

TOC 分析技術3方式の比較

(“Comparison of three TOC methodologies”, JOURNAL AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, Vol.92, Issue 4, April 2000, by Louis A. Kaplan / Stroud Water Research Center)

<要旨>

殺菌剤及び殺菌副生成物(D/DBR)規則は、飲料水原水の TOC 測定を行うことを求めている。

本研究において、北アメリカの102の流域から集めたサンプル水を用い、3つの方式のTOC分析技術の比較が行われた。サンプルはすべてろ過されたものが使用され、固形分(粒子)を除去し、溶存有機物(DOC)成分に注目したテストが行われた。高温燃焼方式の TOC 分析計は、他の2方式、即ち湿式酸化法(9%)及び湿式紫外線酸化法(10.5%)よりも低い DOC 測定結果を示した。

無機炭素を除去するためにサンプル水を外部通気処理するとき、pH値に依存して非揮発性溶存有機物が失われるが、このことを修正後は、3つの方式は大きな差を示さず同様の値を示した。

筆者は、現在の TOC 分析技術は DOC 測定において正確でかつ等価な測定結果を示すことができると結論するが、それでも、適当に調製された溶解性 TOC 及び固形分 TOC 標準液は、飲料水工業における分析者にとって重要なツールになるものであることを主張する。

溶存有機物(DOC)は、飲料水原水中の天然の有機物(Natural Organic Matter, NOM)の主たる構成要素として便利で直接的な表現である。何故ならば、NOMの色々な影響及びDOC濃度を正確に測定することは、飲料水処理設備の設計や監視において、エコロジー及び環境エンジニアリングの研究のために重要なことであるからである。

10年前に、湿式酸化法による海洋水 DOC 測定の有効性が問題になり⁽¹⁾、このことが飲料水原水の分析においても類似の疑問点を提起した。その後、ある限定された数のサンプルにより比較分析が行われ、湿式酸化法、湿式紫外線酸化法及び燃焼酸化法の間で分析結果が良好に一致すること^(2, 3)、及びそれぞれが正確な測定結果を示すことが確認された。⁽²⁾

しかしながら、酸化前に行う無機炭素(IC)の除去工程において、pH値に依存して非揮発性溶存有機物が失われることが報告された。この様な非揮発性溶存有機物が無機炭素の除去工程において失われると言うことは、サンプル容器内で疎水性の分子が吸着または沈積するためであるということが提案されている。⁽²⁾ 別の研究では、この現象がpHに影響を受けるものであり、また燃焼酸化式だけに見られるものであることを確認している。

幅広い地域からの飲料水サンプルを集めてDOC測定技術を比較検討することは過去に実施されたことがない。分析技術に着目した研究は、無機物質(アルカリ度を含む)や、有機炭素の質と量がDOC分析の精度に対して潜在的に影響を持つので重要である。さらに、最近の分析計比較⁽⁵⁾は旧型のTOC分析計を使用しており、ガス透過膜式導電率測定法⁽⁶⁾を含む多数の先進技術の現世代のTOC分析計を評価することが必要である。米国の飲料水供給事業者にとって、米環境保護局(USEPA)の TOC に対する要求、即ち第一段階「殺菌剤及び殺菌副生成物(D/DBR)規則⁽⁷⁾の一部として、飲料水プラントへの表流水及び地下水流入水の TOC を分析することが求められているので、DOCを広範に調査することは、関連性の高いことである。

有機固形物、即ち TOC 中の浮遊物有機炭素成分は、ある種の表流水源においては主たるTOC源となり得る。⁽⁸⁾ しかしながら、固形物を含むサンプルのTOC分析は本研究の目的ではない。

本研究は溶存している成分に対する測定精度に焦点を当てている。本研究の主目的は、(1)地理的に多様な水源において、浄水設備流入水のDOC濃度範囲を調べること、(2)USEPA が承認した異なる方式の分析技術間で測定結果がどの様に異なるか比較すること、(3)同一の水源水により、異なった分析方式での詳細なテストの実施、(4)分析中にpH値に依存して非揮発性 DOC が失われる原因となるメカニズムを解明すること、である。

1. テスト方法

1.1 浄水設備の選定

1996年に、米国及びカナダの240箇所の浄水設備にレターが送付され、水源についての情報提供とDOCの評価テストへの参加意志について質問がなされた。地理的に広範な参加者が得られるように考慮された。浄水場の調査は筆者によって1996年10月から1997年1月にかけて行われた。地下水に比べ

ると一般的により高い DOC を含むので表流水の方に重きが置かれた。⁽⁹⁾

1.2 ガラス容器の準備

ガラス容器は全てホウ珪酸塩であり、500°Cで6時間燃焼して有機物フリーとした。250mLの容器と40 mLバイアルのいずれも PTFE シリコンセプタのネジ蓋付き採集容器が使用された。セプタは10%の二硫酸ナトリウムに60°Cで1時間浸漬し、TOC フリーの純水でリンスして洗浄された。

