

耐硫酸モルタル防食技術の
技術評価に関する報告書

平成 20 年 3 月

日本下水道事業団 技術評価委員会

目 次

(技術評価の経緯)	1
(評価の対象技術と範囲)	2
(モルタルの耐硫酸性向上手法)	2
(耐硫酸モルタル防食工法の設計手法)	8
(施工と維持管理上の留意事項)	12
(今後の課題)	13

(技術評価の経緯)

一般にコンクリート構造物は 50 年の耐用年数を想定しているが、これは中性化を基準としたものである。一方、下水道施設特有のコンクリート劣化には硫酸腐食が挙げられる。硫酸によるコンクリート腐食速度は、中性化速度をはるかに超える速度であり、従来より下水道施設に関しては耐硫酸性向上のための技術が提案されてきた。J Sにおける防食技術は、被覆材として塗布型ライニング工法、シートライニング工法を明記しており、平成 19 年度改訂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル」(以下、JS 防食指針)では、断面修復材に耐硫酸性を有するモルタルの仕様を定めている。

近年、下水道普及率は 71%に及んでおり、昭和 50 年代に建設された処理場においては、建設後 30 年程度が経過しているが、一般に硫酸腐食対策は取られておらず密閉された水路、水槽などでの硫酸腐食が著しい。今後はライフサイクルコスト削減の観点からも、下水道資産の維持管理の時代であり、構造物の耐用年数の向上を図ることが可能となる防食技術が求められている。

本評価における耐硫酸モルタルによる防食工法は、高圧洗浄、劣化部除去工、断面修復までの工程で施工が完了するため、施工日数の短縮化、施工の簡略化が期待できるものである。また、当該工法は、施設を使用する期間に応じて耐硫酸モルタル塗布厚を変えることができ、施設の耐用年数を調整できるので施設全体のライフサイクルを整合させるのに有効である。

このような背景から、本評価では下水道施設における微生物の関与により生成する硫酸によるコンクリート構造物の腐食防止を目的とする耐硫酸モルタルについて、J Sの調査結果や研究成果等に基づいて腐食機構および腐食現象について明らかにするものである。また現在確立している塗布

型ライニング工法、シートライニング工法との工法選択に当たっての留意事項を整理し、最適なコンクリート防食工法選択のために必要な基本方針を技術評価としてまとめた。

(評価の対象技術と範囲)

本技術評価の対象とする技術は、既存の施設における改築更新等での防食工事を前提とし、1) 耐硫酸性を持つモルタルの性能、2) 耐硫酸モルタルによる防食技術、に関するものである。

本評価の耐硫酸モルタルは、①ポルトランドセメント系耐硫酸モルタル、②アルミナセメント系耐硫酸モルタルとする。

評価の範囲は、主として処理場・ポンプ場で採用されているコンクリート防食技術であり、改築更新に限定して使用される耐硫酸性を持つモルタルについてである。

本評価における耐硫酸モルタルの仕様は、次のものを満たすものとする。

- (1) 下水道施設の腐食環境（J S 防食指針によるⅠ類またはⅡ類に相当する環境）内において普通モルタルの5倍以上の耐硫酸性があること。
- (2) 通常のコンクリートで施工された構造物の補修・改築に対しても施工可能であること。
- (3) 補修材料は、既存コンクリートとの一体性が確保されるものであること。

(モルタルの耐硫酸性向上手法)

1. 現在の防食被覆工法の現状

現在の防食被覆技術は、塗布型ライニング工法、シートライニング工法

が規格化されており、すでに多くの採用実績を持つ技術である。これらの技術は腐食環境によって使用区分が明確にされており、腐食が激しく、補修・点検が困難な箇所を除いて塗布型ライニング工法が採用されている。基本的な仕様としては、1) 耐硫酸性、2) 遮断性、3) コンクリートとの接着性、が要求されており性能保証としては10年を規定している。

現在、コンクリート防食工法の主流である塗布型ライニング工法について、樹脂材料に関する化学手法的な劣化挙動の検討を行い、速度論的な検討を含めた劣化メカニズムを明らかにした。実験にあたっては、一般的な複数の樹脂ライニング材料を用いて2つの実験を行った。

