自動車室内の熱環境改善による省エネ効果に関する研究

東京大学大学院
地球システム工学専攻修士2年
開発工学研究室　相田洋志
平成16年1月30日

1. 研究背景と研究目的

1-1. 背景1：地球環境問題～自動車対策は急務～

- COP3にて日本には2010年までに1990年比で温室効果ガスを6%削減するという目標値が課せられている.
- 日本全体のCO2排出量の2割を占める運輸部門における排出量は，1990年より増加の一途を辿っており，2000年度においては1990年比で20.6%増と大幅に増加している（図1－1）.
- 特に自動車からの排出は運輸部門の9割近くを占める為，早急な対策が必要（図1－2）.

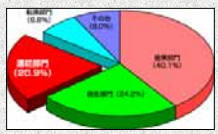


図1－1 日本全体のCO2排出量の部門内訳

図1－2 運輸部門全体のCO2排出量の内訳

1-2. 背景2：都市環境問題～自動車排熱はヒートアイランドの原因？～

- 東京都心部では都市化によるヒートアイランド現象が起こるようになってきている. 原因として考えられるのが，
  - 地表面の人工化（アスファルト化，水面の減少）
  - 建築物・交通からの人工排熱

表1－1 自然状態と現在の状態における，東京都23区の1日あたりの平均熱収支の比較

項目	自然状態	現況	内容
日射	328.1	328.3	大気から地表面へ
放射（下向き）	351.3	358.1	
反射	68.5	69.4	地表面から大気へ
放射（上向き）	426.2	458.3 (24.6増)	
対流顕熱	65.9	90.5	
蒸発潜熱	126.6	53.2 (26.9減)	
人工顕熱	0	26.9	（うち人工排熱）
人工潜熱	0	5.2	（　〃　）
伝導	−7.8	14.9	地表面から地中へ

＊ ヒートアイランド対策手法検討委員会より

大気を直接温める顕熱に注目すると，
・対流顕熱の増加分(24.6W/m2)が地表面の人工化による影響，
・人工顕熱の増加分(26.9W/m2)が建築物・交通からの人工排熱による影響，
と考えられ，両者の影響はほぼ50%ずつと考えられている. 人工排熱における交通の割合を考えると，自動車エネルギー対策はヒートアイランド現象に対しても有効な策であると言える.

1-3. 自動車エネルギー対策～実燃費の向上に向けて～

- 自動車エネルギー対策としては，モーダルシフト，電気自動車への移行，実燃費の向上等が挙げられる.
- 実燃費を下げている要因の一つとしてエアコンの使用が考えられる.
- 自動車は，エアコンを使用する際にエンジン動力の一部がコンプレッサやオルタネータの動力として使用されるために燃費が悪化する（真夏走行時，1割～2割ほど悪化する）.

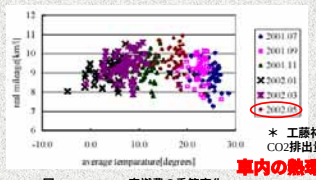


図1－3 GV，HV実燃費の季節変化

自動車の季節ごとの実燃費を比較したもの. 5月はエアコン（冷房，暖房とも）を使うことが少なく，他の月に比べ，実燃費がよくなる傾向にある.

＊ 工藤祐揮,「実燃費を考慮した自動車からの都道府県別CO2排出量の推計」,2003年エネルギーコンファレンスより

車内の熱環境を改善することにより，エアコンの使用を抑え，大幅な省エネ効果を期待することができるのではないか？

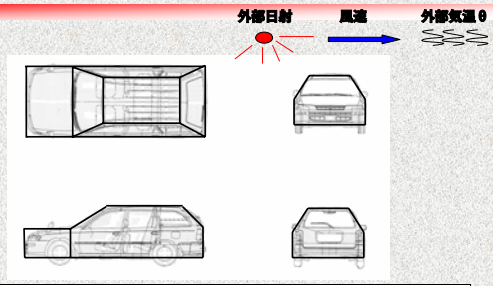
1-4. 研究目的～熱環境改善，実燃費向上，CO2・排熱削減～

1. 自動車車内の熱環境を改善する技術の検討（具体的にはボディ反射率の差異，窓透過率の差異）をおこなう.
2. 自動車の熱環境改善技術の導入により，どの程度の実燃費向上効果があるのかを明らかにする.
   - 諸技術の効果の検討は，熱負荷シミュレーションモデルと実車による実験との両面から行う.

