

論文・解説

18

ランプ内結露現象分析のためのCAE技術開発 CAE Technology to Analyze Dew Condensation in Lamp

高田 俊穂*¹ 井上 実*²
Toshio Takata Minoru Inoue

要 約

ヘッドランプなど車両用のランプは、重要保安部品であるとともに、エクステリアデザインを表現する重要な部品である。そのため、ランプ外表面のレンズに素通しを採用して、ランプ内部の凝ったデザイン処理をより際立たせる設計が一般的になった。最近のランプ設計においては、このレンズ表面と内面の温度差に起因する結露現象を抑制することが、重要な検証項目の一つとなっている。従来、この結露性能検証は実機試験に頼らざるを得なかったため、設計の効率化が阻害されていた。この課題解決のために、ランプレンズ内面に生じる結露の発生メカニズムを分析した。そして、ランプユニット内部温度分布の変化によって生じる空気の自然対流が、結露を左右する重要な因子のひとつであることを究明した。更に、この自然対流を予測しながら効率的に設計するためのCAE技術を構築した。

Summary

Head lights and other vehicle lights play an important role not only for vehicle safety but also for exterior design. Therefore, the design of light has increasingly focused on how to accentuate the intricate design execution behind a lens and, accordingly, transparent outer lens has become dominant. As the result, dew condensation caused by temperature difference between outer surface and inside of lens has become one of the major issues to be validated in designing lights. Conventionally, the dew condensation had been evaluated mainly in physical tests, which encumbered the development efficiency. To improve this situation, we analyzed the mechanism of dew condensation generated behind a lens and identified natural air convection caused by temperature distribution change in a light unit as one of the critical factors. We have developed CAE technology to efficiently design lights by forecasting this natural convection.

1. はじめに

ヘッドランプに代表される車両用の灯火器は視認性、被視認性に関わる重要保安部品であるとともに、エクステリアデザインを表現する重要な部品としても位置付けられる。

マツダのデザインにおいても、ランプ外郭デザインは大型化し、ランプ内部の凝ったデザイン処理をより際立たせる設計に移行している。そのため、ランプ表面を覆っているレンズは素通しでクリアな設計を行うことが定常化し、

その表面積も拡大傾向にある。

一方、このレンズはランプユニット内部環境と外気環境の境界に位置付けられる部品であり、使用環境においてはこのレンズ内面に自然現象である結露が生じ外観品質を損なう場合がある。前述の設計推移とともに、この結露現象の抑制と、実機試験に頼らない効率的な設計検証手法の確立が大きな課題であった。

*1, 2 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

2. ランプ内結露現象のメカニズム究明

2.1 設計因子の明確化

ランプの結露性能を左右する設計因子を抽出し、それらの因果関係を分析していくことにより、結露発生メカニズムと設計で考慮すべき因子を明確にした。主要な因子は次の三つである。

(1) 材料

ランプの構成部品は使用部位の温度環境や生産性を考慮し、様々な樹脂材料を使用している。樹脂材料は水分を吸収し、環境温度が上昇するとその水分を放出する特性をもっており、その特性は材料ごとに異なる。従って、設計時の材料選定時はこうした特性を配慮する必要がある。

(2) ランプ内部温度分布

ランプレンズ内面の結露現象はランプ内部の温度が上昇した際、レンズ表面が急冷される場合に顕著に発生する。従って外気環境や、ランプ電球類の発熱、エンジンルーム温度環境などを配慮する必要がある。

(3) ランプ内部空気の熱対流

ランプ内部温度の分布に伴ない、ランプ内の空気は熱対流現象を生じる。この対流の違いにより、結露発生や結露解消の状況が左右される。構造設計において最も重要な因子である。

2.2 設計活動における課題

構造設計において、ランプ内部の熱対流特性の適正化が結露性能改善に重要であるが、効率的な商品開発を行うためには、実機テストに頼らない設計検証技術の確立が課題であった。この課題解決のために確立した設計段階のインプロセスCAE技術に関して以下述べる。

