

MADONE SLR WHITEPAPER

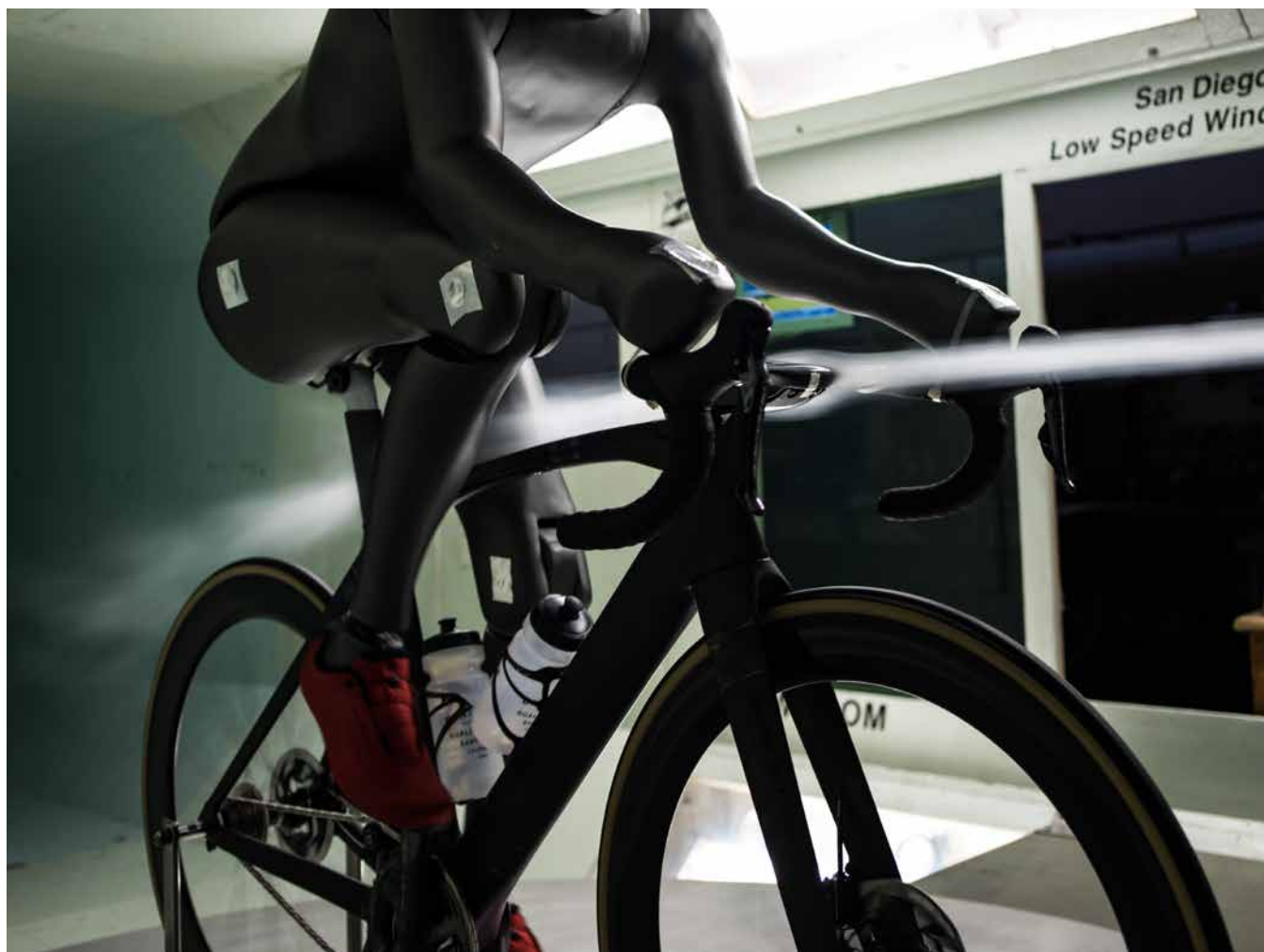
著者

ティム・ハーテュング
ポール・ハーダー
アレックス・ベディンハウス



目次

3	イントロダクション
4	空力性能
6	重量
11	振動吸収テクノロジー
19	ジオメトリー
21	改良およびインテグレーション
27	付録



イントロダクション

エアロレースバイクを作るには、多くの性能を細部までバランス良く実現させなければならない。そして、ある1つの性能を高めようとする、他の性能を犠牲になりがちである。秀逸なエアロレースバイクを生み出すためには、何より「空力性能」と「重量」が重要である。ただし、快適さ、フィット、ハンドリング性、フレーム剛性、外観、インテグレーションなども無視はできない。MadoneがMadoneらしくありながら、より究極に近いオールラウンドなレースバイクとなるよう、トレックは取り組んだ。

このホワイトペーパーでは、前モデルと同様にトレックが行った数値流体力学 (CFD) や幾度とないデザイン工程を事細かに説明され、Madoneのライドチューンドパフォーマンスにも焦点を当てている。それに加え、空力性能や各種バイクの重量を前Madoneのものと比較検討の結果を記載。また、前Madoneと比べ、ライダーの経験を大幅に高める快適さ、フィット、インテグレーション、改良点についても詳しく記載されている。

トレックは、かつてないほどディテールにこだわった。この新たなMadoneは、オールラウンドなパフォーマンスを発揮し、他にはないインテグレーションのデザインや外観を備え、乗り手を乗る気にさせる。



空力性能

トレックは、CFDで解析したいいくつかの数値に焦点を当て、空力性能を向上するため、いかに空気抵抗を削減できるかを特定した。空気抵抗の削減こそが最大の目標であるが、表面気流の分離傾向、バイク表面の低エネルギー渦、後方乱気流の量、ホイール、フォーク、フレーム、コンポーネントに掛かる局所のおよび蓄積した力（図1）をも分析した。また、トレックはCFDを用いて、空力性能に優れるコンポーネントの理解や開発も行った。これら全ての測定や、CFD モデルを風洞実験結果に組み合わせることで、トレックのCFDの精度は、実験結果の3%以内となっている。¹



図1. 第1作目から最終版までのデザイン反復プロセスにおける、CFD シミュレーション（局所のおよび蓄積した力と軸となる位置との関係）（黄 - 新型Madone 第1作目、青 - 前Madone、赤 - 新型Madone最終版）

トレックが新型Madoneに設けた目標は、-12.5から12.5度までのヨー角における空力性能を、前Madoneと同じ水準に保つことであった。この角度の幅は、実際の状況から収集したデータに基づき、乗り手が体感する最も一般的なヨー角である。²新たなディスクブレーキモデル、フィット、快適さを高める新テクノロジーや最新コンポーネントなど、様々なチャレンジに直面した。その中で、空力性能の維持は大きな壁であった。テスト結果をまとめたグラフを図1に示す。最初のデザインは、前Madoneより遅く、トレックが生産段階に行き着く頃には、パフォーマンスが前Madoneを凌ぐことが予想された。

サンディエゴ・ロースPEED風洞施設にて収集した実験結果を図2に示す。ヨー角-12.5から12.5度において、新型Madoneの最終空気抵抗値は3216g、前Madoneは3202gとなった。この14gの差は、トレックの目標および、風洞施設の実験で発生する誤差の範囲内である。



サンディエゴ風洞施設のテスト 1809 -- ロードバイクフレームのデータ、マネキン使用時
(空気抵抗値をバイクモデルごとに換算、支柱の重量は除く、時速30マイル：時速約48.3キロに標準化)

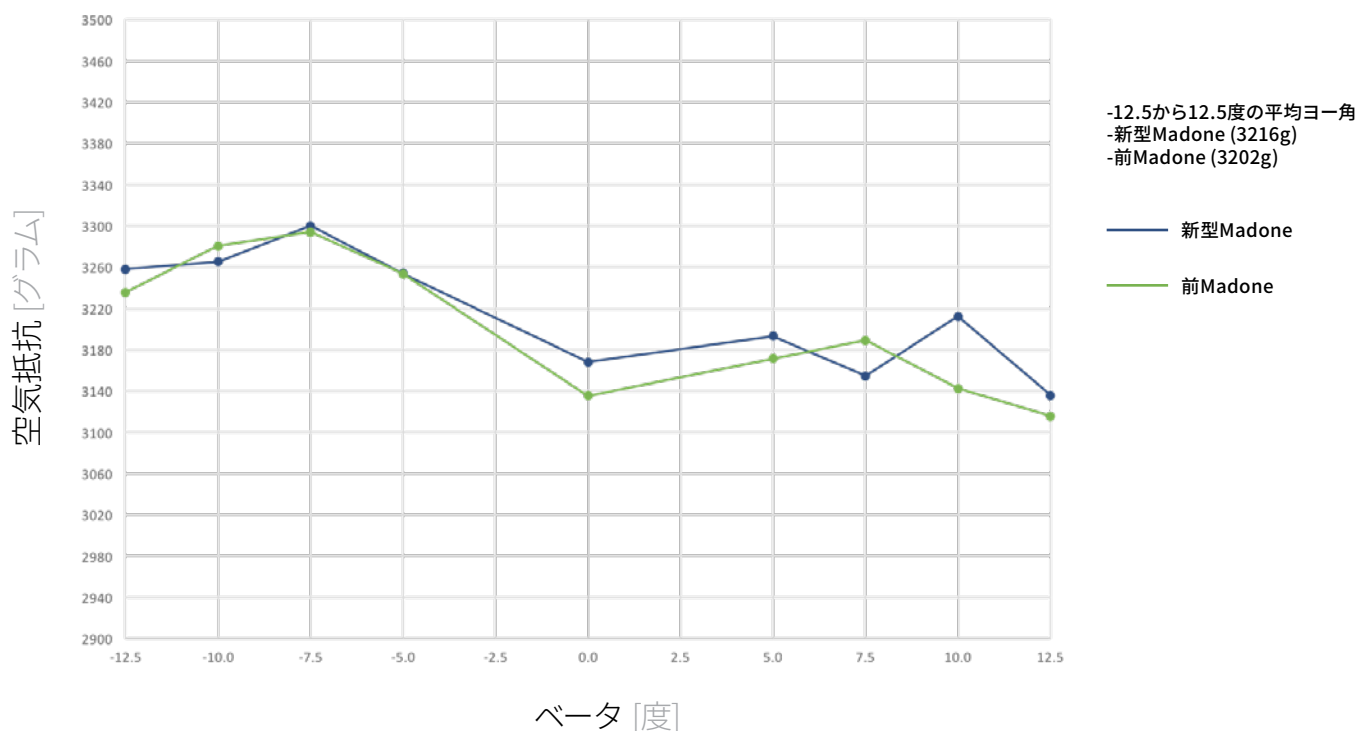


図2. 風洞実験の結果 (サンディエゴ・ロースPEED風洞施設、2018年4月、新型 Madone 101回目 (青) vs 前Madone (緑)、ペダリング運動をするマネキンとウォーターボトル2本をバイクに装着)

²トレック 2014 Speed Concept ホワイトペーパー、第3.2項 “実世界における空力性能の測定”

重量

バイク重量は、アスリートや消費者が気にする情報である。最もオールラウンドなエアロレースバイクを作るには、空力性能、フレーム剛性、そしてこれらの延長線上にある、バイク重量のバランスを慎重に取る必要がある。

一般的に、空力性能に優れた翼形状を設けることは、フレームの剛性と重量を考えると好ましくない。空力性能を高めようとしても、その取り付け位置が不適切であると、バイクフレームが主に受ける荷重条件により、その断面特性はフレーム剛性の向上や軽量化に役立たないからだ。ペダリング荷重は横方向に掛かるが、エアロバイクのフレーム断面は、ペダリング荷重とは反対の最も効果的でない方向にになる。通常、バイクフレームは、幅の広い左右対称のチューブ形状を用いて、高剛性と軽さを実現する。一方、細身のチューブのバイクは、空力性能に優れている。オールラウンドなエアロレースバイクは、これら2つの相反する特性をバランスよく実現する必要がある。空力性能や速さだけに重視し、それに適した剛性や優れた走りを実現させるには、フレームが重くなってしまう。軽さを重視すると、空気抵抗を増やす幅の広いチューブ形状で、遅いフレームが出来上がってしまう。

