

最適な予防メンテナンス・センサーの選択

Chris Murphy、アプリケーション・エンジニア

はじめに

状態基準保全 (CbM) では、センサーを使って装置や設備資産を監視し、それらの現在の健全性を計測します。予防メンテナンス (PdM) では、CbM、機械学習、分析手法といった技術を組み合わせて使用し、将来起こり得る装置や設備資産の故障を予測します。装置の健全性を監視する場合は、異常の検出、診断、更に予測まで行うことができるよう、これらの目的に最も適したセンサーを選ぶことが極めて重要です。現在、回転機械やその負荷には、計画外のダウンタイムを回避することを最終目的として、異常を感知し検出するためのセンサーが数多く使われています。これらセンサーを個々にランク付けすることは困難です。PdM手法は数多くの回転機械 (モータ、ギア、ポンプ、タービンなど) や非回転機械 (バルブ、サーキット・ブレーカ、ケーブルなど) に使われているためです。

多くの工業用モータは化学工場や食品処理工場、発電施設などの継続的に生産が行われるアプリケーションで最大20年程度使用できるように設計されていますが、中にはその予想寿命に達しないモータもあります¹。その理由としては、モータ運転上の問題、不十分なメンテナンス・プログラム、PdMシステムへの投資の欠如、あるいはPdMシステムが全く存在しない、といったことが考えられます。PdMは、メンテナンス・チームが修理計画を立てて計画外のダウンタイムを回避することを可能にします。PdMを通じて装置の異常を早期に予測することは、メンテナンス・エンジニアがモータの非効率的な動作を特定してこれを是正し、性能、生産性、および設備資産の可用性を向上させ、その寿命を延ばす助けにもなります。

最良のPdM戦略は、できるだけ多くの手法とセンサーを効率的に利用して、異常を早期に、なおかつ高い信頼性の下に検出することです。したがって、1つのセンサーですべてをまかなうというソリューションは存在しません。この記事では、予防メンテナンス・センサーがPdMアプリケーションにおける異常の早期検出に不可欠な理由と、各種センサーの利点および欠点を明らかにしていきます。

時系列で考えたシステム異常

図1は、新しいモータの設置から故障発生までのイベントを時系列でシミュレーションしたもので、推奨される予防メンテナンス・センサーのタイプも示されています。新しいモータが設置された時点で、保証が適用されます。その保証は、その後数年間で終了し、そこから人手による多くの点検が頻繁に行われるようになります。

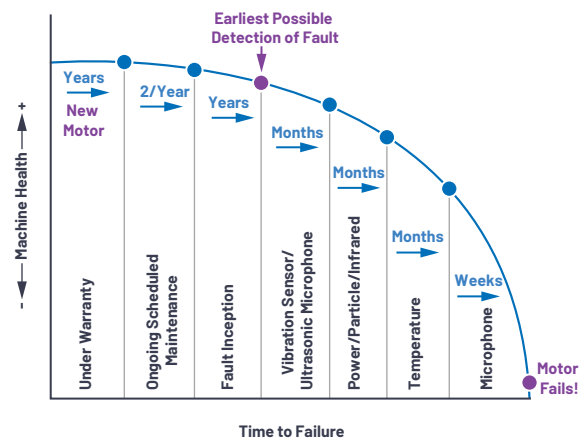


図1 装置の健全性の経時変化

予定されたメンテナンス・チェックの間に異常が生じた場合は、計画外のダウンタイムとなる可能性があります。この場合に極めて重要なのが、適切な予防メンテナンス・センサーを使用して、できるだけ早期に異常の兆候を検出することです。このために、本稿では振動センサーと音響センサーに焦点を当てます。振動解析は一般に、PdMの最良のスタート点と見なされています²。

