

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：13301
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2016～2019
課題番号：16K05195
研究課題名(和文) フーリエ積分と特異積分に関する基礎的・応用的研究

研究課題名(英文) Research on Fourier integrals and singular integrals

研究代表者

佐藤 秀一 (Sato, Shuichi)

金沢大学・学校教育系・教授

研究者番号：20162430

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：Heisenberg 群を含む斉次群(homogeneous 群)上である種の特異積分作用素を考えた、その荷重 Lebesgue 空間上での弱有界性が示された。ここで、特異積分作用素には滑らかさの正則性が仮定されていない、サイズに関する最小の仮定と cancellation に関する仮定が置かれているのみである。Littlewood-Paley 関数、Lusinの面積積分により斉次群上のHardy 空間の特徴づけ、ある種のSobolev 空間の特徴づけが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ある種の特異積分作用素を考えた、その荷重 Lebesgue 空間上での弱有界性が示された。ここで、特異積分作用素には滑らかさの正則性が仮定されていない、サイズに関する最小の仮定と cancellation に関する仮定が置かれているのみである。Littlewood-Paley 関数、Lusinの面積積分により斉次群上のHardy 空間の特徴づけ、ある種のSobolev 空間の特徴づけが得られた。

研究成果の概要(英文)：We considered singular integrals on homogeneous groups including Heisenberg groups and established weak type estimates on the weighted Lebesgue spaces. The kernel of the singular integral is assumed to have no regularity and only a size condition and cancellation were assumed. Characterizations of Hardy spaces on homogeneous groups and some Sobolev spaces were obtained in terms of Littlewood-Paley functions and Lusin area integrals.

研究分野：調和解析, Fourier 解析

キーワード：singular integrals square functions Hardy spaces Sobolev spaces

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

今回の研究課題には従来の研究課題の中でもテーマとして取り上げてきた問題でいまだ解決していない問題が多い。これらの解決のために関係する研究会に積極的に出席し、それまで得られた結果の研究発表(講演)等を行っている。さらに、同じ興味を持つ研究者との討論に努め研究課題の解決に向けて努力している。特に、海外共同研究者 D. Fan 氏(Department of Mathematics, University of Wisconsin-Milwaukee) との共同研究により研究課題に関連した問題に関していくつかの共著論文を発表している。さらに、北京師範大学を訪問し、Y. Ding 氏と研究課題に関係したいくつかの問題について討論し、共著論文を発表している。

2. 研究の目的

次の(1)-(6)について研究する。これらは互いに密接に関係していて、総合的に研究することで成果を得たい。以下(1)-(6)について説明する。

(1) n 次元 Euclid 空間においてクリティカルオーダー $(n-1)/2$ に対する Bochner-Riesz 平均が間隙概発散する可積分関数の存在を示すこと。1 変数のフーリエ級数の場合には類似の古典的結果がよく知られているが、この問題についても S. Bochner の研究(1936)以来知られているフーリエ級数との類似性により、肯定的解決が予想される。球面平均作用素(spherical mean)とクリティカルオーダーの Bochner-Riesz 平均のある種の類似性が知られている。M. Christ は上記論文において球面平均作用素から定義される間隙最大関数(lacunary maximal function)が Hardy 空間 H^1 から weak L^1 空間への有界な作用素を定義することを示した。しかし、M. Christ はこの論文において詳しい証明を与えていない。この結果はクリティカルオーダーの Bochner-Riesz 平均の間隙概収束・発散問題と深く関係していると思われる。そこで、

(2) 球面平均作用素に対するこの結果に独自の証明を与えたい。

これにより、クリティカルオーダーの Bochner-Riesz 平均に対する理解も深まると予想される。

(3) $n+1$ 次元 Euclid 空間の単位球面上の球面調和関数展開に対するクリティカルオーダー $(n-1)/2$ の Cesàro 平均の Antonov 空間 $L \log L \log \log L$ 上での概収束を示したい。これは $n=2$ の時は既に証明されている。

(4) クリティカルオーダー以下のオーダーの Bochner-Riesz 平均 S_R^λ に対して、予想される p の範囲、endpoints に対して適切な荷重 L^p 空間におけるベクトル値弱評価を示すこと、及び

