

特集 ■ 血液凝固異常

血液粘弾性検査

小網 博之 KOAMI, Hiroyuki
佐賀大学医学部附属病院 救急科

intensivist にとって凝固異常や線溶異常に直面する頻度は高い。集中治療を要する多様な病態において、止血・線溶メカニズムは疾患進展の中心的役割を果たすだけでなく、抗凝固薬や抗線溶薬といった治療手段としても重要である。凝固異常の診断はまさに「時間との戦い」である。

従来のプロトロンビン時間 (PT) や活性化部分トロンボプラスチン時間 (APTT) は血小板を除外した血漿検体による検査である。「凝固開始までの時間」という凝固カスケードの初期段階の限定的情報を提示するのみで、生体内の包括的な凝固能を反映しない¹⁾。本稿で述べる血液粘弾性検査 viscoelastic testing (VET) は、「凝固開始から血栓硬度増強、線溶過程への移行」という一連の動態を即時的に描出可能である。従来検査が「静止画」であるとするならば、VET はいわば「動画」である。以下より、VET の理論的基盤から臨床応用までを概説する。

測定原理と測定法

VET の最大の利点は、全血検体を用いて凝固線溶系を迅速かつ包括的に評価できることである。以下に代表的 VET 装置とその測定指標を述べる²⁾。

図1 血液粘弾性検査 (TEG と ROTEM) の各評価項目について
(文献3より許可を得て転載)

國中 ネーム
・基本 1/a ロタン M
・太くするネーム
1/a ロタン DB

図版は、0.12 ミリタイ
色ベタで囲む

47 ミリ
110 (以上)

キーワード

ROTEM
TEG
フィブリノゲン機能障害
血小板機能障害
線溶

の装置が登場し、現場での操作性が向上している。

代表的測定指標³⁾

CT [clotting time (ROTEM)] / R [reaction time (TEG)] は血栓形成開始までの時間を表し、主に凝固因子の機能を反映する。CFT (clot formation time) / K (clot kinetics) は血栓が一定の硬度に達するまでの時間を表し、フィブリノゲン機能を反映する。MCF (maximum clot firmness) / MA (maximum amplitude) は血栓形成の最大硬度を表し、フィブリノゲンおよび血小板機能を示す。LI30 [lysis index at 30 minutes (ML: maximum lysis)] / LY30 (lysis at 30 minutes after maximum amplitude) は線溶活性の指標となる。

測定用アッセイ

クエン酸加全血にカルシウムと各種凝固活性化物質を添加することで、種々の病態を模した評価が行える。ROTEM には EXTEM, INTEM, FIBTEM, APTEM が、TEG には Kaolin TEG, Rapid TEG, Functional Fibrinogen などがあり、内因系・外因系の凝固機能、フィブリノゲン活性、線溶状態、ヘパリンの影響などを個々に評価できる。また、TEG には、ヘパリン加全血を用いた Platelet Mapping があり、血小板凝集の評価も可能である。

実臨床で活用が期待される VET の代表的パターン

IVET の波形は病態に応じて特徴的な変化を示す。以下に代表的なパターンとその臨床的意義を概説する。

フィブリノゲン機能障害パターン

フィブリノゲンは大量出血時に最も早期にクリティカルレベルまで低下する凝固因子であ

る⁴⁾。

ROTEM では、EXTEM-CFT の延長や EXTEM-MCF の低下かつ FIBTEM-MCF など疑い、TEG では CRT や CFF における R の延長や MA の低下などで疑う。測定開始後約 2 分で予測可能である。こうした所見が判明次第、すみやかに FFP やクリオプレシピテート、フィブリノゲン製剤による補充を考慮する。

血小板機能障害パターン

ROTEM では、EXTEM-MCF が低下する一方で、FIBTEM-MCF が保たれる場合に疑い、TEG では、CRT-MA が低下するも CFF-MA が保たれる場合に疑う。MCF や MA は、血小板とフィブリノゲン機能を反映するため、血小板数または機能低下が示唆される。大量出血の蘇生期においては、フィブリノゲン補充を優先しつつ、血小板輸血の必要性判断に重要である。