1.3 サンプル水の保存とろ過

テスト参加の浄水場には、アジ化ナトリウム(サンプル充填後の最終濃度が2.7mMとなるように調製)を入れた250mLの容器と、リン酸(最終濃度15mM)を入れた2本の40mLバイアルが送付された。⁽¹⁰⁾ サンプル水を保存するのに二通りの方法が採られた。これは本研究で使用した分析計のあるものにはアジ化物は不適格であるからである(後段で詳述)。さらに、二通りの保存方法を採用することによって、保存効果を評価することが出来た。各浄水場で未処理水(即ちプラント流入水)を採取し、キャップをして、保存のために良く振って混合し、昼夜便で Stroud Water Research Center に向けて発送した。

1箇所の水源における集中的なサンプリングは White Clay Creek (ピードモント地方)においてなされ、サンプルが保存・貯蔵されることによる影響をなくして分析計を比較する検討が行われた。オートサンプラー(Isco 社製)により、1999年3月の雪解け期と1998年5月の降雨時に毎時1Lのサンプル水を採取した。雪解け期の4つのサンプリングポイントと降雨時の10のサンプリングポイントが DOC 濃度範囲調査のために選定された。White Clay Creek のサンプルは保存薬品を添加せずに5°Cで冷蔵保存され24時間以内に測定にまわされた。

全てのサンプル水は燃焼処理(500°Cで6時間)したグラスファイバーフィルターでろ過された。(GF/F, Whatman, Maidstone, England) 250mL 及び1Lのサンプル水は蠕動式ポンプとインラインのフィルターによってろ過を行った。ろ過水は6本の40mLバイアルに入れ、セプタ付きキャップでシールし、分析を行うまで冷蔵保存した。40mLバイアルのサンプル水はシリンジタイプフィルターとシリンジによってろ過を行った。

1.4 サンプル水の分析

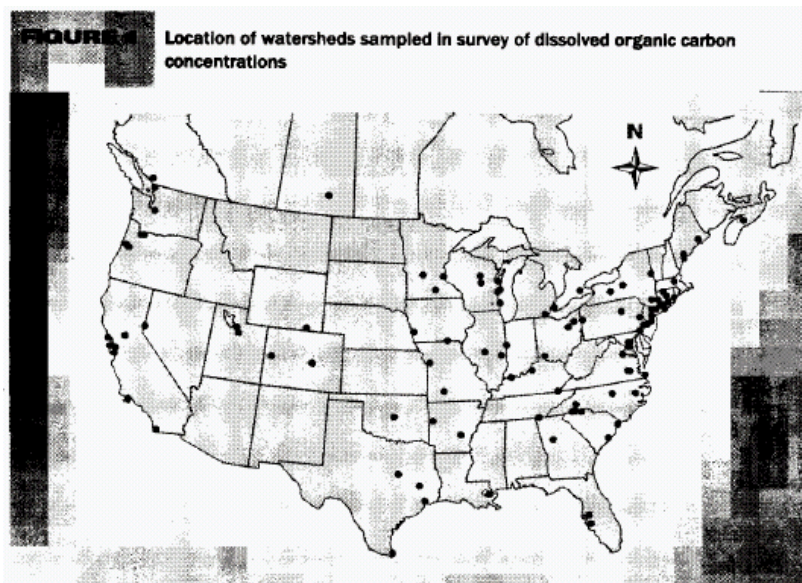
浄水場流入水サンプルは4台の分析計により分析された。2台の白金触媒式湿式酸化NDIR分析計(OI社700型及び1010型)、1台の湿式UV酸化導電率検出法の分析計(Sievers 社 800型)、及び1台の白金触媒式燃焼酸化NDIR分析計(島津社5000A型)である。各分析計は各社のオートサンプラーと共に運転された。

湿式UV酸化法の分析計はメーカーのIC除去モジュールと共に運転された。これは真空脱気モジュール、真空ポンプ、及び活性炭とソーダライムのフィルターから構成されるユニットである。大部分のICを除去後、DOCがTCとICの差として測定された。白金触媒式湿式酸化法分析計では、酸化反応に使用されるのと同じ反応器の中でサンプル水が通気処理される。燃焼式分析計は、NPOCモード(Non-purgeable Organic Carbon)で運転された。保

存処理無しまたはアジ化処理したサンプル水がオートサンプラーに設定する前に塩酸によりpH2に調整された。次いでサンプル水は通気処理してIC除去後、直ちに高感度触媒を充填した燃焼管の中に注入された。本研究においては燃焼式分析計だけが外部通気方式によっている。

アジ化処理したサンプル水のDOCが3方式の白金触媒型分析計で測定された。一方、酸添加処理(pH2またはそれ以下)したサンプルのDOC濃度は1台の白金触媒湿式酸化法分析計と湿式UV酸化法分析計で測定された。White Clay

