

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：56203

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23543

研究課題名（和文）制震装置を活用した付加減衰に基づく送電鉄塔の耐震性向上に関する研究

研究課題名（英文）Study on Improving the Seismic Performance of Transmission Tower Based on Additional Damping by Using the Control Device for the Earthquake

研究代表者

松本 将之（Matsumoto, Masayuki）

香川高等専門学校・建設環境工学科・助教

研究者番号：50847407

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、過去の送電施設の地震被害により、広域に亘る都市生活に甚大な被害が生じた多数の地震被害報告を踏まえ、鉄塔の耐震性評価、及び耐震性向上を検討した。我が国で基幹線に位置する鉄塔を選定し、鉄塔への減衰付与の観点から高減衰化を図る方法で、鉄塔の地震に対する安全性確保、及び耐震性向上について、解析的、且つ実験的に検討を実施した。その結果、制震装置として振り子式の同調質量ダンパー（TMD）を鉄塔へ適用する方法により、塔体の耐震性が向上する事を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、制震装置として振り子式のTMDを鉄塔へ適用する事により、鉄塔本体の応答低減効果が確認でき、結果として耐震性向上が実現できる事を解析的、且つ実験的に確認した。本研究で検討した振り子式のTMDは、比較的容易に同調させる事が可能であり、取り付け構造の工夫により、容易に取り換える事が可能である。この為、本検討に用いたTMDは、現在運用されている多くの鉄塔への適用を想定した場合、新規取り付け時や損傷後の取り換え時に、効率的な設置を実現する制震装置であり、多数の鉄塔の耐震性向上に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the seismic resistance evaluation and improvement of the seismic resistance of the steel tower were examined based on many reports that the earthquake damage of the power transmission facility in the past caused enormous damage to the urban life over the wide area. A steel tower located on the main line was selected in Japan. From the viewpoint of adding damping to the tower, an analytical and experimental study was conducted on ensuring the safety of the tower against earthquakes and improving the earthquake resistance. As a result, it was confirmed that the seismic resistance of the tower was improved by applying the Tuned Mass Damper (TMD) (the pendulum type) to the tower as a seismic control device.

研究分野：地震工学，耐震工学

キーワード：送電鉄塔 地震応答解析 耐震性評価 付加減衰 制震装置 減衰性能

1. 研究開始当初の背景

1999年の台湾集集地震を初め、2011年の東北地方太平洋沖地震、2016年の熊本地震、更には、2018年の北海道胆振東部地震等、多数の地震により、電力の送電不可に直結し、都市生活のダウンに影響するような鉄塔の地震被害が数多く報告された。このような背景より、既往の研究^{[1] [2] [3] [4] [5] [6]}では、鉄塔の基部や脚部といった構造的特性の観点から耐震性向上が検討されてきた。その一方、鉄塔と地震波の共振現象に対して、鉄塔の減衰性を高める方法で補強対策を検討した事例は少ない。又、近年、橋梁の分野では、斜張橋の主塔や免震橋、鉄塔の分野では、無線通信鉄塔に対して、地震時の耐震対策として同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper, 以下、TMDと称す) が採用、実用化されている。とりわけ、振り子式のTMDは、比較的容易に同調させる事が可能であり、取り付け構造の工夫により、容易に取り換える事が可能である。この為、多数の運用鉄塔への制震ダンパーの適用を想定した場合、振り子式のTMDは、新規取り付け時や損傷後の取り換え時に、効率的な設置を実現する制震装置と言える。

2. 研究の目的

本研究では、高電圧の架渉線を有する送電鉄塔に対し、TMDによる耐震対策の有効性について、解析的、且つ、実験的に検討した。初めに、我が国において基幹線を受け持つ220kV山形鋼送電鉄塔を検討対象構造物として選定した。その後、対象構造物の固有振動特性の把握や、動的応答特性の比較を行い、制震装置の性能評価の為の解析的検討を行った。更に、検討対象である鉄塔の固有振動特性を有する縮小模型の塔状構造物を作製し、模型の耐震性評価、及び簡易TMDによる耐震性向上対策について、実験的検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 解析モデルと解析条件

