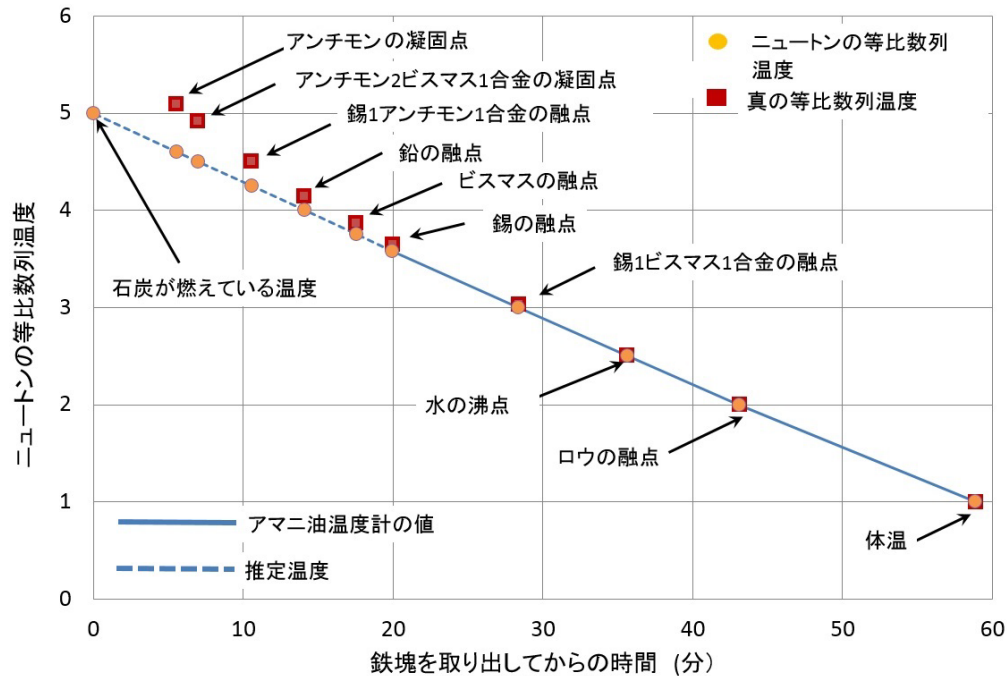




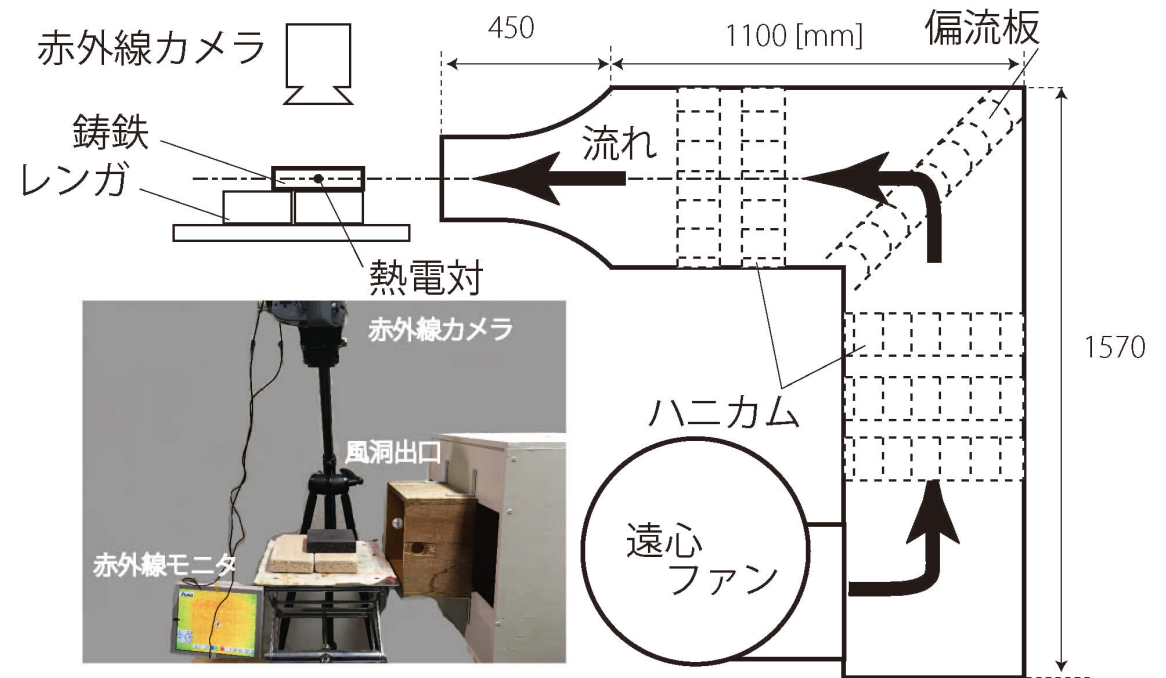
第2章 熱伝導（伝導伝熱）⑦

2-7. ニュートンの冷却法則

ニュートンの冷却法則 $q = h(T - T_{\infty})$



高温の鉄塊が体温になるまでの時間を59分とした時、ニュートン論文の表をグラフにしたもの



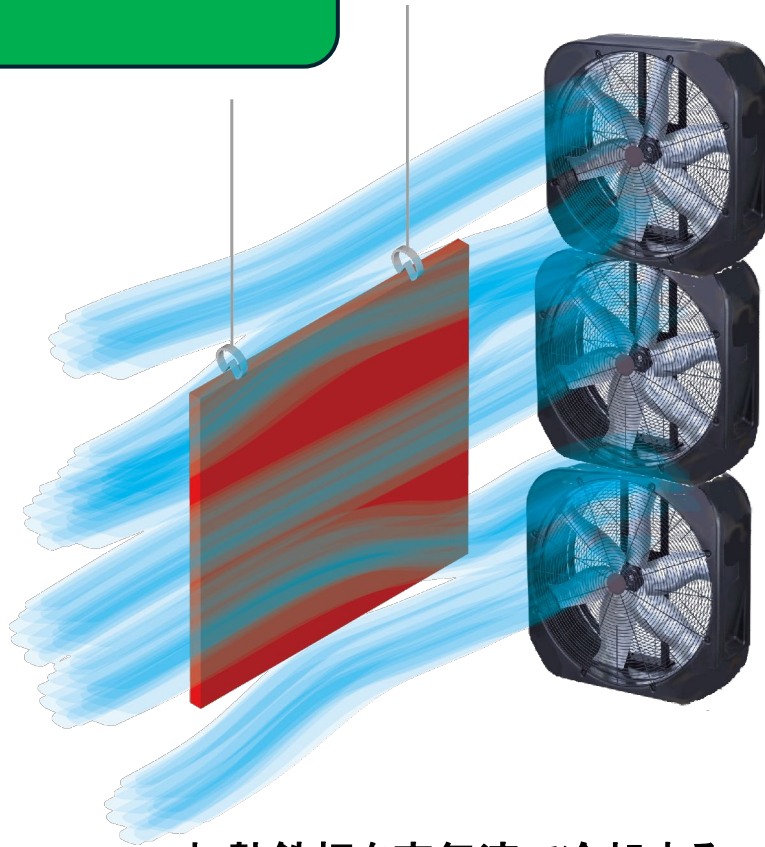
ニュートンの実験を再現するために構築した風洞実験装置



第2章 熱伝導（伝導伝熱）⑥

前回の内容

非定常熱伝導の例題と演習問題



加熱鉄板を空気流で冷却する



冷蔵庫でスイカを冷やす



第2章 熱伝導（伝導伝熱）⑦

- 2-1. 定常熱伝導と物質の熱伝導率
- 2-2. 多層媒体の定常熱伝導
- 2-3. 定常熱伝導の例題と演習問題
- 2-4. 熱伝導方程式と境界条件
- 2-5. 非定常熱伝導
- 2-6. 非定常熱伝導の例題と演習問題
- 2-7. ニュートンの冷却法則



