

耐海塩腐食性に優れた合金型架空送電線

High Corrosion Resistance Conductor for Overhead Transmission Lines

渡部 雅人*
Masato Watabe

伊藤 英人
Hideto Ito

長野 宏治
Koji Nagano

辻 俊伸
Toshinobu Tsuji

菅 伸明
Nobuaki Suga

赤祖父 保広
Yasuhiro Akasofu

日本国内の架空送電線では高経年化が進んでおり、近年、腐食に起因した障害事例が年々増加している。送電線の信頼性確保、延命化などの観点から、耐海塩腐食性に優れた合金型架空送電線を関西電力㈱と共同で開発した。本開発電線はテンションメンバに耐食アルミ合金覆鋼線（Al-Mn合金覆鋼線）を採用したものであり、標準電線（ACSR/AC）に対して1.6~2倍程度の耐食性能を有している。アルミ導体線は従来どおりであることから、コスト増はわずかで経済性も良好であり、2012年以降、国内実線路への適用が広がっている。

The deterioration of overhead transmission lines in Japan has been continuing and transmission failures caused by corroded aluminum conductor steel reinforced (ACSR) conductors have increased year by year. From the viewpoints of securing reliable power supply and prolonging the life of ACSR conductors, Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed a high corrosion resistance ACSR conductor jointly with the Kansai Electric Power Co., Inc. The conductor is highly resistant to sea salt because of the high corrosion resistance offered by aluminum-manganese-alloy-clad steel wires used in the steel core part. The corrosion resistance of the conductor is about 1.6-2 times higher than that of the conventional ACSR/AC conductor. Using conventional materials for the aluminum wires, this product offers high economic efficiency with a minimal cost increase. Since 2012, the conductor has been installed into many transmission lines in the Kansai area other regions of Japan.

キーワード：架空送電線、腐食、海塩、異種金属接触腐食、アルミ合金

1. 緒 言

日本国内の架空送電線は1960~80年代にかけて集中的に建設され、現在では40年以上経過した電線が多く存在している。島国である日本では沿岸部近辺を通過する送電線路が多く、長年に亘り自然環境下に晒されたACSR*¹（図1）などのアルミ系電線においては、腐食による障害事例が散見されるようになってきている。近年、このような

腐食事例は年々増加しており、電線破断に至る事例もみられることから、その対策が急務となっている。

そこで、送電線の信頼性確保、延命化などの観点から、耐海塩腐食性に優れた合金型架空送電線を関西電力㈱と共同で開発し、実線路への適用を図った。本報告では、架空送電線の腐食進展挙動と耐食性向上の考え方、アルミ合金材の製造性、本開発電線の耐食性能などについて述べる。

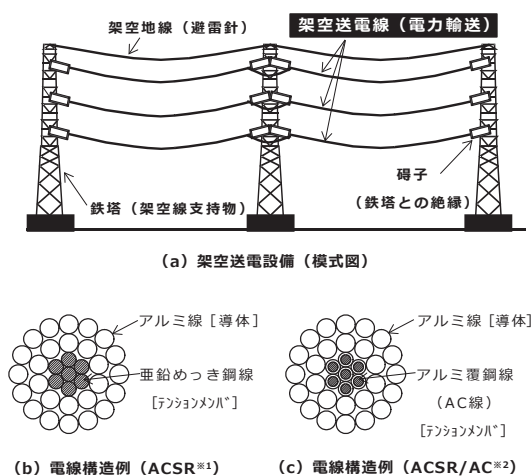


図1 架空送電設備の模式図と架空送電線の断面構造例

2. 耐食電線開発のための基礎検討

2-1 国内での電線腐食実態と開発ターゲット

国内における架空送電線の腐食発生実態⁽¹⁾を図2に示す。全電力会社での実線路の腐食評価データを環境・要因別に整理したものである。同図によれば、海塩のみで腐食に至った事例は全体の74%であり、臨海工業地帯を含めると海塩起因の腐食は全体の86%を占めている。

