

技術論文

高炉スラグ微粉末の特性を活かした高炉セメント関連製品

Slag Cement-related Products Which Utilized a Property of the Ground Granulated Blast Furnace Slag

前 田 悦 孝*
Yoshitaka MAEDA

抄 録

高炉スラグ微粉末は、コンクリートの耐久性や施工性の向上、環境負荷低減などに貢献できる潜在水硬性の結合材である。主な用途である高炉セメント B 種には、高炉スラグ微粉末 4000 相当品が 40 ～ 45% の割合で使用されているが、粉末度や混合割合を調整することにより、更に特長を活かした用途を展開できる。その一例として、高炉スラグ微粉末 6000 を適用したプレストレストコンクリート構造物、高炉スラグ微粉末 3000 を利用した低熱高炉セメントおよび高い流動性を有するモルタル製品の特性や性能を紹介した。

Abstract

The Ground Granulated Blast furnace Slag (GGBFS) is the latent hydraulic materials which improve the durability and workability of the concrete while contributing to environmental load reduction. The main use is an admixture of the Portland Blast furnace Slag Cement, and GGBFS4000 having a specific surface area of approximately 4000cm²/g is used in 40-45% of substitution ratio. GGBFS is used more effectively by fineness and a substitution rate changing. This paper shows the prestressed concrete using GGBFS6000, Low heat Blast furnace Slag Cement using GGBFS3000 and high flow mortar.

1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、高炉による製鉄プロセスで副産される溶融高炉スラグを水で急冷し、乾燥、粉碎したものである。急冷したことにより 100% 近いガラス質となっており、アルカリなどの刺激剤を受けて硬化する潜在水硬性を示す。高炉スラグ微粉末とポルトランドセメントを混合したものが高炉セメントである。

高炉セメントは、長期強度が高く、アルカリシリカ反応や塩分浸透の抑制に優れており、土木構造物を中心に普及してきた。同時に省資源・省エネルギー型のセメントでもあり、セメント製造時の炭酸ガス排出量を大幅に削減できる“環境にやさしいセメント”として、グリーン購入法をはじめ、各方面で更なる利用拡大に向けた取り組みが推進されている。

近年、高炉セメントの販売量は、1000 万 t 前後で推移しており、国内セメント需要の約 1/4 を占めている。高炉スラグ微粉末の主な用途は高炉セメントの混合材である

が、コンクリート用や建材向けにも年間約 43 万 t が販売されており、その特性を活かした差別化商品の展開も進められている。本稿では、その中から高耐久性プレストレストコンクリート構造物部（以下、高耐久性 PC 構造物）、低熱高炉セメントおよび高流動モルタル製品の特性を紹介する。

2. 高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末の種類

高炉セメントは、表 1 に示すように 3 つの品種が JIS R 5211 “高炉セメント” で規格化されているが、汎用セメントとして流通しているのは高炉スラグ微粉末の割合が 40 ～ 45% の高炉セメント B 種（以下、BB）である。

表 1 高炉セメントの規格 (JIS R 5211)
Specification of portland blast furnace slag cement

| Class | Amount of BFS (%) |
|-------|-----------------------|
| A | Over 5, less than 30 |
| B | Over 30, less than 60 |
| C | Over 60, less than 70 |

* 日鉄住金高炉セメント(株) 商品・品質管理部 部長 博士(工学) 福岡県北九州市小倉北区西港町 16 番地 〒 803-0801

表2 高炉スラグ微粉末の規格 (JIS A 6206)
Specification of ground granulated blast furnace slag

| Class | Specific surface area (cm ² /g) |
|-------|--|
| 3000 | Over 2750, less than 3500 |
| 4000 | Over 3500, less than 5000 |
| 6000 | Over 5000, less than 7000 |
| 8000 | Over 7000, less than 10000 |

高炉スラグ微粉末（以下、GGBFS）の品質は、JIS R 6206 “コンクリート用高炉スラグ微粉末”で規定されており、表2に示すように比表面積によって定まる4つの種類がある。比表面積が大きいほど反応性が高く、強度や耐久性向上などの目的に応じて混合率を調整して使用されている。

