

霧模擬技術の革新： 自律型モビリティ評価システムによる高精度な霧環境の再現

Innovation of Fog Emulation Technology: Reproduction of Fog Environment
by Testing and Verification System for Autonomous Mobilities



中山 悠*¹
Haruka Nakayama

吉見 一真*²
Kazuma Yoshimi

日根野 義克*³
Yoshikatsu Hineno

自動運転システムは、世界的に精力的な開発が進み、今後飛躍的な能力向上と普及が見込まれているが、その安全・安心を保証するためには、多様な自然環境下(霧, 雨, 光, 雪など)においてセンサやシステムが正常に機能することを検証する必要がある。三菱重工機械システム株式会社では、この検証ニーズの高まりを見込み、自律型モビリティの評価システムである屋内型の統合環境試験システムを開発中である。本報では、一様な環境の実現・維持の難易度が高い霧模擬について、簡便な方法で10~200mの任意の視程を±10~15%の精度で形成・維持可能な制御システムと制御方法を説明する。

1. はじめに

自然界における霧環境は、水蒸気を含んだ大気が冷やされるなどして飽和状態に達することによって発生する。霧が発生すると、水の微細な粒子によって視界が遮られ視程が減少する。霧の濃度(空気中の水分量)と視程には反比例の関係が成り立ち、近似式(以下、視程変換式)が提案されている⁽¹⁾。

一方、霧模擬装置には様々なタイプがあり、試験室に導入する外気を蒸気ボイラで加湿する方式では、霧の生成に多量のエネルギーを必要とするとともに試験室内に一様な霧を形成することが難しい。別方式として、ある程度加湿した空気を空調機器で冷却することにより霧を発生・維持している装置もあるが、試験室が大規模になると、それに伴い大出力の空調装置が必要になる。一方、簡便に霧を生成する方法としてノズルでの噴霧方式があり、霧粒子の微細化に圧縮空気をを用いる2流体ノズルの使用が一般的である。2流体ノズルで生成した霧の平均液滴径は10 μ m以下が可能となるため沈降速度が小さく、空間中に長時間滞留する特徴をもつため、視程の制御には噴霧を時間軸でON/OFF制御(間欠噴霧)することが必要となる。ただし、外部環境(温湿度)の影響を受けやすく、ノズル噴霧に対する視程変化の時定数も大きいため、試験装置として求められる“規定条件”をフィードバック制御で形成・維持することが難しい。このように、霧の模擬試験装置では、構成を複雑化することなく霧環境を低コストで形成し、かつ一様な視程に制御することが求められている。

本報では、上記課題を解決するために三菱重工機械システム株式会社が開発した、簡便な構成で所望の視程の霧環境を安定的に形成・維持することができる制御システム・制御手法を紹介する。

*1 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 新事業開発部 主席部員 技術士(航空・宇宙部門)

*2 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 新事業開発部

*3 三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 新事業開発部 課長

2. 霧環境模擬システム

開発した霧形成・視程制御システム(図 1)は、流体ノズル、噴霧パターン指令のための電磁弁、制御演算装置、温湿度センサ、視程計と操作部で構成され、制御結果は試験室内の視程計でモニタリングされる。試験空間は、図 2 に示すように空気の流出入を許容する非密閉構造になっており、外部に漏れる空気の漏洩量と、外部から流入してきた湿度 100%未満の空気を湿度 100%に到達させるために消費される水分量を演算する。この処理結果を境界条件として、空間内の視程が目標値となるように、ノズルの噴霧量と噴霧パターンを決定する。