次に、実線路におけるACSRの海塩腐食事例⁽¹⁾を写真1に示す。海塩腐食の特徴は電線表面での腐食が殆んどなく、主に電線内部のアルミ線が腐食進展する点にある。電線の表面様相から内部の腐食を検出することは難しく、問題視されている腐食形態である。

以上により、海塩による電線内部腐食は取組むべき大きな課題といえ、開発ターゲットを「海塩腐食対策」と設定した。

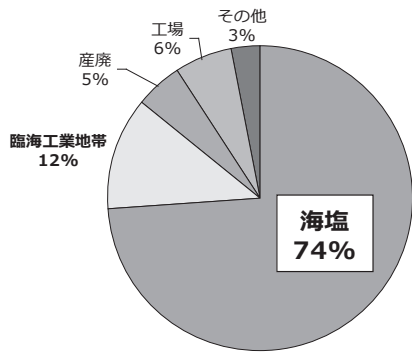


図2 日本国内における架空送電線の腐食発生実態⁽¹⁾

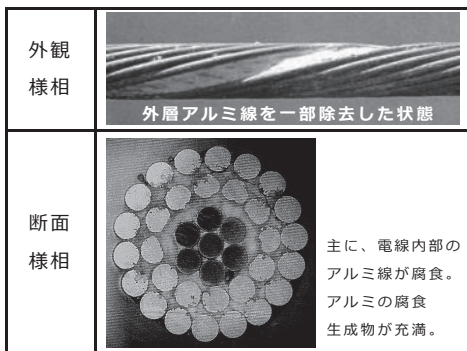


写真1 実線路におけるACSRの海塩腐食事例⁽¹⁾

2-2 海塩腐食進展挙動と耐食性向上の考え方

当社では、架空送電線の腐食進展挙動を詳細に評価すべく、実線路の運用状況を踏まえた腐食加速試験装置(図3)を構築した。通電加熱状態にある電線試料に腐食性水溶液を間欠的に噴霧し、濡れと乾きを繰り返しながら腐食進展させる試験装置である。

本試験装置にてACSRの時系列的な海塩腐食進展挙動を評価した結果、以下の事項が明らかとなった^{(2)~(4)}。

- ①初期段階では、電線内部に海塩を含んだ水分が浸入し、海塩が濃縮・停滞することで、電線内部の鋼心の亜鉛めっき層とともにアルミ線が腐食進展する。
- ②腐食によって鋼心の亜鉛めっき層が消失し、鋼地が露出すると、これと接触するアルミ線に異種金属接触腐

