安全でおいしい水づくりへのソリューション

星川　　寛（ほしかわ　ひろし）

1　まえがき

わが国の近代水道は，1887 年に横浜市で誕生して以来，公衆衛生の向上と生活環境の改善を目的に着実に発展して，現在ではその普及率が約 97 %に達している。そして，水道は国民が衛生的で快適な生活を送るために，欠かすことのできない社会基盤施設になっている。しかしながら，この間人口の都市への集中，産業の急激な発展などにより，大都市を中心にした水道水源の汚染が進行してきた。その結果，既存の上水処理技術では処理できない新たな問題が発生し，これらの問題の早期解決が迫られている。

一方，現在の水道施設は 1960 年代から 1970 年代にかけて建設されたものが多く，老朽化してきている。今後水道の機能を向上させながら，計画的に更新していかなければならない状況にある。

富士電機は，長い間その時々の課題を先取りして，これらに真っ向からチャレンジして，新しい処理技術と周辺技術を開発し，広く水道界に貢献してきた。

そこで，ここではそれらの中から安全でおいしい水づくりのための，オゾン処理および生物活性炭（BAC）処理システムを中心にして，今後水道施設の更新を機に，大いに発展が期待されている膜沪過システムについて，富士電機の取組みの概要を紹介する。

2　安全な水の要件

水道水の安全を確保するためには，以下のように厳しい水質基準が決められており，これらの基準値をクリアしなければならない。

2.1　基準項目

基準項目は水道水にとって必須の項目であり，すべての水道に一律に適用される。内容は「健康に関連する項目」と「水道が有すべき性状に関する項目」から成っている。健康に関連する項目は最重要で 29 項目あり，一般細菌，水銀，ひ素，トリハロメタン，農薬などが健康を害する項目として決められている。水道水が有すべき性状に関する項目は 17 項目あり，色，濁り，臭気など水道水としての生活上，あるいは水道施設の管理上必要な項目が決められている。

2.2　快適水質項目

快適水質項目は，水道事業体においてその目標値の活用が望まれるとして設けられたもので，色，臭気，濁度など 13 項目について設定されている。

2.3　監視項目

監視項目は，将来における水道水質の一層の安全を期するという観点で設定されたものである。トルエンなど 35 項目が指針値として設定されている。

3　おいしい水の要件

水のおいしさは，さまざまな条件，環境によって左右されるが，1985 年に厚生省（現厚生労働省）水道環境部長の私的研究会である「おいしい水研究会」がまとめたおいしい水の要件は，**表 1** のとおりである。

4　安全でおいしい水づくりを脅かす問題

大都市を中心にした水道水源の汚染が進行し，既存の浄

表 1　おいしい水の要件

水質項目	数　値
水　温	20 ℃以下
蒸発残留物	30～200 mg/L
硬　度	10～100 mg/L
遊離炭酸	3～30 mg/L
過マンガン酸カリウム消費量	3 mg/L以下
臭気度	3以下
残留塩素	0.4 mg/L以下

星川　　寛

上下水道分野の水処理技術と水質分析計の研究・開発・企画に従事。現在，電機システムカンパニー環境システム本部技師長。工学博士。AWWA 会員，電気学会会員，日本分析化学会会員。

水処理では処理ができない新たな物質が発見され，下記のようなさまざまな問題が次々と表面化し，早急な解決が望まれている。

(1)　臭気物質問題

水道水から検出されている臭気物質は，放線菌や藍藻（らんそう）類の代謝物であるジェオスミンと 2-MIB である[1]。これらの物質が水道水に含まれると，いわゆるどぶ臭くなる。そして，これらの苦情発生のしきい値は，ng/L オーダーと非常に低濃度であり，既存の浄水プロセスでは除去できず，多くの苦情が発生して社会問題になっている。今後，水道水源の水質汚濁が短期間でよくなることは考えられないので，早急な対応が望まれている。

(2)　トリハロメタン問題

トリハロメタンの問題は，臭気物質問題に引き続いて起きてきた問題である。1973 年にオランダの J. J. Rook[2] が，ライン河川水の塩素処理によって発がん性の疑いがあるクロロホルムが生成することを報告して以来，米国では 1979 年に総トリハロメタンの基準値を 0.1 mg/L に設定した。わが国では，4 成分にそれぞれ単独の濃度を設定し，総トリハロメタンの基準値を 0.1 mg/L にした。

