

高粘度油の加熱による自然対流と温度分布について

福地信義*

Natural Convection and Thermal State of High Viscous Oil by Heating

by

Nobuyoshi FUKUCHI

Recently, a large quantity of high-viscous crude oil is imported into Japan and oil consumed country. Oil tankers carrying high-viscous oil have to equip with the oil heating system taking account of characteristics of viscosity on temperature. In general, the viscosity of high-viscous crude oil changes rapidly according to a thermal change near a normal temperature.

In order to investigate the natural convection and the thermal state in oil tank, the numerical analysis on velocity and temperature during heating up is carried out by the finite element method. By the results of analysis, the relations between the distribution of oil temperature in tank and the arrangement of heating coil or the supplied heat quantity are clarified.

1. はじめに

近年の石油資源の枯渇傾向から、従来からの良質な低粘度原油の輸入に対し、高粘度原油または高流動点原油の輸入の割合が上昇し、これを輸送する原油タンカーもポンピング装置やタンク内加熱システムに高粘度油のための対策を行う必要が生じてきた。高粘度油はポンピング時の流動を容易にするために、加熱を行い粘度の低下をはかる必要がある。一般に高粘度の原油は高粘度の重油とは異なり常温付近の粘度は急激な温度依存性を示し、油タンク内の対流状態および温度分布が問題となる。

本論文では、その粘度特性の温度による変化が大きい高粘度油について、加熱時のタンク内における自然対流の状態および温度分布を知り、高粘度油加熱の基礎的なデータを得るために、タンクモデル内の流速および温度に関する数値解析を行った。これにより、加熱管の配置および供給熱量と温度分布との関係を明ら

かにする。

2. 高粘度原油の自然対流

2.1 高粘度原油の物性

(1) 温度と動粘度の関係

油の物性の中で最も温度依存性が高いのは粘度であり、これが対流の能動性に大きく影響する。Fig. 1に船舶技術研究所において計測された3種の原油の動粘度と温度との関係¹⁾および次のWalther-ASTMの式に基づく値²⁾を示す。

$$\log_{10} \log_{10}(\nu+a) = b - m \log_{10}(\theta+273) \quad (1)$$

ここに、 ν は動粘性係数(cSt)、 θ は油温(°C)である。係数 a 、 b 、 m はそれぞれRedwood #1.3500秒で $a=0.6$ 、 $b=9.94$ 、 $m=3.8$ 、500秒で $a=0.6$ 、 $b=9.79$ 、 $m=3.8$ である。

3種類の原油をVogelの式に従って表わすと次のようになる。

昭和59年4月28日受理

* 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

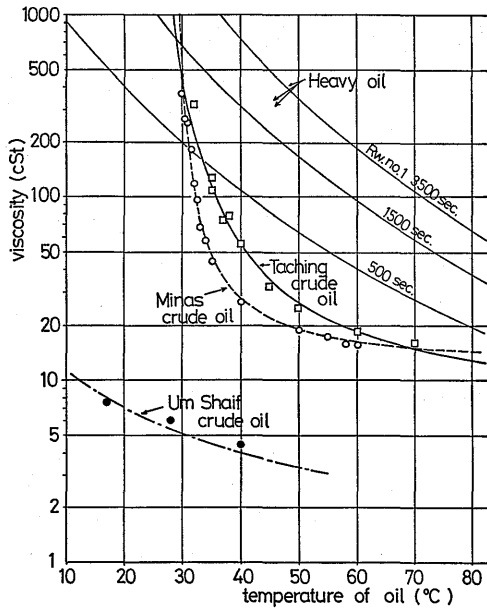


Fig. 1 Relation between viscosity and temperature

$$\nu = A \cdot \exp(B/(\theta - \theta_m)) \quad (2)$$

ここに

A B θ_m

大慶原油 (中国)	: 6.02	45.5	19.4
ミナス原油 (インドネシア)	: 11.4	11.6	26.9
ウム・シャイフ原油 (アブダビ)	: 0.77	129	-38.0