新型Madoneに対するトレックの目標は、前Madoneの空力性能を同水準にし、リムモデルと同等またはそれ以上に軽くしつつ、新機能を搭載させること。振動吸収性を調整できるテクノロジー、リバウンドバンパー、分割したバーとステム、そしてその一新した外観ですら、最高にオールラウンドなレースバイクの特徴の一部である。ディスクブレーキモデルは、先述の特徴を備えた状態で、目標重量を7.5kgに設定。

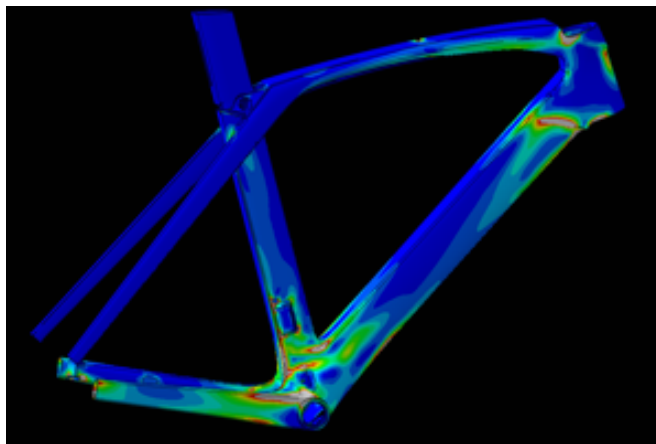
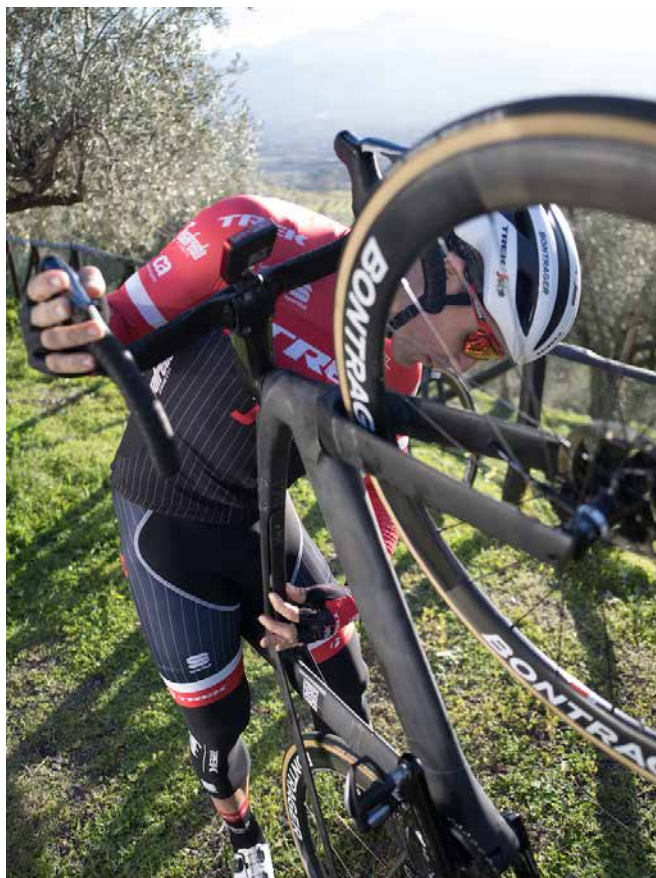


図3. FEA シミュレーション（ひずみエネルギー密度）。数多く反復した分析結果の一例。大きなひずみが掛かる部位が表示され、構造的効率を解析するために役立つ。



この目標を達成するため、新型Madoneのフレーム重量が前Madoneと同じか軽くなるよう、トレックのこれまでの経験と知識を絞りだした。膨大な数の有限要素モデルを解析し、フレームの細部を微調整し、できるだけ重量を削減しつつ、空力性能に求められる条件をバランスよく実現。トレックの設計者は、シミュレーションの結果や予測に満足すると、全てのカーボン製コンポーネントを製造する上での可能性を探った。

新型Madoneのカーボンコンポーネントラミネートのあらゆる細部が、このバイクの目標重量を達成できるよう、トレックはサプライヤーと調べ上げた。この結果、ライダーにさらなる利点をもたらす特徴が追加され、前Madoneと同じ軽さのバイクが誕生した。リムブレーキモデルは、前Madoneと同じ重量（7.1kg）で、新たなディスクブレーキモデルの重量は、ペイントテーマ次第で7.5kgとなった。以下の3つの表は、各種仕様（Shimano Di2 Disc、Sram Red eTap HRD、Shimano Di2 Rim）におけるバイク重量を細かく分けて示したものである。

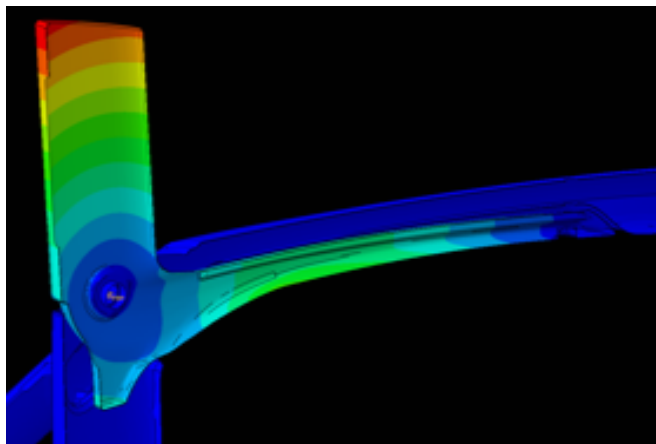


図4. FEA シミュレーション（縦方向の振動吸収性）。数多く繰り返し実行した分析のうち、サドルに垂直荷重が掛かった状態でシートマスト部にどのような力が作用するかを示した図。



表1. Shimano Dura-Ace Di2およびディスクブレーキを搭載した新型Madoneの車重
(但し、バイクは未塗装、ヘッドセットスペーサーは未使用で総重量に含まず)

	コンポーネント	スペック	
フロントホイール	ホイール(リムストリップ込み)	ボントレガー Aeolus 6 Disc Clincher	740.2
	ホイール QR	DT RWS [12 x 124]	51.0
	ローター + ロックリング	SM-RT900-S [160mm]	126.6
	タイヤ	ボントレガー R4 320 TPI 25C	230.0
	チューブ	ボントレガー Lightweight [80mm バルブ]	65.0
リアホイール	ホイール(リムストリップ込み)	ボントレガー Aeolus 6 Disc Clincher	858.6
	ホイール QR	DT RWS [12 x 124]	59.6
	ローター	SM-RT900-S [160mm]	126.6
	タイヤ	ボントレガー R4 320 TPI 25C	230.0
	チューブ	ボントレガー Lightweight [80mm バルブ]	65.0
	カセット(ロックリング込み)	CS-R9100 [11-28T]	193.0
BB	クランク	FC-R9100 [170mm 53-39T]	621.0
	ボトムブラケット	NSK (シール & アクスルシールド込み)	52.7
コクピット / ステアリング	アッパーヘッドセットベアリング	513538 [MR031S]	24.5
	ロワーヘッドセットベアリング	540243 [MR006]	22.5
	ヘッドセットスペーサー [DS/NDS]	15mm [561913/4]	11.7
	ヘッドセットスペーサー [DS/NDS]	5mm [561911/2]	4.4
	トップキャップ/ボルト & コンプレッションプラグ	566031	39.8
	コンプレッションリング	563834	7.6
	ベアリングトップキャップ	561910 [SRP]	23.8
	ステム	110mm x -7度 - 全てのハードウェア + フェイスプレート含む	207.0
	ハンドルバー	42cm VRCF	276.0
	ビニールテープ	3M Super 33+ [200mm]	1.3
	バーテープ + プラグ	ボントレガー Gel Cork [534772 -Black]	62.0
	ステアリングストップ + ボルト	565905 / 318529	1.4
	シフター (左)	ST-R9170	158.0
	シフター (右)	ST-R9170	158.0
	フォーク	(最も短かくした状態 = 196mm)	421.0
サドル/ポスト	サドル	ボントレガー Montrose Pro [138mm]	169.0
	シートポスト + ウェッジハードウェア	ショート x 25 [全てのハードウェアを含む]	234.8
	シートポスト ラバーテール	557630	8.0
ブレーキ	フロントブレーキ + レジンパッド + ノーマルホース	BR-9170-F	162.1
	リアブレーキ + レジンパッド + ノーマルホース	BR-9170-R	165.5
	リアブレーキアダプター、160mm		11.8
	リアブレーキハウジンググロメット	330578	1.8
ドライブレイン	フロントディレイラー	FD - R9150	104.0
	フロントディレイラーボルト + カーボンワッシャー	531901 + 543903	5.8
	リアディレイラー	RD - R9150	198.0
	充電ポート	Shimano Di2 EW-RS910	10.4
	内蔵バッテリー	Shimano Di2	50.0
	ワイヤーキット	JC130-MM [550/50/550], 350, JC200, 700, 550, 650, 150	50.0
	チェーン	CN-HG901-11	247.0
	チェーンキーパー (ワッシャー&ボルト込み)	566021 + 321693 & 521137	16.5
	DT ジャンクションポート	561882 + 510973 & 結束バンド2本	44.1
	フロントディレイラー ワイヤー出口用グロメット	440697	0.5
フレーム	リアディレイラー ワイヤー出口用グロメット	317292	0.5
	フレーム	1478U0519 - SRP	870.0
	シートマスト	564480 -SRP	151.0
	リアディレイラーハンガー (ボルト込み)	524884 + 524188	11.7
	DuoTrap カバー	521455	3.0
	ダンパー	564027 - キャリッジ、ハウジング、バンパー、取付用ボルト2本、ブリロードボルト	17.4
	ピンチボルト + バンパー	564444 + 568099	4.7
	調整用スライダー	564294	3.9
	IsoSpeed ハードウェア	569265 -ボルト、ナット、ワッシャー、ウェーブワッシャー、プッシング2個、インナープッシング	26.0
	IsoSpeed カバー [外側]	565903 - SRP	7.6
	IsoSpeed カバー [内側]	565904	8.0
合計		合計	7.405kg

表2. SRAM Red eTap HRDを搭載した新型Madone
(但し、バイクは未塗装、ヘッドセットスペーサーは未使用で総重量に含まず)

