

(解説)

計装化押し込み試験用解析プログラム tangentGoの解説とHVI(IW)硬さへの適用

○宮原 健介 (物質・材料研究機構)

石橋 達弥 (新潟大学 名誉教授)

吉川 裕輔 (日本電産サンキョーシーエムアイ株式会社)

山本 卓 (株式会社山本科学工具研究社)

講演の内容

1. 背景 – 計装化押し込み試験の抱える課題
2. tangentGoプログラムの解説
3. 原論文とtangentGoとの相違点 ・ ・ ・ HVI(IW)硬さ
4. まとめ

背景 - 計装化押し込み試験の抱える課題

ヤング率や硬さを求める計装化押し込み試験はISO14577として規格化され、ほとんどの市販の計装化押し込み試験機には、これに準拠した解析機能が備わっている。

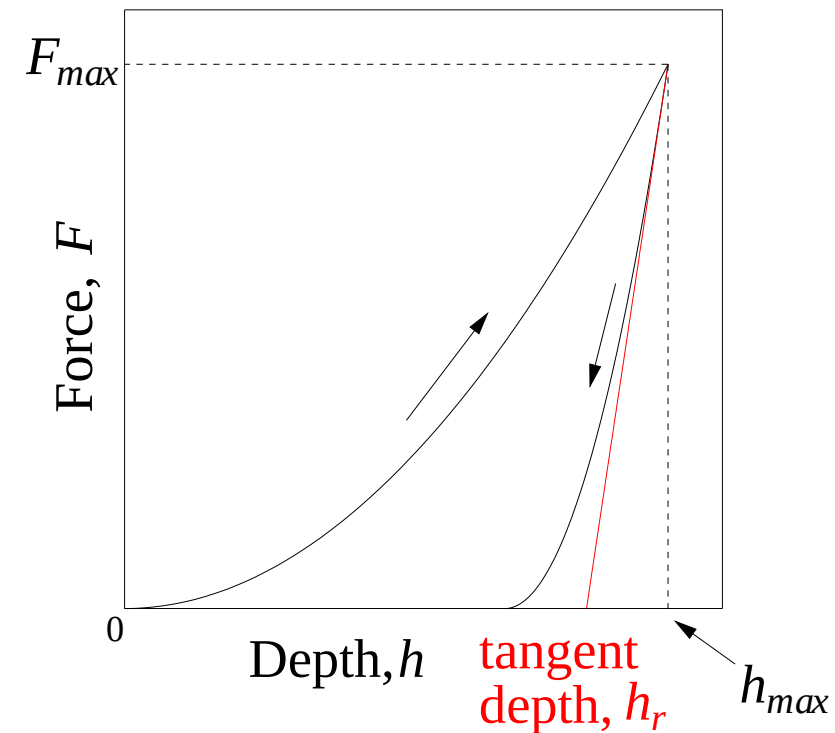
しかし、これまでに著者らが報告した通り、実際に試験機によって算出されるヤング率には、以下の問題点がある。

1. **外れ値** (他の試験機の数倍のように、大きく外れる場合あり)
2. **ばらつき** (ヤング率で変動係数10%超, 外れ値含めると20%超)
3. **標準試料の影響** (BK7・Fused silicaの違いでヤング率に約10%差)

一方、石橋らが提案したtangent depth法は、多数の試料で適切なヤング率や硬さが求まることが検証されている。また、市販の試験機で取得した巡回測定データにtangent depth法を適用して課題点が改善したことから、現状の解析プロセスに原因があることは明らかである。

tangent depth法とは

- 計装化押し込み試験の解析方法で, **tangent depth**に基づいてヤング率や硬さを求める(ISO14577では contact depthを用いる)。
- 多数の試料で適切なヤング率や硬さが求まることが検証されているが, 現状でtangent depth法を選択できる試験機はない。
- このような状況から, 誰でもtangent depth法を試せるよう, 独立な解析プログラムとしてtangentGoが宮原により作成された。



押し込み曲線とtangent depth

tangentGoプログラムの特徴と機能

- tangent depth法を実装(ただし後述の相違点あり)
- 前身は, Rubyを使った単なるスクリプト **ユーザーに負担大**
- 使いやすいグラフィカルなユーザーインターフェース(GUI)を前提として, コアの解析部分については高速なGo言語, それ以外は強力なGUIツールを持つTcl/Tkを利用して作成
- Windows/macOS/Linuxのマルチプラットフォームに対応
- 無償で利用可

tangentGoの機能

解析関連	グラフ表示	その他
各種解析条件の変更	押し込み曲線	Windows/macOS/Linux
結果の保存・コピー	フレームコンプライアンス	設定の保存・読み込み
データの自動読み込み	圧子面積関数	ヘルプ
標準試料登録	ヤング率	デバッグ情報
プロットデータ確認	押し込み硬さ	システム情報
バッチ処理	等価ビッカース硬さ	フォントサイズ変更

tangentGoの解説 (1)メイン画面

メインメニュー(日本語or英語)

解析条件等の設定

sample.xml

ファイル 編集 表示 押し込み曲線 実行 ヘルプ 情報

MEMO Test Analysis /tmp/tangent/sample.xml

Format DEPTH (h) Format FORCE (F) Format LINE METHOD

☐ Auto Column 0 Factor 1 Column 1 Factor 1 Skip 0 E hr H hGeo

UNLOAD fitting: from 0.80 to 0.98 C_F 0.0 $\mu\text{m}/\text{N}$ (leave blank to calc) Option

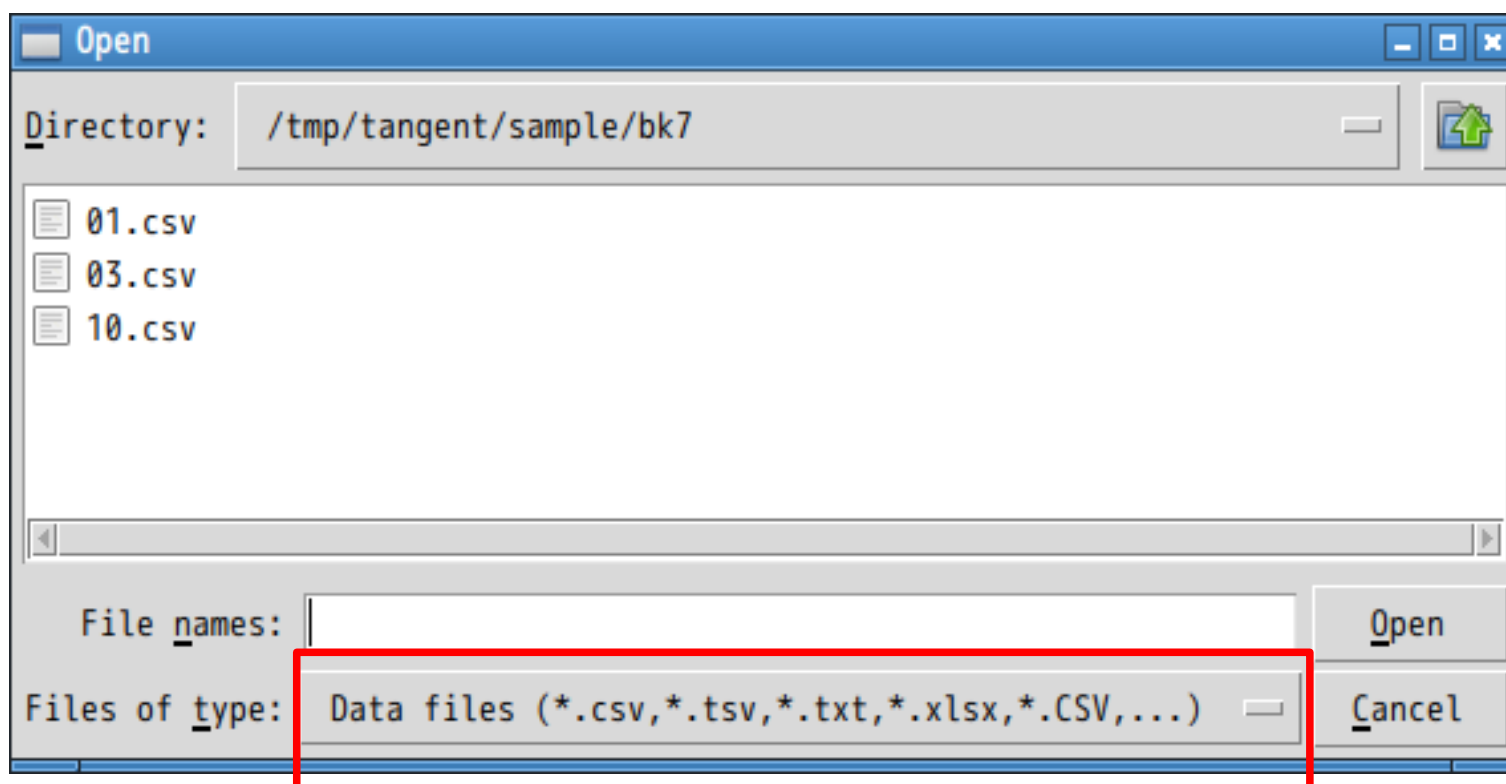
Select File	Specimen name (necessary)	Poisson	E	H	C_F	+
☐ (3)	BK7	0.22	☐	☐	☒	☐
☐ (3)	FS	0.16	☒ 73.32	☐	☒	☐
☐ (3)	test01	0.3	☐	☐	☐	☐

