

## 日中韓フォーサイト事業 平成23年度 実施報告書

### 1. 拠点機関

日本側拠点機関：	東京大学
中国側拠点機関：	復旦大学
韓国側拠点機関：	ソウル大学校

### 2. 研究交流課題名

(和文)：新機能を有する複合酸化物の開発と電子状態の解明

(交流分野：先端材料分野)

(英文)：Joint research on novel properties of complex oxides

(交流分野：Advanced Material Science )

研究交流課題に係るホームページ：

<http://www.physics.fudan.edu.cn/tps/people/dlfeng/Eng/A3.html>

<http://lyra.phys.s.u-tokyo.ac.jp/A3webpage/index.html>

### 3. 開始年度

平成20年度 ( 4年目 )

### 4. 実施体制

#### 日本側実施組織

拠点機関：東京大学大学院理学系研究科

実施組織代表者 (所属部局・職・氏名)：大学院理学系研究科・研究科長・相原 博昭

研究代表者 (所属部局・職・氏名)：大学院理学系研究科・教授・内田 慎一

協力機関：産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構

事務組織：東京大学理学系研究科等事務部

#### 相手国側実施組織 (拠点機関名・協力機関名は、和英併記願います。)

(1) 中国側実施組織：

拠点機関：(英文) Fudan University

(和文) 復旦大学

研究代表者 (所属部局・職・氏名)：(英文) Department of Physics・Professor  
・ Donglai Feng

協力機関：(英文) University of Science and Technology of China  
(和文) 中国科学技術大学

(2) 韓国側実施組織：

拠点機関：(英文) Seoul National University  
(和文) ソウル大学校

研究代表者（所属部局・職・氏名）：(英文) Department of Physics and Astronomy・  
Professor・Je-Geun Park

協力機関：(英文) Yonsei University  
(和文) 延世大学

## 5. 全期間を通じた研究交流目標

本研究の目標は、日本、中国、韓国の研究者による複合遷移金属酸化物の研究ネットワークを構築し、積極的な試料提供、研究参加、情報交換等を通じ、共同で当該物質群における新現象・新機能の開拓、評価、さらには発現メカニズムの解明をおこなうことである。

遷移金属を構成要素とする複合酸化物は、ここ20年の先端材料研究における中心課題として集中的な研究が行われている。その理由は、これらの物質群で出現する「高温超伝導」や「巨大磁気抵抗」といった特異な物性・現象が、従来の物性物理の枠組みによる理解を超えたものであり、新しい研究分野の始まりを告げるものとして認識されたこと、又、これら新機能がエレクトロニクス応用への端緒として期待されたことによる。近年においても、「マルチフェロイック」「スピン3重項超伝導」「巨大熱起電力」といった新現象・新機能が次々と発見されており、複合酸化物の研究は今後も進展、拡大を続けていくと考えられる。

日本は従来、当分野において世界をリードする立場を維持していたが、今後もトップレベルの研究を継続、発展させるためには、多様な物質群をカバーした物質開発および多面的な物性評価が必須である。当分野の急速な進展、特に応用展開をも視野に入れた国際的な競争の激化を考えると、単一グループによる研究体制の維持は実質上不可能であり、今後は、様々な特長を有する研究者・グループが参加するネットワーク型の共同研究が主流となることは明らかである。本研究はその潮流の先鞭を切るものとして、複合酸化物の試料合成、物性評価、更に理論的解析において世界をリードする日中韓の研究者・研究グループによって構成されている。参加研究者が連携し、共同研究を行うことにより、複合酸化物における物質開発、物性探索を行うことを目標としている。

