

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 4 月 17 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06662

研究課題名(和文)高剛性高強度傾斜型頭付きスタッドのせん断強度と合成梁への適用

研究課題名(英文) Application for composite beam and shear strength of inclined headed stud with high rigidity and high strength

研究代表者

貞末 和史 (sadasue, kazushi)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：20401573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、頭付きスタッドを45°傾斜して溶接することで頭付きスタッド1本当たりのせん断剛性とせん断強度を増大できる新型の接合工法の実用化に取り組んだ。傾斜型頭付きスタッドの有効性を示すには、構造実験による検証を行なうことが不可欠であり、頭付きスタッドの径、長さ、配置およびコンクリート強度を変数とした一連の系統的なせん断実験を行って、破壊メカニズムがどのように変化するか明らかにした後、傾斜型頭付きスタッドを用いた接合部のせん断強度の評価式を構築した。さらに、合成梁に対する傾斜型頭付きスタッドの適用方法を考案し、載荷実験を行って適用効果について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内外で多くの施工実績があり、施工法が確立されている在来型の頭付きスタッドに対して、「頭付きスタッドを傾斜させる」という簡単な改良だけで、せん断剛性とせん断強度を増大できる接合工法を確立できれば、頭付きスタッドの施工本数の軽減による省力効率化が図れ、鉄骨とコンクリートを容易に一体化でき、鋼とコンクリートを組み合わせて用いることの合成効果・相乗効果を活かせる設計法を提示することが可能となる。鋼構造および鋼とコンクリートの合成構造における柱脚部分への適用、さらに、合成桁や橋脚への適用など、建築・土木工事に関わらず鋼とコンクリートを結合させる新しい接合工法として広く普及することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Usually, headed studs are vertically welded in a steel surface. However, if we expect the shear resistance in headed studs, the resistance mechanism is changed such that the headed stud is subject to a force along the axial direction of the stud, which is predicted to produce considerable resistance. Therefore, it is hypothesized that composite beams using inclined headed studs would improve shear stiffness and strength.

In this research, first, we confirmed the mechanical behavior of parallel-inclined and cross-inclined headed stud steel and concrete connectors by conducting a structural test. From the test results, the modified coefficient used for determining the ultimate shear strength of the inclined headed studs was identified. Finally, we confirmed that the results of the proposed evaluation method for the shear strength are consistent with the test results. And we proposed an appropriate arrangement and direction of inclined headed studs for the beams and the girders.

研究分野：建築構造

キーワード：頭付きスタッド ずれ止め 合成梁

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1950年代に米国で開発された建築用の頭付きスタッドは、建築および土木構造物におけるシアコネクタ(ずれ止め)として広く普及し、今日の建築では合成梁や柱脚に適用されている。なお、国内では2011年に頭付きスタッドに関するJIS規格が改定され、軸径25までの施工が認められている。しかしながら、現行の設計基準・施工規則のほとんどは22までのサイズが基本とされ、作用する応力に対して鉄骨とコンクリートを剛強に結合するには数多くの本数が必要となり、収まりの都合で所要の本数を設けることが困難な場合がある。また、合成梁に関しては、日本建築学会の各種合成構造設計指針に設計法が示されているが、多数回の繰り返し荷重または大きな衝撃荷重の作用する梁への適用は認められていないため、頭付きスタッドに代わる剛強なずれ止めとして、土木構造物で用いられている「孔あき鋼板ジベル」や「バーリングシアコネクタ」と称された新型のずれ止めを適用しようとする試みも始められている。このような状況の中で、本研究では、鉄骨母材に頭付きスタッドを鉛直に溶接する在来型の頭付きスタッドに対して、頭付きスタッドを45°傾斜して溶接することで頭付きスタッド1本当たりのせん断剛性とせん断強度を増大できる新型の接合工法の実用化に取り組んだ。