最も生産量が多いのはGGBFS4000であり、その殆どはBBの混合材として利用されている。GGBFS6000は初期強度を必要とするコンクリート製品などに使用され、GGBFS8000はその細かさを活かして充填剤などに利用されている。一方、マスコンクリートの温度上昇抑制や収縮を小さくする場合には比表面積が小さい方が適しており、2013年のJIS改正で新たにGGBFS3000が規格化されている。

3. 高炉スラグ微粉末6000を用いた高耐久性PC構造物

高炉セメントは長期強度が良く伸びるものの、普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメント（以下、早強ポルト、記号H）に比べて初期の強度発現は遅れる。このため初期強度を必要とするプレストレストコンクリート（以下、PC）の塩害対策やアルカリ骨材反応抑制には、早強ポルトの一部をGGBFS6000で置き換えた高耐久性PC構造物（略称：BSPC）が実用化されており、橋梁上部工を中心に300を超えるPC構造物に適用されている。その特性に関して近年報告されている研究成果の一部を紹介する。

3.1 圧縮強度

工場製作されたPC桁のコンクリートについて、脱型時から材齢11年まで継続的に圧縮強度を調査した結果を図1²⁾に示す。早強ポルトとGGBFS6000の合計に占めるGGBFS6000の割合は50%である。供試体は、PC桁と同一条件で蒸気養生し、材齢1か月から沖縄県北部西海岸の飛沫帯に暴露した。後述3.2の塩分浸透のデータも一連の調査²⁾で得られたものである。BSPCの初期強度は早強ポルト単味とほぼ同等で、プレストレス導入に必要な強度（35N/mm²以上）を満足しており、暴露後の長期強度増進も良好であることがわかる。

3.2 塩分浸透抵抗性

コンクリート中の鋼材は、鋼材表面の塩化物イオン濃度が一定レベルを超えると不動態が破壊し、水と酸素が供給

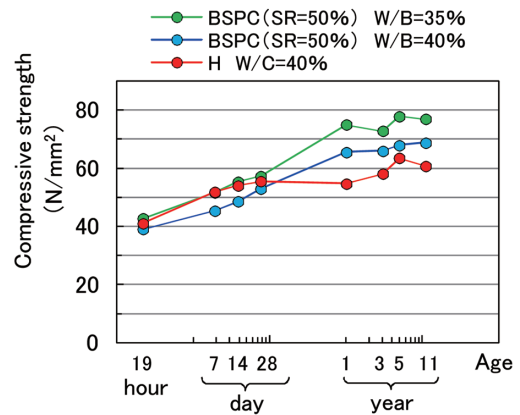


図1 曝露供試体の圧縮強度²⁾
Compressive strength of exposed specimen

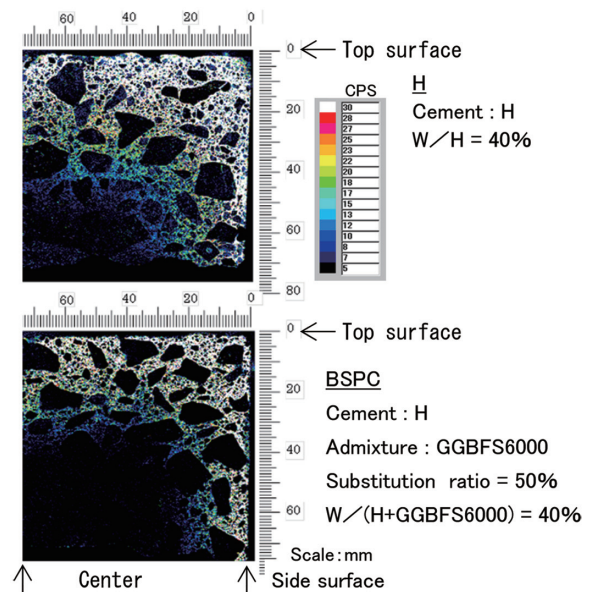


図2 塩分浸透状況（暴露11年）²⁾
Distribution of chlorine by EPMA (11years)

されれば腐食が進行する。この劣化現象は塩害と呼ばれ、放置すれば構造部材としての耐力が低下する。飛来塩分の多い海洋環境や、塩化カルシウムや塩化ナトリウムなどの路面凍結防止剤の散布量が多い地域では被害が生じやすい。