食^{*3}メカニズムが作用し、写真2、図4に示すように電線内部のアルミ線は激しく腐食進展する。

- ③一方、ACSR/AC^{*2}では、鋼心の鋼地露出が遅延化されるため、ACSRよりも耐海塩腐食性に優れる。

このように、ACSRの海塩腐食は、鋼心の鋼地露出、すなわち、アルミ線への異種金属接触腐食作用に大きく支配されることが判明した。

以上により、海塩腐食対策電線として、アルミ線への異種金属接触腐食作用を防止すべく、「鋼心を高耐食アルミ材で被覆した構造」を考案した(図5)。

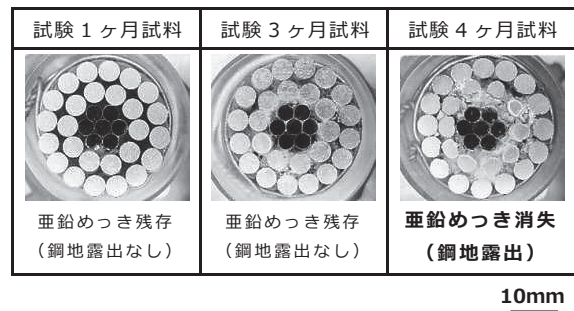


写真2 ACSRの海塩腐食進展挙動(電線断面様相)⁽²⁾

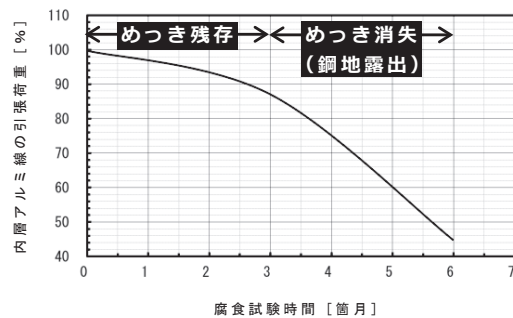


図4 ACSRの海塩腐食進展挙動(アルミ線引張荷重)⁽³⁾

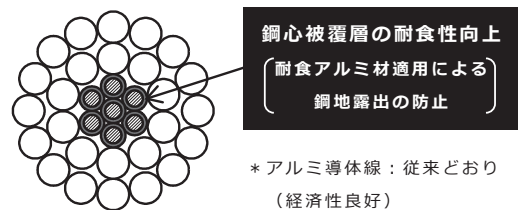


図5 耐食電線の断面構造(海塩腐食対策)

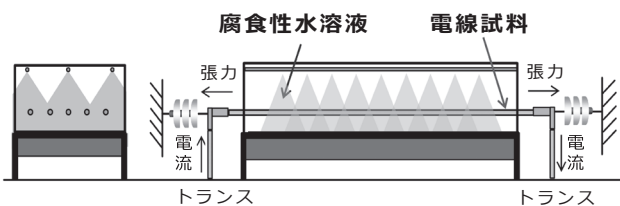


図3 腐食加速試験装置の模式図

2-3 鋼心被覆用耐食アルミ材の考え方

アルミの耐食性に及ぼす材料因子には、含有元素(種類、濃度、存在状態)、表面酸化皮膜(形成状態)などが挙げられる。電気用アルミ地金には、不可避免的な不純物元素

として微量の鉄 (Fe)、珪素 (Si) 等が含まれている (表1) が、Feはアルミへの固溶限^{*4}が極めて小さい⁽⁵⁾ため、アルミ地においてはAl-Fe系、Al-Fe-Si系などの化合物粒子の状態が存在しやすい。

表1 電気用アルミ地金成分の規格および実例 (wt.%)^{(5)*}

| | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Ti+V |
|----|---------|------|-------|--------|--------|---------|
| 規格 | 99.65 ≤ | ≤0.1 | ≤0.25 | ≤0.005 | ≤0.005 | ≤0.005 |
| 実例 | 99.79 | 0.05 | 0.16 | 0.001 | 0.002 | 0.00015 |

* JIS H 2110

アルミ地中に存在するこのような化合物粒子は、以下の要因によって、アルミの耐食性に影響を及ぼすものといわれている。

- ①化合物粒子とアルミ地との電位差に基づく、異種金属接触腐食メカニズムの作用。
- ②化合物粒子によるアルミ表面の酸化皮膜の緻密性、下地保護性の低下。

これらの現象を踏まえると、アルミの耐食性向上のためには含有不純物元素の低減 (アルミの高純度化) が有効となるが、その一方でコスト増を生じる問題がある。

そこで、コストを考慮した耐食アルミ材として、マンガン (Mn)、マグネシウム (Mg) を添加したアルミ合金材の適用を考案した。Al-Mn合金材では、Fe、Siなどからなる化合物粒子とアルミ地との電位差の改善、すなわち、両者における異種金属接触腐食作用の軽減を狙ったものである。一方、Al-Mg合金材では、アルミ表面の酸化皮膜を強固にする効果、すなわち、下地アルミの保護作用の向上を期待したものである (図6)。