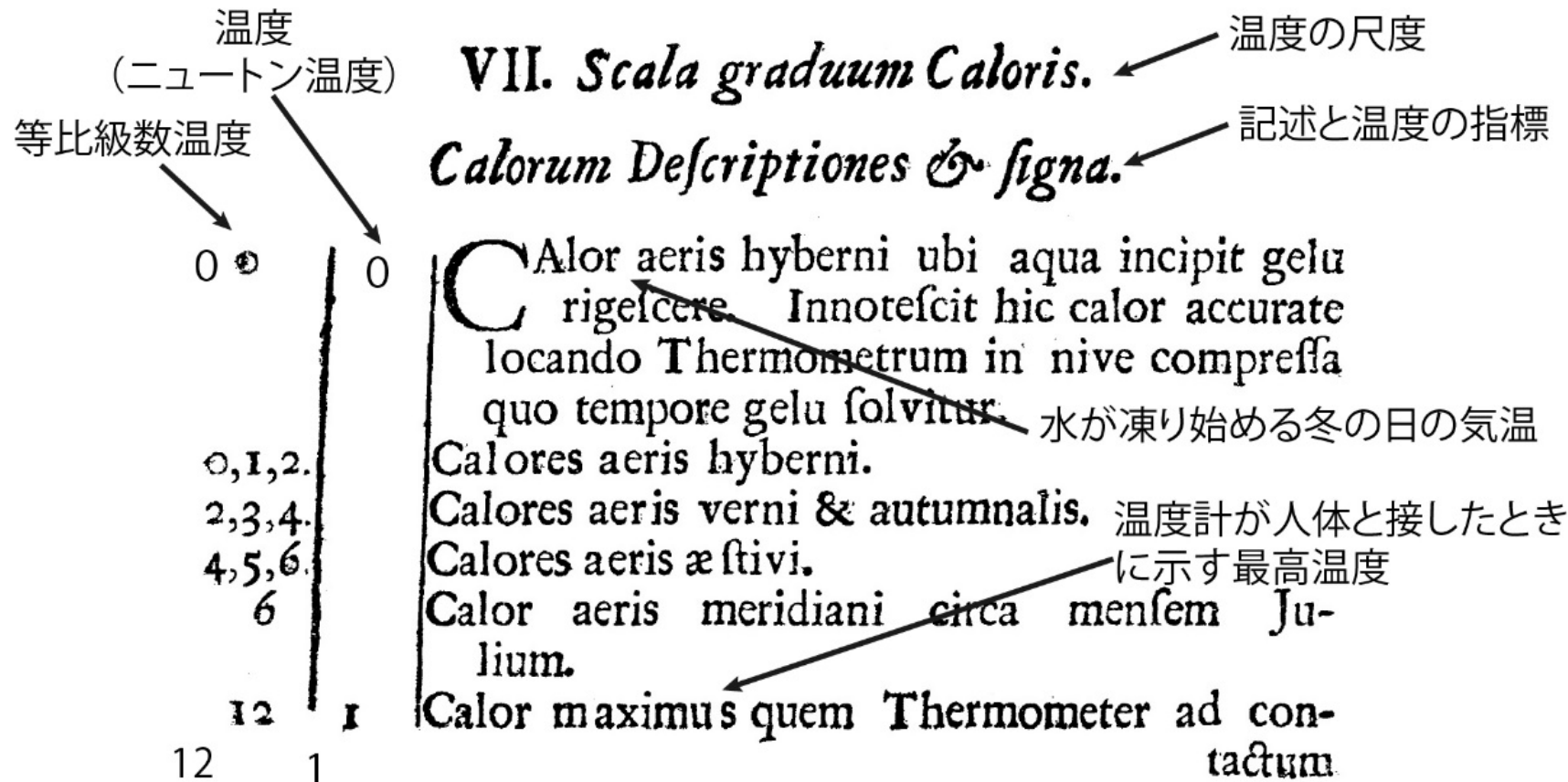
ニュートンの冷却法則



ニュートン(1642-1727)は旧1ポンド紙幣裏には反射望遠鏡と光を分割するプリズムと共にニュートンが描かれています。彼は、熱科学にも貢献しました。



ニュートンが匿名で出版した論文



1701年に英国王立協会から匿名（著者不詳）で出版された熱科学の論文 [1] の表

[1] “Scala graduum Caloris (A Scale of the Degrees of Heat)”, Philosophical Transactions, No. 270, pp. 824-829, (April 1701).



