

温度勾配型および温度平坦型のぜい性亀裂伝播停止試験によるアレスト靱性評価に関する研究報告書

2017年9月

ClassNK
R & D PROJECT



一般財団法人 日本海事協会
一般社団法人 日本溶接協会

内容

1. 緒言
2. CAT試験法の決定
3. Kca値とCATとの相関
4. 結論

1. 緒言 ぜい性亀裂アレスト鋼の承認試験と出荷試験

大型及び超大型
構造モデル試験
($W > 2m$)

要求アレスト靱性値を
決定する

シミュレーション
試験

要求Kca

criticon

広幅材料試験
($W \sim 0.5m$)

要求靱性値の確認

材料承認試験

ESSO試験
(Kca)

to be consistent

平坦温度型試験
(CAT)

小型スクリーニング試験
($W < 0.1m$)

要求靱性値の
スクリーニング

出荷試験

Charpy衝撃試験
(Vノッチ, プレスノッチ)

DWTT試験

プレスノッチ曲げ試験

NRL落重試験

correlation

1. 緒言

■ Concept

$K(\sigma, a, \text{size and shape}) \leq K_{ca}(T) : \text{アレスト !!}$

$K(\sigma, a, \text{size and shape}) > K_{ca}(T) : \text{伝播 !!}$

ただし、 K は破壊の駆動力。

K 値は次式の通り亀裂長さの平方根に比例する。

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W)$$

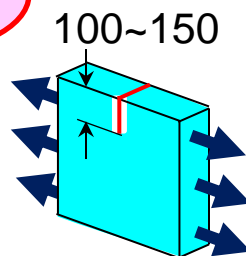
したがって大型モデル試験は長い伝播亀裂距離を確保する必要がある。

1. 緒言

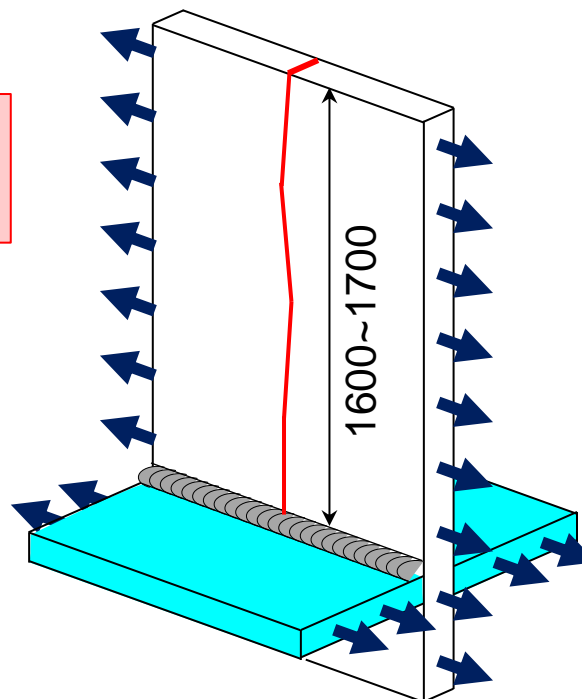
■ 安全性評価試験

亀裂の駆動力はできる限り長い亀裂で評価すべきである。

大型構造モデルアレスト試験片が必要



CAT 試験



超大型構造モデル試験

K. Shibamura, F. Yanagimoto, T. Namegawa, K. Suzuki, S. Aihara, Brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate, Engineering Fracture Mechanics 162 (2016), Part I:Model formulation, pp.324–340
Part II:Experiments and model validation, pp.341–360

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W)$$

1. 緒言

■ CAT試験法の意義

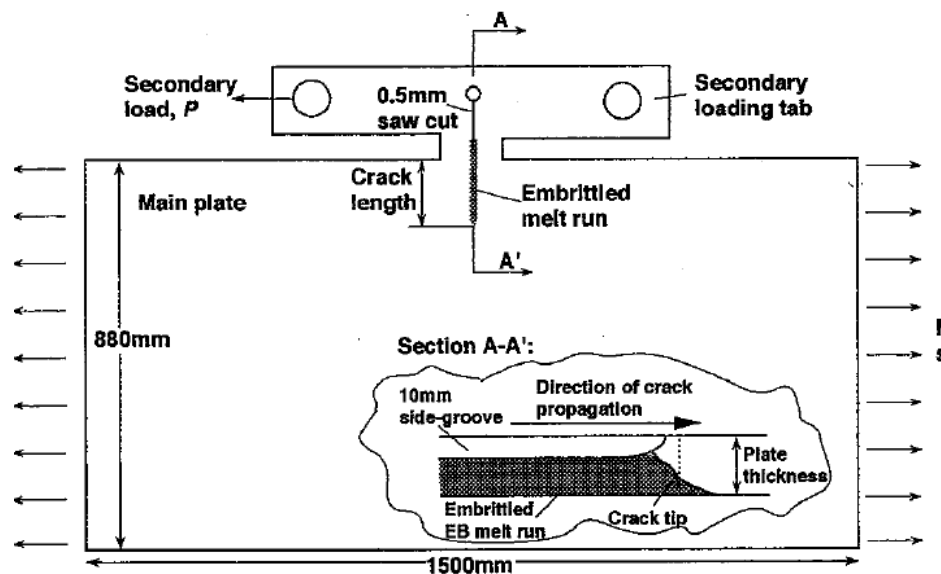


Fig. 1. Schematic of wide plate double tension test used in the present study.

- ・二重引張方式
- ・EBぜい化部長さ: $L_{EB}=100\text{mm}$
- ・EBぜい化とフェイスグループの組み合わせ

CAT試験は短いぜい化部長さかつ応力集中なし: ゆえに材料試験である。

または単純な構造で短い亀裂でのアレスト(SCA)が許される構造物でのみ構造試験とみなすことができる。

モデル試験とは言えない

1. 緒言

■ CAT試験法

亀裂伝播の駆動力である K 値は、次式の通り試験応力と亀裂長さに依存するので、

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W)$$

CAT試験結果は試験応力および ぜい化部長さ(EB長さ)に依存する.

すなわち

低応力でのCAT<高応力でのCAT

短いEB長さのCAT<長いEB長さのCAT

1. 緒言

構造モデル試験
($W > 2m$)

要求アレスト靱性値を
決定する

Tarrest:
構造モデル試験でのア
レスト温度
(実構造でのアレスト温
度と想定)

Kca要求値

広幅材料試験
($W \sim 0.5m$)

要求靱性値の確認

平坦温度型試験
(CAT)

Tarrest \neq CAT

ESSO試験
(Kca)

1. 緒言

目的:

ぜい性亀裂アレスト鋼のKca要求値と整合する
CAT 要求値の確立

検討方法:

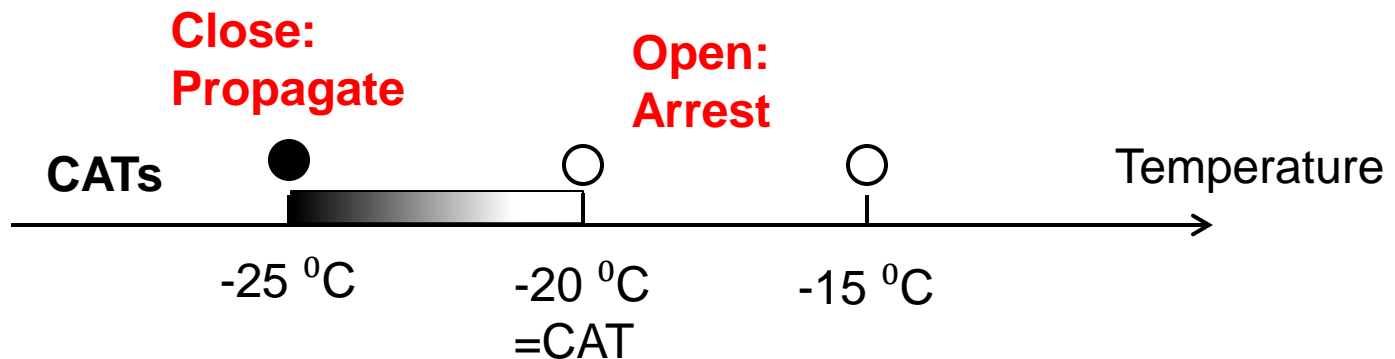
1. CAT試験法
2. Kca値とCATとの相関
3. CAT要求値と温度シフト概念

1. 緒言

なぜとCATと構造モデル試験の相関を求めるのにKcaを用いるのか？

Go/No-go試験の精度は試験温度の温度ピッチに依存する.