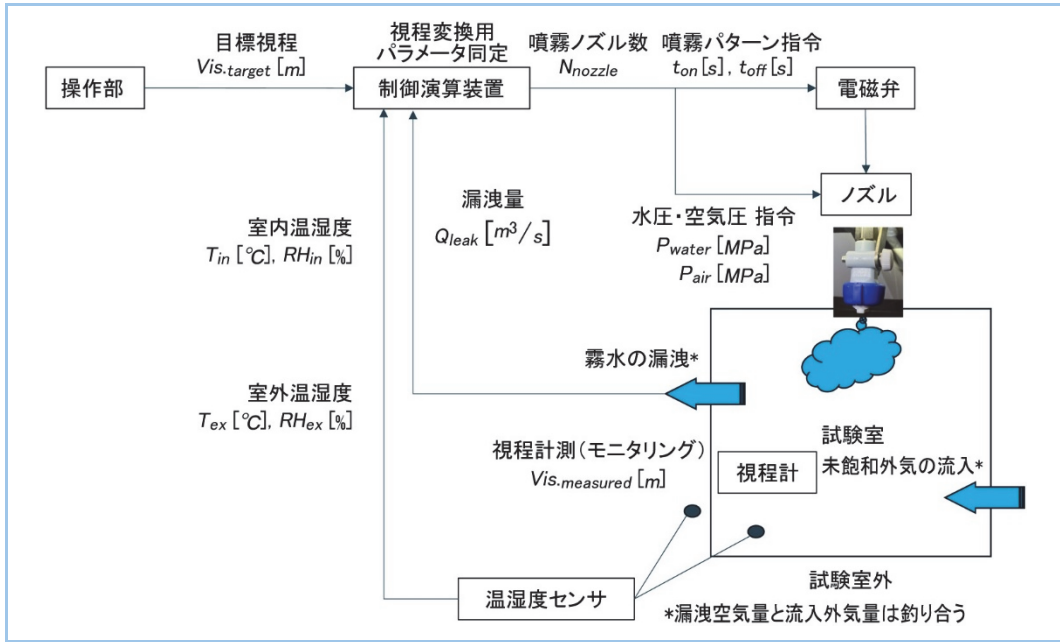


図1 霧形成・視程制御システム
システム構成機器のブロック図(入出力データ含む)

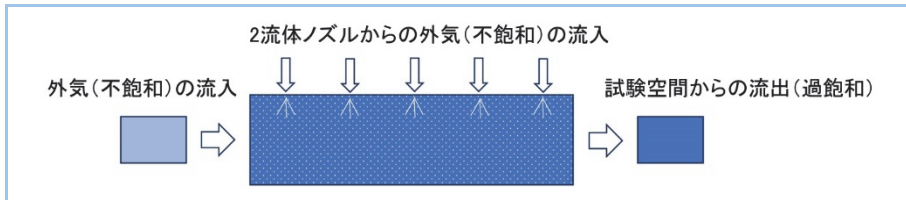


図2 試験空間における外気の流入及び霧の流出
湿度の異なる空気が流入出する事による霧水量の減少

3. 制御手法

濃度や温湿度を制御する汎用的な手法として、目標値からの違いに対して操作を行うフィードバック制御が知られている。一方、今回適用した手法(以下、本制御手法)は、数理物理モデルを基にした、霧の視程(正確には濃度)のフィードフォワード制御である。図 3 に具体的な制御手順を示す。目標視程に応じて、噴霧ノズルの個数 N_{nozzle} 、ノズルに負荷する水圧 P_{water} 、空気圧 P_{air} 及び、噴霧パターン(噴霧時間 t_{on} 、停止時間 t_{off})が決定される。それらの物理量を基に時間平均化した噴霧量 m_{nozzle} と空間内の霧濃度 C の対応表を作成し、視程変換式を介して視程をフィードフォワード制御する。よって、視程計は計測値のモニタリングのみに用いる。なお、試験室内の霧濃度を算出するためには、試験室外の霧濃度 C_{ex} が必要となる。 C_{ex} は、室外の温湿度と漏洩空気量 Q_{leak} から推算される。漏洩量は、一定時間内の視程計の変化量から推算する方法や、絞り機構をもったノズルを試験空間内部から外部(外気)に向けて設置し、内外圧力差の計測結果を基に大気中に漏れる空気量から算出する方法、送風量が既知の送風機にて外気を流入させる

方法などがある。

また、本制御手法を用いて視程 Vis を制御するには、本試験前に視程変換式のパラメータ α を同定するためのキャリブレーションが必要である。その際、必要となる霧粒子の平均粒径 D_p はノズルの水圧と空気圧から決まるため、メーカーのスペック値もしくは、事前計測した値を用いる。

なお、本制御手法では空間を質点(0次)近似しているため、視程の空間的なバラつきは制御できない。そのため、大空間において一様な濃度(視程)を実現するには、ノズルの配置と噴霧方向及び、漏洩空気の流入出口(換気位置)の検討も併せて必要となる。また、生成する霧粒子の直径が大きくなるに従い、床面への沈降による濃度減少の影響も大きくなる。特に空間内に気流が発生していない条件では、自然沈降の効果が顕著になるため、間欠周期の短い噴霧パターンの採用が有効である(停止時間が短く、濃度への影響が軽減できるため)。