図2²⁾は、前述の飛沫帯に11年間暴露した供試体断面（寸法15cm×15cmの1/4）の塩分浸透状況をEPMA（電子線マイクロアナライザー）で測定した画像である。白い部分は塩素濃度が高いことを示している。塩分は上面および側面から浸透しており、早強ポルト単味のHの塩分浸透深さは40～50mmに達しているが、BSPCの浸透深さは20～35mmに抑制されている。

図3³⁾は、上面および底面をエポキシ樹脂で被覆し、両側面のみ解放した供試体（寸法10cm×10cm）の暴露10年の塩分分布である。Hは暴露年数に伴って表面付近の塩分量が増加するとともに内部への浸透量が増加している。供試体右側の塩分浸透深さは、暴露10年で40mm以上に

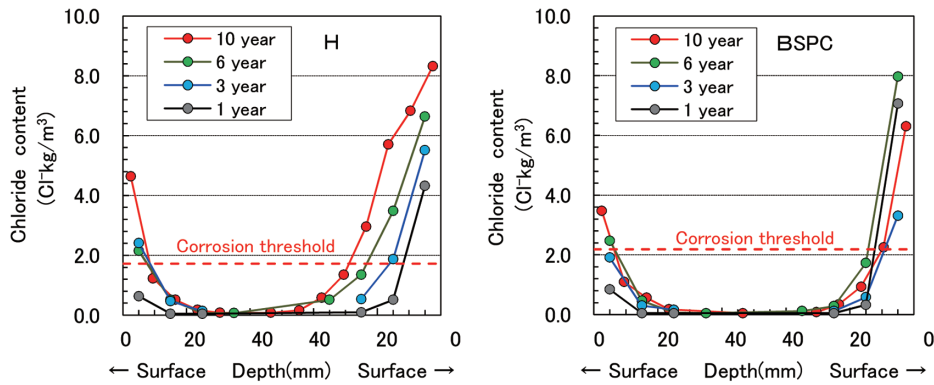


図3 供試体断面の塩分分析結果（暴露10年）³⁾
 H : W/H = 40% BSPC : W/(H+GGBFS6000) = 40%
 Analysis results of chloride



写真1 ASRを促進させたPC梁試験体の暴露状況
 Exposure of the PC beam specimen which accelerated ASR

達し、表面から30mmの範囲は鋼材腐食限界濃度を超過している。これに対してBSPCでは、表層部に塩分が留まり、暴露年数が経過しても塩分浸透深さは約30mmから変化していない。

3.3 アルカリシリカ反応の抑制効果

ある種のシリカ質鉱物は、セメントから溶出するアルカリ成分と反応してアルカリシリカゲルを生成する。このゲルは吸水して膨張する性質があり、これらの鉱物を比較的多く含む石や砂（以下、反応性骨材）を使用したコンクリート構造物では、その膨張圧によって有害なひび割れが発生する。この劣化現象はアルカリシリカ反応（以下、ASR）と呼ばれ、膨張圧によって内部鉄筋が破断することもあり、塩害との複合作用では構造物に深刻な損傷を与える。

高炉スラグ微粉末はASRを抑制することが知られており、その抑制効果は、アルカリ量の希釈、スラグの水和物によるアルカリの固定化、水和組織の緻密化による水やアルカリイオンの移動速度の減少などによるものと考えられている。PC構造物は単位セメント量の多い高強度コンクリートが使用されるため、アルカリ量が増加しやすく、BSPCはPC構造物のASR対策としても有用である。

写真1は、BSPCのASR抑制効果の確認を目的として反応性骨材を用いたPC梁試験体（幅150mm×高さ300mm、長さ3000mm）を長期暴露している様子である。この試験ではASR促進のためNa₂O換算で10kg/m³のNaClを添加している。

