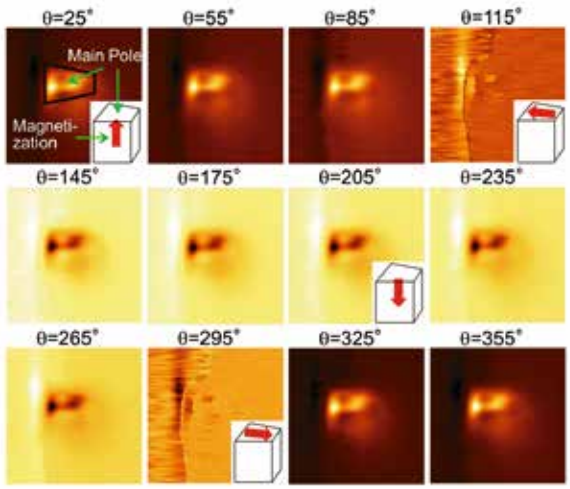
秋　田　大　学
大学院工学資源学研究科

研　究　報　告

第 36 号



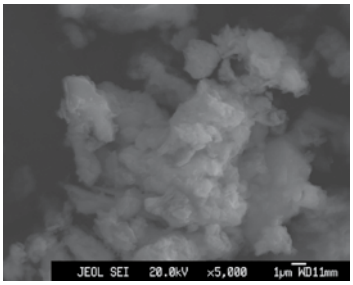
A-MFMによる交流磁場のストロボ磁場計測画像

（解説：齊藤，pp.1-8）

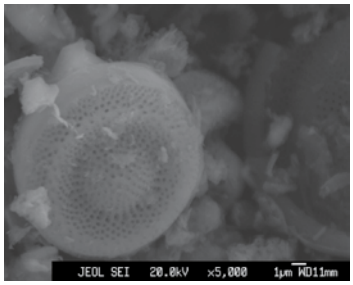
玉川ダム底質

田沢湖底質

採取された柱状コアサンプルの写真と分画位置



玉川ダム底質第 3 層



田沢湖底質第 4 層

採取された柱状コアサンプルのSEM写真

（資料：布田 他，pp.49-53）

ISSN 2186-1382

秋田大学 大学院工学資源学研究科
研 究 報 告

第 36 号

平成 27 年 10 月

目 次

解説

高分解能・交番磁気力顕微鏡の開発とその磁性材料・磁気デバイスへの応用…… 齊藤準 1

研究報告

秋田県北部峰浜地域に分布する上部鮮新統～下部更新統の浮遊性有孔虫化石層序
……山﨑誠，小松優子，福永里実，佐藤時幸 9

量子論における摂動展開と非摂動量子効果の不思議な関係～Resurgence 展開と複合ソリトン配位～…… 三角樹弘 15

International Cooperation to Spread Mosquito Nets: Case Studies in Tanzania and Bangladesh
……Yoshio AIZAWA, Hiromi TSUBOI 27

A Study on Legislative and Administrative Factors behind Informal Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM) in Tanzania
……Yoshio AIZAWA 35

生徒指導における「段階的指導」の効果と課題－2 高校の管理職教員へのインタビュー調査から－
…… 井陽介，鈴木翔 41

資料

田沢湖，玉川ダム湖の底質堆積物の特性調査……布田潔，生魚利治，鈴木純恵，成田修司 49

研究論文目録（2014）…… 55

平成 26 年度博士論文題目リスト…… 89

平成 26 年度修士論文題目リスト…… 90

秋田大学 大学院工学資源学研究科

編集委員会

材料工学専攻　大口健一
（委員長）

地球資源学専攻	大場　司	環境応用化学専攻	小笠原　正剛
生命科学専攻	田村　拓	材料工学専攻	棗　千修
情報工学専攻	内海富博	機械工学専攻	巖見武裕
電気電子工学専攻	佐藤祐一	土木環境工学専攻	荻野俊寛
共同ライフサイクルデザイン工学専攻	髙橋　護	理工学研究センター	網田和宏
数理科学コース	小林真人		

解説論文の企画の意図

研究報告編集委員会

本号では、理工学研究センターの齊藤準先生に解説記事をご寄稿頂きました。お寄せ頂いた記事に関する齊藤先生のご研究「交番磁気力顕微鏡の開発と磁気デバイスの高分解能磁区観察」は、平成２３～２６年度「科学技術振興機構の先端計測の先端計測分析技術・機器開発プログラム」に採択されました。その研究開発の成果は、秋田大学にとって大きな成果であることから、齊藤先生は今年度「特別貢献教授」に就任されました。齊藤先生のご研究を紹介する本企画が、読者の皆様のご活動を発展させる上でお役に立てれば幸いです。

解説

高分解能・交番磁気力顕微鏡の開発とその磁性材料・磁気デバイスへの応用

齊藤 準**

Development of high-resolution alternating magnetic force microscopy and its application to advanced magnetic materials and devices

Hitoshi Saito

Abstract

We have developed novel magnetic force microscopy named as alternating magnetic force microscopy (A-MFM) for DC and AC magnetic fields imaging with ultra high spatial resolution of less than 5 nm. A-MFM utilizes frequency modulation of cantilever oscillation induced by applying off-resonant alternating magnetic force to high sensitive homemade magnetic tip. A-MFM is the first magnetic force microscopy which enables near-surface magnetic imaging. A-MFM has several new functionalities such as, a) zero detection of magnetic field, b) polarity detection of magnetic field, c) stroboscopic AC magnetic field imaging and d) vector DC magnetic fields imaging with selectable measuring axis.

１．はじめに

磁気力顕微鏡（Magnetic Force Microscopy; MFM）は汎用の磁区観察ツールとして，様々な磁性材料や磁気デバイスの磁区構造の観察に広く用いられている．MFM は非接触原子間力顕微鏡（Non-Contact Atomic Force Microscopy; NC-AFM）の一形態であり，探針に磁性体を用いることで，観察試料が発生する磁場勾配を磁気力として検出する．磁気力は遠距離力であるので，MFM では観察試料が非磁性体で被覆されていても磁区観察を行うことができ，空間分解能は数 10 nm に達している[(1)]．近年の高密度磁気記録技術やナノサイズ磁性体に係わる研究の進展等により，MFM にはさらなる高分解能化と高機能化が求められている．本報告では，MFM の高分解能化および高機能化を目的として，我々が近年，(独)科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発プログラムの下で開発を進めてきた，交番磁気力顕微鏡（Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM）の進捗とその磁性材料・磁気デバイスへの応用例について述べる．

２．交番磁気力顕微鏡の特徴および計測原理

Table 1 に，交番磁気力顕微鏡と汎用の磁気力顕微鏡との性能比較を示す．以下では汎用の磁気力顕微鏡を汎用 MFM と略称する．汎用 MFM の測定対象は主に直流磁場である．汎用 MFM では，計測感度が高くなる真空雰囲気中（探針振動の際の空気粘性が小さくなる）での計測においても，空間分解能は 10 nm 程度に留まっている[(1)]．その主な理由は，磁気力が大きく，かつ磁気力分布が急峻になる試料表面近傍での磁気力計測が汎用 MFM では困難であるからである．試料表面近傍では，表面近傍のファンデルワールス力等の近距離力が遠距離力である磁気力より大きくなるため，汎用 MFM では，磁気力が主となる探

Table 1 Characteristics of conventional MFM and alternating MFM.

	Conventional MFM	Alternating MFM
Measuring Object	Mainly DC magnetic field	DC magnetic field by soft magnetic tip AC magnetic field by hard magnetic tip
Detecting Signal	【Scalar Signal】 Change of cantilever oscillation signal (amplitude, phase, resonant frequency) caused by magnetic force	【Vector Signal】 Frequency modulation signals of cantilever oscillation (amplitude & phase, in-phase & quadrature signals) caused by off-resonant alternating magnetic force
Magnetic measurement near sample surface	× (masked by strong short-range forces)	○
Zero detection of magnetic field	×	○
Polarity detection of magnetic field	×	○
Spatial resolution	10 nm～ (Vacuum atmosphere is needed for high-resolution.)	5 nm～ (in air atmosphere)
Vector measurement of DC magnetic field	×	○
Stroboscopic measurement of AC magnetic field	×	○

2015 年 8 月 26 日受理

**秋田大学大学院工学資源学研究科附属理工学研究センター，Research Center for Engineering Science, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

針試料間距離まで探針を遠ざけて計測を行う必要がある．さらに汎用 MFM では，探針を遠ざけたとしても，磁気力の単独検出および磁気力のゼロ検出は，磁気力に近距離力が加わっているために困難である．

一方，A-MFM の測定対象は直流磁場および交流磁場である．A-MFM では試料表面近傍において磁気力のみの検出が可能であり，最近では先鋭な高分解能探針の開発により 5 nm 以下の空間分解能が大気雰囲気において得られている．また，磁気力の振幅情報に加えて位相情報も利用できるので，後に述べるように，直流磁場に関してはベクトル磁場計測が，交流磁場に関してはストロボ磁場計測が可能になる．

A-MFM の計測原理を述べる．強制振動しているカンチレバーの一端に形成されている磁性探針にカンチレバーの共振周波数と異なる非共振の交番磁気力を加えると，カンチレバー振動に周波数変調が発生する[2]．カンチレバーをその共振周波数 ω_0 近傍で励振した場合には，カンチレバー振動の振幅は変化せず，カンチレバー振動の周波数のみが，加えられた交番力の周波数で時間変化する．したがって，交番磁気力によるカンチレバー振動の位相情報を利用した磁場計測が可能になる．なお，カンチレバー振動の振幅情報は，汎用の磁気力顕微鏡と同様に探針試料間距離を一定に保つように制御するのに利用できる．

MFM の磁性探針に，非共振の交番磁気力（角周波数 ω_m）を印加すると，カンチレバーのバネ定数は実効的に変化し，カンチレバー先端の磁性探針の運動方程式は次式で与えられる[2]．

$$m(d^2z(t)/dt^2)+m\gamma\left(dz(t)/dt\right) +(k_0+\Delta k_0^m\cos(\omega_m t))z(t)=F_0\cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

ここで，m は探針の有効質量，γ は振動の減衰定数，k_0 は探針固有のバネ定数，Δk_0^m は交番磁気力により周期的に変化する探針の実効的なバネ定数の振幅，ω_m は交番磁気力の角周波数，F_0 および ω_0 は探針に機械的に加える励振力の振幅および角周波数である．z 方向は探針の振動方向であり，通常の NC-AFM では探針を観察する試料面に垂直方向に励振する．

探針の強制振動の運動方程式に，バネ定数が交番磁気力により見かけ上変化する項（$\Delta k_0^m\cos(\omega_m t)$）が加わるところが，A-MFM の汎用 MFM との差異である．Δk_0^m が探針固有のバネ定数 k_0 と比較して小さな場合（$\Delta k_0^m << k_0$）には，磁性探針の振動は次式で与えられ，探針振動に狭帯域の周波数変調が発生する[2]．

$$z(t)=(F_0/(m\gamma\omega_0))\sin(\omega_0 t+(\Delta k_0^m/(m\gamma\omega_0))\cos(\omega_m t)) \cong(F_0/(m\gamma\omega_0))\sin(\omega_0 t)+(F_0/(m\gamma\omega_0)) (\Delta k_0^m/(m\gamma\omega_0))(\cos[(\omega_0+\omega_m)t]+\cos[(\omega_0-\omega_m)t]) \quad (2)$$

空間分解能の向上に有効となる探針試料間距離が小さな領域では，磁性体探針の磁化が探針の長手方向に向いている場合に探針先端の磁極の寄与が大きくなる単磁極型で近似できる．このとき，磁性探針の振動方向である z 方向に交流磁場 H_z^{ac} を印加した場合の磁性探針の実効的バネ定数の時間変化 $\Delta k_m(t)$ の一般式は次式で与えられる．ここでは，カンチレバーのバネ定数は異方的であり，試料面に垂直方向の z 方向のみに変形すると仮定している．また，試料面に垂直方向の直流磁場 H_z^{dc} も考慮している．

$$\begin{aligned}\Delta k_m(t)&=\Delta(\partial F_m(t)/\partial z)\\ &\cong\partial/\partial z((q_{tip}^{dc}+q_{tip}^{ac}\cos(\omega_m t))(H_z^{dc}+H_z^{ac}\cos(\omega_m t)))\\ &=(q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{dc}/\partial z)+(q_{tip}^{ac}/2)(\partial H_z^{ac}/\partial z))\\ &+(q_{tip}^{ac}(\partial H_z^{dc}/\partial z)+q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}/\partial z))\cos(\omega_m t)\\ &+(q_{tip}^{ac}/2)(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(2\omega_m t)\end{aligned} \quad (3)$$

ここで，$F_m(t)$ は探針に働く磁気力，q_{tip}^{dc} は H_z^{dc} により探針が磁化して探針先端に生じる直流磁極，q_{tip}^{ac} は H_z^{ac} により探針が磁化して探針先端に生じる交流磁極である．式(3)では探針の磁化が磁場に対して線形応答することを仮定している．

A-MFM では，1）交流磁場計測用にハード磁性探針を，2）直流磁場計測用にソフト磁性探針を用いる．これらの場合に対応する式(3)を以下に述べる．

2.1 ハード磁性探針を用いた交流磁場計測

保磁力が大きく角形比が 1 の理想的なハード磁性探針では探針磁極は以下の条件を満たす．

$q_{tip}^{dc}>>1,\ q_{tip}^{ac}=0$ このとき式(3)の時間変化項は，

$$\Delta k_m(t)=q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(\omega_m t) \quad (4)$$

となり，観察試料（ソフト磁性材料等）から発生する交流磁場勾配 $(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(\omega_m t)$ の計測が可能になる[2-6]．ハード磁性探針の磁化が交流磁場で変化する場合には，$q_{tip}^{ac}\neq 0$ となり，$\Delta k_m(t)$ に $(q_{tip}^{ac}/2)(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(2\omega_m t)$ 成分が加わる．ハード磁性探針のハード磁気特性が交流磁場の計測に際し十分であるかどうかは，$\cos(2\omega_m t)$ 成分を変調源とした周波数変調が小さいかどうかにより判断することができる．

2.2 ソフト磁性探針を用いた直流磁場計測

ソフト磁性探針に空間的に一様な交流磁場を外部から印加して探針先端の磁極を $q_{tip}^{ac}\cos(\omega_m t)$ のように周期的に変化させる．観察試料をこの交流磁場により磁化が変化しないハード磁性材料とすると，観察

試料からは交流磁場が発生せず，外部から印加する交流磁場は空間的に一様であるので，$(\partial H_z^{ac}/\partial z) << 1$ となり，式(3)の時間変化項は，

$$\Delta k_m(t) \cong q_{tip}^{ac}(\partial H_z^{dc}/\partial z)\cos(\omega_m t) \quad (5)$$

となるので，ハード磁性材料から発生する直流磁場勾配 $(\partial H_z^{dc}/\partial z)$ の計測が可能になる[7]-[9].

さらに，A-MFM の汎用 MFM と大きく異なる特徴として，汎用 MFM が磁気力の変化に伴うスカラー信号である探針振動の変化量（共振周波数，振動振幅，振動位相）を検出するのに対して，A-MFM では，交番磁気力により誘起される周波数変調信号を周波数復調後にロックイン検出したベクトル信号（周波数復調信号の振幅 R および位相 θ，またはロックインの参照信号に対する同相成分 X および直交成分 Y）を検出する．ここでベクトル信号間の関係は，$R\,e^{i\theta} = X + i\,Y$ で与えられる．

A-MFM ではこのベクトル信号に着目することにより，３）交流磁場計測ではストロボ磁場計測[6]が，４）直流磁場計測ではベクトル磁場計測[10]が実現できる．

2.3 交流磁場のストロボ磁場計測

磁気記録ヘッド等において，交流電流 $I_0\cos(\omega_m t)$ を励磁コイルに印加して，試料を構成する強磁性体から交流磁場を発生させている場合，試料の磁化は時間変化している．交流磁場が試料の磁化の回転磁化成分により発生している場合，回転磁化は交流電流と位相が同一の同相磁化成分，$M_0\cos(\omega_m t)$ と，位相が 90°異なる直交磁化成分，$M_0\sin(\omega_m t)$ をもつので，これらの磁化成分が発生する交流磁場の位相は90°異なる．したがって式(3)の時間変化項は次式で与えられる．

$$\begin{aligned}\Delta k_m(t) &= q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}(M_0\cos(\omega_m t))/\partial z) \\ &\quad + \partial H_z^{ac}(M_0\sin(\omega_m t))/\partial z)) \\ &= q_{tip}^{dc}\cos(\omega_m t)(\partial H_z^{ac}(M_z)/\partial z) \\ &\quad + q_{tip}^{dc}\sin(\omega_m t)(\partial H_z^{ac}(M_x)/\partial z)\end{aligned} \quad (6)$$

ロックインアンプを用いてこれらの磁化成分から発生する交流磁場勾配を抽出し，一定間隔で位相を変化させることで，試料磁化から発生する交流磁場勾配の空間分布の時間変化に係わるストロボ磁場計測が可能になる[6].

2.4 直流磁場のベクトル磁場計測

2.2 節ではソフト磁性探針を，探針先端の磁極密度が変化する単磁極型探針として扱ったが，ここでは近似を高め，ソフト磁性探針を，探針の磁化が外部からの一様な交流磁場により回転する双磁極型探針として定式化する．この場合，探針の磁化は同方向の磁場の勾配を検出するので，実効バネ定数の時間変化項は次式で与えられる．

$$\begin{aligned}\Delta k_m(t) &= M_z^{ac}(tip)\cos(\omega_m t)(\partial^2 H_z^{dc}/\partial z^2) \\ &\quad + M_x^{ac}(tip)\sin(\omega_m t)(\partial^2 H_x^{dc}/\partial z^2) \\ &\cong q_{tip}^{ac}\cos(\omega_m t)(\partial H_z^{dc}/\partial z) \\ &\quad + M_x^{ac}(tip)\sin(\omega_m t)(\partial^2 H_x^{dc}/\partial z^2)\end{aligned} \quad (7)$$

したがって，$\Delta k_m(t)$ は外部からの交流磁場源に対して，位相が同一の同相磁化成分である $(\partial H_z^{dc}/\partial z)$ を含む第１項と，位相が 90°異なる直交磁化成分である $(\partial^2 H_x^{dc}/\partial z^2)$ を含む第２項をもつ．ロックインアンプを用いてこれらの成分を抽出することでベクトル磁場計測が可能になる．さらにこれら成分の位相を調節することで，試料面から任意の角度をもつ計測軸に対しての直流磁場勾配の計測が可能になる[10].

３．計測原理システム

A-MFM の交流磁場および直流磁場に対する計測システムの一例を，各々，Fig.1，Fig. 2 に模式図で示す．磁性探針に非共振の交番磁気力を発生させるのに，探針に非共振の交流磁場（角周波数 ω_m）を加えることは共通である．Fig.1 の交流磁場計測の場合，試料からの交流磁場が，ハード探針先端の直流磁極に加わることで角周波数 ω_m の交番磁気力が発生する[2]．Fig. 2 の直流磁場計測の場合，外部からの交流磁場が，ソフト磁性探針の磁化を変化させ，試料からの直流磁場と相互作用して角周波数 ω_m の交番磁気力が発生する[7]．ここでは，観察試料は，探針に印加する交流磁場により磁化状態が変化しないものを用いる．これらの磁性探針に加わる交番磁気力が探針振動に周波数変調を生み出す．フォトディテクタ

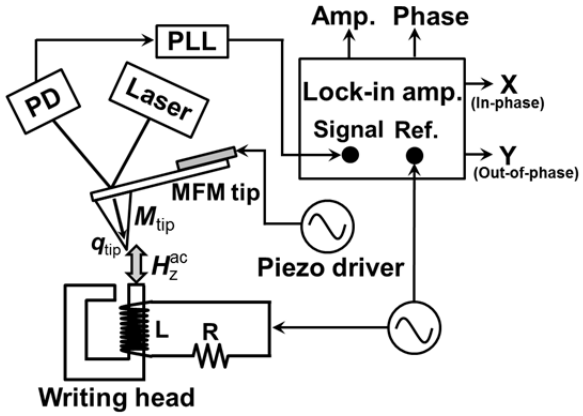


Fig.1 Schematic diagram of A-MFM for measuring AC magnetic field gradient.

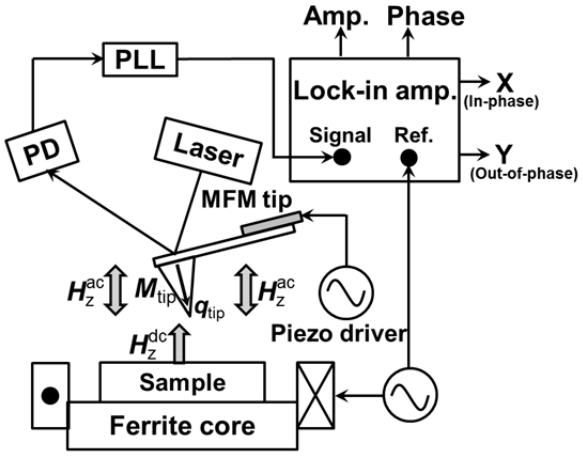


Fig.2 Schematic diagram of A-MFM for measuring DC magnetic field gradient.

で検出した探針振動の周波数変調信号を，位相同期ループ回路（PLL）により周波数復調し，ロックインアンプを用いて，参照信号を交流磁場源の出力信号にとりロックイン検出する．画像化信号は，先に述べた周波数復調信号の振幅 R，位相 θ，または参照信号に対する同相成分 X，直交成分 Y から適宜選択することができる．

4．磁性材料・磁気デバイスへの応用

Fig. 3 に，垂直磁気記録用の高磁場収束型磁気記録ヘッドの交流磁場を A-MFM を用いて観察した，(a)表面形状像，(b)交流磁場の振幅像，(b)交流磁場の位相像，ならびにそれらのラインプロファイル[(d), (e), (f)]，(g) 交流磁場の振幅像のラインプロファイルの空間スペクトラム，を示す．交流磁場像の観察時の探針試料間距離は 2〜3 nm である．磁気記録ヘッドに流す交流電流は 80 mA，周波数は 211 Hz とした．観察雰囲気は大気中である．観察には自作した FePt-MgO 系ハード磁性探針（磁性膜厚 15 nm）を用いた．観察前にハード磁性探針の磁化が試料面に垂直になるように探針を着磁し，磁場の計測方向を試料面に垂直方向とした．

図(a)の表面形状像の中央に見られる三角形の部分が磁気記録ヘッドの主磁極であり，内部に埋め込まれた薄膜コイルに交流電流を流すことにより強い交流磁場が発生する．主磁極の表面から発生した交流磁場は，ギャップを通過してトレーリングシールの表面に吸い込まれる．交流磁場は主磁極とトレーリングシールで試料面に垂直な成分（垂直磁場成分）を持ち，ギャップ部分で垂直磁場成分はゼロとなり，試料面に平行で主磁極とトレーリングシールを結ぶ方向の成分（面内磁場成分）のみとなる．

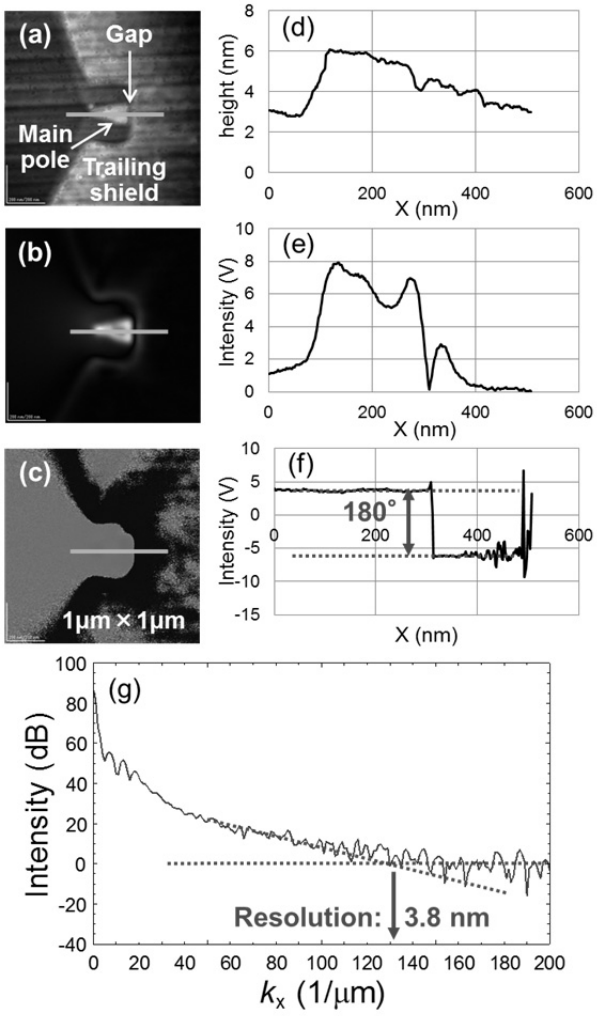


Fig. 3 A-MFM images of AC magnetic field gradient [(a), (b) and (c)] and their line profiles [(d), (e) and (f)], the spectrum of AC magnetic field gradient for a magnetic writing head [(g)].

図(b)の交流磁場の振幅像およびそのラインプロファイル（図(e)）に見るように，垂直磁場成分はゼロ信号のギャップを隔てて主磁極とトレーリングシールで極大値をとり，ギャップ近傍でゼロとなっている様子が明瞭に観察されている．また，主磁極で垂直磁場成分の強度が最大になっている．

図(c)の交流磁場の位相像およびそのラインプロファイル（図(f)）に見るように，位相像は明瞭な明暗の２値画像となっており，位相の値がギャップ部で180°変化していることがわかる．この位相の変化は垂直磁場成分の極性の変化を示しており，次式に対応している．

$$\Delta k_m(t) = q_{tip}^{dc}(\partial(-H_z^{ac})/\partial z)\cos(\omega_m t) = q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}/\partial z)\cos(\omega_m t \pm \pi) \quad (8)$$

空間分解能を、図(g)の空間スペクトラムを用いて，磁気力信号がホワイトノイズレベルと等しくなる

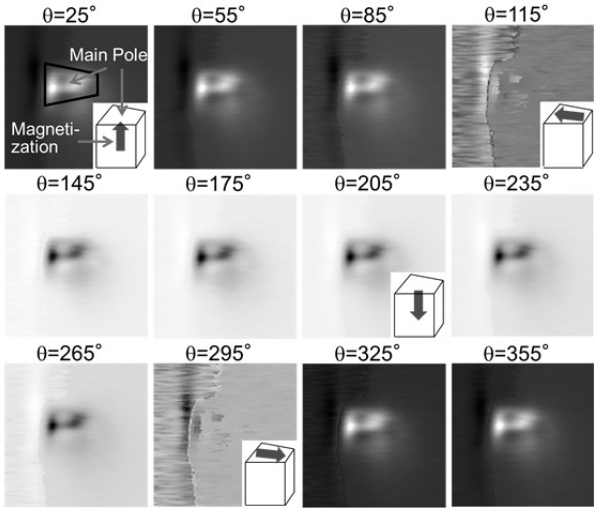


Fig.4　Stroboscopic images of AC magnetic field gradient from a magnetic writing head using A-MFM.

