

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01638

研究課題名（和文）計算流体力学と水槽試験の併用による船体抵抗理論の再構築

研究課題名（英文）Re-construction of Ship Resistance Theory using CFD and Tank Tests

研究代表者

日野 孝則（Hino, Takanori）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60373429

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、CFD手法によって得られる詳細な流場情報を活用することで、流体物理に基づいた船体抵抗理論を再構築し、それによって新たな抵抗成分分離法と実船抵抗推定法を開発することである。抵抗理論の再構築のために、抵抗の各成分（平板摩擦抵抗、形状抵抗、造波抵抗）について既存の分離法の仮定を見直し、新たに開発した非粘性流れのCFD計算法および粘性流れのCFD計算法によって解析を行い、各成分の特性を明らかにした。それらを基に、水槽試験結果に対してCFD計算を援用し模型スケールの抵抗から実船スケールの抵抗を推定する手順を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFDを援用することで、従来の水槽試験結果による実船の抵抗性能推定における流体力学的不合理性を解消する方法を提案した。これにより、実船の性能推定精度が向上し、近年の地球温暖化対応のCO2排出規制に伴う抵抗低減船型の研究開発における高精度水槽試験のニーズの高まりに対応することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present study is to develop a new method for separating resistance components of a ship based on hydrodynamic principle with the aid of CFD analysis. The developed separation method is applied to the resistance extrapolation from a model scale to a ship scale. The reconstruction of ship Resistance theory is achieved by considering validity of various assumptions to separate the resistance components, such as flat plate friction, form factor for viscous resistance and wave making resistance. CFD methods including a newly developed inviscid flow computation methods are applied for flow analyses and characteristics of each resistance component is extracted. Based on the obtained knowledge, a new procedure for extrapolating resistance of a full scale ship from tank test data of a model ship is proposed.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船舶流体力学 CFD 船体抵抗

1. 研究開始当初の背景

船舶の抵抗特性は、抵抗・推進性能のみならず、操縦性能や波浪中の耐航性能などの流体力学的性能の基礎となる基本要素であり、船舶流体力学における重要な概念である。

船舶の抵抗性能評価には現在においても縮小模型による水槽試験が用いられる。模型試験においてフルード数とレイノルズ数を模型スケールと実船スケールで同一にすることができれば、相似則により、模型船の抵抗から実船の抵抗を求めることができる。しかし、模型試験ではフルード数とレイノルズ数を同時に実船と同一にすることはできない。そのために、船舶抵抗論に基づいて、抵抗を成分に分離して、模型スケールにおける性能の計測値から実船スケールの性能を予測する手法が考案され、その予測手法は現在に至るまで広く用いられている。

従来の抵抗分離では、無次元化した全抵抗係数 C_T を図1のように分離する。すなわち、平板摩擦抵抗に形状影響を加味したものを粘性抵抗とし、それに造波抵抗を加えたものを全抵抗としている。各成分の尺度影響については、以下のように仮定している。

- (1) 形状影響係数 K は、尺度影響を受けない(模型船と実船で同一の値とする)。
 - (2) 平板の摩擦抵抗係数 C_{F0} は、レイノルズ数の関数であり、模型と実船のレイノルズ数の違いにより尺度影響を受ける。
 - (3) 造波抵抗係数 C_W はフルード数のみの関数であり、尺度影響を受けない。
- これらの仮定は流体力学的観点から考察するといくつかの問題がある。
- (1) 平板摩擦抵抗係数 C_{F0} の実船レイノルズ数域における妥当性には疑問がある。
 - (2) 形状影響係数 K は、レイノルズ数によって剥離現象が異なるので、定数とは見なせない。
 - (3) K に関するもう一つの問題は、水槽試験における推定精度である。水槽試験では、模型船を低速で走行させ、造波抵抗を微小と仮定して $1+K$ を求めているが、実際にはたとえ低速でも造波抵抗がゼロとは言えない。
 - (4) 造波抵抗係数 C_W については、船体まわりには粘性に起因する境界層が形成されるので、特に船尾において生成される波は尺度影響を受けることになる。