予防メンテナンス・センサー

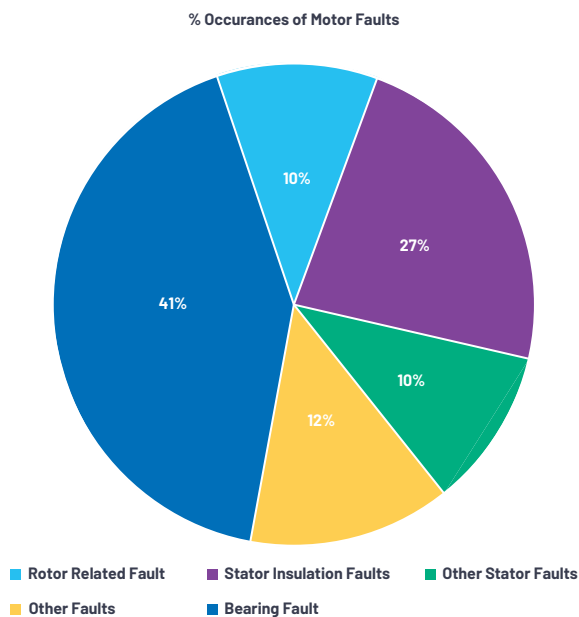
図1に示すように、一部のセンサーは、ベアリング異常などの特定の異常を、他のセンサーよりはるかに早く検出することができます。この項では、できるだけ早期に異常を検出するために最も一般的に使われているセンサーについて述べます。具体的には、加速度センサーとマイクロフォンです。センサーの仕様一覧と、それらのセンサーが検出できる異常の例を表1に示します。ほとんどのPdMシステムでは、これらのセンサーのうち一部だけが使用されます。したがって、予想し得る重大な異常について十分に理解し、それらの異常の検出に最も適したセンサーを知ることが不可欠です。

表1 CbMに使われる一般的なセンサー

計測	センサー	特徴	検出する異常
振動	ピエゾ加速度センサー	低ノイズ、最大周波数30kHz、CbMアプリケーション用として定着	ベアリングの状態、ギアのかみ合い、ポンプのキャビテーション、位置ずれ、アンバランス、負荷状態
振動	MEMS加速度センサー	ロー・コスト/低消費電力/小型、最大周波数20kHz以上	ベアリングの状態、ギアのかみ合い、ポンプのキャビテーション、位置ずれ、アンバランス、負荷状態
音圧	マイクロフォン	ロー・コスト/低消費電力/小型、最大周波数20kHz	ベアリングの状態、ギアのかみ合い、ポンプのキャビテーション、位置ずれ、アンバランス、負荷状態
音圧	超音波マイクロフォン	ロー・コスト/低消費電力/小型、最大周波数100kHz	圧力洩れ、ベアリングの状態、ギアのかみ合い、ポンプのキャビテーション、位置ずれ、アンバランス
モータ電流	シャント、カレント・トランス	ロー・コスト、追加回路不要、通常はモータ電源を計測	偏心ローター、巻線関連の問題、ローターバー関連の問題、電源アンバランス、ベアリング関連の問題
磁界	ホール、磁気センサー、サーチ・コイル	ロー・コスト/小型、最大周波数250Hz、温度に対して安定	ローターバー、エンド・リング関連の問題
温度	赤外線サーモグラフィ	高価、正確、複数の設備資産/熱源を一度に計測	摩擦による熱源の場所特定、負荷変動、過度の起動/停止、不十分な電源
温度	RTD、熱電対、デジタル	ロー・コスト、小型、正確	摩擦による温度変化、負荷変化、過度の起動/停止、不十分な電源
オイル品質	粒子モニタ	粘度、粒子、および汚れ	摩耗によるデブリを検出

センサーとシステムの異常に関する考慮事項

工業用および商業用アプリケーション用の回転機械の90%以上が、回転部品用のベアリングを使用しています³。図2はモータの故障部品の内訳ですが、この図から、PdMセンサー選択時はベアリングのモニタリングが重要であることが分かります。異常の可能性を検出、診断、予測するには、低ノイズで広帯域幅の振動センサーが必要です。

図2 故障モータ部品の内訳 (%) ⁴

回転機械に発生し得る最も一般的な異常と、これに対応するPdMアプリケーション用振動センサーの条件を表2に示します。できるだけ早い時期に異常を検出するためには、一般にPdMシステムには高性能センサーが必要です。設備資産に使用する予防メンテナンス・センサーの性能レベルは、その設備資産自体の価格ではなく、プロセス全般にわたってそれらの設備資産を高い信頼性で継続的に運用することの重要性和相関関係があります。

