

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 25 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246112

研究課題名（和文） 超高精度計測システムと DNS を用いた表面粗度の流体摩擦抵抗影響の理論化の研究

研究課題名（英文） Theoretical study of the relationship between frictional resistance and surface roughness using DNS and accurate measurement systems

研究代表者

川島 英幹 (HIDEKI KAWASHIMA)

海上技術安全研究所・EEDI プロジェクトチーム・上席研究員

研究者番号：20450679

研究成果の概要（和文）：

粗度形状パラメータと乱流摩擦抵抗の関係を調査するため、幾何形状粗度を対象として DNS 計算、二重円筒試験、曳航水槽試験、風洞試験を実施した。その結果、粗面の乱流摩擦抵抗は、剪断力と局所的な圧力抵抗の和となり、粗度の形状がなだらかな波状粗面の場合、乱流摩擦抵抗の変化は局所的な圧力抵抗の変化で説明でき、圧力抵抗は、粗度の流線方向の断面形状に依存する抵抗係数、粗度の間隔に依存する粗度間の干渉現象、境界層内の速度分布に支配されることが判った。そして粗度形状パラメータと乱流摩擦抵抗の関係について定式化し、摩擦抵抗増加の推定式を導出した。

研究成果の概要（英文）：

In order to investigate the relationship between the turbulent frictional resistance and roughness shape parameters, parametrical study of geometrical roughness was carried out using DNS, double cylinder test, towing tank test, the wind tunnel test. As a result, in the case of wavy rough surface, turbulent frictional resistance of the rough surface is the sum of the local pressure resistance and shear forces, changes in the turbulent frictional resistance it can be explained by changes in local pressure resistance of the roughness, the local pressure resistance is governed drag coefficient which depends on the profile of the roughness, the interference phenomenon of roughness between that depends on the spacing of roughness, the velocity distribution in the boundary layer. Then the relational expression between turbulent frictional resistance and roughness shape parameters have been derived for estimating frictional resistance increase on the rough surface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
2011年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2012年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
年度			
年度			
総計	36,100,000	10,830,000	46,930,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：乱流摩擦抵抗、粗度形状パラメータ、幾何形状粗度、水槽試験、DNS、二重円筒試験、風洞試験、流場計測

1. 研究開始当初の背景

流体中を進行する物体と流体の間に生じ

る摩擦抵抗へ表面粗度が与える影響については、Schlichting の図表や、Moody 線図等に代表されるように、古くから研究されており、一般的な法則も提示されている。船舶分野においても、水と船体表面の摩擦抵抗が、全抵抗の 50~80%を占めることから、船体表面の粗度と摩擦抵抗の関係について研究が行われてきた。これらの研究では粗度は、主に高さで評価されている。しかし提案者らが実施した粗度を対象とした平板の水槽試験では、そもそも計測範囲の設定の仕方により計測される粗度の高さの関係が逆になり、当然の事ながら、粗度の計測範囲によっては粗度の高さとの摩擦抵抗の関係が逆転するという現象が観察された。この水槽試験では、サンドブラスト加工で表面に一樣な粗度を施工した平板と、塗装した平板の摩擦抵抗を比較した。それぞれの平板表面の粗度を非接触レーザー変位計と走査型共焦点レーザー顕微鏡を用いて計測した結果が図 1 と図 2 である。

