

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760347

研究課題名(和文)電気防食効果を有する高機能塗装システム

研究課題名(英文) New Coating System with a Function of Galvanic Anode System Cathodic Protection for RC Structures

研究代表者

山口 明伸(YAMAGUCHI TOSHINOBU)

鹿児島大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：50305158

研究成果の概要(和文)：本研究は、犠牲陽極方式の電気防食工法を、腐食因子の浸透を抑制するための塗装としての役割に防食効果を加えた「新しい高機能塗装」ととらえ、その適用性について検討したものである。その結果、犠牲陽極材として用いる溶射金属種類とその表面処理方法、環境条件、対象構造物の劣化程度等が、犠牲陽極方式の電気防食効果に与える影響を明らかにするとともに、犠牲陽極方式電気防食工法をコンクリート構造物の維持管理に効果的に活用する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：A galvanic anode system is one of the ways of cathodic protection used to protect metal from corrosion using galvanic or sacrificial anodes. However, it is so difficult to control the corrosion reaction of sacrificial anode metal in the system that only seldom attempt has been tried for actual concrete structures. In order to apply this system more effectively in the fields of maintenance of concrete structures, electrochemical properties of sacrificial anode metals in several environments must be considered in detail. In this study, considering the system as a new coating system with a function of Cathodic protection, the influence of anode types, environmental conditions and deterioration levels of the concrete structure upon the effect of the system were clarified by experimental examinations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度			
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：維持管理、電気防食、犠牲陽極方式、金属溶射、復極量、防食電流、防食効果

## 1. 研究開始当初の背景

社会資本整備のために構築される各種構造物は、後世に引き継ぐべき大事な社会的資産である。特に、港湾、海岸ならびに外洋に位置するコンクリート構造物には重要なも

のが多く、その長期にわたる健全性の保持は極めて大事であるが、その一方で、これらの構造物は塩害環境という耐久性上極めて厳しい環境にあるために、わが国のみならず諸外国においても数多くの劣化事例が存在し

ている。このため、このような構造物においては、予定供用期間中その耐久性を確実に維持するために、事後保全、予防保全の両面から適切な維持管理を行っていくことが必要不可欠となる。これに対して電気防食工法は、塩害や中性化を受けるコンクリート構造物に対して、その内部鋼材の腐食反応に直接関与してこれを停止させることのできる極めて有力な補修工法であると同時に、本来新設構造物における予防保全的対策としてもその効果が期待できる工法である。

電気防食工法には、「外部電源方式」と「犠牲陽極方式（流電陽極方式）」の2種類に大別されるが、このうち外部電源方式は、直流電源装置から強制的に防食電流を供給するため、構造物の立地環境や劣化状態に応じて防食電流の調整が可能であり、防食効果の維持管理が比較的容易な手法とされている。ただし、設置費用が高額になるため、かなり劣化が進行した「加速期後半」以降の構造物に対する事後保全的な適用に限られてしまっているのが現状であり、加えて、施工ミスにより陽極材と内部鉄筋が一箇所でも短絡してしまうと、その効果が低減するどころか、内部鋼材の腐食を促進させ逆効果になるという危険性を常にはらんでいる。

これに対して、犠牲陽極方式は、文字通り陽極材が鋼材の犠牲となり徐々に溶け出しながら電流を供給するしくみであり、防食期間中に防食電流を調整することは不可能である半面、電源設備の設置も電気代も不要で簡単安価である。短絡事故に対する心配もいらないという利点もある。その防食効果も「劣化期」のような劣化がかなり進行した構造物に対しては十分とは言えないが、「潜伏期」や「進展期」の構造物に対しては十分期待できる。我が国の持つ膨大な社会資本の維持管理を考える場合、電気防食工法の中でも特に安価で施工の容易な金属溶射犠牲陽極方式の利点は極めて大きく、特に予防保全的な維持管理手法において再度その適用性が見直されるべき工法であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、犠牲陽極方式の電気防食工法を、腐食因子の浸透を抑制するための塗装としての役割に防食効果を加えた「新しい高機能塗装」ととらえ、その適用性を検討するとともに、最適システムの構築を目指している。