表2 装置異常と振動センサーに関する考慮事項の概要

センサーの条件	一般的な装置異常			
	アンバランス	芯ずれ	ベアリング異常	ギア異常
低から中程度のノイズ >100 μ g/ $\sqrt$ Hz	✓	✓		
低ノイズ <100 μ g/ $\sqrt$ Hz			✓	✓
帯域幅：基本周波数の 5倍～10倍	✓	✓		
帯域幅：> 5kHz			✓	✓
多軸検出	✓	✓		
低速回転機械用の 低周波数応答	✓			
高いg範囲			✓	

モータの振動や動作のエネルギー量（ピーク値、ピークtoピーク値、実効値）を利用すれば、特に、その装置にアンバランスや位置ずれがないかどうかを判定することができます。ベアリングやギアの異常といったいくつかの異常はそれほど明確なものではなく（特に異常の早期段階にある場合）、振動の増加だけでこれを特定したり予測したりすることはできません。通常、これらの異常を検出するには、低ノイズ（<100 μ g/ $\sqrt$ Hz）で広帯域幅（>5kHz）の高性能予防メンテナンス用振動センサーが必要で、更にこれらに高性能のシグナル・チェーン、処理、トランシーバー、および後処理と組み合わせる必要があります⁵。

PdM用の振動、音響、および超音波センサー

マイクロマシン（MEMS）マイクロフォンにはPCBにMEMS素子が搭載されており、これらは通常、上面または下面から内側へ音波を導くことのできる金属製のケースに収められています。MEMSマイクロフォンは、ベアリングの状態、ギアのかみ合わせ、ポンプのキャビテーション、位置ずれ、アンバランスといった装置異常を検出するための、ロー・コストで小型の効果的な手段を提供します。これらの特長により、MEMSマイクロフォンはバッテリー駆動アプリケーション用に最適な選択肢となっています。これらのマイクロフォンは、ノイズからかなり離れた位置に置くことができ、取り付けに特別な加工を行う必要もありません。複数の

設備資産が稼働している場合は、他の装置からの可聴ノイズの量、あるいは埃や湿気といった環境要素がマイクロフォンのポート・ホールに入り込んで、マイクロフォンをベースとするセンサーの性能に悪影響を与えるおそれがあります。ほとんどのMEMSマイクロフォンのデータシートに記載されているアプリケーションは、依然として、モバイル端末やラップトップ、ゲーミング・デバイス、カメラなど、あまり厳しくない環境向けのもです。一部のMEMSマイクロフォンのデータシートには、考えられるアプリケーションとして振動検出やPdMが挙げられていますが、これらのセンサーは機械的な衝撃や不適切な取り扱いに敏感なので、恒久的な損傷を招く可能性があるという断り書きがあります。その他のMEMSマイクロフォンのデータシートの中には、最大10,000gの機械的衝撃に耐えられるとしているものもありますが、これらのセンサーのいくつかは、衝撃を受ける可能性がある非常に過酷な環境下での使用に適しているかどうかについては、やはり明確な記載がありません。

MEMS超音波マイクロフォンによる解析は、大きい可聴ノイズが存在する複合施設内のモータの健全性監視を可能にします。これは、これらのマイクロフォンが非可聴範囲の周波数（20kHz～100kHz）をモニタするため、この範囲ではノイズがはるかに少なくなります。通常、低周波数の可聴信号の波長は約1.7cm～17m、高周波数信号の波長は約0.3cm～1.6cmの範囲です。周波数が高くなるとエネルギーも大きくなり、超音波の場合は指向性がより強くなります。ベアリングやハウジング内の故障位置を正確に特定しようとする場合は、これが非常に役立ちます。

加速度センサーは最も一般的に使われる振動センサーであり、振動解析は最も一般的に使われるPdM手法です。この手法は、主にタービン、ポンプ、モータ、ギアボックスなどの大型回転装置に使われます。高性能MEMS振動センサーや音響センサーを選ぶ際に考慮すべき重要な仕様と、最も代表的なピエゾ振動センサーを表3と表4に示します。各列のデータは、そのカテゴリ内における最小／最大変動の代表値で、隣接する列との間に相関関係はありません。