ファイル
ボタン

試料の情報: 1行ずつ各試料の情報を入力(最大20行)
(ファイル名, 試料名, ポアソン比, ヤング率, 硬さetc)

tangentGoの解説 (2)データファイル選択

市販の試験機の実験データファイルを各試料ごとに選択する

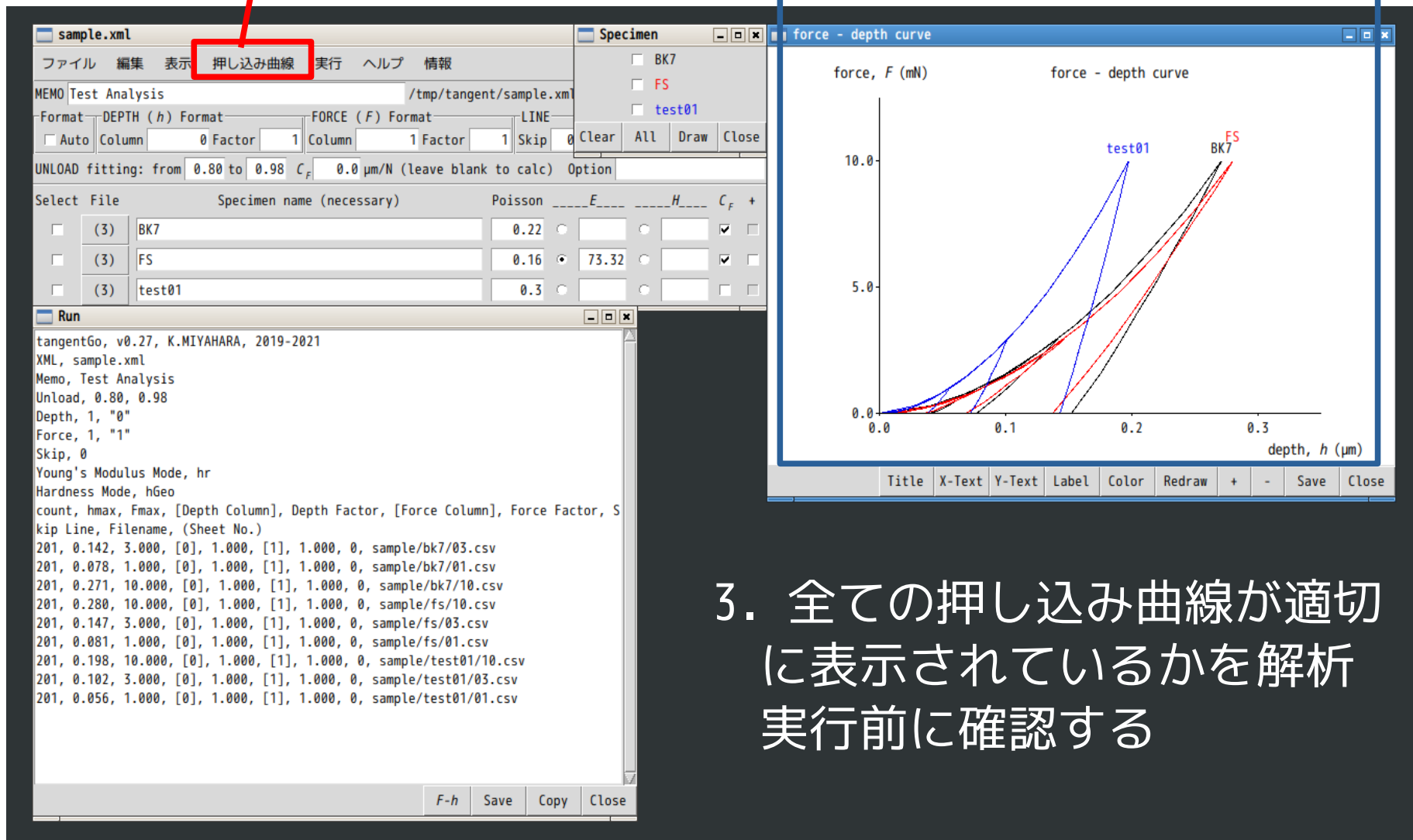


対応形式: **.csv**, .tsv, .txt, **.xlsx**

※各試験機で**.csv**や**.xlsx**のデータ構造(セルの使い方)は異なるが、
自動で読み込み可能。(現在4社以上の試験機に対応)
→ユーザーは実験データファイルを選択するだけ