①硫酸浸漬試験

②暴露試験（JSが開発したエイジトロンによる）

硫酸浸漬試験においては、低濃度領域における樹脂への硫黄浸入速度は直線的に増加し、10wt%濃度付近まで増加・平衡の傾向を示した。一方、10wt%以上の高濃度域では浸入速度が減少に転じる傾向を示した。

また、硫酸浸漬試験、暴露試験（エイジトロン）を行った樹脂の硫黄浸入深さの測定は、エネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用いて行った。樹脂材料のうち、硫黄の浸入が認められたのはエポキシ樹脂のみで、他の材料については、約15,000時間での浸漬、暴露試験においても硫黄の浸入はほとんど確認できない範囲であった。

硫黄の進入が認められたエポキシ樹脂についても、その深さは0.02mm/年で、JS防食指針におけるエポキシ樹脂の最低塗り厚は0.7mmであることから、早期でも樹脂の透過に35年の年月を要することになる。したがって、現在の防食被覆工法において使用される樹脂材料そのものは十分な耐硫酸性能を有している。

2. 実施設における腐食状況

既存の防食技術の現状を把握するために、下水道施設で実際に施工された樹脂材料を採取し硫黄浸透深さの測定を行った。採取したサンプルの樹脂材料は施工後 8 年程度が経過している。採取した樹脂材料は、ガラスフレーク入りビニルエステル樹脂、ポリウレア樹脂、アクリル樹脂、防菌モルタルであり、防菌モルタル以外の材料については、十分な耐硫酸性を持っていたことが電子線マイクロアナライザー（EPMA）による分析で確認できた。

3. 耐硫酸性を高めたモルタル

樹脂による防食工法の不具合調査によれば、材料の耐硫酸性能ではなく、施工に起因する原因によってコンクリートが劣化していることがわかった。今後、増加する改築更新工事では、施工環境が悪く、従来の防食工法とは異なる手法が必要である。

その中で耐硫酸モルタル防食工法は、モルタルに付与した耐硫酸性により施設の長寿命化を計り、改築更新計画と整合させることで、ライフサイクルコスト削減に寄与できる可能性を持っている。

本技術評価は、普通モルタルの 5 倍程度の耐硫酸性を有するモルタルを開発し、腐食環境面に必要な断面を塗布する防食工法として整理し、評価するものである。

(1) 耐硫酸モルタル腐食メカニズム

A. ポルトランドセメント系耐硫酸モルタル

ポルトランドセメント系材料の耐硫酸性能は、1) 二水石こう生成抑制、2) 硫酸浸入抑制、からなる。二水石こう生成抑制は、微粉末高炉スラグ、フライアッシュなどの混入により通常 20%程度含有する水酸化カル

シウムを数%まで削減することで、二水石こうの生成を抑えるものである。一方、硫酸浸入抑制については、比表面積が普通ポルトランドセメントと比較して 40~70 倍である超微粉末のシリカフェュームの混入によって構造の緻密化を図り硫酸の浸入を抑えるものである。これらの手段によって、腐食の反応速度を大幅に遅らせ、耐硫酸性が実現している。反応式及び腐食メカニズムは、図 1 に示すとおりである。

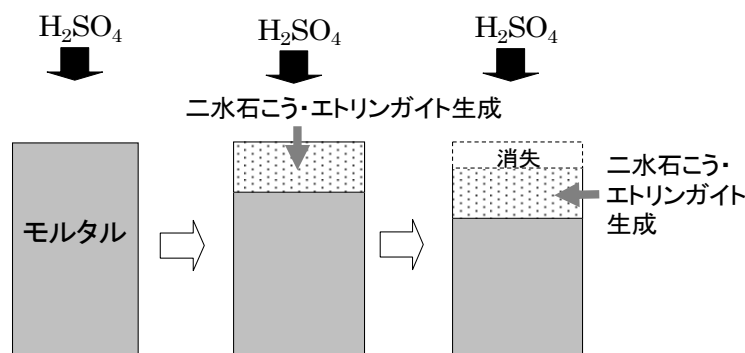
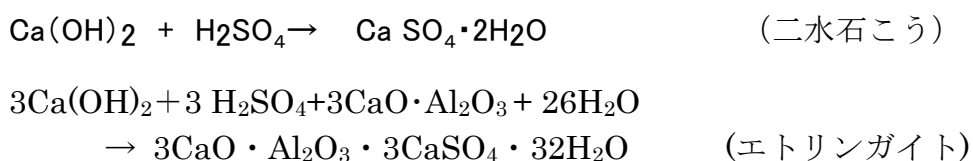


