オープンロールにおけるゴムの熱的挙動

隠 塚 裕 之¹・藤 道 治²

Mill Behavior of Rubber on Two Roll Mill with Temperature

Hiroyuki ONTSUKA¹ and Michiharu TOH² (¹Chemicals Evaluation and Research Institute, Nagoya, Japan, 1, 4-Chome, Orito-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-0858, Japan, ²R & D Department, Kurume Research Park Co., Ltd., 1-1 Hyakunenkouen, Kurume-shi, Fukuoka 839-0864, Japan)

The mixing of unvulcanized compounds and vulcanizing agents is performed on two roll mills at present. It was known that the mixing between the rubber and ingredients is conducted only at the nip on the two roll mill. So the size and temperature of bank at the nip, and the clearance of nip are very important.

It was found that when the roll temperature was varied, four regions of mill behavior were observed. In region 1 the highly elastic rubber will scarcely move into the mill nip at room temperature. In region 2 a good elastic rubber band is obtained on one of rolls. In region 3 the elastomer crumbles and bagging or crumbs occur. In region 4 a melt fluid coats on one of rolls at high roll temperature.

In this paper, mill behavior of rubber on two roll mills with the variation of temperature was expressed.

(Received on February 25, 2015)

Key Words : Two Roll Mill, Roll Temperature, Rubber Temperature, Bank Temperature, Heat Transfer

1. は じ め に

オープンロールは、1833年にChaffeeによって発明されて以来改良されて今日に至っている。しかし、オープンロールにおけるゴムの熱的挙動に関する報告は少なく、ゴム練り作業や混合作業の中で説明されているに過ぎない。ここでは、これまでに報告されている中からオープンロールでのゴム練りと温度との関わりなどについて紹介する。

ドリルド・ロール

ボード・ロール

図1 ドリルド・ロールとボード・ロール

2. オープンロール内の伝熱流路について

オープンロールには、内部が図1のような中空で厚い肉厚を通して伝熱を行うボード・ロール (Bored Roll) と、図1のようなロール表面近傍まで伝熱流路が設けられ表面温度が比較的均一なドリルド・ロール (Drilled Roll) がある¹⁾。Banburyが密閉型のバンバリーミキサーを発明し

隠塚 裕之；(一財)化学物質評価研究機構名古屋事業所 (〒466-0858 名古屋市昭和区折戸町4-1)。1983年福岡大学大学院理学研究科化学専攻修了，同年(財)化学品検査協会(現(一財)化学物質評価研究機構)に入社，現在に至る。1991年～ISO/TC45/SC2物理試験方法分科会にてJIS, ISO規格作成に従事，2002年～2004年，2011年～日本ゴム協会東海支部副支部長。専門は，高分子材料の配合設計，物理試験。

藤 道治；(株)久留米リサーチ・パーク (〒839-0864 久留米市百年公園1番1号)研究開発部人材育成コーディネータ，工博。1966年九州大学大学院工学研究科化学機械工学専攻修了，1971年国立久留米工業高等専門学校工業化学科講師，2006年停年退職，名誉教授，2006年～人材育成コーディネータ，化学工学会 粒子・流体プロセス部会ミキシング技術分科会評議員，2000年～2002年日本ゴム協会九州支部長，編集委員，ゴム練り研究分科会主査。専門は，化学工学(掻き取り攪拌伝熱，混練，粉碎)。

た1916年の1年前、今から100年前の1915年にPearsonは著書Rubber Machinery²⁾において当時主流のゴム練り機であるオープンロールに対して、生産量を二倍にするために回転数やロール面長を従来機の二倍ほどにしたこと、加温やゴム練り時の発熱によるスコーチを防ぐために蒸気や冷却水を流す様々な伝熱方式を持つオープンロールについて説明している。

ドリルド・ロールとして、ロール表面近傍に軸方向（長手方向）に8本の直線的な流路を設けたCowen-Bragg Cooling Rollと、ロール表面近傍にらせん状の流路を設けたBragg Cooling Roll及びそれらの改良型のBrag Built-Up Rollを紹介している。また、ボード・ロールとして、中空内壁にリブを設けリブ間に8本の多孔伝熱管を配置したBrewster Cooling Rollとその改良型、中空部円筒を6枚のパーティションで分割して長手方向に仕切った流路を設けたNorris Cooling Rollを紹介している。

