

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560684

研究課題名(和文) 強震動アレイ記録に基づく実在建物基礎への地震動空間変動を考慮した多次元応答評価

研究課題名(英文) Estimation of multi-dimensional responses of the actual foundations due to spatial variation of seismic ground motions based on strong motion records

研究代表者

釜江 克宏 (Kamae, Katsuhiro)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：50161196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：浜岡原子力発電所敷地における3次元高密度アレイ観測網の強震記録から、硬質地盤の地震動空間変動について、周波数、観測点間の距離に加え、観測点の各深度レベルや水平と鉛直成分の違いに着目した評価を行った。さらに、評価した地震動空間変動特性を用い、回帰分析に基づく統計的なモデルを導出した。コヒーレンスは周波数と距離の増加に伴い低下し、その低下度合いは水平成分より鉛直成分の方が、また深度レベルにおいて浅い方が大きい結果となった。一方、フーリエ振幅比のばらつきは周波数と距離の増加と共に5Hz程度以下では増加し、それ以上の周波数では一定となる傾向が見られた。

研究成果の概要(英文)：We evaluated spatial variations of seismic ground motions in hard soil, focusing on the difference of depth levels and horizontal and vertical components in addition to the frequency and the distance between the observation points, using the strong motion records in the three-dimensional array observation system arranged in the Hamaoka Nuclear Power Station. We derived the statistical models of coherence and standard deviation of Fourier amplitude ratio based on the regression analyses concerning frequency and horizontal distance from the spatial variation features of seismic ground motions. It was shown that the coherency decreased with increasing frequency and the distance. The degree of the decrease in the vertical component was larger than that in the horizontal component, also it is larger shallow in depth levels. The standard deviation of Fourier amplitude ratio under 5Hz increased with increasing frequency and the distance, but that was constant in the range greater than 5Hz.

研究分野：工学・建築学・建築構造・材料・地震防災

キーワード：強震記録 3次元アレイ観測 硬質地盤 コヒーレンス フーリエ振幅比 回帰モデル 空間変動 原子炉建屋

1. 研究開始当初の背景

構造物の地震時の応答は、水平や上下方向の並進震動のみで無く、ロッキング（回転）やねじれ（水平面内での回転）震動が加わった多次元的なものとなっている。このような多次元的な挙動は、1）建物の剛心と重心のずれや地震時の支持地盤の異なる沈下と言った建物及び地盤の振動特性に起因するものと2）建物基礎への入力地震動の空間変動に起因するものに大別できる。本研究ではこれらの内、後者の入力地震動の空間変動が建物及び基礎応答に及ぼす影響を観測記録及び数値シミュレーションに基づいて調査する。

地震波動のインコヒーレント成分により生じる地震動の空間変動は、並進成分の入力低減と同時に、ねじれや回転成分を生じさせる。地震動空間変動特性は地盤毎に異なり、かつランダムな性格を有するため、これまでアレイ地震観測によりサイト毎に統計解析に基づいてモデル化（入力コヒーレンスモデル）されている。しかしながら、これら実測に基づいて設定された入力コヒーレンスモデルによって当該サイトに実在する構造物基礎がどのような挙動を示したかを地震動空間変動量との比較に基づいて定量的に評価した事例は少ない。後述する弱震レベルの地震動を扱った事例があるが、地表面レベルで百ガル程度を越える強震記録に対しては殆ど評価されていない。

最近、地震動空間変動の影響を受けやすい大規模構造物（大きな広がりを持つ基礎を有する）である原子力発電所・原子炉建屋等やその周辺地盤において採取された建物内を含む立体的なアレイ地震観測記録（強震動を含む）が公開され始めている。これらの記録を分析することで、上述の入力地震動の空間変動特性と建物・基礎の多次元応答との強震時における関係が実測に基づいて評価することができると考えられる。ちなみに、こうしたデータはこれまで公開される機会が極めて少なかった。