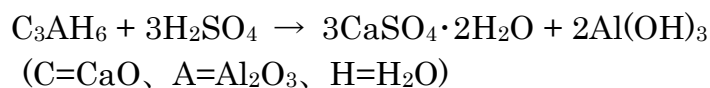
図 1 ポルトランドセメント系耐硫酸モルタル腐食メカニズム

B. アルミナセメント系耐硫酸モルタル

アルミナセメント系材料は、水酸化カルシウムをほとんど含まないため、ポルトランドセメント系材料とは全く異なる反応を示す。アルミナセメントでは pH の低下に伴い安定な水酸化アルミニウムが形成され、モルタル内への硫酸イオン浸入を抑制する。pH < 4 となった場合、水酸化アルミニウムはアルミニウムイオンとして溶出するが、モルタル健全部が酸と接触することで再度水酸化アルミニウムが生成され表層の pH 低下を抑制している。

反応式及び腐食メカニズムは、図 2 に示す通りである。

① pH>4



② pH<4

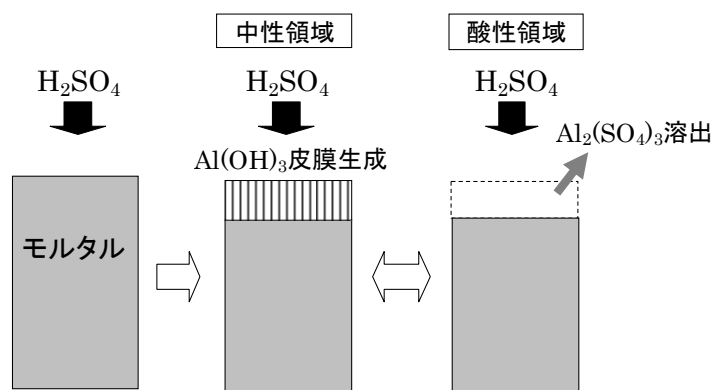
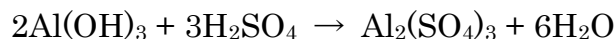


図2 アルミナセメント系耐硫酸モルタル腐食メカニズム

(2) 耐硫酸モルタルの性能確認

耐硫酸モルタルの性能確認試験は、東京都下水道局、JSにおいて定められている、5wt%硫酸による浸漬試験で耐腐食性能を評価するものである。しかしながら、一般的な下水道施設において確認できたコンクリート腐食面に発生した結露水の硫酸イオン濃度は、3wt%程度までであり、5wt%硫酸による浸漬試験における性能評価が妥当であるかの検討が必要となる。そこで、0.5wt%、1wt%、3wt%、5wt%、10wt%硫酸溶液での浸漬試験を実施し、重量変化、中性化深さについて検討を行った。

結果として、硫酸濃度によらず進行する中性化深さは、経過日数を変数とする回帰式で示すことが確認でき、5wt%硫酸による浸漬試験は、腐食促進試験として適用できることを確認した。

4. 実施設における腐食環境下での耐硫酸モルタルの評価

JSでは、耐硫酸モルタルの性能確認のために、硫酸浸漬試験以外に実施

設における腐食環境下での暴露試験を九州地区の2つの施設(汚泥貯留槽、着水井)で実施している。試験結果は、硫酸浸漬試験やエイジトロンによる腐食促進試験のように明確な腐食速度を求めるに至っていない。これは、実際の腐食環境下においては各供試体が均一的な腐食環境とはならないため、供試体の固体誤差が出やすいためであると考えられる。

実施設での腐食環境下での3年間にわたる暴露試験において、中性化の進行に関しては普通モルタルとの比較で耐硫酸モルタルは概ね5倍以上の耐硫酸性能を示すことを確認した。

また、開発した耐硫酸モルタルの試験施工を実施設において行った。試験施工を行なった同じ場所でモルタル供試体の暴露試験も実施している。試験施工後3年が経過し、耐硫酸モルタル施工面の剥離、ひび割れは観察されず、供試体の重量変化、中性化の進行ほとんどなく、暴露試験の比較用とした普通モルタルのみ腐食劣化が顕著な状況である。

