

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：37115

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23611050

研究課題名(和文) サステナブルな自動車社会のための自動車エコデザイン支援システムの研究

研究課題名(英文) Car eco design expert system for sustainable automobile society

研究代表者

東 大輔 (AZUMA, DAISUKE)

久留米工業大学・工学部・教授

研究者番号：20461543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：空気抵抗を低減して燃費を改善することは自動車デザイン開発の重要な課題であり、各自動車メーカーはデザイン性と空力性能の融合に多大な時間とコストをかけている。本研究では、デザイナーがアイデア展開をする際に空力技術の面でサポートする自動車エコ・デザイン支援システムを研究し、開発を試みた。具体的な成果として、1. 自動車の各部位の形状変更がデザイン性や空力性能にどのように影響するかを調査・分析してまとめた。2. システムに組み込む空力シミュレーションソフトの検証を行った。3. 国内外のカーデザイナーからシステムに対する要望意見をまとめた。4. iPhone向けアプリとしてパイロットシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：To reduce air resistance and to improve fuel consumption are the important issues of the automotive design development. As both styling and aerodynamics must be considered, automotive design developments require considerable time. In order to solve this problem, we studied the car eco design expert system for achieving a good fusion between aerodynamics performance and styling. And we tried to develop this system. Set out below are the concrete results. 1. We research and analyze the effect of the aerodynamic shape on the car design impression. 2. We verified the aerodynamic simulation software to incorporate into the system. 3. We summarized an opinion to the system from the domestic and international car designer. 4. We developed a prototype system for iPhone application.

研究分野：自動車空力デザイン

キーワード：自動車デザイン 自動車空力 デザイン開発 エキスパートシステム デザイン工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車デザインと環境問題

他の工業製品と明確に異なる自動車の魅力の一つは、ユーザーが自ら操って目的地まで快適に高速で移動する機能を備えていることにある。しかし、高速で移動する車体に大きな空気抵抗が生ずると燃費が悪化して環境破壊の一因となってしまう。そのため、トヨタ・プリウス(図1)に代表されるような空気に逆らわないエコ・ボディ・デザインが省資源と環境保護の視点から社会の求める価値基準になりつつある。

ただ、空気抵抗を下げる空力処理は車体の揚力を増大させることが多いので注意が必要である。空気抵抗を下げてエコ・ボディ・デザインを実現しても、車両の高速操縦安定性が失われては意味がない。空気抵抗と揚力を合わせて低減しつつ、魅力的なデザインに仕上げることが自動車空力デザインの重要な課題である。



図1. トヨタ・プリウス

(2) 空気抵抗と燃費

欧州メーカーの公表値によれば車両の空気抵抗を10%低減すると燃費が3%程度低減される。仮に自動車一台あたりの燃費改善は微々たるものだとしても、地球全体の車の総数というマクロな視点で考えれば空力デザインによる省資源、地球温暖化抑制効果は無視できるものではない。というのも、現在、自動車は人類全体のわずか8%にしか普及していないが、今後ロシアや中国で爆発的に普及拡大する事は確実だからである。そのため、各自動車メーカーは企業市民としての責任を果たすべく車両の空力デザイン開発に再注力している。

(3) 空力デザインの抱える問題

2度のオイルショックがあった1970年代に燃費を低減する空力デザインの研究開発が急務となり、VW社のHucho博士が「細部形状最適化技術」を提唱した。これは、ボディ全体を流線型にしなくてもフロントコーナーなどの部分形状を最適化するだけで大幅に空気抵抗を低減できるというもので、現在も各自動車メーカーでは独自に研究・改良を重ねたものを自社のデザイン開発に活用している。この「細部形状最適化技術」で自動車

デザインの自由度は飛躍的に向上したが、多様なデザインが求められる現代においては細部形状の空力処理ですらデザイン性を悪化させると考えるデザイナーもあり、実際の自動車デザイン開発の現場で未だにデザイン部門と空力部門の間で形状の駆け引きが頻繁に行われている。これにより、設計部門も含めて多大な開発工数が発生し、企業収益は大きく悪化、さらには企業が環境対策に投資できる費用を圧迫するという意味で地球環境問題にも影響を及ぼしている。イタリアデザイン社のジョルジェット・ジュージャロー氏のように、事前にデザイナーが空力技術を上手く消化した上で造形作業を行うことができれば、空力性能とデザイン性能を高い次元で両立させたデザイン開発がより短期間で実現できるが、全てのデザイナーが複雑な空力技術を一から学ぶのは現実的ではない。そこで本研究では、デザイナーを空力技術面でサポートするエコ・デザイン支援システムの開発を試みる。

