

電線材料の開発と X 線吸収分光を利用した材料分析

後藤 和宏

住友電気工業株式会社 解析技術研究センター

電線はインフラを支える大型の送電線から携帯機器に内蔵される小型細径の製品まで多様な製品ラインナップがあり、電線を構成する材料は主に電気を流す導体、外部と電気的に絶縁する被覆からなる。導体に必要な特性は製品用途により様々であり、用途に応じて素材と製造プロセスを最適化することが必要不可欠である。例えば電線によく使われる銅やアルミニウムでは、強度と電気伝導の特性バランスを高いレベルで両立させるために、添加する元素の種類や量、化合状態をうまく制御させられる伸線加工条件と熱処理条件を選ぶ。近年の車載用途等で強まっている高強度化ニーズに対応させるためには添加元素を化合物として析出させる技術が有効であり¹⁾、その場合には材料特性と元素の化合状態（固溶と析出の 2 つの状態）との相関理解が極めて重要である。しかし材料分析で「状態」を直接調べる技術は必ずしも容易ではないため、そのような解析技術の開発は重要な課題である。

当社では九州シンクロトロン光研究センターに設置した住友電工 BL (BL16/17) を用いて、実験室装置では従来困難であった先進的な材料分析を 2016 年 11 月より常時利用可能な体制をとっており²⁾、各種の材料や部品の原子レベルの解析を基に製品競争力向上を図ってきた。本報告では、放射光を利用した X 線吸収分光を活用することによって、従来の分析手法では困難であったような合金中析出物の定量解析を可能とし、材料特性との相関を調べた事例³⁾を詳しく紹介するとともに、実験室装置と放射光を相補的に活用する利点について議論する。

¹⁾ 田口 欣司, 嶋田 高信, 吉本 潤, 桑原 鉄也, 赤祖父 保広 “エンジンの振動屈曲に耐える高強度アルミワイヤーハーネス”, SEI テクニカルレビュー, 190, 117 (2017)

²⁾ 山口浩司, 飯原順次, 上村重明, 斎藤吉広 “放射光分析用住友電工ビームライン”, SEI テクニカルレビュー, 192, 143 (2018)

³⁾ 第 12 回九州シンクロトロン光研究センター研究成果報告会実施報告書 p72

第14回九州シンクロトロン光研究センター研究成果報告会
(2020/10/21)

電線材料の開発と X線吸収分光を利用した材料分析

概要 :

ものづくりメーカーにおける材料分析の動機
放射光/シンクロトロン光を活用した分析内容

住友電気工業株式会社
解析技術研究センター 後藤和宏

SUMITOMO
ELECTRIC
GROUP

内容

1. 電線製品と製造プロセスの例
2. 材料分析の動機
3. XAFSによるFeの析出量分析
4. 複数施設・BLの比較
5. まとめ

内容

-3-

1. 電線製品と製造プロセスの例
2. 材料分析の動機
3. XAFSによるFeの析出量分析
4. 複数施設・BLの比較
5. まとめ

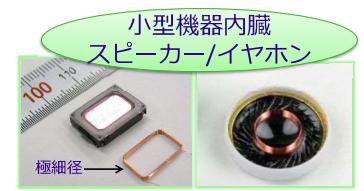
多様な電線製品

-4-

社会を支える電線製品
⇒ 電力・情報を身近につなげる



主な材料：
銅やアルミニウム
太さ：
数cm～数十μm



銅および銅合金の特性

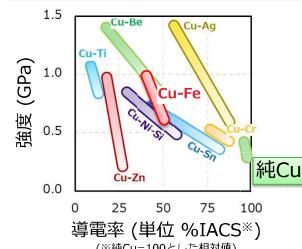
-5-

実用製品では用途に応じて元素を微量添加
⇒ 各種の特性を制御 (強度、導電率、他)
合金は純銅に比べて特性制御が難しい

電線の主な構造

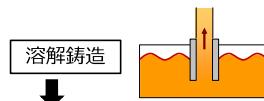
樹脂など (役割：絶縁)
銅やアルミなどの良導体 (役割：電気伝導)

銅、銅合金の代表的な特性



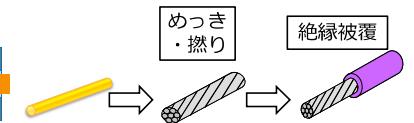
電線の一般的な製法 (全体イメージ)