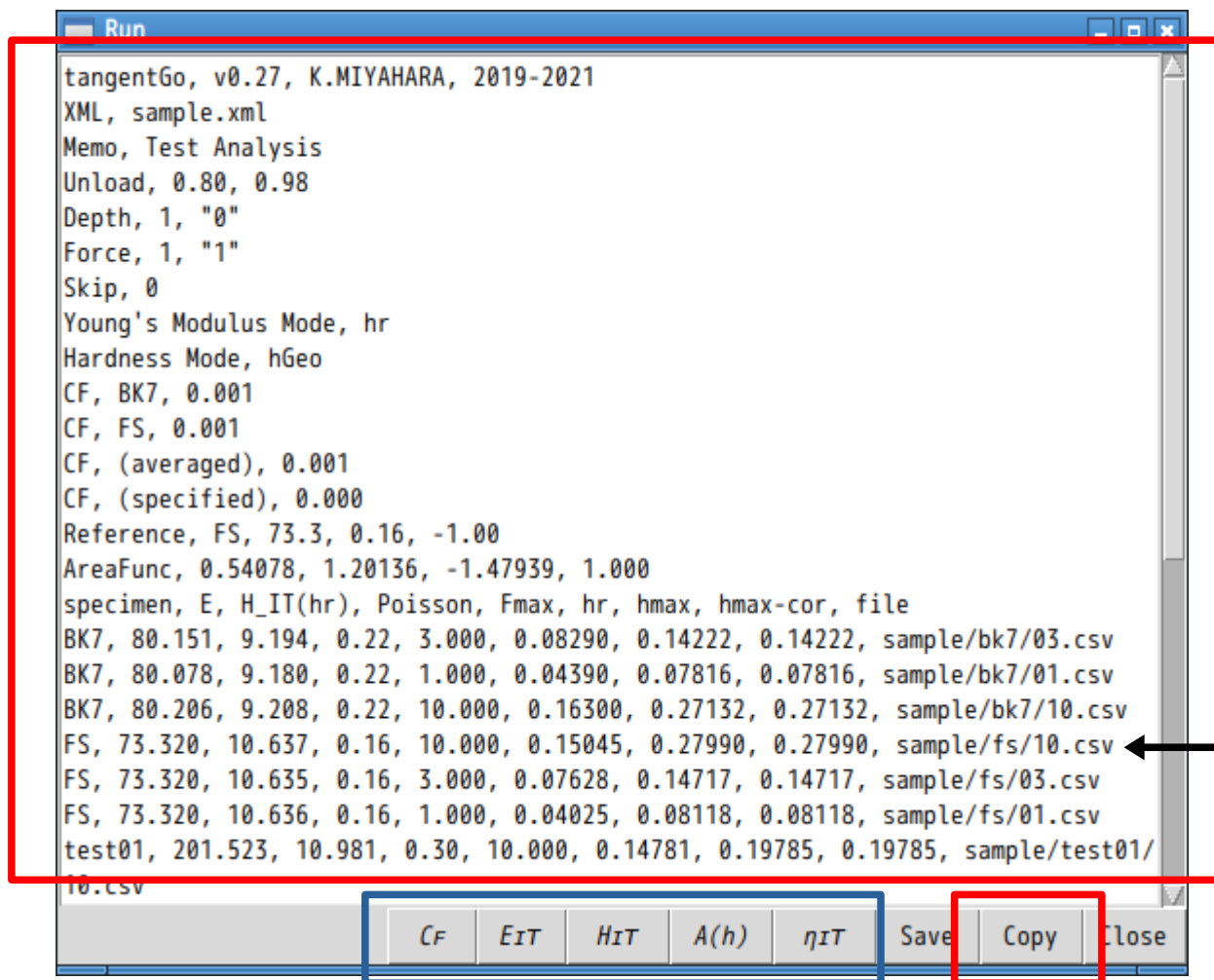
tangentGoの解説 (3)押し込み曲線の表示

1. 押し込み曲線メニューを選択
2. 全ての押し込み曲線を表示 (個別表示も可)