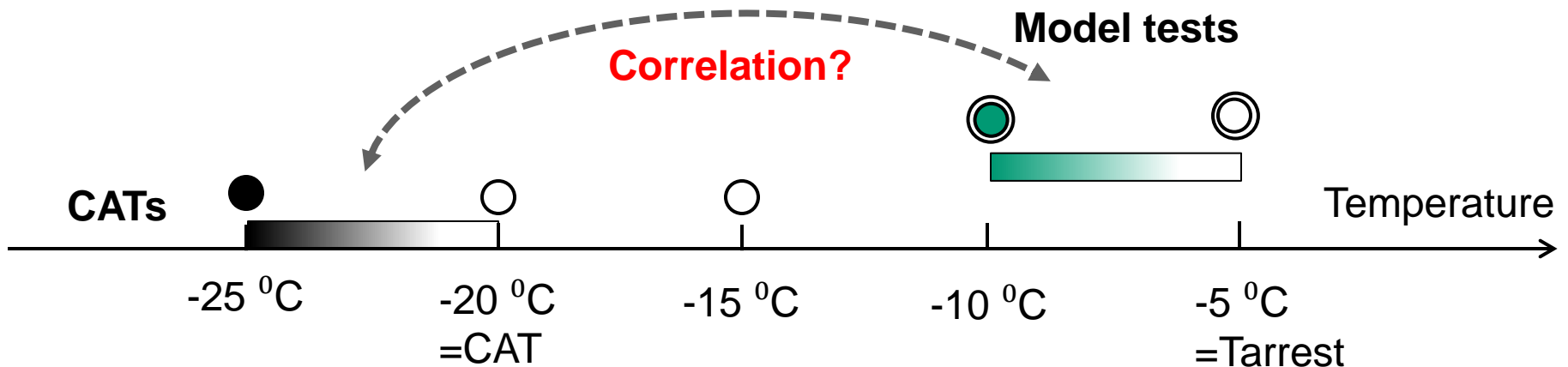
- 試験が5 °Cピッチで行われているならば、CATは最大5 °Cの誤差を含む.
- 例 下図のようにCAT=-20°Cの場合、 $-25^{\circ}\text{C} < \text{CAT} \leq -20^{\circ}\text{C}$.



1. 緒言

それゆえ、CATと構造モデル試験結果の相関を直接取るのは困難である。

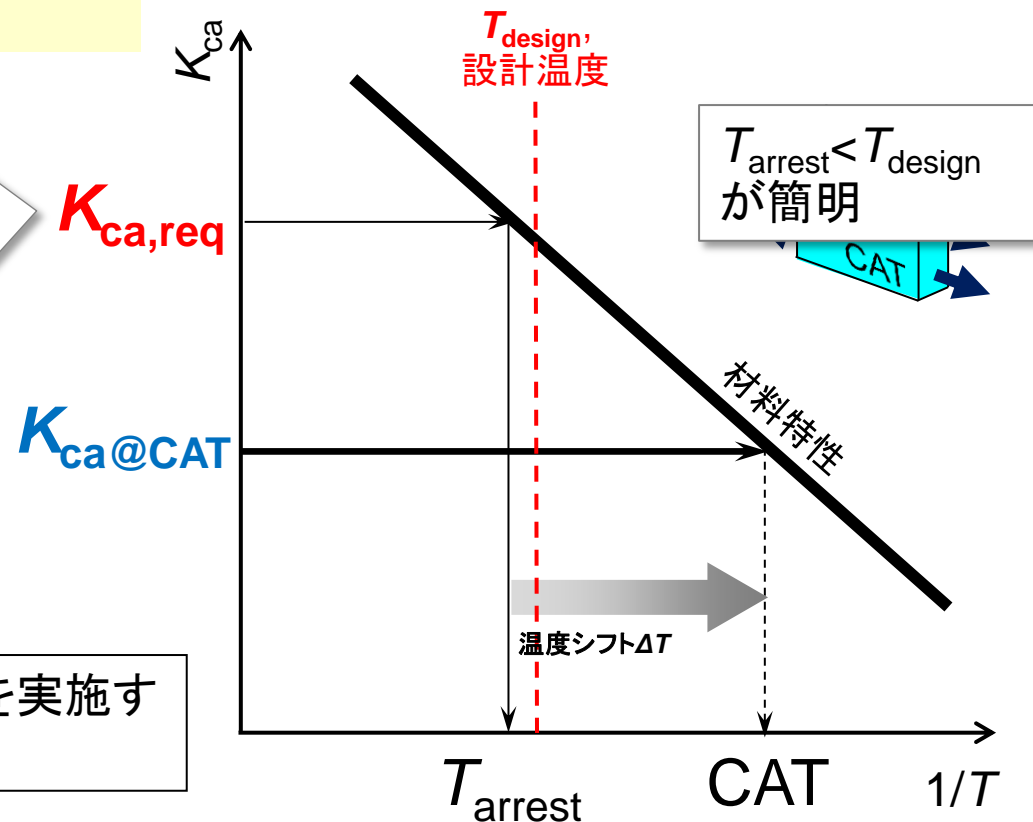
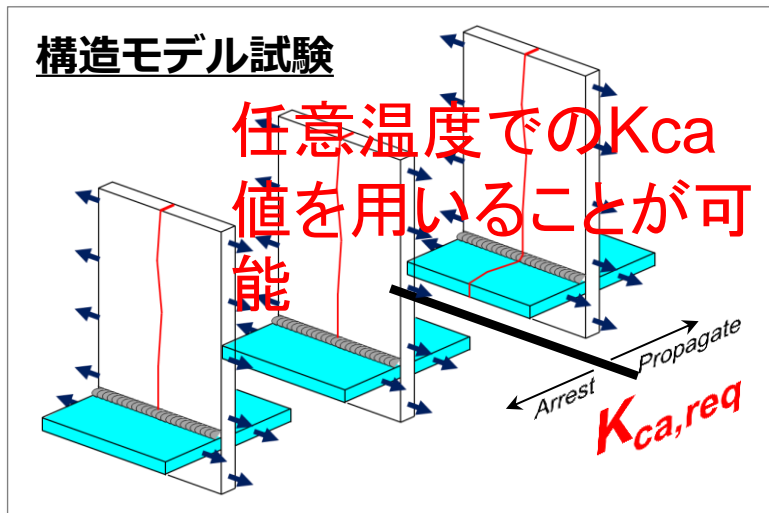
- 両試験とも 5°C の誤差を含むとすれば、両者の相関は最大 10°C の誤差を含むことになる。
- 例 下図のように、 $\text{CAT} = -20^{\circ}\text{C}$ の場合、 $-25^{\circ}\text{C} < \text{CAT} \leq -20^{\circ}\text{C}$ 。
また、 Tarrest が -5°C とした場合、 $-10^{\circ}\text{C} < \text{Tarrest} \leq -5^{\circ}\text{C}$ 。
したがって、 $-20^{\circ}\text{C} < \text{CAT} - \text{Tarrest} < -10^{\circ}\text{C}$ となり誤差は 10°C !!



1. 緒言

温度シフトの評価にESSO試験を介在させる手法は、**連続データ**を使える点と**現存する多くのデータ**を用いることができる**利点**がある。

~課題~
材料評価としてCAT試験を何度で実施すればよいのか？



$K_{ca@CAT}$ が求めれば、CAT試験を実施すべき温度を求めることができる

1. 緒言

表. 1 ぜい性亀裂アレスト鋼に対する要求値

板厚		Kca	CAT	備考
t≤80mm		6000N/mm ^{3/2}	-10 ⁰ C (?)	URに未記載
80mm<t≤100mm	アッパーデッキ (UD)用鋼板	6000N/mm ^{3/2}	?	Kca要求はモデル試験結果より
	ハッチサイド コーミング (HSC)用鋼板	8000N/mm ^{3/2}	?	Kca要求はモデル試験結果より

