

重点研究支援課題 中間自己評価報告書

独立行政法人産業技術総合研究所

1. 重点研究課題名（支援期間:H14.1.1～H18.12.31）

H13-10「ナノ物性計測を利用した次世代半導体技術のための低誘電率層間絶縁膜材料の研究」

2. 研究代表者及び研究実施体制（所属・役職）

総括責任者： 廣瀬全孝 センター長
研究代表者： 吉川公麿 次世代半導体研究センター
秦 信宏 次世代半導体研究センター

3. 支援協力員氏名（それぞれの支援業務に関わる学位、資格、特殊技術等）

高田省三（工学博士、フーリエ変換赤外分光解析技術）
官 国清（工学博士、ポーラスシリカ膜合成技術）
衣笠由布子（理学修士、表面弾性波実験技術）
國重直子（理学士、ポーラス構造解析エックス線技術）
李 賢英（工学博士、吸着分光エリプソメトリ実験技術）

4. 研究概要

次世代半導体デバイスにおいては配線遅延時間を低減することがきわめて重要であり、層間絶縁膜用低誘電率新材料の開発が急務となっている。低誘電率化のため絶縁膜材料の低密度化が必要であるが、金属配線を支える構造材としての絶縁膜に求められる機械的強度および配線金属原子拡散阻止力など諸特性の劣化が大きな問題となっている。本研究ではこうした技術課題を科学的アプローチにより解決する技術体系の構築を目指して、新材料開発の指針を得るために、ナノ物性計測技術を利用して化学結合構造とナノポーラス構造のマクロ物性への寄与を解明することを目的とする。この指針に基づいて原子・分子レベルの物質構造制御を用いた新材料開発を行い、製造プロセス技術を通じて次世代多層配線を実証するために、産業技術総合研究所では時限付の次世代半導体研究センターを立ち上げて、産学官の共同研究体制でこれに取り組んでいる。

誘電率が1.5以下の層間絶縁膜材料を実現するためには、誘電率に寄与する電子分極、イオン分極、配向分極を極小にする化学結合構造を有すると同時に、ナノメートルスケールの空孔すなわちナノポーラス構造を有する材料を開発する。この場合に、膜中の化学結合構造だけでなく、空孔のサイズ、形状、面内及び深さ方向における分布などが、この材料に同時に要求される機械強度、金属原子拡散阻止能に大きく影響することになる。そこで、本研究では新材料開発の指針を立てるために、ナノ物性計測を用いてこれらのナノスケール構造および物性を解明して、それらのマクロ物性との関係を科学的に明らかにする。新物質である低誘電率絶縁膜材料ではナノポーラス構造が微細化して従来の一般的なナノ物性計測装置の性能では評価ができなくなるため、評価装置自身の性能限界を見極めて、信頼性のある評価を実現するために必要とされる評価装置の性能向上や評価手法および試料作成方法も研究として行う。

まず化学結合情報に関しては、主としてフーリエ変換赤外分光技術を駆使した総合的な解析

を行う。具体的には先ず偏光解析技術を用いたフーリエ変換赤外分光法により骨格と空孔の複合構造体としてのナノポーラス構造を有する極限低誘電率材料の複素誘電関数を求め、複素誘電関数に対する空孔と骨格の影響を有効媒質近似計算により分離して骨格の化学結合構造に由来する赤外スペクトルを明らかにする。またこの結果を用いて、骨格の化学結合構造とヤング率の関係を解明する。次にナノポーラス構造に関しては、エックス線反射率法による密度測定から、空孔を含めた薄膜の平均的な密度の値を得るとともに、小角エックス線散乱法およびガス吸着法による空孔サイズ分布の測定を行う。

また新しい材料の構造物性評価に必須の新評価法の開発を同時に行う。具体的には、低誘電率層間絶縁膜の空孔構造による機械的強度低下を定量的に計測評価するために、低機械強度の薄膜ヤング率を非破壊で評価することのできる新技術として、パルスレーザー誘起表面弾性波伝播位相速度周波数分散法の開発を進める。さらに、非破壊の空孔構造評価法として吸着分光エリプソメトリその場測定法の開発を進め、大きさと配列が異なる空孔を有する極限低誘電率薄膜の空孔構造解析を進める。一方、絶縁膜を流れるリーク電流密度、絶縁耐圧劣化の原因となる欠陥電子準位密度分布の評価法として、低誘電率層間絶縁膜材料のための電気容量・電流の過渡応答分光技術を開発する。

