JAEA-Research 2008-105



小型MACROによる塩水侵入試験の光学的手法を 用いた塩水濃度分布の定量的評価

Quantitative Evaluation of Saltwater Concentration Distribution using Optical Method for Saltwater Intrusion Experiment by Mini-MACRO

> 佐藤 久 高須 民男* 澤田 淳 Hisashi SATO, Tamio TAKASU* and Atsushi SAWADA

> > 地層処分研究開発部門 システム性能研究グループ

Peformance Assessment Research Group Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

小型 MACRO による塩水侵入試験の光学的手法を用いた塩水濃度分布の定量的評価

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット 佐藤 久*、 高須 民男*、 澤田 淳+

(2008年12月16日受理)

沿岸地域では、淡水と海水の密度差に起因した塩水侵入現象が生じており、この塩水侵入現象 により塩水楔が形成されることが知られている。放射性廃棄物の地層処分事業を進める際には、 この様な密度流に起因して地下深部に侵入する塩水の濃度とその分布を適切に評価する技術の開 発が課題となっている。

密度流に起因した塩水侵入現象は、塩水の移流分散と密度流の連成問題であり、その数値解法 の検証が課題のひとつで、これまでに数多くの検討が実施されてきた。同様に、筆者らは均質な 場を想定した実験装置(小型 MACRO)を用いて塩水楔を対象とした実験を実施し、数値解析コ ードによる解析結果との比較から、解析結果と実験結果は整合的であることを確認してきた。し かし、数値解析結果との比較に用いた実験データは、染料を塩水のトレーサーとして、色の有無 を目視で判断した塩水楔の形状に着目した定性的な評価データであり、塩水と淡水の遷移帯にお ける濃度分布についての定量的な評価には至っていない。

このため、筆者らは塩水濃度分布を考慮した数値解析コードの検証データの取得を目的として、 小型 MACRO を対象とした塩水濃度分布の光学的手法による定量的な計測技術を開発し、塩水楔 の侵入が定常に達した状態における、定量的な濃度分布を取得した。得られた濃度分布を用いて 遷移帯における塩水濃度分布を分析した。その結果、塩水と淡水の遷移帯での定量的な濃度分布 を取得することが可能となったため、塩水と淡水の遷移帯での分散を考慮した解析コードの検証 データを提示することが可能となった。また、遷移帯に垂直な方向の濃度分布を詳細に分析する と、塩水側での濃度の変化率よりも淡水側での濃度の変化率が大きく、塩水側と淡水側で非対称 となっており、この原因として塩水側と淡水側での流速の違いが影響していることが推察された。

核燃料サイクル工学研究所(駐在):〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 ※技術開発協力員 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務) *検査開発株式会社 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務) +核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課(兼務)

i

Quantitative Evaluation of Saltwater Concentration Distribution using Optical Method for Saltwater Intrusion Experiment by Mini-MACRO

Hisashi SATO^{**}, Tamio TAKASU^{*} and Atsushi SAWADA⁺

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 16, 2008)

In coastal area, the density difference between seawater and freshwater causes seawater intrusion under the freshwater. It is known as "saltwater wedge". The methodology to evaluate saltwater distribution due to density driven flow might be crucial for advancing the radioactive waste disposal project.

Although the extensive verification studies for modeling the saltwater wedge have been reported, it is still under the discussion because of the complex coupled process of migration of saline by advection-dispersion, seepage flow by Darcy flow and density driven flow. We have conducted a saltwater intrusion experiment using Mini-MACRO for investigating of saltwater intrusion phenomenon. And, we had confirmed the shape of saltwater wedge obtained from the experiment was coordinate with an analysis result. However, because saltwater wedge was visualized by using dye tracer, it was qualitative comparison focuses on shape. The saltwater concentration distribution across the transition zone of salt water and freshwater was not evaluated quantitatively.

In order to obtain the data for verifying the codes that can consider saltwater density distribution, we developed the quantitative measurement technology by optical method for Mini-MACRO. And, a quantitative concentration distribution data of saltwater wedge under the steady state saltwater intrusion condition could be obtained. In addition, saltwater concentration distribution in the transition zone was analyzed. As a result, by acquiring the quantitative concentration data of saltwater and freshwater distribution in the transition zone, it might be concluded that we could show the verification data of the numerical codes with considering the dispersion in the transition zone of saltwater and the freshwater. An asymmetric concentration distribution at transition zone was shown the concentration gradient perpendicular to the saltwater-freshwater interface at freshwater side was larger than the concentration gradient at saltwater side. It could be speculated that the asymmetric distribution might be caused by the difference of flow velocity between the saltwater side and freshwater side.