材料試験であるCAT試験は船舶の最低使用温度と同じ温度でのアレストで安全上十分か？

URには未記載であり、船舶の最低使用温度 -10 °C以下の要求で Kca要求との整合性が確保できるか？

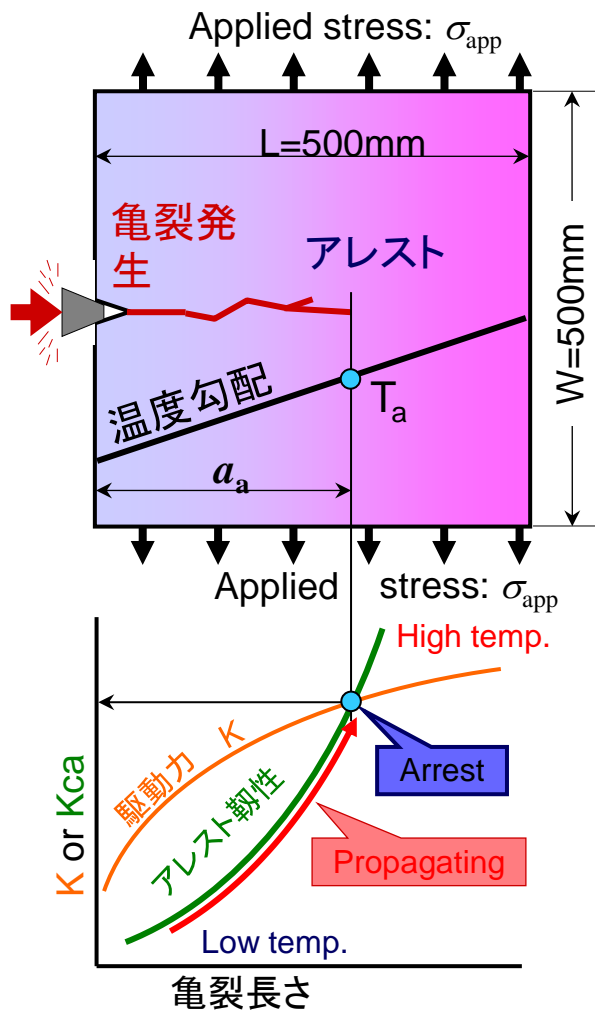
板厚80mm以上

追って検討

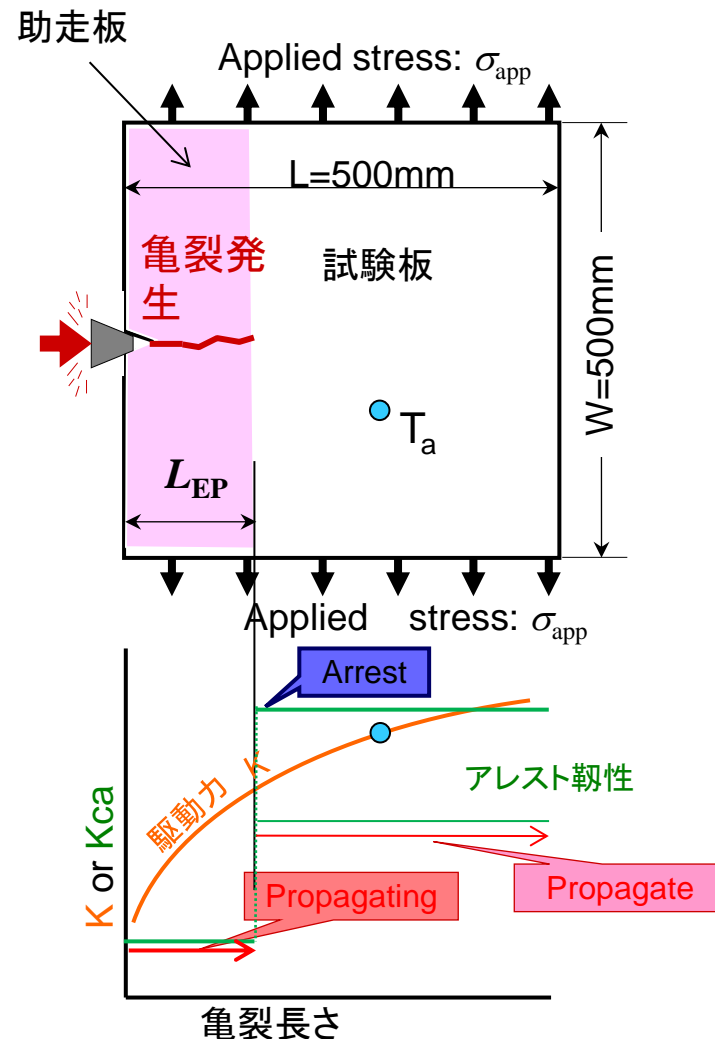
2. CAT試験法の決定

Crack arrest test

温度勾配型ESSO試験



混成ESSO試験



2. CAT試験法の決定

■ CAT試験法 (TWIの方法: C. Wiesner)

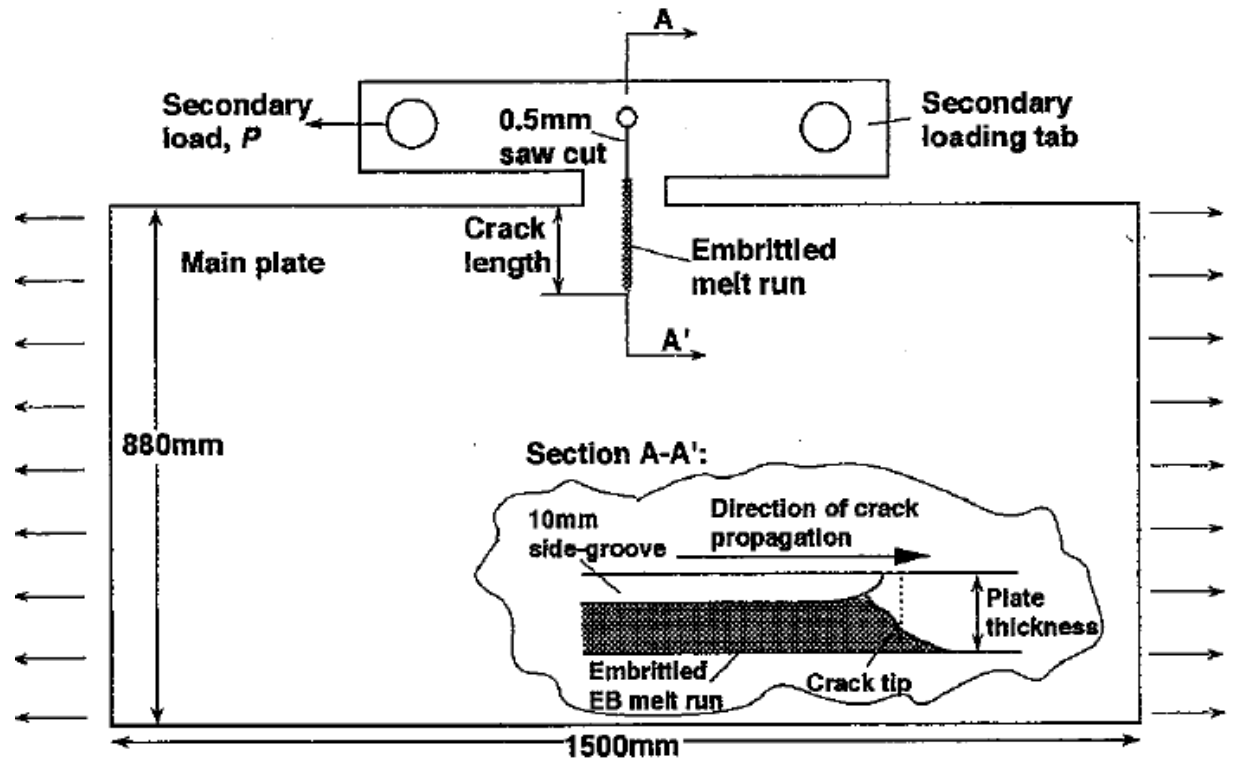


Fig. 1. Schematic of wide plate double tension test used in the present study.

- ・二重引張タイプ
- ・EBぜい化: $L_{EB}=100\text{mm}$
- ・EBぜい化とフェイスグループの組み合わせ

2. CAT試験法の決定

表 2 CAT試験結果に影響する試験パラメーターと JWESの決定

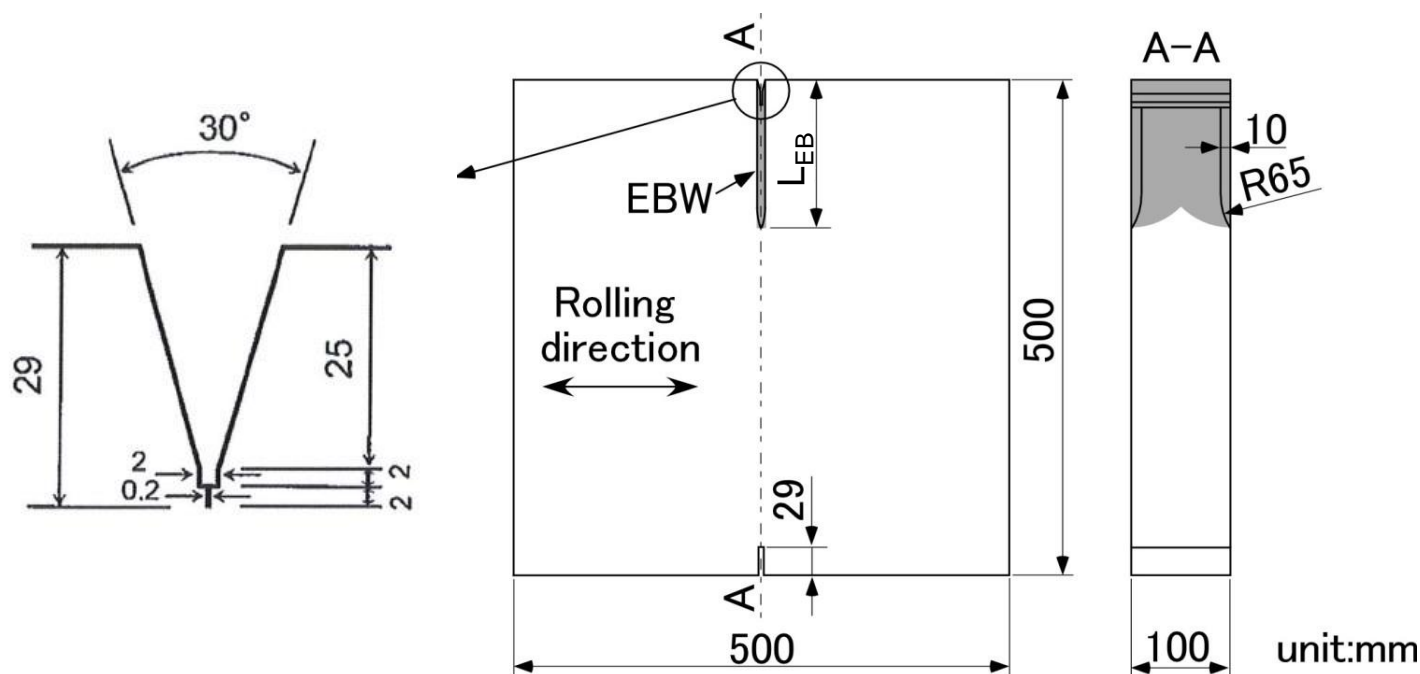
パラメーター	影響	TWI	JWES	備考
試験片幅	小	W=880	W=500	
方式	小	二重引張	打撃	
試験応力	大	2/3SMYS	2/3SMYS	
EB長さ	大	100mm	検討	
アレスト長さ	大	-	≤350mm	cf. WES2815

