

大気中二酸化炭素の溶解によるアルカリ性トンネル排水の中和法

旭川開発建設部 旭川道路事務所 第三工事課 ○加我 直孝
青木 卓也
土田 和宏

一般国道39号武華トンネルでは、トンネルから湧出する地下水がアルカリ性を呈していることが検知され、工事中はもとより供用後も継続的にアルカリ性トンネル排水が排出されている。これまでの対策としては、液化炭酸ガスを用いて中和処理しているのが現状であるが、設備費や中和剤購入にコストを要する。そのため、自然の浄化作用を活用した合理的な中和処理対策が必要とされている。

ここでは、現地に施工されている自然中和施設である水路構造物を流下する過程の水質調査を行い、大気中二酸化炭素の溶解過程をこの構造物を用いて検証することによって、自然の浄化作用に基づく中和法についての設計手法を確立する。本手法は中和剤を一切不要とすることから、コスト縮減のほか、環境負荷軽減にも寄与する。さらに、他の現場においても適用可能な方法である。

キーワード：アルカリ性トンネル排水，地球化学解析，二酸化炭素溶解，中和

1. はじめに

武華トンネルでは、工事を開始した平成14年から現在もなお継続してアルカリ性のトンネル排水が排出されており、そのpH値は、10.5前後にも及ぶ。

本研究の目的は、アルカリ性トンネル排水の原因を究明すること、多大なコストや維持管理費を要する機械や動力を使用しない、自然の浄化作用を最大限に活用した中和処理法を確立することである。このことでライフサイクルコストを抑えることができ、さらに環境負荷も低い合理的な対策技術となりうる。

これまでの調査結果から得られた知見は、以下のとおりである。

- ・ボーリングコアを用いた溶出試験および水質調査から、トンネル排水がアルカリ性を呈するのは、トンネル周辺地山の頁岩、砂岩、礫岩に含まれる方解石に起因する¹⁾。
- ・水質調査およびPHREEQE²⁾を用いた地球化学解析から、トンネル排水を中和するには、周辺沢水との希釈だけでなく、大気中二酸化炭素の溶解が必要である¹⁾。
- ・室内ビーカー実験、室内および現地模型実験の結果から、大気中の二酸化炭素の溶解によりpHを低減するためには、気体と液体とが接触する面積を大きくし、接触時間も長くとることが必要である。さらに、液相側を攪拌させるとより効果がある³⁾。

以上の知見と現地の地形などの状況から、大気中の二酸化炭素を効率的に溶解させるためには、多段式トレイが有効であると判断された³⁾ (図-1)。

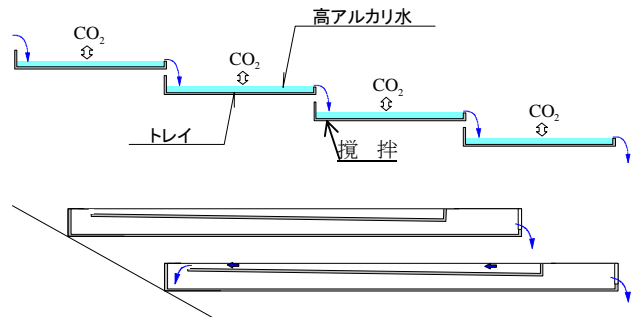


図-1 多段式トレイの概念図

ここでは、現地模型実験で得られた大気中二酸化炭素の溶解速度を評価し、それを踏まえ、現地に施工した中和のための水路構造物において、実際の構造物通過後のpH低下量を測定し、中和機能を検証した。また、溶解速度と後述する二酸化炭素溶解抑制パラメーターを同定し、他の現場でも活用できる設計手法について提案する。さらに、流末である沢水の生物調査を行い、トンネル排水の河川生態系へ影響がないことを確認するとともに、本水路構造物のコスト評価を実施した。

2. 大気中二酸化炭素溶解の速度論的評価

大気から水中に溶解する二酸化炭素の濃度によるpHへの影響は、水中の H_2CO_3 (水和した CO_2) 濃度の変化によって予測することが可能であることをStummとMorgan⁴⁾ が示している。

大気から水中へ二酸化炭素が溶解するとき、気相と液相の境界に薄い境界膜が形成され、この境界膜が物質移動の抵抗となる。水への溶解度の低い気体の場合、液境界膜での拡散速度が律速となる。ここで、液境界膜拡散による反

