と同様に切粉は連続的に巻かれた形状であり、スムーズな切粉の排出を示した。クリカ LN は穿孔加工において、従来の CAC406 と同様の切粉の排出形態を示し、実用上の機械加工は十分可能であると考えられる。

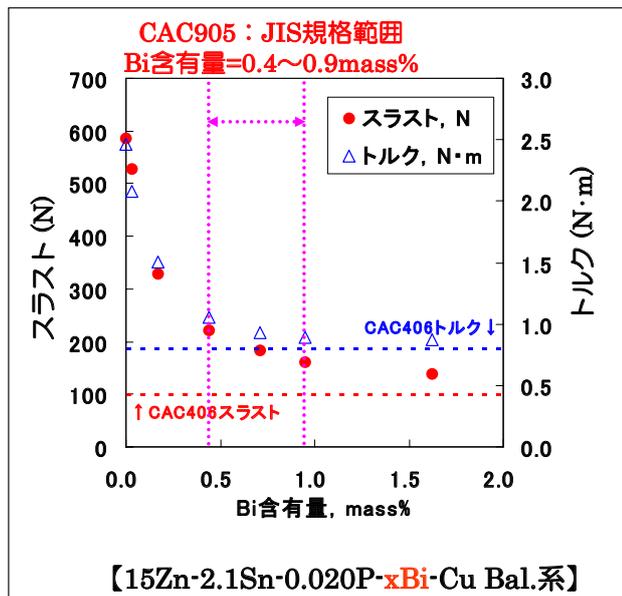


図15 スラスト抵抗およびトルク抵抗に及ぼすBi含有量の影響

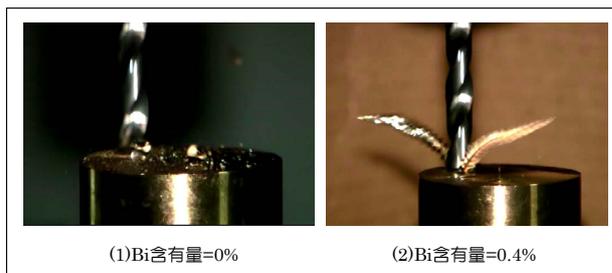


図16 Bi含有量による切粉排出状況の違い

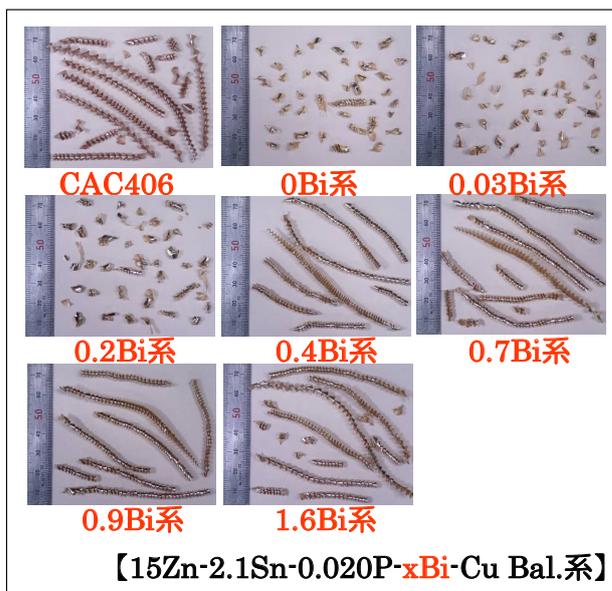


図17 穿孔試験後の切粉形状

5 クリカLNの製品試作例

クリカ LN の製品試作例を図 18 に示す。これまでに水道メータや、当社グループ会社である栗本商事株式会社の給水装置部品である 40A、50A のサドル付分水栓、20A の埋設用仕切弁などを試作し、铸造後の湯廻り不良、機械加工後の不良、引け巣やガス欠陥といった铸造不良、耐圧検査による漏水といった不良率は数%と少なく良好な結果が得られている。本試作例に関しては既存の鉛フリー青銅合金の铸造方案で良好な結果が得られたが、その他製品についても铸造試作による検証を行い、不良率を確認する必要がある。