-試験片幅と方式は、溶接協会はESSO試験に関する経験が豊富でありまた試験結果に対する影響も大きくないので、ESSO試験と同様にすることとした。

-CAT試験は**材料試験**なので、試験応力はオリジナルと等しく2/3SMYSとした。

-EBぜい化部長さはKca要求との整合性を確保するよう検討する。

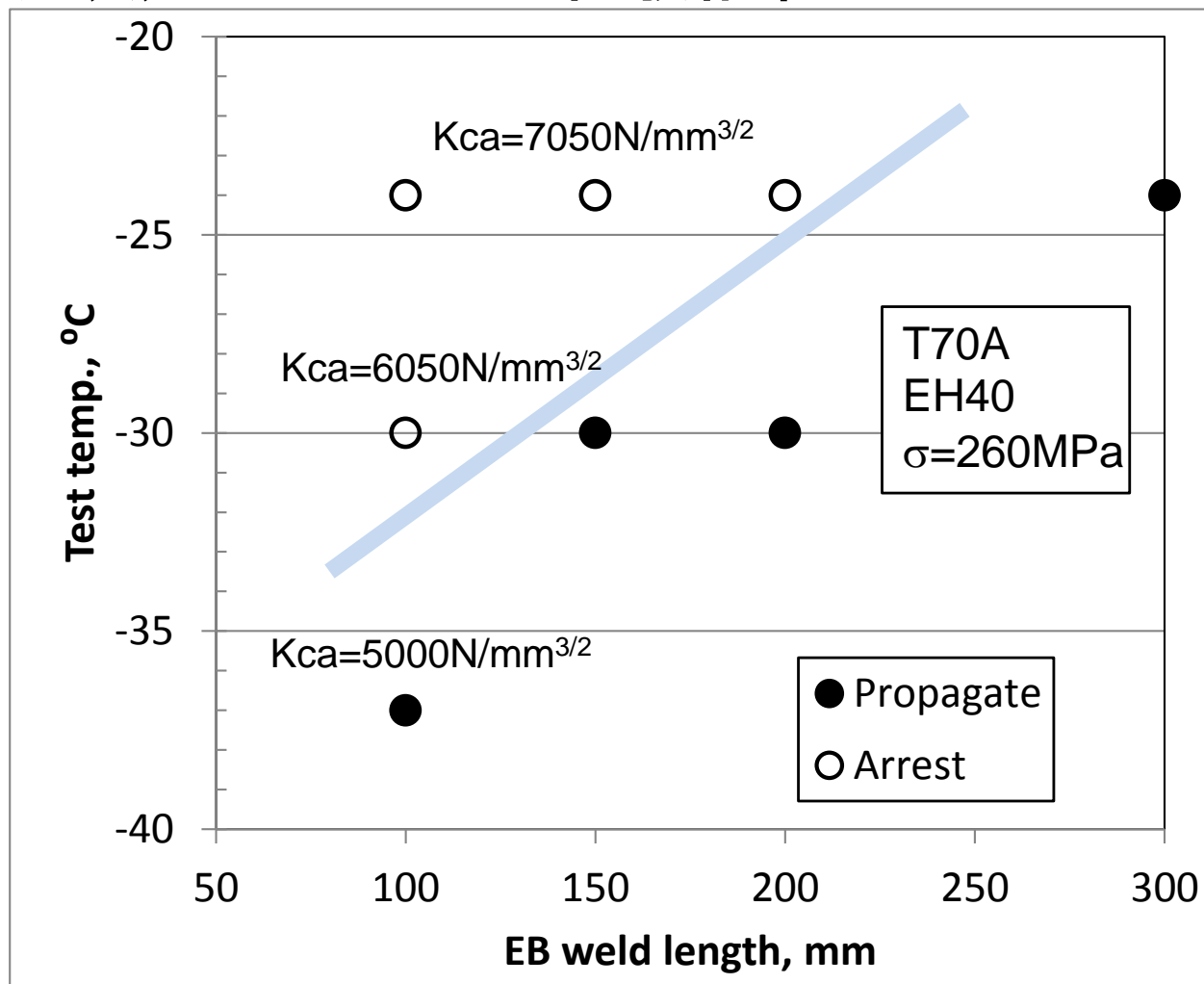
2. CAT試験法の決定



- 打撃方式: ESSOと同様
- ぜい化部長さ: L_{EB}
 - Kca要求との整合性を確保するよう検討
- 試験片寸法: t100×W500×L500 (mm)
- 再度グループ (length= L_{EB})

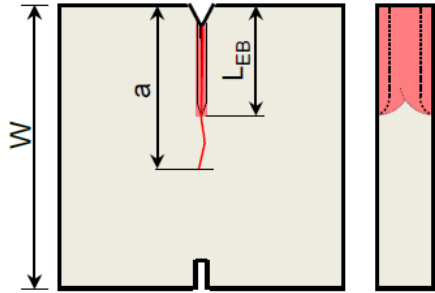
2. CAT試験法の決定

EB長さ決定のためのCAT試験結果

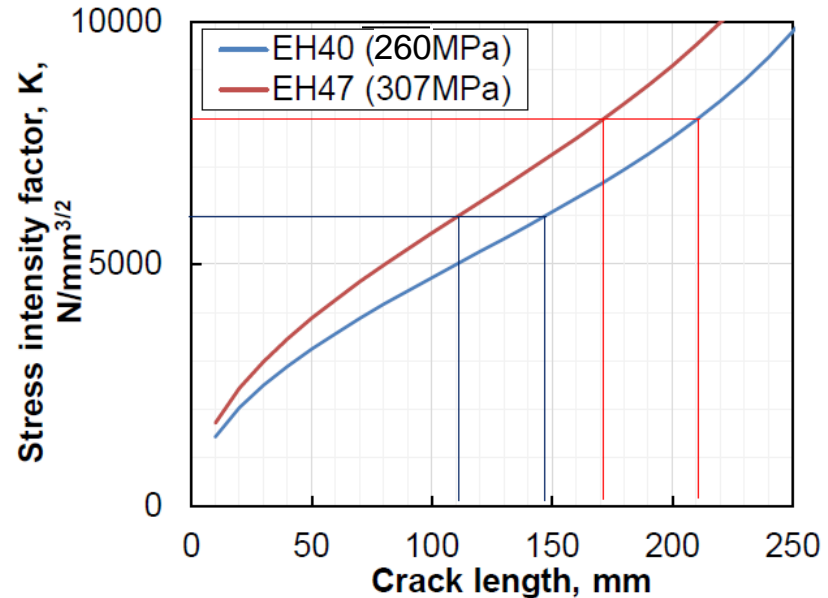


2. CAT試験法の決定

- From a viewpoint of K at a crack propagation into test plate...



$$K = \sigma_{app} \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}$$



- Required EB length to obtain K values of 6000, 7000 and 8000N/mm^{3/2}.

Grade	Applied stress (MPa)	K (N/mm ^{3/2})		
		6000	7000	8000
EH40	260	150mm	185mm	210mm
EH47	307	115mm	145mm	175mm

EH40の試験部突入時のK値がKca要求値の 6000N/mm^{3/2} と等しくなるので、EB長さとして150mmとすることとした。これによりKca要求との整合性が期待できる。

2. CAT試験法の決定

表 2 CAT試験結果に影響する試験パラメーターと JWESの決定

パラメーター	影響	TWI	JWES	備考
試験片幅	小	W=880	W=500	
方式	小	二重引張	打撃	
試験応力	大	2/3SMYS	2/3SMYS	
EB長さ	大	100mm	150mm	
アレスト長さ	大	-	≤350mm	cf. WES2815

-EB長さはKca要求との整合性のため150mmに設定した。

3. Kca値とCATとの相関

Name	Grade	t (mm)	ESSO test		Arrhenius fitting*1			T _{Kca6000} (°C)	T _{Kca8000} (°C)	CAT*2 (°C)	Kca @CAT (N/mm ^{3/2})
			n	K _{ca,max} (N/mm ^{3/2})	A (N/mm ^{3/2})	C	r ²				
T70A	EH40	70	4	7798	3.54E+06	-1.55	0.92	-30.2	-18.7	-24	7035
T100B	EH40	100	4	8304	6.55E+05	-1.18	0.85	-22.4	-6.0	-	-
T100C	EH40	100	5	11391	1.23E+06	-1.27	0.98	-35.1	-21.5	-35*4 -30*5	6012 6708
T100A	EH47	100	5	8478	9.57E+05	-1.17	0.97	-41.8	-27.9	-40	6248
T100C	EH47	100	5	11391	1.23E+06	-1.27	0.98	-35.1	-21.5	<-30*4 -26*5	<6708 7298

