



先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業 フォトンファクトリーの産業利用促進 利用報告書

課題番号： 2014I007
研究責任者： 山口 徹、日本電信電話株式会社
利用施設： 高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 BL-6A
利用期間： 2014年10月～2015年6月

X線小角散乱法によるブロック共重合体の構造解析 Structural analysis of block copolymers by small-angle X-ray scattering method

山口 徹
Toru Yamaguchi

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所
NTT Corporation, NTT Basic Research Laboratories

アブストラクト：

Sub-10-nm リソグラフィ技術として期待されている誘導自己組織化技術に用いられるブロック共重合体構造解析を小角 X 線散乱(SAXS)法及び斜入射小角 X 線散乱(GISAXS)法により調べ、解像性の限界を明らかにした。その結果、ポリスチレンとポリジメチルシロキサン（PS-*b*-PDMS）のキャスト膜にて、7-nm ハーフピッチ（hp）のシリンダ構造を形成できることを SAXS 解析により明らかにした。また、PS-*b*-PDMS の単層膜にて形成されるシリンダ構造の周期を GISAXS 解析により決定できることを明らかにした。本結果は、SEM や AFM などの局所的な構造解析手法と組み合わせることにより、SAXS/GISAXS 解析が非常に強力な手法となることを示している。

Structural analysis of block copolymers that are used in directed self-assembly technique, which is a promising for sub-10-nm lithography, was performed using both small-angle X-ray scattering method and grazing incidence small-angle X-ray scattering methods and the limit of resolution was revealed. As a result, it was clarified that the cylindrical domains with 7-nm hp can be formed in a block copolymer film of polystyrene and polydimethylsiloxane (PS-*b*-PDMS) using SAXS analysis and also that the period of the cylindrical domains formed in a single layer film can be determined using GISAXS analysis. These results indicate that the SAXS/GISAXS analysis would be a powerful technique in combination with local structural analysis method such as scanning electron microscope or atomic force microscope.

キーワード： リソグラフィ、ブロック共重合体、マイクロ相分離、誘導自己組織化

1. はじめに：

半導体微細加工技術の進展により、現在 19nm ハーフピッチ（hp）の NAND 型フラッシュメモリを量産することが可能になってきている。この微細化技術の劇的な進展は高解像リソグラフィ技術に支えられてきた。しかしながら、これまで微細化技術を牽引してきた光リソグラフィ技術は、量産レベルで 38nm hp でその解像限界を迎えた。それ以降の微細化では、二回露光によるピッチ分割法やスペーサー技術によるダブルパターンニング法が用いられている。しかしながら、sub-10nm の解像性を実現するためには、光リソグラフィに代わる革新的なリソグラフィ技術の開発が期待され、EUV（極端紫外線リソグラフィ）、ナノインプリント法、あるいはマスクレス電子線露光法といった様々な露光法が提案され、研究開発が進んでいる。中でも、ブロック共重合

体のマイクロ相分離構造を用いたブロック共重合体リソグラフィ¹⁾は注目を浴びており、近年急速に研究開発が進んでいる。

ブロック共重合体リソグラフィ（BCL）技術は、ブロック共重合体薄膜中で形成した単層のマイクロ相分離ドメインをパターンニングのテンプレートとして用いることを特徴としたボトムアップ技術であり、分子レベルの解像性をもつ超高解像リソグラフィ技術として期待されている。さらに、光リソグラフィに代表されるトップダウン技術と組み合わせることにより、マイクロ相分離ドメインの精密な配列配向制御が可能となる。さらに片方のドメインを選択的に除去することにより、デバイス回路パターンの基本パターンであるコンタクトホール（C/H）やライン&スペース（L&S）パターンを形成できる。例えば、球状相や垂直配向シリンダ相は C/H パターン形成に、

面内配向シリンダ相や垂直ラメラ相はL&Sパターン形成に、それぞれ用いることができる。本融合技術は、Directed Self-Assembly(DSA, 誘導自己組織化)と呼ばれており、グラフォエピタキシ法^[2]や化学エピタキシ法^[3]等、種々の手法が提案されている。

