

タイヤのハイドロプレーニングについて*

Hydroplaning of Tire

中島 幸 雄** NAKAJIMA Yukio

Abstract The numerical procedure for hydroplaning was developed by considering the following three important factors; fluid/structure interaction, tire rolling, and practical tread pattern. The tire is analyzed by FEM with Lagrangian formulation and the fluid is analyzed by FVM with Eulerian formulation. Since the tire and the fluid are modeled separately and their coupling is automatically computed by the coupling element, the fluid/structure interaction of the complex geometry such as the tire with the tread pattern can be analyzed practically. The predictability was validated by comparing the hydroplaning simulation with the experiment on the subjects such as the water flow, the velocity dependence of hydroplaning, and the effect of the tread pattern on hydroplaning. In order to predict the streamline in the contact patch, the procedure of the global-local analysis was developed. The predicted streamline enabled us to develop the new tire pattern in a short period based on the principle; "make the stream line smooth".

Keywords: Hydroplaning, Tire, Fluid/Structure interaction, FEM, FVM

1. 緒 言

タイヤのハイドロプレーニング現象は、水深の 深いわだち路などの上を溝の無い摩耗したタイ ヤで高速で走行するとき、タイヤが浮き上がる現 象である。タイヤにハイドロプレーニングが生じ ると、タイヤは路面に対するグリップを失うため 非常に危険である。ハイドロプレーニング性能は 安全に関する重要な性能であるため、これまで解 析モデル・実験・計算力学を用いて様々な検討が 行われてきた[1-5]。計算力学によるアプローチで は、二次元の Reynolds 方程式に基づく研究[6-16]、 Navier-Stokes 方程式に基づく三次元数値流体シ ミュレーションによる研究が行われている [17,18]。しかし、それらは流体/構造連成問題とし て定式化されていない検討、周方向溝のみのタイ ヤパターンの検討であり、タイヤのパターン開発 に活用できる実用レベルにまで至っていなかっ た。

その後、著者らによってハイドロプレーニング

性能を左右する重要な因子である幅方向溝を考 慮してハイドロプレーニングを予測することが 可能になった[19-22]。さらにこの技術を用いて、 雪上、泥上のタイヤのトラクションの予測まで可 能になっている[23,24]。

ハイドロプレーニングが生じる時、タイヤによ って乱された水の中に空気が混入しているので、 厳密には気液二相流として取り扱う必要がある が、取り扱いの複雑さのため筆者の知る限りその ような研究は公表されていない。

本稿では、筆者らによって開発されたハイドロ プレーニング予測技術の概要及びこの技術を用 いてハイドロプレーニングに優れるパターンを 短期間で開発できた事例について述べる。

2. ハイドロプレーニングとは

ハイドロプレーニングは Fig.1 に示す3ゾーン コンセプトによって説明される[1,6,7]。この状態 ではタイヤは部分的にハイドロプレーニングを

* 2013.3.11 受付

^{**} 工学院大学グローバルエンジニアリング学部機械創造工学科 〒193-0802 東京都八王子市大目町 139 TEL: (042)628-2417 FAX: (042)628-1023 E-mail: y-nakaji@cc.kogakuin.ac.jp

起こしている。A領域ではタイヤは完全に浮き上 がっており、比較的厚い水膜上に乗っているので、 水の慣性項(動水圧)が支配的なダイナミック・ ハイドロプレーニングが生じている。B領域では 浮き上がり~接地の遷移状態である不完全な接 触状態となっており、タイヤは薄い水膜上に乗っ ているので流体潤滑効果によるビスカス・ハイド ロプレーニングが生じている。C領域はタイヤが 完全に接地した状態で、路面とタイヤ間の摩擦係 数が重要となる。Fig.1に示す部分ハイドロプレ ーニングからタイヤが完全に水の上に浮き上が る完全ハイドロプレーニングに移る速度を臨界 速度と呼ぶ。



Fig.1 Three zone concept of hydroplaning.