	コンポーネント	スペック	
フロントホイール	ホイール(リムストリップ込み)	ボントレガー Aeolus 6 Disc Clincher	740.2
	ホイール QR	DT RWS [12 x 124]	51.0
	ローター	Centerline Centerlock [160mm]	124.6
	タイヤ	ボントレガー R4 320 TPI 25C	230.0
	チューブ	ボントレガー Lightweight [80mm バルブ]	65.0
リアホイール	ホイール(リムストリップ込み)	ボントレガー Aeolus 6 Disc Clincher	858.6
	ホイール QR	DT RWS [12 x 124]	59.6
	ローター	Centerline Centerlock [160mm]	124.6
	タイヤ	ボントレガー R4 320 TPI 25C	230.0
	チューブ	ボントレガー Lightweight [80mm バルブ]	65.0
	カセット(ロックリング込み)	XG-1190 [11-28T]	169.0
BB	クランク	Red [GXP 170mm 53-39T]	609.0
	ボトムブラケット	NSK(シール & アクスルシールド込み)	52.7
コクピット / ステアリング	アッパーヘッドセットベアリング	513538 [MR031S]	24.5
	ロワーヘッドセットベアリング	540243 [MR006]	22.5
	ヘッドセットスペーサー [DS/NDS]	15mm [561913/4]	11.7
	ヘッドセットスペーサー [DS/NDS]	5mm [561911/2]	4.4
	トップキャップ/ボルト & コンプレッションプラグ	566031	39.8
	コンプレッションリング	563834	7.6
	ベアリングトップキャップ	561910 [SRP]	23.8
	ステム	110mm x -7度 - 全てのハードウェア + フェイスプレート含む	207.0
	ハンドルバー	42cm VRCF	276.0
	ビニールテープ	3M Super 33+ [200mm]	1.3
	バーテープ + プラグ	ボントレガー Gel Cork [534772 -Black]	62.0
	ステアリングストップ + ボルト	565905 / 318529	1.4
	シフター (左)	ブレーキを参照	0.0
	シフター (右)	ブレーキを参照	0.0
	フォーク	注 ステアリングコラムのチューブ長(最も短くした状態 = 196mm)	421.0
サドル/ポスト	サドル	ボントレガー Montrose Pro [138mm]	169.0
	シートポスト + ウェッジハードウェア	ショート x 25 [全てのハードウェアを含む]	234.8
	シートポスト ラバーテール	557630	8.0
ブレーキ	フロントシフター + フロントブレーキ + レジンパッド + ノーマルホース	Sram Red eTap HRD	390.2
	フロントシフター + フロントブレーキ + レジンパッド + ノーマルホース	Sram Red eTap HRD	380.1
	リアブレーキハウジンググロメット	330578	1.8
ドライブトレイン	フロントディレイラー	フロントディレイラー + バッテリー	164.0
	フロントディレイラーボルト + カーボンワッシャー	531901 + 543903	5.8
	リアディレイラー	リアディレイラー + バッテリー	236.0
	チェーン	Red 22 [114 リンク]	246.0
	チェーンキーパー(ワッシャー&ボルト込み)	566021 + 321693 & 521137	16.5
	フロントディレイラー ワイヤー出口用グロメット	440697	0.5
	リアディレイラー ワイヤー出口用グロメット	317292	0.5
	チェーンキーパー(ワッシャー&ボルト込み)	566021 + 321693 & 521137	16.5
	DTジャンクションポート	561882 + 510973 & 結束バンド2本	44.1
	フロントディレイラー ワイヤー出口用グロメット	440697	0.5
	リアディレイラー ワイヤー出口用グロメット	317292	0.5
フレーム	フレーム	1478U0519 - SRP	870.0
	シートマスト	564480 -SRP	151.0
	リアディレイラーハンガー(ボルト込み)	524884 + 524188	11.7
	DuoTrap カバー	521455	3.0
	ダンパー	564027 - キャリッジ、ハウジング、バンパー、取付用ボルト2本、プリロードボルト	17.4
	ピンチボルト + バンパー	564444 + 568099	4.7
	調整用スライダー	564294	3.9
	IsoSpeed ハードウェア	569265 -ボルト、ナット、ワッシャー、ウェーブワッシャー、プッシング2個、インナープッシング	26.0
	IsoSpeed カバー [外側]	565903 - SRP	7.6
	IsoSpeed カバー [内側]	565904	8.0
合計			7.423kg

表3.Shimano Dura-Ace Di2およびリムブレーキを搭載した新型Madoneの車重
(但し、バイクは未塗装、ヘッドセットスペーサーは未使用で総重量に含まず)

	コンポーネント	スペック	
フロントホイール	ホイール(リムストリップ込み)	ボントレガー Aeolus 6 Clincher	712.1
	ホイール QR	Race Lite (Internal Cam 100mm)	55.0
	タイヤ	ボントレガー R4 320 TPI 25C	230.0
	チューブ	ボントレガー Lightweight [80mm バルブ]	65.0
リアホイール	ホイール(リムストリップ込み)	ボントレガー Aeolus 6 Clincher	861.7
	ホイール QR	Race Lite Road (Internal Cam 130mm)	60.0
	タイヤ	ボントレガー R4 320 TPI 25C	230.0
	チューブ	ボントレガー Lightweight [80mm バルブ]	65.0
	カセット(ロックリング込み)	CS-R9100 [11-28T]	193.0
BB	クランク	FC-R9100 [170mm 53-39T]	621.0
	ボトムブラケット	NSK(シール & アクスルシールド込み)	52.7
コクピット / ステアリング	アッパーヘッドセットベアリング	513538 [MR031S]	24.5
	ロワーヘッドセットベアリング	540243 [MR006]	22.5
	ヘッドセットスペーサー [DS/NDS]	15mm [561913/4]	11.7
	ヘッドセットスペーサー [DS/NDS]	5mm [561911/2]	4.4
	トップキャップ/ボルト & コンプレッションプラグ	566031	39.8
	コンプレッションリング	563834	7.6
	ベアリングトップキャップ	561910 [SRP]	23.8
	ステム	110mm x -7度 - 全てのハードウェア + フェイスプレート含む	207.0
	ハンドルバー	42cm VRCF	276.0
	ビニールテープ	3M Super 33+ [200mm]	1.3
	バーテープ + プラグ	ボントレガー Gel Cork [534772 -Black]	62.0
	ステアリングストップ + ボルト	565905 / 318529	1.4
	シフター (左)	ST-R9150	113.0
	シフター (右)	ST-R9150	113.0
	フォーク	注 ステアリングコラムのチューブ長(最も短くした状態 = 196mm)	378.0
サドル/ポスト	サドル	ボントレガー Montrose Pro [138mm]	169.0
	シートポスト + ウェッジハードウェア	ショート x 25 [全てのハードウェアを含む]	234.8
	シートポスト ラバーテール	557630	8.0
ブレーキ	フロントブレーキ(ウェッジ込み)	559499	119.8
	フロントブレーキカバー	562717 - SRP	27.6
	フロントブレーキストップ	562098	4.6
	ハウジング + ケーブル	Shimano BC-9000	32.0
	リアブレーキ(ウェッジ&カバー込み)	559758	154.3
	リアブレーキストップ(金輪込み)	516820	4.5
	ハウジング + ケーブル + フォームチューブ [5.7]	Shimano BC-9000	72.0
ドライブレイン	フロントディレイラー	FD - R9150	104.0
	フロントディレイラー ボルト + カーボンワッシャー	531901 + 543903	5.8
	リアディレイラー	RD - R9150	198.0
	充電ポート	Shimano Di2 EW-RS910	10.4
	内蔵バッテリー	Shimano Di2	50.0
	ワイヤーキット	JC130-MM [550/50/550], 350, JC200, 700, 550, 650, 150	50.0
	チェーン	CN-HG901-11	247.0
	チェーンキーパー (ワッシャー&ボルト込み)	566021 + 321693 & 521137	16.5
	DT ジャンクションポート	561882 + 510973 & 結束バンド2本	44.1
	フロントディレイラー ワイヤー出口用グロメット	440697	0.5
	リアディレイラー ワイヤー出口用グロメット	317292	0.5
フレーム	フレーム	1477U0519 - SRP	885.0
	シートマスト	564480 -SRP	151.0
	リアディレイラーハンガー (ボルト込み)	315464 + 318604	12.4
	DuoTrap カバー	521455	3.0
	ダンパー	564020 - キャリッジ、ハウジング、バンパー、取付用ボルト2本、プリロードボルト	17.1
	ピンチボルト + バンパー	564444 + 568099	4.7
	調整用スライダー	564294	3.9
	IsoSpeed ハードウェア	569265 -ボルト、ナット、ワッシャー、ウェーブワッシャー、プッシング2個、インナープッシング	26.0
	IsoSpeed カバー [外側]	565903 - SRP	7.6
	IsoSpeed カバー [内側]	565904	8.0
合計			7.087

振動吸収テクノロジー

調整式トップチューブISOSPEED

新型Madoneには、Domane SLRの振動吸収性を調整できる技術が、搭載されている。Madone の調整式IsoSpeedテクノロジーは、Domane SLRのように互いに組み込まれた2つのフレーム部から構成されるが、空力性能を高めるため、Madoneではトップチューブへと移行された。また、このことで、全フレームサイズでより均一な振動吸収性を実現するようになった。そして、ダンピング特性を生むハードウェアをシートチューブ裏側に搭載。

この2つのフレーム構成部品は、トップチューブの中間にボルトで固定されている。(図5参照) これら2部品の間には、スライダーを前後に移動させるための空間があり、シートマスト部は、IsoSpeed 技術により、上側がバイク後方へしなると、下側の構成部品を上へとしならせる。メインフレームのトップチューブはシートマスト下側とは独立しているため、シートマストを上向きにしならせる。スライダーはシートマストとメインフレームのトップチューブとの両方に接触し、ライダーの好みに合わせてシートマストの上向きへのしなり量を調整できるようにする。スライダーをフレーム前方に移動させると、シートマストがしなるための空間が広くなるため、振動吸収性が増える。スライダーをフレーム後方へ移動させると、スライダーがその前にある空間でのしなりを抑制するため、振動吸収性は低くなる。

主観テスト走行、計測機器を付けてのテスト走行、そして実験室でのテストを行った。その結果、ライダーがサドル部で縦方向の振動吸収性を調節できているとの報告を受け、この新たな調整式振動吸収テクノロジーが予想通り機能していることが実証された。

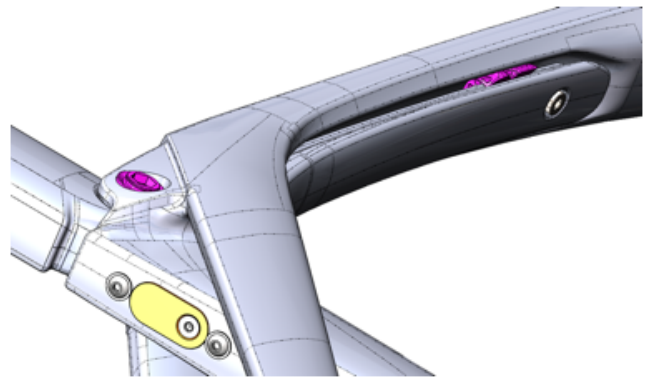
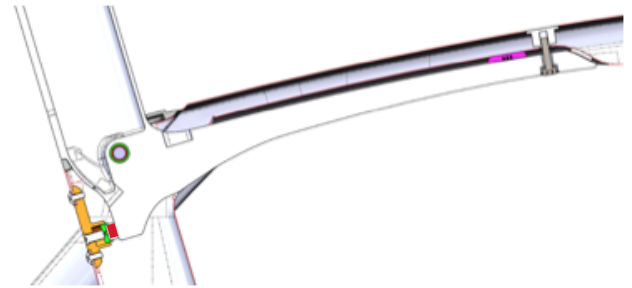


図5. 新型Madone 調整式振動吸収テクノロジーのCAD モデル(上 - フレーム中央断面図、

下 - トップチューブとIsoSpeedを下から見た図

図6に示す通り、研究室で実施したサドル部の縦剛性のテストでは、サイズ56のフレームの振動吸収性において、スライダーの調整範囲では、およそ119N/mmから175N/mmまで変化した。前Madoneの縦剛性は、およそ144N/mmであったため、新型Madoneの振動吸収性は旧型と比べ、17%高く、また22%低くできるということである。