ブロック共重合体を用いたDSA技術へ求められる性能は、先端レジスト材料への要求性能と基本的に同じであり、解像性・ラインエッジ(幅)ラフネス(LER/LWR)・欠陥等の因子について、可能な限り低減することが求められる。弊社では、グラフォエピタキシ技術を用いたDSA技術によりパターンを形成しているが、パターンの評価方法は原子間力顕微鏡(AFM)や走査電子顕微鏡(SEM)のみであり、ミクロン領域での局所的な構造評価に限定されていた。しかも、ナノ構造の観察は非常に困難であり、片方のドメインの選択除去・基板への転写等の破壊処理をしてコントラストを増大させて観察する必要があり、ミクロ相分離構造そのものを直接非破壊で観察・評価することは困難である。さらに、ミクロ相分離構造のサイズがsub-10nm領域になると、観察することさえ困難になることが容易に予想される。このような状況の中、sub-10 nm hpのパターン形成のためのブロック共重合体材料探索・配向ガイドパターンのレイアウト設計を、既存の評価手法のみで行うのは評価のスループットが悪く、研究開発のスピードが鈍化する恐れがあり、既存の評価手法とは全く異なり、かつ相補的なナノ構造評価手法の確立が急務となっている。そこで本研究では、ブロック共重合体のミクロ相分離構造の周期・配向特性等の巨視的(ウェハスケール)評価手法として、X線回折法を取り上げ、その性能評価を行うことを主目的とする。

BCL技術では、ミクロ相分離構造のサイズ及び周期がそのままパターンサイズ及び周期となるため、ミクロ相分離構造のサイズ及び周期の正確な値を把握することが配向ガイドパターンの設計上非常に重要となる。また、ミクロ相分離構造の誘起には臨界分子量が存在し、それ以下の分子量を持つブロック共重合体ではミクロ相分離が起きないため、臨界分子量を把握することは、ブロック共重合体の材料開発において解像性の観点から非常に重要となる。そこで本研究では、DSA技術を用いない平坦面上で形成されるミクロ相分離構造のサイズ及び構造周期の測定を主目標とする。さらに、構造周期だけでなく、界面ラフネスの評価も今後ますます重要性が増してくることが予想されることから、界面ラフネスの抽出に関する予備的評価

を行うことを第2の目標とする。

2. 実験：

ブロック共重合体のミクロ相分離構造について、(1)バルク試料、及び(2)薄膜試料でのサイズ及び構造周期をX線小角散乱(SAXS)法、及び斜入射X線小角散乱(GISAXS)法により行い、SAXS/GISAXS法による構造周期測定の性能評価を2回のビームタイムを用いて行った。1回目のビームタイムでは、作製したサンプルの適合性の確認、及び測定法の習得に重点を置きつつ測定を行い、2回目のビームタイムでは、1回目の結果を基に、試料水準及び測定条件の水準を改めて設定し、本測定を行った。

2-1. ブロック共重合体材料

ブロック共重合体材料としては、①ポリスチレン(PS)とポリメチルメタクリレート(PMMA)のブロック共重合体(PS-*b*-PMMA)、②ポリスチレン(PS)とポリジメチルシロキサン(PDMS)のブロック共重合体(PS-*b*-PDMS)を用いた。前者は既存の半導体プロセスとの整合性が高く、BCL技術の標準材料(第1世代)として知られており、後者はドメイン間の反発力が大きく、いわゆる高 α パラメータブロック共重合体材料として知られ、sub-10nm hpパターン材料(第2世代)として有望視されている。各種ブロック共重合体は、米国Polymer Source社から購入したものを精製等行わずにそのまま用いた。用いたブロック共重合体の水準を表1に示す。PS-*b*-PMMAでは、ラメラ相を形成すると予想される組成比について5分子量水準、PS-*b*-PDMSでは、球状相及びシリンダ相を形成すると予想される組成比について