従来の抵抗分離

		平板摩擦 抵抗係数 (相関式)	
全抵抗 係数	形状影響 係数 (定数)		造波抵抗 係数
$C_T = (1 + K) \times C_{F0(Re)} + C_{W(Fr)}$			
	粘性抵抗 Re のみの関数		造波抵抗 Fr のみの関数

上記のように、従来の抵抗成分分離における尺度影響評価は全ての成分について流体力学的に不合理な仮定を含んでいる。歴史的には船体まわりの複雑な流体现象を解析する手段のなかった時代に、実用的な尺度影響評価法として採用されたものであり、仮定の不合理性などから生じる誤差を相殺するために模型と実船の間の相関係数が用いられ、現在に至っている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、厳密な流体物理に基づいて、縮尺模型による水槽試験結果から抵抗成分を分離し、実船の抵抗を合理的に推定する方法を検討することである。

従来の実船抵抗推定は、上記のように流体力学的には必ずしも厳密とは言えない種々の仮定を導入して、抵抗成分を分離し、尺度影響を考慮して実船の抵抗を外挿していた。本研究では、CFD 手法を併用することで、船体抵抗を流体物理に基づいて成分分離する。

一方で、CFD 解析では種々の誤差が不可避であり、実験計測値と CFD 計算値は必ずしも一致しない。したがって、定量的な抵抗の評価にあたっては模型試験の計測値をベースとすることが妥当である。そのため、実験計測値と CFD による成分分離および尺度影響評価を複合的に用いて実船抵抗を合理的に予測する手法を開発する。

3. 研究の方法

本研究においては、CFD 解析によって、船体まわりの詳細な流れの情報を得ることで、流体

再構築された抵抗論による抵抗分離

		平板摩擦 抵抗係数 (CFD)	
全抵抗 係数	形状影響 係数 (Re)		造波抵抗 係数
$C_T = (1 + K_{(Re)}) \times C_{F0^*(Re)} + C_{W(Fr, Re)}$			
	粘性抵抗 Re のみの関数		造波抵抗 Fr と Re の関数

力学的洞察に基づいて船体抵抗論を再構築し、それに基づいた抵抗成分分離と各成分の尺度影響評価によって、合理的な実船性能推定を可能にする。

本研究における抵抗成分分離の概念を図2に示す。従来の抵抗分離における仮定を見直し、流体力学的に合理的な成分分離を行うとともに、成分毎の尺度影響を CFD を用いて推定するところに特徴がある。

各成分に対する検討内容を以下に示す。

(1) 平板摩擦抵抗 C_{FO} に関する検討

平板摩擦抵抗係数 C_{FO} については、従来の経験式と近年提案された新しい摩擦抵抗式が異なる挙動を示し、CFDによる平板摩擦抵抗の推定では用いる乱流モデルによって摩擦抵抗値が異なるなど、現状では平板摩擦抵抗の値を一意に定めることは難しい。そこで、本研究においては、船体まわりの解析で実績のある乱流モデルを選択し、広範囲のレイノルズ数に対して平板の摩擦抵抗をCFD計算して、これを平板摩擦抵抗係数とみなす。

(2) 形状影響係数 K の検討

形状影響係数 K は自由表面影響のない条件の下での粘性抵抗から求める必要がある。実験的に求めることは難しいため、CFDによって自由表面の影響を無視した二重模型流れの解析を行う。計算された粘性抵抗と(1)による同一のレイノルズ数における平板摩擦抵抗との比によって K を推定する。ここでの検討課題はCFDによる圧力抵抗算定の不確かさである。粘性抵抗は摩擦抵抗と圧力抵抗の和なので、圧力抵抗の算定精度は K の推定精度に直結する。そこで、支配方程式から粘性影響を除去したオイラー方程式を用いて非粘性流れを計算する手法を開発する。この手法で二重模型流れを計算すると、圧力抵抗はゼロになるはずである。これにより、圧力積分法の精度を検証することができる。異なるレイノルズ数での粘性抵抗を計算することで K の尺度影響を検討する。