以上の結果を用いて，
CO2排出削減効果・排熱削減効果
を算出し，有効な対策案を明らかにする.

2. 自動車熱負荷モデルの概要

2-1. 自動車熱負荷モデルの概要

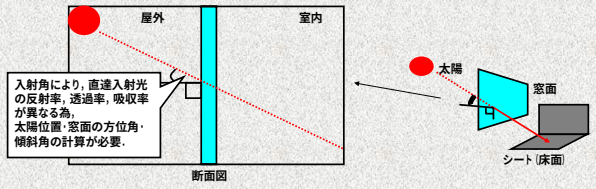


- ある単体の自動車を単純化し、車内の熱環境を評価できるモデル
- 主に建築の分野で用いられる室内の熱負荷計算のモデルを参考にする
- 外部条件を与えた上で，室内温度の時間的変化を算出するモデル

＊トヨタ，新型車解説書より

2-2. 各部の計算原理その1（窓面からの熱流入）

- 窓面の方位角，傾斜角，太陽位置の方位角，高度角より，窓に入射する日射（斜面日射量）を計算する．
- 窓に入射した光は床（実際は車のシート等）を温める，その温まった床が室温を温める．
- 斜面日射量の計算には，直散分離モデル，斜面日射量モデル共にPerezモデルを使用（拡張アメダス気象データより計算）．



2-3. 各部の計算原理その2（壁面からの熱流入）

- 壁面に入った日射は，壁面の外側を暖め，それが伝わっていくことで，壁体内部，室内空気が暖められる（**非定常熱伝導方程式を差分化することで定式化**）．
- 斜面日射量の計算には，窓面同様，直散分離モデル，斜面日射量モデル共にPerezモデルを使用（拡張アメダス気象データより計算）．

時間pにおける場所kの温度

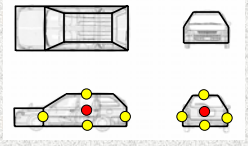
$$\frac{\theta_k^p-\theta_k^{p-1}}{\Delta\tau}=\frac{1}{(cr)_{k,k+1}}\left\{C_k\left(\theta_{k-1}^{p-1}-\theta_k^{p-1}\right)-C_{k+1}\left(\theta_k^{p-1}-\theta_{k+1}^{p-1}\right)\right\}$$ ：熱平衡式

2-4. 各部の計算原理その3（室内温度の計算方法）

- 前項，前々項により，内側壁面の温度が求まる．
- 室内空間の温度は室内の中心に1点温点を決め，室内温度は均一であるとの仮定をおき，計算を行う．
- 室内温度の計算方法も壁体と同様であり，室を代表する温点と各壁面の温点との熱のやり取りにより，温点温度を決定する．

時間pにおける室内の温度

$$\frac{\theta_{air}^p-\theta_{air}^{p-1}}{\Delta\tau}=\sum_k\frac{S_k}{(cr)_{air}V_{room}}\alpha_c\left(\theta_{wall,k}^{p-1}-\theta_{air}^{p-1}\right)$$ ：熱平衡式



2-5. モデルのInput/Output

Input(入力条件)
- 外部気温
- 外部日射
- 壁面(外面)物性値
  - 色(反射率・放射率)
  - 断熱特性(熱容量・熱伝導率)
- 窓面物性値
  - 透過率，反射率，吸収率
- 車速