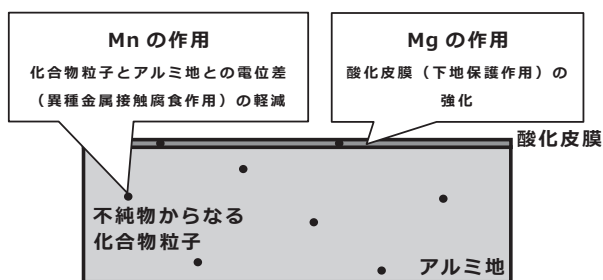


図6 Mn、Mg添加によるアルミの耐食性向上 (模式図)

3. アルミ合金組成の絞込み

黒鉛をつぼおよび水冷鋳型を用いた小規模溶解鋳造により、電気用アルミにMn、Mgをそれぞれ単独添加した合金試料を作製し、加工性および耐食性を評価した。

加工性は、 $\phi 30\text{mm}$ の鋳造材を冷間鍛造および伸線し、

適宜、焼鈍を加えながら $\phi 4.5\text{mm}$ まで加工した際の表面欠陥の発生状況で評価した。その結果、Al-Mn、Al-Mg合金試料とも、添加量が一定量を超えると加工中にキズ、割れ等の欠陥が発生するようになり、加工性が低下した。

次に、耐食性は、塩化ナトリウムを主成分とした乾湿サイクル腐食加速試験により評価した。試験後の素線試料の断面観察により、腐食深さを測定したものである。その結果、Al-Mn、Al-Mg合金試料とも、添加量の増加とともに腐食深さが小さくなり、耐食性が向上する傾向にあった。

本試料の評価結果を表2に示す。耐食電線の開発のためには、製造性、耐食性を両立する合金組成の選定が必要となる。合金材のコスト、電線諸性能に及ぼす影響、過去に実施した類似合金組成材の加工性などを十分に考慮し、Al-Mn合金組成は0.2~1.0wt.%、Al-Mg合金組成は0.5~1.5wt.%の範囲にそれぞれ絞り込みを行った。

表2 小規模溶解鋳造試料の評価結果

| Mn、Mg濃度 | 低 | ⇔ | 高 |
|---------|---|---|---|
| 製造性 | 高 | ⇔ | 低 |
| 耐食性 | 低 | ⇔ | 高 |

4. 量産設備での製造性評価

表3に示す6組成の合金材 (Al-Mn、Al-Mg各3組成) について、量産設備にて鋼線被覆用アルミ合金材、アルミ合金覆鋼線および電線を試作し、各々の製造性を評価した。

表3 アルミ合金材の検討組成

| No. | 試料名 | 合金組成 |
|-----|--------|--------------|
| 1 | 0.2%Mn | Al-0.2wt.%Mn |
| 2 | 0.5%Mn | Al-0.5wt.%Mn |
| 3 | 1.0%Mn | Al-1.0wt.%Mn |
| 4 | 0.5%Mg | Al-0.5wt.%Mg |
| 5 | 1.0%Mg | Al-1.0wt.%Mg |
| 6 | 1.5%Mg | Al-1.5wt.%Mg |

4-1 鋼線被覆用アルミ合金材

4-2項「アルミ合金覆鋼線」に供試するアルミ合金材として、富山住友電工(株)の連続鋳造圧延設備にて $\phi 9.5\text{mm}$ の荒引線を試作した。2種のAl-Mn合金試料 (0.2%Mn、0.5%Mn) および3種のAl-Mg合金試料の表面品質はいずれも電気用アルミ荒引線のそれと遜色なく、良好であった。一方、1.0%Mn試料では、上記の5種の試料と比較して製造がやや難しい結果であり、適用候補材から除外した。

4-2 アルミ合金覆鋼線

(株)ジェイ・パワーシステムズの量産ラインにて、4-1項で絞り込んだ5組成のアルミ合金覆鋼線を試作した。0.2%Mn、0.5%Mn試料では、いずれも安定してアルミ合金覆鋼線を製造でき、表面品質も良好であった。0.5%Mg試料では、製造がやや難しかったものの、アルミ合金覆鋼線を得ることができた。これら試料に対して、1.0%Mg、1.5%Mg試料では、安定製造が難しい結果であり、適用候補材から除外した。