3 次元以上のユークリッド空間において(予想されている) L^p ノルム評価に対する研究の手がかりを見つけること。

前者(a)は非荷重空間上では M. Christ, A. Seeger, C. Sogge, T. Tao 等により研究されているが(M. Christ, Rev. Mat. Iberoamericana, vol. 3 (1987), 25-31 参照), 完全な形でのベクトル値弱評価でさえまだ一部しかできていない($p=1$ の時は既に証明されている)。また荷重空間での研究はまだ始まっていないようである。そこで適当な重み関数を考えて、 $R = R_j$, $j=1, 2, \dots$ として、 L^p ベクトル値弱評価を、まず、スカラー値関数に対して弱評価が示されている $p, 1 < p < 2(n+1)/(n+3)$, と $p = n(1/p - 1/2) - 1/2$ に対して示したい。これにより間隙概収束等にも応用がなされる。後者については、2 次元の場合は Carleson and Sölin Studia Math. 44 (1972)で解決されている。しかし 3 次元以上の場合、 $0 < \lambda < (n-1)/2$, $2n/(n+1+2^\lambda) < p < 2n/(n-1-2^\lambda)$ に対して L^p 有界性が予想されており、最近では J. Bourgain, T. Wolff, T. Tao 等による研究があるが、まだ完全には解決していない。掛谷の問題, Fourier 変換の制限定理, Hausdorff 次元の問題, Dirichlet 級数に関する Montgomery 予想等にも関係し、難しい問題であるがこの解決は調和解析学にとって重要な課題である。前者の研究等を通してこの問題への手がかりを得たい。

(5) 滑らかさの正則性のない非斉次核から定義される Calderón-Zygmund 型(パラボリック)特異積分作用素の弱 $(1,1)$ 有界性及びこのような特異積分核から定義される F. Ricci-E.M. Stein 型の(多項式相関数の振動因子を持つ)振動特異積分作用素に対する弱 $(1,1)$ 有界性を積分核の大きさに対する最小の仮定のもとで示すこと。さらに、ある種の部分多様体上に沿った特異性を持つ特異積分作用素の研究に発展させたい。M. Christ, J. L. Rubio de Francia, S. Hofmann, A. Seeger, T. Tao, A. Vargas 等の研究により、Hörmander 条件を満足しない核を持つ積分作用素に対する弱有界性が示されるようになった。特に、A. Seeger は J. Amer. Math. Soc. 9 (1996) において斉次型の特異積分核に対してサイズに関するある弱い条件(積分核の単位球面上への制限が Zygmund クラス $L \log L$ に属すること)を仮定するだけで、任意の次元で、この核から定義される特異積分作用素の弱 $(1,1)$ 有界性を示すことに成功した。目的のひとつは $\epsilon \log L$ という仮定を $\epsilon \log L^1$ (Hardy 空間)に緩和することである。T. Tao (Indiana Univ. Math. J. 48, 1999) は Fourier 変換に依存しない証明をより一般に斉次群上の特異積分に対して与えている。我々はこの A. Seeger の弱 $(1,1)$ 有界性の結果を非斉次積分核の場合に拡張したい。また、(積分核の斉次性が一般的な nonisotropic dilation に関して考えられた)パラボリック特異積分の場合にも拡張したい。2次元の(斉次核の場合)はすでに解決された。これは T. Tao (1999) の Fourier 変換に依存しない方法を応用して証明されたが、

3次元以上のパラボリック特異積分の場合に拡張したい。さらに、このような特異積分核から定義される(Ricci-Stein型の)振動特異積分作用素を考えてその弱(1,1)有界性を示したい。パラボリック特異積分の理論は曲線に沿った Hilbert 変換の研究(荷重ノルム不等式の問題は未解決である)と密接に関係している。

(6) Littlewood-Paley 関数の研究, 特に, Marcinkiewicz 関数 μ の弱(1,1)有界性の研究。

我々は既に D. Fan 氏との共同研究で Marcinkiewicz 関数に対して(5)で述べた A. Seeger の結果に対応する弱(1,1)有界性を積分核に関する条件 $\in L \log L$ のもとで示しているが, この条件を $\Omega \in L(\log L)^{\frac{1}{2}}$ に緩和したい(これは最良条件である)。

3. 研究の方法

目的(1)について: 1変数フーリエ級数の場合を再考察することから始める。Hardy 空間 H^1 の関数に対しては間隙概収束が知られているが, 可積分関数の場合との違いを詳しく調べる。1変数の特殊性がどこにあるのか調べ, 多変数への拡張を試みる。さらに, J.P. Kahane, R. Salem の三角級数の一意性に関するいくつかの仕事(Ensembles parfaits et séries trigonométriques, Hermann, Paris, 1963), 及び S.V. Konyagin, On everywhere divergence of trigonometric Fourier series, Mat.Sb. 191(200) ($L(\log L)^{\frac{1}{2}}$ に近い空間での概発散)との関連性も考察したい。

