

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540448

研究課題名(和文)不均質構造における地震波伝播とノイズ相互相関に基づくグリーン関数導出法の研究

研究課題名(英文) Study on seismic wave propagation through the heterogeneous structure and the Green function retrieval from the noise cross correlation

研究代表者

佐藤 春夫 (SATO, Haruo)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：80225987

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、固体地球のランダムな不均質構造における地震波動エネルギーの伝播過程を記述すべく、輻射伝達理論の高度化に取り組んだ。散乱物質がフラクタル的に分布すると考えることで、最大振幅やコーダ振幅が経過時間のべき乗に従って減少することを説明することが可能となった。火山直下では低速度の流体や溶融体の存在が示唆されているが、分布する低速度球による共鳴散乱を考慮した輻射伝達理論を構築することができた。任意形状の散乱体(不均質)が存在する場合、雑微動の相互相関関数からグリーン関数を導出するためには一般化された光学定理が満たされるべきことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to describe the propagation of seismic wave-energy through random heterogeneities of the solid earth medium, we have improved the radiative transfer theory. If we imagine a fractal distribution of scatterers, we can explain the power-law decay of the maximum amplitude and coda amplitude with lapse time increasing. Since low-velocity bodies including melt/or water are expected beneath volcanoes, we have developed the radiative transfer theory which deals with the trap and release of wave energy due to resonant scattering. For the Green function retrieval from the cross-correlation function of ambient noise for the existence of an obstacle (heterogeneity) of arbitrary shape, we have theoretically shown that the generalized optical theorem as the necessary condition.

研究分野：固体地球物理学および地震学

キーワード：地震波動 散乱 不均質構造 地殻 リソスフェア 火山 ランダム媒質

1. 研究開始当初の背景

(1) 固体地球の不均質構造の解明は、地球形成ならびにテクトニクスの形成史を考える上で重要である。固体地球の速度不均質構造は走時データの解析に基づくトモグラフィによって詳細に調べられてきたが、実際の不均質構造はそのスペクトルが幅広い波長帯に渡って広がっておりランダム性も強い。特に地震波の波長と不均質の尺度が同程度の場合には、散乱の効果が著しく大きくなるのが理論的に予測される。実際、短周期(特に1 s以下)の観測波形には、散乱によるコーダ波の励起が見られ、直達波のエンベロープの見かけ継続時間は震源における破壊継続時間よりもかなり長い。これらの現象は、従来の層構造モデルでは説明が出来ず、短波長のランダム不均質構造が重畳していることを強く示唆している。

(2) 研究代表者(佐藤)は、検層データに着想を得て、固体地球のランダムな不均質速度構造のスペクトル的特徴に着目した。また、Akiによるコーダ波形成モデルに着想を得て、ランダム不均質構造の中を伝播する短周期地震波のエンベロープを統計数論的に取り扱う統計数理論の構築と観測される短周期波形エンベロープの比較分類に取り組んできた。理論面では輻射伝達理論(Sato et al., 1997)やマルコフ近似理論(Sato, 1989)に基づく新しい波形エンベロープ形成モデルを提唱してきたが、これらの理論は、構造解析において有効だけでなく、短周期強震動の解析モデルとしても有用であることが示されるようになった。観測面では、微小地震のS波のエンベロープ解析から、島弧の背弧側では前弧側よりも短波長不均質が著しく強いことを明らかにした(Obara and Sato, 1995, Takahashi et al. 2007)。

(3) 最近の研究では、ランダム不均質媒質における波動伝播の統計理論の精緻化を進め、波長が不均質の尺度よりも短い場合、従来のスカラー波に関するマルコフ近似法を発展させたベクトル弾性波のエンベロープ形成モデルの構築に成功した(Sato and Korn, 2005; Sato, 2006, 2007, 2008; Sato and Korn, 2007, 2008)。さらに、自由表面における3成分波形エンベロープの増幅特性についても、角度スペクトルを用いた新しいシミュレーション方法を確立した(Emoto et al., 2010)。一連の研究で、平面波と球面波のエンベロープ形成モデルを確立し、差分法による数値シミュレーションによる検証によって高い精度でその妥当性を示した。また、東北地方における微小地震のS波エンベロープを詳しく解析し、波線が第四紀の火山の下を通る場合には波形エンベロープが