CbM産業は今後数年間で大幅に成長すると予想されており、更にこの成長のかなりの部分がワイヤレス設備で占められると予想されています⁶。ピエゾ加速度センサーは、サイズ面や消費電力、集積化機能を持たないといったいくつかの理由からワイヤレスCbMシステムにはあまり向いていませんが、消費電流が代表値で0.2mA～0.5mAのソリューションも存在します。MEMS加速度センサーとマイクロフォンは、サイズも消費電力も小さい上に高い性能を備えているので、バッテリー駆動のPdMシステムに最適です。

すべてのセンサーは適切な帯域幅と低ノイズ性能を備えています。MEMS加速度センサーはDCまでの応答が可能な唯一のセンサーで、回転速度が非常に小さい場合のアンバランス検出や傾き検出に有効です。MEMS加速度センサーはセルフテスト機能も備えており、センサーが100%機能することを確認できます。これは安全性が不可欠な設備に有効で、センサーがまだ機能しているかどうかを検証できるようにすることによって、システムの基準を容易に満たすことができます。

過酷で汚れの多い環境で使用するために、MEMS加速度センサーはセラミック・パッケージに、ピエゾ加速度センサーはメカニカル・パッケージに、ハーメチック・シールで完全に密封することが可能です。表4では、センサーの物理的、機械的、および環境的性能に焦点が当てられています。この表を見れば、集積機能、過酷な環境への耐性、機械的性能、回転機械への取り付け、あるいはマウントなど、各センサーの主な違いを知ることができます。

3軸方向の振動データを検出すれば、より多くの診断情報が得られ、異常検出能力を向上させることができます。これはすべてのPdM設備に必要なわけではありませんが、データ品質、配線、スペース削減などの点に関するピエゾ加速度センサーとMEMS加速度センサーの決定的な利点です。

MEMSマイクロフォンを高湿度下に長時間置くと、最大-8dBの歪みが生じることが分かっています⁷。これは決定的な欠点ではありませんが、PdMアプリケーションを湿度の高い過酷な環境下で使用する場合は考慮する必要があります。このような場合は、MEMSマイクロフォンよりもエレクトレット・コンデンサ・マイクロフォン（ECM）の方が適していることが確認されています。マイクロフォンに影響を与え得るその他の環境条件には、風、大気圧、電磁場、機械的衝撃などがあります⁸。

あまり厳しくない環境条件下では、MEMSマイクロフォンはPdMアプリケーション用として非常に優れた性能を発揮します。現時点では、過度の振動や汚れ、湿度などに曝される過酷な環境下へのMEMSマイクロフォンの取り付けについて、使用できる情報がありません。振動はMEMSマイクロフォンの性能に影響を与える可能性があり、これは検討を要する領域です。しかし、MEMSマイクロフォンはECMほど振動に敏感なわけではありません⁹。ワイヤレスPdMソリューションにMEMSマイクロフォンを使用する場合は、音響信号がセンサーに届くように、取り付けボックスに穴やポートを設ける必要があるため、設計を複雑にする要素が増えると同時に、他の電子機器が汚れや湿度の影響を受ける可能性が出てきます。

表3 予防メンテナンス・センサーの性能仕様

センサー	コスト (1,000個あたり単価)	3dB帯域幅	DC応答	ノイズまたはS/N比	ワイヤレスCbMiに使用した場合の 予想バッテリー寿命	セルフテスト
ピエゾ加速度センサー	\$25～\$500+	2.5kHz～30kHz+	なし	$< 1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} \sim 50\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	短い～中程度	なし
MEMS加速度センサー	\$10～\$30*	3kHz～20kHz+	あり	$< 25\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} \sim 100\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	中程度～長い	あり
MEMS マイクロフォン	$< \$1 \sim \2	20kHz	なし	57dB～74dB	長い	なし
MEMS 超音波センサー	$< \$1 \sim \2	100kHz	なし	65dB	長い	なし

*MEMS加速度センサー・モジュールはコストが\$30を超える場合がありますが、これらはフル・システム・ソリューションです。これに対し、他の部品はすべて単体のセンサーです。