目的(2)について: Bochner-Riesz 平均との関係を明らかにする別証明を与えたい。T. Wolff, Lectures on harmonic analysis, Univ. Lecture series Vol 29, AMS, Chap. 7, J. Duoandikoetxea-L.Vega, Spherical means and weighted inequalities, J. London Math. Soc. 53(1996) が参考になる。また, Seeger-Tao-Wright の $L \log \log L$ 上での球面平均作用素の間隙概収束(2003)との関係を調べる。C.D. Sogge, Fourier Integrals in Classical Analysis, Cambridge Univ. Press, 1993 では2次元の場合に Bourgain の最大球面平均作用素に関する定理と Carbery の最大 Bochner-Riesz 平均に関する定理の証明の共通点について詳しく述べられている。これを参考にして, サークルを(曲率が零になることもある)一般の曲線に換えた場合に類似の結果が成り立つのかどうか調べてみたい(P. Sjölin, Studia Math. (1974) が参考になる)。これにより Bochner-Riesz 平均と球面平均作用素の関係の理解を深めることにより解決を試みる。以上に述べた Bochner-Riesz 平均の研究と球面平均作用素の研究は互いに密接に関係しているものであり, 両者の研究により総合的に解決を試みたい。

目的(3)について: $n=2$ の場合は作用素の解析補間を行うことで, 証明に必要な評価が示されたが, ここでは E. Kogbetliantz(J. Math. Pures Appl. 3, 1924) の複素解析的方法が用いられた。高次元の場合も同様の補間を行うために, 実解析的な方法等で必要な評価が得られないか調べる(Kogbetliantz の方法は高次元の場合うまくいかない)。

目的(4)について: (4)の のベクトル値弱有界性を示す研究に関しては次のような研究計画を考えている。クリティカル インデックス $((n-1)/2)$ における, 弱(1,1)有界性を示す従来の方法(M. Christ, J. L. Rubio de Francia 等の方法)をその他の endpoints の場合に適用できるようにすることを試みる事から始める。さらに, クリティカルオーダーよりも小さいオーダーの Bochner-Riesz 平均の endpoints における弱有界性を扱った論文として: M. Christ の研究目的(4)で述べた論文, T. Tao, Weak-type endpoint bounds for Riesz means, Proc. Amer. Math. Soc. 124(1996), 2797-2805 等があるが, これらの結果を詳しく検討することも行う。上の M. Christ (1987) は複素補間法とクリティカル インデックス $((n-1)/2)$ での評価方法をあわせて用いるのであるが, 間隙 (lacunary) ベクトル値弱有界性を示すには有効であるが, 一般のベクトル値弱有界性には改良が必要のように思われる。T. Tao の方法等も考慮し, 実解析的観点から証明を再構成することも検討する。(4)の研究には, 最近の掛谷の最大関数に関する研究等の幾何学的フーリエ解析の発展等も手がかりに進めて行きたい。特に, T. Wolff, T. Tao, A. Vargas 等の仕事を詳しく検討したい。まず, T. Tao, The Bochner-Riesz conjecture implies the restriction conjecture, Duke Math. J, 1999 の再検討を行う。

目的 (5) について : A. Seeger (1996) と T. Tao (1999) の弱(1,1)有界性に関する論文の方法を見直すことから始める . 特に, 2次元の場合を良く調べてみる . Ricci-Stein 型の振動特異積分の弱有界性に対しては, A. Seeger, T. Tao の方法と筆者の荷重空間の場合に利用された (精密化された) L^2 (decay) 評価, 多項式に関する幾何学的な補題等を総合的に用いて解決を試みる . また, T. Tao の方法は一般のパラボリック特異積分の場合(2次元の斉次核の場合には既に解決している)に一般化できることが期待できるが, まず, 3次元の場合を詳しく調べたい . D. Fan 氏, Y. Ding 氏と協力して研究を進めたい .

目的 (6) について : $\Omega \in L \log L$ の場合の方法を改良し, 解決を試みる . 積分核に関する条件 $\Omega \in L(\log L)^{\frac{1}{2}}$ のもとで μ の L^p ($1 < p < \infty$) 有界性が示されているので, その考え方が弱(1,1)有界性に対する方法の改良に用いられないかどうか調べたい . D. Fan 氏, Y. Ding 氏と協力して研究を進めたい .