4-3 電線

4-2項での0.2%Mn、0.5%Mnおよび0.5%Mg試料のアルミ合金覆鋼線を $\phi 2.6\text{mm}$ まで冷間伸線後、 $\phi 2.6\text{mm}$ アルミ線とともにより合わせ、アルミ导体断面積 160mm^2 の電線を試作した。いずれの試料とも、伸線加工時およびより合わせ時において、アルミ合金覆鋼線の被覆層にキズ、割れ、剥離などの欠陥はみられなかった。また、写真3に示すように、試作電線の表面品質は標準電線のそれと同等であり、良好であった。

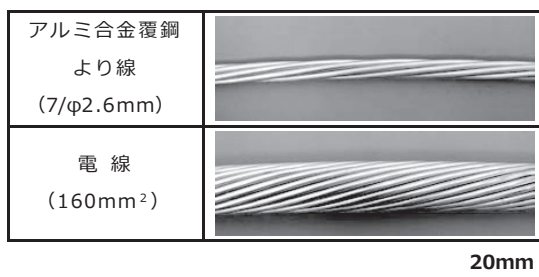


写真3 試作品の外観様相例 (0.5%Mn)

4-4 総合評価

量産設備での製造性評価結果をまとめて表4に示す。耐食電線の適用候補となる合金材は、0.2%Mn、0.5%Mnおよび0.5%Mgの3組成となった。

表4 量産設備での製造性評価結果

| No. | 試料名 | アルミ合金荒引線*1 | アルミ合金覆鋼線*1 | 電線*1 | 総合評価*2 |
|-----|--------|------------|------------|------|--------|
| 1 | 0.2%Mn | ○ | ○ | ○ | ◎ |
| 2 | 0.5%Mn | ○ | ○ | ○ | ◎ |
| 3 | 1.0%Mn | △ | - | - | ※ |
| 4 | 0.5%Mg | ○ | △ | ○ | ◎ |
| 5 | 1.0%Mg | ○ | × | - | ※ |
| 6 | 1.5%Mg | ○ | × | - | ※ |

*1 ○：良 △：若干難 ×：困難 -：評価対象外
*2 ◎：適用候補 ※：適用候補外

5. 合金型耐食電線の各種性能と実線路適用

5-1 各種性能

(1) 耐食性能

乾湿サイクル腐食加速試験により、4-3項で試作した3種の合金型耐食電線 (ACSR/耐食 160mm^2)、標準電線 (ACSR/ 160mm^2 ; 比較材) の耐食性能を評価した。

(a) 外観様相

腐食加速試験後における各種アルミ覆鋼より線の外観様相例⁽⁶⁾を写真4に示す。0.2%Mn、0.5%Mn試料では、初期の金属光沢は消失しているものの、腐食欠損は軽微であった。0.5%Mg試料では、2種のMn試料と比較して腐食欠損程度が大きかった。そして、比較材である標準試料では腐食欠損箇所が散見され、欠損程度は0.5%Mg試料のそれよりも大きい結果であった。