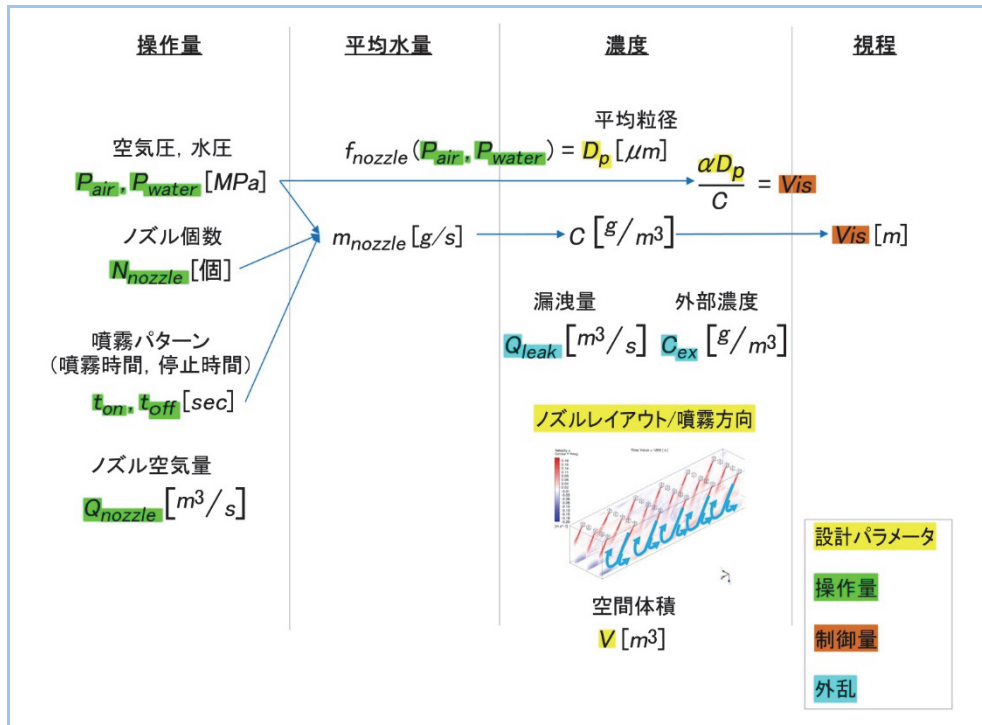


図3 霧の視程制御手順
物理量の入出力関係を図解

4. 検証結果

小空間と大空間の2つのケースにおいて、本制御手法を用いたシミュレーションと実測結果を比較することにより、その有効性を検証した結果を以下に示す。

4.1 ビニルテントを用いた検証

密閉性の高いビニルテント(図4: 体積 9m³)を用いた検証結果を以下に示す。ビニルテントは入口と上部が開閉式になっており、それぞれ部分的に開口させて、入口に送風機を、内部中央に霧ノズルを設置した。ノズルを間欠噴霧させると同時に送風機で外気を流入させ、テント内の視程の時間変化を計測した。ノズルの噴霧量と1回の噴霧時間(10秒)を固定した状態で、噴霧停止時間を操作量としたフィードフォワード制御の結果を図5に示す。停止時間(横軸)を増加させると霧の濃度が薄くなり、視程(縦軸: 3分間の時間平均値)が増加している事が確認できる。試験(橙)と本制御手法を用いた事前シミュレーション(グレー)の結果を比較すると、例えば、停止時間50秒の条件では、実測値と目標値の差分は-4%となっている。他の停止時間においても、差分は全て10%以下であり、小空間における本制御手法の有効性が確認できた。なお、停止時間79秒のみ試験結果の視程がシミュレーションよりも高くなっている理由として、停止時間が長く粒子沈降の影響により、空間内の濃度がシミュレーションよりも薄くなったと考えられる。本結果では

噴霧時間を 10 秒固定としているが、デューティ比を保った上で噴霧パターンを短い周期に変更する事で、霧濃度が薄い条件においてもシミュレーションと試験の偏差を改善可能である。