4 . 研究成果

Heisenberg 群を含む斉次群 (homogeneous 群) 上である種の特異積分作用素を考えて, その荷重 L_p 空間上での弱有界性が示された . ここで, 特異積分作用素には滑らかさの正則性が仮定されていなく, サイズに関する最小の仮定と cancellation に関する仮定が置かれているのみである (論文 (11)) .

ある種の Marcinkiewicz 積分により重みつき Sobolev 空間を特徴づけることに成功した .

この Marcinkiewicz 積分は球上での積分平均とその一般化に基づいており, 距離空間上で Sobolev 空間を定義することに応用される . さらに離散型 Marcinkiewicz 積分による重みつき Sobolev 空間の特徴づけも示された . これらの結果を示すために Littlewood-Paley 作用素に関係した斉次型 Fourier multiplier に対する reversed estimates に関する Hormander の結果が dyadically homogeneous Fourier multiplier の場合に重みつき空間上に一般化された (論文 (9)) . オーダー-2 の Sobolev 空間の場合には, 同様の方法により, 少し異なる方法でも特徴づけがなされた (論文 (10)) .

n 次元 Euclid 空間上の non-isotropic dilation 群に付随した Littlewood-Paley 関数を考え, 積分核の滑らかさに関する正則性を仮定せずに, p 乗可積分空間での有界性を証明した, ここで p は 1 より大きな有限の指数である . これは Muckenhoupt の荷重つき空間でも成立する . この結果は N. Riviere (1971) の結果を特別な場合として含む (論文 (3)) .

Littlewood-Paley 関数による Hardy 空間の特徴づけに対して, 新しい証明方法が与えられた (論文 (5)) . これは, Peetre の最大関数を用いる直接的な計算によるものであり, 種々の設定に拡張することが期待される . 実際, Calderon-Torchinsky の parabolic Hardy 空間に対しても有効であることが示されている (論文 (7)) .

Lusin の面積積分により, Sobolev 空間の特徴づけがえられた . これは, Littlewood-Paley 関数による Sobolev 空間の特徴づけを Lusin の面積積分の場合に拡張するものである (論文 (6)) . 関連した Marcinkiewicz 型 square function に対する精密な評価が論文 (2) で得られている . この Lusin の面積積分による関数空間の特徴づけは H^1 -Sobolev 空間の場合に拡張された . さらに, 1次元の場合は, Marcinkiewicz 積分により, 荷重つき H^1 -Sobolev 空間の特徴づけが証明された (論文 (4)) .

Folland-Stein の斉次群上の H_p の一般の Littlewood-Paley 関数による特徴づけが証明され

た (論文 (1)).

論文

- (1) Shuichi Sato, Hardy Spaces on Homogeneous Groups and Littlewood-Paley Functions The Quarterly Journal of Mathematics 71(1) 295 - 320 2020 年 1 月 25 日 (査読有り), <https://doi.org/10.1093/qmath/haz049>.
- (2) Shuichi Sato, Weak type estimates for functions of Marcinkiewicz type with fractional integrals of mixed homogeneity, MATHEMATICA SCANDINAVICA 125(1), 135-162, 2019 年 8 月(査読有り), <https://doi.org/10.7146/math.scand.a-114725>.
- (3) Shuichi Sato, Boundedness of Littlewood-Paley operators relative to non-isotropic dilations, Czech Math J 69(2) 337 - 351 2019 年 6 月 (査読有り), <https://doi.org/10.21136/CMJ.2018.0313-17>.
- (4) Shuichi Sato, Characterization of H^1 Sobolev spaces by square functions of Marcinkiewicz type, Journal of Fourier Analysis and Applications 25, 842-873, 2019 年 5 月(査読有り), <https://doi.org/10.1007/s00041-018-9618-2>.
- (5) Shuichi Sato, Vector valued inequalities and Littlewood-Paley operators on Hardy spaces, Hokkaido Math. J. 48(1), 61-84, 2019 年 2 月 (査読有り), <https://doi.org/10.14492/hokmj/1550480644>.
- (6) Shuichi Sato, Fan Wang, Dachun Yang and Wen Yuan, Generalized Littlewood-Paley characterizations of fractional Sobolev spaces, Communications in Contemporary Mathematics 20(7) 1750077 (48 pages), 2018 年 10 月(Featured Articles: Most-Read Articles of 2018) (査読有り), <https://doi.org/10.1142/S0219199717500778>.
- (7) Shuichi Sato, Characterization of parabolic Hardy spaces by Littlewood-Paley functions, Results Math 73(3) 106, 20 pages, 2018 年 9 月 (査読有り), <https://doi.org/10.1007/s00025-018-0867-9>.
- (8) Shuichi Sato, Spherical square functions of Marcinkiewicz type with Riesz potentials, Arch. Math. 108(4), 415-426, 2017 年 4 月 (査読有り), <https://doi.org/10.1007/s00013-017-1027-2>.
- (9) Shuichi Sato, Littlewood-Paley equivalence and homogeneous Fourier multipliers, Integr. Equ. Oper. Theory 87, 15-44, 2017 年 1 月 (査読有り), <https://doi.org/10.1007/s00020-016-2333-y>.
- (10) Shuichi Sato, Square functions related to integral of Marcinkiewicz and Sobolev spaces, Linear and Nonlinear Analysis 2(2) 237 - 252 2016 年 12 月 (査読有り), <http://www.ybook.co.jp/online2/lnav2n2.html>.
- (11) Shuichi Sato, Weighted weak type (1,1) estimates for singular integrals with non-isotropic homogeneity, Arkiv for Matematik 54(1), 157-180, 2016 年 4 月(査読有り), <https://doi.org/10.1007/s11512-015-0215-1>.