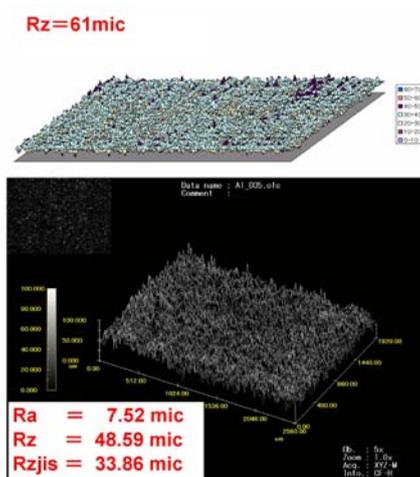


図 1 サンドブラスト加工板の粗度計測例

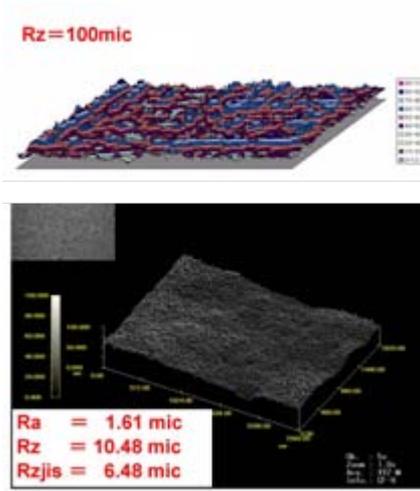


図 2 塗装した平板の粗度計測例
それぞれの図において上方に示す図が非接

触レーザー変位計による計測結果で、計測範囲は 30 mm×30 mm の範囲である。また下方に示す図が走査型共焦点レーザー顕微鏡による計測結果で、計測範囲は 2.5 mm×1.9 mm である。図中に表示されている粗度の定義は Rz が最大高さ、Ra が中心線平均粗さ、Rzjis が十点平均高さである。この計測結果から判ることは、計測範囲 30 mm×30 mm の広い範囲での粗度の計測結果では、サンドブラスト加工面の粗度は 61 μm、塗装面の粗度は 100 μm と塗装面の粗度の方が大きくなっている。一方、計測範囲 2.5 mm×1.9 mm の狭い範囲の粗度の計測結果では、指標による絶対値の違いはあるが、どの定義の粗度を取り上げても、塗装面よりもサンドブラスト加工面の粗度が大きくなっている。水槽試験における抵抗計測では、Re 数が 1×10^7 付近にサンドブラスト加工面は滑面に対して 2.6%抵抗が大きく、塗装面は 0.6%抵抗が大きいという結果が得られた。また Schlichting の図表から求めた滑面に対する摩擦抵抗増を評価すると狭い計測範囲での Ra を用いると最も近い値となった。比較的広い範囲で計測された粗度高さは、抵抗への影響は少なく、狭い範囲で計測された粗度高さが抵抗に影響しているように見える。すなわち同じ粗度高さであっても、勾配の小さなうねりのような長周期の粗度は摩擦抵抗への影響が少なく、勾配の大きい短周期の粗度は摩擦抵抗への影響が大きいと考えられる。そこで、粗度による摩擦抵抗への影響を正確に把握するためには、粗度の摩擦抵抗への影響を単純な粗度高さのみで評価せず、粗度の周期、勾配等、他の粗度のパラメータを抽出し、摩擦抵抗への影響を明らかにすると共に、粗度のパラメータが乱流中に発生する準秩序運動へ与える影響を解明し、一般的な法則を導き出すこととした。

2. 研究の目的

物体の表面粗度が流体摩擦抵抗への影響を与えることは、広く知られている事であるが、提案者らが行った実験結果から、同じ粗度高さであっても、うねりのような長周期の粗度は摩擦抵抗への影響が少なく、短周期の粗度は摩擦抵抗への影響が大きい傾向が見られることが判ってきた。そこで、粗度の摩擦抵抗への影響を単純な粗度高さのみでなく、粗度の勾配、周期等の他のパラメータによる影響をモデル化した粗度を対象とした系統的な抵抗計測により解明し、粗度と摩擦抵抗の関係について、より実現象に即した一般的な法則を導き出す。またモデル化した粗度を対象とした流場計測及び数値シミュレーション結果から粗度の各パラメータが乱流境界層の発達に影響を与えるメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

本研究の目的は、物体の表面粗度が乱流中の流体摩擦抵抗へ影響を与える際に、どのような粗度パラメータがその現象を支配するかを解明し、粗度と摩擦抵抗の関係について、より実現象に即した一般的な法則を導き出すことである。

そのため、波長振幅比を変化させた波状粗面を対象としたDNS計算を行い、波長振幅比と摩擦抵抗の関係について調査した。そしてその流場を詳細に解析することにより、粗度による摩擦抵抗増加の要因を調査した。

さらに二重円筒試験装置において、粗度間隔を変化させた幾何形状粗度の抵抗を計測し、粗度間隔が、粗度の抵抗にどのような影響を与えるか調査した。また流場を計測することにより粗度の伴流と、粗度間の干渉影響について調査した。

また、管理された幾何形状粗面を製作するため、ディスペンサとNC機を組み合わせた幾何形状粗度製造装置を開発した。そして、この幾何形状粗度製造装置を用いて、粗度形状パラメータをパラメトリックに変化させた各種粗度平板を製作し、水槽試験を実施することで、粗度形状パラメータと乱流摩擦抵抗の関係について調査した。さらに粗度平板を対象に風洞試験装置において、熱線流速計による流場計測を行い、粗度による摩擦抵抗増加の原因について調査した。