大きく崩れ、火山と火山の間を通る場合にはパルス的な波形を維持することを見出した(Takahashi et al. 2007, 2008, 2009)。これは、第四紀の火山の下では短波長不均質が周囲と比べて特に強いことを意味し、Hot Finger 仮説と良い対応を示唆している。また、ボアホール観測による地表と地中のコーダ波スペクトルの比較からは、強震時の地盤の増幅特性の経時変化を発見した(Sawazaki, Sato and Nishimura, 2006)。さらに、浅間山における爆破地震動波形のエンベロープをPS変換散乱を取り入れた多重散乱モデルによって説明することに成功し、火山での散乱の強さが通常のリソフェアのそれよりも2桁近く大きいことを明らかにした(Yamamoto and Sato, 2010)。

(4) ノイズ相互相関に基づくグリーン関数の導出は、古くはAkiのSPAC法(1957)に起源を求めることが出来る。研究代表者は、相互相関関数のピークラグ時間だけではなくそれに続く散乱波部分に焦点をあてた研究を目指した。ランダム一様にノイズ源が分布する場合、不均質構造であっても、励起されるスカラー波の相互相関関数からグリーン関数を導出することができることを、一次のボルン近似を用いて証明した(Sato, 2009, 2010)。その後、この問題を散乱形式で定式化すれば、散乱のT行列が光学定理を満たすこととイズ相互相関に基づくグリーン関数導出とが等価であることを証明することができた(Margerin and Sato, 2011)。不均質構造をノイズ源が取り囲むような場合については、Snieder and Fleury (2010)が光学定理の重要性を述べている。この間、研究代表者は、Sniederらと共著で、コーダ波干渉法に関する論文(Curtis et al., The Leading Edge, 2006)を執筆した。

(5) 固体地球の不均質構造と地震波散乱の研究は国際的にも重要視されており、物理探査の分野との連携の上に、AGUやSEGにおいても数多くのワークショップが開かれるようになった。研究代表者(佐藤)らは、IASPEI国際会議において、1989年より毎回、散乱に関するシンポジウムを主催してきた。特に、Wu博士(米国 UCSC)、Fehler博士(米国 MIT)、Korn教授(独、Leipzig大)らと共に、IASPEIの中に"Scattering and Heterogeneity"という研究Task Groupを組織し、この分野の国際共同研究と交流を深化させ、Fehler博士とともに、書籍"Scattering of Short-Period Seismic Waves in Earth Heterogeneity (Advances in Geophysics, vol. 50, 2008, Academic Press)を編纂した。海外の研究動向として、コーダ波の相互相関解析法はCampillo(仏)やSnieder(米)、

Wapenaar (オランダ)らが研究を強く押し進めており、波形エンベロープの解析とモデル作りでは Margerin (仏)や Korn (独)が精力的に研究を進めている。

2. 研究の目的

固体地球の速度不均質構造はランダム性が強く、地震波の波長と不均質の尺度が同程度の場合には散乱の効果が大きい。短周期の観測波形にはコーダ波が励起され、直達波のエンベロープの見かけ継続時間は震源継続時間よりも長い。本研究は、固体地球のランダム不均質構造を明らかにすることを目指し、そのための基礎として、短周期地震波エネルギー伝播を記述する数理論を構築することである。一方、位相情報に着目した構造推定法としてノイズ相互相関関数に基づくグリーン関数導出法があるが、本研究では散乱形式による定式化を行い、その数理的基礎を確立する。

3. 研究の方法

(1) 不均質構造における短周期地震波の伝播特性の記述には、輻射伝達理論が有効である。層構造の中がランダム不均質であるような場合、散乱体や減衰物質がフラクタル的に分布する場合、火山体においては低速度体が共鳴散乱を起こす場合等を考え、短周期地震波のエンベロープ形成の数理論の構築に取り組む。一方、位相情報に着目した構造推定法として、ノイズ相互相関関数に基づくグリーン関数導出法があるが、本研究では散乱形式による定式化の数理論を確立し、T行列に関する光学定理を導き、さらにエネルギー保存則との関連を明らかにする。