応速度は、大気と平衡状態にある H_2CO_3 濃度を C_s とおき、水中の H_2CO_3 濃度である C との差の一次反応で表現できる。すなわち、

$$\frac{dC}{dt} = K(C_s - C) \dots (1)$$

ここで、 K : 速度係数

理論的には、 K は以下の式で表現される。

$$K = \frac{D_{CO_2}}{\delta} \frac{A}{V} \dots (2)$$

ここで、

D_{CO_2} : 液境膜拡散係数

δ : 液境膜厚さ

A : 気液接触面積

V : 水の体積

式(1)を $t=0$ のとき $C=C_0$ 、 $t=t$ のとき $C=C$ として解くと、

$$C = C_s - (C_s - C_0)e^{-Kt} \dots (3)$$

この式は、時間の経過ともなる H_2CO_3 濃度の変化を示している。

水質調査結果を踏まえ、地球化学解析コードであるPHREEQEを用いて H_2CO_3 濃度を計算することで、大気中の二酸化炭素濃度をパラメータとした平衡pHと H_2CO_3 濃度との関係を図-2のように求めることができる。

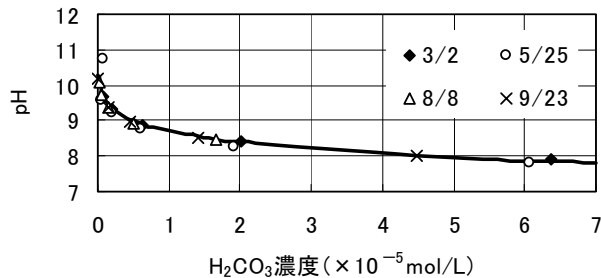


図-2 H_2CO_3 濃度とpHとの関係 (凡例は月日で、その日に採水したトンネル排水水質に基づき解析)

さらに、pH値を媒介として H_2CO_3 濃度と気液接触時間とを対応させ、pHと気液接触時間すなわち反応時間との関係を得ることができる (図-3)。しかし、現地模型実験の結果は、pHの最大低下量は、0.4となり、平衡pH 8.4よりも高い値となった。これは、炭酸カルシウムなどの沈殿物の生成によって二酸化炭素の溶解が抑制されたためであると考えられた。そこで、 H_2CO_3 濃度の溶解に、阻害要因が存在すると考え、そのパラメータを λ とおくと、式(1)は、

$$\frac{dC}{dt} = K(C_s - C) - \lambda \dots (4)$$

となる。これを解くと、

$$C = \left\{ C_s - \frac{\lambda}{K} \right\} - \left\{ \left(C_s - \frac{\lambda}{K} \right) - C_0 \right\} \times e^{-Kt} \dots (5)$$

となる。ここで現地模型実験での実測値と λ をパラメータとして解析した結果との比較を図-3に示す。この図から、 λ は 10^{-9} mol/L/sのオーダーと評価された。すなわち、 λ という二酸化炭素溶解抑制パラメータを用いることによって大気中の二酸化炭素の溶解によるpH低下現象を評価することができた。また、ある時間以上に気液接触をしても効率的にpHが低下しないこともわかる。

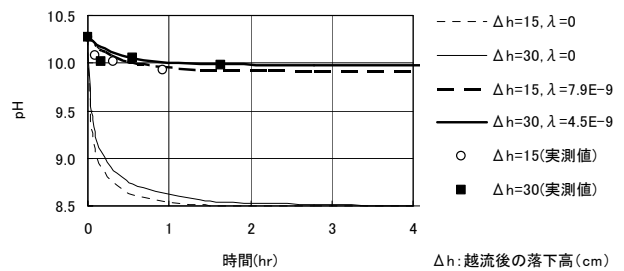


図-3 反応時間ともなるpH変化に関する実測値と解析結果との比較

ここで現地の地形条件などを考慮し、限られた範囲内で施工することを想定し、設計対象流量 (処理流量) を1 L/sとして水路構造物を設計した。その結果、全越流幅が5 m、越流幅1.2 m、長さ1.6 m、深さ22 mmの2層式トレイで1列30段とした4列が妥当であると判断した。