*1: Arrhenius fitting $K_{ca} = A \cdot \exp\left(\frac{1000C}{T_K}\right)$

*2: CAT specimen with electron beam weld (EBW) of 150mm

*3: Blow holes were reported at EB line

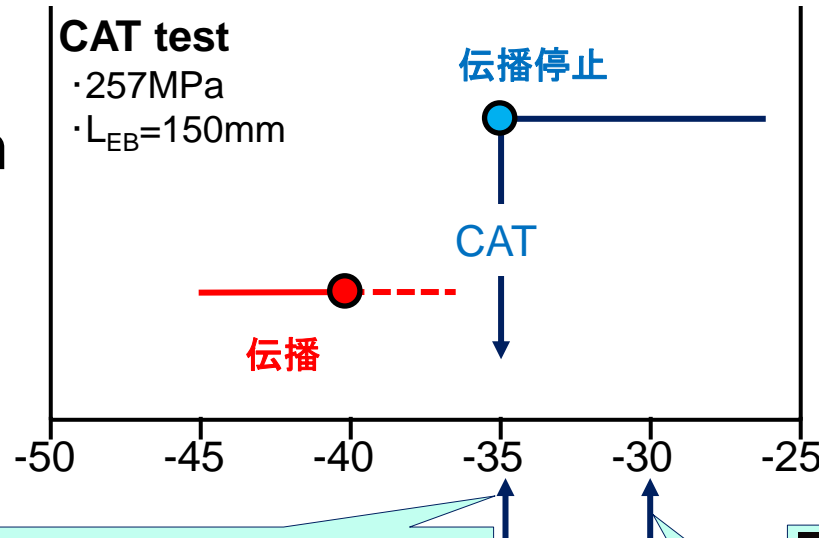
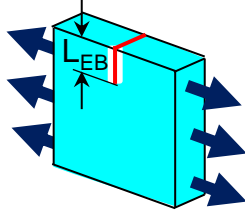
*4: Dual sides EBW for embrittled zone

*5: Single side EBW for embrittled zone

Kca at CAT ~ 6000N/mm^{3/2} for EH40
7000N/mm^{3/2} for EH47

Temperature gap in arrest temperature between structural model test and CAT

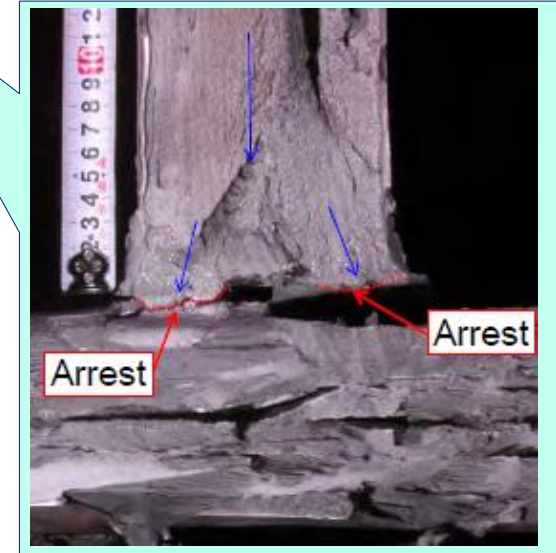
T100C
EH40, $t=100\text{mm}$



Test 1-2
 $t/3$ 開先部分溶け込み
 · 257MPa
 · -30°C
 · 伝播停止

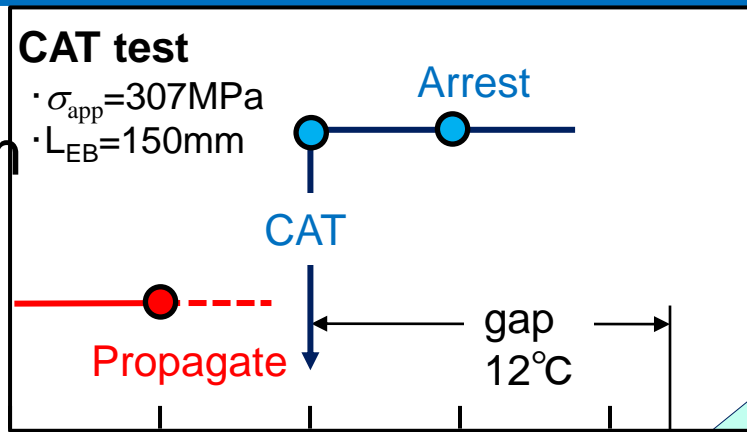
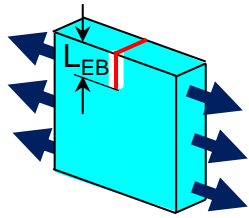
■ シナリオ1
(HSC→UD)

Test 1-3
 $t/3$ 開先部分溶け込み
 · 257MPa
 · -34°C
 · 伝播停止

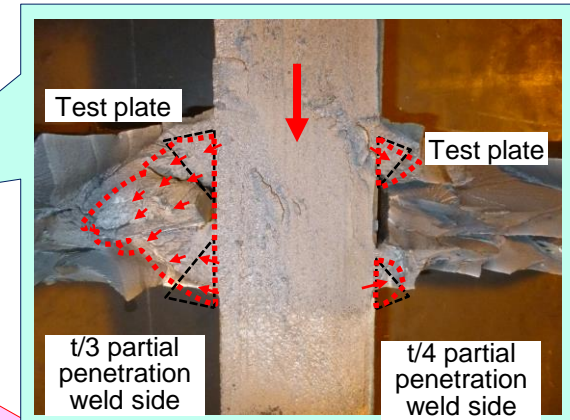


Temperature gap in arrest temperature between structural model test and CAT

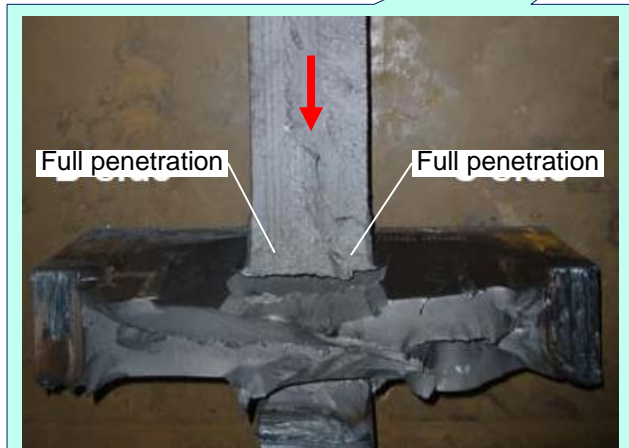
T100A
EH47, t=100mm



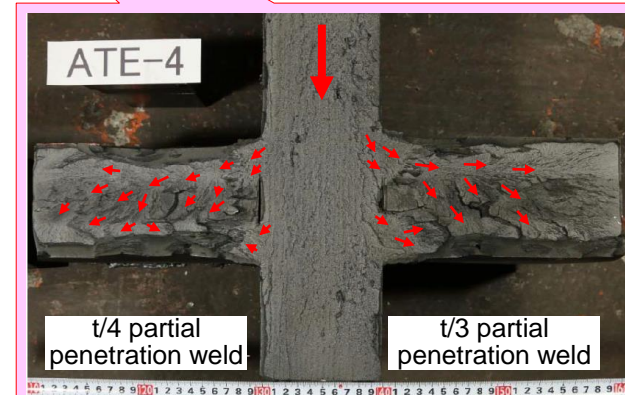
■ シナリオ2 (UD→HSC)
Test 2-4
· 257MPa, -28°C
· 伝播停止