（S/N=1）波数に対応する波長の半値と定義して求めると 5 nm 弱と，汎用の MFM での 10 nm 以上と比較して大幅に向上した値が得られた．ここで，高い空間分解能の実現には，15 nm 以下の膜厚で 15 kOe 以上の保磁力を有する FePt-MgO グラニュラー合金薄膜を均一に極薄形成した探針を用いることが効果的であった．

Fig. 4 に，汎用型の磁気記録ヘッドにおける，A-MFM による交流磁場のストロボ磁場計測画像を示す[6]．試料面に垂直方向の磁場を，試料面に垂直方向の磁化を持つように着磁した FePt ハード磁性探針を用いて大気雰囲気で計測している．交流磁場像に対して，磁気ヘッドの励磁電源との間の位相をロックインアンプで調整することで，交流磁場の 1 周期の間の時間変化をストロボ的に観察することができる．磁場の発生源である主磁極部分（ヘッド表面に現れる台形部分が断面方向に奥行きをもつ）では，励磁電流により磁化が 1 回転するのに伴う磁場変化が観察される．主磁極磁化が試料面に垂直のときには，主磁極面から磁場が発生し，主磁極の側面からは磁場が発生していないのに対して，主磁極磁化が試料面に平行のときには，逆に主磁極の側面から磁場が発生し，主磁極面からは磁場は発生していない．磁気記録ヘッドでは，磁気異方性付与による磁化の回転軸方向の制御が重要であり，この評価には，ストロボ磁場計測が有効と考えられる．

Fig.5 に，NiFe ソフト磁性探針（NiFe 膜厚 30 nm）を用いた A-MFM により大気雰囲気で観察した，垂直磁気記録媒体（線記録密度 200 kfci, 記録ビット長 125 nm）の直流磁場の(a)強度像，(b)極性像，および(c)

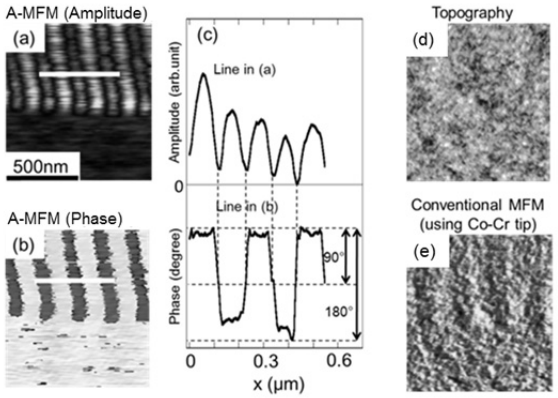


Fig.5　A-MFM images of DC magnetic field gradient [(a), (b)] and (c) their line profiles, (d) topographic and (e) conventional MFM images for a perpendicular magnetic recording medium.

それらのラインプロファイルを示す．同時に図には比較のため真空雰囲気型の汎用 MFM を用いて観察した表面形状像(d)，および A-MFM と同様の探針試料間距離において観察した磁気像(e)を示す[8]．

図(a)の強度像（ロックインアンプの振幅出力像）およびそのラインプロファイル（図(c)）では，記録ビットの境界部で信号強度がゼロに近づいていることがわかる．垂直磁気記録媒体の記録ビットの境界では試料面に垂直な磁場（垂直磁場）がゼロで，試料面に平行で隣接する記録ビットに向かう磁場（面内磁場）が最大となることを考慮すると，直流磁場強度像においては垂直磁場が計測されていることがわかる．図(c)の極性像（ロックインアンプの位相出力像）およびそのラインプロファイル（図(d)）では，明暗の２値画像となっている極性像の明部と暗部の位相差は 180°程度であり，垂直磁場の極性が記録ビットの境界部を隔てて反転していることが明瞭に観察される．この極性の変化は次式で説明できる．

$$\Delta k_m(t) = q_{tip}^{ac}(\partial(-H_z^{dc})/\partial z)\cos(\omega_m t)$$
$$= q_{tip}^{ac}(\partial H_z^{dc}/\partial z)\cos(\omega_m t \pm \pi) \qquad (9)$$

一方、図(e)の汎用 MFM を用いて，A-MFM と同様の探針試料間距離で観察した磁気像では，記録ビットによる磁気コントラストに，図(d)の表面形状情報が重畳しており，A-MFM において空間分解能の向上に有効となる試料表面近傍では，汎用 MFM では磁場計測が困難であることがわかる．

Fig. 6 に，A-MFM を用いて大気雰囲気で観察した，高密度垂直磁気記録媒体（線記録密度 500 kfci，記録ビット長 50.8 nm）の，(a)垂直磁場像（ロックインアンプの参照信号に対する同相成分 X の像），(b)表面形状像，(c)記録ビット部分のラインプロファイル，

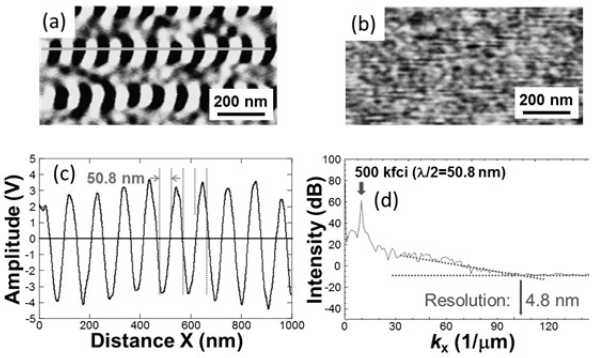


Fig.6 (a) A-MFM image of DC magnetic field gradient, (c) its line profiles, (b) topographic image, (d) the spectrum of DC magnetic field gradient for a perpendicular magnetic recording medium.

および(d)そのラインプロファイルから求めた空間スペクトラムを示す[9].

観察には自作した FeCoSiB 非晶質ソフト磁性探針（磁性膜厚 25 nm）を用いた．探針試料間距離は 2～3 nm である．外部より探針に印加した交流磁場の強度は 300 Oe，周波数は 89 Hz とした．

図(d)の空間スペクトラムから磁場信号とノイズ強度が等しくなる波長の半値より空間分解能を求めると， 5 nm 弱の高い空間分解能が得られた．高い空間分解能の実現には，高い飽和磁束密度を有する FeCoSiB 非晶質合金薄膜を均一に極薄成膜した探針を用いることが有効であった．A-MFM は磁場のゼロ検出ができるので，垂直磁場像のラインプロファイルは，磁場のゼロレベルを有しており，同時に磁場の符号の正負は試料面に垂直方向に対して，磁場の上向きあるいは下向きを示している．A-MFM は，高い空間分解能に加えて，磁場極性ならびに磁場の発生源である表面磁極の極性の検出も可能である．

Fig. 7 に，A-MFM を用いて観察した高密度磁気記録媒体のベクトル磁場計測像を示す[10]．観察には自作した Ni-Fe ソフト磁性探針（NiFe 膜厚 30 nm）を用いた．A-MFM で得られた直流磁場像に対して，ソフト磁性探針を励磁している交流電源との間の位相をロックインアンプを用いて調整することにより直流磁場の計測軸を試料面に垂直方向から任意の角度に調整することができる．図の角度θは位相調整角である．計測軸方向を変化させることにより，試料面に垂直方向の磁場（θ=4.5º, 184.5º）や，試料面に平行方向の磁場（θ=94.5º, 274.5º）等の任意の角度をなす計測軸方向で磁場計測が可能になる．ここで磁場の計測軸は，記録ビット中央の磁場が垂直磁場成分のみとなる位置で，位相を変化させたときに信号が符号を変える際にゼロを通過する位相角を，磁場の計測軸が試料面に平行方向であるとして定めた．ベクトル磁場計測手法は，試料から発生する直流磁場の方向を検出するうえで有用な手法と考えられる．

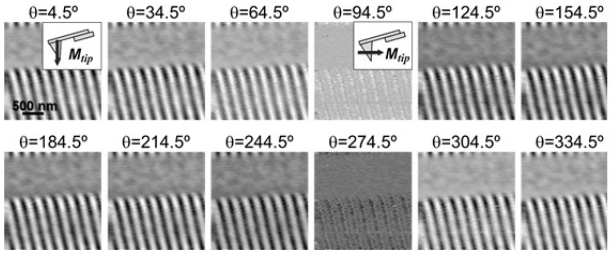


Fig.7 A-MFM images of DC magnetic field gradient for a perpendicular magnetic recording medium by rotating the measuring axis.

５．まとめ

汎用の磁気力顕微鏡（MFM）で困難であった技術課題を解決し，空間分解能を向上させるとともに機能を追加した，“交番磁気力顕微鏡”とその磁性材料・磁気デバイスへの応用例を紹介した．本顕微鏡は磁性材料・磁気デバイスの微細磁区構造の解析に有用となるものと期待している．

謝辞

本研究は，(株)日立ハイテクサイエンス，日東光器(株)，秋田県産業技術センター，および秋田大学の吉村哲・准教授，木下幸則・助教，江川元太・技術職員，研究グループの博士研究員，学生諸氏との共同研究の成果である．本研究は(独)科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発プログラムの支援を受けた．ここに関係の方々に深謝する．

参考文献

(1) 石尾俊二，齊藤準，山岡武博：磁気イメージングハンドブック（第４章 磁気力顕微鏡），(日本磁気学会編)，(共立出版)，95-130 (2010).

(2) H. Saito, H. Ikeya, G. Egawa, S. Ishio, and S. Yoshimura, *Journal of Applied Physics*, **105**, 07D524 (2009).

(3) W. Lu, Z. Li, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and H. Saito, *Applied Physics Letters,* **96**, 143104 (2010).

(4) H. Saito, W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa, and S. Yoshimura, *Journal of Applied Physics*, **107**, 09D309 (2010).

(5) W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and

H. Saito, *IEEE Transactions on Magnetics*, **46**, 1479-1482 (2010).

(6) Z. Li, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and H. Saito, *Applied Physics Letters*, **100**, 222405 (2012).

(7) H. Saito, R. Ito, G. Egawa, Z. Li, and S. Yoshimura, Journal of Applied Physics, **109**, 07E330 (2011).

(8) H. Saito, R. Ito, Z. Li, G. Egawa, and S. Yoshimura, *The International Magnetics Conference (Intermag 2012)*, AF-02 (2012).

(9) S. R. Kapa, S. Okayasu, H. Qi, F. Zheng, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura, and H. Saito, *The International Conference on Magnetism (ICM 2015)*, MO.E.2_O4 (2015).

(10) H. Saito, Z. Li, R. Ito, G. Egawa, and S. Yoshimura, *The 56th Conference of Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2011)*, DG-04 (2011)

研究報告

秋田県北部峰浜地域に分布する上部鮮新統～下部更新統の浮遊性有孔虫化石層序

山﨑　誠**，小松優子***，福永里実****，佐藤時幸**

Upper Pliocene to lower Pleistocene planktic foraminiferal biostratigraphy from Minehama area in the northern part of Akita Prefecture, Japan

Makoto Yamasaki**, Yuko Komatsu***, Satomi Fukunaga**** and Tokiyuki Sato**

Abstract

Planktic foraminiferal biostratigraphy of the upper Pliocene to lower Pleistocene Tentokuji and Sasaoka Formations distributed in the Minehana area located in the northern part of Akita Prefecture, Japan, is described in detail. Totally 44 samples were analyzed for this study. Based on calcareous nannofossil and planktic foraminiferal assemblages, the studied section includes the horizon of global cooling that was resulted from Northern hemisphere galaciation in the latest Pliocene. *Globigerina bulloides* and *Globigerina quinqueloba* occurred throughout the studied section. Cold-water planktic foraminifera were generally observed in the middle to upper part of studied section. Especially, a polar to subpolar dweller, *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral coiling variety), was found commonly just after global cooling at latest Pliocene while dextral coiling variety of this species, which thrived in warmer water, were rare in the middle to upper part of the studied section. On the other hand, tropical to subtropical species such as *Globigerinoides ruber* were also found at the upper part of the studied section. It indicates that the studied area seems to be covered by warm water in the early Pleistocene.

1. はじめに

東北～中部日本の日本海側地域は古くから産油地として知られ，石油を胚胎する最上部新生界を中心として層序学的研究が進められてきた．層序学研究の進展は，石油が形成されるに至った地史の復元についても貢献をしている．日本海側地域の地史において，鮮新世中～後期（約 360～258 万年前）の気候は新生代における顕著な温暖化事件のひとつであり，日本海の海洋環境にも多大な影響を与えた．日本海が外海と狭小な海峡で接続する縁海であるために，日本列島の地史復元にあたって，南北の海峡を介した海流の動態に関する情報は重要である．鮮新世末，日本海には現在の対馬暖流に相当する暖流系が断続的に流入した結果，温暖環境を指標する動物相が形成されたと考えられている（Maiya et al., 1976[(1)]など）．間欠的に記録される暖流系化石の産出のうち，浮遊性有孔虫 *Globorotalia inflata* d'Orbigny s.l.（s.l.は「広義」を意味する sensu lato の略称）は，鮮新統から更新統層序の地質年代を決定する上でも重要な指標として伝統的に利用され（工藤，1967[(2)]），同時に，日本海側で開発される石油坑井の広域的対比に重要な役割を果たしてきた（平松・三輪，2005[(3)]など）．同時代の地層群は，新潟県から秋田県にかけて広く分布するが，既存の研究をかつての日本海への海水の流入方向で概観すると，軟体動物化石（天野ほか，2000[(4)]など）や珪藻化石群集（柳沢・天野，2003[(5)]）は南方からの流入を示唆する一方，底生有孔虫化石（花方ほか，2001[(6)]）と各種海洋生物相（北村・木元，2004[(7)]）は北方からの流入を示唆する．さらに，貝形虫化石は暖流の流入を示唆するが（Irizuki et al., 2007[(8)]），流入経路を指し示す情報は無いとして，暖

2015 年 7 月 27 日受理

**秋田大学大学院工学資源学研究科地球資源学専攻，Department of Earth Science and Technology, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

***神奈川県横浜市（地球資源学科 2005 年度卒業），Department of Earth Resource Science, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

****三重県いなべ市（地球資源学専攻 2008 年度修了），Department of Earth Science and Technology, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

流の経路には言及していない（入月・石田, 2007[9]）．また，各種海洋生物相の再解釈によっては南方からの暖流流入の可能性も依然として残るといい（北村, 2007[10]），海洋環境情報として最も基本となる海流の経路復元ですら混乱しているのが現状である．本報告では，同時代の古環境を検討する目的で，秋田県北部の峰浜地域で調査をおこない，鮮新世末から更新世にかけての浮遊性有孔虫化石の層位分布を明らかにした．

2. 調査地域の層序と試料

本研究報告では，秋田県山本郡八峰町峰浜地域の塙川に分布する上部鮮新統から更新統を調査対象とした（図 1）．本報告では，地層区分の大枠を大沢ほか（1984）[11]に従って，天徳寺層と笹岡層を対象に浮遊性有孔虫化石試料を採取した．なお，塙川に沿った同様のルートで佐藤ほか（2003）[12]が石灰質ナンノ化石層序について，天野ほか（2011）[13]が軟体動物化石群について検討をおこなっている．

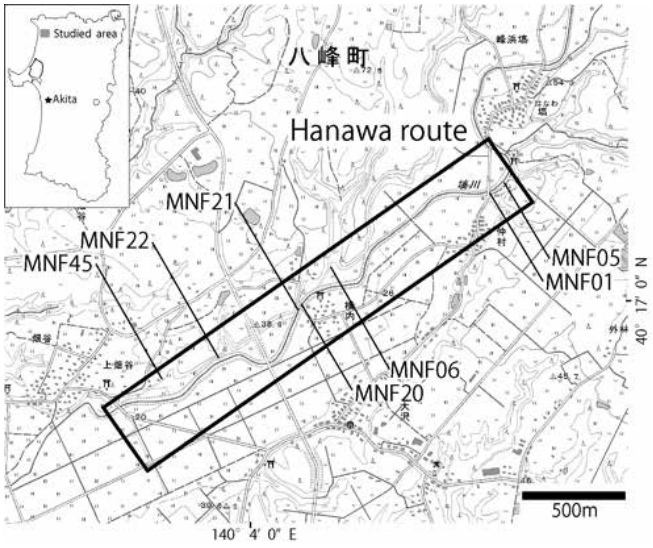


図 1.　調査地域および試料採取地点（国土地理院の電子地形図 25000 を使用）

本調査対象下限の天徳寺層上部は暗青灰色から青灰色シルト岩を主に砂質礫岩との互層をなす．シルト岩には生痕も認められる．礫岩は細礫から中礫サイズで一部極粗粒砂岩からなり安山岩や軽石の亜角礫から亜円礫よりなる．礫岩の基底部は下位のシルト岩を削り込む様子が観察される．本層最上部は礫岩が主体で極粗粒砂岩から細礫より構成される．礫岩は約 5〜20 cm の層厚で円礫から亜円礫である．最上部は青灰色シルト岩とともに中粒砂岩から粗粒砂岩の薄層も観察される．

笹岡層は青灰色の淘汰の悪い極細粒から細粒砂岩よりなり，下位の天徳寺層を整合に覆う．サンドパイプなどの生痕のほか破片化した貝化石を豊富に産する．貝化石は一部合弁のものも認められる．

本報告では，天徳寺層の上部から笹岡層にかけて採取した試料のうち合計 44 試料を浮遊性有孔虫化石調査に用いた（図 1）．

3. 微化石層序

3.1 試料の処理

浮遊性有孔虫化石調査のため，採取した試料は尾田（1978）[14]による硫酸ナトリウム法とナフサ法を併用して処理をおこなった．それぞれの試料をロックペンチで 1〜2 cm 角に砕き恒温乾燥機で乾燥させた後 80 g を秤量し, 岩石の固結度に応じて 1〜3 回の硫酸ナトリウム法を繰り返す．その後，ナフサ法も同様に 1〜3 回繰り返し最終的に砂粒にまで細片化した試料を浮遊性有孔虫化石調査に用いた．試料は，簡易分割器を用いて, 1 試料あたり 200 個体程度の浮遊性有孔虫化石が含まれるようになるまで分割し，試料中のすべての個体を拾い出した．なお，いくつかの層準では同化石の十分な産出が認められなかったため, 100 個体以上の産出が認められた試料についても調査資料に加えることとした（図 2）．

地質年代を検討するために，浮遊性有孔虫化石調査と同一の試料で石灰質ナンノ化石調査もおこなった．試料の処理は高山（1978）[15]に基づいてプレパラートを作成した．

3.2 調査結果

天徳寺層上部から笹岡層の試料において浮遊性有孔虫化石および石灰質ナンノ化石の産出が認められた．調査層準を通して浮遊性有孔虫の石灰質殻の保存は良好から中程度の保存状態であった．それらの試料に基づいて地質年代の検討および群集解析をおこなった．図 2 には，調査した試料に認められる浮遊性有孔虫化石のうち比較的普遍的に産する種について示す．まず，調査層準を通して *Globigerina bulloides* d'Orbigny や *Globigerina quinqueloba* Natland, *Neogloboquadrina pachyderma*（Ehrenberg）の左巻き個体（Sinistral；以下 S と略記）と右巻き個体（Dextral；以下 D と略記）双方が普遍的に産する．また，調査層準の下部で *Globigerina umbilicata* Orr and Zaitzeff や *Globigerinita uvula*（Ehrenberg）が認められる一方，調査層準上部の笹岡層中に *Globigerinoides ruber*（d'Orbigny）が産する．*Neogloboquadrina asanoi*（Maiya, Saito and Sato）は調査層準最下部から浮遊性

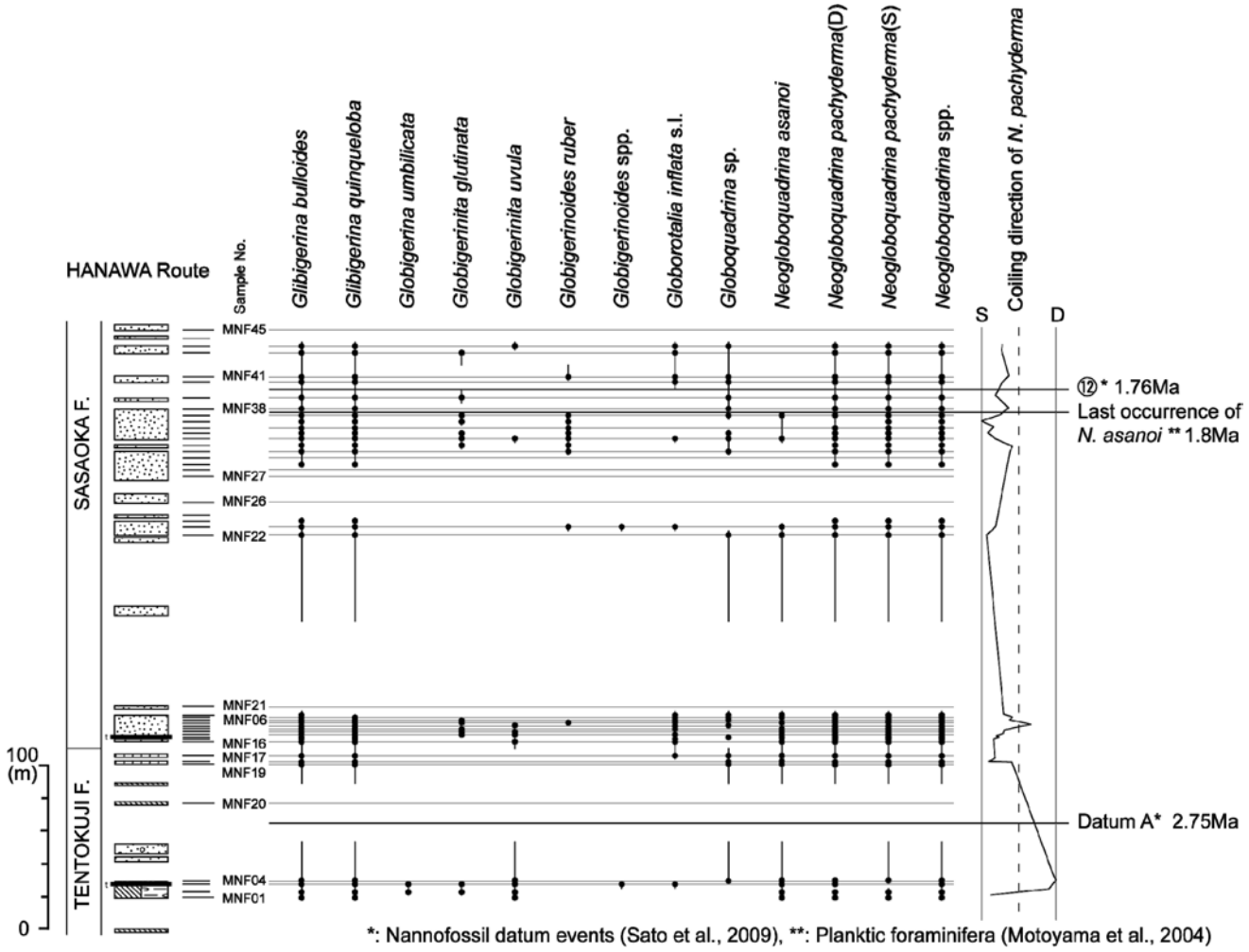


図 2.　　峰浜地域から産出した浮遊性有孔虫化石

有孔虫化石の全く産しない試料を除いて，ほぼ連続的に産するものの，試料番号 MNF38 より上位でその産出は認められない．その他 *Globigerinita glutinata* (Egger)や *G. inflata* s.l.が調査層準内で断続的に産する．図 2 には示されないが，調査した試料中でわずかながら産出する種として，*Globigerina woodi* Jenkins や *Globigerina decoraperta* Takayanagi and Saito，*Globigerinella aequilateralis* (Brady)も挙げられる．

4. 峰浜地域に分布する天徳寺層・笹岡層の地質年代

本研究で対象とする峰浜地域の塙川ルートでは佐藤ほか（2003）[12]によって石灰質ナンノ化石層序の詳細な検討がおこなわれ，本研究で最下限の天徳寺層に鮮新統／更新統境界の直下に追跡される基準面 A（Sato and Kameo, 1996[16]）が見出されている．本研究でも浮遊性有孔虫化石を検討した同一試料で石灰質ナンノ化石層序を検討したところ，調和的な結果を得た（図 2）．また，試料番号 MNF39 と 40 の間に石灰質ナンノ化石基準面 12（図 2）の *Gephyrocapsa caribbeanica* Boudreaux and Hay の産出下限が追跡され，その地質年代は 1.76 Ma と見積もられる（Sato et al., 2009[17]）．なお，浮遊性有孔虫 *N. sasnoi* の産出上限は下部更新統に追跡され日本海側地域での層序対比に有用視されるが（Maiya et al., 1976[1]），本調査地域での同種の産出は MNF37 より下位にのみ認められ，MNF38 以上の層準には産しない．したがって，同層準は下部更新統に対比され，その地質年代は 1.8 Ma と推定される（Motoyama et al., 2004[18]）．この結果は，石灰質ナンノ化石層序と矛盾しない．なお，本報告でも産出が確認された *G. inflata* s.l.は，その多産層準に対して上位から順に No.1 から No.3 の番号が付され（工藤，1967[2]），日本海側地域での坑井層序間の対比に有用視されてきた（米谷，1978[19]）．群集組成および層位分布から本調査層準下部での同種の産出は，最上部鮮新統の No.3 *G. inflata* bed に対比

される可能が否定されないが，その頻度は調査層準下部に限れば浮遊性有孔虫全体に対して 4.8%を占めるにすぎず，多産の傾向は認められないため本報告では判断できない．

