

スライド式ビット交換システムと 電食発進到達工法に関する研究

〔スライド式ビット交換システムと その利（併）用技術に関する研究〕

1. 研究目的

近年、市街地におけるシールド工事は、振動・騒音や交通渋滞の誘発等により住民の理解が得られ難く、また過密化による用地不足から立坑用地の確保が困難となっている。一方、都市部の道路下は地下埋設物が輻輳し、新設管路の設置は大深度化しつつあり、建設費の増大を招いている。

その対策の1つとして、シールドの長距離化が注目されている。長距離施工を行うことで、立坑数が削減でき、建設コストの縮減および用地問題の解消が期待できる。しかし、長距離施工には技術的な課題が多く、その中でもビット交換は、地盤改良により切羽を安定させ坑内から行うことから、工費、工期および安全性に問題がある。

一方、シールド工事の発進・到達は、通常、地盤改良で背面地盤を自立させ、立坑土留め壁を人力等で取り壊しシールド機を進めている。しかし、地上作業を伴う補助工法は周辺環境への影響が大きく、工費および工期の増大の原因となっている。

このため、シールド機のビット交換および発進到達において、補助工法を省略もしくは低減し、安全かつ経済的に行える技術の開発が望まれている。

今回研究対象としたスライド式ビット交換システムは、地盤改良等の補助工法を必要とせず、シールド機内部からビット交換を複数回、任意の場所で行える技術である。また電食発進到達工法は、電食作

用により立坑土留め壁の杭芯材をシールド機で切削可能な状態まで劣化させ、補助工法無しで発進到達を可能とした工法である。

本研究では、スライド式ビット交換システムと電食発進到達工法の技術を確立することで、周辺環境への影響低減、立坑用地問題の緩和、安全性の向上およびシールド工事のコスト縮減を目指すものである。

2. 研究体制

本研究は、(財)下水道新技術推進機構、飛鳥建設(株)、三菱重工業(株)、日本防蝕工業(株)、ライト工業(株)の5者が共同で実施した。

3. 研究内容

平成11年度から2箇年にわたり実施してきた共同研究の主な内容は以下のとおりである。なお、研究成果はパンフレットとして取りまとめた。

(1) スライド式ビット交換システム

- 1) 基本性能の整理
- 2) 適用範囲の整理
- 3) 要素技術の検討

(2) 電食発進到達工法

- 1) 電食の制御

- 2) 必要劣化度の把握
- 3) 切削性の評価
- 4) 地下埋設物への影響検討
- 5) 実証立坑による検証

- ・部材の強度と耐久性
- ・引抜き挿入時の作動性
- ・止水性能
- ・ビット交換時間

(2) 部材の強度と耐久性

シールド掘進時にビットに作用する荷重は、ビットホルダーとガイドレールに伝達される。ビットホルダーとガイドレールは、その負荷に対して十分な強度と長距離施工に対応した耐久性が必要である。そこで、シールド機外径 ϕ 7.0m級の実験装置のビット先端部に最大150kNの静的荷重あるいは繰り返し荷重を作用させ、各部位の発生応力および変状を計測した。その結果、従来のシールド機設計時の想定荷重50kNに対する十分な強度と掘進距離5km相当の耐久性を確認した。

(3) 引抜き挿入時の作動性

本システムでは、ビット交換が必要となった時、スライド機構によりビットをシールド機内に引抜き、交換後切羽に挿入する。その際に、ガイドレール内への土砂の混入、ビットの地山への食い込み、裏込め材の充填等により、ビットの引抜き挿入に支障がきたす可能性があることから、その作動性と必要引抜き挿入力を要素実験で確認した。結果として、引抜き力は10~20kN程度、挿入力は5~10kNであり、引抜き挿入には問題はなかった。

(4) 止水性能

スライド機構には切羽からの地下水の浸入を防ぐためのゲートが設置されている。ゲートにはシールド掘進時およびビット交換時に作用する地下水圧に耐える止水性が要求される。そこで、耐水圧試験を実施し、ゲート部シールの止水性能を確認した。ここでは、東京湾横断道路での水圧を目標とし、600kPaまで加圧したが、ゲート部シールには変形、漏水は発生しなかった。