本研究では、我が国で一般的に採用されている送電鉄塔の構造図を基にモデル化を行った。対象構造物の送電鉄塔は、220kV懸垂型山形鋼鉄塔であり、解析モデルの構造図を図1に示す。同図は、主柱材4本の脚の長さが等しい平脚鉄塔(節点数245、要素数672)である。ここに、図中のA~Dは、主柱材の位置を、図中の番号は、パネル番号を表している。又、同様の懸垂型鉄塔が直線状に連続して配置された状態を想定し、鉄塔間の径間長は若番側、老番側ともに350mと仮定した。主柱材、腹材、水平材、及びその他補助材の全部材を3次元はり要素の線形材料(ヤング率:205.9GPa、ポアソン比:0.3)とし、各部材は、接合部で要素分割し、端部条件は、剛接合としてモデル化を行った。山形鋼の部材減衰に関しては、沢辺らの無線鉄塔における加振実験により、振幅が小さい場合は1.7%、振幅が大きい場合は3.3~3.8%の値を示す事から、山形鋼の部材減衰を2%と仮定している。これを踏まえ、本研究でも等辺山形鋼の部材減衰を2%とした。又、架渉線の減衰定数に関しては、岩間らの電線の振動実験の結果から、本研究においても同様に0.4%と仮定した。既往の研究では、鉄塔と基礎は剛性差や質量差が大きい為、鉄塔基部を固定とした場合と基礎・地盤を含めてモデル化した場合で応答に差がない事から、基礎固定としてモデル化している。本研究においても、基礎は完全固定支持とした。解析ソフトは、汎用構造解析プログラムTDAPIII (Version 3.04)を使用した。解析手法は、微小変形理論に基づく幾何学的線形解析である。固有値解析の方法は、Subspace法を適用する。又、動的解析の方法は、Newmark β 法 ($\beta=0.25$)による直接積分法を適用し、積分時間間隔は0.002secとした。更に、固有値解析による主要モードを基に、Rayleigh減衰を定義した。なお、第一基準振動数と第二基準振動数の組み合わせは、過大な減衰を示さないように、1次の固有振動数と50Hzの組み合わせを採用した。入力地震動は、平成23年東北地方太平洋沖地震、及び平成30年北海道胆振東部地震時に観測された強震記録とし、地震ごとに最大加速度の大きい5地点、2成分(NS成分、及びEW成分)を抽出して、計20波を検討に用いた。

本検討では、橋梁の分野におけるTMDの実績を考慮して、TMDの質量比を鉄塔全質量の2%として検討した。又、TMDの同調比について、チューニングする固有周期は、TMDを設置しない鉄塔モデル(以下、非制震モデルと称す)の架渉線方向の1次固有周期をターゲットとし、TMD取り付け部に想定するダンパーの回転ばねのばね剛性を調整する事でモデル化を行った。更に、ダンパーの回転ばねの特性について、鉄塔の1次モードの振動数に同調させた線形のもの、弾性時の振動数は線形のものと同様とし、鉄塔の加速度が任意の値になると降伏して弾塑性挙動を呈するタイプのものを仮定した。ここに、任意の値は、1.0Gから3.0Gまで0.5G間隔で、パラメトリックに変化させて検討を行った。なお、TMDの設置位置は、鉄塔の架渉線方向の1次、及び2次の振動モードを考慮して、図2に示すとおり、腕金部の中段としたモデルを仮定し、振り子式のTMDを水平材の中央に2体設置した。設置方法は、図3に示すとおり、鉄塔とTMDを仮想のダンパーを想定した回転ばねを介して接合する事で制震モデルを構築した。