tangentGoの解説 (4)解析の実行

メニューから解析を実行すると、解析結果が文字で表示される



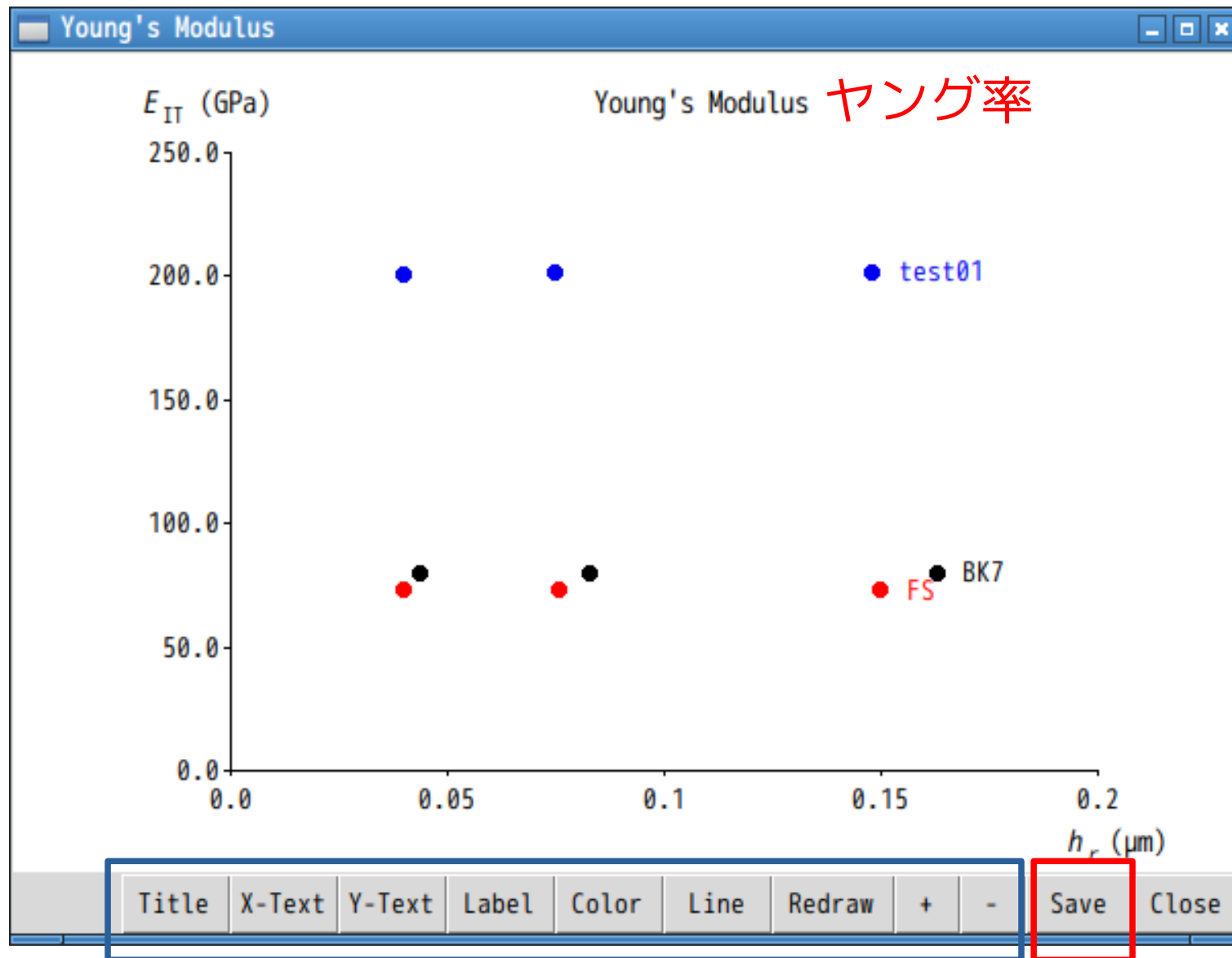
本文は.csv形式

ファイルごとの結果

各グラフの表示ボタン

丸ごとコピーして表計算
ソフトにペースト可能

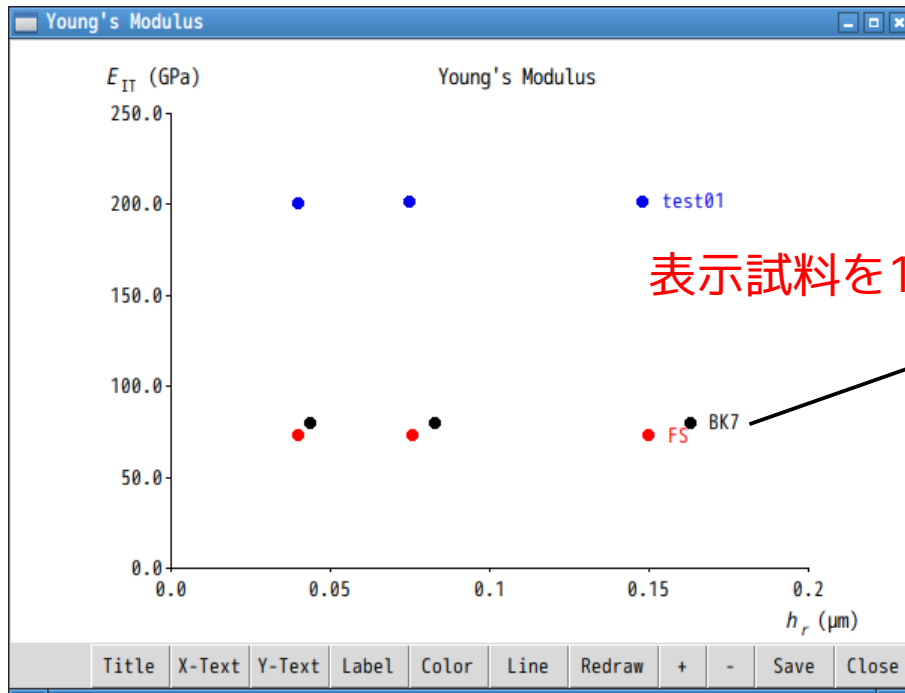
tangentGoの解説 (5)グラフの表示



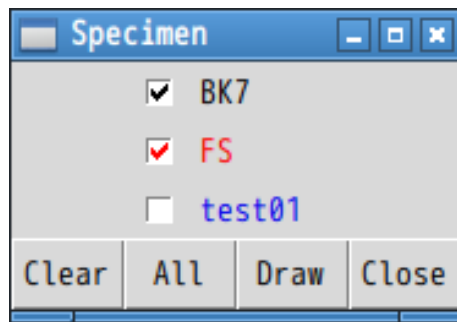
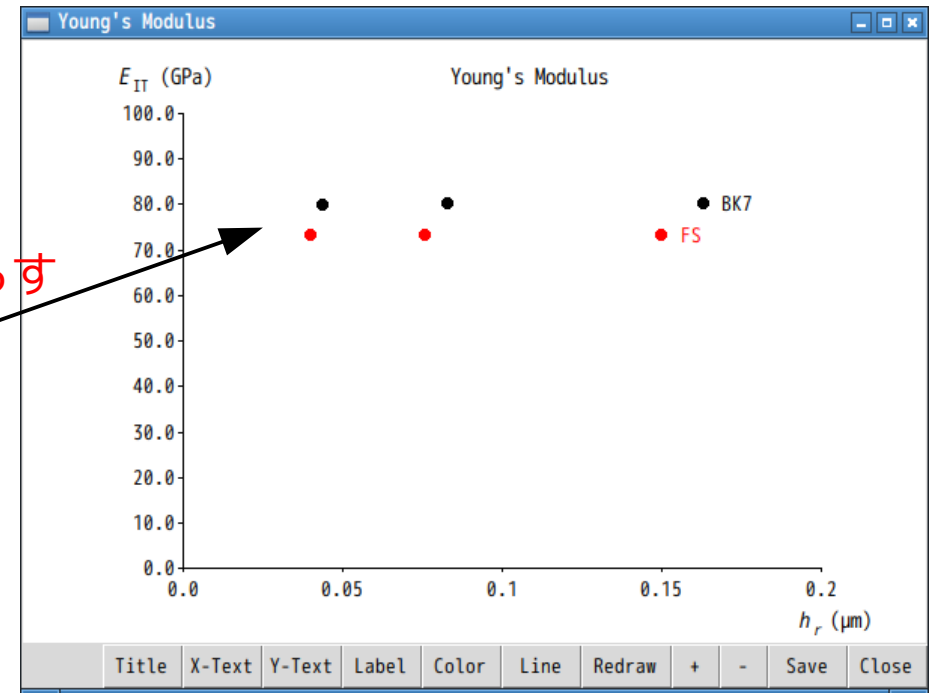
グラフ表示の調整ボタン
(カラー・モノクロなど)