図1 DOC 濃度調査に参加した浄水設備の場所



Creek の降雨時サンプル水も同様に測定が行われたが、2台の湿式酸化法分析計の内の1台と、他の2方式(湿式 UV 酸化及び燃焼式)の分析計が使用された。

pH値に関係して DOC が失われることを更に検討するために、2つの実験が行われた。第1の試みは、この現象の一般性を、浄水設備流入水をアジ化処理した36のサンプル水を含む広範な調査の一部により評価した事である。これらのサンプル水は白金触媒湿式酸化法分析計と白金触媒燃焼酸化法分析計により2つのpH領域、即ちpH2とpH3~4の領域において分析が行われた。二つ目の試みは、雪解け期の White Clay Creek のサンプル水を採取し、pH2で外部通気処理を行い、全ての分析計(湿式酸化、湿式UV酸化、燃焼式)で分析を行った。3つのサンプル処理方法が試された。即ち、(1)ろ過以外の前処理を行わない、(2)pH2で通気処理 - サンプルに酸添加してpH2とし、外部通気処理を行ったあと、各分析計で分析する、(3)pH3~4で外部通気処理 - pH3~4で外部通気処理後、燃焼式分析計で測定する。KHPによる校正が全分析計に対して行われた。IC(炭酸ナトリウム)が燃焼式に対して追加的な校正チェック用に使用された。酸添加処理無しで測定した、酸添加処理したサンプルでICを測定する。炭酸だけが炭素として存在する場合、IC値とTC値は同じでなければならない。異なるpHレベルで通気処理によるICの除去効率をIC値の分析によって評価した。校正は市販の標準液によって検証された。

1.5 データ収集と解析

2台のTOC分析計がRS232Cポートを経由してミニコンに接続され2台がPCに接続され各メーカーが提供するソフトウェアにより運転された。データは市販の統計ソフトで解析された。統計解析として、t-test、変動解析(ANOVA)、繰り返し測定 ANOVA、多変量解析、一変量解析、共分散解析(ANCOVA)、及び the extra sum of squares principle が行われた。(11)

2. 結果と考察

2.1 各所の水源水 DOC 濃度概観

合計102箇所の水域をカバーする浄水設備が調査に参加した(図1)

1台の白金触媒湿式酸化法 TOC 分析計のデータによれば、浄水設備流入水の DOC は幅広い範囲に分散しており、地下

図2 DOC 濃度の度数分布(%)

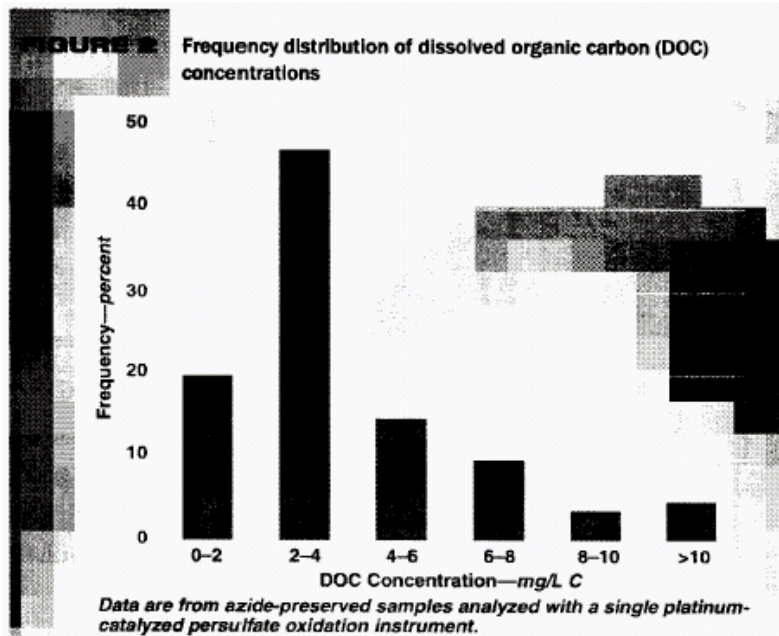
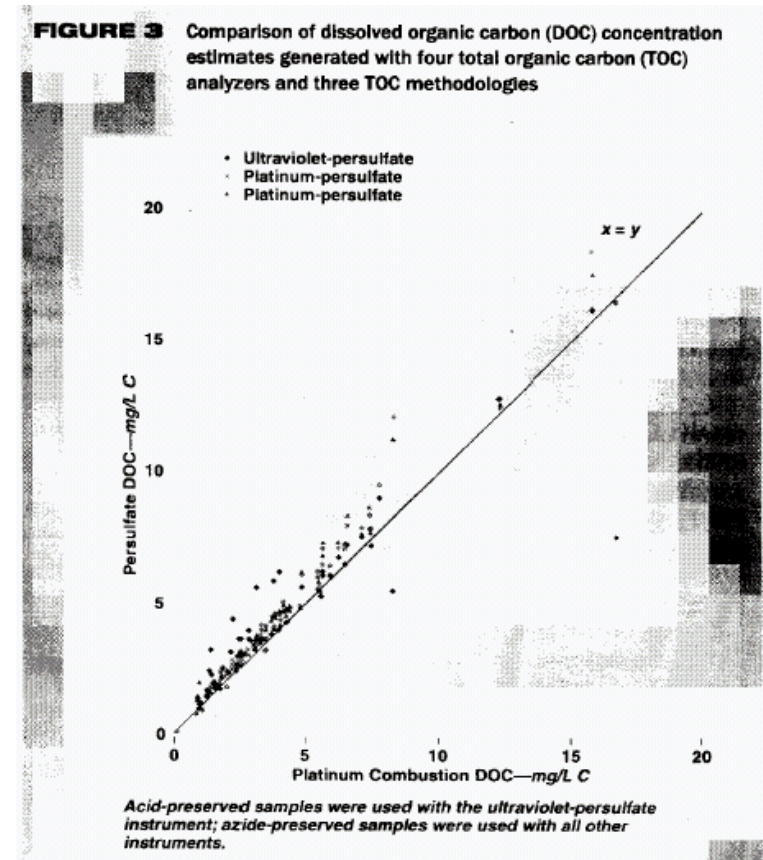


