

技術論文

大型ハイブリッドファンの開発

Development of Large Size Hybrid Fan

西山利彦
Toshihiko Nishiyama
輿水賢悟
Kengo Koshimizu
稲葉恵市
Keiichi Inaba

近年騒音規制がますます厳しくなっており、小型ファンでは幅広、3次元前進翼、あるいはシュラウドリング付きなど多くの低騒音ファンが開発されている。ところが大型ファンは旧態依然の2次元板金ファンがいまだにほとんどの車両で使用されているのが現状である。この状況に対処するため、今回新たに大型ハイブリッドファン(プラスチックブレード+板金スパイダー)を開発した。キー技術は翼負荷分布を考慮した翼形状の設計と騒音、効率および強度の最適化にある。CFD、FEMを活用し、翼の曲率、転向角を変更しながら影響を検討し、これまでの850mmクラスに加え、最大径1450mmまでのファンを系列化した。

A lot of small fans with three-dimensional, wide chord length, forward swept figure, and/or shroud ring have been developed and manufactured by injection molding. When we see large size fans, they are still two-dimensional old-fashioned steel fans. Therefore, a new series of hybrid fans (plastic blades + steel spider) was developed to meet the requirement of low noise and high efficiency. Key technologies of high performance hybrid fans are blade contours that generate gradual load change and the best compromise among noise, efficiency and strength. Using CFD and FEM, several blade contours are investigated varying curvature distribution and blade turning angles. As the results of the development, a lineup of hybrid fans up to diameter of 1450 mm has been completed.

Key Words: Hybrid Fan, Cooling Noise, Fan, Fan Noise

1. 背景

ディーゼルエンジンの排気ガスエミッション規制対応手段として、最も有力な技術がCooled EGRであるが、この採用により通常30~40%のヒートリジェクションが増加し、より多くのファン流量が要求される。このことは走行による冷却風が得られない建設機械にとってはより深刻である。図1、図2に示すようにEU、日本の建設機械ではダイナミック騒音として規制が強化されており、図3の例でみるように冷却騒音の寄与率は非常に大きい。この対応として、油圧駆動ファンドライブに代表されるファンの回転制御により、余分な風量を発生させないことが効果大であるが、ファン自体の低騒音化の要求も高くなっている。