スライダーを最前部から中間まで動かすと、振動吸収性の変化は大きく、その先となる中間から最後部まで動かすと、変化はより小さいことがわかる。

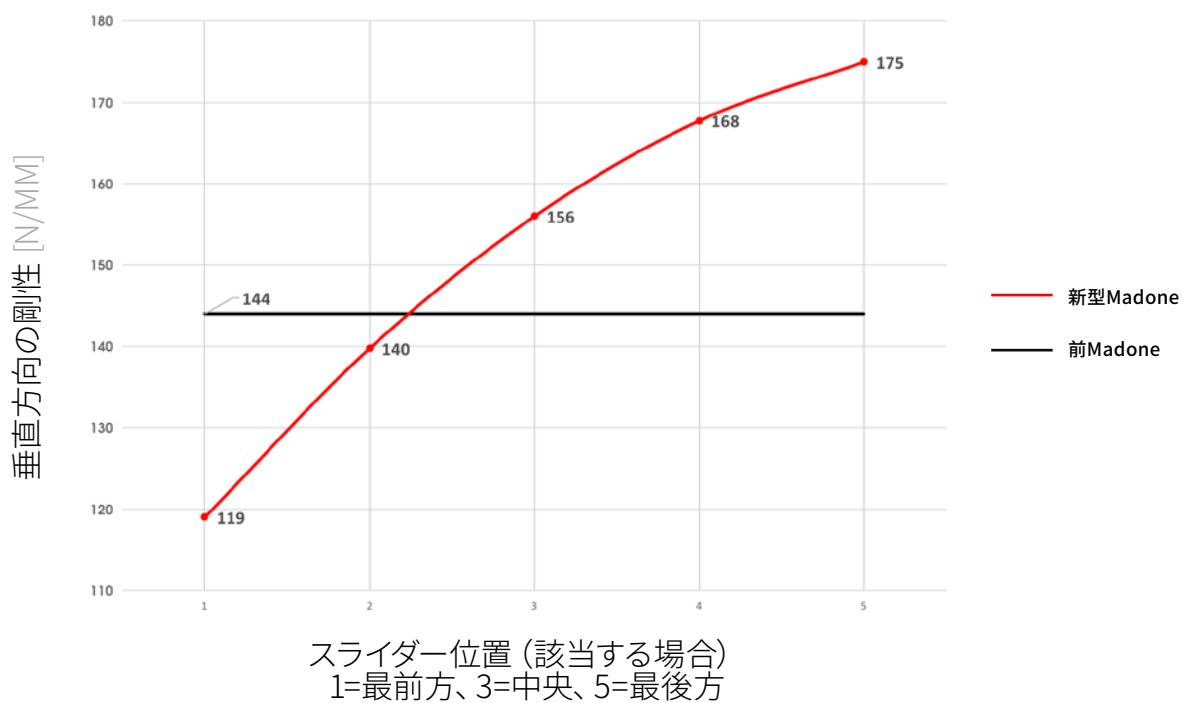


図6. フレーム後部の縦剛性



もう一つの利点は、全てのフレームサイズで縦方向の振動吸収量をほぼ統一させられること。これは、着脱可能なシートマスト部が全てのフレームサイズでほぼ同じ大きさであるためだ。通常のロードバイクであれば、小さいサイズのフレームは縦方向の振動吸収性に乏しく、フレームのサイズが大きくなるにつれて、徐々に剛性が下がっていく。フレームのチューブが長いと（フレームサイズが大きいと）しなりやすく、短いと（サイズが小さいと）しなりにくい。これは、一本の長い棒状の物を曲げようとする考え方を思い浮かべると分かりやすい。例えば、長くて薄い金属製チューブを手を持っているとしよう。短いチューブより長いの方がはるかに曲げやすいはず。シートマスト部の長さは全フレーム共通であるため、この新たなテクノロジーなら、全てのサイズで一貫した振動吸収量を得られるのである。

図7に、全フレームサイズの最小および最大の振動吸収量を示す。フレームサイズが大きくなると、縦剛性が若干下がる傾向にある。これは、フレームサイズが大きくなると、トップチューブが長くなるためである。従来のバイクだと、縦剛性は、フレームサイズにより30-40%異なる。新型Madoneでは、その差が3-6%程度。図には無いが、50cmのフレームサイズだけを比較（前 vs 新型）すると、新型の振動吸収性の方が、27%増えている。

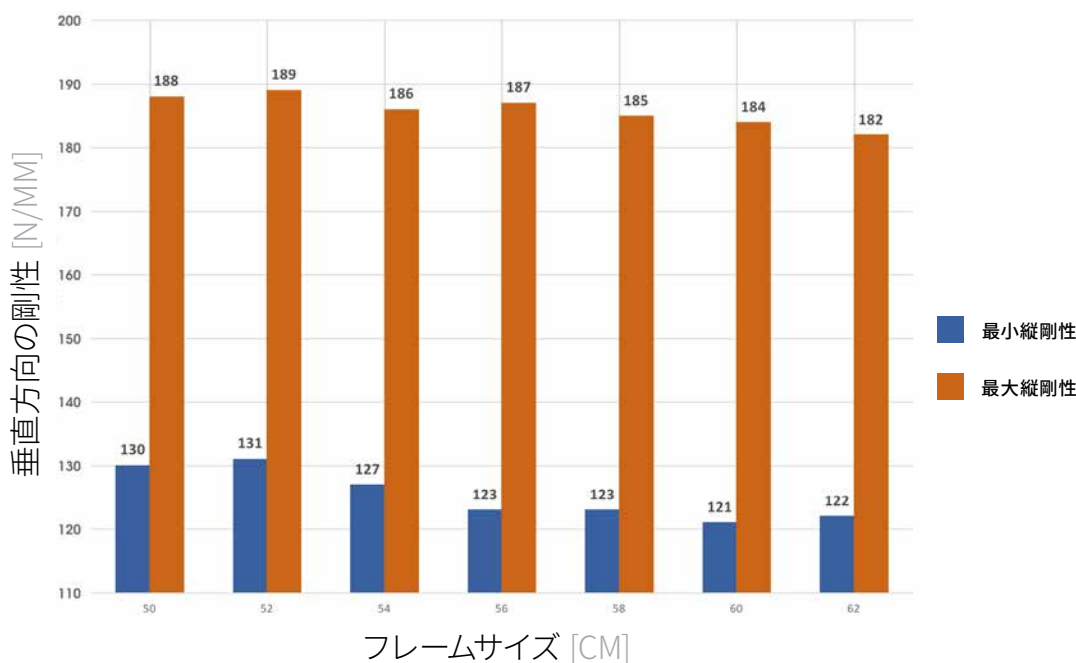


図7. 全フレームサイズにおけるフレーム後部の縦剛性（最大および最小）

トレックのIsoSpeed初となるダンパーを搭載させ、シートマストのリバウンドを制御できるようにした。これまでのIsoSpeed搭載フレームでは、大きな衝撃がフレームに加わると、シートマストがしなり、衝撃をいなして快適さがもたらされることで、乗り手は利点を体感することができた。この動きは、メインフレームと独立しているが、従来のフレームであれば、衝撃そのものがメインフレームに掛かる。しかし、シートマストが元の位置に戻るリバウンド段階では、シートマストの戻る速さにより、乗り手はサドルから体が離れる感覚を得ることがある。

ときによりこの感覚は、サドル上のポジションを調整し直さないといけなため、不快で好ましくなく、長時間続くと、疲労が生じることもある。このリバウンドの速さは、衝撃の大きさにより速くも遅くもなる。IsoSpeed システムにダンパーを搭載することにより、乗り手が感じるであろうこのリバウンドを抑制し、軽減させることができる。

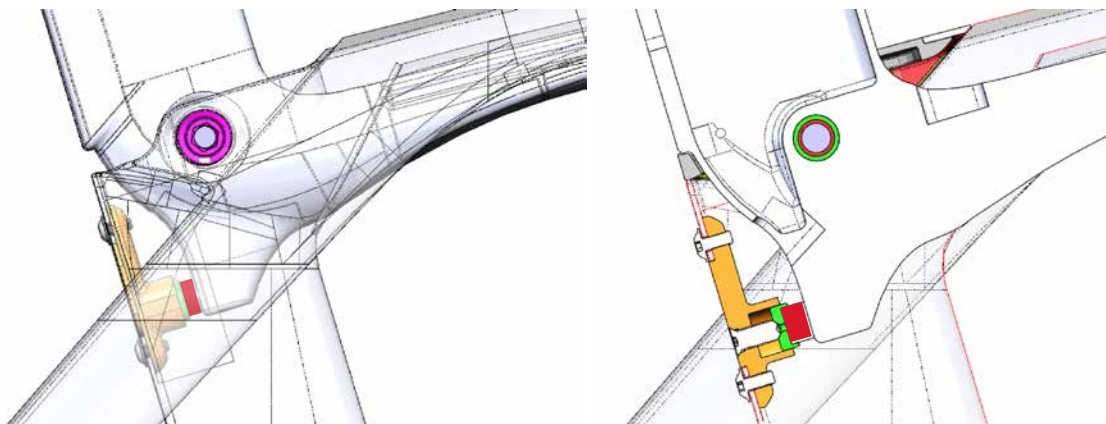


図8. Madone ダンパーのCAD モデル (左 - ドライブ側から見たメインフレームの透視図、右 - フレーム中央断面図)

このダンパーは、エラストマーダンパー (赤)、ダンパーハウジング (緑)、フレームキャリッジ (オレンジ) の3パーツから主に構成される。これらのパーツは、シートチューブ裏側のカーボン製メインフレームに取り付けられ、上の図8に示す通り、シートマスト部の凹みと接している。メインフレームを見やすくするため透明で描写した参照図において、フレームが通常の状態にあると、ダンパーはネジでシートマストに押し付けられている。このネジを緩めることで、ダンパーを押し付ける力が解放され、調整用スライダーの位置を再調整することもできる。スライダーの位置が決まれば、あとはネジをダンパーキャリッジの一番奥まで締め込み、ダンパーを圧縮させればよい。この作業は、微調整が不要で、位置を決めたら固定するというシンプルなものだ。

路面から衝撃を受け、サドルからシートマスト部に荷重が掛かると、シートマストは、図8またはバイクのドライブ側から見るとわかるように、反時計方向にになる。この動きがダンパーをわずかに圧縮させ、リバウンドの動きに備える。シートマストが元の位置に戻り出すと、ダンパーに再び荷重が掛かり、リバウンドの勢いを遅め、そのエネルギーを吸収する。

トレックは、研究室での静的テストだけでなく、動的テストを用いてバイクの動きをさらに深く理解することに務めた。静的テストで発生する現象は、ライダーがさまざまな路面環境で体感することと必ずしも直結しないためである。この工程を支え、環境変化を最小限に抑えるため、トレックは新たに開発したトレッドミル上で、測定機器を取り付けたバイクで走ってテストし、調整式振動吸収テクノロジーおよびダンパーテクノロジーの実証実験を行った。このトレッドミルでは、さまざまな路面環境を再現することができる。大きくばみや段差、アスファルト、グラベル、石畳などは、トレックがこの実験環境下で再現できる路面の一例である。付録の図A1からA4までに、テスト環境を示した。3軸加速度計や直線変位センサーを前Madoneおよび新型Madoneに取り付け、両者の差を記録した。これら装置は、リアアクスルとサドル間のしなり量を測定し、このしなり量がすなわち、バイクのリアサスペンショントラベルとなる。

トレックは、データを収集して、新たな調整式振動吸収/ダンパーテクノロジーが乗り手に与える効果を示し、これが快適さなどのような関係性があるのかを調べた。社内のテストライダー3名にトレッドミルで5種類の路面を走らせ、1回ごとに意図を変えて合計37回のテストを行った。

トレッドミルの速度やIsoSpeedの調整用スライダーの位置などの不確定要素が、このテスト計画では考慮されている。

下の図9は、リアアクスルとサドル間の、ピーク間の平均しなり量を示している。ここで、サドルがリアアクスルに向かって押し込まれると考えよう。「1つのコブ」と「縁石から降りる」テストの結果は、図6で示した研究室での静的テストの結果と最も合っていることがわかる。図9は、前Madoneの動的振動吸収性が、新型Madoneの動的振動吸収性の調整範囲内にあることを示している。さらに詳しく見ると、調整用スライダーを動かした時、圧縮力が概ね一貫して変化していることがわかる。なお、スライダー1は最も振動吸収性に優れた位置、スライダー3は最も固い位置を表す。最後に、コブのサイズが大きくなるほど、スライダーの効果も明らかに大きくなる。これは、衝撃が大きくなるほど、乗り手は高い振動吸収性を求めるため、特に重要な結果である。