講演

- (1) Shuichi Sato, Characterization of some function spaces by square functions, RIMS 共同研究(公開型) 関数空間論とその周辺 (Research Institute for Mathematical Sciences, 京都大学数理解析研究所) 2019 年 12 月 10 日 招待講演, <https://researchmap.jp/read0102999/presentations/21325315>.
- (2) Shuichi Sato, Littlewood-Paley function characterization of Hardy spaces on homogeneous groups, International Conference on Harmonic Analysis and Its Applications, University of Chinese Academy of Sciences, Yanqi Lake, Beijing, China, 2018 年 6 月 17 日 招待講演, <https://researchmap.jp/read0102999/presentations/4223926>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 Hardy Spaces on Homogeneous Groups and Littlewood-Paley Functions | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Quarterly Journal of Mathematics | 6. 最初と最後の頁 295-320 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/qmath/haz049 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 125 |
| 2. 論文標題 Weak type estimates for functions of Marcinkiewicz type with fractional integrals of mixed homogeneity | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 MATHEMATICA SCANDINAVICA | 6. 最初と最後の頁 135-162 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7146/math.scand.a-114725 | 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 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 69 |
| 2. 論文標題 Boundedness of Littlewood-Paley operators relative to non-isotropic dilations | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Czech Math J | 6. 最初と最後の頁 337-351 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21136/CMJ.2018.0313-17 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Characterization of H^1 Sobolev spaces by square functions of Marcinkiewicz type | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Fourier Analysis and Applications | 6. 最初と最後の頁 842-873 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00041-018-9618-2 | 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 48 |
| 2. 論文標題 Vector valued inequalities and Littlewood-Paley operators on Hardy spaces | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Hokkaido Math. | 6. 最初と最後の頁 61-84 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14492/hokmj/1550480644 | 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 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 73 |
| 2. 論文標題 Characterization of parabolic Hardy spaces by Littlewood-Paley functions | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Results Math | 6. 最初と最後の頁 106 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00025-018-0867-9 | 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 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato, Fan Wang., Dachun Yang and Wen Yuan | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 Generalized Littlewood-Paley characterizations of fractional Sobolev spaces | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Communications in Contemporary Mathematics | 6. 最初と最後の頁 1750077 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0219199717500778 | 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 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 108 |
| 2. 論文標題 Spherical square functions of Marcinkiewicz type with Riesz potentials | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Arch. Math. | 6. 最初と最後の頁 415--426 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00013-017-1027-2 | 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 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 87 |
| 2. 論文標題 Littlewood-Paley equivalence and homogeneous Fourier multipliers | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Integr. Equ. Oper. Theory | 6. 最初と最後の頁 15--44 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00020-016-2333-y | 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 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Square functions related to integral of Marcinkiewicz and Sobolev spaces | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Linear and Nonlinear Analysis | 6. 最初と最後の頁 237--252 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Shuichi Sato | 4. 巻 54 |
| 2. 論文標題 Weighted weak type (1,1) estimates for singular integrals with non-isotropic homogeneity | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Arkiv for Matematik | 6. 最初と最後の頁 157--180 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11512-015-0215-1 | 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 - |

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shuichi Sato |
| 2. 発表標題 Characterization of some function spaces by square functions |
| 3. 学会等名 RIMS 共同研究(公開型) 関数空間論とその周辺 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shuichi Sato |
| 2. 発表標題 Littlewood-Paley function characterization of Hardy spaces on homogeneous groups |
| 3. 学会等名 International Conference on Harmonic Analysis and Its Applications (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|