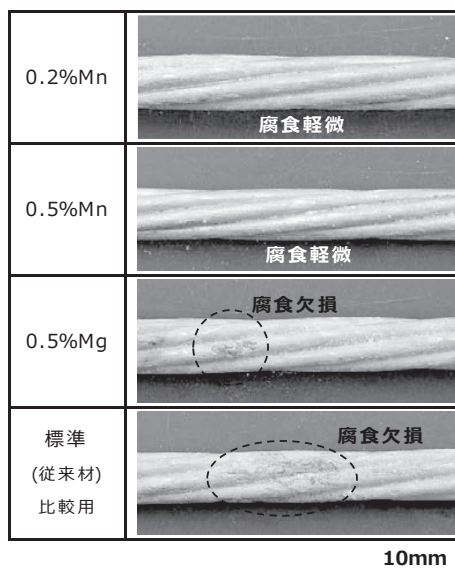


写真4 腐食試験後における各種アルミ覆鋼より線の外観様相例 (7/φ2.6mm)⁽⁶⁾

(b) 断面様相

腐食加速試験後における各種アルミ覆鋼線の断面様相例^{(6),(7)}を写真5に示す。各試料とも20部位にて観察を行ったものであるが、0.2%Mn、0.5%Mn試料では、鋼地に至る腐食進展箇所は確認されなかった。一方、0.5%Mg試料では、鋼地の露出箇所が一部観察され、耐食性はAl-Mn合金材の方が優れることを確認した。また、標準試料においては鋼地露出箇所が散見され、露出の程度は0.5%Mg試料のそれよりも大きな結果であった。

(c) 腐食深さ

各種アルミ覆鋼線の腐食深さの推移^{(6),(7)}を図7に示す。0.2%Mn、0.5%Mnおよび0.5%Mg試料の腐食深さはすべて標準試料のそれと比較して小さく、Mn、Mg添加に

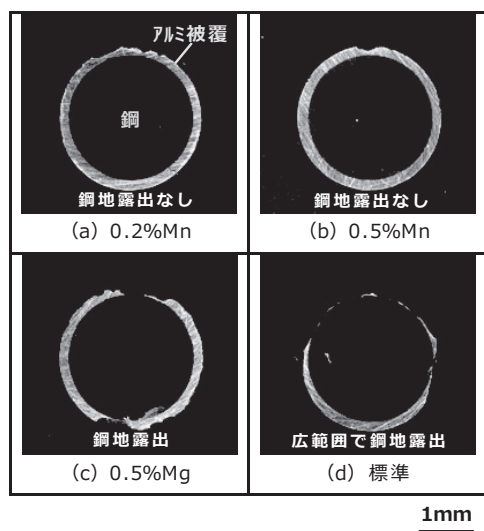


写真5 腐食試験後における各種アルミ覆鋼線の断面様相例 (φ2.6mm) (6)、(7)

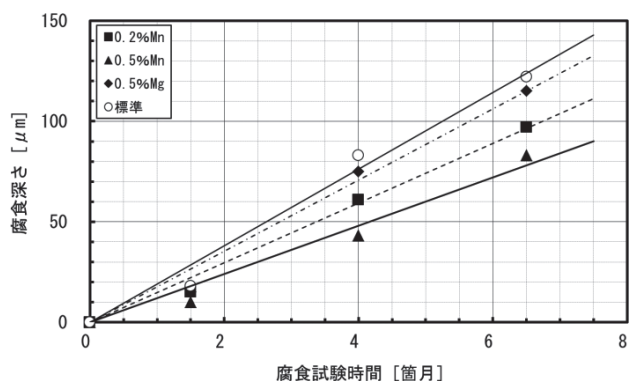


図7 各種アルミ覆鋼線の腐食深さ (φ2.6mm) (6)、(7)

よる耐食性の向上が示された。また、3種の合金試料の中では0.5%Mn試料が最も優れており、標準試料に対して1.6倍の耐食性能を有していた。すなわち、鋼心の鋼地露出によって激しく腐食し始める時間は、標準電線ACSR/ACのそれよりも1.6倍延伸化されるものといえる。

以上により、最適なアルミ合金組成として、Al-0.5wt.%Mnを選定した。

なお、他サイズ電線での評価も行っており、例えば、アルミ導体断面積410mm²サイズの電線では、標準電線比でおよそ2倍の耐食効果が示されている。

(2) 機械的・電気的性能

基本的な機械的・電気的性能を確認すべく、電線およびアルミ合金覆鋼線の各種性能を評価した。機械的性能は電線、素線ともACSR/ACのそれと同等であり、実用上問題ない結果であった。また、電気抵抗はACSR/ACと比較して若干増加するものの、ACSRよりは低い値であった。