5．中間評価結果

5 - 1．研究の進捗状況と今後の見込み

次世代半導体技術に関する研究

次世代ULSI用ポーラス低誘電率層間絶縁膜の加工（プラズマ処理、液相処理）プロセスでは、プラズマ中のイオン・中性活性種や処理液中の化学活性種に晒される表面・空孔壁の化学結合状態の制御が大きな課題である。また、ポーラス低誘電率膜の化学結合状態は熱履歴によっても変化する。これら化学結合状態の解析のためにフーリエ変換赤外分光法を駆使して研究を進めてきた。測定的方式としては透過型、反射型、偏光解析型を採用した。特にシリコン基板上のシリカ（ SiO_2 ）系絶縁膜についての偏光解析型の測定では、s偏光、p偏光に対する反射率の振幅比と位相差から赤外域の複素誘電関数を計算し、Si-O-Siの非対称伸縮振動縦光学（ L_0 ）および横光学（ T_0 ）フォノン周波数の比（ L_0^2 / T_0^2 ）が薄膜のヤング率に相関することを明らかにした。また空孔を有するポーラスシリカ膜についての同様の実験では、得られた複素誘電関数をBruggemann有効媒質近似の逆計算により骨格シリカの複素誘電関数に変換した後、上述の実験で得た（ L_0^2 / T_0^2 ）と薄膜ヤング率の相関関係を用いてシリカ骨格のヤング率を求め、ポーラスシリカ低誘電率薄膜の機械強度に及ぼす骨格と空孔の影響を定量的に分離して解析することに成功した。

次世代ULSI用ポーラス低誘電率層間絶縁膜の加工（プラズマ処理、液相処理）プロセスの際に、プラズマ中のイオン・中性活性種や処理液中の化学活性種が空孔内に拡散侵入する速度は空孔の大きさ、形状、配列に依存する。これを調べるため、テンプレートを用いた水熱合成によりナノメートル以下のサイズの空孔を持ったゼオライトナノ結晶粒を作成し、スピン塗布、焼成、疎水化処理により得た低誘電率薄膜の空孔構造、電気絶縁特性、誘電率、機械強度を明らかにした。

上記のこれまでの進捗結果を生かして、ポーラス低誘電率膜の骨格化学結合状態と空孔構造を系統的に制御した一連の試料を作成し、低誘電率膜骨格の化学的安定性と活性種の空孔内への拡散の体系的な評価を今後進めていく。

低誘電率層間絶縁材料に関する研究

数百ナノメートル以下の厚さとナノメートルサイズの空孔を持つ新しい材料としての極限低誘電率薄膜では、その低い機械強度特性（ヤング率）を非破壊で正確に評価することが困難である。この課題を克服するための新しい評価技術として、シリコン基板上の薄膜表面にレーザー光パルス直線状に集光照射して発生させる広帯域の超音波パルスの中から、表面近傍に局在して伝播するモードに着目、その位相速度の周波数分散を測定する手法の開発を進めた。超音波波形の計測には、ナイフエッジの先端に圧電フィルムを装着した圧電トランスデューサを用いて試料の微小変位を

電気信号に変換する方式を採用し、得られた波形を高速フーリエ変換することにより周波数スペクトルを得た。一方、連続体の運動方程式を用いて、シリコン基板の弾性率テンソル、密度についての既知の値に対して、低誘電率薄膜の弾性率、密度、膜厚を変化させるときに、表面弾性波伝播位相速度周波数分散スペクトルがどのように変化するかを計算により明らかにし、実験データと計算結果の最小二乗法フィッティングにより薄膜の物性値を明らかにする手法を確立し、低誘電率膜ならびに絶縁膜、金属薄膜など配線技術に関係する各種薄膜について実験、解析を進めてきた。