理解を深めるために、ハイドロプレーニング研 究の初期段階で検討されたダイナミック・ハイド ロプレーニングの簡単モデルを紹介する[14]。ダ イナミック・ハイドロプレーニングは Fig.2 に示 す概念図によって、次のように説明される。タイ ヤが水に侵入するとき、水がタイヤに高速度で衝 突すると考えられる。水の慣性力によって生じる 水圧がタイヤの接地圧力より大きくなると、タイ ヤが浮き上がり始める。このときに生じるタイヤ の変形によって、さらに水圧が上昇しタイヤが完 全に浮き上がる。



Fig.2 Schematic figure of dynamic hydroplaning.

ハイドロプレーニングの簡単なモデルは Fig.3 を参照し、タイヤトレッドの接地面積をA、流体 の密度をp、揚力係数を C_L 、タイヤの速度Vと すれば、水の動水圧 P_f 及び浮力Lは下式で表され る。

$$P_f = \frac{1}{2}\rho V^2, \quad L = C_L A \frac{\rho V^2}{2}$$
 (1)

タイヤの内圧をpとすれば、下向きの荷重Wは

$$W = pA \tag{2}$$

と書けるから、浮力 *L* と荷重 *W* のつり合い条件 からハイドロプレーニングが生じる臨界速度 *V*_{cr} は、下式で与えられる。

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2}{\rho C_L}} \sqrt{p} \equiv k \sqrt{p} \tag{3}$$

ここで、kは定数である。式(3)には揚力係数 C_L が入っているので、kを求めることは困難である。



Fig.3 Simple model of complete hydroplaning.

そこで直接タイヤの動水圧 P_f とタイヤの接地圧 の最大値を比較して、臨界速度を評価する。タイ ヤの接地圧分布が放物線に近い形をしており、そ の最大圧力 p_{max} がタイヤの内圧 p の 1.55 倍であ ると仮定すると、下式が成り立つ。

$$p_{\max} = 1.55p \tag{4}$$

接地圧の最も高いタイヤの中心部圧力よりも、流体圧が大きくなればタイヤは完全に浮き上がる と考えられるので、完全ハイドロプレーニングの 臨界速度に関して、下式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\rho V_{cr}^2 \ge 1.55p$$
(5)

これから

 $V_{cr} \ge 63\sqrt{p} \quad \left(V: km/h, p: kgf/cm^2\right) \tag{6}$

が得られる。この式は 1960 年代に NASA が航空

機用バイアスタイヤを用いて実験的に求めたハ イドロプレーニング臨界速度の式と同じもので ある(Fig.4 参照)[4]。ここで注意すべきは完全 ハイドロプレーニングの臨界速度 V_{cr} がタイヤへ の負荷荷重 Wとは無関係でタイヤの内圧 pで決 まることである。



Fig.4 Experimental and calculated hydroplaning velocities [4].

 計算力学を用いたハイドロプレーニング解 析

3.1 支配方程式

式(6)はタイヤの内圧とハイドロプレーニング の関係を示しているだけなので、タイヤのパター ン設計には活用できない。そこで実験や計算力学 的手法によってタイヤのパターンとハイドロプ レーニングの関係に関する研究が行われてきた。 水深が深い場合、Fig.1 の A 領域のダイナミッ ク・ハイドロプレーニングを抑制することが重要 になるので、水の粘性を無視し A 領域のダイナ ミック・ハイドロプレーニングを予測する技術が 開発された。ダイナミック・ハイドロプレーニン グは水の慣性力による現象なので、水の支配方程 式は式(7)~(9)で示す Euler 方程式 (それぞれ連続 の式、運動量保存の式、エネルギー保存の式) で 表わされる。

$$\int_{V} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = -\int_{S} \rho \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n} \, dS \tag{7}$$

$$\int_{V} \frac{\partial(\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} dV = -\int_{S} (\rho \boldsymbol{u}) (\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n}) dS + \int_{S} \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{n} dS$$
(8)

$$\int_{V} \frac{\partial e_{t}}{\partial t} dV = -\int_{S} e_{t} \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{n} dS + \int_{S} \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{n} dS$$
⁽⁹⁾