Keywords: Mini-MACRO, Saltwater Intrusion, Density Driven Flow, Optical Method, Quantitative Evaluation

^{*}Collaborating Engineer: Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories(Additional Post)

^{*}Inspection Development Company LTD.: Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories(Additional Post)

⁺Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories(Additional Post)

目次

1. はじめに	••••••1
2. 試験装置の概要	
2.1 試験装置	2
2.2 撮影装置	
3. 測定原理	4
3.1 光学的手法の基本原理	4
3.2 光学的手法の成立条件	4
3.3 Kubelka-Munk の関係式	4
3.4 染料濃度と反射率の関係	
3.5 正規化濃度の空間的な不均質性について	
4. 塩水楔の濃度分布測定	
4.1 塩水楔の濃度分布測定結果	
4.2 フーリエ変換を用いたノイズ低減処理	11
4.3 塩水楔の濃度分布の分析	
5. まとめ	
参考文献	
付録1	
付録 2	

Contents

1. Introduction ······1
2. Summary of the examination device ····································
2.1 Experiment device ······2
2.2 Imaging device ·····2
3. Principle theory of the measurement ······4
3.1 Principle theory of optical method ······4
3.2 Prerequisite for optical measurement ······4
3.3 Kubelka-Munk relationship ······4
3.4 Relationship between dye concentration and reflectance
3.5 Spatial heterogeneity of normalized concentration7
4. Measurement of saltwater concentration distribution10
4.1 Measurement results of saltwater concentration distribution10
4.2 Noise reduction processes using Fourier transform ······11
4.3 Analysis of concentration distribution of saltwater wedge ······15
5. Conclusion ······18
References ······18
Appendices 1 ······19
Appendices 2 ···································

図表目次

図1	試験装置の概観
$\boxtimes 2$	試験装置及び撮影装置の概念図
図 3	拡散反射の概念図
図 4	染料濃度と(1-R)²/2Rの関係8
図 5	染料濃度と表面反射を考慮した(1-R)2/2Rの関係
図 6	正規化濃度分布の空間的な不均質性
図 7	カラーCMOS カメラによる撮影画像
図 8	CCD カメラで取得したデータから算出した濃度分布
図 9	フーリエ変換を用いたノイズ低減処理
図 1	09ピクセル以下の波長を除去後の正規化濃度分布
図 1	1 濃度分布の比較位置
図 12	2 塩水楔に垂直な方向の濃度分布
図1	3 C/C ₀ =0.5 で反転した濃度分布との比較
表 1	塩水侵入試験の試験条件

This is a blank page.

1. はじめに

沿岸地域では、淡水と海水の密度差に起因した密度流により海水が陸側へ侵入する塩水侵入現 象が生じており、この塩水侵入現象により塩水楔が形成されることが知られている。塩水楔が形 成されることにより塩水楔に沿って上向きの地下水流動が生じたり、海水が地下水と混合して地 下水組成が変化するなど、密度流により生じる塩水楔が地質環境に影響を与える因子になると考 えられる。このため、放射性廃棄物の地層処分事業を進める際には、密度流に起因して地下深部 に侵入する塩水の濃度とその分布を適切に評価する技術が必要となる。

一般に、この様な塩水侵入による塩分濃度とその3次元的な分布は、ボーリング孔で測定され たデータに基づいた分析・評価が行われる。しかしながら、その調査数量は限定されることから、 補足的に数値解析を用いた評価が行われる。ここで、密度流に起因した塩水侵入現象は、塩水の 移流分散と密度流の連成問題であり、その数値解法の検証が課題のひとつで、これまでに数多く の検討が実施されてきた^{1),2)}。

この様な課題解決に向けた取り組みの一つとして、筆者らはこれまで多孔質媒体中水理・物質 移行現象可視化装置(Mass transport Characterization in host Rock 以下「小型 MACRO」と呼 ぶ)を作製して塩水楔を対象とした室内実験を行ってきた。また、数値解析コードによる解析結 果との比較を行い、解析結果と実験結果は整合的であることを確認してきた³⁾。しかし、数値解 析結果との比較に用いている実験データは、染料を塩水のトレーサーとして、色の有無を目視で 判断した塩水楔の形状に着目した定性的な評価データであり、塩水と淡水の遷移帯における濃度 分布についての定量的な評価には至っていない。

同様に、室内試験結果の数値解析による検証はこれまでにも行われているが^{1),4),5)}、いずれも染料を塩水のトレーサーとした塩水楔の形状に着目した定性的な評価であり、定量的な塩水濃度の空間分布を測定したデータは報告されていない。定量的な濃度分布を計測した例としては、電気 伝導度センサーを用いて塩水楔の鉛直方向の1測線を計測したデータがあるが^{4),5)}、塩水濃度の空間的な分布のデータを取得した例はこれまでに報告されていない。しかし、電気伝導度センサー による測定において、測定される濃度はセンサーの電極を中心とした特定の広がりを有する範囲 での平均的な値となり、塩水濃度測定の空間解像度が不十分な場合が生じる場合が考えられるこ とから、測定の対象となる塩水楔の遷移帯における濃度変化の幅に対して測定範囲が十分に小さ いセンサーが必要となる。