**表示例：ワースト、中程度、ベスト

表4 予防メンテナンス・センサーの機械的仕様

センサー	サイズ	軸数	防振メカニカル・パッケージ	業界標準インターフェース	集積機能	機械的取り付け	耐環境性
ピエゾ加速度センサー	中程度	1～3	あり	あり	なし	あり	極めて良好
MEMS加速度センサー	小型／中程度*	1～3	あり	あり	あり	あり	極めて良好
MEMSマイクロフォン	小型	1	なし	なし	なし	非接触式	良好
MEMS超音波センサー	小型	1	なし	なし	なし	非接触式	良好

*通常、MEMSモジュールにはADC、プロセッサ、フィルタ機能が含まれており、シグナル・チェーンのスペースに関する条件を緩和します。フィルタはセンサーが最大限の性能を発揮できるように調整されています。

**表示例：ワースト、中程度、ベスト

近年の容量性MEMS加速度センサー技術の進歩により、小型、ロー・コスト、低消費電力のワイヤレスCbMソリューションを優先度の低い設備資産上に実装して、更に多くの診断情報を施設管理に取り入れ、重要システムのアップタイムを維持することが可能になりました。このような進歩は、MEMS加速度センサーをピエゾ加速度センサーの性能に近付け、より従来型の有線CbMシステムで使用できるという結果をもたらしました。この低ノイズで広帯域という特長と、業界標準の接続方法（ICPとIEPE）を組み合わせたピエゾ加速度センサーは、これまで数十年にわたり代表的なセンサーとして振動計測に使われてきました。MEMS加速度センサーは、図3に示すように、IEPE標準モジュールとインターフェースが取れるようになりました。変換回路は、[Circuits from the Lab®](#)リファレンス設計をベースにしています。この回路は、広い帯域幅にわたって性能を発揮できるような特性を加えられた特別なPCBを使って設計されており、後の段階でメカニカル・モジュールの設計にそのまま組み込むことができます。

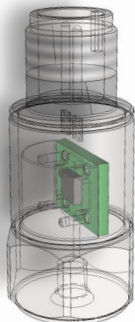


図3 ADXL100xファミリのCbM加速度センサーのレトロフィットを可能にするMEMS加速度センサー、IEPEリファレンス、PCB設計を組み込んだIEPEメカニカル・モジュール注：アナログ・デバイセズはIEPEメカニカル・モジュールを製造していません。

図4に示すデバイスには、3個の1軸MEMS加速度センサー、3個のADC、1個のプロセッサ、メモリ、およびアルゴリズムが組み込まれており、これらはすべて、共振周波数が50kHzを超えるメカニカル・モジュール内に格納されています。このデバイスはMEMS加速度センサーの能力が大きな特長となっており、センサー・ノードにインテリジェント機能を組み込んでセンサーを最良のシグナル・チェーンおよび処理と組み合わせ、最大限の性能を実現できるようにしています。このモジュールは、FFTの実行、時間領域または周波数領域の様々なアラームのトリガ、および故障を予測するための各種のアルゴリズムや機械学習ツールに不可欠な時間領域の統計データの生成を行うことができます。

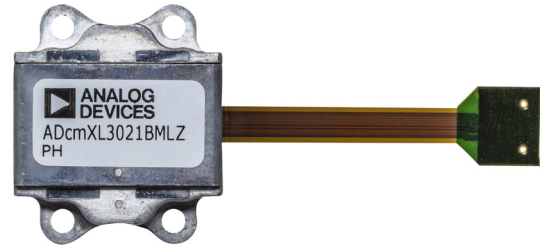


図4 共振周波数が50kHzを超えるメカニカル・パッケージにADC、プロセッサ、FFT、統計機能を内蔵した3軸MEMS CbMモジュール。

使用するPdMソリューションに最も適した振動センサーを選ぶ際の本当の課題は、保有設備資産に発生する可能性が最も高い故障モードに適したセンサーを組み合わせる、という点です。MEMSマイクロフォンについては、過酷な環境下で振動関連故障モードを確実に検出するための十分な耐久性を有することがまだ実証されていませんが、振動検出の業界標準である加速度センサーには、過去数十年間にわたって数多く実装され、信頼できる性能を発揮しているという実績があります。MEMS超音波マイクロフォンについては、加速度センサーよりも早くベアリング異常を検出できるという有望な性能を持つことが分かっており、この潜在的な共生関係は、将来における設備資産の振動解析ニーズに対して最良のPdMソリューションを提供できる可能性を秘めています。