図3 3方式の TOC 分析計による DOC 測定結果比較



水に対する 0.23mgC/L から大西洋側平

野部の表流水に対する 38.01mgC/L までであった。平均濃度は 3.13mgC/L であった。概略 80%のサンプル水が DOC 濃度 2mgC/L 以上であり、34%が 4mgC/L 以上、また 8%が 8mgC/L 以上であった。

(図2参照)

2.2 分析計の比較

TOC 分析計間において全般に良好な測定結果の一致を見た。個々の浄水設備での分析計比較データの 75%が 15%以内で一致をみた。

湿式酸化法分析計と湿式UV酸化法分析計での測定結果は大きな違いを示さなかったが、燃焼式分析計の測定結果は湿式酸化法及び湿式UV酸化法のものとは大きく異なった。

湿式酸化法と燃焼法の平均差は 10.5%であり、湿式UV酸化法と燃焼法のそれは 9%であった。燃焼式の測定結果は一貫して他方式より低かった。

調査データに対する平均濃度は2台の湿式酸化法が 3.10mgC/L 及び、3.13mgC/L、湿式UV法が 3.25mgC/L、燃焼式が 2.76mgC/L であった。

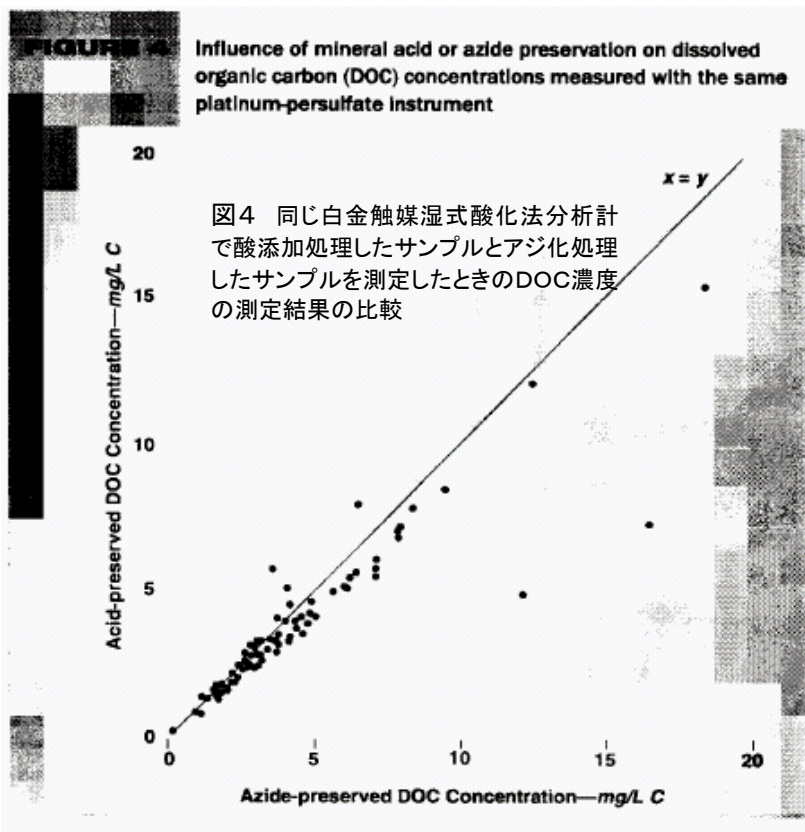
図3は、DOC 濃度に対する分析計の違いを、燃焼式のデータを横軸にとり、それ以外の分析計のデータを縦軸にプロットして示したものである。ほとんどのデータが1:1の対応線より上に示されている。図3には濃度の高いデータ1点が示されていない。このデータを図に示すと他のデータの表示が圧縮されてしまうからである。このデータは2台の湿式法では 35.97mgC/L、38.01mgC/L、湿式UV酸化法では 34.38mgC/L、燃焼式では 33.41mgC/L であった。

2.3 濃度の影響

濃度レベルは分析計の測定結果の変動に直接的な影響を示した。DOC 濃度が高くなるに連れて測定値の違いも増加した(図3)。2台の湿式酸化法の DOC 測定結果はほぼ同じであった($R^2=0.994$)。このことにより濃度の影響に対する統計的な重要性のテストが出来た。このために筆者は1台の湿式酸化法分析計と燃焼式分析計で得られる ANCOVA と他方の湿式酸化法分析計で得られる値を比較した。燃焼式と湿式酸化法では傾きが異なっていた。濃度レベルが影響を持つと言うことが観察されたが、このことは非揮発性有機物が通気処理によって失われるのは、外部通気処理中にガラス容器に疎水性分子が沈積または吸着のいずれかの結果であると言う提案と一致する。何故なら濃度が上昇するに連れて沈積または吸着による非揮発性有機物のロスが加速したからである。