本研究で検討の対象とする金属溶射犠牲陽極式による電気防食工法は、従来から安価なコストと簡易な施工で適用可能という大きな利点を持つ工法である半面、防食電流の調整が不可能であることに加え、各種環境条件や施工条件に応じた防食電流量が変動することや、陽極材の消耗によっても防食電流が減少していくことが避けられないため、電

気防食工法ではあるものの、その防食効果は短期間でしかも不安定なシステムという認識が一般的である。適用事例も栈橋の鋼管杭などが多くのコンクリート構造物への適用は非常に少ない。

しかしながら、最近、溶射金属や溶射方法の改良、さらには排流端子の配置や封孔処理の実施など、これまでよりも防食効果を高めるための手法が提案され始めており、構造物の条件によってはこれまでよりも防食効果の向上も期待できる状況にある。さらに、消耗が避けられない犠牲陽極材についても、発想を転換すれば潜伏期や進展期の比較的劣化初期の段階から陽極材の消耗度を確認しつつ適切な再施工繰返すことでより確実な維持管理が遂行できるという、ライフサイクルコストの観点からも効果的な手法であるという見方もできる。本研究では、現在でも実際になかなか適用されない犠牲陽極式電気防食システムを予防保全のための高機能塗装システムとして最適化することを目指すものである。このような観点からの検討はこれまでほとんど例がなく、本研究の特色であると同時に、本研究で構築を目指す最適化手法は、今後益々重要となる社会基盤のストックマネジメントにとって極めて重要な提案と成り得え、社会的意義も高い。

## 3. 研究の方法

### (1) 試験体概要

鉄筋コンクリート中型試験体（40×40×7cm）、およびモルタル小型試験体（15×15×5cm）を作製した。中型試験体には鉄筋を、小型試験体にはパンチングメタルを内部に埋設した。なお中型試験体内部には、照合電極も埋設した。いずれもW/C=60%とし、内部鋼材の腐食を促進させるため練混ぜ時に12kg/m<sup>3</sup>のNaClを混入した。28日間の屋内気中養生後に各種犠牲陽極材で溶射を施し、溶射面以外の面はエポキシ樹脂で被覆した。その後所定の環境に設置後、内部鋼材と溶射膜を電氣的に接続し通電を開始した。中型試験体の形状を図-1に示す。

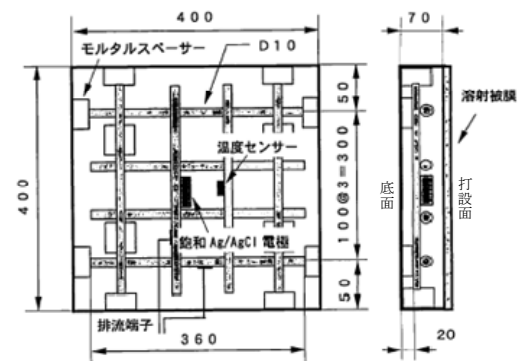


図-1 試験体概要

(2)測定項目

暴露中の試験体の外観観察、防食電流量、復極量等を定期的にモニタリングすることにより、通電特性と分極特性の経時変化を検討した。また、試験終了時に試験体を解体し、実際の防食効果を腐食度で評価した。

(3)影響要因

本研究では、犠牲陽極材、構造物環境、構造物劣化レベルの3つの影響要因について検討を行った。各項目の検討細目は下記の通り。

①犠牲陽極材の種類

表-1の溶射金属および溶射方法を用いた。

表-1 溶射金属と溶射方法

記号	溶射金属	溶射方式
I	Al-Zn-In	アーク溶射
M	Al-Mg	プラズマ溶射
Z	Zn	ガスフレーム溶射
AZ	Al-Zn	常温アーク溶射

②構造物の環境条件

表-2に示す5種類の環境で実施した。なお、写真-1は鹿児島湾の海洋暴露施設である。

表-2 暴露環境

20℃		40℃		海洋 暴露
乾湿 RH	湿潤 RH	乾湿 RH	湿潤 RH	
60⇄90	90	60⇄90	90	



写真-1 海洋暴露場外観

③構造物の劣化レベル

進展期（塩分を混入し、内部鉄筋を予め腐食させる）、加速期（塩分混入後蒸気養生を施し腐食ひび割れを生じされる）の各劣化状態を想定した試験体を製作し、劣化レベルに応じた防食効果の違いを検討した。