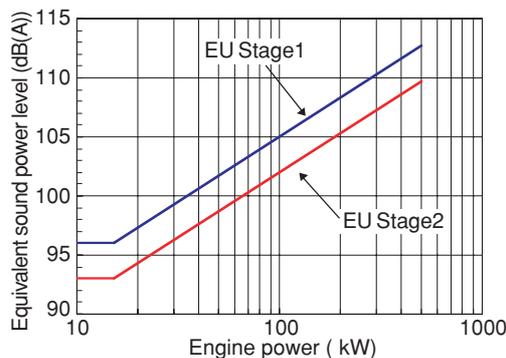


図1 EU騒音規制

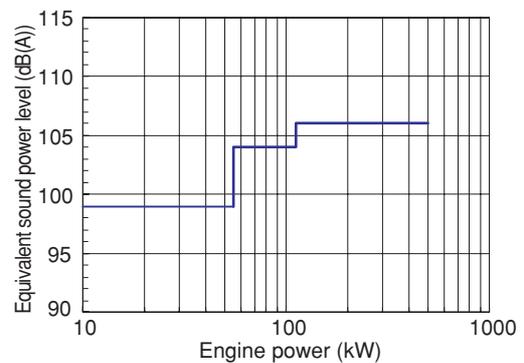


図2 国内騒音規制

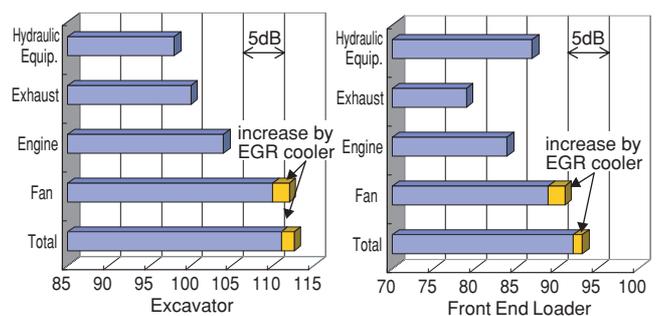


図3 ダイナミックノイズへの寄与度

2. ファン系列

当社のファン系列を図4に示す。625mm以下がプラスチックファン、800～870mmにハイブリッドファンがあるが900mm以上は全て板金ファンである。これまで大型で板金ファンしか使われなかった理由は、一体プラスチックファンの製造には、高価な射出成型型と大型の成型プレスが必要であり、大型機種のような少量生産には不向きと言われているためである。板金ファンは均一な板厚で構成され翼厚に分布がつけられないので強度上、翼弦長は短くせざるを得ず、下記のデメリットを持つ。

- (1) 外周でのソリディティ(翼弦長/ピッチ)が極端に低く、翼間流れが不均一になる。(図5参照)
 - (2) 一般に2次元形状のため、外径側で流れ角度を合わせると内径側で大きなインシデンス(衝突角)がつく(図6)
- これらの解決手段としてハイブリッドファンがある。ハイブリッドファンはその名が示すようにプラスチックブレードと板金スパイダーで構成したもの(図7)で、両者の長所を合わせ持ち大型ファンに適する。

- 長所として
 - (1) 射出成型型はプラスチック翼の1枚分だけでよく、比較的小型のプレスで成形できる
 - (2) 高強度のスパイダーと軽量のプラスチック翼の組み合わせにより低応力、従って長弦翼の設計が可能
 - (3) 多少、設計上の制約があるものの翼の3次元化が可能であり、一方短所としては
 - (1) スパイダーと翼の接合部が不連続になり易い
 - (2) スパイダーと翼はリベット結合のため翼枚数の制約ありなどが挙げられる。(1)は流れを阻害するだけでなく、応力集中の原因ともなるため注意が必要である。

Fan Diameter	400	600	800	1000	1200	1400	1600	(mm)
Plastic Fan	←→							
Hybrid Fan			←→					
Metal Fan				←→				

Fan Diameter	400	600	800	1000	1200	1400	1600	(mm)
Plastic Fan	←→							
Hybrid Fan			←→					
Metal Fan						←→		