Output（出力）
- 車内温度

車内温度をエアコン・暖房で調節するとき，
- 除去熱量
- 空調機器稼働時間
- 使用エネルギー

3. 実験

～各部の温度データ～
～シミュレーションの検証も含めて～

3-1. 目的と概要

- 目的
  - 車内熱負荷シミュレーションの検証
    - ボディの色の差異による各部温度の差異
    - 遮熱フィルムの有無による各部温度の差異
  - エアコンの使用状況，燃料消費量の検証
- 概要
  - 同車種同年式の2台の乗用車
    (ボディ：黒，白)を用いた屋外静置実験*

*三木コーティングデザイン事務所・日本ペイントとの共同実験

3-2. 配置関係

- 黒(正確には濃緑)と白のカローラバン(GG-EE103V)を南向きに設置
- 車体間隔はお互いの影響を受けないように4mを確保
- その間に風向風速計、長短波放射計、データロガー、PC等を設置

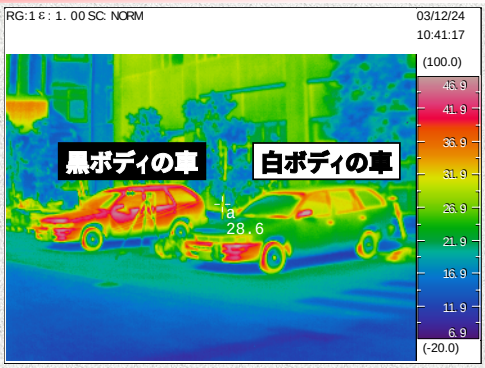
*日本ペイント敷地内において

測定項目

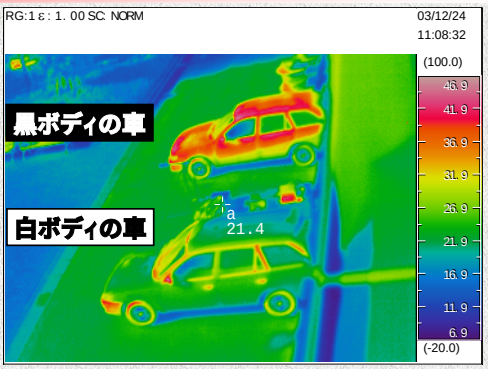
- 気温、湿度、風向、風速
  - MA-130,MT-060,LS-3000PtV
- 下向き短波放射、下向き長波放射、上向き短波放射、上向き長波放射
  - MR-40,LS-3300PtV
- 自動車各部温度(黒、白合計30点)
  - 熱電対DT20TT,MP-092
- 自動車燃費関連
  - FCM2000(カスタマイズ済み)*
- サーモグラフィ(12/24撮影)
  - TH7100

*テクトム製

サーモ画像その1



サーモ画像その2

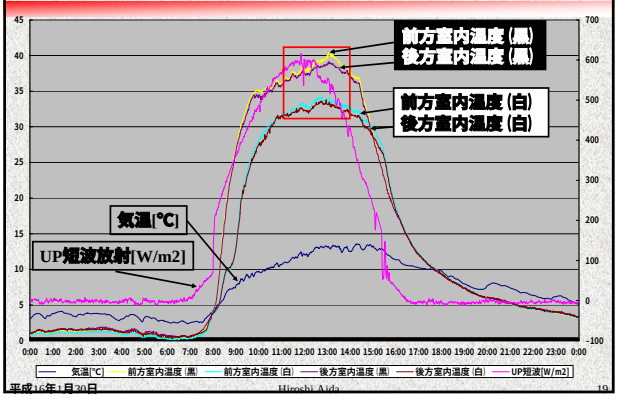


実験ケース (計6パターン)