4. 研究成果

(1)犠牲陽極材の種類の影響

図-2は、金属種類ごとの平均電流密度と平

均復極量を示したものである。屋内環境に関しては、塗りつぶしが湿潤環境、くり抜きが乾湿繰り返し環境、赤丸が海洋環境をそれぞれ示している。「AZ」は湿度環境の違いの影響が比較的小さく、いずれの環境でも安定した防食電流の供給と復極量が得られていることが分かる。「I」は、温度環境の変化には大きな影響を受けないものの、乾湿繰り返し環境で復極量が低下する傾向があり、多湿環境において極めて有効な防食効果が得られると考えられた。

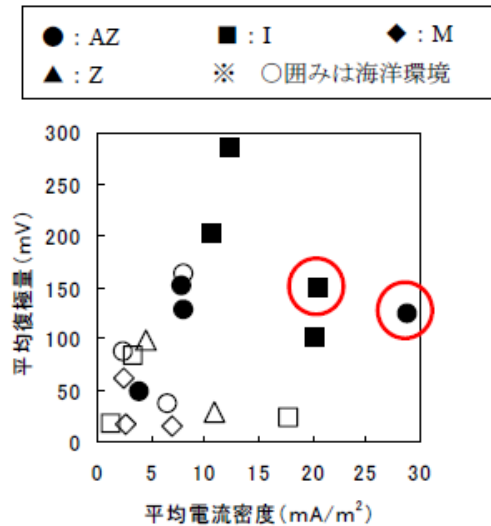


図-2 犠牲陽極材の影響

図-3に示した「I」の海洋環境下における測定結果からも、気象条件が湿度70%以上となった期間で高い復極量が得られていることが分かる。なお、「I」の海洋環境のように、豊富な電流量の供給のわりに復極量が得られていないケースは、図-4に示す電流密度の経時変化のように、通電開始直後に極めて大きな防食電流が供給されたことによって溶射被膜の部分的な剥離や浮きが生じた影響と考えられる。「M」、「Z」については、全体的に上記の2種類ほどの電流量あるいは復極量は得られていないが、「Z」の20℃環境では100mV程度の復極量が得られており、環境条件によっては防食効果が期待できる。

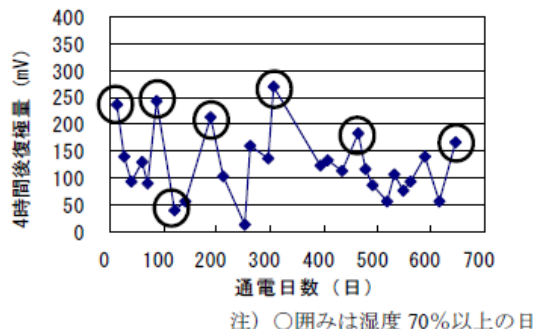


図-3 復極量の経時変化 (I・海洋)

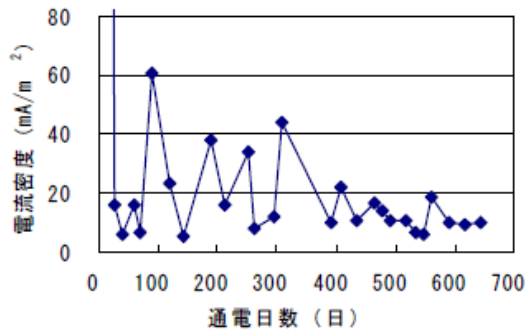


図-4 電流密度の経時変化 (I・海洋)