耐硫酸モルタル防食施工面での結露水のpHは4前後で、同場所で施工されているシートライニング工法施工面の結露水は、pHが2以下であった。このpHの違いは耐硫酸モルタルでは酸の中和が促進され、防食面の劣化進行を抑制していると考えられる。

耐硫酸モルタル工法の施工は、施工方法、施工環境、施工後の養生、作業者の技量などが原因となり、モルタルにひび割れが生じることが想定される。このひび割れが、耐硫酸モルタルの性能にどのような影響を与えるか検証を行った。実施した実験は、強制的にモルタル供試体に0.05mm、0.2mmのひび割れを生じさせ、エイジトロンにおいて2年間暴露させたもので、フェノールフタレインおよびEPMAにて中性化の進行状況、硫黄等の元素の浸入状況を観察した。

ひび割れ幅0.05mmの供試体は、内部への中性化は進行していなかった

が、若干の硫黄の浸入が見られた。一方、ひび割れ幅 0.2mm の供試体では、ひび割れに沿って内部まで中性化が進行しており、硫黄の侵入も 2mm 程度確認された。

したがって、耐硫酸モルタル防食工法における完了検査時の補修は、一般のコンクリート補修の目安となるひび割れ幅 0.2mm として問題ないと考えられる。

(耐硫酸モルタル防食工法の設計手法)

1. 設計手法の分類

現在の構造設計の概念は、許容応力度設計法のような仕様規定から、構造物の機能に応じて性能が求められる性能規定に変化している。コンクリート構造物の劣化は、その劣化過程により、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類される。耐硫酸モルタル防食工法では、中性化が進行し、その影響が鉄筋に及ぶ進展期から加速期へ移行する境界付近を設計構造特性保持限界とし、補修を行なう目安とする。図 3 に、劣化の進行と耐荷性能の関係を示す。

防食工法の設計手法は 3 通り考えられ、工法毎に当てはめて整理をすると以下の通りである。

1) 安全設計法

損傷は起こらないことを前提とするもので従来の防食被覆工法がこれに該当する。

2) フェールセーフ設計法

被害を最小限に抑えるための予防措置を取り入れるもので東京都下水道局の「下水道コンクリート補修マニュアル」、や JS 防食指針における断面修復材の耐硫酸性付与がこれにあたる。

3) 腐食しる許容設計法

損傷の存在を前提とする設計手法である。コンクリート構造物は中性化の影響を取り入れた鉄筋保護のための被りを設定しており、元来安全率を持たせた設計となっており、コンクリート表面が消失した場合においても強度的に問題が生じるまでの損傷は許容できると考えられている。腐食を許容する考えの耐硫酸モルタル工法においては、同様に損傷を許容することが出来る。