以上の結果から，峰浜地域の塙川ルートは佐藤ほか（2003）[12]と同様に後期鮮新世から更新世の前期に対比されることが明らかとなった．

5. 峰浜地域に分布する鮮新統･更新統の古環境変遷

鮮新世末から更新世初めにかけての日本海の古環境変遷はこれまで数多くの研究がおこなわれてきた（たとえば Maiya et al., 1976[1]）．特に鮮新世の中頃から末にかけては mid-Pliocene warmth として知られ（Raymo et al., 1996[20]），現在よりも 2～3℃気温の高い環境であったと考えられている（Dowsett et al., 2011[21]など）．日本海では，この時期に多産が知られる *G. inflata* s.l.が暖流を示唆するとして（Maiya et al., 1976[1]），多くの研究で鮮新世末に日本海沿岸を流れる暖流の存在が指摘されてきた（三輪ほか，2004a[22]など）．また，軟体動物化石群の解析からも当時日本海沿岸には，ごく薄い暖流が存在したと推測されている（天野ほか，2000[4]）．本報告の調査下限の天徳寺層中の浮遊性有孔虫の層位分布をみると，*N. pachyderma* の石灰質殻の巻き方向が右巻き優勢であり，その後笹岡層最下部で一時的に右巻き優勢となるものの，上部では左巻き個体の割合が優勢である．一般に寒冷な環境下で同種の左巻き個体が優勢に産するという観測（Ericson, 1959[23]）に基づくと，調査層準最下部では温暖な環境が予測され，北極氷床の拡大時期を示唆する基準面 A（Sato and Kameo, 1996[16]; Sato et al., 2004[24]）を挟んで寒冷な環境へ移行したものと考えられる．これは峰浜地域で軟体動物群の検討をおこなった天野ほか（2011）[13]の結果と調和的である．また，典型的な温暖種として知られる *G. ruber* の層位分布に注目すると（例えば Bé, 1977[25]），調査層準最上部付近でその産出が認められる．従って，鮮新世の末に急激な寒冷化が認められるものの，その後，更新世の前期（～1.8 Ma）には，徐々に温暖化する傾向も示される．ここで，汎世界的に寒冷化した鮮新世末に相当する天徳寺階と笹岡階の境界付近に注目すると，従来，暖流の指標とされてきた *G. inflata* s.l.がわずかながらも連続的に産する．富山県灘浦地域（三輪ほか，2004b[26]）と新潟県北蒲原郡の胎内川ルート（三輪ほか，2004a[22]）でおこなわれた浮遊性有孔虫化石層序の研究とともに，秋田県峰浜地域の 3 つの地域で産する *G. inflata* s.l.に関して石灰質ナンノ化石基準面 A 直下付近，すなわち汎世界的寒冷化直前の同種の産出割合を比較する（図 3）．それぞれの地域の堆積速度，化石の産出層準の相違から必ずしも同時間面での比較とはならないが，高緯度でその割合が減少する傾向は明らかである．このことは，もし *G. inflata* s.l.が暖流を指標

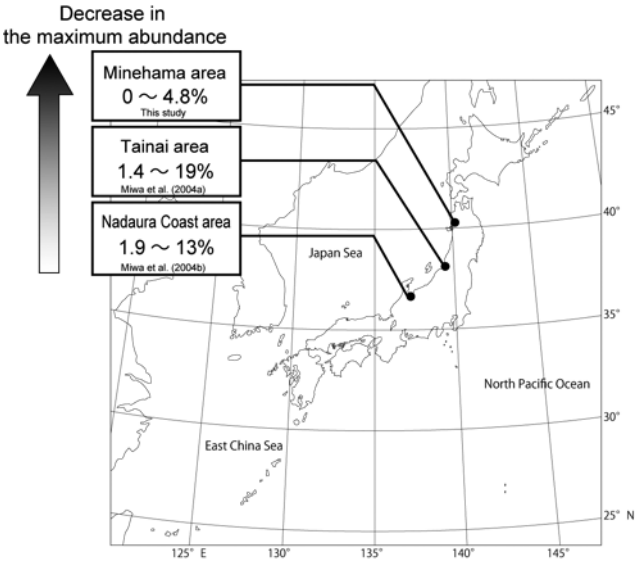


図 3.　基準面 A 直下層準の *G. inflata* s.l.の産出割合

するならば，その流れは南方海峡より日本海に侵入したと推測される．ただし，北極氷床の形成に伴う汎世界的寒冷化以降（基準面 A より上位の層準）でさえも，*G. inflata* s.l.が産し，かつ連続産出することは，同種の指し示す古環境が単純な温暖環境（たとえば暖流）を示唆しない可能性も指摘される．したがって，今後さらに鮮新世末以降の *G. inflata* s.l.の層位分布ならびに地理分布についての詳細を検討する必要がある．

6. まとめ

秋田県峰浜地域に分布する天徳寺層上部から笹岡層の地質時代は鮮新世末から更新世の前期に対比されることが示された．浮遊性有孔虫化石の層位分布に基づけば，天徳寺層最上部に追跡され，汎世界的寒冷化の時期に相当する石灰質ナンノ化石基準面 A を挟んで，下位では温暖な，上位では寒冷な環境が示唆される．また，調査層準上部に対比される更新世の前期では温暖種の存在から徐々に温暖な環境となったことが示唆される．本報告で認められる浮遊性有孔虫群集は鮮新世末の日本海の環境を議論する上で重要であり，周辺地域での調査がさらに必要で

ある.

謝辞

本報告の試料の採取および岩相調査について吉田新氏（地球資源学科 2005 年度卒業）にご協力いただいた．ここに記し感謝の意を表します.

参考文献

（1） Maiya, S., Saito, T., and Sato, T. (1976) : Late Cenozoic planktonic foraminiferal biostratigraphy of Northwest Pacific sedimentary sequences, In Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., Progress in Micropaleontology, Special Publication Micropaleontology, 395-422.

（2） 工藤哲朗（1967）：新潟ベーズンにおける Foraminiferal Ratio の利用について，第 32 回石油技術協会定時総会個人講演要旨集，13-14 頁.

（3） 平松 力・三輪美智子（2005）：秋田県海域および沿岸地域における鮮新世～更新世の浮遊性有孔虫化石マーカーの出現パターンと集油構造形成時期，石油技術協会誌，70 巻，1 号，104-113 頁.

（4） 天野和孝・鈴木正憲・佐藤時幸（2000）：鮮新世中期における暖流の日本海への流入：秋田県太平山周辺の天徳寺層軟体動物群，地質学雑誌，106 巻，4 号，299-306 頁.

（5） 柳沢幸夫・天野和孝（2003）：新潟県上越地域西部に分布する鮮新統の珪藻化石層序と古海洋環境，地質調査研究報告，54 巻，1/2 号，63-93 頁.

（6） 花方 聡・本山 功・三輪美智子（2001）：日本海地域における底生有孔虫 *Spirosigmoilinella compressa* の消滅と *Miliammina echigoensis* の出現の年代およびその古海洋学的意義―中新世～鮮新世の海水準変動との関連―，地質学雑誌，107 巻，101-116 頁.

（7） 北村晃寿・木元克典（2004）：3.9 Ma から 1.0 Ma の日本海の南方海峡の変遷史，第四紀研究，43 巻，6 号，417-434 頁.

（8） Irizuki, T., Kusumoto, M., Ishida, K., and Tanaka, Y.(2007): Sealevel changes and water structures between ca. 3.5 to 2.8 Ma in the central part of the Japan Sea Borderland: analyses of fossil Ostracoda from the Pliocene Kuwae Formation, central Japan. *Palaeogeography*, *Palaeoecology*, *Palaeoclimatology*, **245**, 421-443.

（9） 入月俊明・石田 桂（2007）：日本海沿岸の鮮新世貝形虫群集と海洋環境との関係，化石，82 巻，13-20 頁.

（10） 北村晃寿（2007）：後期鮮新世から前期更新世の間氷期における対馬海流の動態とその要因 －特に下部更新統における浮遊性有孔虫 *Globocenella inflata* の産出の古環境学的意義の再検討－，化石，82 巻，52-59 頁.

（11） 大沢 穠・池辺 穣・平山次郎・粟田泰夫・高安泰助（1984）：能代地域の地質，地域地質研究報告（5 万分の 1 図幅），地質調査所，91 頁.

（12） 佐藤時幸・樋口武志・石井崇暁・湯口志穂・天野和孝・亀尾孝司（2003）：秋田県北部に分布する上部鮮新統～最下部更新統の石灰質ナンノ化石層序 －後期鮮新世古海洋変動と関連して－，地質学雑誌，109 巻，5 号，280-292 頁.

（13） 天野和孝・吉田 新・佐藤時幸（2011）：2.75 Ma の寒冷化の日本海沿岸域の軟体動物群への影響：秋田県の中部および北部の軟体動物群，地質学雑誌，117 巻，9 号，508-522 頁.

（14） 尾田太良（1978）：有孔虫・貝形虫，高柳洋吉編，微化石研究マニュアル，朝倉書店，33-46 頁.

（15） 高山俊昭（1978）：石灰質ナンノプランクトン，高柳洋吉編，微化石研究マニュアル，朝倉書店，51-59 頁.

（16） Sato, T. and Kameo, K., (1996): Calcareous nannofossil biostratigraphy of the Arctic Ocean, ODP Leg 151, In Thiede, J., Myhre, A. M., Firth, J. V., Johnson, G. L. and Ruddiman, W. F. eds., Proc. ODP Sci. Results, **151**, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 39-59.

（17） Sato, T., Chinyonobu, S., and Hodell, D.A. (2009): Data report: Quaternary calcareous nannofossil datums and biochronology in the North Atlantic Ocean, IODP Site U1308, In Channell, J.E.T.,Kanamatsu, T., Sato, T., Stein, R., Alvarez Zarikian, C.A., Malone, M.J., and the Expedition 303/306 Scientists, Proc. IODP, 303/306: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.303306.210.2009.

（18） Motoyama, I., Niitsuma, N., Maruyama, T., Hayashi, H., Kamikuri, S., Shiono, M., Kanamatsu, T., Aoki, K., Morishita, C., Hagino, K., Nishi, H., and Oda, M.(2004): Middle Miocene to Pleistocene magneto-biostratigraphy of ODP Sites 1150 and 1151, northwest Pacific: sedimentation rate and updated regional geological timescale, *The Island Arc*, **13**, 289-305.

（19） 米谷盛寿郎（1978）：東北日本油田地域に

おける上部新生界の浮遊性有孔虫層序，日本の新生代地質（池辺展生教授記念論文集），35-60 頁.
（20） Raymo, M.E., Grant, B., Horowitz, M., Rau, G.H. (1996): Mid-Pliocene warmth: stronger greenhouse and stronger conveyor, *Marine Micropaleontology*, **27**, 313–326.
（21） Dowsett, H.J., Haywood, A.M., Valdes, P.J., Robinson, M.M., Lunt, D.J., Hill, D.J., Stoll, D.K., Foley, K.M. (2011): Sea surface temperatures of the mid-Piacenzian Warm Period: A comparison of PRISM3 and HadCM3, *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, **309**, 83–91.
（22） 三輪美智子・山田桂・入月俊明・田中裕一郎・庄司真弓・渡辺真人・柳沢幸夫(2004a)：新潟県北蒲原郡胎内川における鮮新統鍬江層の浮遊性有孔虫化石層序 −No.3 *Globorotalia inflata* bed の下限の年代について−，石油技術協会誌，69 巻，3 号，272-283 頁.
（23） Ericson, D.B.(1959): Coiling direction of *Globigerina pachyderma* as a climate index, Science, **130**, 219-220.
（24） Sato, T., Yuguchi, S., Takayama, T., and Kameo, K. (2004): Drastic change of the geographical distribution of the cold water nannofossil *Coccolithus pelagicus* (Wallich) Schiller during the late Pliocene-with special reference to increase of ice sheet in the Arctic Ocean-, *Marine Micropaleontology*, **52**, 181-193.
（25） Bé, A.W.H.(1977): An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktic foraminifera, In Ramsay, A.T.S., eds., Oceanic Micropalaeontology, vol 1. Academic Press, London, 1-100.
（26） 三輪美智子・渡辺真人・山田　桂・柳沢幸夫(2004b)：富山県氷見市灘浦地域の藪田層（鮮新統）の浮遊性有孔虫化石群集 −とくに No. 3 *Globorotalia inflata* bed の下限の年代について−. 石油技術協会誌，69 巻，6 号，668-678 頁.

研究報告

量子論における摂動展開と非摂動量子効果の不思議な関係 ~Resurgence 展開と複合ソリトン配位~

三角樹弘**

Relation between Perturbative and Instanton Calculations in Quantum Theories

Tatsuhiro Misumi**

Abstract

The purpose of this work is to investigate the relation between perturbative calculation and non-perturbative physics in quantum theory. For this purpose, we calculate multi-instanton amplitudes in Sine-Gordon quantum mechanics by integrating out quasi-moduli parameters corresponding to separations of instantons and anti-instantons. We propose a proper extension of the prescription of Bogomolny and Zinn-Justin for multi-instanton configurations and the appropriate subtraction scheme. We obtain the multi-instanton contributions to the energy eigenvalue of the lowest band at the zeroth order of the coupling constant. For those with both instantons and anti-instantons, we obtain results with imaginary and ambiguous parts depending on the path of analytic continuation. We show that the imaginary parts of multi-instanton amplitudes precisely cancel the imaginary parts of the Borel resummation of the perturbation series. This result supports the conjectured resurgence structure, in which the combination of perturbative and instanton calculations could lead to a novel definition of the quantum theories including quantum field theory.

1. はじめに

2015年はアインシュタインが一般相対性理論を提唱して100年目にあたり，世界各国で多くの式典・イベントが催されている．一方，20世紀物理学のもう一本の柱である量子力学に関しても100年前には革命的進展が起こりつつあった．

1913年，後に量子物理学の父と呼ばれることになるニールス・ボーア（1885-1962）が量子論の先駆けとなる方法論「ボーアの量子化条件」に基づいて，水素原子の離散的エネルギースペクトルの説明に成功した．この条件によると，陽子の静電ポテンシャル中を運動する電子の作用積分はプランク定数（$h \approx 6.63 \times 10^{-23}$ [Js]）の整数倍の値しか取れない．その後，量子論における粒子と波の「二重性」が明らかになるにつれ，この条件は水素原子中で波として振る舞う電子が定常波を作る条件を意味することが明らかになった．

その後，ハイゼンベルク，シュレディンガー，ディラックによって量子力学の定式化が確立され，ヒルベルト空間における状態ベクトル或いは演算子行列の時間発展こそが量子現象の本質であり，一度ハミルトニアンが分かれば対角化により固有ベクトルが得られ，その時間発展がユニタリー発展として一意に決定することが理解された．ここで量子力学における唯一の物理量は期待値(状態ベクトルと演算子行列から作られるノルム)であり，固有状態にある場合を除いて，確率的にしか観測量を予言出来ないことも詳らかになった．

20世紀中頃には量子論の異なる定式化として，作用に関する汎関数積分を全ての経路について実行することで物理量の期待値を求める「経路積分法」がファインマンによって提唱された．また電磁場など全空間点に定義される「場」と呼ばれる物理自由度に関する量子力学，いわゆる「場の量子論」が発展し，特殊相対論と量子力学の統合が進んだ．これらの比較的新しい量子論の定式化は数学的に厳密なものではないが，現代物理学の発展を支える重要な手法となっている．

本研究では，量子論の根幹に関わる基礎的な問題でありながら，未だ完全な理解には至っていない

2015年7月27日受理 **秋田大学大学院工学資源学研究科・理工学部数理科学コース，Graduate School of Engineering and Resource Science, Mathematical Science Course, Akita University

「摂動計算と非摂動計算（インスタントン効果）の関係」に着目し，摂動計算のボレル和に現れる不定性と複数インスタントン配位から生じる不定性の相殺について議論を行う．特に，無限個の古典真空を持つ場の量子論を念頭に置いて，同様の真空構造を持つSine-Gordon型量子力学に注目する．

2．問題の背景

2.1　量子力学における摂動論

さて，量子力学は古典力学と同様に厳密に解ける問題は限られている．一方，可解つまり対角化可能なハミルトニアンに小さな摂動部分が加わった形式の場合には，その影響を逐次的に計算することが可能である．例えば可解である調和振動子型ポテンシャル $-x^2/2$ に x^4, x^6 などの摂動ポテンシャルが加わったとする．この場合のハミルトニアンは以下の様に書ける．

$$H \;=\; H_0 \;+\; \lambda H_{pert} \qquad (1)$$

ここで H_0 は調和振動子ハミルトニアン，H_{pert} は摂動項であり x^4 以上の偶数次数の項であれば何でも良いとする．摂動計算とは係数 λ（以下結合定数）による級数展開であり，λ が小さい場合にのみ有効とされる．具体的には，例えば最低エネルギー準位 $E_{0,pert}$ を考えると，ゼロ次の値を調和振動子の固有値（$a_0=1/2$）として，

$$E_{0,pert} \;=\; \sum_{q=0}^{\infty} a_q \lambda^q \qquad (2)$$

のように書ける．この級数和はあくまで次数の小さい場合にのみ有効な近似級数つまり漸近級数であり，ほとんどの量子系で係数が階乗的 $a_q \approx q!$ に発散し収束半径はゼロになる．

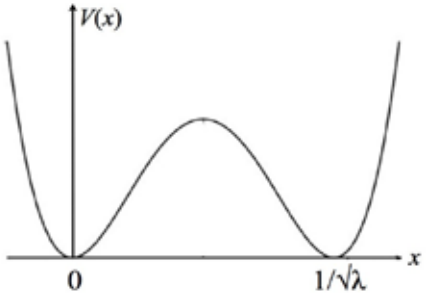


図1 double-well型ポテンシャルの例

例として図1に示したdouble-well型ポテンシャルを考えてみよう．このときハミルトニアンは

$$H \;=\; -\frac{1}{2}\left(\frac{d}{dx}\right)^2 \;+\; \frac{1}{2}x^2\left(1-\sqrt{\lambda}\,x\right)^2 \qquad (3)$$

で与えられる．これは $\lambda \to 0$ の極限で調和振動子ハミルトニアン H_0 に帰着する．この系の最低エネルギー準位に関する $x=0$ 周りでの摂動展開はよく知られており [1]

$$E_{0,pert} \;=\; \frac{1}{2} - \lambda - \frac{9}{2}\lambda^2 - \frac{89}{2}\lambda^3 - \frac{5013}{8}\lambda^4 - \ldots \qquad (4)$$

と与えられる．確かに，0次は調和振動子のエネルギー準位 $E_n = 1/2 + n$ を反映し，その後係数が階乗的に大きくなっていく様子も分かる．このような摂動計算は，結合定数が十分小さい場合($\lambda \ll 1$)に片方のポテンシャルの底からの量子揺らぎを見るには有効だが，縮退した古典真空間のトンネル効果を含めた非摂動的な量子効果は解析出来ない，というのが教科書的な摂動論の理解である．実際，発散する級数から一般の λ での物理情報を取り出すことは困難に見える．

2.2　ボレル変換とボレル和

実は，このような発散する級数和であっても，ボレル変換 [2] と呼ばれる方法によって形式的に有限の収束半径を持つ級和数に書き直す事が可能である．式(2)に対するボレル変換は

$$BP(t) \;\equiv\; \sum_{q=0}^{\infty} \frac{a_q}{q!} t^q \qquad (5)$$

と与えられる．ここで t はボレルパラメータと呼ばれる λ に代わる級数パラメータである．この変換は a_q が以下の条件 [3]（Gevrey class-1）を満たす場合に適用可能である．

$$|a_q| \;\leqslant\; C\,q!\left(\frac{1}{A}\right)^q \qquad (6)$$

$C, A \in \mathbb{R}$ はそれぞれ適当な実数とする．double-wellなど一般の量子系ではこの条件が満たされている．ボレル変換はそれ自体は物理量を表さないが，発散級数和という扱いにくい級数和を収束する級数和に変換することで諸々の解析を可能にし，ポテンシャル底周りでの量子揺らぎ以上の情報を抽出する可能性を与える．特に，ボレル変換 $BP(t)$ の変数 t を複素数に拡張し，複素平面上（以下ボレル平面）での関数と看做すと，多くの量子系でボレル平面上に特異点が表れる（図2, 図3参照）．この特異点の位置は理論によって様々である．問題は，このようなボレル変換からどのようにして元の理論の物理量を取り出すか，ということである．この目的のために，ボレル和と呼ばれる一種の逆変換を考える．

$$B(\lambda) \equiv \int_0^\infty dt \frac{e^{-t/\lambda}}{\lambda} BP(t) \tag{7}$$

このボレル和は，ボレル平面上に特異点が存在せず和と積分の順序を替えられる場合には元の級数和をそのまま与える．一方，この変換はボレルパラメータ t の正の実軸上の積分を含むため，特異点が正の実軸上に存在する場合には問題が生じる．逆に，もし特異点が正の実軸以外に存在すれば積分を実行可能である．例えば，摂動級数が以下のような交代級数で与えられる場合を考えよう．

$$P(\lambda) = C\sum_{q=0}^{\infty} q!\left(\frac{-\lambda}{A}\right)^q \tag{8}$$

C, A は式(6)と同様とする．ここでボレル変換は

$$BP(t) = C\sum_{q=0}^{\infty}\left(\frac{-t}{A}\right)^q = \frac{CA}{A+t} \tag{9}$$

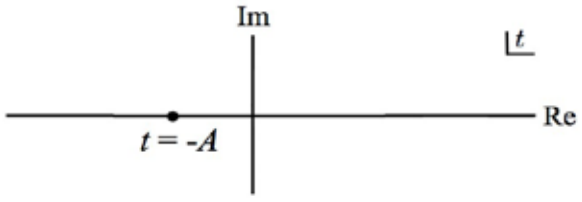


図2 ボレル平面の負実軸上に特異点がある場合

となり，ボレル平面上の特異点は負の実軸上に存在することがわかる（図2参照）．この場合，ボレル和における $[0,\infty]$ 間の積分は問題なく実行可能であり，摂動級数からは読み取れなかった情報がボレル変換・ボレル和を通して読み取れるようになる．実際，摂動展開が交代級数になり，ボレル和がうまく働く場合は少数だが存在する．例えば，調和振動子ポテンシャル $-x^2/2$ にさらに x^2 型のポテンシャルを加えたものは，調和振動子のパラメータを変化させただけなので当然厳密に解ける．ここで，あえて加えた x^2 ポテンシャルを摂動項として扱って，摂動計算とそれに続くボレル変換を行うと，負の実軸上にのみ特異点が表れる [1]．従って，この例はボレル変換に基づく処方が適切に働く例となっている．

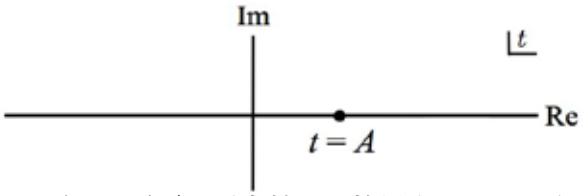


図3 ボレル平面の正実軸上に特異点がある場合

一方，摂動級数が交代級数でない場合，このボレル和の処方はうまく働かない．例えば図1のように複数の縮退した古典真空が存在するdouble-wellポテンシャルがその例であり，摂動計算によって異なる古典真空の情報を抽出することの困難さを示している．交代級数でない場合の摂動級数と対応するボレル変換は大まかに以下の様に与えられる．

$$P(\lambda) = C\sum_{q=0}^{\infty} q!\left(\frac{\lambda}{A}\right)^q \tag{10}$$

$$BP(t) = C\sum_{q=0}^{\infty}\left(\frac{t}{A}\right)^q = \frac{AC}{A-t} \tag{11}$$

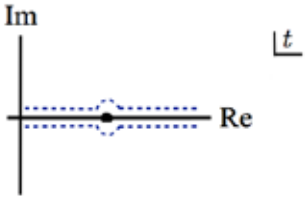


図4 ボレル平面実軸上積分の2つの経路
（正の実軸上に特異点がある場合）

この場合，ボレル変換の特異点は正の実軸上にあり，ボレル和を得る際 $[0,\infty]$ 間の積分が実行出来ない（図3参照）．強いてこの積分を実行しようとすると，図4に示すように積分経路を実軸上側もしくは下側にずらして積分を行い，最終的に経路を実軸に近付ける極限を取る，という処方を取る必要がある．ところがこの処方を取る際，実軸の上下どちらを選ぶかという不定性（ambiguity）が生じる．その結果，経路の取り方によって，以下のように虚数の不定性を含む答えが得られる．

$$B(\lambda \pm \delta) = \Re[B(|\lambda|)] \pm i\Im[B(|\lambda|)] \quad (12)$$

$$\Im[B(|\lambda|)] \approx -\pi e^{-A/\lambda} \quad (13)$$

$\Re$ と $\Im$ はそれぞれ実部と虚部を表す．

この結果には2つの不完全な点がある．まず，今述べたように，物理量の計算結果に不定性が存在すること．もう1つは実数の物理量，例えばエネルギーを計算したはずなのに，虚部が存在することである．このような虚部の不定性(以下，不定虚部)を持つ結果は物理的計算として意味を成さないように見える．因みに不定虚部の主要なファクターは $e^{-A/\lambda}$ という形をしており，A はボレル平面における特異点の位置を表している．後の議論でこの点が非常に重要になる．具体例としてdouble-well量子力学における最低エネルギー準位の摂動級数和（式(14)），ボレル変換（式(15)），ボレル和（式(16)）を示しておく[(4)(5)(6)]．

$$a_q = -\frac{3^{q+1}}{\pi} q! \quad \text{For } q \gg 1 \quad (14)$$

$$BP(t) = -\frac{1}{\pi}\frac{3}{1-3t} \quad (15)$$

$$B(\lambda \mp i\delta) = \Re[B(|\lambda|)] \mp \frac{i}{\lambda} e^{-1/(3\lambda)} \quad (16)$$

さて，このような縮退したポテンシャルの底（以下，古典真空）を持つ理論は量子物理のさまざまな局面で登場する．例えば，非常に強い原子ポテンシャルを持つ物質中や特殊な光格子中の電子系は，実空間における縮退した多数の古典真空を持つ例である．また陽子や中性子，そしてそれらの複合物である原子核を記述する量子色力学も縮退した無限個の古典的真空を持つと考えられている．このように様々な局面での重要性を持つ理論であるにもかかわらず，摂動計算に基づくボレル和に不定虚部が表れるため，結合定数の大きな領域では解析的に物理量を求めることが困難である．

2.3 複合インスタントン配位と不定性の相殺

double-wellのような縮退した古典真空を持つ量子力学系では，真空間の遷移を表す古典解が存在する．インスタントン解と呼ばれるこの古典解は位相励起を表すソリトン解の一種であり，ユークリッド化した理論における運動方程式の解である[(1)]．ユークリッド化は実時間を $t=i\tau$ のように虚時間 τ を用いて表すことで，時間と空間の計量を同じ符号で扱う理論形式である．これによりポテンシャル $V(x)$ は形式的に符号が反転した $-V(x)$ という形になる．以下に元の理論（式(17)）とユークリッド化理論（式(18)）の作用積分を示す（質量 m は1とする）．ここではハミルトン形式ではなくラグランジュ形式に移行していることに注意されたい．

$$S = \int dt \left[\frac{1}{2}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - V(x)\right] \quad (17)$$

$$S_E = \int d\tau \left[\frac{1}{2}\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + V(x)\right] \quad (18)$$

この結果，図5に示したようにdouble-wellポテンシャルの2つの古典真空間の量子的な遷移（トンネル効果）が，ユークリッド化された理論においては上下逆転した形のポテンシャルの一方の山の頂上からもう一方の山の頂上に移る古典解として表される．したがって，2つの真空間の遷移確率は，ユークリッド理論においてはインスタントン古典解を作用に代入することで得られる．因みに，基準となる左の古典真空に戻ってくる解を反インスタントン解と呼ぶ．このような解に基づく解析はまさしく理論の非摂動的な特性を表しており，一つの古典真空の周りでのみ解析を行う摂動計算とは本質的に異

なるように見える. 実際, 真空間遷移もしくはインスタントン解を考慮することで, 最低エネルギー準位は調和振動子近似の $E_0=1/2$ から

$$\Delta E_0^{(1,0)} = \pm\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}} \tag{19}$$

だけずれた2つの準位に分離する. ここで S_I はインスタントン解を代入した作用積分の値であり, double-well量子力学の場合には $S_I=1/6\lambda$ で与えられる. またsuperscript (1, 0)はインスタントンと反インスタントンの数を表す.