ここで ρ は密度、uは流速、Tは流体力の応力テンソル、 e_{t} は内部エネルギーである。

3.2 パターン付きタイヤの流体/構造連成解析 モデル化の方法[19-21]

ハイドロプレーニングによってタイヤが浮き 上がる現象を予測するには、タイヤが水の中に進 入する過程で流体/構造間の境界条件が時々刻々 変化するだけでなく、Fig.1 のC領域で流体領域 の一部がタイヤに潰されてなくなってしまうこ とまで考慮しなければならない。さらに、タイヤ のトレッドパターンはFig.5 に示すように複雑な 形状をしているので、流体/構造問の境界条件が 非常に複雑になってしまう。



Fig.5 Practical tire tread pattern.

この課題を解決する手法として、変形とともに 流体側の要素をリメッシュしながら構造メッシ ュと流体メッシュを接合させる ALE (Arbitrary Lagrangean Eulerian) 手法、メッシュレス法の一 種の SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) 法、流 体/構造問の複雑な境界条件を取り扱うことが可 能な General Coupling 機能[25]が考えられる。本 検討では General Coupling 機能を用いた。General Coupling 機能とは、構造側のラグランジュ・メッ シュと流体側のオイラー・メッシュをそれぞれ独 立に定義し、流体と構造を連成させる機能である。 そのため General Coupling 機能を用いると、Fig.6 に示すように構造側のラグランジュ要素と流体 側のオイラー要素をオーバーラップさせて定義 できるので、両者の境界条件の更新や連成計算は 自動的に計算される。さらに、流体側メッシュを

ある程度細かく切っておけばトレッドパターン は構造側メッシュにのみモデル化すれば良いの で、タイヤのハイドロプレーニングの解析に便利 な機能である。



Fig.6 General coupling and modeling of tire and fluid.

Fig.6 に示すハイドロプレーニングの解析モデ ルは、有限要素法 (FEM: Finite Element Method) のラグランジュ要素でモデル化されたタイヤ (お よび路面) と、有限体積法 (FVM: Finite Volume Method)のオイラー要素でモデル化された流体に よって構成される。収束の容易さの理由から陽解 法FEM を用いた。Fig.7 に示すように、タイヤは トレッドゴムで作られたトレッド部分と、ゴムで 被覆されたスチール・有機繊維の補強材であるベ ルト、プライ部分およびその他のゴム部分から構 成される複合材である。タイヤのトレッドなどの ゴム部分は 8 節点ソリッド要素 (Mooney-Rivlin 材料モデル)でモデル化し、ベルトやプライ等の 補強材は 4 節点シェル要素を用いてモデル化し ている。



reinforcement(shell element)

Fig.7 Tire model of finite element method.

3.3 パターン付きダイヤのハイドロプレーニン グ解析[19-21]

パターン付きタイヤのハイドロプレーニング 解析結果を Fig.8 に示す。タイヤサイズ、水深、 速度、荷重、内圧は、それぞれ 205/55R16、10mm、 60km/h、4500N、220kPa である。水槽の大きさは 300×2000×30mm で、水の流出のない壁面境界 条件を設定した。また、路面の摩擦係数はゼロで ある。流体、タイヤの要素数はそれぞれ 39,000、 18,000 で、計算時間を短縮するためにパターンは タイヤの一部分にのみモデル化した。タイヤが水 を排出しながら進行していき、2本の周方向溝と 横方向溝から水が排水される様子がわかる。

このときの接地反力(水がタイヤを押し上げる 流体反力を含まない、地面とタイヤ間の接地圧 力)をFig.9に示す。縦軸が接地反力,横軸が陽 解法の解析時間である。5ミリ/秒でタイヤに空気 を入れ、50ミリ/秒までにタイヤを地面に押し付 け、135ミリ/秒までにタイヤが 60km/h に加速さ れて定常状態になっている。パターンは部分的に モデル化されており、パターンの部分は135ミリ /秒以降に水に浸入する。水があるときと無いと きの接地反力の差が水がタイヤを浮き上がらせ る力(流体反力)であり、これが大きいほどハイ ドロプレーニングが生じやすくなる。



Fig.8 Hydroplaning analysis of tire.