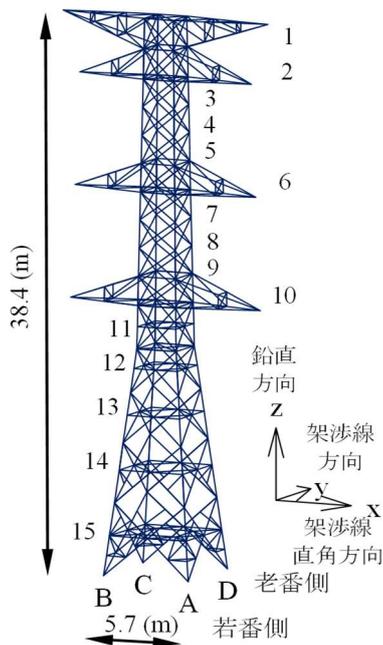


図1 懸垂型山形鋼鉄塔

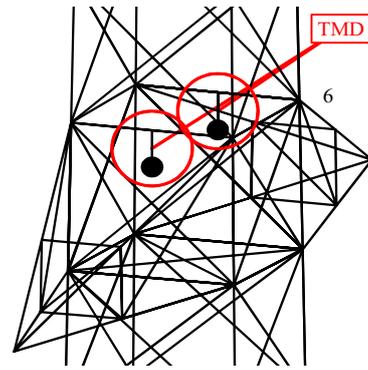


図2 制震装置のモデル化

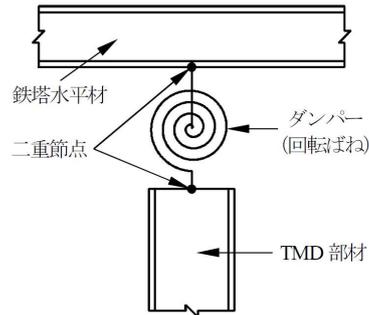


図3 仮想ダンパーの概念図

(2) 模型モデルの構築方法

本研究では、塔高約 38m の平脚鉄塔（図 1）を模擬した塔状構造物として、図 4 に示すように、模型構造物を作製した。模型作製に際しては、実物スケールにおける振動方程式（式(1)）を満足するような模型スケールを検討し、実物と模型の相似則を考慮して、塔状模型を設計した（基準スケール：1/50）。

$$M_p \frac{d^2 x_p}{dt_p^2} + C_p \frac{dx_p}{dt_p} + R_p = -M_p \frac{d^2 y_p}{dt_p^2} \dots (1)$$

ここに、 p ：実スケール、 M ：質量、 C ：減衰、 R ：復元力、 x ：系の応答変位、 y ：入力地震動の地動変位である。又、鉄塔の縦長の構造特性、及び振動特性を再現できる模型を作製する為、5層塔状模型とした。更に、容易に振動系の変更、ダンパーの設置ができる模型とする為、塔高約 77cm とし、模型の構成部材に関しては、幅 3cm、厚さ 1mm のステンレス材を使用し、図 4 に示す寸法とした。1G 場での振動実験の場合、模型スケールでは付加質量による調整が必要となる事、構成部材を予め決定した事により、構造物の剛性が決定された事を考慮し、質量調整による振動系の構築を行った。なお、模型構築の検討フローとしては、5層の均等質量配分を初期とし、1次周期へのチューニングを行う。その後、2次周期へのチューニングを行い、誤差を考慮して、再び1次周期のチューニングへ戻る事を繰り返し、主要モードである1次、及び2次の振動特性を再現した模型を探索した。その結果、各層の付加質量の調整により、1次周期に対する誤差が1%程度以下、且つ2次周期に対する誤差が8%程度以下の振動系モデルを構築した。

4. 研究成果

(1) 動的応答解析による鉄塔の耐震性評価

TMD の制震、非制震の応答変位を重ねた波形を図 5 に示す。一般的には、地震に対する TMD の制震効果は限定的であるが、K-NET 幌毛志 EW に対して、線形、非線形 2.0G のいずれのケースでも 20%程度 of 低減効果を示し、制震効果が表れる結果となった。更に、応答時刻歴より、制震モデルの場合は、非制震に比べて制震ダンパーによる低減効果の特徴である応答の早期収束が認められる。又、今回の検討では、降伏曲げモーメントが大きいほど、応答低減効果が大きい結果となった。各地震動に対する最大応答変位の応答低減率を表 1 に示す。非制震モデルに対する各制震モデルの最大変位の低減率を表している。ここで、負値は、応答増大を表している。本