(4) 本研究の独創的な点

本研究の様に自動車のデザイン性能と空力性能(工学)を融合させた学際的な研究は世界でも類を見ない。このような研究は実際に国内外の自動車メーカーでデザイナーと空力エンジニアの両面を経験した我々にしかできないものとする。また、デザインと空力性能を扱うシステムが実現すれば、他の技術要件、すなわちレイアウト要件や各種設計要件、生産要件等との組み合わせにも拡張する事ができると考えられ、将来的には世界に先駆けた真にジェネラルな自動車エコ・デザイン支援システムの実現が期待できる。

(5) 本研究の社会貢献的意義

本システムの実現は、大手自動車メーカーのデザイン開発期間の短縮に役立つだけでなく、電気自動車などの次世代自動車を開発する小規模な企業に対しても低コストで地球環境に優しい自動車エコ・デザインを行う環境の提供を可能にする。これにより、今後世界中に登場する車の環境性能が向上するならば、本システムの社会貢献的意義は極めて大きいと言える。

2. 研究の目的

自動車エコ・デザインで検討すべき項目は車体の空力性能や軽量化、リユース材料の採用など多岐にわたるが、本研究ではまずデザイン性能と空力性能の2点を高い次元で両立させるデザイン開発支援システムの研究を行う。我々はこれまでの研究でこのシステムに学習させる知見を多数取得してきたが、本研究ではこれら知見をさらに拡充させるとともに、システムに組み込む空力シミュレーション(CFD)ソフトの検証を行い、さらにシステムに新たなデザイン提案を自動で行

わせる手法を検討する．そして，デザイナーがデザイン開発を行う際に有用なパイロットシステムを開発する．

3. 研究の方法

まず始めにシステムに学習させる知見を拡充すべくクーペモデルによるデザイン調査を追加実施する．並行して調査対象部位の形状変更が空力性能へ与える影響を風洞試験と CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を用いて調査・分析する．さらに，そこで得られた知見を組み合わせて新たなデザイン形状を自動で提案する手法を検討する．また，実際のデザイン開発において本システムが真に有用なものになるよう，国内外の自動車デザイナーから意見や要望を集約する．

研究体制は，代表者が所属する久留米工業大学・空力デザイン研究室がデザイン評価および CFD 解析に用いる 3D モデルの作成と，風洞試験と CFD 解析による空力性能調査を担当し，研究分担者の石井先生が所属する九州大学はデザイン評価用 3D モデルの作成とユーザー評価調査の一部を担当する．また，システムに対する要望集約には，かねてより親交のある国内外の自動車デザイナー諸兄に協力を仰ぎ，システムに CFD 解析を活用する手法については代表者の研究活動をサポートしてくれているソフトウェア・クレイドル社に協力を仰いだ．

4. 研究成果

(1) 様々な車種形態のデザイン影響度調査

これまでもシステムに学習させる知見の蓄積を目的として，空力的な形状が車両のデザイン評価にどのような影響を及ぼすかを 2 次元および 3 次元のセダンタイプ車の評価モデルを用いて調査・分析してきた．数量化理論 類を用いた分析結果からそれぞれのアイテムに対するカテゴリースコアレンジから各形状変更部位のデザイン影響度を順位付けし，空力的な影響度の順位と併記したのが図 2 である．各アイテム名の下，中段に示したのがデザイン影響度のランクと順位．下段に示したのが空力影響度のランクである．ランクは上位 2 アイテムを A ランク，3 位から 5 位までを B ランク，残り 3 アイテムを C ランクとした．ここで，空力影響度のランクは農沢らによる文献と Hucho の文献をベースとし，自動車メーカーで空力デザイン開発に従事した著者らの経験も併せて判断した．本調査結果から，「リヤ周りの R」のように空力敏感度は高いがデザイン敏感度は低いアイテムがある一方，「ホイールベース」のように逆にデザイン敏感度は高いが空力敏感度の低いアイテムがあることなどが判明した．これにより，どの部位ならば空力を重視したデザイン開発を進めて良いか等の，極めて有用な知見が多数得られた．