2.4 保存法の影響

サンプル保存法として何を選ぶかによってサンプル DOC 結果に大きい影響を示した。アジ化処理したサンプル水を湿式酸化法で測定した結果の DOC 値は、同じ分析計で酸添加処理したサンプル水よりも6%高い値を示した(図4)。保存剤そのものの有機炭素濃度の影響度はこの比較研究に先立って行い、100 μ gC/L 以下であることを確認した。ここで報告した6%の違いは、リン酸、硝酸、硫酸等の鉱酸を用いて保存処理する場合に以前報告した11~29%の違いよりは小さく、加水分解や脱炭酸反応のためである。しかしながら、11~29%の測定ロス室温で貯蔵されたサンプルの測定であった。加水分解や脱炭酸反応によって有機物は IC に転換するが、温度に対してセンシティブである。アジ



化ナトリウムはマイナスの DOC 値を示すので湿式UV酸化法では使用できない。アジ化物の三重結合はUV光を吸収し、分析計のTCチャンネルにおいては分解されるがICチャンネルでは分解されない。アジ化物は、mMの濃度で存在すると選択性膜を透過しICチャンネルの導電率がTCチャンネルよりも大きくなってしまう。HClも保存剤として使われてきているが⁽¹²⁾、塩素イオンによる酸化妨害性があるため、UV酸化法では必ずしも使われず湿式酸化法で使われている。⁽¹³⁾

図3、図4において湿式UV法の測定結果が非常に低いデータが2点見られるが(燃烧式よりもそれぞれ51%、121%低い)、これは分析計のためではなく、酸添加保存法の影響として説明できる。このことは、はじめに酸添加処理したこの2点のサンプルを湿式法で測定(4.923±0.137mgC/L、及び7.287±0.024mgC/L)した結果と、湿式UV酸化法で測定(5.540±0.043mgC/L、及び7.600±0.033mgC/L)した結果を比較し、次いでアジ化処理したサンプルを湿式酸化法で測定(12.243±0.272mgC/L 及び16.597±0.031mgC/L)した結果と比較することによって示すことができる。

これら2点のサンプル水はかなり藻類が繁茂した貯水池から採取された。この測定値の違いによって、藻類からの滲出物は土壌を源とするDOCよりも酸に対して不安定である可能性を示すものである。(訳者注:藻類由来の有機成分が酸により分解促進され、同じサンプルをアジ化処理して測定したときよりも低くDOCが測定されたということ。) 鉬酸はよくDOCサンプル水の保存剤として使用される。上記のデータは保存剤が使用されるときは注意が必要であることを示している。

2.5 同一水源水の測定比較

1998年5月の荒天時に White Clay Creek のサンプル水が採取され24時間以内に分析が行われた。DOC の測定範囲は概略3~9mgC/Lであった。各分析計は類似の濃度変化パターンを示したが(図5)、燃烧式分析計の測定結果は湿式法のものよりも非常に低かった。平均で湿式法TOC分析計間の測定値は1.3%(範囲0.1~3.3%)の違いがあったが、燃烧式分析計の測定結果は湿式法に比べると11.8%(範囲6.8~14.5%)の開きがあった。サンプル水は採取後24時間以内に分析されているので、上述の分析結果の違いがサンプル水の保存方法に関わる要因によることは考えられず、広範な地域で実施した調査において観察された分析計の測定結果の違い(訳者注:燃烧式が湿式よりも低いDOC測定値を示すということ)の有効性を示すものである。