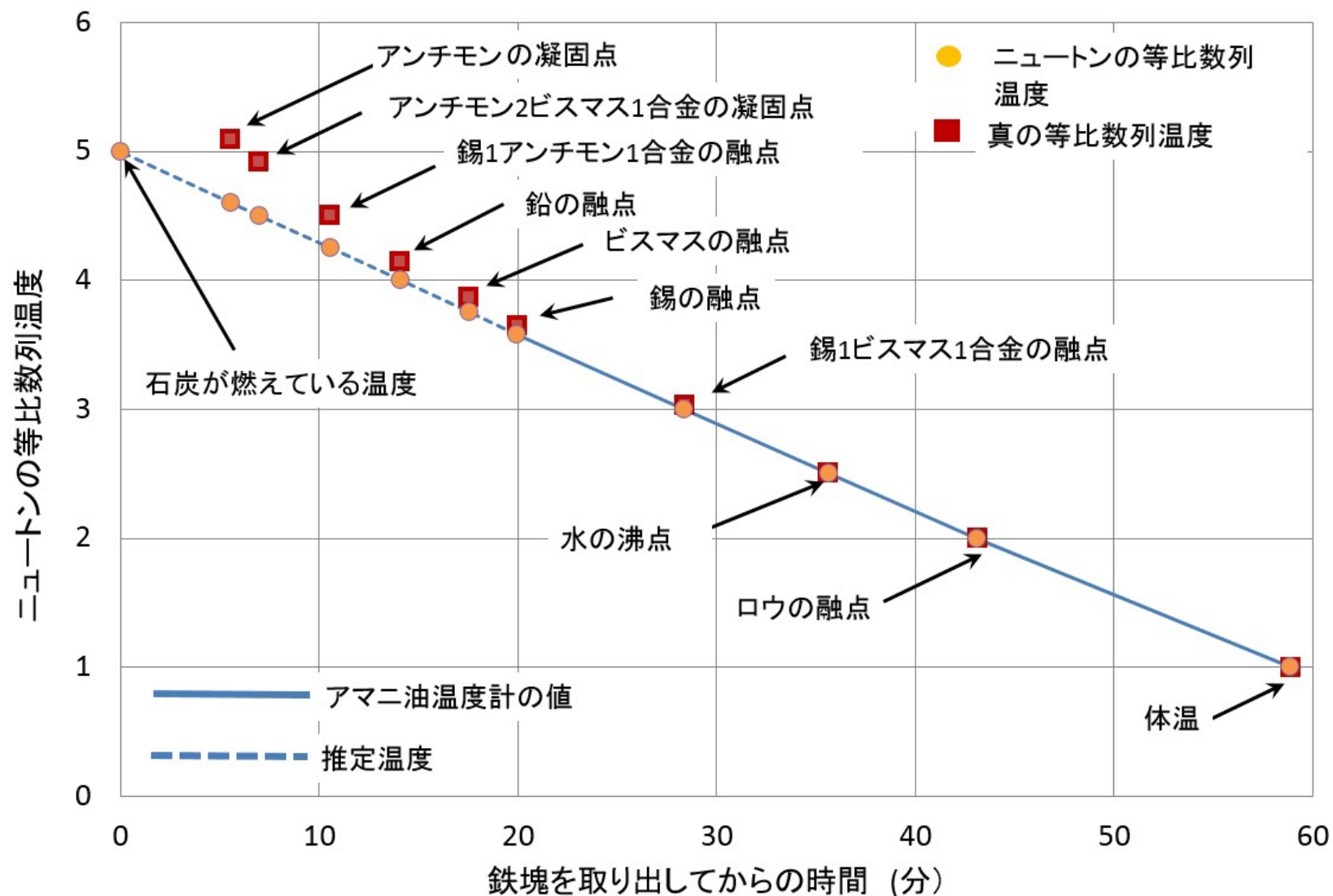
ニュートン論文の表の抜粋

表1 ニュートン温度とその記述（番号は後で付けたもの、*は文章による温度記述を示す。
等比数列温度に†がついているものは筆者の計算値を示す。）

データ 番号	現象の記述と温度	ニュートン 温度 (N)	等比数列 温度	摂氏 温度 (°C)
1	水が凍り始める冬の気温.	0		0.00
12	温度計が人体に接触して達する最大温度.	12	1	35.29
14	風呂に手を動かさず浸して長時間耐えることができる最高温度.	17	1.5	50.00
15	お湯の上に浮かぶ溶融ワックスが凝固し始めてその透明度を失う時の温度.	20.18	1.75	59.35
18*	水は33度の温度で沸騰し始める.	33	2.46 †	97.06
22	水が激しく沸騰する温度および鉛2, 錫3, ビスマス5の合金が冷却時に固化する温度.	34	2.5	100.00
23*	沸騰するお湯は, 34.5度以上にはほとんど達しない.	34.5	2.52 †	101.47
24	鉛1, 錫4, ビスマス5の合金が加熱され融解し, 液体を保つ最低温度.	40.36	2.75	118.71
25*	この合金（錫1, ビスマス1の合金）は冷却すると47度で凝固する.	47	2.97 †	138.24
26	錫1, ビスマス1の合金が融解する最低温度.	48	3	141.18
27	錫2, ビスマス1の合金, または錫3, 鉛2の合金が融解する温度.	57	3.25	167.65
28	ビスマス1, 錫8の合金が融解する最低温度.	68	3.5	200.00
29*	錫は冷却すると70度で凝固する.	70	3.54	205.88
30*	錫は72度で融解する.	72	3.58	211.76
31	ビスマスの融解温度, 鉛4, 錫1の合金でも同じである.	81	3.75	238.24
32*	そして, 鉛は冷却時に95度で凝固する.	95	3.98 †	279.41
37*	アンチモンは146度で凝固する.	146	4.60 †	429.41
39	ふいごを使わずに瀝青炭が燃える小さなコンロの石炭の温度. そのような火の中で, 強く輝く鉄は同じ温度である.	192	5	564.71

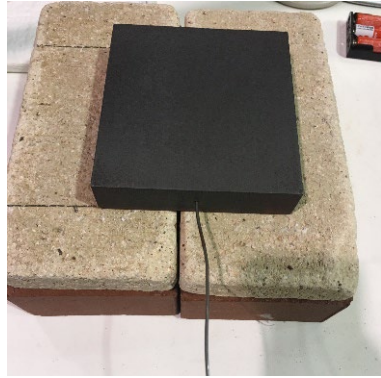


ニュートンの冷却法則

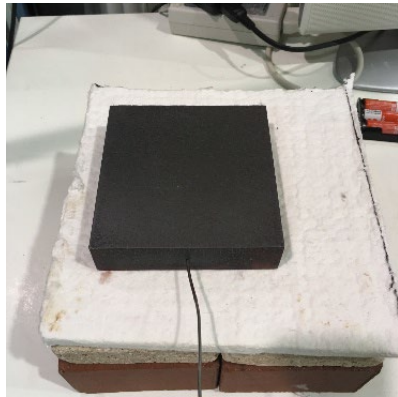


体温になるまでの時間を59分とした時、ニュートン論文の表をグラフにしたもの

実験に用いた鉄塊と風洞実験装置



(a)



(b)