PdMシステムで使用するための振動センサーを1つ推奨することは難しいですが、加速度センサーには多くの実績があり、今後も発展と改善が続いていくことが見込まれます。アナログ・デバイセズは、汎用、低消費電力、低ノイズ、高安定性、高gの加速度センサーから、図4に示すようなインテリジェント機能を備えたエッジ・ノード・モジュールまで、様々なMEMS加速度センサーを提供しています。ADcmXL3021は、専用PdMモジュール・ソリューションの一例にすぎません。アナログ・デバイセズは、PdM対応のMEMS加速度センサーのファミリ（20kHz以上の帯域幅、 $25\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ のノイズ密度）を初めて市場に投入し、現在も、このレベルの性能を有するMEMS加速度センサーの唯一のサプライヤーとしての地位を保っています。アナログ・デバイセズは、センサー、シグナル・チェーン・ソリューション、メカニカル・モジュール、プラットフォーム、機械学習アルゴリズム、人工知能ソフトウェア・プラットフォーム、そして最も過酷な環境下における工業用回転機械の予防メンテナンスを可能にするトータル・システム・ソリューションの供給において、業界をリードし続けています。

詳細については、analog.com/jp/CbMにアクセスするか、CIC.EMEA@analog.comへお問い合わせください。

参照資料

- ¹ Leslie Langnau. “[Sensors Help You Get Maximum Use from Your Motors.](#)” Machine Design, September 2000.
- ² Bram Corne, Bram Vervisch, Colin Debruyne, Jos Knockaert, and Jan Desmet. “[Comparing MCSA with Vibration Analysis in Order to Detect Bearing Faults—A Case Study.](#)” 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), IEEE, May 2015.
- ³ Brian P. Graney and Ken Starry. “[Rolling Element Bearing Analysis.](#)” Materials Evaluation, Vol. 70, No. 1, The American Society for Nondestructive Testing, Inc., January 2012.
- ⁴ Pratyay Konar, R. Bandyopadhyay, and Paramita Chattopadhyay. “[Bearing Fault Detection of Induction Motor Using Wavelet and Neural Networks.](#)” Proceedings of the 4th Indian International Conference on Artificial Intelligence, IICAI 2009, Tumkur, Karnataka, India, December 2009.
- ⁵ Pete Sopcik and Dara O’ Sullivan. “[状態基準保全向けソリューションの性能は、振動センサーで決まる](#)” Analog Dialogue, Vol. 53, June 2019.
- ⁶ [Motor Monitoring Market by Offering \(Hardware, Software\), Monitoring Process \(Online, Portable\), Deployment, Industry \(Oil and Gas, Power Generation, Metals and Mining, Water and Wastewater, Automotive\), and Region—Global Forecast to 2023.](#) Research and Markets, February 2019.
- ⁷ Pradeep Lall, Amrit Abrol, and David Locker. “[Effects of Sustained Exposure to Temperature and Humidity on the Reliability and Performance of MEMS Microphone.](#)” ASME 2017 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, September 2017.
- ⁸ Marcel Janda, Ondrej Vitek, and Vitezslav Hajek. [Induction Motors: Modelling and Control.](#) InTech, November 2012.
- ⁹ Muhammad Ali Shah, Ibrar Ali Shah, Duck-Gyu Lee, and Shin Hur. “[Design Approaches of MEMS Microphones for Enhanced Performance.](#)” Journal of Sensors, Vol. 1, March 2019.

著者について

Chris Murphy

アイルランドのダブリンに本拠を置く European Centralized Applications Center のアプリケーション・エンジニア。2012 年からアナログ・デバイセズに勤務。モータ制御製品と工業用オートメーション製品の設計をサポート。電子工学の修士号とコンピュータ・エンジニアリングの学士号を保有。

連絡先: christopher.murphy@analog.com

アナログ・デバイセズのオンライン・サポート・コミュニティに参加すれば、各種の分野を専門とする技術者との連携を図ることができます。難易度の高い設計上の問題について問い合わせを行ったり、FAQ を参照したり、ディスカッションに参加したりすることが可能です。

 **ADI EngineerZone™**
SUPPORT COMMUNITY

Visit ez.analog.com

* 英語版技術記事は [こちら](#) よりご覧いただけます。