Postscriptで画像保存

tangentGoの解説 (6)グラフの自動スケーリング



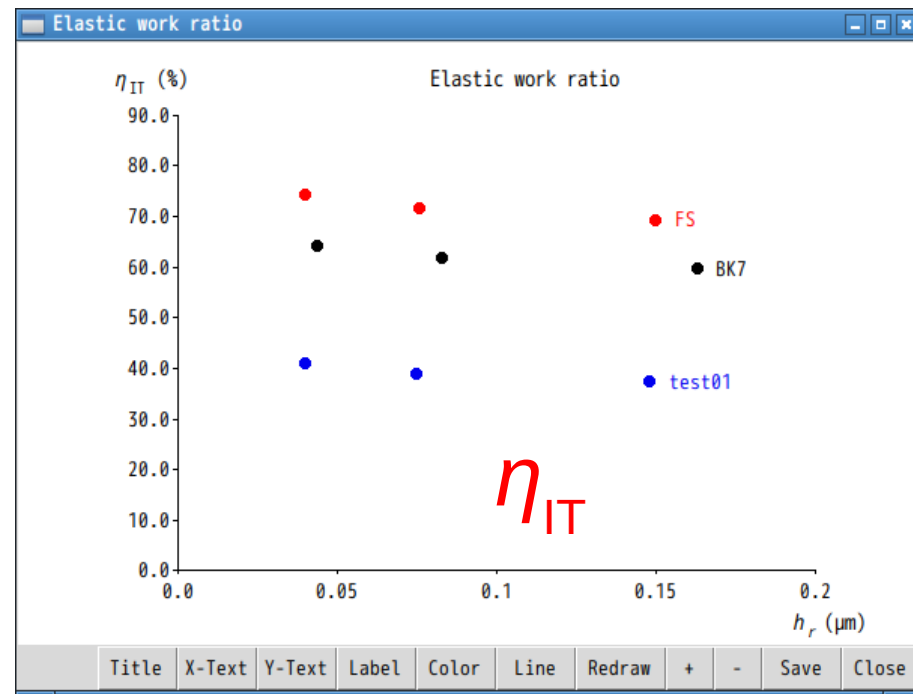
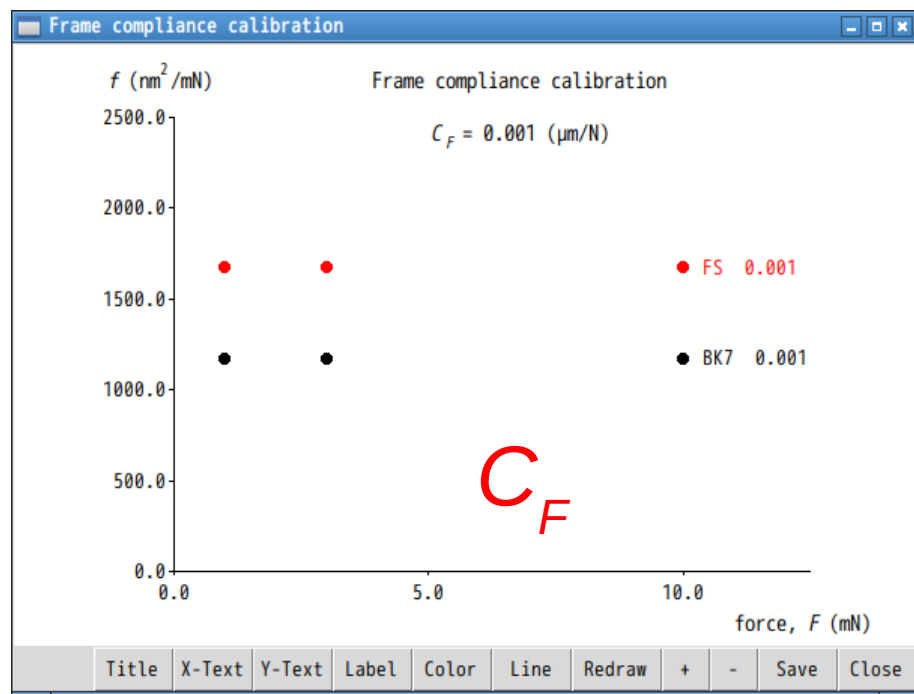
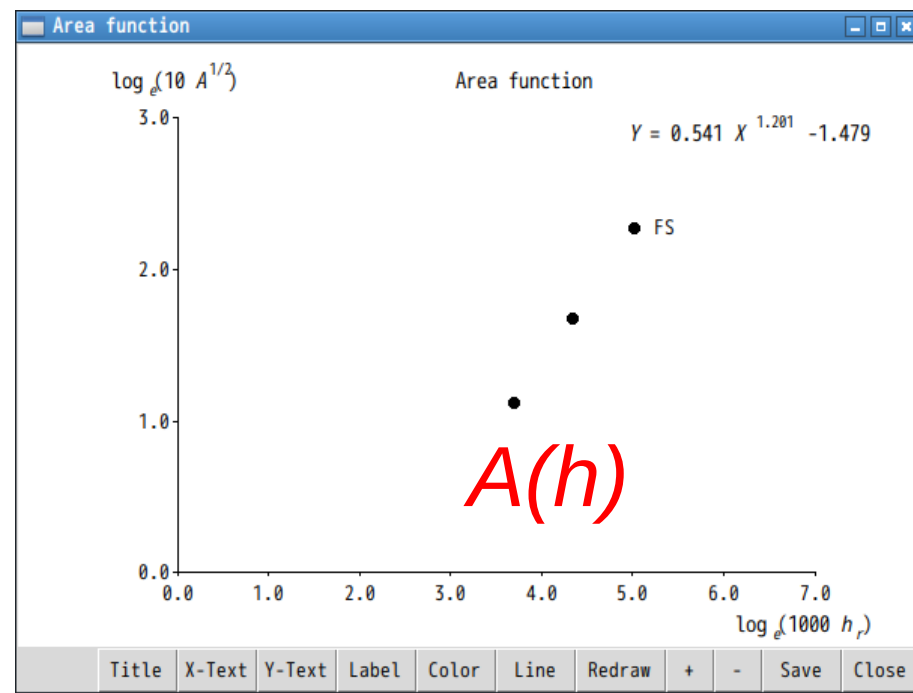
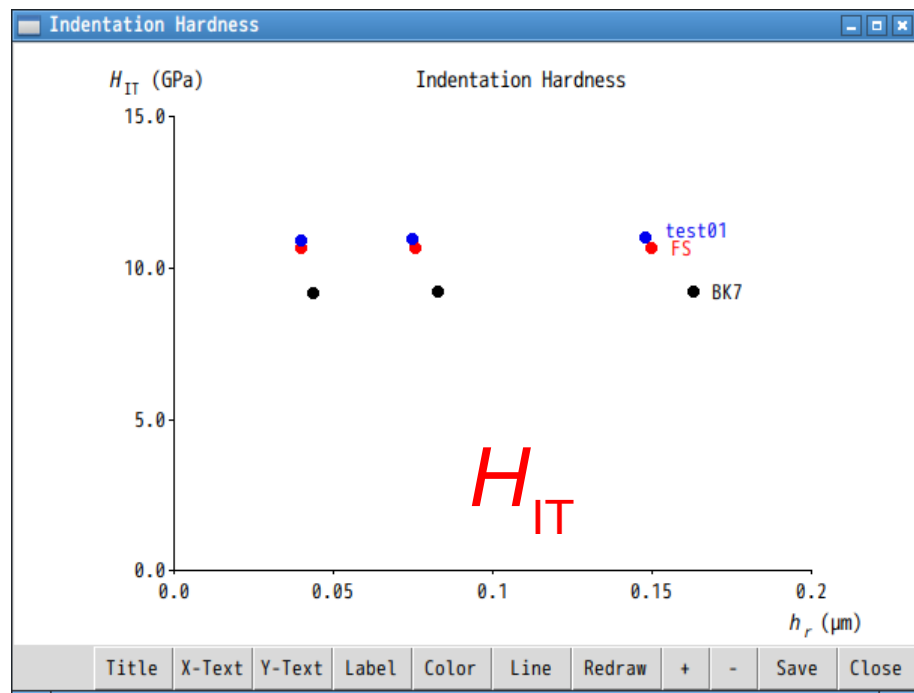
表示試料を1つ減らす



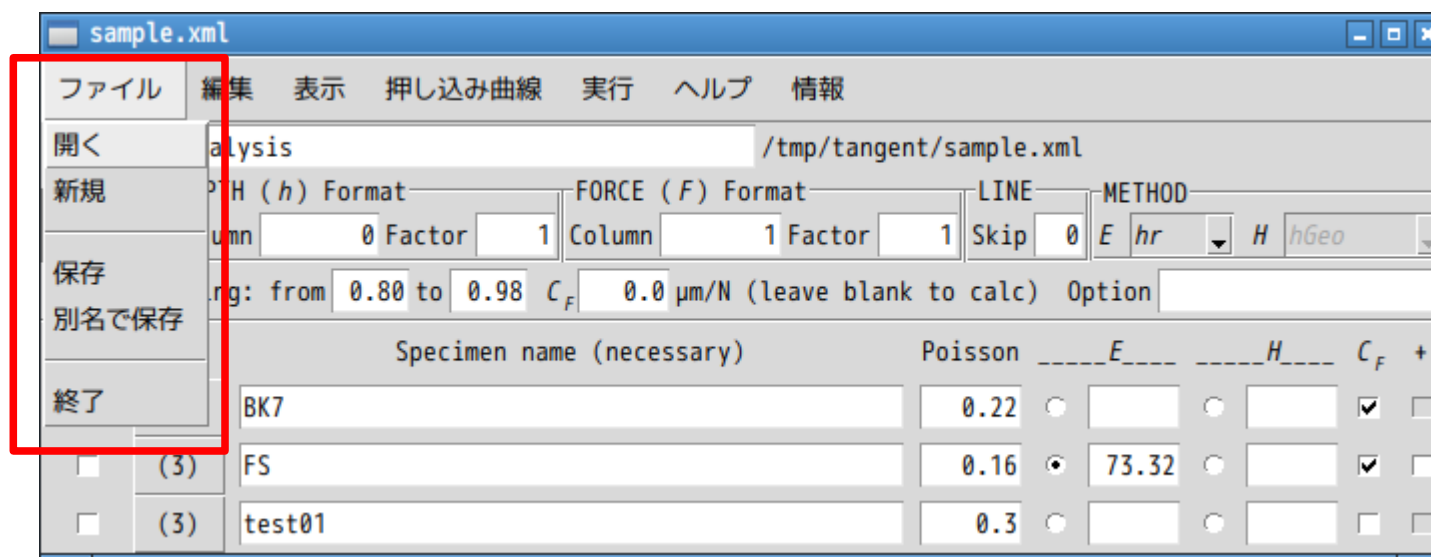
※左の試料選択ウィンドウで表示する試料を変更すると、グラフの縦軸・横軸が自動でスケーリングされて表示される