トリハロメタンは，水道原水中の有機物質と消毒に使う塩素処理により生成するので，水道原水汚染の進行が止まらない現在，まだまだ問題が解決していない状況にある。

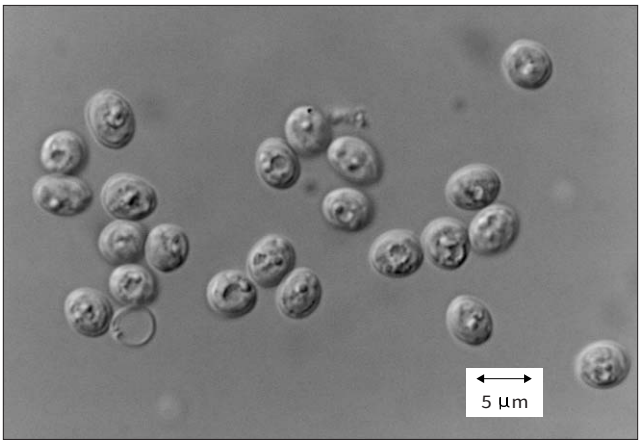
(3)　クリプトスポリジウム問題

クリプトスポリジウムは，**図 1** に示すような 4 ～ 6 μm の球形で，動物の腸管などに寄生する原虫の一種である。感染すると腹痛を伴う水溶性の下痢を起こし，免疫力のない人が感染すると，重症になる可能性がある。

わが国では，1996 年 6 月に埼玉県の越生町で，水道水中にクリプトスポリジウムが混入し，患者数 8,000 人を超える大規模な集団感染が発生した。これを受け厚生省は，同年 10 月にクリプトスポリジウム暫定対策指針を策定し，沪過池出口の濁度を 0.1 度以下に保つように指示している。

一方，1996 年に厚生省が全国の 96 か所の水道水源の調査をし，6 か所からクリプトスポリジウムを検出したと発表している[3]。水道の場合，一度感染症が発生すると影響が大きいため，徹底した対策が必要である。

図 1　Cryptsporidium Parvum



(4)　臭素酸の問題

国際がん研究機関（IARC）では臭素酸（BrO_3^-）は，発がん物質としてグループ 2B（発がん物質の可能性があるもの）に分類している。世界保健機構（WHO）は，1993 年に 25 μg/L の勧告値を発表した。また，米国環境保護局（USEPA）は，規制値を 10 μg/L とした。わが国では 2004 年に改訂が予定されている水質基準（10 μg/L）に追加するかどうかの検討が行われている。オゾン処理で臭素は酸化されて BrO_3^- になるので，十分な BrO_3^- の生成抑制方法を確立しておかなくてはならない。

(5)　その他の問題

以上のほかにも農薬問題，内分泌撹乱（かくらん）物質（環境ホルモン）問題そして鉛問題など，現在の水道界では多くの問題を抱えている。

5　オゾンを用いた高度処理技術

以上の問題を解決するには，既存の処理プロセスではすでに対応できない状況である。そのための方法として，オゾン処理と吸着，生物処理を行う BAC 処理による高度処理技術が，安全でおいしい水づくりのキーテクノロジーになっている。

富士電機は，長い間この処理技術の開発に取り組み，東京都水道局金町浄水場，大阪市水道局柴島浄水場，枚方市水道局中宮浄水場の高度浄水処理設備をはじめ，多くの納入実績を誇っている。**図 2** は中宮浄水場高度浄水施設のオゾン発生装置（5.5 kgO_3/h）である。以下，高度処理技術のうち富士電機が得意とするオゾン処理を中心にその概要

図 2　中宮浄水場高度浄水施設オゾン発生装置

N99-2489-5

を紹介する。

5.1　オゾン発生装置

オゾンの発生方式には無声放電方式，電気分解方式，光化学方式，高周波放電方式，放射線照射方式があるが，この中で工業的に効率よくオゾンを発生させるには，無声放電方式が最もよい。

古くは，空気を原料にしてオゾンを生成していたが，富士電機は酸素を原料にした高濃度オゾン発生装置を製品化し，応用範囲を大幅に拡大している。**表2**に最近のオゾン発生装置の性能を示す[4]。