これら調査結果を総合し、粗度形状パラメータと乱流摩擦抵抗の関係について明らかにし、摩擦抵抗増加の推定式を導出した。

4. 研究成果

2次元の正弦関数状の波状粗面を対象として、粗度高は一定のまま、波長と両振幅の比（粗度の長さ高さ比に相当）を変化させ、DNS計算を行った。その結果、粗度によるいわゆる摩擦抵抗増加は、剪断力成分の変化と圧力抵抗成分の変化の総和で評価でき、波長と両振幅の比が10程度以上であれば、剪断力成分はほとんど変化せず、圧力抵抗成分の変化が、摩擦抵抗の変化を支配していることが判った。その領域では、波長と両振幅の比が大きくなればなるほど、抵抗増加量が小さくなることが判った。図3に波状粗面を対象としたDNSによるパラメトリック計算結果を示す。

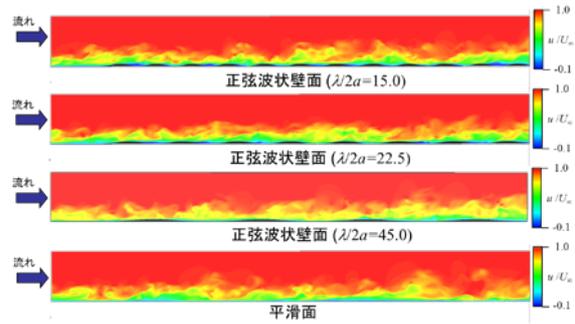
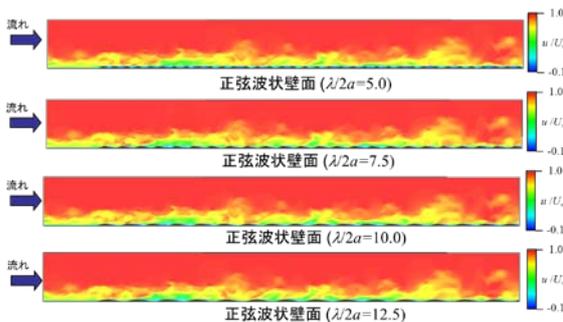


図3 波状粗面を対象としたDNSによるパラメトリック計算結果

二重円筒試験装置において、粗度の間隔を変化させた2次元幾何形状粗面を対象とした試験を実施し、その結果から、粗度間隔が変わると、粗度間の干渉が変化し、各粗度にかかる抵抗が変化するため、全抵抗に大きな影響を与えることが判った。また粗度の伴流の速度分布を推定し、抵抗増加量を求める手法を開発した。図4に二重円筒試験に使用した間隔をパラメータとした粗度を、図5に粗度の伴流の速度分布を、図6に抵抗増加の推測値と実験値の比較を示す。

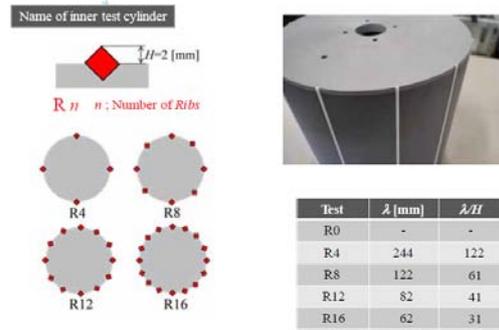


図4 粗度間隔変更試験（二重円筒装置）

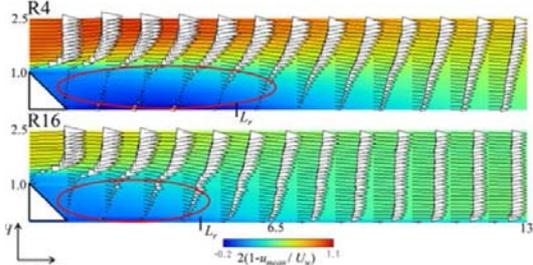


図5 粗度伴流の速度分布

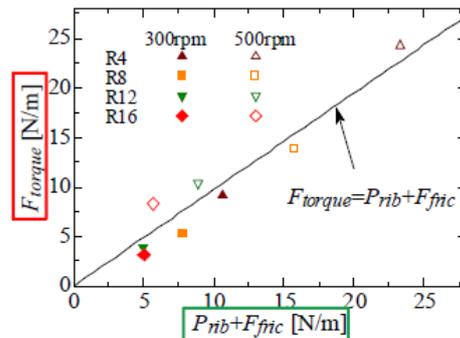


図6 粗度抵抗、推測値と実験値の比較

任意のパラメータの幾何学的粗度を平板上に施工するため、幾何学的粗度製造装置を開発した。本装置は、ディスペンサのノズルから、塗料、樹脂を塗出させ、NC機により移動させることによりモデル粗度を施工する。幾何学的粗度製造装置の写真を図7に示す。