2. 研究の目的

本研究は、地震動空間変動が原子力発電所建屋など、大規模構造物の建物・基礎の地震時並進応答の入力低減とねじれ及び回転応答の励起に及ぼす影響を実測と数値シミュレーションに基づいて定量的に評価することを目的とする。具体的には、地震動の空間変動は周辺地盤におけるアレイ観測記録から評価し、建物・基礎応答は基礎上及び建物各床レベルで採られた強震記録に基づいて評価する。さらに、評価された地震動空間変動量を模擬した波動場を再構築し、それによる建物・基礎の多次元応答を数値シミュレーションに基づいて計算する。

3. 研究の方法

本研究は以下の4項目に沿って実施する。

1) 原子力発電所の原子炉建屋など、大型マツ基礎を有する施設での弱震・強震観測記録（地盤系アレイ観測及び建物・基礎内における立体観測）の収集と主S波部分の抽出や地震計方位誤差推定等の1次分析処理の実施。2) 地盤系アレイ観測記録から地震動空間変動量をサイトごとに導出し、地盤種別や振幅レベルと空間変動量との関係を調べる。3) 評価された空間変動量と建物内の立体観測から求めた建物・基礎の並進応答の低減及び回転・ねじれ応答の増加との関係を調べる。4) 上記2)の観測に基づいて得られた地震動空間変動量と基礎・建物の多次元応答との関係を数値シミュレーションに基づいて評価する。

4. 研究成果

上記研究の方法で挙げた項目の内、1)の地震動記録の整理（欠測成分の除去やノイズ成分の判別など）に時間を要し、また、2)の空間変動量の分析結果において、特定の周波数において地震動空間変動に関して統計解析上のモデル化を行う上での問題（急激なコヒーレンスの低下など）が生じたため、これらを吟味・評価するのに時間を要した。そのため、3)及び4)に関する調査が十分に行えなかった。従って、以下に1)及び2)に関する成果を中心に記載する。

(1) 高密度アレイ観測

浜岡原子力発電所では地盤内において地表～地中100mまで複数の深度レベル上における地震観測点が多く設置されている。このうち、図1に今回の分析で用いた観測点と建屋の配置を示す。本検討ではGL-40mとGL-100mレベル上の観測点の記録を用いた。表1に敷地の地下構造を示す。

図2にGL-40m及びGL-100mの深度レベルにおける観測点間距離の分布を示した。組み合わせの総数はGL-40mレベルが28個、GL-100mレベルが21個である。そこで、後述の各2点間から得られるコヒーレンス及び振幅比標準偏差の分析は、観測点間距離が最も短い約40mから最も長い約250mまでを図2に点線で示す距離に関する5つの区間に分け、それら区間毎に上記の分析値をアンサンブル平均することによって評価した。分析に用いた地震は2009年駿河湾の地震を含む震源距離100km以内の4つの地震とした。

埋設地震計の設置方位に誤差が含まれている場合が多いため、方位が確認できる建屋地階床上の観測点をリファレンスとし、水平面上での方位誤差角を評価した。

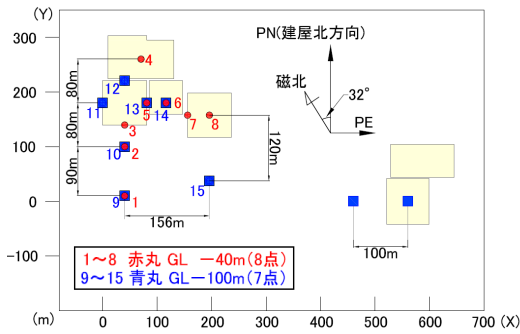


図1 分析に用いた観測点と建屋の配置

表1 敷地の地下構造

上面深度(m)	層厚(m)	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(t/m^3)
0	2	200	380	1.80
-2	2	200	380	1.80
-4	6	320	700	2.10
-10	10	650	1760	2.10
-20	5	720	1820	2.10
-25	5	720	1820	2.10
-30	10	830	1960	2.10
-40	20	830	1960	2.10
-60	40	880	2020	2.10
-100	80	920	2090	2.10
-180	130	1000	2020	2.08
-310	230	1170	2260	2.14
-540	340	1140	2280	2.14
-880	290	1620	2740	2.24
-1170	980	1650	2950	2.28
-2150	1380	2070	3940	2.46
-3530	1650	2290	4600	2.55
-5180	3080	2820	4720	2.57