■ シナリオ1 (HSC→UD)
Test 1-4 · 257MPa, -42°C
· 伝播停止

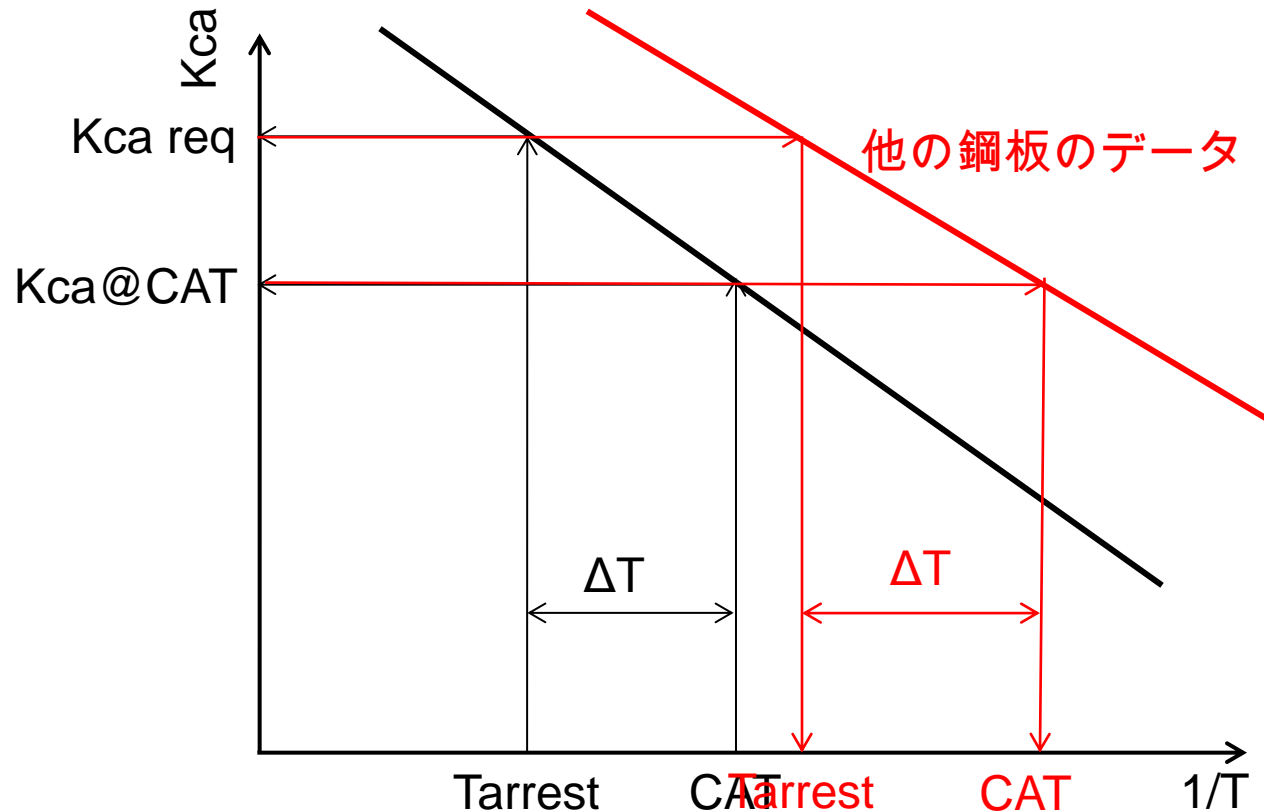


■ シナリオ2 (UD→HSC)
Test 2-3
257MPa
-34°C
· 伝播



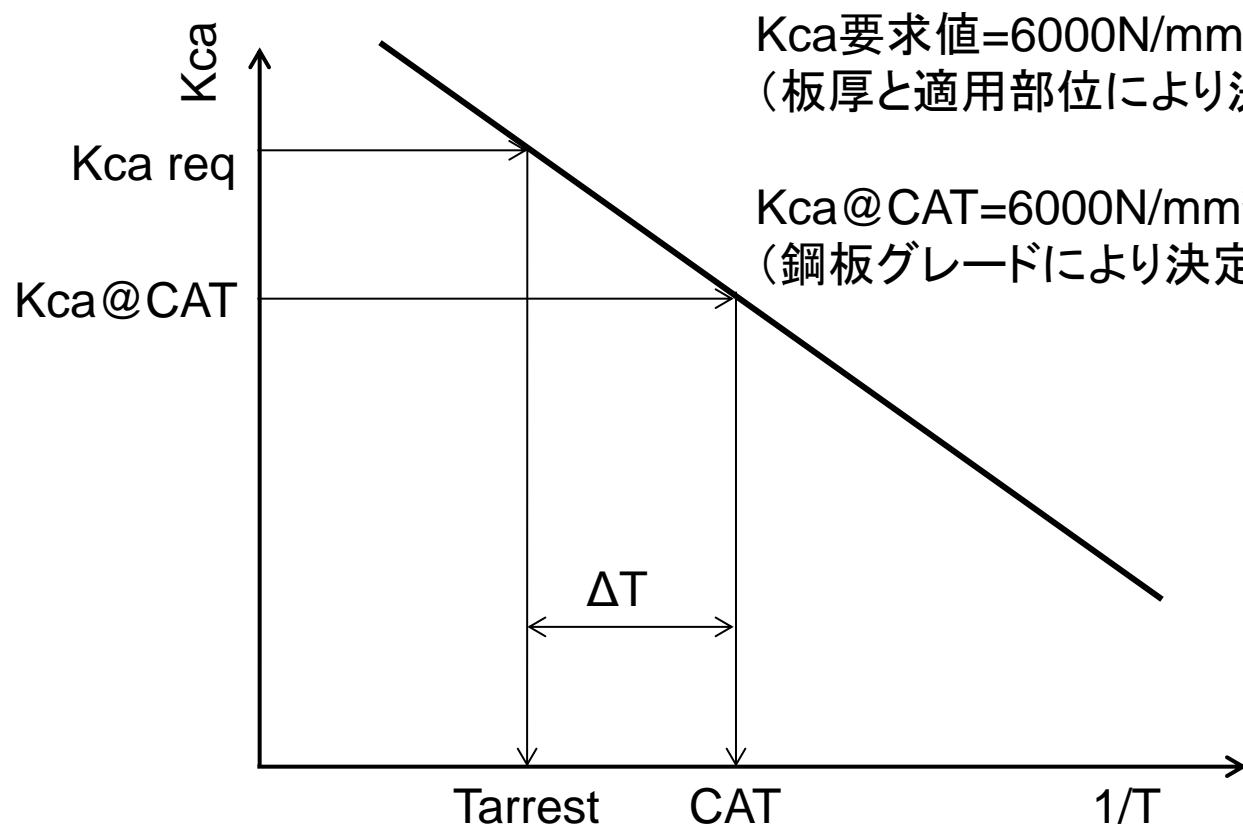
3. Kca値とCATとの相関

Kca要求値とKca@CAT が得られれば、他の鋼板の温度シフト量もKcaのデータを用いて容易に求めることができる。



3. Kca値とCATとの相関

ESSO試験結果はアレニウスプロットを用いてKcaの温度依存性を求めることができる。これはすなわち、任意の温度のKca値を求めることが可能であることを意味する。



3. Kca値とCATとの相関

Kca要求値=6000N/mm^{3/2} で

EH40 (Kca@CAT=6000N/mm^{3/2})の場合、温度シフト不要。

Kca要求値=6000N/mm^{3/2} で

EH47(Kca@CAT=7000N/mm^{3/2})の場合、温度シフトは負。

この場合は温度シフト量を0として要求値を決めても安全側である。

3. Kca値とCATとの相関

表. 1' ぜい性亀裂アレスト鋼に対する要求値

板厚		Kca	CAT	
			EH47	EH40
t≤80mm		6000N/mm ^{3/2}	-10 ⁰ C	-10 ⁰ C
80mm<t≤100mm	UD	6000N/mm ^{3/2}	-10 ⁰ C	-10 ⁰ C
	HSC	8000N/mm ^{3/2}	?	?

材料試験であるCAT試験は、Kca=6000N/mm^{3/2}の要求に対しては、船舶の最低使用温度と同じ温度でのアレストの要求とすることが可能であることが明らかになった。

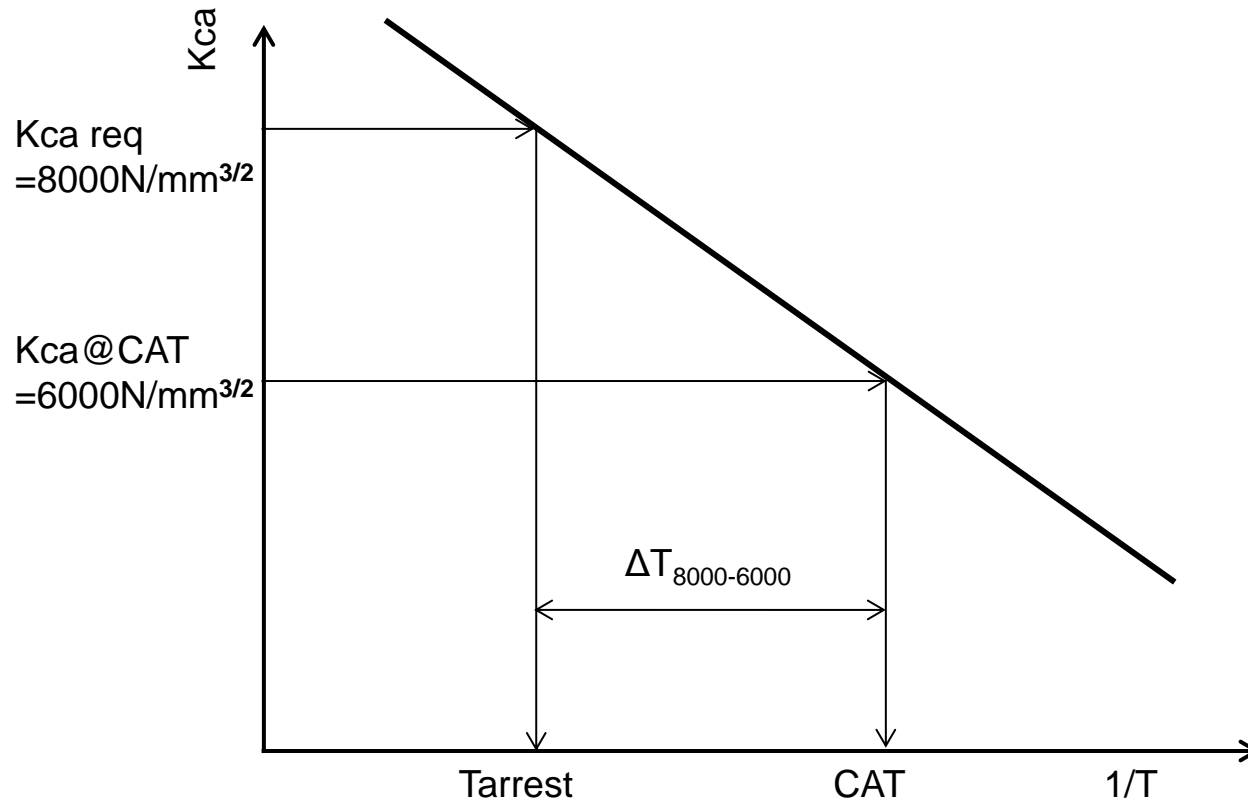
確認 (EH47では安全側)