3. ロール上のゴム温度変化

3.1 ゴムとロールなどとの伝熱

1930年の護謄にYoungの報告³⁾が石黒により翻訳されて「護謄混和機と混和法」として掲載されている⁴⁾。二本ロール混和機（以後オープンロールと呼ぶ）は、密閉式混和機（以後インターナルミキサーと呼ぶ）よりも平均温度は低い温度分布があるとして図2に示すような温度変化などが示されている。目はニップ（ロール最小間隙）Nで7/32インチで5.5 mm、カレンダーシートはバンド厚みで12/32インチで9.5 mmである。前ロール上のゴム温度は、Nのニップ部で105℃、ニップ通過後出口部1で86℃、それ以降はロール下端部2で82℃、ロール水平部3で79℃、ロール上端部4で76℃である。空気中での前ロール90°(2)～270°(4)においては、ゴム温度は放熱により90°毎に3℃低下しているが、これに対してロール上端部4からNまでは約10倍30℃の温度上昇があり、Nから1まで約20℃温度が低下している。

ニップに至るまでの温度上昇は回転するバンク（たまりゴム）内の配合剤とゴムとの混合による発熱、ニップに至る過程でゴムバンドとバンクとの摩擦による発熱及びゴムが高速で伸長されることによる発熱によると考えられる。

ニップにおける限界温度（critical temperature:スコーチがおこる上限温度）が、後ロールの冷却により低く保たれていると述べられ、スコーチが起こるゴム温度より低くしていたのではないかと考えられる。この場合、バンクと接触しながらニップを通り抜けた後ロールは、ロール表面から空気への対流伝熱（heat convection）と放射伝熱（heat radiation）により、また、ロール表面から中空内壁面へは先ず熱伝導（heat conduction）により、次に内壁面から冷却水への対流伝熱で熱が移動し、常に冷却されて

いると考える。

前ロール上のバンドゴムは、ロール内の冷却水により冷却され、また、対流と放射により冷却されていると述べられている。ロールと接しているバンドゴムの熱は、ロールの表面から伝導により中空内壁面に伝わり、内壁面から冷却水に対流伝熱により移動する。また、回転しているバンドゴム表面からの冷却は、空気と接触しているので空気との対流伝熱と空気を介しての放射伝熱によるものであると考える。

原著には、図2の練り条件などは記述されていないが、図2の付図に5種類のオープンロールの諸元などが示されている。図2のロールは直径36か40インチ、ロール面長84インチの非常に大きなロールであり、また、後ロールの回転数は毎分15回転前後、回転比2程度と推測される。例えば、40インチの後ロール表面速度は16回転とした場合毎分51m（0.85m/s）となる。練りと配合剤の投入速度、投入量などについて問題とされているが、スコーチ温度からゴムは天然ゴムと推測される。

3.2 ニップにおける限界温度

ゴムを混和するオープンロールとインターナルミキサーの最も明確な差異は、オープンロールではゴムがニップの間で限界温度下で通過するのにに対してインターナルミキサーではかかる憂いがないと述べている。また、以下のことが述べられている。オープンロールではニップの間のゴム層だけが配合剤と接触するにすぎないが、インターナルミキサーではこの接触が全体的にある。オープンロールでは混合時のゴム平均温度は90～95℃であるが、インターナルミキサーにあってはゴム平均温度は一般に100～105℃で時には110℃に及ぶ。スコーチの生成には練る時間が大きな因子であることを忘れてはならない。インターナルミキサーではゴムは常温から高々105℃までの温度しか受け

図2 二本ロール混和機におけるゴムの温度分布

ておらず、しかも6～7分で練りが終わってしまう。オープンロールの場合には平均のゴム温度は95℃までであるが、練りに35分以上を要して限界温度の120℃に至るニップのところを500回以上も通過する。そこで、スコーチの危険という観点から見ればオープンロールの方にあるように思うと述べている。

3.3 ニップ通過後のゴム温度低下と負圧について

温度が高いバンクと接触して加熱された冷却用後ロール表面は、バンクを通りニップから出た時点で表面からゴムが剥がれて空気にさらされる。ニップ通過後に両ロールが離れた直後の圧力は大気圧よりも下がり負圧が発生し、キャビテーションが起こっているのではないかと考えられる。このため、前ロール上バンドゴム表面から配合された低沸点物質が大気中へ揮発し、図2のNから出口部1の間でバンドゴム表面温度は20℃程温度がかなり大きく下がったと考える。負圧が発生することは、オープンロールではないが次の報告などから推測される。