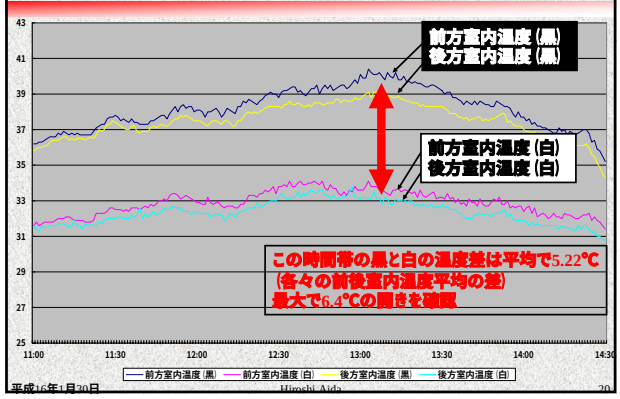
	フィルムなし	フィルムあり
エンジンOFF	12/28,	12/27,
エンジンON エアコンOFF	12/8,	12/22,
エンジンON エアコンON	12/14,12/29,	12/23,12/24

※「フィルムあり」とは黒ボディ車に遮熱フィルムを貼り，白ボディ車には何も貼っていない状態での比較実験（黒ボディ車にのみ貼り，白ボディ車との温度の差異をみることでフィルムの効果を判断）．

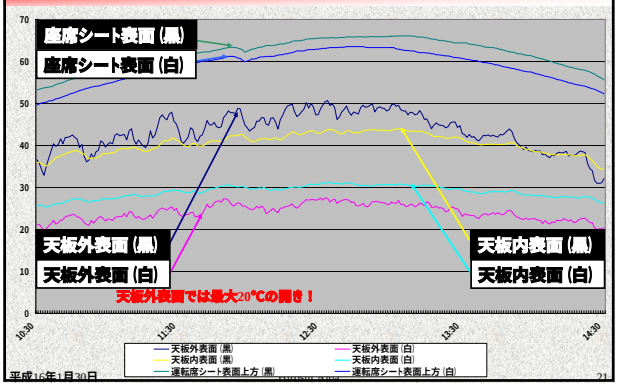
エンジンOFF(室内温度)(12/28)



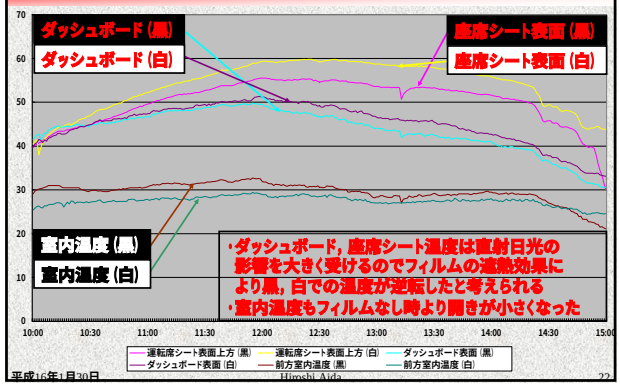
エンジンOFF(室内温度)(12/28)拡大版



エンジンOFF(各部温度)(12/28)



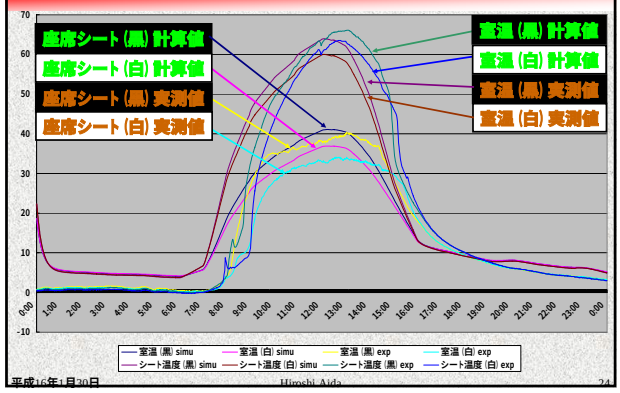
エンジンOFFフィルムあり(各部温度)(12/27)