また、シリコン基板上的低誘電率層間絶縁膜中に存在する欠陥電子状態密度分布の評価法として、等温過渡容量 (ICTS) 法および電荷深準位過渡分光 (QDLTS) 法の適用を新たに試みた。低誘電率薄膜上の電極には銅またはアルミニウムを採用してシリコン基板との間に金属 - 絶縁膜 - 半導体 (MIS) 構造を作成し、キャリアの励起源には紫外光ランプと電圧パルスを用いて、温度を変えて測定を行った。電子的欠陥準位に捕獲されたキャリアの熱放出過程に起因する過渡応答波形の解析から、伝導帯または荷電子帯からの欠陥状態電子準位の深さと状態密度分布を求めた。

今後はこれらの新評価技術の測定の自動化を一層進めるとともに、それらを用いた系統的な実験により低誘電率層間絶縁膜材料の機械特性、電気特性評価を体系的に進める。

ナノ物性計測に関する研究

ポーラス低誘電率膜中のナノメートルスケールの空孔構造はこの材料の電氣的、化学的、機械的物性を大きく支配する。薄膜評価法として広く用いられている可視・紫外域の分光エリプソメトリ法を用いてこの材料を評価する場合、空孔構造の存在は膜屈折率というマクロな物性値の変化としては観測されても、空孔のサイズ分布、形状、配列についての情報を容易に引き出すことはできない。これは測定のプロープに用いる可視・紫外域の光の波長数百ナノメートルが空孔構造のスケールである数ナノメートルあるいはそれ以下に比べて2 - 3桁大きいことが原因である。この原因を回避して空孔構造の解析を行うため次の3つの方法を採用した。(1)波長が空孔構造のサイズより小さな電磁波であるエックス線をプロープに用いるエックス線小角散乱法、(2)空孔サイズ程度かそれ以下の大きさの分子をプロープに用いたガス吸着法、(3)分子の吸着現象を可視・紫外域の膜屈折率変化として検出する吸着分光エリプソメトリその場測定法である。分光エリプソメトリその場測定用の吸着セル、蒸気供給系、真空排気系で構成する装置を試作し、既存の分光エリプソメトリ装置に組み込むことにより、空孔が2次元ヘキサゴナル構造に配列する周期構造ポーラスシリカ膜、大きさの揃った空孔が等方的に配列するディスオーダーポーラスシリカ膜、シリカゼオライト低誘電率膜や有機系の低誘電率膜の空孔径分布の評価を進めてきた。今後は測定の自動化を一層進めることにより、ナノ空孔構造の材料作成条件依存性、加工プロセスによる変化についての研究を進め、物性値、材料特性との関係を明らかにする。

5 - 2 . 研究成果の現状と今後の見込み

次世代半導体技術に関する研究

ポーラス低誘電率層間絶縁膜のフーリエ変換赤外分光偏光解析による複素誘電関数の評価とBruggemann有効媒質近似逆計算による骨格結合振動モード解析、特にシリカ系低誘電率膜のSi-O-Siの非対称伸縮振動縦光学 (LO) および横光学 (TO) フォノン周波数の比 ($\omega_{LO}^2 / \omega_{TO}^2$) とヤング率の相関関係についての一連の成果をこれまでに示してきた。また、ゼオライトナノ結晶粒を用いた低誘電率の作成と構造と物性についての評価結果を併せて示してきた。今後は、骨格結合状態と空孔構造を系統的に制御した一連の試料の作成を進め、ポーラス低誘電率膜の物性、プロセス耐性に対する骨格構造と空孔構造の寄与を体系的に明らかにする。

低誘電率層間絶縁材料に関する研究

パルスレーザー励起表面弾性波伝播位相速度周波数分散法を用いた低誘電率層間絶縁膜のヤング率評価についてツイントランスデューサを用いた実験解析システムを構築し、実験の結果を示し

た。絶縁膜、金属薄膜など低誘電率層間絶縁膜以外の配線技術関連薄膜へのこの技術の適用可能性についても示してきた。また分子軌道法を用いた機械強度の計算結果を明らかにした。等温過渡容量分光法を用いた欠陥電子状態密度分布評価について、バイアス温度ストレス印加により低誘電率膜中に拡散する銅イオンに関係する欠陥準位密度の存在を示した。今後は測定・解析の自動化を進めた測定システムを用いた体系的な研究成果を示していく。