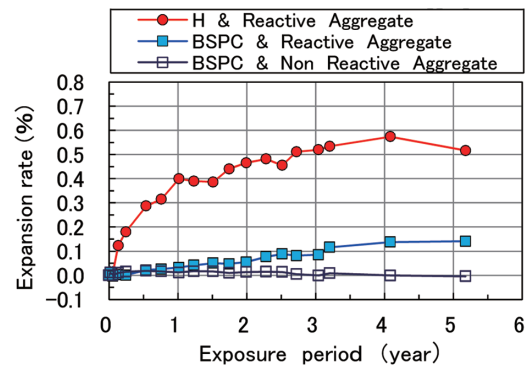


図4 PC梁試験体の膨張率⁴⁾
 Expansion of the PC beam specimen

PC梁は鋼材の配置が下縁に偏心しているので正常な梁でも少し上側に反るが、早強ポルト単味（H & Reactive Aggregate）の梁ではASRによる膨張で反りが更に大きくなっている。図4⁴⁾は、軸方向膨張率の測定結果である。早強ポルト単味では暴露開始直後から著しい膨張を生じている。厳しい促進条件のためBSPCの梁にも緩やかな膨張が認められるが、その膨張率は暴露7年の時点で早強ポルト単味の1/3程度に抑制されている。

図5⁴⁾は、3年3か月経過した梁の載荷試験結果²⁾である。ASRが生じた早強ポルト単味のPC梁では耐荷力が約20%程度低下しているが、BSPCでは耐荷力の低下は見られない。ただし、BSPCのPC梁は3年3か月経過後も膨張が継続しており、その収束段階での耐荷力の検証が必要である。

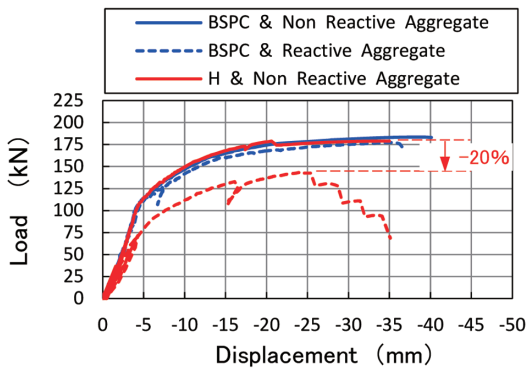


図5 PC 梁試験体の荷重試験結果（暴露3年3か月）⁴⁾
Loading experiment results of the PC beam specimen

4. 低熱高炉セメント（B種）

セメントの硬化は水和熱を伴う発熱反応である。このためコンクリートの内部温度は一時的に上昇し、その後次第に降下する。部材厚が大きいマスコンクリートでは温度上昇量が大きくなるので、温度変化に伴う膨張・収縮ひずみも増大し、ひび割れが発生しやすくなる。この現象は温度ひび割れと呼ばれ、発生時期やひび割れ幅には、打設間隔、拘束条件、外気温などの様々な要因が影響するが、抑制対策の一つに水和熱の小さいセメントの使用が挙げられる。

高炉セメントの水和熱は、高炉スラグの分量が多いほど、また、その比表面積が小さいほど、小さくなる。一般のBBにはGGBFS4000相当品が40～45%の割合で使用されており、BBとしての比表面積は3700～4200cm²/g程度である。これに対して低熱高炉セメント（以下、LBB）はGGBFS3000相当品を約55%の割合で配合しており、その比表面積は3100～3300cm²/gである。LBBは西日本で100件以上のダムに施工されてきた“ダム用高炉セメントB種”に改良を加えたもので、この10年間で、橋脚や橋台、上下水道施設、一級河川の水門や堰など、約60の大型構造物に使用されている。

図6と図7は、圧縮強度とコンクリートの断熱温度上昇の測定結果の一例である。LBBの断熱温度上昇は、一般のBBや中庸熟ポルトランドセメント（以下、中庸熟ポルト、記号M）に比較して、温度上昇速度が緩やかで、最終断熱上昇量は20～30%程度低減できる。発熱を抑制しているため強度発現は遅れるものの、材齢56日でBBやMの材齢28日強度と同程度に達する。マスコンクリートでは、設計材齢を56日として施工することが多く、LBBの特長を活かすために設計材齢を28日から56日に変更して施工されるケースもある。