(3) 形状影響係数 K の決定法の検討

水槽試験における形状影響係数 K の決定法には、いくつかの課題がある。この課題に対処するために、CFDと水槽試験の両面から検討を行う。CFDにおいては(2)で述べたように、二重模型流れの計算によって K を推定することができる。一方の水槽試験では低速で計測した抵抗において造波抵抗を微小であるとして K を求めているが、造波抵抗は必ずしもゼロではない。CFDを用いて水槽試験と同じ低フルード数での抵抗算定を行い、二重模型流れのCFD計算との比較によって、低速での造波抵抗を見積もり、 K の推定精度を検証する。

(4) 造波抵抗 C_W の検討

水槽試験では、造波抵抗は全抵抗から粘性抵抗推定値を差し引くことで間接的に求めている。したがって造波抵抗の推定精度は粘性抵抗評価(すなわち K)の精度に依存することになる。CFDでも、自由表面流れの解析による全抵抗から二重模型流れによる粘性抵抗を差し引いて粘性流れにおける造波抵抗を算出することができる。また、(2)の非粘性流れ計算法を自由表面流れに拡張することで、非粘性に造波抵抗を計算できる。CFDによる非粘性流れの造波抵抗と粘性流れの造波抵抗の差を解析することで造波抵抗に対する尺度影響を考察するとともに、水槽試験の造波抵抗推定を補正する。

(5) 実船抵抗推定法の確立

上記の尺度影響評価を統合し、CFDと水槽試験を併用した実船抵抗推定法として構成する。

4. 研究成果

平板摩擦抵抗係数については、船体まわりの解析で実績のある乱流モデルとして、 $k-\omega$ SSTモデルを採用し、模型スケールの広範囲のレイノルズ数に対して平板の摩擦抵抗を計算し、実験解析で用いられるITTC1957およびSchoenherrの摩擦抵抗係数と比較した(図3)。CFD計算とEmpirical曲線との間にはかなりの相違があることがわかる。

形状影響係数は自由表面影響のない二重模型流れの仮定の下での粘性抵抗から求める。この形状影響係数の算定については、国際共同研究プロジェクトに参加し、他の機関の計算結果との比較によって、推定法の実用的応用法を検討した。図4はCFDによる平板摩擦抵抗を用いて二重模型流れの計算値から形状影響係数を求めた結果の一例である。