4. 研究成果

(1) サブテーマ「不均質弾性媒質におけるノイズ相関法に基づく波動のグリーン関数の導出理論の構築」

ランダム波の相互相関関数からのグリーン関数抽出とエネルギー保存則

ランダム波が等分配状態にあるとき、その相互相関関数(CCF)からグリーン関数を導出することが可能であり、雑微動解析による構造推定にしばしば用いられてきた。散乱体を取り囲むようにランダム波の震源が分布する場合(Wapenaar et al. 2010, Snieder and Fleury 2010)や、空間に様に分布している場合(Margerin and Sato 2011, Margerin and Sato 2011)に、光学定理が成立することとグリーン関数の導出条件が等価であることが報告されている。

本研究では、2次元一様速度構造の中に置かれた任意の形状の散乱体(障害物)と2観測点、これらを囲む十分な円環上に分布するノイズ源によって照射される場合にそのCCFからグリーン関数を抽出するための条件を考察する。グリーン関数抽出の基本式

は2観測点におけるランダム波のCCFが遅延グリーン関数の反対称和とノイズ源の自己相関関数のたたみ込みで書かれることであり、これは2観測点におけるグリーン関数の積の円環状のノイズ震源の分布について積分がグリーン関数の虚部に一致することと等価である。座標原点に置かれた任意形状の散乱体の場合、散乱体の外部におけるグリーン関数の散乱波部分は、一般に第一種ハンケル関数(動径成分)と複素指数関数(角度成分)の級数展開で表すことが出来る。エネルギー流束の円環状の積分を、このグリーン関数の級数展開形を用いて表すと、エネルギー保存則が展開係数に対する拘束式(一般化された光学定理)として得られる。一方、グリーン関数の積の角度成分の積分を実行し、遠方でのハンケル関数の漸近形をもちいると、これはグリーン関数の虚部と残余の項の和で表される。エネルギー保存則から導かれた拘束式は、この残余項をゼロとすることと等価である。すなわち、エネルギー保存則が満たされる場合にはランダム波のCCFからグリーン関数を導くことが可能となり、具体的なグリーン関数の関数表現は一般化された光学定理の拘束条件を満たさねばならない。この結果は、3次元空間においても成立することが確かめられる。なお、2観測点が散乱体の遠方場にあるという条件がこれまでよく用いられてきたが、上記証明はこの条件に拘束されない。

本研究の詳細を Sato[2013]に、室内実験への適用例を Mikesell et al[2012]に、火山における雑微動の相互相関関数解析例を Anggono et al.[2013]として発表した。

(2) サブテーマ「ランダム不均質構造における短周期地震波動伝播の数理論モデルの構築」

ランダム媒質における直達波エンベロープの拡大の数理論

ランダム媒質の中を伝播するに従って、パルス波はその形が崩れていくことが知られている。従来の研究は主に一様等方なランダム媒質におけるエンベロープ拡大が調べられてきた。実際のランダムな速度不均質では、重力方向(上下方向)と水平方向で相関距離が異なることが知られている。本研究では、このような非等方ランダム媒質におけるベクトルパルス波の崩れをMarkov近似に基づいて導出し、かつ数値差分計算を用いてその妥当性を示した。また、ランダム媒質が成層構造をなしているような場合にパルス波がどのように伝播するかについても、数理論的導出を行った。これらの成果を、Emoto et al.[2012]およびEmoto et al.[2013]として発表した。

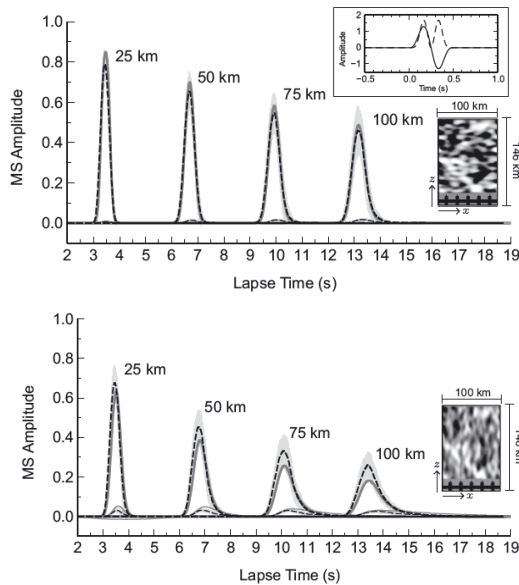


図1. 非等方ランダム媒質をz方向へ伝播するP波パルス(2Hz)のエンベロープ. 灰色実線はMarkov近似理論, 黒点線は差分計算. 大振幅はz成分. 小振幅はx成分 [Emoto et al. 2012]