図8はFEM 3次元温度応力解析（1／4モデル）で推

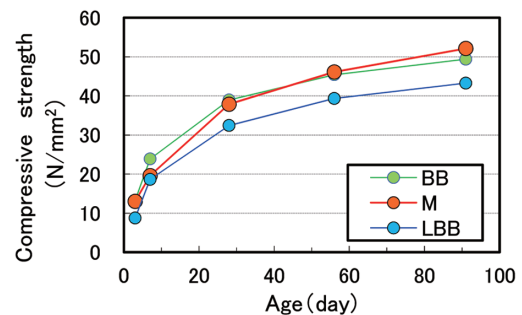


図6 圧縮強度試験結果
Test results of compressive strength

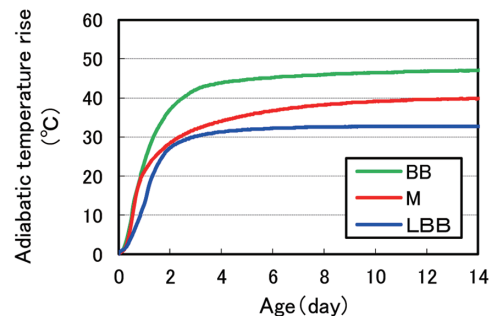


図7 断熱温度上昇試験結果
Test results of adiabatic temperature rise

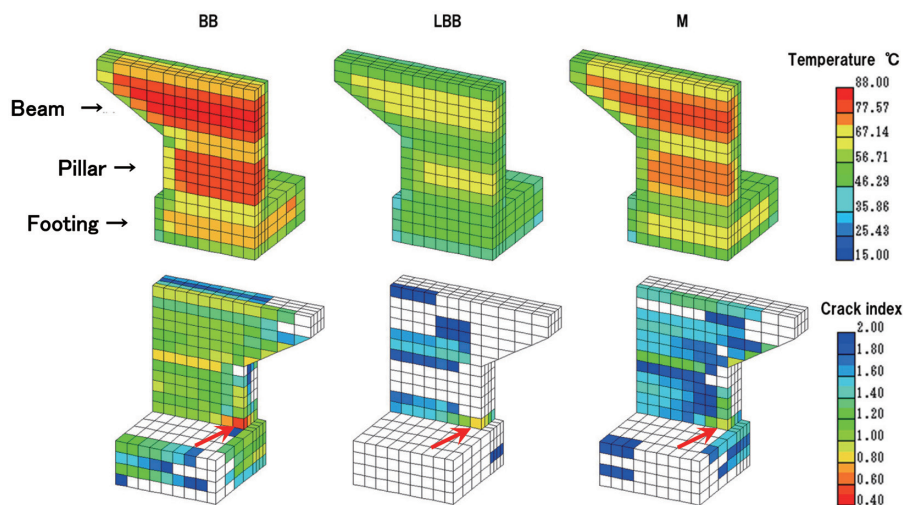


図8 温度応力解析結果の一例（施工期間 7月～8月）
Example of temperature stress analysis

定したT橋脚（部材厚：3m 梁部天端の幅：18m）の内部最高温度（上段）と表面の最小ひび割れ指数（下段：引張強度／温度応力）の分布である。BB, M, LBBを用いた3ケースについて、設計基準強度：30N/mm²（管理材齢28日）、施工期間：7月～8月、3リフトに分けて打設する条件で解析した。

BBとMでは橋脚内部の最高温度が80℃以上に達するが、LBBでは70℃未満に抑制できる結果となっている。ひび割れ指数は、応力が集中しやすい柱部の立ち上がり位置が最も厳しく、いずれも図中の赤矢印の要素で最小となり、1.0を下回った。LBBのひび割れ指数は、この周辺を除けば1.0以上であり、2.0以上（白）の範囲は最も広く、M同等以上の性能を示している。

LBBは初期材齢の強度発現が緩やかなため、湿潤養生期間は長くなるものの、ASR抑制効果や遮塩性はBBと同等であり、高炉スラグの分量が多いので更にCO₂を削減できる。まさに、マスコンクリートのひび割れ抑制やASR抑制、環境負荷低減の効果をさらに強化し、汎用の高炉セメントから差別化した低熱型のセメントである。

5. 高流動モルタル製品

高炉スラグ微粉末は初期の水和反応が緩やかであるため、凝結や初期強度発現が遅れる性質を利用して、フレッシュ状態（硬化前）の流動性の向上に活用されている。スラグ微粉末の置換率が増加すると降伏値や塑性粘度は低下する傾向があり、化学混和剤との組み合わせにより流動性の保持時間を長くすることもできる。