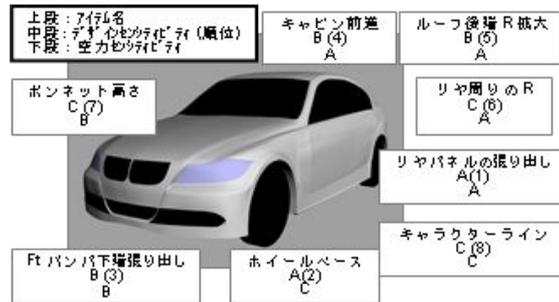


図 2. セダンタイプのデザイン調査結果

本事業ではさらに追加調査として，同じ BMW3 シリーズの「クーペ」モデル (E91 型) に対してもデザイン影響度調査を実施した．調査には基準モデルと各部位に修正を加えた 18 種類の評価ケース車両の 3D モデルを用意し，見た目の印象評価を行った．それぞれの評価モデルの形状変更部位は表 1 に示した通りであり，セダンモデル評価時と合わせてある．なお，評価モデルの作成には Rhinoceros を用いた．

表 1. デザイン変更部位一覧

ケース	変更部位	ケース	変更部位	ケース	変更部位
1	ボンネット高さ	7	Ft パンパ下端	13	ホイールベース
	キャラクタライン		リヤパネル張り出し		Ft パンパ下端
	リヤパネル張り出し		A びらー幅大		リヤ周りの R 幅大
2	Ft パンパ下端	8	キャラクタライン	14	ホイールベース
	キャラクタライン		リヤ周りの R 幅大		キャラクタライン
	キャビン前差		リヤパネル張り出し		ルーフ後端 R 幅大
3	キャラクタライン	9	ボンネット高さ	15	ボンネット高さ
	ルーフ後端 R 幅大		ルーフ後端 R 幅大		ルーフ後端 R 幅大
	A びらー幅大		リヤ周りの R 幅大		A びらー幅大
4	ルーフ後端 R 幅大	10	キャビン前差	16	ボンネット高さ
	リヤ周りの R 幅大		リヤパネル張り出し		リヤパネル張り出し
	A びらー幅大		リヤパネル張り出し		A びらー幅大
5	ホイールベース	11	ボンネット高さ	17	ホイールベース
	キャビン前差		ホイールベース		Ft パンパ下端
	A びらー幅大		ルーフ後端 R 幅大		キャビン前差
6	ボンネット高さ	12	ボンネット高さ	18	Ft パンパ下端
	キャビン前差		Ft パンパ下端		キャラクタライン
	リヤ周りの R 幅大		キャビン前差		リヤパネル張り出し

本結果から，「リヤパネルの張り出し」はデザイン・空力ともに影響度が高く，形状提案検討時にはプロジェクトのキャラクターに合わせてウェイト付けを変更すると良いことや，「ホイールベース」のようにデザイン影響度が A と高いのに対し，空力影響度は C と低いアイテムではデザイン性を重視して開発を進めれば良いこと．また，逆に「リヤ周りの R」のように空力影響度は高いがデザイン影響度の低いアイテムではプロジェクトのキャラクターに関係なく空力を重視してデザイン開発を進めれば良いことなど，空力デザイン支援システム構築する上で有用な知見を得ることができた (図 3)．

また，特筆すべきはクーペモデルのデザイン影響度分析結果がセダンモデルの結果と同様であったことである．細かい順位には若干の差異はあったものの，各アイテムのデザイン影響度ランクは一致した (図 4)．

同じ BMW3 シリーズの派生モデルで形状が

酷似しているため当然とも言えるが、全く異なる被験者で行ったデザイン評価において、酷似したモデルの分析結果が一致したことは、本分析手法の信頼性の高さを示す結果と言える。

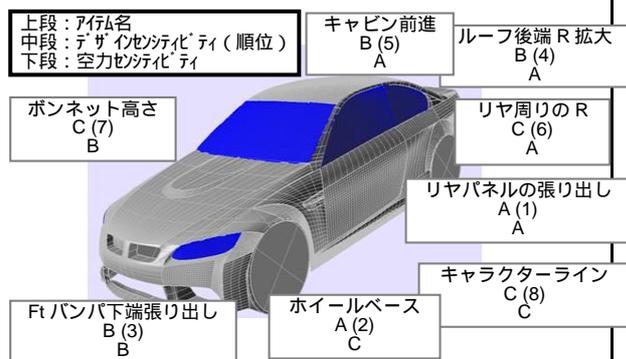


図 3. クーペタイプ車のデザイン調査結果

変更部位	クーペ	セダン
リアパネル張り出し	A (1)	A (1)
リア周りのR大	C (6)	C (6)
ルーフ後端R大	B (4)	B (5)
キャビン前進	B (5)	B (4)
ボンネット高さ	C (7)	C (7)
パンパ下 端張り出し	B (3)	B (3)
ホイールベース延長	A (2)	A (2)
キャラクターライン追加	C (8)	C (8)