θ_m は凝固点 (°C) に相当する。大慶およびミナス原油は高粘度原油の典型的な例であり、高粘度の重油とは異なり40°C以下で急激な粘度変化を示す。

(2) その他の物性

油を加熱する際の自然対流および温度分布を決める物性としては動粘度の他に、比重量、比熱、熱伝導率、体積膨脹率などがある。これらの値は温度依存性があるが、一般に一定の仮定をとる。

i) 比重量: ρ (kg/m³)

15°Cでの比重量は大慶原油 $0.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ミナス原油 $0.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ であり、一般に $0.85 \sim 0.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。比重量は1°Cの温度上昇に対し0.07%程度減少する³⁾。

ii) 比熱: c (kcal/kg°C)

比熱は温度上昇とともに増加し、次の ASTM の式が用いられる⁴⁾。

$$c = 0.415/\sqrt{\rho/1000} + 0.0009 (\theta - 15) \quad (3)$$

大慶原油で約0.45 (kcal/kg°C) である。

iii) 熱伝導率: λ (kcal/m·sec°C)

石油製品の熱伝導率は Gragoe (U. S. Bureau

of Standard Pub. No. 97) が次の式を提案している。

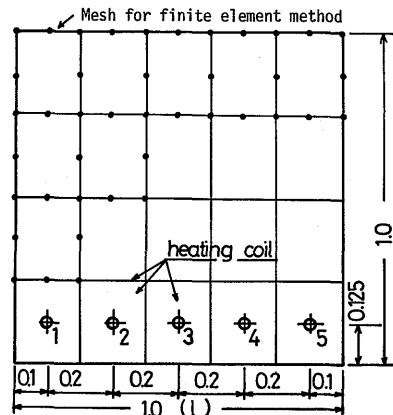
$$\lambda = 0.028 (1 - 0.00054\theta)/\rho \quad (4)$$

iv) 体積膨脹率: β (1/°C)

ミナス原油の体積膨脹率は次式で与えられる⁵⁾。他の原油もほぼ同じ値と考えられる。

$$\beta = 0.57/\rho \quad (5)$$

この他に流動点が問題となるが、これにはろう分の含有量が大きく影響し⁵⁾、大慶原油で30°C、ミナス原油で35°Cである。



Calculating condition of oil tank model

- 1) Assumed length : $l=10 \text{ m}$
- 2) Using heating coil : l -heater 3
2-heaters 2, 4
5-heaters 1, 2, 3, 4, 5
- 3) Heating oil : Taching crude oil (China)
- 4) Temperature of heating coil : 80 °C
- 5) Oil temperature at beginning : 30 °C / 40 °C
- 6) Surrounding temperature : 5 °C
- 7) Heat transmission coefficient of tank surrounding wall : $5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Fig. 2 Tank model for calculation

2.2 基礎式

Fig. 2 に示すようにタンク下部に加熱管を有するタンクモデルについて、油を近似的にニュートン流体とし、流れは層流として自然対流の解析を行う。基礎となる式は以下の通りである。

(1) 流れの連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

ここに、 u_i は流速である。 x_i は座標を表わし、 x_1 、 x_2 を水平方向、 x_3 を鉛直方向 (上向きを正) とする。

(2) 運動方程式

重力場における Navier-Stokes の運動方程式は次

式で表わされる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \beta g_i \theta \quad (7)$$

ここに、 p は圧力、 t は時間、 θ は油温である。また $g_1 = g_2 = 0$, $g_3 = -g$ (重力の加速度) であり、 ν は動粘性係数 (m^2/sec) である。