直達波とコーダ波振幅の冪乗型減衰と内部減衰物質と散乱体のフラクタル分布

地震のマグニチュードを決定する際には, 地震波の最大振幅が幅広い範囲にわたって距離の冪乗に従って減少するという観測事実が用いられる. また, コーダ波振幅も震源時からの経過時間の冪乗に従って減少することが観測されている. これは, コーダ減衰 Q^{-1} が経過時間と共に減少することとして知られている. 一方, 内部減衰物質と散乱体(不均質と言い換えても良い)が空間に一樣ランダムに分布するような場合, 直達波振幅は冪乗型の幾何減衰に指数関数型の内部減衰と散乱減衰が加わることが理論的に予測される. 同様に, コーダ波振幅も経過時間の冪乗の幾何減衰に指数関数型の減衰が加わることが予測される. 一樣分布の場合, 直達波振幅の指数関数型減衰は避けられない. それゆえ, これらの観測事実を解釈するには, 背景速度及び内部減衰物質や散乱体の分布に深さ依存性を導入することが必然と考えられてきた.

本研究では, 直達波とコーダ波, 双方の振幅について冪乗型の減衰を導くモデルを提案する. 散乱体や内部減衰物質の分布を直接測定することは容易ではないが, 微小地震の震源分布については空間次元よりかなり小さいフラクタル次元の計測例があり, 例えば関東地方では2.3という値が報告されている. 地震の震源がクラックであることを考えると, 散乱体や内部減衰物質の分布にフラクタル

ル概念を導入することは自然であろう.

散乱体と内部減衰物質の空間分布がフラクタル的にランダムな場合, このような構造の中でのエネルギーの多重等方散乱過程を記述する輻射伝達方程式を定式化することができる. フラクタル次元が空間次元と同じ3の場合には, 直達波の振幅は距離の逆数の幾何減衰に加えて指数関数的な減衰を示す. しかし, 分布のフラクタル次元を下げると, 振幅の距離減衰の関数形が変化する. 特にフラクタル次元が空間次元より小さい2の場合, 直達波の振幅減衰は, 幾何減衰のみならず内部減衰と散乱減衰の双方の効果が共に距離のべき乗で表されることが導かれる. 内部減衰がある程度以上に強い場合には, 一次散乱過程が卓越する. 直達波振幅とコーダ波振幅の比とこれらの減衰勾配の違い(冪数の違い)は内部減衰と散乱減衰の強さの比によって支配される. フラクタルモデルによる新潟県中越地震の余震の波形解析例を, 図2に示す. この研究の詳細を, Sato and Fukushima [2013]として発表した.

散乱体や内部減衰物質の空間分布にフラクタル性を導入することで, 直達波振幅とコーダ波振幅に関する冪乗則を輻射伝達理論から導くことができた. フラクタル分布に深さ依存性を導入する事も可能である. 今後, このモデルをもとにして短周期地震波エンベロープを解析し, 内部減衰物質と散乱体の分布の地域性や深さ依存性を調べてゆくことが可能であろう.

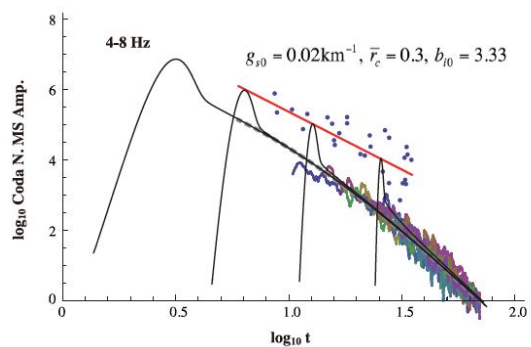


図2. 新潟県中越地震の余震波形解析. 青点は直達波自乗振幅, 多色線は震源近傍の観測点におけるコーダ波自乗振幅. 黒線および赤線はフラクタルモデルによる最適解 [Sato and Fukushima, 2013].