せん断力を受ける在来型の頭付きスタッドはダボ効果によってせん断抵抗するのに対して、傾斜型の頭付きスタッドは傾斜角度の増大と共に材軸方向の力を受けるように抵抗機構が変わり、頭付きスタッドが効率的に接合部の剛性や強度に機能すると予測される。せん断面に対して接合材を傾斜させて用いることの有効性は、プレキャストRC部材の接合面に設ける傾斜型接合筋、既存RC構造の耐震補強で用いるあと施工アンカーの傾斜型アンカー筋に関する実験研究で実証されている。さらに、軸径13の頭付きスタッドの検証実験に限定されるが、過去に行なわれたパイロット試験的な研究や申請者らの先行研究によって、傾斜型頭付きスタッドのせん断剛性とせん断強度の増大効果が確認されている。本接合工法の実用化を図るためには、i) 太径を含む各軸径の頭付きスタッドに対する傾斜溶接の施工法、ii) 接合部のせん断強度の評価式、iii) 合成梁や柱脚等の構造部材への適用方法と適用条件を提示することが必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、傾斜型頭付きスタッドを適用する対象としてRCスラブとH形鋼で構成される合成梁を取り上げ、特に、以下の点を明らかにすることを目的とした。

- (1) 頭付きスタッドの軸径と長さ、コンクリート強度等、設計条件が変わることによって、破壊メカニズム(頭付きスタッドの降伏、コンクリートの支圧破壊およびコーン状破壊など)がどのように変化するのか明らかにし、傾斜型頭付きスタッドを用いた接合部のせん断強度の評価式を構築する。
- (2) 傾斜型頭付きスタッドを適用した合成梁が外力を受けた場合に優れた構造特性を有しているのか検証する。

3. 研究の方法

(1) 接合部のせん断実験とせん断強度評価式の構築

試験体形状の一例を図1に示す。試験体は鉄骨梁とRCスラブを頭付きスタッドを用いて結合する合成梁の接合部分を模擬している。全試験体ともRC部分の形状と配筋、頭付きスタッドの傾斜角度(=45°)は同一であり、頭付きスタッドの向きと配列、軸径 d 、長さ l およびコンクリート設計基準強度 F_c を実験変数として計画した。

荷重は試験体の鉄骨部分が上、RC部分が下になるように荷重装置に設置した。鉄骨部分とRC部分の相対ずれ変位を制御してせん断力 Q を与えるものとした。

(2) 合成梁への適用性検討

試験体形状の一例を図2に示す。頭付きスタッドを用いて鉄骨梁と等厚RC床スラブを接合する合成梁とした。N10Lは頭付きスタッドを垂直に溶接する在来型の完全合成梁として計画した。N08Lは在来型頭付きスタッドを用いて合成率 $n_p/n_f=0.8$ の不完全合成梁として計画した。I08Lは傾斜型頭付きスタッドを適用したもので、 n_p はN08Lと同じであるものの、N10Lより少ない n_p で完全合成梁と同等の性能を与えることができるのか検証する試験体である。