(3) 熱拡散方程式

熱の拡散係数を κ とすると、温度の輸送方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

ここに、 $\kappa = \lambda / c\rho (m^2/sec)$

2.3 解析

(1) 数値解析

解析法としては有限要素法を用いる。基礎式(6), (7), (8)に対し Galerkin 法を用いて有限要素法のための定式化を行い、2次元問題として計算を行う。有限要素としては8節点2次要素を用い、定式化後の u_i , p に関する非線形連立方程式は Newton-Raphson 法により解いた。ただし、時間微分項は差分で近似した。

(2) 問題点

実船における原油タンクの加熱と本解析との相違点としては次の点がある。

i) 高粘度の油は厳密には非ニュートン流体である。特に高分子の油では曇点以下になると擬似粘性を示す⁴⁾。しかし一般には非ニュートン性は小さく、対象とする問題ではニュートン流の扱いで充分と思われる。

ii) 一般に実船における加熱時の対流は完全に発達した乱流域にあるものと思われる⁴⁾。しかしここで問題としている流動点付近の粘度変化の大きい高粘度の場合には代表値のとり方にもよるが、レイリー数が $Gr \cdot Pr = 1 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$ となり、乱流への遷移点 10^8 以下となることも有り得るため、不均一加熱となり勝な層流として計算を行う。なお完全乱流状態のタンク内油温は周壁付近を除いて均一と考えてよい。

iii) 実船では船体動揺のため積載油がかく乱を受けるため熱伝達の様態が変る⁶⁾が、ここでは考慮しない。

3. 加熱時の流速と温度分布

3.1 自然対流の能動性

自然対流の様態は加熱管の配置と加熱管を通して油に供給される熱量により決まる。そこで、これらを変化させ Fig. 2 に示す計算条件により計算を行い、加

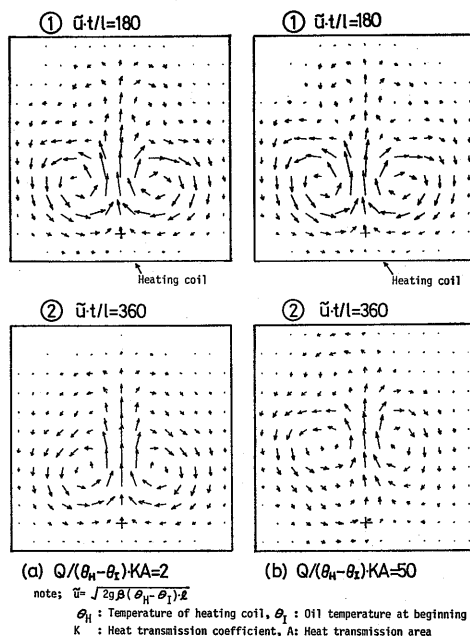


Fig. 3 Velocity distributions in the tank with one heating coil for two kinds of supplied heat quantity