表1. 各種ブロック共重合体の分子量

サンプル名	分子量 (M_n)
PS- <i>b</i> -PMMA (ラメラ相)	
SMMA 50-48	50,000- <i>b</i> -48,000
SMMA 38-36.8	38,000- <i>b</i> -36,800
SMMA 18.5-18	18,500- <i>b</i> -18,000
SMMA 10-10	10,000- <i>b</i> -10,000
SMMA 5-5	5,000- <i>b</i> -5,000
PS- <i>b</i> -PDMS (球状相)	
SDMS 47.1-9	47,900- <i>b</i> -9,000
SDMS 22.5-4.5	22,500- <i>b</i> -4,500
SDMS 11.6-2.2	11,600- <i>b</i> -2,200
SDMS 5.6-2.2	5,600- <i>b</i> -2,200
PS- <i>b</i> -PDMS (シリンダ相)	
SDMS 31-14.5	31,000- <i>b</i> -14,500
SDMS 12-3	12,000- <i>b</i> -3,000
SDMS 10-3	10,000- <i>b</i> -3,000
SDMA 6.3-2.4	6,300- <i>b</i> -2,400
SDMS 5.2-2.1	5,200- <i>b</i> -2,100

それぞれ4分子量水準及び分子量水準のサンプルを用いた。

2-2. 試料作製

SAXS測定用の試料には、各種ブロック共重合体のキャスト膜を使用した。ブロック共重合体の8wt%のトルエン溶液をガラスシャーレに入れ、蓋をして数週間放置して、自然乾燥させ、厚さ数百ミクロンのキャスト膜を作製した。残念ながら、多くの低分子量ブロック共重合体では、自立したキャスト膜は形成できず、粉々になってしまった。そこで、ワッシャ(M4)の片面にカプトンフィルムを貼り付けたサンプルホルダーを作成し、ワッシャの穴部分にキャスト膜を入れ、真空オーブンにて175°C x 48時間の熱処理を行い、マイクロ相分離を誘起した。

GISAXS測定用の試料には、4インチシリコン基板上に形成したスピン塗布膜を使用した。PS-*b*-PMMAでは、ブロック共重合体の5%の*o*-ジクロロベンゼン溶液を用いて、ピラニア洗浄により表面を親水性化したシリコン基板上に、1000rpm x 60秒間の塗布条件にてスピン塗布膜を形成した。塗布直後の膜厚を光干渉式膜厚計により測定したところ、分子量の低い水準から、それぞれ180、210、230、280、310nmであった。その後、窒素雰囲気下にて235°C x 16時間の熱処理を行い、マイクロ相分離を誘起した。PS-*b*-PDMSでは、ブロック共重合体の1.5%の*o*-ジクロロベンゼン溶液を用いて、表面にPSをグラフト結合させたシリコン基板上に、約4000rpm x 30秒間の塗布条件にてスピン塗布膜を形成した後、ホットプレート上で加熱を行い、マイクロ相分離を誘起した。スピン塗布回転数は、熱処理後のスピン塗布膜を光学顕微鏡により観察することにより、できるだけ均一に単層膜が形成されるように設定した。熱処理温度は195°Cとし、熱処理時間は5秒間から10分間までの範囲とした。最後に、2cm x 2cmの大きさにサンプルを切り出し、GISAXS測定に用いた。

2-3. SAXS/GISAXS測定

SAXS/GISAXS 測定は、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーのBL6Aにて行った。用いたX線の波長は1.5Å、カメラ長は2.0mとし、検出器はPILATUS3 1M (Dectris)を使用した。測定時間は、SAXS 測定・GISAXS 測定とも60秒間とした。SAXS 測定では、得られた2次元回折像から、Igor用に開発されたNikaパッケージ^[4]を用いて、動径方向平均プロファイルを抽出し、解析に用いた。解析には、高エネ研より供与されたIgor用のパラクリスタル理論^[5]に基づいた解析パッケージを用いて、相の同定に用