ナノ物性計測に関する研究

ポーラス低誘電率膜の空孔構造評価について空孔形成鋳型分子のアルキル鎖長制御による空孔径制御をエックス線小角散乱法と吸着分光エリプソメトリその場測定法により実証し、空孔径分布評価に対しての吸着質と吸着量検出方式の影響をガス吸着法と吸着分光エリプソメトリその場測定法の実験解析結果の比較から明らかにした。周期構造ポーラスシリカ膜の空孔の形状、サイズ分布と配列構造について、面内・面外の小角エックス線散乱とエックス線回折測定により明らかにした。今後は空孔形成鋳型分子添加量をはじめとする各種材料作成条件、プラズマプロセス、液相プロセスが空孔径分布に与える影響を系統的に示す。

5 - 3 . 支援業務の状況と今後の見込み

ポーラス低誘電率層間絶縁材料およびそのインテグレーション構造における化学状態、電気特性分析に関する業務

本支援業務では次世代半導体技術の研究に必要なフーリエ変換赤外分光装置ならびにフーリエ変換赤外分光偏光解析装置の保守・調整・測定・解析全般を進めてきた。赤外光源、光路、干渉計、試料ホルダー、検出系、制御系の調整、実験目的に適合した測定モード、測定分解能、信号積算時間の選択と測定試料の調整といった基本操作の他、測定で得られた偏光信号からの複素誘電関数の導出とT0およびL0フォノンモード振動数の決定までを含む。ポーラス低誘電率層間絶縁膜材料の化学結合状態分析を中心に進めた。低誘電率ポーラスシリカ膜のプロセスインテグレーションで大きな課題となっている脆弱な機械強度問題の解決には空孔壁シリカの構造物性制御が重要であるとの認識の下にシリカの構造解析を進めた。空孔を導入しないで作成した種々のシリカ膜の化学結合状態をFTIR-高感度反射法を用いて比較した結果、シリカの構造に起因するSi-O-Si非対称伸縮振動縦光学モードのピーク位置が大きく異なることが明らかとなった。表面弾性波解析やナノインデントを用いて測定したヤング率とSi-O-Si非対称伸縮振動縦光学モードの関係を解析し、空孔壁シリカのヤング率と振動スペクトルに現れる化学結合状態の関係を解明した。次に、FTIR-エリプソメトリ（楕円偏光解析）法を用いて赤外域における複素誘電関数を決定し、ポーラスシリカ膜の空孔壁シリカの結合状態評価の高度化を行なった。これらにより、ポーラスシリカ膜の空孔壁シリカのヤング率を見積もる新たな手法を提案することができた。またポーラスシリカ膜中の官能基の化学結合状態を高感度に計測する技術の高度化を行いポーラスシリカ膜の空孔壁表面の修飾技術の確立、メカニズムの解明に寄与した。

低誘電率層間絶縁膜材料の構造・物性評価業務

本支援業務では、レーザー誘起表面弾性波伝播位相速度周波数分散測定のための装置開発とその理論解析・数値計算業務を中心に進めた。パルスレーザー光照射により基板上的薄膜に表面弾性波を発生し、振動振幅を電気信号に変換して高速記録し、フーリエ変換波形の解析から位相速度の周波数分散を求めるこの実験には、試料、レーザー光、検出器の精密な調整、微弱電気信号の検出技術が求められる。また、理論解析には、層構造試料中での表面弾性波の伝播を基板結晶方位に依存する弾性率テンソルを考慮した計算が必要とされた。また、エックス線反射率ならびに分光エリプソメトリ測定で得た膜密度と膜厚を理論解析の入力パラメータとして用いることにより、実験データとの比較から非破壊高精度な薄膜ヤング率の決定が可能となった。表面弾性波を用いることにより低

誘電率層間絶縁膜のヤング率を決定する際には、実測した表面弾性波の位相速度の周波数依存性と理論値のフィッティングを行う。このフィッティングをより精度良く行うための改善を目的として解析アルゴリズム、解析プログラムの改良を行った。これらの改良により正確なヤング率の値を精密かつ迅速に得ることを可能とした。また、表面弾性波測定装置の測定精度・操作性・機能性向上を目的として、電磁シールドならびにレーザー光をサンプルに効率良く照射させるための装置の改良を行った。その結果、光軸の設定時間の短縮と、測定時のノイズの低減に成功した。また、検出部の改良を行い測定のスループットを向上した。本手法を用いて、塗布系ならびにプラズマ重合系の低誘電率層間絶縁膜材料のヤング率の非破壊測定を行い、その作成条件依存性を明らかにした。

