

学位論文題名

生産・物流施設における熱環境改善と 屋根散水手法に関する研究

学位論文内容の要旨

生産施設・工場や倉庫といった、その面積や容積が大きい割に、低いコストで建設される建物においては、内部熱環境、とりわけ夏期における熱環境が悪化する例が見られる。本研究は、このような生産施設を対象とした環境改善技術として、屋根散水手法の適用を検討したものである。

1章では、このような生産施設のなかで、内部熱環境が悪化しやすい施設を研究対象とすることを前提とし、対象となる生産施設の建物的な特徴を列挙した。そして暑熱環境を定量化する手法、すなわち体感温度指標を引用しながら、実際の温度計測例を取り上げて、過酷な暑熱環境下にあることを示した。

2章では、一般的な暑熱環境の改善プロセスを提示し、実存する建物の熱環境シミュレーションに必要な情報を提示したうえで、具体的な建築要素の把握手法について展開した。まず、手軽に実施可能な、短期間の室内での継続的な温度計測から、換気量と室内発熱量を推定する手法について論じた。この手法は、建物の定常状態での熱平衡式を立案し、そのシミュレーション結果と実測結果を照合しながら未決変数を推定するものである。外気温度と日射量の変動を受ける、建物相当外気温度という項に注視することで、未決変数、すなわち換気量と室内発熱量の推定を行う。推定方法は、換気量を順次変動させながら、相当外気温度と実測で観測された室温の相関をとる。換気量の決定方法は、建物相当外気温度が室温に対して比例定数が1となることを利用して行う。また、換気量を使用し室内発熱量を決定するものである。本論では、この手法を、工場の実測データを適用した。その結果、最も単純な熱平衡式で室内熱環境を表現できる建物では使用できる可能性が高いことを示した。次に、屋根の日射吸収率の現場計測手法について論じた。新品の鋼板であれば、その日射吸収率を試験機関などで計測することが可能であるが、汚れの付着と老朽化が進行した屋根面の材料を切り抜き、吸収率を計測することは困難である。本手法は、2つの基準板を用意し、被試験体を含めて太陽光の当たる現場で表面温度を計測することで日射吸収率を推定するものである。

以上の手法は、現地で実施可能な情報入手であり、図面や仕様書などに記載された情報とあわせて総合的に判断することが、的確な予想につながるものと考えられる。

3章では、屋根散水の効果予測と題し、蒸発冷却効果について改めて論じた。空調技術に関わる技術者であれば、論点は湿球温度となる。日常的に使用される湿り空気線図に記載されている湿球温度を利用して、建物の日射の当たる屋根面の濡れ面状態の温度(蒸発冷却面温度)を演繹的に表現することを目指した。この方法は、日射や背面の温度を勘案して乾き面の表面温度を求め、その値と外気の絶対湿度から、湿球温度を算出し、これを表面湿球温度とする。実際の蒸発冷却面温度とは2.3℃の差が生じる。蒸発冷却面温度を湿球温度で表現することにより、屋根散水を実施した場合の湿り空気線図を使用した直感的な理解を可能とした。また、散水効果に影響する要素、すなわち外気対流・放射熱伝達率、外気温度、外気湿度、日射受熱量、夜間放射量、熱コンダクタンス及び室温に関して、その影響度合いを分析し、表面湿球温度を知ることが、極めて重要であることを示した。

次に1室モデルの屋根散水シミュレーションを実施し、空間温度と散水による冷却効果を示した。室内の温度が高くなる条件下において、散水冷却の効果が大きくなることを明らかにした。

4章では、折板屋根と屋根散水の相性について論じた。生産施設の特徴の一つは折板と呼ばれる鋼板製の屋根の使用率が高いことである。断面形状が独特で、この屋根に蒸発冷却を適用しようとした場合に、工夫が必要となる。この章で取り上げた中空層蒸発冷却の目論見は、模型試験において確認することができた。しかし、この仕組みを実現するには、耐久性のある保水面の実現や、中空層の換気量確保など、現実的な工法・及び施工上の問題があり、実現に至らなかった。更に取り上げたのは、この独特な形状に起因する熱流に関する影響である。表面の伝達率に関して、熱流計測を行った結果を示した。その結果、屋根形状による室内外の熱伝達率補正係数と熱貫流率補正係数を提案した。日射吸収率及び長波長放射率に関しては、折板屋根の形状による多重反射の影響を計算で論じ、形状と素材の吸収率、放射率毎に補正係数を示した。この結果、折板の熱貫流率は平板の場合よりも若干大きくなり、日射吸収率、長波長放射率も大きくなることで、屋根面の熱性能の重要性が増すことを示した。