いた。GISAXS 測定では、得られた2次元回折像から、上記のNikaパッケージを用いて、ラインカットプロファイルを抽出し、解析に用いた。

3. 結果および考察：

3-1. ラメラ相形成 PS-*b*-PMMA 試料

3-1-1. SAXS 測定結果

各種分子量のPS-*b*-PMMAのキャスト膜のSAXS結果を図1に示す。図1(a)-(d)に、低分子量から4水準のSAXSの2次元回折像を、図1(e)に2次元回折像の動径方向平均プロファイルを示す。回折像から明らかのように、最も低分子量のSMMA5-5ではマイクロ相分離が起きていないことがわかる[図1(a)]。SMMA10-10では、ブロードな一次ピークを持つ散乱のみ観察された。これはcorrelation holeと呼ばれる高分子鎖の回転半径程度の大きさのピークを持つのが特徴である。従ってマイクロ相分離が起きておらず、相溶していることがわかる。SMMA18.5-18より高分子量的水準では、1次回折ピークとともに高次の回折ピークが明瞭に観察され、マイクロ相分離が起きていることが確認できた。

図1(f)に、SMMA38-36.8の回折像の動径方向平均プロファイルに対し、パラクリスタル散乱理論に基づく理論散乱曲線を用いてフィッティングした結果を示す。格子散乱因子と粒子散乱因子の全散乱関数に対する寄与を合せて示す。

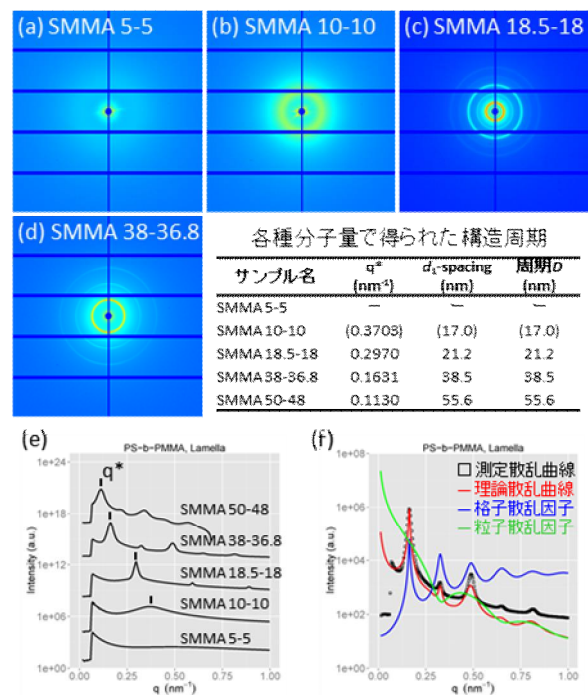


図1. ラメラ相形成 PS-*b*-PMMA 試料の SAXS 結果
各種分子量試料の(a-d)SAXSの2次元解説パターン及び(e)動径方向平均プロファイル.(f) SMMA38-36.8に対する理論散乱曲線のフィッティング結果。

マイクロ相分離構造を、ラメラ相、球状相(bcc)、シリンダ相と仮定して、それぞれの理論散乱関数を用いてフィッティングしたところ、ラメラ相を仮定した場合に、比較的良好一致した。しかしながら、今回作製した試料ではフィッティングの精度が悪いため、回折ピーク位置の確認によるマイクロ相分離構造の相同定及び構造周期の抽出にとどめ、マイクロ相分離構造のサイズ等のその他の情報の抽出は行わないこととした。

1 次回折ピーク位置 q^* より、面間隔 $d_1(d_1=2\pi/q^*)$ を求め、構造周期 D (ラメラ相の場合は、 $D=d_1$) を決定した(図 1 内の表)。平坦面上で形成した SMMA38-36.8 の垂直ラメラ相の直上走査電子顕微鏡観察結果では、約 40nm 周期の構造が観察されており、妥当の結果が得られていることを確認した。一方、SMMA18.5-18 の垂直ラメラ相では、約 32nm 周期の構造が観察されており、SAXS の結果とはかなり違った値となっていることが分かった。また、このような値のずれは、同一分子量の試料においても、キャスト膜の作製条件が異なると起こることがわかった。今後は、キャスト膜作製の際の熱処理条件を系統的に変えて試料を作製するなど、慎重に試料を作製することが必要である。