5.2　オゾン接触池[5]

オゾンは常温で気体なので水処理に使うには，目的物質を必要にして十分な酸化反応をさせるために，オゾン接触池が必要である。小規模の場合は，円筒形の接触池を用いるが，中規模以上になると，**図3**に示すような横流式接触池が多く使われている。接触槽は2，3段が多く，反応を完結させるために滞留槽を設ける場合がある。水深は5～6 mで滞留時間は，10分位で運転されている。

一方，わが国では実用化されている例が少ないが，敷地面積が少ない所などで有利な，下方注入式オゾン接触池がある。水深は20～30 m位でオゾンの吸収率は90 %以上と高い。富士電機はすでに両者の設計技術を確立しており，ニーズに幅広く応じられるようになっている。

5.3　オゾンの反応メカニズム

オゾンの水中での反応メカニズムは，きわめて複雑であるが効率的に目的物質を処理するためには，これを明らかにしておくことが重要である。オゾンが目的物質を酸化するのは，分子状のオゾン（O_3）自身とヒドロキシルラジカル（OH・）である。このOH・はオゾンの自己分解過程で生成され，臭気物質などは主としてこのOH・で酸化される。したがって，オゾンの反応メカニズムを解明する場合は，この自己分解のメカニズムが重要な基本要素になる。

オゾンの自己分解モデルは研究者（Staehelin, Buhler, Hoigne）の頭文字をとってSBHモデルと呼び，古くから利用されてきた。これに対し，富士電機ではこれに有機物質，腐植物質，臭気物質などを加えて**図4**に示すような拡張SBHモデルを開発した。これにより，オゾン接触池の最適設計はもちろん，接触池内での反応がより明確に理解できるようになった。

表2　最近のオゾン発生装置の代表的な性能

内　容	オゾン濃度 (g/Nm³)	動力原単位（放電部） (kWh/kg)
酸素原料オゾン発生器	120	8
空気原料オゾン発生器	20	14

図3　横流式向流3段接触池

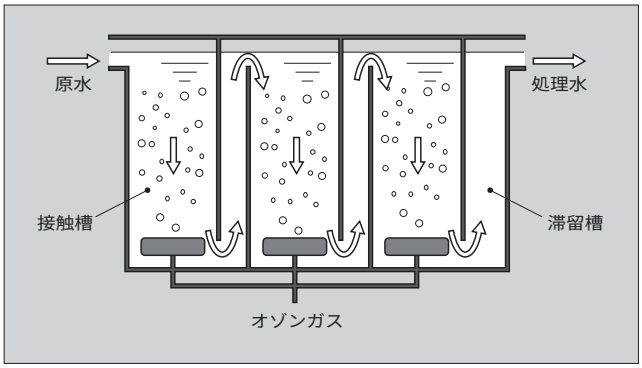


図4　拡張SBHモデル

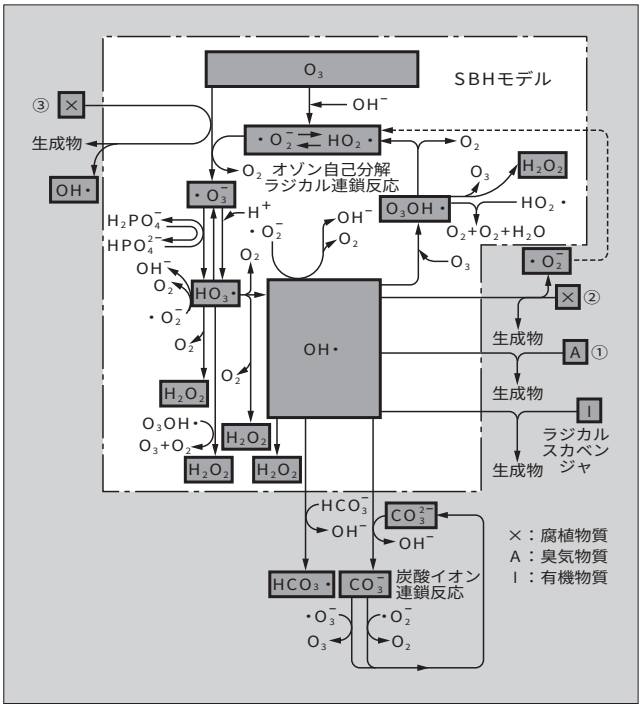
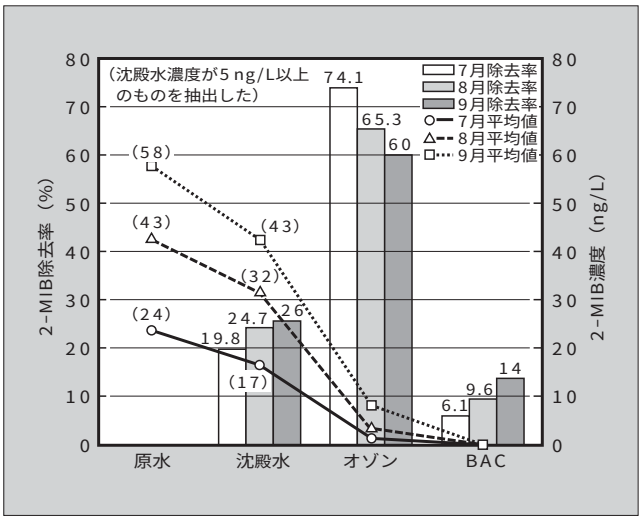