3. 中和水路構造物の施工

2層式トレイを利用した中和水路構造物についての全景写真を図-4と図-5に示す。現地の流下過程はトンネル排水が明かりに出てから吐口までが非常に起伏に富んだ地形のため、水平距離も短く、狭隘な箇所への施工となった。



図-4 中和水路構造物 (下方から撮影)



図-5 中和水路構造物（上方から撮影）

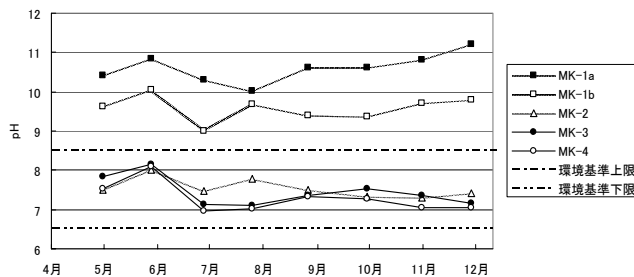


図-7 各調査地点におけるpH変化

4. 検証

(1) 検証方法

現地に施工した中和水路構造物に対して、トンネル排水が施設内部および施設通過後のpH低下量と周辺沢水に合流したときのpHを測定し、構造物の性能を調査した。調査箇所を図-6に示す。さらにウラニン染料を用いたトレーサ試験を行うことで、構造物中の滞留時間を測定した。

(2) 流出水のpH変化

水路構造物施工後の2008年4月から11月にかけて調査したpHの結果は図-7のとおりである。

この図から、施設を通過することでpHが、流量がほとんどない7月期を除き、0.8から1.4の範囲で低下しており、そのうち5ヶ月間は1.0以上低下した。

これは、現地模型実験で得られた結果よりも良好な値となった。

さらに、トンネル排水が周辺沢水と合流した直後であるMK-3地点でのpH値（図-8）が、施設施工前の平成18年と19年では、環境基準であるpH8.5を越える月があったが、施設施工後の平成20年ではすべての時期において、環境基準値を下回った。

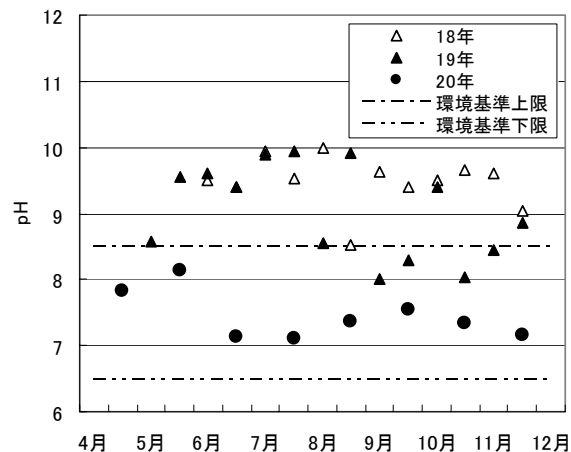


図-8 MK-3におけるpH値変化

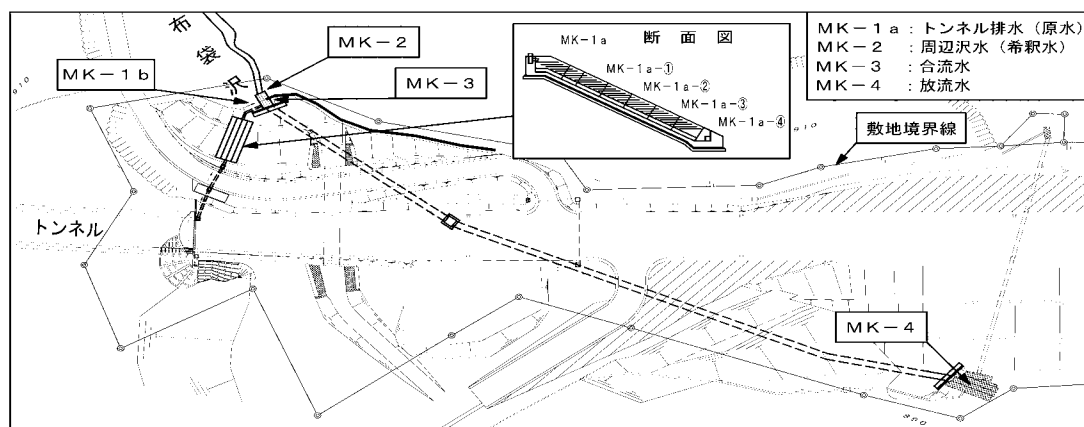


図-6 調査地点の概要図

(3) 水路構造物内pH変化

pHの経時変化を測定した結果は、図-9に示すとおりであり、図中の理論曲線とよく一致することがわかる。ここで、理論曲線は、現地水路構造物で使用しているトレイとほぼ同様の水深2 cmの矩形容器を用いた室内実験から同定された、 $K=1.0 \times 10^{-5}$ および $\lambda=1.5 \times 10^{-10}$ を用いた。