※その他、グラフのデータ値を表計算ソフトに送ることも可能

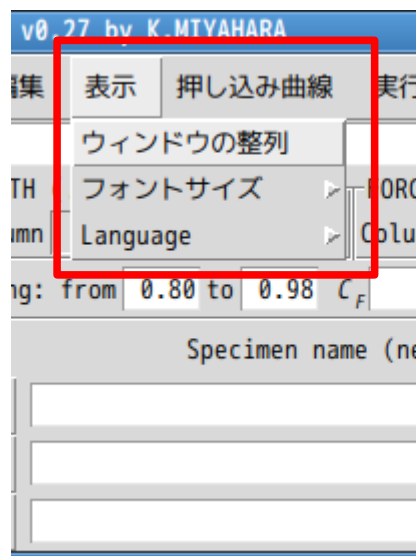
tangentGoの解説 (7)表示可能なグラフ(一部)



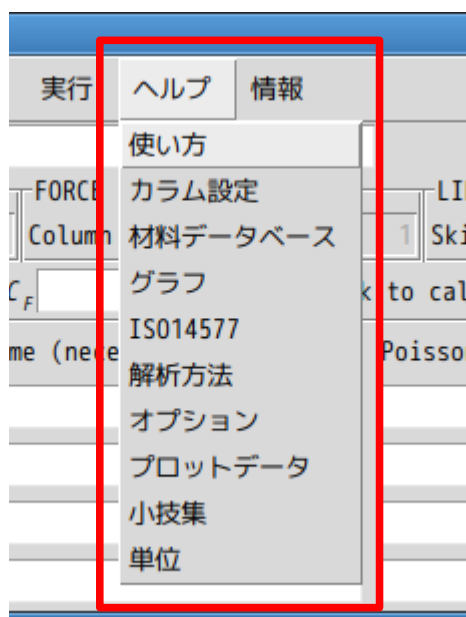
tangentGoの解説 (8)その他の機能・メニュー 設定の保存・読み込み



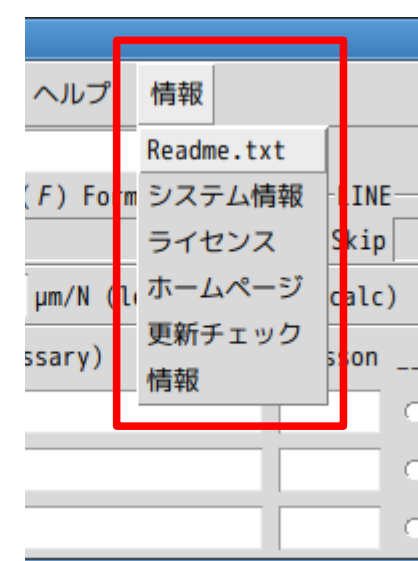
表示の調整



ヘルプ



更新その他



原論文とtangentGoとの相違点・・・HVI(IW)硬さ

- ・ ヤング率に関する解析: 相違点なし
- ・ ビッカース硬さ等価なHVI(IW)硬さ解析: 相違点あり

HVI(IW)硬さを算出する方法

- (1) 各押し込み曲線からHI(IW)硬さを算出(HVと高い相関)

$$HI(IW) = \frac{F}{A} = \frac{F}{26.43 \cdot h_{max} \cdot h_r} = \frac{F}{26.43 \cdot h_{Geo}^2}$$

- (2) 標準試料を使い, HI(IW)硬さとHVの変換係数 $C_{HVI(IW)}$ を求める

$$C_{HVI(IW)} = \frac{HV}{HI(IW)} \quad (C_{HVI(IW)} \text{は全ての試料で共通})$$

- (3) 各試料の等価ビッカース硬さHVI(IW)をそれぞれのHI(IW)から計算

$$HVI(IW) = C_{HVI(IW)} \cdot HI(IW)$$

原論文における(2)変換係数 $C_{\text{HVI(IW)}}$ の算出

BK7 (標準試料, 602HV0.2)

$F_{\max}$											HVI(IW)		
$F_{\max}$	$h_{\max}$	$h_{\text{80-98\%}}$	x	y	$\sqrt{A_{\text{Pm}}}$	$f(E)$	$S(E)$	$E_{\text{IT}}(h_r)$	Rela.err		HI(IW)	$C_{\text{HVI(IW)}}$	HVI(IW)
[mN]	[nm]	[nm]			[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[GPa]	[%]		[N/mm ²]	[kgf/N]	[kgf/mm ²]
9.796	259.4	158.6	5.066	2.381	1.082E-03	1.256E-05	1.169E-05	81.40	0.12%		9008	0.0668	602
14.69	324.4	201.4	5.305	2.586	1.328E-03	1.255E-05	1.167E-05	81.52	0.27%		8511	0.0707	602
24.48	429.0	268.1	5.591	2.836	1.704E-03	1.264E-05	1.177E-05	80.87	-0.53%		8056	0.0747	602
48.97	622.6	395.0	5.979	3.181	2.407E-03	1.263E-05	1.175E-05	80.97	-0.41%		7534	0.0799	602
97.94	897.7	576.6	6.357	3.525	3.395E-03	1.256E-05	1.169E-05	81.43	0.16%		7160	0.0841	602
146.9	1112	718.6	6.577	3.728	4.161E-03	1.257E-05	1.169E-05	81.37	0.09%		6957	0.0865	602
244.9	1451	945.0	6.851	3.985	5.376E-03	1.254E-05	1.167E-05	81.57	0.33%		6756	0.0891	602
489.9	2076	1356	7.212	4.327	7.574E-03	1.257E-05	1.170E-05	81.36	0.08%		6585	0.0914	602
979.8	2962	1947	7.574	4.677	1.074E-02	1.256E-05	1.169E-05	81.40	0.12%		6429	0.0936	602
1470	3648	2400	7.783	4.882	1.318E-02	1.263E-05	1.175E-05	80.97	-0.41%		6352	0.0948	602
1960	4212	2778	7.929	5.025	1.522E-02	1.257E-05	1.170E-05	81.34	0.05%		6338	0.0950	602

変換係数 $C_{\text{HVI(IW)}}$ は, 各試験力 $F_{\max}$ で

$$C_{\text{HVI(IW)}} = \frac{\text{HVI(IW)}}{\text{HI(IW)}}$$

にBK7のHI(IW)とHVI(IW) = 602を代入して計算する。(つまり, $C_{\text{HVI(IW)}}$ は $F_{\max}$ の関数)

HI(IW)	$C_{\text{HVI(IW)}}$	HVI(IW)
[N/mm ²]	[kgf/N]	[kgf/mm ²]
9008	0.0668	602
8511	0.0707	602
8056	0.0747	602
7534	0.0799	602
7160	0.0841	602
6957	0.0865	602
6756	0.0891	602
6585	0.0914	602
6429	0.0936	602
6352	0.0948	602
6338	0.0950	602

$C_{\text{HVI(IW)}}$ by $F_{\max}$

原論文における(3)HVI(IW)硬さの算出

UMV700 (steel)