図 4. セダン，クーペの調査結果比較

(2) 空力シミュレーション信頼度検証

最終的なエコ・デザイン支援システムは一般的な市販 PC レベルのコンピューターで使用することを想定している。そこで、システムに組み込む空力シミュレーション (CFD) ソフトが、市販 PC のような小規模 (小メモリ) 計算でもデザイン検討に有効なシミュレーション結果が得られるか否かの検証を実施した。この検証には正確に同一な形状の試験モデルで風洞試験とシミュレーションを実施し、比較検証する必要があるため、平成 23 年度に本事業予算を用いて 3 次元切削機「Roland MDX-40A」を導入し、CAD データから直接製作した風洞試験モデルで CFD と風洞試験の正確な比較検証を実施できるようにした。

なお、本システムへの導入を検討している CFD ソフトは自動車メーカーの使用実績が豊富で高い信頼性を誇るソフトウェア・クレイドル社の SCRYU/Tetra である。CAD データの取り込みから解析実行までの一連の作業をシームレスに行うことができる極めて操作性の高い CFD ソフトである。CFD の初期条件としては、計算機負荷を考慮して定常計算とし、乱流モデルには標準 k- ϵ モデルを用いた。また、風洞は久留米工業大学が (財) 日本自動車研究所 (JARI) から譲り受けた自動車開発用ゲッチング型小型風洞で、検証用の試

験風速は 27.6[m/s]とした。

実施した試験内容は、リアコーナー R の空気抵抗係数への影響や、リアコーナーに設置するエアロデバイス (図 5) の空力効果などである。

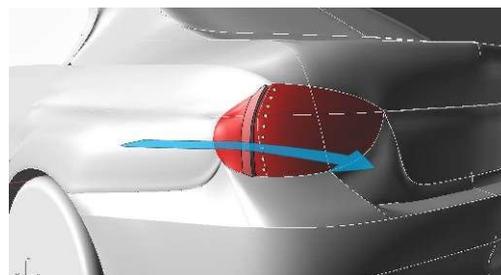


図 5. リアコーナー空力デバイス

いずれの場合も空気抵抗係数 (Cd) の絶対値には差異があるものの、形状変更した際の値の変化の傾向は十分に捉えられた (図 6)。デザイン検討の段階では空力性能の絶対値よりも形状変化による空力性能の増減の傾向が捉えられることが重要である。また、シミュレーションの結果を詳しく分析したところ、得られた流れの変化も空気抵抗係数の変化を説明するに十分なものであったため市販 PC 用に開発するデザイン支援システム上でも本 CFD ソフトが有効に機能することを確認した (図 7)。

なお、リアディフューザ 形状などの検証から、揚力についても変化傾向を捉えられることを確認したが、詳細は割愛する。

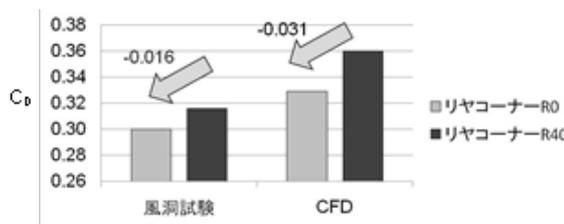
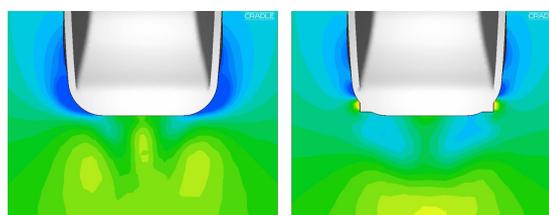