熱時の対流の様態について調べた。

Fig. 3 に2種の供給熱量に対する加熱管1本の場合について、タンク内の流速パターンを示す。またFig. 4に加熱管が2本および5本の場合を示す。流速パタ

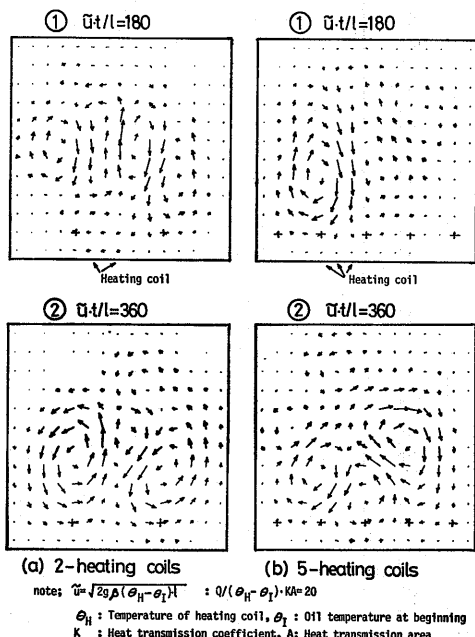


Fig. 4 Velocity distributions for two arrangements of heating coil

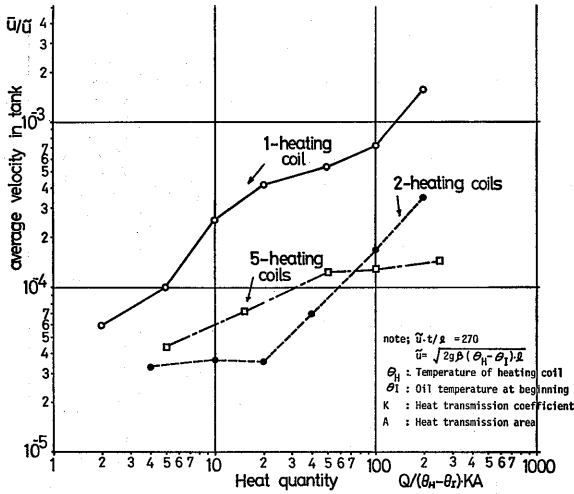


Fig. 5 Relation between average velocity and supplied heat quantity

ーンは時間とともに変化し、加熱初期には上昇流の勢いが小さいためタンク下部で対流が起り、しだいにタンク全体に対流が広がり、ある経過時以降はあまり大きく変化しない。タンク周壁付近では外部からの冷却

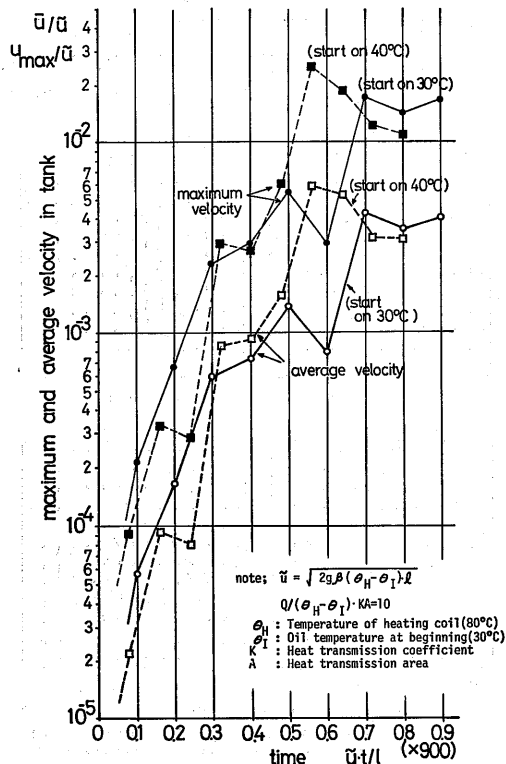


Fig. 6 Variations of velocity in the tank with one heating coil as time proceeds

により温度が低く、従って粘度が高いために殆んど流れが起らないのが分かる。また加熱管の数が多いほど循環流の数が多くなり、流速パターンが定常化するのが遅くなる。

3種類の加熱管配置について、供給熱量とタンク内平均流速との関係を Fig. 5 に示す。数値解析上の粗さなどから両者の関係は滑らかな変化を呈していないが、供給熱量が増すに従い当然対流が活発化するの分かる。これは、タンク内の自然対流が加熱管周りの油温（最高）とタンク周壁付近の油温（最低）との温度差により決まり、加熱管に与えられる熱量に比例することによる。従って、加熱管の数が増し、1本当りの供給熱量が少なくなると対流速も小さくなる。

3.2 熱拡散の状態

(1) 経時変化

初期油温が30°Cおよび40°Cの均一温度の静止状態から油の加熱を開始した場合について、タンク内対流速の時間的変化を Fig. 6 に示す。時間の経過とともに対流は活発化するが $\bar{u}t/l = 540 \sim 630$ 付近から飽和化