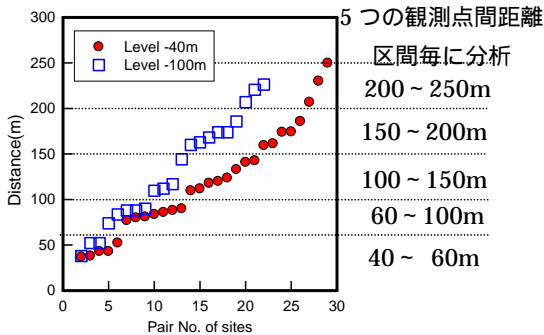


図2 2つの深度レベルにおける観測点間距離の分布

(2) コヒーレンスの周波数・空間変動特性

図3に5つの観測点距離区間に対して2009年駿河湾の地震記録の距離毎に求めたアンサンブル平均としてのコヒーレンスを観測点の2つの深度レベル及び東西と上下成分について示した(5色によるプロット)。図中の曲線は観測によるプロットから回帰式によって求めたモデルを表す。

図3から水平成分のコヒーレンスは、GL-40mで3~5Hz、GL-100mで2~3Hz、鉛直成分のコヒーレンスは観測点の両深度レベルで約2~3Hzの比較的低周波数帯域で落ち込み部を持つ。この現象を詳しく調べるため、表1に示す地盤モデルに対して、水平成層地盤へのSV波及びP波入射による理論

伝達特性を求めた。入射角は地震の震源及び敷地の伝播経路における深部地盤速度構造を考慮してGL-5kmレベルで30度とした。図4に入射波に対する伝達関数を示す。SV波入射における水平成分(図4, 実線)は、GL-40mで4~5Hz, GL-100mで2Hz, 鉛直成分は両深度レベルで2Hz付近に伝達関数の急激な落ち込みが見られた(図4 棒線箇所)。これは図5に示す観測記録のフーリエ振幅スペクトルの落ち込む周波数帯域(図5, 丸印)とほぼ一致した。落ち込む周波数帯域は、当該深度レベル以浅のS波構造による共振周波数に対応しており、地盤共振時振動モードの節となっていると考えられる。落ち込む周波数帯域は、非伝達関数成分のインコヒーレント成分が伝達関数に従うコヒーレント成分に比べて相対的に振幅比の比率が大きくなると考えられ、その結果、コヒーレンスの算出で用いたクロススペクトル密度関数の絶対値がコヒーレント成分とインコヒーレント成分の合算である2地点のパワースペクトル密度関数の積に比べて小さくなることでコヒーレンスの落ち込みが生じたと考えられる。