ナノメートルスケールの空孔構造評価・ナノ物性計測に関する業務

本研究支援業務ではガス吸着法による空孔径分布の解析、分光エリプソメトリによる屈折率分布解析、エックス線散乱による空孔構造解析を行い、次世代の低誘電率層間絶縁膜材料としての多孔性薄膜の空孔構造ならびに深さ方向分布についての重点研究課題：低誘電率層間絶縁膜材料に関する研究の推進に寄与してきた。窒素吸着により周期構造ポーラスシリカ膜の細孔構造評価を行い、エックス線回折および透過電子顕微鏡より得られた細孔構造を考慮した細孔径分布、および空孔率、比表面積を得た。またこれにより、吸着法をポーラス低誘電率薄膜細孔構造評価に適用する際の問題点などを抽出しそれらを考慮した詳細な細孔構造評価の研究の推進に寄与した。さらに、新規な吸着測定法の開発として、簡便かつ非破壊測定が可能な吸着エリプソメトリ法の検討業務について、試作装置による有機分子を用いた吸着測定から得た吸着等温線の解析を進めた。また、多層構造モデル適用の分光エリプソメトリ解析により、ポーラス低誘電率層間絶縁膜の深さ方向分布解析を行う業務に従事し、空孔率の深さ方向分布解析ならびに洗浄薬液の膜構造への影響解析の研究に大きく寄与した。吸着エリプソメトリ装置を操作して、多孔性の低誘電率層間絶縁膜中のナノメートルスケールの空孔構造を明らかにすることに特に注力した。具体的には、装置への薄膜試料セッティング、測定前処理、吸着分光エリプソメトリ測定、エリプソメトリスペクトル解析、吸着等温線計算、毛細管凝縮現象とマイクロ孔フィリングモデルによる吸着等温線解析による空孔径分布解析、 α プロット、Brunauer-Emmett-Teller プロットの解析を進め、一連のポーラスシリカ低誘電率層間絶縁膜のナノ空孔径分布を解析し作成条件によるナノ空孔構造の制御性を実証した。また、その結果のエックス線回折・散乱解析の解析結果との関係を明らかにした。また、吸着分光エリプソメトリのスペクトル解析で得られる膜厚の吸着質蒸気圧依存性を、毛細管凝縮現象でできる吸着質メニスカスの表面張力と薄膜の弾性変形のつりあいとして解析することにより、膜の機械強度(ヤング率)の測定にも寄与した。さらに、吸着量に伴う屈折率と膜厚の変化の挙動から、実用上大きな問題となる巨大な空孔(キラーポア)の存在の有無とその作成条件依存性についての情報を得ることができた。これらの成果を生かして、より広い範囲で空孔径を制御した薄膜や非周期的な空孔構造を有する薄膜のナノ空孔構造解析の研究を今後進める。

(1) 業務内容(研究員との役割分担を含む)

本課題で重要な位置づけにある新しい評価技術の開発とそれを用いたポーラス低誘電率層間絶縁膜材料の評価では、完全自動化された測定装置を用いた実験の場合とは大きく異なり、装置の設計、予備実験、試作、測定条件出し、解析法の検討から、系統的な測定評価に至るまで、科学的なバックグラウンドと実験技術を駆使した知識と創造、業務の膨大な集積が求められるが、研究課題ごとに、その2 - 4割を研究員が分担し、支援協力員が6 - 8割を分担する形で遂行してきた。

(2) 支援技術の高度化の状況(支援協力員に係る特許、実用新案等の出願)

新しい評価技術の開発ならびに分子軌道法による機械強度計算結果については支援協力員に係る特許出願が既に公開され、それとは別に出願済がある。本課題における支援業務の性格上今後も必然的に生まれてくる新規発明に関して、継続的に遅滞なく出願手続きを進める。

