

● 総 説 ●

混合静脈血（中心静脈血）酸素飽和度

小山 薫

キーワード：混合静脈血酸素飽和度，中心静脈血酸素飽和度，連続モニタリング

要 旨

混合静脈血酸素飽和度（mixed venous oxygen saturation：SvO₂）は全身の酸素需給バランスを反映する、他では代用できない重要な指標である。SvO₂は動脈血酸素飽和度、ヘモグロビン値、心拍出量、全身酸素消費量の4つの因子から決定される。SvO₂が変化した際には、この4つの因子のどの因子の変化を反映するかを考えることにより、様々な応用が可能である。従来、酸素需給バランスの連続モニターのためには肺動脈カテーテルを挿入しSvO₂をモニターすることが必要であったが、酸素飽和度センサーのついた中心静脈カテーテルが発売となり、中心静脈血酸素飽和度（central venous oxygen saturation：ScvO₂）の連続モニターが可能となった。ScvO₂は臨床では上大静脈でモニタリングされるが、SvO₂同様に全身の酸素需給バランスのモニターとしての有用性が多く報告されている。SvO₂、ScvO₂ともにその有用性を最大限に発揮するためには連続モニターすることが重要である。

はじめに

重症患者での全身管理において血行動態モニターは必須である。循環動態を適確に把握するためには、心電図、自動/観血的動脈圧、中心静脈圧などの機器を用いたモニターからの指標に加え、第一印象、末梢循環（皮膚色、末梢温、毛細血管再充満時間）、身体診察、尿量など、自らの五感で得た情報と合わせて総合的に判断することが要求される。さらに動脈圧波形解析による心拍出量モニターなども市販され、より低侵襲での循環管理が可能になりつつある。

しかしながら、一定の心拍出量や血圧があれば循環動態は維持されていると言えるだろうか？あるいは心機能低下患者で心拍出量を正常値に維持することが常に正しい管理だろうか？答えはノーである。各患者/病態での酸素需要に見合った循環動態が維持されているかを判断しなければならない。残念ながら上記の指

標では酸素需給バランスの適否は判断できない。酸素需給バランスを反映する代表的な指標が、肺動脈カテーテル挿入により連続モニター（オキシメトリーカテーテル、反射フォトメトリー法）できる混合静脈血酸素飽和度（SvO₂）である。

肺動脈カテーテルの有用性については議論のあるところではあるが^{1~4)}、肺動脈カテーテルは最初の臨床報告から40年以上過ぎた今でも、循環モニターの“ゴールドスタンダード”である⁵⁾。肺動脈カテーテルから得られる指標としては、1. 圧データ、2. 心拍出量、3. SvO₂の3種類がある。SvO₂は他では代用できない酸素需給バランスのリアルタイムの指標であり、後述のように様々な応用も可能である。

しかしながらSvO₂はキャリブレーションしないと表示すらされないこともあり、その有用性は広く認識されていなかった印象がある。またSvO₂測定には肺動脈カテーテル挿入が必要であるため、肺動脈カテーテル挿入に伴う技術的問題や合併症もSvO₂モニターの普及を妨げる要因の一つでもあった。最近では肺動

埼玉医科大学総合医療センター 麻酔科

表 1 重症敗血症における初期治療の目標

1. 中心静脈圧：8～12（～15）mmHg
2. 平均動脈圧：65mmHg 以上
3. 尿量：0.5mL/kg/hr 以上
4. 中心静脈血酸素飽和度（ScvO₂）70%以上、もしくは混合静脈血酸素飽和度（SvO₂）65%以上

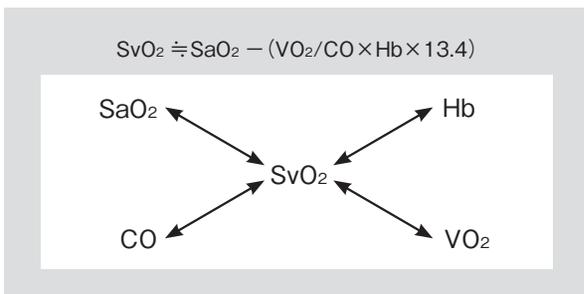


図 2 混合静脈血酸素飽和度を決定する 4 つの因子

SaO₂：動脈血酸素飽和度、CO：心拍出量
 Hb：ヘモグロビン値、VO₂：全身酸素消費量

脈カテーテルと同じ酸素飽和度センサーのついた中心静脈カテーテル(中心静脈オキシメトリーカテーテル)が発売となり、中心静脈血酸素飽和度（ScvO₂）連続モニターにより、少ない侵襲での酸素需給バランスの評価が可能となった。