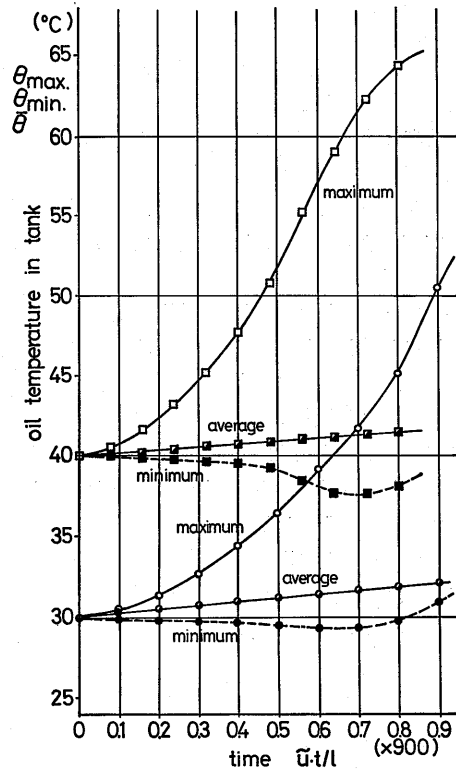


Fig. 7 Variations of oil temperature in the tank with one heating coil as time proceeds

し、経時変化が鈍くなる。なお \tilde{u} は自然対流の代表速度

$$\tilde{u} = \{2g\beta(\theta_H - \theta_I)\}^{1/2} \quad (9)$$

である。ここに θ_H , θ_I は加熱管の温度および初期油温である。

この後は油温の上昇とともに動粘度が低下し、少しずつ対流速が増すものと思われる。

Fig. 6 に対応する油温の時間的変化を Fig. 7 に示す。加熱初期は伝導によるゆっくりした伝熱が主体であり、時間の経過とともに対流速が大きくなり移流の影響が出てくる。このため平均油温は経過時間に比例して増加しているのに対し、最低温度の発生点は周壁付近にあり、周壁からの冷却のため一度低下するが、加熱管の熱が周壁付近まで対流により伝わると上昇し始める。また、30℃からの加熱に比べ、40℃からの加熱の方が外周へ逃げる熱量が大きいので早く最高温度の上昇率が鈍る。

油温分布の時間的変化を Fig. 8 に示す。これによると加熱初期に加熱管から上昇流に載って上方へ熱が伝わり、タンク天井まで到達するとタンク幅方向に熱

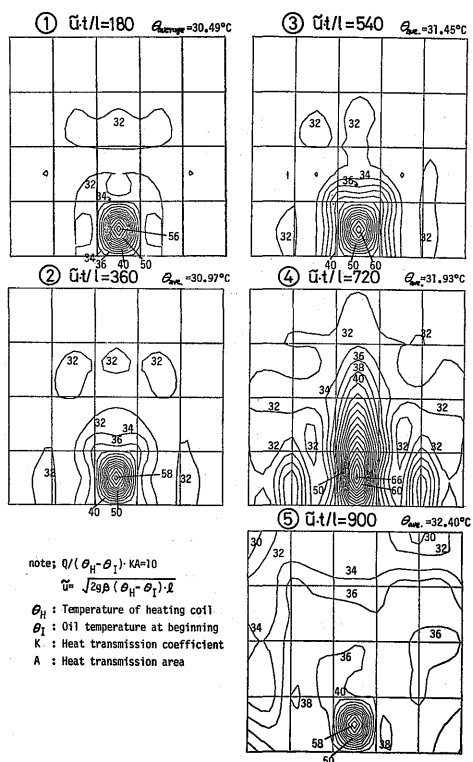


Fig. 8 Variations of temperature distribution in the tank with one heating coil as time proceeds