図5　各処理工程における2-MIB除去状況



5.4　高度処理による処理効果

5.4.1　臭気物質の処理効果

臭気物質であるジェオスミンと 2-MIB はオゾンで酸化分解され無臭になる。**図 5** に東京都水道局金町浄水場の処理効果の例を示す[6]。人間が臭気として感じるのは，20 ～ 30 ng/L 程度なので，原水は明らかにおっていたが BAC 処理後はにおわなくなっていることが分かる。東京都では高度浄水設備を導入（1992 年）する前は，水道利用者から毎年多くの苦情が寄せられていたが，導入後はまったく苦情がなくなっている[7]。

図 6　CT 値と感染力低下との関係に及ぼす温度の影響

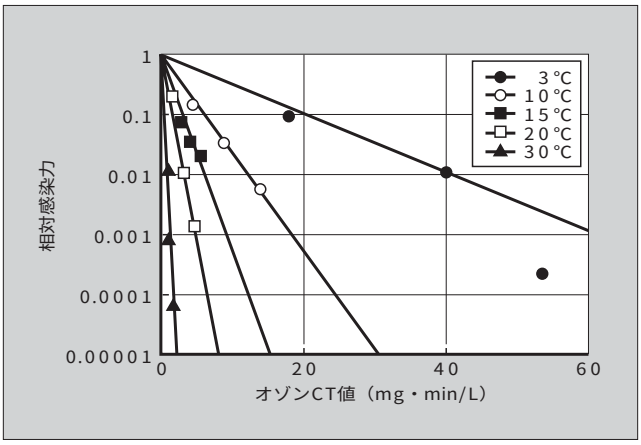
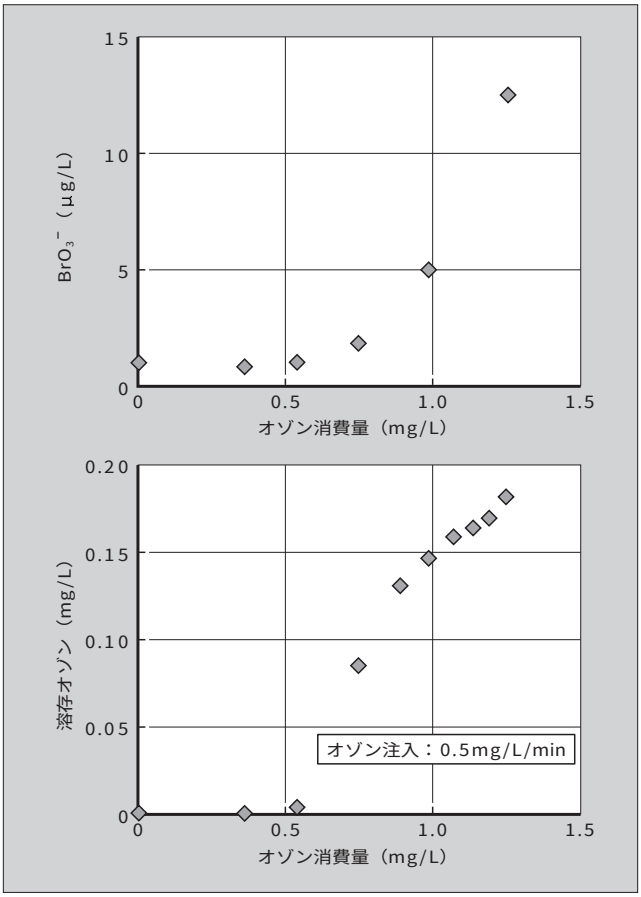