さて, インスタントン解は虚時間のある点に局所的に存在するが, 他の点に別のインスタントンが存在し共存する配位を考える事も出来る.

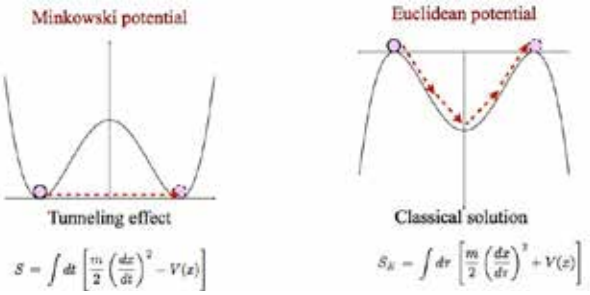


図5 元の理論（左）とユークリッド化理論（右）における真空間遷移の意味の相違

このような複合的な配位は最早運動方程式の解ではないが, 経路積分量子化の観点から言えば量子論に寄与し得る1つの配位である. 最も単純な場合としてある虚時間にインスタントン, 別の虚時間に反インスタントンが存在したとしよう. これは, ある虚時間 τ_1 の時に一方の古典真空からもう一方の古典真空に遷移し（インスタントン）, 別の虚時間 τ_2 で元の古典真空に戻ってくる配位を表している（図6参照）.

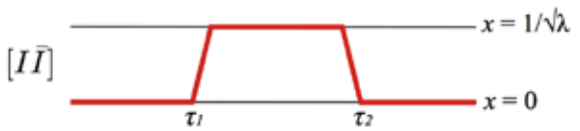


図6 double-wellにおけるインスタントン–反インスタントン. 2つの水平線が2つの古典真空.

これら2つの局所的な解をそれぞれある種の粒子と看做した場合, それらが十分離れたところではその間（距離を R とする）に以下の有効ポテンシャルで表される力が働く [4][7].

$$V_{eff}(R) = -\frac{2}{\lambda}e^{-R} \tag{20}$$

全体に掛かるマイナス符号はインスタントン–反インスタントン間の力が有効的引力であることを表している. この配位の最低エネルギー準位への寄与を知るには, インスタントン間の距離（モジュライまたは準モジュライと呼ぶ）を積分することで, この配位の振幅（amplitude）を求めればよい. その振幅 $[I\bar{I}]$ は以下のように書ける [4][7]（I はインスタントン, $\bar{I}$ は反インスタントンの意味）.

$$[I\bar{I}] = \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2 \int_0^\infty \exp[-V_{eff}(R)-\epsilon R]dR \tag{21}$$

積分の前の因子は式(19)の右辺と同じものであり, インスタントンもしくは反インスタントンが配位に含まれると, その数だけこの因子が入ってくる. 今の場合には2つ含まれるので2乗になっている. 無限大に離れたところからの影響を正則化するため収束因子 ϵ を導入し, 計算の最後でゼロに取ることにする.

式(21)は一見単純な一次元積分に見えるが, 実は半古典極限 $\lambda\to 0$ でill-definedになっている. これは I と $\bar{I}$ が近づいた極限で実際には衝突・消滅して力は働かないはずが, その領域でも式(20)の有効ポテンシャルを用いているためである. このような問題は, 2つの局所解がインスタントン同志の場合には力が斥力であるため生じない（式(20)の符号がプラスの場合）.

そこで結合定数 λ を $\lambda<0$ のように負の値を持つものとして計算を進め, 計算の最後に $-\lambda=e^{\mp i\pi}\lambda$ として解析接続によって正の値に戻すという処方を取る. この処方は物理的・数学的意味合いが些か曖昧であるが, Bogomolny--Zinn-Justin処方 [4][5][6][7] と呼ばれ同様の計算においてよく用いられる. さて, この解析接続を実軸上部から行うか下部から行うかによって結果に不定性が生じるこ

とが予想される．$\epsilon\to 0$ で消える項と $1/\epsilon$ の項を取り除き，また半古典極限 $\lambda \ll 1$ で計算を進めると，振幅とエネルギーへの寄与は以下の様に与えられる．

$$[I\bar{I}] \;=\; -\left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2\left[\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)\pm i\pi\right] \quad (22)$$

$$\Delta E_0^{(1,1)} \;=\; \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2\left[\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)\pm i\pi\right] \quad (23)$$

$\gamma=0.5772...$ はオイラー−マスケローニ定数である．エネルギー準位への寄与は振幅の符号を変えるだけで求められる [8]．予想した通り結果は不定性を含み，その不定部分は虚部となっている．double-wellの場合のインスタントン作用 $S_I=1/6\lambda$ を考慮すると，驚くべきことにこの不定虚部は摂動ボレル計算の結果表れた不定虚部式(16)と同じ大きさで符号が逆になっている [8][9][10][11]．

この結果が意味する事は，ある古典真空からの摂動展開と，別の古典真空に遷移してさらに元の古典真空に戻ってくる配位の寄与を足し合わせれば，以下のように不定虚部は相殺され，実部のみの物理的な結果が得られる，ということである．

$$\Im\left[B(\lambda\mp i\delta)+\Delta E_0^{(1,1)}\right] \;=\; 0 \qquad (24)$$

さらに踏み込んで言えば，摂動計算には不完全ながら不定虚部という形で真空遷移に関連する非摂動的情報が既に含まれていたとも言える．つまり，式(15)のボレル変換に表れた特異点の位置 $t=1/3$ と式(16)のボレル和に表れた虚部の指数関数の $e^{-1/(3\lambda)}$ は，インスタントンと反インスタントンの作用積分の和 $1/(3\lambda)=2\times 1/(6\lambda)$ の情報を含んでいたということである．これは従来の摂動論に対する理解，つまり「古典真空間遷移等の非摂動効果は摂動論では解析出来ない」とする考えを改めさせる結果である．

この結果は1970年代から80年代にかけてBogomolny や Zinn-Justin によって double-well potentialを持つ量子力学系の場合に得られ [4][5][6][7]，その後インスタントンの数が多い場合にも拡張して計算が行われた [8][9][10][11]．これまでわかっていることは，例えば2インスタントン−1反インスタントン配位の振幅の不定部分は，1インスタントン背景での摂動ボレル計算の不定虚部を相殺する．つまり1インスタントン−1反インスタントンを除いた状況での摂動計算と，除く前のインスタントン計算が常に対応することが示された [8]．

2.4 場の量子論でのResurgence展開の可能性

近年，前節で見た構造が例えば量子色力学（QCD）や類似した性質を持つ2次元シグマ模型にも存在すると仮定すると，場の量子論の新たな定義法が可能になると主張されている．つまり，摂動計算だけでなく，インスタントン−反インスタントン背景での摂動計算，そしてそれぞれが2つずつある背景での摂動計算，さらには3つずつある背景での計算を足していく，というようにインスタントンと反インスタントンが同数あるような全ての状況での摂動計算を，級数の級数（trans-series）として足し上げていく．そうすることで，ボレル和の虚部不定性は全て相殺され，最終的に厳密な物理的結果を得られる可能性がある（場の量子論ではインスタントンだけでなく分数インスタントン或はモノポールも重要になる）．このような定義法はResurgence展開 [12] と呼ばれ，場の量子論を半古典近似もしくは摂動論から厳密に定義する新たな試みとして注目されている [13][14][15][16][17][18]．

一方，double-well量子力学は場の量子論に現れる真空構造と異なり2つの古典真空が存在するのみである．より場の量子論の構造に近い量子力学系としてSine-Gordon 型量子力学がある．これは $\sin^2$ 型のポテンシャルによって無限個の真空が存在する系であり（図7参照），QCD真空やシグマ模型の真空に近い構造を有している．実際，2次元 $O(N)$ シグマ模型や $\mathbb{C}P^{N-1}$ シグマ模型は dimensional reductionという簡略化によってSine-Gordon量子力学系に帰着する [15][17]．以下にSine-Gordon型量子力学のハミルトニアンを示す．

$$H \;=\; -\frac{1}{2}\frac{d^2}{dx^2}+\frac{1}{8\lambda}\sin^2\left(2\sqrt{\lambda}\,x\right) \qquad (25)$$

この理論も $\lambda\to 0$ で調和振動子ハミルトニアンに帰着する．

Sine-Gordon型量子力学についてのインスタントン計算は最も簡単な1インスタントン−1反インスタントンの場合に行われ, 摂動的ボレル和の虚部不定性を相殺することが示されている [8]. 一方3個以上のインスタントンが存在する場合は, 計算の複雑さのためこれまで厳密に行われていない. しかし, 場の量子論でのResurgence展開の可否を調べる第一歩として, この系での高次のインスタントン計算は不可欠である.

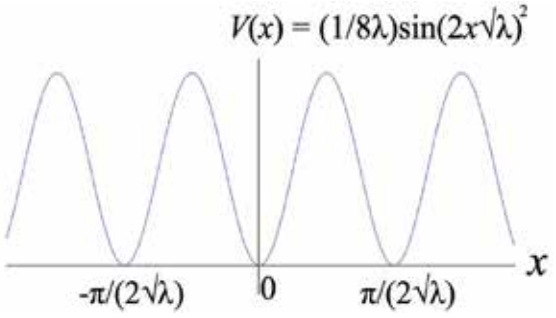


図7 Sine-Gordonポテンシャル.
無限個の周期的古典真空が存在する.

3. Sine-Gordon 量子力学における不定性相殺

3. 1 複数インスタントン配位とモジュライ積分

この章ではSine-Gordon型量子力学系での複数インスタントン計算を行う. まずこの系の式(25)での変数を $y \equiv 2\sqrt{\lambda}\,x$ と置き換えて, ユークリッド化された理論の作用積分とラグランジアンを書き下す.

$$S_E = \int L\, d\tau \tag{26}$$

$$L = \frac{1}{8\lambda}\left(\frac{dy}{d\tau}\right)^2 + \frac{1}{8\lambda}\sin^2(y) \tag{27}$$

この系の（反）インスタントン解は

$$y(\tau) = 2\arctan e^{\pm(\tau-\tau_0)} + n\pi \tag{28}$$

で与えられる. +がインスタントン, -が反インスタントン, $n\pi$ は n 番目の古典真空から遷移する解を表す. それぞれは図8に示すような真空間の遷移を表し, ある虚時間 τ_0 のところに局所的に存在する.

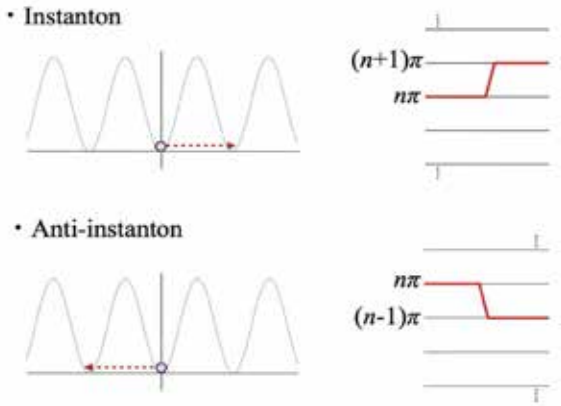


図8 インスタントン（上図）と反インスタントン（下図）の古典真空遷移の様子.

複数インスタントン配位としては, 例えば1インスタントン−1反インスタントンの配位は以下のように与えられる（以下, このような配位は全て $[I\bar{I}]$ のように記す）.

$$y_{I\bar{I}}(\tau) = 2\arctan e^{(\tau-\tau_I)} + 2\arctan e^{-(\tau-\tau_{\bar{I}})} + n\pi \tag{29}$$

ここで τ_I はインスタントンの位置, $\tau_{\bar{I}}$ は反インスタントンの位置を表す（double-wellと同様の構造なので図6を参照されたい）. このとき2つの局所的インスタントン間に働く力は以下の有効ポテンシャルで与えられる.

$$V_{eff}(R) = \mp\frac{2}{\lambda}e^{-R} \tag{30}$$

R は2つの局所解の距離を表す. 式(29)の場合であれば $R=\tau_I-\tau_{\bar{I}}$ となる. マイナス符号はインスタントン−反インスタントン $[I\bar{I}]$ の場合（引力）, プラス符号はインスタントン同志 $[II]$ の場合（斥力）を表す. このポテンシャルを用いて nインスタントン−m反インスタントン配位の振幅は

$$[II\ldots\bar{I}\,\bar{I}]_{n,m} = \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^{n+m} e^{i(n-m)\theta}\int dR_1\ldots dR_{n+m-1}$$
$$\exp[-V_{eff}(R_1) - V_{eff}(R_2) - \ldots - V_{eff}(R_{n+m-1})] \tag{31}$$

と与えられる. この系では $S_I=1/2\lambda$ で V_{eff} は引力か斥力かによって式(30)に従うとする. 収束因子 ϵ の導入も含めて基本的にはdouble-wellの場合の式(21)と同様の形をしているが, 一般の場合として全ての最隣接インスタントン間の距離に関する $(n+m-1)$ 多重モジュライ積分になっている. また周期的ポテンシャルではエネルギー準位がバンド構造を持つことからBloch angle θ が現れる. このBloch angleには I と $\bar{I}$ の数の差に比例する係数がつく. ここでは近似として最隣接インスタントン間のモジュライ積分のみを考えるが, 高次の寄与は非常に小さいことが示せる.

3.2 1インスタントン−1反インスタントン

まず, 最も単純な1インスタントン-1反インスタントン $[I\bar{I}]$ の計算を考える. double-wellの場合の式(22)と同様にBogomolny--Zinn-Justin処方（BZJ処方）を用いる. つまり $-\lambda>1$ のように λ を負の値として扱いながら計算を進め, 計算の最後で解析接続を通して $-\lambda=e^{\mp i\pi}\lambda$ のような形で正の値に戻す. 正の実軸に上下どちらから近付くかによって結果に不定性が生じる. 以下に振幅の具体的な計算過程と, 最低エネルギー準位への寄与を示す.

$$
\begin{aligned}
[I\bar{I}] &= \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2 \int_0^\infty \exp[-\frac{2}{-\lambda}e^{-R}-\epsilon R]dR \\
&\to \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2\left(\frac{-\lambda}{2}\right)^\epsilon \Gamma(\epsilon) \qquad (\lambda\ll 1) \\
&\to -\left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2\left(\gamma+\log\frac{2}{e^{\mp i\pi}}\right)+O(1/\epsilon,\epsilon) \\
&\to \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2\left[-\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)\mp i\pi\right]
\end{aligned}
\tag{32}
$$

$$
\Delta E_0^{(1,1)} = \left(\frac{e^{-S_I}}{\sqrt{\pi\lambda}}\right)^2\left[\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)\pm i\pi\right] \tag{33}
$$

$\lambda\ll 1$ の半古典極限を考えてガンマ関数を用いた. 式(32)の2から3行目にかけて解析接続 $-\lambda=e^{\mp i\pi}\lambda$ を用いた. $O(1/\epsilon)$ と $O(\epsilon)$ は収束因子による正則化に関係する部分でありこの計算では単純に落とす. BZJ処方によって計算を行った結果, やはり虚数不定性が生じた. この不定性はSine-Gordon量子力学の最低エネルギー準位に関する摂動計算の振る舞い（式(34)）とそのボレル和から得られる虚部不定性（式(35)）

$$
a_q = -\frac{2}{\pi}q! \qquad (q\gg 1) \tag{34}
$$

$$
\Im[B(\lambda)] = \mp\frac{1}{\lambda}e^{-S_I} \tag{35}
$$

を見事に相殺する[8]. さて, それではより多くの（反）インスタントンが共存する場合の結果はどうであろうか.

3.3 2インスタントン−1反インスタントン

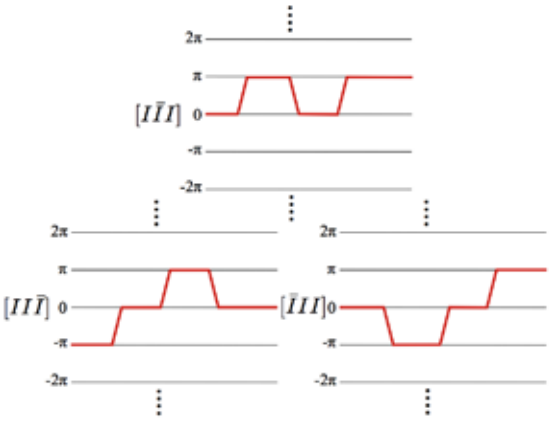


図9 2インスタントン−1反インスタントンの配位

この場合には（反）インスタントンの並び方によって, 最隣接要素間の力が引力か斥力かが変わる（図9参照）. まず $[I\bar{I}I]$ という配位の場合には, 働く力は両方とも引力であり, 振幅は以下のように与えられる（表式を簡単化するため, Bloch angleの指数関数 $e^{i\theta}$ とinstanton factor $\xi\equiv e^{-S_I}/\sqrt{\pi\lambda}$ の3乗で振幅を割っておく）.

$$
\begin{aligned}
&\frac{[I\bar{I}I]}{e^{i\theta}\xi^3} \\
&= \int_0^\infty \exp[-\frac{2}{-\lambda}(e^{-R_1}+e^{-R_2})-\epsilon(R_1+R_2)]dR_1\,dR_2 \\
&\to \left(\frac{-\lambda}{2}\right)^\epsilon\Gamma(\epsilon)\left[\left(\frac{-\lambda}{2}\right)^\epsilon\Gamma(\epsilon)-\frac{1}{\epsilon}\right] \qquad (\lambda\ll 1) \\
&\to \frac{3}{2}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{17}{12}\pi^2\pm 3i\pi\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)
\end{aligned}
\tag{36}
$$

$\epsilon\to 0$ での発散項の除去はまず一つ目のモジュライ積分に対して行い, さらに最終的な結果で現れる $O(1/\epsilon)$ も除去した.

次に $[II\bar{I}]$ のような形を考えよう. この場合, 一方のモジュライは引力, もう一方は斥力となる. したがって, BZJ処方を引力のモジュライ積分にだけ適用し, 斥力の積分には適用しないこととする. これは今まで用いられたことのない拡張型BZJ処方である. この処方では引力の結合定数を $\tilde{\lambda}$, 斥力の方を λ として, 計算の最後で $\tilde{\lambda}\to\lambda$ として共通の結合定数に戻す. まず振幅は以下のようにかける.

$$\frac{[II\bar{I}]}{e^{i\theta}\xi^3} = \int_0^\infty \exp[-\frac{2}{\lambda}e^{-R_1}-\frac{2}{-\tilde{\lambda}}e^{-R_2}-\epsilon(R_1+R_2)]\,dR_1\,dR_2 \tag{37}$$

ここで問題となるのは, $1/\epsilon$ の項を取り除く順序によって結果が異なるということである. 引力のモジュライ積分の発散を先に取り除く場合（式(38)）とその逆の場合（式(39)）の結果を以下に示す.

$$F_1(\lambda)=\left(\frac{\lambda}{2}\right)^\epsilon\Gamma(\epsilon)\left[\left(\frac{-\tilde{\lambda}}{2}\right)^\epsilon\Gamma(\epsilon)-\frac{1}{\epsilon}\right] \to\frac{3}{2}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{5}{12}\pi^2\pm 2i\pi\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right) \tag{38}$$

$$F_2(\lambda)=\left(\frac{-\tilde{\lambda}}{2}\right)^\epsilon\Gamma(\epsilon)\left[\left(\frac{\lambda}{2}\right)^\epsilon\Gamma(\epsilon)-\frac{1}{\epsilon}\right] \to\frac{3}{2}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2+\frac{1}{12}\pi^2\pm i\pi\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right) \tag{39}$$

2行目に移るところで $-\lambda=e^{\mp i\pi}\lambda$ の解析接続を行い, $\tilde{\lambda}\to\lambda$ として結合定数を元の表式に戻し, さらに最後に現れる $O(1/\epsilon)$ も取り除いた. この2つの結果の違いは拡張型BZJ処方を用いたことに起因しており, あくまで計算処方における人為的結果である. そこで, 2つの結果の平均を取ることでその問題を取り除き, 最終的な結果を得ることにする.

$$\frac{[II\bar{I}]}{e^{i\theta}\xi^3} = \frac{F_1(\lambda)+F_2(\lambda)}{2} = \frac{3}{2}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{\pi^2}{6}\pm\frac{3}{2}i\pi\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right) \tag{40}$$

これが $[II\bar{I}]$ の振幅である. 対称性から $[\bar{I}II]$ の寄与はこれと等しいはずであり, 最終的に3つの配位の寄与を足し上げて符号を変えることで, 最低エネルギー準位に対する寄与

$$\Delta E_0^{(2,1)}=-([I\bar{I}I]+[II\bar{I}]+[\bar{I}II]) =-\frac{9}{2}e^{i\theta}\xi^3\left[\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{7\pi^2}{18}\pm\frac{4}{3}i\pi\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)\right] \tag{41}$$

を得る. これは1インスタントン背景での最低エネルギー準位の摂動計算とそのボレル和における虚部不定性

$$a_q=\frac{6}{\pi}q!\left(\log 2+\frac{s(q+1,2)}{q!}\right)\qquad q\gg 1$$
$$\Im[B(\lambda)] = \pm 6e^{i\theta}\frac{e^{-3S_I}}{\sqrt{\lambda^3\pi}}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right) \tag{42}$$

を相殺する寄与である. このようにSine-Gordon量子力学においてインスタントンが3つ以上存在する配位に関しては, 計算の過程で物理的或は数学的意味の曖昧な処方を使う必要がある. しかし, double-well量子力学の場合と同様, $I\bar{I}$ ペアを取り除いた背景における摂動計算から生じる不定性を相殺する, という結果が得られる.

3.4 2インスタントン-2反インスタントン

この場合にも取るべき処方は前節と同じである. ただ, 可能な配位の数が6通りと多く, それぞれに対し拡張型BZJ処方を行う必要がある（図10参照）. まず $[II\bar{I}\bar{I}]$ と $[\bar{I}\bar{I}II]$ においては2つの斥力モジュライ, 1つの引力モジュライが存在し, $1/\epsilon$ の発散項を3段階で取り除く必要がある. 前節と同様, どの順番で $1/\epsilon$ を取り除くかによって今回は3通りの異なる結果が得られる. 煩雑な計算が続くため紙面の都合上詳細は省くが, それらの3つの結果の平均

を取ることで以下の振幅が求まる.

$$[I\,I\,\bar{I}\,\bar{I}]\xi^{-4}=[\bar{I}\,\bar{I}\,I\,I]\xi^{-4}$$
$$=-\frac{8}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^3+\frac{\pi^2}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)+\frac{1}{6}\psi^{(2)}(1)$$
$$\mp i\pi\left[\frac{8}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2+\frac{\pi^2}{18}\right] \tag{43}$$

ここでポリガンマ関数 $\psi^{(2)}(z)=d^3\log\Gamma(z)/dz^3$ を用いた. 次に $[I\,\bar{I}\,\bar{I}\,I]$ と $[\bar{I}\,I\,I\,\bar{I}]$ は2つのモジュライが引力, 残りの 1 つが斥力であり, この場合にも発散除去の順番によって3通りの結果が得られる. それらの平均は

$$[I\,\bar{I}\,\bar{I}\,I]\xi^{-4}=[\bar{I}\,I\,I\,\bar{I}]\xi^{-4}$$
$$=-\frac{8}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^3+3\pi^2\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)+\frac{1}{6}\psi^{(2)}(1)$$
$$\mp i\pi\left[\frac{16}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{7\pi^2}{18}\right] \tag{44}$$

で与えられる. $[I\,\bar{I}\,I\,\bar{I}]$ と $[\bar{I}\,I\,\bar{I}\,I]$ のモジュライは全て引力であり, この場合平均を取る必要はなく得られる振幅は以下のようになる.

$$[I\,\bar{I}\,I\,\bar{I}]\xi^{-4}=[\bar{I}\,I\,\bar{I}\,I]\xi^{-4}$$
$$=-\frac{8}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^3+\frac{23}{3}\pi^2\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)+\frac{1}{6}\psi^{(2)}(1)$$
$$\mp i\pi\left[8\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{7\pi^2}{3}\right] \tag{45}$$

最終的にこれら6つの配位からの振幅の和を取り符号を変えることで最低エネルギー準位への寄与が得られる.

$$\Delta E_0^{(2,2)}\xi^{-4}$$
$$=16\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^3-22\pi^2\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)-\psi^{(2)}(1)$$
$$\pm i\pi\left[32\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{16\pi^2}{3}\right] \tag{46}$$

残念ながらこれに対応する1インスタントン−1反インスタントン背景での摂動計算は知られていないが, 摂動的ボレル和の不定性の相殺が式(46)の虚部によって起きることを予言している.

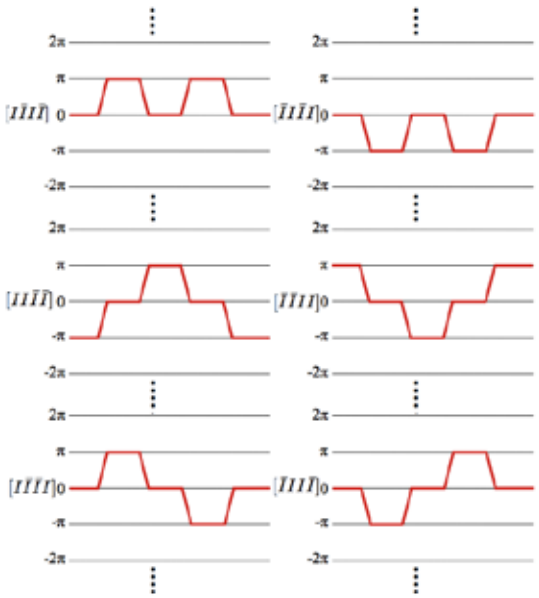


図10 2インスタントン−2反インスタントンの配位

3.5 3インスタントン−1反インスタントン

同様の計算を行うことでこの場合の寄与が得られる. 詳細は省くが最低エネルギー準位に対する寄与は

$$\Delta E_0^{(3,1)}e^{-2i\theta}\xi^{-4}$$
$$=\frac{32}{3}\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^3-\frac{20}{3}\pi^2\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)-\frac{2}{3}\psi^{(2)}(1)$$
$$\pm i\pi\left[16\left(\gamma+\log\frac{2}{\lambda}\right)^2-\frac{2\pi^2}{3}\right] \tag{47}$$

と与えられる.