本共同研究は、物質面においては、3d、4d、5d複合酸化物のバルク単結晶及び薄膜試料を、測定面においては、エネルギー領域としては直流の伝導特性から硬x線分光ま

でを網羅する。又、J-PARC（高エネルギー加速器研究機構）において本事業参加研究者（門野・小嶋グループ）が中心となって開発してきた $\mu$ SR測定施設が稼働を始め、超伝導体や磁性体のミクロな磁氣的性質を詳細に調べる体制が整ったこともあり、今後の2年間においては、J-PARCでの $\mu$ SR測定や、J-PARC内部に隣接された、 $\mu$ SR測定と同様に磁氣的性質を検証する実験手法である中性子散乱施設での実験も行う。このように、過去3年にはなかった、磁氣的性質の検証という観点が加わったことにより、より多角的に、本研究の対象物質の評価、メカニズムの解明を行う。

## 6. 平成23年度研究交流目標

これまでに培った人的交流をより積極的に進め、参加研究者の相互訪問、各国研究者との交流をより強力に推進する。今年度は、積極的に、中韓の大学院学生を東大・産総研に数ヶ月単位で受け入れる。このことは、中韓から派遣された学生に、試料作製と物性評価の技術を習得させるという目的のみに留まらず、彼らが、将来的に、諸外国の研究機関で長期に渡って研究を行う際のステップとなるよう、経験を踏ませるという意図も含んでいる。又、日本側研究者が韓国物理学会に参加、招待講演を行い、本事業の成果をアピールすると同時に、研究ネットワークの更なる拡充を図る。

### ○学術的観点

今年度は、これまでの研究成果によって顕在化した以下の中心課題に取り組む。

#### 1. 鉄-ヒ素-酸化物超伝導体の新物質開発と超伝導機構解明

高压合成法を有効活用することにより、常圧下では実現不可能な新たな結晶構造を有する超伝導体を開発する。又、良質単結晶試料を用いた物性評価を行い、超伝導機構を解明する。

#### 2. 銅酸化物高温超伝導体の電子状態の解明

超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が 100K を超える物質群を対象とした角度分解光電子分光を行い、高い  $T_c$  の起源を明らかにする。

#### 3. ルテニウム、ロジウム、イリジウム酸化物の電子状態の解明と新機能 4d 遷移金属酸化物の開発

特異な表面状態を有することが判明した2次元ロジウム酸化物  $Sr_2RhO_4$  に対し、系統的な元素置換（ドーピング）を試み、その物性の変化を精査する。得られた結果から電子相図を確立すると共に、その知見を物質合成にフィードバックさせることにより、新機能を有する 4d、5d 遷移金属酸化物の物質合成を試みる。

#### 4. ミュオンを用いた超伝導・磁性状態の解明

上記物質群に対して、ミュオンスピン回転・緩和・共鳴実験および中性子散乱実験を遂行し、その超伝導特性および磁氣的特性を精査する。

研究の詳細については、8. 平成23年度研究交流計画概要 に記す。

## ○若手研究者育成

現在日中韓合わせて10名を超える博士課程大学院生が本共同研究に従事しており、いずれも今後2年以内に学位取得の予定である。引き続き彼らの研究が円滑に進むように積極的な支援を行う。ワークショップを開催し、若手研究者の成果発表と人的ネットワーク構築を図る。

## 7. 平成23年度研究交流成果

(交流を通じての相手国からの貢献及び相手国への貢献を含めてください。)

### 7-1 研究協力体制の構築状況

H23年度は、韓国延世大学および中国科学技術大学より大学院学生を日本側研究機関にそれぞれ1ヶ月にわたって招聘し、帯域溶融法による単結晶育成、および高圧合成法による新物質探索技術の指導を行った。本校流で得られた知見を元に、中国科学技術大学において高圧合成法を用いた新物質探索研究が開始された。