SvO₂/ScvO₂ は重症敗血症性ショックの治療指針（いわゆる surviving sepsis campaign）にも取り上げられ、SvO₂/ScvO₂ の重要性が再認識されつつある（表 1）。この治療指針での早期に達成すべき到達目標として、従来の心拍出量や酸素運搬係数ではなく、SvO₂/ScvO₂、すなわち酸素需給バランスが目標に掲げられていることに注目して頂きたい^{6,7)}。

本稿では次に SvO₂/ScvO₂ の基礎および有用性、特に連続モニタリングの重要性について述べる。

I. 混合静脈血酸素飽和度：SvO₂

1. 基本的事項

動脈血 100mL に含まれる酸素の量は、おおよそ 20mL であり、そのほとんどはヘモグロビンと結合している（ヘモグロビン値 15g/dL、PaO₂ 100mmHg、SaO₂ 98%

動脈血酸素含量（CaO₂）

$$CaO_2 = (1.34 \times Hb \times SaO_2) + (0.0031 \times PaO_2)$$

*1.34：報告により 1.34～1.39

全身酸素消費量（VO₂）

$$VO_2 = (CaO_2 - CvO_2) \times CO \times 10$$

$$\doteq 1.34 \times Hb \times (SaO_2 - SvO_2) \times CO \times 10$$

混合静脈血酸素飽和度（SvO₂）

$$SvO_2 = (CaO_2 - CvO_2) \times CO \times 10$$

$$\doteq SaO_2 - (VO_2/CO \times Hb \times 13.4)$$

図 1 混合静脈血酸素飽和度を数式化

Hb：ヘモグロビン値、SaO₂：動脈血酸素飽和度
 CvO₂：混合静脈血酸素含量、CO：心拍出量

表 2 混合静脈血酸素飽和度モニターの応用

- リアルタイムの指標
- 心拍出量下限の判断
- 輸血開始の判断
- 呼吸管理での応用
- 看護ケアにおける重要性

とすると 19.7mL がヘモグロビンと結合、残り 0.3mL は溶存酸素)。全身酸素消費量は動脈血と混合静脈血の酸素含量の差と心拍出量から計算され、この式を変形することにより、SvO₂ を数式化して表現することができる（図 1）。

この式から、SvO₂ は酸素供給（動脈血酸素飽和度：SaO₂、ヘモグロビン値：Hb、心拍出量：CO）と酸素需要（全身酸素消費量：VO₂）の 4 つの因子で決定されることが理解される（図 2）。SvO₂ 連続モニター中に SvO₂ が変化した場合には、この 4 つの因子のどれが変化したかを考えることにより様々な応用が可能である（表 2）。

2. リアルタイムの指標：心拍出量(CO)の鋭敏な指標

SvO₂ 連続モニターの応答時間は 2 秒と早い。全身麻酔や深鎮静下などで SvO₂ を規定する 4 つの因子の中の SaO₂、Hb、VO₂ がほぼ一定の状況下では、SvO₂ は CO の変化を鋭敏に反映するため、SvO₂ を CO のリアルタイムの間接的な指標として用いることができる。例えば、カテコラミン変更、IABP 離脱時、手術操作

などでCOが低下した場合、SvO₂は速やかに低下しCOの変化を迅速に反映する。

肺動脈カテーテルでの連続心拍出量モニターは5～15分の平均値であり、血行動態の急激な変化には追従できない。心エコーによる計測は、人手を要する/施行者により結果が異なる可能性/全ての症例で理想的な画像が得られるとは限らないなどの理由も含め、定量的な連続モニターには不向きである。動脈圧波形解析による心拍出量モニターは不整脈があると測定できず、また急激な血行動態の変化時には心拍出量を過大あるいは過小評価する可能性が報告されている^{8,9)}。

