

解説記事

コーポリ・ガット (実際にはどのような仕組みで機能しているのか)

ジョシュア・スペックマン* (抄訳:川副嘉彦**)

*フリーランス ジャーナリスト

**埼玉工業大学工学部機械工学科

kawazoe.yoshihiko@gmail.com

Copoly Strings: How Do They Really Work?

Joshua. SPECKMAN* (Translation: Yoshihiko KAWAZOE**)

*Freelance Journalist

** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

本稿は *Tennisplayer.net* Vol.7, No.2 (2011 年 5 月号)に掲載された Speckman 氏の On-line Article を翻訳したものである。

● 要約

グスタヴォ・クエルテンが 1997 年の全仏オープンでルキシロン (Luxilon) 製のコーポリ・ガットを使用して優勝して以来, ATP (男子プロテニス協会) ツアーで使用されるほぼすべてのラケットで, 従来の天然ガットや他の合成樹脂製ガットが徐々にこのコーポリ素材に取って代わられるようになった。

正確にはコポリマー (copolymers) と表記されるこのガットは, 滑りの良い様々な化学添加物を含んだポリエステルで作られている。特徴的な沈み込むような軌跡を描く, 強いトップスピンのかかった「ルキシロンショット」は, 今やプロ選手によるゲームの 1 つの特徴になっている。コーポリ・ガットが, テニスの歴史における装備の面で, 最も重要な革新技術の 1 つと

して地位を占めるに至ったことに疑いの余地はない。



図 1 グーガ (グスタヴォ・クエルテンの愛称) が「コーポリ」ガットを使用して全仏オープンで始めて優勝してから 15 年近くになる。

● 本質的变化

2007年の全米オープンの決勝戦で勝利を収めたロジャー・フェデラーは、男子プレイヤーのゲームはコーポリ・ガットによって戦術の変化を迫られ、攻撃的な選手がネットからベースラインへと後退せざるを得なくなったと語っている。

長年に渡ってピート・サンプラスのガット張りを担当したことで知られ、現在ではフェデラー、ジョコビッチ、マレー、それにAPTランキング上位30人のうちの13人のラケットやガットの技術者を務めているネイト・ファーガソンは次のように述べている。「近頃じゃ、ネットに詰めたら完全に終わりだよ」。

「ラファと対戦するときは誰でもそうだけれど、ボールが自分の足下で急降下するかどうかの問題ではないんだ。スピンのかかったボールをラケットで受けてボレーしようとしても難しすぎるんだよ」。

ファーガソンによれば、これは強くトップスピンのかかったボールのペースや軌跡だけの問題ではない。ネットプレイヤー自身のガットの反応も問題となる。



図2 ラファ（ラファエル・ナダルの愛称）のような選手のスピンをボレーするのは、以前よりもはるかに難しくなっている。

「たとえば、ネットプレイヤーがルキシロン製のガットを使用しているとする。その場合、やってくるボールはガットに当たると普通とは異なる反応を示す。これはボールのガットへの食いつき方が異なるからだ。だから、狙ったところにボレーを返すことは難しい」。

攻撃的な選手にとって不幸なことに、コーポリ・ガットと強いスピンの隆盛は、1990年代にITFが時速130マイルを超えるファーストサーブの攻勢に対する対抗措置を講じようとしていた時期と重なっていた。コート面が遅く、ボールが重くなれば、試合中に選手がボールを打ち返しやすくなる。しかし、ボレーを決めるのは難しくなる。

● とどめの一撃になるか

新しいガットは、とどめの一撃になるように見える。コート面、ボール、コーポリ・ガットの組み合わせにより、ベースラインプレイヤーは時間的余裕が得られ、スピンをかけやすくなり、ボールに角度をつけられるようになるため、より多くの選択肢が生まれ、サーブ・アンド・ボレーのプレーはほとんど消滅することになる。