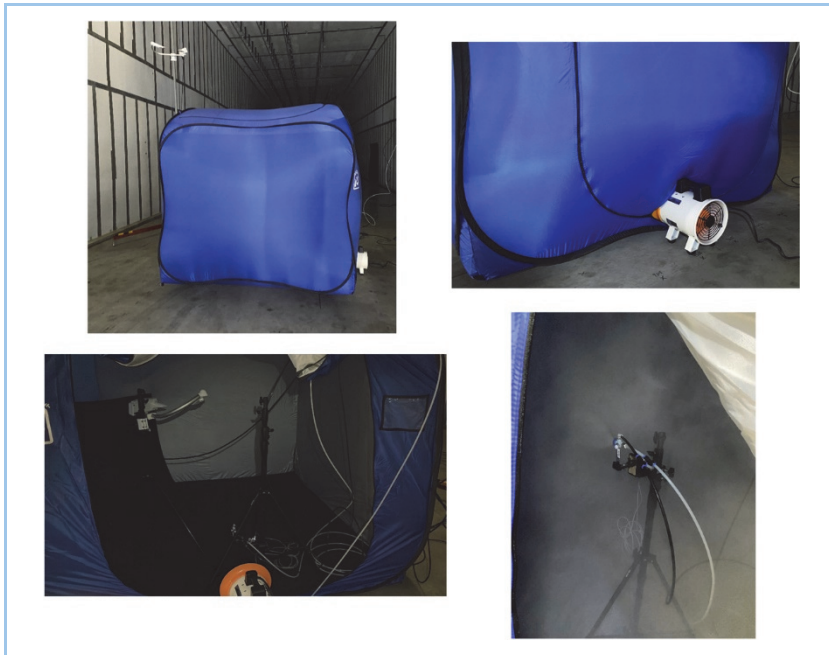


図4 ビニルテント

本制御手法の有効性を検証するために使用したテントと機器配置

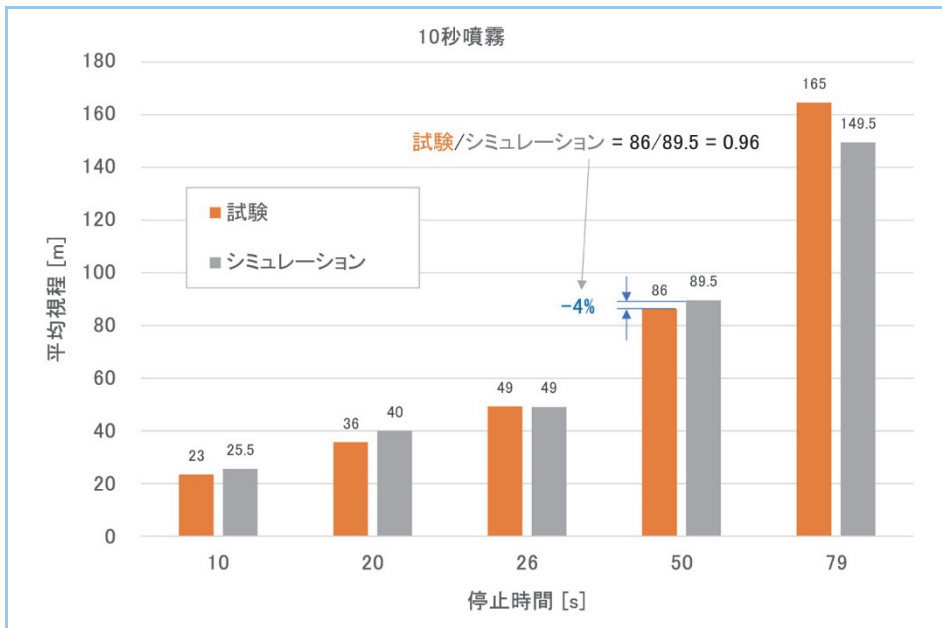


図5 噴霧停止時間と時間平均視程の比較

ビニルテントにおける霧の視程制御の検証結果

4.2 大空間での検証

本制御手法の有効性を大空間で評価するため、実証試験設備(図 6)を用いた検証を実施した。当該設備は、幅 7.5m、高さ 7m、長さ 48m(霧試験エリアは 35m)の試験エリアを有しており、前述のテントと比較して 200 倍の体積をもつ。