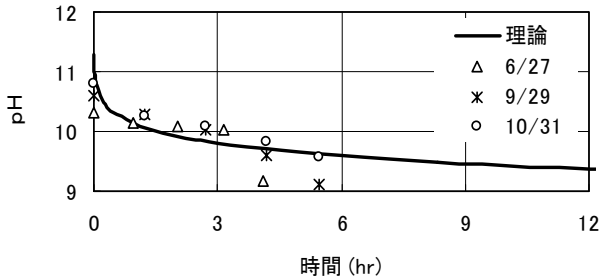


図-9 中和水路構造物におけるpHの経時変化と理論曲線

(4) 水路構造物の滞留時間

水路構造物内を通過する排水の滞留時間を求めるため、トレーサ試験を2回行った。その結果を図-10に示す。ウラン濃度は、トレイ下方の段に移るにつれ希釈されるため、明確なピークが見いだせない。しかし、下から24段目（上から7段目）についてはすべての試験で明確なピークが認められた。この段数のときの流下にかかる時間をトレーサ濃度のピーク値が出現する時間から求め、7段分のトレイの容量とトンネル排水の流量から導かれる平均滞留時間とを比較すると、両方の値はほぼ一致した。このことから、本構造物における滞留時間は、約1.6 hrとなり、図-9と比較してもpH低下に必要な十分な時間を確保できる構造となっている。