図1 レンガの上に直接置いた約
4×4×1 inchの铸铁塊(a)と断熱材の
上に置いた铸铁塊(b)の様子

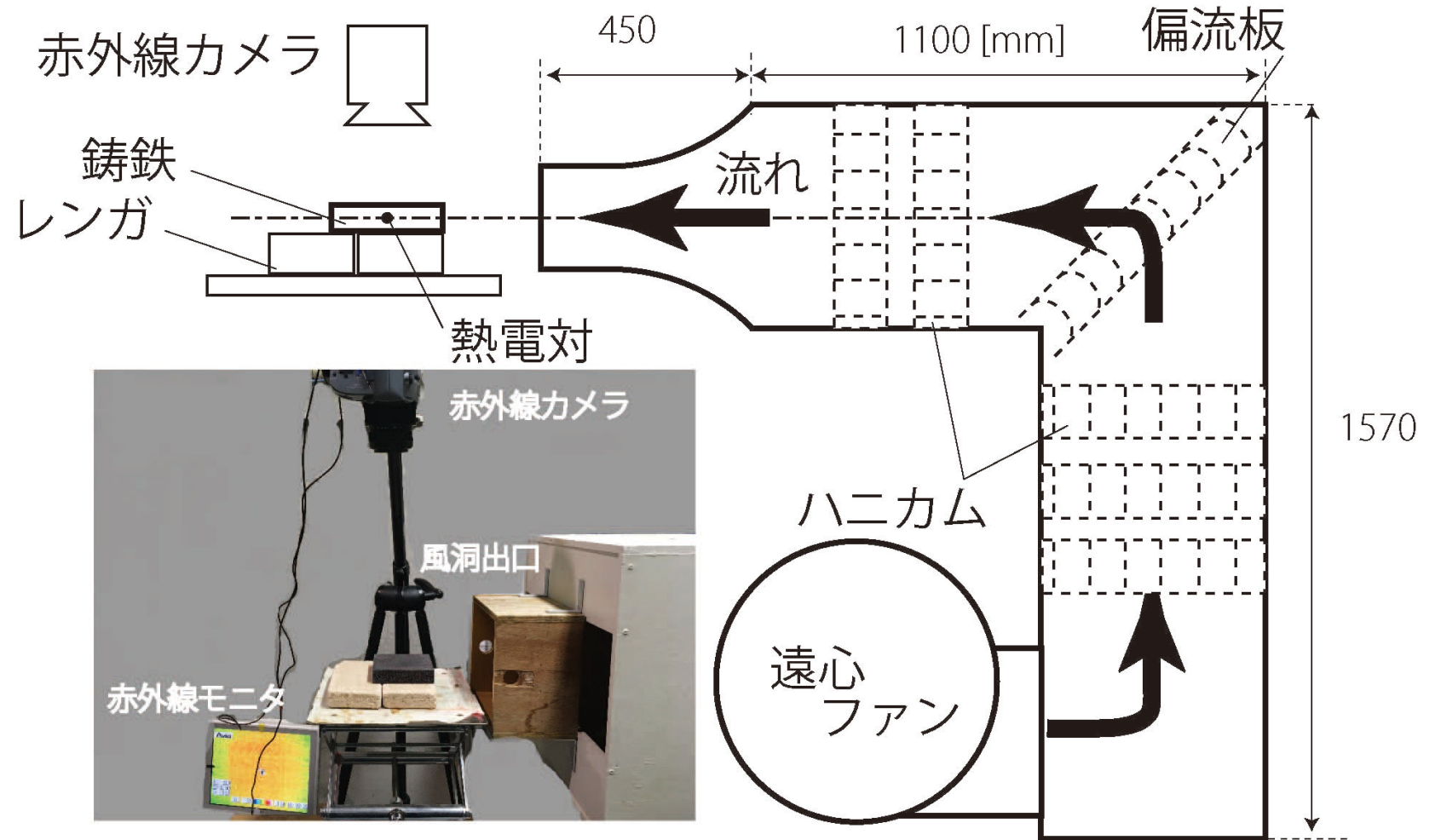
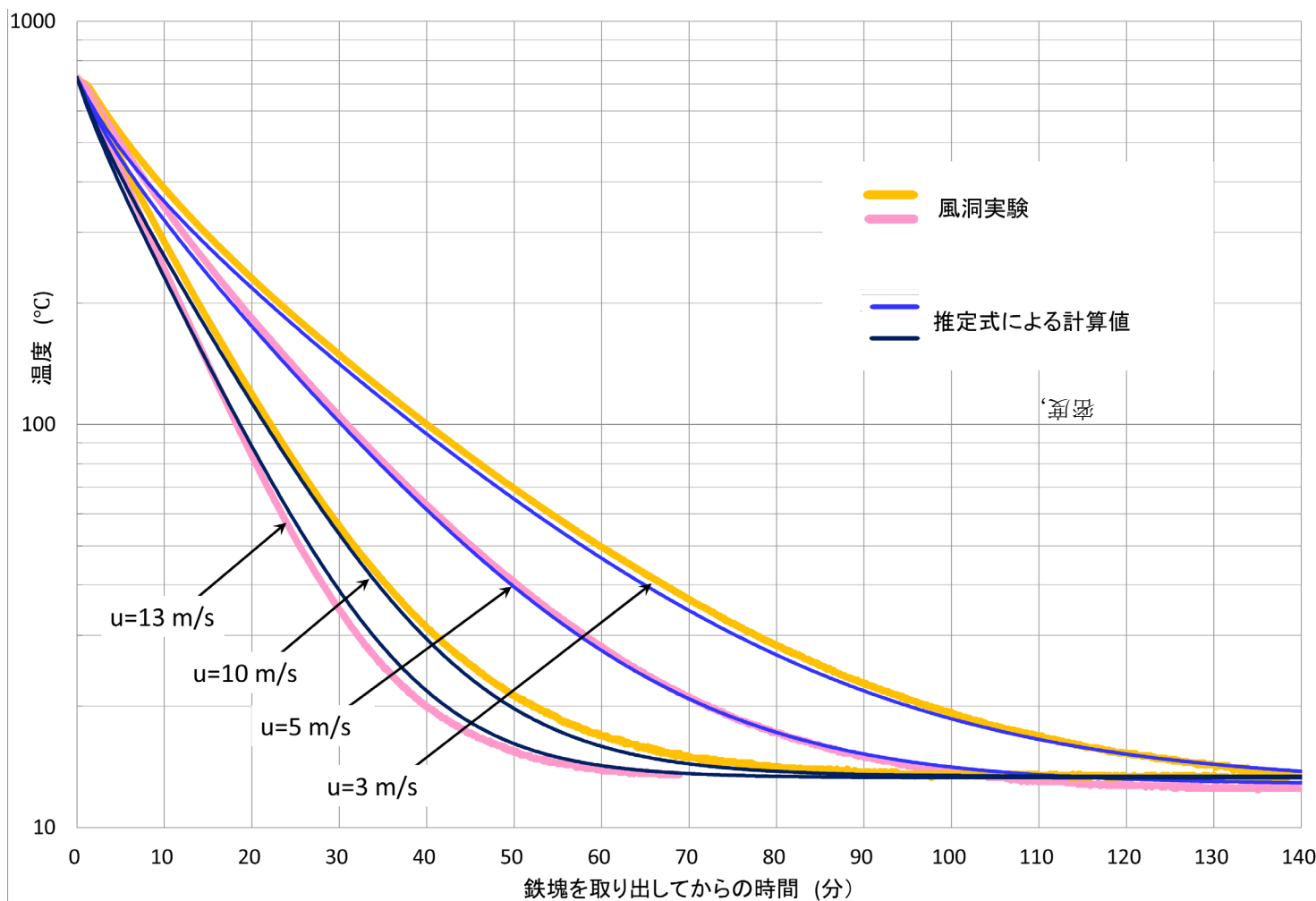