線溶亢進と線溶抑制

線溶亢進 hyperfibrinolysis は、形成された血餅が急速に縮小するのが特徴で、出血の危険因子である。ROTEM では、EXTEM-ML $\geq 15\%$ かつ APTEM-ML が正常化する場合に線溶亢進と診断する。一方、TEG では CRT-LY30 $\geq 3.0\%$ を線溶亢進の目安とする⁵⁾。外傷性ショック、アナフィラキシー、心肺停止時などに認められ、トラネキサム酸 tranexamic acid (TXA) などの抗線溶療法を検討する⁶⁾。一方、EXTEM-LI60 $\geq 97\%$ や CRT-LY30 $\leq 0.8\%$ であれば、線溶抑制 fibrinolytic shutdown と診断され、血栓性合併症による臓器障害のリスクとして有用である⁷⁾。

凝固亢進パターン

INTEM-MCF の高値 ($\geq 75\text{mm}$) ならびに CRT-MA 高値 ($\geq 65\text{mm}$) を特徴とし、感染症初期、外傷慢性期、慢性炎症などで認めら

表 1 外傷蘇生の各時相ごとの VET における特徴的な波形と臨床介入について

時相	臨床判断・介入	注目すべき VET (ROTEM) の所見	代表的な波形パターン例
①受傷直後	MTP 早期発動 受傷機転・バイタルなどで即決	結果待たず MTP 開始 (判断補助には使わない)	なし
②蘇生初期 (0-3 時間以内)	線溶亢進の判断 3 時間以内の評価が鍵	EXTEM-ML $\geq 15\%$ かつ APTEM-ML $< 15\%$	線溶亢進パターン
③蘇生中	目的志向型 輸血管理 過剰輸血防止と成分選択	(1) EXTEM-CT 延長→凝固因子欠乏 (2) EXTEM-MCF 低下かつ FIBTEM-MCF 低下→フィブリノゲン機能障害 (3) EXTEM-MCF 低下かつ FIBTEM-MCF 低下なし→血小板機能障害	フィブリノゲン機能障害パターン 血小板機能障害パターン
④止血期	MTP 終了判断 蘇生期で外科的止血を確認	輸血の判断となった異常が改善	正常パターン
⑤回復期 (止血後)	血栓リスク評価 線溶亢進から線溶抑制へシフト	INTEM-MCF $\geq 75\text{mm}$ で VTE リスク高、早期抗凝固の指標に	凝固亢進パターン

れる。血栓性合併症の予測因子として注目される^{8,9)}、経時的モニタリングへの応用が期待される。

ヘパリンの影響

INTEM-CT と HEPT-CT、CK-R と CKH-R の比較で判断し、INTEM-CT や CK-R が延長し、HEPT-CT や CKH-R で正常化する場合に疑う。ECMO 管理下のヘパリン投与量調整などに有用である¹⁰⁾。

血小板凝集能

TEG の Platelet Mapping を用いて、アデノシン二リン酸 adenosine diphosphate (ADP) 経路やアラキドン酸 arachidonic acid (AA) 経路における血小板凝集能を評価できる。主に抗血小板剤の効果をモニタリングするため

に有用だが、近年では外傷や新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) などにおいて、凝集能の低下が臓器障害や予後と関連するという報告もある¹¹⁻¹³⁾。

実臨床での思考プロセス：外傷蘇生における応用事例

ここでは、大量出血を伴う外傷蘇生における VET 活用の要点を時相ごとに整理する (表 1)。

迅速な MTP (大量輸血プロトコル) 発動

大量出血を伴う外傷では大量輸血プロトコル massive transfusion protocol (MTP) に基づいた輸血戦略が推奨される¹⁴⁾。重症例では VET 結果を待たず受傷直後から MTP を発動すべきである。

メモ1 CRASH-2試験 \rightarrow 色80%+ス15%!

Clinical Randomisation of an Antifibrinolytic in Significant Haemorrhage (CRASH-2) 試験は、世界40か国・約2万例の患者を対象に、外傷後の大量出血に対してTXAを早期投与すると死亡率は下がるのかを検証した無作為化比較試験である⁶⁾。大量出血が疑われる外傷患者において、早期（特に3時間以内）にTXAを投与すると、出血死が有意に減少すると示され、その後の外傷診療において大きな影響を及ぼした。