3-1-2. GISAXS 測定結果

GISAXS の試料として、PS と PMMA のドメイン界面が基板表面に対して、平行に配向しているパラレルラメラ構造を選択した。このようなパラレルラメラ構造は、基板表面の存在により、SAXS 測定で用いたバルク試料(キャスト膜)よりも、マイクロ相分離構造が形成されやすいので

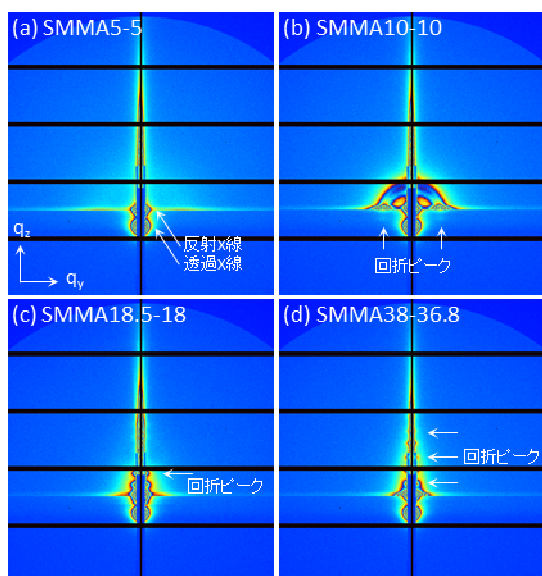


図 2. ラメラ相形成 PS-*b*-PMMA 試料の GISAXS 測定結果

各種分子量の GISAXS の 2 次元回折パターン(a-d)

はないかと予想されるからである。PS-*b*-PMMA では、PS 相の方がわずかに表面張力が低く、表面ウェット層を形成しやすいことが知られている。一方、基板表面が親水性の場合は PMMA 相が基板表面に濡れやすくなる。したがって、ラメラ相の周期を L とすると、マイクロ相分離により $(2n+1)L$ (n : 整数)の膜厚で膜厚が量子化される。図 2 に、各種分子量の GISAXS の 2 次元回折パターンを示す。SMMA5-5 では、中央部に入射 X 線と反射 X 線の強度ピークが観察されるだけで、SAXS 測定同様、回折パターンは観察されておらず、マイクロ相分離は起きていないことがわかる。SMMA10-10 では、SAXS の測定結果と同様に、楕円状の散漫散乱が観察され、膜全体としては相溶していると思われる。但し、水平(q_y)軸上に回折パターンが観察され、入射角が低いほど、この回折ピークが支配的となることから、極表面近傍では垂直ラメラ相が形成されていることが示唆される。PMMA18.5-18 及び SMMA38-36.8 では、垂直(q_z)軸上に回折パターンが観察され、パラレルラメラ構造が形成されていることが分かった。