このように血行動態の急激な変化が予想される場合のCOのリアルタイムの鋭敏な指標としてSvO₂を応用することができる。

3. 心拍出量下限の判断：心機能低下例

心疾患の既往により心機能が低下している患者の全身管理では、目標とする心拍出量をどのように設定するか判断に迷うことがある。肺動脈カテーテルや心エコーなどで測定される心拍出量を“正常化”するために不必要なカテコラミンが投与されれば、頻拍性不整脈などの合併症から予後を悪化させうる。序論で述べたように、心係数が正常であってもそれぞれの状況での酸素需要に見合った心拍出量か否かを判断することはできない。

最終的には自覚症状や他の指標、および経時的な推移と合わせての総合的な判断が必要であるが、心係数が2.2L/min/m²以下であってもSvO₂が概ね65%以上であれば酸素需給バランスは維持されていると判断できる。逆に心係数が正常であってもSvO₂から酸素需給バランスが維持されていないと判断される状況では、SvO₂を指標にカテコラミン増量・輸血などのさらなる循環補助を考慮する必要がある。

4. 輸血開始の判断：ヘモグロビン値下限

宗教上の理由なども含め輸血を避けたい患者において、容認できるヘモグロビン値の下限や輸血開始の判断材料の一つにSvO₂を利用することができる。ヘモグロビン値が低値であってもSvO₂が65%以上あれば、代償的に心拍出量が増加して酸素需給バランスが維持されていると推定される。

一方、心機能や呼吸機能に問題を有する患者では、ヘ

表3 処置に伴う酸素消費量の増加 (%)

ガーゼ交換	10
清拭	23
体位交換	31
シバリング	50～
面会	22
胸部X線撮影	25
気管内吸引	7～70
体重測定	36
体温上昇(1℃上昇につき)	10～13

(文献10より引用改変)

モグロビン値が8～10g/dL以上でもSvO₂が低値であれば、早期の輸血開始が考慮される。

上記の心拍出量下限の判断と同様に、自覚症状、血圧、脈拍、末梢温、CVP、尿量、乳酸値などの絶対値および推移からの総合的な判断が必要であるが、客観的な判断材料の一つとしてSvO₂は有用である。

5. 呼吸管理での応用：permissive hypoxemia

肺動脈カテーテルの呼吸管理目的のみでの使用は推奨されないが⁷⁾、循環管理のために肺動脈カテーテルを挿入された患者が呼吸不全も合併しているような場合には、SvO₂を呼吸管理にも応用することができる。

PaO₂を低めに管理している場合(いわゆるpermissive hypoxemia)、SvO₂が60～65%以上あれば酸素需給バランスが維持されていることが示唆される。加えて積極的な循環管理でSvO₂を高く維持することにより、PaO₂の上昇を認めたARDS患者も時に経験する。

6. 看護ケアにおける重要性：看護スタッフこそ認識すべき指標

ベッドサイドで患者に接する時間が長く、患者の変化を最初に発見できる立場にあるのが看護スタッフである。日常の看護ケアなどに伴う酸素消費量の増加は意外と多い(表3)¹⁰⁾。

心機能に問題のある患者では、これらの処置に伴う酸素消費量の増加に対し心拍出量を増加することができず、自覚症状、血圧や脈拍の変化がほとんどないにもかかわらず、SvO₂が大きく低下する場合がある。すでに25年以上前に、気管内吸引後にSvO₂が大きく低下、その約30分後に心停止を来した症例が報告されている¹¹⁾。常に患者に接し様々な処置を行う看護スタッ

フこそ、 $SvO_2/ScvO_2$ の重要性を認識する必要がある。

心臓外科の術後で、血圧や脈拍などのバイタルサインは安定、自覚症状なく落ち着いているにもかかわらず、体位交換などで $SvO_2/ScvO_2$ が60%以下となる患者は意外と多い。このような患者では組織レベルでの酸素需給バランスの破綻を来す可能性があり、カテコラミン投与量再検討、処置時は医師が付き添う、夜間の処置は必要最小限にする、集中治療室からの転床を延期するなどの配慮が必要である。また最近では、乳酸値と合わせてモニターすることによる組織低還流の早期発見についての報告もされている（後述）。