2003年、マッケンロー、ナブラチロフ、ベッカーなど元プロ選手たちのグループが、ゲームのルールを策定する機関である国際テニス連盟（ITF）に対し、ゲームの現況について懸念を表明する書簡を送った。彼らは、「テニスというスポーツから何かが失われている。ある種の繊細さ、戦略、微妙なニュアンスが失われている」と述べ、ヘッドの小さいラケットへ回帰するよう提案した。

元プロ選手の多くは、コーポリ・ガットがゲームの内容に大きな影響を及ぼしていると考えている。しかし、こうした選手たちの一致した認識にもかかわらず、科学者たちは最近まで、新しいガットが実際にこれまでの天然ガットや合成樹脂製のガット、あるいは「マルチフィラ

メント」のナイロンガットよりも強いスピンを生み出すことを示す証拠を持っていなかった。

現在は事情が変わり, Tennisplayer のウェブサイト上で高速撮影した画像からストロークのメカニズムが解明されたように, プロのゲームでの隠された謎が高速のビデオ画像によって解き明かされている。では, これらのガットはどのような仕組みで機能し, これまでのガットと比べてどの程度強いスピンを生み出すことができるのだろうか。



図3 コーポリ・ガットはサーブ・アンド・ボレーを消滅に追いやりつつあるのだろうか。

● スピンの物理学

スピンの物理学は, ある意味では非常に単純である。スイング面の角度が急であるほど, また, スイングが速いほど強力なスピンの得られる。そして, スピンの物理学の原理はそれ以上でもそれ以下でもないと言える。

しかし, ラケットフレームの技術, すなわちヘッドが大きく幅が広いグラファイト複合材製のラケットが, 今日の高速度で急角度のスイングテクニックを志向するトレンドを生み出し, 木製フレームの時代に比べてスピンの量を劇的に増大させたことも明白である。



図4 単純に言うと, 「高速、急角度でのスイングはより強いスピンを生み出す」ということになる。

そして最新のコーポリ・ガットの技術は, スピンをさらなるレベルへと進化させた。しかし, 実際に新しいガットがより多くのスピンをどのように生み出すのかという物理的な仕組みは, さらに複雑で理解しにくいことも明らかになっている。

トップスピンがかかったボールがガット面に進入し, ガット上をスライドして止まると, ボールはガットに「食いついた」状態になる。このとき, ボールの裏側はガットにめり込んでいるため, 実際にはラケットと同じスピードで同じ方向に, すなわち前方かつ上方に動いている。ここで留意すべきことは, この事象はわずか数ミリ秒の間に起こっているということで, 結果としてボールはトップスピンがかかった状態でガットからはじき出される。

この作用は, ボールがコート上でバウンドする場合の作用に似ている。ボールの底がコートに当たると, ボールは滑り, 減速した後, コートに食いつく。しかし, ボールの頂部は依然として前方に向かって運動しているため, その結果ボールにはトップスピンがかかり, 前方に回転しながらコートから跳ね上がる。



川副嘉彦教授 提供

図5 ボールはガットに食いついた後、トップスピンのかかった状態で打ち出される。

● なぜ(新しいガットは)まっすぐなままなのか

以上がボールとガットの相互作用の基本的な物理現象であるが、コーポリ・ガットではさらに別の事象が発生することがわかっている。選手たちは、新しいガットはゲームのポイントとポイントの間でまっすぐに戻す必要がないことをずっと以前から認識しており、より多くのスピンの得られることもそれで説明がつくと断言していた。

常識的な説明は、単にポリ・ガットは粘着性が高いので、元の位置からずれないというものである。現在でも多くの人々が信じているこの考え方は、ガットが「ずれない」ので剛性が高い面が得られ、摩擦が大きくなるため、より強力なスピンの得られるという論理に結びついていた。

しかし、ガットとテニスコートの間には、この理論が誤っていることを明らかにする決定的な違いがある。テニスコートに向けて打たれたボールは、非常に鋭角でコートに着地することが多く、その際ボールはコートの上をスライドするため、ボールの底はコートに食いつかない。そうすると、ボールにはスピンのかかりにくく、