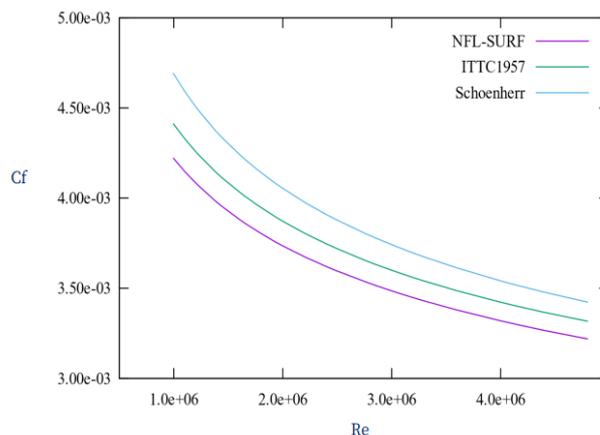


図3 CFDによる摩擦抵抗係数と経験式との比較

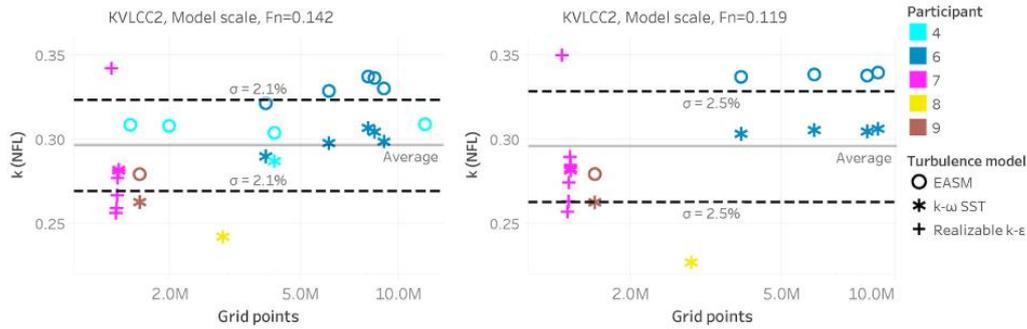


図 4 CFD による形状影響係数推定例

用いた手法や乱流モデル、格子数にかかわらず、推定値はよくまとまっており、CFD による形状影響係数推定は CFD による平板摩擦抵抗をベースとすることで高精度が期待できる。

また、CFD による圧力抵抗算定の不確かさを検討するため、支配方程式から粘性影響を除去したオイラー方程式を用いて非粘性流れを計算する手法を開発し、この手法で二重模型流れを計算した。その結果、ポテンシャル流れではゼロになるはずの圧力抵抗が値を持つことがわかった。パネル法によるポテンシャル流れ計算法を開発し、CFD 計算と同一の船体表面離散化によるポテンシャル流れ計算を試みた。その結果、オイラー方程式による圧力分布とポテンシャル流れによる圧力分布に差異が見られ、CFD において高精度の境界条件を考慮する必要があることがわかった。また、自由表面流れに対して粘性計算と非粘性計算を実施し、流場および抵抗を比較して造波抵抗に対する粘性影響を検討した。図 5 は粘性計算と非粘性計算による波紋の比較である。非粘性計算では粘性計算に比べて波高が大きく、造波抵抗も大きくなることが示された。