図4 コマツファン系列

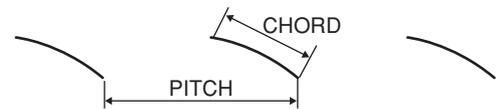


図5 板金2次元ファンの円筒面断面

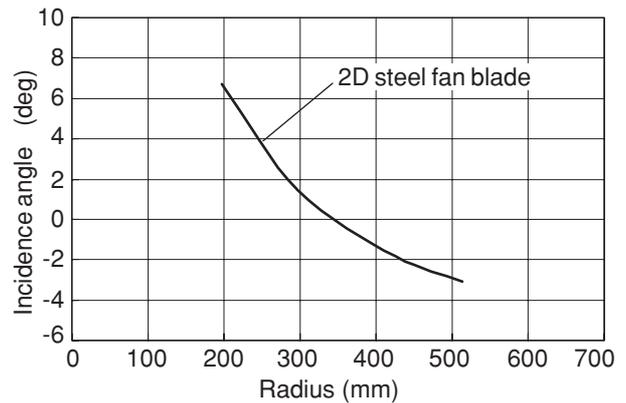


図6 2次元ファン入口インシデンス

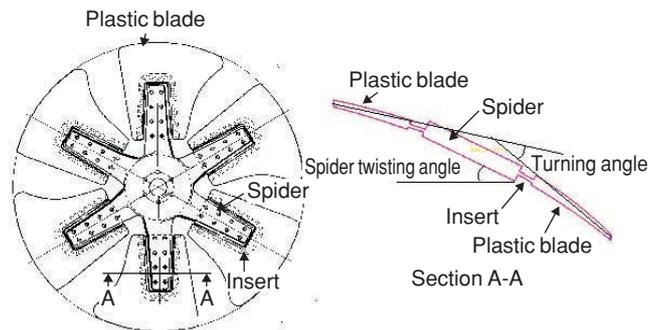


図7 ハイブリッドファン

3. ハイブリッドファンの設計コンセプト

一般に車両用ファンはガスタービン用軸流コンプレッサ並びに軸流ファンと比較すると内外径比が小さい。従って外径部に比べ、周速の低い内径部では、圧力上昇に使われる仕事と風量が少なくなる。図8で見ると中央部は、ディスク部を除いても流速が大幅に遅くなっていることがわかる。今回のハイブリッドファンでは極力均一な流れを得るため下記のようなコンセプトで設計した。

- (1) 内径ほど転向角を大とする
- (2) ソリディティを改善するため特に外径での翼弦長を強度の許す限り長くする
- (3) 半径方向流れを抑制するため前進翼とする

検討水準を表1, 図9, 図10に示す。全て3円弧で、スパイダーとの段差が極力少なくなるよう構成されている。ちなみにこれまでの板金ファン、850mmクラスのハイブリッドファンは1円弧である。Type1が基本モデルで、Type2は3円弧の曲率分布の傾向をType1と逆とした。Type3, 4はType1と類似の曲率分布を持っており転向角のみ異なる水準である。比較のため2次元板金ファンの解析も同時に実施した。

4. CFD モデル

流れ解析に使用したソフトはStar-CDで翼1枚分、つまり1/6モデルで計算した。

- 要素：4, 6面体
- メッシュ数：300,000
- 乱流モデル：k-ε

メッシュモデルを図11に示す。シュラウドはボックスタイプとした。本解析に先立ち850mmハイブリッドファンの実験値と比較し、良い一致を見ている。(図12)

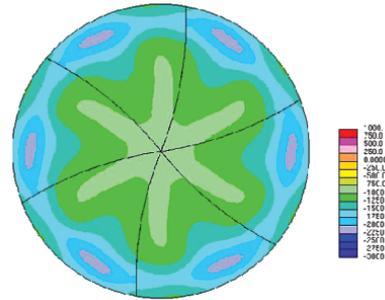


図8 板金ファン前面圧力分布

表1 ブレード形状水準品

	Diameter	Model	Description	Turning Angle	Curvature
Hybrid	1,120 mm	Type 1	Base	31°	Inlet < Outlet
		Type 2	Different Curvature	29°	Inlet > Outlet
		Type 3	High Load	37°	Inlet < Outlet
		Type 4	Light Load	27°	Inlet < Outlet
Metal	1,120 mm	-	Current Production	32°	Inlet = Outlet

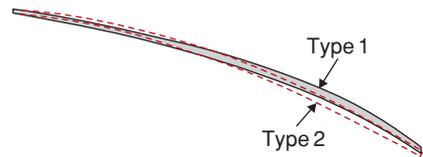


図9 Type1と2の断面形状

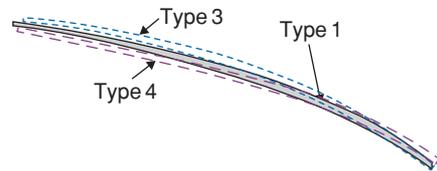


図10 Type3と4の断面形状

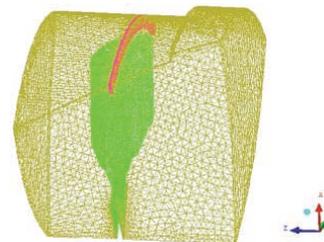


図11 計算メッシュ

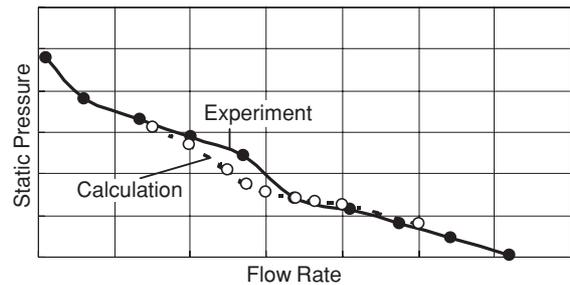


図12 実験値との比較(850mmハイブリッドファン)