スピードも減少する。しかし、ボールが鈍角でガットにぶつかる時には、ボールはガットに弾かれるため、このような現象はほとんど発生しない。

もう1つの説明は、コーポリ・ガットは剛性が高く、死んでいる(弾力性が低い)ためナイロンや天然ガットに比べてパワー(反発力)が小さいというものである。この理屈に従えば、コポリマーガットで打ったボールは飛びにくく、コートの手前側に落ちやすくなる。従って、選手はさらに大きいスイングをすることになる。

● 実際に何が起きているのか

しかし、コーポリ・ガットがずれないというのは本当に事実なのだろうか。これが事実かどうかを確認するためには、超高速で発生する事象をスローモーションで観察し、ボールがガットと接触している4~5ミリ秒の間に実際に何が起きているかを理解する必要がある。

2004年、ヒューマン・ロボティクスが専門の日本の川副嘉彦教授らは、擦れてギザギザになったナイロンストリングを毎秒1万コマの撮影が可能な超高速カメラで撮影した。それにより、衝突時の40~50コマを見ることが可能になった。



川副嘉彦教授 提供

図6 ここをクリックして、従来のナイロンガットがスライドした後、ずれたままの状態になる様子を撮影した動画をご覧ください。



ボールが衝突する前の、潤滑剤を塗布していないガットの配置に注目していただきたい。基本的にすべてのガットは位置が揃い、平行になっている。

潤滑剤を塗布していないガットは、ボールがガット床にめり込むとスライドし、位置がずれる。

潤滑剤を塗布していないガットにボールが衝突した後の状態。下から5番目と6番目のガットは、まだ位置がずれたままの状態である。

川副嘉彦教授 提供

図7 潤滑剤を塗布していないガット

川副教授らは次に、同じガットに潤滑剤を塗ったうえで衝突時の様子を撮影した。ボールとガットが衝突するごとに40～50コマを撮影して観察することで、ガットの動きとスピンの謎が解明された。ある種のガットは他のガットよりも強いスピンを発生させるが、これは摩擦が大きいからではなく、摩擦が小さいためであることが分かったのである。驚いたことに、より強いスピンを発生させるガットは、実際には元の場所からずれないというわけではないのである。

ットは、ボールがガットにめり込むとより素早くずれ、しかもずれるガットの本数も多い。その後、ボールが弾き出される際、メインのガットは弾性によってまっすぐになり、元の位置に戻る。

川副教授らは、このメインのガットが元の位置に戻る動作がボールにさらにスピンを与える力を生み出すことを発見した。驚くべきことに、潤滑剤を塗布したガットは40%も多くのスピンを生み出したのである。

ビデオをクリックしてコマを送っていくと分かるように、潤滑剤を塗布していない通常のガットにボールが衝突すると、何本かのメインのガットがボールとともにずれる。しかし、元に戻る際に1本のガットはラインからずれたままの状態になり、元の位置に戻らない。これが、選手たちが従来のガットで目にする現象である。ガットはすぐにずれて、ずれたままの状態になってしまう。



川副嘉彦教授 提供

図8 ここをクリックして、潤滑剤を塗布したガットがスライドし、すぐに元の位置に戻る様子をご覧ください。

このビデオを、潤滑剤を塗布したガットのビデオと比べて見て欲しい。潤滑剤を塗布したガ



ボールと接触する前の潤滑剤を塗布したガットの配置は、潤滑剤を塗布していないガットの配置とほぼ同じで、正しい位置に、まっすぐに、かつ平行に配されている。

潤滑剤を塗布したガットも、ボールがガット床にめり込む際にボールと接触してスライドし、位置がずれる。

潤滑剤を塗布したガットは元の位置に跳ね返る。下から 5 番目と 6 番目のガットに注目。

川副嘉彦教授 提供

図 9 潤滑剤を塗布したガット

● コーポリ・ガットとの関係

では、潤滑剤を塗布したガットに関するこの考察はコーポリ・ガットとどのように関係してくるのか。滑りやすく剛性も高いコーポリ・ガットは、潤滑剤を塗布したガットと非常によく似た挙動を示す、というのがその答えである。これらのガットは、ボールと一緒にスライドした後、元の位置に素早く跳ね返ることで強いスピンを生み出すトルクを与える。