板厚80mm以上のHSCへの要求は？

検討

3. Kca値とCATとの相関

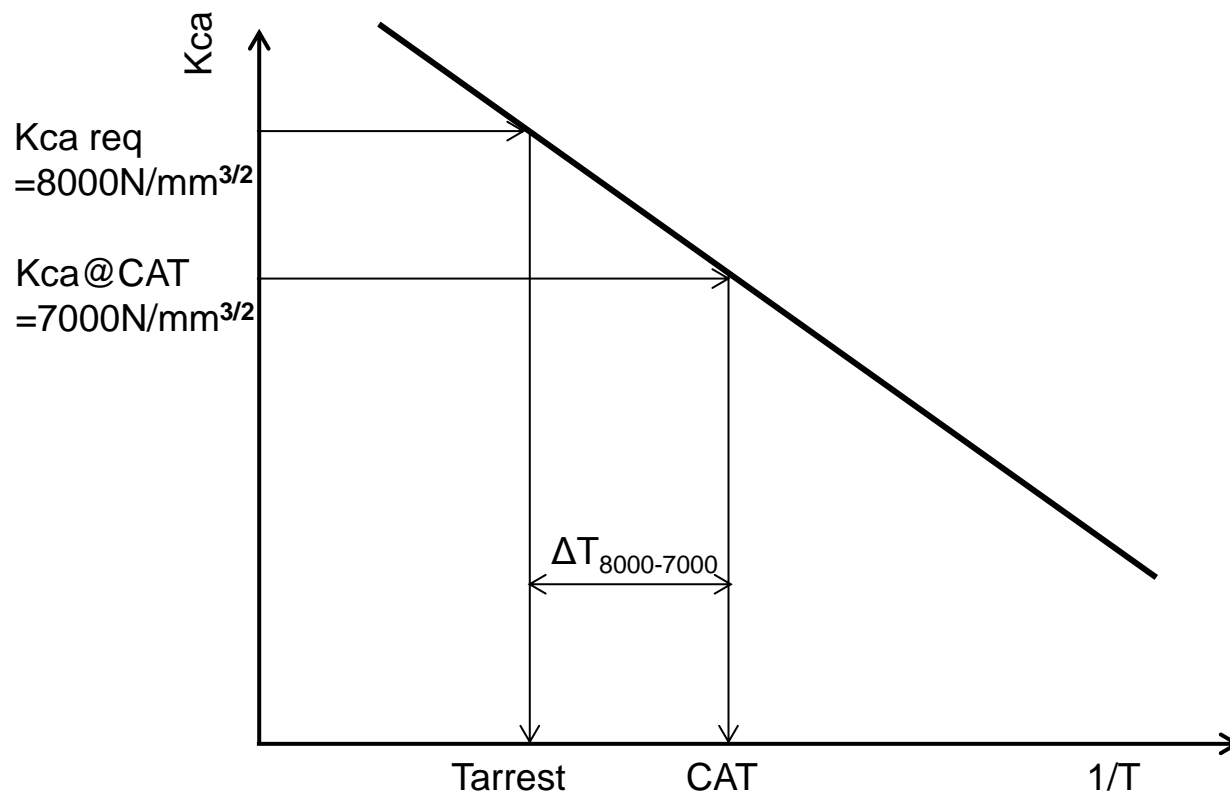
Kca要求値=8000N/mm^{3/2} でEH40(Kca@CAT=6000N/mm^{3/2})の場合



$K_{ca \text{ req}} = 8000 \text{ N/mm}^{3/2}$, EH40 ($K_{ca@CAT} = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$)

3. Kca値とCATとの相関

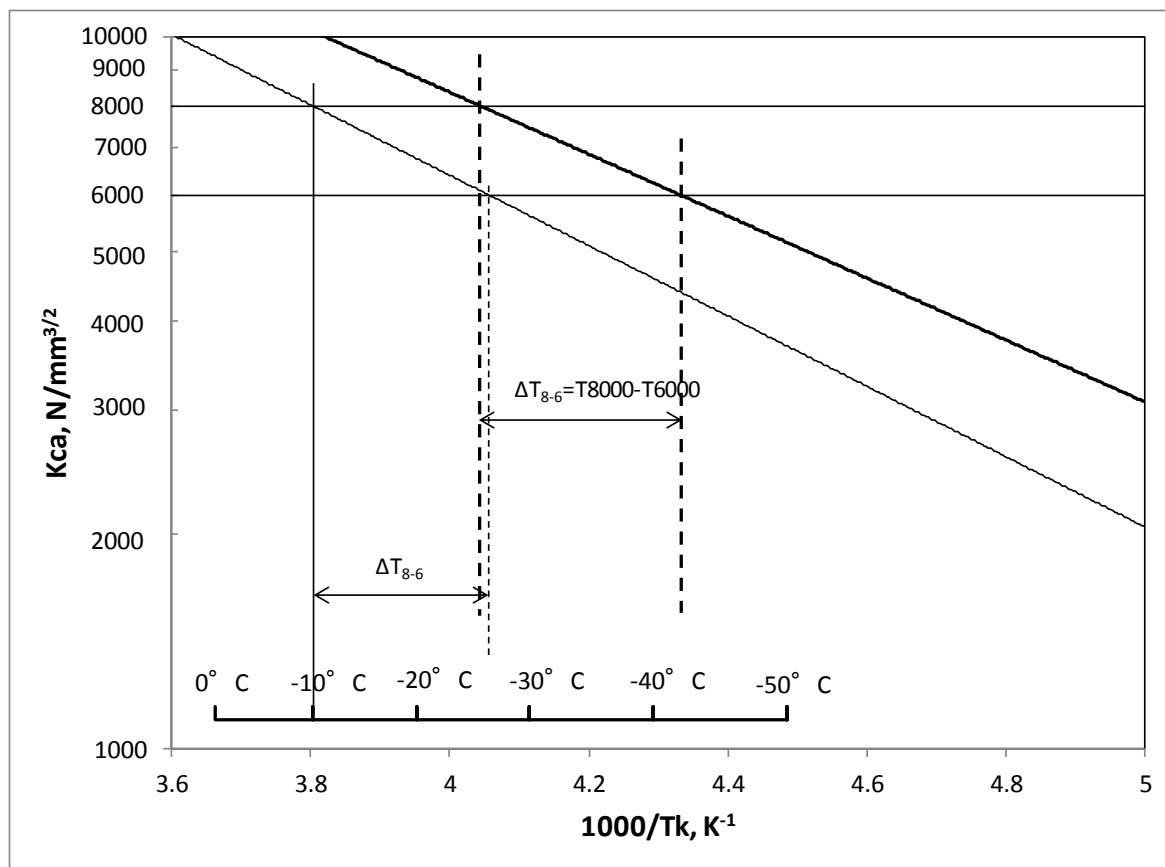
Kca要求値=8000N/mm^{3/2} で EH47(Kca@CAT=7000N/mm^{3/2})の場合



Kca req=8000N/mm^{3/2}, EH40(Kca@CAT=7000N/mm^{3/2})

3. Kca値とCATとの相関

温度シフトの概念 (例 CAT=TKca6000の場合)



靱性レベルが変化しても同一鋼板では温度シフト量 $\Delta T_{8000-6000}$ が一定であると仮定すれば、 $\Delta T_{8000-6000}$ は溶接協会のESSOデータから推定可能

3. Kca値とCATとの相関

表 3 温度シフトを導入したCAT要求

鋼板	板厚	EH47	EH40
UD用	$t \leq 100\text{mm}$	-10°C	-10°C
HSC用	$t \leq 80\text{mm}$	-10°C	-10°C
	$80\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	$-10^{\circ}\text{C} - \Delta T_{8000-7000}$	$-10^{\circ}\text{C} - \Delta T_{8000-6000}$