5. 流れ解析結果

図13～図15に1080mm径における板金ファン、Type1とType2の圧力分布を示す。全水準共通に、プレッシャ面では圧力は徐々に上昇(流速は減少)しその後多少減少する。板金ファンの流れがやや劣ると思われるものの大きな差異は認められない。一方サクション側では圧力が入口付近で減少し、その後増加する。板金ファンとType2はパターンが似通っているが、Type1とは明らかな差異が見られる。Type1は圧力の変換点(翼表面流れの剥離点)が遅いという点で最も望ましい。

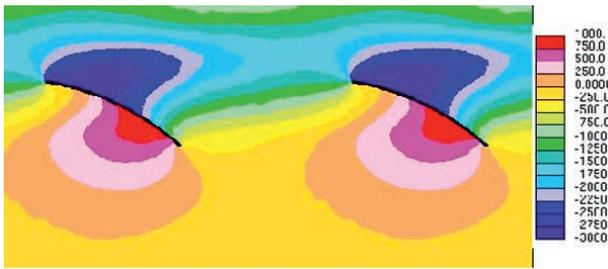


図13 2次元ファン圧力分布(1080mm)



図14 Type1 圧力分布(1080mm)

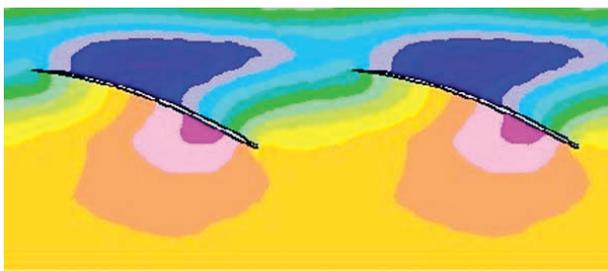


図15 Type2 圧力分布(1080mm)

2次元ファンとType1の翼表面流れの様子を図16に記すが、Type1では半径方向流れが抑制されていることがわかる。図17、図18は翼負荷(転向角)の影響を見るため、Type3、Type4の1080mm径での流れを調べたものである。明らかにType4の方が望ましい分布となっており、最高効率率はType4で得られた(表2)。したがって高効率ファンを設計するには、許容される最大回転で運転し、翼の転向角を少なくすればよいことがわかる。ただし後述するように騒音は必ずしも効率と同期せず、同一圧力、風量における低騒音はむしろ高負荷(転向角大)のファンで得られる。このための最適化が必要である。今回はベスト水準としてType1を選定した。

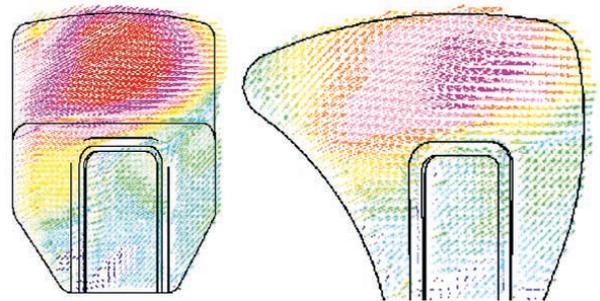


図16 2次元、Type1 ファン翼表面流れ

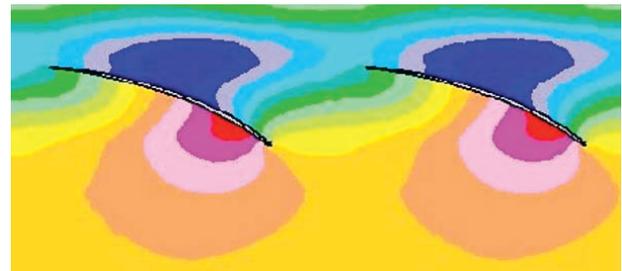


図17 Type3 圧力分布(1080mm)