霧エリア天井に配置した複数のノズルによる噴霧中の様子を図 7 に示す。当該設備では、外部の温湿度と漏洩量を事前に把握する事により、ボイラや加湿空気の冷却装置機器を運用しなくても、大空間(約 1800m³)で霧環境を模擬可能である。なお、1 個あたりのノズル水量は 1.5L/h 程度であり、全ノズルを連続噴霧したとしても、1 時間に使用する水量は 45L/h 程度である。

図 8 は、目標視程 185m、75m、40m に対応する間欠噴霧を行った結果である。同図中央の

表は、エリア左側(★), エリア中央(●), 壁付近(▲)の平面位置に対して、高さ方向(上段 5.5m, 中段 3.5m, 下段 1.5m)の計 9 か所における定常状態到達後 10 分間の平均値を示す。例えば、目標視程 185m に対して、9 点の空間平均値は 189m であり、その標準偏差は 27m となっている。図右側のグラフは、視程の経時変化を示しており、赤線は本制御手法を用いたシミュレーション結果、緑線が各時刻における 9 点の平均視程を表している。赤線で示すシミュレーションは室内を 1 点で近似するので、噴霧開始直後から視程が低下し、停止時間中は外部への漏洩のより徐々に視程が上昇する。目標視程が短いほど停止時間が短いので段差が小さくなる。一方、緑線で示す実測平均値は、ノズルと計測位置が離れているため、霧の移流に要する時間だけ赤線よりも視程の低下が遅れる。また、気流により静定まで(～10 分)は一時的に上昇する時間も見られる。静定後(20 分以降)は目標視程が 40, 75, 185m と幅広いものの、シミュレーション・実測ともに設定した目標視程に収まり、変動も見られない。

他の視程に対応する噴霧パターンも検証した結果、当該設備においては、10～200m の任意の視程を、試験開始から 20 分程度で±10～15%の精度で模擬し、その視程を維持することが可能である事が確認できた。

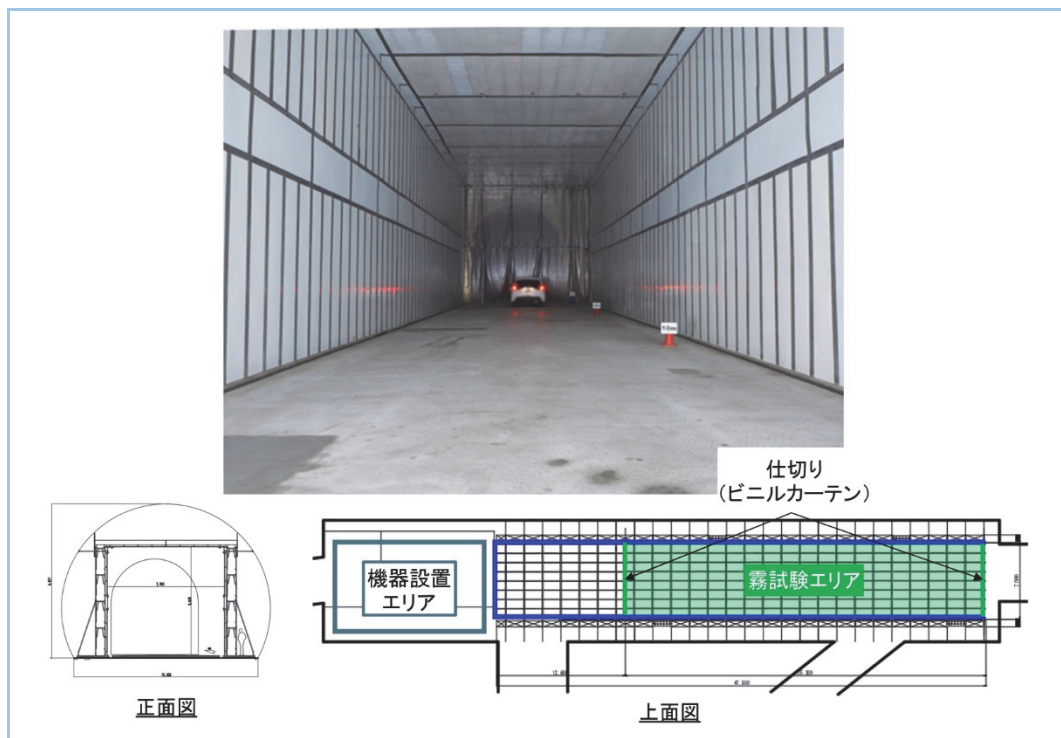


図6 実証試験設備(上:外観写真, 下:概要図)