### 7-2 学術面の成果

鉄系及び銅酸化物高温超伝導体をはじめとする複合遷移金属化合物の研究において、以下のテーマについて集中的な共同研究を行った。

- ① 鉄-ヒ素-酸化物超伝導体の物質開発と超伝導機構解明：様々な新物質の開発および超純良単結晶を用い、元素置換効果やドーピング効果による電子状態の系統的変化の精査を行った。また、一軸圧力効果による非双晶化結晶を用い、面内の電子状態の異方性を検証した。
- ② 銅酸化物高温超伝導体の電子状態の解明：銅酸化物高温超伝導体を対象とした系統的な角度分解光電子分光 (ARPES) を行い、その電子状態の特異性を抽出した。単位胞に3枚の銅-酸素面を有する物質群では、内側と外側の銅-酸素面に対応するバンドが見られることから、内側と外側の銅-酸素面のキャリア濃度が大きく異なっていること、それが本系の高い転移温度の原因となっていることを明らかにした。又、電子ドープ型超伝導体では、反強磁性揺らぎが準粒子の寿命を決定づけていることを見いだした。
- ③ ルテニウム、ロジウム、イリジウム酸化物の電子状態の解明と新機能4d遷移金属酸化物の開発：層状 Ru、Rh 酸化物 (Sr<sub>2</sub>MO<sub>4</sub>) の表面において、顕著な電子-格子相互作用の増大が起きていることを明らかにした。又、これらの系においてその基底状態がドーピングや結晶乱れの微細な変化によって激しく変化することを見いだした。

詳細は8. 実績概要に記す。

### 7-3 若手研究者養成

本研究で得られた成果を元に日本側3名、中国側1名、韓国側1名の大学院生が学位を取得した。

### 7-4 社会貢献

日本側研究者が韓国物理学会に参加、招待講演を行うことにより、本事業の成果をアピールすると同時に、日韓に渡る研究ネットワークの拡充がはかられた。

### 7-5 今後の課題・問題点

H23年度は、震災により産総研および高エネ研における研究員受入・共同研究が当初予定通り遂行できず、H24年に持ち越されることとなった。

### 7-6 本研究交流事業により発表された論文

平成23年度論文総数 3本

相手国参加研究者との共著 3本

(※ 「本事業名が明記されているもの」を計上・記入してください。)

(※ 詳細は別紙「論文リスト」に記入してください。)

## 8. 平成23年度研究交流実績概要

※「10. 平成23年度研究交流実績状況」の概要について記載してください。

### 8-1 共同研究

#### 1. 鉄-ヒ素-酸化物超伝導体の新物質開発と超伝導機構解明

新規鉄系超伝導体の開発、および良質の単結晶育成手法の確立が行われた。特に、中国科学技術大学の大学院生が産総研に長期滞在し、高圧合成装置による新物質開発技術の習得を行った。同手法を元に、日中双方で多面的かつ相補的な物質開発に取り組む体制が構築された。測定面では、H22年度に良質の単結晶試料の育成に成功した $(\text{Ba}, \text{K})\text{Fe}_2\text{As}_2$ 、 $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$ 、 $\text{KFe}_2\text{As}_2$ を対象とした多面的物性測定が開始され、鉄系超伝導体の電子状態および高温超伝導発現機構に対する知見が得られ始めた。

#### 2. 銅酸化物高温超伝導体の電子状態の解明

超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が100Kを超える物質群(ビスマス系高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Tl}_2\text{O}_8$ 、水銀系高温超伝導体  $\text{Hg}_1\text{Ba}_2\text{O}_8$ ,  $\text{Hg}_1\text{Ba}_2\text{O}_8$ ,  $\text{Hg}_1\text{Ba}_2\text{O}_8$ )を対象とした新測定手法(レーザー光電子分光、超低エネルギーシンクロトロン光電子分光)の適用を試みる。特に $\text{Hg}_1\text{Ba}_2\text{O}_8$ 系について、実験条件の最適化がなされ、系統的な実験結果が得られた。又、電子ドーブ

型高温超伝導体におけるキャリアドーピング効果について、磁場中輸送現象と光電子分光実験が行われ、本系の超伝導対称性および金属-絶縁体転移に関する描像が明らかとなった。