(5) ビット交換時間

ビット交換の主な作業手順を以下に示す。

- ① ビット収納箱等設置
- ② ビット引抜き、充填材注入
- ③ ビット交換
- ④ ビット挿入
- ⑤ ビット収納箱等撤去

上記、1サイクルの交換作業時間は、45分程度であることを確認した。

4.1.3 適用範囲の整理

要素実験および川崎市で実施した実証施工を踏まえて、スライド式ビット交換

4. 研究成果の概要

4.1 スライド式ビット交換システム

4.1.1 概要と特徴

スライド式ビット交換システムは、シールド機内部からカッタービットを複数回、最外周まで交換が可能であり、随時土質に適合したビットを供給できるシステムである。その構造は、図-1に示すようにスポークに沿ってガイドレールに納められたビットホルダーを引き抜くことにより、ビットをシールド機に取り込み、内部で新たなビットに交換できるようになっている。

本システムには、以下のような特徴がある。

- ① シールド機内でビット交換が可能
- ② ビット交換に補助工法が不要
- ③ ビット交換の場所を選ばない
- ④ 複数回、最外周まで交換が可能

ビット交換が必要となる砂礫層や長距離施工で、本システムを採用することにより、従来のビット交換に比べ、工期短縮、コスト縮減および安全性の向上が期待できる。

4.1.2 基本性能の整理

本システムの実用化にあたり、実施された要素実験等の結果に基づき基本性能の整理を行った。

(1) 整理項目

本システムの実用化のため、ビット交換に係わる各施工状態（掘進時、ビット引抜き時、ビット交換時、ビット挿入時）での基本性能を以下の点について整理した。

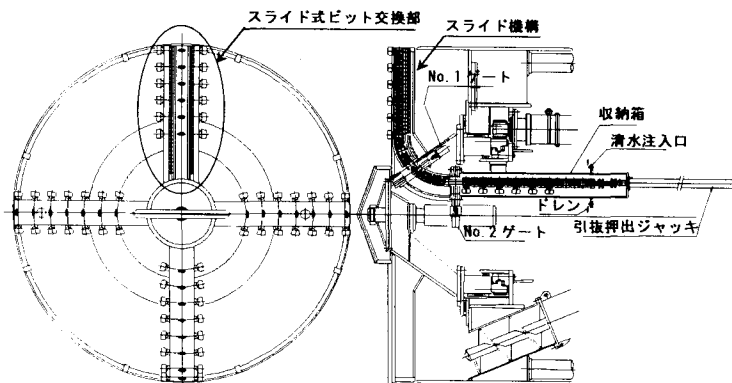


図-1 スライド式ビット交換システムの構造

システムの適用範囲を以下に整理した。

- ◆適用土質：粘土，シルト，砂，砂礫
- ◆掘進延長：延長 5 kmの長距離施工に適用可能
- ◆耐水圧：水圧600kPaまで適用可能
- ◆掘削外径：φ 3.0m以上
- ◆掘削形式：泥水，土圧式シールド機に適用可能
- ◆カッター支持方式：中央支持，中間支持

4.1.4 要素技術の検討

スライド式ビット交換システムを効率的に活用するためには、ビットの摩耗状況を把握し、交換時期の適正化をはかる必要がある。

そこで、ビット摩耗検知装置として現在開発中の電磁誘導型摩耗センサに着目し、現場装着実験によってその性能を評価し、実用性を検討した。

電磁誘導型摩耗センサの原理は、ビットの摩耗量を磁気抵抗の変化として電圧で捉え、摩耗量に変換するもので、トランスの磁気鉄芯がビットの摩耗と共に摩耗すると、磁気回路抵抗が増大し、電圧が低下する関係を利用して摩耗量を把握する方法である。検知装置は図-2に示すように、カッタースポーク上のビット間にビットと同じ高さになるように設置し、検知装置の模擬ビット部の摩耗からビット摩耗量を推測する。