3.6 n インスタントン−m 反インスタントン

一般のnインスタントン−m反インスタントンの場合は複雑になるが同じ処方を用いて計算することができる. このとき ${}_{n+m}C_n$ 個の配位が存在し, それらをモジュライ積分の引力と斥力の数によって分類することが出来る. この分類によって数値的にこれらの計算を進めることが可能であり, アルゴリズムの開発を今後の課題とする.

4. まとめ

この研究ではSine-Gordon量子力学における複数インスタントンのエネルギー準位への寄与を計算した. 我々が拡張型BZJ処方と呼ぶ正則化を用いて計算を行った結果, double-well量子力学の場合と同様に摂動的ボレル和から生じる不定性を見事に相殺することが示された. これはResurgence展開による半古典的な量子論定義法が少なくとも量子力学では可能であることを示している. またSine-Gordon量子力学は2次元シグマ模型からのreductionによって得られることを考えると, 場の量子論も部分的にはResurgence構造を有していることを示唆している. 今後の研究では, 数値的に摂動計算とインスタントン計算を実行し, それぞれの寄与が高次においても完全に相殺し合うことを示す. さらに2次元シグマ模型においてもインスタントン計算と摂動的ボレル計算の比較を行い, 場の量子論におけるResurgence構造の理解を目指す.

謝辞

本研究報告の執筆について助言をいただいた本学数理科学コースの小野田勝教授, 田沼慶忠准教授, 小林真人准教授に感謝の意を述べたいと思います. また, 本研究に関係する分野の共同研究を行っている慶応義塾大学の新田宗土准教授, 坂井典佑訪問教授にも感謝の意を述べたいと思います.

参考文献

(1) J. Zinn-Justin, "Quantum field theory and critical phenomena, " *Int. Ser. Monogr. Phys.* 77, 1 (1989).
(2) E. Borel, *Ann. Sci. Ecole Norm. Sup.* (3) **16**: 9–131(1899)
(3) M. Gevrey, *Ann. Sci. Ecole Norm. Sup.* (3) **35**: 129–190 (1918)
(4) J. Zinn-Justin, "Multi - Instanton Contributions in Quantum Mechanics, " *Nucl. Phys. B* 192, 125 (1981).
(5) J. Zinn-Justin, "Multi - Instanton Contributions in Quantum Mechanics. 2. , " *Nucl. Phys. B* 218 (1983) 333.
(6) J. Zinn-Justin, "Instantons in Quantum Mechanics: Numerical Evidence for a Conjecture, " *J. Math. Phys.* 25 (1984) 549.
(7) E. B. Bogomolny, "Calculation Of Instanton - Anti-instanton Contributions In Quantum Mechanics, " *Phys. Lett. B* 91, 431 (1980).
(8) J. Zinn-Justin and U. D. Jentschura, "Multi-instantons and exact results I: Conjectures, WKB expan- sions, and instanton interactions, " *Annals Phys.* 313, 197 (2004) [quant-ph/0501136].
(9) J. Zinn-Justin and U. D. Jentschura, "Multi-instantons and exact results II: Specific cases, higher-order effects, and numerical calculations, " *Annals Phys.* 313, 269 (2004) [quant-ph/0501137].
(10) U. D. Jentschura, A. Surzhykov and J. Zinn-Justin, "Multi-instantons and exact results. III:Unification of even and odd anharmonic oscillators, " *Annals Phys.* 325, 1135 (2010).
(11) U. D. Jentschura and J. Zinn-Justin, "Multi-instantons and exact results. IV:Path integral formalism, " Annals Phys. 326, 2186 (2011).
(12) J. Ecalle, "Les Fonctions Resurgentes", Vol. I - III (*Publ. Math. Orsay*, 1981).
(13) M. Marino, R. Schiappa and M. Weiss, "Nonperturbative Effects and the Large-Order Behavior of Matrix Models and Topological Strings, " *Commun. Num. Theor. Phys.* 2, 349 (2008) [arXiv:0711. 1954[hep-th]].
(14) P. Argyres and M. Unsal, "A semiclassical realization of infrared renormalons, " *Phys. Rev. Lett.* 109, 121601 (2012) [arXiv:1204. 1661 [hep-th]].
(15) G. V. Dunne and M. Unsal, "Resurgence and Trans-series in Quantum Field Theory: The CP(N-1) Model, " *JHEP* 1211, 170 (2012) [arXiv:1210. 2423 [hep-th]].
(16) I. Aniceto and R. Schiappa, "Nonperturbative Ambiguities and the Reality of Resurgent Transseries, " *Commun. Math. Phys.* 335, no. 1, 183 (2015) [arXiv:1308. 1115 [hep-th]].
(17) T. Misumi, M. Nitta and N. Sakai, "Neutral bions in the CPN−1 model, " *JHEP* 1406, 164 (2014)[arXiv:1404. 7225 [hep-th]].
(18) T. Misumi, M. Nitta and N. Sakai, "Classifying bions in Grassmann sigma models and non-Abelian gauge theories by D-branes, " *PTEP* 2015, 033B02 (2015) [arXiv:1409. 3444 [hep-th]].

研究報告

International Cooperation to Spread Mosquito Nets: Case Studies in Tanzania and Bangladesh

Yoshio Aizawa** and Hiromi Tsuboi***

Abstract

Malaria remains one of the leading health issues threatening development in many parts of the world. In 2000, 189 countries adopted the Millennium Development Goals (MDGs). Among these MDGs is a goal to fight the spread of malaria. Accordingly, international communities have gone to developing countries in order to implement preventive measures against malaria. Although there are many ways of preventing people from contracting malaria, the use of long-lasting insecticidal nets (LLINs) has gained attention as one of the best anti-malaria practices. International efforts utilizing LLINs in malaria stricken areas are currently growing.

With regard to analyzing international efforts to spread LLIN usage in malaria stricken countries, this paper investigates two cases: in Tanzania, A to Z Textile Mills Ltd. and its cooperators; and in Bangladesh, BASF Grameen Ltd. and Grameen Group. In both cases the lead entities locally produce the LLINs and then supply the locally produced LLINs to communities using set distribution lines. In Tanzania, the LLIN this paper will examine is the Olyset® net, and in Bangladesh, the Interceptor® net (also known locally as "Auschorjo Moshori"). However, there is a significant difference between these two cases regarding the distribution approach of the LLINs to the local people. This paper focuses on this distinction and discusses which case is more successful in distributing the nets to combat the problem of malaria.

1. Introduction

Malaria remains one of the leading health issues threatening human development in many parts of the world. In 2000, 189 countries adopted the UN Millennium Declaration, from which the eight Millennium Development Goals (MDGs) were created. These eight goals consist of specific targets (numbering 18 in total) necessary for meeting each goal. Goal 6 ("Combat HIV/AIDs, malaria, and other diseases") specifically mentions the fight against malaria and the target of "halting the spread of malaria and beginning to reverse the incidence of malaria by 2015"[(1)]. Among the many ways of preventing people from contracting malaria, long-lasting insecticidal nets (LLINs), which employ advanced, chemical fabric technology, gained attention as one of the best preventive measures against malaria. This caused international cooperation aimed at spreading this technology.

Received June 15, 2015

** Faculty of International Resource Sciences, Akita University

*** Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

Prominent among international cooperation programs is the Roll Back Malaria (RBM) Partnership initiated in 1998 to control the spread of malaria. The program has been coordinated by various entities including the governments of countries in which malaria is endemic, international development donors, the private sector, and nongovernmental and community-based organizations[(2)]. RBM has consistently emphasized expansion of the full use of insecticidal mosquito nets as a shared vision among stakeholders in malaria-endemic countries[(3)]. The Global Fund, on the other hand, has functioned remarkably as the leading donor for malaria control programs. The Fund has been operating under an international partnership among multiple governments, the private sector, and civil society. Since its establishment in 2002, the Fund has supported programs to distribute more than 310 million LLINs to malaria-plagued areas in the world[(4)].

In light of addressing international cooperation to spread the use of mosquito nets in malaria plagued countries, this paper examines two cases: in Tanzania, A to Z Textile Mills Ltd. and its cooperators; and in Bangladesh, BASF Grameen Ltd. along with Grameen

Group. In both cases, the programs locally produce the LLINs and supply the finished products to communities using their own distribution lines. The LLIN produced in Tanzania is called the Olyset® net, and the Bangladesh LLIN is called the Interceptor® net (also known locally as the "Auschorjo Moshori"). These two nets, which remain effective against mosquitoes for several years, have already received commendation from the World Health Organization (WHO) due to their quality and effectiveness. However, there is a significant difference between the two cases regarding the approach to spreading the LLINs among the local people. This paper focuses on this distinction, and discusses which case is more successful in distributing the nets to solve the problem of malaria.

2. The state of malaria in Tanzania and Bangladesh

Malaria is a mosquito-borne illness which causes fever, headache, shivering, and vomiting. Though malaria is a preventable and treatable disease, these symptoms can lead to comas in severe cases, or death in the worst cases.

The "Reported Malaria Cases and Deaths 2013" was released as part of the "World Malaria Report 2014." These findings of these reports together stated that malaria is currently being actively transmitted in 97 countries and territories worldwide[5]. Table 1 shows some information from the "Reported Malaria Cases and Deaths 2013" comparing malaria in Tanzania and Bangladesh in perspective of the rest of the world. According to Table 1, as of 2013, malaria puts the health of 3.2 billion people at risk and causes 118,000 deaths annually, worldwide. The number of people at risk accounts for approximately 60% of the UN's reported global population, 1.2 billion people are at "high risk" (people living in areas with more than one incident per 1000 people per year) and the remaining 2 billion people at "low risk" (people living in areas with 0-1 incident per 1000 people per year).

In Tanzania, the country's entire population is exposed to malaria and are considered "at risk" of contraction. Of the total population, 36 million people (more than 70% of the population) are at "high risk."

In Bangladesh, on the other hand, only 16 million people (10% of the whole population) are "at risk," a quarter (4 million people) of who are considered to be at "high risk." Therefore, Tanzania has a much greater number of presumed and confirmed cases of malaria, patients suffering from malaria, and deaths attributed to malaria than does Bangladesh (Table 1).

As mentioned above, according to recent studies Bangladesh's entire population is not immediately at risk of malaria. Figure 1 illustrates the areas in Bangladesh where malaria is most often transmitted. Bangladesh consists of 64 administrative districts, 13 of which register troubling rates of the spread of malaria. These 13 districts are all in the east and north-east of Bangladesh near the borders of India and Myanmar.

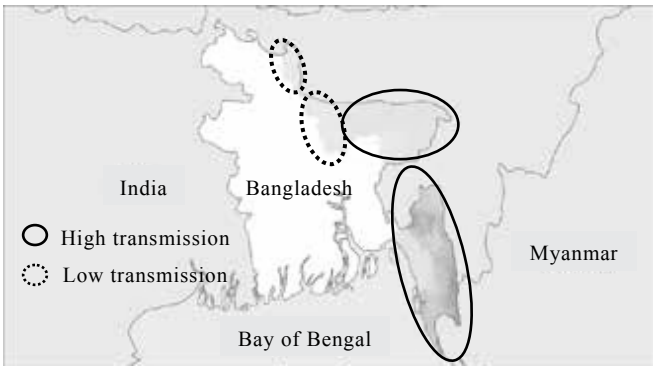


Fig. 1 Epidemiological profile in Bangladesh[5].

3. A to Z Textile Mills Ltd. and its cooperators in Tanzania

3.1 Background: a series of campaigns for malaria control in Tanzania

The effort for malaria control in Tanzania has been operating on a full scale due to the efforts of its Ministry

Table 1 Reported malaria cases and deaths 2013[5].

	UN population	At risk (low + high)	At risk (high)	Presumed and confirmed malaria cases	Inpatient malaria cases	Malaria attributed deaths
Tanzania	49,253,126	49,253,126	36,331,049	8,585,482	371,553	8,528
Bangladesh	156,594,962	16,223,238	4,165,426	3,864	1,155	15
World	5,594,188,398	3,230,675,778	1,163,534,413	132,412,050	5,431,427	118,645

of Health and Social Welfare and its development partners since 2004. These efforts conform to recommendations made by the RBM Partnership and support offered by the Global Fund and other development partners. The Ministry's National Malaria Control Programme (NMCP) has played a core role in promoting the effort to curb malaria through subsidizing the spread of LLINs and their use across the nation.

In the initial stages, NMCP introduced the Tanzania National Voucher Scheme (TNVS) with the financial support of the Global Fund. In the scheme, vouchers are provided to pregnant women when they visit their prenatal care facilities and/or to mothers who already have a child under-five years of age when the child goes in for their first vaccination. Those mothers and expecting mothers then exchange the vouchers with a modest top-up expense for LLINs at registered retailers[6].

Upon extension of the grant by the Global Fund, the NMCP proposed continuing the voucher system as well as an Under-5 Catch-up Campaign (U5CC) whereby LLINs were distributed free to children under five years of age[7]. The U5CC was implemented from April 2009 to May 2010 with the support of the World Bank, President's Malaria Initiative (PMI), UNICEF, and other governmental and non-governmental organizations. The Universal Coverage Campaign (UCC), mainly funded by the Global Fund, then followed after U5CC from October 2010 to October 2011 in order to provide additional LLINs to those who were not covered by TNVS or U5CC. Currently, the Mass LLIN Replacement Campaign is expected to start during 2015 to replace LLINs across the nation[8].

3.2 A to Z Textile Mills Ltd. and cooperators

In accordance with the continuous effort to end malaria in Tanzania, A to Z Textile Mills Ltd. (A to Z) played an essential role in spreading LLIN usage across the nation. A to Z is a private holding company established in the 1960s and has come into prominence for the production of LLINs in response to the demand for controlling malaria. The company together with its affiliates is creating employment opportunities for more than 7,000 Tanzanian people and is capable of producing 30 million LLINs per year at the moment[9].

A to Z was originally a producer of garments for the local market. During the 1970s, it started producing bed nets, to which consumers could coat with insecticide as needed. Later, it started producing insecticide-treated bed nets, although consumers had to reapply insecticide after washing the nets or when they became dirty. Recognized by consumers for the strength of the company's bed nets and production technology, A to Z was the largest producer of insecticide-treated bed nets in Africa by the beginning of the 1990s[10].

An opportunity arose in early 2000s when initiatives for malaria control became active within the Tanzanian government and development partners, aiming to halt the spread of malaria by 2015. Accordingly, WHO, a promoter of RBM approached Sumitomo Chemical Company (SCC) of Japan. SCC was a pioneer of producing LLINs, called Olyset® net, that were made with an insecticidal constituent woven into the fabric[11]. WHO requested SCC to transfer the LLIN technology to local companies in Africa and SCC accepted the request.

Seeking a stable local producer of LLINs under RBM, WHO short-listed local companies and after which SCC selected A to Z for the technology transfer[12]. Acumen Fund, another promoter of RBM and a funder to social venture capital, also played a significant role, providing a loan (325,000 USD)[13] to A to Z for the capital investment in producing LLINs. The Acumen Fund also facilitated ExxonMobil to develop a local market for LLINs as well as to offer resin, a material of synthetic fabric, to produce LLINs. Figure 2 shows the relation between A to Z and these cooperators.

As a result, Olyset® nets produced by A to Z and SCC became the only polyethylene net with a full WHO Pesticide Evaluation Scheme recommendation during the 2000s[7]. Not only that, but with the quality product, A to Z became the largest producer in Africa. A to Z currently supplies Olyset® nets for the demands of the local market, but it mainly supplies organizations including UNICEF and the government of Tanzania and other African nations (see Fig. 2). Due to the significant contribution of A to Z and cooperators, Tanzania achieved full coverage of LLINs across the nation in October 2011[14].

3.3 Successful factors in the spread of LLINs

In the A to Z case, there are key factors associated with the success of spreading the LLINs and their usage. First, the international demand for controlling malaria has been a fundamental factor enabling various stakeholders to cooperate with each other under the

same goal of reversing and ultimately halting the spread of malaria. In accordance with international demand, the Tanzanian government in partnership with international organizations and private organizations has taken initiative to promote three national campaigns: TNVS, U5CC, and UCC.

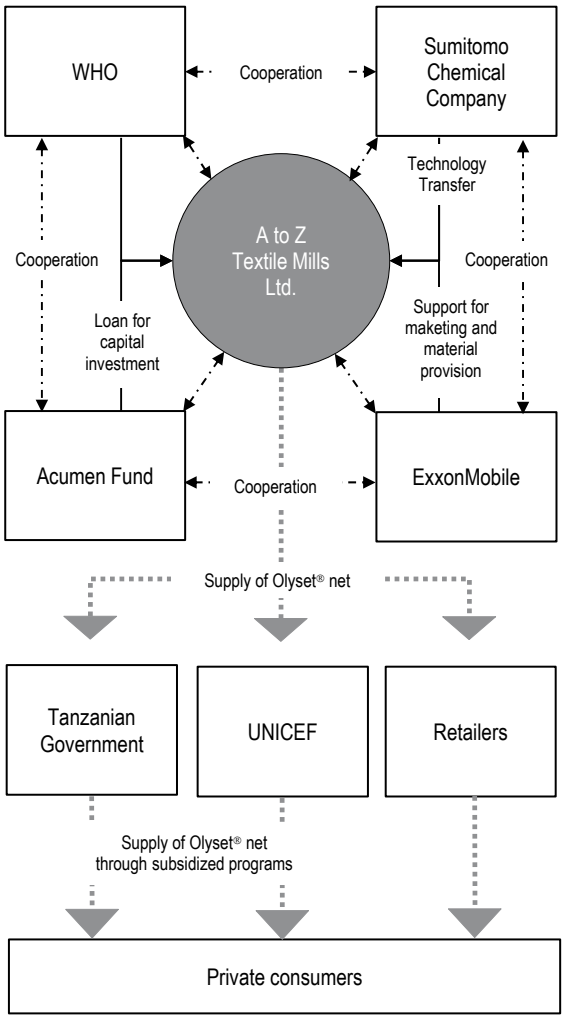


Fig. 2 A to Z Textile Mills Ltd. and cooperators.

Second, in line with the national campaigns, WHO and the Acumen Fund actively promoted a partnership among A to Z as a local LLIN producer and supplier, SCC to provide the necessary technology to assure the quality of LLINs, ExxonMobile as a supporter for material provision and marketing, and UNICEF and Tanzanian government as buyers and distributers of LLINs.

Third, A to Z was an appropriate organization as a producer and supplier. It had already accumulated experiences of producing products that require sewing and most importantly the relevant skills and knowledge for producing the best quality nets. It was not a coincidence that SCC selected A to Z as the recipient of its technology, but rather A to Z's accumulated skills and knowledge. In addition, A to Z itself was capable of playing a role in distribution. A to Z was even selected under a procurement process of U5CC to deliver LLINs to villages due to its capacity[15].

After achieving full coverage of LLINs across the nation, A to Z's challenge has been to diversify its products and activities in order to sustain the company and its presence in the textile and plastic industry for decades to come.

4. BASF Grameen Ltd. and Grameen Group in Bangladesh

4.1 Establishment of BASF Grameen Ltd.

In 2004, the Bangladeshi government took measures to form an official treatment policy for malaria and adopted Artemisinin-based combination therapy (ACT) treatment methods. At around the same time, in 2006, the government started to receive outside grants. Soon after (2007) the Global Fund became the main sponsor promoting the use of LLINs and insecticide-treated nets (ITNs). An NGO called BRAC, a Bangladesh-based international development organization, has also been receiving sponsorship by the Global Fund and has been distributing LLINs and ITNs. However, the health infrastructure in malaria-plagued areas (see Fig. 1) is still inadequate and access to health care services is poor. Therefore, even after these measures malaria is still a nationwide risk[16].

The "World Malaria Report 2008" announced that 72% of the Bangladeshi population was at risk of malaria[17]. In response, BASF SE (a leading chemical company) and Grameen Healthcare Trust (a non-profit organization founded by Muhammad Yunus, the founder of the Grameen Bank) established BASF Grameen as a social business joint venture in Bangladesh in March 2009. BASF Grameen's social purpose was to improve Bangladeshi people's health conditions while providing business opportunities for the poor[16].

4.2 Mosquito net plant, and marketing by BASF Grameen and Grameen Group

BASF Grameen utilized two existing products from BASF's portfolio: 1) chemically treated mosquito nets (LLINs) under the worldwide brand name Interceptor®

that protect people from insect-borne diseases, and 2) dietary supplement sachets (referred to as multi-micronutrient sachets) that contain vitamins and essential micronutrients[16]. This paper focuses on the company's mosquito net project.

In the initial stages, the mosquito nets were sold in grocery stores and pharmacies in urban areas. They were also sold in rural areas via established Grameen networks. Then, the plant producing LLINs was opened in Gazipur, near the capital city of Dhaka, on March 23, 2012. This plant, owned by Grameen Fabrics & Fashions Ltd., is the first local LLIN production facility in Bangladesh. The nets are coated with the insecticide Fendona®, a BASF product, and are sold under the local brand-name "Auschorjo Moshori" (the magic mosquito net). The nets remain effective against mosquitoes for several years, in compliance with the WHO's requirements for LLINs. They also retain their repellent properties for up to 20 washes[16].

By establishing this LLIN production facility, BASF Grameen and Grameen Group have created new jobs for the local people and have influenced the reduction in the number of mosquitoes. Now, BASF Grameen and Grameen Group can source the LLINS (specifically the Auschorjo Moshori brand) from the plant and market them directly. Grameen Distribution Ltd. sells the nets through Grameen Marketing Network[18] as well as other marketing channels. The main sales area is headed by the Chittagong Division in the south-eastern region of Bangladesh. Needless to say, the Grameen Bank, BASF Grameen, and the Grameen Group have made the value of these LLINs very clear to the people in these malaria stricken areas.

According to the second author's fieldwork in December 2012, three sizes of the nets (L, M, and S) are available, retailing for TK.650 ($7), TK.600 ($6.5), and TK.550 ($6), respectively. Baring in mind that the cheapest non-LLIN or ITN that is available is sold for Tk.200 ($2.2), the upfront cost of an LLIN might be too high for the poor, even though the net lasts longer than a non-LLIN. Therefore, it is important to reduce the retail price of the superior LLINs in order to accelerate the spread of their usage.

Figure 3 (which is also based on the second author's fieldwork) shows the collaborative structure between BASF Grameen and Grameen Group.

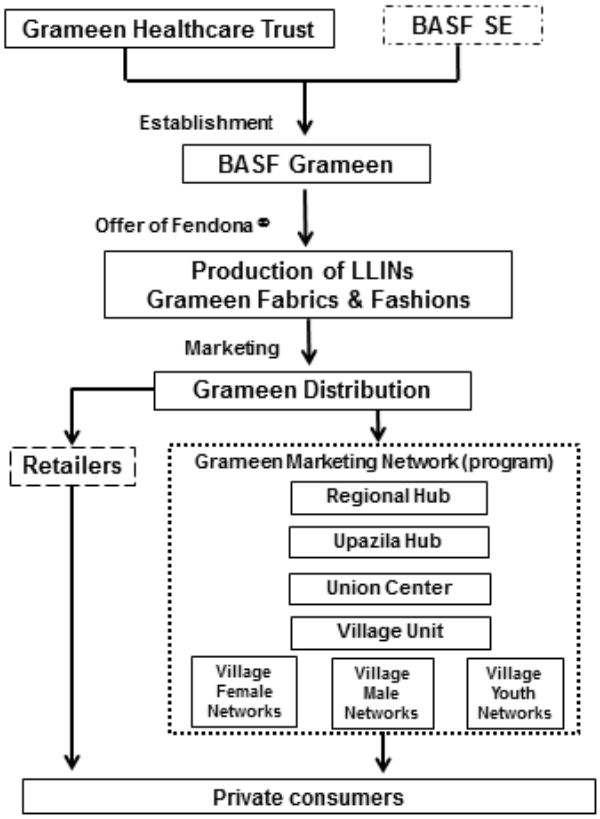


Fig. 3 BASF Grameen and Grameen Group's collaborative structure.

5. Conclusion

As of now, malaria treatments and prevention methods differ from region to region and country to country. No universal approach has been developed to tackle the issue of malaria. Malaria stricken areas lack appropriate treatments, and medicine is typically too costly for the poorest victims. Irrigation ditches, drains, and other places where water tends to collect are not adequately maintained in many places in developing countries, which also aid the spread of malaria. In places with conditions such as these, an LLIN is the best solution[16].

In Tanzania, A to Z's efforts, with the support of the government, has played an essential role in spreading the use of LLINs. They have done so through a social marketing effort that is financially supported by international donors such as the Global Fund, the World Bank, and UNICEF, as well as by private companies such as SCC and ExxonMobile. The initiative has brought full coverage to malaria stricken areas by LLINs, which it achieved in October 2011.

In Bangladesh, on the other hand, efforts to combat malaria are being undertaken by BASF Grameen and Grameen Group, who are not charities but rather for-profit businesses. Therefore, BASF Grameen and Grameen Group do not promote LLINs via social marketing like a national voucher scheme which brings subsidized nets to the poor[19], nor do they (at the time of publication) participate in Bangladesh's National Malaria Control Programme, supported by the Global Fund.

From the perspective of the Millennium Development Goals (however broad or narrow they may be), the case study of malaria control and eradication in Tanzania appears to be more significant than the Bangladeshi case. However, the malaria problem needs to be addressed over the long-term. Therefore, in terms of project sustainability, it remains to be seen as to what extent the Tanzanian government can continuously subsidize the replacement of worn LLINs without financial support from donors. The Bangladeshi case, on the other hand, could be more sustainable in the long run since it is a business whereby the LLINs retail prices are based on the purchasing power of the consumer market.

References

(1) UNDP (2003): Human Development Reports 2003, Oxford University Press, New York, 1-13.

(2) Roll Back Malaria Partnership (2015/01/16) http://www.rbm.who.int/index.html

(3) Roll Back Malaria (2005): Scaling up Insecticide-treated Netting Program: A Strategic Framework for Coordinated National Action, 9.

(4) The Global Fund (2015/01/15) http://www.theglobalfund.org/en/about/diseases/malaria/

(5) WHO: World Malaria Report 2014 (2015/02/18) http://www.who.int/malaria/publications/world_malaria_report_2014/en/

(6) Eze, Ikenna C. et al. (2014): Mass Distribution of Free Insecticide-treated Nets do not Interfere with Continuous Net Distribution in Tanzania, Malaria Journal 13:196, 1-2.

(7) Bonner, Kimberly et al. (2011): Design, Implementation and Evaluation of a National Campaign to Distribute Nine Million Free LLINs to Children under Five Years of Age in Tanzania, Malaria Journal 10:73, 2.