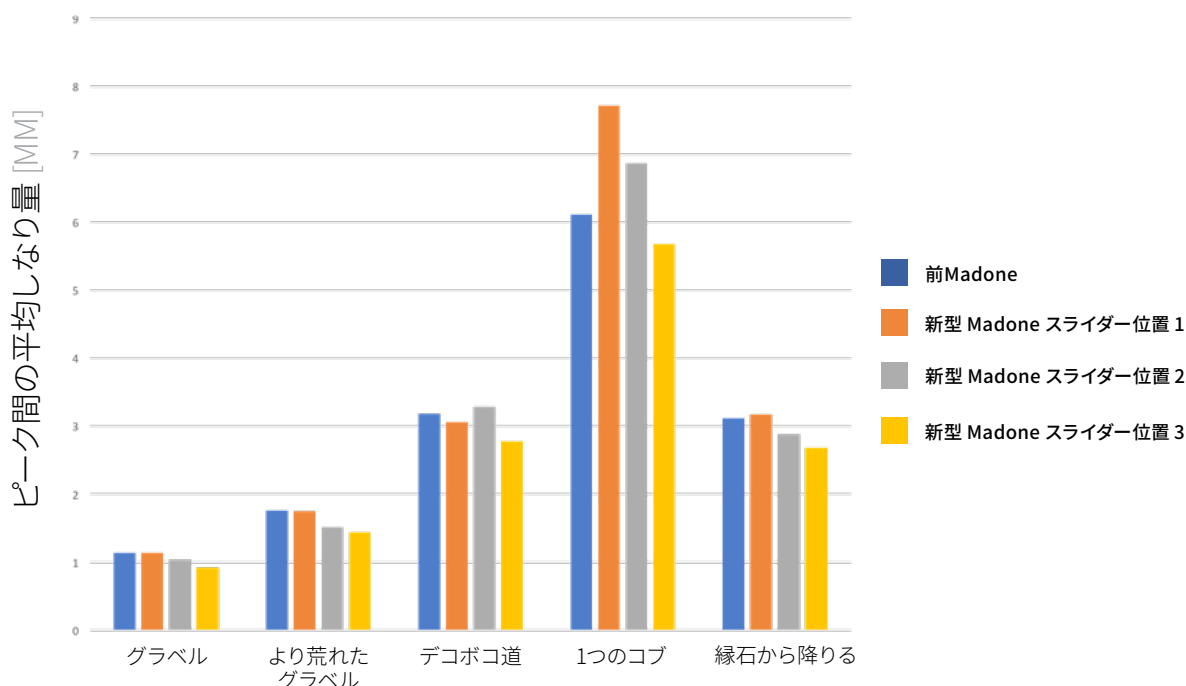


図9. ピーク間のしなり量、新型Madone vs 前Madone (スライダー 位置1 = 最も振動吸収性に優れた位置、スライダー 位置2 = 中間、スライダー位置3 = 最も固い位置)

下の図10は、調整用スライダーを各位置にセットした新型Madoneで「1つのコブ」を走った時の振動波形を示している。この波形は、「1つのコブ」を走るテストを複数回行い、テストごとの波形を平均化し、衝撃を受ける直前に沈み込みを標準化させてこれらの波形を重ねることで生成されている。この図は、新型Madoneのスライダー各位置の効果を、先ほど図9で示した傾向とは異なる形でより見やすく示したものである。図10では、ダンパーの位置や有無が乗り手にどのような効果を与えているかに主に注目したい。ダンパーの目的は、衝撃を受けた後に乗り手が感じる不快な動きを軽減させ、より制御された振動吸収性をシ

ステムに内蔵することであった。衝撃を受けた直後（図11）を拡大すると、スライダー位置やダンパーの有無によって差が生まれている。ここから、ダンパーは衝撃を受けた直後に、リバウンドの戻りを13%軽減していることがわかる。

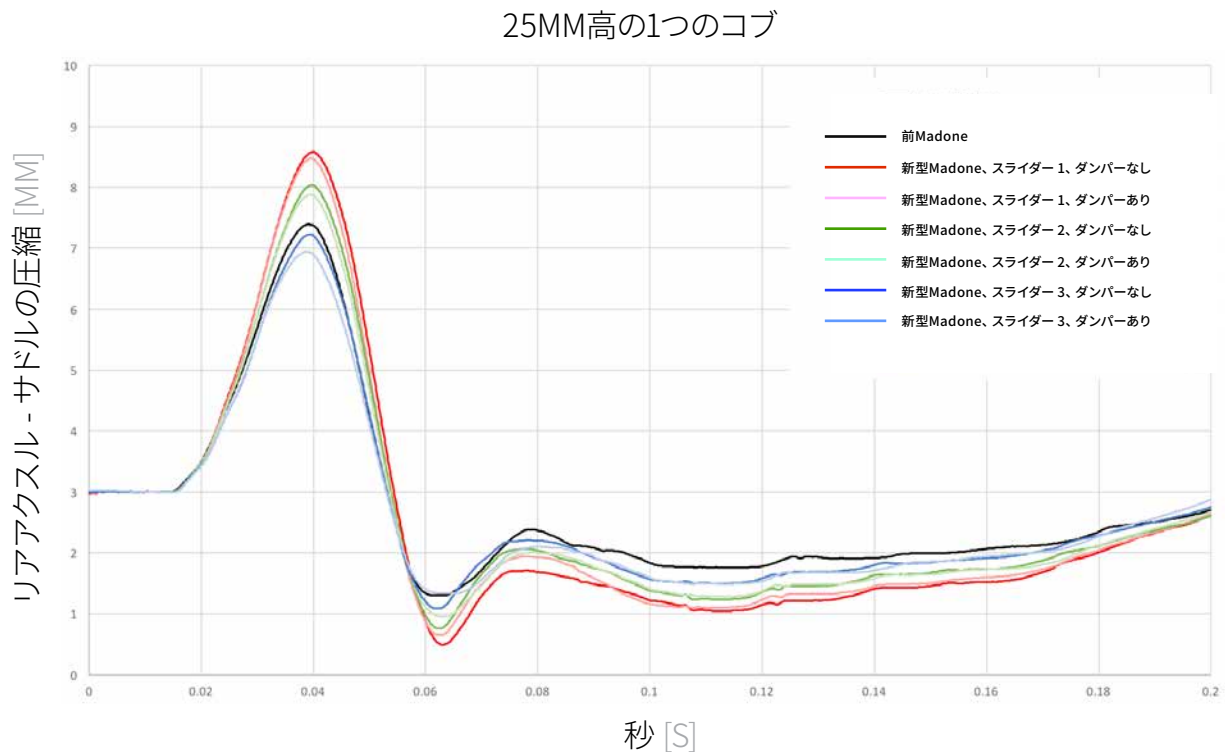
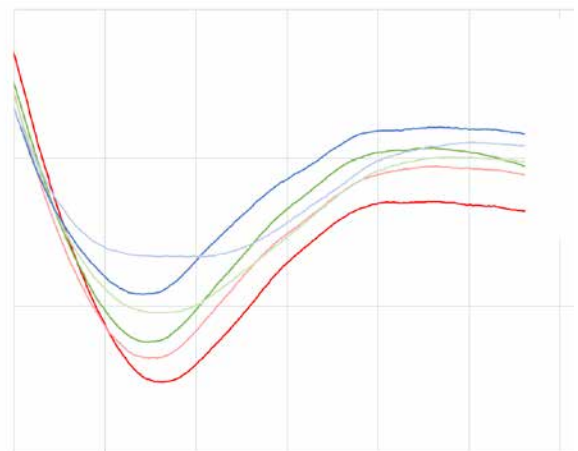


図10. 25mm高の1つのコブの振動波形、新型Madone（スライダー 1-3、ダンパー有/無）（スライダー 1 = 最も振動吸収性に優れた位置、スライダー 2 = 中間、スライダー 3 = 最も固い位置）

図11. 図10において衝撃を受けた直後のリバウンドを拡大（スライダー 1 = 最も振動吸収性に優れた位置、スライダー 2 = 中間、スライダー 3 = 最も固い位置）



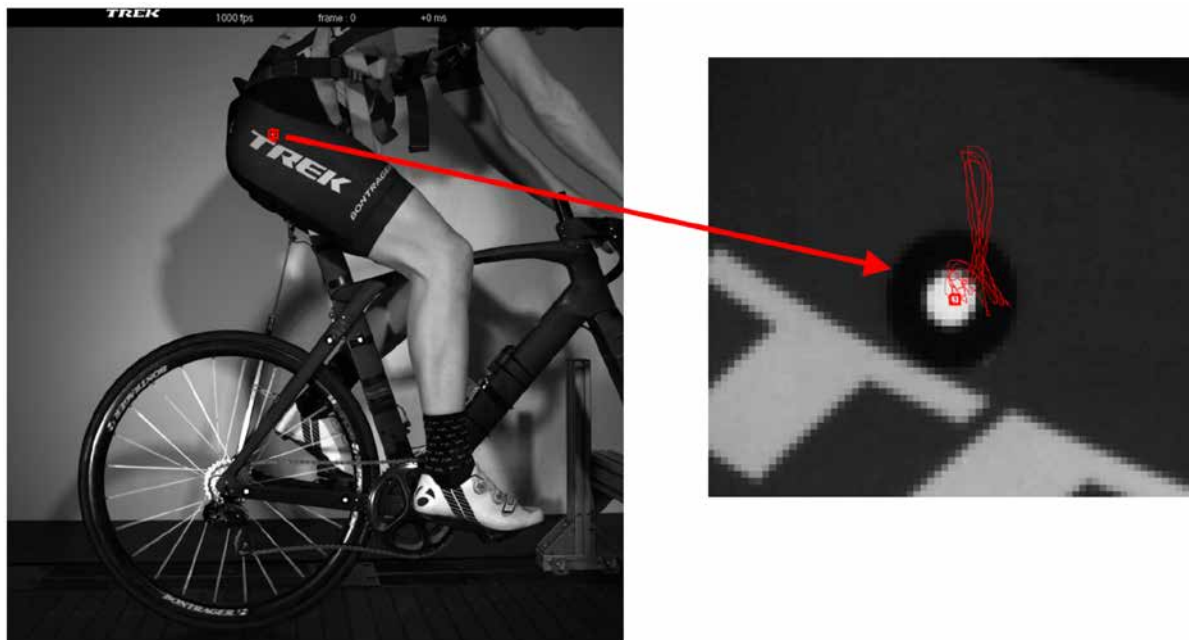


図12. ハイスピードカメラで捉えた腰の動き

このリバウンドの軽減量はまた、トレックの研究室でハイスピードカメラを用いて行ったライダーの腰の動きからも数値化できる（図12）。新型Madone（スライダー 1、ダンパーあり）と前Madoneとの縦方向の動きの差（図13）から、これらの効果が積み重なると、ライダーの体に加えられる振動が大幅に軽減されることがわかる。これはつまり、あらゆるサスペンション技術の最大目的である。