この章は研究成果としては不十分な部分もあるが、より実効性の高い暑熱対策の速やかな実現という趣旨に鑑み、実験と検討の意味を含め掲載するものとした。

5章では、実施している屋根散水をシステムとして紹介した。屋根散水の冷却能力は3章で述べた要素で決定されるが、実際には濡れ面の形成方法や、水使用量の適正化や雨水の利用、及び屋根散水のランニングコストや適否などの問題が山積している。本章では、この解決策とその検証結果を示している。この結果、均一な濡れ面を形成するための散水ノズルの配置と散布水量を検討し、間欠的或いは順次散水による散水量の低減、散水を回収して、循環再使用方法について実験で検証している。また、屋根を利用して雨水の貯留を行い、それを散水に利用する水収支についても検討している。

最後に、屋根散水システムのランニングコストを分析している。この結果、順次散水で水を循環使用することにより、安価な工業用水を使用した場合で22円/(m²年)となり、同じ効果を、電力使用の冷房で実現した場合と比較すると90パーセントの削減となる。しかし、上記の散水の節水技術を適用しない場合では、はるかに高額なランニングコストとなることを示した。

6章では、これまで筆者らが手がけた屋根散水実施例において、設置状況や計測データを示し、その効果をまとめている。ここで取り上げたケースは用途や目的など、様々で中には、前章までの想定に含まれていないコンクリートの屋根での実績も含まれる。この実測結果を日射取得熱の削減、屋根からの放射低減、室温低減、作用温度低減の各効果でまとめ、屋根散水の効果を明らかにした。

また、本章では半屋外空間での屋根散水の実施例の計測結果についても報告している。屋根散水は屋内の冷却効果に加えて、屋外に対しても冷却効果が存在することを示唆している。更に、ノズルを使用した散水の空中での水滴温度の計測結果を報告している。この結果、使用する水温が高くても、散水中に冷却されることが判明し、散水を回収しながら使用可能であることの前提となった。

以上、生産施設の暑熱対策の必要性と、対策の手順、及び効果予測のための建物情報の推定方法を示し、暑熱対策として屋根の散水冷却について検討と実験を行った結果をまとめ、屋根散水の暑熱対策としての効果を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 繪 内 正 道
副 査 教 授 長 野 克 則
副 査 教 授 横 山 眞太郎
副 査 准教授 羽 山 広 文

学 位 論 文 題 名

生産・物流施設における熱環境改善と 屋根散水手法に関する研究

生産施設・工場や倉庫といった、施設容積が大きい割に低いコストで建設される建物では、とりわけ夏期における熱環境が悪化する事例が数多く見られる。本論文は、このような建築施設の環境改善技術として、屋根散水の適用手法を検討している。

1 章では、対象諸施設の建築的な特徴を列挙し、暑熱環境を定量化する手法や実際の温度計測例を取り上げ、過酷な暑熱環境下にある現状を明らかにした。

2 章では、既存施設の熱環境シミュレーションに必要な情報を提示したうえで、具体的な建築要素の把握手法を取り上げている。建物の定常状態での熱平衡式を立案し、そのシミュレーション結果と実測結果を照合しながら未決変数を推定する手法を開発し、換気量と室内発熱量を決定した。次いで、室内熱環境に大きな影響を与える屋根の日射吸収率の現場計測手法を開発し、2つの基準板と被試験体に太陽光を照射させ、表面温度を計測から日射吸収率を推定した。

3 章では、屋根散水の効果予測のために、湿り空気線図に記載されている湿球温度を利用し、日射受照屋根面の濡れ面状態の温度(蒸発冷却面温度)を演繹的に表現することにより、屋根散水効果の直感的な理解を可能にした。また、散水効果への影響要素である外気対流・放射熱伝達率、外気温度、外気湿度、日射受熱量、夜間放射量、熱コンダクタンス及び室温の影響度合いを分析し、表面湿球温度を知ることが、極めて重要であることを示し、室内の温度が高くなる条件下においては、散水冷却の効果が大きくなることを明らかにした。

4 章では、折板屋根の独特な形状に起因する熱流に関しての影響度合いを検討し、形状を踏まえた室内外の熱伝達率補正係数と熱貫流率補正係数を提案した。折板の熱貫流率は平板の場合よりも若干大きくなり、日射吸収率や長波長放射率も大きくなることで、屋根面の熱性能の影響度合いが増すことを明らかにした。

5 章では、均一な濡れ面を形成するための散水ノズルの配置と散布水量を検討し、間欠的或いは順次散水による散水量の低減、散水を回収する循環再使用方法(雨水貯留手法も含む)について実験的に検証を加えた。順次散水の循環使用を安価な工業用水とした場合は、22 円/(m^2 年)で済むが、同じ効果を従前の冷房で実現させようとした場合、210 円/(m^2 年)に達することを示した。

6章では、幾つかの屋根散水実施例の設置状況や計測データを示し、日射取得熱の削減、屋根からの放射低減、室温低減、作用温度低減の各効果を取りまとめ、屋根散水の暑熱対策としての効用を明らかにした。

これを要するに、著者は、物流・生産施設の環境改善に係わって屋根散水手法の新知見を得たものであり、建築計画学、建築環境学、建築設備学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。