新技術・新製品

連続鋳造圧延法による高性能銅合金線の開発

中本　斉*1)　石田徳和*2)　服部芳明**
大石恵一郎***　芦田哲哉****

1. は じ め に

近年環境保護の意識が高まり，環境への負荷を軽減する材料の開発が求められている．銅線材分野においては，例えば銅重量軽減の手段として電線や配線の細径化が進んでおり，細径化前と同等の強度を有する高強度銅合金線や，耐屈曲性，耐摩耗性に優れた銅合金線が求められるようになった．

通常このような銅合金線は，ビレット押出→伸線→熱処理→伸線，といった多くの工程が必要となり生産性やコストに問題がある上，長尺化にも限界があった．

三菱マテリアル株式会社は，無端ベルトと鋳造輪からなり，低コストで生産性の高い連続鋳造圧延装置を有している．本装置はタフピッチ荒引銅線の製造装置であるが，世界で初めて無酸素荒引銅線（ROX®シリーズ）の製造に成功し[(1)]，その製造技術と，従来から当社の型銅部門で培った銅合金製造技術を融合させ，連続鋳造圧延による無酸素銅ベースの高性能銅合金線の製造に成功したので以下に報告する．

2. 連続鋳造圧延による銅合金線製造技術開発

(1) 連続鋳造圧延装置の概要

図1にシステムの概略図を示す．原料（電気銅等）はシャフト炉で溶解され溶銅となり，保持炉に一旦ストックされる．その後鋳造速度に合わせて溶銅を保持炉からタンディッシュへ流し，鋳造輪と無端ベルトからなる鋳造機で鋳造バーを製造し，圧延工程，冷却・還元工程を経て荒引銅線をコイル状に巻き取る．

(2) 連続鋳造圧延による無酸素荒引銅線製造技術[(1)]

連続鋳造圧延工程で無酸素銅を得る為に，溶解工程での燃焼雰囲気を制御する必要がある．**図2**にシャフト炉内の都市ガス燃焼雰囲気と溶銅中の溶存ガス成分の平衡計算結果を示す．燃焼雰囲気としてCO(dry)濃度を指標としている．こ