模擬ビットの摩耗量と出力電圧の関係を事前に把

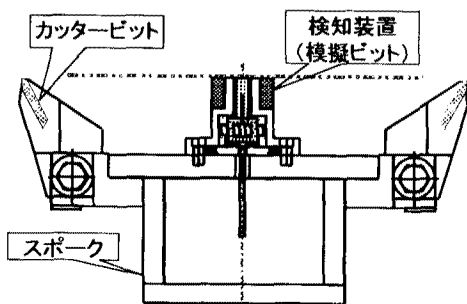


図-2 ビット摩耗検知装置断面図

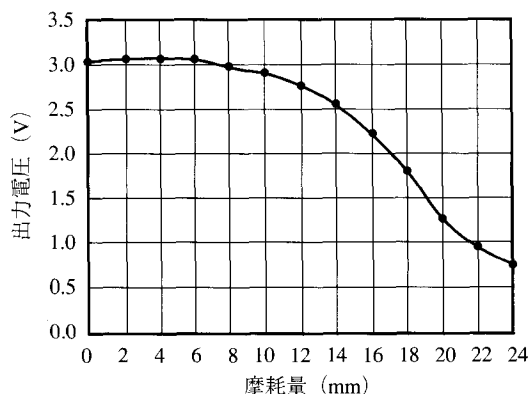


図-3 摩耗量と出力電圧の関係

握しておく必要があったため、室内実験で模擬ビットを機械的に切削し、出力電圧を計測した。その結果を図-3に示す。

摩耗検知装置の装着実験はφ 3,500mmの下水道工事で行い、上流側250m掘進時とさらに下流側500m掘進時で出力電圧から推定した摩耗量と実測値を比較し、摩耗検知装置の性能を評価した。検知装置および実測による摩耗量の比較を表-1に示す。

表-1 検知装置と実測による摩耗量

	検知装置摩耗量 (mm)	実測摩耗量 (mm)
下流側	14.2	12.6
上流側	16.6	16.6

検知装置摩耗量の誤差は、下流側掘進完了時点で+1.6mm、上流側（最終掘進完了時点）で±0mmと小さく、ビット摩耗量の推定性能は高いと言えます、実用化は十分可能と判断できる。

4.2 電食発進到達工法

4.2.1 電食発進到達工法の概要

食塩水等の電解液の中に入れた金属に電流を流すと、金属中の電子が放出されイオン化した金属が溶液中に解け出す。これを電食（アノード溶解）と呼ぶ。溶解した鉄イオン Fe^{2+} は、電解液中で水酸化鉄 $Fe(OH)_2$ （鏽）となり回収可能となる（図-4参照）。

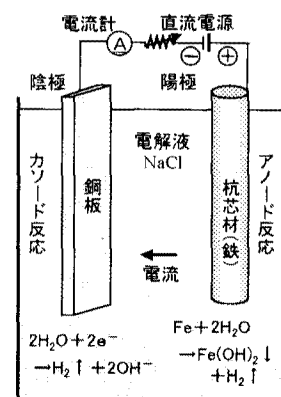


図-4 電食の概要

電食発進到達工法は、この原理を利用して、図-5に示すように柱列式地下連続壁工法等による土留め壁の杭芯材をシールド機で直接切削できる状態まで溶解、薄肉化し、鏡切り工と補助工法を省略して発進到達を可能とする工法である。電食部の杭芯材は矩形断面とし、その内側に設置した陰極内管（銅板）との間に電解液を循環させ、通電して電食を進行させる。

4.2.2 電食の制御

電解液中の鉄に、1Aの電流を1時間通電すると1g

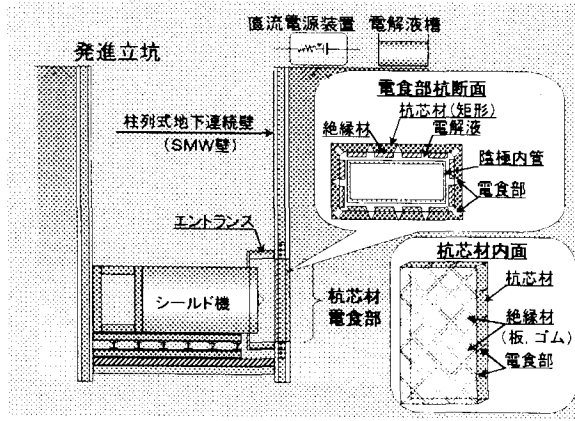


図-5 直接発進到達工法概要図

解け出す。シールド通過部分の杭芯材をすべて溶解するには、計算上 $\phi 3\text{m}$ クラスの断面の場合は、1ヶ月以上の電食期間を要し、工程に支障をきたす恐れがあるため、電食期間を短縮する必要がある。