荷重は梁の両端をローラー支点として、梁中央等曲げ区間が正曲げ(床スラブが圧縮)となる方向に、耐力低下を生じるまで2点集中荷重 $P/2$ を与えるものとした。

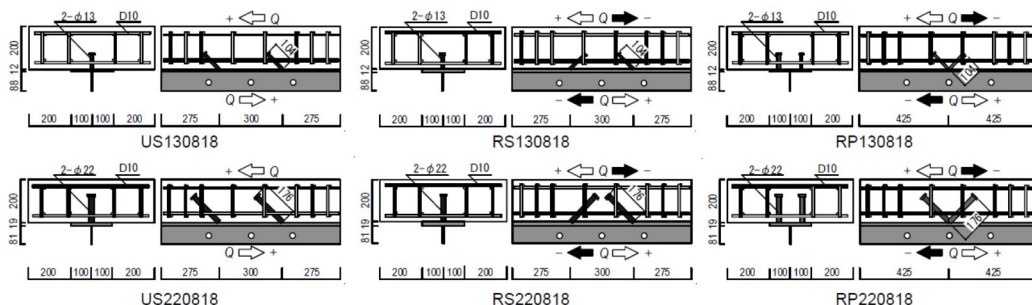


図1 試験体

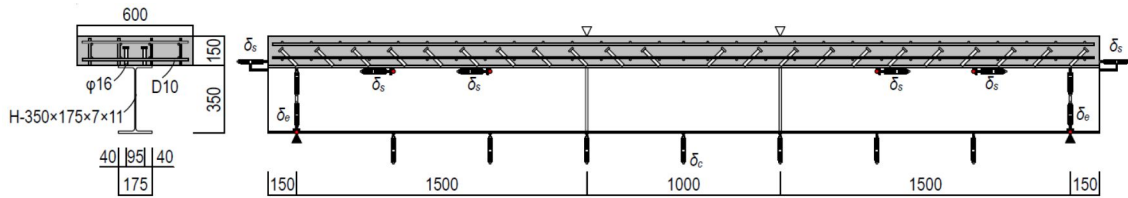


図2 試験体

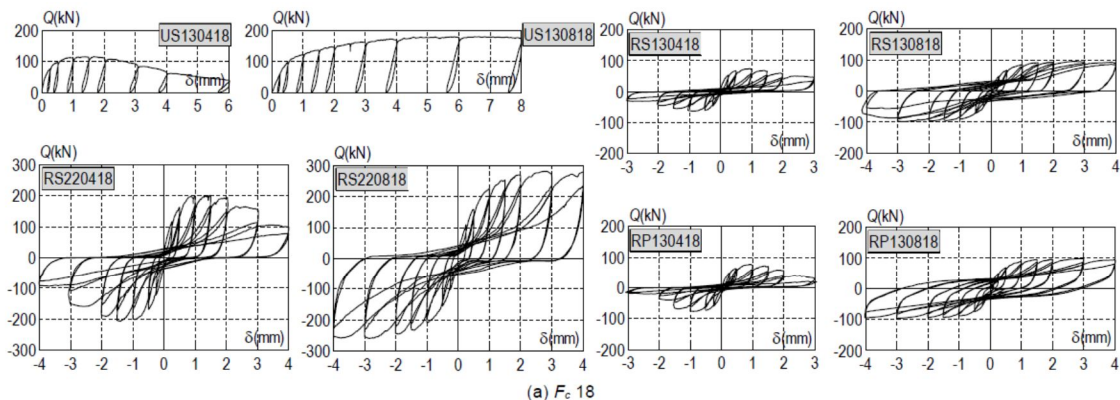
4. 研究成果

(1) 接合部のせん断実験とせん断強度評価式の構築

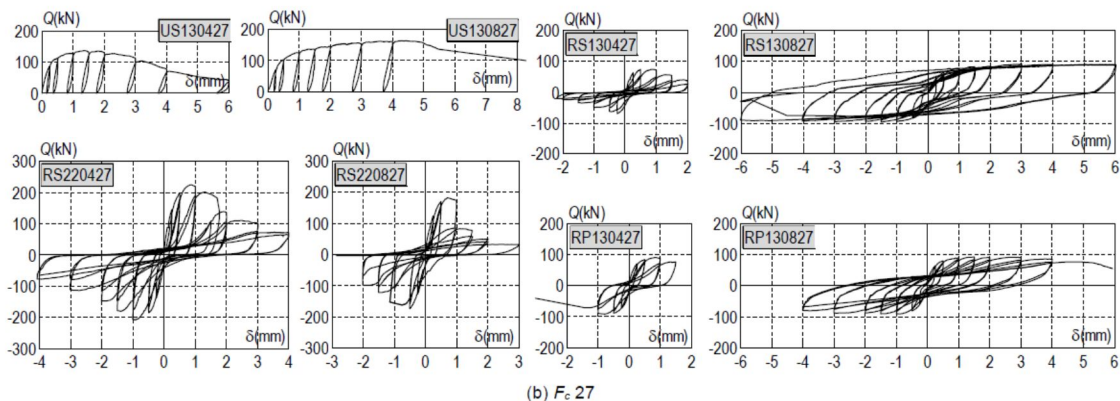
実験結果

破壊形式としては、コンクリートのコーン状破壊、コンクリートの割裂ひび割れ、コンクリートの支圧破壊、頭付きスタッド母材基部の破断、頭付きスタッド溶接部の破断が確認された。