1/a ロダンM
1/a ベタ
17w 話

TXA投与は時間が鍵

CRASH-2試験(メモ1)により、受傷後3時間以内の早期投与が死亡率を低下させると示された⁶⁾。近年の欧州のガイドラインでは、大量出血が疑われる外傷症例では、可能なかぎり早期にTXAを投与することが推奨される¹⁴⁾。加えて、VETで線溶亢進が示される場合には、TXA未投与例のみならず、投与済みであっても、すみやかな追加投与の検討余地がある。VETは、投与の適応判断のみならずTXA投与後の線溶制御の確認にも有用である。

VETによる 目的志向型輸血管理

MTPに基づく外傷蘇生において、VETの意義は大量輸血の開始判断よりも、むしろその後の過剰輸血を抑制し、必要成分を適切選択する点にある。VETを用いて凝固因子やフィブリノゲン、血小板の指標をモニタリングしながら必要な成分を輸血する。こうしたVETを用いた輸血戦略により赤血球使用量減少や転帰改善が報告されている¹⁵⁾。

MTP終了の目安

輸血の判断となった異常に対して、VETを用いてフォローする。米国外科学会ガイドラインでは、 $Hb \geq 10g/dL$ 、 $PT < 18$ 秒、 $APTT < 35$ 秒、血小板数 $>15 \times 10^4/\mu L$ 、フィブリノゲン $>180mg/dL$ が輸血終了の目安とされる¹⁶⁾。

止血から抗凝固への相転換

止血後は過凝固による血栓性合併症が問題となり、日本では重症外傷患者の32%にVTEを認める¹⁷⁾。VETでは、INTEM-MCFやCRT-MAの高値がそのリスクとされる^{8,9)}。VETは早期抗凝固療法を要する高リスク症例同定に有用であり、さらなる知見の集積が期待される。

将来への課題

現在、VETの保険算定は心臓血管手術時の「血液粘弾性検査600点」に限定されており、外傷や産科出血などでは適用外である。また古くから「出血・凝固検査(区分D006)」において「トロンボエラストグラフ(TEG)28点」は存在するが、例えば、ROTEMは査定対象となりやすく、実臨床での使用は限定的である。

おわりに

血液粘弾性検査(VET)は、全血を用いて凝固開始から血栓形成、線溶までの全過程を即時かつ包括的に可視化する「動画」的検査法である。ROTEMやTEGなどの装置により、フィブリノゲン機能、血小板機能、線溶状態、凝固亢進、ヘパリン影響などを個別に評価でき、特に外傷蘇生における目的志向型輸血戦略などで有用とされる。しかし、現行保険制度では臨床使用が制限されており、今後の測定体制の整備が必要である。

文献 \rightarrow 色80%!

1. Brummel KE, Paradis SG, Butenas S, et al. Thrombin functions during tissue factor-induced blood coagulation. *Blood* 2002; 100: 148-52. PMID: 12070020

2. Sakamoto Y, Koami H, Miike T. Monitoring the coagulation status of trauma patients with viscoelastic devices. *J Intensive Care* 2017; 5: 7. PMID: 34798696

3. 日本心臓血管麻酔学会<使用指針作成委員会>. 心臓血管麻酔における血液粘弾性検査の使用指針(2025年4月30日改訂). Accessed Dec. 10, 2025. PMID: 25590522

4. Hayakawa M, Gando S, Ono Y, et al. Fibrinogen level deteriorates before other routine coagulation parameters and massive transfusion in the early phase of severe trauma: a retrospective observational study. *Semin Thromb Hemost* 2015; 41: 35-42. PMID: 25590522

5. Moore HB, Moore EE, Gonzalez E, et al. Hyperfibrinolysis, physiologic fibrinolysis, and fibrinolysis shutdown: the spectrum of postinjury fibrinolysis and relevance to antifibrinolytic therapy. *J Trauma Acute Care Surg* 2014; 77: 811-7. PMID: 25051384

6. Shakur H, Roberts I, Bautista R, et al. Effects of tranexamic acid on death, vascular occlusive events, and blood transfusion in trauma patients with significant haemorrhage (CRASH-2): a randomised, placebo-controlled trial. *Lancet* 2010; 376: 23-32. PMID: 20554319

7. Koami H, Sakamoto Y, Hirota Y, et al. Effect of hypofibrinolysis on clinical outcomes of patients with septic disseminated intravascular coagulation. *Thromb Res* 2025; 245: 109235. PMID: 39644620