共鳴散乱を取り入れた輻射伝達理論

ランダムな不均質構造を伝播する短周期地震波の考察には波形エンベロープに着目した輻射伝達理論が有効であるが, 従来の理論では入射波が散乱体に当たると即時的に散乱波が生じることが暗黙の仮定であった. しかし

高速度の異常とは異なり，低速度の異常は波動をトラップし時間遅れをもって散乱波を生じる共鳴散乱の特性を持つ．火山地帯では構造の不均質が強いことが知られているが，近年の観測から S 波の平均自由時間は 1 s 程度と短く，散乱波の生成が大きいことがわかってきた．特に火山直下では溶融体や水といった流体（低速度物質）の分布が想像されるので，短周期の地震波動の伝播を考察する際には，上記共鳴散乱の時間遅れ効果を考慮した輻射伝達理論の構築が重要である．

本研究では，小さな低速度球体（等方共鳴散乱体）がランダムに分布する媒質において，多重散乱を記述する輻射伝達理論（スカラー波モデル）を構築した．図 3 に，各次数の散乱波（上段），散乱波の自乗振幅とその二乗平均トレース（中段）を示す．下段はデコンボリューションによる散乱効果を示すが，時間遅れ効果が明らかである．点震源からパルス波が放射された場合について，波動の平均 2 乗振幅の時空間変化の両対数プロットを図 4 に示す．コーダ波の時間変化は直達波の着信より遅れて膨らみを持って減少し，空間分布は震源近くで散乱された波動がベル型の膨らみを生じる．この研究の詳細を，Sato and Hayakawa [2014]として発表した．

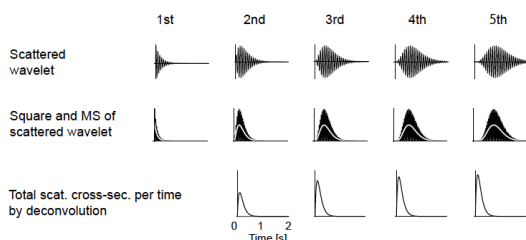


図 3：1 次～5 次散乱波（上段），その平均 2 乗振幅（中段），平均二乗振幅のデコンボリューション（ $v_0=1.56\text{km/s}$, $r_v=0.1$, 球の半径 $a=3\text{m}$, 初期入射波は中心周波数 13.8Hz のパルス波）Sato and Hayakawa [2014]

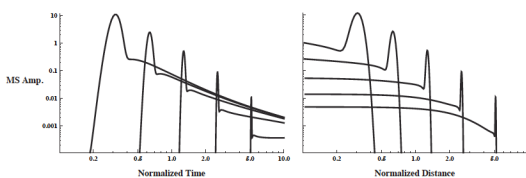


図 4：平均 2 乗振幅の時空間変化の両対数プロット．Sato and Hayakawa [2014]

（3）総括的なレビュー書籍の執筆

固体地球のランダムな不均質構造における短周期地震波動の伝播とエンベロープ形成の数理的モデルについて，総括的なレビューを行い，研究者向け著書 ”Seismic wave

propagation and scattering in the heterogeneous earth (2nd Edition)” (M. Fehler, 前田 托人と共著, Springer, 2012) を上梓した．最終年度には，初学者向けに地震波散乱の導入を含む教科書「地震学」(長谷川昭・西村太志と共著, 共立出版, 2015, 印刷中)を執筆した．

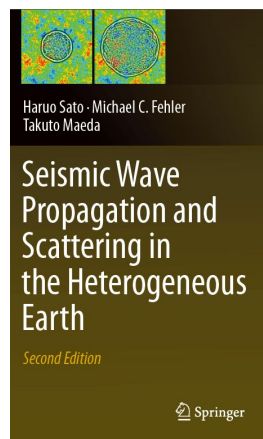


図 5．地震波散乱を取り扱った書籍の執筆．

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 8 件)

Sato, H. and T.Hayakawa, Radiative transfer theory for a random distribution of low velocity spheres as resonant isotropic scatterers, Geophys. J. Int., 2014, 199, 41-59, 査読有．
DOI: 10.1093/gji/ggt338