このため、塩水と淡水の遷移帯における濃度分布を考慮した数値解析コードの検証データの取 得を目的として、光学的手法のを応用した塩水濃度の定量的測定手法を開発した。具体的には、 小型MACROを対象に染料を塩水のトレーサーとして色の濃さを光の反射率として測定すること により、染料濃度と反射率の相関関係から塩水濃度分布を定量的に求める計測技術で、これより 塩水楔の濃度分布の取得及び塩水と淡水の遷移帯における濃度分布の分析を行った。

2. 試験装置の概要

2.1 試験装置

小型 MACRO は、横幅 500mm、高さ 250mm、奥行き 100mm の水槽(以下「媒体槽」と呼 ぶ)の中にガラスビーズを充填することにより任意の透水場を再現する試験装置である 3)。図 1 に試験装置の概観、図 2 に試験装置の概念図を示す。媒体槽の片側に淡水タンク、もう一方には 塩水タンクを設けており、塩水タンクと媒体槽の間には試験開始前に塩水と淡水の混合が生じな いようにシャッターが設けられている。塩水侵入試験は、塩水タンクと媒体槽の間のシャッター を閉めた状態で、媒体槽及び淡水タンクに淡水を満たし既定の水頭を保ちつつ、塩水タンクに塩 水を満たして既定の水頭を設定した後にシャッターを開放して試験を開始する。なお、塩水侵入 試験を実施する際の染料トレーサーとして、赤色の染料(食用赤色 102 号)を使用している。

2.2 撮影装置

図 2 に撮影装置の概念図を示す。撮影装置は CCD カメラ(DVC 社製 DVC1412、撮影解像度 1830×1035 ピクセル、モノクロ 4096 階調)、データ取得用の PC 及び照明で構成されており、 媒体槽での反射光強度を CCD カメラにより 4096 階調の数値データとして記録する。今回の測定 条件では媒体槽の撮影範囲は 1190 ピクセル×595 ピクセルとなったことから、1 ピクセルあたり 約 0.42mm となる。また、比較用のカラー画像を取得するために、CCD カメラとほぼ同様の位 置からカラーCMOS カメラ(EPIX 社製 SV9T001C、撮影解像度 2048×1530 ピクセル、RGB 各色 1024 階調)による同時撮影を行っている。

光学的手法による測定では、媒体槽に背景が写りこまないように、照明を適切に設置することが重要となる。そのため、環境光に対して十分に強い強度の 90W の白熱灯を媒体槽の両側に設置 するとともに CCD カメラの背面には暗幕を設置することにより、媒体槽への背景の映りこみを 防止した。 JAEA-Research 2008-105



図1 試験装置の概観



図2 試験装置及び撮影装置の概念図

3. 測定原理

3.1 光学的手法の基本原理

染料をトレーサーに用いた塩水楔試験では、染料濃度から塩水の濃度が推定できるという仮定 に基づいて、染料の有無を目視により判断することにより、塩水と淡水の境界を判断している。 光学的計測による染料濃度の定量化では、染料の濃度により光の反射率が異なることを利用して 染料濃度と反射率の相関関係から染料濃度を算出する。このため、光学的手法により染料濃度を 定量的に計測するためには、予め染料濃度と光の反射率の相関関係を求める必要がある。

3.2 光学的手法の成立条件

光学的手法では、塩水に溶かした染料をトレーサーとして光の反射率から塩水濃度を測定する が、塩水と染料が同時に移行することを前提としている。塩水と染料が異なる挙動を示す場合と しては、拡散による移行が卓越した場合において、塩水と染料の拡散係数の違いによる影響が考 えられるが、今回の試験条件では拡散による移行に対して移流による移行が卓越しているため、 拡散係数の違いの影響は顕著ではない。詳細については付録1を参照されたい。

3.3Kubelka-Munk の関係式

染料濃度と反射率の相関式として、Kubelka-Munkの関係式がある。Kubelka-Munkの関係式 は透明な媒体中の拡散反射における染料濃度と反射率の関係式である。図3に拡散反射の概念を 示す。入射光が局所的には媒体中で反射や散乱を繰り返すことにより、巨視的には平均的な反射 光が観測される。拡散反射の1例として紙の表面での光の反射がある。紙は透明なセルロースで 構成されているが、反射や散乱を繰り返すことにより巨視的には一様な反射光が観測される。図 3に示すように、反射光の中には正反射も含まれているが、媒体の粒子を細かくすることにより その影響を低減することができると考えられる。

紙の場合にはセルロースが拡散反射の媒体となり、間隙には空気が満たされているが、小型 MACROの場合にはガラスビーズが拡散反射の媒体となり、その間隙が淡水の場合の拡散反射光 強度と染料の場合の拡散反射光を Kubelka-Munk の関係式に当てはめて評価を行うこととした。