7. 注意を要する場合

1) キャリブレーション

SvO_2 連続モニタリングのためには、キャリブレーションを行う必要がある。体内キャリブレーション（カテーテル挿入後にキャリブレーションを行う場合）では、混合静脈血を採血し SvO_2 およびヘモグロビン値（2波長使用のエドワーズ社製カテーテルの場合）を入力する。この際 SvO_2 ではなく間違えて PvO_2 の数値を入力すると、 SvO_2 はモニター画面上異常低値となるので注意が必要である。例えば採血が SvO_2 75% / PvO_2 40mmHgで75と入力すべきところを40と入力すると SvO_2 は40%と表示されてしまう。

1日1回のキャリブレーションが推奨されるが、ヘモグロビン値が変化した場合や必要に応じて適宜キャリブレーションを行う。

2) 敗血症ショック

敗血症ショックの治療目標の1つに SvO_2 65% ($ScvO_2$ 70%) が用いられているが^{6,7)}、敗血症ショックの hyperdynamic state、いわゆる warm shock の時期では、組織での酸素利用障害およびシャント増加により $SvO_2/ScvO_2$ は85%以上の異常高値を示す。このような状態においては $SvO_2/ScvO_2$ は酸素需給バランスを反映しないため注意が必要であり、乳酸値などで判断する必要がある。

Warm shockで $SvO_2/ScvO_2$ が異常高値を示す場合においても、 $SvO_2/ScvO_2$ の経時的な変化を追うことは重要である。治療により warm shock が改善すれば $SvO_2/ScvO_2$ の異常高値は正常化する。一方、ショック状態が悪化し cold shock へ移行する場合も $SvO_2/ScvO_2$ は低下するので注意が必要である。臨床症状や他の循

環系の指標と合わせて判断すれば鑑別可能であることが多い。

3) 透析患者

維持透析で前腕に透析用動静脈シャントがある場合、 $SvO_2/ScvO_2$ はシャント血流を反映し血圧と連動して変化しうる。腎移植レシピエントで移植腎への血流維持の目的で輸液負荷・カテコラミン使用などにより hyperdynamic な循環管理を行い、 $ScvO_2$ が常に90%以上を示した症例を経験する。考え方を換えれば、 $SvO_2/ScvO_2$ の値を透析用シャント開存の指標として応用することも可能である。

SvO_2 が異常高値や低値を示す場合は上記のことを考慮する必要がある。一方、正しくキャリブレーションされているにもかかわらず SvO_2 が低値を示す場合は、緊急事態と判断し迅速に対応しなければならないことが多い。当科では「 $SvO_2/ScvO_2$ 低値は緊急処置を要する異常」と研修医に指導している。

II. 中心静脈血酸素飽和度： $ScvO_2$

SvO_2 は酸素需給バランスの重要な指標であるが肺動脈カテーテルを挿入する必要があった。中心静脈カテーテルの先端に酸素飽和度センサーを取り付けたカテーテル（プリセップ CV オキシメトリーカテーテル、エドワーズライフサイエンス社製）が販売され、より少ない侵襲で酸素需給バランスの連続モニターが可能となった。

重症患者での全身管理では中心静脈カテーテルを挿入することがほとんどであると思われる。中心静脈カテーテル挿入の手技・侵襲のみで酸素需給バランスが連続モニターできる意義は大きい。

$ScvO_2$ を指標とした全身管理は敗血症ショックの治療指針に取り上げられており、 $ScvO_2$ の有用性を示す報告も増えている。

1. SvO_2 と $ScvO_2$

中心静脈の酸素飽和度は測定部位により異なる。健常状態では下大静脈の酸素飽和度の方が上大静脈より高いが、病態により変化、また報告によっても差がある¹²⁾。成人用のプリセップカテーテルの長さは20cmであり、一般的に $ScvO_2$ は上大静脈でモニタリングされる。また下大静脈でのモニタリングは酸素需給バランスを示さないとの報告もある¹³⁾。

SvO₂とScvO₂を比較では、絶対値は一致しないが推移(トレンド)は同じであるという報告がある一方、絶対値も推移も一致しないとする報告もある^{12~16})。患者の病態やカテーテルの位置などにより、SvO₂とScvO₂の関係に差異が生じるものと思われる。当院ICUでもSvO₂とScvO₂を同時モニターすることが時にあるが、経過において絶対値は一定の傾向を示さないが推移は同じ、すなわち同じ方向に変化する場合が多い。