図7 幾何学的粗度製造装置

粗度形状パラメータと摩擦抵抗の関係について系統的に調査するため、粗度高さ、粗度長さ高さ比、粗度間隔を形状パラメータとして変化させた正弦波状の2次元幾何形状断面を持つモデル粗度を製作した。製作したモデル粗度の形状パラメータを図8に、製作したモデル粗度平板表面の写真を図9に示す。

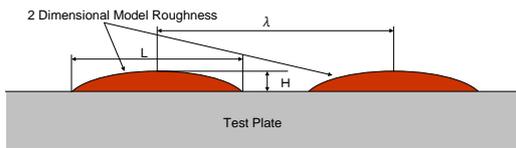


図8 粗度形状パラメータ

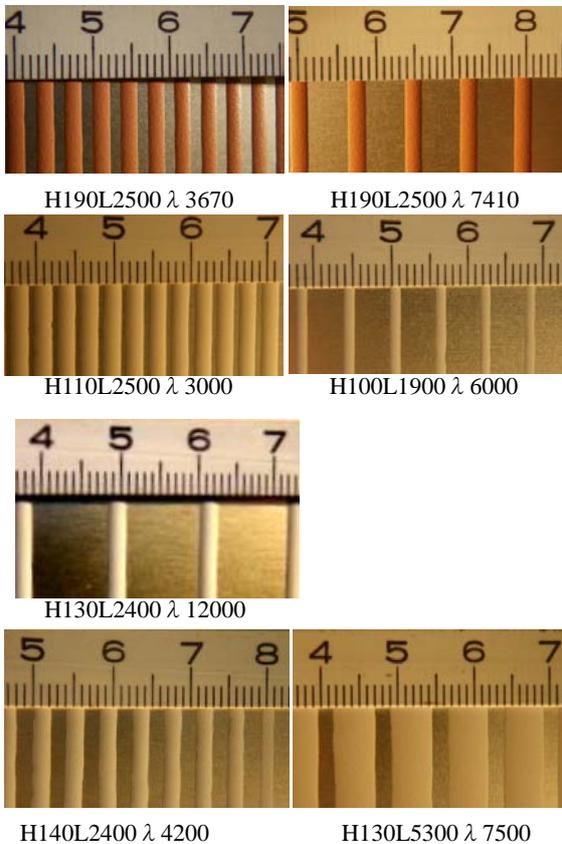


図9 製作した2次元幾何形状粗度

モデル粗度平板を対象とした水槽試験を行った。粗度高さと摩擦抵抗増加率の関係を図10に示す。全体として粗度高さの増加に伴い、摩擦抵抗増加率が大きくなる傾向を示す。

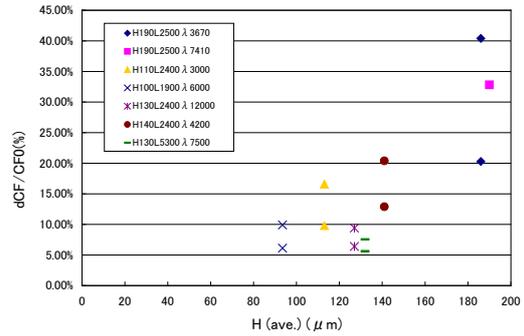


図10 粗度高さと摩擦抵抗増加率の関係

粗度の長さ高さ比と摩擦抵抗増加率の関係を図11に示す。全体として長さ高さ比の増加に伴い、摩擦抵抗増加率が小さくなっていく傾向が見られる。

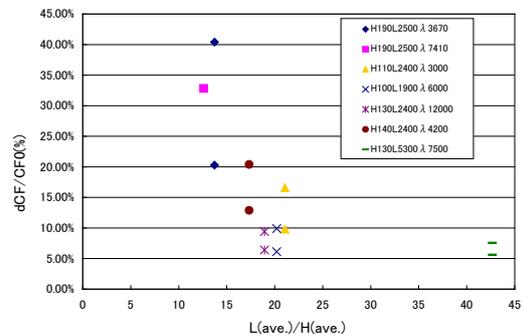


図11 粗度の長さ高さ比と摩擦抵抗増加率の関係

モデル粗度平板を対象とした風洞において流速分布計測を実施した。風洞試験装置を図12に、風洞内部のモデル粗度と熱線流速計の写真を図13に示す。計測した流速分布を図14に示す。