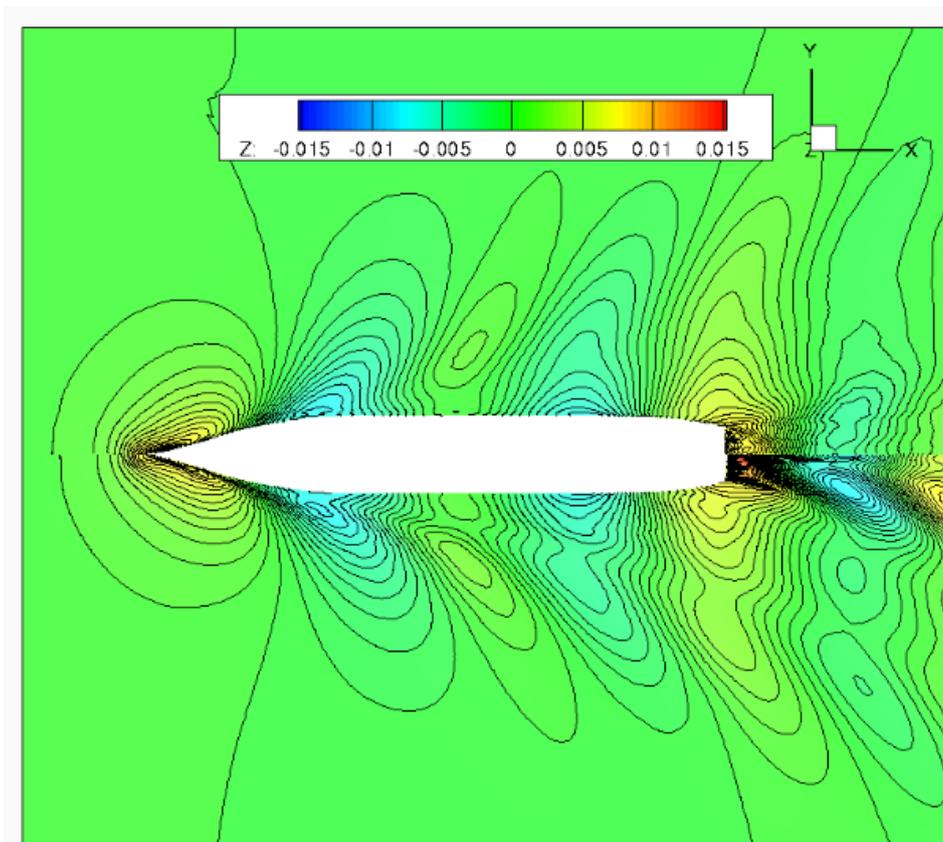


図 5 粘性計算(上)と非粘性計算(下)による波紋の比較

波抵抗の検討については、ナビエ・ストークス方程式による粘性影響を考慮した自由表面流れおよび二重模型流れから求めた造波抵抗と、水槽試験から求めた造波抵抗の相互比較を行った。水槽試験における造波抵抗の算定は全抵抗から粘性抵抗の推定値を差し引いて求めているが、これを CFD 解析結果と比較すると、粘性抵抗推定に用いる形状影響係数のレイノルズ数影響に加えて、自由表面流れにおける摩擦抵抗が二重模型流れの摩擦抵抗より大きいことから、水槽試験による造波抵抗には粘性抵抗成分が含まれていることが明らかになった。また、CFD

における自由表面流れの全抵抗から二重模型流れの全抵抗を引いた抵抗は水槽試験によって推定された造波抵抗と同程度の値になる一方、自由表面流れと二重模型流れの圧力抵抗の差による抵抗成分は実験において計測波形から求めた波形造波抵抗とほぼ同じ値になることが示された(図6)。

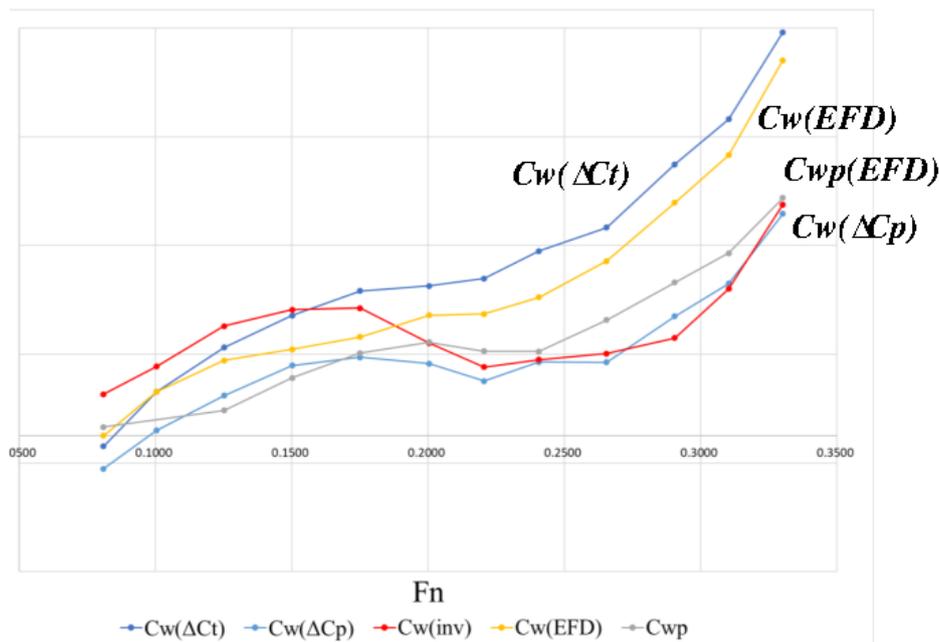


図6 CFDによる造波抵抗推定と実験値の比較

以上の検討により、船舶の抵抗成分分離に関する新たな知見が得られ、再構築した船舶抵抗理論の有用性が明らかになった。これを踏まえ、水槽試験結果に対して CFD 計算を援用し模型スケールの抵抗から実船スケールの抵抗を推定する手順を図7のように構成した。