本工法では、電食を溝状に進行させ、鋼材を不連続な破片状にすることで、電食量を低減し期間の短縮を図ることとした。

(1) 絶縁材の選定

鋼材に絶縁材を貼付あるいは塗布して、電食範囲を限定する必要がある。しかし、絶縁材の材質によっては、電食の進行と共に絶縁材端部が欠落したり、剥がれたりするため、電食部の制御が困難となる。そこで、絶縁材に適した材料を要素実験によって確認した。実験には、塗料、接着剤、磁器、ゴム、木を使用した。

実験の結果、絶縁効果、加工性、耐久性、コスト等から総合的に判断して、木もしくはゴムが絶縁材として適していることが明らかとなった。

(2) 絶縁材の間隔

絶縁材間の電食部の幅（電食溝幅）によって、電食量および電食効率が変化する。電食溝幅が狭いと電食量は少なくなるが電食効率が低下し、広いとその逆の状況となる。

最適な電食溝幅を設定するため、要素実験を行った。実験は平鋼板を使用し、溝幅を5, 10, 15mmとして行った。電食進行状況の観察の結果、溝幅が10mm以上では、腐食生成物の堆積がなく、電食進行深さや均一性が良好であった。しかし、溝幅を15mm以上とすると、電食量が多くなり期間も長くなることから、溝幅10mmが最適と判断した。

4.2.3 必要劣化度の把握

シールド機で直接杭芯材を切削するためには、電食部の残厚をおよそ3mm以下とする必要があるが、

矩形芯材の内部で進行する電食の状況を把握する方法が確立されていない。電食部の残厚を直接計測することは困難なため、電食電流量から杭芯材の直接切削可能状態（必要劣化度）を把握することとした。

必要劣化度の把握実験は、実際の立坑で使用する芯材と同等の断面を有する矩形芯材を使用して行い、必要劣化度に達したときの電流量を把握した。

絶縁材間の電食部の進行は、図-6に示すように電食溝幅で鉛直に進行していくのではなく、円弧状となる。電食溝幅の範囲を「仮想電食範囲」とすると、仮想電食範囲の電食電流量に対して、実際の電食範囲を溶解するために必要な電流量は、体積の増加と電食効率の低下から約1.7倍となることが明らかとなった。

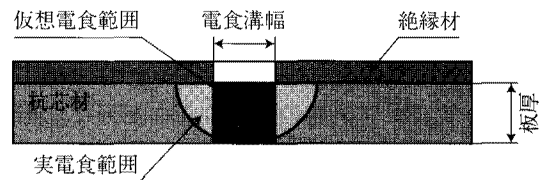


図-6 電食進行概要図

4.2.4 切削性の評価

要素実験で得た必要劣化度に対する電食電流量の確認と電食した杭芯材の切削性を評価するために、実物大の模擬壁を製作して、電食およびシールド機による切削実験を行った。切削性については掘進速度、切削トルク、総推力のデータから評価した。

実験に用いた模擬壁の諸元およびシールド機の仕様は以下のとおりである。

① 模擬壁諸元

- 形状：外径 $\phi 3,000\text{mm}$ 、壁厚1.0m
- 充填材：ソイルモルタル ($\sigma = 0.5 \sim 3\text{N/mm}^2$)
- 杭芯材：矩形管 ($\square\text{-}400 \times 200 \times 10$) SS400

② シールド機仕様

- 掘削外径： $\phi 2,750\text{mm}$ （泥土圧式シールド機）
 - 総推力：600kNジャッキ×6本
 - カッタートルク：336.6kN・m
- 模擬壁の切削実験状況を図-7に示す。