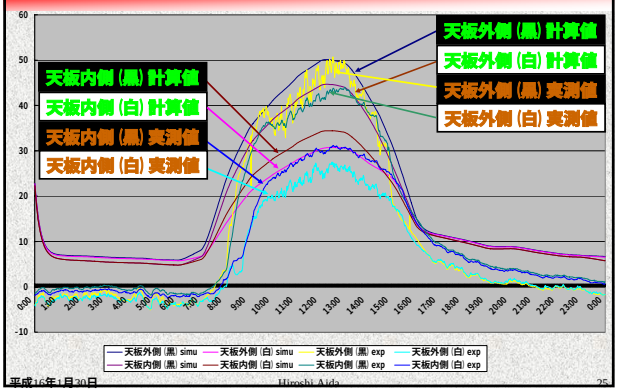
シミュレーションの検証

- 前述したシミュレーションの精度を確認するため、実験データを用いて検証をおこなった
- 各気象条件、自動車ボディの反射率、フィルムの透過率等、各値を代入し、計算をおこなっている

検証その1(エンジンOFF：室温、シート温度)



検証その2（エンジンOFF：天板外側、天板内側）



平成16年1月30日 Hiroshi Aida 25

4. 燃料消費量

燃費計の出力と燃料消費量の算出方法

- 以上の室温の差異がエアコン負荷及び燃費に与える影響を測定するため，人間が快適に感じる温度，25℃に室温を保つようにエアコンをON/OFFする実験をおこなった．
- 燃費計の出力は以下の通り．

インジェクタ噴射時間	エンジン回転数	車速	エンジン水温	エアコンマグネットクラッチのON/OFF
[m秒]	[rpm]	[km/h]	[℃]	[ ]

- 下記の計算方法*を用いることで，燃料噴射時間あたりの燃料消費量[L/m秒]が求められる．今回，横浜周辺，東京-浜名湖-浜名湖，浜名湖-東京間の3区間で，この補正方法を実施したところ以下の換算値が算出された．

平均燃料補正定数[L/m秒]
1.726E-05

横浜周辺：1.72680E-05[L/m秒]
東京-浜名湖（東名高速）：1.72945E-05 [L/m秒],
浜名湖-東京（東名高速）：1.72184E-05 [L/m秒]

*燃料消費量計算方法

- 4サイクルエンジンなので
  工程数[回/分]＝クランク回転数/2＝エンジン回転数/2
  1工程にかかる時間[m秒]＝60×1000／工程数
- 燃費計の出力は1.334・・・秒ごとなので，
  単位[1.33秒/時間当たりの工程数[回]
  ＝1.33・・・×1000／1工程にかかる時間
- 単位時間当たりの燃料噴射時間[m秒]
  ＝インジェクタ噴射時間×工程数
- 経運転時間における燃料噴射時間の積分値と実際の燃料消費量（満タン法によるもの）からその対応関係を得る．

平成16年1月30日 Hiroshi Aida 27

エアコン稼動由来燃料消費量の算出

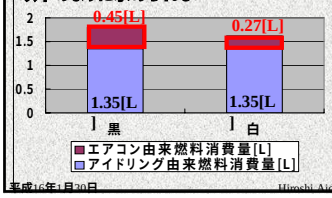
・この日（エンジン・エアコンON）の11時～13時における黒，白の総燃料消費量は前項の算出方法を用い，以下のように算出される．

	総燃料消費量[L]
黒	1.80
白	1.62

・アイドリング由来の燃料消費量はエアコンOFF時の平均燃料消費量であると推察できる．この日の11時～13時のエアコンOFF時の平均出力，前項の計算方法を用いることにより，アイドリング由来の燃料消費量は1.35[L]と計算できる．

	1工程当たりのインジェクタ噴射時間[m秒]	エンジン回転数[rpm]	スピード[km/h]	エンジン水温[℃]
ON_average	2.4	797.0	0.0	89.6
OFF_average	1.9	684.7	0.0	91.8