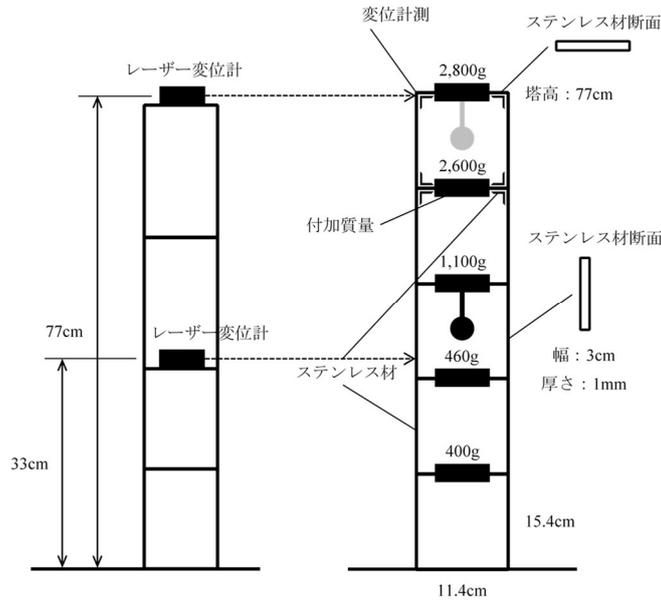


図4 模型塔状構造物 (1/50)

検討に用いた地震動の一部に対しては、応答増加が見られるものの増加率は低く、ほとんどのケースにおいて、10~30%程度の低減効果が認められる。なお、表中の一部のケースは、回転ばねが過大な応答回転角を示した為、微小変形理論を仮定した場合、回転角が大きくなると実現象と解析結果の誤差が増大する事から、TMDの挙動の再現性を考慮して、低減率を示していない。

支柱材以外も含む鉄塔を構成する全部材に対して、動的解析の結果を無次元化軸力により評価し、構造的弱点箇所を特定を試みる。部材に発生した軸力の最大応答値を部材強度(許容軸力)で除したものを、部材強度に安全率1.5を乗じた限界軸力で除したものを、それぞれ許容軸力レベル、限界軸力レベルの無次元化軸力 σ と定義する。地震動を入力した場合の各レベルの無次元化軸力を図6に示す。本ケースでは、支柱材に関して、脚部に限らず塔体上部にまで超過部材が及んでいる。更に、架渉線方向の振動に対して抵抗する腹材で、無次元化軸力が1.0を超過している。又、本地震動に対しては、限界軸力を超過する厳しい結果であるが、非制震モデルに対して、今回検討しているダンパーを鉄塔に設置する事による制震効果が構造全体で確認できる。