(2) 構造物の環境条件の影響

図-5のように、20℃環境下においては、供試体によって程度はことなるものの、湿度条件に関係なく平均防食電流量と平均復極量はほぼ比例関係を示しており、例えば100 mVの復極量を得るためには少なくとも5 mA/m<sup>2</sup>程度以上の防食電流が確保される必要があることが分かる。しかしながら、40℃環境下のより過酷な環境ではその関係に大きなバラツキがみられ、豊富な防食電流が供給されているにも拘わらず十分な復極量が得られていないケースが確認される。特に乾湿繰り返し環境下では、全試験体とも復極量が20~50 mV程度となり十分な防食効果が得られていないことが予想された。一方、海洋環境下においては、100 mV以上の復極量は得られており、防食効果は期待できるが、20℃環境の結果と比較すると、かなり豊富に供給されている防食電流量から予想されるほどの復極量ではないことが分かる。

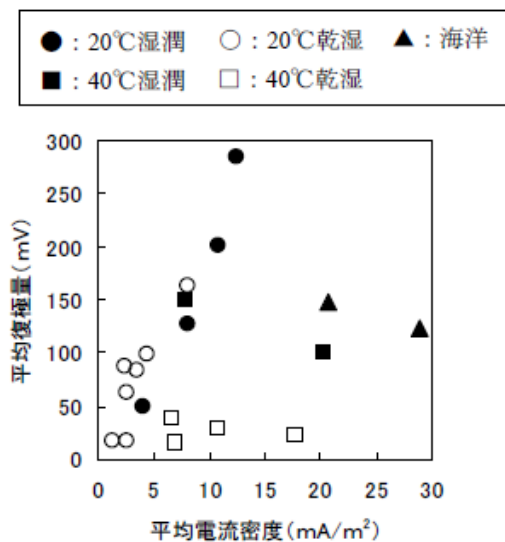


図-5 環境条件の影響

(3) 劣化レベルの影響

進展期の試験体に予防保全的に電気防食を施した場合 (Preventive measure) と、既に

腐食ひび割れが生じた加速期の状態に事後補修として電気防食を施した場合 (Posterior measure) の効果について比較した結果を図-6に示す。図のように、予防保全の場合は5mVの防食電流で100mVを超える復極量が得られているのに対し、事後補修としての利用では50mV程度の復極量しか得られなかった。実際に、図-7に示す解体後の内部鋼材の腐食状況観察結果からも、本システムが予防保全としての活用であれば十分な効果が期待できることが確認された。

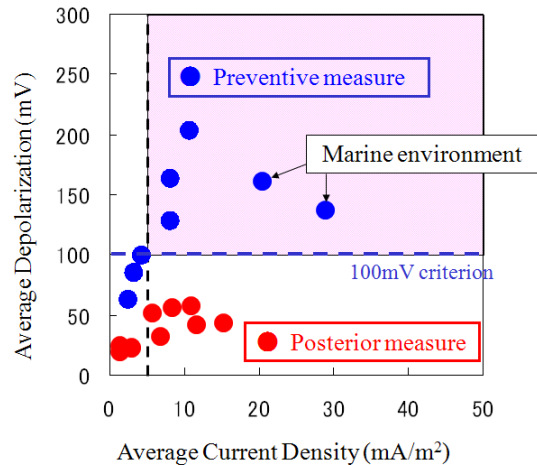


図-6 予防保全と事後補修での復極量

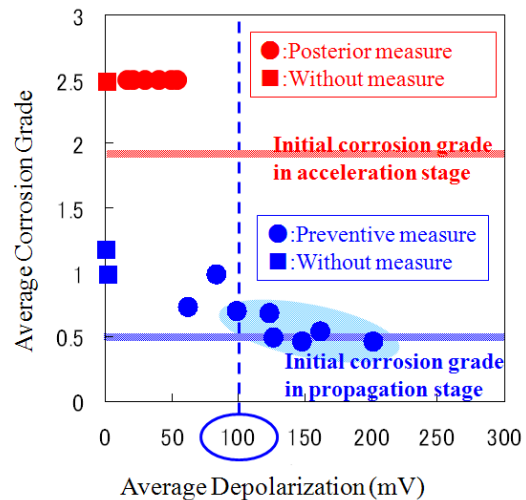


図-7 予防保全と事後補修での防食効果

(4) 表面処理による防食効果向上の試み

上記の検討結果から、Al-Zn-Inを陽極材とした場合、特に多湿環境において極めて高い防食効果が得られることが確認された。しかしその反面、その高い反応性のために防食開始直後から過剰な防食電流が供給され、その際に生じた腐食性生成物等の影響で溶射膜に浮きや剥離が生じ、長期的には防食効果が大幅に低減する可能性があることも明らかとなった。そこで Al-Zn-In の表面処理方法