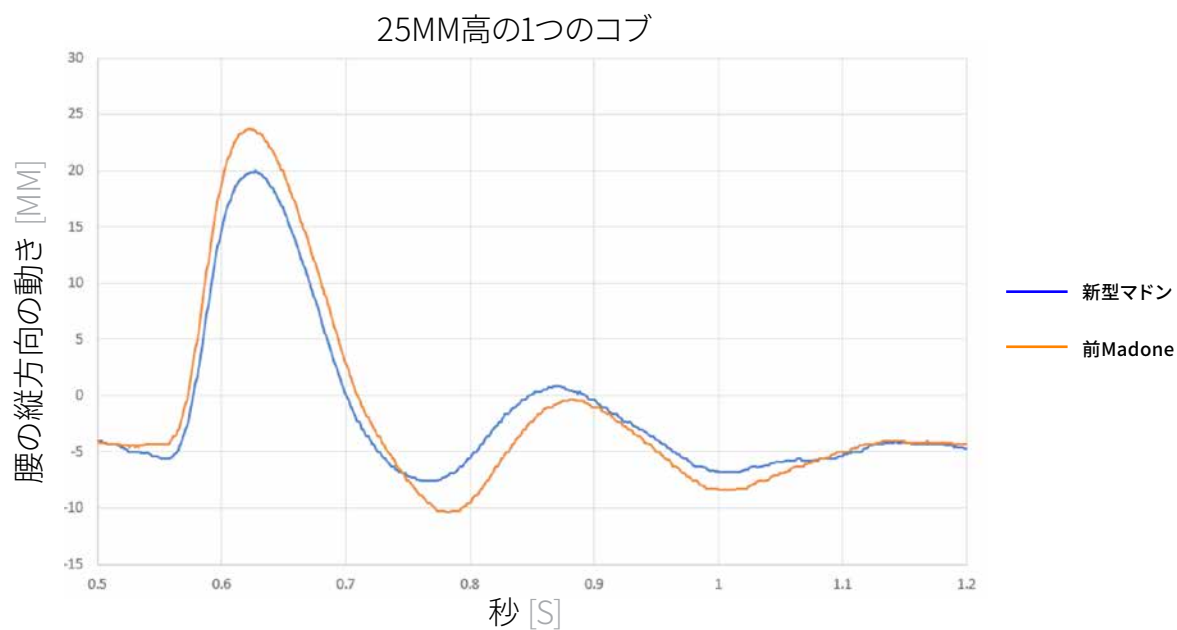


図13. 25mm高の1つのコブを越えた際の新型Madoneと前Madoneにおける乗り手の腰の動き

最後に、トレックはダンピング比を用いて、新型Madoneが前Madoneに対してどのような性能を表すかを求めた。ダンピング比は、衝撃を受けた後の振動がどのように減衰するかを示す、一般的に無次元の値である。言い換えれば、振動があるピークから次のピークへと減衰する速さを示している。手に持ったバスケットボールをある高さから落とし、地面からはずみ、動きが止まる頂点までバウンドさせる方法と考えてみよう。前の結果よりバウンドした高さが低くなることは、振動を吸収し、良くなっているということ。このような振動の一例を図13に示した。ここでは、それぞれの連続するピークが前のものより小さくなっていることがわかる。これを、ある大きなコブを越えようとしているバイクで考えると、サドルと乗り手の一連の動きを、コブを越えた後にできるだけ早く元の安定した状態に戻すことが望ましい。この効果がより制御された快適さを生み、時間が経つと蓄積する疲労を軽減させる。ダンピング比が小さいと、減衰の時間が長くなり、反対に、ダンピング比が大きいと、減衰はより速くなる。

下の図14は、スライダーを各位置にセットした新型Madoneと前Madoneのダンピング比を示している。これらの比を、対数減衰率を用いて計算し、付録で簡潔に説明した。この図から、新型Madoneはダンピング比が44から61%向上していることがわかる。

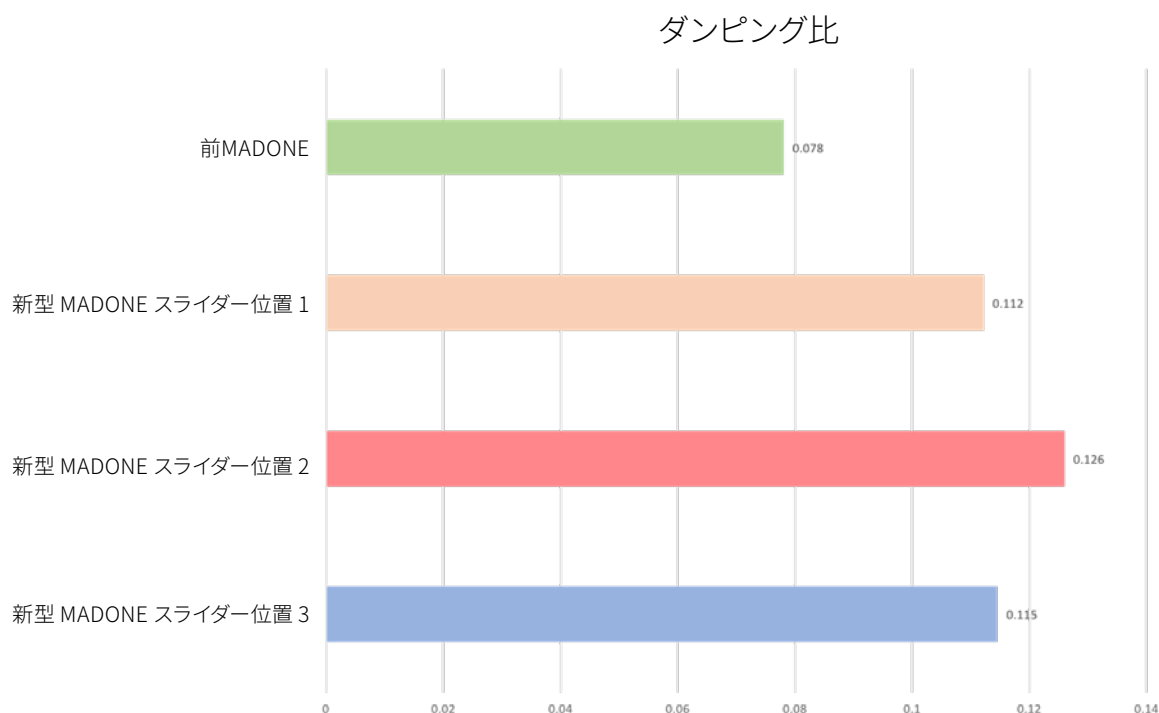


図14. スライダー各位置における新型Madoneと前Madoneのダンピング比 (スライダー位置 1 = 最も振動吸収性に優れた位置、スライダー位置 2 = 中間、スライダー位置 3 = 最も固い位置)

--- 付録では、デコボコ道を走った際の、前Madoneと比べて勝っている新型Madoneの効果も示した。---

ジオメトリー

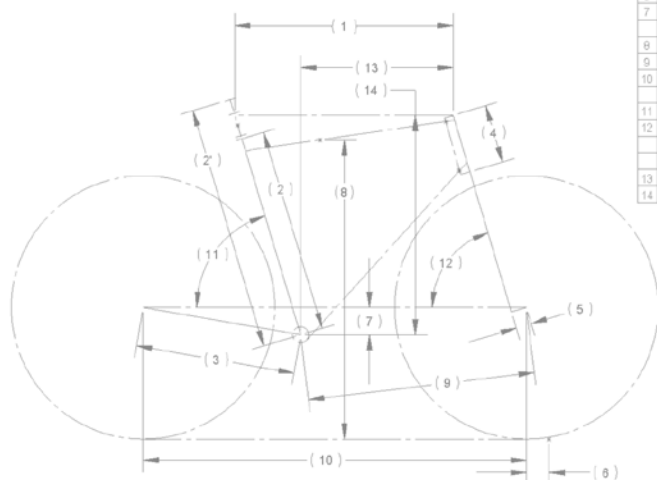
トレックは従来より、MadoneのジオメトリーにH1とH2を用意し、それぞれに適した一体型バー/ステムコンボやヘッドセットスペーサーを選べるようにし、理想のコクピットを実現できるようにした。以前のMadoneのバー/ステムコンボは一体型であったため、サイズのオプションが限られ、バー/ステムコンボを交換するとなると、EmondaやDomaneなどの他のロードモデルで選ばれる組み合わせより高価になりがちだった。トレックは、これをフィットの幅を拡大するための機会として捉え、これまでと同じで今や当然となった一体型コクピットをMadoneに搭載させた。

新型Madoneでは、新たにH1.5 フィットを開発し、より多くのステムやバーサイズを選んだり、バーを前後に5度傾けられるようにした。この新たなフィットにより、性別を問わず、多様なレース向けのフィットを一体型コクピットで実現できるようになった。

MadoneをH1またはH2 フィットのリムブレーキとディスクブレーキモデル（28種類のフレーム）を生産する代わりに、トレックは消費者目線で考え、各ブレーキモデルを1種類のフィット（H1.5）で作り、フレームの種類をシンプルにした。主な変更箇所は、フレームスタック、リーチ、ヘッドチューブ長である。新たなフィットは、Madoneらしい走りの質が保たれるよう、それ以外のジオメトリーを変化させていない。ディスクブレーキモデルを新たに加えながらもリムブレーキモデルも引き続き用意するため、トレックのエンジニアは、空気抵抗や重量をより数の少ない

フレームで解析することができた。フレームサイズは、各種ブレーキモデルで50から62cmである。新型Madoneのジオメトリー表を以下の図15に示した。このフィットで最も素晴らしいのは、新型ステムとバーでフィットを大きく変えられる点である。

H1.5 Madone Frame Geometry



#	Frame Size	50 CM	52 CM	54 CM	56 CM	58 CM	60 CM	62 CM
1	EFFECTIVE TT	521.4	534.2	543.6	559.9	573.2	585.1	598.0
2	SEAT TUBE (c-t)	453	483	496	525	553	573	593
2	SEAT MAST (c-t)	545	575	600	630	650	670	690
3	CHAIN STAYS (c-c)	410	410	410	410	411	411	412
4	HEAD TUBE	111	121	131	151	171	191	211
	HEADSET LSH	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	TIRE DIAMETER	676	676	676	676	676	676	676
	FORK AXLE RACE	374	374	374	374	374	374	374
5	FORK OFFSET	45	45	45	40	40	40	40
6	TRAIL	61.9	57.5	56.3	58.4	56.5	56.1	55.7
7	BB DROP	72	72	70	70	68	68	68
	BB Height	266	266	266	266	270	270	270
8	STAND OVER, MAX	711.3	732.1	743.6	768.1	792.9	811.1	828.4
9	FRONT-CENTER	575	577.4	581	583	590	599	607
10	WHEELBASE	974	977	981	983	992	1001	1010
11	ST-GROUND Angle	74.6°	74.2°	73.7°	73.3°	73.0°	72.8°	72.5°
12	HT-GROUND Angle	72.1°	72.8°	73.0°	73.5°	73.8°	73.9°	73.9°
	ST-CS Angle	64.5°	64.1°	63.9°	63.5°	63.5°	63.2°	63.0°
13	Frame REACH	378.1	383.2	385.8	391.0	395.5	399.9	402.5
14	Frame STACK	529.6	532.5	540.7	553.0	581.2	600.9	620.0

図15. 新型Madone H1.5 フレームのジオメトリー

新型Madoneのバーとステムは、従来のように別体でありながら、トレック独自のシステムとなっている。図16に、バーとステムの展開図を示した。この新しいバー/ステムは、H1/H2フレームで用意された26種類の組み合わせと比べ、40もの組み合わせを実現できる。また、バーを前後に5度傾けられ、フィットをさらに細かく調整できるのだ。

表4は、前Madoneと新型Madoneに用意されたバーとステムの各種サイズ一覧である。-7度のステムは、業界基準の規格であり、-14度のステムは、新型Madoneで前MadoneのH1と同じフィットを実現するためだけでなく、さらなるフィットの幅を持たせるために用意されている。ステム長は、-7と-14度の両方で、90から130mmまで選ぶことができる。バーの幅は前Madoneより1種類増えた38から44cm、形状は可変半径コンパクトフレア（VR-CF）を採用する。このようにフィットの幅が増えたことで、フィットを変えることがより簡単になり、価格も手ごろとなった。