が拡散するのが分かる。また加熱管周囲の急な温度勾配は熱伝導によるもので、対流が活発になると消滅に向かう。

(2) 加熱管数と供給熱量

加熱管の数を 1, 2, 5 本と変化させた場合のタンク内温度分布を Fig. 9 に示す。当然のことながら、

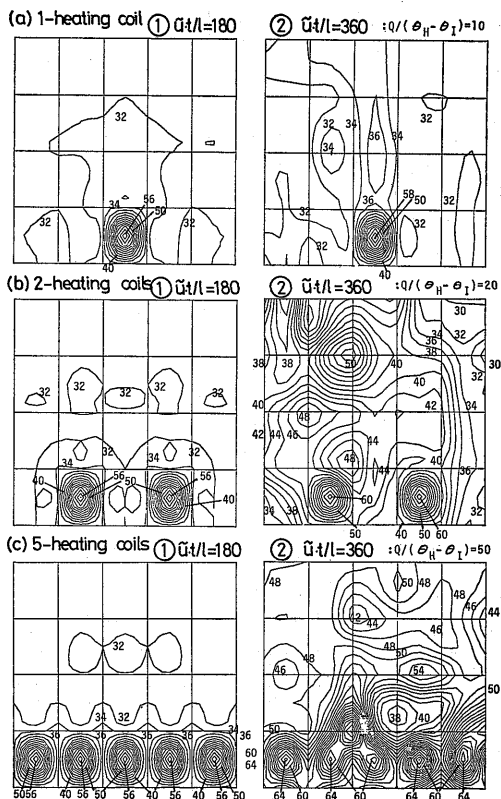


Fig. 9 Distributions of oil temperature for three arrangements of heating coil

加熱管数が多いほどタンク幅方向の温度が均一化するのが見られる。

Fig. 10 に加熱管が 1 本設置されたタンクについて、供給する熱量を変化させた場合の経過時 $\tilde{u} \cdot t/l = 360$ における温度分布を示す。供給熱量が多いほど早く対流が活発化するためタンク内の熱拡散も早く、従って油の動粘度も急速に低下し、さらに対流速が大きくなる。このため移流効果によりタンク内温度分布が均一化する。

加熱管数を変えた場合の供給熱量と油温の平均値または最高値との関係を Fig. 11 に示す。この計算例では周壁からの熱貫流が小さいので熱的に閉じた系に近く、加熱管数に関係なく供給熱量が同じであると平均値はほぼ同じである。しかし、加熱管数が少ないと加

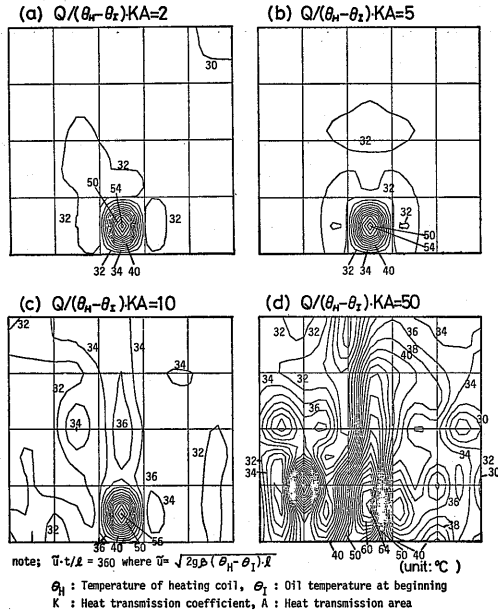


Fig. 10 Distributions of oil temperature in the tank with one heating coil for four kinds of supplied heat quantity