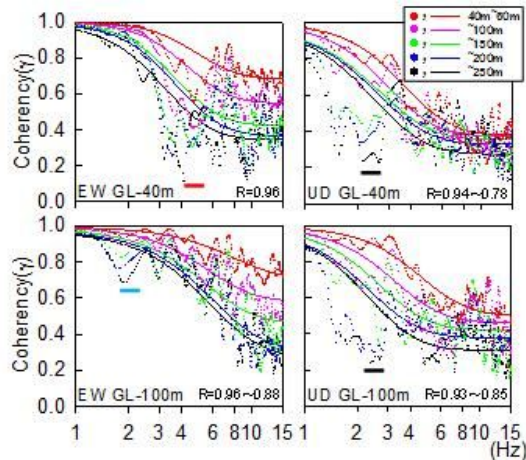


図3 観測点距離区間毎のコヒーレンスと回帰曲線

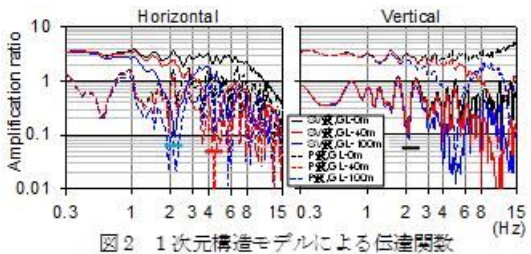


図4 1次元構造モデルによる伝達関数

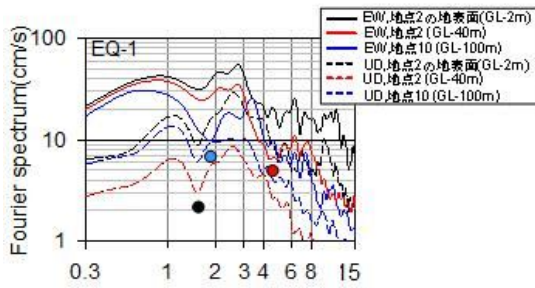


図5 観測記録のフーリエスペクトル

2次元 FEM モデル(図6 上段)を用いて perturbation を持つS波速度によるコヒーレンスへの影響を検討した。Perturbation は、変動係数 20%及び 40%とした指数型相関関数を用いた。鉛直方向の相関距離は 0.012Vs とし、水平方向の相関距離は鉛直方向の 10 倍とした。実観測点距離区間に相当する地点 (GL-40m)の組み合わせから実観測と同様の手順でコヒーレンスのアンサンブル平均を求めた(図7(上段))。図内には EW 成分の GL-40m 観測記録によるコヒーレンスも示した。その結果、観測結果でも見られたコヒーレンスの落ち込み部がシミュレーションによっても認められたことで、不均質構造によって非伝達関数成分であるインコヒーレントな波が発生し、伝達関数の振幅特性が小さくなる周波数帯域でコヒーレンスが低下する傾向が裏付けられた。しかしながら、落ち込み具合について、変動係数 20%よりも 40%の方が大きいものの、観測記録を再現するまでには至らなかった。これは、主なインコヒーレントな波の成分は、敷地・敷地近傍の不均質性ではなく、地震基盤層を含めたより深く、且つ広範囲の地下構造の不均質や地層境界不規則性による散乱成分の影響を受けている可能性を示唆している。

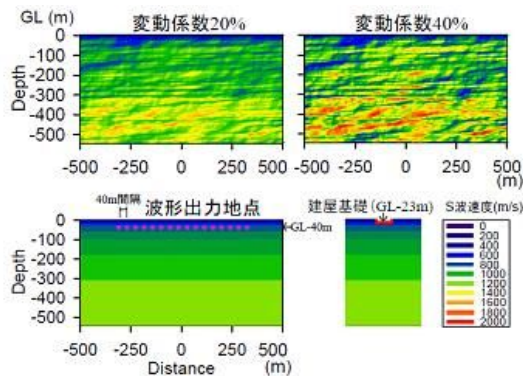


図6 敷地・敷地近傍の均質及び不均質地下構造モデル

強震観測点の上方には埋め込みを有する建屋基礎が存在している。この建屋基礎がコヒーレンスに及ぼす影響を2次元 FEM 解析で検討する。地盤 - 建屋基礎の2次元 FEM

モデルは、図6 下段左に示した均質な水平成層地盤モデルに地表から GL-23m, 横幅 79m の建屋総重量を付加した基礎を設けた(図7 下段右)。図5 下段に3章と同じ手順で求めた GL-40m, 水平成分のコヒーレンスを示す。観測記録によるコヒーレンスと同周波数帯域で低下が若干見られたが、2次元モデルは実建屋基礎の3次元挙動に比べて散乱波による幾何減衰を過小評価することを加味すれば、建屋基礎が観測記録から評価したコヒーレンスに与える影響は少ないと考えられる。