また、今回の試験からトレイ内の水は、局所的に停滞することなく均等に移動することもわかった。

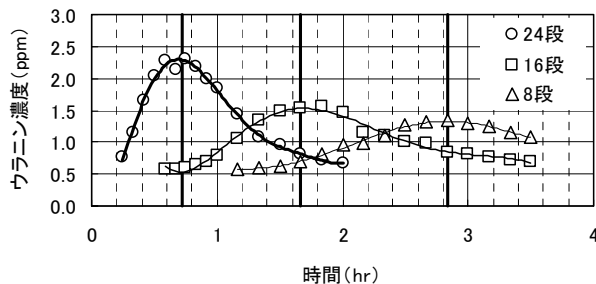


図-10 トレーサ試験結果

5. 設計方法

アルカリ性の地下水を自然の浄化作用を活用した中和法の対策工の設計フローを図-11に示す。

Naotaka KAGA, Takuya AOKI, Kazuhiro TSUCHIDA

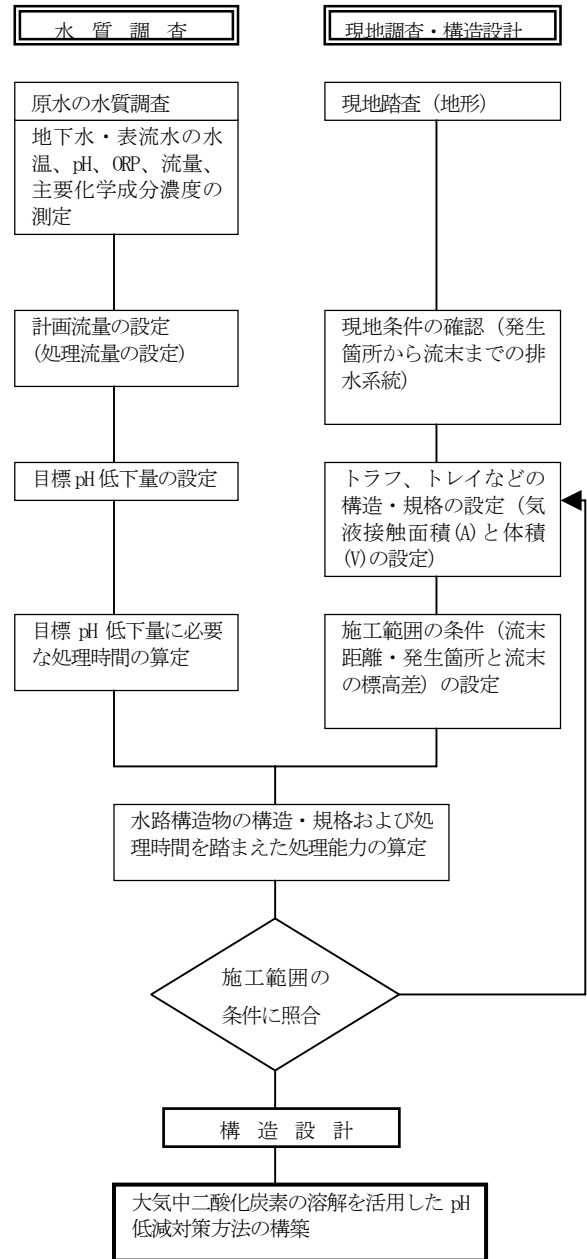


図-11 設計フロー

6. 河川環境調査

構造物の設置による周辺河川環境への影響を把握するため、トンネル排水の流末である布袋沢について、付着藻類と底生生物の調査を実施した。

(1) 調査方法

調査時期は、構造物の施工前後の同時期である平成19年10月と平成20年10月とし、調査地点を図-5に示す。また、地点MK-5をMK-4の約45 m下流に設けた。

付着藻類については、河床の石を選択しその表面に5cm×5cmコドラートをあて、ブラシで定量的に擦り取り採取した。採取したサンプルは、顕微鏡下で種の同定を

行い、細胞数をカウントした。

底生生物については、25cm×25cmコドラート付きサーバーネットを用いて4回ずつ、底泥ごと採取した。採取したサンプルは、ソーティングを行った後に顕微鏡下で種の同定を行い、個体数のカウントと湿重量の測定を行った。

(2) 調査結果

付着藻類調査の結果は図-12に示すように、細胞数は平成20年の方が全体的に少なく、種数については、施工前後ともほぼ同程度であった。また、優占種については、施工前後をとおして、中性種⁵⁾の *Achnanthes minutissima* が優占的であった。

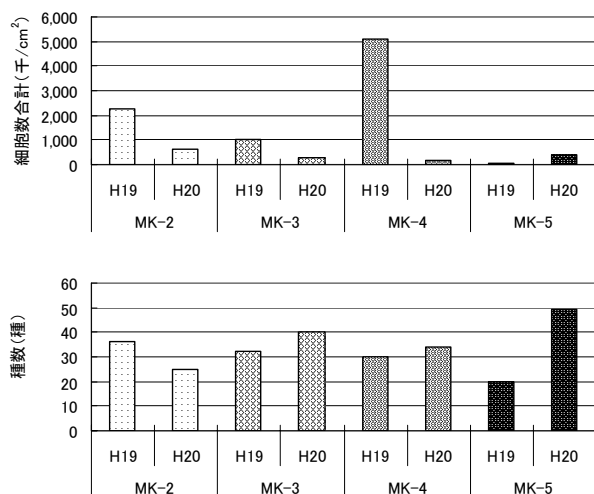


図-12 付着藻類の調査結果 (H19/H20)

底生生物調査の結果は図-13に示すように、個体数については、施工後に増加傾向にあり、種数については、施工前後をとおしてほぼ同程度であった。

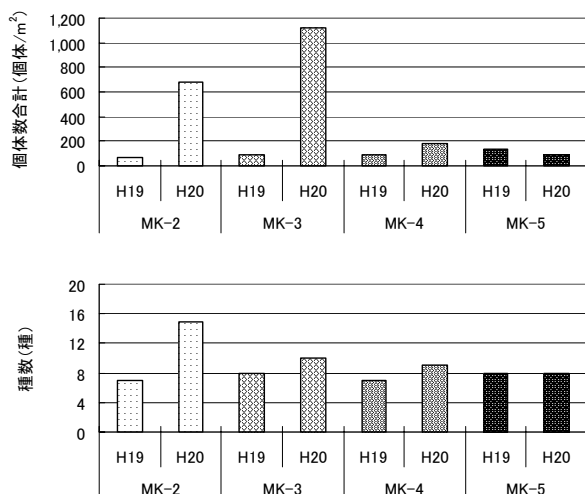


図-13 底生生物の調査結果 (H19/H20)