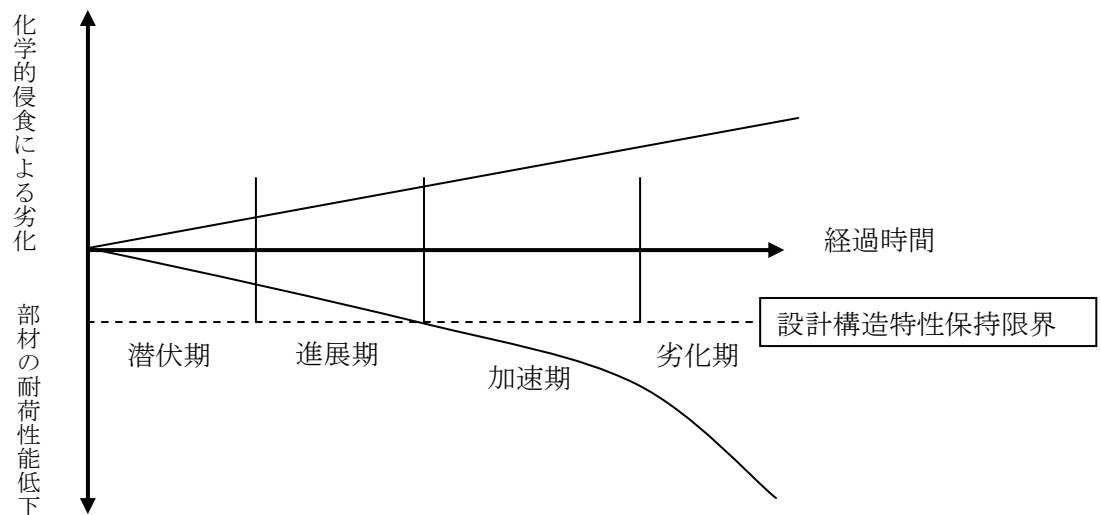


図3 化学的侵食による劣化の進行と耐荷性能低下の関係

2. 耐硫酸モルタル防食工の適用について

本評価における耐硫酸モルタル防食工法は、処理場・ポンプ場の改築・更新時の断面修復過程で用いることができる。耐硫酸性モルタルによる防食工法は、塗布型ライニングまたはシートライニングによる防食工程を省略、または併用するものであり、腐食しる許容設計法に基づき、コンクリートの腐食を許容し、コンクリートの構造に問題が生じるまでの腐食速度を遅らせるものである。本工法は従来工法における防食工程を省略することで、工程の簡略化、工期短縮が可能となる。特に、稼働中の施設・設備の停止が困難な状況下での工期短縮は、建設コストや施設・設備の停止に

よる下水処理への影響を考えればその効果は非常に大きいと考えられる。

本工法における適用可能な施設としては、腐食を許容する工法であることから、流入水路やステップ水路等において断面が変化することで水利計算等への影響が大きくなることが懸念される施設や、機械設備等との取り合いで腐食を許容し難い箇所での適用は控え、ポンプ井や分配槽、汚泥貯留槽など断面の変化による影響の小さい施設での適用とする。

3. 設計手法

①耐硫酸性材料の使用条件

耐硫酸モルタルの防食工法の採用にあたっては、構造物の強度計算への影響度、腐食抑制手法との組み合わせの検討、施工条件の確認、樹脂ライニング工法との費用比較等を行い、耐硫酸モルタル材料、樹脂材料を使い分ける総合的な検討が必要である。

②予定供用年数及び耐用年数

国土交通省の定めるコンクリート構造物の標準耐用年数は50年であり、JS防食指針で定める防食被覆は10年の性能保証としているように双方の耐用年数には隔たりがある。可能な限り補修周期を延ばすことが望まれるポンプ井などの点検・補修が困難な施設では、より高い耐硫酸性能を必要とする。一方で、予定供用年数が短い場合には必要以上の耐硫酸性能は必要ではない。したがって予定供用年数の考えを、防食設計の要素に取り入れることが必要である。

③設計の最適化

設計の最適化のために、既存施設の腐食深さ、必要補修厚み、モルタルの耐硫酸性、予定供用年数を考慮した設計手法について整理した。

耐硫酸モルタルによる断面修復厚さは、既存施設の腐食速度と供用年数から決まる。耐硫酸モルタルの腐食速度がわかれば、補修する厚みによって供用年数を予測することができる。逆に供用年数と補修断面厚が決まっていれば、補修に必要な耐硫酸モルタルの耐硫酸性の腐食速度が決まる。

④耐硫酸モルタル設計法

耐硫酸モルタル防食工法における設計には、5 wt%硫酸浸漬試験結果を用いることとする。硫酸浸漬試験で、耐硫酸モルタルおよび普通モルタルの中性化深さ算定式が得られ、実測で求まる補修対象施設の中性化深さから、耐硫酸モルタルでの中性化深さを求めることができる。これを耐硫酸モルタルの必要補修断面厚とする。アルミナセメント系耐硫酸モルタルでの必要断面算定例を図4に示す。

⑤経済性を考慮した工法選択の考え方

耐硫酸モルタル防食工法の採用の前提条件としては、

- a. コンクリート構造物が強度的に問題でないこと
- b. 工期短縮の必要性があること
- c. 作業環境が劣悪、施工スペースが狭く、施工条件が悪いこと
- d. 経済的であること

などが考えられる。

基本的には予定供用年数における補修コストの比較で行なうことになるが、耐硫酸モルタルによる防食工法は、工期短縮や湿潤環境下での施工も可能であるなど、樹脂による防食工法よりも施工上の優位性もあり、これらについても検討条件とする。