### 3. ルテニウム、ロジウム、イリジウム酸化物の電子状態の解明と新機能 4 d 遷移金属酸化物の開発

Sr<sub>2</sub>RhO<sub>4</sub>系にたいし、系統的な元素置換を行い、不純物添加によって引き起こされる電子状態の変化を光電子分光測定によって評価し、電子相図を確立した。

#### **8-2 セミナー**

第2期の研究開始にあたり、新規加入者を交えた研究参加者が一堂に集うキックオフミーティングを12月17日～20日にかけて中国海南島で開催した。各国の研究者・研究グループの研究体制、研究成果に対する評価、検討を行い、今後の共同研究に向けた具体的なロードマップを策定した。

#### **8-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）**

4月13日から15日にかけて行われた韓国物理学会に日本側研究者が参加、招待講演を行った。本事業の成果をアピールすると同時に、日韓に渡る研究ネットワークの拡充がはかられた。

## 9. 9. 平成23年度研究交流実績人数・人日数

### 9-1 相手国との交流実績

派遣先		日本	中国	韓国	合計
派遣元		<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	
日本 <人/人日>	実施計画		25/160	4/8	29/168
	実績		19/105	3/8	22/113
中国 <人/人日>	実施計画	1/30		(3/18)	1/30 (3/18)
	実績	1/31		1/31	
韓国 <人/人日>	実施計画	3/90	(14/84)		3/90 (14/84)
	実績	2/43	(13/48)		2/43 (13/48)
合計 <人/人日>	実施計画	4/120	25/160 (14/84)	4/8 (3/18)	33/288 (6/36)
	実績	3/74	19/105 (13/48)	3/8	25/187 (13/48)

※各国別に、研究者交流・共同研究・セミナーにて交流した人数・人日数を記載してください。(なお、記入の仕方の詳細については「記入上の注意」を参考にしてください。)

※日本側予算によらない交流についても、カッコ書きで記入してください。(合計欄は( )をのぞいた人・日数としてください。)

### 9-2 国内での交流実績

実施計画	実績
51/181<人/人日>	58/148<人/人日>

## 10. 平成23年度研究交流実績状況

### 10-1 共同研究

—研究課題ごとに作成してください。—

整理番号	R-1	研究開始年度	平成20年度	研究終了年度	平成25年度	
研究課題名	(和文) 新機能を有する複合酸化物の開発と電子状態の解明 (英文) Joint research on novel properties of complex oxides					
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 内田慎一・東京大学・教授 (英文) Shin-ichi Uchida・University of Tokyo・Professor					
相手国側代表者 氏名・所属・職	<中国側> Donglai Feng・Department of Physics, Fudan University・Professor <韓国側> Je-Geun Park・Department of Physics and Astronomy, Seoul National University・Professor					
交流人数 (※日本側予算によらない交流についても、カッコ書きで記入のこと。)	① 相手国との交流					
	派遣先	日本 <人/人日>	中国 <人/人日>	韓国 <人/人日>	計 <人/人日>	
	派遣元					
	日本 <人/人日>	実施計画	1/7	2/4	3/11	
		実績	0/0	1/3	1/3	
	中国 <人/人日>	実施計画	1/30		1/30	
		実績	1/31		1/31	
	韓国 <人/人日>	実施計画	3/90		3/90	
		実績	2/43	(3/18)	2/43	
	合計 <人/人日>	実施計画	4/120	1/7 (3/18)	2/4 (3/18)	7/131 (6/36)
		実績	3/74	0/0	1/3	4/77
	② 国内での交流 50人/120人日					
23年度の 研究交流活動	本年度の研究交流活動としては、主に、中国韓国の学生を日本側（東京大学、産業技術総合研究所、高エネルギー加速器研究機構）で受け入れることとし、11月から12月に3名受け入れて、実験を行わせた。具体的な研					