Fig.9 Time history of contact force.

4. 予測精度の検証[19-22]

Fig.10 に接地面の下からガラス板を通して見 た水の流れの実測写真と予測の比較を示す。タイ ヤの中央部では進行方向(図の上方)に排水され るのに対し、タイヤの両脇では横方向に排水され る様子が良く一致している。また、実験では大ま かな流れの方向がわかるが、溝の内部での流れな ど詳細な流れの情報を得ることが難しい。

一方、予測技術を用いると Fig.11 に示すように 詳細な流れまで見ることが可能になる。タイヤが 水の中を回転しながら進んでいく時に、水が前方 に排出され、排出される方向は、接地面の中央付 近では主に前方向に流れ、接地面の斜め前方から 真横にかけては、斜め前方から真横方向に流れて いることがわかる。また、流れは主に周方向のリ ブ溝と呼ばれる溝や、幅方向のラグ溝と呼ばれる 溝に沿って流れ、流れ全体の方向もリブ溝やラグ 溝の形状によって若干変化している。5章で述べ るようにこのような「流れの見える化」によって、 新たなパターンを発想するヒントを得ることが できる。



Fig.10 Comparison of prediction and measurement.



Fig.11 Detailed water flow in prediction.

次に、Fig.12 にパターンが刻まれたタイヤとパ ターンの無いタイヤの流体反力がタイヤの速度 とともにどのように変化するかを示す。速度が増 えると流体反力も増加しハイドロプレーニング が生じやすくなること、パターン付きタイヤのほ うが流体反力は小さくハイドロプレーニングが 生じにくいこと等、従来の知見と一致した結果が 得られた。

また、Fig.13 に示す V の字型のタイヤパター ンでは V の字の角が最初に接地するようにタイ ヤが回転する場合のハイドロプレーニング臨界 速度は逆回転の場合より大きく、ハイドロプレー ニングが起きにくいことが知られている。予測し た臨界速度の相対値(インデックス)は実験の相 対値と良く一致した。



Fig.12 Speed dependence of hydrodynamic force.



Fig.13 Comparison of critical hydroplaning velocity [22].

5. パターン開発への応用[19-21]

5.1 Global-Local 解析

タイヤパターンのハイドロプレーニング性能 への効果を予測するためには、パターン部分を細 かくモデル化する必要があるが、実用的なパター ンの予測には膨大な計算時間が必要になる。そこ で、Fig.14 に示す Global-Local 解析を用いて計算 時間を短縮する手法が提案されている[19-21]。ま ず Global 解析として、パターンの無いタイヤの ハイドロプレーニング解析を行う。次に Local 解 析として、Global 解析のベルト変位をパターンに 貼り付けたパターンモデルだけでハイドロプレ ーニング解析を行う手法である。Local 解析では タイヤのパターン部分のみをモデル化している ので計算時間を大幅に短縮できる。



Fig.14 Global-Local analysis.

5.2 新しいパターン設計要素(F1ノーズ)開発 ハイドロプレーニング予測技術を用いて新し いパターン設計を行った例として、Fig.15 に示す ように水がスムーズに流れるようにパターンに 三次元的な形状(F1ノーズ)を加工した技術が ある。パターンのどの位置にF1ノーズを付けれ ば最もハイドロプレーニングに効果があるかを 予測技術を用いて検討し、Fig.16 に〇で示した位 置を特定した。予測技術を用いることによって、 複数個のタイヤの金型を作る必要がなくなり、開 発期間とコストを大幅に削減できた。



Fig.15 Shape of F1 nose.

Fig.17 に Fl ノーズをつけた場合とつけない場 合、水の流れがどのように違うかを示す。F1 ノ ーズをつけない場合にはブロックの壁で水の流 れがさえぎられて流れに乱れが生じているのに 対し、Fl ノーズをつけた場合では水が Fl ノーズ の上を流れて乱れが少なくなっている。そしてテ ストコースの水深 10mm の路面で実車試験を行 い、Fl ノーズによってハイドロプレーニング発 生速度が1km/h 改良されることを確認した。



Fig.16 Position of F1 nose.