いずれにしても、キャリブレーションをしっかり行い、絶対値および推移を他の指標と合わせて総合的に判断することが重要である。

2. ScvO₂の有用性

ScvO₂連続モニターは、SvO₂と同様の応用が可能である。すなわち、リアルタイムの指標であり、心拍出量、Hb、PaO₂の適正值の判断、看護ケアでの応用などである。

心内シャントを有する先天性心疾患の患者では、むしろScvO₂の方が酸素需給バランスの指標として適しているとの報告がある¹⁷⁾。術後に痙攣の合併症を来した患者では痙攣発作に伴いScvO₂が著明に低下、痙攣発作/治療のモニターとしてScvO₂が有用であった患者も経験している。

唯一完璧なモニターは存在しない。ScvO₂や他のモニター同様、総合的な判断が必要である。

3. 注意を要する場合

SvO₂と同様の注意が必要である。定期的あるいは必要に応じたキャリブレーション、warm shock/前腕透析用シャントでの異常高値などに注意する必要がある。

中心静脈オキシメトリーカテーテルでは、カテーテル先端の上大静脈壁への先あたりなどで時にSQI(signal quality indicator)が上昇することがある。肺動脈カテーテルと異なり、中心静脈カテーテル挿入後は位置の変更ができないことがほとんどであり、カテーテルフラッシュ、再キャリブレーション、体位変換などで対処するが、SQIが改善しない場合は測定値の信頼度は低下する。挿入時に注意する以外の方策はないが、同じ上大静脈内でもカテーテル先端の位置により絶対値の変化が生じうる¹²⁾。

Ⅲ. ScvO₂と動脈血乳酸値から見た全身管理

動脈血乳酸値はSvO₂/ScvO₂同様、酸素需給バランスを示す重要な指標の1つである。乳酸値測定可能な血液ガス分析装置の普及によりベッドサイドでの測定が容易となった。乳酸値は肝機能や糖代謝など酸素需給バランス以外の影響を受けること、リアルタイムの指標でないことに注意が必要であるが、乳酸値を指標とした全身管理がScvO₂同様に有用であったと報告されている¹⁸⁾。

さらにScvO₂と乳酸値の両者から酸素需給バランスを判断する周術期管理も試みられている。両者の組み合わせは、見かけ上のバイタルは安定しているにもかかわらず組織低還流の状態、いわゆる“occult hypo-perfusion”の早期発見に有用である^{19,20)}。

Ⅳ. おわりに

SvO₂は古くからある指標であるが、surviving sepsis campaignや中心静脈オキシメトリーカテーテルの出現などにより、SvO₂/ScvO₂連続モニターによる酸素需給バランスからみた全身管理の重要性が再認識されている。まさに温故知新である。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) Connors AF Jr, Speroff T, Dawson NV, et al : The effectiveness of right heart catheterization in the initial care of critically ill patients. SUPPORT Investigators. JAMA. 1996 ; 276 : 889-97.
- 2) Bernard GR, Sopko G, Cerra F, et al : Pulmonary artery catheterization and clinical outcomes : National Heart, Lung, and Blood Institute and Food and Drug Administration Workshop Report. Consensus Statement. JAMA. 2000 ; 283 : 2568-72.
- 3) Chatterjee K : The Swan-Ganz catheters : past, present, and future. A viewpoint. Circulation. 2009 ; 119 : 147-52.
- 4) Richard C, Monnet X, Teboul JL : Pulmonary artery catheter monitoring in 2011. Curr Opin Crit Care. 2011 ; 17 : 296-302.
- 5) Swan HJ, Ganz W, Forrester J, et al : Catheterization of the heart in man with use of a flow-directed balloon-tipped catheter. N Engl J Med. 1970 ; 283 : 447-51.
- 6) Dellinger RP, Carlet JM, Masur H, et al : Surviving Sepsis Campaign guidelines for management of severe sepsis and septic shock. Crit Care Med. 2004 ; 32 : 858-73.
- 7) Dellinger RP, Levy MM, Carlet JM, et al : Surviving Sepsis Campaign : international guidelines for management of