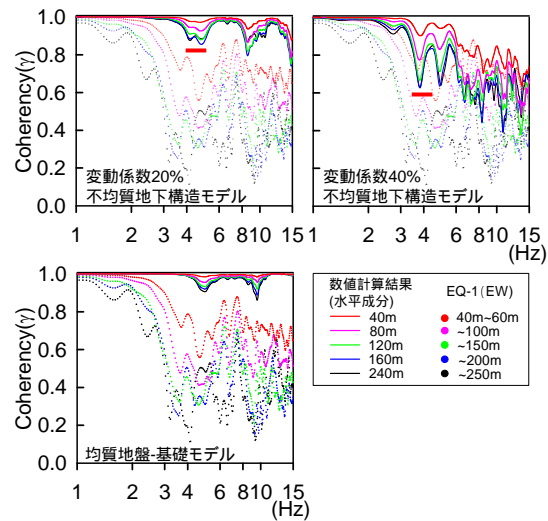


図7 計算から求めたコヒーレンス

(3) コヒーレンスの統計的モデル

コヒーレンスモデルは次式から求めた。

$$\tanh^{-1}(\gamma(f)) = y_0 + a \times e^{bf}$$

ここで、 $\gamma(f)$ はコヒーレンス、 f は周波数を表す。今回の回帰曲線を求めるにあたり、水平成分のコヒーレンスは観測点レベルが GL-40m で 3~5Hz, GL-100m で 2~3Hz, 鉛直成分は両深度レベルで 2~3Hz に落ち込み部が存在していたことから、その周波数帯域を回帰対象から除外して昨年度と同様の手順で行った。回帰による相関係数 R を図内に示したが高い相関性が見られた。回帰結果(モデル)は距離の増加と共に低下する結果となった。

図8にコヒーレンスの回帰係数(y_0, a, b)を水平・鉛直成分毎に GL-40m レベルを一例として示す。更に、各回帰係数の平均的な値を4地震のプロットから距離の関数として最小二乗法により導いた(図中黒線)。係数 y_0 はコヒーレンスの高周波数帯域の収束値を表すが、距離の増加と共に値が小さくなる傾向が見られ、特に水平成分において顕著である。係数 a は水平成分が距離の増加と共に値が小さくなる傾向が見られ、鉛直成分はほぼ一定となった。係数 b はコヒーレンスの低周波数帯域の低下度合を表すが、係数 y_0 と同様に距離の増加と共に値が小さくなる傾向が見

られ、距離に対する低下度合いは水平成分より鉛直成分において顕著であった。

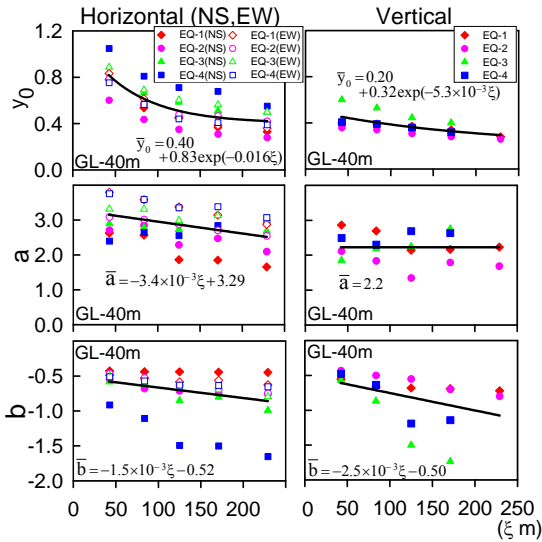


図 8 コヒーレンスの各回帰係数の距離依存性

(4) 振幅比標準偏差の統計的モデル

振幅比標準偏差は昨年度と同様、各観測点の加速度記録からフーリエ振幅スペクトルの自然対数を求め、観測点ペア間(j,k 点間)の差($A_{jk}(f)$)を求めた。同じ距離区間内の全ての観測点の組み合わせに対して $A_{jk}(f)$ を求め、そのばらつきを平均値 0 (スペクトル比換算で 1.0) に対する標準偏差 $A(f)$ (振幅比標準偏差) として評価した。図 9 に GL-40m, EW 成分の振幅比標準偏差を示す。また、振幅比標準偏差は次式 3) による回帰分析を行った (図中曲線)。

$$\sigma_{AA}(f) = A(1 - e^{Bf})$$

ここで、 $A(f)$ は振幅比標準偏差、 A, B は定数を表す。回帰曲線による振幅比標準偏差は、周波数の増加に伴って大きくなる傾向が見られた。図 10 に振幅比標準偏差の回帰係数(A, B)における距離依存性を示す。更に各回帰係数の平均的な値を 4 地震のプロットから距離の関数として導いた(図中黒線)。係数 A は振幅比標準偏差の高周波数帯域における収束値を表すが、距離の増加と共に値が大きくなる傾向が見られた。係数 B は振幅比標準偏差の周波数に対する増加度合を制御する係数であるが、距離の増加と共に値が小さくなる傾向が見られた。