本制御手法の検証に用いた実証試験設備



図7 実証試験設備における霧模擬

実証試験設備内で霧を発生させた様子

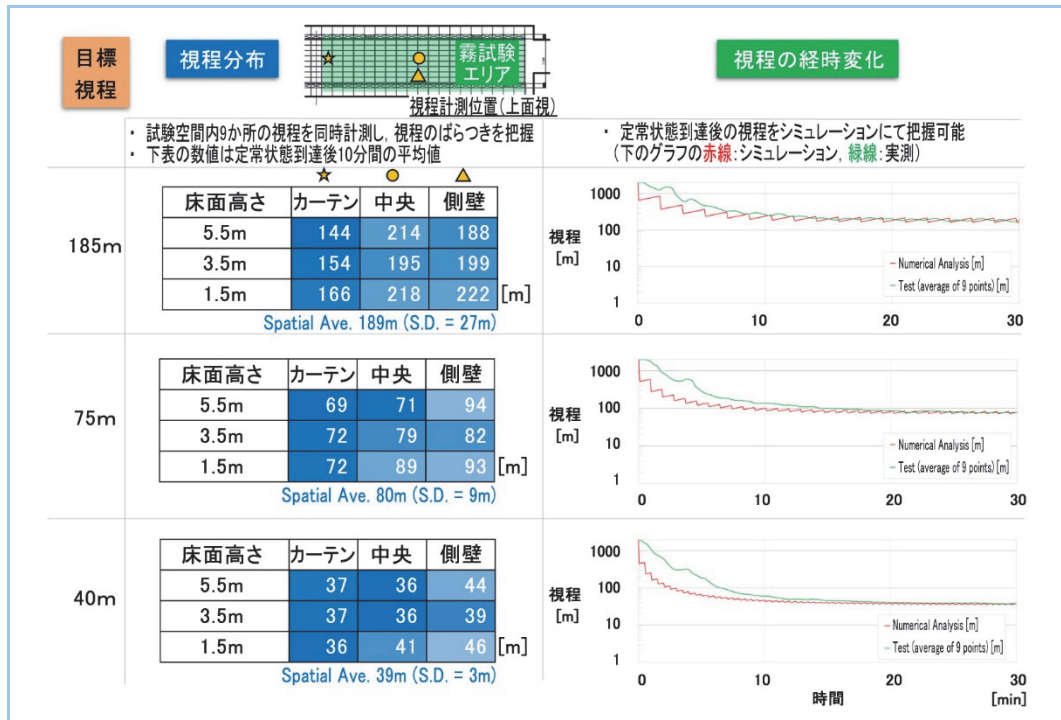


図8 視程の空間分布(左)と経時変化(右)
実証試験設備における霧の視程制御の検証結果

5. まとめ

本報では、環境模擬の中でも規定条件到達までに時間を要し、かつ一様な環境の実現・維持の難易度が高い霧模擬について、ボイラや加湿空気の冷却装置を使用しない簡便な方法で霧を発生、維持する事が可能な制御システムと制御手法を説明した。屋内での車両走行試験には大空間が必要となるため、簡便な方法である本制御手法は特に有効である。ただし、検証試験設備は、奥行方向の境界にビニルカーテンを使用した仮設的な簡易構造であるため、試験エリア外部の温湿度、風の影響が大きい条件では、50~200mの視程の制御が困難になる場合があった。よって、大きな外乱に対応するためには、本制御手法(ソフト)に加えて建屋の構造(ハード)の検討も必要である。

本制御手法を適用した屋内型の統合環境試験システムは、自動運転システムの安全性と信頼性評価試験を主たる適用先として想定しているが、自動運転で使用されている各種センサ(LiDAR, カメラ, レーダなど)は他産業でも多用されている。よって、開発した技術は、これらのセンサを使用している他のモビリティを始めとした多様な製品の認知機能の評価試験にも広く応用可能と考えている。

参考文献

- (1) 井上 君夫, 霧を伴うやませの気象特性, 日本気象学会機関誌“天気”(TENKI), Vol.39, No.8 (1992) p.9~17