3. CAE解析手法

3.1 CAE解析概要

(1) ランプ内部流れ解析に求められる要件

ランプ内部の結露現象を、CAE解析にて厳密に評価しようとする、以下の多くの物理現象を扱う必要がある。

- ① 発熱
- ② 温度境界条件／温度分布／温度変化
- ③ 熱伝導・熱伝達
- ④ 熱対流（密度成層・浮力）
- ⑤ 湿度・結露
- ⑥ 熱輻射

また、再現すべき物理現象あるいは実機評価モードは過渡（～時刻により変化する）現象である。これらの全項目を考慮したCAE解析を実施するためには、特性データ収集・モデル作業工数・必要ハードウェアリソース・計算時間等膨大なものとなる。

一方で我々設計現場においては、常に開発期間の短縮と高品質アウトプットの両立を要求されており、解析検討に

おいても必然的に短期間での完了が求められている。ランプ内部の流れ解析も、1仕様につき1週間以内、できれば数日程度で完了したい。しかし通常的设计現場では、CAE解析用の高速64bitCPUや大容量メモリを装着したPC・EWSが利用できない場合がほとんどである。

(2) 開発したランプ内部流れCAE解析の仕様

前述の状況および前章で述べたメカニズム究明活動の結果、最低限考慮すべき要件はランプ内部がバルブの発熱や太陽光によって温度分布を生じて熱対流を起こしている状況を再現できることであると考えた⁽¹⁾。この結果、熱輻射についてはモデル化せず、簡易的に影響を取り込むために、実機計測結果のランプ表面温度分布を温度境界条件として与えた。湿度・結露についてはメカニズム究明活動の成果として結露の発生しにくい流れ状態・特性目標を明確化できたため考慮しないこととした。

また本手法では、実機評価条件において熱対流現象が最も激しく発生している時点の流れを再現することを主目的と考え、現象としては定常流れとし計算時間の最小化も図った。これらの結果、評価条件としては、発熱・伝熱を考慮した固体-流体定常熱流れ解析となった。

そして作業時間の短縮および設計者が一般的な作業環境でも解析・結果分析等の作業が行えることを考慮して、標準的なメッシュサイズは3mm程度とするとともに表面形状メッシュ作成においては、構造解析で定評のあるHyperworksを活用し、構造解析とのデータ流用や作業ノウハウの活用も行った。これらの結果、Tetra要素で作成したモデル規模は、200万から500万要素程度となり、標準的なヘッドランプの場合、2週間程度で1仕様のモデル作成～結果分析が可能となった。この際1仕様あたりの計算時間は弊社の一般的スーパーコンピュータ環境の8CPU並列計算で4～6時間程度である。

3.2 解析モデル

解析は汎用熱流体解析ソフトSTAR-CDを用いてモデル作成および計算実施を行った。換気穴については、評価モデル毎に位置や数が異なり、モデル作成時点でどの穴が吸込口・吹出口になるか不明である。従って全ての換気穴に圧力境界条件を適用し計算結果として判断する形とした。壁面には、No slip条件および一般化対数側（Generalized Log-Law）を適用した。Fig.1にヘッドランプ解析モデルの例を示す。またFig.2には固体として考慮したヘッドランプ内部の樹脂部品やバルブ等を示す。固体部分には、熱伝導率・比熱等の特性値を付与するとともに、発光するバルブにはワット数・熱変換の効率に応じた発熱を与えている。そして解析では固体-流体の熱連成問題を解いている。

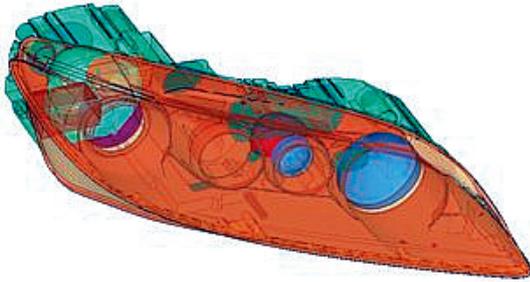


Fig.1 Head Lamp Model (Surface of Fluid Part)