$Q-\delta$ 関係の一例を図3に示す。実験変数が $Q-\delta$ 関係と最大耐力に及ぼす影響について考察する。 d 、 l/d および F_c が同じ条件で、交差傾斜型の RS シリーズと RP シリーズの $Q-\delta$ 関係を比較すると、ほぼ同様の挙動を示している。一方で、平行傾斜型 (US シリーズ) と交差傾斜型 (RS, RP シリーズ) の $Q-\delta$ 関係を比較すると、初期剛性に明確な差異はないが、平行傾斜型は大きなせん断力まで高い剛性を保ち最大耐力が大きくなった。小梁に対しては平行傾斜型、大梁に対しては必要本数に応じて直列および並列の交差傾斜型を適用することで合理的な合成梁の設計ができると考えられる。平行傾斜型、交差傾斜型共に l/d が小さい試験体ほど小さな δ でコンクリートのコーン状破壊を生じており、コーン状破壊後は耐力低下している。 l/d が大きい試験体ほど大きな δ まで耐力低下することなく、頭付きスタッド基部の破断によって耐力低下する場合と、コンクリートがコーン状破壊して耐力低下する場合の2種類があった。 $l/d=4$ の場合はいずれの試験体ともコンクリートがコーン状破壊しており、コンクリート強度が大きいほど最大耐力も大きくなっている。一方で、 $l/d=8$ の 13φ の試験体のように頭付きスタッドが破断している場合はコンクリート強度に関わらず最大耐力はほぼ一定値となっている。



(a) $F_c = 18$



(b) $F_c = 27$

図3 $Q-\delta$ 関係

終局せん断耐力の評価

作用するせん断力に対して、頭付きスタッドの軸方向力 sN_u とコンクリートの支圧力 cN_u による抵抗を考え、頭付きスタッド 1 本あたりの終局せん断耐力 Q_u を(1)式で表す。

$$Q_u = sN_u \cdot \sin\theta + cN_u \cdot \cos\theta \quad (1)$$

正の方向に傾斜している頭付きスタッドの場合、 sN_u は頭付きスタッドの引張力によって生じ

る抵抗力であり、頭付きスタッドが引張降伏する時の耐力 ${}_sN_t$ とコンクリートがスタッドヘッドを起点としたコーン状破壊を生じる時の耐力 ${}_sN_c$ の小さい方で決まると考えて、(2)～(4)式で評価する。

$${}_sN_u = \min ({}_sN_t, {}_sN_c) \quad (2)$$

$${}_sN_t = \sigma_y \cdot {}_sA \quad (3)$$

$${}_sN_c = \sigma_c \cdot {}_cA \quad (4)$$

${}_cN_u$ はコンクリートの支圧力によって生じる抵抗力であり、頭付きスタッド基部がせん断破壊あるいはコンクリートが支圧破壊する時の耐力とし、各種合成構造設計指針で採用されている J.W.Fisher らが提案した(5)式を用いて評価する。

$${}_cN_u = \kappa_p \cdot {}_sA \cdot \sqrt{\sigma_B \cdot E} \quad (5)$$

負の方向に傾斜している頭付きスタッドの場合、 ${}_sN_u$ については、負の方向に傾斜している頭付きスタッドは曲げ変形を伴うため、頭付きスタッドの基部を中心とする回転運動を生じて鉄骨とコンクリートの接合面が離間する。交差傾斜型では正の方向に傾斜している頭付きスタッドが離間を抑制するが、他に接合面の離間を妨げる抵抗力はなく、平行傾斜型、交差傾斜型ともに終局時には離間が進み、負の方向に傾斜している頭付きスタッドは材軸方向の抵抗力を十分に期待できないと思われるため、安全側の仮定として ${}_sN_u=0$ とする。