-6-



◆住友電工

様々な工程を経て
最終製品 (電線) を作る

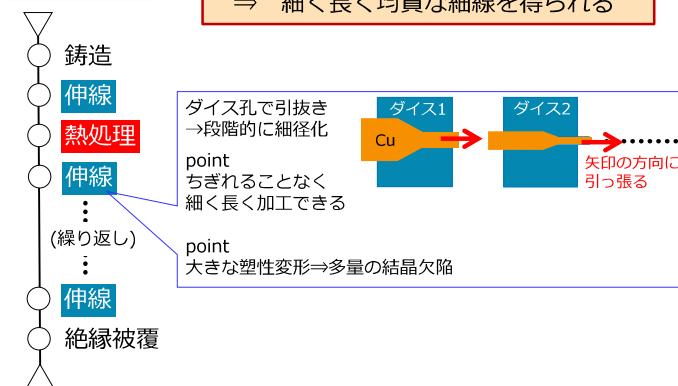


電線の一般的な製法（伸線と熱処理）

-7-

製造フロー^[*]

伸線と熱処理を繰り返す
⇒ 細く長く均質な細線を得られる



◆住友電工 [*]例えば日本塑性加工学会編「引抜き(コロナ社)」3章 p.54

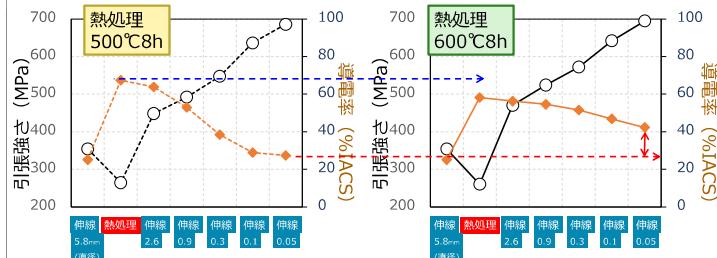
SUMITOMO ELECTRIC GROUP

製造条件と材料特性の関係

-8-

- 特性は漸次変化 ⇒ 良好な最終特性を得るプロセス設計
- 製造条件の履歴が特性に影響を与える ⇒ 分析で要因特定

銅合金の特性変化例(本研究, Cu-0.6%Fe)



◆住友電工

伸線：強度は向上、導電率は低下
熱処理：強度は低下、導電率は向上

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

内容

-9-

1. 電線製品と製造プロセスの例
2. 材料分析の動機
3. XAFSによるFeの析出量分析
4. 複数施設・BLの比較
5. まとめ

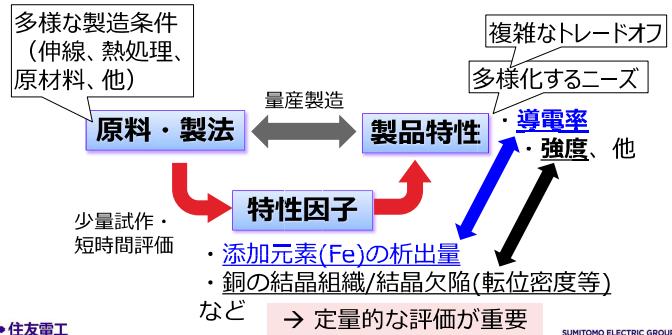
◆住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