図 7　多摩川原水を用いた臭素酸の生成状況



5.4.2　トリハロメタン生成能処理効果

トリハロメタンは，消毒の塩素処理で有機物と反応して生成するので，有機物を除去すれば低減化できる。東京都水道局金町浄水場の例[7]では，高度浄水設備を導入した1992 年から 2002 年末までの処理工程ごとの平均低減率は，凝集沈殿で約 30 %，オゾン処理で約 10 %，BAC 処理で約 20 %で，全処理工程で約 60 %低減され，基準値以下になっている。

5.4.3　クリプトスポリジウムの不活化効果

クリプトスポリジウムの効果に関する実設備のデータはないが，研究室でのマウス感染性試験結果を**図 6** に示す[8]。これによると，2 $\log_{10}$ 不活化 CT 値（濃度接触時間積）は，水温 20 ℃のとき 3.4 mg・min/L となり，この程度であれば実用化が可能である。しかし，水温依存性が高く，水温が低い場合はかなり厳しくなる。

5.4.4　臭素酸の生成抑制技術[9]

図 7 に臭素が 150 μg/L，溶解性有機炭素化合物（DOC）が 1.3 mg/L の多摩川の水を用いて，オゾン処理をしたときの臭素酸の生成状況を示す。これによると，オゾンは被酸化物質を酸化した後，溶存オゾンが検出されるようになり，これが臭素と反応して臭素酸を生成している。富士電機はこのメカニズムを発見して以来，幾つかの実原水で実験して，溶存オゾン濃度を 0.1 ～ 0.2 mg/L に制御すれば，臭素酸濃度を 10 μg/L 以下に抑制することが可能であることを明らかにした。

6　水質計のラインアップ[10]

富士電機は，水のライフラインにそって監視・制御に必要な水質計を鋭意開発している。**図 8** には，主な水質計のラインアップを示す。

原水関係では，突発性油汚染事故や急性毒物を監視する油膜センサとバイオセンサの原理を利用した水質安全モニタがある。凝集プロセスの凝集剤の最適注入制御に寄与する凝集センサ，クリプトスポリジウムの沪過池からの漏洩（ろうえい）管理に有効な高感度濁度計がある。消毒副生成物のトリハロメタン計（THM 計），トリハロメタン生成能計（THM-FP 計）は，富士電機独自の水質計である。そして，給水水質を常時監視する多項目（色，濁り，残留塩素，pH，電気伝導度）が測定できる給水水質モニタがある。これらの水質計は，安全でおいしい水づくりに役立っている。

7　膜沪過システムの開発[11]