	<p>究テーマは、計画概要に書いた（１）、（２）、（３）、（４）であり、特に、日本側が強く、中国韓国サイドが弱い、結晶育成のノウハウとその評価についての実験技術を身につけさせることを主たる目的とする。</p>
<p>研究交流活動 成果</p>	<p>通常の共同研究は、測定試料を日中韓の間の共同研究者サイドに送り、異なる実験プロセス・測定を、異なるグループ・人間が行うということが一般的であるが、中国韓国の学生を長期間に渡って受け入れることによって、それらのことが、一人の人間が行うことが出来るようになり、今まで以上に、スムーズでスピーディな研究の進展が出来、また、若手研究者の育成という観点からも大きな効果が出た。</p>
<p>日本側参加者数</p>	
	<p>43 名 (13-1 日本側参加者リストを参照)</p>
<p>中国側参加者数</p>	
	<p>37 名 (13-2 中国側参加研究者リストを参照)</p>
<p>韓国側参加者数</p>	
	<p>25 名 (13-3 韓国側参加研究者リストを参照)</p>

## 10-2 セミナー

—実施したセミナーごとに作成してください。—

整理番号	S-1
セミナー名	(和文) 日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業 第2期キックオフミーティング
	(英文) JPSJ A3 Foresight Program Second round kick-off meeting
開催時期	平成23年12月17日～平成23年12月20日(4日間)
開催地(国名、都市名、 会場名)	(和文) 中国 海南島 カクタスリゾートサンヤ
	(英文) China, Hainan Island, Cactus Resort, Sanya,
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 内田慎一・東京大学・教授
	(英文) Shin-ichi Uchida, Tokyo University, Professor
相手国側開催責任者 氏名・所属・職 (※日本以外で開催の場合)	Donglai Feng, Fudan University, Professor

### 参加者数

派遣先 派遣元	セミナー開催国 ( 中国 )	
	A.	
日本 〈人/人日〉	A.	14/66
	B.	0
	C.	0
中国 〈人/人日〉	A.	0
	B.	0
	C.	24/72
韓国 〈人/人日〉	A.	0
	B.	0
	C.	13/48
合計 〈人/人日〉	A.	14/66
	B.	0
	C.	37/120

A. セミナー経費から負担

B. 共同研究・研究者交流から負担

C. 本事業経費から負担しない(参加研究者リストに記載されていない研究者は集計しないでください。)

セミナー開催の目的	第2期の研究開始にあたり、新規加入者を交えた研究参加者が一堂に集うキックオフミーティングを開催した。各国の研究者・研究グループの研究体制、研究成果に対する評価、検討を行い、今後の共同研究に向けた具体的なロードマップを策定した。本ワークショップでは特に、大学院生等若手研究者の積極的参加、発表、討論に重点を置き、日中韓三カ国の若手研究者による人的ネットワークの構築を図った。				
セミナーの成果	第2期における最初の共同作業であり、新たな参加者を含めた研究ネットワークの強化が図られた。 重点課題として、鉄-ヒ素-酸化物高温超伝導体、銅酸化物高温超伝導体、ルテニウム超伝導体を対象とした新物質開発および良質単結晶育成手法に関する情報交換を行い、研究分担、研究者の相互派遣等、今後の共同研究に向けた具体的な共同研究指針を決定した。				
セミナーの運営組織	<p>運営委員 内田慎一，東京大学</p> <p>中国側担当者 Donglai Feng, Fudan University (Shanghai)</p> <p>韓国側担当者 Je-Geun Park, Seoul National University (Seoul)</p>				
開催経費 分担内容 と金額	日本側	内容	外国旅費	金額	1,160,480 円
			国内旅費	金額	98,130 円
			消費税	金額	58,024 円
			合計		1,316,634 円
	中国側	内容	国内旅費	金額	500,000 円
			会議費	金額	3,000,000 円
		合計		3,500,000 円	
韓国側	内容	外国旅費	金額	550,000 円	
		合計		550,000 円	