${}_cN_u$ は、(5)式と同様の(6)式を用いるものとする。

$${}_cN_u = \kappa_n \cdot {}_sA \cdot \sqrt{\sigma_B \cdot E} \quad (6)$$

提案した終局せん断耐力式の検証を行なう。計算値 Q_u と実験値 Q_{exp} の比較を図4に示す。平行傾斜型については $Q_{exp}/Q_u=0.90 \sim 1.27$ (平均値 1.05)、変動係数は 9.4%、交差傾斜型については $Q_{exp}/Q_u=0.75 \sim 1.13$ (平均値 0.94)、変動係数は 12.5% となった。交差傾斜型は平行傾斜型と比べてやや危険側に評価される場合があるが、交差傾斜型、平行傾斜型共にほぼ平均値を評価できている。破壊形式について、 $l/d=4$ の場合は実験、計算共にコンクリートはコーン状破壊となり一致した。 $l/d=6$ と $l/d=8$ の場合はコーン状破壊の有無が実験と計算で一致していない試験体があるが、実験では頭付きスタッドが降伏した後のひずみ硬化による応力上昇中にコーン状破壊を生じる場合があることが関係していると思われる。溶接不良の試験体を除き、実験でコーン状破壊が観察されていないのに計算でコーン状破壊と判定される試験体はなかった。

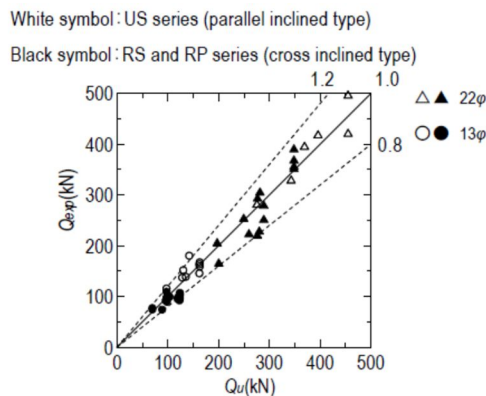


図4 実験値と計算値の比較

接合部のせん断実験とせん断強度評価式の構築に関するまとめ

頭付きスタッドの向きと配列、軸径、長さおよびコンクリート強度を変数とした系統的な実験を行なって、せん断力を受ける傾斜型頭付きスタッドに生じる破壊形式を確認した後、抵抗機構と破壊形式を考慮した終局せん断耐力式を提案し、耐力式に用いる実験係数を同定して耐力式の評価精度について検証した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

i) 実験での破壊形式として、コンクリートのコーン状破壊、コンクリートの割裂ひび割れ、コンクリートの支圧破壊、頭付きスタッド母材基部の破断、頭付きスタッド溶接部の破断が確認された。

ii) 実験で確認された破壊形式の内、終局せん断耐力に影響を与える破壊形式として、正の方向に傾斜している頭付きスタッドに対しては、頭付きスタッド母材基部の引張降伏、コンクリートのコーン状破壊、コンクリートの支圧力による破壊を考慮し、負の方向に傾斜している頭付きスタッドに対しては、コンクリートの支圧力による破壊を考慮した終局せん断耐力式を示した。

iii) 提案した終局せん断耐力式は、平行傾斜型、交差傾斜型共に実験で得られた最大耐力を概ね

妥当に評価できる。

(2)合成梁への適用性検討

実験結果

荷重 P -変位 δ 関係を図 5 に示す。図中の白丸は上フランジ上面とコンクリート下面の固着力喪失開始点、黒丸は固着力喪失終了点である。 K は合成断面としての弾性剛性、 P_y は降伏耐力、 P_u は完全合成梁としての終局耐力であり、材料の実強度と実断面を用いて算定した。最終破壊状況の一例を写真 1 に示す。