この特性を活用した代表的な製品には、床下地調整材として高いセルフレベル性を発揮する“エスレベル”シリーズがある。この製品は、自己流動による水平面の形成、6～9時間におよぶ長時間の流動性保持を発揮し、人手と熟練を要する金ごて仕上げに比べて、作業性を大きく改善し、かつ平滑性に優れた床面を確実に施工できる。フォークリフトが走行する工場床でも数多くの実績を有する（写真2）。

また、この技術はセメント系グラウト材の開発に応用さ



写真2 エスレベル施工後の平滑性
（エポキシ樹脂で塗装）
Flatness of the floor surface using S-LEVEL
(the surface is painted with epoxy resin)

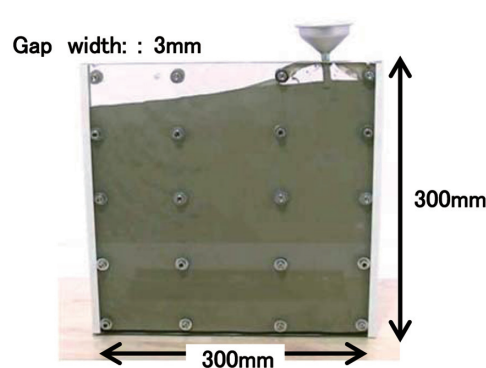


写真3 自己流動による間隙への充填状況
Gap filling by the self-fluidity

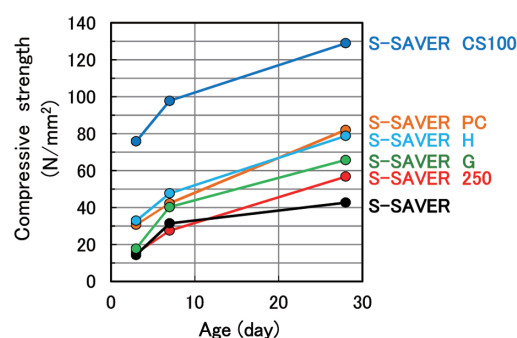


図9 エスセイバーシリーズの強度発現性
Compressive strength of S-SAVER series

れ、“エスセイバー”シリーズとして展開している。優れた充填性（写真3）と可使時間の長さに加えて、無収縮性、ノンブリーディング性のもとより、高レベルの強度発現性を有している。用途は、各種構造物の間隙充填をはじめ、鋼板巻き立て工法、ブレース工法等の耐震補強や鋼管充填補強、機械基礎、高流動コンクリートとの組み合わせによる充填工法、地盤沈下に伴う空洞充填工法など幅広く補修・補強分野で実績を積み重ねている。

また、従来は樹脂注入分野であったミリオーダーの小間隙充填ニーズも多く、1mm程度の隙間も充填できるエスセイバー PCの実績が増えている。更に、充填性、保持時間、無収縮性等は同等で、型枠からの漏出防止性能を向上させたエスセイバー 250も開発され、製品品質のうち、圧縮強度の側面だけでも、40～120N/mm²程度の範囲を網羅し（図9）、多種多様なニーズに対応できる製品を揃えている。

6. おわりに

高炉スラグ微粉末は、主に高炉セメントの混合材としての用途を通して、コンクリート構造物の長寿命化や環境負荷低減に貢献している。しかし、その優れた特長を発揮させるためには、初期養生に手間をかけ、強度発現が遅れることに対する設計・施工上の配慮が必要である。

日鉄住金高炉セメント(株)は、高炉セメント専門メーカーとして長年培った技術に基づいて、今後も高炉セメントお

よび関連製品の適正な普及拡大に努めるとともに、継続的な研究開発を通して高炉スラグ微粉末の価値の向上に貢献していく。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会編：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成 26 年版）。2014, p. 51
- 2) 塩害に対応した高耐久性PC橋の建設に関する研究委員会編：屋嘉比橋における塩害対策工の追跡調査報告書。2012, p. 15
- 3) 塩害に対応した高耐久性PC橋の建設に関する研究委員会編：屋嘉比橋における塩害対策工の追跡調査報告書。2014, p. 34
- 4) 松山高広 ほか：プレストレストコンクリート技術協会 第 20 回シンポジウム論文集。2011, p. 1-4



前田悦孝 Yoshitaka MAEDA
日鉄住金高炉セメント(株)
商品・品質管理部 部長 博士(工学)
福岡県北九州市小倉北区西港町16番地 〒803-0801