(8) National Insecticide Treated Nets –Tanzania (2015/01/19) http://www.natnets.org/

(9) A to Z Textile Mills, Ltd. (2015/01/16) http://www.azpfl.com/index.php/en/profile/company-history

(10) Masum, Hassan et al. (2010): Africa's Largest Long-lasting Insecticide-treated Net Producer: Lessons from A to Z Textiles, BMC International Health and Human Rights 10 (Supple 1): S6, 3.

(11) Nihon-no-kigyou-no-bijinesu-kenkyukai (Study Group on Business of Japanese Companies) (2011): Nihon-no-kigyou-no-BOP-bijinesu (BOP Business of Japanese Companies), 30.

(12) *ibid,* 36.

(13) Brest, Paul et al. (2009): Calculated Impact, Stanford Social Innovation Review, Winter 2009, 53.

(14) Koenker, Hannah et al. (2013): Analysing and Recommending Options for Maintaining Universal Coverage with Long-lasting Insecticidal Nets: the Case of Tanzania in 2011, Malaria Journal 12:150, 1-2.

(15) Bonner, Kimberly et al., *op. cit.*, 5.

(16) Tsuboi, Hiromi (2013): Mosquito Nets as Social Business in Bangladesh: A Case Study of BASF Grameen Ltd., Scientific and Technical Reports of Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University, No.34, 15-19.

(17) WHO (2010): World Malaria Report 2010 (2015/02/26) http://www.who.int/malaria/publications/atoz/9789241564106/en/index.html

(18) Grameen Distribution Ltd.: Grameen Marketing Network (leaflet), Dhaka, Grameen Distribution Ltd.

(19) UNDP (2008): Creating Value for All: Strategies for Doing Business with the Poor, Denmark, Scanprint, 107.

国際協力を通じた蚊帳の普及：タンザニアとバングラデシュの事例から

藍澤淑雄**・坪井ひろみ***

要　旨

マラリアは，世界の地域における開発を脅かす深刻な問題の一つである．このため，2000 年に国連 189 か国が採択したミレニアム開発目標(MDGs)ではマラリア撲滅が目標の一つとして掲げられた．そしてこれを受け，国際社会もマラリア流行地域における撲滅対策を講じてきた．マラリア対策には様々な方法があるが，その中でも予防対策としての防虫蚊帳(LLINs)は，マラリア撲滅対策の最も有効な手段として注目を集めている．

本論では，マラリア流行地域における国際社会による防虫蚊帳の普及にかかる分析を行う．このため，二つの取り組み事例について検討する．ひとつはタンザニアにおける A to Z 社とそのパートナーによる取り組みで，もう一つはバングラデシュにおける BASF グラミン社とグラミン・グループによる取り組みである．具体的には，タンザニアの事例ではオリセット・ネット，バングラデシュの事例ではインターセプター（地域の呼称は「Auschorjo Moshori（魔法の蚊帳)」と呼ばれる防虫蚊帳の普及について検討する．

どちらの事例でも，地域の民間企業・グループが防虫蚊帳を生産し，それぞれの普及ルートを通じて防虫蚊帳を住民に供給している．一方で，二つの防虫蚊帳の住民への普及方法には大きな違いがある．本論では，この違いに着目し，マラリア対策のための防虫蚊帳の普及のためにはどちらの方法が有効かについて検討する．

**秋田大学国際資源学部

***秋田大学大学院工学資源学研究科

研究報告

A Study on Legislative and Administrative Factors behind Informal Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM) in Tanzania

Yoshio Aizawa**

Abstract

This paper examines the case of artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in Tanzania and discusses the legislative and administrative factors that make shifting from the informal sector to the formal sector difficult for ASGM. Artisanal and Small-scale Mining (ASM) activities operate in the informal sector in many cases, causing environmental degradation, health and safety problems, as well as child labor issues. According to the United Nations Economic Commission for Africa (UNECA), the estimated number of ASM workers and dependents in Tanzania is 1.5 million and 9 million, respectively. The bulk of Tanzanian ASM is ASGM, with operations and dependent contracts accounting for approximately 60 percent of the total ASM workers and dependents. This being the case, the government has recognized the importance of supporting ASM and integrating it into its national policies and development strategies, with further policy implementation expected to continue in the future. Given this context the following case study paper discusses the legislative and administrative structures behind informal ASGM.

1. Introduction

Appropriate means of government regulation of artisanal and small-scale mining (ASM) in Africa has been long disputed. In many cases ASM activities operate in the informal sector, meaning respective governments cannot control incidental issues like environmental degradation, health and safety problems, and child labor issues—not to mention the potential problem of fueling armed conflicts amongst competing entities. An equally serious problem is governments' loss of income that they should be collecting through royalties and taxes which could then be invested into economic stimulus activities and social welfare programs for the benefit of the people.

However, tight restriction on ASM activities is not a realistic measure for governments to adopt. In Africa many people are dependent on the income they earn both directly and indirectly from ASM activities. According to an estimate by the United Nations Economic Commission for Africa (UNECA) more than 8 million ASM workers were active in 2011 in 21 mineral-rich African countries, with about 46 million people who were financially rely on ASM operations(1). International organizations and governments have thus recognized the importance of supporting ASM as a means of economic and social development instead of attempting to restrict it too harshly.

Prominent among African ASM initiatives is the African Mining Vision (AMV). The AMV started in 2009 by African Union leaders in mineral producing countries. The AMV emphasizes the promotion of ASM "to stimulate local/national entrepreneurship, improve livelihoods, and advance integrated rural social and economic development".(2) In accordance with the AMV's strategies, many mineral-rich African countries have integrated ASM support-measures into their government's mining policies and poverty reduction strategies.

The issue however is how might informal ASM shift into the formal sector and thereby allow governments more control in addressing current problems connected with ASM. So far there is no evidence that the implementation of regulatory policies and strategies such as those adopted by mineral-rich African countries have had a significant, successful impact on moving ASM into the formal sector(3). Therefore, the question is what factors are there that encourage ASM workers to want to remain in the informal sector.

With this in mind, this paper examines the case of artisanal and small-scale mining of Tanzania, which has

Received July 23, 2015

** Faculty of International Resource Sciences, Akita University

one of the largest number of ASM workers and dependents in Africa. To clarify issues of ASM, this paper particularly looks at artisanal and small-scale gold mining (ASGM) which accounts for the largest part of ASM activities in Tanzania. This paper first overviews the status of ASGM and then discusses some legislative and administrative structures that make shifting from the informal sector to the formal sector difficult for ASGM.

2. Status of ASGM in Tanzania

2.1 Brief history of ASGM in Tanzania

ASGM in Tanzania was first legitimized when the Mining Act was enacted in 1979 although small-scale placer gold mining was already operational even during the colonial period. ASGM achieved rapid growth during the 70s, propelled by the abolishment of the international gold standard system and rise in the gold price[4]. The growth of ASGM was later prompted by an influx of farmers into ASGM, who needed to diversify their means of livelihood after the initiation of the Structural Adjustment Program (SAP) in 1986 which abolished subsidized operations in the agricultural sector. A declaration by President Mwinyi in 1990 also gave the growth of ASGM greater impetus by liberalizing ASM for unregulated operation in the country[5].

At present Tanzania retains the largest number of ASM workers in Africa[1]. The estimated number of ASM workers and dependents, who rely on incomes from ASM, in Tanzania is 1.5 million and 9 million, respectively[1]. ASGM accounts for the largest part of ASM activities, or approximately 60 percent of all ASM workers[6]. Based on this number, estimates indicate that roughly about one fifth and one eighth of all Tanzanians rely on ASM and ASGM, respectively.

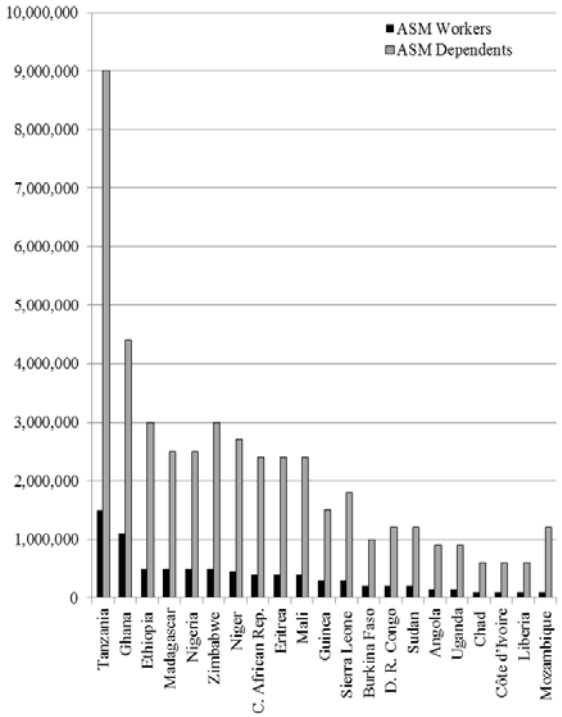


Fig. 1 Estimated Number of ASM in Africa[1].

Meanwhile, another sector of Tanzania's mining industry, large-scale gold mining (LSGM), offers quite the contrast to what is happening with ASGM. ASGM activities are inclined to conduct their operations in the informal sector due to their difficulty with meeting legislative requirements. LSGM activities on the other hand have expanded due to foreign investments which the Tanzanian government has been promoting since the mid-90s[7][8]. With the expanded LSGM activities in mind, the Tanzanian government has emphasized its support for ASM through official policy objectives such as the National Strategy for Growth and Reduction of Poverty II (MUKUKUTA II) and the Mineral Policy 2009, both of which aim to shift informal ASM into the formal sector eventually[9][10].

Policies aimed at shifting informal ASM into the formal sector include allocating mining plots specifically for ASM, establishing legal and regulatory requirements for mine workers, as well as policies that are geared to the more technical aspects of operating ASM[6]. Despite the measures that the government has already taken, still further policy implementation is expected [11].

2.2 ASGM System in Tanzania

The Mining Act (2010)[12] defines ASM (which includes ASGM) in Tanzania as a mining operation "whose capital investment is less than US $100,000 or its equivalent in Tanzania shillings." In a formal ASM operation, the ASM worker is required to have a Primary Mining License (PML) in order to officially maintain the mining right in a potential area for the period of seven years. The right to mine an entitled area can be renewed and even transferred to another miner.

In the case of ASGM, after an ASGM worker becomes a PML holder, in many cases, the holder rents a potential mining area to pit holders[4][13]. Pit holders then either mine by themselves or commission diggers to mine [14]. Once a pit holder and diggers start yielding gold ores, the PML holder, through official channels, markets the ores to registered processors who then sell

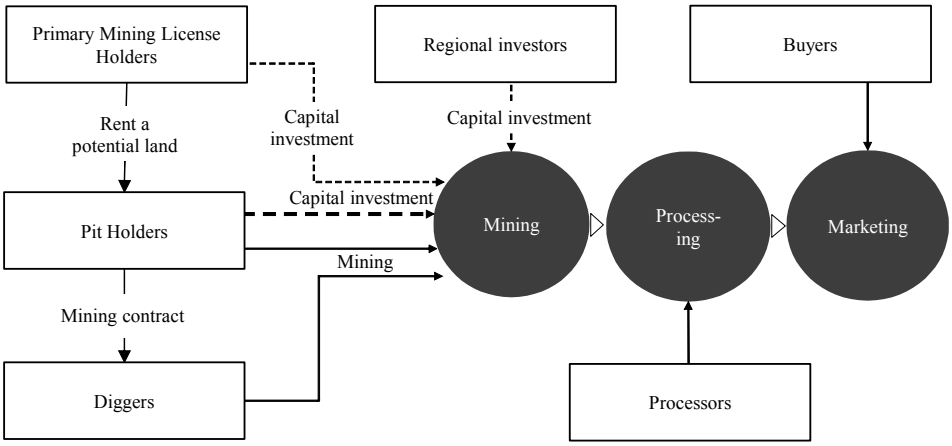


Fig. 2 ASGM System in Tanzania.

the processed gold to registered buyers for further marketing.

While the PML holder is responsible for all of the mining operations in the entitled area, in many cases it is the pit holders who play roles of investing capitals and handling the labor arrangements. Therefore, pit holders take the most financial risk during fruitless periods. In some cases though, the capital investment is made by regional investors. Figure 2 shows stakeholders in a typical ASGM system and their roles and relationships among them.

Although it could vary depending on the particular locality, allocating the profits after a successful yield of gold is roughly 30 percent for a PML holder, 40 percent for pit holders, and 30 percent for diggers in a typical pattern found in the northwestern part of Tanzania where ASGM has been traditionally active[4][14].

3. Factors behind Informal ASGM

Before enacting rules to formalize ASGM in Tanzania, it is essential to examine whether or not the present informal ASGM workers can comply with the Mining Act (2010) and whether or not the government's support system for ASGM is adequate. The following discusses legislative and administrative structures behind informal ASGM.

3.1 Legislative factor

Meeting legislative requirements is one of the most difficult factors for informal ASGM workers to overcome. To be legalized, an ASGM worker needs to acquire a Primary Mining License (PML) as stipulated in the article 54 of the Mining Act (2010). However, acquisition of a mining license is based on a first-come, first-served basis. Those who do not have access to reliable information are discouraged from applying for a mining license. LSGM operators, multi-national companies or their junior companies, in most cases, have the advantage since they are relatively in a better position of acquiring the necessary information on potential mining opportunities[14]. Unlike ASGM, multi-national corporations are able to spend a considerable amount of financial resources in exchange for information on mining resource potential from prospectors.

Therefore, the government has allocated mining areas specifically for ASGM as part of its supporting measures. However, ASGM workers are not necessarily anxious to do their mining activities in the specified areas. And, PML holders are in fact not always operating specified areas[6]. Regardless acquiring a mining license for non-specified areas is still on the first-come, first-served basis.

Even if an ASGM worker successfully acquires a PML, the PML holder should comply with Article 55 of the Mining Act (2010) to "take all responsible measures on and under the surface for the purpose of mining operation" including capital investment, payment of loyalties and taxes, and environmental and social protection[12]. For example, based on the Mining Regulation, which supplements the Mining Act (2010), a PML holder is required to submit an Environmental Protection Plan within four months from the date of acquiring a PML[15]. This should be accompanied with results of an environmental investigation and a social study conducted by an independent expert[15]. The Mining Act (2010) in other words cannot make all ASGM workers

inclusive in the formal sector, assuming that a formal ASGM worker is technically and financially capable of meeting all the requirements.

When an ASGM worker decides to be in the informal sector, their burden is reduced by evading or disregarding environmental and social legal requirements. However, limited formal access to credit for capital investment is still an obstacle. To meet capital needs, in one case, an informal ASGM without sufficient financial resources asked residents in the mining area to contribute their own working capital (like shovels or other hand-tools for mining) while in another case a middleman provided working capital in exchange for a promise that gold would be sold back at a lower price than the official market price[13]. Thus, even without a PML, informal ASGM has a way to make a mining pit operational without meeting legislative requirements and going through cumbersome procedures to acquire a PML.

3.2 Administrative factor

Another structural factor behind informal ASGM is the centralized administration of the mineral sector. The centrally responsible organization is the Ministry of Energy and Minerals (MEM) which has Zonal Mines Offices and Residential Mines Offices across the country.

The centralized administration in the mineral sector is justifiable since it involves critical issues such as a negotiation with foreign investors and equitable distribution of resource benefits at the national level which has an obvious influence over country's overall economy. However, the centralized system in the current administrative structure cannot identify technical, financial, and information needs of ASGM at mining sites and thus cannot provide and coordinate the appropriate services to shift informal ASGM into the formal sector.

In the case of Tanzania, the central government has decentralized its administrative function giving more decision-making power to the local governments over decades. At the regional level, there are Regional Offices acting as operating arms of the central government. At the district level, Local Government Authorities (LGAs), that have rather extensive discretional powers, provide public services in their jurisdiction in response to various people's needs. Provision of public services is made through their operating arms at Ward Offices which staff technical officers of different sectors. Even at the village level, a Village Executive Officer is stationed by the LGA and takes administrative and coordination responsibilities. However, issues related to the mining are out of the responsibility of LGAs due to the institutional set-up of the centralized mining sector. LGAs actually do not regard the mining sector as part of their responsibility and this entails exclusion of the mining sector from LGA's planning[16].

With the current arrangement of the MEM, mine officers at Zonal Mines Offices are responsible for providing technical services to ASM through Residential Offices. However, Zonal Mines Offices are responsible for mining issues including provision of licenses and technical services to as many as 3 to 4 regions at a time, which sometimes includes more than 25 districts. Even in the relatively established decentralized administration of the local government, recent studies show that public services have not been delivered effectively in response to community needs[17][18][19]. In consideration of limited funds and limited access to remote mining communities[20], Zonal Offices and Residential Offices are most probably not able to provide appropriate public services to the needs of ASGM communities.

4. Conclusion

This paper discussed two major structural factors behind informal ASGM: the Mining Act (2010) and the administrative structure to govern ASGM activities. The Mining Act (2010) is not a means to discourage informal ASGM workers unless they are capable of going through procedures to acquire a PML and are able to meet environmental and social requirements necessary for mining operations. However, there is a gap between the current situation and the legislative assumption. Therefore, governmental support is essential. However, government support alone is not sufficient partly due to the administrative capacities and the structure of the mining sector.

Further studies are to be carried out on factors to promote supportiveness of the government in addition to structural factors discussed in this paper. Moreover, to formulate a concrete measure to shift ASGM into the formal sector, it is necessary to understand clearly to what extent ASGM workers choose to remain operating in the informal sector and how much their incentive to stay is as well as what kind of incentives they have.

謝辞

本稿は，平成 27 年度科学研究費助成事業（学術研

究助成基金助成金）（研究課題番号：15K13064, 挑戦的萌芽研究, アフリカの零細鉱業を取り巻く社会構造の解明）の支援によるものである. 記して, ここに感謝したい.

Reference

(1) United Nations Economic Commission for Africa (UNECA) (2011): *Mineral and Africa's Development: The International Study Group Report on Africa's Mineral Regimes*.

(2) African Union (AU) (2009): Africa Mining Vision.

(3) Bourgouin, F. (2013): The Politics of Mining. D.F. Bryceson, E. Fisher, J. B. Jonsson, and R. Mwaipopo (eds.) *Mining and Social Transformation in Africa: Mineralizing and Democratizing Trends in Artisanal Production*. London and New York: Routledge. pp.148-160.

(4) Bryceson, D. F. and J. B. Jønsson (2013): Mineralizing Africa and Artisanal Mining's Democratizing Influence. D.F. Bryceson, E. Fisher, J. B. Jonsson, and R. Mwaipopo (eds.) *Mining and Social Transformation in Africa: Mineralizing and Democratizing Trends in Artisanal Production*. London and New York: Routledge. pp.1-22.

(5) Emel, J., M. T. Huber, and M. H. Makene (2011): Extracting Sovereignty: Capital, Territory, and Gold mining in Tanzania. *Political Geography.* Vol. 30. pp.70-79.

(6) Masanja P. (2013): *ASM Activities and Management in Tanzania*. A presentation material of former Chief Executive Officer of Tanzania Minerals Audit Agency.

(7) Bryceson, D. F., J. B. Jønsson, C. Kinabo and M. Shand (2012): Unearthing Treasure and Trouble: Mining as an Impetus to Urbanisation in Tanzania. *Journal of Contemporary African Studies.* Vol. 30. No. 4. pp 631-649.

(8) Communities and Small-scale Mining (CASM) and The World Bank/International Finance Corporation Oil, Gas, and Mining Sustainable Community Development Fund (CommDev) (2009): *Mining together: Large-scale Mining meets Artisanal Mining*.

(9) United Republic of Tanzania (URT) (2010): *National Strategy for Growth and Reduction of Poverty II (NSGRP II)*.

(10) United Republic of Tanzania (URT) (2009): *The Mineral Policy of Tanzania*.

(11) Bryceson, D. F. and Fisher E. (2013): Artisanal Mining's Democratizing Directions and Deviations. D.F. Bryceson, E. Fisher, J. B. Jonsson, and R. Mwaipopo (eds.) *Mining and Social Transformation in Africa: Mineralizing and Democratizing Trends in Artisanal Production*. London and New York: Routledge. pp.179-206.

(12) United Republic of Tanzania (URT) (2010): *Mining Act 2010.*

(13) Imparato, N. (2010): Artisanal Gold and Transformational Exchange: Toward a Public-Private Partnership in Tanzania. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 18. pp.462-470.

(14) Jønson, B. J. and N. Fold (2013): Dealing with Ambiguity: Policy and Practice among Artisanal Gold Miners. D. F. Bryceson, E. Fisher, J. B. Jonsson, and R. Mwaipopo (eds.) *Mining and Social Transformation in Africa: Mineralizing and Democratizing Trends in Artisanal Production*. London and New York: Routledge. pp.113-129.

(15) United Republic of Tanzania (URT) (2010): *Mining (Mineral Rights) Regulations 2010.*

(16) Fisher, E., R. Mwaipopo, W. Mutagwaba, D. Nyange, and G. Yaron (2009): 'The Ladder that Sends Us to Wealth': Artisanal Mining and Poverty Reduction in Tanzania. *Resource Policy.* Vol. 34. pp.32-38.

(17) Chaligha, A. (2008): *Local Autonomy and Citizen Participation in Tanzania: From a Local Government Reform Perspective*. REPOA Special Paper. No. 08. 26.

(18) Norman, A. S. and L. Massoi. (2010): Decentralisation by Devolution: Reflections on Community Involvement in Planning Process in Tanzania. *Educational Research and Reviews.* Vol. 5. No. 6. pp. 314-322.

(19) Aizawa, Y. (2014): Why isn't Decentralization Substantially Promoted in Tanzania? *Journal of African Studies.* Vol. 85. pp.23-31.

(20) Fisher, E. (2008): Artisanal Gold Mining at the Margins of Mineral Resource Governance: Case from Tanzania. *Development Southern Africa.* Vol. 25. No. 2. pp.199-213.

タンザニアにおけるインフォーマル零細金鉱業を取り巻く法的・行政的要因の検討

藍澤　淑雄**

本論は，アフリカにおける零細鉱業をインフォーマル化させている要因を検討するため，零細鉱業を取り巻く制度的要因について議論するものである．アフリカ鉱物資源国の多くでは，土壌劣化や環境汚染，劣悪な労働安全衛生ならびに児童労働など，零細鉱業のインフォーマル化がもたらす影響が深刻化している．零細鉱業従事者数 150 万人（国連アフリカ経済委員会推定）を有するタンザニアでも，零細鉱業のインフォーマル化がもたらす様々な問題が表面化している．このため，タンザニア政府は，国家貧困削減戦略ならびに鉱業政策に零細鉱業支援を位置付けてきたものの，その実施は必ずしも十分とは言えない．本論は，アフリカにおけるインフォーマル零細鉱業のフォーマル化に資するため，特にタンザニアの零細金鉱業を事例として，フォーマル化の隘路となる可能性がある法的・行政的要因について検討する．

**秋田大学国際資源学部資源政策コース

研究報告

生徒指導における「段階的指導」の効果と課題

－2 高校の管理職教員へのインタビュー調査から－

井　陽介**，　鈴木　翔***

Effects and Issues of Progressive Discipline on Student Guidance and Counseling

Based on Interviews with managerial Teachers of two high schools

Yousuke I**，　Sho Suzuki***

Abstract

In Japan today, there are some high schools that have introduced progressive discipline as a form of student guidance and counseling. To date, opinions have been divided on effects and issues of it. However, there has been very little research that examines effects and issues of progressive discipline through case studies on schools that are implementing it. Furthermore, important implications for examining effects and issues of progressive discipline can be obtained by surveying schools that have been implementing progressive discipline for many years. Therefore, in this study, teachers (vice principals) at schools implementing progressive discipline were interviewed and effects and issues of progressive discipline were examined. Results revealed that, in terms of effects, the number of students who became suspended from the school were reduced and the school environment became less disruptive. In terms of issues, it revealed that negative image of progressive discipline might have reduced the number of applicants for the school. Furthermore, it was found that teachers recognized the issue on how to deal with students with developmental disorders in applying progressive discipline.