・以上から，エアコン由来の燃料消費量は以下のように求められる．

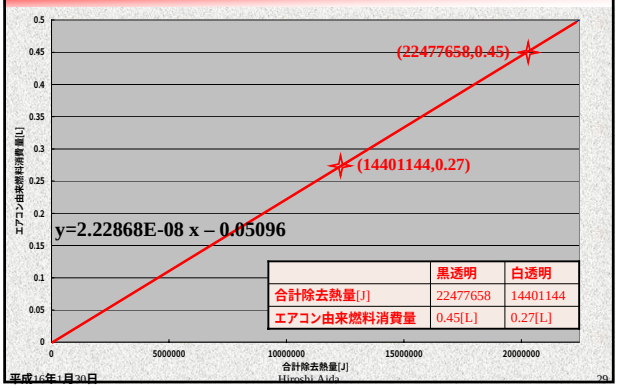


また，このときの除去熱量[J]の合計は，シミュレーションにより以下のように求められる．

	黒透明	白透明
合計除去熱量[J]	22477658	14401144

平成16年1月30日 Hiroshi Aida 28

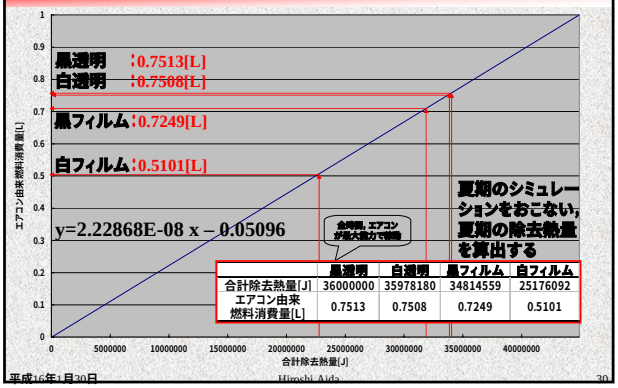
除去熱量とエアコン由来燃料消費量の関係



	黒透明	白透明
合計除去熱量[J]	22477658	14401144
エアコン由来燃料消費量	0.45[L]	0.27[L]

平成16年1月30日 Hiroshi Aida 29

夏の除去熱量と燃料消費量の関係



夏期のシミュレーションをおこない，夏期の除去熱量を算出する

	黒透明	白透明	黒フィルム	白フィルム
合計除去熱量[J]	36000000	35978180	34814559	25176092
エアコン由来燃料消費量[L]	0.7513	0.7508	0.7249	0.5101

平成16年1月30日 Hiroshi Aida 30

5. 結論

結論1

- 実験において，ボディカラーの違い，窓透過率の違いが各部温度に与える影響について確認した．
  - 室内温度について，4～5℃の温度低下を確認した．
  - 座席シート，ダッシュボードなどでは遮熱フィルムの効果が明らかに確認できた．
- 上記結果を用い，作成した熱負荷シミュレーションモデルの検証をおこなった．
  - 室温，室内各部温度の比較までをおこなったが高精度でシミュレーションをおこなえていることを確認した．
- 黒ボディ車と白ボディ車のエアコン由来燃料消費量の差異（0.45[L]>0.27[L]）を算出し，さらに除去熱量を変数とした比例関係を導いた．

結論2

- 夏期におけるシミュレーションをおこなった．
  - 夏期においては冬期以上にエアコン由来の燃料消費があることが確認できた．
    - 0.75L（夏期：白透明）＞0.27L（冬期：白透明）
  - 夏期においては日射が卓越し，エアコンの冷房能力を超えて室内が上昇しているため，例えば，黒透明と白透明の燃料消費量の差は小さかったが，室内温度の差は大きく出ている（下図参照）．

(参考図)

	黒透明	白透明	黒フィルム	白フィルム
室内最高温度[℃]	51.6	36.4	50.3	36.1
エアコン由来燃料消費量[L]	0.7513	0.7508	0.7249	0.5101