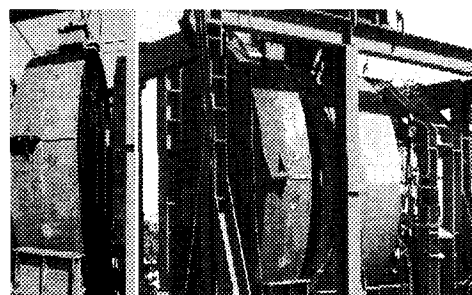


図-7 模擬壁切削実験装置

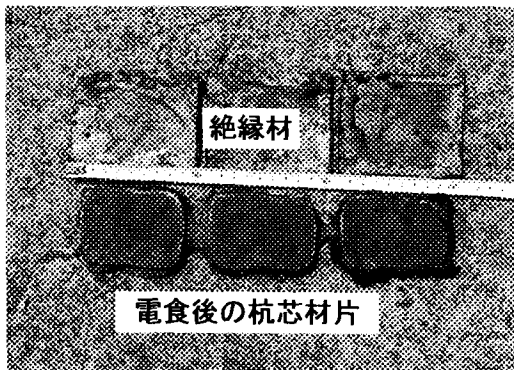


図-8 模擬壁の電食状況

杭芯材は要素実験で設定した電気量（仮想電食範囲に対して1.7倍の電気量）を通電して電食を行った。電食完了時に杭芯材上部をサンプリングして電食の進行状況を確認したところ、図-8に示すように絶縁材によって非電食部と電食部が制御され、電食溝部は所定の電食量（残厚3mm以下）を満足していた。

模擬壁切削時の掘進速度とカッタートルクおよび総推力の関係を図-9に示す。掘進速度が5～10mm/minの切削トルクは9～10kN・m、推力は150～160kNの範囲にあり、シルト粘土を対象とした地盤を掘進する場合よりも小さく、切削性は良好であった。

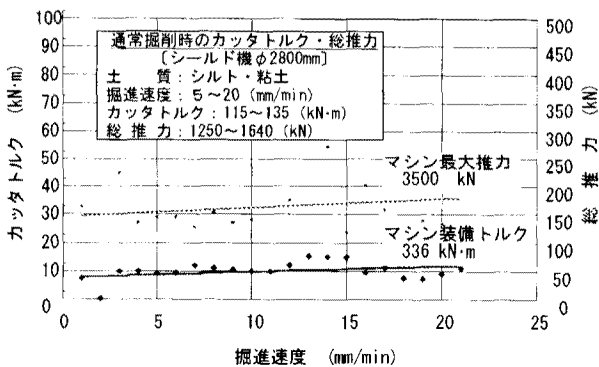


図-9 模擬壁切削特性

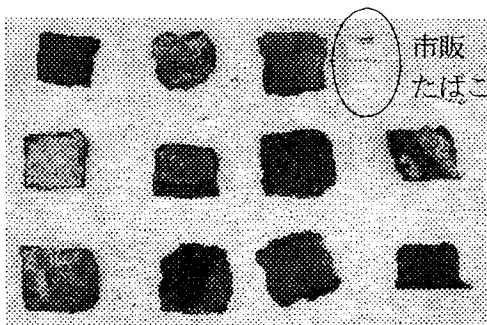


図-10 杭芯材の切削片

た。また、これは通常のシールド機仕様で切削が可能なことを示している。一方、掘進速度が10mm/minを越えるとカッタートルクにバラツキが生じることから、電食壁切削時の掘進速度は10mm/min以下が望ましいと言える。

切削した杭芯材は図-10のように破片状になっており、残土搬出に支障はないと判断される。しかし、杭芯材のコーナー部の一部は電食不足により切削片が連続していた。

4.2.5 地下埋設物への影響検討

シールド工事は都市部における施工が多く、立坑周辺に埋設物が近接している場合が多い。本工法では電食時に杭芯材に電流を流すことから、迷走電流が発生する可能性がある。迷走電流は近傍の地下埋設物に悪影響を及ぼす場合があることから、立坑と埋設管をモデル化したフィールド実験を行い、迷走電流の影響度を判定した。

実験モデルを図-11、条件を以下に示す。

電食管と埋設管の離隔：約1m

電食管の電流：200Aと300A

測定項目：SGP管（埋設物）の電位変化量

電位変化量の測定結果は、+1mV～-3mVで、電気学会が定める安全基準値50mVを大きく下回る値であり、金属性の近接埋設物に与える影響は無いと判断される。

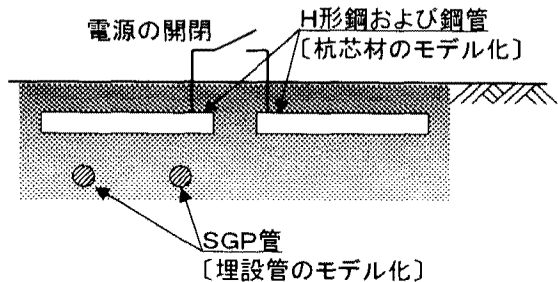


図-11 迷走電流実験モデル図

4.2.6 実証立坑による検証

柱列式地下連続壁工法により立坑土留め壁を築造する場合、通常杭芯材はH形鋼が使用される。本工法では電食部分に矩形管、その上下にH形鋼を継いだ杭芯材を使用する。この継ぎ杭はH形鋼に比べ浮力により建て込み時の抵抗が大きいと予測される。