Kubelka-Munkの関係式では、染料を含む媒体の吸収係数 K と散乱係数 S を用いて反射率 R との関係式を導いており、媒体の吸収係数及び散乱係数と反射率の関係は式(1)で表せる。

$$\frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{K}{S} \tag{1}$$

ここで、散乱係数Sは媒体が同じであれば一定である。また、媒体の吸収係数Kは染料濃度に 比例することから、式(1)は散乱係数を含む比例係数kと染料濃度Cを用いて、式(2)で表せる。

$$\frac{\left(1-R\right)^2}{2R} = k \cdot C \tag{2}$$

-4 -



図3 拡散反射の概念図

式(2)より、(1-R)²/2R と染料濃度 C の関係から比例係数 k を求めることにより、反射率 R から染料の濃度を求めることができる。ただし、Kubelka-Munkの関係式はガラスビーズよりも細かい 粉体の拡散反射を想定しており、ガラスビーズを充填している本媒体槽中の染料に適用するには 媒体槽の表面での反射やガラスビーズ表面での正反射の影響等の諸条件を考慮する必要がある。

3.4 染料濃度と反射率の関係

Kubelka-Munk の関係式は、粒径の小さな粉体の拡散反射に関する関係式であるため、小型 MACRO 試験で使用している比較的粒径の大きなガラスビーズにも適用できるかの確認試験を、 直径 0.8mm のガラスビーズを充填した媒体槽を用いて行った。試験に用いる淡水には水道水を、 トレーサー溶液には染料濃度 100mg/L、塩水濃度 4%(NaCl)の溶液を作成しそれを希釈するこ とにより、染料濃度 75mg/L、50mg/L、25mg/L、6.25mg/Lの溶液を作製し、それぞれの溶液を 媒体槽内に満たした状態における反射光強度を測定することにより、染料濃度と(1-R)²/2R の関係 を求めた。ここで、染料濃度の異なる溶液の置換が不完全であると測定結果に影響を与えること から、媒体槽内が完全に染料で置換されたかの確認は、一定時間毎に媒体槽の反射光強度を測定 し、直近の測定結果との差分を比較することにより確認した。この結果、媒体槽内の間隙体積の 約3倍の量の溶液を流すことにより、媒体槽内を完全に置換できることを確認した。また、照明 の設置条件により媒体槽に照射される光の強度は均一でないことから、媒体槽からの反射光強度 の不均質性を考慮して、媒体槽全面の反射光強度の平均値を用いて評価を行っている。

小型MACROにおける反射率Rはガラスビーズを充填した媒体槽内を淡水で満たした場合の反射光強度の平均値 Rwater、ガラスビーズを充填した媒体槽内を任意の濃度の染料で満たした場合の反射光強度の平均値 Rdyeを用いて式(3)で表せる。

$$R = \frac{R_{dye}}{R_{water}}$$
(3)

図 4 に染料濃度と(1-R)²/2R の関係を示す。染料濃度と(1-R)²/2R の関係は直線からのずれが認められ、Kubelka-Munkの関係式を十分に満たしていないことがわかる。この原因として考えられるのは、媒体槽表面での光の反射の影響である。媒体槽表面では、媒体槽内の染料濃度に関係なく、一定の割合で光を反射していると考えられる。この媒体槽表面での反射光強度を R_{surface} とすると、表面反射の影響を除去した反射率 R'は式(4)で表せる。

$$R' = \frac{R_{dye} - R_{surface}}{R_{water} - R_{surface}}$$
(4)

しかし、表面反射のみを直接測定することができないため、 $R_{surface}$ の値を変数として、(1-R')²/2R' と染料濃度の切片 0 の 1 次近似直線との残差の 2 乗和が最小になるような $R_{surface}$ の値を求めた。 その結果、今回のケースでは R_{water} の値が 2100 に対して、 $R_{surface}$ の値は 930 となった。 図 5 に R_{surface} が 930 の場合の(1-R)²/2R と染料濃度の関係を示す。(1-R')²/2R'と染料濃度は直線 関係となっており、Kubelka-Munk の関係式をほぼ満たしていることがわかる。この結果より、 媒体槽表面での一定の割合の反射を考慮することにより、Kubelka-Munk の関係式に基づいて染 料濃度を算出することができる。

ここで、染料濃度 C₀ での反射率を R'_{C₀}、染料濃度 C での反射率を R'_Cとすると、塩水の正規化 濃度は、式(5)で表せる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\frac{(1 - R'_C)^2}{R'_C}}{\frac{(1 - R'_{C_0})^2}{R'_{C_0}}}$$
(5)

3.5 正規化濃度の空間的な不均質性について

図5に示した染料濃度と反射率の関係は媒体槽全体の平均であることから、反射光強度の空間 的なばらつきが濃度分布の算出結果に与える影響の確認を行うために、ガラスビーズを充填した 媒体槽を各濃度の染料で満たした場合の濃度分布を算出した。図6に正規化濃度C/C₀が0.5、0.25、 0.0625のケースでの測定結果を示す。所々にガラスビーズ表面での正反射の影響と考えられるノ イズの様な点が見られるが、ほぼ一様な濃度分布が得られていることがわかる。このことから、 媒体槽全面における空間的な反射光強度のばらつきは正規化濃度の評価結果に大きな影響を与え ないことが確認できた。