### 10-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）

#### ① 相手国との交流

派遣先		日本	中国	韓国	計
派遣元		<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>	<人/人日>
日本 <人/人日>	実施計画		5/39	2/4	7/43
	実績		5/39	2/5	7/44
中国 <人/人日>	実施計画	0/0		0/0	0/0
	実績	0/0		0/0	0/0
韓国 <人/人日>	実施計画	0/0	0/0		0/0
	実績	0/0	0/0		0/0
合計 <人/人日>	実施計画	0/0	5/39	2/4	7/43
	実績	0/0	5/39	2/5	7/44
② 国内での交流		8/28 人/人日			

所属・職名 派遣者名	派遣・受入先 (国・都市・機関)	派遣時期	用務・目的等
産業技術総合研究所・グループ長・永崎洋	韓国・ソウル・延世大学	4月13日 -15日	韓国物理学会における招待講演を行い、本事業の成果発信を行った。
東京大学・教授・内田慎一	韓国・ソウル・ソウル大学校	5月25日 -26日	コロキウムにて、本事業の成果発信を行った。
東京大学・教授・内田慎一	中国・北京・中国科学アカデミー	8月10日 -16日	中国北京で行われる低温国際会議に出席し、本事業の成果発信を行った。
東京大学・助教・掛下照久	中国・北京・中国科学アカデミー	8月10日 -17日	中国北京で行われる低温国際会議に出席し、本事業の成果発信を行った。
東京大学・大学院生・石田茂之	中国・北京・中国科学アカデミー	8月10日 -17日	中国北京で行われる低温国際会議に出席し、本事業の成果発信を行った。
東京大学・大学院生・中島正道	中国・北京・中国科学アカデミー	8月10日 -17日	中国北京で行われる低温国際会議に出席し、本事業の成果発信を行った。
東京大学・大学院生・劉亮	中国・北京・中国科学アカデミー	8月10日 -17日	中国北京で行われる低温国際会議に出席し、本事業の成果発信を行った。
東京大学・大学院生・石田茂之	日本・大阪・大阪大学	6月14日	大阪大学極限量子科学研究センターにおいて、本事業の情報収集を行った。

東京大学・大学院 生・石田茂之	日本・大阪・大阪大 学	7月11 -15日	大阪大学極限量子科学研究センター において、本事業の情報収集を行っ た。
東京大学・大学院 生・石田茂之	日本・大阪・大阪大 学	9月6- 9日	大阪大学極限量子科学研究センター において、本事業の情報収集を行っ た。
東京大学・大学院 生・高橋正圭	日本・富山・富山大 学	9月21 -24日	物理学会において、本事業の成果発信 を行った。
東京大学・大学院 生・田中貴英	日本・富山・富山大 学	9月21 -24日	物理学会において、本事業の成果発信 を行った。
東京大学・助教・ 掛下照久	日本・富山・富山大 学	9月21 -24日	物理学会において、本事業の情報収集 を行った。
東京大学・大学院 生・三上拓也	日本・富山・ 富山大学	9月21 -24日	物理学会において、本事業の情報収集 を行った。
東京大学・大学院 生・三上拓也	日本・兵庫・関西学 院大学	平成24 年3月2 4-25 日	物理学会において、本事業の情報収集 を行った。

### 1 1. 平成23年度経費使用総額

	経費内訳	金額 (円)	備考
研究交流経費	国内旅費	2,909,820	
	外国旅費	2,600,680	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	4,191,060	
	その他経費	161,352	
	外国旅費・謝金等に 係る消費税	137,088	
	計	10,000,000	
委託手数料		1,000,000	
合 計		11,000,000	

### 1 2. 四半期毎の経費使用額及び交流実績

	経費使用額 (円)	交流人数<人/人日>
第1四半期	1,252,108	28/48
第2四半期	2,733,384	37/145
第3四半期	3,908,030	17/140
第4四半期	2,106,478	1/2
計	10,000,000	83/335