Banksら⁵⁾、Myersら^{6,7)}は、ニュートン流体であるオイルを使ってロールコーターのニップにおける流れを詳細に観察して4領域、二次流れを呈すバンク領域、ニップ部のせん断領域、ニップ後の圧力降下によるキャビテーション領域と両ロールが離れるところのフィラメント領域に分けている、また、鄭⁸⁾は、塗料用ステンレス製2本ロールミル（直径16.4 cm、ロール面長20 cm）においてニュートン流体の重合アマニ油を混練した場合のニップ（間隔70-780 μm ）での圧力変化を測定している。低速側ロールを固定し、内部からニップ部ロール表面近くに圧力センサーを取り付け、高速側ロールを回転させた場合のニップ部の圧力変化を測定して、ニップ前後の圧力が正圧から負圧となることを実測し、理論的一致することを見出している。

また、Tohらは二次元モデルミキサーのローター、ゴムとボイドの動きをビデオカメラで撮影して図3(a)で表している⁹⁾。ローター前方にボイド（空隙）は無くゴムで満たされ鎌状領域が形成され、ローター後方はボイド（空隙）で占められている。また、ローターチップと槽内壁面間のクリアランス部から後方ボイド部にシート状ゴムが出ている。図3(b)、(c)はクリアランス部を拡大したもので、ローターチップ側のゴムはクリアランス部後端ですぐ剥がれて表面に波立ちが起こり、しかも、槽内壁面からの剥がれよりも常に先に剥がれが起こっているように見え、実際のビデオ画像からもそれが観察された。

権藤¹⁰⁾は、小型混練機の槽壁に圧力センサーを取付け、ゴム混練り時の槽内壁面圧力を測定し、ローターチップがセンサー面を通過した直後に負圧が発生して図3(d)の掻き取り羽根前後の圧力変化¹¹⁾に類似していると述べている。

図3(e)は図2のニップ部を拡大したものである。オー

図3(a) (e)ローターと(f)ローターにおけるゴムとボイドの挙動

図3(b) (e)ローターのクリアランス部拡大図

図3(c) (f)ローターのクリアランス部拡大図

図3(d) 掻き取り羽根前後における槽内壁圧力分布

図3(e) ニップ周辺拡大図

ブンロールにおいてニップ直後で後ロールが前ロールのバンドゴムから剥がれるときには負圧となり、丁度ローターチップ側からゴムが剥がれたように、後ロールからバンドゴムが剥がれてその表面は波立ち収縮などが起こっているものとする。

4. ゴムの混合過程とバンクの生成

1943年森¹²⁾は混合作業（ゴム練り）において図4に示すようなゴムの混合状態を示し、混合作業につき注意すべき点は、一般的に見て、(1) 配合諸材料をなるべく短時間で各部分均等に混加（混合）すること。(2) ゴムを焼けと

図4 ゴムの混合状態

図5 オープンロール温度と練り挙動

称する半加硫状態にしないことである。とし、ロール温度、間隙の調節及びその他の操作が適当でなければ配合薬品は完全に各部分に分布せず小塊状に固まるとしている。図中のa, b, c, d, e, fについては説明していない。しかし、Macbeth¹³⁾が1935年にゴムの混合過程として同じ図面を示し、ゴム温度を示していないが、a～fについて次のように説明していた。

- a: ゴムの膨らみ(バンク)がニップの方に引き延ばされて早く動き出す区間
- b: 集まった配合剤がaのゴムと同時に後ロールにより引き込まれる区間
- c: ゴムの速度が一番速くなり、温度上昇が大きくロールへ熱が移動する区間
- d～e: ゴムの温度が徐々に低下する区間
- f: 配合剤のバンクに接してゴム温度が上昇し始める区間

図4は、この図面を参考にしたものと思われる。

5. ロール温度と練り挙動

1966年にTokitaら^{14, 15)}, White¹⁶⁾は、3インチオープンロールを使ってロール温度を変えた場合のBR, SBRなどの素練りを観察撮影して練り挙動が図5に示すように温度により領域1から領域4までの4つの領域に分けられることを見出している。さらに、これらの領域を理論的に解析している。回転数は前ロール16.2 rpm, 後ロール22.7 rpmでニップを0.055インチ(1.4 mm)としている。領域1では、室温でゴムが弾性支配でニップに食い込まない。領域2では、温度が66～71℃でニップを通ったゴムが前ロールに巻き付いて透明な粘弾性流体のバンドゴムとなり、ニップ上に回転するバンクができ、素練りが行われる領域である。領域3では、ロール温度が上昇して100℃になるとゴムが濁りロールに巻き付かず袋状に垂れ下がる