本研究では、9.5mの杭芯材を用いて実際の立坑を築造し、柱列式地下連続壁（SMW）への適用性を検証した。さらに、杭芯材の電食後、シールド機での直接切削による切削性と残土搬出の検証も併せて行った。

- (1) 柱列式地下連続壁への適用性
実証立坑の概要を以下に示す。

杭 芯材：□-400×200×10, 6本

杭 長：L=9.5m, 電食部2.8~3.7m

使用機械：SMW杭打ち機

(三点式クローラークレーン)

杭芯材は現地で電食部とH形鋼を接続し、SMW機で削孔・混練り後建て込みを行った。実験では、事前対策として最下部の削孔攪乱を十分行うと共にソイルモルタルの粘性を低減させるために水/セメント比を変えた。

結果として、6本とも自重による建て込みが可能であったことから、柱列式地下連続壁への適用は可能であると考えられる。

- (2) 電食および切削性の検証

模擬壁による切削実験のときと同様に、杭芯材は仮想電食範囲の1.7倍の電流を流して電食を行った後、シールド機（模擬壁切削実験と同一）で直接切削を行った。

切削に伴うカッタートルクの値は模擬壁のときに比べ4~5倍の40~50kN・m、推力は約2倍の360~380kNであったが、通常のシールド機の装備で切削が可能な範囲であった。

切削片の大きさは約80×80mmで、残土搬出には支障はなく、また連続した切削片は確認されなかった。

スライド機構を構成する部材の強度と耐久性、引抜き挿入時の作動性、止水性能、ビット交換時間について整理した。

- 2) 適用範囲の整理

基本性能の確認と実証を目的に行った実験等の結果から本システムの適用範囲を整理した。

- 3) 要素技術の検討

ビット摩耗状況を推定し、交換時期の適正化を図るため、開発中の電磁誘導型摩耗センサに着目し、その実用性を検討した。

- (2) 電食発進到達工法

- 1) 電食の制御

杭芯材の電食量を低減し、工期短縮を図るために絶縁材を杭芯材に貼付することにより電食範囲を制御した。

- 2) 必要劣化度の把握

シールド機で直接切削が可能となる電食進行度を電流量から把握した。

- 3) 切削性の評価

実物大の模擬壁の切削実験によるカッタートルクと推力の値と切削片から切削性を評価した。

- 4) 地下埋設物への影響検討

立坑と近接埋設物をモデル化したフィールド実験を実施し、迷走電流による影響を明らかとした。

- 5) 実証立坑による検証

実際の立坑を築造し、柱列式地下連続壁への適用性と電食および切削性を検証した。

5. まとめ

本研究では、市街地におけるシールド工事が抱える周辺環境への影響、立坑用地の確保や安全性等の諸問題の解決もしくは低減を目指して、スライド式ビット交換システムと電食発進到達工法の実用化に向けた検討および検証を行ってきた。

その研究内容を整理すると以下ようになる。

- (1) スライド式ビット交換システム

- 1) 基本性能の整理

本研究を通じて、スライド式ビット交換システムと電食発進到達工法は十分実用化が可能であることが明らかになった。また、ケーススタディでは従来の発進方法に比べ約20%のコスト縮減が可能となる結果も出ている。しかし、杭芯材コーナー部の電食不足による切削片の連結、電食進行状況の把握方法や電食杭芯材の製作性向上等、課題も残されていることから、今後要素実験や実証施工を通じて、さらに技術の確立を目指してして行く必要が。

●この研究を行ったのは

研究第二部長	中里 卓治
研究第三部総括主任研究員	本重 信宏
研究第二部研究員	田中 孝
研究第二部研究員	中西 康博
研究第二部研究員	岸田 裕

●この研究に関するお問い合わせは

研究第二部長	中里 卓治
研究第三部総括主任研究員	本重 信宏
研究第二部研究員	田中 孝
研究第二部研究員	岸田 裕