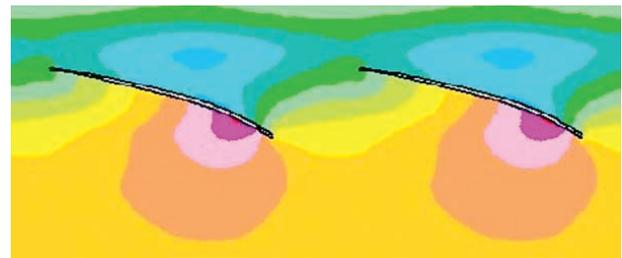


図18 Type4 圧力分布(1080mm)

表2 性能予測結果

	Model	Fan Speed	Efficiency
Hybrid	Type 1	1,401 rpm	48%
	Type 2	1,330 rpm	47%
	Type 3	1,305 rpm	42%
	Type 4	1,450 rpm	50%
Metal	-	1,317 rpm	42%

Type1における平均径(860mm), 翼根(560mm)での分布を図19, 図20に示す. 平均径ではプレッシャ側, 翼根ではサクシヨン側の翼先端にインシデンスの影響と見られる急激な圧力勾配が見られる. 翼根のスパイダーとの接続面にも同様の現象が現れ, 剥離しているものと推定される. また図21の前面圧力分布は図8の板金ファンと比べれば改良されているとは言え, 内径部の流速は外径部と比べまだ遅い. このあたりが今後の改良の課題となる.

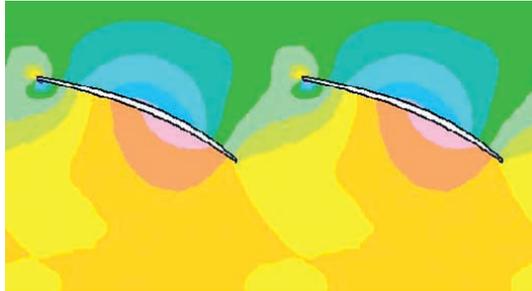


図19 Type1 圧力分布(860mm)



図20 Type1 圧力分布(560mm)

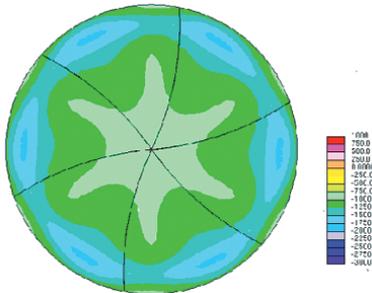


図21 Type1 前面圧力分布

6. 性能, 騒音テスト結果

表3, 図22はType1と板金ファンとの性能, 騒音テスト結果の比較データである. 風量は狙い通り板金ファンと同等であったが, 効率はシミュレーション結果ほど差が大きくなかった. 騒音は3.4dB(A)ほど低減できた. 同時にスパイダーの捻り角を26°から32°に拡大し, 転向角大品と同様の効果を狙ったものを試験した. 結果は転向角大品は同一風量の得られる回転を低減でき, 効率が低下したにも拘わらず, 騒音は低減している. このためファン設計に際しては, 騒音を重視するのか効率を重視するのか, 狙いを明確にして着手する必要がある.