図2 簡易風洞による実験装置



風洞実験と伝熱推定式との比較



$$c\rho V \frac{dT}{dt} = -S\{\bar{h}_c(T - T_\infty) + \varepsilon(T^4 - T_\infty^4)\}$$

c : 比熱, ρ : 密度, V : 体積, S : 表面積,
 t : 時間, h_c : 対流熱伝達率, T : 温度,
 T_∞ : 環境温度

ε : ふく射率 = 0.75 (実験より)

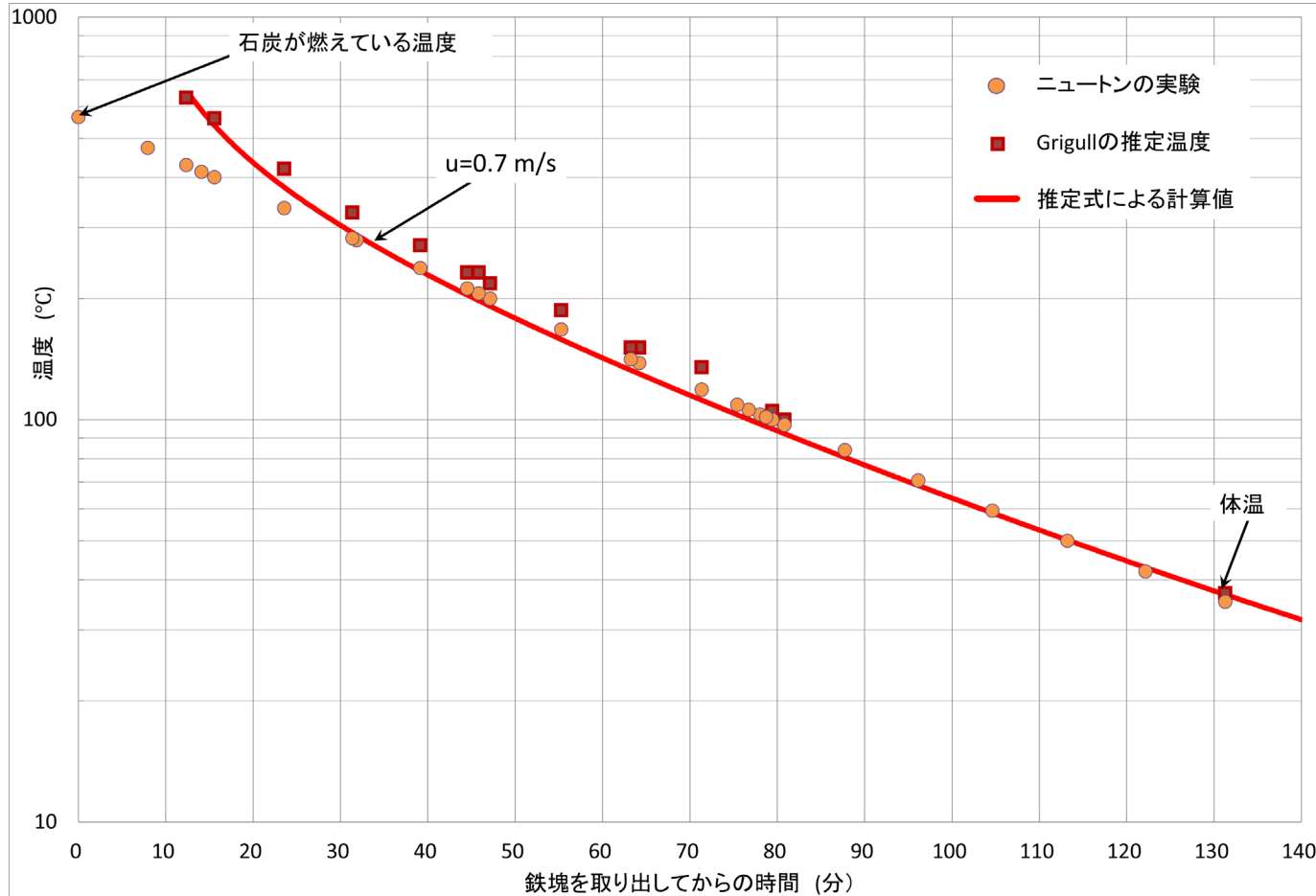
$$Nu_D = \bar{h}_c D / k = C Re_D^m Pr^{1/3},$$