3-2. 球状相形成 PS-*b*-PDMS 試料

3-2-1. SAXS 測定結果

各種分子量の PS-*b*-PDMS のキャスト膜の SAXS

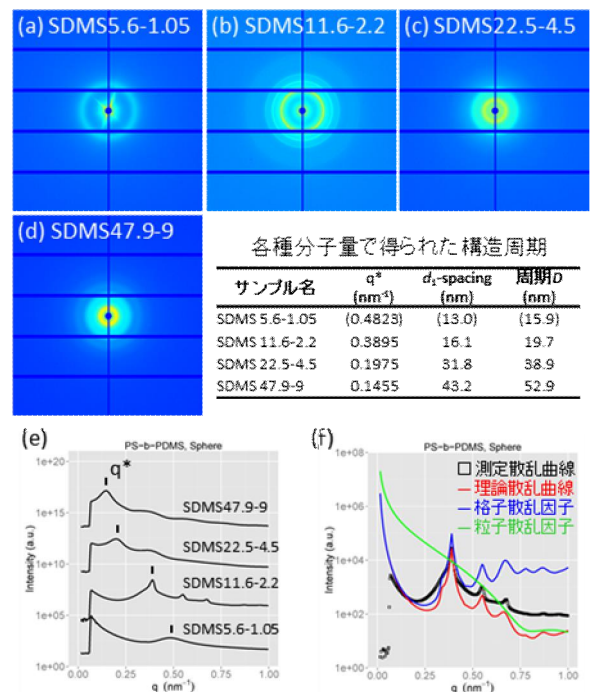


図 3. 球状相形成 PS-*b*-PDMS 試料の SAXS 測定結果

各種分子量試料の(a-d)SAXS の 2 次元回折パターン、及び (e) 動径方向平均プロファイル. (f) SDMS11.6-2.2 に対する理論散乱曲線のフィッティング結果.

結果を図3に示す。図3(a)-(d)に、低分子量から4水準のSAXS2次元回折像を、図3(e)に2次元回折像の動径方向平均プロファイルを示す。最も低分子量のSDMS5.6-1.05では、非常にブロードな1次回折ピーク q^* が観察されたが、高次の回折ピークが観察されないことから、相溶した状態である[図3(a,e)]。SMMA11.6-2.2より高分子量の水準では、1次回折ピークとともに高次の回折ピークが明瞭に観察され、マイクロ相分離が起きていることが確認できた。

図3(f)に、SDMS11.6-2.2の回折像の動径方向平均プロファイルに対し、パラクリスタル散乱理論に基づく理論散乱曲線を用いてフィッティングした結果を示す。球状相(bcc)を仮定した場合に、比較的よく回折ピーク位置が合うことを確認した。1次回折ピーク位置 q^* より、球間の構造周期 D (球状相の場合は、 $D=(\sqrt{3}/\sqrt{2})d_1$)を決定した(図3内の表)。SDMS11.6-2.2よりも低分子量であれば、sub-10nm hpの解像性を実現できることが分かった。

3-3. シリンダ相形成 PS-*b*-PDMS 試料

3-3-1. SAXS 測定結果

各種分子量のPS-*b*-PDMSのキャスト膜のSAXS結果を図4に示す。図4(a)-(d)に、低分子量から4水準のSAXS2次元回折像を、図4(e)に2次元

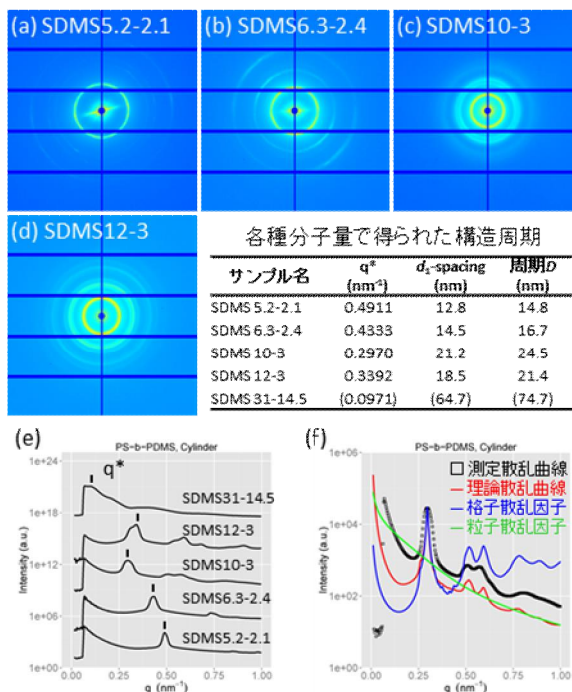


図4. シリンダ相形成 PS-*b*-PDMS 試料の SAXS 測定結果

各種分子量試料の(a-d)SAXSの2次元回折パターン、及び(e)動径方向平均プロファイル。SDMS10-3に対する理論散乱曲線のフィッティング結果。

回折像の動径方向平均プロファイルを示す。最も低分子量のSDMS5.6-2.1においても、明瞭な1次回折ピーク q^* 、及び高次の回折ピークが観察されており、マイクロ相分離が起きていることがわかる。1次回折ピーク q^* より、シリンダ間の構造周期 D (シリンダ相の場合は、 $D=(\sqrt{4}/\sqrt{3})d_1$)を決定した(図4内の表)。SDMS5.6-2.1では、構造周期が14.8nmと、今回検討した試料の中で最も構造周期の小さい値が得られた。SDMS6.3-2.4よりも低分子量であれば、確実にsub-10nm hpの解像性を実現できることが分かった。