表3 性能, 騒音テスト結果

Model	Spider Twisting Angle	Fan Speed	Efficiency	Noise
Hybrid	26°	1,342 rpm	46%	-3.4 dB(A)
Type 1	32°	1,212 rpm	45%	-4.5 dB(A)
Metal	26°	1,350 rpm	44%	-

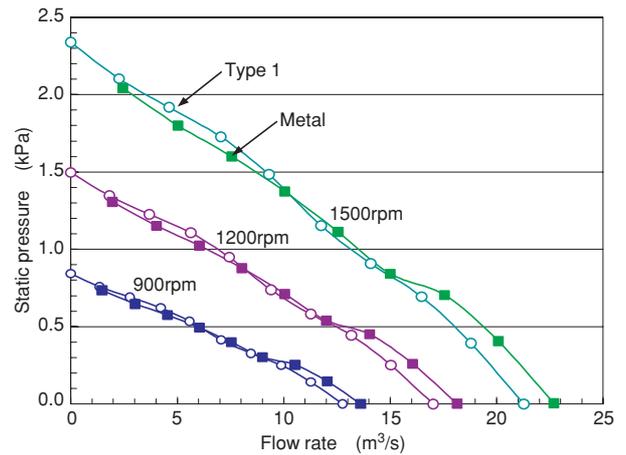


図22 風量-圧力線図

7. FEM 解析

翼形状、特に翼弦長は強度の制約を強く受けるため、流れ解析と応力解析を相互にフィードバックしつつ同時進行させた。図23は遠心力による応力線図を示す。高応力はスパイダー付け根の中央部とインサートの角部に発生する。前者は高強度材の使用あるいはスパイダー板厚アップにより比較的対処が容易である。後者は応力が単純な半径方向引張りにならず、翼に曲げ応力が発生することを示している。これは翼素が半径方向に並んでいないことに起因し、翼弦長に大きく影響される。

一方振動モードについては1次の曲げと捻りがある(図24)。ファンの場合、四角形状のラジエータと組み合わせられるため回転4次との共振を考慮しなければならないが、曲げは通常運転域にあっても問題にならない。回避しなければならないのは、捻りととの共振である。回避手段としては翼厚分布の最適化、スパイダー、インサート等のスチール部の面積拡大があるが、スパイダー延長は先の流れ解析で見たように不連続面が増加し、性能低下につながる。一方インサートは翼と同形状に成形できるため比較的流れの障害となることが少ない。したがって翼厚分布決定後、スパイダーの延長は性能への影響が少ない範囲にとどめ、あとはインサート形状の最適化により捻り振動の回避に努めた。インサートの最終形状を図25に、またスパイダー延長を含めた寄与度を図26に示す。