の影響を検討し、通電開始直後の過剰な電流供給を抑制し、長期間安定した防食効果を得るための施工システムの検討を行った。表面処理方法は、表-3の通り、溶射前にブラスト処理のみを施したもの、ブラスト処理に加え溶射後の封孔処理を施したもの、ブラスト処理後に粗面化形成も施し溶射後に封孔処理も施したものの、の計3種類である。

表-3 表面処理方法

供試体種類	溶射前処理	溶射後処理
I	ブラスト処理	
II	ブラスト処理	封孔処理
III	ブラスト処理 粗面形成	封孔処理

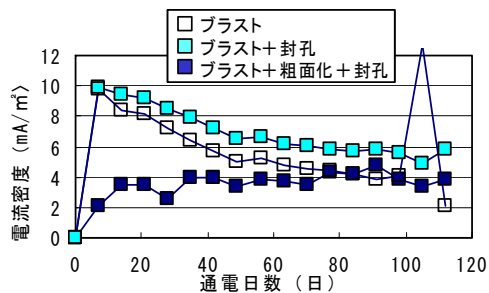


図-8 電流密度の経時変化 (湿潤)

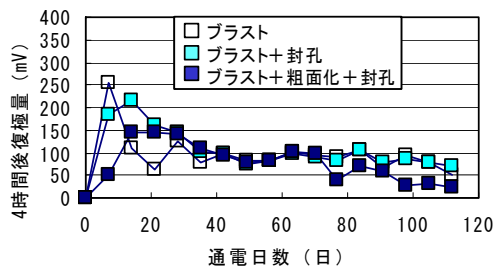


図-9 復極量の経時変化 (湿潤)

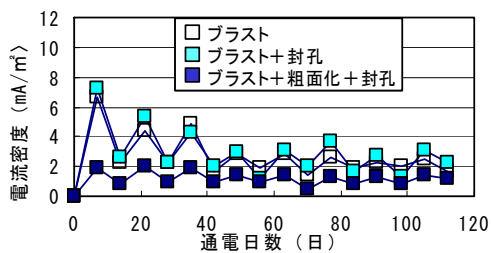


図-10 電流密度の経時変化 (乾湿繰り返し)

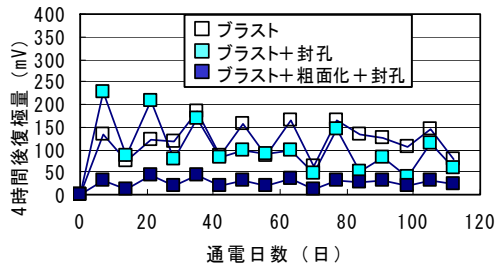


図-11 復極量の経時変化 (乾湿繰り返し)

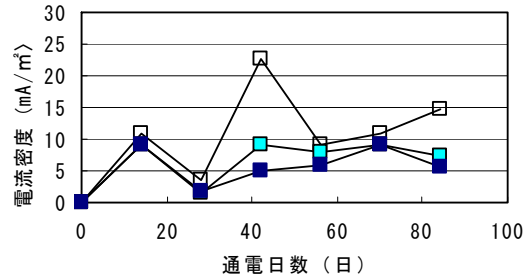


図-12 電流密度の経時変化 (海洋)

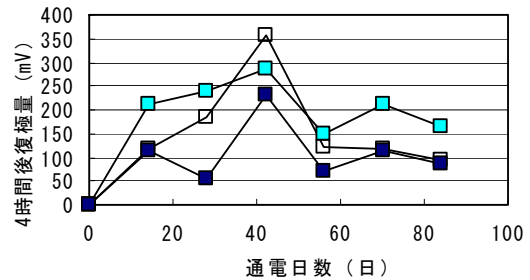


図-13 復極量の経時変化 (海洋)

