

< 論文審査要旨 >

空調機への実装を目的としたアルミニウム冷媒配管の

耐食性評価に関する研究

内山 聖士

主査：関 志朗

本博士論文の本審査を 2024 年 8 月 24 日（土）、八王子校舎 1W-111 教室において、主査、副査 4 名及び 24 名の聴講者の立ち合いの元、14 時より実施した。発表 60 分、質疑 30 分の公聴会の後、主査及び 4 名の副査での審査委員会を行い、既に査読付き学術論文 2 報として成果は既に発表されており、申請者の博士論文は博士（工学）の学位を申請するに十分な内容を含むと判断された。

日本国内の空調設備の冷媒配管には、加工の容易さや耐食性から銅が使用されるが、銅は比較的希少な金属である。また、電気自動車や再生可能エネルギーの需要増加に伴い、近年、銅の価格が大幅に高騰している。本博士論文では、銅に代わる冷媒配管の材料として、資源が豊富で安価なアルミニウムに着目し、これを冷媒配管に適用するため、アルミニウム冷媒配管が銅冷媒配管と同等の性能を有することを示すことを目的としている。本研究は、建築設備の建設から竣工後 1 年程度の短期間と、空調設備の更新時期である 20 年程度の長期間に分けて、アルミニウム冷媒配管の性能評価を包括的行ったものであり、全 6 章の構成から成る。

第 1 章では、今後空調用冷媒配管に求められる要件を整理するため、フロン系冷媒の開発経緯とオゾン層破壊や地球温暖化などの国際的な環境問題に関する規制動向、空調用冷媒配管に使用される原材料のストックと価格動向、建設業を取り巻く状況について考察した。これにより、将来の空調用冷媒配管には、施工性の向上、地球温暖化の観点からの長期使用時の漏洩防止が求められることが明らかとなった。また、アルミニウムを冷媒配管に使用する際に遵守すべき法規や基準を整理し、アルミニウム合金の適用可能性を提案した。

第 2 章では、アルミニウムを冷媒配管に使用した際の短期性能である施工性と空調機の運転能力の評価を行った。アルミニウムは銅に比べて放熱性がやや劣るが、その軽量性が特長である。実験では、軽量のアルミニウムと専用工具を使用することで施工性が向上し、アルミニウム配管の施工時間は銅に比べて約 20%短縮された。また、適切な設計により空調

機の性能が保持され、アルミニウム冷媒配管は銅冷媒配管と同程度の短期性能を有することが確認された。

第3章では、アルミニウム冷媒配管を20年間使用することを想定し、配管内側（冷媒通過箇所）と外側（大気暴露箇所）の腐食要因を整理し、加速劣化試験を行った。実験結果から、内側からの腐食は生じにくいことが示唆された。外側に関しては、初期段階に生成する腐食生成物が保護皮膜として機能し、さらなる腐食進行を遅らせることが示された。最大孔食深さも法規で規定される腐れ代の範囲内であり、内陸部や室内での使用においてアルミニウム配管の有用性が確認された。

第4章では、曲げ加工したアルミニウム配管の機械的特性や耐候性を評価し、引張応力がかかった状態での腐食進行を分析した。実験では、曲げ加工部においても直管部と同様の耐久性が確認され、アルミニウム配管は実用上の使用に耐えることが示された。

第5章では、保温材が被覆された状態でのアルミニウム配管と銅配管の腐食劣化挙動を確認した。保温材が損傷し、雨水などが浸入した場合に深刻な損傷が生じる可能性があることが示唆された。

第6章では、空調用設備の冷媒配管にアルミニウムを適用することについて総括した。コスト面や施工性の観点から、アルミニウム冷媒配管は有益である。濡れる乾くを繰り返す環境では十分な耐久性を示し、室内や内陸部での使用が可能である。しかし、塩害地域での使用には注意が必要であり、配管表面の被覆や施工方法の工夫が求められる。

以上のように、本論文で述べたアルミニウム配管の実装における内在因子を系統的に整理し、実験的かつ化学的手法により評価・分析した本論文は、建築設備の中の冷媒配管の開発の分野発展に貢献しうる研究成果をまとめたものであり、学術的に高く評価できる。

したがって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

2023年8月24日

内山 聖士 氏 博士学位論文 審査委員 所見

工学院大学 教育推進機構 基礎・教養科 教授
高見 知秀

本論文は、空調機に実装される冷媒配管として、銅(Cu)の代替材料としてアルミニウム(Al)を適用するために、Al空調用冷媒配管の短期的性能としての施工性・冷暖房能力、そして長期的性能としての電気化学特性・腐食劣化挙動についてまとめたものである。

第1章では、Cuの代替材料としてAlを適用する根拠として、空調機・配管内に流れる冷媒、配管に使用される原材料のストックと価格、建設業の就業者数、これらの動向を総括し、今後空調用冷媒配管に求められる要件について述べている。そして、価格高騰や資源枯渇が懸念される銅に替わる空調用冷媒配管としてAlを用いる際に遵守すべき法規を総括し、空調用冷媒配管に使用可能なAl合金として実用的には3000番、6000番の使用が望ましいことが示されている。