5-2 実線路への適用

本開発の合金型耐食電線 (Al-0.5wt.%Mn) は、2012年に関西電力(株)の275kV実線路に初採用された。その後、国内の他電力会社も含めて適用箇所が増えており、2016年4月時点での適用総長は1,062kmとなっている。

6. 結 言

架空送電線の信頼性確保、延命化などの観点から、耐海塩腐食性に優れた合金型架空送電線に関西電力(株)と共同で開発した。

本開発電線はテンションメンバに耐食アルミ合金覆鋼線 (Al-0.5wt.%Mn合金覆鋼線) を採用した構造であり、標準電線ACSR/ACと比較して1.6~2倍程度の耐食性能を有している。2012年に関西電力(株)に初採用され、その後、国内の他電力会社も含めて適用が広がっている。

今後は、耐熱アルミ系・高力アルミ系電線、架空地線など他品種も含めて適用拡大を図り、送電線路のさらなる信頼性向上、延命化に貢献していきたい。

最後に、本電線の開発および実線路適用にあたり、関西電力(株)の関係された皆様方に、深く感謝の意を表します。

用語集

※1 ACSR

Aluminum Conductor Steel Reinforced: 鋼心アルミより線。テンションメンバを垂鉛めっき鋼線とし、導体をアルミ線とした架空送電線。

※2 ACSR/AC

Aluminum Conductor Steel Reinforced/Aluminum Clad: アルミ覆鋼心アルミより線。テンションメンバをアルミ覆鋼線とし、導体をアルミ線とした架空送電線。

※3 異種金属接触腐食作用

複数の金属材料が接触(導通)された状態で腐食性環境下に晒された際、卑な金属が腐食促進され、貴な金属が腐食抑制される現象。

※4 固溶限

母相金属中に他元素が原子状態で溶け込むことができる限界の濃度。

参 考 文 献

- (1) 電気学会、「架空送電線の電線腐食現象」、電気学会技術報告第968号、pp.5-6 (June 2004)
- (2) 高城貴弘、小栗修、坂田学、伊藤英人、渡部雅人 他、「架空送電線の腐食挙動に関する研究(その2)」、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、no.19、pp.21-22 (September 2006)
- (3) 高城貴弘、小栗修、坂田学、伊藤英人、渡部雅人 他、「架空送電線の腐食挙動に関する研究(その3)」、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、no.19、pp.23-24 (September 2006)
- (4) 高城貴弘、小栗修、坂田学、伊藤英人、渡部雅人 他、「架空送電線の腐食挙動に関する研究(その4)」、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、no.19、pp.25-26 (September 2006)
- (5) 村上陽太郎 他編、「アルミニウム材料の基礎と工業技術」、日本アルミニウム協会、pp.342-344 (2010)
- (6) N. Shimizu, T. Omote, H. Ito, M. Watabe, "Development of Estimating Method for Conductor corrosion and High Corrosion resistant Conductor for overhead transmission lines," CIGRE Session Paris 2016, No.B2-303, pp.1-6, Paris, France (August 2016)
- (7) 生駒慎吾、土居聡、伊藤英人、渡部雅人 他、「耐食電線の開発」、平成22年電気学会全国大会論文集、no.7、pp.188-189 (March 2010)

執 筆 者

渡部 雅人* : 電力技術開発部 主査



伊藤 英人 : 架空線事業部 主幹



長野 宏治 : 電力技術開発部 グループ長



辻 俊伸 : 架空線事業部 グループ長



菅 伸明 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 架空線部
工場長



赤祖父保広 : 富山住友電工(株) 技術部 主査

*主執筆者

44 耐海塩腐食性に優れた合金型架空送電線