Fig.17 Water flow with and without F1 nose.

5.3 レース用タイヤの WET パターン開発

F1 レースでは、WET 時にタイヤの性能の差が 最も顕著に表れる。しかし、F1 車両をテストコ ースで走られせることは難しく、かつ F1 タイヤ を WET 状態で室内テストすることも難しかった。 そのため、レース用タイヤの WET パターンは設 計者の経験によって設計されていた。

そこで、予測技術を用いてパターンの溝をどこ に設ければ効率良く排水できるかを検討した。速 度 200km/h、水深 2mm の時、溝の無いタイヤで 水の流れを予測すると、Fig.18 に示すようにフロ ントとリアではタイヤの取り付け方や接地形状 が異なるので水の流れが異なることがわかった。 フロントではキャンバ角の影響で流れが左右非 対称になっているのに対し、リアではキャンバ角 がゼロなので、水の流れが左右対称となっている。

「溝のないタイヤで予測した水の流れに沿って 溝を設ければ効率良く排水できる。」という仮説 に基づき設計したパターンを Fig.19 に示す。フ ロントとリアでは水の流れが異なるので、得られ るパターン構成も異なったものになる。フロント タイヤではキャンバ角の影響で水の流れが非対 称となるので、パターンも非対称となり、タイヤ の左側には右側より周方向に向いた溝が設けら れる。一方、リアタイヤでは水の流れが左右対称 となるので、パターンも左右対称基調のパターン となる。



Fig.18 Streamline of F1 tire with blank tread.



Fig.19 New pattern geometry for F1 WET tire.

Fig.20に Global-Local 解析を用いて従来のパタ ーンと新しいパターンにかかる水圧分布を予測 した結果を示す。カッコの中の値は水圧の指数表 示であり、値が小さいほどハイドロプレーニング 性能が良いことを示している。新パターンでは効 率良く排水され、水圧が低下していることがわか る。

Fig.21は Global-Local 解析を用いて、タイヤの 一つのブロックが水に侵入するときに、細い溝 (サイプ)の有無で水圧分布がどう異なるかを予 測したものである。サイプを付加したブロックで はサイプを通してブロック表面の水が排水され るので、水圧が小さくなっている。サイプによっ て排水性能が向上することが予測され、実験でも サイプによる排水性の改良効果が確認された。



Fig.20 Comparison of old and new pattern for F1 WET tire.



Fig.21 Effect of sipe on hydrodynamic pressure.

最終的なF1用WETパターンはFig.19とFig.21 の技術を組み込んだものとなっており、フェラー リとの実車評価でラップタイムの向上が確認さ れた。新パターンは予測技術のみを用いて開発さ れた初めての事例で、2000年からF1レースに投 入され数多くの優勝に貢献した。

6. まとめ

実用的なトレッドパターンを考慮できるハイ ドロプレーニングの予測技術を開発した。接地面 から水が排出される様子やトレッドパターン内 の水の流れ、ハイドロプレーニングの速度依存性 が定性的に実験結果と一致することを確認した。

さらに、パターンの改良に用いるために Global-Local 解析手法を開発し計算時間の短縮を 図った。そして、この「流れの見える化」技術を 用いてハイドロプレーニングを改良できるパタ ーン技術を開発した事例を示した。また、開発し た予測技術を用いることによって科学的にパタ ーン設計ができるようになり、開発期間の短縮と 質の高いパターン設計が可能になった。そしてこ の予測技術はタイヤのパターン設計に必要不可 欠な道具となっている。