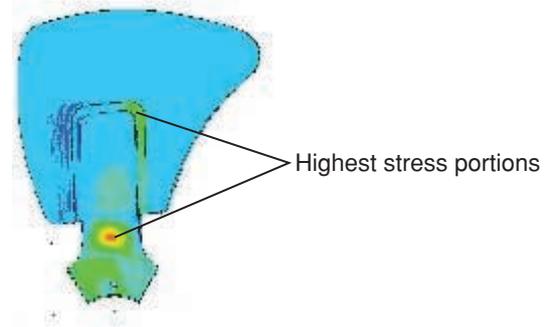


図23 遠心応力分布

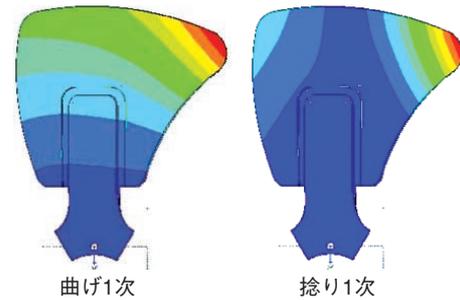


図24 振動モード

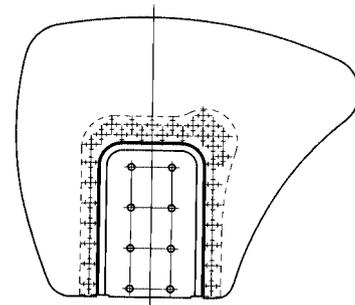


図25 強化型インサート

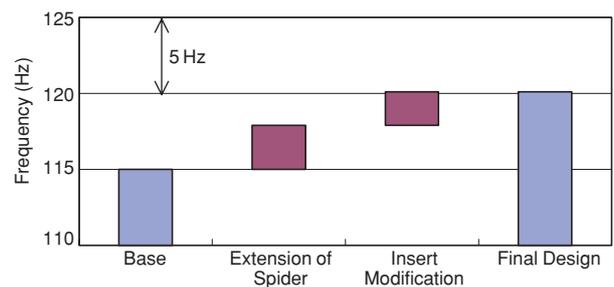


図26 固有振動数捻り1次アップへの寄与度

8. 応力計測結果

図27、図28はそれぞれ遠心力による平均応力と振動応力の計測結果である。捻り振動の1次と回転4次との共振は1700rpm付近に見られ、予測値とほぼ一致している。さらに念のため高速回転での疲労テストを実施し、信頼性、耐久性を確認した。

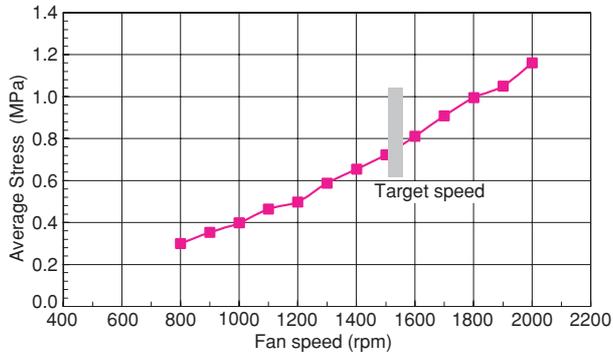


図27 平均応力(遠心応力)

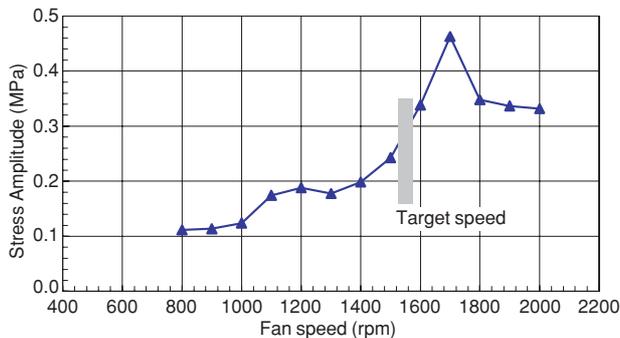


図28 変動応力(振動成分)

筆者紹介



Toshihiko Nishiyama

にしやまとしひこ
西山利彦

1969年、コマツ入社。

現在、IPA コンポーネント研究開発G 所属。



Kengo Koshimizu

こしみずけんご
興水賢悟

1993年、コマツ入社。

現在、IPA コンポーネント研究開発G 所属。



keiichi Inaba

いなばけいいち
稲葉恵市

1976年、コマツ入社。

現在、IPA コンポーネント研究開発G 所属。

【筆者からひと言】

コマツにとって独力でファンを開発する初めての機会であったが、多くの部門の協力もあり比較的順調に開発できたと思う。オールプラスチックファンほどではないものの、相当額のジグ、型費が必要でなかなか開発に恵まれないが、今回そのチャンスを与えられたことに感謝している。

9. まとめ

- (1) 大型ハイブリッドファンを新開発し、850mm から1450mmまで低騒音、高効率のハイブリッドファンを系列化できた。
- (2) ファン効率にはファンの曲率分布が大きな影響を持つ。高効率達成には曲率の最大をなるべく後流にもっていき、剥離点を、遅らせることが重要である。また翼負荷については翼の轉向角を少なくし高周速で回転させた方が高効率達成に有利である。
- (3) ファン効率と低騒音のベスト値は必ずしも一致せず、相反の関係を持つ場合がある。したがってファン設計にあたっては、両者の適切な妥協点を見出すことが必要である。
- (4) ファンの強度向上にはインサート形状をファン形状にあわせ、延長、拡大することが有効である。