1．はじめに

文部科学省(1)によれば，生徒が起こす問題行動（対教師暴力，対生徒間暴力，対人暴力，器物損害）の発生状況は依然高い水準にある．例えば，中学校での学校内における暴力行為発生件数を平成9年の時点（18209件）と平成25年の時点（36869件）とを比較すると約2倍に増加している．このような状況から，学校現場で生徒指導のより実践的な指導体制の構築を検討していく事は喫緊の課題であるといえる．

2015年7月27日受理
**明治学院大学心理学部，Faculty of Psychology，Meiji Gakuin University
***秋田大学大学院工学資源学研究科，Graduate School of Engineering and Resource Science，Akita University

阪根(2)は，香川県内の小中学校の生徒指導に関わる教員（調査対象校としては約7割）を対象に生徒指導に対する質問紙調査を実施し，「『生徒指導上の諸問題の現状と文部省の施策について』の中で公表される問題行動発生の数は，学校・校種によりばらつきがあり，特に中学校では，問題のある学校とない学校の差は顕著であり，その為生徒指導の対応の一般化は難しい状況にある」と指摘している．この結果から，特に教育困難校といわれる学校では，生徒の起こす問題行動に生徒指導として対応する場合，教育困難校独自の生徒指導が求められている現状があるといえる．

また高等学校でも，特に教育困難校と呼ばれるような学校においては，非行や中途退学といった生徒指導上の問題が集中し，教育困難校独自の生徒指導体制が必要となっている．

このような状況を裏付けする動きとして，今日の学校現場では「段階的指導」方式の生徒指導を導入している学校が見受けられる．

2．先行研究の課題と本研究の目的

国立教育政策研究所生徒指導研究センター[3]によれば，「『段階的指導』とは，大きな問題行動に発展させないために，小さな問題行動から，曖昧にすることなく注意するなど，段階的に指導をする方式である」とし，また「この指導方式は，アメリカで広く実践されているゼロトレランス（直訳すれば「寛容ゼロ」ということだが，各学校現場では，「安全で規律ある学習環境」を構築するという明確な目的のもとで，小さな問題行動に対して学校が指導基準にしたがって毅然とした態度で対応するという理念をさす）と深く関わっている」と説明している．この報告書の中では，「段階的指導」の説明は，コラムの中に書かれるに留まっている．またゼロトレランスという用語とともに説明がなされたことも相成り，ゼロトレランスという言葉のインパクトが前面に押し出されてしまい，その部分にばかり注目が集まってしまった経緯がある．

米国の「ゼロトレランス」を調査した加藤[4]によれば，「『ゼロトレランス』とは，『寛容さなしの生徒規律指導』であり，暴力，いじめ，麻薬，アルコール，教師に反抗などの重大な規律違反に対しては，その理由の如何を問わずに『寛容さなしに』規律に従い，放校を含む毅然とした処罰措置をするという方式であり，大多数の善良な生徒の学習環境を最適に保つためには，一部の問題非行生徒を排除して，学校全体の規律を大切にしようとする考えである」と説明している．

この加藤の説明に見られるように，「ゼロトレランス」は問題を起こす生徒を学校から排除するもとして捉えられている一面がある．そのため，教育現場，識者を中心に賛否ある議論が交わされ今日に至っている．

しかし，藤平[5]によれば，「米国で実践されているゼロトレランスは二つの概念があり，「一つは銃や薬物に対する『一年間の放校処分』も視野に入れた国家政策のもの．二つめは『小さなことも曖昧にしないで，段階的に指導をする』という割れ窓理論を応用したものである」としている．

また藤平は，日本でゼロトレランス理念を導入している学校を調査した結果，どの学校も一回で放校処分にするということはなく，小さな問題でも『いけないことはいけない』と毅然とした態度で段階的に指導しているという共通点があり，その効果として学習（学校）環境が好転したこと，教職員の足並みが揃ったことを挙げている．藤平がゼロトレランス理念を導入している日本の学校を調査したことは，どのように日本でゼロトレランス理念に基づいた実践がなされているのかやその有効性について，有益な示唆を与えている．

しかし，「段階的指導」について教育現場や識者から賛否両論の活発な意見が出されるものの，「段階的指導」を実践している学校を調査することは非常に少ない状況にある．そのため教育現場での実践のあり方やその効果・課題については，十分に検討されてきたとは言いがたい．また生徒指導の効果を検討するためには，調査年に実践を行っている学校を調査の対象とするだけでは不十分であり，継続的にその実践を行っている対象がどのような効果を得て，どのような課題を見出しているのかをつぶさに検討していく必要がある．

そこで本稿では，これらの課題を克服するため，「段階的指導」を導入して約 10 年目を迎える高等学校を調査対象校とし，教員へのインタビュー調査を実施した．本稿では，インタビュー調査で得られた事例を分析し，「段階的指導」の継続的運用の在り方とその効果・課題について検討することを目的とした．

3．調査の概要

3．1　調査の概要

「段階的指導」を実践している下記 2 校において，管理職教員である教頭にインタビュー調査を実施した．インタビュー調査は，半構造化面接法で行い，会話内容は B 校については IC レコーダーにて録音をし，調査後逐語録を作成した．

D 校については録音の許可が出なかった為，調査中会話を記録し，調査後詳細に記録を起こした．インタビュー実施日は B 校が平成 27 年 7 月 10 日，D 校は平成 27 年 7 月 3 日であり，それぞれのインタビュー時間は約 45～60 分であった．

主な質問項目は以下の 4 点である．

①「段階的指導」導入の目的
②「段階的指導」運用の在り方
③「段階的指導」の効果
④「段階的指導」の課題

3．2　調査校

A県B校

北陸地方に位置する高等学校．平成17年度より，ゼロトレランス理念に基づきチェックカード制を用いた「段階的指導」を実施していた．

C県D校

東海地方に位置する高等学校．平成17年度より，チェックカード制を用いた「段階的指導」を実施していた．また2008年にも同様の調査で訪れた学校でもあり，その際に頂いた資料を次項において適宜引用した．

4．調査結果と各質問項目における考察

調査で得られた会話データを基に，質問項目ごとに共通点をまとめた．また調査校から頂いた資料を適宜引用し以下にまとめた．

4．1「段階的指導」導入の目的

調査校における導入の目的の共通点は，次の通りであった．

① 「段階的指導」導入の目的は，荒れている学校の改善であったこと．

共通点として，「段階的指導」導入前は，学校が荒れていたという背景が確認された．このことについて調査校の教頭は，下記のように述べている．

B校教頭

「高校が統合する際に，非常に生徒指導で苦労しているという背景もあったので，県の教育委員会が全く新しいコンセプトで学校をつくって，学校を立て直そうとしたのが始まりです」.

D校教頭

「前は，地元でも荒れている高校で有名だった．（「段階的指導」の）導入時には，まだ私は赴任していなかったけど，学校が荒れていたことが関係をしていると聞いている．自分自身も近くに住んでいるから，荒れている学校という認識はあった．

また本校の多くの生徒は，卒業後地元の企業に就職する．社会のルールやマナーを教えられる最後の機会でもあるので，導入したと聞いている」.

以上の事から，調査校においては，「段階的指導」導入前はその地域では荒れている学校または教育困難校と言われる状況にあり，それを改善することを目標に「段階的指導」を導入した経緯がうかがえた．

4．2「段階的指導」運用の在り方

両校ともに一般的に学校で行われている生徒指導の他に，チェックカードを用いた「段階的指導」を行っていた．チェックカードには，各学校で生徒が守らなければならない項目が記載されており，教員が服装違反等している学生を見つけた場合に，チェックされるカードのことである．両校の「段階的指導」の運用についてそれぞれ下記に示す．

B校では，違反した生徒を発見した教員が「生徒指導チェックカード」（図1）を記入し，当該生徒の担任に渡した後，生徒指導チェックカード枚数一覧表（図2）に記入する．担任は「生徒指導チェックカード（担任控え）」を保管し，「生徒指導チェックカード（生徒控え）」を当該生徒に渡す．その際，「生徒指導チェックカード」の枚数と内容に応じて，段階ごとに下記（表1）の指導を行う．

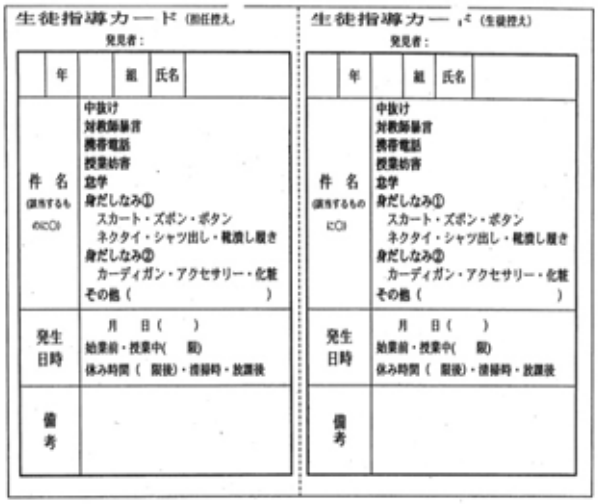


図1．B校の生徒指導チェックカード

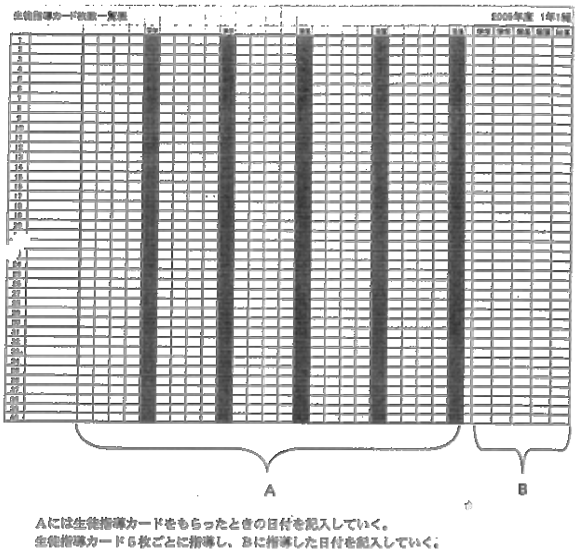


図2．B校の生徒指導チェックカード枚数一覧表

表 1. B 校の指導内容

枚数	指導教員	指導内容
5 枚	学年団	学年団より本人へ注意 保護者への連絡
10 枚	学年団	学年団より本人へ注意 保護者への連絡
15 枚	生徒指導部長	生徒指導部長より本人へ注意，保護者へ連絡
20 枚	教頭	教頭より本人へ注意 保護者へ連絡
25 枚	校長	保護者召喚の上， 校長より注意

またB校では，チェックカードを用いた「段階的指導」の他に，表2に示したような問題行動をレベル別に分け，それに違反した場合の生徒指導も実施をしている．レベル1, 2までの問題行動については表1に示した指導が行われ，レベル3以上の問題行動は特別指導（謹慎処分）の対象となる．

表 2. B 校のレベル別の問題行動と指導内容

レベル	問題行動	指導内容
1	授業中の私語・ピアスの着用・バス停での迷惑行為	生徒指導チェックカードによる指導
2	授業妨害・自転車の二人乗り・無断早退等	
3	無断外泊・深夜徘徊・家出等	特別指導(謹慎処分)
4	喫煙・飲酒・万引等	
5	窃盗・恐喝・薬物乱用等	特別指導(無期謹慎処分) 退学

D校の「段階的指導」の特徴は，生徒の服装面に的を絞って行っていることであった．

学校の日常生活の中で，教員が違反している生徒を発見した場合，チェックカード（図 3）の半券を違反している生徒に渡し，もう一方の半券を職員室に設置されているBOXに入れる．BOXに入れられたチェックカードを生徒指導課がチェックし，枚数に応じた生徒指導（表3）を当該生徒へ行う．

D校では，違反した場合の罰則としては，退学になるようなことはなかった．謹慎解除後は，チェックカード4枚からスタートすることになる．また毎月6枚以上，チェックカードを発行された生徒の情報を教職員全体に周知させ，指導に活かしている．

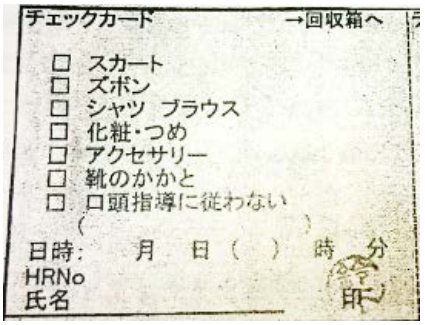


図 3. D 校の生徒指導チェックカード

表 3. D 校の指導内容

枚数	指導教員	指導内容
2 枚	副担任	副担任による指導，課題指導
3 枚	担任	担任による指導，反省文・保護者連絡
4 枚	担任・副担任・学年主任	担任・副担任・学年主任による指導 保護者へ連絡，課題
5 枚	学年生徒課・担任・学年主任	学年生徒課より本人へ注意 保護者へ連絡，課題
6 枚	生徒課長(担任・学年主任同席)	生徒課長指導(担任・学年主任同席)による指導，保護者召喚，振り返りシート
7 枚	教頭(生徒課長同席)	教頭指導（生徒課長同席）による指導，保護者召喚
8 枚	3 日間の謹慎処分	

調査校における運用面での共通点は，次の通りであった．

① 違反内容と違反した場合の罰則について，事前に生徒・保護者へ周知し，運用していた．

②「謹慎処分」を生徒に課す場合は，生徒の実情や家庭状況を考慮して実施していた．

運用の在り方で特筆すべき点は，「謹慎処分」の実施の在り方である．両校ともに違反を繰り返す生徒には，チェックカード枚数が増えていくことになるが，違反をする度に教員から上記に挙げた指導をそれぞれ受け，その度に何がいけなかったのかという反省の機会が与えられる．

しかし，D校では，頻繁に違反を繰り返す生徒はチェックカードの累積によって，謹慎処分となる．

またB校では，レベル別の問題行動と指導内容に定められたレベル3以上の問題行動を起こした場合，謹慎処分となる．謹慎処分は，処分を課せられた生徒を登校させず，家庭内謹慎になるのが一般的である．しかし，B校の謹慎処分では，全て学校内謹慎を実施していた．またD校については，家庭の協力や本人の現状を考慮して，家庭内謹慎と学校内謹慎の両方を採用している．このことについて，両校教頭は次のように述べている．

B校教頭

「家庭内謹慎をしていた時は，やはり生徒(の現状)がなかなか把握できず，親御さんも働いて，意外と家の中で自由にしているとなかなか反省しないという背景があって，欠席が続く訳ですから，逆に生徒にとっても不利になるということなので，生徒の権利保障という人道的な面も含めて，学校で指導いたしますということは徹底して行っています」.

D校教頭

「謹慎の場合，家庭内謹慎にするか，学校内謹慎にするかは場合によります．本人が深く反省をし，ご家庭の協力が得られる場合は，家庭内謹慎を行っています．家庭内謹慎を実施することも大切．子どもと親が向き合える時間をつくることができる．但し，保護者の方が働いており，家にいない場合等の時は，学校内謹慎を行います．一人で生徒を家にいさせてもゲームをしたり，高校に行っていない友達と遊びに行ったりすることもあり，生徒が反省することに結びつかないですから」.

謹慎処分を課せられた生徒を学校から見放さず，どのようにすれば生徒に反省の機会が与えられるかを考えながら運用されていた．

4．3「段階的指導」の効果

調査校における効果面での共通点は，次の通りであった．

① 学校環境が落ち着いたこと

② 謹慎処分を受ける生徒が年々減ってきたこと

両校ともに現在の学校環境は落ち着いていることが共通点の一つであった．その理由として各教頭は次のように述べていた．

B校教頭

「やっぱり停学は減ってきたと思います．あとは軽微なものになってきたというふうに思います．1年生のうちはやっぱりそういう気持ち（先生に注意されない）で入ってくるんですよ．なんだけど，実はそういうのはいけないということが分かって生徒が学校生活をきちんと送ろうと思って卒業していくパターンでしょうか．1年生の時は謹慎に入った子もいたけど，でも結果的には卒業したというパターンは本校は多いです」.

D校教頭

「この指導が始まった頃は，荒れている学校を落ち着かせるということがあったかもしれないが，今は大きな問題を起こす生徒がいない状況です．謹慎処分を受ける学生も少ないです．もちろん時には問題が起こる事もありますが，そんなに大きいことではないです．また遅刻・欠席がとても少ない」.

このように，調査校においては「段階的指導」を導入してから今日までの効果面を振り返ると，学校の荒れが治まり，落ち着いた学校環境になっていると認識していることが分かった．

効果面についての一例として，D校から頂いたチェックカード発行枚数の年度毎の推移を図4に，平成17，18年度チェックカード発行枚数の推移を図5にそれぞれ示す．

図4から，チェックカード発行枚数が導入初期と比較し，少なくなってきていることが確認できる．また図5からは，チェックカード制を導入した最初の月は，チェックカード発行枚数が966枚もあったが，1月から8月のデータはないものの，月を追うごとに徐々にチェックカードの発行枚数が減っていたものと考えられた．

このような効果を可能にしたのは，最初の段階で，生徒が問題行動を起こした場合に見て見ぬふりをせずに段階的に指導を行ったことが関係していると推測できた．

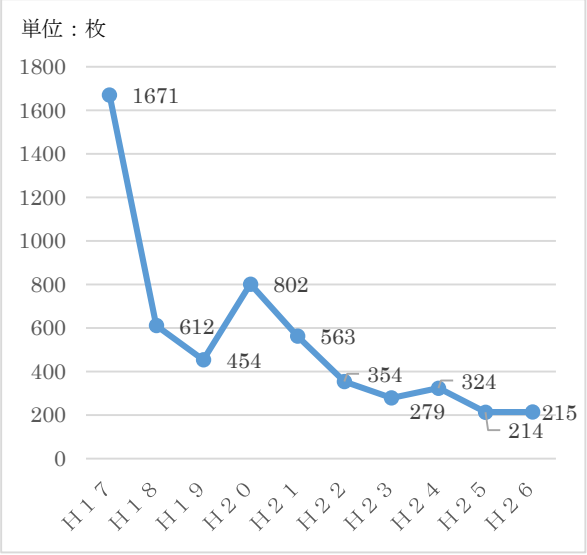


図4．D校のチェックカード発行枚数推移(年度毎)

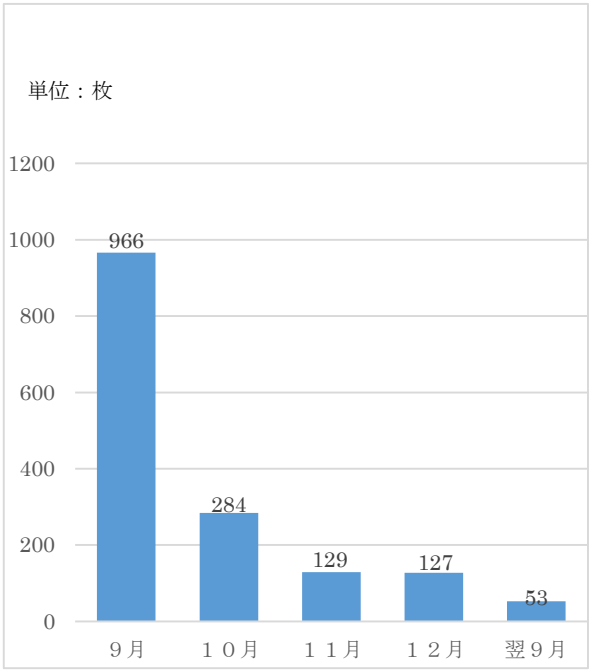


図 5. D 校のチェックカード発行枚数推移
(H17 年 9 月～H18 年 9 月)

4. 4「段階的指導」の課題

調査校における課題面での共通点は，次の通りであった.

① 学校外からの「段階的指導」（ゼロトレランス）のイメージが良くない
② 発達障害の生徒に対する生徒指導上の対応の在り方

調査校においては，「段階的指導」や「ゼロトレランス」という用語を使用することによって，厳しい生徒指導という印象を外部に与えていると認識しており，下記に述べられているようにそのことによる弊害も生じている可能性が推測された.

B 校教頭

「やはり社会ではあまり受け入れられていない面があります．ゼロトレランスって．ゼロトレランスを本校の校長もあまり前面に出すと生徒が集まらないと．なので，生徒募集に苦労しています．最初，開校当時は統合する前の学校の子と見てくれ（生徒の見ため）しか変わっていないので，確かにいろいろ事件はあったかと思います．ただ，最近は中学校の方も（B 校が厳しい生徒指導を行っていることを）分かって入れてくるというところもあるので，そういう生徒（校則を守れない生徒）が絶対的に減ってきて，＜中略＞周りの理解という面ではまだまだ，私たちももっと発信するべきかなと思います」.

D 校教頭

「中学校の生徒には，厳しい高校と思われている面があります．でも，そこは中学校で高校説明会等をやるときは，しっかりと伝えます．厳しいということではなく，どういう意味で指導を行うかということは伝えるようにしています．それでも厳しいということだけを感じる生徒もいるかもしれません．だから，本来ならうちの学校に来るような生徒が選ばなくなったという印象もうけます」.

「ゼロトレランス」や「段階的指導」については，両校ともに社会からの捉え方が良くないと認識をしていた. また興味深いことに, その印象の悪さから，本来ならば近隣の中学校から両校に入学して来るであろうと考えられる生徒が入学するのを避けているのではないかと調査校が認識していた点である．実際, 近年の B 校の入学者数は少子化の影響も重なり，定員を下回っている現状もあった.

次に共通している課題点として，下記に述べられているように，発達障害の生徒に対する生徒指導上の対応の在り方が挙げられた.

B 校教頭

「発達障害の生徒も多いと思うんですけど，うちは一律にだめなものはだめということで，社会に出るということでやっています…」.

「本校も課題としては，より生徒の相談体制は整備して，基準としてゼロトレランスはやっていますけど，その中での細かいいろんな生徒の動向は，相談体制，保健室の養護の先生とかと協力しながら，その相談体制の中でやっていこうと．ただ規律は規律で譲らないということでやっているんですが，皆さん方は（他の学校は）どうしているのかな，ダブルスタンダードでやっているのかななんていうのがちょっと・・・・」.

D 校教頭

「今は，発達障害の子もいるでしょう．発達障害を持つ生徒とかじっとしていられないような生徒がいます．そういった生徒をどのように指導していったら良いかを話しあっています．発達障害の生徒に対しては，チケット制（チェックカード）の段階的指導はどうか（生徒指導の方法として適切なのか）と考えていることもあります」.

調査校においては，発達障害のある生徒や発達障害が疑われる生徒に対し, 他の生徒と同じように「段階的指導」を通して一律に指導をすることを懸念しており，今後の課題として認識していることが分かった.

文部科学省[6]によれば，発達障害等困難のある生徒が高等学校に在籍する割合は，生徒総数の約2%であるとされている．障害のある幼児児童生徒は，その障害の特性による学習上・生活上の困難を有しているため，周囲の理解と支援が重要であり，生徒指導上も十分な配慮が必要であると指摘されている．

このような状況を鑑みて，発達障害等困難のある生徒に対して，一律に指導行う「段階的指導」が及ぶす影響を検討していかなければならないであろう．

5．総合考察

調査校においては，「段階的指導」の導入の背景に，「学校の荒れ」があった．従来までの生徒指導体制では，生徒指導が機能していない状況が考えられ，教育困難校独自の困難さが垣間見られた．このような状況の中で，どのようにすれば学校をより良く再建できるかを教員が真剣に考え，チェックカード制を用いた「段階的指導」を導入した背景は忘れてはならないだろう．学校の実情に合わせて導入した「段階的指導」の裏には，このままの学校ではいけないという学校を慮る教員の危機感があったと考えられた．

次に調査校においては，「段階的指導」を通して問題を起こす生徒を退学，または謹慎処分を課すなどして，学校の外に放り出した成果で学校環境を好転させている訳ではなく，当該生徒の懲戒処分を学校・教員と常に関わりを持たせ，教育的営みの中で実施していることが特徴的な共通点であった．

「段階的指導」を実践した場合，常にその対象となるのは，問題を多く起こす生徒であると考えられる．チェックカードを多くもらう生徒は，チェックカードが累積することによって，多くの指導を受けることとなる．しかし，そのような生徒ほど教育的配慮が必要であるという認識が調査校の教員にはあり，様々な工夫がなされていた．その一例が謹慎処分の運用の在り方であろう．B校，D校の謹慎処分は，学校内謹慎を行っていた．謹慎処分になった後も当該生徒をただ学校の外に出し反省を促す訳ではなく，学校内で責任を持って当該生徒への指導がなされていた．教員が「段階的指導」を通して，問題を起こす生徒との関わりを積極的に持とうとしていることが明らかとなった．

「ゼロトレランス」の問題は，問題を起こす生徒を学校から排除することを可能にすることであると言われている．実際に船木[7]は，「米国で実施されている『ゼロトレランス』の問題点の一つに，『ゼロトレランス』実施後に停学と退学の懲戒処分が増えたこと，またそのような処分を下された生徒は，学校の教室と教育活動から排除されてしまい，代替教育プロジェクトから見放された状態にあるとし，代替教育プログラムの保証が不十分な州や学区では，停学や退学処分を受けた生徒の学校からのドロップアウトにつながること」を指摘している．このような状況は厳に慎まなければならないのであって，そのような状況を防げないとしたら公教育の意味すらなくなるであろう．

しかし本調査の結果，調査校での「段階的指導」は前述の通り教育的営みの中で実施されている事から，米国の「ゼロトレランス」における問題点には重ならないと考えられた．このことについて各教頭は以下のように述べている．

B 校教頭

「必ず先生方とコミュニケーションを取らせるように全部仕組んでありますので，先生方は手間が増えるんですけれども，そうやって接していくことで，今まで中学校の時にはある程度自由にやっていたような生徒に規範意識を教える，プラス先生との関わりを持たせることを目的にやらせています」.

D 校教頭

「チケット（チェックカード）を渡すことが目的ではなく，違反をした生徒の気持ちに教員が気づくことを大切にしています．生徒が出すサインに私たち教員が気づき，どのように指導に活かしていくかということを先生方も考えられ，指導をしています」.

国立教育政策研究所が出した「生徒指導体制の在り方についての調査研究報告書ー規範意識の醸成を目指してー」の報告書[3]では，近年の学校における生徒指導上の多様化・複雑化した問題に教員が毅然とした粘り強い対応をすることによって，生徒の規範意識の醸成を図ることを学校現場に求めている．その一つの手段が「段階的指導」ということであろう．この報告書の調査研究主査を務めた明石要一[8]は，「ゼロトレランスという言葉からは，おどろおどろしい感じを受けるかもしれないが，その概念を端的に表すとすれば，『出席停止の有効活用』である」と説明している．出席停止制度は，市町村教育委員会が，「性行不良」であり，「他の児童生徒の教育の妨げがある」と認められる場合に，当該児童生徒の保護者に対して，子どもの就学を停止するために行われるものである．つまり出席停止制度は，問題行動を起こす生徒本人への懲戒という観点からではなく，他の子どもの学習権を保障するという観点から

設けられているのである．その為に，教育現場を始めとして，今後厳罰主義の権威を借りて，安易な出席停止制度を利用しかねないという反論もある．

しかしながら調査校では，「段階的指導」を実践することによって生じる罰則の適用を学校内で包括的に取り組める仕組みを構築していることで，問題を起こす生徒をも見捨てない工夫が整備されていた．

一方で本調査から課題面の共通点も明らかとなった．「段階的指導」は，一律に「ダメなことはダメ」と教員がぶれない指導を行うことによって，生徒に対して規範意識の醸成をはかることにその特徴がある．しかし，そのことが発達障害のある生徒に対しては，本当に意味のある指導になりうるのかということについては，大きな疑問となる所である．発達障害と一言でいっても，ADHD（注意欠陥多動性障害）やLD（学習障害）等その障害の内容は様々であり，またその程度にも大きな個人差があるといわれている．そのため，発達障害のある生徒に対しては，当該生徒の障害の特性を十分に理解し，個別的な対応が必要であり，一律に指導を行う「段階的指導」では限界があると考えられる．今後，生徒指導上においても発達障害の生徒に対して、より適切な支援を行えるような体制を整えていく必要があるといえる．

本調査では「段階的指導」を実践している学校を調査することによって，その効果面や課題面を検討してきたが，調査校が2校ということもあり，必ずしも一般性があるとはいえないであろう．

また効果面についても，例えば本当に生徒に規範意識が芽生えているのかや，その効果が学校全体の問題行動の減少につながっているのか等は，実証的に証明できてはいない．また，そもそも管理教育的といわれる「段階的指導」が生徒の健全な活動に対しても萎縮を招いているのではないかといった疑問も払拭できず，今後のさらなる調査課題としていきたい．

6．まとめ

本調査では，「段階的指導」の継続的運用の実際とその効果・課題について検討してきた．

その結果，「段階的指導」を継続的に実践している学校には，その運用面や効果面また課題面について共通点を見出すことができた．そして両校とも，「段階的指導」の継続的運用により一定の効果を得られていることが明らかとなった．

その背景には，学校と生徒へのよりよい教育の在り方を模索した，教育現場の熱意が垣間見られた．

謝辞

本調査においては，B校教頭並びにD校教頭には，大変お世話になりました．お忙しい時期にも関わらず，インタビュー調査を快諾して下さり，心より御礼申し上げます．

両校の益々のご発展を心よりお祈り申し上げます．

引用文献

(1) 文部科学省（2014）：「平成25年度児童生徒の問題行動等生徒指導上の諸問題に関する調査」
(2) 阪根健二（2000）：生徒指導と学校教育―生徒指導に関わる教員の意識調査から―，香川大学教育実践総合研究紀要，1巻，79-88頁．
(3) 国立教育政策研究所生徒指導研究センター（2006）： 生徒指導体制の在り方についての調査研究報告書－規範意識の醸成を目指してー．
(4) 加藤十八（2006）：「ゼロトレランス規範意識をどう育てるか」，学事出版，4頁．
(5) 藤平敦（2006）：いま日本で求められているゼロトレランス理念とは，月刊学校教育相談11月号，44-51頁．
(6) 文部科学省特別支援教育の推進に関する調査研究協力者会議高等学校ワーキング・グループ（2009）：高等学校における特別支援教育の推進について
(7) 船木正文（2005）： 学校暴力と厳罰主義－アメリカのゼロ・トレランスの批判的考察－，大東文化大学紀要，41号，155-170頁．
(8) 朝日新聞朝刊，「『寛容度ゼロ』生徒指導」2006年6月17日，15頁．

資料

田沢湖，玉川ダム湖の底質堆積物の特性調査

布田潔**，生魚利治***，鈴木純恵***，成田修司****

Investigation on the Characteristics of Bottom Sediments in Tazawa-ko and Tamagawa-dam Lakes

Kiyoshi Fuda**, Toshiharu Namauo***, Sumie Suzuki*** and Shuji Narita****

Abstract

The bottom sediments extracted in Tazawa-ko (2011.8) and Tamagawa-dam (2012.9) lakes were investigated by chemical and structural analyses. The depth profiles of silicon, aluminum and iron species suggested that the solid of the aluminum and the iron compounds, clays and zeolite minerals were distributed over the whole layer uniformly in the case of Tamagawa-dam lake, on the other hand, Al and Fe species had a lower density in the deeper segments of Tazawa-ko lake bottom sediment. Instead, accumulation of dead body of diatoms was observed in these segments.