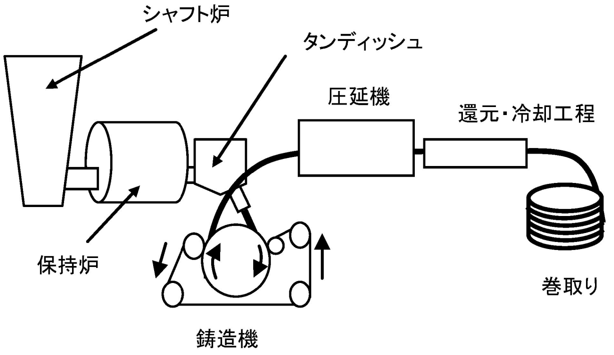

図１　連続鋳造圧延概略図．

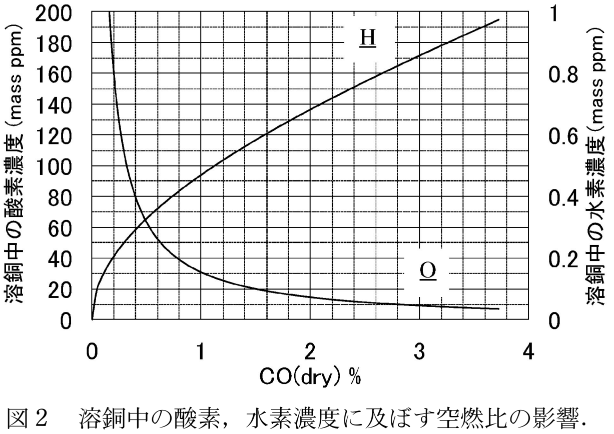

図２　溶銅中の酸素，水素濃度に及ぼす空燃比の影響．

* 三菱マテリアル株式会社：1)堺工場 製造課 課長補佐
2)金属事業カンパニー 銅加工事業部 副事業部長
** 小名浜製錬株式会社：小名浜製錬所 生産部 鋳造課 課長
*** 三菱伸銅株式会社：開発部 部長，シニアフェロー
**** 菱星尼崎電線株式会社：尼崎工場 工場長
Development of High-Performance Copper Alloy Wire on a Continuous Casting and Rolling Process; Hitoshi Nakamoto*, Norikazu Ishida*, Yoshiaki Hattori**, Keiichiro Oishi*** and Tetsuya Ashida****, (*Mitsubishi Materials Corporation, **Onahama Smelting and Refining Co., Ltd. ***Mitsubishi Shindoh Co., Ltd. ****Ryosei Amagasaki Electric Wire Co., Ltd.)
2015年10月30日受理[doi:10.2320/materia.55.114]

れはシャフト炉に供給されている都市ガスと空気の混合ガスをインラインの分析装置にも供給し，装置内で実際に燃焼させた後に排ガス中の CO 濃度を測定することで求められる．

通常操業ではシャフト炉の燃焼雰囲気はおよそ CO(dry)＝0.3％であり，シャフト炉出口での溶銅中の酸素濃度は 90 mass ppm 程度である．これは，都市ガス(組成：CH_4 88％，C_2H_6 6％，C_3H_8 4％，C_4H_{10} 2％)の燃焼反応式より求められる H_2，H_2O，CO，CO_2 ガスの分圧を用いて計算した溶銅中の酸素，水素の活量(2)(3)とよく一致しており，シャフト炉内では平衡がほぼ成立していると考えられる．従って図 2 より，燃焼雰囲気を CO- リッチにする事で低酸素の溶湯を得られることが分かる．ただし実操業では，コスト・湯温・溶解速度を踏まえて制御範囲を決定している．

図 3 に溶解工程から製品までのガス成分の挙動について，通常操業と無酸素銅製造時の場合に分けて示した．タフピッチ銅を製造する場合は，シャフト炉出口以降で酸化が進み，荒引線では約 300 mass ppm の酸素濃度となる．一方無酸素銅を製造する場合は，シャフト炉における燃焼制御によりシャフト炉出口で酸素濃度が約 20 mass ppm 以下となり，更にその後の工程で脱水素，脱酸素を行い，最終的には酸素約 3 mass ppm，水素　約 0.4 mass ppm の荒引線が得られる．

(3) 連続鋳造圧延による高性能銅合金線製造技術

強度や導電性に優れる高性能銅合金の多くには，Mg，Zr, Cr, Ti, Fe, P といった酸素親和性が高い合金元素が含まれることがほとんどであるため，これら元素を含む銅合金を得るには溶銅の無酸素化が不可欠となる．様々な高性能銅合金線の製造技術開発は，前述の溶湯処理技術をベースに達成したものである．

【Cu–Mg 系】

Cu–Mg 系は銅合金の中で最も高強度が得られる合金品種の一つで，鉄道用トロリ線や電子部品の接続部等の素材として使用される．Mg は極めて酸素と反応しやすく連続鋳造が困難とされてきたが，酸素濃度を極めて低減させることでスラグ等による汚染のない Cu–Mg 系の溶湯が得られ，連続鋳造圧延での荒引線製造に成功している．試作段階において，Cu–Mg の鋳造バーの温度が極端に低下するという課題があったが，鋳造鋳型を熱伝導度の小さい材質に変更することで解決した．