(3) 研究課題への寄与

新評価技術の開発や材料評価関係の研究課題の中で不可欠な役割を果たしている。具体的には、それぞれの課題の中での役割に応じて筆頭発表者または連名発表者として、国内会議、国際会議、論文発表に参加していただけるだけの大きな寄与が認められている。支援協力員の1名は本課題に関する学会発表で講演奨励賞を受賞した。

5 - 4 . 発表論文、特許出願、外部表彰等

発表論文

1. 秦 信宏、根来 千絵、山田 和弘、吉川 公麿 , Control of Pore Structures in Periodic Porous Silica Low-k Films , JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS , 43-4A , pp.1323-1326 (2004)
2. Xiao Xia、秦 信宏、山田和弘、吉川 公麿 , Mechanical properties for periodic porous silica low-k films by the twin-transducer surface acoustic wave technique , REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS , 74-10 , pp.4539-4541 (2003)
3. 上等和良、川原 潤、三好 秀典、秦 信宏、吉川 公麿 , Molecular Orbital Calculation of the Elastic Modulus and the Dielectric Constant for Ultra Low-k Organic Polymers , JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS , 43-2 , pp.504-507 (2004)
4. Xiao Xia、秦 信宏、山田 和弘、吉川 公麿 , Mechanical Property Determination of Thin Porous Low-k Films by Twin-Transducer Laser Generated Surface Acoustic Waves , JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS , 43-2 , pp.508-513 (2004)
5. 根来千絵、秦 信宏、山田和弘、吉川 公麿 , Nondestructive Characterization of a Series of Periodic Porous Silica Films by in-situ Spectroscopic Ellipsometry in a Vapor Cell , JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS , 43-4A , pp.1327-1329 (2004)
6. 高田省三、秦信宏、清野豊、山田和弘、奥良彰、吉川公麿、 Mechanical Property and Network structure of Porous Silica Films, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 43-5A, pp.2453-2456 (2004)
7. 三好秀典、松尾尚典、奥良彰、田中博文、山田和弘、三上登、高田省三、秦信宏、吉川公麿、 JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 43-2, pp.498-503 (2004).
8. 山田 和弘、奥 良彰、秦 信宏、高田 省三、吉川 公麿 , Effect of Surfactants on the Properties of Ordered Periodic Porous Silica Films , JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS , 42-4B , pp.1840-1842 (2003)
9. 山田和弘、奥良彰、秦信宏、清野豊、根来千絵、吉川公麿、 JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 151-10, pp.F248-251 (2004).
10. 吉野雄信、秦信宏、吉川公麿、 JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 43-12, pp.8026-8027 (2004).

特許出願、外部表彰等

- 1 . 川原潤、上等和良、三好秀典、秦信宏、有機系層間絶縁膜材料、特開2004-128277、平成14年10月3日出願
- 2 . シャー・シャオ、秦信宏、表面波評価装置、特開2004-286594、平成15年3月20日出願
- 3 . 官国清、秦信宏、吉野雄信、高田省三、特願2004-252498、平成16年8月出願。
- 4 . 2004年春季**応用物理学会講演奨励賞**、受賞者： 高田省三 「メソポーラスシリカLow-k膜におけるシリカ骨格のヤング率」 共著者： 秦信宏、清野豊、三好秀典、藤井宣年、吉川公麿

6 . 総合的評価

本研究の開始当初に重要な課題として挙げたナノメートルスケールの空孔構造を有する低誘電率層間絶縁膜材料の電氣的、化学的、機械的な安定性について、化学結合状態、機械強度、欠陥電子状態密度、空孔構造の観点から新規に開発してきた技術を含む各種ナノ構造物性評価技術を駆使して研究を進めてきた。この材料についてのモデル計算の結果と併せて、空孔構造と骨格化学結合状態に分けての定量的議論ができるようになってきたことについては、既に具体的な成果として示

してきた。一方、本研究の到達目標である次世代半導体のための低誘電率層間絶縁膜材料の技術課題を科学的アプローチにより解決する技術体系の構築に向けてナノ物性計測技術を利用して化学結合構造とナノポラス構造のマクロ物性への寄与を解明するという立場から、これまでに開発した構造物性評価技術の自動化を含め、今後予定されている体系的なデータの取得と解析による研究の推進が必要とされている。