図 6. 風洞試験と CFD の比較検証結果



(a) デバイスなし (b) デバイスあり

図 7. CFD による流れ場の詳細分析

(3) 海外デザイナー意見収集

H24 年度のパリ・モーターショーの時期にフランスとイタリアのデザイン事務所を訪問し、エコ・デザイン支援システムに対する海外デザイナーの意見を収集した。

フランス・ニース

トヨタ ED2 (トヨタ・ヨーロッパ・デザインスタジオ) にて現地デザイナーと意見交換。技術要件で最も重要視するのは当然ながら空力要件であり、詳細はここでは記述できないが、目標の空力性能を満たすために幾つかの空力アイテムから盛り込むものを選択するなどの有益な情報を得た。エコ・デザイン支援システムへの要望として、検討形状に対する空力性能変化予測とユーザー評価が短時間 (1 日) で得られるシステムならば強い興味があるとの貴重な意見を得た。

イタリア・トリノ

世界 3 大カロッツェリア (デザイン・スタジオ) の一つであるベルトネ社を訪問。カロッツェリアは基本的に風洞試験装置を持っていないため、形状変化に伴う空力性能予測が手元でできるシステムに強い興味を示された。

フランス・パリ

パリ・モーターショー会場で各国のカーデザイナーやジャーナリストと意見交換をした。ヨーロッパ市場は空力性能を強く意識する。しかも日本のように空気抵抗低減だけに注目するのではなく、高速走行時の揚力低減にも強い関心を示すとのこと。速度無制限のアウトバーンの存在で、空力デザインに対する考え方が日本よりも数歩進んでいることを痛感させられた。

(4) パイロットシステムの開発

これまでの研究で得られた知見とヨーロッパで得たシステムに対する要望意見を基にして自動車エコ・デザイン支援システムのパイロット版を開発した。このパイロット版はデザイナーが気軽に利用できるものを想定して iPhone や iPad 上で動くアプリとして開発した。利便性は高く評価できるが、アプリとして開発したため、このパイロット版では空力シミュレーション (CFD) を行うことはできない。今回は各部位の形状変更による空力性能変化を事前にシステムにインプットしておくことにした。

アプリの開発はアシアル社の Monaca を用いて行った。プログラミング言語は HTML5, JavaScript, CSS なので扱いやすい。さらに Monaca デバッカーを使用すればリアルタイムで動作の確認が出来る。アプリ開発画面を図 8 に示す。

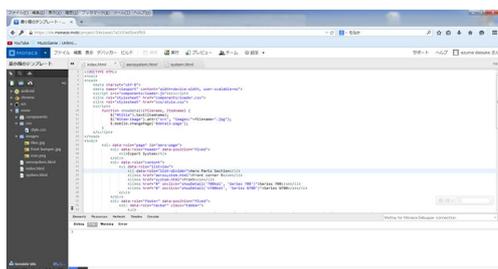


図 8. アプリ開発プログラミング画面

システムのホーム画面は図 9 のようにした。フロントバンパーや A ピラーなど、形状変更を行う各部位ごとにボタンを設け、それをタップすれば入力フォーム画面に切り替わる (図 10 a)。そこで変更形状を選択すれば、変更に伴うデザイン影響度と空力性能変化量が示される (図 10 b) システムである。我々が目指す自ら考えて最適形状を提案する支援システムには届かなかったものの、形状変更に伴うデザイン影響度と空力性能変化を瞬時に手元で知りたいという現場のデザイナーの要望には応えることができた。



図 9. システムパイロット版ホーム画面

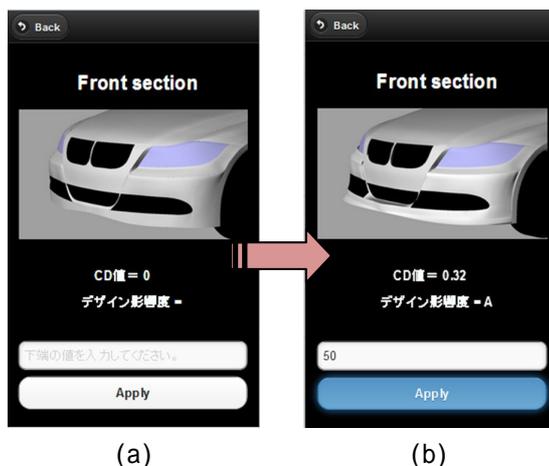


図 10. システム操作画面

(5) 書籍「自動車空力デザイン」出版

これまでの経験と研究成果、ヨーロッパ視察での有益な情報などを一冊の書籍にまとめることができた。執筆と編集に 5 年間苦労したが、各界から高い評価を頂き、何よりカーデザイナーや空力エンジニアを志す学生諸君から有益な本であるとの評価を聞くことができ、微力ながら自動車デザインの発展に貢献できたことを実感できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