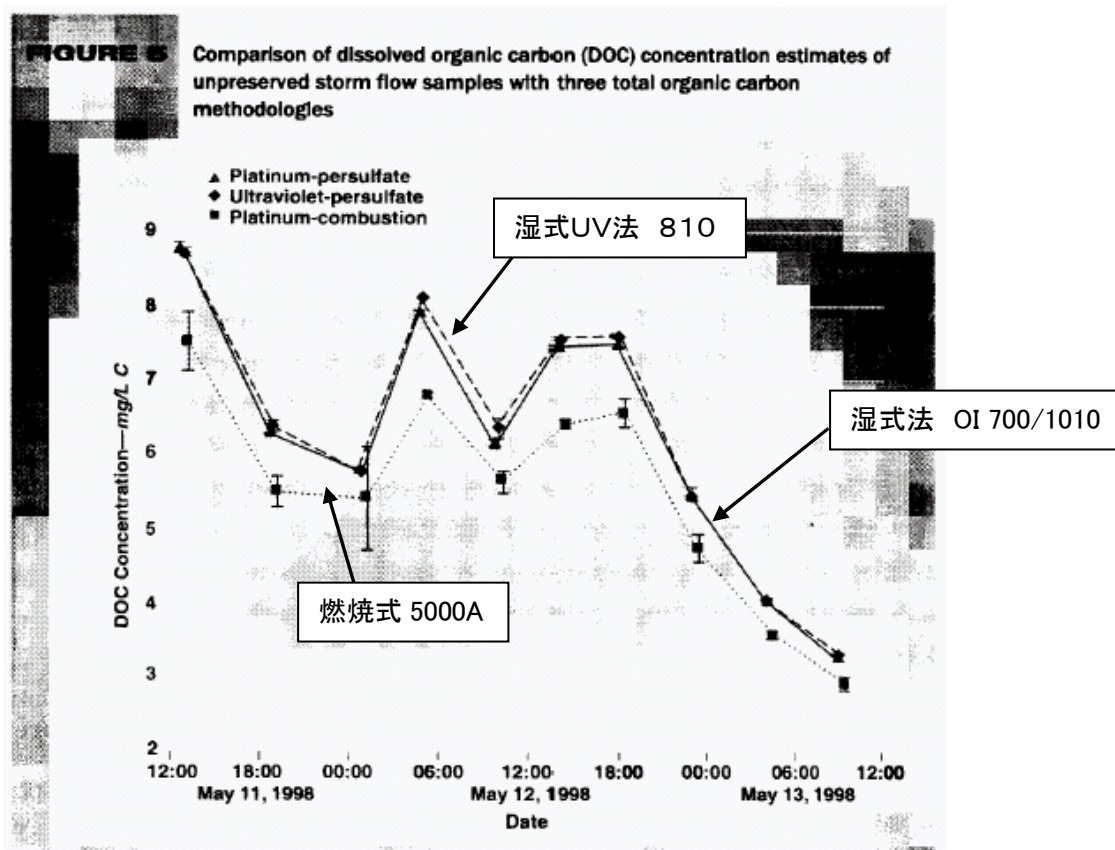


図5 3方式の TOC 分析計で未保存処理の荒天時河川水を分析したときの DOC 測定値の比較

2.6 pHの影響

pH2及びpH3～4で分析した浄水設備入口水の DOC データ比較によって、分析計の測定結果の違いは pHの影響と関わりがあり、広い範囲の DOC 濃度、及び水源水質において見られることが確認された(図6)。

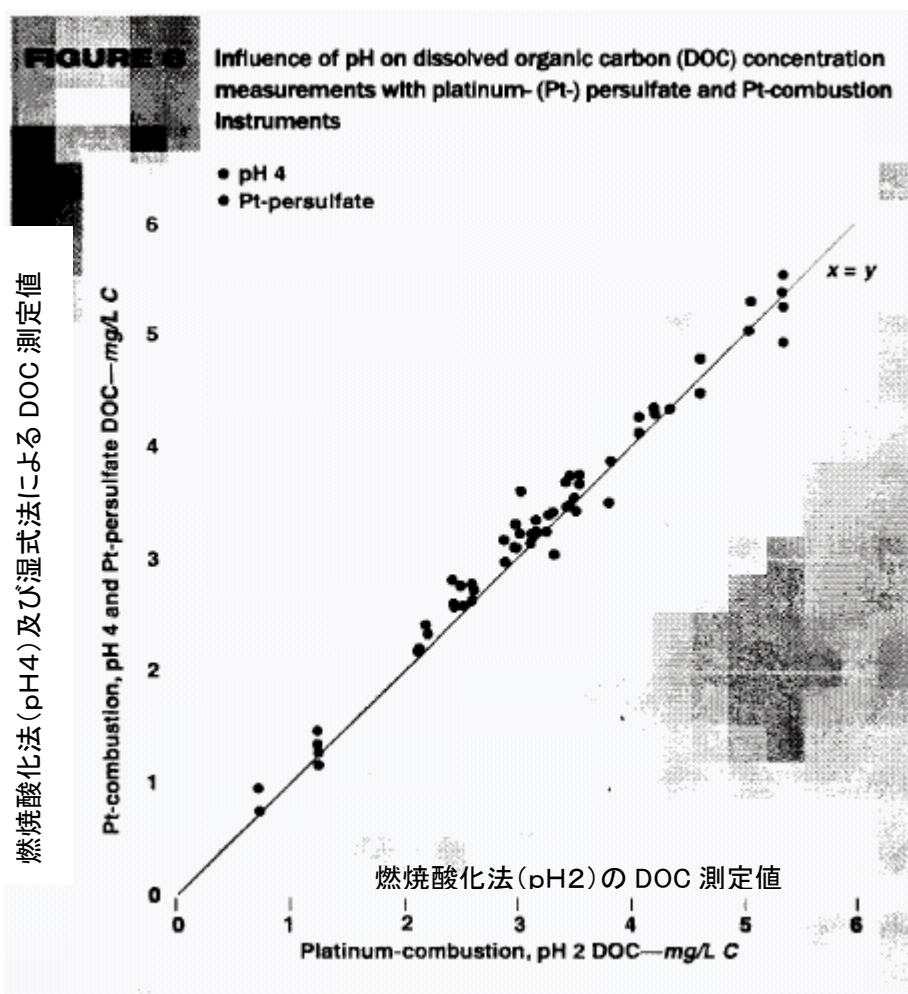


図6 白金触媒湿式酸化法と白金触媒燃焼酸化法 TOC 分析計による、DOC 測定結果にpHが及ぼす影響

同一の分析計で、また湿式酸化法でpH2処理とpH3～4処理の場合の測定結果の違いは大きかった。これらの違いはpHが場合にIC除去が不完全であるためではない。pH4では、99.6%のICが二酸化炭素として存在する。IC濃度をチェックしたらpH4でサンプル水の通気処理を行えばICは完全に取り除かれることが確認された。pH3～4では湿式法及び燃焼法による分析結果は大きく異ならなかった。また、pH2では湿式法の幾つかの測定結果は燃焼式の結果よりも低かった。これらのデータでは燃焼式の強い酸化力がpHの影響を相殺したかも知れない。pHがDOC濃度の測定結果に影響するということは以前の報告^(2, 4)と一致し、大部分の疎水性分子は強酸性の条件で溶解度が最小になるのでこの現象に疎水性分子が関わっていると言う考え方を支持するものである。