図5 染料濃度と表面反射を考慮した(1-R)²/2Rの関係



図6 正規化濃度分布の空間的な不均質性

4. 塩水楔の濃度分布測定

4.1 塩水楔の濃度分布測定結果

Kubelka-Munkの関係式を用いて塩水濃度を定量的に測定できることが確認できたため、確認 試験と同様に淡水には水道水をトレーサーには染料濃度 100mg/L、塩水濃度 4%(NaCl)の溶液 を用いて、0.8mmのガラスビーズを充填した媒体槽を対象に表 1 に示す試験条件で塩水侵入試験 を実施し、塩水楔の侵入が定常状態に達した状態での塩水の正規化濃度を測定した。なお、透水 係数は同媒体槽を対象とした透水試験を事前に実施し求めた。

図7に CMOS カメラで撮影したカラー画像、図8に CCD カメラで取得した反射光強度のデー タから算出した正規化濃度分布を示す。CMOS カメラで撮影した画像からも塩水と淡水のおおよ その境界を目視で判別することは可能であるが、CCD カメラで取得したデータから塩水と淡水の 遷移帯での定量的な濃度分布を取得することが可能となったため、塩水と淡水の遷移帯での分散 を考慮した解析コードの検証データを提示することが可能となった。また、解析コードの検証デ ータとして使用するだけではなく、塩水と淡水の遷移帯における濃度分布を直接用いて、定量的 に分析することもできる。

今回の試験条件では、0.42mm ピッチでの濃度分布が取得できていることから、遷移帯での濃 度分布を表現できており、高解像度でのデータが取得できることも光学的手法の利点の1つであ る。電気伝導度計を用いて測定する場合には、測定される濃度はセンサーの電極を中心とした特 定の広がりを有する範囲での平均的な値となることから、今回のケースでは、たとえ多数の電気 伝導度計を用いて測定を行ったとしても、塩水濃度測定の空間解像度が不十分であると考えられ る。この様な電気伝導度計の測定範囲が測定結果に与える影響については付録2を参照されたい。

塩水濃度分布を詳細に観察すると、正規化濃度 0 (淡水)の領域と正規化濃度が 1 に近い領域 (塩水楔)では、ノイズの無いほぼ一様な濃度分布となっているが、塩水と淡水の遷移帯のよう に濃度が変化している領域ではノイズが多い傾向がある。この原因として考えられるのは、塩水 と淡水の屈折率の違いである。塩水濃度の変化に応じて溶液の屈折率が変化することにより反射 光の角度が変化する。その結果、同じ染料濃度での測定される反射光強度が変化したためである と考えられる。反射光全てが拡散反射であれば、屈折率の変化に伴う反射光の角度の変化も反射 や散乱により平均化されるためその影響は小さいが、ガラスビーズ表面での正反射に関しては、 溶液の屈折率の影響が顕著なため、ノイズの原因はガラスビーズ表面での正反射であると考えら れる。ガラスビーズ表面での正反射の場合、図 5 に示す染料濃度と(1-R)²/2R の関係が直線関係と なっていない可能性が考えられる。染料濃度を算出する際にガラスビーズを充填した媒体槽内を 淡水で満たした場合の(1-R)²/2R と、ガラスビーズを充填した媒体槽内を染料で満たした場合の (1-R)²/2R の関係が直線関係であると仮定して中間の濃度を算出していることから、濃度が 0 (淡 水)に近い場合と 1 (染料の最大濃度)に近い場合には正反射の影響を受けにくいが、その中間 の濃度では正反射の影響を強く受けていることも理由のひとつとして考えられる。 4.2 フーリエ変換を用いたノイズ低減処理

光学的手法により算出した正規化濃度分布はガラスビーズ表面での正反射に起因するノイズが 生じている。このため、算出した正規化濃度分布のノイズ低減手法を検討した。

一般に、ノイズ低減には移動平均など空間的な平均が用いられるが、空間的な平均化を行うと 値の空間的な変化が分散する傾向にあり、結果として塩水の分散を過大評価することになる。一 方、特定の波長のノイズを除去する方法としてフーリエ変換を用いる方法がある。濃度分布の空 間変化を波とみなして、周波数分離することにより、特定の波長の濃度変化を除去することがで きる。塩水楔での濃度変化に比べてガラスビーズ表面での正反射に起因するノイズによる濃度変 化の波長は小さいことから、特定の波長以下の濃度変化を除去することにより、ノイズを低減す ることが可能となる。

図 9 にノイズを除去する波長(ピクセル数)の閾値を変えた場合の塩水と淡水の遷移帯における濃度分布を示す。閾値の波長を大きくするに従い濃度分布のばらつきが小さくなっているのがわかる。また、遷移帯の濃度変化の傾向に変化は無いこともわかる。

図 10 に 9 ピクセル(3.8mm)以下の波長を除去した場合の濃度分布を示す。図 8 に比べてノイズ の少ない濃度分布が得られている。以下では、塩水楔の濃度分布の分析を行う場合には、この 9 ピクセル(3.8mm)以下の波長を除去した正規化濃度分布を用いる。



図7 カラーCMOSカメラによる撮影画像



図8 CCDカメラで取得したデータから算出した濃度分布

表1 塩水侵入試験の試験条件

淡水側水頭(cm)	36
塩水側水頭(cm)	35
塩水濃度(重量%)	4
染料濃度(mg/L)	100
塩水比重	1.027
ビーズ粒径(mm)	0.8
透水係数(cm/sec)	0.57



図9 フーリエ変換を用いたノイズ低減処理



図10 9ピクセル以下の波長を除去後の正規化濃度分布

4.3 塩水楔の濃度分布の分析

遷移帯における濃度分布を詳細に分析するために、図 11 に示す、塩水楔に垂直な各測線における 1cm 幅での濃度の平均値を求めた。図 12 に各ラインでの濃度分布を示す。なお、比較しやすいように正規化濃度 C/Coが 0.5 で重なるように位置を調整してある。濃度の高い領域では若干ばらついているが、最大濃度付近以外では全て濃度分布が重なっていることから、塩水楔の境界に垂直な方向の濃度分布は塩水楔の場所によらず一定であることがわかる。

図 12 の濃度分布の形状に着目すると、濃度分布は正規化濃度 C/Coが 0.5 を中心に点対称となっていないことがわかる。図 13 に濃度分布の形状を比較しやすいように、ライン 3 とライン 3 を正規化濃度 C/Coが 0.5 で反転させた濃度分布との比較を示す。同図より、濃度が低い方での濃度の空間変化の傾きが比較的急であるのに対して、濃度が高い方ではその傾きが比較的なだらかに変化していることがわかる。

この原因として考えられるのが流速の違いである。塩水と淡水の境界部では、境界に沿った方 向に塩水槽に向かった流れが生じていると考えられるが、塩水側に比べて淡水側はその流速が速 く、淡水側では塩水槽側から分散した塩水が速やかに洗い流されるため、淡水側より濃度の変化 が急になると考えられる。また、塩水楔が定常状態に到達したかの確認は、塩水楔の形状が変化 しないことから判断しており、塩水楔内での濃度分布の変化には着目していなかった。このため、 塩水楔が完全には定常状態に達していなかった可能性も指摘できる。今後は、塩水楔が定常状態 に達したかの確認には、塩水楔の形状だけではなく、塩水楔内の濃度の変化も確認する必要があ ると考えられる。



図11 濃度分布の比較位置



図12 塩水楔に垂直な方向の濃度分布



図13 C/C₀=0.5で反転した濃度分布との比較

5. まとめ

染料で着色した塩水の光の反射率に Kubelka-Munk の関係式を適用することにより、小型 MACRO を対象とした塩水侵入試験における、塩水と淡水の遷移帯における定量的な正規化濃度 分布の取得が可能となった。また、塩水と淡水の遷移帯においては、塩水濃度の変化に伴い屈折 率の変化に起因するノイズが生じたが、フーリエ変換を用いたノイズの低減処理によりノイズを 低減し、ノイズの少ない定量的なデータを得た。

塩水と淡水の遷移帯での定量的な濃度分布を取得することが可能となったため、塩水と淡水の 遷移帯での分散を考慮した解析コードの検証データを提示することが可能となった。

また、遷移帯に垂直な方向の濃度分布を詳細に分析すると、塩水側での濃度の変化率よりも淡水側での濃度の変化率が大きく、塩水側と淡水側で非対称となっており、この原因として塩水側 と淡水側での流速の違いが影響していることが推察された。

今後は様々な試験ケースへの適用を図り、定量的な測定データの拡充を進めるとともに、数値 解析結果との比較検討を行い、密度流を対象とした数値解析コードの検証を行う。また、媒体槽 内で移行する染料濃度分布から分散長や実流速などの測定を行うことで、数値解析から得られる 流速分布との比較など、より多角的な検証を行う予定である。

参考文献

- 1) Goswami, R.R., T.P. Clement : "Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics", Water Resour. res., Vol.43, W04418, doi:10.1029/2006WR005151 (2007).
- 2)藤縄克之,増岡健太郎,長野宇規,渡辺紹裕: "海面上昇がゼロメートル地帯に及ぼす影響を 予測するための塩水浸入数値解析モデル",土木学会論文集, Vol. VII-35, No. 790, pp.35-48 (2005).
- 3) 高須民男,前川恵輔: "多孔質媒体中水理・物質移行現象可視化装置(小型 MACRO)の開発及 び予察試験結果", JAEA-Technology 2006-061 (2006).
- 4) 細川土佐男, 籾井和郎, 神野健二, 上田年比古, 伊藤敏郎: "被圧帯水層における塩水混合域の分散特性に関する実験及び数値解析による検討",水理講演会論文集,第 33 巻,pp.193-198 (1989).
- 5) 籾井和郎,細川土佐男,神野健二,伊藤敏郎: "海岸帯水層における鉛直塩分濃度分布に基づく横方向分散定数の推定方法",土木学会論文集,411(II-12)pp.45-53,(1989).
- 6) 佐藤久,肖俊,澤田淳: "光学的手法を用いた亀裂開口幅測定及び亀裂内濃度分布測定手法の 開発",JAEA-Research 2007-006 (2007).

付録1 NaCl と赤色 102 号の拡散係数の違いが測定結果に与える影響の検討

光学的手法による塩水濃度分布測定では、染料をトレーサーとして塩水濃度を測定しているこ とから、塩水と染料が同様に移行していることを前提としている。しかし、塩水(NaCl)と染料 (赤色 102 号)では拡散係数が異なり、流速が遅く拡散による移行が支配的な条件では拡散係数 の違いが塩水と染料の移動に違いを与える可能性がある。そこで、赤色 102 号の拡散係数の推定 及び移流による機械的な分散 D'と拡散 Daを合わせた分散係数 D と流速を比較することにより拡 散の影響を確認した。

付録表1は科学大辞典2⁽¹⁾に記載してある分子量と拡散係数の値である。付録表1より、NaClの拡散係数は1.39×10⁻⁵cm²/s である。しかし、赤色102号については拡散係数が不明のため、分子量から推定した。

付録表1より分子量が大きくなるに従い拡散係数が小さくなっていることから、分子量と拡散 係数には相関関係があることが推定される。そこで、これらの値の相関関係を求めることにより、 赤色 102 号の拡散係数を推定することとした。付録図1に分子量と拡散係数の関係を示す。両対 数グラフにプロットするとほぼ直線の関係が得られることから、累乗近似による近似曲線を求め た。その結果、拡散係数 Da と分子量 M の関係は Da=5.935×M^{-0.39} が得られた。この関係式より、 分子量 631.51 の赤色 102 号の拡散係数を 0.48×10⁻⁵cm²/s と推定した。赤色 102 号の拡散係数は NaClの約1/3であり、拡散による移行が支配的な場合にはその拡散係数の違いが移行に影響を与 えると考えられる。そこで、小型 MACRO の媒体槽の幅 50cm を移行距離として、分散長を移行 距離の 1/00 の 0.5cm と設定した場合の機械的分散 D'と NaCl 及び赤色 102 号の拡散係数 Da を合 わせた分散係数Dと流速を比較することにより拡散の影響を確認した。付録図2に流速とNaCl、 赤色 102 号それぞれの分散係数 D の関係を示す。図より流速が小さい場合には拡散が支配的であ り、NaCl と赤色 102 号の拡散係数の違いの影響が現れるが、流速が大きい場合には移流が支配 的になり、拡散係数の違いの影響は無視できる。本文で塩水楔試験を実施した媒体槽と同条件で 実施した水頭差 1cm での一様流における透水試験結果及び間隙率⁽²⁾から、実流速は 3.2×10⁻²cm/s であり、移流が支配的な領域であることから、NaClと赤色 102 号の拡散係数の違いが光学的手 法による塩水濃度の測定に影響を与えていないと考えられる。

- (1) 化学大辞典編集委員会:"化学大辞典 2", 共立出版株式会社, 328p, (1963).
- (2) 高須民男, 前川恵輔, 澤田淳: "多孔質媒体均質層及び二層不均質層を対象にした塩淡境界面の挙動", JAEA-Research 2008-030 (2008).

	分子量	拡散係数(10 ⁻⁵ cm²/s)
塩化水素	37	2.5
塩化ナトリウム	59	1.39
エチルアルコール	46	1
グリセリン	92	0.83
麦芽糖	342	0.42
血清アルブミン	70,000	0.061
血清グロブリン	167,000	0.04
ウレアーゼ	480,000	0.035
ヘモシアニン	6,600,000	0.0138

付録表1 各物質の分子量と拡散係数



付録図1 分子量と拡散係数の関係



付録図2 流速と分散係数の関係

付録2 光学的手法と電気伝導度計による塩水濃度測定の比較

光学的手法による塩水濃度測定結果の検証のため、電気伝導度計による塩水濃度の測定を検討 している。その予備試験として、付録図3に示す小型の平行平板型の水槽を用いて、赤色102号 で着色した塩水を淡水で満たした水槽の底部から鉛直上向きに一定流量(0.17cm³/s)で注入した場 合の光学的手法と電気伝導度計による塩水濃度を同時に測定し、測定結果の比較を行った。使用 した電気伝導度計はKENEK製のMK-403であり、検知部の直径は4mmである。この電気伝導 度計の検知部を水槽の裏側から流れ方向に対して垂直な方向に設置した。なお、電気伝導度と塩 水濃度の関係は事前に既定の濃度の塩水を用いてキャリブレーションを行っている。

付録図4に測定結果を示す。電気伝導度計での測定結果と比べて、光学的手法の測定結果は濃度の立ち上がりが急であり、濃度が高い領域ではノイズが生じている。C/Coが0.5に到達した時間を塩水の移行時間として評価すると、電気伝導度計による測定結果は光学的手法に比べて移行時間が若干遅れることや、濃度の立ち上がりがなだらかであることから分散が大きく評価される傾向にある。この原因としては、検知部での測定範囲の影響が考えられる。光学的手法では、1ピクセル単位(0.42mm)で測定が可能なのに対して、電気伝導度計では検知部の太さが4mmであるのに加えて、検知部の電極間の電気伝導度を測定していることから、検知部の直径よりも大きな範囲を対象とした平均的な電気伝導度を測定していると考えられる。

このため、電気伝導度計の測定範囲を推定するために、光学的手法による測定範囲(空間的な 平均化を行う範囲)を変えた塩水濃度の変化と電気伝導度計による濃度の比較を行った。その結 果、付録図5に示すように光学的手法における7.1mm(17ピクセル)での平均値による濃度の立ち 上がりが電気伝導度計での測定結果とほぼ一致し、電気伝導度計の測定範囲は約7mm 前後であ ると推定される。

この結果より、電気伝導度計による塩水濃度測定の結果を評価する場合においては、検知部で 測定している空間的な広がりに留意が必要であり、測定の対象とする濃度の空間変化に応じて適 切な測定空間解像度を有するセンサーや測定手法の選定が必要である。



付録図3 光学的手法と電気伝導度計による 濃度測定の比較試験の概念図



表1.SI基本単位				
甘土县	SI 基本ì	单位		
基半里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

和午春	SI 基本単位	
和立里	名称	記号
面	積 平方メートル	m ²
体	積立法メートル	m ³
速さ,速	度 メートル毎秒	m/s
加速	度 メートル毎秒毎秒	m/s^2
波	数毎メートル	m^{-1}
密度,質量密	度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密	度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体	積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強	さ アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度モル毎立方メートル	mol/m
質量濃	度 キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝	度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率	^(b) (数字の) 1	1
比诱磁率	^(b) (数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

衣る.	固有の名称と記方	デじ衣さ	れるSI組立単位		
			SI 組立単位		
組立量	to the	和日	他のSI単位による	SI基本単位による	
	泊你	記り	表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^2$	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$	
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹	
インダクタンス	ヘンリー	Η	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光束	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
カーマ	· · ·	Зy	3.115		
線量当量,周辺線量当量,方向 性線量当量,個人線量当量	シーベルト (g)	\mathbf{Sv}	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ペクレルは放射性核種の統計的道程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される、セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)単位少ペールトし、(P)の270 205) とついてけCUPの軸定?
 (f)単位少ペールトし、(L)C10021 205) とついてけC1004前字の(C)20021 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{\cdot 2} K^{\cdot 1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{2} K^1$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ^{−1} sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	Μ	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デ カ	da	10^{24}	ヨクト	у	

<u>表6.SIに属さないが、SI</u>と併用される単位

衣も、SIに属さないか、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^{2}=10^{4}m^{2}$		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で 表される数値が実験的に得られるもの

名称		記号	SI 単位で表される数値			
	電	子才	ドル	Υ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
	ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
	統一	原子	質量単	自位	u	1u=1 Da
	天	文	単	位.	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位								
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa				
水銀	柱ミリメー	- トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	グストロ	ーム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m				
海		里	Μ	1 M=1852m				
バ	-	ン	b	$1 \text{ b=100 fm}^2 = (10^{-12} \text{ cm}) 2 = 10^{-28} \text{m}^2$				
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ	-	パ	Np `	の形体しの粘体的な眼体は				
ベ		ル	В	し 31 単位 C の 数 値 的 な 関 係 は 、 対 数 量 の 定 義 に 依 存。				
デ	ジベ	N	dB -					

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルブ	$^{\rm sb}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²					
フォト	$_{\rm ph}$	$1 \text{ ph}=1 \text{cd sr cm}^{\cdot 2} 10^4 \text{lx}$					
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	$1 \text{ Oe} \stackrel{\scriptscriptstyle \triangle}{=} (10^3/4\pi) \text{A m}^{-1}$					

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 🍐 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例								
名称					記号	SI 単位で表される数値		
+	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
$\scriptstyle u$	ン	ŀ	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				F	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
ガ		\sim		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T		
フ	T.		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m		
メー	ートル	(系)	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg		
\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
カ			IJ	5	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J		
					cui	(「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)		
Ξ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		

(第8版, 2006年改訂)

この印刷物は再生紙を使用しています