材料分析の役割

-10-

- 材料分析の動機：特性を支配する因子を捉えたい
⇒ キープロセス（熱処理条件など）の特定、改善
- ⇒ 良い製品を提供（細くて切れにくい電線等）

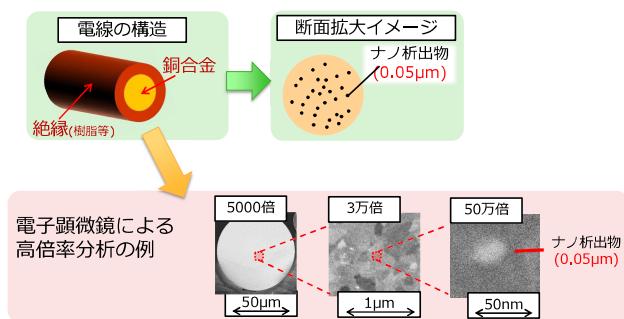


SUMITOMO ELECTRIC GROUP

特性因子に関する分析例

-11-

- Cu-0.6%Fe(本研究)の着目因子：結晶組織、添加元素(Fe)の析出量



◆住友電工

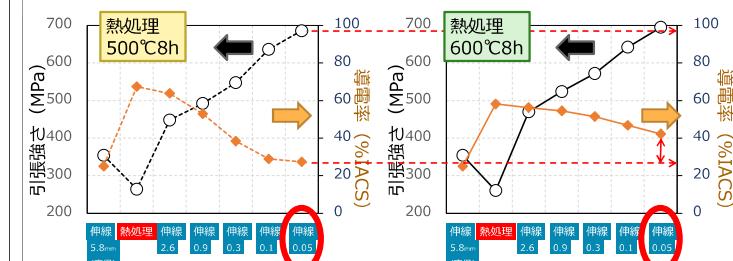
SUMITOMO ELECTRIC GROUP

特性因子に関する分析例

-12-

- Cu-0.6%Fe(本研究)の着目因子：結晶組織、添加元素(Fe)の析出量

再掲：銅合金の特性変化例(本研究, Cu-0.6%Fe)



◆住友電工

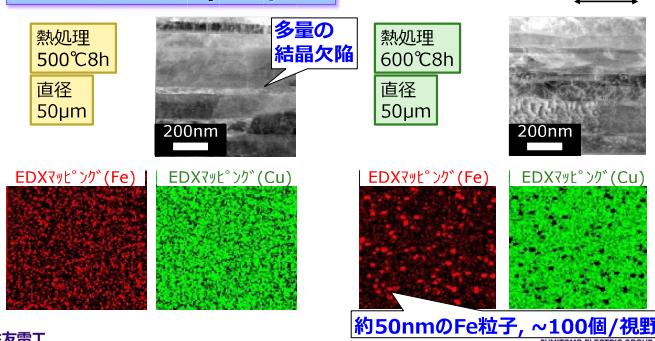
SUMITOMO ELECTRIC GROUP

特性因子に関する分析例

-13-

- Cu-0.6%Fe(本研究)の着目因子：結晶組織、添加元素(Fe)の析出量
⇒ サイズが小さい分だけ観察領域も狭くする必要がある

走査型電子顕微鏡(TEM)写真



◆住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

放射光分析の利用

-14-

- TEMはラボ機もあり実績豊富 ⇔ 分析視野などには制約



- 放射光の活用メリット：特性因子の数値化、分析時間

- 結晶組織
→X線回折による定量評価（転位密度、結晶子サイズ等）
- 添加したFeの析出量
→X線吸収微細構造(XAFS)により可能

- 放射光特有の課題：施設・BLによる違い 取組みを紹介

- ◆施設による違いについて比較

◆住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

内容

-15-

1. 電線製品と製造プロセスの例
2. 材料分析の動機
3. XAFSによるFeの析出量分析
4. 複数施設・BLの比較
5. まとめ

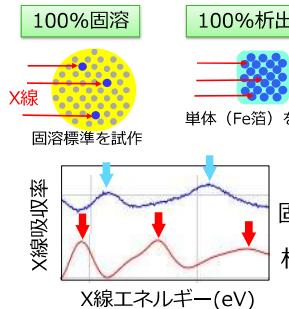
◆住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

XAFSによる析出量/固溶量の分析

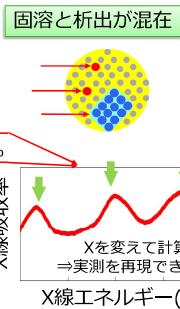
-16-

①標準試料



◆住友電工

②測定試料&フィッティング



原理的にはXAFSで定量可能
実施例/先行研究はまだ少ない

注記：2020/9/4 SPring-8産業利用報告会でも報告

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

①標準試料の測定

-17-

XAFSにより合金中の固溶/析出を識別できる

試料

析出：純Fe箔 (5μm厚, 5N)

固溶：Cu合金=当社で試作

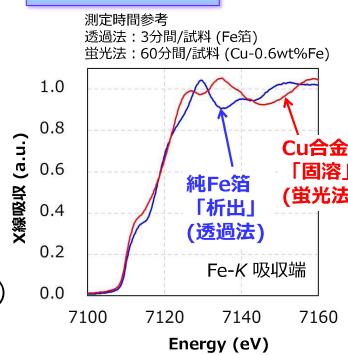
(Fe = 0.6wt%, 鋳造で急冷)