(5) 既往の研究との比較

図 11 に本結果及び既往の研究によるコヒーレンスモデル及び振幅比標準偏差モデルを示す。本結果は GL-40m, 水平成分を示したが、コヒーレンスモデルは Ancheta et al. (2011) と Harichandran et al. (1986) によるモデルの間に位置付けられた。振幅比標準偏差モデルは、本結果が既往の研究よりもやや小

さい傾向が見られた。この傾向は、回帰対象の周波数帯域の違い(本検討が 0 ~ 16Hz, 既往の研究が 0 ~ 50Hz)によるものと考えられ、既往の研究は高周波数帯域(16Hz 以上)のバラツキが大きい影響を受けていると考えられる。

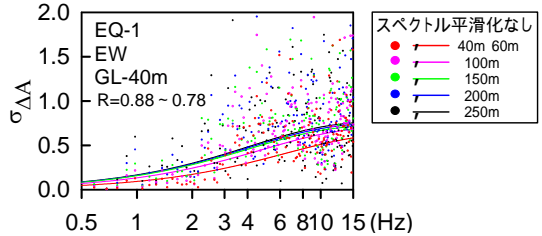


図 9 観測点距離区間毎の振幅比標準偏差と回帰曲線

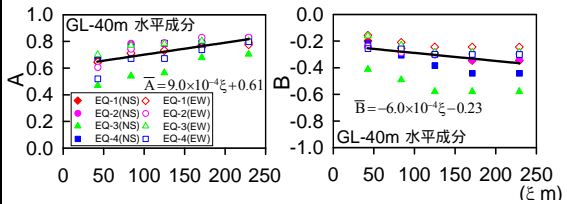


図 10 振幅比標準偏差の各回帰係数の距離依存性

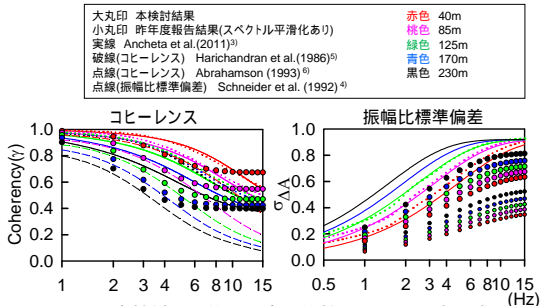


図 11 本検討と既往の研究の比較(GL-40m, 水平成分)

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)

内田治、上林宏敏、釜江克宏、3次元高密度強震アレイ観測記録に基づく硬質地盤の地震動空間変動特性と統計的モデル化、日本地震工学会論文集、査読有、2016 (掲載決定)。

内田治、上林宏敏、釜江克宏、高密度強震アレイ観測記録に基づく硬質地盤の地震動空間変動、第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集、査読なし、GO17、2014、3605-3073。

〔学会発表〕(計 4 件)

内田治、上林宏敏、釜江克宏、高密度強震アレイ観測記録に基づく硬質地盤の

地震動空間変動、日本建築学会大会、(東海大学) 2015年9月4-6日、東海大学(伊勢原市)

内田治、上林宏敏、釜江克宏、高密度強震アレイ観測記録に基づく硬質地盤の地震動空間変動(その2 コヒーレンスと振幅比変動率のモデル化)、日本建築学会大会、2014年9月12-14日、神戸大学(神戸市)

内田治、上林宏敏、釜江克宏、高密度強震アレイ観測記録に基づく硬質地盤の地震動空間変動(その3 コヒーレンスと振幅比に対するモデルの改善)、2013年8月31日-9月1日、北海道大学(札幌市)

上林宏敏、内田治、前田優佑、釜江克宏、高密度強震アレイ記録に基づく硬質地盤地中の地震動空間変動と原子炉建屋基礎応答、日本地震工学会、2013年11月11日-12日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

釜江克宏 (KAMAE Katsuhiko)
京都大学・原子炉実験所・教授
研究者番号：50161196

(2) 研究分担者

上林宏敏 (UEBAYASHI Hirotoshi)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号：30300312

(3) 連携研究者

なし()

研究者番号：