図6 オープンロールの混練りモデル

領域である。領域4では、ロール温度がさらに上昇して121℃となり、ゴムは粘性が支配的な透明な液状となりロールに張り付いてしまう領域である。これらのゴムのムーニー粘度(ML-4)は、35～50である。

図6は領域2に対応した図であるが、本協会発行のテキスト¹⁷⁾などに混練りのモデルとして掲載されている。

6. バンク温度とゴム物性

6.1 素練りにおけるバンク温度とムーニー粘度

青江¹⁸⁾は、工業技術員会第4委員会(カーボンブラック)で行ったゴム用カーボンブラックの評価の中で、オープンロールによるゴム練り条件と物理特性との関係を報告している。この中で、各委員所属の組織で使用されるオープンロールの径が3.5, 6, 7.5, 8.9, 10, 12インチなど直径の差ばかりでなくロール面長など諸元が異なるので、天然ゴム(NR, RSS1)の素練りにおいては、たまり(バンク)ゴム温度を一定にすることにし、ムーニー粘度を測定している。

例えば、径10インチ×長さ20インチの左右無段変速のオープンロールにおいて、前ロールを18 rpm, 温度70±

1℃とし、後ロールが $70 \pm 5^\circ\text{C}$ になった時に素練りを開始している。回転比を1:1~1:1.6と変え、素練り開始時900 g、ロール寄板間隔36 cm、1.4 mmの間隙で5, 15, 25, 40分間練っている。各練り時間後にムーニー粘度測定のため、各100 gを採取し、開始時と同時間にてロール間を通過させるため、寄板間隔を4 cmずつ狭めている。たまりゴムの温度はサーミスターで測定している。

その結果、図7(a), (b)に示すように等速回転時は練り時間とともにたまりゴム温度 92°C (5分) から 82°C (40分) まで、また、ムーニー粘度が63.5 (5分) から32 (5分) で大きく低下しているが、回転比が1:1.6と大きくなった場合でもたまりゴム温度が 98°C (5分) から 94°C (40分) まで、また、ムーニー粘度が66.0 (5分) から40.0 (40分) とその低下は等速時よりも小さい。また、図8に示すようにたまりゴム温度をロールを冷却しながら $85 \pm 2^\circ\text{C}$ に保って同様の実験をした場合、ロールの回転比に関係なく、ムーニー粘度は等速時59.0 (5分) から33.5 (40分)、1:1.6時62.0 (5分) から32.0 (40分) とほとんど実験誤差と思えるバラツキ範囲で一致している。これらの実験においてバンクの回転や回転するバンクの大きさをほぼ同じにしていることから、素練りにおいてはバンクの回転挙動などが重要であることが伺える。

さらに、ロール諸元や回転数が異なる8インチと10インチロールを用いて、たまりゴム温度と通過回数 (ロール時

間) をコントロールした天然ゴムの素練り実験を行い、図9(a) (b)の結果を得ている。10インチ組、8インチ組と各種の条件を異にするが、各組の 85°C の曲線同志、 65°C の曲線同志は測定誤差範囲で一致し、異径ロール、異条件のロールでもたまりゴム温度の一定化を主目的に、他の条件を考慮すれば同一の素練りが可能であるとしている。

6.2 混練りにおけるバンク温度とゴム物性

同委員会は、8名の委員によりカーボンブラックを混合する混練り実験を6, 8, 10インチのオープンロールを用いて行っている。ASTMの混練用ロール基準である径 6 ± 0.1 in (150~155 cm)、寄板間隔 (バンド幅) 10~11 in (23~28 cm)、前ロールの回転数 24 ± 0.5 rpm、回転比1:1.4をもとに、たまりゴム温度 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 、ロール間隙の通過回数を同じにし、ロール間隙はカーボンブラック混入開始時1.4 mmを混入中に適当に開き、混入終了時(20.5分)までに1.9 mmに調節して練り量などを決めて同一の練り条件で三回にわたり行っている。

配合は、恒粘度NR100.0部、カーボンブラック (HAF) 50.0部、亜鉛華5.0部、イオウ2.5部、ステアリン酸3.0部、促進剤DM0.6部である。加硫は、 145°C にて30分間プレス加硫し、加硫片の物性引張り強度 T_B [kg/cm^2]、伸び E_B [%], 300%モジュラスM300 [kg/cm^2]、硬度 H_S [JIS]を測定している。