測定条件

- SAGA-LS BL16
(住友電工ビームライン)
- Si 111 二結晶分光器
- Pt, Rhコートミラー
(集光, 高次光除去 5.0 mrad)
- 蛍光X線検出:4素子SDD
(TechnoAP製)

◆住友電工

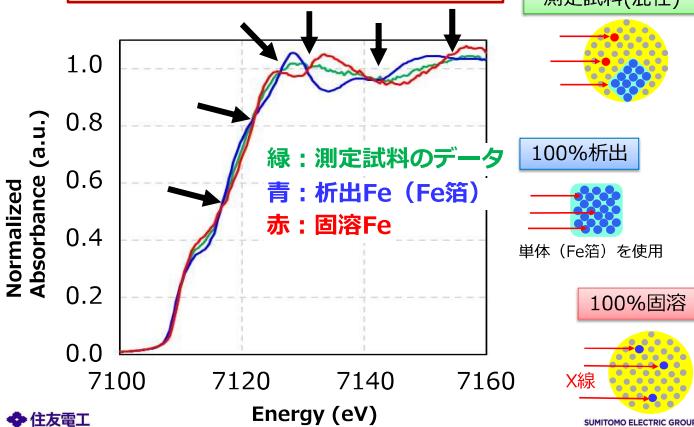
Fe-K 吸収端



②測定試料&フィッティング

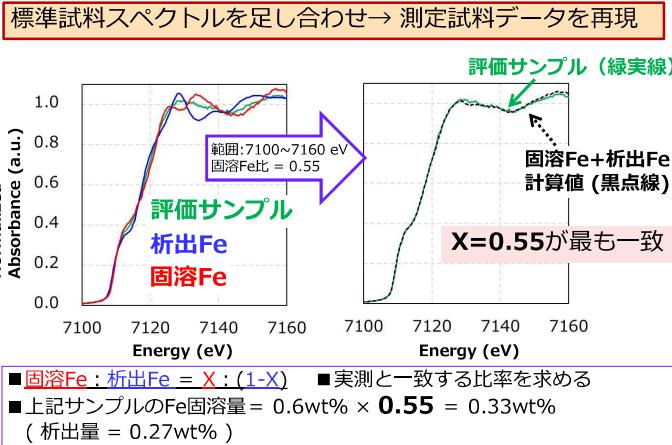
-18-

等吸収点あり：純Feと固溶Feが混在



フィッティングの例

-19-

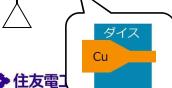


多試料の系統的な分析

-20-

試作フロー

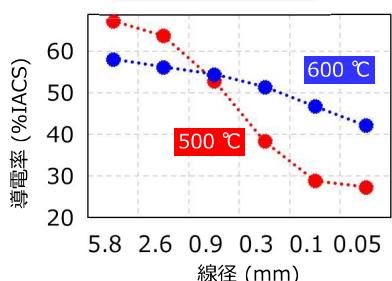
- 鋳造 Cu-Fe (0.6wt%)
- 伸線1 ($\rightarrow 5.8\text{ mm}$)
- 熱処理 (500 or 600°C, 8h保持)
- 伸線2 ($\rightarrow 2.6\text{ mm}$)
- 伸線3 ($\rightarrow 0.9\text{ mm}$)
- 伸線4 ($\rightarrow 0.3\text{ mm}$)
- 伸線5 ($\rightarrow 0.1\text{ mm}$)
- 伸線6 ($\rightarrow 0.05\text{ mm}$)