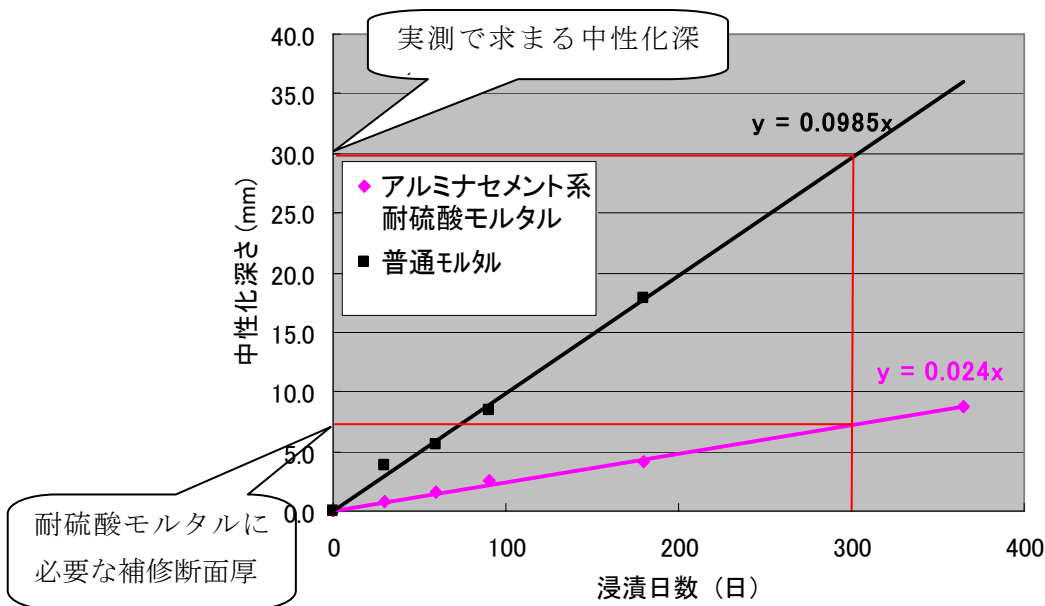


図4 補修断面決定例 (アルミナセメント系耐硫酸モルタル)

(施工と維持管理上の留意事項)

1. 施工方法

耐硫酸モルタルの施工性は基本的に汎用の補修モルタルと同等である。ただし、ひび割れに関しては若干の注意が必要となる。施工後のひび割れ補修は、通常モルタルのひび割れ補修が必要となる 0.2mm 以上のクラックを対象とする。

2. 維持管理

耐硫酸モルタル防食工法における点検・診断は、腐食しろ許容設計の概念を採用していることから、定期的な点検を必要とする。点検項目は通常のコングリート表面の点検と同等でよいが、腐食環境の変化があった場合には、耐用年数が減少する場合もあるので定期的な腐食環境そのものの観察も必要である。

(今後の課題)

耐硫酸モルタル防食工法は、設計条件によって長期間での使用が可能であると考えられるが、長期間での耐酸性能、耐久性に関して知見が得られていない。そのために、J Sではすでに実施している試験施工箇所の観察を今後続けていく予定である。

また、本工法を適用していくにあたっては、下記の課題が残されている。

1. 適用範囲の明確化

本工法は、断面の消失を許容するものであることから、断面の変化による影響が大きな施設や設備との取り合いで腐食が許容し難い箇所には、本工法は適さない。

本工法における適用は施設毎に、断面変化の影響を検討して決定する必要がある。また、蓋や足掛け金物などの付帯設備に関しては腐食による脱落等の支障が発生しないように検討が必要である。

また、コンクリート表面が消失した場合においても構造物の強度に問題が生じるまでの損傷は許容できるという考え方については、更なる検証が必要である。

2. 施工に関する問題点

施工に起因する不具合を防ぐためには、本工法における作業資格者に関する認定制度が必要である。

3. 今後の技術、材料の開発に対応できる規格の作成

今回はポルトランドセメント系、アルミナセメント系耐硫酸モルタルに限定したものであったが、今後は様々な技術・材料の開発も見込まれ、それに応じた規格の作成が必要である

4. 防食樹脂と耐硫酸モルタルの組み合わせ

防食樹脂と耐硫酸モルタルを組み合わせることで、より耐硫酸性能の向上が期待できるが、現時点においては組み合わせに関する十分な知見が得られていない。