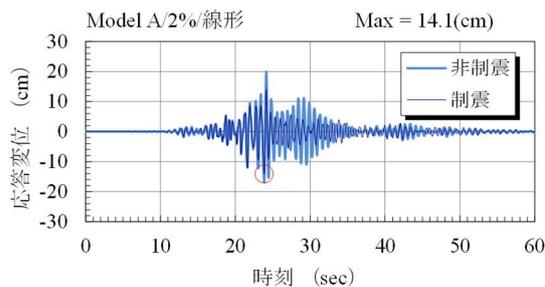
表1 頂部応答変位の応答低減率

(a) 平成23年東北地方太平洋沖地震

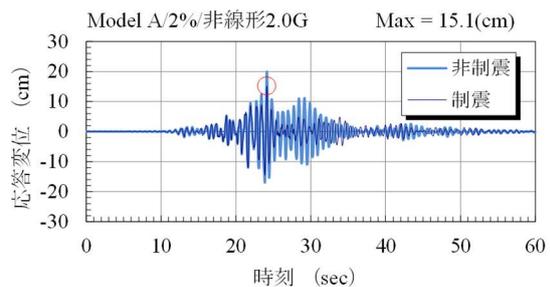
(b) 平成30年北海道胆振東部地震

入力地震動	成分	非制震	制震					
			線形	非線形				
				1.0G	1.5G	2.0G	2.5G	3.0G
K-NET築館	NS	-	8.1	14.9	19.1	12.8	8.2	8.1
	EW	-	-	18.2	25.3	32.1	37.5	40.1
K-NET塩竈	NS	-	28.4	30.7	29.5	28.4	28.4	28.4
	EW	-	-6.6	-5.3	-7.2	-6.6	-6.6	-6.6
K-NET日立	NS	-	3.8	1.4	2.4	3.6	3.8	3.8
	EW	-	27.1	26.6	27.1	27.1	27.1	27.1
K-NET仙台	NS	-	-	0.8	-	-0.1	-1.1	-
	EW	-	-	9.4	13.0	16.0	18.5	20.2
K-NET銚田	NS	-	6.5	19.9	12.9	7.9	6.5	6.5
	EW	-	22.4	8.0	11.2	14.2	16.5	18.1

入力地震動	成分	非制震	制震					
			線形	非線形				
				1.0G	1.5G	2.0G	2.5G	3.0G
K-NET追分	NS	-	11.3	7.3	9.9	11.0	11.3	11.3
	EW	-	15.4	11.6	15.4	15.4	15.4	15.4
Kik-net追分	NS	-	-	5.7	8.4	10.8	13.0	15.1
	EW	-	3.1	2.9	3.1	3.1	3.1	3.1
K-NET徳別	NS	-	-	6.2	8.6	10.7	12.5	14.3
	EW	-	-	7.8	10.0	12.9	15.5	16.4
K-NET幌毛志	NS	-	32.0	29.0	32.0	32.0	32.0	32.0
	EW	-	29.3	13.0	19.1	24.2	27.4	29.1
K-NET早来	NS	-	-	4.5	6.1	7.3	8.3	9.1
	EW	-	-	1.8	2.8	3.6	4.3	-



(a) 制震/質量比2%/線形



(b) 制震/質量比2%/非線形2.0G

図5 頂部応答変位 (平成30年北海道胆振東部地震/K-NET 幌毛志 EW)

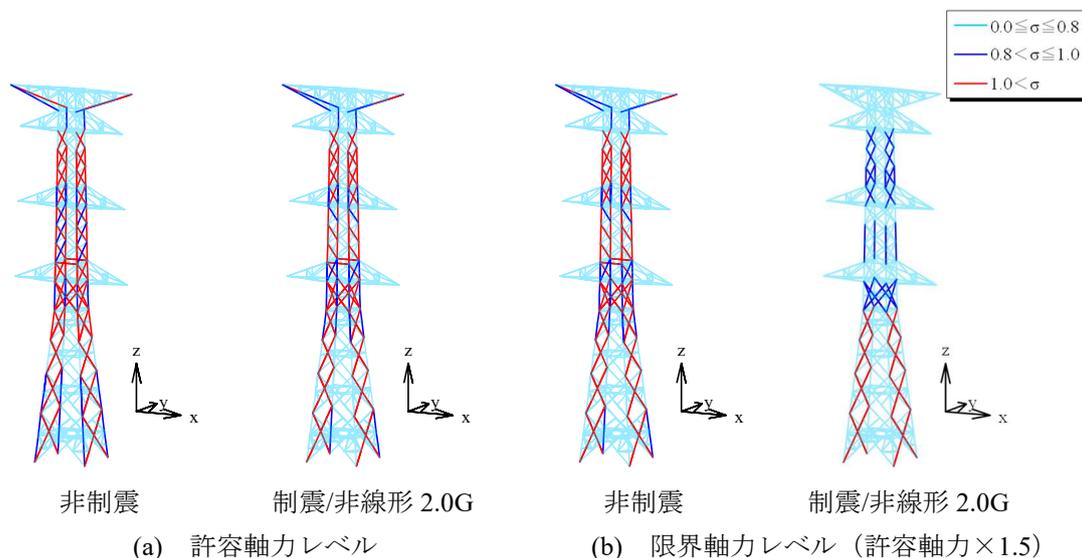
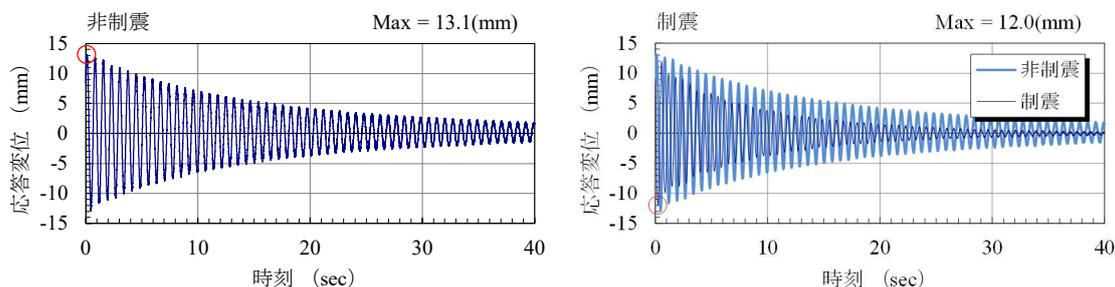