1．緒言

秋田県仙北市玉川上流部に湧出している玉川温泉は，湧出量毎分約 9,000ℓ，酸性・含鉄(Ⅱ)・二酸化炭素 - アルミニウム - 塩化物泉として知られており，日本有数の強酸性泉（pH 約 1.2）である．強い酸性の温泉水は以前から“玉川毒水”とも呼ばれ，下流域の産業や生活に大きな被害を与えてきた．この強酸性水の抜本的対策として，平成元年より国土交通省管轄の石灰石中和処理施設が完成，操業を開始した．この施設は，玉川温泉湧水のうち温泉施設で利用される部分を除きその約 8 割を源泉から直接導入し，pH が 3.5 以上になるように石灰石で中和した後，玉川支流の渋黒川へと放流している．開始後水質の pH の上昇は順調に進み，またヒ素など有害元素の固定化の効果も確認された(1)．ところが平成 14 年頃から源泉の酸度が急激に上昇し，これと共に源泉の酸度を構成する Fe^{2+}や Al^{3+}等の潜在的酸性成分濃度が上昇した．中和処理施設では，この変化に対処すべく石灰石使用量の増加などの対策を講じたが，下流域で pH が低下してしまうという現象も見られるようになった．秋田県ではその原因の究明と田沢湖の水質改善をめざし，平成 24 年 6 月に「田沢湖水質改善検討会」を設置した．またこれに先立ち，秋田県健康環境センターと秋田大学のグループはこの問題での共同研究を開始した．この過程で，pH 低下の要因として，湯川等を経由する未処理酸性水の流下に加え，源泉の総酸度を構成する弱酸成分中の Fe^{2+}，Al^{3+}の流下と中・下流域での酸化ないし加水分解反応が取り上げられた(2)．またこの動態に並行し，この流域において鉄の酸化反応を促進させる鉄酸化細菌が生息し，鉄の動態に影響を及ぼしている可能性も明らかにされた(3)．

中和処理事業による水質管理目標は，玉川ダム及び田沢湖でそれぞれ pH 4.0 以上，6.0 以上とされている。しかし，田沢湖においては平成 23 年に pH 5.2 と観測され，その目標を達成できていない状態が続いており，今後の水質改善について引き続いた努力が求められている．本研究では，玉川温泉から田沢湖に至る玉川ダム流域における中和処理の効果の検証の一環として，玉川ダム湖及び田沢湖の底質について平成 24 年夏に採取された浅層ボーリングコア試料を対象に，沈殿物の堆積状態について各種分光分析及び元素分析を行った．本報告は，その結果をまとめたものである．

2015 年 7 月 30 日受理

**秋田大学大学院工学資源学研究科環境応用化学専攻，
Department of Applied Chemistry, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University
***秋田県健康環境センター，Akita Research Center for Public Health and Environment
****同上（機能物質工学専攻 2001 年修了）

2．実験

2.1 コアサンプル

本実験は，県健康環境センターと秋田大学の共同の一環として実施された．玉川ダム湖及び田沢湖の

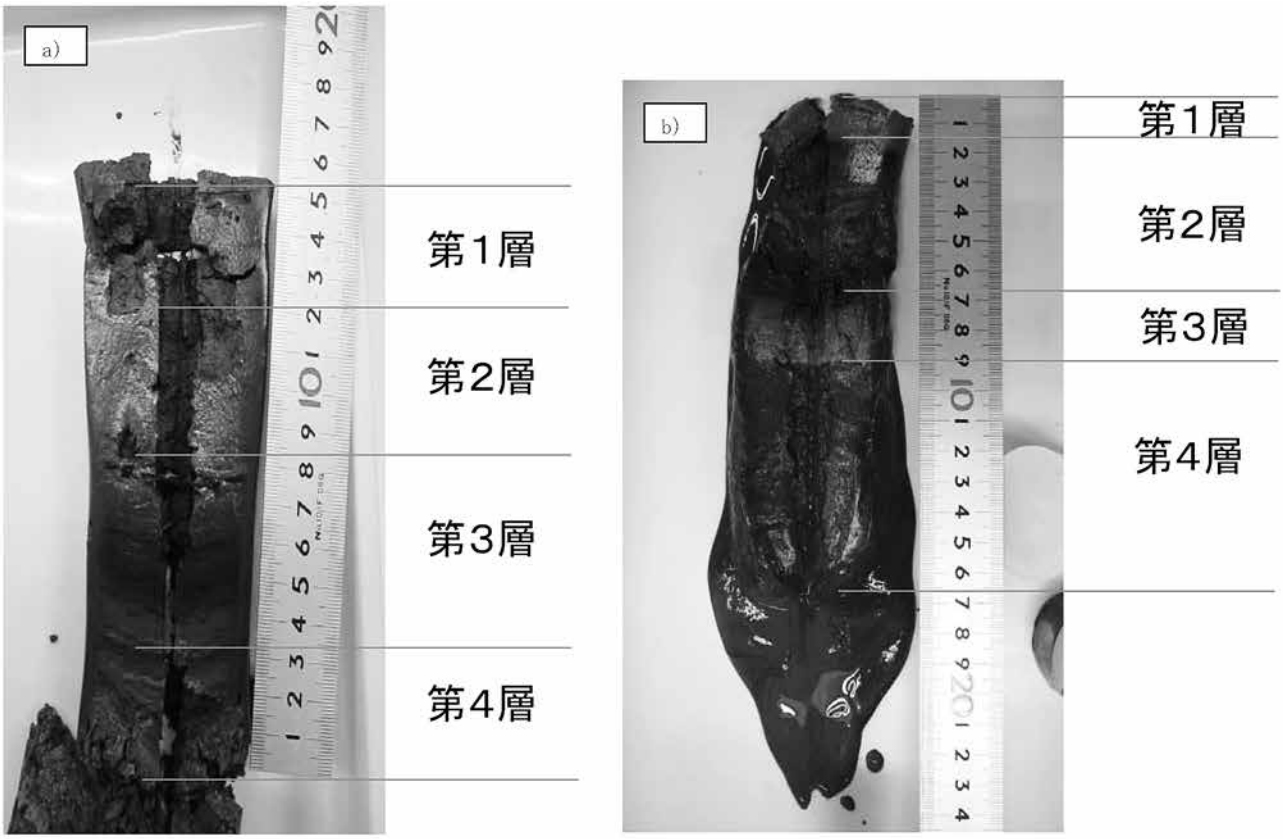


図１　採取された柱状コアサンプルの写真と分画位置．a）玉川ダム底質（男神橋橋脚下部で 2012 年 9 月採取），b）田沢湖底質（湖心部で，2011 年 8 月採取）

コアサンプルは秋田県健康環境センターが，柱状アクリル筒を用いて採取した．各コアサンプルは，玉川ダムでは男神橋の真下で 2012 年 9 月 23 日に，田沢湖では湖心で 2011 年 8 月 23 日に採取した．その写真をそれぞれ図 1 a）及び b）に示す．各試料は色調の変化からともに 4 層に分かれ，その境界線をそれぞれ図に示した．色調は，玉川ダム湖の場合，上から茶（第 1 層 : 0-3 ㎝），こげ茶（第 2 層 : 3-7 ㎝），茶（第 3 層 : 7-12 ㎝），赤茶（第 4 層 : 12-15.5 ㎝）であった．一方，田沢湖の場合は，上から赤茶（第 1 層 : 0-1.5 ㎝），こげ茶（第 2 層 : 1.5-6.5 ㎝），灰茶（第 3 層 : 6.5-9 ㎝），黒茶（第 4 層 : 9-17 ㎝）となっていた．試料の全体長はそれぞれ，15.5 ㎝，17cm であった．

2.2　分析

分割された各層の試料は実験室において 70℃，24 時間で乾燥させた後，メノウ乳鉢を用いて粉砕し分析用試料とした．

2.2.1 粉末 X 線回折法（ XRD ）

作製した試料について，X 線回折装置（株式会社リガク製 RINT 2500，秋田県産業技術センター所有）を用いて粉末 X 線回折の測定及び定性分析を行った．測定条件は対陰極に Cu を使用し，スキャンスピードは 2°/min，サンプリング幅は 0.01°，電圧は 40 kV，電流は 300 mA，走査範囲は 2θ＝3～70° として測定を行った．スリットは発散スリット，散乱スリットをともに 1° とし，受光スリットを 0.15 mm とした．

2.2.2. フーリエ変換赤外線吸収スペクトル法（ FT-IR ）

試料約 1mg と KBr 約 100 mg を測り取り，乳鉢で混合微粉としてから成型器に入れて 5 分間真空状態で脱気しつつ，200 kg/cm² で加圧成型し試料ペレットを作製した．この試料について，フーリエ変換赤外分光光度計（パーキンエルマー社製 S2000 型）を用いて 370～4000 cm^{-1} の波数範囲で測定し，試料の化学結合状態を分析した．

2.2.3. 走査型電子顕微鏡（SEM）

試料の微細形状及び表面状態について，走査型電子顕微鏡（日立社製　S-4500，秋田県産業技術センター所有）を用いて SEM 像観察を行った．拡大倍率は 300 倍，5000 倍に設定した．

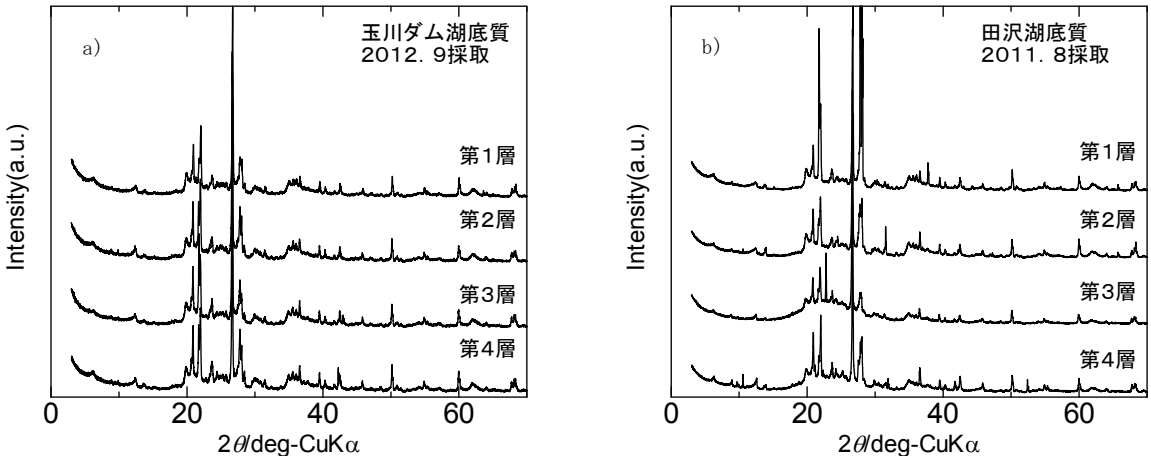


図２　採取されたボーリングコアサンプルの粉末 X 線回折パターン： a）玉川ダム底質（男神橋橋脚下部で 2012 年 9 月採取），b）田沢湖底質（湖心部で，2011 年 8 月採取）

2.2.4. 電子線マイクロアナライザ（ EPMA ）

試料の元素分析を EPMA（日本電子社製　JXA 8200 ，秋田県産業技術センター所有）で行った．EPMA の分析は，粉末試料をカーボンテープ上に付着させて行った．その信頼性のレベルは半定性分析レベルであり，下記の定量分析の予備実験と位置付けた．

2.2.5. 誘導結合プラズマ発光分光分析法（ICP-AES）

『底質調査方法平成 13 年 3 月』[4]にしたがって湿式分解法による前処理を行った各試料溶液について，ICP 発光分光分析装置（Thermo Fisher 製 iCAP6300Duo）を用いて元素分析を行った．底質分析の際，試料溶液に共存するマトリックスによって干渉が引き起こされるため，その対策として適用される標準添加法により測定を行った．また，分析条件として最大積分時間を 15 秒，試料置換時間を 50 秒，ネブライザーガス流量を 0.6 L/min とし，分析波長は Al：396.152 nm，Fe：238.204 nm を用いた．

３．結果と考察

3.1　XRD 測定結果

玉川ダム及び田沢湖底質の XRD 測定結果を図２，a), b)に示す．いずれの試料にも石英，長石類の比較的強いピークが共通して見られ，また天然ゼオライトであるモルデナイトおよびクリノプリロライトに帰属しうる回折が観測された．また層状粘土鉱物に特有の 2θ＝20°および 35°付近から始まる広角側に尾を引く非対称な反射が見られた．底面反射（00l）に相当する回折から緑泥石，モンモリロナイト，雲母類の存在が示唆された．これら観測された鉱物は玉川流域に比較的多く分布している鉱物であり[5]，小和瀬川，湯淵沢，大深川をはじめ玉川ダムに流入する大小の沢を経由して流入したものと考えられる．

玉川ダムの底質の鉛直方向での XRD パターンには大きな差異は見いだされなかったが，田沢湖の場合には多少変化が見られた．上層のパターンは基本的に玉川ダムのものに類似しているが，下層のパターンでは粘土鉱物の回折の相対強度が弱くなる一方，2θ＝20°付近にブロードなハローが見られる．このハローは非晶質のケイ酸類によく見られるものであり，後述する珪藻の死骸を構成するシリカ質に帰属しうるものと考えられた．

3.2　FT-IR 測定結果

玉川ダム及び田沢湖底質の FT-IR の測定結果を図３a），b）に示す．玉川ダム湖底質では 1036 cm^{-1} 及び，1089 cm^{-1} にケイ酸塩化合物中の Si-O の伸縮振動，3449 cm^{-1} に水及び水酸基の O-H の伸縮振動に帰属しうる吸収が確認された．また，1637 cm^{-1} には粘土層間やゼオライト細孔内の水分子の変角振動に帰属される吸収が確認された．田沢湖底質においても同様の吸収バンドが観測されたが，Si-O の伸縮振動はわずかに高波数側にシフトすると同時に，高波数側の吸収強度と低波数側のそれが第 3 層と第 4 層において逆転する変化が観測された．Si-O 伸縮振動のダブレットは，低波数側は層状の粘土鉱物，高波数側は非晶質のケイ酸塩にそれぞれ帰属が可能であり，田沢湖底質では下層にいくにしたがって層状のケイ酸塩から Si-O の 3 次元的ネットワーク構造の成分が増加することを示している．また水分子の吸収強度

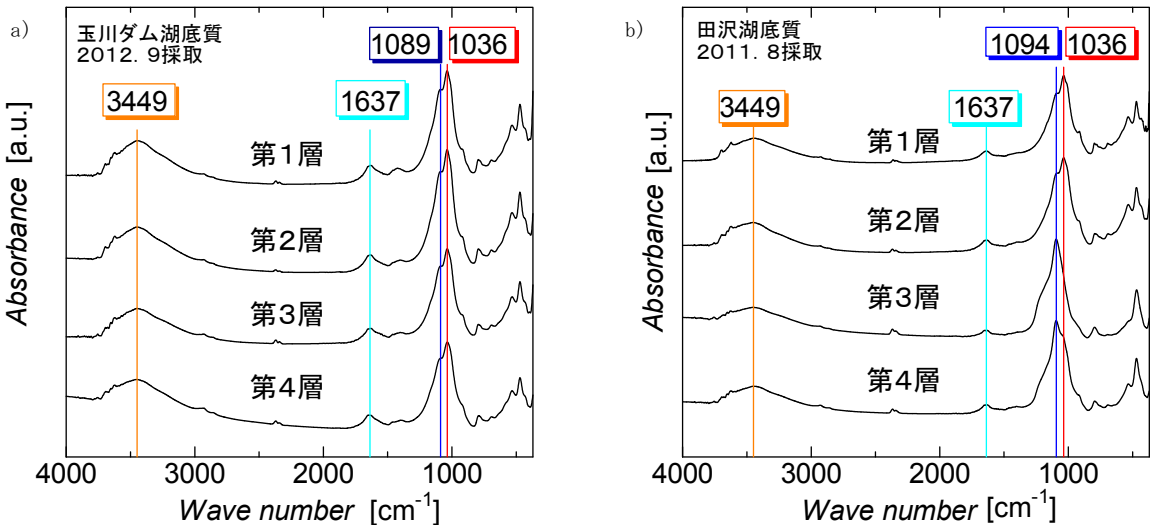


図３　採取されたボーリングコアサンプルの FT-IR スペクトル．a）玉川ダム底質（男神橋橋脚下部で 2012 年 9 月採取），b) 田沢湖底質（湖心部で，2011 年 8 月採取）

の変化から玉川ダムの方が田沢湖より含水率が高いことがわかり，ゼオライトや層状粘土鉱物を多く含んでいる可能性が考えられた．

3.3　SEM 像

玉川ダム湖底質第 3 層及び田沢湖底質第 4 層の SEM による表面観察の結果を図４a），b）に示す．玉川ダム底質では各層であまり大きな差異は見いだされなかったが，層状及び非晶質様の沈殿物に加え，柱状の結晶性物質の混在が認められた．田沢湖底質では，第 1 層及び第 2 層では玉川ダムと同様な形状のものが多く観察されたが，第 3 層及び第 4 層には円盤状の物質が多く見られるようになった．倍率 5000 倍の SEM 像を見ると図４b)に見られるように無数の小さい空孔が観測され，円盤状の物質は珪藻の死骸であると確認された．

3.4　元素分析

EPMA による元素分析から，玉川ダム湖底質ではどの層でも Si と O が多くの割合を占めており，Al と Fe の含有率は層間ではあまり相違がないことがわかった．これに対し田沢湖底質では第２層を境として変化し，Al と Fe の濃度が小さくなる傾向が見られた．このことは Si の相対的濃度が田沢湖の下層で増加していることを意味する．

Al および Fe に関する ICP-AES 測定による定量結果を図５に示す．この 2 地点における堆積物中において Fe と Al が多く堆積していることがわかる．田沢湖では，Fe は玉川ダムより量は減っているが，Al と同様に田沢湖まで流下して多く堆積していること

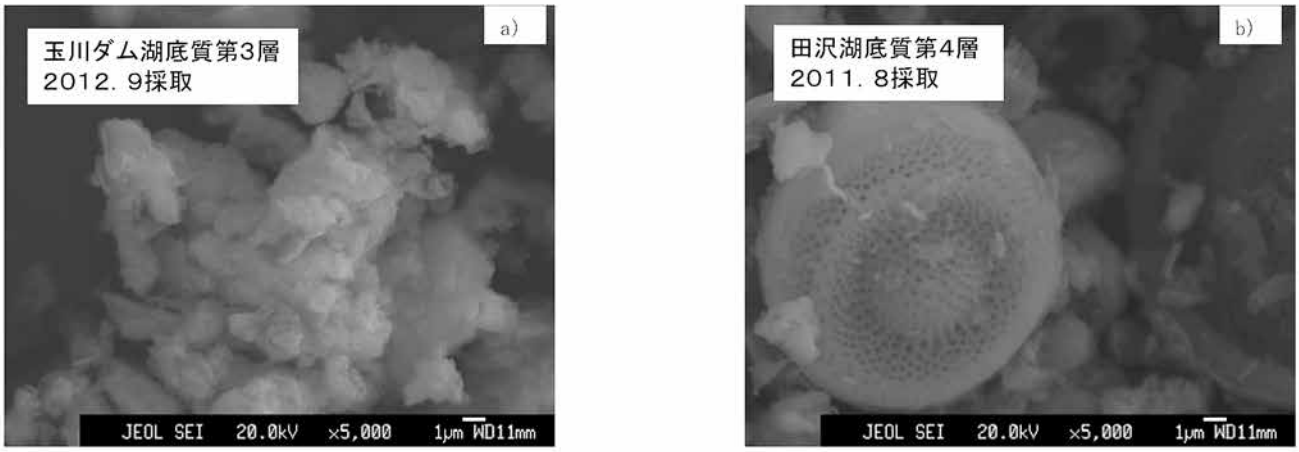


図４　採取された柱状コアサンプルの SEM 写真．a）玉川ダム底質第 3 層（男神橋橋脚下部で 2012 年 9 月採取），b）田沢湖底質第 4 層（湖心部で，2011 年 8 月採取）

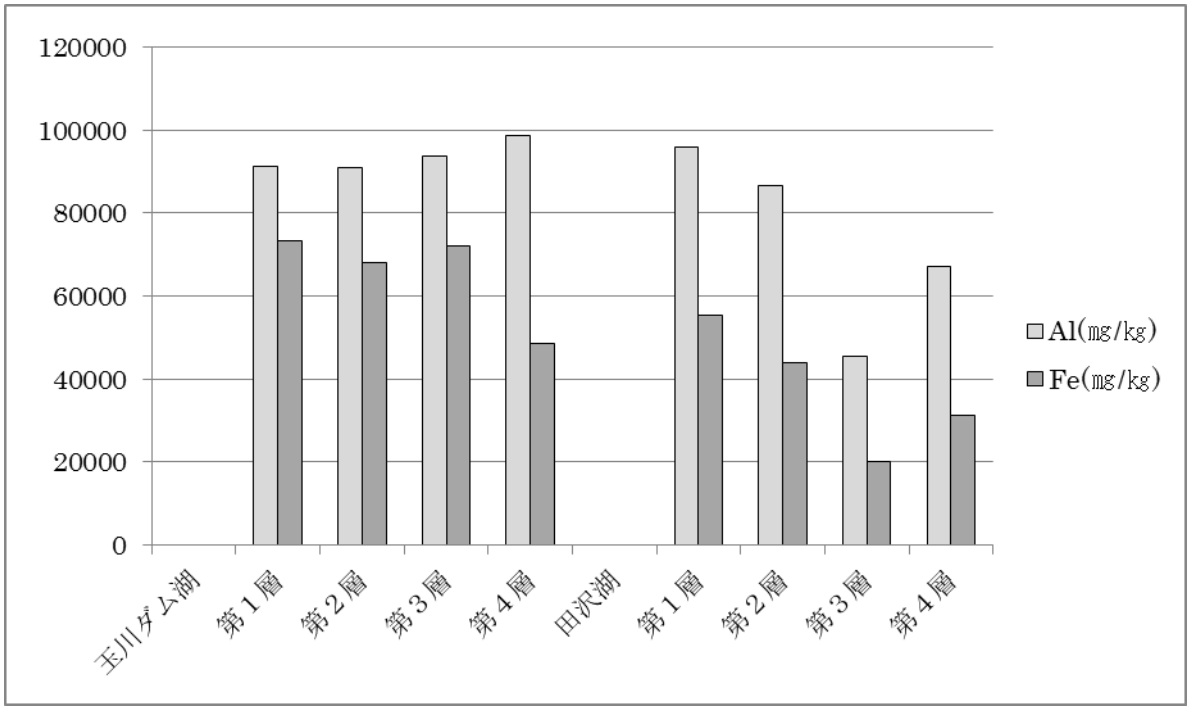


図５　玉川ダム湖底質および田沢湖底質の元素分析結果.

がわかった．玉川ダム湖では，第 4 層の Fe が多少少ないが層間で大きな変化は見られなかった。一方，田沢湖では，第 3 層で比較的明らかに堆積量が減少していた．コアサンプルの写真で見られたように，田沢湖底質の第 3 層目が灰色を呈し，SEM 観察にみられた珪藻の死骸の増加に対応していると考えられた．

４．結言

本研究では，玉川ダム及び田沢湖底質のキャラクタリゼーションを行い，以下のような結論を得ることができた．

（１）XRD 測定により，玉川ダム及び田沢湖底質には各種ケイ酸塩鉱物のピークが確認でき，特に田沢湖底質下層には非晶質性ケイ酸塩の存在が確認された．

（２）FT-IR 及び SEM・EPMA 測定により，玉川ダム底質では深さ方向に大きな変化は見られないが，田沢湖底質では下層にいくにしたがって Si-O 伸縮振動に帰属されるピークに変動があり，一方 SEM 観察から珪藻の死骸が多く存在したことと符合した．

（３）ICP-AES 測定により，Fe 及び Al は玉川ダムで落ちきらず田沢湖まで流下して多く堆積していることがわかった．

謝辞

本資料作成にあたり，環境応用化学科日置傑君（平成 24 年度卒業）の卒業課題研究で得たデータの一部を使用させていただいた．

参考文献

(1) 佐藤比奈子，石山大三，水田敏夫，西川治，世良耕一郎，遠田幸生（2009）:「秋田県八幡平西部の温泉水と渋黒川水系河川水の化学組成」　*NMCC 共同利用研究成果報文集*　13, 128-134.

(2) 成田修司，和田佳久，佐々木典子，八柳潤，布田潔，大下哲生，佐久間昴（2009）:「玉川温泉の成分変化が田沢湖の pH に及ぼす影響」　*秋田県健康環境センター年報*　第 5 号

(3) 大原典子，和田佳久，成田修司，八柳潤，布田潔，(2009):「玉川温泉下流域における鉄酸化細菌の生息分布」，　*水環境学会誌* Vol. 32，No. 1，　pp29~32

(4) 環境省水・大気環境局水環境課（2001）:「底質調査方法　平成 13 年 3 月」

(5) 金原啓司，大久保太治，角清愛，千葉義明，(1982): *岩石鉱物鉱床学会誌*, 77, 86,「玉川溶結凝灰岩類の変質(その 2)― 岩手県葛根田川上流および秋田県玉川上流地域―」