2.7 DOC損失のメカニズム

pHがDOC測定に影響するとして、pH2に酸添加処理を行い湿式法で測定した102の流域のサンプル水DOC測定結果が、アジ化処理され次いでpH2に調整され燃焼式で測定した結果よりも非常に高い値になったかを説明する必要がある。pHの影響にとって通気処理のステップが重要であるとの推測から、White Clay Creek の雪解け水サンプルによりテストが行われた。

サンプル水はpH2に調整され、外部通気処理され、湿式法、湿式UV法及び燃焼式各TOC分析計で分析された。DOC濃度は、pH3～4に調整された同サンプル、または分析計による通常操作(分析計外ではろ過のみ)によるサンプル分析のいずれの場合よりも低かったが、分析計間相互には差は大きくなかつ

た(表1)。さらに各分析計において、pH処理の違いによるDOC濃度差の絶対値及び相対値は、DOC濃度が最も高いところで最も大きくなっている。また、pH3~4で白金触媒燃焼式で測定したDOC濃度は、白金触媒湿式法で測定した結果に非常に近かった。

表1. pH2に調整後外部通気処理によるDOC濃度測定結果への影響

日時	白金触媒燃焼式		白金触媒湿式酸化法		湿式UV酸化法	
	pH2 外部通気処理	pH3~4 外部通気処理	pH2 外部通気処理	分析計による コントロール	pH2 外部通気処理	分析計による コントロール
1999,3/16,12:00	1,854±17	1,915±8	1,896±10	2,035±17	1,975±49	2,115±7
1999,3/17,18:00	3,088±75	3,356±14	3,032±15	3,310±38	3,280±28	3,450±14
1999,3/18,00:00	3,410(n=1)	3,794±7	3,481±20	3,767±33	3,795±7	3,990±0
1999,3/22,12:00	5,516±114	5,893±90	5,322±78	5,849±58	5,863±90	6,440±17

これらの結果はサンプル水の酸添加調整ではなく、通気処理の方法がDOC損失のメカニズムにとって重要であることを示している。通気処理プロセスは、酸添加したサンプル水にガスを送ってバブリングし二酸化炭素と置換するものであり、気泡は気液界面に達すると溶解または崩壊する。海水の波動や淡水の滝等、自然水源の乱れに関する研究⁽¹⁵⁾によれば、気泡が溶解するときに有機固形分が生成されることが報告されている。自然水源においては、気泡界面の表面張力が低く、疎水性の分子が引きつけられ、気泡が溶解または崩壊するときに、疎水性分子の濃縮が起こる。同じ現象が自然水及び疎水性分子の入ったサンプル容器内においても、サンプル水がpH2に調整され、外部通気処理を行う時に発生し得る。さらにこの様な現象は前述の濃度及びpHの影響と一致する。

広域水源のDOC測定調査において、サンプル水を外部通気処理しているのは燃焼式TOC分析計だけである。湿式酸化法もpH2への酸調整と通気処理の工程を含むが、これらの工程は最終的に酸化が行われる反応容器の中で行われている。従って、通気処理によってDOC損失が起きても、損失分は酸化工程において回収可能である。このことは、非揮発性有機物が測定中に失われるということが、外部通気処理を行っている分析計において起こり得るということを意味するものである。さらに、この様なDOCの損失は、pHを3~4に調整するか、DOCをTC-ICの差として求めることによって防ぐことができる。しかしながら、自然水のIC濃度は、通常DOC濃度に比較してかなり高く、TC-ICから計算したDOC分析は、大きい数字同士の小さな差を求めることになるため、測定精度が問題となる。

3. 結論

102箇所の水域において行われたDOC濃度調査で得られたデータは、TOC分析技術を広範なデータと比較する初めての試みである。全体調査及び同一水源における詳細試験のどちらにおいても、燃焼式TOC技術は、IC除去プロセスにおいてpHに依存して非揮発性有機物が失われてしまう結果、他の方式に比べてDOCを低く測定してしまった。サンプル水の外部通気処理をpH3~4で行えば、いずれのTOC分析計も類似のTOC濃度を示す。このことは、海水^(16, 17)及び淡水^(2, 3)においてなされた以前のテストと合致し、旧式の分析計を使って行った淡水での研究⁽⁵⁾を否定する。

さらにここで報告された研究内容は、分析計比較のデータベースを広範な地域に拡張しただけでなく、新しい分析技術に対する情報も含んでいる。選択透過性膜導電率検出法は、IC除去モジュールと湿式UV酸化法と結んで、幅広い範囲の環境水の測定において他の方式に比肩する測定結果を示した。

本研究では、少なくとも2つの未解決の問題について論じていない。即ち、固形分に対する分析計の傾向と性能である。本研究は自然水中の溶解成分について行われた。本当の濃度(真値)は分からないので、分析計の真値からのずれを評価することは出来なかった。TOC分析計を校正するために使用される物質は容易に酸化され脱イオンされた水に溶解する。このような標準液は分析計が校正されているか、あるいは何らかの漏れがあるかを示すことができる。しかしながらこの様な標準液はNOM(天然有機物、Natural Organic Matter)中の難分解性物質を正確に測定できるか、測定妨害物質はないか、或いはICとDOCの完全分離がなされているかについては示さない。