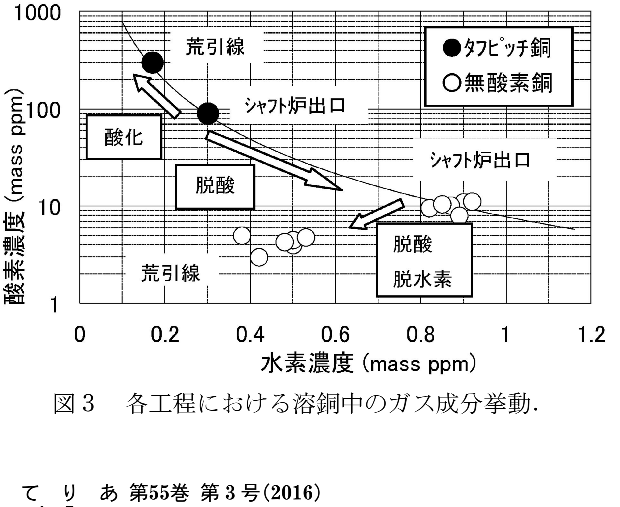

図 3　各工程における溶銅中のガス成分挙動．

【Cu–Cr 系】

Cr も Mg と同様に酸素親和性が高く溶湯を汚染しやすい合金元素であるが，Cu–Mg 系と同様，前述の無酸素銅の溶湯処理技術を活用した．

【Cu–Fe–P 系，Cu–Co–P 系】

Fe や Co は溶銅に対して難溶解性の元素であることから通常の溶湯温度では溶解しないため，溶解工程ラインに溶湯加熱装置を設置した．また P は鋳塊の粒界割れを誘発するが，鋳造組織制御によって解決した．

【共通】

全ての合金品種において，圧延負荷が著しく上昇した．開発当初は鋳造バーや圧延材の温度調整で対応したが，特に高強度の Cu–Mg 系や Cu–Co–P 系は圧延負荷が一段と高くなり，圧延が不可能であった．そこで対象の合金品種毎の高温変形抵抗データを基に圧延シミュレーションを実施し，各圧延スタンドにおいて適正な前方・後方張力になるようパススケジュールを変更し，更に圧延モーターの能力を増強することで連続鋳造圧延を可能にした．

3. 高性能銅合金線 ROX®–CP(4)

(1) 特長

連続鋳造圧延装置により製造した高性能銅合金線である ROX®–CP について紹介する．ROX®–CP は Cu–Co–P 系銅合金で，強度・導電率の特性値は**図 4** に網掛けで示す領域に位置する．

図 4 より，ROX®–CP の特性は Cu–Cd や Cu–Cr–Zr 等の難製造合金とほぼ同等であり，Co–P による析出強化と Sn,

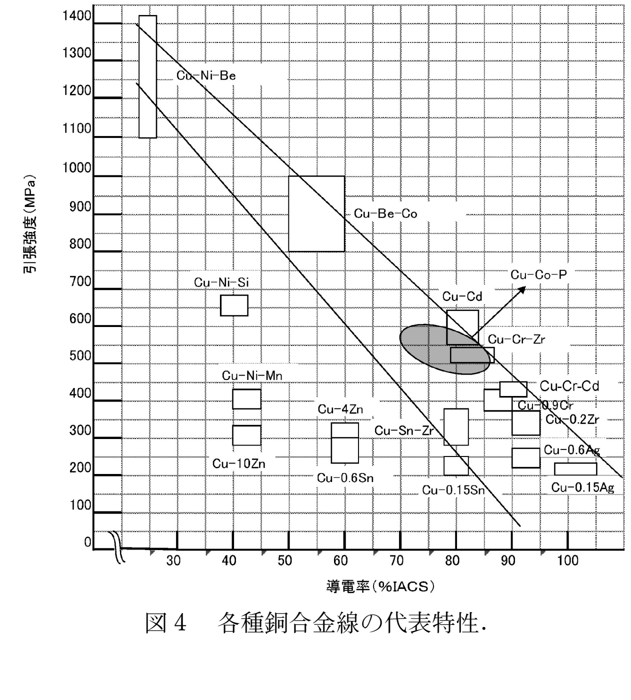

図 4　各種銅合金線の代表特性．

Mg, Ag 等による固溶強化を組み合わせることで，高強度かつ高導電性を有するバランスに優れた特性が実現される．また，時効熱処理の条件を変え，Co–P の析出物のサイズを調整することで，耐摩耗性，耐熱性および耐屈曲性など各ユーザーの要求に応じた様々な特性を自由に選択することができ，トロリ線のような大径サイズから，ロボット用配線等の極細線まで，幅広いサイズに対応が可能である．

更に，従来の製法である熱間押出では数百 kg の短尺品しか製造できないが，ROX®–CP は連続鋳造圧延により製造するので長尺品が可能となる．

このように，ROX®–CP は 1 合金品種で様々な市場のニーズに対応することが可能で，特性バランスとコスト競争力を兼ね備えた優れた銅合金線であり，既に連続鋳造圧延により量産化し，市場に投入されている．