図12 風洞試験装置



図13 モデル粗度と熱線流速計

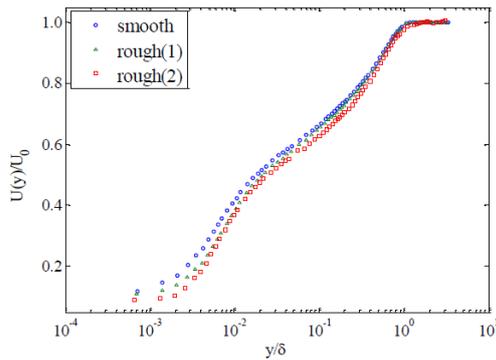


図 1 4 平均速度分布の比較

これらの計算・実験結果を整理した結果、いわゆる粗面の乱流摩擦抵抗は、剪断力と局所的な圧力抵抗の和で構成されることが判った。特に粗度の形状が比較的なだらかな波状粗面の場合、乱流摩擦抵抗の変化の大半は局所的な圧力抵抗の変化で説明でき、その局所的な圧力抵抗は、粗度の流線方向の断面形状に依存する抵抗係数、粗度の間隔に依存する粗度間の干渉現象（上流側の粗度の伴流に下流側の粗度が入り、粗度周りの流れの速度が小さくなる。）、境界層内の速度分布により決まることが判った。これらの知見を踏まえて、2次元幾何学形状粗度における粗度の形状パラメータと摩擦抵抗増加量の推定式として(1)式を導出した。

$$dR = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \rho U_{ke}^2 S_k C_d \quad (1)$$

ρ : 流体の密度

U_{ke} : 各粗度での有効速度

S_k : 各粗度の前面投影面積

C_d : 各粗度の抵抗係数

水槽試験で得られた抵抗増加量と(1)式による推定結果の比較を図16に示す。推定結果と水槽試験結果が、よく一致していることが判る。

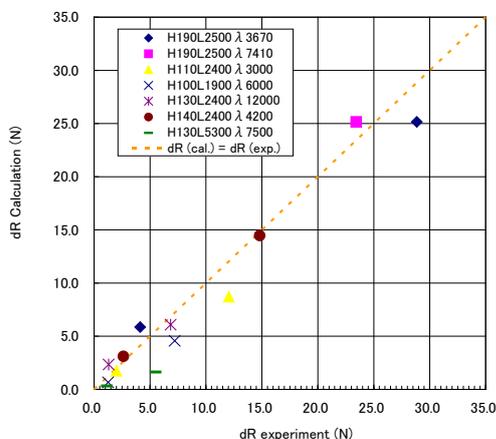


図 1 6 粗度による抵抗増加量の計測値と推定値の比較

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 2 件)

①本澤政明、伊藤崇広、岩本薫、川島英幹、三重野紘央、安藤裕友、千田哲也、辻義之、川口靖夫、Experimental investigations on frictional resistance and velocity distribution of rough wall with regularly distributed triangular ribs、International Journal of Heat and Fluid Flow、査読有、2013

②川島英幹、堀利文、牧野雅彦、竹子春弥、平行平板曳航法による塗装面の乱流摩擦抵抗計測、日本マリンエンジニアリング学会誌、査読無、47巻5号、2012、7-12

[学会発表] (計 14 件)

①佐野喜隆、本澤政明、岩本薫、川島英幹、三重野紘央、安藤裕友、千田哲也、川口靖夫、PROPOSAL OF FLOW RESISTANCE ESTIMATION BASED ON VELOCITY DISTRIBUTION、8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics、2012年06月16日、ポルトガル リスボン

②川島英幹、牧野雅彦、深澤良平、竹子春弥、川口靖夫、辻義之、岩本薫、本澤政明、増田 宏、三重野紘央、粗度の形状パラメータが乱流摩擦抵抗に与える影響、日本船舶海洋工学会 平成 24 年度秋季講演会、2012 年 11 月 27 日、東京大学柏キャンパス

③佐野喜隆、本澤政明、岩本薫、川島英幹、三重野紘央、安藤裕友、千田哲也、川口靖夫、半円型リブ列を有する壁面の速度分布計測に基づく流体抵抗モデル構築、日本機械学会流体工学部門講演会、2012 年 11 月 17 日、同志社大学今出川キャンパス