3. Kca値とCATとの相関

表 4 JWESのアレストデータ集

Name	Grade	t (mm)	Test n	Kca,max (N/mm ^{3/2})	Test n within ±15%	σ _t max /SMYS	Arrhenius K ₀	fitting factors C	r ²	TKca 6000	TKca 7000	TKca 8000	Temp. gap Kca8k-6k	Temp. gap Kca8k-7k	
NK_Pro-1	NK_Pro	36	60	3	6277	3	0.6	1.31E+07	-2.240	1.000	18.5	24.4	29.8	11.3	5.4
NK_Pro-2	NK_Pro	36	60	3	8857	3	0.6	1.41E+07	-2.180	0.969	7.8	13.5	18.6	10.8	5.1
NK_Pro-3	NK_Pro	36	60	3	7248	3	0.6	1.20E+06	-1.497	1.000	9.7	18.2	25.9	16.2	7.8
NK_Pro-4	NK_Pro	36	60	3	7679	3	0.6	5.82E+06	-1.864	0.973	-1.9	4.3	9.9	11.8	5.6
NK_Pro-5	NK_Pro	36	60	4	9082	4	0.6	4.34E+07	-2.392	0.924	-3.9	0.9	5.1	9.0	4.3
NK_Pro-6	NK_Pro	36	60	4	8009	4	0.6	2.84E+06	-1.619	0.996	-10.1	-3.3	2.8	12.9	6.1
NK_Pro-7	NK_Pro	36	60	3	7022	3	0.6	2.48E+07	-2.238	0.835	-4.2	0.9	5.4	9.6	4.6
NK_Pro-8	NK_Pro	36	60	3	8204	3	0.6	4.84E+07	-2.401	0.988	-6.1	-1.4	2.7	8.8	4.2
NK_Pro-9	NK_Pro	36	60	4	8042	4	0.6	5.89E+05	-1.156	0.895	-20.9	-12.2	-4.1	16.9	8.1
NK_Pro-10	NK_Pro	36	60	4	6259	4	0.6	1.58E+05	-0.843	0.945	-15.1	-2.3	9.8	24.9	12.1
NK_Pro-21	NK_Pro	36	60	3	7282	3	0.85	1.55E+06	-1.394	-	-22.0	-14.9	-8.3	13.7	6.5
NK_Pro-11	NK_Pro	36	65	4	7159	3	0.62	1.96E+05	-0.847	-	-30.1	-18.8	-8.2	21.9	10.6
NK_Pro-2	NK_Pro	36	65	4	5532	3	0.51	6.71E+06	-1.958	-	5.9	12.2	17.9	11.9	5.7
NK_Pro-13	NK_Pro	36	65	4	10875	0	0.51	1.29E+06	-1.542	-	14.1	22.6	30.4	16.3	7.8
NK_Pro-14	NK_Pro	36	65	4	6527	2	0.65	8.63E+06	-1.882	-	-14.2	-8.6	-3.5	10.7	5.1
NK_Pro-16	NK_Pro	36	65	4	8718	2	0.7	3.35E+08	-2.738	-	-22.5	-18.9	-15.7	6.8	3.2
NK_Pro-25	NK_Pro	40	60	3	7665	3	0.53	8.71E+06	-1.828	-	-21.9	-16.5	-11.6	10.3	4.9
NK_Pro-26	NK_Pro	40	60	3	8254	3	0.58	8.54E+06	-1.909	-	-10.1	-4.4	0.8	10.8	5.1
NK_Pro-27	NK_Pro	40	60	3	7375	1	0.53	1.85E+06	-1.397	-	-29.1	-22.4	-16.2	12.9	6.2
NK_Pro-28	NK_Pro	40	60	3	6968	3	0.62	7.88E+06	-1.914	-	-6.5	-0.6	4.7	11.1	5.3
NK_Pro-29	NK_Pro	40	60	3	9668	3	0.65	5.67E+06	-1.765	-	-15.4	-9.4	-4.1	11.3	5.4
NK_Pro-17	NK_Pro	40	65	4	8824	3	0.64	1.85E+07	-1.914	-	-34.8	-30.1	-25.9	8.8	4.2
NK_Pro-18	NK_Pro	40	65	3	5186	3	0.51	9.36E+05	-1.170	-	-41.3	-34.0	-27.3	14.0	6.7
T70A	ATE4	40	70	4	7798	4		3.54E+06	-1.549	0.925	-30.2	-24.2	-18.7	11.5	5.5
T70B	ATE4	40	70	4	7995	4		2.23E+07	-2.035	0.918	-25.4	-20.7	-16.4	9.0	4.2
NK_Pro-15	NK_Pro	40	80	4	5093	4	0.36	2.58E+05	-1.110	0.945	22.1	34.7	46.6	24.4	11.8
Mat40-1	Mill提供	40	85	3	7181	3		9.73E+05	-1.268	0.992	-23.8	-16.0	-8.9	14.9	7.1
Mat40-2	Mill提供	40	85	3	7135	3		6.24E+05	-1.148	0.961	-25.9	-17.4	-9.6	16.3	7.8
T100B	ATE4	40	100	4	8304	4		6.55E+05	-1.176	0.850	-22.4	-13.9	-6.0	16.4	7.9
T100C	ATE4	40	100	5	11391	5		1.23E+06	-1.266	0.980	-35.1	-28.0	-21.5	13.6	6.5
Mat40-3	Mill提供	40	100	4	7041	4		6.06E+05	-1.123	0.927	-29.6	-21.2	-13.4	16.2	7.8
Mat40-4	Mill提供	40	100	4	11019			4.52E+05	-1.031	1.000	-34.5	-25.7	-17.5	17.0	8.2
Mat40-5	Mill提供	40	100	4	9883			3.67E+06	-1.566	0.960	-28.9	-22.9	-17.4	11.5	5.5
Mat47-1	Mill提供	47	85	4	7672	4		9.25E+05	-1.177	0.775	-39.3	-32.0	-25.2	14.1	6.8
Mat47-2	Mill提供	47	90	3	7049	3		5.73E+05	-1.084	0.925	-35.3	-27.0	-19.3	16.0	7.7
Mat47-3	Mill提供	47	90	3	6502	3		4.20E+05	-0.963	1.000	-46.4	-37.9	-30.0	16.5	7.9
Mat47-4	Mill提供	47	90	4	10571			5.08E+05	-1.018	0.770	-43.6	-35.4	-27.7	15.9	7.6
Mat47-5	Mill提供	47	90	4	9699			2.61E+07	-2.108	0.780	-21.3	-16.6	-12.4	9.0	4.2
Mat47-6	Mill提供	47	90	4	10120			1.26E+06	-1.313	0.850	-27.4	-20.1	-13.4	14.0	6.7
T100A	ATE4	47	100	5	8478	5		9.57E+05	-1.172	0.965	-41.8	-34.6	-27.9	13.9	6.7
Mat47-7	Mill提供	47	100	4	11380			6.93E+05	-1.117	0.970	-37.8	-29.9	-22.7	15.2	7.3

$$K_{ca} = K_0 \exp\left(\frac{1000C}{T_K}\right)$$

Valid data set is defined as
 (1) Kcamax ≥ 7500N/mm^{3/2}
 and
 (2) More than 3 Kca data are within ±15%

3. Kca値とCATとの相関

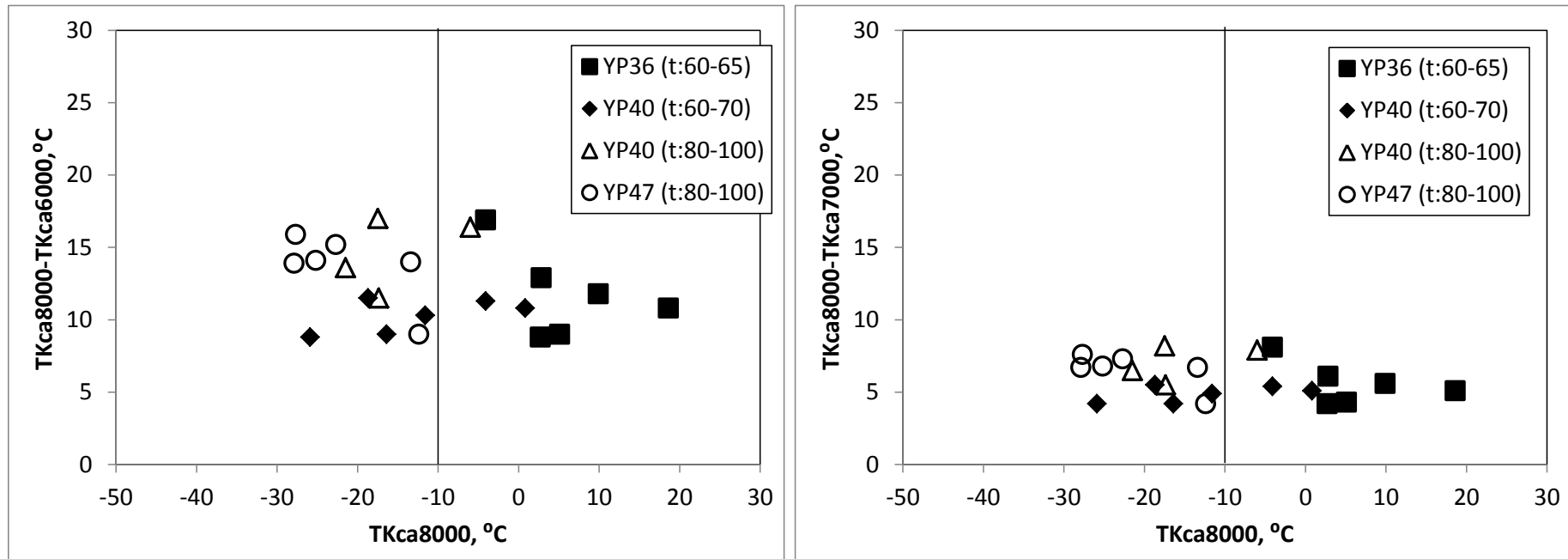


Fig JWESデータ集の温度シフト量

3. Kca値とCATとの相関

表. 1”ぜい性亀裂アレスト鋼に対する要求値

板厚		Kca	CAT	
			EH47	EH40
$t \leq 80\text{mm}$		$6000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$	-10°C	-10°C
$80\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	UD	$6000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$	-10°C	-10°C
	HSC	$8000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$	$-10^\circ\text{C} - \Delta T_{8000-7000}$	$-10^\circ\text{C} - \Delta T_{8000-6000}$

確認済 (EH47は安全側)

JWES案 (ΔT は今後の課題)

板厚80mm以上では温度シフト量 ΔT をCAT要求に導入した。
 ΔT の値は今後決定する。

4. 結論

$L_{EB}=150\text{mm}$ を前提として、

ぜい性亀裂アレスト鋼に対するCAT要求値は下表の通り

表. 1”ぜい性亀裂アレスト鋼に対する要求値

板厚		Kca	CAT	
			EH47	EH40
$t \leq 80\text{mm}$		$6000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$	-10°C	-10°C
$80\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	UD	$6000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$	-10°C	-10°C
	HSC	$8000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$	$-10^{\circ}\text{C} - \Delta T_{8000-7000}$	$-10^{\circ}\text{C} - \Delta T_{8000-6000}$

ΔT は今後決定する