F_{max}										HVI(IW)		
F_{max}	h_{max}	$h_{70-98\%}$	x	y	$\sqrt{A_{Pm}}$	$f(E)$	$S(E)$	$E_{IT}(h_r)$	Rela.err	HI(IW)	$C_{HVI(IW)}$	HVI(IW)
[mN]	[nm]	[nm]			[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[GPa]	[%]	[N/mm ²]	[kgf/N]	[kgf/mm ²]
9.801	206.2	165.8	5.111	2.419	1.124E-03	5.228E-06	4.355E-06	208.93	-0.51%	10843	0.0668	725
14.70	255.5	205.5	5.326	2.604	1.352E-03	5.187E-06	4.314E-06	210.93	0.44%	10590	0.0707	749
24.49	346.8	283.1	5.646	2.884	1.789E-03	5.246E-06	4.373E-06	208.11	-0.90%	9437	0.0747	705
48.98	502.9	414.5	6.027	3.225	2.514E-03	5.115E-06	4.243E-06	214.49	2.14%	8889	0.0799	710
97.96	729.1	603.3	6.402	3.567	3.540E-03	5.130E-06	4.257E-06	213.75	1.79%	8426	0.0841	708
146.9	904.3	749.1	6.619	3.767	4.325E-03	5.152E-06	4.280E-06	212.64	1.26%	8208	0.0865	710
244.9	1183	985	6.893	4.024	5.592E-03	5.101E-06	4.228E-06	215.24	2.50%	7948	0.0891	708
489.9	1702	1419	7.258	4.371	7.912E-03	5.164E-06	4.291E-06	212.06	0.98%	7674	0.0914	702
979.8	2441	2041	7.621	4.723	1.125E-02	5.186E-06	4.313E-06	211.01	0.48%	7443	0.0936	697
1470	3005	2507	7.827	4.925	1.376E-02	5.253E-06	4.380E-06	207.77	-1.06%	7381	0.0948	700
1960	3475	2907	7.975	5.070	1.592E-02	5.216E-06	4.343E-06	209.55	-0.21%	7340	0.0950	697

BK7以外の試料については，BK7で計算された $C_{HVI(IW)}$ by F_{max} を使って，HVI(IW)硬さを計算する。

$$HVI(IW) = C_{HVI(IW)} \cdot HI(IW)$$

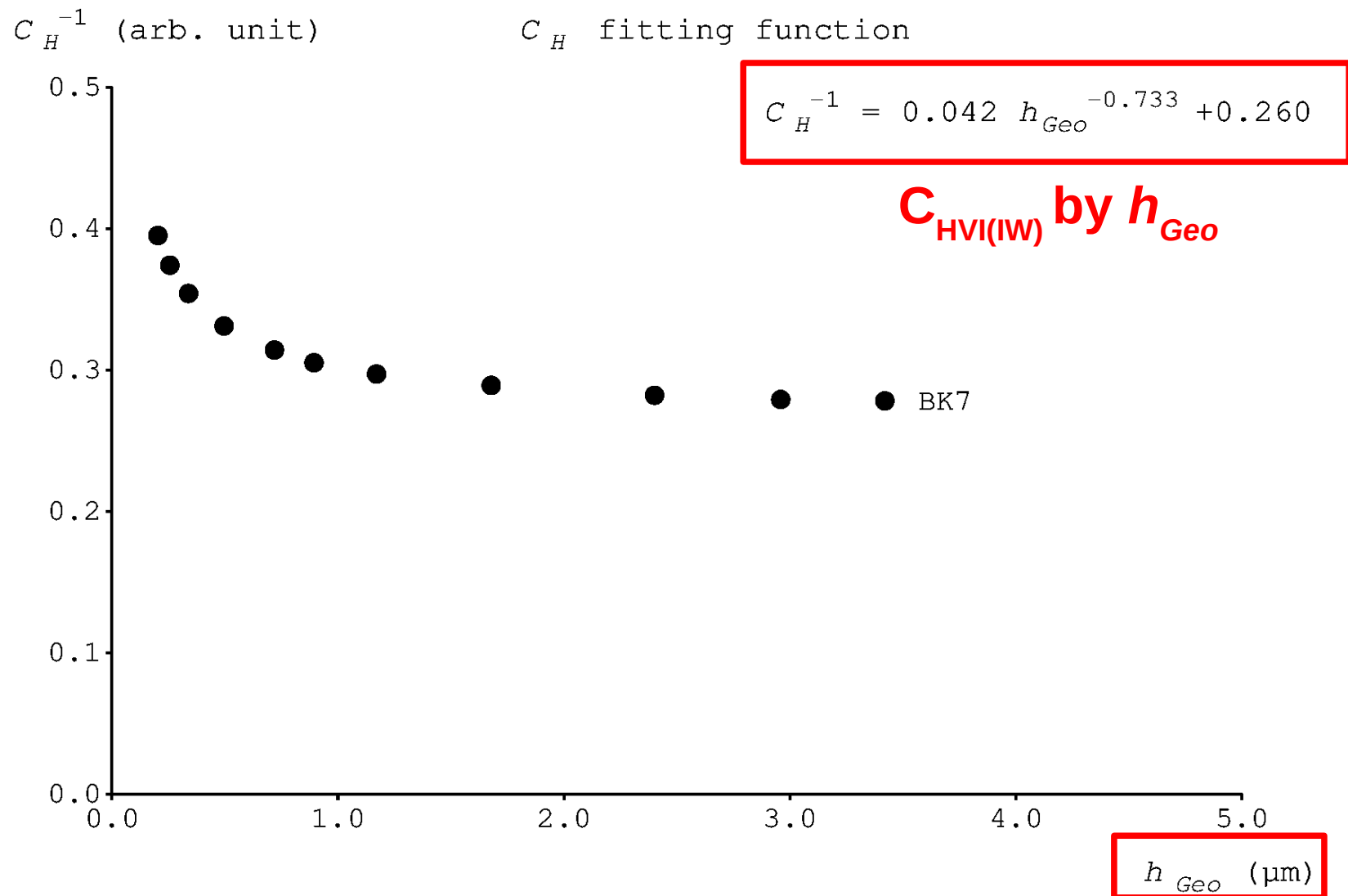
右の表はUMV700の結果であり，HVI(IW)硬さは実際のHVとほぼ同等の値(約700)を示している。10種の試料で，8個は2-5%以内，2個は10%以内でHVI(IW)硬さは実際のHVと一致した。

HI(IW)	$C_{HVI(IW)}$	HVI(IW)
[N/mm ²]	[kgf/N]	[kgf/mm ²]
10843	0.0668	725
10590	0.0707	749
9437	0.0747	705
8889	0.0799	710
8426	0.0841	708
8208	0.0865	710
7948	0.0891	708
7674	0.0914	702
7443	0.0936	697
7381	0.0948	700
7340	0.0950	697