- severe sepsis and septic shock : 2008. *Crit Care Med.* 2008 ; 36 : 296-327.
- 8) Kotake Y, Yamada T, Nagata H, et al : Transient hemodynamic change and accuracy of arterial blood pressure-based cardiac output. *Anesth Analg.* 2011 ; 113 : 272-4.
 - 9) Meng L, Tran NP, Alexander BS, et al : The Impact of Phenylephrine, ephedrine, and increased preload on third-generation Vigileo-FloTrac and esophageal doppler cardiac output measurements. *Anesth Analg.* 2011 ; 113 : 751-7.
 - 10) HeadLey JM : Strategies to optimize the cardiorespiratory status of the critically ill. *AACN Clin Issues.* 1995 ; 6 : 121-34.
 - 11) Divertie MB, McMichan JC : Continuous monitoring of mixed venous oxygen saturation. *Chest.* 1984 ; 85 : 423-8.
 - 12) Reinhart K, Bloos F : The value of venous oximetry. *Curr Opin Crit Care.* 2005 ; 11 : 259-63.
 - 13) Davison DL, Chawla LS, Selassie L, et al : Femoral-based central venous oxygen saturation is not a reliable substitute for subclavian/internal jugular-based central venous oxygen saturation in patients who are critically ill. *Chest.* 2010 ; 138 : 76-83.
 - 14) Dueck MH, Klimek M, Appenrodt S, et al : Trends but not individual values of central venous oxygen saturation agree with mixed venous oxygen saturation during varying hemodynamic conditions. *Anesthesiology.* 2005 ; 103 : 249-57.
 - 15) Marx G, Reinhart K : Venous oximetry. *Curr Opin Crit Care.* 2006 ; 12 : 263-8.
 - 16) Varpula M, Karlsson S, Ruokonen E, et al : Mixed venous oxygen saturation cannot be estimated by central venous oxygen saturation in septic shock. *Intensive Care Med.* 2006 ; 32 : 1336-43.
 - 17) Liakopoulos OJ, Ho JK, Yezbick A, et al : An experimental and clinical evaluation of a novel central venous catheter with integrated oximetry for pediatric patients undergoing cardiac surgery. *Anesth Analg.* 2007 ; 105 : 1598-604.
 - 18) Jones AE, Shapiro NI, Trzeciak S, et al : Lactate clearance vs central venous oxygen saturation as goals of early sepsis therapy : a randomized clinical trial. *JAMA.* 2010 ; 303 : 739-46.
 - 19) Ranucci M, Isgro G, Carlucci C, et al : Central venous oxygen saturation and blood Lactate levels during cardiopulmonary bypass are associated with outcome after pediatric cardiac surgery. *Crit Care.* 2010 ; 14 : R149.
 - 20) Hu BY, Laine GA, Wang S, et al : Combined Central Venous Oxygen Saturation and Lactate as Markers of Occult Hypoperfusion and Outcome Following Cardiac Surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2012 ; 26 : 52-7.

Mixed venous oxygen saturation (SvO₂) and central venous oxygen saturation (ScvO₂)

Kaoru KOYAMA

Saitama Medical Center, Saitama Medical University

Corresponding author : Kaoru KOYAMA

Saitama Medical Center, Saitama Medical University
1981 Kamoda, Kawagoe, Saitama, 350-8550, Japan

Key words : mixed venous oxygen saturation, central venous oxygen saturation, continuous monitoring

Mixed venous oxygen saturation (SvO₂) is a very important parameter to assess oxygen supply and demand balance in critically ill patients, and cannot be substituted by the others. SvO₂ is determined by four components, those are arterial oxygen saturation, hemoglobin value, cardiac output and whole body oxygen consumption. SvO₂ usually represents changes in cardiac output. However, technical problems and complications may limit widespread use of SvO₂. Nowadays, central venous oxygen saturation (ScvO₂) can be monitored continuously with a specific central venous catheter with a fiberoptic sensor. There are many reports about ScvO₂ monitoring as a surrogate for SvO₂ monitoring. Both SvO₂ and ScvO₂ should be monitored continuously to draw the effectiveness in a maximum.