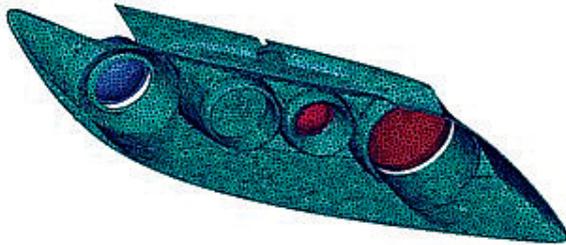


Fig.2 Head Lamp Model (Solid Part)

3.3 CAE適用例

ヘッドランプへの適用例を示す。以後に示す解析結果は、車両停止/アイドリング運転状態で、標準灯点灯/ランプ表面に水をシャワーという条件でランプ内部流れ・温度等を求めたものである。車両外側の点灯させたバルブ中央付近上下断面での、温度分布 (Fig.3: 単位℃) と流速分布 (Fig.4: 単位m/s) を示す。またFig.5には流線を示す。

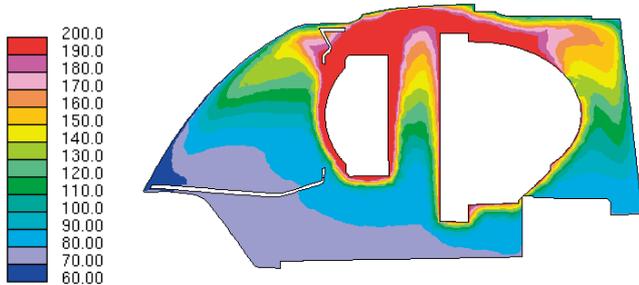


Fig.3 Temperature Contours at Outermost Bulb

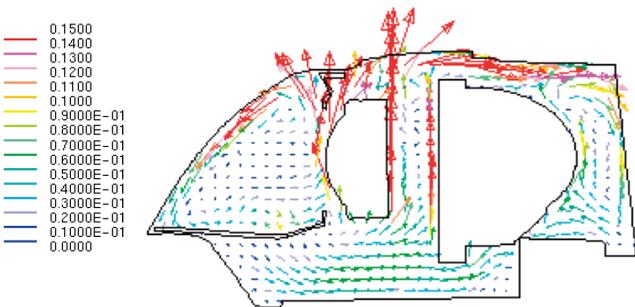


Fig.4 Velocity Distributions at Outermost Bulb

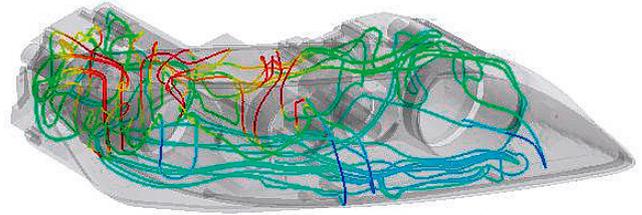


Fig.5 Streamlines Inside Headlamp Unit

Fig.3およびFig.4から、発熱しているランプ周辺で上昇流が発生し、それが上面に達すると前後に分かれて下降流となっている様子が観察できる。ランプ内の最大流速は0.82m/sを示しているが、全般的には高々0.2m/s程度の低速な熱対流状態となっている。またFig.5からは流れは車両前後・上下方向の流れだけではなく、ベゼルとハウジング・レンズ間の隙間を通過して、左右(車両横)方向にも及ぶ立体的なものであることが分かる。

3.4 CAEによる設計変更検討例

3.3と同じモデルによる設計検討例を以下に示す。Table 1にはベースに対して加えた穴塞ぎや面積拡大あるいは穴・詰め物追加等の仕様変更内容を示す。

Table 1 Case Study on Holes and Others

	Base	Spec.-1	Spec.-2	Spec.-3	Spec.-4
Hole#1	Base	Base	Extended area to 400%	Base	Extended Area to 320%
Hole#2	Base	Hole deleted	Hole deleted	Base	Base
Hole#3	Base	Base	Base	Base	Base
Hole#4	Base	Hole deleted	Hole deleted	Base	Extended Area to 300%
Other Changes	N/A	N/A	N/A	Add 2 Holes	Add 4 Holes & 2 Solid Parts