湿潤環境における電流密度の経時変化を 図-8 に示す。ブラスト処理のみの場合、既往の結果と同様に、通電開始直後に過剰な防食電流が供給され、その後経時的に低下していく結果となった。ブラスト処理と封孔処理を施した場合でも、電流量の低下傾向は若干抑制されたが、過剰な防食電流の供給については同様の結果となった。これに対して、ブラスト処理、粗面化処理、封孔処理を全て組み合わせる場合は、通電開始直後からその電流量が次第に増加し、約1カ月程度で安定した電流量となっており、初期の過剰な防食電流の供給を確実に抑制することができていることが分かる。図-9にはこの時の4時間後復極量の経時変化を示している。ブラスト処理のみの施した供試体の場合、初期の高い防食電流が供給のため、通電初期に一時的に250 mV を越える高い復極量が得られているが、その後は急激に低下していることが分かる。一方、ブラスト処理、粗面化処理、封孔処理を施した供試体は、電流量と同様に徐々に復極量が増加し、やや増減が見られるものの概ね50~100mV程度の復極量が得られている。

同様に乾湿繰り返し環境における電流密度の経時変化を 図-10 に示す。この環境においても、ブラスト処理のみを施した供試体には初期に多量の電流が供給され、その後乾湿繰り返しの影響で増減を繰り返しながら電流量が低下していることが分かる。これに対してブラスト処理、粗面化処理、封孔処理を施した供試体は、電流量は少ないが通電初期から安定的に供給されていることが分かる。ただし、図-11に示すようにその復極量は概

ね 50mV 以下で推移していることから、現段階では未だ必要な防食効果が得られていない可能性が高い。

一方、図-12 および図-13 に、海洋環境における電流密度と復極量の経時変化をそれぞれ示す。表面処理の違いによる初期電流量に大きな差異は認められなかったものの、約 1 カ月半後に、プラスト処理のみを施した供試体に  $20\text{mA}/\text{m}^2$  を越える過剰な電流が供給されている。これに対して、プラスト処理、粗面化処理、封孔処理を施した供試体は、気象条件に応じた変動があるものの、通電初期から安定した防食電流量を保持しており、その復極量も 100mv 程度前後を推移していることが分かる。

#### (5) まとめ

以上の結果から、本システムによる防食効果に影響を与える各要因については以下のようにまとめられる。

#### ①犠牲陽極材の種類

金属毎の防食効果は環境によって異なるため、陽極材に用いる場合には環境を考慮して選定することが重要である。

#### ②適用可能な劣化レベル

犠牲陽極方式電気防食工法は、塩害に対する予防保全として「進展期」までに適用することで大きな防食効果を発揮する。

#### ③施工方法の影響

通電初期の過剰な電流供給は局所的な剥離や浮きを引き起こすため、粗面化処理や封孔処理等の適切な表面処理を施すことが重要である。

#### ④今後の課題

本システムの場合は、一般的な防食基準である 100mV 復極量以下であっても十分な防食効果が得られることが確認された。ただし、通電中の適切な管理のためには、犠牲陽極方式電気防食工法のための新たな防食基準を定めることが重要である。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① T.Yamaguchi, K.Takewaka and M.Yamamoto : An Effectiveness of Galvanic Anode System Cathodic Protection for RC Structures under Marine Environment、Proceedings of The 4th International Conference of Asian Concrete Federation、査読無、S-5.1-05、2010

② 清水鉄兵、武若耕司、山口明伸、入江隼輝 : 金属溶射を応用した流電陽極方式電気防食工法の防食効果とその評価手法に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.31、pp.1381-1386、2009

〔学会発表〕(計 1 件)

① 入江隼輝、山口明伸 : 表面処理方法が金属溶射型流電陽極方式電気防食工法の防食効果に与える影響、土木学会第 65 回年次学術講演会、2010 年 9 月 1 日、札幌市(北海道大学)

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://oce.oce.kagoshima-u.ac.jp/~concrete/main/home.htm>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

山口 明伸 (YAMAGUCHI TOSHINOBU)

鹿児島大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号 : 50305158

#### (2) 研究協力者

武若 耕司 (TAKEWAKA KOJI)

鹿児島大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号 : 10155054

山本 誠 (MAKOTO YAMAMOTO)

住友大阪セメント(株)・建材事業部