3-3-2. GISAXS 測定結果

GISAXS測定試料として、SDMS12-3の面内シリンダ相単層膜を用いた。図5(a)に、形成した面内シリンダ相単層膜の断面模式図を示す。表面張力の低いPDMSブロック鎖(赤)が表面に露出し、表面ウェット相を形成するとともに、膜内において面内配向シリンダ相を形成する。195°C2分間の熱処理を行い形成したSDMS12-3

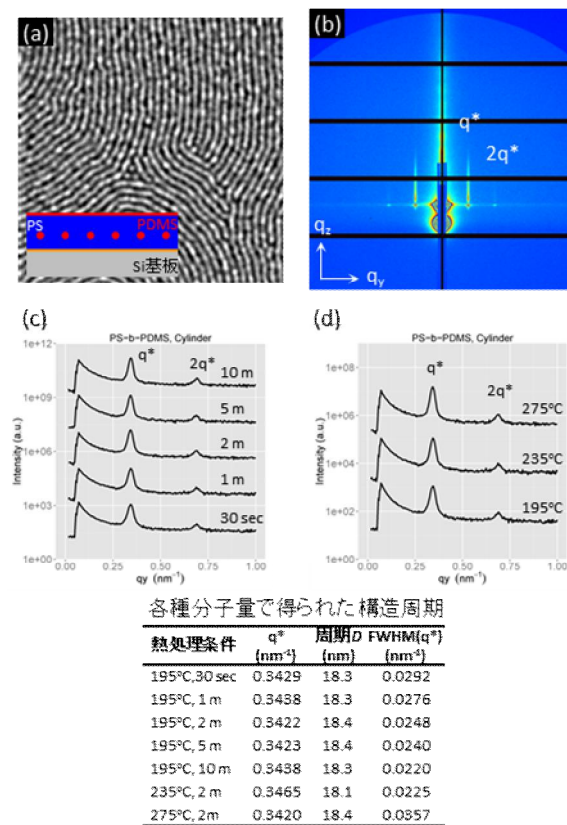


図5. シリンダ相形成 PS-*b*-PDMS 試料(SDMS12-3)の GISAXS 測定結果

(a)面内配向シリンダ相の直上SEM観察像(500nm角領域)。 (b)GISAXSの2次元回折パターン(195°C2m処理)。GISAXSの q_y 方向のラインカットプロファイル:(c)熱処理時間依存性(195°C処理)、(d)熱処理温度依存性(2m処理)。

の面内配向シリンダ相単層膜の直上 SEM 観察像を図 5(a)に合わせて示す。表面の PDMS 相及び PS 相をドライエッチングにより除去して膜内に埋め込まれた PDMS シリンダ相を表面に露出させた試料を観察している。確かに、面内配向シリンダ相が形成されていることがわかる。本試料の GISAXS の 2 次回折パターンを図 4(b)に示す。水平(q_y)方向に、1 次回折ピーク q^* 及び 2 次回折ピーク $2q^*$ が明瞭に観察され、シリンダ相の 1 次元格子(単層膜)が形成されていることが確認できた。