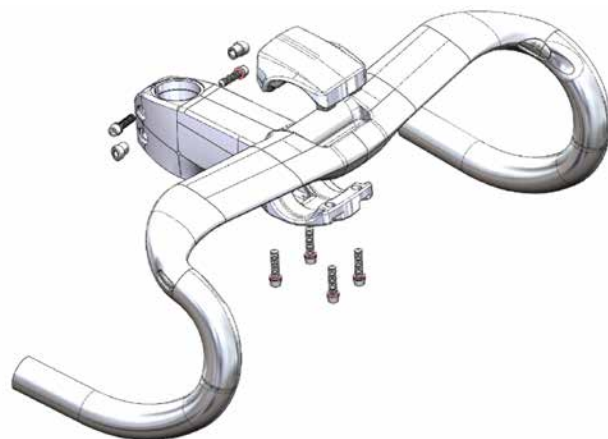


図16. 新型Madoneのバー/ステム CAD モデル

Current Madone		New Madone			
Stem Length (mm) [all -7 deg]	Bar Width (cm) [VRCF]	Stem Length (mm) [-7 deg]	Stem Length (mm) [-14 deg]	Bar Width (cm) [VRCF]	Bar Roll (deg)
90	40	90	90	38	+/- 5
	42			40	
	44			42	
100	40	100	100	44	
	42			38	
	44			40	
110	40	110	110	42	
	42			44	
	44			38	
120	40	120	120	40	
	42			42	
	44			44	
130	42	130	130	38	
				40	
				42	
				44	

表4. 新型Madoneと前Madoneのバー/ステムの組み合わせ一覧

改良およびインテグレーション

リムブレーキ

全く新しいリムブレーキは、機能性を高め、セッティングを簡単にできるようデザインを一新させた。ブレーキアームは、独立したスプリングテンション調整用スクリューで、ブレーキのセンター出しを行う。これにより、ブレーキパッドが磨耗してもパッドの位置調整を正確に行え、レバーを引く力を好みに合わせて調整できる。位置決め用スクリューは、センターウェッジを調整せずに、23から28.5mmまでのリム幅に対応させられる。

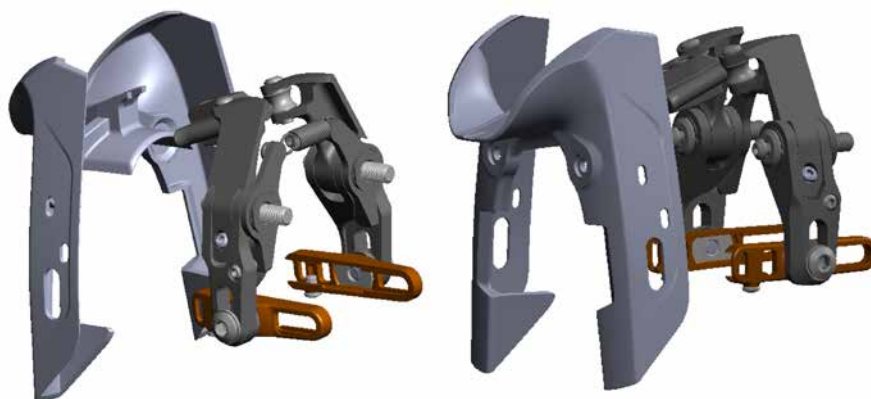


図17. 新型MadoneのフロントリムブレーキのCAD モデル

新たなリムブレーキの最大の変更点は、フロントブレーキの搭載位置である。これは、フロントブレーキをフォーク裏側に搭載させると、フォークとダウンチューブに一切の段差を設けず一体化でき、空力性能が高まることが判明したためだ。新しいフロントブレーキのカバーは、フレームとフォークの同色ペイントが施される。前Madoneと似たセンタープルデザインを用いることで、フロントブレーキのケーブルは、ステアリングコラム前側を通してからステアリングコラム根元とヘッドセットのロワーベアリングの中を通り、フォーク裏側に出る。リアブレーキもフロントと同じセンタープルデザインを採用し、トップチューブからシートチューブ裏側のダンパーキャリッジまでフレーム内を通り、風が当たるケーブル部を短く抑えている。

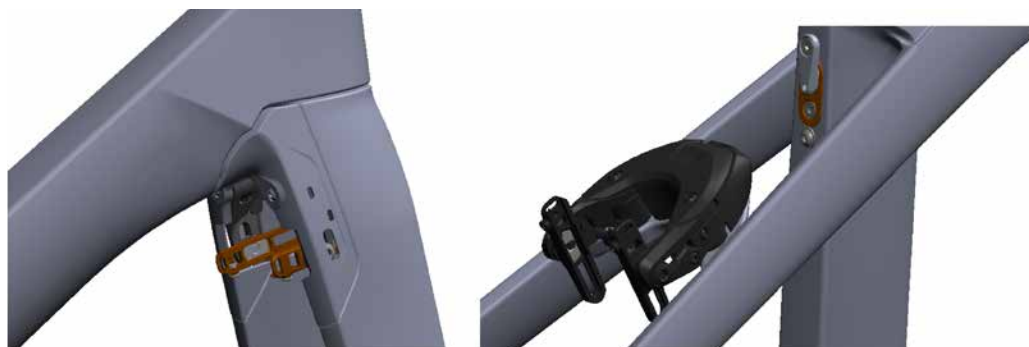


図18. 新型MadoneのフロントおよびリアのリムブレーキのCAD モデル、フレームに組み込んだ全体像

フロントブレーキ（ブレーキ、未塗装のカバーとケーブルストップ）の重量は152g、前Madoneと比べ約5g軽い。リアブレーキ（ブレーキとブレーキストップ）の重量は、前Madoneと同じ152g。タイヤクリアランスは25cを想定、ISO タイヤタイヤクリアランス規格に適合する販売しやすいサイズである。

ディスクブレーキの追加は、新型Madoneの研究開発段階における要であった。そして、空力性能とブレーキホースの配置が、慎重に考慮すべき2つの改善点であった。ディスクブレーキは、バイクのノンドライブ側に風がヨー角で流れてくると、空気抵抗の増加につながる可能性がある。そこで、社内の3D スキャンソフトでディスクブレーキキャリパーとローターの詳細なCFD モデルを作製。リムとディスクブレーキの両方でケーブルを完全に内装させる場合、ヘッドセットのロワーベアリング内を通す方法をいくつか考える必要があった。トレックが思いついたある方法は、ロワーベアリングから上のケーブルをフォークのステアリングコラムに通し、そこから下にそれぞれの通り道を用意するというもの。しかし、ディスクブレーキ側は、ブレーキホースをステアリングコラムからノンドライブ側のフォークレッグ内を通すことがより困難であった。

この問題を克服すべく、トレックはケーブルの通り道となるチューブを接着し、ブレーキホースをフォークレッグからステアリングコラムまで、工具無しに簡単に通せるようにした。

ディスクブレーキなら、より太いタイヤを履くこともできる。新型Madone ディスクブレーキモデルのフレームとフォークは、28cのタイヤクリアランスを想定、ISO タイヤタイヤクリアランス規格に適合するサイズである。



シートポスト / ライトマウント

前Madoneに搭載され、新型Madoneでもさらに空力性能を高めたIsoSpeed システムは、またしてもシートチューブに実証済みのKVF テクノロジーの採用を可能にし、風を騙すシートチューブ形状と他にはない縦方向の振動吸収性を実現させた。このシートポストのヘッドは、独立したピンチボルトとレールクランプシステムを採用し、傾きやセットバックを無段階で調整できる。

また、シートポストの新たな特徴であるウェッジ内蔵デザイン（図20）が、シートマスト裏側の見た目をよりすっきりさせる。ウェッジクランプは外側になく、シートマスト裏側全体をペイントできるようになった。ポストには4種類のカラーが用意され、トレックのProject Oneでもカスタムできる。

最後に、このデザインの安全性を高めるため、Flare R ライトマウントをシートポストヘッド裏側に設け、クリップで装着できるようにして、見た目をすっきりとさせた（図19）。リフレクターブラケットマウントは、シートポスト裏側の溝にぴったりフィットし、これもすっきりとした見た目に貢献している。



図19. 新型Madoneのシートポストと一体型ライトマウント

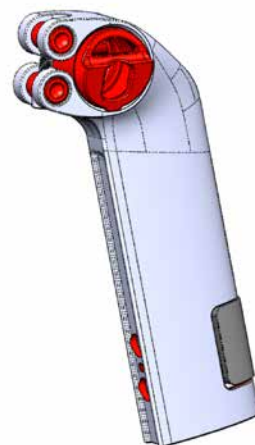


図20. 内蔵ウェッジを示した新型Madoneのシートポスト



バー/ステム

先述した通り、Madoneのフィットの幅を広げることが、トレックのエンジニアにとって優先事項の1つであった。バーとステムを別体で作ることが最も思いつきやすい解決策だが、空力性能も高める必要があった。その答えが、空力性能に優れた一体形状で見た目をすっきりさせるフェイスプレートである。また、走行中に手を置きやすくするため、新しいバーのトップ部は、後方にスウィープした形状となっている。以下の図21で、前および新型Madoneのハンドルバーを並べて比較した。

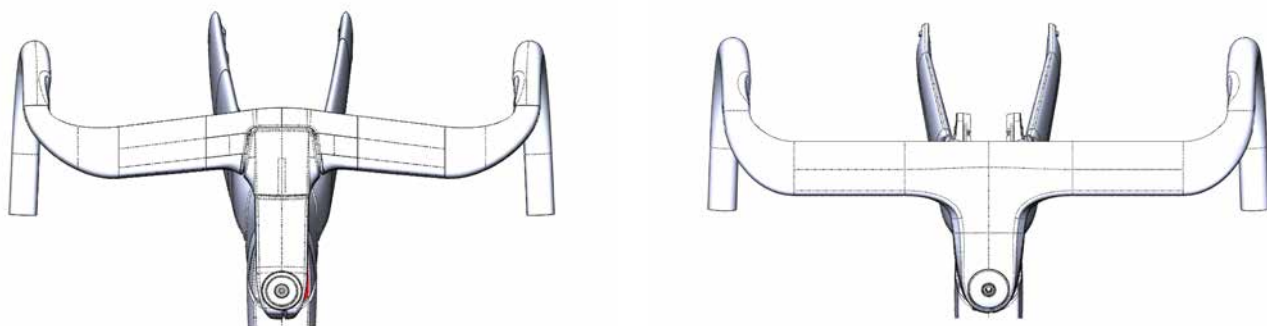


図21. 後方へスウィープさせて握りやすくなった新型Madoneのバー（右）と前Madoneのバー（左）

ヘッドセットスペーサーは、2ピースのクラムシェルデザインを引き続き採用し、バイクを組み上げた後でもハウジングやケーブルを移動させずに、簡単に着脱できるようにした。スペーサーの変更点は、金型の成形線を減らしたこと、バイクの組み立てを簡単にする新しいインターロッキングデザインを採用したこと、そしてスタックサイズを2種類（5mmと15mm）用意したことである。最後に、ベアリングのトップキャップは一体構造となり、前Madoneでリアのリムブレーキケーブル用に設けられたNDSカットアウトは取り除かれている。比較図を図21に示した。

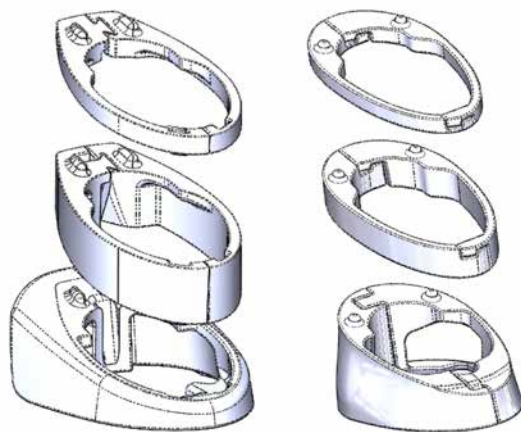


図22. 新型Madoneのヘッドセットスペーサー（左）と前Madone（右）

コントロールセンターも改良され、1つのパーツ（図23）であらゆる仕様に対応し、ウォーターボトルの設置個所も空力性能が最も高まるダウンチューブ位置に移設された。機械式ドライブトレインの場合、コントロールセンターで前後のディレイラー調整を行える。フロントディレイラーの調整用ダイヤルは、OEMが進化したため、もはや存在しない。電動ドライブトレインの場合、ここにDi2 バッテリーとジャンクション B ボックスの両方が収まり、充電用ポートはここではなくハンドルバーのバーエンドに移設される。また、リアディスクブレーキのホースも収納され、ダウンチューブ内でカタカタと音を立てることはない。