図18 クリカLNの製品試作例

6 まとめ

クリカ LN の各試験を実施したところ以下のことが明らかとなった。

- 1) 機械的性質は CAC406 相当であった。特に伸びが既存の青銅系合金と比べて、優れていることが分かった。
- 2) 耐食性において、耐脱亜鉛腐食性および耐エロージョン-コロージョン性は CAC406 と同等の特性を有することが分かった。
- 3) 湯流れ性は、CAC406 と比較しても良好で、 casting 温度が 40℃ 低くても同等の湯流れ性を示すことが示唆された。
- 4) 切削性において、旋削性は、Bi 含有量の影響を受けやすく、CAC406 を 100 とした場合、90 ~ 100 の値を示した。穿孔性は、CAC406 と比較してスラスト抵抗、トルク抵抗がやや高くなる傾向を示したが、実用上の機械加工は十分可能であると考えられる。
- 5) 本開発における製品試作では、不良率が低く、良好なモノづくり性を示した。その他製品に関しても試作検証を重ね不良率を確認する必要がある。

7 最後に

クリカ LN は、既存の青銅合金に比べ、低融点であることから溶解エネルギーコストの低減にも寄与できると考えている。今後、水道関連部材への適用を進め、安全で安心なクリモト鉛フリー銅合金をより多くのお客様へお届けできるよう努めていきたい。

参考文献：

- 1) (一社) 日本バルブ工業会 水栓部会技術小委員会、有害物質 (鉛) 規制の対応技術調査、バルブ技報、Vol.29、No.2 (2014)、pp.107-116
- 2) 梅田高照：銅合金 casting 業界の現状と銅合金 casting JIS H5120 の改正経緯、 casting 工学、81、12 (2009)、pp.606-612
- 3) 岡根利光：銅合金 casting 物、 casting 工学、82、12 (2010)、pp.740-745
- 4) (一社) 日本バルブ工業会 水栓部会技術小委員会：有害物質 (ニッケル) 水質規制動向調査、バルブ技報、Vol.31、No.2 (2016)、pp.96-108
- 5) 山本、山田：高 Zn 低 Bi 系鉛フリー青銅合金および casting 用耐食性鉛フリー黄銅合金の開発、バルブ技報、Vol.28、No.2 (2013)、pp.71-78
- 6) 岡根、上坂、後藤、伊藤、山本、明石、廣瀬：JIS H5120 (銅および銅合金 casting 物) 改正原案の概要、 casting 工学、87、12 (2015)、pp.826-829
- 7) 山田、山本、岡根、上坂、後藤、伊藤：JIS H5120 (銅および銅合金 casting 物) 改正原案における新提案銅合金

casting 物の耐食性、 casting 工学、87、12 (2015)、pp.830-835

- 8) 伊藤、上坂、山本、山田、後藤、明石、岡根：JIS H5120 (銅および銅合金 casting 物) 改正原案における新提案銅合金 casting 物の機械的性質と肉厚感受性、 casting 工学、87、12 (2015)、pp.836-839
- 9) 岡根、碓井、上坂、後藤、伊藤、山本、山田：JIS H5120 (銅および銅合金 casting 物) 改正原案における新提案銅合金 casting 物の被削性、 casting 工学、87、12 (2015)、pp.840-843
- 10) 日本規格協会：JIS H5120; 銅および銅合金 casting 物 (2016)
- 11) M.Matsumura、K.Noishiki、A.Sakamoto：Jet-in-Slit Test for Reproducing Flow-Induced Localized Corrosion on Copper Alloys、CORROSION、Vol. 54、No.1 (1998)、pp.79-88
- 12) 坂本、山崎、松村：水道栓に生じた浸食の事例解析、材料と環境、44、No.6 (1995)、pp.336-342
- 13) M.Matsumura：EROSION-CORROSION; AN Introduction To Flow Induced Macro-Cell Corrosion、Ben tham Science (2012)、pp.70-96
- 14) 山田浩士、山本匡昭：隙間噴流法試験による銅合金の耐エロージョン-コロージョン性評価、銅と銅合金、第 54 巻、1 号 (2015)、pp.119-125

執筆者：

山田浩士

2011 年入社

銅合金の研究・開発に従事



山本匡昭

1997 年入社

銅合金の研究・開発に従事



松葉昌平

1989 年入社

素形材の試作評価に従事



宮本武明

2011 年入社

銅合金の研究・開発に従事