熱処理温度 195°C での熱処理時間依存性の結果を図 5(c)に示す。図 5(b)の回折ピーク付近のラインカットプロファイルを示してある。1 次回折ピーク位置 q^* より、構造周期 $D(D=d_1)$ を決定したところ(図 5 内の表)、熱処理時間によらず約 18.3nm であることが分かった。SAXS 測定で求められた d_1 -spacing の値 18.5nm とよく一致しており、キャスト膜が比較的うまく作製されていると思われる。単層膜では、ヘキサゴナル格子ではなく、1 次元格子が形成されるため、バルクの構造周期 21.4nm とはならない。同一サンプルの SEM の結果からは、熱処理時間が増加するとともに、シリンダ相の配向秩序相関長が増大していくことがわかっている。相関長が大きくなるにつれ、散乱ピーク幅が狭くなるはずである。そこで、散乱ピーク q^* 付近のプロファイルをガウス分布でフィッティングして、半値幅(FWHM)を求めた。結果を表に示してある。FWHM の数値自体は、熱処理時間とともに、単調減少しており、SEM の結果と定性的に一致していることがわかる。さらに、熱処理温度依存性の結果を図 5(d)に示す。FWHM の値から判断すると、235°C2m 処理では、195°C2m 処理よりも配向秩序相関長が増大しているが、195°C10m 処理には及ばず、温度をさらに上げて 275°C2m 処理では、むしろ配向秩序相関長が減少していると予想されることがわかった。

4. まとめ：

本課題では、sub-10-nm リソグラフィの実現に向けて近年研究が活発化している DSA 技術に用いられるブロック共重合体材料について、それらのマイクロ相分離構造のサイズ及び構造周期の測定を主目的として、SAXS/GISAXS 測定を実施した。

バルク試料の SAXS 測定においては、ラメラ相形成 PS-*b*-PMMA、球状相形成 PS-*b*-PDMS、シリンダ相形成 PS-*b*-PDMS の 3 種類のブロック共重合体について、マイクロ相分離構造及び構造周期を決定した。しかしながら、サンプルの作製条件に結果が大きく依存することがわかり、

今後は、試料作製を慎重に行うとともに、作製条件の水準を増やして、信頼性の高い測定を行うことが必要である。薄膜試料の GISAXS 測定においては、面内方向の構造周期を決定した。得られた周期は、2 cm x 0.5 mm の大面積での平均値であり、非常に信頼性の高い測定であることが分かった。本課題の主目的である構造周期の決定に関しては、充分目的を達成できたと考えている。一方、マイクロ相分離構造のサイズ評価や界面ラフネスの定量評価については、実施は困難と判断した。

GISAXS 法は、膜内での配向方向に関する情報も得られることから、SEM などの局所構造解析法と組み合わせることにより、非常に強力な測定方法であることが分かった。他の分析手法にて構造が充分明らかになった試料に対して、GISAXS 法を適用することが最も効果的な利用法だと思われる。

謝辞

本課題にあたり、ご尽力いただきました高エネルギー加速器研究機構(PF)の古室昌徳博士、伴弘司博士、清水伸隆准教授、高木秀彰博士をはじめ、PF のスタッフの皆様のご支援のもと実施されました。ここに深く謝意を表します。

また本課題遂行にあたり、PF の高木博士には BL-6A の使用法から測定方法、データの解析方法に至るまで詳細にご指導・ご助言いただきました。ここに感謝申し上げます。

なお、本研究は、文部科学省の先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業の補助をいただき、実施いたしました。

参考文献

- [1] Park, M.; Harrison, C.; Chaikin, P. M.; Register, R. A.; Adamson, D. H. *Science* **276** (1997) 1401-1404.
- [2] Segalman, R. A.; Yokoyama, H.; Kramer, E. J. *Advanced Materials* **13** (2001) 1152-1155.
- [3] Kim, S. O.; Solak, H. H.; Stoykovich, M. P.; Ferrier, N. J.; de Pablo, J. J.; Nealey, P. F. *Nature* **424** (2003) 411-414.
- [4] J. Ilavsky, *J. Appl. Cryst.* **45** (2012) 324-328.
- [5] R. Hoseman and S. N. Bagchi, *Direct Analysis of Diffraction by Matter*, North-Holland Publishing Co., Amsterdam (1962).

成果発表状況：

- (1) T. Yamaguchi and A. Fujiwara, *Ordering Analysis of In-Plane Cylindrical Domains of Polystyrene-*b*-Polydimethylsiloxane Formed by Thermal Annealing*, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC), 2015.