その結果、バンク温度は、 $76 \sim 89^\circ\text{C}$ (4分)、 $75 \sim 84^\circ\text{C}$ (18分) となっているが、加硫物性の T_B は237~294 (平均258), E_B は505~537 (平均517), M300は119~139 (平均133), H_S は61~68 (平均65) とバラツキがあると報告している。

これらの報告から、オープンロールによる混練りでもバンクの挙動、すなわち、バンク温度やバンクの大きさに関

図7(a) たまりゴム温度と後ロール温度

図7(b) ロール回転比とムーニー粘度

図8 素練り時間を変えた場合のたまりゴム温度とムーニー粘度

図9(a) たまりゴム温度を一定とした場合の10インチロールと8インチロールでの練り時間とムーニー粘度の変化

図9(b) 二組のロールでたまりゴム温度を一定とした場合の練り時間とムーニー粘度変化

わるロール間隙が大きく関わっていることがわかる。

7. お わ り に

オープンロールによるゴムと配合剤の接触は、ただ一か所ニップ上のバンクで起こり、ゴムがニップを通過するときに練りが行われるので、ニップ上に形成されるバンクの挙動は非常に重要である。また、オープンロールにおける練りの挙動は、ロール温度ではなくゴムの温度と直接関係するので、ニップ上のバンク温度とニップ直後のゴムの温度低下が重要となると考える。

References

- 1) Fujitani, I.: In "Gomu Kougyou Binran (4th ed.)", Nippon Gomu Kyoukai Ed. Nippon Gomu Kyoukai, Tokyo, p.1070 (1994)
- 2) Pearson H. C.: In "Rubber Machinery", The India Rubber World, New York, p.59 (1915)
- 3) Young, H. C.: *India-Rubber Journal*, **78**, 621 (1929)
- 4) Young, H. C.; Isiguro, K., Trans.: *Gomu*, **2**, 113 (1929-1931)
- 5) Banks, W. H., Mill, C. C.: *Proc. Roy. Soc. (London)*, A223, 414 (1954)
- 6) Myers, R. R., Miller, J. C.: *Trans. Soc. Rheol.*, **2**, 77 (1958)
- 7) Myers, R. R., Hoffman, R. D.: *Trans. Soc. Rheol.*, **5**, 317 (1961)
- 8) Chung, G.: "Roll Mill no Sousa Tokusei to Bunsan Tokusei ni Kansuru Kenkyu", Doctoral Thesis, Kyushu University (1986)
- 9) Toh, M.; Gondoh, T.; Murakami, Y.; Nishimi, H.; Mishima, M.: In "Handbook of Applied Polymer Processing Technology", Marcel Dekker Inc., New York, p.523 (1996)
- 10) Gondoh T.: 112th Gomuneri Kenkyu Bunkakai Siryou (2014)
- 11) Toh, M.; Murakami, Y.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **6**, 416 (1980)
- 12) Mori, T.: Gomuseizouhou, Kagakukougyoukai, p.71 (1943)
- 13) Macbeth, C.: "Kautschukmaschinen", In "Handbuch der gesamten Kautschuktechnologie", (Union Deutsche Verlagsgesellschaft), Berlin, p.155 (1935)
- 14) Tokita, N., White, J. L.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **10**, 1011 (1966)
- 15) Tokita, N., White, J. L.: *Rubber Chem. Technol.*, **40**, 1126 (1967)
- 16) White, J. L.: *Rubber Chem. Technol.*, **50**, 163 (1977)
- 17) Mizumoto, K.: In "Gomu Gijyutsu no Kiso (6th imp.)", Nippon Gomu Kyoukai Ed., Tokyo, p.146 (1987)
- 18) Aoe, I.: *Nippon Gomu Kyoukaishi*, **41**, 314 (1968)

日本語表記参考文献

- 1) 藤谷岩男：ゴム工業便覧（改訂4版），日本ゴム協会編，日本ゴム協会，東京，p.1070（1994）
- 4) 石黒克己訳護謄，**2**，113（1929-1931）
- 8) 鄭基市：「ロールミルの操作特性と分散性能に関する研究」，九州大学学位論文（1986）
- 10) 権藤豊彦：第112回ゴム練り研究分科会資料（2014）
- 11) 藤道治，村上泰弘：化学工学論文集，**6**，417（1980）
- 12) 森鐵之助：ゴム製造法，（社）化学工業協会，東京，p.71（1943）
- 17) 水本清文：ゴム技術の基礎（第6刷），日本ゴム協会編，東京，p.146（1987）
- 18) 青江一郎：日本ゴム協会誌，**41**，314（1968）

*

*

*

*

*