ここで $C = 0.102$, $m = 0.675$

風洞実験とふく射を考慮した対流熱伝達推定式との比較



ニュートンの実験と伝熱推定式との比較



冷却時間が132分とすると、
流速は0.7m/sとなる。

冷却時間が60分とすると、流
速は4m/sとなる。

現在使われている
ニュートンの冷却法則

$$q = h(T - T_{\infty})$$

鉄塊が体温になるまでの時間を予備実験と同じ132分とした時、
ニュートンの実験と風洞実験による推定式と比較したもの。



ニュートンのプリンキピア

第II編 抵抗を及ぼす媒質内での物体の運動

命題2. 定理2

もし物体がその速度に比例して抵抗をうけ、その慣性のみによって均一な媒体内を動くものとし、かつ時間間隔を等しくとったとするならば、それら各時間の初めにおける速度は1つの幾何級数をなし、また各時間間隔内に描かれる距離は速度に比例する。

[中野猿人 訳, プリンシピア, 講談社, (1977)]

微分法を用いて上記の定理2を表すと、静止媒体中の物体の運動は、

$$\frac{d}{dt}(mv) = -kv \quad (1)$$

ここで、 m, v は物体の質量と速度、 t, k は、時間と定数を表す。

初期速度を v_0 とすると、式(1)の解は、

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{k}{m}t\right) \quad (2)$$

$i\Delta t$ 秒後の速度を v_i とすると、式(2)は式(3)となる。

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_1}{v_0} = \frac{v_i}{v_{(i-1)}} \dots = \exp\left(-\frac{k}{m}\Delta t\right) \quad (3)$$



プリンキピアと冷却法則からニュートン論文の結果を導く

ニュートンの冷却法則

$$q = h(T - T_{\infty}) \quad (4)$$

表面積 S , 体積 V , 比熱 c , 密度 ρ , の物体に集中熱量系の仮定を適用すると

$$c\rho V \frac{dT}{dt} = -hS(T - T_{\infty}) \quad (5)$$

ここで、 $T_{\infty}=0$ と仮定し、
初期温度 T_0 , $i\Delta t$ 秒後の温度を T_i とすると、前スライド(3)式と同様に

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_i}{T_{(i-1)}} \dots = \exp\left(-\frac{\bar{h}S}{c\rho V} \Delta t\right) \quad (6)$$

式(7)で定義されるニュートンの等比数列温度 T' を導入します。

$$T' = \log_2(T / 12) + 1 \quad (7)$$

これを式(6)に代入すると、

$$T'_0 - T'_1 = T'_1 - T'_2 = \dots = T'_{(i-1)} - T'_i = \frac{\bar{h}S}{c\rho V \ln 2} \Delta t = \text{Const.} \quad (8)$$

つまり、鉄塊の既知の2つの温度と冷却初めからのそれぞれの時間が分かれば、等比数列温度で鉄塊の初期温度が推定できることになる。

注意！ 静止流体の運動を用いているので、周囲温 $T_{\infty}=0$ と仮定している。
温度が低い場合、ニュートンの方法は誤差が生じることになる。



なぜ、高温物体の温度計測の匿名論文を出版したのか

当時の熱科学では、温度の基準を決めることが重要なテーマで、皆さんが使っている摂氏（セ氏温度， $^{\circ}\text{C}$ ）や米国で使われている華氏（カ氏温度， $^{\circ}\text{F}$ ）もニュートン温度と同じ頃に考案された。ただし，これらの温度は水が沸騰する温度である 100°C が上限だった。

なぜニュートンは 100°C より高い温度に興味を持ち，実際にその温度基準を作り，**1701年**に匿名の論文を出したのだろうか？（圓山の推論）

ニュートンは，安い金属から貴金属（特に金）を生み出そうとする錬金術（れんきんじゅつ）に熱中していたと言われている。

錬金術は金属工学なので金属が溶ける高温を計測することが重要。そのために，正確な温度を計測する必要に迫られたと考えられる。

実験時の風速によって冷却時間が異なること、 $T_{\infty}=0$ と仮定したため、低温域で集中熱量系の仮定が成り立たないことから、ニュートンの等比数列温度にずれが生じたことから、成果に確信を持てなかった。