Table 2には、計算によって得られた、各仕様におけるランプから排出・換気される時間当たり空気量と、ランプ内の空气体積に対する時間当たり換気回数を示す。

Table 2 Exhausted Air Volume and Ventilation Cycle

	Base	Spec.-1	Spec.-2	Spec.-3	Spec.-4
Exhausted Air Volume	56.0	32.3	127.8	48.7	425.6
Air Charge Rate	7.1	4.1	16.2	6.2	54.3

Table 2からは、仕様によって時間当たりの換気空気量が32.3から425.6L/h、換気回数が4.1から54.3回/hと10倍以上も大きく異なり、換気口の仕様と内部流れとが密接に関係していることが分かる。

そこで、実機評価条件によっては曇りが発生しやすい、車両内側のハイビームバルブ中心付近の上下断面における、空気の流れをベース、仕様①および仕様④についてFig.6~Fig.8に示す。表示条件は前出のFig.4と同一である。

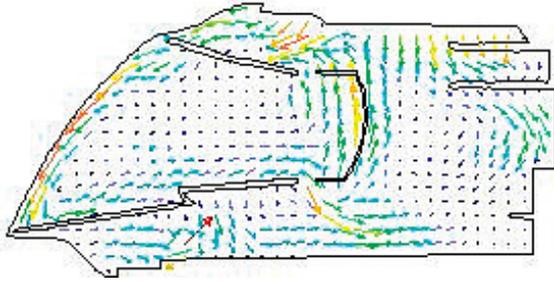


Fig.6 Velocity Vector Distributions (Base)

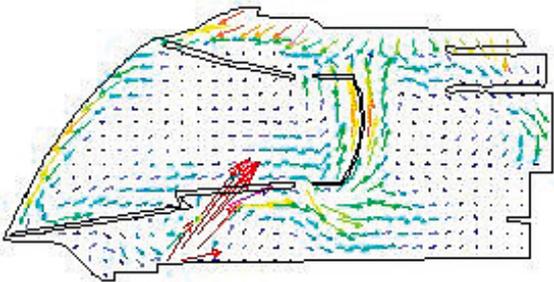


Fig.7 Velocity Vector Distributions (Spec.-1)

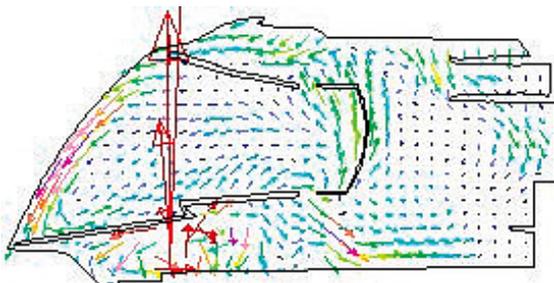


Fig.8 Velocity Vector Distributions (Spec.-4)

表示した断面位置では下方付近に換気口があるため、仕様によって図下側の速度の大きさ・向きが変化していることにまず気づくが、注目すべきは結露現象と密接に関係していると考えられる図では左側のレンズ面近傍の流れ状態である。Fig.6のベースでは0.11~0.12m/s程度であるのに対して、Fig.7では0.1~0.11m/sと若干低下する傾向が見られるとともにレンズ面近傍の流れが弱くなっている様子が観察できる。Fig.8では0.13~0.14m/sと流速値の上昇とともにレンズ面近傍の流れが活発であることが観察できる。これらはTable 2に示した換気量・回数の関係とも対応しており、ランプ内部構造や換気口の諸元・仕様を変化することでレンズ近傍の流れ状態を変更できることが確認できた。