図6 無次元化軸力（平成23年東北地方太平洋沖地震/K-NET 銚田EW）

(2) 自由振動実験による鉄塔の耐震性向上対策

簡易的な制震ダンパー（振り子式）を塔状構造物へ適用し、制震モデルの耐震性評価を行う為、非制震である塔状構造物の固有振動特性（対象鉄塔の1次固有周期： T_1 ）を考慮し、部材長（部材の長さ： l ）のみに依存する振り子（質量比2%程度の重錘を有する仮想ダンパーを想定）を検討した。振り子を模型の中間部である第3層へ設置し、自由振動実験による模型の応答計測結果を図7に示す。簡易ダンパーを設置する事により、応答振幅の低減と、早期の減衰効果が確認できる。又、応答変位の周波数解析により、1次モードに対する応答低減を確認した。



(a) 非制震/1次モード（初期変位15mm） (b) 制震/1次モード（初期変位12mm）

図7 応答変位（非制震，制震）

<謝辞>

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET/KiK-net）において、公開されている強震記録を使用させて頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- [1] 松本将之，松田泰治，岡延夫，石田伸幸：送電鉄塔の地震時挙動に及ぼす脚部の境界条件の影響評価，平成20年度土木学会西部支部研究発表会，福岡市，2009年3月。
- [2] 松本将之，松田泰治，岡延夫，石田伸幸：送電鉄塔の地震時挙動に及ぼす鉄塔形式・幾何学的非線形の影響評価，平成22年度土木学会全国大会，札幌市，2010年9月。
- [3] 松本将之，松田泰治，岡延夫，石田伸幸：送電鉄塔の耐震性評価に関する一検討，平成22年度土木学会西部支部研究発表会，北九州市，2011年3月。
- [4] Masayuki Matsumoto, Taiji Mazda : Seismic Performance of Steel Tower with Different Boundary Conditions at the Bottom, The 8th Japan-China Joint Seminar on Sustainable Management of Cities and Regions under Disaster and Environmental Risks, 熊本市，2015年8月。
- [5] M. Matsumoto, A. Kasai, T. Mazda, N. Ishida, Y. Ito : Study on Improvement of Seismic Performance of Transmission Tower Using Viscous Damper, Journal of Civil Engineering and Architecture 11, pp.455-467, 2017年5月。
- [6] 松本将之，葛西昭，松田泰治，石田伸幸：同調質量ダンパーの適用による送電鉄塔の耐震性向上に関する基礎的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.74, No.4（地震工学論文集第37巻），I_617-I_629，2018年11月。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松本 将之
2. 発表標題 振動台実験のための任意の固有振動数を有する多質点縮小模型の構築方法
3. 学会等名 令和4年度土木学会四国支部 第28回技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 将之
2. 発表標題 制震装置の性能条件に着目した送電鉄塔の耐震性向上に関する研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会四国支部 第27回技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 将之
2. 発表標題 境界条件の異なる送電鉄塔に対する同調質量ダンパーの有効性に関する研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会四国支部 第26回技術研究発表会
4. 発表年 2020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
---------	---------