(2) 用途

(a) 自動車用ワイヤーハーネス

自動車の車体軽量化による燃費向上と排気ガス低減の目的で，多線化が進むワイヤーハーネスの銅線使用重量を削減するために，ワイヤーハーネスの細径化が進んでいる．

通常使用されているワイヤーハーネスは 0.3 mm^2 から 0.22 mm^2, 0.13 mm^2, 0.08 mm^2 へ，導体断面積で50～90％減の細径ハーネスの開発が進められているが，細径化されても要求される強度は 0.3 mm^2 と同等であり，銅合金線を使用しなければ達成できない要求値となっている．

一方で現行材（0.3 mm^2）は軟銅線を用いることによりワイヤーハーネス組み込み時や走行中の衝撃を吸収しており，細径化後も当然ながら耐衝撃性を兼ね備える為に適度の材料伸びが必要とされる．

ROX®–CP は強度，伸び，導電性を兼ね備えていることから，上記ワイヤーハーネスの要求に適合する．ROX®–CP について実際に実機でハーネス組立てまで行い，諸特性の評価を行った結果を**表 1** に示す．

導体特性を最適化することで，ROX®–CP は現行材である 0.3 mm^2 と同等のハーネス組立性を達成することができた．同時に評価した Cu–0.3％Sn はハーネスの組立て自体は可能であったが，伸びが不足し形状を付与する配策性が悪く，線ハネや線絡みにより組み立て作業に時間を要した．

(b) ロボット用ケーブル

ロボット用ケーブルは，ロボットアームの屈曲部等に使用されるため，耐屈曲性の向上による長寿命化が求められる．

図 5 は ROX®–CP と従来材（タフピッチ軟銅線，Cu–0.3％ Sn 硬/軟銅線）の繰り返し曲げ回数を比較したものである．

表 1　0.13 mm^2 ワイヤーハーネス評価．

		タフピッチ銅	Cu–0.3 mass％Sn	ROX®–CP
断面積		0.3 mm^2	0.13 mm^2	0.13 mm^2
導体	抗張力	70 N	102 N	75 N
	伸び	≦20％	3％	7％
	導体抵抗	57 Ω/km	165 Ω/km	180 Ω/km
	耐屈曲性	—	210回	1100回
ハーネス配策性		○	△	○

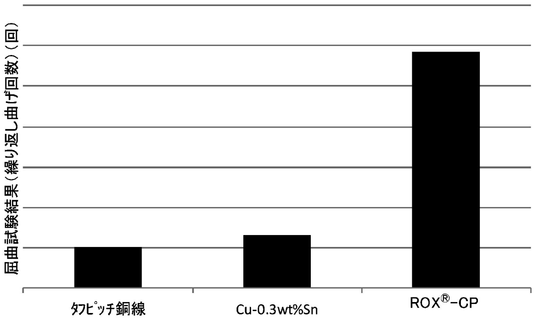

図 5　屈曲試験結果（0.08 mmϕ）．

流通しているタフピッチ軟銅線や Sn 入り銅線に比べ，ROX®–CP は 4～6 倍の耐屈曲性を有する．

4. ま と め

(1) 環境負荷軽減を目的とし，低コストで生産性の高い連続鋳造圧延装置を用いた高性能銅合金線の製造に成功した．
(2) 高性能銅合金線　ROX®–CP は連続鋳造圧延で製造した Cu–Co–P 系の荒引銅線であるが，1 品種の荒引線で多種の加工度，熱処理温度を組み合わせることにより，様々な用途に対応できる．

文　　献

（1）堀　和雅，和田正彦，服部芳明：伸銅技術研究会誌，**40**（2001），153–155.
（2）幸塚善作，鈴木康治，大石敏雄，森山徐一郎：日本金属学会誌，**32**（1968），1132–1137.
（3）加藤栄一，上野晴信：日本金属学会誌，**33**（1969），1161–1164.
（4）中本　斉，石田徳和，芦田哲哉，渡邊和章：銅と銅合金，**51**（2012），306–310.