錬金術の研究から出てきた温度測定方法を匿名論文として出版し，こっそり科学者の反応を見ていたと考えられなくもない。



ま と め

ニュートンの冷却法則のもととなった匿名論文の検証をおこなった。

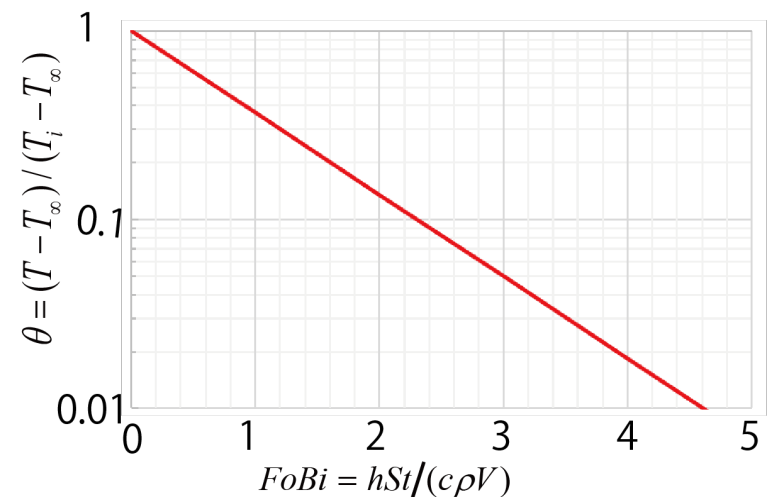
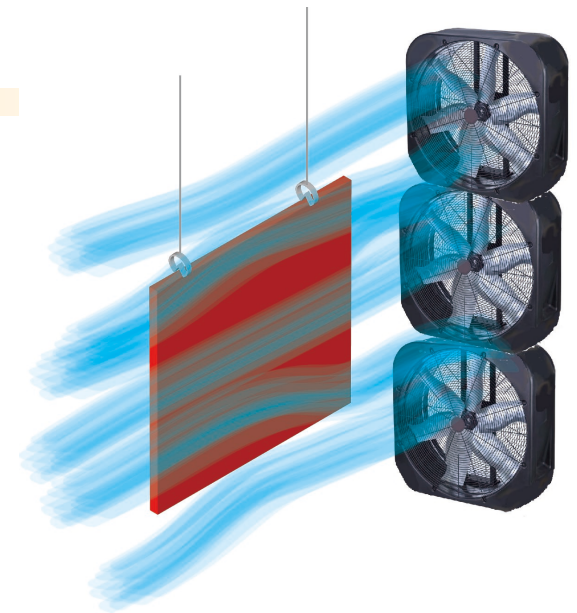
簡易風洞を製作し，ニュートンと同様な実験を行い，ニュートンが実験したときの風の速度を推定した。

ニュートンの冷却法則の根幹となる，等比数列温度の導出はニュートンの名著「プリンキピア」と関係があることを示した。

等比数列温度の導出を考えると，ニュートンの冷却法則は，現在の伝熱工学テキストに記されているように，対流熱伝達の章ではなく，熱伝導の章で集中熱容量系の法則として記述される方が，論文の主旨に合っていると考えられる。

さらに興味のある方は下記の論文を読んでみてください。

Maruyama & Moriya, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2021)



集中熱量系の仮定のもと、均一に加熱された板を空気流で冷却する場合の温度変化



次回予告

第3章 対流熱伝達

- 3-1. 対流熱伝達の概要
- 3-2. 強制対流熱伝達と流動
- 3-3. 自然対流熱伝達
- 3-4. 熱流動の無次元表記
- 3-5. 強制対流の流動と伝熱様式
- 3-6. 自然対流の熱伝達様式
- 3-7. 解析ソフトを使った伝熱計算

技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用



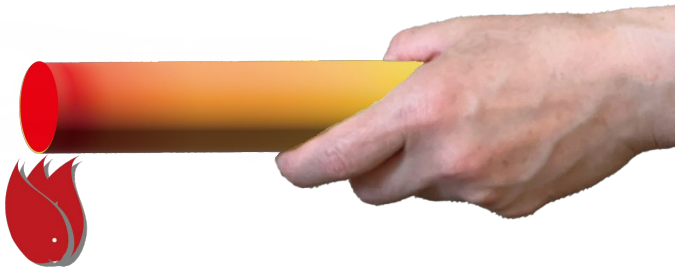
「もっと見る」欄に記載の今回の[要約](#)とホームページの[pdf資料](#)で理解を深めることができる。



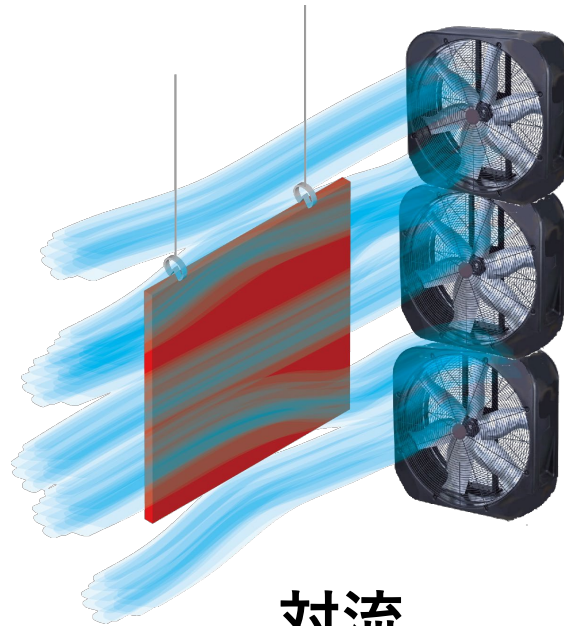
東北大学未来科学技術共同研究センター レクチャーシリーズ

— 熱プロセスを習得したい人のための入門と実践的応用 —

伝熱現象



熱伝導



対流



熱ふく射

講師 圓山重直

東北大学未来科学技術センター シニアリサーチ・フェロー
東北大学名誉教授・八戸高専名誉教授