調査地点は、山地上流の細流に位置しており、降雨による出水などの影響を受けやすく、河床の攪乱が度々確認されている。そういった状況から、付着藻類や底生生物の生息数や種数および優占種において変動がみられるが、それらの変動は地点全体にみられるもので、調査地点においての限定的な変動ではなかった。したがって、この沢水は構造物の施工前後に環境の変化はなく、従来の環境が維持されていることが伺える。

7. コストの検討

武華トンネルで採用した多段式トレイ方式の水路構造物と従来法である液化炭酸ガスによる中和処理方法とのコストを比較する。ここで液化炭酸ガス中和方式は、装置を購入したケースを想定した(表-1)。また、比較対照とした単価は供用した平成18年度とした。なお、それぞれの金額は直接工事費である。

表-1 中和方法のコスト比較

項目	多段式トレイ方式	液化炭酸ガス方式
構造規格	トレイ トラフ・柵	原水槽・反応槽 ガスポンプ pH計・圧力計 制御盤・ポンプ etc.
設備費	—	10,510千円
剤料費	—	2,480千円/年間
燃料費	—	2,630千円/年間
点検費	300千円/年間	500千円/年間
施工費	6,000千円(土工など) 6,500千円(PCC) 5,500千円(トレイ作製)	1,000千円(上屋の基礎、据付・撤去)
計	18,000千円+300千円(点検費)	11,510千円(設備投資)+5,610千円(中和剤費用など)

この表からもわかるように、ほぼ1年目で同等、2年目以降は液化炭酸ガス中和方式での中和剤費用が年間約5,000千円必要となり、アルカリ性トンネル排水が継続して排出されている限り、この費用は常に必要となってくる。また、ここ武華トンネル周辺の地形状況が非常に狭隘な箇所、すなわち排水の排出から流末までの水平距離が約20m、高低差約7mという範囲の中で処理しなければならないため多段式トレイ方式という方法を採用し、さらにトレイを収納する外枠をプレキャストコンクリートによって作製したため、多額の費用を要したが、流末までの水平距離が十分に確保できるような広域な箇所であれば、通常の道路側溝で処理が可能であるため特別な費用は必要としない。したがって、本ケースは厳しい現地状況下での対策となっている。

8. まとめ

武華トンネルにおいて、大気中の二酸化炭素の溶解を

促進させることでアルカリ性トンネル排水を中和する技術，すなわち自然の浄化作用に基づく中和方法の設計手法を構築した。

また，この水路構造物が完成したことで周辺の河川環境などへの影響にも変化がみられず，施工もできる限り表面に露出しない施工を考慮することで，周辺の景観にも配慮された構造物となった。

コストについても，従来方法と比較し，ライフサイクルコストが軽減できるものとなった。

以上のことから，今後，他の現場で，このような事案が生じた場合には，本設計手法に基づき活用することで対策を講じることができる。

謝辞：平成18年度から本問題解決に向け，積極的に取り組んでいただいた北海道大学大学院の五十嵐敏文先生をはじめ，(株)ドーコンの藤田光則氏、(株)エコニクスの江本匡氏、大湊航一氏の方々に，ここに記して感謝を申し上げるものである。

参考文献

- 1) 藤井敏久，青木卓也，原一浩(2006)：自然的原因によるアルカリ性トンネル排水の対策技術（第1報），第50回（平成18年度）北海道開発局技術研究発表会，環-20.
- 2) Parkhurst, D. C., Torstenson, D. C, and Plummer, L. N. (1980): PHREEQE-A Computer program for geochemical calculation, USGS, Water-Resources Investigations 80-96.
- 3) 田中正善，青木卓也，深谷弘明(2007)：自然的原因によるアルカリ性トンネル排水の対策技術（第2報），第51回（平成19年度）北海道開発局技術研究発表会，環-07.
- 4) Stumm, W. and Morgan, J.J. (1996): Aquatic Chemistry, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- 5) 渡辺仁治(2005)：Picture Book and Ecology of the Freshwater Diatoms 淡水珪藻生態図鑑 群集解析に基づく汚濁指数 DAI_{po}, pH耐性性能, (株)内田老鶴圃, p. 210.