1. 東 大輔, 濱地剛尚, 自動車リヤデザイン自由度を高める空気抵抗低減デバイス, 久留米工業大学研究報告, 査読有り, 第34号, pp.29-38, 2011
2. 東 大輔, 石井 明, 空力性能に優れた自動車リヤデザイン, 芸術工学会誌, 査読有り, No.60, pp.16-17, 2012
3. 井手靖雄, 東 大輔, 池田 秀, 梶山項羽市, 次世代高速道路での自動車の省燃費考察, 高速道路と自動車, 査読有り, Vol.56, No.1, 2013
4. 井手靖雄, 東 大輔, 池田 秀, 梶山項羽市, 異なる巡航速度の自動車燃費に及ぼす向い風の影響, 自動車技術会論文集, 査読有り, Vol. 45, No. 2, 2014

〔学会発表〕(計11件)

1. 東 大輔, 亀井宏晃, 濱地剛尚, 石井明 CFDを用いた自動車空力デザイン支援システム構築への基礎研究, 日本デザイン学会, デザイン学研究 2011 第58回春季研究発表大会 2011 大会概要集, pp.54-55, 2011
2. 東 大輔, 亀井宏晃, 濱地剛尚, 石井明 自動車デザインにおけるコーダ・トルンカの空気抵抗低減効果, 日本デザイン学会, デザイン学研究 2011 第58回春季研究発表大会 2011 大会概要集, pp.444-445, 2011
3. 東 大輔, 濱地剛尚, 白石 元, 石井明 自動車デザイン自由度を高める流体制御デバイス, 日本デザイン学会 第5支部, デザイン学研究 2011, 平成23年度研究発表会概要集, pp.54-55, 2011
4. 青井美奈, 東 大輔, 石井 明 流れの可視化によるアドバンストカーデザインの研究, 日本デザイン学会 第5支部, デザイン学研究 2011 平成23年度研究発表会概要集, pp.52-53, 2011
5. 濱地剛尚, 東 大輔, 自動車デザイン自由度を高める空気抵抗低減デバイス, 可視化情報学会, 第78回 風洞研究会概要集, 2012
6. 天野信一, 東 大輔, 自動車デザイン自由度を高める空力デバイス, 自動車技術会 九州支部 学生

自動車研究会 2012 Eternal
Car Life 2012

7. 井手靖雄, 東 大輔, 池田 秀, 梶山項羽市, 異なる巡航速度の自動車燃費に及ぼす向い風の影響, 自動車技術会 2013 春季大会学術講演会前刷集, No.79-13
8. 金子寛典, 東 大輔, 空気抵抗低減と揚力低減を両立する自動車リヤデバイス, 自動車技術会 九州支部 学生自動車研究会 2013 Eternal Car Life 2013
9. 井手靖雄, 東 大輔, 山口卓也, 異なる巡航速度の自動車燃費に及ぼす向い風の影響(第2報), 自動車技術会 2014, 春季大会学術講演会前刷集, No.25-14, pp.13-16, 2014
10. 東 大輔, 中井孝信, 石井 明, 揚抗比に優れた地面効果機デザインの基礎研究, 日本デザイン学会, デザイン学研究 2014, 第61回春季研究発表大会 2014 大会概要集, 2014
11. 中井孝信, 石井 明, 東 大輔, 高速海上輸送における水面効果翼船のデザイン研究, 日本デザイン学会 第5支部, デザイン学研究 2014, 平成26年度研究発表会概要集, 2014

〔図書〕(計1件)

1. 東 大輔(著), 石井 明(監修), 三樹書房, 自動車空力デザイン, 2015年, 総ページ数170ページ

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)
取得状況(計 件)

〔その他〕

ホームページ等
久留米工業大学 空力デザイン研究室
<http://www.12pt.org/azuma/kotsu2/lab/azuma.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 大輔(Daisuke, AZUMA)
久留米工業大学・工学部・教授
研究者番号: 20461543

(2) 研究分担者

石井 明(Akira, ISHII)
九州大学・芸術工学研究院・教授
研究者番号: 80325571