第2章では、Cuに代わる冷媒配管としてAlを適用するために、短期性能(施工性、空調能力)の比較試験を行い、従来のCu配管と同様の選定を行うと、Al配管系統の冷暖房能力はCu配管系統に比べて10～20%劣るが、Al配管はCuと同等の施工が可能で、軽量のAl配管の採用により、Cu配管に比べて約20%施工性が向上することが示されている。また、配管圧力損失に沿った配管選定方法を行うことで、空調能力が維持できることが示されている。

第3章では、配管の内側と外側では腐食要因が異なると想定して、配管の内側と外側における腐食要因を整理して加速劣化試験を行い、配管の内側は、実用上の最高使用温度まで加温した加速劣化試験により、Al配管、Cu配管ともに配管の内側からは、腐食が生じにくいことが示されている。また、配管の外側に対し、実環境を模擬した加速劣化試験を行い、Al配管はCu配管と同等以上の耐候性を有することも示している。

第4章では、曲げ加工による応力腐食について、Al配管とCu配管を機械式ベンダーで曲げ加工し、曲げ箇所毎に引張応力又は圧縮応力が掛かった状態での電気化学的・機械的特性や耐候性について述べている。実環境を想定した加速劣化試験では、曲げによる差はCu配管、Al配管ともに遜色ないことが示されている。

第5章では、Cuに代わる冷媒配管としてAlを適用するために、冷媒配管の保温材の内側での応力腐食の感受性をNaCl水溶液への浸漬試験により検証している。本研究で実施した中性のNaCl水溶液下では、保温材下のAlはCuが腐食生成物が保護皮膜となり、母材の腐食劣化が進行しないことが示唆された。

第6章では、これまでの章の総括として、資源枯渇が懸念されるCuに代わり、Al冷媒配管の使用は、法規的にも短期性能でもCuと同等であると結論している。そして今後の研究課題として、Al配管が不利な条件となる酸やアルカリ環境、またはCuやFeが多量に存在する環境での腐食劣化挙動を探索することを挙げている。

以上の研究成果をまとめた筆頭英語論文として現時点で2報掲載しており、国内外の学会発表と共に十分な研究実績を有している。さらに、実際に実機への実装という応用についても検討されており、化学応用学の検知からも評価される研究成果である。よって、同氏を「博士」の学位に値すると判断する。

2024 年 8 月 24 日

内山 聖士氏 博士学位論文 学外審査委員所見

学位論文題目：空調機への実装を目的としたアルミニウム冷媒配管の耐食性評価に関する研究

工学院大学名誉教授 木村 雄二



日本国内の空調用冷媒配管としてこれまで主に銅（Cu）が使用されている理由として、加工容易性や優れた耐食性、電気伝導性、熱伝導性などが挙げられているが、Cu は希少であり、将来的に価格高騰や資源枯渇の可能性がある。

一方、アルミニウム（Al）は資源が豊富で軽量であり、車両や航空機のボディ、エアコンの室外機などで使用されているが、Cu よりも強度が劣るため、同じ用途で使用する際には注意が必要である。Al は耐食性に優れ、様々な合金として利用されているが、空調用冷媒配管としての施工性や空調能力、耐食性、耐候性については未だ十分な検討がされていない。また、近年の冷媒の開発動向を考えると、塩素を含有しない冷媒の使用は、孔食発生を抑止することに対してアドバンテージを与えることから Al の使用への期待が高まることにもなる。

本研究では、Al 冷媒配管の短期的な施工性や冷暖房能力、長期的な腐食劣化の挙動を評価し、Al を冷媒配管として使用する際の法規や配管形状、被覆状態なども確認している。これにより、Al 冷媒配管の実用性を評価し、その長期性能を検討している。

本論文は 6 章から構成され、

第 1 章では、空調用冷媒配管におけるフロン系冷媒の開発動向と、環境問題への影響について述べた上で、冷媒配管に使用される材料や価格動向、そして労働人口の変化について概説している。また、銅（Cu）に代わりアルミニウム（Al）を冷媒配管に使用するための法規についても整理している。これらを踏まえて、空調用冷媒配管に求められる要件を整理し、本論文の目的を述べている。

第 2 章では、Al 冷媒配管の施工性と空調能力を評価し、従来の Cu 配管と同等の短期性能を有することを明らかにしている。また、配管の選定においては、圧力損失が空調機の性能に大きく影響することを指摘し、配管選定の提案を行っている。

第 3 章では、直管部材における内側および外側の腐食劣化挙動を評価し、Al 配管が Cu 配管と同等の長期性能を持つことを確認している。

第 4 章では、曲げ加工管における腐食劣化挙動を評価し、Al 配管が Cu 配管と同様に実用的であることを示している。

第 5 章では、保温材下における腐食劣化を評価し、Al 配管と Cu 配管の両方が中性の NaCl 水溶液下で健全性を保持することが示唆している。

最後に、第 6 章でこれらの成果を総括し、結論を導いている。

このように、空調用冷媒配管に関連する社会的な背景、フロン系冷媒の開発動向と環境問題への影響について述べた上で、Al 冷媒配管の施工性と空調能力の評価、直管部材における内側および外側の腐食劣化挙動の評価、曲げ加工管における腐食劣化挙動の評価、保温材下における腐食劣化の評価を実施し、これらの成果を総括し、Al 配管の多くの実環境下での使用の可能性と今後の検討課題を結論として導いている。

したがって、本論文は、博士（工学）学位請求論文として十分価値があるものと認められる。

以上