参考文献

- Albert, B. J. and Walker, J. C., Tyre to Wet Road Friction, Proc. Instn. Mech. Engrsn, Vol.180, 105-121 (1965-66).
- [2] Allbert, B. J., Tires and Hydroplaning, SAE paper 680140 (1968).
- [3] Yeager, R. W. and Tuttle, J. L., Testing and Analysis of Tire Hydroplaning, SAE paper 720471 (1972).
- [4] Horner, W. B. and Joyner, U. T., Pneumatic Tire Hydroplaning and Some Effects on Vehicle Performance, SAE paper 970C (1965).
- [5] Browne, A. L., Tire Deformation During Dynamic Hydroplaning, Tire Science and Technology, Vol.3, 16-28 (1975).
- [6] Moore, D. F., The Friction of Pneumatic Tyres, Elsevier Scientific Publishing Company, 103-113 (1975).
- [7] Hays, D. F. and Browne, A. L. eds., The Physics for Tire Traction —Theory and Experiment—, Plenum Press, 281-297 (1974).
- [8] Moore, D. F., On the Inclined Non-Inertial Sinkage of a Flat Plate, J. Fluid Mech., Vol.20, 321-330 (1964).
- [9] Whicker, D., Browne, A. L. and Rohde, S. M., Some Effect of Inclination on Elastohydrodynamic Squeeze Film Problems, J. Fluid Mech., Vol.78, 247 (1976).
- [10] Browne, A., Cheng, H. and Kistler, A., Dynamic Hydroplaning of Pneumatic Tires, Wear, Vol.20, 1-28 (1972).
- [11] Browne, A. L., Computer-Aided Prediction of the Effect of Tire Tread Pattern Design on Thick Film Wet Traction, GMR-2487 (1977).
- [12] Browne, A. L., Whicker, D. and Rohde, S. M., Predicting the Effect of Tire Tread Pattern Design on Thick Film Wet Traction, Tire Science and Technology, Vol.3, 215-234 (1975).
- [13] Rohde, S. M., On the Combined Effects of

Tread Element Flexibility and Pavement Microstructure on Thin Film Wet Traction, SAE paper 770277 (1977).

- [14] Sakai, H., Tire Technology (in Japanese), Grand Prix Publication, 271 (1987).
- [15] Okamura, M. and Someya, T., Research of Hydroplaning (1) (in Japanese), Transactions of JSME, Vol.43, 3932-3943 (1977).
- [16] Okamura, M. and Someya, T., Research of Hydroplaning (2) (in Japanese), Transactions of JSME, Vol.43, 3944-3953 (1977).
- [17] Grogger, H. and Weiss, M., Calculation of the Three-Dimensional Free Surface Flow Around an Automobile Tire, Tire Science and Technology, Vol.24, 39-49 (1996).
- [18] Grogger, H. and Weiss, M., Calculation of the Hydroplaning of a Deformable Smooth-Shaped and Longitudinally-Grooved Tire, Tire Science and Technology, Vol.25, 265-287 (1997).
- [19] Seta, E., Nakajima, Y., Kamegawa, T. and Ogawa, H., Hydroplaning Analysis by FEM and FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning, Tire Science and Technology, Vol. 28, No. 3, 140-156 (2000).
- [20] Nakajima, Y., Hydroplaning Analysis by FEM and FVM : Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning, International Journal of Automotive Technology, Vol.1, No.1, 26-34 (2000).
- [21] Seta, E. and Nakajima, Y., Development of Tire Pattern by Hydroplaning Simulation (in Japanese), Nippon Gomu KyokaiShi, Vol.74, No.4, 148-153 (2001).
- [22] Okano, T. and Koishi, M., A New Computational Procedure to Predict Transient Hydroplaning Performance of a Tire, Tire Science and Technology, Vol.29, No.1, 2-22 (2001).
- [23] Seta, E., Nakajima, Y. and Kamegawa, T., Prediction of Snow/Tire Interaction Using Explicit FEM and FVM, Tire Science and Technology, Vol.31, No.3, 173-188 (2003).
- [24] Oida, S., Seta, E., Heguri, H. and Kato, K., Soil/Tire Interaction Analysis Using FEM and FVM, Tire Science and Technology, Vol.33, No.1, 38-62 (2005).
- [25] MSC Dytran USER'S MANUAL, Version 4.0.