熱管のまわりに熱が集中し、最高温度は加熱管が多い場合に比べて高くなる。

Fig. 11 に応じた、タンク内A、B点の供給熱量と動粘度との関係を Fig. 12 に示す。加熱管の数が多いほどタンク内油温が均一化するためA、B点間の粘度

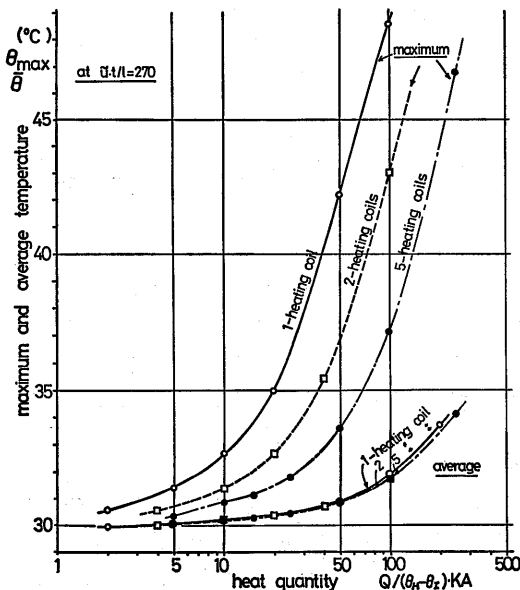


Fig. 11 Relation between oil temperature and supplied heat quantity

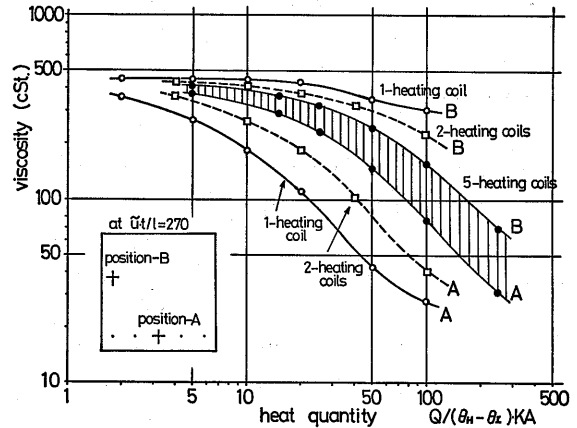


Fig. 12 Relation between oil viscosity and supplied heat quantity

差が小さくなり、またB点の粘度も小さくなっている。このことにより、ポンピングのために高粘度油を加熱する場合、タンク内の最高粘度が揚油の可能な限界粘度以下になる必要があり、同じ熱量でも多くの加熱管に分散して供給する方が有利であることが分かる。

4. 結言

温度依存性が大きい粘度特性をもつ高粘度油について、粘度低下のための加熱を対象に、供給熱量と加熱管数を変えて数値解析を行い、自然対流とそれによる熱拡散の状態を調べた。

実船での油タンク加熱は一般に80~120時間程度行われるが、ここでは粘度変化が大きい加熱初期の短い時間(約1時間に相当)について解析を行った。この加熱初期は対流の様態が不安定であり、また計算における時間ステップが粗いなどの理由から、計算による対流の状態は時間的に滑らかに変化していない。しかし熱対流の成長の過程や自然対流による熱拡散の状態は定性的に把握することができた。

今後、解析の精密化を計り、さらに実験や実船計測の結果とのつき合せにより、加熱初期だけでなく対流の様態が定常化した後も含め、定量的に供給熱量や加熱管配置とタンク内油温分布の関係を明らかにする必要がある。

参考文献

1) 渡辺, 沼野, 山之内, 上田, 加藤: 貨油タンクの高粘度原油洗浄, 昭和58年度春季船舶技術研究所発表会講演集, (1983)

- 2) 機関研究委員会：ディーゼル船用燃料油粘度の3500秒対策について，日本船用機関学会誌，Vol.2，No. 5，(1967)
- 3) 佐藤一雄：“物理定数推算法”，(1975) 丸善出版
- 4) 日本造船研究協会：タンカーのタンクヒーティングに関する研究，日本造船研究協会資料，No.79，(1968) および，栗原至道：船舶艦装における熱伝達に関する研究，九州大学学位請求論文，(1975)
- 5) 中西，古寺，吉田，奈良井，石野：ミナス原油の海底管による送油時の熱的諸問題，日立造船技報，第32巻，第1号(1971)
- 6) 加藤洋治：タンカー荷油の放熱に対する動揺の影響，日本造船学会論文集，第126号(1969)