N10L は、 $P=250\text{kN}$ 程度で上フランジ上面とコンクリート下面の固着力が喪失した際にずれが生じ始めたが、 $P=400\text{kN}$ 程度まで P - δ 関係はほぼ線形挙動を示し、断面のひずみ度分布も $\delta=10\text{mm}$ までは平面保持が成立している。これ以後、すべりが大きくなると共に断面に平面保持が成立しなくなり、 P - δ 関係が非線形挙動を示した後、梁中央部でコンクリートが圧壊して P_u に達した。

N08L は、初期剛性は N10L と同等であったが、N10L より小さな荷重で非線形挙動を示し、すべりは大きく、最大耐力が小さくなった。最終破壊状況は、N10L と同様に梁中央部でコンクリートが圧壊しており、最大耐力は P_u を下回った。

I08L は、初期剛性は N10L と同等であったが、上フランジ上面とコンクリート下面の固着力が喪失する時の荷重、非線形挙動が始まる荷重共に大きく、すべりは小さいため、小さな δ で N10L とほぼ同等の最大耐力に達した。最終破壊状況は、他の試験体と同様に梁中央部でコンクリートが圧壊しており、最大耐力は P_u を上回った。

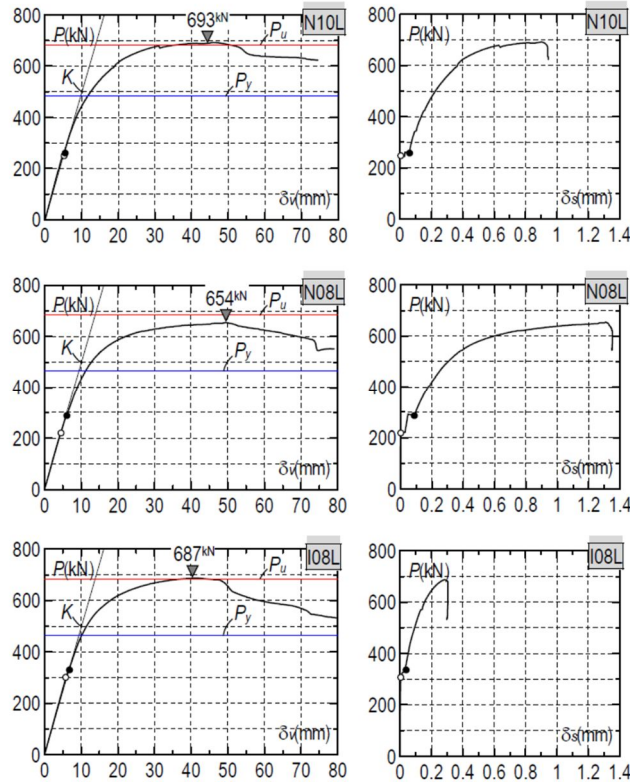


図 5 荷重 P -変位 δ 関係

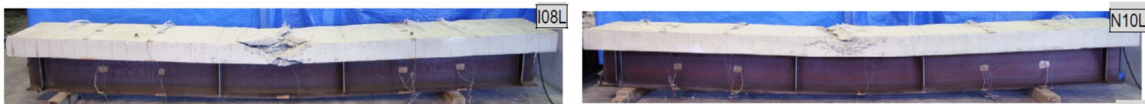


写真 1 最終破壊状況

合成梁への適用性検討に関するまとめ

傾斜型頭付きスタッドを合成梁(小梁)へ適用することで、在来型より少ない本数で完全合成梁としての終局耐力を与えることが可能であることを明らかにした。

引用文献

日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010.11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 貞末和史, 尾籠秀樹	4. 巻 第24巻 第58号
2. 論文標題 正負線返しせん断力を受ける傾斜型頭付きスタッドの力学挙動	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 101-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.3130/aijt.241069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 貞末和史, 尾籠秀樹	4. 巻 第85巻 第769号
2. 論文標題 傾斜型頭付きスタッドのせん断耐力	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 403-413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.3130/aijs.85.403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 貞末和史, 尾籠秀樹
2. 発表標題 傾斜型頭付きスタッドのせん断強度に関する研究 (その2)非線形FEM解析
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告集
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
---------------------------	-----------------------	----