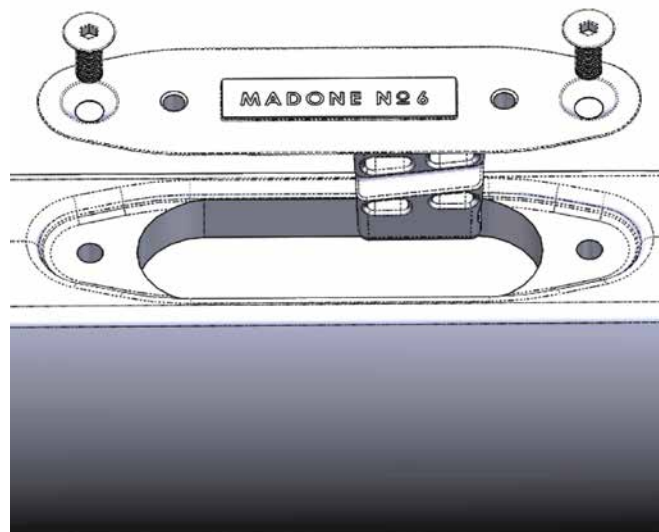


図23. 新型Madoneのコントロールセンター





Trek-Segafredo チームは、新型Madoneの開発に何度も協力し、このバイクが他社製品だけでなく前Madoneより大きなメリットをアスリートと消費者にもたらすことを確認した。2017年12月、チームはシチリア島でMadoneの試作機1号をテスト。この初テストでは、ヒルクライム、コーナリング、スプリント、快適さにおけるあらゆる性能面を前Madoneと比較した。このテストで得たフィードバックから、2種類のラミネートを組み合わせてさらに洗練させ、調整式振動吸収テクノロジーを詳しく調べ上げ、バー/ステムと手が触れる箇所を改良した。

2度目の重要なテストライドを2018年1月にマヨルカ島で行った。Madone 試作機2号目へのチームのフィードバックから、新たなラミネートの組み合わせがクラス最高のハンドリング性能を発揮し、新H1.5 ジオメトリーは最高であることが確証された。

また、テクノロジーや特徴を改良したことで、前Madoneをはるかに上回るバイクが誕生したことも裏付けられた。これは、トレックがクラス最高の製品を作り、そしてそれを上回るものを改良できるという証拠であり、バイクブランドにとってプロサイクリングチームを抱えることの重要性が示された。

付録

トレッドミルテストに関する補足的な写真と情報



図 A1. 実験室でのトレッドミルテスト

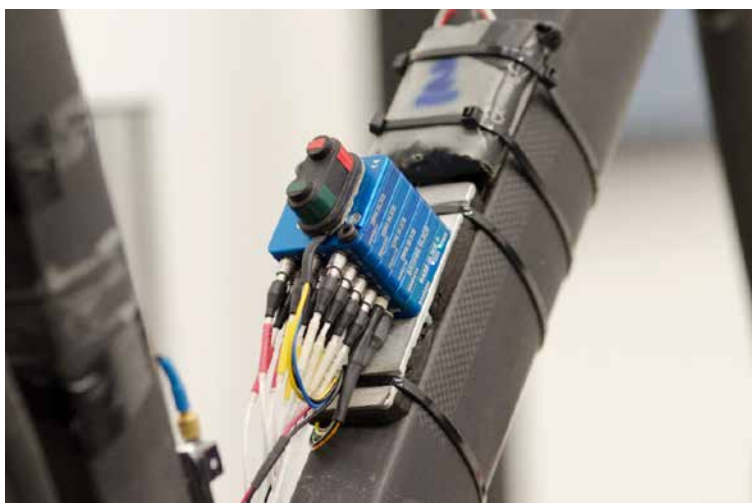


図 A2. ダウンチューブに取り付けられたデータ取得用装置

付録

トレッドミルテストに関する補足的な写真と情報



図 A3. 直線変位センサー



図 A4. 各部に取り付けた3軸加速度計

付録

トレッドミルテストに関する補足的な写真と情報

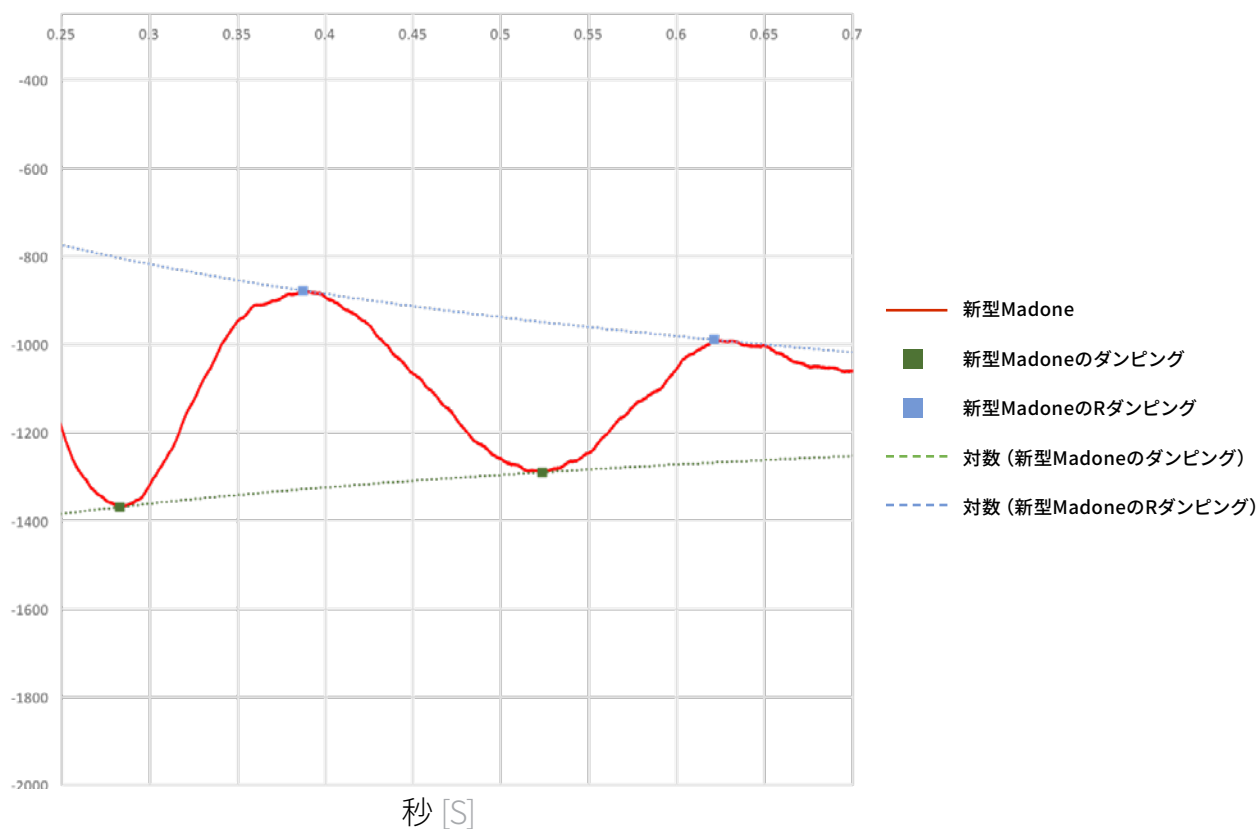


図 A5. 対数減衰率によるダンピング比の計算に用いられた振動波形の例

振動動作を示す減衰振動系では、ダンピング比は対数減衰率を用いて計算できる。図 A5に示す通り、これは任意の2つの連続する振幅比の自然対数で定義される。次にダンピング比は、ゼータ (ζ) をダンピング比、デルタ (δ) を対数減衰率として、次のように計算される。

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad \text{where} \quad \delta \triangleq \ln \frac{x_1}{x_2}$$

付録

トレッドミルテストに関する補足的な写真と情報

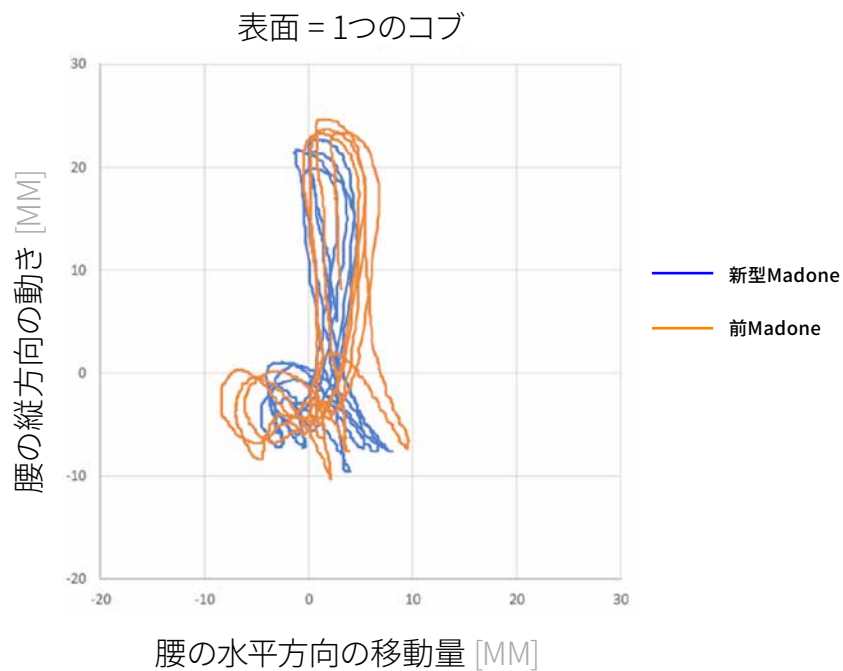


図 A6. 図12でコブを繰り返し乗り越えた時の腰の動きを記録したグラフ

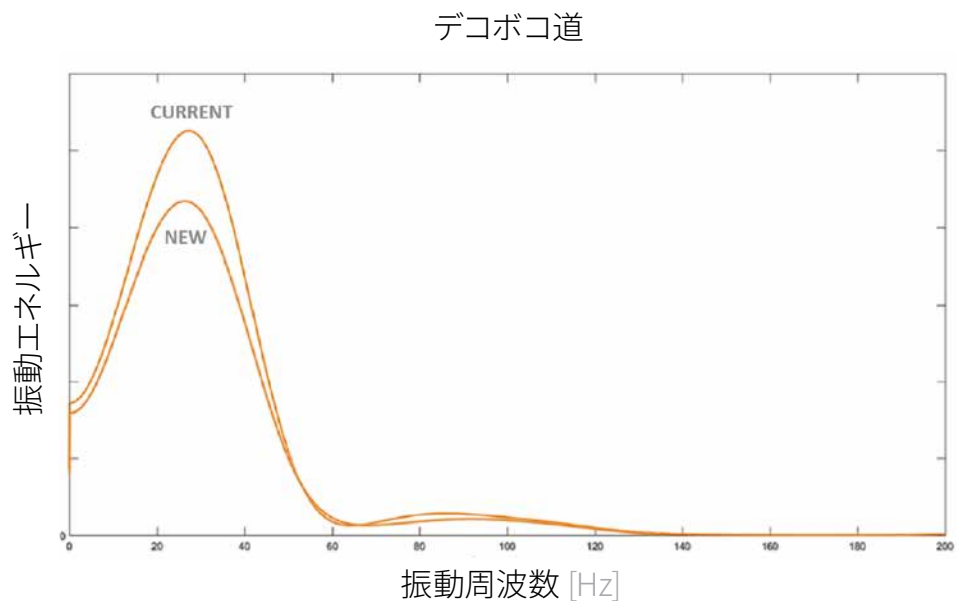


図 A7. デコボコ道表面を走るテストで加速度の減少を示すパワースペクトル密度解析