コーポリ・ガットが強いスピンを生み出すのは、ガットが動かないからではなく、より自由に両方向に動くからである。

ITF も、独自の実験を行い同じ結論に達した。しかし、これらの結果は注目されず、ほとんどの選手やコーチは知らない。川副論文と同様、ITF の論文は技術者向けの雑誌や ITF の刊行物でのみ公表されており、一般のテニス関係者や愛好者、マスコミの関心を引くには至らなかった。

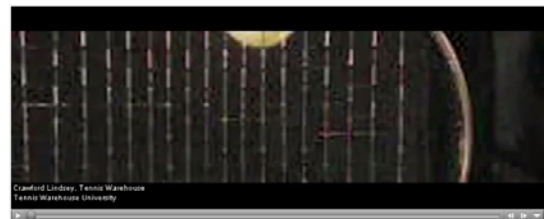


図 10 ここをクリックして、コーポリ・ガットの位置がずれた後、すぐに元の位置に跳ね返る様子をご覧ください。

この状況は、2010 年 4 月に 2 人の著名なテニス関連の科学者、ロッド・クロスとクロフォード・リンゼイが周到に管理された実験の結果を発表したことで変わった。2 人の研究では、平均的なコーポリ・ガットは平均的なナイロンガットに比べて 25% 増、天然ガットに比べて 8% 増のスピンを生み出すことが示された。

クロスとリンゼイは、ほんの数種類のガットを試験したに過ぎない。しかし ITF のスチュアート・ミラーが私に語ったところによると、より広範な ITF の実験結果は 2 人の研究結果とよく似たものであったということだ。事実、ITF は現在市場で販売されるすべてのガットについてスピンの潜在能力を調べよ

うと努めているが、それらのデータは一般には公開されていない。

今でも多くのプロ選手が自ら費用を負担してでも手に入れようとするガットで、クロスとリンゼイが実験した中でも最も優れた成績を示した素晴らしいコーポリ・ガットであるルキシロン ALU Power Rough では、平均的なナイロンガットに比べて35%増のスピンの得られた。ミラーによると、ITFが行った実験で最も優れた成績を示したガットでは、ALUよりもさらに約5%強いスピンの得られるということだ。これらの数字を足し合わせると、彼らが実験した中で一番成績が良かったコーポリ・ガットは、平均的なナイロンガットよりも約42%増のスピンの得られることがわかる。

2011年の初め、クロフォード・リンゼイは滑りやすいガットの理論に関して多くの証拠を示す一連の論文を発表した。「ちょっと考えてみれば（これまで科学者が誰も思いつかなかったのが不思議なくらいだが）、ガットの摩擦を小さくすれば、ガットは動くことが分かる、ガットは弾性エネルギーを蓄え、再放出するんだ」

「ガット（縦糸）が横方向に動けるようにし、蓄えた弾性エネルギーを再放出するようにすれば、より強いスピンの得られる。これ

は非常に理にかなっている。」とリンゼイは付け加えた。

リンゼイは、ずれたガットが跳ね返るタイミングが重要だと考えており、彼の最近の研究では、このメカニズムを最適化するガットの特性が明らかにされつつある。ITFは、コーポリ・ガットの剛性が最も重要な要素であるとしており、それはまたガットのスライドし易さにも関係する。

横糸の剛性が高ければ、横糸はメインのガット（縦糸）がその上を滑る高張力レールのような役割を果たすことができる。コーポリ・ガットは、一般に剛性がナイロンガットの約1.4倍、天然ガットの約2.8倍であるため、これは理にかなっている。