$C_{HVI(IW)}$ by F_{max}

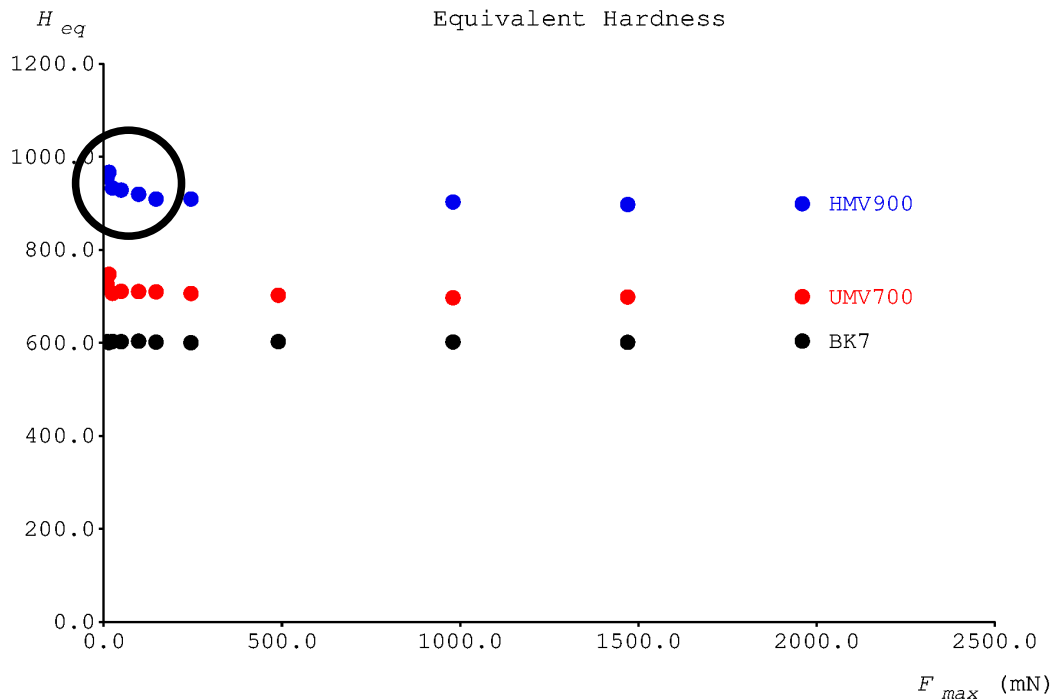
tangentGoにおける(2)変換係数 $C_{HVI(IW)}$ の算出

- 試験力 F_{max} ではなく、押し込み深さ h_{Geo} の関数として算出する(相違点)
($C_{HVI(IW)}$ は圧子形状補正としての役割もあることから)
- 原論文と同じく試験力 F_{max} の関数として求めることも可能

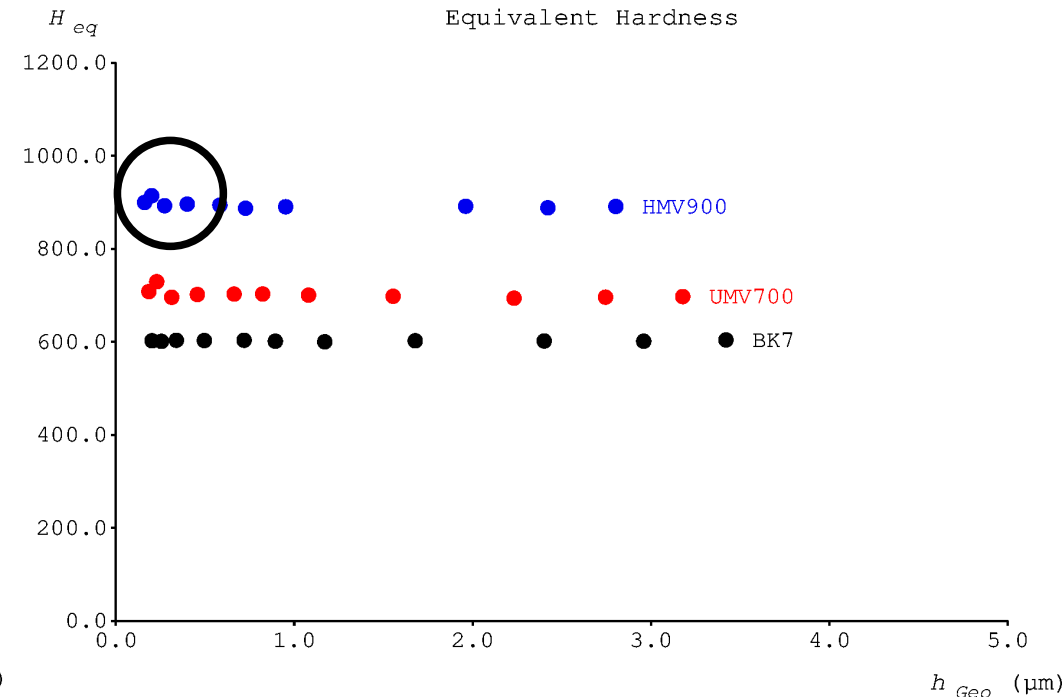


tangentGoにおける(3)HVI(IW)硬さの算出

$C_{\text{HVI(IW)}}$ の算出方法の違いによるHVI(IW)硬さの比較(原論文と同一データ)



(a) $C_{\text{HVI(IW)}}$ by F_{max}
(原論文と同じ)



(b) $C_{\text{HVI(IW)}}$ by h_{Geo}
(tangentGoの既定)

- ・ (a) F_{max} の場合と (b) h_{Geo} による場合で、結果に大きな差はない
- ・ ただし、(a)ではBMV900の等価押し込みビッカース硬さが低試験力領域でやや高めになっているのに対し、(b)ではより一定に近い

算出されたHVI(IW)と実際のHV硬さ値との比較

Specimen	F_{max} (mN)	HV	HVI(IW)	
			by F_{max}	by h_{Geo}
UMV700	24	712	706	696
UMV700	98	702	710	703
HMV900	98	897	919	894
HMV900	980	900	903	891
HN-W	10	441	561	565
HN-W	98	381	400	410
HMV40	98	55	46	51
HMV40	979	44	40	42

- ・ 問題の低試験力領域に相当するHV硬さの試験結果はない
 - ・ HV実測値の範囲では, F_{max} によるHVI(IW)算出値と, h_{Geo} によるHVI(IW)算出値に大差はなく, 明確な優劣なし
- 現状は, $C_{HVI(IW)}$ by h_{Geo} を暫定的にtangentGoの既定としている
(原論文との唯一の相違点)。 今後の検証次第で変更あり

まとめ

計装化押し込み試験用の独立な解析プログラムである tangentGo について，使用例を交えて解説を行った。tangentGo の公開により，tangent depth 法の理解や検証が一層進み，計装化押し込み試験の課題解決への一助となれば幸いである。

tangentGo ホームページ
<https://3zip.net/t/>



tangent depth法に関する文献

- 1) T. ISHIBASHI, Y. YOSHIKAWA, K. MIYAHARA, T. YAMAMOTO, S. KATAYAMA, M. YAMAMOTO: *J. Mater. Test. Res.* Vol.61, No.2, 60 (2016)
- 2) T. ISHIBASHI, Y. YOSHIKAWA, S. KATAYAMA, K. MIYAHARA, M. OHKI, T. YAMAMOTO, M. YAMAMOTO: *J. Mater. Test. Res.* Vol.62, No.2, 68 (2017)
- 3) T. ISHIBASHI, Y. YOSHIKAWA, M. YAMAMOTO, K. MIYAHARA, T. YAMAMOTO, M. OHKI, S. KATAYAMA: *J. Mater. Test. Res.* Vol.62, No.3, 164 (2017)
- 4) T. ISHIBASHI, Y. YOSHIKAWA, K. MIYAHARA, T. YAMAMOTO, S. TAKAGI, M. FUJITSUKA, S. KATAYAMA: *J. Mater. Test. Res.* Vol.65, No.1, 4 (2020)
- 5) 宮原健介, 石橋達弥, 吉川裕輔, 山本卓: 材料試験技術 Vol. 65, No. 1, 25 (2020)
- 6) 宮原健介, 石橋達弥, 吉川裕輔, 山本卓: 材料試験技術 Vol. 65, No. 1, 32 (2020)
- 7) 宮原健介, 石橋達弥, 吉川裕輔, 山本卓: 材料試験技術 Vol. 65, No. 2, 108 (2020)
- 8) T. ISHIBASHI, K. MIYAHARA, Y. YOSHIKAWA, T. YAMAMOTO, S. KATAYAMA: *J. Mater. Test. Res.* Vol.65, No.4, 197 (2020)
- 9) T. ISHIBASHI, K. MIYAHARA, Y. YOSHIKAWA, T. YAMAMOTO, S. KATAYAMA: *J. Mater. Test. Res.* Vol.66, No.1, 16 (2021)
- 10) 宮原健介, 石橋達弥, 吉川裕輔, 山本卓: 材料試験技術 Vol. 66, No. 1, 27 (2021)