3.5 換気効率指標による分析

次にヘッドランプ内部流れに対して換気効率指標(SVE: Scale for Ventilation Efficiency)を適用した結果を示す。換気効率は、建築分野で開発された、閉空間・部

屋等における空調/換気性能・空気汚染度等を評価できる指標である⁽²⁾⁽³⁾。換気効率は実験計測でも取得可能であるが、多数点・高精度計測には手間・ノウハウが必要であり、正にCAE解析向きの分析指標である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

仕様②および仕様④のランプ中央高さにおける水平断面のSVE3(空気齢)分布をFig.9とFig.10に示す。

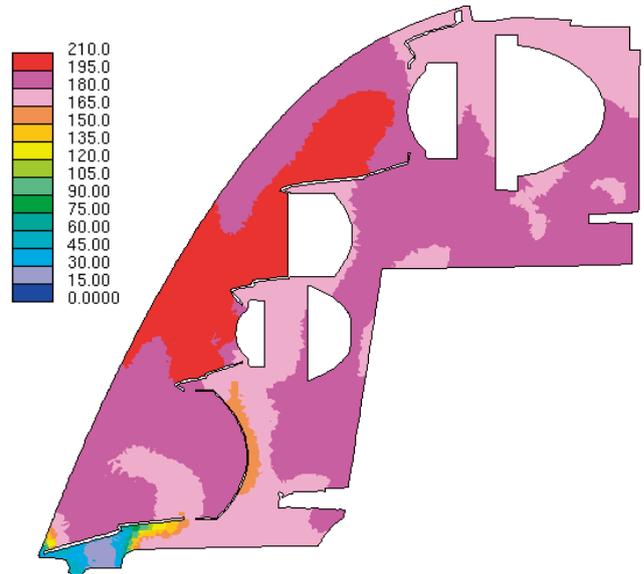


Fig.9 SVE3 (Age of Air) Distributions (Spec.-2)

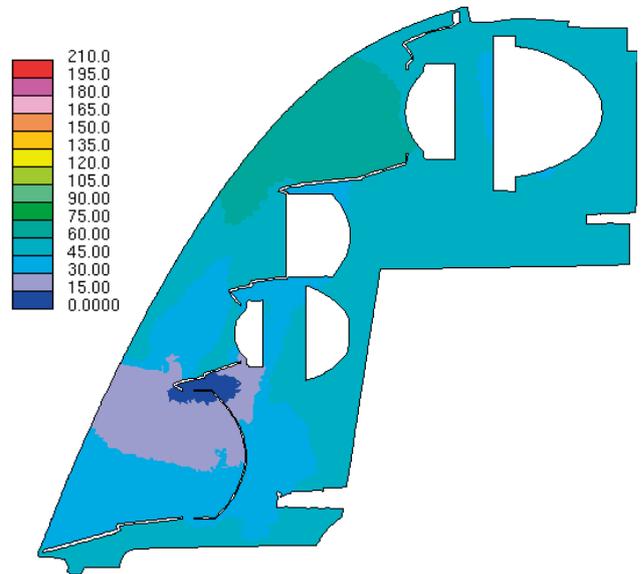


Fig.10 SVE3 (Age of Air) Distributions (Spec.-4)

空気齢(Age of Air)とは、吹出口から入った空気が注目地点に到達するのに要する時間すなわち空気の寿命を表し、図に示す単位は時間(秒)である。数字が小さい領域は空気がフレッシュであり比較的吹出口に近い上流であることを示し、数字が大きい領域は空気齢が高く基本的には流れの下流であることを示す。Fig.9の仕様②では、空気齢のランプ内全体平均値は171.7秒で、最大値は203.5秒であ

る。一方Fig.10の仕様④では空気齢のランプ内全体平均値は43.8秒で、最大値は106.6秒となっており仕様②に比べて空気齢が小さくなっている。Table 2を見ると仕様④は換気回数がベースの7.6倍、仕様②比で3.4倍となっており、ランプ内空気の換気が良く行われていることがSVE3からも確認できる。