2.1 模型スケールでの $1 + K_{(Re)}$ の評価

低速 ($Fr \approx 0.1$) において

- 1.1) 模型試験より全抵抗係数 C_{T0}^E
- 1.2) CFD により、同じ低速 Fr 、 Re における全抵抗 C_{T0}^C
- 1.3) CFD により、同じ Re 数の二重模型流れから粘性抵抗係数と形状影響係数 $C_{V0}^C = (1 + K_0^C)C_{F0m}$
- 1.4) 模型試験における粘性抵抗の推定 $C_{V0}^E = C_{T0}^E \times \frac{C_{V0}^C}{C_{T0}^C}$
- 1.5) 模型スケールの形状影響係数 $1 + K_{0m}^E = \frac{C_{V0}^E}{C_{F0m}}$

2.2 模型スケールでの造波抵抗 C_W の評価

設計 Fr において、

- 2.1) 模型試験より全抵抗係数 C_{Tm}^E
- 2.2) CFD により、設計 Fr 、 Re における全抵抗 C_{Tm}^C
- 2.3) CFD により、2.2) と同じ Re における二重模型流れから、 $C_{Vm}^C = (1 + K_m^C)C_{F0m}$
- 2.4) 模型試験における粘性抵抗の推定 $C_{Vm}^E = C_{Tm}^E \times \frac{C_{Vm}^C}{C_{Tm}^C} = (1 + K_m^E)C_{F0m}$
- 2.5) 模型試験における造波抵抗の推定 $C_{Wm}^E = C_{Tm}^E - C_{Vm}^E$

2.3 実船スケールの全抵抗 C_{Ts} の評価

- 3.1) CFD による実船スケールでの二重模型流れから、 $C_{Vs}^C = (1 + K_s^C)C_{F0s}$
- 3.2) 実船スケールの粘性抵抗は $C_{Vs}^E = (1 + K_m^E) \frac{1 + K_s^C}{1 + K_m^C} C_{F0s}$
- 3.3) すなわち、実船スケール (設計 Re) の形状影響係数は、 $1 + K_s^E = (1 + K_m^E) \times \frac{1 + K_s^C}{1 + K_m^C}$
- 3.4) CFD による実船スケール (設計 Fr) の抵抗 C_{Ts}^C
- 3.5) CFD による実船スケール (設計 Fr) の造波抵抗は、3.1) と 3.4) より $C_{Ws}^C = C_{Ts}^C - C_{Vs}^C$
- 3.6) 実船スケールの造波抵抗は $C_{Ws}^E = C_{Wm}^E \times \frac{C_{Ws}^C}{C_{Wm}^C}$
- 3.7) 実船スケールの全抵抗は、 $C_{Ts}^E = C_{Vs}^E + C_{Ws}^E$

図7 水槽試験と CFD による模型船抵抗の実船への外挿手順

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Korkmaz Kadir Burak, Werner Sofia, Sakamoto Nobuaki, Queutey Patrick, Deng Ganbo, Yuling Gao, Guoxiang Dong, Maki Kevin, Ye Haixuan, Akinturk Ayhan, Sayeed Tanvir, Hino Takanori, Zhao Feng, Tezdogan Tahsin, Demirel Yigit Kemal, Bensow Rickard	4. 巻 220
2. 論文標題 CFD based form factor determination method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 108451 ~ 108451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2020.108451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 日野孝則 高木洋平
2. 発表標題 粘性・非粘性 CFD を用いた船舶の抵抗成分分離
3. 学会等名 第 35 回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日野孝則 大橋訓英
2. 発表標題 CFD技術
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会「GHG非出ゼロに向けた船舶流体力学の現状と展望」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinji Hashimoto , Takanori Hino , Mikito Shirai, Om Prakash Sha , Bijit Sarkar , Jun Kambara and Yoshihisa Fujimoto
2. 発表標題 Hydrodynamic Design and Analysis of High Speed Catamaran with Hydrofoils using CFD
3. 学会等名 PRADS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takanori Hino
2. 発表標題 Development of CFD methods for Industrial Ship Flow Applications
3. 学会等名 32nd Symposium on Naval Hydrodynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スウェーデン	SSPA			
英国	Strathclyde U.			
カナダ	NRC			
ドイツ	HSVA			
米国	U. Michigan			