本研究で全てのサンプル水はろ過されたので、本研究は分析計が有機固形成分を測定できるかどうかの情報は提供していない。USEPAが浄水設備流入水のTOC測定を求めていることを考慮して、溶解性及び固形物有機炭素に対する適当な性能標準液の問題が検討されるべきである。

Acknowledgment

The author thanks S.L. Roberts and M.D. Gentile for technical support, E.L. Zwilling and J.D. Newbold for help with the statistical analyses, H.E.P. Brooks for assistance with data management and graphics, and S.J. VonTill for word-processing help. The author also thanks the drinking water utilities that participated in the survey. This research was funded by the AWWA Research Foundation under project number 251-95 and the Stroud Foundation.

References

1. SUGIMURA, Y. & SUZUKI, Y. High-temperature Catalytic Oxidation Method for Nonvolatile Dissolved Organic Carbon in Seawater by Direct Injection of a Liquid Sample. *Marine Chem.*, 24:105 (1988).
2. KAPLAN, L.A. Comparison of High-temperature and Persulfate Oxidation Methods for Determination of Dissolved Organic Carbon in Freshwaters. *Limnol. Oceanog.*, 37:1119 (1992).
3. BENNER, R. & HEDGES, J.I. Test of the Accuracy of Freshwater DOC Measurements by High-temperature Catalytic Oxidation and UV-promoted Persulfate Oxidation. *Marine Chem.*, 41:161 (1993).
4. FUKUSHIMA, T. ET AL. Freshwater DOC Measurements by High-temperature Combustion: Comparison of Differential (DTC-DIC) and DIC Purging Methods. *Water Res.*, 30:2717 (1996).
5. KOPRIVNJAK, J.F. ET AL. Underestimation of Concentrations of Dissolved Organic Carbon in Freshwaters. *Water Res.*, 29:91 (1995).
6. Sievers Corp. Operation and Service Manual, Total Organic Carbon Analyzer, Model 800/810/820. Boulder, Colo. (1993).
7. USEPA. Stage 1 Disinfectants and Disinfection By-products Rule. EPA 815-F-98-010, Washington (1998).
8. MALCOLM, R.L. & DURUM, W.H. Organic Carbon and Nitrogen Concentrations and Annual Organic Carbon Load of Six Selected Rivers of the United States. Geological Survey Water-Supply Paper 1817-F, Superintendent of Documents, US Government Printing Ofce., Washington (1976).
9. KAPLAN, L.A.; REASONER, D.J.; & RICE, E.W. A Survey of BOM in US Drinking Waters. *Jour. AWWA*, 86:2:121 (Feb. 1994).
10. KAPLAN, L.A. Field and Laboratory Procedure to Collect, Process, and Preserve Freshwater Samples for Dissolved Organic Carbon Analysis. *Limnol. Oceanog.*, 39:1470 (1994).
11. DRAPER, N.R. & SMITH, H. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons, New York (1966).
12. NORRMAN, B. Filtration of Water Samples for DOC Studies. *Marine Chem.*, 41:239 (1993).
13. AIKEN, G.R. Chloride Interference in the Analysis of Dissolved Organic Carbon by the Wet Oxidation Method. *Envir. & Sci. Technol.*, 26:2435 (1992).
14. SUTCLIFFE, W.H.; BAYLOR, E.R.; & MENZEL, D.W. Sea Surface Chemistry and Langmuir Circulation. *Deep-Sea Res.*, 10:233 (1963).
15. PETERSEN, R.C. JR. In Situ Particle Generation in a Southern Swedish Stream. *Limnol. Oceanog.*, 31:432 (1986).
16. OGAWA, H. & OGURA, N. Comparison of Two Methods for Measuring Dissolved Organic Carbon in Sea Water. *Nature*, 356:696 (1992).
17. SHARP, J.H. ET AL. Reevaluation of High-temperature Combustion and Chemical Oxidation Measurements of Dissolved Organic Carbon in Seawater. *Limnol. Oceanog.*, 38:1774 (1993).



About the author: Louis A. Kaplan is senior research scientist at Stroud Water Research Center, 970 Spencer Rd., Avondale, PA 19311-9514. He holds a BA from Franklin and Marshall College in Lancaster, Pa., an MS from the University of California at Davis, and a PhD from the University of Pennsylvania in Philadelphia. He has 25 years of research experience in the ecology of streams and rivers, with a focus on the biogeochemistry of dissolved organic matter and microbial ecology. A fellow of the American Academy of Microbiology and a member of AWWA, the American Society for Microbiology, and the American Society of Limnology and Oceanography, Kaplan has published in a number of journals, including *Applied and Environmental Microbiology*, *Limnology and Oceanography*, *Organic Geochemistry*, and *Hydrobiologia*.

訳者注記:本書はセントラル科学株式会社の社内用に翻訳を行ったものであり、誤訳や本文の記載内容によって第三者が不利益を被ることがあったとしても本文に対しての責任を負うものではありません。段落番号は原文にありませんが、理解容易にするために訳者が付けたものです。