図11 ルキシロン Power Rough はナイロンガットに比べてスピンの増大が約35%



上に示した他のビデオクリップの場合と同様、ボールと接触する前のガットの配置を確認できる。

この静止画像は、ボールが接触したときにガットが下方方向にスライドして位置がずれることを示している。

この静止画像は、コーポリ・ガットは元の位置に跳ね返ることを示している。選手はガットが動いたことすら分からないだろう。

図12 コーポリ・ガット

リンゼイの研究室では、スライドし易さにおいてだけではなく、過剰な動きを防ぐという点でも剛性が重要であることが示されている。ガットが緩すぎて十分なスピードで跳ね返るためのエネルギーを蓄えられない場合や、ガットの粘着性が高すぎ、跳ね返る前にずれたまま固定されてしまう場合、跳ね返りのメカニズムはより多くのスピンを生み出すことができなくなる。剛性と滑りやすさが適度に組み合わされているのが最適なガットであると思われる。

リンゼイは、跳ね返りのメカニズムは極めて複雑であると言う。この作用の持続時間は約2ミリ秒で、ボールがガットに触れている時間の半分かそれ以下である。このことが、跳ね返りのメカニズムを調べることを困難にしている。リンゼイとクロスは、スピンの発生メカニズムとガットの特性を関連づけるために、2011年度に、さらに多くのガットのスピンの潜在能力を測定する予定である*3。

いくつかのメーカーは今日の科学を十分に認識し、跳ね返りの効果を最大限引き出すために独自の研究を行っているようである。ルキシロンとは異なり、研究所で自社製品のスピンの潜在能力を試験しているバボラは、2010年夏に新たなガット、RPM ブラストを発売した。



図13 ラファとスキアボーネは、バボラのコーポリ・ガット「RPM ブラスト」を使ってパリを制覇した。

2010年の全仏オープンでは、4人のファイナリストのうちラファエル・ナダルと予想外のチャンピオンのフランチェスカ・スキアボーネを含めた3人が滑りやすい「シリコン」でコーティングされ、五角形のプロフィールを持つこの新しいガットを使用していたことで人々を驚かせた。

「スピンを生み出すためには滑りやすいガットの方が優れていることを、すべてのメーカーが認識し始めたのだと思う」とクロスは話す。

2008年にプリンスはPTFE（テフロン）コーティングを施したナイロンガットを発売した。プリンスはその後、2011年1月に新しいコーポリ・ガットを発売したが、同社によれば、これはスピンの潜在能力を最適化する特性を分析・特定するための「軍用クラス」のビデオ機器を使用して開発されたとのことである。プリンスは、ガットの跳ね返りのメカニズムのタイミングや、そのメカニズムがいかに容易に発揮されるかを直接示しながら、新しいガットは「最適化された動力学および摩擦特性を備え、ガットがずれてから戻るまでの時間は2ミリ秒以内である」と主張している。



図14 コーポリ・ガットは、スピンだけでなくガットを離れるボールの発射角にも影響を与えるのか

プリンスはまた、自社のガットはボールがガットに跳ね返されるときに角度、すなわち発射角度を小さくすることができるかと主張する最初の会社でもある。プリンスによると、発射角度が小さいほどボールも浅くなり、速いスイングが可能になるため、スピンをかけやすいということだ。しかしこの主張には議論の余地があるだろう。なぜなら発射角度が大きくても、それを補正するために選手がラケット面を閉じることで、スピンを増大することは可能だからだ。いずれにしても、このガットが期待されている効果を発揮するかどうかは時間が経てばわかるだろう。

プリンスの新しい滑りやすいガットは自社で試験した他のコーポリ・ガットに比べ、9%増のスピンを得られるとプリンスは主張している。それが事実ならば、このガットは平均的なナイロンガットに比べて55%も多くスピンを生み出すことができる可能性がある。プリンスの主張を実証するためには独立機関による試験を待つ必要があるが、終始コーポリ・ガットがより多くのスピンを発生させると話していた選手たちに科学がようやく追いついたように思われる。

スピンの増大でプロのゲームはさらにパワフルになったのだろうか。「強力なスピンをかけることができれば、空力学的作用によってボールを早く着地させることができるため、ボールをさらに強打することも可能になる。これは明らかな利点だ」とITFのスチュアート・ミラーは見ている。