④守裕也、宇田川翔太郎、岩本薫、村田章、深淵康二、川島英幹、川口靖夫、辻義之、Effect of wavelength of turbulent thermal boundary layer with sinusoidal wavy wall by direct numerical simulation、JSME-CMD ICMS2012、2012 年 10 月 9 日、神戸大学

⑤和田裕貴、後藤克基、吉田潤、山北智徳、川島英幹、辻義之、乱流境界層における対数領域とカルマン定数に関する実験的考察、日本流体力学会 年会 2012、2012 年 9 月 18 日、高知大学

⑥後藤克基、和田裕貴、吉田潤、山北智徳、辻義之、川島英幹、低レイノルズ数乱流境界層における実験と数値計算との比較、日本流体力学会 年会 2012、2012 年 9 月 18 日、高知大学

- ⑦吉田潤、後藤克基、和田裕貴、山北智徳、川島英幹、辻義之、粗面乱流境界層における摩擦抵抗係数の考察、日本流体力学会年会 2012、2012 年 9 月 18 日、高知大学
- ⑧石川学、塚原隆裕、本澤政明、岩本薫、川島英幹、川口靖夫、Direct Numerical Simulation of Turbulent Taylor-Couette Flow with a Roughened Inner Cylinder、TFEC8 (第 8 回韓国機械学会、日本機械学会熱流体工学会議)、平成 24 年 3 月 21 日、Songdo Convensia Center, 仁川、韓国
- ⑨川島英幹、堀利文、牧野雅彦、竹子春弥、平行平板曳航法による塗膜面の乱流摩擦抵抗計測、日本マリンエンジニアリング学会第 2 回ワークショップ「船底塗料と海洋環境に関する最近の話題」、平成 23 年 9 月 16 日、千葉工業大学
- ⑩牧野雅彦、川島英幹、堀利文、深澤良平、川口靖夫、辻義之、岩本 薫、本澤政明、乱流摩擦抵抗に影響を与える粗度パラメータ解明のための周期的粗度生成法について、日本船舶海洋工学会秋季講演会、平成 23 年 11 月 15 日、タワーホール船堀
- ⑪伊藤崇広、松本歩、伊藤稔久、本澤政明、岩本薫、川島英幹、安藤裕友、千田哲也、川口靖夫、EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECTS OF SURFAACE ROUGHNESS GEOMETRY AFFCTING TO FLOW RESISTANCE、AJK2011-FED (アメリカ機械学会、日本機械学会、韓国機械学会合同流体工学会議 2 0 1 1)、平成 23 年 7 月 26 日、浜松アクトシティ
- ⑫松本歩、伊藤稔久、本澤政明、岩本薫、川島英幹、安藤裕友、千田哲也、川口靖夫、Investigation of Turbulent Statistics using LDV and its Relation to the Flow Friction of Series of Ribs in the Turbulent Couette Flow、9th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY-PIV' 11、平成 23 年 7 月 21 日、神戸大学
- ⑬川島英幹、牧野雅彦、堀利文、乱流摩擦抵抗を増加させる粗度の形状パラメータについて、日本船舶海洋工学会第 16 回推進性能・運動性能合同研究会、平成 23 年 6 月 3 日、東京大学柏キャンパス
- ⑭宇田川翔太郎、岩本薫、川島英幹、川口靖夫、辻義之、直接数値計算による正弦波状壁面乱流層における波長の影響、第 24 回数値流体力学シンポジウム、平成 22 年 12 月 22 日、慶應義塾大学日吉キャンパス (神奈川県)
- [図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川島 英幹 (HIDEKI KAWASHIMA)

海上技術安全研究所・EEDI プロジェクトチーム・上席研究員

研究者番号 : 2 0 4 5 0 6 7 9

(2) 研究分担者

川口 靖夫 (YASUO KAWAGUCHI)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号 : 2 0 3 5 6 8 3 5

辻 義之 (YOSHIAKI TSUJI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 0 0 2 5 2 2 5 5

岩本 薫 (KAORU IWAMOTO)

東京農工大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 5 0 4 0 8 7 1 2

堀 利文 (TOSHIHUMI HORI)

海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号 : 5 0 5 0 5 1 0 4

(2011 のみ)

牧野 雅彦 (MASASHIKO MAKINO)

海上技術安全研究所・流体設計系・主任研究員

研究者番号 : 9 0 4 1 5 7 9 5

(2011~2012)

深澤 良平 (RYOHEI FUKASAWA)

海上技術安全研究所・流体設計系・研究員

研究者番号 : 8 0 5 0 5 1 0 7

(2011~2012)

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :