

深度 321 m から揚水した富山湾滑川海洋深層水中の 硝酸塩濃度の時間変動

Temporal Changes on Nitrate Concentrations in Deep Seawater Pumped up
at 321 m Depth in Toyama Bay, Japan Sea

松永 明信¹・黒川 弘子¹・小善 圭一²・高柳 信孝¹
大戸 幹也¹・豊田 孝義³・中島 敏光³

Akinobu MATSUNAGA, Hiroko KUROKAWA, Keiichi SHOZEN, Nobutaka TAKAYANAGI,
Mikiya OHTO, Takayoshi TOYOTA and Toshimitsu NAKASHIMA

Abstract

Concentrations of nitrate in deep seawater pumped up from 321 m in Toyama Bay were determined at an hour interval between September 2001 and March 2003 with a newly designed continuous fully-automated ion chromatography. Nitrate concentrations were usually around $24 \mu\text{M}$, but sometimes suddenly changed to 10.1 to $24.8 \mu\text{M}$ for periods of several hours to several days. The decrease of nitrate concentration was found to be closely associated with temperature rise. It was thought that seawater masses having low nitrate concentration and high temperature might occasionally reach the inlet of the deep seawater intake pipe due to possible vertical and horizontal movements of seawater masses. Stormy weather in winter and typhoon in summer could be responsible for such seawater mass movements.

Key Words: deep seawater, Toyama Bay, nitrate, ion-chromatography, temperature

要 旨

イオンクロマトグラフを用いて、硝酸塩を 1 時間毎に連続的に自動分析する装置を開発して、2001 年 9 月から 2003 年 3 月まで、富山県滑川市の県水産試験場に揚水されている海洋深層水中の硝酸塩濃度を測定した。上記深層水中に含まれる硝酸塩濃度は通常は $24 \mu\text{M}$ 程度であるが、時々 $10.1 \sim 24.8 \mu\text{M}$ の濃度変動が観察された。濃度変動は時間単位で見られ、数時間から数日間に及んだ。硝酸塩濃度と水温に高い相関が認められ、濃度の減少と水温の上昇が対応した。硝酸塩濃度が低く、水温の高い水塊が深層水の取水口付近へ、水平的又は鉛直的に時々移動してくることが示唆され、原因として冬型の天候や台風等の可能性が考えられた。

キーワード：海洋深層水、富山湾、硝酸塩、イオンクロマトグラフィー、水温

1. はじめに

海洋深層水は表層水に比較して、①水温が低いこと（低温性）、②硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩等の

栄養塩類の含有量が多いこと（富栄養性）、③有機物や細菌類が少なく、化学的及び微生物学的に清浄であること（清浄性）、④水質の季節的変動が小さく安定していること等の特性を有すると言われてい

¹富山県衛生研究所（〒939-0363 富山県射水郡小杉町中太閤山 17-1）

²富山県水産試験場（〒939-8536 富山県滑川市高塚 364）

³海洋科学技術センター（〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15）

る（中島・豊田 1994）。しかしながら、特定深度の深層水中の栄養塩類濃度等が予想外に変動することが示唆されている（豊田ら 1998；深見ら 2000；稲葉ら 2001；木下ら 2002）。

1994 年から富山県水産試験場では、滑川市沖の水深 321 m から深層水の揚水を開始し、水産分野をはじめとして、海洋療法、食品加工及び医薬・化粧品等での利用・研究が行われている。Watanabe *et al.* (2000) は 1996 年 8 月から 1 年間にわたって、揚水された海水を毎日採取して栄養塩類濃度等を測定した。その結果、栄養塩類濃度は大きく変動し、硝酸及び亜硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩濃度の変動範囲はそれぞれ $4.5 \sim 22.4 \mu\text{M}$ 、 $0.86 \sim 1.98 \mu\text{M}$ 、 $9.9 \sim 47.7 \mu\text{M}$ であった。栄養塩類濃度の変化には季節的あるいは規則的な周期性は見られず、水温及び塩分にも相関は認められなかったと報告している。

こうした海洋深層水の栄養塩類濃度の時間変動の詳細を把握し、その変動要因を解明するためには、1 日 1 回の測定頻度ではなく、より頻繁な栄養塩類の濃度測定の必要性が考えられる。そこで、富山県水産試験場に揚水されている深層水について、硝酸塩濃度を 1 時間毎に連続自動分析する装置として、高速液体クロマトグラフの構成装置を組み合わせ、一部は改造した専用イオンクロマトグラフ (IC) を開発した（松永ら 2001, 小善ら 2001）。開発した連続自動分析装置を用いて汲み上げられた深層水の濃度分析を実施したところ、技術的な問題点が発生した。そこで、長期間にわたって正確な値を得るために検討を行った。ここでは、開発した装置の運用管理状況及び 2001 年 9 月から 2003 年 3 月までの硝酸塩濃度の時間変動と水温の関係を報告する。

2. 実験方法

2.1 揚水施設等の概要及び測定対象深層水

水産試験場の沖合い 2.63 km の水深 321 m から、口径 250 mm の鎧装硬質ポリエチレン管を経由してポンプで海水を揚水し、陸上部は地中の距離が 430 m、口径 200 mm の塩化ビニール管を経て、

20 m³ の受水槽へ 3,000 m³/日で送水されている。受水槽中の深層水を水温測定対象とした。配水施設で一部は熱交換され、水温の異なる深層水が各種魚介類の飼育施設へ配水されている。熱交換することなく低温飼育棟へ送られたものの一部（分岐した専用配管；流速は 10 L/分）を用いて、硝酸塩を 1 時間毎に測定した。

2.2 海水ろ過装置

深層水には粒子状物質や細菌が混在しており、分析カラムの劣化を速める等、硝酸塩分析装置の維持管理を困難にする。水産試験場では低温飼育棟へ深層水が加圧送水されており、その一部を硝酸塩測定用として更に分岐配管し、開閉栓で圧力を調整してろ過装置に送り、粒子状物質等を除去した。ろ過装置は、アドバンテック東洋(株)のろ過器ハウジング (1 PP-1-FS 型) を 2 個直列連結し、それぞれ 1 μm (公称孔径) 及び 0.2 μm (粒子補足性能 99 %) のカートリッジフィルター (外径；70 mm, 高さ；250 mm) を装着して、0.3 ~ 0.5 L/分の流速で深層水をろ過した。フィルターは 2 ~ 4 週間毎に交換した。

2.3 イオンクロマトグラフ (IC) 装置

高速液体クロマトグラフ用の各種装置を組み合わせ、IC 方式で硝酸塩の連続自動分析装置を工夫し組み立てた。装置の構成及び IC の分析条件は既に報告したもの（松永ら 2001, 小善ら 2001）に準じ、その概要等を図 1 に示した。連続自動分析装置の分析部にろ過深層水を送るペリスタポンプ駆動送液部分のチューブにシリコンチューブ (ST) を用いた。ST 及びその両端の配管は 1 ケ月毎に交換した。

2.4 水温計

水産試験場の受水槽中にアレック電子(株)製の CO MPACT-CT (水温分解能 0.01 °C) センサーを設置した。10 分毎に計測し、メモリに蓄積されたデータを定期的にパーソナルコンピュータ (PC) に取り込んだ。また、水産試験場では深層水監視用の水

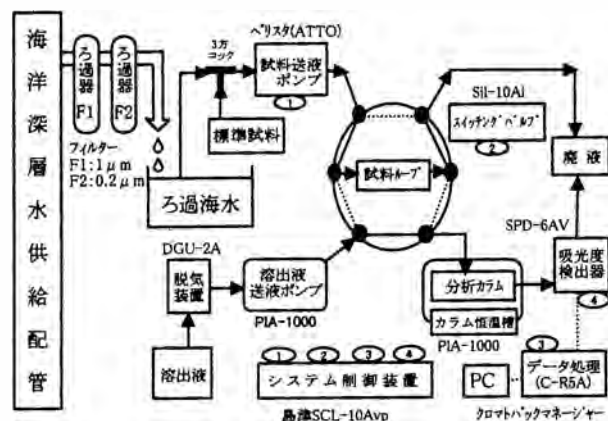


図1 硝酸塩の連続自動分析装置のシステム構成

システム制御装置から次の構成装置に制御信号を出力する。①試料（ろ過海水）送液ポンプのオン、オフ。②スイッチングバルブの切り替え（試料ループを海水で置換する接続モードと分析ラインに接続モードの切り替え）。③データ処理装置の始動（終了時間は装置が内臓）。④吸光度検出器のゼロ点調整。海水分析は1時間サイクル、標準試料は30分サイクルで各装置を制御した（松永ら2001）。

温計が配水施設の送水ポンプの直後に組み込まれ、1 時間毎の測定値（水温分解能 0.1 °C）が記録紙に出力され、1 日平均値が PC に記録されている。これらの値も解析に利用した。

3. 結果と考察

3.1 連続自動分析装置の維持管理

2001 年 2 月から開発した装置を用いて深層水をろ過せずに連続的に測定したところ、5 月になって測定値が $24\mu\text{M}$ 程度から $16\mu\text{M}$ 程度に、1 週間で単調に直線的に減少することに遭遇した。別の IC 装置で深層水を直接手動で測定したところ、その値は $24\mu\text{M}$ 程度であり、開発した装置による連続分析では濃度が減少していることが分かった。そこで、ペリスタポンプ駆動送液部分のチューブ及び配管を蒸留水で洗浄したところ、分析値は一時的に通常値に回復したが、1 週間も経過しない内に再度濃度減少現象が発生した。その原因として、駆動部のチューブ内に細菌等を含む汚染物が沈着して、硝酸塩が消費されることが想定された。また、粒子状物質や藻類が沈着するためか、6 月には分析カラムが 1 ヶ月以内に圧力上昇し、分離性能が劣化した。そこで、深層水中の微生物等を除去するため

に、実験方法に記載したろ過装置を用いて、深層水をろ過して分析することに変更した。またペリスタポンプ駆動送液部のチューブも、タイゴン、ファーマイド及びシリコンと材質の異なるものを比較し、性能を検討した。ろ過した深層水を用いた場合、タイゴンやファーマイドでは徐々に濃度が減少したが、シリコンでは少なくとも1ヶ月間は問題が認められなかった。チューブ材質としてシリコンが優れている理由については不明であるが、ペリスタポンプのチューブは、従来のタイゴンからシリコンに変更した。ろ過装置のフィルターやペリスタポンプの配管等については、実験方法で述べたように定期的に交換することにより、深層水中の硝酸塩濃度の時間変動を正確に把握することが可能になった。なお、本装置を用いた場合の硝酸塩分析カラムの寿命は5～8ヶ月間であった。

3.2 富山湾滑川海洋深層水の硝酸塩濃度の時間変動

2001 年 9 月 20 日から 2003 年 3 月末までの硝酸塩濃度の測定値を図 2 に示した。硝酸塩濃度の変動範囲は $10.1 \sim 24.8 \mu\text{M}$ であり、大部分は $24 \mu\text{M}$ 程度であるが、しばしば濃度の増減が起きていた。2001 年 10 月～12 月は硝酸塩濃度変化が少なく、1 割程度の減少が数回観察されただけで、ほぼ一定 ($24 \mu\text{M}$) していた。一方、2002 年 1 月～3 月には 2～3 日間継続する 3 割程度の濃度減少がしばしば観察された。5～6 月には濃度は比較的安定していたが、4 月中旬、7 月上旬、9 月上旬、10 月下旬～11 中旬、2003 年 1 月上旬～2 月下旬に大きな減少がみられた。2001 年秋冬期と 2002 年の同期を比較すると、濃度減少が起きる時期については 2002 年の方が 1～2 ケ月早まっていた。2001 年秋には台風が日本列島へ接近することもなく、天候は穏やかな日々が続いた。一方、2002 年は 11 月から寒い日々が続いて冬の訪れが早く、2003 年 2～3 月は比較的暖かい日々が続いた。この冬型天候の発生時期の差異が、硝酸塩濃度変動を引き起こす時期の異なる誘因となった可能性が考えられる。2002 年 7 月上旬には季節はずれの台風 6 及び 7 号が日本に上陸し、9 月上旬に台風

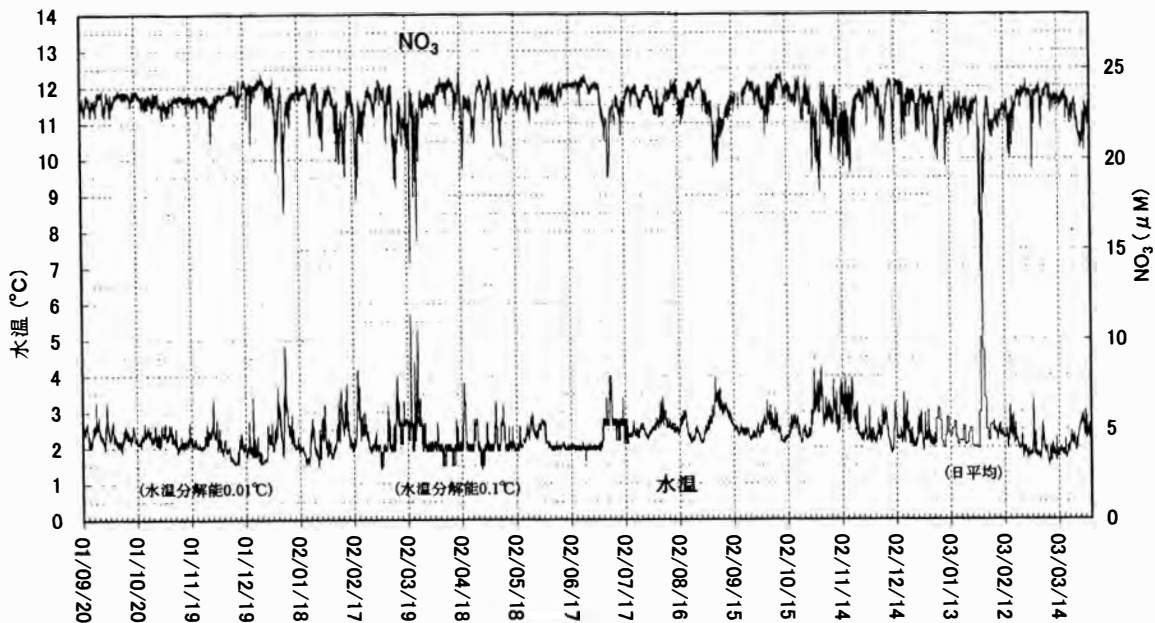


図2 富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度と水温の時間変動

2001年9月20日から2003年3月31日まで、富山県水産試験場に深度321mから揚水された海洋深層水について、低温飼育棟の配管中のものの硝酸塩を1時間毎、受水槽中での水温を10分毎に測定した。水温分解能は0.01℃、ただし、2002年3月1日～5月22日、7月5日～21日は0.1℃、2003年1月5日～2月5日は日平均。

15号が朝鮮半島を直撃しており、こうした海洋気象の影響も考えられる。

3.3 硝酸塩濃度と水温との関係

水産試験場の揚水量は年間を通して一定（約3,000 m³/日）であり、水深321mの深層水取水口から約3km離れた受水槽に深層水が到達するまでの時間は約1時間と算出される。受水槽の水温は取水口付近の水温を正確に示すものではないが、取水口付近の水温を反映するものと考えられる。深層水水温の上昇と硝酸塩濃度の減少との対応が顕著であることが、図2より明らかである。図2の2001年12月20日から1ヶ月間を拡大して図3に示した。水産試験場の深層水の硝酸塩濃度は少なくとも時間単位で変動していることが判明した。また、1日に1回測定すると仮定して、正午付近の測定値だけを併記した。1日に1回の測定では数時間の濃度変動を把握することは困難である。1時間毎の自動分析装置の開発によって、数時間見られる突然の硝酸塩の濃度変動の把握が可能になった。Watanabe *et al.* (2000) の調査では硝酸塩濃度と水温の変化との間に相関が認められなかった。その理由は、1日に1回の硝酸塩測定では時間間隔が

長く、しかも深層水の採取時刻と水温測定時刻がかならずしも一致しないこと等に起因すると推定される。

図2に示した2002年の測定結果を2月1日～2月28日（冬季）と8月15日～9月14日（夏季）に分けて、硝酸塩濃度と硝酸塩測定開始時刻に最も近い時刻の水温との相関を検討した（図4）。いずれの時期も硝酸塩濃度と水温が高い相関を示した。Watanabe *et al.* (2000) は深層水取水口付近の水温に比較して、揚水された深層水の水温は1～2℃高いと報告している。図4から明らかなように、冬季の相関曲線に比較して、夏季のそれは高温側へ0.5℃移動している。これは揚水中に深層水が影響を受ける環境温度の違いによるものと推定される。取水口付近では硝酸塩濃度と水温との関係は、年間を通して変わらないことが示唆される。

計測中の2003年1月下旬に、硝酸塩濃度は10.1 μMまで最も大きく減少した。受水槽の水温計及び深層水監視装置のプリンターの故障のため、詳細な水温は測定できなかったが、1時間毎の測定値の1日平均値は保存されており、最大値は5℃を超えて大きく上昇した。過去にこの程度の大きな水温変動が見られたのは1996年6月20日である。

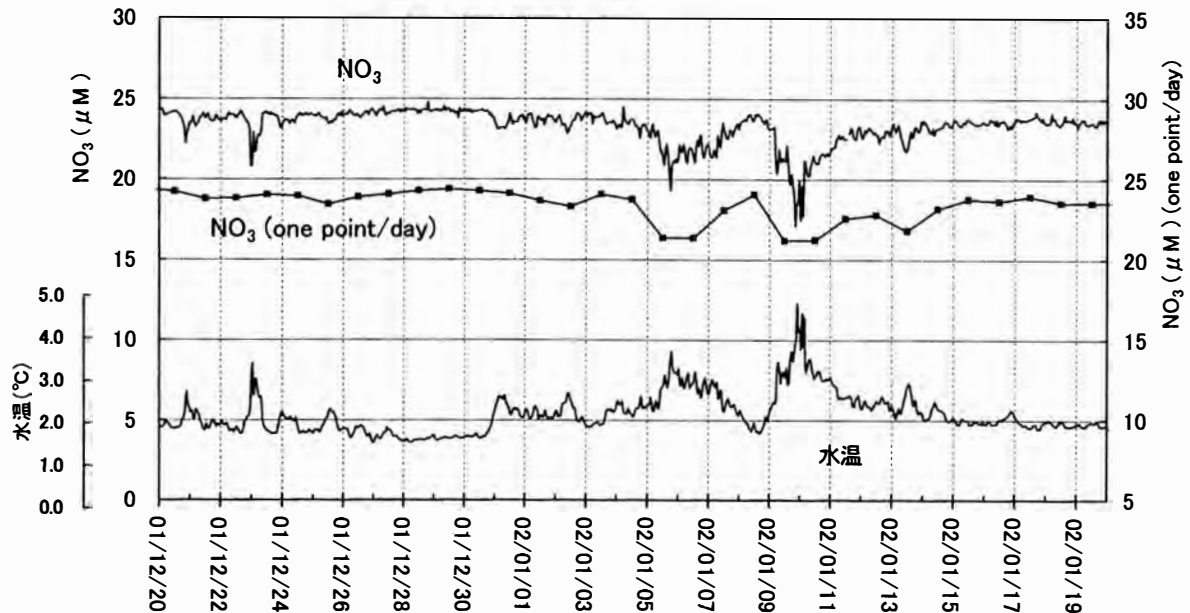


図3 富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度と水温の時間変動

図2に示した2001年12月20日から2002年1月19日の拡大図。NO₃⁻, 1時間毎の硝酸塩濃度；NO₃⁻ (one point/day), 1日に1回、正午に近い時刻の硝酸塩濃度；水温, 10分毎の水温。

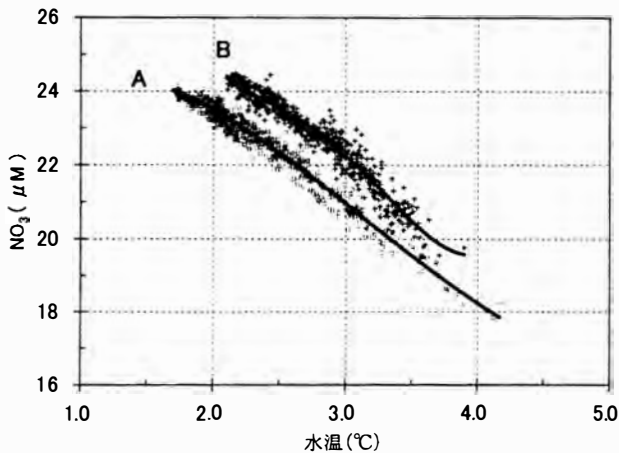


図4 富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度と水温の関係

図2の2期間について、硝酸塩濃度とその測定開始時刻に最も近い時刻の水温との関係を解析した。□；2002年2月1日から2月28日， $n=672$ （30分間隔の測定を含む），実線Aは近似曲線； $Y = -0.0117X^4 + 0.3595X^3 - 2.6813X^2 + 4.8062X + 21.917$ ， $R^2 = 0.9677$ 。+；2002年8月15日から9月14日， $n=710$ （測定の欠落あり），実線Bは近似曲線； $Y = 1.1463X^4 - 13.0911X^3 + 54.674X^2 - 101.6X + 95.583$ ， $R^2 = 0.9411$ 。

したがって、富山湾滑川海洋深層水の取水口付近では、数年に1回程度の頻度で、5℃以上の日平均水温変動を伴う短期間の水質変動が起こっていることが考えられる。

4. まとめ及び今後の展望

本研究で次のことが明らかになった。①開発した1時間毎の自動分析装置は、揚水されている海洋深層水中の硝酸塩濃度の時間変動を1年間の長期間にわたって計測するために、十分に実用的な装置である。②富山県水産試験場の深層水中の硝酸塩濃度は通常は24μM程度であるが、時々2～3割程度減少し、稀には半減することもあり、冬季には減少の割合及びその頻度が高い。③硝酸塩濃度の減少は水温の上昇と対応する。

水産試験場の深層水取水口付近では、性質の異なる水塊が時々移動しているものと推定された。変動の大部分で硝酸塩濃度の低下、高水温を示すことから、何らかの原因で浅い深度の水塊が降下して取水口に達している可能性が考えられる。可能性としては内部波による水塊の上下振動、あるいは移流による異なった水塊の到達等が考えられる。富山県滑川深層水の取水口は、水温躍層の下限近くに位置するために、浅い方の水塊が降下してくると水温と栄養塩類は大きく変動する。一方、深い方の水塊が上昇してきても、同程度の深度では、水温と栄養塩類の変動は小さい。したがって、揚水される深層水の水質の変動を小さくするためには、取水口を水温躍層

の下限から十分に深いところに設置する必要がある。

富山県では水産試験場及び 20 km 離れた入善町で海洋深層水が揚水されている。両施設で硝酸塩濃度の計測調査を実施し、両施設の取水口付近での水温及び流向・流速等の観測を行うことにより、硝酸塩濃度等を指標として、富山湾内での深層水の詳細な動態及びその要因の解明が期待されるものと考えられる。

文 献

- 深見公雄・松本純・門田司・中野雄也・西島敏隆 (2000) : 海洋深層水の水質変動と微細藻類に対する増殖ポテンシャルの関係, 海深研, 1, 27-31.
- 稲葉栄生・勝間田高明・安田訓啓 (2001) : 駿河湾 300 m 層の流動と水温の変動, 海深研, 2, 1-8.
- 木下淳司・近磯晴・宮原司 (2002) : 小田原沖海洋深層

水の栄養塩類特性について, 海深研, 3, 7-13.

- 松永明信・小善圭一・黒川弘子・山本敦・大浦敏 (2001) : イオンクロマトグラフィーによる海洋深層水中の硝酸塩の連続自動分析, 富山衛研年報, 24, 132-137.
- 中島利光・豊田孝義 (1994) : 海洋深層水の資源的価値とその利用, 月刊海洋, 26, 133-138.
- 小善圭一・松永明信・黒川弘子・大浦敏・山本敦 (2001) : 海洋深層水中の硝酸塩の連続自動分析, 海洋深層水利用研究会小田原大会講演要旨集, 33-34 頁.
- 豊田孝義・中島利光・黒山順二 (1998) : KAUL の汲み上げ深層水中の栄養塩類, 海洋深層水利用研究会高知大会講演要旨集, 24-25 頁.
- Watanabe, M., J. Ohtsu and A. Otsuki (2000): Daily variations in nutrient concentrations of seawater at 321 m depth in Toyama Bay, Japan Sea, J. Oceanogr., 56, 553-558.

(2003. 6. 26 受付, 2003. 11. 21 受理)