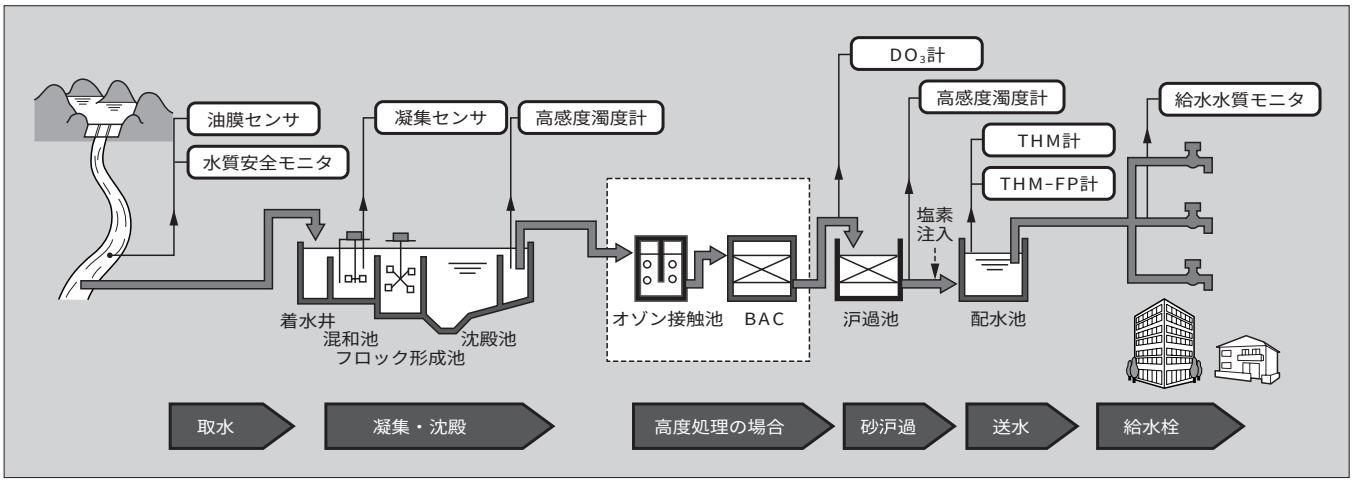
膜沪過システムは，

(1)　原水中の懸濁物質やコロイド物質などの不純物を確実に除去できる。

(2)　用地面積が少なくてすむ。

(3)　凝集剤の使用量が少なくてすむ。

図８　水質計のラインアップ



(4)　簡易で信頼性のある上水プロセスである。

などの特徴があるため，次世代上水処理プロセスとして期待されている。1993 年以降 2002 年 6 月現在で，わが国に導入された膜沪過システムは，280 施設で総処理能力は 13 万 8,000 m^3/日まで発展してきている[12]。

富士電機はこれらの技術の開発に積極的に取り組み，2002 年に(財)水道技術研究センターから水道用膜沪過装置認定書（前オゾン注入式膜沪過システム，オゾン洗浄式膜沪過システム）をいただいた。引き続いて，実証プラントを浄水場に設置して，実用化のための技術開発に取り組んでいる。

8　あとがき

富士電機は長年にわたって，上下水道分野に最先端技術・製品・システムを提供して，広く社会に貢献してきた。これらの中で，ここでは最近特に社会的要求の高い，安全でおいしい水づくりのソリューション技術を紹介した。

今後を展望すると，水道水源の汚染がますます多様化，複雑化することが必至である。富士電機は，これに正面から向き合って問題を解決する技術を開発し，安全でおいしい水を安定して国民に提供できるシステム提供の一翼を担っていく所存である。

参考文献

(1)　矢木修身ほか．水道水のかび臭と対策――かび臭発生機構――放線菌．用水と廃水．vol.26, no.8, 1984, p.3-12.

(2)　Rook, J. J. Production of Potable Water from a Highly Polluted River. Water Treatment and Examination. vol.21, 1972, p.259-274.

(3)　厚生省水道環境部水道整備課報道発表資料．水道水源におけるクリプトスポリジウム等の検出状況について．1997.

(4)　石岡久道．無声放電式オゾナイザの高濃度化・高効率化に関する研究．博士論文（佐賀大学）．2002.

(5)　森岡崇行．水道におけるオゾン処理の臭気物質除去への応用．博士論文（北海道大学）．2001.

(6)　村元修一．東京都金町浄水場のオゾン処理について．平成 4 年度オゾンに関する講演会講演要旨．日本オゾン協会．1992.

(7)　佐藤親房．江戸川を水源とする東京都金町浄水場の高度浄水処理．第 11 回日韓水環境シンポジウム．2002, p.121-130.

(8)　Hirata, T. et al. The effect of temperature on the efficacy of ozonation for inactivating Cryptosporidium parvum oocysts. Wat. Sci. Technol., no.43, 2001, p.163-166.

(9)　加藤康弘ほか．オゾン処理における臭素酸イオン生成を抑制するためのオゾン注入制御システム．富士時報．vol.74, no.8, 2001, p.449-453.

(10)　青木隆ほか．環境水質（湖沼・河川・上水）を見守るセンサ技術．富士時報．vol.74, no.8, 2001, p.444-448.

(11)　Motoyama, N. et al. Advanced Microfiltration system with Ozonation. 第 11 回日韓水環境シンポジウム．2002, p.33-38.

(12)　谷口元．日本の膜ろ過施設の実績．第 11 回日韓水環境シンポジウム．2002, p.143-152.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。