伸線による導電率変化

- ・ 500°C条件では急激に低下
- ・ 600°C条件では緩やかに低下

導電率の測定結果



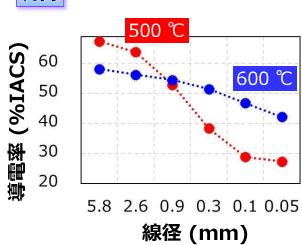
未知試料における固溶Fe量と導電率

-21-

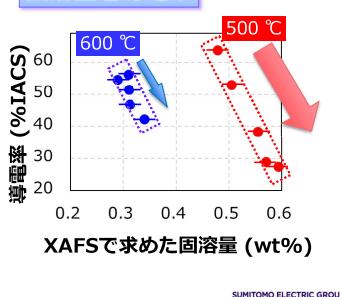
500°C条件では
伸線による固溶量増大が顕著（導電率変化の支配因子）

伸線による導電率の変化

再掲



固溶量と導電率



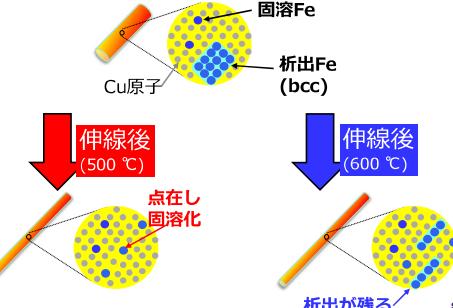
考察：伸線による固溶量の変化

-22-

伸線による析出Feの破碎(固溶化)が導電率低下の主因
⇒ 破碎されにくい析出相の形成が対策として有効

Feの状態変化（推定）

熱処理後の状態



内容

-23-

1. 電線製品と製造プロセスの例
2. 材料分析の動機
3. XAFSによるFeの析出量分析
4. 複数施設・BLの比較
5. まとめ

◆ 住友電工

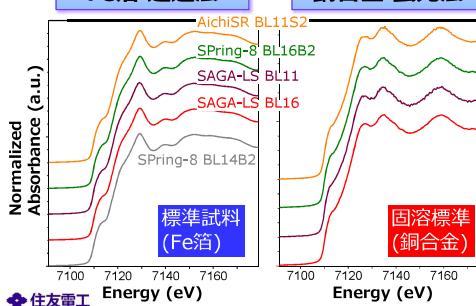
SUMITOMO ELECTRIC GROUP

複数施設・BLの比較（一覧）

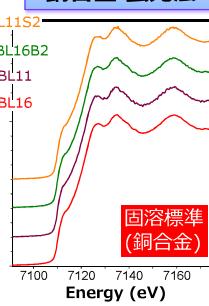
-24-

- 産業利用において「タイムリーに利用できる」事が重要
例：定期的な利用（毎月 / 隔週 etc）、すぐ利用（数日～2週間）、など
- 本日報告のテーマにおいても複数施設利用あり、一部紹介

Fe-K 吸収端 Fe箔 透過法



Fe-K 吸収端 銅合金 蛍光法

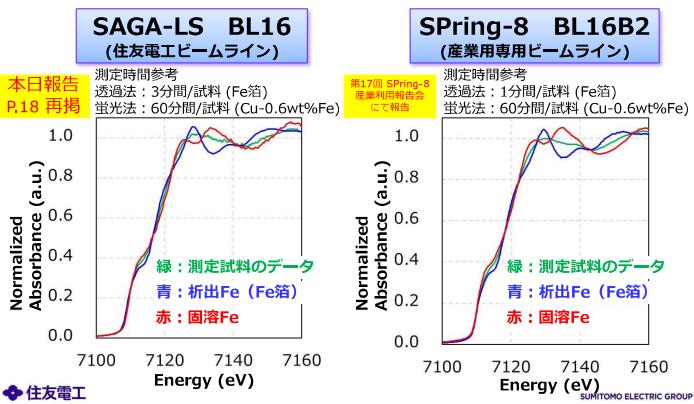


異なる施設・BLで “ほぼ等しい”データ

施設/BL	補足情報
AichiSR BL11S2	201606062 (一般利用)
SPring-8 BL16B2	2018A5330 (成果非専有)
SAGA-LS BL11	1601141G (一般利用)
SAGA-LS BL16	課題番号 (2017-I期利用)
SPring-8 BL14B2	SPring-8 XAFS標準試料データベース

複数施設・BLの比較 (Cu-0.6wt%Fe合金) -25-

- 異なる施設でも同等な結果は得られる（下図：本研究のデータ比較例）
- 施設間の定量的な比較方法等は未確立 → ラウンドロビン活動等へは期待



◆ 住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

内容

- 電線製品と製造プロセスの例
- 材料分析の動機
- XAFSによるFeの析出量分析
- 複数施設・BLの比較
- まとめ

◆ 住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP

まとめ

-27-

- 複雑化が進む製品特性の改善へ向けて特性因子を評価できる分析技術を検討
- 放射光を用いたXAFSにより Cu中のFeを評価 → 析出と固溶の識別、比率算出が可能 (添加量0.6wt%の希薄合金)
- 複数の放射光施設・BLを用いた場合のデータ比較を実施、(ほぼ同等なデータが得られる → 施設・BL間の相対比較ができる基準(標準化)に期待

◆ 住友電工

SUMITOMO ELECTRIC GROUP