「より強力なスピンをかけられれば、ボールを打つときにより強いスイングを維持でき、ボールは加速する。だからスピン生成能力を大胆に変革するガットが作り出されれば、選手がそのメリットを活用するのは当然だ。選手はラケットをより速くスイングし、より強力なスピンをかけることができるようになり、しかもボール

をちゃんとコート内に着地させることができる。」

ラファのとてつもなく強力なスピスが、どの程度彼の驚異的なテクニックや運動能力によるもので、またどの程度コーポリ・ガットによるものか、我々が知ることはおそらくないだろう。分かっているのは、ナダルが他のどの選手よりも強いスピンのかかったボールを打ち、フォアハンドの総スピン量は1,800~4,900回転/分、平均3,200回転/分ということである。ラファの最も重いフォアハンドにおける総スピン量は、ピート・サンブラスの伝説的な重いセカンド・サーブにほぼ匹敵する。

また、コーポリ・ガットはどのようなスイング面からでもより多くのスピンを生成するため、ラファは他のガットを使用した場合ほど急角度で、あるいは高速でスイングする必要はなくなる。

コーポリ・ガットの効果を考えれば、イースタングリップと90インチのヘッドサイズのラケットを使用するロジャー・フェデラーが、平均的なフォアハンドのスピンはラファより20%少ないにもかかわらず、なぜ最大4,500回転/分のフォアハンドを打てるのかを説明できるかもしれない。



図 15 実際にどれほどのスピンをかけられるのか

フェデラーはナイロンガットでもそのようなショットを打てるかもしれない（このプレーヤーがどれほどの能力を持っているかなど、誰が知り得ようか）。しかしそのためには、彼のシングの型を大々的に変える必要があるだろう。

いずれにしても、コーポリ・ガットの効果が現実のものであり、ガットのメーカーがそれをさらに効果的なものにし、プロのゲームのみならずあらゆるレベルにおいて、さらに強力なスピンを加える可能性を追求していることにはや疑いはない。

コーポリ・ガットは、驚異的なスピンを生み出す最初の技術革新ではなかった。40年以上前にも同様の技術は存在していた。1970年代の悪名高いスパゲッティ・ガットは、実際にはコーポリ・ガットよりも多くのスピン生み出すことができたが、国際テニス連盟（ITF）によって禁止されてしまった。これらについては、続報に述べる。

●文献（さらに興味ある人のために）

- (1) Y. Kawazoe and K. Okimoto, "Super high speed video analysis of tennis top spin and its performance improvement by string lubrication," *The Impact of Technology on Sport*, Edited by A. Subic and S. Ujihashi, ASTA Publishing, (2005).
- (2) S. Goodwill, J. Douglas, S. Miller and S. Haake, "Measuring ball spin off a tennis racket," In Proc.

of the 6th Int. Conf. on the Engineering of Sport (ed. F. Moritz and S.J.Haake), Springer, New York (2006). Vol. 1, 379-384.

ジョシュア・スペックマン

ジョシュア・スペックマンはフリーランスのジャーナリスト。科学者としての教育も受け、子供の頃から大のテニス愛好家である。特に、テクノロジーがテニスに及ぼす影響に興味を持っている。2011年1月のAtlantic誌の記事 "The New Physics of Tennis"（「新しいテニスの物理学」）は、コーポリ・ガットがプロのテニスに及ぼす影響について人々の間に関心を引き起こし、テニス界でこのテーマに関する議論を再燃させた。フォトジャーナリストの妻と中国の昆明に暮らす。

（訳者注）

^{*3}Lindsey, C., String Lubrication & Movement in Spin, Tennis Warehouse University (TWU) Web Pages, March 22, 2011
http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/spinandlube.php (2012年10月10日確認)

訳者あとがき

日本語訳を掲載させていただいた著者 Joshua Speckman 氏と Online Tennis Articles: Tennisplayer.net 創設者・編集長 John Yandell 氏のご好意に感謝する。