Sato, H., Green's function retrieval from the CCF of random waves and energy conservation for an obstacle of arbitrary shape: noise source distribution on a large surrounding shell, Geophys. J. Int., 2013, 193, 997-1009, 査読有．
DOI: 10.1093/gji/ggt032

Kawaguchi, R., T. Nishimura, and H.Sato, Volcano inflation prior to an eruption: Numerical simulations based on a 1-D magma flow model in an open conduit, Earth Planets Space, 2013, 65, 1477-1489, 査読有．
DOI:10.5047/eps.2013.05.005

Emoto, K., H. Sato and T. Nishimura, Envelope synthesis of a cylindrical outgoing wavelet in layered random elastic media based on the Markov

approximation, Geophys. J. Int., 2013, 194, 899-910, 査読有.
DOI: 10.1093/gji/ggt125

Sato, H. and R. Fukushima, Radiative transfer theory for the fractal structure and power-law decay characteristics of short-period seismograms, Geophys. J. Int., 2013, 195, 1831-1842, 査読有.
DOI: 10.1093/gji/ggt338

Anggono, T., T. Nishimura, H. Sato, H. Ueda, and M. Ukawa, Spatio-temporal changes in seismic velocity associated with the 2000 activity of Miyakejima volcano as inferred from cross-correlation analyses of ambient noise, J. Volcanol. Geotherm. Res., 2013, 247-248, 93-107, 査読有.
DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.08.001

Mikesell, T.D., K. van Wijk, T. E. Blum, R. Snieder and H. Sato, Analyzing the coda from correlating scattered surface waves, J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131, EL275-281, 査読有.
DOI: 10.1121/1.3687427

Emoto, K., H. Sato and T. Nishimura, Synthesis and applicable condition of vector wave envelopes in layered random elastic media with anisotropic autocorrelation function based on the Markov approximation, Geophys. J. Int., 2012, 188, 325-335, 査読有.
DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.5264.x

[学会発表](計8件)

Sato, H. and R. Fukushima, Radiative transfer approach to the power-law decay characteristics of direct- and coda-wave amplitudes based on the fractal distribution model, CGU, 2014年10月21日, 北京市(中国).

佐藤春夫・早川俊彦, 共鳴散乱を取り入れた輻射伝達理論, 東大地震研共同利用研究会, 2014年9月1日, 東大地震研(東京都).

Sato, H. and T. Hayakawa, Radiative Transfer Theory for a Random Distribution of Low-Velocity Spheres, EGU, 2014年5月2日, ウィーン(オーストリア).

佐藤春夫, 低速度球体による共鳴散乱

と輻射伝達方程式, 東大地震研共同利用研究会, 2013年9月12日, 東大地震研(東京都).

佐藤春夫, ランダム波の相互相関関数からのグリーン関数抽出とエネルギー保存則, 日本地球惑星科学連合学会, 2013年5月20日, 幕張メッセ(千葉県幕張市).

Sato, H., Green function retrieval and energy conservation for an obstacle of arbitrary shape in 2-D space, Workshop on "Noise and Diffuse Wavefields", 2012年11月11日, Neustadt(ドイツ).

佐藤春夫, ノイズ相互相関関数からのグリーン関数抽出とエネルギー保存則, 東大地震研共同利用研究会, 2012年9月11日, 東大地震研(東京都).

佐藤春夫, 直達波とコーダ波振幅のべき乗型減衰と内部減衰物質と散乱体のフラクタル分布, 日本地球惑星科学連合学会, 2012年5月20日, 幕張メッセ(千葉県幕張市).

[図書](計2件)

長谷川昭・佐藤春夫・西村太志, 共立出版, 地震学, 2015, 600(172-332), 印刷中.

Sato, H., M. C. Fehler, and T. Maeda, Springer Verlag, Heidelberg, Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth: the Second Edition, 2012, 494(1-494).

[その他]

ホームページ等

<http://www.zisin.gp.tohoku.ac.jp/~sato>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 春夫 (SATO, Haruo)

東北大学・大学院理学研究科・名誉教授
研究者番号: 80225987

(2) 研究分担者

西村 太志 (NISHIMURA, Takeshi)

東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 40222187