8. Tsantes AG, Papadopoulos DV, Trikoupi IG, et al. Rotational thromboelastometry findings are associated with symptomatic venous thromboembolic complications after hip fracture surgery. *Clin Orthop Relat Res* 2021; 479: 2457-67. PMID: 34076610

9. Cotton BA, Minei KM, Radwan ZA, et al. Admission rapid thromboelastography predicts development of pulmonary embolism in trauma patients. *J Trauma Acute Care Surg* 2012; 72: 1470-5. PMID: 22695409

10. Panigada M, Brioni EIG, Panarello G, et al. Thromboelastography-based anticoagulation management during extracorporeal membrane oxygenation: a safety and feasibility pilot study. *Ann Intensive Care* 2018; 8: 7. PMID: 29340875

11. Kay AB, Morris DS, Collingridge DS, et al. Platelet dysfunction on thromboelastogram is associated with severity of blunt traumatic brain injury. *Am J Surg* 2019; 218: 1134-7. PMID: 31575420

12. Wohlaer MV, Moore EE, Thomas S, et al. Early platelet dysfunction: an unrecognized role in the acute coagulopathy of trauma. *J Am Coll Surg* 2012; 214: 739-46. PMID: 22520693

13. Koami H, Sakamoto Y, Furukawa Y, et al. Reduced ADP-induced platelet aggregation may predict poor clinical outcomes in patients with COVID-19. *Thromb Res* 2025; 255: 109501. PMID: 41037860

14. Rossaint R, Afshari A, Bouillon B, et al. The European guideline on management of major bleeding and coagulopathy following trauma: sixth edition. *Crit Care* 2023; 27: 80. PMID: 36859355

15. Bugaev N, Como JJ, Golani G, et al. Thromboelastography and rotational thromboelastometry in bleeding patients with coagulopathy: practice management guideline from the Eastern Association for the Surgery of Trauma. *J Trauma Acute Care Surg* 2020; 89: 999-1017. PMID: 32941349

16. ACS TQIP: Massive Transfusion in Trauma Guidelines. Accessed Oct. 10, 2025.

17. Yumoto T, Naito H, Yamakawa Y, et al. Venous thromboembolism in major trauma patients: a single-center retrospective cohort study of the epidemiology and utility of D-dimer for screening. *Acute Med Surg* 2017; 4: 394-400. PMID: 29123899

10. Panigada M, Brioni EIG, Panarello G, et al. Thromboelastography-based anticoagulation management during extracorporeal membrane oxygenation: a safety and feasibility pilot study. *Ann Intensive Care* 2018; 8: 7. PMID: 29340875
11. Kay AB, Morris DS, Collingridge DS, et al. Platelet dysfunction on thromboelastogram is associated with severity of blunt traumatic brain injury. *Am J Surg* 2019; 218: 1134-7. PMID: 31575420
12. Wohlaer MV, Moore EE, Thomas S, et al. Early platelet dysfunction: an unrecognized role in the acute coagulopathy of trauma. *J Am Coll Surg* 2012; 214: 739-46. PMID: 22520693
13. Koami H, Sakamoto Y, Furukawa Y, et al. Reduced ADP-induced platelet aggregation may predict poor clinical outcomes in patients with COVID-19. *Thromb Res* 2025; 255: 109501. PMID: 41037860
14. Rossaint R, Afshari A, Bouillon B, et al. The European guideline on management of major bleeding and coagulopathy following trauma: sixth edition. *Crit Care* 2023; 27: 80. PMID: 36859355
15. Bugaev N, Como JJ, Golani G, et al. Thromboelastography and rotational thromboelastometry in bleeding patients with coagulopathy: practice management guideline from the Eastern Association for the Surgery of Trauma. *J Trauma Acute Care Surg* 2020; 89: 999-1017. PMID: 32941349
16. ACS TQIP: Massive Transfusion in Trauma Guidelines. Accessed Oct. 10, 2025.
17. Yumoto T, Naito H, Yamakawa Y, et al. Venous thromboembolism in major trauma patients: a single-center retrospective cohort study of the epidemiology and utility of D-dimer for screening. *Acute Med Surg* 2017; 4: 394-400. PMID: 29123899

利益相反の開示：本稿に関し、著者は、HAEMONETICS社と業務委託契約を結び、粘弾性検査機器に関する教育コースにおいて講師料を受領している。