続いてFig.11には、ベースの換気口②（吹出口②）に対するSVE4（吹出口の勢力範囲）をランプ下方のベゼル直下付近高さにおける水平断面で示す。

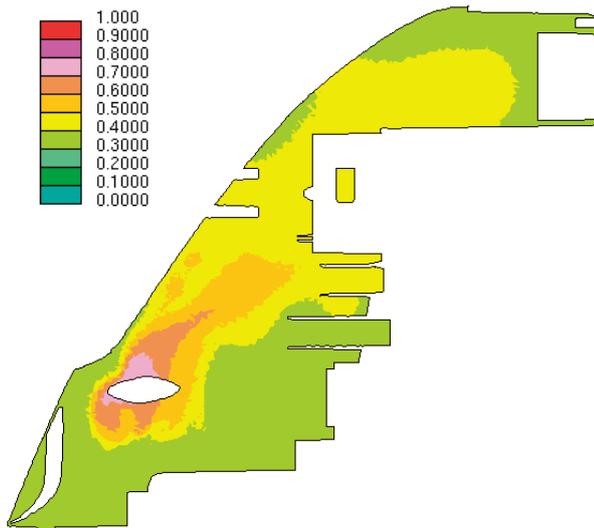


Fig.11 SVE4 (Contribution Ratio of Each Supply Opening) Distributions for Inlet-2 (Base)

吹出口の勢力範囲とは、空間内のある点における空気のうち注目する吹出口から到達した空気が占める割合を指標化したもので、0から1.0までの値を取る。Fig.11は吹出口②のSVE4を示したもので、吹出口②近傍では1に近い0.7～0.8を示し、流れの下流やハウジングに近い遠方ほど数値が低くなっている状況が観察できる。この例のように吹出口が複数個ある場合、SVE4は吹出口の数だけ存在し、ある点におけるSVE4の和は1.0となる（逆に吹出口が1個の場合、SVE4は全域において1.0である）。従って注目する空間内の点において、どの各吹出口の寄与度が高いのかはSVE4によって定量的に把握でき、仕様変更・対策をどの吹出口に加えるべきかが容易に判断できる。単なる流れ・流速分布だけの評価・分析では渦の存在や位置などは概略分かるものの、ある場所の空気がどの吹出口からどれだけ来ているかを判断することは実質不可能であるのとは極めて対照的である。

なお換気効率にはSVE3・SVE4以外にも、SVE3*、SVE5、SVE6、SVE6*、CRP1などがある。これらはCAE解析で求めることができ、吹出口や吸込口の寄与度、年齢・余命、汚染度など閉空間内の気流性状や特性が机上で定量的に可視化・評価できる。

またこれらCAE解析手法はヘッドランプ限定のものではなく、リアコンビランプ等にも適用可能である。

4. おわりに

以上述べたように、ランプ内の流速分布とランプユニット内部と外気との換気量や換気効率指標を用いた定量的分析により、従来実機試験に頼っていた性能評価の大部分を、机上段階で推定可能となり、大幅な開発効率化が可能となった。これらのCAE解析手法を商品設計段階に適用し、商品開発の効率化が進んでいる。

参考文献

- (1) 岡田義浩ほか：The CFD Analysis of the Flow in the Automotive Headlamp, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.14-00, 20005353, (2000)
- (2) 村上周三ほか：新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.32, p91-101 (1986-10)
- (3) 小林光ほか：不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.68, p29-35 (1998-1)
- (4) Yoshiichi Ozeki et. al: Ventilation Characteristics of Modeled Compact Car Part3 Airflow Velocity Distributions with Foot Mode, SAE paper No.2010-01-1065 (2010)
- (5) Hideaki Nagano et. al: Ventilation Characteristics of Modeled Compact Car Part4 Estimation of Local Ventilation Efficiency with Foot Mode, SAE paper No.2010-01-1063 (2010)

■ 著 者 ■



高田 俊穂



井上 実